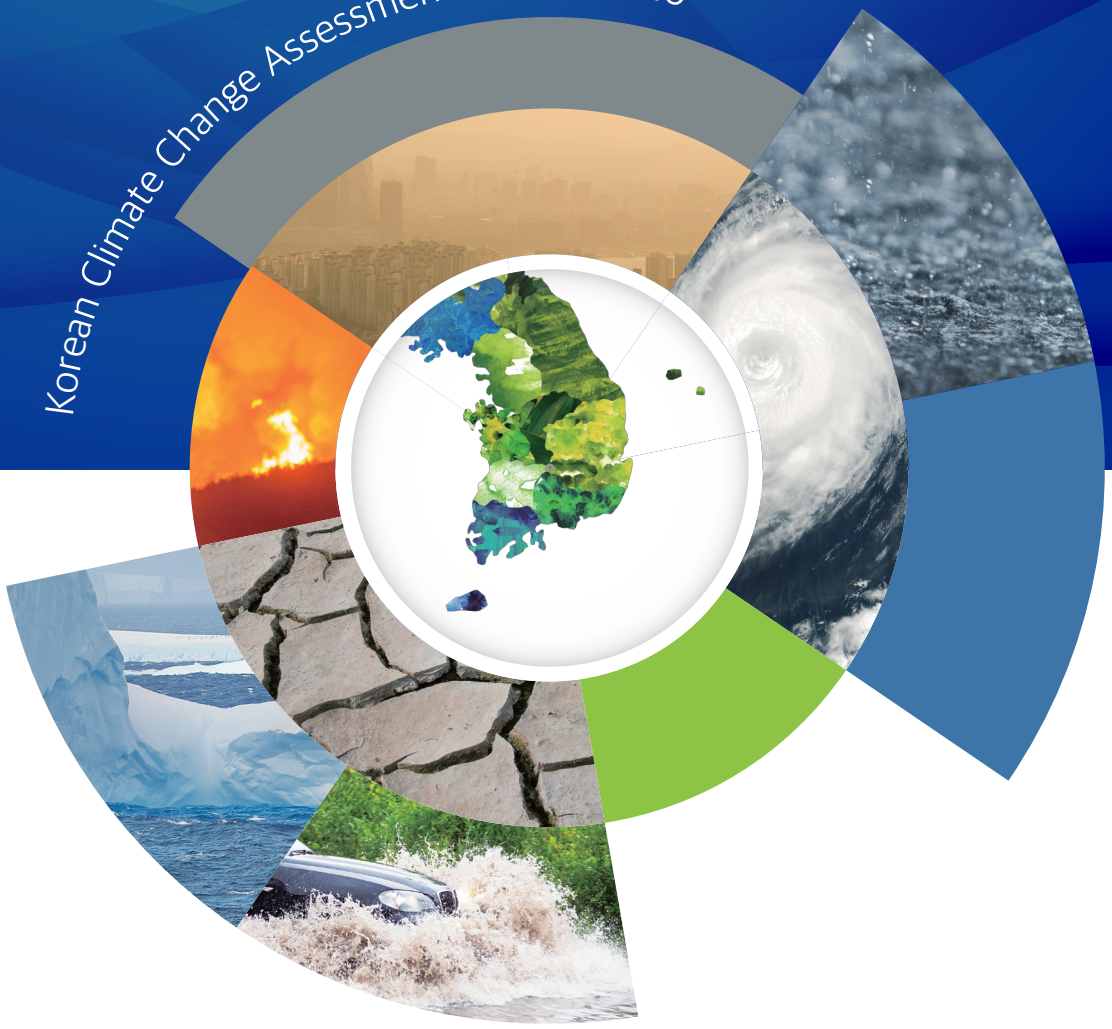
발간등록번호
11-1480000-001690-01

ISBN 978-89-93652-58-1
978-89-93652-57-4 (세트)

한국 기후변화 평가보고서 2020

- 기후변화 영향 및 적응 -

Korean Climate Change Assessment Report 2020



환경부
Ministry of Environment

발간등록번호
11-1480000-001690-01

ISBN 978-89-93652-58-1
978-89-93652-57-4 (세트)

한국 기후변화 평가보고서 2020

- 기후변화 영향 및 적응 -

환경부
Ministry of Environment

서 문

'18년의 기록적인 폭염과 한파, '20. 1월의 이상고온 등 기후변화로 인한 피해는 생태계, 건강, 산업과 사회기반시설 피해 등 사회 전부문에서 영향을 미치고 있어, 온실가스 감축과 함께 상당한 수준의 기후변화 적응 노력이 요구되고 있습니다.

기후변화 피해를 저감하고 적응하기 위해서는 지역마다 서로 다르게 나타나는 기후변화 현상과 영향, 취약성을 파악하고 대응하는 것이 필요합니다. 특히, 한반도의 기후변화 현상은 전지구적 변화 속도에 비해 빠르게 진행되고 있어 이에 대한 이해와 대응이 매우 중요합니다.

이에, 환경부는 한반도에서 발생할 수 있는 기후변화 영향을 정확하게 파악하고 기후변화 적응정책에 반영하기 위해 「한국 기후변화 평가보고서 2020」을 기상청과 공동으로 발간하게 되었습니다. 환경부는 '기후변화 영향 및 적응'을 기상청은 '기후변화 과학적 근거' 분야를 담당하였으며, 2020년 말 수립 예정인 '제3차 국가 기후변화 적응대책('21~'25)' 일정에 맞추어 「한국 기후변화 평가보고서 2014」 발간 이후 6년 동안 한반도의 기후변화 영향 및 취약성과 관련된 새로운 연구들을 집대성하여 정리하였습니다.

'기후변화 영향 및 적응'은 기후변화의 영향을 받는 부문을 수자원, 생태계, 산림, 농업, 해양 및 수산, 산업 및 에너지, 보건, 인간정주공간과 복지 등 8개 부문으로 구분하고, 각 부문별로 한반도 기후변화의 영향 및 전망, 취약성 원인을 제시하고 있습니다. '14년부터 '20년까지 발간된 연구논문과 정부보고서 총 881편을 활용하였고, 수자원, 산림, 농업 등 관련 학계와 연구소 등 각 부문별 전문가 총 42명이 참여하여 주셨습니다. 보고서 발간을 위해 시간과 노력, 열정을 아끼지 않으신 모든 저자분들께 진심으로 감사의 말씀을 드립니다.

「한국 기후변화 평가보고서 2020」가 '제3차 국가 기후변화 적응대책('21~'25)'과 '제3차 광역지자체 기후변화 적응대책 세부시행계획('22~'26)' 등 중앙정부, 지방자치단체, 공공기관, 민간기업 등 각 분야에서 기후변화 적응정책을 수립하는데 유용한 자료로 활용되기를 바라며, 향후에도 다양한 분야의 지식을 공유하여 활발한 기후변화 연구가 수행되기를 희망합니다.

2020. 7.

환경부장관 **조 명 래**

목 차

서문 i

제 1 장 소개 1
1.1 서론 2
1.2 「한국 기후변화 평가보고서 2014」 요약 6
1.3 IPCC WG II 6차 보고서의 논의사항 11
1.4 IPCC 1.5℃ 특별보고서 13
1.5 2050 저탄소 적응 국제 동향 16
1.6 기후변화 대응 기본계획 17
1.7 우리나라 기후변화 영향, 취약성 및 적응 18
1.8 참고문헌 28

제 2 장 수자원 29
2.1 서론 30
2.2 관측된 영향 31
2.3 영향 전망 38
2.4 취약성의 주요 원인 50
2.5 적응 옵션 56
2.6 결론 60
2.7 참고문헌 62

제 3 장 생태계 69
3.1 서론 70
3.2 관측된 영향 70
3.3 영향 전망 80
3.4 취약성의 주요 원인 93
3.5 적응 옵션 94
3.6 결론 96
3.7 참고문헌 97

제 4 장 산림 103
4.1 서론 104
4.2 관측된 영향 106
4.3 영향 전망 121
4.4 취약성의 주요 원인 132
4.5 적응옵션 136
4.6 결론 141
4.7 참고문헌 142

제 5 장 농업 149
5.1 서론 150
5.2 관측된 현황 150
5.3 영향 전망 156
5.4 취약성의 주요 원인 169

목 차

5.5 적응 옵션 175
5.6 결론 179
5.7 참고문헌 181

제 6 장 **해양 및 수산** **187**
6.1 서론 188
6.2 관측된 영향 192
6.3 영향 전망 202
6.4 취약성의 주요 원인 209
6.5 적응 옵션 213
6.6 결론 215
6.7 참고문헌 216

제 7 장 **산업 및 에너지** **221**
7.1 서론 222
7.2 관측된 영향 222
7.3 영향 전망 226
7.4 취약성의 주요 원인 236
7.5 적응 옵션 238
7.6 결론 244
7.7 참고문헌 245

제 8 장 **보건** **247**
8.1. 서론 248
8.2 관측된 영향 249
8.3 영향 전망 264
8.4 취약성의 주요 원인 269
8.5 적응 옵션 272
8.6 결론 275
8.7 참고문헌 276

제 9 장 **인간정주공간 및 복지** **281**
9.1. 서론 282
9.2 관측된 현황 282
9.3 영향 전망 292
9.4 취약성의 주요 원인 297
9.5 적응 옵션 300
9.6 결론 307
9.7 참고문헌 308

제 10 장 **적응대책 및 계획** **313**
10.1. 서론 314
10.2 기후변화 적응대책 수립 315
10.3 기후변화 적응대책 수립 방법론 연구 323
10.4 기후변화 적응대책 수립 시의 고려사항 329
10.5 참고문헌 335

표목차

표 1.1 연구 결과의 신뢰도 평가(동의수준)의 구분. · · · · · 2
표 1.2 IPCC AR6 WG Ⅰ, WG Ⅱ, WG Ⅲ 비교. · · · · · 4
표 1.3 IPCC WG Ⅱ 보고서의 흐름(AR4, AR5, AR6) 및 한국 기후변화 평가보고서 2020의 범위. · · · · · 5
표 1.4 기후변화 평가보고서에 사용된 참고문헌. · · · · · 6
표 4.1 국내 주요 아고산 침엽수림의 면적 변화식(김은숙 등(2019)을 일부 수정). · · · · · 109
표 4.2 수종별 국가 고유 배출계수(국립산림과학원, 2015). · · · · · 109
표 4.3 중부지방소나무의 바이오매스 상대생장식(국립산림과학원, 2015). · · · · · 110
표 4.4 단위면적 당(ha당) 연간 CO_2 흡수량(톤/ha/년)(손영모 등, 2010). · · · · · 112
표 4.5 산림의 탄소흡수량 및 저장량 변화 추정(산림청, 2014). · · · · · 113
표 4.6 기후영향을 반영할 수 있는 산림생장모형. · · · · · 121
표 5.1 국내 논 잡초 우점도 변화(이인용 등, 2016). · · · · · 155
표 5.2 등숙온도에 따른 쌀의 호화 특성(Chun et al., 2015). · · · · · 171
표 5.3 등숙기 고온조건에 따른 보리 전분호화특성 변화(이현석 등, 2016). · · · · · 171
표 5.4 온도에 따른 HPPD 저해 제초제의 논 잡초(강피, 물달개비, 올챙이고랭이, 올방개)에 대한 약효 변화 (박태선 등, 2017). · · · · · 175
표 5.5 주요 조생종 벼 품종과 '중모1024'의 고온등숙 조건에서 완전미율 비교(정지웅 등, 2016). · · · · · 176
표 5.6 고위험해충 9종에 대한 예찰조사 권역(이지은 등, 2019). · · · · · 177
표 6.1 일반순환모델과 IPCC, A1B 시나리오를 기반으로 예측된 2000년대와 2030년대 대한해협 깊이별 평균 수온(℃)과 1968~2010년 관측치(해양수산부, 2019). · · · · · 201
표 6.2 2000년대와 2030년대 사이 변화할 것으로 예측된 어류 서식지 북쪽 이동 거리(해양수산부, 2019). 이동 거리는 다음 2가지를 곱해 평가: (1) 깊이별 수온과 평균 위도사이의 회귀 계수, (2) IPCC A1B 시나리오를 기반으로 일반순환모델에 의해 예측된 수온 변화, 통계적으로 유의하지 않은 회귀 계수를 보인 어종들은 여기서 표시 제외. · · · · · 201
표 6.3 우리나라 주요 해산어류 연간 생산량(103 M/T) 및 생산 추이(국가통계포털, www.kosis.kr). · · · · · 201
표 6.4 우리나라 주요 해산 패류 연간 생산량(103 M/T) 및 생산 추이(국가통계포털, www.kosis.kr). · · · · · 201
표 6.5 우리나라 주요 해조류 연간 생산량(103 M/T) 및 생산 추이(국가통계포털, www.kosis.kr). · · · · · 201
표 6.6 한반도 주변 수역에서 발견된 동물플랑크톤 우점종의 종명, 평균 개체수와 비율(Lee et al., 2019). · · · · · 206
표 6.7 동해의 빈영양화와 부영양화 해역에서 요각류 먹이로 식물플랑크톤과 마이크로(micro-sized) 동물플랑크톤의 상대적 기여율(Park et al., 2015). · · · · · 207
표 6.8 1991년부터 2018년까지 우리나라 연안의 적조생물(Cochlodinium polykrikoides) 발생현황과 수산양식피해 현황(해양수산부, 2019). · · · · · 208
표 7.1 도시가스 산업의 기후변화 취약성 요인(강희정, 2014). · · · · · 233
표 7.2 산업부문 기후변화 취약성평가 항목(최광림,2016). · · · · · 237

표목차

표 7.3 산업단지별 취약한 기후노출(최광림,2016). · · · · · 237
표 7.4 구역별 중소기업주도형 적응산업(김승도 외, 2015). · · · · · 240
표 7.5 중소기업 중점 육성대상 산업 분석 결과(김승도 등, 2015). · · · · · 240
표 7.6 기후변화에 따른 관광산업 취약성 평가 결과(김상태 등, 2017). · · · · · 241
표 7.7 패션디자인에서 기후변화 현상에 따른 적응을 위한 주요 고려사항(장남경, 2015). · · · · · 242
표 8.1 분석 대상 논문의 일반적 특성(우경숙, 2019). · · · · · 250
표 8.2 최근 10년간 원인별 기상재해 피해액(기상청, www.weather.go.kr). · · · · · 252
표 8.3 최근 10년간 기상재해 현황(총괄)(기상청, www.weather.go.kr). · · · · · 252
표 8.4 과거 주요 호우 및 태풍피해현황 우선순위(기상청, www.weather.go.kr). · · · · · 252
표 8.5 연 강수량, 강수일수, 강수강도의 평균과 변화(1912~2017년). · · · · · 252
표 8.6 쯔쯔가무시증 연도별 발생현황(2009~2018)(질병관리본부, 2019d). · · · · · 257
표 8.7 중증열성혈소판감소증후군(SFTS) 감염 위험요인(2013~2018)(질병관리본부, 2019d). · · · · · 257
표 8.8 중증열성혈소판감소증후군(SFTS) 연도별 발생현황(2014~2018)(질병관리본부, 2019d). · · · · · 257
표 8.9 라임병 연도별 발생현황(2011~2018)(질병관리본부, 2019d). · · · · · 260
표 8.10 최근 10년간 렙토스피라증 환자 발생현황(2009~2018)(질병관리본부, 2019c). · · · · · 260
표 8.11 최근 10년간 신증후군출혈열 환자 발생현황(2000~2018)(질병관리본부, 2019c). · · · · · 260
표 8.12 말라리아 연도별 환자 발생 현황 (2005~2018)(질병관리본부, 2019b). · · · · · 260
표 8.13 지역별 일평균기온 1℃ 증가로 인한 말라리아 발생위험(채수미 et al., 2014). · · · · · 261
표 8.14 연도별 일본뇌염 주의보, 경보 발령일 및 환자 발생현황(질병관리본부, 감염병포털 질병별 통계). · · · · · 262
표 8.15 병원성 비브리오균과 해양 환경과의 상관관계(질병관리본부, 2016a). · · · · · 262
표 8.16 식중독통계 (2011~2016)(식품의약품안전처 식품안전나라 식중독통계). · · · · · 269
표 9.1 도시지역 면적 및 도시지역 인구비율(단위: km^2, %)(국토연구원, 2010; 국토연구원, 2011a; 국토교통부 · 한국토지주택공사, 2019).. · · · · · 283
표 9.2 서울과 서울을 포함한 경기도 지역의 토지이용 변화(류지은 등, 2017). · · · · · 283
표 9.3 일반농산어촌개발사업의 세부유형 및 내용(이소영 등, 2017). · · · · · 287
표 9.4 단독주택 건축 연도별 주택 수 및 빈집(2017년)(정문수 등, 2018). · · · · · 288
표 9.5 난방시설 유형(농촌진흥청 농어업인 복지실태조사, 2017)(정문수 등, 2018에서 재인용). · · · · · 290
표 9.6 기상이변 취약계층(신지영 등, 2013). · · · · · 291
표 9.7 주요 기상재해의 특성 및 잠재적 영향(김정곤 등, 2014). · · · · · 294
표 9.8 2017년 농어촌 서비스 기준 핵심항목 이행실태 변화(정주생활기반)(정문수 등, 2018에서 재인용). · · · · 295
표 9.9 농어촌 지역 주거 인프라 현황(2015년 기준), 통계청 농림어업총조사(지역조사 2015) (정문수 등, 2018에서 재인용). · · · · · 296

표목차

표 9.10 난방시설 유형(농촌진흥청 농어업인 복지실태조사, 2017)(정문수 등, 2018에서 재인용). · · · · · · · · · 296
표 9.11 엔트로피 가중치 활용을 통한 대기오염 취약성 분석 이용지표(이상혁 등, 2015). · · · · · · · · · · · · · · 297
표 9.12 전국 및 강원도 시 · 군 · 구의 고온 취약성 분석 지표(신광문과 이재수, 2018). · · · · · · · · · · · · · · 298
표 9.13 국토교통부의 주거실태조사 항목(성주인 등, 2014에서 재인용). · 299
표 9.14 관련 법률에서 제시된 기후변화 취약지역 현황 (신지영 등, 2013). · 300
표 9.15 지표 선정기준 검토 및 핵심지표(유선철과 여관현, 2015). · 302
표 9.16 기후변화 대응 계획요소별 사업 유형화(이정동 등, 2019). · 303
표 9.17 기후변화 영향에 적응하고 에너지 문제를 해결하기 위한 기법 및 기술(김정곤 등, 2014). · · · · · · · · · 304
표 9.18 중앙부처 취약계층 지원사업 중 기후변화와 관련하여 고려 해볼만 한 사업 현황(하종식 등, 2015). · · · · 306
표 9.19 충북지역 취약계층 및 지역 중심, 온열질환자 저감 강화를 위한 폭염피해 저감 방안 제안 (김보은 등, 2018). · 307
표 10.1 우리나라 기후변화 적응대책 수립과정(국가기후변화적응정보포털(2020) 참고하여 저자작성). · · · · · · · 315
표 10.2 우리나라 국가 기후변화 적응계획 및 대책 현황 및 특징(환경부, 2014b에서 수정). · · · · · · · · · · · · · 317
표 10.3 국가 기후변화 적응대책 방향별 핵심계획지표(관계부처합동, 2015). · · · · · · · · · · · · · · · · · · · 318
표 10.4 제2차 광역지자체 적응대책 세부시행계획 수립부문(2차 지자체 세부시행계획을 참고하여 저자작성). · · 319
표 10.5 2차 광역지자체 적응계획에 명시된 지자체별 이행 장애요소(2차 지자체 세부시행계획을 참고하여 저자작성). · 322
표 10.6 기초지자체별 우선순위 선정을 위한 종합분석 방식(현정희 등, 2019). · · · · · · · · · · · · · · · · · · 323
표 10.7 정책방향별 세부과제 단위사업 전체 현황(신지영, 2016). · 328
표 10.8 기상이변 취약계층 지원 사업 개발 가이드북 구성 예시(하종식 등, 2014). · · · · · · · · · · · · · · · · · 329
표 10.9 도시유형별 기상이변 취약계층(하종식 등, 2014). · 330
표 10.10 기후변화 적응역량 지표 및 지수 관련 선행연구(김오석 등, 2016). · · · · · · · · · · · · · · · · · · · 330
표 10.11 기후변화 적응역량 평가지표 및 자료(김동현, 강정은, 2016). · 332
표 10.12 IPCC WG II 의 AR5와 AR6의 목차 구성 변화(IPCC(2014), IPCC(2017) 참고하여 저자작성). · · · · · · · 334

그림목차

그림 1.1 기후변화에 따라 고려되어야 할 항목(RFCs)과 영향을 받는 시스템이 지구온난화 수준에 따라 얼마나 높아지는지 보여줌(IPCC, 2018). · · · · · 13
그림 2.1 8개 기상관측소 선형추세분석 결과(윤선권과 문영일, 2014). · · · · · 32
그림 2.2 연도별 증발산량과 연강수량 시계열 비교(문장원, 2018). · · · · · 34
그림 2.3 과거 가뭄사상(유지영 등, 2016). · · · · · 36
그림 2.4 연도별 홍수피해액과 소하천 피해액의 점유율(소방방재청 홈페이지). · · · · · 37
그림 2.5 시나리오별, 구간별, 일강우 최대치의 재현기간이 300년 이상인 지점(권민성 등, 2015). · · · · · 40
그림 2.6 이동평균 1일 PMP(SMP), 누적평균 1일 PMP(CMP) 산정결과(심규범 등, 2015). · · · · · 41
그림 2.7 미래 월별 강수량, 평균기온, 잠재증발산량 전망(임창수와 김성엽, 2014). · · · · · 43
그림 2.8 빈도별 지속기간별 청계천 모전교 지점의 최대첨두홍수량 산정 및 비교(황정윤 등, 2018). · · · · · 44
그림 2.9 현재 및 RCP 시나리오별 미래 SDF 곡선(박명우 등, 2015). · · · · · 45
그림 2.10 기후변화 시나리오에 따른 미래 지하수위 변화(이지완 등, 2018). · · · · · 49
그림 2.11 (a) Zoning using Average Heavy Rain Damage (b) Zoning using Maximum Heavy Rain Damage(김동현 등, 2018). · · · · · 52
그림 3.1 계방산 지역의 1972년에서 2006년 기간 동안의 생육개시일(a), 생육종료일(b), 생육 기간(c), 유입일사량(d)의 변화 분석 결과(Jang et al., 2015). · · · · · 71
그림 3.2 1972년에서 2006년 기간 동안 계방산 분비나무군락의 총생산량(GPP), 순생산량(NPP), 호흡량(MR) 변화량 분석 결과(Jang et al., 2015). · · · · · 72
그림 3.3 구상나무 2차대사물질 발현량과 기온과의 상관관계(김진희 등, 2018). · · · · · 72
그림 3.4 2000년에서 2014년 기간 동안 남한 산림 전체의 평균 생육개시일(SOG) 변화 추이(최철현 등, 2016). · · 73
그림 3.5 4월 평균기온과 생육개시일(SOG)과의 상관관계(최철현 등, 2016). · · · · · 73
그림 3.6 태백산의 고도에 따른 (a) 종다양성과 (b) 식생구조 변화 분석 결과(안지홍 등, 2019). · · · · · 74
그림 3.7 1938~1950년과 1996~2011년 사이 한국산 나비의 출현 경계지점의 이동(Kwon et al., 2014a). · · · 74
그림 3.8 CO_2와 온도상승 조건 하에서 토양수분(a) 및 유기물함량(b)의 구배에 따른 실험구와 대조구 사이의 죽절초 새싹의 길이 및 잎의 수 차이 분석 결과(이수인 등, 2018). · · · · · 80
그림 3.9 기후변화 예측 모형별 벚꽃의 개화시기(FFD) 예측 결과(Hur et al., 2014). · · · · · 81
그림 3.10 기후변화 예측 모형별 배꽃과 복숭아꽃의 개화시기(FFD) 예측 결과(Hur and Ahn, 2015). · · · · · 81
그림 3.11 기후변화에 따른 한대성 상록활엽수 적합서식지 분포 변화 예측(Koo et al., 2015). RCP 4.5(a)와 RCP 8.5(c) 하의 2050년까지의 적합서식지 분포 변화 예측과 RCP 4.5(b)와 RCP 8.5(d) 가정 하의 2070년 적합서식지 분포 변화 예측. · · · · · 82
그림 3.12 기온상승에 따른 한라산 구상나무 적합서식지 분포 변화 예측(Koo et al., 2017a). · · · · · 82
그림 3.13 기후변화 예측 모형과 시나리오에 따른 후박나무 미래 분포 변화 예측(Koo et al., 2017b). · · · · · 83
그림 3.14 적응능력을 고려한 기후변화에 따른 자금우(*Ardisia japonica*)의 미래분포 예측(Park et al., 2017). · · · 84

그림목차

그림 3.15 국내 포유류의 온도 분포 범위와 2070년 (a) RCP 4.5시나리오에서의 연평균기온 (b) RCP 8.5 시나리오에서의 연평균기온(김진용 등, 2018). · · · · · 84
그림 3.16 조사지점의 연평균기온과 절지동물의 풍부도 또는 다양성 변화율간의 상관관계(Lee et al., 2016). · · · · 85
그림 3.17 우리나라 절지동물 풍부도와 종 다양성 변화(Lee et al., 2016). · · · · · 86
그림 3.18 한국산 파리과의 분포 변화(Lee et al., 2015). · · · · · 86
그림 3.19 *Crematogaster osakensis* 종의 풍부도 변화(Kwon et al., 2015). · · · · · 87
그림 3.20 *Myrmica kotokui* 종의 풍부도 변화(Kwon et al., 2014c). · · · · · 87
그림 3.21 딱정벌레 분포 변화(Kwon et al., 2015). · · · · · 88
그림 3.22 한국 하천에 분포하는 종 중 지표종 3종의 잠재 분포서식지 변화 양상을 A1B시나리오로 예측한 그림(Li et al., 2013). · · · · · 89
그림 3.23 하천 서식 곤충 군집의 NMDS ordination 그래프(Li et al., 2013). · · · · · 89
그림 3.24 기후대 구분 (a) 온량지수에 의한 기후대 구분, (b) 쾨펜의 기후 구분에 의한 기후대 구분(김용석 등, 2017). · · · · 90
그림 3.25 전국 국립공원 기후노출 현황 및 전망(김종천과 김태근, 2016). · · · · · 92
그림 4.1 백두대간에 자생하는 소나무의 연륜생장과 월별 기후인자와의 상관성분석(이상태 등, 2008). · · · · · 106
그림 4.2 소나무와 참나무류의 표준생장량(Standard grwoth)과 온량지수(Warmth Index, WI) 간의 상관관계(Byun et al., 2012). · · · · · 107
그림 4.3 우리나라 주요 수종의 표준생장량과 온량지수(WI)와의 상관관계(Kim et al., 2017). · · · · · 107
그림 4.4 우리나라 주요 수종의 반경생장량(a, c, e, g, l)과 표준생장량(b, d, f, h, j) 변화 분석(Kim et al., 2020). · 108
그림 4.5 우리나라 산림탄소 저장량 변화 추정(Kim et al., 2019). · · · · · 110
그림 4.6 저지대(Other forest)와 고지대(Cool forest) 산림탄소 저장량 변화 추정(Kim et al., 2019). · · · · · 111
그림 4.7 시계열 산사태 위험 예측 결과 그래프(UNDP, 2017). · · · · · 113
그림 4.8 2011년 수도권 산사태를 통해 분석한 인자별 산사태 위험지도(차성은 등, 2018). · · · · · 114
그림 4.9 시계열 산사태 위험 예측 결과 지도(UNDP, 2017). · · · · · 115
그림 4.10 산불발생의 빈도와 강도 분석 결과(2007~2016년)(Lim et al., 2019). · · · · · 115
그림 4.11 1980년부터 2009년까지 산불발생 횟수(Kim et al., 2019). · · · · · 116
그림 4.12 1980년대, 1990년대, 2000년대 산불 발생 지점(Kim et al., 2019). · · · · · 116
그림 4.13 산불발생지역 (a)1990년대, (b)2000년대, (c)1990년대 대비 2000년대 변화(원명수 등, 2011b). · · · 117
그림 4.14 A1B 시나리오에 따른 기후를 적용한 표준생장량과 현재 기후에 대한 표준생장량의 차이 (Byun et al., 2012). · · · · · 121
그림 4.15 RCP 8.5 시나리오에 따른 기후변화가 소나무림 생장에 미칠 영향 추정(김문일 등, 2014). · · · · · 122
그림 4.16 HyTAG 모형을 활용한 미래 산림 잠재수종분포 예측 결과(SRES 시나리오)(Choi et al., 2011). · · · · · 122
그림 4.17 HyTAG 모형을 활용한 미래 산림 잠재수종분포 예측 결과(RCP 시나리오)(유소민 등, 2020). · · · · · 123

그림 4.18 미래 기후인자 변화와 산림분포 변화 (HyTAG모형-RCP 8.5) (MOTIVE, 2016) · · · · · · · · · · · · · · · 125
그림 4.19 한반도 산림 서식 적합도 예측 결과 (Lim et al., 2018) · 125
그림 4.20 (a)소나무림과 (b)굴참나무림의 산림탄소 변화량 추정(이종열 등, 2015). · · · · · · · · · · · · · · · · · 127
그림 4.21 RCP 8.5 시나리오에 따른 전국 미래 산사태 발생 예측 결과(MOTIVE, 2017). · · · · · · · · · · · · · · 127
그림 4.22 RCP 4.5 및 8.5 시나리오가 적용된 미래 산사태 위험 분석 결과(Kim et al., 2015). · · · · · · · · · · · 128
그림 4.23 충남지역의 산불 취약성 지도(윤수향과 이상신, 2017). · 129
그림 4.24 RCP 8.5 시나리오에 따른 미래 산불 발생 가능성 예측 결과(MOTIVE, 2017). · · · · · · · · · · · · · 130
그림 4.25 RCP 8.5 시나리오에 따른 소나무재선충 피해율 예측 결과(한국농촌경제연구원, 2018). · · · · · · · · · 131
그림 4.26 RCP 8.5 시나리오에 따른 솔수염 하늘소의 현재와 미래의 분포 변화(한국환경정책평가연구원, 2015). · 131
그림 4.27 기후변화 취약수종(침엽수림)의 산림분포 취약성 평가 결과(RCP 8.5)(유소민 등, 2020). · · · · · · · · 132
그림 4.28 산림부문 탄소흡수의 최대화와 Negative Emission의 개념(김문일 등, 2017) · · · · · · · · · · · · · 139
그림 5.1 출수 후 40일 동안의 기준 적산 평균기온을 이용해 추정한 출수한계기(이동준 등, 2014). · · · · · · · · 151
그림 5.2 대관령면에서 재배하는 고랭지배추의 단위면적당 생산량(t/ha)과 생육시기별 기후요소와의 관계 (이승호와 허인혜, 2018). · 152
그림 5.3 단감의 수량(kg/10a)과 성숙기 기온과의 관계(허인혜와 이승호, 2017). · · · · · · · · · · · · · · · · 152
그림 5.4 감자뿔나방 분포의 변화(Kwon et al., 2017). · 154
그림 5.5 동계 -19℃ 이하의 일수와 꽃매미 부화율 및 강원지역 발생률 변화(정태성 등, 2015). · · · · · · · · · · 155
그림 5.6 현기후조건과 RCP 8.5 시나리오에 따른 2051~2060년대 기후조건에서의 벼 수량, 수량구성요소 및 품질(상완규 등, 2018). · 157
그림 5.7 1 km RCP 시나리오를 이용한 중만생종 벼의 단위 수량 변화(이변우 등, 2017). · · · · · · · · · · · · 157
그림 5.8 RCP 8.5 기후변화 시나리오에 따른 현재(2001~2010) 대비 콩의 잠재수량 변화 예측도 (이변우 등, 2017). · 158
그림 5.9 RCP 8.5 기후변화 시나리오에 따른 현재(2001~2010) 대비 옥수수의 잠재수량 변화(%) 예측도 (이변우 등, 2017). · 159
그림 5.10 RCP 8.5 기후변화 시나리오에 따른 현재(1981~2010)와 미래 감귤 재배 가능지 변화(문영일, 2017). · · 161
그림 5.11 RCP 4.5(a)와 RCP 8.5(b) 시나리오에 따른 경남지역 기상요인 변화가 단감의 수량에 미치는 영향 (허인혜와 이승호, 2017). · 161
그림 5.12 RCP 8.5 시나리오에 따른 보성지역 마지막 서리일, 참다래 발아일, 동 · 상해 위험 변화 (Jeong et al., 2018). · 162
그림 5.13 기후변화조건 하에서 고추의 형태적 특성 변화(Lee et al., 2018). · · · · · · · · · · · · · · · · · · · 162
그림 5.14 미래기후조건 하에서 배추의 A/Ci 반응곡선과 광반응곡선 변화(Lee et al., 2016). · · · · · · · · · · · · 163
그림 5.15 주야간 온도처리에 따른 한지형 마늘 형태 변화(오순자 등, 2017b). · · · · · · · · · · · · · · · · · · · 164
그림 5.16 시기별 호리허리노린재의 서식 적합도 변화(이준호 등, 2017). · 166

그림목차

그림 5.17 RCP 8.5 시나리오에 따른 포인세티아총채벌레의 연대별 발생세대수 변화(이준호 등, 2017). · · · · · · 167
그림 5.18 RCP 8.5 시나리오에 따른 2020년대와 2060년대 꽃매미 EI(Ecoclimate Index) 지수 (안현진 등, 2018). · · · · · · 168
그림 5.19 RCP 4.5와 RCP 8.5 시나리오에 따른 실망초 잠재분포 변화(이용호 등, 2015). · · · · · · 169
그림 5.20 대기온, 영화 내부온도, 이삭 표면온도, 포화수증기압차에 대한 벼 임실률(Jung et al., 2015). · · · · · · 170
그림 5.21 생육후기 야간온도에 따른 '후지' 사과의 착색 변화(류수현 등, 2015). · · · · · · 172
그림 5.22 고온에 따른 '거봉'과 '흑보석' 포도 착색 변화(류수현 등, 2018). · · · · · · 172
그림 5.23 EPIRICE 병해충 모형의 구조와 출력형태(Kim et al., 2015). · · · · · · 173
그림 5.24 기후변화에 따른 오대벼 이앙기와 월동 먹노린재 99% 발생시기 차이의 변화(Lee et al., 2016). · · · · 173
그림 5.25 온도상승에 따른 벼(A), 강피(B), 물달개비(C), 여뀌바늘(D)의 지상부 생육 변화(Bir et al., 2018). · · · · 174
그림 5.26 더뎅이병 고발생 포장에서 재배한 '대지'와 '제서' 감자(김성용 등, 2013). · · · · · · 178
그림 6.1 해양과 빙권의 과거와 미래 변화 경향(IPCC, 2019). · · · · · · 189
그림 6.2 급격한 해수면 상승 현상 발생이 일어날 가능성(IPCC, 2019). · · · · · · 190
그림 6.3 기후변화로 인한 해양생태계에서의 예상되는 변화, 영향 및 리스크(IPCC, 2019). · · · · · · 191
그림 6.4 국립수산과학원 정선해양관측에서 얻어진 최근 49년간(1968~2016년) 연평균 표층수온 변동경향 및 해역별 연평균 표층수온 변동 경향(해양수산부, 2019). · · · · · · 192
그림 6.5 IPCC SROCC에서 제시한 최근 이상고수온 현상 발생해역도(IPCC, 2019). · · · · · · 193
그림 6.6 국립수산과학원 인공위성 정보를 통해 살펴본 2016~2018년 8월 평균 표면수온 평년편차 분포도 (해양수산부, 2019). · · · · · · 193
그림 6.7 최근 30년간(1989~2018년) 해수면 상승률(국립해양조사원, 2019). · · · · · · 194
그림 6.8 최근 30년간(1989~2018년) 해수면 높이 변동 경향(국립해양조사원, 2019). · · · · · · 194
그림 6.9 1993~2017년 인공위성 해면고도계 자료로부터 확인한 우리나라 주변해역의 해수면 변동 경향 (Watson, 2019). · · · · · · 195
그림 6.10 최근 49년간(1968~2016년) 우리나라 전체 및 각 해역별 연평균 표층염분 변동경향(해양수산부, 2019). · · 195
그림 6.11 동해 울릉분지 표층해수의 (a) fCO_2과 (b) pH 변동 경향(Kim et al., 2014). · · · · · · 196
그림 6.12 1998년에서 2014년까지 한국주변해역 일차생산력의 계절 변화(해양수산부, 2019). · · · · · · 197
그림 6.13 한국주변해역의 연간 일차생산력(1998~2014년) 변동 추세(해양수산부, 2019). · · · · · · 197
그림 6.14 동해에서 위성으로 관측된 월별 일차생산력의 공간 분포(Joo et al., 2015). · · · · · · 198
그림 6.15 동해 북부에서 13C를 이용하여 측정된 작은 크기 식물플랑크톤의 일차생산력과 총일차생산력의 관계 (Lee et al., 2017). · · · · · · 198
그림 6.16 황해에서 13C를 이용하여 측정된 일일 총기초생산력과 작은 크기 식물플랑크톤의 일일 기초생산력 (Jang et al., 2018). · · · · · · 198
그림 6.17 1965~2015년까지 우리나라 연근해에서 어획된 어종의 종조성 변화(Rahman et al., 2019). · · · · · 200

그림 6.18 국립수산과학원에서 예측한 2100년 RCP 8.5 및 RCP 4.5를 사용한 2010년 대비 연평균 표층수온 평년편차 분포(해양수산부, 2019). · · · · · 202
그림 6.19 (a) 산업혁명 시기 평균 수온 대비 99%를 초과하는 이상고수온이 연간 발생할 수 있는 비의 예측, (b) 전 지구 온도 상승에 따른 이상 고수온이 연간 발생할 수 있는 비의 예측(IPCC, 2019). · · · · · 203
그림 6.20 1986~2005년 대비 2081~2100년 기간에서 한반도 주변의 앙상블된 평균 해수면 변화의 공간적 분포(허 등, 2018). · · · · · 204
그림 6.21 RCP 8.5(검은색) 및 2.6(파란색) 시나리오에서 100~600 m 수심에서 산소 농도가 80 μmol L^{-1} 이하로 나타날 해양 체적(IPCC, 2019). · · · · · 205
그림 6.22 동해 남서부에서 관측된 식물플랑크톤과 동물플랑크톤 사이의 월별 지질 함량 관계 (Jo et al., 2017). · · · · · 206
그림 6.23 동해에서 관측된 강한 용승해역(upwell S), 약한 용승해역(upwell W), 그리고 비용승해역(none)에서 박테리아 생산력(BP)과 박테리아 호흡량(BR)(Kim et al., 2017). · · · · · 207
그림 6.24 해파리 이동 예측 시스템 구축을 위한 모델링 적용(이동길 등, 2019). · · · · · 207
그림 6.25 알고리즘을 GOCI 영상에 적용하여 도출된 2013년 8월13일 남해안 코클로디니움 적조 분포 결과 (신 등, 2017). · · · · · 209
그림 6.26 IPCC의 취약성 개념(AR3)(McCarthy et al, 2001). · · · · · 209
그림 6.27 국립수산과학원에서 기후변화에 따른 양식업 피해 저감을 위해 운영중인 실시간 해양환경 어장정보 시스템 위치도(국립수산과학원, 2019). · · · · · 214
그림 7.1 자연재해에 따른 우리나라 피해규모 추이(이승준 등, 2017). · · · · · 223
그림 7.2 발생원인 시설별 식중독 현황(식품의약품안전처, 2018). · · · · · 224
그림 7.3 미래사회 메가트랜드 윌슨 매트릭스(이기원과 김서영, 2017). · · · · · 224
그림 7.4 용도지역별 평균야간지표온도(국토연구원, 2016). · · · · · 225
그림 7.5 폭설에 따른 현재시점 교통시설 피해리스크 결과(이상혁과 강정은, 2019). · · · · · 227
그림 7.6 폭설에 따른 미래 교통시설 피해리스크 추정 결과(이상혁과 강정은, 2019). · · · · · 227
그림 7.7 CC-MIMS 관리 주요 리스크 요소(식품의약품안전평가원, 2014). · · · · · 228
그림 7.8 기후변화에 따른 관광산업 취약성 평가과정(김상태 등, 2014). · · · · · 229
그림 7.9 폭염으로 인한 판매비 및 관리비의 피해 추정(최광림, 2016). · · · · · 231
그림 7.10 기후변화에 따른 기간산업 영향(강희정, 2014). · · · · · 232
그림 7.11 기후특성변수 유무에 따른 지역별 회귀계수값 차이(이동성과 문태훈, 2017). · · · · · 233
그림 7.12 미래 기후변화 시나리오에 따른 에너지수요 변화(정지훈 등, 2014). · · · · · 234
그림 7.13 위험유형별-산업별 기후변화 위험요인(KPMG, 2008). · · · · · 235
그림 7.14 기후노출, 민감도, 적응능력에 의한 취약성 개면(최광림, 2016). · · · · · 236
그림 7.15 홍수 부문 산업단지별 기후변화 취약성(최광림,2016). · · · · · 239

그림목차

그림 7.16 7개 광역시별 상대적 취약성 분포(김윤정, 박보영, 정휘철, 2018). · · · · · 242
그림 7.17 에너지 부문의 기후변화 영향 및 리스크(채여라 외, 2018). · · · · · 243
그림 8.1 폭염의 영향 및 피해 경로(한국환경정책평가연구원, 2014). · · · · · 249
그림 8.2 연평균 최고, 평균, 최저기온의 변화(1912~2017년)(국립기상과학원, 2018). · · · · · 249
그림 8.3 지역별 온열질환 사망 및 질환 발생률(%)(질병관리본부, 2018). · · · · · 250
그림 8.4 미세먼지 건강영향(보건복지부, www.nih.go.kr). · · · · · 254
그림 8.5 X11-ARIMA를 이용한 알레르기 꽃가루 농도의 장기추세분석(오재원, 2018). · · · · · 255
그림 8.6 쯔쯔가무시증 연도별 발생현황(1992~2018)(질병관리본부, 2019d) · · · · · 257
그림 8.7 활순털진드기의 전국 분포(질병관리본부 2010, 질병관리본부 2019d). · · · · · 258
그림 8.8 쯔쯔가무시증 지역별 인구 10만명당 발생률(질병관리본부, 2019d) · · · · · 258
그림 8.9 작은소피참진드기의 전국 분포지역(질병관리본부, 2019d). · · · · · 258
그림 8.10 라임병 연도별 발생현황(2011~2018)(질병관리본부, 2019d). · · · · · 260
그림 8.11 수인성 · 식품매개 감염병 집단발생 현황(질병관리본부, 2018). · · · · · 263
그림 8.12 수인성 · 식품매개질환 유행 월별 발생건수(2010~2015년)(질병관리본부, 2016b). · · · · · 263
그림 8.13 한반도 폭염일수 편차(1981~2010년 모델 기후값 대비) 변화 전망(일)(기상청, 2018). · · · · · 265
그림 8.14 서울 200~2040년 전체연령의 하절기 사망률(한국환경정책 · 평가연구원, 2012). · · · · · 266
그림 8.15 시나리오별 21세기 전반기, 중반기, 후반기의 한반도의 연강수량 편차비(1981~2010년 모델 기후값 대비) 전망(%)(기상청, 2018). · · · · · 266
그림 8.16 폭염에 대한 건강 취약성 평가 결과(RCP 8.5 시나리오, 2040년대)(Oh et al., 2017). · · · · · 270
그림 8.17 국가기후환경회의 목표 및 추진과제(국가기후환경회의, www.ncca.go.kr). · · · · · 274
그림 9.1 한국 온실가스배출량 연도별 변화 추이(환경부, 2019). · · · · · 284
그림 9.2 지역별 농림지역의 소계 비율(국토교통부 · 한국토지주택공사, 2019). · · · · · 285
그림 9.3 농가 인구의 연도별 변화(통계청, 2018). · · · · · 286
그림 9.4 농가수 및 농가인구 추이 변화(e-나라지표, 2018). · · · · · 286
그림 9.5 경영주 연령 분포의 변화(김기복 등, 2016). · · · · · 286
그림 9.6 귀농 트렌드 변화(이연숙 등, 2016). · · · · · 288
그림 9.7 연도별 개발허가면적 및 허가건수(국가통계포털, www.kosis.kr). · · · · · 289
그림 9.8 연도별 농어촌 지역 빈집 현황(정문수 등, 2018에서 재인용). · · · · · 290
그림 9.9 시도별 공공의료기관 취약계층 진료비율(Kosis data를 기준으로 작성). · · · · · 291
그림 9.10 도시지역의 인구 변화 예측(지방자치발전위원회 데이터(2016)를 기준으로 작성). · · · · · 293
그림 9.11 환경 변화에 대한 트래킹 화재증감 선형예측(2016~2020)(박홍기와 김희식, 2019). · · · · · 293
그림 9.12 도시 및 농림지역의 인구 변화 예측(지방자치발전위원회 데이터(2016)를 이용). · · · · · 295

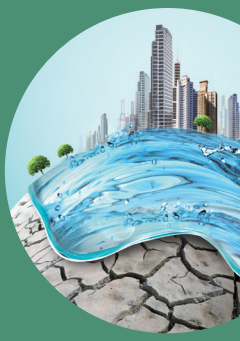
그림 9.13 상위 30개 및 하위 30개 용도지역지구의 평균 LST(안승만 등, 2016a). · · · · · · · · · · · · · · · · · · 297
그림 9.14 스마트녹색도시 개념 및 주요 분야(왕광익과 노경식, 2016). · 301
그림 9.15 다기능성을 지닌 도시의 그린인프라 요소(안승만 등, 2016b). · 303
그림 9.16 고령 소농의 소득 구성(김기복 등, 2016). · 305
그림 10.1 우리나라 기후변화 적응대책 수립이행체계(국가기후변화적응정보포털(2020) 참고하여 저자작성). · · · 314
그림 10.2 역지자체 1차, 2차 기후변화 적응대책 세부시행계획 구성(1차, 2차 지자체 세부시행계획을 참고하여 저자작성). · 321
그림 10.3 국민이 인지하는 정부의 기후변화 적응정책 수준(곽소윤 등, 2016; 곽소윤과 이창훈, 2015). · · · · · · 325
그림 10.4 서울 지역의 폭염 취약성에 대한 공간군집 패턴 분석결과(최예술 등, 2018). · · · · · · · · · · · · · · · · 332

약 어

ALPI	Aleutian Low Pressure Index
ANN	Artificial Neural Network
AO	Arctic Oscillation
ASOS	Automated Synoptic Observing System
AUC	Area Under the ROC Curve
AVHRR	The Advanced Very High Resolution Radiometer
AWS	Automatic Weather System
BCP	Business Continuity Planning
BOD	Biochemical Oxygen Demand
CA	Celluar Automata / Correspondence Analysis
CCGIS	Climate Change Geographic Information System
CDM	Clean Development Mechanism
CGE	Computable General Equilibrium
CM	Climate Modeling
COADS	Comprehensive Ocean and Atmospheric Data Set
DEA	Data Envelope Analysis
DEM	Digital Elevation Map
DEM	Digital Elevation Map
DMU	Decision Making Unit
DO	Dissolved Oxygen
DPSIR	Driving forces, Pressures, States, Impacts, Responses
ENSO	El Niño-Southern Oscillation
EI	Ecoclimatic Index
ETCCDI	Expert Team on Climate Change Detection and Indices
EVI	Enhanced Vegetation Index
EYS	The Eastern Yellow Sea
GCMs	General Circulation Models
GDD	Growing Degree Day
GISS	NASA-Goddard Institute for Space Studies
GLOBEC	Global Ocean Ecosystem Dynamics
HSPF	Hydrological Simulation Program Fortran
IAM	Integrated Assessment Modeling
IAV	Impact, Adaptation, and Vulnerability
IDW	Inverse Distance Weighted
IPCC	Intergovernmental Panel on Climate Change
KMA	Korea Meteorological Association
KODC	Korea Oceanographic Data Center
LEAP	Long-range Energy Alternative Planning
LME	Large Marine Ecosystem

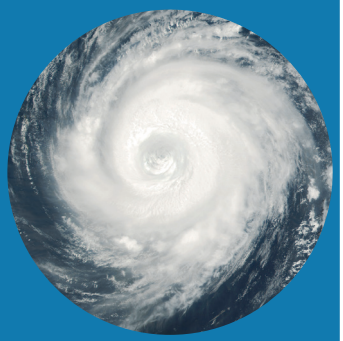
MLD	Mixed Layer Depth
MODIS	MODerate resolution Imaging Spectroradiometer
NDVI	Normalized Difference Vegetation Index
NECS	The Northern East China Sea
NEP	Net Ecosystem Productivity
NJES	The Northwestern Japan/East Sea
NPO	North Pacific Oscillation
NPP	Net Primary Production
PDO	Pacific Decadal Oscillation
PET	Potential EvapoTranspiration
PMP	Positive Mathematical Program
PTSD	Post-Traumatic Stress Disorder
RCM	Regional Climate Model
RCP	Representative Concentration Pathway
REDD+	Reduction of Emissions from Deforestation and Forest Degradation
RMI	Risk Management Index
ROMS	Regional Ocean Modelling System
SDF	Severity-Duration-Frequency
SIMCFR	Korea Agriculture Simulation Model for Climate-Food Relationship
SJES	The Southwestern Japan/East Sea
SO	Southern Oscillation
SPM	Summary for Policy Makers
SPEI	The Standardized Precipitation Evapotranspiration index
SPI	Standardized Precipitation Index
SRES	Special Report on Emission Scenarios
SSP	Shared Socio-economic Pathways
SST	Sea Surface Temperature
STCFM	Spatio-Temporal Changing Factor Method
STARDEX	Statistical and Regional Dynamical Downscaling of Extremes for European Regions
SWAT	Soil & Water Assessment Tool
TAR	Third Assessment Report on climate change (2001)
TGFC	Temperature Gradient Field Chamber
TOPSIS	Technique for Order of Preference by Similarity to Ideal Solution
UNDP	United Nations Development Program
UNICHAL	the Union of European Heat Distributors
UVI	Urban Vulnerability Index
VISIT	Vegetation Integrated SImulator for Trace gases
WAMIS	WAter Management Information System

한국 기후변화
평가보고서 2020
- 기후변화 영향 및 적응 -



제 1 장

소 개



2 1.1 서론

6 1.2「한국 기후변화 평가보고서 2014」요약

11 1.3 IPCC WG II 6차 보고서의 논의사항

13 1.4 IPCC 1.5℃ 특별보고서

16 1.5 2050 저탄소 적응 국제 동향

17 1.6 기후변화 대응 기본계획

18 1.7 우리나라 기후변화 영향, 취약성 및 적응

28 1.8 참고문헌

제 1 장 소개

1.1 서론

1.1.1 연구의 배경 및 목적

전 지구를 대상으로 기후변화의 영향과 적응에 관한 IPCC 보고서가 발간되고 있지만, 기후변화 현황과 그에 따른 영향, 취약성, 피해는 지역에 따라 다르게 나타나고 있어서 지역적인 기후변화 현황 및 영향을 평가하는 것은 매우 중요하다. 기후변화에 따른 한반도의 영향 특수성을 보다 명확하게 파악하고, 적응대책을 마련하기 위하여 우리나라 기후변화 관련 연구를 집대성한 「한국 기후변화 평가보고서 2010」를 발간하였고, 이후 IPCC AR5의 보고서 목차에 대응하는 결과물을 내기 위하여, 국내·외 연구들을 집대성하고 체계적으로 정리하여 「한국 기후변화 평가보고서 2014」를 발간하였다.

2015년 파리협정 이후 전 지구적 기후변화 영향을 줄이기 위하여 2100년까지 온도상승을 1.5℃ 이내로 막아야 한다는 1.5℃ 특별 보고서가 발간되었다. 각국에선 2050 저탄소를 사회 실천 및 기후변화에 대응을 위한 다양한 정책이 수립 및 이행되고 있다. 「한국 기후변화 평가보고서 2014」 이후 6년이 지나면서 수많은 국내·외 논문 및 보고서에서 한반도 기후변화 영향과 적응에 관한 추가적인 연구결과가 도출되었으며, IPCC는 AR6 목차를 공개하면서 보다 새로운 기후변화 영향에 대한 이해와 효과적인 적응을 위한 방향을 설정하고 있다.

이러한 변화에 대응하기 위하여 AR6 보고서에 대응하면서 「한국 기후변화 평가보고서 2014」 이후의 국내·외 연구를 집대성한 「한국 기후변화 평가보고서 2020」가 필요하게 되었다. 최신 지식을 집대성 한 본 과제의 보고서는 이해당사자간의 의사소통, 기후변화 적응에 대한 지식 공유 및 새로운 적응대책 개발 등에 있어 참고가 될 수 있을 것이며, 이를 통해 국가의 기후변화 관련 정책지원과 국민의식 제고를 도모할 수 있을 것이다.

1.1.2 연구의 범위 및 방법

WG II (영향 및 적응)에서는 한반도를 대상으로 한 최신 국내·외 연구 결과를 수집·요약·집대성 및 색인화하고 데이터베이스화하고, 수자원, 해양 및 수산, 생태계, 산림, 농업, 산업 및 에너지, 보건, 인간정주공간과 복지 그리고 적응계획 및 대책 이렇게 9가지 분야로 나누어 기후변화의 영향과 적응에 대한 이슈를 다루었다. 이번 보고서에서

표 1.1 연구결과의 신뢰도 평가(동의수준)의 구분

01 동의수준 견고	관련 분야 논문들의 수가 어느 정도 되고 서로 배치되는 내용이 없이 일치되는 경우 혹은 전문가들의 의견이 일치하는 경우
02 동의수준 중간	논문의 수가 어는 정도 되지만 소수의견 등으로 증거를 판단하기 어렵거나 전문가 사이에서도 소수이지만 다른 의견 있는 경우
03 동의수준 제한적	논문의 수가 아주 적거나 논문의 내용 혹은 전문가 사이에서도 의견이 서로 달라서 신뢰도를 판단하기에 어려운 경우

주목할 점은 1, 2차 평가보고서의 성과와 한계를 분석하고, AR6 보고서 목차 등의 비교를 통해서 분야별로 내용을 정리한 것이다. 특히, AR6에서 주목하고 있는 리스크, 적응, 지속가능성, 지역, 회복력 등의 틀을 추가하여 설명하였으며, 2차 보고서에서 적응전략 분야를 적응계획 및 대책으로 확대시켜 정책수행자들에게 도움이 될 수 있는 보고서가 될 수 있도록 하였다.

본 보고서는「한국 기후변화 평가보고서 2014」에 정리되지 못한 연구 결과물을 중심으로 리뷰 하여 분야별, 지역별 기후변화 영향, 취약성, 리스크 및 적응을 정리·보완하였다. 보고서의 결론 부분에는 연구결과의 동의수준을 표 1.1과 같이 구분하여 향후 기후변화 관련 연구 및 정책결정에 도움이 될 수 있도록 하였다.

「한국 기후변화 평가보고서 2020」(영향 및 적응 분야) 발간 연구회 구성·운영 및 집필진 선정은 IPCC 평가보고서 발간 절차, 체계와 동일하게 진행하였으며, 학계와 정부·연구기관을 중심으로 보고서 발간 연구회를 구성·운영하고, 발간 연구회에서 주저자와 기여저자를 선정하였다. 주저자 이외에도 기여저자를 통해 내용을 보완받으며, 감수 저자를 통해 내용에 대한 검토를 받았다.「한국 기후변화 평가보고서 2020」의 영향 및 적응(WGII) 부문은 2019년에 초안이 작성하였으며, 2020년에 본보고서 완성하였다. 요약보고서는 본 보고서의 내용을 요약하였으며, 영문판으로도 발간하였다.

1.1.2.1 IPCC의 평가보고서 발간 절차

본 보고서는 IPCC의 평가보고서 발간 절차와 유사한 방법으로 진행되었다. IPCC에서는 기후변화 평가보고서 발간을 위해서 "Procedures for the preparation, review, acceptance, adoption, approval and publication of IPCC Reports"를 작성하여 기후변화 관련 보고서의 절차와 방법론, 포함되어야 하는 내용 등을 규정하고 있다. 해당 보고서는 1999년 발간된 후 지속적으로 개정되고 있으며, 아래 정리한 내용은 2013년까지 개정된 내용을 포함하고 있다(IPCC, 2013).

가장 먼저 보고서 발간을 위해 저자를 선정하고, 챕터 별로 주저자, 기여저자, 검토자가 함께 범위를 고려하여 초안을 작성한다. 내용을 작성할 때는 선행연구의 증거 수준에 근거하여 과학적으로 유효한 내용을 작성해야 하며 불확실성을 나타내줄 수 있는 언어를 사용해야 한다.

첫 번째 초안을 작성한 후 외부 전문가 검토를 시행하여 의견을 수렴한 뒤, 검토의견을 보완한 두 번째 초안을 작성함과 동시에 정책결정자를 위한 요약보고서(Summary for Policymakers, SPM)의 초안을 작성하게 된다. 작성된 2차 초안과 요약보고서에 대해 정부기관 및 전문가의 의견을 취합하고 이를 적절히 반영하여 수정된 최종 보고서를 작성하게 된다. 최종 초안 보고서 작성이 완료되면 마지막으로 관련 국가의 리뷰를 통해서 수정사항을 정리하고 WG과 IPCC의 최종 결정을 통해 보고서가 발간된다.

모든 IPCC 보고서는 WG의 합의(endorsement)를 얻어야 하며 3가지 합의가 존재한다. 첫 번째는 승인(Approval)으로 해당 자료의 모든 문장이 합의를 통해 결정되었음을 의미한다. 두 번째는 채택(Adoption)으로 챕터 별 합의 과정으로 종합 보고서 및 개요에 사용된다. 마지막으로 수락(Acceptance)은 한 문장씩 토론 및 합의를 통해 다뤄진 것은 아니지만, 주제에 관해 포괄적이며 객관적 견해를 제시함을 의미한다. 일반적으로 요약보고서의 경우 저자들에 의해 수락된 내용을 정부가 승인하게 되며, 종합 보고서는 채택과 승인 과정을 거친다.

IPCC의 기후변화 평가보고서 절차를 종합해보면 최소 3회에 걸쳐 학계의 전문가 및 관련 단체, 정부 관계자의 리뷰를 통해서 보고서를 작성하게 되며, 과학적·사회적 부분도 포함한 포괄적인 검토를 통해서 문제점을 해결하고자 함을 특징으로 볼 수 있다. 또한, 보고서 작성에 있어서 과학적이고 전문적인 지식을 기반으로 하되 현재의 정책결정에 도움이 될 수 있도록 간단하게 관련 지식을 습득할 수 있는 요약보고서를 제작한다.

1.1.2.2 IPCC 보고서 각 WG 보고서 범주 검토

IPCC는 약 5년을 주기로 기후변화에 대한 전 지구적인 연구 결과를 취합하여 평가하는 IPCC보고서를 발간하고 있으며, 그 역할에 따라 Working Group Ⅰ, Ⅱ, Ⅲ로 나누어

각각 보고서를 발간한다. 본 과업은 IPCC WG II 에 해당하는 과업을 담당하고 있으며, 독자적인 내용을 충분히 반영하기 위해 WG I ,III 그룹에 대한 검토를 실시하였다.

WG I 은 기후시스템과 기후변화에 대한 물리과학적 측면을 평가한다. WG1이 다루는 주된 주제는 대기의 온실가스와 에어로졸의 변화, 대기·육상·해양·빙하·해수면 등의 변화, 기후변화의 역사적·고기후적 측면, 생지화학, 탄소사이클, 위성영상 등의 데이터 분석, 기후모델, 기후전망, 기후변화의 원인과 속성 등이다.

WG II 는 기후변화에 따른 자연 시스템 뿐 아니라 사회·경제적 영향과 취약성을 평가한다. 이에는 기후변화의 긍정·부정적 결과를 포함하며, 앞선 평가를 바탕으로 적응 방안들을 제안하기도 한다. 또한, 각 분야별(수자원, 생태계, 식량, 산림, 해양, 산업, 보건 등), 지역별(아프리카, 아시아 등)로 영향 및 취약성, 적응방안이 서술된다.

WG III 은 온실가스 배출을 제한·방지하거나 대기 중의 온실가스를 제거하는 활동을 강화하는 방법 등으로 기후변화의 저감 옵션을 제안한다. 여기에는 주된 경제활동 분야들이 고려되며, 단기와 장기적인 관점에서 이를 평가한다. 하위분야에는 에너지, 교통, 건물, 산업, 농업, 산림, 폐기물 등이 고려되며, 비용편익분석을 통해 정책의 활용 가능성 및 기술의 적용 가능성을 다루게 된다.

1.1.2.3 IPCC WG II 평가보고서 흐름 및 IPCC AR6를 반영한 발간 범위 조정

IPCC AR6는 물리 과학적 근거 (WG I), 영향, 적응 그리고 취약성(WG II), 기후변화의 저감(WG III)로 구분되어 있다(표 1.2).

기후변화의 영향 및 적응(WG II)의 평가보고서의 경우 지속가능한 개발과 회복탄력성을 중요하게 다루고 있다. 또한, 식량안보, 생태계에서 제공받는 제품, 인간정주공간과 같은 기후현상에 따른 영향에 취약한 부분에도 초점을

표 1.2 IPCC AR6 WG I , WG II , WGIII 비교.

WG I (물리과학적 근거)	WG II (영향, 적응 그리고 취약성)	WG III (기후변화의 저감)
1. 도입 2. 기후 시스템의 변화 3. 인간이 기후 시스템에 주는 영향 4. 미래 전 지구적 기후: 시나리오 기반 5. 전 지구적 탄소 및 생지화학적 순환과 피드백 6. 단기성 기후 강제요인 7. 지구의 에너지 수지, 기후 피드백 및 민감도 8. 물 순환 9. 해양, 빙권, 해수면 변화 10. 전지구와 지역의 기후변화 연계 11. 변화하는 기후에서 날씨와 이상기후 12. 지역 영향과 리스크 평가를 위한 기후 변화 정보	■ **도입** 1. 정책결정자를 위한 요약 ■ **기후변화로 인해 영향을 받는 시스템의 리스크, 적응, 그리고 지속가능성** 2. 대륙 및 담수 생태계 3. 해양 및 해안 생태계 4. 물 5. 식량, 섬유 등 생태계 제품 6. 도시, 정주공간과 인프라 7. 건강과 웰빙 그리고 커뮤니티 8. 빈곤과 지속가능한 개발 ■ **지역** - 범지역적인 문제 9. 아프리카 10. 아시아 11. 오스트랄라시아 12. 중앙 및 남미 13. 유럽 14. 북미 15. 작은 섬 ■ **지속가능한 발전 경로: 적응과 완화의 통합** 16. 전 부문과 지역을 아우르는 주요 리스크 17. 리스크를 관리하기 위한 의사 결정 18. 기후탄력적 개발 경로	1. 도입 2. 배출 추세와 요인 3. 장기목표와 호환되는 저감 경로 4. 단기 및 중기의 저감/개발 경로 5. 저감의 수요, 서비스, 사회적 측면 6. 에너지 시스템 7. 농업, 산림, 그 외 토지이용 8. 도시 시스템과 정주공간 9. 건물 10. 교통 11. 산업 12. 부문간 관점 13. 국가 및 하위국가 정책과 기관 14. 국제접 협력 15. 투자 및 금융 16. 혁신, 기술개발 및 이전 17. 지속가능한 개발측면에서의 전환

표 1.3 IPCC WG II 보고서의 흐름(AR4, AR5, AR6) 및 한국 기후변화 평가보고서 2020의 범위.

<table>
<tr><th>IPCC AR4</th><th>IPCC AR5</th><th>IPCC AR6</th><th>제1차 기후변화 평가보고서 (2010)</th><th>제2차 기후변화 평가보고서 (2012~)</th><th>제2차 기후변화 평가보고서 (2014)</th><th>기후변화 평가보고서 (2020)</th></tr>
<tr><td rowspan="2">3. Freshwater resources and their management</td><td rowspan="2">3: Freshwater resources</td><td>2. Terrestrial and freshwater ecosystems and their services</td><td rowspan="2">수자원</td><td rowspan="2">수자원</td><td rowspan="2">수자원</td><td rowspan="2">수자원</td></tr>
<tr><td>4. Water</td></tr>
<tr><td>6. Coastal systems and low-lying areas</td><td>5: Coastal systems and low-lying areas
6: Ocean systems</td><td>3. Ocean and coastal ecosystems and their services</td><td>해안 및 해양</td><td>해양 및 수산</td><td>해양 및 수산</td><td>해양 및 수산</td></tr>
<tr><td rowspan="2">4. Ecosystem, their properties, goods and services</td><td rowspan="2">4: Terrestrial and inland water systems</td><td rowspan="2">2. Terrestrial and freshwater ecosystems and their services</td><td rowspan="2">생태계</td><td>생태계</td><td>생태계</td><td>생태계</td></tr>
<tr><td>산림</td><td>산림</td><td>산림</td></tr>
<tr><td>5. Food, fibre and forest products</td><td>7: Food production systems and food security</td><td>5. Food, fiber, and other ecosystem products</td><td>농업</td><td>농업</td><td>농업</td><td>농업</td></tr>
<tr><td rowspan="4">7. Industry, settlement and society</td><td>10: Key economic sectors and services</td><td>-</td><td>산업 및 에너지</td><td>산업 및 에너지</td><td>산업 및 에너지</td><td>산업 및 에너지</td></tr>
<tr><td>11. Human health</td><td>7. Health, wellbeing and the changing structure of communities</td><td>보건</td><td>보건</td><td>보건</td><td>보건</td></tr>
<tr><td rowspan="2">8: Urban Areas
9: Rural Areas
12: Human security
13: Livelihoods and poverty</td><td>6. Cities, settlements and key infrastructure</td><td rowspan="2">-</td><td>도시 농촌 및 안전 복지</td><td>도시 농촌 및 안전 복지</td><td>도시 농촌 및 안전 복지</td></tr>
<tr><td>8. Poverty, livelihoods and sustainable development
16. Key risks across sectors and regions
17. Decision-making options for managing risk
18. Climate resilient development pathways</td><td>적응 및 취약성</td><td>적응전략</td><td>적응계획 및 대책</td></tr>
</table>

맞추었으며, 전 지구적으로 지역별 기후변화영향·적응·취약성을 세부적으로 접근하고 있다. 영향, 적응 및 취약성에 관해 서술하는 IPCC WG II 의 6차 보고서는 2021년 10월에 발간될 예정이다. 국제적인 흐름을 반영하기 위해 공개된 IPCC AR6 WG II 평가보고서 범위를 참고하고, WG I·III와의 위상관계, 한반도의 특성을 고려하여 한국 기후변화 평가보고서의 분야를 조정하였다.

1.1.2.4 우리나라 기후변화 평가보고서 발간 절차

우리나라 「한국 기후변화 평가보고서 2020」은 IPCC 평가보고서 작성 원칙 및 절차에 맞추어 진행하였다(표 1.3).

주저자를 중심으로 스코핑을 통해 평가보고서의 범위와 내용을 조정하고, 분야별 최신 연구결과를 활용하여 내용을 보완하였다. 각각 분야별로 필요한 부분에 대해서는

기여저자로부터 새로운 연구 결과 또는 누락된 연구 결과에 대한 정보를 수집하는 것을 원칙으로 하였으며, 최종 보고서를 집필하는 동안 두 차례 이상의 WG Ⅰ·Ⅱ 주저자간 중복성 검토를 통해 내용의 일관성과 통일성을 제고하였다. 그리고 최소 1회의 검토위원의 검토과정을 거쳐서 최종본을 완성하였다.

1.1.2.5 연구 결과 집대성 및 색인화

자료의 범위는 한반도를 대상으로 하는 기후변화의 영향 및 적응 관련 연구를 중심으로 국가보고서, 학술지게재 논문을 포함하고 비공식 문서 및 사기업 보고서, 발표자료 및 석·박사 학위논문은 포함하지 않는 것을 원칙으로 하였다. 또한, 국내 전문가 초빙세미나 및 전문가 자문을 통해 정보를 수집하여 자료를 보완하였다. 연구 결과물 중 기후변화 시나리오를 적용하지 않은 연구 또한 포함하였으며, 분야 내의 세부 분류 간 주제가 중복되는 경우도 일부 연구 내용으로 포함하였다(표 1.4).

분야별 검색한 자료는 엑셀로 정리하여 공유하였으며, 데이터베이스는 저자, 제목, 연구 분야, 연구 지역, 시나리오 형태 및 종류, 사용한 모델, 연구에 사용된 데이터 구축시기, 발간연도, 학술지정보로 정리하였고 각 분야에 따라 필요한 항목을 추가 보완하였다. 실제 보고서에 인용된 참고문헌의 수와 출처를 정리한 표는 아래와 같다.

1.2 「한국 기후변화 평가보고서 2014」 요약

1.2.1 주요 내용 요약

1.2.1.1 수자원

2010년부터 2013년까지 수자원 관련 국내 기후변화 연구는 취약성 평가 등 연구의 관점이 변화되었다. 이전보다 전망 연구 비율이 감소했고, 취약성 평가와 적응대책 수립 등의 도전적인 연구들의 비율이 증가하였다. 지표유출, 홍수, 가뭄 순으로 그 경향이 덜한 것으로 보고되었다.

지표유출은 GCM, RCM을 이용한 장기모의가 주를 이루었으며, 「한국 기후변화 평가보고서 2010」와 다르게 통계적 상세화 기법에 대한 연구 비율이 과거보다 감소하였다. 이는 기상청에서 제공된 RCM을 사용했거나 각 연구 단위에서 축적된 상세화 기법 노하우를 적용했기 때문으로 이해되었다. 이에 대비하여 「한국 기후변화 평가보고서 2014」에서 관심이 높아진 주제는 유출모의인데, 모형을 달리하여 적용성 검토를 하거나 토지이용 변화를 예측하는

표 1.4 기후변화 평가보고서에 사용된 참고문헌.

분야	한국 기후변화 평가보고서					
	2010		2014		2020	
	논문	보고서 및 기타	논문	보고서 및 기타	논문	보고서 및 기타
서론	32	15	0	12	0	7
수자원	77	34	71	12	151	10
생태계	136	5	68	21	75	12
산림	-	-	83	22	102	32
농업	84	19	113	7	80	9
해양 및 수산	213	27	69	4	43	23
산업 및 에너지	1	13	47	19	44	11
보건	44	32	53	9	73	28
인간정주공간과 복지	-	-	47	68	46	40
적응계획 및 대책	-	-	13	48	55	40
합계	587	145	564	222	669	212

등의 시도가 있었다. 지하 유출은 「한국 기후변화 평가보고서 2010」에 비해 연구가 증가한 편이었으나, 지표 유출과의 연계를 시도하기에는 여전히 연구가 미진한 상태였다.

홍수 전망은 지표 유출 전망과 함께 「한국 기후변화 평가보고서 2010」에서는 절대적 비율을 갖고 있었으나 「한국 기후변화 평가보고서 2014」에 이르러 그 비율이 대폭 감소하였다. 발표된 연구들에서는 기존에 다루지 않았던 성격의 변수나 유역을 다루거나, 비정상성 빈도해석을 고려하기 전 단계의 연구들이 발표되었다. 그에 반해 기후변화의 영향으로 인한 홍수 취약성을 평가하는 연구는 다양한 관점에서 수행되고 있었다. 연구 별로 기준 및 지표를 활용한 취약성 평가, 지표 및 기준의 개발, 그리고 경제성 분석이 이루어지고 있었다. 가뭄 연구는 전망 단계에서 취약성 평가, 적응대책 수립 등의 후속 단계로의 진행이 홍수에 비해 더딘 상태였다. 가뭄이 기후변화를 고려했을 때 불확실성의 영향이 더 크게 작용하기 때문이었다.

수자원 분야에서의 적응대책 수립 연구에서는 여러 연구자에 의해 다양한 기법이 발표되었다. 하지만 미래 전망 자료를 입력함으로써 연구 결과 내에 적응전략을 주장하는 결과는 부족한 실정이었다.

1.2.1.2 생태계

급격한 기후변화에 따라 자연생태계가 영향을 받았으며, 기후변화가 생태계에 미치는 영향 및 적응과 관련하여 국내·외적으로 다양한 연구가 진행된 것을 확인하였다. 특히 기후변화에 따른 연평균 기온의 상승과 강수량의 증가로 식물계절의 시기가 변하였고, 식물과 동물의 분포와 종 조성의 변화가 나타났다.

CO_2농도와 온도증가에 따라 식물들의 개화시기가 빨라지고, 한랭성 식물의 경우 수평적, 수직적 분포지가 축소되며, 난대성 식물들의 경우 분포지가 확대될 것으로 전망되었다. 하지만 기후변화와 관련된 동물생태 연구는 주로 곤충, 조류에 집중되었다. 수생태의 경우 해수온도 변화에 따른 어류종 서식지 변화에 관한 연구가 있었다. 그러나, 그 외에는 기후변화로 인한 미래 영향 전망이 미진한 상태였다.

적응대책의 경우 고산 식물 등 취약종에 대하여 서식지 전체의 종합적인 보존 대책 마련에 대한 연구가 진행되었다. 하지만, 적응대책도 새롭게 진행되거나 미진한 상태였다. 분야별로 과거부터 현재까지 연구 자료를 수집하여 연구 결과를 분석하고 현황을 파악하여 미래를 예측하고 적응 대책을 마련할 필요가 있었다.

1.2.1.3 산림

기후변화에 따른 산림분포의 변화를 모니터링한 결과, 연평균 기온이 상승함에 따라 산림 구성의 변화를 확인할 수 있었고 이는 지역별로 다른 특성을 나타냈다. 산림의 탄소는 저장량과 변화량을 연구 대상으로 하여, 식생과 토양 탄소로 세분하여 연구가 진행되고 있다. 토양의 탄소저장가능성을 확인하고 이를 추정하는 연구들이 등장하였다. 그러나 산림 토양의 탄소 저장과 변화에 관해서는 영향 전망에 대한 연구가 미진하고, 예측이 엇갈리고 있어 추가연구의 필요성이 제기되었다.

산림재해는 산림 자원을 위협하며 산림 생태계에 교란을 일으키는 주요한 원인으로서 국내의 산림재해 연구는 주로 산사태와 산불 연구에 집중되어 있다. 특히 산림재해에 대한 대부분의 연구는 현재의 재해 발생 현황을 분석하고 그 원인을 체계적으로 구축하는 데 목적을 두고 있었다. 환경적 요인은 산사태, 산불 및 산림병해충의 발생에서 중요한 역할을 하고 있으므로, 관련 연구들에서 환경의 변화에 따른 재해 발생 양상의 변화를 확인하였다. 그러나 산림 재해 역시 기후변화의 영향 전망 연구가 미진한 분야로 확인되었다. 기후변화 시나리오의 적용이 적고, 대부분 실제 발생 자료를 바탕으로 한 유사식 도출 및 기후인자 추출을 통한 산사태 발생 가능성 예측 연구가 진행되고 있었다. 산림의 병충해 연구에서는, 온도 변화에 따른 매개충 발육 시뮬레이션을 통해 기후변화에 따른 충해의 영향을 전망하고 있었다.

산림의 취약성을 평가하고 분석하고자 하는 연구들이 일부 진행되고 있었으나, 관련 연구와 자료의 부족으로 인하여 취약성의 요인을 판단하기에는 어려움이 따랐다. 따라서 기후변화로 인한 산림의 변화를 이해하고 대처하기 위해서는 우선 장기적으로 자료를 축적하고 연구를 진행하여, 우리

나라에 적합한 모형 등의 신뢰성 있는 영향 예측 방법론을 개발하는 것이 시급하였다. 또한, 임업 환경과 산림 생태계를 유지하기 위해서 산림을 적정하게 관리하는 방안의 필요성이 강조되었다.

1.2.1.4 농업

기후변화로 인해 노지 작물의 생육 가능 기간이 길어짐과, 작물의 재배 적기와 적지가 변함을 확인하였다. 보리의 품종 개량에 의한 내한성 증대와 지구온난화에 따른 겨울철 기온 상승이 맞물려 보리 재배 북방한계선이 상승했다. 주요 과수의 경우도 재배적지가 북상하고 주산지가 변화하였다. 온대과수인 사과는 온난화에 따라 재배적지가 북상하고 있을 뿐만 아니라 아열대 기후대가 증가하면서 재배적지 감소로 재배면적이 감소하는 추세였다.

쌀을 비롯한 작물의 수량성은 지속적으로 증가하였으나 이와 같은 수량 변화에 기후변화가 정 또는 부의 방향으로 얼마나 기여하였는지는 불명확하였다. 쌀의 경우 강수량 증가에 따른 일조 부족으로 수량 변화에 부정적 영향을 미친 것으로 분석되었으며, 고온 불임 및 고온해로 인한 수량성 및 품질 저하가 우려되었다. 기후변화에 따라 재배시기를 조정하면 어느 정도 수량 감소를 완화할 수 있지만 생육 기간이 단축되어 한계가 있는 것으로 나타났다.

기후 변화로 인한 따뜻한 월동환경, 식물체 피복기간 연장, 장마 변동 등의 영향은 월동해충의 증가와 토착화 가능성 확대 등과 맞물려 돌발 병해충 발생을 증가시켰다. 이에 따라 병·해충·잡초 발생 양상도 달라질 것으로 전망되었다. 병해충에 대한 벼 생산의 취약성은 현재보다 미래 기후 조건에서 크게 높아지고 취약지역 면적도 증가할 것으로 전망되었다.

지구 온난화로 발생 빈도와 심도가 증가할 것으로 예상되는 고온장해, 한발, 침관수, 바람 등에 의한 기상재해 피해 저감 개발 및 저항성 품종 육성 보급을 통하여 농작물 생산의 안정성을 향상하여야 하며, 지구온난화로 변화된 생태환경에 적응할 수 있는 작부체계, 재배시기, 재배관리기술, 잡초·병·해충 관리기술과 온실가스발생 저감형 작물생산 기술 개발이 필요하다고 역설하였다.

1.2.1.5 해양 및 수산

전 지구 기후변화의 영향과 마찬가지로 우리나리에서도 해면수온 상승, 해수면 상승, 해류의 변화, 해양산성화, 용존 기체의 감소와 같은 다양한 변화가 감지되었으며, 전 지구 평균보다 빠르게 진행되는 것으로 나타났다. 이러한 변화는 해양생물의 분포, 이동, 성장, 산란과 같은 생물특성의 변화를 가져올 것으로 전망되었다. 이러한 해역의 온난화 현상은 지속적으로 진행될 것으로 예상되었으며, 먹이망 구조의 변화, 일차 생산량의 변화, 주요 어획어종의 변화와 어획 해역의 이동을 수반할 것으로 예측되었다.

대부분 어종과 업종에서는 대응하기 힘든 큰 변화를 수반할 것이기 때문에 전반적으로 부정적인 영향을 많이 미칠 것으로 보였으며, 우리나라 식생활 문화를 보았을 때 국민건강과 식량 확보에도 큰 영향을 미칠 것으로 예상하였다.

수산업의 피해를 최소화하기 위해서는 다방면의 노력이 필요하며, 수산자원량을 유지하기 위해서 생태계 기반 수산자원관리가 필요함을 강조하였다. 인공적인 해중림의 조성, 바다목장을 이용한 어류 서식처의 제공으로 건강한 해양 생태계를 유지하려는 노력이 필요함을 강조하였다.

우리나라 해양의 상태가 아직 정확하게 파악되지는 않았었기 때문에, 각 생물종의 환경변화에 대한 반응을 이해하는 데 한계가 많았다. 우리 해역을 잘 모의할 수 있는 물리-생물 접합모형 개발이 시급하게 요구되었다. 해양 연구는 주로 정부의 재정지원으로 수행되었으나, 재원이 서로 다르고 기관별 연구의 성격이 달랐기 때문에 체계적인 연구가 수행되지 못했었다. 연구 해역이 편중되었으며, 국제 공동연구 체제가 미비하였고, 빅데이터 생산과 운영체제가 미비함이 검토되었다.

1.2.1.6 산업 및 에너지

우리나라는 기후변화로 인해 소비패턴과 산업 및 에너지 분야 전반에 걸쳐 다양한 피해가 발생된 것으로 평가되었다. 기후변화로 인한 경제적 손실이 매년 세계 GDP의 5~20% 정도로 예측되는 등 기후변화가 우리 삶에 미치는 직·간접적인 영향에 대해 부문별로 연구가 이루어졌다. 하지만 산업부문의

경우 특성이 상이한 다양한 산업과 업종이 산업 내부에 존재하고, 각 산업마다 기후변화의 영향이 다르게 나타남에도 불구하고 업종의 특성을 반영한 연구는 활발하게 이루어지지 못했으며, 산업과 긴밀하게 연관되어 있는 에너지 분야에서의 연구도 부족한 실정이었다.

산업부문에서 기후변화 위험평가 및 대응·적응에 대한 연구가 제한적으로 이루어졌다. 산업 내에서의 연구수준 정도에 있어서도 큰 차이가 나타났는데, 관광, 레저, 건설 등의 산업 부문에서는 비교적 많은 연구가 이루어지고 다양한 기후변화 적응방안을 제시했던 반면 유통, 식품, 중소기업 등의 산업부문에서는 선행된 연구가 적었으며 연구에서 제시한 기후변화에 대한 적응·대응 방안도 비교적 제한적이었다.

따라서 각 산업의 종류와 특성을 반영한 연구가 추진되어야 함이 강조되었다. 산업부문에서는 기후변화 시나리오의 수준에 따라 각 산업에서 나타날 수 있는 영향을 구분하여 예측하는 연구, 산업의 기후변화 적응·대응 평가에 대한 지수의 개발, 산업의 종류와 입지, 규모, 생산방식 등을 변수로 하여 적합한 산업의 입지조건, 규모, 생산방식 등을 도출할 수 있는 연구가 필요하며, 산업의 구조를 반영한 기후변화의 영향평가 등 향후 다양한 연구와 타당하고 현실적인 기후변화 적응방안의 제시가 필요함이 강조되었다.

1.2.1.7 보건

폭염에 의한 온열 손상환자 및 사망자, 기상재해로 인한 사망자, 알레르기 질환자, 삼일열 말라리아 발생 등은 기후요소와의 상관성이 확인되었다.

1981년부터 2010년까지 30년 동안 기상재해 빈도수는 감소한 데 비해 피해액은 증가한 것으로 나타났다. 1990년에서 2008년 동안 우리나라에서 가장 많은 사망자를 일으킨 재해는 홍수였지만, 태풍으로 인한 사망자 비율이 크게 증가하였고, 가장 높은 사망원인은 익사였으며. 해안지역 거주, 노년층, 남성이 취약한 것으로 나타났다.

최저기온과 수목류 꽃가루 농도, 꽃가루 알레르기 환자 사이에 유의한 양의 상관관계가 있었다. 삼일열 말라리아의 발생을 기후요인들과 상관관계를 분석한 결과, 기온이 증가할 때 말라리아 환자가 증가했고, 상대습도가 증가할 때, 일조량이 증가했을 때 말라리아 환자가 감소했다.

앞으로 폭염으로 인한 사망부담, 알레르기 질환, 수인성 질환 모두 기후변화로 인해 증가할 것으로 예측되었다. 설사질환의 경우 미래 시나리오자료를 이용했을 때 진료비가 모두 증가할 것으로 예측되었다. 이러한 질환 발생은 노령화 인구에서 더 높게 나타났다.

정부부처 간, 다학제 간, 학문분야 간의 원활한 공조체계 및 공동연구가 이루어지고 있지만, 기후변화와 건강과의 상관관계 및 취약성 분석 결과를 토대로 한 적응대책이 수립되지는 못하고 있었다.

1.2.1.8 인간정주공간과 복지

도시화율이 90%대로 유지되고 있었으며, 인구가 많이 거주하는 만큼 기후변화에 따른 재해위험에 매우 취약하였다. 도시는 기후변화로 인한 영향에 대해서 취약점을 지니는 동시에 기후변화 현상을 유발하는 탄소배출에서도 큰 비중을 차지하고 있었다. 미래 한반도의 아열대 기후구의 변화를 전망해 본 결과 도시지역 모두는 아열대 기후지역에 포함될 것으로 예측되었다.

기후변화 영향에 따라 도시에서 발생하는 홍수 등 재해규모가 대형화되고, 도시는 홍수, 폭설, 폭염, 해수면 상승 등 다양한 재해, 새로운 위험에 노출될 것으로 전망되었으며, 기후변화가 일상화되고, 재해는 대형화, 다양화될 것으로 예상하였다. 기후변화가 도시 시스템에 미치는 영향으로 인해 가장 취약한 공간은 도시의 해안, 하천변, 지하공간, 산기슭으로 이러한 취약공간에 위치한 도시기반시설, 건축물도 취약한 것으로 나타났다. 기후변화 취약성 측면에서는 기반시설군 전체적으로 홍수 및 집중호우와 태풍 및 폭풍에 대한 취약성이 높게 나타났다.

기후변화적응 도시계획기법에 관한 연구가 진행되었다. 도시 구조의 변화, 에너지 절약 설계, 열 부하 분석 및 기후도 작성을 통한 열 저감 계획이 있었다.

농촌에서는 기후변화로 인하여 농작물 생산이 가장 크게 영향을 받을 것으로 예상되었으며, 농경지는 온실가스 배출 비중은 적지만 기후변화를 저감하기 위한 방안 중 하나로

이산화탄소 배출이 없는 청정에너지원 개발에 대한 정부 투자가 지속적으로 증가할 것으로 예상하였다. 향후 농업 및 농촌의 저탄소사회화를 위하여 효율적 연료사용 및 기술 개발을 통한 저탄소 농업, 청정바이오(바이오에너지)의 사용, 친환경농업과 저탄소농업 확대 등을 추진하고 농촌지역 생활환경 개선을 위하여 농가소득 안정화, 농업체질 강화, 규모화 및 전문화, 그리고 농촌 생활인프라 확충 등을 통해 기후변화에 직간접적으로 대응할 것으로 전망되었다.

기후변화로 인한 취약계층의 피해 정도는 공간적인 요소뿐만 아니라 소득, 연령과 같은 사회적인 요소와도 관계를 가지고 있었다. 풍수해 피해와 관련하여 수도권 지역에서 저소득계층이 상대적으로 밀집해서 거주하고 있는 지역에 풍수해 발생빈도가 크게 나타났다. 사회 취약계층을 위한 기후변화적응전략은 사회적, 공간적 환경에 따라 다른 전략을 수립해야 할 필요성이 있었다. 우선 사회경제적 취약계층에 대한 사회적 문제와 관련된 기후변화 대응 추진 전략으로 기후복지제도의 도입, 극한 기후 현상별로 고위험 인구에 대한 응급구조체계 구축 및 집중관리, 저소득계층 기후변화 대응 사회적 안전망 구축 등이 필요하고, 지역사회의 공간적 특징에 따른 대응전략으로는, 도시지역은 주택침수·파손 등 물리적인 피해 예방 및 대응정책 강화, 주거복잡도 등 열악한 정주시설 개선 및 녹지시설 확충, 농어촌지역은 혹한에 대비할 수 있도록 생물학적 취약 가구의 노후 된 정주시설 개선, 물적 인프라 확충 등을 위한 정책과 사업추진이 추진될 필요가 있는 것으로 나타났다.

1.2.1.9 적응전략

국가 기후변화 적응대책은 2008년 최초의 적응대책이 마련된 이후 과학적, 법적 기반 마련, 세부시행계획 수립 등에 의해 계속 발전하고 있었다. 환경부 등 정부는 2008년 국가 기후변화 적응 종합계획을 마련하였고 그 이후 녹색성장 기본법에 근거하여 국가기후변화 적응대책(2011~2015) 및 이의 수정·보완 대책을 수립하였다. 이러한 국가기후변화 적응대책(2011~2015)에 따라 관계부처 합동의 세부시행계획을 마련하여, 각 세부과제 및 담당부처별로 사업개요, 추진실적과 함께 연차별 사업내용 및 소요예산, 기대효과를 작성하였다. 이를 통해 적응대책의 이행성과 책임성을 제고하고자 노력하였다.

지자체 적응대책은 광역지자체와 기초시범지자체로 구분하여 살펴볼 수 있었다. 광역지자체 적응대책 세부시행계획은 기후변화 영향 및 취약성 평가, 비전 및 목표 설정, 적응대책 및 중점과제 선정, 분야 및 전략별 적응대책 등을 담고 있어 체계 및 내용은 강화되었으나 해당 계획의 목적과 목표, 성격에 대한 정립은 필요하였다. 2015년 기초지자체 적응대책 수립 의무화를 앞두고 35개 기초지자체에 대한 시범사업(2012~2013년)을 통해 기초지자체 적응경험을 축적하고 설명회, 가이드라인 마련 등을 통해 수립기반을 강화를 하기 위하여 노력하였다.

기후변화 적응대책의 효과성 및 실효성 제고의 관점에서 적응대책 수립 및 이행연계, 취약성/리스크 평가 강화, 기후변화 적응 경제성 평가 및 우선순위 검토, 기후변화 취약계층 고려, 기후변화 적응을 위한 공간계획 강화, 지자체 기후변화 적응대책의 체계화, 기후변화 적응 관리 구축, 감축과 적응의 연계 및 통합의 8개 전략에 대한 현재의 수준과 발전방향을 검토하였다.

1.2.2 시사점 및 한계점

「한국 기후변화 평가보고서 2010」은 기후변화 영향 및 취약성에 대한 과학적인 사실을 검토한 후, 어떤 연구가 필요한지 제안하였고, 「한국 기후변화 평가보고서 2014」는 그동안 연구를 통해서 얼마나 확신성 있는 자료가 만들어졌는지 확인하였다는 의의가 있다.

2014년까지 우리나라의 기후변화 영향, 취약성 및 적응 연구는 전 세계 연구에 비해 미비한 상태였다. 분야별로 연구가 빠진 부분이 있으며, 미래 영향의 불확실성이 반영이 안 되었다는 한계가 있었다. 미래 영향을 평가하는 데 시나리오 및 모델에 따라 그 결과가 다르게 나타나 불확실성이 커지게 되는데, 기존의 연구에서는 사용된 시나리오나 모델이 한정적이어서 결과에 대한 불확실성이 제시되지 못했다.

가장 큰 한계점은 자료 수집과 정량화의 미진함이었다. 기후변화에 대한 영향을 확인하기 위해서는 오랜 시간 축적된 데이터가 필요하다. 하지만 여러 부문에서 데이터

관리 미비로 인한 한계를 지적해왔다. 특히 산림과 해양 및 수산 부문에서 산림 및 해양의 상태를 정확히 판단할 수 있는 자료가 축적되지 않아 생물종 변화를 이해하는데 한계가 있다고 하였다. 따라서 데이터베이스 관리를 위한 노력이 필요하다는 것을 알 수 있었다.

자료 축적의 한계는 정량화 연구의 한계로 이어졌다. 일부 연구에서는 과거 재해 발생 자료를 바탕으로 유사식을 도출하여 취약성을 분석하였다. 그러나 자료의 부족으로 인해 유사식에 대한 신뢰성을 확보하기 어려웠다. 해양 및 수산 부문에서 주장한 바와 같이, 우리나라 지역에 맞는 물리-생물 접합모형이 개발되어 정량적인 근거를 제시할 필요가 있었다. 최신 보고서에는 기후변화가 각 부문에 주는 영향을 보다 신뢰성 높게 예측하는 연구가 수록되었다.

또한, AR6에서 강조하고 있는 지속가능성의 개념이 「한국 기후변화 평가보고서 2014」에서는 제외되어 있었다. 지금 국제적으로 지속가능성이나 지속가능한 발전 경로에 대한 관심이 높아지고 있다. IPCC에서는 공간별 형평성뿐만 아니라 세대별 형평성을 중요하게 생각하고 있으며, 다음 세대가 누릴 수 있는 환경, 식량 자원 등을 강조하고 있다. 하지만 「한국 기후변화 평가보고서 2014」에 수록된 대부분의 연구는 영향 및 취약성에만 맞춰져 있었으며, 지속가능한 방향에 대해서는 고민이 부족하였다. 하지만 「한국 기후변화 평가보고서 2020」를 보았을 때, 앞으로는 IPCC의 영향을 받아 기후변화 적응과 지속가능한 발전을 연계한 연구가 증가할 것으로 기대된다. 이를 위해서는 부문 간 통합이 필요할 것으로 보인다.

마지막 한계점은 적응대책 관련 연구가 미비하다는 것이었다. 기존의 영향평가 및 취약성 평가 결과들이 적응대책 의사 결정과 연계될 수 있는 연구가 필요하였다. 수자원과 같은 일부 부문에서는 「한국 기후변화 평가보고서 2010」에 비해서 적응대책 수립연구가 증가했다고 언급했다. 하지만 보건, 산업 및 에너지, 생태계와 같은 부문의 경우 적응대책 수립이 발전되지 못한 것으로 나타났다. AR6에서는 적응대책이 커뮤니티 수준에서 이루어져야 함을 강조하고 있다. 기후변화가 개인 및 커뮤니티의 생활 및 건강과 밀접한 연관이 있기 때문에, 이에 대응하기 위해서는 체감이 가능한 커뮤니티 수준의 적응대책이 필요하다는 것이다. 「한국 기후변화 평가보고서 2014」에 따르면 우리나라 적응대책은 대부분 국가 수준에서 이루어지고 있었다. 이후 광역 및 기초지자체 수준에서 적응대책이 수립됨으로써 한 단계 수준이 내려올 수 있었지만, 아직 체감이 가능한 적응대책이 수립되기 위해서는 지속적인 노력이 필요할 것으로 보인다.

1.3 IPCC WG II 6차 보고서의 논의사항

1.3.1 주요 내용 요약

현재 IPCC 6차 보고서는 리뷰 단계에 있으며 2017년 9월 초안의 개요가 승인되었다(IPCC, 2017). 최종적인 WG II 6차 보고서는 2021년 완료될 것이다. 한국 기후변화 평가보고서 2020에는 승인된 개요를 바탕으로 어떤 내용이 논의되고 있는지 알아보고자 한다. WG II 가 보고서는 기후변화 영향, 적응, 취약성이란 제목으로 3개의 부문으로 나눠진다. 세 가지 부문은 각각 '기후변화로 인해 영향을 받는 시스템의 리스크, 적응, 그리고 지속가능성', '지역', '지속가능한 발전 경로: 적응과 완화의 통합'으로 구분된다.

WG II AR6 보고서가 담고 있는 주요 내용은 다음과 같다. AR5와 달라진 정치적 맥락, 부문 별-지역 별 주요한 기후 리스크가 인간과 자연에 미치는 영향, AR6에서 구축한 기후 리스크 프레임워크, 리스크 측면에서 적응의 중요성, 기후 영향 탐지와 적응 대책 구축 방법, 복합적 요인이 고려된 시나리오를 통한 다이나믹 기후 리스크 이해, 잔존하는 영향, 돌이킬 수 없는 손실, 경제적 및 비 경제적 손실을 포함한 과학적, 기술적, 경제적 측면, 적응의 한계와 정부, 기관, 경제적 측면이 포함된 효과적인 적응, 지속가능한 개발과 적응, 그리고 완화의 상호작용과 기후변화의 대응, 기후탄력적 개발 경로를 위한 기회로 구분되어 있다.

1.3.2 기후변화로 인해 영향을 받는 시스템의 리스크, 적응, 그리고 지속가능성

기후변화로 인해 영향을 받은 시스템을 대륙 생태계, 담수 생태계, 해양 생태계, 해안 생태계로 구분하고 있으며 이외에도 물, 식량, 섬유 제품과 도시와 같은 인간의 정주공간과 인프라, 건강과 웰빙 그리고 커뮤니티, 빈곤과 지속가능한 개발에 대해서 구분하고 있다.

각각의 생태계 측면(대륙, 담수, 해양, 해안 생태계)에서는 과거부터 해당 생태계에 주요한 영향을 준 영향과 리스크에 대한 트렌드를 되짚어보고, WG Ⅰ과 연계하여 기후 노출과 위험을 예측하고 있다. 종 변화와 생태계 구조와 생물다양성, 주요한 집단에 대한 위험, 생태계가 주는 서비스에 대한 영향을 관련된 시공간적 스케일에 따라 예측하고, 해당 생태계에서의 취약성과 복원력, 그리고 적응에 대한 가능성과 한계에 대해서 논의한다. 미래의 적응과 완화 시나리오에 따라서 변화하는 리스크, 비용, 절충(trade-off)를 평가하고, 지속가능한 개발과 정책적 맥락에서 관련 시나리오를 논의한다.

물 부문에서는 유역 규모의 변화, 홍수, 가뭄, 산사태를 포함한 물 관련 위험에 대한 수문학적 변화를 관찰하고 미래를 예측한다. 식량-에너지-물-건강 넥서스의 관점에서 단-중-장기적 물 안보에 대한 논의를 진행한다. 이러한 논의는 식량, 웰빙 부문에서도 진행한다. 다양한 기후 구역에서의 수자원 보안 위험에 대한 협력을 포함한 적응 대응을 논의하고 이때에는 지속가능한 개발을 위한 공동의 이익을 고려하도록 한다. 공유 수자원에 대한 사회적 대응, 수자원 시스템에서 복원력을 회복하는 방법 등에 대해 논의하는 구조로 구성되어 있다.

식량, 섬유와 같은 제품과 관련돼서는 주로 농업, 어업, 산림업에서 나타난 주요 기후 영향과 적응, 완화 대응 방법에 대해 논의한다. 약제나 고무 및 염료와 같은 자연적 제품들에 대해서도 현재와 미래의 예상되는 리스크를 예측한다. 제품의 생산 및 사용을 위한 적응 옵션을 논의함에 있어서는 지속가능한 개발 측면과 지역별 규모별 측면으로 구분하고 있다.

인간의 정주공간과 주요 인프라에 대해서는 기후 리스크가 도심과 비도심의 변화에 어떤 상호작용을 미치는지 논의한다. 극한 기상 이벤트 측면에서 리스크를 줄일 수 있는 인프라와 서비스에 대해서 알아보고, 인간 정주공간과 관련된 인프라의 대안에 있어서 시나리오별 미래의 영향을 예측해본다. 적응 옵션에 대해서는 공평성에 대한 고려를 포함시키며 완화와 연계하여 알아본다.

건강과 웰빙 그리고 커뮤니티의 변화에 대한 챕터에서는 취약한 인구나 집단에 대해서 확인한다. 또한, 적응 옵션이 가지는 한계, 사회적, 환경적, 경제적으로 지속가능한지에 대하여 논의한다. 이러한 적응 옵션에는 이주(migration)와 이동(displacement), 갇힘(trapped)이 포함되어 있다.

빈곤과 지속가능한 개발에 있어서도 생활양식의 변화나 경제적 기회에 따른 다양한 시나리오 하에서의 기후 리스크를 확인한다. 예측된 리스크는 공평성과 지속가능한 개발 측면에서 논의될 것이다. 특히 적응 옵션에 대해서는 저소득층과 주민 커뮤니티에 초점을 맞춰서 기술될 예정이다.

1.3.3 지역

기후변화와 관련된 모든 요소는 지역적 특성을 갖고 있다. AR6 보고서에서는 특별히 선정된 특정 지역에 대한 논의와 구분된 지역들에 대한 정보를 논의할 것이다. 공통된 지역에 대한 논의로는 노출과 취약성에 대한 지역적 특성, 문화 및 심리적 차원의 특성, 기후변화에 따른 주요 리스크 및 상호작용하는 리스크, 적응 옵션의 다양성, 법제도 및 재정 등을 고려한 정부차원의 문제, 시간적 고려를 포함한 부문 간, 지역 내 및 지역 간 문제 등이 있다.

보고서에서는 지구를 아프리카, 아시아, 오스트랄라시아, 중앙 및 남미, 유럽, 북미, 작은 섬으로 구분하여 지역적 논의를 이어갈 예정이다. 범지역적인 문제로는 생물다양성 핫스팟, 해안 정주공간, 사막화, 지중해성 지역, 산림, 극지방, 열대우림에 대해서 구분하고 있다.

1.3.4 지속가능한 개발 경로

지속가능한 개발 경로는 세 가지 챕터로 구분된다. 첫 번째는 전 부문과 지역을 아우르는 주요 리스크, 두 번째는 리스크를 관리하기 위한 의사 결정, 세 번째는 기후탄력적 개발 경로이다. 가장 먼저 리스크에 관해서는 시간, 공간 스케일에 따른 개발 경로와 기후변화로 인한 리스크에 대해 논의하며, 왜 스케일에 대한 고민이 필요한지를 다룬다. 리스크 관리를 위한 의사결정은 의사결정에 영향을 주는 요소(인식, 행태, 재정, 장려책 등)를 파악하고, 마찬가지로 시간, 공간 스케일에 따른 의사결정에 대하여 논의한다. 마지막으로 공공 및 민간 금융을 고려한 적응 계획과 구현, 재정의 요구, 국제적 협력에 대해서 논의한다. 기후탄력적 개발 경로에서는 지속가능 개발과 적응과 완화가 갖는 시너지와 절충(trade-off)에 대해서 분석한다. 또한, 여기서 적응 경로에 대해서 논의하는데, 이때 경제적 다양성, 기술, 불평등 감소, 회복탄력성 제고, 인간 웰빙의 개선 등을 고려한 경로에 대해서 정리할 예정이다.

1.4 IPCC 1.5℃ 특별보고서

1.4.1 주요 내용 요약

IPCC는 2018년 1.5℃ 지구 온난화의 영향을 다룬 특별보고서를 발간했다(IPCC, 2018). 위 보고서의 주요 내용은 지구 평균기온이 1.5℃ 이상 상승할 때의 여러 부문에서의 영향을 주로 다루고 있으며, 이는 파리 협정에서 결정된 온실가스 배출 경로(pathway)와 연계하여 분석되었다. 특히 기온 상승과 이로 인한 영향은 지역과 계절에 따라 달라서 1.5℃도 상승 시나리오와 2도, 4도 등 다양한 기온 상승 시나리오를 포함하여 다양한 지역과 다양한 계절에 대하여 영향평가를 실시하였다. 그 결과 온도상승이 1.5℃ 이상이 되면, 많은 영향을 받는 것을 확인하였고, 이를 통해 특별보고서에서 온도상승을 1.5℃로 제한해야하고 이를 위해 야심찬(ambitious) 완화 조치가 필요함을 강조하였다.

그동안 인간의 영향은 약 1℃(0.8~1.2℃)의 지구온난화를 가져온 것으로 추정되고 있고, 2030년에서 2050년 사이에는 1.5℃까지 증가할 것으로 예측하고 있다. 특히 북극은 2-3배 더 높은 지구온난화가 예상되고 있으며 일반적으로 바다보다 육지에서 높은 증가가 예측되었다. 지금까지 배출된 온실가스만으로는 1.5℃의 지구온난화를 유발시키진 않을 것으로 보이지만, 장기적으로 기후시스템에 영향을 줄 것이다. 만약 더 많은 배출로 인해 지구온난화가 1.5℃ 이상이 된다면 지금보다 더 큰 기후리스크가 인간과 자연 생태계에 모두 영향을 줄 것으로 예상되고 있다. 특히 기후모델 전망결과를 바탕으로 영향평가를 한 결과, 지역적 기후특성이 현재와 1.5℃ 지구온난화 사이, 1.5℃와 2.0℃ 지구온난화 사이에 확고한(robust) 차이가 있음을 보여주고 있음이 나타나고 있으며, 이러한 차이에는 육지와 해양 대부분 지역에서 평균 온도 상승(높은 신뢰도), 거주지역 대부분에서 극한 고온(높은 신뢰도), 일부 지역의 호우 증가(중간 신뢰도)와 몇몇 지역의 가뭄 및 강수 부족 가능성의 증가(중간 신뢰도)가 주요한 영향을 미치는 것을 보여주고 있다. 지역적 특성으로 보면, 2100년까지 2℃ 지구온난화와 비교했을 때 1.5℃ 상승은 지구의 평균 수위 증가를 0.1 m 낮출 수 있으며, 모든 지역(육상, 담수 및 연안 생태계)에서 멸종되는 종도 줄일 수 있는 것으로 나타났다. 또한, 해양의 온도 증가, 해양 산도 증가, 산소 감소가 덜 진행될 수 있기 때문에 해양 생태계와 서비스, 북극 빙하에 대한 리스크를 감소시킬 수 있다. 지구온난화가 강화되는 것은 기후변화 적응에 대한

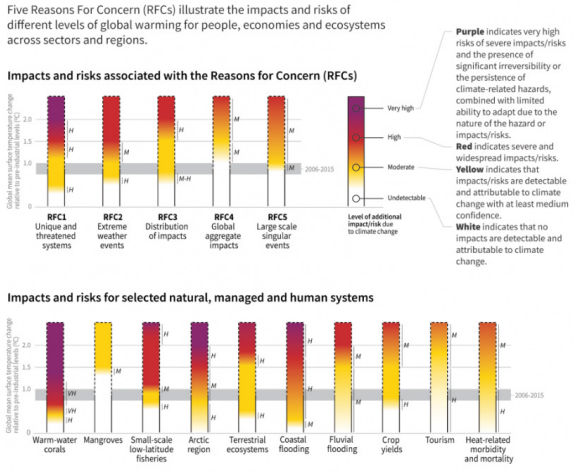


그림 1. 기후변화에 따라 고려되어야 할 항목(RFCs)과 영향을 받는 시스템이 지구온난화 수준에 따라 얼마나 높아지는지 보여줌(IPCC, 2018).

요구 또한 증가시킨다. 기후변화 리스크가 매우 큰 작은 섬이나 몇몇의 개발도상국을 제외하고는 대부분의 지역에서 2℃ 상승에 대한 적응 노력은 1.5℃ 상승에 비해 더 어려울 것으로 전망된다. 그림 1.1에서 보는 것처럼 시스템, 부문별로 온난화 수준에 따라 증가되는 영향, 리스크의 수준이 다르다. 1.5℃ 수준에 비해 지구의 평균 온도가 2℃ 높아지는 경우 산호 생태계, 저위도 어업, 북극 생태계, 해안 침식 등의 영향이 심각해질 것으로 보인다.

1.4.2 배출 경로와 1.5℃

1.5℃ 상승 이내로 지구온난화를 막기 위해서는 전 지구 이산화탄소 배출량이 2030년까지 현재(2010년) 대비 45% 정도 감소해야 하며, 2050년까지 온실가스 배출량이 0으로 수렴해야하고, 그 이후는 흡수가 되어야 한다. 지구온난화를 1.5℃로 제한하는 배출 경로는 에너지 및 자원의 감소, 탈탄소화 속도, 이산화탄소 제거 속도 등이 서로 다른 균형을 갖는 다양한 포트폴리오가 있으며, 서로 다른 구현의 문제와 지속 가능한 개발로 인한 시너지(synergy), 상충(trade-off) 관계가 나타난다.

1.5℃ 배출 경로는 메탄과 카본 블랙의 강한 감소를 요구하며(2050~2100년까지 85% 감소), 냉각 에어로졸이 20~30년 사이에 사려져야 한다. 이산화탄소와 대기오염물질의 감소는 에너지 부문에서 이루어질 수 있으며, 아산화질소와 메탄은 농업 부문에서 감소시킬 수 있다. 바이오에너지 중 일부는 이산화질소 배출을 증가시킬 수 있어 적절한 관리가 중요하다. 화석에너지 사용의 감소로 나타나는 대기오염물질의 감소는 직간접적으로 모든 1.5℃ 배출 경로에서 인간의 건강에 긍정적인 효과를 가져오는 것으로 분석되고 있다. 하지만, SO_2와 같은 대기오염물질은 냉각효과가 있어서 급격한 배출량 감소는 기후변화현상의 완화측면에서 부정적인 효과를 가져올 수 있기 때문에 적절한 고려가 필요하다.

지구온난화의 억제를 위해서는 산업화시대 이전부터 축적된 총 누적 이산화탄소 배출량 제한이 필요하다. AR5에서 지구 평균 온도를 1.5℃로 제한할 가능성에 대해서 탄소 예산은 50%의 확률로 580Gt으로 추정하였으며, 66%의 확률로 420Gt으로 추정하고 있다. GMST의 경우 50%의 확률로 770Gt을 추정하며 66% 확률로 570Gt으로 추정하고 있다. 이러한 추정에 대한 불확실성은 여러 가지 부문에 의해 기인된다. 또한, 미래에 영구 동토층이 해동되면서 배출될 잠재적 탄소와 습지에서 메탄이 배출되게 되면, 탄소 예산이 100Gt 가량 더 줄어들 수 있다. 까지 줄일 수 있으며, 또한, 미래의 이산화탄소 이외의 온실가스의 배출 억제 수준에 따라 250Gt가 변동 될 수 있다.

태양 복사에너지의 변화(Solar radiation modification, SRM)은 이러한 경로에 포함되어 있지 않지만, SRM은 이론적으로 온도의 상승(overshoot)을 막는데 효과적인 기법으로 제시되고 있지만 아직까지 그 리스크에 대한 지식의 차이(gap)와 불확실성이 남아있다. SRM은 해양 산성화를 막아줄 수도 있는 것으로 논의되고 있다.

결국, 지구온난화를 1.5℃로 제한하기 위해서는 에너지, 대륙, 도시, 인프라, 산업 부문에서 빠르고 광범위한 전환이 필요하다. 이러한 시스템 전환은 광범위한 완화 옵션과 상당한 투자 규모의 확대를 의미한다. 1.5℃ 경로는 2℃ 경로보다 향후 20년간 빠르고 뚜렷한 시스템의 변화를 보여줘야 한다. 에너지 부문에서는 에너지 효율 향상을 전제로 전기화를 이뤄야 하며, 에너지 사용량 자체를 줄일 수 있는 수요관리도 일어나야 한다. 1.5℃ 시나리오 중 일부에서는 2050년 이전에 온실가스 저 배출 에너지원이 높은 점유율을 보여야 하며, 70~85%의 전기를 재생에너지를 통해 공급하는 것으로 나타났다. 발전 부문에서는 이산화탄소 포집 및 저장(CCS)와 함께 원자력에너지를 사용하여, 화석연료의 비율을 줄여, 1.5℃ 경로를 달성할 수 있는 것으로 나타났다. CCS를 사용할 경우 2050년 가스 전력 생산 점유율이 전세계 전기생산량의 8%가 되고 석탄 사용은 0%에 가깝게 감소된다. 산업 부문에서는 2010년에 비해 2050년 65~90%정도 이산화탄소 배출이 감소되어야 하는 것으로 나타난다(2℃ 경로의 경우 50~80% 저감). 이러한 감소는 전기화, 수소, 지속가능한 바이오 기반 공급의 원료 사용, 대체 제품, 탄소포집과 활용 및 보관(CCUS)를 포함한 새로운 기술을 통해 이룰 수 있는 것으로 분석되고 있다. 산업 부문에서 에너지나 공정 효율 자체에서의 탄소 배출 감소만으로는 1.5℃로 제한할 수 없다. 도시 및 인프라 부문에서의 시스템 전환은 토지이용이나 도시계획의

변화뿐만 아니라 수송, 건물 등에서의 배출량 감소를 포함해야 하는 것으로 나타났다. 건물 내 전기 에너지 수요의 점유율은 2050년까지 55~75%가 되어야 하며(2℃ 경로의 경우 50~70%), 교통 부문에서 저탄소 에너지 사용이 2050년까지 35~65%(2℃ 경로의 경우 25~45%)가 되어야 한다. 토지이용 시스템의 변화는 식량, 에너지, 생물 다양성 및 생태계 서비스에 대한 요구와 지속가능한 관리에 심각한 문제를 야기한다. 토지 수요를 제한하는 완화 옵션에서는 토지 사용 관행의 지속가능성을 강화하고, 생태계 복원과 자원 집약도가 낮은 시스템으로 변화가 필요하다. 에너지에 대한 투자는 새로운 기후정책이 없을 때 보다 2050년까지 830억 달러가 들 것으로 추정된다. 2℃ 경로에 비해 1.5℃ 시나리오에서는 12% 정도 투자가 더 증가되는 것으로 나타났다. 저탄소 에너지, 에너지 효율 증가에 대한 투자는 2015년에 비해 2050년에는 6배가 증가할 예정이다.

1.5℃ 경로를 위해서는 21세기 동안 이산화탄소 제거(carbon dioxide removal, CDR)를 100-1000 Gt 정도 달성해야 할 것으로 예상된다. CDR은 잔류 배출량을 상쇄하는데 사용된다. 산림 조림, 토지 복원, 토양 탄소 격리, BECCS, 직접 공기 탄소 포집 및 저장(DACCS), 풍화, 해양 알칼리화가 포함하는 대책이 종합적으로 강구되어야 한다. BECCS의 경우 2030, 2050, 2100년까지 각각 연간 0-1, 0-8, 0-16 $GtCO_2$/yr만큼 저감할 수 있을 것으로 예측된다. 반면에 농지나 산림 등 토지이용 변화(AFOLU)는 같은 기간까지 0-5, 1-11, 1-5 $GtCO_2$/yr 저감할 것으로 예측된다. CDR 기술의 전개방법, 속도, 규모 및 사회적 수용에 대한 능력 등이 1.5℃ 경로를 달성에 성패를 결정하게 되는 것으로 나타났다.

1.4.3 지속가능한 개발

파리협약에 따라 제출된 국가들의 완화계획을 취합하여 분석한 결과 2030년까지 52~58Gt만큼의 온실가스가 배출되는 것으로 분석되었고, 이는 1.5℃ 목표를 달성하지 못하는 배출량으로 분석되었다. 2030년 이전에 이산화탄소 배출량이 감소해야지만 미래에 CDR에 대한 의존을 피할 수 있다. 온실가스 배출의 지연은 비용 상승, 탄소 인프라 비용, 중장기적 대응 옵션의 유연성 감소 등의 문제를 가져온다. 이는 서로 다른 개발 단계인 국가 간의 불평등한 영향을 가져올 수 있다.

1.5℃ 경로는 완화와 적응의 시너지 효과가 극대화 되며, 지속가능한 개발, 빈곤의 퇴치, 불평등 완화에 대한 불평등을 완화시킬 수 있다. 기후변화 영향은 지속가능 개발과 밀접한 연관이 있고, 많은 국가에서 SDG와 지구온난화와 빈곤 퇴치, 불평등 완화, 기후 액션과의 관계를 설정하고, 각 개별 요소의 목표를 설정하고 있다.

완화와 적응의 지구물리학적, 환경 생태학적, 기술적, 경제적, 사회문화적, 제도적 차원에서 본 보고서에서 평가한 내용은 1.5℃ 경로의 제한을 가능하게 한다. 다단계의 거버넌스, 제도적 역량, 정책 도구, 기술 혁신과 재무 동원, 인간 행동과 생활방식의 변화는 1.5℃를 위한 일관된 시스템의 전환을 위해 완화와 적응을 향상시키는 조건이다. 국가 상황에 맞는 적응대책을 신중하게 선택할 경우 1.5℃ 정도의 온도상승 억제와 함께 함께 지속가능한 개발과 빈곤 감소에 도움이 될 것이다. 적응대책은 인간과 자연 시스템의 취약성을 감소시키고 지속가능한 개발과 큰 시너지 효과를 갖는다. 잘 관리될 경우 식량 확보, 물 안전, 재난재해 리스크 감소, 건강 개선, 생태계 서비스 유지와 빈곤 및 불평등 개선을 할 수 있을 것이다. 물리적, 사회적 인프라의 개발은 레질리언스와 적응 능력을 높이는 주요 요인이다. 이러한 혜택은 1.5℃가 달성될 경우 대부분의 지역에서 나타날 수 있다.

그러나 1.5℃ 경로에 대한 적응은 지속가능한 개발에 부정적 영향을 주거나 균형을 잃게 할 수 도 있다. 적응 프로젝트는 온실가스 배출을 증가시키거나, 성별 및 사회적 불평등을 증가시키고 자연생태계를 침해할 수 있다. 따라서 적응 대책의 선택은 빈곤과 지속가능한 개발속에서 균형을 찾아야 한다. 배출을 완화시키는 적응 대책(예를 들면 토지관리가 재난위험과 온실가스 배출을 동시에 줄이는 경우, 저탄소 건물이 효율적인 냉각을 위해 설계된 경우)은 시스템 전환과 여러 부문에서 발생되는 비용을 절감시킬 수 있다. 1.5℃ 경로로 제한했을 때 그렇지 않은 온난화 조건에 비해서 식량 안보, 생태계의 기능과 서비스, 지속가능성이 낮아질 수 있는 등의 적응에 있어서 상충관계가 존재한다.

1.5℃로의 배출 제한은 SDGs와 여러 가지 시너지 및

상충효과를 가진다. 시너지의 수가 상충관계의 수를 넘긴 하지만, 최종적인 영향은 변화의 속도와 규모, 완화 포트폴리오 구성 및 전환 관리에 따라 달라질 것이다. 특히 1.5℃ 경로는 SDGs 3(건강), 7(깨끗한 에너지), 11(도시와 커뮤니티), 12(책임있는 소비와 공급), 14(해양)과 관련이 있다. 그러나 몇 가지 1.5℃ 경로는 제대로 관리가 되지 않을 경우 SDGs 1(빈곤), 2(기아), 6(물), 7(에너지 접근)과 잠재적인 상충관계를 보인다. 화석연료 사용에 의존성이 큰 지역에서는 1.5℃ 완화정책이 큰 리스크를 가져다주기도 한다. 경제 및 에너지 부문의 다각화를 촉진하는 정책은 관련 문제를 해결할 수 있다. 또한, 빈곤층과 취약계층을 보호하는 부문과 재분배 정책은 기아, 빈곤, 에너지 접근과 같이 다양한 SDGs와 절충되는 문제를 해결할 수 있다. 이러한 보완적 정책에 대한 투자 요구는 전체 완화를 위한 투자 중 일부에 지나지 않는다.

1.5℃ 제한에 대응하는 적응 비용은 정량화하기가 어렵다. 아직 충분한 연구 결과가 누적되지 않았고, 기후 레질리언스를 구체화하는데 정보가 많지 않은 상황이다. 그러나 1.5℃ 경로가 2℃보다 적응 비용이 더 낮을 것으로 추정된다. 적응 비용은 일반적으로 국가 및 정부 예산과 같은 공공 부문과 개발 지원국, 개발은행 및 기후변화와 관련된 유엔 기본 협약에 의해 지원된다. 그러나 적응 재정과 관련된 제한된 용량, 적응 금융 규모 등의 장벽이 존재한다.

지속가능한 개발은 1.5℃ 제한에 도움이 되는 사회구조 및 시스템 전환을 의미한다. 이러한 변화는 빈곤 퇴치, 불평등 해소와 함께 야심찬 완화 적응을 달성할 수 있는 기후 탄력적 개발 경로를 촉진한다. 사회적 정의와 평등은 기후 탄력적 개발 경로에서의 핵심적인 면이며, 지역과 국가에 따라 기후 탄력적 경로 개발이 달라진다. 지속가능한 개발과 일치하는 경로는 완화와 적응의 문제가 적고 비용이 낮아지게 된다.

1.5 2050 저탄소 적응 국제 동향

1.5.1 2050 저탄소 적응 국제 동향과 적응

2012년 파리협정과 제21차 기후협약 당사국총회 결정문을 통해 모든 당사국이 2050 장기 저탄소 발전전략을 수립하여 제출할 것을 요청받았다. 이에 따라 여러 나라에서 저탄소 전략 보고서를 개발하고 있다. 저탄소 전략 보고서에서 여러 나라가 기후변화 적응에 대해 언급을 하고 있으나 언급하는 정도에 차이가 명확히 드러난다. 감축이 주인 국가 보고서에서는 적응과 관련한 장기적인 관점이나 광범위한 효과에 대해서는 제시하고 있지만, 구체적인 적응정책의 이행이나 감축과의 통합 방식에 관해서는 기술하지 않았다. 예를 들어, 우크라이나에서는 장기적 관점에서 기후변화 적응은 감축과 같은 수준의 우선순위로 다루어져야 하며 정책 계획과 개선의 측면이 포함될 것을 언급한다. 파리 협정 이후, 기후변화 방지와 적응이 실질적으로 모든 경제 및 생계 수단에 대한 방향을 잡고 있기 때문에 관련 산업 정책에 대한 법체계가 점차 바뀌고 있음을 서술하고 있다. 미국에서는 부문별 정책을 제시함에 있어서 탄소배출 감축과 연계될 수 있는 적응 부문인 국토, 농림업 부문에 대해서 적응이 많은 이점을 제공한다는 점을 언급하고 있다.

반면 감축과 적응의 co-benefit을 강조한 국가도 있었는데 이들은 저감정책과 적응정책의 시너지를 유도하는 것을 강조한다. 장기적 관점에서 높은 적응 비용을 회피하기 위해서는 탄소 저감과 함께 적응효과를 놓칠 수 없다는 것이다. 독일에서는 기후변화 완화와 적응을 위한 기술 이전과 개발이 중요하다고 하였으며, 산림 보전과 지속가능한 관리, 비용 효율적인 방식을 통해서 탄소 저감을 목표로 하는 와중에도 서식지 관리나 수자원 보전, 자연 자원의 공급 등의 측면에서 적응에 도움이 될 수 있다고 보았다. 멕시코는 탄소 배출에 있어서 감축 노력을 강화하고 있지만, 동시에 기후변화 영향에 매우 취약한 국가로 감축 정책 우선순위를 결정할 때에도 co-benefit을 포함한 평가항목을 통해서 적응 및 감축 모든 측면에서 정책입안자가 이익을 극대화할 수 있도록 유도하고 있다. 또, 적응과 완화 사이의 시너지를 창출하고 모순된 정책을 피하기 위해서 농업, 어업, 임업, 도시 부문의 도구 및 프로그램 간에 일관성을 보장하고 있다.

기후변화 영향에 가장 취약한 국가의 경우 보고서에서 개별 장으로 적응 관련 내용을 따로 명시하고 있다. 이들 국가는 기후변화 감축 정책의 성공 여부가 적응에 달려있기 때문에 선행적으로 적응이 이루어지지 않는다면 아무런 정책 효과를 거둘 수 없고 취약성이 높아 위협에 처할 수도 있다고 생각한다. 예를 들어 피지와 마셜 제도는 감축을 위한

신재생에너지 기술을 적용함에 있어서 연안지역의 취약성 때문에 인프라 도입 시에 반드시 사전적 적응을 통해 안전을 보장하고 있다. 캐나다에서는 지속가능한 인프라의 개발은 기후변화 적응과 회복탄력성을 강화시키는 것을 저탄소 전략 보고서의 목표로 설정하였다. 영국은 기후변화에 대한 완화 및 적응을 포함한 더 나은 환경적 결과를 제공하는데 중점을 두었다. 피할 수 없는 수준의 기후 변화를 예측하고 이에 대응하기 위해서 적응의 필요성을 강조하였다. 영국은 기후 리스크와 국가 적응 프로그램에 이어 기후변화 리스크 평가를 5년 주기로 실시하여 어떤 조치가 필요할지를 고려하고 있다.

1.5.2 우리나라 2050 저탄소 발전 전략

아직 우리나라의 2050 저탄소 발전 전략은 나오지 않았지만 이를 위해 다각도로 고민하고 연구하고 있는 중이다. 이상엽 외(2017)은 신기후체제와 국내 여건을 반영한 배출경로를 통해 2050 감축목표 설정 방식을 도출하고, 중장기적으로 검토해야 할 대책을 검토한 바 있다. 위 연구에서는 앞으로 에너지효율 개선과 재생에너지 기반의 전기 생산을 통해 배출량 감축이 필요함을 강조하고 있다. 하지만 배출량 감축에만 초점이 맞춰져 있어서 기후변화 영향과 적응에 대한 언급은 부족하였다. 안영환 외(2016)는 저탄소 발전 전략이라는 지속가능한 미래의 비전을 수립하기 위해 사회, 기술, 경제, 환경, 정치 분야별 프레임을 제시하여 대내외 환경을 분석하였으며, 그 결과 2050 저탄소경제 비전을 '지속가능한 성장을 촉진하는 탈탄소화 경제'로 규정하였다. 여기서 안영환 외(2016)는 미세먼지 등의 환경오염을 교통부문과 연계시키고, 녹색성장을 추진하는 거버넌스의 변화를 저탄소정책과 연계시키는 등 우리사회의 트랜드 및 가치관을 고려하였다.

최근에 우리사회의 가치관을 바꾸고 있는 미세먼지 문제, 작년부터 본격적인 시작으로 설명되고 있는 폭염 문제 등 우리 삶을 위협하고 있는 많은 환경난제가 기후변화 문제로부터 자유롭지 못한 현실이다. 국제 동향에서 볼 수 있듯이, 기후변화에 취약한 국가일수록 2050 저탄소 전략에서 언급하고 있는 적응의 비율이 상대적으로 높다. 우리나라는 지금까지는 기후변화로 인한 위협이 그러한 국가들에 비해 적을 수 있었겠지만, 앞으로 예측되는 리스크는 매우 커질 것으로 연구되고 있다. 따라서 우리는 여러 가지 기후변화로 인한 문제를 해결하는 데 필요한 기후변화 적응을 2050년 저탄소 전략에 어떻게 담을지 구체적인 논의가 필요하다. 또한, 최근 전 세계적으로 관심이 집중되고 있는 회복탄력성(Resilience)을 높이기 위해서도 도시에서의 기후변화 완화는 물론이고 적응을 위해 다양한 논의가 이루어져야 할 것이다. 궁극적으로 미래의 감축과 적응을 균형 있게 고려하면서 기후변화에 대비해야 할 것이다.

1.6 기후변화 대응 기본계획

우리나라는 지난 2016년 제1차 기후변화대응 기본계획을 수립하면서 신기후체제에 중장기적으로 대응할 수 있는 기후변화 완화 및 적응과 관련된 구체적인 정책방향을 제시하였다. 이후 2030 국가 온실가스 감축 로드맵 수정과 제3차 에너지 계획과의 정합성 제고를 위하여 수정된 2019년 제2차 기후변화대응 기본계획을 수립하게 되었다(환경부, 2019).

제 2차 기후변화 대응 기본계획 중 적응 부문을 작성함에 있어서 총 3번의 포럼을 진행하여 기후변화 적응 이해주체의 주도적 참여가 기반이 되도록 했다.

이를 통해 총괄 비전 및 핵심과제를 변경하고, 기후변화 적응 부문을 물관리, 생태계, 국토·연안, 농수산, 건강, 감시·예측 및 평가체계, 적응 주류화로 구분하였고 이에 대한 세부과제를 변경하였다.

우선 이전의 기후변화 기본계획에서의 비전 및 목표가 효율적 기후변화 대응을 통한 저탄소 사회 구현이었다면 (관계부처합동, 2016), 2차 기본계획에서는 지속가능한 저탄소 녹색사회 구현으로 변경되었다. 또한, 학심과제 중 기후변화 적응에 해당하는 과제가 이상기후에 안전한 사회 구현(관계부처합동, 2016)에서 기후변화 적응체계 구축으로 변경되었다(환경부, 2019).

각 부문에서 전문가 및 관련 이해당사자의 의견을 수렴하면서 중요하게 생각되어 수정된 내용은 다음과 같다(환경부, 2019). 물 관리 부문에서는 물 재난 대응 및 관측

예측 정보를 통합하고 이를 모니터링할 수 있는 체계를 구축과 홍수 및 가뭄에 대한 예·경보체계 구축을 포함시켰다. 생태계 부문에서는 한반도 생태축 연결 및 복원을 위한 사업을 추진하고, 산불 및 산사태를 예방하기 위한 종합 감시망을 구축하는 등 재해예방을 강화해야 함을 고려했다. 국토·연안은 기후변화를 고려한 건물의 관리체계를 마련하고, 사회기반시설 기후 위험지도를 구축하는 사업을 추가했다. 농수산의 경우에도 재해에 대응할 수 있는 시스템, 고수온 예보 시스템을 구축하고 수산분야에 대한 재해 대응 방안 마련을 포함했다. 건강부문에서는 기후보건영향평가를 시행했으며, 고위험군 건강관리 및 위험예방 프로그램을 도입했다. 감시·예측 및 평가체계에서는 한반도 감시정보를 좀더 다원화하고 표준화 할 수 있는 방안을 추가했으며, 차기 복합위성 개발 및 발사와 연계시킬 수 있는 방안을 마련토록 했다.

기후변화 대응 기본계획 적응부문은 우리나라가 중장기적으로 기후변화 영향에 대응할 수 있는 틀을 마련한 것으로, 앞으로 각 부문에 있어서 구체적인 연구 및 정책이 시행될 수 있도록 할 것이다.

1.7 우리나라 기후변화 영향, 취약성 및 적응

다음은 본 보고서에서 다루고 있는 부문별 기후변화 영향, 취약성 및 적응대책에 관한 내용을 정리한 것이다. 내용에 대한 상세내용과 참고문헌은 각 장에서 확인할 수 있다.

1.7.1 수자원

수자원 분야에서의 영향평가 연구들의 경향을 살펴보면 AR5 RCP기반으로 수행되고 있으며, 홍수보다 가뭄전망의 연구비중이 높아지고 있는 추세이다. 홍수발생 전망의 경우, 전반적으로 미래 확률강우량의 증가와 토지이용변화에 따른 유출특성변화에 의해 유량과 홍수발생빈도와 홍수량이 점차 증가하는 것으로 전망되었다. 가뭄발생 전망의 경우에는 온실가스가 작게 발생하는 배출시나리오(RCP 2.6와 RCP 4.5)은 가뭄발생빈도가 증가하나 온실가스가 많이 발생하는 배출시나리오(RCP 6.0과 RCP 8.5)는 강수발생의 증가로 가뭄발생빈도가 감소하는 것으로 전망되었다.

기상학적 가뭄전망 중심에서 수문학적·농업적 가뭄지수(EDI, SPI, PDSI, RDI, SSI, WADI 등)를 활용하여 수자원 관리 측면에서 가뭄전망을 분석하는 연구들이 진행되고 있다. 영향평가는 미래 모의 시나리오 선정, GCM의 선정, GCM을 지역에 적용하기 위한 편이보정 과정, 시공간적 상세화 기법 선정, 수문모형 및 매개변수 선정과정에서 서로다른 결과를 갖기 때문에, 이 과정에서 나타나는 불확실성을 분석하는 연구도 함께 진행되었다.

취약성 분야의 연구도 물 부족, 가뭄, 이수 측면에서 많이 증가하였다. 하지만 여전히 연구목적에 따른 다양한 취약성 지표 및 기준을 적용하여 미래 수자원 관리 및 정책 수립에 반영하기에는 한계점이 있었다. 홍수 취약성 평가의 경우 피해 설문조사를 기반으로 하는 침수심별 추정함수를 개발하거나 기존의 지표를 기반으로 정량적인 지표를 구성하거나, 민감도 분석을 실시한 연구들이 있었다. 가뭄 취약성 평가의 경우 결합가뭄지수를 개발하는 연구가 진행되었으며, 물 공급에 대해서는 TOPSIS 기법을 사용해 취약한 지역을 평가하거나, 수자원 평가 계획 모형 K-WEAP을 통해 전반적인 물 공급 부족을 전망하였다.

하지만 취약성 평가에 비해 적응계획과 관련된 연구는 부족한 실정이었다. 의사결정방법과 연계하여 해당 종합치수계획이 최선의 대안인지 살펴보거나, 댐의 운영규칙을 산출한 연구가 있었다. 이외에도 더 나은 의사결정을 위하여 취약성 평가 및 홍수예측시스템을 개발하거나, 홍수 예경표를 작성하고, 하천유량 예측 방법, 미래 저수율전망 예측 기법 등이 개발되었다. 수자원 관련 기후변화 의사결정 과정에 시민이 구조적으로 참여할 수 있도록 비전공유계획을 국내에 적용한 사례가 있었으며, 재해 후 다중방어 체계를 통해 복구기법을 개발하는 연구가 진행되었다. 이러한 적응 및 의사결정 연구는 앞으로 기후변화로 인한 수자원부문 영향에 대응할 수 있는 능력을 키워줄 것이다.

1.7.2 생태계

생태계분야는 식물생태, 동물생태, 취약생태계의 연구가 주로 수행되었다. 식물생태에서는 식물생육과 생리, 식물계절, 식물서식지 및 분포와 관련한 연구 성과를 관측된 영향, 영향의 전망으로 나누어 분석되고 있으며, 동물생태에서는 서식지의 분포 변화, 개체군의 풍부도 변화 부분의 연구가 이루어지고 있다. 취약생태계는 기후변화에 취약한 것으로 알려진 고산 및 아고산, 연안 및 도서지역, 내륙습지와 기타 지역이 연구되고 있다.

식물생태의 경우 「한국 기후변화 평가보고서 2014」 때는 식물 종 중심으로 식물계절과 분포 등에 대한 기후변화영향 연구와 자생지 현황이나 장기 모니터링 등 기초자료 구축을 위한 모니터링 및 실험이 대부분이었다면, 그 이후 연구들은 식물의 서식지 변화에 대한 연구와 식물의 생육이나 생리적 변화에 대한 연구가 증가하였고, 식물계절변화 연구가 감소하였다.

기후변화에 따른 식물생육·생리변화 연구들은 주로 실외실험을 통해 CO_2 증가와 온도상승에 따른 식물의 생육 및 생리적인 반응의 변화를 분석하여 기후변화에 따른 영향을 예측하였다. 특히, 기후변화에 따른 유전자발현, 이차대사물질 생산 변화 분석 등 분자생태학 및 생리생태학적 연구들이 새롭게 수행되었다.

식물계절변화 연구는 주로 개화시기와 생육기간에 대한 변화가 분석되었으며 RCP 시나리오 등 미래 기후변화 시나리오를 가정하여 미래 변화를 예측하였다.

식물서식지·분포변화 연구는 미래기후변화 시나리오 가정하에 한반도 스케일이나 남한 스케일에서 기후변화 민감종을 중심으로 분포변화와 서식지 적합도 변화 예측이 이루어졌다. 아고산대 수종의 경우 미래 서식지 감소가 예측되었으나,, GCM 모형에 따라 기후적합서식지 증가 가능성도 제시되었다. 난대성 활엽수종의 경우 종에 따라 그 변화 분포가 다르게 나타났다.

동물생태 관련 연구에서는 현재 분포 자료를 토대로 미래 기후 시나리오에 따라서 2050년 이후 대상 분류군의 서식지 확대 또는 감소, 개체군의 증가 및 감소를 예측한 시뮬레이션 연구가 활발히 이루어졌다. 기후 시나리오 예측 모델에 의하면 멸종위기에 처한 종들은 기후변화에 따라 더 심각한 서식지 감소가 이루어질 것으로 예상되었다. 하늘다람쥐, 긴반점올빼미, 까막딱다구리 와 같은 멸종위기종이 서식 가능성이 모든 시나리오에서 낮아지는 것으로 나타났다. 반달가슴곰의 경우 강수량과 기온의 연간범위에 따라 서식지가 달라지는데, 2070년대까지 약 15배 늘어날 것으로 예상되어 다른 멸종위기종과 다른 추세를 나타냈다.

기후변화에 따른 서식지 이동은 점차 북쪽으로 진행되는 경우가 나비와 조류에서 확인되었으며, 외래종인 등검은말벌과 갈색날개매미충, 위생해충인 모기와 진드기 등의 전국적인 확산이 뚜렷하게 나타날 것으로 보았다. 우리나라 제주도를 비롯한 남부지방을 중심으로 동남아시아에만 분포했던 종이 새롭게 유입되는 사례들이 곤충과 조류에서 확인되었다. 이들 종이 우리나라에 정착할 것인지는 아직 알 수 없지만 새롭게 유입되는 사례가 점차 증가하고 있다.

서식지 변동과 함께 미래 기후 시나리오에 따라 개체군의 풍부도가 어떻게 될 것인가에 대한 것도 많이 이루어졌는데 조사대상에 속한 많은 곤충류가 미래에는 줄어들 것으로 예상되었다.

취약생태계 연구는 영향 관측 및 예측 연구에 비해 상대적으로 적게 확인되었다. 그 중 지역의 취약성 평가 지표 개발이 가장 활발히 연구되었으며, 기후변화 적응 및 대책 마련을 위한 기초 자료로써 활용될 수 있는 자료와 더불어 기후변화 시나리오 하에서의 미래 전망과 적응 대책을 마련하는 연구 성과가 새롭게 제시되고 있었다. 그 결과, 저지대형 및 광분포형 종과 아고산형 종들이 기후변화에 취약한 산림 식물로 나타났으며, 침엽수림의 경우 고지대가 취약성이 높은 것으로 확인되었다.

특히 도서지역에 대한 연구 비중이 크게 증가하였다. 도서해안 지역의 기후변화 대응 정책 시사점을 제시한 연구의 경우, 해수면 상승으로 많은 피해가 전망되는 우리나라 연안 및 도시저역의 대응 정책의 방향성을 제시하였다. 도서지역의 생태계 연구 결과, 급격한 환경변화에 노출될 가능성이 커 높은 취약성을 가짐이 확인되었고 현존 도서 식물상 및 생태계를 보호하는 것이 중요함을 강조했다.

취약성의 주요 원인으로는 기온 등의 기후요소와 그에 영향을 받는 토양환경요인 등을 함께 고려하여 보다 풍부한 결과를 도출함으로써 기후변화의 생태계 영향성 평가 연구 성과의 정밀도 및 신뢰도가 향상되었다. 향후 기후변화에 따른

취약생태계 내 식물 분포역 변화 등과 관련한 연구에서, 토양환경뿐만 아니라 생육에 영향을 미치는 다양한 인자에 대한 보다 세부적인 접근이 이뤄진다면 연구의 정밀도가 더욱 향상할 것으로 판단된다.

향후 연구에서는 생태계 전반에 걸친 장기적 모니터링 결과와 함께 미래전망 및 취약성, 적응대책에 관련한 종합적인 연구가 이루어져야 한다. 이를 통하여 기후변화와 생태계 간의 복합적인 상호작용을 이해하고, 나아가 기후변화에 대응한 지속 가능한 발전 방안을 마련할 수 있을 것으로 기대된다.

1.7.3 산림

산림분야는 기기후변화의 영향과 미래 산림의 변화를 파악하고자 하는 노력이 이루어졌다. 또한, 이를 기반으로 지속가능한 발전을 위한 적응 정책수립을 지원하고자 한 연구가 진행되고 있었다.

지금까지 관측된 영향의 경우, 기후변화로 인한 산림 생장 변화는 수종에 따라 다르게 나타났다. 소나무의 생장은 기온과 음(-)의 상관관계를, 강수량과 양(+)의 상관관계를 가졌다. 참나무류는 기온과 강수량과 모두 양의 상관관계를 가졌다. 기후변화는 고사율에도 영향을 미쳤는데, 소나무의 경우 기온이 1℃ 증가시 고사율이 약 1% 증가하는 것으로 분석되었다. 그러나 우리나라 전반에 걸쳐서 소나무림의 임목축적변화를 예측한 결과, 2040년 이후로는 뚜렷하게 증가하는 것으로 나타났는데, 이는 고산지대에서의 소나무 생장률이 증가하기 때문으로 나타났다.

산림 수종분포의 영향전망에 관한 연구는 과거 및 현재의 서식처 정보와 산림분포 모형을 기반으로 기후변화 시나리오를 적용하여 산림 잠재 생육지 분포에 대한 예측 등이 수행되고 있다. 우리나라 산림은 기후변화 적응속도보다 기후대 이동속도가 더 빨라져 구상나무, 분비나무와 같은 고산·아고산 식생은 저지대 식생과의 경쟁에서 밀려나게 될 것으로 예상되며, 넓은 지역에 걸쳐 침엽수림과 혼효림은 줄어들고, 상록활엽수림은 늘어나고 북상하는 것으로 나타났다.

기후변화는 산림재해의 위험성도 증가시킨다. 강원도 전체를 기후변화 시나리오를 적용했을 때 현재보다 산사태 위험이 증가하며, 특히 RCP 8.5의 먼 미래 결과에서 대형 재해의 위협이 증가할 것으로 예상되었다. 전국에서 평가를 했을 경우 일부지역과 일부시기에 산사태 발생 가능성이 예측되었다. 이 또한 먼 미래로 갈수록 넓은 지역에서 높은 수준의 산사태 발생 가능성이 나타났다.

산불의 경우 기후변화가 발생의 직접적인 원인이 아니기 때문에 모의 연구가 많이 수행되지는 않았다. 대부분의 연구에서 산불 취약성 평가가 이루어졌는데, 충남지역의 경우 미래에 산불 취약성이 증가하다가 2050년대에 다시 감소할 것으로 전망되는데, 적응능력이 증가하기 때문인 것으로 나타난다. 모델을 통해 산불의 영향을 전망할 경우, 기후변화에 의해 두드러진 변화를 보이진 않지만, 모형과 기상 자료의 개선을 통해 봄철 건조기간 증가 및 산림연료량 증가 등이 고려될 경우 산불의 위험수준이나 피해규모변화가 현실적으로 예측될 수 있을 것으로 보인다.

기후변화로 인한 산림병해충 연구의 경우 병해충의 우화시기 변화 등의 생육 특성 파악 연구가 주로 수행되고 있다. 참나무시들음병의 경우, 기후변화가 진행됨에 따라 수도권 북쪽으로 북상하고 동·서해안 지역으로 확장될 수 있다. 꽃매미의 경우 남부지방에서 발생위험도가 높게 나타났는데, 기온이 상승할수록 증가하는 경향을 보여 미래에 증가할 수 있음을 보여줬다.

미래 산림 분포의 취약성 연구에 대해서 최근에는 기후변화에 의해 잠재 수종적합지역이 사라지는 것으로 예측되는 곳을 산림분포 취약성이 높은 곳으로, 그대로 유지되는 것으로 예측되는 지역을 취약성이 낮은 것으로 규정하여 연구되고 있다. 즉 아고산림이나 침엽수림의 경우 취약성이 증가할 것으로 예상되고, 온난대림의 경우 취약성에 큰 변화가 없을 것으로 예상되고 있다. 이러한 취약성의 원인은 온량지수, 최저온도지수 등과 같은 생육기간 및 최한월의 온도 증가에 있는 것으로 분석되었다.

산사태 취약성의 경우 토지이용 변화나 수목의 뿌리 등의 요인이 영향을 끼치는 것으로 나타났다. 수목의 밀도가 적거나 천근성이 많은 지역, 토지이용이 변화하면서 경사진 산림이 생긴 경우 산사태 취약성이 증가하였다. 산불 취약성의 경우 평균기온 증가와 습도의 감소가 중요한 기상요인으로 제시되었다. 대규모 기후인자와 봄철 산불발생을 연구한 결과, 우리나라의 봄철기온과는 뚜렷한 상관성이 나타나지 않아

우리나라 봄철 산불발생은 기후변화로 인한 기온 상승보다는 엘니뇨/라니냐에 의한 서태평양 대류활동과 연관된 열대-중위도 원격상관에 의한 것으로 판단하였다.

소나무 재선충의 확산요인은 크게 선충과 매개충 및 기주수목에 영향을 미치는 기후 요인과 인위적 요인으로 구분할 수 있으며, 기후요인은 선충 및 매개충의 생태와 수목의 건전성에 영향을 미쳐 분포 수 변화에 직접적으로 관여한다. 재선충과 매개충의 발육단계 별로 영향을 미치는 기후 요소들의 차이가 존재하며, 각 계절의 평균기온, 습도, 최대·최소 기온 등이 재선충 피해 확산과 밀접한 관계가 있는 것으로 나타났다.

현명한 기후변화 적응 대책을 수립하기 위해, 숲가꾸기 등과 같은 적극적인 관리가 산림에 미치는 영향을 분석하는 연구가 진행되고 있다. 벌기령(임목 벌채할 수 있는 나무의 연령)을 단축하는 정책은 불균형한 산림의 영급구조를 개선하고 목재를 늘리는 것 뿐만 아니라 부분적으로 탄소흡수량을 증가시키는데 기여할 수 있을 것으로 기대되었다. 간벌(솎아베기)은 인위적 관리를 통해 산림의 지속가능성을 높이는 활동인데, 탄소 흡수 기능 유지와 우수한 목재 생산을 가져온다. 그러나 대부분 연구가 침엽수를 대상으로 수행되었고 장기 모니터링이 부재하여 앞으로 개선되어야 할 부분이 많다.

조림정책의 경우 기후변화에 따라 변화하는 잠재 수종분포를 고려한 적정한 산림관리가 필요하다. 과거 집중적인 조림정책은 잣나무와 낙엽송으로 이루어졌지만, 기후변화로 인해 쇠퇴하거나 북상할 것으로 예상되기 때문이다. 산림 수종분포 취약성을 낮추기 위해서는 취약성이 높은 수종을 보호하거나 미래 적정 수종으로 갱신하여 관리하는 방안을 고려할 수 있다.

기후변화 대응 정책 수립과 이행을 위해서는 국내 온실가스 배출원과 흡수원을 파악하고, 국가 온실가스 인벤토리를 정확하게 산정하는 것이 중요하다. 탄소 인벤토리 및 계정을 기반으로 탄소역배출(Negative Emission, NE)을 산정하는 것도, 산림분야의 좋은 적응옵션으로 고려될 수 있다. 새롭게 떠오르고 있는 바이오에너지 탄소포집 및 저장/활용 방안은 탄소배출을 줄이고 대기중 이산화탄소 농도 감소에 기여할 수 있다. 국제응용 시스템 분석연구소(International Institute for Applied Systems Analysis, IIASA) 연구팀은 우리나라 산림분야의 BECCS 잠재량을 평가한 바 있으며, 연간 6.4백만GJ의 전기생산과 86만톤의 CO_2 배출 저감이 가능할 것으로 추정하였다.

산림 재해에 대응하기 위해서는 재해위험과 취약성 저감을 위한 적응 옵션으로는 정보 고도화를 통한 예·경보 시스템 개선, 사방시설 등 인프라 확충, 산림관리를 통한 산림과 토양의 적응력 증진 등이 있다.

1.7.4 농업

기후변화에 관련된 벼와 보리에서의 관측현황, 영향전망, 취약성 주요원인, 적응대책 연구가 지속적으로 진행되고 있고콩, 옥수수, 감자와 같은 주요 식량작물에서의 재배환경실험과 작물생육모델을 이용한 기후변화 모의실험들이 수행되었다 . 콩의 경우 재배 가능 면적이 점차 확대될 것으로 보이지만, 2070년도 이후에는 지나친 고온의 영향을 받아 감소될 것으로 보이고, 옥수수 또한 온난화로 인해 생육일수가 감소될 것으로 예측된다. 감자는 이산화탄소 농도로 인해 수량이 증가하나, 추가적인 한발처리로 인해 괴경수량이 56% 감소되는 것으로 보고되었다.

벼의 경우 옥외환경조절시설[SPAR(Soil Plant Atmosphere Research)]을 이용한 벼 재배환경실험을 추가하였다. RCP 8.5 시나리오에 따른 2051~2060년대 기상조건에서는 벼의 생육기간이 단축될 뿐 아니라, 고온 등숙 환경에 노출될 위험성이 커 품질 또한 저하될 것이로 예측된다. 벼와 보리에 대한 미래기후영향평가는 신기후변화시나리오를 이용한 모의실험으로 갱신하였다.

식량작물별 생육시기에 따른 취약성에 대한 논문들을 추가적으로 수록하였으며, 고온 저항성 신품종 개발이 벼와 감자 등에서 보고되어 기후변화 적응대책의 방법으로 추가하였다. 고온등숙으로 인한 품질저하에 강한 벼 품종을 확인하였으며, 특정 벼에 아지드화나트륨을 처리하여 고온조건에서 등숙이 양호한 새로운 벼를 육성하였다. 감자의 경우 역병에 강한 종을 인공교배하여 병해 발생률이 적고 수량성이 높은 '다미'감자를 육성하였다.

기후변화로 인한 과수의 재배적지 이동은 「한국 기후변화 평가보고서 2014」에서 다루어졌으나, 채소의 수량성에 대한

내용은 노지고추에 한정되어, 본 보고서에서는 배추, 무, 마늘, 양파 그리고 딸기 등에 대한 연구논문을 추가하였다. 배추를 기후변화조건 챔버에서 재배한 결과 광합성 효율이 감소되고 생육수량이 감소되었다. 마늘 또한 높은 온도에서는 이차생장 발생률을 낮춰 상품성이 낮아지는 것을 발견했으며, 재배적지가 남부지역에서 중북부 지역으로 북상할 것으로 예측되었다. 딸기도 고온 조건이 생리활성물질에 부정적인 영향을 미쳤으나, 양파의 생육은 고온조건에서 적합한 것으로 나타났다.

「한국 기후변화 평가보고서 2014」에서는 원예작물에서의 기후변화 적응대책의 방향성에 대한 논의만 이루어졌을 뿐 구체적인 실험논문들은 수록되지 않아, 본 보고서에서는 고온피해를 경감시키기 위한 재배방법 실험연구들을 추가하였다. 고온에 의한 과피 착색을 감소시키는 연구가 진행되었다.

일부 병해충 발생에 대한 관측현황과 영향전망에 대한 연구가 「한국 기후변화 평가보고서 2014」에 포함되었고, 본 보고서에서는 RCP 시나리오에 따른 다양한 병해충(노린재 5종, 진딧물 5종, 신문제 5종, 식물병 7종 등) 발생위험 연구가 다루어졌으며, 적응대책으로 복합내병충성 품종의 개발과 기후변화조건에 적합한 살충제 선별에 관한 연구가 다루어졌다. 특히 2018년 7개 대학에서는 고위험해충 9종에 대한 예찰협력 네트워크가 구성되었다. 기후변화 조건에서 외래 침입종이 꾸준하게 증가할 것임이 분명하기에 향후 위와 같은 예찰시스템의 대상 해충종과 예찰조사 지역의 확장이 이루어져야 할 것으로 사료된다.

잡초 발생 분포의 경우 「한국 기후변화 평가보고서 2014」에서는 논문이 거의 보고되지 않았지만, 본 보고서에서는 지난 수십 년간의 논, 밭, 과수원에서의 잡초 발생 분포 변화와 미래기후에서의 외래잡초 발생위험에 대한 연구들이 다루어졌다. 잡초 발생으로 인한 잠재 서식지를 판단함으로써 피해를 방지하는 것이 필요하다.

기후변화가 작물에 미치는 영향에 대한 연구에서 아직까지 환경스트레스가 작물에 피해를 주는 기작에 대한 정량적 연구는 미흡한 상태로, 작물생육모델의 환경반응식들에 대한 개선과 검증이 이루어져야 신뢰성 있는 기후변화 영향평가가 이루어질 수 있다고 판단된다. 병해충 및 잡초 발생에서도 모니터링 자료와 환경실험 자료를 이용해 기상요인이 병해충 및 잡초 발생에 미치는 영향을 정량화하고, 발생위험모델을 구축하여 작물생육모델과 결합한 뒤, 농업생태계 전반에 대한 기후변화 영향평가 모의가 이루어져야 될 것으로 사료된다.

1.7.5. 해양 및 수산

해양생태계 변화의 배경이 되는 해양온난화, 해양산성화 및 해양저산소화에 대한 연구 수준은 누적된 관측 자료의 기간과 범위에 따를 수밖에 없어 우리나라는 아직도 종합적인 영향의 평가와 취약성 평가에 한계가 있다. 일부 해수 물성의 변화에 대한 연구에서는 정량적 분석 결과 제시가 가능한 상황이지만 생태계 변화에 근접할수록 정성적 분석 수준에 머물러 있는 실정이다. 이러한 제한적 상황에서 우리나라 해역에서 최근 연구된 해양환경의 변화 상태가 정리되고 있고, 영향 전망이 이루어지고 있다.

영향 전망의 경우 우리나라 수온은 2100년 우리나라 주변해역의 표층 수온은 RCP 8.5 시나리오에서 현재에 비하여 약 3~6℃까지 상승하는 것으로 나타났고 RCP 4.5 시나리오에서는 현재에 비하여 2100년 2~3℃ 표층 수온이 상승하는 경향을 보였다. 해수면 상승의 경우 CMIP5 21개의 앙상블 자료를 활용하여 예측하였으며, RCP 2.6, 4.5, 6.0 및 8.5에서 각각 37.8 cm, 48.1 cm, 47.7 cm 및 65.0cm 상승하여 온실가스 배출량 증가에 비례하여 증가하고 있다는 것을 밝혔다.

이러한 해양의 환경변화는 저차영양단계의 생물들에게 직접적으로 광범위하게 영향을 끼치는데, 동물플랑크톤 분포는 해류와 매우 밀접한 관련이 있어 기후변화의 지시자로 유용하게 사용될 수 있음을 보고하였다. 동해에서는 식물플랑크톤과 동물플랑크톤의 개체수와 다양성의 변화와 함께 이들의 생체조성 변동을 유발하여 먹이로서 저차단계를 거쳐 상위영양단계에 영향을 줄 수 있다는 것이 보고되었다. 지구온난화로 인해 유해생물이 대량으로 출현하는 것도 보고되었다. 특히 노무라입깃해파리는 중국 산동반도와 양자강 하구해역에서 발생한 것으로 추정되는 외래종으로 2003년 이후부터 우리나라 주변해역에서 대량 출현하고 있는 것으로 보고되었다. 대형 해파리와 함께 가장 대표적인 유해생물인 적조는 불규칙적인 주기를 가지고 우리나라 전

연안에서 발생하였으며, 1990년대 이후에는 유독성의 편모조류가 우점하였다.

취약성 평가의 경우, 기존에 개발된 지표를 통해 시공간의 예측치를 적용하여, 시나리오별 평균값을 산정하였다. 생물별로는 홍어, 대게, 아귀, 명태가 높았고, 살오징어, 꽃게, 멸치가 취약성이 낮은 것으로 평가되었다. 민감도 외에도 기후노출, 적응능력의 각 지표를 합산한 결과, 기후변화 시나리오에 따라 상이하게 나타났지만 연안어업이 대체로 높다는 공통점이 있었다. 따라서 연안어업에 대한 기후변화 적응 대책이 더욱 필요한 것으로 사료된다.

우리나라의 양식어업의 경우 취약성평가 대상은 우리나라의 주요 해면 양식 품종 14종이며, 각 품종을 주요 양식 지역별로 구분하였다. 취약성 분석 결과 시나리오별로 품종-지역의 상대적인 취약성은 비슷한 양상을 보이고 있다. 품종간 차이는 크게 나타났는데 기후 노출이 크게 나타난 김, 미역과 같은 해조류가 가장 취약하였다.

「한국 기후변화 평가보고서 2014」에서 강조하였던 '기후변화에 대한 취약성 평가와 적응방안' 마련은 아직도 세밀하게 이루어지지 않고 있어 기존의 적응옵션에서의 권고 사항은 아직도 유효하다. 기후변화 감시체계의 경우 2018년 기상청과 국립수산과학원이 협업을 통해 54개의 실시간 관측 시스템을 총 98개로 확대 운영하였다(국립수산과학원, 2019). 기후변화에 기인한 고수온 현상에 대응하기 위해서 양식기술도 개발하기 위해 R&D를 강화한 것으로 나타났다. 그러나 그 외 수산업의 기후변화 적응을 위해서 다양한 산업 육성이 필요할 것으로 사료된다.

1.7.6. 산업 및 에너지

우리나라는 자연재해로 인하여 최근 10년(2007년~2016년)동안 162명의 인명피해와 더불어 약 7조 3천억 원의 재산피해를 입었다. 재산 피해규모가 증가한 원인은 명확하진 않지만, 사회의 발전에 따라 기반시설을 포함한 자산 규모가 증가한 것이 하나의 원인으로 추정된다.

우리나라의 산업 및 에너지 부분은 압축적 경제성장을 지원하기 위해 구축된 기존 대규모 집중형 에너지 공급정책으로 에너지다소비, 온실가스 및 오염물질 다배출 구조가 정착되어 있어 1인당 에너지 소비는 1990년에 OECD 평균의 50% 수준이었으나 2017년에는 140% 수준으로 증가하였으며, 일본과 독일을 각각 2001년, 2002년에 추월하고, 2008년에는 OECD 평균을 추월하여 기존 에너지 정책이 지속될 경우 미국과 유사한 에너지다소비형 경제구조로 고착화될 것으로 전망되고 있다.

2017년 기준으로 우라나라의 전체 에너지소비 중 산업부문의 비중은 61.7%(원료용 포함)로 OECD 평균에 비해 매우 높은 수준으로[1] 감소세를 보이는 다른 나라와 달리 지속적으로 상승하는 추세에 있다. 이러한 배경에서 본 연구는 국내 산업 및 에너지 부분의 기후변화 영향 및 적응방안 등에 대한 이론적 고찰을 통하여 최근 발표된 IPCC 특별보고서인 1.5℃(및 2℃) 기후변화 정책목표에 상응하는 정책 방향을 설정함으로써 기후변화 대응 역량을 강화할 필요가 있다.

기후변화로 인하여 산업별로 상이한 영향이 관측되었다. 기상산업의 경우 총 매출액이 증가하고 있으며, 기상 기기, 장치 및 관련 제품 제조업이 증가하였다. 유통/식품 분야는 안전과 관련하여 기후변화로 인한 식중독 등에 관심이 높아지고 있다. 또한, 기후변화 및 에너지 자원 고갈이 식품분야에 중요한 역할을 할 것으로 보고 있다. 산업단지의 경우 자연재해로 인한 기술재난이 발생하는 등 복합화 현상이 나타나고 있어 그 파급력이 커지고 있다. 하지만 우리나라는 자연재난과 기술재난(산업 시설)이 구분되어 별도의 법으로 관리되어 왔기 때문에 복합재난에 대한 산업단지 관리방안이 마련되어 있지 않다. 도로교통에 있어서 도로는 교량, 터널, 포장, 안전시설 등 다양한 구조물로 구성되어 있는데 최근에는 폭염과 폭우에 따른 포장 구조물의 영향이 가장 큰 것으로 나타났다. 에너지 분야에서는 기후변화로 인해 2018년 7월 24일 최대전력 수요가 92,874MW를 기록하며 역대 최대치를 경신하였고, 폭염 및 열대야로 7월~8월 건물 부문 전력 소비량이 증가하여 아파트 정전이 증가하였다.

앞으로 해수면 상승, 온도와 강수량 증가가 예측되고 있기

1) OECD 평균은 31.3%

때문에 산업전반에 걸쳐 기후변화로 인한 피해가 증가될 것으로 예측된다. 하지만, 산업단지를 대상으로 실제산업 요소를 고려한 취약성평가는 연구가 미흡한 상황이므로 산업부문에 특화된 기후 변화 취약성 평가 방법 및 도구가 필요하다.

산업별로 높은 위험수준에 처해 있으면서 상대적으로 대응 정도가 낮은 산업을 취약하다고 정의할 수 있는데, 금융, 보건, 항공, 관광, 정유, 가스, 수송장비산업 등은 기후변화 취약산업에 해당되는 것으로 나타났다. 산업별로 최대 위험 유형이 상이하게 나타났지만, 가장 많은 기업이 규제적 위험을 최대 위험요인으로 생각하고 있으며, 물리적 위험을 가장 심각하게 받아들이는 산업으로는 농림수산업, 보험, 보건, 관광산업 등이었다.

산업부문에서의 기후변화 적응은 크게 취약성평가, 리스크평가를 통한 적응대책 마련으로 이루어지고 있으며, 취약성은 기후변화라는 외부적 스트레스가 인간의 노력 여하에 따라 크고 작아짐을 보여준다. 이러한 취약성을 감소시키기 위해서는 시스템에 가해지는 외부 스트레스를 완화 또는 적응 활동을 통해서 감소시켜야하고 시스템 내적으로 대응능력을 강화시켜야 한다. 현재 산업통상자원부와 한국에너지공단은 '산업부문 기후변화 취약성 평가 방법론'을 개발하여 산업단지를 위주로 확산시키고 있다. 환경부와 한국환경정책·평가연구원 국가기후변화적응센터는 2016년부터 'CRAS프로그램'을 중소기업을 대상으로하여 적응대책 수립 지원사업을 추진하고 있다.

2016년에는 제2차 국가기후변화적응대책을 수립하고 기후변화 발생 시 영향이 클 것으로 예측되는 공공기관 25개사와 지방공기업 52개사에 대해 2017년까지 기후변화적응 종합대책 수립을 의무화하고 환경부에 보고하도록 하였다. 그러나 민간 기업들은 아직까지 고효율 설비의 도입이나 에너지절약시설 투자지원 등을 통해 단기적으로 효과가 있는 온실가스 감축의 틀에서 벗어나지 못하고 있다. 앞으로 기후변화 적응대책 수립이 민간 산업부문까지 확산될 수 있도록 해야 하며, 아직 기후변화 대응이 확산되지 못한 산업 및 에너지 분야에 대해서는 추가적 연구가 지속되어야 할 것이다.

1.7.7 보건

지구온난화에 따른 기후변화로 폭염, 태풍, 한파, 지진해일 같은 자연재해의 피해는 점점 커지고 있고, 지구온난화를 유발하는 가장 큰 원인인 온실가서는 그 농도가 해마다 증가하고 있다. 국내의 경우 기후변화에 의한 건강영향을 폭염, 기상재해, 대기질, 알레르기, 감염병 분야로 분류하여 연구가 진행되고 있다.

지난 106년(1912~2017) 동안 우리나라의 연평균 기온은 +0.18℃/10년으로 상승했다. 2018년에는 우리나라 관측 기록상 폭염일수 최다, 온열질환 응급실감시체계 운영 이래 신고환자수가 역대 최다를 기록했다. 기후변화로 인한 폭염의 빈도와 강도가 증가하여 이로 인한 건강 피해가 필연적이지만, 인구집단의 민감도와 적응 능력에 다라 폭염에 의한 건강영향은 다르게 나타날 수 있다. 폭염에 의한 열사병, 열탈진 등의 온열 손상 환자와 사망자는 65세 이상 노인에게 더 취약했다. 노인은 다양한 기저질환을 가지고 있고, 면역력이 낮아 고온을 견디는 신체 증력이 낮은 반면, 젊은 노동자들의 외부 활동이 높기 때문에 폭염에 취약한 것으로 나타났다. 사회경제적 요인인 교육 수준이 낮을수록 폭염이 사망에 미치는 영향이 더 큰 것으로 나타났는데, 이는 적응 능력의 차이로 인해 나타나는 취약성이라고 볼 수 있다.

1990년~2008년 동안 우리나라에서 가장 많은 사망자를 일으킨 기상재해는 홍수였다. 지난 106년간 강우일수의 뚜렷한 변화는 없지만 연강수량과 강수강도는 증가했다. 국외에서는 기상재해로 인한 피해에 미치는 요인을 이해하는 하나의 열쇠로서 취약성 평가 연구를 행하고 있다. 그러나 우리나라의 경우 취약성의 원인들을 분석한 연구는 거의 찾아보기 어렵다. 향후 기상재해로 인한 인명 피해 예방 및 적절한 적응방안 수립을 위해서는 이러한 연구들이 필요하다.

꽃가루 농도나 알레르기 환자는 기온과 양의 상관관계를 보였으며, 기후변화가 대기질에 미치는 영향은 오존 외에는 불확실하다. 오존은 미세먼지를 증가시키며, 사망률과 유병률에 영향을 줄 수 있다.

현재 전 지구적으로 진행되고 있는 기후변화로 인해 질병 발생 양상도 많은 영향을 받을 것으로 예측되고 있다. 국내에서도 기후변화 관련 질병이 급증하고, 삼일열 말라리아처럼

사라졌던 질병이 다시 발생하는 등 기후변화가 건강에 영향을 미치고 있는 것이 여러 분야에서 확인되고 있고, 그런 영향은 향후 계속 증가할 것으로 예상되고 있다. 삼일열 말라리아 같은 매개채 감염병과 온도, 강수량, 습도 같은 기후요인과의 상관성이 확인되었다. 현재 우리나라의 매개체 분포나 겨울철이 존재하는 계절적 특성을 고려하면 열대열 말라리아가 단기간 내에 토착화하는 것은 현실적으로 불가능하다. 해외에서 수입되는 해외 유입형 열대열 말라리아에 의해 유행이 발생하더라도 단기간 국지적 유행에 그칠 가능성이 높다. 그러나 기후변화가 지속되어 금세기 말에 우리나라 대부분의 해안 지역이 아열대 기후로 바뀌는 것이 현실화될 경우 이 지역에서 토착화된 열대열 말라리아가 출현할 가능성도 배제할 수 없다. 수인성 및 식품매개 감염병과 기후요인과의 관련성 연구는 아직 부족한 실정이다.

2011년부터 2015년까지 진행된 중앙부처 및 지자체 단위의 기후변화 적응대책의 성과로는 건강부문에서 온열질환 및 한랭질환 감시체계를 구축 및 운영 확대했고, 기후변화 관련 감염병 DB구축을 추진했다. 또한 사회경제적 취약가구(저소득, 독거노인 등)의 실내 환경 진단 및 개선을 실시했고, 폭염 대비 재난도우미 지정 및 운영을 확대했으며, 폭염 예방 건강 실천 가이드 리플릿과 지자체 업무담당자 대상 폭염대응 건강관리 사업 안내서 및 한파대비 건강수칙을 개발 및 배포했다. 기후변화로 인한 아토피, 천식 같은 알레르기 질환 건강영향 관리를 위해 환경성질환 예방·관리센터 건립을 지원했으며, 꽃가루 알레르기 유발식물의 기후변화 영향평가 기술을 개발했다. 뿐만 아니라 기후변화-건강영향 정책지원 시스템(C-CHAMP, Climate-Change Adaptation & Mitigation Program, 2011~2015)를 개발하여 기후변화-건강영향 관련 DB 구축 및 건강영향 평가·예측, 건강영향 취약성 평가 등 맞춤형 적응정책을 위한 인프라를 제공했다. 그러나 기후변화 취약계층의 정의와 범위가 불분명하여 일반 취약계층 대상 정책과 차별화가 미흡했고, 폭염이나 한파 외의 기후변화로 인한 다양한 환경요인의 건강 영향에 대한 정보제공이 필요하다는 한계가 있었다.

2차 국가기후변화적응대책에서는 2016년부터 취약계층 폭염 피해 예방을 위해 '해피해피 캠페인'을 시작하여 질병관리본부, 기상청, 국민안전처, 연탄은행이 협력하였다. 폭염 시 물 섭취등의 국민행동요령과 129 보건복지부콜센터, 131기상콜센터, 119안전신고센터 번호를 표시해 위급 상황에 빠르게 대처할 수 있도록 했다.

1.7.8 인간정주공간과 복지

기후변화는 도시와 농림지역 모두 취약한 지역, 취약 계층에 더 큰 피해를 초래할 수 있는 것으로 예상된다. 제2차 국가기후변화 적응대책에서는 기후변화 취약계층에 대한 지원정책 방안을 제시하고 있다.

도시는 주요 온실가스배출 공간으로 기후변화에 큰 기여를 하는 동시에 기후변화로 인한 피해를 크게 보는 공간이기도 하다. 특히, 인구 및 자동차 등 도로 교통에 의한 오염원이 대기오염에 큰 영향을 미치는 것으로 나타났다. 또한, 가스, 전기 등 도시 생활에 의한 오염원과, 폐기물 처리, 제조업 등 산업에 의한 오염원이 탄소 배출에 영향을 미치는 것으로 나타났다. 도시화율 증가, 인구성장률 둔화, 고령화율 가속화 등과 같은 도시문제는 여전히 심각한 상황이다.

농림지역의 경우, 지역별로 크게 다른 양상이 나타나며, 농촌의 공동화로 인하여 빈집, 폐교 등이 발생한다. 평균적으로 2014년도에 비하여 2018년도에는 약 0.14%의 농가인구가 감소하였으며, 이 중 제주특별자치도 (약 -0.24%)의 감소율이 가장 높았으며, 서울특별시 (약 -0.01%)의 농가인구 감소율이 제일 낮았다. 농가 인구 감소와 고령화는 농가소득 불평등 원인으로 지적되고 있다. 다만, 정부정책으로 인하여 공가는 감소하고 있다. 노후 된 농림지역의 주거환경을 개선하기 위하여 국가에서는 현황 파악 및 지원을 증가시키고 있는 추세이다.

기후변화 영향과 관련하여, 도시는 인구 밀집도가 증가하여 에너지 사용량이 증가하고 온실가스 배출량도 여전히 증가한다. 다만, 이러한 문제를 해결하기 위하여 기후변화 대응이 가능한 도시재생사업, 스마트도시 등을 추진하고 있다.

농림지역의 경우, 농업생산을 제외하면 에너지 이용 및 주거 부분에서 기후변화의 영향이 크게 나타나는데, 국가에서는 주거실태조사 등을 통하여 농촌 주거현황을 파악하고 있다. 복지 측면에서는, 사회·경제적 취약계층, 공간 취약계층에 대한 연구가 진행되고 있었다.

기후변화는 온도와 관련해서는 폭염과 한파, 강수와 관련해서는 홍수와 가뭄 등 자연재해의 피해를 가속화시키고, 도시 및 농림지역도 이러한 기후변화로 인한 피해에 노출되어 있다. 각 공간에 대하여 다양한 취약성평가 지표를 이용하여 취약 정도를 정량적으로 평가하는 연구들이 진행 중이였으며, 농림지역의 경우 주거환경, 인문·사회적 환경, 물리적 환경 등을 평가 항목으로 포함하고 있다. 기후변화 취약계층을 진단하기 위해서는 건강을 지표로 반영하고 있었다.

기후변화 적응을 위해서 도시에서는 스마트 녹색도시, 기후변화 대응 도시재생, 그린인프라 도입 등에 대한 연구 및 정책이 도입되고 있었으며, 특히 최근 제4차 산업혁명으로 개발한 기술 및 인프라를 이용하여 스마트도시를 조성하고, 이를 통해 기후변화를 포함한 도시 문제를 해결하려는 연구들이 다수 진행되고 있는 추세이다. 도시재생은 도시공간에 있어서 본질적으로 쇠퇴한 도심재개발에서 산업의 변화에 따른 도시기능의 복구에 이르기까지 기후변화의 완화 또는 기후변화 적응에 관한 다양한 대응방안을 요구하고 있으며, 스마트 녹색도시는 도시구조 자체를 혁신해서 계획단계부터 바람직한 도시 운영이 가능하도록 하는 것으로, 지능 중심의 ICT가 스마트 녹색도시의 본질로 많이 거론된다. 그린인프라는 자연생태 가치와 인간에게 다양한 혜택을 주는 녹지공간의 연결된 네트워크로, 공원과 녹지 내 수목의 식재, 소규모 녹지공간 조성, 수변 공간 창출 및 유지, 자연생태적인 하수 처리 및 빗물관리시스템, 도로와 수순환의 통합적 설계, 투수성과 반사율이 우수한 포장재 사용, 패시브 기법 활용 등이 이에 해당한다.

농림지역의 경우, 소득불평등의 정도를 개선, 주거 환경을 개선하기 위해 다양한 정책 제안을 하는 연구보고서 및 논문이 다수 있었다. 기후변화 취약계층과 관련해서는 국가 차원에서의 다양한 정책·제도 개발을 위한 가이드라인을 제시하고 있었으며, 이와 관련하여 취약계층 건강보호를 위한 주택개보수 관련 사업, 에너지효율 개선, 주거환경 개선 등을 포함한 그린 리모델링을 추진하고 있었다. 이외에도 실질적으로 도입이 가능한 무더위 쉼터 조성, 노인 돌봄 서비스 등 다양한 정책을 제안하는 연구들이 다수 있었다.

인간정주공간 및 복지와 관련해서 대부분의 연구는 「한국 기후변화 평가보고서 2014」와 유사하게, 도시부분에 집중되어 있었다. 농림지역의 경우 농업생산성 및 작물의 기후변화에 따른 영향 이외에는 에너지와 관련하여 주거공간에 집중되어 있었으며, 기후변화 시나리오를 이용하여 기후변화가 정주공간에 직접으로 어느정도 영향을 미치는지 평가 및 분석하기 보다는 현황을 파악하고 이를 해결하기 위해 정부 지원을 제안하는 정책제안 연구보고서가 다수 존재했다. 취약계층의 경우 연령별 소득 별, 지역별, 주거공간별로 기후변화가 영향을 미치는 정도가 모두 다르기 때문에 정량적인 평가가 어렵기 때문으로 이와 관련된 연구가 적은 것으로 판단된다. 추후 인간정주공간 및 복지 부분에서, 기후변화 시나리오를 이용하여 정량적이고 객관적인 영향평가 및 적응평가가 수행된다면 보다 효과 높은 적응대책을 수립하는데 기여할 수 있을 것으로 기대한다.

1.7.9 적응계획 및 대책

제1차 국가 기후변화 적응대책(2011~2015)이 수립된 이후, 기후변화 적응정책 지원, 기후변화 영향 및 취약성 평가, 국가 기후변화 적응대책 및 지자체 세부시행계획 수립 지원 등을 위해 국가기후변화적응센터가 설립되었다. 2012년에는 새로운 기후변화 시나리오를 반영하여 제1차 국가 기후변화 적응대책이 수정·보완되었으며, 2015년에는 제2차 국가 기후변화 적응대책(2016~2020)이 수립되었다. 2차 국가 기후변화 적응대책은 크게 4대 정책과 이행기반으로 구분되는 5대 추진과제를 설정하였다(위험관리, 안전사회, 산업경쟁력, 지속가능 자연자원관리, 국내외 이행기반 마련). 대책 이행과 관련한 효율성 제고를 위해 각 적응대책과 세부시행계획의 성과지표를 마련했다는 것이 특징이다.

지방자치단체에서도 적응대책 세부시행계획 수립이 의무화되어, 2015년도에는 189개, 2016년에는 37개의 지자체별 세부시행계획이 수립되었다. 1차 계획이 수립되고 5년의 계획기간이 종료된 이후에 2차 계획이 수립되는 동안 지자체별 세부시행계획에 대한 이행평가가 이루어졌으며, 수립되는 계획의 내용적 측면에서도 많은 변화가 나타났다. 그러나 아직까지 적응대책 선정시 대체로 정성적이고 직관적인 방식으로 계획되고 있으며, 20~30개의 기존 사업에 10개 내외의 신규사업을 추가하는 정도에서 이뤄지고 있고,

선택된 사업이 실제 기후변화 적응에 어느정도 효과를 주는지 파악하기가 어렵다.

기후변화 적응대책을 수립하기 위한 방법론적 연구도 많이 추가되었다. 특히 리스크 평가 연구가 과거에 비해 많이 진행되었다. 전문가 설문을 통해서 주요 리스크를 도출하거나, 평가된 주요 리스크에 대해서 효율적인 관리 방향을 제시하는 연구가 진행되었다. 정량적으로 재해 피해 손실 경향을 분석한 연구도 등장했다. 앞으로 더욱 체계적인 리스크 관리에 대한 연구가 필요할 것이다.

기후변화 인식조사 결과 아직까지 일반국민의 적응에 대한 인식이 낮은 것으로 나타났다, 이는 피해 예방을 위한 적응 행동과도 연계될 수 있기 때문에, 앞으로 인식제고가 더욱 필요할 것으로 보인다.

그러나 정부기관과 지역주민의 참여를 바탕으로하는 거버넌스의 중요성은 더욱 강조되고 있다. 국내의 연구에서는 참여형, 상호협력적인 거버넌스 구조를 제안하고 있으며 지역적 특색 또는 지자체가 강조된 거버넌스 연구와 지역적 주민의 참여를 강한 연구로 나눌 수 있다. 특히, 중앙정부에 의한 하향식 계획방식보다는 지역적 경험과 지식을 바탕으로 하는 자발적인 노력에 의해 적응계획이 수립되고 실행되어 해당 지역의 특성을 반영한 구체적인 적응계획의 수립과 이행이 필수적이다. 그러나 국내에서는 현재까지 적응 거버넌스는 대부분의 시도가 지자체 공무원 또는 연구자(모형개발자)들의 주도하에 이루어졌고 이해당사자들이 참여할 기회가 부족했기에, 지역 이해당사자들의 요청사항을 반영한 모형을 개발하기가 어려웠다.

기후변화 적응대책 및 우선순위를 평가하는 연구에 있어서는 정성적 우선순위 평가와 정량적 평가가 모두 이루어진 것을 알 수 있었다. 우선순위를 평가함에 있어서는 전문가 AHP 설문조사를 이용하는 방법, 중요도 분석과 요인분석을 통한 적응전략 유영화이 있었다. 정량적 분석의 경우 적응대책을 통한 재해피해 경감액을 통해 적응대책을 선정한연구가 있었다.

기후변화 적응대책 수립 시 지역별로 취약성 및 리스크를 평가하고 이에 맞는 계획이 필요하다. 이러한 필요성을 강조하는 연구가 다수 있었는데, 지역별로 지수를 적용하는 과정에서 지역적 특성을 고려한 맞춤형 가중치 설정이 중요하며. 이러한 장소 중심적 접근은 이행성과의 효과를 높일 수 있다고 했다.

선정된 적응대책은 향후 이행평가가 이루어져야 하지만, 아직 지자체 수준의 평가는 없었으며 국가 수준에서 세부 추진과제 현황을 파악한 바는 있었다. 적응계획의 이행과정에서 과학적 정보수집에서 이행평가에 이르는 환류과정에서 중요한 것은 적응이라는 부문 특성상 지역 기반의 맥락에 맞는 대응이 될 수 있도록 지자체장 혹은 지역정부의 관심 속에서 더 적극적으로 수립될 때에 효과적으로 이행될 수 있을 것이다. 이외에도 정부 주도하의 거버넌스 운영체제 운영, 정책평가와 이행평가를 감독·관리할 수 있는 기후변화 자문기구 구성, 지역들이 참여하는 종합평가제도 도입 등의 방안을 통해 효율적으로 적응 이행역량을 향상할 수 있을 것이다.

완화 또는 적응전략으로 분리되어 진행되던 기후변화 대응 논의는 2010년대에 들어서며 두 전략 간 연계성을 바탕으로 한 통합적 대응체제가 강조되면서 보다 활발한 연구가 이루어지고 있다. 우리나라의 국가기후변화 대응체계 역시 이러한 기조로 수정되어, 기후변화대응 기본계획에서는 두 가지 부분을 통합적으로 고려하고 있다. 감축과 적응 상호관계로 인한 효과와 그 타당성에 대한 연구가 진행되고 있으나, 실제로 이러한 두 측면을 모두 고려한 지역기반 적용사례 혹은 관련연구는 미진하기 때문에 대상지 기반 감축과 적응의 시너지를 가시적으로 확인할 수 있도록 하는 부분이 앞으로 추가되어야 할 필요가 있다.

1.8 참고문헌

관계부처합동, 2016: 제1차 기후변화대응 기본계획.

안영환, 이유수, 이철용, 김성균, 이수열, 박환일, 이진면, 이용호, 김재진, 박상준, 2016: 「 2050 저탄소 비전 연구」, 경제·인문사회연구회 2016 미래정책 포커스 겨울호.

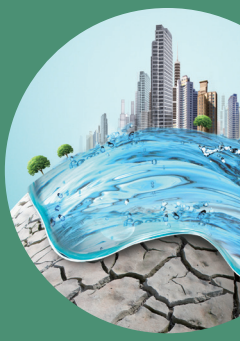
이상엽, 전호철, 김이진, 2017: 「신기후체제 대응을 위한 2050 저탄소 발전전략 연구」, 한국환경정책·평가연구원.

환경부, 2019: 기후변화 적응 중장기 대책 마련 거버넌스 포럼 구성 II ·운영 최종 보고서.

IPCC, 2013, Procedures for the preparation, review, acceptance, adoption, approval and publication of IPCC reports.

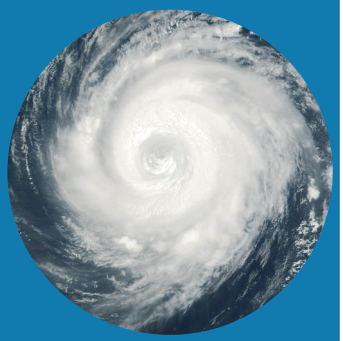
IPCC, 2018, An IPCC Special Report on the impacts of global warming of 1.5°C above pre-industrial levels and related global greenhouse gas emission pathways, in the context of strengthening the global response to the threat of climate change, sustainable development, and efforts to eradicate poverty.

IPCC, 2019, Chapter outline of the working group II contribution to the IPCC sixth assessment report (AR6).



제 2 장

수자원



30 2.1 서론
31 2.2 관측된 영향
38 2.3 영향 전망
50 2.4 취약성의 주요 원인
56 2.5 적응 옵션
60 2.6 결론
62 2.7 참고문헌

제 2 장 수자원

2.1 서론

「한국 기후변화 평가보고서 2014」의 수자원 분야는 2010년 이후 진행된 연구결과들의 경향을 제시하였는데, 전반적 연구흐름이 전망 및 영향평가 분야에서 적응전략 및 취약성 분야로 변화하는 양상을 보였다. 전망 및 영향평가 분야는 기후모형의 배출시나리오가 IPCC(Intergovernmental Pannel on Climate Change) 4차 보고서의 SRES(Special Report on Emission Scenarios)에서 5차 보고서에서 제시된 RCP(Representative Concentration Pathways) 시나리오 기반으로 바뀌었으며, 이를 이용한 유출량, 홍수, 가뭄 등의 강도, 발생빈도 등을 모의하는 연구들이 수행되었다. 특히 가뭄전망과 영향분석에서는 주로 기상학적 가뭄지수(SPI, PDSI 등)를 활용한 연구들이 수행되었으며, 불확실성 관련 연구에서는 각 영향평가 단계에서 발생하는 불확실성의 정량화에 초점이 맞추어졌으나 특정 단계에 집중되는 한계를 보였다. 적응전략 및 취약성 분야에서는 연구목적에 따라 다양한 지표를 활용하여 상이한 결과들을 도출하였고 많은 연구들이 극한홍수사상에 대한 취약성 분석에 초점을 맞추는 경향을 나타냈다.

「한국 기후변화 평가보고서 2010」과 「한국 기후변화 평가보고서 2014」는 기후변화가 수자원 분야에 미치는 다양한 연구를 다루었으며, 막대한 경제적·사회적 피해를 줄일 수 있도록 다양한 대책과 정책에 주요한 기초자료로 활용되었다. 하지만 기후변화에 대한 기술과 연구방법이 보다 빠르게 발전하면서 이후 진행된 연구결과들에 대한 분석이 필요한 시점이 되었다. 최근 기후변화에 따른 수자원 영향평가 연구들의 대략적인 경향을 살펴보면, 배출시나리오에서는 기존 연구들에서 일부 활용되었던 AR5 RCP가 최근 전망 및 영향평가 연구들에서는대부분 이용되고 있었다. 또한, 기상·수문 결과들을 도출한 연구들에서는 극한사상 중 가뭄발생 빈도의 증가로 홍수보다 상대적으로 가뭄전망 연구의 비중이 높아지는 추세이다. 특히, 기존 기상학적 가뭄지수 중심에서 수문학적·농업적 가뭄지수(EDI, SPI, PDSI, RDI, SSI, WADI 등) 등 다양한 가뭄지수의 활용으로 확장되고 있다. 기후변화 불확실성 관련 연구들에서는 영향평가의 단계별 불확실성보다 영향평가 전체를 통하여 불확실성이 전파되는 과정을 파악하려는 연구들이 주로 수행되었다. 전망과 더불어 취약성 분야의 연구들이 많이 증가하였으며, 특히 물부족·가뭄·이수 측면에서의 취약성을 분석하고 대응전략을 제시하는 연구들이 다수 수행되었다. 연구목적에 따라 다양한 취약성 지표 및 기준을 적용하여 미래 수자원 관리 및 정책 수립을 표준화하려는 노력이 있었지만 아직 반영하기까지는 한계점이 있는 것으로 파악되었다.

본 보고서에서는 2014년 이후 한반도 기후변화를 기반으로 수행된 수자원 연구들을 대상으로 연구주제, 연구방법, 연구결과, 결과에 따른 대응·대책 등의 연구성과를 분석하여 기후변화에 따른 최근 수자원 분야 연구흐름을 제시하고자 하였다. 연구성과들은 1) 관측된 인자들의 경향성, 2) 미래 수자원의 영향전망, 3) 수자원 영향평가에서 발생 가능한 불확실성 및 취약성 분석, 적응전략 제시 등으로 주제를 구분하고 분석하여 주제별 기초자료를 제공함으로써, 향후 우리나라에서 기후변화 관련 수자원 분야 연구들이 진행되어야 할 연구방향 및 로드맵을 제시하고자 하였다.

2.2 관측된 영향

2.2.1 기상인자

「한국 기후변화 평가보고서 2014」에서는 기상인자를 따로 분류하여 분석하지 않고 지표수에 포함하여 다루었다. 주요 내용으로는 강수의 경향성 분석이나 유역별 극치강우분석 등이 주로 수행되었다.

2.2.1.1 강수

2014년 이후 기후변화에 의한 강수량과 유출량 등의 극대치 수문사상에 대한 경향성 분석을 수행한 연구결과에 따르면 이들의 발생확률이 증가하고 있었다. 관련 연구들을 살펴보면, 윤선권, 문영일(2014)은 전국 8개 주요 도시(서울, 인천, 대전, 대구, 울산, 광주, 부산, 춘천)의 8개 ASOS(Automated Surface Observing System)의 고품질의 강수자료를 선정(quantile regression 적용) 및 선형추세분석 및 Mann-Kendall, Sen 검정을 실시했다. 평균강우(월, 계절 및 년), 연최대강우, 계절 강우, 습윤강우일수(wet days), 기준강우량(30 mm/day, 50 mm/day, 80 mm/day, 100 mm/day)을 초과하는 강우일수, 연간 상위 10번째 강우자료를 추출하고 경향성 분석을 실시한 결과는 그림 2.1과 같다. 대부분 지점에서 연평균 강수량과 여름철 강수가 뚜렷하게 증가 추세(Sen 검정: 봄철 slope=+0.076, 여름철 slope=+2.775)를 보였으나 가을철과 겨울철은 약한 감소추세(가을철 slope=-0.390, 겨울철 slope=-0.149)를 보였다. Mann-Kendall 검정과 Sen 검정을 적용한 분석에서는 서울과 인천지점에서 최근 여름철 30년 시계열자료가 증가경향을 나타냈고(신뢰구간 95%), 습윤강수일수는 대전과 대구를 제외한 지역에서 최근 증가경향이 나타났다. 기준강수량을 초과하는 강수사상의 경우에는 최근 30년 강수시계열 평균이 3.1%~15% 증가하는 경향을 보였으며, 높은 강우강도에서 현저하게 증가하는 경향을 보였다.

조현곤 등(2014)과 조현곤, 김광섭(2016)은 강우의 발생과정과 군집특성 분석을 위해 NSRPM(Neyman-Scott Rectangular Pulse Model)을 활용하여 한강유역의 시강우자료를 대상으로 강우의 구조적인 변화를 분석하고 강우 경향성을 비교·분석하였다. 한강유역에 포함된 AWS(Automatic Weather Station) 중 30년 이상 장기간 시단위 강우자료를 보유한 14개소 지점(서울 인천 등)의 1973년~2014년 여름철(6~8월) 자료를 선정하였다. Mann-Kendall 추세분석 결과, 강화지점을 제외한 대부분 지점에서 유의한 증가 추세(신뢰수준 5% 혹은 10%)를 보였다. 각 지점의 평균 호우일수는 약 1.2일 증가하는 것으로 나타났으며, 특히 1973년~1999년보다 2000년~2014년에서 뚜렷하게 증가하는 추세를 보였다. 강우 구조적 분석에서는 강우사상의 발생은 줄었으나 강우세포(rain cell)는 많아져 집중호우 발생가능성과 강우량이 증가한 것으로 분석되었다. 무강우 시간은 감소하고 지속시간 48시간 이상의 강우사상 및 1~6시간 강우사상의 발생빈도는 증가한 것으로 나타났다.

인소라 등(2014)은 한반도의 여름철 강수 특성을 분석하기 위해 1973년~2010년 ASOS 61개 지점과 1998~2010년 AWS 352개 지점의 일 강수량 및 시간 강수량 자료를 이용하였다. 강수량·강우강도·발생빈도의 연변화 추세분석 결과, 1973년~2010년 기간 동안 매년 6~8월(특히 7월) 평균 강수량이 계속 증가했다. 전체 100년 빈도 확률강우량은 약 360 mm/day로 추정되었으며, 강원남부와 남해안 일부 지역의 100년 빈도 강우강도는 약 500 mm/day로 나타났다. 시간강수를 이용한 확률강우량 결과에서는 서해안과 남해안 일부 지역이 강하게 추정되었으며(약 100 mm/hour), 특히 경상북도와 충청북도, 전라북도 일부 지역과 강원북부, 경상북도 동해안과 충청북도(55 mm/hour)에서 크게 추정되었다.

황석환, 함대헌(2014)은 측우기(1778년~1907년)를 포함한 서울지점의 일단위 강우량 자료(1908년~2006년)와 강우모형(BLRPM, Bartlett-Lewis Rectangular Pulse Model)을 이용하여 장기적 관점에서 단기 강우특성의 월별 변화양상을 파악하여 자료활용이 유용한 6월~9월 결과에 대해 제시하였다. BLRPM을 이용하여 서울지점의 일강우 자료를 분해하고 시단위 단기 강우의 정량적 장기특성 변화를 분석했다. 분석결과, 1778년~1960년까지는 강우량의 양적변화가 크지 않았으나 1960년 이후 강우량이

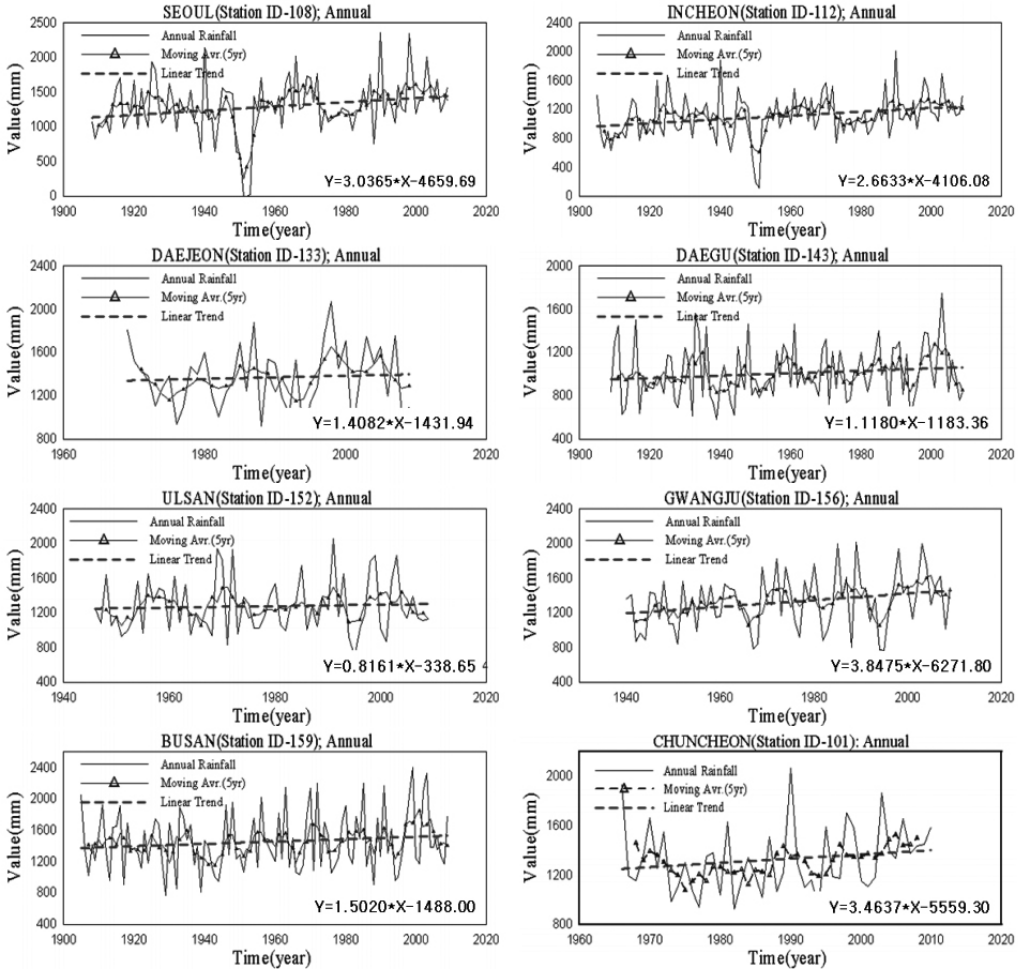


그림 2.1 8개 기상관측소 선형추세분석 결과(윤선권과 문영일, 2014).

작은 감소추세를 보였고 8월과 9월의 강우량은 뚜렷한 증가추세를 보였다. 특히 7월 강우량은 짧은 지속시간의 강우사상 발생이 증가하였다.

이혜숙 등(2016)은 금강수계 용담 댐 유역의 1973년~2014년 기상관측자료(연강우량과 연평균기온, 계절별 강우량)의 경향성을 봄철(3~5월), 여름철(6~8월), 가을철(9~11월), 겨울철(12~2월)로 구분하여 평가하였다. 강수량에서는 여름철에만 전체적으로 증가하는 경향이 나타났으며, 증가와 감소가 반복되며 점진적으로 증가하는 경향성을 보였다. 기온에서는 연평균, 가을, 겨울철 기온이 지속적으로 증가하는 유의한 증가 경향성을 나타냈다.

우성호 등(2017)은 장마기간 우리나라 강수량의 10년 변화특성 및 기후학적 요인 분석을 위해 전국 평균 장마기간·강수량·강수일수 자료(1973년~2016년)를 사용하였다. 결과를 살펴보면, 1990년~2002년에 비해 장마기간 강우발생일의 비율 증가로 인해 2003년~2013년의 강수량이 뚜렷하게 증가하였으며, 특히 30 mm/day와 50 mm/day 이상 강한 강우강도 발생일이 증가한 것으로 나타났다.

기후변화가 PMP(Probable Maximum Precipitation) 등 극한사상에 미치는 연구들도 다수 수행되었다. 최유진 등(2015)은 품질과 자료량(54년 이상)이 우수한 14개 지점(행정구역 기준 강원권, 수도권, 충청권, 영남권, 호남권으로 구분)을 선정하고 1일 강우를 수집해 PMP를 산정하였다.

PMP는 자료처리방법에 따라 1) 30년단위 기준 1년씩 이동하여 산정한 이동평균 1일 PMP (SMP, Simple Moving Average PMP), 2) 관측년도 기준으로 30년, 31년, 32년과 같이 1년씩 누가하여 산정한 누가평균 1일 PMP(CMP, Cumulative Average PMP)로 구분하였다. SMP결과는 전체적으로 단기간 변동성이 크게 나타났으나 CMP 결과는 자료가 누적되어 산정되는 특성상 변동성이 크지 않았다. 결과를 살펴보면, CMP가 SMP의 변화율보다 낮았고, 평균적으로 SMP와 CMP는 각각 4.4 mm/year, 3.22 mm/year씩 증가하는 경향이 나타났다.

심규범 등(2017)은 강우 관측년도~2013년 자료를 보유한 기상청 주요 22개 지점 자료를 이용하여 PMP를 산정했다. 전체적인 평균 PMP는 915.5 mm로 산정되었으며, 포항에서 가장 높은 PMP(1,160.1 mm), 울릉도가 가장 낮은 PMP(730 mm)가 산정되었다.

그 이외에 대규모 기후변동이 우리나라에 미치는 영향에 대한 분석 연구(안시권 등, 2016), 지구온난화에 따른 평창 동계올림픽 개최지의 강수량 및 강수 형태 분석 연구(백희정 등, 2017) 등이 수행되었으나 관련 연구가 많이 수행되지 않아 특정 부문에 대한 집중 연구사례도 수행될 필요가 있는 것으로 나타났다.

2.2.1.2 증발산

기존 지상 관측 증발산 자료의 시공간적 변동성 표현의 한계를 극복하기 위해 최근 원격탐사를 이용한 연구들이 증가하였으며, 이 중 인공위성을 이용한 연구들이 집중적으로 수행되었다. 1990년 중반 이전에는 Landsat기반 연구들이 진행되었으나 이후 MODIS(Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer) 자료의 활용이 가능해짐에 따라 인공위성 기반 증발산 산정 모델연구가 매우 발전하였다.

관련 연구사례들을 살펴보면, 이용관 등(2015)은 용담댐 유역에 대해 SEBAL(Surface Energy Balance Algorithm for Land) 모형의 입력자료로 Terra MODIS 위성영상 자료(2012년~2013년)를 사용하여 우리나라 전역의 증발산량을 산정하였으며, Flux Tower의 실측 증발산량과 비교하여 적용성을 평가했다. 모의결과는 덕유산 Flux Tower의 실측값 자료와 패턴이 유사하게 나타났으나 증발산량은 다소 과소 산정되는 것으로 나타났다. 또한 이용관 등(2016)은 개선된 SEBAL 모형을 설마천과 청미천 유역에 적용하여 일 증발산량(2012년~2013년)을 산정하고, 각 유역에 설치된 Flux Tower 실측 증발산량과 비교하였다. 모의 증발산량은 실측 증발산량과 유사한 분포를 보였으나 전체적으로 모의 증발산량은 과소 추정되었고, 500 m 공간해상도의 MODIS 영상은 설마천 등 작은 유역의 표고에 따른 분포 경향성을 모의하기에는 한계점을 나타냈다.

백종진 등(2016)은 MODIS 자료(2011년~2013년)를 이용하여 산정된 순복사에너지와 MS-PT 알고리즘을 적용한 모의 증발산과 청미천·설마천의 Flux Tower 관측자료를 비교하였으며, 모의 증발산의 정확성이 높게 나타났다. 백종진 등(2018)은 최적 증발산 산정을 위한 방법으로 청미천과 설마천 Flux Tower의 관측 증발산자료를 융합하는 방안을 개발하였다. 자료융합을 위해 인공위성 기반 증발산 모델(revised RS-PM)과 MS-PR 방법으로 산출된 GLDAS (Global Land Data Assimilation System)와 GLEAM(Global Land Evaporation Amsterdam Model)을 적용하였으며, 융합자료의 정확성이 더 높게 나타났다. 추가적으로 백종진 등 (2019)은 인공위성 및 재분석자료 GLDAS, GLEAM, MOD16의 실제증발산량 산출물을 청미천, 설마천 플럭스타워와 비교하여 검증한 후, TC(Tripple Collocation) 방법으로 자료간 불확실성 및 상관분석을 수행하였다.

문장원 (2018)은 기상청 62개 지점의 관측자료(1988년~2017년)를 이용하여 Hargreaves 공식에 따라 지점별 기준증발산량을 선정하였다. 그림.2.2(a)는 산정된 연도별 기준증발산량이며, 그림 2.2(b)는 각 지점별로 연강수량 대비 연증발산량 비율 시계열을 나타낸다. 산정된 비율이 1보다 작거나 1에 근접한 지점이 과거 심한가뭄이 발생한 시기 (1988년, 1994~1996년, 2001년, 2008년, 2015년, 2017년)와 유사하게 나타났다.

2.2.2 수문인자

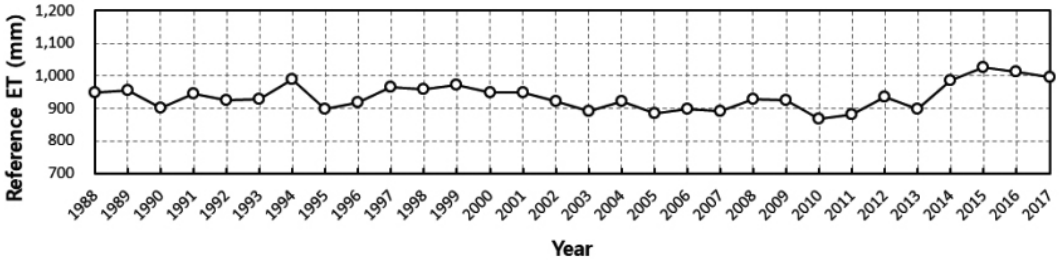
「한국 기후변화 평가보고서 2014」에서는 국내 가뭄지수 개발 혹은 국내에 적합하도록 개선하는 연구들이나 가뭄

발생빈도나 경향성을 분석하는 연구들이 수행되었다. 홍수 연구는 과거 관측자료를 수문모형에 입력하여 생산한 모의 유출량을 이용한 홍수 빈도·규모 등의 경향성 분석과 이에 따른 홍수피해 등을 분석하는 연구가 주로 수행되었다.

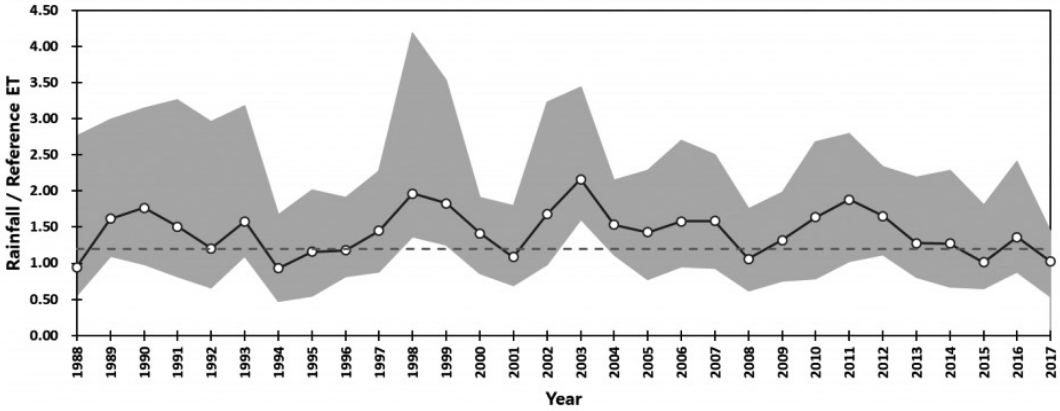
2.2.2.1 가뭄

가뭄이 발생하는 과정에는 다양한 기상학적·수문학적·물리적 과정이 복합되므로 가뭄관측·모니터링·전망을 정확히 수행하기란 매우 어렵다. 일반적으로 가뭄분류는 미국 가뭄경감센터(NDMC, National Drought Mitigation Center)의 분류기준을 따라 제시하고 있으며, 기상학적, 수문학적, 농업적, 사회경제적 가뭄으로 총 4가지 가뭄을 분류하고 있다(Wilhite and Glantz, 1985). 먼저 건조한 기상패턴이 지속되는 상태를 기상학적 가뭄, 하천·저수지·지하수위 저하 등 가용 물공급수준이 장기간 저하되면 이를 수문학적 가뭄이라 한다. 농업적 가뭄은 토양수분 지수를 활용하여 필요한 토양수분이 부족한 상태가 지속될 때를 농업적 가뭄, 물공급이 사회경제적 수요에 미치지 못한 채로 지속되면 이를 사회경제적 가뭄이라고 분류한다. 이와 같이, 가뭄의 정의는 학문적 접근방법, 물수요 주체, 물부족 원인 등에 따라 달라지므로, 가뭄발생특성과 연구목적에 따라 적절한 가뭄지수를 선정하여 가뭄을 평가한 연구들이 수행되었다.

국내 가뭄연구들을 살펴보면, 성장현, 정은성(2014)은 섬진강댐의 유입량(1975년~2012년)을 대상으로 임계수준방법을 적용하여 수문학적 가뭄을 평가했다. 가뭄분석 결과, 1984, 1988, 1995년의 가뭄이 심각하고 지속기간이 길게 나타났으며, 총 물부족량과 지속기간은 1984, 1988, 1995, 2001년이 가장 심각했다. 고정임계수준 방법은 월별과 일별의 변동성은 잘 반영하였으나 계절의 변동성은 잘 반영



(a) 연도별 기준증발산량 시계열



(b) 연도별 연강수량 대비 증발산량 비율 시계열

그림 2.2 연도별 증발산량과 연강수량 시계열 비교(문장원, 2018).

하지 못하는 것으로 나타났다. 서찬양 등(2014)은 2013년 남부지방 가뭄평가를 위해 MODIS 자료 기반의 가뭄지수로서 수문학적·농업적 가뭄평가가 가능한 ESI(Evaporative Stress Index)를 적용하고 이 결과를 PDSI(Palmer Drought Severity Index) 결과와 비교·검토하였다. ESI는 기존 가뭄정보시스템에서 제공하지 못하는 도서 산간지역에 대해 정확한 가뭄심도 산정이 가능하여 적용성이 우수한 것으로 나타났다.

전시영 등(2015)은 2015년 발생가뭄의 정량적 평가를 위해 HMM(Hidden Markov Model)기반 가뭄지수를 이용하였으며, 코플라(copula) 함수 기반의 이변량 가뭄빈도해석 기법을 적용하였다. 기상청 92개 강우관측소 일자료와 월강수량 자료를 6개월 단위로 이동평균한 값을 HMM 입력값으로 하여 가뭄을 평가하였다. 평가결과, 최근 가뭄발생시 영동지방보다 영서지방의 가뭄심도가 더 크게 나타났으며, 심한가뭄은 철원(10% 이상)과 임진강 유역에서 상대적으로 크게 나타났다. 한강유역의 일부지점에서는 재현기간이 1,000년이 넘는 이례적으로 큰 가뭄이 발생하는 것으로 평가되었으며, 휴전선 인근 북한강 및 임진강 유역에서 100년 이상의 기왕최대가뭄이 발생한 것으로 나타났다. 이주헌 등(2015)은 기존 발생한 가뭄의 정량적 평가를 위해, 5대강 권역을 대상으로 기상학적 가뭄지수인 SPI(Standardized Precipitation Index)를 이용하여 가뭄빈도와 재현기간을 추정하였다. 그 결과, 기존 심한 가뭄의 재현기간은 대략 30~50년으로 나타났으며, 유역별 극심한 가뭄은 발생연도가 다소 달랐다. 가뭄강도를 기준으로 1988년과 1994년이 가장 가뭄이 심했던 해로 나타났다. 한강 권역을 중심으로 발생한 2014년의 가뭄은 재현기간 100년으로, 그 규모와 평균심도 면에서 역사상 가장 극심했던 가뭄으로 평가되었다.

최근 특정 가뭄의 발생을 평가하는 것이 아닌 다양한 가뭄들을 평가하기 위해, 여러 가뭄지수들을 결합한 결합가뭄지수 개발하거나 새로운 가뭄지수를 개발하는 연구가 늘어나고 있다. 관련 연구들을 살펴보면, 이보람 등(2015)은 소양강댐 유역에 대해 기상학적 가뭄지수인 SPI와 SPEI(Standardized Precipitation Evapotranspiration Index)를 이용하여 수문학적 가뭄발생 평가(SDI, Streamflow Drought Index)가 가능한지 상관관계를 검토하였다. 검토결과, 월별분석에서 SPI와 SPEI 모두 수문학적 가뭄을 잘 나타냈으며, 두 가뭄지수와 SDI의 상관관계는 0.72~0.87로 높게 나타났다. 연별결과에서는 기상학적 가뭄지수로 수문학적 가뭄평가는 한계가 있는 것으로 나타났다. 박명우 등(2015)은 실시간 가뭄지수인 RDI(Real-time Drought Index)(심현준 등, 2013)를 2015년 6월 강원도를 중심으로 발생한 가뭄을 대상으로 평가하였다. RDI는 인위적 용수(댐, 저수지 등)가 공급되지 않는 자연용수공급지역을 대상으로 빗물의 용수별 수요량과 공급량의 관계를 통해 용수부족량을 산출하는 가뭄지수다. 분석결과, RDI는 시공간적으로 뛰어난 재현성을 보였는데, 가뭄이 강원도에서 시작되어 한 달 만에 중부의 대부분 지역으로 확산되는 모습을 적중률 90.4%, 오경보율 9.6%로 재현했다.

신용철 등(2016)은 MODIS 영상자료 및 수문모형 기반의 자료동화기법을 사용해 우리나라의 복잡한 지형을 고려한 토양수분을 산정하고, 농업 및 산림가뭄을 평가하였다. 원광재와 정은성(2016)은 청미천 유역에 대해 1985년~2015년 동안의 가뭄분석을 수행하였다. 기상학적 가뭄지수로 SPI와 SPEI, 수문학적 가뭄지수 SDI, 농업적 가뭄지수로는 PDSI를 사용하였다. 극한 및 평균가뭄 평가결과, 2014년과 2015년이 가장 가뭄에 취약하였으며, PDSI를 제외하고 SPI, SPEI, SDI는 서로 높은 상관관계를 나타냈다. 하지만 각 가뭄지수는 상이한 극한가뭄 시기와 강도를 나타냈다.

유지영 등(2016)은 서울의 100년 이상 장기간 강수자료(1909년~2015년)를 대상으로 코플라 함수를 적용하여 가뭄의 지속기간과 심도를 고려한 이변량 재현기간을 산정하였다. 그림 2.3에서 과거 극한가뭄으로 판단된 가뭄사상은 대부분 10년~50년의 재현기간을 가지며(1967년~1968년 가뭄: 12년빈도, 1976년~1977년 가뭄: 8년빈도, 1981년~1982년 가뭄: 23년빈도, 1987년~1988년 가뭄: 52년빈도, 1944년~1995년 가뭄: 46년빈도), 가뭄재현기간이 증가하는 것으로 나타났고 2013년~2015년 가뭄은 상대적으로 극심한 가뭄으로 나타났다. 원광재 등(2016)은 한강 유역에 대해 1992년~2015년 동안 SPEI와 RDI 가뭄지수를 적용해 가뭄 정량화 및 특징 비교를 하였다. 분석결과, 한강유역에서 최근 급격히 극한가뭄이 발생하는 지점이 증가하였으며, 두 가뭄지수는 높은 상관관계를 보였으나 가뭄심도와 극한가뭄 발생연도는 다르게 추정되었다.

기상학적 가뭄에서 농업적 또는 수문학적 가뭄으로 변화되는 가뭄전이에 대한 연구 또한 다수 수행되었다. 권민성 등(2016)은 기상청 58개 관측소의 일강수량 자료(1986년~2015년)를 이용하여 새롭게 개발한 가뭄지수 RADI(Rainfall Accumulation Drought Index)를 검증하였다. 분석결과, RADI는 과거 가뭄의 시공간적 발생(2001년, 2008년~2009년, 2012년, 2013년~2015년)을 잘 재현했으며, 전국평균 20년빈도로 가뭄이 발생하고 있는 것으로 제시하였다. 김수현과 정은성(2017)은 SPI, SPEI, SDI 가뭄지수를 사용하여 1985년~2015년까지 청미천 유역의 첨두 가뭄심도와 가뭄기간을 분석했다. 첨두 가뭄심도는 기상학적 가뭄(SPI와 SPEI) 발생 이후 수문학적 가뭄(SDI)이 발생하였고, 평균발생기간 차이의 경우 SPI-SDI는 0.59개월, SPEI-SDI는 0.72개월로 나타났다.

권민성 등(2018)은 한강 유역 8개 기상관측소의 강수량 자료(1973년~2017년)를 사용하여 SPI를 산정하고, 가뭄심도와 강수부족량을 대상으로 이변량 가뭄빈도해석을 실시하였다. 가뭄심도는 가뭄지속기간과 선형적 관계이므로 심한가뭄의 심도를 보면 가뭄 지속기간 추정이 가능한 것으로 나타났으며, 우기의 경우는 그 상관관계가 다소 낮게 나타났다.

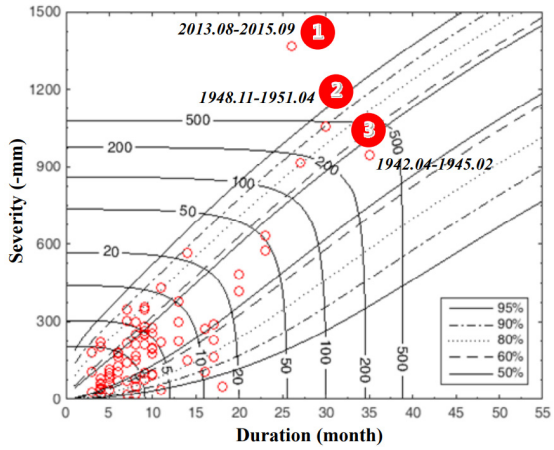


그림 2.3 과거 가뭄사상(유지영 등, 2016).

김수현과 정은성(2018)은 SPI, SDI, SSI(Standardized Streamflow Index)를 사용하여 청미천 유역(1985년~2017년)의 가뭄지수간 첨두 발생시점의 차이를 분석하였다. 다양한 지속기간(60일, 90일, 120일, 150일)에 따른 기상학적 가뭄과 수문학적 가뭄 발생시점 차이를 분석하였으며, SDI가 SSI보다 SPI와의 첨두 발생시점, 가뭄 시작일의 차이 및 평균 가뭄기간이 더 크게 나타남을 확인하였다. 유명수 등(2018)은 가뭄전이의 국내 발생 여부와 발생 패턴을 분석하기 위해 기상학적 가뭄에서 농업적 가뭄으로의 전이에 초점을 맞추어 분석하였다. 기상학적 가뭄은 SPI3를 이용하였으며, 농업적 가뭄지수는 저수지 저수율 자료(한국농어촌공사)와 ARDI(Agricultural Reservoir Drought Index)를 사용하였다. 1970년 이후 가뭄사상에 대해 봄가뭄, 여름가뭄(강수부족), 가을가뭄(태풍 미발생), 단기 강수부족 가뭄, 장기 강우부족 가뭄으로 구분하였다. 유형에 따라 기상학적 가뭄에서 농업적 가뭄으로 전이되지 않거나 최대 3개월까지 지체되는 것으로 나타났다.

2.2.2.2 홍수

2014년 이후 연구들에서는 주로 과거보다 극한강수가 전반적으로 꾸준히 증가하는 추세를 나타내고 있으며, 특히 단기간 강우강도가 증가하여 중소하천에서 홍수발생 가능성이 실질적으로 증가하였다(특히 지속시간 3시간 강우사상의 뚜렷한 증가 추세). 유역규모가 큰 경우 지속시간이 긴 강우사상의 영향을 받으며, 단기간 지속기간의 강우사상은 중소하천에서 발생하는 홍수에 영향을 미친다. 그림 2.4에서 볼 수 있듯이, 하천홍수 피해액은 2002년 이후 감소 추세에 있으나 소하천 피해액은 전체 피해대비 비율이 2009년 85%, 2010년 84%, 2012년 83%로 증가추세에 있다(김양수 등, 2014).

김성훈 등(2016)은 한강유역 56개 지점의 강우자료(1961년~2014년)를 이용하여 확률강우량 산정방법(정상성 지점빈도해석, 비정상성 지점빈도해석, 정상성 지역빈도해석)에 따른 설계홍수량 변화를 비교·분석하였으며, 설계홍수량은 모든 확률강우량 산정결과에서 감소하는 것으로 나타났다.

임정현 등(2017)은 최근 도시화가 급격히 진행된 안양천을 대상으로 기후변화에 따른 홍수량 변화를 분석하였다. 2013년도 유출곡선지수와 기상청 강우자료(1960년~2016년 9월)를 이용하여 홍수량을 산정한 결과, 강우량

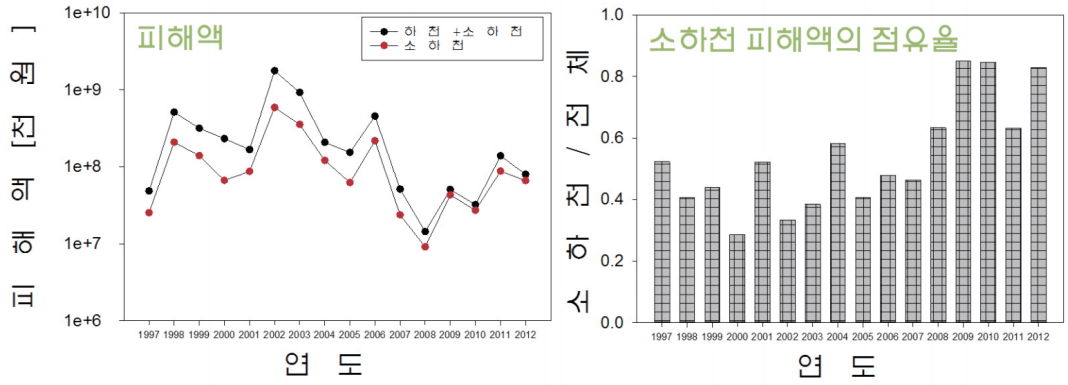


그림 2.4 연도별 홍수피해액과 소하천 피해액의 점유율(소방방재청 홈페이지).

증가에 따라 홍수량이 증가하는 것으로 나타났으며, 확률강우량과 설계홍수량은 각각 16.2 mm, 213.94 m3/sec 증가하였다.

2.2.3 기타

앞서 중점적으로 다루어지지 않은 수문학적 인자들에 대한 연구는 기타 항목으로 분류하였다. 「한국 기후변화 평가 보고서 2014」에서는 지하수 거동, 지표·지하수 연계모형, 지하수 함양량 분석 및 개발 등의 연구들을 주로 다루었으며, 2014년 이후에는 보다 다양한 인자들을 대상으로 살펴보았다.

수위인자 관련 연구들을 살펴보면, 정성호 등(2018)은 한강 잠수교 수위모의를 위해 Tensor Flow를 이용하는 딥러닝 기반 LSTM 모형을 개발하였다. 2011년~2017년까지 10분 단위 자료(잠수교 수위, 팔당댐 방류량, 한강하구 강화대교 지점 예측 조위자료)를 이용하여 모의한 결과, 선행시간 1시간(2017년)에 대한 예측도가 실측수위와 매우 근접하게 나타났으나(RMSE=0.065 m, NSE=0.99) 선행시간이 길어질수록 예측정확도가 낮아지는 것으로 나타났다.

다음으로 지하수인자 관련 연구들을 살펴보면, 이정우 등(2015)은 죽산천 인근지역을 대상으로SWAT-MODFLOW 결합모형을 이용하여 암반층 지하수 양수에 따른 하천수의 감소량을 모의하였다. 모의결과, 평균적으로 5년 동안 암반층(충적층)에서 지하수를 양수할 시 53.6%(66.5%)의 하천유량이 감소하는 것을 확인하였다. 이정호(2017)는 원격탐사 기법기반 지하수 수자원 부존 및 대수층의 동역학적 변화를 살핀 연구들을 정리하였다. 지질 및 식생 분포, 강수량 및 증발산의 변화, 지표수와 지형의 고도차 등을 측정하여 지하수 수자원 부존 여부 분석이 가능함을 확인하였으며, 현재까지 정량적 해석방법으로 GRACE와 InSAR가 가장 활발히 활용됨을 확인하였다.

마지막으로 기후변화에 의한 기상학적·수문학적 인자의 모의에서 중요한 과정 중 GCM 모델의 과거기간 주요인자 모의에 대한 재현성 평가는 아직 국내연구가 미흡한 실정이다. 이에 황세운 등(2018)은 1970년~2005년 동안의 강우특성 공간분포 분석 및 GCM 산출물의 재현성을 평가하였다. 동아시아와 한반도를 대상으로 29개 CMIP5 GCMs 강우특성의 공간적 변동성의 재현 정확성을 평가하고 순위를 제시하였다.

2.2.4 결론

우리나라에서 관측강수발생 연구는 전국 또는 특정유역 대상의 강수자료를 통계 처리한 추세·경향성 분석이 주로 수행되었다. 전반적으로 연평균 강수량이 증가하며, 특히 여름철 강수량이 뚜렷하게 증가하고 가을·겨울철에는 감소하는 것으로 관측되었다. 강우발생일수 및 강수량이 증가하여 강우강도는 다소 약해졌으나 최근 30년 동안 극한 강우발생이 증가하였으며 이로 인해 PMP도 증가하는 경향을 나타냈다. 증발산 연구는 증발산의 시공간적 변동성의

반영을 위해 MODIS 등 원격탐사를 기반으로 대부분의 연구들이 수행되었다. 국내 연구과정을 살펴보면 MODIS 자료를 이용하여 한반도 전역을 대상으로 분석하거나 플럭스타워 자료를 기반으로 증발산을 추정하였다.

과거 가뭄 관련 연구들은 여러 수문학적·기상학적 가뭄지수들을 결합하거나 우리나라에 적합한 새로운 가뭄지수를 개발하고 검증하는 연구들이 많이 수행되었다. 가뭄발생 경향성은 가뭄빈도가 증가하고 가뭄강도가 심화되어 가뭄에 의한 사회·경제적 피해가 커지는 추세였으며, 최근 발생가뭄은 지역적 편차가 큰 경향을 나타냈다. 홍수 연구는 과거 모형을 통한 연구가 많이 수행되었으나 최근 확률통계기법을 통해 확률강우량과 설계홍수량의 증가정도, 홍수발생규모와 빈도에 따른 피해규모 분석에 초점을 맞춘 연구가 주로 수행되었다. 그 외 하천수위와 지하수의 경우, 수문·수리모형을 이용하여 강수·하천변화에 따른 수위·지하수변화를 검증하는 연구들이 주로 수행되었으나 지하수의 경우에는 매우 중요한 수문인자임에도 불구하고 진행된 연구가 매우 미비하였다.

2.3 영향 전망

2.3.1 서론

「한국 기후변화 평가보고서 2014」에는 불확실성에 대한 국내 연구들이 활발한 시점이 아니었으므로 이를 독립된 항목으로 분류하지 않았다. 하지만 이후 기후변화 불확실성에 대한 국내 연구들이 활발해지고 있어 본 보고서에서는 주요 부분으로 고려하여 살펴보았다.

2.3.1.1 불확실성 분석

수문학 분야에서의 기후변화에 따른 영향평가는 다음 각 단계의 선택에 따라 서로 다른 결과를 갖는다. 1) 미래 기후변화를 모의한 시나리오 선정, 2) 전지구의 기후를 격자단위로 모델링하기 위한 GCM(Global Climate Model)의 선정, 3) GCM으로부터 모의된 저해상도의 전망 자료를 대상 지역에 적용하기 위해 편이보정(Bias Correction) 과정, 4) GCM의 해상도를 유역 스케일에 적합한 크기로 일치시켜주는 시공간적인 상세화(downscaling) 기법 산정, 5) 수문 전망을 위한 수문모형 선정과 유역 특성을 반영한 매개변수 선정. 특히 각 단계별 방법이나 모형의 선택에 따라 매우 다른 결과가 발생 가능하다. 이러한 결과들의 상이함은 미래 전망에 대한 불확실성으로 표현될 수 있으며, 각 단계가 진행됨에 따라 불확실성은 점차 증가한다. 특히, 기후변화 영향평가 과정 중 GCM 단계가 전체 불확실성에서 큰 비중을 차지한다고 알려져 있다(Wilby and Harris, 2006;, Kay et al., 2009).

이문환과 배덕효(2016)는 기후변화에 따른 30일 기준 저유량(low flow) 모의 시, 수문모형과 기후변화 시나리오 상세화 기법의 불확실성을 평가하였다. HadGEM3-RA(기상청), RegCM4(공주대), MM5-WRF(서울대), YSU-RSM(연세대)을 기반으로 과거(1981년~2005년) 및 미래(2011년~2035년) 기간에 대해 RCP 8.5기반 CORDEX East Asia 시나리오 자료를 사용하여 소양강댐과 충주댐 유역의 저유량을 전망하였다. 전망 결과, 평가 단계별 기여도에 따른 저유량 모의시 수문모형에서 발생하는 불확실성(수문모형=41.5%, RCM=6.0%, SPP=12.4%, 상호작용효과=40.1%)이 가장 큰 것으로 나타났다. 이문환 등(2016)은 단계별 불확실성 평가기법을 개발하고 검증을 위해 충주댐 대상 지역기후모형(5개 모형), 통계적 후처리 기법(5개 기법), 수문모형(2개 모형)에 따른 불확실성을 분석하였다. 분석결과, 유출량 모의기준으로 겨울철(겨울철에는 수문모형 불확실성 가장 큼: 46.5%)을 제외한 모든 계절에서 RCM 단계의 불확실성이 가장 큰 것(29.3%~68.9%)으로 나타났다. 증발산량 모의기준으로 가을철을 제외한 모든 계절에서 불확실성 28.5~65.1%로 수문모형이 가장 큰 비중을 가졌다. 전체적으로 이수기는 수문모형, 홍수기는 기후모델링이 불확실성에 가장 큰 비중을 차지하는 것으로 나타났다.

김철겸 등(2018)은 충주댐 상류지역을 대상으로 GCM과 상세화 기법 단계에 대한 불확실성 평가를 실시하였다. 29개 GCMs(APEC센터)을 대상으로 과거 유입량 모의정확성이 높은 16개 GCMs를 선정하였으며, 60개 지점 기상관측 자료를 대상으로 SQM(Simple Quartile Mapping), SD-QDM

(Spatial Disaggregation and Quartile Delta Mapping)방법을 각각 적용하여 얻은 상세화 자료를 사용했다. 16개 GCMs에 대해 SQM과 SDGDM기법을 적용한 결과, 상세화 기법의 선정이 GCM 선정보다 중요한 것으로 나타났다.

2.3.2 기상인자

「한국 기후변화 평가보고서 2014」에서는 지표수·홍수 분석에서 강수인자를 포함하여 미래 증가정도·변동성 등을 분석하였다. 대부분의 연구에서 미래 강수량은 증가하는 것으로 전망되었고 이에 따라 유출량도 유역·전망기간에 따라 다소 차이는 있으나 강수량의 증가에 따라 증가하는 것으로 나타났다.

2.3.2.1 강수

2014년 이후 최근 기후변화에 따른 강수변화 관련 연구에서는 강우인자뿐만 아니라 적설인자에 대한 연구들이 증가하였다. 우선 적설인자에 대한 연구들을 살펴보면, 김연수 등(2014)은 기후변화 시나리오에 따른 미래 적설량을 예측하고자 SRES A1B기반 KMA-RegCM3을 입력자료(기상관측소 18개 지점)로 신경망모형을 이용하여 1971년~2100년 기간의 적설량을 예측하고 빈도별(50, 80, 100, 200년) 확률적설량을 추정하였다. 20세기 말 대비 21세기 말 겨울철 한반도는 평균기온 약 3.5℃, 강수량은 약 11.7% 증가하는 것으로 예측되었으며, 적설량 발생확률은 대부분 지역에서 약 6%~18% 지속적으로 감소할 것으로 예측되었다. 박희성(2014)과 박희성 등(2016)은 74개 기상관측소를 대상으로 RCP 4.5&8.5기반 인공신경망모형을 이용해 미래 신적설일수(probable fresh snow days)와 최심신적설량(probable maximum fresh snow depth)을 예측하고 빈도해석을 수행하였고, 전반적으로 확률신적설일수 및 확률최심신적설량이 감소하는 것으로 예측되었다. 특히 강원도 지역의 감소세가 컸으며, 경상도 내륙지역의 일부는 최심신적설은 감소하나 신적설 일수는 증가하는 경향으로 나타났다. 추가적으로 예측인자들(강수량, 일평균기온, 일최고기온, 일최저기온)간의 상호작용을 고려한 회귀식 기반 예측모형을 개발하였으며, 미래 기온 및 강수예측이 정확성 증가할수록 겨울철 적설량 예측정확성이 증가함을 확인하였다.

정승현 등(2015)은 대설에 취약한 온실의 피해를 저감하고자 적설하중 산정을 위한 노출계수를 제안하였고, 이영규 등(2015)은 최대가능적설하중을 추정하였다. 권순호와 정건희(2017)는 회귀분석을 통해 강원도지역을 대상으로 대설피해액 추정 모형을 개발하였으며, 오영록과 정건희(2017)는 대설피해가 빈번한 강원도, 전라도, 충청도 지역에 대해 대설피해 예측모형을 구축하여 그 적용성을 검토했다. 오영록과 정건희(2018a)는 전국의 대설피해 취약성을 등급별로 군집화하고, 취약성 분석결과를 독립변수로 활용하여 지역별 특성을 반영한 대설피해 예측함수 개발 가능성을 검토했다. 선행연구인 오영록과 정건희(2018)에서 전국의 취약성 분석결과를 5등급으로 구분한 자료를 새로운 기준으로 3가지로 구분하여 다중회귀모형을 구축한 뒤 대설피해액을 예측하였으며, 이를 통해 과거 피해사례가 없는 지역에 기습적으로 폭설이 발생 시 예측되는 피해액을 분석하였다. 분석결과, 대부분 경우에 NRMSE가 20% 미만으로 나타나 모형의 적용성을 입증되었다.

다음으로 미래 강수전망 연구들을 살펴보면, 권민성 등(2015)은 4개 RCP 및 한반도 88개 강우관측소(남한 61개, 북한 27개) 일강우자료를 이용하여 미래 연최대일강우의 남북간 지역적 차이를 분석하였다(그림 2.5). 분석결과, 모든 기후변화 시나리오(RCP 2.6, 4.5, 6.0, 8.5)에서 일강우 최대치가 증가한 지점이 많았으며, 특히 북한에서 일강우 평균 증가비율이 높게 예측되었다. 일강우 최대치의 재현기간이 300년 이상인 지점의 평균 비율은 예측기간별 각각 SP1(2011년~2040년) 14%, SP2(2041년~2070년) 28%, SP3(2071년~2100년) 35%이며, 이중 1,000년 이상 재현기간을 갖는 비율은 평균 63%~69%(각각 SP1 64%, SP2 63%, SP3 69%)로 매우 높았다.

심규범 등(2015)은 RCP 2.6&4.5&6.0&8.5의 1일 강우량을 이용하여 PMP를 추정하였으며, 선형회귀식으로 2011년~2100년까지 경향성 및 변화율을 분석하였다. PMP 추정 방법에 사용된 자료에 따라 SMP와 CMP로 구분하여 분석한

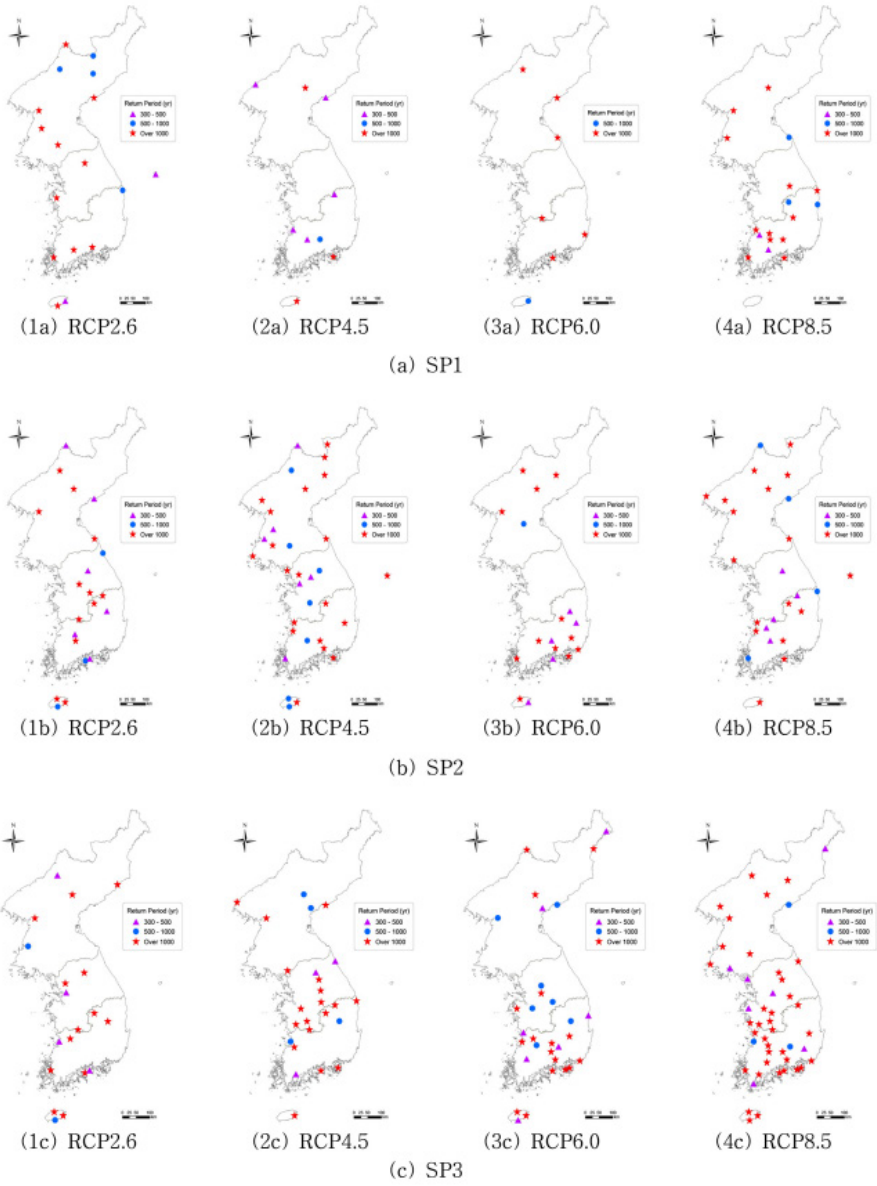
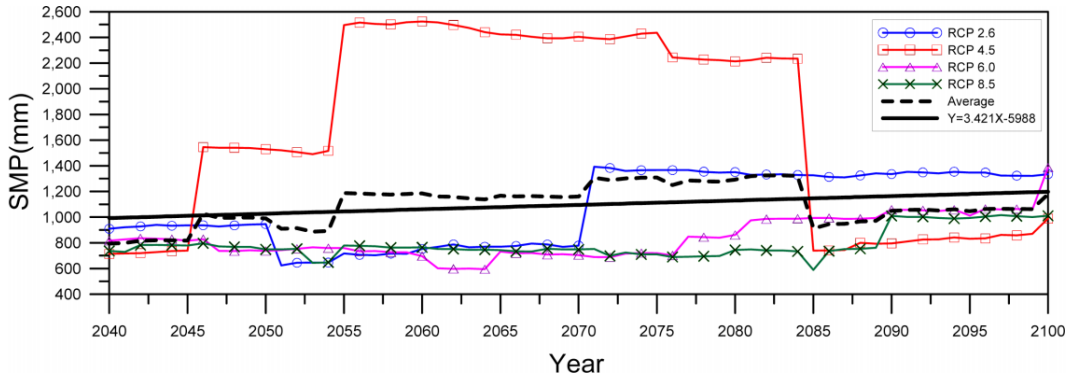


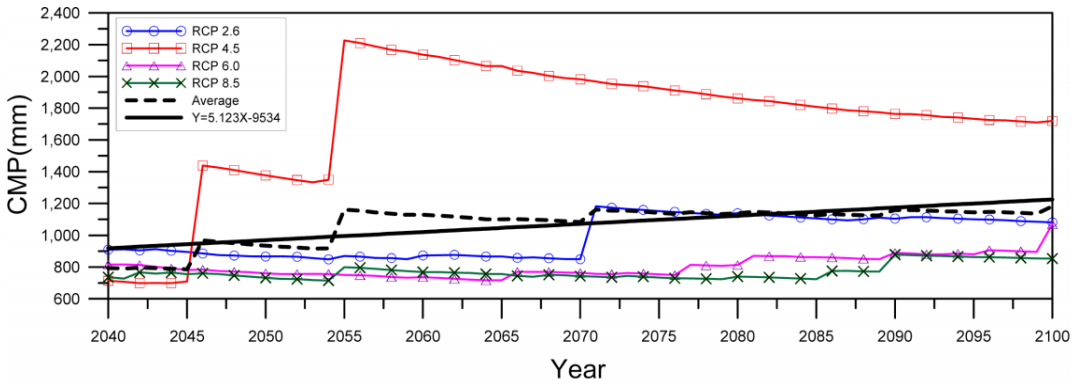
그림 2.5 시나리오별, 구간별, 일강우 최대치의 재현기간이 300년 이상인 지점(권민성 등, 2015).

결과, SMP는 평균 2.0 mm/year 증가 및 전반적 증가 추세를 보였으며, CMP는 평균 2.6 mm/year 증가하는 것으로 예측되었다(그림 2.6). 지역적으로는 수도권과 부산권의 증가율이 상대적으로 높게 예측되었으며, 제주에서 가장 큰 증가율(약 10 mm/year)로 예측되었다.

정세진 등(2017)은 기후변화가 대동강과 압록강 유역의 수문학적 순환에 미치는 영향을 모의하였다. 이를 위해 WMO로부터 제공되는 27개 기상관측소의 강수 및 온도 자료와 RCP 8.5 시나리오, WASMOD(Water And Snow Balance MODeling system)를 사용하였다. 그 결과 대동강의 강우와 유출이 미래1(2011~2040년)기간에서 감소 후 먼미래(2041~2100년)로 갈수록 현재보다 증가, 압록강은 전기간(2011~2100년) 강수 및 유출이 꾸준히 증가하였다. 북한지역에서 월별 강우를 분석결과 미래 강설 가능성은 증가하였고 여름철 강우가 현재보다 줄어들어 가뭄 가능성이 증가할 것으로 전망되었다.



(a) 서울지역 SMP



(b) 서울지역 CMP

그림 2.6 이동평균 1일 PMP(SMP), 누적평균 1일 PMP(CMP) 산정결과(심규범 등, 2015).

이지완 등(2018)은 금강유역을 대상으로 RCP 4.5& RCP 8.5기반 RCM (HadGEM3-RA)을 이용하여 기상인자를 전망하였다. 전망 결과, 미래 강수량은 과거(1975년~2015년) 대비 각각 RCP 4.5&8.5에서 각각 4.7%~13.6%, 1.3%~13.0% 증가하였다. 미래 기온에서는 RCP 4.5&8.5에서 각각 0.9~2.4℃, 1.2~5.3℃ 증가하였다. 마지막으로 증발산량은 RCP 4.5를 통해 전망한 2080s(2070년~2099년)에서 과거기간 대비 17.2% 증가하였다. 김정호(2015)는 4개 지역기후모델(GRIMs, RegCM4, SNURCM, WRF)을 이용해 보정된 남한 상세 기후변화 앙상블 시나리오 일 강수자료를 검토하였다. 보정 이후, 연평균 강수일수는 지역 및 지역 기후모형에 따라 12.9%~33.9% 감소했으며, 연평균 강수량의 특성은 변화가 없으며, 연평균 강수일수의 공간 분포 또한 큰 차이가 없는 것으로 나타났다. 보정된 연평균 강수일수와 평균 일강수량의 관측자료와 시나리오 자료간 상관계수가 높게 나타났으며, 관측자료의 특성과 유사하였다.

조현곤과 김광섭(2018)은 미래 극치강수량의 변동을 효과적으로 전망하기 위해 Logistic 회귀모형, Power 회귀모형, 인공신경망기법을 적용하여 서울지역의 확률강우량을 전망하였다. 또한 이옥정 등(2018)은 기상청 서울관측소의 일기상자료(1961년~2017년)를 이용하여 지표면 기온과 이슬점 온도를 기상변수로 사용한 비정상성 GEV 모형을 개발해 서울 여름철(7~8월) 월 최대 일 강우량 시계열을 분석했다.

김경민 등(2018)은 2개 GCMs(MPI_ESM_LR, HadGEM2-AO)과 4개 RCMs(MM5, WRF, RegCM4, RSM)기반 미래 강우자료를 이용하여 미래 IDF(Intensity Duration Frequency)곡선을 추정하고 관련 불확실성을 정량화하였다. 미래 IDF 곡선 추정결과, 경기지역을 제외한 대부분 지역에서 미래 확률강우량의 지속시간과 재현기간이 평균 5%~15%

증가하였다. 또한 미래 IDF 곡선의 변화율이 지역별로 10% 이상 차이가 나타나 지역별 방재대책수립에 지역별 확률강우량에 적절한 가중치 부여가 필요할 것으로 제안하였다. 불확실성 분석결과, 지속시간 3시간을 기준으로 3시간 미만에서는 더 세밀한 시간해상도가 필요하며, 3시간 이상에서는 지역별 차이 없이 10% 이내 불확실성이 발생하는 것으로 예측되었다.

강수전망 이외 주요 기상인자 관련 연구들을 살펴보면, 이옥정과 김상단(2016)은 RCP 8.5기반 이슬점 변동에 따른 PMP(62개 관측소)를 추정하였다. PMP는 2045년까지 약 1.3 mm/year씩 증가(지속시간 24시간, 영향면적 25 km^2 기준)하는 것으로 전망되었다. 이옥정 등(2017)은 충주댐 유역을 대상으로 미래 PMP를 전망하였고, 그 결과 RCP별로 상이한 결과가 전망되었으나 모든 시나리오에서 충주댐 유역의 PMPs는 증가할 것으로 전망되었다. 심규범 등(2017)은 RCP에 따른 미래 PMP 산정에 미치는 원인분석을 위해, 22개 기상관측소 대상 과거(~2013년) 및 미래(2011년~2100년)기간의 PMP를 산정하였다. 산정결과, 과거 PMP는 평균 915.5 mm이며, 미래 PMP는 평균 1,030.1 mm로서 전체 PMP의 변화율은 13.3% 증가하는 것으로 나타났으며, 통계기반 PMP 산정에서 가장 민감한 매개변수는 연최대 일강우량 표준편차로 분석되었다.

최근 연구에서는 단순한 기상관련 인자들의 예측뿐만 아니라 인자예측에 따른 불확실성 정량화 연구도 함께 수행되었다. 윤선권(2015)은 RCP 4.5&8.5·다중모델 앙상블(9개 CMIP5 GCMs)기법·상세화기법(비모수적 분위사상법)·편의보정기법을 기반으로 한반도 5대강 유역의 미래 강수를 전망하였다. 전망 결과, 미래기간(2011년~2040년) 동안 모든 강수전망의 연간 변동성과 불확실성이 증가하는 것으로 나타났다. RCP에 따라 GCM별 강수전망 편차가 크게 나타나 홍수빈도해석 결과의 불확실성도 큰 것으로 나타났다. 50년 빈도 강수량은 RCP 4.5&8.5에서 각각 -1.7%~10.4%, 4.2%~10.9%의 변화를 보였으며, 100년 빈도 강수량은 각각 시나리오당 -2.3~10.8%, 4.1~10.7%의 변화율을 보였다.

2.3.2.2 증발산량

임창수, 김성엽(2014)은 서울지점대상 과거와 미래 건조지수(P/RET)의 변화율을 분석하였다. 과거기간(1961년~2010년)의 서울 월별·연별 건조지수를 살펴보았으며, 변화율 산정시 과거 30년간(1971년~2000년) 자료를 이용한 건조지수와 RCP 4.5&8.5기반 미래(2011년~2100년) 건조지수를 사용하였다. 특히 건조지수 및 건조지수 변화율 분석을 위해 5가지 잠재증발산량 산정식(FAO P-M, Penman, Makkink, Priestley-Taylor, Hargreaves)을 이용하였다. 분석결과, RCP 4.5&8.5에서 미래 월별 강수량, 평균기온, 잠재증발산량이 증가하는 것으로 나타났으며, 특히 미래 잠재증발산량은 겨울철이 상대적으로 크게 증가하였다(그림 2.7).

문장원(2018)은 62개 관측소의 강수량, 최고/최저기온 관측자료(1988년~2017년)와 RCP 4.5&8.5기반 모의자료를 Hargreaves식에 입력하여 기후변화에 따른 우리나라 기준증발산량의 변화를 평가하였다. 연평균 기준증발산량은 관측자료기간 대비 RCP 4.5&8.5에서 각각 5.4%, 9.5% 증가하였으며, 겨울철에 10% 이상 기준증발산량이 증가하는 것으로 평가되었다. 이지완 등(2018)은 RCP 4.5& RCP 8.5 기반 RCM(HadGEM3-RA)을 이용해 금강유역의 증발산량을 전망하였다. 전망 결과, 2080s(2070년~2099년)의 증발산량은 과거(1975년~2015년)기간 대비 17.2% 증가하는 것으로 나타났다.

2.3.3 수문인자

「한국 기후변화 평가보고서 2014」에는 미래 확률강우량에 따른 확률홍수량 전망, 극한홍수사상에 대한 전망, 홍수로 인한 재해위험(재해지수 개발 포함) 분석에 대한 연구들이 주로 수행되었다. 또한, 가뭄연구의 경우 기존「한국 기후변화 평가보고서 2014」에서도 가뭄전망이나 가뭄발생으로 인한 취약성 평가에 대한 연구들이 수행되었으나 상대적으로 연구가 잘 진행되지 않은 것으로 분석되었다. 이외에도 각 기후시나리오기반 유출량을 전망하는 연구가 주로 수행되었으며, SRES 배출 시나리오와 RCP 시나리오가 혼용되어

연구별로 다소 상이한 결과를 제시하였다. 유출량 전망에 있어서는 불확실성을 고려한 전망 연구들이 점차 증가하였다.

2.3.3.1 홍수

미래 홍수발생은 기후변화에 따른 하천과 유역유출량의 변화에 큰 영향을 받으므로 많은 연구들에서 유출량에 대한 다양한 분석을 적용하여 미래 홍수변화를 전망하고자 하였다. 연구들을 살펴보면, 김상욱과 이영섭(2015)은 국내 8개 다목적댐(충주, 소양강, 안동, 임하, 합천, 대청, 섬진강, 주암댐)에 대한 비정상성 확률분포의 적용성 검토하고 정상성 분석결과와 비교하였다. 비교결과, 비정상성 가정의 홍수발생 재현기간이 정상성 가정의 결과보다 작게 나타났으나, 대부분 다목적댐에서는 아직 정상성 모형이 적합한 것으로 나타났다.

정세진 등(2015)은 현재 IDF 곡선이 기후변화의 영향이 반영되지 않은 정상성 개념에 기초한다는 점에서 비정상성(non-stationary)을 고려하고자 조건부 GEV분포를 통해 지속기간별 확률강우량 및 비정상성 IDF 곡선식을 유도하였다. 또한 이에 S-RAT 모형을 사용하여 강우강도 증가에 따른 설계 홍수량의 변화를 분석했다. RCP 8.5 시나리오를 사용하여 섬진강 유역을 모의한 결과, 전주, 정읍지점은 지속기간이 짧을수록 저빈도와 고빈도의 차가 컸으며 여수지점은 전반적으로 IDF 곡선이 현재에 비해 높게 있었다. 임실 지점은 저빈도에서 큰 차이가 없었으나 고빈도로 갈수로 증가했고, 특히 200년 빈도에서 지속기간이 짧을수록 I-D-F 곡선이 증가하였다. 섬진강에서는 지속시간 3시간일 경우 정상성과 비정상성의 첨두홍수량의 차가 10년 빈도일 때 1,143 CMS, 30년 빈도일 때 2,067 CMS, 100년 빈도일 때 3,810 CMS, 200년 빈도일 때 5,302 CMS 이었다. 지속시간 12시간은 10년 빈도일 때 1,219 CMS, 30년 빈도일 때 1,558 CMS, 100년 빈도일 때 1,900 CMS, 200년 빈도일 때 2,072 CMS로 분석되었다.

황정윤 등(2018)은 미래 미계측 도시유역(서울지점)의 수공구조물의 설계기준 불확실성을 검토하고자 RCP 4.5기반 2017년~2100년의 확률강우량 및 최대 첨두홍수량 변화를 분석하였다. 분석결과, 재현기간 별 확률강우량은 2047년~2076년 기간에 최댓값이 나타났으며, 현재 설계빈도인 10년을 기준으로 미래 50년에는 약 10%, 미래 70년에는 약 20% 정도 확률홍수량이 증가할 것으로 전망되었다(그림 2.8).

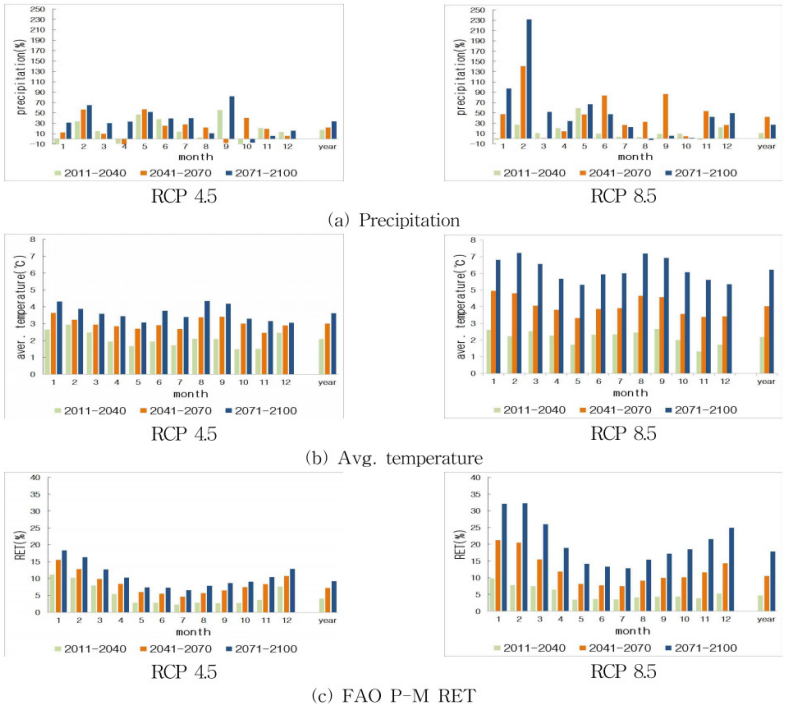


그림 2.7 미래 월별 강수량, 평균기온, 잠재증발산량 전망(임창수와 김성엽, 2014).

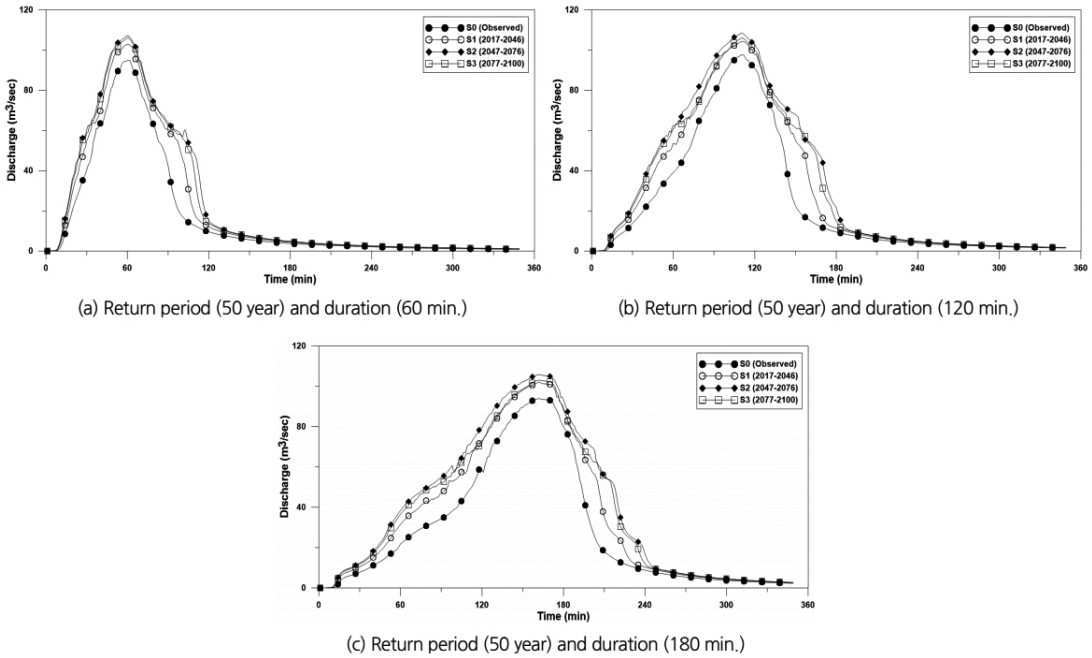


그림 2.8 빈도별 지속기간별 청계천 모전교 지점의 최대첨두홍수량 산정 및 비교(황정윤 등, 2018).

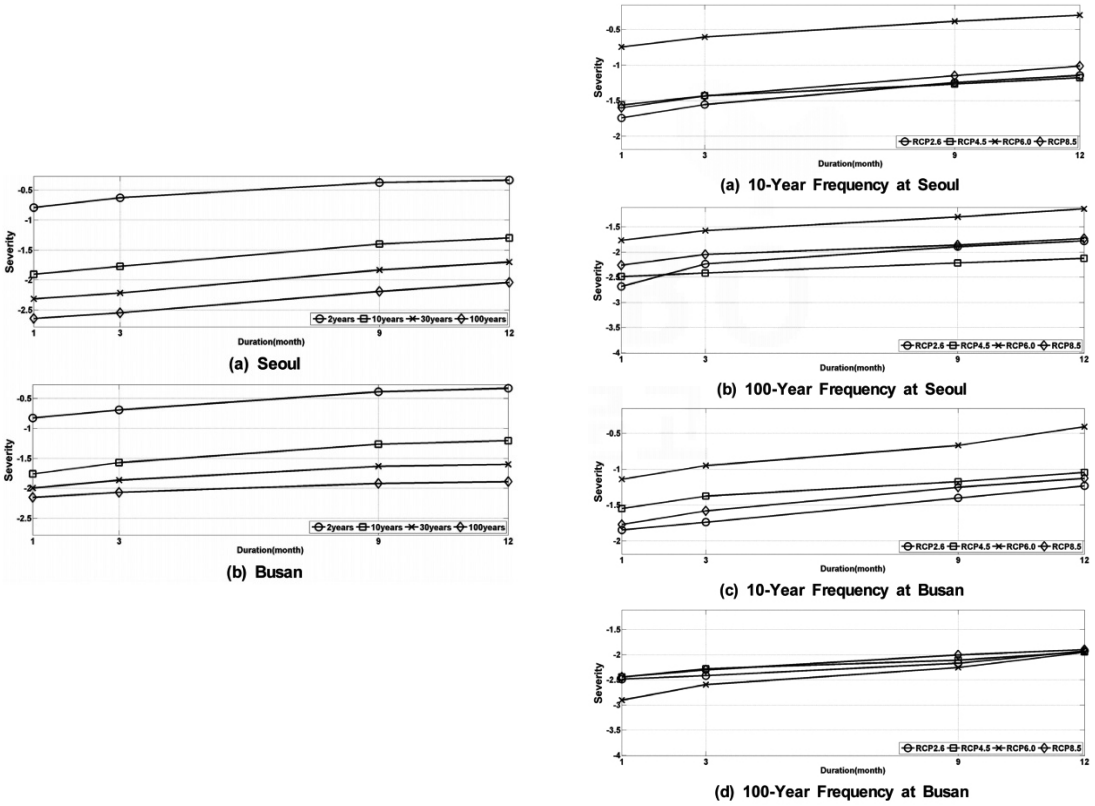
기후변화가 홍수에 비치는 영향을 분석하고자 김호성 등(2018)은 불광천 유역의 강우자료(1961~2016년)와 RCP 4.5 시나리오 자료 및 XP-SWMM모델을 이용하여 과거(S0:1961~2016년) 및 미래(S1:2017~2046년, S2:2047~2076년, S3:2077~2100년) 기간에 대해 유출분석을 실시하였다. 4개 재현기간(10, 30, 50, 100년), 3개 강우지속시간(60, 120, 180분)의 확률강우량을 도출하였고, Huff 4분위에 분포하였다. S0 기간에 대한 최대 유출량 상승률은 S2에서 가장 컸으며 S2 기간에서 가장 넓은 침수면적이 발생했다. 하수도 설계 기준(재현기간 10년)에 대한 침수면적은 S0에 대해 각각 S1(32.5%), S2(91.4%), S3(76.4%) 상승했고, 유출량 증가율은 S1(14.2%), S2(33.3%), S3(28.5%)로 나타났다.

김용원 등(2018)은 극한기온과 사상에 대해 STARDEX 극한지수 및 RCP 8.5기반 10개 GCMs를 적용하여 과거(1975년~2005년)기간 대비 미래 금강유역의 극한기후 변화, 유황분석, 수문변동(SWAT모형 사용)을 전망하였다. 전망결과, 2020년대에서 2080년대로 갈수록 습윤한 시나리오에서 강수량, 기온, 유출량이 증가하였으며, 건조한 시나리오는 강수량, 기온, 증발산, 총유출량 등이 크게 감소하였다.

홍수산정에 강수인자 이외 주요한 인자인 지형인자에 대한 연구들도 다수 수행되었다. 관련 연구를 살펴보면, 기후변화와 토지이용변화가 미래의 유출특성에 미치는 영향을 분석하기 위해, 한우석 등(2015)은 안양천 유역에 대해 RCP 8.5기반 자료와 관측자료(1975년~2005년) 자료를 이용하여 2011년~2100년까지 시가지화 비율에 따른 1일 및 5일 강우지속시간별 확률강우량을 추정하였다. 또한 토지이용변화 예측모형 Dyna-CLUE와 분포형 강우유출모형인 S-RAT을 사용해 미래 홍수유출특성변화를 분석하였으며, 분석결과, 기후변화와 토지이용변화 모두 미래 유출특성에 영향을 미쳤다. 미래로 갈수록, 그리고 시가화율이 높을수록 최대홍수량이 증가하였으며, 특히 최대홍수량 변화가 기후변화의 영향을 크게 받은 것으로 나타났다.

2.3.3.2 가뭄

지금까지 다양한 가뭄전망 연구가 수행되었으나 연구별로 모형 선정, 상세화 기법, 지수 산정 시 시간 단위 선정 등에 의해 가뭄전망 결과가 매우 상이하며 불확실성이 발생했다. 미래 전망 인자에 대한 불확실성증가 및 가뭄전망 연구를 표준화



(a) SPI 12 SDF 곡선 (1971~2010년) (b) 4개 RCP 시나리오에 따른 SPI 12 SDF 곡선

그림 2.9 현재 및 RCP 시나리오별 미래 SDF 곡선(박명우 등, 2015).

하는 것은 한계가 있으므로, 본 보고서에서는 기존 보고서와 유사한 범위인 국내 수행된 다양한 연구들의 전망 결과 서술에 초점을 맞추었다.

윤선권 등(2014)은 광동댐 유역을 대상으로 RCP 4.5& 8.5기반 Arc-SWAT모형을 통해 평균유출량과 저유량을 산정하여 비매개변수적 갈수빈도를 분석하였다. 분석결과, 미래 2030년대에 유출량 감소에 따라 가뭄발생빈도가 증가하며, RCP 8.5기반에서는 저유량의 변동폭이 클 것으로 전망되었다. 중간유량(median flow)의 갈수량 빈도해석을 실시하였으며, 2030년대 30년빈도 갈수량은 과거기간 대비 증가(RCP 4.5: +22.4%, RCP 8.5: +40.4%), 2080년대는 감소(RCP 4.5: -4.7%, RCP 8.5: -52.9%)하는 것으로 전망되었다. 저유량은 2080년대 빈도별 갈수량이 감소(RCP 4.5 최대 -60.0%, RCP 8.5 최대 -96.0%)하여 극심한 가뭄의 발생이 더욱 증가할 것으로 전망되었다. 손경환 등(2014)은 SRES A2기반 3개 GCMs (UKMO-HadCM3, CNRM-CM3, IPSL-CM4), 3개 수문모형(PRMS, SWAT, SLURP), 3개 가뭄지수(SPI, SRI, SSI)를 사용하여 미래 가뭄변화 전망 및 분석하였다. 분석결과, 미래 봄철과 겨울철에 심한 가뭄이 발생하며, 기상·수문·농업적 가뭄발생확률이 다르며, 특히 농업적 가뭄의 발생확률이 가장 높을 것으로 전망되었다.

박명우 등(2015)은 모든 RCP 시나리오를 기반으로 기상청 미래 강우량 상세자료(해상도 1-km)를 이용해 수문학적 가뭄지수인 SPI-12를 산정하여 1971년~2000년과 2012년~2100년 결과를 비교하였고, RCP 2.6&4.5기반 미래 가뭄은 전반적으로 과거보다 심해지며, RCP 6.0기반 미래 가뭄은 과거보다 약해지고, RCP 8.5기반 미래 가뭄은 과거와 비슷한 양상을 보일 것으로 전망되었다(그림 2.9).

김덕환 등(2016)은 한강유역 21개 지점 관측소 기왕 일강우자료(1973년~2010년)와 RCP 8.5기반 전망자료를 이용해 기상학적 가뭄지수인 SPI(-3, -6, -12)를 산정하여 동 유역 가뭄 발생횟수 변화를 분석하였다. 분석결과, 2050년

대와 2080년대에 미래 강우량 증가로 가뭄이 현재와 비슷하거나 감소하는 것으로 전망되었으며, 2020년대에는 가뭄이 증가할 것으로 전망되었다. SPI12 적용결과에 한강 유역에 전반적으로 보통 및 극한가뭄이 발생할 것으로 보이며, 극한가뭄 발생지역이 보통가뭄보다 넓을 것으로 전망되었다.

Muhammad Nouman Sattar 등(2019)은 RCP 8.5기반 전망자료와 과거 관측자료를 베이지안 네트워크 입력자료로 사용하여 한강 유역 대상 가뭄전이의 확률론적 관계를 분석하였다. 분석결과, 가뭄전이 및 지체시간은 1967년~2013년 기간에 비해 2014년~2053년에 증가, 2054~2100년에 감소하는 경향을 보였다. 기상학적 가뭄은 1964년~2013년 보통가뭄에서 심한가뭄 또는 극한가뭄으로 변하는 과정에서, 지체시간의 발생빈도가 감소하거나 공간적으로 변화했다. 김진욱 등(2019)은 RCP 8.5기반 6개 GCMs를 사용하여 2011년~2099년까지 저수지가뭄지수 RDI를 산정하고 이를 이용하여 한반도의 가뭄심도, 지속기간 및 규모를 전망했다. 전망 결과, 전반적으로 여름철에는 강수량 증가폭이 컸으며 겨울철에 증가폭이 작았고, 기온은 가을에 크게, 겨울~봄철에 작게 변화했다. RDI 산정결과를 이용하여 가뭄심도, 지속기간, 규모 산정 결과, 2071년~2099년에 최대 35개월 지속기간, 최대심도 -25의 가뭄이 발생할 것으로 전망되었으며, 남부지역(전남 및 경남)이 가뭄에 취약했다.

다음으로 가뭄전망에 따른 불확실성 정량화 연구들을 살펴보면, 김정호 등(2016)은 RCP별(2.6&4.5&6.0&8.5) SPI 특성분석을 위해 기상청 66개 관측소를 대상으로 2012년~2100년까지 SPI를 이용한 가뭄발생을 검토하였다. RCP별로 건조와 습윤상태는 매우 상이하였으며, 동일한 상태하에서도 건조 및 습윤 정도 및 지속시간이 매우 상이하였다. 또한 RCP별 SPI값이 상관성이 매우 낮아 하나의 RCP기반 가뭄전망은 매우 불확실할 것으로 분석되었다. 또한 김정호 등(2016)은 73개 관측소를 대상으로 2021년~2090년까지 RCP와 RCM 등이 가뭄발생에 미치는 영향을 분석하였으며, 사용된 지수는 SDF(Severity Duration Frequency)이다. 분석결과, 가뭄심도는 RCP 8.5기반에서 더 크게 나타났으며, 특히 공간적 변동비율이 -45.0~50.5%로 매우 넓게 나타났다. 또한, RCM에 따라 가뭄심도가 상이한 것으로 확인되었다.

곽용석 등(2018)은 사용자 중심의 기후변화 영향평가를 위해 개발된 AIMS(APCC Integrated Modeling Solution)를 이용하여 상세화과정 전후 결과값을 비교하였다. 더 나아가 EDI(Effective Drought Index)를 사용하여 가뭄특성 변화를 분석함으로써 미래 가뭄전망 불확실성을 줄이고자 하였다. 60개 관측소의 30년 평균강수량 자료와 29개 GCMs의 시·공간적 재현성을 AIMS를 이용하여 비교하여 상위 10개 GCMs를 선정하였고, 5가지 가뭄관련 강우특성 지수에 대해 GCMs과 강수관측 자료를 이용하여 지점 간 공간재현성 평가를 수행하였다. 수행결과, 가뭄전망 시 전반적인 가뭄의 발생횟수와 지속기간은 총 강수량이 증가할수록 감소하였으나 가뭄강도는 증가하는 것으로 나타났다.

2.3.3.3 유량 및 유출

유량(또는 유출)전망 연구는 대부분의 연구에서 미래 수문전망을 위해 가장 기본적으로 수행되는 연구분야다. 최근 연구들을 살펴보면, 전환돈과 김수전(2014)은 SRES (A2, A1B, B1)기반 SWAT 모형을 이용해 금강유역을 대상으로 과거(1980년~2009년) 대비 미래 기간(2010년~2039년, 2040년~2069년, 2070년~2099년)의 유역 수문변화를 분석하였다. 분석결과, 강수량·증발산·유출량은 증가, 융설량·토양수분량은 감소하였으며, 중장기적으로 유출량 및 불확실성이 증가하는 것으로 나타났다. 또한 차우영 등(2015)은 금호강 유역을 대상으로 수문변화지표인 IHA를 적용하여 미래 유황변화에 따른 수생태의 스트레스를 분석하였다. 그 결과, 미래 여름철과 겨울철 수생태계의 가용서식 공간 증가에 따라 공간적 스트레스는 감소하였으나, 극한사상 발생시기, 지속시간 변화, 고유량 및 저유량 빈도, 지속시간 변화, 일 하천유량의 변동폭 등 다양한 수문인자의 변화로 인해 수생태계 총 스트레스는 증가할 것으로 전망되었다.

정세진 등(2014)은 RCP 8.5 시나리오와 준분포형 수문모형, SLURP 모형을 이용하여 기후변화가 영산강 유역의 수문순환과정에 미치는 영향 및 유역규모가 수자원에 미치는 영향을 전망했다. 분석 결과, 월유출량은 6월에 감소, 8월과

9월에 증가했으며 평균저수량은 증가하고 풍수량과 평수량은 감소했다. 보정한 매개변수를 사용하여 장기유출을 전망한 결과, 미래(1981~2099년)로 갈수록 유출량이 증가하며 특히 Future 2(2041~2070년)일 때 유출량이 가장 많을 것으로 나타났다.

정차미 등(2015)은 용담댐 유역 대상으로 k-fold cross validation 기법으로 통계적 신뢰도를 높인 RCP 4.5&8.5을 입력자료로 SWAT 모형을 적용하여 미래유량을 전망하였다. 전망 결과, 총유출량은 1982년~2011년 대비 2040년대와 2080년대 기간에 RCP 4.5에서 각각 21.9%와 44.6%, RCP 8.5에서 각각 17.7%와 26.1% 증가할 것으로 전망하였다. Ghafouri-Azar Mona와 배덕효(2018)는 RCP 4.5&8.5기반 INCM4(GCM)과 PRMS(유출모형)를 이용하여 5대강의 우기(7~9월)와 건기(10~3월) 시 하천유량 변화를 전망 및 분석하였다. 분석결과, RCP 4.5기반 전망 결과가 RCP 8.5보다 건기시 유출량 감소가 컸으며, RCP 4.5기반의 2025년대와 2055년대 유출량이 각각 -7.23%, -3.81% 감소할 것으로 전망하였다. 또한 2085년대에는 북부지역에서 유량 증가, 남부지역에서 유량이 감소할 것으로 전망되었으며, RCP 8.5에서 대부분 지역이 가뭄에 취약할 것으로 전망하였다.

한정호 등(2016)은 소양강댐을 대상으로 RCP 4.5기반 유출량(SWAT)을 전망하였다. 전망 결과, 미래(2010년~2060년) 연중 최대 일강수량과 연중 최대 5일 강수량은 지속적으로 증가 추세를 나타냈으며, 이를 기반으로 한 극한호우사상의 발생빈도도 증가 추세를 나타냈다. 특히 전망결과에 따라 지속적인 강수량이 증가하는 경우, 2006년 태풍 에위니아를 능가하는 대규모 극한호우 사상 발생가능성이 높음을 확인하였다. 이혜숙 등(2016)은 용담댐 유역을 대상으로 RCP(2.6&4.5&6.0&8.5)기반 전망자료를 입력자료로 HSPF모형을 사용하여 관측기간(1973년~2014년)과 기준기간(2003년~2010년) 대비 미래 유량을 전망하였다. RCP 각 시나리오별 평균 -5.1~8.1% 변화하였으며, 여름철 유량이 감소하며 겨울철 증가율이 높았다.

김철겸 등(2018)은 기후변화에 의한 제주도의 미래 수자원 전망을 위해 RCP 4.5&8.5 전망자료를 입력자료로 SWAT-K를 수행하였다. 관측기간(1992년~2013년)과 미래전망(2010년~2099년)을 비교·분석한 결과, 강수량, 유출량, 증발산량, 함양량 모두 증가하는 경향을 나타냈다. 과거기간 대비 유출량의 변화가 가장 컸으며(최대 50% 증가), 증발산량은 최대 11% 증가하였다. 또한 8월·9월의 강수량 증가에 따라 유출량과 함양량도 크게 증가하였으나 증발산량은 감소하였고 1월·12월은 반대의 경향성을 보였다. 결과적으로 미래 강수량 및 유출량은 증가 추세이며, 특히 여름철 강수량 및 유출량이 뚜렷히 증가하는 것으로 전망되었다.

차우영 등(2018)은 서울과 부산지역을 대상으로 RCP 8.5 전망자료(일강우) 및 NSRPM3을 이용하여 미래 시간강우자료를 생산하였으며, 편이보정을 위해 KDDM, 유출량 모의를 위해 EPA-SWMM을 사용하였다. IETD(Inter Event Time Definition) 방법을 적용하여, IETD 6기간으로 강우사상을 분리 후, 강우사상별 강우량을 계급구간에 따라 분석한 결과, 100 mm 이상의 극한강우에 대해 서울은 감소추세, 부산은 증가 추세로 나타났다. 부산지역 일 강우자료를 통해 모의한 시간강우자료를 부산 녹산공단지역에 대해 EPA-SWMM 모형을 이용하여 강우유출수를 모의한 결과 대부분의 월별 강우유출수 및 월별 첨두일 유출고는 현재보다 미래로 갈수록 증가했다. 또한, 현재 대비 미래 연평균 강우유출수가 미래로 갈수록 증가 추세를 보였으며, 미래 유출량 증가에 따라 홍수위험도와 비점오염부하량이 증가하는 것으로 나타났다.

김선호 등(2019)은 국내 7개 다목적댐 유역(청주, 소양강, 안동, 밀양, 대청, 보령, 주암댐)에 대해 GloSea5의 과거재현 및 미래전망 자료와 4개 유출모형(TANK, ABCD, K-DRUM, PRMS)을 사용하여 장기 기상전망자료에 따른 댐유입량 전망의 정확성을 분석하였다.

정의상과 조홍래(2019)는 금천·은산천 유역을 대상으로 RCP 4.5&8.5 및 STREAM을 사용하여 미래 농업유역의 하천유량 변화(2010년~2100년)를 정량적으로 분석하였다. 분석결과, 2041년~2100년 기간이 상대적으로 전반적인 연평균기온과 연강수량이 증가하는 것으로 나타났으며, 연평균기온은 RCP 8.5기반 기온전망이 1.2℃ 더 높게 나타났다. 또한 RCP 4.5&8.5기반 미래 하천유출특성과 물수지를 전망한 결과, 증발산량은 기온상승과 함께 지속적인 증가 추세를 가졌고, 특히 논의 증발산량이 RCP 4.5&8,5에서 각각 7.1%, 13.2% 증가하는 것으로 나타나 대상유역의 환경특성이

반영됨을 확인하였다. 또한, 미래 관개량이 지속적으로 증가 추세를 나타내, 증발산량 증가가 관개용수 수요량 증가에 큰 영향을 미치는 것을 확인하였다.

지하수 관련 연구를 살펴보면, 이지완 등(2018)은 금강유역 내 충적 지하수 5개 지점(장수장수(JSJS), 옥천청성(OCCS), 보은마로(BEMR), 천안수신(CASS), 부여부여(BYBY))을 대상으로 RCP 4.5&8.5 기반 미래 지하수위 변화를 전망하였다. 전망 결과, 과거기간(1975년~20055년) 대비 2080년대 RCP 4.5기반 총유출량과 지하수함양량은 각각 14.6%, 10.2% 증가하는 것으로 전망되었다. 대청댐 상류유역은 전반적으로 지하수함양량이 감소하는 것으로 나타났으며, 지하수위는 봄과 여름철 감소하였고 가을철은 강수량 증가에 따라 상승하였다. 연평균 지하수위 변동은 RCP 4.5&8.5에서 각각 -9.0~8.0 cm, -13.0~4.0 cm 범위로 전망되었다(그림 2.10).

미래 유출량 전망에 따라 발생하는 불확실성 정량화 연구들을 살펴보면, Nkomozepi와 정상옥(2014)은 5대강 유역에 대해 RCP 2.6&4.5&8.5기반 12개 GCMs와 4개 유출모형(AWBM, SAC-SMA, SIMHYD, SMARG)을 이용하여 미래 유출량을 전망하였다. 전망 결과, 기준년도(1999년~2009년)에 대하여 RCP 2.6&4.5&8.5에서 유출량은 각각 10~24%, 7~30%, 11~30% 증가할 것으로 전망되었으나 전체 유출량 변동계수의 범위가 0.01~0.34으로 나타나 유출모형에 따라 유출량 전망의 불확실성이 상이하였다.

2.3.4 환경인자

기후변화로 인해 미래에는 고온현상 및 강수량이 증가할 것으로 예상된다. 또한, 도시화와 산업발달이 급속하게 진행됨에 따라 불투수층의 면적이 늘어나 비점오염원(non-point pollutants source)으로 인한 하천 수질 오염이 증가할 것으로 예측된다(환경부, 2006). 「한국 기후변화 평가보고서 2014」에서도 수질변화에 대해 연구들이 진행되었으나 다소 미흡하였다. 다만 최근 기후변화에 의한 수문분야 연구에서 환경인자 영향에 대한 연구들이 상당수 수행되고 있으며, 특히 수온이나 수질인자 관련 연구들이 많이 이루어지고 있다.

2.3.4.1 수온 및 성층화

수온인자 관련 연구들을 살펴보면, 윤성완 등(2014)은 주암호를 대상으로 2011년~2100년까지 SRES A1B 시나리오기반 전망자료를 모의하였다. 분석결과, 모든 기상인자에서 증가 추세가 나타났으며, 이에 따라 주암댐 유입량도 증가 추세를 보였다. 또한 기온 상승 전망에 따라 주암호 표층 및 심층 수온은 증가하며, 성층형성 시기가 빨라지며 동시에 그 지속기간은 증가할 것으로 전망되었다. 이혜숙 등(2016)은 용담댐 유역(금본지점)을 대상으로 RCP(2.6&4.5&6.0&8.5)기반 전망자료를 입력자료로 HSPF모형을 사용하여 관측기간(1973년~2014년)과 기준기간(2003년~2010년) 대비 미래 유량과 수온을 전망하였다. 전망 결과, 수온변화는 평균 0.7~1.0℃ 증가하며, 겨울철과 봄철에 증, 여름철에는 다소 감소했다.

윤여정 등(2019)은 RCP 4.5기반 소양호 미래 수온을 전망하였다(2005~2070년). 전망 결과, 대기기온은 0.0279℃/year, 소양호 상층과 하층수온은 각각 0.0191℃/year, 0.008℃/year의 증가율을 나타냈으며, 대기기온 상승률에 비해 상층수온은 68%, 하층수온은 29% 수준으로 나타났다. 계절별 연평균 상층과 하층의 수온 차는 여름이 가장 크게 나타났으며, 겨울철이 가장 작게 나타났다.

2.3.4.2 수질

기온변화에 따라 수온 및 수문환경 변화를 전망하는 연구들이 주로 수행되었고, 지역·계절별로 상이하나 전반적으로 오염배출 부하가 증가하는 것으로 전망되었다. 최근 연구들을 살펴보면, 안소라 등(2014)은 충주댐을 대상으로 SRES A1B 시나리오기반 전망자료를 SWAT과 CE-QUAL-W2모델을 적용하여 저수지로 유입되는 하천유량, 탁수발생량, 저수지내 탁수변화, 부영양화 등 저수지 수환경 변화를 전망하였다. 전망 결과, 미래 기온상승에 따라 상층수온은 증가, 심층수온은 감소하는 것으로 나타났으며, 부유물질 최고유입농도는 평수년과 비교 시 풍수년에 17% 증가, 갈수년에 0.2% 증가했다. 호소 내 부유물질 10 mg/L 이상 점유일수(점유율)는 평수년과 비교시, 풍수년에

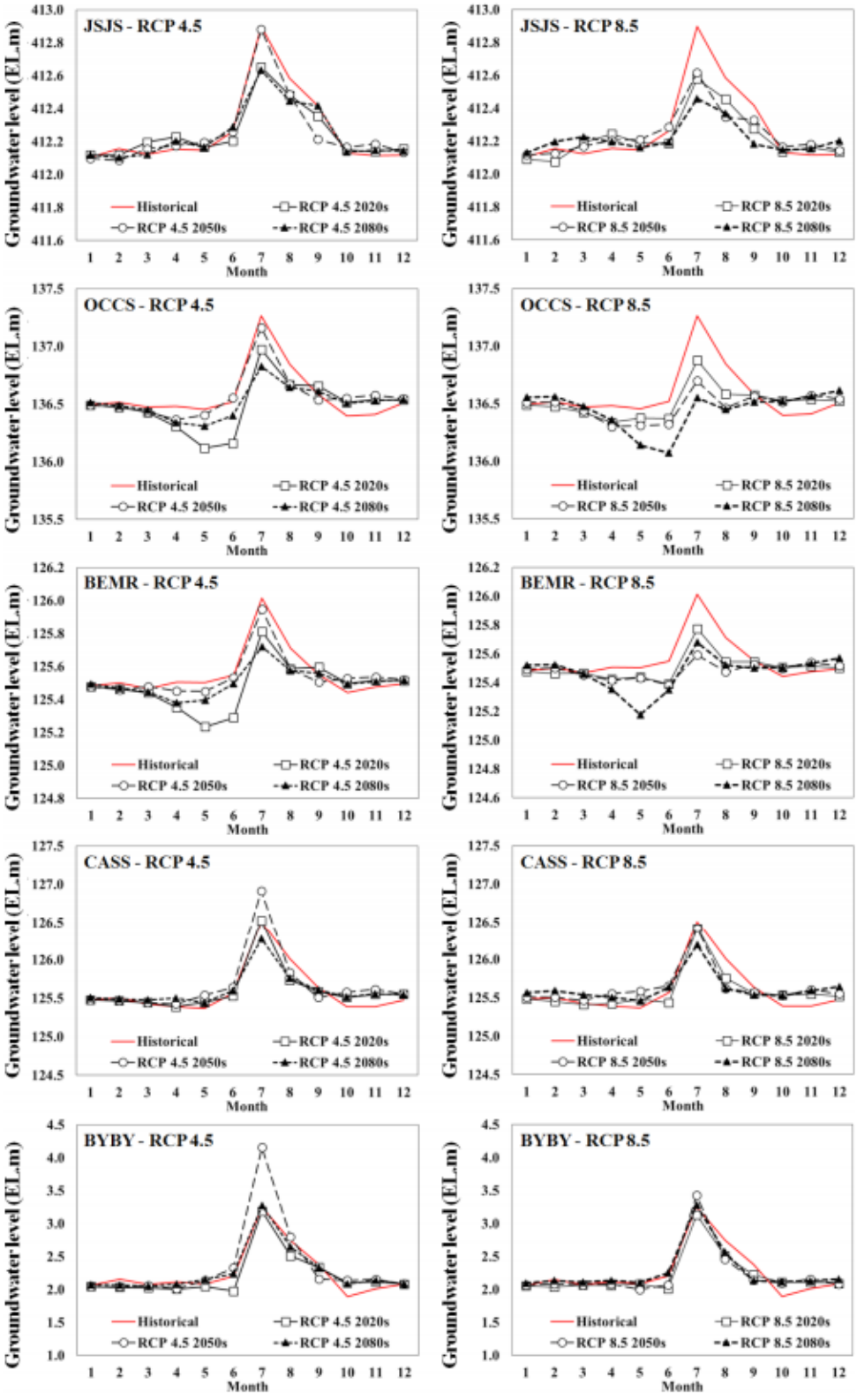


그림 2.10 기후변화 시나리오에 따른 미래 지하수위 변화(이지완 등, 2018).

6일(24%), 갈수년에 17일(26%)로 전망되었으며, 부영양화(Chl-a) 최고농도는 평수년과 비교하여 풍수년에 19%, 갈수년에 3% 증가하여 조류의 영향이 커지는 것으로 나타났다.

박윤경 등(2015)은 병성천을 대상으로 미래 하천유량과 수질전망을 위해 3개 SRES 시나리오, 4개 GCMs, TANK 유출모형을 이용하였다. 적용결과, 전반적으로 미래 하천유량과 수질은 증가하나, 변동성은 2011년~2040년에 현재와 비슷하거나 약간 감소하며, 2041년~2070년에는 현재에 비해 감소, 2071년~2100년에는 현재에 비해 증가하는 것으로 나타났다. 김덕환 등(2015)은 홍천강 유역을 대상으로 RCP 8.5 시나리오 및 다중회귀분석모형, 인공신경망모형, SLURP모형을 사용하여 미래 수질인자들(용존산소량(DO), 생물학적 산소요구량(BOD), 화학적 산소요구량(COD), 총질소(T-N), 총인(T-P))을 전망하였다. 전망 결과, 과거기간(2001년~2010년) 대비 DO는 봄·여름·가을철에 0~10% 상승하였으며, 이에 따라 다른 수질인자들도 악화될 것으로 전망되었다. 특히, 2080년대 여름철에 BOD·COD·SS는 각각 16%, 13%, 15% 증가할 것으로 전망되었다.

이석호 등(2015)은 영산강 유역을 대상으로 RCP 8.5 기반으로 WGEM(상세화기법)과 HSPF모형을 사용하여 미래 하천수질을 전망하였다. 전망 결과, 미래 유출량은 현재(1980년~2010년) 대비 2030년대에 31%, 2050년대에 67%, 2080년대에 54% 증가하는 것으로 전망되었으며, 비점오염부하는 현재 대비 각각 177%, 252%, 216% 증가, T-N은 22%, 76%, 54% 증가, T-P가 30%, 70%, 50% 증가하는 것으로 나타났다. 특히 기후변화에 따른 기온 및 강우량 증가가 유출량 및 BOD 증가에 큰 영향을 미치는 것으로 분석되었다. 정은성 등(2016)은 청미천 유역을 대상으로 RCP 4.5&8.5기반 전망자료를 SWAT와 SWAT-CUP에 입력하여 T-N과 T-P의 월 변동성을 분석하였다. 분석결과, T-N, T-P와 같은 영양물질은 유량의 영향을 많이 받으므로 유량증가에 따라 농도가 강해지는 것으로 나타났다. RCP 8.5에서 2050년대 여름철에 T-N과 T-P 부하량이 2080년대보다 많은 것으로 전망되었다.

2.3.5 결론

기존 기후변화 수자원 영향전망 연구들은 IPCC SRES 시나리오를 기반으로 전망하였으나, 최근 연구들은 시나리오 교체에 따라 IPCC RCP를 기반으로 대부분 수행되었으며, 비정상성을 고려한 방법을 적용한 연구들이 증가하였다. 한반도 강수전망 경향을 살펴보면, 미래 전망기간이 길어질수록 여름철 강수가 겨울철보다 더 뚜렷하게 증가하고 겨울철 적설량은 감소하는 경향으로 전망되었으며, 확률강우량, 극한강수발생비율, PMP도 전반적으로 증가했다. 연평균기온은 평균 2℃ 이상(RCP 4.5 기반)에서 평균최대 5℃ 이상(RCP 8.5 기반) 상승할 것으로 전망되며, 전지구 평균상승보다 다소 높을 것으로 전망되었다. 잠재증발산량은 배출시나리오별로 편차가 다소 있으나 여름철보다 겨울철에 더 증가하는 것으로 전망되었다.

홍수의 경우, 전반적으로 미래 확률강우량의 증가와 토지이용변화에 따른 유출특성 변화에 의해 유량은 물론 홍수발생빈도와 홍수량이 점차 증가할 것으로 전망되었다. 연구결과마다 배출시나리오와 지역적으로 다소 차이는 있으나, 미래 유량변화와 확률홍수량 비율은 최소 10~14.2%에서 최대 20~33.3%까지 증가할 것으로 모의되었다. 미래 가뭄발생 전망의 경우, 온실가스가 작게 발생하는 배출시나리오(RCP 2.6와 RCP 4.5)에서는 가뭄발생빈도가 증가하나 온실가스가 많이 발생하는 배출시나리오(RCP 6.0과 RCP 8.5)에서는 강수발생의 증가로 가뭄발생빈도가 감소하는 것으로 전망되었다. 지역적으로는 중부지방은 유량의 증가로 가뭄이 완화되며, 남부지방은 유량의 감소로 인해 가뭄이 점차 심화될 것으로 나타났다. 수질전망의 경우에는 강수발생, 기온상승정도, 수온상승정도에 따라 달라지는 것으로 전망되었으나, 아직 관련 연구가 미비한 것으로 나타났다.

2.4 취약성의 주요 원인

취약성이란 유역 단위에서 발생하는 자연재해에 대한 잠재적인 피해량 또는 대응할 수 있는 능력으로 정의되며

(IPCC, 2007), 수자원 분야 기후변화 영향전망 연구에서는 취약성 분석까지 수행되고 있다. 이와 관련된 연구들을 살펴보면, 원광재 등(2014)은 수자원 취약성 평가지수인 World Bank의 VRI(Vulnerability Resilience Indicator)와 ESI(Environmental Sustainability Index) 기반 TOPSIS 기법을 적용하여 전 세계 152개국의 수자원 취약성 순위를 추정하였다. 추정결과, 우리나라는 중위권에 범위에 속하였으며, 아시아의 경우에는 취약성 개선을 위해 사회적 요소 보완이 필요한 것으로 나타났고 우리나라는 환경적 요소의 개선이 시급한 것으로 나타났다.

이에 따라 우리나라의 기후변화에 따른 취약성 관련 연구는 환경적 요소와 밀접한 인자들을 중점으로 수행되었으며, 수자원 분야의 주요 인자별 취약성 평가와 전망 연구들 내용은 다음과 같다.

2.4.1 홍수

「한국 기후변화 평가보고서 2014」의 홍수관련 취약성 연구는 여러 취약성 지표, 관점, 기준에 따른 연구 및 경제성 분석까지 다소 산발적인 연구가 진행되었다.

2.4.1.1 취약성 평가

최근 홍수 취약성 평가관련 연구들은 지역적 특성분석과 재해특성 분석 연구 분야에 초점을 맞추어 수행되었다. 이의훈 등(2015)은 서울특별시 25개 구를 대상으로 재해연보 자료(1985~2013년) 및 도시계획 현황 등의 자료를 기반으로 홍수에 따른 취약성을 평가했다. 곽창재 등(2015)은 임진강 유역의 기상학적 요소 및 인문, 사회학적 요소의 통계자료를 사용하여 홍수피해 위험도를 분석하였다. 분석결과, 임진강 유역은 10년 빈도 이상의 돌발홍수 피해가 높으며, 인구가 밀집한 문산천 유역과 임진강 하류부 유역 등에서 취약한 것으로 나타났다.

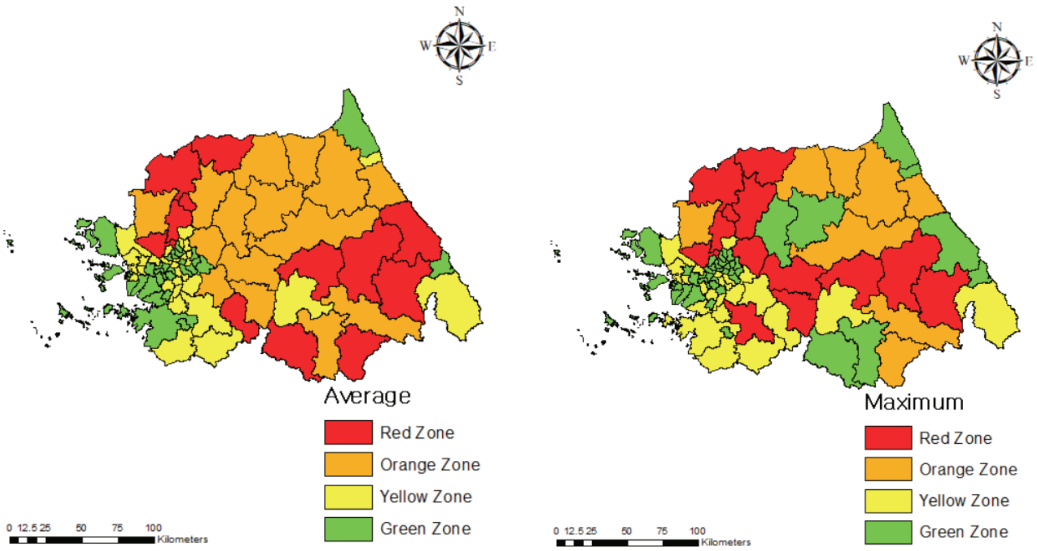
주홍준 등(2018)은 충청도 일대를 대상으로 기존 다양한 홍수 취약성지표(FRI, PFD, FDRRI, FVA, FDI, RSA)를 요인분석 및 주성분 분석을 통해 결합하고 결합지표를 검증하였다. 검증결과, 결합지표의 정확성이 0.42~0.98로 기존 지표보다 우수한 것으로 나타났다.

김동현 등(2018)은 호우피해의 지역적 특성별 피해 유형과 지역적 특성 모두를 고려한 호우피해 특성을 분석하였다. 한강권역의 86개 시군구에 대해 지역적 특성을 반영한 6가지 분류체계(해안-인구밀도 고지역, 해안-인구밀도 저지역, 산간-인구밀도 고지역, 산간-인구밀도 저지역, 내륙-인구밀도 고지역, 내륙-인구밀도 저지역)에 대하여 호우피해 발생빈도(Weibull 및 Gringorten 확률도시공식 적용)를 산정하였다. 또한 시군구별 발생빈도 및 피해액을 표준화하여 4가지 유형(Red, Orange, Yellow, Green Zone)으로 분류했다. 분류결과, 해안-인구밀도 고지역과 해안-인구밀도 저지역은 Yellow Zone(고빈도-소피해 지역)과 Green Zone(저빈도-소피해 지역), 산간-인구밀도 저지역은 Red Zone(고빈도-대피해 지역)과 Orange Zone(저빈도-대피해 지역), 내륙-인구밀도 고지역은 주로 Yellow Zone과 Green Zone, 내륙-인구밀도 저지역은 주로 Red Zone과 Yellow Zone으로 분류되었다(그림 2.11).

2.4.1.2 취약성 전망

김문모와 김억기(2014)는 남양주시를 대상으로 SRES기반 기후변화와 토지이용변화를 SLEUTH과 SWMM 모형에 입력하여 미래 도시지역 침수분석을 수행하였다. 수행결과, 전반적으로 재현기간이 짧을수록 강우량 증가율이 커졌고, 상대적으로 감소율도 커졌다. 남양주시 주변은 시나리오별 지속기간 360분까지 침수가 발생했으며, 지속기간이 짧은 강우사상은 침수총량의 증가율이 크게 나타났다. 토지이용변화까지 반영한 수행결과를 살펴보면, 침수면적은 토지이용변화를 고려하는 경우 침수특성치의 증가율이 상대적으로 증가하는 것으로 나타났다. 이현승 등(2016)은 남강댐을 대상으로 기후변화에 따른 댐안정성을 평가하였다. RCP 4.5&8.5기반 홍수량 전망 결과를 현재 남강댐 설계홍수량(10,400 m^3/s)과 비교한 결과,

미래 홍수량이 남강댐지역의 설계홍수량을 빈번하게 초과하는 것으로 나타났으며, 이에 따라 홍수위험성 증대 및 하류지역인 사천만의 피해 가능성이 높은 것으로 전망되었다.



(a) (b)

그림 2.11 (a) Zoning using Average Heavy Rain Damage (b) Zoning using Maximum Heavy Rain Damage(김동현 등, 2018).

2.4.2 가뭄

「한국 기후변화 평가보고서 2014」에서 가뭄 취약성 분석은 주로 정량적 분석보다 가뭄발생에 대한 경향성 분석에 따른 취약성 경향을 분석하는 방향으로 진행되었다. 또한 가뭄 취약성을 평가하는 지표들이 연구별로 제시되었다.

2.4.2.1 취약성 평가

기존 가뭄 취약성 평가는 대부분 계층화 분석방법 AHP (Analytic Hierarchy Process) 또는 델파이 기법과 같이 설문조사 또는 단순평균을 통해 수행되었으며 최근 확률, 통계적인 기법을 적용하여 각 평가인자의 영향력을 고려하는 연구가 진행되고 있다. 하지만 연구수행 자체가 미흡한 편인 상태이며, 관련 연구들을 살펴보면, 유지수 등(2016)은 이변량 가뭄빈도곡선을 이용하여 2014년~2015년 발생한 가뭄을 해석하였으며, 조건부 결합확률밀도함수의 지속기간에 따른 심도의 비초과확률을 이용하여 가뭄의 임계심도를 산정했다. 이변량 빈도해석 결과, 재현기간은 가뭄발생확률과 직접적인 연관을 가졌으며, 남부지역이 중부와 북부지역보다 더 가뭄에 취약한 것으로 평가되었다. 김지은 등(2019)은 충청도 지역을 대상으로 주성분 분석 및 엔트로피 기법(15개 인자)을 이용하여 더 객관적인 사회·경제적 가뭄 취약성 지수를 산정하고 평가했다. 엔트로피기반 가중치를 반영한 경우, 농가인구수가 가장 큰 가중치를 가져, 충청북도 청주시, 충청남도 당진, 서산시가 가뭄에 대해 가장 취약한 것으로 나타났다.

소재민 등(2015)은 남한을 대상으로 기상·수문정보를 결합한 Copula 함수기반 이변량 결합가뭄지수 BJDI(Bivariate Joint Drought Index)를 이용하여 과거 가뭄사상에 대한 피해를 추정하고 평가하였다. 1968년~2012년 59개 ASOS 강수자료와 토양수분자료 등을 이용하여 BJDI를 산정하였으며, BJDI가 과거 가뭄사상을 적절하게 재현하는 것으로 검증되었다. 한반도를 586개 격자로 구분하여 각 격자에 대해 과거 가뭄사상의 지속기간, 누적심도, 평균심도, 피해면적, 지속기간 및 평균심도, 피해액의 회귀식을 산정한 결과, 결정계수 및 수정결정계수는 각각 0.983, 0.977이며, 추정 피해액은 실제 피해액과 -519~+346억 원 정도로 상이하게 나타났다.

2.4.2.2 취약성 전망

전환돈과 김수전(2014)은 금강유역의 3개 보(금남보, 금강보, 부여보)를 대상으로 SRES A2, A1B, B1 시나리오 전망자료를 수문모형(SWAT 및 CNRM, UKMO, IPSL)에 입력하여 기후변화에 따른 미래 수문순환특성의 변화를 분석하였다. 분석결과, 강수량 증가, 융설량 감소, 증발산량 증가, 토양수분량 감소, 유출량 증가의 경향이 전반적으로 나타났다. 또한, 미래에는 연유출량에 대한 불확실성이 증가함에 따라 장기간적으로 최대값 또는 중간값의 증가 비율보다는 최소값의 감소비율이 더욱 큰 것으로 나타나, 가뭄측면에서 미래 기후변화에 더욱 취약할 수 있음을 확인하였다.

김남성 등(2015)은 한반도를 대상으로 4개 GCMs(CM3, MK3, ECHOG, HADCM) 기반 2011년~2099년까지 SPI3(단기가뭄)과 SPI6(중기가뭄)를 이용하여 극한가뭄 발생에 따른 수문학적 위험도 및 가뭄의 지역적 영향을 평가하였다. 평가결과, 한반도 대부분(한강 일부 유역제외)에서 가뭄 위험도가 높았으며, 극한가뭄 발생 시 유역별 가용수자원의 부족으로 가뭄에 취약한 모습을 보였고 특히 해안가 주변이 가장 가뭄에 취약한 것으로 나타났다. 단기가뭄인 SPI3에서 2030년대에 중부·남부지역에서 가뭄 위험도가 큰 것으로 나타났으며, 2050년대에는 낙동강 유역을 중심으로 큰 가뭄 위험도가 나타났다. 2080년대에는 한반도 전역에서 가뭄에 취약한 양상을 나타냈으며, 장기가뭄인 SPI6에서도 유사한 경향이 나타났다.

유지수 등(2018)은 결합가뭄관리지수 JDMI(Joint Drought Management Index)를 개발하여 2016년~2099년까지의 낙동강 유역 33개 중권역을 대상으로 용수공급 실패사상을 평가하였다. 평가결과, 낙동강 유역에서는 RCP 4.5기반 전망자료를 이용한 경우에 더 높은 가뭄 위험도가 나타났다. 용수공급 취약지역으로는 남강댐이 공통적으로 선별되었으며, RCP 8.5기반 전망자료 사용 시에는 형산강과 낙동강 남해 유역이 추가로 선정되었다.

2.4.3 물 공급

「한국 기후변화 평가보고서 2014」에는 물이용과 관련한 취약성 연구가 국내에 활발하지 않았기 때문에 이를 따로 분류하여 분석하지 않았다. 최근 이와 관련한 국내 연구들이 활발해지고 있어 본 보고서에서는 주요 부분을 고려하여 작성하였다.

2.4.3.1 취약성 평가

원광재 등(2015)은 국내 12개 수계를 대상으로 18개 지표를 반영한 SWAT 및 TOPSIS 기법을 이용하여 물이용 취약성을 물이용의 수요·손실·공급 측면으로 구분하여 평가하였다. 평가결과, 형산강의 물이용이 가장 취약한 것으로 평가되었다. 박혜선 등(2016)은 한강유역을 대상으로 주관적 및 객관적 가중치 적용 방법에 따른 물이용 취약성을 평가하였다. 16개 물이용 취약성 지표와 TOPSIS 기법을 사용하여 유역별로 취약성을 평가하였다. 평가결과, 전반적으로 북한강유역이 가장 취약한 것으로 나타났다.

2.4.3.2 취약성 전망

박혜선 등(2017)은 RCP 8.5기반 SSPs 시나리오(지속가능성, 중도, 분열)를 반영한 TOPSIS 기법을 이용하여 한반도 중권역별 취약성 순위를 도출하였다. 단기 미래(2020년대)와 중기 미래(2050년대)의 중권역별 물이용 취약성 평가결과, RCP기반과 RCP + SSP 시나리오기반 평가결과는 공간적 유사성이 나타났으나 SSP 시나리오 종류에 따라 일부 유역에서 차이가 나타났다. 추가적으로 중기 미래로 갈수록 취약성 완화 지역이 증가하는 것으로 나타났다.

이대웅 등(2017)은 미래 안성천 유역을 대상으로 안전한 용수공급을 위해 용수 이용량을 추정하고 물 부족 사태의 대안을 제시하기 위해 기상관측소(수원, 이천, 천안)의 일단위 기상자료 및 RCP 8.5기반 전망자료를 SLURP 모형의 입력자료로 이용하여 미래 하천 유입량을 전망하였다. 특히 미래 용수이용량 모의를 위해 수정한 통합 수자원 평가계획 모형

K-WEAP(Korea Water Evaluation And Planning System) 모형을 사용하였다. 전망 결과, 2030년대에는 약 6억8천6백만 톤, 2050년대에는 38억 8천6백만 톤, 2080년대에는 91억6천3백만 톤의 물이 부족한 것으로 전망되었다. 이를 극복하기 위해 평화의 댐, 소양강 댐 등의 공급처를 확보하거나, 균형있는 제안급수(생,공 용수 20% 감축)가 효과적인 대안으로 제시되었다. 최시중 등(2018)은 낙동강 유역 33개 중권역에 대해 19가지 대표 시나리오를 분석하고 K-WEAPSccia(Korea-Water Evaluation And Planning System-Climate Change Impact Assessment) 모형을 사용하여 2017년~2099년까지 용수공급시설물의 공급신뢰도 및 물 수급 네트워크에 대한 취약성을 평가하였다. 평가결과, 전반적으로 용수공급시설물 공급신뢰도는 대체적으로 낮아질 것으로 전망되었으며, 농업용수가 가장 기후변화에 영향을 많이 받으며, 하천유지유량은 물부족이 심화될 것으로 전망되었다. 용수공급시설물을 최적 연계 운영하는 경우, 미래에 최소 4.15 백만 m3/year, 최대 484.93 백만 m3/year 용수공급능력 증대가 가능하여 물부족이 완화될 것으로 나타났다.

국내 농업용 저수지 댐 시설물에 대한 취약성 평가 연구를 살펴보면, 저수지의 70%가 1945년 이전에 준공된 노후 시설로 기후변화로 인한 재해위험에 매우 취약할 것으로 판단된다. 관련 연구들을 살펴보면, 최지혁과 문영일(2018)은 6개 저수지(고삼저수지, 금광저수지, 금강유역 동부저수지, 미호저수지, 청천저수지, 영산강유역 광주저수지)를 대상으로 RCP 4.5기반 전망 결과를 이용하여 미래 2070년 PMP 발생시 저수지 홍수추적을 수행하고 평가하였다. 평가결과, 고삼저수지, 금광저수지, 미호저수지, 청천저수지가 설계홍수위 이상의 수위발생 시 여유고 부족으로 인해 수문학적 안정성이 낮은 것으로 전망되었다. 김원진 등(2018)은 보령댐을 대상으로 RCP 4.5&8.5기반 전망 결과를 SWAT 모형의 입력자료로 사용하여 유량을 모의하고 최종적으로 SPI를 산정하여 미래 물부족을 평가했다. 가뭄심도가 가장 크게 전망되는 RCP 8.5기반 BCC-CSM1-1-M을 이용한 평가결과, 기준기간(2007년~2016년) 대비 강수량이 2040년대에 30.5%로 크게 감소하였으며, 저수량은 지속적으로 감소하는 추세를 보여 23.6%까지 감소하는 것으로 전망되었다.

2.4.4 지하수

「한국 기후변화 평가보고서 2014」에서 국내 지하수 연구는 지하수의 거동, 함양량, 수질, 지표수·지하수 연계모형에 치중하였으며, 취약성에 대한 내용은 그 수가 미비하였다.

2.4.4.1 취약성 평가

미래 전지구적 강우사상의 변화추세는 이미 진행되고 있으나 기존 지표수 위주의 취수형태로는 빠르게 증가하는 미래 물 수요량에 대해 대응하기에는 한계점이 존재하며, 실제 대응방법으로 지속가능한 물 이용에 대한 연구들이 진행되고 있다. 대체 수단으로 지하수자원 활용방안이 관심을 받으며 지하수 이용량이 최근들어 꾸준히 증가하고 있으며, 국가지하수관측망 지하수관측연보(건설교통부, 2015) 지하수위 관측자료에 따르면 5대강 권역(한강, 낙동강, 금강, 섬진강, 영산강)의 지하수위 하강 관측소 비율은 평균 약 56.8%이며, 철저한 연구와 관리가 이루어지지 않을 경우 지하수의 취약성은 커질 수밖에 없다. 관련 연구들을 살펴보면, 양정석 등(2017)은 낙동강 유역을 대상으로 지하수위에 영향을 줄 수 있는 자연, 인문, 사회 등 다양한 분야의 10개 인자를 기반으로 가중치를 산정하고 TOPSIS 기법을 적용하였다. 그 결과, 연평균 지하수위 지표는 0.157, 연도별 지하수함양량 지표는 0.152, 연평균 강우량 지표는 0.154로 나타났다. 지하수위관리 취약성 평가결과에서는 상주가 낙동강 유역 21개 시, 군 단위 행정구역 중 가장 취약한 것으로 나타났다.

기존 지하수 취약성 평가는 GIS 등을 이용한 공간적으로 접근하는 연구들이 많이 수행되었으나, 최근 지하수 취약성 평가에 있어서 시간에 따른 취약성 평가연구가 점차 이루어지고 있다. 관련 연구들을 살펴보면, 이재범 등(2018)은 우리나라 남부지역(미계측 유역 중심)을 대상으로 체계적인 지하수자원 관리를 위한 관리기관 선정을 위해 다기준 의사결정방법 기반의 주단위 취약시기 평가방법을 개발하였다. 지하수위와 강수량 관측자료를 이용한 평가결과, 각 관측소 일대의 취약시기는 임실·덕치 28~29주차, 남원·도통 34~35주차, 순창 28~29주차로 산정(월단위: 7월~9월)

되었으며, 이 시기는 강수량이 많아 지표수는 풍족하나 지하수위의 상승폭이 낮아지는 시기에 해당하는 것으로 나타났다. 김일환 등(2018)은 낙동강 유역에 대해 객관적 가중치 산정방법을 통해 관리 취약성 평가 및 월 단위 지하수자원 관리 취약성 평가를 통해 지하수자원 관리 취약기간 평가기법을 제시했다. 평가결과, 상주시가 8월에 가장 취약하였으며, 안동시는 취약한 시점(1년 중 8개월)이 가장 많이 나타났다. 이재범 등(2019)은 기존 개발한 주 단위 지하수자원 취약시기 평가방법을 개선하여 시간적 개발지하수자원의 취약성 평가 정확성을 높이고자 하였다. 평가과정에서 지하수위 및 침투 가능량을 고려한 강우와 하천의 수위 변동특성을 함께 고려하여, 지역적·계절적으로 지하수 취약성을 효율적으로 관리할 수 방안을 제시하였다.

2.4.5 강설

「한국 기후변화 평가보고서 2014」에서는 강설에 대한 국내 연구가 미비하여 다루지 않았으나, 최근 강설 및 폭설 전망 및 취약성 전망 연구가 증가하여 본 보고서에서는 이에 대해 다루었다.

2.4.5.1 취약성 평가

최근 10년(1995년~2004년) 우리나라에 발생한 자연재해의 대부분은 홍수(83%)이나 2000년대 초반 이후 꾸준히 증가 추세이며(NEMA, 2012), 대설로 인한 피해가 홍수에 이어 두 번째로 높아 관련 연구들도 증가하고 있다. 관련 연구들을 살펴보면, 권순호 등(2016)은 재해연보를 이용하여 1994년부터 2013년 총 20년간의 대설에 따른 피해 현황 및 사례를 분석한 뒤, 지역별 방재취약성 및 보완대책을 제시했다. 분석결과, 대설로 인한 피해는 지역별 편차가 매우 크며 주로 비닐하우스와 농작물과 같은 사유시설물에 재산피해가 가장 크게 발생했다. 따라서 시설물 설치 시, 지역별로 표준규격 및 설계강도를 정립하여 관리가 필요하며, 노후 및 피로 시설에 대한 보강 및 지원이 필요하다. 추가적으로, 작물 수확 후 방치되는 비닐하우스에서 상대적으로 큰 피해가 발생하였으므로, 비경작시기의 비닐하우스에 대한 관리가 필요한 것으로 나타났다. 또한, 권순호 등(2016)은 대설로 인한 피해액 예측 모델을 개발하고자 강원지역의 18개 시, 군, 구별 지역을 구분하여 재해연보(1994년~2013년)를 이용해 다중회귀분석(독립변수: 최심적설량, 인구, 면적, GRDP 등)을 수행하였다. 수행결과, R2는 0.112로 모형 설명력이 11.2%로 매우 작으나 사회 경제적 독립변수가 반영되었음을 고려하면 의미있는 결과라 판단하였다. 오영록과 정건희(2018)는 PSR(Pressure State Response) 구성체계와 엔트로피 가중치 기법을 통해 대설피해의 취약성을 분석하였으며, 재해연보(1994년~2016년)의 피해이력과 비교하여 적용성을 검토하였다. 기존 과거 피해 이력이 많은 전라도와 충청도이 대체로 취약지역으로 선정되었으나, 기존 이력이 없는 지역이 취약지역으로 선정되는 경우도 발생하였다. 이는 기존 눈이 많이 내리지 않는 지역일지라도 대설 피해에 취약하여 예측하지 못한 폭설 발생 시 매우 취약할 수 있음을 뜻하는 것으로서 해당 지역에 대한 설해예방 및 저감대책 수립이 필요할 것으로 제시되었다.

2.4.5.2 취약성 전망

폭설은 많은 인명 및 재산피해를 수반하며, 최근 기후변화에 따라 점차 그 빈도와 강도가 증가하고 있어 심각한 경제적, 사회적 피해가 야기된다. 안소라 등(2015)은 RCP 4.5 &8.5기반 미래 강설량 예측 및 폭설 취약지역 분석을 위해 전국 92개 기상관측소의 1984년~2013년의 적설심 관측자료, 시설물별 적설 설계기준(전국지역별 원예특작물시설 설계기준 적설심, 축사 설계기준 적설하중, 건축물 설계기준 적설하중) 자료를 분석하였다. 1971년~2010년의 자료 분석결과, 2000년대로 갈수록 20 cm 이상 적설이 발생한 지역이 전국적으로 확대되었으며, 50 cm 이상 적설이 발생된 지역은 강원도, 속초, 강릉에서 정선, 평창, 삼척가지로 확대되었다. RCP기반 미래 연평균 적설량 전망 결과를 살펴보면, 과거기간(1984년~2013년)의 최대 적설심(122 cm)보다 RCP 4.5(8.5)에서 2020년대에 186.1 cm(254.5 cm), 2050년대에 172.5 cm(161.6 cm), 2080년대에 172.5 cm(194.8 cm)으로

폭설발생이 증가하는 것으로 전망되었다. 미래 폭설 취약지역 분석결과, 기존 폭설에 취약한 지역의 시설물은 미래로 갈수록 2배 가량 더 취약한 것으로 나타났다.

이상혁과 강정은(2019)은 RCP 4.5&8.5기반 전망 결과를 이용하여 현재(2014년) 및 미래 폭설 리스크를 교통시설과 건축물 피해 측면에서 평가하여 현재 및 미래 위험지역에 대하여 분석하였다. 분석결과, 현재 폭설 위험도는 강원도, 충남, 전라도 해안 지역에서 높은 것으로 나타났으며, 미래에는 한반도 남부지역과 내륙지역에서 폭설 위험도가 높아지는 지역이 증가하였다. RCP 4.5에서는 2050년대에 폭설 위험도가 가장 높았으며, RCP 8.5에서는 2080년대로 갈수록 한반도 남부지역과 내륙지역의 폭설 위험도가 증가하는 것으로 전망되었다. 이러한 원인을 살펴보면, 기존 남부지역과 내륙지역의 폭설 빈도가 적어 피해에 대한 대응력이 부족하므로 피해규모가 급격히 높아진 것으로 분석되었다.

2.4.6 결론

취약성 전망 및 분석 부문은 연구비율이 기존보다 증가하여 활발한 연구가 이루어지는 분야다. 홍수 취약성 분석 및 전망에서는 호우발생의 증가로 인한 유역별 홍수피해에 따른 (예상)피해 분석뿐만 아니라 소하천·산지의 돌발홍수에 의한 지역 취약성과 도심홍수에 의한 침수 취약성 등 연구범위가 넓어졌다. 홍수 취약성 분석의 여러 연구에서 경기북부·강원도 지역이 상대적으로 홍수에 취약한 지역으로 분류되었으며, 전망에서는 미래 확률강우량의 증가로 인해 홍수량이 증가하고 침수지역 또한 넓어지는 것으로 나타났다.

가뭄 취약성 분석 및 전망 연구는기존과 유사하게 연구목적에 따라 다양한 방법으로 진행되었다. 가뭄발생빈도, 가뭄발생강도에 따른 취약성을 확률통계기법을 이용하여 분석하거나, 가뭄 관련 인자를 이용한 가뭄 취약성 지표값으로 취약성을 평가하는 방법이 주로 수행되었다. 가뭄 취약성 전망에서 공통적인 결과는 미래 전망기간이 길어지고 겨울철일수록 가뭄빈도와 규모가 증가하여 가뭄피해가 증가할 것으로 전망되었으며, 지역적 취약성은 연구마다 다소 차이가 있었다. 가뭄 취약성 지표에서는 기존 지표의 개선보다 새로운 지표개발이나 지표간 결합 등에 대한 연구가 집중되었다. 본 보고서에서는 댐 기반의 물공급 측면을 분리하여 살펴본 결과, 현재 10년빈도 이하 가뭄에 대해서는 물공급이 안정적이나 향후 미래에는 남부지방을 중심으로 점차 물부족이 심화될 것으로 전망되었다.

추가적으로 지하수에 대한 취약성 연구는 기존 보고서에서 연구진행이 매우 미비한 분야였으며, 현재도 그 연구비율이 높지 않아 매우 관심이 필요한 분야라 할 수 있다. 특히, 지속가능한 물공급 측면에서 지하수활용방안의 중요성이 증가하고 있으나 미래 지하수위의 하강이 증가할 것으로 전망되고 있으므로 공간적·시간적으로 체계적 관리가 가능한 연구들이 시급히 수행되어 지하수 취약성 평가와 관리방안이 제시되어야 할 것으로 판단된다.

2.5 적응 옵션

「한국 기후변화 평가보고서 2014」에서는 적응관련된 연구를 간략히 살펴보는 정도로 수행되었다. 그러나 최근 수자원 기후변화 연구는 전망에서 취약성분석이나및 적응전략으로 넘어가는 시기로, 보다 세분화된 분석이 필요하여 본 보고서에는 인자·방법별로 분류하여 분석하였다.

'기후변화 적응'이란 기후변화의 영향으로 발생하는 손실을 최소화하고 오히려 이를 기회로 삼기 위해 행해지는 자연과 인간의 조정(adjustment) 행위 모두를 포함한다(IPCC, 2001). 기존 국내 기후변화 연구의 대부분은 미래 전망이나 취약성(vulnerability) 평가에 편중되어 있으며, 적응계획/전략(adaptation plan/strategy)에 관한 연구들이 주요 인자별로 추가적으로 수행될 필요가 있다. 본 보고서에서는 적응전략에 많이 활용되는 의사결정 분야와 주요 수문인자인 홍수와 가뭄인자를 중점으로 최근 수행된 연구들을 살펴보았다.

2.5.1 의사결정

기후변화에 대한 수자원 적응 계획을 수립하기 위해 많은 의사결정(decision making)이 따른다. 그러나 기후변화는 '비정상성(non-stationarity)'과 불확실성(deep

uncertainty)의 특성을 가지므로 합리적인 의사결정을 내리는 것이 매우 어렵다(Lempert et al., 2003). 일반적인 의사결정에서는 가장 발생할 가능성이 높은 시나리오에 대해 손해를 최소로(또는 이득을 최대로) 하는 방안을 최적(optimal) 대안으로 선정한다. 그러나 기후변화에서의 의사결정은 미래를 전망하는 특성상 불확실성이 매우 크므로 미래 발생가능성이 있는 다양한 시나리오들을 대상으로 전반적으로 합리적인 결과를 이끌어낼 수 있는 로버스트(robust)한 대안을 찾아야 한다. Lempert and Collins(2007)는 로버스트란 최적(optimal)대안 대신 예상치 못한 상황에 대해 민감하지 않으며, 다양한 미래 상황에 대해 합리적인 수행결과를 나타낼 수 있는 것으로 정의하였다.

강동헌 등(2017)은 영산강 유역종합치수계획(건설교통부, 2005)을 위한 의사결정 과정에 로버스트 의사결정 RDM (Robust Decision Making; Lempert et al., 2003) 기법을 적용하여, 기존 계획에서 도출한 최적대안이 불확실성 큰 상황 속에서도 여전히 최적대안인지를 검토하였다. RDM 적용을 위해 XLRM 프레임워크를 통해 의사결정 문제를 구체화하고 HEC-HMS 및 HEC-ResSim 모형을 이용하여 영산강 유역에 대하여 3가지 불확실성 요소를 포함한 RCP 4.5&8,5기반의 216개 홍수 시나리오를 생성하고 분석하였다. 분석결과, 홍수방어를 위한 대안들의 수행능력은 홍수의 공간분포에 가장 영향을 많이 받는 것으로 나타났으며, 건설교통부(2005)에서 제시한 대안들 중 다양한 크기 및 형태의 홍수에 대해 가장 안정적인 대안을 선정하였다.

안정적인 물공급을 위해 효율적인 저수지 운영규칙을 결정하기 위한 다양한 운영최적화 연구들이 수행되었으나 대부분 정상성을 기반으로 수행되었다. 하지만 최근 기후변화로 인해 주요 수문인자들의 비정상성이 확인되어 이를 고려한 적응전략 연구가 필요한 상황이다(김영오, 정은성, 2017). 비정상성을 고려한 적응전략 연구들을 살펴보면, 윤해나 등(2018)은 로버스트 최적화(RO)와 추계학적 동적계획법(SDP)을 결합한 Robust-SDP 모형을 개발하고 보령댐의 이수기 운영규칙 산출을 위해 적용하였다. 이를 위해 6개 평가지표를 선정하고 27개 GCMs 및 GR4J 모형을 이용하여 400개 유입량 시나리오를 생성하고 분석하였다. 분석결과, Robust-SDP가 미래(2016년~2045년) 기후비정상성 하에서 과거기간(1975년~2005년) 대비 극단적인 물부족의 발생율과 물부족 대응의 실패를 감소시켰으나 작은 양의 물부족 발생율은 증가하는 것으로 나타났다.

2.5.2 홍수

「한국 기후변화 평가보고서 2014」에서는 홍수 관련 적응연구가 매우 간략히 다루어졌으며, 최근 적응 관련 연구가 증가함에 따라 본 보고서에는 이를 더 자세히 분석하고자 하였다.

자연재해에 따른 세계 경제 손실규모는 2016년 기준 약 2천 100억 달러로 추산됐으며(World Economic Forum, 2018), 우리나라는 각종 자연재난으로 인해 최근 10년(2008~2017년)간 연평균 약 3천5백억의 피해액과 약 7천3백억 원의 복구비가 투입되고 있다(국립재난정보센터, 2017). 그중, 홍수재해로 인한 피해가 매우 크기 때문에 적응전략 분야에서 이를 최소화하거나 발생한 피해를 복구하는데 필요한 방법·비용 등에 대한 연구가 수행되고 있다.

미래 홍수발생에 대한 적응전략 연구로 조덕준(2014)은 부산지역을 대상으로 도시홍수예보시스템에 F-N(Flood Nomograph)을 도입할 것을 제안하고 그 적용성을 평가했다. 2009년 7월 호우사상에 대해 F-N과 SWMM 모형을 이용하여 침수발생시간을 추출하였으며, 확률강우량을 사용하여 침수시점을 예측한 결과 F-N 결과가 SWMM보다 약 5~10분 정도 침수시간을 빠르게 예측하는 것으로 나타나 침수예측에 있어서 F-N의 적용성이 우수함을 제시하였다. 윤상후 등(2015)은 2009년~2012년까지 수도권의 돌발홍수 인명피해 사고 자료 38건과 TOPLATS 모형을 통해 수문기상정보를 생성하고 우리나라 지형적 특성이 반영된 돌발홍수 위험성을 정량적으로 평가할 수 있는 지수를 제안하였다. 적용결과 제안된 돌발홍수 평가지수는 단기강우량, 지표유출량, 토양수분상태 등에 민감하여 호우특보 상황이 반영될 수 없는 단기간의 돌발홍수에 대해서도 위험성을 잘 제시할 수 있었다. 강민석 등(2016)은 연안도시의 홍수취약성을 평가하고 의사결정에 필요한 홍수취약성 평가관리시스템의 기초단계 프레임을 GIS를

활용하여 구축하였다.

이병재 등(2018)은 기존 홍수 취약성분석 보고서(국토해양부, 2012)에 대해 동일한 기준으로 홍수 취약성, 변화추이 및 대응방안을 분석하였다. 분석결과, 2012년 보고서와 유사하게 경기, 강원, 충청지역에서 취약성이 증가할 것으로 분석되었으나 취약성 발생의 주요 요인은 다른 것으로 나타났다. 김종성 등(2017)은 주성분분석 및 다중회귀모형(독립변수: 재해기간별 총강우량, 재해일수, 선행강우량(1~5일), 지속시간별 최대강우량(1~24시간))을 기반으로 한 호우피해 예측함수를 개발하여 경기도 지역에 대해 평가를 시행하였다. 1994년~2011년 재해통계 자료를 이용하여 예측함수를 구축한 후 2012년~2015년 자료로 모형 예측력을 검증한 결과, NRMSE가 12%~18%로 호우피해를 적절하게 예측가능한 것으로 나타났다. 또한 김종성 등(2017)은 경기도 지역의 호우피해를 양상에 따라 4가지 등급으로 나누고, 다중회귀모형, 주성분회귀모형, 인공신경망 기반의 호우피해 예측함수(독립변수: 수문기상자료, 종속변수: 재해통계자료)를 개발하였다. 2005년~2011년 자료로 모형을 구축하고 2012년~2015년 자료를 이용하여 모형 예측력을 평가한 결과, NRMSE가 평균 약 19~22%로 나타났으며, 인공신경망이 가장 높은 호우피해 예측력을 보여 재해관리 차원에서 피해를 최소화할 수 있을 것으로 판단되었다.

이후상과 이재준(2018)은 한강 본류의 서울시 구간을 대상으로 RCP 8.5기반 전망자료를 SEEP/W와 HEC-RAS 모형 및 제방홍수취약성지수 LFVI(Levee Flood Vulnerability Index)를 사용하여 기후변화에 따른 제방 침투안전성 및 취약성(2016년, 2025년, 2055년)을 분석하였다. 분석결과, 한강 좌안(우안)의 한강상류 홍수심(16~19 m)의 제방 안전율은 불안정(불안정), 중류 홍수심(12~15 m)은 12 m 수심에서만 안정(모두 안정), 하류 홍수심(15~21 m)은 모두 불안정(모두 불안정)한 것으로 나타났다. 또한 한강 좌안의 경우, 중류와 하류 제방취약성 등급이 높으며, 한강 우안은 중류 제방취약성 등급이 높게 나타났다.

김묘정과 김광섭(2018)은 기후변화에 따른 미래 홍수피해액을 예측하고자 RCP 4.5&8.5기반 25개 GCMs를 이용하여 국내 113개 중권역에 대해 다중선형회귀모형을 적용하여 홍수피해 관련지표인 홍수 피해액을 분석하였다. 분석결과, 홍수피해의 주된 요인인 연강수량, 극치 강우량 등 강우관련 요소들이 전반적으로 증가하는 것으로 나타났으며, 특히 산정된 피해액은 강원도 동해안 유역 및 남강댐 유역에서 높게 예측되는 경향을 보였다. 또한, 이후상과 이재준(2018)은 LFVI의 구성인자 중 기후변화에 따라 수위가 상승하여 변화가 발생하는 인자(여유고, 활동 안전율, 침윤선 길이 비)에 대하여 민감도 분석을 실시하였다. 분석결과, 수위상승에 따라 홍수심을 낮추거나, 여유고를 증대시키는 방안(제방고 증대), 침윤선 길이 비를 단축시키는 방안(제체 확폭) 등이 대안으로 제시되었다.

이종석과 최현일(2018)은 홍수취약성 평가를 위해 IPCC(2001)의 기후변화 취약성 평가이론 중 평가지표 구성에 따른 홍수취약성 평가결과의 영향을 연구하였다. 적응능력지표(AI)는 정책·제도 등의 변수들에서만 산정되므로 정량화가 어렵고 불확실성이 클 수 있기 때문에 홍수취약성 분석에서 일반적으로 평가지표 EI, SI, AI의 영향을 고르게 반영하는 것이 바람직한 것으로 제시되었다. 이에 따라 모든 평가지표에 동일한 가중치를 부여한 홍수취약성 지수 FVI(3)를 활용하는 것이 합리적인 홍수취약성 평가결과를 제공하는 것으로 평가되었다.

최종원 등(2018)은 여수시 연등천과 여수시청 지역을 대상으로 XP-SWMM을 이용하여 해수위 상승고를 고려한 내수침수를 모의하였다. 이를 기반으로 홍수 예경보 기준표를 제안및 모의한 결과, 연등천 지역이 여수시청보다 낮은 해수위 상승고에도 높은 홍수 예경보 발령기준이 필요하며, 해수위 상승의 영향을 더 많이 받는 것으로 나타났다. 따라서 동일 지역이라도 지형적 특성에 따라 홍수 예경보 발령기준이 해수위 상승 또는 강우조건의 영향이 상이함으로 지역을 세분화하여 경보 기준을 개별로 구축할 필요가 있음을 보였다.

박인찬 등(2018)은 연안도시지역의 침수피해를 예측하고 대비하고자 실시간 AWS 강우자료 및 MAPLE 자료를 이용하여 Web-GIS 기반 연안재해예측관리시스템을 개발하여 실시간 조위정보를 연계하고 침수피해를 예측하고자 하였다. 침수상황은 “주의”, “경계”, “심각” 3 단계로 표출하였으며, 이를 통해 실시간 수문기상 상황 및 시나리오에 따라 연안도시 지역의 침수피해에 대해 효과적으로 대응할 수 있음을 제시하였다.

인구가 밀집된 도시지역 중 지형적, 지리적 여건, 우수배제능력 부족 등으로 내수침수 위험도가 높은 지역은 국지성 호우에 매우 취약하다. 임동화 등(2017)은 장항읍을 대상으로 XP-SWMM 모형을 이용하여 침수해석을 실시하였으며, 홍수방어 대책 수립을 위해 다기준 의사결정기법(Multi-Criteria Decision Making)을 적용하여 여러 대안을 비교 및 평가하고 최적의 홍수방어대안을 제시하였다. 구조적 침수방지대책(관로 개량, 우수저류지 설치, 우수펌프장 설치)을 선정하여, 각 대안 설치 시 침수모의를 진행했다. 모의결과, 장항1지구는 우수펌프장 설치, 장항2지구 및 3지구는 우수저류지 설치가 가장 최적의 대안으로 나타났다.

2.5.3 가뭄

「한국 기후변화 평가보고서 2014」에서는 가뭄 관련 적응연구가 거의 다루어지지 않았지만, 근래에 들어 비구조적 대책에 대한 가뭄 적응연구들이 증가하고 있는 추세이다.

최근 국내에 장기간 지속되는 가뭄으로 인한 피해가 증가하고 있으며, 가뭄발생 주기가 짧아짐에 따라 국내 연구가 증가함에 따라 기후변화의 영향으로 용수공급이 더 어려워질 것으로 전망되고 있다(Lee et al., 2019; Chang et al., 2007). 따라서 안정적으로 용수공급을 확보하고, 가뭄으로부터 피해를 예방하고자 구조적(수공구조물 건설)·비구조적(저수지 운영 등)으로 다양한 용수공급 대책에 대한 연구들이 수행되고 정책으로 운용되고 있다. 최근 가뭄관련 적응전략 연구들은 비구조적 대책에 대한 연구들이 증가하고 있는 추세이다.

관련 연구들을 살펴보면, 진영규 등(2016)은 앙상블 하천유량 예측 및 이산화 용수 감량공급 기법을 합천댐 운영에 적용하였다. 검증기간(2006년~2010년) 동안 저수지 운영기법을 적용한 결과, 최대 물 부족량 및 가뭄 기간 동안 전체 물 부족량이 과거 대비 감소하여 최소 물공급량이 2.5배 증가하였으며, 최대 물공급 부족량은 26% 감소하는 것으로 나타났다. 채희찬 등(2018)은 용수공급 예비율 개념(안정적으로 용수를 공급하기 위해, 다목적댐 내 비상용량을 예비량으로 사용하는 방법)을 도입하고 낙동강유역 6개 다목적댐을 대상으로 RCP 4.5기반 9개 GCMs와 RCP 8.5기반 10개 GCMs 전망자료를 HEC-ResSim 모형의 입력자료로 하여 저수지 운영을 일단위로 모의하였다(2011년~2100년). 특히 모의를 위해 비상용량과 용수공급 조정기준에 따른 3가지 case를 설정하였으며, 모의결과에 따라 적정 예비율을 산정하였다.

이지완 등(2018)은 저수지 3,067개에 대한 한국농어촌공사 저수율 관측자료(2002년~2016년)와 기상청 63개 관측소 자료를 사용하여 다중선형회귀분석을 통해 저수율 예측 월단위 회귀모형을 개발하였다. 개발된 회귀모형은 농업용 저수지 운영 패턴을 잘 반영하였으며, 전국적으로 0.64~0.67의 저수율 예측정확도를 나타냈다. 특히 극심한 가뭄의 2년(2015년~2016년) 평균 적중률은 0.64이며, 계절별 적중률은 겨울 0.70 여름이 0.58, 봄과 가을은 각각 0.59, 0.68을 나타냈다.

김기주 등(2019)은 보령댐을 대상으로 시스템 다이내믹스 개념이 반영된 비전공유모형을 구축하였다. 비전공유모형은 기존의 수자원 계획 수립 과정에 구조적인 시민참여 과정이 포함되며 이를 통합적으로 운영 가능한 모형이다. 비전공유모형의 구축에 있어서 이해당사자의 요청을 반영하여 모형을 수정하였으며, 과거 및 미래 용수수요량별 과거 평년 유입량, 과거 가뭄 유입량 및 GCM 유입량의 세 가지 유입량 시나리오에 대해 모의하였다. 모의 결과, 빈도, 지속기간, 크기로 나누어 보령댐과 지자체의 평가지표를 제시하였다. GCM 유입량 시나리오(2015년~2044년)에서 보령댐과 지자체에서의 가뭄이 발생하였고, 이를 통해 미래에도 보령댐이 가뭄에 취약한 것을 확인하였다. 가뭄 대응을 위한 대책의 효과적인 선택을 위해 반응함수(Response Function)의 형태로 두 가지 대안을 비교하였으며, 그 결과 도수로 최대 용량을 증가시키는 방안보다는 지자체별로 계획되어 있는 자체수원 확보율을 충족시키는 대안이 더 효과적임을 제시하였다.

김진욱 등(2018)은 기후변화에 따른 극치기상에서도 농업용수를 안정적으로 공급하고자 형태학적 특성이 같은 전국 1,559개의 저수지에 대해 30개로 군집화한 후, 다중선형회귀모형을 개발하였다. 이를 통해 저수율 데이터 생산 및 기상예보자료(GloSea5) 적용을 통해 회귀식의 미래저수율전망 활용 가능성을 평가하였다. 평가결과,

저수율 회귀모형의 R2=0.76, NSE=0.73, MSE=8.33%로서 적용에 적합한 것으로 나타났다. 저수지 가뭄지수 RDI에 따른 ROC(Receiver Operating Characteristics) 분석 적중률은 각각 관측값을 이용한 회귀식과 GloSea5를 이용한 회귀식에서 각각 0.80, 0.73을 나타냈다.

박해경과 이동근(2019)은 랜덤 포레스트 알고리즘 및 시스템 다이내믹스를 이용하여 경기도 남부지역의 농업적 가뭄 진행양상을 예측하였으며, 이를 기반으로 가뭄대응정책 효과를 평가하였다. 가뭄 전망 시 강수량의 예측이 아닌 토양수분 손실 측면에서 접근하였으며 위성영상 Ladsat8과 수치고도자료(DEM, Digital Elevation Model)를 사용하였다. 분석결과, 기계학습을 통해 예측된 3개월 동안의 가뭄 이후 토양수분지도는 농업적 가뭄의 공간분포 패턴을 R2=0.58 정도로 예측하였으며, 이를 바탕으로 수도가격 인상정책을 모의하였다. 하지만 일시적으로 수도요금을 조절해 물을 확보하는 이 정책은 가뭄완화에 큰 실효성이 없는 것으로 나타났다. 김선호 등(2019)은 국내 7개 다목적댐(청주, 소양강, 안동, 밀양, 대청, 보령, 주암댐)의 상류 유역을 대상으로 장기 기상전망자료가 댐 유입량 전망 정확도에 미치는 영향을 분석하였다. 4개의 강우-유출 모델(TANK, ABCD, K-DRUM, PRMS)을 사용하였으며, GloSea5의 장기 기상전망 자료 중 강수량, 최고기온, 최저기온, 평균 기온, Hagreaves 식을 통해 산정한 잠재증발산량을 사용하였다. 댐유입량 전망 결과, 강우-유출 모델별 댐 유입량 모의 정확도 차이는 크지 않았다. 댐 유입량 전망에서 발생하는 상대오차의 70~80%는 장기 기상전망의 오차에서 발생하는 것으로 나타났으며, 강우-유출 모델로부터 발생하는 오차는 작았다. 기온의 경우, 댐 유입량 전망 정확도에 대한 영향력이 거의 없었으며, 강수량이 기온에 비해 큰 영향력을 보였고 특히 홍수기에 그 영향력이 크게 나타났다.

2.6 결론

기존 대비 본 보고서(2014년~2018년)의 국내 수자원 분야 국내 기후변화 연구는 미래 전망 및 영향평가에서 적응 전략수립·취약성 평가·경제성 평가 등으로 연구방향이 변화되는 과정이라고 총평할 수 있다. 1차와 2차 평가보고서(~2014년)에 비해 전망 연구 비율이 감소하였고(80% 이상에서 약 40%), 취약성 평가·불확실성 평가·적응대책 수립 등 관련 연구들의 비율이 크게 증가하였다(3%에서 20% 이상). 또한 취약성 평가·불확실성 평가·적응대책 수립 등과 연계성이 높은 가뭄전망 및 대응, 지하수활용(대체수자원)·최적화기법·불확실성 정량화 등의 연구들이 활발해지고 있는 것이 전반적인 연구경향이다.

2.6.1 연구결과의 신뢰도 평가

한반도의 기온이 지속적으로 상승하는 추세로 나타났으며(견고한 동의), 강수량뿐만 아니라 가능최대강수량, 확률강수량, 설계강수량, 극치강수량 등도 전반적으로 증가하는 것으로 나타났다(견고한 동의). 강수 전망과 유사하게 미래 유출량 또한 전반적으로 증가하며(중간적 동의), 특히 여름철 유출량 위주로 증가할 것으로 나타났으나(중간적 동의), 전망 모델 및 배출시나리오 선정과정에 따라 지역별·기간별 결과의 불확실성도 증가하고 있다(견고한 동의). 증발산은 강수·유출과 유사하게 증가 추세를 보였으며, 강설은 지역별, 시나리오별 차이가 있지만 확률 최심신적설량은 감소하며(중간적 동의), 확률신적설일수 및 폭설가능성은 전망이 상이했다.

극한호우사상의 발달과 돌발호우 등의 증가로 홍수 취약성이 증가하며, 특히 한강 및 금강권역의 미래 홍수발생 빈도 및 크기가 증가할 것으로 전망되었다(중간적 동의). 그러나 다양한 모형과 기법의 적용으로 전망결과의 차이가 발생하였으며, 전망기간이 길어질수록 결과의 불확실성이 증가했다(견고한 동의). 미래 가뭄은 전반적으로 발생빈도 또는 규모가 심화될 것으로 나타났으며(중간적 동의), 전망기간이 길어질수록 가뭄발생빈도와 규모가 증가하여 가뭄피해가 증가하며(중간적 동의), 특히 한강권역 및 남부지역에서 피해가 증가할 것으로 분석되었다(중간적 동의). 그러나 전망 과정에서 발생하는 불확실성이 큰 것으로 나타났다(견고한 동의). 마지막으로, 하천 수질오염에 대한 연구가 일부 지역에서 진행되었으며 대체로 수질오염이 증가할 것으로 분석되었다(제한적 동의).

2.6.2 연구경향 및 시사점

과거 관측자료를 다루는 연구는 크게 장기간 자료를 이용하여 관측자료의 시공간적 변동성(경향성)을 보고자 하는 목적과 미래 전망에 따른 변화율을 비교하기 위한 목적으로 구분된다. 본 보고서의 관측된 영향에서는 관측자료의 경향성을 연구한 내용을 주로 분석했다. 관측강수 관련 연구는 1·2차 평가보고서보다 연구의 비율이 다소 감소하였으며, 연구내용으로는 전국이나 특정유역 대상의 장기간 강수자료를 통계처리한 추세·경향성 분석이 주로 수행되었다. 이를 기반으로 과거 극한강우, 강수발생일수, 확률강우량, PMP 등도 함께 분석되었고, 시간적 분석보다는 공간적 변동성 분석에 더 초점을 맞추었다. 증발산량 관측자료 분석에서도 시공간적 변동성을 위해 원격탐사 자료를 활발하게 이용하는 연구들의 비중이 높아졌다.

과거 가뭄분석 연구들을 살펴보면, 1·2차 평가보고서에서는 기존 특정분야의 가뭄지수를 개선하거나 개발하고 검증하는 과정이 대부분이었으나, 최근에는 정확한 정량적 가뭄 모니터링 및 전망을 위해 여러 수문학적·기상학적 가뭄지수들을 결합하거나, 우리나라 실정에 적합한 새로운 가뭄지수를 개발 및 검증하는 연구가 많이 수행되었다. 위 과정으로 개발된 다양한 가뭄지수들을 적용한 가뭄전망 연구도 많이 이루어졌다. 1·2차 평가보고서의 과거 관측 홍수관련 연구들은 홍수모형 개발·수행·검증의 비중이 높았으나 최근 연구들은 확률통계기법을 통해 확률강우량과 설계홍수량의 증가 정도, 홍수발생규모와 빈도에 따른 피해규모 분석에 초점을 맞춘 연구가 주로 수행되었다.

미래 수자원 전망 연구들을 살펴보면, 1·2차 평가보고서와 달리 본 평가보고서에서는 큰 두 가지 특징을 나타내고 있다. 첫 번째로 IPCC 배출시나리오가 SRES에서 RCP로 바뀌면서 수자원 분야 모든 인자들의 전망 결과에 큰 영향을 미치고 있다. 두 번째로 연구 패러다임의 변화로 취약성 평가·불확실성 평가·적응대책 수립 등과 연계성이 높은 가뭄전망 및 대응, 지하수활용·최적화기법·불확실성 정량화 등의 연구들이 활발해지고 있는 것이 전반적인 연구경향이다. 분야별로 보면, 1·2차 평가보고서와 달리 영향전망에 대한 연구비중이 전반적으로 낮아졌으며, 수자원 인자에서는 가뭄과 홍수인자에 대한 연구비중은 상대적으로 높으나 그 이외에 수질·수온 등의 환경인자에 대한 연구비중이 증가하고 있었다. 또한 미래 수자원 전망에 이어서 비정상성을 가정한 연구들도 다수 수행되었다. 가뭄전망 및 영향평가 연구의 비중이 높아졌으며, 기존 특정 가뭄지수와 가뭄종류만을 분석하였으나 최근 다양한 가뭄지수 적용에 따른 가뭄종류 분석, 두 개 이상의 가뭄지수 결합, 새로운 가뭄지수 개발 등 다양한 부문의 연구들이 진행되었다. 이러한 추세는 최근 우리나라가 가뭄에 의해 큰 피해가 발생하여 연구주제로 활발히 진행된 측면도 있을 것으로 사료된다. 더 나아가 홍수에 편중되어 있던 연구들이 다양한 연구분야로 확산되는 것에 큰 의미가 있다.

아울러 불확실성에 대한 연구가 중요한 분야로 다루어지고 있다. 최근 수자원 전망에 따라 발생하는 불확실성을 정량화하기 위한 다양한 방법들이 개발되고 있다. 연구과정에서 사용하는 다양한 목적·대상·모형·방법에 따라 상이한 결과가 도출되고 이는 미래로 갈수록 더 큰 불확실성을 갖는다. 불확실성을 보다 정확하게 파악할 수 있다면 효율적인 적응전략·취약성 분석 과정이 수행될 수 있으므로, 불확실성 연구는 향후 지속적으로 연구가 진행되어야 한다.

취약성 전망 및 분석 분야는 1·2차 평가보고서 대비 연구비중이 크게 증가하여 매우 활발히 연구가 이루어지는 분야라 할 수 있다. 홍수 취약성 분석 및 전망에서는 호우발생의 증가로 인한 유역별 홍수피해에 따른 (예상)피해분석뿐만 아니라 소하천·산지의 돌발홍수에 의한 지역취약성과 도심홍수에 의한 침수 취약성 등 연구범위가 넓어졌다. 홍수 취약성 지표개발에서는 다양한 새로운 지표들의 개발이 시도되었으나 연구목적·적용지역·반영인자 등이 연구별로 다소 차이가 있어 그 결과를 공통적으로 평가하기에 한계가 있었다.가뭄 취약성 분석 및 전망에서는 기존 연구경향과 비슷하게 취약성을 평가하고자 연구목적에 따른 다양한 방법들이 적용되었다.지하수에 대한 취약성 연구는 기존 보고서에서도 연구진행이 매우 미비한 분야였지만, 현재에도 연구비율이 높지 않아 많은 관심이 필요한 분야다. 지하수는 지속가능한 물공급 측면에서 매우 중요한 수자원이다. 미래 지하수위가 하강할 것으로 전망되는 만큼,취약성 평가 및 체계적인관리방안 연구가 시급히 수행되어야 한다.

마지막으로, 의사결정 기법 등 적응대책 수립을 위한

다양한 연구들이 진행되었으나, 실제 정책수립에 반영되기 위해서는 보다 활발한 연구가 필요할 것으로 사료된다. 수자원 분야의 정책 수립을 위해 취약성 분석,취약성 평가, 의사결정, 적응대책 등 각 분야가 연계된 균형잡힌 연구가 진행되어야할 것이다.

2.7 참고문헌

가프리 아자르 모나, 배덕효, 2018: CMIP5 기반 건기 및 우기시 국내 하천유량의 변화전망 및 분석, *수자원학회논문집*, 51(S-1), 1091-1103.

강동헌, 김영오, 박준형, 2017: 로버스트 의사결정을 이용한 영산강유역 종합치수계획 재평가, *수자원학회논문집*, 50(2), 99-109.

강민석, 오국열, 김원현, 심우배, 2016: 연안도시 홍수 취약성 평가관리시스템 프레임 구축, *방재학회논문집*, 16(2), 197-204.

건설교통부, 2015: 지하수관측연보

곽용석, 조재필, 정임국, 김도우, 장상민, 2018: 유효가뭄지수(EDI)를 이용한 한반도 미래 가뭄 특성 전망, *한국기후변화학회지*, 9(1), 31-45.

곽창재, 최우정, 조재웅, 2015: 돌발홍수 지수를 이용한 북한 홍수 위험도 평가 -임진강 유역을 중심으로-, *수자원학회논문집*, 48(12), 1037-1049.

권민성, 박동혁, 전경수, 김태웅, 2016: 일 단위 강수량의 누적 패턴을 이용한 가뭄지수 개발 및 적용, *수자원학회논문집*, 49(1), 41-49.

권민성, 성장현, 김태웅, 안재현, 2018: 표준강수지수와 강수부족량을 이용한 이변량 가뭄빈도해석: 한강유역을 중심으로, *수자원학회논문집*, 51(10), 875-886.

권민성, 이규민, 전경수, 2015: RCP 기후변화 시나리오를 활용한 한반도 연최대 일강우 분석, *방재학회논문집*, 15(1), 99-110.

권순호, 김정환, 박희성, 정건희, 2016: 회귀분석을 이용한 대설에 따른 강원지역의 피해액 예측모델 개발, *방재학회논문집*, 16(2), 437-443.

권순호, 박희성, 정건희, 2016: 대설피해에 따른 방재취약성 분석 및 대응대책 방안, *방재학회논문집*, 16(2), 363-368.

권순호, 정건희, 2017: 대설피해액 추정을 위한 다중회귀모형의 적용성 평가, *대한토목학회논문집*, 37(1), 61-72.

김경민, 이정훈, 금종호, 박무종, 김상단, 2018: 다중 RCMs를 이용한 미래 IDF곡선의 불확실성, *방재학회논문집*, 18(6), 405-416.

김기주, 서승범, 김영오, 2019: 협의체 기반 가뭄 대응 대안 도출과 비전공유모형의 역할, *수자원학회논문집*, 52(6), 429-440.

김남성, 김종석, 장호원, 이주헌, 2015: 기후변화를 고려한 한반도 극한가뭄에 따른 수문학적 위험도분석, *방재학회논문집*, 15(4), 45-52.

김덕환, 홍승진, 김정욱, 한대건, 홍일표, 김형수, 2015: 기후변화에 따른 홍천강 유역의 수질 변화 분석, *한국습지학회지*, 17(4), 348-358.

김덕환, 홍승진, 한대건, 최창현, 김형수, 2016: 기후변화에 따른 한강유역의 기상학적 가뭄지수 분석, *한국습지학회지*, 18(4), 432-447.

김동현, 최창현, 김종성, 이준형, 배영혜, 김형수, 2018: 지역적 특성을 고려한 호우피해 분석, *방재학회논문집*, 18(4), 311-320.

김동현, 황세운, 장태일, 소현철, 2018: SWAT 모형을 이용한 기후변화에 따른 만경강 유역에서의 수문 및 수질 영향 평가, *한국농공학회논문집*, 60(6), 83-96.

김묘정, 김광섭, 2018: 26 GCM 결과를 이용한 미래 홍수피해액 예측, *수자원학회논문집*, 51(S-1), 1149-1159.

김문모, 김억기, 2014: SLEUTH 모델을 이용한 기후변화에 따른 도시지역 침수분석, *방재학회논문집*, 14(3), 277-290.

김상욱, 이영섭, 2015: 비정상성 확률분포 및 재현기간을 고려한 홍수빈도분석, *수자원학회논문집*, 48(7), 567-579.

김선호, 남우성, 배덕효, 2019: 장기 기상전망이 댐 저수지 유입량 전망에 미치는 영향 분석, *수자원학회논문집*, 52(7), 451-461.

김성훈, 신홍준, 김태림, 김한빈, 허준행, 2016: 확률강우량 산정 방법에 따른 한강유역의 설계홍수량 변화에 관한 연구, *방재학회논문집*, 16(1), 73-82.

김수현, 정은성, 2017: 기상학적 및 수문학적 가뭄지수를

이용한 청미천 유역의 첨두가뭄지수 분석, *수자원학회 논문집*, 50(1), 65-73.

김수현, 정은성, 2018: 기상학적 가뭄지수와 수문학적 가뭄지수를 이용한 첨두가뭄심도 발생시점 및 가뭄기간 분석, *수자원학회논문집*, 51(6), 471-479.

김양수, 성장현, 이준호, 2014: 최근 우리나라 홍수특성 분석, *한국수자원학회지(물과 미래)*, 47(5) 35-40.

김연수, 김수전, 강나래, 김태균, 김형수 2014: 신경망 기법을 이용한 기후변화에 따른 미래 확률적설량 산정, *방재학회논문집*, 14(1), 93-107.

김용원, 이지완, 김성준, 2018: SWAT과 STARDEX를 이용한 극한 기후변화 사상에 따른 금강유역의 수문 및 유황분석, *수자원학회논문집*, 51(10), 905-916.

김원진, 정충길, 김진욱, 김성준, 2018: SWAT을 이용한 기후변화에 따른 보령댐의 물부족 평가, *수자원학회 논문집*, 51(12), 1195-1205.

김일환, 이재범, 양정석, 2018: 엔트로피 방법을 이용한 낙동강 상류 지역의 지하수자원 관리 취약시기 평가 방법 개발, *수자원학회논문집*, 51(9), 761-768.

김정호, 2015, 방재학회논문집, 지역기후모형별 남한 상세 기후변화 시나리오 일 강수자료의 보정 전 후 전망특성, *방재학회논문집*, 15(4), 261-272.

김정호, 김상단, 박무종, 주진걸, 2016: 미래기후예측모형에 따른 가뭄전망 결과 비교, *방재학회논문집*, 16(2), 463-472.

김정호, 이정호, 박무종, 주진걸, 2016: 기후변화 시나리오와 지역기후모형이 가뭄심도-지속기간-재현기간 분석에 미치는 영향, *방재학회논문집*, 16(2), 351-361.

김종성, 최창현, 김동현, 이명진, 김형수, 2017: 인공신경망과 다중회귀모형을 이용한 호우피해 예측함수 개발, *방재학회논문집*, 17(6), 73-80.

김종성, 최창현, 이종소, 김형수, 2017: 호우 위험도 평가를 이용한 피해예측: (2) 호우피해예측함수 개발, *방재학회 논문집*, 17(2), 371-379.

김지은, 박지연, 이주헌, 김태웅, 2019: 주성분 분석 및 엔트로피 기법을 적용한 사회, 경제적 가뭄 취약성 평가, *수자원학회논문집*, 52(6), 441-449.

김진욱, 이지완, 김성준, 2019: 저수지 가뭄지수와 기후변화 시나리오를 이용한 우리나라 미래 농업가뭄 평가, *수자원학회논문집*, 52(6), 381-395.

김진욱, 정충길, 이지완, 김성준, 2018: 기상예보자료 기반의 농업용저수지 저수율 전망을 위한 나이브 베이즈 분류 및 다중선형 회귀모형 개발, *수자원학회논문집*, 51(10), 839-852.

김철겸, 박지훈, 조재필, 2018: GCM 및 상세화 기법 선정을 고려한 충주댐 유입량 기후변화 영향 평가, *한국기후 변화학회지*, 9(1), 47-58.

김철겸, 조재필, 김남원, 2018: 다중 GCM과 유역모델링을 이용한 기후변화에 따른 제주도의 수문학적 영향 평가, *수자원학회논문집*, 51(1), 11-18.

김호성, 황정윤, 안정환, 정창삼, 2018: 기후변화를 고려한 도시유역의 유출량 변화율 분석, *대한토목학회논문집*, 38(5), 645-654.

무하마드 누만 사타르, 김지은, 이주헌, 김태웅, 2019: 기후변화에 따른 한강 유역의 확률론적 가뭄 전이 분석, *대한토목학회논문집*, 39(1), 155-163.

문장원, 2018: 기후변화에 따른 우리나라 기준증발산량 변화 분석, *방재학회논문집*, 18(7), 71-81.

박명우, 심현준, 박윤경, 김상단, 2015: 기상청 1-km 해상도 RCP 시나리오에 따른 가뭄심도-지속기간-재현기간 분석, *방재학회논문집*, 15(3), 347-355.

박명우, 장수형, 김상단, 2015: 실시간가뭄지수를 이용한 2015년 한반도 가뭄 분석, *방재학회논문집*, 15(6), 451-458.

박인찬, 박상형, 김종광, 2018: 연안지역 실시간 침수피해예측 모듈을 탑재한 연안재해예측관리시스템 개발, *방재학회논문집*, 18(7), 183-188.

박해경, 이동근, 2019: 기계학습과 시스템 다이내믹스를 이용한 재난예측 및 대응정책효과 시뮬레이션: 경기도 단기가뭄을 사례로, *방재학회논문집*, 19(1), 45-53.

박혜선, 김정빈, 엄명진, 김연주, 2016: 주관적, 객관적 가중치를 활용한 TOPSIS 기반 단위유역별 물이용 취약성 평가, *수자원학회논문집*, 49(8), 685-692.

박혜선, 김혜진, 채여라, 김연주, 2017: 기후 및 사회, 경제 변화를 고려한 한강 유역의 물이용 취약성 평가, *대한토목학회논문집*, 37(6), 965-972.

박희성, 2014: 기후변화 시나리오와 신경망 모형을 이용한 미래 신적설일수와 최심신적설 빈도 분석, *방재학회*

논문집, 14(6), 365-377.

박희성, 정상만, 정건희, 2016: 상호작용이 고려된 다중 회귀분석을 이용한 미래 최심신적설 빈도 분석, *방재학회논문집*, 16(2), 369-376.

백종진, 박종민, 최민하, 2016: MODIS 위성자료를 이용한 Modified Satellite-Based Priestley-Taylor (MS-PT)의 적용 및 실제 증발산 평가, *수자원학회논문집*, 49(11), 903-912.

백종진, 정재환, 박종민, 최민하, 2019: 실제증발산 자료의 불확실성 파악에 관한 연구: flux tower, 인공위성 및 재분석자료, *수자원학회논문집*, 52(1), 11-19.

백종진, 정재환, 최민하, 2018: 인공위성과 재분석모델 자료의 다중 증발산 자료를 활용하여 최적 증발산 산정 연구, *수자원학회논문집*, 51(3), 273-280.

백희정, 안광득, 주상원, 김윤재, 2017: 강원 지역의 장기 겨울철 강수 및 강설 변화의 경향분석, *한국기후변화학회지*, 8(2), 109-123.

서찬양, 김경준, 최우정, 심재현, 최민하, 2014: 인공위성 가뭄지수를 활용한 한반도 가뭄 평가; 2013년 남부지방 가뭄을 대상으로, *방재학회논문집*, 14(3), 127-131.

성장현, 정은성, 2014: 임계수준 방법을 이용한 하천수 가뭄지수의 적용, *수자원학회논문집*, 47(5), 491-500.

소재민, 손경환, 배덕효, 2015: 가뭄특성인자를 활용한 가뭄피해추정 기법 개발 및 평가, *방재학회논문집*, 15(2), 93-101.

손경환, 배덕효, 안재현, 2014: 미래 기후, 수문 정보에 따른 국내 가뭄의 전망 및 분석, *수자원학회논문집*, 47(1), 71-82.

신용철, 최경숙, 정영훈, 양재의, 임경재, 2016: 원격탐사자료를 이용한 시,공간적으로 분포되어 있는 토양수분산정 및 가뭄평가: (2)가뭄, *한국물환경학회지*, 32(1), 70-79.

심규범, 이옥정, 김상단, 김응석, 2015: AR5 RCPs에 따른 우리나라 1일 가능최대강우량 산정, *방재학회논문집*, 15(4), 273-280.

심규범, 이옥정, 김상단, 김응석, 2017: 기상청 AR5 1-km 해상도 RCP 자료를 이용한 미래 가능최대강수량 분석, *방재학회논문집*, 17(4), 335-342.

심현준, 류정수, 안재현, 김정숙, 김상단, 2013: 자연용수공급 지역에서 가뭄상황판단을 위한 실시간가뭄지수, *방재학회논문집*, 13(5), 365-373.

안소라, 이준우, 김성준, 2015: RCP 기후변화 시나리오에 따른 미래 강설량 예측 및 폭설 취약지역 평가, *방재학회논문집*, 35(3), 545-556.

안소라, 하림, 윤성완, 김성준, 2014: CE-QUAL-W2를 이용한 충주호의 기후변화에 따른 탁수 및 부영양화 영향평가, *수자원학회논문집*, 47(2), 145-159.

안시권, 최원영, 신홍준, 허준행, 2016: 경험적 모드분해법을 이용한 기상인자와 우리나라 강수 및 기온의 상관관계 분석: 2상관관계 분석, *수자원학회논문집*, 49(3), 207-215.

양정석, 이재범, 김일환, 2017: 낙동강 유역 지하수위 관리 취약성 평가, *수자원학회논문집*, 50(12), 815-825.

오영록, 정건희, 2018: 대설 대응 능력 평가를 위한 대설 피해 취약성 분석, *방재학회논문집*, 18(2), 347-353.

오영록, 정건희, 2018a: 대설피해 취약 등급별 피해예측 회귀모형 개발, *방재학회논문집*, 18(2), 355-359.

우성호, 임소영, 권민호, 김동준, 2017: 2000년대 초반 우리나라 장마기간 강수량의 십년 변화 특성, *한국기상학회지*, 27(3), 345-358.

원광재, 성장현, 정은성, 2015: SWAT 모형과 TOPSIS 기법을 이용한 우리나라 물이용 취약성 평가, *수자원학회논문집*, 48(8), 647-657.

원광재, 정은성, 2016: 기상학적,농업학적,수문학적 가뭄지수를 이용한 청미천 유역의 가뭄 분석, *수자원학회논문집*, 49(6), 509-518.

원광재, 정은성, 김연주, 홍일표, 2014: 국가 별 수자원 취약성 지수의 산정, *수자원학회논문집*, 47(2), 183-194.

원광재, 정은성, 이보람, 성장현, 2016: SPEI와 RDI를 이용한 한강유역 가뭄의 특징 분석, *수자원학회논문집*, 49(3), 187-196.

유명수, 조영현, 김태웅, 채효석, 2018: 수문기상 정보를 이용한 가뭄 전이 분석: 기상학적 가뭄에서 농업적 가뭄, *수자원학회논문집*, 51(3), 195-205.

유지수, 유지영, 이주헌, 김태웅, 2016: 코플라 함수를 활용한 이변량 가뭄빈도해석을 통한 우리나라 가뭄 위험도 산정, *수자원학회논문집*, 49(3), 217-225.

유지수, 최시중, 권현한, 김태웅, 2018: 결합가뭄관리지수(JDMI)를 이용한 낙동강 유역의 미래 용수공급 위험도

분석, *수자원학회논문집*, 51(S-1), 1117-1126.

유지영, 유지수, 권현한, 김태웅, 2016: 가뭄해갈 가능성을 고려한 가뭄사상의 결정 및 확률 가뭄심도 산정, *수자원학회논문집*, 49(4), 275-282.

윤상후, 최수민, 이병주, 최영진, 2015: 통계적 돌발홍수지수 산정에 관한 연구, *방재학회논문집*, 15(6), 189-197.

윤선권, 2015: CMIP5 GCMs의 근 미래 한반도 극치강수 불확실성 전망 및 빈도분석, *수자원학회논문집*, 48(10), 817-830.

윤선권, 문영일, 2014: 한국의 주요도시지점 기준강수량 초과 강수의 최근 증가경향 분석, *대한토목학회논문집*, 34(1), 117-133.

윤선권, 조재필, 문영일, 2014: RCPs 시나리오 자료를 이용한 비매개변수적 갈수빈도 해석: 광동댐 유역을 중심으로, *대한토목학회논문집*, 34(4), 1125-1138.

윤성완, 박관영, 정세웅, 강부식, 2014: 기후변화가 주암호 수온성층구조에 미치는 영향 예측, *한국물환경학회지*, 30(5), 491-502.

윤여정, 박형석, 정세웅, 2019: 기후변화에 따른 소양호 수온 및 성층강도 변화 예측, *한국물환경학회지*, 35(3), 234-247.

윤해나, 서승범, 김영오, 2018: 기후변화의 비정상성 대비 댐 운영 개선을 위한 Robust-SDP의 개발, *수자원학회논문집*, 51(S-1), 1135-1148.

은코모제피 템바, 정상옥, 2014: 기후변화에 따른 우리나라 수문 기상학적 예측의 불확실성, *수자원학회논문집*, 47(3), 275-267.

이대웅, 정재원, 홍승진, 한대건, 주홍준, 김형수, 2017: 기후변화를 고려한 안성천 유역의 미래 물 부족량 평가, *한국습지학회지*, 19(3), 345-352.

이문환, 배덕효, 2016: 기후변화에 따른 저유량 전망 및 불확실성 분석, *한국기후변화학회지*, 7(4), 407-419.

이문환, 소재민, 배덕효, 2016: 기후변화에 따른 수자원 전망의 불확실성 평가기법 개발, *수자원학회논문집*, 49(8), 657-671.

이병재, 김학열, 김소윤, 2018: 기후변화 홍수에 대한 국토 취약성 변화 분석 연구, *방재학회논문집*, 18(6), 27-33.

이보람, 성장현, 정은성, 2015: 기상학적 가뭄지수와 수문학적 가뭄지수의 비교, *수자원학회논문집*, 48(1), 69-78.

이상혁, 강정은, 2019: 기후변화를 고려한 폭설 리스크 평가: 교통시설 및 건축물 피해를 중심으로, *방재학회논문집*, 19(2), 57-68.

이석호, 이병현, 김병식, 민선흥, 2015: BASINS-HSPF 기후변화가 하천수질에 미치는 영향평가, *위기관리이론과 실천*, 11(10), 257-272.

이영규, 이철주, 안승일, 2015: 신적설의 단위중량과 최대가능적설하중 추정, *방재학회논문집*, 15(1), 47-55.

이옥정, 김상단, 2016: RCP 8.5 기후변화 시나리오의 이슬점온도 변화에 따른 미래 PMPs의 전망, *방재학회논문집*, 16(2), 505-514.

이옥정, 심인경, 김상단, 2018: 기상변수를 이용한 일강우량 비정상성 빈도해석, *방재학회논문집*, 18(7), 639-647.

이옥정, 조덕준, 김상단, 2017: 기상청 기후변화 시나리오에 따른 충주댐 유역 미래 PMP 산정, *방재학회논문집*, 17(1), 365-373.

이용관, 김상호, 안소라, 최민하, 임광섭, 김성준, 2015: Terra MODIS 위성영상과 SEBAL 모형을 이용한 공간증발산량 산정 연구 - 용담댐 유역을 대상으로 -, *지리정보학회지*, 18(1), 90-104.

이용관, 정충길, 안소라, 김성준, 2016: SEBAL 모형과 MODIS 영상을 이용한 혼효림, 논 지역에서의 공간증발산량 산정 연구, *수자원학회논문집*, 49(3), 227-239.

이의훈, 최현석, 김중훈, 2015: 수방능력 및 재해위험을 고려한 침수위험도 결정, *수자원학회논문집*, 48(9), 757-768.

이재범, 김일환, 양정석, 2019: 한계침투량 개념과 수문자료 간 상관관계를 고려한 영산강 유역의 주 단위 지하수 자원 관리 취약 시기 평가 방법 개발, *수자원학회논문집*, 52(3), 195-206.

이재범, 양정석, 김일환, 2018: 한계 침투량을 고려한 강우와 지하수위의 상관관계를 이용한 주 단위 지하수자원 관리 취약시기 평가 방법 개발, *수자원학회논문집*, 51(12), 1237-1245.

이정우, 김남원, 정일문, 차준호, 2015: 죽산천 주변 암반층 지하수 양수로 인한 하천수 감소 영향 분석, *수자원학회논문집*, 48(9), 769-779.

이정호, 2017: 원격탐사의 지하수 수자원 적용 사례 고찰, *대한원격탐사학회지*, 33(5-3), 855-866.

이종석, 최현일, 2018: 기후변화취약성 평가지표 분류체계에 따른 홍수취약성 평가결과의 비교, *방재학회논문집*, 18(3), 221-229.

이주헌, 장호원, 김종석, 김태웅, 2015: 우리나라 과거 가뭄 사상의 정량적 특성 분석 -5대강 유역의 가뭄빈도 분석을 중심으로, *수자원학회논문집*, 48(12), 1011-1021.

이지완, 김진욱, 정충길, 김성준, 2018: 기상자료기반 다중선형회귀분석에 의한 농업용 저수지 월단위 저수율 예측 및 저수지 가뭄지수(RDI) 추정, *지리정보학회지*, 21(3), 19-34.

이지완, 정충길, 김다래, 김성준. 2018: SWAT을 이용한 미래기후변화에 따른 금강유역의 지하수위 거동 평가, *수자원학회논문집*, 51(3), 247-261.

이현승, 이태삼, 박태웅, 손찬영, 2016: 기후변화를 고려한 남강댐 유역의 홍수량 재산정, *수자원학회논문집*, 49(8), 719-729.

이혜숙, 김동섭, 황만하, 안광국, 2016: 기상 관측자료 및 RCP 기후변화 시나리오를 고려한 용담댐 유입하천의 유량 및 수온변화 전망, *한국물환경학회지*, 32(2), 173-182.

이후상, 이재준, 2018: 기후변화에 따른 제방의 안전성 영향 분석을 위한 제방홍수취약성지수의 적용, *수자원학회 논문집*, 51(4), 293-299.

이후상, 이재준, 2018: 기후변화에 따른 제방홍수취약성지수 민감도 분석, *수자원학회논문집*, 51(S-1), 1161-1169.

인소라, 한상옥, 임은순, 김기훈, 심재관, 2014: 여름철 한반도 강수의 시·공간적 특성 연구, *한국기상학회지*, 24(2), 159-171.

임동화, 정순찬, 이은경, 이재응, 2017: MCDM을 이용한 홍수방어대안 우선순위 정립에 관한 연구, *수자원학회 논문집*, 50(3), 169-179.

임정현, 이동환, 박민수, 박지환, 박승희, 2017: 기후변화에 따른 설계홍수량의 변화분석, *방재학회논문집*, 17(6), 81-85.

임창수, 김성엽, 2014: RCP 4.5와 8.5에 따른 기온 및 강수량 변화를 반영한 서울 기후 건조/습윤특성, *수자원학회 논문집*, 47(5), 421-434.

전시영, 김용탁, 권현한, 2015: Hidden Markov Chain 모형과 이변량 코플라함수를 이용한 가뭄빈도분석, *수자원학회 논문집*, 48(12), 969-979.

전환돈, 김수전, 2014: 기후변화와 수리구조물의 영향을 고려한 금강유역의 미래 수문순환 특성 변화 분석, *방재학회논문집*, 14(5), 299-309.

정성호, 조효섭, 김정엽, 이기하, 2018: 딥러닝 기반 LSTM 모형을 이용한 감조하천 수위 예측, *수자원학회논문집*, 51(12), 1207-1216.

정세진, 김병식, 전계원, 최종인, 2014: 기후변화시나리오를 이용한 기후변화가 영산강유역의 장기유출에 미치는 영향평가, *위기관리 이론과 실천*, 10(2), 289-305.

정승현, 윤재섭, 이종원, 이현우, 2015: 온실의 적설하중 산정을 위한 노출계수의 비교 및 결정, *한국생물환경 조절학회지*, 24(3), 226-234.

정은성, 김상욱, 김형배, 2016: 기후변화에 따른 미래 유출 및 수질 모의를 위한 SWAT 모형의 적용, 강원대학교 산업기술연구소, 36, 9-16.

정의상, 조홍래, 2019: 준분포형 유역모델 STREAM을 이용한 기후변화가 농업유역의 하천유량에 미치는 영향 분석, *한국물환경학회지*, 35(2), 131-144.

정차미, 신문주, 김영오, 2015: SWAT모형을 이용한 용담댐 유역의 유량 전망 결과 비교 연구, *수자원학회논문집*, 48(6), 439-449.

조덕준, 2014: Flood Nomograph의 도시침수예보에의 적용성, *방재학회논문집*, 14(6), 421-425.

조현곤, 김광섭, 2016: 추계학적 강우모형을 이용한 한강유역에 강우사상의 구조적인 변동 특성 분석, *방재학회논문집*, 16(2), 103-111.

조현곤, 김광섭, 2018: 신경망 기법과 GCM자료를 이용한 비정상성 확률강수량 산정, *방재학회논문집*, 18(2), 63-73.

조현곤, 김광섭, 이재응, 2014: 추계학적 강우모형의 매개변수 변동을 통한 서울지역 여름철 강우 변동특성 분석, *수자원학회논문집*, 47(8), 693-701.

주홍준, 이명진, 최창현, 김수전, 김형수, 2018: 홍수 취약성 평가를 위한 대표 지표 선정에 관한 연구, *방재학회논문집*, 18(6), 335-346.

진영규, 정태훈, 이상호, 강신욱, 2016: 앙상블 하천유량 예측

기법과 용수 감량공급 기법을 이용한 합천댐의 가뭄 시 운영 방안, *방재학회논문집*, 16(1), 93-101.

차우영, 이옥정, 김상단, 박윤경, 2015: AR5 RCP 시나리오에 따른 금호강 유역 수문변화지표 분석, *방재학회논문집*, 17(4), 317-326.

차우영, 이옥정, 최정현, 이정훈, 김상단, 2018: 점강우모형을 이용한 미래 시간강우자료 생산 및 미래 강우유출수 분석, *방재학회논문집*, 18(2), 483-492.

채희찬, 지정원, 이재응, 2018: 기후변화를 고려한 다목적 댐의 적정 예비율 산정 연구, *수자원학회논문집*, 51(S-1), 1127-1134.

최시중, 강성규, 이동률, 강신욱, 2018: 미래 시나리오 기반 낙동강 유역의 용수공급 안정성 평가, *수자원학회논문집*, 51(S-1), 1105-1115.

최유진, 심규범, 김상단, 김응석, 2015: 1일 가능최대강수량 추세분석, *방재학회논문집*, 15(1), 369-375.

최종원, 박규진, 최소현, 전환돈, 2018: 연안도시 내수침수 피해저감을 위한 예, 경보 체계 구축: 여수시를 중심으로, *방재학회논문집*, 18(7), 475-484.

최지혁, 문영일, 2018: 기후변화를 고려한 농업용 저수지 여유고 평가에 관한 연구, *수자원학회논문집*, 51(4), 371-381.

한우석, 정세진, 김병식, 2015: Dyna-CLUE를 이용한 기후 및 토지이용변화를 고려한 미래 홍수 유출 분석 방법, *방재학회논문집*, 15(6), 361-371.

한정호, 이동진, 강부식, 정세웅, 장원석, 임경재, 김종건, 2016: 기후변화에 따른 미래 극한호우사상이 소양강댐 유역의 유량 및 유사량에 미치는 영향, *한국물환경학회지*, 33(2), 160-169.

행정안전부, 2017: 재해연보.

홍일, 김병식, 정세진, 2015: 기후변화를 고려한 배수시스템 설계를 위한 비정상성 IDF 곡선 작성 및 설계홍수량 산정, *위기관리 이론과 실천*, 11(10), 237-255.

환경부, 2006: 물환경관리계획 - 4대강 대권역 수질보전 기본계획('06~'15)

황석환, 함대헌, 2014: BLRPM을 이용한 서울지점 시단위 강우의 월별 경년변화 연구, *방재학회논문집*, 14(4), 267-278.

황세운, 조재필, 윤광식, 2018: CMIP5 GCM의 동아시아 해안지역에 대한 공간적 강우특성 재현성 평가, *수자원학회논문집*, 51(8), 629-642.

황정윤, 안정환, 정창삼, 허준행, 2018: 기후변화에 따른 미계측 도시유역의 확률홍수량 변화에 관한 연구, *수자원학회논문집*, 51(5), 395-404.

Chang, H. J., F. Franczyk, E. S. Im, W. T. Kwon, D. H. Bae, and I. W. Jung, 2007: Vulnerability of Korean water resources to climate change and population growth, *Water Science & Technology*, 56(4), 57-62.

Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), 2001: Impacts, adaptation and vulnerability, summary for policy makers, World Meteorological Organization, Switzerland.

Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), 2007: The physical science synthesis report, Climate change, Cambridge University Press, Cambridge.

Jeung, S., B. Kwon, and B. S. Kim, 2017: Prediction of change in hydrologic cycle components in North Korea river basins: The RCP 8.5 climate change scenario, *WIT Transactions on Ecology and the Environment*, 220, 263-272.

Kay, A. L., H. N. Davies, V. A. Bell, and R. G. Jones, 2009: Comparison of uncertainty sources for climate change impacts: Flood frequency in England, *Climatic Change*, 92(1-2), 41-63.

Kim, Y.-O., and E. S. Chung, 2017: Chapter 8 adapation to climate change: decision-making, in: Kolokytha et al. (eds), Sustainable Water Resources Planning and Management Under Climate Change, Springer Singapore, 189-221pp.

Lee, M. H., E. S. Im, and D. H. Bae, 2019: A comparative assessment of climate change impacts on drought over Korea based on multiple climate projections and multiple drought inces, *Climate Dynamics*, 1-16.

Lempert, R. J., and M. T. Collins, 2007: Managing the risk of uncertain threshold responses: Comparison of robust, optimum, and precautionary approaches, *Risk Analysis*,

27(4), 1009-1026.

Lempert, R. J., S. W. Popper, and S. C. Bankes, 2003: Shaping the next one hundred years: New method for quantitative, long-term policy analysis, Santa Monica, CA:RAND.

NEMA, 2012: The Development of heavy snowfall casualty minimixation policies and optimal road snow removal systems considering climate change, National Emergency Management Agency NEMA.

Park, Yoonkyung, Jeonghoon Lee, Daegyu Choi, and Sangdan Kim, 2015: Future changes of stream flow and water quality in the Byongseong stream watershed under multiple future climate scenarios, *J. Korean Soc. Hazard Mitig*. 15(2), 341-351.

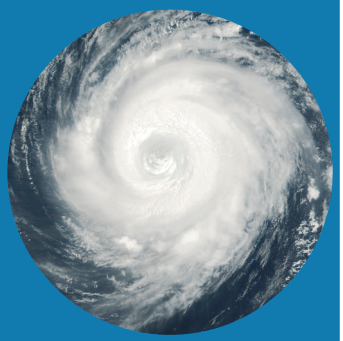
Wilby R. L., and I. Harris, 2006: A framework for assessing uncertainties in climate change impacts: Low-flow scenarios for the River Thames, *Water Resources Research*, 42(2), 02419, doi:10.1029/2005WR004065.

Wilhite D. A., and M. H. Glantz, 1985: Undestanding: the drought phenomenon: The role of definitions, *Water International*, 10(3), 111-120.

World Economic forum, 2018: Which natural disasters hit most frequently? Retrieved from <<https://www.weforum.org/agenda/2016091/which-natural-disasters-hit-most-frequently>>.

제 3 장

생태계



70 3.1 서론
70 3.2 관측된 영향
80 3.3 영향 전망
93 3.4 취약성의 주요 원인
94 3.5 적응 옵션
96 3.6 결론
97 3.7 참고문헌

제 3 장 생태계

3.1 서론

지난「한국 기후변화 평가보고서 2014」에서 생태계 분야는 식물, 동물, 취약생태계 3가지 분야로 나누어 기술되었으며, 관련한 연구 성과를 관측된 영향, 영향의 전망, 취약성의 주요 원인 등으로 구분하여 분석 및 정리하였다.

그 결과 연구 대부분이 기후변화 적응 및 대책 마련을 위한 기초자료의 성격을 가지고 있으며, 기후변화의 현황에 관한 연구가 미래전망, 적응 대책에 대한 연구에 비하여 활발하게 이루어졌음이 확인되었다.

생태계와 기후변화에 대한 연구는 장기간의 연구 결과가 필요하며 대부분의 기존 연구들이 정확한 생태계 메카니즘을 설명하기에는 미진하므로 제한적 동의 수준을 나타내며, 신뢰도를 높이기 위한 학제적 연구의 필요성이 제시되었다.

본 보고서는「한국 기후변화 평가보고서 2014」발행 이후의 식물생태, 동물생태, 취약생태계의 연구 성과를 정리하였다.

식물생태에서는 식물생육과 생리, 식물계절, 식물서식지 및 분포와 관련한 연구 성과를 관측된 영향, 영향의 전망으로 나누어 분석하였다. 동물생태에서는 서식지의 분포 변화, 개체군의 풍부도 변화 부분에서의 연구 성과를 분석하였다. 취약생태계는 기후변화에 취약한 것으로 알려진 고산 및 아고산, 연안 및 도서지역, 내륙습지와 기타 지역으로 나누어 분석하였다.

기후변화는 매우 복잡한 메카니즘을 가지고 나타나며, 그러한 변화가 생태계에 적용되었을 때는 더욱 복잡하고 다양한 차원의 상호작용을 통하여 예상치 못한 결과를 가져오게 되므로 이를 정확히 예측하고 대응 방안을 마련한다는 것은 쉽지 않다.

그럼에도 기후변화가 생태계에 미치는 파급효과는 매우 거대하며 인간 생활에 직접적인 영향을 끼칠 수 있다는 점과, 한 번 파괴된 생태계를 되돌리는 것은 불가능에 가깝다는 점을 고려해보았을 때 다양한 시각에서 기후변화에 대응한 생태계의 변화를 관측하고 그 영향을 전망하여 대책 방안을 마련하는 것은 매우 중요한 국가적 과제라고 할 수 있다.

3.2 관측된 영향

3.2.1 식물생태

「한국 기후변화 평가보고서 2014」에 따르면 2014년 이전 기후변화에 따른 식물생태 연구는 식물 종 중심으로 식물계절과 분포 등에 대한 기후변화영향 연구와 자생지 현황이나 장기 모니터링 등 기초자료 구축을 위한 모니터링 및 실험 등이 대부분이었다.

이에 반해 2014년 이후 연구들은 연구논문의 경우 기후변화에 따른 식물의 서식지 변화에 대한 연구가 상대적으로 활발히 진행되었으며 식물계절변화 연구가 상대적으로 감소하였고 식물의 생육이나 생리적인 변화에 대한 연구들이 증가하는 경향을 보였다.

연구보고서의 경우에는 기후변화 모니터링, 기후변화영향 평가, 기후변화에 대한 적응 관련 연구들이 이루어졌다. 각 분야별 연구의 양이나 질에 있어서는 제한적이었으나, 분야별 편중성을 고려했을 때 균형적으로 이루지고 있는 것으로 분석되었다.

기후변화에 따른 식물생육·생리변화 연구들은 주로 실외실험을 통해 CO_2 증가와 온도상승에 따른 식물의 생육 및 생리적인 반응의 변화를 분석하여 기후변화에 따른 영향을 예측하였다. 특히, 기후변화에 따른 유전자발현, 이차대사물질 생산 변화 분석 등 분자생태학 및 생리생태학적 연구들이 새롭게 수행되었다.

식물계절변화 연구는 주로 개화시기와 생육기간에 대한 변화가 분석되었으며 RCP 시나리오 등 미래 기후변화

시나리오를 가정하여 미래 변화를 예측하였다.

식물서식지·분포변화 연구는 미래기후변화 시나리오 가정 하에 한반도 스케일이나 남한 스케일에서 기후변화 민감종을 중심으로 분포변화와 서식지 적합도 변화 예측이 이루어졌다.

또한 국가 차원에서 기후변화영향 모니터링이 국립생태원을 중심으로 이루어졌으며, 멸종위기종이나 보호종을 대상으로 적응정책 수립을 위한 연구들이 수행되어 왔다.

본 보고서에서는 2014년 기후백서 출간 이후 출간된 논문 29편과 보고서 11편을 분석하여 식물의 생태연구를 식물생육·생리변화, 식물계절변화, 식물서식지 및 분포 변화 등 3개의 주된 주제로 나누어 작성하였다.

보고서 작성에 활용된 논문은 식물생육·생리변화 연구논문 6편, 식물계절변화 연구논문 4편, 식물서식지·분포변화 연구논문 19편이다. 보고서는 기후변화영향 연구보고서 4편, 기후변화적응 연구보고서 7편이다.

3.2.1.1 식물생육·생리

국내의 식물생육·생리에 대한 기후변화 영향 연구는 식물개체와 개체군, 군집 등 다양한 식물생태계에 대하여 이루어지지 않고 있으며 특히 장기간의 자료 축척의 부족으로 신뢰할 만한 영향 분석이 매우 미흡한 상태이다.

이러한 한계 내에서 2014년 이후 현재까지 이루어진 식물생육·생리에 대한 기후변화 영향은 기후의 변화에 따른 생육 기간의 변화, 개체군 변화, 군집구조 변화 및 유전자 발현과 이차대사물질 생산의 변화 등이 특정 식물들에 대하여 매우 제한적으로 연구되었다.

생육 기간 변화에 관한 연구는 생육 기간 변화 분석과 생육 기간 변화에 따른 식물생육 영향 연구로 수행되었다.

생육 기간 변화 분석 연구는 남한 전체를 대상으로 19개의 기상관측소 1970년에서 2013년 자료를 토대로 계산한 결과 생육개시일은 평균 2.7일/10년이 앞당겨졌고 생육종료일은 평균 1.4일/10년 늦어져 총 생육 기간은 평균 4.2일/10년 늘어난 것으로 분석되었다(정명표 등, 2015). 지역스케일에서 수원지역의 1971년에서 2013년 기간 자료를 사용하여 계산한 결과, 수원지역의 생육개시일은 4.1일/

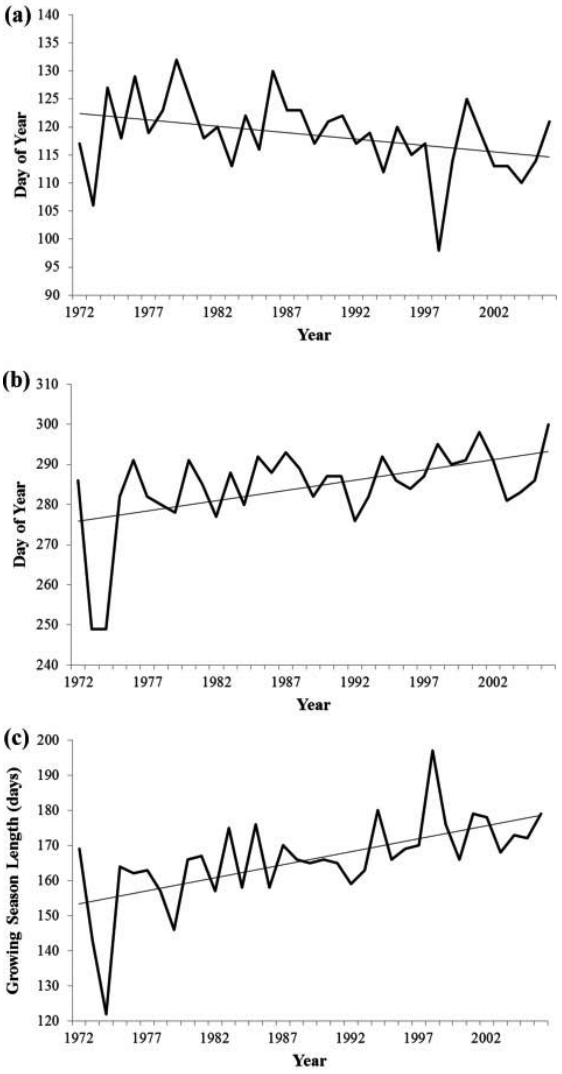


그림 3.1 계방산 지역의 1972년에서 2006년 기간 동안의 생육개시일(a), 생육종료일(b), 생육 기간(c), 유입일사량(d)의 변화 분석 결과(Jang et al., 2015).

10년 빨라지고 생육종료일은 2.7일 늦어져 총 생육 기간은 6.8일 늘어난 것으로 분석되었다(정명표 등, 2014).

생육 기간 변화의 식물생육 영향 연구는 계방산 가문비나무(*Picea jezoensis*) 군락의 사례를 통해 연구되었다(Jang et al., 2015). 계방산 지역은 기후변화(1972~2006년)에 따라 생육개시일은 빨라지고 생육종료일은 늦어져 생육 기간이 증가하는 것으로 분석되었다(그림 3.1). 그러나 증가한 생육 기간이 가문비나무의 생장에 유의한 영향을 미치지 못하는 것으로 분석되었다(그림 3.2).

개체군 및 군집 단위에서 식물 생리 및 생육에 대한 기후변화 영향 연구는 국립생태원 등 국가기관의 장기간

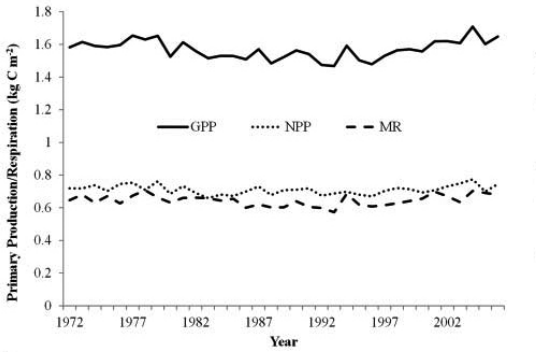


그림 3.2 1972년에서 2006년 기간 동안 계방산 분비나무 군락의 총생산량(GPP), 순생산량(NPP), 호흡량(MR) 변화량 분석 결과(Jang et al., 2015).

과제로서 기후변화에 민감한 특정 식물생태계에 대하여 제한적으로 이루어졌다.

구상나무(*Abies koreana*)의 개체군 동태 등이 주로 한라산에서 분석되었으며 개체군 쇠퇴가 보고 되었다. 또한, 한라산 구상나무 군락의 경우 군집구조의 변화를 파악하기 위하여 군락을 구성하고 있는 식물의 종다양성, 밀도, 고사율 등을 분석하였다(이선미 등, 2016, 이상훈 등, 2018a, 이상훈 등, 2018b). 이를 통해 장기적으로 한대성 식물종의 감소와 온난한 기후에서 서식하는 식물종의 군집 내 증가를 평가할 수 있는 기초자료를 제공하였다.

기후변화에 따른 식물 생육에 영향을 미치는 유전자 발현 및 이차대사물질 생산의 변화와 개체군 단위의 유전 다양성에 대한 연구가 수행되었다(김일용 등, 2015; 김진희 등, 2016, 2017, 2018; 박형철 등, 2015, 2016, 2017, 2018).

유전자 발현 및 이차대사물질 생산 관련 연구는 국립생태원에서 한라산과 지리산에 생육하고 있는 구상나무를 대상으로 수행하였다(김진희 등, 2016, 2017, 2018; 박형철 등, 2015, 2016, 2017, 2018). 연구결과 고농도의 이산화탄소에서 지상부 생장의 증가와 줄기 및 잎의 두께가 증가하는 것으로 나타났다. 또한 고농도의 이산화탄소와 고온 조건하에서 발현되는 특이발현 유전자를 찾고 스트레스 하에서 이러한 유전자의 발현이 감소 또는 증가하는 것을 발견하였다(박형철 등, 2017, 2018).

구상나무 이차대사물질 연구에서는 구상나무의 추출물의 주요 성분(Resveratrol, Maltol, Piceid, Taxifolin, Protocatechuic acid, 4-Hydroxybenzoic acid, Keampferol-3-glucoside, p-counmaric acid, Dehydroabietic acid 등)을 찾고 이 이차대사물질 발현량이 서식지 환경과 시기에 따라 다르게 나타나는 것을 발견하였다. 특히 한라산과 지리산에 서식하는 구상나무의 건전지역과 쇠퇴지역을 구분하는 데 활용 가능한 이차대사물질을 발견하고, 서식지 강수량 및 기온 조건과 상관관계를 분석하였다(김진희 등, 2016, 2017, 2018).

구상나무 잎의 채취 계절에 따라, 기온 및 강수량과 높은 상관관계(0.5이상)를 보이는 이차대사물질이 다른 것으로 분석되었다. 이차대사물질의 발현량은 전전월의 기온 조건이나 당월의 강수량 또는 계절 평균 강수량과 0.5이상의 유의한 상관관계를 보였다.

기후변화에 따른 식물의 적응 능력 판단에 기초자료가 되는 개체군의 유전다양성 연구는 전국에 있는 조릿대(*Sasa borealis*) 12 개체군에 대하여 AFLP(amplified fragment length polymorphism) 분석을 통하여 수행되었다(김일용 등, 2015). 이 집단유전학 연구는 조릿대 개체군들의 유전 다양성이 위도가 높아짐에 따라 감소하는 것으로 제시함으로서 온난화에 따른 조릿대 생육 변화의 정도를 파악할 수 있는 기초자료를 제공하였다.

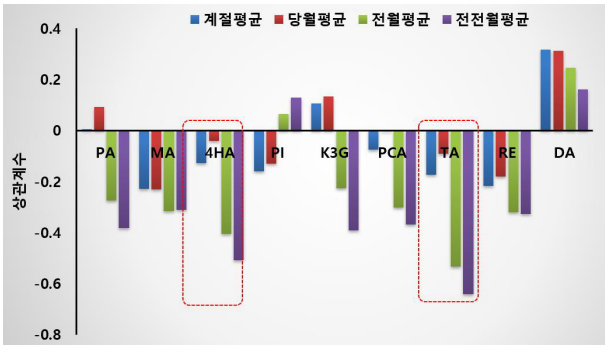


그림 3.3 구상나무 2차대사물질 발현량과 기온과의 상관관계(김진희 등, 2018). 4-Hydroxybenzoic acid는 전전월평균 기온과 Taxifolin은 전전월평균기온, 전월평균기온과 0.5이상의 높은 상관관계를 보임. PA: Protocatechuic acid, MA: Maltol, 4HA: 4-Hydroxybenzoic acid, PI:PiceidK3G: Keampferol-3-glucoside, PCA: p-coumaric acid, TA: Taxifolin, RE:ResveratrolDA: Dehydroabietic acid.

3.2.1.2 식물계절

식물계절 연구는 2014년 이전에 비해 다소 감소하는 추세를 보였다. 2014년 이후 이루어진 식물계절 연구는 대부분 국가연구기관의 장기생태 연구 지역에서 모니터링 수준으로 이루어졌다.

개별 연구에서는 식물계절과 기온과의 상관관계 분석, 개화시기의 시계열적 변화 및 기온과의 상관관계 분석 등이 매우 제한적으로 수행되었다.

최철현 등(2016)은 위성영상 자료를 활용하여 남한 산림 전체의 생육개시일을 추정하고(그림 3.4) 기온과 상관관계를 분석하였다. 분석결과 남한의 생육개시일은 4월 평균기온 및 생육개시일 평균기온(3℃, 12days)과 가장 높은 상관관계를 갖는 것으로 분석되었다(그림 3.5).

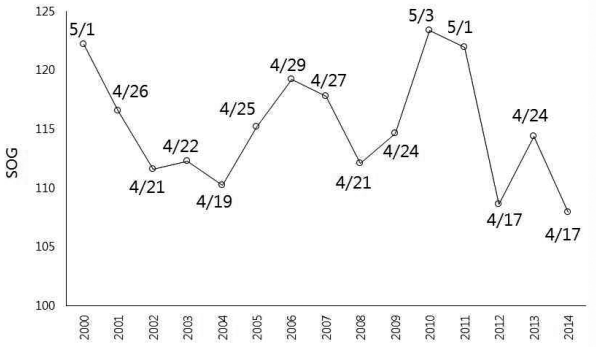


그림 3.4 2000년에서 2014년 기간 동안 남한 산림 전체의 평균 생육개시일(SOG) 변화 추이(최철현 등, 2016)

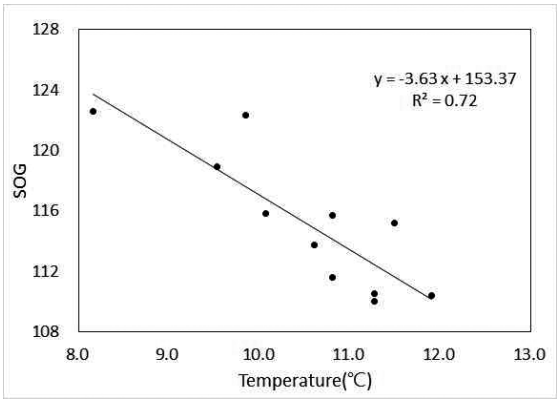


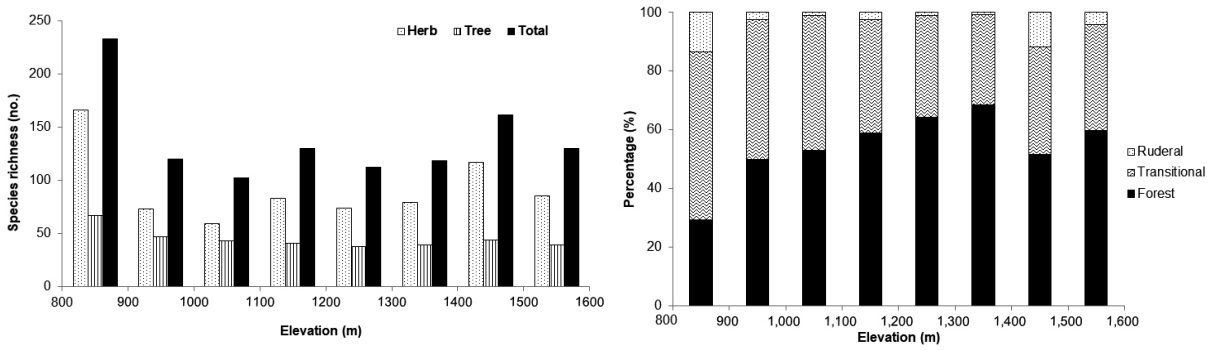
그림 3.5 4월 평균기온과 생육개시일(SOG)과의 상관관계 (최철현 등, 2016).

성정원과 김근호(2018)는 가야산국립공원의 아고산 식물종 솔나리(*Lilium cernuum*), 설앵초(*Primula modesta* var. *hannasanensis)*, 기생꽃(*Trientalis europaea* subsp. *arctica*), 개회향(*Ligusticum tachiroei*), 금강애기나리(*Disporuum ovale*) 등 5종을 대상으로 2012년에서 2016년 5년간 개화와 낙화시기를 조사하고 온·습도와 상관관계를 분석하였다. 분석결과 5종 식물종의 개화시기는 일최고기온과 일평균기온과 높은 상관관계를 갖는 것으로 분석되었다.

3.2.1.3 식물서식지·분포

2014년 이후 몇몇 식물의 서식지 및 분포 변화에 대한 기후변화 영향 분석·예측 연구가 이루어졌다. 이 연구들은 다양한 모형을 활용하여 현재 적합서식지의 지리적 범위가 기후변화에 의해 어떻게 변화될 것인지 예측하였다. 이러한 기후적 적합서식지 연구는 대부분 지역적 규모(local scale)에서 식생이나 군집 수준에서 수행되었다. 식생과 군집의 고도별 종조성과 분포 패턴 분석을 분석하였으며, 기후변화에 따른 미래 분포범위 변화 예측을 위한 기초 연구의 일부로 이루어졌다.

지역단위의 적합서식지 분석 연구는 고도와 기온과의 음의 유의한 상관관계 가정 하에 고도별 식생의 종조성 및 개별 종의 분포 패턴의 변화가 분석되었다.지리산에서 수행된 식물사회학적 연구에서는 해발고도가 높아질수록 아고산 식물종 등 북방계식물과 희귀·특산 식물의 비율이 높아지는 것으로 분석되었다(김지동 등, 2018, 김윤영 등, 2017). 태백산에서 수행된 고도별 관속식물의 종다양성 패턴과 분포변화 분석에서는 고도가 높아질수록 종다양성은 감소하는 것으로 분석되었고(그림 3.6 (a)), 산림에 생육하는 종의 비율은 증가하고 교란지에 생육하는 식물종은 감소하는 것으로 분석되었다(그림 3.6 (b), 안지홍 등, 2019).



(a) (b)

그림 3.6 태백산의 고도에 따른 (a) 종다양성과 (b) 식생구조 변화 분석 결과(안지홍 등, 2019).

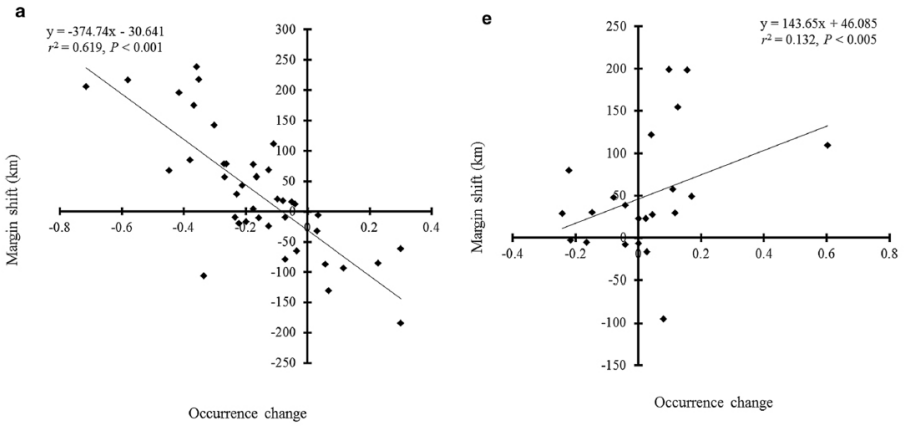


그림 3.7 1938~1950년과 1996~2011년 사이 한국산 나비의 출현 경계지점의 이동(Kwon et al., 2014a). (a)는 북방계 41종을 (e)는 남방계 22종의 분포변화를 나타냄.

3.2.2 동물생태

「한국 기후변화 평가보고서 2014」에서, 2014년 이전 기후변화에 따른 동물생태 연구는 과거자료를 바탕으로 현재 어떠한 분포 양상을 띠거나 또는 개체군 크기가 변화하였는가에 대하여 주로 이루어졌으며 이들 개체군 변동에 관여하는 기후인자 분석도 다수를 차지하였다.

3.2.2.1 서식지 분포변화: 서식지의 북쪽으로 이동 또는 확대

Kwon et al. (2014a)은 한국산 나비의 분포 변화를 한국전쟁을 기점으로 두 시기 (1938~1950년과 1996~2011년) 동안 어떻게 변화했는지를 파악하였다(그림 3.7). 연구는 우리나라에서 알려진 종 중 분포기록이 5개 이상 있는 종 63종을 대상으로 하였으며 종의 지리적 분포성향(북방계와 남방계)에 따른 한계선을 토대로 출현지점이 위도별로 가장 높은 곳과 낮은 곳 5개씩을 비교하여 분포가 어떻게 변화했는지를 조사했다. 연구결과 남방계의 북방 한계선은 점차 북쪽으로 올라가는 것을 확인하였다. 분포 범위 역시 지난 60년 동안 매년 1.6 km씩 이동하였으며 북방계 종은 남방 한계선이 남쪽으로도 확대된 것을 확인하였다. 특히 북방계 나비의 경우 지난 수 십년 동안 산림녹화로 숲 면적이 넓어지면서 분포 범위가 넓게 나타난 것으로 추정하여 개체군의 분포 변화를 살피는데 기온 상승의 영향뿐만 아니라 서식지 환경변화도 중요한 변수로 작용하는 것으로 나타났다.

박헌우 등 (2018)은 한반도에 분포하는 조류 6종(검은이마직박구리(*Pycnonotus sinensis*), 붉은부리찌르레기(*Sturnus sericeus*), 팔색조, 물꿩(*Hydrophasianus chirurgus*),

호사도요(*Rostratula benghalensis*), 긴꼬리딱새(*Terpsiphone atrocaudata*)의 분포 변동을 1997~2005년과 2005~2014년까지 2개 기간으로 구분하여 비교한 결과 분포 범위가 전반적으로 넓어지고 북쪽으로 이동하는 것을 확인하였다. 이들을 분포 범위와 기후요인과의 상관성을 바탕으로 두 종류로 구분하였는데 하나는 기후변화와 관련된 종으로 긴꼬리딱새와 물꿩, 팔색조가 해당된다. 이들 종은 여름철새로 새 관찰날짜와 관찰지점 또는 관찰 당시의 온도와 밀접한 관련을 짓고 있었으며 이들은 분포지가 북쪽으로 이동한 양상이 뚜렷하고 번식확인지역 역시 기후변화가 예측하는 온도범위에 맞게 북쪽에서 확장하였다(최순규 등, 2018). 기온 상승이 진행되면서 이들 종은 주 분포지역인 제주도와 한반도 남부지방뿐만 아니라 한반도 중북부 지역에서도 더 많은 수를 관찰할 수 있을 것으로 예상되었다. 한편 기후변화와 관련성이 적은 종류에 해당하는 검은이마직박구리, 붉은부리찌르레기, 호사도요의 분포는 관찰날짜와 관찰지점 또는 관찰 당시의 온도와는 특별한 상관관계를 나타내지 않았다. 이 종들은 중국에서 우리나라로 분포지역이 확대된 종으로 중국에서의 개발압력과 기후변화 등으로 확대된 것으로 예상하였다. 그러나 검은이마직박구리와 붉은부리찌르레기는 중국에서 개발이 진행된 도시와 시골의 인가 주변에 흔히 서식하는 종으로 최근 한국에서 분포가 확대된 요인으로 기후변화가 큰 영향을 미쳤을 가능성도 높다. 또한 2000년에 국내 최초로 기록된 붉은부리찌르레기, 2002년에 국내 최초로 기록된 검은이마직박구리는 현재 전국적으로 관찰되고 있으며, 번식은 물론 월동기록이 크게 증가하고 있다. 아열대종이 국내로 분포가 확대된 후 20년도 안 되는 단기간에 한국의 텃새로 정착한 사례로 주목받고 있다.

감염병 매개체인 모기, 털진드기, 참진드기 등의 국내 분포가 기후변화에 따른 온도상승, 강우량 변동 등에 의해 변화할 것으로 예측되었다. 이동규(2017)는 국내 감염병 매개체의 생태학적 특성을 고찰하면서 기후변화에 따른 매개체 곤충의 분포 범위가 북상할 것으로 예상하였다. 뎅기열이나 지카바이러스를 전파할 수 있는 흰줄숲모기(*Stegomyia albopicta*)의 경우 2050년 국내 겨울철 평균기온이 10℃ 이상으로 올라갈 경우 국내 토착화가 가능할 것으로 예상하였다.

또한 쯔쯔가무시의 주요 매개체가 지역에 따라 달리 나타나는데 중부지방에서는 대잎털진드기(*Leptotrombidium pallidum*)이고, 남부 및 제주도에서는 활순털진드기(*Leptotrombidium scutellare*) 유충으로 밝혀졌다. 기온 상승으로 인하여 남부 우점종인 활순털진드기가 점차 북상할 가능성이 높다고 예상하였으며 이러한 우점종 변화가 쯔쯔가무시증의 역학적 양상에 어떤 영향을 줄 것인지 미리 파악할 필요가 있을 것으로 제안하고 있다(이동규, 2017).

외래종인 등검은말벌(*Vespa velutina nigrithorax*)은 2003년 부산에서 발견된 이후 2008년까지는 부산지역을 중심으로 출현하다 2014년에는 서울 경기 및 충청 일부 지역을 제외한 전국 103개 시군으로 확대되었으며 2015년에는 전국 155개 시군으로 확대되어 최초 침입지인 부산 영도에서 직선거리거리가 300 Km가 넘은 인천시까지 확산 분포하였다. 최근 기후변화로 인한 따뜻한 겨울은 말벌류들의 월동 성공률을 높여주고 동시에 장마철의 감소 및 무더운 여름 날씨로 빠른 번식이 가능하였을 뿐만 아니라 국내의 높은 양봉꿀벌의 봉군밀도 역시 이들 말벌의 국내확산에 기여한 것으로 추측하고 있다(박정준과 정철의, 2016). RCP 8.5 시나리오를 이용한 등검은말벌의 2050년 분포 가능성은 전국 전역으로 확대될 것으로 여겨졌으며 종 간 경쟁이나 포식 및 피식자와의 상호작용 등 다양한 생태학적 상호작용이 등검은말벌을 포함한 우리나라 말벌류 분포에 영향을 줄 것으로 예상하였다.

등검은말벌과 함께 전국적인 분포로 확산을 보이고 있는 갈색날개매미충(*Pochazia shantungensis*)은 2010년 충남 공주, 예산 등지에서 처음 알려진 이후 전국적으로 피해가 보고되고 있다. 갈색날개매미충은 중국 산둥성, 저장성 등이 원산지로 추정되며 중국 지린성에서 다양한 과수와 가로수의 주요 경제적 해충으로 알려져 있다(김동언 등, 2015). 갈색날개매미충 분포에 영향을 주는 환경요인으로 여름철 강수량과 평균온도, 임상 현황 및 토지피복현황 등으로 기후요인이 분포에 영향을 주는 요인으로 나타났다. 현재 분포 현황을 통해 분포 가능한 면적은 남한 전체 면적의 34%로 주로 중서부 지역에 국한되어 있지만 기주식물의 범위가 138여종 이상으로 활엽수뿐만 아니라 초본류, 침엽수 등 광범위하여 기후요인과 함께 유리하게 작용하여 우리나라 전역에서 분포할 가능성이 높을 것으로 예상된다.

3.2.2.2 서식지 분포변화: 남방계 종의 유입

지금까지 우리나라에서는 발견되지 않았던 아열대종이 새롭게 발견되어 보고되고 있다. 하지만 이들 종이 최근 기온상승과 같은 기후변화로 유입되었는지에 관한 기초자료가 부족하기 때문에 이들의 국내 관찰로 인한 분포가 기후변화로 인한 직접적인 결과인가에 대해서는 신중히 접근할 필요가 있다. Jeong et al. (2016)은 아열대지방에서 흔히 볼 수 있는 큰남방제비나방(*Lyssa zampa*)을 제주도 서귀포 지역에서 처음 채집하여 보고하였고 김민영과 박규택(2017)은 제주도에서 채집한 3종의 뿔나방을 한국에서 처음으로 분포하는 것을 발표하였다. 이들 미기록종은 주로 중국 남부나 대만 등지에서만 분포하는 것으로 알려져 제주도에서 발견된 것은 새롭게 우리나라에 유입된 결과로 추정하였다. Sohn et al. (2019)은 쌍꼬리나방아과에 속하는 2종이 남방계로 우리나라 제주도에서 채집되었지만 우연히 우리나라로 유입되지 않았나 추측하고 있다.

조류도 아열대종이 지속적으로 발견되어 보고되었다. 김성현과 이두표(2006)는 신안군 홍도에서 귤빛지빠귀(*Zoothera citrina*), 김은미 등(2009)은 제주도 마라도에서 푸른날개팔색조(*Pitta moluccensis*), 김완병 등(2010)은 제주도 용수리에서 작은뻐꾸기사촌(*Centropus bengalensis*), 김화정 등(2012)은 제주도 마라도에서 붉은가슴딱새(*Niltava davidi*), 박진영과 오미례(2018)는 옹진군 소청도에서 회색머리노랑딱새(*Culicicapa ceylonensis calochrysea*), Kim et al.(2018)은 통영시 소매물도에서 우는뻐꾸기(*Cacomantis merulinus querulus*), 양진원 등(2018)은 부산에서 레이산알바트로스(*Laysan albatross*)를 보고하였다. 아열대종의 한국 내 기록이 지속적으로 증가하는 추세가 기후변화로 인한 것인지에 대한 논의는 더 필요할 것으로 보여 진다.

3.2.2.3 개체군 풍부도 변화: 척추동물

최우진 등 (2018)은 국내 산간 계곡에 번식하는 계곡산개구리(*Rana huanrenensis*)와 도룡뇽(*Hynobius leechi*) 의 개체군 변동을 2005년부터 2012년 사이 조사한 결과 3~4년 주기로 증감 양상을 보였지만 도룡뇽의 번식 개체군 크기는 계속 감소하는 것을 확인하였다. 이 연구에서는 기후변화가 지역적 미기후에 영향을 준 것으로 추정하였는데 조사지점의 기온변화 특히 봄철 평균 일교차의 감소가 도룡뇽 개체군 크기 감소와 밀접한 관련이 있는 것으로 제안하였다. 봄철 온도차가 줄어들면서 번식지에 출현한 도룡뇽 개체들의 에너지 소모를 가중시켜 번식시간을 단축시키고 이러한 번식시간 감소는 번식률 감소, 번식 후 번식개체의 생존율 저하 등 연속적으로 이루어졌을 것으로 판단하였다.

한편 연평균 최고기온의 하락이 계곡산개구리의 번식과 생존율 증가에 영향을 준 것으로 나타났는데 최고기온 하락과 계곡산개구리 개체군 크기 변화에 작용하는 구체적인 기작은 알 수 없지만 지역적 미기후변화가 양서류에 미치는 영향은 종에 따라 차이가 있음을 보여주고 있다(최우진 등, 2018).

3.2.3 취약생태계

취약생태계란 고산 및 아고산지역, 연안지역, 도서지역 등의 생태 환경을 의미한다. 특히 Choe et al.(2017)은 연안의 산지(Coastal mountain)와 산악지대(Montane), 저지대(Lowland)의 생물을 기후변화에 가장 취약한 그룹으로 구분하였다. 이러한 지역의 생태계는 인간 활동으로 인한 교란 및 파괴 가능성이 낮으나 다른 지역에서는 확인되지 않는 특정 종이 분포하는 경우가 많으므로 환경조건의 변화에 대해 매우 민감한 생태계라 할 수 있으며, 특히 기후환경이 변화할 경우 빠른 속도로 파괴될 가능성이 높은 지역이다.

한반도 내의 취약생태계는 다른 지역에 비해 높은 생물 다양성을 가지며, 기후변화에 의한 생물 종의 감소 속도 역시 급속하게 나타나므로 앞으로의 기후변화에 대응하여 보다 체계적인 연구가 이루어져야 한다. 특히 이러한 취약생태계는 급진적인 기후변화에 더욱 높은 취약성을 가지므로, 다른 지역과 차별화된 관리가 이루어질 필요가 있다(권영한 등, 2014).

현재까지 국내의 기후변화 및 생태계 관련 적응 대책은 일부 종들을 대한 장기적인 모니터링에 초점을 둔 경우가

많았으며, 기후변화에 취약하여 보다 시급한 대응을 필요로 하는 국내 생태계의 적응능력과 회복력을 증진하기 위한 대응 방안은 간과되는 경향이 있었다(권영한 등, 2015).

기후변화에 관한 정부 간 협의체(IPCC)의 제 5차 보고서에서, 해수면 상승과 연안 홍수 및 폭풍 해일로 인한 생명 및 재산 피해, 홍수로 인한 재해 및 질병, 사회기반시설과 핵심 공공 서비스의 와해, 극한의 장기간 혹서로 인한 취약 도시인구의 사망, 질병 및 기타 재해 위험, 농업생산성 저하 및 식량 불안정 등의 변동성이 전망되었다는 것을 고려해 보았을 때(최한주와 박세영, 2018), 이러한 변화에 특히 심각한 영향을 받을 수 있는 취약생태계의 생물 종에 대한 대응 및 관리방안이 기후변화 적응 대책의 수립 및 평가에 우선적으로 반영될 필요가 있다(권영한 등, 2015).

따라서 본 보고서에서는, 국내외 논문 21편과 보고서 3편의 연구 성과를 분석하여 앞으로의 기후변화 시나리오에 대하여 취약생태계가 받을 수 있는 영향을 관측된 영향, 영향의 전망, 취약성의 주요 원인으로 나누어 기술하고, 현재까지의 기후변화 대응 취약생태계 연구를 정리 및 평가해보고자 한다. 이는 앞으로의 기후변화 적응 대책 수립을 위한 기초자료로써 활용될 수 있으며, 향후 취약생태계 연구의 방향성을 제시할 수 있을 것으로 판단된다.

3.2.3.1 고산 및 아고산

한반도 주요 산지인 백두산, 설악산, 지리산, 한라산의 산정을 대상으로 지구 온난화가 고산식물에 미칠 영향을 파악하기 위하여 기후변화에 취약할 것으로 보이는 식물종을 선발하였다(공우석 등, 2014). 고유종, 법정 보호종, 멸종위기종, 위기종, 취약종, 특정식물로 지정되어 분포가 매우 제한적인 식물을 대상으로, 수평적으로 고립되어 1곳에만 한정적으로 자라거나 2곳에 격리되어 자라고, 수직적으로는 해발고도 1,500 m 이상의 고지대에 분포하여 온난화 진행 시 분포역이 크게 축소될 위험이 있는 식물 종을 취약 대상 종으로 선정하였다. 연구 결과 설악산에서는 설악눈주목(*Taxus caespitosa*), 눈잣나무(*Pinus pumila*), 노랑만병초(*Rhododendron aureum*), 땃두릅나무(*Oplopanax elatus*), 들쭉나무(*Vaccinium uliginosum*), 눈측백(*Thuja koraiensis*) 등이 선정되었으며, 지리산에서는 구상나무, 흰참꽃(*Rhododendron tschonoskii*), 땃두릅나무, 주목(*Taxus cuspidata*), 가문비나무, 눈향나무(*Juniperus chinensis* var. *sargentii*)가, 한라산에서는 돌매화나무(*Diapensia lapponica* var. *obovata*), 제주산버들(*Salix blinii*), 시로미(*Empetrum nigrum* var. *japonicum*), 들쭉나무, 눈향나무, 주목, 좀갈매나무(*Rhamnus taquetii*), 구상나무, 산매자나무(*Hugeria japonica*), 섬개벚나무(*Prunus buergeriana*), 섬매발톱나무(*Berberis amurensis* var. *quelpaertensis*)가 선정되어 향후 기후변화에 대비한 고산 취약생태계 정밀조사의 필요성을 제시하였다.

김윤영 등(2017)은 다른 지역에 비하여 특히 높은 생물다양성을 가지는 국립공원 지역을 대상으로, 기후변화 취약종에 대한 기초정보를 수집하여 기후변화가 생태계에 미치는 영향을 예측을 시도하였다. 연구 대상 국립공원은 가야산 국립공원으로, 2016년 3월부터 10월까지 28회에 걸쳐 기후변화 취약 산림식물 및 국가 기후변화 지표생물종을 파악하였다. 연구 결과 국가 기후변화 지표식물은 구상나무, 사스래나무(*Betula ermanii*), 설앵초의 총 3분류군이며, 모두 상왕봉을 비롯한 인근 지역의 능선부에 분포하는 것으로 확인되었다. 기후변화 취약 산림식물은 총 39분류군(목본식물 27분류군, 초본식물 12분류군)이 존재하는 것으로 조사되었으며, 이 중 식재종을 제외하면 총 33분류군의 분포가 확인되었다. 이들에 대한 수직적 분포역은 고도 1,000 m를 기준으로 저지대형(11분류군), 아고산형(12분류군), 광분포형(10분류군)으로 구분되었다. 저지대형 및 광분포형 종들은 상대적으로 지구온난화에 따른 영향이 미약하거나 수직분포가 확대될 것으로 예상되었다. 아고산형의 경우 분포역이 좁고 개체수가 적어 지구온난화에 민감하게 반응할 것으로 파악되었다. 특히 수직적 분포역이 다른 식물에 비하여 극히 좁은 병풍쌈(*Parasenecio firmus*)과 기생꽃의 경우 지구온난화 현상이 지속될 경우, 연구지역에서 소멸될 것으로 추정되었다. 아울러 기후변화 취약종에는 포함되지 않으나, 연구지역에 자생하는 고유종 및 식물구계학적 특정식물 V등급에 해당하는 식물들 역시 기후변화에 매우 취약할 것으로 판단되었다. 이러한 연구 결과는 국립공원 지역에서 기후변화에 더욱 취약한 아고산지역을 대상으로 장기적인

모니터링이 진행되어야 하며, 기후변화 취약종을 재선정할 수 있는 타당한 기준 마련 및 적절한 보전방안 제시가 필요함을 시사한다.

김도성 등(2014)은 한반도 북부지역에 분포하는 나비가 다수 서식하는 것으로 알려진 한라산 고산지대를 대상으로, 영실(1,280 m)에서 백록담(1,950 m)에 이르는 지역을 모니터링하여 나비의 출현 양상 및 기후변화 관련 종들의 고도별 분포 변화를 과거 기록과 비교하였다. 연구 결과 해발 1,665~1,700 m에서 가장 많은 종 및 개체수가 관찰되어 백록담 아래의 열린 초지공간이 나비의 주요 서식지인 것으로 나타났다. 또한, 고산지대에 서식하는 나비인 산굴뚝나비(*Hipparchia autonoe*), 가락지나비(*Aphantopus hyperantus*), 함경산뱀눈나비(*Oeneis urda*), 산꼬마부전나비(*Plebejus argus*) 등의 종들에 대한 과거 모니터링 결과와 현재를 비교해 본 결과 고산지대에 서식하는 종들은 더욱 고도가 높은 지역으로 분포지가 변화되고 있으며 저산지역에서 서식하던 종들이 새롭게 고산지역에서 관찰되고 있음이 확인되었다.

김은숙 등(2019)은 전국 아고산 지역 침엽수림의 장기 면적 변화 파악을 위하여, 1990년대 중반 이후 20년간의 시계열 Landsat 위성영상을 분석하고 침엽수림의 면적과 기후정보의 변화를 함께 비교하였다. 연구지역은 아고산 지역에 특수하게 자생하는 침엽수종이 분포하는 지역을 중심으로 선정하였으며, 총 면적 약 118,970 ha의 54개 지역이 선정되었다. 기후정보 자료로는 장기간의 통계정보가 제공되는 평균기온, 누적강수량, 최심적설, 최대풍속최고, 최대순간풍속최고 자료를 활용하여 정리하였다. 연구 결과 침엽수림의 면적은 9,327 ha에서 6,990 ha로 20년간 약 25%의 감소율을 보였으며, 특히 설악산, 백운산(정선)-함백산-장산, 지리산, 한라산의 경우 침엽수림의 면적 감소가 200 ha 이상의 대규모 발생이 확인되었다. 네 지역의 침엽수림 감소 지역과 유지 지역을 비교한 결과, 네 지역 모두 침엽수림의 감소지역이 침엽수림 유지지역에 비해 평균 해발고도가 높은 것으로 나타나 고지대의 생태계 취약성이 더욱 높은 것으로 확인되었다. 네 지역 산림생태계에 영향을 주는 기후요인의 시계열적 변화를 비교한 결과, 누적강수량, 최심적설, 최대풍속, 최대순간풍속의 경우 뚜렷한 장기간의 변화 추세가 나타나지 않았다. 연평균기온의 경우 다른 기후요소와 비교해 보았을 때 뚜렷한 상승 추세가 나타나 연평균온도가 침엽수림의 면적 변화에 주요한 지표가 되고 있음을 확인하였다.

3.2.3.2 연안 및 도서

최한주와 박세영(2018)은 향후의 기후변화가 한반도 해안 및 도서지역에 미치는 영향에 대해 살펴보고, 이와 관련한 타 국가들의 기후변화 적응 대책 사례를 정리하여 도서해안 지역의 기후변화 대응 정책 시사점을 제시하였다. 기후변화가 해안 및 도서지역에 미치는 영향 및 관측 결과는 기후변화 시나리오를 토대로 1) 해수면 상승으로 인한 저지대 범람, 습지 손실, 해수의 유입 및 거주민들의 삶의 터전 붕괴, 2) 유기체의 생리학적 특성 및 행동, 개체군의 역학에 영향을 미치는 해양 산성화와 산호초 파괴, 어패류의 감소로 인한 지역 주민의 경제적 피해, 3) 염수의 지하수 침투 현상 등 염분농도 증가로 인한 이용 가능 수자원 감소 등으로 나누어 정리하였다. 연안 및 도서지역에서 이러한 기후변화 영향에 대응한 정책의 사례로는 남태평양 피지 섬의 제도 개혁 사례, 해수면 상승으로 인한 상습 침수 피해에 대응한 템스 강 하구의 하천관리 사례, 잦은 재해로 많은 피해를 입었던 필리핀의 국가 재해 리스크 감소 및 관리법과 해양환경 보호 사례를 예시로 들어 설명하였다. 이는 기후변화와 해수면 상승으로 많은 피해가 전망되는 우리나라 연안 및 도서지역의 기후변화 대응 정책의 방향성을 제시하였다.

김현희 등(2016)은 기후와 생태환경의 급격한 변화로 인하여 고유한 생태계가 훼손될 위기에 처한 전라남도 남해안 일부 도서지역(총 75곳)의 식물상에 대한 기초 자료를 확보하고 이를 토대로 도서생물지리학적 특성을 분석하였다. 연구 지역(유인도 15곳, 무인도 60곳)에 분포하는 식물은 총 180과 1,941종이었으며, 온난다습한 남해 도서지역의 기후적 특수성을 반영하여 다양한 외관형의 식물종이 출현한 것으로 확인되었다. 일부 지역에서는 설앵초, 눈향나무와 같이 한랭한 기후에 서식하는 종이 분포하는 것으로 나타났는데, 이들은 기후변화로 인한 온난화에 더욱 취약하게 반응하여 분포역이 급속하게 줄어들 것으로 전망되었다. 전체 출현종의 약 69%는 7곳 이하의 도서지역에

제한적으로 분포하며, 약 25%의 종은 단 1곳의 섬에서만 서식하여 남해안의 도서지역이 식물지리학적으로 높은 지역성을 가짐을 확인할 수 있었다. 이러한 연구결과를 통하여 대부분의 도서지역 생태계가 협소한 면적과 지리적인 고립으로 인하여 다른 지역과 구별되는 고유한 특성을 가지며, 급격한 환경변화에 노출될 경우 기존의 식물상이 빠르게 변화하여 높은 생태계 취약성을 가짐이 확인되었다. 이와 같이 도서지역의 식물다양성 현황을 파악하고 분석한 연구는 현존의 도서 식물상 및 생태계를 보호, 관리하는 것이 중요하다는 점을 시사한다.

오상백 등(2014)은 전국 총 10곳(인천시, 군산시, 목포시, 여수시, 통영시, 부산시, 울산시, 속초시, 제주시, 서귀포시)의 연안도시를 대상으로 기후변화 취약성의 평가지표를 개발하고 이를 활용하여 기후변화 취약성을 평가하였다. 평가지표는 연안도시의 기후노출과 민감도, 적응능력을 고려한 함수로 개발되었다. 기후노출은 연안도시가 직, 간접적으로 재해를 유발할 수 있는 기후환경에 노출될 수 있는 정도를 의미하며, 평가인자로는 기온, 강수, 풍속, 해수면이 설정되었다. 민감도는 연안도시의 인간 활동이 기후노출에 의하여 부정적인 영향을 받는 자극의 정도를 나타내며 평가인자로는 인적요소, 시설요소, 토지요소, 해양요소가 설정되었다. 적응능력은 기후노출에 대응하거나 민감도를 저감시킴으로써 기후변화에 의한 피해에 대처할 수 있는 연안도시의 총체적 능력을 의미하며 평가인자로는 경제능력, 사회능력, 행정능력, 해양대응능력이 설정되었다. 이러한 연구 결과는 향후 더욱 체계적인 연안도시 관리를 위한 기후변화 취약성 평가 지표 개발의 토대자료로써 높은 가치를 가진다.

홍선기(2014)는 지구온난화와 무분별한 개발 등으로 인해 고유한 특성을 잃고 훼손되어가는 도서해양생태계의 취약성 및 기초연구의 미진함을 강조하고, 우리나라 도서생태계의 생물상 및 서식지 보전에 대한 종합적이고 정량적인 방안 마련 및 지속적인 조사·관리시스템 개발을 위한 학제적 공동연구를 제안하였다. 특히 우리나라의 기후과학 연구가 도서해안지역에서 적용될 수 있는 방안을 1) 기후변화에 대응한 생태계의 보전관리, 2) 도서환경 보전을 위한 생태계 리모델링, 3) 다도해 희귀생물서식처 가이드라인, 4) 도서개발에 따른 환경영향평가의 정량화 등으로 정리하여 제시하였다.

시공간적으로 끊임없는 변화를 겪는 해안지역은 지리적 특성 상 기후변화에 의한 해수면 상승의 영향을 직접적으로 받을 수밖에 없는 취약생태계이다(유재진 등, 2016). 지구적 기후변화는 해안지역의 침식 및 퇴적작용의 양상에도 직접적인 영향을 미치며, 이와 관한 연구들이 국내외로 활발히 진행되고 있다.

유재진 등(2016)은 충청남도 태안군 바람아래 해빈의 동쪽에 위치한 할미섬을 대상으로, 기후변화와 관련한 침식 및 퇴적의 변화 요인을 파악하고, 장기간의 침식기준목 측정자료와 풍향, 풍속 자료를 활용하여 기후변화와 할미섬 주변의 침식, 퇴적환경 변화 양상 간 관계성을 분석하였다. AWS (automatic weather system) 자료를 분석한 결과, 할미섬은 남풍이 우세한 여름철을 제외하고는 모든 계절에서 북서풍 및 서풍 계열이 주도적이었으며, 이러한 계열의 바람이 할미섬의 지형형성작용에 지배적인 영향을 미친 것으로 파악되었다. 기상자료와 침식, 퇴적환경 변화의 관계성을 확인하기 위하여 할미섬을 동단과 서단, 북서단으로 구분한 후 연도별 침식, 퇴적량의 누적 변화를 살펴본 결과 서단에서는 퇴적 양상이, 동단에서는 침식 양상이 우세하게 나타났다. 이러한 차이는 지역에 주도적으로 나타나는 풍향과 풍속, 지형조건의 차이를 모두 반영하여 나타난 결과이다. 이는 기후변화로 인한 최대순간풍속 등 기상요소의 변화가 해안지역의 침식, 퇴적 양상에 영향을 미칠 수 있음을 시사한다(Choi and Moon, 2008; 유재진 등, 2016).

3.2.3.3 내륙습지 및 기타지역

장동호와 김성훈(2013)은 고기후 환경 복원과 다양한 생물의 서식처 제공 등 높은 생태적 기능과 보전가치를 가지는 산지습지를 대상으로 기후변화 취약성을 평가하고자 다중시기 항공사진과 기후자료를 활용하여 습지면적 변화와 유의성 검증을 진행하였다. 경상남도 양산시에 위치한 신불산 고산습지의 1975년~2012년도 항공사진을 활용하였으며, 분석 결과 골프장 건설 등 인위적 영향과 더불어 1980년 이후의 급격한 연평균기온 상승이 식물상의

분포 변화와 습지 면적 축소에 영향을 미친 것으로 확인되었다. 특히 봄철의 평균기온 상승이 연구지역의 토양 표면 건조화를 유발하였고, 습지의 육화에 영향을 주었을 것으로 판단되었다.

인구 과밀화와 산업화로 열악해진 환경에 처한 도시하천은 많은 내·외부적 물리화학적 요인에 더욱 높은 취약성을 가지는 생태계이다. 이에 부산시의 대표적인 도시하천인 온천천을 대상으로, 가뭄 및 집중호우 등의 환경적 교란이 수질과 부착규조류의 군집에 미치는 영향을 파악하고 국지적 환경 변화에 대응한 도시하천의 유지관리 방안의 필요성을 제고하였다(이유정 등, 2017). 연구 결과 도시화가 진행된 유역에서 가뭄 및 국지성 집중호우 등 환경변화에 의하여 하천 유출 특성 및 도심지 비점오염물질 유입의 정도에 따라 급격한 수질변화가 일어났다. 부착규조류는 가뭄기간 동안 종 조성이 변화하였고 집중호우 이후에는 생물량이 급격하게 감소되어 도시하천의 수생태계 구조와 기능이 국지적인 기후변화에 많은 영향을 받음이 확인되었다.

2014년 이후의 연구는 죽절초(*Sarcandra glabra*)와 섬시호(*Bupleurum latissimum*), 구상나무에 대하여 수행되었으며, 온난화(CO_2 농도 및 온도상승) 영향뿐만 아니라 서식지의 영양소, 광, 수분과 같은 다른 환경 인자들의 영향을 함께 고려하여 생리·생태에 대한 기후변화 영향을 예측하였다(안경호 등, 2016; 박형철 등, 2017, 2018; 이수인 등, 2018).

죽절초의 경우 온난화와 더불어 토양 유기물 함량과 수분조건이 고려되었으며, 온난화 환경에서 수분과 유기물에 대한 내성 범위가 넓어져 성장이 증가하는 것으로 나타났다(그림 3.8, 이수인 등, 2018). 결과적으로 온난화 환경 하에서 수분과 유기물이 죽절초의 성장을 제한하지 않는 것으로 예측되었다(이수인 등, 2018).

멸종위기종인 섬시호의 경우에는 광, 수분, 영양소가 온난화(CO_2 농도 및 온도상승) 조건과 함께 고려되었고 영양소보다는 온난화가 섬시호의 생장에 더 많은 영향을 주는 것으로 보고되었다(안경호 등, 2016). 생장에 가장 좋은 조건은 온난화 조건에서 영양소가 증가한 경우로 나타났다.

3.3 영향 전망

3.3.1 식물생태

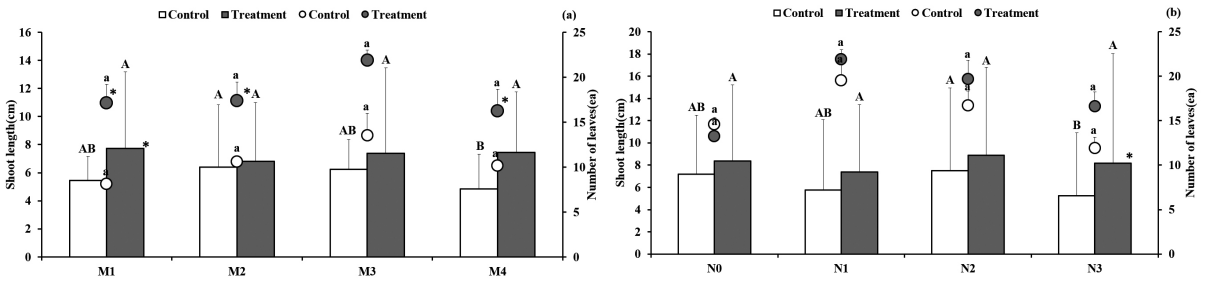
3.3.1.1 식물생육·생리

국내의 식물생육·생리에 대한 기후변화 영향 예측 연구는 CO_2 농도와 온도를 인위적으로 증가시킨 온실과 대조구에서 식물의 생육 차이를 비교함으로써 수행되었다.

3.2.2.2 식물계절

식물계절(plant phenology)에 대한 기후변화 영향 전망에 대한 연구는 기후변화에 따른 왕벚나무(*Prunus yedoensis*), 돌배나무(*Pyrus pyrifolia*), 복사나무(*Prunus persica*)의 개화시기 변화 예측이 수행되었다(Hur et al., 2014; Hur and Ahn, 2015).

벚꽃의 개화시기는 RCP 4.5와 RCP 8.5 기후변화 시나리오



(a) (b)

그림 3.8 CO_2와 온도상승 조건 하에서 토양수분(a) 및 유기물함량(b)의 구배에 따른 실험구와 대조구 사이의 죽절초 새싹의 길이 및 잎의 수 차이 분석 결과(이수인 등, 2018). *는 실험구와 대조구 사이의 유의한 차이를 보이는 분석 결과를 의미함.

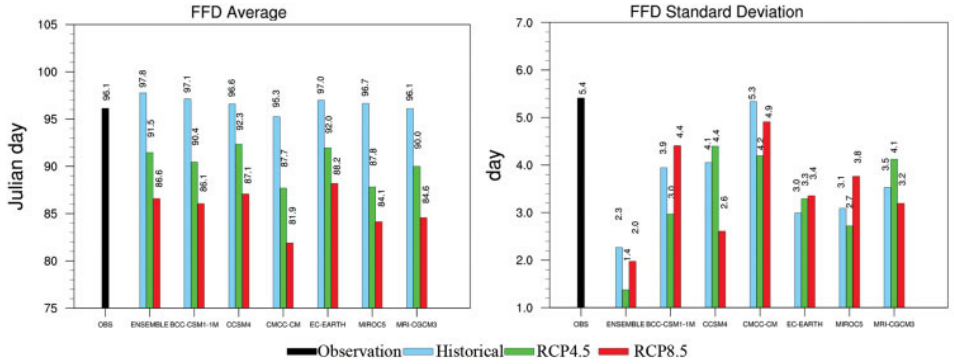


그림 3.9 기후변화 예측 모형별 벚꽃의 개화시기(FFD) 예측 결과(Hur et al., 2014).

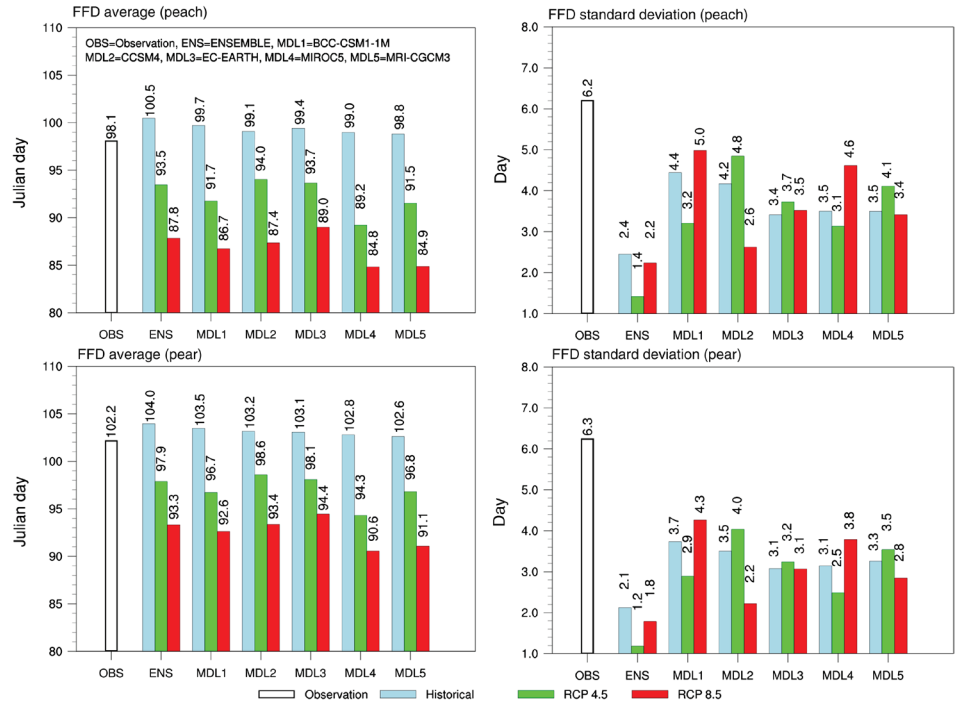


그림 3.10 기후변화 예측 모형별 배꽃과 복숭아꽃의 개화시기(FFD) 예측 결과(Hur and Ahn, 2015).

가정 하에 2090년까지 각각 6.3일과 11.2일 빨라질 것으로 예측되었으며(그림 3.9), 배꽃은 6.1일과 10.7일, 복숭아꽃은 7일과 12.7일 빨라질 것으로 예측되었다(그림 3.10).

3.3.1.3 식물서식지·분포

2014년 이전과 비교하면 기후변화에 따른 서식지 및 분포 변화 예측 연구는 식물계절이나 생육 및 생리 분야의 연구에 비해 증가 추세를 보였다. 이것은 식물생태의 기후변화 영향을 이해하는데 서식지 단위의 종합적인 분석의 중요성이 강조되었고 모형을 활용한 다양한 예측 기법의 도입 때문으로 판단된다.

기후변화에 따른 식물의 서식지 변화와 분포 변화를 예측하기 위해서는 먼저 각 식물종에 적합한 서식지 기후조건을 이해해야 한다. 동시에 이러한 기후조건에 영향을 미치는 다른 생물적, 비생물적 환경요인에 대한 이해가 필요하다. 이와 더불어 각 식물의 적응 능력의 평가가 이루어져야 신뢰할 수 있는 예측이 가능하다. 이러한 면을 고려할 때 서식지 변화 연구와 이를 바탕으로 한 분포 변화

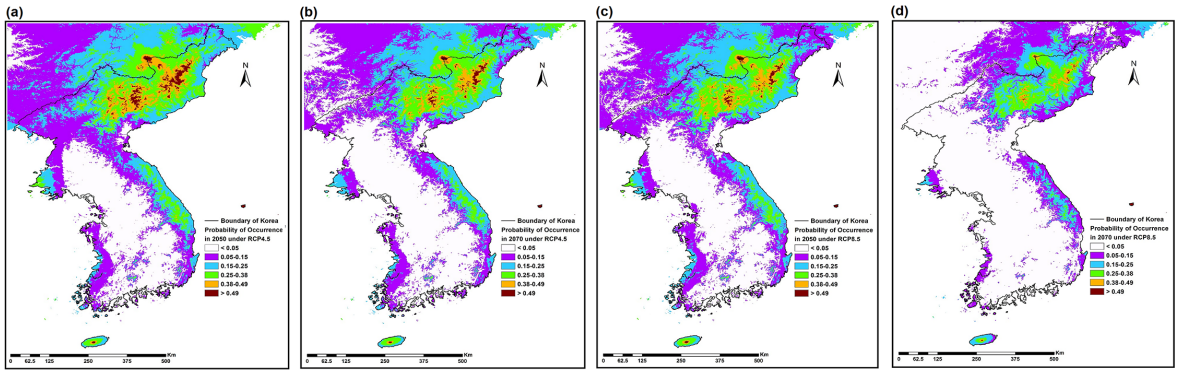


그림 3.11 기후변화에 따른 한대성 상록활엽수 적합서식지 분포 변화 예측(Koo et al., 2015). RCP 4.5(a)와 RCP 8.5(c) 하의 2050년까지의 적합서식지 분포 변화 예측과 RCP 4.5(b)와 RCP 8.5(d) 가정 하의 2070년 적합서식지 분포 변화 예측.

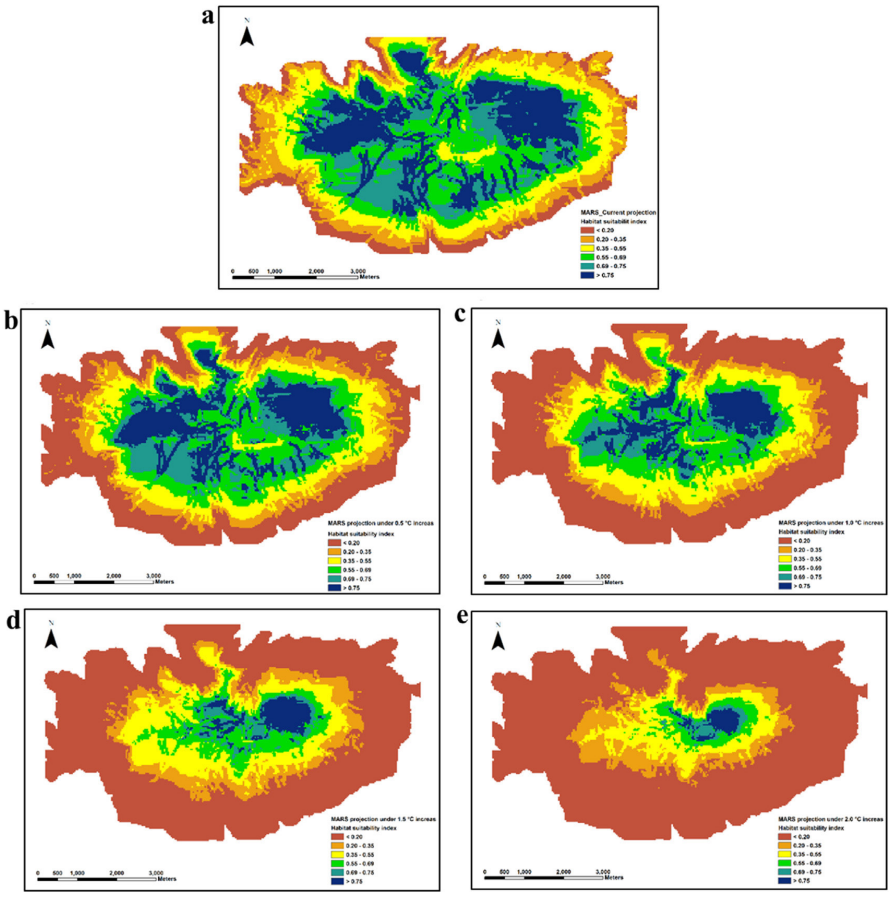
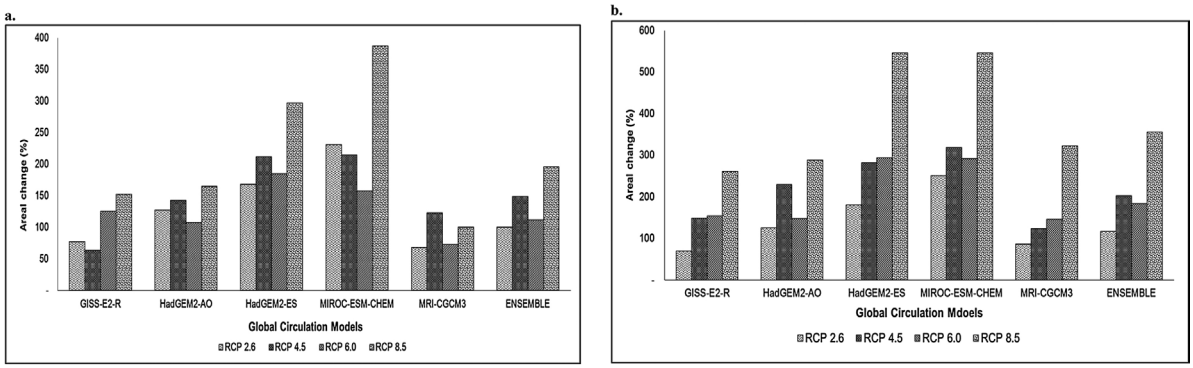


그림 3.12 기온상승에 따른 한라산 구상나무 적합서식지 분포 변화 예측(Koo et al., 2017a). (a) 현재 적합서식지 분포, (b) 0.5℃ 상승 시 적합서식지 분포, (c) 1.0℃ 상승 시 적합서식지 분포, (d) 1.5℃ 상승 시 적합서식지 분포,. (e) 2.0℃ 상승 시 적합서식지 분포.

연구는 식물생태계의 다양한 연구들을 통합하여 종합적으로 이해하고자 하는 노력으로 볼 수 있다.

미래 변화 예측 연구는 남한이나 한반도 스케일(regional scale)에서 기후변화 시나리오 가정 하에 기후변화 민감종에 대하여 종별 분포 변화 예측을 통해 수행되었다. 예외적으로, 한라산의 지역스케일에서 구상나무 서식지 및 분포 변화에 대한 기후변화 영향 예측이 수행되기도 하였다.

기후변화 리스크 평가를 위하여 산림청 한반도 기후변화



(a) (b)

그림 3.13 기후변화 예측 모형과 시나리오에 따른 후박나무 미래 분포 변화 예측(Koo et al., 2017b). (a) 2050년 분포 변화 예측, (b) 2070년 분포 변화 예측.

적응 대상 식물종 중 개족도리풀(*Asarum maculatum*), 보리장나무(*Elaeagnus glabra*) 등을 포함하는 111종에 대하여 미래 변화 예측 연구가 남한 스케일에서 이루어졌다(홍승범 등, 2017). 또한, 기후변화에 따른 식물 종풍부도 변화를 예측하기 위하여 주요 민감 식물종에 대한 분포 변화 예측이 수행되었다(신만석 등 2018). 그 외에도 외래식물의 확산 방지를 위한 기초자료 제공을 위하여 털물참새피(*Paspalum distichum* var. *indutum*), 실망초(*Conyza bonariensis*), 청비름(*Amaranthus viridis*)에 대한 분포 변화 예측이 수행되었다(이용호 등, 2015, 2016; 조강현과 이승현, 2015).

기후변화 민감종 중에 북방계 식물로 기후변화에 따라 서식지 손실이 예측되는 한대성 상록활엽수와 침엽수에 대한 서식지 적합도 및 분포 변화 예측 연구가 수행되었다.

우리나라 한대성 수종의 경우 기후의 온난화에 따라 그 분포지가 축소될 것으로 예측되었으나 강수량의 증가 때문에 분포지 확대의 가능성도 제기되었다. 고산·아고산에 주로 서식하고 있는 한대성 상록활엽수의 경우 기후온난화에 따라 그 분포지가 축소하는 것으로 예측되었으며, 특히 북한의 일부 고산지역을 제외한 지역에서는 서식이 불가능한 것으로 분석되었다(그림 3.11, Koo et al., 2015).

우리나라 대표적인 아고산대 수종인 구상나무와 분비나무의 경우 한라산의 지역단위 및 남한 스케일의 연구에서 기후변화에 따라 서식지가 감소되는 것으로 예측되었다(그림 3.12, 박현철 등, 2015; Koo et al., 2017a). 그러나 남한 스케일에서 RCP 4.5와 8.0 시나리오 가정 하에- 영국 Hadley Center의 GCM 모형에 의해 예측된 기후변화(기온상승과 강수량 증가)를 고려한 결과 구상나무의 기후적 적합 서식지가 확대될 수 있는 증가 가능성도 제시되었다(구경아 등, 2016).

난대성 활엽수종의 경우 적합서식지 및 분포 변화는 종에 따라 다르게 나타났다(박선욱 등, 2016a, 2016b). 현재 분포지가 상대적으로 넓은 후박나무(*Machilus thunbergii*)와 모밀잣밤나무(*Castanopsis cuspidata*), 돈나무(*Pittosporum tobira*), 다정큼나무(*Raphiolepis indica var. umbellata*), 우묵사스레피나무(*Eurya emarginata*), 송악(*Hedera japonica*) 등 몇몇 수종은 기후변화에 따라 기후적합서식지의 면적이 확대되어 분포지가 확대될 것으로 예측되었다(박선욱 등, 2016b: Koo et al., 2017b, 그림 3.13). 그러나 현재 분포지가 매우 좁아 해안가 등 일부 지역에만 분포하는 난대성 수종 남오미자(*Kadsura japonica*), 참식나무(*Neolitsea sericea*), 감탕나무(*Ilex integra*), 황칠나무(*Dendropanax morbifera*)의 경우에는 서식지가 소실될 수 있기 때문에 보존 대책이 필요하다고 보고하였다 (Koo et al., 2017c, Koo et al., 2018).

또한, 각 수종의 산포능력 등 적응능력을 고려할 경우, 미래 분포지 확대가 예측되는 상록활엽수의 경우에도 확대 정도가 감소하는 것으로 나타났다(그림 3.14). 식나무와 동백나무 모두 산포능력을 무제한으로 가정한 예측에 비해 산포능력 제한 하에 각각 최소 10%에서 42%, 14%에서 37% 분포 면적이 감소하는 것으로 예측되었다(박선욱 등, 2019).

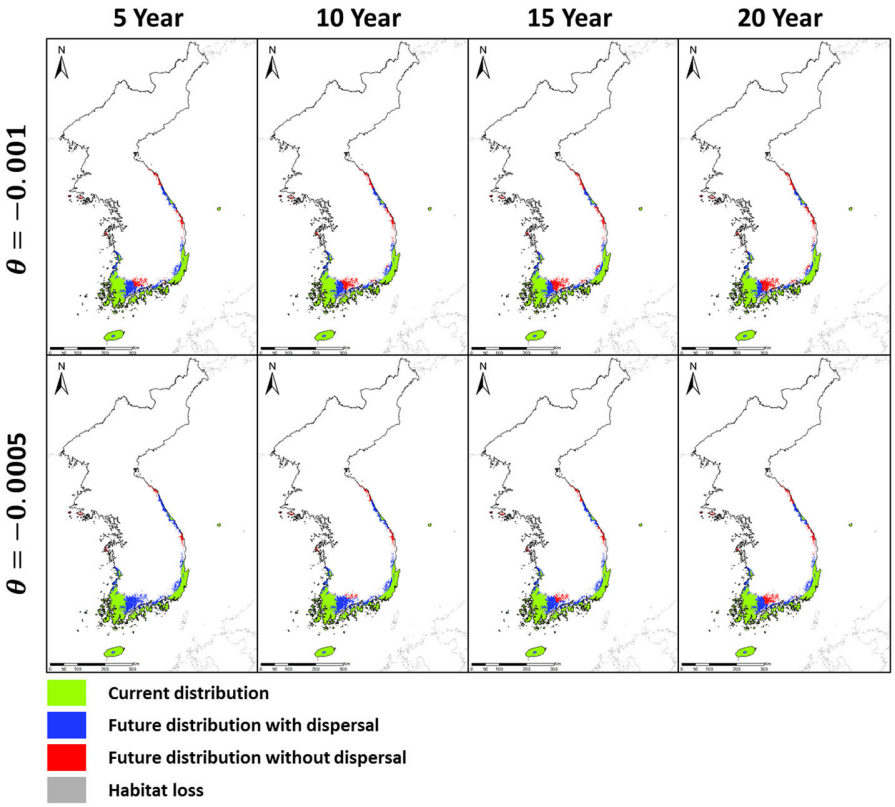


그림 3.14 적응능력을 고려한 기후변화에 따른 자금우(*Ardisia japonica*)의 미래분포 예측(Park et al., 2017). 위쪽 그림은 단거리 산포를 고려한 예측이며 아래 그림은 장거리 산포를 고려한 예측임.

3.3.2 동물생태

3.3.2.1 서식지 분포변화: 서식지 확대 또는 감소

기온상승에 따른 동물의 반응은 서식지 확대 또는 감소 등 여러 형태로 나타나는데 제한된 분포를 갖는 경우가 많은 멸종위기종의 경우 기온상승에 따른 서식지 변화에 취약할 가능성이 높다. 김진용 등 (2018)은 국내 멸종위기 야생동물을 대상으로 기후변화에 따른 기온상승이 멸종위기종 분포에 어떠한 영향을 주는지 알아보았다(그림 3.15).

RCP 4.5 시나리오에 따르면 2070년 하늘다람쥐(*Pteromys volans*), 긴점박이올빼미(*Strix uralensis*), 까막딱다구리(*Dryocopus martius*) 등은 취약한 것으로 나타났고 RCP 8.5 시나리오에서는 하늘다람쥐, 긴점박이올빼미, 까막딱다구리, 올빼미(*Strix aluco*), 뜸부기(*Gallicrex cinerea*), 큰덤불해오라기(*Ixobrychus eurhythmus*), 팔색조가 취약한 것으로 나타나 기후변화에 따른 멸종위기종은 서식 가능성이 낮아지는 것으로

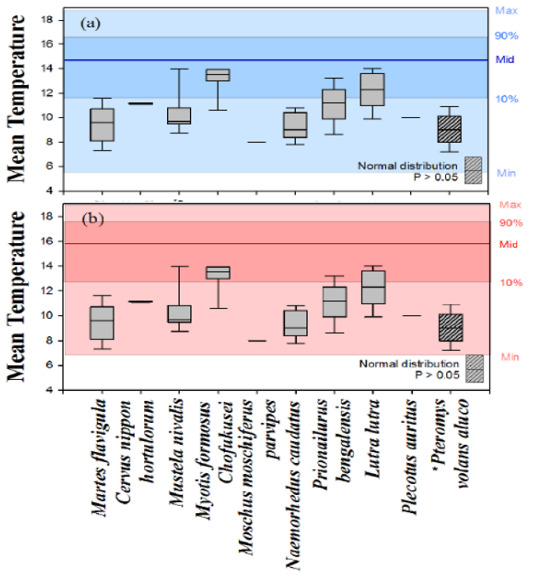


그림 3.15 국내 포유류의 온도 분포 범위와 2070년 (a) RCP 4.5 시나리오에서의 연평균기온 (b) RCP 8.5 시나리오에서의 연평균기온(김진용 등, 2018). *는 정규분포를 나타내 온도 범위가 온도에 크게 영향을 받는 것을 나타냄.

예상하였다.

기온상승과 함께 종이 서식하는 환경도 중요한 변수로 작용할 수 있는데 긴점박이올빼미와 까막딱다구리, 올빼미 등은 백두대간과 같은 산림지대에서 낮은 온도를 선호하는 것으로 나타나 기후변화로 인한 산림지대 분포의 변화도 미래 멸종위기종 관리에서 고려해야 할 것으로 제안하고 있다(김진용 등, 2018). 한편 여름철새인 뜸부기, 큰덤불해오라기, 팔색조는 여름철 평균기온 상승과 고온 발생 빈도 증가가 번식 실패 요인으로 작용하여 개체군 감소로 이어질 수 있을 것으로 예상하였다. 그러나 이 종들은 한국보다 따뜻한 아열대지역에서도 번식하므로 기온이 상승할 경우 국내분포가 더 넓어질 가능성도 있다(박헌우 등, 2018).

낮은 온도에 분포하는 특성을 보이고 분포범위가 매우 좁은 대륙사슴(*Cervus nippon*), 사향노루(*Moschus moschiferus*), 토끼박쥐(*Plecotus ognevi*), 수원청개구리(*Hyla suweonensis*), 멋조롱박딱정벌레(*Acoptolabrus mirabilissimus mirabilissimus*), 물장군(*Lethocerus deyrolli*), 붉은점모시나비(*Parnassius bremeri*) 등 7종은 멸종위기종 1급에 해당하면서 기후변화에도 취약할 것으로 여겨져 미래에도 개체군 유지를 위한 노력이 절대적으로 필요할 것으로 예상하였다.

Koo et al. (2019)는 제주도에서만 발견되는 비바리뱀(*Sibynophis chinensis*)의 서식지 특이성을 연구하고 이를 바탕으로 미래 분포 범위에 관한 연구결과를 발표하였다. 비바리뱀은 중국, 홍콩, 베트남 등 아시아 국가에 넓게 분포하지만 한국에서는 제주도에서만 발견되고 있으며 개체군이 작고 분포역이 좁아 멸종위기종으로 지정 보호받고 있다. 비바리뱀의 분포에 영향을 주는 요인으로는 비가 많이 오는 우기 동안 강수량이 큰 영향을 미치는 것으로 나타났고 이를 토대로 제주도 미래 기후변화에 따라 비바리뱀의 분포가 섬 서쪽과 고산 지대에서는 감소하는 반면 섬 동쪽에서는 늘어날 것으로 예측하여 제주도 내에서의 비바리뱀의 분포 범위가 지역별로 차이가 날 것으로 예상하였다.

김태근 등(2016)은 반달가슴곰(*Ursus thibetanus ussuricus*)의 서식지 분포와 기후변화에 따른 변화를 예측하였다. 현재 서식하기 적합한 지역으로는 전남, 전북, 강원도 지역으로 확인되었으며 반달가슴곰의 서식 분포에 영향을 주는 요인으로 기온보다는 토지피복 유형과 강수량 등이 더 크게 작용하였다. 반달가슴곰의 서식지 변화는 건조시기 동안 강수량과 기온의 연간 범위 등에 따라 달라질 수 있는데 현재보다 2050년에는 약 10배, 2070년대에는 약 15배가 늘어나는 것으로 예상하여 다른 멸종위기종의 분포범위 감소와는 다른 증가추세를 나타내었다.

3.3.2.2 개체군 풍부도 변화: 무척추동물

우리나라에 분포하는 무척추동물과 척추동물 개체군이 미래 기후변화로 증가 또는 감소할 것인가에 관한 예측 연구가 많이 이루어졌다. 개체군의 풍부도 변화는 앞 절의 서식지 확대와 밀접한 관련을 지니고 있어 서식지 확대를 풍부도 변화와 구분하기는 다소 어렵지만 이 부분에서는 풍부도 변화의 증감을 우선으로 소개하였다.

Lee et al. (2016)은 한국에서 기후변화 시나리오 RCP 4.5와 RCP 8.5를 적용하여 2056년부터 2065년까지 절지동물의 다양한 분류군의 종 다양성과 풍부도 변화를 예상하였다. 연구에서 저자들은 절지동물 풍부도와 종 다양성은 기온 상승에 따라 감소추세를 나타날 것으로 예상하였는데 풍부도의 경우 13~36%가 감소하며 종 다양성은 5~13% 감소할 것으로 예상하였다(그림 3.16).

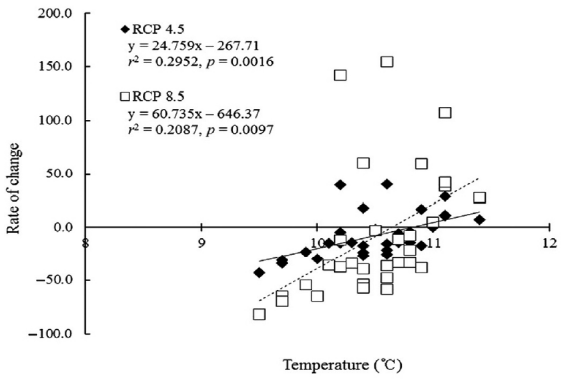


그림 3.16 조사지점의 연평균기온과 절지동물의 풍부도 또는 다양성 변화율간의 상관관계(Lee et al., 2016). 두 시나리오 하에서 모두 감소할 것으로 여겨짐.

거미 풍부도는 감소할 것으로 여겨지지만 과 수준에서 차이를 나타내었고 4개과(늑대거미과, 너구리거미과, 밭고랑거미과, 깡충거미과)의 경우에는 증가양상을 띠었다(Lee et al., 2016). 딱정벌레 중에는 풍뎅이과가 유일하게 증가추세를 나타내었고 나머지는 감소세를 나타내었다(Lee et al., 2016). 절지동물인 갑각강, 곰보노래기목(Oniscomorphia), 귀뚜라미과, 노린재목 등은 증가추세인 반면 각시노래기목(Juliformia), 돌좀목(Archaeognatha), 곱등이과, 매미목, 개미과, 벌목, 나비목 등은 감소추세를 나타내었다(Lee et al., 2016). 비록 이 연구에서는 과 또는 목 등 상위분류단계를 대상으로 실시하여 종 단위 증감여부를 파악하기는 어렵지만 상위분류군 수준에서 우리나라 전역에 걸친 풍부도의 증감양상을 예측하였고 무척추동물 전체가 증가 또는 감소하는 일관적 양상이 나타나는 대신 종류에 따라 서로 다른 양상을 띠었다.

절지동물 종 다양성 증감에 영향을 주는 환경요인으로 기온이 가장 큰 변수로 밝혀졌는데(Lee et al., 2016), 이 연구에서는 산림지를 중심으로 조사하였기 때문에 고도도 중요한 변수로 나타났다(그림 3.17).

우리나라를 포함한 온대지역의 경우 기온이 증가하면서 종 수와 개체수도 증가하는 양상을 나타내지만(Deutsch et al., 2008) 한국은 반도라는 지형적 특성으로 북방계 종의 감소가 남방계 종의 증가보다 더 두드러지게 나타나 미래에 기온상승으로 전체 종 다양성과 풍부도가 감소할 것으로 예상하였다.

파리류를 대상으로 과 수준에서 풍부도의 변화를 알아본

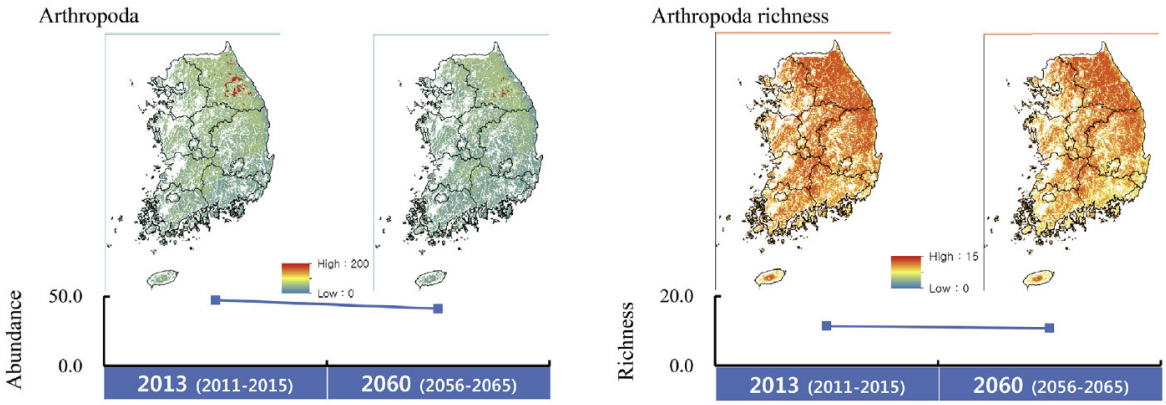


그림 3.17 우리나라 절지동물 풍부도와 종 다양성 변화(Lee et al., 2016). 현재(2011~2015)에 비해 앞으로 50년 뒤인 2056~2065년에는 모두 줄어들 것으로 예상됨.

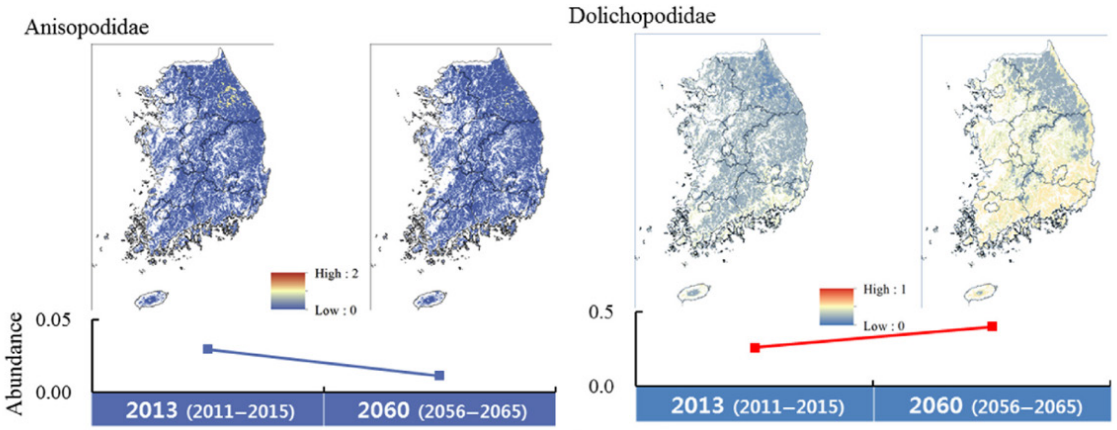


그림 3.18 한국산 파리과의 분포 변화(Lee et al., 2015). 모기파리과는 가장 큰 폭으로 감소할 것으로 여겨지며 장다리파리과는 유일하게 증가할 것으로 예상됨.

연구에서는 22개과 풍부도가 장다리파리과(Dolichopodidae)를 제외하고 모두 감소하는 것으로 나타났다(Lee et al., 2015). 특히 모기파리과(Anisopodidae)의 감소폭이 가장 크게 나타났으며(그림 3.18) 가시날개파리과(Heleomyzidae)도 감소폭이 두 번째로 크게 나타났다. 모기파리과는 부식성 또는 균을 먹는 습성을 지니고 있으며 축축한 숲에서 주로 서식하면서 썩은 유기물과 액을 선호한다. 모기파리과 종의 현재분포에서 풍부도는 3~7℃의 낮은 온도에서 가장 높았으며 기온 요인과는 부정적 상관관계를 보인 반면 강우량과 긍정적인 상관을 보였다. 현재 강원도에 주로 분포하고 있으며 추후 50년 뒤에는 우리나라에서 거의 사라질 것으로 예상되었다. 장다리파리과는 유일하게 증가하는 종류로 17.5~54.3%까지 증가하는 것으로 예상되었다. 장다리파리과는 소형 포식성 파리로 물가나 꽃, 잎 그리고 줄기에서 발견된다. 환경요인과의 상관을 살펴본 결과 어두운 숲보다는 빛이 많이 들어오는 장소를 선호하며 최저기온과 양적인 상관을 보여 다른 과들과는 차이를 보였다. 현재는 경남지역에서 가장 풍부도가 높았지만 50년 후에는 남부지방 전체에 걸쳐 흔히 볼 수 있을 것으로 예상되었다.

종 수준에서 미래 풍부도 증감에 관한 연구로 Kwon et al. (2014c)는 개미에 관한 풍부도 변화를 알아보고 이 풍부도에 영향을 주는 요인도 함께 연구하였다. 우리나라 전역에서 채집된 개미 57종을 대상으로 변화를 살펴본 결과 최고 및 평균온도가 주요한 환경변수로 파악되었으며 조사한 종 중 32종은 감소하고 나머지 15종은 증가할 것으로 예상하였다.

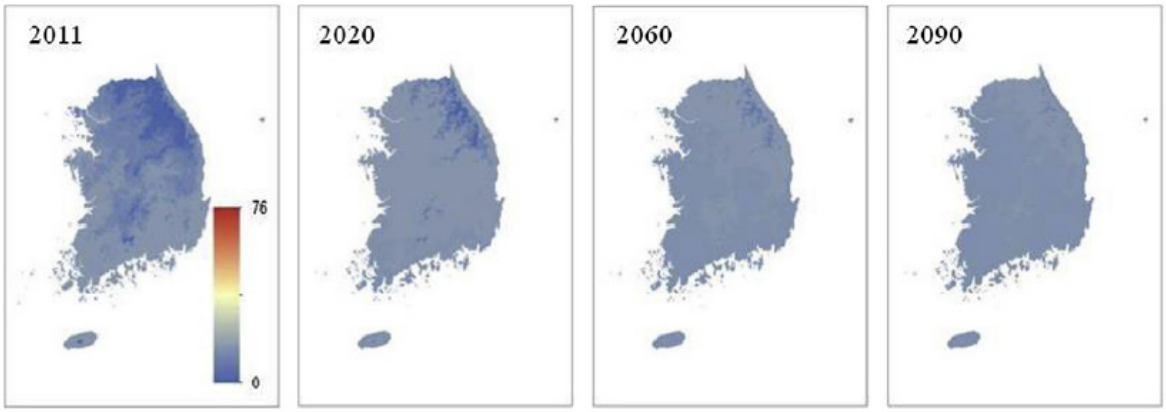


그림 3.19 *Crematogaster osakensis* 종의 풍부도 변화(Kwon et al., 2015). A1B기후 시나리오에 맞추어 네 단계로 나타낸 그림으로 풍부도가 기온 증가에 따라 증가 추세를 나타냄.

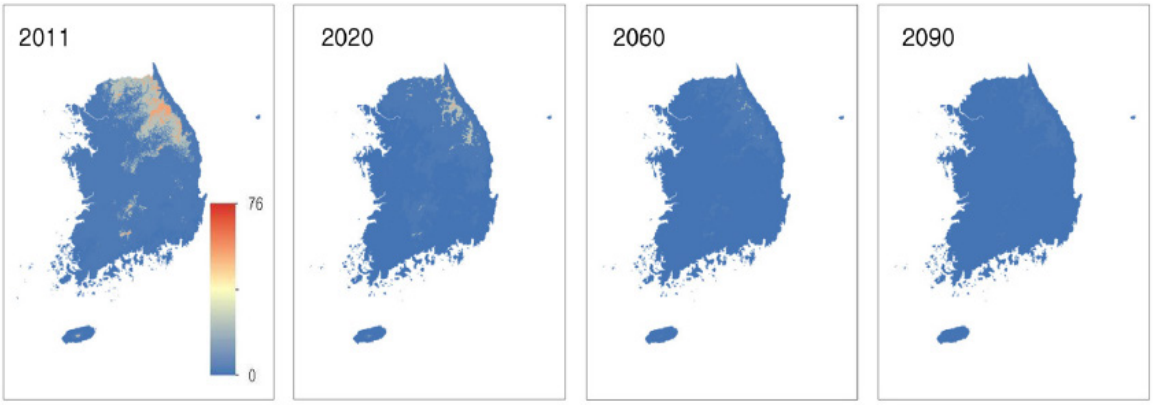


그림 3.20 *Myrmica kotokui* 종의 풍부도 변화(Kwon et al., 2014c). A1B기후 시나리오에 맞추어 네 단계로 나타낸 그림으로 풍부도가 기온 증가에 따라 감소 추세를 나타냄.

이러한 종 증감에 관한 예측결과는 Kwon et al. (2014b)에서 거미를 이용한 결과와 유사한 양상을 띠었는데 여기에서는 68종이 감소하고 9종이 증가하는 것으로 나타나 개미와 거미 종의 풍부도는 기온 증가에 따라 증가하는 종 보다 감소하는 종이 훨씬 많은 것으로 나타났다(그림 3.19, 3.20).

딱정벌레 역시 기온상승으로 개체군이 증가하기보다는 감소가 더 많을 것으로 예상하였다. Kwon et al. (2015)은 딱정벌레 151종의 분포변화를 한국 전역에서 채집된 자료를 대상으로 RCP 4.5와 8.5시나리오를 이용하여 분석한 결과 77종은 감소하는 반면 57종만 증가하는 것으로 나타났다 (그림 3.21).딱정벌레와 함께 개미와 거미 종 역시 늘어나는 종 보다는 감소하는 종이 더 많은 것으로 나타났다. 이러한 결과가 반도에서만 일어나는 현상인지 아니면 전 세계에서 보편적으로 일어나는가에 대한 비교분석 연구가 필요할 것으로 보인다.

우리나라 하천 조사가 이루어진 720곳 중 오염이 심하지 않으면서 곤충 분포가 기록되어 있는 지점 501곳을 대상으로 주요 수서곤충목인 하루살이목, 잠자리목, 강도래목, 날도래목의 분포가 앞으로 어떻게 될 것인가를 연구하였다 (Li et al., 2013; Li et al., 2014). 이 연구에서는 온도가 증가하면서 잠자리목을 제외한 다른 대부분의 수서곤충 풍부도는 줄어드는 것으로 나타났다(그림 3.22). 이들은 또한 시간이 지나면서 멸종할 가능성에 대한 평가에서도 2040년대부터 종 수가 점차 줄어들다가 2060년 이후 급격한 감소가 이루어져 멸종위기가 클 것으로 예측하였다. 지표종으로 이용한 3종 역시 분포 감소가 2060년 이후에는 급격한 것으로 예상되었다.

고산 하천의 경우 2080년대에는 20%이상 종이 사라지는 최대 생물다양성 손실이 있을 것으로 예측하였다(Li et al., 2013). 각 목을 대상으로 알아본 결과 강도래목의 종 다양성 손실이 가장 클 것으로 여겨지는데 2080년대 고산 하천에서 62.1%가 사라져 날도래목 17.8%, 하루살이목 15.2%보다 큰 폭으로 감소가 예상된다. 기온이 상승하면 저온 선호성수서곤충은 고도가 높거나 위도가 높은 쪽으로 이동하게 되는데 저온 선호성 강도래목의 경우 비행능력이 60 m 미만으로 환경변화에 적응하기 힘들어 가장 치명적인 영향을 받을

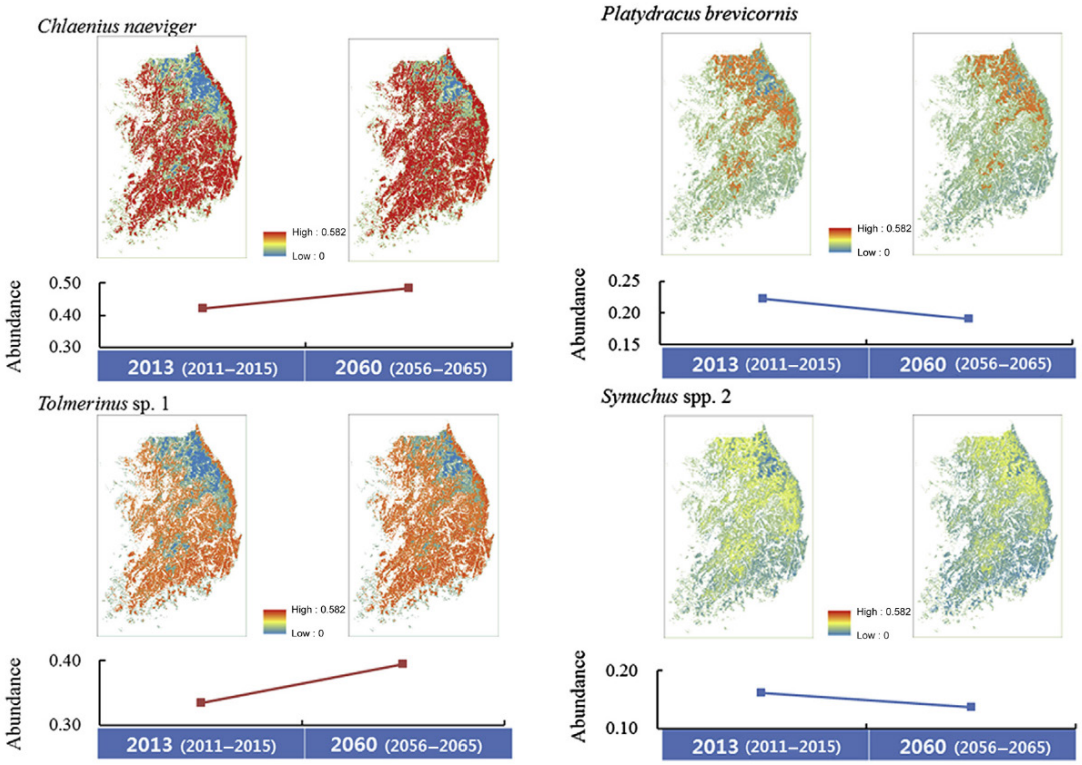


그림 3.21 딱정벌레 분포 변화(Kwon et al., 2015). 왼쪽 두 종은 분포가 늘어날 것으로 여겨지지만 오른쪽 두 종은 분포가 감소할 것으로 예상됨.

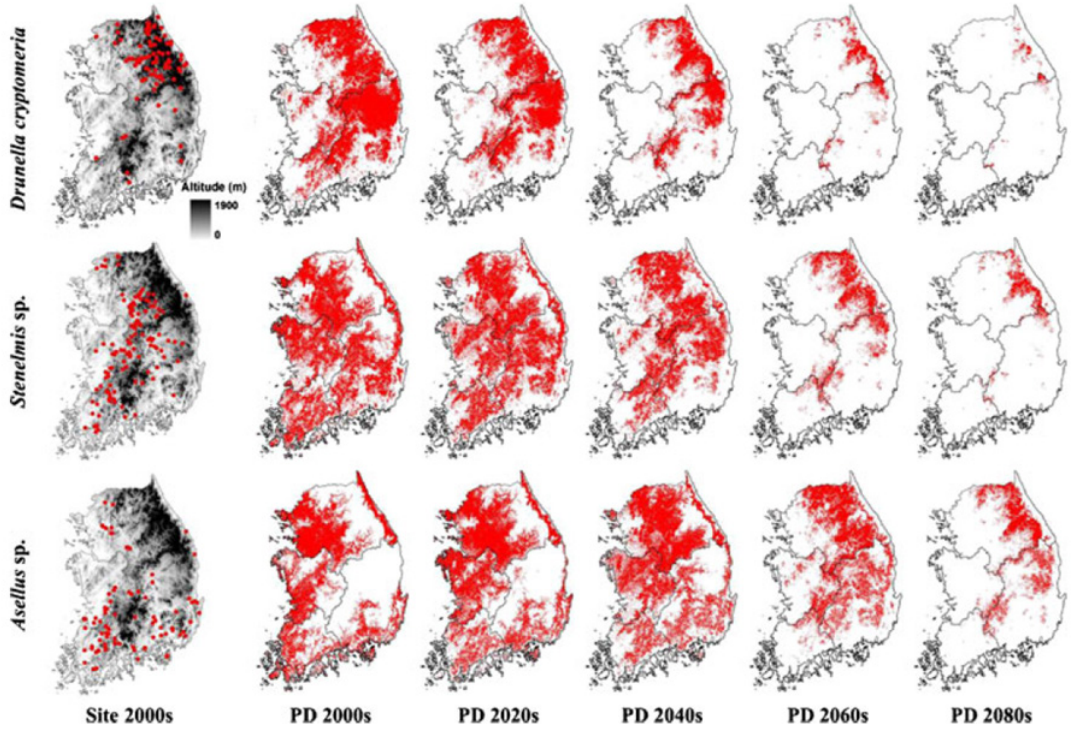


그림 3.22 한국 하천에 분포하는 종 중 지표종 3종의 잠재 분포서식지 변화 양상을 A1B시나리오로 예측한 그림(Li et al., 2013).

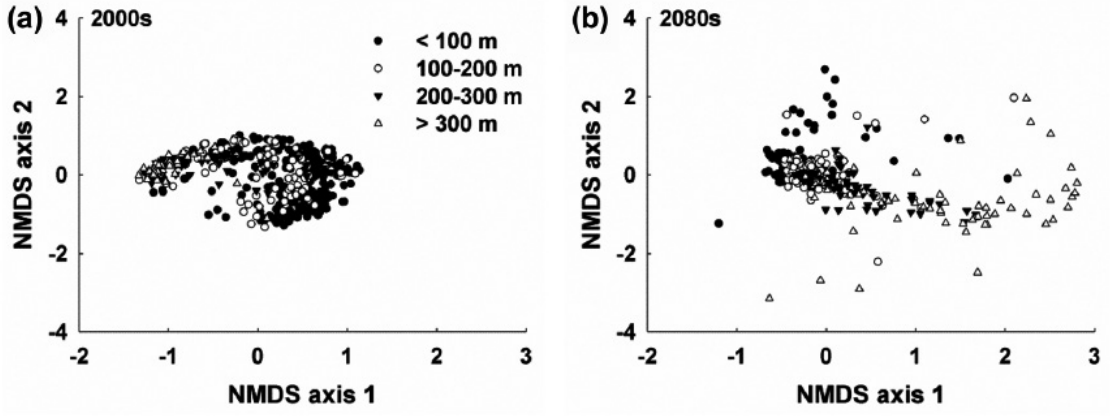


그림 3.23 하천 서식 곤충 군집의 NMDS ordination 그래프(Li et al., 2013). (a)2000년대, (b)는 2080년대로 고도가 높은 하천(하얀 삼각형)의 경우 두 그래프상에서 큰 차이를 나타냄. 그 이유는 고산 하천에서 종 다양성이 급격히 감소하였을 뿐만 아니라 중간이나 저지대에서 새로운 곤충의 유입이 많기 때문임.

것으로 예상된다. 반면 기온 상승으로 수서곤충류 33.1%가 증가할 것으로 여겨지는데 이중 2/3가 잠자리목이고 나머지 1/3이 나머지 수서곤충으로 이루어져 잠자리목 곤충은 기온상승으로 혜택을 볼 것으로 예상되었다.

한편 종 구성간의 유사도를 고도별로 살펴본 결과 고도별 종 구성 차이가 점차 줄어들어 거의 비슷할 것으로 예상되었다(Li et al., 2014). 이들은 하천이라는 생태계가 생태학적으로 생물지리학적으로 유사한 성격을 띠지만 여기에 서식하는 곤충은 기후가 변화함에 따라 매우 다른 방식으로 반응하는 것을 확인할 수 있었으며 이러한 차이는 각 종별 특이성이 존재하기 때문으로 추정하였다(그림 3.23).

온도 증가는 곤충의 고온 감수성 차이에 따라 발생량을 조절하는 것으로 나타났다. 김민현 등 (2016)은 배추의 주요 해충인 배추좀나방(*Plutella xylostella*)과 파밤나방

(*Spodoptera exigua*)의 계절적 발생 양상 차이가 나타나는 요인을 파악하기 위하여 40℃ 이상의 고온 조건에서 감수성 실험을 실시하였다. 여기에서 배추좀나방은 파밤나방에 비해 높은 고온 감수성을 갖는 것으로 나타났는데 이러한 종 특이성 조건은 열충격단백질 유전자인 Hsp70, Hsp74, Hsp83 등이 온도 스트레스에 관여하는 다양한 유전자의 발현과 체내 혈당류인 글리세롤의 합성과 밀접한 관련이 있는 것으로 추정하였다. 기온 상승은 해충 종 간에도 다양한 생리학적 작용기작 유무에 따라 개체군 감소 또는 증가를 불러일으킬 것으로 예상된다.

3.3.3 취약생태계

3.3.3.1 고산 및 아고산

인위적 영향에 의한 기후대 변화가 수직적으로 나타나는 한라산 고산지대를 중심으로, 10년(2003~2012년) 기상관측 자료와 1 km 격자간격의 고해상도 지역기후모델에서 산출한 미래 기후변화 시나리오 자료를 분석하여 21세기 후반(2071~2100년)까지의 변화 전망을 분석하였다(최광용, 2017).

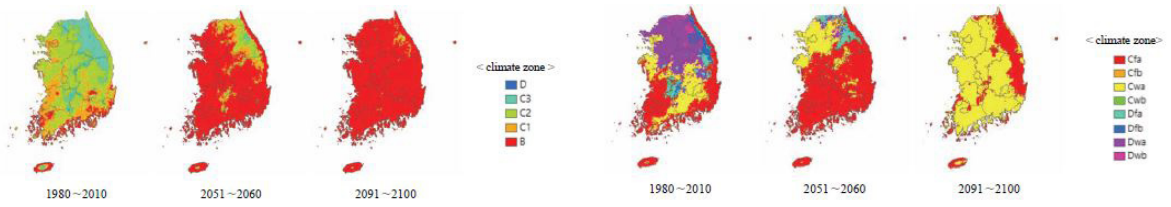
21세기 말, 한라산 지역에는 한반도 지역 평균보다 더욱 뚜렷한 기온상승 현상이 나타나 아열대-온대, 온대-아고산대 기후대 간 경계선의 해발고도가 상승할 것으로 전망되었다. 이와 같은 변화 정도는 RCP 4.5 시나리오보다 RCP 8.5 시나리오를 적용하였을 때 최소 2배 정도의 더 큰 폭을 나타냈다.

공간적인 관점에서 해안지역보다는 한라산 산간지역의 아고산대에서 기후대의 수직적 변화가 더욱 뚜렷하게 나타날 것으로 전망되었다. 이를 종합하면 21세기 말에 중산간 지역까지는 겨울철 저온 스트레스의 감소로 아열대 기후대가 확장되지만, 산간지역에서는 여름철 고온 스트레스의 증가로 아한대 기후대의 범위가 축소되거나 사라질 가능성이 있음을 나타낸다. 이러한 영향 전망 결과는 고해상도 모델 자료를 활용하여 연속적인 기후대 이동 가능성을 제시함으로써 제한된 수를 가지는 자동기상관측망 자료의 한계를 보완하였다는 점에서 의미가 있다. 또한, 21세기 후반 아고산대 생태계 종 다양성 보전 노력의 필요성과 기온 외 다른 기후요소 및 기후현상 변화 양상에 대한 지속적인 연구의 필요성을 시사한다.

김용석 등(2017)은 전 지역의 30년 평년 기후자료가 나타난 전자기후도를 바탕으로 온량지수와 쾨펜의 기후 구분을 적용하여 한반도 기후지대를 구분하고, RCP 8.5 시나리오 하에서 미래의 기후지대 변화를 예측하였다.

온량지수에 의한 기후지대 분석 결과는 그림 3.24 (a)와 같으며, 시간이 흐름에 따라 기온이 증가하여 아한대지역은 완전히 사라지고 극히 일부를 제외한 대부분이 난온대에 속하게 될 것으로 전망되었다. 쾨펜의 기후 구분에 의한 기후지대 분석 결과 역시, 기온의 꾸준한 증가와 강수량의 연중 빈도 차이로 인하여 2091~2100년을 기준으로 남한 전체의 약 75%가 Cwa(온대하우기후)지대, 약 25%는 Cfa(온난습윤기후)지대에 속할 것으로 전망되어 2019년대 이후 우리나라에서 한랭한 기후지대가 사라질 것으로 분석되었다(그림 3.24 (b)). 이러한 결과는 RCP 8.5라는 다소 극단적인 시나리오 하에서 분석되었으나, 지역별로 다양했던 기후형태가 기후온난화의 영향으로 점차 단순화될 수 있음을 나타낸다.

위성탐사와 현지조사를 통하여 국내 백두대간의 아고산 지역의 기후변화 영향 및 전망을 조사하였다(권영한 등, 2014).



(a) (b)

그림 3.24 기후대 구분 (a) 온량지수에 의한 기후대 구분, (b) 쾨펜의 기후 구분에 의한 기후대 구분(김용석 등, 2017).

기후변화 취약생태계 전망은 RCP 4.5와 8.5 시나리오를 통하여 분석되었고, 영향을 미치는 기후변화요인을 온도와 강수량만으로 한정하여 2010~2100년까지의 강수량과 평균기온을 분석한 평균값을 활용하였다.

한반도의 주요한 생태축으로 특정 고립된 생물종의 피난처 역할을 하는 백두대간에서 기후변화와 그에 따른 온난화가 지속될 경우 가문비나무나 구상나무 등 아고산지대 식생과 생태계가 더욱 취약해질 것으로 예상되며, 고산지역에 분포하는 월귤(*Vaccinium vitis-idaea*), 솜다리(*Leontopodium coreanum*)등 북방계 식물의 자생 환경이 악화될 것으로 예측되었다. 반면, 기온이 높아지면서 백운란(*Vexillabium yakushimensis*)과 같은 남방계 식물과 소나무(*Pinus densiflora*), 잣나무(*Pinus koraiensis*) 등 낮은 고도에서 서식하던 식물은 북상하여 기존의 북방계 식물이 경쟁에서 밀릴 것으로 예상되며, 빠른 정착 종에 의한 종의 단순화가 우려되었다. 저온 다습한 곳에서 생장하는 한라산 정상부의 구상나무 군락과 설악산 눈잣나무 군락은 RCP 4.5와 8.5 시나리오에서 공통적으로 나타나는 봄철 기온 상승 및 강수량 감소에 큰 영향을 받을 것으로 예측되었다.

3.3.3.2 연안 및 도서

육지와 바다의 경계부로서 독특한 생태계를 가지며 인간 활동과도 직접적인 연관성을 가지는 연안지역의 경우, 지구 온난화로 인한 강수 및 태풍의 강도 및 빈도 변화와도 밀접한 관계를 가지므로 기후변화에 취약한 생태계라 할 수 있다(조광우와 맹준호, 2007).

3면이 바다로 둘러싸인 우리나라의 특징 상 연안지역에서 기후변화와 해수면 상승으로 인한 피해는 필수불가결적이다. 평형해빈단면이론을 적용한 해수면 상승에 따른 해안 후퇴율을 확인해 보면, 우리나라 해수면 상승률인 75 cm를 적용하였을 때 동해안은 56%, 남해안은 77.2%, 서해안은 78.5%의 해안 후퇴율을 보일 것으로 전망되었다(강태순 등, 2014). 특히 갯벌, 하구, 습지 등의 연안생태계가 서, 남해안에 집중되어 분포함을 고려해 보았을 때, 이러한 연안생태계는 기후변화와 해수면 상승에 큰 영향을 받게 될 것임을 예측할 수 있다.

최근 두드러지게 나타나는 연근해 어획량 감소에 대한 구체적인 대책 마련을 위한 토대로써, 남해안 연근해 어업의 기후변화 취약성 평가를 진행하였다(김봉태 등, 2018). 분석은 RCP 8.5와 RCP 4.5 시나리오를 적용하여 2016년부터 2100년까지의 우리나라 주변 해역을 전망한 국립수산과학원(2016)의 결과를 활용하여 진행되었으며, 기후 노출지표로는 수온변화와 염분농도 자료가 활용되었다.

각 업종에서 어획하는 수산 생물의 민감도를 결과에 반영함으로써 어획 어종에 따른 민감성의 차이를 고려하였다. 그 결과 RCP 8.5와 4.5 모두에서 근해어업보다는 연안어업의 기후변화 취약성이 대체로 높게 나타나, 향후 이에 대한 대책이 더욱 필요할 것으로 제시되었다.

해양생태계는 기후변화를 비롯한 여러 요인들에 의한 복합적 스트레스를 받으며, 다양한 요인들에 의해 주도되는 해양생태계의 변화는 해양 생물뿐만 아니라 연쇄적으로 인접 생태계에 크고 작은 변화를 야기한다(홍선기, 2014). 이러한 변화는 궁극적으로 인간 활동에도 영향을 미치는데, 그 중에서도 가장 직접적인 피해를 주는 것은 바로 어획량의 변화이다(홍선기, 2014).

급격한 인구 증가와 경제성장에 따라 수산자원의 수요 역시 빠르게 증가하고 있다. 홍선기(2014)는 기후변화에 의한 해류 및 열수지의 변화와 해양수의 산화 현상이 해양생태계 및 해양생물에 미치는 영향력을 분석하고, 기후변화에 따른 어획량의 변화 양상에 따라 전 세계 주요 어장을 크게 1, 2, 3그룹으로 구분하여 각 그룹의 어업 특징을 분석하며 지속 가능한 어업 방향성을 제시하였다.

3.3.3.3 내륙습지 및 기타지역

MaxEnt 모델을 활용하여 기후변화에 따른 금강 유역 어류종 분포를 예측하였다(배은혜와 정진호, 2015). 환경인자로는 최저기온, 최고기온, 평균기온, 강수량, 최저수온, 최고수온, 평균수온, 고도, 경사 등의 9개 요인을 선정하여 분석하였으며, RCP 8.5 시나리오를 가정하여 2050년과 2100년의 어류 종 분포를 전망하였다.

분석 결과 고도, 강수량, 최저수온 순으로 종 분포 예측에 높게 기여하는 것으로 확인되었으며, 기후변화 진행 과정에서

고유종의 출현확률은 감소하는 반면 외래종의 출현확률은 크게 눈에 띄게 증가하였다(배은혜와 정진호, 2015). 또한 유역 내 종 풍부도가 높은 지역이 기후변화 과정에서 북상하였으며, 2100년에는 일부 어류가 금강 유역에서 서식하지 못할 것으로 전망되었다(배은혜와 정진호, 2015). 이러한 결과는 기후변화로 인하여 금강 유역 수생태계가 크게 교란될 수 있음을 시사하는 것이다.

미래 기후변화가 하천 수생태계에 미치는 영향을 정량적으로 파악하기 위하여, 만경강 하도와 홍수터 영역에서 기후변화에 따른 하천 유황 및 감돌고기(*Pseudopungtungia nigra*) 서식환경의 변화를 예측하였다(홍일 등, 2019). 예측결과 극히 낮은 흐름, 낮은 흐름, 높은 흐름 펄스, 작은 홍수, 커다란 홍수의 5가지 환경흐름요소 중 극히 낮은 흐름과 커다란 홍수와 같은 극한 수문 조건의 경우 현재보다 미래에 더욱 악화될 것으로 확인되었다. 유황 특성의 변화에 따른 감돌고기의 물리서식처 역시 기후변화로 인한 미래 생태환경 변동에 큰 위험성을 가질 수 있음이 제시되었다.

습지의 기후는 곧 습지의 수분수지와 생태계 환경변화를 초래하며, 특히 산간지역에 위치한 습지의 경우 주변 미세기후의 영향을 많이 받아 불확실성이 크다(권영한, 2014). 산지대에 위치하는 습지인 용늪과 무제치늪, 우포늪을 대상으로 RCP 4.5와 8.5 시나리오를 활용하여 2100년까지의 기후변화 영향을 조사 및 분석하였다. RCP 8.5 시나리오 하에서, 용늪의 연 강수량은 2031년과 2061년 사이 잠시 증가하였다가 점차 줄어들 것으로 예측되었다. 특히 겨울철을 중심으로 봄, 가을의 강수량이 감소할 것으로 예상되어 습지생태계 변화에 적지 않은 영향을 끼칠 것으로 예측되었다. 같은 시나리오 하에서 연 평균기온은 꾸준히 증가할 것으로 전망되었으며, 2100년에는 약 2배 정도 상승할 것으로 예측되었다.

울산 무제치늪의 경우 기후변화에 따른 강수량 변동은 40년을 기점으로 꾸준한 상승세를 보일 것으로 전망되었으며, 온도는 완만한 추세로 꾸준히 상승할 것으로 전망되었다. 우포늪의 경우 역시 기후변화 시나리오에 따라 2100년에는 연평균기온이 약 18℃가 될 것으로 예측되었으며, 향후 기후변화에 따른 수온 및 기온상승의 영향을 받을 것으로 추정되었다. 이러한 습지생태계는 주변 미세기후의 영향으로 높은 불확실성을 가지나, 향후 기후변화에 따라 전체적인 기후 패턴 상 여름철 강수 집중이 심화될 것임을 고려해 보았을 때 습지보호지역 경계를 기후변화 시나리오에 맞춰 재설정하고 지속적인 모니터링을 진행해야 할 필요가 있음을 제시한다.

김종천과 김태근(2016)은 국립공원의 기본 통계자료와 RCP 8.5 시나리오를 활용하여 전국 21개 국립공원을 대상으로 기후변화 취약성 평가를 진행하고, 평가된 취약성의 유형을 기후노출, 민감도, 적응력을 기준으로 4가지로 분류하였다.

기후노출 평가요소로는 연평균 강수량, 연속적인 무강수일수의 최대값, 일 평균기온이 영하인 날의 횟수, 일 최고기온이 33도 이상인 날의 횟수, 봄, 여름, 가을, 겨울철 강수량, 일 강수량 80 mm 이상인 날의 횟수, 최대 풍속이 14 ms^{-1} 이상인 날의 횟수를 활용하여 분석하였다. 그 결과 현재

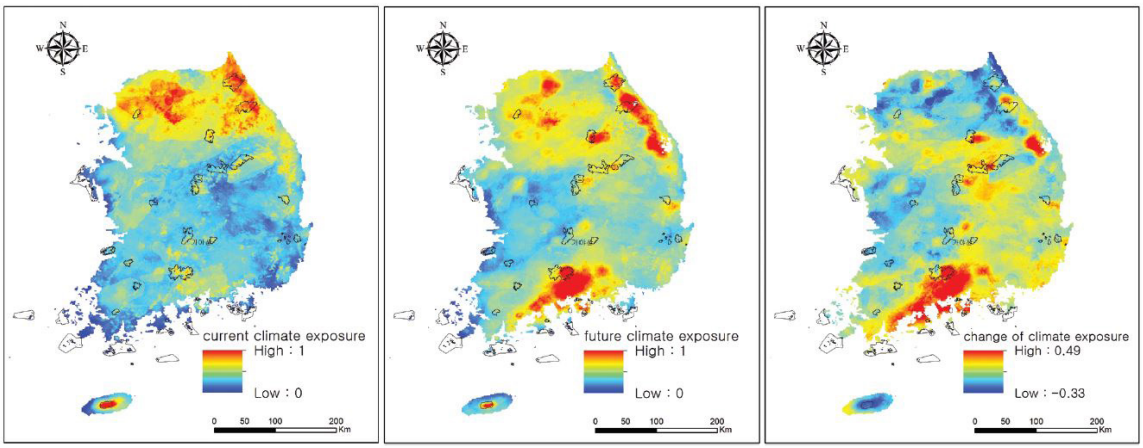


그림 3.25 전국 국립공원 기후노출 현황 및 전망(김종천과 김태근, 2016).

(2010년대)는 설악산, 오대산, 지리산, 치악산 국립공원의 기후노출이 높게 나타났으며 미래(2050년대)에는 지리산, 오대산, 설악산, 한려해상국립공원의 기후노출이 높을 것으로 예측되었다(그림 3.25).

국립공원의 기후변화 취약성은 현재와 미래에서 큰 차이가 나타나지는 않으나, 향후 높아질 것으로 예상된다.

국립공원의 기후노출, 민감도, 적응 능력은 각 지역의 지역적 기후환경에 따라 상이하게 나타나므로, 전 공원을 대상으로 획일적인 기후변화 적응 대책을 마련하기보다는 각 지역의 기후특성을 반영하여 적응대책을 마련하는 것이 바람직하다는 결론이 도출되었다.

3.4 취약성의 주요 원인

육상과 해양의 물리·화학·생물학적 요인이 복잡하게 얽힌 해안염습지는 환경의 변화가 크고 높은 염분농도로 인하여 식물의 분포가 제한되어 있는 독특한 생태계이다(김하송과 명현호, 2014).

면적이 넓고 자연성과 학술적 가치가 매우 높은 순천만 염생식물 서식지를 대상으로, 기후변화와 토양환경의 변화를 추적하여 염생식물 생육지의 특성과 환경 요인의 변화에 대한 기초 모니터링 자료를 확보하였다(김하송과 명현호, 2014).

기후환경 변화요인으로는 기온, 강수량, 상대습도, 일조시간을 선정하였으며, 과거 40년(1973~2013)과 최근 4년(2010~2013) 간의 추세를 비교하였다.

그 결과 기온은 유의하게 높아지는 추세를, 상대습도와 강수량은 유의하게 감소하는 추세를, 일조시간은 유의한 변화가 나타나지 않는 것으로 조사되었다. 토양환경 변화 요인으로는 pH, 토양함수량, 유기물함량, 염분도, 전기전도도, 총질소량을 선정하였다. 이 중 pH와 토양함수량, 염분도, 전기전도도는 유의한 증가, 유기물함량은 유의한 감소를, 총질소량은 유의한 변화가 나타나지 않은 것으로 조사되었다. 이러한 결과를 바탕으로 토양성분과 기후변화에 대한 통계적 분석을 실시한 결과, 토양환경 중 pH, 유기물함량, 염분도, 전기전도도는 기후환경에 영향을 받으며 특히 염분도와 전기전도도의 경우 기후환경에 상대적으로 큰 영향을 받는 토양환경요인임이 확인되었다.

이러한 결과는 토양환경이 기후환경에 따라 변화할 수 있음을 나타내며, 연안습지 생태계 보전을 위한 염습지의 토양환경 및 기후환경 변화에 대한 기초 정보 수집의 필요성을 제시한다.

권영한 등(2015)은 우리나라의 주요 취약생태계인 아고산지대, 내륙습지생태계, 연안생태계를 대상으로 기후변화의 위협 요인을 선정하고, 이에 대한 적응 방안을 제시하였다.

아고산지대의 경우, 수목과 같이 오래 사는 종의 기후변화에 대한 적응성이 더욱 낮으며, 특히 극한기온과 생육기간이 식물의 생육에 절대적인 영향을 미친다. 지구온난화로 인한 기온 상승은 극지, 고산식물 등 한랭 기후에 적응하여 생존해 온 한대성 식물의 생물다양성 감소와 생태계 파괴에 지배적인 영향을 줄 수 있음이 확인되었다.

백두대간 고산대와 한라산 산정부의 기후요인과 주빙하성 지형으로 인해 간섭이 발생하는 불리한 조건으로 인하여 열악한 환경에서 상대적으로 높은 경쟁력을 가지는 고산식물들이 생육한다. 지구 온난화로 인한 기온 상승이 계속될 경우 이러한 한대성 식물은 생리, 생태적 스트레스와 북상하는 난온대성 수종과의 서식지 경쟁에서 밀려 멸종할 위험이 매우 높은 것으로 판단되었다.

해수의 열팽창 등으로 인한 해수면 상승이 생태계의 구조 및 기능 변화에 가장 큰 영향을 줄 것으로 예상되었다. 이러한 해수면 상승은 염수가 내륙으로 침투하는 직접적인 원인이 되며, 이는 식물체에 치명적인 악영향을 주며 토양의 화학적 조성을 변화시켜 주변 생태계를 파괴시킨다.

더 장기적인 측면에서, 해수면의 상승은 해안 침식과 연안의 침강을 일으켜 더욱 큰 피해를 발생시킬 수 있다. 실제로, IPCC의 해수면 상승 시나리오를 활용한 시뮬레이션 결과 2100년까지 염습지의 면적이 현재와 비교해보았을 때 20~45% 가량 줄어들 것으로 예측되었다. 이러한 생태계의 변화는 생물 종 다양성뿐만 아니라 생태계 서비스에도 부정적인 영향을 줄 것으로 판단되므로 적절한 대응 및 관리 방안이 필수적인 상황이다.

기후변화 영향에 적응하기 위한 대응 전략 마련을 위하여, 상대적으로 영향 정도 및 시급성이 높은 관심지역을 대상으로

리스크 평가를 진행하였다(박창석 등, 2015). 선행연구 분석 결과를 통하여 폭염(기온 요인), 폭우(강수 요인), 해수면 상승의 3가지 요인을 핵심 동인으로 설정하였으며, RCP 4.5와 8.5 시나리오를 활용하여 분석하였다.

이를 바탕으로 노출환경, 취약환경, 기후위해를 평가하여 현재와 미래 시점(2030년, 2050년)에서의 관심지역(hot spot)을 도출하고, 동인별 관리 방안을 제언하여 우리나라 실정에 맞는 지역별 적응 전략 및 정책 방향의 시사점을 제시하였다.

3.5 적응 옵션

3.5.1 식물생태

본 보고서에서는 국내 식물생태계에 관한 연구를 식물생리·생육, 식물계절, 식물 서식지·분포 3분야로 나누고 각 분야의 연구를 관측된 기후변화 영향, 기후변화 영향 전망으로 구분하여 정리하였다. 식물생태계 연구는 3분야 모두 매우 제한적으로 이루어지고 있는 것으로 분석되었다. 정확한 기후변화 영향 및 전망을 위하여 다양한 식물종에 대한 장기적인 연구가 시급한 것으로 나타났다.

식물생태 연구 중 식물 서식지·분포 영향 및 영향 전망 연구가 다른 연구들에 비하여 상대적으로 많이 수행되었다. 이는 다양한 예측 모형의 활용이 가능해 지고 서식지 단위의 종합적인 생태계 기후변화 영향 예측의 필요성에 따른 것으로 판단된다. 또한, 식물계절 연구가 감소하고 분자생태학적 연구나 이차대사물질 추출을 통한 기후변화 영향 파악 연구 등 생리생태학적 연구의 시도들이 새롭게 이루어지고 있다는 점이 2014년 이후 연구의 특징이라고 할 수 있다.

기후변화로 인한 영향이 복잡한 생태계를 통해 농업, 산림, 어업, 건강 등 타 분야에 심각한 영향을 미치는 것을 고려할 때 새로운 시도들이 이루어지고 있다. 그러나 지난 5년간 이루어진 연구들은 이러한 복잡한 식물생태계를 이해하고 적응대책을 수립하기에 매우 제한적인 정보만을 제공하고 있다.

특히, 식물생태계에 대한 기후변화 영향을 예측하기 위해서는 과거로부터 현재까지의 기후환경 변화 자료와 그에 따른 식물의 생리·생육 자료를 종합적으로 고려해야 한다. 이를 위하여, 현재부터 미래까지의 연속적 또는 온난화된 어느 시점의 환경을 조성하여 두 시점의 환경 하에서 수집된 식물 반응으로부터 식물생태계의 방향성을 예측해야 한다. 하지만 기록된 과거 자료가 부족하고 야외의 다양한 환경 조건을 반영하는 온난화 환경을 조성하는 것이 매우 복잡하고 까다롭기 때문에 매우 제한된 자료만이 수집된 상황이다. 이러한 자료의 제한성으로 인해 우리나라의 온난화에 의한 식물생태계의 영향 예측 수준은 그 범위와 정확도가 매우 낮은 수준에 그치고 있다. 따라서 한층 더 심도 있고 정확성이 증대된 영향 예측을 위해서는 1) 야외의 온난화 환경 하에서 소나무, 신갈나무, 굴참나무 등과 같은 한반도에 서식하는 주요 생태계의 우점종에 대한 생리·생육적 실험 자료가 충실하고 폭넓게 수집되고, 2) 이러한 자료를 분석할 수 있는 다양한 모형 등의 도구가 활용되어 광역적이며 장·단기적 예측을 하여야 할 것이다.

연구 분야, 연구종, 연구방법의 다각화 필요성이 지속적으로 제기되어 왔으나 지금까지의 국내 연구는 구상나무와 같은 일부 종과 군락에 대한 장기적인 모니터링 및 제한적 분석에 초점을 맞추고 있다. 복잡한 식물생태계의 기후변화 영향을 이해하고 효과적인 적응대책을 수립하기 위하여 다양한 식물생태계의 구조와 기능에 대한 심화한 이해가 필요하다. 이를 위하여 장기적인 모니터링뿐만 아니라 이들 생태계에 대한 종합적인 기후변화 영향 분석 및 예측을 위하여 장기적이고 지속적인 실내외 실험·분석과 이를 바탕으로 한 예측 연구의 증가와 고도화가 요구된다. 이러한 상황을 종합적으로 고려할 때, 국내의 기후변화 영향을 파악하는 연구는 매우 제한적이고 초보적인 수준에 머무르고 있는 상황으로, 현재 연구결과들은 기후변화에 따른 식물생태의 변화를 이해하는 데 제한적 동의 수준으로 판단된다.

3.5.2 동물생태

기후변화에 따른 동물의 서식지 분포 변화 및 풍부도 변화에 관한 연구 등 동물생태계의 적응 양상은 장기적인 자료를 바탕으로 이루어져야 하지만 이번 보고서에 수록된

내용들은 현재 분포 자료를 토대로 2050년 이후 미래 기후 시나리오(RCP 4.5, RCP 8.5)에서 대상 분류군의 서식지 확대 또는 감소 그리고 개체군 증가와 감소 등을 예측한 시뮬레이션 연구이므로 다양한 동물 분류군이 미래 기후 및 환경변화에 어떠한 적응 양상을 띨 것인가에 대한 연구가 시급히 필요한 실정이다.

기후 시나리오 예측 모델에 의하면 멸종위기에 처한 종들은 기후변화에 더 취약하며, 일부 종을 제외한 대부분의 멸종위기종은 기온상승에 의해 심각한 서식지 감소가 이루어질 것으로 예상되었다. 또한 미래 기후 시나리오 예측 모델에 따른 동물의 서식지 분포변화는 감소되는 양상이 많이 나타나 동물의 미래 적응 양상은 대체적으로 낮은 것으로 여겨진다. 그러나 제주도에 서식하는 비바리뱀이나 지리산에 서식하는 반달가슴곰, 그리고 팔색조, 긴꼬리딱새, 물꿩 등은 서식지 확대가 이루어질 것으로 예상되어 한반도 동물상의 전반적인 변동이 예상된다.

기후변화에 따른 서식지 이동은 점차 북쪽으로 진행되는 경우가 나비와 조류에서 확인되었다. 2002년에 국내 최초로 기록된 검은이마직박구리는 최근 전국적으로 관찰되는 텃새로 자리를 잡아가고 있다. 외래종인 등검은말벌과 갈색날개매미충, 위생해충인 모기와 진드기 등의 전국적인 확산이 뚜렷하게 나타날 것으로 보여진다. 이러한 남방계 종의 유입과 해충 확산 등으로 인한 농업 및 보건위생학적 문제가 새롭게 제기되고 있어 이에 대한 대비 전략 수립과 지속적인 모니터링을 통한 개체군 변동 양상을 확인할 필요가 있다.

동물 종의 확산에는 기온상승과 같은 기후적 요인이 중요한 요인으로 작용하였지만 숲의 확대나 개발로 인한 서식지 질 하락 등 서식지 변화도 함께 작용하는 등 복합적으로 예측되어 기후변화와 환경변화에 따른 동물생태계의 다양한 생물학적 반응을 일으킬 수 있는 요인에 대한 연구가 필요할 것으로 판단된다.

수계에 서식하는 수서곤충인 날도래목과 하루살이목 곤충 역시 기후변화로 인한 강우량 변동으로 큰 폭으로 감소할 것으로 예측되었으며 도롱뇽도 봄철 온도차 감소로 인한 에너지 소모로 감소 가능성이 높은 것으로 예측되어 육상생태계뿐만 아니라 수계 생태계에 서식하는 다양한 동물에 대한 지속적인 모니터링과 이들 분포 요인에 영향을 주는 요인을 파악하기 위한 연구가 필요하다고 판단된다.

온도 증가가 곤충의 고온 감수성에 영향을 주어 해충 발생량이 조절되는 연구를 통하여 온도 스트레스에 관여하는 다양한 유전자와 체내 혈당류인 글리세롤이 관련 있는 것으로 알려졌다. 국내외 연구에서 온도 증가로 인한 곤충의 생리적인 영향이 작용하는데 많은 연구가 이루어지지 않은 실정이다. 온도 적응과 관련한 실내외 실험 필요성이 더 부각되고 있으며 이에 대한 연구가 시급히 이루어져야 할 것으로 판단된다.

3.5.3 취약생태계

전 지구적으로 보았을 때, 극지방, 툰드라, 고산 및 아고산, 열대우림, 해안 및 연안, 내륙습지, 도서지역 등을 기후변화에 특히 취약한 취약생태계로 정의할 수 있다(권영한, 2014).

이러한 정의 중에서 한반도 내 생태계와 관련이 있는 취약생태계는 고산 및 아고산지역, 해안 및 연안과 도서지역, 내륙습지로 이러한 국내 취약생태계에 대한 연구가 이루어지고 있는 것을 확인할 수 있었다.

본 보고서에서는 국내 취약생태계에 관한 연구를 관측된 영향, 영향 전망, 취약성의 주요 원인으로 구분하여 정리하였다.

취약생태계 연구 중, 관측된 영향과 영향 전망에 비하여 취약성의 주요 원인과 관련한 연구의 결과가 상대적으로 많지 않은 것으로 확인되었다.

연구결과 유형에서는 기후변화에 따른 지역의 취약성 평가 지표 개발에 대한 연구 성과가 두드러지게 나타났다. 또한 기후변화 적응 및 대책 마련을 위한 기초 자료로써 활용 가능한 성격의 자료와 더불어 기후변화 시나리오 하에서의 미래 전망과 적응 대책을 마련하는 연구들의 성과가 새롭게 제시되고 있음이 확인되었다.

특히 2014년 이전 취약생태계 관련 연구에서 고산 및 아고산지대와 관련한 연구 성과가 대부분을 차지하였던 것과 달리, 2014년 이후 연구에서는 연안 및 도서지역에 관련한 연구의 비중이 크게 증가하여 차이점을 보인다.

다양한 생태환경을 대상으로 기후변화가 취약생태계에 미치는 영향에 대한 연구 성과가 발표되고 있다는 점으로

미루어보았을 때, 취약생태계 연구 성과는 지난 2014년 보고서의 연구 성과에 비하여 더욱 높은 신뢰수준을 가지는 것으로 판단된다. 더불어, 취약성의 주요 원인으로써 기후요소뿐만 아니라 토양환경요인 등 더욱 다양한 요소들을 함께 고려하여 입체적인 시각을 확보하고자 하는 노력이 연구 성과에 반영되고 있다는 점, 기존 기초자료 성격의 자료에서 나아가 분포 예측 및 정책 제안 등 풍부한 연구결과가 도출되고 있다는 점에서 중간적 동의 수준을 보인다고 할 수 있다.

향후 기후변화에 따른 취약생태계 내 식물 분포역 변화 등과 관련한 연구에서, 토양환경뿐만 아니라 생육에 영향을 미치는 다양한 환경 인자에 대한 보다 세부적인 접근이 이뤄진다면 연구의 정밀도가 더욱 향상할 것으로 판단된다.

3.6 결론

본 기후변화 평가보고서(2020년도)는 생태계 분야의 연구 성과를 식물생태, 동물생태, 취약생태계로 나누어 분석하였다.

기존 「한국 기후변화 평가보고서 2014」에서의 연구 성과는 기후변화 적응 및 대책 마련을 위한 기초자료로써, 현황에 관한 연구가 대부분을 차지하였으며 미래전망 및 취약성, 적응대책에 대한 연구가 미진한 것으로 확인되었다.

반면 2014년 이후의 연구 성과는 기후변화시나리오에 따른 생물 서식지 및 분포변화에 대한 예측 연구가 상대적으로 활발히 진행되어 기존 연구보다 더욱 발전된 성과를 나타내고 있는 것으로 판단된다.

특히 2014년 이후 미래 기후변화 시나리오(RCP 4.5, RCP 8.5)와 관련한 생물의 분포역 변화 및 개체군 증가 및 감소 연구 성과가 두드러지게 나타나 기후변화에 따른 미래전망 연구의 비중이 높아진 것으로 확인되었다.

식물생태의 경우, 식물계절변화 연구는 주로 생육개시일과 개화시기에 대한 변화가 매우 제한적으로 분석되다. RCP 시나리오 등 미래 기후변화 시나리오 가정 하에 미래 생육개시일, 개화시기가 앞당겨지는 것으로 예측하였다.

식물서식지와 분포변화 연구는 미래 기후변화 시나리오 가정 하에 한반도 스케일이나 남한 스케일에서 기후변화 민감종, 멸종위기종, 외래종에 대하여 분포변화와 서식지 적합도의 변화 예측이 이루어졌다. 난대성 수종의 분포 확대 및 한대성 수종의 분포 축소 가능성이 예측되었다.

이러한 연구 성과는 향후 기후변화에 대한 식물생태의 영향 분석에 있어서 복잡한 식물생태계의 기후변화 영향을 이해하고 효과적인 적응대책을 수립하기 위하여 다양한 식물생태계의 구조와 기능에 대한 심화적 이해가 요구됨을 시사한다.

아울러 장기적 모니터링뿐만 아니라 생태계에 대한 종합적인 기후변화 영향 분석 및 예측에 대한 연구의 증가 및 고도화 필요성을 제시한다(제한적 동의).

동물생태의 경우, 2014년 이전 기후변화에 따른 동물생태 연구는 주로 과거자료를 바탕으로 현재 어떠한 분포 양상 또는 개체군 크기가 나타나는가에 대한 연구와 이들 개체군 변동에 관여하는 기후인자 분석 연구였다.

2014년 이후 연구들은 한국 내 다양한 동물들의 분포 자료를 바탕으로 기후변화시나리오에 따른 예측모델 연구가 다수를 차지하였다. 현재 동물 분포 자료를 토대로 미래 기후시나리오(RCP 4.5, RCP 8.5)에 따라서 2050년 이후 대상 분류군의 서식지 확대 또는 감소 그리고 개체군 증가와 감소 등을 예측하였는데 무척추동물을 이용한 연구가 척추동물에 비하여 훨씬 많아 추후 척추동물 특히 양서파충류와 포유류를 대상으로 한 연구가 필요할 것으로 판단된다.

기후 시나리오 예측 모델에 의하면 멸종위기에 처한 종들은 기후변화에 따라 더 심각한 서식지 감소가 이루어질 것으로 예상되었지만 (중간적 동의)제주도에서 발견되는 비바리뱀이나 멸종위기종인 반달가슴곰 등은 서식지가 더 넓어질 것으로 예상되었다.

기후변화에 따른 서식지 이동은 점차 북쪽으로 진행되는 경우가 나비와 조류에서 확인되었다. 외래종인 등검은말벌과 갈색날개매미충, 위생해충인 모기와 진드기 등 역시 전국적인 확산이 뚜렷하게 나타나거나 예측되었다(견고한 동의).

이들 종의 확산에는 기온상승과 같은 기후적 요인이 중요한 요인으로 작용하였다. 그러나 숲의 확대나 개발로 인한 서식지 질 하락도 함께 작용하는 것으로 나타나 복합적인 요인이 작용하는 것으로 확인되었다(견고한 동의).

또한 우리나라 제주도를 비롯한 남부지방을 중심으로

동남아시아에서만 분포했던 종이 새롭게 유입되는 사례들이 곤충 및 조류에서 확인되었으며(제한적 동의), 서식지 변동과 함께 미래 기후 시나리오에 따라 개체군의 풍부도 변화에 관한 연구(견고한 동의)와 온도 증가로 인한 고온 감수성과 발생량 조절과 관련한 연구 역시 성과를 보였다(중간적 동의).

무척추동물과 척추동물의 국내 분포 자료는 환경부에서 실시하는 전국자연환경조사나 국립산림과학원에서 전국 단위로 실시하는 연구 그리고 국립공원공단의 멸종위기종 연구 등의 결과를 바탕으로 한 것으로 기초자료를 충실히 모은 것을 토대로 미래 예측 모델을 도출하는데 효과적으로 사용되고 있음이 확인되었다.

취약생태계의 경우 역시 다른 분야와 마찬가지로 2014년의 연구 성과와 비교해보았을 때 기후변화 시나리오를 활용한 미래전망 연구의 성과가 두드러졌다.

이와 함께, 기후변화 취약생태계의 적응 및 대책 사례를 소개하며 우리나라에 적용될 수 있는 정책의 방향성을 제시한 연구 등이 새롭게 소개되어 기존 2014년 보고서에서 비교적 미진한 성과를 나타냈던 미래 전망 및 적응 대책 관련 연구가 점차 보완되고 있는 것으로 판단된다(중간적 동의).

또한, 기존 연구에서 주로 다루었던 고산 및 아고산지역과 함께 습지, 하천 수생태계 등 폭넓은 생태계와 생물 종을 대상으로 한 연구가 진행되고 있음이 확인되었다.

기후변화가 생태계에 미치는 영향에 대한 연구 성과는 기존의 기초자료 성격의 연구에서 점차 발전된 연구로의 진행이 이루어지고 있는 것으로 판단된다.

기후변화에 따른 생태계의 변화과정이 단기간이 아닌 장기간에 걸쳐 일어난다는 점을 고려해보았을 때, 장기적인 모니터링과 함께 종합적인 기후변화 영향 분석 및 예측에 관한 연구가 꾸준히 이루어질 필요가 있다.

향후 연구에서는 생태계 전반에 걸친 장기적 모니터링 결과와 함께 미래전망 및 취약성, 적응대책에 관련한 종합적인 연구가 이루어져야 한다. 이를 통하여 기후변화와 생태계 간의 복합적인 상호작용을 이해하고, 나아가 기후변화에 대응한 지속 가능한 발전 방안을 마련할 수 있을 것으로 기대된다.

3.7 참고문헌

강창완, 김화정, 김은미, 강희만, 2018: 한국미기록종 알류샨 제비갈매기 (*Onychoprion aleuticus*) 의 국내 기록, *한국조류학회지*, 25(1), 58-61.

강태순, 조광우, 이종섭, 박원경, 2014: 평균해빈단면이론을 이용한 해수면 상승에 따른 해안후퇴율 산정, *한국해안해양공학회 논문집*, 26(4), 197-206.

공우석, 김건옥, 이슬기, 박희나, 조수현, 2014: 한반도 주요 산정의 식물종 분포와 기후변화 취약종, *환경영향평가*, 23(2), 119-136.

권영한, 이명진, 박채아, 송영일, 박창석, 이정호, 2014: 기후변화에 대응하기 위한 생태계 환경안보 강화방안(II): 기후변화 취약 생태계 분석 및 전망을 중심으로, 한국환경정책·평가연구원, 319.

권영한, 이승준, 박채아, 2015: 기후변화에 대응하기 위한 생태계 환경안보 강화방안(III): 기후변화 적응을 위한 생태계 관리방안 개선, 한국환경정책·평가연구원, 187.

김도성, 박성준, 김동순, 조영복, 이영돈, 안능호, 김기경, 서홍렬, 차진열, 2014: 제주도 한라산 나비군집 모니터링, *한국환경생태학회지*, 28(6), 697-704.

김동언, 이희조, 김미정, 이도훈, 2015; 갈색날개매미충 (*Pochazia shatungensis*)(Hemiptera: Ricaniidae)의 기주식물, 발생지역 및 잠재서식지 예측, *한국응용곤충학회지*, 54(3), 179-189.

김민현, 이승희, 김용균, 2016: 파밤나방과 배추좀나방의 고온 감수성 차이와 연중 발생 변이, *한국응용곤충학회지*, 55(1), 17-26.

김봉태, 이준수, 서영상, 2018: RCP 시나리오를 적용한 한국 연근해어업의 기후변화 취약성 평가, *Ocean and Polar Research*, 40(1), 37-48.

김양모, 박세영, 박창욱, 서슬기, 이승연, 강화연, 박종현, 조숙영, 진경순, 박종길, 2018: 풀쇠개개비 (가칭) *Acrocephalus schoenobaenus* 국내 첫 기록 보고, *한국조류학회지*, 25(1), 65-68.

김용석, 심교문, 정명표, 최인태, 강기경, 2017: 기후변화 시나리오를 이용한 우리나라의 기후지대 변화 연구,

한국농림기상학회지, 19(2), 37-42.

김윤영, 임효선, 한세희, 지성진, 소순구, 2017: 가야산국립공원 기후변화취약종의 분포 및 보전방안, *한국자원식물학회지*, 30(2), 167-175.

김은숙, 이지선, 박고은, 임종환, 2019: 아고산 침엽수림 분포 면적의 20년간 변화 분석, *한국산림과학회지*, 108(1), 10-20.

김일용, 유다솜, 최홍근, 2015: AFLP 마커를 이용한 조릿대 개체군의 식물지리학적 연구, *식물분류학회지*, 45(1), 29-35.

김종천, 김태근, 2016: 국립공원의 기후변화 취약성 평가, *생태와 환경*, 49(1), 42-50.

김진용, 홍승범, 신만석, 2018: 지구 온난화에 따른 국내 멸종위기 야생동물의 민감도 및 취약성 분석. *Journal of Climate Change Research*, 9(3), 235-243.

김태근, 양두하, 조영호, 송교홍, 오장근, 2016: Maxent모델을 이용한 반달가슴곰의 서식지 분포변화 예측, *생태와 환경*, 49(3), 197-207.

김하송, 명현호, 2014: 순천만 염생식물의 생육지 환경요인 변화, *한국도서연구*, 26(4), 195-211.

김현희, 김다빈, 원현구, 김찬수, 공우석, 2016: 전라남도 남해안 도서식물상의 도서생물 지리학적 특성, *한국기후변화학회지*, 7(2), 143-155.

박선욱, 구경아, 공우석, 2016: 기후변화에 따른 한반도 난대성 상록활엽수 잠재서식지 분포 변화, *대한지리학회지*, 51(2), 201-217.

박선욱, 구경아, 공우석, 2019: 산포능력을 고려한 기후변화 생물지표종의 미래 분포 변화 예측, *한국기후변화학회지*, 10(3), 185-198.

박선욱, 구경아, 서창완, 공우석, 2016: 기후변화에 따른 송악의 잠새서식지 분포 변화 예측, *한국기후변화학회지*, 7(3), 325-334.

박정준, 정철의, 2016: CLIMAX 모델을 이용한 외래 침입해충, 등검은말벌(*Vespa velutina nigrothorax*)의 분포 위험 예측. *Journal of Apiculture*, 31(4), 293-303.

박창석, 송영일, 강영은, 안윤정, 문태훈, 김동환, 변병설, 박지영, 이동성, 정수영, 김수영, 조동인, 2015: 국가 리스크 관리를 위한 기후변화 적응역량 구축, 평가: 기후환경 리스크 전망과 국가전략(Ⅱ), 한국환경정책·평가연구원, 255.

박창욱, 김양모, 박종길, 오해선, 2019: 한국미기록종 덤불개개비(*Acrocephalus dumetorum*) 의 국내 첫 기록 보고, *한국조류학회지*, 26(1), 16-20.

박헌우, 박도영, 최순규, 2018: 한국에서 조류의 분포 변화 - 기후와 환경 변화에 대한 대응으로-, *에너지기후변화교육*, 8(2), 235-253.

박현철, 이정환, 이관규, 엄기증, 2015: 구상나무와 분비나무 분포지의 환경 특성 및 기후변화 민감성 평가, *환경영향평가*, 24(3), 260-277.

박형철, 박진호, 김윤정, 정헌모, 신학섭, 장인영, 김진희, 이중효, 서창완, 김종민, 최재천, 2015: 기후변화에 의한 생물 적응 현상 연구, 국립생태원, 105.

박형철, 박진호, 김윤정, 최재천, 2016: 기후변화에 의한 생물 적응 현상 연구(II), 국립생태원, 94.

박형철, 황정은, 김윤정, 김진희, 2018: 기후변화 대응 구상나무의 분자생태학적 연구 I, 국립생태원, 94.

박형철, 황정은, 김윤정, 김진희, 신명환, 2017: 기후변화에 의한 생물 적응 현상 연구(III), 국립생태원, 94.

배은혜, 정진호, 2015: 기후변화에 따른 금강 유역의 어류 종분포 변화 예측, *Ecology and Resilient infrastructure*, 2(3), 198-205.

성정원, 김근호, 2017: 기후변화에 따른 가야산 아고산지역 식물의 개화시기 변화, *농업생명과학연구*, 52(1), 13-23.

신만석, 서창완, 이명우, 김진용, 전자영, 프라딥아디카리, 홍승범, 2018: 한반도 기후변화 적응대상 식물 종풍부도 변화 예측 연구, *환경영향평가*, 27(6), 562-581.

안경호, 유영한, 조규태, 2016: 기후변화환경 하에서 멸종위기식물 섬시호(산형과)의 보전방안 마련을 위한 광, 수분, 영양소에 대한 반응 연구, *한국환경생태학회지*, 30(5), 803-809.

안지홍, 박환준, 이새롬, 서인순, 남기흠, 김중현, 2019: 태백산국립공원 백단사코스의 고도별 관속식물상 변화와 환경요인 분석, *한국환경생태학회지*, 33(4), 378-401.

양진원, 강승구, 이원호, 정명규, 2018: 한국 미기록종 레이산알바트로스(*Phoebastria immutabilis*) 의 첫 기록, *한국조류학회지*, 25(1), 19-22.

양진원, 강승구, 정선희, 이원호, 2019: 한국 미기록종 뿔바다오리(Aethia cristatella) 의 첫 기록, *한국조류학회지*, 26(1), 29-32.

오상백, 강영훈, 이한석, 2014: 국내 연안도시의 기후변화 취약성 평가 연구, *대한건축학회연합논문집*, 16(4), 87-98.

유재진, 김장수, 장동호, 2016: 안면도 바람아래 할미섬 주변의 시계열적 침식·퇴적환경 변화 분석, *한국지형학회지*, 23(1), 47-60.

이동규, 2017: 국내 서식 감염병 매개체의 생태학적 특성과 현황. *Journal of the Korean Medical Association*, 60(6), 458-467.

이상훈, 윤충원, 최세웅, 유영한, 이상임, 김범철, 주기재, 이점숙, 2018: 생태계 장기모니터링 지역의 기후변화 영향, 국립생태원, 171.

이상훈, 한상학, 이창훈, 안나현, 2018: 생태계 기후변화 조사 연구, 국립생태원, 372.

이선미, 차재규, 신학섭, 문호경, 최태영, 강다인, 김진희, 박형철, 최철현, 정헌모, 박은진, 2016: 기후변화 민감 생태계 관리 및 보전방안 연구, 국립생태원, 107.

이수인, 이응필, 정영호, 김의주, 이재근, 이승연, 박재훈, 이상훈, 유영한, 2018: 증식 및 복원을 위한 기후변화 조건에서 수분과 유기물에 따른 멸종위기식물 죽절초 (*Sarcandra glabra*(Thunb.) Nakai)의 생태적 반응 연구, *한국환경생태학회지*, 32(1), 30-38.

이용호, 오영주, 홍선희, 나채선, 나영은, 김창석, 손수인, 2015: 기후변화 시나리오에 의한 외래식물 실망초 (*Conyza bonariensis*)의 서식지 분포 예측, *한국기후변화학회지*, 6(3), 243-248.

이용호, 홍선희, 나채선, 손수인, 김명헌, 김창석, 오영주, 2016: MaxEnt를 활용한 청비름(*Amaranthus viridis*)의 기후변화 시나리오에 의한 서식지 분포 변화 예측, *환경생물*, 34(4), 240-245.

이유정, 김경선, 조정구, 2017: 도시 기후 변화가 도시하천의 부착규조류 군집에 미치는 영향, *환경생물*, 35(2), 143-151.

장동호, 김성훈, 2013: 다중시기 항공사진과 기후자료를 이용한 신불산 산지습지의 기후변화 취약성 평가, *한국사진지리학회지*, 23(1), 39-52.

정명표, 심교문, 김용석, 최인태, 2015: 한반도의 기후학적 식물생육기간의 변화, *한국환경농학회지*, 34(3), 192-195.

정명표, 심교문, 김용석, 최인태, 소규호, 2014: 일평균기온(1971~2013)을 이용한 수원지역의 기후학적 식물생육기간의 변화 경향, *한국기후변화학회지*, 5(4), 285-289.

조강현, 이승현, 2015: 한반도에서 기후변화에 따른 수변 외래식물인 털물참새피의 분포 변화 예측, *응용생태공학회지*, 2(3), 206-215.

조광우, 맹준호, 2007: 우리나라 해수면 상승 대응방향에 대한 소고, *한국해양환경에너지학회지*, 10(4), 227-234.

최광용, 2017: 고해상도 기후변화 시나리오 자료를 활용한 한라산 지역 기온 및 기후대 변화 전망, *기후연구*, 12(3), 243-257.

최순규, 임상진, 박영철, 2018: 멸종위기종 긴꼬리딱새 (*Terpsiphone atrocaudata*)의 서식지 선택에 영향을 미치는 환경요인, *농업생명과학연구*, 52(1), 45-52.

최우진, 박대식, 김자경, 이정현, 김대인, 김일훈, 2018: 기후변화에 따른 산간계곡에 번식하는 계곡산개구리 (*Rana huanrenensis*)와 도롱뇽(*Hynobius leechii*) 번식개체군 크기의 변동, *한국환경생태학회지*, 32(6), 582-590.

최철현, 정성관, 박경훈, 2016: 위성영상을 기반으로 도출된 식물계절과 기온요인과의 상관관계 분석, *한국지리정보학회지*, 19(1), 30-42.

최한주, 박세영, 2018: 도서해안 지역의 기후변화 대응 정책과 시사점, 물 정책·경제, 30, 79-92.

홍선기, 2014: 기후변화에 따른 경관생태학의 연구동향과 섬 생태계의 적용, *한국도서연구*, 26(3), 77-95.

홍선기, 2014: 기후변화에 따른 해양생태계 변화와 어업, *생태와 환경*, 47(4), 302-311.

홍승범, 유동수, 이재호, 여인애, 배해진, 김진용, 신만석, 정헌모, 권오창, 전자영, 박은진, 2017: 생태계 기후변화 리스크 평가 및 적응대책 연구, 국립생태원, 297.

홍일, 김지성, 김규호, 전호성, 2019: 기후변화가 하천 유황과 어류 물리서식처에 미치는 영향 평가, *대한토목학회논문집*, 39(1), 33-44.

Choe, H.Y., H.T. James, H. Robert, J.Y. Kim, H.S. Kwon, and C.W. Seo, 2017: Meta-corridor solutions for climate-vulnerable plant species groups in South Korea, *Journal*

of Applied Ecology, 54, 1742-1754.

Choi, E.S. and I.J. Moon, 2008: The Variation of Extreme Values in the Precipitation and Wind Speed during 56 Years in Korea, *Atmosphere*, 18(4), 397-416 (in Korean).

Deutch, C.A., J. J. Tewsbury, R. B. Huey, K. S. Sheldon, C. K. Ghalambor, D. C. Haak, and R. R. Martin, 2008: Impacts of climate warming on terrestrial ectotherms across latitude. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 105, 6668-6672.

Hur, J. and J.B. Ahn, 2015: The change of first-flowering date over South Korea projected from downscaled IPCC AR5 simulation: peach and pear, *International Journal of Climatology*, 35, 1926-1937

Hur, J., J.B. Ahn, and K.M. Shim, 2014: The change of cherry first-flowering date over South Korea projected from downscaled IPCC AR5 simulation, *International Journal of Climatoogy*, 34, 2308-2319.

Jang W., C.R. Keyes, S.W. Running, J.H. Lim, and P.S. Park, 2015: Climate-growth relationships of relict *Picea jezoensis* at Mt. Gyebang, South Korea, *Forest Science and Technology*, 11(1), 19-26.

Jeong, H.C., M.J. Kim, I. Kim, and S.W. Choi. 2016: A new record of *Lyssa zampa* (Butler) from Korea. *Journal of Species Research*, 5, 220-222.

Kim, M., and K.T. Park, 2017: Three species of Gelechiidae (Lepidoptera: Gelechioidea) new to Korea. *Korean Journal of Applied Entomology*, 56(1), 93-96.

Koo, K.A., W.S. Kong, N.P. Nibbelink, C.S. Hopkinson, and J.H. Lee, 2015; Potential effects of climate change on the distribution of cold-tolerant evergreen broadleaved woody plants in the Korean Peninsula, *PLoS ONE*, 10(8), e0134043.

Koo, K.A., W.S. Kong, S.U. Park, J.H. Lee, J. Kim, and H. Jung, 2017: Sensitivity of Korean fir (*Abies koreana* Wils.), a threatened climate relict species, to increasing temperature at an island subalpine area, *Ecological Modelling*, 353, 5-16.

Koo, K.A., S.U. Park, W.S. Kong, S. Hong, I. Jang, and C. Seo, 2017: Potential climate change effects on tree distributions in the Korean Peninsula: Understanding model & climate uncertainties, *Ecological Modelling*, 353, 17-27.

Koo, K.A., S.U. Park, W.S. Kong, S. Hong, I. Jang, and C. Seo, 2018: Future distributions of warm-adapted evergreen trees, *Neolitsea sericea and Camellia japonica* under climate change: ensemble forecasts and predictive uncertainty, *Ecological Research*, 33, 313-325.

Koo, K.A., S.U. Park, and C. Seo, 2017: Effects of climate change on the climate niches of warm-adapted evergreen plants: expansion or contraction?, *Forests*, 8, 500.

Koo, K.S., D. Park, and H. S. Oh, 2019: Analyzing habitat characteristics and predicting present and future suitable habitats of *Sibynophis chinensis* based on a climate change scenario. *Journal of Asia-Pacific Biodiversity*, 12, 1-6.

Kwon, T.S., and C.M. Lee, 2015: Prediction of abundance of ants according to climate change scenarios RCP 4.5 and 8.5 in South Korea, *Journal of Asia-Pacific Biodiversity*, 8, 49-65.

Kwon, T.S., C.M. Lee and S. S. Kim, 2015: Prediction of abundance of beetles according to climate warming in South Korea, *Journal of Asia-Pacific Biodiversity*, 8, 7-30.

Kwon, T.S., C.M. Lee, and B.W. Kim, 2013: Prediction of distribution and abundance of forest spiders according to climate scenario RCP 4.5 and 8.5. Research Note 528. Seoul: Korea Forest Research Institute [in Korean].

Kwon, T.S., C.M. Lee, and S.S. Kim, 2014a: Northward range shifts in Korean butterflies, *Climatic Change*, 126, 163-174.

Kwon, T.S., C.M. Lee, J. Park, S.S. Kim, J.H. Chun, and J.H. Sung, 2014c: Prediction of abundance of ants due to climate warming in South Korea, *Journal of Asia-Pacific Biodiversity*, 7, 179-196.

Kwon, T.S., C.M. Lee, T.W. Kim, S.S. Kim, and J.H. Sung, 2014b: Prediction of abundance of forest spiders

according to climate warming in South Korea, *Journal of Asia-Pacific Biodiversity*, 7, 133-155.

Lee, C.M., T.S. Kwon, O.Y. Ji, S. S. Kim, G. E. Park, and J. H. Lim, 2015: Prediction of abundance of forest flies (Diptera) according to climate scenarios RCP 4.5 and RCP 8.5 in South Korea, *Journal of Asia-Pacific Biodiversity*, 8, 349-370.

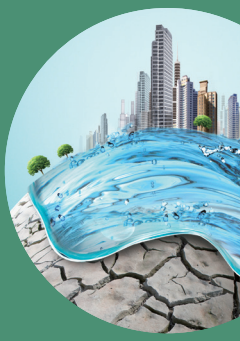
Li, F., N. Chung, M. J. Bae, Y.S. Kwon, T.S. Kwon, and Y.S. Park, 2013: Temperature change and macro-invertebrate biodiversity: assessments of organism vulnerability and potential distributions, *Climatic Change*, 9, 421-434.

Li, F., Y. S. Kwon, M. J. Bae, N. Chung, T.S. Kwon, and Y. S. Park, 2014: Potential impacts of global warming on the diversity and distribution of stream insects in South Korea, *Conservation Biology*, 28, 498-508.

Park, S.U., K.A. Koo, C. Seo, and S. Hong, 2017: Climate-related range shifts of *Ardisia japonica* in the Korean Peninsula: a role of dispersal capacity, *Journal of Ecology and Environment*, 41, 38.

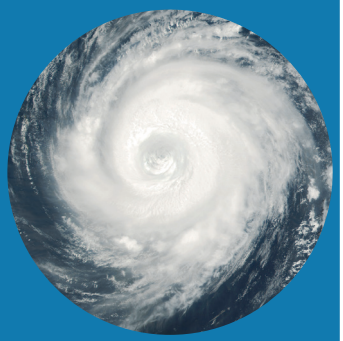
Sohn, J.C., S.S. Kim, and S.W. Choi. 2019: Three species of Epipleminae (Lepidoptera: Uraniidae) new to Korea, with a new synonym for *Epiplema nubifasciaria Leech*, *Korean Journal of Applied Entomology*, 58, 63-68.

한국 기후변화
평가보고서 2020
- 기후변화 영향 및 적응 -



제 4 장

산림



104 4.1 서론
106 4.2 관측된 영향
121 4.3 영향 전망
132 4.4 취약성의 주요 원인
136 4.5 적응 옵션
141 4.6 결론
142 4.7 참고문헌

제 4 장 산림

4.1 서론

「한국 기후변화 평가보고서 2014」에서는 1970년대 이후 국내 산림의 변화 특성과 장기적인 기후변화 관련 현황에 대해 기술하였다. 특히 당시 기후변화협약 측면에서 산림부문 주요 논의 사항이었던 REDD+에 대한 노력과 관련 연구들에 대해 다루었다.

산림은 목재 생산과 같은 경제적 기능뿐만 아니라 수자원 함양, 대기오염 정화, 휴양 및 관광 등 다양한 생태계서비스를 제공하는 유용한 자원이자 육상생태계의 주 구성요소다. 또한, 최근 기후변화로 인한 영향과 피해가 전 지구적으로 보고되면서, 온실가스 흡수를 통해 기후변화를 통제할 수 있는 요소로 그 가치가 높아지고 있다. 최근 파리협정(Paris agreement)에서는 각국이 자발적인 감축목표를 제시하고 이를 지키도록 명시하고 있으며, 유엔은 지속가능발전목표(Sustainable Development Goals, SDGs)를 통해 경제-사회-환경의 균형적인 발전의 지향점을 제시하고 있다. 우리나라는 기후변화에 대응하기 위한 국제협력체에 적극적으로 협력하는 한편, 경제와 환경의 조화로운 발전을 위하여 2010년에 「저탄소녹색성장기본법」을 제정·시정하였으며, 제48조 및 같은 법 시행령 제 38조에 따라 지난 2010년 제1차 국가기후변화적응대책(2011~2015)에 이어 2015년에 제2차 적응대책(2016~2020)을 수립하였다. 2차 적응 대책은 20개 부처가 합동으로 수립하였으며, 적응(adaptation)과 감축(mitigation)을 통해 기후변화로 인한 위험감소 및 기회의 현실화를 목표로 하고 있다. 최근 IPCC에서 발간한 기후변화와 토지특별보고서(SRCCL)에 따르면 산림을 포함한 토지이용분야는 인간활동에 의한 온실가스 배출량의 23%를 차지하고 있으며, 기후변화에 따른 생물다양성 감소와 토지관련 재해의 증대에 관한 많은 내용을 제시하고 있다(IPCC, 2019).

이런 상황 속에서, 적응과 감축에 동시에 기여할 수 있는 산림에 대한 관심이 높아지고 있다. 산림은 광합성을 통해 대기 중 CO_2를 흡수하고 바이오매스 형태로 저장함으로 기후변화 완화에 기여하지만, 다른 생태계와 마찬가지로 기후변화로 인한 영향을 받는다(Dale et al., 2001). 진행되고 있는 기후변화는 크게 온도와 강수량 및 패턴의 변화로 나타나고 있으며, 이는 전지구적으로 산림 식생대, 수종변화, 생장패턴, 생산성 등에 영향을 미치는 것으로 보고되고 있다(Fang and Lechowicz, 2006).

우리나라의 국토면적은 2017년 기준으로 10,036,372 ha이며 실제적인 산림면적은 6,383,441 ha로, 전 국토의 63.6%에 해당한다. 이는 OECD 국가 중 핀란드(72.9%), 스웨덴(68.7%), 일본(68.5)에 이어 네 번째로 높은 산림비율이나, 10년전(2007년)에 비해 약 80,400 ha가 감소했다(산림청, 2018). 우리나라는 반도(Peninsula) 지역이고 지형이 복잡하여 기후의 공간적 변이가 크며, 기후변화의 진행 속도도 IPCC에서 발표한 전 지구적인 온난화 추세를 상회하는 것으로 평가되고 있다. 즉, 기후변화가 우리나라 산림부문에 미치는 영향은 국토 전반과 연관되어 있으며, 따라서 산림자원의 변화를 예측할 때, 기후변화의 영향을 고려하는 것은 매우 중요하다고 할 수 있다.

산림청은 6차 기본산림계획을 통해 "일자리가 나오는 경제산림, 모두가 누리는 복지산림, 사람과 자연의 생태산림"이라는 비전 아래, 2018~2037년을 위한 8가지 전략을 수립하였다(산림청, 2018). 이중 기후변화와 관련된 추진계획은 1)지속가능발전목표(SDGs) 달성을 위한 산림역할 강화, 2)국가 온실가스 감축 목표 달성에 기여, 3)지속가능한 목재생산체계 구축, 4)산림생물다양성의 지속적 관리기반 구축, 5)산림생태계서비스 가치 증진, 6)과학적 산불예방과 산불진화 대응역량 강화, 7)산림·지역 특성을 고려한 산사태 재해 안전망 구축, 8)선제적 산림병해충 예찰 및 방제,

9)개도국 산림전용 방지(REDD+) 등 신기후체제 대응, 10)인문·사회·경제 요소 등 융복합 산림 거버넌스 체계 구축, 11)문제 해결형 산림분야 연구개발 혁신 및 성과 산업화 등이 있다.

현재(2017년) 우리나라의 산림은 1970년대 이후 침엽수 위주의 치산녹화사업으로 인하여 침엽수 면적이 전체의 36.6%(2,339천 ha)로 가장 넓게 분포하고 있으며, 활엽수림과 혼효림은 각각 31.8%(2,029천 ha), 26.7%(1,706천 ha)를 차지하고 있다(산림청, 2018). 10년 전인 2007년의 각 면적은 2,687, 1,662, 1,862천 ha로 침엽수림의 감소와 활엽수림의 증가 현상이 관측되고 있다. 이러한 산림분포의 변화는 산림생태계, 임업 및 임업생산물 등에 직간접적인 영향을 미치며, 이러한 변화는 기후변화로 인해 더욱 가속화될 것 이란 전망이 지배적이다. 또한, 이러한 임상분포와 비율의 변화는 산림생장 및 탄소량의 변화, 건강성 및 병해충 발생 변화 등과도 밀접하게 연관되어 있다. 즉, 하나의 현상을 다양하게 해석할 수 있는 통합적인 분석과 평가가 필요할 뿐만 아니라, 이를 기반으로 미래의 잠재적 위험성과 취약요소를 도출하고 이를 해결하기 위한 실제적인 산림관리 계획수립이 과거 그 어느 때 보다도 요구되고 있다. 이번 기후변화 평가보고서의 산림부문에서는 기후변화가 산림의 생장, 분포, 탄소량의 변화 및 산림재해 분야의 연구 동향을 파악하고 한계와 시사점에 대하여 논하고자 한다.

제2차 기후변화 평가보고서에 따르면 산림분야의 연구는 주로 산림분포 변화, 산림 탄소저장 및 흡수량 추정, 산림재해(산사태, 산불, 병해충 등) 발생 기작 분석 및 예측 측면에서 이루어지고 있는 것이 확인되었다.

산림분포 모니터링 결과와 기후변화의 상관성을 분석한 결과, 연평균기온 상승에 따라 한반도 전체에서 산림분포와 구성의 변화가 이루어지고 있는 것이 확인되었으며, 지역별로 다른 특성이 나타났다. 동시에 산림의 탄소 흡수량이 미래에는 대부분 감소할 것으로 전망되어, 산림의 탄소 흡수원으로서의 역할을 증대시키기 위한 관리 및 적응전략이 필요한 것으로 나타났다. 단, 산림토양의 경우 연구에 따라서 다양한 경향을 보이고 있어 지속적인 모니터링과 분석이 필요할 것으로 판단되었다.

산림재해와 관련된 연구에서는 산사태, 산림병해충, 산불에 대한 연구가 주를 이루고 있는 것으로 파악되었으며, 특히 산사태와 산림 병해충에 대한 연구가 주를 이뤘다. 산사태의 경우 발생원인 및 기작을 파악하기 위한 많은 연구들이 진행되고 있으며, 기상 및 지형인자 중 유의미한 요인들이 파악되고 있다. 기후변화로 인해 극한기후현상의 강도와 빈도가 증가됨에 따라 병충해의 종류 및 분포범위에 변화가 있는 것으로 확인되었으며, 특히 아열대성 병해충의 지속적 유입 및 정착과 함께 특정 병해충의 돌발적 발생도 예상되었다.

제2차 기후변화 평가보고서에 따르면, 그동안 진행되었던 국내 연구들을 통해 기후변화가 산림에 영향을 미친다는 것이 확인되고 있지만, 서로 상이한 결과들로 인해 판단을 보류해야 하는 부분들도 있었으며, 통합적인 관점에서의 해석이 부족한 것으로 나타났다.

각 연구의 공간규모를 살펴보면, 산림의 분포 및 탄소저장량, 산림병충해에 대한 연구는 국가적인 규모의 분석들이 수행되고 있으며, 산사태, 산불은 주로 재해가 일어난 지역 및 인근을 대상으로 하여 연구가 진행되었다. 따라서 기후변화 영향 및 취약성 평가와 이에 연관된 적응대책을 수립하기 위해서는 국가-지자체 간의 차이를 밝히고 각각의 분야에서 진행되고 있는 연구들의 범위를 확장 혹은 구체화하여 적용가능성을 높여야 할 필요가 있다.

이와 동시에 연구자별로 다양한 변수와 기후변화 시나리오를 사용하고 있어 향후 표준화된 기후변화 시나리오와 변수를 활용한 연구를 통해 불확실성을 줄이고 국제적 신뢰성을 제고할 수 있는 방향으로 연구가 진행되어야 한다는 문제의식이 제기되었다. 이를 해결하기 위한 방안으로 1)장기적인 관점에서 기후변화로 인한 영향을 관측하고 이를 바탕으로 미래의 영향을 예측하는 연구, 2)표준화된 방법 및 연구를 통해서 개별 연구의 적용가능성 확보, 3)장기적인 관측을 통한 데이터 구축 및 검증, 4)미래의 기후변화 영향 예측 및 취약성 분석을 통한 신뢰도 높은 적응대책 수립, 5)현재 진행되고 있는 산림분야 내 다양한 연구들의 상호관계를 파악하여, 통합적 접근을 기반으로 한 합리적 대책 수립 등이 제언되었다.

산림부문의 제3차 기후변화 평가보고서는 주로 2012년 이후에 진행된 연구들을 기반으로 작성하여, 현재 국내에서 진행되고 있는 가장 최신의 연구 동향 및 검증된 과학적 사실들을 통해 기후변화의 영향과 미래 산림의 변화를

파악하고자 하였다. 또한 취약성의 원인과 이를 줄일 수 있는 적응옵션을 다각도로 검토하여 가능한 방안들을 정리하였다. 이를 통해 산림부문 현명한 기후변화 대응, 국가기후변화 적응대책 마련 및 범 국가적인 지속가능발전에 기여하고자 한다.

4.2 관측된 영향

4.2.1 산림생장

「한국 기후변화 평가보고서 2014」에서는 기온 및 강수량의 변화에 따라 지역별, 수종별 산림 생장의 변화가 나타났다고 보고하였으며(견고한 동의), 넓은 지역에서 침엽수종의 생장감소가 관측됨을 기술하였다(중간적 동의).

산림생장은 산림의 생산성과 건강성을 대표할 수 있는 중요한 인자로 고려되고 있다. 또한, 산림생장은 산림의 탄소흡수·저장, 목재 수확량 등과도 직접적으로 연관되어 있으며, 산림관리 및 경영계획 수립을 위한 중요한 정량적 지표로 사용되어 왔다. 사계절이 뚜렷한 우리나라의 기후특성에 따라 대부분의 임목은 일년 단위로 생장(직경 및 수고)하며, 각 연도의 생장량은 해당연도의 기후에 직, 간접적으로 영향을 받는다(Neilson and Marks 1994). 우리나라에서 기후와 산림생장의 상관관계는 주로 특정 조사구, 산, 지역 등 비교적 국지적 공간규모를 대상으로 정성적인 분석이 수행되었으나, 2006~2010년 기간에 시행된 제5차 국가산림자원조사(5th NFI)부터 표본점 설계 및 조사 체계가 개편되면서 전국 규모의 분석이 가능해졌다.

기후변화가 우리나라 주요 수종의 생장에 미치는 영향을 분석하기 위해서, 임목의 연륜 자료를 활용한 연륜연대학(Dendrochronology) 분석 기법이 유용하게 사용되고 있다. 기후변화에 따른 산림생장과 기후인자와의 상관관계를 분석한 결과, 지난 30년간 연평균기온의 뚜렷한 증가와 강수주기 및 강도의 변화는 산림생장에 분명한 영향을 미친 것으로 나타났으며, 이는 수종별, 지역별로 다른 특성을 보이는 것으로 확인되었다. 강원도 지역의 활엽수 생장과 17개 기후변수 간의 상관관계를 검토한 결과 직경생장은 한랭지수, 건조지수, 상대습도와, 수고생장은 건조지수와 월 평균 일조시수, 재적생장은 상대습도와 건조지수와 유의미한 상관관계가 있는 것으로 확인되었다(신만용 등, 2008).

우리나라에서 단일 수종으로는 가장 광범위하게 분포하고 있는 소나무의 경우, 상대적으로 좀 더 다양한 연구가 수행되어왔다. 목편자료를 기반으로 백두대간 중 해발고도 700 m 이상에서 자생하고 있는 소나무의 직경생장과 월 기후요소를 분석한 결과, 공통적으로 강수보다는 기온의 영향을 더 크게 받는 것으로 확인되었으며 특히 당년 8월의 기온과 유의한 정의 상관관계가 확인되었다.

전국 규모의 연구에서는 보다 흥미로운 결과들이 도출되었다. 28개 시군의 소나무 생장목편 자료를 분석한 결과, 우리나라에 분포하는 소나무림은 생장패턴을 기준으로 크게 5개의 군집으로 구분이 가능한 것으로 나타났으며, 공통적으로 2~3월의 기온과 연륜생장 간에 정의 상관을 보이는 것으로 확인되었다(이상태 등, 2008). 또한, 대부분의 지역에서 전년도 10월의 기온이 당년도 연륜생장에 부정적인 영향을 끼치는 것으로 나타났다. 그러나 김해와 포항 지역의 소나무림의 연륜생장은 전년도 10월의 기온과 정의 상관을 보였다. 이는 해안지역과 인접한 지역의 경우, 겨울철의 수분 스트레스가 상대적으로 낮기 때문으로 해석되고 있으며,

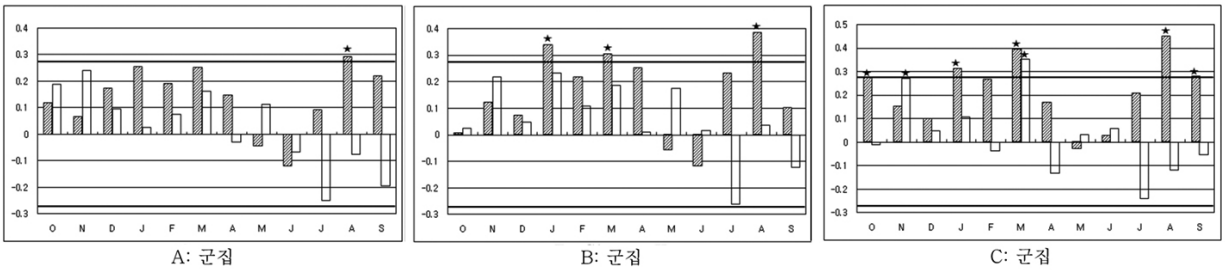


그림 4.1 백두대간에 자생하는 소나무의 연륜생장과 월별 기후인자와의 상관성분석(이상태 등, 2008). Y축: 상관계수, X축: 월별 기후인자(빗금박스: 기온, 일반박스: 강수량), *: 0.05 유의수준.

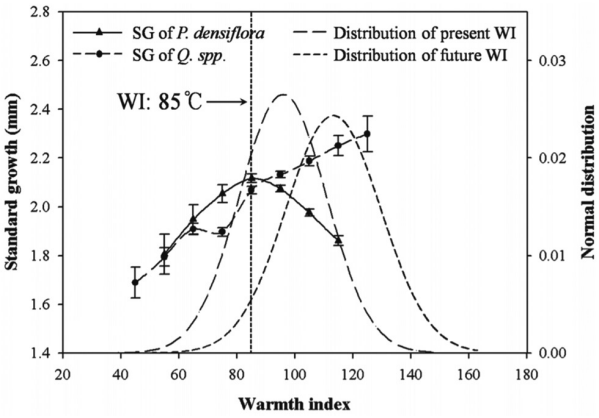


그림 4.2 소나무와 참나무류의 표준생장량(Standard grwoth)과 온량지수(Warmth Index, WI) 간의 상관관계(Byun et al., 2012). X축: WI, Y축: 표준생장량, 보조 Y축: 소나무와 참나무류 분포의 확률밀도 함수.

동일 수종 내에서도 환경 및 입지적 요인의 이질성에 따라 기후에 대한 생장반응이 다르게 나타날 수 있음을 잘 보여준다.

제5차 국가산림자원조사(National Forest Inventory, NFI)를 통해 구축된 수종별 목편DB를 통해 전국규모의 산림생장 연구를 수행할 수 있는 기반이 마련되었다. 전국에 배치된 16,000여 개의 고정표본점의 5~6개 우세목에서 목편을 채취하였으며, 총 78,000개의 목편을 1/100 mm 단위로 정밀하게 측정하고 DB화하여 기후변화의 단, 장기적인 영향뿐만 아니라, 공간적, 수종적, 환경적 이질성을 정량적으로 평가할 수 있게 되었다. 우리나라에 가장 널리 분포하고 있는 소나무와 참나무는 일반적으로 기온의 증가에 따라 서로 다른 생장반응을 보인다는 것이, 본 자료를 통해 처음으로 밝혀졌다(Byun et al., 2013). 분석결과 온량지수(Warmth Index, WI)가 85℃ 이하인 지역(상대적으로 기온이 낮은 지역)에 자생하는 소나무는 기온과 생장이 정의 상관관계를 보이나, 85℃ 이상인 지역(상대적으로 기온이 높은 지역)에서는 전반적으로 부의 상관관계를 보이는 것으로 확인되었다. 결과적으로 현재 소나무림은 상대적으로 WI가 85℃ 이상인 지역에 더 많이 분포하고 있기 때문에 기온의 증가는 전반적인 소나무림의 생장감소 현상을 야기하는 것으로 나타났다. 이는 기존의 지역적 규모의 연구들이 상이한 결과를 도출한 것에 대한 타당성과 산림공간계획의 중요성을 잘 설명해주고 있다. 반면, 참나무림의 직경생장은 WI가 120℃ 넘는 환경에서도 기온과 정의 상관을 보였다. 이는 우리나라 남부 일부지역을 제외한 대부분의 지역에서 기후변화에 따른 평년기온의 증가가 참나무림 생장에 긍정적인 영향을 미쳤다는 것을 시사한다.

또 다른 주요 침엽수종인 낙엽송과 잣나무의 생장도 기온과 전반적으로 부의 상관관계를 보이는 것으로 나타났으며, 기온증가에 따른 생장감소가 소나무보다 더 심각한 것으로 분석되었다(Kim et al., 2017). 또한, 현재 두 수종이 분포하고 있는 대부분의 지역에서 기후변화로 인한 산림생장의 부정적인 영향이 관측되고 있는 것으로 확인되었다.

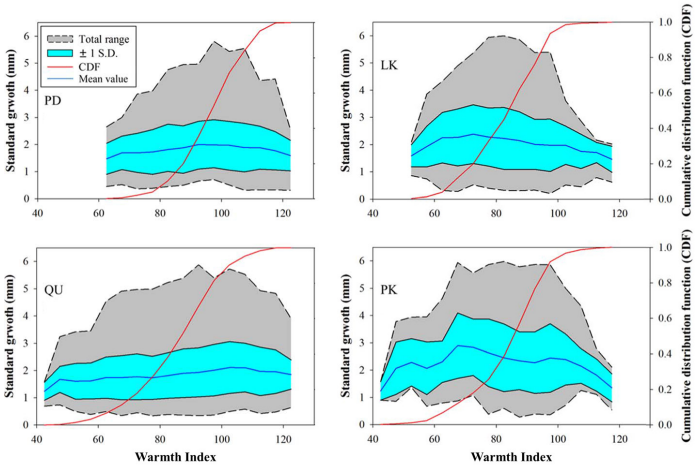


그림 4.3 우리나라 주요 수종의 표준생장량과 온량지수(WI)와의 상관관계(Kim et al., 2017). PD: 소나무, LK: 낙엽송, QU: 참나무류, PK: 잣나무.

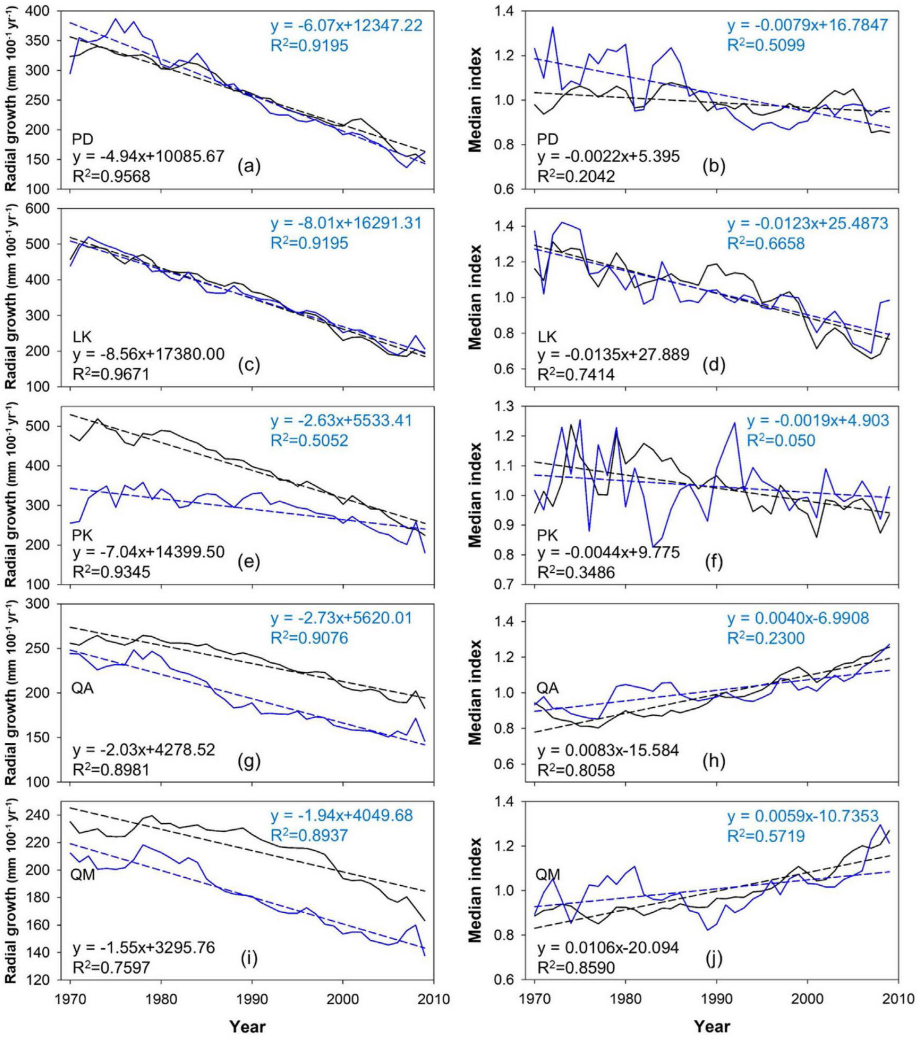


그림 4.4 우리나라 주요 수종의 반경생장량(a, c, e, g, I)과 표준생장량(b, d, f, h, j) 변화 분석(Kim et al., 2020). 파란선은 고지대 산림, 검은선은 저지대 산림을 나타냄. PD: 소나무, LK: 낙엽송, PK: 잣나무, QA: 굴참나무, QM: 신갈나무.

목편자료를 통한 장기적인 생장경향 분석은 기후변화가 산림생장에 미치는 지속적인 영향을 파악하는데 도움이 되고 있다(Kim et al., 2020). 목편자료를 통해 1970~2005년 기간의 우리나라 주요 5개 수종의 생장을 저지대와 고지대산림으로 구분하여 분석한 결과, 임령이 증가함에 따라 모든 수종에서 연년직경생장이 감소하는 것이 관측되었으나, 이를 연륜연대학적 분석방법을 통해 생산성(Productivity)을 추정한 결과 참나무류의 생산성은 1990년대 이후 지속적으로 증가하고 있는 것으로 나타났다. 또한, 이러한 증가는 저지대 참나무림에서 더 분명한 것으로 확인되었으며, 낙엽송과 잣나무림의 생산성은 저지대보다 고지대 산림에서 더 높은 것으로 확인되었다. 이러한 결과는 기후변화의 영향이 수종 및 공간별로 다르다는 것을 잘 보여주고 있다.

4.2.2 산림분포

「한국 기후변화 평가보고서 2014」에서는 기후변화에 따른 산림분포 변화 모니터링 결과들을 다루었고 그 결과, 연평균기온이 상승함에 따라 산림 구성에서의 변화를 확인할 수 있었다. 이는 지역별로 다른 특성을 나타냈다고 기술하였다(견고한 동의).

우리나라 산림분포의 과거부터 현재까지의 영향을

연구하기 위해서 주로 모니터링 방법을 이용하고 있다. 우리나라의 경우 지난 30년간 연평균기온이 상승함에 따라 군락지 감소, 개화시기 변화 등 산림 구성에서 변화를 확인할 수 있는데 기후변화에 따른 임상변화와 지형특성과의 상관관계를 분석한 결과 지역별로 다른 특성을 나타냈다. 현재 우리나라 식생 군락유형을 내륙지역을 중심으로 22개 산림지역 1,456개소의 식생자료를 수집하여 분석한 연구결과, 대립종군은 총 네 쌍으로 굴참나무군락형과 청시닥나무군락형, 회양목군락형과 팥배나무군락형, 사스래나무군락형과 서어나무군락형, 소나무군락형과 분비나무군락형 등으로 나타났다(윤충원 등, 2011). 이처럼 여러 쌍의 대립종군으로 분류된 것은 우리나라의 독특한 산악요소와 지형요소 및 온도대 등의 다양성을 반영하여 성립된 식생구조에 기인하므로, 기후변화는 우리나라 식생 군락유형 변화에 영향을 미칠 가능성이 있는 것으로 사료된다.

충남해안지역의 산림 영향을 조사한 결과, 기온이 상승할수록 저지대에 분포하는 침엽수림보다 고지대의 침엽수림이 더 큰 영향을 받는다는 것을 확인하였다(김찬수 등, 2011). 유사한 지역을 대상으로 다중시기 위성영상과 DEM 자료를 이용하여 1984년부터의 임상 변화를 분석한 결과, 해발 550 m 이하에서는 침엽수림 감소가, 해발 50~700 m 사이에서는 혼효림의 증가가 확인되었다. 반면에 활엽수림은 전 고도에서 증가하였다. 특히 북서향, 북향에서의 침엽수 감소와 혼효림 증가를 통해 침엽수림이 점차 혼효림으로 천이되고 있는 추세를 확인하였다(김장수 등, 2012).

강원도 산지지역을 대상으로 임상변화를 확인한 결과,

표 4.1 국내 주요 아고산 침엽수림의 면적 변화식(김은숙 등(2019)을 일부 수정).

대상지	아고산림면적 (ha)		변화면적 (ha)
	1990년대	2010년대	
설악산	1,086	754	-332
백운산-함백산	999	457	-542
오대산	1,086	889	-198
태백산	960	770	-190
덕유산	377	176	-168
지리산	2,239	1,913	-326
한라산	915	610	-304

표 4.2 수종별 국가 고유 배출계수(국립산림과학원, 2015).

수종	목재기본밀도	바이오매스 확장계수	뿌리함량비
강원지방소나무	0.42	1.48	0.26
중부지방소나무	0.47	1.41	0.25
낙엽송	0.45	1.34	0.29
리기다소나무	0.50	1.33	0.36
곰솔	0.48	1.52	0.29
잣나무	0.41	1.74	0.28
삼나무	0.35	1.31	0.23
편백	0.43	1.35	0.20
기타 침엽수	0.46	1.43	0.27
굴참나무	0.72	1.34	0.32
신갈나무	0.66	1.60	0.39
상수리나무	0.72	1.45	0.31
굴참나누	0.66	1.55	0.43
붉가시나무	0.83	1.70	0.19
기타 활엽수	0.68	1.51	0.36

침엽수는 전 고도에서 감소하였고 혼효림은 일부 고도를 제외하고 전반적으로 증가하였다. 활엽수림 또한 전반적으로 증가하였는데 특히 침엽수가 급격하게 감소하는 해발 1300 m 이상 지역에서는 급격하게 증가하였다. 사면향에 따른 분석에서 침엽수림은 모든 사면향에서 감소하였으며, 혼효림은 북동향을 제외하고 모두 증가하였다. 활엽수림 또한 모든 사면향에서 증가하였고 특히 북서향, 서향, 북향에서 많이 증가하였다(김성훈과 장동호, 2013).

1990년대 중반부터 2010년대 중반까지 약 20여년 간 국내 주요 산지에 분포하는 아고산 침엽수림의 면적 변화는 약 25% 감소하였다(김은숙 등, 2019). 이는 산악지역에서 두드러지는 온도변화가 가장 큰 원인으로 확인되었다. 반면 난온대 상록활엽수림대 면적은 과거(1968~1987) 대비 최근(1988~2007) 20년 간 약 2.7배 증가하였다(박종철, 2010).

4.2.3 탄소

「한국 기후변화 평가보고서 2014」에서는 현장 조사 및 원격탐사방법을 이용한 탄소 및 바이오매스 추정과 과정기반 모델을 적용한 산림 탄소 연구들을 기술하였다. 주요 결과로는 성공적인 국가조림 사업을 통해 산림탄소 저장량과 흡수량이 증가했으나(견고한 동의), 임령의 증가와 기후변화 영향에 의해 탄소 흡수 및 토양 탄소저장량 패턴의 변화가 관측되었다고 기술하였다(중간적 동의).

4.2.3.1 산림탄소 저장량

산림의 주요 탄소저장고는 크게 지상부, 지하부, 고사목, 낙엽층(litter), 토양으로 구분할 수 있으며 각 저장고는 유기적으로 연결되어 있다. 따라서 각 저장고의 탄소량을 정량화하는 것은, 산림의 탄소저장량 정량화뿐만 아니라 동적변화를 이해하고 예측하는데 도움이 된다. 2000년 이후로 국내 산림탄소량을 평가하기 위한 많은 연구와 노력이 있어왔다. 국립산림과학원은 수종별 국가 고유 배출계수를 개발하여 국가의 산림탄소 인벤토리 고도화에 기여하였다.

또한, 수종별 바이오매스 상대생장식을 개발하여 임목의 줄기뿐만 아니라 가지, 잎, 뿌리의 탄소량도 쉽게 추정할 수 있도록 하였다.

표 4.3 중부지방소나무의 바이오매스 상대생장식(국립산림과학원, 2015). [D: 흉고직경(cm), H: 수고(m)]

부위	식1: $y = a \cdot D^b$		
	a	b	적합도
줄기	0.235	2.071	0.964
가지	0.004	2.748	0.757
잎	0.054	1.561	0.629
뿌리	0.031	2.279	0.778
사용범위	흉고직경: 6 ~ 40 cm		

부위	식2: $y = a \cdot D^b \cdot H^c$		
	a	b	c
줄기	0.034	1.734	1.025
가지	0.008	3.586	-1.158
잎	0.077	1.931	-0.566
뿌리	0.034	2.394	-0.160
사용범위	흉고직경: 6 ~ 40 cm		

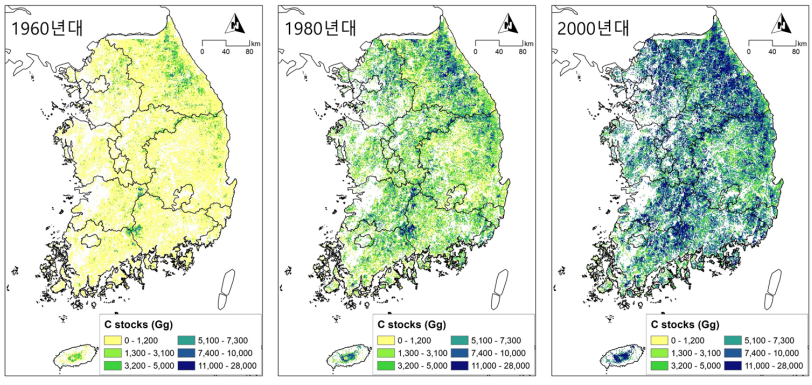


그림 4.5 우리나라 산림탄소 저장량 변화 추정(Kim et al., 2019).

제 5차 국가산림자원조사(2006~2010년) 자료를 통해 토양과 낙엽층의 탄소저장량도 정량화되었다. 분석결과 토양과 낙엽층 탄소 저장량(tC/ha)은 침엽수림에서 59.9±31.2와 5.6±2.6으로, 활엽수림에서 96.1±43.2와 4.3±3.1의 범위로 확인되었다. 위의 결과에서 알 수 있듯이, 산림 탄소저장량은 수종과 임령 및 환경에 따라 영향을 받으므로 지속적인 다양한 연구들이 필요하다. 광릉 지역을 대상으로 천연 소나무림의 임령별(10~71년) 탄소저장량을 측정한 결과, 18.8 tC/ha에서 201.4 tC/ha까지 임령에 따라 탄소저장량의 차이가 나타났다(Noh et al., 2013).

위성영상과 공간통계 및 모델링 방법을 활용하여 조사구 규모의 자료를 기반으로 지역규모의 탄소저장량을 추정하고, 각 방법론의 정확도를 비교하는 연구가 수행되었다. 충청남도와 대전시를 대상으로 지도대수(방법 1), 회귀크리깅(방법 2) 및 지리가중회귀(방법 3)를 이용하여 산림탄소저장량을 추정 및 검증한 결과 지형과 임분 구조가 복잡한 우리나라 산림의 경우 방법 2가 가장 적합한 것으로 나타났다.

산림청은 지난 2007년에 우리나라 숲에 저장된 CO_2를 23.5억 톤(임목: 10억 톤, 토양: 13.5억 톤)으로 추정하였고, 우리나라 산림 면적의 61%가 나무 생육이 왕성한 30년 이하의 어린 산림으로 구성되어 있어 향후 온실가스 저장량은 더욱 증가될 것이라고 전망하였다. 최근 모델기반의 연구들을 통해 국가 규모의 산림탄소량을 추정하는 연구들이 진행수행되면서 이러한 산림청의 전망이 맞았음을 뒷받침하고 있다. 국가산림자원조사의 임분조사 자료를 기반으로 한국형 산림토양탄소모델(KFSC)을 구동한 결과, 2014년 임목 전체의 탄소저장량은 440.4 Tg C, 고사 및 토양탄소 저장량은 463.1 Tg C으로 추정되었다(Lee et al., 2014).

캐나다 산림청에서 개발한 산림탄소모형인 CBM-CFS3 (Carbon Budget Model of the Canadian Forest Sector)을 통해 2000년의 지상부, 지하부, 고사목, 낙엽층(litter), 토양의 평균 탄소량은 16.9, 6.9, 7.9, 3.4, 60.6 tC/ha로 추정되었다. 2014년의 각 부위별 탄소량은 54.9, 13.2, 9.6, 4.9, 60.2 tC/ha로 추정되었으며, 토양탄소량을 제외하고, 전체적인 증가가 확인되었다. 이는 우리나라 산림의 평균 임령이 낮고 연년생장량이 높은 특성이 잘 반영된 결과라고 할 수 있다.

최근 연구에 따르면 고도에 따른 탄소저장량의 차이도 있는 것으로 확인되었다. 우리나라 산림을 해발고도 700 m를 기준으로 두 그룹(저지대 산림, 고지대 산림)으로 나누어서 비교해본 결과 면적의 차이(저지대 산림: 552만 ha, 고지대 산림: 77만 ha)이로 인해 총 탄소저장량은 저지대 산림이 높지만, 단위 면적당 탄소저장량은 고지대 산림이 더 높은 것으로 나타났다.

모델 결과에 따르면, 저지대 산림과 고지대 산림의 평균 탄소저장량은 1960~2014년 기간동안 각각 0.43, 4.03 tC/ha에서 73.76, 102.43 tC/ha로 증가한 것으로 확인되었다.

이는 수종별, 탄소저장고별 연구뿐만 아니라, 공간과 환경의 이질성에 따른 산림 탄소저장량 정량화에 대한 지속적인 노력과 관심이 필요하다는 것을 시사한다.

4.2.3.2 산림 탄소흡수량

산림은 육상생태계의 주요 탄소저장고로서 이산화탄소 배출감소와 기후변화 완화에 중요한 역할을 하고 있다.

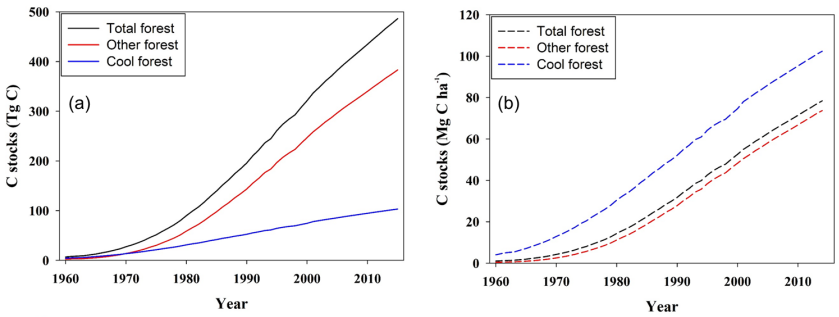


그림 4.6 저지대(Other forest)와 고지대(Cool forest) 산림탄소 저장량 변화 추정(Kim et al., 2019). (a) 총 탄소저장량, (b) 단위 면적당 탄소 저장량.

표 4.4 단위면적 당(ha당) 연간 CO_2 흡수량(톤/ha/년)(손영모 등, 2010).

대상지	임령(년)					
	10	20	30	40	50	60
강원지방소나무	7.4	9.9	9.4	8.1	6.6	5.2
중부지방소나무	4.0	9.4	12.1	6.3	3.2	1.8
소나무(평균)	5.7	9.7	10.8	7.2	4.9	3.5
잣나무	5.3	11.5	10.6	8.9	7.4	6.4
낙엽송	9.0	10.3	9.3	8.3	7.7	7.3
리기다소나무	4.5	11.3	10.1	7.1	4.8	3.4
편백	4.6	7.8	7.2	5.9	4.6	3.7
상수리나무	11.7	16.5	14.5	12.8	11.4	10.2
신갈나무	9.0	15.6	9.7	8.8	7.8	7.1
참나무(평균)	10.4	16.1	12.1	10.8	9.6	8.7

이산화탄소 배출을 저감하고 흡수량을 늘리기 위해서는 육상생태계의 탄수흡수와 관련된 기작을 깊게 이해하고, 이를 정량화하는 것이 필요하다.

산림청은 정부의 산림부문 국가 온실가스 흡수/배출 산정기관으로서 우리나라 산림의 온실가스 흡수기능에 대한 국민들의 인식확산과 적극적인 온실가스 감축 활동 참여 유도를 위하여 『산림 탄소흡수량 국가 표준』을 개발했다. 이에 따르면 우리나라 산림 1 ha(100 m×100 m)는 평균적으로 매년 10.8 톤의 CO_2를 흡수하는 것으로 나타났다.

우리나라를 대상으로 지상부 및 지하부 식생의 장기간(1981~2006년) 탄소변화량을 확인하기 위해 기후요소 및 AVHRR, MODIS의 위성영상을 이용하여 NPP를 분석한 결과, 남한지역의 연간 순 일차생산량이 AVHRR의 경우 8.93-10.68 tC/ha/yr로 나타나며, MODIS의 경우 6.10-6.95 tC/ha/yr로 나타나 지상관측과 비교한 경우 MODIS를 이용한 분석이 보다 근접한 결과를 보였다(홍지연 등, 2011). 기간별로는 2000~2006년동안 MODIS에서 매년 평균 6.08tC/ha/yr 만큼 증가하였으며, 특히 남서해안과 제주도의 경우에 순일차생산량의 증가가 높았다(홍지연 등, 2011). 이와 유사한 지역을 대상으로 VISIT(Vegetation Integrated Simu lator for Trace gases) 생태계 모형을 구동하여 식생탄소수지를 측정한 연구에서는 연간 순일차생산량이 5.89tC/ha/yr로 나타났다(유성진 등, 2012).

수도권 산림에서 과거 30년(1971~2000) 자료를 이용해 모의한 산림의 순일차생산량도 평균 6.02tC/ha/yr로 나타나고 있다(권선순 등, 2012). 공간적으로는 남부지방과 제주도에서 단위면적당 바이오매스 증가량이 월등히 높은 것으로 나타났고 남한 전체 내에서 순일차생산량과 관계있는 기후요소는 월별 강수량 및 평균기온으로 나타났다(유성진 등, 2012). 이는 서남해안과 제주도에서 미래 NPP 증가율이 높은 것을 확인한 연구와 동일한 결과를 보였다(이동근 등, 2010b).

Yoo et al. (2012)은 VISIT(Vegetation Integrated Simulator for Trace gases) 모형을 구동하여 우리나라의 초지, 농지, 산림 등을 포함한 육상 생태계 전체의 탄소 수지를 추정하였다. 연구결과에 따르면, 1999~2008년 동안 우리나라의 식생 생태계는 연평균 3.51 Tg C yr^{-1}(0.36 Mg C ha^{-1})의 탄소를 흡수한 것으로 추정되었다. 산림청은 NFI 자료를 기반으로 2015년 우리나라 산림의 연간 탄소흡수량을 11.12 Tg C yr^{-1}(1.72 Mg C ha^{-1})로 추정하였으며, 이는 Yoo et al. (2012)의 결과보다 3배 정도 높은 값이다. 이 두 결과는 산림이 다른 생태계에 비해 탄소흡수량이 높다는 것을 잘 보여준다.

탄소수지는 토지피복에 큰 영향을 받으며, 이것은 우리나라와 북한의 비교를 통해 분명하게 확인된 바 있다. 1980~2000년대에 우리나라는 도시 면적은 증가하였으나 산림 면적은 유지된 반면, 북한은 많은 산림이 농지와 초지로 전용되었다. Cui et al. (2014)는 VISIT 모형을 통해 토지이용 변화에 따른 탄소수지 변화를 추정한 결과 우리나라의 1990년대 탄소흡수량은 약 10.9 Tg C yr^{-1}(1.11 Mg C ha^{-1} yr^{-1})에서 2000년대에 약 6.8 Tg C yr^{-1}(0.69 Mg C ha^{-1} yr^{-1})로 변화된 것으로 추정되었으며, 같은 기간 북한은 3.0 Tg C yr^{-1}

표 4.5 산림의 탄소흡수량 및 저장량 변화 추정(산림청, 2014).

항목	연도					
	2010	2015	2020	2030	2040	2050
총 탄소흡수량 (Million t CO_2 yr^{-1})	59.6	44.1	30.8	14.1	4.8	0.15
단위 면적당 탄소흡수량 (t CO_2 ha^{-1} yr^{-1})	9.33	6.90	4.83	2.21	0.76	0.02
총 탄소 저장량 (Billion t CO_2)	1.57	1.83	2.01	2.22	2.31	2.33
단위 면적당 탄소 저장량 (t CO_2 ha^{-1})	246	286	314	347	360	363

(0.25 Mg C ha^{-1} yr^{-1})에서 -0.36 Tg C yr^{-1}(-0.03 Mg C ha^{-1} yr^{-1})으로 급격하게 감소한 것으로 추정되었다. 원인을 분석한 결과, 북한은 1980년대 이후 급격하게 산림 면적이 감소되면서 2000년대에 들어서는 육상 탄소흡수량이 배출량보다 적어, 국토 전체 육상생태계가 탄소흡수원이 아니라, 배출원이 된 것으로 추정되었다. 이는 국가 규모의 산림의 보존과 관리의 중요성을 시사한다.

Cui et al. (2014) 연구 결과와 같이, 현재 우리나라 산림은 순생장량이 많은 21~40년생이 59.3%를 차지하고 있어 탄소흡수에 유리하나(KFS 2014), 향후 노령화로 인해 이산화탄소 순흡수량은 급격히 감소할 것으로 예측되었다(Table 2). 산림청은 우리나라 산림의 연간 CO_2 흡수량이 2010년 59.67 백만 t CO_2에서, 2050년에는 0.15 백만 t CO_2로 급격하게 감소할 것으로 추정하였다(Table 2). 이는 임령증가에 따른 순생장량 감소가 반영된 결과로, 따라서, 신규·재조림, 산림갱신, 목제품(Harvested Wood Product, HWP) 이용 등을 통해 흡수량을 유지 및 증진하기 위한 노력이 필요할 것으로 사료된다. 그러나 벌채된 산림은 재조성될 때까지 공익적 기능을 상실함으로, 산림이 가진 공익적 기능의 협력(synergy)과 상충(trade-off)을 고려한 구체적인 시공간적 계획 수립이 필요하다.

4.2.4 산림재해

「한국 기후변화 평가보고서 2014」에서 산림재해 부분은 산림 자원을 위협하며 산림 생태계에 교란을 일으키는 주요한 원인으로 다루었으며, 국내에서는 기후변화와 관련하여 주로 산사태와 산불 연구에 집중되어 있다고 기술하였다. 대부분의 연구에서는 현재의 재해 발생 현황을 분석하고 그 원인을 체계적으로 구축하고자 하였다.

4.2.4.1 산사태

우리나라는 1970년대에 비해 2010년대 산사태 발생 면적과 복구비가 지속적으로 증가하는 경향을 보이며, 기후변화의 영향으로 산사태에 대한 취약성은 계속 증가할 것으로 예상된다(Lee et al., 2018; 산림청, 2018). 복구비용의 경우 안전과 복지 관련 예산 확대 및 물가상승률이 고려되었으나 면적의 경우 강한 태풍이나 호우가 발생했던 해에 큰 증가가 있었다. 지역적으로는 지난 10여 년 동안 강원도 및 경상남·북도의 산사태 발생면적이 가장 넓은 것으로

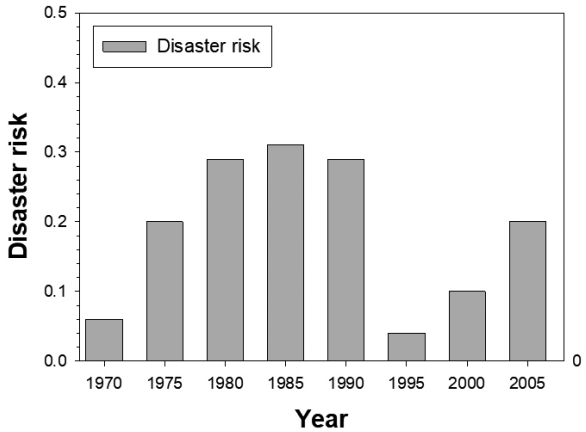


그림 4.7 시계열 산사태 위험 예측 결과 그래프(UNDP, 2017).

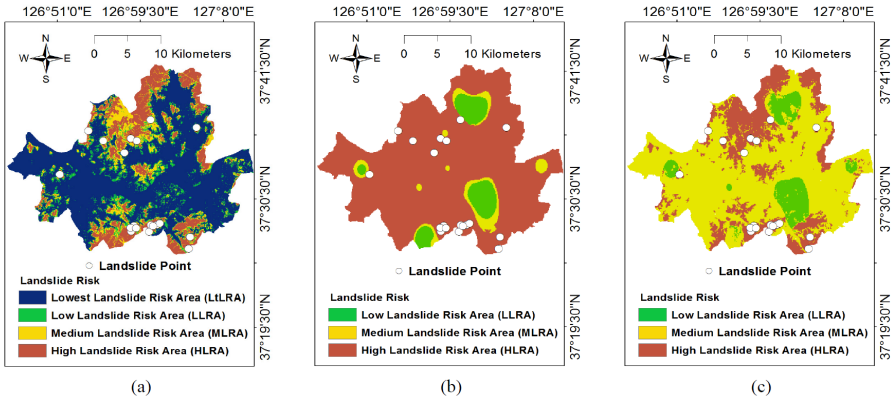


그림 4.8 2011년 수도권 산사태를 통해 분석한 인자별 산사태 위험지도(차성은 등, 2018). (a) 지형공간인자만 활용, (b) 기후인자만 활용, (c) 기후인자와 지형공간인자 모두 활용.

나타나 앞으로도 이 지역에 대한 원인분석, 방지대책 및 기후변화 예측 연구 등이 지속적으로 이루어져야 할 것으로 보인다(산림청, 2018).

우선 산사태를 유발하는 주요한 원인으로는 지질, 토양, 토지이용현황, 강수량 등이 거론되고 있다. 산사태 위험도를 도출하기 위하여 강우정보, 지형학적 특성(사면경사, 사면형상, 사면방향), 토질(토층두께, 표토 토성), 식생정보(산불발생이력, 식생종류, 식생 영급·경급)을 이용하여 산사태 발생의 기여도를 산출하고 산사태 위험도 예측식을 개발하는 연구가 진행되었다(이승우 등, 2012).

2006년 여름에는 태풍 에위니아, 빌리스, 개미와 집중호우로 인해 많은 산사태가 발생하였다. 강원 인제 지역에서의 산사태 발생 후 촬영된 위성영상(SPOT5)을 판독하여 발달부, 유하부, 퇴적부로 디지타이징 하여 발생현황을 분석한 연구에서는 인제 지역 산사태 발생의 지형적 특성은 경사도 평균 26.34°, 경사 방향은 남향·남동·남서향이며, 고도는 평균 627 m인 것으로 나타났다(오치영 등, 2009). 수문학적 분석 결과 유하지, 퇴적지로 갈수록 유하면적이 급격히 퍼짐을 나타내었고, 임상학적 분석 결과 소나무림에서의 발생률이 크며 경급 속성에 따라 흉고직경 6~16 cm의 임목 수관점유 비율이 50% 이상인 소경목에서 산사태가 발생하는 것을 알 수 있었다.

마찬가지로 2006년에 강원도 진부면 지역의 실제 산사태 현장과 지형, 지질, 토양, 임상, 선구조, 토지이용도 등의 자료를 수집하여 분석한 결과 산사태에 영향을 미치는 요인으로 '경사 방향'과 '경사'는 다른 요인들보다 1.2~1.5배 높게 나타났으며, 이 가중치를 이용하여 취약성도를 작성하여 검증에 이용하였다(81.44%)(오현주, 2010).

강원도 지역에서 2006년부터 2011년까지 발생한 토석류 피해 지역에 대해 2008년부터 2012년까지 5년간 현장조사를 실시하여 구축한 자료와 주제도를 이용해 토석류의 발생부, 유하부, 임상, 토양 등에 대한 빈도분석을 실시하였는데 토석류의 발생부 평균 경사는 33.68°이며, 25~40°사이의 빈도가 70% 이상을 차지하였다. 평균 폭은 15.57 m이며 20 m 이상에서 가장 높은 빈도를 보였다. 평균 심도는 1.97 m이며 대부분 3 m 이내였으며 평균길이는 25.56 m로 나타났다. 파괴형상은 평면파괴가 높은 빈도를 보였고, 이를 통해 토석류의 발생부는 좁고 긴 형상을 가지고 있다고 판단할 수 있다(고석민 등, 2013).

반면 일반적으로 산사태 발생빈도는 낮지만 사람들의 이용이 잦은 제주지역 사라봉과 별도봉, 송악산을 대상으로 산사태 발생 예측지도를 분석한 연구에서는 경사, 고도, 건조밀도, 투수계수, 간극률을 유발인자로 입력하였으며 야외조사와 토양물성시험을 병행하였다. 그 결과 사면경사도와 토양 내 간극률이 산사태 발생에 크게 영향을 미치는 것으로 나타났으며, 공간적으로 주요 도로변과 산책로(오름)를 중심으로 산사태 발생가능성이 높게 분포하고 있음을 알 수 있었다(권혁춘 등, 2011). 또한 주요 산림지역 뿐 아니라 인위적인 산지 변형으로 인한 산사태도 빈번한 가운데, 한국도로공사에서 조사한 2001~2003년 동안의 총 596개 산사태 발생이력 자료와 GIS 기법을 적용하여 산사태 위험도 분석을 수행하였다(윤홍식 등, 2009). 그 결과 표고는 0~100 m,

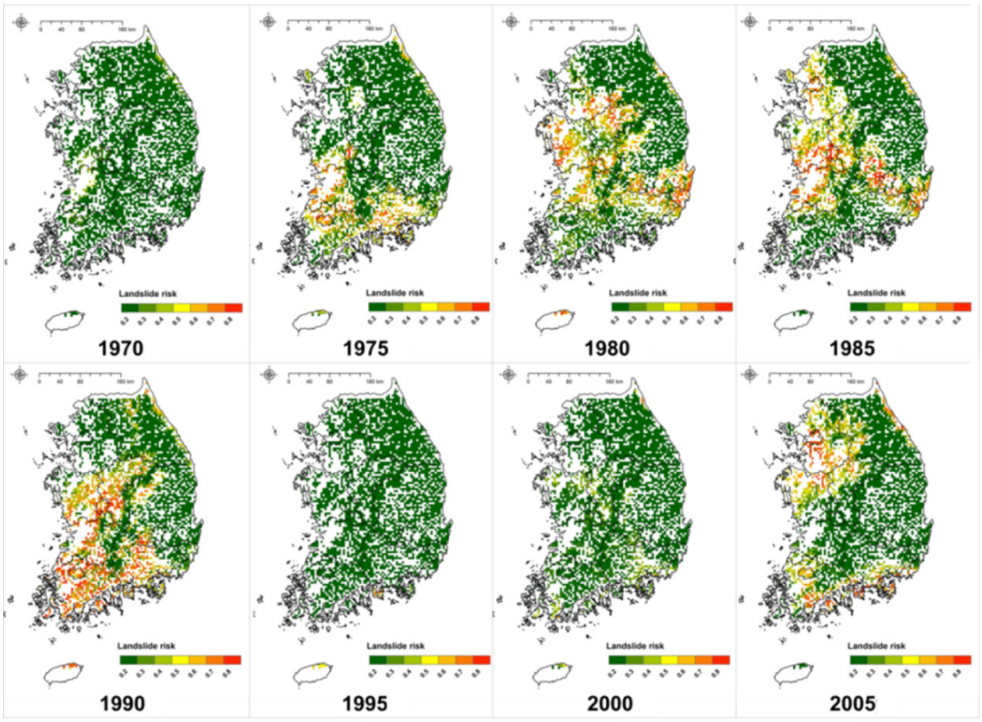
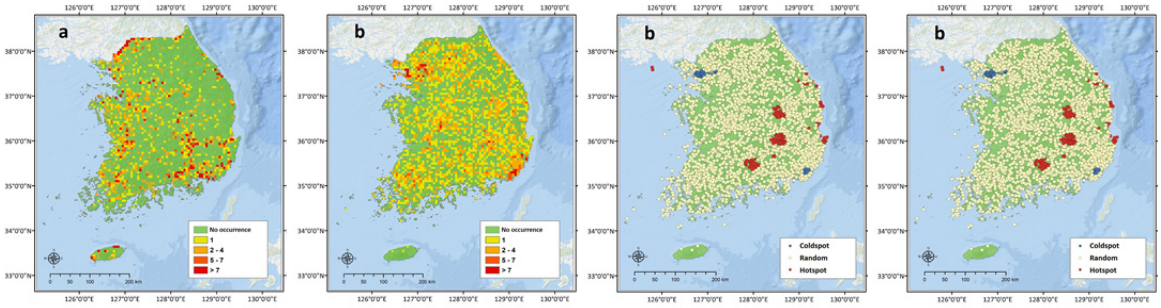


그림 4.9 시계열 산사태 위험 예측 결과 지도(UNDP, 2017).



(a) MODIS 위성 자료 (a) 산림청 조사 자료 (b) MODIS 위성 자료 (b) 산림청 조사 자료

그림 4.10 산불발생의 빈도와 강도 분석 결과(2007~2016년)(Lim et al., 2019). (a): 빈도, (b): 강도.

토질은 사양토, 경사각은 15~20°에서 자주 발생한 것으로 나타났으며, 강수량과의 상관관계도 확인할 수 있었다.

최근에는 단순 강우량이 아니라 구체적인 강우특성과 산사태 발생간의 관계를 분석하고자 하는 연구가 점차 발표되고 있다. 우리나라 중남부지방을 대상으로 실제 발생한 18개의 산사태와 누적강우량, 강우강도, 선행강우량 사이의 관계를 분석한 결과, 산사태는 주로 연속강우 개시 이후 1~3일간의 집중호우에 의해 발생하며, 강우강도가 30 mm/hr, 누적강우량 200 mm 이상인 경우 발생하는 것으로 나타났으며, 특히 강우강도가 강해질수록 산사태 발생시간이 단축되는 것을 확인하였다(김석우 등, 2012).

2011년 7월 집중호우에 의해 수도권 지역에 다수의 산사태가 발생했던 사례에서는 지형공간적인 위험지역에 극한 기후가 노출되면 산사태 발생이 크게 증가하는 것으로 확인되었다. 고도가 100 m 높아질 때, 산사태 발생 확률이 약 2.68배 증가하였고, 지형습윤지수 값이 1 증가할 때마다 산사태 발생확률은 약 0.40배 감소하는 것으로 나타났다(차성은 등, 2018).

1970년대부터 장기 시계열 기상 및 공간자료와 종분포 모형(MaxEnt)을 통해 산사태 발생 위험을 예측한

연구에서는 해당 시점의 강수에 큰 영향을 받았지만, 증가하는 추세를 나타냈다. 지형공간인자의 변화가 없는 상태에서 강수 변화나 산림분포의 차이로 산사태 위험지역이 확산된 것이다(UNDP, 2017).

4.2.4.2 산불

우리나라의 전체 산불 중 89%가 인간부주의로 인해 일어나는 현상과 관련되어 있으며, 대부분의 산불 연구는 주로 원인파악 및 예방에 집중되어 있음을 확인할 수 있었다(이병두 등, 2012). 산불의 원인은 대기 중 낮은 습도와 높은 온도, 산림 내 건조한 낙엽 등이다(원명수 등, 2011a). 또한 최근 겨울~봄철 고온현상이 수목의 가뭄 스트레스를 증가시켜 돌발적인 소나무 고사를 유발한 사례가 발생하였으며(산림청, 2011), 가뭄 증가로 인해 산불 발생 사례도 미래에 지속적으로 증가할 것으로 보인다.

기후와 환경적 요인은 산불의 발생보다는 확산과 피해규모에 영향을 준다. 산불발생에 영향을 줄 수 있는 인자로 인구밀도분포나 도로와의 거리, 보호·보전지역 등이 제시되고 있으며, 산불조심기간 중 강수나 온도, 실효습도, 임상분포 등은 산불 확산과 피해에 영향을 주는 인자로 볼 수 있다(Lim et al., 2019). 최근 산불발생의 강도와 빈도를 분석하였을 때, 빈도 보다는 강도에서 더 군집된 형태의 결과를 나타냈다(Lim et al., 2019). 이는 작은 산불의 경우 국지적으로 파편화되어 나타나지만, 강도 높은 산불의 경우 기후·환경인자에 영향을 받은 것을 의미한다.

1980년대부터 2000년대까지의 산불발생 현황을 분석한 결과 발생횟수가 크게 증가한 것으로 나타났다(Kim et al., 2019). 산불 발생 횟수의 증가는 사회경제적 변화가 많은 영향을 주었으나, 건조기간 증가 및 산림연료량 증가 등으로 인해 대형 산불 또한 다수 포함되어 있었다(Kim et al., 2019).

지난 20년간 우리나라의 산불 발생을 1990년대와 2000년대로 나누어 변화를 분석한 결과, 2000년대에는

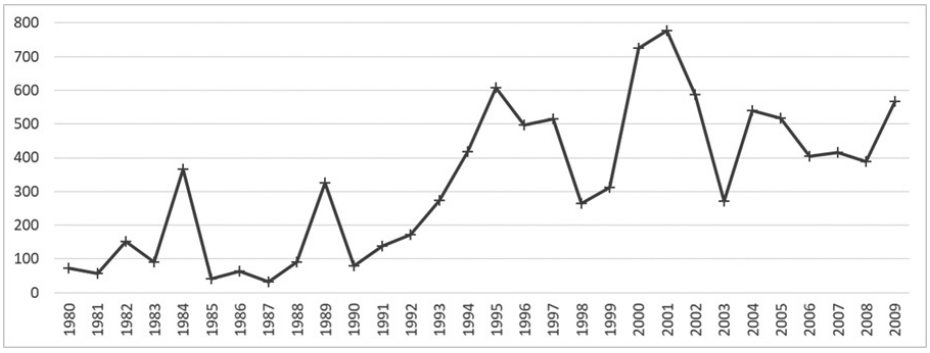


그림 4.11 1980년부터 2009년까지 산불발생 횟수(Kim et al., 2019).

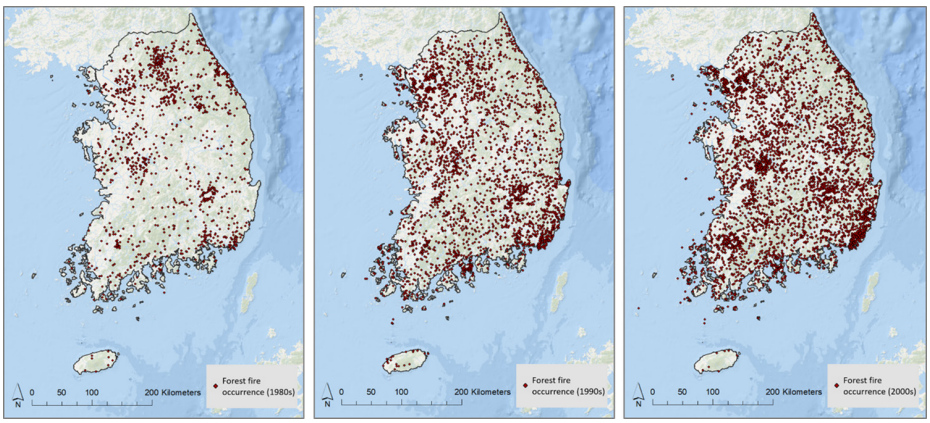


그림 4.12 1980년대, 1990년대, 2000년대 산불 발생 지점(Kim et al., 2019).

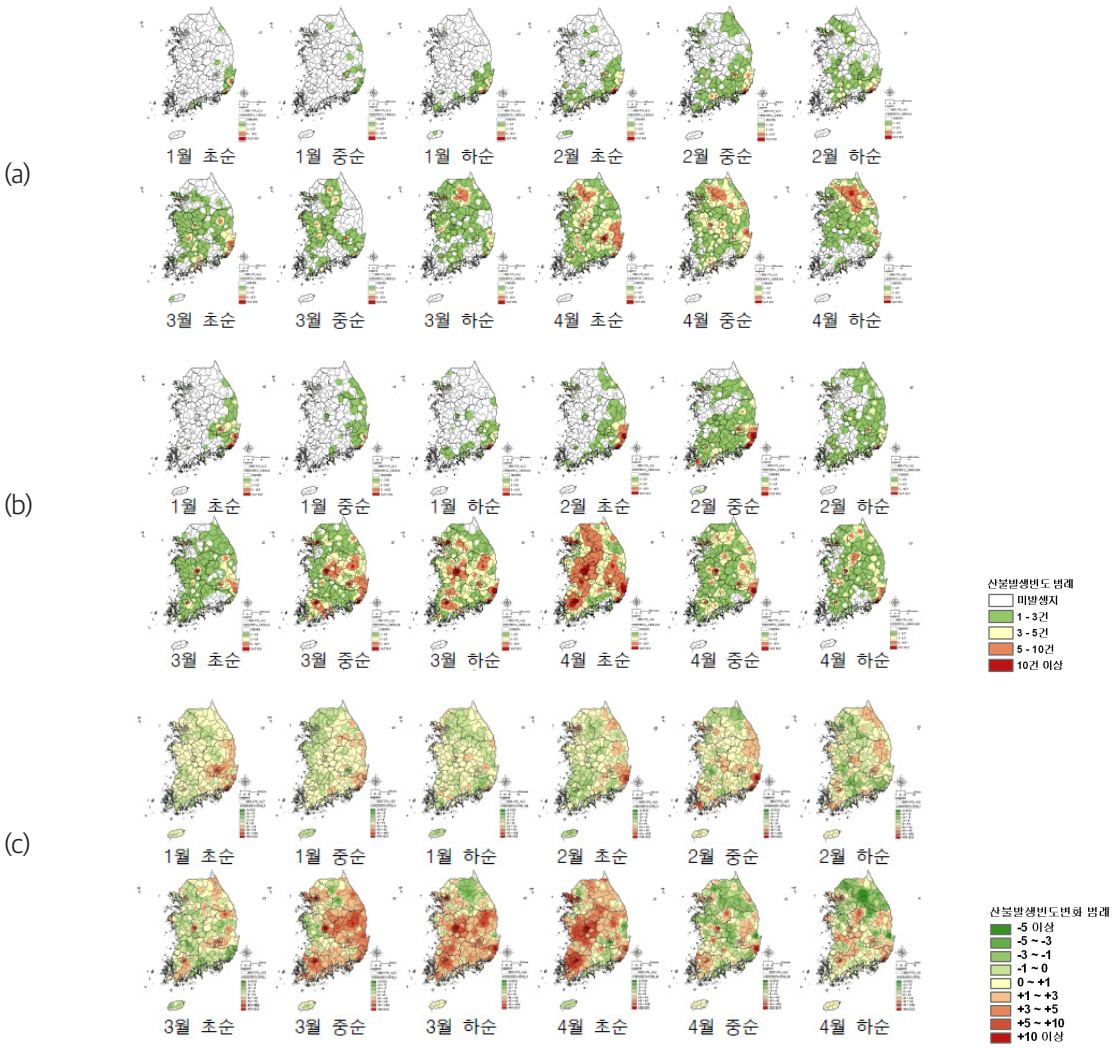


그림 4.13 산불발생지역 (a)1990년대, (b)2000년대, (c)1990년대 대비 2000년대 변화(원명수 등, 2011b).

1990년대에 비해 지역별 산불 발생빈도가 증가하였고, 지역별 공간 분포도 대도시를 중심으로 인근 주변 지역으로 확대되면서 백두대간을 중심으로 동서로 분할되어 발생하는 경향을 보였다(원명수 등, 2016).

시기에 따라서는 1990년대와 2000년대 모두 4월 초순> 4월 중순>4월 하순 순으로 빈번하게 나타났는데, 이는 4월의 기온 상승과 대기 건조 때문인 것으로 추정된다(원명수 등, 2011b). 공간적으로도 영남해안지역에서 시작하지만 4월로 접어들수록 내륙지방으로 산불 빈도가 증가하는 것을 확인할 수 있는데, 이는 봄철로 접어들면서 전체적인 대기 온도가 상승하지만 중부내륙지방은 건조하기 때문에 산불 발생이 내륙으로 확산되는 것으로 볼 수 있다(원명수 등, 2011b).

특정 지역을 대상으로 수행한 연구결과에 따르면, 1991년부터 2008년까지 산불 발생 자료를 이용하여 기후변수들과의 연관성을 규명하고, 공간적 차이를 분석한 결과, 경년 변동성이 상당이 크기는 하지만 대체로 발생이 증가하는 추세를 나타내고 있으며, 특히 호남 지역에서 가장 급격한 증가 추세를 나타내었다(성미경 등, 2010).

전라남도지역에서 기상과 산불 간의 관련성을 파악하기 위해 2005년부터 2009년까지의 기상변화를 파악하고 산불 발생자료의 시간과 원인을 분석한 결과, 최고온도 상승과 상대습도 감소로 인해 산불발생의 위험성이 높은 기후조건이 형성되었으며, 산불은 최고기온 10~20℃에서, 상대습도 40~60%에서, 평균풍속 2 m/s 이하에서 주로 발생하였다(이시영 등, 2011).

강원 영동지역을 대상으로 90년대 이후 산불 발생건수와 피해면적을 기상인자와 비교분석한 결과, 영동지역은 90년대 대비 2000년대 산불발생 건수는 1.7배 이상 증가하였으며, 피해면적은 5.6배 증가하였다(김승수 등, 2015).

4.2.4.3 산림병해충

우리나라에서 발생하고 있는 주요 산림병해충의 발생변화 추이는 기후변화와 결코 무관하지 않으며, 특히 환경적 유인이 병해충의 발생에 중요한 역할을 한다는 점에서 더욱 그러하다. 기후변화는 수목과 병해충 발생, 생존, 번식, 확산 등에 직접적인 영향을 미치고, 수목의 방어에 관련된 생리적 변화, 공생자 및 경쟁자들에게도 간접적인 영향을 미칠 수 있다. 기후변화는 그 자체로도 중요하지만 그에 따른 이상온도 및 강수량의 급격한 변화 등 이상기상현상은 수목에 큰 스트레스를 주게 되며, 그 결과 수세가 약화된 나무들은 각종 병해충은 물론, 평소 크게 피해를 주지 않았던 낮은 병원성의 병원균이나 나무좀류와 같은 2차 해충들에게도 취약하게 된다(최원일 등, 2012).

국립산림과학원에서는 매년 산림병해충의 발생예찰 조사를 실시하고 있으며, 산림청의 임업통계연보에서 병해충 발생 현황을 제시하고 있다. 이에 따르면, 산림병해충 발생량은 기후변화의 영향으로 인해 신종병해충 발생빈도 및 기존병해충 확산위험이 증가하나, 예찰, 방제체계 강화 등의 방제를 통해 전반적으로 감소추세를 보이고 있다(산림청, 2019). 주요 병해충의 변화 추이를 살펴보면, 솔잎혹파리의 경우 '05년에서 '08년까지는 증가되는 경향을 보였으나, 이후 둔화하는 추세를 나타내 2008년 피해면적 183천 ha) 대비 2017년 피해면적(36천 ha)은 80%감소한 것으로 조사되었다. 솔껍질깍지벌레는 2008년 이후 감소추세를 나타내다 2016년 전년대비 증가를 나타내었다. 참나무시들음병은 '04년 경기도 성남에서 최초 발생되어 2008년을 정점으로 감소하였으나, 2011년 수도권과 충북을 중심으로 피해가 극심한 이후 수도권 외곽으로 피해가 확산되고 있으며, 전국적으로는 감소추세에 있으나 수도권에 집중 발생되고 있다. 소나무재선충의 경우, 2013년 고온현상, 가뭄 등 기후적 요인과 고사목 존치, 피해목의 무단이동 등 인위적 요인이 결합하여 피해가 급속히 확산된 바 있으나 2013년 이후 피해 고사목을 전량 방제하는 등 적극적인 방제 대응으로 2014년부터 감소추세로 전환하였다. (2014년 피해본수 218만 본, 2018년 69만 본) 하지만 피해지역은 확산되어 방제여건이 불리해진 것으로 나타났다(한국농촌경제연구원, 2018).

4.2.4.3.1 산림병해

최근 산림병해 중 가장 주목할 만한 것은 미국 남부지역, 일본 오카나와, 하이티 등 아열대성 기후지역대의 소나무류에서 큰 피해를 주고 있는 푸사리움가지마름병이다. 이 병해는 1996년 처음으로 우리나라에 보고된 이후 리기다소나무 등 주로 3엽송 소나무류에서 큰 피해를 주었다. 이 병해는 2004년 이후 지속적으로 감소하고 있으나, 아직도 남부지역에서는 지속적으로 발생하고 있으며 특히 제주도의 곰솔에서 감염목이 발생하고 있어 기후변화와 관련하여 확산이 우려되고 있다(최원일 등, 2013).

잣나무 잎떨림병의 경우, 우리나라에서는 1970~80년대 광릉, 양평, 가평 등 서울 근교와 홍천, 평창 등 잣나무 조림지에서 매우 흔하게 발생하여 어린 나무의 생육에 큰 피해를 주었다. 그러나 2012년 현재는 경상남도 거창 조림지를 최남단으로 홍천, 영월, 평창, 양구 등 해발고 300~400 m 이상 높은 지역의 어린 나무 임지에서만 발생하고 있으며, 과거 잣나무 잎떨림병이 극심하였던 강원도와 경기도지역은 아직 이 병에 취약한 20년생 이하의 잣나무 조림지가 있음에도 불구하고 피해와 분포지역이 감소하고 있는 이유에 대하여 잣나무 조림지의 지속적인 감소 외에도 기후변화가 관여되어 있다는 연구 결과가 발표된 바 있다(최원일 등, 2012; 국립산림과학원, 2013).

과거 우리나라 산림에 유행한 또 다른 병해로는 잣나무 털녹병이 있는데, 이는 1,000 m 내외 고산지역의 20년생 이하 어린 잣나무에서 주로 발생하는 병해이다(Kim et al., 2010). 털녹병의 발생 면적은 1978년에 4,064 ha를 정점으로 2012년 현재 강원도 평창, 영월, 정선, 횡계 등의 해발고 약 1,000 m 내외의 고산지역 잣나무 어린 조림지 약 50~80 ha에서만 발생하고 있으며, 피해 본수는 매년 감소

하고 있다(최원일 등, 2012, 2013). 이 병해는 한랭하고 다습한 기상조건에서 발생하기 때문에 지구온난화의 영향이 있을 것으로 추정되나(Maloney, 2011; Smith et al., 2011; Sturrock, 2011), 우리나라에서는 구체적인 연구가 미흡한 실정이다.

우리나라에서는 1989년, 1998년, 2002년, 2007년, 2009년에 소나무와 잣나무림에서 많은 나무가 집단적으로 고사한 바 있으며, 2007년 피해는 중북부 지역의 잣나무 조림지를 중심으로 약 10만 본이 고사하였으며, 2009년에는 밀양, 거제, 통영 등 남부지역 소나무 임지에서 약 1,007천 본이 고사하였다(국립산림과학원, 2008, 2010). 극심한 집단고사가 발생하였던 2007년과 2009년 모두 2월의 평균온도는 예년 값(1971~2000) 대비 약 3~5℃ 정도 높았으며, 특히 2009년도 소나무 집단고사피해가 매우 심하였던 경남 밀양시의 경우, 2월의 월평균 온도는 예년값 대비 약 5℃가 높았다. 강수량의 경우, 피해 발생 전년도인 2006년과 2008년의 늦여름과 초가을에 강수량이 매우 적었다(국립산림과학원, 2008; 국립산림과학원, 2010).

기후변화과정에서 가장 염려가 되고 있는 것은 돌발적으로 발생하는 이상기상현상에 의해 생리적으로 적응하지 못하는 수목과 산림에서 대면적 피해가 발생할 수 있다는 점이며, 수세가 약화된 상록성 침엽수에서 특히 저병원성 병원균에 의한 피해가 증가하고 있다. 남부지역 소나무와 잣나무 고사목의 줄기와 가지에서는 병원성 약하다고 알려져 있는 피목가지마름병균이 검출되어 남부지역 소나무류의 대면적 피해는 이상기온(겨울기간의 고온)에 따른 수세가 약화된 나무에서 발생하는 저병원성균의 병원균화와 관련된 대표적인 사례로 알려져 있다(최원일 등, 2011; 최원일 등, 2012).

2011년에는 관측 이래 가장 추웠던 1월, 평균 강수량 대비 144%의 기록적인 여름 강우, 평균 최고 기온보다 2~6℃ 높아 일 최고기온 극값을 경신한 가을철 늦더위 등 특이기상현상이 발생하였다(기상청 보도자료, 2011). 이러한 특이기상현상은 산림병해에도 영향을 미쳐 청주, 평창 등 한반도 중북부지역의 낙엽송림에서는 잎떨림병, 신갈나무 등 참나무류에서는 투바키아잎마름병 등이 발생하였고, 자작나무류, 고로쇠나무, 버드나무, 마가목, 물푸레나무 등 활엽수류에서 잎마름성 병해에 의해 8~9월에 대량의 조기낙엽이 발생하였다(최원일 등, 2012). 특히 신갈나무에서의 잎마름병은 2011년에 우리나라에서 처음으로 윤혜영 등이 신종으로 보고한 Tubakia seoraksanensis에 의한 것으로 밝혀졌다(Yun and Rossman, 2011).

비록 산림병해는 아니나 최근 매우 심각한 문제가 되고 있는 병해로는 이팝나무 녹병(국내 미기록)이 있으며, 이 병해는 전남 강진, 곡성, 보령 등의 가로수에서 매우 심하게 발생하고 있다(최원일 등, 2012, 최원일 등, 2013). 이팝나무 녹병의 병원균은 생활사 내에 중간기주(현재 미기록)가 존재하여야 하며, 털녹병 등 다른 녹병과 마찬가지로 중간기주의 분포는 물론 향후 병의 확산에도 크게 영향을 미치게 될 것이다. 이팝나무 녹병균의 중간기주 분포와 병의 확산에 미치는 기상인자의 영향에 대한 연구가 시작되어야 한다.

4.2.4.3.2 산림충해

기후변화가 산림해충에 미치는 영향은 현존하는 해충의 생활사 변화 또는 피해 증가, 새로운 잠재해충의 해충화, 새로운 외래해충의 유입 정착 등을 들 수 있다. 변온동물인 곤충의 생활사는 온도에 의해 직접적으로 영향을 받으므로 기후변화에 의한 영향이 상대적으로 빠르게 표출되는 현상이 생활사 변화이다. 산림해충을 포함한 곤충의 생활사는 온도에 의해 조절되므로 온도상승은 곤충이 서식할 수 있는 기간을 늘리고 누적되는 열량을 증대시켜 세대수 증가를 야기한다. 다양한 국외사례에서 산림해충이 생활사 변화를 거쳐 기후변화에 적응할 수 있음을 보여주고 있다(Gomi, 1995, 2007; Gomi et al., 2004; Jönsson et al., 2009).

국내에서는 솔나방 생활사 변화가 기후변화 영향으로 보고되었다(Choi et al., 2011). 솔나방은 흔히 송충이라 불리는 해충으로서 1960년대, 70년대 국내 산림의 주요 해충 중의 하나였다. 솔나방은 토착해충으로서 조선왕조실록에서도 대발생이 보고될 정도로 문제가 되었던 해충이다. 1970년까지 솔나방은 1년 1세대가 발생하는 것으로 보고되었다. 그러나 1990년 중반이후 유아등 모니터링 자료를 분석한 결과 2000년대 솔나방의 발생은 이전에 보고되었던 것처럼 1년에 1세대가 발생한 것이

아니라 1년에 2세대가 발생하였음이 보고되었다. 성충 발생 시기는 채집 연도에 따라 변이가 있으나 7월과 9월로 추정되었다(Kwon et al., 2002).

소나무재선충에 의한 피해 증가도 기후변화와 관련이 있을 것으로 추정되고 있다. 2013년도 소나무재선충 피해 면적은 11,550 ha로 우리나라에서 소나무재선충에 의한 피해가 집계된 이래 최대 피해면적이었다(최원일 등, 2014). 일본에서는 소나무재선충병 위험도를 추정하기 위한 MB지수 (Monochamus, Bursaphelenchus)와 JPS 활동 시기 지수(Japanese Pine Sawyer)를 활용하고 있다. MB 지수는 솔수염하늘소 활동시기 중 월 평균 기온이 15 ℃ 이상 되는 달 평균 기온에서 15 ℃를 뺀 수를 합산하여 구하며 이 지수가 40이 넘으면 소나무재선충병 발생 위험이 높다고 판단하며 JPS지수는 평균온도 21 ℃가 넘은 달에서 강수량이 10 mm이상인 날을 제외한 일 수를 합산하며 지수가 80일 넘으면 발생위험이 높다고 판단한다(Zhao et al., 2008). 소나무재선충병 피해가 높았던 2013년 제주, 부산 등을 분석한 결과 이들 지역의 MB와 JPS지수가 각각 40과 80을 넘어 실제로 발생위험도가 높았음을 보여주었다. 또한 이러한 지수는 고온 건조 현상을 반영한 지수이므로 기후변화에 의한 기온상승이 계속될 경우 소나무재선충병 피해가 증가할 수 있음을 보여주었다.

두 번째로 새로운 해충의 출현에 들 수 있다. 이는 국내에는 분포하였으나 밀도가 낮았다가 최근에 증가한 해충류에 대한 예이며 대표적인 경우로는 참나무시들음병을 매개충하는 광릉긴나무좀 증가가 있다. 실제로 영국의 전문가들은 온난화에 의해 영국 산림에서 출현 빈도가 증가할 것으로 예측되는 곤충 목록을 제시하였는데, 이 중에는 현재 국내에서 문제가 되고 있는 광릉긴나무좀과 같은 속에 속하는 긴나무좀류, Ips속 해충들이 문제 해충으로 공통적으로 제시되고 있다. 또한 주로 나무줄기를 가해하는 바구미류, 나무좀류, 긴나무좀류 등 천공성 해충이 많이 포함되어 있다. 이는 기후변화에 의해 이동성이 없는 수목이 받는 스트레스가 증가하여 천공성 해충류에 대한 저항성이 감소하였기 때문인 것으로 추정된다(Choi et al., 2011). 그러나 온난화에 의해 발생이 예측되는 산림해충은 과학적인 명확한 근거 기반이 아닌, 전문가의 견해로 선발되었다는 점을 유의할 필요가 있다.

참나무시들음병균을 매개하는 광릉긴나무좀은 국내 토착종으로 이미 1930년대에 국내에 분포함이 알려져 있다. 최근 참나무시들음병 발생 원인과 광릉긴나무좀 밀도증가를 설명하는 3가지 가설이 제시되고 있다. 첫 번째로는 병원균인 Raffaelea quercus-mongolicae의 유입에 의한 광릉긴나무좀과 새로운 관계 형성, 두 번째로는 최근 산림녹화가 완료됨에 따라 신갈나무 숲이 주로 흉고직경이 큰 나무 위주로 구성된 점, 세 번째로 기후변화에 의해 신갈나무의 스트레스가 증가하고 광릉긴나무좀 서식에 유리한 환경이 조성되었다는 것이다(Lee et al., 2011a). 실제로 광릉긴나무좀은 대경목에 대한 공격 선호성이 있고(Nam et al., 2013a) 광릉긴나무좀 우화시기를 모델로 분석한 결과 지난 40년 동안 우화시기가 적어도 9일이 빨라졌다(Nam et al., 2013b). 이러한 과학적인 증거들은 기후변화가 참나무 시들음병 발생에 영향을 미쳤음을 보여주는 예라고 판단된다.

2010년 경북 영양 약 10 ha 잣나무 임지에서는 1,300여 본의 잣나무가 고사했다. 영양 인근지역에서 솔여섯 가시나무좀 피해가 관찰된 임지를 분석한 결과 주로 경사지고 건조한 임지에서 피해가 발생한 것으로 보고되었다. 또한 낙엽송 조림지에서 Ips속 나무좀의 피해가 꾸준히 보고되고 있다. 이러한 예들은 조림지에서 천공성 해충의 밀도가 증가하고 현상을 보여주는 예라고 판단된다.

외래종의 침입은 침입종의 생활사적 특성, 기주식물 군집, 외부 유입원 강도 등의 조건이 일치하여야 가능하다. 최근의 국제간 교역 증가는 외래종의 침입 가능성을 증가시킨 것으로 추정되며, 이와 더불어 외래 식물종 유입가능성 증가, 기후변화로 인하여 과거에는 침입하지 못하였던 종들의 침입가능성 및 정착 가능성이 증가하였다(Ward and Master, 2007).

우리나라에서는 2006년 서울 은평구 등에서 대발생하여 사회적으로 문제가 되었던 꽃매미가 있다. 꽃매미는 중국이 원산지로서 남방계 아열대성 산림해충으로 알려져 있다 (최원일 등, 2011; 최원일 등, 2012). 국내 전국적으로 분포하는 가죽나무를 선호하는 것으로 알려져 있으며 중국과의 교역증가로 중국으로부터 유입된 것으로 추정하고 있는데, 알로 나무 수피나 기타 인공물 표면에서 월동을 하는 특성에 따라 교역용 컨테이너 등 화물에 알이 부착되어 유입될

가능성을 두고 있다. 꽃매미는 2006년 서울 및 수도권 인근, 천안, 청주 등에서 발생이 보고되었으며 이후 전북 정읍, 경북 상주 등에서 발생이 보고되었다. 겨울 온도 상승도 꽃매미 유입 후 정착에 영향을 미친 것으로 알려져 있다. 실제로 겨울온도가 상이한 춘천, 청주, 완주에서 월동 후 채집된 꽃매미 알 부화율은 겨울 온도가 높은 지역에서 높았다. 이는 꽃매미 알은 수피에서 월동하여 겨울 저온에 취약하므로 겨울 온도 증가가 꽃매미의 번식에 기여하고 있음을 보여주는 것이다(Lee et al., 2011b).

4.3 영향 전망

4.3.1 산림생장

「한국 기후변화 평가보고서 2014」에서는 산림생장을 주요 항목으로 다루지 않아 많은 내용이 기술되지는 않았다. 전반적으로 기후변화에 따른 기온증가로 인해 전국적으로 침엽수림의 생장감소를 예상하였고, 일부 고산지대에서는 증가할 것으로 예측되었다(견고한 동의). 반면 활엽수림의 생장은 보다 증가할 것으로 추정된다고 기술하였다(중간적 동의).

기상의 영향을 반영할 수 있는 생장모델은 기후변화 영향 추정 및 산림자원변화 예측에 다양하게 활용되고 있다.

표 4.6 기후영향을 반영할 수 있는 산림생장모형.

i: tree age, $\triangle r_i$: Annual radial growth (㎜), eSG: Estimated standard growth (㎜), TWI: Topographic Wetness Index, m: Mean, T: Annual mean temperature (℃), P: Annual precipitation (㎜), DBH: Diameter at breast height (cm), SI: Site index, Nha: tree number per ha

출처	생장모형
Byun et al. (2013)	$\triangle r_{i+5} = \triangle r_i \cdot \left(\frac{age_{i+5}}{age_i}\right)^a \cdot \left(\frac{eSG}{meSG}\right)$, $eSG = a + b \cdot TWI + c \cdot T + d \cdot P$
Choi et al. (2014)	$\ln \triangle r_{i+5} = \ln \triangle r_i + \alpha \cdot \ln\left(\frac{age_{i+5}}{age_i}\right) + \beta_1 \cdot \ln\left(\frac{TWI_i}{mTWI}\right) + \beta_2 \cdot \ln\left(\frac{T_{i+5}}{mT}\right) + \beta_3 \cdot \ln\left(\frac{P_{i+5}}{mP}\right)$
Kim et al. (2018)	$\triangle r_{fij} = \triangle r_{ipj} \cdot \left(\frac{age_{ij}}{age_{ipj}}\right) \cdot \left(\frac{eSG_{fi}}{meSG_p}\right)$, $eSG = \beta_1 \cdot WI_i^2 + \beta_2 \cdot WI_i + \beta_3 \cdot PEI_i^2 + \beta_4 \cdot PEI_i + \beta_5 \cdot TWI_i + \alpha$

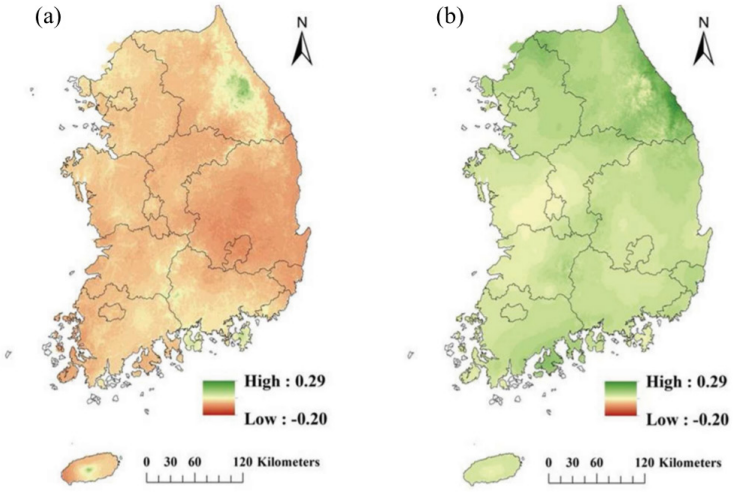


그림 4.14 A1B 시나리오에 따른 기후를 적용한 표준생장량과 현재 기후에 대한 표준생장량의 차이(Byun et al., 2012). a: 소나무, b: 참나무류.

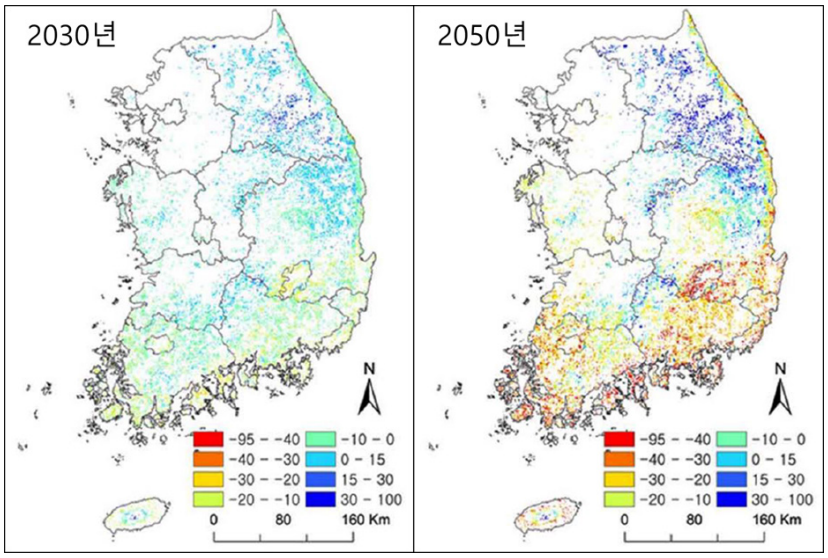


그림 4.15 RCP 8.5 시나리오에 따른 기후변화가 소나무림 생장에 미칠 영향 추정(김문일 등, 2014).

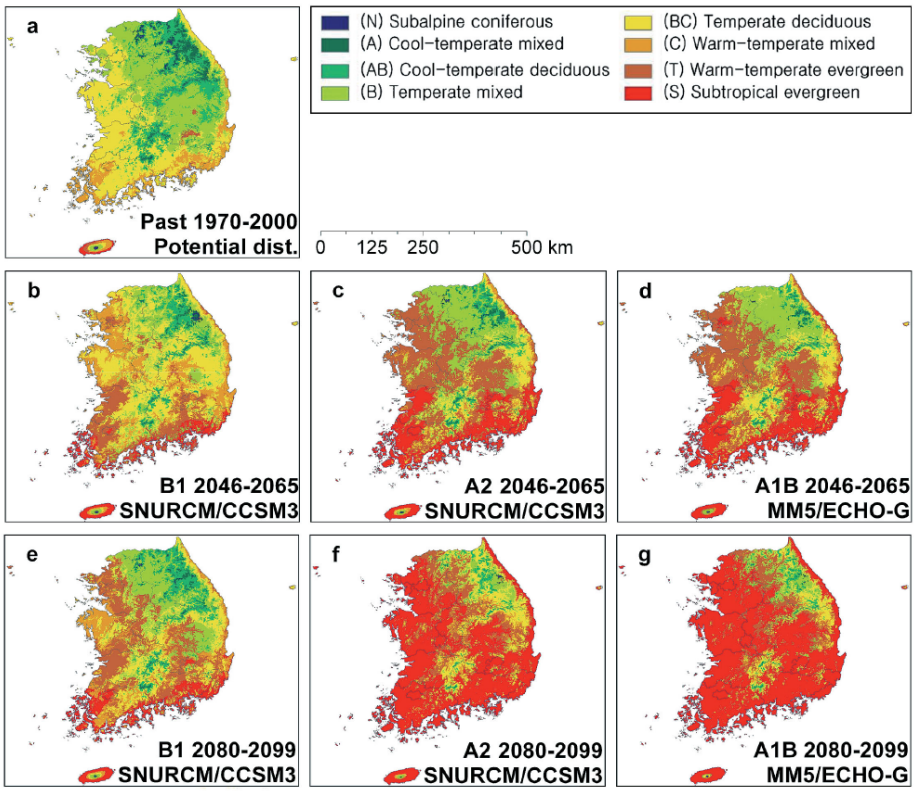


그림 4.16 HyTAG 모형을 활용한 미래 산림 잠재수종분포 예측 결과(SRES 시나리오)(Choi et al., 2011).

Byun et al. (2013)은 5차 국가산림자원조사(National Forest Inventory, NFI)를 통해 획득된 전국규모의 자료를 통해, 우리나라에서는 처음으로 국가 규모의 산림에 적용할 수 있으며, 기후와 지형의 영향을 반영한 생장모형을 개발하였다. 분석결과 소나무의 반경생장(Radial growth)은 기온과는 음(-)의 상관관계를 갖는 것으로 확인된 반면, 참나무류는 양(+)의 상관관계를 갖는 것으로 나타났으며, 기온과 관련된 계수의 절대값은 소나무가 더 큰 것으로 나타났다(소나무: 0.038, 참나무: 0.005). 반면, 두 수종 모두 강수량과 생장은 양(+)의 상관관계를 갖는 보이는 것으로

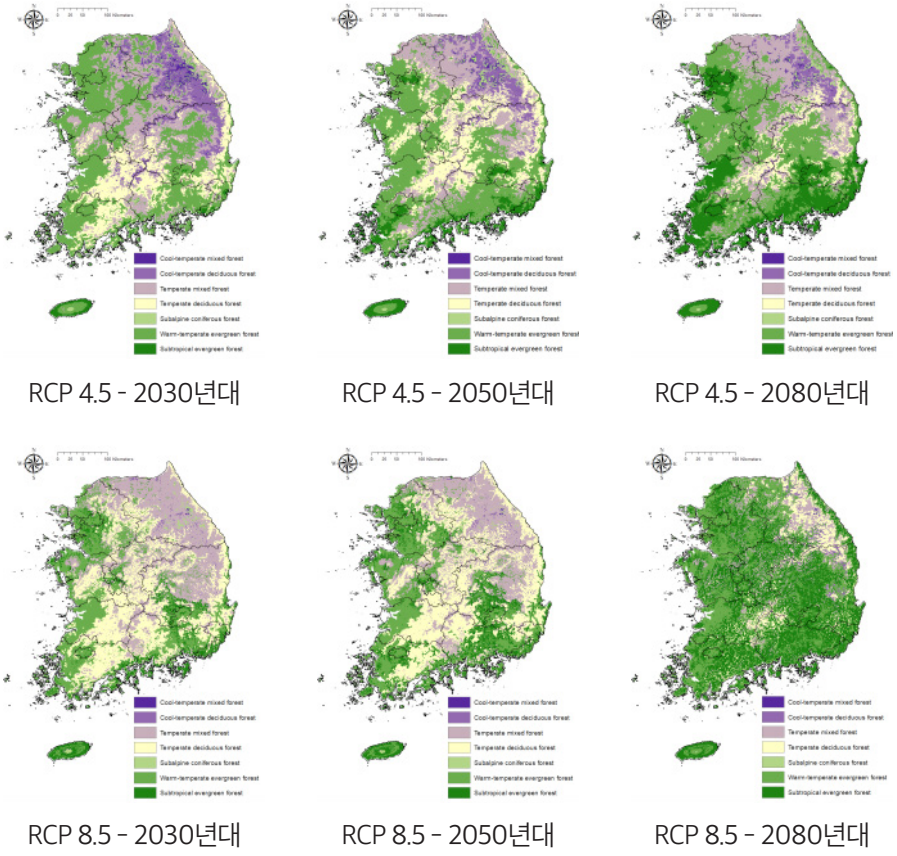


그림 4.17 HyTAG 모형을 활용한 미래 산림 잠재수종분포 예측 결과(RCP 시나리오)(유소민 등, 2020).

나타났다. 최고미 등(2014)은 우리나라 주요 5개 수종(소나무, 신갈나무, 그 외 참나무류, 일본잎갈나무, 밤나무)을 대상으로 기상인자와 반경생장의 상관관계를 분석하였다. 그 결과, Byun et al. (2013)의 연구와 동일하게 침엽수종들은 기온 증가에 음(-)의 영향을, 참나무류는 양(+)의 영향을 받는 것으로 확인되었으며, 계수의 절대값도 침엽수류가 더 큰 것으로 추정되었다(소나무: 0.042, 일본잎갈나무: 0.090, 신갈나무: 0.030, 그 외 참나무: 0.025). 두 연구에 사용된 방법론이 상이함에도, 임목생장과 기온과의 관계가 수종별로 동일하게 도출되었다는 것은, 미래 기후변화의 영향이 수종별로 다르게 나타날 수 있다는 것을 시사한다. 또한, 두 연구 모두 침엽수종들의 모형 계수가 참나무 수종들에 비해 크게 추정되었으며, 이는 상대적으로 침엽수종들이 기후변화에 더 민감하다는 것을 의미한다.

개발된 생장모형을 기반으로 미래 기후변화 영향을 추정한 결과 아고산 및 고산지대를 제외한 대부분의 지역에서 소나무림의 생장이 현재보다 감소할 것으로 추정되었다. 반면 참나무림의 생장은 전국적으로 증가될 것으로 예측되었다.

기후변화가 수종별 임목의 직경생장에 미치는 영향도 정량적으로 분석된 바 있다. 분석결과 연평균기온이 1℃ 증가하면 우리나라 주요 침엽수종인 소나무, 낙엽송, 잣나무의 직경크기는 기후변화가 없을 때에 비해 0.04, 0.267, 0.258 cm 씩 감소할 것으로 예측되었다(Piao et al., 2018). 반면 참나무류는 같은 조건에서 평균적으로 0.002 cm 씩 증가할 것으로 추정되었다. 산림생장과 밀접한 관련이 있는 임목 고사율에 대한 연구도 수행되었다(Kim et al., 2017). 분석결과 소나무는 겨울철 기온이 1℃ 증가할 때마다 고사율이 1.01% 증가하는 것으로 분석되었다. 낙엽송과 잣나무의 경우, 봄철 온도에 더 높은 상관성이 있는 것으로 확인되었으며, 같은 조건에서 고사율이 1.43, 2.26% 증가하는 것으로 확인되었다. 참나무류의 경우는 오히려 고사율이 소폭 감소하는 것으로 나타났으나, 통계적인 유의성은 검증되지 않았다.

기후변화에 의한 생장도일(Growing Degree Days)의

변화가 생장에 미치는 영향에 대해서도 평가되었다(임종환 등, 2016). 과거 60년 동안의 연도별 생장도일과 기온효과지수를 산출함으로써 시간 경과에 따른 신갈나무의 잠재분포 범위와 생장의 변화 추이를 평가하였다. 기후변화 시나리오 RCP 4.5와 RCP 8.5를 적용하여 2011년부터 2100년까지 신갈나무의 생장 변화를 산출하여 비교한 결과 위도와 해발고도가 낮은 지역은 시간이 경과함에 따라 신갈나무에 적합한 생육가능 범위를 벗어나는 것으로 분석되었다. RCP 4.5의 경우 강원도 산악지역의 경우 2070년 이후에도 온도효과지수가 0.7이상으로 유지될 것으로 나타났으나, 극한 기후변화 시나리오인 RCP 8.5를 적용했을 경우 해발고도가 높은 지역에서도 2050년대 이후로는 온도효과지수(온도효과지수는 0부터 1까지의 범위 내에서 값을 갖도록 지수화한 것으로, 생장도일에 근거한 생육범위의 상한과 하한에서는 0이 되고 생육범위의 중앙값에서는 1을 갖는다)가 0.5이하로 급속하게 감소할 것으로 분석되었다.

기후변화(RCP 8.5 시나리오)가 소나무림의 생장에 미치는 영향을 반영하여 미래 임목축적변화를 예측한 결과, 우리나라 소나무림의 평균 임목축적은 현재 131 m^3/ha에서 2050년에는 212.42 m^3/ha까지 증가할 것으로 예측되었으며, 현재의 기후가 유지될 경우에는 221.92 m^3/ha까지 증가할 것으로 예측되었다(김문일 등, 2014). 2030년까지는 기후변화의 영향이 전국적으로 크게 차이가 나지 않으나, 2040년 이후로는 뚜렷하게 나타나는 것을 확인할 수 있다. 이는 각 연도의 기후조건에 따른 영향이 누적되어 시간이 흐를수록 산림 생장의 차이가 커지기 때문이다. 현재보다 기온 상승 폭이 높을 것으로 예측되는 남부지역과 해안가 지역은 전반적으로 생장률이 감소할 것으로 예측되며, 강원도, 태백산맥, 소백산맥 지역의 고산지대의 경우 반대로 생장률이 증가할 것으로 예측되었다.

4.3.2 산림분포

「한국 기후변화 평가보고서 2014」에서는 산림 분포 모형을 기반으로 기후변화에 따른 산림분포의 영향을 전망하고 산림 생육지 분포에 대한 예측하였던 연구들을 기술하였다. 영향 전망 결과, 기후대의 이동으로 인해 고산 및 아고산 식생이 경쟁에서 밀려나게 될 것으로 예상된다는 일부 연구가 있으며(제한적 동의). 침엽수림과 혼효림의 감소, 활엽수림의 증가가 예측되고 있다(중간적 동의).

산림 수종분포의 영향전망에 관한 연구는 과거 및 현재의 서식처 정보와 산림분포 모형을 기반으로 기후변화 시나리오를 적용하여 산림 잠재 생육지 분포에 대한 예측 등이 수행되고 있다. 산림 분포 모형을 이용하여 미래 우리나라의 산림을 분석한 결과 미래 우리나라 산림은 기후변화 적응속도보다 기후대 이동속도가 더 빨라져 구상나무, 분비나무와 같은 고산·아고산 식생은 저지대 식생과의 경쟁에서 밀려나게 될 것으로 예상되며, 넓은 지역에 걸쳐 침엽수림과 혼효림은 줄어들고, 상록활엽수림·낙엽활엽수림은 늘어날 것이라고 예측하고 있다. 충주댐 유역을 대상으로 1985~2000년의 위성영상을 통해 토지피복 변화를 모니터하여 변화양상을 바탕으로 2090년까지 산림분포를 예측한 결과, 2000년 대비 2090년에는 활엽수림과 혼효림은 각각 14.3 %, 11.6 % 증가하였으며, 침엽수림은 24.9 % 감소하는 것으로 나타났다(박민지 등, 2010). 또한 강원도의 경우에도 침엽수림은 줄어들고, 활엽수림과 혼효림은 늘어나는 등 임상의 변화가 나타날 것이라는 전망이 보고되었으며, 이 경우는 장기적으로 침엽수가 감소하므로 혼효림도 점차 활엽수림으로 전이될 가능성이 높다고 할 수 있다(김점수, 2009).

침엽수가 감소하고 활엽수가 늘어날 것이라는 전망은 수종별 연구에서도 관찰되었다. 수종별로 기후변화에 따른 생리적 반응이 다르게 나타나고 그에 따라 산림 구성 변화에 영향을 미치므로 수종별 반응 연구는 산림 분포 변화를 이해하는 밑바탕이 된다. 국내에서 소나무와 굴참나무 묘목을 대상으로 기온을 3℃ 증가시킨 실외 온난화 실험에서 온난화에 대한 각 수종의 생리적 반응이 다르게 나타남을 관찰하였다. 연구 결과 온난화 처리구에서 소나무 묘목은 잎의 생물량이 감소하였으나 굴참나무 묘목은 묘고, 근원경, 엽록소 함량 및 순광합성률이 대조구보다 높게 나타나는 경향을 보였다(이선정 등, 2012, 2013; 조우용 등, 2011). 또한 굴참나무의 경우 식물계절 반응이 온난화에 의해 봄철 개엽 시기가 3~8일 빨라졌고, 가을 낙엽 시기는 14~19일 늦춰지며, 생육시기가 증가하는 것으로 나타났다(Han et al.,

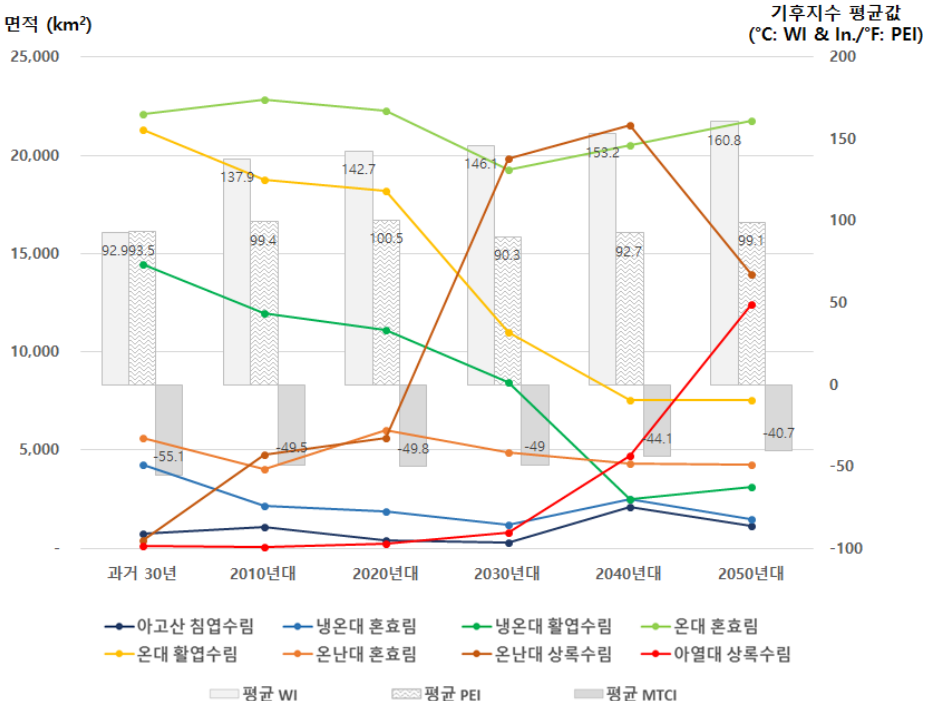


그림 4.18 미래 기후인자 변화와 산림분포 변화 (HyTAG모형-RCP 8.5) (MOTIVE, 2016)

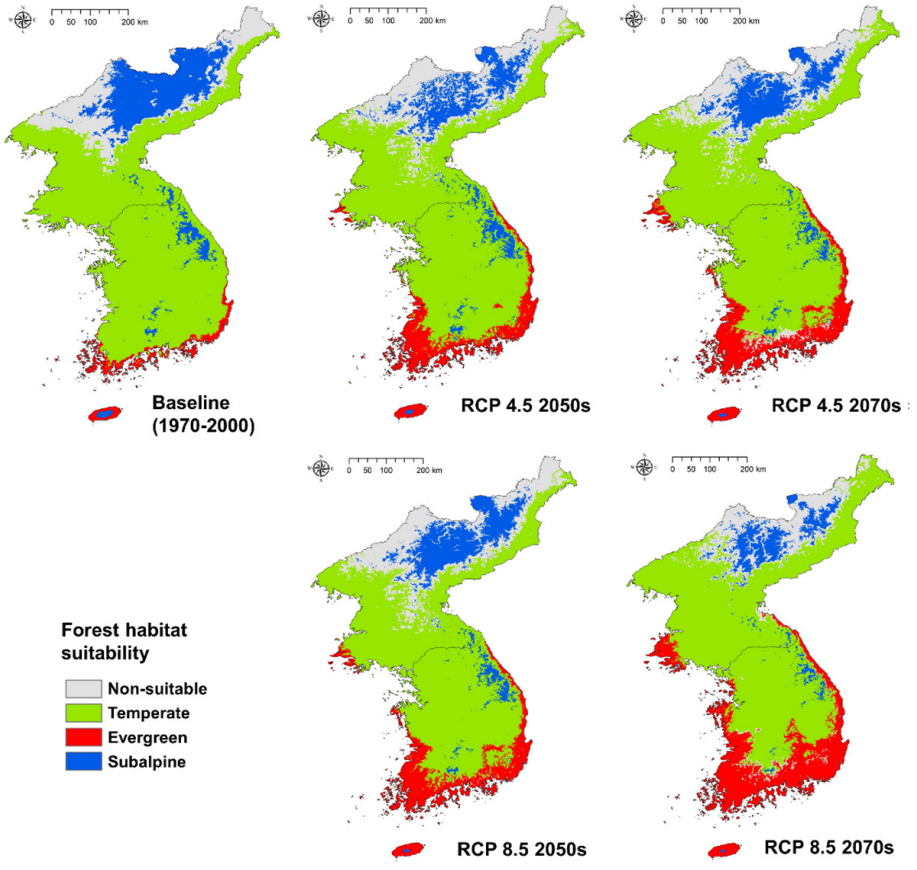


그림 4.19 한반도 산림 서식 적합도 예측 결과 (Lim et al., 2018)

2014). 이와 같이 온난화된 환경에서 소나무 잎의 생물량은 감소한 반면 굴참나무의 생장은 유리한 것으로 보아 온난화가 지속될 경우 소나무림은 감소하고 참나무림은 증가할 것으로 예상된다.

현존식생도의 수종별 자연림 위치정보와 온량지수(Warmth Index), 최저온도지수(Minimum Temperature Index of the Coldest month), 유효강우지수 (PEI: Precipitation Effectiveness Index)를 이용한 HyTAG(Hydrological and Thermal Analogy Groups) 모형과 SRES 시나리오를 활용한 미래 장기모의에서는 아고산과 냉온대림이 크게 감소하고, 온대수종 및 아열대수종은 크게 확대되는 것으로 나타났다 (Choi et al., 2011).

IPCC 5차 평가보고서부터 활용된 RCP 시나리오를 활용한 재예측 결과에서도 유사한 경향을 나타냈으며, RCP 8.5 시나리오에서 소나무림은 2050년대에 현재보다 8%가량 줄어들 것으로 전망되었고, 2080년대에는 15 %가 줄어드는 것으로 나타났다(유소민 등 2020).

한반도를 대상으로 아고산림, 온대림, 온난대 상록수림의 서식적합도 개념으로 미래 영향을 평가한 결과에서는 RCP 8.5 시나리오에서는 온난대 상록수림이 북한 동·서해안에서 모두 분포할 수 있을 정도로 북상하는 것으로 전망되었다. 또한 남한에서는 아고산림의 서식적합지역이 지속적으로 감소하여 먼 미래에는 매우 적은 지역만 적합할 것으로 예측하였다(Lim et al., 2018). 모든 RCP 시나리오에서 난대성 상록활엽수의 잠재서식지 면적은 증가하고 북상하는 것으로 나타난 것이다(박선욱 등, 2016).

다양한 기후모델을 적용하고 종분포 모형을 앙상블하여 예측한 결과에서도 난대성 산림이 북상하고 아고산림이 쇠퇴하는 동일한 결과를 보였다(Koo et al., 2017) 이는 기후모델이나 방법론에 따라 변화의 정도는 달라도 동일한 경향을 제시하였다고 볼 수 있다.

한편 모형을 이용한 산림분포 예측 연구에서 종자산포의 거리나 확률, 변화된 환경에 적응할 수 있는 능력 등이 반영되지 못하므로 산림분포 예측은 산림수종의 분포범위가 아닌 최적생육가능범위로 이해되어야 한다는 한계점이 지적되고 있다(천정화와 이창배, 2013).

4.3.3 탄소

「한국 기후변화 평가보고서 2014」에서는 임목 생장에 따라 산림의 전체적인 탄소저장량은 계속해서 증가할 것으로 추정되나, 기온증가가 토양 유기물 분해에 영향을 미쳐 토양탄소 저장량은 감소할 것으로 추정된다고 기술하였다(중간적 동의). 또한 연년 탄소흡수량은 임령과 기온의 증가에 의해 현재보다 감소할 것으로 추정된다고 제시하였다(견고한 동의). 다만, 산림 토양의 탄소 저장과 변화에 관해서는 영향 전망에 대한 연구가 미진하고, 예측이 엇갈리고 있으므로 추가 연구가 필요하다고 기술하였다 (제한적 동의).

4.3.3.1 산림 탄소저장량

기후변화가 산림탄소 동태에 미치는 영향을 파악하고 예측하기 위한 다양한 조사와 분석들이 수행되고 있다. 연간 낙엽량 자료를 이용하여 광릉숲의 토양탄소저장량을 추정한 연구에서는 가까운 미래(2040)에서 증가를, 먼 미래(2100)에서 급격한 감소가 있을 것으로 추정하였다(이아름 등, 2009). IPCC A1B 시나리오를 이용하여 수도권의 토양탄소저장량을 모의한 연구에서는 현재 66.84 tC/ha에서 가까운 미래 61.37 tC/ha, 먼 미래 52.81 tC/ha로 지속적인 감소 현상이 전망되었다(권선순 등, 2012). 다른 연구에서는 기후변화로 인한 기온의 증가가 식생 탄소저장량 증가에 긍정적인 영향을 미칠 것으로 추정되었다. 모델 결과에 따르면 소나무림의 식생 탄소저장량은 2012년 61.7에서 2100년에 105.8 tC/ha, RCP 8.5 시나리오에서는 106.0 tC/ha으로 증가하였다. 굴참나무의 경우 같은 기간 105.9 tC/ha에서 186.1 tC/ha로, RCP 8.5 시나리오에서는 188.0 tC/ha으로 증가하였다(이종열 등, 2015). 그러나 기존의 다른 연구들과 마찬가지로, 기후변화로 인해 낙엽층과 토양의 탄소량은 지속적으로 감소할 것으로 추정되었다.

기후변화의 영향을 모의할 때 기온의 상승 뿐만 아니라 대기 중 이산화탄소의 농도를 고려하면 식생 탄소의 뚜렷한 증가가 나타나는 결과가 있으며(Davi et al., 2006), 국외 생태계 탄소 모형에서는 식생 탄소의 생장을 모의할 때

기온뿐만 아니라 대기 중 이산화탄소의 농도, 수분, 광량, 양분 유효도 등의 환경 요인들을 고려하고 있다(Chen et al., 2000; Sitch et al., 2003; Krinner et al., 2005). 따라서 식생 탄소의 변화를 보다 정확히 모의하기 위하여 기온뿐만 아니라 대기 중 이산화탄소의 농도 및 수분 조건과 같은 환경 요인들을 동시에 고려해야 할 것으로 판단된다.

4.3.3.2 산림 탄소흡수량

다양한 측정과 분석들을 기반으로 고안된 알고리즘에 미래 기후변화 시나리오를 적용하여 미래 탄소흡수량의 변화를 추정하는 연구가 수행되고 있다. IPCC A1B 시나리오를 통해 수도권 주변 산림의 미래 NPP를 예측한 결과, 가까운 미래(2021~2050년)에서의 NPP는 과거 대비 3% 감소하여 5.85 tC/ha/yr로 나타나며, 먼 미래(2071~2100년)에는 5.88 tC/ha/yr로 가까운 미래에 비해서는 소폭 증가하지만 현재보다는 감소될 것으로 추정되었다(권선순 등, 2012). 세부적으로, 서울, 인천, 경기북부, 경기남부로 나누었을 때, 현재는 경기북부에서 NPP가 가장 낮고(5.69 tC/ha/yr) 인천에서 가장 높으나(6.6 tC/ha/yr), 가까운 미래에는 전반적으로 감소하고 먼 미래에서는 경기북부만 증가할 것으로 추정되었다. 또한, 고도 150 m 이상의 산림지역은 지속적으로 NPP가 증가할 것으로 나타났다. 임상별로는 침엽수림의 평균 NPP는 6.27 tC/ha/yr로, 활엽수림은 5.95 tC/ha/yr로 추정되었다.

모델기반의 산림탄소 예측에 관한 연구도 활발하게 진행되고 있다. 국내 소나무림을 대상으로 RCP 8.5 시나리오를 적용한 연구결과, 산림이 성숙함에 따라 산림 토양탄소가 증가하지만, 2080년 이후 미생물 활동이 크게

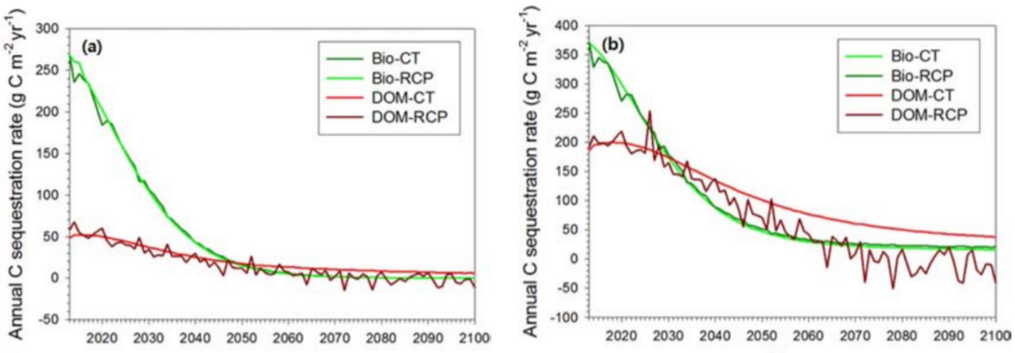
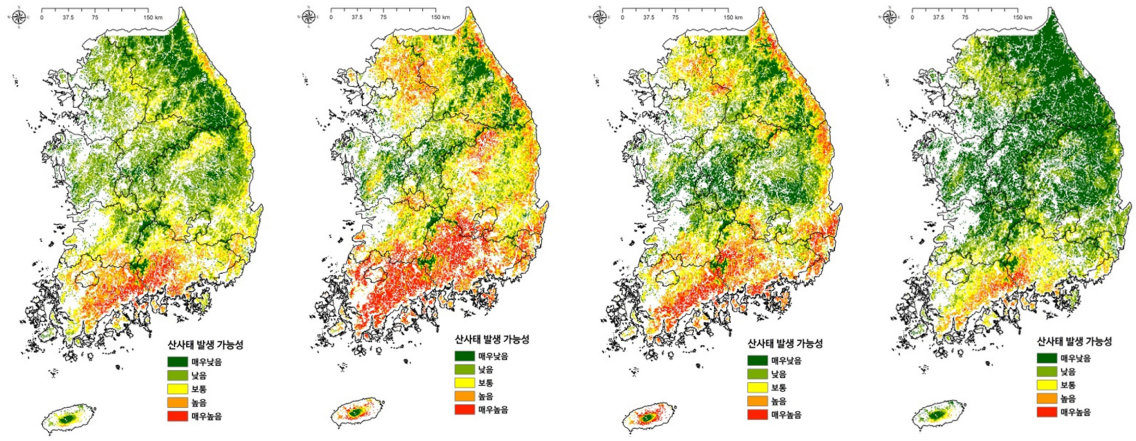


그림 4.20 (a)소나무림과 (b)굴참나무림의 산림탄소 변화량 추정(이종열 등, 2015).



(a) 2020년대 (b) 2030년대 (c) 2040년대 (d) 2050년대

그림 4.21 RCP 8.5 시나리오에 따른 전국 미래 산사태 발생 예측 결과(MOTIVE, 2017).

증가하면서 감소하는 경향이 나타날 것으로 예측되었다(박찬우 등, 2013). 기후고정(CT)과 기후변화(RCP 8.5)에 따른 소나무와 굴참나무의 탄소흡수량 변화 전망을 예측 및 비교한 연구도 있다.

소나무림의 연간 탄소 흡수율(gC/m^2/yr)은 2013년에 316.1(CT 시나리오; 식생: 268.0, 고사유기물: 48.1)과 325.5(RCP 8.5 시나리오; 식생: 267.4, 고사유기물: 58.1)에서 2100년에는 6.0(CT 시나리오; 식생: 0.22, 고사유기물: 5.8)과 -11.1(RCP 8.5 시나리오; 식생: 0.04, 고사유기물: -11.2)로 추정되었다. 굴참나무림은 2013년에 558.0(CT 시나리오; 식생: 372.1, 고사유기물: 185.9)과 563.1(RCP 8.5 시나리오; 식생: 371.5, 고사유기물: 191.6)에서 2100년에는 53.9(CT 시나리오; 식생: 16.1, 고사유기물: 37.8)과 -20.2(RCP 8.5 시나리오; 식생: 20.7, 고사유기물: -40.9)로 예측되었다. 위의 결과에 따르면 소나무림과 굴참나무림의 연간 탄소 흡수율은 시간이 경과함에 따라 전체적으로 감소하는 추세를 보일 것으로 나타났으며, 이는 시간의 경과에 따른 임분의 노령화가 반영된 것으로 사료된다. 또한, 기온의 증가도 산림탄소 흡수량에 부정적인 영향을 미칠 것으로 추정되었는데, 심지어 RCP 8.5 시나리오의 경우 모의기간 후기에는 산림탄소의 순손실이 발생할 것으로 예측되었다.

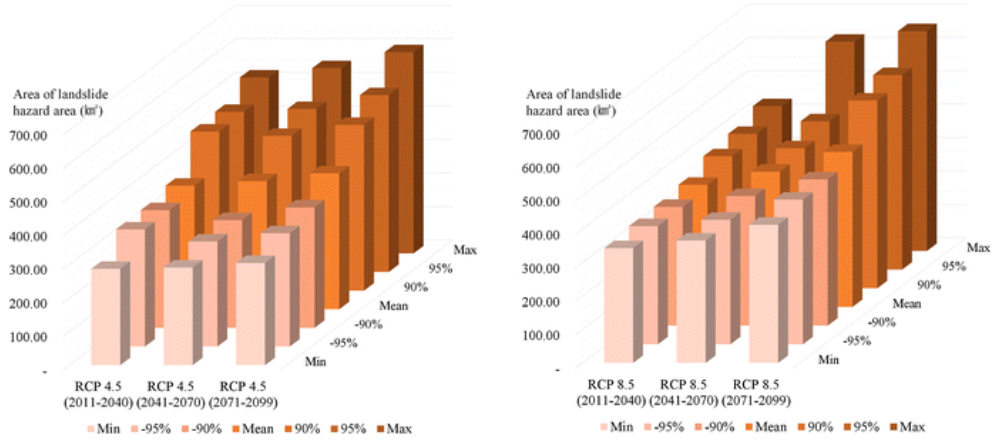
4.3.4 산림재해

「한국 기후변화 평가보고서 2014」에서는 산림재해 분야에서는 기후변화 영향 전망(시나리오 적용)을 위한 연구가 많지 않은 실정임을 제시하였다. 산사태 측면에서는 실제 발생자료를 바탕으로한 예측이 일부 수행되었고, 온도변화에 따른 병충해 영향 전망 연구들이 일부 진행된 것으로 기술하였다.

4.3.4.1 산사태

미래 기후변화에 따른 산사태 발생 및 위험 예측 연구에서는 주로 기계학습 또는 종분포모형, 로지스틱 회귀모형 등의 방법론에 기후변화 시나리오를 적용하여 예측하는 연구들이 많이 제시되고 있다. 이를 위해서는 정확한 산사태 발생 지점 정보가 필요하며, 위성영상을 통한 발생시점 획득 혹은 산사태 후 현장조사를 통한 정보 획득 등을 활용하고 있다.

기후변화 시나리오를 적용한 연구로는 강원도 평창군 일대를 대상으로 실제 산사태 발생지점과 기후인자, 지형·식생 인자의 분석자료를 구축한 뒤 RCP 8.5 시나리오를 적용하여 이 지역의 미래 산사태 발생가능성을 분석한 연구가 보고되었다(김호걸 등, 2013). MaxEnt 모형에서



(a) RCP 4.5 (b) RCP 8.5

그림 4.22 RCP 4.5 및 8.5 시나리오가 적용된 미래 산사태 위험 분석 결과(Kim et al., 2015).

입력변수와 미래 산사태발생가능성간의 관계는 기후인자 중 5일주기 최대강우량, 일강우량 80 mm 이상인 날의 횟수, 일최대강우량이 1, 2, 4위의 변수기여도를 가지는 것으로 나타났다. 특히 5일주기 최대강우량은 600 mm 이상, 일강우량 80 mm 이상인 날의 횟수는 5회 이상, 일최대강우량 210 mm 이상인 지역에서 발생가능성이 높게 나타났다. 지형인자에는 10~18°의 경사, 550~700 m의 고도, 동·남동·남쪽 방위, 35 cm 이하 토심, 식생인자로서는 침엽수림과, 1영급 이하~6영급 이상, 1경급 이하~4경급 이상, 인공림에서 발생가능성이 높게 나타났다.

동일한 방법을 활용하여 강원도 전체를 대상으로 RCP 4.5, 8.5 시나리오를 적용하였을 때, 연 편차는 크게 나타났으나 전반적으로 현재보다 산사태 위험이 증가할 것으로 나타났다. 특히 불확도를 고려한 RCP 8.5 시나리오의 먼 미래 (2041년 이후) 결과에서 산사태 위험 지역의 최대치가 크게 증가하는 것으로 나타나 대형 재해의 위협이 증가할 것으로 예상되었다(Kim et al., 2015).

전국적인 산사태 발생에 대한 미래 예측을 위해 전국단위 산사태 영향평가 모형에 RCP 8.5 시나리오를 적용한 결과에서는 예측치의 연 편차는 매우 크나, 일부지역 및 시기에 매우 높은 수준의 산사태 발생 가능성이 예측되었다. 특히 2030년대에는 현재보다 매우 높은 수준 및 넓은 지역의 산사태 발생 가능성이 나타날 것으로 나타났다 (MOTIVE, 2017; Yoon et al., 2019).

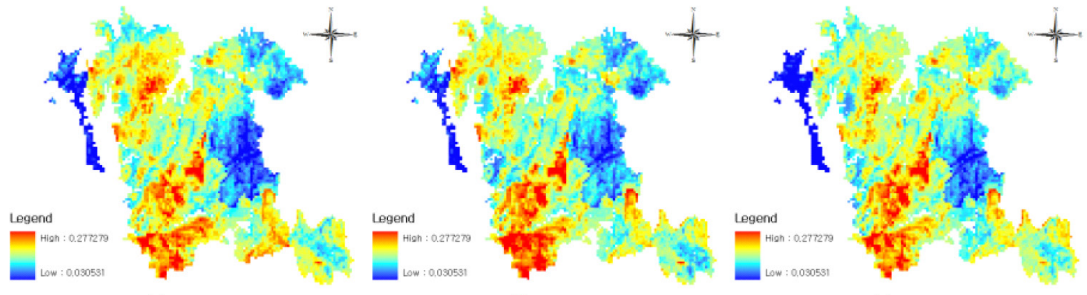
수도권의 집중호우를 학습한 산사태 발생 예측 모형으로 미래 극한 강수에 따른 변화를 모의한 결과에서 극한 강수가 20% 증가 시 대상지 전체의 평균 산사태 발생확률이 5배 증가하고, 극한 강수가 30% 증가 시 대부분의 지역이 산사태로 인해 위험해지는 것으로 나타났다(MOTIVE, 2017).

4.3.4.2 산불

산불의 경우 발생 원인에 기후변화가 직접적이지 않고, 타 분야에 비해 관계성이 적어 기후변화와 산불에 대해 집중한 기후변화 모형 연구는 많이 수행되지 않았다.

임채현과 김창영(2018)은 한국정책평가연구원에서 개발 및 제공하고 있는 VESTAP(Vulnerability Assessment Tool To Build Climate Change Adaptation Plan)을 활용하여 제주시와 서귀포시의 기후변화에 따른 산불취약성을 평가한 바 있다. VESTAP에서 산출된 노출, 민감도, 적응능력 취약성지수를 표준화하여 분석하였으며, 현재(2010년대)에서 미래(2040년대)까지 기후변화에 따른 산불 취약성을 평가하였다. 그 결과 제주시와 서귀포시 모두 미래로 갈수록 산불에 대한 취약성이 증가하였으며, 제주시보다 서귀포시의 산불 취약성이 높게 나타났다. 이는 서귀포시가 제주시보다 시스템에 미치는 기후자극이 크고, 적응역량이 부족하기 때문으로 분석되었다.

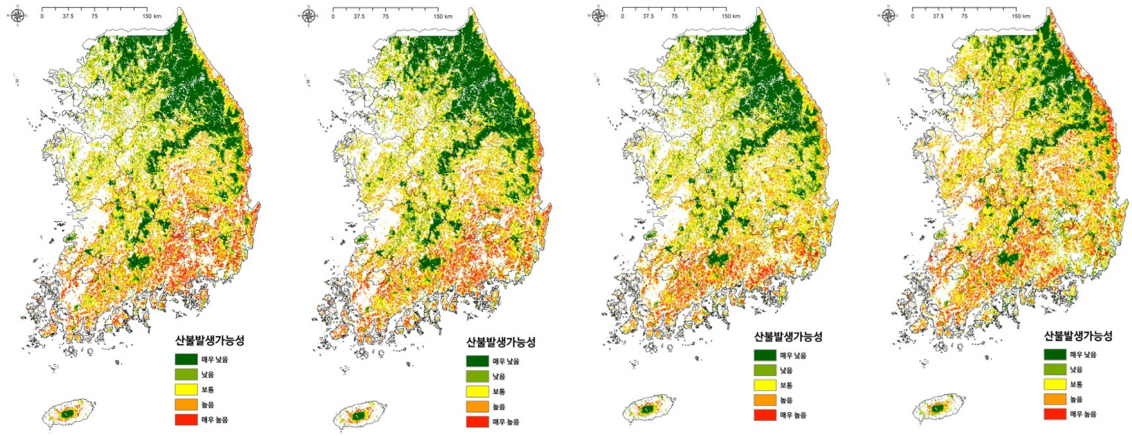
신규 기후변화 취약성 분석도구 prototype을 개발하고 충남지역의 산불 취약성을 평가한 연구 결과에서는 2010년대에 비해 2020년대 취약성은 증가할 것으로 예측되며, 2050년대에는 다시 감소할 것으로 전망하였다. 이러한 결과는 가까운 미래인 2020년에는 적응능력보다 기후 노출과 민감도 대용변수의 영향이 커 취약성이 증가하나,



(a) 2010s (b) 2020s (c) 2050s

Fig. 3. Vulnerability map of forest fires in the (a) 2010s, (b) 2020s, (c) 2050s.

그림 4.23 충남지역의 산불 취약성 지도(윤수향과 이상신, 2017).



(a) 2020년대 (b) 2030년대 (c) 2040년대 (d) 2050년대

그림 4.24 RCP 8.5 시나리오에 따른 미래 산불 발생 가능성 예측 결과(MOTIVE, 2017).

2050년대에는 상대적으로 적응능력이 뛰어난 것을 의미한다. 시·군 별 취약성 비교 결과, 해안에서 내륙방향으로 취약성이 높아지는 경향을 보였다(윤수향과 이상신, 2017).

RCP 8.5 시나리오를 산불 영향평가 모형에 적용한 연구에서는 타 재해에 비해 기상인자의 기여도는 낮아 연편차가 낮게 나타났다. 또한 입력자료로 활용된 봄철 유효강우지수와 산불조심기간 기상정보의 연교차가 적고 급격하게 변화하지 않은 것이 원인으로 분석되었다. 연대별 분석결과에서, 2020년대는 현재와 유사한 수준이면서 높은 산지와 별도관리구역을 제외한 지역에 발생확률이 나타나며, 봄철 온도가 높은 남부 및 동해안에 높은 발생확률을 보였다. 2030년대와 2040년대에서도 큰 차이를 나타내지 않았으며, 현재보다 조금 낮은 수준의 발생확률을 나타내어, 기후변화의 영향이 크지 않은 것으로 분석되었다. 2050년대에서는 상대적으로 높아진 발생확률을 확인할 수는 있으나, 변화 폭이 크지는 않았으며, 공간적 분포는 현재 시점과 유사하였다(MOTIVE, 2017)

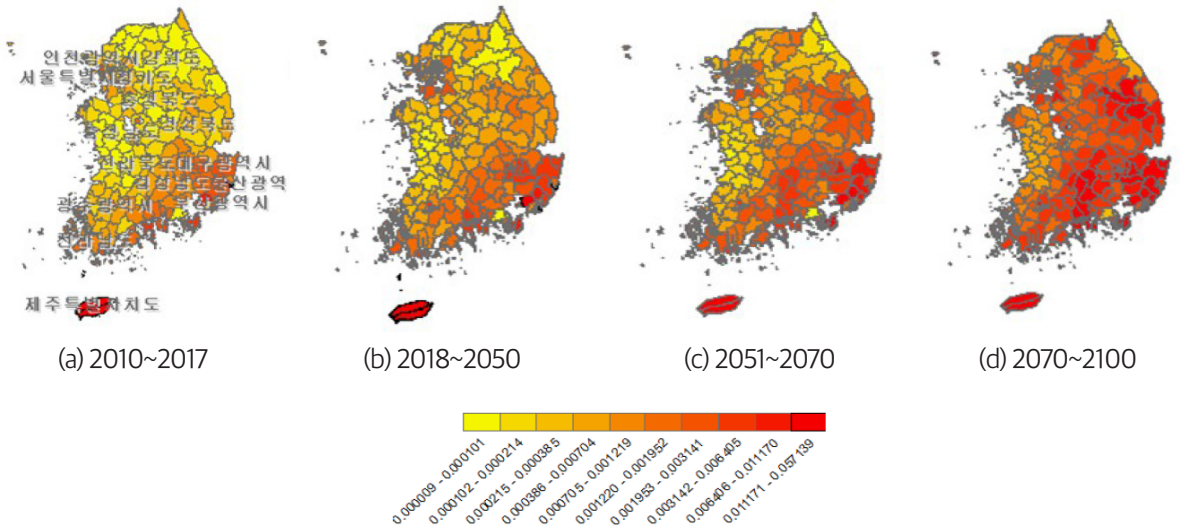
산불에 대한 영향전망의 경우 기후변화에 의해 두드러진 변화를 보이지 않았다. 그러나 모형과 기상자료의 개선을 통해 봄철 건조기간 증가 및 산림연료량 증가 등이 고려될 경우 산불의 위험수준 및 피해규모 변화에 대해 더욱 현실적인 예측이 가능할 것으로 예상된다.

4.3.4.3 산림병해충

기후변화에 따른 산림병해충의 영향 연구는 산림병해충의 우화시기 변화 등의 생육 특성파악연구와 이를 기반으로 한 분포 변화 연구가 수행되고 있다.

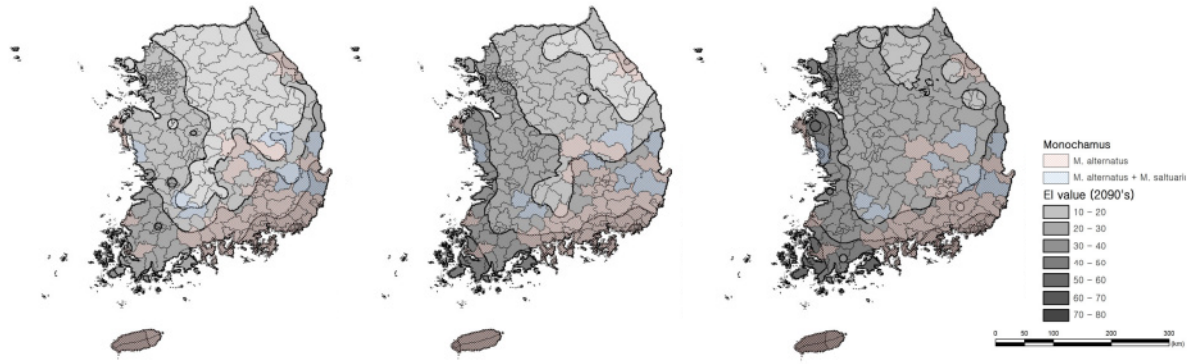
우리나라 재선충병의 매개충으로 보고되는 솔수염하늘소의 발육모델 개발을 위한 기초실험 결과, 월동 유충이 상충으로 우화하기까지 걸린 시간은 온도가 15℃에서 30℃로 증가함에 따라 169일에서 50일로 감소하였으며, 직선회귀분석으로 추정된 솔수염하늘소 월동 유충의 발육 영점 온도는 10℃ 이었다(국립산림과학원, 2011b). 이러한 결과로 우화시기 예측모델을 구축한 결과 솔수염하늘소 우화시기를 예측할 수 있음이 확인되었다(Park et al., 2014). 매개충의 우화시기가 온도에 민감한 점을 고려할 때 기후변화에 의해 우화시기가 빨라질 가능성이 높다.

이에 따라 여름 평균기온이 상승할 시 현재 재선충 비적합 지역인 북쪽 지역까지 재선충이 확산될 가능성이 있다. 소나무재선충의 매개충인 솔수염하늘소의 서식 적합지역의 변화분석 결과, 기후변화에 따라 월평균 최저기온 및 최고기온이 상승함에 따라 현재는 제주도, 부산광역시, 광주광역시, 울산광역시가 발생적합지로 나타났으나, 기후변화에 따라 월평균 최저기온 및 최고기온이 상승하여 2050년대부터는 강원도 일부를 제외한 남한 전역이 솔수염하늘소의 서식 적합지가 될 것으로 전망하였다(한국환경정책평가연구원, 2015). 미래 소나무재선충으로 인한 피해율 예측



(a) 2010~2017 (b) 2018~2050 (c) 2051~2070 (d) 2070~2100

그림 4.25 RCP 8.5 시나리오에 따른 소나무재선충 피해율 예측 결과(한국농촌경제연구원, 2018).



(a) 현재 (b) 2050년대 (c) 2090년대

그림 4.26 RCP 8.5 시나리오에 따른 솔수염 하늘소의 현재와 미래의 분포 변화(한국환경정책평가연구원, 2015).

연구결과는 다음 <그림 4.24>와 같다. 현재는 제주도와 남부지역의 피해율이 높은 것으로 나타났으나, 기후변화가 진행됨에 따라 미래에는 북부지역의 피해율이 높아질 것으로 예상되었다. 2050~2070년대에는 충남과 경기지역까지 피해 심화지역이 될 것으로 보여지며, 2090이후에는 강원도 일부를 제외한 전국에 재선충 피해가 크게 나타날 것으로 전망된다(한국농촌경제연구원, 2018).

참나무시들음병 매개충인 광릉긴나무좀의 우화시기 또한 기후변화에 의해 빨라질 가능성이 높다. 실제로 광릉긴나무좀 우화시기 모델은 과거에 비해 이미 우화시기가 빨라졌음을 보여주고 있다(Nam et al., 2013b). 이와 별도로 광릉긴나무좀 세대수 증가 가능성에 대한 연구가 필요하다. 현재까지는 실험실 사육이 가능하지 않아 온도발육 혹은 생명표 연구 결과가 없어 분석이 어려우나 이에 대한 연구가 필요한 실정이다.

참나무시들음병의 피해율 예측에 따르면 현재 수도권과 경기도에 집중적으로 발생하고 있는 참나무시들음병은 기후변화가 진행됨에 따라 수도권 북쪽으로 북상함과 동시에 동·서해안 지역으로도 확장될 수 있을 것으로 전망되었다. 미래에도 주 피해지역은 수도권과 경기도 일대이나 충청도, 전라도, 경상도는 해안지역의 피해율이 내륙지역에 비해 높을 것으로 전망되었다. 과거 일본에서 참나무시들음병이 해안지역을 중심으로 확장되었던 사례를 미루어 보아 국내 해안지역 피해 상황을 관심 있게 지켜볼 필요성이 있다(한국농촌경제연구원, 2018).

솔잎혹파리 우화시기에 대한 모델에 대한 연구도 최근에

보고되었다(Nam and Choi, 2014). 이들의 모델은 솔잎혹파리 우화시기를 정확하게 예측할 수 있었다. 이 기본 모델에 솔잎혹파리 적응 함수를 포함하여 솔잎혹파리 발생시기를 기후변화 시나리오 RCP 4.5와 RCP 8.5 하에서 분석한 결과 발생시기의 변화는 관찰되지 않았다. 이는 솔잎혹파리 우화시기가 소나무 개엽시기와 동조화되었기 때문인 것으로 추정되며 이에 대한 추가적인 분석 연구가 필요한 것으로 판단된다. 이외에도 기후변화가 솔나방의 발생 생태를 변화시킬 수 있음을 밝힌 연구도 있다. 실험실내 온도 발육 실험 결과를 모의한 결과, 솔나방은 1994년 이후 1년에 2세대 발생할 수 있는 환경조건이 되었다는 것이 밝혀졌다. 실제 야외에서 솔나방이 1년 2세대 발생한 경우가 1996년에 보고된 점을 미루어 볼 때 솔나방의 온도에 대한 반응은 즉각적임을 알 수 있다. 이러한 결과는 기후변화와 도시 열섬현상에 따른 온도상승이 적어도 경기 중부의 솔나방의 발생 생태를 변화시켰음을 보여주는 결과이다. 그러나 솔나방이 1년에 2세대 발생한다고 하여 솔나방 대발생이 우려되는 것은 아니다. 솔나방은 주로 솔잎이 연한 봄철에 솔잎을 많이 섭식하는 해충이나 1년에 2세대 발생함에 따라 솔잎이 많이 경화된 여름이나 가을에 솔잎을 섭식해야 되며 일부 개체들은 여름철 고온기간을 견뎌야 한다. 이러한 환경은 솔나방 밀도 증가에 불리한 조건이 될 수 있다(Choi, 2011).

겨울 온도에 따른 꽃매미 알 월동치사율을 이용하여 꽃매미 발생위험도를 평가한 결과 남부지방에서의 꽃매미 발생위험도가 높았다. 또한 이를 기후변화 시나리오에 적용한 결과 기온이 상승할수록 꽃매미 발생위험도가 증가하는 경향을 보였다. 이는 꽃매미처럼 최근 발생한 해충의 경우 기후변화가 진행됨에 따라 발생위험도가 증가할 수 있음을 보여주는 것이다.

4.4 취약성의 주요 원인

4.4.1 산림생장

「한국 기후변화 평가보고서 2014」에서는 산림생장에 대한 취약성과 원인을 다루지 않았다.

미래 산림 생장의 취약성을 평가하기 위해서 취약성을 민감도와 적응 능력 등의 지표로 규정하여 이 지표들을 분석하는 연구가 진행되고 있다. 취약성은 민감도에서 적응 능력을 감하는 식을 주로 적용해왔으며, 이때 민감도는 미래 기후와 현재 기후에 따른 잠재생장량의 차이가 사용되었다. 적응 능력은 산림관련 사회기반시설 및 관리강도 등이 활용되어왔다.

전반적으로 우리나라의 주요 활엽수림인 참나무류보다 소나무, 낙엽송, 잣나무 등과 같은 침엽수림이 기후변화에 취약할 것으로 분석되었다. 특히, 상대적으로 기온증가량이 높을 것으로 예상되는 해안가 및 남부저지대 지역에서 침엽수림의 생장 취약성이 높을 것으로 예측되었다.

조사구와 실험구 단위의 연구에서는 기온과 대기 중 CO_2 농도의 증가가 산림생장에 긍정적인 영향을 미칠 수 있는 것으로 밝혀졌으나, 실제 우리나라에서 관측 및 분석된

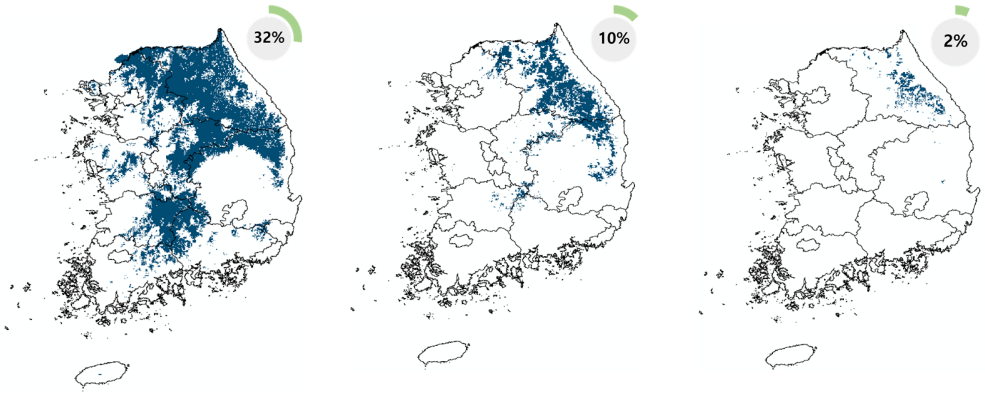


그림 4.27 기후변화 취약수종(침엽수림)의 산림분포 취약성 평가 결과(RCP 8.5)(유소민 등, 2020).

연구결과들에 따르면 주요 침엽수림은 기후변화가 진행됨에 따라 생장이 감소하고 있는 것으로 나타났다. 아직 각 수종의 생장감소 기작이 명확하게 밝혀지진 않았으나 다음과 같은 요인들이 복합적으로 영향을 미쳤을 것으로 분석되고 있다.

- 기온 상승으로 의한 수분 요구량 증가
- 가을 및 겨울철 기온증가로 인한 토양 수분량 감소
- 참나무림과의 자연경쟁에서 상대적 열세
- 봄, 가을철 가뭄 강도의 증가
- 산림 병해충에 의한 피해 증가

기존의 관측 및 분석에 따르면, 기후변화의 영향은 수종별로 시·공간에 따라 다르게 나타날 것으로 예측되고 있다. 따라서 예상되는 기후변화 취약성을 낮추고, 적응능력을 높이기 위한 적극적인 관리가 필요할 것으로 사료된다. 또한, 적응지표로 활용될 수 있는 사회·경제적 관련 지표들이 실제 기후변화 취약성과 정성적, 정량적으로 어떤 연관이 있는지 파악하는 것도 필요하다.

4.4.2 산림분포

「한국 기후변화 평가보고서 2014」에서는 지표를 기반으로한 취약성 연구들이 일부 진행되고 있다고 제시하였으나, 연구와 자료의 부족으로 인해 취약성의 요인을 판단하기에는 어려움이 따른다고 기술하였다(중간적 동의).

미래 산림 분포의 취약성을 평가하기 위해서 취약성을 민감도와 적응 능력 등의 지표로 규정하여 이 지표들을 분석하는 연구가 진행되고 있었다. 취약성은 민감도에서 적응 능력을 감하는 식을 적용하며, 이 때 민감도는 식생의 변화 빈도로, 적응 능력은 산림의 변화 방향으로 평가되었다(이상철 등, 2011; Choi et al., 2011). 변화 빈도란 기후변화에 따른 식생유형의 변화 가능성을 의미하고, 산림의 변화 방향은 아열대 상록수림을 낮은 것으로, 아고산 침엽수림을 높은 것으로 분류하는 산림 유형에서의 추이를 의미한다.

최근 연구에서는 기후변화에 의해 잠재 수종적합지역이 사라지는 것으로 예측되는 곳을 산림분포 취약성이 높은 곳으로, 그대로 유지되는 것으로 예측되는 지역을 취약성이 낮은 것으로 규정하여 연구되고 있다(유소민 등, 2020). 즉 아고산림이나 침엽수림의 경우 취약성이 증가할 것으로 예상되고, 온난대림의 경우 취약성에 큰 변화가 없을 것으로 예상되고 있다.

한국형 산림분포 모델인 HyTAG 모형을 이용하여 IPCC가 제시한 기후변화 시나리오 A2(발전 지향적)와 B1(자연친화적)에 따라 산림분포 취약성을 평가해 본 결과, A2 시나리오에서는 시간이 지남에 따라 아고산림 및 냉온대림의 분포가 줄어들며 온난대림은 북상하여 분포하는 것으로 나타났으며, 남서해안 지역과 동해안 해안선 일부지역의 취약성은 30.78 %로 나타났다. B1 시나리오에서는 시간이 지남에 따라 아고산림 면적은 감소하며 온난대 상록수림의 면적이 증가하는 것으로 나타났고, 남서해안 지역과 동해안 해안선 일부지역의 취약성은 49.45%로 나타났다(이상철 등, 2011).

기후변화 취약수종으로 선정된 침엽수림을 대상으로 RCP 시나리오와 HyTAG 모형을 적용한 산림분포 취약성 평가 결과에서는 가문비나무, 구상나무, 분비나무, 눈잣나무는 전반적으로 미래로 갈수록 잠재 분포 가능 면적이 줄어드는 것으로 나타나 취약성이 높은 것으로 나타났다. 가문비나무의 경우 다른 수종에 비해 잠재 서식할 수 있는 분포범위가 상대적으로 큰 것으로 예측되었으나, 눈잣나무의 경우 서식가능한 분포범위가 크게 줄어들어 2050년대부터 생육할 수 있는 공간이 거의 사라지는 것으로 나타났다. 이러한 취약성의 원인은 온량지수, 최저온도지수 등과 같은 생육기간 및 최한월의 온도 증가에 있는 것으로 분석되었다(유소민 등, 2020).

4.4.3 탄소

「한국 기후변화 평가보고서 2014」에서는 산림탄소에 대한 취약성과 원인에 대해 다루지 않았다.

식생의 탄소저장량 및 변화량은 임상의 바이오매스에 의존하므로, 미래의 산림생장 전망에 따라 취약성이 결정될 것으로 추정된다. 식생의 탄소량뿐만 아니라, 토양 탄소량의 취약성도 중요하게 고려되어야 한다. 대부분의 연구에서 미래 기온의 증가가 토양탄소의 감소를 야기할 것으로

예측하고 있다. 기온의 증가가 토양유기물의 분해 및 호흡을 촉진시켜, 나중에는 산림탄소의 순손실까지 발생할 가능성이 있는 것으로 나타났다. 토양의 기후변화 취약성을 낮추기 위한 효율적인 전략이 필요할 것으로 사료된다.

4.4.4 산림재해

「한국 기후변화 평가보고서 2014」에서는 산림재해 측면의 취약성과 원이 관련 연구가 많지 않다고 기술하였다. 산사태의 취약성 요인으로는 경사도, 토양 특성 및 강우강도 등의 특성이 확인되었다고 제시하였으나, 다른 분야의 경우 취약성에 대한 연구가 크게 진행되지 않아 장기적인 자료 축적 및 연구가 필요하다고 기술하였다.

4.4.4.1 산사태

전반적인 연구를 바탕으로 볼 때 산사태에 영향을 주는 주요 요인으로는 '경사 방향', '경사도', '토양특성', '강우강도', '식생활력', 산림관리, 토지이용 등이 있는 것으로 나타났다. 토양특성과 관련해서는 사질토, 흑운모화강암·편마암과 변성퇴적암과 셰일과 같은 토양에서 산사태 발생가능성이 높다는 연구가 있었으며, 강우강도가 강해질수록 산사태 발생가능성이 높아진다는 연구는 다수 확인되었다(Kim et al., 2015; MOTIVE, 2017).

집중호우로 인해 산사태가 집중적으로 발생한 이암 풍화토층을 대상으로 산사태와 관련한 여러 토질특성을 분석한 결과 산사태발생지역의 토층은 미발생지역에 비해서 간극률이 크고 단위중량을 작은 것으로 나타났으며, 입도는 양호하나 느슨한 토층지반의 특성상 큰 간극과 작은 단위중량을 지님으로써 산사태에 상대적으로 취약한 것으로 분석되었다. 또한 산사태발생지역의 토층이 전반적으로 투수성이 양호하므로 토층이 더 쉽게 포화되어 하중이 증가될 뿐만 아니라 물이 더 빠르게 경계부에 도달함으로써 토층의 파괴요인으로 작용하여 산사태에 더 취약한 것으로 분석되었다(황의순 등, 2013).

지형적 측면에서, 경사도의 경우 산사태 발생이 많이 나타나는 범위는 10~40°로 폭넓게 분포하였다(차성은 등, 2018). 이는 실제 산림에서 40°이상의 경사를 지닌 지역이 상대적으로 적은 것이 원인으로 예상되고 있다.

수목이 없는 곳이 있는 곳보다, 수목의 밀도가 적은 곳이 높은 곳보다 산사태가 훨씬 많이 발생하는 것으로 나타났다. 또한 뿌리가 깊은 심근성 나무는 말뚝효과가 있는 반면, 뿌리가 얕은 천근성 나무는 뿌리가 사방으로 넓게 퍼지는 그물효과가 있다. 즉 관리되지 않은 산림의 경우 산사태 취약성을 높일 수 있는 원인이 되는 것이다(차두송, 2016).

토지이용의 측면 또한 산사태의 취약성을 변화시키는 요인으로 나타나고 있다. 신규 도로나 건물, 도시 확장 등 국지적인 토지이용이 변화하면서 경사진 산림과 수목의 안전성이 낮아지는 지역이 많아지고 있다. 이 지역들에 사방댐 등을 통해 관리하고 있으나, 기본적으로 취약성이 증가할 수 있는 원인이 된다(박수진 등, 2015).

4.4.4.2 산불

산불발생을 증가시키는 주요 요인은 기후요인과 인위적 요인으로 구분할 수 있다. 우리나라 산불의 발생은 입산자 실화와 소각행위 등 대부분 인간 활동과 관련하여 발생하며, 이에 따라 인구밀도가 높은 대도시 인근지역에서 높게 나타난다(원명수 등, 2016). 하지만 여러 연구에서 기후변화가 산불 발생 빈도와 피해 규모 증가에 영향을 준 것을 규명하였다.

다수의 연구에서 과거 산불 발생자료 분석결과, 평균기온 증가와 습도 감소가 산불발생의 가장 중요한 기상요인으로 제시되었다(성미경 등, 2010; 김승수 등, 2015; 원명수 등, 2016; 원명수 등 2018). 국가산불위험예보시스템에서 실시간으로 분석되는 기상에 의한 산불발생확률 모형의 문제점을 개선하기 위해 봄철과 가을철의 전국 통합 산불 발생확률모형 개발 연구에서는 봄철 산불 발생에 영향을 주는 기상변수는 해당 시간대의 평균기온, 상대습도, 실효습도, 평균풍속이었으며, 가을철은 평균기온, 상대습도, 평균풍속인 것을 높은 신뢰수준에서 확인하였다(원명수 등 2018).

각 권역별 산불발생과 관련되는 기상요소로 경상남·북도,

전라남도 4개 권역은 최고기온, 상대습도, 실효습도, 평균풍속, 경기도와 충청남도 2개 권역은 최고기온, 상대습도, 평균풍속, 충청북도는 최고기온, 상대습도, 실효습도, 전라북도는 최고기온과 상대습도, 마지막으로 제주도는 최고기온과 평균풍속에서 95% 이상의 신뢰도에서 유의성이 있는 것으로 나타났다(원명수 등, 2016). 강원영동 지역을 대상으로 수행한 연구에서는 강수 계속시간의 감소, 최소습도일수의 증가의 기후변화가 산불 발생빈도 증가에 직접적인 영향을 주었으며, 평균기온과 평균풍속의 증가 또한 산불발생건수와 피해면적 증가에 영향을 준 것으로 분석되었다 (김승수 등, 2015).

또한 기후변화의 지역적 편차를 분석하고 이러한 지역적인 차이가 산불 발생 분포의 변동에 미치는 영향 분석한 연구에서는 대도시에서의 산불 증가율이 높은 이유를 기후변화로 인한 평균 기온 증가와 습도 감소가 도시화 효과에 의해 국지적으로 강화되면서 대도시를 중심으로 산불 증가율을 높이는 역할을 했을 것으로 추정하였다. 또한 산불 증가율이 가장 광범위하면서 높게 나타났던 호남 지역의 경우, 기온과 습도 변화보다는 강수일수의 변화가 산불 발생의 주요 원인으로 작용했을 가능성이 큰 것으로 나타났다 (성미경 등, 2010).

한편, 대규모 기후인자와 봄철 산불과의 연관성을 분석한 연구에서는 우리나라 산불위험도의 증가는 유라시아 중서부-중국 및 한반도 지역의 평년보다 높은 기온, 중국 북동부-한반도-북서태평양 상의 저기압 아노말리, 중국중부-한반도 지역의 강한 동서바람, 낮은 습도와 관련이 있다는 결론을 도출하였다. 본 연구에서 봄철 산불발생과 우리나라의 봄철기온과는 뚜렷한 상관성이 나타나지 않아 우리나라 봄철 산불발생은 기후변화로 인한 기온 상승보다는 엘니뇨/라니냐에 의한 서태평양 대류활동과 연관된 열대-중위도 원격상관에 의한 것으로 판단하였다 (정지윤 등, 2018).

4.4.4.3 산림병해충

소나무 재선충의 확산요인은 크게 선충과 매개충 및 기주수목에 영향을 미치는 기후 요인과 인위적 요인으로 구분할 수 있으며, 기후요인은 선충 및 매개충의 생태와 수목의 건전성에 영향을 미쳐 분포 수 변화에 직접적으로 관여한다. 재선충과 매개충의 발육단계 별로 영향을 미치는 기후요소들의 차이가 존재하며, 각 계절의 평균기온, 습도, 최대·최소 기온 등이 재선충 피해 확산과 밀접한 관계가 있는 것으로 나타났다.

한국농촌경제연구원(2018)의 재선충 피해함수 추정 결과에 따르면, 소나무재선충의 피해율은 한 해 전 겨울 최저기온, 봄 평균기온, 여름 평균기온과 그 제곱, 가을 최저기온, 봄 상대습도, 여름 평균강수량, 한 해 전 겨울 적설량, 돌발더미, 인구변수 등이 통계적으로 유의한 것으로 나타났다. 봄 평균기온과 상대습도는 피해율과 양의 상관관계로, 봄 평균기온이 상승하고 상대습도가 증가할수록 재선충 피해율이 높아지는 것으로 나타났다. 북방수염하늘소의 주 우화시기가 봄이고 솔수염하늘소의 우화시기가 봄과 여름임을 고려하였을 때, 봄 기온이 높아질수록 매개충의 우화시기가 빨라져 재선충 피해율이 높아질 것으로 예상된다. 또한 봄 평균기온의 상승은 솔수염하늘소의 분포 범위를 북쪽으로 넓혀 솔수염하늘소에 의한 재선충 피해율 증가의 원인이 될 수 있을 것으로 보인다. 여름 기온은 20°C 이상인 곳에서 발병하나, 27°C 이상부터는 매개충의 이동 및 산란활동 둔화로 인해 감염률이 감소하는 것으로 나타났다. 여름 강수량의 증가는 피해율의 감소로 나타났는데, 이는 솔수염하늘소의 섭식·산란 시기인 여름 동안 수목의 수분 스트레스를 완화시켜 저항성 증진시키고, 성충의 비행활동을 부분적으로 저하시켜 피해율 확산을 감소시키는 효과가 있는 것으로 해석된다. 가을 최저기온은 상승함에 따라 재선충 피해율도 증가하는 양상이 나타났다. 이는 매개충인 솔수염하늘소의 산란활동 기간을 연장시키고, 재선충의 성장기간을 단축시켜 개체수를 증가시키기 때문으로 예상된다. 봄 상대습도의 경우 상대습도가 증가할수록 매개충의 수명이 길어지는 경향으로 인해 피해율을 증가시키는 것으로 나타났다. 또한 한 해 전 겨울의 최저기온과 재선충 피해율은 양의 상관관계로 겨울 최저기온의 상승에 따라 재선충 피해율도 증가할 것으로 보여진다. 한 해 전 적설량과 피해율도 양의 상관관계인 것으로 나타났다. 따라서 한 해 전 겨울기온과 적설량은 월동유충 생존율과 관련이 있을 것으로 예상된다. 유충이 추운 겨울 온도에

노출되지 않으면 생존률이 증가하고, 우화기 성충 밀도 증가로 인한 병해충 피해가 커질 수 있다.

또한 인위적인 요인 중 시군구별 인구와 재선충 피해율이 양의 상관관계를 나타냄에 따라 인구가 많고 이동이 활발한 지역에서 인위적 감염에 의한 피해가 늘어날 것으로 예상된다.소나무재선충 발생지와 비발생지 간 환경특성을 분석한 결과에서도 발생지가 비발생지에 비해 상대적으로 건물과 도로에 가깝게 나타나 인간의 활동으로 인해 외부로 반출된 피해목 또는 매개충에 의한 소나무재선충병 확산 원인으로 추측된다(이대성 등, 2017).

참나무시들음병의 경우 갑작스런 피해확산 요인으로 이상기온, 비적지 참나무의 생리적 쇠약 등이 제시되고 있으나 아직 관련 연구는 미흡한 상황이다. 일본의 경우 기온이 높고 강수량이 적은 해에 피해가 많이 발생하고, 기온이 낮고 강수량이 많은 해에는 상대적 피해가 적은 경향이 나타나 기온 및 강수량과 참나무시들음병 확산 간의 관계가 주목되고 있다(이승규 2009).

광릉긴나무좀은 주로 쇠약목과 고사목을 공격하는 2차 해충으로 알려져있다. 최근에는 건강한 수목을 공격하는 사례도 빈번히 발견되고 있으나, 쇠약한 수목은 매개충의 주 공격대상이 될 수 있다. 따라서 고온건조한 기후에 따른 수분 스트레스는 기주나무의 건전성을 악화시키고, 매개충의 공격을 받을 시 나무의 저항기조로 분출되는 수액의 생산량이 감소하기 때문에 매개충의 공격에 취약하다(Bentz et al. 2010). 쇠약한 수목에 매개충이 서식하면 주변의 건전한 수목 또한 매개충의 공격을 받을 수 있다(Gaylord 2014). 국립공원연구원(2012)은 덕유산·계룡산 국립공원 내 참나무시들음병 출현지점 공간자료를 이용하여 참나무시들음병 피해에 영향을 주는 기후변수들의 기여율을 최대 엔트로피 모델을 적용하여 추정하였다. 연구결과, 최고기온, 최저기온, 강수량 등의 기여율이 높았으며, 평균기온의 기여율은 낮은 것으로 나타났다. 그러나 각 변수들의 방향성은 연구에서 구체적으로 나타나지 않았다.

한국농촌경제연구원(2018)의 피해함수 추정결과에 따르면, 참나무시들음병 확산에 영향을 주는 기후 요인은 겨울 최저기온과 강수량, 봄 최고기온, 여름 최고기온과 강수량, 가을 강수량 등으로 나타났다. 겨울 최저기온과 봄최고기온이 상승할수록 참나무시들음병 피해율이 증가할 것으로 예상된다. 기존연구에 따르면 기온의 상승은 유충의 사망률 감소 및 성충 조기 우화로 인한 매개충 활동 시기 확장의 원인이 되며, 매개충 활동과 밀도 증가는 병해충 확산의 직접적 원인이 되는 것으로 나타났다. 여름 최고기온의 경우, 27°C이상부터는 피해율이 점차 감소하다 35℃이상에서는 피해가 0에 가까워지는 것으로 나타나 너무 높은 여름기온은 피해율의 감소를 초래할 것으로 보여진다. 이는 높은 여름기온은 매개충의 이동 및 산란활동 둔화로 인해 감염률의 감소를 초래할 수 있다는 기존연구와 비교적 일치하는 것으로 판단된다. 가을 최고기온과 피해율은 양의 상관관계를 가지나 통계적으로 유의하지 않은 것으로 나타났다. 강수량의 감소는 수분 스트레스를 야기하여 기주 수목의 저항성을 약화시키며, 이로 인한 병해충의 빠른 확산으로 피해를 증가시킬 것으로 보여진다. 병해충의 집중공격이 이루어지는 시기인 여름과 감염증상이 심화되는 가을, 유충이 기주 수목에서 월동하는 시기인 겨울의 강수량 감소가 병해충 피해율과 통계적으로 유의한 것으로 나타났다. 인위적 요인의 경우, 비방제 피해목 면적이 증가할수록, 흉고직경이 클수록, 인구가 많은 지역일수록 병해충 피해율이 높아지는 것으로 나타났다.

4.5 적응 옵션

4.5.1 산림생장

「한국 기후변화 평가보고서 2014」에서는 기후변화에 따라 미래의 임업환경 및 생산성이 변화하므로 미래 식생분포를 고려한 임산물 생산지역 관리가 필요하다고 기술하였다. 우리나라 주요 수종인 소나무와 잣나무를 대상으로 생장을 모의하여 미래의 적정관리방안에 대해 기술하였다.

4.5.1.1. 관리와 시업을 통한 산림 생장량 및 탄소 저장량 유지 및 증진

현재까지 연구된 결과들을 종합해봤을 때, 미래 기후변화는 우리나라 주요 침엽수림의 생장과 탄소량 증가에 부정적인 영향을 미칠 가능성이 높으며, 이는 사회, 경제,

환경에 직·간접적인 손실을 야기할 것으로 판다된다. 한 예로 현재 우리나라 소나무림의 면적은 1,467,758 ha이며, 현재 면적이 그대로 유지된다고 가정할 때 기후변화로 인해 2050년까 잠재적으로 최대 -13,700,000 m^3의 임목축적 손실이 있을 것으로 예상된다. 이를 단순히 현재 국내 소나무 원목의 가치로만 평가해도 최대 약 36,441억 원의 경제적 손실이 발생할 수 있을 것으로 추정된다. 이는 목재로서의 가치만 평가한 것으로, 휴양, 수자원함양, 대기정화, 탄소고정 등 산림의 다양한 가치를 고려할 경우, 추정 피해액은 더욱 커질것으로 사료된다.

현명한 기후변화 적응 대책을 수립하기 위해, 숲가꾸기 등과 같은 적극적인 관리가 산림에 미치는 영향을 분석하는 연구가 진행되고 있다. 최근 산림청은 국내 주요수종에 대한 벌기령을 단축하였다. 벌기령이란 임분 또는 임목을 벌채할 수 있는 나무의 연령을 말하며, 벌기령 단축이란 그러한 연령을 보다 낮게 조정하는 것이다. 이 정책의 주요 목적은 불균형한 산림의 영급구조를 개선하고, 목재시장에 목재 공급을 늘리는 것이지만, 부가적으로 탄소흡수량을 증가시키는데 기여할 수 있을 것으로 확인되었다(유동훈 등, 2016). 2010~2100년까지 벌기령 단축 전과 후의 기준을 적용하여 분석한 결과, 소나무의 경우 벌기령 단축 후, 단축 전에 비하여 이산화탄소 흡수량이 6.5%의 증가될 것으로 전망되었다. 잣나무, 낙엽송, 참나무류는 각각 1.1%, 6.9%, 12%의 증가가 기대되었다. 비록 본 연구는 기후변화의 영향을 고려하진 않았다는 한계가 있으나, 벌채 후 재조림을 실시할 때 미래 기후영향을 고려한 적합 수종을 조림할 경우 추가적인 효과도 기대할 수 있을 것으로 판단된다.

간벌과 같은 숲가꾸기 사업의 효과에 대한 분석도 수행되었다. 간벌(솎아베기)은 인위적 관리를 통하여 산림의 지속가능성을 영위하게 하는 경영활동 중 하나로서, 일부 임목을 벌채하여 임목간 광선, 수분, 양분 등에 대한 경쟁을 완화하여 잔존 임목의 생육 조건을 개선하기 위해 수행되며, 이는 산림의 탄소흡수 기능 유지와 우수한 형질의 목재생산 등으로 이어진다. 기존 국내 연구결과를 기반으로 간벌 효과를 분석한 결과, 간벌에 의하여 직경 생장량과 토양 탄소 저장량은 증가하고, 임목 탄소 저장량은 감소하며, 고사목과 낙엽층 탄소 저장량은 변화가 없는 것으로 나타났다. 한편 직경 생장량과 임목 탄소 저장량은 간벌 강도 및 회복 시간과상관 관계를 보인 반면 낙엽층, 고사목, 토양 탄소 저장량 등은 위의 두 요인과 뚜렷한 상관관계가 없는 것으로 확인되었다. 그러나 1)간벌에 의한 직경 생장량과 탄소 저장량 변화 연구는 대부분 잣나무 등 침엽수를 대상으로 수행되어 활엽수에 대한 연구가 부족하다는 것과, 2) 장기 모니터링 부재 및 반복 측정 주기가 너무 길다는 점, 3) 간벌 후 하층 식생 변화에 대한 연구가 부족하다는 점 등이 앞으로 개선되어야 할 부분으로 나타났다. 향후 지속적인 모니터링과 다양한 연구들을 통해 기후변화에 대해, 보다 효율적이고 통합적인 시·공간 관리 계획 수립이 요구된다.

4.5.2 산림 수종분포

「한국 기후변화 평가보고서 2014」에서는 산림 분포와 관련하여 우리나라의 독자적인 산림분포변화예측 모형을 개발하는 것이 필요하며, 임상의 변화가 다른 분야에 미칠 영향을 고려하여 다양한 인자가 고려된 모델 연구가 지속적으로 이루어져야 할 것으로 기술하였다.

4.5.2.1 미래 잠재 수종분포를 고려한 적정 산림관리

우리나라는 1970년대 이후 집중적인 조림정책으로 현재의 산림이 형성되었으며 당시의 주 식재 수종은 잣나무와 낙엽송이었다(강길남 등, 2010). 그러나 기후변화로 인해 점차 침엽수림이 쇠퇴하거나 북상하고, 혼효림의 증가와 온난대 활엽수림의 북상 등이 예상된다(Lim et al., 2018). 즉, 기후변화에 따라 변화하는 잠재 수종분포를 고려하여 적정한 산림관리가 필요한 상황이다.

산림 수종분포 취약성을 낮추기 위해서는 취약성이 높은 수종을 보호하거나 미래 적정 수종으로 갱신하여 관리하는 방안을 고려할 수 있다.

현재 수종을 유지하는 관리방안에서는 숲가꾸기, 특별보호수종 관리 등의 인위적인 수종관리를 통해 산림의 생육환경을 개선함으로써, 기후의 부정적인 영향을 최소화시키고 적응능력을 높여 취약성을 낮추는 관리 방안을 적용할 수 있다(MOTIVE, 2018).

적정 수종으로 갱신하는 관리방안에서는 벌기령에 도달한 임목을 벌채 후 조림 시 산림 수종분포 예측모형 결과를 고려하여 해당 지역 기후조건에 가장 적합한 수종으로 조림하는 것으로 관리방안을 설계할 수 있다(MOTIVE, 2018).

기후변화에 따라 미래의 임업환경이 변화하므로 생산환경에 많은 변화를 미칠 것으로 예상된다. 특히 기후변화에 따른 수종별 생육범위가 변화함으로 인해 조림지대가 바뀌어 임업생산성에 변화가 예상되는 것으로 나타났다(국립산림과학원, 2011b). 또한 강원도의 임산물 생산 환경 분석에서 기후변화로 인한 소나무림의 감소에 따라 송이 생산의 적지가 감소할 것으로 예측되고, 고랭지를 이용한 산나물, 과수재배, 채소 등의 재배적지 역시 감소할 것이 예측되었다(김점수, 2009). 탄소흡수와 가치 있는 목재 생산을 통해 사회 효용을 극대화하기 위해서 산림 관리의 필요성이 강조되며(이상민 등, 2011), 이를 위해 우리나라의 주요 수종인 소나무와 잣나무를 대상으로 모형을 통해 적정관리 할 수 있는 방안들이 제안되었다(MOTIVE, 2018; 유소민 등 2020).

4.5.3 산림탄소

「한국 기후변화 평가보고서 2014」에서는 산림 탄소와 관련하여 이산화탄소 흡수원으로서의 산림생태계의 적응 역량을 연구하고 국가차원의 국토 계획 시 탄소흡수능력을 고려하는 것이 필요하다고 기술하였다. 더불어 탄소저장량을 유지 및 확대하고 임목의 탄소뿐만 아니라 토양의 탄소를 효과적으로 관리하는 전략이 필요하다고 기술하였다.

4.5.3.1 탄소 인벤토리 및 계정

기후변화 영향파악 및 대응 정책의 수립과 이행을 위해서는 국내 온실가스 배출원 및 흡수원을 파악하고, 국가 온실가스 인벤토리를 정확하게 산정하는 것이 필요하다. 파리협정(Paris agreement)에 따라 우리나라는 자발적 감축목표(INDC: Intended Nationally Determined Contributions)로 37 %를 제시하였으며, 이는 우리나라의 온실가스 감축노력에 대한 대내·외적 평가를 좌우하는 국가 온실가스 인벤토리의 체계적 작성과 국제적 수준의 인벤토리 품질의 중요성이 강조되는 계기가 되고 있다. 게다가 파리협정 이후 신기후체제 하에서는 모든 국가가 의무이행을 지게 됨에 따라, 앞으로 감축의무 이행에 대한 투명성을 높이는 검증체제의 고도화가 보다 중요한 사항이 될 전망이다.

이런 세계적인 흐름과 요구에 발맞춰 우리나라에서도 국내 산림탄소계정 체계 구축을 위한 기초 연구과제(교토의정서 대응 산림탄소계정 기반 구축 연구, 2007~2010, 산림청)를 통해 주요 수종별 탄소배출계수가 개발되었으며, 최근까지도 후속 과제(Post-2020 대응 산림탄소계정 체계 고도화, 2013~2016)를 추진하면서 국제 협약 동향, 산림탄소모델 개발 및 고도화, 목제품 탄소 계정 구축 등 산림탄소 계정 전반에 대한 연구가 수행되고 있다. 우리나라는 IPCC 기준 중, 가장 신뢰도 높은 Tier 3에 해당하는 수준으로 산림탄소 인벤토리 및 감축 잠재력 산정을 목표로 하고 있으며, 이를 위해 고사목 탄소 인벤토리 구축을 위한 계수 개발, 산림생태계 탄소순환모델 개발, 습지 및 산불지에 대한 국가 온실가스 인벤토리 작성, 산림 활동자료 구축 및 MRV(Measurement, Reporting and Verification) 상용화 등을 위한 노력을 지속적으로 하고 있다. 또한, 이런 노력은 다양한 모델 연구를 통한 미래 산림자원 변화 및 기후영향 예측에 기여하고 있다(Kim et al. 2014; Kim et al. 2017; Lee et al. 2015; Ryu et al. 2016).

탄소 인벤토리 및 계정을 기반으로 탄소역배출(Negative Emission, NE)을 산정하는 것도, 산림분야의 좋은 적응 옵션으로 고려될 수 있다. NE는 대기 중의 온실가스인 탄소를 흡수 및 고정하고, 이를 산림, 토양 등에 직접 격리하여 기후변화를 완화시키는 방안들을 말한다(Fuss et al. 2014). 산림과 관련된 탄소역배출은 조림 및 재조림(Afforestation and reforestation)을 통해 산림의 탄소 흡수량을 증가시켜 대기 중의 탄소를 나무에 축적시키는 방법, 탄소를 흡수한 나무를 생태 숯(Biochar)으로 만들어 토양으로 순환시키는 방법, 식물 기반 자재 또는 목재(Plant-based materials or wood)를 사용하여 만든 건물이나 제품 등에 탄소를 축적시키는 방법 등이 있다(McLaren 2012). 캐나다와 스웨덴처럼 산림면적이 높은 선진국에서는

벌기령에 다다른 산림을 집중적으로 관리하여 탄소역배출을 실시하고 있다. 벌기령에 다다른 산림 중 벌채에 적합한 지역을 선별하고, 생산된 목제를 가공하여 목제품(Harvested Wood Product, HWP)을 제작하는데 사용되며, 벌채지는 재조림하여 탄소 흡수량을 유지 및 증진시키고 있다. 산림부문의 탄소역배출 방법론들은 국외에서 다양하게 연구되어지고 있지만, 국내의 경우 국내 통계자료와 FAO 통계자료를 통해 HWP의 탄소 저장 및 배출의 변화를 평가하고 비교하는 연구만이 수행되었다(Choi and Joo 2011).

NE를 고려하였을 때, 산림에 탄소저장을 최대화(maximization)하는 것 보다는, 산림에서 목제품(HWP)을 생산하여 온실가스를 배출하는 자재를 대체함을 통해 탄소역배출을 최대화하는 산림탄소 최적화(optimization)를 구현하는 관리 전략이 필요하다. 벌채를 통해 산림 탄소흡수량이 감소하지만, 생산된 산림바이오매스와 HWP가 탄소배출계수가 높은 화석연료(원유: 19.7 C ton/TJ, 무연탄: 29.7 C ton/TJ)나 철강 등과 같은 탄소 다배출 재료를 대체함으로, 탄소배출량을 더 많이 줄인다면 기후변화 완화에 더 크게 기여하게 된다. 따라서 산림에서의 생산관리뿐만 아니라 생산된 목제품(HWP) 관리에 대한 정책, 모니터링, 통계구축 등도 중요하게 다루어질 필요가 있다.

4.5.4 산림재해

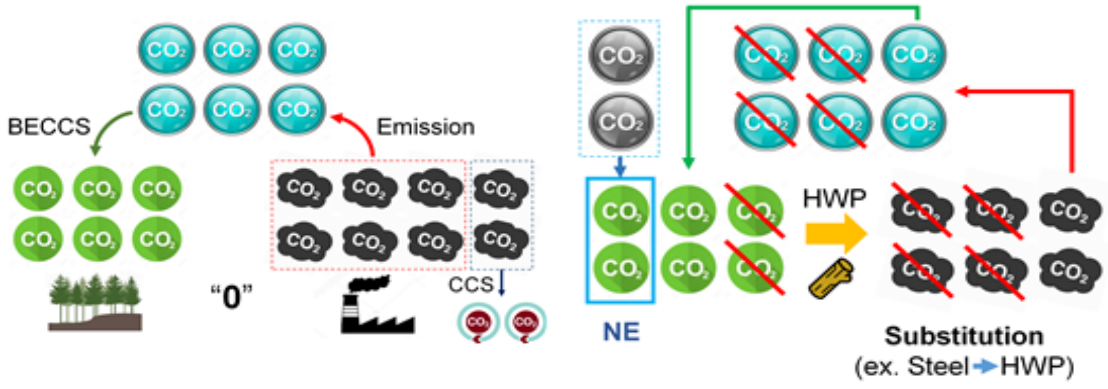
「한국 기후변화 평가보고서 2014」에서는 기후변화 적응 연구를 통해 미래에 예상되는 산림재해 위험 및 피해에 대응할 수 있어야 한다고 기술하였다. 산사태와 산불의 경우 예측정보를 개선하여 위험정보의 정확도를 높여야 한다고 제시하였으며, 병해충 측면에서도 변화 예측을 통한 방제체계 효율화 및 임지의 전략적 관리가 요구된다고 기술하였다.

4.5.4.1 산사태

산사태 재해위험과 취약성 저감을 위한 적응 옵션으로는 정보 고도화를 통한 예·경보 시스템 개선, 사방시설 등 인프라 확충, 산림관리를 통한 산림과 토양의 적응력 증진 등이 있다.

정보 측면에서, 정확한 기후변화 및 강우량 변화가 예측되고 산사태 발생에 대한 자료가 누적된다면 산사태에 대한 정확한 예측이 가능할 것으로 나타났다(이명진 등, 2013). 또한 레이더 자료를 이용한 국지적 산사태 발생 예보의 가능성을 평가하여 결과적으로 레이더 강우장을 이용할 경우 강우강도와 누적강우량의 분포상황을 정밀하게 추적할 수 있으며 산사태를 더 정밀하게 예측할 수 있는 것으로 나타났다(최윤석 등, 2013).

2011년 수도권 사례를 비롯하여 최근의 산사태로 인한 피해사례는 우리나라의 토지이용 특성 상 국지성 집중호우가



(a) (b)

그림 4.28 산림부문 탄소흡수의 최대화와 Negative Emission의 개념(김문일 등, 2017)

발생하면 언제 어디서라도 산사태가 발생할 수 있는 위험성이 있다는 점을 명백히 각인시켜 주었다. 산사태를 줄이기 위한 방법으로 사방댐 건설과 같은 구조적 대책이 대표적이었다. 그러나 기존의 사방댐 중심의 구조물 대책만으로는 막대한 비용과 오랜 기간이 요구된다는 점에서 돌발적으로 발생하는 산사태·토석류의 피해 예방에 한계가 있음이 시사되었다(김석우 등, 2013). 앞으로는 산사태정보시스템, 제도적 장치 등 비구조적 장치들이 많은 역할을 할 것으로 예상된다(차두송, 2016).

장기적으로는 재해에 강한 산림으로 식재하고 수목의 주근과 세근이 토양 내 균형적으로 발달시킬 수 있도록 관리하는 것이 재해 방지를 유도할 수 있는 산림생태계 관리가 될 수 있다(차두송, 2016).

4.5.4.2 산불

산불 발생위험과 취약성 저감을 위한 적응 옵션으로는 정보 고도화를 통한 산불발생 예·경보 시스템 고도화, 소방인력 및 인프라 확충, 산림 내 연료관리를 통한 대형산불 저감 등이 있다.

우리나라 전 지역에 대해서 산불 발생 위험도를 예측하기 위해서 기상청 디지털예보를 이용하여 정확도를 높인 연구가 있으며(원명수 등, 2012), 이중 최고기온과 실효습도를 적용하는 기상지수를 이용하여 산불발생확률식을 적용하였다. 이와 유사하게 국립산림과학원은 산불예보시스템을 개발하여 시군구별 실시간 산불위험정보를 전국에 웹서비스를 해 오고 있다. 또한 최근 들어 발생하는 산불발생 패턴 변화 및 기후변화에 대응하기 위하여 산불발생 확산모형의 개선을 시도하였다. 이는 2000년대 기후변화를 반영한 권역별 산불발생 알고리즘의 개발 및 적용, 기상에 의한 산불발생 확률 계산, 우리나라 주용 수종인 소나무림을 대상으로 '대형산불위험지역' 선정 등이 그 주요 내용이며, 이들 모든 정보는 '손에 잡히는 산불위험정보' 웹서비스(http://forestfire.kfri.go.kr/mobile)를 통해 제공받을 수 있다.

산불확산에 관여하는 여러인자들 중 지형과 기상인자는 산불행동특성을 결정하는데 중요한 역할을 하지만, 인위적인 관리가 불가능하다. 반면, 연료는 숲가꾸기, 솎아베기 등 산림시업이 가능하기 때문에 인간의 노력을 통해 대형산불을 막을 수 있는 유일한 인자이다. 따라서 산불 연료의 구조와 특징을 분석하여 관리하는 것이 중요하다(이선주 등 , 2019)

4.5.4.3 산림병해충

기후 변화에 따른 산림병해충 발생에 대응하기 위해서는 산림병해충 변화에 대한 예측과 이에 따른 산림 관리가 필요하다고 판단된다. 산림병해충 변화로는 산림병해충 발생 양상 변화 및 새로운 산림병해충 발생에 대한 예측을 포함한다.

첫 번째로 소나무재선충 매개충, 광릉긴나무좀, 솔잎혹파리, 솔껍질깍지벌레 등 주요 산림병해충 발생시기 예측 시스템 구축이 필요하다. 기술적으로 대부분의 곤충류 발생시기(우화시기) 예측은 기술적으로 가능하며 실제로 솔수염하늘소, 광릉긴나무좀 등 주요 산림해충의 우화시기 예측 모델은 구축되어 있다. 이를 토대로 발생시기 예측 시스템을 구축하여 시기 적절하게 주요 산림해충을 방제할 수 있는 시스템으로 방제를 효율화하여야 할 것이다. 두 번째로는 주요 산림병해충 발생위험도 분석을 통해 발생위험 임지를 인지하여 체계적인 대응을 하여야 할 것이다. 마지막으로 돌발산림병해충에 대한 장기적인 분석으로 앞으로 발생위험도가 높은 산림병해충군에 대한 탐색이 필요하다. 최근 임상변화와 기후변화로 인하여 국내 돌발성 산림병해충상은 크게 바뀌어져 왔다. 장기 자료를 바탕으로 기후변화 환경하에서 발생 위험도가 높은 돌발병해충에 대한 탐색이 필요하다.

또한 기후변화가 산림병해충상에 미치는 영향 분석 연구를 토대로 상대적으로 취약성이 높은 임지에 대한 관리 전략이 도출되어야 한다. 기후변화 환경하에서 산림병해충 대발생은 산림의 천이 방향과 속도에 지대한 영향을 미칠 수 있다. 기후변화에 의한 급격한 환경변화를 완화하기 위해서는 산림병해충에 취약한 임지를 선별하고 이를 우선적으로 산림생태계 측면에서 관리하는 전략이 수립되어야 할 것이다. 또한 병해충 피해의 확산을 방지하기 위해서는 수종 교체·다양화 등의 대안이 제시될 수 있다. 병해충 저항성을

가지며 지역 기후에 적합한 수종을 식재하고, 수종을 다양화하여 특정 병해충에 따른 피해를 최소화하는 것이 필요하다.

겨울기온의 상승과 함께 기록적인 저·고온 및 극심한 가뭄 등 이상기후현상이 빈번하게 나타나면서 초래되는 수목생육환경의 변화로 인해 특히 온대 중북부 및 한대성 수종에서 병원성이 낮은 균류 또는 2차 해충에 의한 피해가 증가할 것으로 예상된다. 산림청은 숲의 건강성 유지를 목표로 2010년부터 전국 소나무류 임지를 대상으로 적정임분밀도를 유지하기 위한 적정 및 강도의 솎아베기(간벌) 사업(피해저감사업)을 전국적으로 실시하고 있으며, 사업물량은 2013년 6,509 ha, 2014년 4,370 ha이다(산림청, 2013; 산림청, 2014). 아울러 기후변화가 산림병해충에 미치는 영향에 대한 연구를 체계적이고 장기적으로 실시할 필요가 있다.

4.5.5 BECCS/U(바이오에너지 탄소포집 및 저장/활용)

이번 평가보고서에서 「한국 기후변화 평가보고서 2014」에서는 다뤄지지 않았던 BECCS/U를 적응옵션으로 다루었다.

Bio-energy with carbon capture and storage/use, BECCS/U)는 1990년대부터 논의되기 시작했으며, 바이오에너지와 CCS를 결합한 온난화 방지 기술, 온실가스 감축 기술이다. 임목과 같은 자연계 바이오매스는 공기 중의 CO_2를 식물의 탄소동화작용을 통하여 고정한 것이기 때문에, 바이오매스를 연소하는 과정에서 배출되는 CO_2는 화석연료가 연소될 때 나오는 CO_2와는 다르게 취급되므로, 탄소배출이 0으로 산정된다.

바이오매스에서 에너지를 얻고 그 과정에서 배출되는 CO_2를 포집하여 영구 저장하거나 다른 원료로 활용한다면 (BECCS/U), 이론적으로 대기 중 이산화탄소 농도 감소(NE)에 기여할 수 있다.

독일, 오스트리아, 캐나다, 핀란드 등과 같은 산림 선진국에서는 산림 바이오매스를 활용한 BECCS/U 연구 및 현행화가 활발하게 진행되고 있다. 우리나라는 1970년대 이후 국가적인 조림사업과 보호를 통해 일제강점기와 한국전쟁으로 파괴된 산림을 성공적으로 복구했고, 현재는 이를 효율적으로 관리 및 활용하기 위한 정책들을 수립하고 있다. 국립 산림과학원의 분석 의하면 우리나라 전체 산림의 총 바이오매스는 804백만톤이며, 벌채량 중 제재목과 원목으로 이용되고 남은 목질부 바이오매스 중, 매년 시장으로 공급 가능한 산림 바이오매스 자원은 약 1.3백만톤/년이다(손영모 등, 2014). 이를 석유환산량으로 전환하면 약 585천 toe/년으로, 연료용 무연탄 116만톤(250만톤CO_2 배출)에 해당하는 에너지다. 즉, 산림 분야의 BECCS/U 시스템을 구축하기 위한 기본적인 산림자원은 충분한 것으로 판단된다. 국제응용시스템분석연구소(International Institute for Applied Systems Analysis, IIASA) 연구팀은 우리나라 산림분야의 BECCS 잠재량을 평가한 바 있으며, 연간 6.4백만 GJ의 전기생산과 86만 톤의 CO_2 배출 저감이 가능할 것으로 추정하였다(Kraxner et al., 2014).

산림 바이오매스를 활용한 BECCS/U는 산림관리 및 시업을 통해 발생하는 부산물(경제성이 낮은 줄기, 가지 등)을 활용하기 때문에 추가적인 환경파괴를 유발하지 않으며, 열병합발전소(CHP)를 통해 에너지를 생산함으로써 기술적 진입장벽이 낮은 장점이 있다. 최근 미국을 대상으로 한 연구에서는 석탄발전소를 바이오매스를 함께 활용할 수 있는 혼소발전으로 변경하는 것이, 탄소배출저감 효과뿐만 아니라 경제적인 이익과 고용증진에도 기여할 수 있다는 전망이 도출되었다(Patrizio et al., 2018). 이러한 연구 결과는 저탄소사회 및 저탄소 에너지시스템으로의 전환이 환경과 기후변화 측면뿐만 아니라, 경제적으로도 긍정적인 영향을 미칠 가능성이 있다는 것을 시사한다.

4.6 결론

산림은 우리나라는 전체 국토의 64%를 차지하고 있으며, 산림휴양, 생물다양성 보전, 수자원 저장 및 공급, 열섬완화, 토사유출방지 등 다양한 공익적 기능을 제공하여 국민의 삶의 질과 사회 및 경제 발전에 기여하고 있다. 이러한 산림의 기능은 기후변화로 인해 영향을 받기 때문에, 기후변화가 산림에 미치는 영향 정확하게 평가하고, 이를 기반으로 합리적인 적응계획을 수립하는 것은 산림생태계 보존 뿐만

아니라 국가의 UN 지속가능발전목표(Sustainable Development Goals, SDGs) 달성에 필수적이다.

본 연구를 통해 기후변화가 우리나라 산림에 미치는 영향을 종합적인 관점에서 검토할 수 있었으며, 모든 부분에서 기후변화가 영향을 미치고 있는 것이 확인되었다.

다양한 규모의 시공간 관측자료를 기반으로 기후변화의 영향을 평가한 결과, 기온 및 강수량의 변화에 따라 지역별, 수종별 산림 생장의 변화가 나타났으며(견고한 동의), 넓은 지역에서 침엽수종의 생장감소가 관측되고 있다(중간적 동의). 장기적인 기온상승에 따라 산림구성과 개화시기 등의 변화가 나타났으며(견도한 동의), 특히 아고산 침엽수림의 감소가 두드러졌다(견고한 동의). 산림탄소량은 성공적인 국가조림 사업을 통해 과거에 비해 크게 증가한 것으로 확인되었으며(견고한 동의), 임령의 증가와 기후변화 영향에 의해 탄소 흡수 및 토양 탄소저장량 패턴의 변화가 보이는 것으로 나타났다(중간적 동의). 장기적으로 산사태와 산불 등 산림재해 면적과 복구비용이 지속적으로 증가하고 있으며, 계절별 극한 기후에 따라 대형 산림재해 발생의 빈도와 가능성이 증가하고 있다(중간적 동의).

현재 연구를 기반으로 미래 기후변화 영향을 예측한 결과 산림생장 부문은 기후변화에 따른 기온증가로 인해 전국적으로 침엽수림의 생장감소가 예상되나 일부 고산지대에서는 증가할 것으로 예측되며(견고한 동의), 반면 활엽수림의 생장은 보다 증가할 것으로 추정되었다(중간적 동의). 전반적인 기온상승과 최한월 기후의 변화로 고산 및 아고산 식생이 경쟁에서 밀려날 것으로 예측되고 있으며(견고한 동의), 활엽수림의 증가 및 해안을 중심으로한 온난대 상록수림의 북상이 전망되고 있다(중간적 동의). 산림탄소는 임목 생장에 따라 전체적인 탄소저장량은 계속해서 증가할 것으로 추정되나, 기온증가가 토양 유기물 분해에 영향을 미쳐 토양탄소 저장량은 감소할 것으로 추정되고 있다.(중간적 동의). 그러나 임령과 기온의 증가에 의해 연년 탄소흡수량은 현재보다 감소할 것으로 추정되었다(견고한 동의). 산림재해 측면에서는 연 변동성이 큰 수문학적 변화에 따라 재해 발생의 연편차 및 지역편차가 크게 나타날 것으로 예상되며(중간적 동의), 병해충 북상과 대형 산불 발생 등에 대한 잠재적 위험성은 증가할 것으로 전망되고 있다(제한적 동의).

기후변화에 대한 취약성에 대응하기 위해서는 산림의 적응력을 높이고 생장량을 유지하기 위한 적극적인 관리가 필요할 것으로 사료된다(중간적 동의). 특히 재해 측면에서는 토층, 수목 밀도, 사방시설, 연료량, 병해충방제 등 재해 특성에 맞는 관리 방안이 요구된다(제한적 동의).

우리나라의 국가산림자원조사 시스템은 산림생태계와 자원의 변화를 관측하고 분석하며, 국가 및 지역규모의 통계를 구축하는데는 매우 유용하나, 기후변화의 영향을 분석하고 전망하기 위한 활용성 측면에서는 지속적인 검토와 보완이 필요할 것으로 판단된다. 이는 기후변화 영향 및 취약성 평가의 신뢰도를 높이고, 합리적인 관리계획과 적응대책을 수립하는데 크게 기여할 수 있을 것으로 사료된다.

4.7 참고문헌

강길남, 박관수, 이상진, 이항구, 김준성, 김연태, 2010: 충남 공주지역 잣나무림과 낙엽송림의 지상부와 뿌리에 의한 탄소고정, *농업과학연구*, 37(1), 45-52.

권선순, 최선희, 이상돈, 2012: 기후변화에 따른 수도권 산림의 순일차생산량과 토양탄소저장량의 시공간적 변화 추정, *환경영향평가*, 21(5), 757-765.

국립공원연구원, 2012: 국립공원(계룡산-덕유산)내 참나무 시들음병 발생현황 및 확산예측 분석.

국립산림과학원, 2008: 연구사업보고서.

국립산림과학원, 2010: 연구사업보고서.

국립산림과학원, 2011a: 연구사업보고서.

국립산림과학원, 2011b: 연구사업보고서.

국립산림과학원, 2013: 연구사업보고서.

국립산림과학원, 2015: 기후변화에 따른 산림생태계 영향영가 및 적응 연구 (2009-2014).

국립산림과학원, 2018: 산림병해충 발생예찰조사 연보 2018.

기상청, 2011, 기상청 보도자료.

김문일, 유소민, 김나희, 이원아, 함보영, 송철호, 이우균, 2017: 기후변화가 한국 산림에 미치는 영향과 관리 전략, *환경생물*, 35(3), 413-425.

김문일, 이우균, 최솔이, 김창길, 권태성, 2014: 미래 기후변화 시나리오에 따른 우리나라 소나무 임부의 재적 추정, *한국산림과학회지* (구 한국임학회지), 103(1), 105-112.

김석우, 전근우, 김진학, 김민식, 김민석, 2012: 2011년 집중호우로 인한 산사태 발생특성 분석, *한국임학회지*, 101(1), 28-35.

김석우, 전근우, 김경남, 김민식, 김민석, 이상호, 서정일, 2013: 산사태 취약지역 지정 · 관리 제도의 의의와 향후 과제, *Journal of Forest Science*, 29(3), 237-248.

김석우, 전근우, 김민석, 김민식, 김진학, 이동균, 2013: 우리나라에 있어서 산사태 유발강우의 강도-지속시간 한계, *한국임학회지*, 102(3), 463-466.

김성훈, 장동호, 2013: 기후변화에 따른 강원 산지지역의 지형요소별 임상변화 분석 -다중시기 위성영상 및 ASTER DEM을 이용하여-, *한국지형학회*, 20(2), 117-128.

김은숙, 이지선, 박고은, 임종환, 2019: 아고산 침엽수림 분포 면적의 20 년간 변화 분석, *한국산림과학회지* (구 한국임학회지), 108(1), 10-20.

김장수, 장동호, 2012: 다중시기 위성영상과 ASTER DEM 자료를 이용한 충남해안지역의 임상 변화 분석, *한국지형학회지*, 19(1), 69-81.

김점수, 2009: 기후변화에 따른 강원도 임산물 생산 환경 변화 조사, 강원발전연구원.

김찬수, 박지훈, 장동호, 2011: 위성영상과 임상통계를 이용한 충남해안지역의 기후변화에 따른 임상 변화, *한국지형학회지*, 20(4), 523-538.

김호걸, 이동근, 모용원, 길승호, 박찬, 이수재, 2013: MaxEnt 모형을 이용한 기후변화에 따른 산사태 발생가능성 예측, *환경영향평가*, 22(1), 39-50.

박민지, 박근애, 이용준, 김성준, 2010: 미래 산림식생변화 예측을 위한 개선된 CA-Markov 기법의 적용, *한국농공학회논문집*, 52(1), 61-68.

박선욱, 구경아, 공우석, 2016: 기후변화에 따른 한반도 난대성 상록활엽수 잠재서식지 분포 변화, *대한지리학회지*, 51(2), 201-217.

박수진, 주우영, 이수연. 2015: 한국의 산사태취약지역과 사방지의 환경요인 분석, *국토지리학회지*, 49(2), 267-285.

박종철, 양금철, 장동호, 2010: 기후변화에 따른 난온대 상록활엽수림대의 이동에 관한 연구, *기후연구*, 5(1), 29-41.

박찬우, 이종열, 이명종, 김춘식, 박관수, 김래현, 손요환, 2013: 한국형 산림토양탄소모델 (KFSC Model) 을 이용한 RCP 8.5 기후변화 시나리오 하에서의 국내 소나무림 토양탄소 저장량 장기 변화 추정 연구, *한국기후변화학회지*, 4(2), 77-93.

부문별 기후변화 영향 및 취약성 통합평가 모형 개발 연구단(MOTIVE), 2016: 2차년도 연차보고서

부문별 기후변화 영향 및 취약성 통합평가 모형 개발 연구단(MOTIVE), (2017: 3차년도 연차보고서

부문별 기후변화 영향 및 취약성 통합평가 모형 개발 연구단(MOTIVE), 2018: 4차년도 연차보고서

산림청, 2011: 임업통계연보, 2010. 산림청, 대전, 대한민국

산림청, 2013: 임업통계연보, 2010. 산림청, 대전, 대한민국

산림청, 2014: 임업통계연보, 2010. 산림청, 대전, 대한민국

산림청, 2018: 임업통계연보 2017. 산림청, 대전, 대한민국

산림청, 2018: 제 6차 산림기본계획 2018년-2037년. 산림청, 대전, 대한민국

산림청, 2019: 임업통계연보 2018. 산림청, 대전, 대한민국

성미경, 임규호, 최은호, 이윤영, 원명수, 구교상, 2010: 기후변화에 따른 한반도 산불 발생의 시공간적 변화 경향, *대기*, 20(1), 27-35.

손영모, 김래현, 이경학, 표정기, 김소원, 황정순, 이선정, 박현, 2014: 한국 주요 수종별 탄소배출계수 및 바이오매스 상대생장식. 국립산림과학원, 서울시, 대한민국. pp. 47.

손영모, 이경학, 김래현, 표정기, 박인협, 손요환, 이영진, 김춘식, 2010: 산림 온실가스 인벤토리를 위한 주요 수종별 탄소배출계수, 국립산림과학원 연구보고 10-25, pp. 89.

손영모, 이선정, 김소원, 황정순, 김래현, 박현, 2014: 우리나라 산림 바이오매스 자원량 평가 및 지도화, *한국산림과학회지*(구 한국임학회지) 103(3), 431-438.

신만용, 정상영, 한원성, 이돈구, 2008: 입지유형별 미기후가 천연 활엽수림의 임목 생장에 미치는 영향, *한국농림기상학회지*, 10(1), 9-16.

원명수, 윤석희, 이우균, 2011a: 2000-2008년 봄철 황사와 산불발생의 관계 분석, *한국농림기상학회지*, 13(3), 148-

156.

원명수, 윤석희, 구교상, 김경하, 2011b: 1990년대와 2000년대 건조계절의 산불발생 시공간 변화 분석, *한국지리정보학회지*, 14(3), 150-162.

원명수, 윤석희, 장근창. 2016: 2000 년대 기후변화를 반영한 봄철 산불발생확률모형 개발, *한국농림기상학회지*, 18(4), 199-207.

원명수, 장근창, 윤석희, 2018: 봄철과 가을철의 기상에 의한 전국 통합 산불발생확률 모형 개발, *한국농림기상학회지*, 20(4), 348-356.

오치영, 김경탁, 최철웅, 2009: SPOT5영상과 GIS분석을 이용한 인제 지역의 산사태 특성 분석, *대한원격탐사학회지*, 25(5), 445-454.

오현주, 2010: 항공사진을 이용한 산사태 탐지 및 인공신경망을 이용한 산사태 취약성 분석, *대한원격탐사학회지*, 26(1), 47-57.

유동훈, 이우균, 송철호, 임철희, 이슬기, 박동범, 2016: 벌기령 단축이 미래 산림의 이산화탄소 흡수량에 미치는 영향 분석, *한국기후변화학회지*, 7(2), 157-167.

유성진, 이우균, 손요환, 2012: 생태계 모형과 시공간 환경정보를 이용한 우리나라 식생 탄소 수지 추정, *대한원격탐사학회지*, 28(1), 145-159.

유소민, 임철희, 김문일, 송철호, 김세진, 이우균, 2020: 기후변화에 따른 멸종위기 침엽수종 분포 변화 예측, *한국기후변화학회지*, 11(3).

윤수향, 이상신, 2017: 기후변화 취약성 평가 분석도구 개발에 관한 연구: 충남지역 산불 취약성을 중심으로, *한국기후변화학회지*, 8(3), 275-285.

윤홍식, 이동하, 서용철, 2009: GIS 기법 및 발생자료 분석을 이용한 산사태 위험지도 작성, *한국지리정보학회지*, 12(4), 59-73.

윤충원, 김혜진, 이병천, 신준환, 양희문, 임종환, 2011: 우리나라의 산림식생에 대한 군락형 분류, *한국임학회지*, 100(3), 504-521.

이대성, 남영우, 최원일, 박영석, 2017: 우리나라에서 소나무재선충병 초기 발생지의 환경 특성 분석, *생태와 환경*, 50(4), 374-380.

이동근, 박찬, 오영출. 2010: 기후변화에 따른 식생과 토양에 의한 탄소변화량 공간적 분석, *농촌계획*, 16(4), 109-116.

이병두, 유계선, 김선영, 김경하, 2012: 로지스틱 회귀모형을 이용한 산불발생확률모형 개발, *한국임학회지*, 101(1), 1-6.

이상민, 김경덕, 송성환, 2011: 탄소가치를 고려한 산림관리 최적화 방안, *농촌경제*, 34(4), 59-81.

이상철, 최성호, 이우균, 박태진, 오수현, 김순아, 2011: 기후변화 시나리오에 따른 산림분포 취약성 평가, *한국임학회지*, 100(2), 256-265.

이상태, 박문섭, 전향미, 박진영, 조현서, 2008: 기후인자가 Pinus densiflora 의 연륜 생장에 미치는 영향, *한국농림기상학회지*, 10(4), 177-186.

이선정, 한새롬, 윤태경, 정혜근, 노남진, 조우용, 박찬우, 고수인, 한승현, 손요환, 2012: 실외 실험적 온난화 처리가 굴참나무 묘목의 생장에 미치는 영향, *한국임학회지*, 101(4), 722-728.

이선정, 한새롬, 윤태경, 조우용, 한승현, 정예지, 손요환, 2013: 실외 실험적 온난화가 3년생 굴참나무 묘목의 엽록소 함량 및 순광합성률 변화에 미치는 영향, *한국임학회지*, 102(1), 156-160.

이선주, 김성용, 이병두, 이영진. 2019: 잣나무림의 산불연료량 예측을 위한 동적생장모델 개발, *한국방재학회 논문집*, 19, 121-130.

이승우, 김기홍, 윤차영, 유한중, 홍성재, 2012: 데이터베이스 구축을 통한 산사태 위험도 예측식 개발, *한국지반공학회지*, 28(4), 23-39.

이승규. 2009. “주요 산림병해의 발생 동향과 기후변화.” Forest Information 기후변화와 산림 pp. 71-75.

이시영, 박흥석, 김영웅, 윤화영, 김종갑, 2011: 통계자료에 의한 기상과 산불특성의 관련성 -전라남도지방을 중심으로-, *경상대학교 농업생명과학연구*, 45(4), 29-35.

이명진, 이사로, 전성우, 김근한, 2013: GCI(Geospatial Correlative Integration) 및 확률강우량을 고려한 인제 지역 산사태 취약성도 작성, *환경정책연구*, 12(3), 21-47.

이종열, 한승현, 김성준, 이소혜, 손영모, 손요환, 2015: 국내 산림의 간벌에 따른 직경 생장량 및 탄소 저장량변화에 관한 메타 분석, *J. Korean For. Soc.* 104(4), 527-535.

이종열, 한승현, 김성준, 장한나, 이명종, 박관수, 손요환, 2015: RCP 8.5 기후변화 시나리오에 따른 소나무림과

굴참나무림의 산림 탄소 동태 변화 추정 연구, *한국농림기상학회지*, 17(1), 35-44.

임종환, 박고은, 신만용, 2016: 연도별 생장도일의 변화가 신갈나무의 잠재분포와 생장에 미치는 영향, *한국농림기상학회지*, 18(3), 109-119.

임채현, 김창영, 2018: 제주시와 서귀포시에서의 기후변화에 따른 산불 취약성 평가 연구, *한국도시환경학회지*, 18(2), 217-223.

정지윤, 우성호, 손락훈, 윤진호, 정지훈, 이석준, 이병두, 2018: 대규모 기후인자와 관련된 우리나라 봄철 산불 위험도 변동, *대기*, 28(4), 457-467.

조우용, 손요환, 정혜근, 노남진, 윤태경, 한새롬, 이선정, 이수경, 이 궁, Lixia Jin, 2011: 실외 인위적 온난화 처리가 굴참나무 묘목의 엽록소 함량 및 순광합성률에 미치는 영향, *한국임학회지*, 100(4), 733-737.

차두송, 2016: 산사태 예방을 위한 산림관리 전략. 방재저널, 18(1), 13-14.

차성은, 임철희, 김지원, 김문일, 송철호, 이우균, 2018: 수도권 집중호우에 따른 산사태 발생 위험지역 분석, *한국지형공간정보학회지*, 26(3), 3-11.

천정화, 이창배, 2013: 소나무의 지리적 분포 및 생태적 지위 모형을 이용한 기후변화 영향 예측, *한국농림기상학회지*, 15(4), 219-233.

최고미, 김문일, 이우균, 강현우, 정동준, 고은진, 김찬회, 2014: 기후와 지형 조건을 반영한 우리나라 주요 수종의 반경 생장 반응 예측, *한국기후변화학회지*, 5(2), 127-137.

최원일, 고상현, 이승규, 2011: 2010년도 산림병해충발생 예찰조사 연보, 삼성에드컴, 서울.

최원일, 고상현, 이승규, 2012: 2011년도 산림병해충발생 예찰조사 연보, 삼성에드컴, 서울.

최원일, 고상현, 이승규, 2013: 2012년도 산림병해충발생 예찰조사 연보, 사회복지법인 나우리, 서울.

최원일, 고상현, 이승규, 2014: 2013년도 산림병해충발생 예찰조사 연보, 삼성에드컴, 서울.

최윤석, 최천규, 김경탁, 김주훈, 2013: 국지적 산사태 발생 예보를 위한 레이더 자료의 활용성 평가, *한국습지학회지*, 15(2), 191-201.

한국농촌경제연구원, 2018: 기후변화에 따른 산림병해충 영향과 대응과제.

한국환경정책평가연구원, 2015: 기후변화와 생태계 변화에 기반한 침입외래종의 관리 전략.

황의순, 정대석, 김경수, 이문세, 송영석, 2013: 통계기법에 의한 산사태발생지역 이암 풍화토층의 토질특성 분석, *한국토목섬유학회논문집*, 12(3), 31-41.

홍지연, 심창섭, 이명진, 백경혜, 송원경, 전성우, 박용하, 2011: 위성영상으로 분석한 장기간 남한지역 순일차생산량 변화: 기후인자의 영향, *대한원격탐사학회지*, 27(4), 467-480.

Bentz, B. J., J. Regniere, C. J. Fettig, E. M. Hansen, J. L. Hayes, J. A. Hicke, R. G. Kelsey, J. F. Negron, and S. J. Seybold, 2010: Climate Change and Bark Beetles of the Western United States and Canada: Direct and Indirect Effects, *BioScience*, 60(8), 602-13.

Byun, J. G., W. K. Lee, M. Kim, D. A. Kwak, H. Kwak, T. Park, T., W. H. Byun, Y. Son, J. K. Choi, Y. J. Lee, J. Saborowski, D. J. Chung, and J. H. Jung, 2013: Radial growth response of Pinus densiflora and Quercus spp. to topographic and climatic factors in South Korea, *Journal of Plant Ecology*, 6(5), 380-392.

Chen, W., J. Chen, J. Liu, and J. Cihlar, 2000: Approaches for reducing uncertainties in regional forest carbon balance, *Global Biogeochemical Cycles*, 14(3), 827-838.

Choi, S., W. K. Lee, D. A. Kwak, S. Lee, Y. Son, J. H. Lim, amd J. Saborowski, 2011: Predicting forest cover changes in future climate using hydrological and thermal indices in South Korea, *Climate Research*, 49(3), 229-245.

Choi, S. I. and R. W. Joo, 2011: An estimation of carbon stocks in harvested wood products in Korean houses, *Journal of Korean Society of Forest Science*, 100(4), 708-714.

Choi, W. I., Y. K. Park, Y. S. Park, H. P. Lee, and M. I. Ryoo, 2011: Changes in voltinism in a pine moth Dendrolimus spectabilis (Lepidoptera: Lasiocampidae) population: implications of climatic change, *Applied Entomology and Zoology*, 46(3), 319-325.

Dale, V. H., L. A. Joyce, S. McNulty, R. P. Neilson, M. P. Ayres,

M. D. Flannigan, and D. Simberloff, 2001: Climate change and forest disturbances: climate change can affect forests by altering the frequency, intensity, duration, and timing of fire, drought, introduced species, insect and pathogen outbreaks, hurricanes, windstorms, ice storms, or landslides, *BioScience*, 51(9), 723-734.

Davi, H., Dufrêne, E., Francois, C., Le Maire, G., Loustau, D., Bosc, A., S. Rambal, A. Granierd, and E. Moors, 2006: Sensitivity of water and carbon fluxes to climate changes from 1960 to 2100 in European forest ecosystems, *Agricultural and Forest Meteorology*, 141(1), 35-56.

Fang, J., and M. J. Lechowicz, 2006: Climatic limits for the present distribution of beech (Fagus L.) species in the world, *Journal of Biogeography*, 33(10), 1804-1819.

Fuss, S., J. G. Canadell, G. P. Peters, M. Tavoni, R. M. Andrew, P. Ciais, and C. Le Quéré, 2014: Betting on negative emissions, *Nature climate change*, 4(10), 850.

Gaylord, M. 2014: Climate Change Impacts on Bark Beetle Outbreaks and the Impact of Outbreaks on Subsequent Fires, ERI working paper 31. Ecological Restoration Institute and Southwest Fire Science Consortium, Northern Arizona University

Gomi, T. 1995: Effect of temperature on diapause response to photoperiod in Hyphantria cunea with special reference to local divergence, *Applied Entomology and Zoology*, 30(3), 490-492.

Gomi, T., M. Muraji, and M. Takeda, 2004: MitochondrialDNA analysis of the introduced fall webworm, showing its shift in life cycle in Japan, *Entomological Science*, 7, 183-188.

Gomi, T., 2007. Seasonal adaptations of the fall webworm Hyphantria cunea (Durry) (Lepidoptera: Arctiidae) following its invasion of Japan, *Ecological Research*, 22, 855-861.

Han, S., H. Chung, N. J., Noh, S. J. Lee, W. Jo, T. K. Yoon, K. Yi, C. Park, S. Ko, and Y. Son, 2014: Effect of open-field experimental warming on the leaf phenology of oriental oak (Quercus variabilis) seedlings, *Journal of Plant Ecology*, 7(6), 559-566.

IPCC, 2019: Climate Change and Land: an IPCC special report on climate change, desertification, land degradation, sustainable land management, food security, and greenhouse gas fluxes in terrestrial ecosystems [P.R. Shukla, J. Skea, E. Calvo Buendia, V. Masson-Delmotte, H.-O. Pörtner, D. C. Roberts, P. Zhai, R. Slade, S. Connors, R. van Diemen, M. Ferrat, E. Haughey, S. Luz, S. Neogi, M. Pathak, J. Petzold, J. Portugal Pereira, P. Vyas, E. Huntley, K. Kissick, M. Belkacemi, J. Malley, (eds.)]. In press.

Jösson, A. M., G. Appelberg, S, Harding, and L. Bäring, 2009: Spatio-temporal impact of climate change on the activity and voltinismof the spruce bark beetle, Ips typographus, *Global Change Biology*, 15, 486-499.

Kim, M. S., N. B. Klopfenstein, Y. Ota, S. K. Lee, K. S. Woo, and S. Kaneko, 2010: White pineblister rust in Korea, Japan and other Asian regions: comparisons and implications for North America, *Forest Pathology*, 40(3-4), 382-401.

Kim, H. G., D. K. Lee, C. Park, S. Kil, Y. Son, and J. H. Park, 2015: Evaluating landslide hazards using RCP 4.5 and 8.5 scenarios, *Environmental earth sciences*, 73(3), 1385-1400.

Kim, M., F. Kraxner, Y. Son, S. W. Jeon, A. Shvidenko, D. Schepaschenko, D., B. Y. Ham, C. H. Lim, S. C. Song, M. Hong, and W. K. Lee, 2019: Quantifying Impacts of National-Scale Afforestation on Carbon Budgets in South Korea from 1961 to 2014, *Forests*, 10(7), 579.

Kim, M., W. K. Lee, Y. Son, S. Yoo, G. M. Choi, and D. J. Chung, 2017: Assessing the impacts of topographic and climatic factors on radial growth of major forest forming tree species of South Korea, *Forest ecology and management*, 404, 269-279.

Kim, M., W. K. Lee, G. M. Choi, C. Song, C. H. Lim, J. Moon, D. Piao, F. Kraxner, A. Shividenko, and N. Forsell, 2017:

Modeling stand-level mortality based on maximum stem number and seasonal temperature, *Forest ecology and management*, 386, 37-50.

Kim, M., B. Y. Ham, F. Kraxner, A. Shvidenko, D. Schepaschenko, A. Krasovskii, T. Park, and W. K. Lee, 2020: Species-and elevation-dependent productivity changes in East Asian temperate forests, *Environmental Research Letters*, 15(2020), 034012

Kim, S., C. H. Lim, G. Kim, J. Lee, T. Geiger, O. Rahmati, O., ... & W. K. Lee, 2019: Multi-temporal analysis of forest fire probability using socio-economic and environmental variables, *Remote Sensing*, 11(1), 86.

Koo, K. A., S. U. Park, W. S. Kong, S. Hong, I. Jang, I., and C. Seo, 2017: Potential climate change effects on tree distributions in the Korean Peninsula: Understanding model & climate uncertainties, *Ecological modelling*, 353, 17-27.

Kraxner, F., K. Aoki, S. Leduc, G. Kindermann, S. Fuss, J. Yang, Y. Yamagata, K.I. Tak, and M. Obersteiner, 2014: BECCS in South Korea—analyzing the negative emissions potential of bioenergy as a mitigation tool, *Renewable Energy*, 61, 102-108.

Krinner, G., N. Viovy, N. de Noblet-Ducoudré, J. Ogée, J. Polcher, P. Friedlingstein, P., P. Ciais, S. Sitch, and I. C. Prentice, 2005: A dynamic global vegetation model for studies of the coupled atmosphere-biosphere system, *Global Biogeochemical Cycles*, 19(1).

Kwon, T. S., Y. K. Park, K. S. Oh, Y. D. Kwon, S. C. Shin, C. S. Kim, and H. P. Lee, 2002: Increase in the number of generations in Dendrolimus spectabilis (Butler)(Lepidoptera:Lasiocampidae) in Korea, *Journal of Korean Forestry Society*, 91(2), 149-155.

Lee, J. S., R. Haack, R., and W. I. Choi, 2011a: Attack pattern of Platypuskoryoensis (Coleoptera:Platypodidae) in relation to crown die back of Mongolian oak in Korea, *Environmental Entomology*, 40, 1363-1369.

Lee, J. S., I. K. Kim, S. H. Koh, S. J. Cho, S. J. Jang, S. H. Pyo, and W. I. Choi, 2011b: Impact of minimum winter temperature on egg mortality of Lycorma delicatula(Hemiptera: Fulgoridae), *Journal of Asia-Pacific Entomology*, 14(1), 123-125.

Lee, J., T. K. Yoon, S. Han, S. Kim, M. J. Yi, G. S. Park, C. Kim, Y. M. Son, R. Kim, and Y. Son, 2014: Estimating the carbon dynamics of South Korean forests from 1954 to 2012, *Biogeosciences*, 11, 4637-4650,

Lee, J., C. H. Lim, G. S. Kim, A. Markandya, S. Chowdhury, S. J. Kim, W. K. Lee, and Y. Son, 2018: Economic viability of the national-scale forestation program: The case of success in the Republic of Korea, *Ecosystem services*, 29, 40-46.

Lim, C. H., S. Yoo, Y. Choi, S. Jeon, Y. Son, and W. K. Lee, 2018: Assessing climate change impact on forest habitat suitability and diversity in the Korean Peninsula, *Forests*, 9(5), 259.

Lim, C. H., Y. S. Kim, M. Won, S. K. Kim, and W. K. Lee, 2019: Can satellite-based data substitute for surveyed data to predict the spatial probability of forest fire? A geostatistical approach to forest fire in the Republic of Korea, Geomatics, *Natural Hazards and Risk*, 10(1), 719-739.

Maloney, P. E., 2011: Incidence and distribution of white pine blister rust in the high-elevation forests of California, *Forest Pathology*, 41(4), 308-316.

McLaren, D. 2012: A comparative global assessment of potential negative emissions technologies, *Process Safety and Environmental Protection*, 90(6), 489-500.

Nam, Y. W., W. I. Choi, D. S. Won, and J. K. Kim, 2013a: Density related plasticity in stand-level spatial distribution of the ambrosia beetle, Platypuskoryoensis (Coleoptera:Curculionidae), *Population Ecology*, 55, 3-10.

Nam, Y. W., S. H. Koh, D. S. Won, J. K. Kim, and W. I. Choi, 2013b: An empirical predictive model of the flight period of the ambrosia beetle Platypuskoryoensis (Coleoptera:Platypodinae), *Applied Entomology and Zoology*, 48, 515-524.

Nam, Y. and W. I. Choi, 2014: An Empirical Predictive Model

for the Spring Emergence of Thecodiplosis japonensis (Diptera: Cecidomyiidae): Model Construction and Validation on the Basis of 25 Years of Field Observation Data, *Journal of Economic Entomology*, 107(3), 1136-1141.

Neilson, R. P. and Marks, D. 1994: A global perspective of regional vegetation and hydrologic sensitivities from climatic change. *Journal of vegetation science*, 5(5), 715-730.

Park, C. G., D. S. Kim, S. M. Lee, Y. S. Moon, Y. J. Chung, and D. S. Kim, 2014: A forecasting model for the adult emergence of overwintered Monochamus alternatus (Coleoptera: Cerambycidae) larvae based on degree-days in Korea, *Applied entomology and zoology*, 49(1), 35-42.

Patrizio, P., S. Leduc, F. Kraxner, F., S. Fuss, G. Kindermann, S. Mesfun, K. Spokas, A. Mendoza, N. M. Dowell, E. Wetterlund, J. Lundgren, E. Dotzauer, P. Yowargana and M. Obersteiner, 2018: Reducing US coal emissions can boost employment, *Joule*, 2(12), 2633-2648.

Piao, D., M. Kim, G. M. Choi, J. Moon, H. Yu, W. K. Lee, S. W. Wang, S. W. Jeon, Y. Son, Y. M. Son, and G. Cui, 2018: Development of an Integrated DBH Estimation Model Based on Stand and Climatic Conditions, *Forests*, 9(3), 155.

Sitch, S., B. Smith, I. C. Prentice, A. Arneth, A. Bondeau, W. Cramer, ... and K. Thonicke, 2003: Evaluation of ecosystem dynamics, plant geography and terrestrial carbon cycling in the LPJ dynamic global vegetation model, *Global Change Biology*, 9(2), 161-185.

Smith, E. K., Resler, L. M., Vance, E. A., Carstensen L. W. Jr., and Kolivras, K. N., 2011: Blister Rust Incidence in Treeline White bark Pine, Glacier National Park, U.S.A.: Environmental and Topographic Influences. *Arctic, Antarctic, and Alpine Research*, 43(1), 107-117.

Sturrock, R. N., Frankel, S. J., Brown, A. V., Hennon, E., Kliejunas, J. T., Lewis, K. J., Worrall, J. J. and Woods, A. J., 2011: Special issue: Climate change and Plant Diseases, *Plant Pathology*, 60(1), 133-149.

UNDP, 2017: Sustainable Development Goals - Policy Brief Series. No.1

Ward, N. L., and Masters, G. J., 2007: Linking climate change and species invasion: an illustration using insect herbivores, *Global Change Biology*, 13(8), 1605-1615.

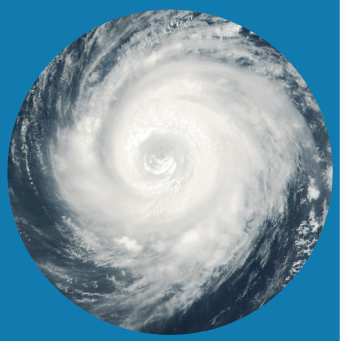
Yoon, E. J., J. H. Thorne, C. Park, D. K. Lee, K. S. Kim, H. Yoon, C. Seo, C.-H. Lim, H. Kim, and Y.-I. Song, 2019: Modeling spatial climate change landuse adaptation with multi-objective genetic algorithms to improve resilience for rice yield and species richness and to mitigate disaster risk, *Environmental Research Letters*, 14(2), 024001.

Yun, H. Y. and Rossman, A. Y., 2011: Tubakia seoraksanensis, a new species from Korea, *Mycotaxon*, 115, 369-373.

Zhao, B. G., Futai, J. R., Takeuchi, Y., 2008: Pine Wilt Disease, Springer, Japan.

제 5 장

농업



150 5.1 서론
150 5.2 관측된 현황
156 5.3 영향 전망
169 5.4 취약성의 주요 원인
175 5.5 적응 옵션
179 5.6 결론
181 5.7 참고문헌

제 5 장 농업

5.1 서론

「한국 기후변화 평가보고서 2014」에서는 기후가 온난화됨에 따라서 노지 작물의 생육가능 기간이 길어지고, 작물의 재배 적기와 적지가 변화하고 있다고 보고하였다. 미래 기후의 변동성이 커지며 극한 기상 현상에 의한 재해가 커질 것으로 전망되고, 기후변화는 미래 쌀 생산성과 품질에는 부정적인 영향을 미칠 것이나, 보리의 수량에는 긍정적인 영향을 미칠 것으로 전망되었다. 또한, 돌발 병해충 발생이 증가하는 등 병해충 발생과 피해양상이 변할 것으로 보고하였다. 이러한 기후변화의 부정적 영향에 대응하기 위해서는 장·단기적 적응 전략과 정책을 수립하여 착실히 이행하여야 하며, 기후변화 영향평가 및 적응기술을 학제적으로 공동연구할 수 있는 종합연구시설이 마련되어야 한다고 하였다.

농업은 토양, 기후, 생물 등 자연 환경에 지배를 받는 산업이다. 특히 기후 환경은 직접적으로 농업에 영향을 미칠 뿐만 아니라 토양 및 생물 환경을 통해서 간접적으로 영향을 하므로 기후 환경은 지역의 농업 형태, 농작물의 작부 형태, 적지, 작기, 생산성, 안정성 등을 결정하는 주요 요소이다. 따라서 지구 온난화에 따른 기후변화는 농업기후 자원의 지리적, 계절적 변화를 초래하여 농업기후지대의 변화, 이에 따른 작물 적응지역의 변화, 잡초, 병해충 등의 발생종 및 발생량의 변화, 토양 비옥도의 변화, 한발 정도의 변화 등 농업생산에 간접적인 영향을 준다. 이와 더불어 대기 중의 탄산가스 농도 증가와 온도 상승은 작물의 광합성에 의한 물질 생산, 동화물질의 각 기관으로의 배분, 발육속도, 물의 이용효율 등에 영향하여 작물의 생산성에 직접적인 영향을 미친다. 또한 지구 온난화에 따른 기후변화와 그 영향은 지리적 및 국지적으로 매우 다르게 나타날 것으로 예상된다.

기후변화가 작물생산에 영향을 미치고 있다는 것은 세계 여러 지역에서 분명하게 관측되고 있으며, 긍정적인 영향보다는 부정적인 영향이 더 보편적인 것으로 보고되고 있다. 3~4℃ 또는 그 이상의 기온 상승이 예견되는 기후변화 시나리오 하에서 기후변화는 농업 생산성에 지대한 부정적 영향을 줄 것이며 이에 따라 세계의 식량생산과 식량안보에 심각한 위험을 초래할 것으로 전망되고 있다. 이러한 위험은 열대 지역 국가에서 더 클 것인데, 그 이유는 열대지역 국가에서는 적응 능력을 넘어서는 더 큰 영향을 받으며 온대지역과 비교할 때 빈곤율도 더 높기 때문이다(IPCC, 2014).

본 보고서에서는 「한국 기후변화 평가보고서 2014」 발간 이후 한반도를 대상으로 한 농업 연구들을 중심으로 식량작물, 원예작물, 병해충, 잡초의 4가지 분야에서 기후변화와 관련한 관측현황, 영향전망, 취약성의 주요 원인, 적응옵션 등에 대한 종합적 검토를 하고자 하였다.

5.2 관측된 현황

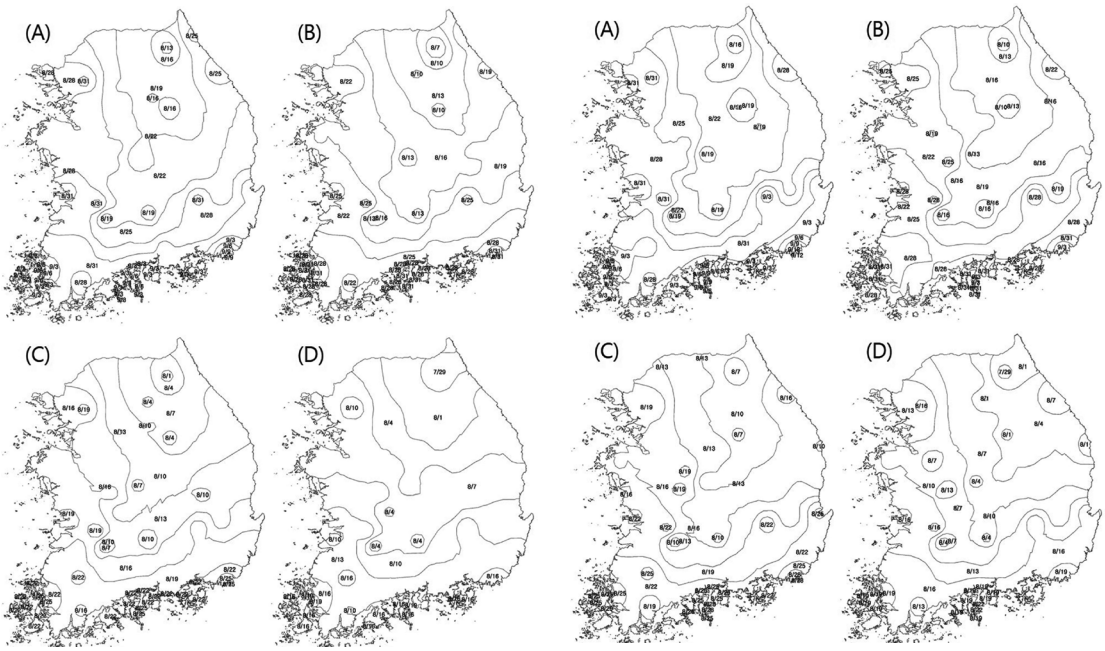
「한국 기후변화 평가보고서 2014」에서는 작물의 경우 기후가 온난화됨에 따라 재배 북방한계선과 재배적지가 북상하고 있음이 관측되고 있으나, 작물의 수량성은 기후변화와 더불어 신품종 개발과 재배기술 발달 등에 복합적으로 영향을 받기 때문에, 기후변화의 영향만을 분리한 연구는 미흡하다고 하였으며, 기후의 변동성이 커짐에 따라 수량의 변동 폭이 커지고 있다고 하였다. 병해충의 경우 기온상승에 따른 따뜻한 월동환경, 식물기간 연장, 장마 변동 등의 변화가 월동해충의 발생을 증가시키고 토착화 가능성을 확대시키고, 아열대성 병해충의 출현 등 유해생물군의 돌발적 발생과 규모화를 일으킨다고 하였다. 이전 보고서에서는 잡초 발생 분포 변화에 대한 관측현황은 거의 다루어지지 않았다.

5.2.1 식량작물

본 보고서에서는 「한국 기후변화 평가보고서 2014」에서 다루어졌던 벼와 보리의 재배적기 및 수량성에 대한 내용을 최신 자료로 갱신하였으며, 기상요인이 옥수수와 감자의 수량성에 미친 영향에 대한 연구를 추가적으로 수록하였다.

이동준 등(2014)은 과거 평년(1971~2000)과 현재 평년(1981~2010) 기상자료를 이용하여 51개의 관측지점에서의 벼 출수한계기를 설정한 결과, 과거 평년에 비해 현재 평년에서 출수한계기가 앞당겨지거나 변화가 없는 지점도 있었으나 대부분의 지점에서 출수한계기가 늦추어지고 (그림 5.1), 출수한계기까지 출수를 늦추더라도 기후적인 측면에서의 수량 손실은 크지 않은 것으로 보고하였다. 기후변화가 벼의 수량성에 미친 영향에 대한 전국 단위의 평가는 보고되지 않았지만, 지역별 평가는 보고된 바 있다. 신종희 등(2019)은 과거 20년간의 대구와 안동 지역 벼 수량 자료를 이용하여 기상요인이 벼 수량에 미치는 영향을 평가한 결과, 대구지역에서 중만생종의 수량은 등숙기 일조시수와 높은 정의 상관을 보이며, 안동지역에서 중만생종의 수량은 영양생장기 최고기온과 생육전반 일조시수가 유의미한 정의 상관을 나타낸다고 보고하였다. 지난 39년(1980~2018년)간 논벼(쌀)의 10a당 생산량은 연평균 1.6% 증가한 것으로 나타나(통계청, 2019), 아직까지는 기후변화로 인한 고온피해 등이 유의하게 나타나지 않는 것으로 판단되나, 이는 신품종 개발과 더불어 기후변화에 따른 농가의 자율적·점진적 적응(파종, 이식 등 재배 시기의 변동)의 결과이기도 하다.

정상욱 등(2019)은 충주와 청양에서 2017년과 2018년에 걸쳐 '광평옥' 옥수수를 재배한 결과, 2018년 여름철 고온현상과 장기간의 가뭄 및 강수량 부족이 '광평옥' 건물수량을 급격히 감소시켰다고 하였다. 그리고 지난 30년 동안 발간된 옥수수 생산에 관한 논문의 수량 데이터와 충주 및 청양 지역의 시청과 농업기술센터에서 제공하는 수량 데이터를 수집한 뒤, 이를 기반으로 옥수수의 수량에 악영향을 미치는 기후인자를 선정하여, 충주와 청양지역을 대상으로 1999년부터 2018년까지의 기후영향취약성평가를 실시한 결과, 과거에 비해 최근에 기후영향취약성이 높아진 것으로 보고하였다.



과거 평년(1971~2000) 출수한계기 현재 평년(1971~2000) 출수한계기

그림 5.1 출수 후 40일 동안의 기준 적산 평균기온을 이용해 추정한 출수한계기(이동준 등, 2014). [760℃(A), 800℃(B), 840℃(C), 880℃(D)]

이안수 등(2016)은 7개년 동안 9개 지역의 '수미' 감자 피복재배 시험 자료를 이용하여 기상요인들이 감자의 상서수량에 미치는 영향을 분석하고 상서수량 예측모형을 구축한 결과, 감자의 상서수량은 기온보다는 강수량과 강우일수 등에 민감하게 반응하는 것으로 보고하였다. 하지만 위와 같은 과거 수량 및 기상 자료를 이용한 통계적 기법에는 설명변수(기상요인)간의 다중공선성 문제가 존재하고 재배기술의 발달에 대한 고려가 미흡하여 관측된 수량의 변동이 기후변화로 인한 것인지는 명확하지 않다.

지난 30년(1981~2010)간 보리 등의 동계작물의 파종기간 평균기온이 10년에 0.45 ℃씩 상승함에 따라 파종 후 웃자람과 월동기 및 이른 봄의 유수형성으로 인한 저온피해가 빈번해진 것으로 보고되어, 동계작물의 적정 파종시기를 늦추는 논의가 진행되고 있다(심교문 등, 2015). 지난 39년(1980~2018년)간 보리의 10a당 생산량은 연평균 0.3~0.4% 감소하여(통계청, 2019), 위와 같은 적응대책 수립이 시급한 것으로 판단된다.

5.2.2 원예작물

본 보고서에서는 「한국 기후변화 평가보고서 2014」에서 다루어졌던 과수의 재배적지 이동에 대한 내용은 최신 자료로 갱신하였으며, 기상요인이 배추, 무, 마늘, 양파 등의 채소와 단감 등의 과수에 미친 영향에 대한 연구와 과수작물에서의 이상기상의 영향에 관한 논문을 추가적으로 수록하였다.

김태훈 등(2014)에 따르면 고랭지 배추와 무의 재배면적은 1990년대까지 정체 내지 소폭 증가 추세였으나 2000년대 이후 빠르게 감소하여 최근 10여 년간 절반 가까이 감소하였으며, 이는 강원지역이 아닌 남부지역에서의 기온상승으로 인한 준고랭지 배추와 무의 상품성 악화에 기인한 것으로 판단된다. 2010년대 이후부터 강원도 고랭지배추 재배면적도 지속적으로 감소하는 추세이다. 1991~2016년 고랭지 및 준고랭지 배추 자료와 생육시기별 기후요소를 분석한 결과, 완전고랭지인 대관령면에서의 재배면적당 생산량은 생육기와 결구기의 기온과 유의미한 음의 관계를 보였으나(그림 5.2), 삼수동에서는 강수의 영향이 기온보다 큰 것으로 나타났으며, 고도가 조금 낮은 준고랭지 지역에서는 최저기온 상승이 정식기 저온피해를 줄여 수량을 증가할 수 있다고 보고되었다(이승호와 허인혜, 2018). 김용석 등(2015)은 채소 주산지의 1981~2010년 기상자료를 분석한 결과, 여름 배추의 경우 5월의 기온이 다소 높아지고 가을 배추의 경우 결구기 최고기온이 점차 상승하여 배추의 생육에 영향을 미칠 수 있으며, 마늘의 경우 서귀포지역에서 인경 비대기인 5월에 최고기온이 증가하여 생육에 영향을 미칠 것으로 예상되며, 양파의 경우 일조시간의 감소가 생육에 영향을 미칠 것이라 하였다.

통계청(2018)은 1970~2015년 기간 과수작물의 재배면적

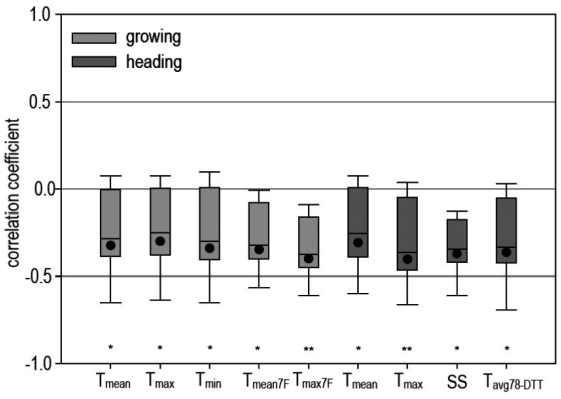


그림 5.2 대관령면에서 재배하는 고랭지배추의 단위면적당 생산량(t/ha)과 생육시기별 기후요소와의 관계 (이승호와 허인혜, 2018).

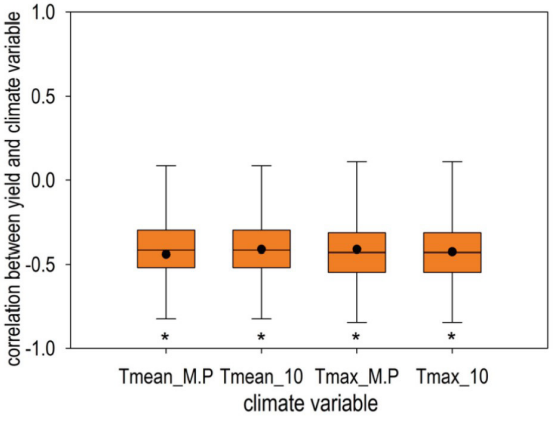


그림 5.3 단감의 수량(kg/10a)과 성숙기 기온과의 관계 (허인혜와 이승호, 2017). [1차 차분(first difference)한 수량과 기온 이용]

변화를 분석한 결과, 사과 재배면적은 과거 사과의 주산지인 대구 및 인근 지역(경산, 영천, 경주 등)에서 감소한 반면, 경북, 충북, 충남 일부 지역을 중심으로 증가하였으며, 강원 산간지역으로까지 확산되고 있다고 하였다. 또한 복숭아, 포도, 단감, 감귤 등의 주요 과수 작물의 주산지도 점차 북상하고 있음이 보고되었다. 심교문 등(2014)은 단감의 안전재배 가능지점을 분석한 결과, 과거 40년 동안에는 남한의 기상관측지점 61개 중에 38개 지점에서 단감의 안전재배가 가능하였던 것으로 분석되었으나, 최근 10년(2003~2012년) 동안에는 속초, 원주, 충주, 서산, 울진, 양평, 이천, 천안, 거창 등 9개 지점이 추가되어, 단감의 안전재배가능 지점이 총 47개로 확대되었다고 하였다. 허인혜와 이승호(2017)는 1998~2015년간 단감 생산량, 재배면적, 생산성 자료와 기후자료를 이용하여 단감 생산에 미치는 생육시기별 기후요소를 추출한 결과, 개화기(4~5월)의 기온은 단감의 생산성과 정의 관계를 보이는 반면 성숙기(9~11월)의 고온과 병해충 발생은 낙과 또는 과실 불량에 영향을 미친다고 하였다(그림 5.3). 정은지와 이승호(2018)는 1998~2015년 노지감귤의 발아기, 개화기, 만개기 자료와 기상자료를 분석한 결과, 감귤나무의 생육 시기는 온도가 상승함에 따라 점차 빨라지고 있으며, 발아는 2~3월의 기온에 개화는 2월과 4월의 기온에 영향을 받는다고 하였다.

작물의 생산성은 재배기간 동안의 평균 기상의 변화에도 영향을 받지만 단기적인 이상기상에도 크게 영향을 받는다. 정재원 등(2018)은 최근 10개년(2007~2016) 자료를 이용하여 이상기상이 과수 생산성에 미치는 영향을 평가한 결과, 폭염 특보의 발효 횟수가 증가함에 따라 참다래와 유자의 생산 효율성은 감소하고, 호우 특보의 발효 횟수가 증가함에 따라 유자의 생산 효율성이 감소되며, 건조특보의 발효횟수가 증가함에 따라 유자, 사과, 배 등의 생산 효율성이 감소한다고 하였다. 이외에도 강풍특보, 대설특보, 한파특보, 태풍특보 등에 의해 과수작물의 생산 효율성이 영향을 받는 것으로 보고하고 있어, 기후변화로 인한 이상기상 발생 빈도수 증가는 과수작물의 생산 효율성에 악영향을 미친다고 하였다.

5.2.3 병해충

본 보고서에서는 「한국 기후변화 평가보고서 2014」에서 다루어졌던 벼에서의 병해충과 기상요인간의 관계와 과수에서의 외래·돌발해충 발생에 관한 내용은 최신 자료로 갱신하였으며, 감자, 고추, 양파 등 밭작물에서의 병해충과 기상요인간의 관계에 대한 논문을 추가적으로 수록하였다.

곡물류인 벼의 경우, 넓은 재배면적과 경작지의 연결성으로 인해 외래 해충 및 병원체 유입에 취약한 작물로 보고되고 있다(김광호 등, 2016). 김관원과 김태영(2018)은 패널 토빗모형을 이용해 논 병해충 피해 모형을 구축한 결과, 잎도열병, 잎집무늬마름병, 줄무늬잎마름병의 병해는 공통적으로 일조시간 감소, 상대습도 증가, 강수시간 계속 등 다습한 상황에서 많이 발생하며, 애멸구, 벼물바구미, 혹명나방의 해충은 월동기를 포함한 이동시기와 증식기의 고온에 큰 영향을 받는 것으로 나타났으며, 벼물바구미를 제외한 해충은 서식환경의 습도가 높을 때도 발생한다고 하였다.

1960년대에 국내에 유입된 것으로 알려진 감자뿔나방은 온대성 해충으로 감자 생육시기뿐 아니라 수확 후 저장, 유통 중에 괴경에 피해를 주는 주요 해충이다. 1978~1979년 조사에 의하면 감자뿔나방은 남부지역에서만 서식하는 것으로 알려져 있었으나, 2009~2012년 조사에 의하면 현재 중북부 지역에서도 많은 피해가 나타난 것으로 보고되었다(그림 5.4). 이와 같은 감자뿔나방의 북상은 기후변화로 인한 평균기온의 상승(+0.9 ℃)에 기인하는 것으로 보고되었다(Kwon et al., 2017).

윤덕훈 등(2014)은 1999~2005년 기간 보고된 병해충 자료를 이용하여 기온 및 강수량과 고추에 있어 주요 병해인 역병과 탄저병의 발병률을 분석한 결과, 고추 정식기인 5월의 평균 기온이 18.3 ℃ 이상이고, 7월의 평균 강수량이 532 mm 이상인 두 가지 조건을 만족했을 때 발병률이 50%를 넘는다고 보고하였다. 양파에서는 11~1월의 평균기온이 4.0 ℃ 이상이고, 3월 평균 강수량이 40 mm 이상일 경우, 흑색썩음균핵병 발병율이 증가하는 경향을 보인다고 하였다.

외래 해충으로 알려진 미국선녀벌레는 2009년 서울, 경기, 경남의 3개 지역에서 처음 확인되었으며, 당느릅나무, 박태기나무, 아까시나무, 물오리나무, 가죽 나무, 벚나무,

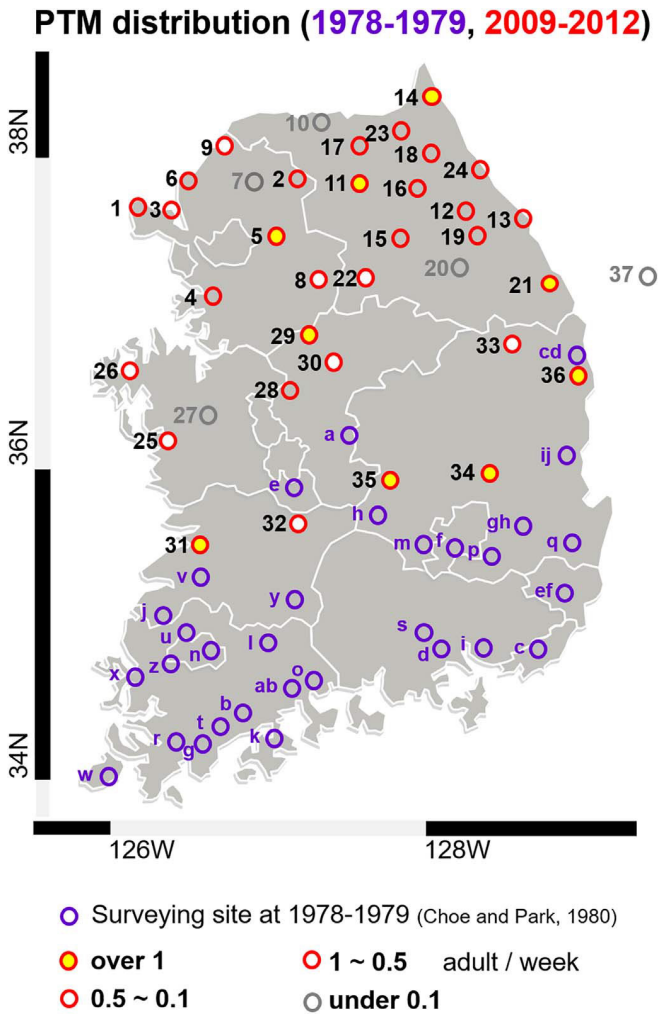


그림 5.4 감자뿔나방 분포의 변화(Kwon et al., 2017).

단풍나무, 산뽕나무을 비롯해 감 나무, 포도나무, 인삼, 두릅나무 농작물을 기주식물로 삼으며 수확물의 상품가치를 떨어뜨려 농가에 경제적으로 큰 피해를 입히고 있음이 보고되고 있다. 이와 같은 넓은 기주식물의 범위로 인해 미국선녀벌레 피해는 빠르게 증가하고 있는 것으로 보고되고 있다(김동언과 길지현, 2014).

또 다른 외래 해충인 꽃매미는 강원도(춘천과 원주)에서 2008년 도내 최초로 발견되었으며, 2011년 발생면적이 36.8 ha로 증가하다 2012년과 2013년 11.8 ha, 8.7 ha로 감소되는 경향을 보였으나 2014년과 2015년에 22.1 ha, 47.2 ha로 다시 증가 추세에 있다(정태성 등, 2015). 기상요인을 분석한 결과, 동계에 -19℃ 이하의 일수와 -10℃ 이하의 경과일수는 월동난의 부화율, 포도과원에서의 발생양상, 강원도 내 발생면적과 밀접한 영향을 보인다고 하였다(그림 5.5).

김선국 등(2015)은 충북지역 노지포도원에서는 돌발 해충 중 하나인 열점박이별잎벌레가 포도 잎과 열매에 피해를 주고 있다고 보고하였다. 하지만 열점박이별잎벌레에 대한 생리생태나 방제에 대해서 알려진 것이 전무한 실정으로 대책이 시급하다고 하였다.

5.2.4 잡초

「한국 기후변화 평가보고서 2014」에서는 잡초 발생 분포의 변화에 대한 내용은 거의 다루어지지 않았지만, 기후변화와 그로 인한 작부체계와 재배방법의 변화, 과도한 제초제 시용 등은 농경지 내의 잡초 발생 양상을 변화시키고

있으며, 최근 외래잡초와 제초제 저항성 잡초의 발생에 대한 조사들이 진행되고 있어, 본 보고서에서는 지난 수십 년간의 잡초 발생 분포의 변화를 다룬 논문들을 수록하였다. 잡초 발생의 분포는 논, 밭, 과수원 등에 따라 다르게 나타나며 밭의 경우 하계작물 재배지와 동계작물 재배지에 따라 다른 양상을 나타낸다.

이인용 등(2016)은 1971년부터 2013년까지 10년 주기의 논 잡초 발생 분포를 조사한 결과, 1971년에는 주로 마디꽃, 쇠털골, 물달개비 등 일년생잡초가 많이 발생된 반면에 1981년에는 피의 발생이 줄어들고 물달개비와 올미, 벗풀 등의 광엽잡초가 우점하였고, 1991년에는 일년생잡초보다는 올방개, 올미, 벗풀 등과 같은 다년생잡초가 우점하였고, 2000년에는 물달개비가 가장 많이 발생되었고 그 다음으로 올방개, 피, 벗풀 등이었으며, 2013년에는 제초제 저항성잡초인 피와 물달개비가 최우점하였으며, 올방개, 올챙이고랭이, 벗풀 등의 순으로 우점하였다고 하였다(표 5.1). 향후 논 잡초의 발생에 대하여는 피의 발생량은 계속 증가할 것이며, 다년생잡초의 발생비율이 일년생잡초의 발생비율보다 높아질 것이라 하였으며, 기후변화와 재배방식 등의 변화는 제초제 저항성 잡초와 외래잡초의 발생을 증가시킬 것이라 하였다.

이인용 등(2015)은 2014년 우리나라 밭 6,219지점을

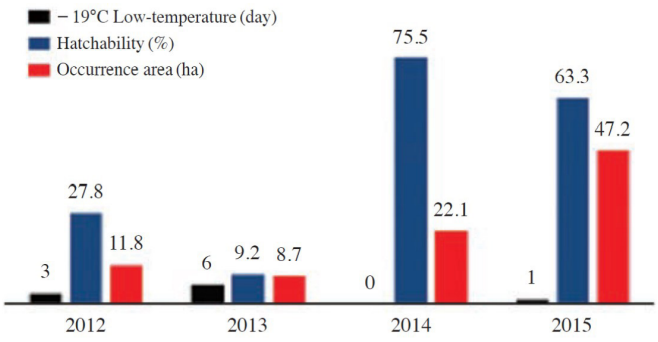


그림 5.5 동계 -19℃ 이하의 일수와 꽃매미 부화율 및 강원지역 발생률 변화(정태성 등, 2015).

표 5.1 국내 논 잡초 우점도 변화(이인용 등, 2016).

Rank	Dominant weed[y] and dominance degree by year				
	1971	1981	1991	2000	2013
1	ROTIN (40.7)[z]	MONVA (22.2)	ELEKU (19.6)	MONVA (12.7)	ECH spp. (17.3)
2	ELEAL (11.8)	SAGPY (17.5)	SAGPY (15.6)	ELEKU (9.5)	MONVA (12.4)
3	MONVA (11.3)	SAGTR (9.0)	SAGTR (13.2)	ECH spp (9.5)	ELEKU (7.8)
4	CYPDI (7.8)	POTDI (9.0)	ECH spp. (12.2)	SAGTR (9.1)	SCIJU (6.2)
5	ECH spp. (7.1)	CYPSE (8.5)	MONVA (11.2)	BIDTR (5.8)	SAGTR (6.1)
6	POTDI (3.5)	ROTIN (6.0)	SCIJU (6.0)	LUDPR (4.9)	LUDPR (4.7)
7	LINPR (3.4)	ANEKE (4.4)	CYPSE (4.6)	ANEKE (4.4)	BIDTR (4.5)
8	ANEKE (2.5)	LINPR (3.9)	POTDI (3.3)	LINPR (4.0)	AESIN (4.1)
9	ELEMA (2.2)	ELEKU (3.4)	LUDPR (2.6)	ROTIN (2.8)	PERHY (3.5)
10	PERHY (1.9)	LUDPR (3.0)	ANEKE (2.5)	ECLPR (2.7)	ANEKE (3.3)

[y]ROTIN: *Rotala indica* (마디꽃); ELEAL: *Eleocharis acicularis* f. *longiseta* (쇠털골); MONVA: *Monochoria vaginalis* (물달개비); CYPDI: *Cyperus difformis* (알방동사니); ECH spp.: *Echinochloa* spp. (피속류); POTDI: *Potamogeton distinctus* (가래); LINPR: *Lindernia procumbens* (밭뚝외풀); ANEKE: *Aneilema keisak* (사마귀풀); ELEMA: *Eleocharis maritimes=Scirpus planiculmis* (새섬매자기); PERHY: *Persicaria hydropiper* (여뀌); SAGPY: *Sagittaria pygmaea* (올미); SAGTR: *Sagittaria trifolia* (벗풀); CYPSE: *Cyperus serotinus* (너도방동사니); LUDPR: *Ludwigia prostrata* (여뀌바늘); SCIJU: *Scirpus juncoides* (올챙이고랭이); BIDTR: *Bidens tripartita* (가막사리); ECLPR: *Eclipta prostrata* (한련초); AESIN: *Aeschynomeme indica* (자귀풀).
[z]Data in parentheses indicate the % of ratio against total.

조사하여 1990년 조사와 비교한 결과, 2014년에 조사된 밭 잡초 중 동계작물 재배지에는 45과 287종, 하계작물 재배지에는 47과 339종이 발생하였으며, 1990년 조사에서는 동계작물 재배지에서 39과 165종, 하계작물 재배지에는 41과 189종으로 1990년 조사에 비해 2014년 조사에서 동계작물 재배지에는 6과 124종, 하계작물 재배지에는 6과 151종이 더 많이 발생하였다고 하였다. 이는 전반적으로 발생초종이 증가하였기 때문이기도 하지만, 24년간의 연차간 잡초변화를 보여주는 것으로 판단된다고 하였다. 외래 잡초로는 가는털비름, 단풍잎돼지풀, 애기똥풀, 흰명아주, 개비름, 망초, 좀명아주, 미국가막사리, 털별꽃아제비, 개망초, 개쑥갓, 유럽점나도나물, 서양민들레 등이 우리나라 밭에서 발생하고 있다고 하였다.

이인용 등(2017)은 2015년 과수원에서의 잡초 발생을 조사하여 1990년과 2003년 조사 자료와 비교한 결과, 1990년에는 바랭이, 여뀌, 쇠비름 등이 우점하였으나, 2003년에는 바랭이, 깨풀, 쑥 등으로 변하였으며, 2015년에는 바랭이, 쑥, 쇠별꽃 등으로 크게 변하지 않았음을 확인하였다. 최근 잡초 발생의 변화폭이 작은 이유로는 최근 친환경 및 초생재배 등으로 과수에 항상 식생이 존재한다는 점을 들 수 있지만, 아직까지도 많은 농가에서 잡초방제에 제초제를 사용하고 있어 그 신뢰도가 높다고 볼 수는 없다고 하였다. 2015년 조사결과, 외래잡초는 127종으로 전체의 25.8%를 차지하고 있으며, 토끼풀, 망초, 흰명아주, 서양민들레, 소리쟁이 순으로 발생이 많다고 하였다.

기존의 자생 잡초에 비해 서식영역의 확장이 빠르고, 매우 다양한 환경조건에 잘 적응하는 생태적 특성을 지닌 외래 잡초는 국내에서도 최근 들어 빠르게 확산하고 있으며 생태계에 미치는 영향이 심각해지고 있는 것으로 보고되고 있다. 우리나라 논, 밭, 과수원 및 목초지에 발생하는 외래 잡초를 전국 9개도 12,568지점에서 2013년부터 2015년까지 조사한 결과, 논에서는 4과 7종, 밭에서는 24과 130종, 과수원에서는 24과 126종, 목초지에서는 23과 82종이 조사되었고, 총 28과 166종이 발생하고 있었으며, 생활형으로 보면, 일년생은 128종, 다년생 38종이었으며, 동계잡초가 37.9%로, 외래 잡초 중 동계잡초의 비율이 상대적으로 높은 것으로 보고되었다(김창석 등, 2018).

5.3 영향 전망

「한국 기후변화 평가보고서 2014」에서는 식량작물의 경우 기후변화가 미래의 쌀 생산성과 품질에는 부정적 영향을 미치고 월동작물인 보리의 수량에는 긍정적 영향을 미칠 것으로 전망하였다. 원예작물의 경우 미래기후조건에서 과수의 개화기와 만개기가 빨라지고, 21세기말에 이르면 사과, 배 등의 재배적지가 급격히 감소할 것으로 전망하였다. 한지형 마늘의 재배지역은 크게 줄어들고 노지 건고추의 수량은 감소할 것으로 예측하였다. 병해충의 경우 우리나라 기후대가 아열대성으로 변화함에 따라 재배 가능한 농작물 종류 및 재배 작형이 변화하고 그에 따른 병해충 발생양상도 달라질 것으로 전망되며, 병해충에 대한 벼 생산의 취약성은 크게 높아지고 취약지역 면적도 증가할 것이라 하였다. 잡초의 경우 미래 조건에서 논 잡초의 출아 및 초기생육이 촉진된다는 연구만이 포함되었다.

5.3.1 식량작물

본 보고서에서는 「한국 기후변화 평가보고서 2014」에서 다루어졌던 벼에 대한 기후변화 대응 재배실험 연구는 최신 자료로 갱신하였으며, 콩, 옥수수, 감자 등에 대한 기후변화 대응 재배실험과 작물생육모형을 이용한 신 기후변화 시나리오(RCP)에 따른 벼, 콩, 옥수수, 감자, 보리의 생산성 변화에 관한 연구를 추가적으로 수록하였다.

이규종 등(2015)은 생태형이 다른 8개 벼 품종을 대상으로 포트 실험을 실시하여 대기온, 대기온 대비 +1.5℃, +3.0℃, +5.0℃ 온도 조건에 따른 수량 및 수량 관련 요소의 반응을 분석한 결과, 수량 관련 요소 중 온도 상승에 가장 민감한 반응을 보인 요소는 등숙률이었으며, 가장 둔감한 요소는 천립중이라고 하였다. 등숙률의 하락과 맞물려 수량은 고온 조건일수록 낮아졌으나, 영화수 증가 영향으로 수량의 저하 정도는 등숙률의 그것보다 크지 않았다고 하였다. 상완규 등(2018)은 옥외환경조절시설[SPAR(Soil Plant Atmosphere Research)]을 이용하여 RCP 8.5 시나리오에 따른 2051~2060년대 기후조건(온도 2.8℃ 상승, 이산화탄소 농도 580 ppm)하에서 벼를 재배한 결과, 벼 생육 및 노화가 급격하게

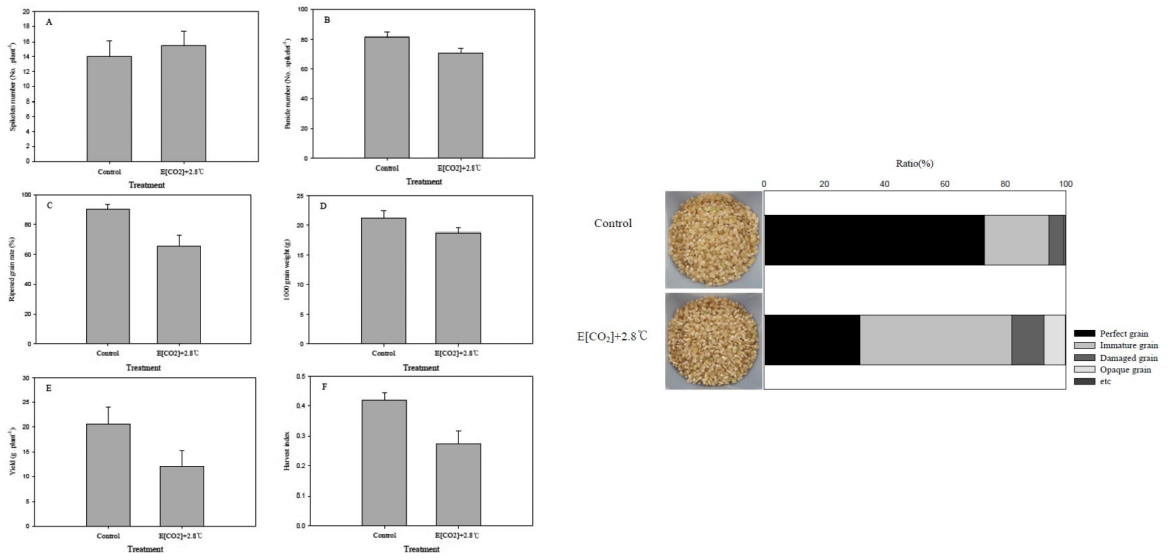


그림 5.6 현기후조건과 RCP 8.5 시나리오에 따른 2051~2060년대 기후조건에서의 벼 수량, 수량구성요소 및 품질(상완규 등, 2018).

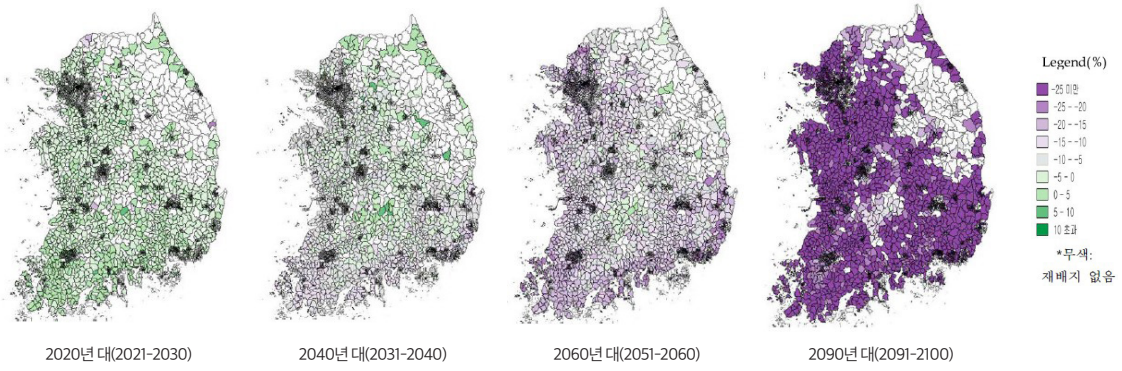


그림 5.7 1 km RCP 시나리오를 이용한 중만생종 벼의 단위 수량 변화(이변우 등, 2017).

촉진되어 출수기가 현재 대비 5일 이상 빨라지는 등 생육기간이 단축될 뿐 아니라 이로 인해 고온 등숙 환경에 노출될 위험성이 크게 높아지게 됨을 알 수 있었다고 하였으며, 이로 인해 벼의 수량 뿐 아니라 품질 또한 크게 저하되어 미래에는 정상립 비율은 현저히 저하되는 반면 불완전립 특히 미숙립이 크게 증가한다고 하였다(그림 5.6).

이러한 결과는 고온 등숙에 의한 전분 합성 관련 유전자들의 발현 감소 및 분해 관련 유전자들의 발현 증가 등 종실 체내 전분 전류 및 축적 양상이 크게 변화하여 나타난 것이라 하였다.

RCP 8.5 기후변화 시나리오 기반 우리나라 벼 생태형별 생산성의 시공간적 변동을 작물생육모형 모의를 통해 읍면동 수준의 지도를 작성하여 분석한 결과, 생태형별로 기후변화에 따라 전반적으로 수량이 감소하는 양상을 보였으나 생태형에 따라 지역 및 시기별 감소 속도는 서로 달랐다. 전반적으로 조생종이 가장 빠르게 수량감소지역이 확산되고 그 감소폭이 컸으며, 그 다음으로 중만생종, 중생종 순으로 감소 속도가 늦은 편이었다. 결과적으로는 세기말에는 대부분의 지역에서 25%이상의 수량감소가 발생할 것으로 전망되었다(그림 5.7)(이변우 등, 2017).

Choi et al.(2016)은 온도조절 플라스틱 하우스를 이용한 콩의 고온 반응 실험 결과(대기온, 대기온 대비 +1.5℃, +3.0℃, +5.0℃), 콩의 수량은 25.0~26.4℃ 이상의 고온에서 감소하며, 협수와 협당립수 감소로 인한 전체립수의 감소가 주된 수량

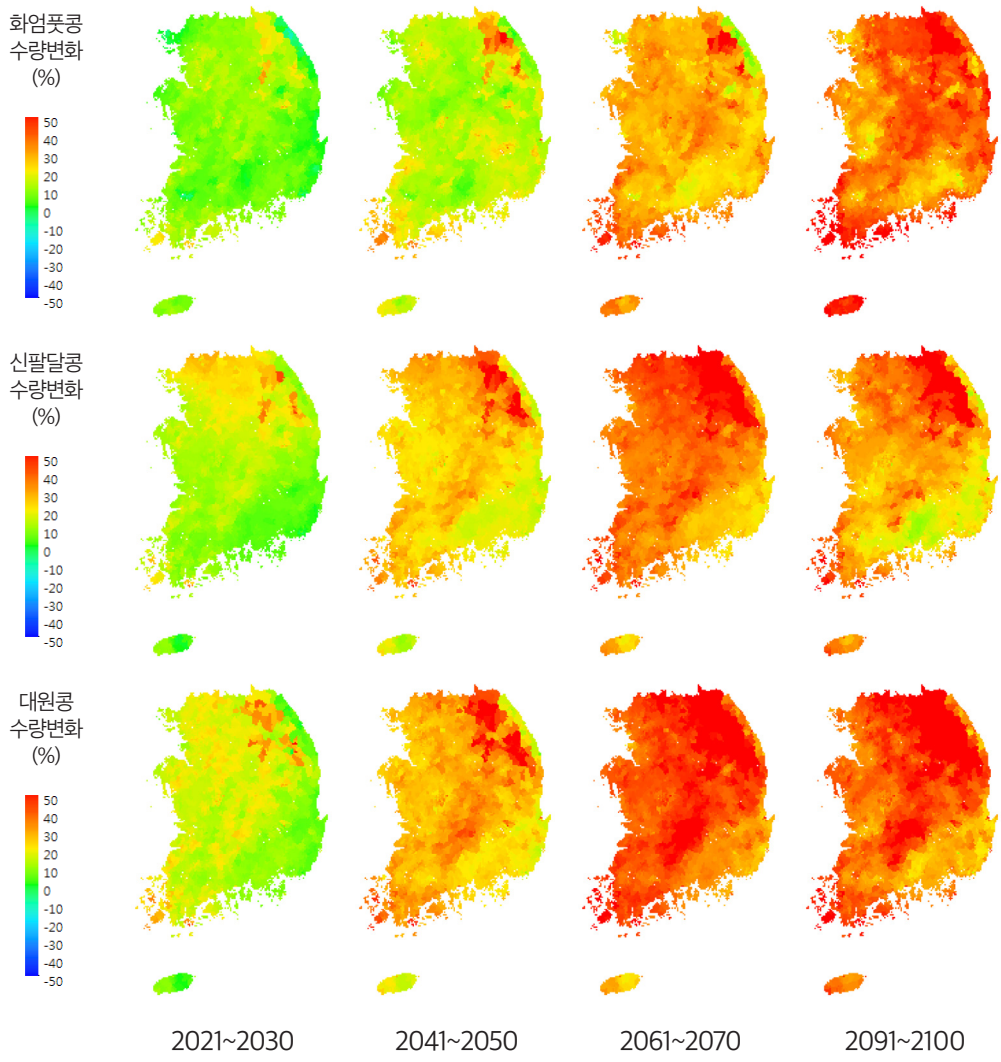


그림 5.8 RCP 8.5 기후변화 시나리오에 따른 현재(2001~2010) 대비 콩의 잠재수량 변화 예측도(이변우 등, 2017).

감소의 원인이라고 하였다. 이변우 등(2017)은 CROPGRO-Soybean 모델을 이용하여 RCP 8.5 시나리오에 따른 기후변화 영향을 평가한 결과, 콩의 생육일수는 2091~2100년까지 전국 평균 4일 가량 감소할 것으로 보이며, 생육기간이 긴 강원 산간 지역의 단축 정도가 커서 생육일수의 지역 편차는 줄어들 것으로 예상된다고 하였다. 생육일수 감소로 인해 우리나라의 콩 재배 가능 기간 및 지역이 점차 확대될 것으로 보이는 반면 수량은 이산화탄소 농도 상승의 영향으로 2061~2070년까지 전국 평균 35% 증가하다가, 그 이후에는 지나친 고온의 영향을 받아 감소로 전환될 것이라 하였다(그림 5.8).

Shim et al.(2017)은 온도조절 플라스틱 하우스를 이용한 옥수수의 고온 반응 실험 결과(대기온, 대기온 대비 +1.5℃, +3.0℃, +5.0℃), 고온은 종실중보다는 종실수를 감소시켜 수량을 감소시킨다고 하였다. 위의 실험자료를 이용하여 국내 실정에 맞게 CERES-Maize 모델을 개선한 뒤 RCP 8.5 시나리오에 따른 미래기후 옥수수의 생육 및 수량 변화를 모의한 결과, '찰옥1호'와 '광평옥' 품종 모두 온난화가 진전될수록 생육일수가 점점 단축되며 2090년대에는 '찰옥1호'가 약 18일, '광평옥'이 약 32일 정도 단축될 것이라 하였다. 잠재 수량은 2040년대 이후부터 급격한 감소를 보이며, 2090년대 이후에는 전국적으로 '찰옥1호'는 10%, '광평옥'은 20% 이상 감소될 것이라 하였다(그림 5.9)(이변우 등, 2017).

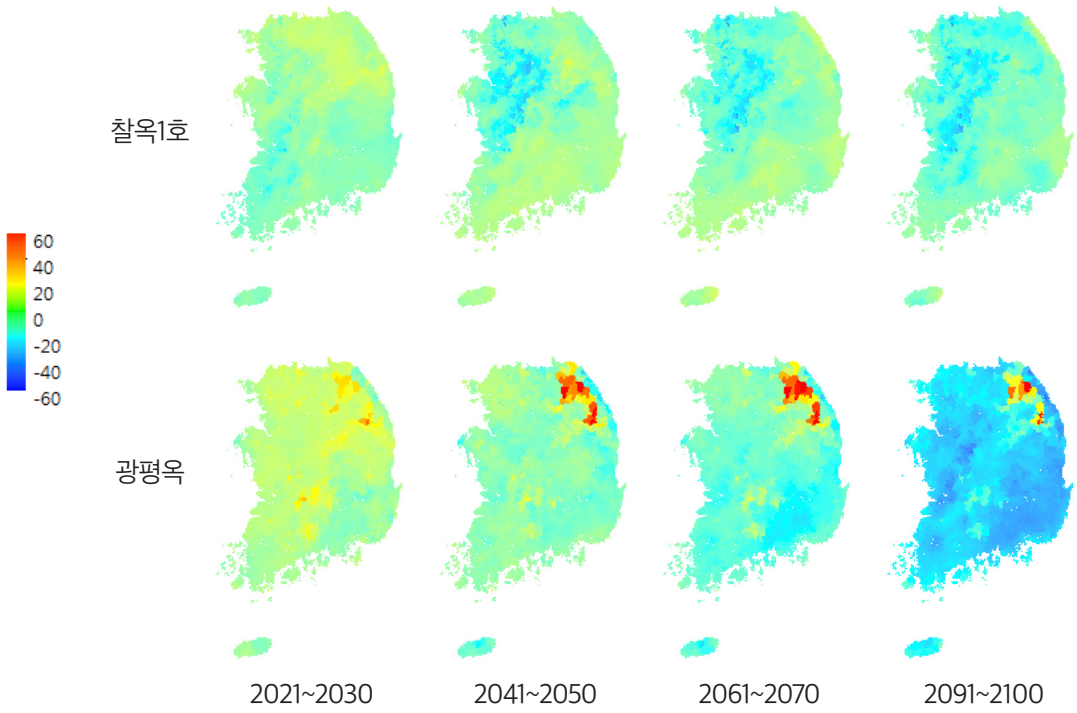


그림 5.9 RCP 8.5 기후변화 시나리오에 따른 현재(2001~2010) 대비 옥수수의 잠재수량 변화(%) 예측도(이변우 등, 2017).

Kim et al.(2017)은 온도조절 플라스틱 하우스를 이용한 감자의 고온반응 실험 결과, 감자의 상서수량(>80g)은 19.1~27.7℃ 구간에서 온도가 1℃ 상승함에 따라 11%씩 감소한다고 하였으며, 이는 생육초기(괴경형성기) 불량 환경과 연관되어 있을 것이라 추측하였다. 이윤호 등(2018)은 옥외환경조절시설(SPAR)을 이용하여 봄 감자에 대한 상승된 이산화탄소 농도(700 ppm), 고온(+2.8℃) 그리고 한발이 미치는 영향을 평가한 결과, 이산화탄소 농도와 온도를 같이 상승시킬 경우 괴경 크기의 증가로 수량이 다소 증가하나, 추가적인 한발 처리는 광합성률 감소와 괴경으로 전류 되는 동화산물을 감소시켜 괴경수량이 56% 감소되는 것으로 보고하였다. 위의 결과들을 종합해보면 서늘한 기후를 선호하는 감자의 수량성은 고온에 의한 피해가 예상되지만, 극심한 고온이 아닌 경우에서는 탄산가스 시비효과가 이를 충분히 보상할 수 있을 것으로 전망된다. 이변우 등(2017)은 SUBSTOR-Potato 모델을 이용하여 RCP 8.5 시나리오 기반 전국 감자 생육 모의 결과, 2060~2090년대 봄감자는 10%가량 증수되는 반면 여름감자는 조식을 통해 고온으로 인한 수량피해를 완화하여도 30% 이상의 극심한 수량피해가 예상되어 고온저항성 품종의 도입이 시급하다고 하였다. 가을감자는 10% 가량의 수량피해가 예상되었으나, 모델이 고온에 의한 출아율 감소를 반영하지 않아, 실제 피해는 더 심각할 것으로 보고하였다.

이변우 등(2017)은 CERES-Barley를 이용하여 미래기후 조건 보리의 수량을 모의한 결과, RCP 4.5 시나리오에서는 완만하게 증수되는 경향을 보이고 RCP 8.5 시나리오에서는 2030년 이후 급격히 증수되는 경향을 보인다고 하였다. 권역별 상세 모의 결과 각 권역별 다양한 기후와 환경조건에 따른 변이는 존재하지만 제주를 제외한 모든 권역에서 대체로 전국 상세 기후조건과 같은 경향으로 모의되었다고 하였다. RCP 4.5 및 RCP 8.5 시나리오 기반 미래기후 조건에서 1월 최저기온 등온선 분포를 통한 맥종별 적정 재배 가능 지역을 설정한 결과, RCP 4.5 시나리오 조건하에서 맥주보리(-4℃) 및 쌀보리(-8℃)의 경우 완만하게 등온선이 북상하고 겉보리(-10℃)는 비교적 급격하게 북상할 것으로 예측되며, RCP 8.5 시나리오 조건하에서는 쌀보리 및 겉보리는 등온선이 급격히 북상하고 맥주보리는 다른 맥종에 비해 상대적으로 서서히 북상할 것이라 하였다.

5.3.2 원예작물

본 보고서에서는 사과, 배, 복숭아, 포도, 감귤, 단감 등의 과수에 대한 기후변화 대응 재배실험과 재배적지 모의 연구들을 갱신하였으며, 기후변화 조건에서의 저온피해 상존 가능성에 대한 연구와 고추와 더불어 배추, 월동무, 한지형 마늘, 난지형 마늘, 양파, 딸기 등에 대한 기후변화 대응 재배 실험 연구들을 수록하였다.

손인창 등(2017)은 온도구배하우스에서의 실험 결과(최대 대기온+5.0℃), 기온상승에 의해 '후지' 사과의 만개기는 빨라지고 영양생장도 왕성해지나, 지나친 고온은 영양생장과 과실비대를 억제하고 착색을 불량하게 한다고 하였다. 반면 착과량에는 온도 상승이 문제가 되지 않아, 생산량보다는 과실 품질에 영향을 많이 미친다고 하였다. 농업용 미래 상세 전자기후도를 이용하여 사과의 재배적지를 예측한 결과, 1981~2010년 평년 기후자료에 의한 사과 재배적지는 우리나라 전체 농경지 면적 중 적지 23.2%, 가능지 34.4%, 저위생산지 42.4%로 나타났으나, 2100년 사과 재배적지는 RCP 4.5 시나리오에서 적지와 가능지는 각각 22.4%, 33.1%가 감소하였고, 저위생산지는 55.6% 증가하는 것으로 모의되었다. RCP 8.5 시나리오에서는 적지와 가능지가 0%, 0.2%로 고품질의 사과 재배가 가능한 지역이 거의 없는 것으로 예측되었다.

손인창 등(2017)은 농업용 상세 전자기후도를 이용하여 배의 30 m 고해상도 미래 재배적지 전자지도를 작성한 결과, RCP 4.5 시나리오에 따르면 적지 면적은 2040년까지 서서히 감소하다가 그 이후 급격하게 감소하는 경향을 보였으며, RCP 8.5 시나리오에서는 2040년까지 평년 수준의 적지 면적이 유지되었으나, 이후 급격하게 감소하여 2100년에는 적지가 1.7%에 그칠 것이라 하였다. 또한 RCP 4.5와 RCP 8.5 시나리오에서 모두 배의 주 재배적지가 전라남도에서 충청남도로 변할 것으로 예측하였다.

위와 같은 방법을 이용한 복숭아 연구 결과, RCP 4.5 시나리오에서 복숭아의 재배적지는 경기도, 충청남도, 경상북도 등에서 늘어나 2040년까지 적지의 면적은 1.5배 증가하나, 이후 감소하여 2100년에는 평년과 비슷한 수준으로 감소한다고 하였다. RCP 8.5시나리오에서는 2040년까지 평년 수준이 유지되다 이후 감소하여 전체 농경지 중 2.4%만이 적지로 예측되었다.

손인창 등(2014)은 온도와 이산화탄소 농도 상승이 3년생 '캠벨얼리' 포도의 수체 생육 및 과실특성에 미치는 영향을 구명하기 위한 라이조트론 실험 결과, 착색개시일이 이산화탄소 + 온도구(700 ppm, 대기온도 + 4.0℃)에서는 7월 30일, 온도 상승구(대기온도 + 4.0℃)와 이산화탄소 상승구(700 ppm)에서는 8월 4일, 대조구(390 ppm, 대기온도)에서는 8월 11일로 나타나 이산화탄소 + 온도 상승구가 대조구보다 약 12일 빠르게 착색되어, 착색초기 고온을 회피하여 착색불량이 나타나지 않았다고 하였다. 수확기는 이산화탄소 + 온도 상승구에서는 약 11일 정도 단축되고, 이산화탄소 상승구와 온도 상승구에서는 각각 4일과 2일이 단축된다고 하였다. 과립 횡경은 이산화탄소 농도가 높을수록 증가하였고, 당함량은 이산화탄소 상승구가 14.6°Brix로 처리구 중 가장 높았으며 온도 상승구에서 13.9°Brix로 가장 낮다고 하였다. 평균 신초 길이는 이산화탄소 + 온도 상승구가 312.6 cm로 처리구 중 가장 높았고, 온도 상승구와 이산화탄소 상승구는 각각 255.6, 224.8 cm이었으며, 대조구는 206.2 cm로 가장 작았으나, 신초 직경은 온도 상승구와 이산화탄소 + 온도 상승구에서 감소한다고 하였다. 생육기 광합성과 증산량을 조사한 결과, 광합성률은 이산화탄소 상승구와 이산화탄소 + 온도 상승구의 생육초기에 높았으나, 하계에 접어들면서 급격히 감소하여 증산량과 상반된 것으로 보고하였다. 손인창 등(2017)은 농업용 미래 상세 전자기후도를 이용하여 포도의 재배적지를 예측한 결과, 포도의 재배 적지는 평년 대비 RCP 8.5와 4.5 시나리오에서 모두 크게 감소하며, 2090년대에 이르면 RCP 8.5 시나리오에서는 전체 농경지 중 0.2%, RCP 4.5시나리오에서는 전체 농경지 중 2.9%만이 포도 재배 적지일 것으로 보고하였다.

문영일 등(2017)은 RCP 8.5 시나리오를 바탕으로 제작된 농업용 미래 상세 전자기후도를 이용하여 감귤 중 온주밀감과 '부지화'의 재배적지를 예측한 결과, 온주밀감의 잠재적 재배적지는 기준년도(1981~2010년)에서는 대부분 제주 지역이 해당되며, 재배가능지역은 제주 동부지역과 남해안 일부지역이 포함된다고 하였다.

2030년대에는 온주밀감 재배적지는 증가하며 재배가능지도 전남지역의 해안 지역을 중심으로 증가하고, 2060년대

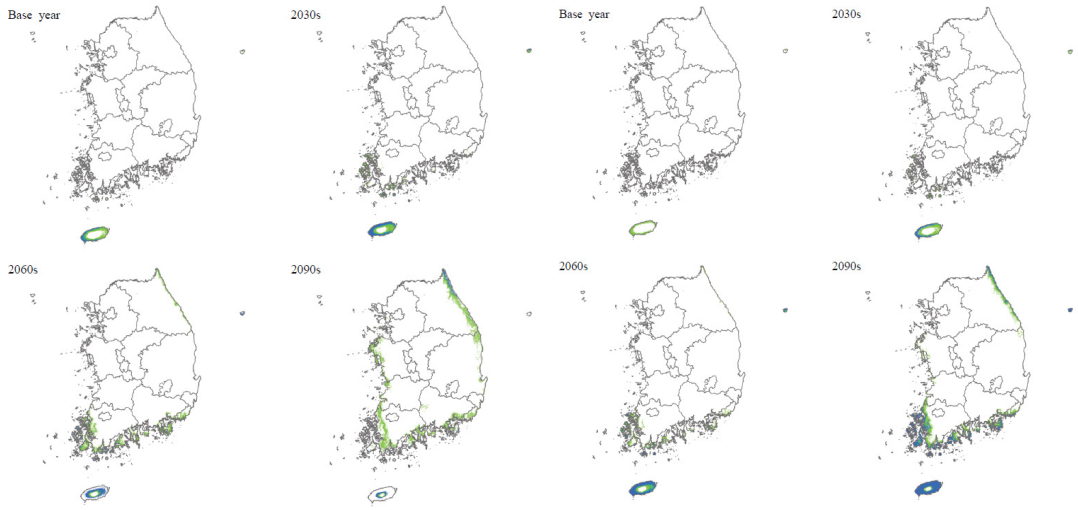


그림 5.10 RCP 8.5 기후변화 시나리오에 따른 현재(1981~2010)와 미래 감귤 재배 가능지 변화(문영일, 2017).

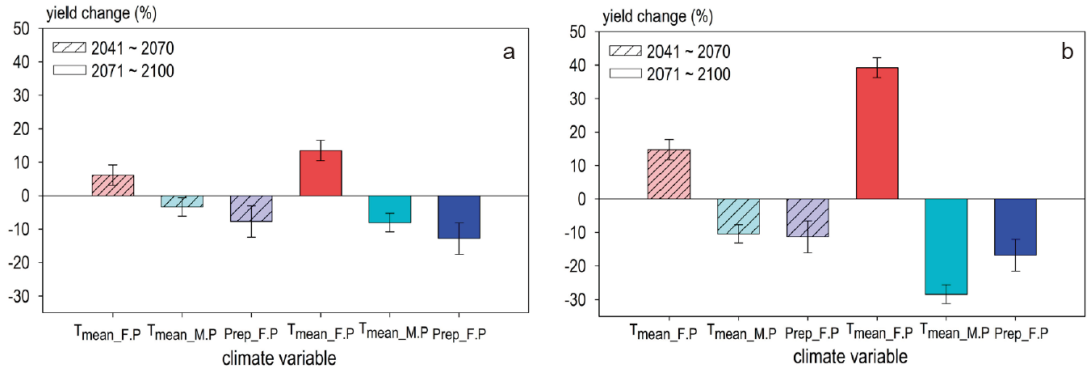


그림 5.11 RCP 4.5(a)와 RCP 8.5(b) 시나리오에 따른 경남지역 기상요인 변화가 단감의 수량에 미치는 영향(허인혜와 이승호, 2017).

부터 재배적지는 제주 산간과 전남과 경남, 강원도 해안지역으로 점차 증가하고 재배가능지도 경북, 충남, 전북 지역까지 확대될 것으로 예상되나, 2090년대 제주에서는 한라산 국립공원 내의 산간지역을 제외하고는 재배적지가 감소하여 사실상 제주에서의 재배는 불가능해질 것으로 예상하였다. '부지화' 감귤의 경우 기준년도(1981~2010년)에서의 재배적지는 제주 해안지역 일부만 포함되었으며 재배가능지역은 제주지역과 전남 남해안 일부 지역만 해당된다고 하였다. 2030년대 재배적지는 현재 온주밀감 재배지가 해당되었으며 재배가능지도 남해안 일부 지역까지 북상할 것으로 예측하였다. 2090년대에는 재배적지가 점점 증가하여 제주지역 전체와 전남, 경남, 강원도 해안지역이 재배적지가 되며 재배가능지도 점점 해안가를 중심으로 북상할 것이라 하였다. 이상의 결과를 종합해볼 때 온주밀감 재배적지는 감소하고 '부지화' 감귤의 재배적지는 증가하는 것으로 나타날 것으로 예측되며, 21세기 말에는 강원도 지역까지 감귤이 재배될 것이라 예측하였다(그림 5.10).

손인창 등(2017)은 농업용 미래 상세 전자기후도를 이용하여 단감의 재배적지를 예측한 결과, 평년 기후에 따르면 우리나라 전체 농경지 면적 중 6% 면적이 기후학적인 재배적지로 나타났으며, 전라남도가 2.9% 재배적지 면적 비율이 가장 높다고 하였다. RCP 8.5 시나리오에 따르면 2090년대에는 전체 농경지의 30% 정도가 단감의 재배적지로 예측되었으며, 평년에 비해 5배 적지 면적이 증가할

것이라 하였다. 허인혜와 이승호(2017)는 경남지역에 한하여 RCP 4.5와 RCP 8.5 시나리오에 따른 단감 생산성은 감소할 것으로 예측되며, 이는 가을철 기온 상승과 봄철 강수량 증가에 기인한다고 하였다(그림 5.11).

2000년대 들어서면서 이상기상 현상의 발생빈도수가 늘어나며 사회 여러 분야에 경제적인 피해가 증가하고 있다. 김대준과 김진희(2018)는 배, 복숭아, 사과 작물이 실제 재배되고 있는 국내 주산 지역에 대하여 기후변화 시나리오(RCP 8.5)를 이용하여, 미래 개화일의 변화를 예측하고, 개화 후 온도 분포를 정량화함으로써, 미래의 저온 발생 추세를 전망하였다. 그 결과, 온난화로 인해 개화기는 현재 재배중인 지역을 대상으로 모든 과종에 대하여 현재 평년을 기준으로, 미래 평년(2071~2100)에는 약 20일 정도 앞당겨질 것으로 예상되었으며, 개화 후 저온의 분포는 과종, 지역별로 일정 부분 차이가 있을 것으로 나타났다. Jeong et al.(2018)은 미래기후조건(RCP 8.5)에서의 전라남도 지역 참다래의 봄철 동·상해 피해를 예측한 결과, 기온이 상승함에 따라 봄철 서리일수는 감소하고 마지막 서리 날짜도 빨라질 것으로 예상되어 참다래 재배 가능지는 점차 늘어날 것으로 모의되었지만, 보성과 같은 지역에서는 참다래의 발아가 촉진되어 봄철 동상해 피해가 계속될 것이라 하였다(그림 5.12).

위의 결과들을 종합해보면 과수에서의 저온피해가 지구 온난화로 인해 빠르게 줄어들지는 않을 것으로 사료된다.

송은영 등(2016)은 온도와 이산화탄소 농도의 상승이

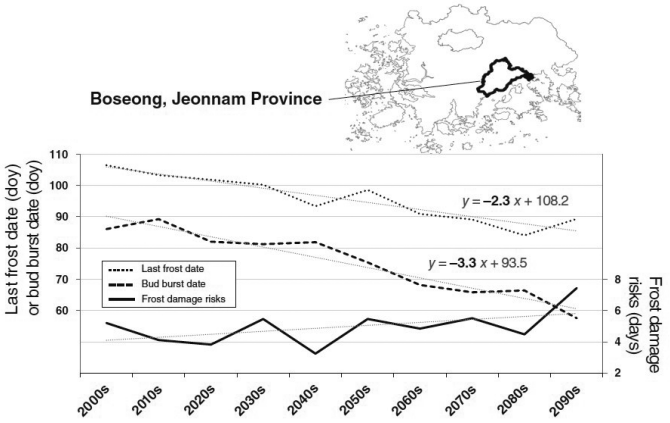


그림 5.12 RCP 8.5 시나리오에 따른 보성지역 마지막 서리일, 참다래 발아일, 동·상해 위험 변화(Jeong et al., 2018).

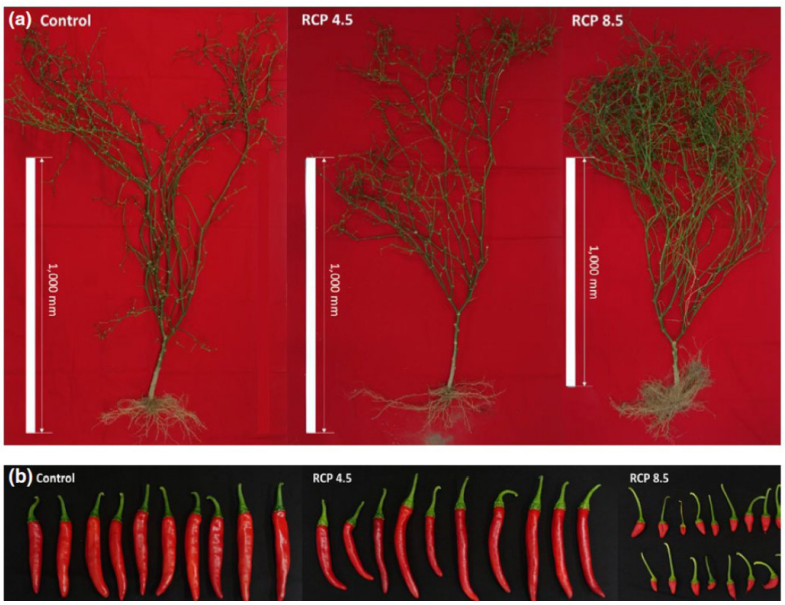


그림 5.13 기후변화조건 하에서 고추의 형태적 특성 변화(Lee et al., 2018).

'무한질주' 고추의 생육 및 과실품질에 미치는 영향을 구명하기 위해 SPAR 챔버를 이용한 재배실험을 수행하였다. 대조구인 대기온도는 노지고추 주산지인 안동지역의 평년(1971~2000; 30년) 5~10월의 생육기 평균기온(20.8℃)를 기준으로 설정하였으며, 처리구는 대조구(대기온도, 400 ppm CO_2), 이산화탄소 상승구(대기온도, 800 ppm CO_2), 온도 상승구(대기온도+6℃, 400 ppm CO_2), 이산화탄소 + 온도 상승구(대기온도+6℃, 800 ppm CO_2) 등 4 수준으로 설정하였다. 대조구보다 고온 및 이산화탄소 농도 상승 조건에서 재배하였을 때 초장, 분지수, 엽수 등이 증가하였으나, 엽면적과 SPAD값은 급격히 감소하는 것으로 나타났다. 개화 및 꽃봉오리수도 온도 및 이산화탄소 농도가 증가할수록 급격히 감소하며, 개체당 총 착과수와 총 착과중도 대조구에 비해 감소하였는데 과실무게도 약간 적어지고 과실 길이와 과실 두께도 약간 줄어지는 것으로 나타났다. 위 결과로 보아 대기온 + 6℃ 및 800 ppm의 이산화탄소 농도의 미래기후조건에서는 고추의 착과가 저해되고 과실수량도 크게 감소하나, 완숙 과실의 비율은 증가하여 수확 시기는 다소 앞당겨질 것으로 예측되었다. 이상규 등(2018)은 토양 건조 스트레스 및 기온상승에 대한 고추의 생리반응 및 생산량 변화를 연구한 결과, 고온 처리구에서 광합성 산물의 전류가 정상적으로 되지 않았고, 공변세포 조직이 +6℃ 고온 처리구에서 정상적인 형태를 갖추지 못하고 있음을 확인하였다. 따라서 외기온도보다 6℃ 고온 조건에서 생육은 촉진되지만 수량이 감소하고 비정상적 세포조직이 늘어난다고 하였다. 이에 따라 현재 재배되고 있는 채소 품종으로는 미래기후조건에서 안정적인 생산량 확보가 곤란하므로 새로운 품종 개발 및 피해경감 기술 개발이 이루어져야 할 것이라 하였다. Lee et al.(2018)도 RCP 4.5(+3.4℃, 540 ppm)와 RCP 8.5(+6.0℃, 940 ppm) 시나리오 하에서의 "슈퍼마니따" 고추의 생육과 수량을 평가하였는데, RCP 8.5 시나리오하에서 엽수는 크게 증가하였지만 고추의 수량은 89.2% 감소한다고 하였다(그림 5.13).

문경환 등(2016)은 2001~2010기간 전국적으로 높은 적합성을 보이는 노지고추의 재배적지 면적은 미래로 갈수록 점차 줄어드는 경향을 보이고, 현재 평년을 기준으로 재배가 어려운 것으로 나타나는 강원도 일대가 미래에는 다른 지역과 비슷한 수준으로 고추 재배가 가능해질 것이라 하였다.

손인창 등(2015)은 미래 기후변화 시나리오에 근거한 5가지 온도처리(-2.0℃, 평년온도, +2.0℃, +4.0℃, +6.0℃)가 '춘광' 배추의 생육, 품질 및 생리반응에 미치는 영향을 확인하기 위해 환경제어챔버 연구를 수행하였다. 생체중, 엽수 및 엽면적의 경시적 변화를 조사한 결과, 결구 이전에는 고온 처리구인 +4.0℃와 +6.0℃ 처리구에서 왕성한 생육을 보였으나, 결구기 이후 현저히 감소하여 정식 후 70일에는 고온처리구일수록 생육이 저하되는 경향을 보였다. 배추 내부의 무름 증상은 +6.0℃ 처리구가 85.7%로 가장 높았으며, +4.0℃(64.3%), +2.0℃ (28.6%), 평년온도(14.3%), -2.0℃(7.1%)순으로 감소하였다. 광합성률을 측정한 결과, 정식 후 30일전에는 +2.0℃, +4.0℃, +6.0℃ 처리구의 광합성률이 높은 수치를 보였으나, 생육후반에는 크게 감소하였다. Lee et al.(2016)은 기후변화가 배추의 생육과 수량에 미치는 영향을 평가하기 위하여 RCP 4.5 (+3.4℃, 540 ppm)와 RCP 8.5(+6.0℃, 940 ppm) 시나리오

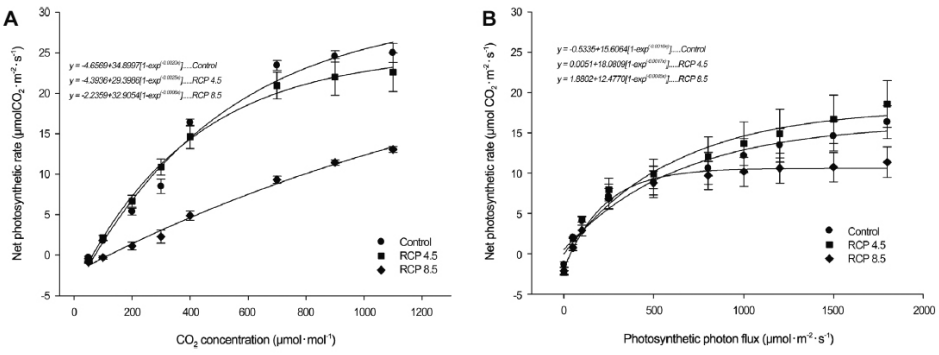


그림 5.14 미래기후조건 하에서 배추의 A/Ci 반응곡선과 광반응곡선 변화(Lee et al., 2016).

기후변화조건의 챔버에서 '추노' 배추를 재배한 결과, 미래 기후조건에서는 배추의 광합성 효율이 감소되어 동화산물 축적이 저해되고 생육 및 수량이 감소한다고 하였다(그림 5.14).

오순자 등(2017a)은 온도구배터널(대기온도 + 4°C 대기온도 + 7°C)을 이용하여 기온상승이 월동무의 광합성, 무기성분 조성, 생장에 미치는 영향을 조사한 결과, 겨울철 온도 상승은 무기염류의 흡수와 광합성 속도를 증가시켜 전반적인 생육을(지상부와 뿌리 건물중, 초장, 뿌리의 길이와 직경) 왕성하게 하지만, 수분이용효율을 감소시켜 수분 부족의 문제가 생길 수 있다고 하였다.

오순자 등(2017b)은 한지형 마늘의 생육 최적 재배온도를 알아보기 위하여 주야간 온도를 달리한 SPAR 챔버 내에서 마늘을 재배하고 그 생육 특성과 광계II 활성, 수확기 인경 및 인편의 특성 등을 조사하였다. 인경의 중량은 17/12~20/15°C에서 가장 무거웠으며, 인경 당 인편 발생률도 17/12~20/15°C에서 가장 높았으나, 인경 당 정상적인 인편 발생률은 그보다 낮은 14/10~17/12°C에서 가장 양호하였다. 인편의 크기와 무게도 14/10~17/12°C에서 재배하였을 때 가장 크고 무거웠다. 광계II의 최대 광화학적 효율(Fv/Fm)과 잠재적 광합성능(Fv/Fo)은 14/10~20/15°C 범위에서 가장 높았으나, 20/15°C 이상의 온도에서는 잎줄기가 터지거나 마늘통이 갈라지거나 벌마늘을 형성하는 등의 이차생장 현상이 관찰되어, 이차생장 발생률을 낮추면서 상품성이 높은 마늘을 생산하기 위해서는 14/10~17/12°C의 낮은 온도 조건에서 재배하는 것이 바람직한 것으로 나타났다(그림 5.15).

이희주 등(2018)은 기온과 토양수분 함량이 난지형 마늘의 생장, 인편분화, 생리장해 및 수량에 미치는 영향을 평가한 결과, 마늘재배시 대기온보다 6°C 높은 고온조건과 다습조건에서는 상품수량이 감소하고, 생리장해 발생이 많아진다고 하였다. 문경환 등(2016)은 기후변화 시나리오에 근거하여 미래의 난지형과 한지형 마늘 재배가능 지역을 예측한 결과, 한지형 마늘은 재배적지가 점차 사라질 것으로 예측된 반면, 난지형 마늘의 적지는 현재 남부지역에서 중북부 지역으로 북상하며 재배적지의 총면적은 증가할 것이라 하였다.

이희주 등(2019)은 고온과 다습조건이 양파의 생육,

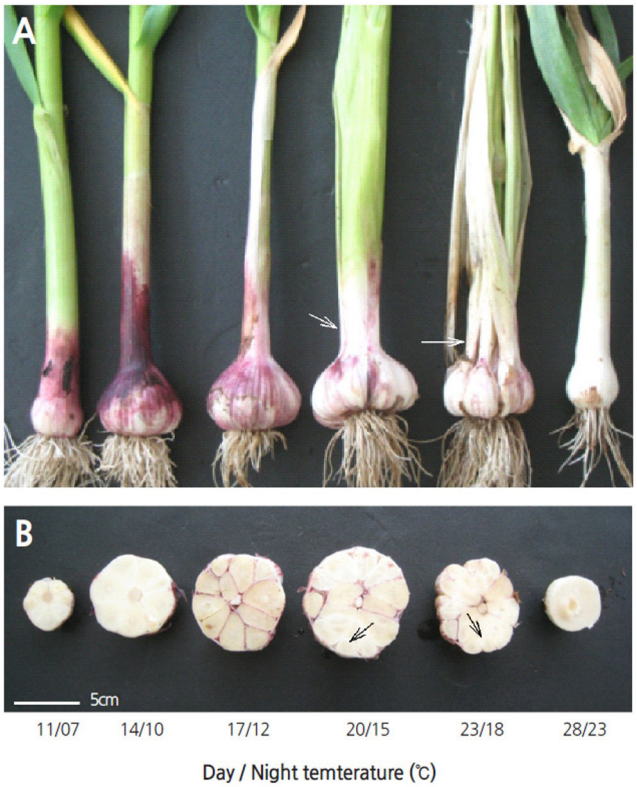


그림 5.15 주야간 온도처리에 따른 한지형 마늘 형태 변화(오순자 등, 2017b).

생리반응 및 수량에 미치는 영향을 구명하기 위한 실험 결과, 양파는 대기온보다 6℃ 고온조건에서 수량이 증수됨을 확인하였으며, 생육 후기 과다한 토양수분은 생장을 억제한다고 하였다. 이형진 등(2014)은 양파의 인경 비대기(3~5월)의 온도 급변이 양파의 생육과 수량에 미치는 영향을 평가하고자 4월 평균온도를 5℃ 낮춘 처리(T1), 5월 평균온도를 5℃ 높인 처리(T2), 4월 평균온도는 5℃ 낮추고 5월 평균온도는 5℃ 높인 처리(T3)와 대조구 처리에서의 양파 생육과 수량을 비교한 결과, 고온처리구(T2)에서 대조구에 비해 생육과 수량이 개선된 반면 저온처리구(T1)에서는 불량해져, 비대기 양파의 생육은 고온조건에서 적합한 것으로 나타났다.

이규빈 등(2019)은 고온이 딸기의 생육, 수량, 품질 및 생리활성 성분에 미치는 영향을 평가하기 위한 실험을 진행하였다. 그 결과, 딸기의 생리활성물질 함량은 25℃보다 20℃에서 높게 나타났으며, 수량과 품질도 20℃에서 가장 좋은 것으로 나타나, 여름철 고온 조건이 딸기 생리활성물질에 부정적인 영향을 미쳐 수량과 품질을 악화시킨다고 하였다.

5.3.3 병해충

본 보고서에서는 RCP 시나리오에 따른 주요 농작물 병해충(노린재, 진딧물, 신문제, 식물병, 기타 외래해충)의 발생위험 연구와 RCP 시나리오에 따른 토마토 황화잎말림병, 꽃매미, 참다래 궤양병 등의 피해 양상 모의 연구를 수록하였다.

이준호 등(2017)은 기후변화에 따른 노린재류 5종(톱다리개미허리노린재, 썩덩나무노린재, 호리허리노린재, 가시점둥글노린재, 가로줄노린재), 진딧물류 5종(목화진딧물, 복숭아혹진딧물, 기장테두리진딧물, 무테두리진딧물, 콩진딧물), 신문제 해충 5종(호박꽃과실파리, 흰띠명나방, 포인세티아총채벌레, 볼록총채벌레, 갈색날개매미충)의 발생위험을 예측하였으며, 기후변화에 따른 식물병 7종(벼 세균벼알마름병, 고추 탄저병, 사과 갈색무늬병, 배 검은별무늬병, 보리 붉은곰팡이병, 감자역병, 배 붉은무늬병)의 발생위험을 예측하였다.

노린재류는 주로 식물의 잎이나 과실의 즙액을 빨아 식량작물과 원예작물 모두에서 큰 피해를 일으키는 주요 해충이다. 현재 전국적으로 발생하고 있는 톱다리개미허리노린재, 썩덩나무노린재, 가시점둥글노린재의 경우 기후변화로 인해 남부지역부터 서식 적합도가 떨어질 것으로 예측되었다. 반면 현재 남해안 일부지역 또는 서남해안가 지역에서 주로 발생하는 것으로 나타난 호리허리노린재와 가로줄노린재의 경우 기후변화로 인해 그 분포가 점차 북상하여 2070년대에 호리허리노린재의 경우 강원 산간지역을 제외한 대부분의 지역에서 발생할 수 있을 것으로 예측되었다(그림 5.16). 가로줄노린재의 경우 국내 대부분의 지역에서 발생할 수 있을 것으로 예측되었으며 특히 내륙지역에서 서식 적합도가 높아질 것으로 예측되어 각별한 주의가 필요할 것으로 나타났다.

진딧물은 식물을 흡즙하여 해를 끼칠 뿐 아니라 각종 식물 바이러스병을 매개하여 작물의 생육, 생산성, 품질 등에 악영향을 미친다. 기후변화가 진행됨에 따라 목화진딧물과 콩진딧물의 경우 여름철, 봄철, 가을철 포괄적 적합도는 계속 높아지고, 겨울철 포괄적 적합도는 남부지역에서만 높아지는 것으로 예측되었다. 복숭아혹진딧물의 경우 봄철, 가을철 포괄적 적합도는 전국적으로, 겨울철 적합도는 남부지역에서만 높아지는 반면 여름철 포괄적 적합도는 2050년대까지는 계속 증가하다 2070년대부터 감소하는 것으로 나타났다. 무테두리진딧물과 기장테두리진딧물의 경우 여름철, 봄철, 가을철 포괄적 적합도는 계속적으로 증가하지만, 겨울철 적합도는 계속해서 낮게 유지되어 번식하기 어려운 상태를 보였다.

흰띠명나방은 주로 엽채류인 시금치, 근대, 비트 등의 작물에 피해를 주는 해충으로 현재 국내 내륙에서 2~3세대 발생하는 것으로 나타났지만, 2090년대에는 5세대까지 발생할 수 있는 것으로 예측되었다. 호박꽃과실파리는 꽃 내부에 산란하여 유충이 꽃의 봉우리 혹은 드물게 과육을 섭식하여 피해를 주는 해충으로 현재 내륙지역은 9~10세대, 산악지역에서는 4~5세대 발생하는 것으로 나타났으나, 2090년대는 대부분의 지역에서 10세대까지 발생할 수 있는 것으로 예측되었다.

볼록총채벌레는 포도, 감귤, 망고 등의 과수의 신초나 과실에 피해를 입히는 해충으로 현재 내륙지역은 4~5세대,

산악지역에서는 1~2세대 정도 발생할 수 있는 것으로 나타났지만, 2090년대에는 내륙지역은 9~13세대까지 발생할 수 있는 것으로 예측되었다. 갈색날개매미충은 사과나무, 두릅나무 등을 포함한 62과 138조의 식물을 기주로 하는 해충으로 현재 내륙지역에서는 1세대만 나타날 수 있는 것으로 알려져 있지만, 남부지역에서는 2세대까지 발생할 수 있는 것으로 예측되었으며, 2090년대에는 지역에 따라 1~3세대까지 발생할 수 있는 것으로 예측되었다. 포인세티아총채벌레는 2010년 제주시 수입식물 재배온실에서 처음 확인된 해충으로 국내의 경우 아직까지는 온실에서만 발생하는 것으로 알려져 있다. 하지만 포인세티아총채벌레는 내륙지역에서는 11세대까지 산간지역에서는 2세대 발생할 수 있는 것으로 예측되었으며, 2090년대에서는 대부분의 지역에서 10세대 이상 발생할 수 있는 것으로 예측되어, 온실뿐만이 아니라 노지에서의 발생여부 모니터링이 필요한 것으로 판단된다(그림 5.17).

벼 세균벼알마름병은 주로 벼알에서 발생하는 종자전염성병으로 출수기 고온과 잦은 강우 시 많이 발생한다. 기준연대(2001~2010년)에 우리나라 서해안을 중심으로 위험도가 높게 나타나고 있으며, 2090년대까지 점차적으로 위험도가 높아져, 전국적으로 5등급의 위험도를 보이게 되어 벼 재배에 큰 피해를 줄 것으로 예측되었다. 감자 역병은 습윤한 상태에서 나타나는 병으로, 첫 발생 이후 일주일 이내에 전체 포장으로 퍼질 정도로 확산력이 빠른 주요 병해이다. 기준연도에는 경기도 북부, 강원도, 전라도 일부 지역에서 위험도가 높게 나타났으나, 이후 점차 감소할 것으로 예측되었다. 하지만 감자 주산지인 고랭지에서는 2090년대까지도 높은 위험도를 보이는 것으로 나타나

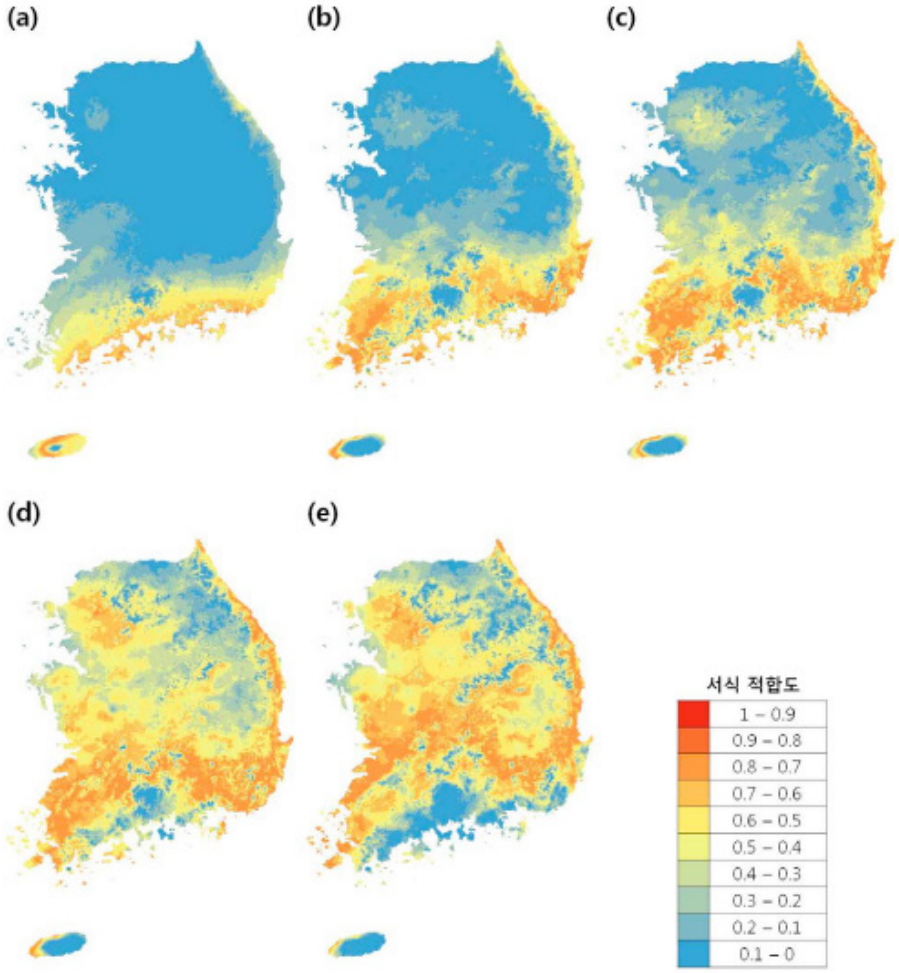


그림 5.16 시기별 호리허리노린재의 서식 적합도 변화(이준호 등, 2017). [(a)2000년대, (b)2030년대, (c)2050년대, (d)2070년대, (e)2090년대]

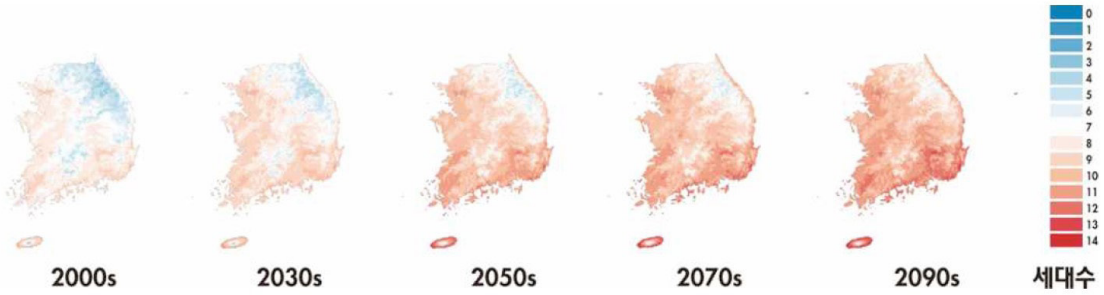


그림 5.17 RCP 8.5 시나리오에 따른 포인세티아총채벌레의 연대별 발생세대수 변화(이준호 등, 2017).

주의가 요구된다. 보리 붉은곰팡이병은 보리와 밀 이삭의 종실을 연갈색으로 변하게 하며 마름증상을 일으키고 분홍생 곰팡이를 생기게 하는데 심할 경우 종실이 여물지 못하여 쭉정이가 된다. 보리 붉은곰팡이병의 위험도는 전국적으로 2등급 이상으로 나타났으며 기후변화에 따른 위험도 변동은 크지 않을 것으로 예측되었다. 고추 탄저병은 고온다습한 조건에서 빠르게 전파되는 고추의 주요 병해이다. 기준연대와 비교했을 때 2070년대까지 대부분의 지역에서 그 위험도가 비슷하거나 감소하는 것으로 예측되었지만, 남해안 지역에서는 위험 등급이 높았으며, 2090년대에는 2~4등급으로 기준연대보다 위험성이 높아질 것으로 예측되었다. 사과 갈색무늬병은 여름철 비가 많고 기온이 낮은 해에 많이 발생하여 사과나무에서 조기낙엽을 가장 심하게 일으키는 병이다. 기준연도에는 주요 지역이 2~4등급의 위험도를 보인 반면, 2030년대 이후부터 우리나라 전역에서 위험도가 매우 높을 것으로 예측되었다. 배 검은별무늬병은 국내 배 재배의 80%를 차지하는 '신고' 품종에서 많이 발생하는 병으로 잎과 과실에 검은 병반이 나타난다. 기준연대에는 서해안 일부 지역을 제외하고는 1등급의 위험도를 보이고 있으나, 2030년대 이후 배 검은별무늬병은 전국적으로 4등급 이상의 매우 높은 위험도를 보일 것으로 예측되었다. 배 붉은별무늬병은 4~5월까지 배나무에 기생하다 6월 이후 향나무류에 기생하는 병원균으로 잎과 과실에 황색 반점을 만드는 병이다. 기준연대에는 경기도, 충청남도, 충청북도, 전라북도, 경상북도, 강원도 지역에서 3~5등급으로 위험도가 높으나, 점진적으로 위험도가 감소할 것으로 예측되었다.

토마토 황화잎말림병은 2008년 경남 통영의 토마토 농가에서 처음 발견된 후 전국으로 급속히 확산되고 있는 병이다. RCP 8.5 시나리오하의 기온상승에 따라 2040년의 토마토 황화잎말림병의 피해 정도는 현재에 비하여 커지고, 그 피해도 전국적으로 퍼질 것으로 예측되었다. 그 중 피해의 증가폭이 가장 큰 지역은 춘천, 횡성, 홍성 일대, 부여, 보령 일대, 경주로 나타나, 지역 특성, 공간적 분포, 지역의 토마토 재배 양상에 따른 지역 단위 정책 수립이 필요할 것으로 판단된다(윤지윤 등, 2015).

꽃매미는 한국에 유입된 후 최근 몇 년 동안 지리적으로 급속히 확산하여 과수에 피해를 입히고 있으며, 현재 서울과 경기남부, 충청도, 경상도 및 전라도 북부에서 발견되고 있다. RCP 8.5 시나리오 하에서 꽃매미 발생 기후 적합도를 계산한 결과 2060년 경에 이르면 현재 꽃매미 서식 부적합지로 알려진 강원도 산간지역을 포함한 남한지역 전역이 겨울 최저기온 상승으로 인해 꽃매미 서식 적합지역이 될 것으로 예측되어(그림 5.18) 경제적 피해가 더욱 증가할 것으로 예상된다(안현진 등, 2018).

참다래 궤양병은 1988년 제주에서 처음으로 발생하여 현재 참다래의 주요 병해 중 하나로 알려져 있다. 참다래 병 피해 예측 모형 'D-PSA-K', 미래 참다래 재배가능지 지도와 기후변화 시나리오(RCP 4.5, RCP 8.5)를 이용하여 미래 참다래 궤양병 피해를 예측해 본 결과, 2050년대에 이르면 남부지역을 제외한 대부분의 지역에서 최대 75% 이상의 이병주율을 보여 피해가 극심할 것으로 예상되었다. 월동기 저온 환경의 감소는 궤양병 피해를 감소시키는데, 이를 고려할 경우 참다래 궤양병의 피해 양상은 지역별로 상이할 것으로 모의되나 RCP 4.5 시나리오 하에서는 궤양병 피해가 현재와 비교해 큰 차이가 없거나 감소할 것으로 예상된다(도기석 등, 2016).

5.3.4 잡초

본 보고서에서는 제주도를 중심으로 발생하고 있는 외래 잡초의 분포에 대한 기후변화 영향평가 연구를 수록하였다.

이준호 등(2017)은 기후변화(RCP 8.5)에 따른 외래 밭 잡초 10종(가시비름, 청비름, 주홍서나물, 큰땅빈대, 양명아주, 냄새냉이, 실망초, 선풀솜나물, 큰참새피, 큰이삭물)의 발생 위험도를 예측하였다. 가시비름은 현재 분포지인 제주도를 중심으로 2030년대에는 증가하다가 2050년대에는 감소하고 2070년대 다시 증가하다 2090년대가 되면 감소하는 경향을 보였다. 청비름은 현재 분포지인 남부지방에서 점진적으로 북상하여 2090년대에는 중북부지방까지 확산할 것으로 분석되었다. 주홍서나물은 분포지역이 조금씩 감소하는 경향으로 분석되었다. 큰땅빈대는 2090년대까지 지속적으로 분포범위가 증가하는 것으로 분석되었으며, 경기도, 중청남도, 경상북도를 중심으로 확산이 이루어 질 것으로 모의되었다. 양명아주는 제주도와 남부지방 위주로 분포하나 점차 분포범위가 축소되는 것으로 나타났다. 냄새냉이는 2070년대까지 제주도 해안가를 중심으로 조금씩 증가하는 양상을 보일 것으로 예측되었다. 선풀솜나물은 분포의 범위에 큰 변화가 없을 것으로 예측되었다. 큰참새피는 2050년대 분포범위가 조금 감소하다 이후 다시 늘어나는 것으로 보고되었다. 큰이삭풀은 2070년대까지 분포범위가 남부지방을 중심으로 빠르게 증가하다, 2090년대에 이르면 다소 감소할 것으로 나타났다. 실망초는 2030년대까지는 제주도와 남부지방을 중심으로 분포하다가 2070년대부터 급격하게 분포지역이 확대되어 전라도와 충청남도까지 분포지역이 확대되고, 2090년대에는 경기도와 충정북도, 강원도 해안지역으로 분포범위가 증가하는 양상을 보일 것으로 예측되었다(그림 5.19)(이용호 등, 2015).

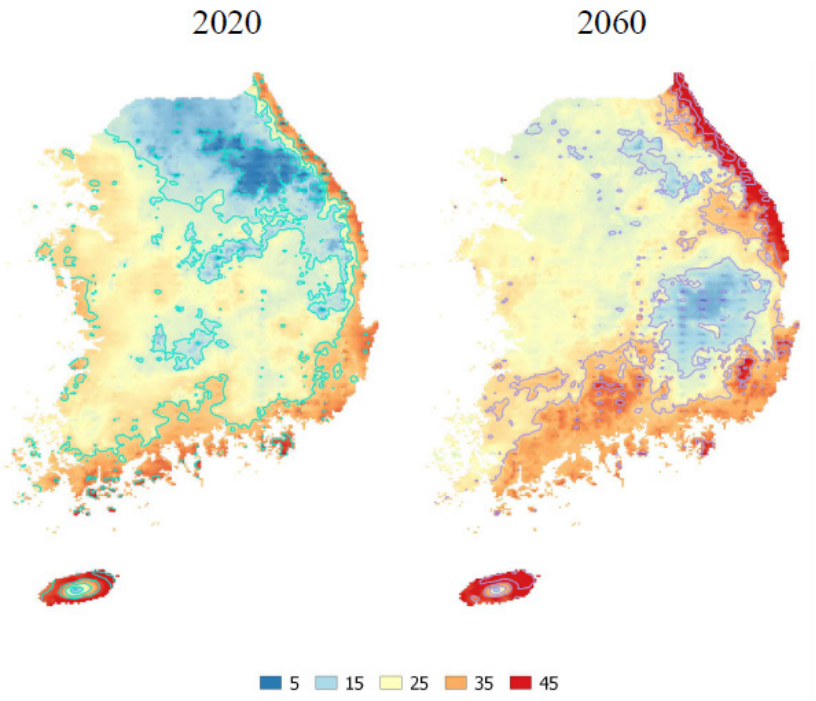


그림 5.18 RCP 8.5 시나리오에 따른 2020년대와 2060년대 꽃매미 EI(Ecoclimate Index) 지수(안현진 등, 2018).

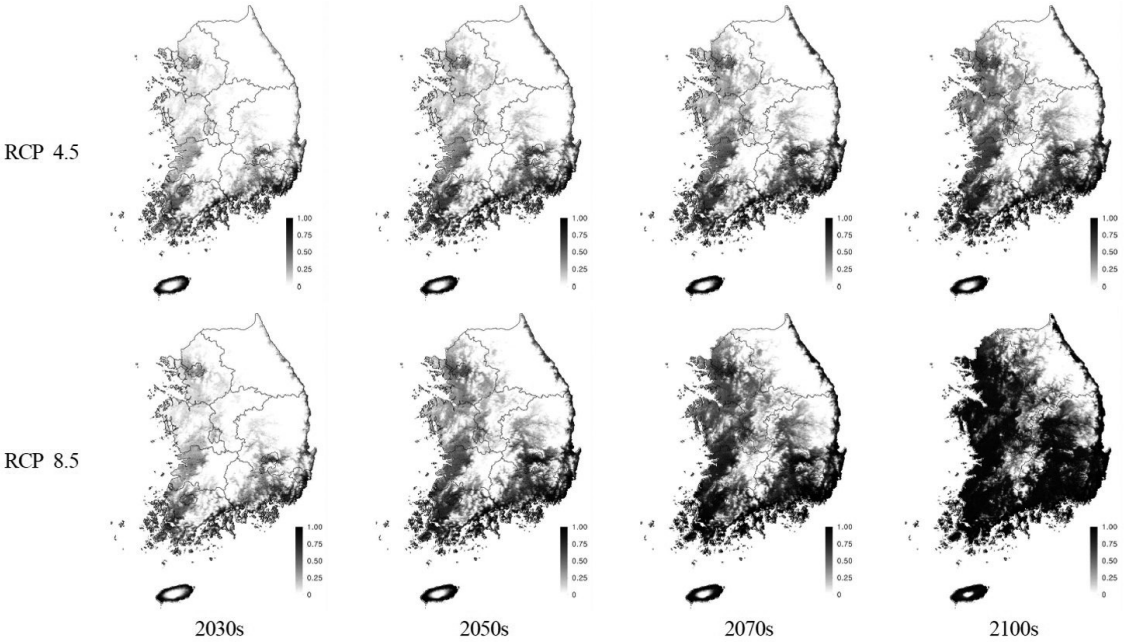


그림 5.19 RCP 4.5와 RCP 8.5 시나리오에 따른 실망초 잠재분포 변화(이용호 등, 2015).

5.4 취약성의 주요 원인

「한국 기후변화 평가보고서 2014」에서는 식량작물의 취약성의 원인으로 온도와 오존 농도 상승으로 인한 식물체 생리기능 저하 등 개괄적인 생리적 원인에 대하여 보고하였지만, 작물에 따른 취약성 주요 원인은 다루어지지 않았다. 원예작물의 경우도 겨울철 온도 상승으로 인한 과수의 휴면 타파 지연과 식물계절 변동으로 인한 피해, 성숙기 고온 피해 등에 대하여 보고하였지만, 구체적인 실험이 수록되어 있지는 않았다. 병해충의 경우 재배 가능한 농작물의 종류와 작형 변화에 따른 병해충 발생 양상의 변화, 따뜻한 월동환경, 식물기간의 연장, 장마 변동 등에 따른 월동병해충의 증가와 토착화, 국외로부터 들어오는 아열대성 병해충의 증가, 유해생물군의 돌발적 발생과 규모화 등이 문제가 될 것이라 하였으나, 이와 관련된 국내 연구논문은 보고되지 않았다. 잡초의 경우 국외 문헌을 토대로 기후의 변화가 외래잡초의 분포를 넓힐 것이며, 이산화탄소 농도의 증가는 일부 제초제의 효과를 낮출 것이라 보고하였으나 국내연구는 수록되지 않았다.

5.4.1 식량작물

본 보고서에서는 작물별로 기후변화에 취약한 생육시기와 그 원인에 대한 국내 재배실험들을 수록하였다.

벼가 고온에 가장 민감한 시기는 감수분열기와 출수기로 해당 시기의 고온은 벼의 불임을 조장하여 급격한 수량 감소를 야기한다. Jung et al.(2015)은 벼 개화기 기상환경이 영화불임에 미치는 영향을 비교 검토하였는데, 개화기 기온의 상승과 더불어 포화수증기압차의 증가가 벼의 임실률 저하를 비교적 정확히 설명한다고 하였으며, 임실률은 기온 36℃와 포화수증기압차 3.0 kPa에서 50%로 저하된다고 보고하였다(그림 5.20). 아직까지 온대지역에서는 이와 같은 고온불임의 피해는 크지 않은 것으로 판단되나, 이상고온이 발생한 해의 경우 개화기 불임이 논 포장조건에서 발생한다는 일본 내의 보고가 있어(Hasegawa et al., 2011), 국내의 논에서도 고온불임의 피해가 작게나마 나타나고 있을 것으로 사료된다. 임실률은 한계온도(35℃) 이상의 기온상승에 급격하게 반응하기 때문에 미래기후에서는 해에 따라 극심한 불임으로 인한 감수가 나타날 수 있다고 판단된다. 감수분열기와 개화기 다음으로 고온에 민감한 벼의 생육시기는 등숙기로 알려져 있다. 손지영 등(2015)은 등숙기

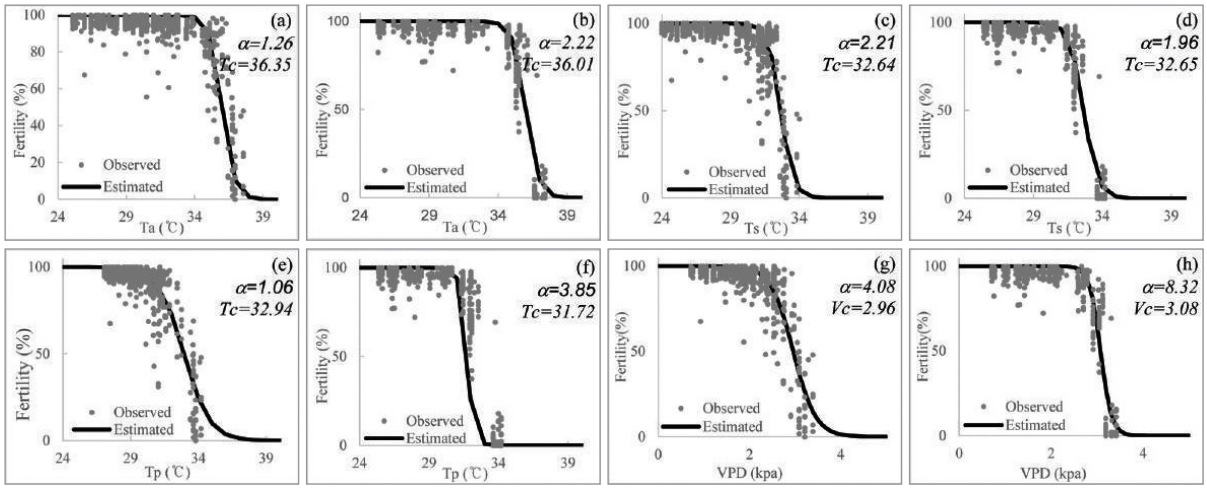


그림 5.20 대기온, 영화 내부온도, 이삭 표면온도, 포화수증기압차에 대한 벼 임실률(Jung et al., 2015).

고온이 벼 잎의 생리적 활력과 등숙에 미치는 영향을 알아보고자, 동안과 일품 두 품종의 등숙기에 고온을 처리하여 등숙 형질을 분석하고, 잎의 광합성, 엽록소 함량 및 엽록소 a/b율 등을 조사하였다. 등숙률, 완전립률, 천립중은 등숙기 고온(27±4℃)에 의해 감소하였으며 일품이 동안에 비해 민감하게 반응하였다. 등숙초기 엽록소 함량과 단백질농도는 고온에서 증가하였지만, 등숙 중기이후에는 온도처리에 따른 차이가 없었다.

최대 광합성량은 출수 후 14일에 고온이 적온보다 높았으나, 출수후 7일과 등숙후기에는 유의한 차이가 없었다. 잎의 유리당 함량은 고온이 적온보다 낮았다. 위의 결과들을 종합해보면 등숙기 고온은 잎의 생리적 활력을 적온보다 오히려 증가시켜 엽록소함량과 광합성율을 증가시켜, 고온에 의한 등숙저하는 이삭으로의 전류나 전분축적기작 과정의 문제에 기인하는 것으로 판단된다고 하였다. Shi et al.(2017)도 등숙기 주간고온으로 인한 벼의 전분축적 관련 효소 활성의 감소가 벼의 등숙에 부정적 영향을 미친다고 보고하였다. 등숙기 고온은 벼의 수량과 더불어 품질에 영향을 주는 것으로 보고되는데, Chun et al.(2015)는 등숙기 고온이 쌀(일품벼와 추청벼)의 호화온도를 높여 취반특성을 감소시키고 식미에 악영향을 미친다고 하였다(표 5.2).

감자가 고온에 가장 민감한 시기는 괴경형성기로 알려져 있다. Kim and Lee(2019)는 생육시기별 야간고온과 주간고온이 봄감자 '수미'의 생육과 수량에 미치는 영향을 분석한 결과, 괴경형성기 야간고온은 괴경의 발달을 지연시켜 괴경비대기간을 단축시켜 수량을 감소시킨 반면 괴경형성기 주간고온은 광합성속도와 더불어 발달 중인 괴경의 sink strength를 감소시켜 식물체 건물중과 수량을 같이 감소시킨다고 하였다. 괴경형성 이후에는 고온에 의한 피해가 작아지거나 없어지는 것으로 나타났는데, 이는 감자에서의 고온피해 기작이 주로 괴경의 발달과 연관되어 있기 때문이라고 하였다. 최근 기후변화로 인해 봄가뭄의 빈도수가 증가하여, Chang et al. (2018)은 생육초기 가뭄이 감자의 생육과 수량에 미치는 영향을 평가하였다. 생육초기 가뭄은 지상부 생육을 억제하는데 조생종의 경우 괴경의 길이신장을 억제하여 괴경수량을 감소시킨다고 하였다. 반면 만생종은 가뭄의 길이에 따라 수량반응이 다르게 나타난다고 하였다. 장기간의 가뭄에 이은 강수는 조생종에서 괴경의 이차생장 발생률을 증가시켜 괴경의 수량과 더불어 품질도 악화시킨다고 하였다.

가을보리는 온도가 상승함에 따라 출수기가 앞당겨지며, 등숙기간이 보다 서늘한 계절로 이동하여 수량이 증가할 가능성이 있지만, 이현석 등(2017a)에 따르면 월동기 고온처리는 봄철 생식생장기로의 전환을 빠르게 하여 분얼의 발달을 저해하고 단위면적당 수수를 감소시켜, 수량이 감소할 가능성도 존재한다. 또한, 온도 상승은 월동전 혹은 이른 봄에 보리의 유수를 분화시킴으로 냉해의 위험을 높이기도 한다. 보리도 벼와 마찬가지로 등숙기 고온에 민감한 것으로 알려져 있다. 이현석 등(2017b)은 보리의 등숙기 고온이 전분합성 및 동화산물 전류 특성에

표 5.2 등숙온도에 따른 쌀의 호화 특성(Chun et al., 2015).

cultivar	ripening temperature (°C)	T_o (°C)	T_p (°C)	ΔH (J/g)	T_c (°C)	ΔT (°C)
Ilpum	22/14	68.5b	74.8d	4.18c	86.6d	18.1d
	25/17	70.1a	77.0c	5.58b	89.8c	19.8c
	28/20	70.7a	79.7b	6.11b	92.1b	21.4b
	31/23	70.8a	81.3a	7.32a	94.2a	23.6a
Chucheong	22/14	67.7c	74.8d	4.69b	88.0d	20.2b
	25/17	68.3c	76.7c	6.56c	90.3c	21.7ab
	28/20	70.6b	79.5b	6.16b	92.3b	21.7ab
	31/23	71.5a	81.6a	8.26a	94.9a	23.4a

[a] T_o, onset temperature; T_p, peak temperature; T_c, completion temperature; ΔH, gelatinization enthalpy; $\Delta T = T_c - T_o$. Values with the same letter in a column are not different significantly according to a Duncan's multiple-range test ($p < 0.05$).

표 5.3 등숙기 고온조건에 따른 보리 전분호화특성 변화(이현석 등, 2016).

Temperature (℃)	Treatment stage (DAH)	Ripening period	Peak viscosity (RVU)	Trough viscosity (RVU)	Final viscosity (RVU)	Break down (RVU)
21(16/26)	10	42	256[a]	142[a]	206[a]	114[a]
24(19/29)	10	37	170[d]	109[c]	148[c]	61[c]
	17	39	227[c]	132[b]	192[b]	95[b]
	24	40	241[b]	143[a]	206[a]	98[b]
27(22/32)	10	33	106[f]	70[f]	85[e]	36[d]
	17	34	168[d]	104[d]	138[d]	64[c]
	24	36	159[e]	99[e]	145[c]	60[c]

†Mean separation within colums by Duncan's multiple range test at 5% level
‡Thermal treatment was lasted until the harvest time.

미치는 영향을 분석하였다. 등숙기 평균온도가 18.4℃에서 21.2℃로 약 3℃ 상승함에 따라 천립중은 약 4.2 g 감소하였으며, 등숙기간은 약 5일정도 단축된 반면 전분합성 최대속도는 약 11% 증가하여 동화산물의 이삭으로의 분배속도가 증가하였다. 전분합성 각 단계에 관여하는 유전자의 발현양상은 고온처리에서 초기 발현량이 증가하였지만, 발현 지속정도가 빠르게 감소하는 경향을 보였으며, 특히 soluble starch synthase의 감소가 두드러졌다. 엽신의 노화속도는 온도가 상승할수록 크게 증가하였지만, 등숙이 거의 완료된 이후에 크게 증가하여, 고온에서의 등숙기간 단축에 엽신의 노화가 영향을 주지는 않는 것으로 보인다. 위 결과들을 종합해보면 고온조건에서의 전분합성 지속정도 감소로 인한 등숙기간의 단축이 보리의 수량을 제한하는 것으로 사료된다. 등숙기 고온은 수량과 더불어 보리의 품질에도 영향을 미치는데, 이현석 등(2016)은 등숙기 고온처리의 온도가 높아지고(대조구 21℃, 고온처리구 24℃, 27℃) 처리시기가 길어짐에 따라 전분호화특성에서의 최고점도가 낮아지며, 최저점도, 최종점도, 강하점도 등의 특성들에서도 유사한 경향이 나타난다고 하였다(표 5.3).

5.4.2 원예작물

본 보고서에는 착색기 고온이 과실의 품질에 미치는 영향에 대한 재배실험들을 수록하였다.

과실의 색은 소비자를 유혹하는 주요 품질로, 생육후기의 고온은 착색을 불량하게 만들어 경제적 피해를 야기하는 것으로 알려져 있다. 류수현 등(2015)은 생육후기 야간고온이 '후지' 사과의 과실 품질에 미치는 영향을 평가하기 위해 7월부터 10월까지 인공기상실에서 대기온도 대비 -4℃, +4℃의 야간온도 처리를 하였다. 그 결과 생육후기 야간고온은 '후지' 사과의 과실 품질(과실의 횡경, 과중, 당도)에는 영향을 미치지 않지만, 잎과 과실의 당 조성을 변화시키며, 안토시아닌 생합성 유전자의 발현과는 관계없이 과피의 착색을 억제한다고 하였다(그림 5.21). 김선애 등(2016)은 고온에 의한 '홍로' 사과의 착색 피해가 착색 초기단계에 가장 크게 나타난다고 보고하였다.

류수현 등(2018)은 착색 초기부터 30일 동안의 고온처리에 의해 '거봉' 포도의 과피의 착색이 감소하고, 고온처리의 종료 후에도 착색이 정지된 상태로 안토시아닌

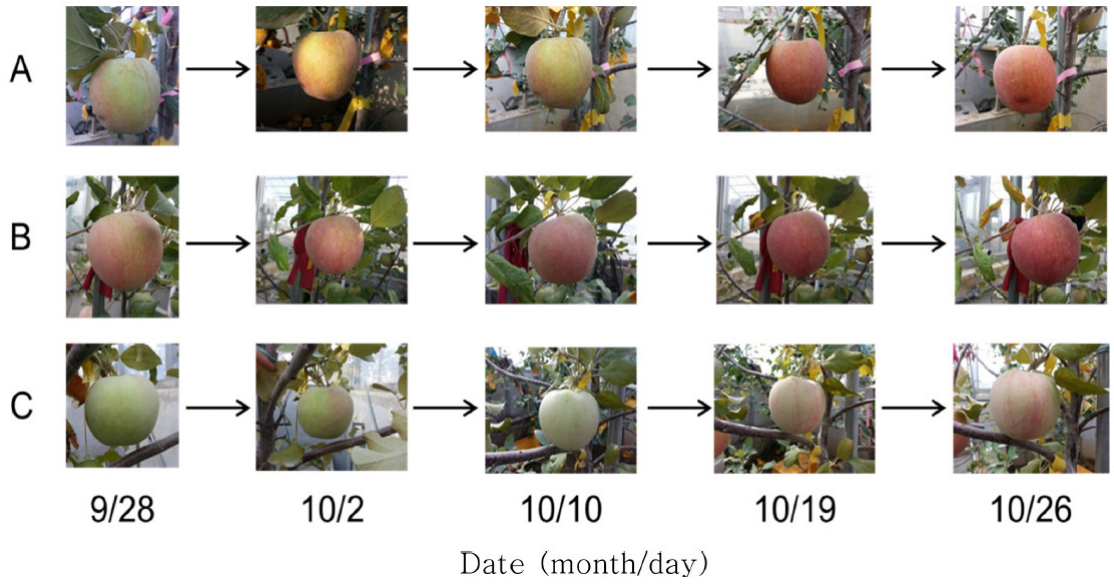


그림 5.21 생육후기 야간온도에 따른 '후지' 사과의 착색 변화(류수현 등, 2015). [(A)대조구, (B)야간저온, (C)야간고온]

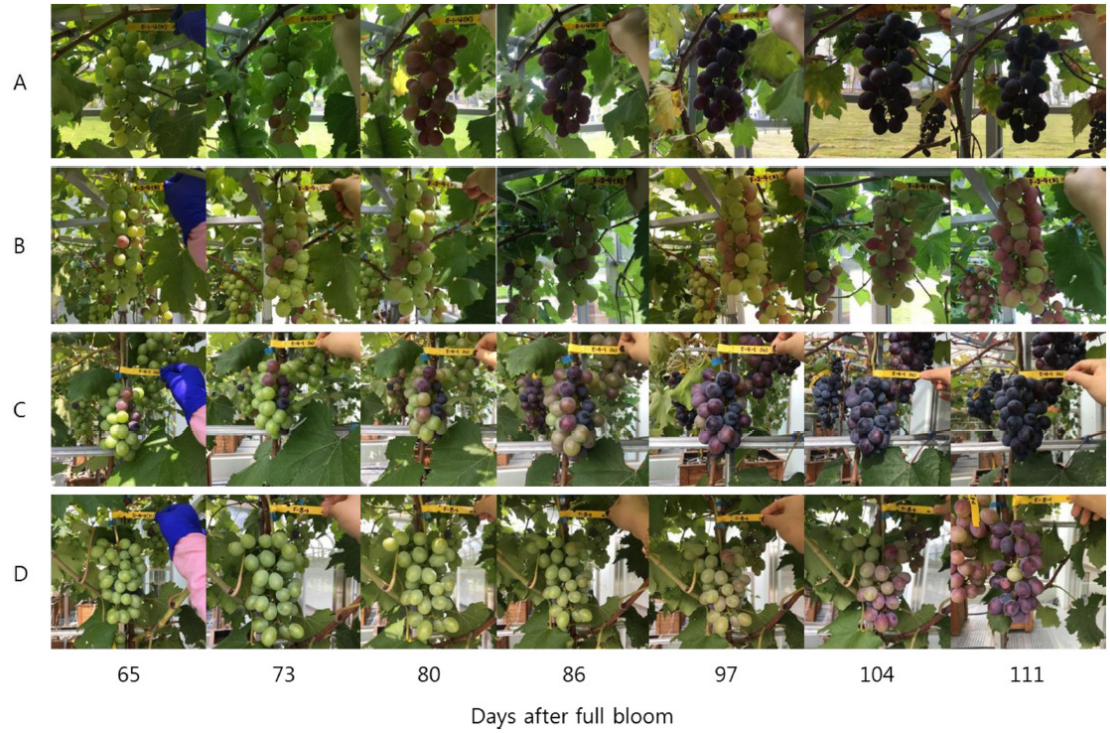


그림 5.22 고온에 따른 '거봉'과 '흑보석' 포도 착색 변화(류수현 등, 2018). [(A) '거봉' 대조구, (B) '거봉' 고온구, (C) '흑보석' 대조구, (D) '흑보석' 고온구].

함량이 증가하지 못함을 보고하였다(그림 5.22). 그러나 '흑보석' 포도에서는 고온에 의한 과피 착색 감소가 고온 처리 후 회복된다고 하여 고온에 대한 착색반응에 품종간 변이가 있는 것으로 사료된다. 류수현 등(2019)은 변색초기 고온으로 인한 착색 불량의 원인은 과피에서의 안토시아닌 생합성 억제이며, 이는 ABA와 GA의 비율로 조절된다고 하였다.

5.4.3 병해충

본 보고서에서는 기후변화에 따른 병해충 피해 정도와 작물의 생물계절과의 관계에 대한 국내 연구와 기후변화가 작물의 병해충 저항성에 미치는 영향에 대한 연구를 수록하였다.

잎집무늬마름병은 매년 전국 모든 지역에서 발생하는 것으로 알려진 벼에서의 주요 병해로, 균핵이 겨울 동안 토양이나 그루터기 등에서 월동하여 모내기 이후 벼의 잎과 잎집사이에 붙으며 엽초의 표면에 회록색 병반을 만들어 천립중과 수량을 감소시킨다. 김용준과 안동환(2018)은 농업기후지대, 벼의 출수생태형, 병해충 발생에서의 공간효과 등을 고려한 기후변화에 따른 잎집무늬마름병의 발생률을 예측하기 위해 병해충 공간효과 모형과 병해충 피해함수 모형을 구축하였다. 모형을 이용한 모의 결과, 기후변화에 따른 잎짚무늬마름병 발생률의 변동은 지역별로 상이하였으나, 2071~2100년을 기준으로 조생종과 중생종은 남부해안지대에서 최대치를 보였으며, 중만생종은 중부내륙지대에서 최대 발생률을 나타냈다. 동해안중부지대의 경우 잎집무늬마름병의 절대적 발병률은 낮지만, 2011년~2040년 대비 2071년~2100년 500% 이상의 발병률 증가율을 보여 향후 피해가 예상된다고 하였다. 반면, Kim et al.(2015)은 필리핀 국제미작연구소(International Rice Research Institute; IRRI)에서 개발한 EPIRICE 벼 병해충

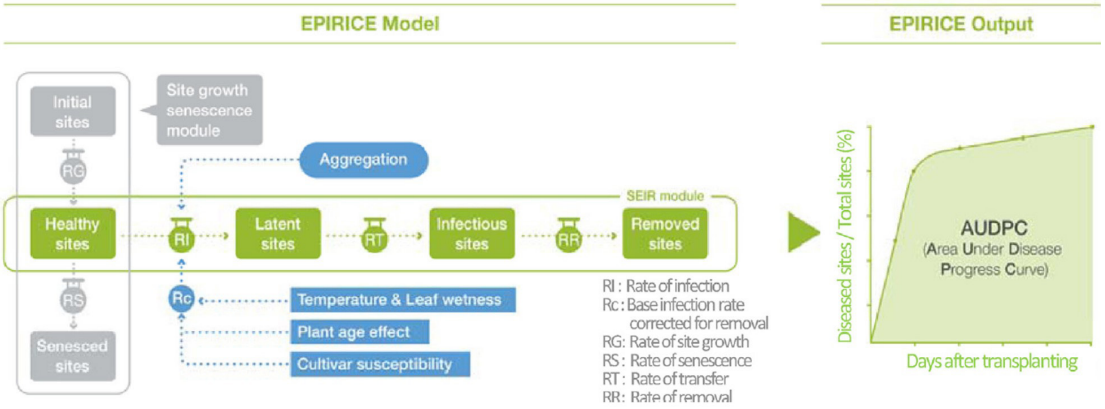


그림 5.23 EPIRICE 병해충 모형의 구조와 출력형태(Kim et al., 2015)

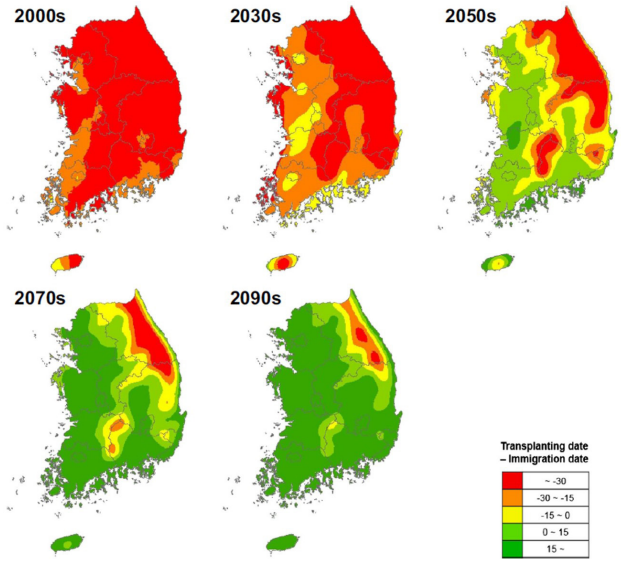


그림 5.24 기후변화에 따른 오대벼 이앙기와 월동 먹노린재 99% 발생시기 차이의 변화(Lee et al., 2016).

모형(그림 5.23)을 국내 특성에 맞게 개선하여, 벼 도열병과 잎집무늬마름병에 대한 기후변화 영향을 평가하였다. 그 결과 미래기후에서 벼 도열병과 잎집무늬마름병의 잠재적 발병률은 감소할 것으로 예측되었으나, 도열병은 2020년대 중반까지, 잎집무늬마름병은 2040~2070년대에 연차간 변이가 클 것으로 모의되어, 이 기간 병해충 발생 모니터링과 예찰시스템 개발 및 활용의 필요성이 크다고 하였다. 위의 두 연구와 같이 이용하는 모형에 따라서 기후변화의 영향은 다르게 평가될 수 있기에, 다양한 모형들을 모두 이용해 결과를 예측하고, 그 결과를 통합 분석하는 앙상블 모델 연구가 필요할 것으로 사료된다. Lee et al.(2016)은 기후변화(RCP 8.5)에 따라 벼의 병해충인 월동 먹노린재의 발생과 벼의 생물계절 이동을 비교 분석하여 미래 월동 먹노린재의 본답 정착 가능성을 평가하였다. 기온이 상승함에 따라 월동 먹노리재의 발생시기가 앞당겨지는 것으로 나타났으나, 벼의 이앙기는 뒤로 미룰 수 있는 것으로 나타나, 2050년대부터 남부 해안 등 일부 지역 본답에서의 먹노린재 정착이 어려워질 것으로 예상되며, 2090년대에 이르면 산간지역을 제외한 대부분의 지역에서 본답 정착이 불가능 할 것으로 추정되었다(그림 5.24). 위 결과들을 종합해보면 미래기후에서의 병해충 피해 정도는 병해충 발생의 규모와 횟수와 더불어 병해충 발생시기와 작물의 생육계절의 동시성에 의해 결정될 것으로 판단된다.

또한, 기후변화는 식물 병해충의 발병력과 기주 식물의 저항성에 모두 영향을 미칠 것으로 예상된다. 장종옥 등(2018)은 이산화탄소 농도 상승이 고추와 세균점무늬병간의 상호 작용에 미치는 영향을 구명하기 위해, 400 ppm과 800 ppm의 이산화탄소 농도에서 고추의 병저항성 유전자 발현량과 세균점무늬병의 발병도를 확인하였다. 그 결과 이산화탄소 농도의 상승은 고추 식물체의 병저항성 관련 유전자의 발현을 감소시켜 세균점무늬병의 발병도를 증가시킨다고 하였다.

5.4.4 잡초

본 보고서에서는 온도 상승에 따른 벼와 논 잡초간의 생육 비교 연구와 온도 상승에 따른 제초제 방제 효과 변화에 대한 국내논문을 수록하였다.

일반적으로 농지에서 문제가 되는 잡초는 작물보다 적응할 수 있는 환경의 범위가 넓으므로 기후변화에 따른 피해가 작물에 비해 작거나, 오히려 생육이 증진될 수 있다.

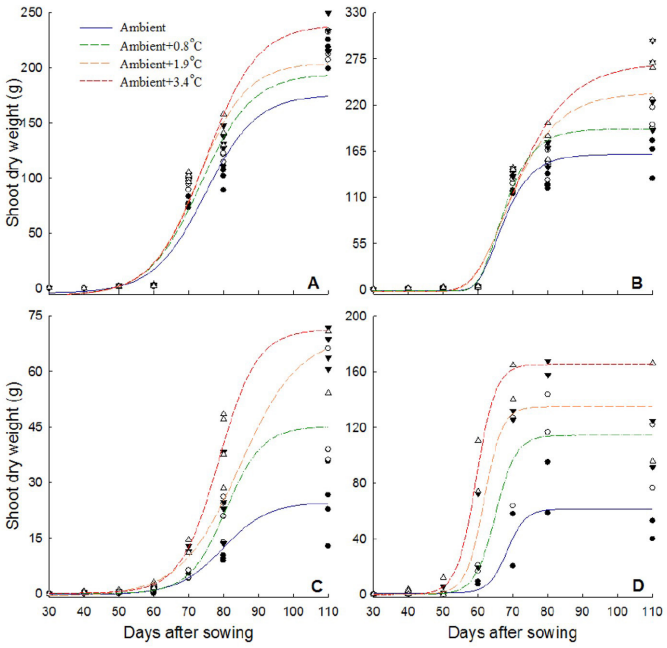


그림 5.25 온도상승에 따른 벼(A), 강피(B), 물달개비(C), 여뀌바늘(D)의 지상부 생육 변화(Bir et al., 2018).

표 5.4 온도에 따른 HPPD 저해 제초제[benzobicyclon+mefenacet+phenoxsulam (3+18+0.5)% 액상수화제]의 논 잡초(강피, 물달개비, 올챙이고랭이, 올방개)에 대한 약효 변화(박태선 등, 2017).

Temperature (°C)	*Echinochloa oryzicola*		*Monochoria vaginalis*		*Scirpus juncoides*		*Eleocharis kuroguwai*	
	Control value (%)							
	15 DAT[z]	25 DAT	15 DAT	25 DAT	15 DAT	25 DAT	15 DAT	25 DAT
20.0	65	95	100	100	75	95	40	90
22.5	100	100	100	100	90	100	55	90
25.0	85	95	100	100	95	100	70	95
27.5	60	40	100	100	100	100	80	95

[z]DAT: days after treatment

Bir et al.(2018)은 온도가 상승한 조건의 논에서 벼와 논 잡초의 생육 양상을 비교하기 위하여 파이토트론을 이용하여 4개의 온도처리구(대기온, 대기온 + 0.8℃, +1.9℃, +3.4℃)를 만들어 벼와 잡초의 생육을 관측하였다.

3.4℃ 높은 고온조건에서 벼의 지상부 생육은 30.4% 정도 증가하였지만, 일년생 잡초인 여뀌바늘의 지상부 생육은 211.8% 증가하였으며, 물달개비와 강피도 벼에 비해 지상부생육의 증가폭이 컸다(그림 5.25). 다년생 잡초인 벗풀도 고온 조건에서 지상부 생육이 124.8% 증가하여, 기온이 상승됨에 따라 논에서의 잡초 피해는 커질 것으로 예측된다.

기후변화는 잡초의 생육과 발생 양상을 변화시키는 동시에 제초제의 방제 효과에 영향을 주기도 한다. 박태선 등(2017)은 온도가 상승함에 따라 국내에서 널리 사용되고 있는 HPPD 저해 제초제의 벼에 대한 약해와 논 잡초(강피, 물달개비, 올챙이고랭이, 올방개)에 대한 약효 변동을 구명하기 위한 실험을 수행하였다. 그 결과, 강피를 제외한 잡초들에 대한 HPPD 저해제의 방제가는 고온(27.5℃)에 의해 감소하지 않았지만, 강피의 경우 25℃까지의 온도에서는 95%이상 방제가 되었지만, 고온조건(27.5℃)에서는 HPPD 저해제의 방제효과가 40%로 크게 감소하였다(표 5.4).

이와 더불어 벼에 대한 약해는 증가하였으며 특히 찰벼와 통일벼에서 크게 나타났다. 따라서 기후가 변화함에 따라 현재 이용되고 있는 제초제를 통한 잡초방제의 효율성은 감소할 수 있으며, 이는 제초제 저항성 잡초들의 발생과 확산으로 심화 될 것으로 예측된다.

5.5 적응 옵션

「한국 기후변화 평가보고서 2014」에서는 기후변화에 적응하고 안정적인 작물생산을 위해서는 지역 기후를 상세하게 파악하여 이를 근간으로 하는 작부체계 개발 및 보급, 작물의 재배시기 및 재배관리 표준의 재설정 및 보급, 적응 품종 선정 등 지역별 최적 작부체계와 표준재배법에 대한 재검토와 보급이 조속히 이루어져야 한다고 하였다. 병해충의 경우 기후변화에 따라 위해도가 크게 높아지는 병해를 중심으로 그 병해의 발생 환경조건을 갖추지 않는 것과 그 병해의 위해도를 절감할 수 있는 새로운 방제법 개발이 필요하다고 하였다. 잡초의 경우 기후변화로 인해 새로운 잡초종이 계속해서 유입되고 작물기간 연장으로 농경지에서의 잡초 번무가 극심해질 것으로 예상되어 이에 대한 대책을 마련하여야 한다고 하였으나, 구체적인 대책은 제시되지 않았다.

5.5.1 식량작물

재배관리에 대한 내용은 이전 보고서에서 다루어져, 본 보고서에서는 기후변화 적응성 품종 선발연구와 최근 발표되기 시작한 고온 저항성 신품종 육종에 관한 논문들을 수록하였다.

우리나라의 논에서는 아직까지 고온불임의 피해는 크게 보고되고 있지 않지만, 고온등숙의 피해는 지속적으로

발생하고 있다. 이에 성덕경 등(2014)은 남부 평야지에서 벼 조기재배시 발생하는 고온등숙으로 인한 품질 저하에 강한 벼 품종을 선발하기 위하여 조생종 14품종('운광', '운미', '한들', '황금보라', '산들진미', '신운봉1호', '조광', '주남조생', '만나', '보석', '조아미', 지역적응시험 진행중의 조생종 3계통)을 진주에서 재배하였다. 그 결과, '산들진미', '조광', '만나' 그리고 '밀양247'이 높은 완전미 수량과 취반미 윤기치를 보여, 고온기 등숙이 문제가 되는 남부평야지 조기재배에 적합한 품종으로 판단되었다. 위와 같은 기존 품종들에 대한 평가 외에도 고온등숙에 강한 품종을 육종하기 위한 연구들도 계속되고 있다. 정지웅 등(2016)은 고온 등숙으로 인한 벼의 피해를 경감하기 위해 '남일' 벼에 아지드화나트륨을 처리하여 확보한 돌연변이 후대계통들의 작물학적 성능을 기존 품종들과 비교하여, 고온조건에서 등숙이 양호하고 도열병에 강한 '중모1024' 벼를 육성하였다. 일반포장과 온실조건에서의 고온 등숙 내성평가를 실시한 결과, '중모1024'는 기존의 조생 품종들에 비해 현미 완전미율이 유의미하게 높게 나타났다(표 5.5).

1975년 처음 도입되어 아직까지도 가장 많이 재배되고 있는 '수미' 감자는 고온피해로 인한 기형서 발생률이 높아 상품성이 떨어지는 경우들이 있다. 이에 박영은 등(2019)은 기형서를 포함한 다양한 생리장해에 강한 품종을 육성하기 위하여, 내부생리장해에 강한 '대관1-97호'와 감자역병에 강한 '대관1-98호'를 부본으로 인공교배하여 후대에 대한 선발을 진행하였다. 그 결과 기형서, 열개서, 내부생리장해 등의 발생률이 적고 '수미' 감자에 비해 수량성은 약간 높은 '다미' 감자를 육성하였다.

5.5.2 원예작물

본 보고서에서는 다양한 국내 사과 품종들에 대한 기온상승 실험, 배추와 시설딸기에서의 기후변화 대응 재배법 개발 관련 연구를 수록하였다.

권헌중 등(2017)은 국내에서 육성되거나 재배되고 있는 주요 사과품종들의 개화기 예측에 필요한 기초자료를 제공하고자, 저온요구도 충족 여부에 따른 개화지연 정도와 온도별 개화 소요일수 및 발아 후 변온에 따른 개화소요일수를 온도가 조절되는 생장상에서 조사하였는데, 일부 사과 품종들은 겨울철에 저온요구도가 충족되지 못하는 경우 개화가 불량해져, 기온 상승에 대비하기 위해서는 저온요구도가 낮은 품종을 육성할 필요가 있다고 하였다.

이상규 등(2015)은 안정적인 여름철 배추 생산방법을 구명하기 위해 초기 저온처리(춘화처리 유무), 재배 기간의 온도처리(25℃와 30℃), 토양 수분 결핍 처리(토양수분 평균함량을 2주간 20%, 4주간 10%, 정상관수 40%)에 따른 배추의 엽육조직, 생장 및 발달 그리고 수량 변화를 조사하였다. 토양수분 결핍 4주 처리구에서는 엽육조직의 세포조직이 완전히 붕괴되었고, 배추의 생장은 전박적으로 낮은 경향을 보였으며, 수확시 결구력도 중 이하로 나타났다.

표 5.5 주요 조생종 벼 품종과 '중모1024'의 고온등숙 조건에서 완전미율 비교(정지웅 등, 2016).

Cultivars	Green House (High-Temp.)[y]			Paddy field (Ordinary temperature)		
	Head rice[x] (%)	Heading Date (month.day)	Mean temp. of ripening[w] (℃)	Head rice[x] (%)	Heading Date (month.day)	Mean temp. of ripening[w] (℃)
Jungmo1024 (Suweon535)	39.7[a]	8.04	28.4	82.4[a]	8.02	25.9
Goun	30.3[b]	7.29	28.5	75.2[a]	7.28	26.2
Jinbu	23.0[c]	7.30	28.4	76.3[a]	7.29	26.2
Odae	24.1[c]	7.29	28.4	64.7[b]	7.29	26.1
Ungwang	19.0[c]	8.03	28.4	66.8[b]	8.02	26.0

[z]The experiment was conducted during two years (2009~2010) at National Institute of Crop Science, Suwon (37°16′N, 126°59′E, 37 m altitude), Korea.
[y]Green house was closed after transplanting the seedlings to have high-temperature condition.
[x]Five to seven grams of brown rice per each rice cultivar was used to estimate the head rice percentage by using a near-infrared spectrometric analyzer (FOSS Cervitec 1625 Grain Inspector). Means with the same letter are not significantly different by Duncan's multiple range test at 5% level.
[w]After checking the heading date for each cultivar, the mean temperature of ripening stage was calculated by averaging the daily mean temperature for 40 days.

반면, 배추의 수량은 춘화처리 후 고온에서 충분히 관수한 처리구에서 가장 많았으며, 배추에서 문제가 되는 추대는 정식 초기에 저온처리 후 고온으로 관리하여도 추대가 발생하지 않았다. 따라서 여름철 고온기 배추 재배 시 가뭄이 지속될 경우 엽육조직이 붕괴하고 생장이 지연되고 결구력도 약해져 수량이 줄어들기 때문에, 적극적인 관수가 필요할 것으로 판단된다.

여름철 시설 딸기 재배시 고온으로 인해 생산성과 품질이 감소하는데, 이규빈 등(2018)은 이와 같은 고온피해를 경감시킬 수 있는 재배법으로 지하수를 활용한 근권 냉방을 제시하였으며 그 효과를 검정하였다. 하절기 온도환경(일평균 29.5℃) 하에서 '설향'과 '매향' 딸기를 고설벤치 베드에서 재배하며 20°C 전후의 지하수를 순환시켜 냉방한 결과, 대조구 대비 토양온도는 2℃ 정도 하강하였고, 지상부와 지하부 생육 모두 촉진되었으며, 생산량과 품질도 개선되어, 지하수 근권 냉방이 여름철 시설 딸기 재배의 고온피해를 경감시키기에 적합한 방법으로 판단된다.

5.5.3 병해충

이전 보고서에서는 기후변화에 대응하기 위한 구체적인 병해충 관련 국내연구는 보고되지 않아, 본 보고서에서는 외래 침입종 모니터링 시스템 구축, 내병충성 품종 육성, 기후변화 조건에서의 살충제 선택 등과 같은 연구논문을 수록하였다.

기후변화와 국제교류의 증가 등으로 고위험식물병해충의 유입은 꾸준하게 증가하고 있어, 외래 침입종으로 인한 농업 피해를 방지하기 위해서는 이러한 외래침입해충들에 대한 국내 유입 및 예찰 시스템이 필요하다. 이에 따라 2018년 7개 대학(경상대학교, 군산대학교, 서울대학교, 순천대학교, 안동대학교, 제주대학교, 충북대학교)이 참여하여 고위험 해충 9종에 대한 예찰협력 네트워크를 구성하여, 전국단위의 감시체계를 구축하였다(표 5.6)(이지은 등, 2019).

기후변화 조건에서 외래 침입종이 꾸준하게 증가할 것이 분명하기에 향후 위와 같은 예찰시스템의 대상 해충종과

표 5.6 고위험해충 9종에 대한 예찰조사 권역(이지은 등, 2019).

Species	1st region	2nd region	3rd region	4th region	5th region	6th region	7th region
Aceria diospyri				Suncheon, Gwangyang, Gurye		Jinju, Gimhae, Sacheon	
Bactrocera dorsalis	Seoul, Ansan, Sokcho	Yesan, Goesan, Gongju	Jeongeup, Gimje, Wanju	Goheung, Boseong, Haenam	Geyonsan, Chilgok, Yeongcheon	Gimhae, Changwon, Sacheon	Northern, Western, Southeastern part
Cydia pomonella	Seoul, Ansan, Sokcho	Yesan, Goesan, Gongju	Jeongeup, Gimje, Wanju	Naju, Suncheon, Hwasun	Andong, Cheongsong, Mungyeong	Gimhae, Changwon, Sacheon	Northern, Western, Southeastern part
Bactrocera minax							Northern, Western, Southeastern part
Bactrocera tsuneonis							Northern, Western, Southeastern part
Lobesia botrana	Incheon, Ansan, Hwaseong	Yeongdong, Okcheon, Cheonan	Jeongeup, Namwon, Wanju		Sangju, Yeongcheon, Chilgok		
Proeulia sp.	Incheon, Ansan, Hwaseong	Yeongdong, Okcheon, Cheonan	Jeongeup, Namwon, Wanju		Sangju, Yeongcheon, Chilgok		
Solenopsis invicta	Seoul, Ansan, Sokcho	Yesan, Goesan, Gongju	Jeongeup, Gimje, Wanju	Yeosu, Gwangyang, Muan	Geyonsan, Chilgok, Uiseong	Gimhae, Changwon, Jinju	Northern, Western, Southeastern part
Stephanitis takeyai				Suncheon, Gwangyang, Gurye		Jinju, Gimhae, Sacheon	

A. 'Dejima' B. 'Jeseo'

그림 5.26 더뎅이병 고발생 포장에서 재배한 '대지'와 '제서' 감자(김성용 등, 2013).

예찰조사 지역의 확장이 이루어져야 할 것으로 사료된다.

박현수 등(2017)은 벼흰잎마름병에 대한 저항성 고품질 벼 품종을 개발하고자, 최고품질 벼 품종인 '호품'과 벼흰잎마름병 저항성 유전자가 집적된 계통을 교배하여, 벼흰잎마름병에 저항성을 보이고 수발아에 내성을 지니는 동시에 준수한 수량성을 보이는 고품질 벼 '만백'을 육성하였다. 김우재 등(2018)은 고품질이지만 벼멸구에 감수성인 중만생 품종 '황금누리'를 모본으로, 벼멸구 저항성을 지닌 야생병. australiensis를 모본으로 하여 교배한 뒤 F5 세대에서 벼멸구, 벼흰잎마름병, 벼줄무늬잎마름병 저항성 유전자 보유여부를 분자마커로 판정하여 선별을 진행하였다. 그 결과, 벼멸구, 벼흰잎마름병 K1, K2, K3 레이스, 벼줄무늬잎마름병에 강하며 5.7 MT/ha의 쌀수량을 보이는 복합내병충성 벼 품종 '중모1045호'를 육성하였다. 미래기후에서는 다양한 병해충 발생이 예상되어 위와 같은 복합내병충성 품종의 육종이 중요해질 것으로 사료된다.

국내 이기작 감자 혹은 가을감자는 대부분 '대지' 품종을 이용하여 재배되고 있지만, '대지'는 괴경의 표면에 반점을 만들어 상품성을 크게 낮추는 더뎅이병에 매우 취약한 품종으로 알려져 있다. 이를 해결하기 위해 김성용 등(2013)은 각종 바이러스와 더뎅이병, 무름병에 저항성을 갖는 '체세포잡종'을 모본으로 하고 '대지'를 화분친으로 교잡하여 더뎅이병 저항성 '제서' 품종을 육성하였다(그림 5.26).

최근 이기작 감자 재배가 가장 많이 행해지는 제주도에서는 더뎅이병 저항성 품종인 '탐나' 감자가 육성되어 빠르게 보급되고 있는 것으로 알려져 있다.

'신고' 배는 국내 배 재배면적의 83%를 차지하고 있으나 배검은별무늬병에 취약한 것으로 알려져, 김윤경 등(2016)은 품질이 우수한 것으로 알려진 '황금배'와 검은별무늬병 저항성을 보이는 'Bartlett'를 교배하여 '그린시스' 품종을 육성하였다. '그린시스'는 검은별무늬병에 대한 저항성을 보이는 동시에 과즙이 풍부하고 식미가 좋은 것으로 나타났다.

살충제의 효과는 살충제의 종류, 대상해충, 환경조건에 따라 다를 수 있어 기후변화조건에서는 현재 사용되고 있는 살충제의 효과가 변화할 수도 있다. 모형호 등(2016)은 다양한 식량작물과 원예작물에 광범위하게 피해를 주는 해충, 점박이응애에 대한 두 종류의 살충제(Acrinathrin-Spinomesifen 혼합제와 Azocyclotin 유기주석계) 효과를 20℃, 25℃, 30℃, 35℃에서 평가한 결과, 고온조건에서 Acrinathrin-Spinomesifen 혼합제의 효과는 감소한 반면 Azocyclotin 유기주석계의 효과는 증가하여 미래 기후변화에 따라 적절한 농약 선발과정이 필요할 것이라 하였다.

5.5.4 잡초

이전 보고서에서는 기후변화에 대응하기 위한 구체적인 잡초 관련 국내연구는 보고되지 않아, 본 보고서에서는 잡초의 잠재적 서식지 판단 연구, 잡초 발생 분포 변화와 우점잡초에 따른 제초제 처리 양식 개발에 관한 연구들을 수록하였다.

농경지에서 잡초 발생으로 인한 피해를 방지하기 위해서는 우선 잡초의 잠재적 서식지를 판단하는 것이 중요하다.

이용호 등(2018)은 남한 전국의 254지점의 가는털비름 분포 자료와 6개의 생물 기후 인자를 활용하여 MaxEnt 모형을 구축하고 격자 혹은 지역별 밭 농업에 대한 가는털비름의 잡초 위험도 지수를 계산하였다. 예측된 잠재서식지는 실제 서식지와 유사하게 나타나 활용 가능성을 확인할 수 있었지만, 잠재서식지 비율, 격자 위험도 지수, 지역 위험도 지수 등의 지역별 순위에는 차이가 있어 다양한 평가기법 개발의 필요성을 보여주었다.

앞장(5.2.4)에서 다루었던 것처럼 시간의 흐름에 따라 잡초 발생 분포는 계속해서 변화해오고 있으며, 이에 따라 제초제 종류와 시용양식도 변해야 할 것이다. 민이기와 소윤섭(2016)은 고추 밭에서의 다음과 같은 제초제 처리 체계를 확립하였다. 바랭이가 우점하는 포장에서는 잡초 발아 전 토양 처리제(pendimethalin)를 정식 후 처리하고 바랭이가 3~5엽기일 때 화본과 선택성 제초제(fluazipfop-P-butyl EC와 pendimethalin EC를 혼용)를 처리하고, 화본과 잡초 외에 방동사니과와 광엽잡초들이 혼재되어 있을 경우 비선택성 제초제(glufosinate-ammonium SL)와 토양처리제(pendimethalin EC)를 혼용해서 잡초가 20 cm 정도 자랐을 때 처리하고 30일 후 비선택성 제초제(glufosinate-ammonium SL)를 처리하면 효율적인 잡초 방제가 가능하다고 하였다.

동일한 제초제를 연용할 경우 제초제 저항성 잡초의 발생이 촉진되어, 미래에 더 큰 잡초문제를 야기할 수 있다. 이를 방지하기 위해서는 다른 작용기작의 제초제를 교호로 살포하거나, 물리적, 경종적, 생물학적 방제법을 같이 활용한 종합적잡초방제로 잡초에 대한 선택압을 낮춰주는 것이 중요하다고 판단된다.

5.6 결론

농업은 자연환경에 지배를 받는 산업이다. 따라서 지구온난화에 수반된 기후변화는 직간접적인 영향을 통하여 식량·원예작물의 식물계절, 재배 적기와 적지, 생산성과 품질, 병해충 및 잡초 발생 등을 변화시키고 있으며, 앞으로도 이와 같은 농업분야의 변화가 가속화될 것으로 전망된다(견고한 동의). 이와 같은 변화를 조기에 정확하게 예측하여 기후변화에 따른 피해는 줄이고 기후변화를 농업에 유리한 쪽으로 이용할 수 있도록 적응 전략을 수립·시행하여야 할 것이다(견고한 동의).

식량작물의 경우 아직까지 심각한 수량 감소가 관측되지는 않았으나, 과거자료를 이용한 통계적 분석에 따르면, 온도 상승, 일조 감소, 가뭄 증가 등이 수량에 악영향을 미치고 있는 것으로 보고되었다. 그러나 통계적 기법에는 설명변수(기상요인)간의 다중공선성 등의 문제가 존재하고 재배기술의 발달과 신품종 개발 등에 대한 고려가 미흡하여 관측된 수량의 변동이 기후변화로 인한 것인지는 명확하지 않다(견고한 동의). 식량작물에 대한 영향전망 연구의 일환으로 다양한 재배환경실험과 작물생육모델을 이용한 모의 실험들이 수행되었으며, 월동작물을 제외한 식량작물(벼, 콩, 옥수수, 감자)은 21세기 중반까지는 수량이 일정 수준 유지되거나 오히려 증가하나, 21세기 말에 이르면 급격한 감수가 예상되며, 이러한 피해는 작물에 따른 특정 생육시기의 고온스트레스에 기인할 것이다(중간적 동의). 벼의 경우, 아직까지는 고온 등숙이 문제가 되고 있지만, 미래기후조건에서는 고온 불임의 문제가 커질 것으로 예상된다(중간적 동의). 감자는 괴경 형성기 고온으로 인한 괴경 발달장애가 문제가 되는 것으로 보고되었다(중간적 동의). 반면, 보리의 경우 작물생육모델을 이용한 모의연구에서는 기후가 변화함에 따라 증수될 것으로 예상되었으나, 재배환경 조절실험에서는 월동기 온도 상승이 생식생장기로의 전환을 촉진하여 분얼과 수수의 감소를 야기하고, 등숙기 고온은 보리의 수량과 품질에 악영향을 미치는 것으로 나타나, 추후 재배환경실험에서 관측된 피해의 생물학적 기작에 대한 연구와 그 기작이 작물생육모형에 잘 반영되고 있는지를 확인하고, 기후변화의 영향을 재평가하는 과정이 필요할 것으로 사료된다(견고한 동의). 적응옵션으로는 지역별 기후변화에 적합한 작부체계 및 재배관리법 개발과 내재해성 품종 개발이 있는데, 최근에 고온 저항성 벼·감자 품종들이 육성되고 있어, 향후 현재 이용되고 있는 감수성 품종들을 점진적으로 대체할 것이다(중간적 동의).

원예작물의 경우 기온상승과 일조시간 감소, 이상기상의 빈도수 증가 등이 채소와 과수의 수량성과 품질에 영향을 주고 있다(중간적 동의). 과수의 경우 기후변화에 따라 사과,

배, 포도, '부지화' 감귤 등의 재배적지는 줄어드는 반면 복숭아, 단감, 온주밀감 등의 과수는 재배적지가 북상하며 늘어날 수 있을 것으로 예측되었다(견고한 동의). 과수에서의 취약성은 과실 착색초기 고온에 의한 착색 불량과 월동기 온도 상승으로 인하여 생물계절이 앞당겨져 발생하는 동상해 등이며(중간적 동의), 이에 대응하기 위해 온도 상승에 따른 생물계절 변화의 품종 간 차이에 대한 연구가 이루어지고 있다. 채소의 경우 고추와 배추에서는 고온피해가 예상되며 마늘의 경우 한지형 마늘은 재배적지가 점차 사라질 것이나, 난지형 마늘은 재배적지가 북상하여 적지 면적은 증가할 것이며, 양파는 고온조건에서 수량이 증가할 것이다(중간적 동의). 딸기의 경우 25℃ 이상의 고온에서 상품성이 감소한다고 하였다. 적응옵션으로 고온피해를 경감시키기 위한 적극적인 관수, 지하수를 이용한 근권 냉방, 내재해성 품종 육종 등이 있다(중간적 동의).

병해충의 경우 기온이 상승함에 따라 감자뿔나방, 고추 역병과 탄저병, 양파 흑색썩음균핵병 등의 발생률이 증가하고, 월동·외래해충들의 발생이 증가하는 것으로 관측되었다(중간적 동의). 기후변화에 따라 발생위험이 감소하는 병해충이 있는 반면 발생위험이 크게 증가하는 병해충도 존재하여, 향후 농경지에서의 병해충 발생 양상의 변화가 예상되며, 1년동안 발생할 수 있는 병해충의 세대수가 크게 증가할 것으로 예측되어 병해충 피해가 커질 가능성이 존재한다(중간적 동의). 병해충 피해 정도에는 병해충의 발병 규모와 횟수와 더불어 병해충의 발생시기와 기주식물 생육시기의 동시성이 크게 관여하기 때문에 농업생태계 전반을 모의할 수 있는 복잡계 연구가 필요하다(중간적 동의). 적응옵션으로는 전국 단위 병해충 모니터링 및 예찰 시스템의 구축과 병해충 종수와 지역수의 확장, 기후변화 조건에 적합한 살충제 선별, 병해충 저항성 품종 개발 등이며, 최근에는 여러 병해충에 저항성을 보이는 복합내병충성 벼 품종이 개발되어 병해충 피해 감소에 도움이 될 것으로 기대하고 있다(중간적 동의).

잡초의 분포 양상은 시간이 지남에 따라 변화하고 있으며 외래잡초와 제초제 저항성 잡초들이 증가하고 있는 것으로 관측되었으며, 여기에는 기후변화와 더불어 재배작물의 변화, 재배법의 변화, 제초제 사용의 변화 등이 기여하였을 것이다(중간적 동의). 기후변화에 따른 잡초 분포 변화에 대한 연구는 미흡하지만, 외래잡초 중 청비름, 실망초 등의 분포가 확대될 것으로 예상된다. 새로운 잡초의 분포가 점차 확대되므로 위해성도 증대될 것으로 예상되어 이들 잡초의 방제법 개발이 필요할 것으로 판단된다(중간적 동의). 일반적으로 농경지에서 문제가 되는 잡초는 작물에 비해 환경에 대한 적응성이 뛰어나기 때문에 기후변화 조건에서 생육이 왕성해질 위험이 있으며, 제초제의 잡초에 대한 활성이 기후변화 조건에서 감소하는 경우와 작물에 대한 약해가 증가하는 경우가 있어 제초제를 이용한 방제효율이 감소할 수 있다. 적응대책으로는 잡초 발생에 대한 모니터링과 예찰시스템 구축이 우선되어야 할 것이며, 잡초 발생 양상의 변화에 따른 제초제 처리 양식에 변화를 주는 것이 필요할 것이다(중간적 동의). 잡초의 경우 기후변화에 중점을 둔 연구보다는 단일 제초제 연용 등으로 발생하는 제초제 저항성 잡초에 대한 연구들이 활발하게 진행되고 있으며, 제초제 저항성 잡초는 미래에 더 큰 잡초문제를 야기할 것으로 예상되기 때문에 이를 방지하기 위해서는 물리적, 경종적, 생물학적 방제법을 제초제와 같이 활용하는 종합적잡초방제 기술개발이 필요하다(견고한 동의).

기후변화가 작물에 미치는 영향에 대한 연구 결과는 재배환경실험과 작물생육모델을 이용한 모의실험을 통해 꾸준히 발표되고 있으나, 환경스트레스가 작물에 피해를 주는 기작에 대한 정량적 연구는 미흡한 상태로, 이로 인해 작물생육모델에 포함된 여러 환경반응식들이 국내에서 검증되지 않은 채 이용되고 있다. 따라서 작물생육모델의 환경반응식들에 대한 개선과 검증이 이루어져야 신뢰성 있는 기후변화 영향평가가 이루어질 수 있을 것이다(견고한 동의). 병해충 및 잡초 발생에서도 모니터링 자료와 환경실험 자료를 이용해 기상요인이 병해충 및 잡초 발생에 미치는 영향을 정량화하고, 발생위험모델을 구축하여 작물생육모델과 결합한 뒤, 농업생태계 전반에 대한 기후변화 영향평가 모의가 이루어져야 될 것이다(중간적 동의). 이와 동시에 정성적 평가가 이루어진 환경스트레스에 대해서는 예상되는 피해를 최소화할 수 있는 작부체계, 재배시기, 재배관리기술, 병해충 및 잡초 관리기술, 내재해성 품종 등을 개발하여 농작물 생산 안정성 및 기후변화 대응력을 향상하여야 한다(견고한 동의).

5.7 참고문헌

권헌중, 박무용, 송양익, 사공동훈, 2017: 휴면기 저온 누적 시간 및 발아 후 변온이 국내 주요 사과품종의 개화에 미치는 영향, *한국농림기상학회지*, 19(4), 252-269.

김관원, 김태영, 2018: 기후변화에 따른 벼 병해충 피해의 공간적 파급효과 분석, *농촌경제*, 41(1), 51-80.

김광호 등, 2016: 기후변화에 따른 남방계 해충과 동반 병원체의 국내확산 및 피해예측, 농촌진흥청.

김대준, 김진희, 2018: 기후변화 시나리오에 근거한 과수 개화기 변화 및 개화 후 저온 발생 전망, *한국농림기상학회지*, 20(4), 313-320.

김동언, 길지현, 2014: 국내 미국선녀벌레의 분포 및 기주식물, *한국환경과학회지*, 23(8), 1385-1394.

김선국, 윤창만, 이석호, 장후봉, 김이기, 김길하, 김형환, 2015: 충북지역 노지포도원에서 열점박이별잎벌레(Oides decempunctatus)의 발생생태 및 발육특성, *한국토양동물학회지*, 19(1-2), 63-70.

김선애, 안순영, 윤해근, 2016: 고온에 의한 변색단계별 '홍로' 사과의 착색 및 당 축적 관련 유전자 발현 분석, *시설원예 · 식물공장*, 25(1), 9-15.

김성용, 안율균, 김태균, 강형식, 송승운, 김봉찬, 강성근, 2013: 더뎅이병 저항성 감자 신품종 '제서', *한국육종학회지*, 45(4), 468-473.

김용석, 심교문, 정명표, 최인태, 2015: 채소 주산지의 기상요소별 경향성 분석, *한국기후변화학회지*, 6(4), 283-290.

김용준, 안동환, 2018: 공간효과를 고려한 병해충 발생률 추정 연구: 벼 잎집무늬마름병을 대상으로, *농업경제*, 59(2), 85-115.

김우재, 신운철, 박현수, 남정권, 김현순, 백만기, 김보경, 김기영, 김정주, 조영찬, 고재권, 고종철, 백소현, 2018: 복합내병충성 고품질 중만생 벼 '중모1045호', *한국육종학회지*, 50(1), 72-79.

김윤경, 강삼석, 원경호, 신일섭, 조광식, 마경복, 김명수, 최장전, 최진호, 2016: 배 검은별무늬병 저항성 품종 그린시스 육성, *원예과학기술지*, 34(4), 655-661.

김창석, 김진원, 오영주, 홍선희, 허수정, 이채영, 박기웅, 조승현, 권오도, 임일빈, 김상국, 성덕경, 정영재, 이정란, 이인용, 2018: 우리나라 농경지에 발생하는 외래잡초 현황, *Weed&Turfgrass Science*, 7(1), 1-14.

김태훈 등, 2014: 고랭지 채소면적 변동요인과 전망, 한국농촌경제연구원.

도기석, 정봉남, 최경산, 안정준, 좌재호, 2016: 기후변화 시나리오에 따른 미래 참다래 궤양병 피해 예측, *한국농림기상학회지*, 18(2), 65-73.

류수현, 권용희, 도경란, 한점화, 한현희, 이한찬, 2015: 야간 고온에 의한 사과 후지 품종의 생리반응 및 과실품질 변화, *시설원예 · 식물공장*, 24(3), 264-270.

류수현, 한점화, 한현희, 정재훈, 조정건, 도경란, 2018: 변색기 고온에 의한 '거봉' 및 '흑보석' 포도의 과피 안토시아닌 조성 변화, *시설원예 · 식물공장*, 27(3), 213-221.

류수현, 조정건, 정재훈, 이슬기, 한점화, 김명, 2019: 변색기 고온에 의한 포도 거봉의 과피 착색 및 내생 호르몬 변화, *시설원예 · 식물공장*, 28(3), 234-242.

모형호, 강주완, 조기종, 배연재, 이미경, 박정준, 2016: 온도가 농약효과에 미치는 영향분석 및 농약사용량 예측 모의실험, *환경생물*, 34(1), 56-62.

문경환 등, 2016: RCP 시나리오를 적용한 고추, 배추, 마늘 생산영향평가 및 공간분석 연구, 농촌진흥청.

문영일, 강석범, 이혜진, 최영훈, 손인창, 이동훈, 김성기, 안문일, 2017: RCP 8.5 기후변화시나리오에 근거한 온주밀감과 '부지화'의 잠재적 재배지 변화 예측, *한국농림기상학회지*, 19(4), 215-222.

민이기, 소윤섭, 2016: 고추 밭 잡초 관리를 위한 제초제 체계처리법 개발, *Weed&Turfgrass Science*, 5(4), 213-218.

박영은, 조지홍, 임주성, 조광수, 김점순, 이영규, 장동칠, 진용익, 천충기, 정진철, 2019: 생리장해에 강하며 건물함량이 높고 맛이 좋은 감자 '다미', *한국육종학회지*, 51(2), 122-127.

박태선, 황재복, 배희수, 박홍규, 이건휘, 2017: 온도상승에 따른 논 제초제의 약효 및 약해 변동, *Weed&Turfgrass Science*, 6(3), 203-211.

박현수, 백만기, 김보경, 김기영, 신운철, 고재권, 남정권, 김우재, 조영찬, 고종철, 김정주, 김현순, 2017: 벼흰잎

마름병 저항성 고품질 중만생 벼 '만백', *한국육종학회지*, 49(3), 235-244.

상완규, 조현숙, 김준환, 신평, 백재경, 이윤호, 조정일, 서명철, 2018: RCP 8.5 시나리오에 따른 미래 기후조건에서 벼의 품질 및 전분 동화 특성 변화, *한국농림기상학회지*, 20(4), 296-304.

성덕경, 김영광, 조용조, 신현열, 김민철, 심상인, 정종일, 김석현, 김철수, 정정성, 2014: 남부지방 평야지 벼 조기재배 적품종 선발, *농업생명과학연구*, 48(6), 1-9.

손인창, 한점화, 조정건, 김승희, 장은하, 오성일, 문경환, 최인명, 2014: 온도와 이산화탄소의 상승처리가 포도 캠벨얼리의 수체생육과 과실품질에 미치는 영향, *원예과학기술지*, 32(6), 781-787.

손인창, 문경환, 송은영, 오순자, 서형호, 문영일, 양진영, 2015: 고랭지 여름배추 주산지의 기온을 기준으로 한 수준별 온도가 배추 '춘광'의 생육 및 생리반응에 미치는 영향, *한국농림기상학회지*, 17(3), 254-260.

손인창 등, 2017: 기후변화시나리오에 근거한 사과, 포도, 감귤, 인삼, 천궁, 당귀작물의 생산영향평가, 농촌진흥청.

손지영, 김준환, 이충근, 양운호, 2015: 벼 등숙기 고온이 잎의 엽록소구성과 광합성 및 생리적 변화에 미치는 영향, *한국작물학회지*, 60(3), 266-272.

송은영, 문경환, 손인창, 위승환, 김천환, 임찬규, 오순자, 2016: 온도 및 CO_2 상승이 고추의 생육 및 과실품질에 미치는 영향, *한국농림기상학회지*, 18(4), 179-187.

신종희, 한채민, 권중배, 김상국, 2019: 영남내륙 지역 과거 20년간 기후와 벼 조만성별 쌀 수량 변화, *한국작물학회지*, 64(3), 193-203.

심교문, 김용석, 정명표, 최인태, 허지나, 2014: 남한 온량지수의 변화와 단감의 안전재배에 관한 연구, *한국기후변화학회지*, 5(4), 367-374.

심교문, 김용석, 정명표, 최인태, 2015: 최근 동계작물의 파종기간 동안 기후변화 특징, *한국기후변화학회지*, 6(3), 203-208.

안현진, 조성주, 오새라, 정재민, 2018: 기후변화에 따른 미발생 병해충 피해 경제적 영향 분석, *한국산학기술학회논문지*, 19(7), 415-422.

오순자, 문경환, 송은영, 손인창, 위승환, 고석찬, 2017a: 월동무의 생장, 무기성분 조성과 광합성에 미치는 온도 상승의 영향, *원예과학기술지*, 35(1), 38-45.

오순자, 문경환, 고석찬, 2017b: 한지형 마늘의 생육 및 인편 발달에 미치는 주야간 온도의 영향, *원예과학기술지*, 35(1), 1-10.

윤덕훈, 오소영, 남기웅, 엄기철, 정필균, 2014: 기상요인 변화에 따른 주요 양념채소의 재배면적 및 주요 병해 발생 변화, *한국기후변화학회지*, 5(1), 47-59.

윤지윤, 김소윤, 김관수, 김홍석, 안동환, 2015: 지역별 기후변화에 따른 토마토 황화잎말림병 피해 분석, *농촌계획*, 21(4), 35-43.

이규빈, 이정은, 최윤의, 박영훈, 최영환, 강남준, 강점순, 2018: 이상 고온 조건에서 지하수 냉방 처리가 딸기의 생육과 수량 및 품질에 미치는 영향, *한국환경과학회지*, 27(8), 631-639.

이규빈, 이정은, 제병일, 이용재, 박영훈, 최영환, 손병구, 강남준, 강점순, 2019: 이상 고온 조건이 딸기의 생육, 수량 및 생리활성 성분에 미치는 영향, *한국환경과학회지*, 28(1), 147-158.

이규종, 김동진, 반호영, 이변우, 2015: 온도 조건에 따른 벼 수량 및 수량 관련 요소 반응의 품종간 차이, *한국농림기상학회지*, 17(4), 306-316.

이동준, 김준환, 김광수, 2014: 평년 기후자료를 활용한 국내 벼 안전출수 한계기의 시공간적 변화 평가, *한국농림기상학회지*, 16(4), 316-326.

이변우 등, 2017: 생육모의 연구를 통한 신기후시나리오(RCP)에 따른 주요 식량작물의 수량성, 재배적지 및 적응기술 평가, 농촌진흥청.

이상규, 이희주, 김성겸, 최장선, 박성태, 장윤아, 도경란, 2015: 춘화, 온도와 토양건조 기간에 따른 배추의 생장 및 수량, *원예과학기술지*, 33(6), 820-828.

이상규, 이희주, 김성겸, 문보흠, 이진형, 이희수, 도경란, 2018: 토양 건조 스트레스와 기온상승에 의한 고추의 생리반응 및 생산량 변화, *한국환경과학회지*, 27(4), 251-259.

이승호, 허인혜, 2018: 기후가 고랭지배추 생산에 미치는 영향 - 강원도를 사례로 -, *대한지리학회지*, 53(3), 265-282.

이안수, 최성진, 전신재, 맹진희, 김종환, 김인종, 2016:

시기별 기상값 활용 피복재배 감자 상서수량 예측, *한국작물학회지*, 61(1), 70-77.

이용호, 오영주, 홍선희, 나채선, 나영은, 김창석, 손수인, 2015: 기후변화 시나리오에 의한 외래식물 실망초 (Conyza bonariensis)의 서식지 분포 예측, *한국기후변화학회지*, 6(3), 243-248.

이용호, 나채선, 홍선희, 손수인, 김창석, 이인용, 오영주, 2018: Maxent를 활용한 가는털비름 (Amaranthus patulus)의 잠재서식지 예측 및 위험도 평가, *환경생물*, 36(4), 672-679.

이윤호, 조현숙, 김준환, 상완규, 신평, 백재경, 서명철, 2018: 이산화탄소와 온도 그리고 한발 영향에 따른 감자의 생육과 수량반응, *한국농림기상학회지*, 20(2), 149-158.

이인용, 오영주, 홍선희, 최준근, 허수정, 이채영, 황기선, 박기웅, 조승현, 권오도, 임일빈, 김상국, 성덕경, 정영재, 김창석, 이정란, 서현아, 장형목, 2015: 우리나라 밭작물 재배지 잡초 발생 및 분포현황, *Weed&Turfgrass Science*, 4(3), 159-175.

이인용, 김창석, 이정란, 박태선, 문병철, 박재읍, 2016: 과거 50 년간 우리나라 논잡초 군락의 변화, *Weed&Turfgrass Science*, 5(1), 1-4.

이인용, 오영주, 홍선희, 허수정, 이채영, 박기웅, 조승현, 권오도, 임일빈, 김상국, 성덕경, 정영재, 김창석, 이정란,서현아, 2017: 우리나라 과수원에 발생하는 잡초 현황과 군락 변화, *Weed&Turfgrass Science*, 6(1), 21-28.

이준호 등, 2017: 기후변화 대응 농작물 주요 병해충잡초 발생과 확산 예측 및 영향 평가, 농촌진흥청.

이지은, 이효빈, 기웅, 김동순, 김수빈, 김효중, 박종석, 오재석, 유영혁, 이승환, 이재하, 정철의, 조건호, 홍기정, 이원훈, 2019: 2018년 고위험해충 9종에 대한 예찰조사 보고, *한국응용곤충학회지*, 58(3), 183-187.

이현석, 김대욱, 황운하, 정재혁, 안승현, 백정선, 강제란, 정한용, 윤종탁, 이건휘, 최경진, 2016: 등숙기 고온조건에 따른 보리종실의 이화학적 특성 변화, *한국국제농업개발학회지*, 28(3), 358-363.

이현석, 황운하, 정재혁, 안승현, 백정선, 정한용, 김대욱, 윤종탁, 이건휘, 최경진, 2017a: 동기 고온 및 춘파에 따른 보리의 수량, 품질 및 생육 특성 변화, *한국국제농업개발학회지*, 29(3), 262-270.

이현석, 황운하, 김대욱, 정재혁, 안승현, 백정선, 정한용, 윤종탁, 이건휘, 최경진, 2017b: 보리 등숙기 고온에 따른 전분합성 및 동화산물 전류 특성 변화, *한국작물학회지*, 62(2), 124-133.

이형진, 한효심, 천상욱, 김동관, 권현숙, 이경동, 2014: 급변온도 변이에 따른 양파의 생리적 특성 및 수량 변화, *한국환경농학회지*, 33(4), 364-371.

이희주, 이상규, 김성겸, 문보흠, 이진형, 이희수, 권영석, 한지원, 김철우, 2018: 기온과 토양수분 함량에 따른 난지형 마늘의 생장, 인편분화, 생리장해 및 수량에 미치는 영향, *시설원예 · 식물공장*, 27(3), 191-198.

이희주, 이상규, 김성겸, 안세웅, 이진형, 이희수, 김철우, 권영석, 한지원, 2019: 고온과 다습조건이 양파의 생리반응에 미치는 영향, *원예과학기술지*, 37(5), 571-578.

장종옥, 김병혁, 문두경, 고상욱, 좌재호, 2018: CO_2 농도 상승 효과에 의한 고추 세균점무늬병 발병 양상 분석, *한국미생물·생명공학회지*, 46(1), 77-84.

정상욱, 성시흥, 장치만, 정종성, 오미래, 윤영식, 성혜진, 문상호, 2019: 국내 중부지역에 있어서 기후변화에 따른 사료용 옥수수의 생산성 및 기후영향취약성 평가, *한국초지조사료학회지*, 39(2), 105-113.

정은지, 이승호, 2018: 제주와 서귀포 기온변동과 감귤나무 생육시기의 관계, *기후연구*, 13(2), 119-130.

정재원, 김성섭, 이인규, 소남호, 고현석, 2018: 이상기후가 과수 생산성에 미치는 악영향 -기상특보 발효횟수를 중심으로-, *한국농림기상학회지*, 20(4), 305-312.

정지웅, 강경호, 최임수, 장재기, 김명기, 이점호, 박향미, 양창인, 전용희, 서정필, 최인배, 정종민, 성낙식, 이정희, 윤미라, 김정곤, 2016: 고온조건에서 등숙이 양호하고 도열병에 강한 조생 고품질 벼 '중모1024' 육성, *한국육종학회지*, 48(1), 72-84.

정태성, 황미란, 문윤기, 이재홍, 이남길, 권순배, 김인종, 최병렬, 2015: 강원지역의 꽃매미 발생상황과 동계 기온 변화에 따른 발생양상, *한국토양동물학회지*, 19(1), 52-56.

통계청, 2018: 기후변화에 따른 주요 농작물 주산지 이동현황.

통계청, 2019: 주요 농작물 생산 변화 추이.

허인혜, 이승호, 2017: 기후가 단감 생산에 미치는 영향-경상남도를 사례로-, *기후연구*, 12(2), 133-147.

Bir, M. S. H., Won, O. J., Bo, A. B., Ruziev, F., Umurzokov, M., Jia, W., Yun, H. J., Khaitov, B., Park, K. W., 2018: Growth Response of Weed Species in a Paddy Field under Elevated Temperatures, *Weed&Turfgrass Science*, 7(4), 321-329.

Chang, D. C., Jin, Y. I., Nam, J. H., Cheon, C. G., Cho, J. H., Kim, S. J., Yu, H. S., 2018: Early drought effect on canopy development and tuber growth of potato cultivars with different maturities, *Field Crops Research*, 215, 156-162.

Choi, D. H., Ban, H. Y., Seo, B. S., Lee, K. J., Lee, B. W., 2016: Phenology and seed yield performance of determinate soybean cultivars grown at elevated temperatures in a temperate region, *PloS one*, 11(11), e0165977.

Chun, A., Lee, H. J., Hamaker, B. R., & Janaswamy, S., 2015: Effects of ripening temperature on starch structure and gelatinization, pasting, and cooking properties in rice (Oryza sativa), *Journal of agricultural and food chemistry*, 63(12), 3085-3093.

Hasegawa, T., Ishimaru, T., Kondo, M., Kuwagata, T., Yoshimoto, M., Fukuoka, M., 2011: Spikelet sterility of rice observed in the record hot summer of 2007 and the factors associated with its variation, *Journal of Agricultural Meteorology*, 67(4), 225-232.

IPCC, 2014: Climate Change 2014: Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. the Summary for Policy makers.

Jeong, Y., Chung, U., Kim, K. H., 2018: Predicting future frost damage risk of kiwifruit in Korea under climate change using an integrated modelling approach, *International Journal of Climatology*, 38(14), 5354-5367.

Jung, W. S., Lee, K. J., Lee, B. W., 2015: Responses of spikelet fertility to air, spikelet, and panicle temperatures and vapor pressure deficit in rice, *Journal of crop science and biotechnology*, 18(4), 209-218.

Kim, Y. U., Lee, B. W., 2019: Differential Mechanisms of Potato Yield Loss Induced by High Day and Night Temperatures During Tuber Initiation and Bulking: Photosynthesis and Tuber Growth, *Frontiers in plant science*, 10.

Kim, K. H., Cho, J., Lee, Y. H., Lee, W. S., 2015: Predicting potential epidemics of rice leaf blast and sheath blight in South Korea under the RCP 4.5 and RCP 8.5 climate change scenarios using a rice disease epidemiology model, EPIRICE, *Agricultural and forest meteorology*, 203, 191-207.

Kim, Y. U., Seo, B. S., Choi, D. H., Ban, H. Y., Lee, B. W., 2017: Impact of high temperatures on the marketable tuber yield and related traits of potato, *European Journal of Agronomy*, 89, 46-52.

Kwon, M., Kim, J., Maharjan, R., Choi, J. Y., Kim, G. H., 2017: Change in the distribution of the potato tuber moth, Phthorimaea operculella (Zeller)(Lepidoptera: Gelechiidae), in Korea, *Journal of Asia-Pacific Entomology*, 20(4), 1249-1253.

Lee, S. G., Kim, S. K., Lee, H. J., Choi, C. S., Park, S. T., 2016: Impacts of climate change on the growth, morphological and physiological responses, and yield of Kimchi cabbage leaves, *Horticulture, Environment, and Biotechnology*, 57(5), 470-477.

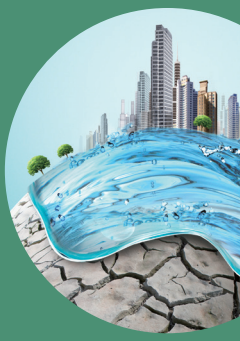
Lee, H., Kang, W. S., Ahn, M. I., Cho, K., Lee, J. H., 2016: Predicting temporal shifts in the spring occurrence of overwintered Scotinophara lurida (Hemiptera: Pentatomidae) and rice phenology in Korea with climate change, *International journal of biometeorology*, 60(1), 53-61.

Lee, S. G., Kim, S. K., Lee, H. J., Lee, H. S., Lee, J. H., 2018: Impact of moderate and extreme climate change scenarios on growth, morphological features, photosynthesis, and fruit production of hot pepper, *Ecology and evolution*, 8(1), 197-206.

Shi, W., Yin, X., Struik, P. C., Solis, C., Xie, F., Schmidt, R. C., Huang, M., Zou, Y., Ye, C., Jagadish, S. K., 2017: High day-and night-time temperatures affect grain growth dynamics in contrasting rice genotypes, *Journal of experimental botany*, 68(18), 5233-5245.

Shim, D., Lee, K. J., Lee, B. W., 2017: Response of phenology-and yield-related traits of maize to elevated temperature in a temperate region, *The Crop Journal*, 5(4), 305-316.

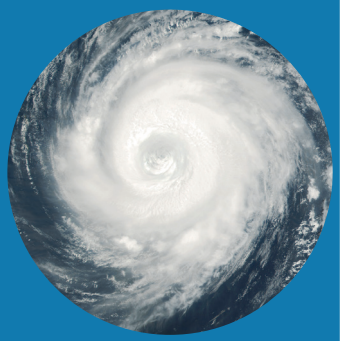
한국 기후변화
평가보고서 2020
- 기후변화 영향 및 적응 -



제 6 장

해양 및 수산

188 6.1 서론
192 6.2 관측된 영향
202 6.3 영향 전망
209 6.4 취약성의 주요 원인
213 6.5 적응 옵션
215 6.6 결론
216 6.7 참고문헌



제 6 장 해양 및 수산

6.1 서론

「한국 기후변화 평가보고서 2014」에서는 IPCC 제5차 평가보고서에 기술된 해양의 물리적 현상과 지구환경 변화에 따른 생물종의 변화에 대하여 주로 기술하였다. 특히 지구온도의 상승으로 2050년까지 다수의 해양생물종이 멸종되어 생물종 다양성에 변화가 발생하고, 수온 상승에 따른 생태계 변화와 수산어류의 이동으로 인해 어업이 받게 될 영향이 클 것으로 전망하였다.

바다는 인위적으로 배출량이 급증하고 있는 대기 중의 이산화탄소와 열을 흡수하고 조정하면서 지구 시스템 내의 기후조절자로서의 역할을 하고 있다. 하지만, 최근 수온의 상승과 해양산성화 현상의 심화로 기후조절자로서의 역할이 심각하게 줄어들고 있다. 이와 같은 차원에서 기후변화에 관한 정부간 협의체(IPCC: (Intergovernmental Panels on Climate Change)에서는 해양 및 빙권에 관한 특별보고서(SROCC; Special Report on Ocean and Cryosphere in a Changing climate)의 발간에 합의하였고, 2019년 9월에 열린 제 51차 총회에서 정책결정자를 위한 요약서(SPM: Summary for Policymaker)가 승인되었다. 이 보고서는 IPCC AR5(5th Assessment Report) 이후에 발간된 해양, 수산 및 빙권과 관련된 기후변화 연구 결과와 모델 개발 자료를 통하여 해양과 빙권의 현재 상황과 예측되는 변화에 대하여 상세히 기술하였다. IPCC SROCC에 기술된 해양의 변화에 대하여 의미 있는 내용에 대하여 살펴보고자 한다(IPCC, 2019).

우선 해양 온난화(Ocean warming) 경향은 1993년부터 더욱 증가했을 가능성이 높다. 전 지구 표층(0~700 m) 및 중층 이심(700~2,000 m)에서의 해양 열용량(Ocean heat content)은 1970년부터 1993년까지 3.22±1.61 ZJ yr^{-1} 및 0.97±0.64 ZJ yr^{-1}로 증가한 반면, 1993년부터 2017년까지는 6.28±0.48 ZJ yr^{-1} 및 3.86±2.09 ZJ yr^{-1}로 증가하였다. 이는 적어도 전 지구 해양이 두 배 이상의 열을 흡수한 것을 의미한다. 또한 1970년 이후 해양의 상층부는 성층화가 심각하게 진행되고 있다. 해양의 수온 상승과 고위도에서의 염분 감소는 심층 해양에 비교하여 시간이 갈수록 표층부의 밀도를 감소시키고 이는 표층과 심층의 해수 교환을 억제하는 효과로 작용할 것이다. 해양 상층 200 m까지의 성층은 1970년 2.18%에서 2017년 2.42% 범위까지 더욱 증가하였다.

해양은 현재에 대비하여 2100년까지 RCP 2.6의 경우 2~4배, RCP 8.5의 경우 5~7배 더욱 온난화될 것으로 전망된다. 0~2,000 m 수층까지 해양은 RCP 2.6에서는 약 900 ZJ 정도 증가할 것으로 예측되며, RCP 8.5에서는 약 2,150 ZJ 정도까지 온난화 될 것으로 전망된다. 전 해양의 상층부는 더욱 성층화 될 것으로 전망되어 이번 세기 말까지 상층부 200 m의 연평균 성층은 RCP 2.6과 8,5 시나리오에서 각각 위도 60°N~60°S에서 1986~2005년 평균치 대비 1~9% 및 12~30% 증가할 것으로 예측된다(그림 6.1). 하지만, 수온 상승, 성층 정도, 열용량 등 해양온난화의 지역적 차이는 매우 크게 나타 날 수 있다.

전 지구 해수면은 지속적으로 상승하고 있으며, 상승률도 가속화되고 있다. 조위관측소 및 인공위성 자료 분석을 통하여 살펴본 전 지구 해수면 상승 속도는 1901~1990년까지는 1.4 mm yr^{-1}, 1970~2015년까지는 2.1 mm yr^{-1}, 1993~2015년까지는 3.2 mm yr^{-1}, 2005~2015년까지는 3.6 mm yr^{-1}로 나타나며 이러한 가속화의 가장 큰 원인은 인간 활동에 의한 영향으로 규정하고 있다. 미래의 전 지구 해수면은 열팽창, 빙하와 빙상의 융해, 육지 물 저장 형태 변화 등에 의하여 상승할 것이며 이는 RCP 시나리오에 의해 강하게 지배될 것으로 예측하고 있다. RCP 2.6 시나리오에 따르면, 2000년까지 전 지구 해수면은 1986~2005년 평균 해수면에 대비하여 0.43 m(0.29~0.59 m) 상승할 것으로

예측되며, RCP 8.5에서는 0.84 m(0.61~1.10 m)까지 상승할 것으로 예측된다(그림 6.1).

RCP 8.5 시나리오에서는 2100년까지 해수면 상승률이 15 mm yr^{-1}에 도달 할 것으로 예측하고 있으며, 22세기에 접어들면 상승폭이 더욱 늘어날 것으로 예측하고 있다. 전 지구 해수면 상승 예측과 함께 급격한 해수면 상승 현상(Extreme sea level events)은 더욱 증가할 것으로 예측되어 모든 RCP 시나리오에서 과거 100년에 한 번 일어날 극한 현상이 2050년 이후가 되면 1년에 한 번 일어날 수 있는 현상으로 흔하게 나타날 것을 우려하고 있다(그림 6.2).

지속적인 해양의 탄소 흡수에 의하여 해양은 계속 산성화 되고 있으며, 대양에서 표층 해수의 pH는 1980년대 이후부터 10년당 0.017~0.027의 범위로 감소하고 있음이 관측되고 있다. 인위적인 해수 중 pH 변화는 1950년 이후 3/4의 전체 해양 면적에 해당하는 해양 표층에서 위험이 나타나고 있으며, 전 세계 해양의 약 95%에서 이미 영향을

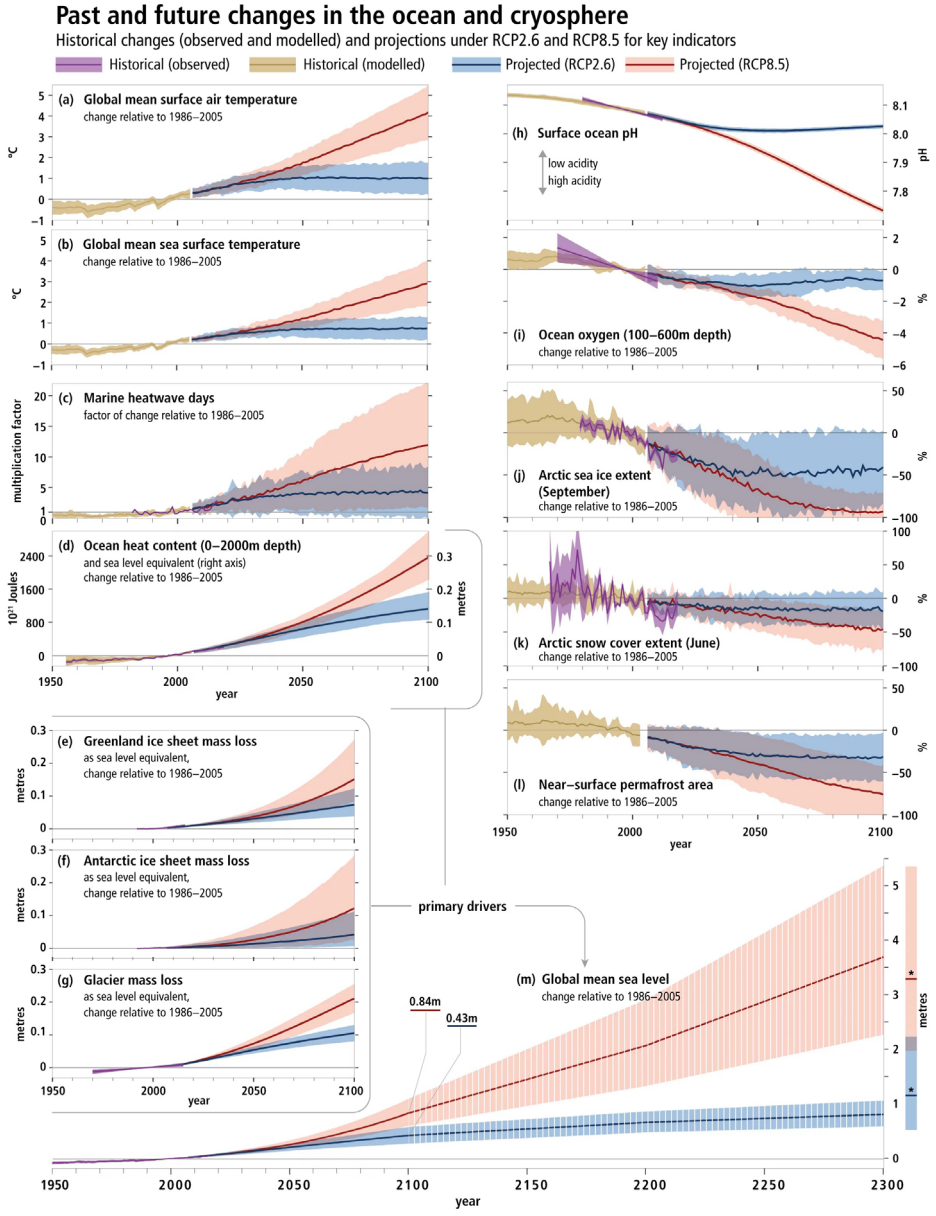


그림 6.1 해양과 빙권의 과거와 미래 변화 경향(IPCC, 2019). (a) 전지구 기온, (b) 전지구 표층수온, (c) 이상고수온 발생일수, (d) 0~2,000 m까지의 해양 열용량, (e) 그린랜드 빙상 질량 감소, (f) 남극 빙상 질량 감소, (g) 빙하 질량 감소, (h) 표층 해수 pH, (i) 100~600 m 해양 산소, (J) 북극 얼음면적(9월), (k) 북극 눈덮힘 면적(6월), (i) 영구동토층 면적, (j) 전지구 평균 해수면. (a)~(i)는 1950년부터 2100년까지의 관측 및 예측치, (j)는 1950~2300년까지의 변화.

받고 있어 기후변화로 인한 영향이 가장 위험한 형태로 나타나고 있다고 말할 수 있다.

1970~2010년 사이에 해양 표층부터 1,000 m 수심까지 약 0.5~3.3%의 산소 감소 현상이 나타나고 있음이 역시 관측되었다. 온난화로 인한 산소 손실은 해양 물리 및 생지화학적 반응에 따라 강화되고 있다. 해양 온난화와 성층 강화로 인하여 영양염의 순환은 교란되고 있으며, 지역적으로는 기초 생산력에 다양한 형태로 영향을 미치고 있지만, 현장 관측 자료와 시계열 자료는 아직 부족한 형편이다. 해양 표층의 pH는 2006~2015년에 대비하여 2081~2100년까지 RCP 2.6과 8.5 시나리오에서 각각 0.036~0.042 및 0.287~0.290 만큼 감소할 가능성이 매우 높다. 해양의 산소도 향후 더욱 감소될 것으로 예측되어 2006~2015년 대비 2081~2100년까지 RCP 8.5 시나리오에서는 약 3.2~4.7%, RCP 2.6 시나리오에서는 약 1.6~2.0% 감소할 가능성이 매우 높을 것으로 예측하고 있다. 또한 해양의 성층 강화와 관련하여 2006~2015년 대비 2100년에 표층 100 m까지의 질산염 농도는 평균 9~14% 감소할 가능성이 매우 높을 것으로 판단하고 있다.

해양 온난화의 영향으로 식물플랑크톤부터 대형 해양 포유류까지 해양생물들의 지리적 분포 변화가 관측되어 있으며, 1950년 이후 관측된 해양생물의 이동은 표영부에서는 약 51.5±33.3 km/decade, 저서부에서는 약 29.0±15.5 km/decade로 추정된다. 다양한 기후모델에서는 순 기초

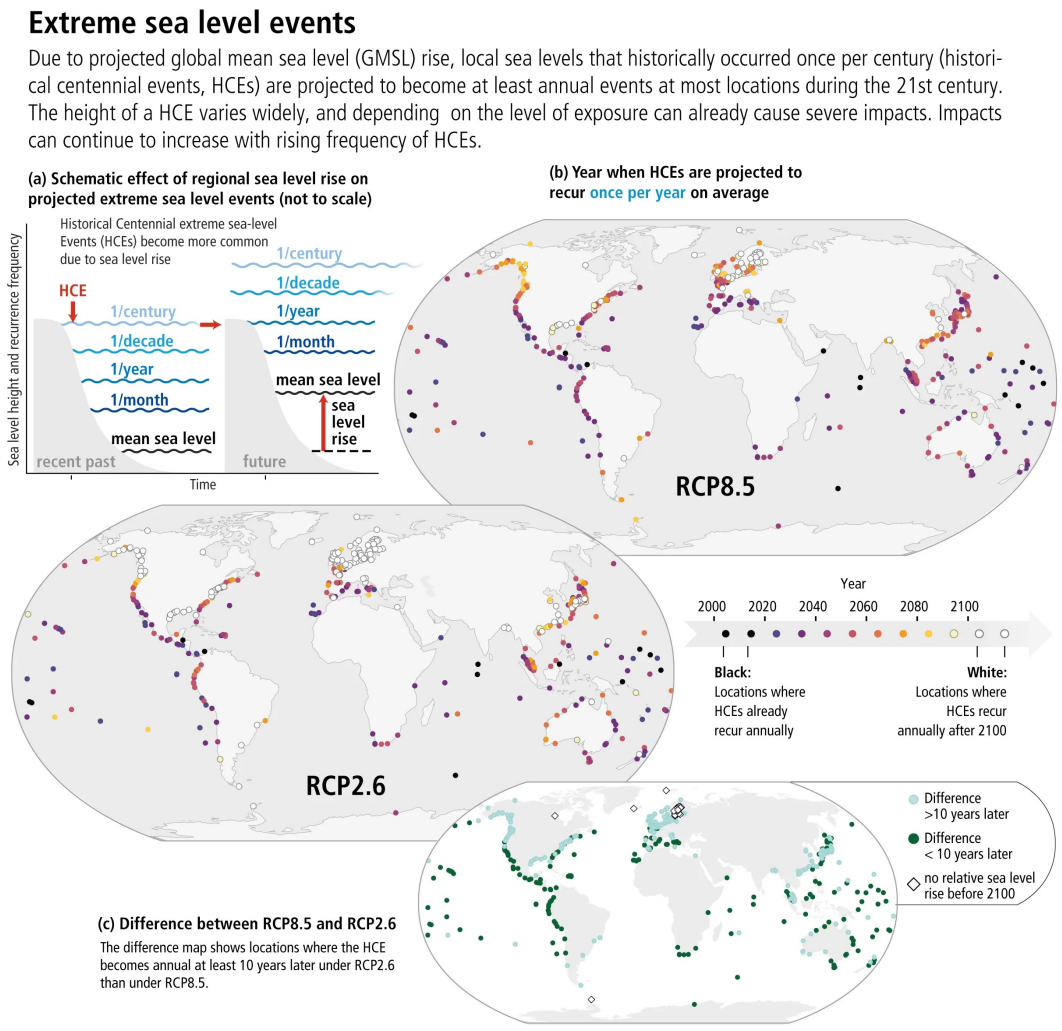


그림 6.2 급격한 해수면 상승 현상 발생이 일어날 가능성(IPCC, 2019). (a) 급격한 해수면 발생 가능성에 대한 영향 모식도, (b)~(C) RCP 8.5와 2.6에서 과거 100년에 한번 일어날 급격한 해수면 상승현상이 1년에 한번 일어날 수 있는 연도 예측.

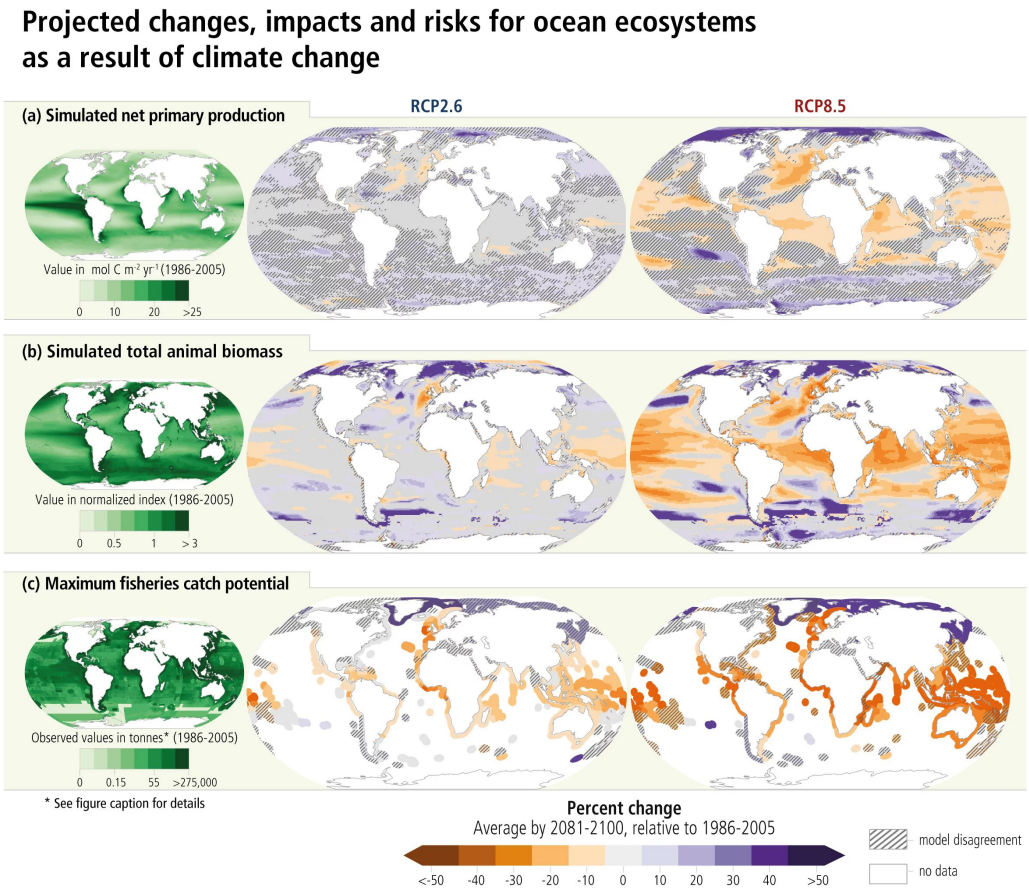


그림 6.3 기후변화로 인한 해양생태계에서의 예상되는 변화, 영향 및 리스크(IPCC, 2019). (a) 예상되는 순 기초생산력, (b) 예상되는 총 해양생물 생체량, (c) 최대 잠재 어획량 변화.

생산력(NPP, Net Primary Production)이 2006~2015년 대비 2081~2100년에는 RCP 8.5 시나리오 상에서 약 4~11% 감소할 것으로 예측하고 있다. 21세기 동안 예측되는 해양 온난화와 NPP 변화는 방향과 크기에 따라 지역적 차이를 보이겠지만, 전 세계 해양 생물의 생체량과 수산자원의 최대 잠재 어획량 감소를 일으킬 것으로 추정하고 있다. 해양 생물의 전 지구 생체량은 1986~2005년 대비 2080~2099년까지 RCP 2.6과 8.5 시나리오에서 각각 4.3±2.0% 및 15.0±5.9% 정도로 감소할 것으로 예상되고 있으며, 최대 잠재 어획량은 역시 같은 기간에서 각각 2.8~9.1% 및 16.2~25.5%까지 감소할 것으로 예측하고 있다.

IPCC SROCC에서는 기후변화로 인하여 전 세계 해양은 물리적, 생지화학적, 생물학적 및 수산분야에서도 큰 변화가 발생하였고, 더욱 큰 변화가 나타날 것으로 예측하고 있다. 이와 같이 급격한 변화에 대응하기 위하여 해양 및 수산분야에서도 세계 각국이 적응 기술 및 정책 마련에 적극적으로 나서줄 것을 권고하고 있다. 우리나라 관할 해역에서 기후변화와 관련된 관측과 미래 전망에 대한 연구가 취약한 가운데 IPCC SROCC는 지침서와 같은 역할을 할 것으로 판단된다. 우리나라 해역이 북서태평양의 일부로서 전지구 해양의 변화 경향에서 벗어날 수 없기 때문이다.

본 보고서에서는 2010년과 2014년에 발간된 한국 기후변화 평가보고서를 바탕으로 2014년 이후의 상태 설명에 주안점을 두었다. 해양생태계 변화의 배경이 되는 해양온난화, 해양산성화 및 해양저산소화에 대한 연구 수준은 누적된 관측 자료의 기간과 범위에 따를 수밖에 없어 우리나라는 아직도 종합적인 영향의 평가와 취약성 평가에 한계가 있다. 일부 해수 물성의 변화에 대한 연구에서는 정량적 분석 결과 제시가 가능한 상황이지만 생태계 변화에

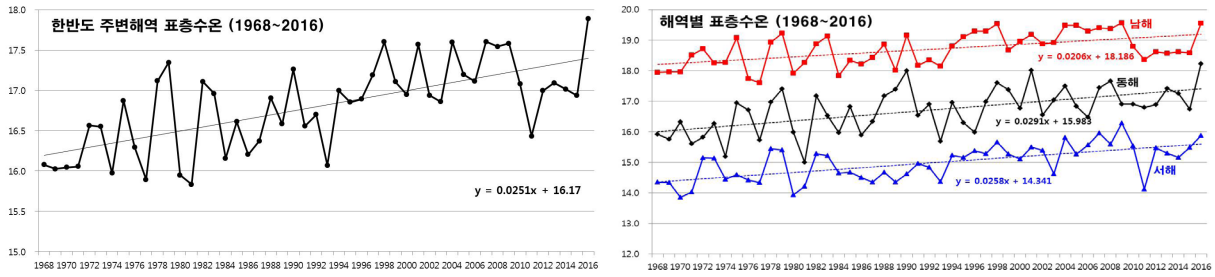


그림 6.4 국립수산과학원 정선해양관측에서 얻어진 최근 49년간(1968~2016년) 연평균 표층수온 변동경향 및 해역별 연평균 표층수온 변동 경향(해양수산부, 2019).

근접할수록 정성적 분석 수준에 머물러 있는 실정이다. 본 보고서는 이러한 제한적 상황에서 우리나라 해역에서 최근 연구된 해양환경의 변화 상태를 정리하였고 영향 전망을 기술하였다. 취약성 평가 부분에서는 2014년 이전에 발간된 문헌을 포함 참고하여 취약성 평가 방법론부터 설명에 포함하였다.

「한국 기후변화 평가보고서 2014」에서 강조하였던 '기후변화에 대한 취약성 평가와 적응방안' 마련은 아직도 세밀하게 이루어지지 않고 있어 기존의 적응옵션에서의 권고 사항은 아직도 유효하다.

6.2 관측된 영향

6.2.1 해양환경

「한국 기후변화 평가보고서 2014」에서는 지구온난화에 의한 해수면 상승, 해류의 변화, 해양 산성화, 용존기체의 감소와 같은 현상이 관찰되고 있으며, 그 진행 속도는 전지구 해양보다 빠르다는 것이 견고한 동의 수준으로 제시되었다. 우리나라 주변의 급격한 온난화의 영향은 시베리아 고기압의 약화와 해양의 역할 증가에 의한 변화로 설명하고 있으며, 해수면 상승은 1968~2007년까지 2.16±1.71 mm/yr 정도로 상승함을 보고하였다. 우리나라 근해의 용존산소는 국립수산과학원 정선자료를 기반으로 전체 수심에서 심각하게 감소하고 있음을 지적하였다.

6.2.1.1 수온 상승

국립수산과학원에서 지속적으로 수행하고 있는 정선해양조사(NIFS Serial Oceanographic Observations)를 통하여 우리나라 해역의 최근 49년간(1968~2016년) 연평균 표층수온의 변동 경향을 살펴보면, 우리나라 해역은 약 1.23℃ 상승하여 같은 기간 전 세계표층수온 상승(0.47℃)에 비하여 약 2.6배 내외 높은 수준을 보이고 있으며, 해역별로는 동해의 경우 1.43℃, 남해는 1.01℃, 서해 는 1.26℃ 상승하여 서해와 남해에 비하여 동해에서의 수온 상승이 높은 경향을 보이고 있다(그림 6.4; 해양수산부, 2019). 좀 더 긴 기간의 수온 변화를 살펴보기 위하여 일본 기상청이 보유하고 있는 COBE-SST(Centennial in situ Observation-Based Estimated of the variability of sea surface temperature and marine meteorological variables-Sea Surface Temperature) 자료를 살펴본 결과, 동해 중부의 경우 100년을 기준으로 연평균 1.70℃, 동해 남서부의 경우 1.28℃, 황해는 1.24℃, 동중국해 북부의 경우 1.20℃ 상승하는 것으로 나타나 저위도에서 고위도로 갈수록 수온 상승이 높게 나타남을 확인할 수 있다. 또한 최근 100여 년간 겨울철과 여름철 수온 상승 경향은 여름철 수온 상승에 비하여 겨울철 수온 상승이 약 2~3배 높은 수준에 있음을 확인할 수 있었다(해양수산부, 2019).

IPCC SROCC에서는 지속적인 해양 수온의 상승뿐만 아니라 최근 이상 고수온(Marine heatwaves) 현상의 빈번한 발생을 우려하고 있다. 대표적으로 "the Blob"으로 불리는 북동태평양에서 2013~2015년 사이에 나타난 이상고수온 현상(Bond et al., 2015), 2011년 오스트레일리아 서쪽

해역(Kataoka et al., 2014) 및 2012년 북서대서양 해역의 고수온 현상(Mills et al., 2013) 등이 있다. 전 세계의 이상 고수온 현상이 더욱 빈번하고 강력하게 확대되는 원인을 자연 기후 변동성으로는 설명하기 힘들다(Frölicher et al., 2018; Oliver 2019). 기후모델에서 21세기 동안 해양 수온의 장기적인 상승을 예상함에 따라(Collins et al., 2013) 지구 온난화가 지속되는 이상 고수온 현상의 발생 확률도 증가될 것으로 판단하고 있다. 실제로 이상 고수온 현상은 미래 지구 온난화에 따라 빈도, 지속시간, 공간적인 범위와 강도가 증가할 것으로 예측된다(Ramirez and Briones, 2017; Alexander et al., 2018). 우리나라 해역에서도 이상 고수온 현상이 2016년부터 두드러지게 나타나고 있으며, 특히 서해와 남해의 연안역을 중심으로 이상 고수온 현상이 지속적으로 나타나고 있다(그림 6.5).

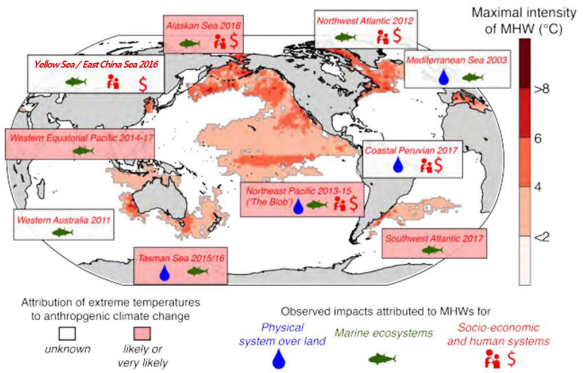


그림 6.5 IPCC SROCC에서 제시한 최근 이상고수온 현상 발생해역도(IPCC, 2019).

실제로 인공위성으로 관측한 2016년부터 2018년까지 8월 평균 해수면 수온의 평년편차 분포를 살펴보면, 이 기간 동안 우리나라 해역의 월평균 해수면 수온이 평년에 대비하여 1~4℃ 높게 나타나고 있음을 확인할 수 있다. 이와 같이 우리나라 주변에 여름철 고수온 현상이 빈번히 발생하는 원인으로는 북태평양 고기압의 위치와 세력에 따른 폭염의 지속과 2016~2018년 여름철 우리나라에 직접적으로 영향을 주는 태풍의 부재로 인하여 표층부근의 연직혼합이 크게 약화되어 표층과 아표층 사이에 성층을 강화시켰으며, 2016년 이후 하계에 강한 대마난류 세력이 유지됨에 따른 영향으로 이해하고 있다(그림 6.6).

6.2.1.2 해수면 상승

우리나라 연안에 설치된 조위관측소 중, 관측기간이 20년 이상 누적된 21개 조위계 기록을 분석한 결과에 의하면 최근 30년간(1989~2018) 우리 해역 전체의 평균 해수면 상승률은 2.97 mm yr^{-1}이며, 해역별 평균 해수면은 제주 부근 4.26 mm yr^{-1}, 동해안에서 3.50 mm yr^{-1}, 남해안은 2.44 mm yr^{-1}, 서해안은 2.48 mm yr^{-1} 순으로 상승한 것으로 나타났으며, 각 관측지점별로 보면 제주가 5.43 mm yr^{-1}, 울릉도 5.13 mm yr^{-1}, 포항 4.55 mm yr^{-1}, 거문도 4.39 mm yr^{-1} 순으로 나타났다(그림 6.7, 그림 6.8; 국립해양조사원, 2018).

Yoon(2016)은 한반도 주변의 30년 이상 운영하고 있는 조위관측소 자료를 활용하여 해역별 해수면의 장기변동을

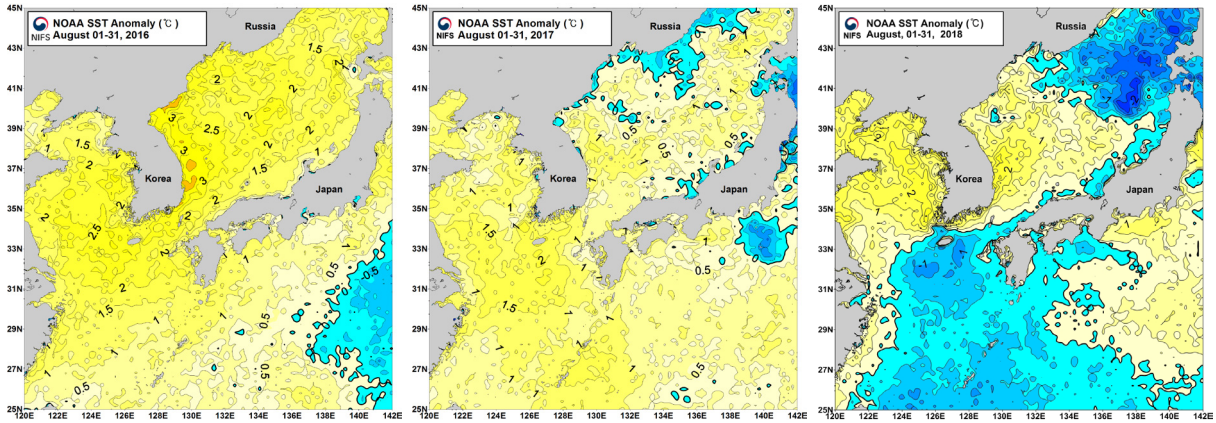


그림 6.6 국립수산과학원 인공위성 정보를 통해 살펴본 2016~2018년 8월 평균 표면수온 평년편차 분포도(해양수산부, 2019).

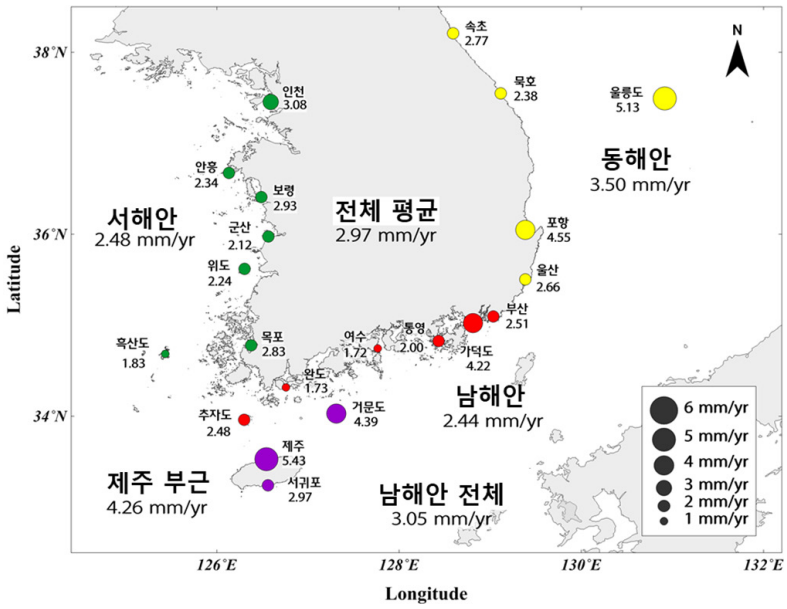


그림 6.7 최근 30년간(1989~2018년) 해수면 상승률(국립해양조사원, 2019).

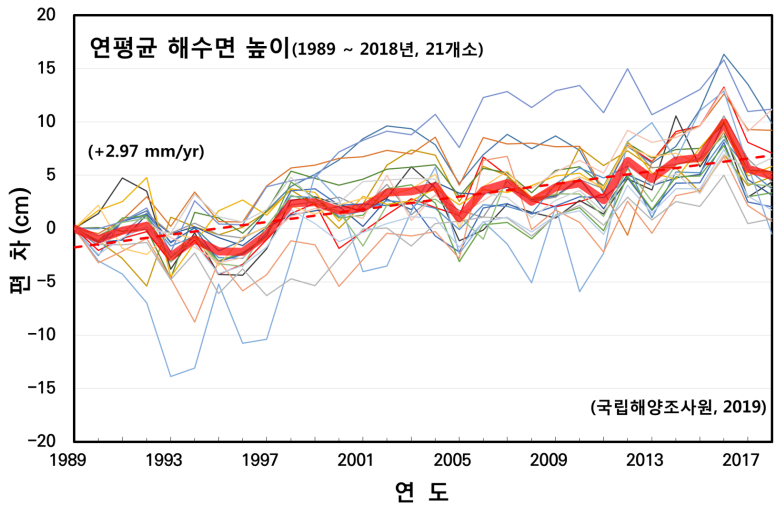


그림 6.8 최근 30년간(1989~2018년) 해수면 높이 변동 경향(국립해양조사원, 2019).

살펴보았다. 회귀분석을 통하여 각 관측소의 상대 해수면에 관한 장기 변동을 살펴본 결과, 서해 연안을 따라서는 2.0 mm yr^{-1} 내외로 적은 상대 해수면 상승률이 나타난 반면, 동해와 남해는 각각 3.6 mm yr^{-1}, 2.8 mm yr^{-1}로 나타났고 제주는 가장 높은 3.8 mm yr^{-1}로 나타났다. 우리나라 연안의 해수면의 연간 변동은 지역별로 큰 차이를 보였다.

1990년대에 들어오면서 인공위성 고도계 자료를 활용하여 근해역의 해수면 관측이 가능하게 되었다. 1993년부터 2017년까지 AVISO 위성 해면고도계 자료로부터 우리나라 주변 해역의 총 1041개 격자(grids)에서의 연평균 해수면 상승률은 약 3.21 mm yr^{-1}로 나타났다(그림 6.9; Watson, 2019). 가장 큰 해수면 상승이 나타나고 있는 해역은 동해와 황해의 위도 37.5°N 부근 해역으로 8.0 mm yr^{-1} 이상의 상승률이 나타났다. 해역별로 살펴보면 황해가 3.33 mm yr^{-1}, 동해가 3.54 mm yr^{-1}, 남해를 포함한 동중국해가 2.88 mm yr^{-1}로 나타나고 있다. 이는 조위 관측소에 의하여 관측된 해수면 변동과는 차이가 있음을 확인할 수 있다. 또한 인공위성 해면고도계 자료를 통한 전 지구 해역의 최근 25년간 해수면 상승률 3.62 mm yr^{-1}보다 우리나라 해역의 해수면 상승률이 낮게 나타나고 있어 이 점에서도 조위 관측소 결과와 차이가

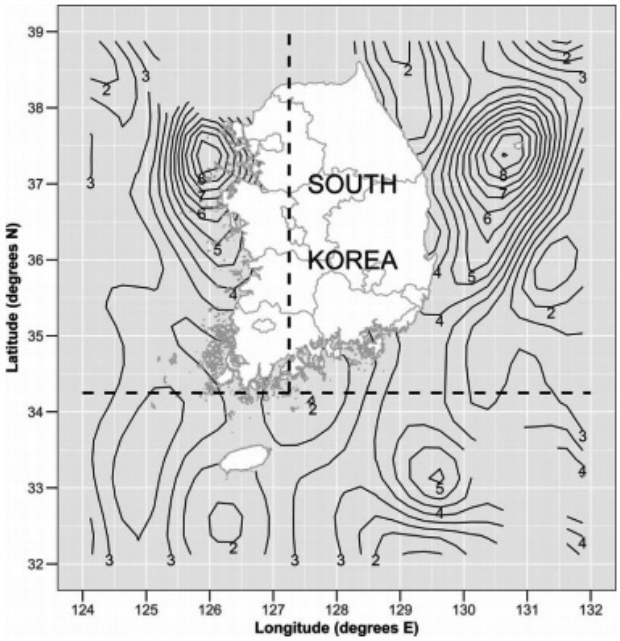


그림 6.9 1993~2017년 인공위성 해면고도계 자료로부터 확인한 우리나라 주변해역의 해수면 변동 경향(Watson, 2019). 각 격자별 관측치로부터 선형 회귀를 통한 상승률 산정.

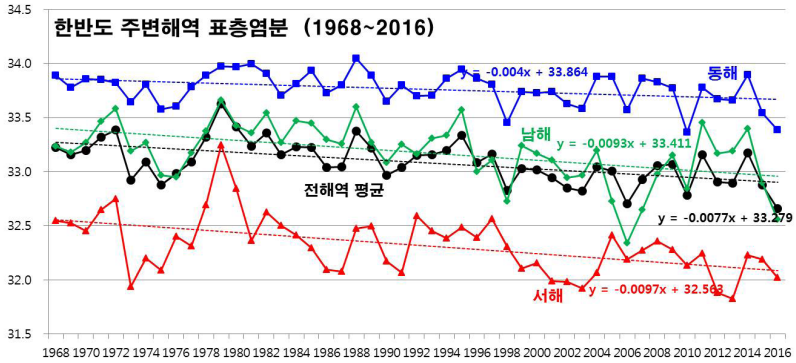


그림 6.10 최근 49년간(1968~2016년) 우리나라 전체 및 각 해역별 연평균 표층염분 변동경향(해양수산부, 2019).

있음을 확인할 수 있다.

황 등(2016)에 의한 인공위성 고도계 자료에서 얻어진 해수면 변화는 쿠로시오 해류 및 대륙성 기후 영향, 중규모 소용돌이의 영향 등 외해역의 변동성에 의한 영향을 많이 받음으로서 해수면 변화에 영향을 크게 주기 때문이라고 분석하였다.

6.2.1.3 화학적 변화

국립수산과학원 정선해양조사에서 얻어진 염분의 장기 변동 자료로부터 1968년부터 2016년까지 최근 49년간 장기적인 표층염분 변동 경향을 살펴보면 우리나라 전체의 연평균 표층 염분은 최근 49년간 약 0.29 psu 감소하였으며, 해역별로는 동해가 0.14 psu, 남해가 0.38 psu, 서해가 0.43 psu 감소하여 동해에 비하여 서해 및 남해에서의 표층염분 감소율이 2배 이상 높게 나타났다(그림 6.10; 해양수산부, 2019).

특히 서해와 남해의 염분 감소율은 여름철에 높게 나타나는 특징을 보였다. 이는 서해와 남해의 염분이 하계 양자강 유출수 변동에 의한 영향을 받기 때문으로 추정된다.

우리나라 해양산성화 영향에 대한 조사는 현재 단편적으로 기관별로 진행되고 있는 상황으로 전체적인 변동 경향 파악에는 아직 곤란한 점이 많다. Park et al.(2018)은 모델

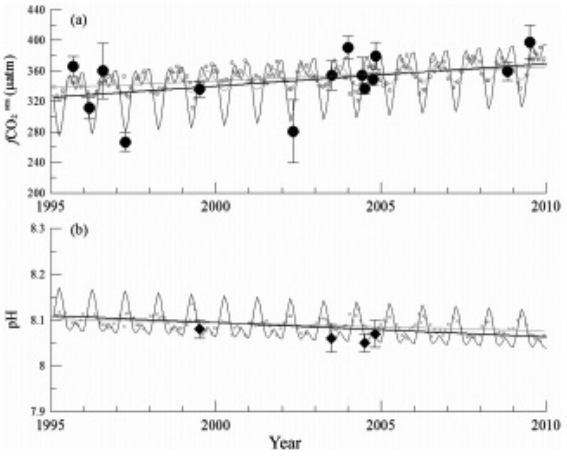


그림 6.11 동해 울릉분지 표층해수의 (a) fCO_2과 (b) pH 변동 경향(Kim et al., 2014). 약한 회색선은 Station ALOHA에서의 변동 경향.

결과를 통하여 최근 30년간(1980~2010년) 동해는 이산화탄소 침강을 통하여 산성화가 진행되고 있지만, 이산화탄소 플럭스의 변화보다는 물리적인 과정에 의한 영향, 즉 탄소의 이류 수송에 의하여 더 많은 영향을 받는 것으로 지적하고 있다. Kim et al.(2014)은 1995년부터 2009년까지 울릉분지 표층에서의 해양산성화에 대한 정량적인 분석 결과를 기반으로 이 해역에서의 pH 감소는 -0.03±0.02 pH decade^{-1}로 제시하였다. 또한 표층해수의 이산화탄소 분압(fCO_2)을 측정한 결과, 매년 2.7±1.1 μatm yr^{-1}의 속도로 증가하였으며, 이는 전 세계 장기관측 지점들에서 추정된 값(1.58±0.07~2.22±0.11 μatm yr^{-1}) 보다 높은 증가율이다. 울릉분지에서의 대기 이산화탄소 분압 증가율은 1.8±1.1 μatm yr^{-1}으로 기상청의 안면도 기후감시센터에서 측정된 관측치보다 약간 낮은 값을 보였다. 이는 같은 기간에 시계열 관측이 이루어지는 다른 해역에서의 표층 pH 감소보다 훨씬 높은 수준으로 동해에서의 해양산성화가 빠르게 진행되고 있음을 시사하고 있으며, 대기보다 높은 해양 표층 이산화탄소 분압 증가율은 시간이 갈수록 동해 표층으로 흡수되는 대기 이산화탄소량이 줄어들고 있음을 의미하고 있다.

또한 동해 내부로 대기 이산화탄소 흡수율이 감소하는 것으로 밝혀졌으나, 모델 결과에 따르면 그 크기가 줄더라도 동해는 지속적으로 대기 이산화탄소를 흡수하는 흡수원으로 남을 것으로 예상된다(Luo and Boudreau, 2016).

Kim et al.(2015)는 2007년부터 2009년까지 동해 중앙 해역에서 채취한 해수를 분석하여, 동해에서의 용존유기탄소(DOC; Dissolved Organic Carbon)의 변동 경향성을 살펴보았다. 동해 심층에서의 DOC는 약 58±4 μM으로서 북대서양과 지중해의 ~50 μM 및 ~34 μMdp 비하여 높은 농도를 나타내었다. 또한 동해 심층에서의 DOC 감소율은 0.04 μmol C Kg^{-1} yr^{-1}로서 북대서양 및 지중해에 비하여 2~3배 느린 속도로 나타났다. 이와 같이 낮은 감소율의 원인은 동해 심층 수괴의 수온이 1℃ 이하의 매우 낮은 수준을 유지하고 있기 때문으로 판단하였다(그림 6.11).

Yoon et al.(2018)은 1990년대 중반부터 2010년대 중반까지 동해에서 관측된 생지화학적 자료 분석을 통하여 2000년대 이후부터 저층수 형성의 강화로 인하여 저층으로의 산소 공급이더욱 활발해진 반면, 중층수 형성은 감소하여 중층으로의 산소 공급은 상대적으로 약화되었음을 지적하였다.

6.2.2 해양생물과 생태계 (PP, 플랑크톤, Nutrients)

「한국 기후변화 평가보고서 2014」에서는 엔소의 영향으로 황해 및 동중국해의 식물플랑크톤 경년변화에 기여를 한다는 점과 기후체제변화에 따라 한반도 근해 동물플랑크톤의 변화가 연동되고 있음을 설명하였다. 그러나 참고문헌이 많지 않아 체계적 설명에는 미치지 못하였다.

해양의 체제변환(regime shift)에 의한 물리·화학적 환경변화는 우리나라 주변 해역에 플랑크톤에서 어류까지 해양생태계 전반에 걸쳐 변화를 유발하고 있으며, 이와 관련하여 생태계 반응과 미래의 환경변화를 예측하는 연구가 활발히 진행되고 있다.

해양생태계에서 가장 중요한 일차생산자로서 식물플랑크톤은 태양에너지를 이용하여 무기물을 유기물로 합성하며, 이렇게 생성된 유기물은 먹이사슬에 의해 상위단계로 에너지를 전달하고 생태계를 유지하는데 있어 가장 근원이 된다. 또한 탄소와 영양염류의 순환에도 중요한 역할을 담당한다. 식물플랑크톤은 생물 요인들과 비생물 요인들에 의해 조절된다. 생물학적 요인들은 종간 경쟁과

상위소비자에 의한 섭식 등의 하향식 조절(topdown control)에 의해 제어되며, 비생물 요인들은 수온, 염분, 영양염, 광량 등의 상향식 조절(bottopup control)에 의해 제어된다(심 등, 2015). 한편 일차생산력은 영양염, 투명도, 수온과 같은 환경요인에 영향을 받는 것으로 알려져 있으며 이와 같은 환경요인들이 복합적으로 상호작용하여 결정된다(Choi et al., 2015). 그러므로 해양생태계에서 일차생산력의 분포와 변화를 이해하는 것은 해양생태계내의 에너지 흐름과 물질순환을 이해하는데 있어서 매우 중요한 요소이며, 일차생산력의 변화는 수산자원 생산에도 직접적인 영향을 미치므로 선행되어야 하는 연구 중에 하나이다.

우리나라 주변해역에서 일차생산력에 직접적으로 영향을 끼치는 영양염 농도의 경우, 인산염은 유의한 변화가 관찰되지 않았으나, 질산염의 농도가 다소 증가하는 것으로 나타나 일차생산력의 변화가 발생한 것으로 예측되었다(해양수산부, 2019). 그러나 동해의 경우 표층에서 질산염과 인산염 농도의 연간변화와 관련하여 인간기원의 질소성분 유입, 해류를 통한 영양염 공급, 그리고 해양내부의 물리적/생물적 작용에 의한 변화 등 여러 상반된 주장이 있어 자료의 상호 비교를 통한 장기적인 변화를 살펴보는 것이 필요하다(해양수산부, 2019).

우리나라 주변해 일차생산력의 계절적 변동을 살펴보면(그림 6.12), 황해 북부가 가장 높고 다음으로 동중국해 연안 그리고 동해 남부 해역이 상대적으로 높은 것으로 나타났다(해양수산부, 2019). 1998년부터 2014년까지의 연간 변동을 살펴보면(그림 6.13), 동해는 감소하나 서해는 증가하는 경향으로 나타났고, 남해는 전반적으로 변화가 없는 것으로 예측되었다(Yoo et al., 2019).

우리나라 주변해역에서 측정된 일차생산력은 단기적이고 제한된 해역에서 조사된 한계점이 있으나, 최근에는 이를 극복하기 위해 인공위성 자료가 활용되고 있다. Joo et al. (2016)는 MODIS 자료를 활용하여 동해의 연간 일차생산력이

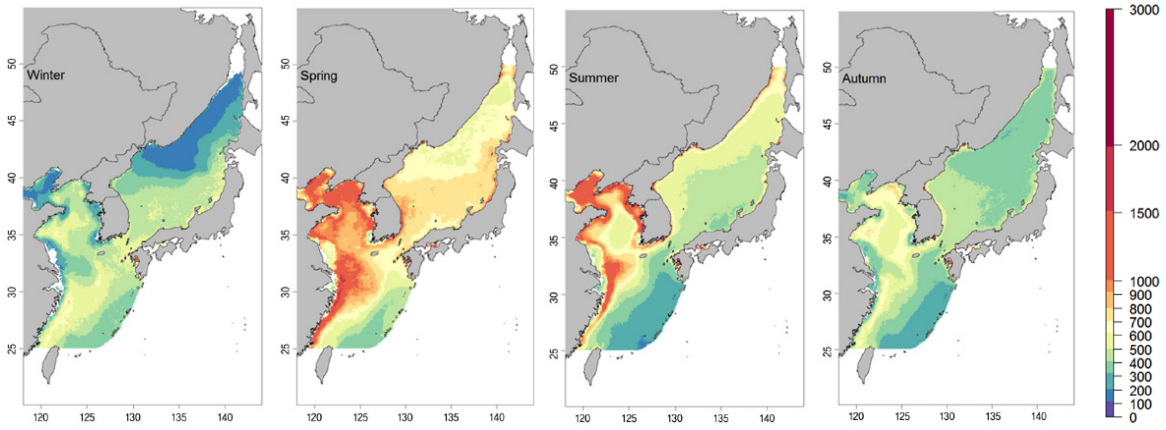


그림 6.12 1998년에서 2014년까지 한국주변해역 일차생산력의 계절 변화(해양수산부, 2019).

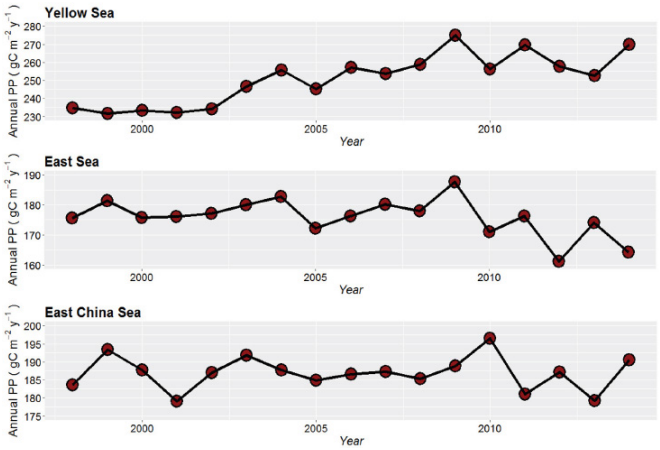


그림 6.13 한국주변해역의 연간 일차생산력(1998~2014년) 변동 추세(해양수산부, 2019).

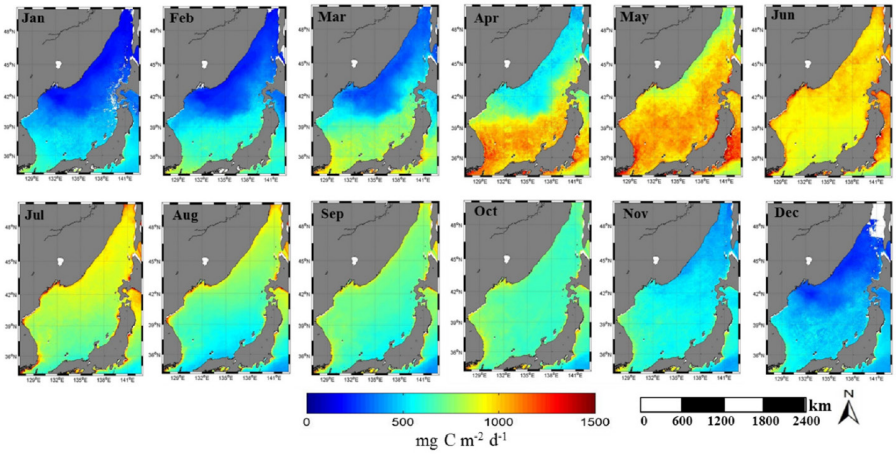


그림 6.14 동해에서 위성으로 관측된 월별 일차생산력의 공간 분포(Joo et al., 2016).

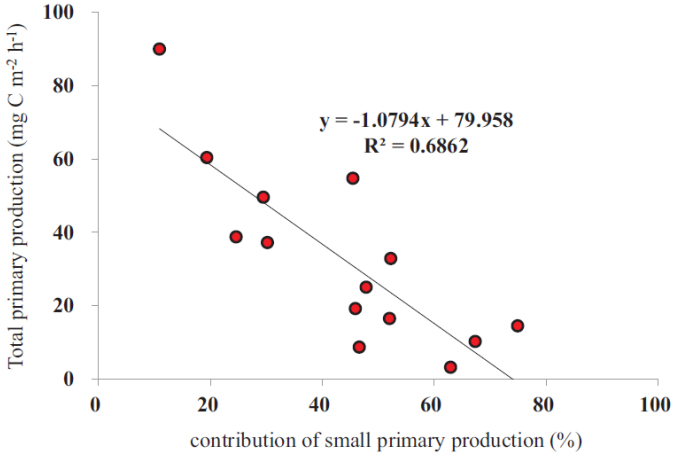


그림 6.15 동해 북부에서 13C를 이용하여 측정된 작은 크기 식물플랑크톤의 일차생산력과 총일차생산력의 관계(Lee et al., 2017).

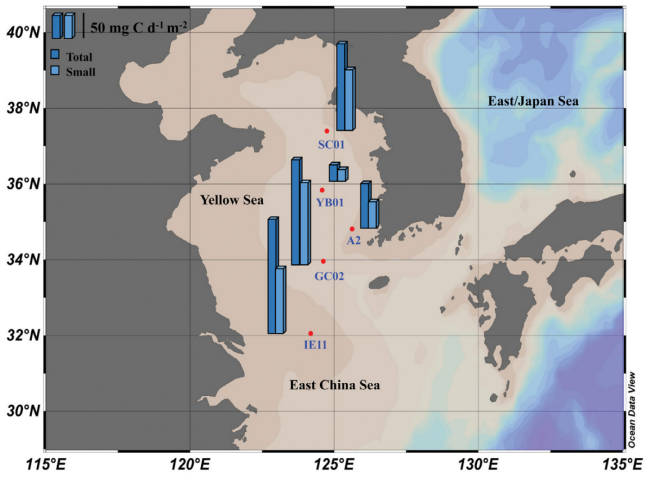


그림 6.16 황해에서 13C를 이용하여 측정된 일일 총기초생산력과 작은 크기 식물플랑크톤의 일일 기초생산력(Jang et al., 2018).

246.8 g·C·m^{-2}·y^{-1}로 추정하였고, 2003~ 2012년 사이 일차생산력이 전체의 13%가 감소한 것은 PDO와 밀접한 관련이 있는 것으로 보고하였다(그림 6.14). Yoo et al. (2019)는 인공위성 알고리듬을 개선하여 1998년부터 2014년 사이 한국주변해의 일차생산력을 계산하였다. 황해와 동중국해는 각각, 231.7~275.1 g·C·m^{-2}·y^{-1} (평균 250.8 g·C·m^{-2}·y^{-1})과 179.0~196.6 g·C·m^{-2}·y^{-1} (평균 186.9 g·C·m^{-2}·y^{-1})의 범위를 보였고, 반면 동해는 161.1~187.6 g·C·m^{-2}·y^{-1} (평균 175.9 g·C·m^{-2}·y^{-1})의 범위를 보여 가장 낮았다.

Lee et al.(2017)는 13C와 15N을 이용한 현장 실험을 통해, 동해의 낮아진 일차생산력이 수온상승으로 인한 작은 크기의 식물플랑크톤의 증가로 보고하였다(그림 6.15). 동일한 안정동위원소 추적자를 이용하여 Jang et al.(2018)은 황해에서 이전에 비하여 약 50% 낮아진 일일 기초생산력 (평균 291.1 mg·C·m^{-2}·y^{-1})과 함께 작은 크기의 식물플랑크톤이 일일 기초생산력의 약 72%(평균 205.7 mg·C·m^{-2}·y^{-1})를 차지하고 있음을 보고하였다(그림 6.16). 과거에 비해 상대적으로 낮아진 황해의 기초생산력과 작은 식물플랑크톤 기여의 증가는 P-limited 해양환경과 관련이 있는 것으로 보고하였다.

6.2.3 수산

「한국 기후변화 평가보고서 2014」에서는 수온 상승이 해양생태계에 미친 영향으로는 수산업 대상 어종의 가입 증가와 생물의 분포, 계절생물학적 변화가 있음이 견고한 동의 수준으로 제시되었다. 대부분 어종과 업종에서 전반적으로 기후변화에 대응하기 힘든 부정적인 영향이 많이 미칠 것으로 보았다.

6.2.3.1 어획량 변화

수산자원은 환경변화의 영향으로 자원량, 분포, 종조성 등이 변하게 되며, 이러한 변화는 생태계 구조 변화와 함께 나타나기도 한다. 우리나라 주변 해역의 남측과 북측은 다양한 기후대의 특성을 보이며, 명태, 연어와 같은 냉수성 어종이 분포하는 남방 한계, 또는 오징어등과 같은 난류성 어종 분포의 북방한계에 해당하기도 한다. 따라서 기후변화 등에 의해 해양환경이 변하면 수산자원량의 증감 또는 주 서식지의 변화가 나타나며, 기후변화에 따른 해역별 해양환경 및 수산자원의 반응 정도는 다르게 나타난다(Jung et al., 2017; Rahman et al., 2019)

1920년대부터 1990년대 이후까지 어획되는 우점종의 변화가 지속되어 왔으며(1920~30년대: 정어리, 명태, 1950~60년대: 참조기, 1970년대: 꽁치, 1980년대: 명태, 말쥐치, 정어리, 1990년대 이후: 멸치, 고등어, 살오징어, 청어, 대구), 이런 우점종의 변화는 여러 요인중 기후변화에 따른 해양생태계 체제 변환의 영향이 상대적으로 큰 것으로 보인다(환경부·국립환경과학원, 2014).

1965년부터 2015년까지 우리나라 주변해역에서 어획된 어종의 종조성 변화를 분석하면 크게 세 시기(Fig. 그룹 A: 1965~1974, 그룹 B: 1993~2015, 그룹 C: 1975~1992)으로 구분이 된다. 그룹 A와 B는 난류성 어종(우점 어종은 다르게 나타남), 그룹 C는 냉수성 어종이 우점하는 것으로 나타난다 (Fig. 6.17; Rahman et al., 2019). 이러한 어종의 변화는 해양환경이 따뜻한 환경에서 차가운 환경 (또는 그 반대 경향)으로 변하는 것과 연관성이 높게 나타난다.

해양환경변화는 수산자원의 분포, 종조성 뿐만 아니라 생산량의 변화에도 영향을 끼친다. 우리나라 연근해어업의 총 어획량은 1970년대 평균 120만 톤, 1980년대 152만 톤, 1990년대 137만 톤, 2000년대에는 115만 톤으로 백만 톤 이상이 어획되었으나(해양수산부, 2019), 2016년과 2017년에는 약 93만 톤 정도로 낮아졌다(국가통계포털). 해역별로 남해, 동해, 서해 순으로 어획 생산량이 높고, 점차적으로 어획량이 감소하고 있는 추세이다. 근해 어업 생산량에서 근해 어업이 차지하는 비율은 약 70% 정도이다.

어획량 변동과 관련하여 남획의 영향에 고려해야 하지만, 아직까지 그 영향에 대한 정량적 분석은 미흡한 편이다. 그러나, 우리나라 연근해 자원상태는 1990년대초에 비해 2010년에는 과잉노력 상태이며, 인접국가들간 어업 협정으로 인한 어장 축소, 어업 장비의 기계화, 어장 예측 능력 등 어획능력은 향상 되고 있다(해양수산부, 2019). 이러한 장기간에 걸친 어획강도 변화가 자원량 변화에 미치는 영향에 대해서도 분석이 필요하다.

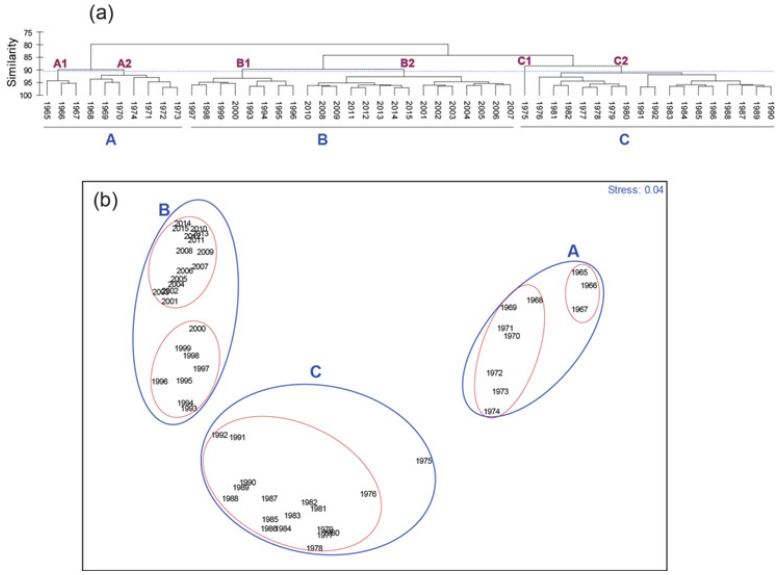


그림 6.17 1965~2015년까지 우리나라 연근해에서 어획된 어종의 종조성 변화(Rahman et al., 2019). (a) 계층적 군집분석, (b) 비모수다차원척도법.

6.2.3.2 어장위치의 변화

지난 40년간 수온 상승에 따라 북상하는 어종은 전갱이, 정어리, 살오징어, 삼치, 방어 등이며, 대형 부어류인 삼치와 방어의 북상 경향이 두드러졌다(환경부·국립환경과학원, 2014).

우리나라 주요 어획 대상종인 오징어는 기후변화 영향으로 회유 경로 및 주 어장의 위치가 변화되는 것으로 나타난다(김 등, 2019). 오징어는 동중국해를 중심으로 산란장이 형성되며, 이후 해류를 따라 서해, 남해, 동해 및 일본의 태평양 연안으로 서식지가 변하며, 그 과정에서 어장 위치도 변한다.

동해로 유입되는 난류의 수송량이 증가하고 고수온역이 동해 중부 연안까지 넓게 분포할 때 오징어 어장은 동해 연안에서 울릉도를 중심으로 주 어장이 형성되는 반면, 난류의 분포가 동해의 일본 연안역으로 치우치는 경우는 어장 중심이 동해 외해로 이동한다. 이러한 현상은 해양환경 변화에 따라 생물이 서식에 적합한 환경을 따라 이동하는 현상에서 비롯된다.

우리나라 주변 해역의 수온 상승은 해역별로 차이는 있으나, 미래 기후에서도 지속될 것으로 전망이 되고 있으며(표 6.1), 수온 상승은 어종의 공간적인 분포 변화를 초래 할 것으로 예상된다. 난류성 어종의 경우 어종별 이동 속도의 차이는 있으나, 대부분 북상하는 것으로 전망된다(표 6.2).

6.2.3.3 양식생물 대량 폐사

우리나라 천해양식 생산량은 2005년에 약 100만 톤을 기록한 후 지속적으로 증가하여 2010년 약 130만 톤, 2015년 약 160만 톤, 그리고 2017년과 2018년에는 200만 톤 이상으로 연근해 어업생산량 보다 높게 나타난다(국가통계포털). 우리나라 양식생물 현황을 보면 표 6A.2-6A.4와 같다. 양식생물 중 어류 양식은 넙치와 조피볼락이 전체 어류 양식 생산량의 약 70% 이상을 차지하고 있다(표 6.3). 어류 양식은 2009년 이후 점차 감소하는 추세이다.

패류 양식은 굴과 홍합이 전체의 약 90%정도를 차지하고 있다(표 6.4). 2005년에 비해 2018년에는 26% 정도 생산량이 증가하였다.

해조류 양식은 전체 양식생물 생산량에서 차지하는 비중이 높으며, 대상종이 다양한 특징이 있다(표 6.5). 해조류 양식은 서남해안 해역에서 전체 해조류 생산량의 90% 이상이 생산되며(해양수산부, 2019), 2005년에 비해 2018년 생산량이 약 175% 증가하였다.

표 6.1 일반순환모델과 IPCC, A1B 시나리오를 기반으로 예측된 2000년대와 2030년대 대한해협 깊이별 평균 수온(℃)과 1968~2010년 관측치(해양수산부, 2019).

수심(m)	2000~2009(A)	2030~2039(B)	차이(B-A)	연변화율(℃yr^{-1})(C)	관측된 변화율(1968~2010)(℃yr^{-1})(C)
1	19.18	20.75	1.57	0.052	0.024
10	18.20	19.75	1.55	0.052	0.024
20	17.17	19.50	2.33	0.078	0.016
30	16.51	19.52	3.01	0.100	0.014
50	16.13	19.59	3.46	0.115	0.006
75	16.12	19.72	3.60	0.120	0.008

표 6.2 2000년대와 2030년대 사이 변화할 것으로 예측된 어류 서식지 북쪽 이동 거리(해양수산부, 2019). 이동 거리는 다음 2가지를 곱해 평가: (1) 깊이별 수온과 평균 위도사이의 회귀 계수, (2) IPCC A1B 시나리오를 기반으로 일반순환모델에 의해 예측된 수온 변화, 통계적으로 유의하지 않은 회귀 계수를 보인 어종들은 여기서 표시 제외.

어 종	예측수온 수심	회귀계수(degree ℃$^{-1}$)	예측극한이동(km)	속도(km yr^{-1})
멸치	10 m	-0.13	-23	-0.75
전갱이	30 m	0.08	26	0.86
정어리	75 m	0.05	19	0.63
오징어	10 m	0.29	50	1.65
삼치	1 m	0.41	71	2.37
방어	1 m	0.22	39	1.30

표 6.3 우리나라 주요 해산어류 연간 생산량(103 M/T) 및 생산 추이(국가통계포털, www.kosis.kr).

품종별	2005	2007	2009	2011	2013	2015	2017	2018
넙치류	40	41	55	41	37	46	41	37
농어류	3	2	2	2	1	2	2	1
감성돔	3	3	2	1	1	1	2	1
참돔	6	7	9	3	3	6	7	5
조피볼락	21	36	33	17	24	19	22	23
어류 전체	81	98	110	72	73	85	86	81

표 6.4 우리나라 주요 해산 패류 연간 생산량(103 M/T) 및 생산 추이(국가통계포털, www.kosis.kr).

품종별	2005	2007	2009	2011	2013	2015	2017	2018
굴 류	252	321	241	281	240	265	315	303
홍합류	44	98	55	70	34	52	76	49
전복류	2	4	6	7	7	10	16	20
꼬막류	3	28	3	2	2	0	0	0
바지락	17	19	18	26	5	10	10	20
패류 전체	326	479	327	389	291	342	428	411

표 6.5 우리나라 주요 해조류 연간 생산량(103 M/T) 및 생산 추이(국가통계포털, www.kosis.kr).

품종별	2005	2007	2009	2011	2013	2015	2017	2018
김	198	211	211	316	406	387	524	568
다시마	108	250	306	247	373	443	542	573
미역	282	309	309	394	327	333	623	516
톳	30	21	20	23	13	28	55	36
해조류 전체	621	793	859	992	1,131	1,205	1,762	1,710

천해양식은 해양환경변화, 양식생물의 밀식 사육 등으로 인한 문제가 지속적으로 발생하고 있으며(국립수산과학원, 2017), 최근 하계(동계) 이상 고수온(저수온) 현상이 직·간접적인 원인이 되어 양식생물 대량폐사가 나타나고 있다. 수온 상승 자체가 양식생물에 부정적인 영향만을 끼치는 것으로 보기에는 어려움이 있을 수 있다.

그러나, 수온 상승이 생물이 살아가는 서식 공간의 물리, 생물, 화학적 환경을 변화시키는 주요 원인임을 감안하면, 환경변화에 대한 양식생물의 적응력과 그에 따른 생산력 변화에 대한 지속적인 모니터링과 연구가 필요하다.

수온 상승이 지속될 경우 양식 대상종 및 양식에 적합한 해역이 공간적으로 변할 수 있다. 참가리비는 1980년대 이전까지는 포항 연안을 남방 한계로 분포하였으나, 2000년대 후반에는 강원도 북부 해역으로 이동하였다. 기후변화는 양식장의 분포 변화뿐만 아니라 대상 생물의 생존율 변화에도 양향을 끼치는 것으로 보인다. 참가리비는 1990년대 이후 최대 1600톤 정도까지 생산량이 증가하였으나, 이후 대량 폐사하였다. 이러한 대량 폐사의 영향으로 기후변화가 주요 원인으로 분석되고 있다(해양수산부, 2019). 2013년부터 2017년 사이에 동해에서 발생한 양식생물 폐사 경향을 보면 적조발생에 따른 피해 외에 고수온과 급격한 수온변화가 원인이 된 사례가 증가하고 있다(국립수산과학원, 2017).

6.3 영향 전망

6.3.1 해양환경

「한국 기후변화 평가보고서 2014」에서는 동해 북부에서 온난화 경향이 가장 크게 나타날 것으로 전망하였으며, 해수면 상승은 모형에 따라 큰 차이를 보이고 있음을 지적하였다. 우리나라 주변해역의 해양산성화 현상은 당분간 미래에도 지속될 것으로 예상하였으며, 동중국해와 남해에서는 수온 상승에 따라 용존산소가 전 수층에서 뚜렷하게 감소할 것으로 예측하였다. 또한 겨울철 혼합층의 깊이가 감소하고, 성층 강화에 따라 영양염 감소 및 엽록소의 정량적인 양이 감소할 것으로 전망하였다.

6.3.1.1 해면수온 상승

국립수산과학원에서는 ROMS(Regional Ocean Model System)를 기반으로 downscalling을 통하여 수평해상도 약 10 km 내외 공간 해상도의 국지 해양기후모델의 예측 자료를 구축하였다. 이 모델을 기반으로 IPCC 5차 평가보고서(AR5)에서 사용된 RCP 시나리오 중 RCP 8.5와 4.5 두 시나리오를 선정하여 우리나라 주변해역의 미래 해수온 변화를 예측하였다(그림 6.18). 2100년 우리나라 주변해역의 표층

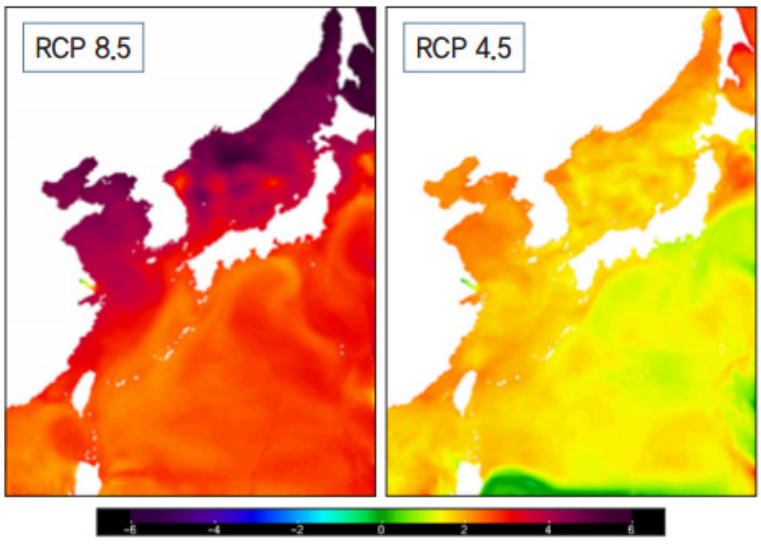


그림 6.18 국립수산과학원에서 예측한 2100년 RCP 8.5 및 RCP 4.5를 사용한 2010년 대비 연평균 표층수온 평년편차 분포 (해양수산부, 2019).

수온은 RCP 8.5 시나리오에서 현재에 비하여 약 3~6℃까지 상승하는 것으로 나타났으며, 특히 동해 중부 이북 및 황해 북부 해역을 중심으로 수온 상승이 높을 것으로 나타났다. 동해와 황해북부해역을 중심으로 높은 수온 상승 예측은 이 해역에 위치한 아극전선의 이동에 따른 지역적 영향이 크게 영향을 주는 것으로 판단되었다. 또한 RCP 4.5 시나리오에서는 현재에 비하여 2100년에는 표층 수온이 2~3℃ 상승하는 경향을 보였다(해양수산부, 2019). 이는 IPCC SROCC에서 제공한 RCP 2.6 시나리오 상에서 전 지구 평균 수온의 2081~2100년의 0.73℃ 상승(0.60~0.87℃) 및 RCP 8.5 상에서 2081~2100년의 2.58℃ 상승(2.34~2.82℃) 보다 훨씬 높은 수준이다. 현재까지 수온 변화도 우리나라에서 높게 나타났으며, 미래에도 수온 상승이 높게 나타날 것임을 의미한다.

또한 장 등(2017)에서도 북서태평양 지역기후 접합 모형을 수립하고 역학규모 축소를 통하여 한반도 주변해 해면수온의 미래변화 상세 전망(1981~1985년 대비 2081~2085년 전망)을 추진한 결과 해면수온 증가가 서해와 동중국해보다 동해에서 크고, 겨울보다는 여름에 클 것으로 전망하였다.

IPCC는 현재 급격하게 증가하고 있는 이상 고수온 (MHWs) 현상 역시 그 빈도, 기간, 공간적 범위와 강도 등이 미래 지구 온난화 상황하에서 더욱 증가할 것으로 예상하고 있으며, 이와 같은 현상은 해양생물, 수산업 및 생태계 등에 심각한 영향을 줄 것으로 예측하고 있다(그림 6.19). 전 지구적으로 이상 고수온의 빈도는 1850~1900년에 비교하여 2081~2100년에는 RCP 8.5 시나리오에서 46~55 factor[2], RCP 2.6에서는 16~24 factor 증가할 것으로 예측하였으며, 이는 전 지구의 평균 수온 상승이 큰 원인으로 판단된다(IPCC, 2019). 하지만 2019년 현 시점에서 우리나라 주변 해역의 이상 고수온 발생의 기작과 미래 변화에 대한 연구 결과는 매우 부족하며, 향후 이상 고수온이 해양생태계 및 수산업에 미치는 연구 분야를 포함한 다양한 이상 고수온과 관련된 연구가 추진되어야 할 것이다.

6.3.1.2 해수면 상승

국립기상과학원에서는 CMIP5 (Coupled Model Intercomparison Project Phase 5)와 CSIRO(Commonwealth Scientific and Industrial Research Organization)를 이용하여 그림 6.20과 같이 우리나라 해역의 해수면 변화를 전망하였다(허 등, 2018). 현 시점에서는 미래 해수면 상승전망에 대한 불확실성이 빙하, 해양순환을 다루는 모델링의 차이에 기인하므로, 많은 모델의 앙상블 자료를 활용하였다. CMIP5 21개 모델 앙상블에 따르면, 우리나라의 미래 해수면 상승은 전 지구 평균 해수면 상승전망 추세와 유사하여, RCP 2.6, 4.5, 6.0 및 8.5에서 각각 37.8 cm, 48.1 cm, 47.7 cm 및 65.0 cm 상승하여 온실가스 배출량 증가에 비례하여 증가하고 있다.

2) factor(MHWs probability ratio) : 산업혁명 이전시기(1850~1900년)의 수온범위의 99%를 초과하는 수온이 나타날 수 있는 일수

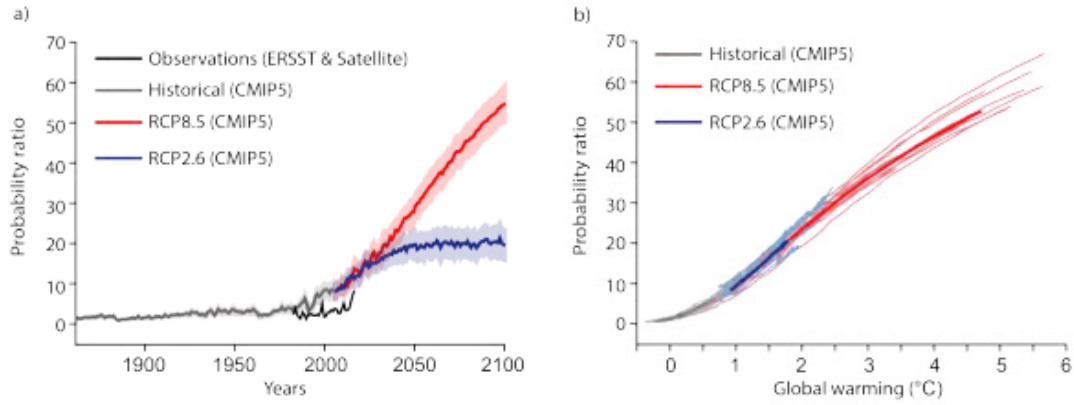


그림 6.19 (a) 산업혁명 시기 평균 수온 대비 99%를 초과하는 이상고수온이 연간 발생할 수 있는 비의 예측, (b) 전 지구 온도 상승에 따른 이상 고수온이 연간 발생할 수 있는 비의 예측(IPCC, 2019).

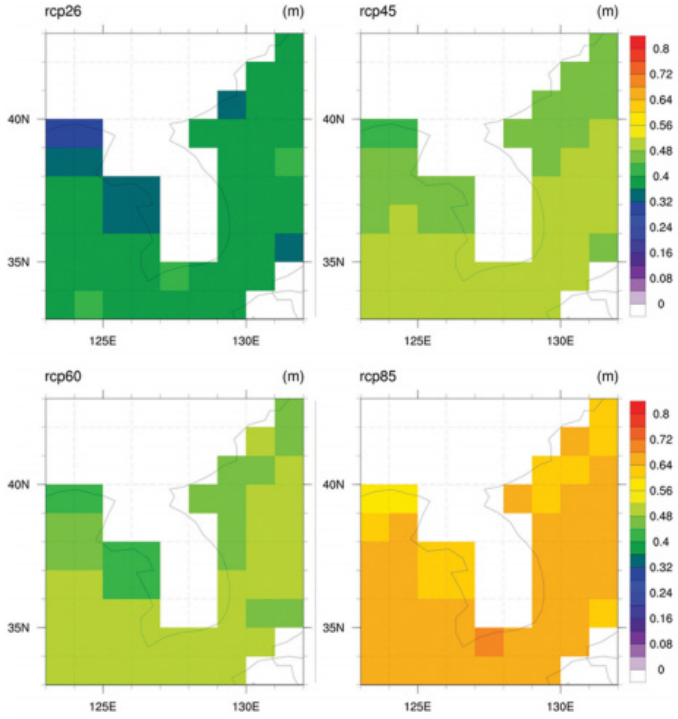


그림 6.20 1986~2005년 대비 2081~2100년 기간에서 한반도 주변의 앙상블된 평균 해수면 변화의 공간적 분포(허 등, 2018).

이는 Huang and Qiao(2015)에서 제시한 남중국해의 해수면 상승전망(21세기말 40~64 cm)과도 유사하다. 해역별로는 상승 전망의 차이는 3 cm이내로 적게 나타났으며, 동, 서, 남해를 비교하였을 경우, 남해의 해수면 상승이 상대적으로 크게 일어나고, 서해의 해수면 상승이 상대적으로 가장 낮을 것으로 예측되었다. 그들은 또한 장기적인 해수면 상승에서 지역변화에 미치는 영향 요인을 분석한 결과 RCP 2.6에서 RCP 8.5로 가면서 해양과정의 영향이 증가하고, 빙하관련 영향이 상대적으로 감소하는 경향을 보인다고 설명하면서, 전 지구 평균 해수면변화와 우리나라 연안과의 차이는 6~7% 정도 해양과정의 영향이 더 중요한 것으로 보고하였다.

이 등(2014)는 한반도 주요 권역에서의 미래 평균 해수면 상승을 장기 조위자료를 사용하여 통계적으로 추정하였다. 변동성 분석결과를 기반으로 총 5개 관측소에서 미래 해수면 상승을 분석한 결과, 제주 권역이 가장 뚜렷한 해수면 상승을 나타내었고, 서해안 권역과 부산 권역에서 두 번째로 높은 해수면 상승의 증가가 추정되었으며, 여수 권역 및 동해안 권역에서 가장 낮은 해수면 상승의 증가가 추정되었다.

6.3.1.3 화학적 변화

북서태평양에서 인산염과 산소의 미래 변화에 대한 연구결과 이들의 농도는 해양 수온과 성층뿐만 아니라 대규모 풍성순환에 기인한 해양 대순환의 영향이 중요한 역할을 하는 것으로 알려졌다(Kwon et al., 2016). Luo and Boudreau(2016)은 모델링 연구를 통하여 동해에서 향후 수십년간 calcite에 대한 불포화 상태가 빠르게 진행될 것으로 예측하였지만, 같은 동아시아 연해인 남중국해에서는 상대적으로 느린 해양산성화 경향이 나타날 것으로 전망하였다. 산성화 기간 동안 동해는 대기 중의 이산화탄소 sink 역할을 지속적으로 할 것으로 내다보았다.

IPCC SROCC에서는 CMIP5 모델 결과를 활용하여 RCP 8.5와 2.6 시나리오에서 전 지구 평균 해양 표층의 pH는 2006~2015년 대비 2081~2100년에 각각 0.287~0.291 및 0.036~0.042 감소할 것으로 예측하였다. 이와 같은 pH의 변화는 북극과 대서양 고위도 해역 및 태평양 해역에서 높게 나타날 것이며, 그 원인은 용승 시스템의 변화와 완충

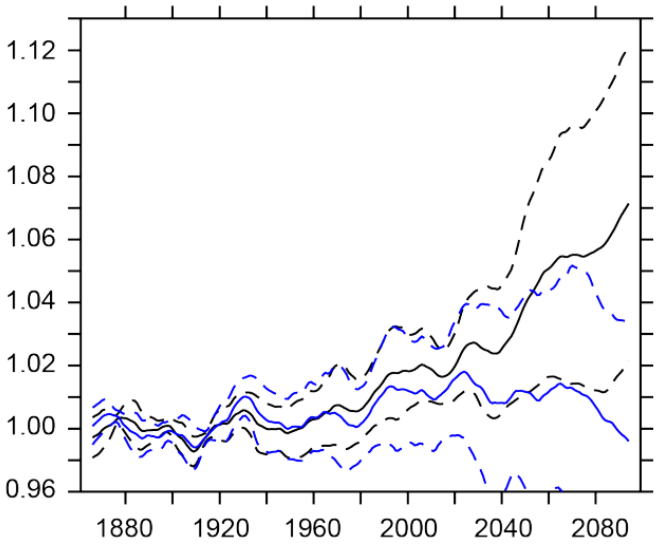


그림 6.21 RCP 8.5(검은색) 및 2.6(파란색) 시나리오에서 100~600 m 수심에서 산소 농도가 80 μmol L^{-1} 이하로 나타날 해양 체적(IPCC, 2019).

능력의 저하 때문이라고 판단하였다. 전 지구 표층의 H+의 계절 변화 진폭은 21세기 동안 RCP 8.5 시나리오 상에서 71~91% 증가할 것으로 예측하였으며, 고위도 해역에서 더욱 변동이 클 것으로 예상하였다. 반면 pH 및 아라고나이트 포화도의 계절적 변동은 각각 12~20% 및 4~14% 감소할 것으로 예측하였다.

IPCC SROCC에서는 해양에서의 산소 역시 물리적 영향 및 생지화학적 영향에 의하여 미래 급격한 변화가 있을 것으로 예측하였으며, 2000년 대비 2100년에 RCP 8.5와 2.6 시나리오 상에서 각각 3.2~3.7% 및 1.6~2.0% 감소할 것으로 예상하였다. CMIP5 모델에서 예측한 수심 100~600 m 수심에서 80 μmol L^{-1} 이하의 산소 농도가 나타나는 체적에 대하여 예상한 결과 RCP 2.6에서는 큰 변화가 나타나지 않을 것으로 판단하였지만, RCP 8.5에서는 2100년에 7.0±5.6%의 영역이 늘어날 것으로 판단하였다 (그림 6.21). 질산염 역시 RCP 8.5와 2.6 시나리오 상에서 2006~2015년 대비 2081~2100년에 해양 표층 100 m 이내에서 농도가 각각 9~14% 및 1.5~6% 줄어들 것으로 예상하였다. 영양염의 표층부근에서의 감소 예측은 해양 성층의 강화가 큰 영향을 줄 것으로 판단하였다.

6.3.2 해양생물과 생태계

「한국 기후변화 평가보고서 2014」에서는 먹이망 구조의 변화, 일차 생산량의 변화, 주요 어획어종의 변화와 어획 해역의 이동을 견고한 동의 수준으로 수반할 것으로 예측하였다.

6.3.2.1 저차영양단계 변화 (Nutrient, Plankton 등)

지구온난화가 진행될수록 해양은 성층 강화와 수직혼합 약화로 인하여 영양염 공급이 감소하고 일차생산도 감소한다. 또한 해양산성화와 저산소화 현상이 현재보다 심화되어 개체군수준에서 생리/생태에 다양한 영향을 미치게 되어, 결국, 생물 생체량과 종다양성 감소를 유발할 것으로 예상된다.

이러한 해양의 환경변화는 저차영양단계의 생물들에게 직접적으로 광범위하게 영향을 끼친다. 식물플랑크톤 생체량, 종조성 그리고 일차생산력의 변화는 먹이사슬에 의해 저차영양단계에서 동물플랑크톤 군집에 직접적인

표 6.6 한반도 주변 수역에서 발견된 동물플랑크톤 우점종의 종명, 평균 개체수와 비율(Lee et al., 2019).

Current	Species	Mean abundance (inds.m^{-3})	Composition (%)
NKCC	*Pseudocalanus newmani*	54.41	19.84
	Metridia pacifica	33.73	12.3
	Metridia sp. copepodite	23.87	8.7
	Oithona atlantica	19.66	7.17
	Neocalanus spp. copepodite	15.24	5.56
EKWC	*Pseudocalanus minutus*	70.28	19.30
	Metridia sp. copepodite	26.47	7.27
	Oithona plumifera	23.05	6.33
	Metridia pacifica	22.71	6.24
	Calanoida spp.copepodite	16.65	4.57
JWC	*Calanus* sp. copepodite	33.16	28.57
	Calanus sinicus	9.57	8.25
	Euchaetidae spp. copepodite	8.80	7.59
	Calanoida spp.copepodite	7.76	6.69
	Sagittidae spp. juvenile	7.28	6.27
YSWC	*Calanus* sp. copepodite	21.87	20.76
	Calanus sinicus	18.83	17.88
	Oithona atlantica	18.23	17.31
	Sagittidae spp. juvenile	16.40	15.57
	Paracalanus parvus s.l.	4.85	4.61
Y1	Sagittidae spp. juvenile	25.49	22.11
	Calanus sp. copepodite	19.52	16.93
	Calanus sinicus	17.96	15.58
	Calanidae spp. copepodite	6.19	5.37
	Calanoida spp. copepodite	5.73	4.97

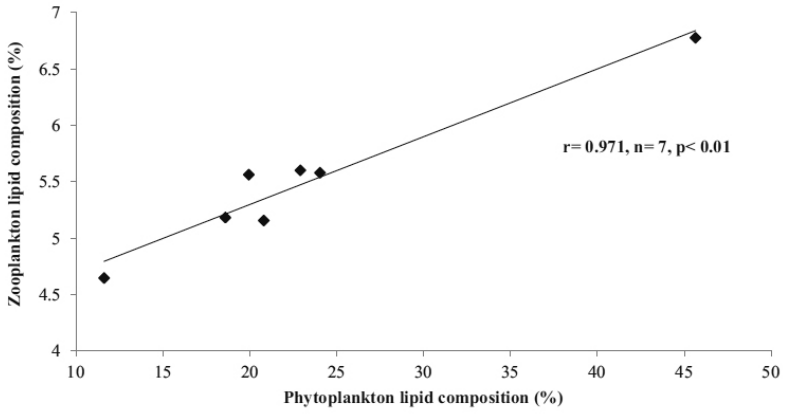


그림 6.22 동해 남서부에서 관측된 식물플랑크톤과 동물플랑크톤 사이의 월별 지질 함량 관계(Jo et al., 2017)

영향을 끼치고, 순차적으로 소형어류와 대형어류까지 영향을 주어 생태계 전체로 전달된다. 나아가, 동물플랑크톤은 부유생태계에서 식물플랑크톤과 상위영양단계의 에너지 연결고리로서 핵심역할을 한다. 한반도 주변해역 동물플랑크톤은 북한한류 수역과 황해에서는 각각 냉수종 81종과 41종이 우점하고, 반면에 동중국해와 제주해역에서는 각각 온수종 99종과 102종이 우점하는 것으로 나타나, 결국 동물플랑크톤 분포는 해류와 매우 밀접한 관련이 있어 기후변화의 지시자로 유용하게 사용될 수 있음을 보고하였다(표 6.6, Lee et al., 2019). 최근, 동해의 환경변화는 식물플랑크톤과 동물플랑크톤의 개체수와 다양성의 변화와 함께 이들의 생체조성(단백질, 탄수화물 및 지질) 변동을 유발하여 먹이로서 저차단계를 거쳐 상위영양단계에 영향을 줄 수 있다는 것을 보고하였다(그림 6.22; Jo et al., 2017).

또한 동해 남서부 해역 요각류가 우점하는 동물플랑크톤 군집의 특징으로 높은 단백질과 상대적으로 낮은 지질 함량은 먹이연쇄를 통하여 자치어와 소형어류의 먹이로서 상당한 기여를 할 것으로 예측하였다(Jo et al., 2018).

표 6.7 동해의 빈영양화와 부영양화 해역에서 요각류 먹이로 식물플랑크톤과 마이크로(micro-sized) 동물플랑크톤의 상대적 기여율(Park et al., 2015).

	Word ocean		East Sea	
	oligo-trophic	eutrophic	oligo-trophic	eutrophic
Chl-a con. (ugC/L)	<1	>3	<1	>2
% phytoplankton production grazed by microzooplankton	69.6[b]	59.9[b]	78.2	49.7
% microzooplankton in total carbon ration ingested by copepod[(2)]	48.0[c]	19.0[c]	47.2	27.4
% phytoplankton in total carbon ration ingested by copepod[(2)]	5.0[a]	12.3[a]	52.8	73.6

[a]Including only diatoms
Values are taken from the following references: [b]Calbet and Landry (2004), [c]Saiz and Calbet (2011)

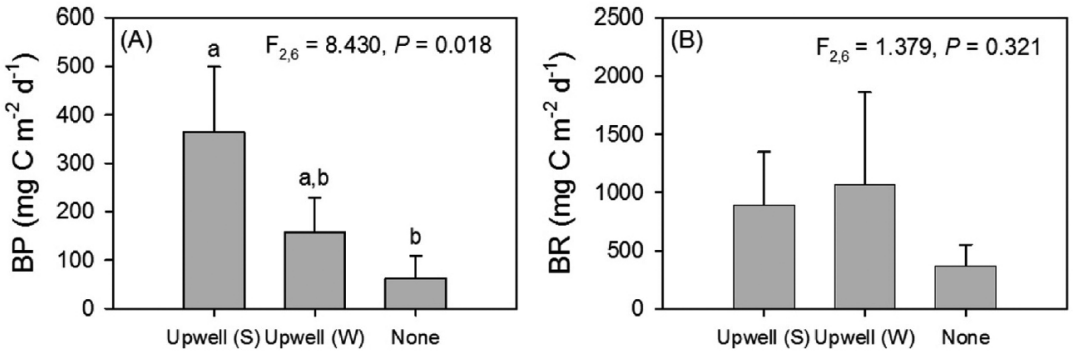


그림 6.23 동해에서 관측된 강한 용승해역(upwell S), 약한 용승해역(upwell W), 그리고 비용승해역(none)에서 박테리아 생산력(BP)과 박테리아 호흡량(BR)(Kim et al., 2017).

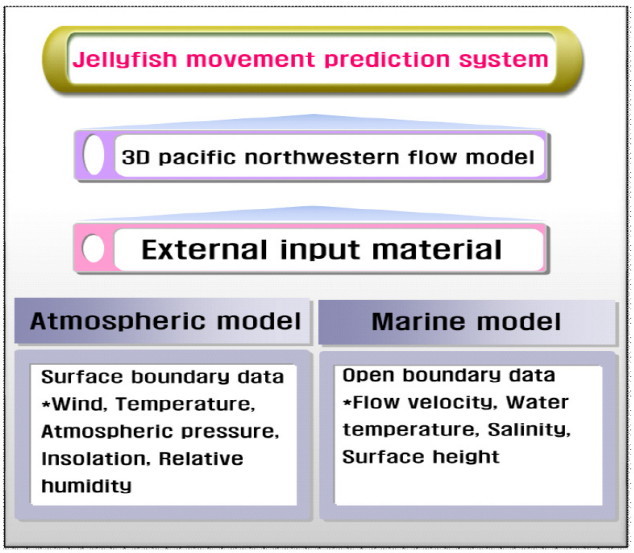


그림 6.24 해파리 이동 예측 시스템 구축을 위한 모델링 적용(이동길 등, 2019).

Park et al.(2015)은 동해에서 마이크로(micro-) 크기의 동물플랑크톤이 미세생물고리(microbial loop)를 통하여 일차생산의 상당량을 상위영양단계로 전달하는 것을 보고하고, 미래 부유생태계 구조와 기능을 이해하기 위해 기후변화와 해양산성화로 인한 이들의 반응을 장기적으로 관측하는 것이 필요하다는 것을 강조하였다(표 6.7).

이와 관련하여 Kim et al. (2017)은 종속영양 박테리아의 생산력이 동해의 용승해역에서 비용승해역에 비하여 매우 높은 것을 관측하고(그림 6.23),

기후변화와 관련하여 수층의 물리적 구조변화의 강도와 횟수 변화가 기초생산력과 저차영양단계 구조를 변화시켜 탄소순환에 영향을 줄 수 있다는 것을 보고하였다.

6.3.2.2 유해생물 대량 출현

지구온난화를 포함하는 해양환경 변화는 열대성 또는 아열대성 유해생물군의 대량 출현을 유발할 것으로 예상된다. 특히, 1990년대 후반부터 최근까지 동중국해와 동해에서는 대형해파리의 출현이 크게 늘어나고 있다. 특히, 노무라입깃해파리는 중국 산동반도와 양자강 하구해역에서 발생한 것으로 추정되는 외래종으로 2003년 이후부터 우리나라 주변해역에서 대량 출현하고 있는 것으로 보고되었다(박 등, 2015). 노무라입깃해파리는 길이가 1 m가 넘고 무게는 200 kg 이상으로 독성을 가지고 있어 대개 여름철 해수욕객에게 피해를 입히는 것으로 알려져 있다(이 등, 2019).

국립수산과학원에서는 유해 해파리의 피해방지를 위해 해파리 이동 예측과 과거 이동 경로 추정을 위한 예측 시스템을 구축하고, 이를 위해 3차원 해수 유동모델을 적용하여 해파리 예보체제를 완성하고자 노력하고 있다(그림 6.24, 이 등, 2019).

대형 해파리와 함께 가장 대표적인 유해생물인 적조는 불규칙적인 주기를 가지고 우리나라 전 연안에서 발생하였으며, 1980년대까지는 규조류와 편모조류가 대표적이었으나, 1990년대 이후에는 유독성의 편모조류가 우점하였다(해양수산부, 2019; 이 등, 2015). 지역별 특징은 남해안의 경우 유해성 생물인 Cochlodinium polykrikoides에 의한 적조현상이 빈번하게 발생하나, 서해안의 경우에는 Noctiluca scintillans와 Heterosigma akashiwo 등에 의한 무해성 적조가 주로 발생하는 것으로 알려져 있다(NFRDI, 2015). 특히, 대표적인 적조생물인 코클로디니움(C. polykrikoides)은 1982년 남해안의 진해만에서 최초 발생한 이후 현재까지 거의 우리나라 전 연안에서 1회 이상 발생하여 광역화하고 있는 추세에 있으며, 수산양식생물에

표 6.8 1991년부터 2018년까지 우리나라 연안의 적조생물(Cochlodinium polykrikoides) 발생현황과 수산양식피해 현황(해양수산부, 2019).

측정값	연도															
	1991	1993	1995	1997	1999	2001	2003	2005	2007	2009	2011	2013	2015	2016	2017	2018
PD[1]	18	21	46	25	47	37	56	55	46	14	7	51	56	14	0	28
MCD[2]	3,000	9,800	30,000	20,000	43,000	32,200	48,000	25,000	32,500	1,660	100	34,800	32,000	1,500	2	4,500
Area (km^2)	〈79	〉79	〉79	〉79	〉79	〉79	〉9	〉79	〉79	〉79	〈12	〉79	〉79	〈9	0	〈12
AL[3]	1	3	3	3	3	3	3	3	3	3	1	3	3	2	0	2
EL[4]	0	7	60	1.2	0.2	7	18.6	0.9	10.4	0	0	24	4.9	0	0	0.2

[1]PD : 지속일수.
[2]MCD : 최대 셀 밀도(단위:cells mL^{-1}).
[3]AL : 경고 수준: 1은 출현, 2는 감시, 3에서는 경고.
[4]EL : 경제적 손실(USD million).

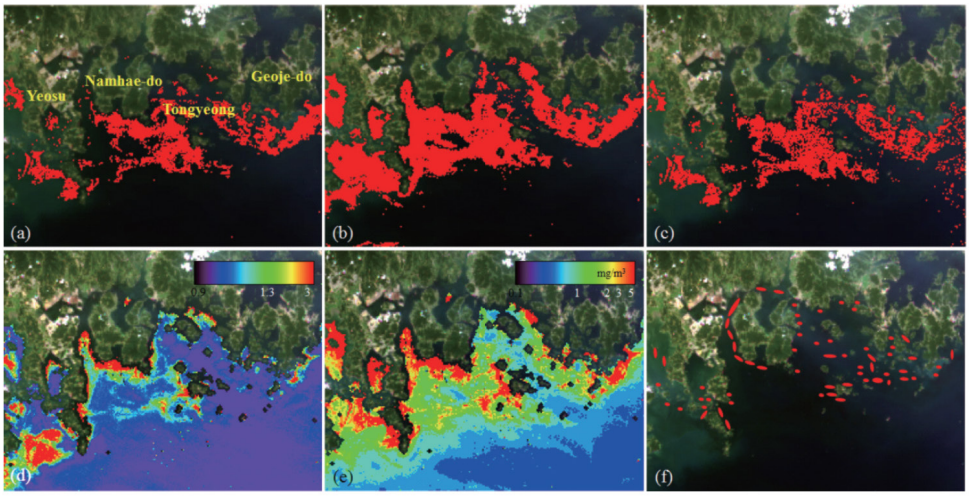


그림 6.25 알고리즘을 GOCI 영상에 적용하여 도출된 2013년 8월13일 남해안 코클로디니움 적조 분포 결과(신 등, 2017). (a)SS, (b)FRTD, (c)MRI, (d)RI 방법, (e)클로로필 농도, (f)실재 관측 결과.

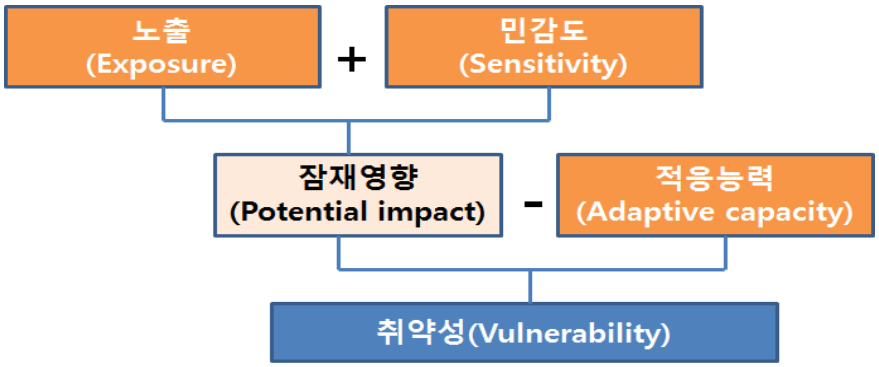


그림 6.26 IPCC의 취약성 개념(AR3)(McCarthy et al, 2001).

상당한 피해를 끼치고 있는 것으로 알려져 있다(이 등, 2015). 한 현재까지 남해안의 코클로디니움 적조는 주로 8월을 중심으로 가장 많이 발생하였으나, 적조의 최초발생 시기는 점차 빨라지는 경향을 보이고 있다(이 등, 2015). 이와 같은 적조현상은 해양환경변화, 기상, 기후변동, 인간활동 등 다양한 요인들에 의해 영향을 받고 있어 적조 발생 특성을 파악하는 것은 매우 어려우며, 인공위성을 활용한 적조 감시체계 구축을 통한 모니터링의 중요성이 증가하고 있다(그림 6.25, 신 등, 2017).

6.4 취약성의 주요 원인

「한국 기후변화 평가보고서 2014」에서는 해양 및 수산분야의 취약성의 주요 원인은 연구해역의 편중, 국제 공동연구 체제의 미비, Big data 생산과 운영체제의 미비, 적응대책의 결여, 확고한 연구/교육/홍보 체제의 결여 등으로 제시하였다.

6.4.1 취약성 평가 방법론 개발

IPCC는 2001년 3차 평가 보고서(AR3)와 2007년 4차 평가 보고서(AR4)에서 기후변화 취약성을 기후변화에 대한 노출, 민감도, 그리고 적응능력의 함수로 정의하였다(그림 6.26).

기후변화 영향 및 취약성 평가 방법은 정량적(quantitative)인지, 정성적(qualitative)인지에 따라 구분된다. 정량적인 방법이 기후 모델에 사회·경제적인 통계 자료를 연계하는 것이라면 정성적인 방법은 사례 연구, 비교 분석 등 정성적인 정보에 기초한다. 또 다른 평가 방법의 분류는 평가의 기초 자료를 수집하는 경로를 기준으로 하향식(top-down)인지, 상향식(bottom-up)인지를 나누는 것이다. 하향식 방법은 통계와 같은 간접 자료에 기초하여 모델링이나 통계 분석을 통해 평가하는 것이고, 상향식 방법은 취약성의 이해관계자를 직접 조사하거나 자료를 얻어 평가하는 것이다. 앞의 구분과 연관하면 보통 하향식 방법은 정량적인 방법과 밀접하고, 상향식 방법은 정성적인 방법과 밀접하다.

하향식/정량적 방법에서 취약성은 위험 발생의 정량화된 가능성으로 측정되는데, 지표 기반(indicator-based) 방법과 모델링 기반(modelling-based) 방법으로 나눌 수 있다. 지표 기반 방법에서 지표는 시스템의 생물·물리적이고 경제적인 특성과 연계되는데, 보통은 IPCC의 취약성 모형의 구성요소인 노출, 민감도, 적응능력의 대리지표로서 선정되고 이를 종합하여 상대적인 취약성의 개념으로 측정된다. 모델링 기반 방법은 생물·물리시스템에 초점이 있으며 용량-반응(dose-response) 논리에 기초하여 기후 변수의 충격을 전망하거나 모의 실험하는 것이 일반적이다. 그러나 최근 농수산 분야에서는 생물물리적 모델링의 결과에 경제적 모의실험을 통합하여 기후변화 적응에 따른 비용, 적응능력에 영향을 미치는 농가의 사회경제적 특성, 기후변화로 인한 수산업의 경제적인 손실 등을 평가하는 방법이 시도되고 있다. 한편 하향식/정량적 방법은, 특히 모델링 기반 방법의 경우 그 특성 상 시간 지평이 장기적이며 공간적으로 거시적 단위를 다루게 된다.

상향식/정성적 방법은 참여적인 이해관계자 기반(participatory stakeholder-based) 방법이 주로 사용된다. 기후변화에 영향을 받는 당사자로부터 직접 조사한 복합적인 차원의 취약성 관련 자료에 기초하므로 특정 집단에 대한 이상적인 취약성 평가 방법이 될 수 있다. 따라서 하향식/정량적 방법과 달리 시간 지평이 짧고 공간적으로 미시적 단위를 다루게 된다.

우리나라 수산업에 대한 기후변화 영향 및 취약성 평가는 McCarthy et al.(2001)의 취약성 함수식에 기초하여 가용 자료 여건에서 가장 실행가능성이 높은 지표 기반 방법을 기본적인 틀로 삼는다. IPCC의 기후변화 취약성(V)은 앞서 그림에서 소개한 바와 같이, 기후 노출(E), 민감도(S), 적응능력(AC)의 함수로서 노출과 민감도의 합($E+S$)이 기후변화의 잠재적 영향(potential impact)이고, 여기에서 기후변화에 대한 적응능력을 차감하면 취약성이 된다. 지표 기반 방법은 기후 노출, 민감도, 적응능력 각각을 대리하는 지표 또는 하위지표들을 설정하여 구한 다음 이들을 취약성 함수식에 적용하여 구하는 방법이다.

$$V = f(E, S, AC) = (E+S) - AC$$

지표 기반 방법에서는 연근해어업, 양식업 등에 대해 분석 대상의 특성을 고려하여 기후변화 영향 및 취약성을 가장 잘 나타낼 수 있는 지표를 개발·선정하는 것이 핵심적인 과제이다. 특히 기존 연구에서 가용 자료의 제약과 분석 방법의 부재로 산정에 한계가 많았던 기후 노출 지표에 대표농도경로(Representative Concentration Pathways, RCP) 시나리오를 반영하고, 민감도 지표에 수산물의 생물학적인 특성과 산업적인 특성을 고려한다.

6.4.2 연근해어업(남해안)의 취약성 평가 결과

연근해어업의 기후변화 취약성(V)은 IPCC의 정의에 따라 기후 노출(E), 민감도(S), 적응능력(AC)의 함수로 설정하고 지표 기반 방법으로 평가하였다.

노출 지표는 수온과 염분으로 구성되며 IPCC의 표준 시나리오인 대표농도경로(Representative Concentration Pathways, RCP)를 적용하여 2016년부터 2100년까지의 우리나라 주변 해역을 전망한 국립수산과학원(2016)의 결과를 적용하였다.

이들 노출 지표를 연근해어업의 각 업종에 대해 도출하기 위해 김봉태 외(2016b)와 같이 수협어업정보통신본부가 보유한 남해안 연근해어선의 조업정보를 이용하여 시공간의 가중치를 설정하고, 여기에 시공간의 예측치를 적용하여 시나리오별로 평균값을 산정하는 방식을 적용하였다. 즉 2011~2015년 동안 각 업종이 월(j)·해구(i)별로 조업한 실적이 전체 실적 중에서 차지하는 비중(w_{ij})을 가중치로 삼아 월·해구별로 수온 및 염분의 각 전망 시점(y)의 예측치를

적용하여 평균값($Temp_{ij}^{y}$, $Salt_{ij}^{y}$)을 구하였다. 이 값은 수심별로도 다른데 자료가 제공되는 수심 범위(0 m, 30 m, 50 m, 100 m) 중 각 업종이 주로 조업하는 대표 수심을 기준으로 하였다. 최종적인 노출 지표는 이러한 방식을 적용하여 수온, 염분 각각에 대해 2016년 대비 취약성 평가 시점인 2030년, 2050년, 2100년의 수온 상승분(E_{temp}^{y}) 및 염분 변화분의 절댓값(E_{salt}^{y})으로 도출하였다.

민감도 지표는 연근해어업의 각 업종이 어획하는 수산생물의 민감도로 설정하였다. 수산생물 민감도는 수산생물이 생물학적인 측면에서 기후변화에 민감한 정도를 나타내는 지표로 각 업종의 어획 비중을 적용하여 업종별 값을 산정할 수 있다. 이는 생물학적인 지표이기도 하지만 어획량이 곧 업종의 경영과 직결되므로 경제적인 민감성도 반영한다고 볼 수 있다. 이밖에 다른 지표로 기후변화에 의한 수산재난 위험도를 상정할 수 있으나, 미래 예측 자료가 부족하고 과거 피해 자료를 활용하더라도 연근해 업종별로는 세분화되지 않아 제외하였다. 수산생물의 민감도는 김도훈 외(2016)의 결과를 이용하였다. 김도훈 외(2016)는 Pecl et al.(2014)의 Applied Ecological Risk Assessment 방법을 원용하여 32개 주요 연근해 어종의 생물 민감도를 평가하였다. 자원량(포란수, 성숙기간), 분포(공간 범위), 생물특성(서식수온 범위, 환경변수와의 관계성)에 대해 각각 평가한 다음 이를 종합하였는데, 홍어, 대게, 아귀, 명태가 높았고, 살오징어, 꽃게, 멸치는 낮은 것으로 평가되었다.

이러한 결과를 활용하여 연근해어업 k 업종의 수산생물의 민감도(S_k)는 각 어종의 민감도(S_l)를 업종의 어종별 생산량 비중(w_{kl})을 가중치로 평균한 값으로 산정하였다. 업종의 생산량 비중은 노출 지표와 같이 2011~2015년 연근해어선의 조업정보를 기준으로 하였다.

$$S_k = \sum_l w_{kl} S_l$$

적응능력 지표는 연근해어업 각 업종에 종사하는 어업인의 능력을 나타낼 수 있는 지표로서 어업인의 인구사회적인 특성(연령), 경험 및 교육 정도, 경영행태를 나타내는 생산자조직화 및 정보화, 소득의 안정성을 나타내는 매출규모 및 겸업정도를 종합하여 지표화 하였다. 이러한 적응능력 지표는 김봉태 외(2016a)와 동일한 지표를 사용하되 통계청이 5년마다 전수조사하는 어업총조사에서 얻을 수 있는 자료로 갱신하였다. 기준 연도는 가장 최근 조사 시점인 2015년이며 각 세부 지표는 각 업종별로 평균한 값이다. 연령을 제외한 모든 지표는 그 값이 클수록 적응능력이 높은 것으로 산정되고 연령은 그 반대이다. 이상의 세부 지표에 대해 가중치를 적용하여 합산하면 각 업종에 대해 종합적인 취약성 평가 결과가 도출된다.

연근해어업 평가 대상 업종은 남해안의 주요 근해 업종 14개와 연안 업종 6개로 모두 20개 업종이다. 2011~2015년 기준 이들 업종의 조업횟수는 연간 56만 건에 달한다. 수산생물 민감도가 산정되는 32개 어종의 어획량 비중은 66.5%이다. 나머지 어종은 민감도 관련 정보가 없기 때문에 민감도에 영향을 주지 않는다고 가정한다.

이상에서 산정된 기후 노출, 민감도, 적응능력의 각 지표를 가중 합산한 기후변화 취약성은 다음과 같이 도출된다. 기후변화 시나리오에 따라 기후 노출의 정도가 다소 상이하게 나타나서 최종적인 취약성도 그러한 경향을 따르고 있다. RCP 8.5에서는 연안개량안강망, 연안들망, 연안선망, 연안자망 등의 연안어업과 근해안강망, 근해장어통발 등 일부 근해어업의 취약성이 높았다. RCP 4.5에서 연안개량안강망과 근해장어통발은 여전히 높았지만 RCP 8.5와 달리 근해연승, 연안통발, 연안복합, 서남해구외끌이중형저인망 등이 높게 나타났다. 그렇지만 두 시나리오 모두 근해어업보다는 연안어업이 대체로 높다는 공통점이 있다. 따라서 연안어업에 대한 기후변화 적응 대책이 더욱 필요한 것으로 사료된다. 또한 시나리오에 따라 업종별로 노출되는 정도가 상이하고 선형적인 관계에 있지 않아서 효과적인 대응을 위해서는 기후변화 영향을 정확하게 예측하려는 노력이 강화되어야할 것으로 판단된다.

6.4.3 양식업의 취약성 평가 결과

양식어업의 기후변화 취약성(V) 또한 IPCC의 정의에 따라 기후 노출(E), 민감도(S), 적응능력(AC)의 함수로 설정하였다. 노출 지표는 양식어업에 영향을 미치는 중요한 요인인 수온과 염분으로 구성되며(Handisyde et al., 2017; Doubleday et al., 2013; Lee et al., 2011), IPCC의 표준 시나리오인 대표농도 경로(Representative Concentration Pathways, RCP)를 적용하여 2016년부터 2100년까지의 우리나라 주변

해역을 전망한 국립수산과학원(2016)의 결과를 적용하였다. 시나리오의 시점은 각각 단기, 중기, 장기를 대표하여 2030년, 2050년, 2100년으로 설정하였다.

취약성 평가를 위해 이들 노출 지표는 평가 수준에 따라 양식품종-지역별로 도출되도록 하고, 노출의 정도는 물리적인 측면뿐만 아니라 생물적인 특성을 반영하도록 설정하였다. 이는 동일한 수온이더라도 품종에 따라 양식에 적합한 수온일 수도 있고 아닐 수도 있기 때문이다. 수온은 경제적으로 양식할 수 있는 적정 수온과 생물학적으로 생존이 가능한 서식 수온으로 구분하였고, 양식 주기 동안 각 수온의 상한(upper limit)을 초과하는 기간을 기준으로 지표화 하였다. 적정 수온을 넘더라도 서식 수온 이내에 있으면 양식은 가능하지만 서식 수온을 초과하면 기존의 방식으로는 양식 자체가 불가능해지므로 양식 기간 중 서식 수온을 초과하는 기간의 비중에 따라 5~8점을, 서식 수온 이내에 있으나 적정 수온을 초과하는 기간의 비중에 따라 1~4점을 부여하였다.

수온의 경우에는 품종별로 적정 수온, 서식 수온에 대한 선행 연구를 활용하였다. 염분에 대해서는 선행 연구가 거의 없기 때문에 품종의 특성을 고려하지 않고, 각 지역에서 시나리오 설정 시점의 염분과 2016년 시점의 염분 차이의 절댓값을 지표로 사용하였다.

민감도 지표는 두 가지로 설정하였다. 하나는 양식 품종 및 양식 방법의 특성에 따라 노출에 얼마나 민감하게 반응하는지를 나타내는 지표이다. 이는 Doubleday et al.(2013)의 민감도 평가 방법을 적용하여 각 품종의 양식에 대해 수집된 질적 자료(species profile)와 양식 전문가의 자문을 통해 9개 항목 각각에 대해 3점 척도로 평가한 다음 이를 합산하여 도출하였다. 노출 지표가 외부 환경 변화의 정도에 대한 것이라면 이 지표는 외부 환경 변화에 양식어업이 얼마나 민감하게 반응하는지에 대한 것을 나타낸다. 따라서 만일 노출 정도가 높아서 양식 품종이 생존할 수 없는 환경이더라도 양식 방법이 그러한 환경을 통제할 수 있다면 민감도는 낮게 평가된다. 이는 Handisyde et al.(2017)과 같이 개별 양식의 특성을 고려하지 못하는 국가 단위의 취약성 평가에서는 다룰 수 없는 지표이다.

민감도 지표의 다른 하나로는 우리나라의 양식어업에 큰 영향을 미쳤고, 기후변화로 더욱 빈번할 것으로 예상되는 재난위험을 설정하였다. 앞의 지표에서도 재난에 각 품종의 양식 방법이 얼마나 노출되는지가 평가되지만, 재난의 지역별 특성이 반영되지는 않는다. 이를 개선하기 위해 양식 지역의 재난피해 가능성을 지표로 반영할 필요가 있는데, 현재의 자료로는 재난피해의 가능성은 예측하기 힘들기 때문에 지역별로 과거 양식어업에 대한 경영체당 재난 피해액을 지표화 하였다. 경영체당 피해액은 기존 연구에서 홍수, 가뭄, 태풍, 사이클론 등의 빈도 데이터를 활용한 것(Handisyde et al, 2017; Bell et al., 2011)보다 민감도를 구체적으로 반영하는 지표로 볼 수 있다. 자료는 우리 정부가 발행하는 재해연보를 이용하여 2011~2015년 연평균 양식어업 피해액을 구하고, 경영체당으로 환산한 값을 적용하였다.

적응능력 지표는 기후변화에 대응하는 개별 어업인의 능력과 지역의 능력으로 구분하였다. 국가 단위의 평가에서는 건강, 교육, 인간개발지수(Human Development Index), 1인당 GDP, 거버넌스 지표 등을 사용하고 있는데(Allison et al, 2009; Qi et al, 2017; Handisyde et al., 2017, Bell et al., 2011), 이는 기후변화에 적응하는 개인 능력과 국가의 능력으로 볼 수 있다. 어촌공동체 단위에서 평가한 Cinner et al.(2012; 2013)에서는 한층 구체화되어 물질적 생활수준(material style of life), 신용에 대한 접근성(access to credit), 직업의 이동성(occupational mobility), 사회적 자본(social capital), 공동체의 사회간접자본(infrastructure) 등을 지표로 사용하였는데, 이 또한 개인의 능력과 지역의 능력으로 구분할 수 있다.

우리나라의 양식어업에 대해서도 양식을 경영하는 어업인의 능력과 양식 지역의 능력으로 구분하여 이를 반영하는 지표를 구체화할 수 있다. 전자는 어업인의 인구사회적인 특성인 연령, 경험 및 교육 정도와 경영행태를 나타내는 생산자 조직화 및 정보화, 소득의 안정성을 나타내는 매출 규모 및 겸업 정도를 종합하여 지표화하며 필요한 자료는 한국 통계청(Statistics Korea)의 어업총조사에서 얻을 수 있다. 이때 연령을 제외한 모든 지표는 그 값이 클수록 적응능력이 높은 것으로 산정된다. 어업총조사는 5년마다 시행되는 전수조사로 어업 가구와 가구원에 대한 인구사회, 정주여건, 어업경영 관련 사항을 50개 이상의 항목으로 조사하고 있다. 본 분석에서는 가장

최근 자료인 2015년 통계를 이용하였고, 각 세부 지표는 각 품종-지역별로 평균한 값을 사용하였다. 그리고 후자인 지역의 능력에는 지역의 경제적 능력을 반영하는 1인당 GRDP, 지방 정부의 재정안정성을 나타내는 재정 자립도 및 재정 자주도, 수산업 및 기후변화에 대한 투자 정도를 나타내는 경영체당 수산 예산, 수산 예산의 비중, 경영체당 기후변화 관련 예산을 종합하여 지표화 하였고, 우리나라의 통계청과 수협(National Federation of Fisheries Cooperatives)의 자료를 이용하였다.

평가 대상은 우리나라의 주요 해면 양식 품종 14종이며, 각 품종을 주요 양식 지역별로 구분하였다. 이들 양식 품종의 생산액은 해면 양식 전체에서 93%를 차지하며, 우리나라의 어업생산액에서 차지하는 비중도 27%로 산업적인 중요성이 크다(KOSIS, 2017). 넙치, 조피볼락 등 어류의 생산액이 가장 많고, 전복, 굴 등의 패류, 김 등의 해조류, 그리고 새우 양식이 일부 있다. 육상수조에서 양식하는 넙치, 제방을 쌓아 못에서 양식하는 새우를 제외하고 모든 품종은 해상에서 가두리나 연승수하를 이용하고 있어 자연 환경에 많이 노출되어 있으며, 전복을 제외한 패류, 해조류는 자연급이에 의존하여 자연 환경에 대한 의존성이 더욱 크다. 양식 지역은 우리나라의 남해안에 대부분 집중되어 있고 동해안, 서해안에 일부가 있다.

기후 노출, 민감도, 적응능력의 각 지표를 가중 합산한 기후변화 취약성 분석 결과, 기후 노출의 정도가 시나리오별로 크게 다르지 않아 최종적인 취약성도 시나리오 간 비교에서 큰 차이를 보이지 않았다. 즉, 절대적인 취약성은 노출 정도가 심해지는 RCP 8.5의 장기 시점에서 높지만 품종-지역의 상대적인 취약성은 비슷한 양상을 보이고 있다. 한 품종 내에서 생산 지역 간의 차이는 크지 않았으나 품종간의 차이가 크게 나타났는데, 이는 가중치가 높은 수온 노출, 양식 품종의 민감도에서 품종간 차이가 컸기 때문이다.

기후 노출이 크게 나타난 김, 미역과 같은 해조류가 가장 취약하였고, 이들 품종을 양식하는 지역 중 재난피해 영향이 큰 서해안 지역(Seocheon)이 특히 높았다. 바지락과 멍게가 그 다음으로 취약성이 높았는데, 전자는 품종의 민감도와 어업인의 능력이 크게 열위였고, 후자는 수온 상승에 노출된 정도가 컸기 때문이다. 굴, 홍합은 중간 수준이었는데, 기후 노출은 높지 않았으나 바지락과 같이 양식 품종의 민감도가 높고, 어업인의 능력이 낮은 것에서 이유를 찾을 수 있다. 어류, 새우, 전복, 다시마 등은 기후 노출이 낮은 데다 민감도가 양호하여 일부 적응능력이 낮은 생산 지역이 있지만 전반적으로 취약성이 낮은 것으로 나타났다.

6.5 적응 옵션

「한국 기후변화 평가보고서 2014」에서는 수산업은 기후변화에 큰 영향을 받을 것이며, 수산업의 피해를 최소화하기 위한 다방면의 노력이 필요함을 제시하였다. 특히 생태계 기반 수산자원관리의 중요성을 강조하였다. 또한 안정적인 수산식량 자원 확보를 위하여, 서식지 확보, 새로운 양식기술 개발 및 수산자원 분포 예측에 대한 연구 필요성을 제시하였으며, 해양산성화와 관련한 관측 확대와 신규어종에 대한 새로운 어업 기술 개발의 필요성에 대해서도 기술하였다.

6.5.1 수산분야 기후변화 감시체계

국립수산과학원에서는 기후변화에 기인한 고수온 및 저수온 현상의 빈번한 발생에 대응하기 위하여 실시간 해양환경 어장정보시스템을 구축하여 운영하고 있다. 2018년에는 기상청과의 협업을 통하여 기존 54개의 실시간 관측 시스템을 총 98개로 확대하여 운영하고 있다(그림 6.27; 국립수산과학원, 2019). 이를 통하여 2017년부터 시행되고 있는 고수온 및 저수온에 대한 특보를 발령함은 물론 양식 밀집해역 및 수온 피해 다발 해역에 대한 실시간 정보를 제공함으로써 기후변화에 따른 수산업 피해 저감에 기여하고 있다.

6.5.2 기후변화 대응 양식기술 개발

해양수산부에서는 심화되고 있는 기후변화에 기인한 고수온 현상에 대응하기 위해 다양한 양식기술 개발 연구를

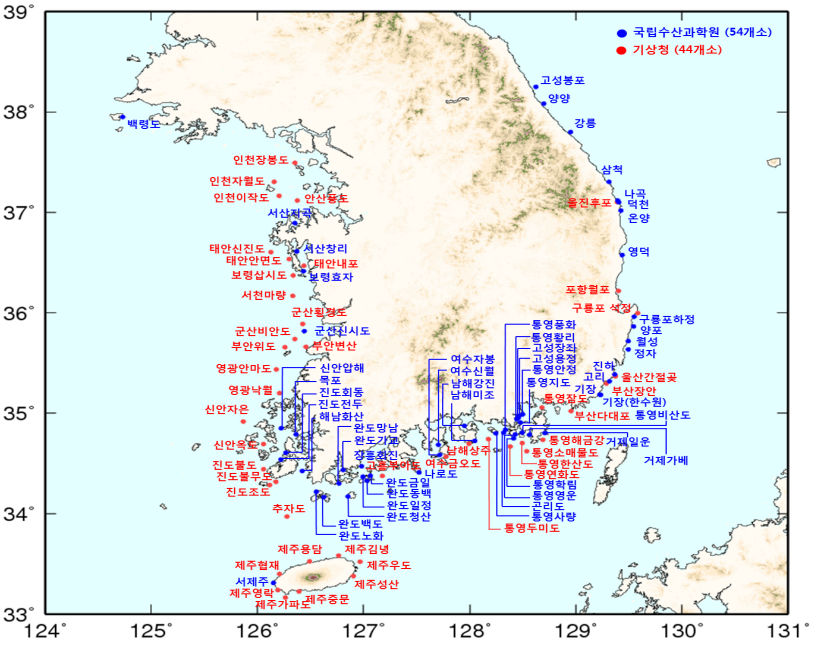


그림 6.27 국립수산과학원에서 기후변화에 따른 양식업 피해 저감을 위해 운영중인 실시간 해양환경 어장정보시스템 위치도(국립수산과학원, 2019).

추진하고 있다(해양수산부, 2018). 2018~2022년까지 넙치, 전복, 조피볼락 등 대표적인 양식품종을 대상으로 고수온 노출 시험을 토대로 한계 수온조사 및 고수온 내성 가계 생산과 재현성 검증 등을 통한 고수온 내성 양식품종 개발을 추진하고 있다.

또한 미래 양식품종으로 방어, 바리과 어류, 돔류 등 아열대성 품종의 종묘 생산 및 양식 기술을 2018년부터 2021년까지 개발하여 미래전략형 양식품종으로 개발할 방침이다. 특히, 잿방어류 및 바리과 어류 등을 고수온에 강한 신품종으로 개발하여 인공생산 종자를 양식어장에 보급하는 등 미래 전략품종으로 육성할 계획이다. 또한 고수온기에 대비하여 순환여과 양식시스템의 여과 효율 향상 기술을 개발하고, 상업형 순환여과 양식시스템 개발을 위한 연구를 추진중에 있으며, 해면어류의 바이오플락 양식시스템 개발 및 시스템 관리 기술을 고도화하여 품종별 최적성장 조건 규명 및 해면어류 양식품종을 확대하는 등 전략적으로 기후변화에 대응하기 위한 기술 개발을 추진 중에 있다.

6.5.3 기후변화 적응산업 육성

변화하는 기후에 적응하는 문제는 기업 등 산업계에 위기와 함께 새로운 성장의 기회를 제공하고, 적응 산업의 육성은 기후변화 대응력을 제고한다는 차원에서 매우 중요하다(환경부, 2014). FAO(2014)에서는 수산분야에서 기후변화 적응에 필요한 활동에 대하여 기술하고 있다. FAO에서 제시하는 수산분야 기후변화 적응 활동에는 육상기원 오염물 저감 및 어획 기술의 개발, 가치 있는 어장에 대한 보호와 보존, 안정한 항만 및 물동장 구비, 수산 질병 리스크 관리, 식품 안전성 확보, 보험 등을 포함한 재정 메커니즘 구축, 새로운 수입 가능 품목 개발, 국가 및 지자체 정책의 연계와 프로그램, 공간적인 계획 수립, 불법어업의 저감, 수산물의 국제적 무역 활동 강화 등의 내용이 포함되어 있다. 이와 관련하여 우리나라도 수산업의 기후변화 적응을 위한 다양한 산업 육성이 필요할 것으로 사료된다.

6.6 결론

우리나라 해역의 표층수온 상승 경향은 전 세계 평균에 비하여 약 2.6배 높은 수준을 보이며, 저위도에서 고위도로 갈수록 높은 수온 상승이 나타나고 있고, 겨울철 수온 상승이 여름철에 비하여 2~3배 높은 경향을 보인다(견고한 동의). 최근 우리나라의 이상고수온 현상이 심화되고 있으며, 특히 서해와 남해 연안역을 중심으로 지속적으로 나타나고 있다(제한적 동의). 해수면 상승은 제주와 동해 연안에서 높게, 남해와 서해 연안에서 상대적으로 낮게 나타나고 있다(중간적 동의). 우리나라 해역의 표층 염분은 전반적으로 감소하는 경향을 보이고 있으며, 특히 서해와 남해의 여름철 감소 경향이 뚜렷한 특징을 보인다(중간적 동의). 동해에서의 pH와 이산화탄소 분압 변화를 통하여 전 세계 평균에 비하여 해양산성화가 빠르게 진행되고 있음을 보여주고 있다(중간적 동의).

RCP 시나리오를 기반으로 우리나라 해역의 해면수온은 현재에 비하여 2100년 2~6℃까지 상승할 것으로 전망되어 전 지구 평균 수온 상승에 비하여 훨씬 높은 수준으로 수온이 상승할 것으로 전망되고 있다(제한적 동의). 이상고수온 현상 역시 기후변화가 심화될수록 더욱 빈번히 발생할 가능성이 높을 것으로 전망된다(제한적 동의). RCP 시나리오에 따른 우리나라의 해수면 상승은 현재에 비하여 37.8~65.0 cm까지 상승할 것으로 전망되고 있다(제한적 동의). 우리나라를 포함한 전 세계적으로 표층 pH의 감소, 해수중 산소의 감소, 상층부의 영양염 감소 등이 심각하게 나타날 것으로 전망하고 있다(제한적 동의).

연근해어업(남해안)을 대상으로 기후변화에 따른 취약성 평가를 실시한 결과 근해어업보다는 연안어업이 대체로 높게 나타났다(중간적 동의). 따라서 연안어업에 대한 기후변화 적응 대책이 근해어업에 비해 상대적으로 더욱 필요한 것으로 판단된다(제한적 동의). 하지만 시나리오에 따라 업종별 기후변화에 대한 노출 정도가 상이하고, 선형적인 관계에 있지 않아 효과적인 대응을 위해서는 우선적으로 기후변화 영향을 정확하게 예측하려는 노력을 강화하는 것이 필요하다(제한적 동의). 그리고 이러한 노력이 이루어진 후에 전 해역을 대상으로 한 취약성 평가를 실시하여 어느 해역, 어떠한 업종을 대상으로 우선적인 기후변화 적응 대책이 필요한지에 대한 판단이 필요할 것이다(제한적 동의).

양식업을 대상으로 취약성 평가를 실시한 결과 김, 미역과 같은 해조류가 가장 취약한 것으로 나타났으며, 해조류 양식이 이루어지는 지역 중 특히 서해안 지역(Seocheon)에서 취약성이 높게 나타났다(중간적 동의). 이러한 취약성은 기후 노출이 크거나 민감도가 높은 반면 적응 능력이 낮은 데서 연유한 것이다. 양식어업이 기후변화 속에서도 안정적인 수산물을 공급하고 어업인의 생계를 유지하며 경제발전을 촉진하기 위해서는 기후변화에 대한 노출과 민감성을 줄일 수 있도록 어디에서 어떤 방식으로 양식하느냐가 중요하다(양식어장 재배치, 양식어장 해외 이전, 스마트 양식 기술 접목 등)(제한적 동의). 그리고 기후변화에 적응할 수 있는 새로운 품종을 개발하는 등 적응능력을 향상시킬 수 있는 대책이 필요하다(제한적 동의).

해양에서 일차생산은 생태계를 유지하는데 있어서 근원이 되며, 영양염 농도 변화는 일차생산력에 직접적인 영향을 끼친다(견고한 동의). 우리나라 주변해역의 경우 인산염은 유의한 변화가 관찰되지 않은 반면, 질산염 농도가 다소 증가하는 것으로 나타나 일차생산력의 변화가 발생한 것으로 예측된다(중간적 동의).

해양환경변화는 수산자원의 종조성, 분포, 자원량, 생태 등에 직·간접적인 영향을 끼친다. 기후변화가 진행되는 과정에서 상대적으로 온난한 환경과 한랭한 환경 교차하며, 이러한 환경변화는 우리나라 주변해역에서 어획되는 어종의 변화, 어획량, 어장의 위치 변화와 밀접한 관련이 있다(견고한 동의). 기후변화에 따른 해역별 해양환경의 변화 정도는 차이가 있으며, 수산자원의 반응정도도 다르게 나타난다(중간적 동의).

우리나라 연근해어업의 총 어획량은 1980년대 152만 톤에서 점차 감소하여 2017년에는 약 93만 톤으로 감소하였다. 해역별 어획량이 점차 감소하고 있는 추세이다(제한적 동의).

우리나라 주변 해역의 수온 변화는 해역별로 상승 정도의 차이는 있으나, 미래 환경에서도 상승 경향이 지속될 것으로 전망되고 있다(견고한 동의). 이러한 수온 상승은 어종의 공간적인 분포 변화를 초래하며, 어종별 이동 차이는 있으나 대체적으로 북상하는 경향이 예상된다(견고한 동의).

우리나라 천해양식 생산량은 2005년에 100만 톤을

기록한 후 2018년에는 200만 톤 이상으로 증가하였다. 해조류 양식은 점차 증가하는 반면, 어류 양식은 점차 감소하고 있는 추세이다(제한적 동의).

양식생물의 폐사는 수온 상승의 영향을 직·간접적으로 받는다. 참가리비 등과 같은 양식 대상종은 양식에 적합한 해역이 점차 북상하는 경향을 나타내며, 기후변화의 영향이 대량폐사를 일으키는 주요 원인으로 분석되고 있다(중간적 동의).

지구온난화가 지속될수록 성층 강화와 수직혼합이 약화되고 이로 인하여 영양염 공급 감소 및 일차생산 감소가 예상된다(견고한 동의). 해양산성화와 저산소화 현상이 점차 심화되어 해양생물의 생리, 생태에 영향을 끼치며, 그 결과 해양생물의 생체량, 종 다양성의 감소를 유발할 것으로 예상된다(제한적 동의).

지구온난화가 미래기후에서도 지속 될 경우 열대성 또는 아열대성 유해생물군의 대량 출현 빈도 및 분포역이 증가할 것으로 예상된다(중간적 동의).

기후변화 적응 옵션의 일환으로 이상고수온 등 급격한 기후변화 영향에 대응하기 위하여 실시간 수온관측 시스템의 구축을 확대하여 피해 저감에 기여하고 있다(견고한 동의). 이상 고수온 현상이 최근 사회적으로 문제가 되고 있음으로 기작 규명과 미래 예측에 대한 활발한 연구가 요구된다. 또한 장기적으로 수온 상승에 대응하기 위하여 고수온 내성 품종 개발 및 새로운 양식 기술을 개발하여 현장에 적응하기 위한 연구를 진행하고 있다(중간적 동의). 수산업 부문에서도 기후변화 적응을 위한 다양한 산업 육성이 필요하며 이는 어업현장 뿐만 아니라, 수산업과 관련된 수송, 항만, 질병, 보험, 식품 등 다양한 형태에서 진행이 필요할 것으로 판단하고 있다(제한적 동의).

6.7 참고문헌

국가통계포털 website www.kosis.kr.

국립수산과학원, 2016: 기후변화가 수중생태계 구조에 미치는 영향 및 예측기술 개발.

국립수산과학원, 2017: 동해안 양식생물 폐사원인 조사 보고서(2013-2017년), 142pp.

국립수산과학원, 2019: 2018년 국립수산과학원 연보, 국립수산과학원, 118pp.

국립해양조사원, 2019: 기후변화 대응 해수면 변동 분석 및 예측 연구(4), 해양수산부, 385pp.

국립해양조사원, 2018: 우리나라 연안 해수면 상승속도 계속 빨라지나?, 국립해양조사원 보도자료('19.12.27), 5pp.

해양수산부, 2018: 2018년 고수온 대응계획, 해양수산부, 13pp.

해양수산부, 2019: 한국해양환경평가 II - 상태 및 추세, 한국해양과학기술원, 528pp.

환경부, 2014: 기후변화 적응산업 활성화를 위한 정책방안 연구, 한국환경정책·평가연구원, 177pp.

환경부·국립환경과학원, 2014: 한국기후변화 평가보고서, 303pp.

김도훈, 최예은, 김홍식, 박현지, 2016: 기후변화에 따른 수산분야 경제학적 분석, 국립수산과학원.

김봉태, 육근형, 기해경, 박혜진, 배기환, 권오민, 2016a: 수산업의 기후변화 영향 및 취약성 평가 기법 개발, 국립수산과학원.

김봉태, 이준수, 서영상, 2016b: RCP 시나리오에 따른 남해안 어업 및 어종의 기후변화 노출 분석 : 수온 변동을 대상으로, *수산경영론집*, 47(4), 31-44.

김윤하, 정해근, 오승용, 김현우, 이충일, 2019: 동해와 서해의 살오징어(Todarodes pacificus)회유 및 분포에 관한 고찰, *한국생명과학회지*, 4(1), 14-21.

박성욱, 이경훈, 윤원득, 이동길, 김성훈, 양용수, 이건호, 2015: 유해 해양생물 해파리 피해 저감 방안 연구, *수산해양교육연구*, 27(1), 49-62.

신지선, 민지은, 유주형, 2017: GOCI를 활용한 한반도 주변해역 적조 감시 체계 연구, *대한원격탐사학회지*, 33(2), 213-230.

심정민, 권기영, 김상우, 윤병선, 2015: 동해 연안 수괴 특성에 따른 식물플랑크톤 우점종의 계절 변동, *해양환경안전학회지*, 21(5), 474-483.

이동길, 한인우, 채진호, 윤원득, 양용수, 김도훈, 이경훈, 2019: 해수욕장에 출현하는 유해 해파리 피해 저감 장치의 유형별 장 · 단점 분석, *수산해양교육연구*, 31(4), 1230-1241.

이문옥, 김병국, 김종규, 2015: Cochlodinium polykrikoides

적조 발생시의 한국 남해안 고흥 연안의 해양환경 특징, *한국해양환경·에너지학회지*, 18(3), 166-178.

이철응, 김상욱, 이영섭, 2014: 장기 조위자료를 이용한 한반도 권역별 미래 해수면 상승 추정, *한국수자원학회 논문집*, 47(9), 753-766.

장찬주, 신호정, 정희석, 김철호, 2017: 지역기후 접합모델링을 이용한 우리나라 해면수온 미래변화 시범전망, *한국연안방제학회지*, 4(1), 35-41.

황도현, 윤홍주, 서원찬, 2016: 위성 고도계 자료를 활용한 한반도 해수면 높이 변동 연구, *Journal of the Korea Institute of Electronic Communication Sciences*, 11(3), 325-330.

허태경, 김영미, 부경온, 변영화, 조천호, 2018: CMIP5 자료를 활용한 우리나라 미래 해수면 상승, *한국기상학회 대기*, 28(1), 25-35.

KOSIS, 2017: Korean Statistical Information Service, (Accessed November 2017).

Alexander, M.A., J.D. Scott, D. Friedland, K.E. Mills, J.A. Nye, A.J. Pershing, and A.C. Thomas, 2018: Projected sea surface temperatures over the 21st century: Changes in the mean, variability and extremes for large marine ecosystem regions of Northern Oceans, *Elementa: Science of the Anthropocene*, 6(1), 9, doi:10.1525/elementa.191.

Allison, E.H., A.L. Perry, M.C. Badjeck, W.N. Adger, K. Brown, D. Conway, A.S. Halls, G.M. Pilling, J.D. Reynolds, N.L. Andrew, and N.K. Dulvy, 2009: Vulnerability of national economies to the impacts of climate change on fisheries, *Fish and Fisheries*, 10, 173-196.

Bell, J.D., J.E. Johnson, A.S. Ganachaud, P.C. Gehrke, A.J. Hobday, O. Guldberg, R. Le Borgne, P. Lehodey, J.M. Lough, T. Pickering, M.S. Pratchett, and M. Waycott, 2011: Vulnerability of tropical Pacific fisheries and aquaculture to climate change: summary for Pacific island countries and territories. Noumea, Secretariat of the Pacific Community.

Bond, N.A., M.F. Cronin, H. Freeland, and N. Mantua, 2015: Causes and impacts of the 2014 warm anomaly in the NE Pacific, *Geophysical Research Letters*, 42 (9), 3414-3420.

Choi J.K., J.H. Noh, T. Orlova, M.O. Park, S,H. Lee, Y.I. Park, S. Son, I. Stonik, and D.H. Choi., 2015: Oceanography of the East Sea (Japan Sea); Chapter 10, Phytoplankton and primary production, Springer, Switzerland.

Cinner, J.E., T.R. McClanahan, N.A.J. Graham, T.M. Daw, J. Maina, S.M. Stead, A. Wamukota, K. Brown, and Ö. Bodin, 2012: Vulnerability of coastal communities to key impacts of climate change on coral reef fisheries, *Global Environmental Change*, 22(1), 12-20.

Cinner, J., T. McClanahan, A. Wamukota, E. Darling, A. Humphries, and C. Hicks, 2013: Social-ecological vulnerability of coral reef fisheries to climatic shocks. FAO Fisheries and Aquaculture Circular No. 1082. FAO.

Collins, M. et al., 2013: Long-term Climate Change: Projections, Commitments and Irreversibility. In: Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 1029-1136.

Doubleday, Z.A., Clarke, S.M., Li X., Pecl, G.T. and others, 2013, Assessing the risk of climate change to aquaculture: a case study from south-east Australia, *Aquaculture Environment Interactions*, 3, 163-175.

FAO, 2014: Climate change adaptation in fisheries and aquaculture: compilation of initial examples, FAO, 34pp.

Frölicher, T.L., E.M. Fischer, and N. Gruber, 2018: Marine heat waves under global warming, *Nature*, 560 (7718), 360-364.

Handisyde, N.T., L.G. Ross, M.-C. Badjeck, and E.H. Allison, 2006: The effects of climate change on world aquaculture: a global perspective, Final Technical Report. Stirling, UK, Stirling Institute of Aquaculture. 151.

Huang, C. and F. Qiao, 2015: Sea lever rise projection in the South China Sea from CMIP5 models, *Acta Oceanologica Sinica*, 34, 31-41.

IPCC, 2019: Final draft of Special Report on the Ocean and Cryosphere in a Changing climate, IPCC, 1125pp.

IPCC, 2019: Summary for policymakers of Special Report on the Ocean and Cryosphere in a Changing climate, IPCC, 42pp.

Jang H.K., J.J. Kang, J.H. Lee, M. Kim, S.H. Ahn, J.Y. Jeong, M.S. Yun, I.S. Han, and S.H. Lee, 2018: Recent primary production and small phytoplankton contribution in the Yellow Sea during the summer in 2016, *Ocean Science Journal*, 53(3), 509-519.

Jo N., J.J. Kang, W.G. Park, B.R. Lee, M.S. Yun, J.H. Lee, S.M. Kim, D. Lee, H.T. Joo, J.H. Lee, S.H. Ahn, and S.H. Lee, 2017: Seasonal variation in the biochemical compositions of phytoplankton and zooplankton communities in the southwestern East/Japan Sea, *Deep-Sea Research II*, 143, 82-90.

Jo N., J.J. Kang, W.G. Park, B.R. Lee, J.H. Lee, Y. Kim, S.H. Ahn, D. Lee, J.O. Min, C.K. Kang, and S.H. Lee, 2018: Carbohydrate-dominant phytoplankton and protein-high zooplankton in the northern part of the southwestern East/Japan Sea in 2015, *Journal of Coastal Research*, 85, 371-375.

Joo H.T., S.H. Son, I.W. Park, J.J. Kang, J.Y. Jeong, C.I. Lee, C.K. Kang, and S.H. Lee, 2016: Long-term pattern of primary productivity in the East/Japan Sea based on ocean color data derived from MODIS-Aqua, *Remote Sensing*, 8(1), 25, doi:10.3390/rs8010025.

Jung H.K., S.M. Rahman, C.K. Kang, S.Y. Park, S.H. Lee, H.J. Park, H.W. Kim and C.I. Lee, 2017: The influence of climate regime shifts on the marine environment and ecosystems in the East Asian Marginal Seas and their mechanisms, *Deep Sea Research II*, 143, 110-120.

Kataoka, T., T. Tozuka, S. Behera, and T. Yamagata, 2014: On the Ningaloo Niño/Niña, *Climate Dynamics*, 43 (5), 1463-1482.

Kim B., S.H. Kim, J.H. Kwak, C.K. Kang, S.H. Lee, and J.H. Hyun, 2017: Heterotrophic bacterial production, respiration, and growth efficiency associated with upwelling intensity in the Ulleung Basin, East Sea, *Deep-Sea Research II*, 143, 24-35.

Kim, J.-Y., D.-J. Kang, and K.-R. Kim, 2014: Long-term trend of CO_2 and ocean acidification in the surface water of the Ulleung Basin, the East/Japan Sea inferred from the underway observational data, *Biogeosciences*, 11, 2443-2454.

Kim, T.-H., G. Kim, S.-A. Lee, and T. Dittmar, 2015: Extraordinary slow degradation of dissolved organic carbon(DOC) in a clod marginal sea, *Scientific Reports*, doi:10.1038/srep13808.

Kwon, E.Y., Y.H. Kim, Y.-G. Park, Y.-H. Park, J. Dunne, and K.-I. Chang, 2016: Multidecadal wind-driven shifts in northwest Pacific temperature, salinity, O_2, and PO_4, *Global Biogeochemical Cycles*, 30, 1599-1619.

Lee, B.-D., B.T. Kim, and Y.-S. Cho, 2011: A Study on Vulnerability Assessment to Climate Change in Regional Fisheries of Korea, *The Korean Society of Fisheries Business Administration*, 42(1), 57-70.

Lee J.Y., W. Park, S.Y. Moon, amd H.K. Cha, 2019: Distribution and indicator species of zooplankton in the East Sea, Yellow Sea and Northern East China Sea in winter, *Journal of Environmental Biology*, 40, 871-883.

Lee S.H., H.T. Joo, J.H. Lee, J.H. Lee, J.J. Kang, H.W. Lee, D. Lee, and C.K. Kang, 2017: Seasonal carbon uptake rates of phytoplankton in the northern East/Japan Sea, *Deep-Sea Research II*, 143, 45-53.

Luo, Y. and B.P. Boudreau, 2016: Future acidification of marginal seas: A comparative study of the Japan/East Sea and the South China Sea, *Geophysical Research Letters*, 43, 6393-6401.

McCarthy, J.J., O.F. Canziani, N.A. Leary, D.J. Dokken, and K.S. White, eds., 2001: Climate Change Third Assessment Report 2001: Impacts, Adaptation and Vulnerability, Intergovernmental Panel on Climate

Change, Cambridge, UK, Cambridge University Press.

Mills, K. et al., 2013: Fisheries Management in a Changing Climate: Lessons From the 2012 Ocean Heat Wave in the Northwest Atlantic, *Oceanography*, 26 (2), 191-195.

Oliver, E.C., 2019: Mean warming not variability drives marine heatwave trends, *Climate Dynamics*, 1-7.

Park C., H.L. Suh, Y.S. Kang, S.J. Ju, and E.J. Yang, 2015: Oceanography of the East Sea (Japan Sea); Chapter 12, Zooplankton, Springer, Switzerland.

Park, Y.-G., K.-H. Seol, K.-O. Boo, J. Lee, C. Cho, Y.-H. Byun, and S. Seo, 2018: Acidification at the surface in the East Sea: A coupled climate-carbon cycle model study, *Ocean Science Journal*, 53(3), 437-448.

Pecl GT, T.M. Ward, Z.A. Doubleday, S. Clarke, J. Day, C. Dixon, S. Frusher, P. Gibbs, A.J. Hobday, N. Hutchinson, S. Jennings, K. Jones, X. Li, D. Spooner, and R. Stoklosa, 2014: Rapid assessment of fisheries species sensitivity to climate change. *Climate Policy*, 127(3-4), 505-520.

Rahman S.M., H.K. Jung, H.J. Pakr, J.M. Park, and C.I. Lee, 2019, Synchronicity of climate driven regime shifts among the East Asian marginal sea waters and major fish species, *Journal of Environmentak Biology*, 40, 948-961.

Ramírez, I.J. and F. Briones, 2017: Understanding the El Niño Costero of 2017: The Definition Problem and Challenges of Climate Forecasting and Disaster Responses, *International Journal of Disaster Risk Science*, 8 (4), 489-492.

Qi, D., X. Chen, R. Hilborn, and Y. Chen, 2017: Vulnerability to impacts of climate change on marine fisheries and food security, *Marine Policy*, 83, 55-61.

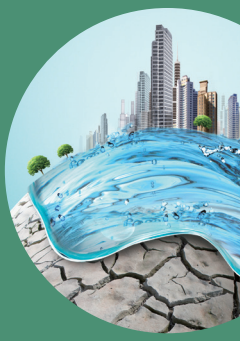
Watson, P.J., 2019: Updated mean sea-level analysis: South Korea, *Journal of Coastal Research*, 35(2), 241-250.

Yoo S., C.E. Kong, Y.B. Son, and J. Ishizaka, 2019: A critical re-assessment of the primary productivity of the Yellow Sea, East China Sea and Sea of Japan/East Sea large marine ecosystems, *Deep-Sea Research II*, 163, 6-15.

Yoon, J.J., 2016: Analysis of long-period sea-level variation around the Korean Peninsula, *Journal of Coastal Research*, 1432-1436.

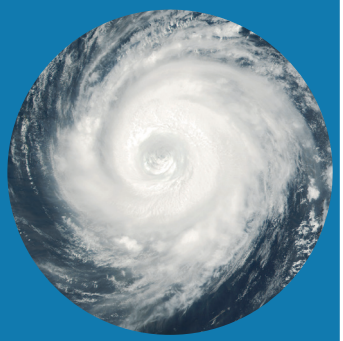
Yoon, S.T., K.I. Chang, S.H. Nam, T.K. Rho, D.J. Kang, T. Lee, K.A. Park, V. Lobanov, D. Kaplunenko, P. Tishchenko and K.R. Kim, 2018: Re-initiation of bottom water formation in the East Sea (Japan Sea) in a warming world, *Scientific Reports*, doi:10.1038/s41598-018-19952-4.

한국 기후변화
평가보고서 2020
- 기후변화 영향 및 적응 -



제 7 장

산업 및 에너지



222 7.1 서론

222 7.2 관측된 영향

226 7.3 영향 전망

236 7.4 취약성의 주요 원인

238 7.5 적응 옵션

244 7.6 결론

245 7.7 참고문헌

제 7 장 산업 및 에너지

7.1 서론

지난 106년(1912년~2017년) 동안 우리나라의 연평균 기온은 13.2℃로 10년마다 약 0.18℃씩 상승하는 것으로 나타났다. 계절적으로는 겨울과 봄이 각각 0.25℃, 0.24℃로 기온상승 폭이 뚜렷하게 나타나고 있다. 일최고기온 및 일최저기온의 변화를 보면 거의 모든 계절에서 최고기온의 상승폭보다 최저기온의 상승폭이 현저히 높은 것으로 나타나고 있다. 최근 30년 기온은 과거30년(1912년~1941년)에 비해서 1.4℃가 증가한 것으로 나타났다. 이러한 급격한 변화로 인해 국내에서는 기후변화에 관한 연구가 계속해서 수행되어 오고 있으며, 최근 세계적인 관심사인 온실가스 감축과 관련하여 그 연구 활동과 정책적인 변화에 대한 목소리가 높아지고 있다.

지난 2014년에 발표된 IPCC 5차 평가보고서에 따르면 경제 및 인구 성장으로 산업화 시대 이전부터 인위적 온실스 배출량은 계속 증가해왔고, 현재 이산화탄소, 메탄, 아산화질소의 대기 중 농도는 인위적 배출로 인해 지난 80만년 내 최고 수준으로 기타 인위적 동인과 함께 전체 기후 시스템에 영향을 주는 것은 계속해서 탐지되어 왔으며, 이는 20 세기 중반 이후 관측된 온난화의 주 원인일 가능성이 대단히 높다고 보고 있다.

세계적으로 폭염과 한파 등 이상기온과 태풍과 같은 자연재해가 자주 발생하고 있는데 2019년 1월, 기록적인 북미의 혹한과 호주의 폭염이 동시에 나타나는 등 극단적 이상기온 현상이 발생하여 세계적으로 2005년부터 2015년 사이에 자연재해로 발생한 경제적 피해는 1조 3천억 달러를 넘는 것으로 보고 있다(Hassol et al,2016)(견고한 동의).

우리나라는 자연재해로 인하여 최근 10년(2007년~2016년)동안 162명의 인명피해와 더불어 약 7조 3천억 원의 재산피해를 입었다(행정안전부,2017).

우리나라의 산업 및 에너지 부분은 압축적 경제성장을 지원하기 위해 구축된 기존 대규모 집중형 에너지 공급 정책으로 에너지다소비, 온실가스 및 오염물질 다배출 구조가 정착되어 있어 1인당 에너지 소비는 1990년에 OECD 평균의 50% 수준이었으나 2017년에는 140% 수준으로 증가하였으며, 일본과 독일을 각각 2001년, 2002년에 추월하고, 2008년에는 OECD 평균을 추월하여 기존 에너지 정책이 지속될 경우 미국과 유사한 에너지다소비형 경제 구조로 고착화될 것으로 전망되고 있다(한국환경정책·평가연구원, 2017)(견고한 동의).

2017년 기준으로 우라나라의 전체 에너지소비 중 산업 부문의 비중은 61.7%(원료용 포함)로 OECD 평균에 비해 매우 높은 수준[3]으로 감소세를 보이는 다른 나라와 달리 지속적으로 상승하는 추세에 있다. 이러한 배경에서 본 연구는 국내 산업 및 에너지 부분의 기후변화 영향 및 적응방안 등에 대한 이론적 고찰을 통하여 최근 발표된 IPCC 특별보고서인 1.5℃(및 2℃) 기후변화 정책목표에 상응하는 정책 방향을 설정함으로써 기후변화 대응 역량을 강화할 수 있게 하고자 한다.

7.2 관측된 영향

최근 37년간의 추세를 살펴보면, 1980년대에 비해 2000년대에는 상대적으로 사망과 실종자 수가 줄어든 반면 피해액은 증가했음을 알 수 있다. 태풍을 동반한 주요 사건의 유무에 따라 피해 정도가 크게 영향을 받겠지만, 한편으로는 사회적 취약성도 그 원인으로 고려할 필요가 있다. 재산피해규모가 증가한 원인은 명확하지 않지만, 사회의 발전에

3) OECD 평균은 31.3%

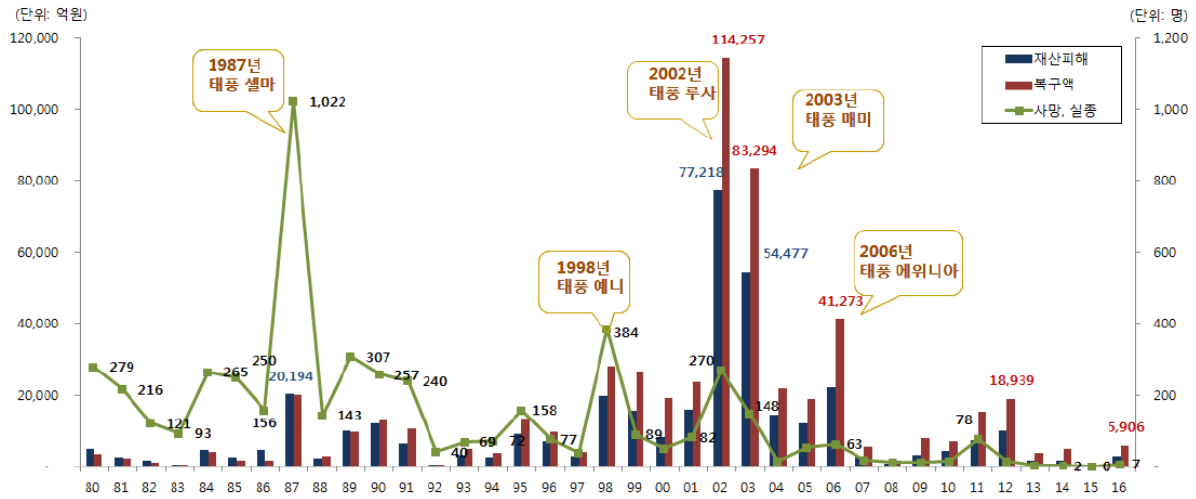


그림 7.1 자연재해에 따른 우리나라 피해규모 추이(이승준 등, 2017).

따라 기반시설을 포함한 자산 규모가 증가한 것이 하나의 원인으로 추정된다. 이와 관련하여 IPCC는 날씨나 기후 관련 재난의 경제적 손실이 장기적으로 늘어나는 것은 사람과 경제적 자산의 노출(exposure)이 증가한 데 기인한다고 높은 수준의 확신(high confidence)으로 언급했다(IPCC, 2012, p.9)(견고한 동의).

경제가 발전하고 사회구조가 복잡해질수록 재난이 일어났을 때 재산 상의 피해가 극심해질 수 있다는 사실은 네트워크 이론의 연구 결과를 통해 짐작할 수 있다(이승준, 2017)(중간적 동의).

7.2.1 기상산업

신기후 체제하에서 전지구 기후변화 대응 분야의 시장 규모는 2030년까지 1,800조 달러에 이를 것으로 전망되고 있다(한경, 2016).

기상청(2018)의 조사에 따르면, 기상산업 부문 총 매출액은 4,077억 원으로 2017년 조사결과(3,838억 원)보다 239억 원 증가(6.2%)했다. 이는 기상장비 부문에 해당하는 '기상 기기, 장치 및 관련 상품 도매업'과 기상 기기, 장치 및 관련 제품 제조업의 매출액이 전년 대비 각각 14.5%, 11.3% 순으로 크게 증가했다. 반면, 기상서비스 부문에 해당하는 기상관련 전문, 기술 서비스업과 기상관련 방송 및 정보서비스업의 매출액은 각각 9.1%, 10.5%로 소폭 증가했으며, 기타 기상관련 서비스업(손해보험업)은 6.8% 감소했다. 지속적인 기상산업 성장세와 함께 기상산업 상시근로자 수도 총 2,583명으로 2017년 조사결과(2,496명)보다 87명이 증가(3.5%)한 것으로 나타났다. 기상산업 부문 수출액은 108억 9,000만원으로, 2017년 조사결과(107억 5,400만원)보다 소폭 증가(1억 3,600만원, 1.3%)했다. 이는 기상장비 부문에 해당하는 △기상 기기, 장치 및 관련 상품 도매업의 수출액이 62.9%로 증가했기 때문이다.

다만, 기상상산업의 성장세는 계속되고 있으나, 부가가치가 높은 서비스 산업의 비중은 여전히 낮아 이에 대한 지원과 육성이 필요한 것으로 보인다.

7.2.2 유통/식품

유통/식품분야에서는 최근 안전과 관련하여 기후변화 영향에 큰 관심이 쏠리고 있다. 최근 이상고온 등 기후변화와 외식·급식 이용 증가 등 우리 국민의 식생활 패턴 변화에 따라 식중독 발생 패턴이 변화하고 있다. 식중독이 가장 많이 발생하는 곳은 음식점이었으나, 식중독 환자는 학교에서 가장 많이 발생하였다(식품의약품안전처, 2018)(견고한 동의).

과학기술 예측조사 보고서를 토대로 STEEP 분류방법, 윌슨매트릭스 분석을 통해 식품분야 메가트렌드를 도출한 결과 기후변화 및 에너지 자원 고갈이 식품분야에 중요한

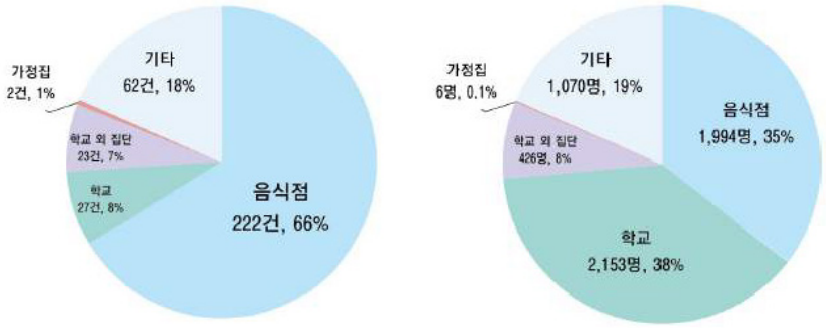


그림 7.2 발생원인 시설별 식중독 현황(식품의약품안전처, 2018).

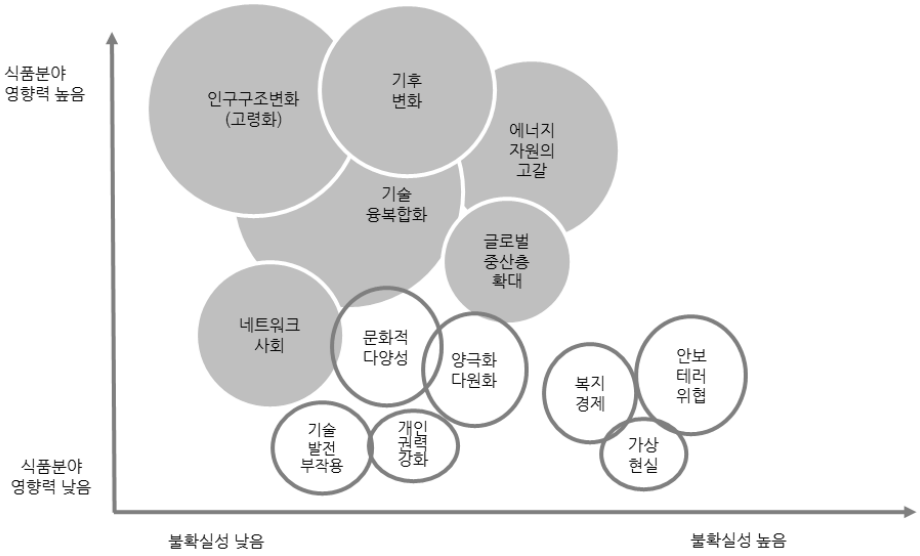


그림 7.3 미래사회 메가트랜드 윌슨 매트릭스(이기원과 김서영, 2017).

역할을 할 것으로 보고 있다(이기원·김서영, 2017)

기후변화에 기인된 식품안전 사건·사고로 인한 피해를 최소화하기 위해서는 선제적·효과적 대응체계 구축이 필요하며, 이를 위해서는 식품안전 분야에 기후변화로 인한 직·간접적 영향에 대한 다각적, 체계적인 분석이 필요하다. 또한 식품안전 분야의 주요 취약 부문들을 미연에 파악하고 적응·대응에 대한 잠재력을 확보하는 것이 중요한데, 기후변화에 선제적·효과적 대응체계를 구축하기 위해서는 국내외 기후변화와 식품안전관련 정보의 수집·분석 대상 범위를 확대하고, 최신 정보통신기술과의 융합 및 모니터링·감시 결과와의 병합·연동될 수 있는 지속적이고 체계적인 수집·분석·확인 체계를 구축하는 것이 매우 중요하다(식품의약품안전평가원, 2014)(중간적 동의).

7.2.3 산업단지

한국의 경우 1970년대 산업화와 함께 도시화가 시작되어 토지이용을 극대화하려는 압력이 높아졌다. 따라서 토지 당 인구밀도가 급격히 상승하며, 도시 내 열섬현상이 심해지는

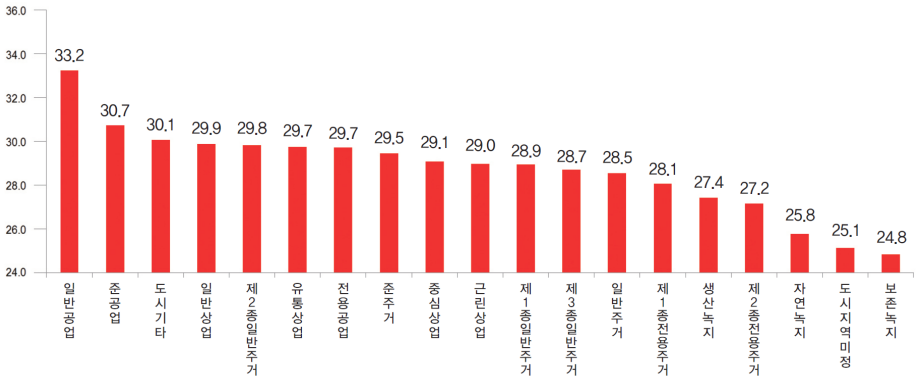


그림 7.4 용도지역별 평균야간지표온도(국토연구원, 2016).

결과를 가져왔다. 도시지역이 비도시지역보다 약 2°C 이상 고온피해가 높은 것으로 알려져 있으며 용도지역에 따라 도시온도를 더욱 상승시키는 것으로 조사되었다(관계부처 합동, 2016).

수도권 분석결과, 도시열섬은 인공피복 비율이 높은 ①산업단지, ②공항, ③저층 고밀지역 등을 중심으로 도시온도를 상승시켰고, 인공피복비율, 건물들의 인동간격, 높이, 배치형태 등 지표 성질들도 도시열섬을 심화시키는 요인으로 분석되었다(관계부처 합동, 2016).

한편, 전 세계적으로 재난의 발생 빈도 및 규모가 증가할 뿐만 아니라 유형의 복합화 현상이 나타나고 있다. 이러한 복합재난(NATECH: Natural Hazard Triggering Technological Disaster)은 자연재해(극한 이상기온, 홍수, 지진 등)로 인해 기술재난(화학사고 등)이 발생하는 것으로 정의되며, 연쇄적 또는 동시다발적으로 발생하는 것이 특징으로 그 파급력이 크다(오윤경, 2013, p.13).

최근 우리나라에서도 지진, 홍수 등의 자연재해가 빈번하게 발생하고 있으며, 그 규모도 점차 커지고 있으며, 또한 2012년 이후 화학사고가 연이어 발생하는 등 증가 추세를 보이고 있다. 2016년 9월 12일 경주에서는 규모 5.8의 지진이 발생하여 현재까지 총 23명의 부상자와 총 9,368건의 물적 피해가 발생하였고 피해액은 약 110억 원을 넘었으며, 현재까지도 여진이 지속되고 있다. 최근 지진이 발생한 경주 및 울산 등 인근 지역에는 원자력발전소뿐 아니라 대규모 화학공단, 일반 화학시설 및 폐기물다량배출업종(제조업 등)이 산재되어 있다. 경주 인근 사고대비물질 취급 사업장은 총 672개이며 이 중 53%인 353개가 9월 12일경주 지진 발생 지점에서 30 km 이내에 분포한다.

이처럼 복합재난의 위험 가능성이 커지고 있는 우리나라는 자연재난과 기술재난(산업 시설)이 구분되어 별도의 법으로 관리되어 왔기 때문에 복합재난에 대한 산업단지 관리방안이 마련되어 있지 않다(채여라 외 2017).

7.2.4 제조업

광업 및 제조업 등 야외 근로가 중심이 되는 산업은 기후변화로 인해서 노동생산성이 떨어져서 생산성 하락이 나타날 수 있다. 높은 기온이나 습도는 불쾌지수를 높여 근로자의 생산성을 저하시키고 야외 근로자의 경우 탈진을 예방하기 위해 자주 쉬어야 하는 등 생산 효율성이 악화될 수 있다(Easterly and Levine, 2003).

국내의 연구에 의하면 기온상승으로 실외뿐 아니라 실내에서도 열부하 현상으로 근로환경 악화를 초래하고 근로자의 건강을 위협하여 생산성을 저하시키는 것으로 보고 있다(김동현·이준범, 2015).

기후변화로 인한 근로자의 고온노출로 근로자의 건강 및 작업역량에 직접적으로 영향을 줄 뿐 아니라 해당지역의 고용구조, 지역기반 산업 등에도 영향을 줄 수 있는데, 이러한 근로자의 체감온도 상승은 지역별로 다르게 나타나며, 작업역량 저하는 지역의 기반산업에도 악영향을 끼칠 것으로 보고 있다(김동현·이준범, 2015)(중간적 동의).

7.2.5 교통

도로교통에 있어서 도로는 교량, 터널, 포장, 안전시설 등 다양한 구조물로 구성되어 있는데 최근에는 폭염과 폭우에 따른 포장 구조물의 영향이 가장 큰 것으로 나타났다(국토연구원, 2018)

도로가 30 cm 이상 솟아오르는 블로우-업(Blow-up)이라는 현상이 대표적이다. 2019년 6월에는 평택시의 왕복 2차로 도로에서 5 t 트럭이 중앙선을 넘어 마주오던 승용차와 충돌하여 승용차 운전자가 숨지는 사고가 발생하였으며, 트럭 운전자는 포트-홀을 지나는데 갑자기 운전대가 왼쪽으로 돌아갔다고 진술하는 사례가 있었다. 포트-홀은 장마철 집중 호우 때 많이 발생하는 대표적인 파손 형태이고, 이와 관련된 사고가 최근 증가하고 있는 실정이다.

7.2.6 에너지

에너지 분야에서는 기후변화로 인해 2018년 7월 24일 최대전력수요가 92,478 MW를 기록하며 역대 최대치를 경신하였고, 폭염 및 열대야로 7월~8월 건물 부문 전력 소비량이 증가하여 아파트 정전이 증가하였다(관계부처 합동, 2018).

한편, 1월~2월 사이에는 겨울철 한파로 인한 에너지 소비량이 증가한 것으로 나타났다.

7.3 영향 전망

기후변화는 전세계적으로 사회, 경제, 환경 전반에 영향을 미치는 중요한 화두가 되었다. 매년 세계의 주요 이슈를 논의하는 다보스 세계경제포럼(World Economic Forum)은 극한 기상 현상, 기후변화 대응(저감 및 적응) 실패, 주요 자연재해 등을 환경 분야 최상위 리스크로 발표하였다(WEF, 2017).

극한기상, 자연재해는 기후변화의 심화와 함께 그 빈도와 강도가 증가한다. 지금까지 기후변화로 발생하는 다양한 극한기상 현상들 가운데, 폭염, 열대야 등 고온과 관련된 현상과 집중 강우, 태풍, 홍수 등 풍수해에 대해서는 다양한 분야의 연구들이 수행되어 오고 있다. 그러나 우리나라의 겨울철에 그 강도가 강해지고 있는 폭설 및 한파에 대한 연구는 아직 다양한 접근이 부족한 실정이다.

2014년에 발표된 5차 평가보고서에서 IPCC는 한국의 평균 기온은 2100년까지 최저 3.0℃에서 최고 5.9℃까지 상승하여 향후 기후변화의 속도가 급격하게 이루어질 것으로 예상하였다. 또한 강수량에 있어서도 평균 강수량도 현재보다 16%에서 18% 이상 증가할 것으로 예상하였다. 2050년에 한국의 평균 기온은 현재보다 3.2℃가 높아지고 연평균 강수량도 15.6%가 증가할 것으로 예상하였고, 한국의 해수면을 27 cm 높여 양식업 등해안지역의 산업에 영향을 미칠 것으로 분석하였다.

7.3.1 산업전반

산업부문은 기후변화로 인해 많은 영향을 받고 있으며 기후변화는 산업부문뿐만 아니라 사회전반에 걸쳐 피해를 끼치고 있다. 그럼에도 불구하고 국내에서는 아직 산업부문에 특화된 기후변화 취약성 평가 도구가 없다. 더욱이 산업단지를 대상으로 실제산업요소를 고려한 취약성평가는 연구가 미흡한 상황이므로 산업부문에 특화된 기후 변화 취약성 평가 방법 및 도구가 필요하다(김윤정 외, 2013) (견고한 동의).

7.3.1.1 제조업

제조업 분야에서는 기존의 추상적인 개념에서의 리스크 측정에서 벗어나 Pardo et al.(2007)이 이용한 실증모델을 추정하여 국내의 제조업 및 서비스업의 품목별 기후리스크를 예상하였다.

간단한 선형모델을 이용하여 제조업 품목과 서비스업종의 기후리스크 추정을 시도하였다. 실증분석에는 1970년대 이후 기상청의 기후데이터, 통계청이 제공하는 1970~2012년간의 '광공제조업 동향조사' 월간 자료, 2000~

2012년 간의 '업종별 서비스업(월별)생산지수' 등이 이용되었다.

분석결과, 광공업 부문 539개 품목의 26.7%에 해당하는 144개 품목이 기온여건에 따라 판매량에 유의미한 변화를 겪고 있는 것으로 나타났다. 서비스업종의 경우 전체 229개 업종 중 28.9%에 해당하는 64개 업종에서 기온변화에 따른 경영성과 변화가 발견되었다. 이는 온난화와 이상기온현상이 증가함에 따라 국내 제조업체와 서비스업계가 감당해야 할 기후리스크가 증가할 것이라는 예상을 가능하게 한다(오형나, 2015)(제한적 동의).

7.3.1.2 교통

교통 분야에서는 그동안 많이 다뤄왔던 폭우 및 폭염 연구와는 달리 최근 증가하고 있는 폭설과 관련된 연구가 진행되었다.

기후변화로 인해 증가하는 극한 기상인 폭설에 의한 리스크를 평가한 연구에서는 폭설에 의한 리스크는 교통시설과 건축물을 대상으로 평가를 수행하였으며, 각각의 폭설피해에 영향을 미치는 변수를 선정하고, 베이지안 추정을 통해 가중치를 산정하였다. 베이지안 추정은

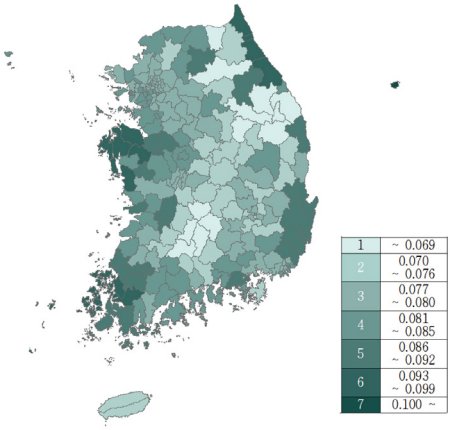


그림 7.5 폭설에 따른 현재시점 교통시설 피해리스크 결과(이상혁과 강정은, 2019).

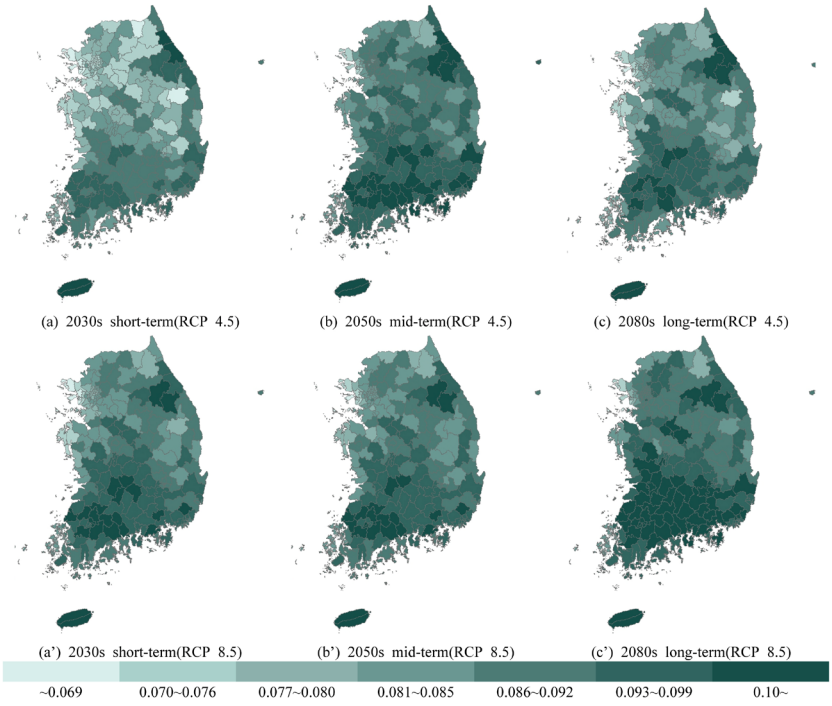


그림 7.6 폭설에 따른 미래 교통시설 피해리스크 추정 결과(이상혁과 강정은, 2019).

난수생성 및 학습에 효과적인 Markov Chain Monte Carlo (MCMC) 시뮬레이션을 활용해 10회 실시 후 평균값을 활용하였으며, 추정된 가중치를 바탕으로 현재(2014년 기준) 리스크와 미래 리스크를 평가하였다. 미래 추정을 위한 기상자료는 기후변화 시나리오인 RCP 4.5/8.5를 바탕으로 한 미래 적설량을 2030년, 2050년, 2080년의 단기, 중기, 장기로 구분하여 평가를 진행하였다.

평가결과, 교통시설 및 건축물의 현재 리스크 모두 강원도와 충남, 전라도의 해안 지역에서 높은 것으로 나타났다. 미래 리스크는 교통시설 및 건축물 모두 시나리오와 시간에 흐름에 따라 한반도 남부지역과 내륙지역에서 고위험지역이 확대되는 것으로 나타났다. RCP 4.5의 경우 중기(2050s)에 고위험지역이 가장 많이 나타났다가 장기(2080s)에 줄어들었으며, RCP 8.5의 경우는 중기에서 장기로 갈수록 한반도 남부와 내륙지역에 높은 리스크가 지속적으로 증가하고 위험지역이 급격히 확대되었다. 이러한 경향은 기후변화의 심화에 따른 적설량의 증가가 직접적인 영향으로 보이며, 이외에도 기존에 폭설 빈도가 적었던 한반도 남부와 내륙지역은 적설량이 많아졌을 때 피해에 대한 대응력 부족으로 오히려 그 피해규모가 급격하게 높아지게 된 것을 원인으로 들 수 있다(이상혁·강정은, 2019) (중간적 동의).

7.3.1.3 식품/안전

식품분야의 기후변화로 인한 영향을 최소화하기 위해서는 기후변화가 식품안전에 미치는 전반적인 영향과 취약성을 평가하기 위한 예측모델을 개발하여야 하고 기후변화에 따라 발생 가능한 위험요인(Hazards)들의 장기적인 모니터링을 통하여 과학적 근거 자료를 확보하여야 한다.

이를 위해서 필수적으로 과거의 기상자료 수집 및 미래의 기후변화 시나리오(RCP 4.5, RCP 8.5 등)에 따른 정량화된 자료가 필요하며, 특히, 과거 기상자료의 경우 그 특성상 매년 변화되는 특성을 가지고 있어, 지속적인 업데이트가 요구되며, 기상자료 수집 및 매핑 등 데이터 핸들링 도구의 마련이 필요하다.

추가적으로 다양한 생물학적 및 화학적 위해요소를 대상으로 한 시공간적인 모니터링 자료가 필요하며, 기후변화 사업단에서 수행한 기후변화 영향평가 목적으로 미리 계획하여 실시한 표적 모니터링(Target Monitoring)내지는 기존에 탐색 혹은 규제 모니터링 자료를 통한 위해요소별, 식품별 오염도 자료가 요구되었다. 위와 같은 기후변화와 감시 모니터링 자료는 상호 매우 이질적인 자료일 뿐만 아니라 부처별로 산발적으로서로 다른 형식으로 생산되고 있는 실정이어서, 분산 운영되는 자료를 수집하여, 유기적으로 병합하고, 조정·관리하여 이종자료의 통합DB 구축 및 ICT의 지식탐색 기술의 접목이 필요하였다.

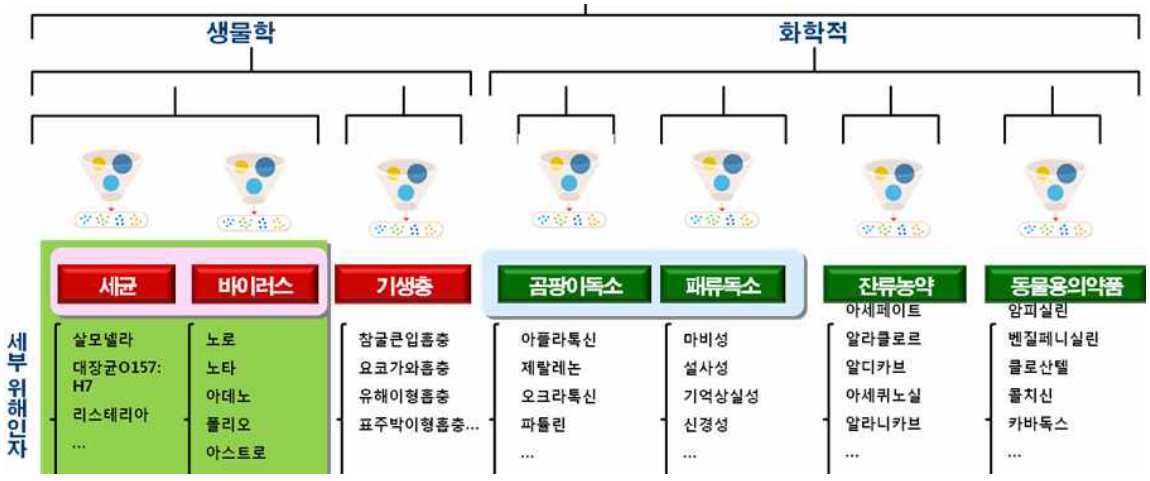


그림 7.7 CC-MIMS 관리 주요 리스크 요소(식품의약품안전평가원, 2014).

이와 같은 이유로 CC-MIMS 프로그램을 개발하여 대용량의 기상자료 및 모니터링자료를 DB화함은 물론 기후변화 영향평가에 요구되는 모니터링 자료 수집 시 요구되는 변수들에 대한 프레임워크를 제시 하였고, 식약처 서버에 이관(2014.8.22.)하여 지속적으로 식품안전에 대한 기후변화 영향 평가에 활용될 수 있도록 하였다(식품의약품안전평가원, 2014)(제한적 동의).

7.3.1.4 관광산업

일반적으로 기후변화에 민감한 분야는 농업, 수산업 등의 1차 산업이라고 알려져 있으나 기상 및 기후 여건 등의 자연적인 요인에 따라서 관광객의 수요가 결정되는 서비스업인 관광산업의 기후변화 영향도 매우 크다.

관광산업은 서비스업이라는 특성으로 인해 기온상승, 폭염, 폭우, 가뭄 등 기후변화에 따른 관광산업 피해 및 관광객 감소 등의 연구가 진행되어왔다.

베이징을 중심으로 한 동북지역과 홍콩을 중심으로 한 남부지역으로 그 지역을 구분하여 패널모형을 구축하였다. 또한 기후변화는 장기간에 걸쳐 서서히 변화하는 것임을 감안하여 연구의 시간적 길이는 2100년까지로 하고 있다. 결론적으로 기후변화의 영향이 관광 수요에 미치는 영향을 분석하기 위해 A1B 시나리오를 기준으로 2100년까지 한반도 및 동북아의 기후변화를 추정하였고 관광수요를 분석하기 위해서 한국으로 유입되는 중국인 관광객과 사회경제적 요인을 패널자료 형태로 분석하였다. 또한 기후변화 중에서 급격한 기상변화가 관광수요에 영향을 줄 것으로 가정하고 극대강우, 폭염 등의 이상기후 현상을 모형에 반영하여 기존 모형과의 차별성을 부각하였다. 패널분석을 통해서 얻어진 결과를 기반으로 사회경제요인 중 여행비용, 환율과 GDP 측면에서 관광 수요의 탄력성은 각각 1.15, 7.03 및 0.58를 나타냈다. 또한 기후변화의 영향을 강수뿐만 아니라 극대강우 및 폭염을 제곱근을 이용하여 모형에 반영하였고 이는 관광객들이 무더위에 비해 강우에 더 민감하게 반응하는 것으로 분석되었다(황윤섭·이윤 외, 2014)(중간적 동의).

제주도를 대상으로 한 연구에서는 기후변화에 따라 관광경험, 관광가치, 관광 위험요인이 만족도와 행동의도에 미치는 영향력의 차이를 살펴보고, 관광객의 국적(중국, 한국)에 따라 관광경험, 관광가치, 관광 위험요인이 만족도와 행동의도에 미치는 영향력의 차이를 살펴보았다. 한국 관광객의 경우 중국 관광객의 경우보다 관광경험이 관광지 만족도에 더 큰 영향을 미치는 것으로 나타났고, 행동의도에는 관광가치가 더 큰 영향을 미치는 것으로 나타났다(제한적 동의).

이산화탄소 배출을 감소하는 관광행동을 유도하기 위해 관광객들의 기후변화에 대한 인식의 정도를 파악 후

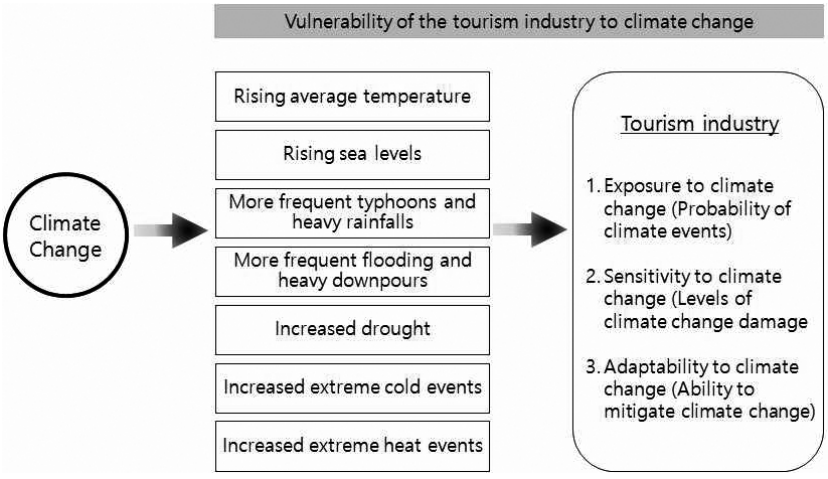


그림 7.8 기후변화에 따른 관광산업 취약성 평가과정(김상태 등, 2014).

관광객의 성향을 분석한 연구에서는 기후변화에 대한 인식 수준에 따른 관광지 선택속성에 대한 중요도를 파악하기 위한 방법으로 컨조인트 분석을 사용하였다. 본 연구 결과 기후변화 인식에 따라 관광객 선택 속성에 차이가 있음을 확인하였다.

전문가를 대상으로 기후변화 취약성에 관한 설문조사를 실시하였으며, 조사 내용의 분석을 통해 기후변화에 취약한 관광산업 부문을 도출하였고, 관광산업이 기후변화에 대응하기 위한 적응, 완화 전략을 논의하였다. 기후변화 현상의 발생가능성(노출정도)에 대한 전문가들의 의견을 분석한 결과, 총 7가지의 하위 현상 중 '태풍 및 폭풍'과 '홍수 및 집중호우'의 가능성이 높게 나타났다. 기후변화로 인한 민감도(피해수준)를 살펴보면, 관광자의 야외활동이 많은 스키리조트나 골프리조트 부문에서 대체적으로 높게 나타났다. 적응능력은 평균값이 높을수록 기후변화에 대응하기 위해 조치가 시급하고, 투자규모가 큼을 의미하며, 분석결과 민감도와 유사한 결과가 나타났다. 마지막으로 노출정도, 민감도, 적응능력을 모두 고려한 취약성 분석결과, 기후에 민감하고 방문객이 주로 야외에서 활동하는 스키리조트, 골 프리조트가 기후변화에 취약한 것으로 나타났다(김상태,2017)(중간적 동의).

7.3.1.5 레저산업

휴양 활동에 있어 기후가 중요한 요소로서 역할하고 있는 만큼, 더욱 쾌적한 기후, 더욱 좋은 기후 조건을 찾기 위한 많은 연구들이 진행되어 왔다.

레저활동에 있어서는 주로 물놀이, 자전거, 트래킹 등 야외활동에 집중되어 연구가 진행되었다.

TCI를 이용하여 관광목적지의 기후 여건 변화를 분석한 연구(Chung et al., 2013; Park et al., 2014), 기후가 관광목적지의 관광객 수에 미치는 영향을 분석한 연구(Gong et al., 2013; Chun and Lee, 2006) 등이 진행된 바 있다.

기후변화 영향과 관련하여 가장 많은 연구가 진행된 레저활동 중 하나는 기후 자체가 자원으로서의 역할을 하는 야외 물놀이 활동일 것이다. 지금까지 많은 연구자들이 야외 물놀이 활동에 선호되는 기후 조건이 무엇인지에 대한 연구를 진행하여왔다.

서울을 중심으로 야외 물놀이 활동에 기후변화가 미치는 영향을 분석한 결과, 야외 물놀이 활동은 기온, 체감기온, 불쾌지수, 강수량의 정도와 높은 상관성을 갖는데, 구체적으로 기온은 일 최고 23.51℃에서 선호, 37.56℃에서 비선호되고, 체감기온은 25.90℃에서 선호, 39.43℃에서 비선호되며, 불쾌지수는 71.61에서 선호, 88.98에서 비선호, 강수량은 22.8 mm부터 비선호되는 것으로 나타났다(제한적 동의).

트래킹 참가자를 대상으로 기후변화가 레저 활동에 어떠한 영향을 주는지 알아보기 위해 트래킹경험이 있는 성인을 대상으로 설문지를 통해 구조방정식 모형을 활용하였다. 분석결과를 살펴보면, 기후변화에 대한 인식은 레저스킬과 행동의도에 영향을 미치는 것으로 나타났으며, 기후변화에 대한 인식은 레저스킬과 행동의도에 영향을 미치는 것을 알 수 있었다. 또한 기후변화는 행동의도, 태도와 주관적 규범에 영향을 미치지만, 행동통제에 영향을 미치지 못하는 것으로 나타났다(제한적 동의).

강변지역에서 자전거를 이용하는 사람들이 지각하는 기후변화는 무엇인지 밝혀보았는데, 분석 결과, 자전거 이용객은 기후변화에 대해 완화정책 현상, 극한기후, 사회심리적 현상, 환경변화 등 네 개의 요인으로 지각하고 있으며, 포기/유보/축소, 활동전환, 장소변경 등 세 개의 행위에 의해 기후변화 영향에 적응하는 것으로 나타났다. 또한 지각된 기후변화 중 완화정책 현상에 따라 다른 장소를 선택해 자전거를 이용하거나 다른 활동으로 전환하는 반면, 지각된 극한기후는 자전거이용을 포기 및 유보 또는 축소하게 하거나 다른 레저관광으로 전환하는데 영향을 미치는 것으로 조사되었다(제한적 동의).

아웃도어 레크리에이션 중에서도 등산을 대상으로 기후변화에 대한 적응행동과 전문화와의 관계를 파악하고자 한 연구에서는 산업 관점에서 활동횟수 줄임, 활동중지 및 활동대체, 장비투자 줄임이 공간대체보다 높게 나타났으며, 특히 현재 등산을 즐기고 있는 등산객의 약 30%가 활동횟수를 줄이겠다고 응답하여 전반적인 등산 수요에 영향을 미치고, 관련 산업의 손실가능성이 커질 수 있는 것으로 나타났다(제한적 동의).

7.3.1.6 패션산업

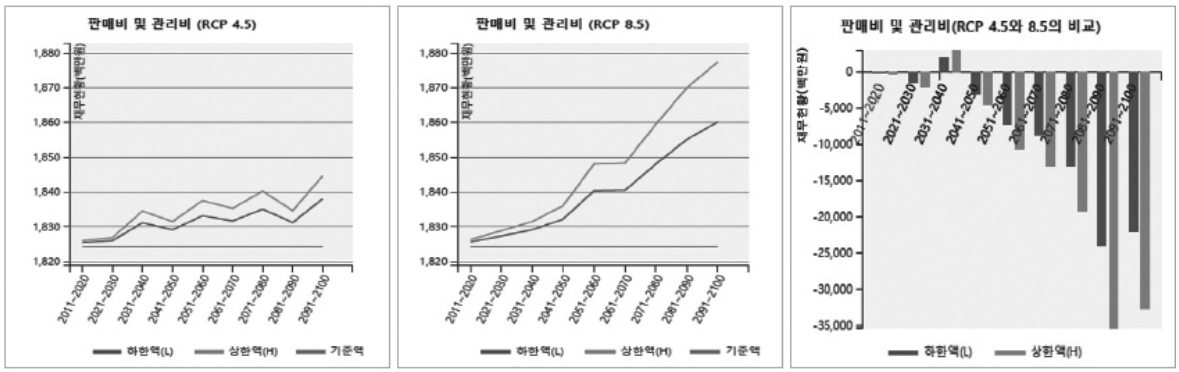
기후변화 인식은 패션소비자의 복식행동에 영향을 줄 수 있다. 기후변화 인식에 따른 소비자 집단 간의 차이 결과에서 살펴본 바와 같이, 소비자의 기후변화 인식이 높을수록 윤리적 구매 성향이 높아지는데 이는 매우 고무적인 현상이라고 볼 수 있다. 따라서 일반 소비자들의 복식행동에 있어 친환경적, 윤리적, 착한, 지속가능한 소비로 이끌기 위해서는 기후변화에 대한 관심을 적극적으로 유도해야 하며 또한 올바른 기후변화 인식을 가질 수 있도록 개인적 그리고 사회적 차원의 노력이 필요하다. 기후변화에 관련된 복식행동의 측면에서 레이어드나 크로스 오버 등 새로운 스타일 착용과 친환경 구매이다. 마케터의 차원에서는 선도하고 있지만 소비자들은 상대적으로 긍정적으로 수용하고 있지 않았다. 그러나 기후변화 인식정도에 따라서는 유의한 차이가 있었으므로 이는 향후 일반 소비자의 기후변화 인식이 높아지면 새로운 스타일 착용이나 친환경 구매는 증가한다고 볼 수 있다.

근거 이론 분석 기법을 적용하여 기후 변화에 따라 변화한 소비자의 의복 관리 경험을 포괄적이고 탐색적으로 살펴보았다. 소비자들은 황사와 미세 먼지 등 대기 요소와 아열대화된 여름과 겨울철 한파와 같은 계절적 요소에서 의복관리에 영향을 미치는 기후 변화를 인식하고 있었다. 추가적으로, 가정 내 성 역할 변화, 커뮤니케이션 채널 변화, 협소하게 느껴지는 주거 공간, 화학제품 유해성 인식 증가, 피부 관련 면역 질환 증가 등의 사회문화적 조건들이 소비자의 기후 변화에 따른 의복 관리에 맥락적 영향을 주었다. 기후변화와 사회문화적 맥락의 변화는 소비자로 하여금 기후변화를 반영한 의복 관리 대책의 필요성을 인식하게 하였다. 현재 상태에서 기후 변화로 인해 발생한 의복 관리의 문제를 해결할 수 있는 대안이 부족한 상황이기 때문에, 소비자들은 이러한 문제를 해결할 수 있는 대안의 필요성을 절실하게 인지하고 있었다. 기후 변화에 따른 의복 관리 대안의 필요성은 의복 관리와 의복 관리 가전에 대한 감정에 의해 증폭되었으며, 이들 감정은 의복관리에 대한 걱정과 부담감, 의복 관리 가전에 대한 호기심과 경제적 부담감으로 나타났다(제한적 동의).

7.3.1.8 보험산업

보험산업에 있어 기후변화 위험은 보험회사 경영과정에서 보험, 시장, 투자, 그리고 평판위험 등 다양한 모습으로 나타날 수 있다.

보험에 따른 위험은 기후변화로 인해 자연재해의 빈도와 심도가 높아지고, 이에 따른 지급보험금의 증가를 통해 영향을 받는다. 시장위험은 기후변화의 물리적 위험 증가로 위험기반 보험료가 급격히 상승하여 시장수요가 위축되면서 영향을 받게 된다. 투자위험은 기후변화 위험이 보험회사 운용자산의 급격한 가치 저하를 불러 보험금 지급에도 영향을 미칠 수 있으며, 기업의 사회적 책임을 인식하고 자산 운용관점에서 저탄소 기업에 대한 투자를 늘리는 영향을 줄 수 있다(중간적 동의).



(a) RCP 4.5 시나리오에서 폭염으로 인한 기업의 피해

(b) RCP 8.5 시나리오에서 폭염으로 인한 기업의 피해

(c) 온실가스를 상당히 저감했을 경우와 현 추세대로 배출했을 경우의 피해 금액 차이

그림 7.9 폭염으로 인한 판매비 및 관리비의 피해 추정(최광림, 2016).

7.3.1.7 중소기업

전라남도 통영시에 위치한 수산업 관련 기업을 대상으로 국가기후변화센터에서 개발 한 CRAS를 활용하여 폭염에 대한 RCP 4.5 리스크 평가 결과, 폭염으로 인한 리스크 피해로 판매비와 관리비에서 기준년도 대비 2100년의 경우 약1300~2000만원의 피해가 증가되는 것으로 나타났으며, 재고자산의 경우 240~340만원 정도의 피해가 예상되었다. 재고자산과 판관비의 경우 모두 10년 주기로 증가와 감소를 반복하고 있으나, 장기적으로는 재고자산의 피해와 비용은 꾸준히 증가되는 추세이다. 하한액과 상한액의 차이는 미미하지만, 기준액 대비 약 1300~2000만원 정도의 피해가 예상되었다.

7.3.2 에너지

에너지 분야는 크게 폭염 및 한판에 따른 에너지 사용 증가와 관련된 연구와 풍력발전에 대한 기후변화 영향, 대형재난에 따른 송/배전 인프라 파괴 등의 리스크 요소들에 대한 연구가 주로 이루어졌다.

7.3.2.1 발전

발전에 있어서 기후변화와 관계된 주요 연구들을 요약하면 기후변화에 의한 재해 발생에 따른 발전소 리스크요인 검토 및 송/배전 설비의 손상 등이 있다. 수위하강을 일으키는 음의 해일고의 발생 여부에 대하여 검토하고 음의 해일고 발생 시 피해가 예상되는 발전소 취수구에 대하여 수리모형실험을 통하여 검토방안을 모색하였다.

태풍에 의한 음의 해일고의 발생은 주로 서해안에서 나타났다. 2012년 기준의 음의 해일고 크기는 최대 1.3 m, 음의 해일고 지속시간은 최장 25시간까지 지속되는 것으로 파악되었다. 설계조위 이하로 낮아지는 경우 수중와류에서 강도 2레벨인 dye core가 관측되었으며, HI기준의 한계수위 이하에서는 자유수면 와류에서 dye core가 발생하였다. 발전소 운영에 문제가 발생할 수 있는 dye core에 대하여 수중와류는 와류저감장치공법을 적용하였을 때 와류 강도 저하가 크게 나타났으며, 유로연장공법은 와류저감장치 공법에 비하여 효과가 낮은 것으로 분석되었다(제한적 동의).

가스 및 전력산업과 같은 에너지 산업은 타 산업에 비해 공급시설의 노출 정도, 상품의 특성, 불특정 다수가 사용하는 필수 공공재, 국제 교역 및 수급 등의 특수성으로 인하여

기반 시설 유형	기온 변화	강우 감소	집중 호우	폭풍 강도 증가	강풍 강도 증가	해수면 상승
수도	◎	◎	◎	◎	△	△
하수 시설	△	◎	◎	◎	△	◎
전기	◎	◎	◎	◎	◎	△
석유/ 가스	◎	△	◎	◎	△	◎
유선 통신망	◎	△	◎	◎	◎	◎
무선 통신망	△	△	△	△	◎	△
도로	◎	△	◎	◎	△	△
철도	◎	△	◎	◎	△	△
교량	◎	△	◎	◎	◎	△
터널	△	◎	◎	◎	△	◎

그림 7.10 기후변화에 따른 기간산업 영향(강희정, 2014). △: 경미한 위험, ◎: 명백한 위험

표 7.1 도시가스 산업의 기후변화 취약성 요인(강희정, 2014).

구분	주요영향	예상되는 영향
시설물관리 (태풍과 집중호우)	국제가스시장의수급불안	생산시설 피해로 국제 가스시장의 불안 및 가스의 수급차질
		LNG 국적선의 운항중지, 접안 불가, 해상사고 등
		원료비 상승에 따른 에너지 가격상승
	시설물관리	인수기지 침수로 인한 저장설비의 파괴 및 공급 불가
		정압시설 침수로 인한 공급 중단
		배관망 유실에 따른 공급 중단
		탱크로리 안전사고로 인한 공급중단
한파 및 폭설	수요변화	난방에너지 사용 증가에 따른 가스수급 불균형
		동절기 스팟물량 구매에 따른 추가비용 발생
		계절간 소비량 격차증가로 저장비용 증가
	안전관리 부실	폭설로 인한 교통두절, 고립 등으로 각종 시설물의 유지보수 불가 등 안전관리 어려움
	시설물 파손	폭설에 의한 시설물 부하하중 증가
		도로 결빙으로 탱크로리 운송 지연 혹은 전복사고 등으로 인한 공급중단
	관말압력 저하	관말압력 저하로 공급중단
		피크부하용 설비 증대(기존 설비의 확장 및 신규설비의 배관망해석 강화)에 따른 건설비용의 증가
		유지보수의 애로로 긴급사태 대응 능력 저하
혹서	시설물 이격	응력저하에 따른 시설물 피로도 증가 및 각종 피해발생(배관 처짐 현상, 누설 현상 등)
	가스압력상승	가스압력 상승에 계량시스템 마비, 계량정확도 저하 및 피해 발생
	에너지수요변화	난방용 수요 증감 및 가스냉방 사용량 증가

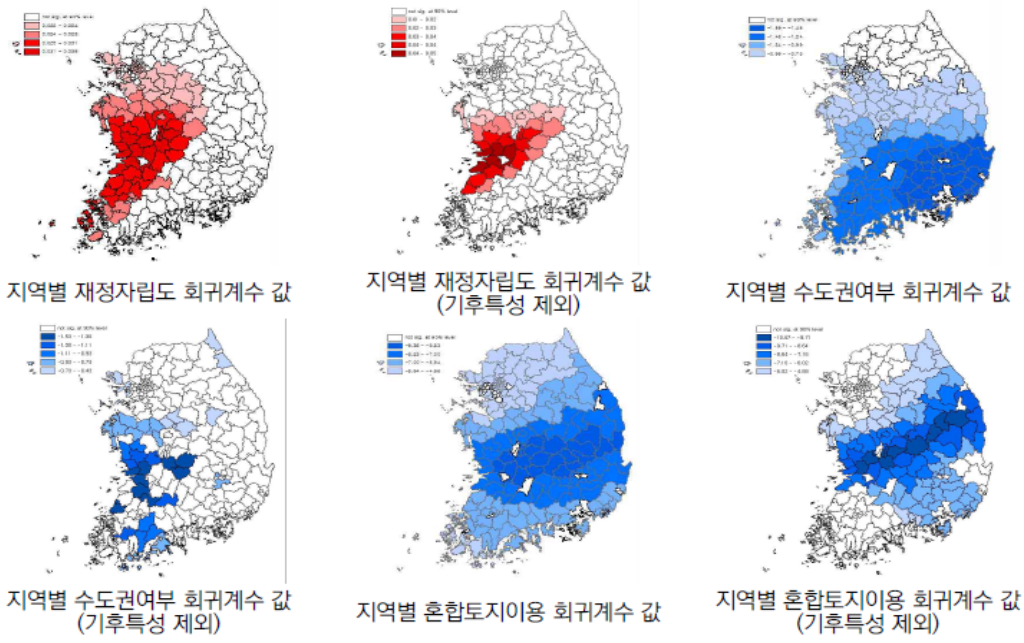


그림 7.11 기후특성변수 유무에 따른 지역별 회귀계수값 차이(이동성과 문태훈, 2017).

기후변화의 영향이 매우 특징적으로 나타나다. 대부분 국가에서 가스산업은 기간산업으로 타 산업에 미치는 연관 효과가 높기 때문에 기후변화의 부정적 영향은 국가의 경제 성장률은 물론, 사회 통합, 나아가, 국가 안보에 이르기까지 다양한 영향을 미칠 수 있다(중간적 동의).

가스산업의 기후변화 영향요인은 크게 두 가지로 구분 가능한데, 첫째는 폭우, 폭염, 폭설, 한파, 태풍 등에 대한 도시가스 공급시설물 안전강화와 외기온도 변화에 따른 가스 소비패턴 변화가 발생하는 난방부하 변화 및 냉방부하 증가현상이다.

기후변화에 대한 영향을 최소화 하기 위해서 우선 도시가스 공급시설의 안전한 우영을 위한 대비책 마련이 필요하다 (강희정, 2014).

7.3.2.2 에너지 수요

기후변화에 따른 기온의 변화는 에너지 수요의 증가를 가져오는 주요 원인이다. 이에 따라 다양한 분야에서 에너지 소비 증가가 발생하는 원인에 대한 연구가 이루어지고 있는 추세이다. 기후변화와 사회경제적 요소를 고려하여 가정 부문의 냉난방 에너지 사용량을 예측하였다. 에너지 사용량 예측을 위해 서비스 수요를 산정하고, 또한 서비스 수요를 산정하기 위한 기초자료로 가구수, 가구당 GDP, 냉·난방도일 등을 작성하였다. 도출된 결과를 바탕으로 기후변화와 사회경제적 시나리오에 따른 가정 부문의 냉난방 에너지 사용량 변화를 분석한 결과 Wilbanks et al.(2008)의 전망대로 국내 가정 부문에서도 난방의 에너지 사용은 감소하고, 냉방의 에너지 사용은 증가하는 경향을 볼 수 있었다. 이는 기온상승의 영향이 작용하였을 것이다.

그러나 앞서 가정 부문의 냉난방 서비스 수요를 도출하였을 때 난방에 대한 서비스 수요는 전반적으로 증가하는 경향을 보였으나, 에너지 사용량에서는 고 성장 시나리오를 제외한 두 시나리오에서 점차적으로 감소하는 경향을 보였다. 반면 냉방에 대해서는 서비스 수요와 에너지 사용량 모두 증가하는 경향을 보였다. 냉방의 주된 에너지원은 전기 에너지이며, 기후 변화가 더욱 심화되는 장기적인 미래에는 냉방 수요의 증가로 인한 전기 사용량이 지금보다 더욱 증가할 것이다. 또한 냉방의 경우 주로 단기간에 많은 전력을 사용하므로 전력 피크 문제를 야기할 수도 있다(중간적 동의).

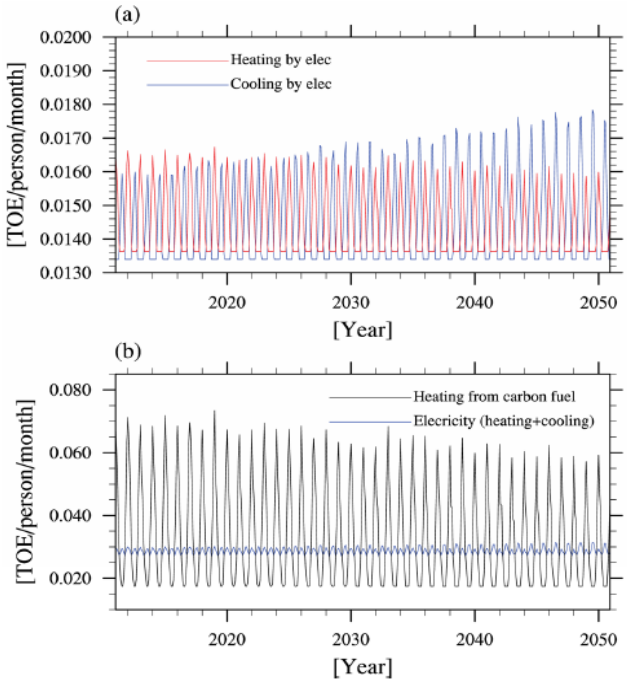


그림 7.12 미래 기후변화 시나리오에 따른 에너지수요 변화(정지훈 등, 2014).

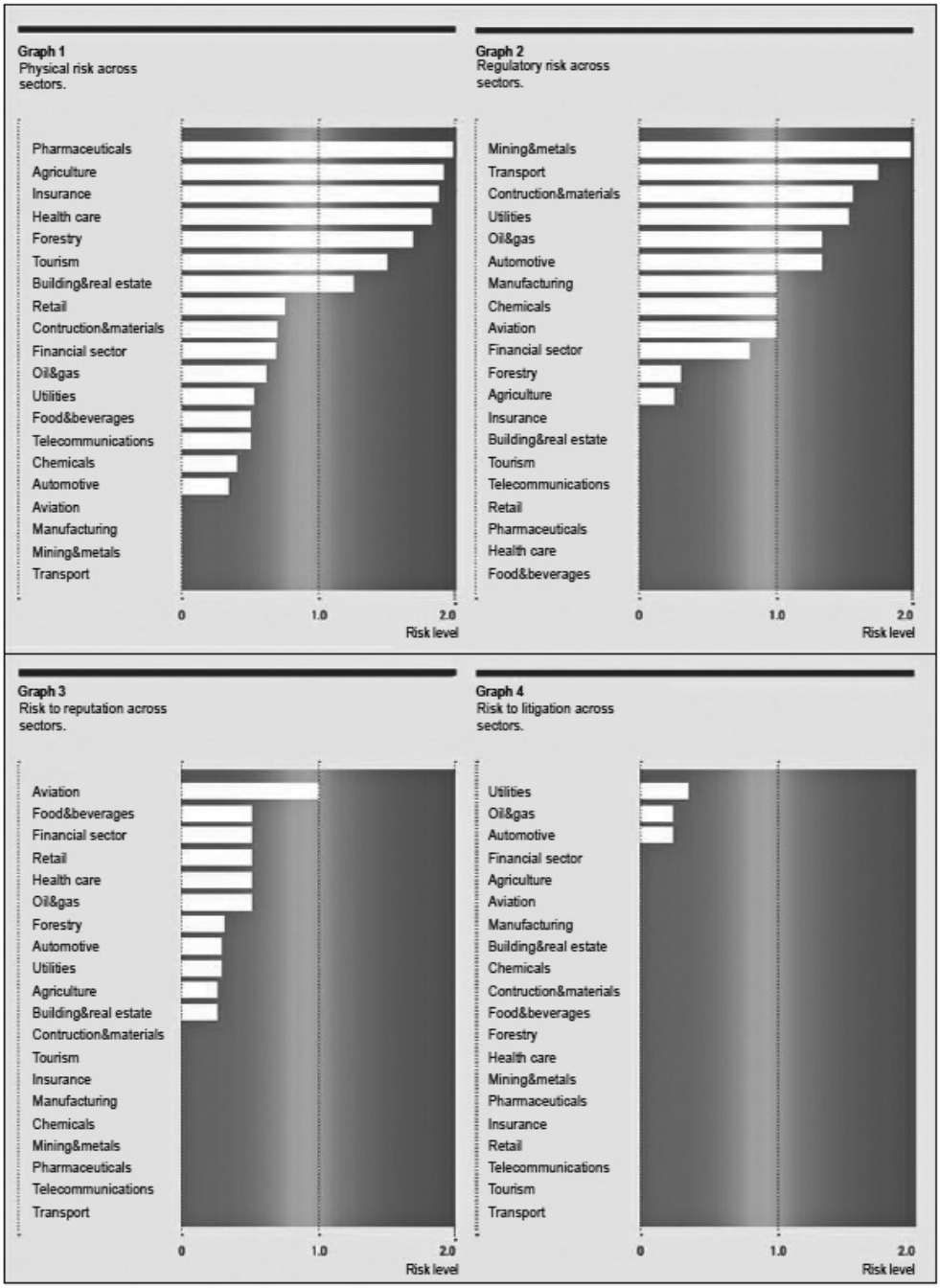


그림 7.13 위험유형별-산업별 기후변화 위험요인(KPMG, 2008).

지역 에너지소비에 영향을 미치는 도시특성 및 기후특성을 파악한 연구에 따르면, 우리나라의 경우 냉방도일보다 난방도일의 영향이 더 큰 것으로 판단된다. 따라서 단기적으로 우리나라는 에너지소비량을 감축시키기 위한 겨울철에 대한 대책마련이 보다 시급한 것으로 판단된다. 하지만 IPCC(2014)에 따르면, 점차 냉방도일은 증가하고, 난방도일은 감소할 것으로 전망하기 때문에 향후에는 여름철 냉방에 대한 대책 마련이 더 중요해 질 것으로 판단되고, 이러한 변화에 대해 예측할 수 있는 연구들이 필요하며, 도시특성과 기후특성이 에너지사용량에 지역별로 서로 다른 영향을 미친다는 사실을 파악하였다. 분석결과를 통해 알 수 있는 사실은 에너지소비감축 정책을 시행할 경우 전국적으로 일률적인 정책이 아닌 지역특성에 맞는 정책을 시행하는 것이 바람직하다는 것이다(견고한 동의).

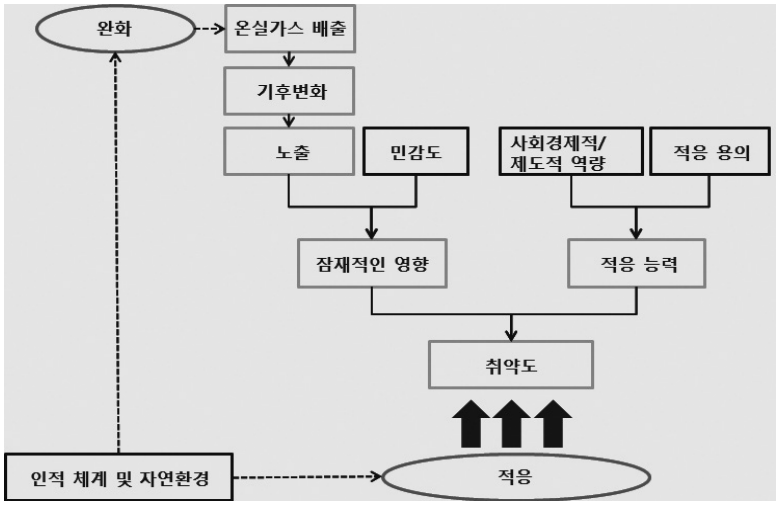


그림 7.14 기후노출, 민감도, 적응능력에 의한 취약성 개면(최광림, 2016).

지난 20년(1991~2010년) 동안의 우리나라 월별 가정 및 상업 부분 에너지수요와 남한 평균 기온간의 관계로부터 HDD 및 CDD 계산의 기준이 되는 최적 기준기온을 추정하였으며, 이를 통해 HDD 및 CDD를 새로 계산하였다. HDD 및 CDD와 에너지 소비량 간의 회귀분석을 통해 기온 변동에 따른 에너지 소비량 변동을 정량적으로 추정하는 회귀모델을 구성하였다. 이 회귀모델을CMIP5 기후모형들이 생산한 한반도 미래 기온 변화 시나리오에 적용하여, 미래 기후 변화에 따른및 상업 부문의 에너지 사용량의 변화를 추정하였다. 전반적인 온난화에 따라, 겨울철 난방을 위한 탄소연료 소비의 감소가 나타나고, 이에 따라 연간 1인당 총 에너지 소비는 지속적으로 감소하는 것으로 예상되었다(제한적 동의).

특히 전력 소비의 경우 여름철 냉방 전력 소비 증가 추세와 겨울철 난방 전력 소비 감소 추세의 계절적 대비가 뚜렷하여, 2020년대 중반 무렵부터는 여름철 냉방에 의한 전력소비가 겨울철 난방에 의한 소비를 넘어설 것으로 추정되었다.

한편, 1995~2014년 기간 동안 서울을 대상으로 기온변화에 따른 전력소비의 장·단기 탄력성을 시계열 ARDL 모형을 사용하여 추정한 연구에 따르면, 서울의 경우 1990년대 중반 이후 전력소비는 지속적으로 증가하는 추세였지만 2011년 9월 대정전 사태 이후 전력소비 절감에 대한 정부의 강력한 규제 조치 및 시민들의 인식 전환으로 전력수요가 약간 감소하거나 횡보하고 있다. 또한 전력수요는 강한 계절성을 띠고 있으며, 기온변화에 따른 전력소비의 탄력성을 분석한 결과, CDD와 HDD가 통계적으로 매우 유의하여 전력소비의 두 개의 피크가 존재하고 있다. 하지만 장·단기 탄력성의 크기를 비교하여 보면 CDD의 회귀계수가 HDD의 그것보다 2배 정도 커서 하절기 피크에서 전력수요의 증가가 더 크다. 따라서 기후 온난화에 따른 전력수요의 증가가 하절기에 나타난다는 논의와 맥을 같이하고 하지만 이에 대해서는 추가적인 논의가 필요하다(중간적 동의).

기후변화는 장기적으로 기온변수에 영향을 미치며 전력수요는 이와 밀접한 관련성을 가진다. 이에 따라 기후변화는 전력수요의 패턴에 영향을 미치게 된다. 특히 전기는 냉·난방을 충족하는데 흔히 사용되고, 이러한 냉·난방은 화석원료의 과도한 사용에 따른 지구의 온난화에 영향을 받는다. 이러한 관계를 고려하면 기후변화에 따른 전력소비의 민감도 또는 탄력성을 추정할 수 있다. 하지만 기후변화가 특히 하절기 전력수요의 증가를 견인하는 것만은 아니다.

경제성장 및 소득증가에 따른 각종 냉방용 가전기기의 대대적인 보급 확대가 이러한 하절기 전력수요의 증가에 기여하고 있다. 이러한 점에서 전력수요의 변화는 인문과 자연환경의 결합으로서 이해되어야 할 필요가 있다.

7.3.2.3 송/배전

전기시설물은 옥외에 시설된 경우가 많아 자연재해에 큰 영향을 받아 전기설비 관련 사고가 증가하는 추세이다. 김완석(2018)은 국내의 기후변화에 따른 전기화재, 감전사고 및 전기설비사고의 통계 현황을 분석하여 기후변화와 연계한 위험도를 제시하였으며, 또한, 다양한 지역 별(광역시) 기후조건(온도, 습도)과 연계한 전기재해 데이터 분석을 통하여 각 지역의 월별 전기화재 위험도 분석 모델을 제시하고, 저압, 고압 설비의 자연재해에 대한 사고 위험도를 분석하였다. 이러한 지역별, 설비별 위험도 분석 모델을 통하여 기초적인 전기재해 예측 모델을 제시하였다.

7.4 취약성의 주요 원인

기후변화는 산업성장을 저해하는 위험요인으로 작용할 수 있으며, 다양한 위험유형 중에서도 국제협약 및 정책에 의한 '규제적 위험'과 기업의 행위에 대한 소비자의 평가가 기업의 신뢰도와 브랜드 가치에 영향을 주는 '평판에 의한 위험'이 상대적으로 큰 것으로 나타났다. 그 외에도 기후변화로 인한 '물리적 위험' 및 '소송에 따른 위험'이 존재하는 것으로 나타났다.

기후변화는 다양한 기업활동과 관련이 있는데, 특히 기업의 물리적·지리적 공간, 생산성, 연구개발투자, 경영전략 등과 관련이 깊은데 기후변화의 영향이 기업의 입지에 따라 다르게 발현되며, 반대로 기후변화로 인한 기업이전 등의 사례도 있는 것으로 나타났다.

표 7.2 산업부문 기후변화 취약성평가 항목(최광림,2016).

평가부문	내용
기후노출	산업단지 및 기업에 영향을 줄 수 있는 기후현상 및 그 정도 혹서, 혹한, 집중호우, 가뭄, 폭설, 해수면 상승
민감도	기후노출로부터 해로운 영향이든 유익한 영향이든 기후교란에 의해 산업단지 및 기업이 받는 영향의 정도를 의미
적응능력	기후변화 영향에 대응한 산업단지의 복원 조정능력

표 7.3 산업단지별 취약한 기후노출(최광림,2016).

업종	산업단지	취약한 기후노출	
		현재	미래
전기/전자	수원	혹한	폭설
	구미	혹한	혹서
정유	장의수	혹한	가뭄
	시설물관리	폭설	가뭄
제철	장의수	태풍	가뭄
	장의수	태풍	가뭄
자동차	장의수	폭우	폭우
	수요변화	태풍	혹서

기후변화로 인한 온난화 현상은 근로자의 노동생산성을 저해하여 기업의 이윤뿐 아니라 해당 지역의 기반산업에도 영향을 줄 수 있고, 기후변화 대응정책은 기업에 연구개발 투자 유인을 줄 수 있으며, 이로 인해 유도된 기술변화는 보다 낮은 비용으로 환경목표를 달성할 수 있게 한다.

기후변화는 기업의 다양한 경영전략에도 영향을 미치는데, 기업은 기후변화 현상 및 이에 대한 대응을 전략적으로 활용하여 기업의 현재가치 및 미래가치를 높일 수 있게 한다.

세계적인 신용평가 회사가 기후변화 관련 위험을 금융기관 신용평가에 반영할 것을 예고하는 등 다양한 산업부문에서 기후변화가 중요한 이슈로 부각되고 있는데 기업이 기후변화에 대응하는데 있어 겪는 가장 큰 어려움은 기후변화에 관한 불확실성이고, 이 때문에 기후변화에 대한 위험을 인식하고도 아무런 조치를 취하지 않는 경우가 발생한다.

산업별로는 높은 위험수준에 처해 있으면서 상대적으로 대비 정도가 낮은 산업을 취약(Danger Zone)으로 정의하였으며, 금융, 보건, 항공, 관광, 정유, 가스, 수송장비 산업 등은 기후변화 취약산업에 해당되는 것으로 나타났다.

산업별로 최대 위험 유형이 상이하게 나타났지만, 가장 많은 기업이 규제적 위험을 최대 위험요인으로 생각하고 있으며, 물리적 위험을 가장 심각하게 받아들이는 산업으로는 농림수산업, 보험, 보건, 관광산업 등이었다.

7.5 적응 옵션

산업과 에너지 부문의 적응옵션은 2016년 20개의 중앙부처가 참여하여 수립한 제2차 국가 기후변화 적응대책 이후로 다양한 연구가 이루어지고 있다.

중앙정부 차원에서는 기후변화 영향과 개연성이 있는 기관 중 공공시설물을 관리·보유하며 기후변화 발생 시 영향이 클 것으로 예측되는 공공기관 및 지방공기업에 기후변화적응 종합대책 수립을 의무화하였다. 민간기업의 경우 고효율 설비의 도입이나 에너지 절약시설 투자지원 등을 통해 단기적인 계획들이 수립되고 있다.

7.5.1 산업 부문의 기후변화 적응

산업부문에서의 기후변화 적응은 크게 취약성평가, 리스크 평가를 통한 적응대책 마련으로 이루어지고 있으며, 취약성은 기후변화라는 외부적 스트레스가 인간의 노력 여하에 따라 크고 작아짐을 보여준다. 이러한 취약성을 감소시키기 위해서는 시스템에 가해지는 외부 스트레스를 완화 또는 적응 활동을 통해서 감소시켜야하고 시스템 내적으로 대응능력을 강화시켜야 한다(중간적 동의).

이러한 개념에 따라 산업부문 기후변화 취약성 평가는 기업이 기후변화 영향으로부터 얼마나 민감하며 이에 얼마나 잘 적응할 수 있는지를 평가하고 취약부분에 대한 대책 수립을 할 수 있도록 한다.

현재 산업통상자원부와 한국에너지공단은 국내 산업부문의 기후변화 적응대책 수립을 지원하기 위하여 '산업부문 기후변화 취약성 평가 방법론'을 개발하여 산업단지를 위주로 확산시켜 나가고 있으며, 환경부, 한국환경정책·평가연구원 국가기후변화적응센터는 'CRAS프로그램'을 개발 중소기업을 대상으로 기후변화적응 대책 수립 지원사업을 2016년부터 본격 추진하고 있다.

7.5.1.1 산업단지

산업단지의 기후변화 적응과 관련된 연구는 산업통상자원부를 중심으로 이루어지고 있다. 산업단지의 기후변화 취약성 평가를 실시하기 위해 기후노출 부문의 취약성 지표는 기상청에서 제공하는 RCP 시나리오 4개(2.6, 4.5, 6.0, 8.5)를 이용하였다. 그 외에 민감도/적응능력 부문은 산업단지관리공단에서 공식적으로 제공하는 자료를 활용하여 평가하였다.

한국에너지공단에서 개발한 민간기업 기후변화 취약성 평가 프로그램을 활용하여 국가 산업단지 중 다양한 입지(남해, 서해, 동해안 및 내륙 등)를 포함하는 42개의 산업단지를 선정하여 연도별로 취약성 평가를 수행하였다. 기준시점은 현재, 2020년, 2050년, 2100년까지로 홍수, 혹서, 혹한, 폭설, 강풍, 가뭄, 해수면 상승에 대해 42개

산업단지의 기후변화 취약성을 도출하였다.

한편 한국환경정책·평가연구원에서는 산업단지 환경영향평가 시에 고려가 필요한 기후변화 영향을 파악하였는데 산업단지 환경평가 시 고려할 필요가 있는 기후변화 영향과 피해를 살펴보기 위하여(스크리닝) 우리나라에서 기후변화로 인하여 발생할 수 있는 피해와 산업단지 환경평가와의 관련성을 체크리스트를 작성하여 검토하였다. 산업단지가 영향을 받는 기후변화 리스크는 입지에 따라 다른데 연안지역에 위치한 산업단지가 155개 리스크로 가장 다양한 기후변화 리스크에 노출될 수 있는 것으로 나타났으며, 내륙과 산지에 위치한 산업단지는 각각 137개 기후변화 리스크와 관련되었다. 평가 단계별로는 전략환경평가 단계에서 고려될 수 있는 기후변화 리스크(94개, 51%)보다 환경영향평가 단계와 관련된 리스크(121개, 66%)가 많은 것으로 나타났다.

한편, 산업단지 계획 수립시 산업단지 계획 수립시 현행 법제하에서 기후변화 및 해수면 상승 영향을 관련 법제도에 포함하는 방안을 검토하여 관련법 개정(안)을 제시하고, 환경영향평가 시 관련법 개정(안)에 따른 기후변화와 관련 세부 평가항목을 제시하였다.

- 기후변화에 따른 집중호우 또는 가뭄시 재해 방지대책수립
  - 집중호우 시 침수방지 및 피해를 최소화하기 위한 배수시설 및 영구저류지 조성
  - 투수성 재료 도입
  - 산업단지 내 또는 인근하천 범람방지를 위한하천 정비계획 수립
  - 가뭄 시 용수공급 확보대책수 립
- 해수면 상승 및 폭풍해일고를 고려한 산업단지계획수립
  - 해양을 포함하거나 해양을 접한 지역에 산업단지를 계획하는 경우에 해당
  - 해수면 상승 및 폭풍해일고, 가능최대강수량 등 해수위 상승요인을 조합하여 가능최고해수위를 결정하고 이를 고려한 산업단지 부지고확보 및 해안구조물 설계(필요시 지진해일고포함)

7.5.1.2 중소기업

중소기업의 기후변화 적응 관련한 연구는 수출기반 육성을 목적으로 기존의 7개 분야 45개 적응산업을 대상으로 시장 경쟁력이 있으면서 환경부 주도로 추진이 가능한 방법을 고려하여 대기업 주도형과 중소기업 주도형으로 기술을 구분하였다.

국내 적응산업 경쟁력을 우리나라 기술수준과 세계 시장 성장률에 근거하여 다음과 같이 분류 하였는데 1구역은 성장세도 높고, 우리나라 기술수준도 높아 향후 중점적으로 추진해야할 분야로서 민간주도형 추진을 2구역은 우리나라 기술 수준은 낮지만 매출규모가 높아 향후 기술력 향상을 통해 시장진입이 가능한 분야, 3구역은 성장세가 낮으나 국내 기술 수준이 높아 우리나라가 경쟁력이 높은 분야,

취약성이 낮은 산업단지 ← → **취약성이 높은 산업단지**

1등급 산업단지	2등급 산업단지	3등급 산업단지	4등급 산업단지	5등급 산업단지
21, 석문국가 04, 구미국가 36, 파주출판문화정보 05, 구미하이테크밸리 10, 대구사이언스파크 31, 장항국가 19, 빛그린 29, 월성전원	15, 반월특수 시화 11, 대덕연구개발특구 42, 한국수출 주안지구 28, 울산미포국가 27, 온산국가 18, 북평국가 24, 여수국가 37, 파주탄현영세중기 39, 포항블루밸리 41, 한국수출(서울디지털) 35, 창원국가	38, 포항국가 08, 남동국가 40, 한국수출(부평지구) 25, 오송생명과학 16, 반월특수(안산) 09, 달성2차 일반	07, 군산2 국가 26, 옥포국가 13, 대죽자원비축 06, 군산국가 12, 대불국가 03, 광주첨단과학 01, 고정국가 22, 아산국가 30, 익산1국가	20, 삼일자원비축 33, 지세포자원비축 34, 진해국가 23, 안정국가 14, 명지녹산 32, 죽도국가 17, 보은 02, 광양

그림 7.15 홍수 부문 산업단지별 기후변화 취약성(최광림,2016).

표 7.4 구역별 중소기업주도형 적응산업(김승도 외, 2015).

구역	종소기업주도형
1	의료관리운영, 기상정보, 관리운영기술, 관측 및 조기경보장치, 지속가능한 관리 운영기술
2	생태모니터링, 보험금융업, 기후적응계획, 컨설팅
3	의료서비스, 의료제품, 질병예방, 방역 및 구제, 생산증진, 적응형 식량자원, 산림재해 피해 저감, 유지보수, 기후리스크 분석, 예측평가 기술
4	보험 금융업, 기후적응계획, 컨설팅, 교육 및 홍보

표 7.5 중소기업 중점 육성대상 산업 분석 결과(김승도 등, 2015).

유망산업분류	우선순위	세계적 유망 적응산업
		L3
중소기업주도형	1	기후적응계획 (1. 연안지역)
	2	지속가능한 관리운영기술 (1. 연안지역, 2. 농축산, 3. 수자원)
	3	관리운영기술 (6. 기반시설)
	4	컨설팅 및 교육(2. 농축산), 컨설팅(3. 수자원), 교육 및 홍보(5. 건강)
	5	컨설팅(6. 기반시설)
	6	관측 및 조기 경보 장비(1. 연안 지역, 2. 농축산, 3. 수자원)
	7	적응형 식량자원(2. 농축산)
	8	기상정보(7. 관광)
	9	의료관리운영(5. 건강)
	10	생태모니터링(4. 육상생태계)

4구역은 성장세가 낮고 우리나라 기술수준도 낮아 경쟁력이 없는 분야이다.

이를 토대로 최종적인 국내 구역별 유망 적응산업을 분류하였다. 총 4개의 구역에 대한 연구결과는 위의 표와 같다.

구축된 국내 적응산업 통계자료를 토대로 우수 환경산업체, 분야별 대표환경기업, 환경 분야 적정기술 진출기업 중 기후변화 적응 산업 관련 후보기업군을 선정하여 그 결과, 수자원 분야 37개, 기상 분야 10개, 재난·재해 분야 3개, 산림생태 6개의 유망기업을 도출하였다. 기후변화 적응기술 보유 국내 중소기업의 해외진출 가능성을 분석하고 이를 지원하기 위한 과업도 수행하였다. 구체적으로 기업의 현황과 발전 가능성 등을 바탕으로 전문가 의견수렴을 거쳐 중소기업 4곳을 선정하였으며, 해당 기업들에 대한 개별적인 컨설팅을 수행하였다(중간적 동의)

7.5.1.3 관광산업

기후변화 취약성 연구는 장기적이고, 다양한 학문 분야 간에 논의를 통해 수행되어야 할 과제이다. 관광분야에서도 마찬가지로 현재까지는 개별 관광지(주로 해양형 관광지), 개별 시설(주로 스키장) 위주로 기후변화에 따른 관광객 감소, 지역경제 악화, 사업체의 수입 감소 현상을 개별적으로 보고하거나 산발적으로 대처하는 수준이다. 관광부문의 취약성 분석은 관광지, 관광산업이 위치하고 있는 지역의 미래 기후 예측 데이터를 토대로 관광지, 관광산업의 기후변화 노출수준, 피해수준(민감도), 적응능력을 토대로 산출을 해야 한다. 하지만 관광 및 기후와 관련한 데이터 부족, 기후변화에 따른 관광객의 행동 변화 예측이라는 부분이 포함되어 있어 예측에 어려움이 있다(견고한 동의).

표 7.6 기후변화에 따른 관광산업 취약성 평가 결과(김상태 등, 2017).

	Rising average temperature	Rising sea levels	More frequent typhoons and heavy rainfalls	More frequent flooding and heavy downpours	Increased drought	Increased extreme cold events	Increased extreme heat events
Lodging industry	3.49	3.11	3.64	3.72	3.68	3.55	3.34
F&B industry	3.43	2.99	3.45	3.51	3.67	3.53	3.35
Ski resorts	4.42	3.13	3.86	3.96	3.88	3.95	3.44
Golf resorts	3.95	3.23	4.00	4.20	3.92	4.08	3.74
Theme parks	3.67	3.13	3.81	3.86	3.70	3.83	3.56
Convention facilities	3.22	2.73	3.29	3.28	3.24	3.22	2.95

기존의 Australian Academy of Technology Sciences and Engineering(2008)과 명수정 외(2009)의 연구를 토대로 기후변화 취약성에 대해 전문가 설문조사를 토대로 분석 과정을 진행한 연구에서는 주요 항목을 관광지 및 관광산업의 ①기후변화 노출정도(기후변화 발생가능성), ②기후변화 민감도(기후변화로 인한 피해수준), ③기후변화 적응능력(기후변화를 극복할 수 있는 능력)의 하위범주로 나누어 조사한 내용을 분석하였다.

분석결과, 기후에 민감하고 방문객이 주로 야외에서 활동하는 스키리조트, 골프리조트가 취약한 것으로 볼 수 있다. 이는 기후변화에 대응한 정책수립에 스키리조트, 골프리조트가 우선적으로 고려되어야 함을 의미한다. 또한 기후변화에 대비한 관광지 조성 계획을 수립할 필요가 있고, 스키장, 골프장의 경우 복합시설화를 통해 관광객이 방문하여 즐길 수 있는 시설과 매력물을 확대할 필요가 있다. 더불어 기후변화 완화를 위해 에너지 소비를 조절하고 줄일 필요가 있다는 점을 제시하였다(김상태 외, 2017).

기후변화가 관광에 미치는 영향력에 대한 적응전략은 실제 또는 기대되는 기후 자극이나 그것의 영향에 반응하는 자연적인 조정 또는 반응하는 인간시스템으로 정의할 수 있는데, 이 적응전략으로 기후변화에 효과적으로 적응할 수 있도록 사회 전반의 체질을 개선할 수 있으며, 기후변화의 영향분석 및 평가능력, 재해관련 제도 정비가 진행될 수도 있다(민승규·강희찬, 2007; Antonio & Oliveira, 2009).

이 같은 기후변화에 대한 관광산업의 적응전략은 다음과 같은 몇 가지 하위범주로 나누어서 논의가능하다. 먼저 기후변화로 발생하는 다양한 위험성에 적응하기 위해서 대처해야 할 관광산업 분야의 적응전략 중 선행되어야 할 것은 공간구성 및 배치와 연관된 관광시설 조성 부문의 대응이다.

이와 관련한 예로 폭우, 태풍과 같은 기후변화로 침수가 발생할 수 있는 주차장, 1층 지상 관광시설, 기계실 등의 안전을 위해 차단막과 같은 시설 설치와 관광지 안전 가이드 프로그램 운영이 필요하다(김남조, 2009)(중간적 동의).

영국을 비롯한 세계 곳곳의 지자체에서는 이미 기후변화로 인한 관광지 인프라의 안정성을 위해 다양한 시설적, 프로그램 기반 가이드라인을 마련해두고 있으며, 기후변화로 인해 발생하는 취약성 분석과 적응전략을 강구하기 위해 노력하고 있다(국립환경과학원, 2008). 특히 스키장처럼 기후변화에 민감한 관광시설의 경우 다양한 관광활동을 할 수 있는 복합리조트로 시설을 변경하거나, 기후변화에 적응하여 관광시설의 용도변경, 추가시설 조성 등과 같은 적응전략을 실천하고 있다(김남조, 2009; 조리나, 2009).

7.5.1.4 패션산업

제조업 중에서는 식음료, 가전, 패션이 기후의 영향을 많이 받는 업종이다. 특히 패션산업은 기후와밀접한 관계를 가지고 있다. 인간이 환경에 적응하여 신체를 보호하기 위해

표 7.7 패션디자인에서 기후변화 현상에 따른 적응을 위한 주요 고려사항(장남경, 2015).

기후변화 적응	보온, 통풍, 방투습, 방풍, 위기상황 대처, 체온조절, 자외선차단 등
기후변화 현상	이상고온, 이상저온, 한파, 폭염, 폭설, 급속한 기후변화 등

옷을 입는다는 옷의 가장 근본적인 기능 때문이다. 패션 상품은 날씨와 기후에 따라 소비자의 구매욕구와 감정이 달라지므로 어떠한 제품을 개발하는 것 뿐 아니라 언제 출시할 것인가를 결정하는 것도 중요하다. 기후는 의류 및 액세서리 매출에 있어 주요 변수이므로 몇몇 패션기업들은 기후의 변화를 분석하여 상품기획에 적극적으로 반영하는 TFT를 운영하기 시작하였다.

최근 5년 (2011 S/S~2015 F/W)동안 뉴욕, 밀라노, 파리, 런던 컬렉션에 발표된 기성복을 고찰하여 기후변화에 적응하고 있다고 판단되는 디자인을 자료로 수집하였으며, 패션디자인을 통해 기후변화에 적응할 수 있는 유형은 상위개념으로 기능성, 레이어드, 시즌리스, 크로스 오버로 분류하였다. 기능성과 시즌리스는 각각 3개의 하위개념으로 나뉘는데, 기능성의 하위개념은 기능성 디자인, 기능성 소재, 기능성 액세서리로, 시즌리스의 하위개념은 시즌리스 디자인, 시즌리스 소재, 시즌리스 컬러이다. 각 유형별로 디자인 특징을 발견할 수 있었는데, 기능성은 스포츠나 아웃도어의 기능성 디자인이나 소재를 일반 의복에까지 확대하여 적용하고, 레이어드는 품목과 소재를 자유롭게 활용하여 다양한 기후에 맞춰 활용이 가능하게 하는 것이다. 시즌리스는 의복이 가지고 있는 주요한 특징 중 하나인 시즌성을 잠시 접어두고 시즌을 초월하여 입을 수 있도록 하고, 크로스 오버는 품목과 스타일을 믹스하여 다양한 상황에 대처할 수 있도록 하는 것이다. 이러한 디자인 특징들은 혹한과 폭우와 같은 특정한 기후에 적응력을 높이는 동시에 다양한 환경적 상황에 대처할 수 있는 유연한 디자인으로 요약될 수 있다(제한적 동의).

7.5.1.5 교통

교통부문에서는 기후변화 적응과 관련하여 폭설과 관련된 취약성 평가가 주로 이루어졌다.

광역 및 기초 지자체의 사전예방적 기후변화 영향평가를 지원하기 위한 웹 기반 취약성 평가 지원도구(vulnerability assessment tool to build climate change adaptation plan; VESTAP)의 신규항목으로 폭설에 의한 기후변화 취약성 평가를 제시하기 위해 폭설에 의한 도로의 교통흐름 방해, 교통사고 발생에 영향을 미치는 각종 취약요인을 기후변화

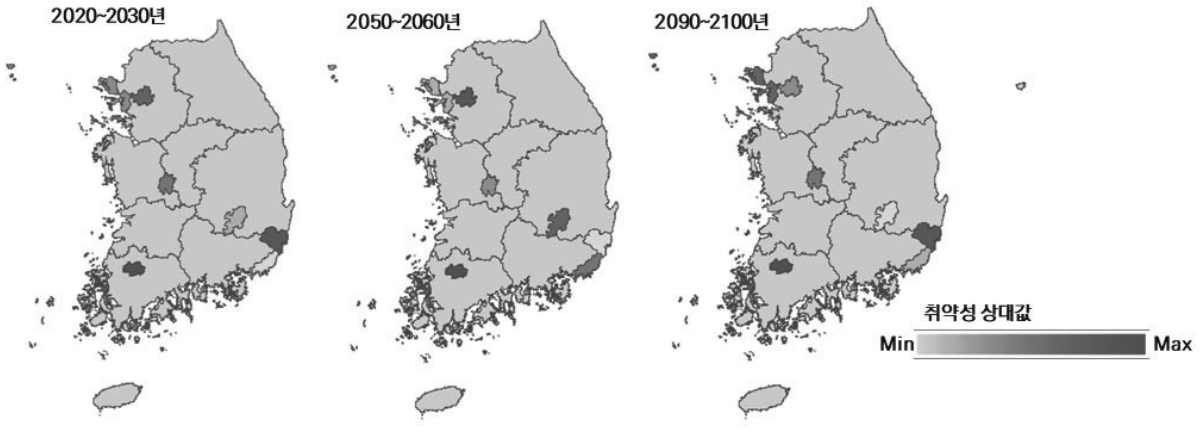


그림 7.16 7개 광역시별 상대적 취약성 분포(김윤정, 박보영, 정휘철, 2018).

취약성평가 개념에 입각하여 제시하였다.

7개 광역시에 대해 미래 2020년~2030년, 2050년~2060년, 2090년~2100년의 도시별 상대적 취약성을 규명한 연구에 따르면, 과거 2005년~2017년간 신적설량의 규모에 따른 교통사고 발생 영향을 분석하였을 때 신적설량 5 cm 및 10 cm의 기준이 교통사고 발생에 뚜렷한 양의 상관관계를 보이는 것으로 관측되었으며 폭설로 인해 실제 도로피해 가 발생하였음을 입증하였다.

또한, 사회경제적 구조와 물리적 요인을 고려하여 기후변화 피해에 대한 민감성과 적응능력을 높이는 요인을 지표로 제안하고 AHP분석에 의한 지표별 가중치를 규명하였다.

남양주시는 인구감소에 따른 노년층 증가가 나타나고 기초수급자가 산재한 도농복합 지자체로 현재도 기후변화 적응을 위한 다양한 정책을 성실히 수행하고 있으나 기존 경관계획에는 이를 포함하지 못한 부분을 반영하기 위해 디자인가이드라인에 반영되지 않은 기후변화적응에 대한 문제점을 분석하여 버스정류장 디자인 방향을 제시하였다.

남양주시가 기존에 진행 중인 살수차 운영뿐 아니라 버스정류장 앞 포장재 개선, 주변 보도블록의 교체, 태양광을 이용한 버스정류장 내 송풍기 설치로 내부 온도를 낮추는 등의 개선방안을 제시하였으며, 폭염과 한파를 대비한 취약지역 정류장에 피난 텐트를 설치하여 기후변화에 빠르게 대처해 줄 것을 제안하였다(제한적 동의)

7.5.2 기후변화와 에너지 적응 방안

기후변화가 에너지, 특히 전력 부문에 미칠 피해에 관한 연구는 그간 다양하게 진행되어 왔다. 하지만 데이터에 기반을 둔 연구(evidence-based approach)를 통해 의미 있는 결과를 도출한 연구는 많지 않은 편이다. 기존의 연구들은 잠재적 위험을 분야별로 분류하고, 전문가나 일반인의 설문을 통해서 이를 계량화하는 방법을 택하고 있다.

기후예측 모형을 통해서 예상되는 기후변화의 다른 현상 중 하나는 강수량이 줄어든다는 점이다. 원자력, 석탄 및 가스 발전, 수력 및 일부 태양력 발전 과정에서는 냉각 과정이 필수이다. 그러나 줄어드는 강수량으로 인한 냉각수 부족으로 전력 생산에 차질이 생길까 우려된다. 또한 높은 기온으로 인하여 냉각수의 온도가 높아져 전력 생산의 효율성이 떨어질 것으로 예상된다(중간적 동의).

기후변화로 인한 피해 중에서 장기적이면서 전 지구적인 가장 대표적인 경우는 해수면 상승에 따른 피해라고 할 수 있다.

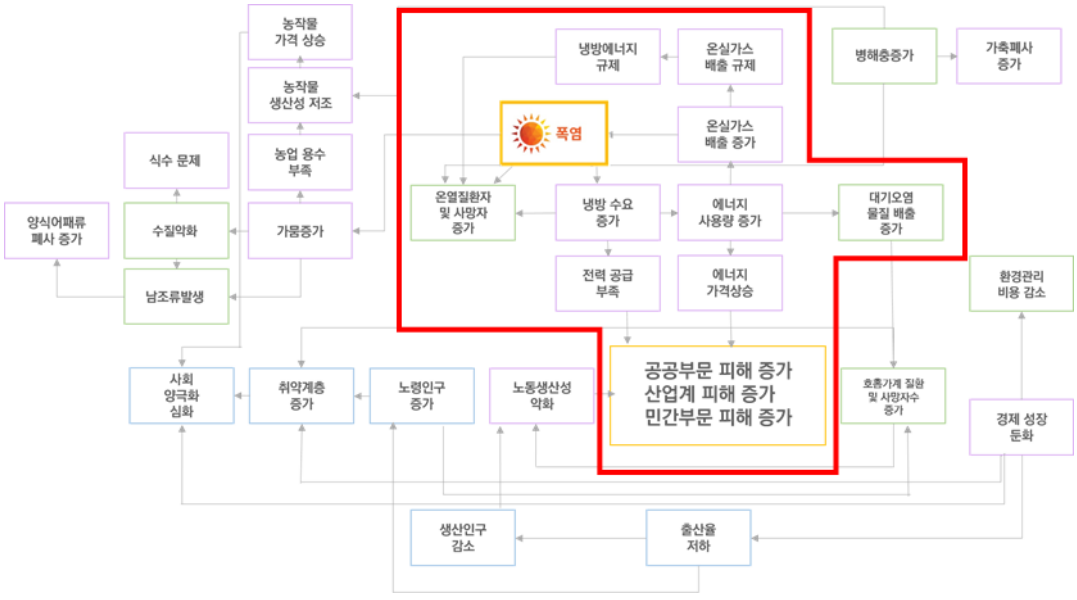


그림 7.17 에너지 부문의 기후변화 영향 및 리스크(채여라 외, 2018).

많은 에너지 생산 및 수송 인프라가 냉각수 확보의 용이성, 에너지 원료의 수입 등의 편의성을 이유로 저지대의 해변가에 위치하고 있다. 따라서 해수면 상승이나 태풍과 같은 기후현상에 취약하다. 후쿠시마 원전 사고가 대표적인 예라고 할 수 있다.

기후변화로 인한 수요측면 리스크로는 폭염 등 높은 기온이 지속됨에 따른 전력수요의 증가를 들 수 있는데, 반대로 겨울철 기온의 상승으로 인한 난방수요의 감소는 전력수요 감소로 이어진다. 기존의 연구에 의하면 폭염 등으로 인한 전력수요 증가가 난방수요의 감소 보다 클 것으로 예측되고 있다. A2 시나리오 하에서 미국의 에너지 수요 변화를 분석한결과, 2041~2070년에는 지역에 따라 냉방수요가 최대 89% 상승하는 반면, 난방수요는 최대 20% 감소하는 것으로 나타났다.

최대전력의 고온 및 폭염에 대한 높은 기온반응은 첨두부하만을 담당하기 위한 발전소추가 건설을 의미한다. 하지만 첨두부하만을 담당하기 위한 발전소는 하계 피크기간에만 필요하므로 단위발전량당 높은 유지·보수비용이 사회에 전가되게 된다. 따라서 기후변화에 따른 최대전력 증가에 따른 경제적 리스크를 최소화할 수 있는 방안으로 전력저장기술(electricity storage technologies)의 활용을 들 수 있다. 물론 현재의 전력저장기술은 기술적 측면과 더불어 높은 가격이라는 한계를 지닌다. 하지만 최근 문헌에 따르면 전력저장기술은 많은 기술개발투자와 더불어 빠른 속도로 가격 경쟁력을 확보해 가고 있다(중간적 동의).

다른 방안으로는 전기자동차의 배터리를 이용하는 방법이 있다. 전기자동차는 빠른 속도로 내연 자동차를 대체해 가고 있고 배터리 용량도 빠르게 늘어나고 있다. 따라서 낮에 이용되지 않는 전기자동차의 배터리에 충전되어 있는 전력을 피크시간대에 재구입하는 방법(V2G: Vehicle-to-Grid)을 고려해 볼 수 있다. V2G는 전기자동차의 경제성 확보에도 도움이 될 수 있어 현재 관련된 다양한 연구들이 진행 중이다. 신재생 에너지를 이용한 발전의 확대를 통한 경제적 리스크 완화방법도 있다. 특히 태양광 발전은 비록 피크수요와 시간적으로 완전히 일치하지는 않지만, 대체로 기온이 높은 시간대에 발전이 활발히 일어나기 때문에짧은 시간의 피크부하 담당을 맡아 대규모 발전소 건설을 회피하는 수단으로 활용할 수 있다(중간적 동의).

7.6 결론

기후변화는 산업 및 에너지 각 분야에 미치는 영향이 그 특성에 따라 제각각이다.

기후변화로 인해 발생하는 영향은 산업 부문에서는 이득을 가져다 줄 수도 있으며, 피해를 줄수도 있다. 그렇기 때문에 각 산업별로 체계화된 리스크 평가 및 적응능력 측정이 필요하다.

우리나라의 경우 현재 기 구축된 기존의 연구결과를 바탕으로 리스크평가의 고도화 및 적응계획 수립이 진행되고 있는 과정에 있다고 생각된다. 기후변화와 연계된 기상기술은 ICT 등 4차산업 혁명과 맞물려 다양한 형태로 융복합되어 산업 및 에너지 분야에 적용되고 있는 추세이다.

2016년 20개의 중앙부처가 참여하여 제2차 국가 기후변화 적응대책(2016~2020년)을 수립하고, 4대 정책부문, 1개 이행 기반 체계를 마련하였다. 기후변화 영향과 개연성이 있는 기관 중 공공시설물을 관리·보유하며 기후변화 발생 시 영향이 클 것으로 예측되는 공공기관 25개사와 지방공기업 52개사에 대해 2017년까지 기후변화적응 종합대책 수립을 의무화하고 환경부에 보고하도록 하였다. 그러나 민간 기업들은 아직까지 고효율 설비의 도입이나 에너지절약시설 투자지원 등을 통해 단기적으로 효과가 있는 온실가스 감축의 틀에서 벗어나지 못하고 있다.

이제부터라도 정부는 기후변화 적응대책 수립이 민간 산업부문까지 확산될 수 있도록 법·제도적 장치를 마련하고 이를 이행할 수 있도록 적절한 지원책을 강구하여야 한다.

이와 더불어 아직까지 확산되지 못한 산업 및 에너지 분야에 대해서는 추가적인 연구가 지속되어야 할 것으로 보인다. 산업 및 에너지 분야는 기후변화에 따른 피해가 막대함에도 불구하고 일부 산업단지, 관광 등에 국한된 연구가 활발하게 이루어질 뿐이다.

제조업과 관련하여 각 세부업종별 기후변화 영향에 대한 체계적인 연구가 활발하게 이루어져야 하며 이에 대한 적응대책 등에 대한 연구도 추가적으로 진행되어야 할 것이다.

7.7 참고문헌

강희정, 2014: 도시가스산업의 기후변화 취약요인 및 영향분석, *대한설비관리학회지*, 19(3), 15-21.

관계부처 합동, 2017: 2016 이상기후 보고서.

관계부처 합동, 2018: 2017 이상기후 보고서.

국토연구원, 2016: 국토정책 Brief. 2016.9.19. 도시의 미기후 관리방향.

권수안, 2018: 기후변화에 따른 도로 인프라의 관리 제언, *도로정책 Brief* 9, No.131, 2-3.

기상청, 2018: 2018 기상산업 실태조사, 기상청·한국기상산업기술원.

김상태, 민웅기, 김남조, 2017: 기후변화에 의한 관광산업 취약성 분석 및 대응전략. 관광연구, 32(6), 273-292.

김선우, 문희강, 이윤정, 정혜정, 2018: 기후 변화에 따른 소비자의 의복 관리 경험, *복식*, 68(8), 81-100.

김송이, 박진한, 이동근, 2015: 기후변화가 야외 물놀이 활동에 미치는 영향, *한국기후변화학회지*, 6(3), 193-201.

김송이, 박찬, 박진한, 이동근, 2015: 스키산업에 기후변화가 미치는 영향 분석-한국의 스키장을 사례로, *환경영향평가*, 24(5), 432-443.

김수영, 변병설, 2014: 관광자원의 기후변화 취약성 평가에 관한 연구, *국토지리학회지*, 48(1).

김승도 외, 2015: 기후변화 적응산업 육성전략(II): 2015년도 기후변화 적응산업 활성화 방안 마련, 환경부.

김완석, 김영훈, 김재혁, 오훈, 2018: 기후환경 변화에 따른 전기재해 위험도 분석, *한국산학기술학회논문지*, 19(4).

김유미, 임윤진, 이현경, 최병철. 2014: 기후변화 시나리오를 활용한 한반도 미래 풍력에너지의 시공간적 변동성 전망, *대한지리학회지*, 49(6), 833-848.

김윤정 외, 2013: 산업단지의 입지적 요건을 고려한 기후변화 취약성 평가-지자체 및 산업단지의 물리적, 경제적 특성에 집중하여, *환경영향평가*, 22(6), 627-637.

김윤정, 박보영, 정휘철, 2018: 기후변화에 의한 도로의 폭설 취약성 평가: 웹기반 취약성평가 지원도구(VESTAP) 신규항목 생성, *IDI 도시연구* 제14호

김재학, 2014: 기후변화에 대한 자전거이용객의 지각과 적응에 관한 연구, *관광학연구*, 38(9), 215-238.

김진영, 김도용. 2017: 기후변화를 고려한 한반도 미래 풍력자원 지도 생산, *대한공간정보학회지*, 25(1), 3-8.

김현정, 김상태, 김남조. 2018: 아웃도어 레크리에이션 참여자의 전문화 수준이 기후변화 적응행동에 미치는 영향: 등산객을 중심으로, *관광레저연구*, 30(1), 133-149.

김혜민, 김인겸, 박기준, 유승훈. 2015: 기온이 전력수요에 미치는 영향 분석, *에너지공학*, 24(2), 167-173.

박기령, 2019: 기후변화대응을 위한 기후변화영향 평가에 관한 법제연구, 한국법제연구원.

변재영, 김유미, 최병철. 2014: 기후변화 시나리오에 근거한 한반도 미래 풍력· 태양-기상자원 변동성, *신재생에너지*, 10(2), 29-39.

보험개발원, 2017: 기상 예측의 불확실성을 고려한 신규 보험상품 개발 및 적용방안 연구.

손미영, 2017: 기후변화에 대한 소비자의 인식과 복식행동 연구, *패션비즈니스*, 21(4), 61-72.

식품의약품안전처, 2018: 2018 식품의약품안전백서.

안성식, 박효정, 조아람, 2018: 기후변화에 따른 국제관광산업 경쟁력 강화를 위한 관광지 선택속성에 대한 중요도 차이 연구-컨조인트 분석 활용을 통해, *통상정보연구*, 20(3), 193-213.

안성식, 이상무, 박연옥. 2017: 기후변화에 따라 관광경험, 관광가치, 관광 위험요인이 만족도와 행동의도에 미치는 영향력 차이에 관한 연구: 제주도를 방문한 한국과 중국 관광객을 중심으로, *관광연구저널*, 31(11), 107-125.

오형나, 2015: 제조업과 서비스 부문 기후 리스크 측정, 자원·*환경경제연구*, 24(3), 551-572.

오홍석, 양희원, 송운강. 2017: 기후변화와 관광수요 관계에 관한 연구: 기후쾌적성을 중심으로, *관광연구*, 32(1), 65-84.

왕길, 이승구. 2016: 레저 활동 참가자의 기후변화인식이 레저스킬과 행동의도에 미치는 영향-아웃도어 트레킹을 중심으로, *관광학연구*, 40(8), 11-22.

유이선, 임소영, 2017: 기후변화에 대한 기업의 인식과 산업 정책적 대응방향, 산업연구원 정책자료.

이기원, 김서형, 2018: 미래기술 기반 건강한 먹거리 산업 동향과 과제, 2019 농업전망, 7, 206-223.

이동성, 문태훈. 2017: 도시특성과 기후특성이 지역 에너지 사용량에 미치는 영향에 관한 연구, *한국지역개발학회지*,

1, 13.

이미진, 이동근, 박찬, 박진한, 정태용, 김상균, 홍성철, 2015: 기후변화와 사회·경제적 요소를 고려한 가정 부문 냉난방 에너지 사용량 변화 예측, *환경영향평가*, 24(5), 487-498.

이민재, 황윤섭, 2014: 자국의 기후변화 인식이 관광객의 경험의 질, 지각된 가치, 만족 및 행동의도에 미치는 영향 탐색, *사회과학연구*, 40(2), 227-246.

이민재, 황윤섭, 서원석. 2014: 기후변화인식과 관광객의 만족 및 행동의도 간 관계 탐색: 제주 자연관광지 방문객을 대상으로, *관광학연구*, 38(7), 123-142.

이승준 외, 2017: 기후변화의 부정적 영향에 따른 손실과 피해 대응방안, 한국환경정책평가연구원.

임윤정, 김선애, 장동호, 박종철, 김연희, 김백조, 김맹기. 2016: RCP 시나리오에 근거한 고해상도 미래 풍력 기상자원 분석, *기후연구*, 11(1), 29-47.

임윤정, 김선애, 장동호, 박종철, 김연희, 김백조, 김맹기, 2016: RCP 시나리오에 근거한 고해상도 미래 풍력 기상자원 분석, *기후연구*, 11(1), 29-47.

장남경, 2015: 패션디자인에서 기후변화 적응의 유형과 특징, *한국패션디자인학회지*, 15(3), 35-51.

정병순, 방경훈, 신문섭, 유병로, 고장희, 2016: 음의 해일고 가정하의 해수위 변화에 의한 발전소 흡입수조 유동변화 및 대책방안 검토, *한국환경기술학회지*, 17(5), 482-491.

정준호, 허인혜, 2015: 기온변화가 전력소비에 미친 효과의 추정, *기후연구*, 10(2), 193-207.

정지훈, 김주홍, 김백민, 김재진, 유진호, 오종열, 2014: 미래 기후변화에 따른 가정 및 상업 부문 에너지수요 변화 추정, *대기*, 24(4), 515-522.

정찬영, 김남조, 이훈, 2015: 지역축제의 기후변화에 대한 적응전략 연구, *호텔관광연구*, 58(0), 248-267.

정환수, 이은영, 이윤제, 허학무, 2018: 기후변화가 국내 산업에 미치는 영향 및 대응방안, KCRC Issue Report vol.9.

조경득, 2019: 기후변화에 따른 버스정류장 개선에 관한 연구 -남양주시를 중심으로-, *한국 디자인문화학회지*, 25(3), 415-425

채여라 외, 2018: 국가리스크 관리를 위한 기후변화 적응역량 구축·평가, 체감형 적응을 위한 데이터 기반 기후변화 리스크 대응체계 구축, KEI.

최광림, 2016: 산업계 기후변화 적응대책 수립 현황, 환경정보.

최영준, 박현용, 2016: 한국 기후변동 패턴과 제조업 총요소 생산성의 관계 분석, *자원·환경경제연구*, 25(2), 227-247.

최영준, 박현용, 2015: 기후환경변수와 한국의 지역별 총요소생산성의 연관성에 관한 연구, *생산성논집* (구 생산성연구), 29(2), 121-141.

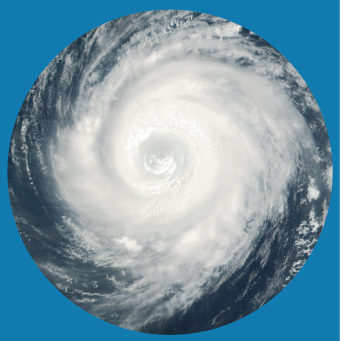
행정안전부, 2017: 재난안전 상황분석 결과 및 중점과리 대상 재난안전사고.

황윤섭, 김동환, 유천, 2017: 기후변화와 국제관광수요의 관계에 관한 연구-극한기후를 중심으로, *국제지역연구*, 21(3), 205-217.

황윤섭, 이윤, 심창섭, 최영준, 2014: 기후변화가 한국 관광 경영에 미치는 영향, *기업경영연구 (구 동림경영연구)*, 55, 57-70.

제 8 장

보건



248 8.1. 서론

249 8.2 관측된 영향

264 8.3 영향 전망

269 8.4 취약성의 주요 원인

272 8.5 적응 옵션

275 8.6 결론

276 8.7 참고문헌

제 8 장 보건

8.1 서론

「한국 기후변화 평가보고서 2014」에서는 기후변화가 건강에 미치는 영향을 폭염, 기상재해, 대기질과 알레르기, 곤충 및 설치류 매개 감염병, 수인성 및 식품 매개 감염병 5가지 항목으로 나누어 살펴보았다. 폭염에 의한 온열 손상 및 사망자의 취약성은 나이, 기저질환 동반 유무, 소득, 교육 수준, 지역에 따라 차이가 있고, 미래에는 고령화, 도시개발, 정책 등 여러 기후적, 사회적, 의학적 요인에 따라 건강 피해가 다르게 나타날 것이라고 예측했다. 극단적인 기상현상은 기후변화가 지속될수록 기상재해로 인한 사망자는 증가할 것이라고 예측되고 있으나 이에 대한 국내연구는 미흡하다고 지적했다. 기후변화가 대기질에 미치는 영향은 오존 이외에는 불확실성이 많으며 대기질 악화가 심혈관 및 호흡기 질환에 악영향을 주며, 알레르기 질환 국내연구는 활발하지 않으나 국내 기상 요인이 꽃가루 농도와 알레르기성에 영향을 준다고 밝힌 바 있다. 곤충 및 설치류 매개 감염병은 기후변화로 인해 확장될 가능성이 높기에 국가 감시체계 및 주변국과의 연계성을 통한 관리 정책이 요구된다. 수인성 및 식품매개 감염병과 기후요인과의 관련성 연구는 아직 매우 적기에 연구가 보다 필요한 부분이라고 기술되었다.

기후변화에 관한 정부간 협의체(IPCC) 5차 평가보고서에 따르면 19세기 이후 전지구 평균기온은 지속적으로 상승하였고(IPCC, 2013), 지구온난화 1.5℃ 특별보고서에 따르면 산업화 이전(1850~1900년)과 대비해 전지구 평균기온이 1.5℃ 상승할 경우, 극한 고온과 호우, 가뭄 발생이 증가하고 이는 전지구 평균기온의 상승폭이 커짐에 따라 더욱 심화될 것으로 전망하고 있다(IPCC, 2018).

지구온난화에 따른 기후변화로 폭염, 태풍, 한파, 지진해일 같은 자연재해의 피해는 점점 커지고 있다. 2019년 9월 시작되어 약 6개월만인 2020년 2월 중순에 잡힌 호주의 산불은 2019년 뉴사우스웨일스나 퀸즈랜드 두 주 모두 1년 동안 기온이 높은 폭염과 적은 강우량으로 산불 위험이 높아 발생했고(Yu et al., 2020), 이는 기후변화로 인해 호주의 산불이 증가할 것이라고 경고했던 기존 연구의 연장선상에 있다고 볼 수 있다(Horton et al., 2010; Buxton et al., 2011; Johnston et al., 2011; Sharples et al., 2016; Bardsley et al., 2018). 이와 같은 지구온난화를 유발하는 가장 큰 원인인 온실가스는 그 농도가 해마다 증가하고 있다. 기후변화로 인한 건강 영향은 물리적 환경, 사회구조, 취약성 및 적응력에 따라 국가나 지역에 다르게 나타나기 때문에 우리나라의 물리적, 사회적 환경 등을 고려한 기후변화 연구 및 평가가 필요하다(Maibach et al., 2008). 또한 2000년 이후에 전 세계적으로 유행한 감염병들(사스(2003년), 신종플루(2009년), 메르스(2014년), 에볼라, 지카(2015년) 및 코로나 19(2019년))은 바이러스 감염병들로 특정지역 및 국가에서 발생했지만 세계화 효과에 의해서 전세적으로 전파 확산이 일어났으며 세계보건기구(World Health Organization, WHO)에서는 이들 감염병들에 대해서 국제적 공중보건 위기사태(Public Health Emergency of International Concern, PHEIC)를 선언했다. 이들 바이러스 감염병들중에는 계절성이 있거나 모기와 같은 곤충 매개 감염병으로 이들 감염병들의 발생, 전파 및 유행에 기후변화(혹은 기후인자들)가 영향을 미칠 수 있다. 하지만 이들 감염병들과 기후변화와의 상관관계에 대한 연구는 아직 매우 미흡하다. 따라서 앞으로 이에 대한 연구가 필요할 것으로 생각된다. 국내의 경우 기후변화에 의한 건강영향을 폭염, 기상재해, 대기질, 알레르기, 감염병 분야로 분류하여 해당 연구나 정책을 내놓고 있는데 이에 맞추어 기후변화로 인해 국내 건강 영향, 전망, 취약성 원인과 관련 국가 정책에 대해 살펴보고자 한다.

8.2 관측된 영향

「한국 기후변화 평가보고서 2014」에 따르면, 폭염에 의한 열사병, 열탈진 등의 온열 손상 환자와 사망자는 65세 이상 노인에게 더 취약했고, 1990년~2008년 동안 우리나라에서 가장 많은 사망자를 일으킨 기상재해는 홍수였다. 꽃가루 농도나 알레르기 환자는 기온과 양의 상관관계를 보였으며, 기후변화가 대기질에 미치는 영향을 오존 외에는 불확실하다. 삼일열 말라리아 같은 매개체 감염병과 온도, 강수량, 습도 같은 기후요인과의 상관성이 확인되었고, 수인성 및 식품매개 감염병과 기후요인과의 관련성 연구는 아직 부족한 실정이다.

8.2.1 폭염

우리나라는 폭염일수를 일최고기온이 33℃ 이상인 날의 연중 일수로 정의하지만, 폭염을 정의하는 기준은 지역마다

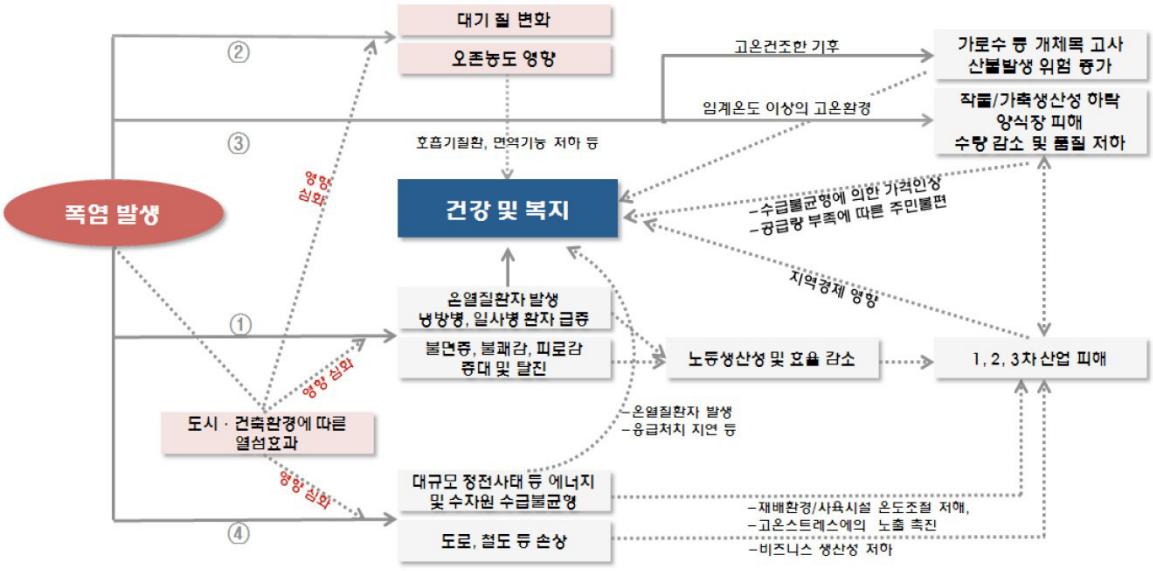


그림 8.1 폭염의 영향 및 피해 경로(한국환경정책평가연구원, 2014).

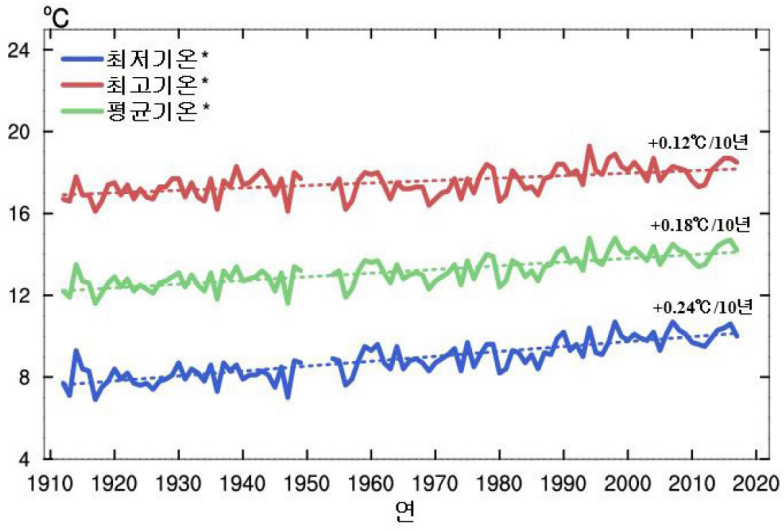


그림 8.2 연평균 최고, 평균, 최저기온의 변화(1912~2017년)(국립기상과학원, 2018).

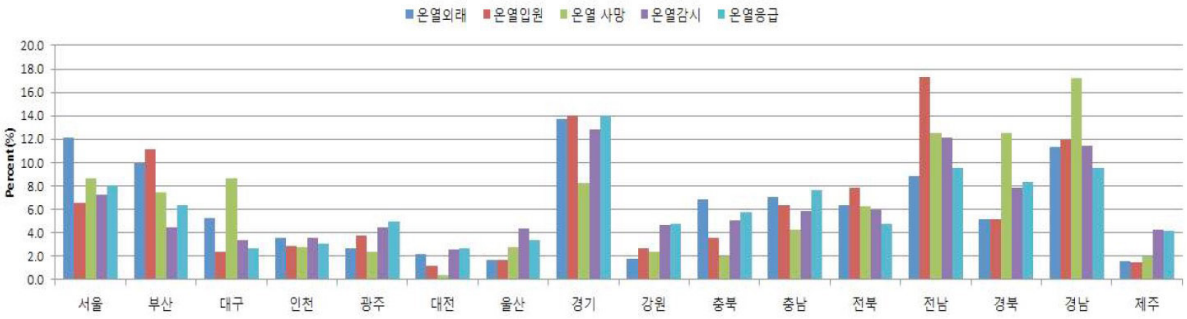


그림 8.3 지역별 온열질환 사망 및 질환 발생률(%)(질병관리본부, 2018).

표 8.1 분석 대상 논문의 일반적 특성(우경숙, 2019).

저자(출판연도)	조사기간	노출	역치기온	결과	성별	연령	지역
Heo et al. (2016)	1996-2000, 2008-2012	1℃ 증가	(최고기온) 31.5℃,33.5℃	전체 사망, 심혈관계 질환 사망, 호흡기계 질환 사망	전체, 남성, 여성	전체, 20세 미만, 75세 이상	전국
Lee et al. (2016a)	1991-2012	1℃ 증가	(일평균기온) 28.2℃(서울)	손상(사고) 제외 사망	전체	전체	서울, 부산
Lee et al. (2016b)	1992-2012	폭염	폭염 vs. 비폭염	손상(사고) 제외 사망, 심혈관계 질환 사망, 호흡기계 질환 사망	전체	전체	서울
Kim et al. (2015)	1992-2009	1℃ 증가	(최고기온) 29.5℃	전체 사망, 심혈관계 질환 사망, 호흡기계 질환 사망	전체	전체	서울
Gasparrini et al. (2015a)	1992-2010	폭염	(최고기온) 99percentile vs. 최저사망 percentile	손상(사고) 제외 사망	전체	전체	전국
Gasparrini et al. (2015b)	1992-2010	폭염	(일평균기온) 89percentile vs. 최저사망기온	손상(사고) 제외 사망	전체	전체	전국
Ha et al. (2013)	1993-2009	1℃ 증가	(일평균기온) 27.2℃	손상(사고) 제외 사망, 심혈관계 질환 사망	전체	전체	전국
Lim et al. (2013)	1992-2007	1℃ 증가	(일평균기온) 23.4℃-25.3℃	뇌혈관계질환 사망	전체	전체	서울, 인천, 대구, 부산
Son et al. (2013)	2000-2007	폭염	(일평균기온) 29℃vs.15℃	손상(사고) 제외 사망, 심혈관계 질환 사망, 호흡기계 질환 사망	전체, 남성, 여성	전체, 0-14세, 15-64세, 65-74세, 75세 이상	서울
Son et al. (2012)	2000-2007	폭염	폭염 vs. 비폭염	손상(사고)제외사망, 심혈관계 질환 사망, 호흡기계 질환 사망	전체, 남성, 여성	전체, 65-74세, 75세 이상	전국, 서울, 부산, 인천, 대구, 광주, 울산
Ha et al. (2011a)	1991-2008	1℃ 증가	(일평균기온) 27.1℃-28.4℃	손상(사고)제외사망, 심혈관계 질환 사망	전체	전체, 65세 이상	서울, 대구, 인천
Ha et al. (2011b)	1992-2007	1℃ 증가	(일평균기온) 25.5℃-28.1℃	손상(사고)제외사망, 심혈관계 질환 사망	전체	전체, 65세 이상	서울, 대구, 인천
Kim et al. (2006a)	2000-2002	1℃ 증가	(최고기온) 29.2℃	사고 제외 사망	전체	전체, 65세 이상	서울
Kim et al. (2006b)	1994-2003	1℃ 증가	(일평균기온) 26.6℃-28.1℃	전체 사망	전체	전체, 65세 이상	서울, 대구, 인천, 광주, 대전

다양하다(Xu et al., 2016). 최고기온, 평균기온, 바람과 습도를 고려한 겉보기 온도(apparent temperature), 열지수와 같은 기온 지표와 강도(절대적 기온(absolute temperature)과 상대적 기온(temperature percentile)), 지속기간이 서로 복합적으로 결합하여 폭염을 정의할 수 있다.

지난 106년(1912~2017) 동안 우리나라의 연평균 기온은 +0.18℃/10년으로 상승했다(그림 8.1). 특히 최근 30년 기온은 20세기 초보다 1.4℃ 상승했는데 1980년대에는 연평균기온이 13.4℃였으나 1990년대에는 14℃로 크게 상승했다. 2018년에는 우리나라 관측 기록상 폭염일수 최다, 온열질환 응급실감시체계 운영 이래 신고환자수가 역대 최다를 기록했다(기상청, 2019).

폭염의 직접적 노출은 온열질환자 발생, 탈진과 피로감 증대 등의 원인이 되어 노동생산성 감소로 이어져 산업의 피해로 전이될 수 있고, 지속적인 고온으로 인해 대기오염물질 및 오존농도 증가로 호흡기 질환자 증가나 면역기능이 저하될 수 있는 등 폭염으로 인한 영향 및 피해 경로를 통해 건강 영향, 환경적 영향, 산업 및 사회기반시설 영향 등이 상호 연결되어 나타나게 된다(그림 8.2).

폭염으로 인한 건강 영향 중 열사병, 열탈진, 열피로 등의 온열질환이 가장 많고, 신장질환(급성신장손상, 요로결석 등)과 심뇌혈관질환이 폭염과 관련 있는 질환으로 알려져 있다(임연희, 2019). 또한 고온은 정신질환으로 인한 사망이나 자살과 관련성이 높은 것으로 나타났다(Kim et al., 2015a; Kim et al., 2015b; Kim et al., 2019). 질병관리본부(2018)에 따르면 폭염과의 연관성 연구가 거의 보고되지 않았지만, 온열질환, 인플루엔자, 신장질환, 허혈성심장질환과 기온은 응급입원과 유의한 연관성을, 보통 당일부터 하루내지 이틀 내로 강한 연관성을 보였다. 또한 어지러움증, 미니에르병, 대상포진도 기온과 유의한 연관성이 있음을 설명했다.

대프리카라는 말이 나올 정도로 대구는 우리나라에서 폭염이 가장 많이 발생하는 지역이다. 하지만 온열질환자는 경기 지역에서 가장 많이 발생했다(그림 8.3). 이는 지역마다 고온에 대한 회복력, 취약성이 다르고, 인구집단 또는 개인의 건강상태 및 사회적 적응 역량에 차이가 있기 때문이다. 또한 지역마다 기온의 변화가 다르게 나타나고, 폭염의 정의가 다르기 때문에 국외에서 입증된 폭염의 건강 영향을 국내에서 그대로 적용하기엔 한계점이 있다(Xu et al., 2016; Guo et al., 2017). 우경숙 등(2019)은 2017년 4월까지 기온이 사망에 미치는 영향을 분석한 우리나라에서 수행된 논문들을 메타 분석했다(표 8.1). 기온 1℃ 증가할 때 사망위험이 5%(95% CI: 3~6%) 증가하고, 비폭염 기간 대비 폭염기간에는 8%(95% CI: 2~14%) 사망 위험이 증가했다. 또한 75세 이상 인구집단에서는 사망의 위험이 통계적으로 유의하게 증가했고, 기온 증가에 따라 심혈관질환 6%, 뇌혈관질환 4%, 호흡기질환 2% 즉, 만성질환으로 인한 사망위험이 더 높아졌다. Son et al.(2012)에 따르면 우리나라 7개 도시에서 폭염의 강도가 크고, 폭염일수가 길고, 폭염이 평소보다 이른 여름에 왔을 때 폭염으로 인한 사망 위험이 높아지고, 여성, 노인, 교육을 받지 못한 사람이 위험에 더 취약한 것으로 나타났다. 그리고 여름철(6~8월) 폭염시 65세 이상의 사망률 변화는 농촌 지역이 도시 지역에 비해 높게 나타났고, 폭염일수가 적음에도 폭염 시 사망률이 크게 증가하는 지역은 65세 이상 인구, 저소득층, 1인 가구, 야외노동종사자, 노인 농어업 비율이 높고, 의료기관 종사자 수가 다른 지역에 비해 낮았다(채여라 등, 2018). 이처럼 폭염으로 인한 건강영향은 성, 연령, 건강 상태, 소득, 교육수준이나 지역별 차이(도시와 농촌, 건물밀집도, 지리적 특성, 인구밀도) 등 사회경제적 상태에 따라 다르게 나타난다(Son et al., 2012; Na et al., 2013; Benmarhnia et al., 2015).

8.2.2 기상재해

기상재해는 일반적인 상태라고 생각되는 기상현상으로부터 벗어난 불규칙적이고 무질서한 사건으로 예측하기 어려운 특성을 지닌다(질병관리본부, 2011). 재난 및 안전관리 기본법 제3조 제1호 가목에 따르면 “자연재난”은 태풍, 홍수, 호우, 강풍, 풍랑, 해일, 대설, 한파, 낙뢰, 가뭄, 폭염, 지진, 황사, 조류 대발생, 조수, 화산활동, 소행성·유성체 등 자연우주물체의 추락·충돌, 그밖에 이에 준하는 자연현상으로 인하여 발생하는 재해를 말한다. 따라서 여기서 말하는 기상재해는 태풍, 호우, 대설, 지진뿐만 아니라 폭염, 한파와 같은 이상 고온 혹은 저온 현상 등을 포함한다고 볼 수 있다.

최근 10년간 원인별 기상재해 재산피해액은 2018년

표 8.2 최근 10년간 원인별 기상재해 피해액(기상청, www.weather.go.kr). *2018년도 환산가격 기준임.

구분(연도)	호우	대설	강풍	풍랑	지진	태풍	태풍·호우	기타	합계(백만원)
2009	276,735	13,873	7,638	26,152					324,399
2010	189,041	69,339	182	7,358		180,407			446,328
2011	517,079	47,018		292		213,956			778,347
2012	37,404	19,808	2,599			976,905			1,060,116
2013	156,408	11,218	922	43		1,671			170,264
2014	141,413	32,239	94			5,261			179,008
2015	1,256	13,488	4,031	345		13,886			33,007
2016	37,867	19,720		8,760	11,627	226,300			304,276
2017	103,612	85		617	6,713				191,028
2018	53,799	14,031	6	2,822		64,199	6,416	7,350	141,284

표 8.3 최근 10년간 기상재해 현황(총괄)(기상청, www.weather.go.kr). *2018년도 환산가격 기준임.

구분(연도)	사망·실종(명)	이재민(명)	재산 피해액(백만원)*	피해 복구액(백만원)
2009	13	11,931	324,399	839,782
2010	14	76,110	446,328	748,171
2011	78	70,099	778,348	1,621,014
2012	16	18,356	1,060,117	1,998,335
2013	4	4,233	170,265	382,354
2014	2	7,691	179,009	504,220
2015	0	92	33,008	39,493
2016	7	7,221	304,277	623,204
2017	7	8,731	191,029	509,613
2018	53	2,487	141,284	443,270

표 8.4 과거 주요 호우 및 태풍피해현황 우선순위(기상청, www.weather.go.kr). *2018년도 환산가격 기준임.

순위	재해연도	주요 피해원인	주요 피해지역	사망·실종(명)	재산피해(억원)*
1	2002	태풍(루사)	전국	246	51,479
2	2003	태풍(매미)	전국(서울, 인천 제외)	131	42,225
3	2006	호우, 태풍(에위니아)	전국	62	18,344
4	1998	호우	전국(제주 제외)	324	12,478
5	1999	호우, 태풍(올가)	전국	67	10,490
6	2002	호우	전국(제주 제외)	23	9,181
7	1990	호우	서울, 경기, 강원, 충북	163	5,203
8	2004	대설	충남, 충북, 대전, 경북 등		6,734
9	2012	태풍	전남, 제줄, 충청(괴산, 부여)	5	6,366
10	1987	태풍	남해, 동해	345	3,913

표 8.5 연 강수량, 강수일수, 강수강도의 평균과 변화(1912~2017년)(국립기상과학원, 2018).

구분	평균	변화경향(/10년)	최근 30년 (1988~2017) ~ 과거 30년 (1912~1941)	최근 30년 (1988~2017) ~ 과거 30년 (1912~1941)
강수량(mm)	1237.4	16.32	124.1	-60.4
			(1181.4 → 1305.5)	(1305.5 → 1245.1)
강수일수(일)	77.6	0.19	1.6	-0.2
			(76.5 → 78.1)	(78.1 → 77.9)
강수강도(mm/일)	15.7	0.18	1.3	-0.7
			(15.2 → 16.5)	(16.5 → 15.8)

환산가격 기준 태풍이 가장 높았고(약 1.7조원), 호우 (약 1.5조원), 대설(약 2.4천억원), 지진(약 980억원), 풍랑(약 460억원), 강풍(약 150억원) 순이었다(표 8.2).

기상재해로 인해 피해는 사망, 실종, 이재민 발생 같은 인명 피해뿐만 아니라 재산 피해액과 피해 복구액이 3조가 넘을 정도로(2012년) 그 피해가 매우 크다(표 8.3). 기상청 홈페이지(www. weather.go.kr)에 따르면 2002년 태풍 루사로 3일동안 246명, 2003년에는 태풍 매미로 2일 동안 131명, 1998년에는 호우로 324명이 사망 또는 실종되었고, 각각 재산피해액은 약 5조 1천억, 4조 2천억, 1천 2백억 원이었다(표 8.4).

지난 106년간 기후변화를 살펴본 국립기상과학원 연구에 따르면(2018), 고온 극한현상일수는 증가했고, 저온 극한현상일수는 감소했으나 폭염일수는 뚜렷한 변화가 없었다. 또한 가뭄을 일으킬 수 있는 무강수 기간 혹은 호우로 인명이나 재산 피해를 일으킬 수 있는 강수 기간의 경우에도 지난 106년 동안 최장수 무강수 지속기간과 최장 강수 지속기간은 큰 변화가 없었다. 연 강수량은 증가했으나 강수일수는 뚜렷한 변화가 없었다(표 8.5). 그러나 질병관리본부(2011)에서는 지난 100년간 강수일수는 14% 감소했으나 강우강도는 18% 증가했다는 다소 다른 결과를 보이기도 했다.

우리나라 기상재해 발생빈도는 1980년대 후반에 최고를 기록한 후 감소추세를 보이고 있으나 평균 지속 기간은 1990년대 중반 이후 증가추세를 보였다. 하지만 1980년부터 2006년까지 기상재해로 인한 사망자수를 분석한 결과, 연도별 기상재해로 인한 총 사망자수는 감소추세이나 재해당 평균 사망자수는 1980년대 12.5명에서 2000년대에는 21.3명으로 증가했다(질병관리본부, 2011).

표 8.2와 표 8.4에서 확인할 수 있는 바와 같이 태풍으로 발생되는 폭풍, 홍수, 토사에 의한 재해는 홍수범람이나, 산사태, 토사 유출 등을 일으켜 그 인명 및 경제적 피해가 매우 크다. 지구온난화로 평균기온이 상승하고 있고, 이는 해수 온도 상승으로 이어져 태풍의 대형화와 강도 증가의 직접적 원인이 될 수 있다. 즉, 기후변화로 태풍의 영향이 보다 커질 가능성이 높은데 송기섭과 하만복(2007)에 따르면 지난 30여 년간 태풍이 점점 강해지면서 1일 강우량 100 mm, 최대풍속 20 m/sec가 상승했고, 20~30년 후에는 슈퍼태풍이 올 것이라는 예측을 했다. 또한 2002년 태풍 루사나 2013년 태풍 매미의 경로나 강도를 적용한 슈퍼 태풍을 가상 모의하여 폭풍 해일고를 추산하기도 했는데 (Hur et al. 2006; Kang et al, 2008; Hur et al. 2008), 윤종주 등 (2012)은 기후변화 시나리오 상의 대기 중 이산화탄소 증가분에 따라 가능 최대태풍 강도도 급격히 증가하는 것으로 나타났다.

지구온난화로 인해 북극의 얼음이 녹으면서 구름을 대량 발생시키고, 이로 인해 북반구 지역 적설량이 증가해 우리나라를 포함한 고위도 북반구에 폭설이 빈번하게 발생하고 있어 기후변화로 인해 폭설의 영향 또한 증가할 것으로 예측된다(기상청, 2010). 2000년 이후 기후변화 관련 기상재해에 대한 연구보고서는 폭설의 건강영향에 대응한 방안(소방방재청, 2012) 연구만이 확인되었다 (하종식, 2014), 이처럼 기후변화에 따른 기상재해의 건강 영향을 정량화한 연구는 매우 부족한 실정이다.

8.2.3 대기질과 알레르기

기후변화는 기온 상승과 함께 대기질에 영향을 줄 가능성이 있다(Dias et al., 2012). Ebi & McGregor(2008)의 보고에 따르면 기후변화는 대기오염물질 중 특히 오존(O_3)과 미세먼지의 농도 수준을 증가시키며, 사망률과 유병률에 영향을 줄 수 있다고 하였다. 최근 우리나라 주요 도시에서는 오존농도가 해마다 증가하고 있는데, 대기오염자료를 분석해보면, 일 최고기온이 증가하면 오존농도가 증가하는 현상을 확인할 수 있다. 또한 기후변화로 인한 오존증가에 따른 초과 사망률을 계산했을 때, 2055년 기후변화로 인한 오존증가에 따라 총 사망이 약 0.11% 증가하고 65세 이상 고령층에서는 약 0.29% 증가하는 것으로 나타났다(한국보건사회연구원, 2010).

이처럼 기후변화가 대기 중 온도 상승으로 오존의 농도를 증가시키는 것은 명확하지만, 미세먼지의 농도 증가는 다소 불확실성이 높은 것으로 보고되고 있다(Tainio et al., 2013). 하지만 Jacob & Winner(2009)는 기후변화로 인한 온도 상승은 대기 상하 혼합을 감소시키기 때문에 대기 중 미세먼지 농도를 증가시킬 수 있으며, 자연적 화재의 증가도

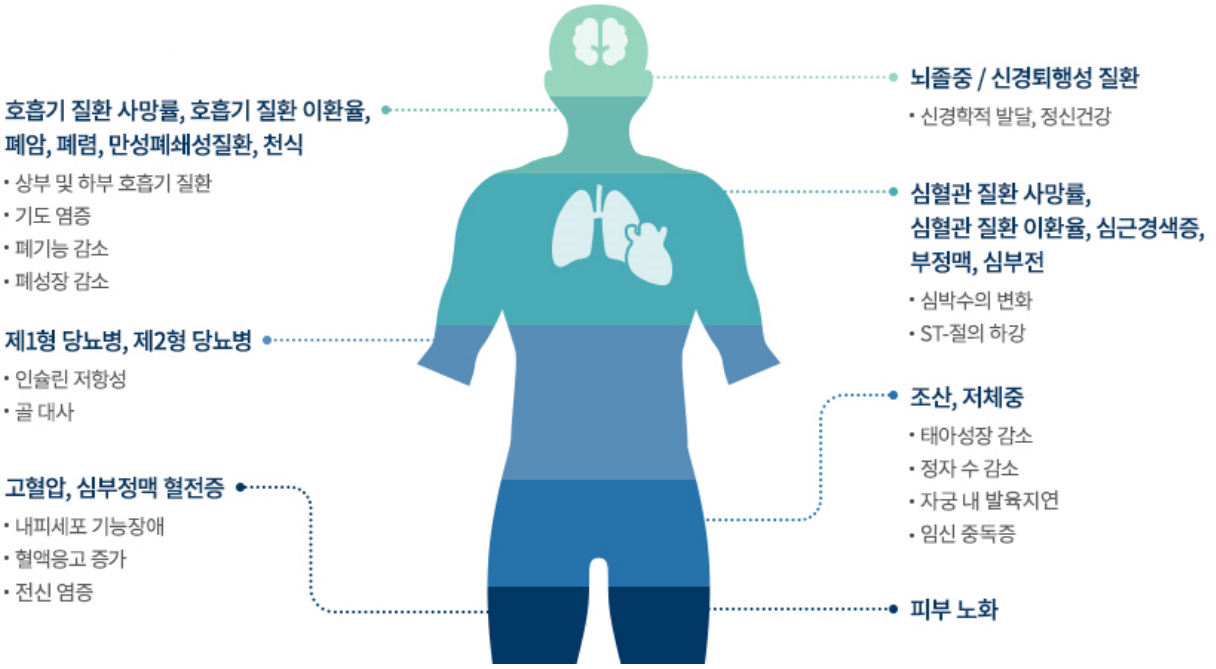


그림 8.4 미세먼지 건강영향(보건복지부, www.nih.go.kr).

미세먼지 농도를 높일 수 있다고 보고하였다. 그동안의 기후변화와 미세먼지의 관련성에 대한 연구 결과를 고찰할 때, 기후변화는 지상 대기의 오존 농도 상승을 야기하지만, 미세먼지의 농도 증가는 불확실한 것으로 판단할 수 있다. 기후변화는 온도 상승과 습도 변화를 야기한다. 이런 변화는 대기오염물질 거동(확산과 이동)에 영향을 주기 때문에 미세먼지 농도 변화와 관련성이 있다고 볼 수 있다. 특히 오존 농도 증가는 대기 중 광화학스모그 때문이며 그 원인 물질이 질소산화물(NOx)과 휘발성유기화합물(VOCs)임을 고려할 때, 가스 상태의 물질이 입자상 물질로 변화하는 기전을 통해 알 수 있는 것은 기후변화가 대기 중 미세먼지 농도에 영향을 줄 수 있다는 점이다(Fuzzi et al., 2015).

미세먼지는 피부와 눈, 코 또는 인후 점막에 직접 접촉하여 물리적 자극을 유발하고, 크기가 작아 호흡기와 혈관을 통해 인체 곳곳에 영향을 주게 된다. 이에 따라 폐렴, 폐암, 뇌졸중, 심장질환, 천식 등의 질병을 악화시키며, 어린이의 경우 폐성장을 저해하고, 임산부의 경우 저체중과 조산을 초래할 수 있으며, 노인의 경우, 호흡기질환, 심혈관질환 등의 기저질환이 악화될 수 있다고 알려져 있다(그림 8.4).

이처럼 미세먼지의 건강영향에서 심혈관계 및 호흡기계 질환은 잘 알려져 있지만 최근에는 신장질환, 정신질환, 뇌신경질환과 대기오염도 관련이 있다는 연구가 발표되고 있다.

Kim et al.(2018a)은 대한민국 성인을 대상으로 한 연구에서 PM_{10}과 NO_2 노출은 추정 사구체 여과율(estimated glomerular filtration rate, eGFR)의 감소와 유의한 연관성을 나타냈다. 사구체는 혈액을 걸러서 수분과 노폐물을 제거하는 역할을 하는데, 미세먼지 농도가 높아질수록 사구체 여과 기능은 줄어든다. 사구체 여과율이 감소한다는 것은 신장 기능의 저하를 의미하고, 신장 기능 감소나 만성신장질환은 또한 심혈관계 사망과 밀접한 관련이 있기에(Sarnak et al., 2003; Di et al., 2010) 최근 신장 기능과 대기오염 관련 연구가 주목 받고 있다(O'Neill et al., 2008; Mehta et al., 2016; Yang et al., 2017). 또한 대기오염 물질에의 장기노출이 말기신부전증 환자의 사망이나(Jung et al., 2020), 신장기능 저하 및 만성신부전증 발생률과 관련이 있다는 연구가 현재도 활발하게 발표되고 있다(Jeong et al., 2020; Wu et al., 2020). Wu et al.(2020)은 메타분석 결과에서 대기오염 장기노출이 $PM_{2.5}$ 10 ug/m^3 증가당 1.1배, PM_{10} 10 ug/m^3 증가당 1.16배, CO 10 ppm 증가당 1.31배, NO_2 10 ppb 증가당 1.11배 만성신장질환의 위험을 증가시키며, PM_{10}과 $PM_{2.5}$ 증가는 추정 사구체

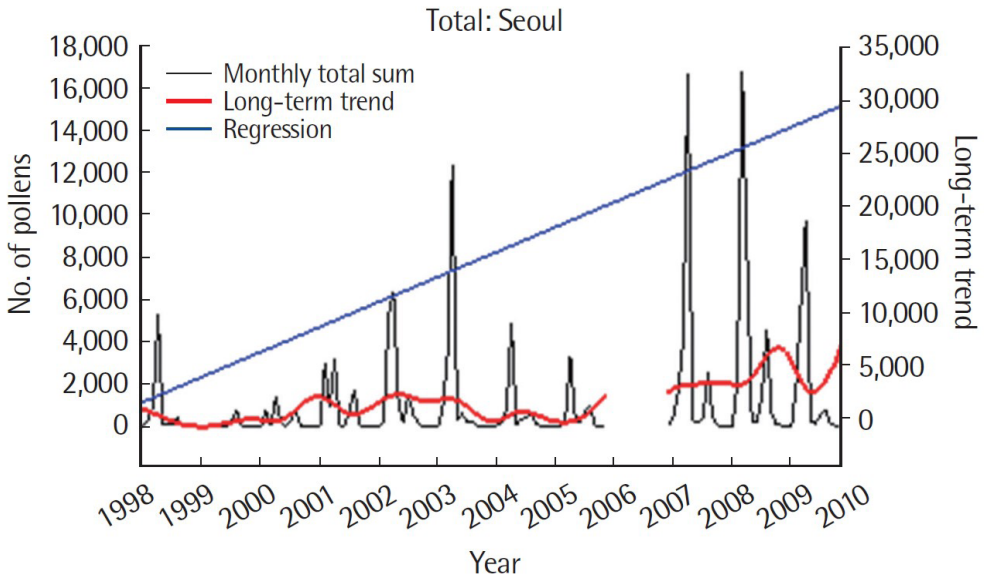


그림 8.5 X11-ARIMA를 이용한 알레르기 꽃가루 농도의 장기추세분석(오재원, 2018).

여과율을 각각 -0.83, -4.11 mL/min/1.73 m^2 감소시킨다고 했다.

대기오염과 자살의 관련성 연구도 국내외에서 활발하게 이루어지고 있다(Kim et al. 2010; Bakian et al. 2015; Lin et al. 2016; Ng et al. 2016; Kim et al., 2018b). Min et al. (2018)은 2002~2013년 국민건강보험공단 표본 코호트에 등록된 성인을 대상으로 대기오염과 자살의 연관성을 분석한 결과, 미세먼지가 자살위험을 최대 4배까지 높이는 것으로 나타났다. 특히 대도시에 거주하고, 신체 또는 정신적 질환을 가진 경우 더 높은 자살위험이 관찰되었다. 대기오염 물질이 체내 염증반응을 유발하는 사이토킨 단백질을 활성화하고, 이게 전신 염증 및 후속 산화 스트레스로 이어져 심리적 문제 발생이나 자살시도로 이어질 위험성을 높일 가능성이 있다는 것이다.

대기오염과 뇌신경질환 관련 연구 또한 우리나라 자료를 이용한 연구가 최근 증가하고 있다. Jeon and Lee(2016)에 따르면 $PM_{0.1}$이 활성산소를 생성, 신경세포에 독성을 띄게 되어 미세먼지 농도가 높아질수록 신경세포 사멸 비율이 높아졌다. 즉, 미세먼지가 뇌로 전달되면, PM은 신경 염증 반응 및 산화 스트레스를 일으켜 알츠하이머 치매를 야기할 수 있고, 혈류의 원활한 흐름을 방해해 동맥경화를 촉진시킴으로써 적절한 뇌혈류 유지가 어려워 인지기능, 뇌졸중 및 혈관성치매에도 영향을 미칠 수 있다. 이처럼 대기오염으로 인해 인지기능 저하(노지현 등, 2018; Shin et al., 2019), 뇌졸중(Han et al., 2015), 알츠하이머치매(Lee et al., 2019a), 파킨슨병(Lee et al., 2017) 등을 일으킬 수 있다. $PM_{2.5}$, PM_{10}, NO_2, SO_2, CO와 같은 대기오염 물질은 70세 이상 노인에게서 인지손상 뿐만 아니라 전반적 인지, 주의, 기억, 실행기능과 관련성을 보였는데(Shin et al., 2019), 뿐만 아니라 노인 우울증은 PM_{10}, NO_2, O_3와(Lim et al., 2012), 편두통은 $PM_{2.5}$, PM_{10}, NO_2, O_3, CO와도(Lee et al., 2018a) 유의한 관계를 보였고, 단기간 대기오염물질($PM_{2.5}$, PM_{10}, NO_2, SO_2, O_3, CO) 노출이 근위축성 측색 경화증(루게릭병)의 위험을 증가시켰다는 연구도 발표되었다(Myung et al., 2019).

알레르기 유발성 꽃가루 농도는 지구 온난화 및 대기오염 악화로 천식, 비염, 결막염 등의 알레르기 질환자를 급증하게 하는 원인이다. 지구 온난화에 따라 수목류 꽃가루의 개화시기가 빨라지고, 꽃이 피어있는 기간도 길어져서 꽃가루에 노출되는 기간은 길어지고, 노출 총량도 증가한다. 1997~2011년 서울의 꽃가루 농도가 증가했는데(그림 8.5), 이처럼 온실가스 및 오염물질 증가로 꽃가루 알레르기 유발 물질의 농도가 증가하거나 알레르기 반응이 더 자극됨으로써 알레르기 질환 자체가 급증하게 될 수 있다. 또한 기온과 강수는 꽃가루 농도를 결정짓는데 중요한 역할을

한다. 김규랑 등(2012)에 따르면 소나무를 제외한 수목류에서 꽃가루 관측일이 점점 당겨지고, 강수량이 없을 때 꽃가루 농도가 최고치를 기록했다.

8.2.4 곤충 및 설치류 매개 감염병

매개체는 모기, 진드기 및 설치류 등이 있으며 병원체(바이러스, 세균 및 말라리아)에 감염된 매개체에서 사람에게 전파 및 감염되는 질병을 매개체 감염병이라고 한다. 기온 변화에 따른 매개체 감염병들에 대한 발생을 예측 한 연구결과에서 우리나라의 온도가 섭씨 1℃ 상승할 경우 쯔쯔가무시증, 렙토스피라증, 말라리아순으로 이들 감염병들의 평균 발생이 4.27% 증가 할 것으로 예측되었다(Shin et al., 2009). 매개체 분포 확대와 밀도 증가는 기온, 강우량 및 습도와 같은 기후요소에 밀접한 영향을 받는다. 즉 기후변화로 인한 생태계 교란은 매개체 분포 대와 밀도 증가에 영향을 주기 때문에 쯔쯔가무시증, 렙토스피라증 및 말라리아와 같은 곤충 및 설치류 매개 감염병의 질병발생 양상이 변할 수 있다. 하지만 기후변화 시 매개체의 서식, 밀도 및 분포에 얼마나 영향을 받는지에 대한 연구 결과가 여전히 미흡하다.

국내에서 기후변화에 영향을 받고 있는 매개체 감염병들에 대한 질병관리본부에서 2001년 이후 연도별 발생추이를 분석한 결과는 다음과 같다(질병관리본부 감염병포털 질병별통계).

털진드기(총 7종의 털진드기: 대잎털진드기(Leptotrombidium pallidum), 수염털진드기(L. palpale), 활순털진드기(L. scutellare), 동양털진드기(L. orientale), 반도털진드기(L. zetum), 사륙털진드기(Neotrombicula japonica), 조선방망이털진드기(Euschoengastia koreaensis)가 매개하는 세균 감염병인 쯔쯔가무시증은 들쥐나 야생동물에 있는 쯔쯔가무시균(Orientia tsutsugamushi)이 이들 털진드기 유충에 감염이 된 후 사람을 물어 전파되는 진드기 매개 감염병이다. 1994년 제3군 법정 감염병으로 지정되었으며 현재는 3급 감염병으로 지정된 감염병으로 2001년부터 매년 환자 발생지역이 넓어지고 증가추세를 보이고 있다. 지역별로는 전북, 전남, 충남, 경남지역에서 환자발생률이 높으며 발생 시기는 털진드기의 유충에서 성충이 되는 9월부터 11월 사이와 일치하고 있다.

쯔쯔가무시증은 기후변화와 관련성이 높은 곤충 매개 감염병으로 알려져 있으며 다른 매개체 감염병보다 국내에서 환자발생이 많고 인구구조 변동 기준을 적용하더라도 온도상승에 따라 10배 이상의 질병부담이 증가할 것으로 예측되었으며, 국가 기후변화적응 정책에서 가장 시급성이 요구되는 감염병으로 환자수가 매해 증가하고 있다. 2018년에는 전년 대비 36% 감소하였지만 (2,637명('01)→6,480명('06)→ 10,345명('13)→10,528명('17) →6,786명('18)) 앞으로도 환자 발생이 증가할 가능성이 높다(표 8.6, 그림 8.6)(질병관리본부 2019d). 2018년에 전년 대비 환자수가 36% 감소한 이유로는 기존 사용하는 진단 기준에서 새로운 진단기준 적용으로 확진된 환자수가 줄었다고 생각되며 따라서 앞으로 환자수의 변화에 대한 추이분석이 필요할 것으로 생각된다(질병관리본부 감염병 포털 질병별 통계).

쯔쯔가무시증 연평균 환자 발생 수는 기온, 일 최고기온, 일 최저기온과 모두 양의 상관성을 나타내었고 늦봄과 여름의 기온과 밀접한 관련성이 있다. 강수량은 환자발생에 있어서 기온에 비해 전반적으로 상호 관련성이 높지 않은 걸로 나타났으며, 상대습도의 경우 강수량보다 전반적으로 높은 상호 관련성이 있었으나, 강수량과 마찬가지로 쯔쯔가무시증의 연평균 환자발생수와 역상관성을 나타내었다. 따라서 쯔쯔가무시증 환자 발생은 기후 요소 중 기온이 밀접한 관련이 있다고 볼 수 있다(강공언 등, 2016). 또한 털진드기의 발생밀도는 쯔쯔가무시증 환자 발생수와 밀접한 상관관계가 있으며 최근 3년간의 털진드기 유충의 발생밀도를 보면, 2013년에 털진드기 발생수가 매우 높다(2015년에 비해 2.0배 높았고 2014년에 비해 9.7배 높음). 연도별 털진드기의 밀도에 영향을 주는 요인은 털진드기 산란기인 8월의 평균기온에 영향을 받는 것으로 추정 된다(이동규, 2017). 또한 쯔쯔가무시증을 매개하는 주요종인 활순 털진드기의 분포가 1996년에 비해 2008년에는 충청지역에서 경기도 지역까지 북상한 것이 확인된 것에서 볼 수 있듯이 분포지역이 계속해서 북상할 것으로 예상되며(Lee et al, 2011) 이러한 사실은 기후변화로 활순털진드기의 서식 및 분포지역이

표 8.6 쯔쯔가무시증 연도별 발생현황(2009~2018)(질병관리본부, 2019d). *발생률은 인구 10만명당 발생률을 나타내며, 2018년은 변동 가능한 잠정 통계임.

구분	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018
환자수	4,995	5,671	5,151	8,604	10,365	8,130	9,513	11,105	10,528	6,786
발생률	10.06	11.31	10.17	16.92	20.31	15.87	18.5	21.52	20.35	13.12
사망자수	-	-	6	9	23	13	11	13	18	4

표 8.7 중증열성혈소판감소증후군(SFTS) 감염 위험요인(2013~2018)(질병관리본부, 2019d).

구분	전체 (N=866)	
직업적 노출	450명	52.0%
농업	410명	91.1%
임업	30명	6.7%
축산업	10명	2.2%
야외활동	353명	40.8%
임산물 채취	90명	25.5%
성묘, 벌초(풀베기, 풀접촉)	99명	28.0%
여행, 등산, 산책	90명	28.5%
양봉, 벌목, 조경	20명	5.7%
기타	54명	15.3%
불명	63명	7.2%

표 8.8 중증열성혈소판감소증후군(SFTS) 연도별 발생현황(2014~2018)(질병관리본부, 2019d). *인구 10만명당 발생률을 의미하며, 2018년은 잠정통계임.

구분	2014	2015	2016	2017	2018
환자수	55	79	165	272	259
발생률*	0.11	0.15	0.32	0.53	0.5
사망자수	16	21	19	54	47

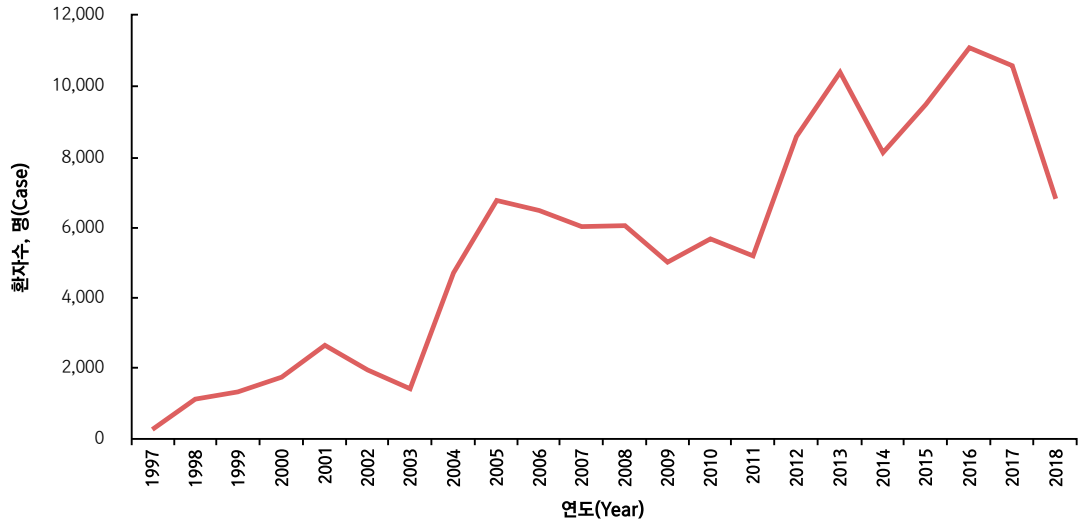


그림 8.6 쯔쯔가무시증 연도별 발생현황(1992~2018)(질병관리본부, 2019d). *2018년은 변동 가능한 잠정통계임.

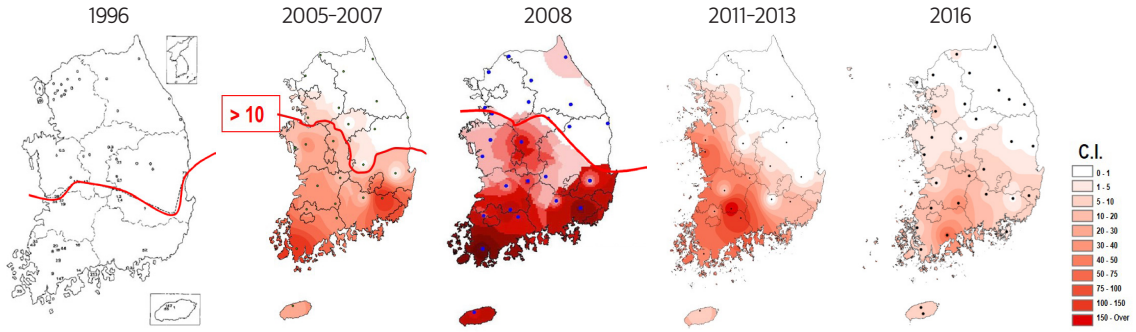


그림 8.7 활순털진드기의 전국 분포(질병관리본부 2010, 질병관리본부 2019d).

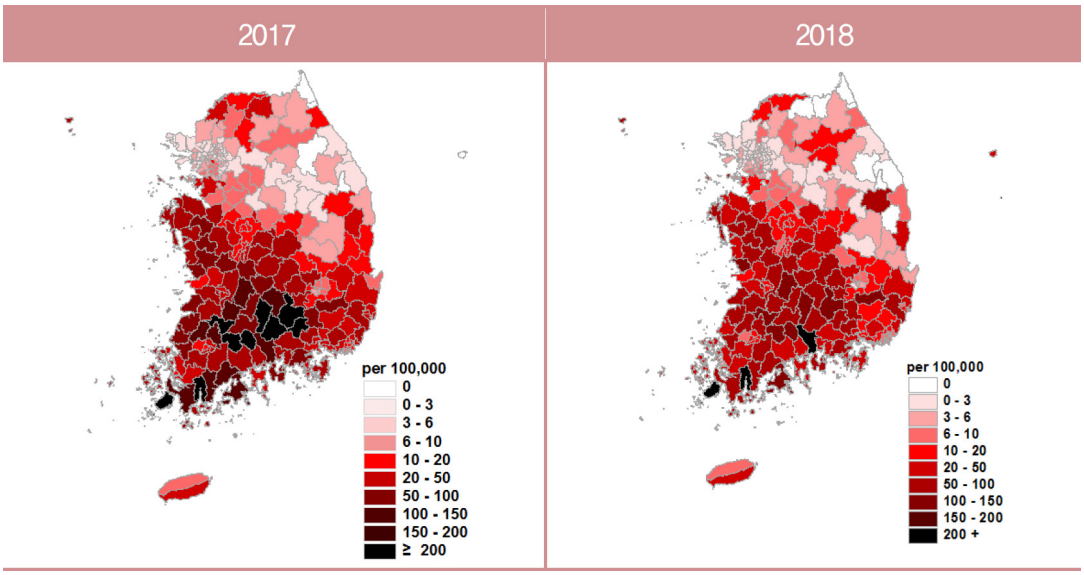


그림 8.8 쯔쯔가무시증 지역별 인구 10만명당 발생률(질병관리본부, 2019d). *2018은 변동 가능한 잠정통계임.

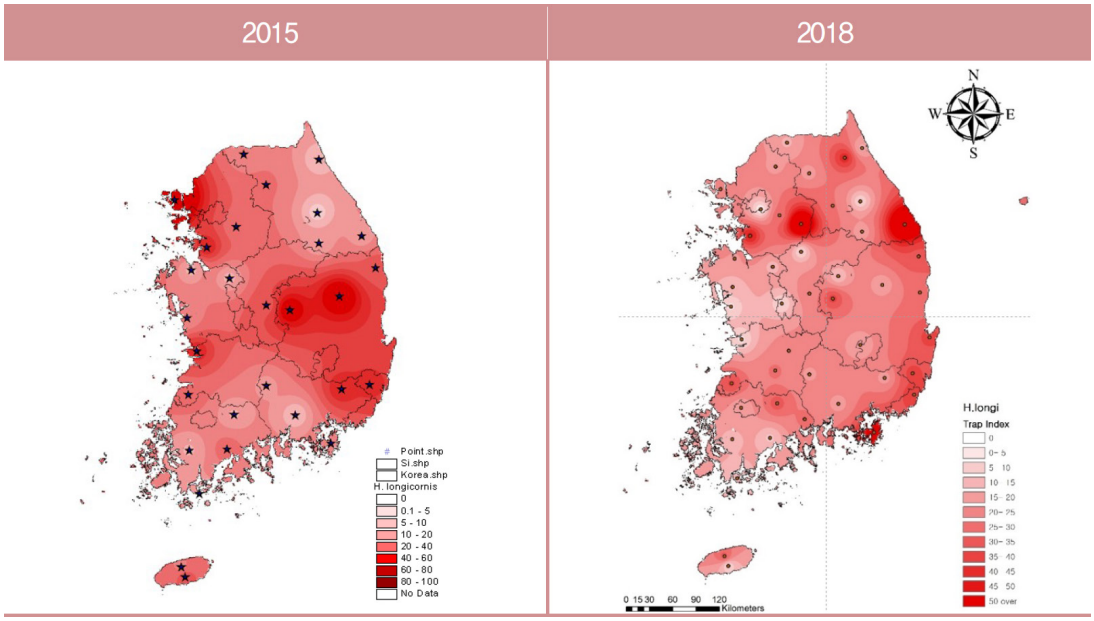


그림 8.9 작은소피참진드기의 전국 분포지역(질병관리본부, 2019d).

확대되고 있다는 사실을 보여주는 결과라고 생각된다(이동규, 2017)(그림 8.7). 쯔쯔가무시증은 RCP(Representative Concentr- ation Pathway) 기반 미래 온도변화에 따른 감염병의 기여 위험도가 높은 매개체 감염병이며(건강증진연구사업, 2014) 또한 사회경제적 손실도 매우 큰 감염병으로 김진현 등(2009)은 연간 690억원의 손실액을 추정하고 있으며 고위험군은 농촌지역의 취약 계층인 노인층이다.

중증열성혈소판감소증(Severe Fever with Thrombocy topenia Syndrome, SFTS)는 쯔쯔가무시증과 같은 진드기 매개 감염병으로 질병의 발생 및 확산이 기후요소에 영향을 받을 수 있다(Rossati, 2017). 따라서 SFTS와 기후변화와의 관련성에 대한 연구가 필요할 것으로 생각된다.

SFTS는 작은소피참진드기(Haemaphysalis 속), 개피참진드기, 뭉뚝참진드기 및 일본참진드기 매개 바이러스 감염병이다. 2009년 중국에서 첫 환자가 보고된 이후 2013년에 한국 및 일본에서 첫 환자가 보고 된 3급 감염병으로 2018년 베트남, 2019년 타이완에서도 첫 환자가 보고되면서 아시아지역에서 유행하는 곤충매개 감염병이다. 주매개체인 작은소피참진드기는 지역적인 차이 없이 전국에 걸쳐 고르게 분포하고 있으며 2014년부터 2018년 자료분석 결과를 보면 SFTS 환자는 전국적으로 발생하며 경기도, 경상북도, 강원도, 전라남도, 제주도, 전라북도 순으로 환자 발생이 많으며, 5월에서 10월까지 주로 발생하고 11월까지도 환자가 발생한다(그림 8.9).

전파 및 감염은 이들 매개체 진드기와 접촉 빈도가 높은 농촌 지역에 거주하는 고연령층(65세 이상)에서 주로 발생하며 농업 및 임업 종사자의 비율이 높다. 도시지역은 야외 활동이나 일시적인 농업 관련 작업 참여로 인한 우연 노출에서 전파 및 감염이 일어나며, 환자의 체액 및 혈액과 직접 접촉 시 진드기 매개 없이 직접 전파 및 감염이 가능하다(표 8.7). 2013년 국내에서 첫 환자 보고 후 환자 발생은 매년 증가추세를 보이며 치사율은 첫 환자 보고해인 2013년에 47.2%, 2018년에는 17.8%로 다른 매개체 감염병에 비해서 매우 높은 감염병이다(표 8.8).

라임병은 보렐리아속균(Borrelia burdorferi, B. afzelii, B. garinii)감염에 의한 진드기 매개 3급 감염병으로 감염된 참진드기(Ixodes persulcatus), 일본참진드기(I. nipponesis), 남방참진드기(I. granulatus)가 사람을 물어 전파된다. 1992년 진드기로부터 병원체가 분리되었으며, 제주도 서귀포, 강원도 평창, 부산 등에서 환자 발생이 보고되었다(그림 8.10, 표 8.9). 라임병의 경우 쯔쯔가무시증 및 SFTS처럼 진드기 매개 감염병으로 기후변화와의 관련성에 대한 연구가 필요할 것으로 생각된다. 설치류 매개 감염병 중 렙토스피라증은 1984년(200여명), 1985년(264명), 1987년(562명),1990년(129명), 1998년(90명) 등 몇 번의 유행이 보고되었으며 1998년 이후 2006년까지 매년 100명 내외로 신고 되었으며, 2007년 208명을 정점으로 점차 감소하여 2008년 이래 100명 이내로 신고 되었고, 2015년 이후 100명 이상으로 증가 양상을 보이고 있다(표 8.10). 신증후군 출혈열은 법정 감염병으로 지정된 1977년 176명이 신고 되었고, 2000년 이후에는 매년 약 400명 내외로 지속적으로 발생하고 있으며 2017년에는 590명으로 증가하였다(표 8.11). 하지만 이들 설치류 매개 질환들의 경우 기후변화 시 즉 매개체 서식 및 분포에 영향을 미칠 수 있는 기온과 같은 기후요소에 따라 환자 발생수의 변화를 보일 것으로 예측할 수 있다.

모기는 일평균기온 혹은 최고기온이 1℃ 상승함에 따라 일주일후 모기 성체 개체수가 27% 증가할 가능성이 있으며 상대습도와 강수량은 양의 상관성을 보인다(질병관리본부, 2017). 따라서 기후변화로 기온 상승 시 매개모기의 밀도 증가가 예상되며 이로 인해서 환자수가 다시 증가할 가능성이 있다. 모기가 매개하는 질환 중 기후 변화에 의해 우리나라에서 환자 발생이 증가가 가능한 감염병들은 삼일열 말라리아, 일본뇌염이 있으며, 해외에서 유입이 되어 국내 기후변화에 의해 국내에서 새롭게 발생하리라 예상되는 감염병들은 지카, 뎅기열, 황열, 웨스트나일열, 치쿤구니야열, 열대열 말라리아 등이 있다. 삼일열 말라리아(병원체: Plasmodium vivax)는 중국얼룩날개 모기 매개 감염병으로 국내에서 1979년 박멸된 후, 1993년 비무장지대(Demilitarized zone, DMZ) 인근 경기도 지역 전역 군인에게서 재발생이 보고되었다, 2000년 4,142명으로 정점을 보였으나 최근 5년 이내에는 연간 700명 미만의 환자가 발생하고 있다(표 8.12).

기온은 매개체에 의한 감염병 발생에 가장 많은 영향을 주는 기후요인으로 삼일열 말라리아 매개 모기인 중국얼룩

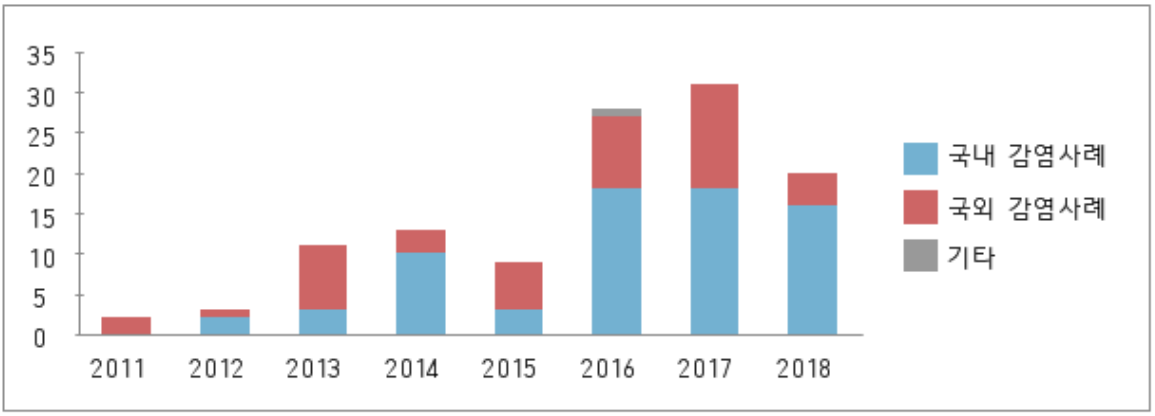


그림 8.10 라임병 연도별 발생현황(2011~2018)(질병관리본부, 2019d).

표 8.9 라임병 연도별 발생현황(2011~2018)(질병관리본부, 2019d). *불명(1사례) 포함, 2018년은 잠정통계임

구분	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018
국내 감염사례	-	2	3	10	3	18*	18	16
국외 감염사례	2	1	8	3	6	9	13	4
계	2	3	11	13	9	27	31	20

표 8.10 최근 10년간 렙토스피라증 환자 발생현황(2009~2018)(질병관리본부, 2019c).

	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018
신고수(명)	62	66	49	28	50	58	104	117	103	149
발생률 (인구 10만명당)	0.12	0.13	0.10	0.06	0.10	0.11	0.20	0.23	0.20	0.29

표 8.11 최근 10년간 신증후군출혈열 환자 발생현황(2000~2018)(질병관리본부, 2019c).

	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018
신고수(명)	334	473	370	364	527	344	384	575	590	506
발생률 (인구 10만명당)	0.67	0.94	0.73	0.72	1.03	0.67	0.75	1.11	1.18	0.98

표 8.12 말라리아 연도별 환자 발생 현황(2005~2018)(질병관리본부, 2019b). *국내 발생은 모두 삼일열 말라리아, 이외 해외 유입의 경우 대부분 열대열 및 삼일열 말라리아임 *2018년은 잠정통계임.

구분/연도		2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018
총계		2,051	2,227	1,052	1,345	1,772	826	542	445	638	699	673	515	576
국내 발생	민간인	1,278	1,283	566	639	996	323	330	227	402	361	307	280	338
	군인	743	909	457	680	725	439	159	158	156	267	295	156	63
	소계	2,021	2,192	1,023	1,319	1,721	762	489	385	558	628	602	436	100
해외유입		30	35	29	26	51	64	53	60	80	71	71	79	75

표 8.13 지역별 일평균기온 1℃ 증가로 인한 말라리아 발생위험(채수미 등, 2014).

지역	상대위험도[1]	95% 신뢰구간	역치기온(℃)
서울	1.108	(1.097-1.119)	9.5
부산	1.123	(1.087-1.159)	9.0
대구	1.101	(1.073-1.129)	8.2
인천	1.142	(1.126-1.159)	0.6
광주	1.126	(1.075-1.180)	9.0
대전	1.091	(1.044-1.139)	7.4
울산	1.091	(1.045-1.140)	8.8
경기	1.127	(1.120-1.134)	4.4
강원	1.208	(1.162-1.255)	15.5
충북	1.179	(1.095-1.269)	0.3
충남	1.033	(1.014-1.052)	-3.4
전북	1.163	(1.110-1.218)	17.5
전남	1.141	(1.085-1.200)	6.2
경북	1.158	(1.099-1.219)	17.5
경남	1.090	(1.068-1.111)	-3.3
제주	0.952	(0.858-1.056)	4.9

*주: 1. 지역별 역치기온 이후에서 기온 1℃ 증가에 따른 위험도임.

날개모기의 밀도는 강수량에 의해서 증가되고 기온 상승에 의해서 삼일열 말라리아 전파를 연장시켜 발생을 증가시킨다는 보고가 있으며 환자 발생과 상관관계가 있다고 분석되었다. 또한 말라리아 발생에 영향을 주는 지역적 특성을 반영하여, 기온으로 인한 말라리아 발생 위험을 추정했을 때 기온상승에 따라 말라리아 발생 위험이 증가하였는데, 말라리아 환자가 밀집되어 있는 서울, 경기, 인천, 강원에서 기온이 1℃ 상승하면 발생 위험이 10.8%, 12.7%, 14.2%, 20.8% 증가하였다(표 8.13).

일본뇌염의 경우 동물(돼지)이나 집모기 등에서 일본뇌염 바이러스 활동이 지속되고 있으나 백신으로 예방이 가능하다. 그러나 기후변화, 특히 기온의 상승으로 인한 환경 및 생태계 변화로 모기의 숙주 특이성과 서식 밀도가 증가하면 삼일열 말라리아와 마찬가지로 사람에게 전파 및 감염이 증가될 가능성이 높아질 수 있다. 다만 삼일열 말라리아와 달리 백신이 있어 다른 모기 매개 감염병 및 진드기 매개 감염병보다 발병률은 낮을 것으로 예상된다.

진드기 매개 감염병인 쯔쯔가무시증의 연평균 환자 발생수는 기온, 일 최고기온, 일 최저기온과 상관성을 나타내었고 늦봄과 여름의 기온과 밀접한 관련성이 있으며 계절성이 뚜렷하다(강공언 등, 2016). 즉 쯔쯔가무시증은 털진드기의 유충에서 성충이 되는 9~11월, 신증후군 출혈열은 10~12월, 렙토스피라증은 9~11월, SFTS는 4~11월로 특정 계절에 환자가 발생하며 10~11월에 쯔쯔가무시증과 SFTS는 동시(혹은 혼합) 감염된 경우가 발생하고 있다. 이는 매개체의 발생 및 활동 시기와 매우 일치하는 결과로 쯔쯔가무시증을 매개하는 털진드기가 유충시기에 숙주에 기생하여 체액을 섭취하는데 가을철에 성충으로 발육하므로 계절적 특성이 나타나며, 설치류 등 매개체 활동 시기 이외에 추수기 및 성묘로 인한 가을철 작업과 야외활동으로 인한 사회적 요인도 관련되어 있다.

모기 매개 감염병의 매개 모기는 얼룩날개모기(Anopheles), 집모기(Culex), 숲모기(Aedes 속)등이 있으며 진드기 매개 감염병 매개 진드기는 Leptotrombidium, Ixodes, Haemaphysalis, Amblyomma 속등이 있다. 병원체를 가지고 있는 이들 매개체가 질병을 전파함에 있어 생활사에 영향을 미치는 기온, 강수량, 및 습도 등 기후요소와 매개체 밀도와의 상관관계를 분석한 연구 결과는 아직까지 부족하지만 쯔쯔가무시증은 연평균 환자 발생수와 기온과 상관성이 있음이 확인이 되었고(강공언 등, 2016) 말라리아 환자가 밀집되어 있는 지역에서 기온이 1℃ 상승하면 발생 위험이 증가한다(표 8.13). 일본뇌염을 매개하는 작은

표 8.14 연도별 일본뇌염 주의보, 경보 발령일 및 환자 발생현황(질병관리본부, 감염병포털 질병별 통계).

연도	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019*
주의보 발령일	4.30.	4.14.	4.28.	4.25.	4.18.	4.20.	4.8.	4.3.	4.4.	4.3.	4.8.
경보 발령일	7.23.	7.31.	9.9.	7.19.	7.4.	8.5.	8.6.	7.11.	6.29.	7.6.	7.22.
환자 발생수(명)	6	26	3	20	14	26	40	28	9	17	-
첫 환자 발생일**	9.25.	8.11.	5.30.	8.28.	8.14.	6.19.	8.18.	8.30.	8.21.	8.14.	-
사망자수(명)	-	7	-	5	3	4	2	3	2	1	-

*2019년은 잠정통계임 *감염병포털(odc.go.kr) 신고일 기준 주의보 발령 이후 첫 환자발생일이며, 해외 유입사례는 제외함.

표 8.15 병원성 비브리오균과 해양 환경과의 상관관계(질병관리본부, 2016a).

Environmental factors /Vibrio spp.	V. cholerae	V. vulnificus	V. parahaemolyticus
Temperature of seawater(℃)	-0.25	0.91	0.90
Temperature of atmosphere(℃)	-0.17	0.87	0.79
Salinity(‰)	-0.04	-0.83	-0.62
pH	0.14	0.44	0.23

빨간집모기(Culex pipiens pallens)의 발생밀도를 보면, 2011년에 비해 2013년부터 2015년까지 1.6~3.0배 증가하였고 개체 수는 점차 증가할 것으로 예측되었다(Kim et al,, 2014). Kim 등의 연구에서 1999년부터 2012년까지 14년간 국내 10개(부산, 경기, 강원, 충북, 충남, 전북, 전남, 경북, 경남, 제주)지역에 유문등을 설치하여 채집된 모기에 대해서 주별 일일평균(mosquitoes/trap/night)으로 산출하여 분석하였다. 분석결과 전체 모기 개체 수는 2009년 이후 점차 증가하여 2011년 7만 마리에 이르렀다. 작은 빨간집모기의 개체 수는 2010년 4만 마리 수준으로 급증하였다가 2011년 이후 7천마리 수준으로 감소하였다. 2013년~2016년 기간 중 모기 개체수를 AR(auto regressive)모형으로 예측한 결과, 전체 모기 개체 수는 4만~4만5천 마리 수준으로 소폭 감소할 것으로 보이며, 빨간집모기(Culex pipiens pallens) 개체 수는 2014년 2만 5천 마리 수준으로 급격히 증가한 후 약간 감소하지만 2016년에는 1만8천 마리로 높은 수준을 유지할 것으로 보인다.

결론적으로 일본뇌염의 환자 발생 수는 매개모기의 발생밀도와 밀접하게 연관되어 있고, 2010년 이후 일본뇌염에 대한 중요성이 다시 부각되었다. 2013년 이후 일본뇌염 매개모기 개체 수는 높은 수준을 유지할 것으로 보여 향후 기후변화에 의한 매개모기 밀도증가 등으로 인해 일본 뇌염이 재유행할 가능성이 있으므로 지속적인 예방 활동과 유행예측을 실시해야한다. SFTS는 2013년에 국내에서 첫 환자가 발생한 이후 매년 증가 추세에 있지만 질병의 전파에 있어서 온도와 강수량, 습도 등 기후요소와 이들 매개체 밀도와의 상관관계를 분석한 연구 결과는 아직까지 없다(표 8.8). 하지만 쯔쯔가무시증처럼 질병 발생과 기후요소 특히 기온과 관련성이 있을 것으로 생각되며 이에 대한 연구가 앞으로 필요할 것으로 생각된다.

진드기 매개 질환 중 아나플라즈마(Anaplasma phagocytophilum)와 에르리키아(Ehrlichia chaffeensis)를 매개하는 진드기에 대해서 풀숲 및 야생설치류에서 채집 후 밀도를 조사해 보면 가을철에 밀도가 가장 높았으며 연평균 강수량의 증가, 습도 증가 및 일평균 일조량 감소 등으로 인해서 진드기의 밀도가 감소하는 것으로 확인되었다(Oh et al., 2009).

8.2.5 수인성 및 식품 매개 감염병

수인성 및 식품 매개 감염병은 바이러스, 세균 및 원충생물들과 같은 병원 미생물이 오염된 물이나 식품을 매개로 구강을 통해 전파 및 감염되어 발생하는 소화기계 질병이다. 이들 병원 미생물은 기후변화에 의해 기온, 해양온도, 습도, 강수량, 염도, 생태환경 등이 변화하면 이들

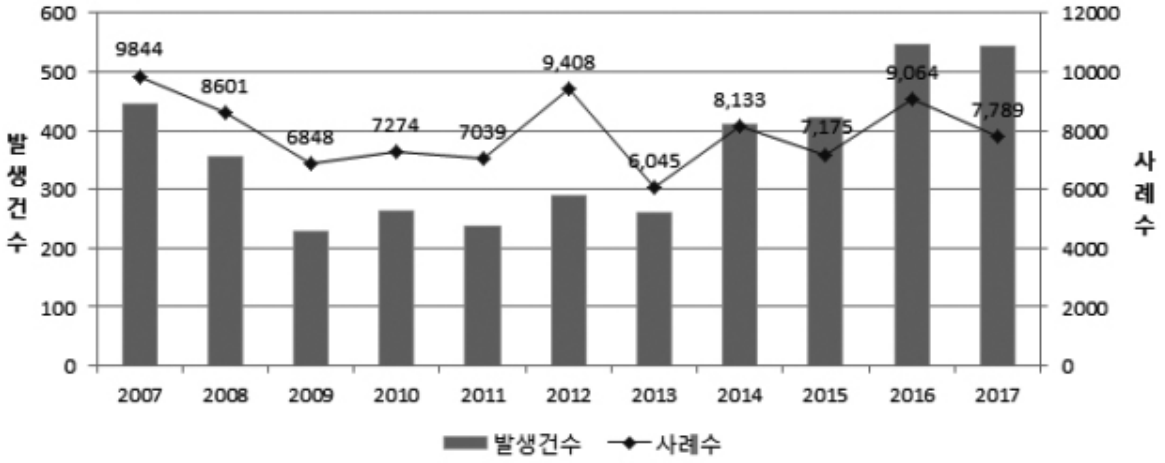


그림 8.11 수인성·식품매개 감염병 집단발생 현황(질병관리본부, 2018).

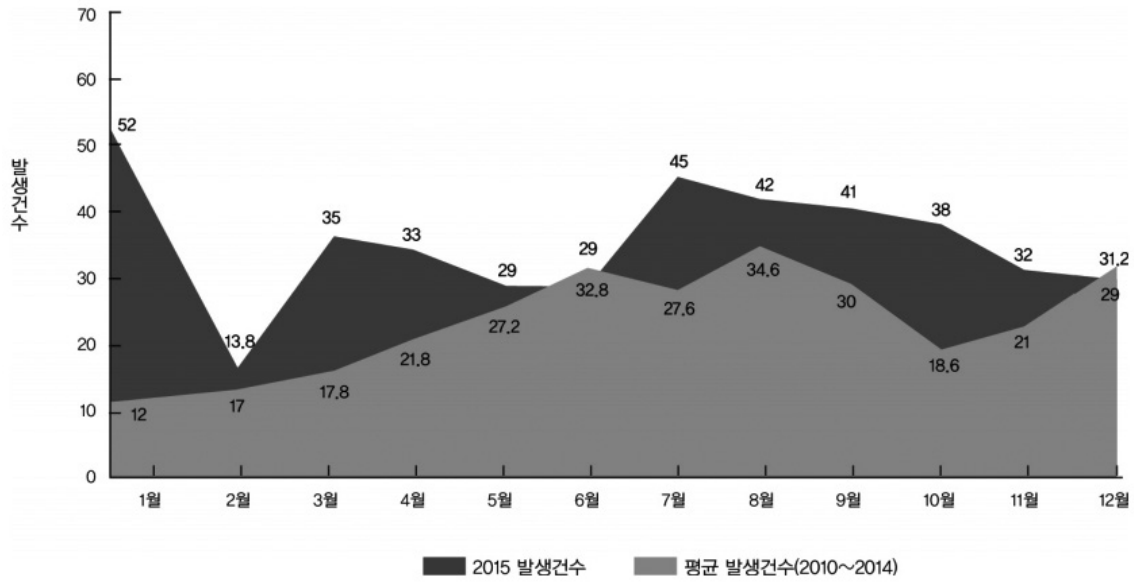


그림 8.12 수인성·식품매개질환 유행 월별 발생건수(2010~2015년)(질병관리본부, 2016b).

병원미생물들의 이상 증식 및 번식이 올 수 있다. 기온과 연관된 모든 설사성 질환 발생률 비율(Incidence rate ratio, IRR)을 살펴보면 살모넬라, 캄필로박터균 감염증, 비콜레라 비브리오균감염증에서 평균 기온과 양의 상관성이 높게 나타났으며 기온 상승, 폭우 및 홍수에 의한 대규모 감염병 발생 중 비브리오균 감염증이 높게 나타났다(질병관리본부, 2017). 우리나라의 경우 기온이 섭씨 1℃ 상승할 경우 장염 비브리오, 세균성 이질순으로, 수인성 및 식품매개 감염병의 평균 발생이 4.27% 증가할 것으로 예측이 되었다(Kim et al., 2009).

질병관리본부의 병원성 비브리오균의 검출률과 해양환경 인자들과의 상관관계 분석결과를 보면 병원성 비브리오균 검출률과 상관관계가 가장 높은 환경 인자는 수온으로 확인되었다. 비브리오 패혈증균과 장염 비브리오균의 상관계수는 각각 0.91과 0.90으로 수온과 높은 상관관계를 보였으나, 계절성이 관찰되지 않은 비브리오 콜레라균의 상관계수는 -0.25로 수온과 낮은 상관관계를 나타내었다. 기온의 경우는 비브리오 패혈증균, 장염 비브리오균과 각각 상관계수 0.87과 0.79로 수온보다는 낮은 상관관계를 나타내었다. 염도는 수온, 기온과는 반대로 강수량이 높은

7~8월에 일시적으로 감소하는 경향을 보여 3종의 병원성 비브리오균의 검출률과 음의 상관관계를 나타냈으며, 담수에서도 잘 자라는 비브리오 콜레라균은 -0.04의 상관관계를 보여 염도와 관련이 낮았다. 수소이온농도[pH]와 비브리오 패혈증균의 상관계수는 0.44로 나머지 두 병원체와의 상관관계 보다 높음으로, pH 감소와 지난 3년간 패혈증균의 검출률 감소와의 관계에 관한 지속적인 분석이 필요하다고 판단된다(표 8.15)(질병관리본부 2016a).

연도별 수인성·식품매개질환 유행 발생 건수는 신고대상이 확대된 2007년 이후 매년 200~300건이 발생하였으나 2015년의 경우 422건이 발생하여 큰 폭으로 증가하였다(그림 8.11). 2015년의 발생건수(422건)는 지난 5년(2010~2014년) 평균(288건) 비교하여 46.5% 증가하였고 월별 발생건수는 2015년 월별 발생건수를 살펴보면 1월(52건), 7월(45건), 8월(42건), 9월(41건) 발생이 높았으며 지난 5년간(2010~2014년)에 대비하여도 높은 발생을 나타내었고 특히 1월간 발생건수가 가장 높아 전체 발생건수의 12%를 차지하였다(그림 8.12).

질병관리본부의 2016년에서 2018년까지 수인성, 식품매개 감염병 병원체 감시사업을 통해서 수집된 병원체에 대해서 병원체별, 계절별, 연령별 발생동향 분석결과를 보면 살모넬라와 병원성 대장균은 하절기인 6월부터 10월까지 분리율이 지속적으로 높았고 캄필로박터의 경우 하절기인 6월부터 8월까지 분리가 되었다. 이러한 결과는 고온 다습한 하절기에 수인성, 식품매개감염원인세균에 의한 질병이 발생한다고 볼 수 있다(질병관리본부, 2019a).

국내에서 2006년부터 2015년까지 노로바이러스 식중독은 겨울철에 주로 발생하였다. 기후요소들 중 평균기온, 최고 및 최저기온, 강수량, 강수일수, 그리고 습도가 월별 노로바이러스 식중독 발생건수와 유의한 음(−)의 상관을 보였다($p<0.05$)으로 최저기온($r=-0.398$)과 평균기온($r=-0.396$)이 가장 큰 상관계수를 보였다. 하지만 봄, 가을철의 노로바이러스 식중독 발생 비율의 합이 겨울철 발생과 유사하였다(김종규 et al., 2019).

8.3 영향 전망

「한국 기후변화 평가보고서 2014」에 따르면, 기후변화로 폭염의 빈도 및 강도가 증가하여 이로 인한 건강 피해가 필연적이지만, 인구집단의 민감도와 적응 능력에 따라 폭염에 의한 건강영향은 다르게 나타날 수 있다. 미래기후 시나리오에 따르면 강수량과 강수 농도가 증가하여 이로 인한 사회경제적 피해액도 커질 것으로 예측된다. 대기오염물질은 기후변화로 인한 건강영향평가에서 혼란변수로 사용되고, 이산화탄소 농도 증가에 따라 꽃가루 시기 및 노출 증가로 알레르기 질환 부담이 증가할 것으로 예상된다. 곤충 매개 질병이 기후변화에 가장 민감하게 반응할 것으로 예상되고, 기온 상승으로 식중독과 설사 질환 환자수가 증가할 것으로 추정했다.

8.3.1 폭염

기상청(2018)에 따르면 우리나라 연평균기온을 온실가스 농도 변화를 이용한 대표농도경로(RCP, Representative Concentration Pathway) 시나리오로 전망했을 때, 전 지구 및 동아시아 연평균기온에 비해 그 상승폭이 더 클 것으로 전망했다. 특히 폭염일수는 현재 연간 10.1일에서 RCP 8.5 시나리오의 경우 21세기 후반에는 35.5일로 여름철의 30% 이상이 폭염일에 해당할 것으로 전망했으며, 기온이 높은 저지대를 중심으로 큰 폭으로 증가할 것으로 전망했다(그림 8.13).

기후변화로 인한 폭염의 건강영향 추정은 미래의 폭염 발생현황, 폭염의 건강영향정도, 미래 인구구조 변화, 인구집단의 폭염 적응, 건강수준 등 개인적 특성 및 미래의 비기후적 요인 등을 고려해야하는 등 복합성 및 불확실성이 존재한다. 미래 폭염으로 인한 사망자 추정에 미래 인구집단의 건강수준을 고려하여 서울 전체 연령에 대한 하절기 사망률을 추정한 결과, 사망률이 2011년에 인구 10만 명 당 100.6명에서 2040년에는 230.4명으로 약 2배 정도 증가하는 것으로 나타났다(그림 8.14). 이는 인구수의 변화 및 65세 이상 인구수의 급격한 증가로 인해 나타난 것으로

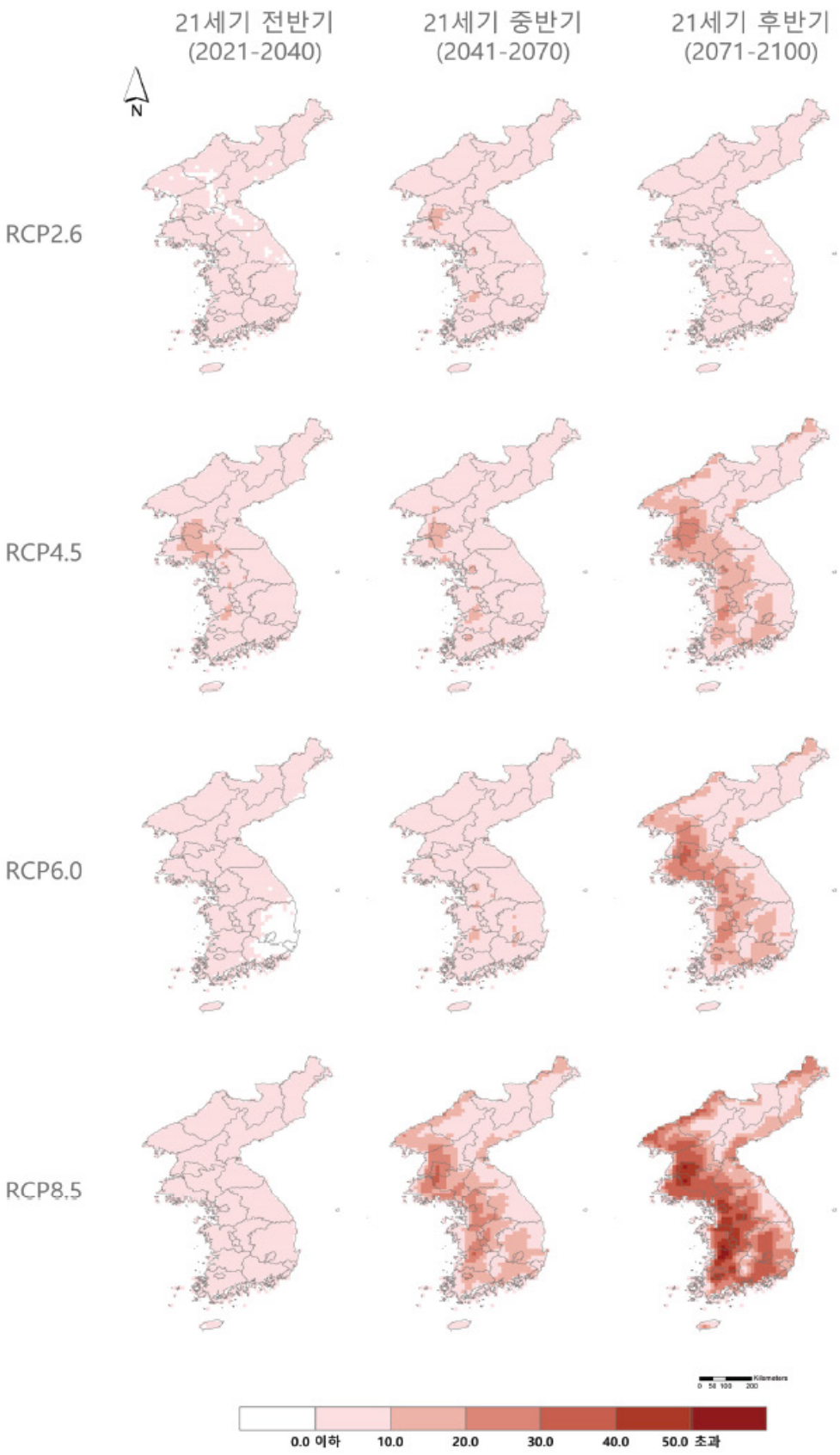


그림 8.13 한반도 폭염일수 편차(1981~2010년 모델 기후값 대비) 변화 전망(일)(기상청, 2018).

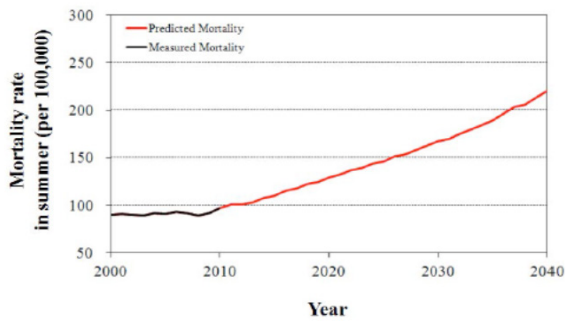


그림 8.14 서울 2000~2040년 전체연령의 하절기 사망률 (한국환경정책·평가연구원, 2012).

예상되는데 이처럼 인구집단의 노출 인구수 증가 및 노령화는 더 많은 초과사망을 야기할 수 있다. 또한 온열질환으로 인한 사망은 온실가스 저감 정책이 상당히 실현되는 RCP 4.5에서도 피할 수 없다는 연구결과도 있다(Kim et al., 2016). 따라서 폭염의 민감도와 적응능력을 높이고, 취약 인구집단 혹은 취약지역의 폭염 노출을 줄여야 기후변화로 인한 폭염의 건강 피해를 줄일 수 있겠다.

8.3.2 기상재해

기상청(2018)은 지구온난화에 따라 폭염일수와 열대야일수와 같은 고온 관련 극한지수는 증가하고, 한파일수, 서리일수, 결빙일수와 같은 저온 관련 극한지수는 감소할 것으로 전망하고 있다. 대기-해양 대순환 모델(Atmosphere Ocean General Circulation Model, AOGCM)에 따르면 RCP 시나리오대로 미래 기온이 상승할 경우, 집중강우가 발생하고, 열대성 저기압과 풍속이 심화되고, 열파의 빈도와 세기가 증가한다. 즉, 기후변화로 인한 기온상승으로 태풍, 홍수, 폭염, 대설, 가뭄과 같은 비이상적인 자연현상의 강도가 심해지고 대형화되어 사회, 경제, 환경적으로 초대형 재해 리스크 위험이 증가하게 된다(반영운, 2015).

우리나라 연강수량은 대부분의 RCP 시나리오의 기간에서 증가하고(그림 8.15), 강수량의 변동성 증가로 가뭄이나 호우 같은 극한강수 현상이 빈번해질 것으로 전망했다. 표준강수증발산량지수(SPEI)와 대표농도경로(RCP 8.5)를 이용한 우리나라 미래 가뭄의 영향 전망(김병식 등, 2013)에서 강수량은 증가하지만 기온 상승과 건조함 지속으로 인한 증발산 증가로 인해 가뭄이 악화될 것으로 예상했다. 미래 강수량을 예측했을 때, 2000년에 비해 2050년에는 15% 증가하고, 가뭄과 호우강도가 심화될 것으로 전망했다(질병관리본부, 2011).

과거 30년간(1980~2010) 적설량이 영동은 증가, 호남은 감소했고(김샛별 등, 2012), RCP 시나리오를 이용해 미래 적설량을 예측한 결과, 기온 상승으로 연평균 적설량은 감소하는 것으로 나타났다(조형경 등, 2011). 하지만 폭설 취약지역은 현재 강원도, 경상북도에서 경기, 인천 등으로 국지적이었던 폭설이 전국 대부분의 지역으로 확대되는 것으로 나타났다(안소라 등, 2015). RCP시나리오 모든

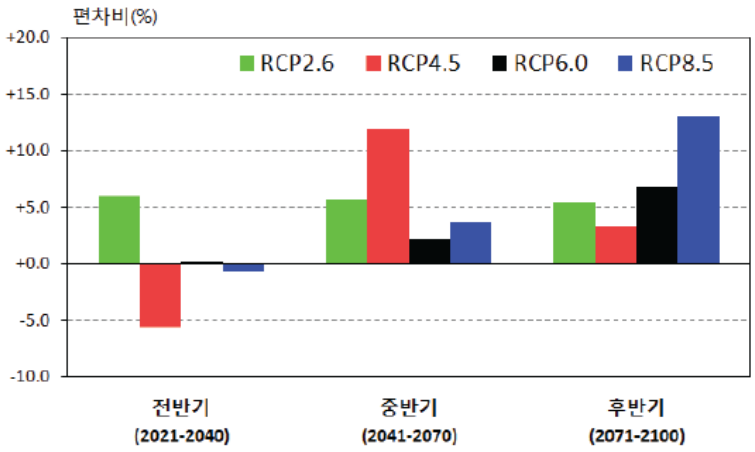


그림 8.15 시나리오별 21세기 전반기, 중반기, 후반기의 한반도의 연강수량 편차비(1981~2010년 모델 기후값 대비) 전망 (%)(기상청, 2018).

기간에서 남부해안, 한라산 주변을 제외한 제주도, 동해안, 수도권 및 광역시 등에서는 서리일수와 결빙일수가 적지만, 해발고도가 높은 강원 산간지역과 경상북도 북동부, 소백산맥 줄기에 위치한 지역에서는 그 빈도가 많을 것으로 예측되었다(박창용 등, 2013).

이처럼 기후변화의 영향으로 폭염 증가와 더불어 가뭄이 심화되고, 폭우 및 폭설 발생 빈도 및 강도 증가 등 기상재해의 위험은 증가하여 인명피해 뿐만 아니라 사회경제적 피해까지 커질 것으로 예상된다.

8.3.3 대기질과 알레르기

기후변화에 따른 대기오염과 이에 따른 건강 영향에 대한 직접적인 연구는 거의 없는 실정이다.

RCP 기후변화 시나리오에 따른 미래 여름철(6~8월) 오존 농도 증가로 인한 천식 입원을 추정하기 위해, 국민건강보험공단의 유병자료 및 미국 환경보호청(Environmental Protection Agency, EPA)에서 개발한 대기오염물질 농도 변화에 따른 건강영향 규모를 산출하는 프로그램인 BenMAP (Environmental Benefits Mapping and Analysis Program)을 이용한 결과, 전국 시군구 및 전체 연령집단에서 2052년에 천식입원이 급격히 증가하는 것으로 추산되었다(환경부, 2015).

우리나라의 꽃가루 농도와 기상요소의 관련성은 매우 크다고 나타났는데 특히 기온과 양의 상관관계를 가진다(이혜림 등, 2012). 따라서 기후변화에 따라 꽃가루 개화기간이 길어지고, 특히 적정온도가 유지되면 꽃가루 농도도 높아져서 천식, 비염, 결막염 등 알레르기 질병 발생율도 높아질 것으로 예측된다.

8.3.4 곤충 및 설치류 매개 감염병

현재 전 지구적으로 진행되고 있는 기후변화로 인한 생태계 교란은 곤충 및 설치류 매개 감염병의 질병 발생 양상에 많은 영향을 미칠것으로 예측된다. 국내에서도 쯔쯔가무시증과 같이 기후변화에 민감한 질병이 급증하고, 삼일열 말라리아처럼 사라졌던 질병이 다시 발생하는 등 기후변화가 건강에 영향을 미치고 있는 것이 여러 질병에서 확인되고 있고, 그런 영향은 향후 계속 증가할 것으로 예상되고 있다. 특히 곤충 매개 질병의 경우 매개체가 기후변화에 가장 민감하게 반응할 것으로 예상되며 말라리아가 그 대표적인 질병이다.

기후변화가 말라리아 발생에 영향을 미치는 직접적인 이유는 원충의 분화, 성숙이 빨라지고 성충의 수명이 길어지며 이로 인해 전파능에 변화가 발생하기 때문이다. 또한 기후변화로 인한 기온의 상승은 낮은 기온으로 인해 현재는 원충의 분화, 성숙이 불가능한 지역에서의 원충의 생장을 가능케 한다. 따라서 위험지역 경계부나 위험지역 내 고산지대, 불안정 말라리아가 발생하는 고위도 지역은 조그만 온도변화에도 말라리아 전파의 위험이 급격히 증가할 가능성이 있는데 우리나라가 바로 이러한 지역에 속한다. 기후변화는 특히 매개체에 의한 질병전파 기간에 영향을 미칠 것으로 예상되며 이는 질병 부담(disease burden)에 직접적인 영향을 미친다.

최근 우리나라에서 말라리아 전파기간이 점점 길어지고 있는 것도 이 같은 현상의 일종으로 사료된다. 질병 전파 기간이 길어짐에 따라 한반도 주변 지역에서의 말라리아 전파 양상도 영향을 받을 전망이다. 현재 남한 지역에서는 연중 4~6개월, 북한 지역에서는 연중 1~3개월 동안 말라리아 전파가 가능하나 기후 변화에 의해 금세기 중후반부에는 남북한 전체에서 연중 4~6개월 동안 말라리아 전파가 가능해질 전망이다. 특히 한반도와 동위도 상의 중국 지역에서는 연중 7~11개월 동안 말라리아 전파가 가능해질 전망이어서 한반도도 이의 영향을 받을 가능성이 있으므로 이에 대한 주의가 요망된다.

기온이 질병에 미치는 영향은 비교적 단순하지만 강수량의 영향은 기온에 비해 복잡한 양상을 보인다. 기후 변화로 인해 금세기 동안 전체적인 강수량은 증가할 전망이나 중저위도 육지부에서는 오히려 감소할 가능성이 더 크다. 적당한 강수량 증가는 모기 서식에 유리한 환경을 조성하여 말라리아 발생이 증가하지만 강수량이 지나치게 증가하면 고인 물에서 서식하던 모기 유충을 다 쓸어버리게 되어 모기 밀도는 오히려 감소할 가능성이 높다. 한편 기후 변화에 의해 강수량이 늘어나면 공항을 통해 유입된 모기의 생존 기간도

길어진다. 기후 변화에 의한 이와 같은 강수량의 변화는 우리나라가 위치한 위험 지역의 경계부에서 가장 큰 영향을 미칠 것으로 예상된다.

뎅기열 발생 위험지역은 1월 평균기온이 10℃ 이상인 지역이다. 현재 국내에서는 이와 같은 지역을 찾기는 어려우나 기후변화로 인한 기온상승으로 뎅기열 바이러스의 주 매개모기 중 열대지방에서 서식하는 이집트 숲모기(Aedes aegypti)의 서식 조건이 형성되고 흰줄숲모기(Aedes albopictus)가 겨울철에도 존재하는 서식조건이 형성되면 국내에서도 뎅기열, 치쿤구니야열 및 지카 바이러스의 전파가 가능할 것으로 예상된다. 2019년의 Lee와 Farlow의 연구를 보면 우리나라에서 부산의 동내, 연제, 부산진, 수영 그리고 해운대, 울산의 서쪽지역 및 군산 그리고 무안의 남쪽과 제주도의 남쪽 지역이 뎅기 바이러스의 고 위험 지역으로 확인되었다(Lee and Farlow, 2019b).

상기한 바와 같이 기후변화에 의해 우리나라에서 발생이 계속해서 증가가 예상이 되는 곤충 및 설치류 매개 감염병은 쯔쯔가무시증이며 SFTS, 삼일열 말라리아 환자수가 증가될 가능성이 있다. 또한 세계화 효과에 의해서 해외에서 국내로 유입이 가능한 열대열 말라리아, 뎅기열 및 황열은 2014년 일본에서 국외에서 유입되어 뎅기열 환자가 토착적으로 발생한 사례처럼 우리나라에서 여름철에 단기적으로 환자가 국외에서 유입되어 국내에서 환자 발생 및 유행이 가능하지만 2014년 일본에서 일시적인 뎅기열 유행에서 보듯 우리나라의 매개체 분포 특징 및 겨울철이 존재하는 계절적 특성으로 열대열 말라리아, 뎅기열 및 황열이 국내에 유입이 되더라도 일회성 및 단기간 유행에 그칠 가능성이 높다. 그러나 기후변화가 지속되어 우리나라의 제주도 및 남쪽 지역의 기후가 아열대 기후로 바뀌어 겨울이 없어진다면 이들 지역을 중심으로 열대열 말라리아, 뎅기열 및 황열이 토착적으로 발생할 가능성도 있다(Lee and Farlow, 2019b). 특히 뎅기열의 경우 감염된 환자에서 높은 바이러스 역가로 바이러스 혈증이 유발되기 때문에 숲모기 매개로 사람 간 전파가 가능하기 때문에 주의가 요망된다. 웨스트나일열의 경우 사람이나 영장류뿐만 아니라 조류, 말 등 다른 동물도 광범위하게 감염시킬 수 있으며 이들 동물에 의해서 국외에서 유입 후 광범위하게 전파된 미국의 사례처럼 물적 인적 교류가 점점 활발한 우리나라의 특성을 고려하면 이러한 위험성은 항상 존재하고 있다.

열대열 말라리아, 뎅기열뿐만 아니라 현재에는 국내에서 나타나고 있지 않지만 기후변화로 인해 아열대성 기후로 변한다면 웨스트나일열, 치쿤구니야열 등이 해외에서 유입되어 국내에서 토착적으로 발생 및 확산 될 가능성이 있다. 또한 라임병, 진드기 뇌염, 바베시아 등 참진드기 매개 질환들의 출현 가능성이 있다. 특히 쯔쯔가무시증을 매개하는 주요종인 활순털진드기의 분포가 1996년에 비해(Lee et al., 2011) 2008년에는 충청지역에서 경기도 지역까지 북상한 후 계속적으로 북상중에 있으며(그림 8.7)(질병관리본부 2019d), 이러한 사실은 털진드기 등을 매개체로 하는 질병들의 분포가 확산될 것이고, 이에 따라 건강부분에 있어서 취약계층에서 더 많은 영향을 받을 것으로 예측된다. 따라서 쯔쯔가무시증처럼 진드기 매개 바이러스 감염병인 SFTS의 주매개체인 작은소피참진드기의 분포 및 밀도와 기후변화와의 관련성에 대한 연구가 필요할 것으로 생각된다.

8.3.5 수인성 및 식품 매개 감염병

식품의약품안전처는 지난 100년(1912년~2010년)간 우리나라 6대 도시 평균 기온이 약 1.8℃ 상승했고 기온이 1℃ 상승할 때 살모넬라, 장염비브리오 및 황색포도상구균으로 인한 식중독 발생 건수는 각각 47.8%, 19.2% 및 5.1% 증가하는 것으로 조사했다. 한국보건산업진흥원 연구에 따르면 시나리오 RCP 4.5와 RCP 8.5에 따른 기상 예측자료를 이용하여 식중독 발생 건수를 예측한 결과, 2090년대에는 식중독 발생 건수가 연평균 337건 발생할 것으로 예상되고, 이는 2002~2012년에 비해 42퍼센트나 높은 수준이며 기온변화로 인해 2090년 식중독 발생건수 최대 42% 증가할 것으로 예측하고 있으며 평균기온이 1℃ 상승하면 식중독 발생건수는 5.27%, 환자 수는 6.18% 증가할 것으로 예측하고 있다(Sari at al., 2005). 병원성 대장균, 캠필로박터, 살모넬라는 대기온도, 비브리오는 수온과 관련이 있으며 2016년 평년기온 2015년 대비 0.2℃ 상승에 따라 전체 식중독 환자수가 5,981명에서 7,162명으로 19.7% 증가하였다. 이중 2,145명은 여름폭염(8~9월)으로 인해 학교에서 발생한 식중독 환자수 건수이다(식품의약품안전처, 2017).

식품의약품안전처 식품안전나라 식중독통계자료에 따르면 2012년부터 2018년까지 식중독 질환으로 인해 내원한 환자수는 48,778명으로 집계됐으며, 2018년 보고된 식중독 환자수는 11,504명으로 식중독 통계자료를 보면 발생 추이는 계속적으로 증가하거나 머물러 있는 상태이다(표 8.16).

식중독 발생의 사회·경제적 잠재적 손실비용은 연간 2조 8,000억원으로 추정하였다(식품의약품안전평가원, 2013). RCP 기반(RCP 4.5, 8.5) 온도 변화에 따른 설사질환의 미래 질병부담은 시간이 지날수록 증가하는 한다(2020년 0.021 ASR DALY/1.000(RCP 4.5)과 0.019 ASR DALY/1.000 (RCP 8.5), 2030년 0.025 ASR DALY/1.000(RCP 4.5)과 0.027 ASR DALY/1.000(RCP 8.5), 2050년 0.025 ASR DALY/1.000(RCP 4.5)과 0.046 ASR DALY/1.000(RCP 8.5) (건강증진연구사업, 2014).

8.4 취약성의 주요 원인

「한국 기후변화 평가보고서 2014」에 따르면, 폭염에 노출이 크고, 민감도가 높고, 적응능력이 낮을수록 폭염에 대한 취약성이 높았다, 기상재해로 인한 취약성 원인을 분석한 연구는 국내에서는 아직 거의 찾아보기 힘든 실정이다. 오존 농도는 대구 분지 주변과 서울을 포함한 광역 도시에서 높게 나타났고, 특히 여름에 오존 등 대기오염 물질의 농도 증가로 호흡기계 및 심혈관계 질환 및 사망자가 증가한 것으로 나타났다. 쯔쯔가무시나 수인성 및 식품매개 감염병의 경우 지역별로 취약성이 다르게 나타났다. 모든 부문에서 교육수준이나 지역 또한 취약성을 분석하는 중요 요인 중 하나였고, 특히 노인 인구가 취약한 것으로 나타났다.

8.4.1 폭염

폭염에 취약한 집단에 대해서는 많은 연구에서 입증되었다. 질병관리본부(2018)에 따르면 65세 이상 인구, 독거노인, 기초생활수급자, 등록장애인 비율이 높은 시군구에서 온열질환 외래환자 발생위험이 높았다. 특히 전라남북도가 온열질환 취약지역에 포함되는 시군구가 많았으며 상대위험비는 2.15였다. 국민건강보험 데이터를 활용하여 기후변화 영향별 가이드라인을 데이터베이스화한 연구에서는 폭염에 민감 취약집단은 65세 이상 노인, 유아 및 어린이, 심뇌혈관 질환이나 호흡기계 질환 등 만성질환자, 장애인, 노숙인, 직업상 노출이 많은 사람으로 나타났다 (환경부, 2015).

VESTAP을 통해 기후변화에 따른 폭염의 건강 취약성을 평가한 결과, RCP 8.5 시나리오에 따르면 우리나라에서 2040년대에 폭염에 가장 취약한 곳은 대구였고 그 중에서 평리2동과 서구로 밝혀졌다(그림 8.16). VESTAP (Vulnerability Assessment Tool to build Climate Change Adaptation Plan)는 웹기반 기후변화 취약성 평가도구로, CCGIS(Climate Change adaptation program based on GIS)와 LCCGIS(Local Climate Change adaptation program based on GIS)의 문제점을 개선하여 기초 및 광역지자체 단위의 취약성 평가를 웹기반에서 통합적으로 수행할 수 있도록 개발되었다(오관영 등, 2016).

Oh et al.(2017)에 따르면 취약성 평가 대용변수 중, 기후노출 부문은 일 최대기온이 33도 이상인 날의 횟수와 일 상대습도가, 민감도 부문은 기초생활수급자 비율과 65세 이상의 인구가 결과에 큰 영향을 주었다. 적응능력 부문에서는 건강보험적용 인구 비율과 인구 당 보건의료 종사자들의 수였는데 이는 폭염에 대한 건강 취약성 관련 적응능력을

표 8.16 식중독통계(2011~2016)(식품의약품안전처 식품안전나라 식중독통계).

구분	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018
발생건수	256	235	349	330	399	336	363
환자수	6,058	4,958	7,466	5,981	7,162	5,649	11,504

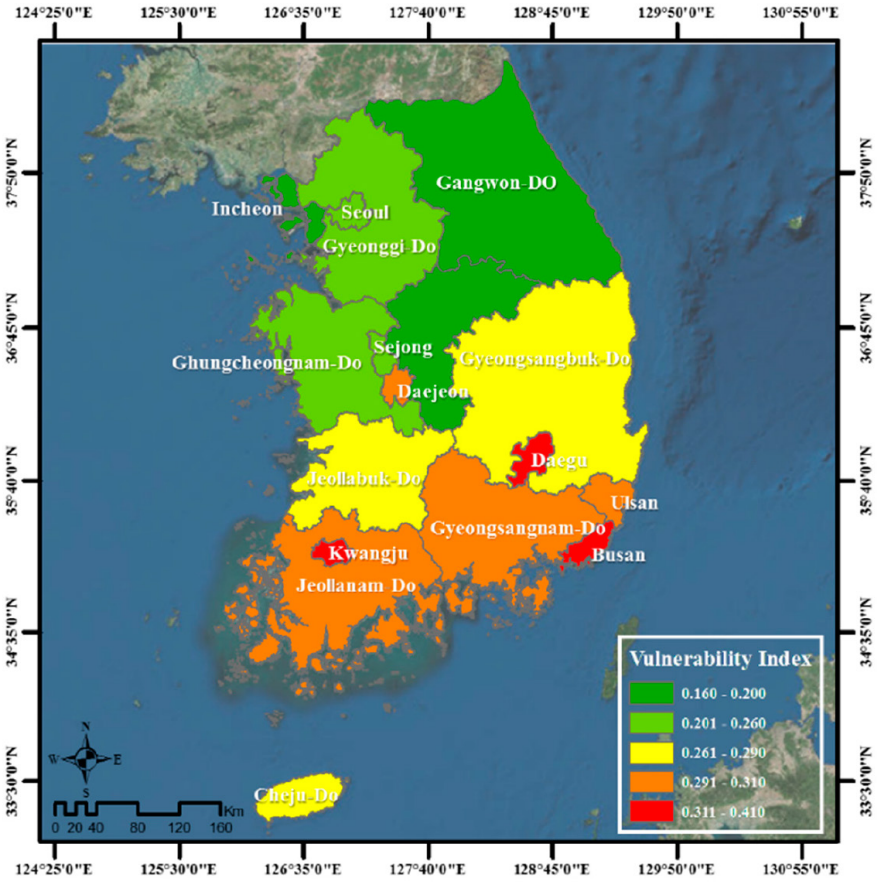


그림 8.16 폭염에 대한 건강 취약성 평가 결과(RCP 8.5 시나리오, 2040년대)(Oh et al., 2017).

증가시키기 위해서는 전반적인 경제수준을 향상시키는 것보다는 지역사회 의료 인프라를 향상시키는 것이 훨씬 효과적이라는 의미이다.

8.4.2 기상재해

태풍, 강풍, 풍랑, 호우, 대설, 폭풍해일, 한파, 폭염, 황사 등 각종 기상 현상으로 인한 재해발생이 예상될 때 기상특보(주의보 및 경보)를 발령한다. 기후변화 영향으로 인한 집중호우 빈도 증가는 사망, 상해, 감염, 호흡기계 및 피부질환 위험 증가와 더불어 홍수로 인해 주거, 사업, 교통마비, 도시 및 기반시설 손실과 같은 피해를 낳게 되고, 가뭄 증가는 수확량 감소 및 경작 실패로 식량 및 물 부족 위험 증가, 물 스트레스 확대로 인한 수인성 및 식중독 질병 위험이 증가하는 등 인간생활 및 사회 전반에 악영향을 주게 된다. 수해 발생의 직접적인 원인은 단시간에 국지적으로 발생한 폭우이지만, 하수관거 통수능력 부족이나 저지대지역 개발, 불투수면적 증가, 침투시설 미흡 등 재해를 고려하지 않은 도시개발로 인해 그 피해가 크게 나타나게 된다(국토연구원, 2013). 홍수로 인한 기후변화 취약성은 기상요소의 영향이 가장 컸으며, 그 외에 보건의료체계, 사망 혹은 이재민 피해, 환경요소(녹지면적, 도로면적, 산림내 경사도, 하천 개수율, 재해 피해액) 등이 취약성 증가에 기여한 것으로 나타났다(신호성과 이수형, 2014).

국토연구원(2012)은 기후변화에 따른 기상재해로 도로, 항만 등 국가기반시설에 피해를 유발하고, 해수면 상승으로 인한 해안지역 침수위험 가중은 국토 이용에 부정적인 영향을 미칠 것으로 우려되어 기후변화에 따른 기상재해별, 지역별 국토 취약성을 분석하여 취약지역을 도출했다. 홍수는 서울, 강원도, 경상남도, 폭설은 백두대간을 따라 강원도, 충청북도, 전라북도, 경상남도, 해수면상승 취약지역은

남해안(전라남도 진도군, 신안군 등)과 서해안(충청남도 태안군 등) 일대 지자체가 취약한 것으로 나타났다. 특히 기상재해로 인한 지역별 사망자는 대도시보다 중소도시 및 농어촌 지역의 사망률이 더 높았는데 특히 중소도시 및 농어촌 지역 해안지역에 거주하는 사람은 대도시 내륙지역에 거주하는 사람보다 약 11배 이상 기상재해에 취약한 것으로 나타났다(질병관리본부, 2011).

기후변화로 인한 기상재해 중 한파에 취약한 요인을 살펴보면, 한랭 질환으로 인한 외래 방문의 취약지역 분석 결과에서는 충북, 강원 내륙, 영호남 지역이 한랭 질환 취약지역에 포함되는 시군구가 많았다(질병관리본부, 2018). 고온에서는 심혈관계 입원이었지만, 저온에서는 알레르기, 천식 등 호흡기계 질환 입원에서 유의한 결과를 보였다(Son et al., 2014). 급성심근경색 입원과 기온 관련 연구(Kwon et al., 2015)에서는 낮은 사회경제적 상태인 사람들의 생활방식이 날씨에 더 취약한 것으로 나타났다. 또한 고혈압, 부정맥 등의 위험이 높은 여성이 남성보다, 체온조절기능이 떨어지는 75세 이상의 인구 집단이 기온에 더 취약한 것으로 나타났다.

8.4.3 대기질과 알레르기

대기오염물질 농도 증가에 따른 영향은 연령, 기저질환, 유전적 소인, 교육이나 소득 수준과 같은 사회경제적 상태, 거주지에 따라 다르게 나타난다(한설희, 2019). 노인은 체내에 흡입된 미세먼지를 체외로 배출시키고 독성을 제거하는 능력이 떨어지고, 이미 심혈관 또는 호흡기 질환이 있는 경우가 많고 면역력이 떨어져서 기저질환에 의해 증상이 악화될 수 있다. 또한 학령기 아동이 만성적으로 대기오염에 노출되면 과체중이나 비만이 되기 쉽고, 비만은 그 자체가 만성 염증을 동반하므로, 미세먼지에 대한 취약성이 배가 된다. 체내로 흡수된 대기오염물질은 전신 염증을 유도해 심혈관 질환을 유발하거나 악화시키므로 관상동맥질환, 죽상경화증, 심근경색, 고혈압과 같은 심혈관 질환을 앓는 사람과 천식, 만성 폐색성 폐질환 같은 호흡기 질환이 있는 사람에게 취약하다. 또한 알츠하이머병의 진단방법 중 하나인 Apolipoprotein E4(ApoE4) 유전자는 인지기능 저하에 취약한 유전적 위험인자이다. 교육이나 소득과 같은 사회경제적 상태가 좋지 않을수록 기존 질환의 이환율이 높고, 취약계층 거주지가 상대적으로 대기오염에 노출되기 쉽거나 의료기관 접근성이 좋지 않는 등의 요소가 상황을 악화시킬 수 있다. 혹은 미세먼저 농도가 높은 지역이나 미세먼지를 유발하는 주변도로와 가까이 위치한 지역이 취약하다고 볼 수 있다.

자살위험과 대기오염 노출을 사회경제적 요인에 따라 층화 분석한 결과 남성, 65세 이상, 낮은 교육수준을 가진 집단의 자살 위험이 더 높은 것으로 나타났다(Lee et al., 2018b). 국민건강보험공단 표본 코호트(2002~2013년) 100만명의 빅데이터를 분석한 결과에서는 대기오염이 심할수록 응급실을 찾은 파킨슨병 환자가 많았는데 그 중 약 90%가 65세 이상 노인이었다(Lee et al., 2017). 서울의 뇌졸중 환자를 대상으로 한 연구에서는 대기오염 농도가 높아질수록 뇌졸중 발병 위험이 상승했다. 특히 뇌졸증 발생률은 1월보다 9월이 1.23배 높았고, 계절성 허혈성 뇌졸중 발생률은 겨울보다 여름이 1.18배 높아 계절적으로 취약성이 다른 것을 확인할 수 있었다.(Han et al., 2015).

질병관리본부(2012)에 따르면 우리나라는 봄에는 나무 꽃가루, 가을에는 잡초 꽃가루가 주된 알레르기 원인인데 알레르기 비염과 천식 모두 같은 양상으로 봄과 가을에 악화되었고, 10년 전에 비해 질환 발생이 증가하는 추세를 볼 수 있었다. 또한 알레르기 질환은 면역기능이 취약한 소아가 알레르기 질환에 취약한 것으로 나타났다. 특히 소아가 집먼지 진드기에 취약하고 소아에서 큰조아제비 잔디 꽃가루의 감작율이 높아져서 녹지화로 잔디 재배 면적이 넓어짐에 따라 과거에 비해 잔디에 의한 알레르기 질환의 악화가 증가될 것으로 보았다.

8.4.4 곤충 및 설치류 매개 감염병

곤충 및 설치류 매개 감염병중 쯔쯔가무시증의 연평균 환자 발생수는 기온, 일최고기온, 일최저기온과 상관성을 보이고 늦봄과 여름의 기온과 밀접한 관련성이 있다, 즉 곤충 매개체 활동 시기와 같은 계절성이 뚜렷하다(강공언 등,2016). 또한 설치류 등 매개체 활동 시기 이외에 추수기 및 성묘로

인한 가을철 작업과 야외활동으로 인한 사회적 요인도 관련되어 있으며, 곤충 및 설치류 매개체와 접촉 빈도가 높은 농촌지역에 거주하는 고연령층(65세 이상)에서 주로 발생하며 농업 및 임업 종사자의 비율이 높다.

삼일열 말라리아는 1993년 비무장지대(DMZ) 인근 경기도 지역 전역 군인에게서 재발생이 보고되었으며, 2000년 정점을 보인이후 환자수가 감소하는 경향을 보이고 있으며 기온상승에 따라 말라리아 발생 위험이 증가를 환자가 밀집되어 있는 서울, 경기, 인천, 강원 순으로 기온이 1℃ 상승하면 발생 위험이 증가하는 것으로 나타났다(표 8.13).

SFTS은 전국적으로 환자가 발생하며 강원도, 경기도, 제주도에서 취약성이 높게 나타나고 있다. 연령층으로는 60세 이상으로 매개체와 접촉빈도가 높은 고령이 취약하였다. 최근에 발생한 곤충 매개 감염병으로 기후변화와 관련성에 대한 연구가 아직 없지만 기후변화, 매개 진드기 분포 및 밀도와 환자발생과의 상관관계에 대한 연구가 이루어져야 한다. 기후변화로 인한 기온상승으로 뎅기열 바이러스의 매개 숲모기 서식환경이 형성된다면 부산의 동내, 연제, 부산진, 수영 그리고 해운대, 울산의 서쪽지역 및 군산 그리고 무안의 남쪽과 제주도의 남쪽 지역이 뎅기 바이러스의 고 위험 지역으로 확인되었다(Lee and Farlow, 2019b).

8.4.5 수인성 및 식품 매개 감염병

기온과 연관된 모든 설사성 질환 발생률 비율(Incidence rate ratio, IRR)을 살펴보면 살모넬라, 캄필로박터균 감염증, 비콜레라 비브리오균감염증에서 평균 기온과 양의 상관성이 높게 나타났으며 우리나라의 기온이 섭씨 1℃ 상승할 경우 장염 비브리오, 세균성 이질순으로, 수인성 및 식품매개 감염병의 평균 발생이 4.27% 증가할 것으로 예측이 되었다(Kim, 2009). 또한 병원성 비브리오균의 검출률과 해양 환경 인자들과의 상관관계를 분석을 보면 병원성 비브리오균 검출률과 상관관계가 가장 높은 환경 인자는 수온으로 확인되었으며 2016년 평년기온 2015년 대비 0.2℃ 상승에 따라 전체 식중독 환자수가 5,981명에서 7,162명으로 19.7% 증가하였다. 식중독균인 살모넬라와 병원성 대장균 및 캄필로박터는 고온 다습한 하절기 분리율이 높으며 이시기에 식중독이 발생한다고 볼 수 있다(질병관리본부, 2019a).

8.5 적응 옵션

「한국 기후변화 평가보고서 2014」에서는 2007년 이후 기후변화 적응대책 경과를 기술하고, 보건복지부와 기상청, 소방방재청 중앙안전재난관리본부의 기후변화 취약성 감소를 위한 적응사업을 소개했다. 기후변화와 건강과의 관계 및 취약성 분석 연구가 증가하고 있고, 이를 토대로 적응대책을 수립하여 기후변화가 건강에 미치는 악영향을 최소화하는 것이 중요하다고 했다.

8.5.1 기후변화건강적응대책

8.5.1.1 2차 국가기후변화적응대책 및 건강분야 추진사업

제2차 국가기후변화적응대책에서 건강 관련 정책과제는 기후변화의 불확실성을 최소화하기 위해 이상기후(폭염, 한파, 가뭄)에 대한 장기예보 도입, 미세먼지나 오존 등의 환경예보 강화, 폭염 및 한파로 인한 온열·한랭 질환 감시, 기상재해 대응을 위한 24시간 재난응급의료상황실 운영 및 권역별 응급의료센터 확충, 수인성·식품매개 등 감염병 감시체계 운영 등으로 꼽을 수 있겠다.

기후변화 대응과 함께 건강증진에 기여하는 공동편익 사업(대중교통 이용, 도시 녹지 확대 등) 활성화나 폭염 시 물 섭취 등의 구체적인 국민행동요령을 홍보하고 있다. 예를 들어 폭염이 지속되고 휴가철 국내외 여행이 잦은 여름에는 수인성·식품매개 감염병 위험이 높아지기에 흐르는 물에 30초 이상 비누로 손 씻기, 안전한 물과 음식 섭취 등 감염병에 대한 예방수칙을 준수하기, 폭염기간 동안 독거노인에 안부 확인 방문 혹은 전화, 경로당의 냉방비 지원 등이 있다. 뿐만 아니라 폭염 피해 예방 위해 2016년부터 질병관리본부, 기상청, 국민안전처, 연탄은행이 폭염의 위험성과

행동요령을 알려 온열질환 피해를 최소화하고자 폭염 취약계층의 피해예방을 위한 '해피해피 캠페인'을 시작하여 129 보건복지부콜센터, 131기상콜센터, 119안전신고센터 번호를 표시해 위급 상황에 빠르게 대처할 수 있도록 했다.

기상재해에 대한 정부의 적응정책은 주로 홍수에 대해 실시되고 있다(질병관리본부, 2011). 정확한 조기 예·경보 시스템을 통해 피해를 최소화하고, 기술적인 대책과 홍수 발생에 대비한 국민행동요령 등 홍보를 강조한다. 그밖에도 태풍·호우, 낙뢰, 강풍·풍랑, 대설, 한파, 폭설, 황사, 지진, 해일로 기상재해를 구분하여 국민행동요령이나 위기대처 요령과 같은 재난 관련 정보를 인터넷, TV, 휴대폰 문자 등을 통해 전달하고 있다. 기상재해 대비 건강관리대책으로는 24시간 비상 가동하는 감염병 관리체계를 통해 특히 콜레라 감시 의료기관을 대상으로 설사환자를 조기 발견·보고하는 감시체계를 가동 중이다. 또한 홍수로 인한 침수지역 건강관리대책으로 위생교육을 강화하고, 설사 증상이 발현될 때 가까운 보건소에 신고하도록 홍보하여 감염병 예방약품(살충제, 손소독제 등)을 배포하고 장마철 방역 비축물자를 확보하여 긴급 지원하고 있다. 또한 재난 및 안전관리 기본법에 의해 자연재해(지진, 태풍, 폭풍, 홍수, 화산폭발 등) 발생시 재해대비 상시 기동감시 대응체계를 가동하고 있다. 현장 출동 및 처치(119), 응급의료정보센터(1339) 등 유기적 협력체계를 구축하고 있다.

국민재난안전포털에서는 풍수해(태풍, 홍수, 호우, 해일, 강풍, 풍랑, 대설, 지진)로 인한 재산피해 발생 보험료 일부를 국가 및 지자체에서 보조하는 재난관리제도인 풍수해보험, 재난심리상담, 강수량과 수위 정보, 이재민 임시주거시설, 재해정보지도, 자연재난상황 통계와 행동요령 등의 정보를 제공하고 있다. 또한 긴급재난 발생 정보와 국민행동요령을 앱을 통해서도 제공하고, 지진옥외대피장소, 무더위 쉼터 등 관련 시설물의 위치정보도 지도에서 찾을 수 있게 했다.

또한 미세먼지 취약계층의 건강피해를 최소화하기 위해 심뇌혈관질환(허혈성 심장질환, 심부전, 부정맥, 뇌졸증)자, 호흡기질환자, 천식환자 등 기저질환자는 고농도 미세먼지가 자주 발생하는 겨울철에 외출을 자제하거나 외출 시 비상약 소지하기, 취약계층에 미세먼지 마스크 지원, 어린이나 노인, 임산부는 미세먼지 나쁨 예보 시 등 외출 자제하기 등 구체적이고 실질적인 방법을 정책적으로 홍보하고 있다. 뿐만 아니라 꽃가루 알레르기 기후변화 건강위험 평가 등 생명기상기후영향평가 모델 개발을 개발하고, 천식지수 개발 및 예보제 운영, 아토피·천식 안심학교 사업, 호흡기·알레르기 질환 조사감시 체계를 구축하고 이에 대한 예방관리사업을 추진 중이다.

곤충 및 설치류 매개 감염병에 대해서는 말라리아가 발생하는 위험지역을 중심으로 계절적 발생빈도를 측정하는 등 말라리아 매개모기 감시 사업을 하고 있다. 또한 지구온난화에 따라 일본뇌염의 매개모기인 작은빨간집모기의 한반도 내 분포지역이 점차 북상하고, 출현일이 점차 짧아질 것으로 예상되기에 가장 오래된 매개모기 감시체계인 일본뇌염 매개모기 감시사업 또한 꾸준히 진행하고 있으며, 최근에는 국립검역소에서 해외유입 매개체 감시 등 매개체 질환 종합감시체계를 견고히 하고 있다. 모기나 진드기 등 감염병 매개체의 권역별 감시 거점센터를 중심으로 감시망(VectorNet)을 구축하여 정보를 제공하고, 비브리오넷(VibrioNet) 감시체계를 강화하고, 매개곤충 질병 감염실태 조사 모니터링 및 야생동물 AI 검사를 추진할 뿐만 아니라 기후변화로 발생 증가가 우려되는 산림병해충을 모니터링 하고 있다.

기후변화와 건강 전반에 관해서는 기후변화 급·만성질병 대상 질병자료(사망, 건강보험자료, 감염병 신고자료 등)와 기후변화와의 연관성 규명을 위한 기후변화 건강영향 평가 체계를 구축하고 있고, 앞서 언급했던 공동편익 사업으로는 도시 녹지 조성, 에너지 고효율 건축 등 공동편익을 동반하는 적응대책 개발, 생활습관 및 식습관으로 기후변화 완화와 건강증진에 기여하는 공동편익 발굴, 도시 녹지 확대와 건물의 녹색화 등 도시녹화 사업을 추진하고 지자체 건강도시 구축사업과의 연계 활성화를 하고 있다.

8.5.2 국가기후환경회의

사회적 재난 수준인 미세먼지 문제 해결을 위한 범국가적 대책 및 주변국과의 협력 증진 방안을 마련하기 위해 2019년 4월 국가기후환경회의가 대통령령(제29713호)으로 설치, 9월 제1차 국민정책제안이 발표되었고(그림 8.17), 11월 대기오염 및 기후변화 대응 국제포럼이 개최되었다.

국가기후환경회의는 대통령 직속 자문기구로서, 미세먼지 문제 해결에 사회 각계각층의 국민이 직접 참여하여 미세먼지 정책 수행 기반을 마련하는 것을 목표로 한다. 이에 따라 정당·산업계·학계·시민사회·종교계·정부·지자체 등을 대표하는 위원으로 구성했고, 미세먼지 발생 저감, 피해 예방, 과학기술, 홍보·소통, 국제협력 등 분야별 전문위원회와 국내외 석학들과 관련 분야에 깊은 경륜이 있는 사회 원로들로 구성된 자문단이 있다. 또한 기후변화와 연계하여 미세먼지 문제 해결을 위한 동북아시아 지역 등 여러 국가들과 네트워크를 구성하는 노력을 하고 있다.

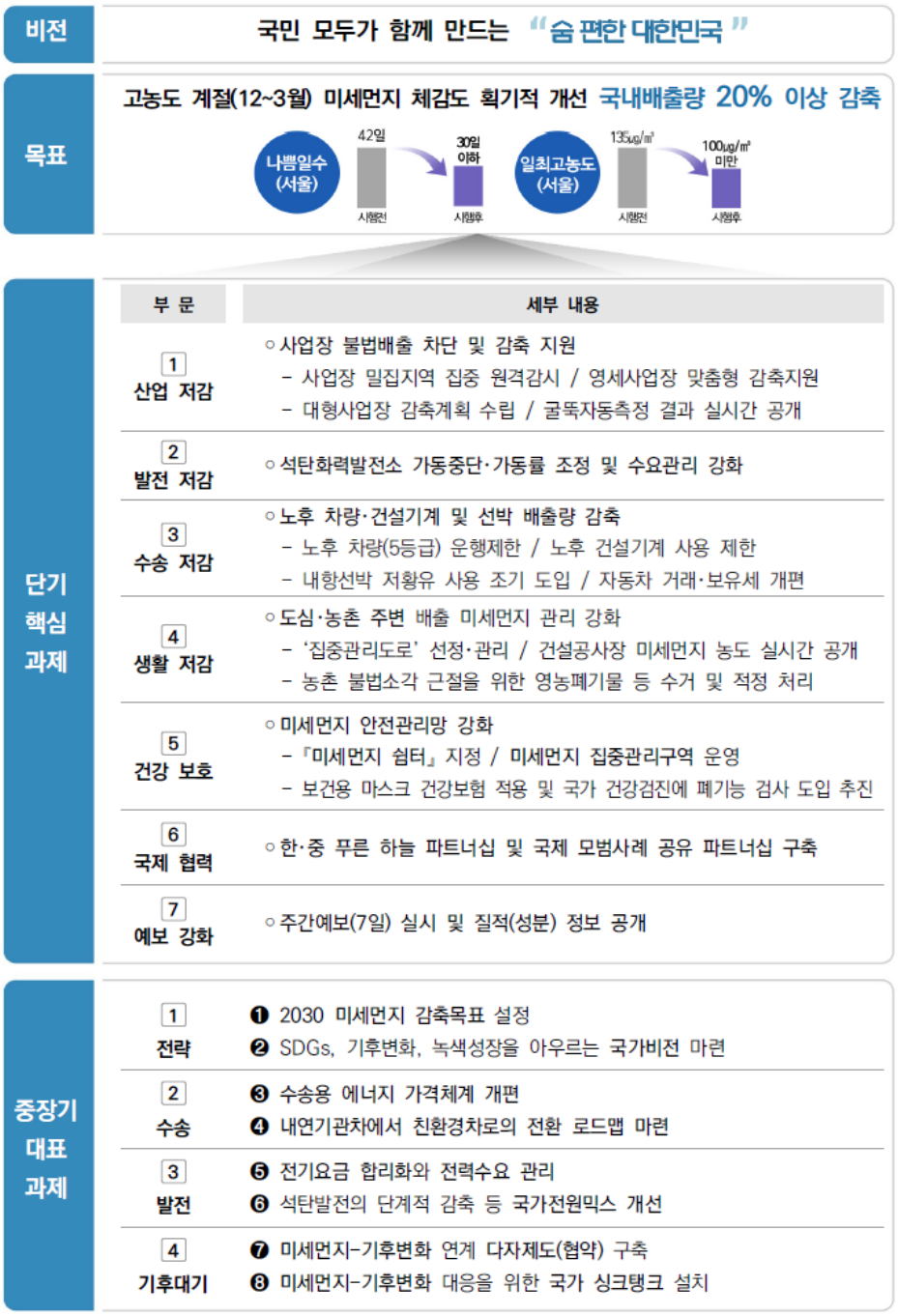


그림 8.17 국가기후환경회의 목표 및 추진과제(국가기후환경회의, www.ncca.go.kr).

8.6 결론

기후변화 건강영향 분야별 연구결과의 신뢰도를 논문의 수, 의견의 일치되는 정도 등을 기준으로 견고한 동의, 중간적 동의, 제한적 동의의 3단계로 구분하여 평가하였다.

8.6.1 폭염

폭염의 건강영향에 대한 연구, 폭염에 대한 취약성 연구는 활발한 편이다. 현재 온실가스 배출을 지속한다면 폭염의 빈도와 강도는 현재보다 더욱 증가하여 건강에 영향을 미칠 것이라는 것에는 의심의 여지가 없다(견고한 동의). 특히 최근에는 40도 이상의 고온으로 폭염의 피해가 더욱 증가하였다. 하지만 정부에서 건강적응정책을 활발히 내놓고 있고, 이에 따라 국민들의 폭염에 대한 인식도도 높아졌다. 앞으로도 폭염이 건강에 영향을 주는 다양한 기후, 경제, 사회, 인구, 건강 요인 등을 토대로 미래 건강 부담 예측 연구와 대응정책을 지속시켜야 할 것이다.

8.6.2 기상재해

기후변화로 강수량이 증가하고 강수량 변동성이 커지고 (강한 강수는 증가하고 약한 강수는 감소), 서리일수와 한랭일은 많아질 뿐만 아니라 극단적 기상현상이 증가하고 있다. 기상재해로 인한 사망자수는 감소했으나 재해당 사망자수는 증가했다. 기상재해에 대한 정부 적응정책도 주로 홍수에 대해 실시되고 있고, 그밖에 태풍, 강풍, 대설, 한파, 폭설, 황사, 지진, 해일은 재해대비 상시 기동감시·대응체계를 가동하고 있다. 기후변화가 지속될수록 기상재해는 증가하겠지만 기후변화 관련 기상재해의 건강영향 연구는 아직 미흡한 실정이다. 기상재해의 빈도와 강도는 증가할 것으로 예상되고 이에 따른 우리사회의 적응도 진행되고 있으나 미래의 기상재해에 대한 충분한 대비는 제한적이다(견고한 동의).

8.6.3 대기질과 알레르기

대기오염의 심혈관계 및 호흡기계 질환 관련 건강 악영향 연구는 국내외에서 1990년대부터 활발히 이루어졌다. 최근 미세먼지 악화 및 이에 대한 국민적 관심 증가로 관련 부처나 정책 등이 생기고, 매일 날씨예보를 보듯 미세먼지예보를 보고 현재 미세먼지를 확인하는 것이 일상화되었다. 이에 따라 미세먼지와 말기신부전증 등 신장질환, 자살 등 정신질환, 치매, 우울증, 뇌경색 등 뇌신경질환 등 대기오염과 새로운 질환의 연구가 활발히 진행 중에 있다. 하지만 기후변화가 미세먼지에 영향을 직접적으로 주기보다는 간접적 요인, 혼란변수로 작용하고 있다. 기후변화로 꽃가루 알레르기 노출기간이 길어져 알레르기 질환에 영향을 준다는 국내 연구는 해외에 비해 꽤 적은 편이라고 볼 수 있다 (중간적 동의).

8.6.4 곤충 및 설치류 매개 감염병

기후변화로 인해 곤충 및 설치류 매개 감염병의 발생 및 확산 될 가능성이 높은 이유는 매개체 분포 및 밀도가 기후요소에 의해 생활사에 미치는 영향이 크고 이로 인해 감염병 발생에 영향을 미치기 때문이다. 쯔쯔가무시증 및 삼일열 말라리아 발생률은 기온에 의해 양의 상관관계를 나타내는 연구 결과는 견고한 수준으로 평가 될 수 있다. 또한 2013년에 국내에서 처음으로 확인된 신종 진드기 매개 바이러스 감염병인 SFTS 환자가 지속적으로 증가추세에 있기 때문에 쯔쯔가무시증과 같이 진드기 분포 및 밀도, 환자 발생율과 기온과 같은 기후요소들과의 상관관계에 대한 연구가 필요하다. 기후변화와 매개체 밀도와 분포와의 상관관계는 장시간의 지속적인 연구가 필요하기 때문에 지금까지 나온 연구결과로 평가하기는 아직 미흡하다. 하지만 지속적인 국가적인 감시체계를 통한 곤충 및 매개체 감시 및 이들 매개 감염병 발생에 대한 예보 및 피해 저감을 위한 교육 홍보 및 경보 체계 운영을 통하여 곤충 및 설치류 매개 감염병 발생에 대한 피해를 최소화 할 수 있을 것이다. 곤충 및 설치류 매개체 감염병에 대한 정밀한 과학적 연구가 더 필요한 것으로 판단된다(중간적 동의).

8.6.5 수인성 및 식품 매개 감염병

지금까지 국내에서 수인성 및 식품매개 감염병과 기후요인과의 상관관계에 대한 연구를 보면 지난 100년(1912년~2010년)간 우리나라 6대 도시 평균 기온이 약 1.8℃ 상승했고 기온이 1℃ 상승할 때 살모넬라, 장염비브리오 및 황색포도상구균으로 인한 식중독 발생 건수는 각각 47.8%, 19.2% 및 5.1% 증가하는 것으로 조사됐다. 또한 2016년 평년기온이 2015년 대비 0.2℃ 상승함에 따라 전체 식중독 환자수가 19.7% 증가하였다. 따라서 일부의 수인성 및 식품매개 감염병에 대하여 기후 요인과의 관련성에 대한 국내 연구의 수준은 충분치는 않다고 볼 수 있다(중간적 동의). 하지만 노로바이러스 처럼 기후변화가 미치는 영향은 수인성 및 식품매개 감염병의 병원체의 종류 마다 다르게 나타날 수 있으므로 개별 질환과 기후요인과의 관련성을 살펴보는 연구가 앞으로도 필요할 것으로 생각된다.

8.7 참고문헌

강공언, 마창진, 오경재, 2016: 전북지역 쯔쯔가무시증 발생과 기후요소의 상호 관련성, *한국환경보건학회지*, 42(1), 41-52.

강주환, 박선중, 박민원, 2008: 서남해안의 해수면 상승과 해일고 증가 경향, *한국해안해양공학회지*, 20(1), 14-24.

건강증진연구사업, 2014: 기후변화로 인한 건강피해 부담 및 사회경제적 영향평가 관련 연구, 성균관대학교 산학협력단.

국가기후환경회의 홈페이지, www.ncca.go.kr

국토연구원, 2012: 기후변화에 따른 국토취약성 분석과 적응방안.

국토연구원, 2013: 2012년 국가도시방재연구센터 운영연구.

기상청 홈페이지, www.weather.go.kr

김규랑, 박기준, 이혜림, 김미진, 최영진, 오재원, 2012: 알레르기 꽃가루 위험도 예보모델의 개발과 검증, *한국농림기상학회지*, 14(4), 265-268.

김병식, 성장현, 이병현, 김도정, 2013: 표준강수 증발산량 지수와 대표농도경로를 이용한 남한지역 미래 가뭄의 변화전망, *한국방재학회지*, 13(2), 97-109.

김샛별, 신형진, 하림, 김성준, 2012: 우리나라 5대 대설지역의 적설량 변화 분석, *대한토목학회지*, 23(2B), p103-111.

김종규, 김중순. 2019: 우리나라에서 지난 10년간 노로바이러스 식중독 발생의 특징과 기후요소와의 관련성, *한국환경보건학회지*, 45(6), 622-629.

노지현, 정한용, 이강준, 2018: 미세먼지와 인지기능, *대한신경정신의학회지*, 57(1), 81-85.

박창용, 최영은, 권영아, 권재일, 이한수, 2013: 남한 상세 기후변화 시나리오를 이용한 아열대 기후대 및 극한 기온사상의 변화에 대한 연구, *한국지역지리학회지*, 19(4), 600-614.

반영운, 2015: 초대형 재해 리스크 전망과 분석, 국토연구원, 국토406, 14-19.

보건복지부 홈페이지, www.nih.go.kr

송기섭, 하만복, 2007: SUPER 태풍에 대비한 재난 대책, *한국도로학회지*, 9(3), 106-114.

식품의약품안전평가원, 2013: 식중독 사고발생 추정 및 사회경제적 손실분석 연구, 군산대학교 산학협력단.

식품의약품안전처, 2017: 식중독 분야 다수부처 공동 직제개정 종합대책(안).

식품의약품안전처 식품안전나라 식중독통계.

신호성, 이수형, 2014: 기후변화 건강 취약성 평가지표 개발, *환경정책연구*, 13(1), 69-93.

안소라, 이준우, 김성준, 2015: RCP 기후변화 시나리오에 따른 미래 강설량 예측 및 폭설 취약지역 평가, *대한토목학회지*, 35(3), 545-556.

오관영, 이명진, 한도은, 2016: 기초 및 광역지자체 기후변화 취약성 평가를 위한 웹기반 지원 도구(VESTAP) 개발, *한국지리정보학회지*, 19(1), 1-11.

오재원, 2018: 한국의 기후 변화가 꽃가루 알레르기에 미치는 영향, Allergy, Asthma & Respiratory Disease, 6(Suppl 1), S31-S39.

윤종주, 전기천, 심재설, 박광순, 2012: 기후변화 시나리오에 따른 최대 가능 태풍강도 추정 및 이에 따른 폭풍해일고 양상 모의, 한국해양환경· *에너지학회지*, 15(4), 292-301.

이동규, 2017: 국내 서식 감염병 매개체의 생태학적 특성과 현황, *Journal of the Korean Medical Association*, 60(6), 458-467.

이혜림, 김규랑, 최영진, 오재원, 2012: 일별 꽃가루농도에 대한 기상영향, *한국농림기상학회지*, 14(3), 99-107.

조형경, 김샛별, 정정혁, 신형진, 김성준, 2011: 기후변화 시나리오를 이용한 미래의 강설량 예측, *한국지리정보학회지*, 14(3), 188-202.

채수미, 김동진, 윤석준, 신호성. 2014: 기온과 지역특성이 말라리아 발생에 미치는 영향, *보건사회연구*, 34(1), 436-455.

질병관리본부, 2010: 기후변화 건강영향 및 감시체계 개발 연구, 아주대학교 산학협력단.

질병관리본부, 2011: 한국의 기후변화 건강영향과 적응대책.

질병관리본부, 2012: 연령과 대기오염원 변화에 따른 꽃가루 알레르기 질환 환자의 임상양상 및 면역학적 특성 분석, 아주대학교 산학협력단, p54.

질병관리본부, 2016a: 2013-2015년 국내 해양환경 분리 병원성 비브리오균의 분포와 환경인자와의 연관성 분석, 국립보건연구원, 주간건강과 질병, 9(9), 154-158.

질병관리본부, 2016b: 2016년도 수인성 및 식품매개감염병 관리지침

질병관리본부, 2017: 주요환경변화에 따른 미래 감염병의 발생양상, 질병관리본부 미래감염병대비과, 주간 건강과 질병 10(38), 1024-1028.

질병관리본부, 2018; 폭염·한파로 인한 급만성질병 및 사망률 예측 연구, 서울대학교 산학협력단, p143.

질병관리본부, 2019a: 2016-2018년 국내수인성, 식품매개 감염병 원인세균병원체 감시현황, 질병관리본부 세균분석과, 주간 건강과 질병 12(27), 898-903.

질병관리본부, 2019b: 2019년도 말라리아관리지침.

질병관리본부, 2019c: 2019년 설치류 매개감염병 관리지침.

질병관리본부, 2019d: 2019년 진드기 매개감염병 관리지침.

질병관리본부 감염병포털 질병별 통계.

하종식, 2014: 한국의 건강 분야 기후변화적응 연구동향 분석, *한국기후변화학회지*, 5(2), 139-151.

한국보건사회연구원, 2010: 사회보건분야 기후변화 취약성 평가 및 적응역량 강화.

한국환경정책평가연구원, 2012: 미래 건강부담 추정의 영향요인 고찰.

한국환경정책평가연구원, 2014: 기후변화 폭염 대응을 위한 중장기적 적응대책 수립 연구.

한국환경정책평가연구원, 2018; 국가 리스크 관리를 위한 기후변화 적응역량 구축·평가.

한설희, 2019: 미세 먼지와 치매: 대기 오염이 인지 건강과 관계있을까?, *대한신경과학회지*, 37(2), 135-143.

허동수, 염경선, 김지민, 김도삼, 배기성, 2006; 부산연안에서 폭풍해일고의 추정, *한국해양공학회지*, 20(3), 37-45.

허동수, 이현우, 이우동, 배기성, 2008; 슈퍼태풍 내습 시 부산 경남 연안역의 폭풍해일고, *한국해안해양공학회지*, 20(1), 128-136.

환경부, 2015: 국민건강보험 빅데이터 연계 기후변화 건강영향평가, 한국환경정책평가연구원.

환경부, 2016: 환경 통합건강평가 적응 기술개발, 한국환경산업기술원.

Bakian, A. V., R. S. Huber, H. Coon, D. Gray, P. Wilson, W. M. McMahon, and P. F. Renshaw, 2015: Acute air pollution exposure and risk of suicide completion, *American journal of epidemiology*, 181(5), 295-303.

Bardsley, D. K., E. Moskwa, D. Weber, G. M. Robinson, N. Waschl, and A. M. Bardsley, 2018: Climate change, bushfire risk, and environmental values: examining a potential risk perception threshold in peri-urban South Australia, *Society & Natural Resources*, 31(4), 424-441.

Benmarhnia, T., S. Deguen, J. S. Kaufman, and A. Smargiassi, 2015: Vulnerability to heat-related mortality: A systematic review, meta-analysis, and meta-regression analysis, *Epidemiology*, 26, 781-793.

Buxton, M., R. Haynes, D. Mercer, and A. Butt, 2011; Vulnerability to bushfire risk at Melbourne's urban fringe: the failure of regulatory land use planning, *Geographical research*, 49(1), 1-12.

Di Angelantonio, E., R. Chowdhury, N. Sarwar, T. Aspelund, J. Danesh, and V. Gudnason, 2010: Chronic kidney disease and risk of major cardiovascular disease and non-vascular mortality: prospective population based cohort study, *BMJ*, 341, c4986.

Dias, D., O. Tchepel, A. Carvalho, A. I. Miranda, and C. Borrego, 2012: Particulate matter and health risk under

a changing climate: assessment for Portugal, *The Scientific World Journal*, 2012.

Ebi, K. L., and G. McGregor, 2008: Climate change, tropospheric ozone and particulate matter, and health impacts, *Environmental health perspectives*, 116(11), 1449-1455.

Guo, Y., A. Gasparrrini, B. G. Armstrong, B. Tawatsupa, A. Tobias, E. Lavigne, M. S. Z. S. Coelho, X. Pan, H. Kim, M. Hashizume, Y. Honda, Y.-L. Guo, C.-F. Wu, A. Zanobetti, J. D. Schwartz, M. L. Bell, M. Scortichini, P. Michelozzi, K. Punnasiri, S. Li, L. Tian, S. D. O. Garcia, X. Seposo, A. Overcenco, A. Zeka, P. Goodman, T. N. Dang, D. V. Dung, F. Mayvaneh, P. H. N. Saldiva, G. Williams, and S. Tong, 2017: Heat wave and mortality: A multicountry, multicommunity study, *Environmental Health Perspectives*, 087006, p.1-8.

Han, M. H., H. J. Yi, Y. S, Kim, and Y. S. Kim, 2015: Effect of seasonal and monthly variation in weather and air pollution factors on stroke incidence in Seoul, Korea, *Stroke*, 46(4), 927-935.

Horton, G., L. Hanna, and B. Kelly, 2010: Drought, drying and climate change: emerging health issues for ageing Australians in rural areas, Australasian *Journal on Ageing*, 29(1), 2-7.

Jeon, Y. M., and M. Y. Lee, 2016: Airborne nanoparticles (PM0.1) induce autophagic cell death of human neuronal cells, *Journal of Applied Toxicology*, 36(10), 1332-1342.

Jeong, S. M., J. H. Park, H. J. Kim, H. Kwon, and S. E. Hwang, 2020: Effects of abdominal obesity on the association between air pollution and kidney function, *International Journal of Obesity*, 1-9.

Johnston, F., I. Hanigan, S. Henderson, G. Morgan, and D. Bowman, 2011: Extreme air pollution events from bushfires and dust storms and their association with mortality in Sydney, Australia 1994-2007, *Environmental research*, 111(6), 811-816.

Jung, J., J. Y. Park, Y. C. Kim, H. Lee, E. Kim, Y. L. Kim, Y. S. Kim, J. P. Lee, and H. Kim, 2020: Long-Term Effects of Air Pollutants on Mortality Risk in Patients with End-Stage Renal Disease, *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 17(2), 546.

Kim, C., S. H. Jung, D. R. Kang, H. C. Kim, K. T. Moon, N. W. Hur, D. C. Shin, and I. Suh, 2010: Ambient particulate matter as a risk factor for suicide, *American journal of psychiatry*, 167(9), 1100-1107.

Kim, B., J. H. Sung, B. H. Lee, and D. J. Kim, 2013: Evaluation on the impact of extreme droughts in South Korea using the SPEI and RCP 8.5 climate change scenario, *Journal of Korean Society of Hazard Mitigation*, 13(2), 97-109.

Kim, C. T., Y. H. Lim, A. Woodward, and H. Kim, 2015a: Heat-attributable deaths between 1992 and 2009 in Seoul, South Korea, *Plos One*, 10(2), e0118577.

Kim, Y., H. Kim, Y. Honda, Y. L. Guo, B.-Y. Chen, J. M. Woo, and K. L. Ebi, 2015b: Suicide and ambient temperature in East Asian countries: a time-stratified case-crossover analysis, *Environmental Health Perspectives*, 124(1), 75-80.

Kim, D. W., R. C. Deo, J. H. Chung, and J. S. Lee, 2016: Projection of heat wave mortality related to climate change in Korea, *Natural Hazards*, 80(1), 623-637.

Kim, H. J., J. Y. Min, Y. S. Seo, and K. B. Min, 2018a: Association between exposure to ambient air pollution and renal function in Korean adults, Annals of occupational and environmental medicine, 30(1), 14.

Kim, Y., C. F. S. Ng, Y. Chung, H. Kim, Y. Honda, Y. L. Guo, Y. Lim, B. Chen, L. A. Page, and M. Hashizume, 2018b: Air pollution and suicide in 10 cities in Northeast Asia: a time-stratified case-crossover analysis, Environmental health perspectives, 126(3), 037002.

Kim, Y., H. Kim, A. Gasparrini, B. Armstrong, Y. Honda, Y. Chung, C. F. S. Ng, A. Tobias, C. Íñiguez, E. Lavigne, F. Sera, A. M. Vicedo-Cabrera, M. S. Ragettli, N. Scovronick, F. Acquaotta, B.-Y. Chen, Y.-L. L. Guo, X. Seposo, T. N. Dang, M. D. S. Z. S. Coelho, P. H. N.

Saldiva, A. Kosheleva, Z. Zanobetti, J. Schwarts, M. L. Bell, and M. Hashizume, 2019: Suicide and ambient temperature: a multi-country multi-city study, *Environmental health perspectives*, 127(11), 117007.

Kovats, R. S., S. J. Edwards, D. Charron, J. Cowden, R. M. D'Souza, K. L. Ebi, C. Gauci, P. Gerner-Smidt, S. Hajat, S. Hales, G. H. Pezzi, B. Kriz, K. Kutsar, P. McKeown, K. Mellou, B. Menne, S. O'Brien, W. Pelt, and H. Schmid, 2005: Climate variability and campylobacter infection: an international study, *International Journal of Biometeorology*, 49(4), 207-214.

Kwon, B., E. Lee, S. Lee, S. Heo, K. Jo, J. Kim, and M. Park, 2015: Vulnerabilities to temperature effects on acute myocardial infarction hospital admissions in South Korea, *International journal of environmental research and public health*, 12(11), 14571-14588.

Lee, H., W. Myung, D. K. Kim, S. E. Kim, C. T. Kim, and H. Kim, 2017: Short-term air pollution exposure aggravates Parkinson's disease in a population-based cohort, *Scientific reports*, 7, 44741.

Lee, H., W. Myung, H. K. Cheong, S. M. Yi, Y. C. Hong, S. I. Cho, and H. Kim, 2018a: Ambient air pollution exposure and risk of migraine: Synergistic effect with high temperature, *Environment international*, 121, 383-391.

Lee, H., W. Myung, S. E. Kim, D. K. Kim, and H. Kim, 2018b: Ambient air pollution and completed suicide in 26 South Korean cities: Effect modification by demographic and socioeconomic factors, *Science of the total environment*, 639, 944-951.

Lee, H., J. M. Kang, W. Myung, J. Choi, C. Lee, D. L. Na, S. Y. Kim, J.-H. Lee, S.-H. Han, S. H. Choi, S. Y. Kim, S.-J. Cho, B. K. Yeon, D. K. Kim, M. Lewis, E.-M. Lee, C. T. Kim, and S. Y. Kim, 2019a: Exposure to ambient fine particles and neuropsychiatric symptoms in cognitive disorder: A repeated measure analysis from the CREDOS (Clinical Research Center for Dementia of South Korea) study, *Science of the total environment*, 668, 411-418.

Lee J. S., and A. Farlow, 2019b: The threat of climate change to non-dengue-endemic countries: increasing risk of dengue transmission potential using climate and non-climate datasets, BMC Public Health. 19(1), 934.

Lim, Y. H., H. Kim, J. H. Kim, S. Bae, H. Y. Park, and Y. C. Hong, 2012: Air pollution and symptoms of depression in elderly adults, *Environmental health perspectives*, 120(7), 1023-1028.

Lin, G. Z., L. Li, Y. F. Song, Y. X. Zhou, S. Q. Shen, and C. Q. Ou, 2016: The impact of ambient air pollution on suicide mortality: a case-crossover study in Guangzhou, China, *Environmental health*, 15(1), 90.

Maibach, E. W., A. Chadwick, D. McBride, M. Chuk, K. L. Ebi, and J. Balbus, 2008: Climate change and local public health in the United States: preparedness, programs and perceptions of local public health department directors, *PLoS One*, 3(7), e2838.

Mehta, A. J., A. Zanobetti, M. A. C. Bind, I. Kloog, P. Koutrakis, D. Sparrow, P. S. Vokonas, and J. D. Schwartz, 2016: Long-term exposure to ambient fine particulate matter and renal function in older men: the veterans administration normative aging study, *Environmental health perspectives*, 124(9), 1353-1360.

Min, J. Y., H. J. Kim, and K. B. Min, 2018: Long-term exposure to air pollution and the risk of suicide death: A population-based cohort study, *Science of the total environment*, 628, 573-579.

Myung, W., H. Lee, and H. Kim, 2019: Short-term air pollution exposure and emergency department visits for amyotrophic lateral sclerosis: A time-stratified case-crossover analysis, *Environment international*, 123, 467-475.

Ng, C. F. S., A. Stickley, S. Konishi, and C. Watanabe, 2016: Ambient air pollution and suicide in Tokyo, 2001-2011, *Journal of affective disorders*, 201, 194-202.

Na, W., J. Y. Jang, K. E. Lee, H. Kim, B. Jun, J. W. Kwon, and S. N. Jo, 2013: The effects of temperature on heat-related illness according to the characteristics of patients during the summer of 2012 in the Republic of

Korea, *Journal of preventive medicine and public health*, 46(1), 19.

Oh, J. Y., B. C. Moon, B. K. Bae, E. Shin, Y. H. Ko, Y. J. Kim, Y. H. Park, and J. S. Chae, 2009: Genetic identification and phylogenetic analysis of Anaplasma and Ehrlichia species in Haemaphysalis longicornis collected from Jeju Island, Korea, *Journal of bacteriology and virology*, 39(4), 257-267.

Oh, K. Y., M. J. Lee, and S. W. Jeon, 2017: Development of the Korean climate change vulnerability assessment tool (VESTAP)—Centered on health vulnerability to heat waves, *Sustainability*, 9(7), 1103.

O'Neill, M. S., A. V. Diez-Roux, A. H. Auchincloss, T. G. Franklin, D. R. Jacobs, B. C. Astor, J. T. Dvonch, and J. Kaufman, 2008: Airborne particulate matter exposure and urinary albumin excretion: the Multi-Ethnic Study of Atherosclerosis, *Occupational and environmental medicine*, 65(8), 534-540.

Rossati, A. 2017: Global warming and its health impact, *International Journal of Occupational and Environmental Medicine*, 8(1), 7-20.

Sarnak, M. J., A. S. Levey, A. C. Schoolwerth, J. Coresh, B. Culleton, L. L. Hamm, P. A. McCullough, B. L. Kasiske, E. Kelepouris, M. J. Klag, P. Parfrey, M. Pfeffer, L. Raij, D. J. Spinosa, and P. W. Wilson, 2003: Kidney disease as a risk factor for development of cardiovascular disease: a statement from the American Heart Association Councils on Kidney in Cardiovascular Disease, High Blood Pressure Research, Clinical Cardiology, and Epidemiology and Prevention, *Circulation*, 108(17), 2154-2169.

Sharples, J. J., G. J. Cary, P. Fox-Hughes, S. Mooney, J. P. Evans, M. S. Fletcher, M. Fromm, P. F. Grierson, R. McRae, and P. Baker, 2016: Natural hazards in Australia: extreme bushfire, *Climatic Change*, 139(1), 85-99.

Shin, H., and D. Kim, 2019: Climate Change and Infectious Disease in South Korea, *Epidemiology*, 20(6), S175.

Shin, J., S. H. Han, and J. Choi, 2019: Exposure to Ambient Air Pollution and Cognitive Impairment in Community-Dwelling Older Adults: The Korean Frailty and Aging Cohort Study, *International journal of environmental research and public health*, 16(19), 3767.

Son, J. Y., J. T. Lee, G. B. Anderson, and M. L. Bell, 2012: The impact of heat waves on mortality in seven major cities in Korea, *Environmental health perspectives*, 120(4), 566-571.

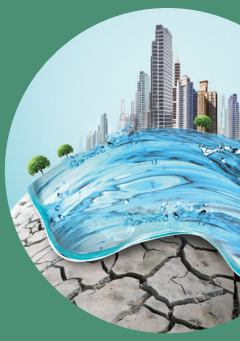
Son, J. Y., M. L. Bell, and J. T. Lee, 2014: The impact of heat, cold, and heat waves on hospital admissions in eight cities in Korea, *International journal of biometeorology*, 58(9), 1893-1903.

Wu, M. Y., W. C. Lo, C. T. Chao, M. S. Wu, and C. K. Chiang, 2020: Association between air pollutants and development of chronic kidney disease: A systematic review and meta-analysis, *Science of The Total Environment*, 706, 135522.

Xu, Z., G. FitzGerald, Y. Guo, B. Jalaludin, and S. Tong, 2016: Impact of heatwave on mortality under different heatwave definitions: A systematic review and meta-analysis, *Environment International*, 89-90, 193-203.

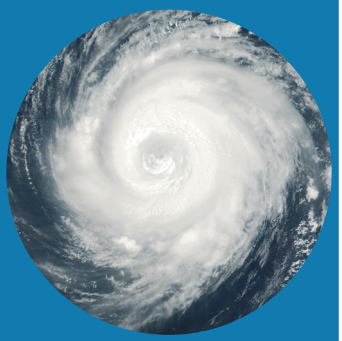
Yang, Y. R., Y. M. Chen, S. Y. Chen, and C. C. Chan, 2017: Associations between long-term particulate matter exposure and adult renal function in the Taipei metropolis, *Environmental health perspectives*, 125(4), 602-607.

Yu, P., R. Xu, M. J. Abramson, S. Li, and Y. Guo, 2020: Bushfires in Australia: a serious health emergency under climate change, *The Lancet Planetary Health*, 4(1) E7-8.



제 9 장

인간정주공간 및 복지



282 9.1. 서론
282 9.2 관측된 현황
292 9.3 영향 전망
297 9.4 취약성의 주요 원인
300 9.5 적응 옵션
307 9.6 결론
308 9.7 참고문헌

제 9 장 인간정주공간 및 복지

9.1 서론

기후변화는 인간의 주거공간에도 많은 영향을 미친다. 폭염, 열대야, 집중호우, 한파 등 극한 기상현상이 빈번해지고, 강도가 증가하면서 인명 및 재산피해가 크게 증가하고 있다. 최근 폭염, 열대야 등 고온(신광문, 2017) 및 홍수 등에 의한 피해가 증가하면서 이에 대한 영향 및 대책 마련에 대한 관심이 증가하고 있다.

「한국 기후변화 평가보고서 2014」서는, 도시에 인구가 밀집하여 거주하므로 이산화탄소배출 비율이 매우 높으며, 우리나라 인구의 대부분이 거주하고 있어 기후변화에 따른 재해에 취약하고, 농촌은 인구감소, 고령화, 환경오염, 기후변화에 의한 영향을 받을 것으로 예측하고 있다. 이러한 부분에 있어 해결책으로 지역도시 공간 단위의 접근이 필요하다고 하였다.

우리나라는 2017년 8월을 기점으로 고령사회로 진입하였으며, 소득 양극화가 매우 높아서 2012년 기준으로 한국 소득 상위 10%의 소득집중도는 약 44.9%로 나타났다(신광문, 2017). 또한, 우리나라 도시화율은 2018년 기준으로 91.8%로 이르러 도시문제와 취약계층에 대한 문제가 매우 심각한 상황이다. 이들은 기후변화에 직접적으로 영향을 주고받는 주체로 기후변화로 인한 피해를 줄이기 위해서는 기후변화 및 인간의 생활과 직접적으로 연결되어 있는 도시 및 농촌지역의 정주공간 및 복지에 대한 현황·기후변화 영향·기후변화 취약성·적응과 관련된 다양한 연구들이 필요한 상황이다.

기후변화는 장소의 개념을 포함한 개인적, 지리적, 사회적 특성에 따라 다르게 나타난다(왕광익 등, 2012). 특히, 고령계층을 포함한 취약계층은 이러한 기후변화에 더 취약하기 때문에(이나영 등, 2014), 빠르게 고령화되고 있는 우리나라는 기후변화로 인해 정주공간 및 복지의 질이 낮아질 우려가 있다(신광문, 2017).

기후변화에 따른 폭염 및 열대야의 증가는 기존 주택의 실내온도를 상승시켜, 기존과 같이 적당히 견디며 생활하기 불가능하게 된다. 특히, 보다 많은 태양열에 노출되는 건물 상층 및 옥탑방 등에 거주하는 취약계층은 고온 등의 기후변화에 의한 피해에 직접적으로 영향을 받을 수 있다. 이러한 주거 공간의 온도 변화는 여름철 냉방 및 겨울철 난방전력 등 에너지 소비와 이산화탄소 배출을 증가시켜 지구온난화를 심화시키는 원인이 된다(신광문, 2017).

기후변화를 도시차원으로 대처하는 방안은 감축 대책(완화)과 적응으로 구분할 수 있다(이철희와 정재희, 2017). 완화는 기후변화를 일으키는 온실가스의 발생원을 줄이거나 온실가스의 흡수원을 확충하기 위한 인위적인 개입을 의미하며, 적응은 기후변화의 영향으로 인한 위협을 줄이거나 기회를 만들기 위하여 자연시스템 혹은 인류 시스템에서 취하는 모든 조치를 의미한다(최준성, 2015; 최준성과 박천보, 2014). 최근 2014년부터 2019년까지 연구 동향은 완화와 적응이 서로 긍·부정적인 영향을 주고받을 수 있으므로, 이를 명확히 구분하기보다 기후변화 적응 요소 및 대책 등으로 제시하고 있다.

9.2 관측된 현황

9.2.1 정주공간

9.2.1.1 도시

「한국 기후변화 평가보고서 2014」에서는, 도시는 수도권 및 지방 광역시도를 중심으로 확장되었으며, 도시화·산업화로 인하여 전력 소비 및 에너지 소비의 증가가 발생하여 온실가스 배출량이 급증하였기 때문에, 추후 도시 공간을 계획할 때에 에너지의 생산과 소비까지 고려하는 것이 필요하다고 하였다.

도시는 인구, 건물, 교통시설을 비롯한 공공시설이 집약되어 있어 에너지 소모율이 높고, 다량의 온실가스를 배출하고 있어 지구온난화의 주범으로 기후변화에 지대한 영향을 미친다. 도시화에 영향을 미치는 인구수는 30만 명을 기준으로 한다(윤동현 등, 2018). 한국에서 도시화 현상이 처음 나타나기 시작한 시점은 1920년대로 추정되며, 일제강점기와 한국전쟁이 끝난 1960년대부터 도시화가 본격적으로 가속화되어 36.8%이던 도시화율은 1990년대까지 40%나 상승하여 82.6%까지 증가하였다. 도시인구는 1950~1955년 사이 연간 4.6%로 성장하였고, 1965~1970년 사이 연간 6.6% 증가하여 전 세계 평균(2.7%)보다 세 배 가까이 높은 수치로 최고점에 이르렀으며, 1990년대 초반 이후 증가율은 평균 이하로 크게 감소하였다(국토연구원, 2013a). 수도권으로의 집중도 더욱 가속화되어 1960년 전국대비 20.8%이던 인구가 1990년 거의 절반(42.8%) 수준까지 수도권에 집중되었다. 도시화율은 1990년대 이후에는 큰 변화가 일어나지 않았으나 꾸준한 증가로 2005년 90.1%가 된 이후, 2018년 91.8%로 다소 증가하였다(표 9.1)(국토연구원, 2010; 국토연구원, 2011a; 국토교통부·한국토지주택공사, 2019). 지역별로 보면, 서울 및 경기도의 면적과 도시화율 의 증가가 인구 비율의 증가와 함께 나타나고 있다(표 9.2).

도시지역은 국토의 11.7%를 차지하며, 전국 인구와 국가 GDP의 절반 가까이 차지하는 서울의 도시지역 면적은 2018년 현재 약 606 km^2로서 개발제한구역(약 151 km^2)을 제외하면 서울의 도시화율 약 100%이다. 이러한 도시 고밀화의 주된 원인 중 하나인 주거의 형태는 아파트가 전체 약 59%를 차지하고 있으며, 단독주택의 비율은 30% 이하이다. 도시지역의 평균적인 통행거리는 도시 이외의 지역에 비해 상대적으로 짧아 도시의 압축성이 높게 나타났다. 광역시도의 교통수단 분담 비율은 지하철이 잘 보급된 서울, 부산, 인천시의 경우만 자동차 분담 비율이 40% 미만이었고, 지하철이 잘 보급되지 않은 타 광역시도는 자동차 분담 비율이 50%를 크게 상회하는 것으로 나타났다 (국토연구원, 2013c).

표 9.1 도시지역 면적 및 도시지역 인구비율(단위: km^2, %)(국토연구원, 2010; 국토연구원, 2011a; 국토교통부·한국토지주택공사, 2019).

연도	면적			인구(천명)			
	국토	도시계획 구역	국토면적 대비 (%)	전국(A)	도시(B)	비도시 (C=A-B)	도시화율(%) (B/A*100)
1990	99,274	13,901	14.0	43,390	-	-	-
1995	99,268	14,790	14.9	45,981	39,852	6,129	86.7
2000	99,461	15,806	15.9	47,954	42,375	5,579	88.3
2005	106,114	17,043	15.10	48,792	43,960	4,822	90.1
2010	105,522	17,492	15.77	50,516	45,933	4,583	90.9
2015	106,061	17,613	15.85	51,530	47,298	4,232	91.8
2018	106,286	17,788	15.88	51,826	47,596	4,230	91.8

표 9.2 서울과 서울을 포함한 경기도 지역의 토지이용 변화(류지은 등, 2017).

	Seoul			Seoul and Gyeonggi		
	2002	2006	2016	2002	2006	2016
Built-up Area	33,112.6 (54.7%)	33,533.6 (55.4%)	34,367.1 (56.8%)	126,758.8 (11.8%)	142,896.8 (13.3%)	180,761.7 (16.8%)
Water	5,791.3 (9.6%)	5,766.9 (9.5%)	5,720.0 (9.5%)	73,913.1 (6.9%)	73,646.4 (6.9%)	74,582.1 (6.9%)
Forest	16,527.4 (27.3%)	16,380.9 (27.1%)	16,364.6 (27.0%)	587,452.4 (54.7%)	580,055.5 (54.0%)	564,023.9 (52.3%)
Other Areas	5,120.7 (8.5%)	4,851.2 (8.0%)	4,067.9 (6.7%)	285,167.3 (26.6%)	277,102.6 (25.8%)	259,497.8 (24.1%)

2000년대에 들어서 한국은 인구 및 도시성장 둔화, 고령화 사회의 대두, 경제위기, 기후변화, 빈부격차 심화 등의 사회·경제적 여건변화에 직면하였다. 특히, 저출산·고령화의 문제는 이를 더욱 심화시키고 있다. 지방소도시의 경우 기성 시가지 공동화와 높은 고령화율에 따른 경기체에 의해 도시쇠퇴가 가속화되고 있으며, 대도시의 경우 인구 저성장과 경기둔화로 인해 기성 시가지의 활력이 점차 감소되고있는 실정이다.

지난 수십 년간 생활 수준의 향상, 도시화 추세, 산업부문의 확대는 한국을 에너지 소비적인 경제로 만드는 데 크게 기여하였다. 에너지경제연구원(2017)과 KOSIS 1차 에너지원별 소비(OECD, 2019.10.21.접속)에 따르면, 한국은 1990년에 1인당 1차 에너지 소비량이 2.17 toe/인에서 2018년에 5.8 toe/인으로 증가하였으며, 1인당 전력소비량은 1990년에 2,202 kWh/인에서 2016년에 9,699 kWh/인으로 급격히 증가하였다. 이산화탄소 배출량도 1990년에 292.2백만 CO_2톤에서 2017년에는 709.1백만 CO_2톤으로 높은 증가율을 나타냈으며 (환경부, 2019)(그림 9.1), 이는 2018년 기준으로 OECD 국가 중 5위에 해당한다. 주거부문에서는 난방, 냉방, 가전, 조명 및 취사 등이 에너지 수요의 대표적인 예이다 (정용주 등, 2015).

도시들의 직접적 에너지 소비 증가는 대기오염의 증가로 이어졌다. 1999~2007년 사이 전체 대기오염물질이 6.4% 증가하고 화석연료의 이용으로 인한 질소산화물배출은 90년대 초반에는 농도가 증가하였지만, 이후 증감을 반복하고 있으며, 아황산가스는 황함유기준제도('81년), 고체연료사용 금지제도('85년), 청정연료사용 의무화제도('88년) 등 아황산가스 저감을 위한 정부 정책으로 인하여 '89년 이후 꾸준히 감소하고 있는 추세이다. 미세먼지 농도는 측정 시기가 질소산화물 및 아황산가스보다 비교적 늦게 시작하였으며, PM_{10}은 '95년 이후 측정을 시작하였고, $PM_{2.5}$는 '15년부터 측정을 시작하였다(국립환경과학원, 2018). 기후변화는 대기오염물질의 농도와 분포에 영향을 주며, 천식 등 알레르기 질환의 악화에 관여한다(박혜경, 2018).

인구가 집적된 도시는 기후변화로 인한 영향에 대해서 취약점을 지니는 동시에, 교통, 냉난방, 전기발전 용도의 화석연료 대량 소모로 인하여 기후변화 현상을 유발시키는 탄소배출에서도 큰 비중을 차지하고 있다(정지원과 송지혜, 2014). 전국을 행정구역 단위로 토지이용 비율에 따라 도시와 비도시로 구분하여 NO_2 농도에 영향을 미치는 환경변수를 통계적으로 분석한 결과, 인구 및 자동차 등 도로교통에 의한 오염원이 대기오염에 큰 영향을 미치는 것으로 나타났다(Ryu et al., 2019; 유윤진 등, 2013). 또한 가스, 전기 등 도시 생활에 의한 오염원과, 폐기물 처리, 제조업 등 산업에 의한 오염원이 탄소 배출에 영향을 미치는 것으로 나타났다(유윤진 등, 2013). 공간적인 관점에서 탄소배출과 깊은 연관성을 지닌 에너지소비량(전국, 23.4억 toe)은

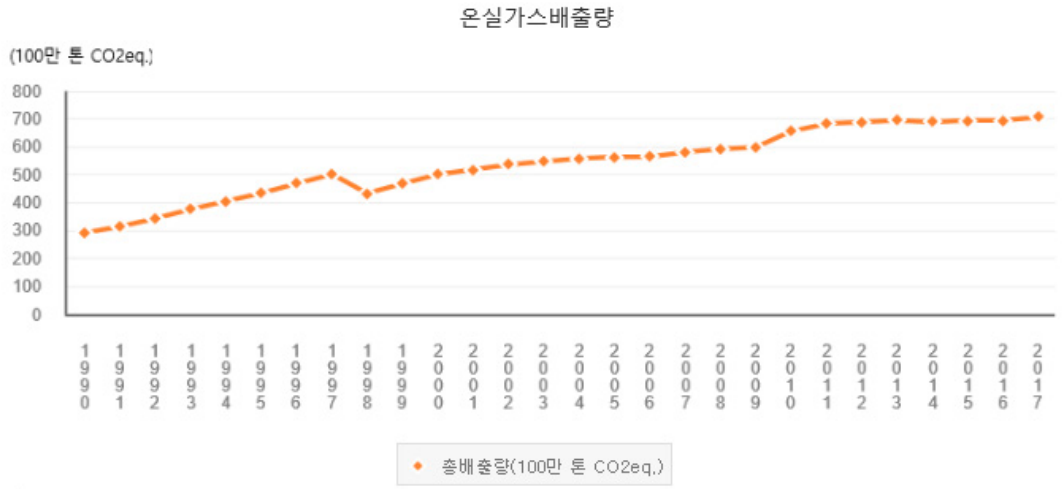


그림 9.1 한국 온실가스배출량 연도별 변화 추이(환경부, 2019).

2017년 기준으로 전라남도가 약 18.15%, 경기도에서 약 12.54%, 울산이 약 12.17%, 경상북도가 9.00%, 서울에서 약 6.41% 순으로 나타났다 (Kosis, 최종에너지소비량). 지역 별 발전설비에서 생산하는 전력용량(99.3백만 Kw)은 충남이 약 20.72%, 인천이 13.67%, 경북이 12.52%, 경기 11.71%, 전남 10.30% 순으로 나타났다(Kosis, 지역별 발전설비 현황). 이처럼 전력 에너지의 생산과 소비 공간의 분포는 특정지역에 집중하고 있는 현상이 나타나는데, 생산은 원자력과 화력 발전소가 입지한 지역에, 소비는 수도권의 산업중심지역, 업무중심지역과 광역시지역에 집중되고 있다. 이는 앞으로 도시공간계획에 에너지의 생산과 소비까지 고려해야 저탄소 녹색도시를 이루는 데 도움이 될 것임을 시사하고 있다 (김인현 등, 2011).

9.2.1.2 농촌

「국토의 계획 및 이용에 관한 법률(시행 2020.1.1.)」은 국토의 용도에 따라 도시지역, 관리지역, 농림지역, 자연환경보전지역으로 구분하고 있다(동법 제6조). 도시지역은 인구와 산업이 밀집되어 있거나 밀집이 예상되어 그 지역에 대하여 체계적인 개발·정비·관리·보전 등이 필요한 지역을 말한다(동법 제6조 제1호). 관리지역은 도시지역의 인구와 산업을 수용하기 위하여 도시지역에 준하여 체계적으로 관리하거나 농림업의 진흥, 자연환경 또는 산림의 보전을 위하여 농림지역 또는 자연환경보전지역에 준하여 관리할 필요가 있는 지역을 말한다(동법 제6조 제2호). 농림지역은 도시지역에 속하지 아니하는 「농지법」에 따른 농업진흥지역 또는 「산지관리법」에 따른 보전산지 등으로서 농림업을 진흥시키고 산림을 보전하기 위하여 필요한 지역을 농림지역을 말한다(동법 제6조 제3호). 자연환경보전지역은 자연환경·수자원·해안·생태계·상수원 및 문화재의 보전과 수산자원의 보호·육성 등을 위하여 필요한 지역을 말한다 (동법 제6조 제4호).

「한국 기후변화 평가보고서 2014」에서는, 농촌은 통상 행정구역에 기초하여 행정구역상 읍·면을 농촌으로, 동을 도시로 구분해왔다. 이에 따라 농촌은 전 국토의 90%를 차지하는 것으로 나타났지만 최근 농촌과 도시로 양분하기 어려운 지역들이 등장하여 이를 구분하는 것이 모호해 지고 있으며 전 국토가 도시화가 될 수 있다고 언급하였다. 도시가 점차 확장되며 농촌의 인구 및 경작하는 농경지의 면적은 점차 감소하고 있다.

2018년 도시계획현황에 따르면, 농림지역은 울산 (72.77%), 강원도가 (약 68.46%)로 가장 많고, 경상북도 (64.60%) 순서로 많았다. 반면, 부산광역시 (0%)와 제주특별자치도 (6.83%) 순서로 적게 나타났다(그림 9.2).

지역 별로 농가 인구의 변화 역시 크게 다르며, 농림어업조사 (통계청, 2018)에 따르면, 경상북도의 인구가 다른 지역에

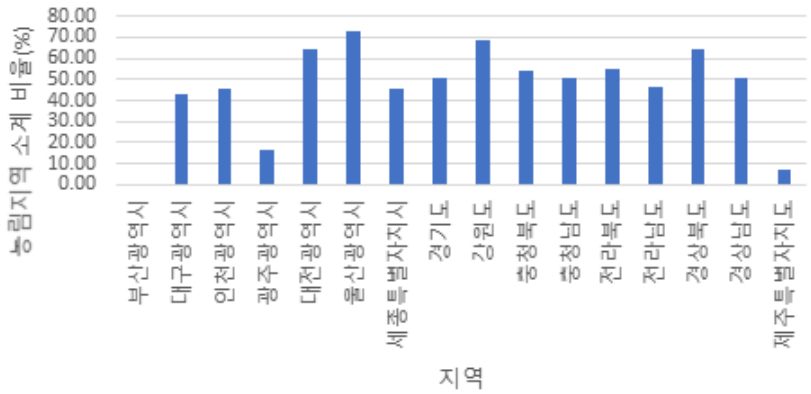


그림 9.2 지역별 농림지역의 소계 비율(국토교통부·한국토지주택공사, 2019).

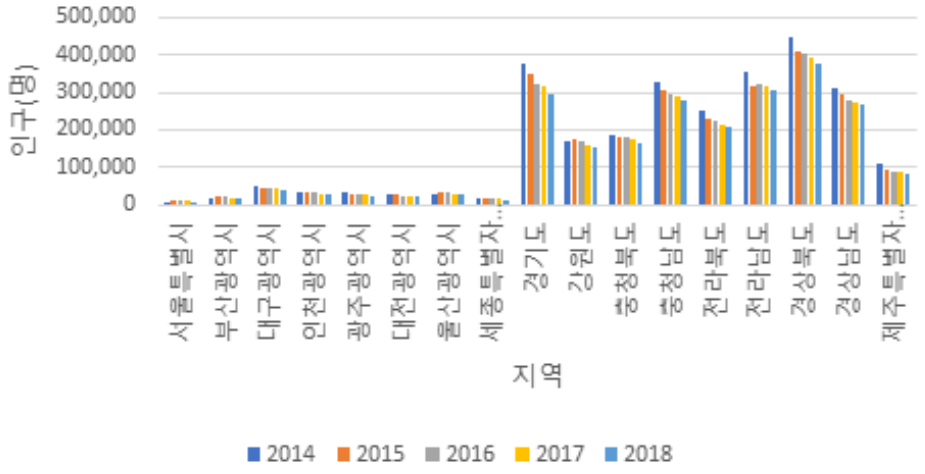


그림 9.3 농가 인구의 연도별 변화(통계청, 2018).

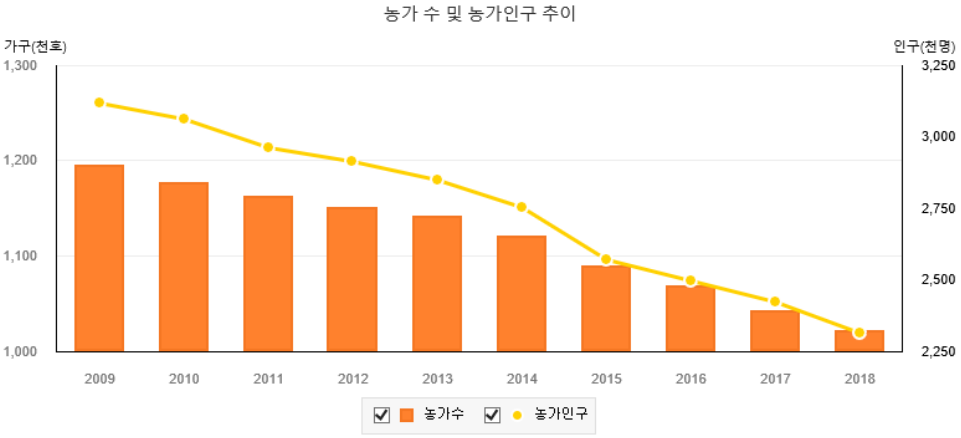


그림 9.4 농가수 및 농가인구 추이 변화(e-나라지표, 2018).

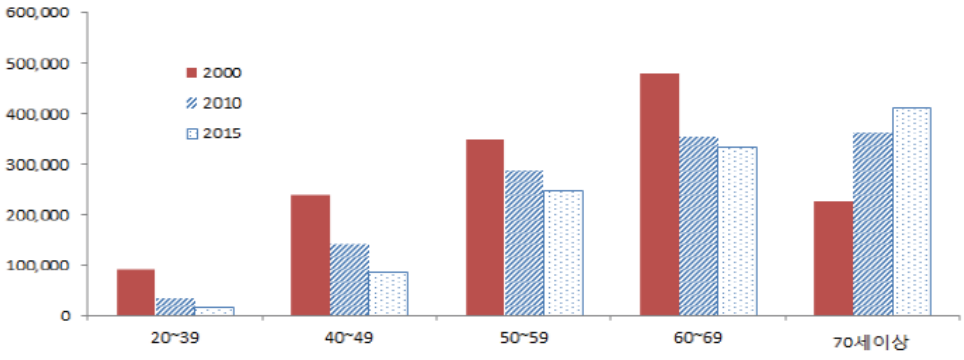


그림 9.5 경영주 연령 분포의 변화(김기복 등, 2016)

비해서 평균적으로 높았으며(2014~2018년 자료를 기준), 서울특별시의 농가 인구가 가장 적다(그림 9.3). 평균적으로 2014년도에 비하여 2018년도에는 약 0.14%의 농가인구가 감소하였으며, 이 중 제주특별자치도 (약 -0.24%)의 감소율이 가장 높았고, 서울특별시 (약 -0.01%)의 농가인구 감소율이 제일 낮았다.

통계청 농업조사, 농업총조사에 따르면, 농가 수 및 농가인구 추이는 (그림 9.4)와 같이 지속적으로 감소하는 추세이며, '09년 대비 '18년에 농가수는 119.5만명에서 102.1만명으로 감소하였으며, 농가인구는 311.7만명에서 231.5만명으로 감소하였다. 반면, 65세 이상 인구비중은 34.2%에서 44.7%로 지속적으로 증가하는 추세를 보였다 (e-나라지표의 농가 및 농가인구). 이처럼 농촌지역 인구는 고령화로 인하여 신체적인 노화가 진행되어도, 생계를 위하여 지속적으로 농사와 관련된 작업을 지속적으로 하고 있다 (이윤재, 2017). 국민 건강 수준 향상 및 기계화로 전업농이 65세까지는 이전 경영규모를 유지하지만, 그 이후는 유지가 어려운 상황이다(김기복 등, 2016)(그림 9.5). 이러한 농가인구 감소와 고령화는 농가소득 불평등 원인으로 지적되고 있다(윤영석 등, 2013).

2015년 농업총조사에 따르면, 70세 이상 고령인구 비중이 38.4%로, 2010년에 비하여 6.7%가 증가하였으며, 상대적

표 9.3 일반농산어촌개발사업의 세부유형 및 내용(이소영 등, 2017).

구분	세부유형	지원내용 및 지원조건		비고
읍(면) 소재지 종합정비		지원내용	- 기초생활기반 확충, 경관개선시설 중심 - 지역역량강화 지원 가능 * 재래시장현대화사업은 경관개선으로 분류 * 소득사업은 지양	<통합된 사업> 소도읍육성사업 거점면소재지 정비사업
		지원조건	지원: 4년간, 국고70%, 지방비 30% - 100억원 범위에서 사업성에 따라 차등지원 * 2013년부터 면단위는 70억원	
권역단위 종합정비		지원내용	- 기초생활기반 확충, 경관개선, 지역역량 강화 중심 - 지역소득 증대 지원 가능	<통합된 사업> 농촌마을개발사업 산촌생태마을조성 어촌마을종합개발사업
		지원조건	지원: 5년간, 국고70%,지방비30% - 지원규모: 권역규모에 따라 25억원~70억원 - 2013년부터는 25~50억원	
신규마을 조성 및 재개발	신규마을 조성	지원내용	- 기초생활기반 확충, 경관개선시설 중심	<통합된 사업> 전원마을 조성사업
		지원조건	- 지원: 국고 70%, 지방비 30%	
	기존마을 정비	지원내용	- 기초생활기반 확충, 경관개설시설 중심	<통합된 사업> 주거환경개선사업
		지원조건	지원: 국고70%, 지방비 30% - 실비기준지원(한도액 초과 시 지방비 부담)	
기초생활 인프라 정비	농촌생활 환경정비	지원내용	- 종합정비(읍면소재지, 권역단위) 대상지역 이외 지역에 개발단위로 지원하는 기반시설, 농어촌경관개선, 문화복지, 환경보전, 농어촌 체험시설, 농어촌 생활용수 개발 등의 시설 지원조건(국고 70%, 지방비 30%) - 농촌생활 환경정비는 계속 소요의 범위에서 지자체가 자체적으로 판단하여 시행	<통합된 사업> 농촌생활환경정비사업 농촌생활용수개발사업 녹색농촌체험마을사업 어촌체험마을사업 살기좋은 도시만들기사업 등
	농업생산 조성	지원내용	- 기계화경작로, 소규모용수개발, 지표수보강 개발 등의 농업생산 지원시설	<통합된 사업> 기계화경작로확장포장 소규모용수개발사업 지표수보강개발사업
		지원조건	- 지원: 국고70%, 지방비30% - 농업생산 기반정비는 계속 소요의 범위에서 지자체가 자체적으로 판단하여 시행	
	마을공동 소득 창출 및 문화조성	지원내용	- 마을공동소득창출, 마을공동문화조성	<통합된 사업> 없음 *2013년부터 신규사업
		지원조건	- 지원: 2년, 국고70%, 지방비 30% - 지원규모: 소득창출 5억원, 문화조성 2억원	

으로 소득이 낮은 고령농가 비중 증가에 따라 평균 농가 소득에도 영향을 미치고 있다(이승교 등, 2014). 농어촌 지역 개발을 위해 정부는 2010년 이후 포괄보조금제도를 도입하여 마을, 읍면 등을 대상으로 한 개별 사업 단위의 개발 정책을 농어촌 정주공간을 육성하는 정책으로 변환하였으며, 일반농산 어촌개발사업을 통해 농산어촌지역 주민의 소득과 기초 생활수준을 높이고 농촌의 어메니티 증진 및 계획적 개발을 통해 농산어촌의 인구유지 및 지역별 특화발전을 목적으로 하는 정책을 시행하고 있다(우장명 등, 2018)(표 9.3).

최근에 농촌은 정부의 다양한 청년 귀농정책과 다문화가정의 증가로 2010년 인구 총 조사 결과에서 출산율 상위 10위권의 지역 중, 농촌에 해당하는 지역이 9곳이 포함되기도 하였다. 그러나 자녀 성장 과정에서 도시로 이주 비율이 높다는 특징이 있으며, 농촌으로의 인구 유입은 증가하지만, 수요자가 그들의 특성에 맞는 적절한 주택을 찾기 쉽지 않다는 문제도 제기되고 있다(이연숙 등, 2016)(그림 9.6). 귀농의 경우, 인구수로는 증가하지만, '12년 기준 50대가 38.3%, 40대가 24.7%, 40~50대가 63%였다(박정아 등 2015). 이처럼 인구가 증가하는 지역은 일부이며, 농촌의 공동화 현상으로 인한 인구유출, 고령화, 경제쇠퇴 등도 동시에 발생하고 있으며, 토지의 황폐화는 지역 주민들의 정주체계를 붕괴시키고, 농촌의 공동화로 인한 폐교, 빈집, 빈터 등은 다른 공동화를 야기하기도 하며, 농촌의 공지는 개발수요가 부족한 농촌의 재개발을

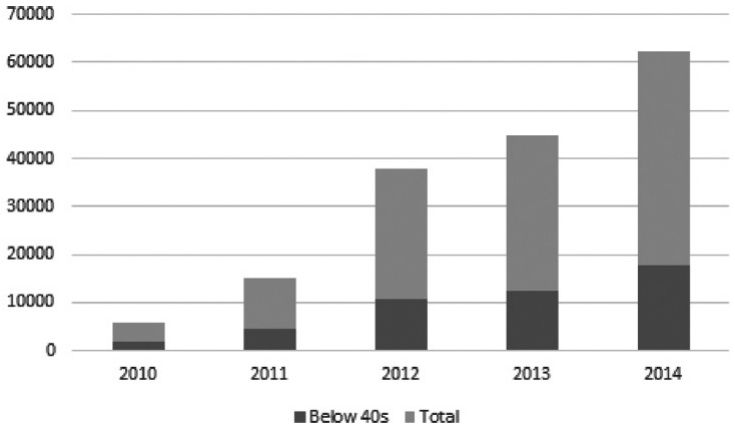


그림 9.6 귀농 트렌드 변화(이연숙 등, 2016).

표 9.4 단독주택 건축 연도별 주택 수 및 빈집(2017년)(정문수 등, 2018).

		전체 단독주택 수	'10년 이후 (호,%)	2000~2009 (호,%)	1990~1999 (호,%)	1980~1989 (호,%)	1979년 이전 (호,%)
전국	계	3,963,072	442,482 (11.2)	502,959 (12.7)	923,706 (23.3)	65,128 (17.0)	1,418,797 (35.8)
	빈집	309,697	6,211	11,700	23,734	26,620	241,432
동부	계	1,863,823	157,403 (8.4)	193,914 (10.4)	462,537 (24.8)	467,507 (25.1)	582,462 (31.3)
	빈집	70,603	615	846	2,775	9,900	56,467
읍부	계	560,283	77,864 (13.9)	77,678 (13.9)	116,710 (20.8)	74,490 (13.3)	213,541 (38.1)
	빈집	41,618	1,026	1,134	2,303	2,743	34,412
면부	계	1,538,966	207,215 (13.5)	23,367 (15.0)	344,459 (22.4)	133,131 (8.7)	622,794 (40.5)
	빈집	197,476	4,570	9,720	18,656	13,977	150,553

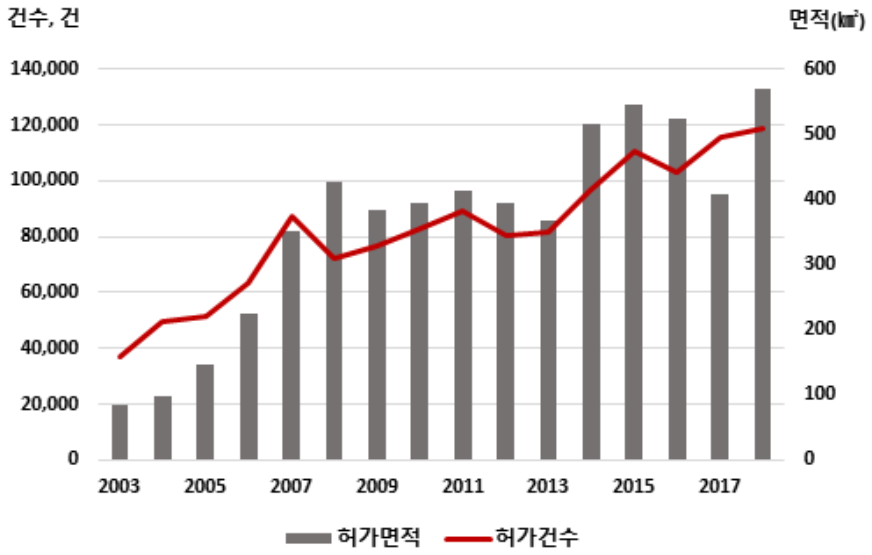


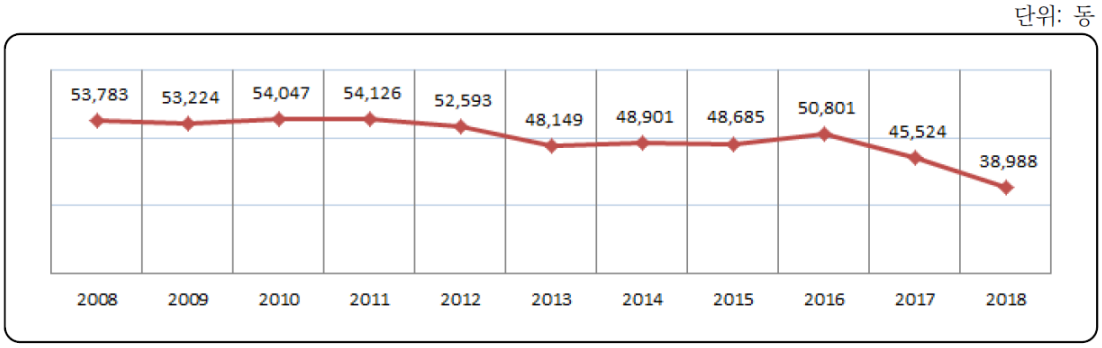
그림 9.7 연도별 개발허가면적 및 허가건수(국가통계포털, www.kosis.kr).

더욱 어렵게 만들기도 한다(김현중과 정일훈, 2017).

비도시지역의 토지이용 현황은 농·산림 등 보전용지가 지속적으로 감소하여 농지(전·답)는 13.4% (2,947 km^2) 감소, 산지(임야)는 3.1%(2,075 km^2) 감소한 반면, 대지는 72.1% (1,250 km^2), 기타용지는 72.9% (5,989%)가 증가하였다. 이외에 소규모 분산개발의 증가하고 있으며, 이는 대부분 관리지역 (81.6%)에서 발생하고 있다. 또한 토지이용 간 충돌이 발생하고 있으며, 특히 주거용지와 공장용지간의 토지이용 충돌이 심각한 수준이다(김승종, 2018). 우리나라는 경제개발 5개년 계획에 따라 인구의 도시집중과 도시화의 가속화에 따라 도심 주변의 도시외곽지역 개발이 증가하였으며, 난개발을 제지하기 위하여 비도시지역의 체계적 관리를 위해 「국토의 계획 및 이용에 관한 법률」을 제정하고, 시·군별로 성장관리방안을 수립할 수 있도록 규정하고 있다. 그러나 비도시지역에서 개발행위허가 및 지구단위계획을 수행할 수 있는 체계를 마련하였지만, 제도와 운영의 한계로 비도시지역의 계획관리지역의 확대와 소규모 점진적 개발이 확산되고 있다(윤동순과 최민섭, 2014).

관리지역 세분화 이후, '12년 전체 개발행위 허가가 80,635건 393.88 km^2이었으며, '18년에는 118,531건 568.5 km^2으로 개발 행위허가 건수 및 면적이 점진적으로 증가하고 있다(그림 9.7). 도시지역에서의 개발행위허가건수는 '12년 기준으로 21,437건 62.35 km^2에서 '18년 26,012건 192.80 km^2으로 증가하였으며, 비도시지역의 개발행위는 '12년 기준으로 59,198건 331.53 km^2에서 92,519건 375.70 km^2으로 급증하여 개발행위의 연도별 전체 개발행위가 '12년에 도시에서 약 26.6%이었는데 '18년에 약 21.9%로 감소하였으며, 반면 비도시지역은 73.4%에서 78.1%로 증가하였다. 토지적성 평가에 의해 4·5등급지로 구분된 계획관리지역과 농림지역은 '12년 약 17,076 ha, 7,232 ha의 개발행위허가가 이루어졌으며, '17년에는 14,617 ha, 10,321 ha로 증가하여 비도시지역 중 개발행위허가 면적의 86% 이상이 두 지역에 집중된 것으로 나타났다 (윤동순과 최민섭, 2014). 80~90년대에는 주거환경 편의성 증진을 위해 주택개량과 마을길 포장사업, 농로정비 등 공간계획적 요인이 직접적으로 이루어졌으나, 2000년대 이후에는 관광기반 관점으로 현대식 개발과 보존위주의 생활경관의 모습이 복합적으로 나타나는 경향도 나타난다 (최진아 등, 2016).

농어촌지역과 도시지역 모두 일반 단독주택의 수는 지속적으로 감소하고 있으나, 최근 다가구주택과 영업겸용 단독주택의 수는 증가하고 있으며, 농촌주택의 유형 중에서 아파트가 차지하는 비중도 크게 증가하고 있다. 노후주택은 일반적으로 단열이 나빠 냉방에너지 효율을 떨어뜨린다 (신광문, 2017). 노후주택의 비율도 29.6%로 높으며, 특히 면지역에서 약 37.9%가 노후주택이고, 최근 아파트 단지가



자료: 농식품부 농촌 빈집실태조사(2018)

그림 9.8 연도별 농어촌 지역 빈집 현황(정문수 등, 2018에서 재인용).

표 9.5 난방시설 유형(농촌진흥청 농어업인 복지실태조사, 2017)(정문수 등, 2018에서 재인용).

구분		중앙난방 (%)	지역난방 (%)	도시가스 보일러 (%)	기름 보일러 (%)	화목 보일러 (%)	LPG 보일러 (%)	전기 보일러 (%)	연탄 보일러 (%)	기타 (%)
읍/면	읍	1.2	11.3	49.6	21.4	2.6	5.4	6.4	1.4	0.7
	면	1.6	2.3	16.6	50.0	7.3	2.0	16.8	2.9	0.4
주택 건축 및 신축 년도	1960년대 이전	0.6		1.4	70.0	10.8	0.35	10.6	5.7	0.5
	1970년대	0.1		2.4	71.2	5.5	0.1	14.9	5.4	0.4
	1980년대	0.7		10.6	66.0	4.0	3.1	13.7	1.8	0.2
	1990년대 이후	1.8	8.9	41.6	24.5	4.7	4.1	12.2	1.6	0.7

건설되고 있는 읍 지역에서도 노후주택 비율이 19.9%이다. 특히 농어촌 지역에서 가장 일반적인 주택 유형인 단독주택의 노후화 수준은 매우 높다 (정문수 등, 2018)(표 9.4). 빈집 중 폐가는 문제가 될 수 있는데 전국 농어촌 빈집수는 농촌 주민의 고령화와 과소화로 주택 수요가 줄면서 2016년까지는 매년 비슷한 규모의 빈집이 발생했으나(성주인과 김영단, 2014), 매년 정부사업으로 7천여 채를 정비하는 등 정책 효과 등으로 인하여 최근 3년간 빈집은 감소하였다 (정문수 등, 2018)(그림 9.8).

농림어업총조사 지역조사 자료로 농어촌 행정리별 주거 인프라 수준을 보면 전체 행정리 중 36.6%는 일반상수도를 통해 물을 공급받지 못하고 있으며, 간이수도와 전용수도를 사용하고 있다. 하수도와 도시가스 공급시설은 설치되지 않은 행정리가 더 많았다. 하수처리시설이 없는 행정리는 전체 행정리의 51.2%였으며, 도시가스가 설치되지 않은 행정리는 99%로 나타났으며, 이들은 기름, LPG, 전기, 연탄, 화목 등을 사용하는 것으로 나타났다(표 9.5).

노후 된 농촌지역의 주거환경 개선을 위해 2007년 행정자치부의 농촌주택개량 사업 및 2012년 국토해양부의 농촌지역 주거환경개선사업의 업무이관, 2013년 농어촌 마을리모델링시범사업 등이 추진되어 왔으며, '09년부터는 정부에서 도시에 거주하는 젊은 인력을 농어촌으로 유치하여 지역 활력을 증진하고자 농어촌뉴타운사업을 시행하고 있다. 전국 5개 시범지구를 선정하였으며, 2013년 기준 시범사업이 완료된 상태이며, 시범사업 이후 계획들은 부정적 요인들로 인하여 중단된 상태이다(박정아 등, 2015).

9.2.2 복지

「한국 기후변화 평가보고서 2014」에서는, 우리나라 국가 단위 기후변화 취약계층 관련 지원대책은 건강 및 재난재해 분야가 큰 비중을 차지하고 있다. 특히, 우리나라의 복지시설은 특정 취약계층을 주요 대상으로 하는 비중이 높으며, 복지에

표 9.6 기상이변 취약계층(신지영 등, 2013).

기준	세부대상
생물학적 요인	노인, 만성질환자, 치매환자, 임산부 등
사회·경제적 요인	일반농민, 축산농민, 과수농민, 시설재배 농민, 화훼 농민, 임업인, 양식어민, 건설 근로자, 캐디, 해운사, 택배기사, 외국인 근로자, 재래시장 상인 등 옥외근로자, 기초생활수급자, 노숙자 등 저소득 계층
거주 및 지리적 요인	상수도 미보급 지역 주민, 고지대 주민, 저지대 주민, 산간마을 주민, 도서주민, 해안 거주자, 산사태 위험지역 거주자, 주택 노후화 주민 등

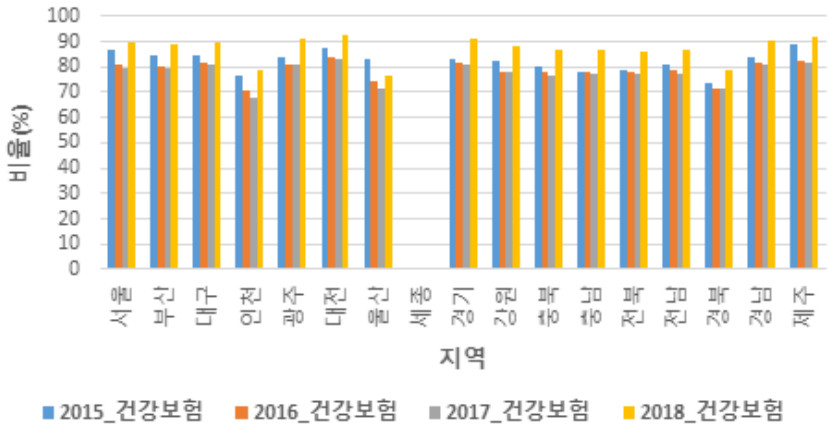


그림 9.9 시도별 공공의료기관 취약계층 진료비율(Kosis data를 기준으로 작성).

대한 국가정책 및 인식 변화에 따라 복지시설이 증가하고 있지만 급격한 수요를 고려하면 미비한 실정이다. 기후변화로 영향을 받는 취약계층은 지역의 환경 차이에 따라 공간별로 다르게 나타나는 경향이 있다.

제2차 국가 기후변화 적응대책 (관계부처합동, 2015)에 따르면, '10년에 14개 부처 합동으로 최초 국가대책인 제1차 국가 기후변화 적응대책(2011~2015) 수립으로 인하여 기후변화로 인한 건강 피해 저감 대책의 다양화 및 활성화 구현 측면에서 취약계층의 건강관리 사업 부분 중 교육 및 정보 제공 측면에 대해서는 성과를 도출하였지만, 기후변화 취약계층과 일반 취약계층 (저소득, 다자녀, 한부모, 독거노인 등)의 차이점이 불분명하고 기존 정책과의 차별화가 미흡하였다는 평가를 하였다. 이에 따라, 2차 대책에서는 취약계층·지역 관리를 강화하는 방향을 추가하였다.

지방자치단체 기상이변 취약계층 지원 사업 개발 가이드북에 따르면, 기상이변 취약계층은 "기후노출에 직·간접적으로 영향을 받는 지역에 거주하며 적응 능력이 부족한 계층"이며, 구체적으로 "생물학적 요인, 사회경제적 요인, 거주 및 지리적 요인에 의한 취약계층"으로 구분한다(표 9.6).

제2차 기초지자체 기후변화 적응대책 세부시행계획 수립지침(환경부, 2017)에서도 환경부장관은 법 제48조 제4항에 따라 기후변화에 따른 취약계층·지역 등의 재해 예방에 관한 사항을 포함하여 기후변화 적응대책을 관계 중앙행정기관의 장과 협의 및 위원회의 심의를 거쳐 5년 단위로 수립·시행하여야 한다고 명시되어 있다. 기후변화로 인한 위험감소 및 기회의 현실화를 목표로 하였으며, 이를 위하여 수립한 4대 정책 중, 안전한 사회건설에서 기후변화 취약계층 보호, 건강피해 예방 및 관리, 취약지역·시설관리, 재해·재난관리를 언급하였다.

우리나라에서 기후변화 적응과 관련된 복지는 모든 국민들을 대상으로 하는 다른 생활 인프라와 달리 특정 취약계층을 주요 대상으로 하고 있다는 점에서 차별된다. 제2차 기후변화적응 기본계획(2019)에 따르면, 기후변화 적응과 관련 기본 방향을 우리사회의 기후 탄력성 제고와

취약계층 지원 강화로 규정하였다. 복지에 대한 국가정책 및 국민인식의 변화에 따라 전반적으로 복지 관련 시설수가 증가하고 있는 추세이나, 공급이 급격한 수요의 증가를 따라오지 못하고 있는 실정이다.

특히, 노령인구의 급격한 증가와 전통적으로 부양을 담당했던 가족기능의 약화로 공공에 대한 노인복지의 요구는 급격히 늘어나고 있다. 노인복지시설의 현황을 살펴보면, 양적인 측면에서 다른 복지시설에 비해 많은 공급이 이루어지고 있는 것으로 나타나지만, 공급되고 있는 시설의 대부분이 경로당 및 노인교실과 같은 노인여가복지시설로 더 절실한 수요가 있는 노인주거 및 의료복지 관련 시설의 공급은 상대적으로 이루어지지 않는 실정이다(조판기 등, 2013). 환경부에서는 기후변화취약계층을 경제적(기초생활수급자, 차상위계층, 일반저소득자(복지사각지대)), 사회적(어린이(한부모가정, 소년소녀가장 등), 만성질환자, 노숙인, 노인(독거노인 등))으로 구분하고, 취약계층의 따뜻한 겨울나기 방문서비스를 2017년부터 시행 중이다(환경부, 2017 보도자료).

기후변화로 영향을 받는 취약계층은 기후의 특성과 공간에 따라서 다르게 나타났다(경기개발연구원, 2013). 시도별 공공의료기관 취약계층 진료비율을 건강보험 기준으로 2015~2018년 자료를 비교하였을 때, 가장 취약계층 진료비율이 높은 곳은 제주도였으며, 인천이 가장 낮은 비율로 나타났다(그림 9.9).

9.3 영향 전망

9.3.1 정주공간

9.3.1.1 도시

「한국 기후변화 평가보고서 2014」에서는, 2020년까지 인구 및 가구수는 지속 증가하나 증가율은 둔화 될 것으로 예상된다. 기대수명 증가로 초고령 장수사회가 되고, 가구의 소규모화가 가속화되어 1인 가구 비율이 급증할 것으로 추정된다. 다만, 통일을 가정하면 고령화 추세는 둔화되고 생산인구는 증가할 것으로 예상된다. 기후변화로 인하여 미래의 토지이용 및 수자원 분야에서 이상기후와 자연재해의 빈도가 증가가 예상되나, 스마트성장 및 녹색성장 등과 같은 새로운 도시정책 패러다임을 적용해 볼 수 있으며, 이러한 정책을 반영하였을 때에 도시면적 증가 및 산림면적 감소가 발생할 수 있을 것으로 나타났다. 또한, 기후변화로 인하여 도시 및 지역 구조가 에너지 절약적 및 온실가스 배출이 적은 구조로 변화하지만, 노후하여 기후변화에 취약한 기반시설의 피해는 증가할 것으로 예상된다.

최근 우리나라는 세계에서 유래를 찾기 힘들 정도로 빠르게 진행되고 있는 저출산·고령화, 1~2인 소형가구의 증가 등을 경험중이다. 이러한 현상은 국토공간에서 균등하게 일어나는 것이 아니라 특정 지역에서의 인구감소가 집중적 으로 발생 하는 등 공간상에서의 불균형이 발생하고 있다(민성희 등, 2016).

통계청 '2010년 인구주택총조사'와 국토해양부·통계개발원의 시도별 인구추계 등에 따르면 2020년까지 인구 및 가구수는 지속 증가하나 증가율은 점차 둔화될 것으로 점쳐지고 있다(국토연구원, 2011b). 미래의 인구구조와 변화를 예측하는 인구 추계는 다양한 사회 문제의 유용한 자료로 사용할 수 있다(민성희 등, 2016). 인구 추계 방법으로는 수학적 방법을 사용하며 코호트- 조성법이 대중화된 20세기 중반 이전에 주로 이용된 경향-외삽법, 통계청이 인구추계 시 사용하는 대표적 기법인 코호트-조성법, 인구집단의 인구학적 특징과 사회경제적 특성이 다른 형태의 특징들 사이에 관찰된 관계에 의존하는 구조적 방법이 있다. 지방자치발전위원회 (2016)의 연구 결과에 의하면, 기초지방 정부의 도시화 정도를 기준으로 도시형, 농촌형, 도농형의 세 가지 유형으로 구분하여 인구를 추계하였으며, 도시형은 주로 시와 구를 포함하는 단위이며, 도시형 지방정부의 경우, 인구 50만을 기준으로 한다. 2010년 대비 2030년의 인구는 특별자치구의 인구는 약 11.8% 감소하지만, 이외에 인구 50만 이상·미만인 시, 광역시 자치구의 인구는 각 1.6%, 22.5%, 2.7% 증가할 것으로 예측되었다(그림 9.10).

도시인구가 차지하는 비율을 의미하는 도시화율은 G20의 도시화율 기준으로 우리나라는 1950년에는 21.4%에서 2050년 86.4%까지 증가할 것으로 예측되었다(UN World Urbanization Prospects, 2018). 급격히 증가하다가 80% 전·후의 도시화율을 유지하고 있다. 도시화율은 인구의 밀집된 정도를 의미하며, 도시화율이 커질수록 에너지

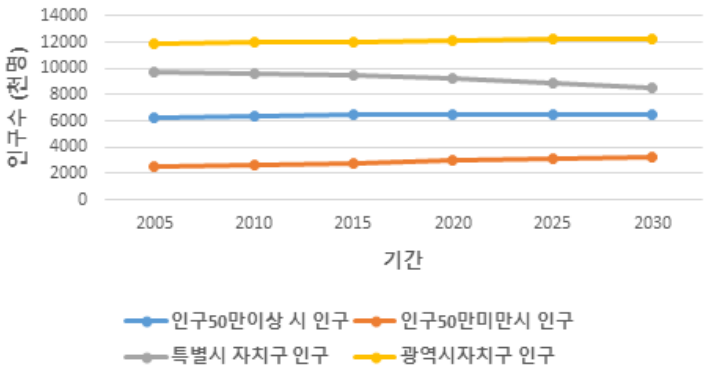


그림 9.10 도시지역의 인구 변화 예측(지방자치발전위원회 데이터(2016)를 기준으로 작성).

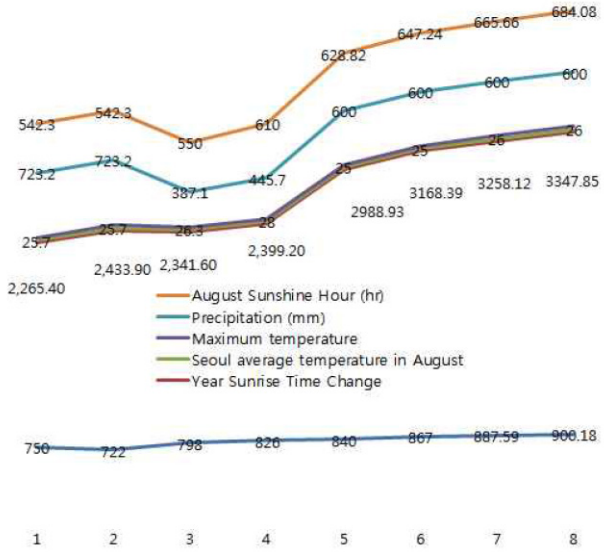


그림 9.11 환경 변화에 대한 트래킹 화재증감 선형예측(2016~2020)(박홍기와 김희식, 2019).

사용이 많기 때문에 이산화탄소를 많이 배출하게 된다. 이산화탄소 배출 영향 요인을 설명하기 위한 대표적 모형인 STIRTAP 모형을 이용한 분해분석 기법을 이용한 결과, 인구, GDP, 화석연료비율, 도시화율, 에너지원단위 모두 이산화탄소 배출량의 증가요인으로 나타났다 (진태영과 김진수, 2017).

1970년대 이후 급속도로 이루어진 산업화와 도시화는 대부분 도시의 물리적 계획에 집중되어 있고, 2000년 이후 공공기반시설 확충 및 인프라 구축에 초점이 맞춰져 사업이 진행되어왔다(이정동, 2019). 2013년 도시재생활성화 및 지원에 관한 특별법이 제정되면서 노후화된 주택을 고려한 종합적 도시계획을 수립하게 되었다. 도시재생 사업은 2014년도에 전국 13개 지역을 대상으로 경제기반형사업과 근린일반형 사업을 선정하였고, 2017년 도시재생 뉴딜사업을 시작한 이후 266개 사업지구를 선정하고 2019년 현재 46개 사업을 준공하였다(국토교통부, 2019). 기후변화에 따른 이상기후의 피해가 증가하면서, 노후화된 공동주택이나 다가구·다세대 주택, 상업·업무시설 등이 밀집해 있는 노후화된 도시 내 쇠퇴지역이 기후변화에 따른 대응 방안이 시급한 지역이다(유선철과 여관현, 2015). 최근, 「스마트도시 조성 및 산업진흥 등에 관한 법률(법률 제16388호)」에 근거하여 수립된 제3차 스마트도시종합계획에서는 도시 성장 단계별 스마트도시 추진 전략을 주요 과제로 제시하였으며, 스마트도시 조성은 기후변화 대응과 도시문제를 해결 할 수 있을 것으로 기대한다(국토교통부, 2019).

표 9.7 주요 기상재해의 특성 및 잠재적 영향(김정곤 등, 2014).

		폭염	폭우	가뭄
재해 규모	발생기간	중기~장기	단기~장기	장기
	크기	중~대	중~대	대
	잠재적 이재민 수	대	중	대
대표적인 피해지역		·도시의 불량주택 밀집 지역 ·고밀도 지역	·하천변 저지대 및 산 및 ·인프라 구축 미비지역	·수자원 관련시설 미비지역
도시의 잠재적 영향		·냉방 에너지 수요 증가 ·대기의 질 악화 ·열섬현상으로 인한 기온상승 ·산불위험 증가 ·식품 생산량 감소 ·수질문제 발생(조류) ·노인 및 영유아, 빈곤층 피해	·홍수의 위험 증가 ·산사태의 위험 증가 ·지반침하 및 토양침식 발생 ·기반시설의 피해 ·수질에 부정적인 영향 ·수인성 감염질환 사망 증가 ·시골지역으로부터 이주 발생	·수자원 부족/고갈 ·수력 발전 가능성 감소 ·시골지역으로부터 이주 발생 ·높은 식량 가격

기상청 발표에 의하면, 우리나라는 2050년까지 RCP 시나리오를 기반으로 최대 3.4℃, 2100년까지 최대 5.7℃가 증가할 것으로 예상되며 기후변화의 영향, 도시화, 고령화로 인하여 대기오염의 피해도 증가하고 있으며(이상혁 등, 2015), 노후 된 트래킹으로 인한 화재 현상이 점차 증가하고 있다. 트래킹 화재는 8월 일조시간과 최고온도가 강한 상관성이 있는 것으로 나타났다(박홍기와 김희식, 2019)(그림 9.11).

도시에서 기후변화는 온도 및 강수와 관련된 폭염, 폭우, 가뭄 등을 초래하며, 이와 관련된 다양한 영향이 도시의 취약지역에 영향을 미치게 된다(표 9.7) 기후변화에 직·간접적으로 영향을 미치는 노후도심지역의 건축물에서 에너지의 효율이 낮으므로, 탄소배출이 다른 지역에 비하여 높다. 지자체 온실가스 배출량 산정지침은 2006년 IPCC 가이드라인의 방법을 일반적으로 따르고 있다.

9.3.1.2 농촌

「한국 기후변화 평가보고서 2014」에서는, 인구 유동이 증가하며, 농촌의 미래전망은 인구감소와 고령화로 농지 및 산지의 이용이 줄고 여가 관광 공간으로 활용되는 사례가 증가할 것으로 예측된다. 2020년부터 도시와의 접근성을 개선하여 농촌지역 의료 및 복지 수준이 크게 향상될 것으로 예측하였으며, 2050년에는 저탄소사회로의 실현을 위하여 사회·경제구조의 체질 전환이 가능할 것으로 예측하였다.

우리나라는 인구성장세가 둔화되어 2030년 이후에는 인구감소가 예상되는 가운데 지역 간 인구이동이 크게 진정되고, 인구유동이 상대적으로 확대될 것으로 전망하고 있다. 그리고 인구이동은 중소도시 등 도시지역에 거주하는 인구가 주변 농촌지역으로 통근 등을 통하여 주간에 유입되는 특성을 지닌다(국토연구원, 2012; 국토연구원, 2013b). 지방자치발전위원회 (2016)의 연구 결과에 의하면, 기초지방정부의 도시화 정도를 기준으로 도시형, 농촌형, 도·농형의 세 가지 유형으로 구분하여 인구를 추계하였으며, 농촌형은 군을 중심으로, 도·농형은 도시형과 농촌형의 특성이 혼재된 형태이다. 농촌 지방정부의 경우, 인구 6만이 기준인데 6만 이상이면 대군으로, 미만이면 소군으로 분류하였다. 도농복합도시는 2010년에 비하여 2030년에는 약 59.6% 증가, 인구 6만 이상 군에서도 약 26.7% 증가하는 경향이 나타났지만, 인구 6만 미만의 군에서는 약 33.3% 감소할 것으로 나타났다(그림 9.12).

농림축산식품부에서 고시하는 농어촌 서비스기준은 정부가 농어촌 주민들이 제공받아야 할 공공서비스 항목별로 개선해야 할 목표치를 제공하고 있다. 이 농어촌 서비스 기준의 주택 항목은 농어촌 주민들이 최저주거기준 이상의 주택에서 거주하도록 명시하고 있으나, 농촌지역의 최저주거기준을 도출할 수 있는 통계적 지표는 아직 부재하다. 하지만, 이를 기준으로 보면, 정주생활기반에는 주택, 상수도, 난방, 대중교통, 광대역통합망을 핵심항목으로 하고 있다(정문수 등, 2018)(표 9.8). 이러한 항목을 기준으로 보면, 기후변화가

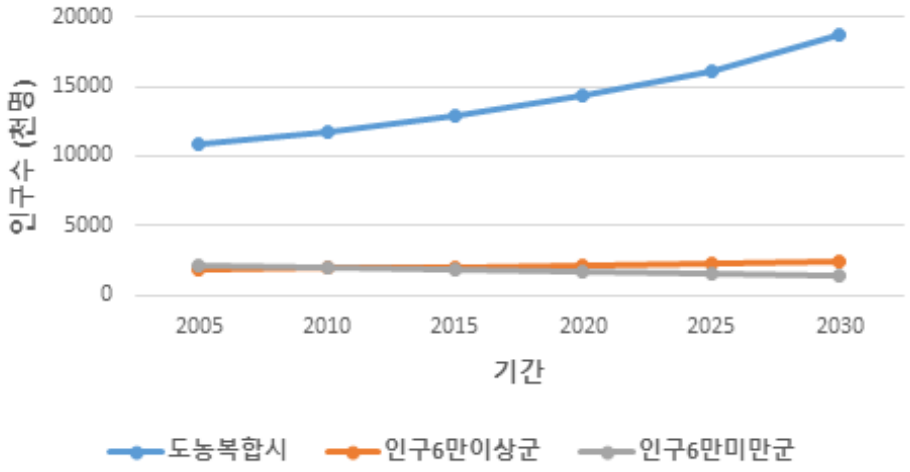


그림 9.12 도시 및 농림지역의 인구 변화 예측(지방자치발전위원회 데이터(2016)를 이용).

표 9.8 2017년 농어촌 서비스 기준 핵심항목 이행실태 변화(정주생활기반)(정문수 등, 2018에서 재인용).

핵심항목	국가최소기준	`16 (%)	`17 (%)	(목표) `19 (%)
주택	주민 누구나 최저기준 이상의 주택에서 거주한다.	-	-	95
상수도	주민 누구나 상수도를 통해 깨끗하고 안전한 물을 마실 수 있다	69.3	71.3	82
난방	읍지역에서 도시가스를 이용할 수 있다. 도시가스 보급이 어려운 지역에서는 LPG 소형저장탱크 등 난방비 저감정책을 추진한다	57.0	60.0	70
대중교통	마을 내에서 대중교통을 하루 3회 이상 이용할 수 있다. 대중교통 운행이 어려운 지역은 준대중교통 프로그램을 도입한다. 도서지역의 경우 모든 본도에서 1일 왕복 1회 이상의 여객선이 운항된다.	90.4	88.6	100
광대역통합망	농어촌 어디에서나 광대역 통합망을 이용할 수 있다.	92.8	96.4	90

온도 변화 및 강우량에 직접적으로 영향을 줄 수 있으므로, 주택의 경우 냉난방 효율 감소로 인한 비용 증가, 상수도 부문에 있어서는 안정적인 물공급, 대중교통 부분에서는 한파 및 혹서에 의한 영향에 노출되어 있다고 볼 수 있다(표 9.8).

농림어업총조사 지역조사 자료와 농촌진흥청의 농업어인 복지실태조사(2017)에 따르면, 농어촌 행정리별 주거 인프라 수준은 전체 행정리 중 36.6%가 일반상수도를 이용하지 못하고 있으며, 하수도와 도시가스공급 시설이 설치되지 않은 곳이 더 많았다(표 9.9). 국토부 주거실태조사(2017)에서 조사한 주택난방 및 단열실태 조사 결과에 따르면, 농촌 주택의 약 21%가 조금 불량하거나 불량한 상태이며, 농어촌의 난방은 대부분 기름보일러에 의존하고 있다(표 9.10).

9.3.2 복지

「한국 기후변화 평가보고서 2014」에서는, 기후변화로 인한 기온, 강우, 해수면 등의 변화는 자연생태계에 직접적인 영향을 미치는 것뿐만 아니라, 인간사회에도 직접적인 보건, 인명, 재산피해와 사회 갈등을 유발시켜 간접적으로 영향을 미칠 수 있을 것으로 나타났다. 기후변화로 인한 강우에 의한 피해의 정도는 공간적인 요소뿐만 아니라 소득, 연령과 같은 사회적인 요소와도 관계를 가지므로, 지역 및 취약계층이이 기후변화에 취약한 정도를 분석하는 연구들이 다수 있었다. 60세 이상의 취약 인구는 대부분 농어촌지역에 밀집하여 거주하여 폭염과 같은 극한 기후변화현상에 매우 취약한

표 9.9 농어촌 지역 주거 인프라 현황(2015년 기준), 통계청 농림어업총조사(지역조사 2015)(정문수 등, 2018에서 재인용).

구분		개 (전체 행정리 수/해당 항목별 행정리 수)
상수도	상수도	23,342 (63.4)
	간이수도	12,174 (33.1)
	전용수도	881 (0.2)
	없음	395 (0.1)
하수도	공공하수처리	13,974 (38.0)
	마을하수처리	3,982 (10.8)
	없음	18,836 (51.2)
도시가스	설치	3,601 (1.0)
	미설치	33,191 (99.0)
계		36,792

표 9.10 난방시설 유형(농촌진흥청 농어업인 복지실태조사, 2017)(정문수 등 2018에서 재인용).

구분		중앙난방 (%)	지역난방 (%)	도시가스 보일러 (%)	기름 보일러 (%)	화목 보일러 (%)	LPG 보일러 (%)	전기 보일러 (%)	연탄 보일러 (%)	기타 (%)
읍/면	읍	1.2	11.3	49.6	21.4	2.6	5.4	6.4	1.4	0.7
	면	1.6	2.3	16.6	50.0	7.3	2.0	16.8	2.9	0.4
주택 건축 및 신축 년도	1960년대 이전	0.6		1.4	70.0	10.8	0.35	10.6	5.7	0.5
	1970년대	0.1		2.4	71.2	5.5	0.1	14.9	5.4	0.4
	1980년대	0.7		10.6	66.0	4.0	3.1	13.7	1.8	0.2
	1990년대 이후	1.8	8.9	41.6	24.5	4.7	4.1	12.2	1.6	0.7

것으로 언급되었으며, 저가 에너지 접근성 저하, 소득역진성 악화 등과 같은 사회문제가 발생 가능한 것으로 나타났다.

취약계층의 구분 기준 및 이와 이들의 건강 관리방안에 대한 연구들이 다수 진행되고 있다. 취약계층의 구분의 기준이 되는 연령 분포를 비교하면, 우리나라의 65세 이상 인구구성은 1965년 3.1%, 1995년 5.9%, 2015년 13.1%, 2060년 40.1%로 2015년에 고령사회로 진입하였으며, 2020년에는 20.0%로 초고령사회로 진입하여 급격히 고령화가 진행되고 있는 것으로 나타난다(통계청, 2015). 지역별로 보면, 2013년 65세 이상 고령인구 추계비율은 서울특별시와 6개 광역시(부산, 대구, 인천, 광주, 대전, 울산)에서는 부산이 13.3%로 가장 높았고, 울산이 7.8%로 가장 낮았다(장창곡 등, 2017). 고령화를 나타내는 중위연령은 2013년 전국평균이 39.7세였으나 가장 높은 지역은 전남이 45.2세, 경북이 42.9세, 강원이 42.6세, 전북이 42.2세 순이었고, 가장 낮은 지역은 대전 37.3세, 광주가 37.0세였다(통계청, 2014).

사회경제적 취약계층에 미치는 영향은 풍수해 피해와 관련하여 수도권지역에서 저소득계층이 상대적으로 밀집 거주하고 있는 지역에 풍수해 발생빈도가 유의하게 크게 나타는 경향이 있으므로 이들을 고려한 대비책이 필요하다. 최병한 등(2019)은 댐의 취약성 대비를 위한 비상대처계획에 근거하여, 고령화 인구의 보행속도, 대상지 지형의 현황을 고려하여 저수지 붕괴 시 대피소의 지정 유효성 검토 및 지형공간분석을 통한 대피지점 선정 방법을 제시하였다. 이와 관련하여, 권진석 등(2015)는 일본 내각부에서 자연재해 피난 보행속도로 고령자의 경우 0.5 m/s, 이소희 등(2015)는 65~74세는 0.78 m/s, 70세 이상은 0.70 m/s의 속도로 걷는다고 하였다.

폭염과 관련해서는, 65세 이상의 고령자는 일반인보다 면역력 감퇴 및 저항력 약화로 외부환경에 더 민감하게 반응하므로 기후변화에 취약한 인구집단으로 분류되므로,

신동희 등(2015)은 IPCC의 시나리오를 토대로 2015~2060년 동안 여름철 폭염으로 인해 예상되는 65세 이상 고령자의 초과 사망자수를 전망하였다. 이 연구에서는 서울, 부산, 대구, 인천, 광주, 대전, 울산을 대상으로 1992년부터 23011년까지 일주일 단위로 호흡기계 혹은 심혈관계 질환 환자 중 사망자의 변화를 회귀식으로 분석한 결과, 서울과 대구는 여름철 최고 기온이 35℃를 넘어서면 사망자 수가 급증하고, 부산과 광주는 30℃를 넘어 갈 때에 호흡기계 질환 혹은 심혈관계 질환 사망자 수가 급증하는 것으로 나타났다.

9.4 취약성의 주요 원인

9.4.1 정주공간

9.4.1.1 도시

「한국 기후변화 평가보고서 2014」에서는, 우리나라에 가장 많은 피해를 주는 기후요인은 강우이며, 인명피해는 감소하지만, 재산 피해액은 증가하는 경향이 있다. 특히, 재해취약지역의 밀집하여 거주 등은 피해를 가중시킬 수 있으며, 이외에도 도시열섬, 대설, 황사의 빈도 증가 등에 도시가 취약한 것으로 나타났다.

그림 9.13 상위 30개 및 하위 30개 용도지역지구의 평균 LST(안승만 등, 2016a).

표 9.11 엔트로피 가중치 활용을 통한 대기오염 취약성 분석 이용지표(이상혁 등, 2015).

요소	세부지표	출처	요소	세부지표	출처
노출	일 최고기온(연평균)	기상청 AWS	적응능력	지역 내 총생산	통계청
	강수량			재정자립도	행정안전부
	8시간 평균 오존농도의 60 ppb 초과 일수	국립환경과학원		실업률	통계청
	시간 오존농도 100 ppb 초과일수			교육수준	행정안전부
	여름철 오존 연평균 농도			주민 1인당 보건의료 예산	
민감도	65세 이상 인구 비율	통계청		인구당 의사 수	통계청
	13세 이하 인구 비율			인구당 응급의료기관 수	
	독거노인 비율			인구당 보건소 인력	
	기초생활 수급자 비율			주민 1인당 환경예산	행정안전부
	장애인 비율			대기오염농도 알림체계	환경부
	도로면적 비율	국토교통부		인구 당 환경공무원 인력	행정안전부
	대기오염배출 시설 수	통계청		녹지면적 비율	국립환경과학원
	자동차등록대수				
	호흡기계 관련 질환 입원환자 수	국민건강보험공단			
	심혈관계 관련 질환 사망자수	통계청			

도시의 기후변화 위험은 지역 별 차이가 있지만, 홍수, 수자원 부족, 열섬현상 등으로 그 원인을 나누어 볼 수 있다(정지원과 송지혜, 2014)(그림 9.13).

평균지표면 온도와 용도지역지구를 비교한 결과, 주로 아스팔트 및 콘트리트 등 인공적인 포장비율이 높은 토지이용지역에서 평균지표온도가 높고, 인공피복비율이 낮은 토지이용은 평균지표온도 열섬 발생위험이 낮았다(안승만 등, 2016a).

엔트로피 가중치를 활용한 대기오염 취약성 분석에는 표 9.11과 같은 지표를 이용하였으며, 변수 특성별 엔트로피 가중치를 적용하였을 때, 서울·경기도와 경북, 전남 일부 지역에서 대기오염에 대한 노출지수가 상대적으로 높았고, 민감지수의 경우, 서울·경기와 부산 일부, 제주에서 높았으며, 부산, 광주, 충남, 경기 일부에서는 적응능력이 낮게 나타났다. 취약 상위지역들은 대기오염에 대한 적응능력이 높고, 노출에 대한 영향이 높았으며, 지역별 민감도의 차이는 크지 않았다(표 9.11).

건물 단열은 기상학적 환경으로 인해 변하는 외부 기온에 따른 실내온도의 변동 폭을 줄이고, 여름철 더운 외부 기온을 차단할 수 있어 취약성을 저감시킬 수 있다(엄정희, 2016). 지역, 연령, 경제소득, 학력, 병력 등 인구·사회적 요인과 주택유형, 토지이용 등 주거공간의 구성요인에 따라 고온 취약성이 다르게 나타날 수 있다(신광문과 이재수, 2018). 고온에 의한 주거공간의 취약성을 평가하기 위해서 신광문과 이재수(2018)는 표 9.12와 같은 지표를 이용하였다. 열지수는 지역의 연평균 고온상태를 반영하며, 폭염일수는 지역의 고온 극한값을 반영할 수 있다. 고온에 취약한 주택 환경은 단열 상태로 구분할 수 있다(신광문과 이재수, 2018).

9.4.1.2 농촌

「한국 기후변화 평가보고서 2014」에서는, 농업 부문과 에너지의 관계 및 영향, 취약성에 대한 연구가 진행되고 있으며, 농촌에서의 이산화탄소 배출은 경유 소비가 크고, 이외의 작물에 의한 배출량 등에 대한 연구가 진행되었다.

사람의 접근성이 낮은 낙후된 농촌 지역은 쇠퇴하여 버려지거나 관리되지 않는 토지들이 다수 존재하며, 이는 기후변화에 매우 취약한 요인이 된다(심재헌 등, 2017). 낮은 지가와 기반시설 부족의 문제로 수요가 없어서 방치되는 주거 및 시설 들이 크게 증가하고 있다. 특히 주택 노후정도는 면 지역, 농가, 60대 이상 연령층의 주택 노후도가 심했으며, 70대 이상 연령층의 주택은 30년 이상의 주택에서 거주도가 높았다(황정임과 신동호, 2014).

농촌진흥청에서는 농촌의 생활실태 파악 및 시계열적인 변화 추이 분석을 위해 농촌생활지표조사를 2000년부터 실시하고 있으며, 전국 114개 시군 2000 가구를 대상으로 인구 및 사회, 여가생활 등 5개 부문 76개 항목에 대해 조사를

표 9.12 전국 및 강원도 시·군·구의 고온 취약성 분석 지표(신광문과 이재수, 2018).

구분	선행연구 지표		단위	산출방법	출처	비고
기후 환경	열지수		지수	지역의 연 평균 열지수	기상청	2001~2010(현재) 2021~2030년(미래)
	폭염일수		일	지역의 일 최고기온이 33도 이상인 날의 연중 횟수	기상청	2001~2010(현재) 2021~2030년(미래)
인구·사회적 환경	수치	65세 이상 인구 수	명	지역의 65세 이상 인구 수	통계청	2016년 자료
		기초생활수급자 수	명	지역의 기초생활수급자 수	통계청	2016년 자료
	비율	65세 이상 인구 비율	%	지역의 총인구 대비 65세 이상 인구 비율	통계청	2016년 자료
		기초생활수급자 비율	%	지역의 총인구 대비 기초생활수급자 비율	통계청	2016년 자료
주택 환경	수치	단독주택 및 비거주용 건물 수	개수	지역의 단독주택 및 비거주용 건물 수	통계청	2016년 자료
		40년 이상 노후주택 수	개수	지역의 40년 이상 노후주택 수	통계청	2016년 자료
	비율	단독주택 및 비거주용 건물 비율	%	지역의 총주택 대비 단독주택 및 비거주용 건물 비율	통계청	2016년 자료
		40년 이상 노후주택 비율	%	지역의 총주택 대비 40년 이상 노후주택 비율	통계청	2016년 자료

표 9.13 국토교통부의 주거실태조사 항목(성주인 등, 2014에서 재인용).

대분류	중분류	조사항목
기본조사	기본현황	주택 유형, 규모, 점유 형태, 건축연도
주택상태	주택상태	방 개수, 거주 층, 내부시설 및 사용, 주택 상태
	주택 개보수경험 (최근2년)	개보수 유무, 개보수 위치(목적), 개보수 비용, 개보수 여건
주거상태	주거환경	통근 환경, 생활환경, 교통약자 환경, 범죄예방 환경
	주거만족도	주택환경 만족도 및 중요도, 주변 환경 만족도 및 중요도, 전체 만족도
	주택비용	주택가격, 주택비용 마련 방법, 주택가격 부담 수준, 적정 주택가격
주거이동	주거이동경험 (최근2년)	이사 유무, 이사 이유, 주택유형, 주택 규모, 주택 위치, 주택 입지, 주택 점유형태, 주택 가격, 주거이동만족도, 이전 주택처분방법
	주거이동계획 (향후2년 내)	이사계획 유무, 이사계획 이유, 주택 유형, 주택 규모, 주택 위치, 주택 입지, 주택 점유형태, 주택 가격, 주택 상태, 현 주택처분 방법
주택관리	주택 개보수 계획 (향후 2년)	개보수 유무, 개보수 위치(목적), 개보수 비용, 개보수 여건
	소유주택 처분계획	현 거주 외 주택 소유 여부, 현 거주 외 주택 소유 목적 및 이용 상태, 주택처분계획(향후 2년 이내)
주택 및 주거 선호도	주택 선호도	주택 유형, 주택 위치, 주택 입지, 현 가구 구성원의 적정 주택 규모
	주거 선호도	내집 마련 필요성, 내집 마련 실현예상 시기, 한계수용 주택노후도
가구 특성	가구·세대	가구원 수, 가구 구성, 세대 변화, 가구원 특징
	소득	연소득
	주거비	주거생활비, 적정주거비

실시하고 있다. 농촌 주거환경과 관련해서는 주택노후 정도, 주택 시설 실태 및 변화(난방시설 종류, 부엌/화장실/목욕시설의 유형), 가장 불편한 주거시설, 주택 수리 실태, 주택 정책 요구와 이상의 5개 항목에 대한 조사를 수행하고 있다.

이외에도 주거기본법 및 주거기본법 시행령에 근거하여 주거실태조사를 수행하고 있으며, 이러한 조사 결과를 기반으로 주거면적, 방 개수, 설비기준 등과 더불어 주택 구조, 성능, 환경기준 등을 고려해 최저주거기준을 설정하고 있다(표 9.13). 이러한 방법은 실제적으로 농촌 주거의 기후변화 및 자연재해 등에 취약한 정도를 반영하지 못하고 있다. 최저주거기준 미달 가구를 도·농간 비교하였을 때에, 도시는 약 9.7%, 농촌은 약 14.5%로 나타났으며, 이는 면적 기준 미달이 도시지역에서 매우 높았기 때문에 나타난 결과이며, 최저주거기준은 농어촌서비스기준으로는 미흡하여 추가적인 지표 개선이 필요하다.

성주인 등(2014)의 연구에서 완주지역을 대상으로 노후도를 조사한 결과, 법적 단열 기준이 적용되지 않은 1980년대 이전에 지어진 건물들이 대부분이었으며, 한식목조, 시멘트 블록, RC조가 혼재되어 있었으며, 개량 시에도 구조인 한식목조는 유지하고 외부만을 개량하여 사용하는 경우가 많아, 구조체에 대한 점검이 필요했다. 이러한 집의 경우, 단열이 취약하여 겨울철 난방비에 대한 부담이 높았다. 주택 성능에 있어 단열과 창호, 출입문 기밀성 등의 문제가 대부분 존재했으며, 지붕 구조체의 접합부, 벽체의 균열, 창문과 벽의 접합부 등에서 침기가 발생하여 에너지 손실이 많았다. 툇마루와 같은 반외부공간은 겨울철을 대비해 비닐이나 PVC 패널로 중간벽을 설치하는 경우도 종종 존재한다. 정부가 농촌 지역 주택을 대상으로 지붕개량사업, 부엌 현대화, 화장실 개선사업 등으로 인하여 오래된 구옥의 경우에도 대부분 부엌, 화장실, 난방 등은 개선이 다수 진행되어 있다.

9.4.2 복지

「한국 기후변화 평가보고서 2014」에서는, 기후변화가 인간 복지 측면에서 미칠 수 있는 영향은 직접적인 영향보다는 지구의 물리적 시스템과 생물시스템의 변화가 다시 자연생태계 및 인간 사회에 영향을 미치는 2차적, 그리고 기후변화 완화 및 적응을 위한 인간의 활동에의해 나타나는 3차적 영향으로 구성할 수 있다. 정책은 특히 저소득층 등 취약계층의 기후변화 취약 정도에 큰 영향을 미친다.

기후변화 취약계층은 생물학적·사회경제적 취약계층,

표 9.14 관련 법률에서 제시된 기후변화 취약지역 현황 (신지영 등, 2013).

구분	정의	관련 기후 현상	소관부처
자연재해위험개선지구	상습침수지역, 산사태위험지역 등 지형적인 여건 등으로 인하여 재해가 발생할 우려가 있는 지역	풍수해	소방방재청
해일위험지구	해일로 인하여 침수 등 피해가 예상되는 지역	해일	
상습설해지역	대설로 인하여 고립, 눈사태, 교통두절 및 농수산 시설물 피해 등의 설해가 상습적으로 발생 또는 발생할 우려가 있는 지역	폭설	
상습가뭄재해지역	가뭄 재해가 상습적으로 발생하였거나 발생할 우려가 있는 지구	가뭄	
재해위험개선사업지구	「자연재해대책법」에 따라 자연재해위험개선지구로 지정·고시된 지역 태풍, 홍수, 호우, 해일 등 자연현상으로 인한 상습 풍수해 등의 피해가 빈발하는 지역 상습피해로 인해 집단이주단지 조성이 필요한 수해복구 지역	풍수해	
급경사지	택지·도로·철도 및 공원시설 등에 부속된 자연 비탈면 인공비탈면(옹벽 및 축대 등) 비탈면과 접한 산지	풍수해	
붕괴위험지역	붕괴·낙석 등으로 국민의 생명과 재산의 피해가 우려되는 급경사지와 그 주변 토지	풍수해	소방방재청
재해위험 저수지·댐 정비지구	안전점검 실시 결과 재해위험성이 높다고 판단되는 저수지·댐의 인근지역	풍수해	소방방재청
홍수관리구역	하천 보전 및 홍수로 인한 피해 예방을 위해 필요하다고 인정되는 지역	홍수	하천관리청
하수도정비 중점관리지역	하수범람으로 인하여 침수 피해가 발생하거나 발생 우려가 있는 지역 공공수역의 수질을 악화시킬 우려가 있는 지역	풍수해	환경부
방재지구	풍수해, 산사태, 지반의 붕괴, 그 밖의 재해를 예방하기 위하여 필요한 지구	풍수해 등	국토교통부
연안침식관리구역	연안침식으로 인하여 심각한 피해가 발생 또는 발생할 우려가 있어 특별히 관리할 필요가 있는 지역 핵심관리구역, 완충관리구역으로 구분하여 관리	연안재해	해양수산부
연안해역기능구	해일, 파랑, 지반의 침식 또는 적조 등 연안재해가 자주 발생하여 관리가 필요한 구역	연안재해	해양수산부
산림보호구역	토사유출 및 낙석의 방지와 해풍·해일·모래 등으로 인한 피해 방지를 위하여 필요하다고 인정되는 구역	풍수해	산림청
산사태취약지역	산사태로 인하여 인명 및 재산 피해가 우려되는 지역	풍수해	산림청

취약지역 거주자, 취약시설 인근에 거주하는 사람으로 구분할 수 있으므로(신지영 등, 2013), 이러한 구분 기준에 따라 기후변화 취약성의 원인은 다양하다. 관련 법률에서 제시된 기후변화 취약지역은 다음의 (표 9.14)와 같이 15개로 구분할 수 있다.

기후변화로 인하여 폭염, 풍수해, 가뭄, 한파, 대기오염 및 해수면 상승이 발생한다면, 취약계층의 주거환경 및 건강에 직접적으로 영향을 미칠 수 있으며, 취약지역에 거주하는 생물학적·사회경제적 취약계층은 일반 사람과 비교하여 기후변화에 상대적으로 크게 기후변화 취약성이 증가할 수 있다. 이는, 취약공간에 기후변화의 영향이 보다 크게 나타나기 때문이며, 노후화된 주거시설 및 낮은 에너지 효율로 인하여 수리비용의 증가와 건강 문제 발생 가능성이 높다.

주거 부분에서는 주택 개보수에 대한 관리, 기후변화 취약계층 가구 실내 환경 진단 및 개선의 노력으로 생활환경 유해 인자 진단 및 컨설팅, 지역적 취약계층이 될 수 있는 침수가구에 대한 기후변화 영향관련 병원성 미생물 진단 지원 및 연령적 취약계층 아동은 아토피, 천식, 알레르기성 비염 등 환경성 질환 체크를 통해 취약성의 원인을 파악하고 (최경호, 2016), 이에 대한 적응대책을 수립할 수 있다.

9.5 적응 옵션

9.5.1 정주공간

9.5.1.1 도시

「한국 기후변화 평가보고서 2014」에서는, 도시 부분에 있어서 다양한 적응 옵션에 대해 연구를 수행하고 있으며, 주로 기후변화로 인하여 피해가 증가할 수 있는 재해에 연구가

집중되어 있었다. 물부족, 침수피해와 관련된 연구가 우세하지만, 탄소중립도시 등을 제시하고 있으며, 이외에도 기후변화 적응을 위한 도시계획요소를 도출하는 연구들도 다수 수행되었다. 이를 직접적으로 사업으로 추진한 경우도 있었으며, 국토해양부에서는 저탄소 녹색시범마을을 추진하였고, 국토교통부는 광역도시계획수립, 도시기본계획 수립, 도시관리계획수립 등에 기후변화 취약성을 고려하도록 하였다.

기후변화 적응 도시는 외부의 충격을 빠르게 흡수하여 원상태로 재건할 수 있는 시스템을 갖춘 회복탄력성을 지닌 도시 즉 기후변화로 인한 위험요소에 유연하게 대응하여 기후변화의 영향에서 오는 피할 수 없는 부정적인 측면을 최소화 하는 도시로, 계획하기 위해서는 주요 기상재해의 특성 및 잠재적 영향을 분석하고 계획 및 설계하는 것이 필요하다(김정곤 등, 2014). 회복력은 단순히 충격(재해)을 예방하거나 손실 최소화에 집중하기보다 복잡한 도시의 시스템이 충격(재해)를 흡수하고 안정적으로 적응할 수 있는 능력을 의미한다(김은영 등, 2018). 기후변화 심화로 인한 도시의 복원력(Resilience)강화의 필요성이 강조되고 있으며, 이를 위하여 기상재해의 범위를 구분하고, 이들의 특징을 명확히 파악하여 이에 적응할 수 있는 도시를 만드는 것이 필요하다. 이를 위하여 위험노출의 완화, 취약성 개선, 위기나 충격이후 적응성 등을 고려한 도시계획 차원의 종합적인 회복전략이 필요하다(전유미와 이제선, 2018).

도시를 지능화하여 효율적으로 만든다는 '스마트도시'와 환경친화적이고 지속가능하게 만들겠다는 '녹색도시'라는 개념을 융합한 '스마트녹색도시'는 기후변화 대응과 경제성장을 위한 새로운 성장 동력의 확보 및 우리사회의 지속가능한 발전으로 부각되고 있다(오인환, 2016). 스마트 녹색도시는 도시구조 자체를 혁신해서 계획단계부터 바람직한 도시 운영이 가능하도록 하는 것으로, 지능 중심의 ICT가 스마트 녹색도시의 본질로 많이 거론된다(황종성, 2016; 이서정 등, 2016; 김기호 등, 2017). 스마트 그린시티의 온실가스 에너지 저감 목표는 3단계로 나누어 볼 수 있으며(김기호 등, 2017), 1단계는 건물 차원으로 현재 기술을 활용해서 건물의 에너지 소비 효율화를 통해 에너지 소비를 30% 감축시키는 것이다. 2단계는 커뮤니티 차원으로서, 자연채광을 고려한 건물 클러스터링, 보행 대중교통 중심 디자인 등 도시디자인을 통해 에너지 소비를 20% 감축하는 것이다. 3단계는 사람 중심 도시디자인, 에너지, 스마트 그리드의 요소를 도시 차원에서 통합적으로 디자인함으로써 에너지 소비를 28% 감축시키는 것이다. 이러한 종합적인 기후변화 적응 및 도시문제 해결을 할 수 있는 스마트녹색도시의 개념 및 주요 분야는 (그림 9.14)와 같이 정리할 수 있다.

스마트녹색도시 개념을 적용하기 위하여 이서정 등(2016)은 고층 주거단지에 적용 가능한 스마트 그린시티 계획기법을 도출하였다. 오덕성 등(2015)은 에너지 측면에서 스마트

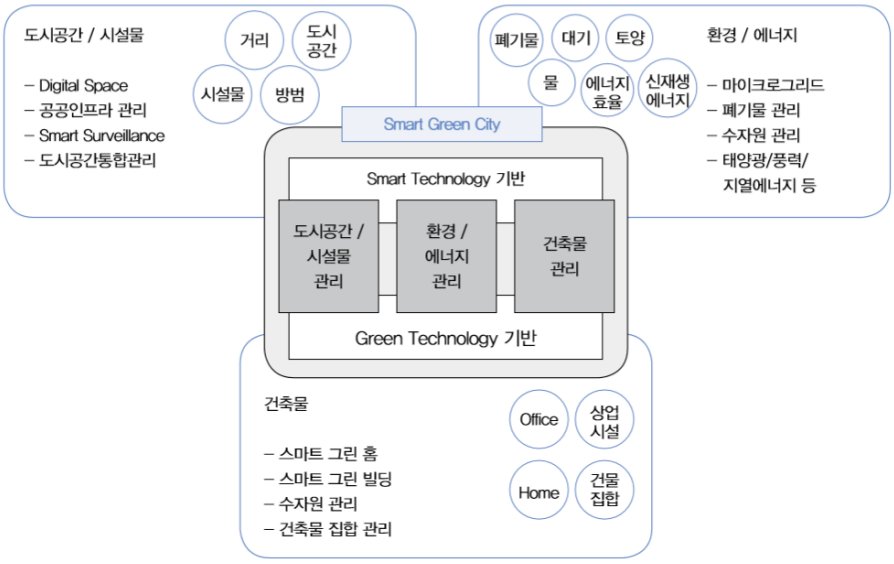


그림 9.14 스마트녹색도시 개념 및 주요 분야(왕광익과 노경식, 2016).

그린시티 계획기법을 제시하였으며, 스마트 그린시티 조성을 위한 주요 계획 기법은 '도시 에너지 통합관리 센터 구축', '건축물 에너지 관리 시스템', '빌딩 자동화 시스템', '녹색교통 체계 구축', '지능형 교통 시스템', '친환경 교통수단 보급' 등 건축물 에너지 소비 절감과 지능형 녹색교통 시스템 구축과 관련된 계획기법들을 도출하였다.

도시재생은 도시공간에 있어서 본질적으로 쇠퇴한 도심재개발에서 산업의 변화에 따른 도시기능의 복구에 이르기까지 기후변화의 완화 또는 기후변화 적응에 관한 다양한 대응 방안을 요구하고 있으며(이정동, 2019), 도시재생 과정을 통해 다양한 공간 변화가 수반되며, 이러한 공간 변화에서 기후변화에 대응하는 도시계획을 수립하는 방향으로 도시계획의 형태와 토지공간구조를 변화시킬 수 있다(유선철과 여관현, 2015). 서울시에서는 지역 불균형 완화 및 기후변화에 대비한 친환경 도시 구현을 위하여 서울형 도시재생을 추진하고 있으며(서울특별시, 2015),

표 9.15 지표 선정기준 검토 및 핵심지표(유선철과 여관현, 2015).

부문		기후변화 대응 도시재생 진단지표		핵심지표 선정기준 및 선정결과					
				대표성	방향성	단순성	이론적 근거	자료취득 가능성	선정결과
도시 재생	인구사회	인구증감	지난 30년간 최대치 대비 20% 감소	○	△	○	○	○	●
			지난 5년간 3년 연속 감소						
		순이동률		○	△	○	△	X	-
		노령화지수		○	△	△	○	○	-
		평균교육년수		X	△	○	△	○	-
		독거 노인 가구 비율		△	△	○	○	△	-
		인구 천명당 기초생활보장 수급자수		△	△	△	○	△	-
		인구 천명당 소년소녀가장 가구원수		△	△	△	△	△	-
	산업경제	인구 천명당 종사자수		○	○	○	○	○	-
		사업체수 증감	지난10년간 최대치 대비 5% 감소	○	△	○	○	○	●
			지난 5년간 3년 연속 감소						
		제조업 종사자 비율		△	△	○	△	○	-
		고차서비스 종사자 비율		○	△	X	△	△	-
		인구 천명당 도소매 종사자수		○	△	○	△	○	-
		재정자립도		△	△	○	△	△	-
		1인당 지방세액		△	△	○	△	△	-
		지가변동률		△	○	○	△	X	-
		1인당 보험료		△	△	△	△	△	-
	물리환경	노후주택비율		○	△	△	○	○	●
		신규주택비율		X	△	△	△	△	-
		공가율		△	△	△	△	X	-
기후 변화	기후	온도		○	○	○	○	○	●
		습도		△	△	△	△	△	-
		강수량		X	△	△	△	○	-
		풍속 및 풍향		X	△	△	△	○	-
		열대야 일수		○	△	△	○	△	-
		대기오염도		X	△	X	△	△	-
	에너지	전력 사용량		○	○	○	○	○	●
		도시가스 사용량		○	△	△	△	△	-
		지역난방 사용량		△	△	△	△	△	-
		상수도 사용량		△	△	△	△	△	-
		석유 사용량		△	X	X	△	X	-

도시재생의 방향을 ① 지역 특성 활용 맞춤형 주거환경 개선, ② 커뮤니티에 기반 한 소단위 점진적 정비 ③ 사회취약계층을 위한 생활 기반시설 확충으로 설정하였으며, 사회취약계층을 위하여 노후주택의 에너지효율 제고를 통한 친환경 주거지 재생, 노인 및 장애인 등 보행약자를 배려한 생활 기반시설 확충을 목표로 하고 있다. 유선철과 여관현(2015)은 기후변화에 대응한 도시재생 계획 수립을 평가할 수 있는 평가 지표를 제시하였다(표 9.15). 이 평가 지표는 폭염·한파 등이 발생하였으나 냉·난방 등의 대응여건이 취약한 지역을 선정하는 것을 목표로 한다. 이정동(2019)은 기후변화 대응 계획요소 별 사업유형화를 하였으며, 기후변화 대응을 위해서 완화 측면과 폭염, 폭우, 가뭄 등의 피해에 대응하는 방안인 적응 측면까지 고려하는 포괄적인 접근 방식일 필요하다고 하였으며, 도시공간에서 적응 계획은 향상된 주거환경 개선과 기반시설, 서비스 구축에 있다고 하였다(표 9.16). 따라서 도시의 토지이용, 교통, 에너지, 녹지 등 물리적인 측면과 생활패턴의 변화와 노력, 취약계층 관리 등 비물리적인 측면에 대한 방안도 함께 모색해 기상재해에 대한 영향을 최소화해야 한다.

그린인프라는 자연생태 가치와 인간에게 다양한 혜택을 주는 녹지공간의 연결된 네트워크로(강정은 등, 2014)(그림 9.15), 자연·생태적 요소의 구조 및 기능을 활용하여 인간 삶 영위 및 질적 향상을 도모할 수 있는 도시공간 요소 및 시스템으로(강정은 등, 2014), 그린인프라의 다기능성은 기후변화

표 9.16 기후변화 대응 계획요소별 사업 유형화(이정동 등, 2019).

국가별			학자별				요소 선정	비고
영국	일본	국토부 ('09)	Lammia and alexis	김정곤 등 (2014)	왕광익 (2014)	최정은 (2015)		
온실가스 감축	집약형 도시구조	도시계획 요소 (교통, 건물, 녹지)	이동거리의 감소	적응	교통	교통 분야	녹색 교통	유형 I
			대중교통 이용의 증대					
			자동차 이용의 억제					
			무동력 이동수단(걷기, 자전거)의 지원					
			자동차 효율/대체연료 확대					
효율적 건물계획	도시 녹화		건물의 에너지 효율성 증대		도시 구조	토지 이용	물리적 시설	유형 II
			도시열섬현상 영향 이상고온 취약성 감소		건축			
			도시관리 및 토지이용		기반 시설	녹지 자원		
재생에너지 생산제도	하수도자원 에너지이용	신재생 에너지	재생 가능한 에너지의 지역생산 비율 확대	완화	에너지	에너지 자원	대체 에너지	유형 IV
지속	-	민간협업	-		생활	정책 제도	거버 넌스	유형 III

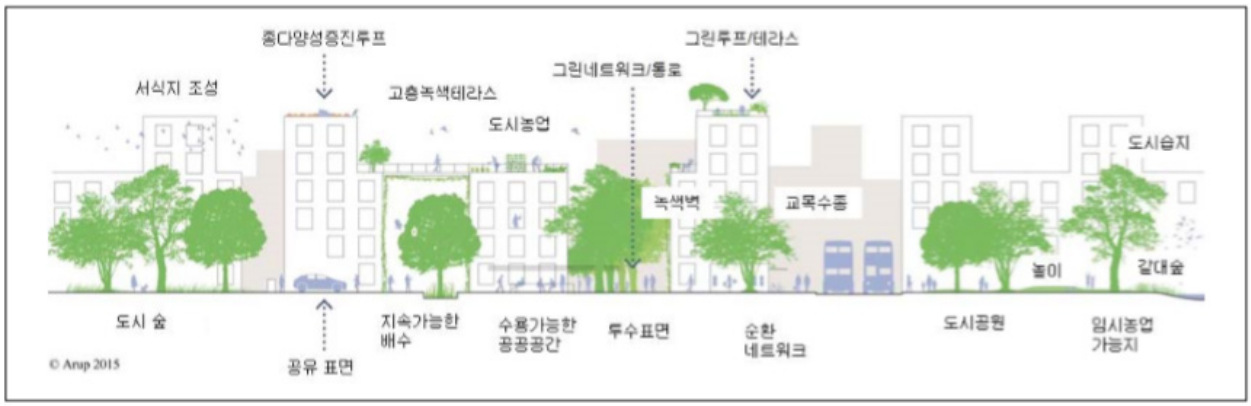


그림 9.15 다기능성을 지닌 도시의 그린인프라 요소(안승만 등, 2016b).

표 9.17 기후변화 영향에 적응하고 에너지 문제를 해결하기 위한 기법 및 기술(김정곤 등, 2014).

계획기법 및 기술	유럽				미국			
	K	R	E	J	H	S	C	P
• 토양개선						●		
• 도시 숲 관리 및 복원						●	●	
• 기존지형 보존 최대화	●	●	●					
• 바람통로를 고려한 도시 구조 구축	●	●						
• 태양 고도를 고려한 건물 배치	●	●						
• 폭우 및 강풍을 고려한 건물 배치	●	●						
• 복합적인 기능 배치				●	●			
• 도시농장 조성 및 운영			●		●			
• 공원·녹지 내 수목 식재	●	●		●		●	●	●
• 정원 및 소규모 녹지공간 조성	●	●	●	●			●	
• 자연에 근접한 조경, 녹지 조성·보존			●				●	
• 생태 습지 조성			●		●		●	●
• 분수, 호수 등 수변공간 창출 및 유지	●	●	●	●				
• 강과 하천 보전 및 복구			●					
• 자연적인 저류가 가능한 수공간 조성						●	●	●
• 우수 및 중수의 재이용			●	●	●			
• 생태적인 우수·하수처리 및 배수관련시설 구축			●	●	●	●	●	
• 빗물관리 시스템	●	●	●	●	●	●	●	●
• 도로와 수순환의 통합설계	●	●		●		●		●
• 도로 및 주차장의 투수성 포장재 사용	●	●	●			●	●	●
• 철로와 보도의 쿨링 식재	●	●		●		●	●	●
• 도시 내 빗물침투를 위한 나무여과박스 설치	●	●		●		●	●	●
• 도로 및 지붕의 태양반사율이 높은 재료 활용							●	●
• 잔디 및 수목 식재를 통한 족색 주차장 조성	●	●	●					●
• 건물의 냉각·보온을 위한 지붕·옥상·발코니 녹화								●
• 혹한, 혹서에 보조적 대응을 위한 패시브 건축기법			●		●	●	●	
• 혹한, 혹서에 보조적 대응을 위한 태양열 활용	●	●	●	●	●	●	●	
• 바람통로 인접 건물에 생태건축기법 도입		●						
• 재생가능 에너지원 활용			●	●	●			

K: Kronsberg, R: Riem, E; EVA-Lanxmeer, J: Jenfelder Au, H: Haulander Weg, S: Seattle, C: Chicago, P: Philadelphia

적응형 도시를 위한 중요한 전략적 수단으로서 다양한 요소와 기능이 공간 전략을 통해 통합해야 한다(안승만 등, 2016b). 서울시에서는 옥상녹화·텃밭 조성 지원사업 등 산림청에서 추진하는 '도시 숲 조성 사업'등 과 같은 자연피복 확충사업을 시행하고 있다.

김정곤 등(2014)은 미국과 유럽의 사례에서 계획되거나 적용된 도시의 기후변화 적응 관련 세부계획 및 기법·기술을 분석하였으며, 공원·녹지 측면과 수자원 순환 및 활용 측면이 두드러지게 그린인프라는 자연·생태적 요소의 구조 및 기능을 활용 측면이 부각되어 있는 것을 확인하였다. 특히,

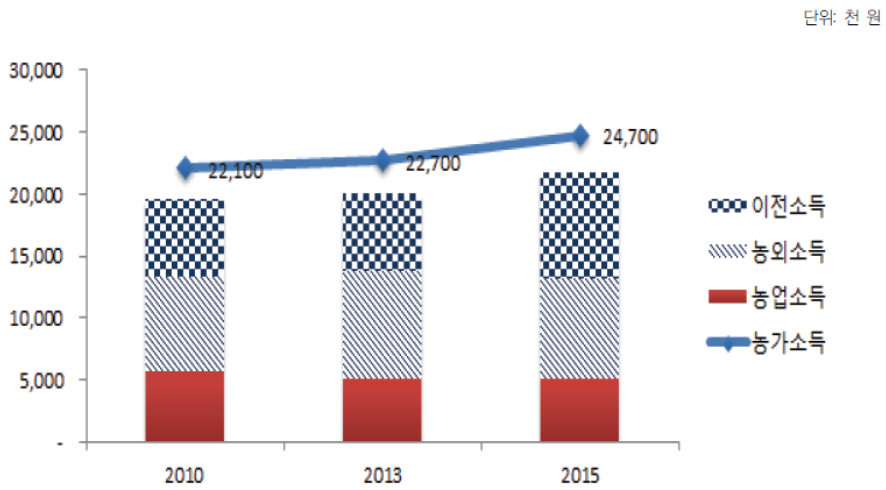


그림 9.16 고령 소농의 소득 구성(김기복 등, 2016).

공원과 녹지 내 수목의 식재, 소규모 녹지 공간 조성, 수변 공간 창출 및 유지, 자연생태적인 하수 처리 및 빗물관리시스템, 도로와 수순환의 통합적 설계, 투수성과 반사율이 우수한 포장재 사용, 패시브 기법 활용 등이 주로 언급되고 있었다 (표 9.17). 김민영과 문은설(2016)은 가로 블럭 내 다가구 주택들의 담장과 가로 개선 및 옥상녹화를 적용하여 ENVI-met 모델을 이용해 시뮬레이션을 수행 한 결과, 담과 협소한 공간 장애물들이 없고 식재를 증가시킨 경우, 약 1℃의 차이가 있었다. 김동준 등(2018)은 ENVI-met을 이용하여 도시 노후 아파트의 리모델링 전·후 미기후 환경을 분석하고, 예상 온열감을 이용하여 온열 쾌적성을 평가한 결과 지상부 녹화, 휴식공간, 필로티 구성으로 온도가 약 1℃ 저감 효과가 있었으며, 풍속은 외부공간의 녹지화로 약 0.8~1.0 m/s 감소하는 것으로 나타났다. 기존 공동주택은 꽉찬 매스형태였으며 아스팔트였지만, 리모델링하면서 필로티 공간 및 수공간 녹지공간을 조성하고, 주 포장재질을 보도블록과 녹지화 된 토양으로 변경하였기 때문이다.

9.5.1.2 농촌

「한국 기후변화 평가보고서 2014」에서는, 농촌과 관련하여 녹색성장위원회에서 농업부문의 녹색성장을 추진하고 였다. 녹색성장은 친환경농업과 저탄소농업확대 등 지속가능한 농업체계로의 전환을 목표로 하고 있으며, 향후 농업 및 농촌의 저탄소사회화를 촉진할 수 있는 효율적 연료사용 및 기술개발을 통한 저탄소 농업, 청정바이오, 국가식량안보를 주요 내용으로 정책을 추진한다.

농가의 고령화에 따른 소득 불평등도를 개선하기 위해서는 고령농가 증가는 어쩔 수 없는 부분이지만, 상대적 소득격차 축소를 위해 우선 영세 고령농가에 한해 각종 세금부담을 경감시키고, 기초노령연금, 노인장기요양 보험제도, 국민연금 등 기존 복지제도를 적극 활용하여 실질적 가처분 소득을 증대시키는 것이 필요하며, 영농 능력이 없거나 농한기에 마땅한 농외 소득원이 없는 영세 고령농업인에 대해서는 농촌마을 가꾸기 사업 등 농촌지역 공공근로사업에 참여를 유도하여 임금소득을 올리도록 돕는 방안 등이 필요하다. 영농 능력이 있는 고령농가의 경우, 실질적 소득증대를 위해 고령농가를 대상으로 수확 및 판매를 지원, 영농자재 지원, 고령친화농업 육성 등 다양한 정책 제도의 개발이 필요하다(윤영석 등, 2013).

고령 소농의 농가소득 중 농업외보조금 규모 증가 및 비중이 늘고 있다. 이는 연금, 실업수당, 기초노령연금, 영세민생활보조금, 장애인보조금, 산업재해보험급여 등 농업 외 보조금의 비중이 '10년 15.7%에서 '13년 21.0%, '15년에 27.9%로 증가 했기 때문이다. '15년 전체 농가의 농업외보조금은 556만원 으로, 농가 소득의 15%였지만, 고령 소농의 농업외 보조금은 690만원으로 농가소득의 27.9%를 차지했다(그림 9.16).

9.5.2 복지

「한국 기후변화 평가보고서 2014」에서는, 사회 취약계층을 위한 기후변화적응전략은 사회적, 공간적 환경에 따라 다른 전략을 수립해야 하며, 기후변화 및 녹색성장과 관련된 법규에 기반한 제도화, 종합적책으로서의 기후복지제도 도입, 홍수와 가뭄 등 극한 기후 현상별로 고위험인구에 대한 응급구조체계 구축 및 집중관리, 시민들의 자발적 참여에 의한 사회적 안전망 구축, 저소득층 기후변화 적응능력 실태조사 등의 정책도입 및 연구 진행이 필요하다.

기후변화 취약계층관련 국가기후변화2차 적응대책에서는 기후변화 취약계층 보호를 위하여 국가에서 다음 <표 9.18>과 같이 기후변화 취약계층을 위한 사업을 개발하는 실무자를 대상으로 다음과 같은 사업을 제안하였다(하종식 등, 2015). 중앙부처의 취약계층 지원 사업 중 기후변화 영향 요인 및 대응과 관련한 정책은 <표 9.18>과 같이 주거환경 개선, 동절기 제설작업, 취약지역 개조사업, 위험지역 정비 사업이 기후변화 취약계층을 위한 사업으로 볼 수 있다.

취약계층 건강 보호를 위해 기존 주택 개보수 관련 사업의 에너지 효율개선, 주거환경 개선 등을 통합관리 및 그린리모델링 가이드라인 수립이 필요하며, 그린리모델링이란 환경 친화적 건축물을 만들기 위해 에너지 성능 향상 및 효율 개선이 필요한 기존 건축물의 성능을 개선하는 것을 의미한다(녹색건축물 조성지원법). 이러한 정책사업은 쾌적하고 건강한 거주환경을 제공하기 위하여 에너지 효율을 높이며, 온실가스 배출을 낮추어 기존 노후 건축물의 가치를 향상 시키기 위하여 국토교통부와 LH 한국토지주택공사에서 추진하는 것으로, 공공건축물 지원사업과 민간건축물 지원사업으로 구분하며, 민간건축물 지원 사업 시 사업비를 대출받을 경우 이자를 지원해 주는 '그린리모델링 이자지원 사업'이 있다(김성민, 2017). 그린리모델링은 창호 또는 단열 공사를 통해 건축의 열손실을 최소화 하고, 장비에 대한 효율성 향상을 목적으로 하고 있기 때문에(손원득과 송영학, 2016), 적용 요소기술은 대표적으로 고성능 창호 교체가 약 38%, 단열강화공사가 26%로 나타났다. 일반적인 주거 건축물의 경우 적용 가능한 요소가 창호, 단열, LED 조명 교체가 일반적이다.

충청북도에서는 취약계층 폭염대책 추진을 위해 재해구호기금을 시·군에 교부하여 건강·생활환경이 취약한 독거노인을 위한 쿨스카프 구입, 무더위 쉼터, 냉방비, 냉방기기 수리비 등으로 활용하도록 하고 있다. 노인돌봄 기본서비스 및 9988 행복 지키미 사업을 통해 생활관리사(450명), 행복 지키미(5,110명), 어르신들(독거노인, 치매노인) 가정을 매일 전화 또는 방문하여 수시로 안전을 확인하고 있다. 또한, 노인일자리 사업 329개에 대해 휴식 시간제 운영, 야외활동이 많은 117개 사업에 대해서는 시간 단축(88개 사업), 일시중지(29개 사업)등에 참여하는 어르신을 보호하고 있으며, 도내 지역자활센터 31개 야외사업장에서는 폭염시간대 휴식 및 조기 출근을 시행하고 있다(표 9.19).

표 9.18 중앙부처 취약계층 지원사업 중 기후변화와 관련하여 고려 해볼만 한 사업 현황(하종식 등, 2015).

관련 사업	목적	취약지역 및 취약계층	담당부처
(농어촌) 주거환경개선	농촌지역의 주거문화 향상 및 주거 복지 실현, 농촌정주 의욕 고취 및 삶의 질 향상	농어촌 지역 불량주택 거주자, 기존 불량주택개량자, 무주택자, 귀농·귀촌자 등	농림축산식품부, 해양수산부
동절기 제설작업	겨울철 폭설과 결빙으로 인한 도로이용 불편 해소 등 설해 피해 최소화	해안가 위험지역 거주자, 어업종사자, 폭설 취약구간, 비닐하우스 종사자, 축산업종사자, 난방이 되지 않는 시설에 거주하는 노인 등	국민안전처
취약지역 개조사업	마을공동체 활성화를 지원하여 지속가능한 마을공동체 실현	주거환경이 열악하고 안전위생이 취약한 농어촌, 노후 슬레이트 주택 비율이 높은 지역, 침수, 산타애 위험이 높은 지역, 상하수도, 도로, 쓰레기 처리 등이 취약하여 생활이 불편한 지역 등	농림축산식품부, 해양수산부
위험지역 정비	침수, 붕괴 등의 위험을 해소하여 국민의 생명과 재산 보호	자연재해위험지구, 자연재해저감시설을 포함한 주변지역의 자연재해로부터 안전하지 못하여 국민의 생명과 재산에 피해를 줄 수 있는 지역	국민안전처

표 9.19 충북지역 취약계층 및 지역 중심, 온열질환자 저감 강화를 위한 폭염피해 저감 방안 제안(김보은 등, 2018).

적응정책 제안	세부 실행내용 제안
지자체별로 취약계층을 가능한 직접 찾아보는 등 실질적, 적극적 대처	- 전기요금 걱정으로 더위에 속수무책인 분들을 직접 방문해 건강상태를 확인하고, 폭염 대비 행동요령과 가까운 쉼터를 안내 - 생계 때문에 어쩔 수 없이 폭염 속에서 폐지를 모으거나, 노숙인, 한 낮에도 노동을 해야 하는 노인 분들에게 일정기간 휴식을 취하도록 하고 손실을 지자체에서 보전, 얼음조끼를 지급하고 근로자 보호 조치 이행 점검 - 도민이 원하는 위치에 그늘막을 설치하고, 폭염시 차량 내 영유아 방치사고를 막기 위해 통학차량에 '슬리핑 차일드 체크 시스템' 설치를 지원 - 대로변 물뿌리기를 이면도로와 골목길까지 확대 - 충북 각 시군별로 적합한 폭염 매뉴얼을 만들고, 필요한 예산이나 시설을 정비
충청북도 온열질환자 감시체계운영	- 폭염특보상황에 맞춰 탄력운영 하되, 일일보고 감시체계 운영 - 온열질환 발생 건 수(응급실 내원자 중 온열질환자(열사병, 열탈진 등)으로 진단 또는 의심되는 환자) 및 발생위치, 활동유형 등 공간 및 속성 정보화
충북에서 양산쓰기 운동 확산	- 온열질환 대책으로 '충북 양산쓰기 운동'확산. 이는 체감온도를 3-7℃저감 효과가 있음 - 목마르지 않아도 물 자주 마시고, 외출시 폭염패션 유도 등 생활밀착형 폭염 완화 행동요령 캠페인 실시로 도민들이 폭염에도 건강한 생활이 가능하도록 지원
충북 및 각 시군의 쿨링포그 시스템 운영	- 쿨 스팟(Cool-spot)선정 및 쿨링포그 시스템 가동: 지자체별로 주요 지점 선정 및 운영 방식 결정 - 충북에서 이동인구가 많은 보행로를 선정하여 폭염저감대책 추진 · 보행로 복사열 차단을 위해 물뿌리기 시행으로 온도 저감 · 보행로 야자매트를 설치하여 목사열을 차단, 물을 뿌려 콘크리트 보행로 복사열을 낮춤 - 노후 사회복지시설, 저층주택 밀집지역 쿨루프 설치 · 폭염에 열악한 지역아동센터 및 노인복지시설, 노후 저층 주택이 밀집한 지역을 대상으로 수요조사 및 현장실사를 통하여 사업대상지 선정
충북 폭염대응 종합계획 수립	- 충북 혹은 시군별로 폭염지도 작성하여 정확한 실태 파악 - 도시 폭염 저감을 위한 정책 효과 분석 시도

취약계층에 포함되는 노인은 일반인보다 기후변화에 더욱 민감하게 반응할 수 있으므로, 외부 공간 계획 시 기후에 대한 적절한 디자인 조치가 필수적이다. 실내와 외부가 만나는 곳에 전이 공간을 만들어 햇빛이나 비바람을 차단하는 것이 필요하고, 이동이 편리한 의자나 테이블을 제공해 휴식공간을 조성해야 한다. 인위적인 바람막이를 위해 나무나 관목 같은 조경요소를 도입하여 자연스러운 외부공간을 조성하는 것이 필요하다. 햇빛 반사가 가능한 포장 재료를 사용하고, 보도 중간에 쉴 수 있는 의자를 배치하며, 심리적 안정감을 제공하는 것이 필요하다(이관용, 2017).

9.6 결론

「한국 기후변화 평가보고서 2014」에서는, 도시나 농촌과 같은 인간 정주공간 및 복지 부분에 있어서 기후변화는 큰 영향을 미칠 것으로 예측되었다. 이러한 영향을 저감시키기 위하여 다양한 정책 및 연구가 진행되고 있으며, 특히 자연재해에 의한 취약성 분석, 다양한 기후변화 적응형 도시계획 기법 및 요소 도출, 농경지와 관련하여 기후변화로 인하여 영향을 받을 수 있는 농작물 예측 등과 같은 연구들이 다수 진행되어왔다. 이외에도 복지 측면에서는 취약계층에 대한 언급이 많았으며, 사회 취약계층은 기후변화로 인하여 더 큰 피해를 받을 수 있으므로, 이들에 대한 연구들이 지속적으로 필요하다. 다만, 전체적으로 인간 정주공간과 복지 부문은 도시 부분에 연구가 집중되는 경향이 많았다.

2020년 보고서 역시 기후변화는 도시와 농어촌지역 모두 취약한 지역과 취약계층에 더 큰 피해를 초래할 수 있는 것으로 예상하지만(견고한 동의) 2014년 평가보고서와 마찬가지로 도시에 대하여 집중적으로 연구가 진행된 경향이 나타났다. 다만, 취약계층이 더 큰 피해를 입을 수 있으므로, 제2차 국가 기후변화적응대책(관계부처합동, 2015)에서는 기후변화 취약계층에 대한 지원정책방안을 적극적으로 제시하고 있다.

도시는 주요 온실가스배출 공간으로 기후변화에 큰 기여를 하는 동시에 기후변화로 인한 피해를 크게 보는 공간이기도 하다(견고한 동의). 도시화율 증가, 인구성장률 둔화, 고령화율

가속화 등과 같은 도시문제는 여전히 심각한 상황이다. 농어촌 지역의 경우, 지역별로 크게 다른 양상이 나타나며, 공동화 현상으로 인하여 빈집, 폐교 등이 발생한다. 다만, 정부정책으로 인하여 공가는 감소하고 있다(중간적 동의). 노후 된 농촌지역의 주거환경을 개선하기 위하여 국가에서는 현황 파악 및 지원을 증가시키고 있는 추세이다.

기후변화 영향과 관련하여, 도시는 인구 밀집도가 증가하여 에너지 사용량이 증가하고 온실가스 배출량도 여전히 증가한다(견고한 동의). 이러한 문제를 해결하기 위하여 기후변화 대응이 가능한 도시재생사업, 스마트도시 등을 추진하고 있다. 농촌지역의 경우, 농업생산을 제외하면 에너지 이용 및 주거 부분에서 기후변화의 영향이 크게 나타나는데, 국가에서는 주거실태조사 등을 통하여 농촌 주거 현황을 파악하고 있다. 복지 측면에서는, 사회·경제적 취약계층, 공간취약계층에 대한 연구가 진행되고 있었다.

기후변화는 온도와 관련해서는 폭염과 한파, 강수와 관련해서는 홍수와 가뭄 등 자연재해의 피해를 가속화시키고, 도시 및 농촌지역도 이러한 기후변화로 인한 피해에 노출되어 있다(견고한 동의). 각 공간에 대하여 다양한 취약성평가 지표를 이용하여 취약 정도를 정량적으로 평가하는 연구들이 진행 중이였으며, 농촌지역의 경우 주거환경, 인문·사회적 환경, 물리적 환경 등을 평가 항목으로 포함하고 있다. 기후변화 취약계층을 진단하기 위해서는 건강을 지표로 반영하고 있었다(중간적 동의).

기후변화 적응을 위해서 도시에서는 스마트녹색도시, 기후변화 대응 도시재생, 그린인프라 도입 등에 대한 연구 및 정책이 도입되고 있었으며, 특히 최근 제4차 산업혁명으로 개발한 기술 및 인프라를 이용하여 스마트도시를 조성하고, 이를 통해 기후변화를 포함한 도시 문제를 해결하려는 연구들이 다수 진행되고 있는 추세이다(중간적 동의). 이와 관련하여 세부적인 기술요소 선정 등과 관련된 연구들도 있었다. 농촌지역의 경우, 소득불평등의 정도를 개선, 주거환경을 개선하기 위해 다양한 정책 제안을 하는 연구보고서 및 논문이 다수 있었다. 기후변화 취약계층과 관련해서는 국가차원에서의 다양한 정책·제도 개발을 위한 가이드라인을 제시하고 있었으며, 이와 관련하여 취약계층 건강보호를 위한 주택개보수 관련 사업, 에너지효율 개선, 주거환경 개선 등을 포함한 그린 리모델링을 추진하고 있었다. 이외에도 실질적으로 도입이 가능한 무더위 쉼터 조성, 노인 돌봄 서비스 등 다양한 정책을 제안하는 연구들이 다수 있었다.

인간정주공간 및 복지와 관련해서 대부분의 연구는 2014년 보고서와 유사하게, 도시 공간에 집중되어 있었다(중간적 동의). 농림지역의 경우 농업생산성 및 작물의 기후변화에 따른 영향 이외에는 주거공간의 에너지 효율에 집중되어 있었으며, 기후변화 시나리오를 이용하여 기후변화가 정주공간에 직접으로 어느 정도 영향을 미치는지 평가 및 분석하기 보다는 현황을 파악하고 이를 해결하기 위해 정부 지원을 제안하는 정책제안 연구보고서가 다수 존재했다(중간적 동의). 취약계층의 경우 연령별 소득 별, 지역별, 주거공간 별로 기후변화가 영향을 미치는 정도가 모두 다르기 때문에 정량적인 평가가 어렵기 때문으로 이와 관련된 연구가 적은 것으로 판단된다. 추후, 인간정주공간 및 복지 부분에서, 기후변화 시나리오를 이용하여 정량적이고 객관적인 영향평가 및 적응평가가 수행된다면 보다 효과 높은 적응대책을 수립하는 데 기여할 수 있을 것으로 기대한다.

9.7 참고문헌

강정은, 이명진, 구유성, 조연희, 2014: 도시물순환 개선을 위한 그린인프라 계획 프레임워크 개발 및 시범적용: 부산시 연제구 및 남구를 대상으로, *환경정책연구*, 13(3), 43-73.

경기개발연구원, 2013: 경기도 생활환경복지 지표개발 연구.

관계부처합동, 2015: 제2차 국가기후변화 적응대책 2016-2020.

관계부처합동, 2019: 제2차 기후변화대응 기본계획.

국가통계포털, 2020, www.kosis.kr, 국토교통부, LH, 「도시계획현황」.

국립환경과학원, 2018: 대기환경연보 2017

국토교통부, 2019.6, 제3차 스마트도시종합계획.

국토교통부·한국토지주택공사, 2019: 2018 도시계획현황.

국토연구원, 2010: 한국의 도시화 과정과 정부정책에 관한 연구.

국토연구원, 2011a: 도시정책 시나리오에 따른 토지이용변화 예측연구, 106.

국토연구원, 2011b: 사회·경제구조 전환기의 주택정책 패러다임 정립방안 연구, 224.

국토연구원, 2012: 인구저성장시대의 도·농 상생발전 전략 연구, 324.

국토연구원, 2013a: OECD URBAN POLICY REVIEW, 213.

국토연구원, 2013b: 도농교류시대의 농촌지역의 특성과 정책 방안, 324.

국토연구원, 2013c: 한국 컴팩시티 정책의 현황 및 과제 연구, 185.

권진석, 윤동현, 고준환, 2015: 집중호우에 따른 수해 발생 시 피난 속도를 고려한 대피소의 수용범위 분석, *Journal of the Korean Society of Hazard Mitigation*, 15(3), 115-123.

김기복, 오내원, 황의식, 2016: 농가유형별 소득구조 변화와 정책적 시사점, 한국농촌경제연구원, 제132호, 1-24.

김기호, 안건혁, 이재준, 2017: 스마트 그린시티 기후변화 시대의 Urban design, *환경논총*, 59, 51-57.

김동준, 김형규, 오세규, 강준모, 2018: 공동주택 리모델링의 저층부 미기후환경 및 온열 쾌적성 평가, *한국도시설계학회지 도시설계*, 19(3), 66-46.

김민영, 문은설, 2016: 폭염 및 도시열섬현상에 따른 노후 주거지의 적응 계획기법에 관한 연구: 광진구 군자동을 중심으로, *한국생태환경건축학회 논문집*, 16(4), 31-39.

김보은, 오후, 배민기, 2018: 2018년 폭염피해 양상에 따른 대응방안, *충북 FOCUS*, 155, 1-26.

김성민, 2017: 기존 건축물 그린리모델링 적용 요소기술 및 에너지절감효과 분석, *한국건축친환경설비학회논문집*, 11(3), 238-245.

김승종, 2018: 비도시지역의 토지이용 관리체계 재정립 방향, *국토정책*, 3, 1-8 page

김은영, 정경민, 송원경, 2018: 기후변화 대응을 위한 도시회복력 평가 및 증진방안: 수원시를 대상으로, *환경영향평가*, 27(4), 335-344.

김인현, 오규식, 정승현, 2011: 도시패턴과 탄소배출량의 관계 분석, *한국공간정보학회지*, 19(1), 61-72.

김정곤, 임주호, 이상준, 이영환, 권혁삼, 이성희, 2014: 기후변화 적응 도시모델 및 적용기법 개발, 토지주택연구원.

김현중, 여관현, 2019, 한국의 미래 인구분포 변화에 대한 예측 - 셀기반 로지스틱 회귀모형을 적용하여, *GRI 연구논총*, 21(1), 301-328.

김현중, 정일훈, 2017: 농촌 주거지 축소지역 예측: Dyna-CLUE 모형의 적용, *주거환경*, 15(2), 51-66.

류지은, 황진후, 이준희, 정혜인, 이경일, 최유영, 주용언, 성민준, 장래익, 성현찬, 전성우, 강진영, 2017: 도시의 공간확장 및 형태적 특징에 따른 산림녹지의 변화 분석, *대한원격탐사학회*, 33(5-3), 835-854.

민성희, 변필성, 김선희, 차은혜, 이철호, 안용진, 2016: 국토계획 수립자원을 위한 인구분석 방법 연구, 국토연구원.

박정아, 최병숙, 강인호, 2015: 농어촌 뉴타운조성사업을 토대로 본 농촌 활성화를 위한 주거환경 정책 방향, *Korean Journal of Human ecology*, 24(6), 887-901.

박혜경, 2018: 대기오염과 기후변화: 천식에 미치는 영향, *Allergy Asthma respir*, 6(2), 79-84.

박홍기, 김희식, 2019: 서울특별시 노후 건축물의 트래킹에 의한 전기 시설물의 전기화재 증가 추이 가능성 2020년 이후 예측분석, *Asia-pacific Journal of Multimedia Services Convergent with Art, Humanities, and Sociology*, 9(5), 717-726.

서울특별시, 2015: 2025 서울시 도시재생전략계획, 43.

성주인, 김영단, 2014: 정주 여건 변화에 대응한 농촌 주거정책 추진 방안, 한국농촌경제연구원.

손원득, 송영학, 2016: 그린리모델링의 에너지 절약기법 및 건축물 가치향상 평가에 관한 연구, *한국건축친환경설비학회 논문집*, 10(2), 152-158.

신광문, 2017: 강원도 고온 취약주거지의 열환경 개선 방안, 한국기후변화연구원, 2017-003 정책연구.

신광문, 이재수, 2018: 인구사회와 주택부문을 중심으로 한 강원도 주거공간의 고온 취약성과 에너지 복지제도 연구, *주택도시연구*, 8(3), 117-134.

신동희, 이나영, 조용성, 2015: 폭염 발생에 따른 취약계층의 사망률 변화와 사회적 비용 추정: 7대 광역시의 65세 이상 고령층을 중심으로, *환경정책연구*, 44(1), 3-32.

신지영, 임영신, 홍남희, 김나영, 배채영, 2013: 기후변화 적응관련 취약계층 지원대책 현황조사 및 분석연구, 한국환경정책평가연구원.

심재헌·송미령·손학기·서홍석·이정해·서형주. 2017: 미래

국토 전망과 농촌의 계획적 정비 방안 연구(1/3차년도). 한국농촌경제연구원.

안승만, 김승종, 이형찬, 2016b: 도시지역 미기후 관리방향 연구, 국토연구원.

안승만, 김승종, 이형찬, 손은영, 2016a: 도시의 미기후 관리방향, *국토정책 Brief*, 583, 4.

엄정희, 2016: 공간계획 활용을 위한 도시 열환경 취약성 평가 연구: 서울시를 사례로, *한국조경학회지*, 44(4), 109-120.

오덕성, 박소연, 이서정, 2015: 에너지 측면의 스마트 그린시티 계획기법에 관한 연구: 행복도시의 적용실태를 중심으로, *Journal of the Korea Academia-industrial cooperation society*, 16(9), 6368-6375.

오인환, 2016: 기후변화 대응 및 지속가능발전을 위한 스마트 녹색도시, *국토*, 419, 2-4.

왕광익, 노경식, 2016: 신기후변화 체제에 따른 스마트 녹색도시의 역할, *국토*, 429, 36-40.

왕광익, 정윤희, 이진희, 박근현, 2012: 기후변화 취약계층을 위한 녹색도시 정책연구, 국토연구원.

우장명, 박종섭, 설영훈, 남윤명, 최시영, 2018: 농촌인구 감소 대책 중점과제 발굴 연구용역, 충청북도.

유선철, 여관현, 2015: 기후변화에 대응한 도시재생 지표개발 및 활성화지역 선정연구: 서울특별시 사례를 중심으로, *도시행정학보*, 28(4), 77-99.

유소민, 이우균, 야마가타 요시키, 임철희, 송철호, 최현아, 2015: 토지이용균형모델을 이용한 기후변화에 따른 제주도 지역의 주거용 토지이용변화와 인구 밀도 예측, *한국지리정보학회지*, 18(4), 43-58.

유윤진, 김도년, 손세형, 2013: 저탄소 녹색도시 구현을 위한 탄소배출영향요인 분석: 경기도 탄소배출량을 중심으로, *한국도시설계학회지 도시설계*, 14(2), 149-159.

윤동순, 최민섭, 2014: 비도시지역의 효율적 관리방안: 계획관리지역을 중심으로, *한국지역개발학회지*, 26(1), 1-26.

윤동현, 남원호, 홍은미, 김태곤, 허창회, Michael J. Hayes, 2018: 최근 60년간 도시 및 농촌 지역의 국지적 기후변화 비교 분석, *한국농곡학회논문집*, 60(3), 37-50.

윤영석, 이병훈, 박준기, 2013: 농가의 고령화가 소득불평등에 미치는 영향: 연령효과의 실증분석을 중심으로, *농촌경제*, 36(3), 33-51.

이관용, 2017: 노인주거복지시설의 외부환경계획, *건축*, 61(6), 51-56.

이나영, 임재영, 조용성, 2014: 폭염으로 인한 기후변화 취약계층의 사망률 변화 분석: 서울을 중심으로, *보건사회연구*, 34(1), 456-484.

이상혁, 강정은, 배현주, 윤동근, 2015: 엔트로피 가중치를 활용한 대기오염 취약성 평가, *한국지역지리학회지*, 21(4), 751-763.

이서정, 이응현, 오덕성, 2016: 스마트 그린시티 개념을 적용한 고층주거단지 계획기법에 관한 연구: 행정중심복합도시 2-1생활권을 중심으로, *한국산학기술학회논문지*, 17(5), 379-387.

이소영, 김상민, 2017: 인구감소지역 정주공간 현대화 및 생활서비스 지원체계 개선방안, 한국지방행정연구원.

이소희, 구신회, 전영우, 박영진, 2015: 도로경사와 연령별 보행속도 차이를 고려한 자연재난 대피소의 입지분석: 서울시 사례분석, *한국지형공간정보학회지*, 23(2), 69-77.

이승교, 황정임, 원향례, 2014: 농촌 거주 70-80대 노인의 주거 및 식생활 환경 변화추이 2001-2010, *한국지역사회생활과학회지*, 25(3), 401-415.

이연숙, 김진구, 허혜영, 2016: 농촌 자녀양육 가구의 주거공간 실태조사 연구, *Journal of the Korean Housing Association*, 27(2), 21-31.

이정동, 2019: 기후변화 대응을 위한 도시재생 계획요소 연구: 도시재생 사업을 중심으로, *주거환경*, 17(3), 39-52.

이철희, 정재희, 2017: 기후변화 대응 주거단지 가이드라인 개발을 위한 연구, *대한건축학회-계획계*, 33(4), 77-89.

장창곡, 박윤주, 황원숙, 김명숙 , 2017: 보건소 단위 기후변화 건강취약계층 건강관리방안 개발 연구, 질병관리본부.

전유미, 이제선, 2018: 인구 100만 이상 대도시권의 도시 회복력 수준에 관한 분석, 한국도시설계학회지 *도시설계*, 19(3), 21-32.

정문수, 이정해, 정유리, 최령, 2018: 농촌형 주거기준 제정 및 주거실태조사 추진방안, 한국농촌경제연구원.

정용주, 김후곤, 백천현, 김영진, 2015: 상향식 모형을 이용한 국내 주거부문의 온실가스 한계감축비용 분석, *에너지*

공학, 24(1), 56-68.

정지원, 송지혜, 2014: 도시의 기후변화 대응을 위한 개발협력: 논의 동향 및 시사점, 대외경제정책연구원.

조판기, 민범식, 손경환, 박제훈, 김성수, 2013: 생활인 프라 실태의 도시간 비교분석 및 정비방안, 국토연구원.

지방자치발전위원회, 2016: 자치단체별 사회 인구구조 변화와 추계 최종보고서.

진태영, 김진수, 2017: 화석연료를 사용을 고려한 탄소 배출량과 도시화율의 관계에 관한 연구, *환경정책*, 25(3), 47-70.

최병한, 김익훈, 홍재주, 정은진, 원동현, 2019: 저수지 비상대처계획 운영시 대피소 적지선정 기법: 농촌지역 고령인구 이동조건에 따른 대피소 선정, *대한공간정보학회지*, 27(3), 3-13.

최준성, 2015: 국내 기후변화 시범도시의 완화와 적응계획 비교연구, *한국산학기술학회 논문지*, 16(8), 5664-5672.

최준성, 박천보, 2014: 기후변화 대응계획 도시사례 비교연구: 창원시와 포틀랜드시를 대상으로, *한국산학기술학회 논문지*, 15(1), 539-546.

최진아, 김상범, 김은자, 임창수, 박미정, 2016: 지역개발로 인한 농촌마을 경관변화요인 평가 및 분석연구: 전라도 지역을 대상으로, *한국지역사회생활과학회지*, 27(s), 689-702.

통계청, 2019: 2018년 농림어업조사 보도자료(2019.4.17. 보도).

하종식, 송영일, 박창석, 이정호, 이상아, 양태경, 2015: 기후변화 취약계층 적응대책 개발, 한국환경정책평가연구원.

환경부, 2017: 제2차 기초지자체 기후변화 적응대책 세부 시행계획 수립지침.

환경부, 2017: 취약계층 따뜻한 겨울나기 방문서비스, 환경부 보도자료(2017.11.15.).

환경부, 2019: 국가온실가스통계, 온실가스종합정보센터, 2019 국가온실가스 인벤토리.

황정임, 신동호, 2014: 농촌생활지표 장기 변화 추적 연구, 농촌진흥청.

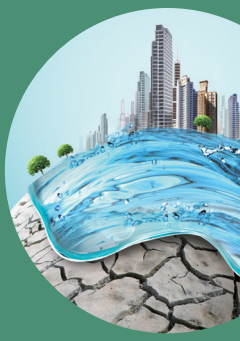
황종성, 2016: 스마트 녹색도시의 세계동향, *국토*, 419, 6-12.

e-나라지표, 농가 및 농가 인구, http://www.index.go.kr/potal/main/EachDtlPageDetail.do?idx_cd=2745 (2019.12.2.접속)

Ryu J., C. Park, S. Jeon, 2019: Mapping and Statistical Analysis of NO_2 Concentration for Local Government Air Quality Regulation, *Sustainability*, 11(14), 3809. https://doi.org/10.3390/su11143809

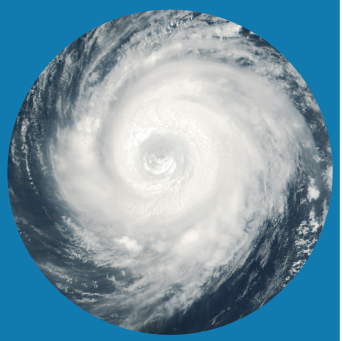
UN World Urbanization Prospects, 2018, https://population.un.org/wup (accessed 2019.12.2.)

한국 기후변화
평가보고서 2020
- 기후변화 영향 및 적응 -



제 10 장

적응대책 및 계획



314 10.1. 서론

315 10.2 기후변화 적응대책 수립

323 10.3 기후변화 적응대책 수립 방법론 연구

329 10.4 기후변화 적응대책 수립 시의 고려사항

335 10.5 참고문헌

제 10 장 적응대책 및 계획

10.1 서론

「한국 기후변화 평가보고서 2014」에서는 1999년 기후변화 대책위원회가 설치된 이후의 종합대책 추진과정에서부터 2008년 정부의 국가 기후변화 적응 종합계획의 수립과정, 그리고 국가기후변화 적응대책이 수립되기에 이르는 흐름을 기술하였다. 2010년 '저탄소녹색성장기본법' 제48조 및 동법 시행령 제38조에 따라 최초의 법정계획인 국가기후변화 적응대책(2011~2015)이 환경부 주관으로 수립되어, 2012년 12월 기초지자체 적응대책 수립·시행을 위한 근거 규정을 마련하고 2015년부터 시행토록 하였다. 기후변화 적응대책은 기후변화로 인해 발생하는 피해와 영향을 줄일 뿐만 아니라, 이를 새로운 기회로 활용하고 적응능력을 높이기 위하여 국가 및 지자체에서 수립하는 5년 단위 행동계획이라고 할 수 있다(환경부, 2014a).

제1차 국가 기후변화 적응대책(2011~2015)이 수립된 이후, 기후변화 적응정책 지원, 기후변화 영향 및 취약성 평가, 국가 기후변화 적응대책 및 지자체 세부시행계획 수립 지원 등을 위해 2009년에 설립된 국가 기후변화 적응센터와 환경부가 적응대책 운영·지원 총괄기관으로 지정되었다. 2012년에는 새로운 기후변화 시나리오를 반영하여 제1차 국가 기후변화 적응대책이 수정·보완되었으며, 2015년에는 제2차 국가 기후변화 적응대책(2016~2020)이 수립되었다(그림 10.1).

본 기후변화 평가보고서에서는 적응계획 수립체계에 초점을 맞추었던 2014년 보고서 이후 발간된 연구를 종합하여, 세부내용을 구체화하였다. 주된 내용으로서 국가 차원에서의 과학 기반의 기후정보의 제공, 의사결정에 활용하기 위한 교육 프로그램과 서비스 제공 등을 담고 있다(견고한 동의). 최근에는 기후변화로 인한 영향 평가 및

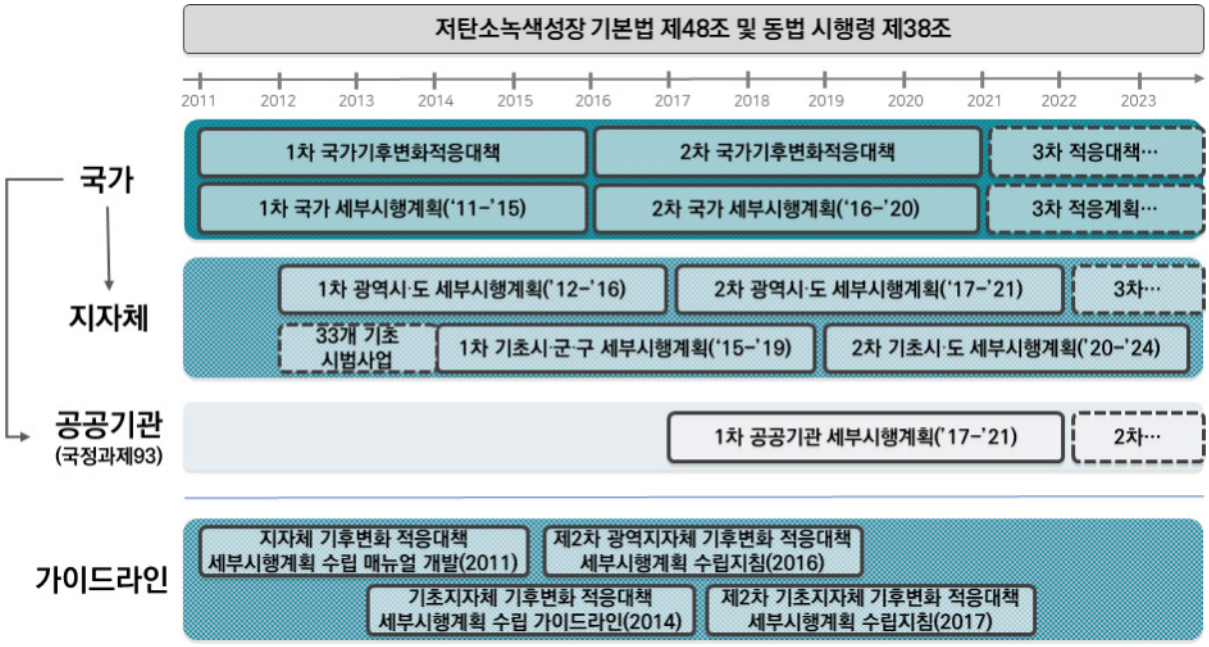


그림 10.1 우리나라 기후변화 적응대책 수립이행체계(국가기후변화적응정보포털(2020) 참고하여 저자작성).

인식조사, 거버넌스에 관련된 연구가 증가하였다. 2021년 발간이 예정된 IPCC의 새로운 평가보고서 AR6의 승인된 목차를 고려했을 때 앞으로 국제적 적응 연구는 지역의 맥락에 맞는, 보다 지역 특화된 정량적 평가 기반의 연구가 진행될 필요가 있다(중간적 동의).

10.2 기후변화 적응대책 수립

「한국 기후변화 평가보고서 2014」에서는 2008년 국가 기후변화 적응 종합계획과 2010년 저탄소녹색성장기본법에 근거하여 수립된 제1차 국가 기후변화 적응대책(2011~2015)과 2012년의 수정·보완사항을 중점적으로 기술하였다.

본 기후변화 평가보고서에서는 제1차 적응대책에서의 수정·보완대책과 2015년 수립된 제2차 국가 기후변화 적응대책(2016~2020)의 수립내용을 위주로 기술하였다. 제2차 적응대책의 수립과정에서는 제1차 적응대책의 한계로 지적되었던 부문별 영향 및 취약성 분석과 이행체계의 부족 등을 극복하고자, 적응대책 수립에 앞서 위험평가를 시행할 것과 5년간의 대책 이행체계를 수립할 것을 명시하였다(이승준 등, 2016).

10.2.1 국가 기후변화 적응대책 수립과정

2008년 수립된 '기후변화협약 대응 종합기본계획'에 국가 기후변화 적응 종합계획 수립이 명시됨에 따라, 환경부 등

표 10.1 우리나라 기후변화 적응대책 수립과정(국가 기후변화적응정보포털(2020) 참고하여 저자작성).

구분	국가계획	국가계획 (적응)	지자체계획	지침 개발
1999	제1차 기후변화협약 대응 종합대책			
2000				
2001				
2002	제2차 기후변화협약 대응 종합대책 (완화)			
2003				
2004				
2005	제3차 기후변화협약 대응 종합대책 (완화+적응)			
2006				
2007				
2008	기후변화대응 종합계획 ('08.12)			
2009				
2010				
2011				
2012		제1차 국가 기후변화 적응대책 (2011~2015) 1차 대책 수정·보완 ('12.12)	제1차 광역지자체 기후변화 적응대책 세부시행계획 (2012~2016)	
2013				
2014				
2015				
2016	제1차 기후변화 대응 기본계획 ('16.12)	제2차 국가 기후변화 적응대책 (2016~2020)		제2차 광역지자체 적응대책 세부시행 계획 수립지침('16.2)
2017			제2차 광역지자체 기후변화 적응대책 세부시행계획 (2017~2021)	제2차 기초지자체 적응대책 세부시행 계획 수립지침('17.11)
2018				
2019	제2차 기후변화 대응 기본계획 ('19.10)			
2020				
2021				

→대응대책 > 적응대책 → 국가 기후변화 적응대책 수립: 국가 기후변화 적응 종합계획('08.12)

13개 부처는 최초의 국가 적응계획으로 '국가 기후변화 적응 종합계획'을 마련하였다(관계부처합동, 2008). 종합계획은 국가 적응정책의 비전과 방향을 제시하고, 국가 장기비전인 저탄소 녹색성장의 주요 행동계획으로서 범부처 참여형 종합계획의 성격을 가진다. 전체 계획 기간은 2009년에서 2030년까지로, 단기(2009~2012년), 중장기(2013~2030년)으로 기간을 구분하였다. 단기적으로는 취약성 평가 및 기반조성 등 우선적으로 필요한 중점추진사업을 제시하였으며, 중장기적으로는 기후변화로 인한 피해 최소화를 위한 사업 추진방안과 기후변화로 인한 기회를 극대화하여 미래성장 동력으로 발전시키는 방안을 함께 다루도록 하였다. 계획에서 다루는 사업의 범위는 기후변화 감시·예측, 영향·취약성 평가, 적응사업이다. 계획의 비전은 '기후변화 적응을 통한 안전사회 구축 및 녹색성장 지원'이며, 세부목표를 단기목표와 장기목표로 구분하여 제시하였다. 단기목표는 종합적이고 체계적인 역량 강화이며, 정량적 목표로는 한반도 시공간적 취약성지도 100% 달성, 예측·감시 기술 수준 선진국 대비 70% 달성을 설정하였다. 장기목표는 기후변화 위험감소 및 기회의 현실화로, 정량적 목표로는 과거 10년(1996~2005) 대비 기상재해피해 10% 감소, 기후변화 적응 관련 생산 GDP 대비 1% 달성을 설정하였다. 계획은 5가지 추진전략을 제시하였는데, 첫째, 과학적이고 종합적인 기후변화 위험평가 체계 구축, 둘째, 비용 효과적이고 지속가능한 적응프로그램 마련, 셋째, 적응역량 강화 및 인식 제고를 위한 국내 파트너십 구축, 넷째, 국제협력과 기여를 통해 글로벌 리더십 확보, 다섯째, 적응 행동 이행 강화를 위한 제도적 기반 확보이다(관계부처합동, 2008).

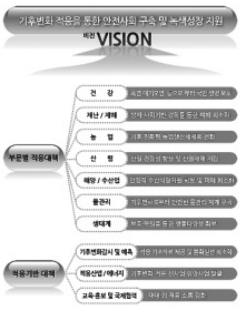
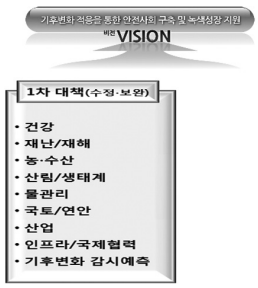
한편, 2010년 시행된 저탄소녹색성장기본법 제40조에 따라 정부는 20년을 계획 기간으로 하는 법정계획인 제1차 기후변화대응 기본계획을 2016년에 처음으로 수립하였다. 기존의 기후변화협약 대응 종합대책이 감축정책 실현에만 중점을 둔 반면, 제1차 기후변화 대응 기본계획은 감축, 기후변화 적응, 국제협력 등을 총망라하여 세운 첫 번째 계획이다(관계부처합동, 2016). 제1차 기후변화대응 기본계획에는 기후변화위험 및 영향을 완화하여 건강·자연재해 등에 대응하는 적응대책이 포함되었다. 2030년 온실가스 국가감축목표 달성 등 저탄소 이행을 준비하는 계획이자, 기후변화 적응의 중요성을 부각하여 기후변화 대응 추진전략의 방향을 전환한 계획이다. 하부 관련 계획 중의 하나인 기후변화 적응대책과의 정합성이 유지되도록 하였으며, 파리협정 이후의 신기후·대응체계 등 국제동향을 반영할 수 있도록 하였다(관계부처합동, 2016). 2019년에는 2030 국가 온실가스 감축 로드맵의 감축목표와 이행수단 등을 반영하기 위해 제2차 기후변화대응 기본계획이 수립되었다(관계부처합동, 2019). 제2차 기후변화대응 기본계획에서는 파리협정의 5년 단위 NDC 갱신에 맞추어 국가 온실가스 감축목표 및 이행로드맵을 포함하여 계획을 수립하였다. 기본계획에서 지난 기후변화대응 정책 성과와 실적을 평가한 결과, 감축정책에서는 선진적 정책 기반은 마련되었으나 가시적 효과는 미흡하였다. 또 하위계획을 총괄하고 집행 단위에서 구속하는 등 총괄계획으로서의 위상과 조정 기능이 부족하여 이를 확대할 필요가 있었다. 체계적 이행점검의 수단이 부재하여, 실적과 정책효과 간의 격차가 발생하였으며, 이를 위해서 정량적 이행지표를 활용하여 지속적인 환류를 추진하는 것을 요구하였다. 적응정책 관련해서는 적응 관련 총괄 제도 및 전담부서의 부재로 기후변화 적응 주류화를 위한 관리 및 기반이 미약하여 이행력 확보에 한계가 있으므로 기후 리스크를 강조하여야 한다고 기술하였다. 마지막으로 거버넌스 등 기후변화 대응 핵심 당사자의 정책 참여가 부족하므로, 국민·지자체·산업계 모두가 참여하는 제도적 기반이 조성될 필요가 있다고 하였다(관계부처합동, 2019). 기후변화 적응의 주류화 관련 추진과제로는 공공기관 적응대책 수립 의무화와 평가제도 도입, 기후변화 취약성 저감 사업 발굴 및 산업계 적응대책 수립 지원 강화 등이 제시되었다(관계부처합동, 2019).

10.2.2 국가 기후변화 적응대책

2010년 10월 시행된 저탄소녹색성장기본법은 온실가스 감축 및 기후변화 적응에 관한 국가계획, 그리고 중앙정부 및 지자체 적응대책 수립 의무를 부여하였으며(시행령 제38조), 이에 따라 정부는 기존의 비법정계획인 국가 기후변화 적응 종합계획을 수정·보완하여 법정계획의 지위를 갖는 '국가 기후변화 적응대책(2011~2015; 이하 제1차 적응대책)'을 환경부를 포함하여 13개 관계부처 합동으로 수립하였다

(관계부처합동, 2010; 고재경, 2018). 이는 저탄소녹색성장 기본법 시행('10.4)에 따른 최초의 법정계획으로, 정부 및 지자체 세부시행계획 수립을 위한 기본계획(master plan)인 동시에 기후변화 영향의 불확실성을 감안한 5년 단위 연동계획(rolling plan)이라는 점을 특징으로 가진다. 기후변화 관련 10개 부문인 건강, 재난/재해, 농업, 산림, 해양/수산업, 물관리, 생태계, 기후변화 감시 및 예측, 적응산업, 교육·홍보 및 국제협력에 대해서 87개의 세부과제(261개 세세부과제)를 제시하였다(표 10.2). 제1차 국가 기후변화 적응대책은 국가 기후변화 적응 종합계획과 마찬가지로 '기후변화 적응을 통한 안전사회 구축 및 녹색성장 지원'을 비전으로 제시하였으며, 이를 토대로 10개의 부문별 목표를 마련하였다. 부문별 목표로서, 건강 부문에서는 '폭염, 전염병, 대기오염 등으로부터 국민 생명 보호'를, 재난/재해 부문에서는 '적응을 고려한 방재·사회기반 강화 및 사회기반시설 구축'을, 농업 부문에서는 '기후적응 농업생산체제로 전환하여 피해 저감 및 기회창출'을, 산림 부문에서는 '산림 건강성·생산성 증진 및 산림재해 저감'을, 해양/수산업 부문에서는 '해수면 상승 대응 및 안정적 수산식량자원 확보'를, 물관리 부문에서는 '홍수·가뭄 등 기후변화로부터 안전한 물관리 체계 구축'을, 생태계 부문에서는 '생태계 보호·복원을 통한 생물다양성 확보'를, 기후변화감시 및 예측 부문에서는 '기후변화 적응 기초자료 제공 및 불확실성 저감'을, 적응산업/에너지 부문에서는 '산업별 기후변화 적응유도 및 신사업·유망사업 발굴'을, 교육·홍보 및 국제협력 부문에서는 '국내·외 적응 정책 추진기반 확립'을 목표로 설정

표 10.2 우리나라 국가 기후변화 적응계획 및 대책 현황 및 특징(환경부, 2014b에서 수정).

구분	국가 기후변화 적응 종합계획(2008)	제1차 국가 기후변화 적응대책(2010)	제1차 국가 기후변화 적응대책(수정·보완)(2012)	제2차 국가 기후변화 적응대책(2015)
비전	기후변화 적응을 통한 안전사회 구축 및 녹색성장 지원			기후변화 적응으로 국민이 행복하고 안전한 사회구축
체계				
주요내용 (추진과제)	3개 부문 29개 대책(57개 세부과제) 구성 - 기후변화 위험평가 체계 구축 3개 과제(19개 세부과제) - 생태계 등 6개 부문별 기후변화 적응프로그램 추진 17개 과제 (41개 세부과제) - 국내·외 협력 및 제도적 기반 확보 2개 과제(7개 과제)	2개 분야 10개 부문 29개(대책 87개 세부과제) 구성 - 건강 등 8개 부문별 적응대책 (21개 대책, 71개 세부과제) - 기후변화감시 및 예측 등 2개 부문 적응기반 대책(8개 대책, 16개 세부과제)	적응대책 우선 수정·보완(9개 부문 67개 세부과제) - 건강, 농수산, 물관리, 재난재해, 산림/생태계, 국토연안, 산업, 인프라 국제협력, 기후변화 감시예측 등 9개 부문	적응기반 및 경제·사회·환경 분야별 통합적 적응추진체게 구축 (20개 중점 추진과제로 정책 효율화) - 크게 4대 정책과 이행기반으로 구분되는 5대 추진과제를 설정 - 위험관리, 안전사회, 산업경쟁력, 지속가능 자연자원관리, 국내외 이행기반 마련
계획기간	2009~2030	2011~2015	2013~2015(2012.12)	2016~2020(2015.12)
수립주체	환경부 등 14개 중앙부처			기후변화 적응 관계부처 20개
특징	우리나라 최초의 적응대책(행정계획 성격) - 국가적응정책 기본계획 - 저탄소 녹색성장 주요 행동계획 - 범부처 참여형 종합계획	우리나라 최초의 법정계획(저탄소녹색성장기본법) 정부 및 지자체 세부시행계획 수립을 위한 기본계획 기후변화 불확실성을 감안한 5년 단위 연동계획	부문별 대표과제는 수정·보완, 완료 및 적응 관련성이 낮은 과제 등은 폐지 - 취약계층 보호, 통합적 적응대책, 기후변화 유망산업 발굴 및 기업의 적응역량 강화 지원	대책 이행과 관련한 효율성 제고를 위해 각 적응대책과 세부시행계획의 성과지표를 마련

하였다.

2012년 12월 기상청에서 발표한 기후변화 新시나리오 전망을 반영하고 대책 실효성 제고를 위해 2010년 수립되었던 기존의 국가 기후변화 적응대책(2011~2015)이 수정·보완되었다(관계부처합동, 2012). 수정·보완 내용에는 첫째, 기후변화 新시나리오를 고려하여 기존 대책 중 존속시킬 과제와 폐지해야 할 과제를 구분, 성격이 유사한 과제를 통·폐합하는 것이었으며 둘째, 취약계층 보호대책, 기후변화 유망산업 발굴, 기업의 적응역량 강화 지원 등 새로운 정책수요에 따른 적응대책의 추가·보완 등을 포함하였다. 최종적으로 9개 부문의 67개 세부과제로 정리되어, 건강, 농수산, 물관리, 재난/재해, 산림/생태, 국토/연안, 산림, 인프라/국제협력, 기후변화 감시·예측의 9개 부문으로 수정되었다.

표 10.3 국가 기후변화 적응대책 방향별 핵심계획지표(관계부처합동, 2015).

구분	핵심계획지표	목표치	
		'15	'20
1. 과학적인 기후변화 위험관리 체계 마련			
- ('20) 기후변화 영향·취약성, 리스크 파악 고도화			
	기후변화 시나리오 고도화	AR5기반 시나리오	AR6기반 국가 기후변화시나리오
	기후변화 취약성 지도 구축	AR5기반 취약성 지도	AR6기반 취약성 지도
	권역별 기후변화 매개체 감시 거점센터 구축률 (누적 %)	62.5	100
	적응정보 공동DB 구축	-	구축
2. 기후변화에 안전한 사회 건설			
- ('20) 기후변화 취약계층·지역 관리 기후복지 기반 강화			
	기후변화 취약계층 DB 구축	-	구축
	홍수위험지도 제작율(누적 %)	19	64
	재난안전 통합시스템 활용기관 확대율(%)	20	100
3. 기후변화를 활용한 산업계 경쟁력 강화			
- ('20) 기후변화 대응 경제생산기반 강화			
	기후변화 대응 품종 개발 (누적 건)	147	200
	적응대책 수립 기업 수 (누적 개소)	46	100
	개발도상국 적응 기술 및 적책 협력·이전 수 (누적 건)	-	10
4. 지속가능한 자연자원 관리			
- ('20) 생태계 피해 및 생물다양성 감소 최소화			
	한반도 생물유전자원DB 구축 (누적 건)	('14) 42,756	48,000
	한반도 핵심 생태계 복원율 (%)	37.8	50.2
	산악기상 관측망 서비스 운영 (누적 개소)	120	200
	해양 생태계 구조변화 모니터링 지점 수 (개소)	3	10
5. 국내·외 적응정책 이행기반 마련			
- ('20) 국민이 참여하고 체감할 수 있는 적응기반 마련			
	기후적응 지역사회 모델 개발	-	유형별 모델개발
	기후변화 적응 남북협력사업 (누적 건)	-	10
	적응 교육프로그램 인증 제도화	-	제도시행
	국민 기후변화 적응 인식도 (%)	62.1	75
	기후변화 적응 협력(교육) 국가 (누적)	19	25

국가 기후변화 적응대책의 이행을 위해 2011년 6월 관계부처 합동으로 국가기후변화 적응대책(2011~2015)에 따른 세부시행계획을 마련하였다(관계부처합동, 2011). 세부과제별로 사업개요, 배경 및 필요성, 그간 추진실적과 함께 연차별 사업내용, 2011년 추진계획, 소요예산, 기대효과를 제시하였다. 그리고 2012년 기후변화 적응대책 수정·보완에 따라 2013~2015년 수정된 세부시행계획을 작성하였다(관계부처합동, 2013). 여기에서는 9개 분야별 67개 과제에 대해 추진배경, 사업개요. 그간 추진실적(2011~2012), 세부 추진계획 (2013~2015), 소요예산을 제시하였다. 두 번에 걸쳐 수립된 세부시행계획에서는 세부과제별로 담당부처의 업무담당자와 상세한 사업내용을 같이 서술함으로써 세부 시행계획에 대한 책임성과 이행성을 높이고자 노력하였다.

2015년 제1차 국가기후변화적응대책 완료에 따라 '제2차 국가 기후변화 적응대책(2016~2020; 이하 제2차 적응대책)'이 마련되었다. 이는 제1차 적응대책의 성과를 계승·공유하며 기후환경 및 사회·경제적 변화와 국내·외 정책 수요에 대응하고, 국민 피부에 와 닿는 대책을 마련하는 것을 목표로 하였다. 그간 우리나라에서 녹색기후기금(GCF) 사무국을 유치하고 글로벌녹색성장연구소(GGGI)를 설립하는 등의 기후변화 대응 리더십을 보인 바와 같이 국가적 위상에 부합하는 적응대책을 마련하고 추진할 필요성이 제기되었다. 제2차 적응대책은 기존의 녹색성장 전략과 함께 16년 수립된 '기후변화대응 기본계획' 등의 관련 계획과 기후변화 적응력을 강화하기 위한 국정과제로, 기후변화 적응 관계부처 20개가 참여하여 수립하였다. 기존의 1차 적응대책이 국가 차원의 기후변화 적응 추진 기반체계를 마련, 부문별/지역별 기후변화 적응기반 구축을 지원했으며, 기후변화 적응정책의 과학적 근거 및 활용기반을 마련, 기후변화 적응대책 추진으로 적응국가 위상을 제고하는 등의 성과를 달성하였으나, 적응대책의 실질적 성과 창출이 미흡하고, 기후변화 적응 추진을 위한 전략적 기반체계가 미흡한 등의 한계가 존재하여 이를 보완할 수 있는 제2차 적응대책이 마련되었다. 제2차 적응대책에서는 부문별로 기존 대책의 성과와 한계를 평가하고, 제1차 적응대책에서 반영되지 못한 리스크 관련 대책 부분을 보완하였다. 또한 장기비전 달성을 위한 부문별

표 10.4 제2차 광역지자체 적응대책 세부시행계획 수립부문(2차 지자체 세부시행계획을 참고하여 저자작성).

	기후변화 적응대책 부문								
구분	건강	재난/재해	농·수산	산림/생태계	물관리	국토/연안	산업	인프라/국제협력	기후변화 감시예측
서울	○	○		○	○				
부산	○	○	○	○	○	○	○	○	○
대구	○	○	○	○	○				
인천	○	○	○	○	○			○	○
광주	○	○	○	○	○	○	○	○	○
대전	○	○	○	○	○		○		
울산	○	○						○	
세종*	○	○	○	○	○				
경기	○	○	○	○	○	○			
강원	○	○	○	○	○	○	○		
충북	○	○	○	○	○		○	○	○
충남	○	○	○	○	○	○			
전북	○	○	○	○	○	○			
전남	○	○	○	○	○	○	○		
경북	○	○	○	○	○	○	○		
경남	○	○	○	○	○	○	○		
제주	○	○	○	○	○	○			
합계	17	17	15	16	16	10	8	5	3

(지자체 세부시행계획 중 국가기후변화적응대책 9개 부문에 해당하는 부문만 표기)

* 세종특별자치시의 경우 1차 세부시행계획으로 표기

대책 필요성만을 제시했던 제1차 적응대책과는 달리 중장기 및 단기 비전과 목표를 차등화하여 제시하였고, 기후변화 감축과 적응을 함께 고려하여 공동편익(Co-benefit) 효과를 고려하였다. 이외에도 이행 및 점검체계를 강화하여, 기후변화 영향 모니터링과 적응대책 평가의 통합점검·환류체계 마련으로 효과적 대응을 꾀하였다는 특징을 가진다. 제2차 적응대책은 '기후변화 적응으로 국민이 행복하고 안전한 사회구축'이라는 비전을 통해' 기후변화로 인한 위험감소 및 기회의 현실화'라는 목표를 달성하고자 하였다. 적응원칙으로는 지속가능발전에 부합할 것, 취약계층을 고려할 것, 과학적 근거 및 기술을 기반으로 할 것, 기존 정책과의 연계성을 확보하고 통합적 시너지를 창출할 것, 이해당사자의 참여를 활성화할 것을 명시하였다. 이에 따라 20개의 과제를 마련하였는데 크게는 4대 정책 부문과 이행기반으로 나뉘며, 4대 정책 부문에는 과학적 위험관리(기후변화 감시·예보 시스템, 취약성 통합평가·리스크관리, 한국형 기후 시나리오 개발, 통합정보 제공시스템 마련, 기후영향 모니터링), 안전한 사회건설(기후변화 취약계층 보호, 취약지역·시설 관리, 건강피해 예방 및 관리, 재난·재해 관리), 산업계 경쟁력 강화(산업별 적응역량 강화, 기후변화 적응 기술개발, 산업별 적응인프라 확대, 해외시장 진출기반 조성), 지속가능한 자연자원관리(생물종 보전·관리, 생태계 복원·서식처 관리, 생태계 기후변화 위험요소 관리)가 있고, 이행기반에는 국내·외 이행기반 마련(적응정책 실효성 강화, 적응 국제협력 강화, 지역단위 적응활동 촉진, 적응 홍보·교육)을 제시하였다. 이후에는 적응대책 핵심지표와 부문별 성과지표를 통해서 평가하는 과정을 거치게 된다.

10.2.3 지방자치단체 기후변화 적응대책

「한국 기후변화 평가보고서 2014」에서는 국가 기후변화 적응대책 이행을 위한 광역 및 기초지자체 단위의 실행계획 성격을 가진 지방자치단체 기후변화 적응대책 세부시행계획의 수립내용에 대해 기술하였다. 또한, 저탄소녹색성장기본법 시행 이전에 16개 광역시·도 단위에서 기후변화 대응을 목적으로 수립된 기후변화 대응 종합계획의 내용을 기술하였는데 각 지자체는 '기후변화 현황 → 기후변화 영향 → 취약성 평가 → 대책 수립'으로 이어지는 체계를 가지고 과학적 근거를 토대로 적응계획을 작성하고자 노력하였으며, 제시된 적응대책 분야에는 건강과 재난재해가 가장 많이 나타났고, 물관리와 산림, 농업 및 생태계 부문도 많은 지자체에서 다루었다. 2014년 당시에는 광역지자체 기후변화 적응대책 세부시행계획 수립이 1차 계획만 수립된 시점이었기 때문에, 수립된 계획들에 대해서 지자체별로 수립 내용의 차이를 비교하는 방식으로 서술하였다.

저탄소녹색성장기본법 제48조 및 동법 시행령 제38조에 의거하여 국가, 광역 및 기초지자체 적응대책 세부시행계획 수립이 의무화되어, 2015년도에는 189개, 2016년에는 37개의 지자체별 세부시행계획이 수립되었다(현정희 등, 2019). 1차 계획이 수립되고 5년의 계획 기간이 종료된 이후에 2차 계획이 수립되는 동안 지자체별 세부시행계획에 대한 이행평가가 이루어졌으며, 수립되는 계획의 내용적 측면에서도 많은 변화가 나타났다.

10.2.3.1 광역지자체 기후변화 적응대책 수립현황

저탄소녹색성장기본법에 근거한 광역지자체 적응대책 세부시행계획의 수립 주체는 시·도지사이고, 5년 단위로 계획을 수립·시행하여야 한다. 광역지자체의 경우 국가 단위 적응대책 중 광역지자체에 해당하는 소관사항에 대하여 계획을 수립하여야 한다. 제1차 광역지자체 적응대책 세부시행계획은 2012년 세종특별자치시를 제외한 16개의 모든 광역지자체에서 수립되었으며(세종특별자치시는 2016년 수립), 2017년에는 5년의 계획 기간이 종료된 16개 지자체에서 2차 계획을 수립하여 현재에 이르고 있다.

제2차 광역지자체 기후변화 적응대책 세부시행계획에서 건강, 재난/재해, 농수산, 산림/생태계, 물관리, 국토/연안, 산업 분야의 7개 부문을 대부분 다루고 있으나, 인프라/국제협력, 기후변화 감시예측 부문은 상대적으로 다루지 않는 것으로 나타나, 제1차 세부시행계획과 큰 차이는 없었다(표 10.4). 적응계획 선행 연구(김진아와 윤순진, 2014)에서 언급되는 주요요소들을 단계별로 구분하여 목표수립, 현황조사, 의사결정, 실행 및 평가로 설정하여 24개의 요소를 도출하여 제1차 및 제2차 광역지자체의 적응계획이 제시한

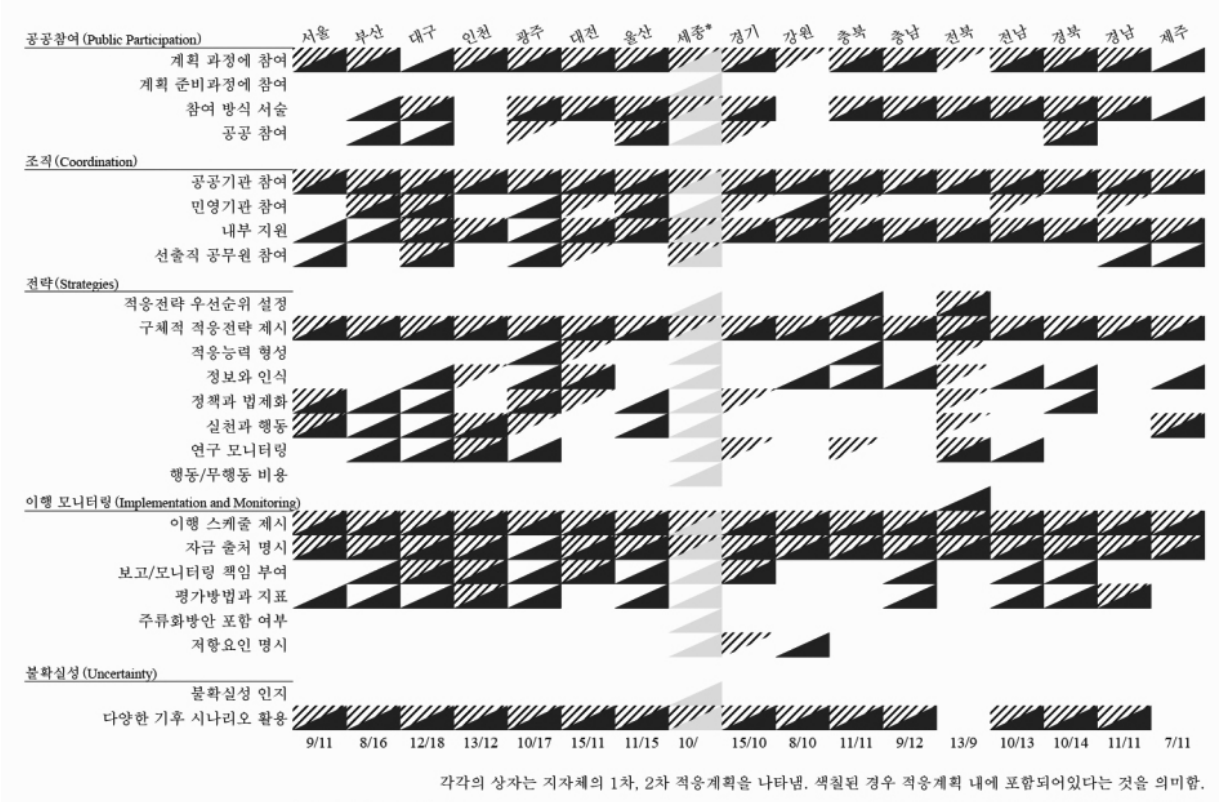


그림 10.2 광역지자체 1차, 2차 기후변화 적응대책 세부시행계획 구성(1차, 2차 지자체 세부시행계획을 참고하여 저자작성).

계획요소들의 포함 여부를 평가했을 때, 광역지자체의 1·2차 적응대책에서 공통으로 나타나는 강점으로는 계획과정에 공공기관이 주도적으로 참여한다는 것(Public agencies), 각 대책/전략의 주관부서나 책임자가 명시되어 있다는 것(Internal support), 그리고 특정한 기후 영향에 대한 구체적인 전략이 포함되어 있다는 것(Specific adaptation strategies)이다(그림 10.2).

각 광역지자체에서 활용하고 있는 기후변화 관련 현황 혹은 미래 시나리오 등 과학적 자료의 종류에 차이가 있었으며, 이들 자료를 통한 중요 부문 도출 과정 방식과 이해관계자 의견수렴 방법, 그리고 적응대책 부문별 주요 내용 등에 차이가 나타났다. 대부분의 광역지자체 기후변화 적응대책 세부시행계획에서는 기상청에서 제공하는 기후변화 현황 기상자료를 활용하였으며, 기후변화 전망 부문에서는 RCP 시나리오를 적용하였다. 취약성 평가 부분에서는 과거에는 국립환경과학원이 개발 및 배포한 취약성 지도 및 평가도구인 CCGIS (Climate Change adaptation toolkit based on GIS)를 사용하였으나, 이후 이를 보완한 기후변화적응센터의 기후변화 취약성 평가도구 VESTAP(Vulnerability Assessment Tool to build Climate Change Adaptation Plan)이 개발되어 대부분의 지자체는 이를 활용하였다.

우리나라 광역지자체의 제1차 적응대책 세부시행계획과 제2차 세부시행계획을 비교한 결과, 목표 설정(Goals)이 되었다고 해도 이를 실현하기 위한 세부과제 도출 과정은 대부분 기술하지 않아, 기존 정책 위주로 적응대책 리스트가 만들어졌다. 적응계획의 구체적인 적응대책 선정 및 연차별 계획과정은 지자체마다 다르지만, 대체로 정성적이고 직관적인 방식으로 계획되고 있으며, 대체로 20~30개의 기존 및 보완사업에 10개 내외의 신규 사업을 추가하는 정도에서 이루어지고 있다. 또 목표(objective) 설정이 가시적이고 측정 가능한 지표로 표현되지 않았기 때문에, 기후변화 적응을 위해 선택된 과제들의 정량적 효과를 파악하기 어렵다.

또한, 적응대책의 실효성을 높이기 위해 적응협의체 등이 구성되는데, 대부분 지자체에서는 적응협의체를 공무원 중심으로 구성하여 운영하였다. 적응협의체는 지자체별로 적응협의회, 추진위원회, 이행추진단, TF팀 등 다양한 이름으로 구성되어 있고, 협의체 내의 구성원들에게는 계획

단계에서의 우선순위 선정에서부터 추진정책 이행과 모니터링 등의 역할이 부여된다(김진아와 윤순진, 2014).

부문별 우선순위를 도출한 지자체는 많았으나 구체적인 선정 기준을 제시한 곳은 적었고, 정책(사업)별 우선순위를 도출하지 않았다. 광역지자체의 1·2차 적응대책에서 공통으로 나타나는 강점으로는 계획과정에 공공기관이 주도적으로 참여한다는 것(Public agencies), 각 대책/전략의 주관부서나 책임자가 명시되어 있다는 것(Internal support), 그리고 특정한 기후 영향에 대한 구체적인 전략이 포함되어 있다는 것(Specific adaptation strategies) 등이 있다.

10.2.3.2 기초지자체 기후변화 적응대책 수립현황

기초지자체 기후변화 적응대책 세부시행계획은 국가에서 제공된 계획수립 관련 표준내용인 "기초지자체 기후변화 적응대책 세부시행계획 수립지침"을 준용하여 [계획준비]→[계획수립]→[계획이행] 3단계를 거쳐 추진되었다. 구체적으로 계획수립 단계에서는 ① 기후변화 현황분석 및 미래전망 → ② 선행연구 및 관련자료 조사·분석 → ③ 기후변화 영향 및 취약성 평가 → ④ 비전 및 목표 설정 → ⑤ 분야별 적응대책 발굴 및 선정 → ⑥ 연차별 세부시행 계획 작성 및 확정(승인) → ⑦ 공표 및 이행체계 마련의 7개 세부절차를 제시하였다. 이를 토대로 기후변화 적응대책 세부시행계획을 수립한다.

10.2.3.3 기후변화 적응대책 수립 기반과 장애요소

제2차 광역지자체 기후변화 적응대책에는 제1차 광역지자체 기후변화 적응대책의 이행평가 내용이 서술되어 있어, 각 지자체가 겪고 있는 어려움과 계획 수립 장애요소를 도출할 수 있다. 각 지자체 계획이 가지고 있는 한계점으로는 상위계획의 방향 고려가 미흡한 점, 세부시행계획 추진을 위한 이행평가체계가 미흡한 점 기후변화 적응 주류화 및 적응을 위한 통합적 연계 시스템의 부재, 각 지역의 지리적 특성을 반영한 수요자가 필요로 하는 기후환경 정보의 부족, 조례 혹은 예산 등 제도적 기반이 미약하여 정책의 실효성 확보에 한계가 있는 점, 광역시도 간 업무공유 등 정보교류 및 체계적 성과관리를 위한 제도가 미비한 점, 세부사업 간 유사 중복성으로 사업 관리의 어려움이 있는 점, 기존사업 위주의 시행으로 이전부터 시행해 온 사업의 테두리를 벗어나지

표 10.5 2차 광역지자체 적응계획에 명시된 지자체별 이행 장애요소(2차 지자체 세부시행계획을 참고하여 저자작성).

구분	해당 장애요소에 대해 응답을 한 지자체
수요자를 위한 기후환경정보 부족	경기도, 충청남도
상위계획과의 연계, 주류화 방안 부족	강원도
인식/이해도 부족(공무원, 주민), 추진의지 부족	인천광역시, 충청남도, 제주특별자치도
지역주민 수용성 반영 미비	대전광역시
부문간, 세부사업간 유사 중복성 문제	부산광역시
담당자 축소변경에 따른 연속성 문제	대구광역시, 대전광역시, 울산광역시
예산 추가확보의 어려움	대구광역시, 대전광역시, 경상북도
이행평가 체계 미흡, 평가결과 활용방안 미비	대전광역시, 울산광역시, 강원도, 충청남도, 전라남도, 경상북도
광역시도간 정보교류 및 체계적 성과관리 필요	경상남도, 제주특별자치도

표 10.6 기초지자체별 우선순위 선정을 위한 종합분석 방식(현정희 등, 2019).

지자체	최약성 평가	시민 인식조사	공무원 인식조사	과거 영향평가	전문가 평가	기타
관악구 (서울특별시)	80%		20%			
달성군 (대구광역시)	50%	30%	20%			
남동구 (인천광역시)	√*	√	√	√		
동구 (대구광역시)	√				√	√
서구 (대전광역시)	√			√	√	√
동구 (울산광역시)	√	√	√	√	√	
포천시 (경기도)	20%	30%	30%	20%		
태백시 (강원도)	√	√	√	√	√	√
화천군 (강원도)	√	√	√	√	√	
청주시 (충청북도)	√	√	√	√		
괴산군 (충청북도)	20%	25%	25%	10%		20%
아산시 (충청남도)	√	√	√			
예산군 (충청남도)	20%	30%	30%	20%		
광양시 (전라북도)	20%	30%	30%	20%		
화순군 (전라남도)	√	√	√	√		
포항시 (경상북도)	√	√	√	√	√	√
영양군 (경상북도)	√	√			√	√
김해시 (경상남도)	√	√	√			
산청군 (경상남도)	√			√		

* 숫자가 있을 경우 평가 항목의 가중치이며 √는 평가 항목으로 사용되었으나 가중치는 매겨지지 않음

못하는 점, 이행관리평가지표 등 이행평가 체계의 부재 등이 도출되었다(임영신 등, 2016).

또한, 표 10.6에서 보여지는 바와 같이 기초지자체에서 이행과제 선정을 위해 우선순위 도출에서 사용되는 근거 및 지표들은 체계적인 방법론 부재로 다르게 분석되어 결과 해석이 어려울뿐더러 실제 이행과제 선정으로 연계가 되지 않고 있다(현정희 등, 2019).

환경부는 국가기후변화적응센터와 함께 2011년부터 광역 및 기초지자체를 대상으로 계획수립 관련자료 제공, 역량강화 교육훈련 및 컨설팅 등의 지속적인 지원을 통하여 성공적인 계획수립 및 이행을 유도하고 있다(임영신 등, 2016).

10.3 기후변화 적응대책 수립 방법론 연구

「한국 기후변화 평가보고서 2014」에서는 실효성 있는 적응대책 수립을 위한 방법론 및 선행연구가 정리되었다. 불확실성을 줄인 기후변화 관련 자료를 생산, 축적할 필요성과 기후변화 적응 거버넌스에 대한 지속적 관심, 인식 제고 관련 설문 조사, 취약성 분석(CGGIS 등), 지자체 특성 및 유형 분석 등을 토대로 한 사전예방 원칙의 의사결정 방법 연구(low-regret) 등이 있었다. 의사결정을 위해서는 비용과 손실, 편익 산출 등에 대한 경제학적 분석이 중요하지만, 현재는 관련 문헌 분석과 일부 분야에 대한 검토에 머무르고

있었다. 국가 적응대책의 이행평가에 대한 논의는 제한적이었고, 2012년 수립된 적응계획에 대한 이행평가는 거의 없었기 때문에 이에 대한 관심이 필요하다고 기술하였다.

본 보고서에서는 지난 보고서에 이어 영향 평가의 고도화를 통해 불확실성을 줄이기 위한 최근 연구들의 동향에 관해 기술하였다. 또한, 이해관계자의 참여와 관련하여 인식조사와 거버넌스 관련 최근의 문헌연구에 대해 정리하였으며, 적응대책 이행의 첫 단계라 할 수 있는 우선순위 설정에 대한 연구 동향을 확인하였다. 마지막으로, 지난 보고서에서 필요성을 언급하였던 이행 및 이행평가과정에 대해서 그동안 수행된 이행평가 결과를 토대로 정리하였다.

10.3.1 영향/취약성 및 리스크 평가

「한국 기후변화 평가보고서 2014」에서는 현실성 있고 실효성 있는 적응대책 수립을 위해서는 불확실성을 줄이는 것이 중요하므로 이를 위한 관련 자료를 생산하고 지속적으로 축적하는 것이 필요하다고 기술하였다. 국립환경과학원, 환경부와 한국환경정책·평가연구원에서는 각각 취약성 지도 및 평가도구(LCCGIS, Local government Climate Change adaptation toolkit based on GIS), 취약성 평가 표준화 기반과 기후변화 리스크 목록 구축, 다차원평가기법 개발, 식량 등 국제 리스크 검토 방법에 대한 연구가 이루어졌다.

기후변화로 인한 미래 추정에 있어 가장 기본적인 과학적 자료가 되는 영향평가의 고도화를 위해서는 표준화된 기후변화 시나리오 자료처리 방법의 개발과 다양한 GCM 결과를 활용한 기후변화 시나리오 자료의 불확실성을 언급하는 연구가 진행되어야 한다(중간적 동의). 같은 지역에 대하여 기후변화 시나리오를 다양한 방법으로 처리·적용함에 따라, 결과가 상이하게 도출되는 경우가 있으며, 이는 정책결정을 위한 시나리오 자료 적용 시 문제점으로 작용한다(윤선권과 조재필, 2015).

영향 평가 외에도 취약성 평가 혹은 위험평가를 통해서 기후변화 대응을 위한 기초자료를 생성할 수 있다. 취약성 평가의 발전은 실제 우리나라 계획수립 과정 및 지원 도구에서 확인할 수 있다. 취약성(vulnerability)은 기후 관련 재해 위험에서 기인한 사회·경제적 시스템 노출 상태 또는 기후의 변화, 극한기상 등에 대한 시스템 수용 능력을 의미하며, 일반적으로 기후 노출, 민감도, 적응능력의 함수로 정의된다(윤수향과 이상신, 2017). 국가기후변화적응센터는 지난 2014년 11월부터 광역 및 기초 지방자치단체의 기후변화 적응 세부시행계획 수립 지원을 위해 웹 기반 기후변화 취약성 평가 지원도구(Vulnerability assESsment tool To build climate change Adaptation Plan; VESTAP) 서비스를 제공하고 있다(VESTAP, 2018; 박두선 등, 2017). 광역지자체의 제1차 기후변화 적응대책 세부시행계획(2012~2016) 수립 당시 대다수 광역 시·도에서 CCGIS를 활용하였고, 시범 기초지자체의 경우 LCCGIS를 이용하여 취약성 평가를 실시한 것으로 조사되었다. 제2차 세부시행계획(2017~2021)은 VESTAP을 통해 수립·시행 중인 것으로 파악되었다. VESTAP은 RCP 4.5와 RCP 8.5 시나리오를 적용한 취약성 평가 프로그램으로 광역·기초지자체의 과거 기후(2000년대)와 미래기후(2010년대, 2020년대, 2030년대, 2040년대) 취약성 결과를 제공한다(윤수향과 이상신, 2017).

VESTAP의 주요개발 목적은 기초 및 광역지자체의 기후변화 적응대책 수립을 위한 기본 참조자료 제공에 있으나, 상대적인 취약성이기 때문에 실제 취약성 수준(절대적 측면)을 예측 불가능하다는 한계점이 지적되었다(윤수향과 이상신, 2017). 또한, 읍·면·동 내 상대적 우선순위만을 제공하여 개별지자체 세부시행계획 수립에만 적용할 수 있고, 지자체 간 비교분석 또는 시·군·구와 읍·면·동 간 비교가 불가능하다. 따라서 VESTAP의 취약성 평가결과를 바탕으로 특정 지자체의 시군구 또는 읍면동이 특정 기후변화 항목에 더 취약하다고 분석하기에는 어려움이 있다(중간적 동의; 오관영 등, 2016).

정확한 취약성 평가를 위해서는 기본 제공되는 지표가 지속적으로 업데이트되고, 지역적 특성을 반영한 가중치가 설정되는 등 보다 전문적인 세부 조정이 필요하다(중간적 동의). 이를 위하여 국가 차원의 지속적인 관리와 데이터 갱신이 필요하다(오관영 등, 2016).

IPCC 5차 보고서(2014)부터 기존 시나리오 기반 영향평가에서 기후변화의 불확실성과 그 결과의 합으로 제시되는 리스크 평가체계로 전환하고 있으며, 주요 선진국들도 유사한 체계를 계획·구현하고 있다(박창석 등, 2015). 기후변화

영향에 대비하기 위한 국제적 대응전략 역시 불확실한 미래의 손실을 예견하고 관리하는 리스크 관리체계로 개편되고 있다. 기후변화 리스크 평가는 기후변화로 인하여 발생할 수 있는 영향에 대한 불확실성을 줄이는 것을 주목적으로 하며, 나아가 기후변화 대응정책 방향 설정에 활용될 수 있다. 리스크 평가 수행의 근본적인 목적은 상대적으로 영향 정도 및 시급성이 높은 리스크를 도출하는 것이다(박창석 등, 2015).

최근의 리스크 평가 연구들은 크게 신문기사 분석을 통한 영향분석(Kand and Park, 2018)과 리스크 도출(강영은 등, 2016a), 그리고 개별 리스크에 대한 효율적인 관리 방향 제시 연구로 나눌 수 있다. 기사 분석 연구의 경우 기존의 위험 지표를 참고하여 24년간의 3098개 기사를 분석, 영향 요인을 도출하는 연구(Kang and Park, 2018)가 있고, 리스크 관리 연구의 경우 피해 정규화 방법론을 한국에 적용하여 정확한 재해 피해 손실 경향을 분석하는 연구(Choi et al., 2019)가 수행되었다.

현재까지는 리스크 분석과 평가에 관한 연구들이 강조되고 있었다면 앞으로는 리스크 관리에 대한 체계적인 연구가 추진될 필요가 있다(중간적 동의).

10.3.2 기후변화 적응인식조사

기후변화 적응대책의 효율적인 수립과 이행은 사회적 가치와 목적, 그리고 위험 인식에 따라 다르게 설정되므로 기후변화인식 제고에 대한 관심이 필요하다(환경부, 2014b). 국민과 공무원을 대상으로 한 인식조사에 따르면 대부분은 기후변화에 대한 인식 정도가 높고 적응정책의 필요성을 인식하고 있으나, 정책이 왜 지역적 차원에서 필요한지에 대한 충분한 이해가 부족하다고 지적하였다(고재경과 김지현, 2011).

최근에는 일반 국민뿐만 아니라 이해관계자(사업체, 도시가스 산업체 등)를 대상으로 기후변화 적응에 대한 인식을 구체적으로 조사하여 적응을 유도하는 요인과 요인별 상대적 중요도를 발견한 연구가 진행되고 있다(견고한 동의; 고재경과 이우평, 2016; 정윤지와 하종식, 2015). 일반 국민과 이해관계자의 기후변화 적응인식 부족은 기후변화 적응정책에 대한 사회적 합의(social agreement) 정도 혹은 관련 정책 순응도(policy compliance)를 높이는 데 걸림돌로 작용할 수 있다(정윤지와 하종식, 2015).

2012년부터 매년 실시되고 있는 '국민환경인식조사 연구'에서는 기후변화를 포함한 세부 부문별 질문을 통해 국민들의 환경에 대한 의식수준을 확인하고 있다. 적응관련 설문 항목은 '정부의 기후변화 적응정책 인지도'를 평가하는 하나의 항목이 있다. 2015년부터 2017년까지 설문자 중 '어느 정도 알고 있다' 또는 '이름만 들어본 정도이다'라고 답변한 비율이 81%, 83%, 86%로 매년 인식정도가 상승한 것으로 나타났다(곽소윤과 이창훈, 2015; 곽소윤 등, 2016; 안소은 등, 2017; 안소은 등, 2018). 2018년부터는 적응과 관련된 설문 항목이 제외되었다.

일반 국민과 이해관계자의 기후변화 적응인식을 비교한

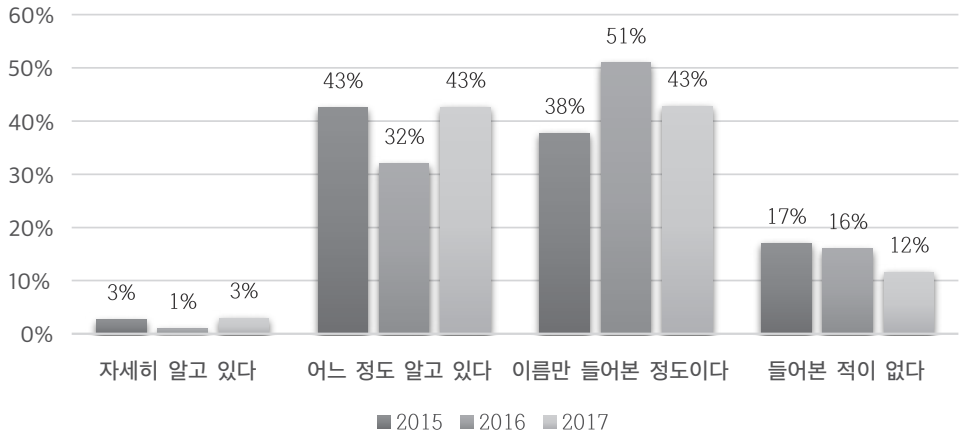


그림 10.3 국민이 인지하는 정부의 기후변화 적응정책 수준(곽소윤 등, 2016; 곽소윤과 이창훈, 2015).

연구에 따르면, 이해관계자보다 일반 국민은 기후변화 관련 7개 용어(지구온난화, 온실가스, 기상이변, 해수변 상승, 교토의정서, 완화/적응, IPCC)에 대한 인지도가 낮으며, 특히 전문가 수준의 지식을 요구하는 교토의정서, 완화 및 적응, IPCC에 대한 인식이 매우 낮은 것으로 보고하고 있다. 또한, 일반 국민은 이해관계자보다 완화와 적응에 대한 인식이 부족하지만, 일반국민과 이해관계자 모두 기후변화 대응에 있어서 완화보다 적응을 더 중요하게 생각하는 것으로 나타났다(중간적 동의; 정윤지, 하종식, 2015). 집단의 특징에 따른 기후변화 적응에 대한 인식 차이는 정책적 효용성을 줄이며 국내 연구에서는 공무원과 시민들 간의 인식을 비교 분석한 결과 두 집단 간에 인식 차이가 있음을 확인되었다(반영운 등, 2017).

또한, 개인적 수준에서 기후변화 위험이나 그 영향에 대한 인식 정도를 높이는 것이 적응과 완화에 대한 조치나 자발적 행동에 영향을 미친다(고재경과 이우평, 2016). 일반적으로 소득이 높을수록, 농촌 지역 거주자일수록 적응 행동에 적극적이며, 기후변화 적응에 대해 개인의 책임이라는 인식이 높을수록 위험 저감을 위한 투자와 비용부담 의사도 높게 나타났다(고재경과 이우평, 2016). 그러나 개인의 사회경제적 특성과 상관없이 기후변화라는 범사회적 위험에 대한 대응은 규범적으로 수용되고 있다(윤지웅 등, 2017). 이렇듯 효과적인 적응계획 이행을 위해서는 일반 시민뿐만 아니라 다양한 적응 주체들의 인식과 행동에 따른 연구가 필요하다(중간적 동의).

이러한 맥락에서 산업체를 대상으로 분석한 기후변화 인식 연구는 국내 산업체의 기후변화에 대비한 대응수준이 낮은 것으로 파악하였다(강희정, 2014). 기후변화에 대한 우려가 커지고 있음에도 불구하고 기업은 매우 제한적인 예방적 완화 및 적응 조치를 시행하고 있다(Kang et al., 2017). 일례로 도시가스사의 기후변화에 대한 인식은 주로 도시가스 수요탄력성과 공급부문에 집중되어 있었다. 기후변화에 대한 일반적 인식을 살펴보면, 기후변화가 산업에 영향을 줄 것이라는 비율이 90.5%를 차지하는 등 다른 산업보다 매우 높게 나타났지만, 기후변화에 대한 대응력은 전력 등 기존 에너지 산업보다 상대적으로 낮았다(강희정, 2014). 산업계의 기후변화 대응 인식에 영향을 미치는 중요 요소로서 조직의 역량(리더십, 직원 역량, 관련 부서의 존재)과 비즈니스에 대한 우려 등이 나타나므로 조직 역량을 강화함으로써 기후변화 대응력을 높일 필요가 있다(Kang et al., 2015).

국내 기후변화 적응정책의 성공적인 수립과 이행을 위해서 일반국민, 공무원, 이해당사자 등 여러 주체의 높은 적응인식이 선행되어야 하므로 실질적인 적응 주체인 지자체는 기후변화 적응의 중요성을 강조하는 교육 및 홍보를 적극적으로 수행해야 한다(중간적 동의; 정윤지, 하종식, 2015). 실제 적응 효과를 높이기 위해서 적응의 실제 주체인 지자체는 적응사업 개발과 이해관계자를 대상으로 기후변화와 관련된 인지 혹은 정서적 반응과 행동을 변화시켜 기후변화에 대한 태도를 변화시키거나(문성원, 2016), 환경과 기후변화에 대한 다양한 활동을 제공(방강임과 신동훈, 2016)하는 등의 방법이 있다.

10.3.3 기후변화 거버넌스

「한국 기후변화 평가보고서 2014」에서는 기후변화의 부정적 영향을 확인 및 최소화와 함께 사회의 대응 역량을 높이는 적응 또한 중요하기 때문에 기후변화 적응을 위한 사회적 공론화와 합의 과정, 의사결정 구조에 대한 정책적 관심과 연구가 중요하다고 기술하였다. 특히, 주요한 사회 문제들을 탐색하고 해결하는 데 있어 정부가 유일한 행위자가 아니므로 다양한 행위자가 의사결정 과정에 참여하는 거버넌스를 통한 접근과 참여가 필요하다. 거버넌스가 새로운 사회문제 해결을 위한 조정 기제로서 작동하기 위해서는 중앙정부, 지자체, 시민 등 수직적—수평적 파트너십을 통해 정책의 적응 효과를 이루어내야 한다(배재현, 2010).

적응은 지역 거버넌스에 대한 의존성이 높은 활동으로, 기후변화를 경험하는 해당 지역의 지방정부와 이해관계자가 주도하는 노력으로 효과를 볼 수 있다(견고한 동의). 기후변화 적응 거버넌스는 적응을 위한 다양한 주체 간에 이루어지는 상호협력적인 조정제로 폭넓게 정의할 수 있다. 최근에도 정부 기관이 포함된 거버넌스가 지속해서 연구되고, 지역에 맞춰진 거버넌스가 강조되고 있다. 현재 세부시행계획 수립 시 TF 기획단(Task Force)은 대체로 해당 광역지자체의 기후변화 담당 공무원이 주축이 되어 조직되어 있으며, 일부 자문위원이 포함되어 있다(김진아와 윤순진, 2014).

일반적으로 TF 회의 시 자문위원들이 참석하기 때문에 자문위원 목록을 TF에 포함하여 결과를 정리하는 방식을 취했다.

국외 연구에서는 적응 거버넌스의 특성을 다층적 구조, 유연하고 강건한(flexible and robust) 방향성, 재해 위험관리와 사회·경제적 가치의 결합, 장기적인 시간 프레임과 단기적 문제의 통합 등 네 가지 특성으로 설명하고 있다(고재경, 2018). 국내의 연구에서는 참여형, 상호협력적인 거버넌스 구조를 제안하고 있으며 지역적 특색 또는 지자체가 강조된 거버넌스 연구와 지역 주민의 참여를 강조한 연구로 나눌 수 있다.

먼저, 적응계획은 기후변화가 경험되는 지역의 특성에 기반한 계획을 수립해야 효과적이므로 업무담당자들과 전문가들은 물론 다양한 이해당사자들을 포함한 지역 구성원들의 참여가 중요하다(견고한 동의; 김진아와 윤순진, 2014; Huh et al., 2017). 특히, 중앙정부에 의한 하향식 계획방식보다는 지역적 경험과 지식을 바탕으로 하는 자발적인 노력으로 적응계획이 수립되고 실행되어 해당 지역의 특성을 반영한 구체적인 적응계획의 수립과 이행이 필수적이다(유정민과 윤순진, 2015a; 김동원, 2018)

기후변화 적응 거버넌스는 기존의 전문지식과 권력을 바탕으로 하는 권위적 거버넌스에서 탈피하여 이제는 지역적 경험과 지식을 바탕으로 하는 참여형 거버넌스에 의해 주도되는 경향이 있으나, 정부가 지역 주민의 참여를 의사결정 과정에 반영하려는 의지가 없다면 현실성은 떨어지는 것으로 나타났다(김동원, 2018). 지역 주민을 포함한 다양한 이해당사자들의 합의에 기초하여 지역의 적응계획을 수립할 때 그러한 적응계획에 대한 수용성이 높아지고 이행의 효과성 또한 높아진다(고재경, 2018; 김기주 등, 2019). 일방적인 하향식 의사결정 과정을 바탕으로 진행된 정책은 이해당 사자 간의 갈등을 야기하므로, 이를 방지하기 위해서는 이해당사자와 정책결정자들 간의 참여형 의사결정 과정이 포함되어야 한다.

그러나 국내에서는 현재까지 적응 거버넌스는 대부분의 시도가 지자체 공무원 또는 연구자(모형개발자)들의 주도하에 이루어졌고 이해당사자들이 참여할 기회가 부족했기에, 지역 이해당사자들의 요청사항을 반영한 모형을 개발하기가 어려웠다(김기주 등, 2019). 따라서, 해외에서 사용되고 있는 참여형 의사결정 과정의 틀 아래에서 국내 적응계획의 특성을 반영하여 모형개발자, 이해당사자, 정책결정자들이 모두 적극적으로 참여하는 모형을 개발하여 이해당사자와 정책결정자들의 원활한 합의를 하기 위한 노력이 필요한 시점이다(중간적 동의). 마지막으로, 적응계획은 수동적으로 수립되기보다는 지자체장이 관심을 가지고 지역의 조건에 맞게 더욱 적극적으로 수립될 때, 또 지방정부의 전 부서에서 수행하는 업무들에 통합적으로 반영되고 지역 주민들의 관심과 참여를 통해 수립될 때 보다 지역 실정에 맞는 내용을 포함하면서 효과적으로 이행될 수 있다(견고한 동의).

10.3.4 적응대책 평가 및 우선순위 평가

「한국 기후변화 평가보고서 2014」에서는 기후변화 적응의 효율적인 이행을 위한 첫 단계는 적응대책의 우선순위를 설정하는 것이며, 설문 조사, 취약성 분석, 지자체 특성 및 유형 분석 등을 토대로 사전예방 원칙에 근거한 낮은 유감(low-regret)의 의사결정이 이루어져야 한다고 기술하였다(중간적 동의). 또한, 의사결정을 위해서는 비용과 손실, 편익 산출 등에 대한 경제학적 분석이 중요하지만, 관련 문헌을 분석한 결과 농업 등 일부 분야에 대한 검토에 머무르고 있다.

최근에도 부문 간, 부문 내 우선순위 도출을 위해서 정성적인 평가방법이 사용되긴 하지만, 한 부문 내에서 정량적인 분석평가를 통해 이행과제 우선순위가 도출되는 연구도 진행되고 있다. 부문 간 우선순위를 도출한 연구의 경우 기후변화 적응전략 분석과 현재/미래 관점에서의 중요도 분석에 기반한 사분면 구분 및 그룹 간 차이, 요인 분석을 통한 적응전략 유형화를 수행하였다(강영은 등, 2016b). 부문 내 우선순위를 도출한 경우 농업 분야에서 연구가 진행되었다. 농업 분야에 관련한 세부과제를 도출하기 위해 16명의 전문가를 확보하고 집단심층 면접(Focus Group Interview)을 하여 총 19개의 세부과제를 도출하였는데, AHP 설문 조사를 통하여 상대적 우선순위를 분석, 상위지표 및 우선순위 가중치를 도출하였다(정원희 등, 2015).

정량적 분석을 통해 우선순위를 도출한 경우에는 피해액을

산정하거나 적응대책 도입에 따른 편익을 구하는 방법들이 있으며, 피해 경감액을 산출하여 대안을 선정하는 연구가 진행되었다. 기후변화로 인해 증가하는 홍수피해액을 분석하고 구조물적 홍수 저감 대안을 설정, 홍수감소 효과 분석 및 홍수피해 경감액을 통해 적정 홍수 저감 대안을 선정하는 연구가 수행되었다(한대건 등, 2016). 특히 영향 저감 대안에 대한 평가는 목표 기간별, 입지별 분석한 결과가 달라지기 때문에 지역특성을 반영할수 있는 시뮬레이션 기반 분석이 효과적이다(중간적 동의; 한대건 등, 2016; Park et al., 2019).

10.3.5 적응대책 이행 및 이행평가과정

「한국 기후변화 평가보고서 2014」에서는 국가 적응대책의 이행평가에 대한 논의는 제한적이었고, 2012년 수립 완료된 광역지자체에 대한 이행평가는 거의 없었기 때문에 이에 관한 관심이 필요하다고 기술하였다.

최근에는 제2차 국가 기후변화 적응대책의 실질적 효과에 대한 점검 및 성과 도출을 위해서 세부시행계획의 이행점검 및 평가, 평가결과의 정책 환류를 통한 수정·보완 등 이행점검이 강화되었다. 저탄소 녹색성장기본법 시행령에 따라 환경부는 세부시행계획 시행의 적정성 등을 확인하기 위하여 관계 중앙행정기관의 장에 대하여 매년 그 실적을 점검할 수 있으며 관계 중앙행정기관의 고위 공무원단에 속하는 공무원으로 구성된 협의체를 구성·운영할 수 있다(신지영, 2016). 이에 따라 국내 및 해외의 적응대책 사례를 검토하여 효과적인 적응대책을 위한 모니터링 지침이 마련되었고 (이승준과 이승한, 2015) 매년 이행평가가 이루어지고 있다.

기초지자체 수준의 이행평가는 현재까지 없으며 국가 및 광역 지자체 수준에서 세부추진과제의 현황을 파악한 바는 있다(신지영, 2016). 제1차 국가 기후변화 적응대책 이후 수립된 제2차 적응대책의 변화 파악 및 추적을 위한 기초자료를 제공하고 동시에 향후 수립되는 제3차 적응대책의 방향성 설정에 참고자료로 활용하고자 하였다. 총 341개의 세부추진과제의 인벤토리 구축 및 추진 관리와 현황을 파악하였다.

추진과제들의 점검 방법은 정량점검(이행집행 노력, 목표달성 노력)과 주요 실적 및 향후 계획에 따라 자체점검 후 주관부서에 제출 후 취합되어 환경부에 제출되었다. 제2차 국가 기후변화 적응대책 이행 모니터링 및 평가지원 결과 이행점검 및 평가 추진체계, 관계 중앙행정기관 자체점검 방향·절차·방법 및 중점관리과제 평가를 위한 100개 과제 선정, 평가 방향 및 기준, 관련 양식 등이 마련되었다. 이들에 대한 이행평가는 2017년에 도입된 평가요소 세분화(계획, 이행, 성과, 가점) 및 점수화로 더욱 체계적인 자체평가가 시행되었다(환경부, 2018). 특히 협력·소통 노력의 가점 부여, 대내외적 환경변화 대응 등을 추가하여 과제추진 노력 및 과제유형별 평가에 대한 유연성을 확보하였다.

중점과제 이행평가 결과를 살펴본 결과, 90% 이상의

표 10.7 정책방향별 세부과제 단위사업 전체 현황(신지영, 2016).

구분	과제 개수(개수, %)		과제 예산(억원, %)	
	개수	비율	예산	비율
방향 1. 과학적 위험관리	94	27.6	14,552.1	2.8
방향 2. 안전한 사회건설	46	13.5	188,262.2	36.0
방향 3. 산업계 경쟁력 강화	65	19.1	236,809.7	45.3
방향 4. 지속가능한 자연자원 관리	58	17.0	81,108.7	15.5
방향 5. 국내외 이행기반 마련	78	22.9	2,119.4	0.4
총계	341	100.0	522,852.1	100.0

과제의 이행수준은 '우수'로 평가되어 원활하게 추진된 것으로 확인되었다. 이행성과가 '미흡'으로 평가된 과제의 경우 '기후변화와 관련된 계획의 적절성 부족', 또는 '예산 집행률 저조' 등이 주요 원인으로 지적되었다(견고한 동의).

추후 운영이 미흡했던 적응협의회에 적응대책 이행성과 점검과 공유 등의 기능을 부여하여 실제 운영될 수 있도록 추진하고 이행결과에 따라 향후 3차 대책 수립에 참고할 수 있는 기초자료 마련·구축이 필요한 상황이다(중간적 동의; 신지영, 2016)

10.4 기후변화 적응대책 수립 시의 고려사항

「한국 기후변화 평가보고서 2014」에서는 다양한 주제와 이론을 바탕으로 적응대책 수립 관련 요인들이 제시되었다. 먼저, 2010년 저탄소녹색성장기본법 제정과 국가 기후변화 적응대책 수립, 중앙정부 및 광역지자체 적응대책 세부시행계획이 이루어지며 적응전략에 대한 연구가 본격적으로 시작되었다. 연구들은 계획수립 체계보다는 각 계획의 세부 내용을 구성하는 분석방법, 의사결정을 위한 자료, 거버넌스가 마련되어야 함을 강조하였다(중간적 동의). 기후변화 취약계층의 경우 비기후적 요인으로 인한 다차원적 불평등을 겪으며 적응능력의 한계로 기후변화 위험에 보다 쉽게 노출되고 더 많은 영향을 받을 우려가 있으므로 체계적인 지원이 필요하다고 하였다. 또, 감축과 적응 사이의 공편익에 대한 검토가 이론적 수준에 머물러 있어 적응대책 수립과정 등에서 이에 대한 충분한 검토가 필요하다고 기술하였다(제한적 동의). 마지막으로 지역에 적합한 적응대책을 수립하기 위해서는 각 지자체가 가진 물리적, 사회·경제적 현황, 기존 정책 및 적응능력을 우선 파악 및 평가해야 하며 이를 바탕으로 적응대책의 우선순위 및 자원배분 결정이 이루어져야 효과적인 적응대책 수립이 가능하다고 하였다(견고한 동의).

본 보고서에서는 취약계층에 대한 적응대책 수립관련 최근의 문헌연구와 지역적 특성이 강조된 공간계획에 대한 내용을 기술하였다. 또한, 지난 보고서에서 한계로 짚었던 적응과 감축의 상관관계에 대한 연구동향을 확인하였으며, 최종적으로 기후변화 적응대책 수립 시 고려해야 할 사항들을 정리하고 발전방향을 제시하였다.

10.4.1 기후변화 취약계층 영향과 대응

「한국 기후변화 평가보고서 2014」에서는 기후변화 취약계층은 비기후적 요인 등에 따른 다차원적 불평등, 적응능력의 한계로 인한 기후변화 위험에 쉽게 노출되어, 더 많은 영향을 받을 우려가 있으므로 체계적인 지원이 필요하다고 기술하였다. 정부는 국가기후변화 적응대책 등을 통해 저소득층 등 사회경제적 취약계층의 적응역량 강화를 위한 대책을 제시하였으며 관련 내용에 대한 시범적용 연구가 수행되었고(왕광익 등, 2012; 환경부, 2012; 환경부, 2013), 기후변화 적응과 관련된 취약계층 지원현황을 조사하였다(신지영 등, 2013).

표 10.8 기상이변 취약계층 지원 사업 개발 가이드북 구성 예시(하종식 등, 2014).

구분	내용
Ⅰ. 기상이변과 취약계층	·기후변화에 따른 기상이변 사례 및 국내 기상이변 현황 ·기상이변 취약계층 정의 및 기상이변별 취약계층 목록
Ⅱ. 기상이변 취약계층 지원 사업 개발 단계·방법	·기상이변 취약계층 지원 사업 개발 단계 ·단계별 상세 내용 및 원주시 사례
Ⅲ. 참고자료	·읽어볼 문서 (참고문헌 소개) ·유용한 사이트 ·기상이변별 기후변화 적응사업 사례

표 10.9 도시유형별 기상이변 취약계층(하종식 등, 2014).

영향	도시유형	취약계층
폭염	도시형	장애인, 독거노인가구, 자영업자, 축산업종사자, 야외근로자, 주거층 취약계층
	농어촌형	한부모가구, 차상위계층, 65세 이상 노인, 장애인, 자영업자, 축산업종사자, 시설/원예종사자, 비주택거주자, 주택난방 취약계층
가뭄	도시형	기초생활수급자, 장애인, 조손가구, 자영업자, 야외근로자, 저소득계층, 주거층 취약계층, 비주택거주자
	농어촌형	장애인, 독거노인, 65세 이상 노인, 자영업자, 축산업종사자, 어업종사자, 비주택거주자, 주택난방 취약계층
한파	도시형	독거노인가구, 기초생활수급자, 장애인, 자영업자, 축산업종사자, 야외근로자, 주거층 취약계층, 비주택거주자, 주택난방취약계층
	농어촌형	기초생활수급자, 독거노인, 차상위계층, 어업종사자, 자영업자, 축산종사자, 저소득계층, 주택난방 취약계층, 비주택거주자
폭설	도시형	기초생활수급자, 한부모가구, 장애인, 축산업종사자, 자영업자, 야외근로자, 주거층 취약계층, 비주택거주자
	농어촌형	기초생활수급자, 독거노인, 차상위계층, 어업종사자, 자영업자, 야외근로자, 비주택거주자, 주택난방 취약계층
태풍	도시형	장애인, 한부모가구, 조손가구, 독거노인가구, 자영업자, 축산업종사자, 야외근로자, 주거층 취약계층, 비주택거주자
	농어촌형	독거노인, 65세 이상 노인, 기초생활수급자, 어업종사자, 농업종사자, 시설/원에종사자, 비주택거주자, 주택난방 취약게층
집중호우	도시형	장애인, 한부모가구, 기초생활수급자, 자영업자, 축산업종사자, 야외근로자, 주거층 취약계층, 비주택거주자
	농어촌형	기초생활수급자, 차상위계층, 독거노인가구, 야외근로자, 자영업자, 어업종사자, 비주택거주자, 주택난방 취약계층

표 10.10 기후변화 적응역량 지표 및 지수 관련 선행연구(김오석 등, 2016).

명칭(기관, 년도)	평가지표(분야)	지표가중치	지수 산정방식
지자체 기후변화 적응능력 평가를 위한 지표체계 개발 및 시범적용 (이정호 등, 2010)	5개 영역/112개 평가지표 (적응)	적용 안 함	도출된 지표 항목과 데이터를 바탕으로 주성분분석 후 16개 시도를 대상으로 기후변화 영향 및 적응 순위 도출
기후변화 대응지표 개발 및 지수 산정 (강원도, 2011)	2개 영역/18개 평가지표 (완화, 적응)	동일 가중치 적용	모든 지표를 0에서 1사이의 값을 갖도록 표준화 하거나 지표점수를 구간별로 척도화한 후 점수를 부여, 평가결과는 3그룹으로 분류
기후변화 대응지수의 개발 (서울특별시)	2개 영역/49개 평가지표 (완화, 적응)	델파이 기법	-
지방자치단체 기후변화 대응 통합지수 개발 연구 (에너지경제연구원, 2010)	2개 영역/30개 평가지표 (완화, 적응)	분석적 계층화 방법	지표별 표준화를 통해 얻은 점수와 가중치 산정결과를 곱해 얻은 값을 모두 환산
광역지자체 기후변화 대응 평가지표 (녹색사회연구소, 2009)	7개 분야/46개 평가지표 (완화, 적응)	적용 안 함	지수별 점수 부여, 총 200점 만점으로 환산

이후에 수행된 취약계층 영향과 대응에 대한 연구에서는 지역사회 특성에 따른 지원 방향이 설정되어야 함을 강조하고 있다. 지역단위(기초지자체 단위)의 기후변화 적응대책은 지역사회의 특성을 고려한 단기적인 영향의 민감도 및 현 수준의 지역사회 적응능력을 고려해야 하며(하종식 등, 2014), 기후변화, 나아가 현 시점의 기상이변에 대한 취약계층의 지원·관리 체계와 관련된 직접적인 기후변화 영향 관리, 그리고 지역사회 주민의 실질적이고 다양한 서비스 제공에 중점을 두어야 한다(중간적 동의).

기후변화의 실질적 영향은 취약계층 특성에 따라 다르고, 이들에 대한 적절한 지원방안 역시 이에 따라 다르기 때문에 기후변화 취약계층을 선정하는 방법에 대한 연구가 수행되었다. 개인의 사회경제적 활동을 기후변화 영향에 대한 노출, 외부 충격에 대한 민감성, 그리고 영향에 대응할 수 있는 역량의 세 가지 기준으로 직무위험특성을 위험 비노출 직종(60개), 잠재적 위험 노출 직종(65개), 위험 노출 직종(24개)으로 구분하였으며, 최종 기후변화 취약 근로 직종으로 선정된 직종은 총 32개로 전체 직종의 21.5%에 해당하였다(김동현과 이헌영, 2014).

취약계층의 기후변화 영향을 줄이기 위하여 기후변화에 대응하는 능력, 즉 기후탄력을 강화하는 관리방안에 대한 연구 또한 진행되었다(환경부, 2016). 기후변화 취약계층

이용시설의 기후탄력 강화는 시설 본래의 기능을 유지할 수 있도록 하여, 기후의 불확실성에 대응하여 부정적 효과를 감소시키는 적응 활동이라 할 수 있다. 우리나라의 경우 기후변화라는 현상에 대한 인식은 높으나, 기후변화 적응이나 기후탄력이라는 개념은 생소하여 시설관리자의 자발적인 참여는 어려울 것으로 판단되었다(중간적 동의; 환경부, 2016).

10.4.2 지역별 기후변화 적응대책

「한국 기후변화 평가보고서 2014」에서는 공간계획에 있어서 기후변화 적응도시 모델 및 방법론, 그린인프라에 기초한 적응방안에 대해 기술하였다. 기후변화로 인한 외생적 조건의 변화를 공간계획에서 내재화하여 실질적 적응으로 나타날 수 있도록 하는 도시를 기후변화 적응도시로, 커뮤니티 차원의 적응 시나리오를 통합적으로 구성하여 참여에 기반한 의사소통적 계획과정 통해 수립되는 공간계획을 기후변화 적응형 공간계획으로 정의하였다(김동현 등, 2013). 더하여 그린인프라의 방재효과를 실증적으로 확인하여 도시계획 적응전략으로서의 효과를 입증하였다(강정은 등, 2012). 또한 지역에 적합한 적응대책을 수립하기 위해서는 각 지자체가 가진 물리적, 사회·경제적 현황, 기존 정책 및 적응능력을 우선적으로 파악할 필요가 있고, 이에 대한 평가를 바탕으로 적응대책의 우선순위 및 자원배분 결정이 이루어져야 한다고 기술하였다. 적응대책 선정을 위해 설문조사, 취약성 평가도구, 취약성 분석, DPSIR 체계 등을 활용하고 있었으며, 지자체 적응능력 평가를 위한 지표 개발 연구에서는 적응의 시급성과 미래 적응전략 수립의 용이성 등을 고려한 평가지표를 이용하여 적응대책의 우선순위를 제시하였다(이정호 등, 2010).

공간별로 취약성과 리스크가 다르게 나타나고 적응능력 또한 공간, 계층, 지역에 따라 달라지기 때문에 공간 맞춤형 연구가 수행되어야 한다(견고한 동의; 김동현 등, 2014). 공간에 따라 상이한 적응대책 수립이 이루어져야 하며, 공간계획에서의 기후변화 적응을 위해 적응과 지역 발전의 개념이 통합된 접근방법이 필요하다(김동현 등, 2014). 기후변화 적응을 위해 개발된 공간계획 방법을 실제 커뮤니티에 모의 적용하여, 대상 지역의 지역자원을 발굴하고 공간의 맥락을 파악하였다. 실제로 장소 중심적 접근이 기후변화 적응의 이행성과 효과를 높인다는 근거가 속속들이 제시되고 있다(김동현 등, 2014). 특히, 커뮤니티를 중심으로 지역발전과 공동체 사업, 물리적 개선사업, 안전 및 기후변화 적응의 통합되는 계획의 수립을 위해서는 주민과 새로운 대안적 조직이 중심이 된 틀이 필요하다(김동현 등, 2014). 이외에도 국가 단위의 공간 리스크를 평가한 연구(박창석 등, 2014)에서는 국토공간 리스크 평가항목을 개발하고 평가를 수행하여 지역 유형별 적응형 공간 관리 전략을 제시하였다. 연구에서는 도시를 구성하는 주된 토지이용에 따라서, 도시유형을 공업지역·상업지역·혼합용도지역·주거지역·녹지지역으로 구분하고 이외에 농촌지역까지 더하여 서로 다른 관리방안을 제시하였다.

또한 도시의 기후탄력 평가결과는 그 유형과 수준을 고려한 적응계획 수립에 중요 정보로 활용될 수 있다(제한적 동의; 김동현 등, 2016). 단기적 회복력의 측면에서 2000년, 2005년, 2010년의 기초지자체 회복력 비교평가를 진행한 결과 우리나라 도시들의 기후변화 회복력은 지역별, 도시 기능별로 전혀 다른 양상을 보였다(김동현 등, 2016). 대도시권에서는 인구와 경제활동의 집중으로 주택, 범죄 관련 사회적 안전성이 낮게 나타났으며 환경적 문제 또한 존재하여 기후탄력을 위해 사회/환경 전반의 강화가 요구되었다. 도시를 구성하는 다양한 요인들의 회복력이 감소하였고 (김동현 등, 2016), 특히 도시를 구성하는 개인의 정보와 지식을 재생산하는 사회적 교류 활동의 다양성이 감소하였다. 또한, 토지이용 형태에 따라 도시의 서비스를 제공받는 집단이 수도권과 대도시를 중심으로 형성되어 고용구조가 양극화되는 등 지역의 고용시장의 구조적 특성으로 인한 취약계층문제가 더욱 심화되었다(김동현 등, 2016).

공간적 특성에 따라 지역의 특성이 다르게 나타나므로 그에 대한 적응 방안은 다르게 만들어질 필요가 있다(견고한 동의). 국내 폭염 연구들의 대부분은 공간 단위에 따른 취약성을 평가하였으며, 취약성의 구성요소인 적응능력에 대해서는 행정구역 단위를 적용하였다. 대부분의 적응전략 수립 연구는 적응능력이 상대적으로 가장 낮은 지역이 아닌 기후변화 취약지역에 대한 적응능력 향상 전략을 제시하고

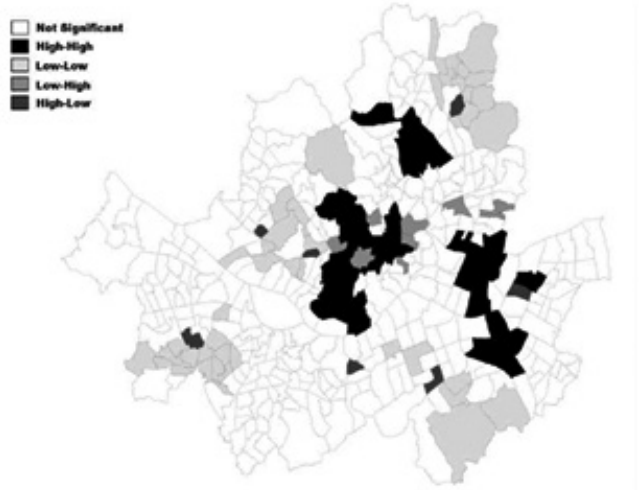


그림 10.4 서울 지역의 폭염 취약성에 대한 공간군집 패턴 분석결과(최예술 등, 2018).

표 10.11 기후변화 적응역량 평가지표 및 자료(김동현과 강정은, 2016).

명칭(기관, 년도)	세부지표	측정지표	방향	통계자료	제공기관
개인에 내재된 적응역량	학력	대졸이상 비율(전체인구 대비)	+	인구주택 총조사	통계청
	문맹률	비문해율	-	국민의 기초문해력 조사	통계청
	인터넷 사용	인터넷 이용률	+	인터넷이용 실태조사	통계청
	인구학적 구조	60세 이상 인구비율	-	인구주택 총조사	통계청
사회적 관계에 기반한 적응역량	자원봉사	자원봉사활동 참여 비율	+	사회조사	통계청
	참여정도	단체 참여정도(사회 및 민단단체)	+	사회조사	통계청
	멤버십	기부 및 후원 비율	+	사회조사	통계청
	부패정도	부패인식지수(투명정도)	-	부패인식지수	국제 투명성 기구
	인터넷 사용	커뮤니케이션 목적의 인터넷 사용 비율 (블로그, 소셜네트워크 커뮤니티 등)	+	인터넷이용 실태조사	통계청
	커뮤니티 참여	지역사회 모임 참여 비율	+	사회조사	통계청
자연 및 물리적 조건에 기반한 적응역량	목초지(식생지대) 비율	녹지면적(전체면적대비)	+	LH도시정보부 통계	통계청
	자연 및 생태관련 구조물	하천 구조물 면적비(하천면적 대비)	+	국토해양부 지적기획과	통계청
	공원녹지비율	공원녹지비율(개발면적 대비)	+	국토해양부 지적기획과	통계청
	산림면적	산림면적(녹지면적 대비)	+	산림기본통계	통계청
	수자원 이용	상수도 보급률	+	환경부 수도정책과	통계청
	지하수 개발정도	지하수 이용비율(총 상수도 이용량 대비)	-	국토해양부 건설수자원실	통계청
경제적 상태에 기반한 적응역량	가구의 총 자산규모	가구별 자산총액(평균)	+	가계금융조사	통계청
	가구의 현금 수입	가구별 경상소득(2010년 기준)	+	가계금융조사	통계청
	1인당 GDP	1인당 국내 총 생산	+	국민계정	통계청
	부양인구비율	인구부양비	-	인구주택 총조사	통계청
	빈곤계층	지니계수	-	국제통계	통계청
	산업다양성	제조업 특화지수	-	사업체 총조사	통계청
제도에 기반한 적응역량	관련정책의 통합 및 조정능력	업무상 공무원 협조 관계정도	+	정부 간 관계 인식조사	한국행정연구원
	법의 지배 정도	사회의 공정성에 대한 인식정도	+	사회조사	통계청
	정부 서비스 정도	공무원 1인당 담당 인구 수	+	행정안전부 인사통계	통계청

있어, 적응능력 향상 필요 지역과 매칭이 잘 되고 있지 않다(최예술 등, 2018). 서울 지역에 대하여 폭염 취약지역의 공간적 분포를 분석하고, 폭염 적응형 공간계획을 수립한 연구(최예술 등, 2018)에 따르면, 폭염에 더 취약한 지역의 경우 기후노출과 민감도 수준은 높은 반면 무더위쉼터, 의료시설 등 폭염 취약성을 경감시킬 수 있는 적응능력 수준은 낮은 경우가 많았으며(최예술 등, 2018),

이들 결과로 도출된 취약성평가 결과를 바탕으로 지역별(행정동) 환경적 특성에 맞는 선택적 대응정책 수립이 필요하다고 하였다. 적응능력 평가 관련 IPCC에서 제시된 방법론은 우리나라에 바로 적용하기에는 한계가 있으며, 특히, 지수 적용 시 지역적 특성 맞춤형 가중치의 설정이 중요하다(김오석 등, 2016).

따라서, 지역적 특성에 맞는 대응정책 수립을 위해 도시계획시설과 용도지역지구제 등에 제도적 방안을 함께 고려하여, 장기적인 적응대책 마련을 하여야 한다(중간적 동의). 이를 위해 공간계획이 마련되어야 하며, 지구단위계획상에서 반영되어야 한다. 지자체별 특성에 따라 지구단위계획 수립 가이드라인이 작성되는 것도 가능하다. 결론적으로 지자체의 기후변화 적응대책은 지역 유형별로 다르게 진단되는 상태를 고려하여 수립되어야 하며, 세분화된 공간 단위에서 기후변화 영향·도시공간의 형태를 분석해야만 성공적인 공간계획을 수립할 수 있다(김동현 등, 2016).

10.4.3 감축과 적응 상호관계 분석

「한국 기후변화 평가보고서 2014」에서는 감축과 적응 사이 공동편익에 대한 검토가 이론적 수준에 머물러 있어 적응대책 수립 과정 등에서 이에 대한 충분한 검토가 필요하다고 기술하였다. 적응과 완화 사이에, 그리고 서로 다른 적응 대상 사이에 공동편익, 상승효과 및 상충(trade-off)이 존재할 수 있다. 기후변화 완화 및 적응정책의 통합은 시너지 효과가 있는 정책을 우선으로 추진하되, 완화와 적응에 모두 부정적이거나 완화와 적응이 서로 상충되는 정책은 사전조정이 바람직하다고 기술하였다(고재경, 2011; 고재경, 김희선, 2013).

완화 또는 적응전략으로 분리되어 진행되던 기후변화 대응 논의는 2010년대에 들어서며 두 전략 간 연계성을 바탕으로 한 통합적 대응체제가 강조되면서 보다 활발한 연구가 이루어지고 있다. 우리나라의 국가기후변화 대응체계 역시 이러한 기조로 수정되어, 기후변화대응 기본계획에서는 감축과 적응의 두 부분을 통합적으로 고려하고 있다. 감축과 적응 상호관계로 인한 효과와 그 타당성에 대한 연구(황인창과 김대수, 2017; 김청일과 오윤경, 2018)가 진행되고 있으나, 실제로 이러한 두 측면을 모두 고려한 지역 기반 적용사례 혹은 관련 연구는 미진하기 때문에 앞으로 추가 연구될 필요가 있다(견고한 동의).

감축정책과 적응정책은 별개로 시행할 경우 상쇄효과가 발생할 수 있는 반면, 연계해서 시행할 경우 공편익이 발생할 수 있기 때문에(황인창과 김대수, 2017) 온실가스 감축과 기후변화 적응의 효과적인 연계를 위해서는 상호 편익을 강조하는 전략과 정책이 수립될 수 있도록 지원하는 분석 도구의 개발이 필요하다(견고한 동의). 감축과 적응정책은 서로 상보적인 성격을 가지고 있어 이들 간 균형을 조정하는 것이 중요한데, 감축과 적응조치가 가지는 효과에 따라서 정책을 구분한 연구(최준성, 2016)에 따르면 긍정적인 시너지, 긍정적 완화와 적응 효과가 기대되는 정책들은 더욱 확대하여 추후 갈등요인에 대비하는 것이 필요하고, 부정적인 시너지, 상쇄, 그리고 부정적 완화와 적응 효과가 기대되는 정책들은 긍정적인 효과로 전환되도록 조정하여야 한다.

완화 전략이 비용 효율성과 기술 혁신 등을 중심으로 온실가스 배출 저감을 목표로 하는 전략인 반면, 적응 전략은 지역 중심의 회복력 강화 전략 등을 포함한다(김청일과 오윤경, 2018). 완화와 적응전략에 관한 연구들이 서로 상호보완적 특성을 지니고 있는 만큼 각 분야의 연구를 연계할 수 있는 융복합 연구를 통해 통합적 정책대안이 마련될 필요가 있다. 연구들의 키워드를 분석하였을 때, 완화 전략의 경우 주로 정량화가 가능하고 과학기술적, 경제적 관점에서 기후변화에 사전적으로 대응하는 내용의 키워드가 주로 나타났다. 예를 들어, 온실기체, 배출, 감소, 에너지, 기술, 비용과 연관된 키워드는 정량적인 분석과 관리를 할 수 있는 완화 부분이다. 적응전략의 경우 기후변화 영향에 대한 사후적 대응 수단으로, 정성적 개념의 키워드가 많이 사용되었다(김청일과 오윤경, 2018). 적응에서는 물관리, 위험, 취약성, 수용력, 회복력 등과 연관된 키워드가 주로 나타나

지역 수준을 나타내는 키워드와 함께 거버넌스, 전략, 계획 등 정책 및 사회과학적 관점의 단어가 많이 등장하였다 (김청일과 오윤경, 2018).

10.4.4 기후변화 적응전략 발전방향

「한국 기후변화 평가보고서 2014」에서는 저탄소녹색성장 기본법 제정과 국가기후변화적응대책 수립 이후 적응관련 연구들이 충분히 수행되지 않은 상태에서, 향후에 적응전략 발전을 위해서 검토되어야 하는 부분들을 몇 가지로 기술하였다. 정리하면 기후변화에 따른 사회경제적 영향, 그리고 적응의 경제학적 분석과 이행평가체계 및 모니터링에 대한 연구, 리스크 평가지표와 평가체계, 취약계층과 취약지역 적응형 공간개발에 대한 연구, 적응인식 제고와 적응행동, 거버넌스 구축, 그리고 감축과 적응의 연계수단과 기후회복 경로에 관한 연구들이다.

최근에는 기후변화 적응 연구와 실제 적용에 있어 중요한 부분 중 하나로서, 적응은 수동적으로 수행될 수 있는 것이 아니라 지역사회의 이해관계자들의 관심과 의견이 모여 적극적으로 이행될 때에 가능하다는 것이다(중간적 동의). 이를 위해서는 정부기관에서부터 시작되는 하향식(Top-down) 적응계획 수립 과정, 지역과 시민단체에서부터의 상향식(Bottom-up) 의견수렴 과정, 그리고 각 전략과 대책별 정량적·과학적 효과를 통합하여 적응대책을 수립하여야 하며, 그 과정에서 다양한 이해관계자들을 설득할 수 있는 타당성을 확보할 수 있다(견고한 동의). 이를 위해서는 대외에서도 지속적으로 공유하고 참여할 수 있는 참여의 장(포럼)이 마련되어야 하며, 환경부의 조정(coordination) 역할이 강화될 필요가 있다(송영일 등, 2018).

적응계획의 이행과정에서 환류과정은 과학적 정보수집에서 이행평가에 이르는데, 적응의 특성상 지역 기반의 대응이 될 수 있도록 지자체장 혹은 지역정부의 관심 속에서 보다 적극적으로 수립될 때에 효과적으로 이행될 수 있다(유정민과 윤순진, 2015b). 그러나 이행평가 모니터링 등에 대한 제도적 기반과 관련 연구가 미흡함이 지적되었으며 (윤시웅 등, 2018), '국가—광역—기초' 간의 협의와 조정과정을 통해서 환류체계의 반영이 강조되었다. 위계적인 상위-하위계획 간 관계에서뿐만 아니라, 지역 적응계획에서 지역의 다양한 이해관계자의 의견이 반영될 수 있도록 하는 환류체계가

표 10.12 IPCC WG II 의 AR5와 AR6의 목차 구성 변화(IPCC(2014), IPCC(2017) 참고하여 저자작성).

	IPCC AR5		IPCC AR6	
1장	Part A: 국제적 및 부문별 특성	서론	Section 1: 기후변화의 영향을 받는 시스템의 리스크, 적응 및 지속가능성	서론
2장		의사결정을 위한 기반		국토연안 및 담수 생태계 및 서비스
3장		담수 자원		해양 및 해안 생태계 및 서비스
4장		국토연안 물관리		물
5장		해안 및 저지대 지역		식량, 섬유 및 기타 생태계 제품
6장		해양 시스템		도시, 정주지 및 주요 인프라
7장		식품 안전 및 생산 시스템		건강, 복지 및 지역사회의 구조변화
8장		도시 지역		빈곤, 생계 및 지속가능발전
9장		농촌 지역	Section 2: 지역	아프리카
10장		주요 경제분야 및 서비스		아시아
11장		건강: 영향, 적응 및 상승효과		오스트랄라시아
12장		인간 안보 생계와 빈곤		중남미
13장		생계와 빈곤		유럽
14장		적응 니즈 및 옵션		북미
15장		적응 계획 및 이행		군소도서
16장		적응 기회, 제약 및 한계	Section 3: 지속가능발전 경로: 적응 및 완화 통합	부문별 지역별 주요 리스크
17장		적응 경제		리스크 관리를 위한 의사결정
18장		관찰된 영향의 탐지 및 분석		기후탄력 발전 경로
19장		리스크 및 주요 취약점		
20장		기후탄력성 경로: 적응, 완화 및 지속가능발전		
21~30장	Part B: 지역 특성			

있어야만 더욱 효과적인 적응계획 이행 역시 가능하다(제한적 동의; 유정민, 윤순진, 2015b). 이외에도 정부 주도하의 거버넌스 운영체제 운영, 정책평가와 이행 평가를 감독·관리할 수 있는 기후변화 자문기구 구성, 지역 들이 참여하는 종합평가제도 도입 등의 방안을 통해 효율 적으로 적응 이행역량을 향상할 수 있다(김진영 등, 2019).

또한, 적응전략의 설득력을 높이고 관련자들의 조정과 이행 추진을 원활하게 하기 위해서는 최종목표부터 부문과 정책, 사업단위에 이르기까지 각 내용과 전체 구조의 구성이 보다 간단하고 명확해야 한다(최준성, 2014). 그중에서도 명확한 목표와 전략은 지속적이고 일관성 있게 수립되어야 하며, 이들 정보를 가이드라인 등 다양한 방식으로 시민과 사회에 공유하고 장려하는 것이 중요하다(강정은,, 2014). 지속적인 전달과 모니터링, 평가과정이 맞물려 돌아갈 때 실제로 지역에 적응효과를 가져다주는 전략을 수립하고 실천할 수 있다.

특히, 2019년 10월에 관계부처합동으로 작성한 제2차 기후변화대응 기본계획에서는 국민 모두가 함께 참여하는 기후변화 대응 주류화 실현을 기후변화 적응의 기본방향으로 세워졌다(관계부처합동, 2019). 이를 위해서는 국민 각자가 기후위기의 심각성을 이해·인식하고 스스로 적응의 주체로서 행동할 수 있도록 제도 설계가 필요함이 강조되었다. 따라서 이러한 제도 설계를 위한 체계연구와 정책의 과학적 근거가 될 연구가 지속적으로 필요할 것이다.

2021년 4월 IPCC WGI의 평가보고서(Assessment Report, AR) 출간을 시작으로, 2021년 7월에는 WG III 보고서, 2021년 10월에는 WG II 의 보고서를 포함한 IPCC의 새로운 보고서인 AR6가 발간될 예정이다. 기후변화의 국제트렌드를 선도하는 IPCC의 새로운 평가보고서의 합의된 목차를 참고했을 때, 앞으로 우리나라의 적응계획 연구는 지역특성을 고려한 과학 기반의 평가를 수행하고, 의사결정에 적극적으로 활용하는 데 중점을 두어야 할 것이다.

10.5 참고문헌

강영은, 신지영, 박창석, 2016a: 텍스트마이닝을 활용한 우리나라 기후변화 리스크 평가 및 적응 대책 논의, *한국도시설계학회지 도시설계*, 17(2), 69-84.

강영은, 안윤정, 박창석, 2016b: 기후변화 적응 전략 중요도 분석 및 유형화, *환경정책*, 24(1), 243-262.

강정은, 배현주, 최희선, 이명진, 강윤원, 엄정희, 박재철, 2012: 기후변화 적응형 도시구현을 위한 그린인프라 전략 수립, 한국환경정책·평가연구원.

강정은, 2014: 주민참여기반 기후변화적응형 공간계획방법의 모의적용, 한국환경정책·평가연구원.

강희정, 2014: 천연가스 산업의 기후변화 적응대책에 대한 연구, *한국경영공학회지*, 19(1), 93-103.

고인철, 백종인, 홍나은, 반용은, 2018: 효율적 리스크 관리를 위한 기후변화 리스크 발생가능성 및 영향 특성 분석, *한국위기관리논집*, 14(1), 77-88.

고재경, 2011: 기후변화 완화와 적응정책 통합방안 연구, 경기개발연구원.

고재경, 김지현, 2011: 지방공무원들은 기후변화 적응정책의 필요성을 인식하고 있는가?, *도시행정학보*, 24(3), 51-72.

고재경, 김희선, 2013: 기후변화 완화와 적응 통합에 관한 시론적 연구, *환경정책*, 21(1), 29-59.

고재경, 이우평, 2016: 기후변화 적응 행동 촉진 요인 연구, *환경정책*, 24(2), 109-136.

고재경, 2018: 정책통합 관점에서 본 지방자치단체 기후변화 정책 변화 연구, *IDI 도시연구*, 14, 7-47.

곽소윤, 이창훈, 2015: 2015 국민환경의식조사 연구, 한국환경정책·평가연구원.

곽소윤, 이창훈, 임용빈, 2016: 2016 국민환경의식조사 연구, 한국환경정책·평가연구원.

관계부처합동, 2008: 국가기후변화적응종합계획.

관계부처합동, 2010: 국가기후변화적응대책(2011~2015).

관계부처합동, 2011: 국가기후변화적응대책(2011~2015) 세부시행계획.

관계부처합동, 2012: 기후변화 신시나리오 반영 국가기후변화적응대책 수정·보완.

관계부처합동, 2013: 국가기후변화적응대책(2013~2015) 세부시행계획.

관계부처합동, 2015: 제2차 국가기후변화적응대책(2016~2020).

관계부처합동, 2016: 제1차 기후변화대응 기본계획.

관계부처합동, 2019: 제2차 기후변화대응 기본계획.

국가기후변화적응정보포털, 2020: https://kaccc.kei.re.kr/, 국가기후변화적응센터.

국립환경과학원, 2012: 지자체 기후변화 적응세부시행계획 수립 지원을 위한 기후변화 부문별 취약성 지도.

김기주, 서승범, 김영오, 2019: 협의체 기반 가뭄 대응 대안 도출과 비전공유모형의 역할, *한국수자원학회지*, 52(6), 429-440.

김동원, 2018: 기후변화 적응분야를 포섭하기 위한 국제개발협력진영의 전략과 이론: 취약성 감소를 위한 사회적 모형의 제안, *한국조직학회보*, 15(1), 53-73.

김동현, 이수재, 이명진, 서혜정, 2013: 기후변화 적응형 공간계획방법의 개발과 모의적용 연구(Ⅰ), 한국환경정책·평가연구원.

김동현, 이정호, 이명진, 서혜정, 정주철, 강정은, 김종성, 2014: 기후변화 적응형 공간계획방법의 개발과 모의적용 연구(Ⅱ), 한국환경정책·평가연구원.

김동현, 이헌영, 2014: 기후변화 취약 근로 직종 파악을 위한 기초연구, 한국환경정책·평가연구원.

김동현, 강정은, 2016: 니즈평가 기법을 활용한 기후변화 적응역량 평가, *환경정책*, 24(3), 51-72.

김동현, 송슬기, 강상준, 권태정, 김진오, 남기찬, 윤동근, 이동근, 정주철, 조성철, 홍사흠, 2016: 도시의 기후회복력 확보를 위한 공간단위별 평가체계 및 모형 개발(Ⅱ), 한국환경정책·평가연구원.

김오석, 한기주, 김걸, 2016: 광역지자체별 기후변화 적응역량 평가를 위한 지수분석, *한국지도학회지*, 16(3), 115-127.

김진아, 윤순진, 2014: 광역지자체의 기후변화 적응계획 평가: 계획요소와 수립과정을 중심으로, *한국사회와 행정연구*, 25(2), 29-51.

김진영, 김미숙, 김도용, 2019: 기후변화적응을 위한 효율적 정책방안에 관한 국외사례분석, *한국환경기술학회지*, 20(1), 1-7.

김청일, 오윤경, 2018: 기후변화 대응정책 방향 모색을 위한 연구동향 분석: 완화(mitigation)와 적응(adaptation) 전략을 중심으로, *한국행정논집*, 30(3), 577-599.

문성원, 2016: 기후변화와 심리적 적응: 심리적 반응, 적응, 예방, *한국대기환경학회지*, 32(3), 237-247.

박두선, 박보영, 정은화, 2017: VESTAP 기반 기후변화 취약성 평가 지침, *한국기후변화학회지*, 8(4), 339-346.

박창석, 송영일, 이정호, 명수정, 조광우, 채여라, 김동현, 정휘철, 하종식, 이승준, 신지영, 이명진, 정선희, 권영한, 김유정, 이승한, 2014: 제2차 국가기후변화적응대책 수립방안 연구, 환경부.

박창석, 송영일, 강영은, 안윤정, 문태훈, 김동환, 변병설, 박지영, 이동성, 정수영, 김수영, 조동인, 2015: 기후환경 리스크 전망과 국가전략(II), 한국환경정책·평가연구원.

반영운, 고인철, 백종인, 2017: 기후변화 적응에 대한 공무원 및 도민의 인식 비교 분석 - 충청북도를 중심으로 -, *지역연구*, 33(4), 19-28.

방강임, 신동훈, 2016: 신문기사를 활용한 초등학교 기후변화 교육 방안 탐색, *에너지기후변화교육*, 6(1), 65-80.

배재현, 2010: 지방정부의 네트워크 거버넌스에 관한 연구 : 부산시 하천환경개선 사업을 중심으로, *행정논총*, 48(3), 195-221.

송영일, 장훈, 박창석, 이병국, 심창섭, 김시현, 하혜민, 2018: 기후변화 적응 부문별 전문가 포럼, 한국환경정책·평가연구원.

신지영, 임영신, 홍남희, 김나영, 배채영, 2013: 기후변화 적응관련 취약계층 지원현황 및 분석 연구, 한국한국환경정책·평가연구원.

신지영, 이승한, 배채영, 김동현, 황인창, 이명진, 정선희, 최영웅, 정은화, 강주연, 송지윤, 손승우, 김진형, 2016: 제2차 국가기후변화적응대책 세부시행계획 수립 및 이행지원, 한국환경정책·평가연구원.

안소은, 김현노, 전호철, 김충기, 서양원, 배현주, 곽소윤, 윤태경, 김진옥, 이홍림, 조윤랑, 박윤선, 지선우, 박주영, 이창훈, 문난경, 전호철, 정다운, 하종식, 강형식, 이승준, 2017: 환경·경제 통합분석을 위한 환경가치 종합연구: 2017 국민환경의식조사 연구, 한국환경정책·평가연구원.

안소은, 김현노, 전호철, 이홍림, 서양원, 정다운, 김충기, 이승준, 김진옥, 윤태경, 2018: 환경·경제 통합분석을 위한 환경가치 종합연구: 2018 국민환경의식조사 연구, 한국환경정책·평가연구원.

오관영, 이명진, 한도은, 2016: 기초 및 광역지자체 기후변화 취약성 평가를 위한 웹기반 지원 도구(VESTAP) 개발, *한국지리정보학회지*, 19(1), 1-11.

왕광익, 정윤희, 이진희, 박근현, 2012: 기후변화 취약계층을 위한 녹색도시정책 연구, 국토연구원.

유정민, 윤순진, 2015a: 런던과 뉴욕 기후변화 적응정책의 제도화와 거버넌스 구조에 대한 비교 연구, *사회과학연구*, 26(3), 217-247.

유정민, 윤순진, 2015b: 전환적 기후변화 적응에 대한 비판적 고찰: 가능성과 한계, *환경정책*, 23(1), 149-181.

윤선권, 조재필, 2015: CMIP5 GCMs의 근 미래 한반도 극치강수 불확실성 전망 및 빈도분석, *한국수자원학회 논문집*, 48(10), 817-830.

윤수향, 이상신, 2017: 기후변화 취약성 평가 분석도구 개발에 관한 연구- 충남지역 산불 취약성을 중심으로, *한국기후변화학회지*, 8(3), 275-285.

윤지웅, 윤영석, 김영오, 2017: 지방자치단체의 기후변화정책 효과 인식에 관한 연구 - 물관리정책 효과 인식의 계층요인 영향을 중심으로 -, *한국정책학회보*, 26(4), 349-377.

이승준, 이승한, 2015: 기후변화 적응 모니터링 지침 마련, 환경부.

이승준, 최상희, 임채욱, 정재동, 2017: 기후변화의 부정적 영향에 따른 손실과 피해 대응방안, 한국환경정책·평가연구원.

이정호, 김호석, 강정은, 안재은, 백경혜, 2010: 지자체 기후변화 적응능력 평가를 위한 지표체계 개발 및 시범적용, 한국환경정책·평가연구원.

임영신, 빈슬지, 유소현, 2016: 지자체 기후변화 적응대책 실효성 및 적응능력 강화 지원, 환경부.

정원희, 조일형, 서인석, 2015: 농업 기후변화 적응성 구축을 위한 사업 우선순위분석, *한국위기관리논집*, 11(11), 199-223.

정윤지, 하종식, 2015: 일반국민 및 이해관계자의 기후변화 적응 인식 비교 연구, *한국기후변화학회지*, 6(2), 159-166.

최예술, 김재원, 임업, 2018: 서울시 폭염 취약지역의 공간적 패턴 및 적응능력 취약지역 분석, *국토계획*, 53(7), 87-107.

최준성, 2014: 기후변화 대응계획 도시사례 비교연구: 창원시와 포틀랜드시를 대상으로, *한국산학기술학회 논문지*, 15(1), 539-546.

최준성, 2016: 국내 기후변화시범도시 기후변화대응계획의 완화와 적응영향 분석, *대한건축학회논문집*, 32(12), 127-136.

하종식, 송영일, 박창석, 명수정, 신용승, 임영신, 빈슬지, 2014: 기후변화 취약계층 지원·관리 체계화, 한국환경정책·평가연구원.

한대건, 최창현, 김덕환, 정재원, 김정욱, 김수전, 2016: 기후변화 대응을 위한 경안천 유역의 홍수저감 대안 선정, *한국습지학회지*, 18(2), 154-165.

현정희, 김지연, 윤석환, 박채연, 정휘철, 정태용, 이동근, 2019: 적응경로 기반 지자체 기후변화 적응대책 강화를 위한 의사결정 지원 전략, *한국기후변화학회지*, 10(2), 89-102.

환경부, 2012: 기후변화적응정책 평가 및 인벤토리 구축: 기후변화 취약지역 및 취약계층 실태조사.

환경부, 2013: 기후변화 취약계층 적응대책 개발 및 시범적용 연구.

환경부, 2014a: 기초지자체 기후변화 적응대책 세부시행계획 수립 가이드라인.

환경부, 2014b: 한국 기후변화 평가보고서 2014 - 기후변화 영향 및 적응.

환경부, 2016: 기후변화 취약계층 이용시설의 기후회복력 강화 방안.

환경부, 2018: 제2차 국가기후변화적응대책 이행 모니터링 및 평가 지원, 한국환경정책·평가연구원, 국가기후변화 적응센터.

황인창, 김대수, 2017: 온실가스 감축-기후변화 적응 정책 연계의 타당성 및 기대효과, *한국정책학회보*, 28(4), 295-311.

Choe, H. and J. H. Thorne, 2019: Climate exposure of East

Asian temperate forests suggests transboundary climate adaptation strategies are needed, *Climatic Change*, 156(1-2), 51-67.

Choi, D., D. O. Kasdan, and D. K. Yoon, 2019: Analyzing Disaster Loss Trends: A Comparison of Normalization Methodologies in South Korea, *Risk Analysis*, 39(4), 859-870.

Huh, T., Y. Park, and J. Y. Yang, 2017: Multilateral Governance for Climate Change Adaptation in S. Korea: The Mechanisms of Formulating Adaptation Policies, *Sustainability*, 9(8), 1364.

Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), 2014, Climate Change 2013: The Impacts, Adaptation and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, M.L. Parry, O.F. Canziani, J.P. Palutikof, P.J. van der Linden and C.E. Hanson (eds), Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.

Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), 2017: Decision adopted by the Panel at the 46th Session of the IPCC, Montreal, Canada, 6-10 September 2017. https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/03/AR6_WGII_outlines_P46.pdf

Jeong, H., H. Seo, and H. Kim, 2018a: Game Theory-Based Analysis of Decision Making for Coastal Adaptation under Multilateral Participation, *Journal of Management in Engineering*, 34(6), 04018034.

Jeong, H., S. Ha, H. Kim, 2018b: Flood Protection Cost Allocation Using Cooperative Game Theory for Adapting Infrastructure to Climate Change, *Journal of Water Resources Planning and Management*, 144(4), 04018010.

Kang, J. E., D. K. Yoon, and J. Rhee, 2015: Factors contributing to business actions in response to climate change in Korea, *Journal of Risk Research*, 20(3), 385-403.

Kang, Y. and C.-S. Park, 2018: A Multi-Risk Approach to Climate Change Adaptation, Based on an Analysis of South Korean Newspaper Articles, *Sustainability*, 10(5), 1596.

Kang, W., J. H. Thorne, G. Kim, D. Lee, and Y. Song, 2019: Conserving terrestrial linkages that connect natural landscapes of the Korean Peninsula, *Environmental Monitoring and Assessment*, 191, 385.

Kim, D. and J. E. Kang, 2016: Integrating climate change adaptation into community planning using a participatory process: The case of Saebat Maeul community in Busan, Korea, *Environment and Planning B: Urban Analytics and City Science*, 45(4), 669-690.

Kim, D. and S.-K. Song, 2018: Measuring changes in urban functional capacity for climate resilience: Perspectives from Korea, *Futures*, 102, 89-103.

Kim, K. and J.-S. Kim, 2018: Economic Assessment of Flood Control Facilities under Climate Uncertainty: A Case of Nakdong River, South Korea, *Sustainability*, 10(2), 308.

Kim, K., T. Park, S. Band, and H. Kim, 2017: Real Options-Based Framework for Hydropower Plant Adaptation to Climate Change, *Journal of Management in Engineering*, 33(3), 04016049.

Lee, J.-S. and J. W. Kim, 2018: Assessing Strategies for Urban Climate Change Adaptation: The Case of Six Metropolitan Cities in South Korea, *Sustainability*, 10(6), 2065.

Lee, T. and M. Painter, 2015: Comprehensive local climate policy: The role of urban governance, *Urban Climate*, 566-577.

Min, D., H.-S. Chon, and H. Im, 2019: A DEA Model for Using Qualitative Data to Rank Options for Adapting to Climate Change, *Industrial Engineering & Management Systems*, 18(2), 260-273.

Moon, T. H., D.-H. Kim, C. S. Park, and D.-S. Lee, 2017: Policy Analysis to Reduce Climate Change-Induced Risks in Urban and Rural Areas in Korea, *Sustainability*, 524.

Oh, K.-Y., M.-J. Lee, and S.-W. Jeon, 2017: Development of the Korean Climate Change Vulnerability Assessment

Tool (VESTAP)—Centered on Health Vulnerability to Heat Waves, *Sustainability*, 9(7), 1103.

Park, C. Y., D. K. Lee, and J. H. Hyun, 2019: The Effects of Extreme Heat Adaptation Strategies under Different Climate Change Mitigation Scenarios in Seoul, Korea, *Sustainability*, 11(14), 3801.

Suh, J., 2015: Adaptive Approach to Water Resources Management in Korea, *Korean Public Management Review*, 29(4), 51-85.

VESTAP, 2018, https://vestap.kei.re.kr/, KACCC

World Bank, 2010: The Economics of Adaptation to Climate Change, Synthesis Report, Washington, D.C.

Yoon, E. J., D. K. Lee, H. G. Kim, H. R. Kim, E. Jung, and H. Yoon, 2017: Multi-Objective Land-Use Allocation Considering Landslide Risk under Climate Change: Case Study in Pyeongchang-gun, Korea, *Sustainability*, 9(12), 2306.

Yoon, E. J., J. H. Thorne, C. Park, D. K. Lee, K. S. Kim, H. Yoon, C. Seo, C.-H. Lim, H. Kim, and Y.-I. Song, 2019: Modeling spatial climate change landuse adaptation with multi-objective genetic algorithms to improve resilience for rice yield and species richness and to mitigate disaster risk, *Environmental Research Letters*, 14(2), 024001.

참여 연구진

제 1 장 소 개

주 저 자 이 동 근 (서울대학교)

기여저자 박 찬 (서울시립대학교)
박 채 연 (일본국립환경연구원)

감수저자 정 휘 철 (한국환경정책 · 평가연구원)

제 2 장 수자원

주 저 자 김 영 오 (서울대학교)

기여저자 이 재 경 (대진대학교)

감수저자 김 병 식 (강원대학교)

제 3 장 생태계

주 저 자 공 우 석 (경희대학교)

기여저자 최 세 웅 (목포대학교)
구 경 아 (한국환경정책 · 평가연구원)
황 가 영 (한국농어촌공사)

감수저자 이 재 석 (건국대학교)
박 진 영 (국립생물자원관)

제 4 장 산림

주 저 자 이 우 균 (고려대학교)

기여저자 임 철 희 (고려대학교)
김 문 일 (국제응용시스템분석연구소(IIASA))

감수저자 손 요 환 (고려대학교)

제 5 장 농업

주 저 자 이 변 우 (서울대학교)

기여저자 김 연 욱 (서울대학교)

감수저자 김 도 순 (서울대학교)
김 광 수 (서울대학교)

제 6 장 해양 및 수산

주 저 자 이 재 학 (한국해양과학기술원)

기여저자 한 인 성 (국립수산과학원)
이 충 일 (강릉원주대학교)
김 도 훈 (부경대학교)

감수저자 강 수 경 (국립수산과학원)
장 찬 주 (한국해양과학기술원)

제 7 장 산업 및 에너지

주 저 자 김 정 인 (중앙대학교)

기여저자 최 종 석 (한국환경정책 · 평가연구원)

감수저자 조 동 민 (광주테크노센터)

제 8 장 보건

주 저 자 김 호 (서울대학교)

기여저자 이 근 화 (한양대학교)

감수저자 권 호 장 (단국대학교)

제 9 장 인간정주공간 및 복지

주 저 자 전 성 우 (고려대학교)

기여저자 류 지 은 (인천연구원)

감수저자 김 승 종 (국토연구원)
서 창 완 (국립생태원)

제 10 장 적응대책 및 계획

주 저 자 이 동 근 (서울대학교)

기여저자 송 영 일 (한국환경정책 · 평가연구원)
허 주 영 (서울대학교)
윤 은 주 (국토연구원)

감수저자 장 훈 (한국환경정책 · 평가연구원)

종합감수 및 편집

감수저자 배 연 진 (환경부)
이 현 준 (환경부)
정 봉 우 (환경부)
김 희 옥 (환경부)
정 휘 철 (한국환경정책 · 평가연구원)
홍 제 우 (한국환경정책 · 평가연구원)

한국 기후변화 평가보고서 2020
- 기후변화 영향 및 적응 -

발 행 인 환경부장관

총괄편집 환경부 (배연진, 이현준, 정봉우)
한국환경정책·평가연구원 (정휘철)

발 행 일 2020년 7월

(30103) 세종특별자치시 도움6로 11 정부세종청사 6동 환경부
T. 1577-8866 F. 044-201-6386 W. http://me.go.kr

ISBN 978-89-93652-58-1, 978-89-93652-57-4 (세트)
발간등록번호 11-1480000-001690-01

한국 기후변화 평가보고서 2020

- 기후변화 영향 및 적응 -

환경부
Ministry of Environment

ISBN 978-89-93652-58-1
978-89-93652-57-4 (세트)