발 간 등 록 번 호
11-1480523-002031-01

NIER-GP2014-159

한국 기후변화 평가보고서 2014

- 기후변화 영향 및 적응 -

Korean Climate Change Assessment Report 2014

환경부

국립환경과학원
National Institute of Environmental Research

발간등록번호
11-1480523-002031-01

NIER-GP2014-159

한국 기후변화 평가보고서 2014

- 기후변화 영향 및 적응 -

환경부

국립환경과학원
National Institute of Environmental Research

ISBN 978-89-6558-262-593530

한국 기후변화 평가보고서 2014

- 기후변화 영향 및 적응 -

편집

홍지형

(국립환경과학원 기후대기연구부장)

정휘철

(한국환경정책·평가연구원)

최영은

(건국대학교)

김상균, 김대곤, 홍성철, 이재범,
문경정, 차준석, 홍준석, 마영일, 김승연

(국립환경과학원 지구환경연구과)

이동근

(서울대학교)

ISBN 978-89-6558-262-5 93530

발간등록번호 11-1480523-002031-01

NIER 번호 NIER-GP2014-159

환경부·국립환경과학원

서 문

최근 승인된 IPCC(Intergovernmental Panel on Climate Change)의 제5차 기후변화 종합보고서에서는 “인간의 활동이 기후시스템에 미치는 영향은 분명한 사실이며 기후변화가 인류와 자연 시스템에 폭넓은 영향을 미치고 있다”고 언급하고 있습니다.

IPCC에서 발간한 기후변화 평가보고서는 전 지구규모 또는 지역 및 대륙규모를 대상으로 하고 있기 때문에 이를 바탕으로 한반도의 기후변화 현상을 이해하는 것은 정보의 활용성이나 신뢰성에 한계가 있습니다. 특히 기후변화로 인한 한반도 영향은 전 지구적 변화 속도에 비해 빠르고 다양하게 진행되는 것으로 보고되고 있습니다.

따라서 한반도에서 발생 가능한 기후변화의 부정적 영향을 최소화하기 위해서는 기후변화 영향 및 취약성과 관련된 연구 결과의 체계적인 정리가 필요할 것입니다. 이러한 이유로 한반도 지역에 초점을 맞춘 기후변화 평가보고서의 발간이 요구되었으며, 2011년에 ‘한국 기후변화 평가보고서 2010’이 발간되었습니다. 이후 환경부 국립환경과학원과 기상청은 IPCC 제5차 평가보고서 발간 일정에 맞추어 2012년부터 후속보고서 발간을 위한 작업을 시작하였고, 3년간의 준비 끝에 ‘한국기후변화 평가보고서 2014’를 공동으로 발간하게 되었습니다.

이 보고서는 IPCC 실무그룹 Ⅱ(WG Ⅱ)에 해당하는 ‘영향 및 적응’ 내용을 담고 있으며, 환경부 국립환경과학원이 담당하여 발간을 추진하였습니다. 보고서는 총 10장으로 구성되었으며, IPCC WG Ⅱ의 보고서를 참조하되 우리나라의 실정을 고려하여 서론, 수자원, 생태계, 산림, 농업, 해양 및 수산, 산업 및 에너지, 보건, 인간정주공간과 복지, 적응전략으로 구분하였습니다.

보고서 발간을 위해 총 1,500편 이상의 연구논문을 이용하였고 학계와 정부, 연구소에 재직중인 각 분야별 전문가 총 65명께서 참여하여 주셨습니다. 집필에 참여해주신 모든 저자분들께 보고서 발간을 위해 시간과 노력, 열정을 아끼지 않으신 데 대하여 진심으로 감사의 말씀을 드립니다.

또한, 본 보고서가 한반도 기후변화와 관련된 영향 및 적응을 이해하고 부문별 적응 대책을 수립하는데 참고자료로 활용되기를 바라며, 기후변화연구 분야 중 여전히 미흡한 부분의 연구들이 활발히 수행되기를 희망합니다.

2015. 1

국립환경과학원장

머리말

IPCC에서는 지난 1990년 이후 총 5회에 걸쳐 기후변화 평가보고서를 출간하였습니다. 제5차 평가보고서는 2013년도 제 1 실무그룹(WG Ⅰ)의 '과학적 근거(The Physical Science Basis)'를 시작으로 2014년도에는 제 2 실무그룹(WG Ⅱ)의 '영향, 적응 및 취약성(Impacts, Adaptation and Vulnerability)', 제 3 실무그룹(WGⅢ) '기후변화의 완화(Mitigation of Climate Change)'와 '종합보고서(Synthesis Report)'가 발간되었습니다.

기후변화는 인간의 활동으로 인해 발생되는 이산화탄소를 비롯한 다양한 온실기체, 블랙카본과 같은 에어로졸, 도시화, 토지이용 변화 등이 원인이 될 수 있습니다. 특히 우리나라는 기후변화의 직접적인 영향과 더불어 동북아시아의 급속한 경제성장으로 인한 온실가스 배출 증가에 따른 영향을 직·간접적으로 받을 것으로 전망되고 있습니다. 따라서 한반도에서 관측된 기후변화의 영향을 파악하고 발생 가능한 부정적 영향을 최소화하기 위한 적응대책 수립이 필요할 것입니다. 이에 한국은 IPCC 기후변화 종합보고서에 상응하는 '한국기후변화 평가보고서 2010'을 2011년에 발간한 바 있으며, 2010년 이후의 연구결과들을 기반으로 한 '한국기후변화 평가보고서 2014'를 환경부 국립환경과학원과 기상청이 공동으로 발간하게 되었습니다. 기상청은 IPCC WG Ⅰ에 해당하는 '과학적 근거'를, 환경부 국립환경과학원은 IPCC WG Ⅱ에 해당하는 '영향 및 적응'을 중심으로 추진하였습니다.

보고서 발간을 위해 제2차 한국 기후변화 평가보고서(영향·적응 분야) 발간 연구회를 구성하였으며, 집필진 선정은 학계와 정부, 연구기관을 중심으로 하였습니다. 또한 이 보고서는 과학적 연구논문을 기반으로 하여 작성하였으며, 각종 정부 보고서를 참조하여 보완하는 과정에서 한반도를 대상으로 한 최신 국내·외 기후변화 영향·적응 분야 연구 결과를 집대성하고 색인화였습니다.

보고서는 각 분야별로 관측된 영향과 전망, 취약성의 주요원인, 적응옵션에 대하여 서술하였습니다. 특히 기존 보고서와 달리 생태계를 산림과 생태계로 나누었으며, 인간정주공간과 복지, 적응전략을 새롭게 추가하였습니다. 또한 정책결정자를 위한 요약보고서를 추가로 작성하였으며, 종합적인 전문가 평가를 통하여 연구결과의 불확실성에 대한 판단을 포함한 연구결과의 신뢰도를 3단계로 제시하였습니다.

본 보고서는 기후변화 영향 및 적응과 관련한 연구자들에게 한국에서 일어나는 기후변화 현상을 이해하고 관련분야의 연구 활성화에 도움이 되기를 바랍니다. 아울러 정책결정자들에는 미래의 기후변화에 따른 적응정책을 수립하는 데 활용될 수 있기를 기대합니다.

목 차

서문 ····· i
머리말 ····· ii

제1장 소개 ····· 1
1.1 서론 ····· 1
1.2 한국 기후변화 평가보고서 2010 요약 ····· 5
1.3 IPCC WGⅡ 5차 보고서의 주요 결론 ····· 13
1.4 우리나라 기후변화 영향, 취약성 및 적응 ····· 14
1.5 참고문헌 ····· 23

제2장 수자원 ····· 29
2.1 서론 ····· 29
2.2 관측된 영향 ····· 29
2.3 영향전망 ····· 34
2.4 취약성의 주요원인 ····· 50
2.5 적응옵션 ····· 59
2.6 결론 ····· 60
2.7 참고문헌 ····· 62

제3장 생태계 ····· 67
3.1 서론 ····· 67
3.2 관측된 영향 ····· 67
3.3 영향전망 ····· 75
3.4 취약성의 주요원인 ····· 79
3.5 적응옵션 ····· 81
3.6 결론 ····· 81
3.7 참고문헌 ····· 82

제4장 산림 ····· 86
4.1 서론 ····· 86
4.2 관측된 영향 ····· 88
4.3 영향전망 ····· 103
4.4 취약성의 주요원인 ····· 109
4.5 적응옵션 ····· 111
4.6 결론 ····· 115
4.7 참고문헌 ····· 115

제5장 농업 ····· 121
5.1 서론 ····· 121
5.2 관측된 현황 ····· 122
5.3 영향전망 ····· 130
5.4 취약성의 주요 원인 ····· 150
5.5 적응옵션 ····· 153
5.6 결론 ····· 157
5.7 참고문헌 ····· 159

제6장 해양 및 수산 ····· 166
6.1 서론 ····· 166
6.2 관측된 영향 ····· 169
6.3 영향전망 ····· 177
6.4 취약성의 주요원인 ····· 188
6.5 적응옵션 ····· 191
6.6 결론 ····· 192
6.7 참고문헌 ····· 194

제7장 산업 및 에너지 ····· 200
7.1 서론 ····· 200
7.2 관측된 영향 ····· 200
7.3 영향전망 ····· 202
7.4 취약성의 주요원인 ····· 210
7.5 적응옵션 ····· 211
7.6 결론 ····· 217
7.7 참고문헌 ····· 218

제8장 보건 ····· 220
8.1 서론 ····· 220
8.2 관측된 영향 ····· 220
8.3 영향전망 ····· 232
8.4 취약성의 주요원인 ····· 236
8.5 적응옵션 ····· 241
8.6 결론 ····· 244
8.7 참고문헌 ····· 245

제9장 인간정주공간 및 복지 ····· 251
9.1 서론 ····· 251
9.2 관측된 현황 ····· 251
9.3 영향전망 ····· 255
9.4 취약성의 주요원인 ····· 263

9.5 적응옵션 ····· 266
9.6 결론 ····· 278
9.7 참고문헌 ····· 279

제10장 적응전략 ····· 284
10.1 서론 ····· 284
10.2 국가기후변화 적응대책 수립 ····· 284
10.3 지방자치단체 기후변화 적응대책 수립 ····· 287
10.4 기후변화 적응전략 및 적응기법 연구 ····· 294
10.5 참고문헌 ····· 299

표 목차

표 1.1 연구결과의 신뢰도 평가(동의수준)의 구분 ····· 2
표 1.2 WGⅠ, WGⅡ, WGⅢ 비교 ····· 3
표 1.3 IPCC에서 밝히고 있는 평가 방법의 목표와 방법(IPCC, 2007 재구성; 환경부, 2011b) ····· 4
표 1.4. IPCC WGⅡ 보고서의 흐름(TAR, AR4, AR5) 및 2차 기후변화 평가보고서의 범위 ····· 5
표 1.5 기후변화 평가보고서에 사용된 참고문헌 ····· 6
표 1.6 영향평가와 완화평가의 분석범위 예시 ····· 10
표 1.7 광역지자체별 적응대책 비전 및 목표 수립현황(한국환경정책·평가연구원, 2011) ····· 26
표 1.8 기초지자체별 적응대책 비전 및 목표 수립현황(한국환경정책·평가연구원, 2013a) ····· 27
표 2.1 지표수 유출 연구별 기후자료, 상세화 기법 및 모형 ····· 35
표 2.2 한강의 과거와 미래의 평균 물수지 비교(김병식 등, 2010) ····· 36
표 2.3 홍수 취약성 평가 연구별 지표 및 기준 ····· 47
표 2.4 시기별 한강유역 홍수취약성 평가 결과(윤선권, 2012) ····· 47
표 2.5 예상침수면적의 비교(단위: ㎡)(이건행, 2011) ····· 54
표 2.6 예상홍수피해액의 비교(이건행, 2011)단위: 백만원 ····· 54
표 2.7 우리나라 물의 잠재가격 산정(류문현 등, 2011) ····· 58
표 4.1 식생의 연간 탄소변화량 현황 ····· 88
표 4.2 식생의 탄소저장량 ····· 89
표 4.3 토양의 탄소저장량 ····· 90
표 4.4 주요 수종별 나무 한그루당 표준탄소흡수량(국립산림과학원, 2012b) ····· 92
표 4.5 주요 수종별 단위면적당 표준탄소흡수량(국립산림과학원, 2012b) ····· 92
표 4.6 강우강도와 산사태 발생 위험간의 관계(김석우 등, 2012) ····· 95
표 4.7 2090년대까지의 임상 변화(이동근 등, 2010a) ····· 104
표 4.8 식생의 연간 탄소변화량 영향전망 ····· 104
표 4.9 산림 취약성 평가 지표(변정연 등, 2012) ····· 107
표 4.10 대형산불 판정을 위한 다변수 로지스틱 회귀모델의 결과(이병두와 김경하, 2013) ····· 109
표 4.11 2009년 경남 밀양시의 월평균 온도와 예년값(1971~2000) 대비 아노말리
(국립산림과학원, 2010b) ····· 111
표 5.1 현재의 파종 적기에 파종한 조·중·중만생 품종의 미래 기후(SRES A1B) 조건에서 생육기간과
생육온도 변화(이충근 등, 2011a) ····· 131
표 5.2 각 연대별 최적 파종에 파종한 조·중·중만생 품종의 미래 기후(SRES A1B) 조건에서 생육기간과
생육온도 변화(이충근 등, 2011a) ····· 132
표 5.3 기온 및 CO_2 농도 상승 처리에 따른 현미의 외관적 품위와 백미의 품질 변화(김한용, 2011) ····· 137
표 5.4 미래 기후 변화 시나리오(SRES A2 및 RCP8.5)에 따른 우리나라 쌀 공급 변화 예측
(한국농촌경제연구원, 2012b) ····· 141
표 5.5 1916~2012 기간 중 기상재해 피해 순위(소방방재청, 2013) ····· 147
표 5.6 농림수산식품부문 기후변화 적응대책 추진 로드맵(한국농촌경제연구원, 2011) ····· 151
표 5.7 분야별·단계별 기후변화 적응 연구개발 로드맵(한국농촌경제연구원, 2011) ····· 154
표 6.1 1984-2010년 기간 동안 주요어종의 중심어장에 대한 평균위도와 대한해협(126°20'-129°20'E, 33°30'
-35°00'N) 각 수심에서의 연평균 수온, 연간 어획량, 국제원유가격, 그리고 어업별 어획조성에 대한

대응분석으로부터 추출한 두 개의 dimension 사이의 상관계수(Jung et al., 2014) ····· 177
표 6.2 IPCC AR4 A1B 시나리오를 근간으로 하는 2000년대와 2030년대의 대한해협 수심별 수온변화전망과 1968~2010년 동안의 관찰기록과 GCM을 이용한 수심별 수온상승 경향(Jung et al., 2014) ····· 187
표 6.3 2000년대부터 2030년대까지 주요 어류 종에 대한 고위도 해역으로의 이동 예측. 어종의 평균위도와 특정수심에서의 수온의 회귀계수와 IPCC A1B 시나리오를 근간으로 하여 GCM으로 전망된 수온변화를 곱하여 산출된 극 방향 이동 정도와 연간 이동속도(Jung et al., 2014) ····· 192
표 7.1 1, 2, 3차 산업 및 전체산업의 생산량 변화(류문현 등, 2012) ····· 202
표 7.2 취약성 평가결과(김수영과 변병설, 2014) ····· 204
표 7.3 기후변화의 잠재적 관광영향(문화관광부, 2009) ····· 204
표 7.4 제주도의 시나리오별 해수면 상승고(이동욱과 부양수, 2011) ····· 208
표 7.5 홍수에 대한 산업단지의 등급별 적응대책(국토연구원, 2012) ····· 209
표 7.6 홍수에 대한 도로의 등급별 적응대책(국토연구원, 2012) ····· 213
표 7.7 홍수에 대한 철도의 등급별 적응대책(국토연구원, 2012) ····· 215
표 8.1 각 시도별 온열 손상에 대한 역치 온도 및 상대적 위험도(Na et al. 등, 2013) ····· 222
표 8.2 재해우형별 발생건수, 사망, 재해당 사망자수(1981~2010년)(장재연 등, 2008) ····· 224
표 8.3 기후요인과 수인성 및 식품매개 감염병 연관성 국내 연구 현황 ····· 232
표 8.4 식품매개질환 하위 20개 지역의 취약성 하부요소 분포(신호성 등, 2012) ····· 239
표 8.5 기상재해 유형별 지역 사망자 비율(Myung and Jang, 2011) ····· 239
표 9.1 도시지역 면적 및 도시화율 현황(건설교통부, 2007) ····· 253
표 9.2 국가단위 종합 기후변화 취약계층 적응대책 분포현황(한국환경정책·평가연구원, 2013c) ····· 255
표 9.3 지역별 국토여건 변화 전망(국토연구원, 2011e) ····· 257
표 9.4 기후사상별 상위 10순위 취약 사회기반시설(한국환경정책·평가연구원, 2010b) ····· 259
표 9.5 일상생활 가뭄피해액 산정 기준 및 피해금액(최충익, 2010) ····· 260
표 9.6 기후변화 현상과 그 영향(국립기상연구소, 2008) ····· 261
표 9.7 재해에 따른 위험성이 높은 중요 기반시설 목록(국토연구원, 2011c) ····· 264
표 9.8 연안도시의 기후변화 적응을 위한 관련 공간계획 지침의 검토 결과(최충익 등, 2012) ····· 265
표 9.9 2007년 농업분야 에너지원별 사용실태(지식경제부, 2008) ····· 265
표 9.10 탄소저감형 신도시 토지이용을 위한 공간적 적용단위 별 계획요소(충북개발연구원, 2010) ····· 267
표 9.11 도시재생에 관한 연구 ····· 268
표 9.12 서울시의 기후변화 적응요소와 취약요인(서울시정개발연구원, 2010) ····· 270
표 9.13 재해유형에 따라 적합한 계획요소(국토연구원, 2010e) ····· 273
표 9.14 녹색성장 국가전략 중 농업·농촌과 관련된 내용(녹색성장위원회, 2009) ····· 275
표 9.15 사회경제적 및 고용 취약가구별 도시와 농촌간 기후변화 적응역량강화 관련정책수요 비교 (한국환경정책·평가연구원, 2010d) ····· 277
표 9.16 어린이/산모·영유아 및 노령자 대상 기후환경복지 정책(한국환경정책·평가연구원, 2013b) ····· 278
표 10.1 우리나라 국가 기후변화 적응계획 현황 및 특징 ····· 288
표 10.2 기후변화대응종합계획에서 제시된 적응 정책 수립 현황(환경부, 2012a) ····· 288
표 10.3 광역지자체 기후변화 적응대책 세부시행계획 과정별 분석방법 ····· 289
표 10.4 적응대책 수립을 위한 의견수렴 방법 ····· 290
표 10.5 광역 지자체 적응대책 세부시행계획 수립부문과 주요 내용 분석 ····· 291
표 10.6 광역지자체별·사업별 기후변화 적응대책 재원 및 사업유형 ····· 291
표 10.7 기초지자체 별 과업수립 장애요소(환경부, 2014b) ····· 293

그림 목차

그림 1.1 IPCC의 보고서 발간 절차(IPCC, 2007a) ····· 2
그림 1.2 WGⅡ AR5에서의 중요 개념 설명; 기후위험는 위해(hazard)요소와 취약성, 기후노출(exposure)의 상호관계에 따라서 발생하고 인간과 자연시스템에 영향을 미친다(IPCC, 2013). ····· 11
그림 2.1 한강의 과거(좌)와 미래(우)의 평균 물수지 비교(김병식 등, 2010). ····· 35
그림 2.2 한강의 과거와 미래의 시공간적 유출변화(김병식 등, 2010). ····· 36
그림 2.3 미래 계절별 유출량 전망(박진혁 등, 2011) ····· 36
그림 2.4 남강댐 유역의 특성(이종문 등, 2012) ····· 37
그림 2.5 기후변화에 따른 수문요소의 영향 분석 연구흐름도(박민지 등, 2010) ····· 40
그림 2.6 2000~2013년 평창군 지하수관정의 수 및 이용량(이진용 등, 2012) ····· 41
그림 2.7 낙동강 유역 강수량의 공간분포(장재호와 안종호, 2012a) ····· 41
그림 2.8 인천계양구지역 홍수발생지점(강나래 등, 2011) ····· 44
그림 2.9 1971 ~ 2000년의 SPI 3(좌), SPI 12(우) SAD 곡선(김호성 등, 2010) ····· 45
그림 2.10 월평균 토양수분 편차 공간적 분포(최대규 등, 2010) ····· 48
그림 2.11 한강유역 내 홍수위험지수(FRI)의 체계(윤선권, 2012) ····· 48
그림 2.12 취약도 지표와 홍수피해밀도의 비교(김태형 등, 2011) ····· 52
그림 2.13 신경망-퍼지추론 시스템 빈도분석결과(좌)와 다양한 기후변화 모형(우)를 유입량으로 입력했을 때의 소양강댐 방류량(정건희 등, 2011) ····· 54
그림 2.14 SDF 곡선 유도와 미래 가뭄우심지역 지도화를 위한 연구 흐름도(박범섭 등, 2013) ····· 55
그림 2.15 지역별 물 빈곤지수(좌)와 기후 변동성지수(우)의 변화(홍승진 등, 2011) ····· 57
그림 3.1 식물계절 스펙트럼[(A)Phytolacca insularis, (B)P. americana](김해란, 유영한, 2010) ····· 67
그림 3.2 식물계절 순환 비교표(2009~2010)(신재성 등, 2011) ····· 67
그림 3.3 주요 식물종의 기온감율에 따른 잠재적 분포와 실제분포(이상철 등, 2011) ····· 69
그림 3.4 한계령풀 집단의 지형적 분포, 고도, 사면 방향(이상훈 등, 2011) ····· 70
그림 3.5 한국에서 위도와 나비 종수와의 상관관계(Choi, 2004) ····· 70
그림 3.6 다년간에 걸친 감관총채벌레에 의한 피해지역 분포 확산(신원우 등, 2003) ····· 72
그림 3.7 난온대 상록활엽수림대의 분포 변화(박종철 등, 2010) ····· 74
그림 3.8 GCMs 평균값의 잠재적 분포면적 변화(표)와 GCM 평균 6개 유형에 따른 잠재적 분포 예상 (검은색 음영은 잠재적으로 높은 분포를 의미)(이상혁 등, 2011) ····· 74
그림 3.9 GCM 평균 6개 유형을 이용한 미선나무 분포지 예상(2050년대와 2080년대)(이상혁 등, 2011) ··· 74
그림 3.10 기후시나리오별 미선나무 예상 분포지역(이상혁, 2011) ····· 75
그림 3.11 감염병과 기상학적 요소의 상관관계(2001~2008)(김시헌과 장재연, 2010) ····· 76
그림 3.12 표준화된 노출 지표의 공간분포 지도 c) 말라리아, d) 쯔쯔가무시증 취약성 평가 결과 지도, 폭염에 의한 건강 취약성(말라리아) e) 현재, f) 미래, 쯔쯔가무시즈에 의한 건강 취약성 g) 현재, h) 미래) (유성진 등, 2012) ····· 77
그림 3.13 조사 대상 어류의 최대내성온도 추정치 및 수온 상승에 따른 적합 서식지 감소율(정남일 등, 2010) ····· 80
그림 4.1 (좌) 충남 공주지역 연평균기온 변화(1981~2009), (우) 충남 공주지역 임상변화(1981~2009) (김장수 등, 2012) ····· 86
그림 4.2 1988~2009년의 산림고도(좌) 및 사면향(우)별 임상 변화(김성훈와 장동호, 2013) ····· 87

그림 4.3 2000~2006 남한 NPP 변화(MODIS)(홍지연 등, 2011) ····· 90
그림 4.4 미래(2030~2100) 기온변화에 따른 NPP 추정(이동근 등, 2010b) ····· 91
그림 4.5 산사태 위험지도 도출(윤홍식 등, 2009) ····· 93
그림 4.6 산사태 발생원인 분석(윤홍식 등, 2009) ····· 93
그림 4.7 1976~2012년의 산사태 피해 면적 변화(http://sansatai.forest.go.kr/) ····· 94
그림 4.8 산불발생 빈도 (a)1990년대, (b)2000년대, (c)1990년대 대비 2000년대 변화(원명수 등, 2011b) · 97
그림 4.9 순별 산불발생 빈도 (a)1990년대, (b)2000년대, (c)1990년대 대비 2000년대 변화
(원명수 등, 2011b) ····· 97
그림 4.10 울진군 산사태 예측지역과 실제 발생지역 비교(조명희와 조윤권, 2009) ····· 97
그림 4.11 연도별 잣나무 털녹병 발생 면적(ha)(최원일 등, 2012) ····· 97
그림 4.12 가을과 겨울 미래 산불위험도의 증가 분포 예측(이미나 등, 2013) ····· 97
그림 4.13 온도와 자낭반 성숙율의 비선형회귀모형에 의한 시기별 잣나무 잎떨림병의 발생 추정
(국립산림과학원, 2013b) ····· 98
그림 4.14 과거(1971 ~ 2000), 가까운 미래(2021 ~ 2050), 먼 미래(2071 ~ 2100)의 NPP 연간 변화량
(권선순 등, 2012) ····· 101
그림 4.15 HyTAGs 모형으로 예측한 미래의 산림 수종 및 재적량 분포(Kwak et al., 2012) ····· 102
그림 4.16 Frequency ratio를 적용한 산사태 취약성 정도(이명진 등, 2013) ····· 104
그림 4.17 RCP 시나리오에 따른 강원도 평창군 일대의 산사태 발생가능성 종합 지도(김호걸 등, 2013) 106
그림 4.18 잣나무 잎떨림병균의 강원도 홍천 지역 기후자료를 적용한 과거 40년간의 발생률 변화 (%)
(최원일 등, 2013) ····· 106
그림 4.19 솔수염하늘소(재선충의 매개충)의 발육온도모델(왼쪽)과 국내 분포 매개충의 자연분포 지역
(국립산림과학원, 2011b) ····· 108
그림 4.20 관리방법에 따른 소나무의 재적성장(이상민 등, 2011) ····· 112
그림 4.21 관리방법에 따른 잣나무의 가치함수값(이상민 등, 2011) ····· 112
그림 5.1 우리나라 이상고온 및 이상 저온 발생 변화(심교문 등, 2013) ····· 121
그림 5.2 벼 농업지대 및 연대 별 이상저온(상) 및 이상고온(하) 발상 빈도(심교문 등, 2013) ····· 123
그림 5.3 한 농가의 농사 일기에 나타난 벼, 배추 및 고추의 주요 재배 시기의 변화 경향(조리나, 2008) 124
그림 5.4 감 재배지역 및 재배면적 변화 현황(농촌진흥청, 2012) ····· 125
그림 5.5 1985~2010년의 벼와 콩의 단수 변동성 변화(농촌진흥청, 2011) ····· 126
그림 5.6 열화상카메라를 이용한 축사환경 및 젖소의 체표온도 모니터링 장면(김별 등, 2014) ····· 126
그림 5.7 국내 젖소의 시계열별 열스트레스 영향 예측(양승학 등, 2014) ····· 126
그림 5.8 과거 25년간의 젖소의 평균사료효율 변화(섭취 건물중 당 우유생산량) 변화(이정진 등, 2013) · 127
그림 5.9 현재 및 이산화탄소 배증 조건에서 서리일수의 차이
($2\times CO_2$ - $1\times CO_2$: a 3월, b 4월, c 3월과 4월 평균)(안중배 등, 2010) ····· 128
그림 5.10 기후변화(IPCC SRES A1B 시나리오)에 따른 지역별 토양유실량 변화(김민경 등, 2010) ····· 131
그림 5.11 현재 및 미래기후(RCP8.5) 조건에서 추파 겉보리, 쌀보리 및 맥주보리의 안전재배지대
(김대준 등, 2012) ····· 134
그림 5.12 미래 기후(RCP8.5) 조건에서 복숭아 재배적지 변동 전망(농촌진흥청, 2013) ····· 135
그림 5.13 미래 기후(RCP8.5) 조건에서 사과 재배적지 변동 전망(농촌진흥청, 2013) ····· 135
그림 5.14 RCP8.5 기후변화 시나리오에 따른 난지형 마늘(상)과 한지형 마늘(하)의 재배 적지 변동
(문경환 등, 2013) ····· 136
그림 5.15 기온 및 CO2 농도 상승 처리에 따른 수량 및 수량구성요소의 현재의 기온 및 CO2 농도 조건

대비 변화율(김한용, 2011) ····· 137
그림 5.16 2012년 수원의 온도구배형온실(TGFC)에서 기온과 CO2 농도 상승 처리에 따른 안미벼의 수량 및 수량구성요소 변화(이충근 등, 2013) ····· 137
그림 5.17 기준년도(1986~2010)와 2050년대(2037~2062) 및 2100년대(2087~2112)의 미래기후(SRES A1B) 조건에서 벼 작물모델 CERES_rice로 모의한 벼 수량, 증발산(ET) 및 질소 흡수량(N)의 누적상대도수분포(CDF)(Kim et al, 2013). 상, 중, 하단은 각각 남평벼, 세계화벼 및 운광벼임. ····· 139
그림 5.18 동아시아 벼 재배지대에 대하여 벼 작물모델 CERES_rice로 모의한 벼 수량의 기준년도(1997 ~ 2008) 대비 2050년대(2044 ~ 2055) 및 2100년대(2094 ~ 2105)의 미래기후(SRES A1B) 조건에서의 변화(Kim et al, 2013) ····· 140
그림 5.19 현재와 미래기후(SRES A1B) 조건에서 중만생 벼 품종의 파종기 이동에 따른 출수 후 40일간 평균 등숙온도와 출수 후 40일 평균 등숙온도 22.5℃로 판단한 최적파종기의 변화(이충근 등, 2012)140
그림 5.20 벼 파종기를 평년기후(1981~2010)에서의 파종기로 고정할 경우 현재 평년기후 대비 미래기후(SRES A1B) 조건에서 벼 품종군 및 벼 재배지대별 수량 변화(이충근 등, 2012; 이충근 등, 2013) ····· 141
그림 5.21 파종기를 기후변화에 따른 최적 파종기로 변경할 경우 현재 평년기후(1981~2010) 대비 미래기후(SRES A1B) 조건에서 벼 품종군 및 벼 재배지대별 수량 변화(이충근 등, 2012; 이충근 등, 2013) ····· 141
그림 5.22 기후 변화(IPCC SRES A1B 시나리오)가 농업지대별 가을보리 "새쌀보리"의 잠재 수량성 변화 (심교문 등, 2011) ····· 142
그림 5.23 미래 기후 변화 시나리오(SRES A2 및 RCP8.5)에 따른 우리나라 쌀 생산 및 수입량 변화 예측 (한국농촌경제연구원, 2012a) ····· 143
그림 5.24 미래 기후 변화 시나리오(SRES A2 및 RCP8.5)에 따른 우리나라 쌀 자급율 변화 예측 (한국농촌경제연구원, 2012b) ····· 143
그림 5.25 벼 출수 전 지엽에 접종한 흰잎마름병 병반장의 진전 (김한용, 2011) ····· 145
그림 5.26 기후변화(SRES A1B)에 따른 병해충에 대한 벼농사의 취약성 변화 (김명현 등, 2013) ····· 145
그림 5.27 기후변화(IPCC SRES A1B 시나리오)에 따른 고추 탄저병 감염위험도(방제 횟수)의 지역별 변화 (신정욱과 윤성철, 2011) ····· 146
그림 5.28 현재(A), 1℃ 상승(B) 및 2℃ 상승(C) 조건에서 갈색여치의 분포 예측(방혜선, 2012) ····· 147
그림 5.29 기후변화(IPCC SRES A1B 시나리오)로 인한 농업분야 손실과 적응수단의 경제효과 분석 (박경원과 권오상, 2011) ····· 148
그림 6.1 수산업에 대한 기후변화 리스크. (a) 주요 포획 어류와 무척추동물 1,000 종에 대한 최대 잠재어획량의 2001~2010년과 2051~2060년의 각 10년 평균을 비교한 전 지구적 재 분포 전망(SRES A1B (RCP6.0) 사용, 산업화 이전 대비 2℃ 상승 기준, 남획의 잠재적 영향 분석 배제), (b) 해양 연체류 및 갑각류 어장(예상 어획률 0.005 톤/km² 이상)과 난류와 한류 산호의 알려진 서식지를 RCP8.5 하에서 2100년의 해양산성화 분포를 세계지도 상에 함께 표시(IPCC, 2013) ····· 167
그림 6.2 해면수온 연변화 (a) 2007년 8월 11일 해면수온(SST) 분포, (b) 한국연안(그림 a 빨간선) (Park and Kim, 2010) ····· 167
그림 6.3 Pathfinder AVHRR 월평균 자료에서 구한 중국해 및 황해의 1982~2003년 사이 평균 해면수온 상승경향. 장강 주변 해역 온난화(1.0℃/10년) 경향은 전지구 평균(0.133℃/10년)의 약 8배 (Belkin, 2009) ····· 170
그림 6.4 다양한 측정방법(선박을 이용한 현장관측, 위성 수신, 부이를 이용한 실시간 관측)을 통해 얻은 수온과 엽록소의 장기 변화 예시(주세종과 김세주, 2013) ····· 171
그림 6.5 황해 동부(EYS), 동중국해 북부(NECS), 동해 남서부(SJES) 해역의 동물플랑크톤 네 분류군 (Kang et al., 2012) ····· 173

그림 6.6 동해에서의 연도별 연어 치어 성장률과 서식환경변화(Seo et al., 2006) ····· 174
그림 6.7 1989년 기후체제변환에 의해 변화하는 연어의 암컷과 수컷의 체장(Urbach et al., 2012) ····· 174
그림 6.8 GCMs(위)와 RCMs(아래)를 이용하여 재현한 2010년부터 2100년까지의 연간 평균 해면수온 상승 경향(Seo et al., 2014) ····· 174
그림 6.9 1968년부터 2013년까지 한국근해에서 어획된 어종 구성의 대응분석. 그림안의 어종 이름은 각기 다른 네 번의 해양체제기간동안에 대표적으로 어획되었던 어종을 표현함(Jung et al., 2007) ··· 176
그림 6.10 GCMs(위)와 RCMs(아래)를 이용하여 재현한 2010년부터 2100년까지의 연간 평균 해면수온 상승 경향(Seo et al., 2014) ····· 177
그림 6.11 RCM-MIROC을 이용하여 추정한 2010, 2030, 2050, 2070, 2090, and 2100년 8월의 황해 저층 수온의 점진적인 변화(Seo et al., 2014) ····· 178
그림 6.12 2001년부터 2020년까지 황해 해양특성치 평균 (a) 해수표면 pCO2, (b) 알칼리도, (c) DIC, (d) 대기-해양 CO_2 교환량(박영규 등, 2011) ····· 179
그림 6.13 (a) A1B 시나리오를 이용하여 모사한 동중국해 수심 0~100m의 O_2 변화. 검은 선은 연평균, 붉은 선은 10년 이동평균 (b) 동중국해 3월의 수심에 따른 O_2 변화. 검은 선은 2001~2020년의 평균, 붉은 선은 2081~2100년의 평균(박영규 등, 2012 수정) ····· 180
그림 6.14 2001~2100년 동안 동중국해에서의 pCO_2 평균에 대한 모사. 검은 선은 연평균, 붉은 선은 10년 이동평균(박영규 등, 2012 수정) ····· 181
그림 6.15 4개의 CMIP5 모형에서의 대한해협의 해양특성 전망. (상단) 월평균 수송량, (중간) 수온, (하단) 열수송량. 1901~2000년의 과거 기후 모의실험 결과(파란선), 2050~2099년의 RCP4.5 시나리오 미래 예측 실험결과(빨강선), 둘의 편차(점선)(최아라 등, 2013) ····· 182
그림 6.16 동중국해 3월의 영양염 수직분포. 검은 선은 2001~2020년의 평균, 붉은 선은 2081~2100년의 평균 (a) NO_3, (b) PO_4(박영규 등, 2012) ····· 182
그림 6.17 해양산성화 배양 시스템 모식도와 pH에 따른 어린 굴의 성장률 변화(국립수산과학원, 2013) · 183
그림 6.18 2020~2100년 영양단계의 상대적인 생물량 변화(강윤호 등, 2012) ····· 183
그림 6.19 성게 두 종(Strongylocentrotus nudus와 Hemicentrotus pulcherrimus)의 수정성공률의 비교 (Sung et al., 2014) ····· 185
그림 6.20 메조코즘 산성화 환경에서 굴 치패의 체중 및 패각 성장률 변화(국립수산과학원, 2013) ····· 185
그림 6.21 해양산성화 환경에서 넙치의 부화율과 생존율 변화(국립수산과학원, 2013) ····· 185
그림 6.22 지구온난화에 의한 산란장의 이동과 계절에 의한 낮 길이변화 모식도(Shoji et al., 2011) ····· 186
그림 6.23 두 기후모델로 추정한 1990년대, 2030년대 살오징어 가을 산란장 위치(김중진 등, 2012) ····· 186
그림 7.1 산업단지 취약성 지도(김윤정 등, 2013) ····· 200
그림 7.2 기후별 지표 가중치(배채영 등, 2013) ····· 202
그림 7.3 기후변화경쟁력지수 부문별 산정결과 비교(이명균과 김호석, 2010). ····· 203
그림 7.4 A1B 시나리오에 따른 연대별 골프장 개·휴장일 분포(임근욱 등, 2010) ····· 204
그림 7.5 A2 시나리오에 따른 극치호우사상 발생일수의 변화율 분포(배덕효 등, 2008) ····· 207
그림 7.6 관광부문 저탄소 프레임 워크(이성은 등, 2010) ····· 209
그림 7.7 기후변화를 역이용한 관광적응전략(이영진 등, 2011). ····· 210
그림 7.8 관광부문 녹색관광(김남조 등, 2009). ····· 212
그림 8.1 기후변화로 인한 건강영향 경로(IPCC, 2007) ····· 220
그림 8.2 전국 7대 광역대도시의 폭염에 따른 잠재 위험 인구밀도(인/km^2)(환경부, 2009) ····· 222
그림 8.3 연도별 기상재해에 따른 총사망자수(장재연 등, 2008) ····· 222
그림 8.4 년도별 기상재해 당 평균 사망자수(1981~1990) ····· 224

그림 8.5 년도별 기상재해 당 평균 사망자수(1991~2010) ····· 224
그림 8.6 비브리오패혈증의 기상재해 후 발생비 추이(장재연 등, 2012) ····· 224
그림 8.7 기후변화와 천식의 유병율 및 중증도 사이의 관계 모식도(식물과 꽃가루에 의한 영향을 중심으로) (Beggs and Bambrick, 2005). ····· 225
그림 8.8 최저기온과 tree pollen 환자의 연도별 추이(kim et al., 2011). ····· 226
그림 8.9 쯔쯔가무시증 환자 분포(2001~2012)(질병관리본부 통계) ····· 226
그림 8.10 기온(x축)과 모기 개체수(y축)의 상관관계(R=0.520, P=0.004)(장재연 등, 2003) ····· 228
그림 8.11 모기 개체 수 예측(전체 모기, 작은 빨간집 모기, 2013년~2016년)(Kim et al, 2011) ····· 229
그림 8.12 쯔쯔가무시증 다발 지역에서의 진드기 밀도와 평균 기온과의 상관관계(Lee et al., 2008) ····· 230
그림 8.13 해수면 온도와 비브리오 검출건수의 상관관계(R=0.824, P=0.000)(장재연 등, 2003) ····· 230
그림 8.14 주간 평균 일최고온도와 설사질환 발생률과의 관계(채수미 등, 2011) ····· 230
그림 8.15 월평균기온과 식중독 환자수(김동진 등, 2012) ····· 231
그림 8.16 서울시 여름철 일 평균 기온이 28.1℃ 이상의 일 수(김은영 등, 2012) ····· 232
그림 8.17 역치온도(75, 80, 85 백분위 일평균 온도)에 따른 2001~2040년의 연간 사망 부담 (양지훈 등, 2013) ····· 232
그림 8.18 기상재해로 인한 연평균 사망자수 변화(Myung and Jang, 2011) ····· 233
그림 8.19 SRES A1B시나리오에 따른 24시간 초미세먼지(PM2.5)의 2000년과 2020년 비교 (국립환경과학원, 2013) ····· 233
그림 8.20 활순털진드기(Leptotrombidium scutrellare)의 분포지 확대(질병관리본부, 2010) ····· 235
그림 8.21 부천시 폭염 취약성 평가지도(환경부, 2009) ····· 236
그림 8.22 서울시의 폭염 취약 요인 분포도(김은영 등, 2012) ····· 236
그림 8.23「기후변화 적응 건강관리대책(2011 ~ 2015)」의 개요(질병관리본부, 2010) ····· 239
그림 8.24 매개체질환 종합 관리체계(환경부, 2008b) ····· 241
그림 9.1 도시지역 면적 비율(좌)과 도시화율(우)(국토해양부, 2008a) ····· 252
그림 9.2 농촌의 마을 수 변수 추이 ····· 254
그림 9.3 논과 밭의 경지 면적 변화 추이(자료: 통계청, 국가통계포털(http://kosis.kr) ····· 254
그림 9.4 기후변화에 따른 도시수종의 출현가능성(김윤정 등, 2013a) ····· 256
그림 9.5 지역유형별 사회기반시설의 기후변화 영향별 위험도(한국환경정책·평가연구원, 2010b) ····· 257
그림 9.6 기후변화 취약계층 사례지역 선정을 위한 지표 구축 ····· 261
그림 9.7 2008년 서울시 구별 열대야 일수 분포(서울시정개발연구원, 2010) ····· 263
그림 9.8 저소득계층과 고소득계층의 에너지 이용 불평등(한국환경정책·평가연구원, 2010d) ····· 264
그림 9.9 신도시 토지이용 계획 차원의 탄소저감을 위한 공간단위 별 계획요소의 1순위 연계적용 요소 (충북개발연구원, 2010) ····· 267
그림 9.10 도시의 기후변화 재해 취약성 분석 절차(국토교통부, 2013b) ····· 272
그림 10.1 우리나라 기후변화 적응대책 수립체계(환경부, 2013c) ····· 284
그림 10.2 기초지자체 적응대책 세부시행계획 시범사업 지자체 분포현황(환경부, 2014b) ····· 291
그림 10.3 정책단계별 평가내용(환경부, 2011b) ····· 294
그림 10.4 기후변화 적응대책의 단계별 우선순위 평가방법(채여라와 조현주, 2013) ····· 295
그림 10.5 기후변화 적응형 공간계획을 위한 모델 및 방법론 ····· 296
그림 10.6 경기도 지지체 기후변화 취약성 분석 지도(고재경, 2011a) ····· 298
그림 10.7 완화와 적응 상호관계를 고려한 정책유형과 우선순위(고재경과 김희선, 2013) ····· 299

참여 연구진

제 1 장 소개

주저자
이동근 (서울대학교)

기여저자
박찬 (일본국립환경과학원)
김은영 (한국환경정책・평가연구원)
정태용 (KDI 국제정책대학원)

감수저자
한화진 (한국환경정책・평가연구원)
정회성 (환경과 문명)
이명균 (GGGI, 계명대학교)

제 2 장 수자원

주저자
김영오 (서울대학교)

기여저자
이재경 (기상청)
서영원 (영남대학교)

감수저자
이주헌 (중부대학교)
권현한 (전북대학교)

제 3 장 생태계

주저자
공우석 (경희대학교)

기여저자
이재석 (건국대학교)
최세웅 (목포대학교)
오장근 (국립공원관리공단)

감수저자
이우신 (서울대학교)
이현우 (한국환경정책・평가연구원)

제 4 장 산림

주저자

이동근	(서울대학교)

기여저자

손요환	(고려대학교)
이승규	(국립산림과학원)
최원일	(국립산림과학원)

감수저자

이우균	(고려대학교)
이경학	(국립산림과학원)
전성우	(한국환경정책・평가연구원)

제 5 장 농업

주저자

이변우	(서울대학교)

기여저자

김광수	(서울대학교)
이석하	(서울대학교)

감수저자

김도순	(서울대학교)
이상규	(원예특작과학원)
문경환	(원예특작과학원)
정봉남	(원예특작과학원)

제 6 장 해양 및 수산

주저자

김수암	(부경대학교)

기여저자

심정희	(국립수산과학원)
장찬주	(한국해양과학기술원)
정석근	(제주대학교)

감수저자

강수경	(국립수산과학원)
윤상선	(Univ. of British Columbia, CANADA)
이충일	(강릉원주대학교)

제 7 장 산업 및 에너지

주저자
김정인 (중앙대학교)

기여저자
정성훈 (건국대학교)
배두환 (남서울대학교)
조동민 (광주테크노파크)

감수저자
김창길 (농촌경제연구원)
박기현 (에너지경제연구원)
류문현‘ (수자원공사 정책경제연구소)

제 8 장 보건

주저자
장재연 (아주대학교)

기여저자
나원웅 (예방의학전문의)
명형남 (아주대학교)
김시헌 (아주대학교)
박미연 (질병관리본부)
임지선 (을지대학교)

감수저자
송경준 (서울대병원)
박해심 (아주대병원)
정해관 (성균관대학교)

제 9 장 인간정주공간과 복지

주저자
서창완 (국립생태원)

기여저자
왕광익 (국토연구원)
이인희 (충남발전연구원)
추장민 (한국환경정책・평가연구원)

감수저자
김학열 (서경대학교 도시공학과)
고재경 (경기개발연구원)
신상영 (서울연구원)

제 10 장 적응전략

주저자

박창석 (한국환경정책・평가연구원)

기여저자

신지영 (한국환경정책・평가연구원)
반영운 (충북대학교)

감수저자

정회성 (환경과 문명)
전성우 (한국환경정책・평가연구원)
조경두 (인천발전연구원)
고재경 (경기개발연구원)

종합 감수 및 편집

감수저자

김상균 (국립환경과학원)
김대곤 (국립환경과학원)
이재범 (국립환경과학원)
홍성철 (국립환경과학원)
문경정 (국립환경과학원)
홍준석 (국립환경과학원)
마영일 (국립환경과학원)
김승연 (국립환경과학원)
정휘철 (한국환경정책・평가연구원)
최영은 (건국대학교)

약어

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
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

제 1 장 소개

1.1 서론

1.1.1 연구의 배경 및 목적

최근 기후변화로 인한 홍수, 가뭄, 한파, 폭설 등의 기상재해가 빈번히 발생함에 따라 이로 인한 환경, 경제, 사회적 문제가 발생하고 있으며 이러한 현상은 전 지구적으로 더 가속화 될 것으로 전망되고 있다. 특히, 한반도를 포함한 아시아 지역은 기후변화에 가장 취약하며 생물다양성 감소, 질병, 홍수 등의 문제가 다른 지역보다 더 심각한 것으로 관측되고 있다.

이에 따라 IPCC는 전 지구적으로 기후변화에 따른 영향 및 취약성을 평가하고, 적응방안을 논의한 연구결과를 토대로 기후변화 평가보고서를 발간하고 있다. 2013년 9월 WGⅠ를 시작으로, 2014년 3월 WGⅡ, 2014년 10월 WGⅢ로 예정된 IPCC의 새로운 보고서 AR5의 목차가 미리 공개됨에 따라 새로운 AR5 보고서 목차에 대응하는 결과물을 과학적 관점에서 심층적으로 종합·정리 할 필요가 대두되고 있다. 그러나 IPCC 보고서는 세계적 관점에 대한 보고서로서 지역적 기후변화의 영향 및 적응에 관해서는 상세히 기술되어 있지 않다. 따라서 한반도를 대상으로 하는 지역적인 관점의 기후변화 평가보고서가 별도로 필요하다. 한반도를 대상으로 한 기후변화 평가 보고서는 이해당사간의 대화의 활성화, 기후변화 적응방법에 대한 지식공유, 유망한 적응방법을 개발하는데 있어 참고가 될 수 있는 기초자료로서 중요한 역할을 수행할 것이다.

이러한 기대를 충족시키기 위해 기존의 기후변화 평가보고서를 바탕으로 최근 국내·외 연구를 집대성하고 체계적으로 정리하여 한반도를 대상으로 한 기후변화 평가보고서를 발간하고자 한다. 또한 이를 통해 국가의 기후변화 관련 정책지원과 국민의식 제고를 도모한다.

1.1.2 연구의 범위 및 방법

기후변화에 따른 영향 및 취약성의 한반도의 특수성을 보다 더 명확하게 파악하고, 적응대책을 마련하기 위하여 우리나라 기후변화 관련 연구를 집대성한 기후변화 평가보고서를 발간하였고, 1차 보고서 발간 이후 국내·외에서 한반도를 대상으로 한 기초연구 및 신 시나리오를 반영한 연구 등을 총망라하고 분야별, 지역별 영향, 취약성, 리스크를 정리·보완하여 2차 평가보고서에 담고 있다.

본 보고서는 2011년 완료한 '한국 기후변화 평가보고서 2010'에 이어 3개년 사업으로 기상청과 공동으로 발간한 것으로 기상청은 WG-I(관측 및 예측), 과학원은 WG-II(영향 및 적응)을 담당하고 있다. WGⅡ에서는 수자원, 해양 및 수산, 생태계, 산림, 농업, 산업 및 에너지, 보건, 인간정주공간과 복지 그리고 적응전략 이렇게 9가지 분야로 나누어 기후변화의 영향과 적응에 대한 이슈를 다루게 된다. 이번 보고서에서 주목할 점은 1차 평가보고서와 다르게 생태계를 산림과 생태계로 나누었고 인간정주공간과 복지라는 분야를 새로 추가하였으며 적응전략을 단독적으로 만들어 정책수행자들에게 도움이 될 수 있는 보고서가 될 수 있도록 하였다.

제2차 한국 기후변화 평가보고서의 영향 및 적응(WGII)은 1차년도('12) 초안 작성, 2차년도('13) 요약보고서, 3차년도('14) 본보고서 발간 및 영문판 발간으로 진행되었다. 그리고 2차 기후변화 평가보고서 3차년도(본 사업연도)의 과업의 방법 및 절차는 다음과 같다.

제2차 한국 기후변화 평가보고서(영향.적응 분야) 발간 연구회 구성.운영 및 집필진 선정은 학계와 정부·연구기관을 중심으로 보고서 발간 연구회를 구성·운영하였으며, 주저자와 기여저자를 선정하였다. 또한 한반도를 대상으로 한 최신 국내·외 연구 결과를 수집·요약·집대성 및 색인화하고 데이터베이스화하였다. 마지막으로 평가보고서의 초안본('12)과 보완본('13)을 중심으로 본보고서('14)를 발간하였다. 이를 작성할 때 주저자 이외에도 기여저자를 통해 내용을 보완 받으며, 감수저자를 통해 내용에 대한 검토를 받았다. 이후 완성된 본보고서 최종본을 중심으로 국문 요약보고서 및 영문요약 보고서를 작성하였다. 또한 본보고서 최종본과

국·영문 요약본 작성시 결론부문에 연구결과의 동의수준을 구분하여 향후 기후변화 관련 연구 및 정책결정에 도움이 될 수 있도록 하였다(표 1.1).

표 1.1 연구결과의 신뢰도 평가(동의수준)의 구분

① 동의수준 견고	관련 분야 논문들의 수가 어느 정도 되고 서로 배치되는 내용이 없이 일치되는 경우 혹은 전문가들의 의견이 일치하는 경우
② 동의수준 중간	논문의 수가 어는 정도 되지만 소수의견 등으로 증거를 판단하기 어렵거나 전문가 사이에서도 소수이지만 다른 의견 있는 경우
③ 동의수준 제한적	논문의 수가 아주 적거나 논문의 내용 혹은 전문가 사이에서도 의견이 서로 달라서 신뢰도를 판단하기에 어려운 경우

1.1.3 한국 기후변화 평가보고서 2014 발간

1.1.3.1 IPCC의 평가보고서 발간 절차

IPCC는 기후변화 평가 보고서 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.

IPCC 보고서 작성은 가장 먼저 보고서 발간을 위한 범위를 결정하여 개요의 초안을 작성하게 되고 이를 IPCC 내부 검토를 통해 확정지어서 정부, 단체 및 전문가 중에서 적합한 저자를 선정하여 첫 번째 초안을 작성한다. 첫 번째 초안을 작성한 후 외부 전문가 검토를 실시하여 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 최종보고서를 작성하게 된다. 최종 초안 보고서 작성이 완료되면 마지막으로 관련 국가의 리뷰를 통해서 수정사항을 정리하고 Working Group과 IPCC의 최종 결정을 통해 보고서가 발간된다(그림1.1).

IPCC의 기후변화 평가보고서 절차를 종합해보면 최소 3회의 학계의 전문가 및 관련단체, 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.

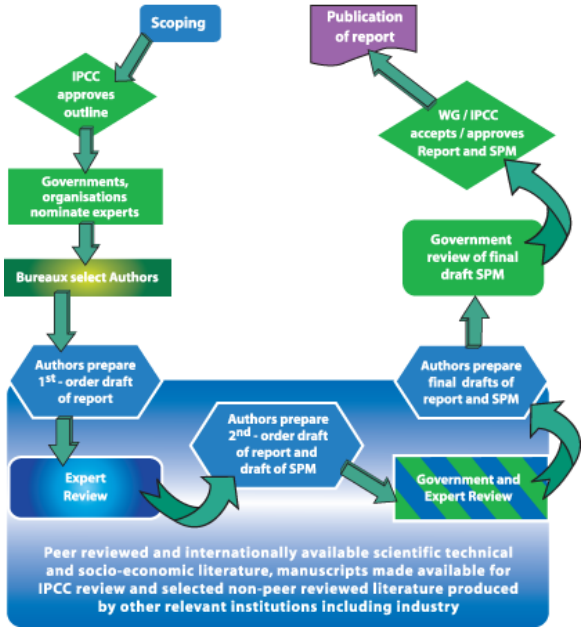


그림 1.1 IPCC의 보고서 발간 절차(IPCC, 2007a)

1.1.3.2 IPCC 보고서 각 WG 보고서 범주 검토

IPCC는 약 5년을 주기로 기후변화에 대한 전 지구적인 연구결과를 취합하여 평가하는 IPCC보고서를 발간하고 있으며, 그 역할에 따라 Working Group Ⅰ,Ⅱ,Ⅲ로 나누어 각각 보고서를 발간한다. 본 과업은 IPCC WGⅡ에 해당하는 과업을 담당하고 있으며, 독자적인 내용을 충분히 반영하기 위해 WGⅠ,Ⅲ 그룹에 대한 검토를 실시하였다(표 1.2).

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

표 1.2 WGⅠ, WGⅡ, WGⅢ 비교

WG Ⅰ (물리과학적 근거)	WG Ⅱ (영향, 적응 그리고 취약성)	WGⅢ (기후변화의 저감)
1. 도입 2. 관측: 대기와 지표 3. 관측: 해양 4. 관측: 빙권 5. 고기후 아카이브로부터의 정보 6. 탄소와 생지화학적 사이클 7. 구름과 에어로솔 8. 인위적, 자연방사적 힘 9. 기후모델의 평가 10. 전 지구부터 지역적인 기후변화 감지 11. 단기 기후변화: 전망과 예측가능성 12. 장기 기후변화: 전망, 책임, 비가역성 13. 해수면 변화 14. 기후현상과 미래 지역 기후변화간의 상관관계	1. 도입 2. 정책결정자를 위한 요약 □ 자연·관리자원의 시스템과 이용 3. 담수자원 4. 육상 및 내륙수 시스템 5. 해안과 저지대 6. 해양시스템 7. 식량생산과 식량안보 □ 인간정주공간, 산업, 인프라 8. 도시지역 9. 농촌지역 10. 주요 경제 및 서비스분야 □ 인류건강, 웰빙 및 안전 11. 인류건강 12. 인류안보 13. 생활 및 빈곤 □ 적응 14. 적응의 필요성과 옵션 15. 적응 계획과 적용 16. 적응 기회, 제한사항, 한계 17. 적응의 경제학 □ 영향, 리스크, 취약성과 기회 18. 관측된 영향의 감지 19. 떠오르는 리스크와 주요 취약성 20. 기후 레질리언스 경로: 적응, 저감, 지속가능한 개발	1. 도입 □ 프레이밍 이슈 2. 기후변화 대응 정책의 통합적 리스크 및 불확실성 평가 3. 사회, 경제 및 윤리적 개념과 방법 4. 지속가능한 개발과 평등 □ 기후변화저감의 경로 5. 유발인자, 트렌드와 저감 6. 변화된 경로 평가 7. 에너지 시스템 8. 교통 9. 건물 10. 산업 11. 농업, 산림 및 기타 토지이용 12. 정주공간, 인프라 및 공간계획 □ 정책, 기관 및 금융 평가 13. 국제 협력: 합의와 도구 14. 지역 개발과 협력 15. 국가 및 지방자치단체 정책 및 도구 16. 크로스커팅 투자 및 금융 이슈

WGⅡ는 기후변화에 따른 자연시스템 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.

WGⅢ은 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 활용가능성 및 기술의 적용가능성을 다루게 된다.

1.1.3.3. IPCC WGⅡ 평가보고서 흐름 및 IPCC AR5를 반영한 발간 범위 조정

기후변화의 영향 및 적응(WGⅡ:Working Group Ⅱ)의 평가보고서의 경우 기존보고서에서는 잘 다루지 않았던 기후변화가 사회 및 경제에 미치는 영향과 지속가능한

개발을 중요하게 다루고 있다. 또한 식량안보, 인간정주공간과 같은 기후현상에 따른 영향에 취약한 부분에도 초점을 맞추었으며, 전 지구적으로 지역별 기후변화영향·적응·완화를 세부적으로 접근하였다.

영향, 적응 및 취약성에 대해 서술하는 IPCC WGⅡ의 5차 보고서는 2014년 3월에 발간되었다. 국제적인 흐름을 반영하기 위해 공개된 IPCC AR5 WGⅡ 평가보고서 범위를 참고하고 WGⅠ·Ⅲ와의 위상관계와 한반도의 특성을 고려하여 한국 기후변화 평가보고서의 분야를 조정하였다. 또한 최근 부각되고 있는'도시 농촌 및 안전복지'항목을 '인간정주공간과 복지'로 수정하였고 '적응 및 취약성'의 내용에서 적응전략만을 특화시켜 우리나라에 맞는 적응전략을 분야별로 다루는 '적응전략' 항목으로 새롭게 구성하였다.

표 1.3 IPCC에서 밝히고 있는 평가 방법의 목표와 방법(IPCC, 2007 재구성; 환경부, 2011b)

접근법				
	영향(Impact)	취약성(Vulnerability)	적응(Adaptation)	통합평가(Integrated)
과학적인 목표	미래 기후변화의 영향 및 위험에 대한 평가	기후변화의 취약성에 영향을 미치는 과정들을 평가	적응 및 적응 능력에 영향을 미치는 과정을 평가	다양한 구동인자와 영향을 사이의 상호작용 및 피드백 평가
실제적 목표	위험을 감소시키기 위한 방법 개발	취약성을 감소시키기 위한 방법 개발	적응을 향상시키기 위한 방법 개발	세계적인 정치적 대안과 비용 산출
연구 방법	CCIAV의 표준 접근법 DPSIR 방법 Hazard-driven risk 방법	취약성 지표 및 profile 과거 및 현재의 기후위험 Likelihood 방법 Agent-based 방법 서술적 방법 임계점의 이해를 포함하는 위험지각 지속가능 정책의 성능평가 지속가능 개발을 위한 적응 능력과의 관계에 대한 접근		통합평가 모델링 분야별 통합 상호작용 다른인자들 과의 기후의 통합 여러 규모 및 종류에 따른 이해당사자들의 토론을 통한 모형의 연계 접근법 간의 조합
공간	하향식 세계규모 - 지역	상향식 국지적 - 지역적 거시 경제적 접근은 하향식 접근법을 이용		여러규모의 통합 주로 세계 혹은 지역적 접근 격자 기반의 접근도 종종 있음
시나리오 종류	기후 및 다른 요소들의 탐구적인 시나리오 작성 서술적 시나리오	사회-경제적인 조건 가설들 혹은 역 추산법	기준점 적응 역사적 사실 및 장소와 행동에 따른 적응 방안 유추	탐구 시나리오 작성: 외형 및 내형적 시나리오(피드백 포함) 표준적인 방법
동기	연구 중심	연구/이해당사자 중심	이해당사자/연구중심	연구/이해당사자 중심

1.1.3.4 우리나라 기후변화 평가보고서 발간 절차

우리나라 2차 기후변화 평가보고서는 IPCC 평가보고서 작성 원칙 및 절차에 맞추어 진행하였다. 주저자를 중심으로 스코핑을 통해 평가보고서의 범위와 내용을 조정하고, 분야별 최신 연구결과 수집 및 내용보완을 실시하였다. 각각 분야별로 필요한 부분에 대해서는 기여저자로부터 새로운 연구결과 또는 누락된 연구결과에 대한 정보를 수집하는 것을 원칙으로 하였으며, 최종보고서를 집필하는 동안 두 차례 이상의 WGⅠ·Ⅱ 주저자간의 중복성 검토를 통해 내용의 일관성과 통일성을 제고하였다. 그리고 최소 1회의 검토위원의 검토과정을 거쳐서 3차 최종본을 완성하였다.

3차 최종본을 기반으로 각 분야 간 검토 및 국내·외 전문가의 검토를 통하여 제 2차 한국 기후변화 평가보고서의 완결성을 높임과 동시에 3차년도 추가 연구를 통해 정부 각 부처에 실무자 검토를 실시하고, 수정 및 보완하여 제 2차 한국 기후변화 평가보고서(백서)를 발간하였다.

1.1.3.5 연구결과 집대성 및 색인화

자료범위는 한반도를 대상으로 하는 기후변화의 영향

및 적응 관련 연구를 중심으로 국가보고서, 학술지게재 논문, 박사학위논문을 포함하고 비공식 문서 및 사기업 보고서, 발표자료 및 석사학위논문은 포함하지 않는 것을 원칙으로 하였다. 또한 국내 전문가 초빙세미나 및 전문가 자문을 통해 정보를 수집하여 자료를 보완하였다. 연구결과물 중 기후변화 시나리오를 적용하지 않은 연구 또한 모두 포함하였으며, 분야내의 세부 분류 간 주제가 중복되는 경우도 일부 연구내용으로 포함하였다.

각 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. 기타 분류로는 단행본 및 보도 자료가 포함되었다.

1.2 한국 기후변화 평가보고서 2010 요약

1.2.1 주요 내용 요약

1.2.1.1 한반도 기후변화 현황 및 미래전망 개관

IPCC 4차 평가보고서에서 제시하고 있는 절차에 따라 기후변화의 영향, 취약성, 적응성의 현황 및 미래전망을 제시하고 있다. 첫째, 변화의 탐지를 위해서 기후 및 비기후적 요인 등을 고려하였으며 둘째, 우리나라에서 진행되고 있는 기후변화와 관련된 자연 및 인간계의

표 1.4. IPCC WGⅡ 보고서의 흐름(TAR, AR4, AR5) 및 2차 기후변화 평가보고서의 범위

<table>
<tr><th>TAR</th><th>AR4</th><th>AR5</th><th>제1차 기후변화 평가보고서 (2010)</th><th>제2차 기후변화 평가보고서 (2012~)</th><th>제2차 기후변화 평가보고서 (2014)</th></tr>
<tr><td>4. Hydrology and Water Resources</td><td>3. Freshwater resources and their management</td><td>3: Freshwater resources</td><td>수자원</td><td>수자원</td><td>수자원</td></tr>
<tr><td>6. Coastal Zones and Marine Ecosystems</td><td>6. Coastal systems and low-lying areas</td><td>5: Coastal systems and low-lying areas
6: Ocean systems</td><td>해안 및 해양</td><td>해양 및 수산</td><td>해양 및 수산</td></tr>
<tr><td rowspan="3">5. Ecosystems and Their Goods and Services</td><td rowspan="2">4. Ecosystem, their properties, goods and services</td><td rowspan="2">4: Terrestrial and inland water systems</td><td rowspan="2">생태계</td><td>생태계</td><td>생태계</td></tr>
<tr><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>농업</td><td>농업</td><td>농업</td></tr>
<tr><td>8. Insurance and Other Financial Services</td><td rowspan="4">7. Industry, settlement and society</td><td>10: Key economic sectors and services</td><td>산업 및 에너지</td><td>산업 및 에너지</td><td>산업 및 에너지</td></tr>
<tr><td rowspan="3">7. Human Settlements, Energy, and Industry</td><td>11: human health,</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 rowspan="2">-</td><td>도시 농촌 및 안전 복지</td><td>인간정주공간과 복지</td></tr>
<tr><td>적응 및 취약성</td><td>적응전략</td></tr>
</table>

변화를 파악하기 위해 수자원, 생태계, 농업, 연안 및 해양, 산업, 보건 분야를 중심으로 고찰하였다. 마지막으로 관찰된 기후변화에 대한 대응으로서 기후변화 취약성, 적응평가 등의 필요성을 제시하였다.

국내 기후변화에 영향을 미치는 요소로는 기온, 강수량, 습도, 증발산량, 일조시간, 풍향, 풍속 등 다양한 것들이 있지만, 온도와 강수량이 자연 및 인간계에서 발생하는 기후현상을 잘 설명하는 기후요소이다. 또한 도시화나 CO_2 농도의 변화, 지형적 특성과 같은 비기후적 요인들에 의해서도 변화가 관찰된다.

한반도에서 최근 관측된 기후변화의 경향을 살펴보면, 1981~2010년 동안 0.41℃/10년, 2001~2010년 기간 동안 0.5℃/10년의 변화율을 보여, 과거 1954~1999년 동안 +0.23℃/10년의 변화율보다 큰 변동을 보이는 것으로 나타났다. 기상청(2008)에 따르면 한반도 지역의 연평균 강수량 은 수십 년 주기의 큰 변동 폭을 보이나 장기적으로 증가추세에 있다. 특히 최근 10년(2001 ~ 2010) 평균 연강수량은 1,412 mm로 지난 30년 평균 연강수량 약 1,315 mm에 비하여 약 7.4% 증가하였으며 최근 10년 우리나라의 연강수량의 증가는 여름철 증가가 가장 큰 부분을 차지한 것으로 나타났다. 또한 호우일수(일강수량 80mm 이상)는 최근 10년 간 28일로 종전 20일보다 증가한 것으로 나타났다.

한 결과 2100년도에는 한반도 전 지역에 대하여 온도는 4℃ 상승하고, 강수량은 17% 증가하는 것으로 나타났다. 특히, 남한지역의 강수량이 13% 증가할 것으로 나타났고 혹서일이 증가하며 혹한일은 감소하고 8~9월 사이의 강수량 증가가 뚜렷할 것으로 나타났다(국립기상연구소, 2008).

1.2.1.2 기후변화의 영향평가

기후변화의 영향, 적응 및 취약성평가(Climate Change Impacts, Adaptation, and Vulnerability: CCIAV)는 불확실한 환경에서의 기후변화 대응을 위한 의사결정 정보를 제공하기 위하여 수행되고 있다. IPCC의 4차 평가보고서는 기후 영향, 적응 및 취약성(CCIAV) 평가 방법론을 자세하게 다루고 있어 3차 평가보고서 보다 그 범위가 확장되어 있다.

IPCC 영향평가는 온실가스 농도 증가가 기후·비기후적인 요인에 영향을 미치는 현상과 이 현상이 사회, 경제, 생태계에 미치는 직·간접적인 영향을 파악하는 방법이 사용되고 있다. 취약성 평가는 과거엔 기후변화에 따른 생태계 영향을 파악하는 연구가 주를 이루었으나 최근에는 사회적 취약성이 평가 항목으로 포함되면서 위험평가와 함께 사회적 측면에 중점을 둔 정책 수단들을 위한 근거 자료를 제공하고 있다. IPCC에서 제안하는 적응 평가는 이해관계자들이 정책결정을 하는데

표 1.5 기후변화 평가보고서에 사용된 참고문헌

분야	한국 기후변화 평가보고서				
	1차(2009~2010)		2차(2012~2014)		
	논문	보고서 및 기타	논문	보고서	기타
서론	32	15		11	1
수자원	77	34	71	8	4
생태계	136	5	68	6	15
산림	-	-	83	22	
농업	84	19	113	7	
해양 및 수산	213	27	69	4	
산업 및 에너지	1	13	47	18	1
보건	44	32	53	5	4
인간정주공간과 복지	-	-	47	67	1
적응과 취약성	-	-	13	48	
합계	588	145	566	196	26

미래의 기후전망을 위하여 지역기후모형을 이용하여 IPCC의 SRES 시나리오 중 A1B시나리오의 미래를 예측

있어서 도움을 주기 위하여 과거와 현재 기후변화에 대한 적응을 파악한다. 또한 기후변화의 적응 평가는 기후

변화 영향에 노출되는 영향요소들의 변화의 민감도를 분석하는 것이 주목적이다.

우리나라의 경우 기후변화와 관련된 연구들 중 영향평가와 관련된 연구들이 가장 많이 진행되고 있다. 육상생태계, 농업, 수자원, 연안・해양 분야의 경우 시나리오를 이용한 연구들이 활발하게 진행되고 있다. 여기서 시나리오는 각각의 분야에서 임의적으로 온도 혹은 강수량을 가정하여 미래의 영향을 평가하거나(조광우, 2003 ; 임종환과 신준환, 2005 ; 식품의약안전청, 2008), 전 세계적으로 사용되고 있는 IPCC SRES 시나리오를 이용하여 미래의 영향을 평가하고 있다(전성우 등, 2001 ; 김병식 등, 2005 ; 이동근 등, 2010). 이러한 시나리오를 이용한 영향평가는 물리적 모형, 실험, 모델링 등을 이용한다(전성우 등, 2001 ; 서희철 등, 2006).

IPCC에서 제안하고 있는 적응 평가는 기후변화의 기후적인 요소 이외에 비기후적인 요소를 포함하고 있다. 취약성 평가는 영향평가에서 비기후적 요인이 민감도에 영향을 주는 부분을 추가하고 적응 능력에 영향을 주는 요소를 파악하는 형태로 진행되고 있다. 적응 능력의 경우 비기후적인 요소에 의해서 영향을 받기 때문에 아직 명료한 방법론이 부재하여 국내·외에서 많은 연구가 진행되지는 않았다.

앞서 언급한 평가들을 위해서는 데이터 수집이 결정적인 역할을 하므로 양질의 자료를 수집하여 접근하는 것이 필수적이기 때문에 적절한 제도 및 기반시설이 갖추어져야 한다. 이를 위해서 전지구적 지구 관측시스템들의 시스템 계획이 착수 및 실행 중에 있으며, IPCC의 데이터 유통센터에서 사회-경제적 자료 및 대기-해양 일반 순환모형 등을 공유하고 있다. 다른 한편에서는 적절한 온라인 데이터베이스를 사용하거나, 이해관계자의 조사 내용 및 조사 방법들을 이용하여 자료를 수집하고 있다(IPCC, 2007b).

1.2.1.3 수자원

기후변화로 인하여 유출수, 호수 수위, 지하수, 홍수와 가뭄 및 수질 등의 변화가 관찰되고 있다(IPCC, 2007a). 수자원은 농업과 환경에 직접적인 영향을 주는 자원임과 동시에 전염병 등을 옮길 수 있는 중간매체로서의 역할도 하고 있다. 따라서 기후변화에 의한 수자원의 변화는 지구의 물순환에 영향을 미치고 이는 다시 에너지, 대기성분, 대륙・수생 생태계 전반에 영향을 미치게 된다.

수문과 관련된 대표적인 기상인자인 강수량, 증발산량의 변화 양상을 살펴보면 주로 단순한 통계적 방법인 평균, 선형회귀 기법과 Mann-Kendall 검정 등 이 주로 사용되었다. 우리나라의 강수량은 점차 증가추세에 있으며, 강수패턴은 강우일수는 줄어드는 대신에 강우강도는 증가하는 경향을 보이는 것으로 나타났다. 증발산량의 경우에는 강수와 기온이 증가함에도 불구하고, 전국 대부분 지역에서 감소하였다(김광섭 등, 2006).

수문인자의 경우 지표수, 지하수, 홍수, 가뭄이 대표적인 인자이다. 홍수의 경향성 파악을 위하여 집중호우의 발생과 홍수에 의한 피해액을 살펴본 결과에 따르면, 계획홍수량을 초과하는 홍수가 빈번하게 발생하고 있으며, 그 규모도 꾸준히 증가하는 것으로 나타났다. 빈번한 홍수 발생과 더불어 가뭄으로 인한 농업, 산업의 영향도 지대할 것으로 예상된다.

미래 국내의 기후변화에 따른 기상인자의 변화양상을 살펴보면, 미래 시나리오와 기후모형에 따라서 약간 차이가 있으나, 기온은 대체적으로 증가하는 것으로 나타났다. 하지만 강수량은 비교적 큰 차이를 보이고 있는데, 모형에 따라서 30% 감소하는 결과에서 30 ~ 50% 증가하는 등의 상이한 결과를 전망하고 있어 불확실성이 높은 것으로 나타났다. 그리고 WGⅠ 의 1.2절에는 강수량변화 경향이 중간적 동의 수준으로 평가되었다.

1.2.1.4 생태계

식물 및 동물들은 특정한 기후 및 환경의 변화가 생물의 내성을 넘어서면 생체주기의 변화, 서식 범위의 변화, 형태 및 생식의 유전적 변화, 소멸 또는 멸종을 초래할 것으로 예상 된다. 우리나라 식생의 경우 기온 상승에 따라서 개화시기와 개엽시기가 앞당겨지고 있는 것으로 관측되었다(Kim et al., 2009). 또한, 기후변화에

따른 일부 수종의 쇠퇴가 예상되고 있으며 특히 지구온난화에 취약한 고산식물, 고유종, 산호초, 연안 습지의 피해가 나타날 것으로 우려되고 있다(구경아 등, 2001).

그리고 우리나라에서는 봄 및 여름철의 기온 증가에 따라서 산불 및 산사태와 같은 산림재해가 증가하고 있는 추세이다. 우리나라에서는 최근 10년간(1999 ~ 2008) 연평균 497건의 산불이 발생하였으며, 산불 발생의 84%가 건조기인 1 ~ 5월에 발생한 것으로 나타났다. 또한, 산림병해충의 발생 세대수 증가 및 외래병해충의 유입과 확산이 관찰되고 있다(임종환, 2008 ; 최광식, 2009).

조류의 경우에 철새들의 회귀날짜나 산란의 시기가 온도변화와 관련성이 높은 것으로 나타났다(IPCC, 2007b). 취약생태계의 경우 북방계 극지, 고산식물이 자라는 고산대와 아고산대의 피해가 가장 클 것으로 예상되고 있으며, 습지와 해안사구는 개발과 환경변화에 따른 영향을 많이 받는 것으로 나타났다.

1.2.1.5 농업

기후는 작물의 종류와 재배시기, 생산성, 품질 등을 결정하는 요소로서 중요한 농업자원이라고 할 수 있다. 농업이 기후에 크게 좌우되지만 비-기후적인 요인들의 영향도 크게 작용하므로 기후변화로 인한 생산량의 변화추이를 판단하기는 쉽지 않다. 일 평균기온이 5℃ 이상인 날을 나타내는 식물기간은 월동작물이 생육을 시작하고 겨울채비를 시작하는 시기를 알려주는 지표로 활용되고 있는데, 우리나라 경우에 이러한 식물기간이 평년에 비하여 빨라지고 일수도 길어지고 있는 것으로 나타났다.

기상재해에 의한 농업분야의 피해는 증가 추세에 있으며 피해액수는 연간 평균 2,070억원으로 나타났다. 풍수해가 가장 큰 비중을 차지하고 있으며, 피해면적이 증가하고 있다. 냉해의 피해규모는 줄어들고 있으나, 발생 빈도는 증가하고 있다. 기후변화에 따른 기온 증가로 인하여 전체적으로 한발지수가 개선되고 있어서 적정 재배시기가 변화하고 있다. 기온 상승으로 인한 월동해충의 증가와 토착화 가능성의 증대, 아열대성 병해충의 출현 등 농작물에 피해를 주는 해충의 변화도 관찰되고 있다(심교문 등, 2008).

미래의 기후변화에 따라 작물기간이 연장될 것으로 예상하고 있으며, 벼와 콩의 수확량이 감소할 것으로 나타났다. 벼의 경우 현재의 품종과 재배기술을 미래에 그대로 적용하는 경우 고온에 따른 생육기간 단축과 등숙기 고온으로 인한 등숙 저해 등으로 인하여 최대 수확량이 40%까지 감소할 것으로 예측되었다(정유란 등, 2006).

1.2.1.6 연안 및 해양

해안지역들은 이미 기후변화로 인한 해수면 상승, 지형적 요인 및 인간으로 인한 토지 침강, 그리고 또 다른 지역적 요인들의 결합에 의해서 해수면 상승의 효과를 경험하고 있는 실정이다. 전 세계적으로 침강이 이루어지고 있는 해안지역에서의 해수면 상승은 20세기의 상승속도인 1.7 ~ 1.8 ㎜/yr을 상회하는 것으로 나타났다(IPCC, 2007a). 국립해양조사원(2009)에 따르면, 우리나라의 전체평균 해수면 상승률은 2.2 ㎜/yr이고, 서해는 1.1 ㎜/yr, 남해는 3.2 ㎜/yr, 동해는 2.2 ㎜/yr를 각각 나타냈으며, 제주도 부근은 평균 4.9 ㎜/yr의 높은 상승률을 나타내었다.

우리나라는 1년에 약 1개의 태풍이 상륙하게 되는데, 우리나라에 영향을 준 태풍의 수 자체는 크게 변화가 없었지만 연간 최대풍속 및 일강수량의 극값은 점점 증가하고 있는 추세에 있었다. 해양의 수질과 관련한 표층 해수 산성화, 심층 해수 무산소화, 연안 부영양화 및 빈산소화와 같은 현상 역시 우리나라의 해역에서 나타나고 있으나, 아직까지 많은 연구가 진행되지 못 하였다.

한반도 주변해역의 37년간(1968 ~ 2004)의 수온변화의 선형추세에 따르면 서해 표면수온은 0.9℃ 상승, 50 m 수심은 0.49℃ 하강하였으며, 동해의 표면수온은 0.91℃ 상승, 50 m 수심은 0.28℃ 상승, 100 m수심은 0.845℃ 하강, 남해의 표면수온은 0.93℃ 상승, 50 m 수심은 0.34℃ 상승, 100 m 수심은 0.37℃상승하였다. 특히 서해의 50 m와 동해의 100 m 수심에서 수온이 하강하는 추세가 나타났다. 한반도 주변해역의 해수온 변화양상은 Kim et al.(2005)에 의해 수행되었는데, IPCC A1B 시나리오를 이용한 결과에 따르면,

2100년의 해표면 온도는 2000년을 기준으로 할 때 1.3 ~ 2.0℃ 정도 상승할 것으로 예측되었다.

1.2.1.7 산업

IPCC 4차 평가보고서에서는 기후변화에 따른 에너지 수요 변화 및 관광산업, 지역적 적응 등의 사회-경제영역에서의 기후변화 영향을 분석하고 있다(IPCC, 2007b). 우리나라의 경우 경제의 수출 의존도가 높고, 에너지 소비의 97%를 해외에 의존하고 있어 국내·외의 기후변화 관련 규제들이 시행되게 되면 온실가스 규제에 따라서 국내 산업에 미치는 영향이 대단히 클 것으로 예상되고 있다.

우리나라의 경우 철강 산업, 비철금속산업 그리고 화학, 고무 및 플라스틱 산업 등 에너지집약 산업을 중심으로 국제 경쟁력이 향상되어 국내 생산 활동이 활발해져 산업구조가 개편될 것으로 예상하고 있으며, 기후변화에 따른 사회의 영향에 관한 연구에서는 이상기후에 따른 기반시설의 파괴 등 악영향이 있을 것으로 예상하고 있다.

기후변화가 농업, 임업, 보건산업 및 산업, 경제에 영향을 미칠 것으로 나타났다. 향후 농・축산업의 이산화탄소 배출량이 농약 사용 감소 및 에너지 이용효율 증가로 감소할 것으로 나타났으며, 농업부문이 배출권 거래제에 포함된다면 흡수원으로서 기능이 가능할 것으로 예상되고 있다.

탄소세 부과에 따른 산업의 영향을 예측한 연구에서는 톤당 50달러의 세금이 부과될 경우 2030년에는 탄소세가 73조원에 이를 것으로 예상되며, 1차금속, 석유화학, 석유석탄업, 비금속광물업의 부담이 높을 것으로 예상되고 있다(산업연구원, 2008). 또한 배출권 거래제가 시행되면 우리나라의 경우 배출비용을 감소시킬 수 있을 것으로 예상하고 있으며, 탄소세 부과에 따른 고용 감소효과와 GDP 감소가 나타날 것으로 예상하고 있다.

1.2.1.8 보건

건강에 미치는 기후변화의 영향은 건강관련 장기자료의 부재, 인간의 질병과 관련된 분포와 강도를 결정하는 비-기후적 동인들의 중요성으로 인하여 그 증거를 찾기가 매우 어렵다. 그러나 기후변화와 연관이 있는 것으로 알려진 건강영향에는 폭염 및 혹한 스트레스로 인한 영향, 곤충을 매개로 하는 질환, 음식 및 수인성 질병, 그리고 꽃가루 및 먼지에 의한 질병 등이 있다.

국내에서 기후변화로 인한 건강영향에 대한 심각성에 대한 인식은 생겨 난지 아직 오래되지 않아서, 제한적인 범위에서 연구가 진행되고 있으며, 주로 폭염이 건강에 미치는 영향, 기상재해로 인한 인명피해 특성과 변화 추세, 대기오염에 의한 건강 영향, 곤충 및 설치류 매개 전염병에 의한 영향, 수인성・식품 매개 질환에 의한 영향과 같은 분야에서 연구가 진행되고 있다.

극한 폭염이나 혹한은 사망률 증가와 관련이 있는 것으로 알려져 있는데, 우리나라에서도 기후변화로 인하여 고온의 발생 빈도와 강도가 증가하여 이로 인한 초과사망률이 증가하는 것으로 나타났다. 기상재해로 인한 피해의 특성과 변화 추세를 분석 한 결과 재해의 빈도는 감소하고 있으나 피해의 강도는 증가하고 있다.

병원균 매개체에 의한 질병은 기온상승의 이유도 있지만, 병원충들의 저항력 증가, 병원균 매개체에 대한 관리 소홀 등도 원인으로 볼 수도 있다. 그러나 대부분의 짧은 시기에 축적된 자료이기 때문에 명확한 인과관계를 밝히기가 어렵다(IPCC, 2007b). 미래에 기온변화로 인한 고온현상의 빈도가 증가함에 따라서 고온에 따른 초과사망자가 늘어날 것으로 예상되고 있으며, 재해의 빈도 및 불확실성이 높아짐에 따라서 사회·경제적 피해가 늘어날 것으로 예상되고 있다. 동시에 대기오염의 증가, 전염성 질병의 증가로 인한 피해가 증가할 것으로 예상된다. 특히 어린이, 노인, 저소득층, 만성질환을 가진 사람들의 피해가 심각할 것으로 예상되며, 도시지역과 해안 및 저지대 인구의 피해가 클 것으로 예상된다.

1.2.2 한계점 및 시사점

기후변화 영향, 적응 및 취약성, 위험 평가관련 연구는 미래 기후변화의 위협을 이해하고, 적응 능력을 향상시키는 것을 목표로 연구를 수행하던 차원에서 다양한 구동인자와 영향들 사이의 상호작용 및 피드백 평가

를 통해 전 세계적 혹은 지역적인 대안을 찾고, 대안별 비용효과 등의 평가를 통한 의사결정을 위한 통합평가로 발전하고 있다. 의사결정자들이 기후변화 대응 정책을 개발함에 있어서는 기후변화로 인해 현재 피해가 예상되는 지역에 대한 정보, 기후변화로 인해 예상되는 영향 범위에 대한 정보, 기후변화 영향의 신뢰성 평가, 잠재적으로 피할 수 없는 영향이나 염려되는 영향에 대한 정보, 기후변화와 관련된 다양한 위험요소 분석 및 기회에 대한 평가, 미래의 적응전략에 따른 취약성 감소, 다양한 대응전략수단별 비용, 적응・완화방안을 포함하는 대응수단 비교 등의 다양한 정보가 필요하다. 1차 평가보고서에서는 이러한 기후변화의 영향, 적응 및 취약성의 복잡한 상황을 이해시키고, 한반도와 관련된 기후변화 연구를 명확하게 설명하기 위해서 IPCC 4차보고서에서 정리되었던 방법론 틀에 준거하여 연구 방향을 제시하고, 연구방향을 제시한 바 있다. 미래 기후변화 연구를 위해 온실가스 농도증가와 기후・비 기후적인 요인의 변화는 시나리오 접근법을 제안하고, 미래 기후변화의 영향, 적응 양상을 뒷받침하기 위해서 실험, 모델링, 사례연구, 전문가 의견조사 등의 방법을 제시하였다. 하지만 일부 분야에서는 아직도 기후변화의 일련의 흐름을 추정할 만한 근거를 제시하는 연구를 찾기 어렵다.

현재는 기존의 개별 영향, 취약성, 및 적응연구 뿐만 아니라 기후변화로 인한 위험 양상과 잠재적 편익, 적응과 완화를 통해 어떻게 위험을 줄 일수 있는 지의 여부가 핵심쟁점 사안으로 떠오르고 있다. 특히 적응계획은 각 분야별 이해관계가 상충되거나, Co-benefit 효과가 발생할 수 있기 때문에 통합적인 접근 방법이 필요하다. 이는 이 연구가 개별적 연구로 그치는 것이 아니라 사회・경제적 대책 수립에 중요한 자료로 사용되기 때문이다. 즉, 기후변화에 의한 문제 해결에 있어 통합적 관점은 적응과 완화 전략의 통합, 기후변화로 인한 영향을 받는 분야 간의 통합이 요구된다(PEER, 2007). IPCC에서는 Working Group Ⅰ, Ⅱ, Ⅲ의 기후변화 영향·적응·완화의 상호작용, 크게는 국가 간 또는 좁게는 지역 간 영향에 대한 고려 그리고 여러 분야 간 상호작용에 대한 내용 등 통합의 개념을 새롭게 논의하고 모델링 커뮤니티를 통해 연구방법론 공유 및 연구결과 공유를 모색하고 있다(IPCC, 2013). 또한 기후변화의 연구결과의 적용에 있어서 학문적 탐구와 의사결정 차원에서 요구되는 불확실성 정도의 차이는 존재하지만 결과의 불확실성을 줄이는 것이 향후 과제로 떠오르고 있다.

우리나라의 기후변화 연구를 살펴보면, 통합평가 및 연구간 비교의 중요성에도 불구하고 연구의 초점이 주로 개별 분야의 영향평가 및 지역별 취약성 평가에 머무르고 있다(환경부, 2010). 일부 연구에서 농업 및 수자원간의 관계를 통한 평가, 수량 및 수질의 평가, 생태계 서비스와 산림 평가 등의 연계가 이루어지고 있지만 일관된 방향성에 대한 논의를 도출하기에는 결과가 부족한 실정이다. 개별 연구차원에서 한반도를 대상으로 한 영향 및 적응 가능성 평가 연구를 살펴보면, 자연과학 분야인 생태계, 농업, 연안 및 수 환경에 관한 연구

표 1.6 영향평가와 완화평가의 분석범위 예시

	분석 범위 (예시)	비고 (예시)
영향 평가	○ 총 60 종 : 다음의 기후 시나리오와 사회 경제 시나리오를 조합 ○ 기후 시나리오 20 종 (= 배출시나리오 RCP : 4 종 × 기후 모형 CMIP5 : 5 종) ○ 사회 경제 시나리오 SSP : 5 종	○ 대책 평가와 일관성을 증진을 위해 완화 정책 실시에 의해 변화하는 사회 경제적 조건에서의 영향 평가도 실시 ○ 평가시기: 현재 (1981 ~ 2000년), 가까운 미래 (2020년), 중기 (2050년대), 장기 (2080년대)
완화 평가	○ 각 사회경제적 시나리오(SSP)에서 정책 목표에 맞는 SPA 시나리오를 설정 (완화목표를 설정) (SSP2) RCP8.5 → RCP6.0 (SSP1) RCP6.0 → RCP4.5	○ 완화에 따른 영향평가 결과 비교(비용효과 분석 등) ○ 특정한 문제를 해결하기 위해 도입하는 대책의 한계치 적용

에서는 과거 문헌 연구 및 통계적인 방법을 이용한 모델개발 및 적용에 관한 연구가 진행되었고, 2000년대 개발된 SRES 공통시나리오에 따른 배출 시나리오가 적용된 GCM, RCM을 이용한 연구가 진행되었으며, 최근에는 IAMC (The Integrated Assessment Modeling Consortium), IAV (The Impacts, Adaptation, and Vulnerability), CM (Climate Modeling) 등 모델링 포럼에서 공통으로 논의된 시나리오인 RCP를 이용한 연구도 활발히 진행되고 있다. 하지만 아직 우리나라에 맞는 수준의 모델이 다양하지 않으며 일부 시나리오에 대해서만 적용이 되고 있는 단계이기 때문에 일관성 있는 논의를 이끌기에는 미흡한 실정이다. 사회과학 분야인 산업이나 보건 분야의 연구는 국내·외적으로 연구가 다양하게 시도되고 있으나, 기후변화와의 인과관계를 명확하게 설명할 수 있는 요소가 한정되어 있어 한정된 부문을 대상으로 한 영향 평가가 이루어지고 있다. 국내 산업이나 보건 분야의 연구를 보다 명확하게 이해하고, 통합적으로 이해하기 위해서는 연구의 기초자료가 되는 자연과학 분야의 많은 연구가 필요하다.

현재 국가 기후변화 대응계획 수립 및 각 지자체를 대상으로 기후변화 적응계획이 수립되고 있다. 적응계획 수립을 위해 취약성 평가 방법론 등이 다양하게 제안되었고, 일부 연구가 수행되었지만, 대응계획 수립 방법 및 절차를 살펴보면 계획을 수립하기 위한 충분한 정보가 존재하지 않은 상태에서 적응계획 수립이 이루어지고 있다. 즉, 우리나라에는 불확실성 및 신뢰도를 평가 할 수 있는 연구가 부족하고, 통합된 시나리오에서 연구 결과를 활용한 것이 아니기 때문에 위험, 적응 비용관리 측면에서 올바른 의사결정을 도출하기 쉽지 않다. 위험은 기후의 영향에 대한 잠재적 결과를 예상하는 것으로 위험의 한계를 나타내는 임계 치를 사용하여 구체화하고, 의사결정을 하게 되는데, 우리나라의 경우 구체적이고 잠재적인 결과 및 회피 비용 등을 예상할 수 있는 근거가 미약하기 때문에 정책관리자, 과학자, 지역공동체 구성원 등 사회의 폭넓은 개인 및 집단들의 의사를 종합하기가 쉽지 않다.

따라서 앞으로 기후변화 영향, 취약성 및 적응 연구를 바탕으로 기후변화 위험에 대비하기 위해서는 다음과 같은 몇 가지 요소가 충족된 가운데 연구가 이루어지고, 연구결과가 집대성되어야 할 것이다.

첫째, 기후변화의 복잡하고, 불확실한 양상을 이해하기 위해서는 다양한 시나리오를 반영한 여러 기후모형을 연구에 활용하여 불확실성이 높은 미래에 기후변화가 자연과 인간에 어떠한 영향을 미칠 것인지 예측하고 대비해야 한다. 우리나라 연구의 대부분은 기후변화 시나리오 외에 사회, 경제 발전 시나리오 등을 함께 고려한 연구가 미비하기 때문에 미래에 통일되고 일관된 논의를 위해서 공통의 사회-경제 시나리오가 개발되거나 사용되어야 한다. 이미 기후변화 현상에 대한 예측에 있어서는 RCP(Representative Concentration Pathways)를 바탕으로 도출된 기후자료를 활용하고 있으나, 단일 시나리오만을 이용한 연구가 주를 이루는 등 다양한 시나리오가 고려되지 못하고 있다. 사회경제적 시나리오의 경우에는 기후시나리오와 다르게 아직 국내에 공통적으로 사용되는 포맷이 미비하다. 미래 불확실성을 감안한 연구결과 도출을 위해서 국내 적용 가능한 사회경제적 시나리오 등의 개발이 필요하며, 개별적인 개발이 어려울 경우에는 국제적으로 논의되고, 활용되고 있는 SSP (Shared Socio-economic Pathway) 시나리오를 적극 활용하는 것도 고려해 볼 수 있다.

둘째, 미래 기후변화 연구는 시나리오를 기반으로 예측 및 평가하기 때문에 일련의 시나리오의 통합적인 관리 및 논의가 필요하다. 일련의 통합관리 틀을 제시하고, 이에 맞게 연구를 장려하여 연구결과를 도출하여 통합된 논의를 이끌어 낼 수 있어야 한다.

위와 같은 논의는 설정한 완화 목표에 대해 기온 상승 폭의 변화에 대한 다양한 영향완화의 경제적 비용과 파급 위험 등을 파악할 수 있다. 이때 고려해야할 불확실성에는 기후 (+영향) 불확실성, 완화 불확실성, 사회·경제 불확실성 등이 있으며 이를 감안하여 의사결정을 하면 된다. 예를 들어 기후 민감도가 더 크면 기온 상승은 예상보다 크게 되고, 반대라면 예상보다 작아진다. 완화대책(기술)은 다양한 옵션의 조합으로 구성하여 능동적으로 선택할 수 있으나, 혁신과 사회적 수용 가능성 등 불확실성에 따라 좌우되기 때문에 이에 따른 완화 비용과 파급 위험에 변화가 생기는 점도 고려할

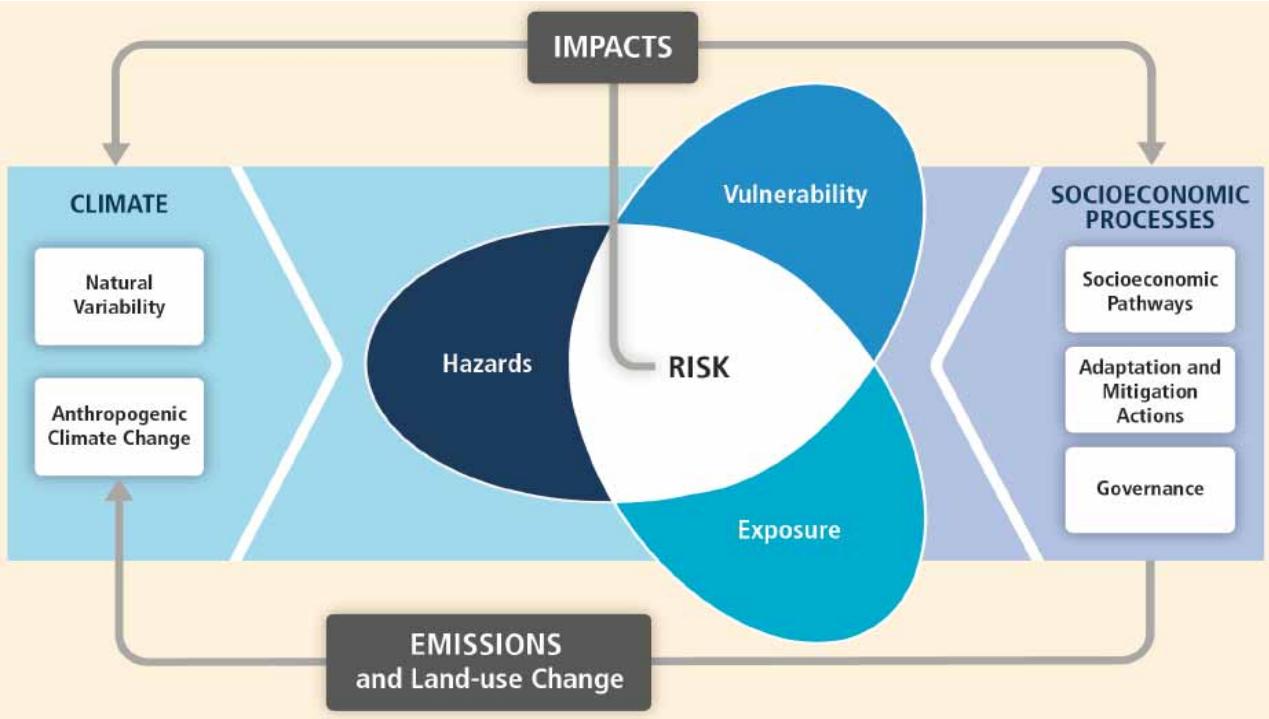


그림 1.2 WGⅡ AR5에서의 중요 개념 설명; 기후위험는 위해(hazard)요소와 취약성, 기후노출(exposure)의 상호관계에 따라서 발생하고 인간과 자연시스템에 영향을 미친다(IPCC, 2013).

필요가 있다.

셋째, 크로스-분야평가를 통한 통합적인 접근 방법이 필요하다. 수자원, 농업, 산림, 생태계, 보건, 산업 등 각 분야 내에서의 평가 요소(주요 영향인자)간 영향관계를 이해하고, 각 기후변화 적응을 위한 대책 혹은 정책의 정합성 및 비용변화 등을 명확히 살펴야 한다. 예를 들어, 수자원 분야의 경우 미래 기후변화로 인해 수량변화, 수질변화가 발생할 수 있다. 수량 및 수질의 경우 일정부분 상관성이 있기 때문에 단독으로 모델링 되는 것 보다는 두 관계가 일관된 시나리오 속에서 미래 변화양상이 밝혀지는 것이 필요하다. 또한 기후변화로 인한 위험 양상과 잠재적 편익, 적응과 완화를 통해 어떻게 위험을 줄 일수 있는 지의 여부를 제대로 이해하고, 적응계획 각 분야별 이해관계가 상충되거나, Co-benefit 효과를 밝히기 위해서는 분야 간 영향 및 적응, 위험을 계량화해야 한다. 이는 위험 관리를 목적으로 상호 연관관계가 있는 몇몇 분야들의 영향 및 취약성 관계를 밝히고 이들 간의 영향 정도를 분석한 모형을 제시해 다각도의 영향 및 취약성 평가도 가능하게 한다. 그리고 분야 내 통합, 분야 간 통합의 단계적 통합을 통하여 국내에 적합한 통합 영향을 논의할 수 있다. 예를 들어 물이용의 경우만 보더라도 인간의 일상생활을 위한 물이용, 농업용 물이용, 공업용 물이용, 자연생태계의 물이용 등 이해관계가 복잡하게 얽혀있다. 따라서 미래 기후변화에 따른 물 부족 위험을 논의하고 적응대책을 수립하기 위해서는 통합적 모델링 결과를 바탕으로 한 대책 수립이 필요하다. 통합평가 논의를 효율적으로 이끌기 위해서는 다음 표와 같은 분야 선정 및 연계분석 가능성 분석을 통한 합리적 연계 방안을 도출해야 한다.

넷째, 연구자간 효과적인 의사소통을 통해 기후변화의 위험을 확실히 평가하고 연구결과의 불확실성을 줄이고, 기후변화 연구에 적용되는 기술 및 정보 격차를 줄일 필요성이 있다. 이를 위해서는 평가 방법론 및 데이터의 공유가 필요하다. 현재는 평가 방법론이 미비하고, 이에 걸맞은 데이터도 부족하기 때문에 이에 대한 보완이 필요하다. 또한 전 지구적인 기후변화 연구는 기후적 인자와 비 기후적 인자를 포함한 연구로 나아가고 있기 때문에 우리나라도 이에 대한 고려가 필요하다.

다섯째, 정부는 기후변화 대응을 위해 기후변화 적

응·완화 정책과 이를 평가할 수 있는 정책평가 모형 개발을 수행해야한다. 기후변화의 적응전략을 평가하고 다양한 대응 전략 및 수단별 비용의 상호 비교를 통하여 다양한 정보를 제공하여야 할 것이다.

1.3 IPCC WGⅡ 5차 보고서의 주요 결론

1.3.1 주요 내용 요약

1.3.1.1 전 지구적 관찰된 영향, 취약성, 적응

최근 몇 십년간 기후는 전 세계적으로 인간과 자연시스템에 막대한 영향을 끼쳐 왔고 많은 지역에서 실제 변화하고 있는 기후를 체험하고 있다. 이로 인해 전 세계는 강우량 변화의 영향을 받고 있으며 융설과 같은 수문학적 시스템의 변화로 인해 수질 및 수량 등 수자원에 영향을 받고 있다. 기후변화로 인해 대륙간, 지역간 상호작용하는 자연시스템의 물리적 성향도 바뀌어 가고 있다.

기후변화는 기온상승으로 인해 수확물과 식량안보에 긍정적인 측면보다 부정적인 악영향을 더 많이 끼치고 있다. 또한 전 세계적으로 기후변화와 관련된 질병들이 늘어나고 있고 혹한, 혹서기의 사망률이 증가하고 있다.

기후변화는 지역 및 계층간의 서로 다른 사회, 경제, 환경적 조건에 따라 그 영향을 미치는 정도가 다르기 때문에 취약성에 차별성이 존재한다. 최근 기후변화와 관련된 영향에는 폭염, 가뭄, 홍수, 태풍, 산불 등이 있으며 이러한 영향에 의해 인간 및 자연시스템이 취약해지고 있다. 그리고 이러한 영향들은 결국 2차, 3차적 피해를 일으켜 인간의 삶을 파괴하고 가난을 불러오며 자연생태계에도 악영향을 끼치고 있다.

이러한 인간은 기후변화에 적응하기 위해서 과거로부터 많은 노력을 기울여 왔다. 적응에 대한 노력은 각 지역마다 상이하지만 그 정도가 축적이 되어 지역커뮤니티로부터 변화에 적응하는 능력이 각자 생기게 되었고 다양한 수준의 정부들도 이에 대응하기 위한 대책을 마련하고 있다.

따라서 대책을 마련하고 수행하기 위해서 의사결정 시스템을 거치게 되고 그 과정에서 어떤 대안이 효율적인지 타당성을 따지게 되었으며 불확실성을 감안하게 되었다. AR5 WGⅡ 보고서는 이러한 불확실성을 감안하기 위해 다양한 전문가로부터의 의견 또는 증거를 모아 통합적인 시각에서 의사결정을 하도록 권고하고 있다. 또한 기후적인 요소에만 의존하지 않고 사회·경제적인 측면을 반드시 같이 고려해야 할 것을 강조하고 있다.

1.3.1.2 기후변화 적응에 대한 위험과 기회

전 세계적으로 기후변화현상을 겪고 있지만 지역별·국가별로 받아들이는 정도, 즉 취약성과 적응능력이 다르기 때문에 기후변화로부터의 위험이 기회가 될 수도 있고 더 큰 위험요소로 작용할 수도 있다. 또한 분야별로 기후변화로부터의 위험과 기회가 서로 다르기 때문에 이에 대해 파악할 필요가 있다.

담수자원과 관련하여 생길 수 있는 위험요소에는 홍수로 인한 위험과 가뭄 등으로 인해 발생할 수 있는 물 부족 현상이다. 위도가 낮은 고온지역에서는 가뭄의 빈도가 더욱 높아지지만 위도가 높은 지역은 오히려 수자원이 더욱 많아질 것이다. 그러나 온도가 상승하면서 수질이 나빠질 것이라는 위험요소가 있다.

그리고 담수와 육지 생태계의 관계를 살펴봤을 때, 온도상승과 함께 수질이 악화됨에 따라 육지생태계에도 영향을 미칠 것이고 결국 서식지의 파편화, 종의 감소 등을 야기할 것이다. 또한 RCP8.5 또는 6.0과 같은 온실가스 농도가 높은 기후시나리오에서의 미래는 육지 및 담수와의 관계에서 생태계 시스템 구조의 변화 등이 생기게 될 것이다.

해수면 상승으로 인해 21세기에는 연안 저지대가 가장 큰 피해를 입을 것이고 침수, 홍수, 침식 등의 영향을 받게 될 것이다. 해양생태계는 전 세계적으로 작은 플랑크톤에서 큰 생물에 이르기까지 해양생물의 종이 재분배가 일어날 것이고 지역적 특징이 있는 토착종의 의미가 사라지게 될 것이다.

식량안보적 측면에서 열대지역에서는 기후변화로부터 악영향을 받게 될 것이고 특정 식량항목에 상관없이 모든 식량이 기후변화로 인해 영향을 받을 것이다.

도시지역은 기후변화로 인해 매우 다양한 위험요소가 공존하는 공간으로 회복력을 높이고 지속가능한 개발을 하는 것이 매우 중요하다. 또한 농촌지역은 물의

수요와 공급에서의 시스템 변화, 수질의 변화 등이 결국 식량안보적 차원에서의 악영향을 미치게 될 것이다.

중요 경제분야에는 기후적 요소도 영향을 많이 미치지만 주로 비기후적 요소인 인구, 성별, 수입, 기술, 가격, 생활패턴, 규제, 정부의 역할 등이 더욱 영향을 많이 미친다. 그러나 특정 분야에 관해서는 악영향을 받기도 하지만 기회로 역이용할 수 있는 요소가 많기 때문에 기회가능성이 높은 분야이다.

사람의 건강분야는 기후변화가 일어나기 시작한 시점부터 미래에도 지속적으로 영향을 미칠 것이다. 지역에 따라서는 편차가 크게 작용할 것이며, 특히 개도국에서 미치는 영향이 선진국에 비해 클 것이다. 이러한 지역적, 국가적 차별성이 형평성의 차이를 불러와 지역 간의 갈등을 초래할 수 있으며 이를 조절하기 위한 세계국가기구의 역할이 중요할 것이다.

1.3.1.3 위험관리와 회복력 강화

기후변화로부터 위험을 관리하고 회복력을 강화하겠다는 것은 미래세대와 경제, 환경을 고려하여 기후변화의 완화와 적응을 동시에 포함하는 것이라고 하겠다. 이는 회복력을 강화하기 위해 어떻게 적응을 해야 하고 기후변화를 완화하기 위해 어떻게 대응을 해야 하는지를 의미한다.

효과적인 적응을 위해서는 한 분야만을 고려해서 대책을 마련하는 것이 아닌 전 분야를 고려한 통합적인 시각이 필요하다. 또한 적응대책은 개인에서부터 정부, 사회단체에 이르기까지 다양한 사람들이 참여해야 하는 것이다. 미래 기후변화에 적응하기 위해서 가장 먼저 해야 할 단계는 취약성을 줄이고 기후로부터의 노출 요소를 줄이는 것이다. 그리고 적응을 위한 모든 대책들은 그 지역의 사회경제적 요소와 여러 상황들을 고려하여 세워야 하고 효율적인 정책결정을 위해서는 정책결정과정에서의 투명성과 다양성을 인정되어야 한다.

또한 정책결정을 하는데 있어 하나의 정책이 다른 분야에 어떠한 영향을 미칠지도 사전에 파악을 해야 하며 이행과정에서 계층 및 지역간 갈등을 최소화하여야 한다.

기후변화로부터 적응력과 회복력을 높이기 위해서는 지속가능한 개발이 매우 중요하다. 지속가능한 개발을 하겠다는 것은 기후변화 완화를 강화함은 물론 기후변화에 대한 적응능력을 높이겠다는 것을 그 속에 포함하고 있다고 할 수 있다. 앞으로 기후변화는 더 큰 규모로 영향을 줄 것이기 때문에 이러한 부분에 있어 지속가능성은 경제, 사회, 행정, 정치 등 다양한 요소들을 고려하여 방향을 설정해야 한다. 즉 기후변화로부터 영향을 최소화하기 위해 저영향의 개발을 추진해야하고 그렇게 해야 기후변화로부터 회복력과 적응력을 높일 수 있다.

1.4 우리나라 기후변화 영향, 취약성 및 적응

1.4.1 수자원

최근(2010 ~ 2013년)의 수자원 관련 국내 기후변화 연구는 취약성 평가 등 연구의 관점이 넘어가기 시작한 시기였다고 총평할 수 있다. 「한국 기후변화 평가보고서 2010」에 비해 전망 연구의 비율이 감소했고, 취약성 평가 및 그 외 적응대책 수립 등의 도전 연구들의 비율이 증가했다. 이는 지표·하 유출, 홍수, 가뭄 순으로 그 경향이 덜했다.

지표 유출은 GCM, RCM을 이용한 장기모의가 주를 이루고 있는데, 1차 평가보고서와 다르게 인식할 부분은 통계적 상세화 기법에 대한 연구의 비율이 과거 대비 다소 감소하였다는 점이다. 이는 기상청에서 제공된 RCM을 사용했거나 혹은 각 연구단위에서 기존 연구를 수행하는 동안 다져진 상세화기법의 노하우를 적용했기 때문으로 이해된다. 이에 대비하여 최근 관심이 높은 주제는 유출모의인데, 모형을 달리하여 적용성 검토를 하거나 토지이용 변화를 예측하는 등의 시도가 있다. 지하 유출은 1차 평가보고서에 비해 연구가 증가한 편이나, 지표 유출과의 연계를 시도하기에는 여전히 연구 단계가 미진한 상태이다.

홍수 전망은 지표 유출 전망과 함께 1차 보고서에서는 절대적인 비율을 갖고 있었으나, 2차 보고서에 이르러 그 비율이 대폭 감소한 분야 중 하나이다. 그러나 여전히 의미 있는 연구들이 발표되고 있는데, 기존에 다루지 않았던 성격의 변수 혹은 유역을 다루거나, 비정상성 빈도해석을 고려하기 전 단계의 연구들이 발표되고 있다. 그

에 반해 기후변화의 영향으로 인한 홍수 취약성을 평가하는 연구는 큰 관심을 얻고 있다. 각자의 기준 및 지표를 활용한 취약성 평가, 지표 및 기준의 개발, 그리고 경제성 분석까지 다양한 관점에서의 홍수 취약성 평가 연구가 수행되고 있다.

가뭄 연구는 홍수 연구에 비해 전망 단계에서 취약성 평가, 적응대책 수립 등 후속 단계로의 진행이 더딘 편이다. 이는 가뭄 연구의 대상 자료가 과거 관측일 경우에도 상대적으로 다루기가 힘들고 조심스러운 편인데, 기후변화의 영향을 고려함으로써 불확실성의 영향이 더욱 크게 미치기 때문이다. 그에 따라 여전히 미래 전망에 대한 연구도 비율상 꽤 존재하는 편이다. 비율은 높지 않지만, 기후변화를 고려한 기법 개발 연구나 취약성 평가 단계의 연구 또한 수행되고 있다.

기후변화에 대한 수자원 분야에서의 적응대책 수립에 관련한 연구는 현재 여러 연구자들에 의해 시도되는 중으로 알려져 있다. 이와 관련하여 활용할 수 있는 다양한 기법에 대한 연구들이 발표되는 반면, 미래 전망 자료를 입력함으로써 연구 결과 내에 적응전략을 주장하는 연구 결과는 부족한 실정이다.

1.4.2 생태계

최근 급격한 기후변화에 따라 자연생태계가 영향을 받고 있으며, 기후변화가 생태계에 미치는 영향 및 적응과 관련하여 국내·외적으로 다양한 연구들이 진행되고 있다

기존의 1차 기후변화 평가보고서 내용을 서술한 분야 중 생태계와 산림 분야는 동일한 카테고리 내에서 서술이 되었지만 2차 기후변화 평가보고서에서는 생태계와 산림 분야를 따로 분리하여 보고서를 집필하였다. 결과적으로 1차 기후변화 평가보고서에 포함되었던 내용 가운데 산림생태계에 포함되는 생산량, 산불, 산림재해, 산림병해충에 대한 내용은 산림 분야로 분리되었다.

생태계 분야에서 식물생태는 식물계절에 더해 수목생장, 멸종위기종, 외래종과 귀화식물을 포함한다. 동물생태는 곤충과 조류에 질병매개곤충, 양서파충류, 포유류, 수생태로 구성된다. 취약생태계는 습지와 무인도서, 고산 및 아고산 생태계에 서식지와 보전구역(국립공원, 천연보호구역, 생태경관보전지역)을 다루었다.

제2차 기후변화 평가보고서에 포함된 자료는 논문, 연구보고서, 단행본, 기타 연구물의 자료형태이다. 연구 자료들은 2000년대부터 현재까지에 해당하는 자료로 기후변화 시나리오를 적용한 연구와 적용하지 않은 연구를 모두 포함하였다.

제2차 기후변화 평가보고서에서는 기후변화가 식물생태, 동물생태, 취약생태계에 미치는 영향, 미래전망, 취약성, 적응대책에 대한 다양한 연구에 대한 정보를 검토하여 관련 DB를 구축하였다. 구축된 DB는 식물생태의 경우 식물계절, 수목생장, 멸종위기종, 외래종과 귀화식물을 다루었다. 동물생태는 곤충, 질병매개곤충, 양서파충류, 포유류, 조류, 수생태를 검토하였다. 취약생태계에서는 보호구역, 습지와 무인도서, 고산 및 아고산생태계 등을 검토하였다.

기후변화가 생태계에 미치는 영향을 이해하고 기후변화에 취약한 것으로 알려진 생태계를 유지 보전하기 위해서는 분야별로 과거부터 현재까지 연구 자료를 수집하여 연구결과를 분석하고 현황을 파악하여 미래를 예측하고 적응 대책을 마련하여야 한다.

1.4.3 산림

우리나라는 국토면적의 64%가 산림으로 산지가 풍부한 편에 속하지만, 최근 산지전용이 해마다 증가하여 그 면적이 감소하고 있는 추세이다(국립산림과학원, 2012). 그리고 우리나라의 기온상승률은 지난 100년간 전 지구적인 평균 기온 상승률보다 높은 것으로 나타나(국립기상연구소, 2009), 우리나라 산지 기후변화에 따른 산림부문의 영향은 국토 전반에 큰 변화를 초래할 것으로 예상된다(국립산림과학원, 2011). 이에 따라 변화를 가속화하는 원인인 기후변화와 산림의 관계에 대한 관심이 높아지고 있으며, 산림의 분포, 산림의 탄소 및 산림의 재해를 대상으로 하여 현재까지의 변화 양상과 미래의 영향 예측에 대한 내용이 국내의 관련 연구의 주를 이루고 있었다.

기후변화에 따른 산림분포 변화를 모니터링한 결과, 연평균기온이 상승함에 따라 산림 구성에서 변화를 확인할 수 있었고 이는 지역별로 다른 특성을 나타냈다. 산림의 탄소는 저장량과 변화량을 연구 대상으로 하여,

식생과 토양 탄소로 세분하여 연구가 진행되고 있다. 현장 조사와 원격탐사방법을 이용하여 탄소 및 바이오매스 양을 추정하는 연구들은 이미 활발하게 이루어지고 있으며, 최근에는 토양의 탄소저장가능성을 확인하고 이를 추정하는 연구들이 등장하였다. 산림재해는 산림자원을 위협하며 산림 생태계에 교란을 일으키는 주요한 원인으로서 국내의 산림재해 연구는 주로 산사태와 산불 연구에 집중되어 있다. 특히 산림 재해에 대한 대부분의 연구는 현재의 재해 발생 현황을 분석하고 그 원인을 체계적으로 구축하는 데 목적을 두고 있다. 환경적 요인은 산사태, 산불 및 산림병해충의 발생에서 중요한 역할을 하고 있으므로, 관련 연구들에서 환경의 변화에 따른 재해 발생 양상의 변화를 확인하였다.

기후변화에 따른 산림 분포의 영향을 전망하는 연구에서는 산림 분포 모형을 기반으로 기후변화 시나리오를 적용하는 산림 생육지 분포에 대한 예측 등이 수행되고 있다. 모형을 이용한 분석 결과, 기후대의 이동으로 인해 고산 및 아고산 식생이 경쟁에서 밀려나게 될 것으로 예상되며, 침엽수림과 혼효림의 감소, 활엽수림의 증가가 예측되고 있다. 산림의 탄소 저장량에 관한 일부의 연구들만이 기후변화에 의한 영향을 전망하고 있었으며, 식생의 탄소 저장량은 산림 분포의 예측과 높은 상관관계를 보이고 있다. 산림의 탄소 변화량의 경우, 현재까지의 연구를 바탕으로 하여 추출된 환경적 인자들에 기후변화 시나리오를 적용하여 미래를 전망하고 있다. 특히 산림 토양의 탄소 저장과 변화에 관해서는 영향 전망에 대한 연구가 미진하고, 예측이 엇갈리고 있으므로 추가 연구의 필요성이 높다. 산림 재해 역시 기후변화의 영향 전망 연구가 미진한 분야로 확인되었다. 산사태 발생 예측 연구에서는 기후변화 시나리오의 적용이 적으며, 대부분 실제 발생 자료를 바탕으로 한 유사식 도출 및 기후인자 추출을 통해 산사태의 발생 가능성을 예측하는 연구들이 진행되고 있다. 산림의 병충해 연구에서는, 온도 변화에 따른 매개충 발육 시뮬레이션을 통해 기후변화에 따른 충해의 영향을 전망하고 있다.

산림의 취약성을 평가하고 분석하고자 하는 연구들이 일부 진행되고 있으나, 관련 연구와 자료의 부족으로 인하여 취약성의 요인을 판단하기에는 어려움이 따른다. 따라서 기후변화로 인한 산림의 변화를 이해하고 대처하기 위해서는 우선 장기적으로 자료를 축적하고 연구를 진행하여, 우리나라에 적합한 모형 등의 신뢰성 있는 영향 예측 방법론을 개발하는 것이 시급하다. 또한 임업 환경과 산림 생태계를 유지하기 위해서 산림을 적정하게 관리하는 방안의 필요성이 강조되고 있다.

1.4.4 농업

기후의 변동성이 커져서 폭염, 폭설, 한파, 한발, 폭우 등 이상 기상 발생과 그에 의한 농작물 피해가 급격히 늘어나고 있는 반면 이상저온의 연간 출현 빈도는 크게 감소하여 저온 관련 농업기후자원 특성이 과거에 비하여 많이 개선되었다. 그러나 온난화에 따라 발아기, 개화기 등의 식물계절이 빨라짐으로 인하여 저온에 의한 피해 위험성은 상존한다.

온난화에 의한 기후 자원 변화에 따라 작물의 재배 적기와 적지가 변하고 있다. 벼의 경우 기후학적인 적정 출수기는 늦어지고 있으며, 미래에도 이와 같은 경향이 지속될 것으로 예측되어 이앙시기 재조정 등 주기적인 표준 재배법의 개선이 요구되고 있다. 보리의 품종 개량에 의한 내한성 증대와 지구온난화에 따른 겨울철 기온 상승이 맞물려 보리 재배 북방한계선이 상승하고 있다. 주요 과수의 경우도 재배적지가 북상하고 주산지가 변화하고 있다. 온대과수인 사과는 온난화에 따라 재배적지가 북상하고 있을 뿐만 아니라 아열대 기후대가 증가하면서 재배적지 감소로 재배면적이 감소하는 추세이다. 온난화가 지속되면 꽃눈 분화에 필요한 저온요구도 충족을 위해서 사과 등 온대 과수는 재배적지가 점차 북상하거나 고도가 높은 곳으로 이동이 되고 금세기 말이 되면 우리나라 대부분의 지역에서 온대과수의 재배가 어려워질 것으로 전망된다. 한편 아열대 과수로 제주도에서만 재배되었던 감귤이 전남, 경남 등으로 재배지역이 확대되고 있고, 참다래, 무화과의 경우 역시 재배 가능지역과 재배지역이 북상하고 있다. 온난화로 인하여 여름철 채소의 주산지인 고랭지 채소 재배 면적은 점차 감소하는 추세이고, 작물 재배 가능지역이 고도가 높은 지역으로 확장되는 것으로 파악되

고 있다.

쌀을 비롯한 작물의 수량성은 지속적으로 증가하였으나 기후변화가 정 또는 부의 방향으로 얼마나 기여하였는지는 불명확하다. 쌀의 경우 지금까지 상승 추세에 있는 기온이 쌀 수량 변화에 부정적인 영향을 미치진 않았지만 강수량 증가에 따른 일조 부족은 수량 변화에 부정적 영향을 미친 것으로 분석되었고, 지구온난화가 진전됨에 따라 생육기간 단축, 고온 불임 등 고온해로 인하여 벼 수량성 및 품질 저하가 우려된다. 기후 변화에 따라 재배 적기로 재배시기를 조정하면 벼 수량성 및 품질 결정에 영향력이 큰 등숙기간의 온도환경을 개선할 수 있어 수량 감소를 어느 정도 완화할 수는 있지만 출수 전 생육기간이 크게 단축되어 여전히 벼 수량성 감소를 경감시키는데 한계가 있다. 또한 우리나라 벼의 수량성은 수량의 변동성이 특히 최근 들어 커지고 있으며 여기에는 최근 빈번히 발생하는 이상기후나 그에 따른 자연재해가 많은 영향을 미쳤을 것으로 분석되고 있다.

지구 온난화에 따른 기후 변화는 따뜻한 월동환경, 식물체 피복기간 연장, 장마 변동 등으로 월동해충의 증가와 토착화 가능성 확대 등과 맞물려 최근 돌발 병·해충 발생이 크게 증가하고 있다. 온대기후대에 속한 한반도는 이러한 온난화의 진행에 따라 점진적으로 아열대성 기후대로 변화하게 되어 우리나라에서 재배 가능한 농작물의 종류 및 재배 작형이 변화되고 그에 따른 병·해충·잡초 발생양상도 달라질 것으로 전망된다. 병·해충에 대한 벼 생산의 취약성은 현재보다 미래 기후 조건에서 크게 높아지고 취약지역 면적도 증가할 것으로 전망된다.

기후변화에 따른 농업 피해는 줄이고 변화를 우리나라 농업 및 국가 경제에 유리하도록 적응 전략과 정책을 수립하여 착실히 이행하여야 한다. 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 한다. 지구온난화로 변화된 생태환경에 적응할 수 있는 작부체계, 재배시기, 비배관리기술, 병·해충·잡초 관리기술과 온실가스발생 저감형 작물생산 기술의 개발을 통한 농작물 생산 안정성 및 기후변화 대응력을 향상하여야 한다.

1.4.5 해양 및 수산

IPCC 제5차 평가보고서(AR5)는 제4차 평가보고서(AR4)보다 해양 문제를 더욱 심도 깊게 다루었다. AR5에 따르면 21세기부터 급속한 해수면의 상승으로 인하여 연안과 저지대 지역은 침수될 위험성이 커지며, 많은 수의 해양생물종이 멸종되어 생물종 다양성에 변화가 발생하고, 수온 상승에 따른 해양생태계 변화와 어류의 이동으로 인해 어업이 받게 될 영향도 매우 클 것으로 전망하고 있다. 특히 동남아시아 국가에서 이러한 영향이 클 것이라 예상하였는데, 동아시아에 위치한 우리나라도 이러한 위험으로부터 크게 벗어나 있는 것은 아니므로 각별한 준비가 필요하다.

해양의 온난화에 따라 여러 해양산업이 부정적 혹은 긍정적인 영향을 받을 것이다. 온난화에 의한 북극항로의 개발, 연장된 하계 해변 레저산업 등은 국가경제와 지방경제에 큰 도움이 되겠지만, 폭풍과 재해에 의한 연안역에서의 인명손실과 재산피해는 기후변화의 커다란 불안요인이다. 해양수산업의 경우에도 면밀한 주의와 심도 깊은 연구가 진행되어야 기후변화에 의한 수산자원의 변화예측이 정밀해 질 것이다. 북반구의 중위도권에 위치한 우리나라는 최근에 들어와 수온이 매우 가파르게 상승하였으며, 동물플랑크톤 생물량의 증가도 급격하였다. 이러한 결과는 해양의 표층에 서식하는 어류들의 번성에 유리하게 작용한 것으로 보인다. 특히 표층에 사는 소형의 어류를 소형표층어류(small pelagic fish)라고 하는데 수명이 짧고 무리를 이루어 사는 특징이 있다. 최근 이러한 어종의 자원량이 증가하고 있으며, 주요 어종의 어획 분포나 산란장의 위도가 상승하는 경향이 있다. 우리나라 해역에서 잡히는 어류의 구성을 분석해보니 소형표층어류의 비율이 지난 30년 전에 비하여 두 배 가까이 증가하였다. 한편, 우리나라 연안 전해역 표층생태계에는 남쪽으로부터 어류를 포함한 아열대성 생물의 유입이 더욱 증가하였으며, 앞으로도 이러한 외래종의 출현은 더욱 가속화 될 것처럼 보인다. 반면, 연어와 같은 냉수성 어류의 입지는 더욱 어려워 질

것으로 예상된다.

기후가 온난해지면서, 해양의 상층은 하층에 비하여 더욱 따뜻하게 되어 두 층의 수온 차이가 심해진다. 우리나라 해역의 경우, 해양의 깊은 곳에는 대구, 명태, 청어, 말쥐치 등이 서식하고, 상층인 표층에는 정어리, 고등어, 멸치, 살오징어 등이 서식한다. 두 층의 수온 차이가 심해지면, 영양염, 용존기체 등의 물질교환이 점점 어려워져 생태계에 큰 영향을 끼치며, 결과적으로 두 층에 서식하는 생물체들의 교류도 힘들어 진다.

2011년에 발간된 제1차 한국기후변화 평가보고서에서는 해양의 물리화학적 변화뿐만 아니라 태풍해일, 파랑 등에 대한 현재의 상황과 기후변화의 영향에 대한 취약성 평가와 적응 정책에 대해 제언하였다. 해양 표층의 온난화와 이에 따른 어류생물상의 변화도 예견되었으며, 어업의 경우 어종과 어업 방법, 어업 해역에 따라 긍정적인 면과 부정적인 면이 함께 나타날 것이라 예상하였다. 하지만 해양환경의 변동은 복잡하여 우리나라 해양의 상태가 아직 정확하게 파악되지 않았으며, 각 생물종의 환경변화에 대한 반응을 완전히 이해하기까지는 아직도 우리의 과학수준이 일천하다. 생물에 대한 기본 생물학 지식의 결여와 한국형 기후모형 개발의 미비는 우리의 분석을 정성분석의 수준에 머물게 하였다. 우리나라 해역을 잘 표현하는 모형의 결과를 근거로 하여 해양생태계와 수산자원, 어업을 예측하기 위한 물리-생물 접합모형의 개발이 시급하게 요구되며, 각 산업분야별 취약성과 적응방안을 마련하여 급격하게 변화하는 기후환경에 현명하게 대처하는 지혜가 필요하다.

1.4.6 산업 및 에너지

우리나라는 기후변화로 인한 영향에 매우 취약하고 직접적인 영향을 받고 있는 것으로 평가되고 있다. 또한 기후변화로 인한 경제적 손실이 매년 세계 GDP의 5 ~ 20% 정도로 예측되는 등 기후변화가 우리 삶에 미치는 직·간접적인 영향에 대해 대부분 부문별로 연구가 이루어지고 있다. 하지만 산업부문의 경우 특성이 상이한 다양한 산업과 업종이 산업 내부에 존재하고, 각 산업마다 기후변화의 영향이 다르게 나타남에도 불구하고 업종의 특성을 반영한 연구는 활발하게 이루어지지 못하고 있으며, 산업과 긴밀하게 연관되어 있는 에너지 분야에서의 연구도 부족한 실정이다.

기후변화로 인해 발생하는 영향과 적응, 대응에 산업과 에너지는 많은 영향을 주고 받는 관계이다. 기후변화는 산업과 에너지에 동시에 영향을 미치고, 에너지는 산업에, 산업은 다시 에너지에 영향을 미치며 에너지는 다시 기후변화에 영향을 미치고 있다.

산업은 기후변화에 크게 영향을 받는 부문이다. 산업부문으로부터 배출되는 온실가스가 기후변화의 주원인이기는 하지만, 기후변화를 억제하기 위해 당장에 온실가스 배출을 획기적으로 감축할 수도 없다는 점을 고려할 때, 산업분야에서 기후변화에 어떻게 적응하고 대응해 나가야 할지를 연구하는 것은 상당히 중요한 일이다.

우리나라는 현재 산업부문에서 기후변화 위험평가 및 대응·적응에 대한 연구가 제한적으로 이루어지고 있다. 뿐만 아니라 산업 내에서의 연구수준 정도에 있어서도 큰 차이가 나타나 관광, 레저, 건설 등과 같은 산업 부문에서는 비교적 많은 연구가 이루어지고 다양한 기후변화 적응 방안을 제시하고 있는 반면, 유통, 식품, 중소기업 등의 산업부문에서는 선행된 연구가 적으며 연구에서 제시한 기후변화에 대한 적응·대응 방안도 비교적 제한적이다.

따라서 각 산업의 종류와 특성을 반영한 연구가 추진되어야 할 것이다. 동일한 산업 내에서도 산업의 규모, 입지, 생산방식 등에 따라 기후변화에 영향 받는 형태와 정도에 차이가 있다. 또한 산업부문은 다수의 전·후 산업이 서로 얽혀 있는 매우 복잡한 구조를 갖고 있으므로 어떤 특정 산업에서의 기후변화 영향이 다른 산업에 영향을 미칠 가능성도 매우 크다. 따라서 산업부문에서는 기후변화 시나리오의 수준에 따라 각 산업에서 나타날 수 있는 영향을 구분하여 예측하는 연구, 산업의 기후변화 적응·대응 평가에 대한 지수의 개발이 필요하고 산업의 종류와 입지, 규모, 생산방식 등을 변수로 한 적합한 산업의 입지조건, 규모, 생산방식 등을 도출할 수 있는 연구 및 산업의 구조를 반영한 기후변화 영향 평가 등 향후 다양한 연구와 타당하고 현실적인 기후변화 적응 방안의 제시가 필요하다.

1.4.7 보건

폭염이 발생한 기간 동안의 열사병, 열탈진 등 온열 손상 환자는 하루 15.7명으로 폭염이 발생하지 않은 기간의 환자 수(3.7명)보다 4배 이상 많았으며, 사망자 6명 중 5명이 노인이었다(조수남 등, 2012). 전국적으로 일 최고온도 31.2℃의 임계 온도에서 1도 증가에 따라 환자 수가 69.1%씩 증가하는 것으로 나타났다(나원웅 등, 2013). 초과 사망자의 경우, 폭염의 영향이 65세 이상에서 더 크게 나타났으며 온열 손상의 경우 역시 노인에게 그 경과가 심하게 진행되는 것으로 나타났다(나원웅 등, 2013).

1981년부터 2010년까지 최근 30년 동안 기상재해 빈도수가 감소한 것에 비해 피해액은 전체적으로 증가한 것으로 나타났다(성지혜 등, 2011). 1990년에서 2008년 동안 우리나라에서 가장 많은 사망자를 일으킨 재해는 홍수였지만, 태풍으로 인한 사망자 비율이 크게 증가하고 있었고, 가장 높은 사망원인은 익사였다. 해안지역거주, 노년층, 남성이 취약한 것으로 나타났다(Myung and Jang, 2011).

최저기온과 수목류 꽃가루 농도, 꽃가루 알레르기 환자 사이에 유의한 양의 상관관계가 있었다. 환자의 연령과 성별, 대기오염을 보정하고 분석한 결과, 3월 최저기온이 1℃ 높아지면 수목류 꽃가루 환자가 14% 증가하는 것으로 나타났다(Kim et. al., 2011). 광주전남 지역에서 시행된 연구에서도 흡입성 항원에 대한 감작률이 2003년부터 2008년까지 유의하게 증가하였고, 수목꽃가루와 목초꽃가루에 대한 감작률이 기온과 양의 상관관계를 나타냈다(윤병조 등, 2011).

2001년에서 2009년까지 삼일열 말라리아의 발생과 기후요인들 사이의 상관관계를 분석한 결과, 기온이 1℃ 상승할 때 3주 후에 말라리아 환자가 17.7% 증가하고, 상대습도가 10% 증가할 때 7주 후에 말라리아 환자가 40.7% 감소하며, 1주에 일조량이 10시간 증가하면 2주 후에 말라리아 환자가 5.1% 감소하는 현상을 확인하였다(김영민 등, 2012).

2005 ~ 2008년도 발생한 설사질환과 기후변화 시나리오 자료를 이용하여 2038년, 2058년도의 환자 발생 및 진료비 상승을 예측한 결과, 2038년과 2058년에 환자 발생이 각각 0.9 ~ 2.4% 및 4.2 ~ 11.2%, 연간 진료비가 각각 60 ~ 160억원 및 290 ~ 760억원 증가할 것으로 예상되었다(채수미 등, 2011).

1.4.8 인간정주공간과 복지

도시에는 전 세계 인구의 절반정도가 거주하고 있고, 전체 지구에너지의 60 ~ 80%를 소비하며 이산화탄소를 50% 가까이 배출하고 있다. 우리나라는 전체 인구의 90% 이상이 도시에 거주하고 있어 기후변화에 따른 재해위험에 매우 취약하다. 도시는 기후변화로 인한 영향에 대해서 취약점을 지니는 동시에 기후변화 현상을 유발시키는 탄소배출에서도 큰 비중을 차지하고 있다. 미래 한반도의 아열대 기후로의 변화를 전망해 본 결과 도시지역 모두는 아열대 기후지역에 포함될 것으로 예측되었다.

기후변화 영향에 따라 도시에서 발생하는 재해규모가 대형화되고, 홍수, 폭설, 폭염, 해수면 상승 등 다양한 재해 및 새로운 위험에 노출될 것으로 전망되어 기후변화가 일상화되고, 재해는 대형화, 다양화 될 것으로 예상된다. 기후변화가 도시 시스템에 미치는 영향으로 인해 가장 취약할 것으로 평가되는 공간은 도시의 해안, 하천변, 지하공간, 산기슭으로, 이러한 취약공간에 위치한 도시기반시설, 건축물, 시민은 기후변화로 인한 재해위험성이 더욱 높아지게 된다. 기후변화 취약성 측면에서는 기반 시설군 전체적으로 홍수 및 집중호우와 태풍 및 폭풍에 대한 취약성이 높게 나타났다.

기후변화적응 도시계획기법으로는 첫째, 탄소배출 억제를 위한 도시계획 및 설계로서 분산적 집중화된 공간구조, 대중교통중심의 교통구조, 신·재생에너지 이용과 에너지 절약을 위한 도시설계를 들 수 있고, 둘째, 기후변화 적응을 위한 도시계획으로 도시의 열부하 분석, 기후분석과 기후도 작성, 도시의 바람길 조성을 들 수 있다. 그 외 도시 내 사회기반시설에 대한 적응방안과 제도적인 방안들을 고려해야 한다.

국내 식량생산의 기반이 되는 농경지 면적의 변화는 1968년을 정점으로 지속적인 감소추세를 보이고 있다. 지역정주공간으로서 농촌의 미래전망은 인구감소와 고령화로 농업중심의 농지와 산지이용이 줄어들고, 여가관광 공간으로 활용될 것으로 예측된다. 지역간 인구이

동은 크게 진정되고, 인구유동이 상대적으로 확대될 것으로 전망된다. 농촌에서는 기후변화로 인하여 농작물 생산이 가장 크게 영향을 받을 것으로 예상된다. 우리나라의 경우, 농경의 온실가스 배출비중은 적지만 기후변화를 저감하기 위한 방안 중 하나로 청정에너지원 개발에 대한 정부투자가 지속적으로 증가할 것으로 예상된다.

향후 농업 및 농촌의 저탄소사회화를 위하여 효율적 연료사용 및 기술개발을 통한 저탄소 농업, 청정바이오(바이오에너지)의 사용, 친환경농업과 저탄소농업 확대 등을 추진할 것으로 전망된다. 그리고 농촌지역 생활환경 개선을 위하여 농가소득 안정화, 농업체질 강화, 규모화 및 전문화, 그리고 농촌 생활 인프라 확충 등을 통해 기후변화에 직·간접적으로 대응할 것으로 전망된다.

기후변화로 인한 취약계층의 피해 정도는 공간적인 요소뿐만 아니라 소득, 연령과 같은 사회적인 요소와도 관계를 가진다. 풍·수해 피해와 관련하여 수도권지역에서 상대적으로 저소득계층이 밀집거주하고 있는 지역에 풍·수해 발생빈도가 유의하게 크게 나타난다.

사회 취약계층을 위한 기후변화적응전략은 사회적, 공간적 환경에 따라 다른 전략을 수립해야 할 필요성이 있다. 우선 사회·경제적 취약계층에 대한 사회적 문제와 관련된 기후변화 대응 추진전략으로 기후복지제도의 도입, 극한 기후 현상별로 고위험 인구에 대한 응급구조체계 구축 및 집중관리, 저소득계층 기후변화 대응 사회적 안전망 구축 등이 필요한 것으로 나타났다. 지역사회의 공간적 특징에 따른 대응전략으로는, 도시지역은 주택침수·파손 등 물리적인 피해 예방 및 대응정책 강화, 주거복잡도 등 열악한 정주시설 개선 및 녹지시설 확충, 농·어촌지역은 혹한에 대비할 수 있도록 생물학적 취약가구의 노후 된 정주시설의 개선, 물적 인프라 확충 등을 위한 정책과 사업이 추진될 필요가 있는 것으로 나타났다.

1.4.9 적응전략

우리나라에서 기후변화 대책이 본격적으로 추진되기 시작한 것은 교토의정서가 채택된 이후인 1999년 기후변화 대책위원회가 설치 이후부터다(김정식, 2009). 기후변화 적응에 대한 본격적인 논의는 제3차 종합대책(2005 ~ 2007년)에 이르러서야 시작되었고, 2008년의 국가 기후변화 적응마스터플랜(2008) 마련과 2011년 '저탄소 녹색성장 기본에 따른 국가기후변화적응대책(2011 ~ 2015년)으로 발전되었다. 국가기후변화 적응대책은 우리나라 최초의 법정 계획이며, 현재와 같은 국가 - 광역지자체 - 기초지자체의 기후변화 적응체계를 마련하였다. 본 장에서는 체계적인 계획 수립과 이행을 위한 첫 단계로 국가 및 지자체로 구분하여 우리나라 기후변화 적응대책 수립 현황과 분야별 적응전략 파악을 통해 앞으로 나아가야 할 방향을 검토하고자 한다.

국가 기후변화 적응대책은 2008년 최초의 적응대책이 마련된 이후 과학적, 법적 기반 마련, 세부시행계획 수립 등에 의해 계속 발전되고 있다. 환경부 등 정부는 2008년 국가 기후변화 적응 종합계획을 마련하였고 이후 녹색성장기본법에 근거하여 국가기후변화 적응대책(2011 ~ 2015년) 및 이의 수정·보완 대책을 수립하여 현재에 이르고 있다. 이러한 국가기후변화 적응대책에 따라 관계부처 합동 세부시행계획을 마련하여, 각 세부과제 및 담당부처별 사업개요, 추진실적과 함께 연차별 사업내용 및 소요예산, 기대효과를 작성하였다. 이를 통해 적응대책의 이행성과 책임성을 제고하고자 노력하였다.

지자체 적응대책은 광역지자체와 기초시범지자체로 구분하여 살펴볼 수 있다. 광역지자체 적응대책 세부시행계획은 기후변화의 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 정립이 필요하다. 2015년 기초지자체 적응대책 수립 의무화를 앞두고 35개 기초지자체에 대한 시범사업(2012 ~ 2013년)을 통해 기초지자체 적응경험을 축적하고 설명회, 가이드라인 마련 등을 통해 수립기반을 강화하기 위하여 노력하고 있다.

기후변화 적응대책의 효과 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.

1.4.10 우리나라 기후변화 적응정책

1.4.10.1 정부의 기후변화 적응정책

정부는 급변하는 기후변화 환경에 대응하기 위하여 저탄소녹색성장 기본법 제48조 및 동법 시행령 제38조에 기후변화 적응대책 수립, 이행근거를 마련하였다. 이를 위해 13개 관계부처 합동으로 국가기후변화적응대책(2011 ~ 2015년)을 수립·시행하고있다. 국가기후변화적응대책은 직접적인 사업 수행이 필요한 건강, 농업, 물관리, 재난/재해, 해양/수산, 산림/생태계와 같이 부문별 적응대책(7개 부문)과 감시예측, 산업·에너지, 교육협력·국제홍보와 같이 대책 수립 지원을 위한 적응기반대책(3개 부문)으로 구성되어 있다.

최근 전 세계 및 우리나라에서 기록적인 극한 기후현상이 빈번하게 발생하였으며, 기상청에서 발표한 새로운 시나리오에 따르면 미래 기후변화는 속도가 더 빠르고, 피해의 규모도 더 커질 것으로 전망되었다(관계부처 합동, 2012). 이에 따라 기후변화 新시나리오를 반영한 국가기후변화적응대책의 수정·보완이 관계부처 합동으로 2012년 12월에 완료되었다.

수정·보완된 국가기후변화적응대책은 기존 대책의 문제점을 제시하고 이를 개선하기 위한 기본방향을 제시하였다. 新시나리오(RCP)에 따른 영향분석 결과를 토대로 부처·부문별 우선 수정·보완 필요 대표과제를 선정하였다. 이에 기존 10개 부문 87개 세부과제를 존속, 폐지, 통·폐합 과정을 거쳐 9개 부문 60개 세부과제로 수정·보완하였다. 또한, 기후복지 실현을 위해 취약계층 보호대책을 우선 마련하고, 통합적 적응대책 수립을 위한 관계부처 협력을 강화할 수 있도록 대책을 수립하였다. 그 밖에 기업의 적응역량 진단 및 관리 매뉴얼을 개발·보급하는 등 기후변화 유망산업 발굴 및 기업의 적응역량 향상을 위한 지원대책을 수립하였다.

부문별 목표와 주요 과제를 살펴보면 건강부문은 기후변화 취약계층 중심의 건강 보호대책 수립을 목표로 하였으며 폭염에 대비한 감시·예측 체계를 구축, 취약계층 맞춤형 대응방안 마련, 취약계층의 안전한 주거·의료 환경 조성, 기후변화로 인한 감염병의 종합적 감시-방재체계 구축을 주요 과제로 제시하였다. 농·수산부문은 안정적인 먹을거리 생산기반 강화를 목표로 기후친화형 농작물 생산 인프라 구축, 기후변화 적응품종 개발 및 보급, 병·해충 관리대책 강화, 안정적 수산물 공급체계 마련을 주요 과제로 제시하였다. 물 관리부문은 기후변화 적응형 물 관리 시스템 구축 및 확대를 목표로 기후변화를 고려한 물 순환 관리체계 구축, 용수 공급 취약지역 대응체계 강화, 앞서 대응하는 수질/수생태 관리체계 구축이 주요 과제이다. 재난/재해부문은 국가방재시스템의 기후변화 적응역량 강화를 목표로 도시 방재기준 강화 및 관련제도 개선, 도시 침수방지를 위한 분산 방어체계 구축, 한파 대비 취약계층 특별관리, 재난정보의 신속·정확한 전달체계 운영 강화가 주요 과제이다. 산림/생태계부문은 건강한 생태계 유지를 위한 자연환경 관리 강화를 목표로 한반도 생태계 생물다양성 관리 강화, 산림기상 정보 활용 및 산사태 대응체계 구축이 주요 과제이다. 국토/연안부문은 기후변화 적응형 국토·연안 환경 조성을 목표로 기후변화 적응을 고려한 환경영향평가 체계 구축, 도심 속 바람길 확보 및 생태공간 조성, 해수면 상승 예측능력 제고 및 안전 대응체계 강화가 주요 과제이다. 산업부문은 산업계 기후변화 적응역량 강화를 목표로 산업계 기후변화 적응역량평가 체계 개발·제공, 민간으로의 기후변화 적응 확산 지원이 주요 사업이다. 인프라/국제협력부문은 적응대책 수립 및 이행 지원 기반 강화를 목표로 통합적 적응대책 수립 및 이행 지원 인프라 구축, 기후변화 적응 ODA 관련 네트워크 운영 강화가 주요 사업이다.

이와 같이 정부는 최근 기후변화 동향과 新시나리오 전망을 통한 부문별 영향분석 결과를 반영하고 일부 세부 대책을 수정·보완하여 적응대책의 실효성을 제고하였다.

1.4.10.2 지자체의 기후변화 적응정책

정부는 저탄소녹색성장기본법 및 동법 시행령에 따라 국가기후변화적응대책을 수립하고 동법 시행령 제38조 제2항에 따라 국가 대책의 이행을 위하여 중앙부처와 광역지자체로 하여금 기후변화 적응대책 세부이행계획을 수립할 것을 명시하고 의무화하였다. 지자체 적응대책 세

부시행계획은 국가 대책 소관사항에 대한 이행과 더불어 해당 지자체로 하여금 기후변화로 인하여 발생할 수 있는 피해와 영향을 줄이고 기회를 확대하기 위하여 지자체의 현실과 특징을 고려한 구체화된 실행계획을 마련하는 것을 목적으로 수립하였다(환경부, 2011a).

광역지자체 단위 기후변화 적응대책 세부시행계획 수립 대상 광역시·도는 '12년 기준으로 총 17개이며, 이중 세종특별자치시를 제외한 16개 광역시·도가 적응대책 세부시행계획 수립을 완료하였다. 광역지자체 적응대책 세부시행계획은 지역별 기후변화 현황 및 전망, 기후변화 영향 및 취약성 평가, 적응대책 비전 및 목표, 적응대책 수립 결과 및 이행 추진체계를 포함하고 있다. 기후변화 적응을 위해서는 기후변화 노출과 그에 따른 민감성 분석, 현재 시스템의 적응능력 파악을 통한 정확한 취약성 평가가 필요하다.

광역지자체 역시 지역특성을 반영한 실효성 있는 적응대책 마련을 위해서는 정확한 취약성 평가과정이 중요하나, 지자체 단위의 과학적 근거 및 사례 등이 부족한 단계에서 광역지자체 기후변화 적응대책 세부시행계획 수립이 추진되었다. 이에 광역지자체 기후변화 적응대책 세부시행계획 수립 지원을 위하여 국가차원(2012년)에서 취약성 평가 방법론 개발 및 전국 단위 취약성 평가를 수행하고 그 결과와 평가도구(CCGIS v 3.1)를 광역지자체에 제공하였다. 광역지자체는 CCGIS를 적용 및 활용하거나 별도 방법을 추가하는 등 다양한 방법을 사용하여 취약성 평가를 수행하였고, 그 결과 지자체별로 취약성 평가 현황 및 방법, 분야별 세부항목 등의 차이가 나타났다.

광역지자체 적응대책에서는 해당 지자체 현황, 기후변화 현황 및 전망, 영향 및 취약성 평가, 인식조사 등을 기초로 해당지역의 기후변화 적응관련 이슈를 파악하고 미래에 대한 전망을 실시하여 적응의 방향성인 비전을 설정하고 목표를 마련하였다.

적응 분야별 적응대책 발굴 및 선정은 중점추진 분야를 선정하고 각 분야별 세부단위사업이 제시되었는데 적응 분야 중 재난/재해 분야와 물관리 분야를 가장 많은 지자체가 중점추진분야로 선정하였다. 이 외에도 지자체는 적응대책 이행을 위하여 연차별 사업 우선순위를 선정하거나 이행을 위한 조직, 우선순위 사업에 대한 연차별 투자계획 등 계획 실현을 위한 방안을 마련하고 제시하였다. 금번 광역시·도 기후변화 적응대책 세부시행계획은 우리나라 지자체 단위 적응대책 수립 체계 및 절차, 방법론을 마련하는 한편, 지자체 적응대책 세부시행계획의 개념과 성격을 정립하고 지자체의 기후변화 적응에 대한 총체적이고 지속적인 점검을 위한 기반을 마련했다는데 의의가 있다.

기초지자체 적응대책 세부시행계획 수립·시행 의무화를 대비하고 제도의 실효성 및 효율성 제고를 위하여 시범사업 운영을 통해 기초단위 적응대책을 확산, 추진하고자 2012년 20개 지역, 2013년 15개의 총 35개 시범지역을 선정하고 적응대책 세부시행계획을 수립하였다.

시범지역의 비전 및 목표는 대부분 건강과 안전, 적응기반 구축, 적응역량 강화와 관련된 사항이 포함되어 기후변화 피해로부터 시민의 건강과 안전을 도모하고 기후변화 적응을 위한 기반을 강화하도록 하고 있다(환경부, 2013a).

시범 기초지자체는 지역에 해당사항이 있는 적응대책 분야에 대하여 적응대책과 세부대책사업을 마련하고 세부대책사업은 시범지역에 따라 최소 20개(아산시)에서 최고 117개(청주시·청원군)를 제시하였다. 분야별로는 건강분야 152개(17.3%), 재난/재해분야 146개(16.6%)로 가장 많은 수를 차지하고 있으며 해양수산분야 8개(0.9%)와 적응기반분야 28개(3.2%)가 가장 적다.

특히, 시범지역 20개 지역 중 16개 지역(울주군, 안산시, 아산시, 포항시 제외)은 기후변화 적응대책 분야를 구분함에 있어 국가기후변화적응대책의 7개 적응대책 분야와 3개 기반분야의 10개 분야를 기반으로 분야를 구분, 이 중 기초단위의 특성과 여건을 반영하여 복합분야를 제시하거나 기존 분야를 통합하여 명칭을 새로 제시 또는 신규 분야를 추가하여 적응대책을 제시하였다.

지자체의 경우 법적 체계에 따라 광역시·도 기후변화 적응대책 세부시행계획(2012 ~ 2016년) 수립 완료 후 이를 이행 중이고 기초 시·군·구의 경우 2015년 1월 1일 수립 및 시행 의무화에 앞서 35개 시범지역에서 기초지자체 단위 기후변화 적응대책 세부시행계획을 시범사업으로 운영 중에 있으나 제도 초기단계에서 적응대책 이행 현실화와 체계화를 위해서는 많은 준비와 지속적인 노력이 필요하다

(환경부, 2013b).

1.4.10.3 기후변화 적응정책 관리

지역사회와 지자체 공무원의 낮은 인식수준으로 적응대책 이행의 효율성 저하, 부서간의 업무협조 미흡, 지역사회 공감대 미흡, 대책 활용 및 집행력 저하 문제가 발생하였다(한국환경정책·평가연구원, 2013a). 특히, 적응대책 수립·이행 담당자의 잦은 변경으로 인해 효율성 및 지속성 저하로 부서협조 관계 및 적응 인식·정보의 재형성이 필요하며, 시·군·구 기초단위에서 활용 가능한 전문가 및 기관 등 전문인력 부족으로 인해 정책 수립에 어려움이 있다. 따라서 기후변화 적응대책을 효과적이고 효율적으로 이행하기 위해서는 기후변화 적응 관리 구축이 필요하다.

효과적인 기후변화 적응 관리 구축을 위해서는 중앙정부, 지방정부, 전문가, 시민, 환경단체간의 협력이 중요하다. 보다 효과적인 기후변화 적응대책 수립 및 이행을 위해서는 각 주체별, 주체간의 협력적 관리 구축이 필요하다. 협력적 관리의 성공 요인으로는 참여성, 투명성, 책임성을 들 수 있다. 참여성을 제고하기 위해서는 실질적인 주민참여의 보장, 참여적 의사결정, 이해당사자 간 합의형성 시스템 등이 필요하다. 투명성을 제고하기 위해서는 정보의 불균형이 발생하지 않도록 적극적이며 공평한 정보제공, 절차적 합리성 제고 등이 필요하다. 그리고 책임성을 제고하기 위해서는 효율적인 행정협조체계 구축 및 역할선정, 합리적인 보상체계구축, 전문지식과 상식의 조화를 통한 정책문제의 진단 등이 필요하다(한국환경정책·평가연구원, 2009).

우리나라의 경우 여러 가지 모범 사례나 대안을 만드는 데 시민단체들이 적극적으로 참여를 하였지만, 정작 제도화가 이뤄진 뒤에는 시민단체의 참여가 매우 제한적이 되며, 위원으로서의 참여도 배제되곤 한다. 그 결과 중앙정부와 지방정부로만 구성되는 관리가 되어 실질적인 효과를 기대하기 어려운 구조가 된다. 이러한 상황에서는 탄소포인트제도나 기후행동파트너십(CAP) 등이 광범위하고 지속적인 시민 참여를 보장하고, 지역 이슈를 가지고 지역 단위에서 문제해결을 위한 관리가 되기에 역부족일 수밖에 없을 것이다(한국환경정책·평가연구원, 2009). 따라서 기후변화 적응 관리 구축을 위해서는 관계부처를 비롯해 다양한 이해당자들의 참여가 보장될 수 있도록 다양한 노력을 기울이는 것이 중요할 것이다.

1.5 참고문헌

구경아, 박원규, 공우석, 2001: 한라산 구상나무(Abies koreana Wilson)의 연륜연대학적 연구, *한국생태학회지*, 24, 281-288.

국립기상연구소, 2008: 기후변화협약대응 지역기후 시나리오 활용기술개발(Ⅳ), 국립기상연구소, 355.

국립기상연구소, 2009: 기후변화 이해하기 Ⅱ - 한반도 기후변화: 현재와 미래.

국립산림과학원, 2011: 제5차 국가산림자원조사 보고서.

국립산림과학원, 2012: 기후변화 숲 그리고 인간.

관계부처 합동, 2012: 기후변화 新시나리오 반영, 국가기후변화적응대책 수정・보완.

김광섭, 임태경, 2006: 1973년부터 2004년까지의 관측된 대형증발량 자료 분석, *대한토목학회논문집*, 26(6B), 583-596.

김병식, 김형수, 서병하, 2005: 기후변화가 수자원에 미치는 영향과 평가방법, 자연과 문명의 조화, 54(4), 30-42.

김시헌, 박해심, 장재연, 2011: Impact of meteorological variation on hospital visit of patients with tree pollen allergy, *BMC Public Health*, 11:890.

김정식, 2009: 기후변화 적응 필요성 및 국가적응정책, *한국방재학회지*, 9(4), 25-33.

박창근, 김정수, 김좌관, 오수길, 이인화 , 2009: 기후변화 대응과 녹색성장을 위한 새로운 환경거버넌스 구축방향, 한국환경정책・평가연구원.

산업연구원, 2008: 온실가스 배출저감 의무부담의 산업별 영향과 산업구조 고도화 전략, 339pp.

서희철, 김성기, 이영수, 조영철, 2006: 경기북부지역 콩 생산에 미치는 지구온난화의 영향, *한국농림기상학회지,* 8(4), 242-249.

성지혜, 김동훈, 한상옥, 2011: 최근 우리나라 기상재해 피해 현황 분석, *한국기상학회,* 244-245.

3식품의약품안전청, 2008: 국제 기후변화에 따른 식품안전 관리대책 추진 방안, 한국보건사회연구원,

심교문, 김건엽, 노기안, 정현철, 이덕배, 2008: 기후변화에 따른 농업기후지수의 평가, *한국농림기상학회지,* 10(4), 113-120.

윤병조, 김상훈, 김동현, 고영일, 2011: 광주, 전남지역 알레르기 환자에서 흡입성 항원에 대한 감작률의 종적 변화와 기온과의 관련성 분석, *천식 및 알레르기*, 31(2), 93-104.

이동근, 성선용, 정휘철, 2010: 기후변화 시나리오 및 토지이용변화에 따른 유출수 변화량 산정 -2020년 과천도시기본계획을 사례로 -, *국토계획,* 45(5), 241-248.

임종환과 신준환, 2005: 지구온난화에 따른 산림식생대 이동과 식물계절 변화, *자연보존*, 111, 3-17.

임종환, 권태성, 천정화, 이임균, 이윤영, 최형태, 원명수,이창우, 최원일, 장응순, 2008: 국가 기후변화 적응 마스터플랜 작성연구: 산림 및 임업부문, 한국환경정책평 가연구원 위탁과제 최종보고서, 국립산림과학원, 75.

전성우, 박용하, 최재용, 정휘철, 김정원, 2001: 기후변화에 따른 생태계영향평가 및 대응방안 -산림부문의 생기후모형개발을 중심으로, 한국환경정책·평가연구원.

정유란, 조경숙, 이변우, 2006: 지구온난화에 따른 우리나라 벼농사지대의 생산성 재평가, *한국농림기상학회지*, 8(4), 229-241.

조광우, 2003: 지구온난화에 따른 한반도 주변의 해수면 변화와 그 영향에 관한 연구, 환경정책·평가연구원.

조수남, 김시헌, 김선자, 정성훈, 이윤환, 나원웅, 장재연, 송경준, 2012: 2011년 여름철 폭염으로 인한 응급실 내원 온열질환자의 특성 분석, *대한응급의학회*, 23(5), 687-695.

채수미, 윤석준, 2011: 기후변화로 인한 설사질환의 부담, 한국보건사회연구원, *보건복지포럼*, 84-92.

최광식, 2009: 2009년 산림병해충의 발생 전망, *산림과학 정보*, 213, 4-5.

한국환경정책·평가연구원, 2009: 기후변화 대응과 녹색성장을 위한 새로운 환경거버넌스 구축방향, (사)시민환경연구소.

환경부, 2010: 기후변화 통합영향평가모형 체계 개발 : 정책연계모형개발을 중심으로, 한국환경정책·평가연구원.

환경부, 2011b 광역지자체 적응 세부시행계획 수립 지원, 한국환경정책·평가연구원.

환경부, 2011a: 한국 기후변화 평가보고서 2010, 국립환경과학원.

환경부, 2013a: 「지자체 기후변화 적응대책 수립 및 이행지원」 시범 기초지자체 적응대책수립 운영 및 지원. 한국환경정책·평가연구원.

환경부, 2013b: 「지자체 기후변화 적응대책 수립 및 이행지원」지자체 기후변화 적응대책 모니터링, 한국환경정책·평가연구원.

Myung H.N. Jae-Yeon Jang, 2011: Causes of death and demographic characteristics of victims of meteorological disasters in Korea from 1990 to 2008, *Environ Health*, 10, 82.

Kim, S. H., J. H. Sung, and Y. K. Kim, 2009: Changes in Flowering Times of the Woody Plant Species in the Hongneung Arboretum, Seoul. In: IUFRO Conference -Extending Forest Inventory and Monitoring over Space and Time-, Quebec, 135.

Kim Si-Heon, Park Hae-Sim, Jang Jae-Yeon, 2011: Impact of meteorological variation on hospital visit of patients with tree pollen allergy, *BMC Public Health*, 11, 890.

Kim YM, Park JW, Cheong HK, 2012; Estimated Effect of Climatic Variables on the Transmission of Plasmodium vivax Malaria in the Republic of Korea, *Environmental Health Perspectives*, 120(91), 1314-1319.

Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), 2007a: Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change,

Solomon, S., D. Qin, M. Manning, Z. Chen, M. Marquis, K.B. Averyt, M. Tignor and H.L. Miller (eds.), Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.

Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), 2007b: Climate Change 2007: 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), 2013;, Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, Solomon, S., D. Qin, M. Manning, Z. Chen, M. Marquis, K.B. Averyt, M. Tignor and H.L. Miller (eds.), Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.

IPCC, 2000: Special Report on Emissions Scenarios: A special report of Working Group III of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press.

IPCC, 2007c: Towards New Scenarios for Analysis of Emissions, Climate Change, Impacts, and Response Strategies, IPCC Expert Meeting Report.

IPCC website www.ipcc.ch.

Na W1, Jang JY, Lee KE, Kim H, Jun B, Kwon JW, Jo SN., 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, J Prev Med Public Health, 46, 19-27.

표 1.7 광역지자체별 적응대책 비전 및 목표 수립현황(한국환경정책·평가연구원, 2011)

구분	비전	목표	부문별 전략
강원도	기후변화 적응을 통한 주민의 삶의 질 향상과 미래 대비형 강원도 구축	◦ 기후변화 위해로부터 도민의 안전과 삶의질 향상 ◦ 지속가능발전을 위한 원동력 제공	○(9)
경기도	기후변화에 안전하고 회복력 있는 사회	◦ 기후변화 영향으로 인한 단기적 위험 경감 ◦ 기후 친화적 사전예방 시스템 구축 ◦ 기후 취약계층 복지 향상 ◦ 기후변화 적응 인식 제고 및 적응역량 강화	○(8)
경상남도	대한민국 기후변화 안전지대 경남	◦ 2016년까지 기후변화 적응기반 구축	○(8)
경상북도	기후변화에 유연한 적응 선진지 경북	◦ 장기 : 글로벌 기후적응 선도지역 Top5 진입 ◦ 중기 : 전분야 기후변화 적응 토털 솔루션 구축 ◦ 단기 : 23개 시·군별 완벽한 기후변화 관측기반 조성	○(10)
광주광역시	행복한 생태공동체	◦ 생태도시 인프라 강화 ◦ 세계를 선도하는 환경(기술) 선도도시 구축	○(6)
대구광역시	기후변화의 위기를 기회로 활용하는 글로벌 기후적응 선도도시	◦ 장기 : 기후변화 적응 허브도시화 ◦ 중기 : 기후변화 적응 토탈 솔루션 구축 ◦ 단기 : 전분야 기후변화 적응매뉴얼 도입	○(9)
대전광역시	최적의 기후변화 적응으로 안전 및 위기관리 선도도시 구현	◦ 기후변화 고도적응을 선도하여 시민의 안전과 삶의질 향상 및 대전광역시의 지속적인 발전을 위한 도시기반 제공	○(9)
부산광역시	기후변화 적응을 통한 글로벌 해양 중심도시로 지속가능발전 도모	-	○(10)
서울특별시	기후변화 고도적응의 기후환경수도 서울	-	○(5)
울산광역시	능동적 기후적응 대처로 건강하고 안전한 에코폴리스 울산 달성	◦ 건강 안전도시 울산 조성 ◦ 물순환 생태도시 울산 조성 ◦ 기후적응 친화도시 울산 구현	-
전라남도	기후변화 적응 역량강화를 통한 풍요로운 녹색 전남 실현	◦ 적응을 통한 안전사회 구축 및 녹색발전 전략 마련	○(8)
전라북도	기후변화 적응을 위한 전라북도 안전사회 기반구축	-	○(7)
제주특별자치도	자연에 순응하는 기후변화대응 시범도 제주 실현	-	○(7)
충청남도	기후변화에 순응하는 친환경 충남 구현	◦ 기후변화 적응대책의 성공적인 추진으로 도민의 안전과 삶의질 향상 및 지속가능한 충남 실현을 위한 기반 제공	○(8)
충청북도	지속가능한 충청북도 기후변화 적응 전략 수립「Save the future 충북」 - 현재 그리고 미래에 나타날 기후변화의 영향 및 피해에 대하여 다양한 부문의 자연·인위적인 조절을 통해 피해를 완화하고 성장기회를 마련하여 충청북도의 지속가능한 발전기반을 구축	◦ Safe region : 충북도민 건강관리 기반 구축, 기후감시 및 재난/재해 관리·대응체계 구축 ◦ Aqua region : 안정적인 수자원 관리능력 강화 ◦ Vital region : 안정적인 농·임업 기반 구축, 지속가능한 생태계관리 기반 구축 ◦ Extreme region : 충북내 극심한 기후취약지역에 대한 전부문의 통합적 기후변화 적응정책 마련	s○(6) 취약 지역

표 1.8 기초지자체별 적응대책 비전 및 목표 수립현황(한국환경정책·평가연구원, 2013a)

구분		비전	목표
인천	연수구	기후변화 적응을 통한 환경복지 국제도시 구현	◦ 기후안전도시를 통한 주민행복향상 ◦ 기후적응분야 국제화 선도 ◦ 기후변화 적응기반 정책 강화
울산	울주군	기후적응 선도하여 명품행복도시 울주 구현	◦ 기후 취약계층 없는 건강행복도시 ◦ 풍수해 피해 없는 안전도시 ◦ 경쟁력 있는 기후친화도시 ◦ 지속가능한 기후변화 선도도시
경기	고양시	기후변화 안전수도 고양	◦ Safe GoYang ◦ Nature GoYang
	수원시	기후 회복력이 강한 지속가능한 도시	◦ 기후친화형 도시인프라 구축 ◦ 취약계층의 건강과 복지 향상 ◦ 도시생태계 건강성 및 회복력 증진 ◦ 환경수도 시민 적응능력 배양과 지속가능성 제고
	안산시	기후복지도시 안산	◦ 기후변화 리스크 선제관리 ◦ 기후변화재해 회복력강화
	용인시	기후변화 적응형 지속성장 및 저탄소 모범도시 실현	◦ 현재 및 미래에 나타날 기후변화 영향을 완화, 조절 및 피해를 저감하여 지속가능한 녹색성장 발전기반을 구축하여 모범도시 실현
	광명시	기후친화적인 건강한 녹색도시	◦ 기후변화 영향으로부터 안전한 도시 - 기후변화 영향으로부터 안전한 도시 - 취약계층 건강과 복지향상 - 그린인프라를 활용한 적응능력 배양 - 기후변화 적응 민·관 파트너십과 기반구축
	평택시	기후변화 적응형 행복한 일류 문화도시 실현	◦ 현재 및 미래에 나타날 기후변화 영향을 완화, 조절 및 피해를 저감하여 안전하고 행복과 희망이 지속가능한 일류 문화도시 실현
	파주시	기후변화 적응 지역 균형발전 및 재해안전 도시 실현	◦ 무재해 안전도시 : 기후변화 자연재해로부터 안전한 균형발전 도시건설 ◦ 신재생 첨단농업 도시 : 기후변화 적응형 첨단농업 기반구축 ◦ 건강장수 복지도시 : 취약계층 및 시민생명보호 건강증진 도시 ◦ 수자원 도시 : 수자원과 산림원천이 풍부한 도시
충북	옥천군	기후변화 안전지대, 기후적응 Leading City, 옥천군	◦ 기후변화로 인한 피해 최소화 : 군민 모두 기후변화에 안전하고 건강한 옥천 - 취약계층 중심, 적응부문간 융합을 통해 정책 실효성을 높이자 - 바로 실행할 수 있고 도움되는 과제 우선. 단기적, 직접적 피해부터 줄이자 - 과제를 단계별로 구분하여 중장기적으로 대비하자
	청주시/청원군	지속가능한 기후변화 적응 「C.H.A.N.G.E」 청주·청원	◦ Clean water : 상하수도 관망 재정비·확대를 통한 물공급 안정성 확보 및 통합 물관리 시스템 도입을 통한 수질 안전성 보장 ◦ Health : 폭염 및 한파 대응체계 마련 및 미세먼지 저감을 통한 주민 생활의 질과 건강 증진 ◦ Agriculture : 농가안정성 확보와 농업경쟁력 강화를 위한 기후변화 적응형 로컬푸드 시스템 구축 ◦ Natural ecology : 지역의 비오톱맵 작성 및 관리방안 마련, 생태네트워크 구축을 통한 지역 생태계의 지속가능성 확보 ◦ Green forest : 산림관리체계를 정비·강화 및 임산물 생산 안정화 시스템 마련을 통한 임업경제의 지속가능성 확보 ◦ Emergency management : 도시형 홍수관리 체계 및 폭설대응 정책 마련, 재난상황 발생시의 전계층에 대한 종합재난대응시스템 마련을 통한 주민안전 확보 ◦ +Process-Governance : 기후변화 적응대책 추진을 위한 협력적 관리 체계 구축 및 운영

		비전	목표
충북	괴산군	기후변화 적응 잘 하는 '활기차고 풍요로운 괴산	◦ 기후변화에 안전한 도시 구현 ◦ 기후적응 잘하는 건강한 군민 ◦ 기후적응 경쟁우위 농업육성
충남	예산군	기후변화 취약성 관리를 통한 기후변화 적응형 안전도시 구현	◦ 예산군 특성을 반영한 분야별 기후변화 적응정책의 성공적 추진으로 기후변화에 대한 군민의 안전 도모 및 지역 경제 활성화
	태안군	기후변화 적응에 선도하는 그린 태안 실현	◦ 저탄소 녹색 해안도시 실현을 위한 친환경 인프라 구축과 건강하고 안전한 지속가능 도시 건설
	논산시	기후변화 적응한 기후변화 안전도시 구현	◦ 논산시 특성 반영한 분야별 기후변화 적응정책의 성공적 추진으로 시민의 안전 도모 및 지역 경제 활성화
	아산시	시민과 호흡하는 기후소통도시 구현	◦ 기후변화 적응주체는 시민 ◦ 기후변화 적응대책의 성공적인 추진으로 시민의 안전성 확보 및 삶의 질을 향상시키며, 지속가능한 아산시 실현을 위한 기반을 제공
전북	고창군	기후변화 적응의 Top, 지속가능 생물권역 고창	◦ 기후변화 적응기반 강화를 통한 지속가능발전도모
전남	장성군	기후변화 적응 "살고 싶은 청정 장성"	◦ 3安 장성 : 기후변화 적응대책을 통해 기후변화에 안전하고, 안심할 수 있고, 안정적인 장성 실현
경북	포항시	기후변화에 강한 행복도시 포항	◦ 창조 : 스마트 적응솔루션 구축 ◦ 기회 : 신성장 산업기반 제공 ◦ 참여 : 시민중심 시정구현 ◦ 연계 : 취약계층 제로시스템 운영

제 2 장 수자원

2.1 서론

기후변화의 영향은 여러 부문에 광범위하게 영향을 미칠 것이며, 특히 수자원 분야에 미치는 영향은 매우 클 것으로 예상된다. 기후변화에 의하여 수자원에서 발생되는 현상들은 홍수에 의한 재해피해, 가뭄 및 수질오염에 의한 물이용 문제 등 수자원 내 자체적인 문제를 야기하기도 하지만, 농업, 환경 및 기타 다양한 분야에 직·간접적으로 영향을 미치게 된다. 따라서 기후변화에 따른 수자원 영향평가는 기후변화 정책 수립 시 수자원 관리 및 물 안보 측면에서 대단히 중요하며 다른 분야의 기초자료로도 활용될 수 있다(국립환경과학원, 2010).

지난 '한국 기후변화 평가보고서 2010'에서의 수자원 분야는 2010년까지의 국내 기후변화 관련 수자원 연구들의 분석을 연구 목적으로 하였다. 당시에는 한반도의 기온 및 강수량, 유출량의 증감, 더불어 해수면의 변동 등 수문 전망이나 유역별 극치 강우로 인한 홍수 전망에 대한 연구가 주를 이뤘으며, 서로 다른 연구 결과들이 도출되는 와중에도 연구들의 경향성을 분석하고 확보하는 것이 검토 보고서로서 주요 사안이었다고 볼 수 있다. 그러나 최근의 국내 기후변화 관련 수자원 연구는 '한국 기후변화 평가보고서 2010'가 대상으로 하던 2010년까지와는 관심 주제가 다르다고 볼 수 있다. 기상청의 RCM 제공과 통계적 상세화 기법에 대한 연구의 숙성 등에 의해 1차적인 전망 연구보다는 유출모의 과정 등 보다 세부적인 요소에 대한 기후변화 연구를 수행하고 있다.

1차적인 기후·수문 전망에 대한 연구가 줄어든 배경에는 기상청에 의한 미래 기후 시나리오의 제공이 가장 큰 역할을 하고 있다. 최근 국내 기후변화 연구들은 대부분 '기상청-기후변화정보센터(CCIC, https://www.climate.go.kr)'에서 제공하는 기후변화 시나리오 자료를 활용하고 있다. IPCC 4차 보고서에 적용되었던 ECHO-G 모형 기반의 A2, A1B, B1 배출 시나리오에 대해 전지구(400 ㎞), 한반도(27 ㎞), 남한상세(10 ㎞) 단위로 동역학적 상세화와 통계적 상세화(PRISM)를 수행하여 격자형 기후 시나리오의 형태로 제공하고 있다. 또한 IPCC 5차 보고서에 대해서도 HadGEM2-AO에 의한 전지구(135 ㎞), HadGEM3-RA에 의한 한반도(12.5 ㎞), 남한상세(1 ㎞)의 격자형 기후 시나리오를 제공하고 있다. 이와 같이 국립기상연구소에 의해 개발되어 일반에 공개되고 있는 기후변화 시나리오는 입력자료에 의한 불확실성을 줄이고 국내 기후변화 연구의 통일성을 높이고 있다.

극치 수문에 대한 연구 또한 전망 단계를 넘어 취약성 평가를 시도하는 연구가 늘고 있으며, 각 연구자들이 다양한 기준과 지표들을 제시하고 있는 단계이다. 이수·치수를 넘어 수자원 통합 관리 측면에서의 취약성 평가 또한 수행되고 있으며, 기후변화 전망 자료를 이용하지 않아 본 보고서에 포함하지는 않았으나 적응전략 수립을 위한 의사결정 연구 또한 지속적으로 발전하여 기대감을 높이고 있는 상황이다.

현 시점에서의 기후변화 관련 수자원 연구는 전망 단계를 넘어 취약성 평가 단계로 진입하는 과도기적 상태로 파악되며, 전망 단계에서의 심도 깊은 연구와 적응전략 수립 단계를 위한 준비 연구들이 함께 혼재하는 형국이다. 따라서 본 보고서에서는 기후변화 관련 수자원 연구가 지난 2010 ~ 2013년의 연구대상기간 동안 어떤 주제에 관심을 가져왔는지, 또 어떤 연구 성과가 도출되었는지에 대한 흐름을 분석하여 경향을 제시하고자 하였다. 최종적인 목표는 기후변화가 미래 수자원에 미치는 영향을 전망하고, 현 인간 사회활동의 취약성을 평가하여 이에 대한 적응대책을 수립하는 것이다. 본 보고서는 최종 목표에 이르는 과정에서 현 시점의 국내 수자원 연구의 현주소와 향후 어떤 연구들이 수행되어야 하는지에 대한 정보를 제시하고자 하였다. 또 이를 바탕으로 수자원 분야 연구를 수행하는 전문 연구자들이 보다 발전적인 로드맵을 그릴 수 있도록 돕고자 하였다.

2.2 관측된 영향

현재 기후변화가 한반도 수자원에 미치는 영향에 관

련된 문헌들은 기후변화 전망과 영향평가에 대한 보고서와 논문들이 주를 이루었다. 이는 기후변화 전망과 이에 따른 영향평가에 편중되어 진행되고 있음을 나타낸다. 본 장에서는 과거 관측 자료로부터 현재까지의 기후변화 연구들에 관해 크게 4가지로 구분했으며 지표수, 지하수 유출, 홍수·가뭄의 영향전망 및 경향성 분석에 대해 알아보고자 한다.

2.2.1 지표수

우리나라에서 지표수에 대한 대부분의 연구는 댐 유입량 및 하천유출량과 관련하여 수문모형의 개발, 홍수와 관련된 유출량 산정, 빈도분석 등에 초점이 맞추어져 있으나 기초가 되는 지표수의 통계적 특성이나 경향성 분석 등은 미비하였다. 대부분의 연구도 비교적 정확한 자료를 얻을 수 있는 댐 유출량에 초점이 맞추어져 있었다. 이는 통계분석을 위한 자료의 부족이 한 원인으로 이로 인해 댐 상류에 국한하여 연구들이 진행된 것으로 보인다. 국내 지표수에 대한 경향성 분석을 살펴보면, 대부분의 연구에서 댐 유입량이나 댐 유역의 하천유출량에 있어서 증가하는 경향을 보이긴 하였으나 통계적으로 유의한 결과를 얻지는 못하였다. 몇몇 연구에서는 홍수와 관련이 있는 여름철 유출량에서는 어느 정도 통계적으로 유의한 상향추세를 나타내는 것으로 제시하였다. 손태석과 신현석(2010)은 낙동강유역을 대상으로 강우의 경향성 분석을 통하여 기후변화가 수문학적 요소에 미치는 영향을 파악하기 위하여 강우와 유출의 탄성도 분석을 하였으며 김종필과 김광섭(2011)은 기온상승과 강수량 변화로 인한 강수효율 및 유출량의 변화특성을 파악하였다. 김미은 등(2012)은 과거자료를 기반으로 국내 기후변화의 수문영향을 경향성 분석기법과 탄성도 분석기법으로 수문변동량을 정량화하여 평가하고 중·단기 예측이 가능한 비시나리오 기반의 전망 기술을 개발하였다.

낙동강 유역을 대상으로 강우의 경향성 분석을 통하여 기후변화의 영향을 규명하고, 기후변화가 수문학적 요소에 미치는 영향을 파악하기 위하여 강우와 유출의 탄성도 분석을 하였다. 강우의 경향성 분석을 위하여 낙동강 주요지점의 기상청 강우자료를 수집하여 년, 계절, 월 단위로 재추출하여 경향성 분석자료로 이용하였고, 강우와 유출의 탄성도 분석에서는 WAMIS에서 제공하는 면적평균강우와 장기유출 자료를 수집하여 년, 계절 분석을 하였다. 그 결과 강우 경향성 분석에서 낙동강 유역 주요 기상청지점의 연강우가 증가하는 경향을 나타내고 있었으며, 계절별로는 여름철 강우의 증가경향은 두드러지며 가을과 겨울에 전 지역에서 감소하는 경향을 나타내고 있었다. 낙동강 유역 주요지점 탄성도를 분석한 결과 유역 평균은 1.666이고, 전 지점에서 탄성도 값이 1이상으로 분석되어 강우의 증가에 유출은 더 크게 증가하여 유출량의 변동이 민감한 지역이라고 판단되었다(손태석과 신현석, 2010).

기후변화에 따른 지역적 영향인 기온 상승과 강수량 변화로 인한 수자원 변화 특성을 파악하기 위하여 기상청(KMA)으로부터 전국 59개 관측지점에 대해서 1973년부터 2009년까지 강수량 및 기온자료를 이용하여 산정한 강수효율자료와 국가 수자원관리 종합시스템으로부터 1966년부터 2007년까지 PRMS 모의 유출량 자료를 분석하였다. 그 결과 전반적으로 강수효율의 거동은 강수량의 변화 특성을 따르나 지역적으로 강수량이 증가함에도 불구하고 기온상승에 따라 강수효율이 감소하는 거동을 보였으며, 이는 유출량의 변화 특성과 유사하였다. 또한 유출량의 평균대비 변화율은 강수량 변화보다 상당히 크게 나타나, 기후변화의 영향에 민감한 것으로 나타났다. 강수량이 증가하는 5 ~ 9월을 제외한 전체 기간에 대하여 강수효율은 강수량보다 더 유의한 감소 경향을 나타내고 있어 해당기간의 가용 수자원량이 줄어들 것으로 판단되었다(김종필과 김광섭, 2011).

과거자료를 기반으로 국내 기후변화의 수문영향을 경향성 분석기법과 탄성도 분석기법으로 수문변동량을 정량적으로 평가하고 중·단기 예측이 가능한 비시나리오 기반의 전망 기술을 개발하였다. 먼저 기후변화에 따른 강우와 유출량 변동 특성 분석을 위하여 경향성 분석 및 탄성도 분석기법을 선정하고, 이를 이용하여 전국 24개 지점에 대하여 1966년부터 2001까지 장기 관측 자료를 기초로 하여 2020년까지 중·단기 수문전망을 실시하였다. 그 결과 탄성도 기법을 이용한 결과가 더 신뢰성이 있으며 중·단기 수문전망에 효율적인 것으로 나타났다(김미은 등, 2012).

2.2.2 지하수

국내 지하수 연구들을 살펴보면, 지하수의 거동, 지표수·지하수 연계모형 개발, 지하수 함양량의 이용, 지하수의 수질 등에 관한 연구가 이루어 졌다. 특히 지하수 함양량이 지하수 가능 이용량이 되므로 이를 추정하는 연구에 편중되어 있는 실정이었다. 그렇기 때문에 국내 지하수 연구에서는 지하수의 통계특성이나 경향성에 대한 연구는 그 수가 미비하였다. 이덕배 등(2010)은 농경지의 전용 실태와 강수량이 많은 태백지역에서 겪은 2009년 물 부족의 원인을 토지이용 측면에서 분석하였으며, 양정석과 김남기(2011)는 강우와 지하수위의 관계를 분석한 후 강우자료를 이용하여 이동평균을 취한 후 지하수위와의 상관관계를 분석하였다. 이승현과 배상근(2011)은 지하수 함양량을 산정하고 강수량 증감에 따른 지하수함양량의 변화특성을 분석하였다.

수자원인 빗물을 효율적으로 활용하는 토지이용 방향을 제시하고자 우리나라 농경지의 전용 실태와 강수량이 가장 많은 태백지역에서 겪은 2009년 물 부족 원인을 토지이용 측면에서 조사하였다. 1970년대와 2000년대의 온도 변화를 비교분석한 결과, 평균온도는 0.95℃가 상승하였으며 계절별로는 여름철이 1.02배 상승한 반면 겨울철은 1.45배 상승하였다. 같은 시기에 연평균 누적 강수량은 198 mm가 증가하였으며, 여름철 강수량은 27% 증가한 반면, 겨울철 강수량은 오히려 1970년대에는 4.5배였으나, 2000년대에는 6.3배로 증가되는 것으로 나타났다. 그 결과 논 1 ha는 연간 2,944 m^3의 홍수를 조절하고, 4,143 m^3의 지하수를 보충하는 기능을 가지고 있는 것을 고려했을 때 이는 국가적으로 연간 338백만 m^3의 홍수 조절 능력 상실과 연간 448 m^3 의 지하수 보충능력이 상실되어 수자원 관리의 취약성이 한층 심화되는 토지이용 구조를 갖고 있는 것으로 나타났다(이덕배 등, 2010).

강수량변화가 도시 및 해안지역의 지하수함양량에 미치는 영향을 파악하기 위하여 부산광역시 수영구를 포함하는 광역 지하수유역에 강수량 자료를 변화시켜 지하수 함양량을 산정하고 강수량 증감에 따른 지하수 함양량의 변화 특성을 분석하였다. 그 결과 강수량 증감에 따라 지하수 함양량의 증감량은 차이가 있으나 강수량과 지하수 함양량의 변화 양상은 동일한 경향을 나타내었다. 또한 연도가 증가함에 따라 지하수 함양률이 감소하는 추세를 나타내었다. 강수량 변화 시의 지하수 함양량의 전체 평균 변화율은 강수량이 10%증가 시에는 2.23%, 10% 감소 시에는 2.20%, 20% 증가 시에는 4.39%, 20% 감소 시에는 4.36% 로 강수의 변화율에 비하여 지하수함양량은 적은 변화율을 보였다(이승현과 배상근, 2011).

한반도와 제주를 포함한 전국의 강우 자료와 국가지하수위 관측소에 관측된 지하수위 관측 자료를 수집하여 강우와 지하수위의 관계를 분석한 후 강우자료를 이용하여 이동평균을 취하여 지하수위와의 상관관계를 분석하였다. 또한 유역평균 일 최대 침투량인 한계 침투량을 고려한 후, 강우 이동평균과 지하수위간의 상관계수를 산정하였다. 한계 침투량 고려 시 0.6 이상인 곳을 최종적으로 선정하였고, 선정된 지역의 공통점과 지역 특성에 다른 차이점 등을 비교 분석하였다. 총 26개 지역이 선정되었고 행정구역별로 경기도가 4개소, 강원도가 4개소, 충청도가 5개소, 전라도가 3개소, 경상도가 9개소, 제주도가 1개소이다. 그 결과 상관계수가 높을수록 강우사상 발생에 따른 지하수위 변동은 뚜렷하게 나타났으며, 강우와 상관없는 요인에 의한 지하수위의 변동이 거의 없는 것으로 나타났다(양정석과 김남기, 2011).

2.2.3. 홍수

국내 홍수에 대한 연구에서는 과거 관측 강수를 수문모형에 입력하여 생산한 모의 유출량을 이용하여 홍수를 분석하는 방법이 대부분이었다. 과거 연구논문들의 주된 홍수의 경향성은 과거 발생빈도와 피해액을 중심으로 정리되었다. 국내 홍수 경향성을 종합해 보면 그 빈도와 규모가 꾸준히 증가하고 있음을 알 수 있으며 이에 비례하여 홍수 피해도 증가하는 경향을 보이고 있었다. 특히 강수량은 증가하나 강수일수가 감소하여 강우강도가 증가하고 이에 집중호우의 발생빈도가 증가하여 홍수를 발생시킨다고 예상하였다. 서린 등(2010)은 강

우 관측 자료가 가지는 통계적 특성을 유지하면서 추계학적 시계열 모의발생기법을 이용하여 강우자료를 발생시킨 후 경향성 검정을 실시하였으며, 이승호 등(2011)은 호우의 변화경향을 분석하기 위해 호우와 관련된 7개의 극한강수지수를 분석하였으며 성장현 등(2012)은 미래 확률강우량을 통계적으로 전망하고 홍수취약도 모형을 통하여 미래 서울 지역의 홍수취약도를 정량적으로 가늠해 보았다. 윤선권과 문영일(2014)은 주요도시 지점 강우관측 자료를 대상으로 Quantile Regression (QR)에 의한 기준강수량 초과 강우의 선형추세분석과 Mann-Kendall, Sen 검정을 실시하였다.

강우시계열에서 나타나는 경향성의 시간적 변동 분석을 위해 현재 경향성이 나타나지 않는 강우관측소 51개 지점에 대하여, 관측소에 따라 최저 34년, 최대 46년의 강우 관측 자료가 가지는 통계적 특성을 유지하면서 추계학적 시계열 모의발생기법을 이용하여 강우자료를 발생시킨 후 경향성 검정을 실시하였다. 경향성 분석은 Mann-Kendall Test, Hotelling-Pabst, Speraman's Rho Test 를 사용하였으며 신뢰수준은 95%로 설정하였다. 강우 시계열에서 추세성분을 제거한 후 잔차분석을 통해 잔차의 분포형으로부터 자료를 모의하였으며 현재 자료에서 50개의 자료를 더 추가한 후 다시 추세성분을 병합하였다. 그 결과 한반도 내의 지점 51개 중 13개 지점에서 향후 10년 이내에 경향성이 나타나는 것을 확인할 수 있었으며 23개 지점은 앞으로 20년 이내에 경향성이 나타남을 확인할 수 있었다(서린 등, 2010).

호우의 변화경향을 분석하기 위해 한국을 6개 유역으로 나누고 호우와 관련된 7개의 극한강수지수를 분석하여 변화지속성을 파악하였다. 유럽지역을 대상으로 개발한 STARDEX지수와 전 세계의 기후변화 감지를 위해 개발한 ETCCDI 기후극한지수 중 우리나라의 호우 표현에 유용한 7가지 지수를 선정하였으며, 호우관련지수는 상대적인 극한지수인 95, 99 퍼센타일 이상의 강수일수와 강수량 및 절대적인 극한지수를 분석하였다. 통계적 유의성 검정은 극한기후의 변화경향을 평가하는데 유용한 Kendall-tau 검정을 사용하였으며, 변화지속성을 유역별로 구분하여 유의수준이 a=0.05와 a=0.1 사이일 때를 약한 경향으로 표현했다. 그 결과 호우관련지수는 분석기간 동안 대부분 증가경향이지만 한강 유역, 낙동강 상류지역, 동해안지역이 다른 유역에 비해 증가경향이 뚜렷하게 나타났으며 금강 유역과 섬진강 유역은 호우의 증가경향은 통계적으로 유의하지 않고 변동성이 크게 나타났다. 호우의 증가경향은 1970년대 중반 이후 한강과 낙동강 유역에서 지속적이지만 2000년대 중반 이후 증가 경향이 지속적으로 나타나는 지점들이 감소하는 것으로 나타났다(이승호 등, 2011).

미래 확률 강우량을 통계적으로 전망하고 홍수 취약도 모형을 통하여 미래 서울 지역의 홍수 취약도를 정량적으로 가늠해 보았다. 비정상성을 고려한 확률 강우량 전망을 위하여 서울 지점의 연 최대 일강우량을 초기 30년 자료 이후로 1년씩 누적하며 General Extreme Value (GEV) 분포의 매개변수를 추정하였다. 시간 대 위치, 규모 및 형상 매개변수의 선형정도를 비교하여 시간에 따른 위치 매개변수의 선형회귀식을 구성하고, 선형회귀분석에 의한 위치 매개변수를 이용하여 2030년의 확률강우량을 산정하였다. 이 확률 강우량을 홍수 취약도 분석의 모델의 입력 자료로 하여, 2030년 서울지역의 홍수 취약도를 평가하였다. 그 결과 2030년에 재현기간 100년의 강우가 발생한다면 현재에 비해 지역 평균 5% 정도 취약도가 증가할 것으로 전망되었다(성장현 등, 2012).

전국의 8개 주요 도시지점 강우관측 자료를 대상으로 다양한 분류 기준을 적용하여 Quantile Regression (QR)에 의한 기준강수량 초과 강우의 선형추세분석과 Mann-Kendall, Sen 검정을 실시하였다. 분석결과 봄철과 여름철 강수의 뚜렷한 증가 경향이 있으며, 가을철과 겨울철 강수는 감소하는 경향이 나타났으며, 폭우사상은 최근 30년 평균 3.1 ~ 15% 증가 하였다. 또한, 연도별 발생강우의 Ranking에 따른 TOP10th 백분위 강수의 3 IQR (inter quantile range)의 최근증가경향을 분석한 결과, 대부분 지점에서 강수의 증가경향을 확인하였으며, Quantile 90%의 평균 백분위 강수량은 43.5 mm, 증가경향은 0.1412 mm/yr으로 나타났으며 Quantile 99%의 평균 백분위 강수량은 68.0 mm, 증가경향은 0.1314 mm/yr로 나타났다(윤선권과 문영일, 2014).

2.2.4. 가뭄

국내 가뭄 연구들을 살펴보면 대부분 가뭄지수를 국내에 맞게 수정하거나 개발하는 연구들에 편중되어 있다. 또한 과거 가뭄사례를 분석하고 해결방안을 제시하는 연구도 있었으나, 그 수가 미비하였다. 국내 가뭄에 대한 과거 경향성을 종합해 보면, 가뭄 발생주기는 점차 짧아지고 있으며, 그 피해 또한 증가하고 있다. 특히 최근 발생하는 가뭄은 어느 지역에 국한하여 발생하거나 심하게 발생하는 것이 아니라 전국적으로 확대되어 발생하는 경향을 나타내고 있다. 홍승진 등(2011)은 물 빈곤지수에 세부지표를 추가한 기후 변동성지수를 개발하여 국내에 적용하였다. 이주헌 등(2012a)은 SPI (Standardized Precipitation Index)를 이용한 가뭄 빈도해석을 통하여 남한지역에서 발생했던 과거가뭄사상의 시·공간적 분포 특성을 정량적으로 평가하고자 하였으며 이주헌 등(2012b)은 과거 한반도에서 발생했던 과거 가뭄사상의 통계학적 특성을 분석하기 위하여 SPI 와 PDSI (Palmer Drought Severity Index)를 선정하여 월평균 가뭄지수를 산정하고자 하였다.

수자원 상황을 평가하기 위하여 기존에 개발된 물 빈곤지수에 지역적 기후변동성 및 홍수피해를 평가할 수 있는 세부지표를 추가한 기후 변동성지수를 개발하여 국내에 적용하였다. 물이용 평가에 초점이 맞추어진 물 빈곤지수와 기후 변동성지수를 산정하기 위해 환경, 수자원 이용 효율성, 수자원의 이용능력, 수자원 배분의 공평성 및 수자원의 양에 관련한 세부지표와 치수 및 기후변화를 지역적으로 평가할 수 있는 지역적 특성이 추가된 지역적 특성인자 항목의 세부지표를 선정하여 시도별 물 빈곤지수와 기후 변동성지수를 산정하여 지수의 변화에 대해 분석하였다. 1998년부터 2007년까지 물 빈곤지수와 기후 변동성지수에 대한 분석을 실시하여 지역별 변동성을 평가하고 물 부문 정책, 투자 및 적용에 대한 우선순위를 결정하는데 도움을 줄 수 있는 정보를 제공하고자 하였다. 그 결과 환경 지수는 대전과 인천 같은 공업단지가 많은 지역에서 낮은 값을 나타냈으며, 충청북도와 경상남도 같은 지역의 경우 환경 지수는 증가하는 것으로 나타났다. 수자원 이용효율성 항목은 전체적으로 다른 항목들에 비해 낮은 값을 나타내었으며, 수자원 이용능력의 경우 지역별 편차가 큰 것으로 분석되었다. 수자원 배분의 공평성은 광역시와 같은 경우 보급률이 높은 값을 보였으며, 수자원의 양은 특·광역시의 값이 현저히 낮게 나타났다. 기후 변동성 지수의 경우 서울특별시를 비롯하여 인천광역시 및 경기도 지역의 경우 다른 지역에 비해 값이 현저히 낮은 값이 나타났으며 특·광역시의 경우 홍수로 인한 피해의 경우는 다른 지역에 비해서 안전한 것으로 분석되었다(홍승진 등, 2011).

기상학적 가뭄지수인 SPI 를 이용한 가뭄 빈도해석을 통하여 남한지역에서 발생했던 과거 가뭄사상의 시·공간적 분포 특성을 정량적으로 평가하고자 하였다. 가뭄의 심도별, 지역별 발생빈도를 추정하기 위하여 Drought Spell 분석을 실시하였고, 남한지역을 대상으로 심한 가뭄에 대한 가뭄 우심지역의 공간적 분포 특성을 평가하기 위하여 가뭄의 지속기간별 가뭄빈도 해석을 통해 관측소 별로 SDF (Severity-Duration-Frequency) 곡선을 작성하고 이를 이용하여 남한지역을 대상으로 하는 가뭄우심도(Potential Drough Hazard Map)를 작성하였다. 가뭄단계별 과거의 발생빈도를 분석한 결과 금강, 낙동강, 섬진강 유역에서 심한 가뭄과 극한 가뭄 단계의 발생빈도가 큰 것으로 나타났으며 가뭄 빈도해석을 통해 작성된 SDF 곡선에서도 한강 유역에 위치한 서울 관측소에 비해 금강, 낙동강, 섬진강 유역에 위치한 대전, 대구, 광주 관측소의 재현기간별 가뭄심도가 심하게 나타났다. 가뭄 빈도해석을 통해 작성된 가뭄 우심도에서는 한강 유역과 낙동강 유역의 상류 지역에 비해 금강, 섬진강, 영산강 유역이 가뭄에 취약했던 지역으로 분석되었으며 가뭄단계별 발생빈도와 유사한 결과를 나타냈다(이주헌 등, 2012a).

한반도에서 발생했던 과거 가뭄사상의 통계학적 특성을 분석하기 위하여 SPI와 PDSI를 선정하였고, 기상청 산하의 59개 기상관측소의 1980 ~ 2009년까지의 기상자료를 수집하여 월평균 가뭄지수를 산정하였다. 산정된 가뭄지수를 이용하여 지수별 경향성 분석, 주기성 분석 및 가뭄기간 조사를 통하여 과거 한반도 가뭄의 통계학적 특성을 분석하였다. 한반도 가뭄의 유역별 경향성을 분석한 결과 SPI 3(지속기간 3개월)와 SPI 6

(지속기간 6개월)은 봄과 겨울에 모든 유역에서 가뭄이 심화되는 경향을 보였고 여름철에는 가뭄이 완화되는 경향을 보였으나, SPI 12(지속기간 12개월)와 PDSI의 경우 짧은 지속기간의 가뭄지수와는 다른 경향을 나타내었다. 한편, 유역별 가뭄의 주기성을 분석한 결과 1 ~ 2년 또는 6년 내외의 주기 성분이 유의한 것으로 나타났으며, SPI 3의 분석결과 유역 전반에서 1 ~ 2년의 주기성을 보였고, SPI 6와 SPI 12는 유역별로 다소 차이를 보이기는 했으나 4 ~ 6년에서 강한 주기성을 나타내었다. 또한 PDSI도 마찬가지로 6년 내외의 주기성을 보였으며 가뭄기간 조사에도 금강, 영산강, 낙동강 유역에 위치하는 관측소를 중심으로 극심한 가뭄이 많이 나타났던 것으로 분석되었으며, 한반도의 중부지방보다 남부지방이 극심한 가뭄에 취약했던 것으로 나타났다(이주헌 등, 2012b).

2.2.5 결론

우리나라에서 지표수에 대한 대부분의 연구는 댐 유입량 및 하천유출량과 관련되어 수문모형의 개발, 홍수와 관련된 유출량 산정, 빈도분석 등에 초점이 맞추어져 있으나 기초가 되는 지표수의 통계특성이나 경향성 분석 등은 미비하였다. 대부분의 연구도 비교적 정확한 자료를 얻을 수 있는 댐 유출량에 초점이 맞추어져 있었다.

국내 지하수 연구를 살펴보면, 지하수의 거동, 지표·지하수 연계모형 개발, 지하수 함양량의 이용, 지하수의 수질 등에 관한 연구가 이루어졌다. 특히 지하수 함양량이 지하수 가능 이용량이 되므로 이를 추정하는 연구에 편중되어 있는 실정이었다. 그렇기 때문에 국내 지하수 연구에서는 지하수의 통계특성이나 경향성에 대한 연구는 그 수가 미비하였다.

국내 홍수에 대한 연구에서는 과거 관측강수를 수문모형에 입력하여 생산한 모의 유출량을 이용하여 홍수를 분석하는 방법이 대부분이었다. 과거 연구논문들의 주된 홍수의 경향성은 과거 발생빈도와 피해액을 중심으로 정리되었다. 국내 홍수 경향성을 종합해 보면, 홍수의 빈도와 규모가 꾸준히 증가하고 있음을 알 수 있으며, 이에 비례하여 홍수 피해도 증가하는 경향을 보이고 있다.

국내 가뭄 연구들을 살펴보면 대부분 가뭄지수를 국내에 맞게 수정하거나 개발하는 연구들에 편중되어 있다. 또한 과거 가뭄사례를 분석하고 해결방안을 제시하는 연구도 있었으나, 그 수가 미비하였다. 국내 가뭄에 대한 과거 경향성을 종합해 보면, 가뭄 발생주기는 점차 짧아지고 있으며, 그 피해 또한 증가하고 있다. 특히 최근 발생하는 가뭄은 어느 지역에 국한하여 발생한다거나 심하게 발생하는 것이 아니라 전국적으로 확대되어 발생하는 경향을 나타내고 있다.

2.3 영향전망

2.3.1 지표 및 지하수 유출

2.3.1.1 지표수

지표수 유출 전망 논문들의 대부분은 GCM, RCM을 이용하여 장기간의 전망을 연구하였다. 또한 되도록 많은 GCM과 RCM을 쓰는 방향으로 연구가 진행되고 있다. 따라서 1차 보고서에서는 배출 시나리오 이용 현황에 대해 정리한 바 있으나, 이번 2차 보고서에서는 이러한 정리는 의미가 없는 것으로 판단된다.

현재까지 개발된 GCM이나 RCM 등의 기후변화 시나리오는 실제 관측된 강수의 특성을 재현하지 못하는 문제점을 가지고 있는 것으로 보고되고 있으며, 수자원 분야에 직접 적용하기 위해서는 일반적으로 통계적 상세화를 통해서 기후변화 영향을 유역 단위의 수문 시나리오로 재생산하는 작업이 필요하다. 김병식 등(2010)과 박진혁 등(2011)은 다지점 비정상성 Markov Chain 모형을 활용한 상세화 기법을 도입했다. 이아연과 김상단(2011)은 시공간적 변화인자기법(Spatio-Temporal Changing Factor Method, STCFM)을 적용하여 한반도 남동부에 위치한 19개 기상관측지점을 상세화 하였으며 이종문 등(2012)은 인공신경망(Artificial Neural Network, ANN) 상세화 기법을 사용하였다.

기후변화 시나리오를 반영한 장기 유출모의에서는 불확실성 요소가 반영되므로 매개변수 추정 과정이 쉽고 안정성이 높아야하며 국외 뿐 아니라 국내 다수 유역에 적용, 분석되어 모형 적용성 검토가 이루어져 신뢰성이 확보된 모형을 사용해야 한다. 따라서 최근 연

표 2.1 지표수 유출 연구별 기후자료, 상세화 기법 및 모형

연구자	기후자료	유역	상세화기법	유출모형	비고
김병식 등 (2010)	RegCM3 (A2, RCM)	한강유역	비정상성 Markov Chain 모형	SLURP	CA-Markov Chain 기법 (토지이용)
박진혁 등 (2011)	ECHO-G (A1B, RCM)	금강유역 내 대청댐 및 용담댐 유역	다지점 비정상성 Markov Chain 모형	SWAT	
이아연과 김상단 (2011)	CGCM3.1(T63), CM3, Mk3.0, ECHAM5/OM (A1B, A2, B2)	낙동강 본류	Spatio-Temporal Changing Factor Method (STCFM)	TANK	
배덕효 등 (2011)	RCM 모형 (A2)	5대강 유역 109개의 중권역	CSEOF, WXGEN	PRMS,SWAT, SLURP	
이종문 등 (2012)	RCM 모형 (논문 상 정보 부재)	낙동강유역 내 남강댐	인공신경망	SWAT	
국립환경 과학원 (2012)	RCP 시나리오 (RC4.5, 8.5)	소양감댐, 안동댐 용담댐, 주암댐 상류 유역	-	CoLM	
김정진과 류재현 (2013)	CIMIP3 모형 (A1, A1B, B1)	평창	-	HSPF	
안소라 등 (2013)	RCP 시나리오 (RCP4.5, 8.5)	설마천 혼효림 유역	HadGEM-3-RA	SWAT	
은코모제피 템파와 정상옥 (2014)	RCP 시나리오 (RCP2.5, 4.5, 8.5)	5대강 유역	LARS-WG	Catchment Modeling Toolkit	
정세진 등 (2014)	RCP 시나리오 (RCP8.5)	영산강 유역	Weather generator	SLURP	

구 주제로는 기후변화에 따른 미래 상황에 보다 적합하도록 유출 모형 운영에서의 다각화를 시도하고 있다(표 2.1).

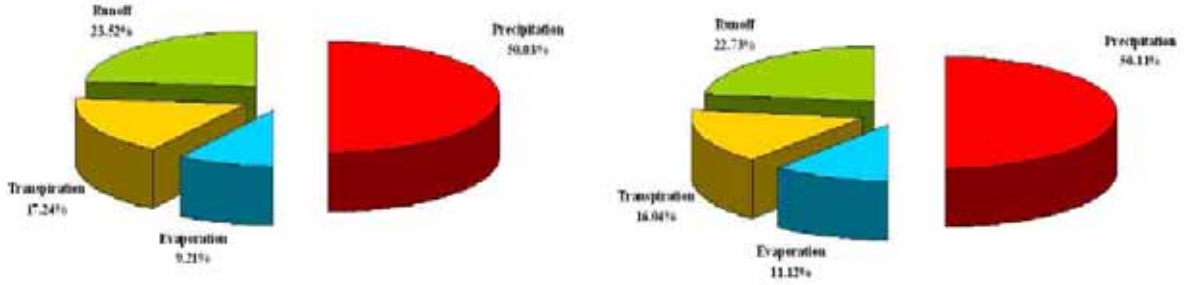


그림 2.1 한강의 과거(좌)와 미래(우)의 평균 물수지 비교(김병식 등, 2010).

미래 토지이용변화를 예측하기 위하여 토지이용의 변화된 경향을 반영할 수 있는 Markov Chain 모형과 시간변화를 고려할 수 있는 CA (Celluar Automata) 기법을 결합한 CA-Markov Chain 기법을 적용하였다. 박진혁 등(2011)은 금강유역 내 대청댐 및 용담댐 유역을 대상으로 2011 ~ 2090년 까지 SWAT 모형을 이용하여 미래 유출량 전망을 분석하였다. 이아연과 김상단(2011)은 낙동강 유역을 대상으로 환경유량의 개념을 도입하고 TANK 모형을 이용하여 유출량 전망 분

석을 하였다. 배덕효 등(2011)은 PRMS, SWAT, SLURP 모형을 선정하여 수문모형의 불확실성을 고려한 수자원 전망을 하였고 이종문 등(2012)은 2011년부터 2100년까지 낙동강 수계의 남강댐 유역을 대상으로 SWAT 모형을 이용하여 유출량 변화를 예측하였으며 김정진과 류재현(2013)은 HSPF 모형을 적용하여 평창 유역의 적설량을 모의하였다. 안소라 등(2013)은 SWAT 모형을 이용하여 설마천 혼효림 유역의 수문순환 영향을 평가하였으며 정세진 등(2014)은 SLURP모형을 사용하여 영산강 유역의 유출을 전망하였다(김병식 등, 2010).

력하여 2001년부터 2090년까지 총 90년에 대한 한강 유역의 미래 유출모의를 실시하였다. 예측된 미래의 유출사상을 기반으로 각 댐별 과거와 미래 유출량을 월별로 비교하고 이들의 유량분석을 실시하였다. 그 결과 최종 모의 지점으로 선택한 팔당댐에서 월단위 유출모의 결과 8월 보다는 9월 유출량이 증가하는 결과를 보였고, 그 이유를 미래 강우 패턴의 변화에 기인한 것으로 판단하였다. 한강유역의 연 강수량과 연 증발량은 증가하고 연 증발산량과 연 유출량은 감소하였는데, 특히 미래 강수량과 유출량은 과거보다 산발적이고 공간적 분포가 두드러지는 결과를 보였다. 이로부터 기후변

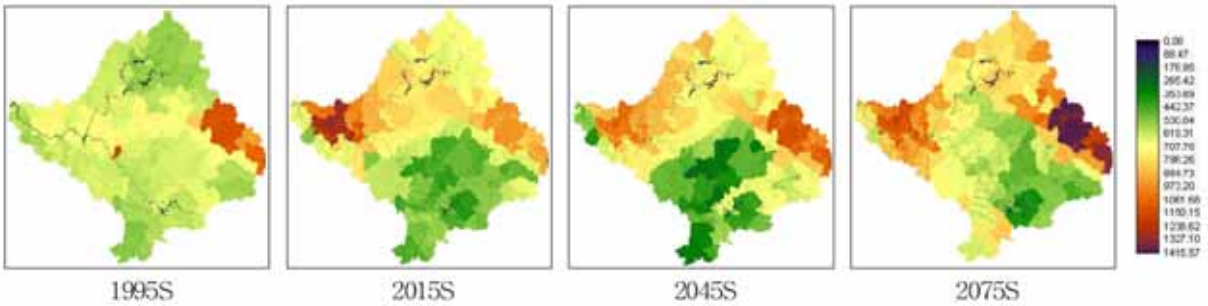


그림 2.2 한강의 과거와 미래의 시공간적 유출변화(김병식 등, 2010).

그러나 이와 같은 노력들에도 불구하고, GCM 및 RCM이 갖는 미래 전망의 불확실성이 매우 크다는 단점을 해결하기 힘들다. 그에 따라, IPCC 기후변화 시나리오를 사용하지 않는 중단기 전망 연구가 수행되고 있다.

기후변화와 토지이용변화에 따른 미래 한강 유역의 수자원 변동성을 평가하기 위해 CA-Markov Chain기법을 이용하여 토지이용변화를 추정하였으며, 기온과

화 상황에서는 국지성 호우 발생 빈도가 높아지거나 특정기간(예: 장마)의 강우 발생 확률이 증가하는 등 강우 패턴 변화의 지속 가능성 있음을 밝혀내었다. 위와 같은 결과들을 바탕으로, 논문에서는 기후변화가 물 순환 구조에 미치는 영향을 검토한 결과 한강유역은 물 순환 요소(강수량, 증발량, 증산량, 유출량)의 변화에 의하여 수자원 관리 측면에서 어려움이 가중될 것으로 평가하였다. 그림 2.1과 표 2.2는 한강 유역의 과거와 미래의

표 2.2 한강의 과거와 미래의 평균 물수지 비교(김병식 등, 2010)

	Past (%)	Future (%)	Variation (%)
Precipitation	50.03	50.11	0.08
Evaporation	9.21	11.12	1.91
Transpiration	17.24	16.04	-1.20
Runoff	23.52	22.73	-0.79

강수자료를 독립변수로 이용한 다중회귀식을 이용하여 미래 NDVI를 추정하였다. 이어 기상청에서 제공하는 RegCM3 지역기후모형에 상세화 기법을 이용하여 기후변화 시나리오 추정하였고, 이를 SLURP 모형에 입

각 강수량, 증발량, 증산량과 유출량에 대한 과거 대비 미래 구성비를 비교하여 나타내었고 그림 2.2는 한강 유역의 과거와 미래의 유출량에 대한 시·공간적 분포 변화를 나타내었다(김병식 등, 2010).

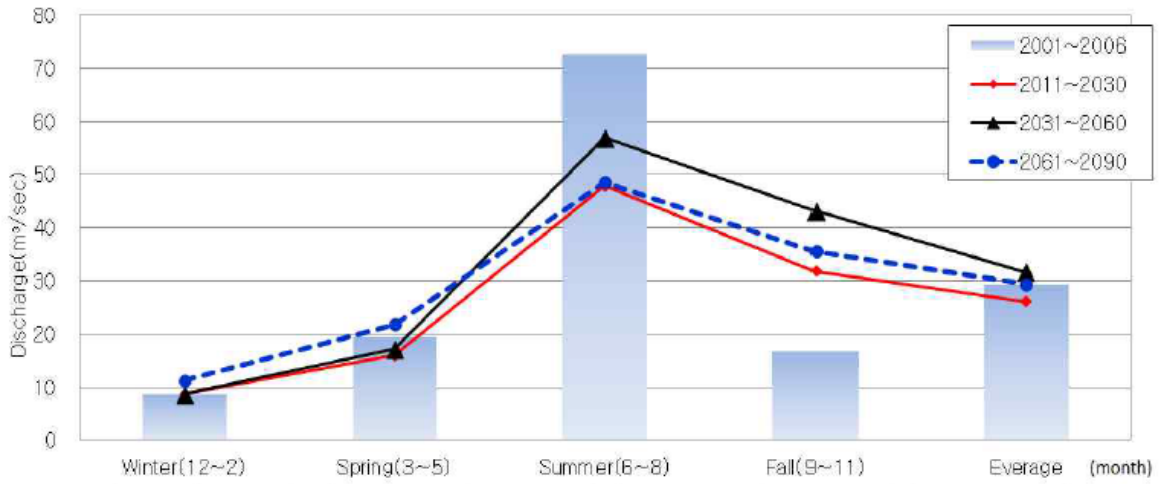


그림 2.3 미래 계절별 유출량 전망(박진혁 등, 2011)

금강유역 내 대청댐 및 용담댐유역을 대상으로 기상청에서 제공하는 A1B 시나리오 기반의 KMA-RCM모형과 SWAT모형을 이용하여 미래 유출량 전망을 분석하였다. 그림 2.3과 같이 기후변화 분석기간은 2011년부터 2090년까지 80년을 대상기간으로 유출량을 전망하였다. 용담댐의 경우 2011 ~ 2030년에 6%, 2031 ~ 2060년에 14%, 2060년 이후 18% 유출량이 증가하였다. 대청댐도 용담댐 유역과 마찬가지로 전반적인 유출량이 증가하였다. 유출량의 계절별 변화 경향성 분석결과 가을철의 유출량은 관측 유출량에 비해 상대적으로 증가하였지만, 여름철 유출량은 지금보다 감소하였다(박진혁 등, 2011).

배출 시나리오 A1B, A2, B2에 관한 미래기후정보를 모두 제공하고 있는 GCMs인 CGCM3.1 (T63), CM3, Mk3.0, ECHAM5/OM를 대상으로 하여 미래기후정보를 추출하고 강우-유출 모형인 TANK 모형을 이용하여 기후변화가 낙동강 본류 하천유량에 미치는 영향에 대한 분석을 실시하였다. 미래 한반도 동남부의 하천유량은 증가할 가능성이 가장 큰 것으로 분석되었지만 적용 시나리오에 따라 2071 ~ 2100년 기준으로 연평균유량은 지역적으로 48.1% 증가에서 5.82% 감소까지의 불확실성이 존재하였다. 미래 하천의 유량은 미래로 갈수록 적용 시나리오에 따른 편차가 커지고 있다(이아연과 김상단, 2011).

GCM 및 유출모형의 불확실성을 고려하여 기후변화에 따른 미래 한반도 수자원의 변화를 전망하였고 그

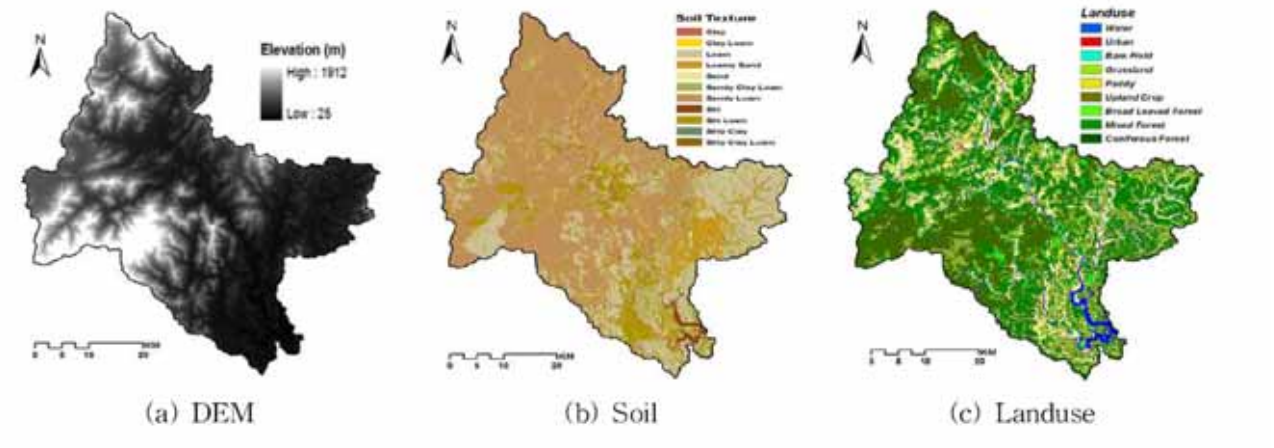


그림 2.4 남강댐 유역의 특성(이종문 등, 2012)

결과에서 나타나는 불확실성을 평가하고자 하였다. 온실가스 배출시나리오와 GCMs의 불확실성을 고려하기 위해 IPCC AR4에 적용되었던 3개 시나리오(A2, A1B, B1)에 대한 13개의 GCMs 결과를 이용하였으며, 유출모형 구조 및 증발산량 산정방법에 따른 영향을 고려하기 위해 PRMS, SWAT, SLURP 모형을 선정하였고 각 모형별로 2 ~ 3개의 증발산량 방법을 고려하였다. 우리나라 109개 중권역 유역에 대해 312개의 결과가 제시되었으며, 이를 이용하여 Gaussian 핵밀도함수(kernel density function)을 산정함으로써 평가결과의 앙상블 평균과 불확실성을 동시에 제시하였다. 분석결과 여름철과 겨울철 유출량은 증가, 봄철은 감소 할 것으로 전망되었다. 연평균유출량은 전체유역에서 증가할 것으로 전망되었으며, 공간적으로는 한강유역이 위치한 북쪽유역이 남쪽유역에 비해 연유출량이 더 크게 증가할 것으로 전망되었다. 평가결과에서 나타난 불확실성은 겨울철 유출량에서 가장 크고 여름철 유출량에서 가장 적은 것으로 나타났다(배덕효 등, 2011).

낙동강 수계의 남강댐 유역을 대상지역으로 기후변화 취약성을 평가하기 위하여 SWAT모형을 이용하여 유출량 변화를 예측하였다. RCM의 분석 및 인공신경망을 통한 상세화 기법을 적용하여 예측인자들에 대한 모의결과로부터 미래 기상자료를 구축하였다. 그 중 강우의 경우 총량에 대한 보정을 위해 분위사상법을 적용하였다. 이와 같이 구축된 미래 기상자료를 SWAT 모형에 적용하여 기후변화에 따른 유출량 변화를 예측하였다. 그 결과, 예측인자인 강우, 상대습도, 최고기온, 최저기온의 값이 강우의 비홍수기를 제외하고는 전체적으로 증가하였으며, 홍수기시 강우의 증가로 저수지에 유입되는 유입량의 총량이 증가하고 갈수기시에는 강우의 감소로 인해 유량이 감소되어 가뭄현상이 지속되어 수질이 악화될 것으로 예측하였다(이종문 등, 2012).

한반도 물 부문의 미래 기후변화에 대한 적응을 위한 정량적인 기후변화 영향평가 방법론을 제시하기 위하여 기후변화 불확실성을 고려해서 산출된 한반도 최적 상세 기후변화 시나리오를 이용하여 지면모형인 CoLM(Common Land Model)을 한반도에 적용하고 이를 통해 모의된 유량 및 지표면 온도를 추적(routing)기법을 통해 하천 유량과 하천 수온을 선정하였다. LSM (Land Surface Model)을 1 km의 고해상도로 한반도에 성공적으로 적용하였으며, 불확실성 분석방법 제시, 지면모형의 한반도 적용성 확인, 군집 분석 및 환경인자 추출 등의 향후 기후변화 영향평가 연구에 초석이 될 것으로 판단하였다(국립환경과학원, 2012).

HSPF 모형을 적용하여 평창유역의 적설량을 모의 및 미래 적설량을 평가하기 위해 CIMIP3에서 제공하는 A1, A1B, B1의 온실가스 배출시나리오에 기반한 GCMs를 이용하였다. 또한 HSPF 모형과 GCMs의 통계학적 오류를 최소화하기 위해 편의보정과 시간적 분해모형을 적용하였다. 잠재증발산량을 구하기 위해 Penmann-Monteith 방법을 이용하였으며, 모형의 검보정 결과 모의된 유출량과 적설량의 경우 모형 효율이 높게 나타났으며, 모형의 검정 후 상관계수를 분석한 결과 월별 유출량의 상관계수는 0.94로 나타났으며 월별 적설량 또한 상관계수가 0.91로 나타나 보정된 HSPF 모형이 평창지역에 대한 유출량과 적설량을 비교적 잘 모의하고 있는 것으로 나타났다(김정진과 류재현, 2013).

SWAT 모형을 이용하여 설마천 혼효림 유역(8.54 km^2)을 대상으로 RCP (AR5) 기후변화 시나리오에 따른 수문순환 영향을 평가하였다. 모형의 불확실성을 효과적으로 줄이기 위해 설마천 유역의 2007년부터 실측된 유량, 증발산량 및 토양수분을 이용하여 모형의 보정(2007 ~ 2008년) 및 검증(2009 ~ 2010년)을 수행하였다. 모형의 보정 및 검증 결과 유출량의 R^2가 0.74 ~ 0.91로 분석되었고, 증발산량의 R^2는 0.56 ~ 0.71, 토양수분의 R^2는 0.45 ~ 0.71로 분석되어 토양수분으로부터 증발산이 발생하고, 이로 인해 유출까지 영향을 미치는 물수지 현상을 잘 재현하고 있음을 알 수 있었다. 미래 기후자료로 AR5 RCP4.5 및 8.5 시나리오에 대한 모의결과 값을 이용하였고, 사용된 지역기후모형은 기상청에서 제공하는 HadGEM3-RA 모형이며 오차보정하여 사용하였다. 그 결과 두 가지 시나리오 모두 미래 기온은 0.9 ~ 4.2°C 상승하고, 강수량은 7.9 ~

20.4% 증가하였다. 또한 미래 유출량은 0.6 ~ 15.7% 증가한 반면 유출률은 3.8 ~ 5.4% 감소하였고, 증발산비는 4.1~6.8% 증가, 토양수분은 4.3 ~ 5.5% 감소하였다(안소라 등, 2013).

기후변화가 우리나라 5대강 유역의 유출량에 미치는 영향을 분석하기 위하여 Catchment Modeling Toolkit의 네가지 수문기상 모형을 사용하였다. 세 가지 RCP 시나리오에 대하여 12개의 GCM 모형으로부터 미래 2021 ~ 2040년, 2051 ~ 2070년, 2081 ~ 2099년의 기후자료를 추출하였다. LARS-WG방법으로 상세화하였으며, 수문기상모형들은 1999년부터 2009년까지의 관측자료를 이용하여 보정 및 검정 하였다. 그 결과 미래의 유출량은 기준년도에 비하여 RCP2.6, RCP4.5, RCP8.5 시나리오에 대하여 각각 0 ~ 24%, 7 ~ 30% 및 11 ~ 30% 증가할 것으로 예상되었다(은코모 제피 템파와 정상옥, 2014).

기상청에서 제공하는 RCP8.5 시나리오 자료를 일기발생기법(weather generator)을 이용하여 상세화 하였다. 이를 기반으로 하여 준분포형 장기유출모형인 SLURP 모형에 입력하여 2011년부터 2100년까지 영산강 유역의 유출을 모의하고 과거와 미래 유출량을 월별로 비교, 유황분석을 실시함으로써 미래의 영산강 유역의 수자원 변동성을 평가하였다. 그 결과 미래로 갈수록 유출량이 증가할 것으로 전망되었다. 또한 하천유황분석을 통해 갈수기, 저수기, 평수기, 풍수기의 변화를 파악하였다(정세진 등, 2014).

2.3.1.2 지하수

지하수를 고려한 기후변화 영향 평가 논문들의 경우, 강원도 지역, 경상북도 칠곡군과 그에 인접한 지역 및 중국의 관릉소 유역 등 다양한 지역을 대상으로 하였다. 지하수를 다루는 연구는 신뢰할 수 있는 다량의 자료를 확보해야하는 문제 때문에 연구하는 유역선정 자체가 매우 중요하여 연구지역에 대해 의존적이라 할 수 있다. 박민지 등(2010)과 이진용 등(2012)은 각각 강원도 지역의 산지(평창)와 하천변(소양강 유역)의 지하수 함양 전망에 대한 연구를 수행하였는데. 두 연구 모두 기후변화 시나리오들을 사용하여 미래 기후를 전망하였고 이를 토대로 지하수 함양량의 변화량을 전망하였다. 이명진 등(2010)은 경상북도 칠곡군과 그에 인접한 다소 넓은 유역을 연구지역으로 삼았고, 기존의 기후변화와 지하수 함양량의 불명확한 관계를 정량적으로 분석하여 향후 기후변화를 고려한 국내 지하수 수자원의 관리방안 수립을 위한 방향을 제시하였다. 이명진(2011)은 지리정보를 활용하여 기후변화에 따른 지하수 함양량 산정 모형 개발 및 검증을 수행하였다.

SWAT 모형을 이용하여 소양강 유역의 기후, 식생활력도, 토지이용 변화에 따른 수문요소 변화 값을 정량화하여 기후변화에 따른 수문요소의 영향을 분석하였다. 그림 2.5와 같이 A2, A1B, B1를 기반으로 한 IPCC GCM 모형인 MIROC3.2 hires, ECHAM5/OM, HadCM3을 이용하였고 통계적 상세화 기법으로는 Change Factor Method가 이용되었다. 미래 기후자료는 2020년대 (2010 ~ 2039년), 2050년대 (2040 ~ 2050년), 2080년대 (2070 ~ 2099년)의 기간으로 나누어 지하수 함양량을 분석하였다. 그 결과로 지하수 함양량은 각 3개의 GCMs 별로 평균 0.2 mm, 0.4 mm, 0.2 mm 감소하며, 과거 30년(1977 ~ 2006년)과 비교하여 최대 55.4% 까지 감소함을 보였다. 또한 B1 배출 시나리오에 지하수 함양량이 평균적으로 0.4 mm로 배출 시나리오 중 가장 높게 감소하였다(박민지 등, 2010).

경상북도 칠곡군, 구미시 일부 및 대구시 북구 일부, 달성군, 성주군, 김천시 및 군위군과 인접한 지역을 대상으로 기존의 기후변화와 지하수 함양량의 불명확한 관계를 정량적으로 분석 및 미래 기후변화 예측 결과를 반영한 연구지역 내 지하수 함양률 변화를 시-공간적으로 산정하고, 기존 산정 결과와의 비교를 통해, 향후 기후변화를 고려한 국내 지하수 수자원의 관리방안 수립을 위한 방향을 제시하고자 하였다. 그 결과 기후변화에 따른 지하수 함양률의 변화는 강우량이 가장 많은 기간(2031 ~ 2050년)에 가장 많은 지하수 함양량을 나타내었고, 이를 고려했을 때 전반적으로 지하수 함양량의 변화는 강수량의 변화에 민감하게 반응하는 것으로 분석되었으며, 유출곡선지수에 따른 함양량 변화는 크게 영향을 받지는 않으나, 지수 값이 불투수층에 가까

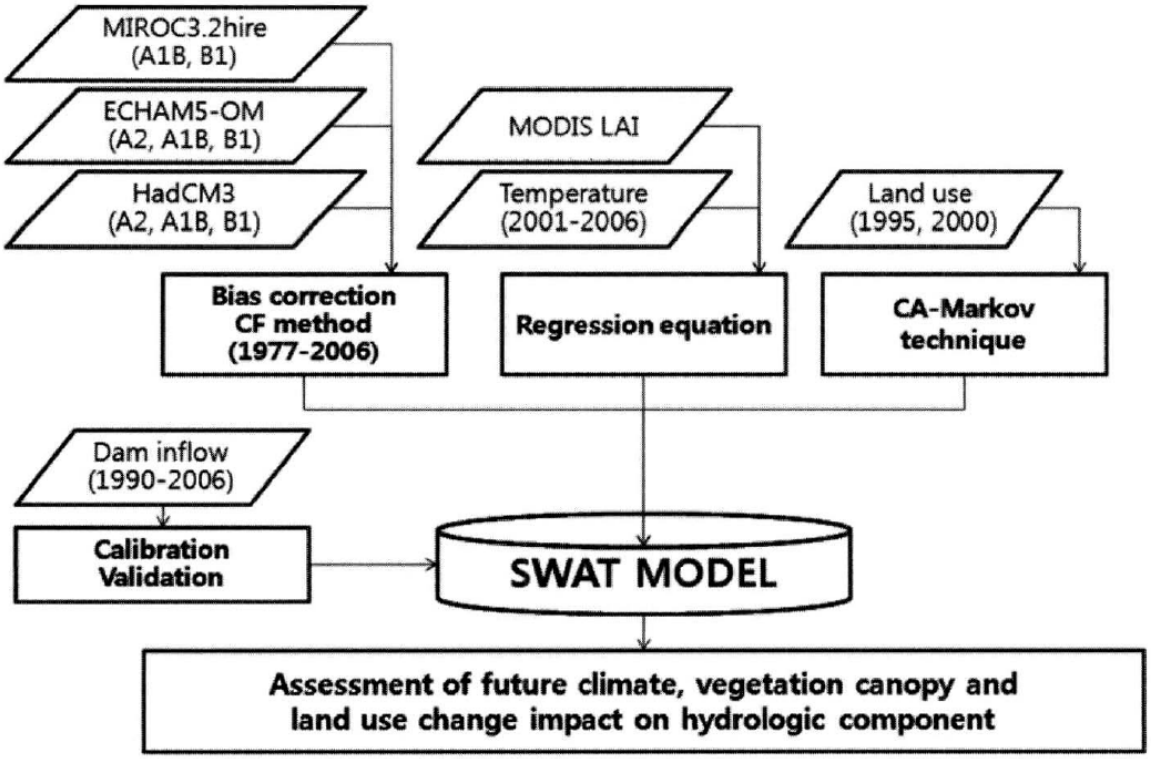


그림 2.5 기후변화에 따른 수문요소의 영향 분석 연구흐름도(박민지 등, 2010)

운 지역일수록 지하수 함양률이 급격히 감소됨을 알 수 있다(이명진 등, 2010).

지리정보시스템(GIS)과의 연계시스템을 제시하여 기후변화에 따른 지하수 함양량 산정 모형을 개발하고 기후변화와 지하수 함양량의 불명확한 관계들의 정량적 분석이 진행되었다. 개발된 기법을 연구지역인 낙동강 유역에 적용하여 실제 기후변화 영향에 대한 지하수 함양량을 미래 시기별로 추정 및 검증하였고, 그 최종 연구결과로 미래 기후변화에 따른 시기별 강우량, 지하수 함양률, 지하수 함양량을 추정하였다. 배출시나리오 A1B를 이용한 KMA-RCM 산출자료로, 기후변화에 따른 지하수 함양량의 시간적 변화는 1970 ~ 2000년에 6.1925 109㎥/yr, 2001 ~ 2030년에 6.2065×10^9 ㎥/yr, 2031 ~ 2050년에 5.8133×10^9 ㎥/yr, 2051 ~ 2100년에 6.4276×10^9 ㎥/yr으로 산정되었고 이는 유역 내 기저유출량과의 비교 분석을 통하여 검증하였다. 이명진 등(2010)에서와 마찬가지로 지하수 함양률 변화는 전반적으로 강수량의 변화에 민감하게 반응하는 것으로 분석되었으며, 유출곡선지수에 따른 지하수 함양량 변화는 크게 영향을 받지는 않으나, 지수 값이 불투수층에 가까운 지역일수록 지하수 함양률이 급격히 감소됨을 확인하였다. 추후 연계모형의 고도화 방안 및 현장조사가 추가 된다면 보다 정량적으로 기후변화와 지하수 함양량의 상관관계를 파악할 수 있을 것으로 전망하였다(이명진, 2011).

이진용 등(2012)는 강원도 평창군의 지하수 현황과 향후 기후변화가 가져올 지하수 함양 변화를 고찰하였다. 기상청 누리집, 국가지하수관측망, 국가지하수정보센터(GIMS)에서 자료를 수집하고 RCP4.5, RCP8.5에 대한 평창군 강수량 및 기온자료를 비교 분석하고 각 자료에 대한 변화율은 선형회귀분석을 적용하였다. 평창군은 84%가 임야로 이루어진 청정지역이라 기온상승과 그 영향이 더디게 발생하고 있는 것으로 추정되었으나, 39년간 기온이 지속적으로 증가하였다. 전반적으로 강수량과 연별 강수량 격차도 증가하였는데, 특히 여름철 강우량 비중이 커지고 강설량 증가는 미비하였다. 강설은 지하수함양에 유리함에도 이의 비중이 줄어든다는 것은 지하수자원 확보 측면에서 불리하다. 그림 2.6과 같이 평창군의 관정수 및 지하수 이용량은 꾸준히 증가하고 있고 RCP 배출 시나리오에 따르면 평창군

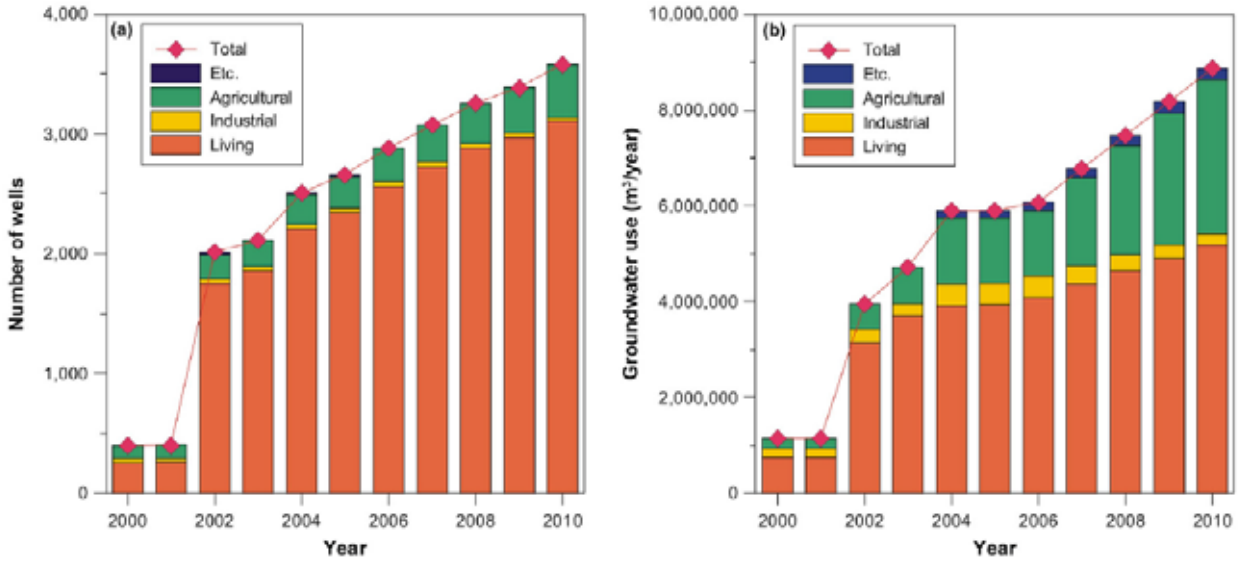


그림 2.6 2000~2013년 평창군 지하수관정의 수 및 이용량(이진용 등, 2012)

의 기온은 지속적으로 상승하며 현재의 기후상황처럼 폭우의 빈발과 강설의 감소가 강화된다면 지하수 함양이 줄어 지하수자원 확보와 관리에 어려움이 가중될 것으로 전망하였다.

이재민과 우남칠(2012)는 장기모니터링을 통한 지하수계의 이해를 위해 관릉소유역 사례를 연구하였다. 인위적인 간섭이 최소화된 유역단위에서 장기적인 순환체계에 대한 현장관측에 근거한 자료의 분석과 해석을 수행함으로써, 전 지구적 기후변화가 물 순환체계에 미치는 영향 해석을 위한 발판을 마련하였다. 데이터로거를 이용하여 4년간(2008 ~ 2011년) 지속적으로 수위, 전기전도도(EC), 수온 등을 관측 및 기록하였다. 장기 모니터링 자료를 통해 전체적인 경향성을 분석하고, 소유역의 지하수 유동과 Nest-Type 관측공에서 지하수의 수직적 거동을 분석하기 위해 심도별 시간에 다른 변화를 분석하였다. 시간에 따른 장기적 기온과 지하수온, 전기전도도의 변화를 확인하기 위해 4년간의 전체 자료를 분석하였다. 장기적 관점에서 연강수량의 증가 추세, 집중강우가 증가한 2011년에 그 경향이 뚜렷하였다. 지하수위는 비교적 일정하게 유지하였으며, 집중강우는 지표 침투보다는 지표 유출을 증가 시켰다. 심도별 지하수 수위와 성분 분석결과, 심도별로 다른 지속적인 지하수의 흐름과 일관성 있는 수질을 유지하였다. 대기 기온변화에 대한 심도별 지하수의 수온변화는 관측위치와 심도에 따라 최소 1개월부터 최대 3개월까지의 지연효과를 나타냈다.

2.3.2 수질

기후변화를 제외한 수질분야의 연구분야는 활발하게 진행 중이나 기후변화를 포함한 수질분야의 연구는 그 수가 미흡한 실정이었다. 손태석 등(2011)의 연구는 낙동강 정비 전 구축된 장기간 실측 자료를 바탕으로 한 최초의 수온 및 수환경의 요소 분석으로써 연구를 통해 자료를 수집하고 이에 적합한 분석 기법을 제시하고자 하였으며 장재호와 안종호(2012a)는 낙동강 미래 기후변화 시나리오 추출을 위해 CGHR (T63) 모형과 A1B 온실가스 배출시나리오를 통계적 규모내림방법으로 대상유역의 규모로 축소•변환한 후, 수문•수질의 거동변화 등의 영향을 모의하기 위해 SS와 TP를 대상으로 SWAT모델을 적용하였다. 또한 장재호와 안종호(2012b)는 이상기후에 따른 낙동강 유역의 수문과 수질에 미치는 영향을 평가하기 위해 장기유출 유역모의를 통해 오염 부하량 발생 특성을 분석하였으며 강지윤 등(2013b)은 기후변화가 서낙동강 시험유역의 유출 및 수질에 미치는 영향을 분석하고자 하였으며 또한 강지윤 등(2013a)은 남강유역에서의 미래 기후변화에 의한 하천의 흐름과 수질변화를 예측하기 위해 유역-하천 모형을 연계하고자 하였다. 정승현 등(2013)은 기후변

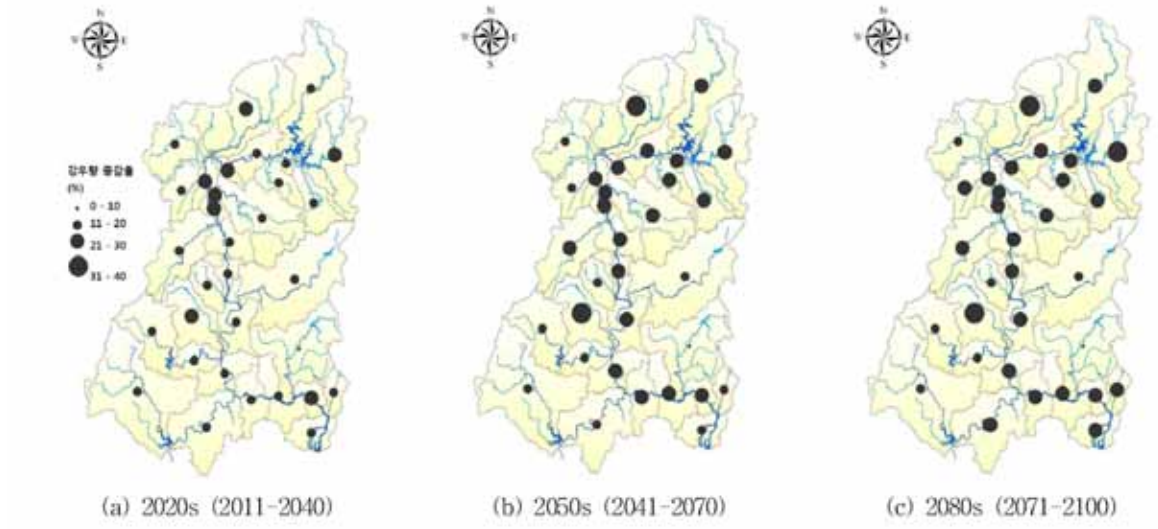


그림 2.7 낙동강 유역 강수량의 공간분포(장재호와 안종호, 2012a)

화와의 관련성과 향후 기후변화가 이 시기의 식물플랑크톤 생물량 변동에 어떠한 영향을 미치는지를 확인하고자 하였다.

수환경시스템과 유역관리 등의 문제에 따른 유역환경변화 적응을 위해 효율적인 수환경 관리 및 정책적으로 활용할 수 있는 기본 자료를 구축하고 분석기법을 개발하고자 하였다. 분석 기초자료로 사용한 수질 및 유량 데이터는 낙동강 유역을 대상으로 총량제의 기초자료를 제공하기 위해 낙동강물환경연구소를 주체로 실시된 수질모니터링의 결과를 활용하였다. 평균 8일 간격으로 연간 30회 이상 단위유역 말단의 수질 변화를 현장 조사항목 (수온, pH, 용존산소, 전기전도도) 과 실험실 조사항목(BOD, COD, SS, TN, TP)으로 나누어 평균 8일 간격, 30회 이상 각 지점별로 측정하였. 1차 기간은 2004 ~ 2010년, 2차 기간을 2011 ~ 2015년으로 계획하였다. 장기간 수질 및 유량변동을 파악하고 오염총량관리 기준유량 설정을 위한 기초자료 확보하기 위해 단위유역말단에서 수질측정을 실시하였으며 탄성도 분석을 위해 2004 ~ 2009년, 총 5년간의 모니터링 자료를 사용하였다. 항복별 수온-수질의 탄성도는 상류에서 하류 모든 지점을 대상을 평균탄성도를 산정한 결과, COD > TP > BOD > TN > SS의 순으로 크게 나타났으나, 타 항목에 비해 수온, SS의 평균탄성도가 특히 낮은 것으로 나타났다. 또한 수중환경인자의 탄성도가 하류로 갈수록 대체로 낮아지는 반면, 낙동강 증류의 탄성도 수치는 상류의 약 2배, 하류의 약 4배 값을 가지며 이는 준설 작업 등 하상의 변화가 큰 낙동강 중류의 수질항목 SS의 관리가 필요한 것으로 판단되었다. 낙동강 본류 구간에서의 계절별 수온-수질의 탄성도는 BOD, COD, SS, TN, TP 모두 가을에 높은 탄성도를 나타내었으며 낙동강 본류구간 중에서도 중·하류 지점이 강우량이 많은 여름철 수질의 탄성도가 높게 분석되는 것으로 나타났다(손태석 등, 2011).

낙동강 미래 기후변화 시나리오 추출을 위해 CGHR(T63) 모형과 A1B 온실가스 배출시나리오를 통계적 규모내림방법으로 대상유역의 규모로 축소·변환한 후, 수문·수질의 거동변화 등의 영향을 모의하기 위해 SS와 T-P를 대상으로 SWAT 모형을 적용하였다. 과거 30년 자료와 비교한 결과, 지표유출은 지역에 따라 최대 60%까지, 오염배출 부하는 TSS와 TP의 경우 각각 35 ~ 45%, 5 ~ 20% 정도 변화되어, 미래 기후변화로 인한 지표유출과 오염부하 배출은 향후 뚜렷한 증가가 예상되었다. 그리고 그 증가경향은 낙동강 하류지역보다 상류지역에 크게 나타나며 계절별로는 겨울과 봄철의 증가가 크고 먼 미래로 갈수록 증가하는 반면, 여름과 가을철에는 먼 미래로 갈수록 증가율이 감소하는 경향을 나타내어 갈수기 지표수 수질에 부정적인 영향을 미칠 것으로 예측되었다(장재호와 안종호, 2012b).

가뭄, 홍수와 같은 이상기후에 따른 낙동강 유역의 수문과 수질에 미치는 영향을 평가하기 위해 강우 시나리오기반의 장기유출 유역모의를 통해 지표유출과 오염부하량 발생 특성을 분석하였다. 전반적으로 가뭄년도에서는 지표 유출량 감소에 따라 오염 부하량 감소현상이 나타났으며 홍수년도에는 강우유출 증가에 따른 부하량 증가를 나타냈으나, 상류 유역의 댐 직·하류와 같은 특정유역에서는 가뭄 시 댐 운영으로 인한 방류효과와 토양수분량의 변화 등의 물리적 요인들로 인해 SS 부하량의 증가현상이 나타났다. 가뭄에 따른 SS의 농도변화는 유량변화에 따라 민감하게 반응하여 가뭄년도의 평수량 및 갈수량 시기에 높은 농도분포를 나타내었고 TP는 상대적으로 본류 구간보다는 유량이 비교적 적은 지류 구간에서 높은 농도범위가 나타났다. 반면 홍수년도의 경우 SS와 TP 모두 기준년도와 유사한 농도범위에서 완만한 형태의 변화를 보였으며 유출량이 적은 건기 시에는 부하량 유출이 크고 강우 시에는 오히려 감소하여 건기일 수와 강우 패턴에 지배적으로 각기 다른 영향을 받는 것으로 판단되었다(장재호와 안종호, 2012b).

기후변화가 서낙동강 시험 유역의 유출 및 수질에 미치는 영향을 분석하기 위해 기상청 지역기후모형(RCM: Regional Climate Model)전망의 인공신경망 상세화기법을 이용하여 각각의 예측변수들에 대한 미래 기상자료를 구축하고, 기 구축된 유역모형 (SWAT)을 이용하여 장래의 유출 전망을 수행하였으며, 그 결과를 통해 미래 기후변화가 서낙동강 유역의 지천 유출과 본류 수질에 미치는 영향을 분석하고자 하였다. 서낙동강 유역의 미래 유출량을 30년 단위로 나누어 추정한 결과, 2071 ~ 2100년에 8% 증가하는 것으로 나타났으며 여름철에는 최대 45% 증가하며 비홍수기에는 미래로 갈수록 비슷하거나 약간의 역전현상이 나타났다. 미래 수문환경 변화에 따른 수질 변화를 모의한 결과, 서낙동강의 대부분의 유역이 산지와 농경지로 이루어져 있어 유출량이 증가할수록 유역에서의 토사유출이 증가하는 것으로 나타났고, 2011년까지 51.9% 증가하였고 강우가 집중되는 8월에 최대 153%까지 증가하는 것으로 나타났다(강지윤 등, 2013b).

남강유역에서의 미래 기후변화에 의한 하천의 흐름과 수질변화를 예측하기 위해 유역-하천 모형을 연계하고자 하였다. 인공신경망기법을 이용하여 기후시나리오를 예측한 후 유역 수문 모형인 SWAT모형을 구축하였고 이의 적용성 평가를 위해 환경부 자료를 이용하여 검·보정한 결과 R^2가 0.7 이상으로 적정 수준으로 모의되었다. SWAT의 결과와 HEC-ResSIM을 이용한 미래 남강댐 방류량을 QUALKO의 입력 자료로 사용하였으며, 그 결과 저수기에는 풍수기와는 달리 연도별 유량에 따라 BOD가 많게는 약 2mg/L의 차이를 보이는 등 변화 폭이 크게 나타났다. 강우와 유역의 유출이 하천의 수질에 큰 영향을 끼치기 때문에 풍수기에 비해 유량이 적은 저수기에 수질농도가 높은 것으로 나타났다(강지윤 등, 2013a).

부영양상태인 낙동강 하류 지역에서 지속적으로 겨울 및 봄철에 발생하는 식물플랑크톤 대량증식 현상에 대하여 기후변화와의 관련성과 향후 기후변화가 이 시기의 식물플랑크톤 생물량 변동에 어떠한 영향을 미치는지를 확인하고자 하였다. 기상청의 기상자료로써 1905년부터 2010년까지의 지역 자료를 이용하였으며, 수질 자료는 물금지점에서의 1989 ~ 2010년까지 월별로 측정된 환경부 수질측정망자료로써 chlorophyll a, 수온, 총질소, 질산성질소, 암모니아성질소, 총인 및 인산염인 항목 등을 이용하였다. 조사 자료의 통계적 분석은 SPSS statistics을 이용하여 주성분 분석을 실시한 후에 다중회귀분석을 실시하였다. 그 결과 겨울 및 봄철의 높은 식물플랑크톤 생물량은 부영양 상태의 수체에서 저수온 기간동안에 발생되는 생태적 특성을 가지고 있는 stephanodiscus 로 조사되었으며, 11월부터 3월까지 월별 식물플랑크톤 생물량 변동 경향을 분석한 결과 11월과 3월은 점차 감소하는 경향을 보이는 반면에, 12월 또는 1월과 2월은 높은 농도의 식물플랑크톤 생물량 유지되거나, 점차 증가되는 경향이 나타났다. 또한 물금지점에서의 영양염 상태는 부영양 상태로 조사되었고, 특히 겨울 및 봄철에 높은 농도를 나타냈다(정승현 등, 2013).

강우량에 따른 부하량 변화를 고려하여 보다 정확한 비점부하량 산정방법을 개발 및 적용하였으며 경기도

경안천 유역에 위치한 두 개의 비점오염 저감시설을 대상으로 2010년 6월부터 11월까지 모니터링을 수행하여 강우강도, 유출 특성, 오염부하 등에 관한 분석을 진행하였다. 비점오염원 유출수의 특성을 나타내는 유량가중평균농도 (Event Mean Concentration: EMC)의 경우 도시 지역인 경기도 광주시 경안동이 산과 밭으로 이루어진 용인시 모현면에 비해 높거나 비슷한 값을 보였으나, TP의 경우 유역 내 농경지에 사용된 퇴비나 비료에 포함된 인의 영향으로 모현면이 경안동보다 더 높게 나타났다. 강우량과 오염물질 배출 부하량과의 관계는 3차원 다항식에 의해 가장 잘 설명되었으며, 0.33 ~ 0.81 범위의 결정계수를 나타내고 있다. 산정된 유출율 및 부하량 함수의 기울기가 EMC 결과와 반대되는 경향을 보이는 것으로부터, 비점오염원은 토지이용 이외에도 지형, 토성, 수리·수문현상 등에 따라 배출특성이 달라짐이 나타났다(이혜원 등, 2011).

2.3.3 홍수

기존에는 시나리오별 강우의 변동성 분석은 많았으나 실제 설계홍수량 및 홍수위 변화 분석은 현재까지 미흡하였다. 그런 측면에서 손경환 등(2010)은 미래기간의 확률강우량, 홍수량, 홍수위 변화 정량적 분석을 시도하였기 때문에 의미가 있다. 또한 기후변화로 인해 집중호우 및 기습폭우로 인한 도심지의 피해가 확대되고 있어 국가적 차원에서 기후변화에 대응하기 위한 대안의 마련이 필요하다.

Multi-GCMs의 기후시나리오를 이용한 홍수특성 변화를 평가하였다. IPCC SRES A2 기후시나리오에 13개 GCMs를 적용하였으며, 자료기간은 1971 ~ 2100년으로 총 130년이다. 미래 확률강우량(강우지속기간 1440분의 100년 빈도)은 4개 자료기간(S0 : 1971 ~ 2000년 ; S1 : 2011 ~ 2040년 ; S2 : 2041 ~ 2070년 ; S3 : 2071 ~ 2100년)으로 생성하였다. 이 연구에서 개발한 미래 확률강우량 산정 기법인 단순변화율가중법(simple weighted rate method)은 특정 지점의 관측 자료와 기후시나리오를 활용하여 유역의 확률강수량을 산정하는 기법이다. 연구 결과는 미래 기간의 확률강우량, 홍수량, 홍수위 산정으로 도출되었다. 남한강유역은 과거의 확률강우량 142.1 mm에 비해 13.0 ~ 15.1% 증가, 첨두홍수량은 20,708.0 m^3/s에 비해 29.1% ~ 33.5% 증가, 홍수위는 구간평균 12.6% ~ 13.6% 증가하는 것을 확인하였다(손경환 등, 2010).

강나래 등(2011)은 인천광역시 계양구 일대를 대상지역으로 하여 기후변화가 도심지에 미치는 영향을 파악하는 연구를 수행하였다. 온실가스 배출 시나리오 A1B, A2, B1에 대한 GCM 모형 CNCM3의 전망 값을 이용하여 미래 증가하는 확률강우량을 XP-SWMM 모형에 적용해 도시배수시스템의 홍수유출량을 산정하였다. 그 결과 월류로 인해 침수가 발생한 곳은 총 7곳이었다. 모두 작전동 지역이었으며 목표기간별 홍수발생지점을 그림 2.8과 같이 나타내었다. 2070 ~ 2099년의 경우 현재와 비교하여 10배가 넘는 월류량이 발생하였으며, 월류로 인한 평균 침수심은 0.31 ~ 0.65 m 로 전망되었다.

SERS A2기후변화시나리오와 고해상도 RCM 모형을 이용하여 미래(2001 ~ 2100년)의 일 강우량을 모의한 후 극한변동지수, 인간위험지수, 재해영향지수를 산정하여 한반도의 시공간 분포를 비교·분석하여 미래 기후변화 시 극한 강우의 발생이 한반도의 재해위험에 미치는 영향이 평가되었다. Gumble 분포형을 선정하고 확률가중모멘트법을 이용하여 매개변수를 추정하였으며 확률강우량을 산정하였다. 그 결과 극한변동지수는 경상도와 전라도 지역이 크게 나타났고, 인간위험지수는 7대 광역도시 및 수도권에서 크게 나타났으며 재해영향지수는 서해안 일대, 경상도와 전라도 경계에 위치한 지역 등이 크게 나타났다(장대원 등, 2012).

기후변화가 배수체계에 미치는 영향을 평가하기 위해 IPCC 제5차 평가보고서에 대비하여 개발된 RCP8.5 배출 시나리오로부터 미래 기후변화 정보를 추출하고, 기후변화를 고려할 수 있는 비정상성 빈도해석기법을 개발하여 지속시간별, 빈도별 설계강우량을 산정하였다. 또한 HEC-HMS 모형을 이용하여 설계홍수량을 산정하였다. 그 결과 기후변화로 인해 대상유역의 설계홍수량이 증가됨을 확인할 수 있었으며 이로 인해 미호천 유역의 홍수위험성이 현재에 비해 증가함을 확인할 수 있었다(김병식과 하성룡, 2013).

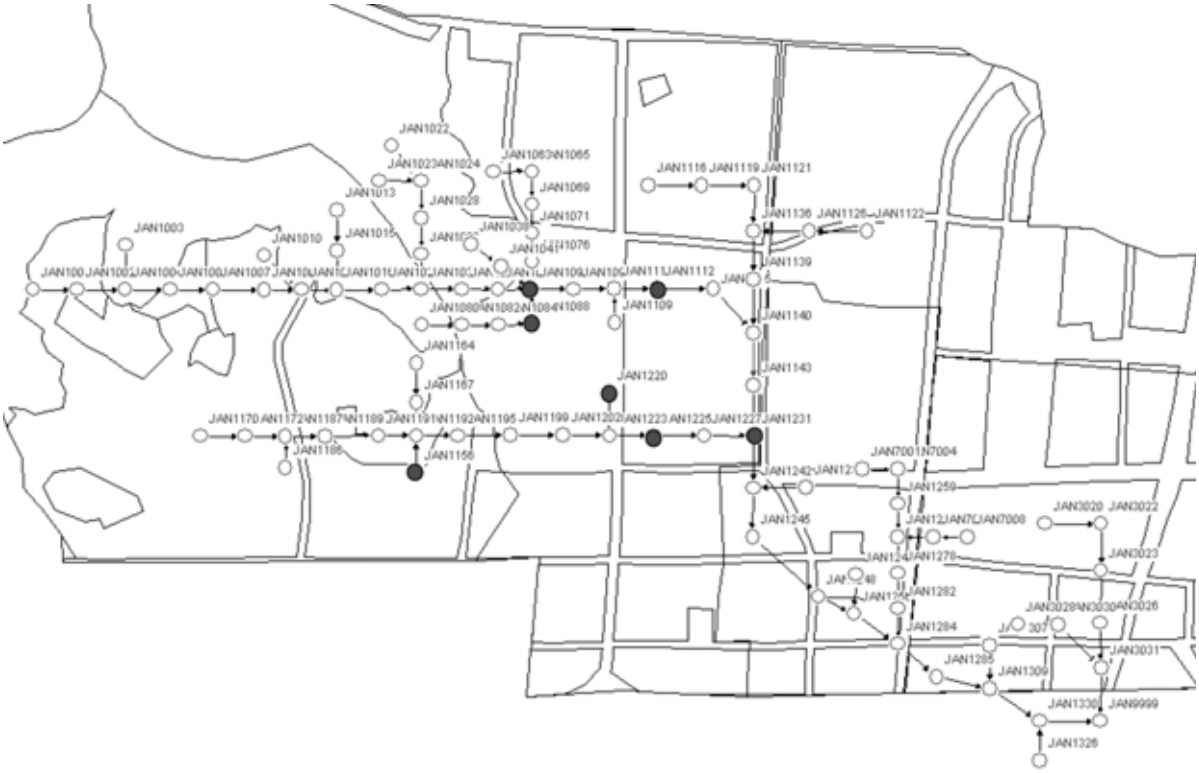


그림 2.8 인천계양구지역 홍수발생지점(강나래 등, 2011)

김진겸 등(2014)은 기후변화 및 도시화 등의 요인으로 인하여 증가하는 불확실성에 대처하기 위하여 건설되는 홍수 저류지 형태의 치수시설물이 기존의 치수시설물과 연계되어 치수능력을 극대화 할 수 있는 설계기준과 절차를 제시하였다. 본류의 홍수위 증가량에 대비할 수 있는 저류지 용량결정, 저류지 용량이 주어져 있을 경우의 본류의 홍수위 저감효과 산정 등에 적용할 수 있는 다양한 시나리오 하에서의 분석을 위한 절차를 제시하였다. 기존 설계홍수량 산정절차에 근거한 IDQ (Intensity-Duration-Quantity) 분석을 통해 산정한 강우량을 기반으로 등가첨두 수문곡선을 산정할 수 있으며, 기존 수문곡선과 동일한 지속시간 하에서 하천의 수위가 높아질 수 있는 저빈도 수문곡선과 기존 수문곡선에 비해 하천의 수위 및 수문곡선이 모두 증가하는 수문곡선 등 다양한 형태의 수문곡선에 대한 시나리오 해석을 가능하게 한다.

2.3.4 가뭄

기후변화에 따른 한반도 가뭄 전망의 연구논문 수는 1차 평가보고서 대비 비율상 거의 변화가 일어나지 않았다. 이는 홍수에 대한 관심이 전망에서 취약성 평가 단계로 넘어간 반면, 가뭄 연구는 연구수행의 어려움으로 인해 아직 단계 진행이 더디기 때문으로 판단된다.

2.3.4.1 정량적 평가

A1B 배출 시나리오를 이용한 KMA-RCM 산출자료 결과의 현재 강수량 모의 자료(1971 ~ 2000년)로부터 도출된 SAD 곡선과 미래 강수량 모의 자료(2011 ~ 2040년, 2041 ~ 2070년, 2071 ~ 2100년)로부터 도출된 SAD 곡선을 비교함으로써 극한 가뭄에 대한 기후변화의 영향을 분석하였다. 그 결과 단기간의 지속기간을 갖는 농업가뭄의 경우 현재보다 가뭄이 심화되며, 수문학적 가뭄의 경우 단기 및 장기간의 지속기간에 상관없이 모두 현재보다는 미래에 가뭄심도가 더 깊어질 가능성이 있었다. 아래 그림 2.9은 농업가뭄을 대변하는 것으로 알려진 3개월 지속시간 SPI(이후 SPI 3)와 수문학적 가뭄을 대변하는 것으로 알려진 12개월 지속시간 SPI(이후 SPI 12)를 기준으로 하여 분석하였다.

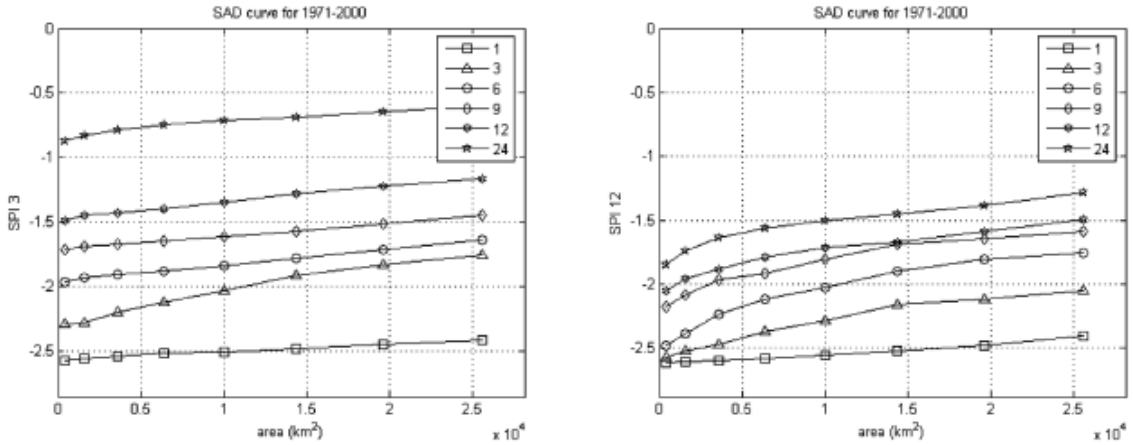


그림 2.9 1971 ~ 2000년의 SPI 3(좌), SPI 12(우) SAD 곡선(김호성 등, 2010)

지속기간이 1개월에서 24개월로 길어질수록, 그리고 고려되는 가뭄 영향면적이 커질수록 가뭄심도가 감소하였다. SPI 3과 SPI 12를 비교할 때, 지속시간이 길어지고 영향면적이 커질수록 두 곡선 사이의 차이가 크게 벌어졌다(김호성 등, 2010).

한강 유역을 대상으로 기후변화를 고려하여 미래 물부족 정도를 평가하고, 기후변화가 수자원의 이수측면에서 미치는 영향의 검토를 위해 물수지 변화가 분석되었다. RegCM3 RCM (27 km × 27 km)의 A2 기후변화 시나리오에 의한 기후자료를 비정상성 Markov Chain 모형으로 유역규모로 상세화하여 70년의 일강우량을 발생시켰다. 이를 장기 강우유출모형인 SLURP 모형의 입력자료로 활용하여 2020 ~ 2090년간의 일유출량을 모의하였다. 이를 수자원 평가계획모형 K-WEAP에 적용하여 한강유역의 월별 물수지 분석을 실시하였다. 미래의 물수요와 기후변화에 의한 유출량을 예측하는 데는 많은 불확실성을 내포하기 때문에 3개의 물수요 시나리오 (저수요, 기준수요, 고수요)와 70년 기간 동안 각각 50 set씩 모의된 유출량 계열인 50개의 유출 시나리오를 조합하여 150 set의 입력자료를 구성하여 검토하였다. 연구 결과 미래 한강유역의 물부족량은 장기적으로 증가하는 것으로 나타났으며 특정 소유역에서 물부족이 가중되는 모습을 보였으며, 장기적으로는 물부족 소유역이 한강유역 전체에서 증가하는 경향을 보였다(김수전 등, 2010).

미래기후에서의 가뭄심도-영향면적-지속기간 곡선의 비교를 통한 극한 가뭄사상의 시·공간적 거동에 대한 기후변화의 영향이 분석되었다. 미래의 기온상승 경향을 고려하기 위하여 표준토양수분지수가 제안되며, 이는 일평균기온과 일강우량 자료가 반영된 개념적인 토양수분모형으로부터 산출된다. CGCM3.1-T63과 CSIRO-MK3.0 전구기후모형에 A1B 온실가스 배출시나리오를 적용하여 미래기후를 획득하였으며 그 결과 CGCM3.1-T63 및 CSIRO-MK3.0 모두 미래가뭄이 현재보다 극심해질 것으로 예측하였다(김상단 등, 2011).

김병식 등(2011)은 RCM 강수모의 자료를 활용한 표준강수지수(Standardized Precipitation Index)를 산정하여 가뭄의 변동성을 평가하였다. 또한 산정되어진 표준강수지수를 이용하여 가뭄의 시·공간적 변동성 분석을 실시하여 2015년대, 2045년대, 2075년대 가뭄지수의 주성분 분석을 통하여 현재와의 차이점을 확인하였다. IPCC SERS 시나리오에 대하여 27 km × 27 km 해상도 격자 규모의 기상청 RegCM3 RCM을 이용하여 한반도 규모의 기후변화를 모의하였으며 분위사상법(quantile mapping)을 이용하여 RCM 자료의 각 지점별 관측기간 자료에 대한 편이보정을 실시하였다. 그 결과 2015년대에는 강수의 증가가 전망되며 2045년대 및 2075년대에는 일반적으로 강수의 감소가 전망되었다.

손경환 등(2011)은 전 지구 수문해석도구인 지표수문해석모형을 활용하여 국내 가뭄해석에 적용성을 평가하였다. 댐 상류 유역의 관측유입량 자료를 대상으로

표 2.3 홍수 취약성 평가 연구별 지표 및 기준

연구자	홍수취약성 평가 지표 및 기준
장대원(2010)	기존 취약성 지수(사회, 경제, 홍수방어 등) 외 도시화, 유역 경사 등을 포함하여 강우--유출 사이의 잠재적 위험을 고려한 홍수위험관리지수(FRMI) 개발
김보경 등(2011)	STADEX(2005)의 10가지 극한지수 중 선정된 6개 지수(집중호우 한계점, 지속기간 5일 최대 강수량 등) 및 지형, 인문사회, 재해 및 재해취약조건, 시설물, 경제, 대피 등 구분에 따른 지수들에 대한 요인분석
이문환 등(2011)	노출(인구밀도 외 2개)과 민감도(일최대강수량 외 2개)의 곱을 적응능력(댐 홍수조절용량 외 2개)으로 나누어서 홍수취약성지수(FVI) 산정
김태형 등(2011)	민감도(일최대강수량 외 3개)와 노출도(단위면적당 인구밀도 외 3개)의 곱을 저감성 지표(홍수조절용량 외 2개)로 나누어서 홍수 취약도 지표 산정
손민우 등(2011)	지속가능성에 대한 정량화 지표 DPSIR (EEA, 1999)
강정은과 이명진(2012)	기후노출, 민감도, 적응능력으로 구분된 13개 지표(일 최대 강수량, 침수지역 등)의 GIS 기반 자료에 퍼지모형을 적용
김환석 등(2012)	노출, 민감도, 적응능력으로 구분, 분야별 대리변수에 Dimension Index로 표준화하여 취약성-탄력성 지표로 합산(가중치 계산은 엔트로피 방법 적용)
윤선권(2012)	홍수위험지수(수문학적 위험도, 사회·생태학적 취약도의 합, 그림 2.11 참조)
한우석 등(2012)	기후노출, 기반시설 민감도, 적응능력 3개의 지표
김응석 등(2013)	지류하천 수심변화 정도에 따라 등급구분 및 중소하천에 미치는 영향의 범위설정
김영규 등(2012)	그룹의사결정기법을 사용하여 우리나라 공간적인 홍수 취약성을 정량화하는 접근법 설정

표 2.4 시기별 한강유역 홍수취약성 평가 결과(윤선권, 2012)

Flood Risk Index Range	Classification	Coverage(%)	
		period Ⅰ	period Ⅱ
1.0~0.8	very high	4.47	4.47
0.8~0.7	high	8.43	15.55
0.7~0.5	medium	45.71	36.01
0.5~0.2	low	36.36	25.21
0.2~0.0	very low	16.04	18.75

모형의 모의능력을 평가하고 남한 전역에 대한 수문성분(유출, 토양수분)을 생산하였다. 격자별 일 단위 유출 및 토양수분자료를 해당기간별 누가 시계열(3, 6, 12개월)로 변환하여 가뭄지수를 생산하였고, 빈도해석에 따른 누가확률값 산정 및 표준화를 통해 SRI(Standardized Runoff Index) 및 SSI(Standard- ized Soil moisture Index)를 산정하였다. 산정된 지수의 평가를 위해 국내 과거 가뭄기록사례를 조사하고 기존 가뭄지수인 SPI 및 PDSI를 활용하였다. 본 연구는 시계열별, 지역별 분석 및 유역별 물수지 분석을 통해 영향평가를 수행하였으며, 주로 가뭄기간동안의 가뭄심도와 가뭄 발생 및 해갈의 재현여부를 평가하였다. 분석 결과 SRI 및 SSI 모두 시·공간적으로 과거 기록된 피해기간 및 지역 상황을 잘 반영한 것으로 나타났으며, 가뭄기간 동안의 정량적인 수문정보 생산이 가능하다는 점에서 유역단위 가뭄관리에 유용하게 활용될 것으로 전망되었다.

손경환 등(2014)은 기후변화에 따른 미래 기후, 수문정보로부터 가뭄전망 정보를 생산 및 분석하였다. 미래의 불확실성을 고려하기 위해 3개 GCMs와 3개의 수문모형을 이용하였다. 강수량, 유출량 및 토양수분량으로부터 기상학적, 수문학적 및 농업적 가뭄지수로 분류되는 SPI, SRI 및 SSI를 산정하였다. Mann-Kendall test 결과, 미래 가뭄의 경향은 봄철 및 겨울철에 크게 증가할 것으로 전망되었으며, 가뭄발생빈도의 경우

SRI 및 SSI가 SPI보다 더 높게 나타났다. 미래 기후변화가 기상학적 가뭄 보다는 수문학적 및 농업적 가뭄에 큰 영향을 미치는 것으로 확인되었다.

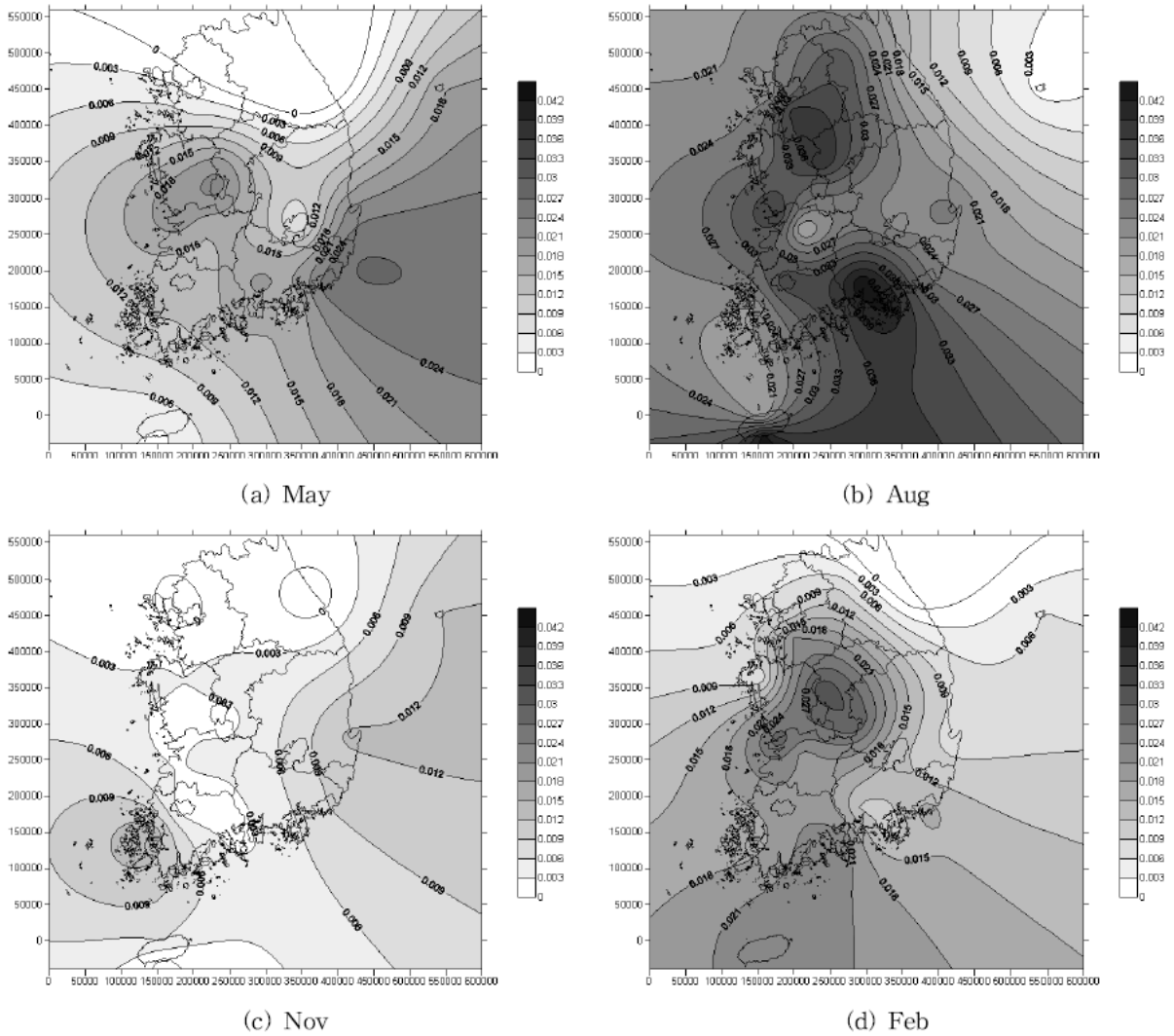


그림 2.10 월평균 토양수분 편차 공간적 분포(최대규 등, 2010)

2.3.4.2 기법

기후변화에 따른 가뭄 빈도해석을 수행한 연구 중 최대규 등(2010), 곽재원(2012), Lee and Kim (2013)은 기존의 일반적인 방법이 아닌 다양한 새로운 방법을 시도하였다. 최대규 등(2010)은 토양수분 확률밀도함수를 사용하여 우리나라 가뭄빈도를 전망하였고 일별 스케일링 기법을 적용하였다. 가뭄은 절대적인 양적 개념이 아니라 시·공간적으로 상대적인 개념이며 확률적으로는 평균적인 사상이 아니기 때문에 대상 지점 및 대상 기간에 대한 발생확률이 크지 않은 극한 사상으로 정의하는 것이 보다 현실적일 것으로 지적하였다. 이러한 관점에서 본 연구에서 적용한 Quantile 기법 즉, 기준 토양수분을 기점으로 현재와 미래의 비초과확률 비교는 극한 수문 사상의 영향평가를 위해 적절하게 적용될 수 있을 것으로 기대된다. 곽재원(2012)은 기존의 단변량 기반의 빈도분석과 달리 코풀라 이론에 기반하여 결합확률을 이용한 가뭄빈도분석을 시행하였다. Lee and Kim(2013)은 기후변화를 고려한 빈도해석을 통하여 가뭄심도-지속시간-생기빈도 (Severity-Duration-Frequency, SDF) 곡선을 유도하는 방법을 제시하였다.

최대규 등(2010)은 개념적인 토양수분모형을 이용하여 가뭄에 대한 기후변화의 영향을 모형화 하고, 모형으로부터의 결과를 분석하였다. 미래 기후자료는 A2

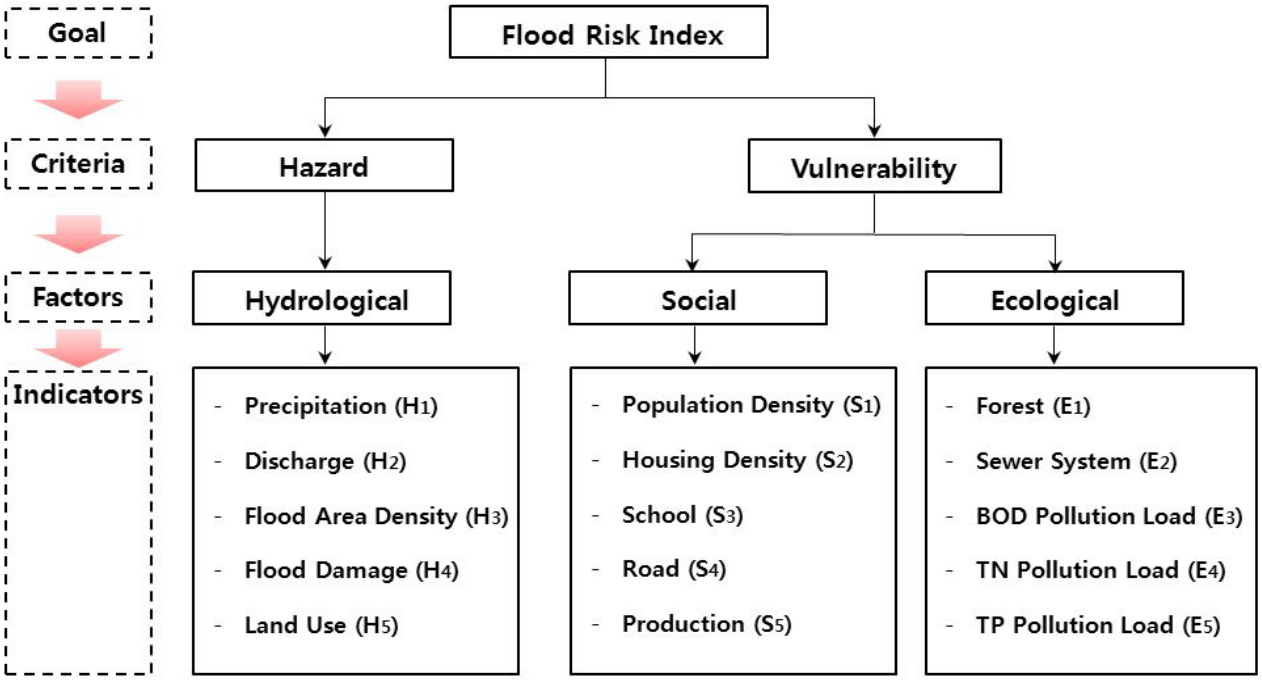


그림 2.11 한강유역 내 홍수위험지수(FRI)의 체계(윤선권, 2012)

온실가스 배출 시나리오에 따라 CGCM3.1 (T63) 모형에 의해 도출된 자료를 사용하며, 일별 강수분포 및 월별 강수량 및 잠재증발산량의 변화를 고려하기 위하여 일별 스케일링 기법을 적용하였다. 모형으로부터 도출된 주요 전망으로부터 우리나라 가뭄빈도가 증가함을 살펴볼 수 있었다.

곽재원(2012)은가뭄변수 분석을 통하여 결합확률을 이용한 가뭄분석이 타당함을 보이고, 코풀라 이론에 기반하여 결합확률을 이용한 가뭄빈도분석을 수행하고자 하였다. 또한 기후변화가 유역단위의 수문학적인 가뭄에 미치는 영향을 정량적으로 평가·예측하고자 하였다. 먼저 Clayton 코풀라 함수를 적용하여 가뭄의 결합확률을 고려한 빈도분석을 수행해 기존의 단변량 기반의 빈도분석방법과 비교하였으며, 결합확률을 이용하여 가뭄의 재현빈도를 분석하고 이를 이용하여 가뭄의 심도-지속기간-빈도 곡선을 유도하였다. 그리고 기후변화가 가뭄에 미치는 영향을 분석하기 위하여 IPCC의 SRES A1B 시나리오와 KMA RCM 기후모형을 이용하여 미래 가뭄 시계열을 산정하고, 미래 가뭄에 대한 결합확률 빈도해석과 미래 가뭄분석을 수행하였다. 연구결과, 가까운 미래에 짧은 지속기간을 가진 심한 가뭄이 다발할 것으로 전망되었다(곽재원, 2012).

Lee and Kim(2013)은 한강유역에 대해 기후변화를 고려한 빈도해석을 통하여 가뭄 심도-지속시간-생기빈도(SDF) 곡선을 유도하는 방법을 제시하였으며, A2 배출 시나리오를 적용하여 기후변화에 따라 SDF 곡선이 미래에 어떻게 변화하는지를 추정하여 제시하였다. 가뭄 발생 패턴 분석을 위한 자료는 과거 관측과 A2 배출 시나리오의 4개 GCMs (Cm2_1, ECHO-G, CGCM2_3_2, HADGEM1)을 적용하였다. 가뭄의 통계적 특성들을 분석하기 위해 SPI를 활용하여 SDF 곡선을 유도하였다. 가뭄 빈도를 추정하기 위한 Drought Spell 분석을 수행한 결과 약한 가뭄의 빈도는 줄고, 심한 가뭄의 빈도는 증가하는 경향을 확인하였다. 또한 과거 관측과 GCM의 SDF 곡선 분석을 통해서는 가뭄 재현기간이 길어질수록 가뭄심도는 감소하며, 같은 가뭄 재현기간에서의 가뭄심도는 과거 관측보다 GCM 으로부터 산정된 경우가 보다 심한 것으로 나타났다. 적용된 4개 GCM 중 CGCM2_3_2에 의한 가뭄 심도 전망 결과가 가장 심하게 산정되었다.

2.4 취약성의 주요원인

2.4.1 홍수

홍수 취약성과 관련된 논문들을 취약성 평가, 지표개발, 경제성 분석으로 구분하여 다루었다. 경제성 분석을 도입한 연구는 1 편에 불과하였고, 지표개발에 대한 연구가 홍수취약성 연구 총 12편 중 3편을 차지하여 현재 홍수 취약성 연구 중 새로운 지표 혹은 기존 지표의 수정에 대한 관심이 증가함을 알 수 있었다. 각 세부 기준별로 살펴보면 다음과 같다.

2.4.1.1 취약성 평가

홍수 취약성 평가는 2차 기후변화 보고서 수자원 부문에서 가장 활발히 연구가 이루어지고 있는 분야로 다양한 방법의 연구가 진행되고 있다. 홍수전망에 따른 취약성 평가가 다양한 방법으로 이루어졌는데, 윤선권(2012)은 도시 유역의 홍수 범람면적과 제방 위험단면적을 홍수 취약성 평가 기준으로 삼았고 이와 유사하게 김보경 등(2011)과 강정은과 이명진(2012)은 홍수피해면적과 침수 발생지역을 홍수 취약성의 기준으로 삼았다. 김환석 등(2012)의 경우 연구에서 선정한 대리변수와 엔트로피 방법을 이용하여, 결정된 가중치를 통해 취약성을 계산하였다. 각기 다른 지표 혹은 기준을 목표로 하여 연구 결과를 도출하고 있다는 점이 특징인데 이것은 아직 다양한 연구들이 시도되는 시기임을 보여준다. 향후 보다 다양한 연구들을 수행함으로써 발전해 나갈 필요가 있다.

김보경 등(2011)은 도시홍수 피해와 관련 있는 항목 24개 요소를 선정하여 기후변화에 따른 도시홍수위험을 전반적으로 규명하고자 하였다. 도시홍수 피해액과의 상관분석을 수행하고, 최종 선정된 10개 항목들을 대상으로 요인분석을 실시한 결과, 강우, 인문-사회, 경제, 홍수피해 부문으로 4개의 요인이 추출되었고 설명력은 67.79%였다. 이를 검토한 결과 도시홍수피해 유발요인인 강우, 피해를 가중시키는 요인인 인문-사회, 경제적 측면, 그리고 피해결과에 해당하는 침수면적이 도시홍수발생의 유의한 요소임을 확인하였다.

이문환 등(2011)은 기후변화에 따른 국내 5대강 유역의 홍수 취약성 평가를 위해 Multi-Model Ensemble 기법을 통해 생산된 기후 및 수문 시나리오를 사용하여 불확실성의 범위를 평가하고 기후변화에 따른 홍수 취약성 평가 기법 제안 및 5대강 유역에 적용하여 평가하였다. 109개 중권역에 대해 3개 온실가스 배출 시나리오 13 GCMs의 8개 수문모형의 총 39개 기후시나리오 및 312개 수문시나리오 결과가 생산되었으며, 본 연구에서는 이 자료를 토대로 홍수 취약성 평가를 수행하였다. 그 결과 현재 기후상황에서 홍수에 가장 취약한 지역은 한강, 영산강, 섬진강 하류지역으로 나타났으며, 기후시나리오를 이용한 미래기간에는 낙동강 유역에서 홍수 취약성이 가장 크게 증가할 것으로 분석되었다.

강정은과 이명진(2012)는 IPCC에서 제시한 기후변화 취약성 개념을 서울시에 적용, 적정 홍수 취약성 지표 산정 및 퍼지모형을 활용하여 기후변화 분야 중 홍수취약성을 평가하고 GIS를 이용하여 취약성도를 작성하였다. 선행연구를 기반으로 기후노출, 민감도, 적응능력 등의 지표를 도출하였고, 이를 GIS 기반의 공간데이터베이스로 구축, 퍼지모형을 활용 구축된 지표 값들을 통합하였다. 빈도비 활용 퍼지소속값을 결정하였으며, 2010년 침수 발생 자료를 활용하여 항목들 간의 상관관계 및 퍼지소속값을 산정하였다. 2011년 침수 발생 지역으로 작성된 취약성도를 검증하였다. 그 결과 서울지역 홍수피해에 크게 영향을 미치는 지표는 일강수량이 80 ㎜이상인 강수일, 하천과의 거리, 불투수층으로 나타났다. 영향이 낮은 항목으로는 경사도가 있었으며, 한강 본류를 중심으로 양안에 위치한 '구'들이 비교적 넓은 면적의 취약지역을 보유함을 확인하였다.

취약성지표 대리변수를 선정하고 시군구별 자료를 수집하여 엔트로피 방법에 의해 대리변수별 가중치 산정하고, 선정된 대리변수와 엔트로피 방법을 사용해 결정된 가중치를 활용해 취약성을 계산하고 이를 지도로 작성함으로써 낙동강 지역의 기후변화와 대규모 하천정비사업 영향에 의한 취약성 변화가 평가되었다. 그 결과 대규모 하천정비에 의해 취약성이 완화되는 지역이 있었으며 미래 기후변화에 의해 취약성이 증가하는 지역이 발생하였다. 미래상황에서의 대규모 하천정비사업의 효과는 기후변화에 따른 홍수량 증가로 인해 취

약성 완화에 있어서 그 효과가 미미함을 확인하였다(김환석 등, 2012).

기후변화가 도시 유역의 유출에 미치는 영향 분석하기 위해 전국 8개 주요 도시지점 대상 과거 관측 자료와 기후변화 시나리오 자료를 바탕으로 한 미래 기후변화 영향 분석이 실시되었다. Mann-Kendall Test와 Sen Test에 의한 비시나리오 기반 미래강수 증가 경향이 분석되었고, KMA RCM 자료를 바탕으로 시나리오 기반 미래강수 예측, RCM 기후변화 시나리오 자료의 상세화를 위하여 IDW (Inverse Distance Weighted) 방법과 Theissen-Polygons를 통한 3단계 공간적 분해방법을 개발되었으며 분 단위 강우자료를 이용한 Kernel Approach를 통한 시간분포모형이 개발되었다. 기후변화 시나리오 자료의 시간적 분해 가능성이 제시되었고 도시유출 모형에 의한 기후변화에 따른 유출량 산정, Monte Carlo Simulation 기법을 통한 도시하천 유역의 기후변화 위험 및 취약성이 분석되었다. 위험도와 관련하여 재해와 취약성을 포함하도록 홍수위험지수(Flood Risk Index, FRI)가 산정되었으며 그림 2.11과 같이 홍수위험지수는 수문학적 요인과 사회적 요인 그리고 생태학적 요인의 함수로 표현되었다. 각각의 인자를 period Ⅰ(1966 ~ 1990년), period Ⅱ(1991 ~ 2007년)로 구분한 후 표준화 기법을 적용하여 일반화된 값을 지표로 산정되었으며, 표 2.4와 같이 취약성의 단계를 5단계로 구분되었다(윤선권, 2012).

기후변화 영향에 의해 대형화되는 홍수 피해에 대한 기반시설의 취약성을 평가하는 방법이 수립되고 그 결과가 분석되었다. 기후노출, 기반시설 민감도, 적응능력의 3가지 지표를 활용하여 232개의 지자체 홍수기반시설의 취약성이 분석되었고, 각각의 지표별로 대용변수들이 선정되어 지표값들이 계산되었다. 또한, 기후노출 지표값 계산을 위해 기후변화 시나리오(A1B)데이터가 활용되어, 현재뿐만 아니라 미래(2020, 2050, 2100년대)에 대한 각각 기반시설의 취약성들이 분석되었다. 그 결과 현재 서울을 포함하는 경기도 북부, 강원도 및 경상남도의 해안지역의 기반시설이 홍수에 취약한 것으로 분석되었다. 미래의 경우 2100년대에 가까워질수록 경기도와 강원도에 위치한 기반시설의 홍수 취약성이 가중되는 것으로 분석되었다(한우석 등, 2012).

김응석 등(2013)은 낙동강 유역을 대상으로 기후변화를 고려한 대하천과 지류하천의 수위변화량을 분석하였다. 홍수량 및 홍수위 변화 분석은 HEC-HMS 및 HEC-RAS 모형을 이용하였다. 낙동강 본류의 경우 0.35 ~ 0.75m의 수위변화량을 보였으며 지류하천의 경우 0.47 ~ 0.72m의 수위변화량을 보였다. 또한, 기후변화에 대한 설계빈도의 변화 양상을 평가하기 위하여 수립된 하천기본계획상의 재현기간-홍수위 조사결과를 바탕으로 지류하천에 대해 재현기간-홍수위 관계를 분석하였다. 낙동강유역 지류하천의 수심변화 분석결과를 바탕으로 기후변화 영향 면적을 분석하였으며 낙동강 유역의 전체 영향 면적 비율은 최대 6.45%의 변화양상을 보였다.

그룹의사결정기법을 사용한 우리나라의 공간적 홍수 취약성 정량화 접근법이 제시되었다. 개인의 선호도를 분석하기 위해 Fuzzy TOPSIS가 사용되었고 개인 선호도의 통합을 위해 Borda count, Condorcet 그리고 Copeland 방법이 사용되었다. 마지막으로 도출된 결과들은 Fuzzy TOPSIS 및 TOPSIS의 결과들과 비교되었고 Spearman 순위상관계수와 Kendall 순위상관계수, Emond와 Mason이 제시한 순위상관분석들이 이용되어 순위의 일치성이 검토되었다. 그 결과 일부 지역의 취약성 순위가 큰 폭으로 역전되는 현상을 보였다(김영규 등, 2012).

2.4.1.2 재난·재해

기후변화의 영향은 산사태, 지질재해와 같은 재난위험성의 증가를 야기한다. 이와 관련하여 주로 강우강도 및 지속강우시간에 따른 재해 위험성 및 상관관계에 대한 연구들이 주를 이루었으며 강우기준 설정에 대한 연구 역시 진행되고 있었다. 오정림과 박혁진(2013)은 강원 지역의 약 50여개 사면재해 이력자료를 및 강우강도-강우지속시간을 활용하여 강우기준을 설정하였으며 권세명 등(2013)은 산사태 붕괴사면을 대상으로 표면침식에 영향을 미치는 강우강도, 유출토사량 변화를 파악하여 2차 피해 방지 및 복구를 위한 기초자료로 제안하였다. 한국환경정책·평가연구원(2013)은 기존의

국내의 강우량 발생에 따른 산사태 발생과의 상관관계를 정량적으로 분석하였다.

오정림과 박혁진(2013)은 사면재해에 대한 사전 대응을 유도하기 위해 강우데이터를 활용하여 위험성을 평가하고자 하였다. 이를 위해 강원지역에 대한 과거 산사태 이력자료와 과거 산사태가 발생했을 때의 강우자료를 분석하여 경험적인 방법에 의해 강원지역의 사면재해 발생 강우기준을 설정하였다. 경험적 방법에 의해 설정된 강우기준은 우기철 강우발생 시 위험성을 판단할 수 있는 기준으로 활용되며, 본 연구에서는 강우강도-강우지속시간을 활용하여 강우기준을 설정하였다. 강원 지역의 약 50여개의 사면재해 이력자료를 활용하였으며 검증데이터를 활용한 결과 발생 시간을 예측하는데 효과적으로 사용될 수 있을 것으로 나타났다.

권세명 등(2013)은 산사태 발생 후 자연 피복이 거의 이루어지지 않은 산사태 붕괴사면을 대상으로 표면침식에 영향을 미치는 강우강도와 붕괴사면으로부터의 유출 토사량의 변화를 파악하였다. 이를 통해 산지토사재해 발생에 따른 2차 피해의 방지 및 복구를 위한 기초자료로 활용하고자 하였다. 연구 결과 붕괴사면의 침식에 영향을 미치는 강우강도는 경과 년 수의 증가 및 다양한 입지환경에 따라 다양하게 나타났다. 즉, 경과 년 수가 증가됨에 따라 붕괴사면 상부의 유출 가능 토사량의 감소로 보다 강한강도의 강우에서 침식 및 퇴적이 발생하였으며, 표면침식 깊이 및 유출 토사량의 변화 폭은 감소하는 것으로 나타났다. 또한, 경사가 급한 붕괴사면의 상부구간에서는 강우의 직접적인 영향, 즉 빗방울침식에 의한 표면침식이 발생한 반면, 상대적으로 급환경사의 하부구간에서는 약한 강도의 강우에서도 지표수의 집중이동으로 인한 표면침식이 발생한 것을 알 수 있었다.

한국환경정책·평가연구원(2013)은 도심지역 지질재해 중 산사태 발생을 중심으로 발생원인, 평가 요소 및 평가방법을 분석하고, 이를 바탕으로 국내 강우량과 산사태 발생의 정량적 관계를 분석하였다. 강우량과 산사태 발생사이의 상관관계를 정량적으로 분석하기 위하여 2000년대 강우량과 산사태 발생 자료를 분석하여 당일 강우량, 누적 강우량 및 최대시간당 강우강도와 산사태 사이의 상관관계를 정량적으로 계산하였다. 이를 통하여 향후 기후변화에 의한 지질재해 영향 및 취약성 평가 적정항목을 도출하였고 도심 지질재해 영향을 관리할 수 있는 관리 항목으로의 시사점을 제안하였다. 당일 강우량 기준으로 지질재해 중 산사태 발생과의 관계는 7월 중순부터 7월 말까지와 8월 중순부터 8월 말까지 집중되어 있으며 최대강우량 164.5 mm 이상의 경우 산사태 위험으로 분류된다고 나타났다. 더불어 누적 강우량에서는 3일 누적이 다른 장기간의 누적 강우량보다 산사태 발생에 영향을 미치는 것으로 분석되었으며 최대시간당 강우강도는 2002년, 2003년 및 2006년에 영향이 높았던 것으로 분석되었다. 이러한 연구결과를 바탕으로 평가요소, 평가방법, 평가를 위한 기반자료와 관련된 시사점을 제안하였다. 각 시사점은 평가요소와 관련하여 도심지역의 특성을 고려한 대축척 자료의 활용이 효율적일 수 있고, 평가방법과 관련하여 기존 취약성 평가의 개선을 위하여 GCI방법을 제안하였다. 평가를 위한 기반 자료 과 관련하여 기후변화 관련 연구의 한계점인 불확실성을 논의하고, 다양한 기후변화 시나리오를 활용하는 방법 및 특정 기상현상을 예측하는 방법을 연계하여 기후변화의 불확실성을 줄이는 방안을 제시하였다(한국환경정책·평가연구원, 2013).

2.4.1.3 지표개발

홍수 취약성 평가 논문 12편 중 3편이 새로운 지표개발 혹은 기존 지표 수정 등을 연구 주제로 삼고 있어 홍수 연구자들이 현재 지표개발 쪽에 관심을 기울이고 있음을 알 수 있었다. 지표개발에서도 다양한 접근 방법을 볼 수 있었는데, 장대원(2010)은 안성천의 홍수위험성과 취약성을 고려한 홍수관리지수를 개발하여 홍수방어우선 지역을 선정하였고, 김태형 등(2011)은 홍수 위험성(flood hazard)과 홍수취약도(flood vulnerability)의 곱으로 홍수위험도(flood risk)라는 지수를 제시하여 침수범위의 예측과 분석을 실시하였다. 손민우 등(2011)의 경우 홍수 취약성 지표개발을 위해 IPCC의 취약성 개념을 이용, 북한강 유역의 6개 중권역의 잠재적 취약성을 하나의 정량적인 지수로 표

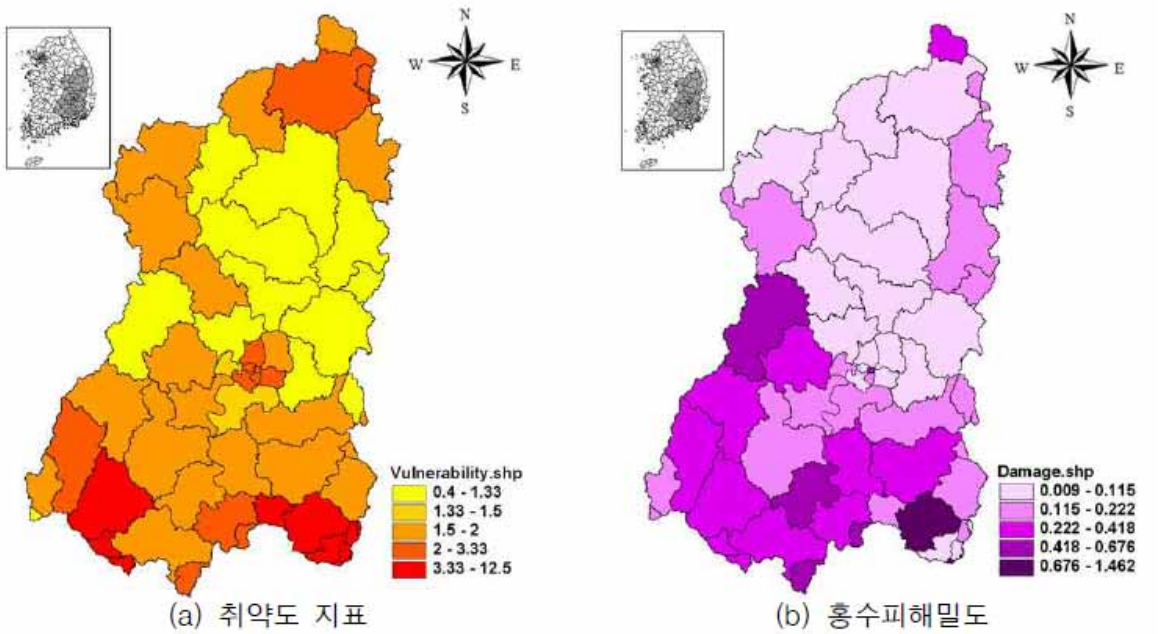


그림 2.12 취약도 지표와 홍수피해밀도의 비교(김태형 등, 2011)

현하였다. 이처럼 각각의 연구에서 통일된 접근방식을 찾아볼 수 없었으며 이는 지표개발 연구자들이 홍수 취약성을 평가하는 것에 있어 중요하다고 판단하는 부분이 다르다는 것을 의미한다고 볼 수 있다.

장대원(2010)의 경우 안성천의 홍수 위험성과 취약성을 파악하고 이를 활용한 홍수방어 우선순위 지역을 예측하기 위하여 홍수관리지수를 개발하였다. 그리고 장래 토지이용변화 및 기상학적 변동에 의한 홍수에 대한 취약성을 고려하기 위하여 장래 토지이용 모의 및 기상학적 변동을 고려한 홍수위험관리지수를 평가하고 그 활용방안을 제시하였다. 먼저 기상학적 취약성, 사회-경제적 취약성, 홍수방어 취약성 및 시설물 취약성으로 구분하고 홍수에 영향을 주는 인자와 홍수로 영향을 받는 인자들을 고려하여 각 특성에 맞는 지표 선정하였다. CA-Markov Chain 기법을 적용하여 미래의 토지이용 상태를 추정하고, 기후변화 시나리오에 의한 극한변동지수를 이용하여 안성천 114개 소유역에 대한 홍수위험도를 평가하였다. 각 취약성 지표별 가중치는 Entropy 방법과 Survey 방법의 결과를 조합하여 적용하였으며 300년, 400년 빈도로 하천범람해석을 수행하여 범람 예상도를 작성한 후 최종 지수를 산정하였다. 연구 결과 안성천 114개 대상 유역에서 10곳의 소유역이 매우 취약한 것으로 드러났으며 100% 방재를 목적으로 홍수 방어 대안을 설정할 경우에는 구조적 방법으로 하천 개수가 가장 적합한 대안인 것으로 평가되었다.

김태형 등(2011)은 기상이변에 따른 수공구조물 붕괴 등으로 인한 침수피해를 예방하기 위해 침수범위의 예측 및 분석을 통한 홍수 위험지도 작성 필요하다고 판단하고, 이러한 홍수위험지도 제작에 있어 단순한 위험성(hazard)의 개념이 아닌 위험도(risk) 개념으로 확장할 필요가 있음을 주장하였다. 연구수행을 위하여 홍수에 노출된 지역의 인구수, 경제적 활동의 형태, 홍수가 발생했을 때 2차적 피해를 불러올 수 있는 설비 등을 나타내는 홍수 취약도에 대한 정량적 평가가 이루어졌으며, 낙동강 유역에 적용하여 행정구역별 세분화된 홍수위험지도 제작을 위한 취약도 지표를 산정하였다. 지표별로 세부지표를 설정하였으며, WAMIS, 통계연보, 수치지형도 등을 이용하여 자료를 구축하고, Z-점수법을 적용하였다. 홍수위험도(flood risk)를 홍수위험성(flood hazard)과 홍수취약도(flood vulnerability)의 곱으로 제시하고 홍수 취약도는 민감도, 노출도, 저감성의 함수로 나타냈다. 이를 각각 지표화하여 구성하여 지역별 홍수 취약도를 산출하였다. 그 결과

각 지역별 홍수피해에 가장 취약한 지역은 경상남도 남부지방이었고 경상북도 내륙지방의 취약도 지표는 비교적 낮게 나타났다(그림 2.12). 대구 지역은 인구밀도에 의한 영향 때문에 높은 노출도를 나타내어 홍수피해에 취약한 지역으로 나타나 홍수 피해 밀도와 일치하지 않는 결과를 보였다. 이는 홍수 취약도 지표는 홍수 피해를 나타내는 절대적인 수치로는 부적합하다는 것을 시사했고 홍수 취약도 지표의 보다 정확한 적용을 위해서는 홍수 위험성과의 결합을 통해 홍수위험도의 개념까지 확장되어야 한다고 하였다.

표 2.5 예상침수면적의 비교(단위: ㎡)(이건행, 2011)

침수심	현재	기후변화	HEC-FDA	Bootstrap	SIR
0.0~0.5 m	1,408,494	1,806,581	1,383,179	1,857,383	1,943,370
0.5~1.0 m	1,675,491	1,797,523	3,685,810	1,740,495	1,821,071
1.0~2.0 m	4,509,517	3,979,637	4,544,905	3,808,975	3,985,311
2.0~3.0 m	4,088,315	3,761,426	4,082,917	3,597,177	3,763,708
3.0 m 이상	23,576,877	24,938,260	23,577,117	23,838,197	24,941,780
소계	35,258,694	36,283,427	35,273,928	34,842,227	36,455,240

손민우 등(2011)의 경우 기후변화를 고려한 홍수 취약성지표의 개발을 위해 IPCC의 CGCM3 모형의 A1B와 A2 온실가스 배출시나리오를 이용하였고, 이를 일단위로 상세화하기 위해 SDSM (Statistical Downscaling Model) 모형을 이용하였다. 취약성 인자는 추진력-압력-상태-영향-반응(Driver-Pressure-State-Impact-Response, DPSIR) 모형을 이용하였고 유출 모형은 HSPF가 사용되었다. 이는 북한강유역의 6개 중권역에 적용되고, 유역의 현 상태 및 기후변화의 영향으로 인한 잠재적 취약성을 정량적인 하나의 지수로 간결하게 표현 가능한 것에 그 의미가 있다.

표 2.6 예상홍수피해액의 비교(이건행, 2011) 단위: 백만원

확률홍수량범위	현재	기후변화	HEC-FDA	Bootstrap	SIR
예상홍수피해액	11,634,693	14,108,752	13,524,812	9,848,818	14,436,378

2.4.1.4 경제성 분석

이건행(2011)은 기후변화를 고려한 예상 홍수 피해액을 산정하여 현재 대비 편익을 정량적으로 산출함으로서 기후변화를 고려한 대응책의 필요성 검토하였다.

또한, 안양천 유역을 대상으로 수문자료와 수문해석과정에 포함되어 있는 불확실성을 고려함으로서 현재 하천제방에 적용되고 있는 안전율 혹은 여유고와 불확실성을 비교 검토하였다. 이를 위해 KMA RCM의 결과인 일강수량을 카오스 기법을 이용하여 시단위로 분해하여 빈도해석을 통해 산정된 확률 강우량을 이용하였고, 불확실성을 고려하기 위해 연 최대 강우량을 이용하여 연 최대 홍수량을 산정하였다. 이를 HEC-FDA에서의 불확실성 분석방법에 적용하여 연 최대 강우량 자료를 Bootstrap 방법과 SIR 알고리즘을 통해 재추출하였고 불확실성을 고려한 확률강우량을 산정하였다. 이렇게 산정된 현재 확률강우량과 기후변화에 의한 확률강우량, 그리고 불확실성을 고려한 확률강우량에 대해 다차원 홍수 피해 산정방법(MD- FDA)을 이용하여 예상침수면적을 표 2.5와 같이 산정하였으며 예상 홍수 피해액을 도출하였다. 연구결과 방법별 현재대비 예상 홍수 피해액은 표 2.6과 같이 산출되었다(기후변화 고려 : 1.21배, HEC-FDA 불확실성 분석방법 : 1.15배, Bootstrap 방법 : 0.92배). SIR 알고리즘은 자료의 재추출시 가중치 부여를 위한 우도함수의 영향을 크게 받으며 이로 인해 불확실성 구간이 커져 가장 큰 예상 홍수 피해액이 도출되었고 적정 위치에 우도를 결정하는 것이 관건이라 판단되었다.

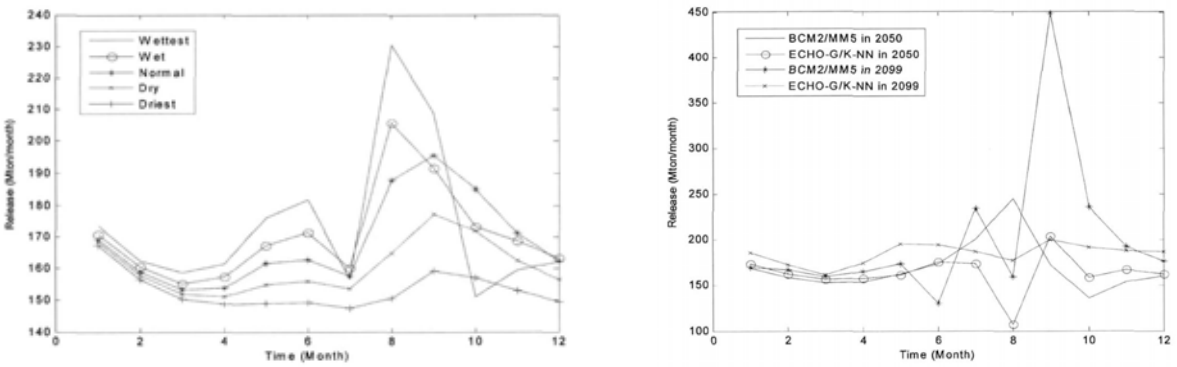


그림 2.13 신경망-퍼지추론 시스템 빈도분석결과(좌)와 다양한 기후변화 모형(우)를 유입량으로 입력했을 때의 소양강댐 방류량(정건희 등, 2011)

2.4.2 가뭄

최근의 기후변화를 고려한 가뭄 취약성 평가 연구들은 홍수 취약성 평가와 같이 정량적인 결과를 도출하는 것 보다는 경향에 대한 분석을 수행하고 있다. 전망 단계의 연구에서 수행되어야 할 과제들이 아직 해결되지 못한 영향이 있는 것으로 추측된다. 또한, 지표 혹은 기준들이 연구마다 각기 제시되면서 통일성이나 뚜렷한 연구 경향성을 제시할 수 없는 상황이다. 가뭄 취약성에 관한 연구들을 각기 취약성을 판단하는 근거로서 다양한 결과들을 이용하였다. 정지웅 등(2010)은 민감도, 기후에의 노출, 기후변화에 대한 적응력을 수자원 취약성 평가에 이용하였고, 정건희 등(2011)는 다목적댐의 방류량 및 저류량 모의 결과를 물부족 판단의 근거로 활용하였다. 양정석 등(2012)은 경향성 검정에 따라 수자원, 강우, 인문 분야의 10가지 변수를 지표로 선정하였고 박범섭 등(2013)은 남한지역 전체에 대해 SPI의 시·공간적 분포를 전망하고 이를 도식화함으로써 미래 가뭄 우심지역을 평가하였다. 가뭄이 일어났을 때의 물의 경제적 가치 변동에 대한 연구(류문현, 2011) 또한 진행되었다. 홍수 취약성 평가에서와 마찬가지로 지표 개발에 대한 연구가 많았는데, 이러한 연구들을 살펴보면 기존의 가뭄 지수의 한계점을 지적하고 새로운 지수를 개발 및 적용한 홍승진 등(2011), 김병식 등(2012), 김병식과 하성룡(2013)이 있었다.

2.4.2.1 가뭄 취약성 평가

홍수, 가뭄, 물관리 등 수자원 분야 취약성을 규준(criteria) 및 지표(indicators)를 활용하여 전국 및 지역 단위의 취약성을 평가하는 방법이 제시되었다(정지웅 등, 2010). 해당 연구에서 수자원 취약성 평가에 이용한 규준은 민감도, 기후에의 노출, 기후변화에 대한 적응력으로 분류할 수 있으며 각 규준을 지표로 계량화 및 표준화하여 취약성 평가에 반영하였다. 그 결과 기후변화에 대한 수자원 분야의 취약성은 일반적으로 시간이 갈수록 증가하는 것으로 평가되었다. 평가 대상지의 유역 규모는 국가차원의 취약성 평가 시 대유역을 기준으로 설정하는 것이 유의하며 지역 차원의 평가는 소유역을 기준을 설정하는 것이 적절한 것으로 나타났다.

정건희 등(2011)은 기후변화 등 외부환경의 변화에 기인하는 미래의 불확실한 상황에 대한 한강수계 저수지변 적응능력을 분석하기 위하여 퍼지 추론 시스템을 이용하여 다양한 유입량에 따른 방류량 및 저류량의 변화를 분석하였다. 그리고 정확하고 효율적인 모의를 위해 소양강댐을 대상으로 적응 신경망-퍼지추론 시스템을 구축하여 적응능력을 평가하였다. 그 결과 저류량이 상대적으로 작은 관동댐의 경우, 유입량의 급격한 증가를 감당하기 어려운 것으로 모의되었고, 소양강댐의 강우량 변화에 대한 적응능력이 가장 뛰어난 것으로 판단되었다. 그림 2.13은 소양강 댐에 적응 신경망-퍼지추론 시스템을 구축하여 9개의 다양한 강우 시나리오를 적용하여 방류량 및 저류량을 모의한 결과 유입 시나리오에 따라 매우 상이한 저수지 운영결과를 보였다.

양정석 등(2012)은 가뭄 취약성 지표를 선정하고 경향성 검정에 따른 지수 산정을 실시하였다. 가뭄에 대

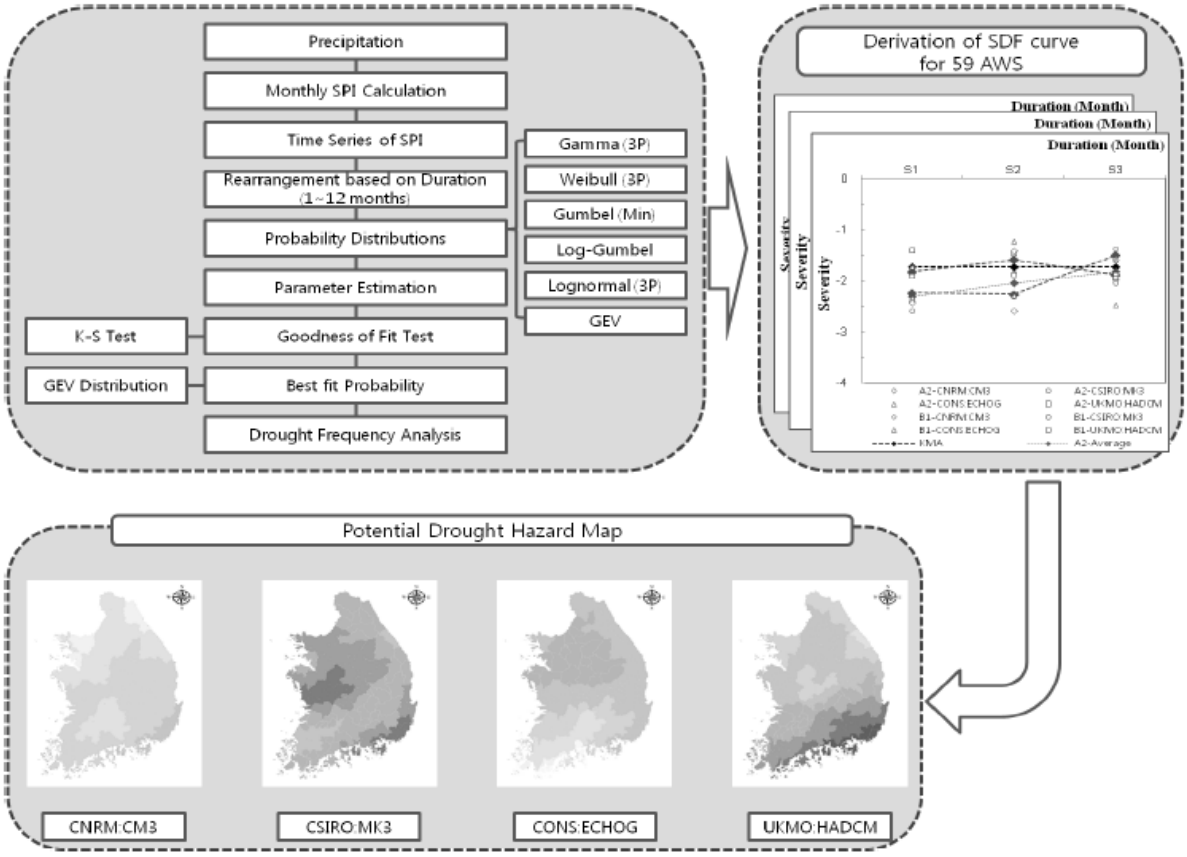


그림 2.14 SDF 곡선 유도와 미래 가뭄우심지역 지도화를 위한 연구 흐름도(박범섭 등, 2013)

한 취약성 지수 개발을 목적으로 한 1차 선정 지표는 12개였으나 자료의 적용 및 확보의 문제로 취수율과 물자급율은 최종 지표 선정에서 제외되었다. 4대강 살리기의 일환으로 새로이 설치될 보 중 금강 및 낙동강 유역 10개 지점을 연구 대상지역으로 선정하고 수자원, 강우, 인문 분야 등 3개 분야 10개 지표를 선정하였다. 10개 지표는 연 최저 및 평균 하천수위와 지하수위, 무강우일수, 강우집중률, 강우편차율, 1인당 가용수자원량, 물재정 건전성, 물이용 공평성이다. 이러한 자료들을 시계열로 정리하여 Mann-Kendall, Hotelling-Pabst, 그리고 Sen trend test를 실시하여 지수를 산정하였다. 그 결과 구미보, 상주보, 합천보, 칠곡보는 기후변화로 인해 하천 수위 및 지하수위의 하강이 분명하게 관찰되므로 이에 대비하기 위한 수자원 확보 방안이 시급한 것으로 나타났다. 금강보, 강정보, 달성보, 함안보 등 4개 지역은 취약성 지수가 높게 산정되지는 않았지만 잠재적인 가뭄의 위험요소를 무시할 수 없다고 나타났다. 낙동강 유역에 위치한 연구 지점들이 대체적으로 취약하였으며 금강유역은 낙동강에 비해 비교적 취약성이 낮음이 확인되었다.

가뭄 우심지역을 평가하기 위하여 A2와 RCP8.5 배출 시나리오를 활용한 남한지역 미래 가뭄 시·공간적 분포의 전망함을 통한 미래 가뭄 우심지역(가뭄에 취약한 지역)이 평가되었다(박범섭 등, 2013). 지수는 SPI, 가뭄빈도해석을 통한 관측지점별 SDF 곡선을 유도하여 지속기간별, 재현기간별 가뭄 우심지역이 지도화되었다(그림 2.14). 해당 연구는 수문학적인 가뭄 보다는 기상학적 가뭄에 초점을 둔 연구를 수행하였다고 평가할 수 있다. 과거 관측에 대한 가뭄 우심도 추정 결과, 가뭄 우심지역으로 평가되고 있는 낙동강, 섬진강, 영산강 유역에서 극한가뭄에 해당하는 가뭄이 나타났다. 온실가스 배출 시나리오 A2를 적용한 미래에서는 과거에 비해 낙동강 유역으로 심한 가뭄이 확장되는 것을 확인하였으며, RCP8.5 온실가스농도 시나리오를 적용한 미래에서는 중부지역에 위치한 한강유역의 가뭄이 심화될 것으로 예측되었다.

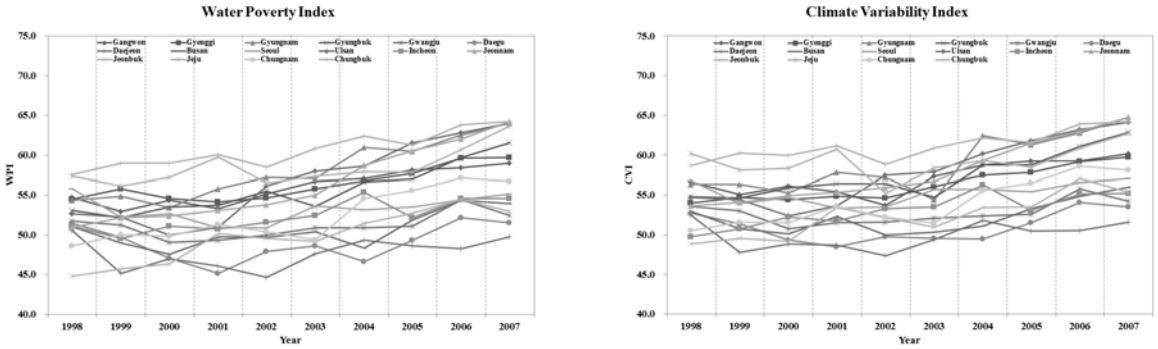


그림 2.15 지역별 물 빈곤지수(좌)와 기후 변동성지수(우)의 변화(홍승진 등, 2011)

기존의 기후변화를 고려한 물수급 분석 방법론의 문제점을 개선하기 위해 GCM 미래 기후 시나리오를 물수급 모형에 직접 입력하는 대신 과거 유량 시나리오의 가중값(재현확률)을 부여하는 새로운 물수급 전망기법을 제안하였다. GCM 미래 기후자료를 TANK 모형에 입력하여 중권역별 미래 유량을 모의하였으며 모의결과에 대한 편이보정을 위해 Quantile Mapping 기법을 적용하였다. 이러한 미래 유량 전망결과를 반영하여 각각의 입력자료에 대한 가중값(재현확률)을 새롭게 산정함으로써 미래 목표 전망구간에 대한 물부족량을 산정하였다. 물수급 모형의 입력자료에 대한 가중값 산정을 위해 K-nn 알고리즘을 적용하였으며 비홍수기 유량을 가중값 산정을 위한 기준유량으로 결정하였다. 또한, 기후변화의 불확실성을 고려하고자 4개의 GCM과 3개의 AR4 SERS 온실가스 배출 시나리오를 앙상블 조합하여 생성한 기후변화 시나리오를 활용하였다. 이와 같은 방법론으로 한반도 4대강 유역에 적용한 결과, 기후변화를 고려한 한반도 미래 평균 물부족량은 2020년대(2010 ~ 2039년)에는 과거에 비해 10 ~ 32% 정도 증가할 것으로 전망되었다. 또한 한반도 4대강 유역의 경우 먼 미래로 갈수록 비홍수기 유량이 점차 감소할 것으로 전망됨에 따라 2080년대 (2070 ~ 2099년)에는 과거 대비 평균 물부족량이 최대 97% 증가할 것으로 전망되었다(김초롱 등, 2013).

2.4.2.2 지표개발 및 적용

기존의 가뭄 지수의 한계점을 지적하고 새로운 지수를 개발 및 적용한 사례로 박민지 등(2011), 홍승진 등(2011), 김병식 등(2012) 등이 있었다. 가뭄을 전망하는데 주로 사용되는 표준강수지수(SPI)는 두 가지 사항을 가정하고 있는데 첫째, 가뭄은 강수의 변동성이 기온과 잠재증발산량(Potential Evapotranspiration, PET)의 변동성보다 절대적이라는 것, 둘째, 기온과 PET은 시간에 따라 변하지 않는 정상성을 가진다는 것이다. 하지만 최근의 여러 선행연구에서는 기온과 관련된 변수를 고려하지 않는 가정에 대한 문제점을 제시하고 있다. 이에 따라 김병식 등(2012)은 기존 가뭄지수 SPI의 한계를 지적하면서 최근에 기후변화와 가뭄분야에서 새롭게 제시된 SPEI를 연구에 적용시켰다. 홍승진 등(2011)은 물 빈곤지수에 지역적 기후 변동성 및 홍수 피해를 평가할 수 있는 세부지표를 추가한 기후변동성 지수를 개발하였다.

홍승진 등(2011)은 기존에 개발된 물 빈곤지수에 지역적 기후 변동성 및 홍수 피해를 평가할 수 있는 세부지표를 추가한 기후 변동성 지수를 개발하였다. 이를 국내에 적용하여 우리나라 수자원 상황을 평가하고자 하였다. 먼저 물이용 평가에 초점이 맞추어진 물 빈곤지수 세부지표를 선정하고, 지역적 특성에 따른 치수 및 기후 변동성 내용이 추가된 지역별 특성 인자를 선정하였다. 지역별 변동성은 1998년부터 2007년까지 물 빈곤지수와 기후 변동성 지수에 대한 분석을 실시함으로써 평가하였다. 물 빈곤지수 산정을 위해 사용된 자료는 수자원의 양, 수자원 배분의 공평성, 수자원의 이용능력, 수자원 이용효율성, 환경변수 등이다. 연구결과 물이용만을 고려한 물 빈곤지수에 지역적 특성인자를 고려하였을 경우 지역별로 값의 차이가 나타나는

것을 확인할 수 있었으며, 물 빈곤지수에 비해 순위의 변화도 많이 발생하는 것을 확인하였다(그림 2.15). 수자원 현황 분석 및 기후변화를 고려한 물이용을 평가하기 위해서는 물이용만을 평가할 수 있는 물 빈곤지수의 적용보다는 물 빈곤지수의 내용을 포함하고 지역별 특성인자를 추가로 고려한 기후 변동성 지수로 평가하는 것이 보다 합리적임을 확인할 수 있었다.

김병식 등(2012)은기상청 산하의 60개 기상관측소의 1973 ~ 2011년의 기상자료를 대상으로 SPEI를 적용하여 남한지역의 가뭄발생의 변화를 평가하였다. 기상청 관할 관측소 중 60개 지점에서 총 39년간(1973 ~ 2011년)의 월자료를 이용하여 각 지점별 지속시간 6개월 SPI와 SPEI를 계산하였으며, 가뭄지수의 남한지역 평균, 지점 최대, 최소값과 발생 지점을 분석하였다. SPEI는 최근 기후변화와 가뭄분야에서 새롭게 제시되고 있는데, SPI와 PDSI의 단점을 상호 보완한 가뭄지수로서 강수와 기온의 변동성을 원인으로 하는 증발산량의 변동성을 고려할 수 있으며, 강수 부족이 지속되는 시간 단위에 의해서 가뭄의 양상을 분리할 수 있는 다규모적 가뭄지수다. 연구 결과 전국적으로 SPI와 SPEI 모두 봄과 겨울에 가뭄이 심화되고 여름철에는 가뭄이 완화되는 경향을 보였다. 지표로서는 SPEI가 SPI보다 가뭄심도를 크게 나타냄을 확인하였다. 또한 지속기간 12개월의 SPI와 SPEI는 전반적으로 6년 내외의 저빈도 주기성을 갖는 극심한 가뭄이 반복되고 있음을 보였다.

SPI와 유사하지만 기온의 변동성이 포함된 새로운 개념의 가뭄지수인 표준강수 증발산량지수(SPEI)를 이용하여 가뭄발생을 평가하였다. 미래의 기후변화가 한반도의 가뭄발생에 미치는 영향을 평가하기 위해 IPCC 제5차 평가보고서의 RCP기후변화 시나리오로부터 모의된 미래강수 및 기온자료(2011~2099년)를 추출하였으며 전국 기상관측소의 강수 대비 증발산의 비율을 분석하였다. 또한 SPEI를 산정하여 남한지역의 미래 가뭄발생의 변화를 평가하였다. 그 결과, 미래로 갈수록 강수량이 증가하고는 있으나 건조 지속시간의 증가 및 기온 상승으로 인한 증발산의 증가로 인해 가뭄의 심도가 증가될 수 있음을 확인할 수 있었다(김병식과 하성룡, 2013).

표 2.7 우리나라 물의 잠재가격 산정(류문현 등, 2011)

수자원공급량 (백만톤)	수자원공급 감소비율	CDP 감소분 (백만원)	잠재가격 (원/㎥)	영향을 미치는 산업
26,143		-		
23,529	10%	6,437,000	2,462	농업
20,914	20%	12,875,000	2,462	농업
18,300	30%	19,312,000	2,462	농업
15,686	40%	25,749,000	2,462	농업
14,379	45%	34,115,000	2,899	목재/종이/출판
13,072	50%	146,250,000	11,188	섬유/가죽
11,764	55%	300,574,000	20,904	비금속/1차금속
10,457	60%	488,028,000	31,112	음식료/담배, 석유정제/피혁
9,150	65%	745,670,900	43,881	일반기계
7,843	70%	1,031,160,500	56,347	서비스
5,229	80%	1,608,367,260	76,902	가구 및 제조, 전기/전자

2.4.2.3 경제성 분석

가뭄 역시 홍수와 마찬가지로 경제성 분석을 다룬 연구는 한 편에 불과하였다. 가뭄의 시작과 끝을 정확히 정하기 힘들며, 긴 시간에 걸쳐 일어나는 가뭄의 특성으로 그 피해액을 정확히 산출해내기 힘든 것이 가뭄 분야의 경제성 분석을 힘들게 하는 요인이라 볼 수 있다. 류문현 등(2011)은 이를 파악하기 위해 인위적으로 물 부족을 가정하여 경제성 분석을 실행하였다.

류문현 등(2011)은 기후변화로 초래될 수 있는 가뭄

의 경제적 파급효과를 추정하기 위하여 인위적으로 물 부족을 가정하고 우리나라의 수자원과 경제모델을 연결시킨 수자원 투입산출 선형계획법(WIOLP)을 사용하여 물의 수요와 공급을 고려한 물의 잠재가격을 추정하였다. 그 결과 경제 내 필요한 수자원량 중 10%가 감소할 경우, 경제에 주는 피해액은 약 6조 4천억원으로 추정되었고 물의 부족량에 따라 수자원의 잠재가격은 2,462원에서 76,902원까지 증가하는 것으로 추정되었다(표 2.7).

2.5 적응옵션

채여라와 염유나(2010)는 기후변화의 영향평가와 경제학적 분석에 관한 연구현황 분석을 통한 효율적 기후변화 적응대책 수립 방안을 제시하기 위하여 국내·외 연구결과들을 이용 및 분석하였다. 분석결과 수자원 분야에서 경제학적 분석에 대한 연구는 매우 미비한 것으로 나타났다.

국립환경과학원(2010)은 수자원 분야에서 기후변화의 관점에서 기존 수자원 계획의 개선에 대한 종합적 연구 및 기후변화 적응 능력 제고를 위해 수자원 정책 결정자들에 대한 역할 및 영향 검토, 현재 수자원관리 체제에 기초한 기후변화 적응능력 검토 및 지역별·분야별 치수 적응전략 개발 등을 제안하였다. 이러한 다양한 제안들을 수질 모니터링, 수질 관리대책, 유역 적용, 수생태계 적응의 4가지 분야로 구분하여 다음과 같이 정리하였다. 수질 모니터링 부분에서는 기후변화에 민감하게 반응하는 지표 중심의 자동 모니터링 체계를 구축하고, 이를 토대로 기존의 모니터링 체계와 통합한 기후변화 모니터링 체계를 제안하였다. 수질 관리대책 부분에서는 기후변화에 따른 영향은 비점오염원 부문이 가장 크다고 하였으며 유역별로 적용할 수 있는 기후변화 취약성 평가기법의 개발 및 적용이 우선적으로 추진될 필요가 있다고 제안하였다. 마지막으로 수생태계 적응을 위해서 현재 정부에서 추진 중인 사업인 범람원 및 천변저류지 복원을 통한 수변 완충녹지 확보가 지속적으로 추진될 필요가 있다고 제안하였다.

기상청에서 생산되는 지점 및 격자 형태 강우 자료를 수문 분야에 적용함에 있어 자료의 활용 가능성을 판단하기 위한 기반 연구가 수행되었다. 자료의 활용 가능성을 판단하기 위해 기본적인 강우 분석을 수행하고 그 결과를 비교하였으며, 강우 자료를 바탕으로 유역 유출을 산정하고 비교 분석을 수행한 후 유역별 수문순환 특성 및 우리나라의 물 공급 안정성 평가에 대한 비교 분석을 수행하였다. 또한, 강우 자료에 따른 수문순환 특성의 변동을 평가하고 물 공급 안정성 분석 결과의 차이를 검토한 후 기상청에서 생산되는 지점 강우 자료(ASOS 및 AWS)와 격자 단위 강우 자료의 활용 가능성을 제시하고 기존 수문 분석 과정에서 한계로 나타나는 부분에 대한 개선 방안을 제시하였다. 물 관련 시스템이나 재해 등에 대한 기후변화의 영향 및 반응평가의 결과를 활용한 적절한 적응 및 완화대책을 수립을 통해 장기적인 국가 물 안보를 확보를 위한 연구를 수행해야 할 것이다(기상청, 2011).

국토해양부(2011)는 기후변화와 4대강 살리기 사업 등 미래 예상되는 하천환경 변화에 대응하고 첨단기술 융복합에 의한 하천운영 및 관리와 미래 기술수요 대응을 통한 스마트 하천 관리기술 일류국가 실현을 위해 기후변화 대응 하천운영 및 관리기술을 기획하였다. 기술의 정의로는 4대강 친환경시설물 및 하도 유지관리 기술, 첨단기술(IT/GIS/RS) 기반의 하천계측 및 운영 기술 개발, 한국형 수문량 분석 선진화 기술 개발 및 물안보 확보를 위한 하천의 탄력적 물관리 기술로 구분하였다. 기술의 기대효과로는 기술적 효과, 경제적 효과, 사회적 효과의 3가지 효과로 구분하여 제시되었다. 기술의 활용방안으로는 하천의 건전성 회복으로 인한 국민 삶의 질 개선 및 첨단기술 기반의 하천운영 및 관리를 위한 S/W 및 지침서 제공, 마지막으로 하천표준 계측기술 및 데이터베이스 표준화와 이를 활용한 다양한 하천 관련 업무의 적용으로 제시되었다.

건천화의 적응전략으로서 하수처리수 재이용이 선정되었고 어느 지역에 우선적으로 선정되어야 하는가를 결정할 수 있는 방법이 제시되었다(전상묵 등, 2013). 기후변화로 인해 변화된 평가치와 평가기준에 대한 가중치의 불확실성을 완화하고자 Fuzzy TOPSIS 방법을 이용하여 각 대안을 평가하였다. 또한 견고한 의사결정을 위해서 통계적인 기법과 maximin,

maximax, Hurwicz, equal likelihood criterion 방법을 사용하였다. 그 결과 Fuzzy TOPSIS를 통한 대안의 순위 선정과 견고한 의사결정기법을 통해 불확실성과 순위의 애매모호함을 완화시켰다.

강노을 등(2013)은 기후변화 불확실성 하의 용수공급계획을 위해 견고한 의사결정(Robust Decision Making, RDM)기법을 국내 유역에 시범 적용하고, 가중치와 평가기준 점수를 합산하는 일반적인 형태의 표준 의사결정(Standard Decision Making, SDM) 결과와 비교하였다. RDM은 기후변화 시나리오의 발생하지 않는 대안을 유도할 수 있는 후회도(regret criterion)을 사용하여 대안의 순위를 결정한다. SDM과 RDM에 의해 산정된 순위를 비교하기 위하여 안동댐과 임하댐 유역에 용수공급계획 사례를 작성하여 각 기법을 적용하였다. 그 결과, SDM과 RDM 사이에는 동일한 시나리오와 대안을 사용했음에도 불구하고, 평균적으로 0.33 ~ 1.33순위 차를 나타내었다.

한봉구와 정은성(2013)은 견고한 우선순위 결정을 위한 퍼지 다기준 의사결정기법의 타당성을 수자원 계획수립 문제에 적용하여 제시하였다. 즉 일반적인 다기준 의사결정 기법인 가중합계법, 계층화분석과정, 수정계층화분석과정, TOPSIS 방법과 퍼지가중합계법, 퍼지계층화분석과정, 퍼지수정계층화분석과정, 퍼지 TOPSIS 방법을 사용하여 비교한 결과 다기준 의사결정방법을 사용할 경우 사업들의 순위 변동성이 퍼지를 사용하지 않을 때보다 크지 않아 보다 일관된 순위의 유도가 가능하였다. 따라서 사업의 우선순위를 결정하는 문제에서 자료와 가중치의 불확실성을 고려할 수 있는 퍼지 다기준 의사결정기법을 활용해서 방법의 변화로 인한 순위의 변동성을 최소화해서 견고함의 순위를 결정하는 것이 보다 효과적으로 나타났다.

2.6 결론

최근(2010 ~ 2013년)의 수자원 관련 국내 기후변화 연구는 영향 전망에서 취약성 평가 등으로 연구의 관점이 넘어가기 시작한 시기였다고 총평할 수 있다. 1차 평가보고서(~ 2010년)에 비해 전망 연구의 비율이 감소했고 취약성 평가 및 그 외 불확실성 평가와 적응대책 수립 등의 도전 연구들의 비율이 증가했다. 이는 지표·하 유출, 홍수, 가뭄 순으로 그 경향이 덜했다. 이는 기존의 수자원 관련 연구 자체에서 갖는 각 분야별 연구의 접근과 흡사한데, 상대적으로 가뭄·이수 측면의 연구가 논문 발표가 적은 등의 현상이 기후변화 관련 연구에서도 유사하게 드러난다고 볼 수 있다.

2.6.1 연구결과의 신뢰도 평가

한반도의 지표 유출량은 미래로 갈수록 증가할 것으로 전망되었으며 그 변화정도는 먼 미래로 갈수록 증가하였다(견고한 동의). 하지만 연평균유량은 지역적으로 매우 다른 전망이 산출되어 불확실성이 크며, 미래로 갈수록 적용 시나리오에 따른 편차가 커지고 있다(중간적 동의). 한편, 지하수 함양량은 줄어들 것으로 전망되고 있다(견고한 동의). 집중강우는 빈발은 지표침투보다는 지표 유출을 증가시키고 강설이 감소하는 기후변화의 추세로 지하수 함양량이 줄어들어 전망 수자원 관리 측면에서 어려움이 가중될 것으로 보인다.

한반도 홍수 연구에 따르면 기후변화로 인해 홍수량은 증가할 것으로 전망된다(견고한 동의). 따라서 향후 홍수위험성 및 취약성이 현재에 비해 증가할 것으로 예상되며(중간적 동의) 각 지역별로 홍수취약성 평가 결과 낙동강 유역의 홍수 취약성이 가장 크게 증가할 것으로 분석되었다(제한적 동의).

미래 가뭄의 발생빈도 및 심도는 지역적으로 다소 차이를 보이지만 전반적으로 모두 증가할 것으로 전망되었다(중간적 동의). 따라서 가뭄의 발생빈도와 심도가 증가하는 지역에서는 필연적으로 물부족이 발생할 것으로 예상되었다(견고한 동의). 가뭄의 계절별 경향을 보면 봄철 및 겨울철의 가뭄현상이 심화될 것으로 전망되었다(견고한 동의). 미래 기후변화는 근본적으로 강수 및 기온의 변화를 가져오므로 기상학적 가뭄에 큰 영향을 미치게 되며, 가뭄의 지속기간이 길어지고 심도가 심해짐에 따라서 순차적으로 농업적 가뭄 및 수문학적 가뭄에 큰 영향을 미칠 것으로 예상된다(중간적 동의). 미래에는 약한 가뭄 및 보통 가뭄의 발생빈도는 줄어들고 농업 또는 수문학적으로 영향을 미치는 심한가뭄 및 극심한 가뭄의 발생빈도가 증가하는 것으로 전망

하고 있다(제한적 동의).

2.6.2 연구경향 및 시사점

지표 유출은 GCM, RCM을 이용한 장기모의가 주를 이루고 있는데, 1차 평가보고서와 다르게 인식할 부분은 통계적 상세화 기법에 대한 연구의 비율이 과거 대비 다소 감소하였다는 점이다. 이는 기상청에서 제공된 RCM을 사용했거나 각 연구단위에서 기존 연구를 수행하는 동안 다져진 상세화 기법의 노하우를 적용했기 때문으로 이해된다. 이에 대비하여 최근 관심이 높은 주제는 유출모의인데, 모형을 달리하여 적용성 검토를 하거나 토지이용 변화를 예측하는 등의 시도가 있다. 지하 유출은 1차 평가보고서에 비해서는 연구가 증가한 편이나, 지표 유출과의 연계를 시도하기에는 여전히 연구 단계가 미진한 상태이다.

홍수 전망은 지표 유출 전망과 함께 1차 보고서에서는 절대적인 비율을 갖고 있었으나, 2차 보고서에 이르러 그 비율이 대폭 감소한 두 가지 세부 분야 중 하나이다. 그러나 여전히 의미 있는 연구들이 발표되고 있는데, 기존에 다루지 않았던 성격의 변수 혹은 유역을 다루거나, 비정상성 빈도해석을 고려하기 전 단계의 연구들이 발표되고 있다. 기후변화의 영향으로 인한 홍수 취약성을 평가하는 연구는 큰 관심을 얻고 있는데 각자의 기준 및 지표를 활용한 취약성 평가, 지표 및 기준의 개발, 그리고 경제성 분석까지 다양한 관점에서의 홍수 취약성 평가 연구가 수행되고 있다. 각 홍수 전문가들의 관점, 기준을 담은 다양한 형태의 연구 결과들이 발표되고 있는 실정을 고려하면 당분간 이와 같은 산발적인 경향이 지속될 것으로 예상된다.

가뭄 연구는 홍수 연구에 비해 전망 단계에서 취약성 평가, 적응대책 수립 등 후속 단계로의 진행이 더딘 편이다. 이는 가뭄 연구의 대상 자료가 과거 관측일 경우에도 상대적으로 다루기가 힘들고 조심스러운 편인데, 기후변화의 영향을 고려함으로써 불확실성의 영향이 더욱 크게 미치기 때문이다. 그에 따라 여전히 미래 전망에 대한 연구도 비율상 꽤 존재하는 편이다. 비율은 높지 않지만 기후변화를 고려한 기법 개발 연구나 취약성 평가 단계의 연구 또한 수행되고 있다. 그리고 기후변화를 고려할 수 있는 지표 및 기준에 대한 관심이 연구로 발표되고 있는데, 가뭄 연구의 특성상 지표 개발이 갖는 비중이 높기 때문으로 짐작된다.

기후변화 관련 수자원 연구의 수행과정에서 발생하는 불확실성에 대한 연구는 관심을 갖는 연구자들의 수가 많지는 않으나, 최근의 기후변화 관련 수자원 연구의 경향을 고려하여 지속적으로 연구가 수행되고 있다. 주 관심 대상은 기후변화 시나리오의 사용에 있어 발생하는 불확실성, 그리고 기후자료가 수문모형을 거치면서 발생하는 모형 불확실성 등이 있다.

기존의 수자원 연구에서는 홍수와 가뭄을 따로 떼어 놓고 수행하는 연구가 많았으며, 이수·치수·수질 등을 복합적으로 고려하는 수자원 통합관리 연구는 개별 분야에 국한한 연구보다 후속 연구로 인식되었다. 또한 이와 같은 복합적인 통합 연구는 취약성 평가 및 수자원 정책 수립 및 평가 단계에서 수행되는 경우가 많았다. 기후변화 관련 수자원 연구에서도 마찬가지로 취약성 평가 및 적응대책 수립 과정에서 홍수 및 가뭄으로 분류할 수 없는 통합 연구가 발표되었다.

기후변화에 대한 수자원 분야에서의 적응대책 수립에 관련한 연구는 현재 여러 연구자들에 의해 시도되는 중으로 알려져 있다, 그러나 이와 관련하여 활용할 수 있는 다양한 기법에 대한 연구들이 발표되는 반면, 미래 전망 자료를 입력함으로써 연구 결과 내에 적응전략을 주장하는 연구 결과는 부족한 실정이다.

현 시점에서의 기후변화 관련 수자원 연구의 연구방향을 제시하자면, 다음과 같다.

첫 번째로, 기후변화 영향을 고려하기에 적절한 중장기 유출모의에 대한 연구를 지속할 필요가 있다. 미래 기후전망은 IPCC GCM의 지속된 개선과 RCM 작성에 대한 꾸준한 연구를 통해 기술적으로 고도화되고 있는 반면, 이를 수문변수로 변환하는 유출모의 과정에 대해서는 토지이용 변화를 예측하는 정도가 지속적인 관심을 통한 연구 성과가 발견되고 있다고 볼 수 있다. 보다 다양한 입력자료, 모형 계산과정에 대해 기후변화를 고려하는 관점에서 연구 수행이 필요하며 기후변화용 유출 모형 선정 또는 개발 연구가 수행될 필요가 있다.

두 번째로, 홍수 및 가뭄의 극치 수문 연구에 비정상

성을 고려하는 연구가 보다 더 다양하게 발표될 수 있으나 결과가 매우 상이하여 신뢰도를 높이는 연구가 필요하다. 아직 많은 기후변화 관련 홍수 및 가뭄 연구들이 기존의 정상성 가정을 바탕으로 하고 있다. 그러나 기후변화에 의한 영향을 고려하는 것의 요체는 현재와 다른 미래의 상황을 가정하는 것이며, 정상성에 대한 관점을 달리할 필요가 있다. 비정상성을 가정하는 빈도해석 기법을 적용하거나, 혹은 정상성 가정 하에서 보다 미래 전망의 통계특성 변화를 고려할 수 있는 기법들에 대한 관심이 필요하다. 또한 최근까지 기후변화와 관련된 많은 연구가 논의되고 많은 영향평가가 있어 왔으므로 지난 과거시점에서 전망했던 기후변화 시나리오에 의한 홍수 및 가뭄에 대한 전망에 대해서 검증이 가능한 시점이다. 이러한 연구를 추진하는 것도 기후변화와 관련된 또 다른 시각의 연구결과를 도출할 수 있을 것으로 기대된다.

세 번째로, 영향평가를 기반으로 견디는 능력을 평가하는 취약성 평가는 보다 다양한 관점 및 기준에 대한 관심을 지속할 수 있다. 현재에도 서로 다를 수 있는 지표, 관점, 기준에 따른 취약성 평가가 수행되고 있는데, 이는 보다 통합적으로 고려할 수 있거나 정론으로 확립될 수 있는 표준이 도출되기 위한 과도기에 있는 것으로 평가된다. 향후에도 실무적으로나 이론적으로 필요성이 예상되는 다양한 연구들이 수행되어, 선택의 폭을 넓히는 것이 유리할 것으로 보인다.

마지막으로, 적응대책 수립을 위한 의사결정 기법 등의 연구들이 전망 자료를 적용하여 수행될 필요가 있다. 최근 수자원 분야에서는 취약성 평가를 넘어 설계 및 대안에 이르는 연구나, 의사결정 기법을 활용한 연구들이 다수 보고되고 있다. 이러한 분야에 대한 관심은 수자원 통합 관리 연구에 대한 관심의 측면에서 볼 수도 있으나, 이는 기후변화에 따른 미래 기후 및 수문 상황에 대한 적응의 측면을 고려하지 않을 수 없다. 따라서 과거 관측 및 단기 전망자료 뿐만 아니라, 기후변화 관련 연구에서 주로 활용하는 중·장기 전망자료 또한 활용하는 것이 연구의 의의를 더할 수 있을 것으로 기대된다.

2.7 참고문헌

강나래, 김수전, 이건행, 김덕길, 2011: 기후변화가 도시배수시스템에 미치는 영향, *한국습지학회지*, 13(3), 623-631.

강노을, 김영오, 정은성, 박준형, 2013: 기후변화 불확실성하의 용수공급계획을 위한 로버스트 의사결정의 적용, *한국기후변화학회지*, 4(1), 11-26.

강정은, 이명진, 2012: 퍼지모형과 GIS를 활용한 기후변화 홍수취약성 평가 - 서울시 사례를 중심으로, *한국지리정보학회지*, 15(3), 119-136.

강지윤, 김영도, 강부식, 2013a: 기후변화에 따른 남강유역의 수문환경의 변화가 하천수질에 미치는 영향, *한국수자원학회논문집*, 46(8), 873-884.

강지윤, 김정민, 김영도, 강부식, 2013b: 기후변화에 따른 서낙동강 시험유역에서의 수질영향 분석, *한국물환경학회지*, 27(2), 197-206.

곽재원, 2012: 코풀라 기반의 가뭄분석 및 기후변화 영향, 박사학위논문, 인하대학교.

국립환경과학원, 2010: 국제 기후변화 적응센터 발전방안 마련 연구, 한국환경정책・평가연구원, 593.

국립환경과학원, 2012: 기후변화에 의한 유역환경영향 통합평가, 국립환경과학원 물환경연구부 수질통합센터, 53.

국토해양부, 2011: 기후변화대응 하천운영 및 관리기술 과제 기획보고서, 명지대학교, 한국건설기술연구원, 335.

국토교통부, 2013: 기후변화에 의한 수문 영향분석과 전망 연구보고서, 서울대학교 산학협력단, 1036.

권세명, 전근우, 서정일, 김진학, 윤주웅, 김용래, 2013: 산사태지 붕괴사면에 있어서 강우인자에 따른 표면침식량 변화, 한국산림휴양학회 학술발표회자료집, 4, 849-852.

권현한, 김장경, 이종석, 나봉길, 2012: Bayesian 모형을 이용한 단일사상 강우-유출 모형의 불확실성 분석, *한국수자원학회논문집*, 45(5), 505-516.

기상청, 2011: 기후변화 감시, 예측 및 국가정책지원 강화사업, 한국건설기술연구원수자원연구실, 621.

김다은, 정용, 박무종, 윤재영, 김상단, 최민하, 2011: 기후변화를 고려한 수자원 분야의 취약성 분석, *한국습지학회지*, 13(1), 25-33.

김미은, 손태석, 장영수, 강두기, 신현석, 2012: 기후변화의 영향을 고려하기 위한 비시나리오 기반의 중단기 유출 전망에 관한 연구, *한국방재학회지*, 12(6), 315-324.

김병식, 권현한, 김형수, 2011: 기후변화가 가뭄 위험성에 미치는 영향 평가, *한국습지학회지*, 13(1), 1-11.

김병식, 김수전, 김형수, 전환돈, 2010: 기후변화와 토지피복변화를 고려한 한강 유역의 수자원 영향 평가, *한국수자원학회논문집*, 43(3), 309-323.

김병식, 성장현, 강현석, 조천호, 2012: 표준강수 증발산지수(SPEI)를 이용한 남한지역의 가뭄심도 평가, *대한토목학회논문집*, 45(9), 887-900.

김병식, 하성룡, 2013: 기후변화시나리오를 이용한 기후변화가 미호천 유역의 설계홍수량에 미치는 영향평가, *한국습지학회지*, 15(1), 105-114.

김보경, 장대원, 장남, 양동민, 2011: 기후변화를 고려한 도시홍수 위험요인 도출, *한국위기관리논집*, 7(1), 125-142.

김상단, 이아연, 이재운, 김태웅, 2011: 개념적인 토양수분 모의모형을 이용한 미래 극한 가뭄사상의 시공간적 해석, *한국방재학회논문집*, 11(6), 349-356.

김선명, 김남의, 2012: 기후변화 취약성 평가에 관한 연구. *한국거버넌스학회보*, 19(2), 99-123.

김수전, 김병식, 전환돈, 김형수, 2010: 고해상도 RCM 자료를 이용한 기후변화가 한강유역의 수자원(이수적 측면)에 미치는 영향 평가, *대한토목학회논문집*, 43(3), 295-308.

김수전, 강나래, 김형수, 2013: 기후변화가 댐의 이수 및 치수안전도에 미치는 영향 평가, *한국방재학회지*, 13(1), 57-64.

김영규, 유정아, 정은성, 2012: 기후변화에 따른 우리나라 물 관리의 취약성 평가, *한국기후변화학회지*, 3(1), 1-12.

김응석, 이재혁, 박무종, 정건희, 2013: 기후변화를 고려한 재해환경 변화 분석: 1. 홍수위 분석, *한국방재학회지*, 13(4), 207-217.

김정진, 류재현, 2013: 기후모형(GCMs)에 기반한 2018년 평창 동계올림픽 적설량 및 수문모의, *한국수자원학회논문집*, 46(3), 229-243.

김종필, 김광섭, 2011: 기후변화에 따른 우리나라 강수효율 및 유출량의 변화특성 분석, *한국수자원학회논문집*, 44(8), 683-694.

김진겸, 강부식, 윤병만, 2014: 홍수저류지 설계를 위한 강우강도-지속시간-홍수량(IDQ) 곡선 해석, *한국수자원논문집*, 47(1), 83-93.

김초롱, 김영오, 서승범, 최수웅, 2013: 기후변화 시나리오를 활용한 미래 한반도 물수급 전망, *한국수자원학회논문집*, 46(8), 807-819.

김태형, 한건연, 조완희, 2011: 홍수위험지도 활용을 위한 낙동강 유역에서의 홍수취약도 분석, *한국지리정보학회지*, 14(3), 203-222.

김호성, 박진혁, 윤재영, 김상단, 2010: 극한가뭄의 시공간적 특성에 대한 기후변화의 영향을 평가하기 위한 SAD 곡선의 적용, *대한토목학회논문집*, 30(6), 561-569.

김환석, 박기정, 김상단, 최민하, 박무종, 윤재영, 2012: 기후변화와 대규모 하천정비 사업을 고려한 낙동강 유역 자연재해 홍수 취약성 평가, *한국방재학회논문집*, 12(2), 107-113.

류문현, 장석원, 박두호, 2011: 기후변화와 가뭄- 가뭄시 물의 잠재가격 및 피해 추정 연구, *한국습지학회지*, 13(2), 209-218.

박민지, 신형진, 박근애, 김성준, 2010: SWAT 모형을 이용한 소양강댐 유역의 미래 수자원 영향 평가, *대한토목학회논문집*, 30(4), 337-346.

박민지, 신형진, 안정훈, 염경택, 김성준, 2011: 용수공급능력을 고려한 가뭄 지수 개발, *한국방재학회지*, 11(1), 65-69.

박범섭, 이주헌, 김창주, 장호원, 2013: 다양한 기후변화 시나리오와 기후모델에 의한 남한지역 미래가뭄의 확률론적 전망, *대한토목학회논문집*, 33(5),

1871-1885.

박진혁, 권현한, 노선희, 2011: A1B기후변화시나리오 기반 RCM과 SWAT모형을 이용한 대청댐 및 용담댐 유역 유출 전망. *한국수자원학회논문집*, 44, 929-940.

배덕효, 정일원, 이병주, 이문환, 2011: GCM과 수문모형의 불확실성을 고려한 기후변화에 따른 한반도 미래 수자원 전망, *한국수자원학회논문집*, 44(5), 389-406.

서린, 최민하, 김태웅, 2010: 극치강우자료의 경향성에 대한 시간적 변동 전망, *한국습지학회지*, 12(2), 13-23.

성장현, 백희정, 강현석, 김영오, 2012: 서울 지역의 미래 홍수취약도 평가, *한국습지학회지,* 14(3), 341-352.

손경환, 이병주, 배덕효, 2010: Multi-GCMs의 기후시나리오를 이용한 홍수특성변화 평가, *한국수자원학회논문집*, 43(9), 789-799.

손경환, 배덕효, 정준석, 2011: 지표수문해석모형을 활용한 국내 가뭄해석 적용성 평가, *한국수자원학회논문집*, 44(8), 667-681.

손경환, 배덕효, 안재현, 2014: 미래기후-수문정보에 따른 국내 가뭄의 전망 및 분석, *한국수자원학회논문집*, 47(1), 71-82.

손민우, 성진영, 정은성, 전경수, 2011: 기후변화를 고려한 홍수취약성지표의 개발, *한국수자원학회논문집*, 44(3), 231-248.

손태석, 신현석, 2010: 기후변화에 따른 강우 경향성 및 유출과의 탄성도 분석, *대한토목학회논문집*, 30(5), 497-507.

손태석, 이규열, 임태효, 신현석, 2011: 기후변화를 고려한 낙동강 유역의 수온과 수질 탄성도 분석, *한국물환경학회지*, 27(6), 830-840.

안소라, 박은애, 장철희, 김성준, 2013: SWAT 모형을 이용한 미래 기후변화가 설마천 혼효림 유역의 증발산과 토양수분에 미치는 영향 평가, *한국수자원학회논문집*, 46(6), 569-583.

양정석, 김남기, 2011: 한국의 지하수위와 강우이동평균간의 상관관계, *대한토목학회논문집,* 31(3), 265-276.

양정석, 박진혁, 김남기, 2012: 경향성 분석을 통한 가뭄취약성 지수의 개발. *대한토목학회논문집*, 32(3), 185-192.

오정림, 박혁진, 2013: 강원지역 사면재해 위험성 분석을 위한 강우기준 설정 연구, *한국방재학회논문집*, 3, 43-51.

윤선권, 2012: 기후변화에 따른 도시하천의 홍수위험 및 취약성 분석에 관한 연구, 박사학위논문, 서울시립대학교.

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

은코모제피 템바, 정상옥, 2014: 기후변화에 따른 우리나라 수문 기상학적 예측의 불확실성, *한국수자원학회논문집*, 47(3), 257-267.

이건행, 2011: 기후변화와 불확실성을 고려한 예상홍수 피해액 산정, 박사학위논문, 인하대학교.

이덕배, 심교문, 김진호, 노기안, 김건엽, 2010: 농지전용과 수자원 취약성 간의 관계 분석, *한국기후변화학회지*, 1(1), 75-83.

이명진, 이정호, 전성우, 홍현정, 2010: 기후변화 연동 지하수 함양량 산정 모델 개발 및 정책방향 고찰, 환경정책연구, 9(2), 157-184.

이명진, 2011: GIS를 이용한 기후변화 연동 지하수 함양량 산정 모델 개발 및 검증, *한국지리정보학회지*, 14(3), 36-51.

이문환, 정일원, 배덕효, 2011: 기후변화에 따른 국내 홍수 취약성 평가, *대학수자원학회논문집*, 44(8), 653-666.

이승현, 배상근, 2011: 강수량 변화가 지하수함양량에 미치는 영향, *한국습지학회지*, 13(3), 377-384.

이승호, 김은경, 허인혜, 2011: 한국의 유역별 호우변화에 관한 연구, *한국지역지리학회지*, 17(5), 505-520.

이아연, 김상단, 2011: 낙동강 유역 환경유량에 대한 기후변화의 영향 분석, *한국물환경학회*, 27(3),

273-285.

이재경, 김영오, 2012: 불확실성을 고려한 기후변화 시나리오의 선정, *한국기상학회대기*, 22(2), 149-161.

이재민, 우남칠, 2012: 장기모니터링을 통한 지하수계의 이해 - 광릉소유역 사례 연구, *지하수통양환경*, 17(4), 51-62.

이종문, 김영도, 강부식, 이혜숙, 2012: 남강댐 유역에서의 기후변화에 대한 유출 영향, *대한수자원학회논문집*, 45(6), 517-529.

이주헌, 조경준, 김창주, 박민재, 2012a: 가뭄우심도를 활용한 가뭄의 시공간적 분포특성분석, *한국수자원학회논문집*, 45(10), 983-995.

이주헌, 서지원, 김창주, 2012b: 가뭄지수를 활용한 한반도 가뭄의 경향성, 주기성 및 발생빈도 분석, *한국수자원학회논문집*, 45(1), 75-89.

이진용, 전우현, 박영윤, 임홍균, 2012: 강원도 평창군의 지하수 현황과 전망, *지질학회지*, 48(5), 435-444.

이혜원, 최남희, 이용석, 최정현, 2011: 강우강도와 토지이용을 고려한 비점오염물질 부하량 산정에 관한 연구, *대한환경공학회*, 33(8), 572-577.

장대원, 2010: 홍수방어대안 선정을 위한 위험관리지수의 개발 및 적용, 박사학위논문, 인하대학교.

장대원, 김병식, 김주환, 2012: 기후변화로 인한 극한강우가 재해에 미치는 영향의 정량화, *한국방재학회논문집*, 12(4), 169-178.

장재호, 안종호, 2012a: 미래 기후변화에 따른 낙동강 유역의 수문-수질 변화, *한국수자원학회논문집*, 45(11), 1121-1130.

장재호, 안종호, 2012b: 이상기후변화가 낙동강 유역의 수문-수질요소에 미치는 영향, *한국수자원학회논문집*, 45(11), 1081-1091.

전상묵, 정은성, 이상호, 김연주, 2013: 기후변화 시나리오의 불확실성을 고려하기 위한 로버스트 의사결정 기법의 개발 및 적용, *한국수자원학회논문집*, 46(9), 897-907.

정건희, 전면호, 김형수, 김태웅, 2011: 기후변화를 고려한 한강유역 저수지의 적응능력 평가, *대한토목학회논문집*, 31, 439-447.

정세진, 김병식, 전계원, 최종인, 2014: RCP8.5 기후변화시나리오를 이용한 기후변화가 영산강유역의 장기유출에 미치는 영향 평가, *한국위기관리논집*, 10(2), 289-305.

정승현, 박혜경, 이혜진, 이수형, 2013: 낙동강 물금 지점의 겨울 및 봄철 식물플랑크톤 생물량에 대한 기후변화 영향, *한국물환경학회지*, 29(2), 155-164.

정지웅, 이우균, 최계선, 이상철, 최성호, 최현아, 2010: 수자원 기후변화 취약성 평가모형의 공간 및 유역규모별 적용 연구, *한국기후변화학회지*, 1(1), 21-30.

채여라, 염유나, 2010: 효율적 기후변화 적응대책 수립을 위한 기후변화의 경제학적 분석, *대한환경공학학회지*, 32(9), 818-829.

채희문, 이상신, 이현주, 2011: 기초지자체 기후변화 인식조사를 통한 적응대책 수립방안에 관한 연구, *한국방재학회논문집*, 11(6), 131-138.

최대규, 안재현, 조덕준, 김상단, 2010: 토양수분 확률밀도함수로 살펴본 가뭄발생에 대한 기후변화의 영향, *대한수자원학회논문집*, 43(8), 709-720.

한국수자원공사, 2012: 기후변화에 따른 댐저수지수환경 취약성 평가 및 대응방안 수립(2차년도), K-water 연구원, 265.

한국환경정책・평가연구원, 2013: 기후변화에 따른 도심지역 지질재해 리스크 체계 마련, 65pp

한봉구, 정은성, 2013: 로버스트 우선순위 결정을 위한 Fuzzy 다기준 의사결정기법의 적용, *대한토목학회지*, 33(3), 917-926.

한우석, 심우배, 이병재, 유재환, 2012: 기후변화에 따른 홍수에 대한 지자체 기반시설 취약성 평가 방법 제시, *한국기후변화학회지*, 3(1), 25-37.

홍승진, 최시중, 백승협, 강성규, 2011: 물 빈곤지수와 기후 변동성지수의 국내 적용을 통한 지역별 수자원 특성 분석, *한국습지학회지*, 13(3), 427-441.

European Environment Agency, 1999: Environmental

indicators: typology and overview, Copenhagen, Denmark.

Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), 2007; Climate Change 2007a: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, Solomon, S., D. Qin, M. Manning, Z. Chen, M. Marquis, K.B. Averyt, M. Tignor and H.L. Miller (eds.), Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.

Jun, K. S., Chung, E. S., Sung, J. Y., Lee, K. S., 2011: Development of spatial water resources vulnerability index considering climate change impacts, *Science of the total environment*, 409, 5228-5242.

Lee, J. H., Kim, C. J. 2013: A multimodel assessment of the climate change effect on the drought severity-duration-frequency relationship, *Hydrological Process*, 27, 2800-2813.

제 3 장 생태계

3.1 서론

자연생태계가 최근 급격한 기후변화의 영향을 받고 있으며, 기후변화가 생태계에 미치는 영향 및 적응과 관련하여 국내·외적으로 다양한 연구들이 진행되고 있다. 식물 및 동물들은 특정한 기후 및 환경의 변화가 생물의 내성을 넘어서면 생체주기의 변화, 서식 범위의 변화, 형태 및 생식의 유전적 변화, 소멸 또는 멸종을 초래할 것으로 예상되고 있다. 이에 따라 생태계를 유지 보전하기 위하여 분야별로 과거부터 현재까지 연구자료를 수집하고 분석하여 현황을 파악함으로서 미래를 예측하고 적응 대책을 마련하는 것이 필요하다.

1차 기후변화 평가보고서에서 생태계와 산림 분야는 동일한 카테고리 내에서 서술이 되었으나 2차 기후변화 평가보고서에서는 생태계와 산림 분야를 분리하여 보고서를 집필하였다. 결과적으로 1차 기후변화 평가보고서에 포함되었던 내용 가운데 산림생태계에 포함되는 생산량, 산불, 산림재해, 산림병해충에 대한 내용은 산림 분야로 분리되었다.

제2차 기후변화 평가보고서에서 생태계 분야를 식물생태, 동물생태, 취약생태계로 나누고 기후변화가 각각의 생태계에 미치는 영향, 미래전망, 취약성, 적응대책에 대한 다양한 연구에 대한 정보를 검토하여 관련 DB를 구축하였다. 구축된 DB는 논문, 연구보고서, 단행본, 기타 연구물들을 토대로 구축되었으며 2000년대부터 현재까지에 해당하는 자료로 기후변화 시나리오를 적용한 연구와 적용하지 않은 연구를 모두 포함하였다.

식물생태는 식물계절, 수목생장, 멸종위기종, 외래종과 귀화식물을 포함하였고 동물생태는 곤충과 조류, 양서파충류, 포유류, 수생태을 포함하였다. 취약생태계는 습지와 무인도서, 고산 및 아고산 생태계에 서식지와 보전구역(국립공원, 천연보호구역, 생태경관보전지역)을 다루었으며, 제한적이나마 북한의 생태계의 취약성을 포함하였다.

현 시점에서의 기후변화 관련 생태계 연구는 현황파악, 영향 전망, 취약성 원인 등의 연구들이 함께 혼재되어 있으며, 적응전략에 대한 연구들은 매우 미진한 상태이다. 따라서 본 보고서에서는 기후변화 관련 생태계 연구의 2000년대부터 현재까지의 연구 성과들을 분석하여, 기후변화가 미래 생태계에 미치는 영향을 전망하고, 취약성을 평가하여 이에 대한 적응대책을 수립하기 위한 자료를 제공하고자 한다. 본 보고서는 또한 현 시점의 국내 생태계 연구의 현주소를 파악하고, 향후 어떤 연구들이 수행되어야 옳은지에 대한 정보를 제시하고자 한다.

3.2 관측된 영향

3.2.1. 식물생태

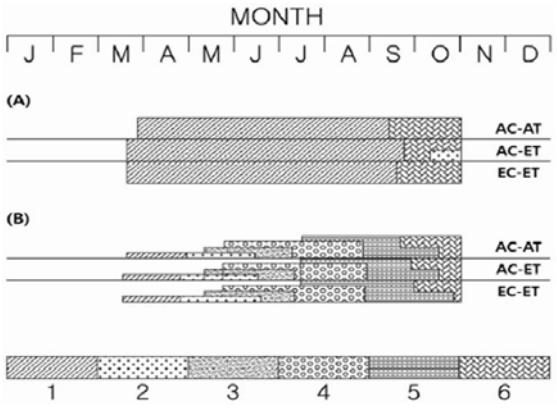


그림 3.1 식물계절 스펙트럼[(A)Phytolacca insularis, (B)P. americana](김해란, 유영한, 2010)

한국특산식물 섬자리공(Phytolacca insularis)과 귀화식물 미국자리공(Phytolacca americana)의 CO_2 농도와 온도의 증가에 따른 발아율, 식물계절, 잎의 형태적 변화가 분석되었다(김해란과 유영한, 2010). 식물계절의 경우 섬자리공은 CO_2 + 온도상승구에서 3월 20일에, 대조구는 3월 27일에 개엽하였으며, 낙엽 시기는 CO_2 + 온도상승구에서 9월 25일에, 대조구는 9월 15일로 나타났다. 반면 미국자리공의 경우 CO_2 + 온도상승구에서 3월 17일 개엽하였으며, 대조구보다 3일 빠르게 나타났다. 꽃대 형성 시기는 CO_2 + 온도상승구가 대조구보다 4일 빨랐고 개화 시기는 CO_2 + 온도상

No	Scientific name	Flowering		Fallen blossoms		Aestivation		Red leaves		Fallen leaves	
		2009	2010	2009	2010	2009	2010	2009	2010	2009	2010
1	*Carpinus laxiflora* (Siebold & Zucc.) Blume var. *laxiflora*	-	-	-	-	5/19	5/11	9/8	10/6	10/8	10/29
2	*Pinus koraiensis* Siebold & Zucc.	-	-	-	-	6/24	6/30	-	10/21	-	-
3	*Abies koreana* Wilson	-	-	-	-	5/6	6/26	-	10/21	-	-
4	*Quercus mongolica* Fisch. ex Ledeb.	5/19	-	6/4	-	5/13	5/25	9/16	10/6	10/16	10/13
5	*Rhododendron mucronulatum* var. *lucidum* Nakai.	-	-	-	-	-	5/11	9/8	9/29	10/16	10/13
6	*Acer pseudosieboldianum* (Pax) Kom.	-	-	-	-	5/6	5/26	10/8	10/6	10/22	10/21
7	*Betula costata* Trautv.	-	-	-	-	5/6	5/25	9/16	9/9	9/24	9/9
8	*Betula ermanii* Cham.	-	-	-	-	5/13	5/25	9/8	9/9	9/16	9/9
9	*Hemerocallis fulva* (L.) L.	7/31	7/29	9/2	8/12	-	5/11	10/16	9/29	10/22	10/29
10	*Rhododendron schlippenbachii* Maxim.	-	6/1	-	6/16	5/19	6/1	9/16	9/29	10/8	10/13
11	*Abies koreana* Wilson.	-	-	-	-	5/19	6/1	-	10/21	-	-
12	*Vaccinium hirtum* var. *koreanum* (Nakai) Kitam.	6/4	6/16	6/12	6/21	5/13	5/25	9/8	10/6	10/16	10/29
13	*Stewartia pseudocamellia* Maxim.	-	-	-	-	5/13	5/25	9/16	9/29	9/24	10/13
14	*Coreanomecon hylomeconoides* Nakai.	4/28	6/7	5/6	6/21	4/28	4/28	9/24	10/6	9/24	10/28
15	*Pinus densiflora* S. et Z.	5/26	6/21	6/24	6/30	7/10	7/20	-	10/13	-	-
16	*Weigela florida* (Bunge) A.DC.	6/4	6/16	6/24	6/21	5/6	5/25	9/16	9/9	10/8	10/13
17	*Rhododendron mucronulatum* var. *ciliatum* Nakai.	5/6	5/11	5/13	5/25	5/13	5/25	9/8	9/29	10/8	10/13
18	*Acer barbinerve* Maxim.	-	5/25	-	6/16	-	5/25	9/8	9/4	9/8	10/6
19	*Stereospus ovalis* (Ohwi) F.T.Wang & Y.C.Tang var. *ovalis*.	-	6/7	6/12	6/16	-	5/25	9/24	7/20	9/24	10/6
20	*Syringa reticulata* var. *mandshurica* (Maxim.) H.Hara.	6/4	-	6/24	-	-	5/11	10/8	9/29	10/16	10/21
21	*Rhododendron tschonoskii* Maxim. var. *tschonoskii*.	7/10	7/29	7/31	8/12	5/26	6/1	9/16	10/6	9/24	10/13
22	*Smilacina bicolor* Nakai.	-	6/7	6/12	6/16	-	5/15	7/31	7/20	8/27	7/29
23	*Abies koreana* Wilson.	-	-	-	-	6/12	6/16	-	-	-	-
24	*Acer komarovii* Pojark.	5/19	6/7	6/4	6/21	5/13	5/25	9/2	9/29	9/24	9/29
25	*Oplopanax elatus* (Nakai) Nakai.	7/10	6/30	7/31	7/20	5/26	6/7	10/8	9/4	10/16	10/13
26	*Filipendula formosa* Nakai.	-	6/30	7/31	7/20	-	5/25	9/24	9/29	10/8	10/13
27	*Acer ukurunduense* Trautv. & C.A.Mey.	6/4	6/16	6/12	6/21	5/13	6/1	9/8	9/4	9/24	9/29
28	*Picea jezoensis* (Siebold & Zucc.) Carriere.	-	-	-	-	6/12	6/16	-	10/13	-	-
29	*Rhododendron brachycarpum* D.Don ex G.Don.	6/12	6/21	6/24	6/30	6/4	6/16	-	-	-	-
30	*Rhododendron schlippenbachii* Maxim.	5/19	6/7	5/19	6/16	5/19	6/1	9/24	10/6	10/8	10/22
31	*Abies koreana* Wilson.	-	-	-	-	7/10	7/20	-	-	-	-
32	*Pinus koraiensis* Siebold & Zucc.	-	-	-	-	7/31	6/16	-	9/29	-	-
33	*Taxus cuspidata* Siebold & Zucc.	-	-	-	-	6/12	6/16	-	-	-	-
35	*Clintonia udensis* Trautv. & C.A.Mey.	-	6/7	6/12	6/16	-	5/25	9/16	10/6	10/8	10/22
36	*Betula ermanii* var. *saitoana*.	5/19	6/7	6/4	6/16	5/19	6/1	9/16	7/29	10/8	8/12
37	*Fraxinus chiisanensis* Nakai.	6/4	6/7	6/12	6/16	5/13	6/7	9/24	10/13	10/8	10/13
38	*Cardamine amaraeformis* Nakai.	-	6/1	6/24	6/21	-	4/20	-	10/6	-	10/21
39	*Rhododendron yedoense* for. *albiflora* Chang.	-	6/7	6/12	6/21	-	5/25	-	10/6	-	11/2
40	*Dendranthema sichotense* Tzvelev.	9/2	8/12	9/24	-	-	4/20	10/8	10/21	10/16	10/29
41	*Aconitum jaluense* Kom.	8/27	-	8/27	-	-	4/20	10/8	10/13	10/22	10/29
42	*Acer tegmentosum* Maxim.	-	-	-	-	-	5/26	9/16	7/29	9/24	9/4
43	*Lindera obtusiloba* Blume	-	4/14	-	4/20	-	5/25	-	10/13	-	10/29
44	*Larix kaempferi* (Lamb.) Carriere	-	-	-	-	-	5/15	-	10/21	-	10/29
45	*Lindera obtusiloba* Blume	-	4/14	-	4/28	-	5/25	-	9/29	-	10/13
46	*Larix kaempferi* (Lamb.) Carriere	-	-	-	-	-	5/11	-	10/6	-	10/13

그림 3.2 식물계절 순환 비교표(2009~2010)(신재성 등, 2011)

승구가 대조구보다 1일 빨랐다. 열매 형성시기는 CO_2 + 온도상승구가 대조구보다 4일 빨랐고, 낙엽 시기는 CO_2 +온도상승구가 대조구보다 9일 늦었다(그림 3.1).

국가장기생태연구사업을 통하여 점봉산, 남산, 월악산, 지리산을 중심으로 식물계절현상을 분석하고 기온상승과 연관시켜 미래의 지구온난화에 따른 생물행동의 변화가 예측되었다(환경부, 2007). 그 결과, 점봉산은 남산보다 5일 정도 늦은 시기에 식물계절학적 특징을 보여야하는 것으로 추정되었으나, 실제 연구에서는 겨울눈 파열시기, 개엽시기, 꽃망울 관찰 시기, 개화시기 및 낙화시기는 남산이 다른 지역에 비해 1개월 또는 보름 이상 빠른 시기에 나타났다. 이는 남산이 도심에 위치하고 있어 열섬현상에 영향을 받기 때문인 것으로 보았다.

일본, 우리나라와 같이 비교적 습윤한 기후에서는 C4 단자엽식물 종류가 많이 분포한다. C3, C4식물이 동일지역에서 생육하는 경우, 이들 종간의 온도에 대한 민감성 차이에 의해 생물계절 혹은 광합성 활성의 차이가 나타나는 것으로 보고되었다(김명현 등, 2011). C4 식물은 고온 건조한 환경에 적응한 식물로 C3 식물에 비해 기후 변화로 인해 발생하는 여름 고온 조건에 내성이 높을 것으로 보았다.

덕유산 향적봉, 중봉 지역에 분포하는 기후변화 취약식물종을 대상으로 식물계절 변화를 분석하여 이 종들의 보전에 필요한 기본 자료를 제공하였다(김혁진 등, 2011). 지리산국립공원 식물종의 생물계절에 대한 연구(신재성 등, 2011)에서 미기상을 조사한 결과 평균기온의 경우 여름철에는 세석지역의 온도가 높고, 겨울

철에는 칠선지역의 온도가 낮게 관측되었다. 상대습도의 경우 두 지역 사이의 뚜렷한 차이는 없었으나 지역별 편차가 크게 나타났다. 지표식물 모니터링 결과는 대부분의 식물에서 개화시기가 1주 ~ 1달 정도 늦어지는 경향을 보였다. 단풍 시기는 전년도와 비슷하거나 몇 주 간격으로 빠르거나 늦었으며, 낙엽 시기는 대부분의 지표식물이 2009년과 비슷하거나 1 ~ 2주 정도 늦어진 것으로 확인되었다(그림 3.2).

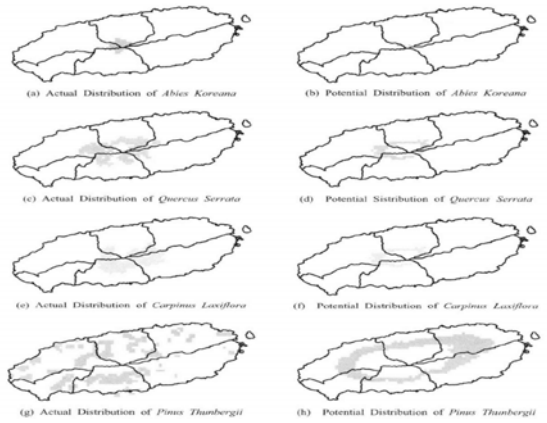


그림 3.3 주요 식물종의 기온감율에 따른 잠재적 분포와 실제분포(이상철 등, 2011)

기온감율을 적용한 온도자료와 미적용한 온도자료를 이용하여 잠재 산림분포를 예측하고 결과를 현존 식생도와 비교한 정확도 검증이 진행되었다(이상철 등, 2011). 잠재 식생분포 결과는 기온감율 적용 유무에 따라 큰 차이가 있음이 확인되었다. 적용 전의 경우 아고산 침엽수림은 강원 산간지방 일부에서만 분포하였으나, 적용 후 분포에서는 강원 산간지방, 지리산 일대, 한라산 정상부근에서 나타났다. 또한 적용 전 제주도의 경우 전 지역이 아열대림을 나타냈으나 적용 후 아고산림, 냉온대 혼효림, 온대 혼효림, 온대 활엽수림, 온난대 혼효림, 온난대 상록수림, 아열대림 다양하게 분포하는 것으로 나타났다. 구상나무, 졸참나무, 서어나무, 곰솔을 대상으로 현존식생도와 잠재 식생분포를 비교한 결과, 4가지 수종 모두 현존 식생도에서 분포 면적이 넓게 나타났으며, 정확도는 한라산 정상의 구상나무가 가장 높게 나타났고, 제주도 전역에 분포하는 곰솔은 가장 낮게 나타났다(그림 3.3).

한반도 난온대 상록활엽수는 60 ~ 70년(1941 ~ 2009년)에 걸쳐 일부 종은 분포역이 남쪽으로 이동하였으나 대다수의 종은 북으로 이동할 것으로 추론되었다(윤종학 등, 2011a). 한반도 난온대 상록활엽수 분포 예측모델의 Area Uncer the Curve(AUC)값과 AUC의 평가기준 수치를 비교해볼 때 본 모델 구축 시 각 독립변수의 공헌도가 높았음을 확인하였다. EG-model의 결과 한반도 난온대 상록활엽수의 분포 적지로써 서해안의 백령도에서 남부 내륙의 전주, 하동, 대구, 동부해안 지역의 속초를 잇는 선으로 확인하였다.

한반도 고산대, 아고산대에 분포하는 식물을 중심으로 기온 상승률에 따른 식물종별, 산지별 취약성과 잠재적 영향을 분석하였다(공우석 등, 2010). 이를 토대로 지구온난화에 취약한 산지와 취약종을 판정하고 기후변화의 영향 파악하고 기후변화 지표 후보종을 선발하였다. 아울러 종별 수평적 분포와 수직적 분포역을 지도화하고, 산지별 수직 분포역을 기온감율에 따른 고도별 기온역을 환산하여 산지 내 식물종별 분포역과 기온적 범위를 파악하였다. 최종적으로 지구온난화에 따른 기온상승률을 적용하여 단계별로 온난화가 식물종에 미칠 잠재적 영향을 분석하였다.

식물계절에 대한 현장조사를 보완할 수 있는 대안으로 위성영상을 이용하는 연구 방법이 도입되었고 위성영상을 시계열적으로 분석함으로 식물계절 변화를 파악하였다(김남신, 2011). 이 연구에서 228개의 영상을 분석하여 EVI(Enhanced Vegetation Index)값의 결과를 산출하였으며, 연도별, 고도별, 시도별, 식생군락별로 식생지수의 변화를 분석하였다. EVI에 의한 분석 결과, 2009년에 식물계절이 2005년에 비해 약 6일 정도 빨라진 것으로 나타났다. 이 외에도 MODIS 영상을 이용하여 식물계절 변화와 시·공간적 분포를 특징을 분석하였고 또한 기상청 벚꽃개화일과 대비 분석하여 영상분석을 통한 식물계절 변화에 적용 가능성을 검토하였다(김남신 등, 2013).

월귤은 한반도에서는 북한의 고산대, 아고산대, 남한의 설악산에 자라는 것으로 보고되었는데, 강원도 홍천군 내면 방내리 풍혈은 월귤의 세계적인 분포의 남한계선 중 하나이며, 가장 낮은 고도에 자라는 하한계선

에 해당한다(공우석과 임종환, 2008). 또한, 난대성 상록활엽수인 붉가시나무, 참식나무, 후박나무 3종에 대하여 한반도 분포지와 자생북한계지에 대한 연구가 수행되었다(이정현과 최병희, 2010). 이 연구의 결과는 식물구계 구분 및 기후변화 생물지표의 기초 자료로 활용되었다.

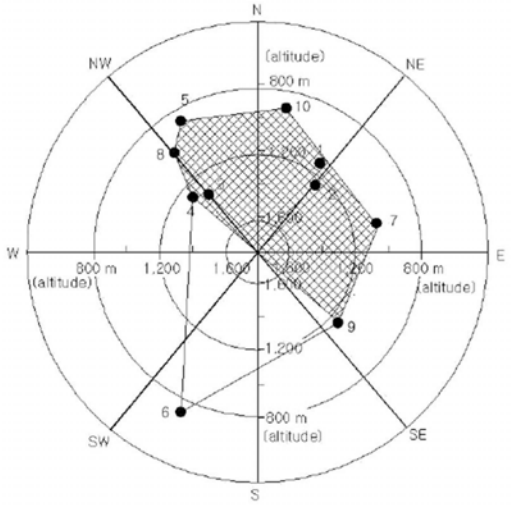


그림 3.4 한계령풀 집단의 지형적 분포, 고도, 사면 방향(이상훈 등, 2011)

월출산국립공원 일대 삼림식생을 대상으로 한 식물사회학적 연구에서 식생구조 및 수직적 분포, 환경조건과 식생구조 간의 상관관계가 분석되었다(이성제와 안영희, 2011a). 분석 결과, 지구온난화에 따른 식생의 수직적 분포변화와 식생구조의 천이 가능성이 예측되었다. 추이대 삼림식생의 식물사회학적 식생구조 분류는 Detrended Correspondence Analysis (DCA) 분석법을 통하여 붉가시나무군락, 소나무군락, 졸참나무-굴참나무군락, 졸참나무군락 총 4개의 유형으로 분류되었다.

한계령풀은 대부분 1,000 m 이상 고도에서, 경사는 약 5 ~ 17°, 낙엽층의 두께는 2 ~ 8 cm, 50% 이상의 조도, 온량지수(WI) 59.7, ± 6.3 °C·month에 분포하는 것으로 확인되었다(이상훈 등, 2011). 온량지수를 이용한 Yim and Kira(1975)의 한반도 삼림대구분으로 볼 때 한계령풀 분포는 빙기 이후 기후가 온난해짐에 따라 북으로 분포지가 이동하면서 기온이 낮은 고지에 격리되어 나타났을 것으로 추정되었다(그림 3.4).

기후변화에 따른 자생종과 외래종간의 발아율, 식물계절, 잎의 형태적 변화를 실험한 연구는 환경요인 구배를 달리하여 실험되었다(김해란과 유영한, 2010). 섬자리공이 미국자리공에 비해 낮은 발아율을 보이는 것으로 나타나 이를 통해 기후변화가 진행됨에 따라 외래종인 미국자리공이 자생종인 섬자리공에 비해 높은 발아율을 보여 분포범위가 넓어질 것으로 보았다.

국내에서 수집된 왕포아풀의 생육 특성을 조사한 결과 국내 품종은 대부분 여름철 고온다습의 피해를 많이 받는 것으로 확인되었다(심상렬 등, 2010). 이는 한지형 잔디에서 발생하는 흔한 문제로 이를 개선하기 위해서는 여름철 생육에 대한 품질 개선이 선행되어야 할 것으로 보인다.

3.2.2 동물생태

한반도에 서식하는 나비의 위도와 경도에 따른 분포현황이 연구되었다(Choi, 2004). 남한지역을 대상으로 위도와 경도를 각각 0.5°씩 나누어 만든 격자 43개에 분포하고 있는 나비자료를 1938년부터 1950년까지와 1976년부터 1999년까지 비교하였다. 우리나라 나비종은 기원이 구북구계인 종과 동양구계인 종으로 나누어지는데 나비 전체 종수는 위도가 올라갈수록 증가하는 반도효과를 나타내었고 서식지의 다양성도 나비 종수에 영향을 주는 것으로 나타났다(그림 3.5).

각 조사지역별로 나비의 분포변화를 살펴본 결과 한국전쟁 이전(1938 ~ 1950년)과 이후(1976 ~ 1999년)는 통계적으로 유의한 차이를 나타낸 것으로 나타났다. 시간 차이에 따른 종 분포 변화를 살펴본 결과 131종은 늘어나고 40종은 줄어들었으며 5종은 큰 변화를 보이지 않았다. 한국전쟁 이후 종수가 늘어난 가장 큰 이유는 샘플링 효과로 한국전쟁 이전은 채집자가 한사람인 반면 전쟁 이후는 채집자가 다수로 채집 규모가 커졌다. 샘플링의 효과가 커졌지만 5종은 오히려 분포가 크게 줄어든 것으로 나타났다. 이들은 큰수리팔랑나비(Bibasis striata), 산부전나비(Lycaeides subsolanus), 상제나비(Aporia crataegi), 시골처녀나비(Coenonympha amaryllis), 들신선나비(Nymphalis xanthomelas)로 분포가 감소한 이유는 서식지 감소가 주요한 요인이지만 기후변화

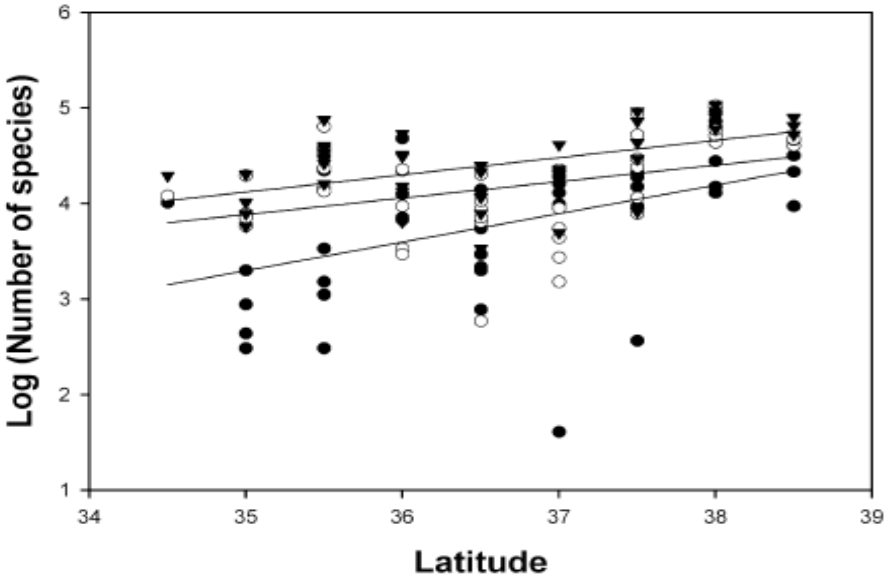


그림 3.5 한국에서 위도와 나비 종수와의 상관관계(Choi, 2004): 검정 점은 1938년부터 1950년까지의 나비분포자료를 나타내고 빈원은 1976년부터 1999년까지의 자료를 그리고 역삼각형은 두 자료를 합한 것이다. Y축은 종수로 로그로 치환한 값이다.

역시 분포의 한계선을 상승시켜 한국 내 분포 감소를 초래한 것으로 분석하였다.

경기도 광릉지역에서 1958년과 2004년에 조사한 나비자료를 비교하여 나비류의 생활주기에 지구온난화의 영향이 분석되었다(권태성 등, 2008). 나비류 조사에서는 1958년과 2004년에 총 103종의 나비류가 관찰되었으며 양 조사기간 모두 10개체 이상 관찰된 나비류는 멧팔랑나비(Erynnis montanus) 등 14종이었다. 평균 출현 시기 조사 결과로써는 지구온난화로 예견되는 나비의 출현시기가 빨라지는 현상일수는 있으나, 출현기간이 길어지는 현상을 본 연구에서는 확인할 수 없었다. 나비류의 세대수나 월동형에 따른 생활주기 변화의 차이는 나타나지 않았다.

기온상승에 따른 유달산 나비종 분포 및 출현빈도의 변화가 분석되었다(기경자와 최세웅, 2004). 이 연구결과 40종의 나비종이 분포하고 있었으며, 각 지점별 나비 개체군 변동을 관찰한 결과 고도가 낮을수록 종수와 개체군 수가 증가함을 확인하였다. 월별 종 수 변동은 M-자형을 나타내었으나 월별 개체수 변동은 8월에 가장 높은 피크를 보이는 곡선을 나타냈다.

고도별 초식곤충 섭식활동의 차이와 식물-초식곤충-조류 사이의 상호작용을 조사한 결과, 연도와 시기별로 최초 식흔 관찰시기는 다르게 나타났지만 고도가 올라갈수록 초식곤충의 활동시기가 늦어지는 것으로 나타났다(김낭희와 최세웅, 2014). 고도가 높은 지역에서는 개엽이 늦어지지만 개엽 이후 잎의 팽창은 급속하게 이루어지는 것을 확인하였다. 잎의 확장은 먹이원의 증가를 가져오지만 잎의 화학성분 변화 또한 초식곤충의 섭식에도 영향을 끼쳐 식물과 곤충간의 복잡한 상호작용을 보였다. 초식곤충의 출현과 애벌레를 먹이로 삼는 곤출박이의 산란일을 고도별로 살펴본 결과 초식곤충이 섭식활동을 시작하는 시기(피아골 15째주, 시암재 18째주, 노고단 20째주)와 곤줄박이의 첫 번째 산란일(피아골 15째주, 시암재 약 17째주, 노고단 19째주)이 거의 비슷한 시기에 일어나는 것을 확인하였다.

설문조사를 통해 우리나라의 감관총채벌레(Ponticulotrips diospyrosi)의 최초 발생 시기, 분포 확산 양상, 발생 면적을 파악하여 지역별 발생확대 추이(그림 3.6)를 파악하였다(신원우 등, 2003). 전남은 1995년부터 확대되었으며 전북은 익산에서 2001년에 처음으로 발생하였고, 경북과 충북은 각각 2000년과 2002년에, 제주도에서는 2001년에 처음으로 발생하였음을 확인하였다. 경남 지역의 경우 창원시, 김해시, 밀양시, 진주시, 마산시, 양산시, 사천시, 하동군, 창녕군,

의령군, 함안군, 합천군, 고성군, 남해군 등 14개 시군에서 발생되었으며 창원시, 밀양시가 가장 피해가 심각한 것으로 나타났다.

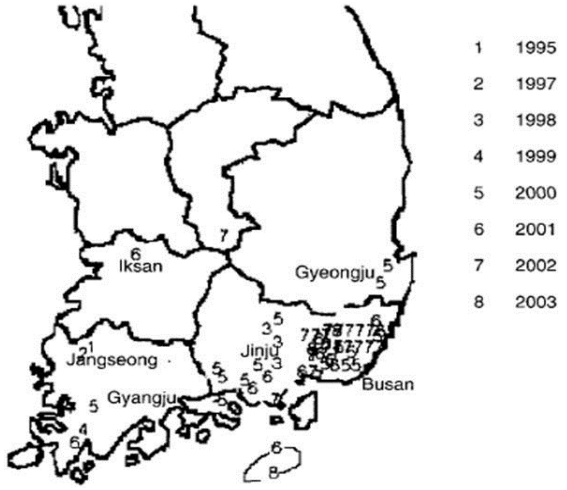


그림 3.6 다년간에 걸친 감관총채벌레에 의한 피해 지역 분포 확산(신원우 등, 2003)

기상요소와 말라리아 발생자수의 상관관계 연구(신호성, 2011)에서는 최근 3년간(2005 ~ 2007년) 시군구 말라리아 발생자수는 지속적으로 증가함을 확인하였다. 전국적으로 말라리아 발생은 일부지역에 편중되어 나타나는데 비해 서울의 경우 모든 범위에서 나타나며 저소득층 밀집지역에 비해 고소득층이 주로 밀집된 곳에서 발생하는 경향을 확인하였다.

쯔쯔가무시증의 매개체인 털진드기 개체군의 환경 및 계절별 발생밀도를 조사한 결과 털진드기 개체군의 계절적 발생양상은 2개의 정점(peak)이 나타남이 확인되었다(박원일 등, 2011). 이 연구는 보균율 검사와 종합하여 쯔쯔가무시증의 유행예측에 적용할 수 있을 것으로 보았다.

2002년대 초반 재출현한 말라리아 발생에 대한 개체군 밀도조사 및 환경인자(온도, 강수량)와의 상관관계 조사하여 효과적인 매개모기 관리를 위한 기초자료를 제공하였다(박용배 등, 2002). 모기류는 총 4속 12종이 서식하고 있는 것으로 조사되었으며 조사지역의 주변 환경의 차이에 따라 연중발생밀도가 다르게 나타났다. 특히, 일본뇌염 매개모기인 Culex tritaeniorhynchus는 조사지역 중 의정부시 송산동에서만 채집되었다.

1999년 경기북부지역의 시군별 말라리아 환자 수는 772명이었으며 파주시 > 연천군 > 고양시의 순으로 나타났다(박용배 등, 2000). 계절별로는 8월 > 7월 > 9월 순으로 발생하였으며 6 ~ 9월에 집중적으로 발생하였다. 유문등 채집 결과 중국얼룩날개 모기는 6월 > 7월 > 8월 순으로 모기수가 많았으며 말라리아 매개모기밀도도 6월(84.5%) > 7월(61.9%)로 나타났다. 말라리아 항원·항체 검사를 한 결과 파주시 탄현면(5.4%) > 가평군 하면(4.9%) > 연천군 연천읍 순으로 나타났다.

최근 5년간(2006 ~ 2010년) 대체번식지 내에서 고리도롱뇽을 모니터링 한 연구 결과(이정현 등, 2010)에 따르면 고리도롱뇽 성체들은 2008 ~ 2010년 사이에는 3월 중순경에, 2007년에는 3월 초순에 가장 많이 이동하는 것으로 나타났다.

해안사구지역과 산지지역을 조사한 결과, 표범장지뱀은 19개 해안사구지역 가운데 11개 지역에서 서식하며, 표범장지뱀이 살고 있는 지역의 식물 피도가 더 높게 나타남이 확인되었다(김자경 등, 2011). 이 연구결과, 해안사구 서식지 내에 분포하는 식물은 도마뱀의 일광욕 장소와 먹이원을 공급하는 장소가 되며 여름철 높아진 표면온도로부터 피할 수 있는 장소가 되었다.

동굴성 박쥐 7종에 대해 동면생태와 행동생태를 연구한 결과(김선숙, 2010) 동굴성 박쥐의 온도 선호도는 뚜렷한 차이를 보였고 지리적 분포에도 차이가 나타났다. 종 다양도 또한 이러한 예측과 일치하여 중부지역 이상의 고위도에서 보다 다양한 박쥐 종이 출현하는 것으로 나타났다. 또한 동면처에서 출현된 동굴성 박쥐의 종은 동면처 내부의 온도 범위와 관련이 깊은데, 저온의 동면처를 선호하는 물윗수염박쥐, 토끼박쥐, 큰집박쥐, 관코박쥐의 분포는 충북, 강원, 경북 등 고위도 지역이며 저위도 지역에서는 고도가 높은 지역에 제한될 가능성이 높은 것으로 보았다.

낙동강 하구에서 백로류의 장기적 도래 현황에 대한 연구(홍순복, 이인섭, 2010)에서는 알락해오라기, 덤불해오라기, 해오라기, 검은댕기해오라기, 흰날개해오라기, 황로, 대백로, 중대백로, 중백로, 쇠백로, 흑로, 왜가리 등 12종 12,420개체를 확인하였다. 시기별로는 1990년대 전반기에는 9월에 가장 많은 개체수가 관찰

되었으며 2000년대 중반기에는 8월에 가장 많은 개체수가 관찰된 것으로 확인하였다.

울산 태화강 하류에서 조사된 조류는 2001년 48종에서 2004년 31종으로 매년 줄어들고 있었으며 개체수 또한 연별로 최근으로 올수록 줄어드는 것이 확인되었다(이종남, 2005). 이는 당시 기후나 휴식지 및 채식지 등의 영향으로 조류는 다른 장소로 왕래하기 때문일 것으로 보았다. 긴꼬리딱새의 번식생태를 조사한 결과, 도래시기는 5월 초에서 말로, 이 시기에 번식지로 이동하여 세력권을 형성하는 것으로 확인되었다(김영호, 2011).

최근 기후변화가 동해 수온에 영향을 줌으로서 냉대성 어류인 명태 어획량 감소에 영향을 주는 것을 트랜스로그 비용함수를 이용하여 분석하였다(이윤과 김동엽, 2010). 분석 결과 해수온도가 1℉ 증가할 때에 9%의 어획량이 감소하는 것으로 확인하였고, 이는 기후변화 영향임이 명백하므로 어획량 감소 방지는 어려울 것으로 판단하였다.

3.2.3 취약생태계

국립공원 내 식물에 대한 연구로 남한의 대표적 고산지대인 지리산에서 기후변화 취약산림식물종의 조사대상종으로 구상나무, 사스래나무, 땃두릅나무, 가문비나무, 만병초, 주목, 좀고채목, 금강애기나리, 자주솜대 등 42종(기후변화 취약식물종은 9종, 특산식물 11종, 희귀식물 7종)이 선별되었다, (신현탁 등, 2010). 이 종들에 대해 개엽, 개화, 낙화 등의 생리적 시기도 함께 조사, 분석되었다.

기후변화에 취약·민감한 산림식물종의 현지 내(산림 등 자생지 내)와 현지 외(수목원 식재종) 조사지역을 설정하여 생물기후학적 연구를 통한 모니터링을 시행, 변화경향을 분석하여 미기후 차이에 따른 식물계절 변화의 상관성을 파악하였다(오승환 등, 2011). 종별로 구상나무, 전나무, 주목에 대해 연구가 실시되었다. 조사종 모두 현지내와 현지외 지역에 상관없이 2010년의 동아파열과 개엽시기 그리고 개화시기나 낙화시기를 2009년의 자료와 비교하였을 때, 동아파열과 개엽시기는 늦어졌고 개화시기와 낙화시기를 빨라진 것으로 나타났다.

국립공원 내 동물에 대한 연구로 오광식 등(2011)은 속리산국립공원 내의 송장벌레류를 대상으로 2003 ~ 2007년간 포획된 송장벌레류의 개체군 종구성과 월별 풍부도 조사에 따라 우점종과 기온, 강수량과의 연관성이 나타나는지 확인하였다. 연구결과를 통해 송장벌레류는 환경지표종으로 이용가능하며 종구성과 풍부도 변화상은 속리산의 기후변화를 간접적으로 나타내고 있음을 확인하였다.

국립공원 내 식물과 기후요소, 환경요인에 대한 연구의 일환으로 지리산과 한라산 지역에 분포하는 한반도 기후변화에 대표적 민감종인 구상나무의 서식지 입지환경을 분석되었고, 분포양상이 예측되었다(김남신과 이희천, 2013). 또한, 국립공원의 종 다양성에 대한 생물기후학적 영향을 평가하기위해 종 다양성지수와 생물기후변수자료의 단순상관분석이 수행되었다(김태근 등, 2013).

태안 학암포 해안사구 초지생태계의 미기상 상태는 산림생태계와 비교하여 상대적으로 고온 다습하며 6월과 7월에 집중 강우를 보였다(이나연과 최인영, 2013). 토양온도는 기온보다 평균 2 ~ 3℃ 높은 상태로 계절변화 하였으며 토양수분함량은 연중 10% 미만으로 매우 건조한 특성을 나타내었다. 또한 2011년 최고 풍속은 156.72 m/sec(10월 7일)를 기록하였고 현지 측정한 풍향과 기상청 자료는 상이함을 알 수 있었다.

오대산에 분포하는 분비나무의 군락구조와 동태에 대한 연구(전영문 등, 2011)의 경우 분비나무군락은 해발고도 1,300 m 이상에 분포, 남서 ~ 북서사면, 조사지 주변의 식생은 신갈나무, 잣나무, 사스래나무, 당단풍, 피나무 등이 분포하는 것으로 확인되었다. 흉고직경 5 cm 이상의 분비나무 개체수는 1,250 개체/ha로 높은 밀도를 보였으며 흉고직경 26.6 cm인 분비나무의 수령은 평균 80년으로 나타났다. 조사구별로는 연평균 연륜생장에서는 두로봉, 상왕봉, 노인봉조사구에서 각각 1.79 mm/yr, 1.55 mm/yr, 1.20 mm/yr의 순으로 측정되었다. 이는 기온상승의 영향으로 분포역 축소와 생장쇠퇴의 영향을 민감하게 받는 아고산대 식생에 관련하여 추후 기후변화와의 관련성을 연구하기

위한 기초자료로 활용이 가능할 것으로 보인다.

함경남도 금야군 룡남리 종달골에 있는 석회암동굴에서 인류화석, 석기, 짐승류 화석 등을 발견되었다(김근식과 김세찬, 1994). 룡남동굴 퇴적층에서 새로 찾은 짐승류 화석들을 감정 기재하고 그것을 통하여 퇴적층의 시대와 이 일대의 옛 기후환경을 복원하였다. 복원결과 당시 동굴주변일대의 자연지리적경관은 현재와 큰 차이가 없고 이 지역의 기후는 현재 북한 일대의 기후보다는 덜 추웠다고 추론하였다.

금옥동물상의 특징과 시대, 당시의 자연환경에 대한 고찰을 통하여 새로 5종의 짐승류 화석을 연구하여 기재하였다(김근식과 한금식, 2007). 금옥동굴유적의 짐승류 동물상은 7목 16과 21속 26종으로 구성된다. 금옥동굴유적퇴적층의 지질시대는 제 4기 갱신세 상부 중기로 추측되어, 금옥동물퇴적층 형성 시기는 따뜻한 기후로부터 서늘한 기후로, 다시 따뜻한 기후로부터 서늘한 기후로 변화하였으며 당시 동굴 주변은 산림위주의 초원 및 습지로 추측하였다.

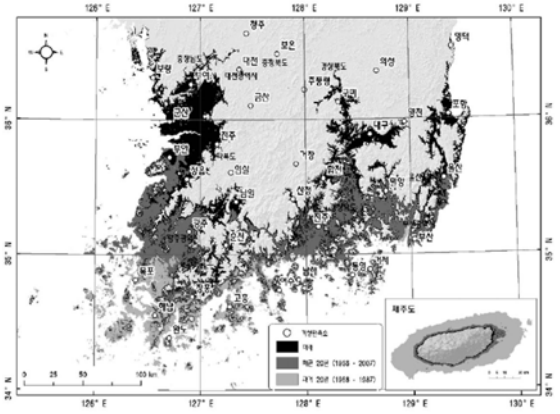


그림 3.7 난온대 상록활엽수림대의 분포 변화(박종철 등, 2010)

빙하흔적이 발견된 융빙퇴적층의 포분화석식물상 자료와 언진산 빙하시기의 기후조건과 식물상을 바탕으로 언진산 빙하시기의 자연환경을 고찰하였다(류정길, 1999). 포분학적 연구를 통하여 밝힌 언진산 융빙퇴적층 형성시기의 기후환경은 아한대성온대로부터 한온대로 넘어가는 환경으로 밝혀졌다. 당시 식물상은 한랭한 습지풀류가 기본적으로 나타나는 산간초원-혼성림군락의 특성으로 확인되었다.

기후학적방법에 의한 온난기의 기온결정을 위해 위도에 따른 기온과 주어진 지역의 태양복사 반사율과의 관계를 식을 통해 산출하였다(한종필과 김명숙, 2003). 기후학적 최량기로 볼 수 있는 B.C. 5000년의 기후는 온난(온난기)하였는데, 온난기 이전에는 현재보다 중위도의 기온이 2 ~ 3℃ 더 높았다. 온난기의 온도는 계단적으로 빙하시기보다 2 ~ 5℃ 더 높았다. 이를 기후학적 방법에 의하여 온난기의 연평균기온을 계산한 결과 현재보다 3℃ 정도 높았음을 확인하였다.

북한의 고산대 생태계에 대한 연구로 김현삼 등(1994)은 백두산 고산동결대의 식물상을 조사하여 동남쪽으로 1,900 m, 서북쪽으로 2,000 m 이상 지역에 외소저목류, 초본류, 이끼류, 지의류가 층성구조를 이루는 것을 확인하였다. 식물종류는 37과 125속 221종이고 출현빈도가 높은 과는 벼과, 사초과, 국화과, 패랭이꽃과, 버드나무과 순으로 나타났다. 구계요소는 북주극요소, 아무르 및 조중구계요소, 특유요소, 광포요소 등이 기본성분이었다. 식물상의 기후생물학적 생활형분석율을 보면 N-8.6, CH-19.1, H-51.1, G-15.8, TH-4.5, HH-0.9로서 H형이 최호적종형으로 나타났다.

일반적으로 한대성식물군락은 생활형적으로 고산왜저목군락의 군총과 고산초본군락의 군총으로 구성되며 생태환경적으로 센바람, 눈쌓임, 씻김에 의한 토양 미발달의 세기와 온도, 빛, 토양습도, 토양알갱이 조성 등의 세부적인 생태환경을 지시하는 군총들로 구성되었다(조성훈 등, 2006). 조선식물피복도에 묘사된 식물군락은 경관적으로 완성된 관모봉-차일봉형과 미완성된 백두산형을 나타냄이 확인되었다.

북한 식물의 생태에 대한 연구로 류영수와 김현일(2007)은 뽕나무 생육상태 조사지표를 품종별로 뽕눈 부푸는 시기, 뽕눈 비늘 터지는 시기, 제비부리시기, 1 ~ 5잎 피는 시기로 나누어 해당하는 시기가 최성기에 이른 날짜를 취하여 조사하였다. 기상기후조건과 뽕나무 생육과의 관계, 뽕잎 5잎 피는 시기에 영향을 주는 요인, 뽕잎 5잎 피는 시기 예측모형에 의한 봄누에 떠는 시기 결정방법을 고찰하였다.

북한과 관련된 각종 자연환경계획이나 환경모니터링에 유용한 수준의 level 3 type 토지피복도를 작성함

Region	Present	2050's			2080's		
		Min	Mean	Max	Min	Mean	Max
Korean Peninsula	851	519	4,593	30,723	0	3,461	46,010
North Korea	0	519	4,593	18,046	0	3,461	41,447
South Korea	851	0	0	12,677	0	0	4,563

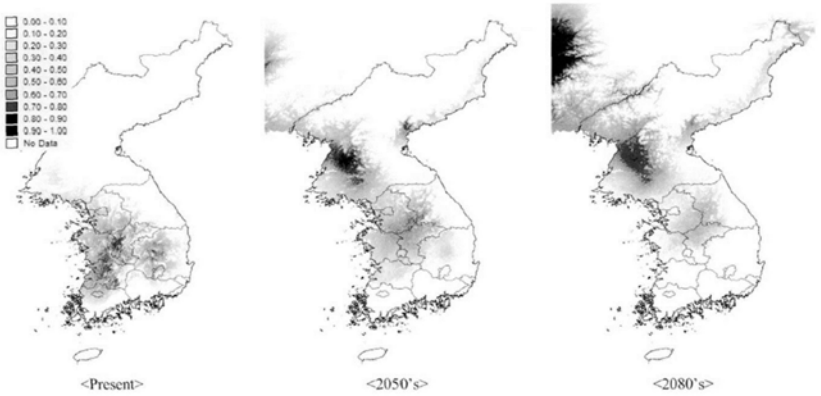


그림 3.8 GCMs 평균값의 잠재적 분포면적 변화(표)와 GCM 평균 6개 유형에 따른 잠재적 분포 예상(검은색 음영은 잠재적으로 높은 분포를 의미)(이상혁 등, 2011)

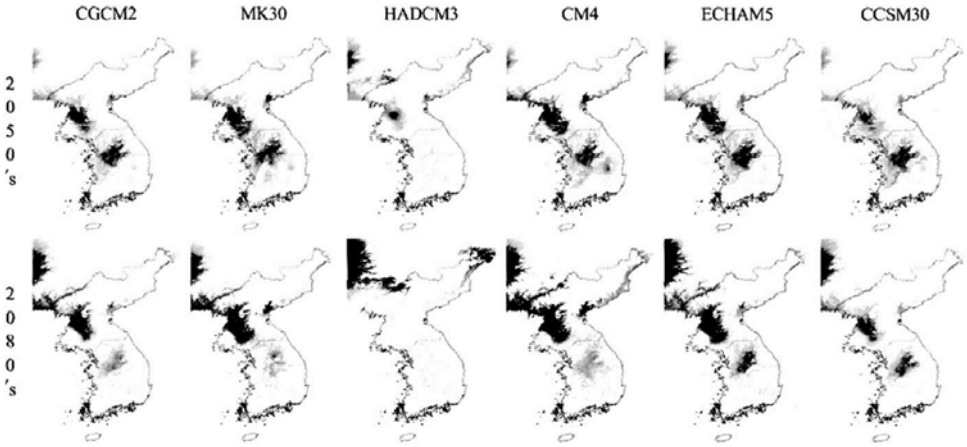


그림 3.9 GCM 평균 6개 유형을 이용한 미선나무 분포지 예상(2050년대와 2080년대)(이상혁 등, 2011)

으로 유재심 등(2011)은 생물계절 특성을 밝히고자 생물계절상을 분석하였다. 북한 전체가 27개의 서식지로 분류되어 낙엽침엽수림, 무립목지, 고산 등의 서식지 표현이 가능하였다.

3.3 영향전망

3.3.1 식물생태

현재의 식물계절과 미래의 예측를 비교하여 기후변화에 따른 식물계절의 시공간적인 변화를 분석하였다(권영아 등, 2008). 관측자료에 의한 현재 계절 시작일 및 지속기간의 공간 분포 특성을 파악하고, A1B 시나리오에 근거한 MM5 모델에서 전망한 2090년대의 자료를 이용하여 분석한 미래의 예측을 비교함으로써 계절별 시작일 및 계절 지속기간의 공간 분포 변화를 전망하였다.

난온대 활엽수림대를 파악하기 위해 온량지수(WI)를 세 시기(과거, 최근, 미래 ; 시기 구분은 그림 3.8 참조)로 구분하여 계산하고, 온량지수를 산정하여 이를 토대로 한반도 기후가 미래에 어떻게 변할지에 대해 분석하였다(박종철 등, 2010). 과거에 비해 최근 온량지수가 상대적으로 많이 상승한 기후 지역은 남해안 및 도서

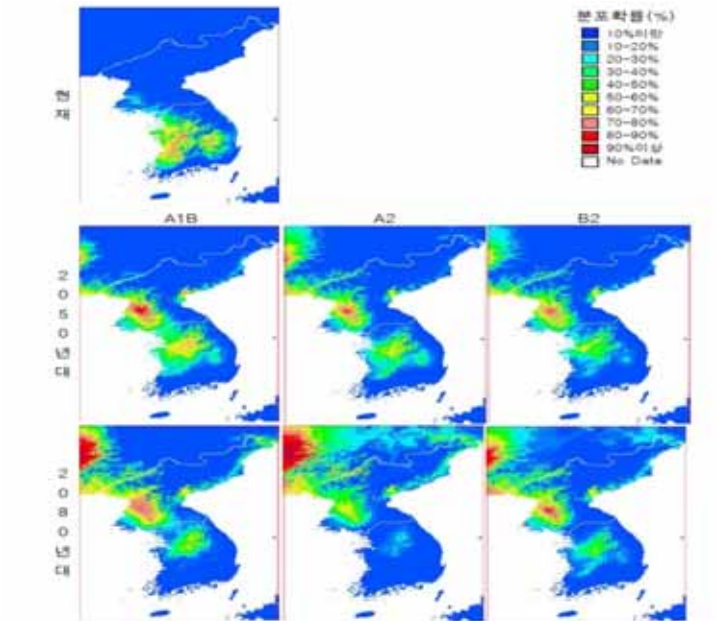


그림 3.10 기후시나리오별 미선나무 예상 분포지역(이상혁, 2011)

기후 지역 > 중부 기후 지역 > 남부 기후 지역 > 중부산지 기후 지역 순으로 나타났다. 미래의 기후 지역별 온량지수 상승은 남해안 및 도서 기후 지역 > 남부 기후 지역 > 중부 기후 지역 > 중부산지 기후 지역 순으로 나타났다. 한반도 기온이 연평균 0.5℃ 상승할 때에 난온대 상록활엽수림대의 분포는 서해안과 동해안이 80 km 정도 북상할 것으로 예상되었다. 이는 동서해안의 북상거리는 유사하나, 면적으로는 서해안 지역이 넓을 것으로 예상되었다. 제주도의 경우 난온대 상록활엽수림대는 과거에 비해 최근엔 산지 방면으로 약 2 km가 확장되고, 미래엔 최근보다 1 ~ 2 km 확장될 것으로 보았다. 고도상으로는 해발고도 약 360 m까지 분포할 것으로 예측하였다(그림 3.7).

이상혁 등(2011)은 기후변화에 따른 물푸레나무과 내 1속 1종에 해당하는 미선나무의 서식처 분포의 변화가 예측하였다. 미선나무 분포에 가장 중요한 변수는 기온으로 그 중 최저강수분기의 평균기온(75.4%) > 최고강수분기의 평균기온(6.2%) > 최난월의 최고기온(4.5%)순으로 중요도가 나타났다. 미선나무 잠재분포지의 경우 잠재적 서식가능 확률 70 ~ 80%로 분석된 지역에 현재 자생지가 위치하고 있는 것으로 나타났다. 미선나무의 잠재적 예상분포지는 남한의 경우 3가지 시나리오에서 대기대순환 모델(GCM)간 평균적으로 75% 이상의 분포적지가 모두 소멸하는 것으로 예측하였다(그림 3.8). 특히 HADCM3모델 결과를 바탕으로 한 예측에서는 미선나무의 잠재적 서식가능지역은 완전히 소실될 것으로 예측하였고, ECHAM5모델 결과를 바탕으로 한 예측의 경우 잠재적 분포가능 확률이 75% 이상인 지역은 충북, 경기도, 강원도 일부지역에서 4,563 ㎢로 분석하였다(그림 3.9).

현재 기후에서 후박나무 생육지 예측 결과 (윤종학 등, 2011b), 생육적지는 한반도 남부해안 지역, 서남부 지역의 나주, 동남부 지역의 부산, 울산, 포항 등의 해안내륙 지역, 제주도 동부지역으로 예측되었다. 기후변화에 의한 생육지 변화 예측에서는, 남한 49 ~ 51%, 북한 2 ~ 5% 면적이 증가될 것으로 예측하였다.

한반도를 대상으로 종분포 모델을 이용한 난온대 상록활엽수의 잠재 생육지 변화가 예측되었다(윤종학 등, 2011c). 이 연구에서는 현재 기후에 대한 난온대 상록활엽수의 잠재적 생육지를 예측하고, 분포 변록지, 잠재 생육지 면적을 예측하였다. 지역별 하한계선과 미래기후에 대한 잠재적 생육지 예측 결과도 확인하였다. 기후변화에 따라 난온대 낙엽활엽수림대의 북상이 예상되며, 후박나무, 구실잣밤나무, 참식나무, 동백나무 등의 난온대 상록활엽수림이 대신할 것으로 예측하였다.

홍천의 월귤은 지구온난화에 따른 기온 상승에 따라

Diseases	Meteorological factors				
	Average temperature	Maximum temperature	Minimum temperature	Relative humidity	Precipitation
Scrub typhus	-0.024	0.010	-0.041	0.054	-0.306
HFRS	-0.091	-0.062	-0.101	0.040	-0.352
Leptospirosis	0.153	0.182	0.144	0.261	-0.174
Malaria	0.881*	0.846*	0.912*	0.942*	0.966*
V. vulnificus sepsis	0.697*	0.673*	0.725*	0.814*	0.656*

Each value is the Pearson's correlation coefficient between the number of cases and monthly mean value of meteorological factor.
HFRS: hemorrhagic fever with renal syndrome.
*$p<0.05$.

그림 3.11 감염병과 기상학적 요소의 상관관계(2001~2008)(김시헌과 장재연, 2010)

생리적인 스트레스로 인한 피해가 나타나거나 다른 수종과의 경쟁에서 서식지를 잃을 가능성이 높은 수종으로 지속적인 모니터링과 다각적인 연구가 필요한 것으로 나타났다(공우석과 임종환, 2008).

우리나라의 주요 수종인 소나무, 참나무류의 측방생장량과 지형, 기후인자와의 관계 연구에서 소나무의 생장은 약 60 km까지 공간적 자기상관성이 있으나, 참나무는 없는 것으로 분석되었다(변재균 등, 2010). 또한 시간이 지남에 따라 식생 분포의 변화는 소나무에서 참나무류로 변화 가능하여, 60년 후 부터는 남부 및 동해안 지역을 중심으로 참나무류림이 소나무림을 대체하기 시작할 것으로 예측되었다.

희귀 및 멸종위기식물인 미선나무를 대상으로 현재 자생지의 잠재적 분포 가능지역 분석과 미래 서식처 분포 및 면적의 변화를 예측한 연구는 이상혁 등(2011)에 의해 이루어졌다. 미선나무 서식지에 중요도를 갖는 변수는 기온 가운데 최저강수분기의 평균기온변수, 최고강수분기의 평균기온, 최난월 최고기온으로 확인되었다. 현재 미선나무 잠재 분포지를 토대로 미래의 잠재적 예상분포지를 설정하였다.

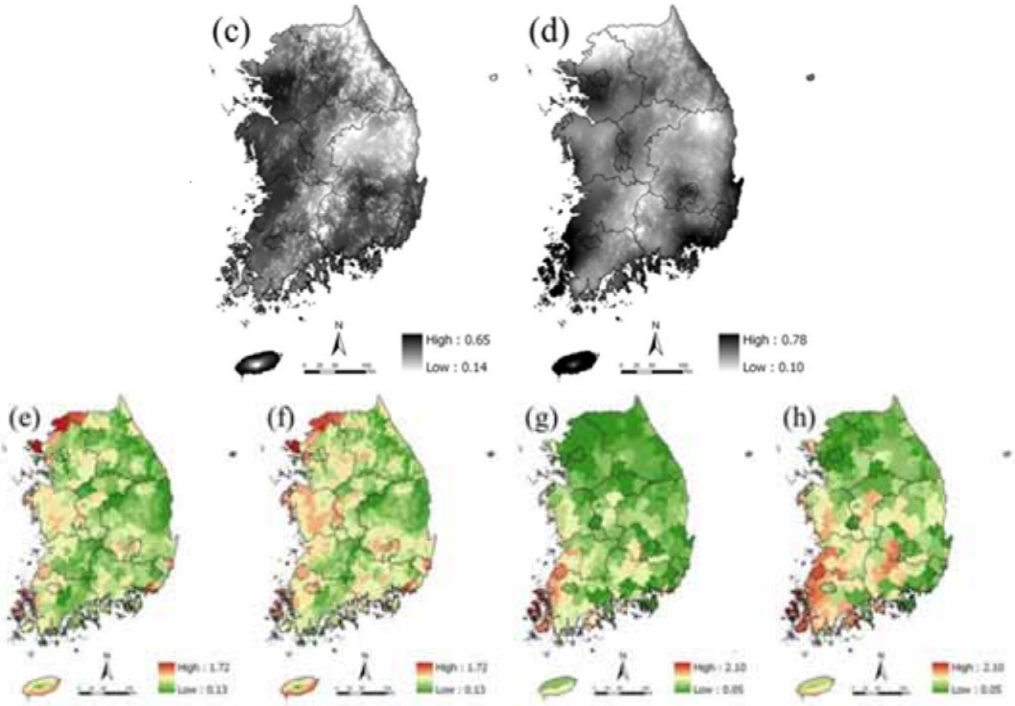


그림 3.12 표준화된 노출 지표의 공간분포 지도 c) 말라리아, d) 쯔쯔가무시증 취약성 평가 결과 지도, 폭염에 의한 건강 취약성(말라리아) e) 현재, f) 미래, 쯔쯔가무시즈에 의한 건강 취약성 g) 현재, h) 미래)(유성진 등, 2012)

한계령풀은 다른 종들과 관계에서 강하게 우점하는 군락을 형성하고 있지만 환경 변화에 영향을 크게 받을 수 있는 것으로 나타났다(이상훈 등, 2011). 종합적으로 한계령풀은 북방계식물로 빙하기 이후 기후가 온난해짐으로 인해 빙하가 퇴각하면서 수평적으로는 북으로, 수직적으로는 높은 고산에 고립된 것으로 보았다. 고산의 제한된 지역에 분포하는 한계령풀의 경우 온난화가 가속되고 인간의 활동이 증가함에 따라 서식지가 감소할 것으로 예측하였다.

3.3.2 동물생태

건강 피해에 직간접적으로 영향을 미칠 수 있는 인자들을 고려하여 자료를 통합하고, 취약성 평가를 실시하였다(유성진 등, 2012). 미래 기후 자료 및 예측자료를 이용하여 건강 취약성을 평가하고자 하였다. 말라리아와 쯔쯔가무시증에 의한 건강 취약성은 유병율이 높은 지역에 따라 지역 특이적으로 나타났으며 두 전염병 모두 미래에 취약한 지역이 확대되는 경향을 확인하였다(그림 3.11).

노린재목에 속하는 톱다리개미허리노린재를 중심으로 한 연구는 암컷 성충의 휴면을 종료시키는 데에는 장일조건, 저온 조건이 필요함을 확인하였다(허완 등, 2010). 흑다리긴노린재의 온도에 따른 발육을 실험한 결과, 이 종은 기후 변화 따라 온도가 상승하였을 때 잠재적 돌발해충이며 간척지 주변 벼 재배지역에 미질 및 수량에 문제를 일으킬 것으로 예측하였다(박창규 등, 2010).

3.3.3 취약생태계

지리산국립공원을 대상으로 사찰 주변의 식생구조 및 군락구조 분석, 환경조건과의 상관관계를 분석한 연구(이성제와 안영희, 2011b)에서는 현재 식생을 여러 개의 종류로 구분하여 현재 지리산의 사찰림뿐만 아니라 한반도의 사찰림은 기후변화에 따른 온도상승으로 인해 기후대 변화와 함께 식생구조도 변화할 것으로 예측되었다.

덕유산국립공원 향적봉 일대 삼림식생은 신갈나무, 졸참나무, 굴참나무, 들메나무, 층층나무, 소나무, 구상나무, 주목 등 소수의 수종이 최상층부의 우점종으로 분포하고 있으며, 이종들에 의하여 형성된 수많은 군락들은 식생천이 및 기후적 요인에 의하여 이지역 일대의 극상수종인 신갈나무, 서나무, 들메나무 등으로 군락 대체가 예상된다(최영은 등, 2013a). 아고산침엽수림은 기후온난화와 인위적 교란에 의하여 점차적으로 낙엽활엽수의 분포비율이 증가할 것으로 예측하였다.

덕유산국립공원 남덕유산 일대의 산림식생은 신갈나무, 들메나무, 졸참나무, 소나무, 굴참나무 등 소수의 수종들이 최상층부의 우점종으로 구성되어 있으며, 이들 종들과 관련된 수많은 군락들은 식생천이 및 기후적 요인들에 의하여 군락 대체가 매우 빠르게 일어날 것으로 보았다(오장근 등, 2013a). 따라서 이 지역 일대 잠재 자연 식생의 주요종은 산지낙엽활엽수림은 신갈나무, 산지습성림은 들메나무, 산지낙엽활엽수림과 산지습성림의 경계부에는 온도, 습도, 토양들의 요인에 의하여 서나무와 박달나무 등에 의하여 우점 될 것으로 판단하였다.

덕유산국립공원 거칠봉 일대 삼림식생은 신갈나무, 졸참나무, 굴참나무, 들메나무, 층층나무, 소나무 등 소수의 수종이 최상층부의 우점종으로 분포하고 있으며 이 종들에 의하여 형성된 수많은 군락들은 식생천이 및 기후적 요인에 의하여 이 지역 일대의 극상수종인 신갈나무, 서나무, 들메나무 등으로 군락 대체가 예상될 것으로 예측되었다(오장근 등, 2013b; 김창환 등, 2013).

적상산 일대의 산림식생은 신갈나무, 굴참나무, 소나무, 들메나무, 층층나무와 이들 종들과 혼생군락을 이루고 있는 군락들이 주요군락을 형성하고 있으며, 천이 및 기후적 요인들에 의하여 산지 낙엽활엽수림은 신갈나무, 산지습성림은 들메나무와 층층나무군락으로 천이가 진행될 것으로 예측되었다(최영은 등, 2013b).

3.4 취약성의 주요원인

3.4.1 식물생태계

기온, 토양수분, 광량 등의 환경요소가 형성층 활성에 미치는 영향에 대해서 분석하여, 수종 간의 성장 차이와 우세목과 피압목의 성장 차이를 비교하였다(박원규 등, 2000). 이 연구에서는 형성층에서 하루 동안 발

생하는 직경생장변화에 기온, 광량, 수분과 수소이온의 영향을 분석하였다. 직경생장은 4월 말 ~ 5월 초부터 급격하게 증가, 6월 중순 ~ 말경에 약간 감소하였는데, 이는 기온, 광량의 영향으로 판단하였다. 7월 중순 ~ 말에 일시적 생장의 감소는 강수량의 영향으로 보았다. 기상인자와 형성층의 활성 및 비대생장과의 관계는 기후변화에 따른 수목생장 예측자료로 활용할 수 있을 것이다.

멸종위기식물 섬시호를 대상으로 CO_2 농도와 온도 증가가 식물 생육과 분포에 광, 수분, 토성, 토양영양소 등 6가지 환경요인을 통해 어떠한 영향을 미치는지 분석하였다(정중규, 2012). 분석 결과 섬시호는 CO_2농도와 온도보다 광, 수분, 유기물에 의해 영향을 더 많이 받는 것으로 나타났다.

EG-model 구축 시 이용된 4개의 독립변수 가운데 분리공헌도가 가장 높은 것은 TMC(최한월최저기온)로 한반도 상록활엽수의 분포역을 결정하는 제 1요인으로 보았다(윤종학 등, 2011a). 이는 구경아 등(2001b)이 밝힌 겨울철 최저기온과 저온 지속기간이 난대성 상록활엽수 분포에 영향을 미친다는 연구 결과와 일치하는 측면이 많다.

3.4.2. 동물생태계

국내 쯔쯔가무시증은 1980년대 이후부터 급격하게 증가하였는데, 이는 산림녹화, 농촌인구 이동, 년 평균 기온 증가 등의 영향 때문으로 나타났다(보건복지부, 2009). 산림녹화에 따른 낙엽 채취금지는 이불효과로 진드기 서식처가 잘 보존되도록 유지하고, 숙주동물의 먹이원 증가 등을 가져왔다. 농촌인구 이동은 농촌 인구감소로 이어져 난방 및 취사용 신탄 사용량 감소, 사료용 초본류 채취 감소, 등줄쥐의 증가를 초래하였다. 결국 기후 변화에 따른 년 평균 기온 증가는 매개체 개체군의 밀도 증가를 초래하였다.

쯔쯔가무시증 환자의 시공간적 분포와 기후, 토지이용 등 환경생태요인과의 관계를 분석한 결과, 기후요소 못지않게 토지이용 변화가 쯔쯔가무시증 환자의 발생에 중요한 요인인 것으로 나타났다(공우석 등, 2007). 국내의 감염병 발생에 기후변화가 영향을 주고 있는지 분석한 결과, 가을철에는 쯔쯔가무시증, 신증후군출혈열, 렙토스피라증, 여름철에는 말라리아, 비브리오패혈증의 환자 발생이 큰 것으로 나타났다(김시헌과 장재연, 2010). 연중 다른 기간에는 환자가 발생하지 않아 이들 감염병은 계절성이 매우 강한 것으로 나타났다. 말라리아 환자발생건수는 연중 기온, 습도, 강수량의 변화 패턴과 양의 상관관계가 매우 높게 나타났으나, 쯔쯔가무시증, 신증후군출혈열, 렙토스피라증은 월별 환자발생건수가 동일한 시기의 기상요인들과 유의한 상관성을 보이지 않는 것으로 나타났다(그림 3.12).

말라리아 매개모기인 중국얼룩날개모기의 개체수가 말라리아 환자발생과의 밀접한 상관관계가 있음을 나타났다(박용배 등, 2000). 온도 증감은 모기 개체수 증감에 영향을 주고, 집중호우는 모기의 개체수 감소에 영향을 주는 것으로 분석되었다.

국내 나비전문가를 대상으로 한 설문지와 분포 자료를 이용하여 멸종위기에 처한 나비 종 20종을 선정한 후 이들 개체군이 감소한 요인을 살펴보았다(Choi & Kim, 2012). 그 결과 초지나 수변 초지를 포함한 서식지 감소, 숲으로의 천이, 지구온난화, 과도한 채집 및 공생 개미의 감소 등이 원인인 것으로 확인되었다. 멸종위기에 처한 20여종 중 지구온난화와 초지의 감소로 인하여 영향을 받는 종은 약 12종으로 산부전나비(Lycaeides subsolanus), 큰홍띠점박이푸른부전나비(Shijimiaeoides divinus), 산꼬마표범나비(Boloria thore), 여름어리표범나비(Mellicta ambigua), 봄어리표범나비(Melitaea britomartis), 산굴뚝나비(Hipparchia autonoe), 풀표범나비(Argynnis aglaja), 가락지나비(Aphantopus hyperantus), 시골처녀나비(Coenonympha amaryllis), 봄처녀나비(Coenonympha oedippus), 붉은점모시나비(Parnassius bremeri) 및 상제나비(Aporia crataegi) 등으로 확인되었다.

온대낙엽혼합림의 나방 종 다양성과 풍부도에 온도가 가장 유의한 환경요인인 것으로 나타났다(Choi, 2008). 봄이 시작되는 4월에 출현하는 나방과 이들 출현에 영향을 미칠 것으로 예측되는 단기간 기후요인과의 상관관계를 조사한 결과, 일평균온도가 가장 큰 영향을 미치는 것으로 나타났다(Choi & An, 2008).

겨울 전 기간 동안의 비교적 장기간 기상변화가 4월에 출현하는 나방에 어떠한 영향을 미치는 가를 조사한 결과, 겨울동안 내리는 비와 강한 바람이 큰 영향을 미치는 것으로 나타났다(An & Choi, 2013). 이는 겨울비와 강한 바람이 애벌레가 나무에 붙어있지 못하게 하거나 곰팡이의 확산을 높여 성충으로 우화하는 것을 낮추는 역할을 하기 때문인 것으로 보았다. 그러나, 한반도 남서부지역에서 조사한 결과 2월동안 내리는 강우량은 4월에 우화하는 나방에 오히려 긍정적인 역할을 하고 전해 12월의 기상변화는 번데기나 성충으로 월동하는 나방에게 큰 영향을 미치지 않는 것으로 확인되었다. 이러한 결과는 앞으로 겨울은 점차 따뜻해지면서 건조해진다는 예측과 연관지어볼 때 건조한 겨울은 봄에 출현하는 나방에 부정적인 영향을 줄 수 있고 나방과 연관된 식물과 상위포식자까지 연결되는 먹이사슬에 큰 영향을 줄 수 있을 것이다.

봄철 식물의 잎이 나오는 개엽은 고도가 100 m 올라갈수록 약 2.7일이 지연되는데 초식곤충의 활동시기는 식물의 개엽과 밀접한 상관관계를 보였다(김낭희와 최세웅, 2014). 고도가 상승할수록 온도 저하를 포함한 기상여건의 악화로 환경조건이 불리한 것이 식곤충의 활동시기가 늦어지는 것의 주요인으로 작용할 것으로 예상하였다.

최근 5년간(2006 ~ 2010년) 대체번식지 내에서 고리도롱뇽을 모니터링 한 연구 결과, 성체 및 산란된 알의 수와 기온, 강수량의 관계 분석 결과, 대체번식지에서의 성체 수는 연최저기온 및 겨울철 평균기온과 음의 상관관계를, 자연번식지에서 출현한 성체의 수는 겨울철 평균 강수량과 음의 상관관계를 보였다(이정현 등, 2010). 일반적으로 양서류의 경우 겨울철 평균기온이 상승함에 따라 번식지에 출현하는 개체수는 줄어들게 되는데, 동면기간 동안 온도가 상승할 경우 동면중인 고리도롱뇽들의 에너지 소모를 증가시켜 사망률을 높이는 것으로 분석되었다.

학 명	국 명	최대내성온도(℃)	서식지 변화(%)
Cottus koreanus	둑중개	26.5	-42.9
Liobgrus mediadiposalis	자가사리	27.0	-25.0
Phoxinus phoxinus	연준모치	27.0	-40.0
Oncorhynchus masou masou	산천어	27.0	-42.9
Ladislabia taczanowskii	새미	27.5	-16.7
Rhynchocypris steindachneri	버들개	28.0	-40.0
Rhynchocypris kumgangensis	금강모치	28.8	-36.4
Rhynchocypris oxycephalus	버들치	29.1	-23.7
Silurus microdorsalis	미유기	29.2	-30.0
Gobiobotia brevibarba	돌상어	29.8	-55.0
Iksookimia koreensis	참종개	30.0	-21.3
Koreacobitis rotundicaudata	새코미꾸리	30.0	-21.5
Orthrias nudus	대륙종개	30.4	-18.9

그림 3.13 조사 대상 어류의 최대내성온도 추정치 및 수온 상승에 따른 적합 서식지 감소율(정남일 등, 2010)

수온 상승에 따른 각 어류종의 서식지 변화를 유역단위에서 평가하기 위해 13종의 대상어종을 중심으로 GIS를 이용하여 공간 분석을 실시하였다(정남일 등, 2010). 어류 13종의 서식지 수온의 최저치는 0.0 ~ 2.0℃, 최고치는 27.0 ~ 32.0℃로 나타났다. 최대내성온도 추정치는 둑중개 26.5℃로 가장 낮았고, 대륙종개가 30.4℃로 가장 높게 나타났다(그림 3.13). 수온이 2℃ 상승하였을 때에 적합 서식지는 수온 상승 전에 비해 16.7 ~ 55.0%의 감소를 보였는데, 새미의 서식지가 가장 적은 영향을 받았다. 수온 상승에 따른 가장 높은 비율로 서식지가 감소하는 종은 돌상어로 분석되었다.

3.4.3. 취약생태계

한국 고유수종인 구상나무의 보존을 위한 기초자료를 제공하기 위한 연구에서 구상나무의 생장은 강수량에 가장 민감하게 영향을 받는 것으로 분석되었다(구경아 등, 2001a). 또한 구상나무의 생장과 엘리뇨-남방진동과 상관관계를 분석한 결과, 구상나무의 생장은 전년도 1월, 2월, 3월 및 11월 남방진동지수(SOI)와 양의 상관관계를 가지는 것으로 나타났다.

철원지역에서 월동하는 두루미류의 장기 모니터링과 개체군 변화에 대한 연구에서(유승화 등, 2011) 철원지역의 재두루미는 증가 양상을 보인 반면 일본 이즈미지역의 재두루미는 감소하였으며 이 두 가지 요소는

상관관계를 나타냈다. 이는 기후변화의 결과뿐만 아니라 서식지 과밀로 인해 두루미의 분산이 촉진된 것으로 판단되었다.

3.5 적응옵션

대부분 1,000 m 이상 고도에서 분포하는 한계령풀은 북방계식물로 빙하기 이후 기후가 온난해짐으로 인해 빙하가 퇴각하면서 수평적으로는 북으로, 수직적으로는 높은 고산에 고립된 것으로 보았다(이상훈 등, 2011). 이 연구에서 한계령풀의 경우 온난화가 가속되고 인간의 활동이 증가함에 따라 서식지가 감소할 것으로 보고, 이에 작은 범위를 갖는 한계령풀 집단 보호보다는 고산지역의 분포역이 넓은 집단을 전체적으로 보호하여 유전적 다양성을 보존할 필요가 있을 것으로 판단하였다.

국내 쯔쯔가무시증은 1980년대 이후부터 급격하게 증가하였는데, 이는 산림녹화, 농촌인구 이동, 년 평균기온 증가 등의 영향 때문으로 나타났다(보건복지부, 2009). 산림녹화와 농촌인구 이동은 숙주동물의 서식지의 증가를 가져와 먹이원을 증가시켰다. 또한 기후변화에 따른 년 평균 기온 증가는 매개체 개체군인 활순털진드기의 밀도 증가와 서식지의 북상을 초래하였다. 이러한 쯔쯔가무시 매개종의 확산으로 인한 쯔쯔가무시증의 확산을 막기 위하여 매개체 관리를 위한 효율적인 매개체 방제시스템을 구축해야 할 것으로 보았다.

도래현황과 둥지장소 선택환경, 둥지재료, 암수의 둥지 짓는 참여도, 탁란하는 개체, 둥지와의 거리에 따른 경계음 등에 대해 조사한 결과, 제주도의 긴꼬리딱새 서식처인 곶자왈과 하천 개발, 레져산업 발달로 인한 번식 방해 요인 증가하고 있는 것으로 나타났다(김영호, 2011). 또한, 전 지구적인 기후변화에 의한 식생변화, 지엽적인 번식방해요인에 의한 개체수 감소가 일어나고 있어 정기적 모니터링이 필요한 것으로 보았다.

한라산에서 고도별 박새류의 번식 생태에 대한 연구(강택중 등, 2011)에서는 조사지에서의 평균기온은 고도가 높아질수록 낮아졌으며, 3년간 고도가 높아질수록 기온이 낮아짐을 확인하였다. 산란일 분포의 경우 연도별로 곤줄박이는 관음사와 어리목에서 해마다 늦어졌고, 영실에서는 불규칙하게 나타났다. 박새는 관음사와 영실에서 해마다 늦어졌으며 어리목에서는 불규칙하게 나타나는 것으로 확인하였다. 이는 곧 기후변화, 해발고도의 차이는 기온변화로 이어져 조류의 직접적인 영향을 미친다는 선행연구로 볼 때 연도별 차이에 있어 장기적인 모니터링이 필요할 것으로 보았다.

수온 상승에 따른 각 어류종의 서식지 변화를 유역단위에서 평가하기 위해 13종의 대상어종을 중심으로 한 연구에서, 정남일 등(2010)은 수온 상승에 따라 둑중개, 연중모치, 산천어, 돌상어(멸종위기 야생동물 Ⅱ급 어류)의 서식지 감소 비율이 모두 40% 이상임을 보였다. 이는 생물자원의 다양성 보존을 위한 장기적인 기후변화 적응대책 수립이 필요하다는 것을 의미한다고 보았다.

3.6 결론

생태계 분야 전반에 걸쳐 기후변화 시나리오를 적용한 연구와 기후변화 전반에 걸친 연구가 식물생태(식물계절), 동물생태(곤충, 조류), 취약생태계(고산 및 아고산 생태계)를 제외한 분야는 상당히 미흡한 편이다. 현재까지의 연구물은 대부분 기후변화 적응 및 대책마련을 위한 기초자료로써 활용할 수 있는 성격의 자료가 많은 것으로 확인하였다.

식물생태, 동물생태, 취약생태계를 통틀어 모든 분야에서 기후변화 '현황'에 대한 부분은 기존에 연구들이 활발하게 이루어져 있었으나, 미래전망, 취약성, 적응대책에 대한 연구물은 최근 들어 새롭게 진행되거나 혹은 거의 미진한 상태이다. 따라서 앞으로의 한반도 전반에 걸친 생태 모니터링이나 장기조사 등이 선행된 연구가 동시에 이루어져 추가적인 기후변화 평가보고서 집필 시에 병행될 수 있을 것으로 생각된다.

현재까지의 기후변화 평가보고서의 생태계 부문은 기후변화에 따른 현상 파악과 전반적인 경향에 대한 해석 정도에 그치는 것으로 기존의 연구결과들이 기후변화와 연관된 결과물들은 다소 적고 기후변화의 기초자료의 성격을 띠는 것이 많다. 따라서 앞으로의 기후변화 관련 연구물이 추가적으로 집필될 때에 기후변화 미래전망, 취약성 나아가 적응대책 부분까지 작성가능하

며 집대성 가능할 것으로 생각된다.

식물생태의 경우 식물계절은 전국적인 장기 모니터링 네트워크를 마련하여 체계적인 관측을 할 수 있는 시스템을 구축하고, 식물들을 현지 내(in situ)에서 보전하기 위한 방안이 마련되어야 한다. 수목생장은 지역별, 생태계별, 수종별 대상을 선정하고 지속적으로 조사 연구하는 방안이 수립되어야 한다. 멸종위기종은 대상종의 기후환경에 대한 과학적인 조사, 보호 관리를 위한 과학적인 정보 구축이 필요하다. 아울러 기후변화에 따른 외래종의 도입과 확산에 대한 조사 연구가 있어야 한다. 아울러 기후변화 환경 아래서 멸종위기종을 보전하기 위한 현지 외(ex situ) 보전 대책이 필요하다.

동물생태의 경우 주로 곤충, 조류에 집중되어 있는 기후변화 영향 조사 연구를 다양한 관점에서 여러 분류군으로 확대·발전시켜 조사 연구를 다변화해야 한다. 아울러 기후변화에 따라 식물과 동물 또는 동물과 동물 사이에서 나타나는 변화를 연계하여 시스템적으로 조사 연구하는 종합적인 접근이 요망된다.

취약생태계는 생태계를 구성하는 자연환경이나 생물 가운데 일부라도 기후변화로 인하여 일단 훼손되거나 파괴되면 복구가 불가능하므로 원형을 보전하기 위한 많은 노력이 필요하다. 이를 위해서는 법적으로 보호 받는 생태계에 대한 지속적인 모니터링과 엄격한 관리가 요구된다. 기후변화나 환경파괴로 이미 손상된 취약생태계는 원형을 찾아 복원하여 생태계의 기능을 살리는 노력이 필요하다.

기후변화가 생태계에 미치는 영향을 이해하기 위해서는 장기간에 걸친 체계적인 자료가 구비되었을 때 설득력 있는 설명을 할 수 있다. 그러나 우리나라에서는 이 분야에 대한 연구의 역사가 길지 않고 생태계를 구성하는 구성요소가 수많은 식물과 동물로 구성되어 있어 생물종의 환경 특히 기후에 반응하는 것이 시간과 공간에 따라 달라질 수 있다. 더욱이 국토에서 산지가 차지하는 비중이 65%에 이르는 자연환경 조건에서 생태계의 변화가 어떤 요인에 의하여 나타나는 것인지 알기 어렵고, 생태계 변화를 야기하는 기후요소를 특정하고 기여도를 파악하기는 더욱 쉽지 않다는 한계를 가진다.

기후변화에 따른 생태계의 변화는 식물생태, 동물생태, 취약생태계에서 관찰되지만 정확히 어떤 기후요소가 어느 정도의 중요성을 가지고 관여하는지를 파악하는 것은 쉽지 않다. 따라서 기후변화가 생물종 또는 생태계에 작용하는 메카니즘을 아는 것은 쉽지 않아 제한적 동의가 현실적이다.

기후변화가 생태계와 구성요소에 미치는 영향에 대한 연구 결과는 장기간의 연구 결과들이 필요하며 대부분의 연구들이 메카니즘을 설명하는데 아직 미진한 수준으로 제한적 동의 수준을 제시할 수 있으며 신뢰도를 높이기 위해서는 추가적인 연구가 필요하다. 향후 연구자들이 전문분야별 연구 성과를 바탕으로 학제적 연구를 실시하면 생태계에 미치는 기후변화의 영향에 대한 연구의 정밀도는 향상될 것으로 기대한다.

3.7 참고문헌

강택중, 이정연, 김여호, 한상현, 김태규, 양병국, 김명진, 오홍식, 2011: 한라산 지역에서 고도별 박새류의 번식 생태, *한국조류학회지*, 18(4). 297-305.

공우석, 신이현, 이희일, 황태성, 김현희, 이난영, 성지혜, 이슬기, 2007: 쯔쯔가무시증의 시・공간적 분포와 환경생태요인, *대한지리학회지*, 42(6), 863-878.

공우석, 황태성, 김현희, 이난영, 성지혜, 이슬기, 2007: 쯔쯔가무시증 발생지 내 비오톱(biotope, 생물소서식지)의 환경생태요인, 보건복지부 질병관리본부 2007년도 연구용역사업 과제.

공우석, 임종환, 2008: 극지, 고산식물 월귤의 격리 분포와 기온요인, *대한지리학회지*, 43(4), 495-510.

공우석, 이슬기, 박희나, 2010: 지구온난화가 식물생태계에 미칠 잠재적 영향, 환경부 Ecotopia 21 과제.

구경아, 박원규, 공우석, 2001a: 한라산 구상나무의 연륜연대학적 연구-기후변화에 따른 생장변동 분석-, *한국생태학회지*, 24(5), 281-288.

구경아, 공우석, 김종규, 2001b: 한반도 상록활엽수의 지리적 분포와 기후요소, *대한지리학회지*, 36(3), 247-257.

권영아, 권원태, 부경온, 2008: A1B 시나리오 자료를 이용한 우리나라 자연 계절 시작일 및 지속기간의 공간 분포 변화 전망, *대한지리학회지*, 43(1),

36-51.

권태성, 변봉규, 강승호, 김성수, 이봉우, 김영걸, 2008: 광릉 숲 나비류의 생활주기 변화분석 및 문제점, *한국응용곤충학회지,* 47(3), 209-216.

기경자, 최세웅, 2004: 목포 유달산에서의 나비 개체군 동태에 관한 연구, *한국환경생물학회지*, 22(1), 35-42.

김근식, 김세찬, 1994: 금야군 룡남동굴유적에서 새로 찾은 짐승류화석에 대하여, *김일성종합대학학보*, 12, 85-89.

김근식, 한금식, 2007: 짐승류화석에 의한 금옥동굴유적의 시대와 자연환경연구, *김일성종합대학학보*, 7, 164-169.

김남신, 2011: MODIS 영상을 이용한 식물계절 변동의 시공간적 분포 특징, 국가장기생태연구.

김남신, 이희천, 차진열, 2013: MODIS 위성영상을 이용한 식물계절의 변화와 공간적 분포 특징에 관한 연구, *한국환경복원기술학회지*, 16(5), 59-69.

김남신, 이희천, 2013: 아고산 지역의 구상나무 분포 변화에 관한 연구, *한국환경복원기술학회지*, 16(5), 49-57.

김낭희, 최세웅, 2014: 온대낙엽수림에서 초식곤충의 계절과 고도에 따른 먹이활동 양상 연구. *생태와 환경,* 47(1), 24-31.

김도성, 권용정, 2010: 한국산 꼬리명주나비의 메타개체군 동태, *한국응용곤충학회지*, 49(4), 289-297.

김명현, 한민수, 강기경, 나영은, 방혜선, 2011: 기후변화에 따른 국내 C4 식물 목록과 분포 변화 : 고찰, *한국농림기상학회지*, 13(3), 123-139.

김선숙, 2010: 동굴성 박쥐 7종의 동면생태와 행동연구, 경희대학교 대학원 박사학위논문.

김시헌, 장재연, 2010: 국내 기후변화 관련 감염병과 기상요인간의 상관성, *대한예방의학회지*, 43(5), 436-444.

김영호, 2011: 긴꼬리딱새 (Terpsiphone atrocaudata)의 번식 생태에 관한 연구, 제주대학교 대학원 박사학위논문.

김자경, 김일훈, 라남용, 박대식, 2011: 해안사구와 산지지역에서 표범장지뱀 (Eremias argus) 서식지의 특성, *한국양서파충류연구회지*, 3, 11-18.

김창환, 오장근, 이남숙, 2013: 덕유산 국립공원 삼림식생에 관한 연구, *생태와 환경학술지*, 46(1), 33-40.

김태근, 정종철, 김의경, 조영환, 2013: GIS를 활용한 국립공원의 종 다양성에 관한 생물기후학적 영향 분석, *국립공원연구지*, 4(1), 1-6.

김해란, 유영한, 2010: CO_2 농도와 온도증가에 따른 한국특산식물 섬자리공과 귀화식물 미국자리공의 발아, 식물계절 및 잎의 형태학적 반응연구, *한국환경생태학회지*, 24(1), 062-068.

김혁진, 홍정기, 김상철, 오승환, 김주환, 2011: 한반도 아고산지대내 기후변화 취약식물종의 식물계절성 변화 연구-덕유산 정상 지역을 중심으로-, *한국자원식물학회지*, 24(5), 549-556.

김현삼, 홍영표, 1994: 백두산 고산동결대의 식물상, *생물학*, 2, 52-53.

류영수, 김현일, 2007: 뽕나무 생육진단에 의한 봄누에 떠는 시기 결정방법에 관한 연구, *생물학*, 4, 35-36.

류정길, 1999: 언진산 빙하시기의 자연환경연구, *김일성종합대학학보*, 4, 114-117.

박용배, 강정복, 방선재, 손진석, 최명순, 우진균, 2002: 경기북부지역의 말라리아 등 매개모기 활동양상에 관한 연구, *대한위생학회지*, 17(1), 1-11.

박용배, 강정복, 방선재, 조규홍, 최명순, 2000: 경기북부지역의 말라리아에 관한 역학적 연구, *대한위생학회지*, 15(1), 46-53.

박원규, 서정욱, 2000: 파이토그램을 이용한 월악산 기후요소,토양환경 및 수목생장 장기간 모니터링, *한국제4기학회지*, 14(2), 101-107.

박원일, 노종열, 신은희, 박후남, 이현주, 박찬, 신이현, 2011: 채집기를 이용한 쯔쯔가무시증의 매개체인 털진드기(Acarina : Trombiculidae)개체군의 환경 및 계절별 발생밀도 조사, 2011년도 한국응용곤충학회 춘계학술발표회.

박종철, 양금철, 장동호, 2010: 기후변화에 따른 난온대 상록활엽수림대의 이동에 관한 연구, *기후연구*, 5(1), 29-41.

박창규, 박홍현, 엄기백, 이준호, 2010: 흑다리긴노린재

[*Paromius exiguus (Distant)*] 온도발육 모형, *한국응용곤충학회지*, 49(4), 305-312.

변재균, 이우균, 노대균, 김성호, 최정기, 이영진, 2010: 중부지방 소나무와 참나무류의 반경생장량과 지형, 기후인자의 관계, *한국임학회지*, 99(6), 908-913.

보건복지부, 2009: 기후변화에 따른 건강분야 적응대책 수립방안 연구 최종보고서, 아주대학교 건강증진사업지원단.

신원우, 이규철, 박정규, 2003: 감관총채벌레(Ponticuiothrips diospyrosi)의 분포확산, *한국응용곤충학회지*, 42(3), 263-267.

신재성, 유난희, 강희곤, 신현탁, 2011: 지리산국립공원 식물종의 생물계절성 연구, *한국환경복원기술학회지*, 14(2), 47-57.

신현탁, 신재성, 유난희, 강희곤, 박은희, 2010: 지리산국립공원의 기후변화 취약산림식물종 연구, 2010년도 산림청 및 국립수목원 기후변화 취약산림식물종 보전・적응사업 연구.

신호성, 정기혜, 윤시몬, 이수형, 2009: 기후변화와 식중독 발생 예측, *보건사회연구,* 29(1), 143-162

신호성, 2011: 기상요소와 지역 말라리아 발생자수의 상관관계, *보건사회연구*, 31(1), 217-237.

심상렬, 정대영, 안병준, 김재환, 2010: 국내에서 수집된 주요 왕포아풀(Poa pratensis L.)의 생육 특성, *한국환경복원기술학회지* 13(1), 69-81.

오광식, 김도성, 조영복, 2011: 비행간섭트랩에 포획된 속리산국립공원내의 송장벌레류 종구성 및 풍부도의 계절적 변동, *한국응용곤충학회지* 50(3), 209-214.

오승환, 장정원, 변준기, 이철호, 이유미, 2011: 한반도 주요 기후변화 취약 산림식물종의 생물계절성 연구(Ⅰ), *한국환경생태학회 학술대회논문집*, 21(1), 50-53.

오장근, 김창환, 강은옥, 진유리, 2013a: 덕유산 국립공원 남덕유산 일대 삼림식생의 군락분포에 관한 연구, *생태와 환경학술지*, 46(3), 440-448.

오장근, 김창환, 이남숙, 진유리, 2013b: 덕유산 국립공원 거칠봉 일대 삼림식생의 군락분포에 관한 연구, *생태와 환경학술지,* 46(3), 449-459.

유성진, 이우균, 오수현, 변정연, 2012: GIS기반 시공간 정보를 이용한 건강부문의 기후변화 취약성 평가, *한국공간정보학회지*, 20(2), 13-24.

유승화, 이기섭, 김진한, 박종화, 2011: 철원지역에서 월동하는 두루미류의 장기 모니터링 및 개체군 변화 요인, *한국조류학회지*, 18(1), 59-71.

유재심, 박종화, 이승호, 2011: 생물계절상 분석을 통한 Level 3 type 북한 토지피복 특성, *대한원격탐사학회*, 27(4), 457-466.

윤종학, 김중현, 오경희, 이병윤, 2011a: 한반도 난온대 상록활엽수의 분포변화 및 기후조건, *한국환경생태학회지*, 25(1), 47-56.

윤종학, 중미승양, 박찬호, 이병윤, 오경희, 2011b: 기후변화에 따른 한반도 난온대 상록활엽수의 잠재 생육지 변화 예측, *한국환경생태학회지*, 25(4), 590-600.

윤종학, 나카오카츠히로, 박찬호, 이병윤, 중미스양, 2011c: 기후변화에 따른 한반도 후박나무의 잠재 생육지 및 변화예측, *한국환경생태학회지*, 25(6), 903-910.

이나연, 최인영, 2013: 태안해안국립공원 학암포 해안사구 초지생태계의 미기상인자 계절변화, *한국농림기상학회지*, 15(1), 9-16.

이상철, 최성호, 이우균, 유성진, 변재균, 2011: 기온감율을 적용한 기후자료가 잠재 산림분포 예측에 미치는 영향, *한국지형공간정보학회지*, 19(2), 19-27.

이상혁, 2011: 기후변화에 따른 우리나라 특산속식물 분포 예측, *충남대학교 대학원 석사학위논문*.

이상혁, 최재용, 이유미, 2011: 기후변화에 따른 우리나라 미선나무의 분포변화 예측, *농업과학연구*, 38(2), 219~225.

이상훈, 연명훈, 심재국, 2011: 멸종위기종 한계령풀(Leontice microrhyncha S. Moore)의 서식지 및 분포 특성, *한국환경생태학회지*, 25(6), 819-827.

이성제, 안영희, 2011a: 월출산 국립공원 추이대 군락의 수직적 분포를 통해 본 지구온난화의 영향과

금후의 천이 가능성, *한국환경과학회지*, 20(12), 1561-1584.

이성제, 안영희, 2011b: 녹지환경: 지구온난화를 고려한 지리산국립공원 구역 사찰림 식생에 관한 연구, *한국환경생태학회지*, 20(1), 474-476.

이승혁, 정중규, 조규태, 장래하, 한영섭, 유영한, 2013: CO2 농도와 온도 증가가 멸종위기식물 섬시호의 번식생태학적 특성에 미치는 영향, *생태와 환경,* 46(3), 380-387.

이윤, 김동엽, 2010: 트랜스로그 비용함수를 이용한 해수온도변화에 따른 명태 어획량 분석, *자원·환경경제연구*, 19(4), 897-914.

이정현, 최병희, 2010: 상록활엽수 3종의 한반도 분포 및 자생북한계지, *한국식물분류학회지*, 40(4), 267-273.

이정현, 김태호, 백혜준, 민미숙, 박대식, 김자경, 2010: 대체번식지 내 고리도롱뇽(Hynobius yangi)의 5년간 모니터링, *한국양서파충류연구회지*, 2, 35-44.

이종남, 2005: 울산 태화강하류의 겨울철 조류 모니터링 연구, *한국습지학회지,* 7(4), 81-89.

전영문, 안재기, 홍문표, 신정태, 원혁재, 이승호, 2011: 오대산국립공원 분비나무군락의 군락구조와 동태, *국토지리학회지*, 45(4), 559-570.

정남일, 박배경, 김경현, 2010: 수온 증가에 따른 어류 서식지 변화에 관한 연구, 한국환경과학회 2010년 정기학술발표회 논문집, 19.

정중규, 2012: 환경처리조건에 따른 멸종위기식물 섬시호(산형과)의 생태학적 반응에 관한 연구, 공주대학교 대학원 석사학위논문.

조남철, 1998: 백두산지구 고산대의 식물종구성과 분포특성에 대한 연구, *생물학*, 2, 43-46.

조성훈, 2006: 조선식물피복도에 묘사된 한대성식물군락의 생태적 특성에 대한 연구, *생물학*, 3, 48-49.

최영은, 오장근, 김창환, 2013a: 덕유산국립공원 향적봉일대 삼림식생의 군락분포에 관한연구, *생태와 환경학술지*, 46(2), 289-300.

최영은, 김창환, 오장근, 2013b: 덕유산국립공원 적상산일대 삼림식생의 군락분포에 관한연구, *생태와 환경학술지*, 46(3), 460-470.

한국환경정책·평가연구원, 2010: 기후변화에 대한 생물종의 민감성 평가방안 연구, 정책보고서.

한종필, 김명숙, 2003: 기후학적방법에 의한 온난기의 기온결정, *기상과 수문*, 3, 35-36.

허완, 손대영, 박정규, 2010: 톱다리개미허리노린재 암컷 성충의 휴면종료에 미치는 일장과 온도의 영향, *한국응용곤충학회지*, 49(2), 115-121.

홍순복, 이인섭, 2010: 낙동강하구에서 백로류(Egretta spp.)의 장기적 도래 현황, *한국조류학회지*, 17(3), 227-237.

환경부, 2007: 국가장기생태연구사업, 환경부.

An, J.S., Choi, S.W., 2013: The role of winter weather in the population dynamics of spring moths in the southwest Korean peninsula. *Journal of Asia-Pacific Entomology*, 16, 49-53.

Choi, S.W., 2004: Trends in butterfly species richness in response to the peninsular effect in South Korea. *Journal of Biogeography,* 31, 587-592.

Choi, S.W., 2008: Effects of weather factors on the abundance and diversity of moths in a temperate deciduous mixed forest of Korea, *Zool. Sci.*, 25, 53-58.

Choi, S.W., Kim, S.S., 2012: The past and current status of endangered butterflies in Korea, *Entomol. Sci.*, 15, 1-12.

Choi, S.W., An, J.S., 2008: Small-scale dynamics of moths in spring from a coniferous forest of southwestern Korea, *J. Ecol. Field Biol.*, 31, 83-87.

Choi, S.W., An, J.S., 2013: What we know and do not know about moth diversity from seven-year-monitoring in Mt. Jirisan National Park, South Korea, Jour. *Asia-Pacific Entomol.*, 16, 401-409.

Yim, Y.J. and T. Kira. 1975. Distribution of forest vegetation and climate in the Korean Peninsula, 1. Distribution of some indices of thermal climate. Japan. J. Ecol., 25: 77-88.

제 4 장 산림

4.1 서론

우리나라 산림면적은 약 6,369천 ha로 국토면적의 64%에 해당하여 다른 나라에 비해서 산지가 풍부한 편에 속하지만, 최근 도시화와 개발수요의 증대로 인한 산지전용이 해마다 증대하여 산지의 면적이 감소하고 있는 추세이다(국립산림과학원, 2012a). 또한, 우리나라의 기온 상승률(1.7℃)[1]은 지난 100년(1906 ~ 2005년)간 전 지구적 평균 기온 상승률(0.75℃)보다 높은 것으로 나타나(국립기상연구소, 2009), 우리나라 산지 기후변화에 따른 산림부문의 영향은 국토 전반에 큰 변화를 초래할 것으로 예상된다(국립산림과학원, 2011a). 이에 따라 산림청은 2011년 산림분야 기후변화 적응 시행계획을 수립하여 산림분야에서 기후변화 유발 온실가스의 저감 뿐 아니라 기후변화에 적응할 수 있는 정책을 수립하였다. 산림 분야 기후변화 적응 정책에서는 주로 (1) 산림생태계 및 생물다양성 보전, (2) 임업의 생산성 유지·증진, (3) 산림재해 예방 및 대응, (4) 산림의 공익적 기능 증진을 추진과제로 삼고 있어 우리나라에서 산림 관련 주요 현안을 확인할 수 있다.

(2,580천 ha)로 가장 넓게 분포하고 있으며, 활엽수림과 혼효림은 각각 27.9% (1,719천 ha), 30.3% (1,865천 ha)를 차지하고 있다(산림청, 2010). 그러나 2000년대 이후 침엽수림은 점차 감소하고 혼효림과 활엽수림이 점차 증가하고 있는 추세이다. 산림분포의 변화는 산림생태계, 임업 및 임업생산물 등에 직간접적인 영향을 미칠 수 있으며, 기후변화로 인해 변화가 더욱 가속화될 가능성이 있다. 따라서 기후변화를 유발하는 온실가스를 저감하는 산림 바이오매스, 탄소의 변화에 대한 연구가 집중적으로 진행되고 있다. 또한 앞으로 기후변화로 인해 평균기온상승 뿐 아니라 강우강도 및 빈도의 변화가 예상되는 가운데, 산림재해를 예방하고 미래 기후에 적응하기 위한 과학적 근거로서, 원인파악 및 미래 예측 연구가 진행되고 있다. 이번 기후변화 평가보고서에서는 기후변화에 따른 산림의 분포, 탄소량의 변화 및 산림재해로 크게 나누어 산림분야의 연구동향을 파악하고 한계와 시사점에 대하여 논하고자 한다.

1차년도 기후변화 평가보고서에 따르면 산림분야의 연구는 산림생태계 및 생물다양성 보전, 임업의 생산성

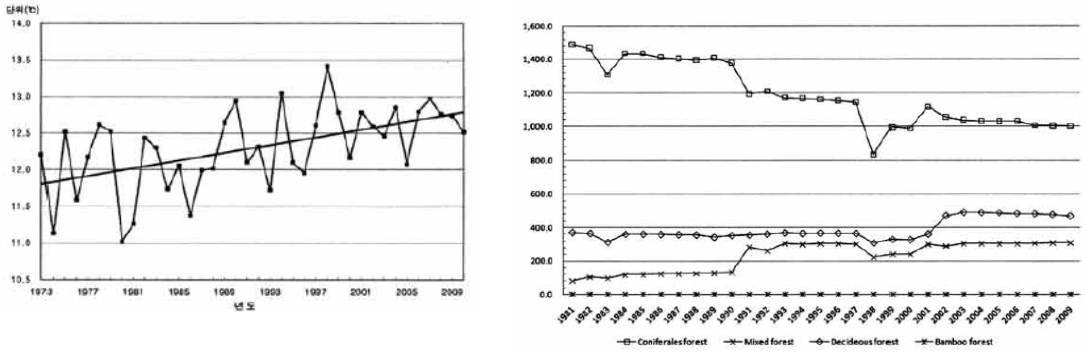


그림 4.1 (좌) 충남 공주지역 연평균기온 변화(1981~2009), (우) 충남 공주지역 임상변화(1981~2009)(김장수 등, 2012)

우리나라의 산림은 1970년대 이후 침엽수 위주의 치산녹화사업으로 인하여 침엽수 면적이 전체의 41.8%

유지·증진, 산림재해 예방 및 대응, 산림의 공익적 기능 증진 측면에서 이루어지고 있다. 최근의 급속한 기후변화로 인해 산림생태계의 생물다양성과 생태계 서비스 기능이 크게 영향 받을 것으로 예상된다.

산림분포와 관련된 전반적인 연구에 따르면 연평균

1) 우리나라 통계에 쓰인 자료는 주요 6개 도시(서울, 인천, 강릉, 대구, 목포, 부산)의 1912-2008년 평균 자료이며, 전 지구 자료는 1906-2005년 평균이 사용되었음.

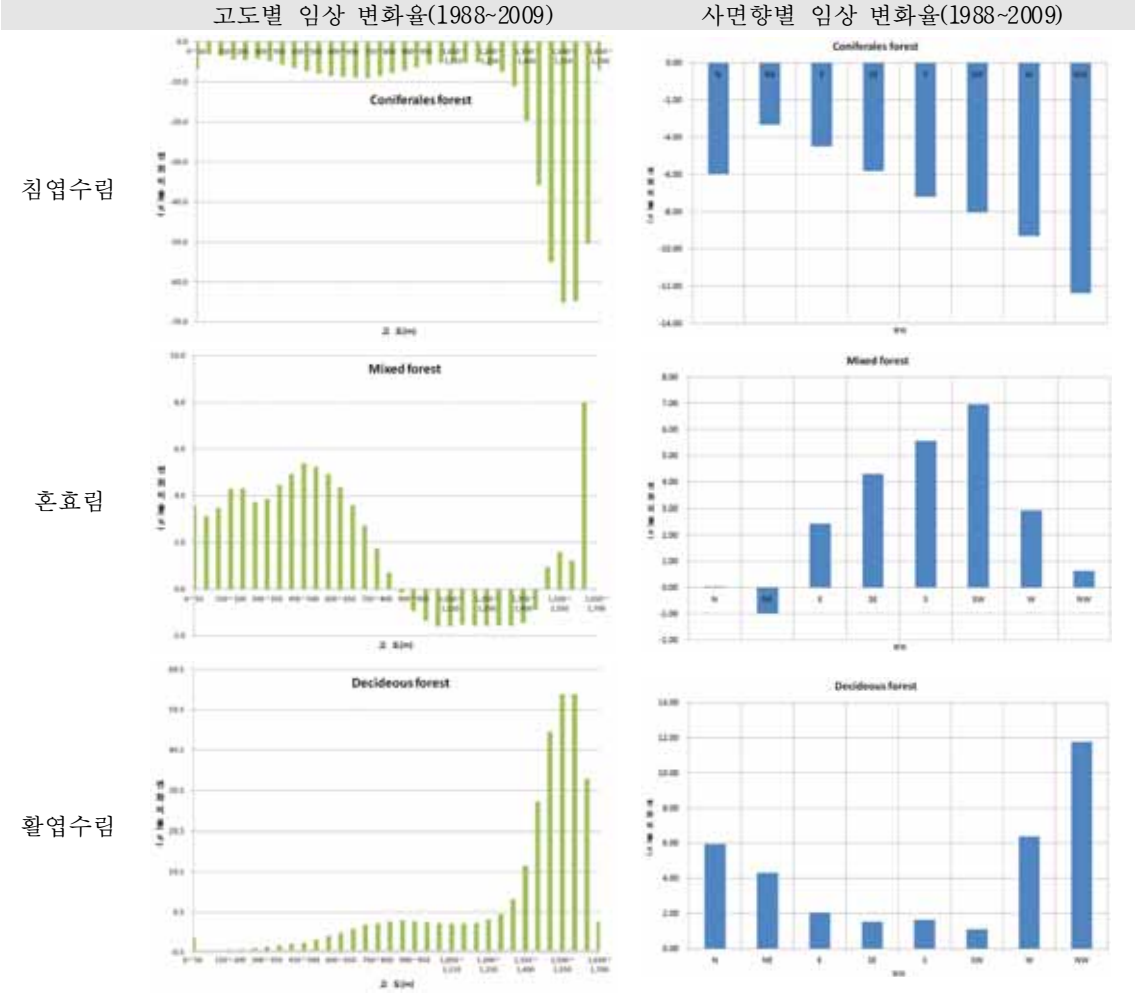


그림 4.2 1988~2009년의 산림고도(좌) 및 사면향(우)별 임상 변화(김성훈와 장동호, 2013)

기온 상승은 특정 수종의 감소 및 증가, 개화시기 변화 등 산림 분포에 영향을 미치고 있는 것으로 나타났다. 우리나라에서는 국립산림과학원, 국립환경과학원, 기상청 등에서 장기 생태연구와 모니터링, 생물계절 관측을 수행하며 일부 수종의 고사 및 쇠퇴, 산림재해와 새로운 병해충 발생의 증가 등에 대한 영향을 분석하고 있다. 연구 결과에 따르면 지구온난화로 인한 겨울철 고온 및 수분 스트레스 증가 등으로 구상나무와 같은 일부 상록침엽수종은 고사하거나 쇠퇴하는 현상이 관측되고 있다. 높은 온도에서 경쟁력 있는 수종은 북상하면서 전체 산림 구조 및 면적을 변화시킬 것으로 예상된다. 또한 산림과 농경지의 감소가 나타날 것으로 예상된다(이동근 등, 2010a).

기후변화와 산림탄소에 대한 연구는 REDD+ 논의로 인하여 탄소저장량을 국가단위에서 파악하고 관리하기 위하여 지역별, 수종별, 영급별 등으로 상세하게 파악하고자 하는 노력이 지속적으로 이루어지고 있으며(산림청, 2010), 산림의 공익적 기능중 하나인 산림의 탄소축적을 지역별, 임상별로 추정하는 연구가 많이 진행되었다. 추정방법으로는 현장조사, 실험, LiDAR, 위성영상, 과정기반모델, Flux타워 등이 활용되고 있다. 전반적인 연구 결과에 따르면 산림의 탄소저장량은 기후변화에 따라 감소할 것으로 예상된다.

기후변화와 관련한 국내 산림재해연구는 주로 산사태와 산불에 집중되어 있다. 기후변화와 관련한 산림재해는 여름철 집중폭우에 의해 산지토사 재해가 우려되며 연료 증가 및 지역별 강수량 차이 등으로 일부 지역의 산불 발생 위험이 높아질 수 있는 것으로 나타났다. 산사태와 관련된 최근의 연구는 주로 산사태를 유발하는 주요한 원인과 사건과의 상관관계 분석에 집중하고

있는 것으로 나타났다. 산사태의 주요 원인으로는 강우정보, 지형학적 특성, 토질, 식생정보 등이 분석에 사용되었다. 산불의 경우는 대부분의 산불 연구가 원인파악 및 예방에 집중되어있음을 확인할 수 있다(원명수 등, 2011b). 산불의 원인으로는 대기 중 낮은 습도와 높은 온도, 산림 내 건조한 낙엽 등으로 분석되었다(원명수 등, 2011a).

산림 병충해와 관련해서는 연구가 많이 이루어지지 않고 있었으며, 대부분의 연구가 현황 조사에 치중되었다. 최근 우리나라에서의 산림 병충해 발생 상황은 한대성 병해충의 감소, 아열대성 병해충의 지속적 유입·확산·정착, 이상기상현상에 의한 특정 병해충의 돌발적 대발생 등으로 크게 요약할 수 있으며, 일부 곤충의 생활주기를 변화시킴에 따라 산림해충의 활동을 증가시켜 산림생태계에 부정적인 영향을 끼칠 수 있는 것으로 나타났다.

4.2 관측된 영향

4.2.1 산림분포

우리나라 산림분포에 대한 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 연구 결과, 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 영향 조사 결과, 기온이 상승할수록 저지대에 분포하는 침엽수림보다 고지대의 침엽수림이 더 큰 영향을 받는다는 것을 확인되었다(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

표 4.1 식생의 연간 탄소변화량 현황

대상지역	범위	연간 탄소변화량(tC/ha/yr)	출처
남한 전체 (NPP)	A+B(혼효림)	7.03	홍지연 등(2011)
	A+B(침엽수)	7.06	
	A+B(활엽수)	6.98	
남한 전체 (NPP)	A+B(전체 식생)	5.89	유성진 등(2012)
	A+B(상록침엽수림)	6.56	
	A+B(낙엽활엽수림)	5.00	
	A+B(혼효림)	6.15	
남한 전체 (총 변화량)	A+B(전체)	3.32	Lee et al. (2014)
수도권 (NPP)	A+B(전체)	6.02	권선순 등(2012)
충남 공주	A+B(잣나무림)	8.79	강길남 등(2010)
	A+B(낙엽송림)	11.42	
광릉숲	A+B	6.04	임희정 등(2010)

A : 지상부 식생 탄소, B : 지하부 식생 탄소

표 4.2 식생의 탄소저장량

대상지역	범위	탄소저장량(tC/ha)	출처
충남 공주	A+B (잣나무)	103.38	강길남 등(2010)
	A+B (낙엽송)	96.59	
강원 춘천	A+B (침엽수)	107	서환석 등(2012)
	A+B (잣나무)	124	
	A+B (활엽수)	127	
경기 시흥	A+B (혼효림)	193.19	위광재 등(2011)
전북 무주	A+B	149	임종수 등(2009)
충북 단양	A	38~46	유수홍 등(2011)
충북 단양	A	52.13~53.29	박현주 등(2012)
전국	A+B	75.0	Lee et al. (2014)

A : 지상부 식생 탄소, B : 지하부 식생 탄소

추세를 확인하였다(김장수 등, 2012).

강원도 산지지역을 대상으로 임상변화를 확인한 결과, 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).

4.2.2 탄소

4.2.2.1 산림 탄소저장량

과거부터 현재까지의 탄소저장량 변화를 확인하기 위해 식생과 토양탄소로 세분하여 연구가 진행되고 있다. 식생은 지상부와 지하부로 나뉠 수 있으며 토양은 지상부유기물과 토양내부(0 ~ 30 cm)로 구성된다. 횡성지역 천연 소나무와 참나무 순림 및 혼효림의 탄소저장량을 추정한 연구에서 임상 간 식생, 토양, 낙엽층, 고사목 탄소저장량 등을 측정하였는데, 생태계 내 총 탄소저장량은 순림보다 혼효림에서 낮았으며 이것은 탄소저장량의 대부분을 차지하는 식생 탄소저장량이 혼효림에서 더 적기 때문이었다(이수경 등 2009). 전국적으로 다양한 지역에서 현재 산림 탄소저장량을 확인하는 연구들이 진행되고 있으며, 최근에는 토양탄소저장량 연구가 활발히 진행되고 있다.

한편 산림 탄소저장량은 수종과 임령에 따라 영향을 받는 것으로 알려져 있다(Noh et al., 2013). 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). 또한 잣나무와 소나무는 임령이 높을수록 탄소저장량이 증가한 것으로 측정되었고, 지상부 바이오매스 축적량과 지하부 탄소저장량을 분리하여 측정한 결과, 탄소저장량은 지상부보다 지하부에서 더 큰 것으로 확인되었다(Li et al., 2011, 2013).

식생의 탄소저장량 연구의 대상이 되는 주요 수종은 1970년대 집중적인 산림 복원에 사용된 대표수종인 잣나무와 낙엽송이다. 위 두 대표수종에 대해 충남 공주 지역을 대상으로 잣나무림(40년생)과 낙엽송림(37년생)의 탄소저장량을 현장 조사를 통해 분석한 결과 지상부 및 지하부 전체 탄소저장량은 잣나무림이 103.38 tC/ha, 낙엽송림 96.59 tC/ha로 나타났다(강길남 등, 2010). 잣나무의 평균 탄소함량은 54.31%, 낙엽송은 53.49%로 나타나 기존의 탄소전환계수 50%에 비해 구체적인 값을 도출하였다. 또한 전체 탄소저장량 중 지상부가 차지하는 비율은 잣나무림 80.5%, 낙엽송림이 82.7%로 나타나 일반적으로 알려진 온대 침엽수림과 활엽수림에서의 지상부:지하부 탄소저장량 비인 0.20, 0.24(IPCC, 2003)와 유사하게 도출된 동시에 국내 주요 수종에 대한 값을 도출하였다.

표 4.3 토양의 탄소저장량

대상지역	범위	탄소저장량(tC/ha)	출처
온대습윤지역	S	63(Low activity soil)~88(High activity soil)	IPCC (2003)
수도권	S	66.84	권선순 등(2012)
	S (침엽수)	68.81	
	S (활엽수)	66.34	
광릉숲	O+S	46.30(±4.28)	이아름 등(2009)
광릉숲 (KoFlux DK-site)	S	77.57	권선순 등(2012)
광릉숲 Sampling site	S	75.12	
광릉숲	O	9.1	임희정 등(2010)
	S	73.8	
전국	O+S	70.8	Lee et al. (2014)
	D	8.1	

S : 토양 탄소, O : 지상부 유기물(낙엽 등), D : 고사목

현장 조사를 이용한 산림 탄소 추정 외에도 위성영상을 활용한 원격탐사방법을 이용하여 간접적으로 산림현황에 대한 정보를 얻어 탄소 및 바이오매스량을 추정하는 연구들이 활발하게 진행되고 있다. Landsat 영상을 이용한 연구에서 전북 무주의 지상 및 지하부 산림 탄소량이 149 tC/ha로(임종수 등, 2009), 강원대학술림의 지상 및 지하부 산림 탄소량 118.5 tC/ha로 추정되었다(서환석 등, 2012).

이 외에도 나무의 최소 높이, 산림의 최소 면적, 산림의 울폐도 등 3차원적인 산림 정보를 획득할 수 있는 LiDAR 영상을 이용한 연구에서 경기도 시흥시 혼효림지의 탄소저장량은 193.19 tC/ha로 나타났다(위광재 등, 2011). 충북 단양에서 실시된 지상부 탄소저장량 추정 연구에서는 Landsat 영상에서 38 ~ 46 tC/ha(유수홍 등, 2011), 크리깅보간법으로 52.13 ~ 53.29 tC/ha의 결과를 나타내며(박현주 등, 2012), 연구방법과 데이터에 따라 동일 대상지의 탄소저장량이 다르게 추정될 수 있음을 확인하였다. 또한 현장 조사와 위성영상분석을 병행하는 방식으로 강원도 춘천에서 진행된 우리나라 주요 수종별 탄소저장량은 침엽수 107 tC/ha, 잣나무 124 tC/ha, 활엽수 127 tC/ha로 조사되었다(서환석 등, 2012).

최근에는 임목 내 부위에 따른 탄소저장량에 대한 연구들이 증가하고 있다. 지상부 및 지하부 탄소는 식생의 바이오매스 성장에 의해 결정되므로 지속적인 탄소저장을 기대하기 어려우나 토양탄소는 식생 바이오매스가 저장할 수 있는 양보다 더 많은 탄소를 저장할 수 있다고 알려져 있다. 토양탄소는 대부분이 지상부 30 cm 이내에 존재하며 낙엽이 이에 크게 기여하고 있으므로(이아름 등, 2009), 식생 내에서 가장 많은 생산량을 가진 잎이 토양탄소에도 기여할 수 있다는 점을 시사하고 있다.

광릉숲 내에서 임상별 토양탄소량을 확인한 결과 평균 토양탄소저장량(Soil Carbon Stock, SCS)은 침엽수림이 68.81 tC/ha, 활엽수림은 66.34 tC/ha로 나타났으며(임희정 등, 2010; 권선순 등, 2012), 활엽수림을 대상으로 한 부위별 탄소저장량은 식생이 159.3 tC/ha, 토양은 82.9 tC/ha로 나타났다(임희정 등, 2010). 또한 광릉 낙엽 활엽수림 내 고사목의 현존량(26.7 t/ha)을 탄소저장량으로 추정한 결과 13.35 tC/ha로(Yoon et al., 2011) 고사목의 탄소저장가능성도 확인하였다.

최근 국내에서 개발된 한국형 산림토양탄소모델(KFSC)을 한국 전체 산림에 적용한 결과, 식생의 평균 탄소저장량은 75.0 tC/ha, 낙엽층의 평균 탄소저장량은 12.6 tC/ha, 고사목의 평균 탄소저장량은 8.1

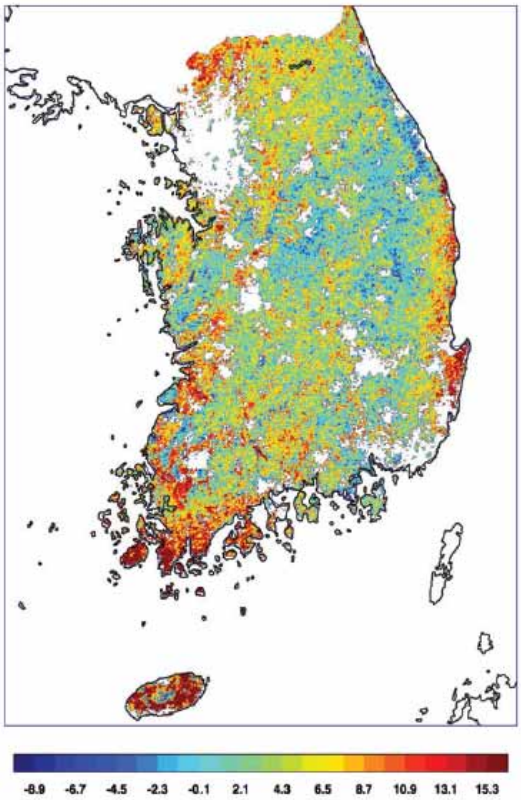


그림 4.3 2000~2006 남한 NPP 변화(MODIS)(홍지연 등, 2011)

tC/ha, 토양층의 평균 탄소저장량은 58.2 tC/ha 등으로 나타났다(Lee et al., 2014). 우리나라의 결과를 IPCC(2003)에서 제시하고 있는 온난습윤지역(temperate moist region)과 비교했을 때 토양풍화정도에 따라 63 ~ 88 tC/ha로 대부분 일치하는 것으로 나타났다.

년 대비 68.0% 증가하였으나 2010년 대비 2.1% 감소하였다. 산림의 임목축적량은 꾸준히 증가하고 있으나, 신규 조림대상지가 거의 없으며 산림이 타용도로 전용되었으므로 산림 면적이 감소하여 흡수원의 감소요인으로 작용하고 있다(온실가스종합정보센터, 2014). 국내 연구들에서는 탄소변화량을 도출하기 위해 주로

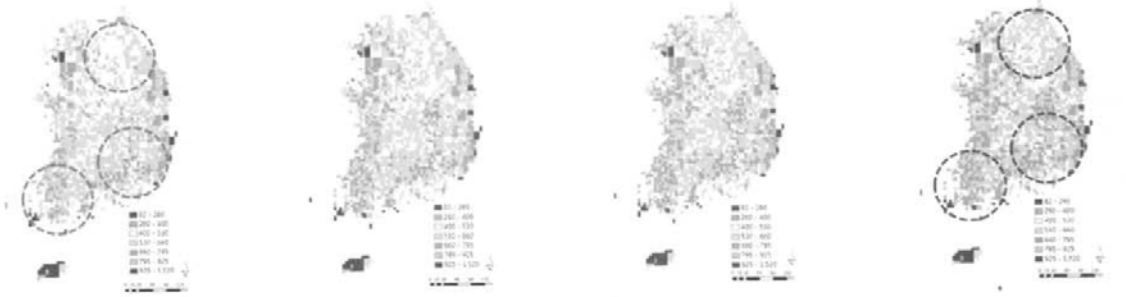


그림 4.4 미래(2030~2100) 기온변화에 따른 NPP 추정(이동근 등, 2010b)

4.2.2.2 산림 탄소변화량

산림의 탄소 흡수는 1990년부터 조금씩 감소하다가 1995년부터 점차 증가하여, 2011년의 흡수량은 1990

AVHRR, MODIS 등 위성영상을 이용한 방법이 사용되고 있었으며, 탄소변화량을 측정하는 대체지표로는 NPP(순일차생산량, Net Primary Production)를 사용하는 것을 확인하였다. 대부분의 연구는 지상부 및

표 4.4 주요 수종별 나무 한그루당 표준탄소흡수량(국립산림과학원, 2012b)

수령(년) / 수종	10	20	30	40	50	60
강원지방소나무	0.6	1.8	4.6	6.8	7.2	7.2
중부지방소나무	1.1	5.1	8.6	6.3	3.8	2.5
소나무(평균)	0.9	3.5	6.6	6.6	5.5	4.8
잣나무	1.6	8.5	12.2	13.8	13.8	13.0
낙엽송	2.4	9.0	13.4	15.5	15.8	15.3
리기다소나무	0.8	4.8	7.4	7.7	6.2	5.3
편백	2.1	4.3	5.0	5.0	4.7	4.0
상수리나무	6.6	14.1	14.6	15.5	16.2	16.6
신갈나무	1.0	5.8	7.0	9.2	11.2	12.8
참나무(평균)	3.8	10.0	10.8	12.4	13.7	14.7
전체 (평균)	2.0	6.7	9.1	10.0	9.9	9.6
침엽수(평균)	1.4	5.6	8.5	9.2	8.6	7.9
활엽수(평균)	3.8	10.0	10.8	12.7	13.7	14.7

(단위 : kgCO_2/그루/년)

지하부 식생에서의 변화량에 초점을 맞추고 있었고, 일부 토양에 관한 탄소변화량 연구가 진행 중이다.

우리나라의 연간 탄소변화량은 위성영상을 통한 NPP로 계산하였을 때 6 tC/ha로 나타났으며, 실측을 통한 연구에서는 이보다 높게 나타나 연구 자료의 범위 및 해상도에 따른 차이가 있었다. 최근에는 과정기반 모델을 적용하여 산림 탄소변화량을 예측하는 연구 또한 진행되었다(Lee et al., 2014).

남한을 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

표 4.5 주요 수종별 단위면적당 표준탄소흡수량(국립산림과학원, 2012b)

임령(년) / 수종	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
전체 (평균)	6.9	11.5	10.4	8.3	6.7	5.6
침엽수(평균)	5.8	10.0	9.8	7.4	5.7	4.6
활엽수(평균)	10.4	16.1	12.1	10.8	9.6	8.7

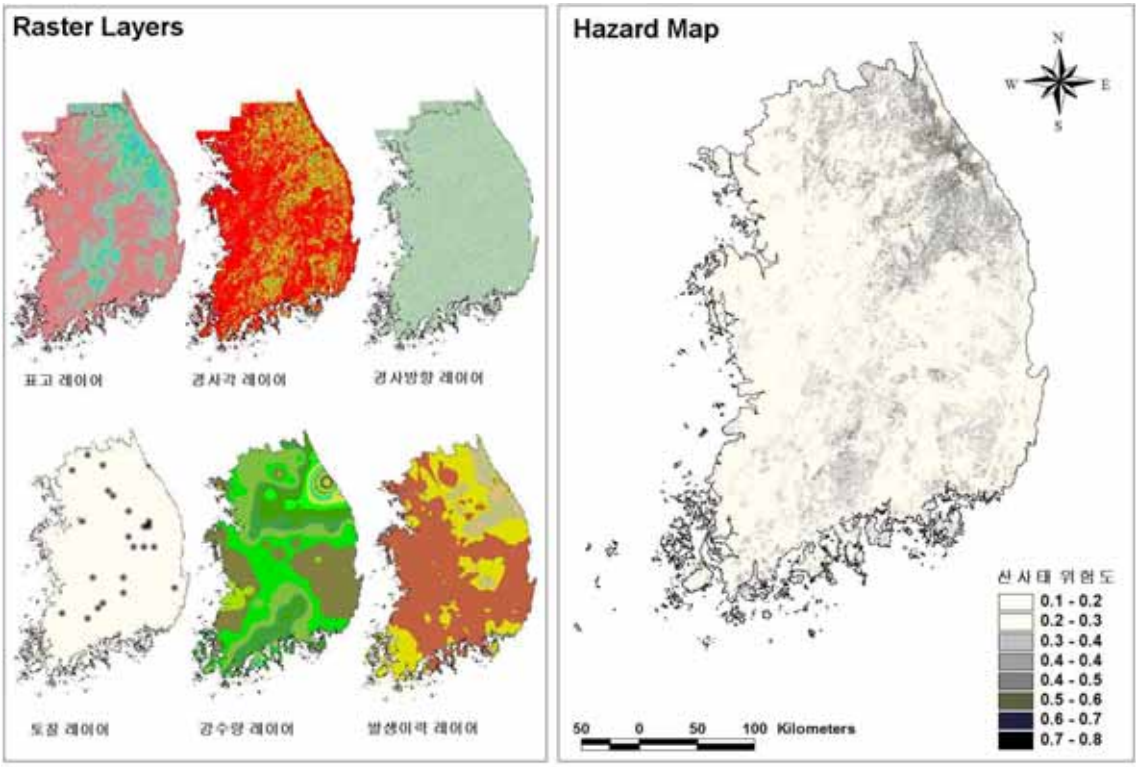
(단위 : tCO_2 /ha/년)

2000 ~ 2006년 동안 MODIS에서 매년 평균 6.08 tC/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 5.89 tC/ha/yr로 나타났다(유성진 등, 2012).

수도권 산림에서 과거 30년(1971 ~ 2000년) 자료를 이용해 모의한 산림의 순일차생산량도 평균 6.02 tC/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).

결과적으로 남한에서의 NPP는 약 6 tC/ha/yr로 나타났으며, 높은 NPP를 보이는 공간의 분포는 대부분의 연구에서 남서해안과 제주도라는 유사한 결과를 얻고 있다(이동근 등, 2010b; 홍지연 등, 2011; 유성진 등, 2012).

제5차 국가산림자원조사(2006 ~ 2010년)를 통해 이루어진 조사에서 임분수확표와 탄소전환계수를 이용하여 우리나라 주요 수종별 단위면적당 표준탄소흡수량과 주요수종 한 그루당 표준탄소흡수량이 산출되었다(국립산림과학원, 2011a). 수종별 단위면적당 표준탄소흡수량 중 대표적으로 30년생 소나무와 참나무의 연간 탄소흡수량은 10.8 tC/ha, 12.1 tC/ha으로 참나무가 소나무보다는 흡수량이 더 높은 것으로 나타났다.



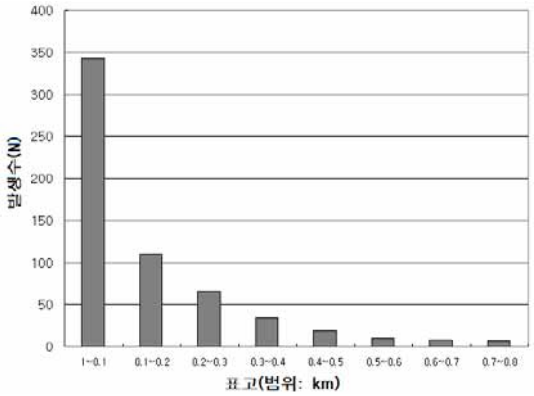
a) 자료별 위험도 인덱스 레이어 b) 산사태 위험지도

그림 4.5 산사태 위험지도 도출(윤홍식 등, 2009)

그러나 위 연구의 결과는 대부분의 위성영상을 통한 시뮬레이션 연구에서 활엽수림보다 침엽수림에서 높은 NPP를 보인 결과와 상반되는 결과를 보이고 있어 수종별 변화량에 대한 연구가 더욱 이루어져야 할 것으로 보인다.

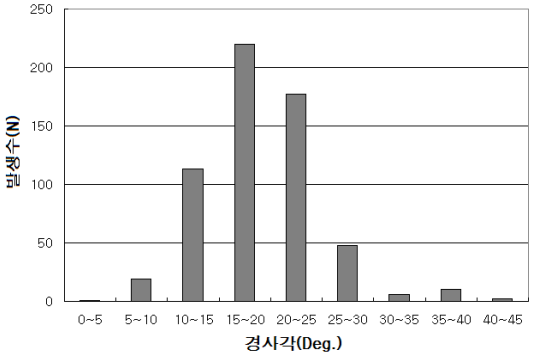
식생뿐만 아니라 고사유기물(낙엽층, 고사목, 토양)

의 탄소 변화를 추정하기 위하여 국내에서 개발된 KFSC 모형을 적용한 바 있다(Lee et al., 2014). 대규모 조림 사업 이전(1954 ~ 1973년)에는 식생과 고사유기물의 연간 산림탄소 증가율이 약 0.03과 0.12 tC/ha로 나타났으며, 이 때 한국 산림은 탄소 배출원으로 추정된다. 대규모 조림 사업 이후(1974 ~ 2013) 식생과 고사유기물의 연간 산림탄소 증가량은 약 1.75와 0.39 tC/ha로 나타났으며, 매년 약 2.14 tC/ha를 흡수하는 탄소 흡수원이 되었다고 추정하였다. 특히 2012년 한국 산림의 연간 탄소 흡수율은 4.37 tC/ha로 다른 국

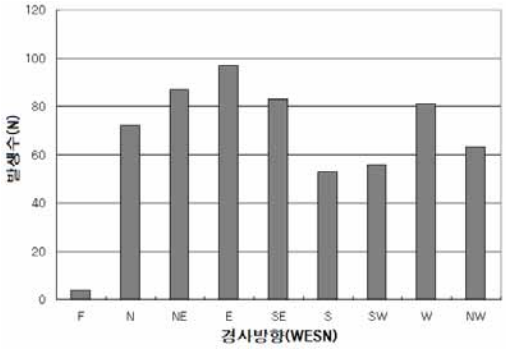


표고

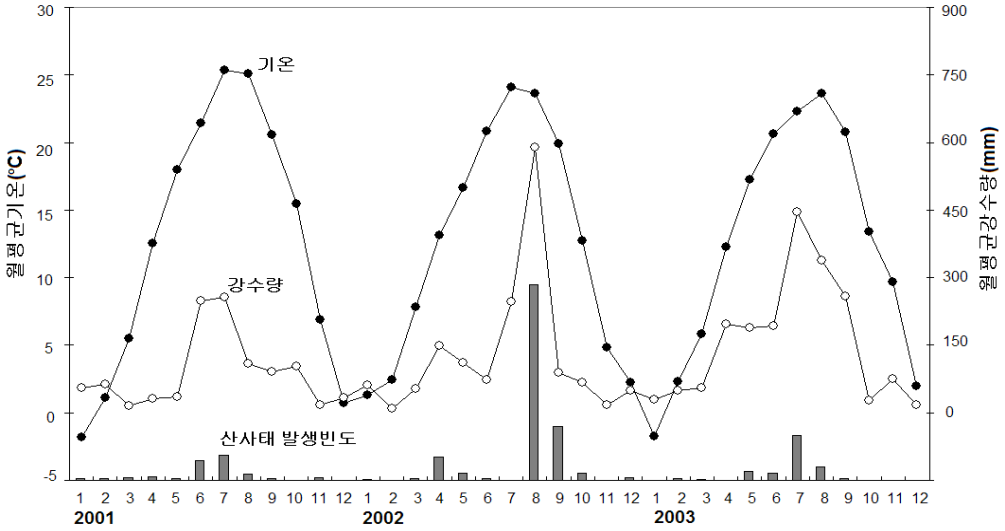
토질	특성	발생빈도
SgE2	사암토	209
JiB		48
WiE		41
OnD2		46
YaD2		39
EgB	점성토	8
ImC		4
KzE2		3
Ng		5
TaE2		2
UoB		4



경사각



경사방향



월별 평균 강수량 및 평균기온

그림 4.6 산사태 발생원인 분석(윤홍식 등, 2009)

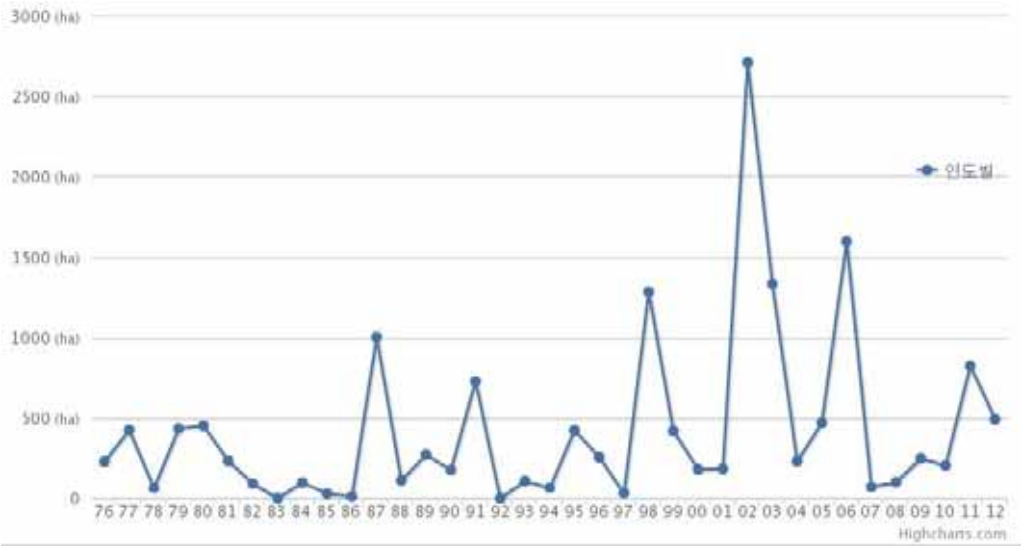


그림 4.7 1976~2012년의 산사태 피해 면적 변화(http://sansatai.forest.go.kr/)

가 산림에 비하여 높게 나타났다. 한국 산림은 1954년부터 2008년까지의 화석 연료로부터 배출된 탄소의 13.4%를 흡수한 것으로 나타났다.

4.2.3 산림재해

산림재해는 산림 생태와 산림자원을 위협하는 원인이며, 산림 생태계의 교란을 일으키는 주요한 원인이다. 특히 우리나라와 같이 홍수기와 갈수기가 반복되는 몬순 기후대는 여름철 산사태와 겨울 ~ 봄철 산불에 매우 취약하여, 기후변화로 인한 빈도와 강도의 증가로 미래에 더욱 위협적인 영향을 줄 것으로 예상된다. 이에 따라 기후변화와 관련한 국내 산림재해연구는 주로 산사태와 산불 연구에 집중되어 있다. 그러나 재해에 대한 대부분의 연구는 현재 발생에 대한 환경적 원인을 체계적으로 구축하는데 집중되어 있어 재해의 미래 전망 연구는 미흡한 것으로 나타났다.

4.2.3.1. 산사태

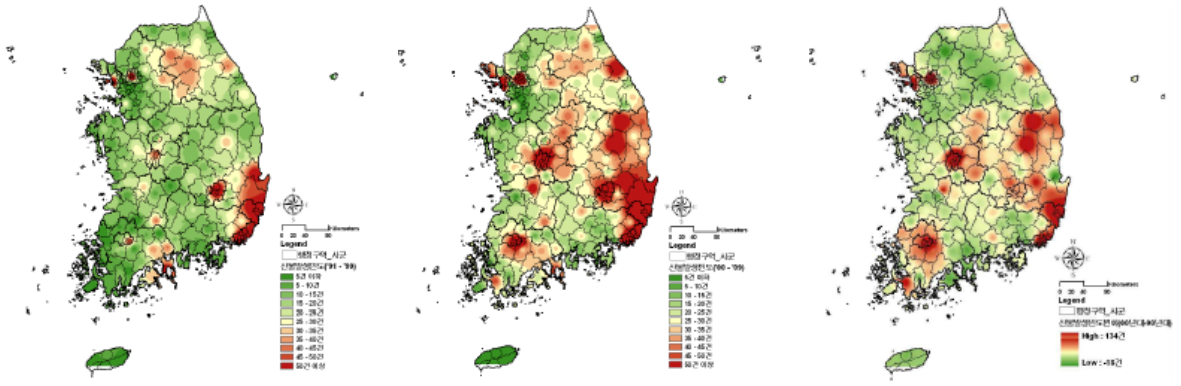
우리나라는 1970년대에 비해 2000년대 산사태 발생 면적과 복구비가 지속적으로 증가하는 경향을 보이며, 기후변화의 영향으로 산사태에 대한 취약성은 계속 증가할 것으로 예상된다(산림청, 2011). 지역적으로는 지난 10여 년 동안 강원도 및 경상남·북도의 산사태 발생 면적이 가장 넓은 것으로 나타나 앞으로도 이 지역에 대한 원인분석, 방지대책 및 기후변화 예측 연구 등이 지속적으로 이루어져야 할 것으로 보인다(산림청, 2011).

우선 산사태를 유발하는 주요한 원인으로는 지질, 토양, 토지이용현황, 강수량 등이 거론되고 있다. 산사태 위험도를 도출하기 위하여 강우정보, 지형학적 특성(사면경사, 사면형상, 사면방향), 토질(토층두께, 표토토성), 식생정보(산불발생이력, 식생종류, 식생 영급·경급)을 이용하여 산사태 발생의 기여도를 산출하고 산사태 위험도 예측식을 개발하는 연구가 진행되었다(이승우 등, 2012).

표 4.6 강우강도와 산사태 발생 위험간의 관계(김석우 등, 2012)

Average rainfall intensity (mm/hr)	Duration time for the landslide occurrence (hr)
10	48
20	24
30	12
40	6
50	3
60	2
70≤	1

2006년 여름에는 태풍 에위니아, 빌리스, 개미와 집중호우로 인해 많은 산사태가 발생하였다. 강원 인제 지역에서의 산사태 발생 후 촬영된 위성영상(SPOT5)



(a) (b) (c)

그림 4.8 산불발생 빈도 (a)1990년대, (b)2000년대, (c)1990년대 대비 2000년대 변화(원명수 등, 2011b)

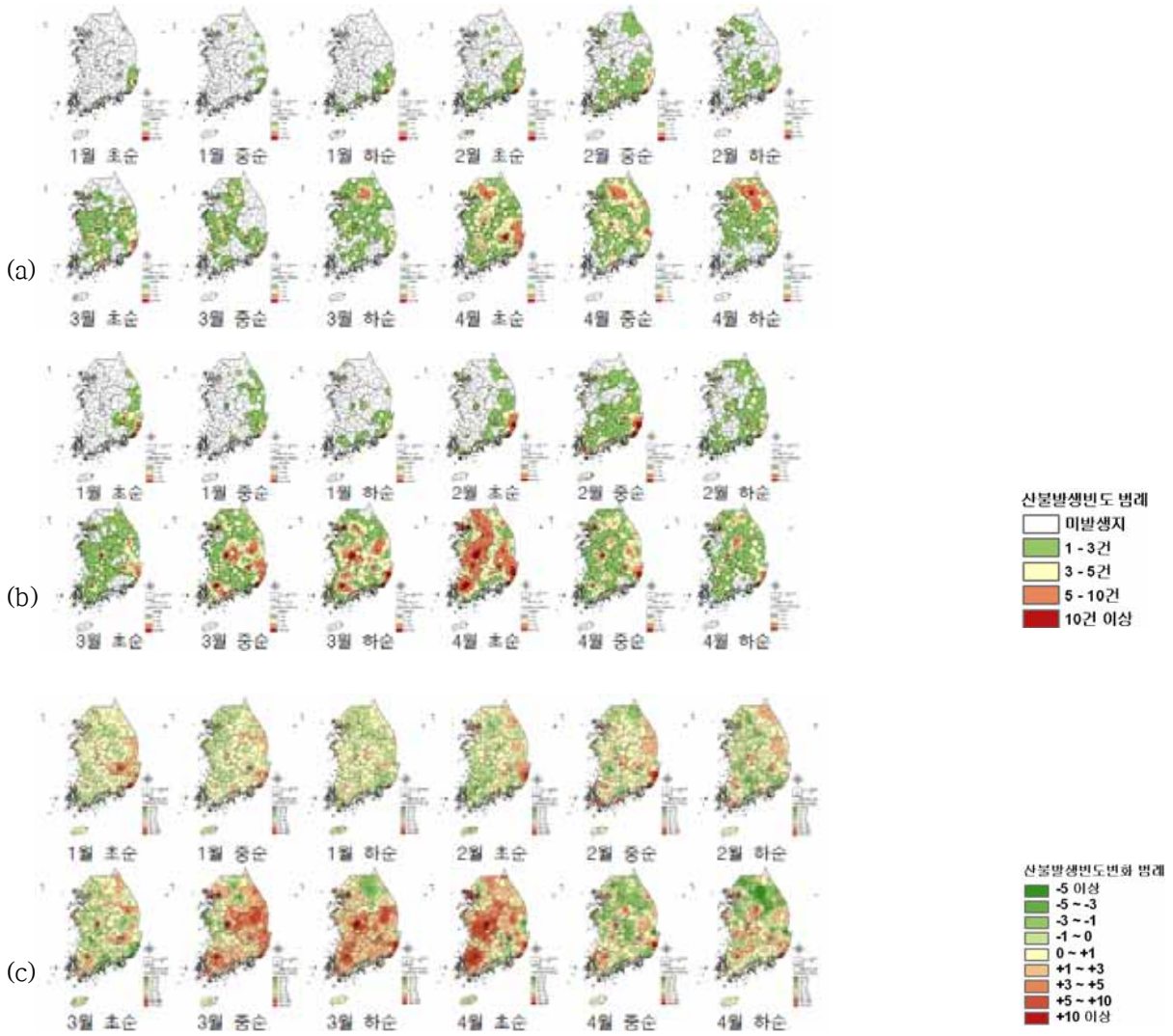


그림 4.9 순별 산불발생 빈도 (a)1990년대, (b)2000년대, (c)1990년대 대비 2000년대 변화(원명수 등, 2011b)

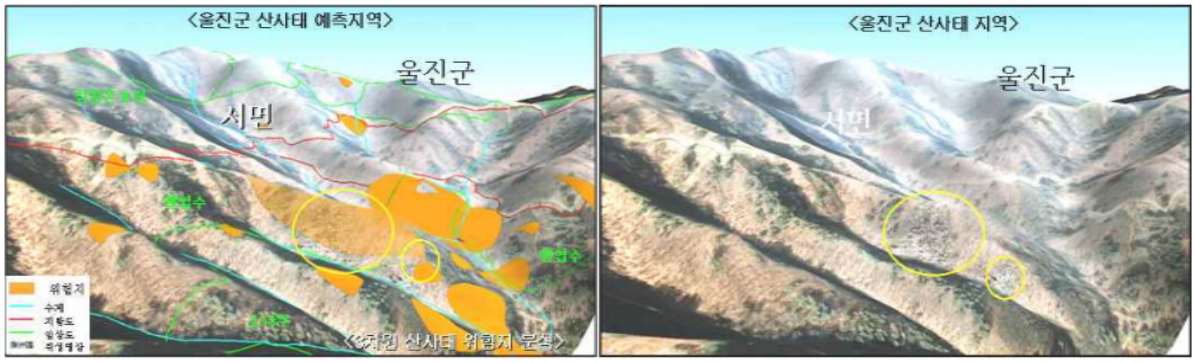


그림 4.10 울진군 산사태 예측지역과 실제 발생지역 비교(조명희와 조윤권, 2009)

을 판독하여 발달부, 유하부, 퇴적부로 디지타이징 하여 발생현황을 분석한 연구에 따르면 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 제주지역의 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 산지변형으로 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 ~ 100m, 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).

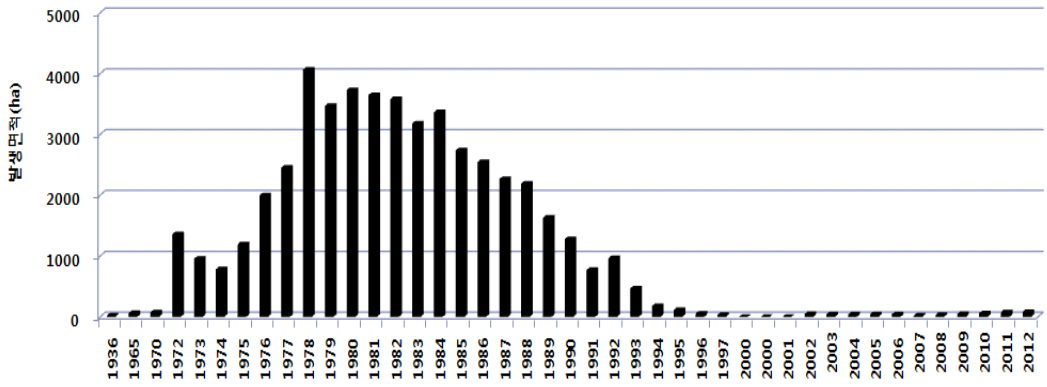


그림 4.11 연도별 잣나무 털녹병 발생 면적(ha)(최원일 등, 2012)

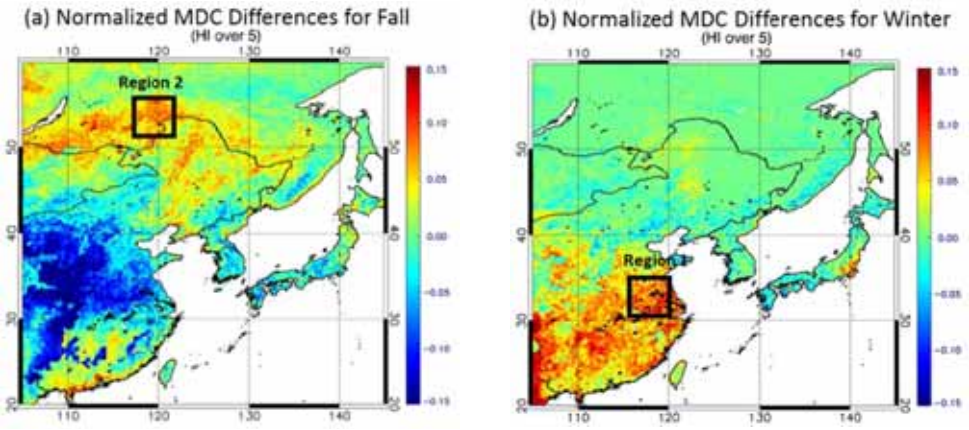


그림 4.12 가을과 겨울 미래 산불위험도의 증가 분포 예측(이미나 등, 2013)

울진 지역을 대상으로 다양한 지형인자와 기상자료를 활용하여 산사태 발생 위험지를 예측한 연구에서는 해당 지역에서 평균 강우량이 높은 지역, 흑운모화강암·편마암, 변성퇴적암과 세일을 가지는 토양도, 0.005 ~ 0.202 미만의 식생활력, 12˚ 이상의 경사도, 남·남동 사면의 경사지에서 높은 산사태 발생 위험을 나타내었으며(조명희와 조윤권, 2009) 이를 고해상도 항공사진을 통해 표현하였다.

4.2.3.2 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.

지난 20년간 우리나라의 산불 발생을 1990년대와 2000년대로 나누어 변화를 분석한 결과, 1990년대에는 주로 영남해안지역에서 빈번하게 발생한 반면 2000년대에는 대전, 호남권, 인천에서 발생 빈도가 증가하고 강원에서는 낮아지는 것으로 나타났다(원명수 등, 2011b).

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 봄

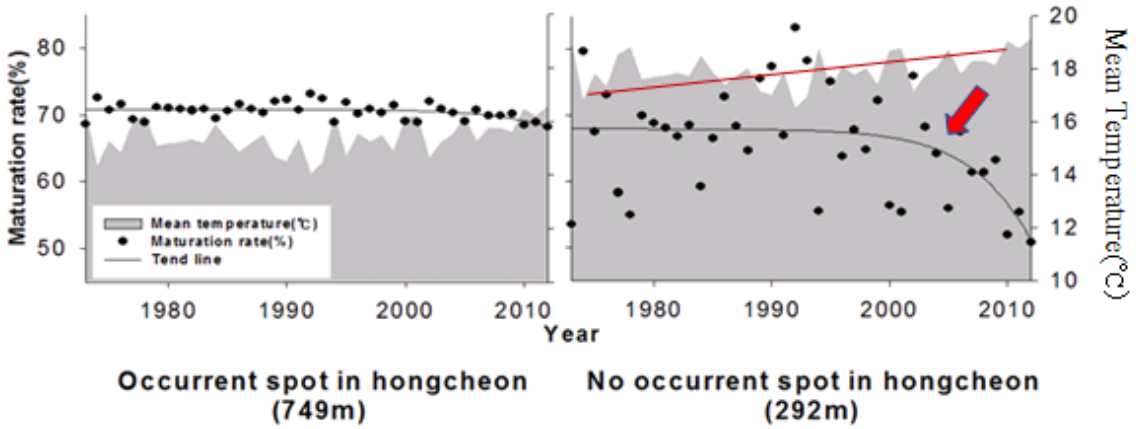


그림 4.13 온도와 자낭반 성숙율의 비선형회귀모형에 의한 시기별 잣나무 잎떨림병의 발생 추정(국립산림과학원, 2013b)

철로 접어들면서 전체적인 대기온도가 상승하지만 중부내륙지방은 건조하기 때문에 산불발생이 내륙으로 확산되는 것으로 볼 수 있다(원명수 등, 2011b).

지역기후 모형을 활용한 현재(가까운 과거)와 미래의 기후변화 모의결과를 토대로, 산불의 시공간적 특성 변화를 대기-지표간 상호작용의 관점에서 산불 위험도 평가를 위한 Haines Index(HI) 이용 연구가 동아시아 지역을 대상으로 진행되었다(이미나 등, 2013). IPCC A1B시나리오를 이용한 미래의 기후변화는 동아시아 전 지역에 걸쳐 온도가 2 ~ 3℃ 상승하고 강수량은 소폭 증가하는 것으로 나타났고, 이를 토대로 지역별 산불 위험도를 분석한 결과 미래 산불위험도가 가을과 겨울에 증가할 것으로 모의되었다(신형진 등, 2012).

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/sec 이하에서 주로 발생하였다(이시영 등, 2011).

4.2.3.3 병해충

4.2.3.3.1 산림병해

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 등과 같은 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).

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 거창조림지를 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 분포지역이 감소하고 있는 이유에 대하여 잣나무 조림지의 지속적인 감소 외에도 기후변화가 관여되어 있다는 연구 결과가 발표된 바 있다(최원일 등, 2012; 국립산림과학원, 2013b).

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 내·외의 고산지역 잣나무 어린 조림지 약 50 ~ 80ha에서만 발생하고 있으며, 피해 본수는 매년 감소하고 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 중·북부 지역의 잣나무 조림지를 중심으로 약 10만 본이 고사하였으며, 2009년에는 밀양, 거제, 통영 등 남부지역 소나무 임지에서 약 1,007천 본이 고사하였다(국립산림과학원, 2008, 2010b). 극심한 집단고사가 발생하였던 2007년과 2009년 모두 2월의 평균온도는 예년 값(1971 ~ 2000년) 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, 2010b).

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 병원성이 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, 2012).

2011년에는 관측 이래 가장 추웠던 1월, 평균 강수량 대비 144%의 기록적인 여름 강우, 평균 최고 기온보다 2 ~ 6℃가 높아 일 최고기온 극값을 경신한 가을철 늦더위 등 특이기상현상이 발생하였다(기상청 보도자료, 2011). 이러한 특이 기상현상은 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, 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.

4.2.3.3.2 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

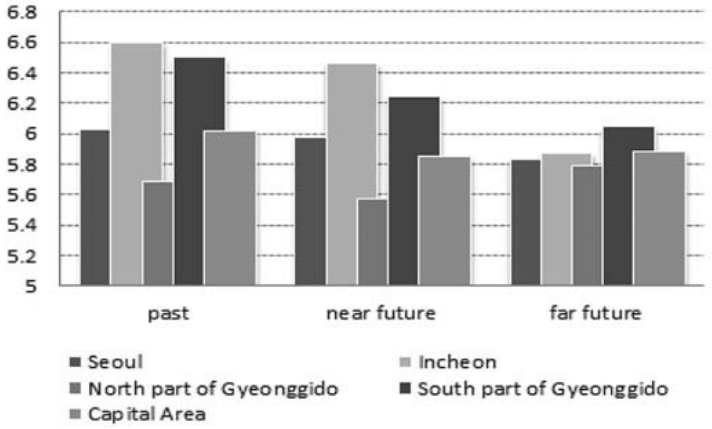


그림 4.14 과거(1971 ~ 2000), 가까운 미래(2021 ~ 2050), 먼 미래(2071 ~ 2100)의 NPP 연간 변화량(권선순 등, 2012)

영향을 받으므로 기후변화에 의한 영향이 상대적으로 빠르게 표출되는 현상이 생활사 변화이다. 산림해충을 포함한 곤충의 생활사는 온도에 의해 조절되므로 온도 상승은 곤충이 서식할 수 있는 기간을 늘리고 누적되는 열량을 증대시켜 세대수 증가를 야기한다. 다양한 국외 사례에서 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 피해면적은 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. MB지수는 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 판단한다 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 기후

변화에 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., 2011). 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 참나무시들음병 발생에 영향을 미쳤음을 보여주는 예라고 판단된다.

2010년 경북 영양 약 10 ha 잣나무 임지에서는 1,300여 본의 잣나무가 고사했다. 영양 인근지역에서 솔여섯가시나무좀 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

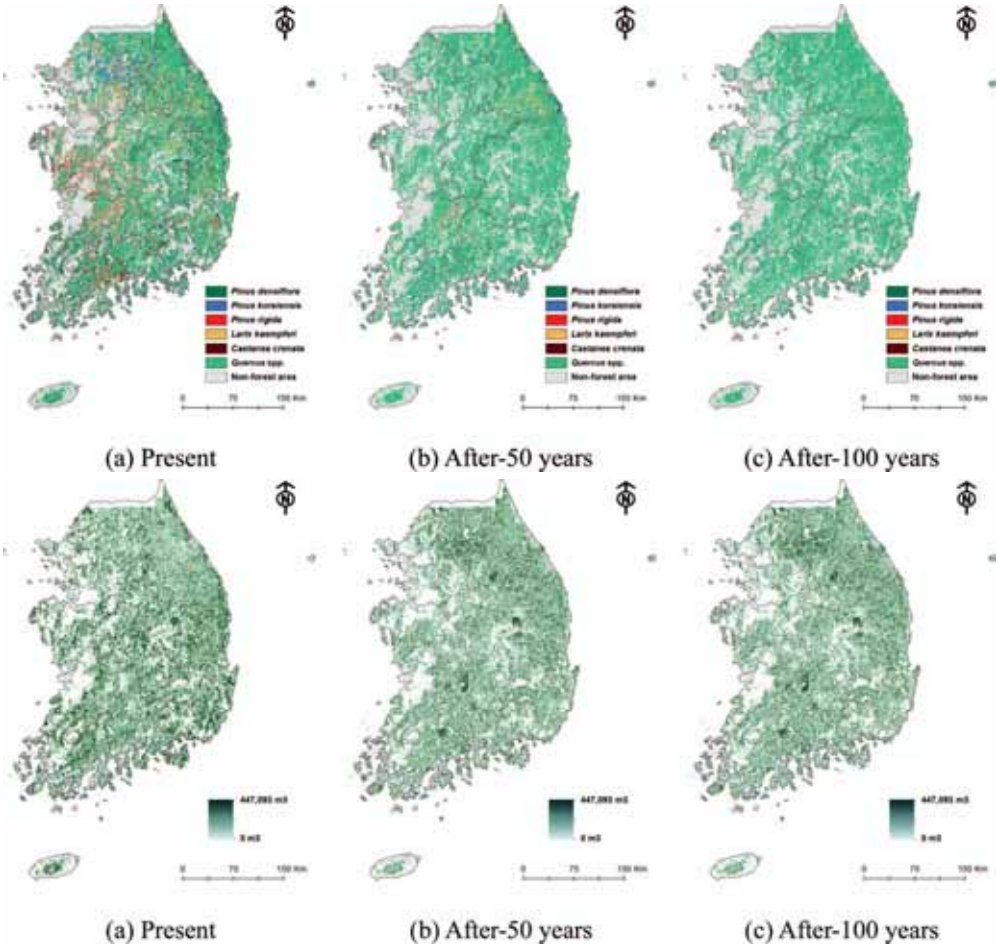


그림 4.15 HyTAGs 모형으로 예측한 미래의 산림 수종 및 재적량 분포(Kwak et al., 2012)

군집, 외부 유입원 강도 등의 조건이 일치하여야 가능하다. 최근의 국제간 교역 증가는 외래종의 침입 가능성을 증가시킨 것으로 추정되며, 이와 더불어 외래 식물종 유입가능성 증가와 기후변화로 인하여 과거에는 침입하지 못하였던 종들의 침입가능성 및 정착 가능성 증가로 추정되었다(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, 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 겨울 온도가 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., 2011).

4.3 영향전망

4.3.1 산림분포

산림 분포의 영향전망에 관한 연구는 위성영상을 이용한 산림분포 또는 산림분포 모형을 기반으로 기후변화 시나리오를 적용하여 산림 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 토지피복변화를 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).

용인시 산림을 기반으로 진행된 연구에서는 HyTAG 모형을 적용하여 10년 단위로 미래 100년 후까지 산림분포 영향전망을 분석한 결과, 침엽수림 37.8%, 활엽수림 62.2%는 30년 후 기후변화에 의해 침엽수림 0.13%, 활엽수림 99.97%로 변화하였으며, 60년 후에는 용인시 전체의 임상이 활엽수림으로 분포하게 될 것으로 예측 되었다(정현용 등, 2013).

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., 2014). 이와 같이 온난화된 환경에서 소나무 잎의 생물량은 감소한 반면 굴참나무의 생장은 유리한 것으로 보아 온난화가 지속될 경우 소나무림은 감소하고 참나무림은 증가할 것으로 예상된다.

한반도 전체에 대해 토지피복 변화를 바탕으로 일본 기상청의 RCM을 적용하여 미래(2090년대)의 산림식

표 4.7 2090년대까지의 임상 변화(이동근 등, 2010a)

	1990년대		2090년대		변화율(%)
	면적(㎢)	비율(%)	면적(㎢)	비율(%)	
소나무군락	70,680	30.8	98,202	45.5	38.9
참나무군락	122,233	53.2	109,800	50.9	-10.2
고산/아고산 식생	35,158	15.3	4,832	2.2	-86.3
상록활엽수림	1,686	0.7	2,868	1.3	70.1
전체	229,757	100	215,702	100	-6.1

생분포를 예측한 연구(이동근 등, 2010a)에서는, 산림은 69.7%에서 65.4%로 감소하고 농경지 또한 20.2%에서 18.8%로 감소될 것으로 추정하였다. 소나무군락은 북한지역과 고지대로 확대 이동하여 한반도 내에서는 증가하지만 남한지역에서는 감소하게 된다. 참나무군락은 한반도 전체에서 현재보다 분포가 줄어들 것으로 예상되었으며, 고산 및 아고산 식생은 남한지역에서는 사라지며 북한 개마고원 일대 일부에서 나타날 것으로 예상되었다.

이 밖에도 지형, 최한월온도, 여름평균강수량, 토양염기포화율, 토양유기물함량 자료를 바탕으로 식생과의 관계식을 도출한 뒤 일본환경과학원(NIES)이 A1B 기후시나리오를 이용하여 우리나라 산림식생분포변화를 전망한 결과에서, 시나리오상 미래 여름강수량과 최한월온도는 현재보다 지속적으로 증가하는 것을 확인하였으며, 2080년대에는 현재에 비해 활엽수림과 혼효림이 각각 56.9%와 8.3% 증가하고 침엽수림은 11.2% 감소하는 것으로 전망하였다(신형진 등, 2012). 지역적으로는 섬진강과 영산강 유역에서 침엽수림 감소와 활엽수혼효림 증가를 확인할 수 있었고, 한강유역에서는 침엽수림 증가와 활엽수혼효림 감소를 확인하였다(신형진 등, 2012).

국가 산림자원조사 자료를 기초로 HyTAGs 모형을 이용한 미래(50년, 100년)의 산림 수종 및 재적 예측에 관한 연구에서는 기후변화로 인해 침엽수림의 약 80%가 참나무속의 유령림으로 변화하여 50년 동안 358,719,163 ㎥의 재적 감소가 전망되며, 이후 유령림 성장으로 인해 100년 이후의 재적은 315,810,920 ㎥로 증가할 것으로 보인다(Kwak et al., 2012)

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).

4.3.2 탄소

4.3.2.1 산림 탄소저장량

산림 탄소저장량의 경우, 저장량을 추정하기 위한 방법론이 연구의 대부분을 차지하며 바이오매스의 영향전망에 대한 일부 연구에서만 기후변화의 영향을 전망하고 있다. 우리나라 산림을 생태권역과 임상별로 구분하여 변화량을 예측한 연구에서는 산악권역, 남동산야권역 및 남서산야권역의 모든 임상에서 바이오매스가 감소하는 것으로 평가되었다. 중부산야권역의 침엽수림과 혼효림은 2100년까지 꾸준한 증가세를 보이는 다른 변화 경향을 가지며, 해안도서권역에서 침엽수림은 중기 이후 감소하고 혼효림과 활엽수림의 경우 전체적인 증가가 예측된다(신진영 등, 2013).

토양탄소저장량에 대한 연구는 현재의 저장량 추정에 초점을 맞추고 있으며 영향전망은 일부 연구에서만 확인되고 있다. 기후변화로 인해 온난화가 발생할 경우 토양탄소는 미생물작용으로 인해 양이 감소하며 이는

표 4.8 식생의 연간 탄소변화량 영향전망

대상지역	범위	시기	연간 탄소변화량(tC/ha/yr)	출처
수도권	A+B	2021~2050	5.85	권선순 등(2012)
	A+B	2071~2100	5.88	

A : 지상부 식생 탄소, B : 지하부 식생 탄소

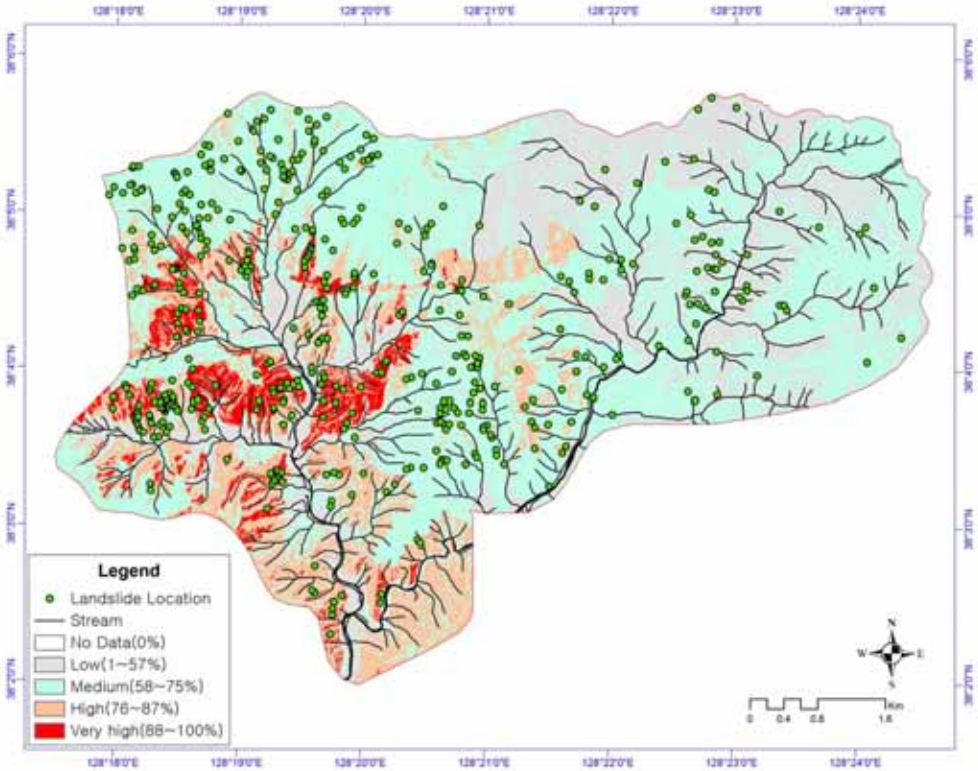


그림 4.16 Frequency ratio를 적용한 산사태 취약성 정도(이명진 등, 2013)

곧 대기 중으로 방출되어 대기 탄소 증가로 이어질 것으로 알려져 있다. 연간 낙엽량 자료를 이용하여 광릉숲의 토양탄소저장량을 추정한 연구에서는 가까운 미래(2040)에서 증가가, 먼 미래(2100)에서 급격한 감소가 추정되었다(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 감소가 추정됨을 확인하였다(권선순 등, 2012). 이는 대체적으로 기온이 증가하게 되면 토양 내 미생물 호흡으로 인해

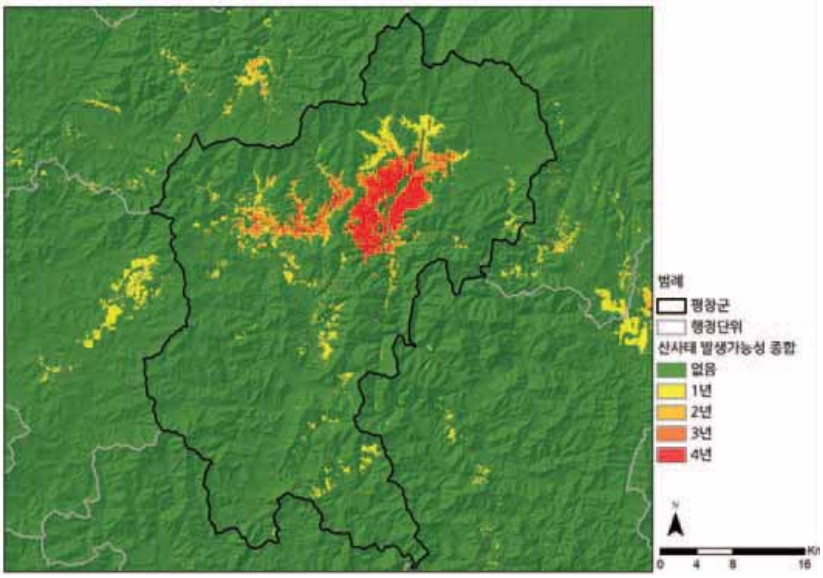


그림 4.17 RCP 시나리오에 따른 강원도 평창군 일대의 산사태 발생가능성 종합 지도(김호걸 등, 2013)

토양탄소가 감소한다는 일반적인 견해와 일치하고 있다.

그러나 토양탄소저장량의 영향전망은 연구마다 편차가 큰 것을 확인할 수 있었는데, 이는 같은 수종이라도 미기후 및 공간적 특성(임분밀도, 임령, 토양특성)에 따라 토양탄소의 변동성이 크기 때문인 것으로 보인다(권선순 등, 2012).

4.3.2.2 산림 탄소변화량

과거부터 현재까지의 변화량에 대한 연구를 바탕으로 변화량에 기여하는 다양한 환경적 인자들을 추출해 낸 후 미래 기후변화 시나리오에 적용하여 미래 탄소변화량의 전망과 그에 따른 저장량의 변화를 확인하였다.

NOAA AVHRR와 MODIS 영상을 이용하여 기후 시나리오 IPCC A2, B2를 적용한 우리나라 주요 5대강 유역의 미래 식생정보를 예측한 결과, 기온이 평균적으로 상승함으로 인해 식생이 지기 시작하는 8월 이후에도 활력을 띄었으며, NDVI값이 감소하기 시작하는 9월 이후에도 현재보다 NDVI값이 높게 지속 될 것으로 추정되었다(하림 등, 2007). 또한 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)의 NPP는 5.88 tC/ha/yr로 가까운 미래에 비해서는 소폭 증가하지만 현재보다는 감소됨을 확인하였다(권선순 등, 2012). 세부적으로, 서울, 인천, 경기북부, 경기남부로 나누었을 때, 과거의 NPP는 경기북부에서 가장 낮고(5.69 tC/ha/yr) 인천에서 가장 높았으나(6.6 tC/ha/yr), 가까운 미래에서 모두 감소하고 먼 미래에서는 경기북부만 증가하였다. 또한 고도 150 m 이상 산림에서는 지속적으로 NPP가 증가함을 확인하였다. 임상별로는 침엽수림의 평균 NPP가 6.27 tC/ha/yr, 활엽수림이 5.95 tC/ha/yr로 나타났다.

토양탄소변화량은 산림 탄소변화량과는 달리 다양한 전망 양상을 가지는 것으로 나타났다. 기후변화에 따른 세근과 낙엽 등의 증가로 인해 토양탄소변화량이 다소 증가한다는 보고가 있으나, 대기 온도가 올라감에 따라 토양 내 미생물 활동이 증가하여 연간 0.49 ~ 2.31 tC/ha의 탄소가 토양에서 배출될 것이라는 연구도 확인되었다(이동근 등, 2010b). 그러나 낙엽이 증가하면서 토양탄소로 전환될 가능성이 있으며, 이로 인한 변화량은 지상부 유기물층에서 3.4 tC/ha/yr, 지하부 토양층에서 2.3 tC/ha/yr로 추정된다(임희정 등, 2010). 또한 국내 소나무림을 대상으로 하여 RCP8.5 시나리오를 적용한 연구 결과, 2080년까지 산림이 성숙함에 따라 산림 토양탄소가 증가하지만, 이후 미생물 활동이 크게 증가하며 산림 토양탄소는 감소할 것으로 보고되었다(박찬우 등, 2013). 이에 토양탄소변화량에 대한 심층적인 연구가 필요할 것이다.

4.3.3 산림재해

4.3.3.1 산사태

미래 기후변화 관련 산사태 발생 예측 연구에서 기후변화 시나리오의 적용은 매우 적은 편이며, 대부분 실제 발생 데이터를 바탕으로 유사식을 도출하거나 기후인자 및 확률을 기반으로 강우량을 적용하여 산사태 발생 가능성을 예측하는 연구 등이 보고되고 있다. 또한 인력과 비용이 많이 드는 실제조사 뿐만 아니라 넓고 접근이 불가능한 지점에 대해 광역적이고 정확한 발생지점 파악을 위해 고해상도 위성영상을 활용한 발생지점 조사도 함께 진행되고 있는 추세이다.

산사태에 대한 미래 위험도를 작성하기 위하여 2006년 태풍 에위니아에 의하여 산사태가 발생한 강원도 인제 지역의 실제 발생 데이터 중 일부인 470개 지점과 지질, 지형도(경사, 경사방향, 곡률도), 토양도(토양 지형, 토질, 토양 배수, 토양 모재 및 유효토심), 임상도(영급, 경급, 소밀도 및 수종) 데이터가 사용되기도 한다(이명진 등, 2013). Frequency ratio model의 적용 결과 경사도가 20° 이하인 지역에서는 산사태 발생 확률이 낮게 나타났으며 경사도 36 ~ 40°인 지역이 가장 높게 나타났다. 사면의 경우 동쪽과 남동쪽이 높게 나타났으며, 곡률 요인은 오목한 지역이 높은 상관관계를 나타냈다.

실제 기후변화 시나리오를 적용한 연구로는 강원도 평창군 일대를 대상으로 실제 산사태 발생지점과 기후인자, 지형·식생 인자의 분석자료를 구축한 뒤 RCP8.5

시나리오를 적용하여 이 지역의 미래 산사태 발생가능성을 분석한 연구가 보고되었다(김호걸 등, 2013). MaxEnt 모형에서 입력변수와 미래 산사태발생가능성 간의 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 80mm 이상인 날의 횟수는 5회 이상, 일최대강우량 210mm 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. 이를 바탕으로 2006년, 2050년, 2070년, 2090년의 산사태 발생 위험지역을 중첩한 미래 산사태 위험지역 지도는 아래 그림과 같다. 범례 상의 1년은 4개 목표연도 중 한 해에만 산사태 발생가능성이 높은 지역을 의미하며, 4년은 4개 목표연도 모두에서 발생가능성이 높은 지역을 의미한다.

1963년부터 2012년까지 우리나라 전역에서 6 ~ 9월 사이의 집중호우로 야기된 산사태 중 발생지점의 위치, 시간, 강우자료를 획득할 수 있는 총 478건의 산사태를 대상으로 산사태를 유발하는 강우 강도와 지속시간의 한계를 구하였다(김석우 등, 2013). 강우분석은 강우개시 직후부터 산사태 발생시점까지 지속된 강우를 계산하였고 강우지속시간(D), 평균 강우강도(I)를 이용하여 실시하였다. 그 결과 산사태 유발강우의 강도-지속시간 한계는 하위 2% 분위의 회귀식으로 아래와 같이 도출되었다.

4.3.3.2 병해충

1970 ~ 80년대 잣나무 조림지에서 대표적인 한대성 산림병해이었던 잎떨림병이 감소하고 있는 원인으로는 이 병의 발생에 취약한 20년 이하의 조림지가 매우 적기도 하지만 과거에는 피해가 심했던 20년 이하의 저해발고 조림지에서 피해가 발생하지 않고 있는 이유는 1) 포자의 발아온도가 15℃ 내외의 저온성이며, 2) 특히 병원균의 포자 생성 기관인 자낭반 성숙에 미치는 환경인자 중 온도의 영향이 크며 온도와 자낭반 형성률은 역의 상관관계($y=69.14/(1+(x/ET_{50})^{44.45}$, $R^2=0.7881$)를 갖기 때문이다. 이러한 연구 결과를 토대로 기후변화에 따른 기온상승이 우리나라에서 잣나무 잎떨림병의 발생 감소에 가장 큰 영향을 미쳤으며, 우리나라에서 이 병해의 발생분포 및 발생량 모두 지속적으로 감소할 것으로 예측되고 있다(최원일 등, 2013).

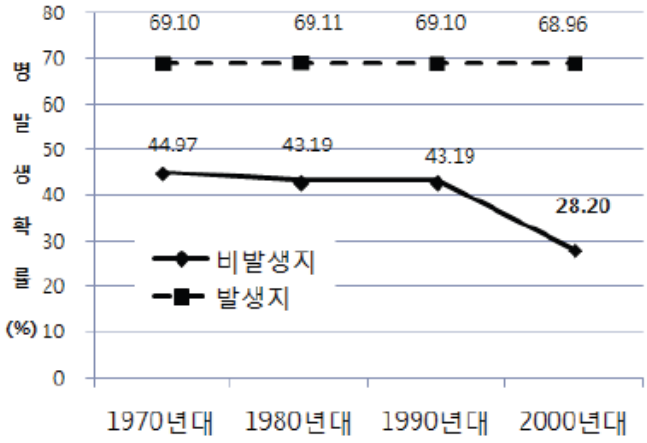


그림 4.18 잣나무 잎떨림병균의 강원도 홍천 지역 기후자료를 적용한 과거 40년간의 발생률 변화 (%)(최원일 등, 2013)

최근 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

표 4.9 산림 취약성 평가 지표(변정연 등, 2012)

규준	지표
민감도	식생유형의 변화 횟수
	순일차 생산량 변이성
	토양탄소 저장량 변이성
	산지전용 증감률
	경사도
	임상
	산림밀도
	영급
노출	봄철 평균 일사량 증감률
	봄철 평균 강수량 증감률
적응능력	식생유형의 변화 방향
	순일차생산량 변화 방향
	토양탄소 저장량 변화 경향
	숲 가꾸기 증감률
	재정자주도
	산림면적 당 산림보호구역
	산림면적 당 산림관계 공무원

월동 유충의 발육 영점 온도는 10℃였다(국립산림과학원, 2011b). 이러한 결과로 우화시기 예측모델을 구축한 결과 솔수염하늘소 우화시기를 예측할 수 있음이 확인되었다(Park et al., 2014). 또한 북방수염하늘소 성충 우화시기 예측 모델도 구축 중에 있다. 현재까지는 이러한 모델을 이용한 기후변화 영향전망이 수행되지 않았으나 이들 두 매개충의 우화시기가 온도에 민감한 점을 고려할 때 기후변화에 의해 우화시기가 빨라질 가능성이 높다. 또한 이와별도로 두 매개충인 북방수염하늘소와 솔수염하늘소의 혼재지역이 확대될 수 있는 가능성, 특히 솔수염하늘소의 분포가 현재의 분포지역에서 북쪽으로 확대될 수 있다고 예측되고 있다(국립산림과학원, 2011).

참나무시들음병 매개충인 광릉긴나무좀의 우화시기 또한 기후변화에 의해 빨라질 가능성이 높다. 실제로 광릉긴나무좀 우화시기 모델은 과거에 비해 이미 우화시기가 빨라졌음을 보여주고 있다(Nam et al., 2013). 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.

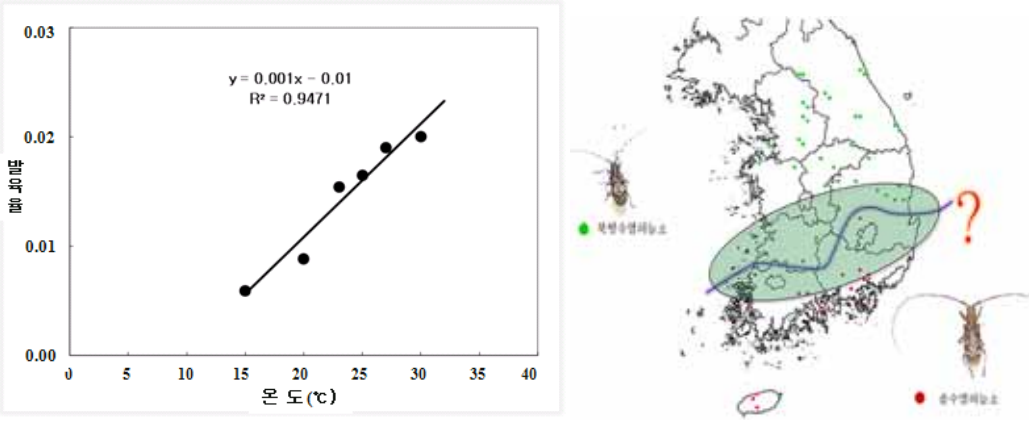


그림 4.19 솔수염하늘소(재선충의 매개충)의 발육온도모델(왼쪽)과 국내 분포 매개충의 자연분포 지역(국립산림과학원, 2011b)

솔잎혹파리 우화시기에 대한 모델 연구도 최근에 보고되었다(Nam and Choi, 2014). 이들의 모델은 솔잎혹파리 우화시기를 정확하게 예측할 수 있었다. 이 기

본 모델에 솔잎혹파리 적응 함수를 포함하여 솔잎혹파리 발생시기를 기후변화 시나리오 RCP4.5와 RCP8.5 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 et al., 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 주요원인

4.4.1 산림분포

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.

표 4.10 대형산불 판정을 위한 다변수 로지스틱 회귀모델의 결과(이병두와 김경하, 2013)

Parameter	Estimate	Standard Error	Wald Chi-Square	Pr>ChiSq
Intercept	-13.6929	3.4223	16.0084	<.0001
Temperature(defree)	0.1202	0.0329	13.3890	0.0003
Wind speed(m/s)	0.2928	0.1286	5.1893	0.0227
Continuous drought days	0.0632	0.0328	3.7166	0.0539
Elevation(m)	-0.00425	0.00248	2.9281	0.0871
Slope deviation(degree)	0.3280	0.1665	3.8811	0.0488
Forest area(ha)	0.0305	0.0172	3.1717	0.0749

한국형 산림분포 모델인 TAG와 HyTAG 모델을 이용하여 IPCC가 제시한 기후변화 시나리오 A2(발전 지향적)와 B1(자연 친화적)에 따른 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).

또 다른 연구에서는 취약성을 (민감성*노출)/적응성으로 규정하고 이에 사회, 환경적 지표를 통합하여 현재(1971 ~ 2000년)를 바탕으로 미래(2021 ~ 2050년)의 산림 취약성을 평가하였다. 현재 산림의 취약성을 평가하기 위한 요소로 민감도, 노출, 적응능력을 선정

하였는데, 세부 내용은 표 4.9와 같다.

4.4.2 탄소

식생탄소저장량 및 변화량은 임상의 바이오매스에 의존하므로, 미래의 산림분포 전망에 따라 취약성이 결정될 것으로 추정된다. 활엽수림보다 침엽수림에서 평균 NPP 변화량이 높으므로(권선순 등, 2012), 미래 기후변화에 따라 NPP 변화량이 큰 침엽수림이 감소하는 지역에서의 탄소변화량 감소가 높을 것으로 예상되었다. 또한 토양탄소저장량과 순일차생산량의 변화량 및 변화량의 추이가 산림 기능의 취약성을 판단하는 지표로 이용된 것을 확인하였다(Choi et al., 2011).

4.4.3 산림재해

4.4.3.1 산사태

전반적인 연구를 바탕으로 볼 때 산사태에 영향을 주는 주요 요인으로는 '경사 방향', '경사도', '토양특성', '강우강도', '식생활력' 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.

집중호우로 인해 산사태가 집중적으로 발생한 이암풍화토층을 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).

경사도의 경우 발생량이 많은 것으로 나타난 정도는 10 ~ 40°로 다양하게 나타났으며, 산사태가 그 이상이나 그 이하의 경사도에서 높게 나타난다는 연구결과는 없었다. 이는 실제 산림에서 40° 이상의 경사를 지닌 지역이 상대적으로 적기 때문일 것으로 추정된다.

4.4.3.2 산불

산불과 기후변화에 관한 연구는 많지 않았으며 산불 발생에 가장 큰 영향을 미치는 요소는 환경적인 요인보다 인간부주의의 영향이 큰 것으로 나타났다. 환경적인 요인 중 산불 발생에 영향을 미치는 것으로 나타난 것은 습도, 온도, 산림 내 건조한 낙엽, 바람 등으로 나타났다. 산불 발생 빈도가 높게 나타난 지점의 환경변수를 통계적으로 계산한 연구결과 최고기온 10 ~ 20℃, 상대습도 40 ~ 60%, 평균풍속 2 m/sec 이하 등의 조건에서 산불 발생가능성이 높은 것으로 조사되었다.

산불의 피해를 최소화하기 위해 대형산불로의 발전 가능성이 있는 산불을 판단하기 위해 로지스틱 회귀식을 이용한 대형산불판정 모형을 개발한 연구 결과 산불은 온도, 풍속, 무강우일수, 고도, 경사 편차, 산림 면적이 의미 있는 인자로 추출되었다(이병두와 김경하, 2013).

4.4.3.3 병해충

소나무류, 특히 한대성 수종인 잣나무에서 병해충에 대한 취약성을 증가시키는 요인은 수세의 약화와 함께 저병원성 병원균 및 2차 해충의 활동성 증가로 설명할 수 있다.

2007년과 2009년에 발생하였던 소나무와 잣나무의 집단고사의 원인이 기본적으로 겨울철 이상고온이라는 환경적 요인 외에 이들 피해지의 고사된 나무의 가지와 줄기에서는 피목가지마름병의 병원균으로 알려져 있는 Cenangium ferruginosum이 높은 빈도로 검출되었다. 피목가지마름병을 일으키는 C. ferruginosum은 나무가 건강한 상태에서는 외부 병징을 나타내지 않는 내생균(內生菌, endophyte)이면서 비록 약하지만 병원성을 지닌 병원균이므로 환경적 스트레스에 의하여 수세가 약화된 숲과 나무에서 주로 발생하는 것으로 보고되어 있다(Sinclair et.al., 2005, 최원일 등, 2012).

결론적으로 소나무 및 잣나무 피해는 피해 전년도 8 ~ 10월의 가뭄에 의해 1차적으로 생장의 둔화현상이

표 4.11 2009년 경남 밀양시의 월평균 온도와 예년값(1971~2000) 대비 아노말리(국립산림과학원, 2010b)

Temperature (℃)	Jan	Feb	Mar	Apr	May	Jun	Jul	Aug	Sep	Oct	Nov	Dec
1971~2000(A)	-0.2	1.8	6.8	12.9	17.5	21.6	25.2	25.6	20.8	14.6	8.0	1.8
2009(B)	0.0	6.7	8.8	14.4	19.8	23.3	26.0	26.5	22.2	15.7	8.5	1.9
B-A	0.2	4.9	2.0	1.5	2.3	1.7	0.8	0.9	1.4	1.1	0.5	0.1

나타나고, 피해 당년도 1 ~ 3월에 이상고온현상에 의한 2차적인 고온·건조스트레스를 받은 후 3차적으로는 이들 나무의 침엽 내부에 내생균으로 잠복하고 있었던 저온성 피목가지마름병균이 쇠약해진 잣나무의 어린 가지나 가지에 침입하여 최종적으로 나무 전체를 고사에 이르게 한 것으로 조사되었다. 아울러 남부지역 소나무류 대면적 피해와 관련하여 간과할 수 없는 것은, 천연림이 대부분인 소나무림의 경우 피해가 급경사지, 과밀임분 등에서 집중적으로 발생하였고, 대표적인 한대성 수종인 잣나무는 비적지 조림문제가 관여되어 있어 기본적으로 이상기상현상 등 환경적 요인에 취약한 임분구조의 나무들에서 피해가 많았다는 점이었다(국립산림과학원, 2008, 2010b).

잣나무 고사를 일으키는 취약성의 요인 중 하나로 하기 간벌 수행 후 간벌목을 임지에 방치하여 솔여섯가시나무좀 증식이 가능해진 것으로 추정되고 있다. 또한 신갈나무의 스트레스 요인인 광릉긴나무좀은 비교적 저온 조건을 선호하는 수종으로 최근 기후변화에 의해 신갈나무의 스트레스가 증가하여 광릉긴나무좀 공격에 취약해졌을 가능성이 있는 것으로 나타난다. 이외에도 최근 산림녹화가 완료됨에 따라 신갈나무 숲이 주로 흉고직경이 큰 나무 위주로 구성된 점도 광릉긴나무좀 발생 증가에 기여했을 가능성이 높다(Choi, 2011).

꽃매미의 증가와 관련하여 Lee et al.(2011)은 온도가 상이한 춘천, 청주, 전주에서 월동을 마친 꽃매미 알덩어리를 채집하여 부화율을 조사한 결과 겨울 온도가 가장 낮은 춘천에서 채집된 알 부화율이 가장 낮았고 온도가 가장 높은 전주에서 채집된 알 부화율이 가장 높았다는 결과를 보이며, 외래종인 꽃매미가 정착하는데 있어 겨울 온도의 증가도 기여하였다는 것을 보여주고 있다.

유럽 중부에서 Phytophthora에 의한 뿌리 역병 발생의 증가는 겨울철 평균 온도와 강우량의 증가 및 폭우 빈도의 증가와 관련이 있으며(Kliejunas et al., 2008), 미국 오레건주의 Douglas fir에 발생하는 Swiss needle cast는 봄과 여름의 온도 상승에 기인하며(Black et. al., 2010), 미국 서부에서 발생하고 있는 Quaking aspen (Populus tremuloides)의 급격한 고사 현상 (SAD: Sudden aspen decline)의 증가는 고온 및 건조로 인한 뿌리 피해와 관련이 있다고 알려져 있다(Morelli and Carr, 2011). 이러한 연구 사례로 볼 때 기상학적으로 매우 이례적이었던 2011년의 중북부지역 낙엽송 잎떨림병과 참나무류 투바키아잎마름병을 포함한 활엽수류의 잎마름성 병해의 대발생은 매우 의미있는 사건이었으며, 우리나라에서도 특정 병해충의 발생과 기상인자와의 관계 구명을 위해 장기적인 모니터링 연구가 필요할 것이다.

4.5 적응옵션

4.5.1 산림분포

4.5.1.1 독자적인 산림분포변화예측 모형 개발

산림 분포와 관련하여, 우리나라는 전후 집중적인 조림정책으로 산림이 형성되었으며 당시의 주 식재 수종은 잣나무와 낙엽송이었다(강길남 등, 2010). 그러나 기후변화로 인해 점차 침엽수림이 쇠퇴하거나 북상하고, 혼효림의 증가와 활엽수림의 북상 등이 예상된다. 우리나라는 침엽수, 활엽수, 혼효림 등 다양한 식생이 좁은 면적에 분포하고 있어 전 지구적인 기후모형을 적용하기 어렵기 때문에, 우리나라 고유의 생태계 구조와 기능을 반영할 수 있는 독자적인 모형 연구가 필요하다(김순아 등, 2009). 현재 많은 연구에서 쓰이는 DGVM을 비롯한 식생모형들은 미국에서 개발한 모형으로, 우리나라에 적용할 경우 상당한 오차가 발생하는 것을 확인하였다(권선순 등, 2012).

국내 수종별 온량지수(Warmth Index)와 최저기온지수(Minimum Temperature of the Coldest month Index)를 이용하여 수종분포예측모형인 HyTAG은 미래에 소나무와 잣나무의 서식지가 감소하고, 상록성 활엽수림이 이를 대체할 것으로 예측하였다(Choi et al., 2010). 그러나 4차 임상도 자료를 통해 모델을 검증하였을 때 약 57%의 낮은 수준의 정확도를 보였는데, 이는 다양한 인자가 고려된 모델 개발 및 연구가 필요함을 시사한다. 임상의 변화는 침엽수림을 이용하는 농산업, 관광업 등 다양한 분야들에 영향을 미칠 것으로 예상되므로, 이에 대한 연구는 앞으로도 지속적으로 이루어져야 할 것이다.

4.5.1.2 미래 식생분포를 고려한 임산물생산 지역 관리

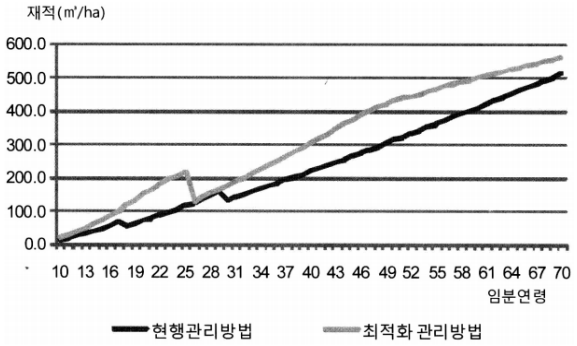


그림 4.20 관리방법에 따른 소나무의 재적성장(이상민 등, 2011)

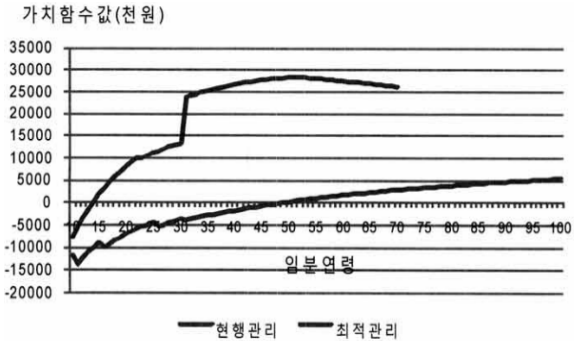


그림 4.21 관리방법에 따른 잣나무의 가치함수값(이상민 등, 2011)

임업 생산성은 임상의 변화와 바이오매스 변화의 조합에 의해 동시에 영향 받을 수 있는 인자이며, 인간의 직접적인 산림 이용과 관련되므로 가장 영향을 받는 요인이다. 산림의 바이오매스는 임목의 부피를 나타내는 산림축적량 (㎥)이라는 대체지표를 이용하여 산출하며 이는 목재생산과 직접적으로 관련된다. 기본계획구별 산림축적량이 가장 많은 곳은 강원도로 24.4%, 다음으로는 경북이 21.3%로서, 이들 2개 지역이 우리나라 산림축적량의 거의 1/2을 차지하고 있는 것으로 나타났다(국립산림과학원, 2011a).

기후변화에 따라 미래의 임업환경이 변화하므로 생산 환경에 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 송이생산의 적지가 감소할 것으로 예측되고, 고랭지를 이용한 산나물, 과수재배, 채소 등의 재배적지 역시 감소할 것이 예측되었다(김점수, 2009). 탄소흡수와 가치 있는 목재생산을 통해 사회 효용을 극대화하기 위해서 산림 관리의 필요성이 강조되며(이상민 등, 2011), 이를 위해 우리나라의 주요 수종인 소나무와 잣나무를 대상으로 모형을 통해 적정관리방안을 제안되었다.

4.5.2 탄소

4.5.2.1 탄소를 고려한 국토계획

산림생태계의 순일차생산량이나 토양탄소저장량 등은 기후변화에 대비할 수 있는 이산화탄소 흡수원으로서 중요한 역할을 담당하고 있기 때문에, 국가 차원의 국토종합계획이나 수도권정비계획, 토지이용계획 및 택지개발 수립 시 이들을 고려할 필요가 있다(권선순 등, 2012). 식생의 탄소저감효과를 극대화하기 위해 기후변화에 따른 생산성이 증대되는 지역의 개발을 최소화하고, 불가피한 개발에 대한 대안과 중점적인 관리방안의 제시가 필요할 것이다(권선순 등, 2012).

이를 실현하기 위해 공간 계획적인 측면에서 무분별한 개발을 방지하고 토양과 식생을 효과적으로 보전하기 위한 제도적 수단으로 탄소흡수능을 고려한 환경계획지표 개발과 탄소흡수원을 확충하기 위한 환경영향평

가 방법론 도입 등이 제안된다(황상일 등, 2009, 2010). 그리고 확대되고 있는 도시녹지를 대상으로 한 탄소 인벤토리가 구축되고 있다(국립산림과학원, 2010a).

4.5.2.2 탄소저장량 유지 및 확대 가능성 연구

현재 우리나라 산림 임목의 탄소저장량은 지역별로 많은 차이를 나타내고 있다. 임목(지상, 지하)의 탄소저장량에 한정했을 때, 충남지역에서 97 ~ 103 tC/ha, 강원지역 80 ~ 181 tC/ha, 경기지역에서 약 96.5 tC/ha의 값을 얻었다. 이는 주로 산림이 풍부하게 분포한 지역에서 높은 저장량을 나타낸 결과라고 볼 수 있다. 현재 우리나라 산림의 탄소저장량은 국립산림과학원에 의한 국가산림자원조사를 통해 지속적으로 보완되고 있다.

강원도지역 25년생과 55년생 소나무를 대상으로 간벌 강도에 따른 소나무림의 탄소저장량 차이를 측정한 결과, 25년생 소나무의 경우 간벌 강도에 따라 탄소저장량에 큰 변화는 없었으나, 55년생 소나무림은 간벌 강도에 따라 대조구(임분밀도 0%간벌)에서 66.3 tC/ha, 약도구(임분밀도 20%간벌)에서 117.9 tC/ha, 강도구(임분밀도 30%간벌)에서 84.2 tC/ha로 간벌 강도에 따라 탄소저장량의 차이를 발견 할 수 있었다(Yang et al., 2011). 낙엽송을 대상으로 광릉 시험림과 무주 시험림에서 진행된 다른 연구에서는 모두 약도구(임분밀도 20%간벌)의 탄소저장량보다 강도구(임분밀도 30%간벌)에서 탄소저장량이 높았다(Ko et al., 2012). 이는 수종과 지역적 특성에 따라 근소한 차이는 있지만 대체적으로 간벌 강도에 따라 탄소저장량을 인위적으로 조절 할 수 있음을 시사한다.

현재의 연구들은 광릉숲 등 인위적인 교란이 최소화된 한정적인 공간을 대상으로 이루어지고 있어 우리나라 전반에 대한 평가를 내리기에는 아직 부족한 실정이다. 토양탄소는 임목탄소와 대등하거나 더 많은 양을 지니고 있기 때문에 탄소저장 역할에 매우 중요한 것으로 알려져 있다. 기온이 증가하면 모든 기후대에서 산림 토양의 탄소저장량이 감소한다는 결과를 확인한 많은 연구들이 있으며(권선순 등, 2012), 우리나라의 토양탄소 저장량의 미래 전망에서도 온도가 증가함에 따라 토양 미생물의 활성이 증가하여 저장량이 감소하는 것으로 나타났다(이아름 등, 2009). 따라서 적절한 산림 관리를 통해 생체량과 낙엽량을 증가시키면 임분 내 토양탄소 저장량을 증가시킬 수 있으므로, 토양탄소를 효과적으로 관리하는 전략이 필요할 것이다(이아름 등, 2009).

4.5.2.3 탄소흡수량 핫스팟 연구

우리나라 전역에 대해 탄소생산량(흡수량)을 평가한 결과, 남부지방과 제주도, 서남해안 등지에서 탄소생산량이 월등히 높은 것을 확인하였다(홍지연 등, 2011; 유성진 등, 2012 ; 이동근 등, 2010b). 탄소생산량과 관련이 높은 기후요소는 월별 강수량 및 평균기온으로 나타났으며, 활엽수림보다 침엽수림에서 높은 생산량을 보였다(홍지연 등, 2011). 이러한 우리나라 산림 생태계의 탄소수지는 인위적 탄소배출량의 3.3%(2007년 배출량 기준, 유성진 등, 2012) ~ 7%(국립산림과학원 온실가스통계)를 상쇄하는 탄소흡수원의 역할을 하고 있는 것으로 확인된다. 따라서 기후변화의 원인인 온실가스를 저감하는 효과를 가지고 있어 적극적인 산림관리정책을 통해 탄소배출량을 저감시킬 수 있는 가능성을 확인하였다.

4.5.2.4 탄소 인벤토리 및 계정 연구

기후변화협약에 대응하기 위해 온실가스 관리를 위해 산림의 역할이 중요시되며, 국가적인 수준에서의 탄소 인벤토리 연구가 진행되고 있다. 우리나라는 관리체계가 미흡하고, 관련 연구가 거의 전무하므로 흡수/배출계수 산정과 시스템 구축 등을 통하여 향후 기후변화협약에 대응하고자 하는 연구가 필요한 것으로 확인되었다(산림청, 2013)

또한 산림이 생장 기간 동안 흡수한 탄소는 벌채 후에도 목제품에 잔존하여 대기로의 탄소 방출을 지연시키므로 목제품의 탄소 계정 연구가 요구된다. 하지만 우리나라의 경우 정확한 통계자료가 부재하며, 투입된 국내재 목재량에 비하여 낮은 목재이용의 탄소축적변화량을 보이고 있다(국립산림과학원, 2013a). 따라서 탄소축적 변화량의 장기적인 증가와 계정을 위해서 활동자료의 구축, 정책과 정책효과에 대한 연구가 필요한

것으로 보고되었다(국립산림과학원, 2013a).

4.5.3 산림재해

4.5.3.1 산사태

GCI 방법론을 통하여 산사태, 강우량, 지형공간정보간의 관계를 파악하였으며, 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 누가강우량의 분포 상황을 정밀하게 추적할 수 있으며 산사태를 더 정밀하게 예측할 수 있는 것으로 나타났다(최윤석 등, 2013).

4.5.3.2 산불

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 산불 예보시스템을 개발하여 웹서비스를 통해 시군구별 실시간 산불위험정보를 전국에 제공하고 있다. 또한 최근 들어 발생하는 산불발생 패턴 변화 및 기후변화에 대응하기 위하여 산불발생확산모형의 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.

4.5.3.3 병해충

기후 변화에 따른 산림병해충 발생에 대응하기 위해서는 산림병해충 변화에 대한 예측과 이에 따른 산림관리가 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 돌발 산림병해충에 대한 장기적인 분석을 통해 앞으로 발생 위험도가 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.

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 강도의 솎아베기(간벌) 사업(피해저감사업)을 전국적으로 실시하고 있으며, 사업물량은 2013년 6,509 ha, 2014년 4,370 ha이다(산림청, 2013, 2014). 아울러 기후변화가 산림병해충에 미치는 영향에 대한 연구를 체계적이고 장기적으로 실시할 계획이다.

4.6 결론

우리나라는 산림면적이 전체 국토면적의 64%에 해

당하여 산림의 면적이 다른 나라에 비해 넓은 편이다. 그러므로 산림에 대한 연구가 필요하며, 산림에 변화를 일으킬 것으로 예상되는 기후변화를 고려하는 것은 필수적이다. 이에 따라서 국내의 연구를 종합한 결과 전국을 대상으로 산림의 분포, 산림 및 산림토양의 탄소저장량, 산림의 재해에 대한 현재까지의 변화양상의 관측과 미래의 기후변화에 따른 영향 예측이 주로 진행되고 있는 것으로 나타났다(견고한 동의).

기후변화에 따라서 산림분포를 모니터링하고 예측한 결과 특히 아고산, 고산 지대의 산림과 활엽수가 쇠퇴하는 것으로 나타났으며(제한적 동의) 한반도 전체 식생의 변화가 관측 및 예상되고 있다(견고한 동의). 동시에 산림의 탄소저장량은 미래에는 대부분 감소하는 것으로 나타나 산림의 탄소 흡수원으로서의 역할을 증대시키기 위한 관리 및 적응전략이 필요한 것으로 나타났다(견고한 동의). 단, 산림토양의 경우 연구에 따라서 다양한 경향을 보이고 있어 흡수원 혹은 배출원으로 역할에 대한 충분한 논의가 필요한 것으로 보인다(중간적 동의).

산림재해와 관련된 연구에서는 산사태, 산림병해충, 산불에 대한 연구가 주를 이루고 있었으며, 특히 산사태와 산림 병해충에 대한 연구를 주로 진행하고 있었다. 산사태의 경우 현재의 산사태 발생 원인을 파악하기 위한 많은 연구들이 진행되고 있으며 여전히 다양한 변수의 상관관계를 파악하기 위한 많은 연구들이 진행되고 있다(제한적 동의). 병해충에 대한 연구는 미진하지만 기후변화와 그에 따른 이상기상현상이 빈번하게 발생됨에 따라 병충해의 종류 및 분포범위에 변화가 있을 것이며(중간적 동의), 특히 아열대성 병해충의 지속적 유입 및 정착과 함께 특정 병해충의 돌발적 발생 또한 예상된다(제한적 동의).

이처럼 기후변화가 산림분야에 영향을 미친다는 것은 인지하고 있으나, 기후변화와 산림이 결부된 연구는 역사가 오래되지 않았기 때문에 기후변화 영향에 대해 체계적인 접근이 어려운 것으로 나타났다.

현재의 연구에서는 산림의 분포 및 탄소저장량, 산림 병충해 변화에 대한 연구는 국가적인 단위에서 진행되고 있으며 산사태, 산불은 사건이 일어난 지역 및 인근을 대상으로 하여 연구가 진행되고 있다. 기후변화 영향에 대한 취약성 평가 및 적응대책을 수립하기 위해서는 국가-지자체 간의 차이를 밝히고 각각의 분야에서 진행되고 있는 연구들의 범위를 확장 혹은 구체화하여 적용가능성을 높여야 할 것이다(중간적 동의).

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 할 것이다. 이와 같은 문제의 해결을 위해 장기적인 관점에서 기후변화로 인한 영향을 관측하고 이를 바탕으로 미래의 영향을 예측하는 연구가 필수적이다(견고한 동의).

동시에 표준화된 방법 및 연구를 통해서 개별 연구의 적용가능성을 확보해야 할 것이다. 선행적으로 장기적인 관측을 통한 데이터 구축 및 검증으로 미래의 기후변화 영향과 이를 바탕으로 한 취약성을 밝혀 적응대책의 신뢰도를 높여야 할 것이다. 최종적으로는 향후 현재 진행되고 있는 산림분야 내 다양한 연구들의 상호관계를 밝혀 분야 내 영향을 밝히고 이들 사이의 통합적인 영향을 밝혀야 미래 기후변화에 조금 더 지혜롭게 대처할 수 있을 것이다(견고한 동의).

4.7 참고문헌

강길남, 박관수, 이상진, 이항구, 김준성, 김연태, 2010: 충남 공주지역 잣나무림과 낙엽송림의 지상부와 뿌리에 의한 탄소고정, *농업과학연구*, 37(1), 45-52.

고석민, 이승우, 윤찬영, 김기홍, 2013: GIS를 이용한 강원지역 토석류 특성분석, *한국측량학회지* 31(1), 57-67.

국립기상연구소, 2009: 기후변화 이해하기 Ⅱ - 한반도 기후변화: 현재와 미래.

국립산림과학원, 2008: 연구사업보고서.

국립산림과학원, 2010a: 도시녹지 온실가스 인벤토리 - 서울시를 대상으로 -.

국립산림과학원, 2010b: 연구사업보고서.

국립산림과학원, 2011a: 제5차 국가산림자원조사 보고서.

국립산림과학원, 2011b: 연구사업보고서.

국립산림과학원, 2012a: 기후변화 숲 그리고 인간.

국립산림과학원, 2012b: 주요 산림수종의 표준탄소흡수량.
국립산림과학원, 2013a: 수확된 목제품(HWP)의 탄소계정 기반 구축 연구
국립산림과학원, 2013b: 연구사업보고서.
권선순, 최선희, 이상돈, 2012: 기후변화에 따른 수도권 산림의 순일차생산량과 토양탄소저장량의 시공간적 변화 추정, 환경영향평가, 21(5), 757-765.
권혁춘, 이병걸, 이창선, 고정우, 2011: 로지스틱회귀분석기법과 인공신경망기법을 이용한 제주지역 산사태 가능성분석, *한국지형공간정보학회지*, 19(3), 33-40.
기상청, 2011, 기상청 보도자료
김석우, 전근우, 김민석, 김민식, 김진학, 이동균, 2013: 우리나라에 있어서 산사태 유발강우의 강도-지속시간 한계, *한국임학회지*, 102(3), 463-466.
김석우, 전근우, 김진학, 김민식, 김민석, 2012: 2011년 집중호우로 인한 산사태 발생특성 분석, *한국임학회지* 101(1), 28-35.
김성훈, 장동호, 2013: 기후변화에 따른 강원 산지지역의 지형요소별 임상변화 분석 -다중시기 위성영상 및 ASTER DEM을 이용하여-, *한국지형학회*, 20(2), 117-128.
김순아, 이우균, 손요환, 조용성, 이미선, 2009: 산림에 대한 기후변화 영향평가 모형의 국내 적용성 분석, *한국임학회지*, 98(1), 33-48.
김장수, 장동호, 2012: 다중시기 위성영상과 ASTER DEM자료를 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, *환경영향평가학회지*, 22(1), 39-50.
박민지, 박근애, 이용준, 김성준, 2010: 미래 산림식생변화 예측을 위한 개선된 CA-Markov 기법의 적용, *한국농공학회논문집*, 52(1), 61-68.
박찬우, 이종열, 이명종, 김춘식, 박관수, 김래현, 이경학, 손요환, 2013: 한국형 산림토양탄소모델(KFSC model)을 이용한 RCP8.5 기후변화 시나리오 하에서의 국내 소나무림 토양탄소 저장량 장기 변화 추정 연구, *한국기후변화학회지*, 4(2), 77-93.
박현주, 신휴석, 노영희, 김경민, 박기호, 2012: 크리깅 기법을 이용한 단양군의 산림 탄소저장량 추정 - 지상부 바이오매스를 대상으로-, *한국지리정보학회지*, 15(1), 16-33.
변정연, 이우균, 최성호, 오수현, 유성진, 권태성, 성주한, 우재욱, 2012: 시공간 정보기반 산림 생태계의 기후변화 취약성 평가, *한국원격탐사학회지*, 28(1), 159-171.
산림청, 2010: 임업통계연보, 산림청.
산림청, 2011: 임업통계연보, 산림청.
산림청, 2013: Post-2012 대응 산림부문 온실가스 인벤토리 및 탄소계정 체계 개발.
산림청, 2014: 임업통계연보, 산림청.
서환석, 박동환, 임종수, 이정수, 2012: k-NN기법을 이용한 산림바이오매스 자원량 평가 -강원대학교 학술림을 대상으로-, *한국임학회지*, 101(4), 547-557.
신진영, 원명수, 김경하, 신만용, 2013: 기후변화에 따른 생태권역별, 임상별 산림 바이오매스 변화량 예측, *한국농림기상학회지*, 15(3), 119-129.
신형진, 박근애, 박민지, 김성준, 2012: 미래 기후변화 시나리오 MIROC3.2 A1B에 따른 우리나라 산림식생분포의 변화 전망, *한국지리정보학회지*, 15(1), 64-75.
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, *대한원격탐사학회*, 26(1), 47-57.
온실가스종합정보센터, 2014: 2013 국가 온실가스 인벤토리 보고서.
원명수, 윤석희, 구교상, 김경하, 2011b: 1990년대와 2000년대 건조계절의 산불발생 시공간 변화 분석,

한국지리정보학회지, 14(3), 150-162.

원명수, 윤석희, 이우균, 2011a: 2000-2008년 봄철 황사와 산불발생의 관계 분석, *한국농림기상학회지*, 13(3), 148-156.

원명수, 이명보, 이우균, 윤석희, 2012: 디지털예보자료와 Daily Weather Index (DWI) 모델을 적용한 한반도의 산불발생위험 예측, *한국농림기상학회지*, 14(1), 1-10.

위광재, 이현, 이동하, 조재명, 서용철, 2011: 항공 라이다 데이터를 이용한 산림의 탄소 흡수량 측정, *한국측량학회지*, 29(1), 55-62.

유성진, 이우균, 손요환, 2012: 생태계 모형과 시공간 환경정보를 이용한 우리나라 식생 탄소 수지 추정, *한국원격탐사학회지*, 28(1), 145-159.

유수홍, 허준, 정재훈, 한수희, 김경민, 2011: Landsat TM 위성영상과 비율영상을 적용한 지상부 탄소 저장량 추정, *한국지형공간정보학회지*, 19(2), 39-48.

윤충원, 김혜진, 이병천, 신준환, 양희문, 임종환, 2011: 우리나라의 산림식생에 대한 군락형 분류, *한국임학회지*, 100(3), 504-521.

윤홍식, 이동하, 서용철, 2009: GIS 기법 및 발생자료 분석을 이용한 산사태 위험지도 작성, *한국지리정보학회지*, 12(4), 59-73.

이동근, 김재욱, 박찬, 2010a: 토지피복 변화를 반영한 미래의 산림식생 분포 예측에 관한 연구, *한국영향평가학회지*, 19(2), 117-125.

이동근, 박찬, 오영출, 2010b: 기후변화에 따른 식생과 토양에 의한 탄소변화량 공간적 분석, *농촌계획*, 16(4), 109-116.

이명진, 이사로, 전성우, 김근한, 2013: GCI(Geospatial Correlative Integration) 및 확률강우량을 고려한 인제지역 산사태 취약성도 작성, *환경정책연구*, 12(3), 21-47.

이미나, 홍승범, 박선기, 2013: Haines Index를 이용한 동아시아 지역 산불 확산 위험도 변화와 지표-대기 상호관계와의 연관성 연구, *한국기상학회지*, 23(2), 131-141.

이병두, 김경하, 2013: 로지스틱 회귀식을 이용한 대형 산불판정 모형 개발, *한국임학회지*, 102(3), 415-419.

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.

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.

이수경, 손요환, 노남진, 허수진, 윤태경, 이아름, 이우균, 2009: 횡성지역 천연 소나무와 참나무류 순림 및 혼효임분의 탄소 저장량 추정, *한국임학회지*, 98(6), 772-779.

이승우, 김기홍, 윤차영, 유한중, 홍성재, 2012: 데이터베이스 구축을 통한 산사태 위험도 예측식 개발, *한국지반공학회지*, 28(4), 23-39.

이시영, 박홍석, 김영웅, 윤화영, 김종갑, 2011: 통계자료에 의한 기상과 산불특성의 관련성 -전라남도지방을 중심으로-, 경상대학교 농업생명과학연구, 45(4), 29-35.

이아름, 노남진, 윤태경, 이수경, 서경원, 이우균, 조용성, 손요환, 2009: 연륜연대학적 접근을 이용한 Yasso 모델의 산림토양탄소 저장량 추정, *한국임학회지*, 98(6), 791-798.

임종수, 한원성, 황주호, 정상영, 조현국, 신만용, 2009: 위성영상자료 및 국가 산림자원조사 자료를 이용한 산림 바이오매스 추정, *대한원격탐사학회지*, 25(4), 311-320.

임희정, 이영희, 권효정, 2010: 광릉 활엽수림에서

Community Land Model version 3.5-Dynamic Global Vegetaion Model의 평가, *한국농림기상학회지*, 12(2), 95-106.

정현용, 이우균, 남기준, 김문일, 2013: 기후변화에 따른 임상분포 변화 및 탄소저장량 예측 –용인시 산림을 기반으로–, *한국기후변화학회지*, 4(2), 177-188.

조명희, 조윤원, 2009: 기상과 지형자료를 통합한 산사태 위험지 예측 기법 개발 –울진지역을 대상으로–, *한국지리정보학회지*, 12(2), 1-10.

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.

천정화, 이창배, 2013: 소나무의 지리적 분포 및 생태적 지위 모형을 이용한 기후변화 영향 예측, *한국농림기상학회지,* 15(4), 219-233.

최원일, 고상현, 이승규, 2011: 2010년도 산림병해충발생예찰조사 연보, 삼성에드컴, 서울.

최원일, 고상현, 이승규, 2012: 2011년도 산림병해충발생예찰조사 연보, 삼성에드컴, 서울.

최원일, 고상현, 이승규, 2013: 2012년도 산림병해충발생예찰조사 연보, 사회복지법인 나우리, 서울.

최원일, 고상현, 이승규, 2014: 2013년도 산림병해충발생예찰조사 연보, 삼성에드컴, 서울.

최윤석, 최천규, 김경탁, 김주훈, 2013: 국지적 산사태 발생 예보를 위한 레이더 자료의 활용성 평가, *한국습지학회지*, 15(2), 191-201.

하림, 신형진, 김성준, 2007: 위성영상을 이용한 기후변화에 따른 미래 식생정보 예측 기법 제안, *한국지리정보학회지*, 10(3), 58-69.

홍지연, 심창섭, 이명진, 백경혜, 송원경, 전성우, 박용하, 2011: 위성영상으로 분석한 장기간 남한지역 순 일차생산량 변화: 기후인자의 영향, *한국원격탐사학회지*, 27(4), 467-481.

황상일, 명수정, 조공장, 안정이, 박선환, 홍석영, 장용선, 손연규, 한경화, 2010: 식생과 토양의 역할을 고려한 저탄소 토지이용계획 수립방안 (II), 한국환경정책·평가연구원 연구보고서, 단일호(2010), 1-296.

황상일, 명수정, 조공장, 조한나, 2009: 식생과 토양의 역할을 고려한 저탄소 토지이용계획 수립 방안 (Ⅰ), 한국환경정책·평가연구원 연구보고서, 단일호(2009), 1-113.

황의순, 정대석, 김경수, 이문세, 송영석, 2013: 통계기법에 의한 산사태발생지역 이암 풍화토층의 토질특성 분석, *한국토목섬유학회논문집*, 12(3), 31-41.

Black, B. A., Shaw, D. C and Stone, J. K. 2010. Impacts of Swiss needle cast on overstory Douglas-fir forests of the western Oregon Coast Range. Forest Ecology and Management 259: 1673-1680.

Choi, S., Lee, W. K., Kwak, H., Kim, S. R., Yoo, S., Choi, H. A., Park, S., and Lim, J. H., 2011: Vulnerability assessment of forest ecosystem to climate change in Korea using MC1 Model, *Journal of Forest Planning*, 16, 149-161.

Choi, S., Lee, W. K., Son, Y., Yoo, S., and Lim, J. H., 2010: Changes in the distribution of south Korean forest vegetation simulated using thermal gradient indices, *Science China Life Sciences*, 53(7), 784-797.

Choi, W. I., 2011: Influence of global warming on forest coleopteran communities with special reference to ambrosia and bark beetles, *Journal of Asia-Pacific Entomology*, 14(2), 227-231.

Choi, W. I., Park, Y. K., Park, Y. S., Lee, H. P., and Ryoo, M. I., 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.

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. 2007. Seasonal adaptations of the fall

webworm Hyphantria cunea (Durry) (Lepidoptera: Arctiidae) following its invasion of Japan. *Ecological Research*, 22: 855-861.

Gomi, T., Muraji, M. and Takeda, M. 2004. MitochondrialDNA analysis of the introduced fall webworm, showing its shift in life cycle in Japan. *Entomological Science*, 7: 183-188.

Han, S., Chung, H., Noh, N. J., Lee, S. J., Jo, W., Yoon, T. K., Yi, K., Park, C., Ko, S., and Son. Y., 2014: Effect of open-field experimental warming on the leaf phenology of oriental oak (Quercus variabilis) seedlings, *Journal of Plant Ecology*, in press.

IPCC, 2003: Good practice guidance for land use, land-use change and forestry, IPCC National Greenhouse Gas Inventory Programme, IGES, Japan.

Jösson, A.M., Appelberg, G., Harding, S., Bäring, L., 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., Klopfenstein, N. B., Ota, Y., Lee, S. K., Woo, K. S., and Kaneko, S., 2010: White pineblister rust in Korea, Japan and other Asian regions: comparisons and implications for North America, *Forest Pathology*, 40(3-4), 382-401.

Kliejunas, J., Geils, B., Glaeser, J., Goheen, E., Hennon, P., Kim, M-S., Kope, H., Stone, J., Sturrock, R., and Frankel, S. 2008: Climate and forest diseases of Western North America: a literature review. Albany, CA: U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Pacific Southwest Research Station. 36.

Ko, S., Son, Y., Noh, N. J., Yoon, T. K., Kim, C., Bae, S. W., and Kim, H. S., 2012: Influence of thinning on carbon storage in soil, forest floor and coarse woody debris of Larix kaempferi stands in Korea, *Forest Science and Technology*, 8(2), 116-121.

Kwak, D. A., Lee, W. K., Son, Y., Choi, S., Yoo, S., Chung, D. J, Lee, S. H., Kim, S., H., Lee, Y., J., and Byun, W. H., 2012: Predicting distributional change of forest cover and volume in future climate of South Korea, *Forest Science and Technology*, 8(2), 105-115.

Kwon, T. S., Park, Y. K., Oh, K. S., Kwon, Y. D., Shin, S. C., Kim, C. S., and Lee, H. P., 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., Haack, R.,Choi, W. I., 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., Kim, I. K., Koh, S. H., Cho, S. J., Jang, S. J., Pyo, S. H., and Choi, W. I., 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., Yoon, T. K., Han, S., Kim, S., Yi, M. J., Park, G. S., Kim, C., Kim, R., and Son, Y., 2014: Estimating the carbon dynamics of South Korean forests from 1954 to 2012, *Biogeosciences Discussions*, 11(3), 5023-5052.

Li, X., Son, Y. M., Lee, K. H., Kim, R. H., Jin, G., Son, Y., and Yi, M. J., 2013: Biomass and carbon storage in an age-sequence of Japanese red pine (Pinus densiflora) forests in central Korea, *Forest Science and Technology*, 9(1), 39-44.

Li, X., Yi, M. J., Son, Y., Park, P. S., Lee, K. H., Son, Y. M., and Jeong, M. J., 2011: Biomass and carbon storage in an age-sequence of Korean pine (Pinus koraiensis) plantation forests in central Korea, *Journal of Plant Biology*, 54(1), 33-42.

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.

Morelli, T. L. and Carr, S. C. 2011: A review of the potential effects of climate change on Quaking aspen (Populus tremuloides) in the Western United States and a new tool for surveying aspen decline, USDA Forest Service Pacific Southwest Research Station, General Technical Report PSW-GTR-235.

Nam, Y. W., Choi, W. I., Won, D. S., Kim, J. K., 2013a: Density related plasticity in stand-level spatial distribution of the ambrosia beetle, Platypuskoryoensis (*Coleoptera:Curculionidae*), *Population Ecology*, 55, 3-10.

Nam, Y. W., Koh, S. H., Won, D. S., Kim, J. K., Choi, W. I., 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 Choi, W. I., 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.

Noh, N. J., Kim, C., Bae, S. W., Lee W. K., Yoon, T. K., Muraoka, H., and Son, Y., 2013: Carbon and nitrogen dynamics in a Pinus densiflora forest with low and high stand densities, *Journal of Plant Ecology*, 6(5), 368-379.

Park, C. G., Kim, D. S., Lee, S. M., Moon, Y. S., Chung, Y. J., and Kim, D. S., 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.

Sinclair, W. A. and Lyon, H. H. 2005: Diseases of Trees and Shrubs(second ed.), Cornell University Press, Ithaca and London, 660.

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.

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.

Yang, A. R., Son, Y., Noh, N. J., Lee, S. K., Jo, W., Son, J. A., and Hwang, J., 2011: Effect of thinning on carbon storage in soil, forest floor and coarse woody debris of Pinus densiflora stands with different stand ages in Gangwon-do, central Korea, *Forest Science and Technology*, 7(1), 30-37.

Yoon, T. K., Noh, N. J., Kim, R. H., Seo, K. W., Lee, S. K., Yi, K., Lee, I. K., Lim, J. H., and Son, Y., 2011: Mass dynamics of coarse woody debris in an old-growth deciduous forest of Gwangneung, Korea, *Forest Science and Technology*, 7(4), 145-150.

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

5.1 서론

농업은 토양, 기후, 생물 등 자연 환경에 지배를 받는 산업이다. 특히 기후 환경은 직접적으로 농업에 영향을 미칠 뿐만 아니라 토양 및 생물 환경에 대한 영향을 통해서 간접적으로 영향을 미치므로 기후 환경은 지역의 농업 형태, 농작물의 작부 형태, 적지, 작기, 생산성, 안정성 등을 결정하는 결정적인 요소이다. 따라서 지구 온난화에 따른 기후 변화는 농업기후 자원의 지리적·계절적 변화를 초래하여 농업기후지대의 변화와 이에 따른 작물 적응지역의 변화, 잡초 및 병충해 등의 발생종 및 발생량의 변화, 토양 비옥도의 변화, 한발 정도의 변화 등을 통해 농업생산에 간접적인 영향을 준다. 뿐만 아니라 대기 중의 탄산가스 농도 증가와 온도의 상승은 작물의 광합성에 의한 물질 생산, 동화물질의 각 기관으로의 배분, 발육속도, 물의 이용효율 등에 영향을 주어 작물의 생산성에 직접적인 영향을 미칠 것으로 예상이 된다. 또한 지구 온난화에 따른 기후변화와 그 영향은 지리적 및 국지적으로 매우 다르게 나타날 것으로 예상된다(환경부, 2011).

기후변화가 작물과 식량 생산에 영향을 미치고 있다는 것이 세계 여러 지역에서 분명하게 관측되고 있으며, 긍정적인 영향 보다는 부정적인 영향이 더 보편적인 것으로 보고되고 있다. 3 ~ 4℃ 또는 그 이상의 지역 평균기온 상승이 예견되는 기후변화 시나리오 하에서 농업 생산성은 지대한 부정적 영향을 받을 것이며 이에 따라 세계의 식량 생산과 식량안보에 심각한 위험이 될 것으로 전망되고 있다. 이러한 위험은 열대 지역 국가에서 더 클 것으로 예측되고 있는데, 그 이유는 열대 지역 국가에서는 적응 능력을 넘어서는 더 큰 영향을 받으며 온대지역과 비교할 때 빈곤율이 더 높기 때문이다(IPCC, 2014).

과거의 기후 변화가 우리나라 농업의 다양한 방면에 영향을 미쳤으며, 미래의 기후변화 또한 우리나라 농업에 지대한 영향을 미치게 될 것으로 전망된다. 초상일이 늦어지고 만상일이 빨라짐에 따라서 무상기간이 길어지고, 과수의 발아기와 개화기가 빨라지고 있으며, 보리, 가을감자, 마늘, 복숭아, 사과의 재배적지가 점차 북상하고, 기상재해에 의한 농업분야의 피해는 증가 추세이이며, 월동해충의 증가와 토착화 가능성의 증대, 아열대성 병해충의 출현 등 농작물에 피해를 주는 해충의 변화 등이 관찰되고 있다. 또한 미래의 기후변화에 따라서 작물기간이 연장될 것으로 예상하고 있으며, 벼의 경우 현재의 품종과 재배기술을 미래에 그대로 적용하는 경우 고온에 따른 생육기간 단축과 등숙기 고온으로 인한 등숙 저해 등으로 인하여 수량이 저하될 것으로 예상된다 또한 과수의 경우 미래 기온의 변화로 인하여 재배적지가 남쪽에서 북쪽으로, 해안에서 내륙으로, 평지에서 산지로 점차 축소되며, 특히 사과의 경우 평균기온이 3℃ 상승하게 되면, 우리나라의 대부분의 지역이 사과재배에 적합하지 않을 것으로 전망된다(환경부, 2011).

한국기후변화평가보고서 2010(국립환경과학원, 2011)에서는 2010년 이전에 발표된 연구논문을 중심으로 기후변화와 관련된 농업분야 영향, 취약성 및 적응에 대하여 종합적인 검토가 이루어졌었다. 본 보고서는 2010년도 이후에 발표되었거나 그 이전에 발표되었더라도 누락되었던 연구 논문을 중심으로 기후변화에 따른 농업 분야에의 영향 현황과 전망, 취약성 및 적응대책에 대한 연구결과 및 시사점들을 종합하고자 하였다.

과거 기후변화에 따른 농업 기후자원 변화와 관련해서는 농업기후지수, 기상재해, 식물계절, 기후생산력지수 등의 변화에 대해서는 대부분 2010년의 한국 기후변화 영향평가 보고서 2010(환경부, 2011)에서 다루어졌고, 이 보고서에서는 과거 기후변화에 따른 벼 재배가능기간 변화, 미래 기후 조건에서 기후지수, 가뭄 심도 변화 등에 대한 연구내용이 추가로 다루었다. 작물재배 분야에서는 2010년 기후변화영향평가 보고서에서 다루어지지 않았던 벼의 온도구배형온실(Temperature gradient field chamber, TGFC) 실

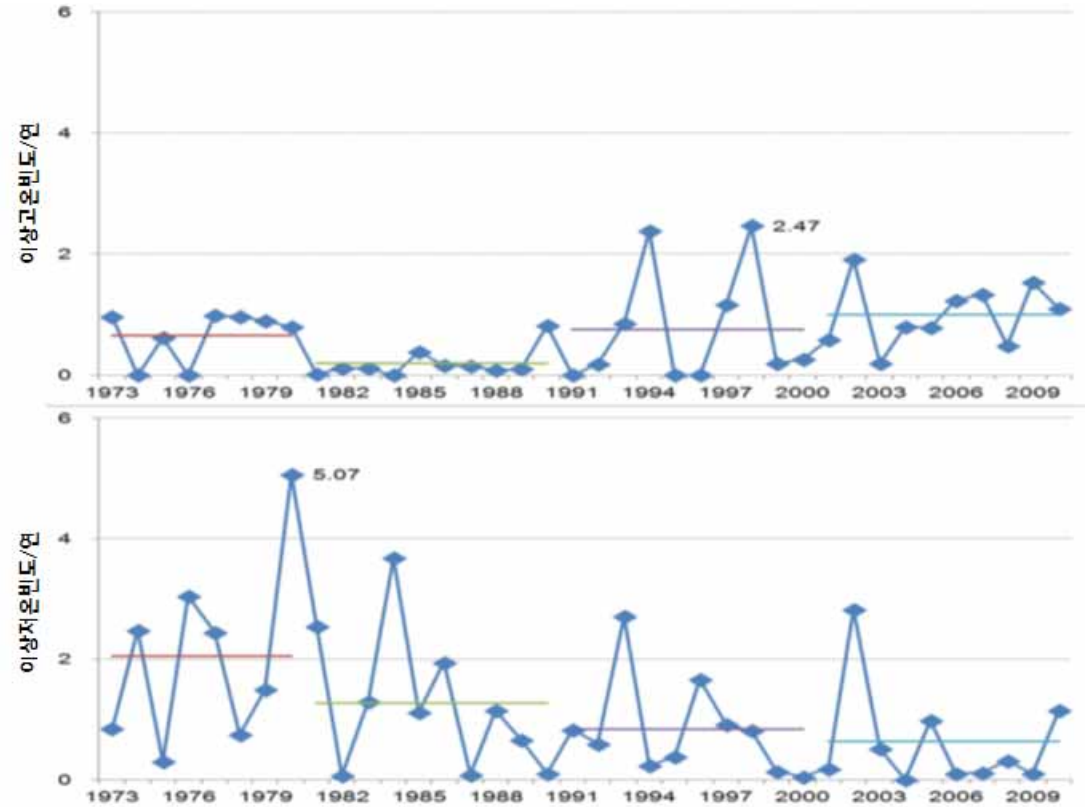


그림 5.1 우리나라 이상고온 및 이상 저온 발생 변화(심교문 등, 2013)

험을 통하여 대기 중의 CO_2 농도와 기온 상승에 따른 벼 생장, 수량 및 품질을 검토한 실험, IPCC SRES 기후변화 시나리오와 신기후변화 시나리오를 이용한 일부 작물의 기후변화에 따른 생산성 변화 예측에 대한 연구가 추가로 다루어졌다. 또한 기후변화에 따른 작물 생산성과 재배면적 변화에 따른 공급 변화와 미래 수요 변화를 종합 전망하여 자급률 변화를 예측하고자 하는 연구가 처음으로 시도되었고, 벼의 2기작재배 가능성 검토, 기후변화 적응 재배법 연구 등 기후변화 적응에 대한 연구가 보고되기 시작되어 추가로 다루어졌다. 축산분야에서는 기후변화 시나리오를 적용한 영향평가연구가 처음으로 시도되었으며 가축의 열스트레스 영향과 관련되어 진행되었다. 병·해충·잡초 분야는 2010년의 보고에서와 마찬 가지로 많은 연구가 이루어지고 있지는 않으나 신기후변화 시나리오를 이용한 일부 병해충의 발생시기, 발생세대수 변화 예측 등의 연구가 보고되었다. 한편 기후변화가 토지가격, 농업 수익, 고랭지 농업지대 등에 미치는 영향 등 경제적 영향 평가에 대한 연구도 보고되기 시작하였다.

5.2 관측된 현황

5.2.1 농업기후자원

5.2.1.1 농업기후지수

기후가 온난화됨에 따라서 노지 작물의 생육 가능기간이 길어지고 있다. 작물 기간(기준온도 15℃)은 전국 평균 165일로 과거 18년간(161일)보다 평균 4일 정도 길어졌다. 첫서리는 늦어지고 늦서리는 빨라져 무상기간이 뚜렷하게 길어지고 있다. 우리나라의 평균 초상일은 10년에 2.9일씩 늦어지는 반면, 만상일은 10년에 3.8일씩 빨라져, 서리가 내리지 않은 무상기간은 10년에 6.7일씩 길어지고 있다(환경부, 2011).

5.2.1.2 농업기상재해

기후변화에 따른 폭염, 폭설, 한파, 한발, 폭우 등의 이상기상의 발생과 그 피해가 급격히 늘어나고 있다. 심교문 등(2013)이 기상청 소관 60개 주요 관측지점의 1973년부터 2010년까지 38년 동안의 일별 평균기온의 10일 평균값을 분석 최소단위로 하여, WMO에서 정한 이상기온의 정의에 따라 이상기온(이상고온, 이상저온)

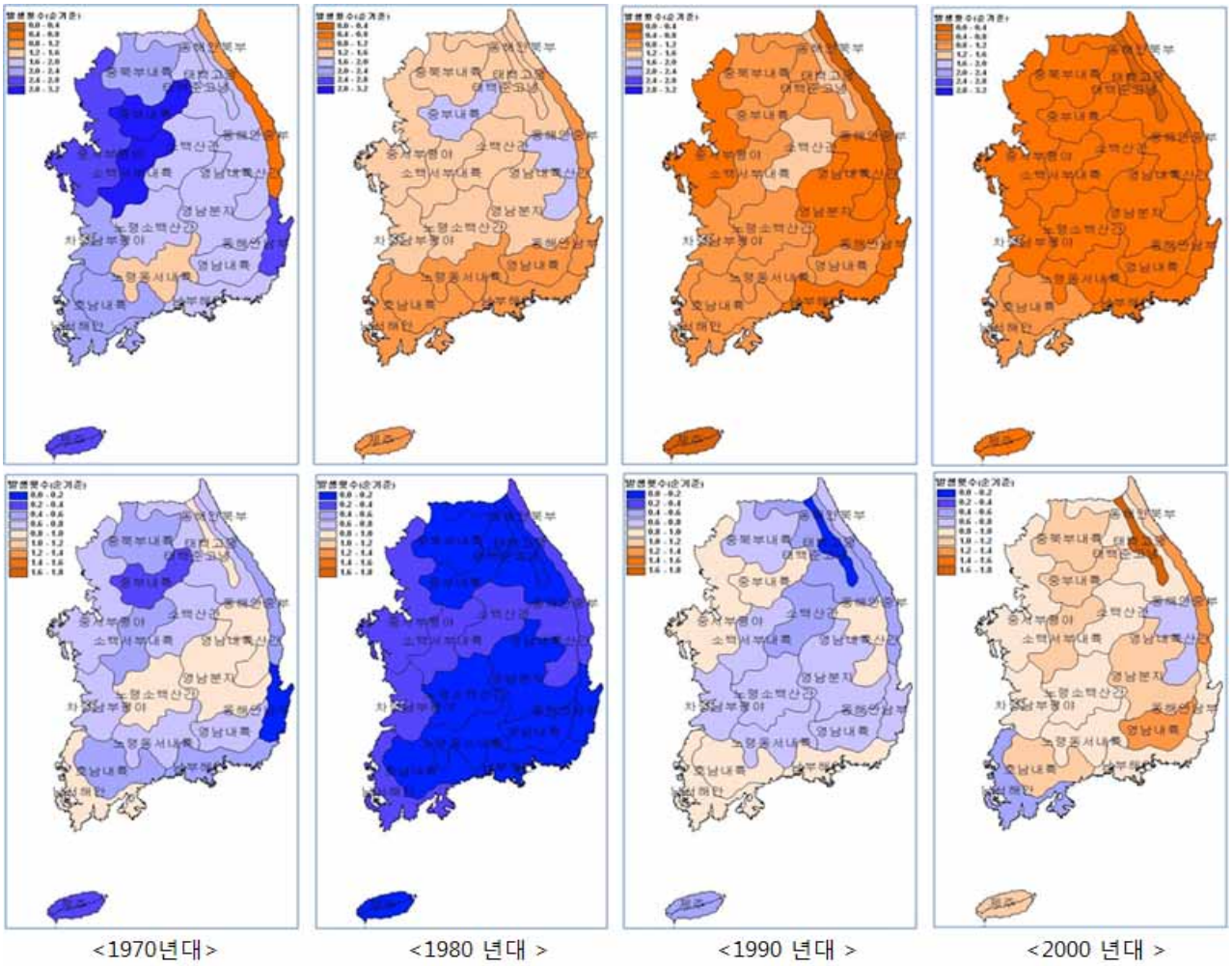


그림 5.2 벼 농업지대 및 연대 별 이상저온(상) 및 이상고온(하) 발상 빈도(심교문 등, 2013)

의 발생횟수를 시·공간규모로 나누어 분석한 바에 의하면 과거 38년간 이상기온의 출현횟수는 연 평균 1.8회(이상고온 0.65회, 이상저온 1.15회)였는데, 이상고온의 연간 출현횟수는 1980년대(1981 ~ 1990년)의 0.2회에서 2000년대(2001 ~ 2010년)의 1.0회로 5배 이상 크게 증가한 반면에, 이상저온의 연간 출현횟수는 1970년대(1973 ~ 1980년)의 2.06회에서 2000년대의 0.63회로 1/3 이하로 크게 감소하는 경향을 나타내고 있다(그림 5.1).

농업기후지대별로는 대부분 기후지대에서 이상고온의 출현이 늘었는데, 특히 태백 고랭지대에서는 이상고온의 출현횟수가 1970년대의 연 평균 0.88회에서 2000년대의 연 평균 1.80회로 20개 농업기후지대 중에서 가장 크게 늘었다. 따라서 태백 고랭지대에서 주로 재배되고 있는 여름철 고랭지 무·배추의 고온장해 가능성이 과거보다 높아졌으며, 실제로 2010년 8월 고랭지의 평균기온이 평년보다 3.2℃ 높아, 배추의 결구에 아주 불리한 기상조건으로 배추 값 폭등에 하나의 원인이 되었다(이덕배와 심교문, 2011). 반면에, 모든 농업기후지대에서 이상저온의 출현횟수가 줄어드는 것으로 분석되었는데, 특히 중부내륙지대에서는 1970년대의 연 평균 2.88회의 이상저온 출현횟수에서 2000년대의 0.47회로 연간 2.41회 줄어든 것으로 조사되어, 저온 관련 농업기후자원 특성이 과거에 비하여 많이 개선되었으나, 여전히 이상저온에 대한 피해에도 대비를 해야 한다. 예를 들어 2013년 봄철에는 2월 하순부터 3월 중순까지 평년보다 2℃ 정도 고온으로 경과되어 과수와 월동작물의 생물계절이 빨라졌는데, 4월의 평균기온이 평년보다 2℃ 정도 낮았고, 이례적으로 일 최저기온이 영하로 떨어져서 과수의 꽃과 새순에 저온피

해가 크게 나타났으며, 월동작물(맥류, 마늘 등)의 생육 부진으로 생산량이 크게 줄어들었다(심교문 등, 2013). 축산분야에서는 주로 폭염에 의해 1,985천 두수(닭 1,664천 수, 오리 242천 수, 돼지 2,133 두 등)가 폐사되었으며, 우유생산량이 약 10% 감소되었다(기상청, 2013).

5.2.1.3 작물 재배적기와 재배시기

기후 변화에 따른 농업기후자원 변화에 따라서 기상재해를 회피하고 작물의 품질과 생산성을 최대화할 수 있는 재배 적기가 변하고 있다. 과거 30년(1931~1960)과 최근 30년 (1971 ~ 2000)의 평년기온을 이용하여 벼 작기의 변화와 생육반응을 분석한 바에 의하면 이앙 후 벼가 저온에 의하여 활착이 불량해지지 않는 가장 빠른 이앙 한계일인 이앙기조한은 과거 30년 동안 지역별로 4~7일 빨라졌고 가을의 저온 피해를 입지 않고 안전하게 등숙할 수 있는 가장 늦은 한계일인 안전출수기만한은 약 3일 늦어졌고(이정택 등, 2010), 벼가 출수 후 등숙에 가장 적합한 온도를 확보할 수 있는 적정 출수기가 늦추어지고 있는 것으로 분석됨에 따라 벼 이앙시기의 재조정 등 작부체계 개선이 요구되고 있다(심교문 등, 2008).

한편 농가에서는 기후 변화에 따라서 자율적으로 적응을 하게 됨으로써 작물의 파종, 이식 등 재배 시기가 변한다. 조리나(2008)는 나주시 봉황면 와우리 분동마을에 거주하는 한 농부의 1980 ~ 2006년의 농사일기를 분석하여 기후변화에 따른 작물 재배시기의 변화 경향과 기후변화와의 관계의 파악을 시도하였다(그림 5.3). 벼의 파종기, 이앙 시기 및 수확기가 1990년대 후반 까지는 뚜렷하게 늦어졌으나 그 이후는 오히려 빨

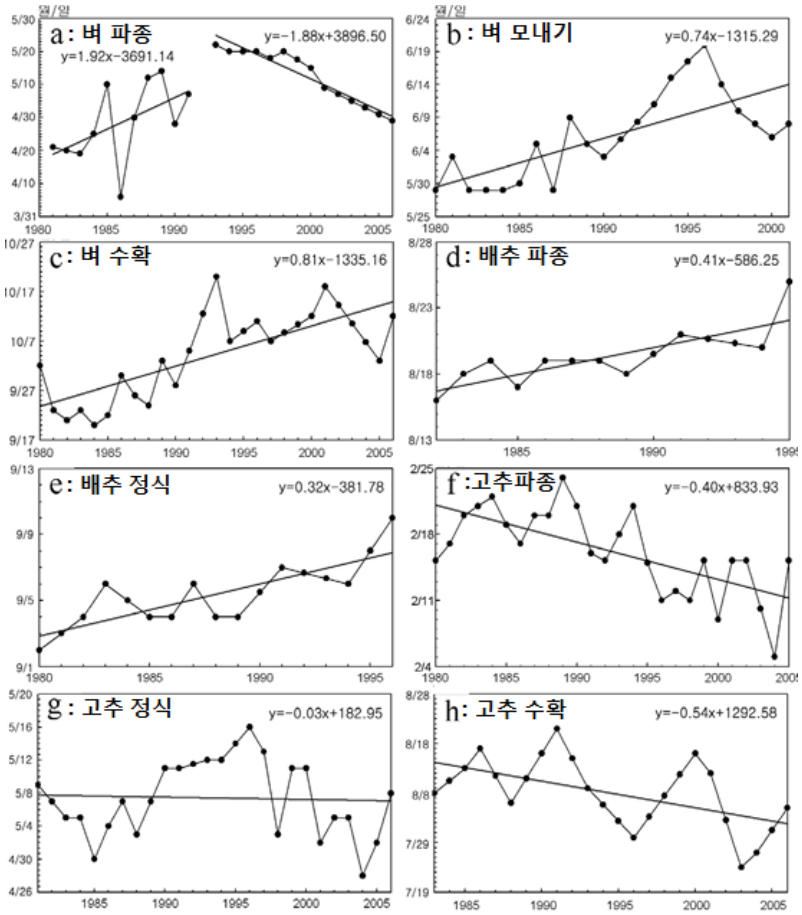


그림 5.3 한 농가의 농사 일기에 나타난 벼, 배추 및 고추의 주요 재배 시기의 변화 경향(조리나, 2008)

라지는 경향이었는데, 벼의 재배 시기는 인위적인 영향이 크게 작용하기 때문에 기후요소와의 관계가 유의하지 않다고 하였다. 그러나 벼의 경우 1990년대 중후반까지는 기후 온난화에 따른 등숙기간 중 고온을 회피하기 위하여 재배시기를 늦춘 것이며, 1990년대 중후반부를 경계로 파종·이앙 시기가 빨라진 것은 벼 생산비 절감을 위하여 육묘기간이 짧은 어린모 재배가 권장되었기 때문인 것으로 판단된다. 김장 배추의 파종기 및 정식기가 늦춰지는 경향이 뚜렷하였으며, 특히 정식기는 8월 기온과 유의한 양의 상관관계를 보여, 저온성 작물인 배추의 경우 8월의 기온이 높아짐에 따라서 파종시기를 늦춘 것으로 파악된다. 고추의 파종기와 수확시기는 빨라지는 경향이 뚜렷하였다. 유의하지는 않지만 재배시기가 기온과 높은 음의 상관관계를 나타내어, 고온성 작물인 고추는 기온이 상승함에 따라 파종 시기를 앞당긴 것으로 보인다.

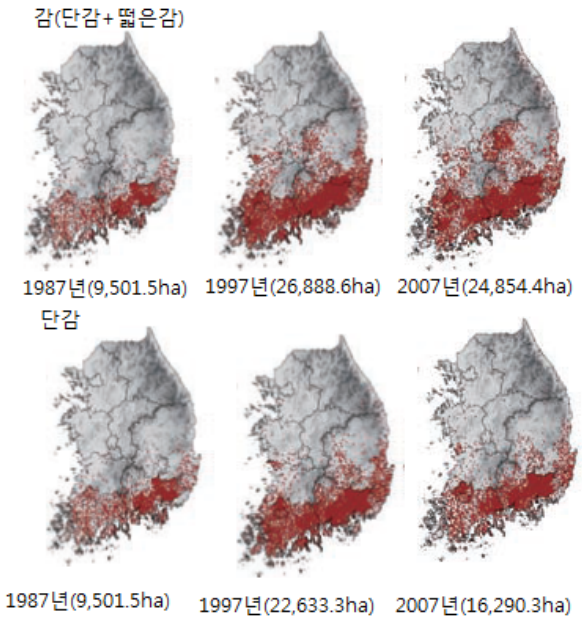


그림 5.4 감 재배지역 및 재배면적 변화 현황(농촌진흥청, 2012)

5.2.1.4 작물 재배적지

월동 작물의 재배 북방한계선은 작물의 내한성과 월동기간 중의 최저온도에 의하여 결정된다. 보리 품종 개량에 의한 내한성 증대와 지구온난화에 따른 겨울철 기온의 상승이 맞물려 보리 재배 북방한계선이 상승하고 있다(환경부, 2011). 주요 과수의 경우도 재배적지가 북상하고 있다. 한라봉은 전북 김제까지, 무화과는 충북 충주까지, 포도는 강원 영월까지, 사과는 경기 포천까지, 녹차는 강원 고성까지 북상한 것으로 파악되고 있다(강기경 등, 2011).

또한 최인명 등(2011)에 의하면 기후변화는 우리나라 과수의 주산지 변화에 영향을 미친 것으로 분석되고 있으며 금후에도 재배지대 변화가 예상되고 있다. 사과 재배 면적은 1980년대 중반 이후 지속적으로 증가하여 1994년을 정점으로 감소하고 있다. 현재의 사과재배지는 백두대간 주변인 산간지로의 이동이 현저하다. 1982년부터 2007년까지 5년 간격으로 전국 시군단위의 재배면적의 증감변화 분석 결과, 꾸준히 증가한 지역은 밀양, 장수, 무주 3개 시군으로 주로 일교차가 큰 내륙산간지역에 해당된다. 반면 1970년대 사과 주산지였던 경산, 이천, 칠곡, 대구광역시는 꾸준히 재배면적이 감소되고 있다. 사과의 품질은 수확기의 과피내 안토시아닌 함량에 의해 크게 좌우되는데, 안토시아닌 발현은 고온 조건에서 발현이 불량하기 때문에 지구 온난화가 계속 지속될 경우 사과의 재배지대는 계속해서 온도가 낮은 산간지대와 북쪽으로 이동될 것으로 예상하였다. 배는 특별한 지역으로의 분포는 보이지 않고, 전국적인 분포를 보이고 있으며 산간지 보다는 평지로의 변화가 이루어지고 있다. 배는 사과와 달리 온도에 의한 과피색의 영향이 크지 않으므로, 온도상승에 따른 재배지 변화가 사과보다 크지 않을 것으로 추정된다. 그러나 밀증, 과육 연화와 같은 생리장해 발생 증가가 예상된다. 복숭아 재배면적은1996년까지 감소하다가 그 이후 2003년까지 증가하였다. 1970년대 복숭아 주재배지역은 서해안 일대와 경남이었으나 2000년대 후반에는 거의 전국적으로 분포하고 있다. 그러나 복숭아는 우리나라 주요 과수 중 비교적 동해를 받기 쉽기 때문에 급격한 확대는 어려울 것으로 예상된다. 충주, 음성, 이천 등 충북지역과 경기지역의 복숭아 재배면적이 증가하고 있으며, 완주, 밀양, 함안 등 경남, 전북지역의 재배면적은 감소하고 있다. 한편, 단감의 경우도 기후 온난화와 함께 기존 재배지역의 면적 증가와 함께

중북부지역으로의 확대가 현저하게 일어나고 있다. 떫은감의 재배면적은 증가되고 있으나 지역적인 변동은 뚜렷하지 않은 것으로 조사되고 있다(그림 5.4).

기후가 온난화됨에 따라서 작물 재배 가능지역이 고도가 높은 지역으로 확장될 가능성이 있다. 김선영 등(2011)은 위성영상 자료(1989, 1999, 2003년)를 이용하여 태백산지 고랭지 농업지역의 토지피복을 분석하여 기후변화가 고랭지 농업지역의 토지피복에 미친 영향을 파악하였다. 시기별 토지피복 분석 결과 1989년에서 2003년 사이 태백산지 지역 임야 면적은 감소한 반면 농경지와 시가지 특히 농경지 면적이 크게 증가한 것으로 파악되었는데, 이를 기후 변화와 관련이 있는 것으로 분석하였다. 즉, 고랭지 농업은 평지와는 다르게 서늘한 기후특성을 이용한 농업으로 기온이 상승하여 평지와의 차별성이 없어지면 고랭지 농작물의 상품성이 떨어지게 되므로 농민들은 고도가 높아 상대적으로 기온이 더 낮은 곳을 개간하여 농경지를 확보할 수 있으므로 기온 상승으로 인해 고랭지 농업지역의 면적

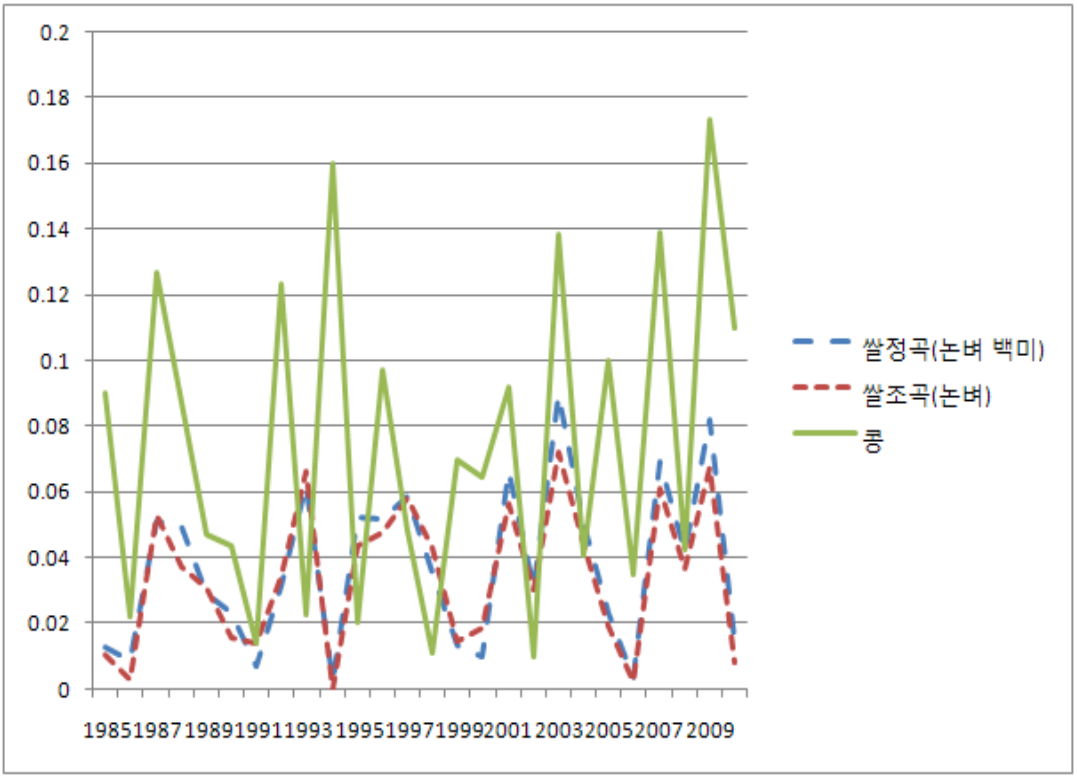


그림 5.5 1985~2010년의 벼와 콩의 단수 변동성 변화(농촌진흥청, 2011)

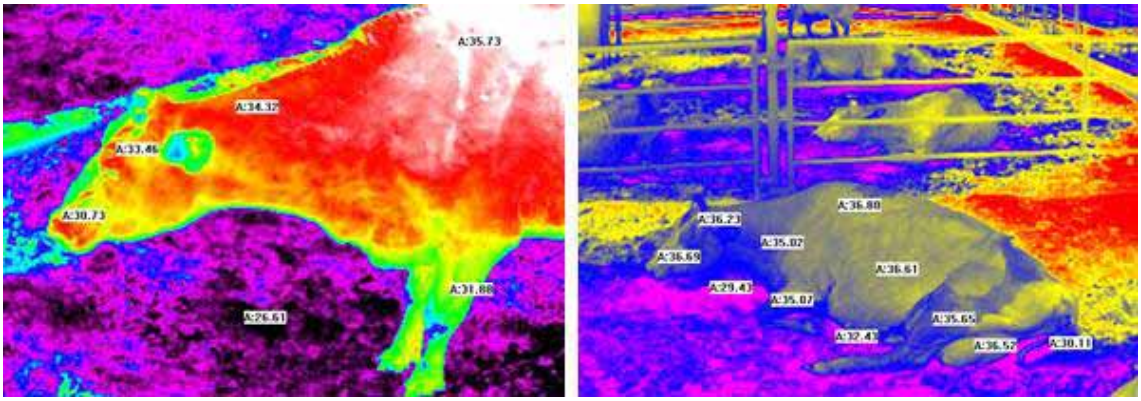
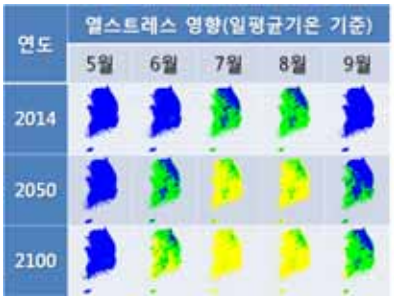
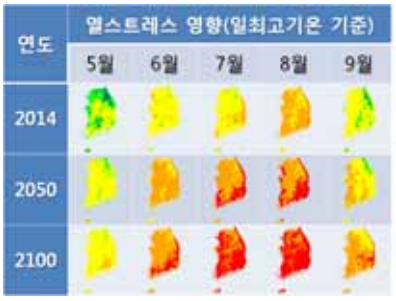


그림 5.6 열화상카메라를 이용한 축사환경 및 젖소의 체표온도 모니터링 장면(김별 등, 2014)

단계구분	표시색상	열스트레스영향
1		영향 없음
2		경미함
3		심함
4		매우 심함
5		폐사 위험





<열스트레스 수준 범례> <일평균기온 폭염영향 변동> <일최고기온 폭염영향 변동>

그림 5.7 국내 젖소의 시계열별 열스트레스 영향 예측(양승학 등, 2014)

이 증가할 수 있을 것이라 하였다.

5.2.2 작물의 생산성

우리나라의 쌀을 비롯한 작물의 수량성은 지속적으로 증가하였으나 이와 같은 수량 변화에 기후변화가 얼마나 기여하였는지에 대한 종합적인 연구는 드물다. 작물의 연차적인 수량 변동에는 기상요인 이외에도 품종의 수량성, 품종의 보급률, 재배기술 등 기술적 요인이 복합적으로 영향을 미치지만 그 해의 풍·흉을 좌우하는 것은 기상 요인이다. 미곡 수량의 경우 온난화에 따라서 과거에 비하여 기상의 변동성이 커짐에 따른 수량의 변동성이 커지고 있다(환경부, 2011). 농촌진흥청(2011)이 1985년 이후 2010년까지의 통계청 단수통계자료를 이용하여 분석한 결과에 의하면 단수의 가변성 변동형태는 품목별로 상당한 차이가 있으나 공통적으로 나타나는 현상은 1990년대 말과 2000년도 초기에 상당히 안정화되었던 단수 변동이 최근 증가하는 현상이 뚜렷한데 여기에는 최근 빈번히 발생하는 이상기후나 그에 따른 자연재해가 많은 영향을 미쳤을 것이라고 하였다(그림 5.5).

노재선 등(2012)은 1971 ~ 2010년의 통계청 조사결과, 우리나라 쌀 수량과 기후변수 간의 Granger 인과관계 분석을 통하여 강수량, 강수일수, 일조시간, 기온과 같은 기후변수가 쌀 생산 단수변화와 인과관계가 있으며, 회귀분석 결과 7 ~ 8월의 기온이 높아지면 쌀 수량이 높아지는 관계를 보여 지금까지 상승 추세에 있는 기온이 쌀 수량 변화에 부정적인 영향을 미치진 않았지만 강수량 증가에 따른 일조 부족은 수량 변화에 부정적 영향을 미친 것으로 분석하였다. 이와 같이 장기적인 추세를 가지고 변하는 기온이나 강수량 자료가 쌀 수량 변화에 영향을 미치지만 이상기후가 발생 여부가 가장 통계적으로 유의성이 높게 쌀 단수에 영향을 미치는 것으로 나타나 장기적인 기후변화는 물론이고, 기후변화의 또 다른 특성인 잦은 이상기후 발생에 대한 적응 노력이 필요함을 지적하였다.

기후변화에 따른 작물 생산성 변화는 지역적으로 다르게 나타날 것이나 이에 대한 종합적인 연구는 없고 일부 지역에 대한 보고가 있을 뿐이다. 허인혜 등(2008)이 전라남도 나주시를 사례지역으로 하여 조사한 바에 의하면 벼는 1980년대 초반, 밀과 보리는 1990년대 초반 이후 수량이 감소하는 경향을 보이는 것으로 보고하였다.

5.2.3 가축의 열스트레스 영향

가축은 적정 환경온도 범위 안에서 사육될 때 최상의 생산성을 보이고 에너지 소비량이 적지만 적정 온도 범위를 벗어나게 되면 스트레스를 받게 되어 건강과 생산성에 직·간접적으로 영향을 받게 된다. 최근 가축의 기후변화 영향평가 연구에 있어 다양한 시도가 이루어졌는데, 열화상카메라를 포함한 축사환경 및 젖소의 체표온도 원격모니터링기법에 의해 적정 온도를 벗어났을 때 가축의 이상행동 및 우유생산량 감소 등이 조사되었다. 온습도지수와 총 우유생산량의 관계를 조사한 결과, 온습도지수가 80이 넘은 시점부터 우유생산량이 감소하였고 최대감소율이 19%까지 달했다(김별 등, 2014).

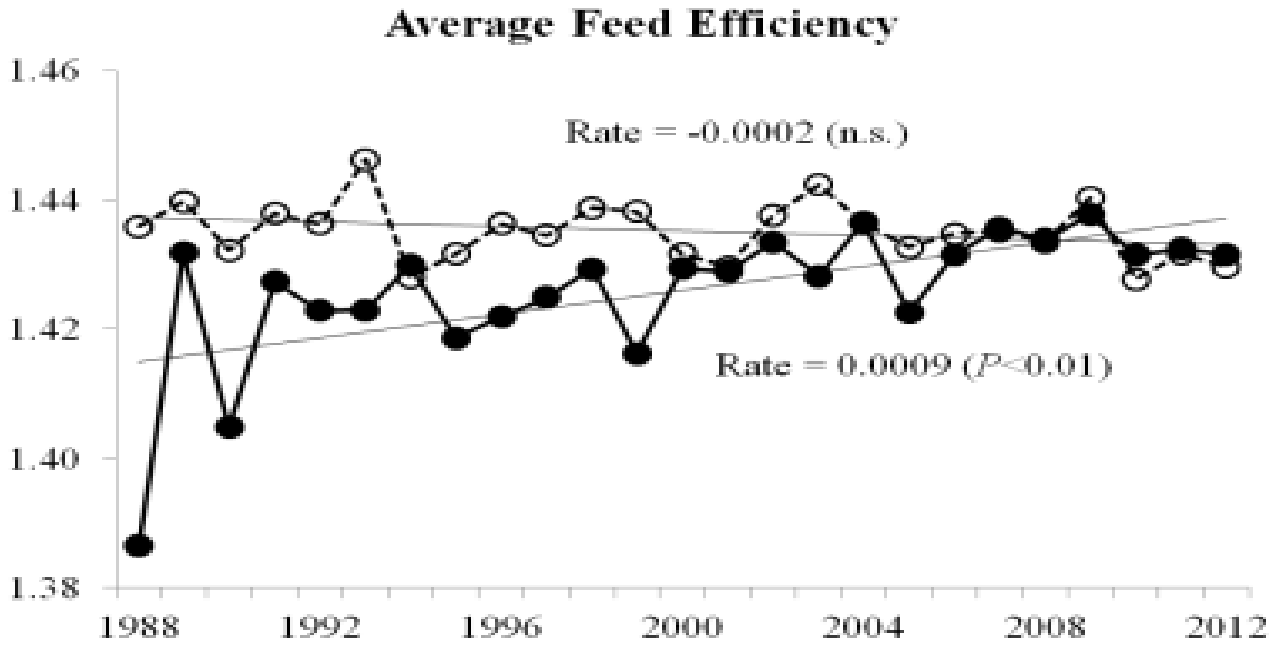


그림 5.8 과거 25년간의 젖소의 평균사료효율 변화(섭취 건물중 당 우유생산량) 변화(이정진 등, 2013)

또한 분야최초로 기후변화시나리오(RCP8.5)를 적용한 상세전자기후도가 제작되었으며 중장기 기후변화 영향예측모델로 제시되었는데, 열스트레스 심각단계가 해안지역에서 내륙지역으로 확대 전망되었다(양승학 등, 2014). 이 결과는 사육적지 파악 및 중장기 적응기술 투입수준결정 등 기초정책자료에 활용될 것으로 평가되었다. 사육온도를 달리한 어린돼지의 생산성 영향 연구에 있어서 고온 환경이 생산성에 영향을 거의 미치지 않았으나, 분변의 세균수 증가에 따라 감염의 위험율이 증가할 것으로 판단되었다. 그러나 육성돼지는 높은 온도에서 사육되었을 때 호흡횟수 증가, 생산성(증체량)감소, 면역력 저하가 유의적으로 나타났다(양승학 등,2013). 산란계의 생산성 영향연구에서 고온 환경이 계란 생산능력을 정상조건보다 50%이하로 떨어뜨리며 분변의 세균수 증가를 유발하였다. 육계의 경우 고온환경이 지속되었을 때 생산성(증체량)이 감소하였다(농촌진흥청, 2014).

이정진 등(2014)이 한국젖소사양표준(2012)에 Cornell Net Carbohydrate and Protein System (CNCPS)의 환경에 따른 젖소의 영양소 요구량 및 공급량 변화 예측 모듈을 융합한 모델을 구축하여 고랭지인 대관령과 평난지인 대구 두 지역의 지난 25년간 (1988 ~ 2012년)의 기후 변화에 따른 젖소의 사료 효율(사료 건물 1kg당 우유생산량) 변화를 모의하였다. 모의 실험은 두 지역의 기후를 제외한 모든 조건이 동일한 상태에서 동물을 사육하는 것으로 가정하고 실시하였다. 그림 5.8에서 보는 바와 같이 대구의 경우 유의하지는 않지만 사료효율이 감소경향을 보이는 반면 대관령의 경우는 사료효율의 유의한 증가 경향을 나타내는 것으로 추정되었다. 고랭지인 대관령은 극심한 추위의 겨울철을 제외하고는 기온 상승으로 인하여 저온에 따른 유지에너지 요구량 증가가 발생하는 빈도가 감소한 반면 여름철의 온도가 고온스트레스를 야기할 정도 까지 상승하지는 않았기 때문에 사료효율 증가 추세를 보이는 반면 평안지인 대구의 경우 봄, 여름, 가을철에는 온도스트레스에 대한 영향이 없으나 여름의 최저기온 상승으로 인한 고온 스트레스 노출빈도가 높아져 사료 효율이 감소 경향을 보이는 것으로 평가하였다.

5.2.4 병해충 및 잡초 발생

지구 온난화에 따른 기후 변화는 따뜻한 월동환경, 식물체 피복기간 연장, 장마 변동 등으로 월동해충의 증가와 토착화 가능성 확대, 아열대성 병해충의 출현 등 유해생물군의 돌발적 발생과 규모화가 예상되는데

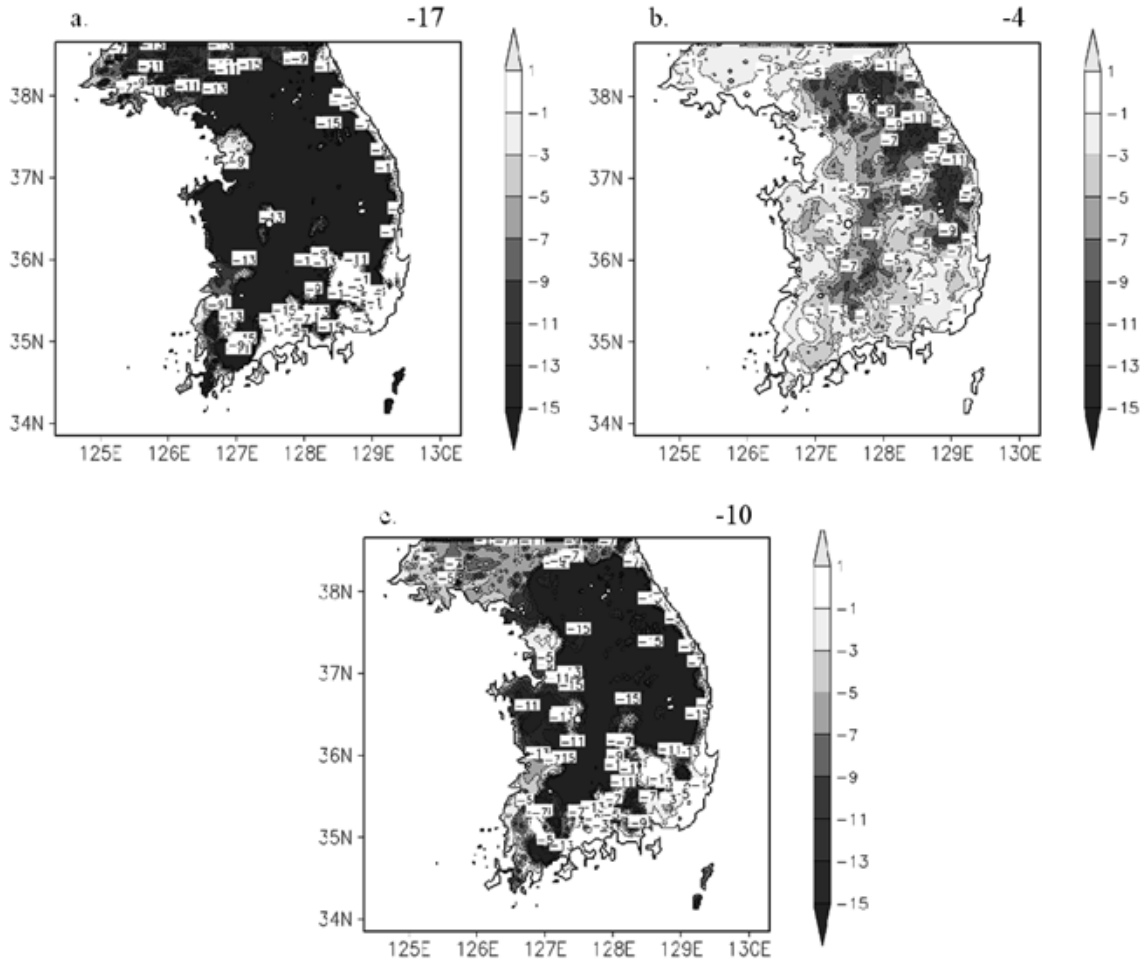


그림 5.9 현재 및 이산화탄소 배증 조건에서 서리일수의 차이(2×CO_2 – 1×CO_2: a 3월, b 4월, c 3월과 4월 평균)(안중배 등, 2010)

(환경부, 2011), 최근 돌발 병해충 발생이 크게 증가하고 있다. 돌발 병해충이란 기류나 수입 농산물을 따라 국외로부터 들어 왔거나, 국내 정착 병해충 중 기후 및 재배양식 등 서식환경 변화에 따라 밀도가 급증하여 예상하지 않았던 병해충이 갑자기 대발생하여 피해를 주는 것을 말한다(최덕수 등, 2012; 심홍식 등, 2012). 최근 돌발적으로 발생되어 피해를 주고 있는 병해충으로는 벼줄무늬잎마름병, 토마토 황화잎말림바이러스, 클로버씨스트선충, 꽃매미, 미국선녀벌레, 갈색날개매미충, 블루베리혹파리 등이다(심홍식 등, 2012).

애멸구가 매개하는 벼 줄무늬잎마름병의 피해지역이 북상하여 경기, 충남, 전남·북, 경남 등으로 확대되어 2007년에는 전국적으로 14,137 ha에서 발생하였는데, 그 원인은 겨울철 온난화에 따른 매개충의 월동 등으로 추정되고 있다(농촌진흥청, 2008). 토마토황화잎말림바이러스(Tomato yellow leaf curl virus, TYLCV)는 담배가루이가 매개하는 병으로서 2008년 경남 통영에서 처음으로 발견되었으나 2012년에는 전국 62개 지역에서 보고되고 있다(심홍식 등, 2012).

꽃매미(*Lycorma delicatula*)는 중국남부와 동남아시아가 원산지인 아열대성 곤충이며, 원산지에서 침입한 개체들이 과거에도 있었으나 낮은 기온으로 인하여 서식이 어려웠지만(Lee and Kwon, 1977), 최근에는 겨울철의 이상고온으로 월동이 가능해졌으며, 2006년에는 대발생하여 2007년에는 서울, 경기, 충북, 2008년에는 충남 천안, 공주, 연기, 전북 정읍, 경북 상주 등으로 확산되는 등 발생지역이 점차 늘어나고 있으며, 2007년에는 서울, 경기, 충북, 2008년에는 충남 천안, 공주, 연기, 전북 정읍, 경북 상주 등으로 확산되었고(KFRI, 2007; Han et al., 2008), 전남지역에는 2010

년에 장성, 영광, 담양을 시작으로 2011년에는 나주, 화순, 구례 등 전남 중북부 지역까지 확대되었다(최덕수 등, 2012).

갈색여치는 2001년부터 충북 영동지역 과수원에 대발생하여 과수농가에 큰 피해를 주었으며(안기수 등, 2007) 그 분포범위가 확대되면서 영동 인근의 옥천, 청원, 보은 등에서 그 피해가 계속되고 있다(방혜선 등, 2008 ; 노두진 등, 2008). 갈색날개매미충은 국내 미기록 토착해충으로 2010년 8월 처음으로 충남 공주, 예산의 사과와 블루베리를 가해하는 것이 발견되었으며(최용석 등, 2011), 전남지역에서는 2011년 3월 구례군 산동면 외산리 인근의 약 286 ha에 발생하여 산수유, 감, 밤, 매실 등의 농작물에 피해를 주었다.

원산지가 북미대륙인 미국선녀벌레는 우리나라 검역대상 해충인데 2005년 8월 김해 한림원의 단감원에서 처음 발견되어 점차 확산되고 있다(Kim et al., 2009). 원산지가 북미대륙인 블루베리 혹파리는 2010년 경기도 화성에서 처음 발견되었으며, 2012년에는 충남북 전북 등의 11개 시군으로 발생이 확대되었으며, 시설재배 블루베리에서 계속 발생하고 있으며, 일부 지역에서는 고온 지속으로 노지에서 발생 및 피해가 증가하고 있다(심홍식 등, 2012).

해에 따른 병해충 발생과 피해면적 변화는 기후 변화, 시비·방제 등 재배기술의 발달 등과 밀접한 관계가 있다. 정학균 등(2014)이 기후변화가 벼 병해충 피해면적 발생에 미치는 영향을 패널모형을 이용하여 분석한 결과, 기온상승 및 강수량 증가가 병해충의 피해면적 발생과 밀접한 관계가 있음을 보고하였다. 즉, 2월 최고기온 상승은 벼물바구미 피해를, 6월 최저기온 상승은 혹명나방 피해를, 6월 강수량 증가는 줄무늬잎마름병 피해를, 7월 일조시간 감소는 잎집무늬마름병 피해를, 7월 호우 일수 증가는 잎도열병 피해를 확대시키는 것으로 분석하였다. 반면에 벼 재배에 있어 방제와 시비에 관한 기술들이 지속적으로 발전되어 왔고 그 결과 병해충 피해 면적이 감소한 것으로 나타났다고 하였다.

5.2.5 농업 경제

기후 변화는 농작물의 생산성, 품질 등에 대한 영향을 통하여 농산물 수익 변화뿐만 아니라 중요한 생산요소인 농지가격 등에도 영향을 미친다. 김창길과 이상민(2009)은 기후변화에 따른 농지의 가치와 농산물 수익변화를 추정함으로써 경제적인 영향을 평가하는 방법인 리카디안 모형을 이용하여 기후변화와 농경지 가격과의 관계를 분석하여 연평균 기온(12.4℃)이 1℃ 높아지면 ha당 농경지 가격이 145 ~ 192만원, 즉 5.7 ~ 7.5% 하락하지만 월평균 강수량(110.8mm)이 1mm 증가하면 ha당 농경지 가격이 145 ~ 192만원 상승하는 것으로 평가 되는데, 지구온난화에 따른 기후변화 요소 중 기온의 변화가 강수량의 변화 보다 농경지가격에 더 크게 영향한다고 하였다.

정준호 등(2012)도 1993 ~ 2010년 기간 동안 전국 56개 시·군별 기후, 지리 및 토양, 사회·경제적 변수들에 대한 패널자료를 구축하고 리카디언 방법을 사용하여 기후변수가 논과 밭의 경작유형별 농지가치에 미친 경제적 효과를 추정하여 김창길과 이상민(2009)의 보고와 유사한 결과를 보고하였다. 즉, 기온변수가 논과 밭의 토지가치에 부정적인 경제적 영향을 미치지만 강수량변수보다는 기온변수가 더욱더 중요하다고 하였다. 또한, 정준호와 김광배(2012)는 강원도의 농업을 사례로 분석하여 기온변수가 논과 밭의 토지가치와 경작면적에 부정적인 영향을 미치고 있는 것으로 분석되었다고 하였다.

한편 정준호와 이승호(2012)는 극한 기후 변수들이 논과 밭 경작유형별로 토지가치에 미친 경제적 효과를 리카디언 방법을 사용하여 강원도 농업을 사례로 분석하였다. 이 연구는 호우 관련 극한기후 변수와 논과 밭의 토지가치는 부정적인 관계가 있고, 여름철 관련 극한기온 변수들은 토지가치에 음(-)의 영향을 미치고 있지만, 한파를 제외한 겨울철 관련 극한기온 변수들은 토지가치와 정(+)의 관계를 보인다고 하였다.

5.3 영향전망

5.3.1 농업기후 자원

5.3.1.1 농업기후지수

일평균기온이 연중 15℃이상 되는 일수를 작물기간이라고 하며 이는 대체로 노지에서의 여름작물 재배가

능 기간을 나타내는 지표로 삼고 있다. GISS 2 × CO_2

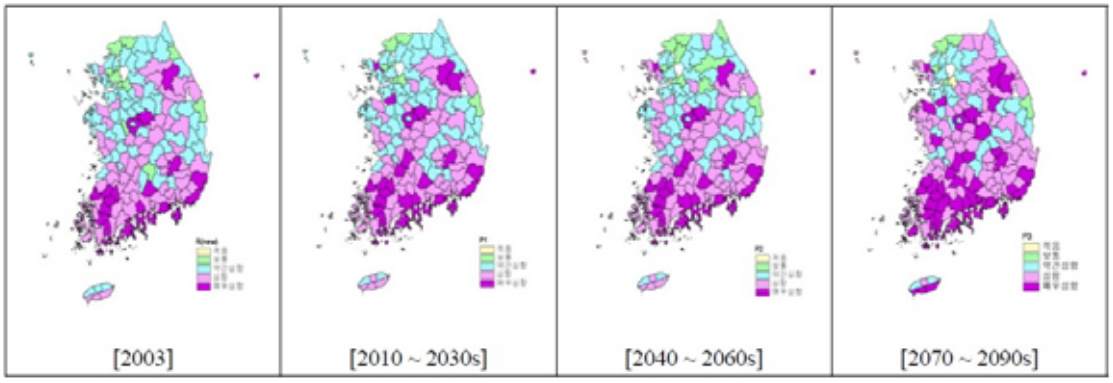


그림 5.10 기후변화(IPCC SRES A1B 시나리오)에 따른 지역별 토양유실량 변화(김민경 등, 2010)

Scenario와 같이 기후가 변화되는 경우 작물기간은 제주도 남쪽의 240일에서의 북쪽의 180일까지 작물기간이 30 ~ 50일 정도 더 연장될 것으로 보이고, 해발 820 m정도 되는 대관령의 경우 작물기간이 150일 정도까지 연장되어 평년 기후의 중북부지방 평지의 작물기간과 비슷하여질 것으로 예상되어 작물의 재배한계가 보다 높은 고도로 높아질 것으로 보인다. 어느 지역의 온량자원(Thermal resources)은 그 지역의 식물 생장기간, 특정작물의 재배가능 여부 등을 관정하는데 중요한 지표가 된다. 온량자원을 평가하는 지표로서 유효적산온도와 생장도일(Growing degree day, GDD)이 이용 되는데 이들 지표로 판단할 때 GISS 2 × CO_2 Scenario와 IPCC SRES A2 시나리오 100년 후 기후조건에서는 현재는 온량자원이 평지보다 부족하여 벼 재배가 이루어지지 않고 있는 고랭지에서도 벼 재배가 가능해지고 제주도 등은 벼의 2기작 재배가 가능하여지는 등 작부 체계에 커다란 변화가 올 것으로 예상 되었다(이변우 등, 1991).

안중배 등(2010)은 접합 대순환 모형인 PNU CGCM을 이용하여 CO_2 배증 조건에서 모의한 결과를 이용하여 지구온난화에 따른 식물기간과 작물기간 등의 농업기후지수의 변화를 살펴보았다. CO_2 배증 조건에서 마지막 서리일은 빨라져서 서리일수가 줄어들고(그림 5.9) 식물기간과 작물기간은 길어지고, 기후생산력지수는 출수 후 40일간의 평균 일조시간과 기온의 상승으로 인해 증가할 것으로 예상하였다(그림 5.9).

5.3.1.2 농업기상재해

김수옥 등(2012)은 '장호원황도' 복숭아의 휴면과 동해위험지수를 이용하여 새로운 기후변화 시나리오(RCP8.5) 조건에서 경기 이천시 주변(A)과 충북 충주시 일대(B), 경북 영천과 경산시 지역(C) 등 복숭아 주산지 3곳의 동해위험 변화를 전망하였다. 3곳의 복숭아 주산지에 대해 1km 격자의 월별 미래 수치기후도로부터 농경지에 해당하는 격자점의 공간 평균값을 추출하고, 이로부터 확률추정기법에 의해 10년 간격으로 30세트씩 일별 기상자료를 생성하였다. 이들 기온자료를 동해위험도 예측모형에 입력하여 2000년대, 2020년대, 2050년대 및 2080년대의 월동기간(11월 1일 ~ 3월 15일) 일별 휴면심도 및 동해위험도를 계산하였는데, 현재(2000년대)의 경우 A와 B지역은 월동기간 내내 동해위험도가 높지만 C지역은 12월 중순에서 1월까지는 상대적으로 위험도가 낮은 것으로 평가되었다. 미래로 갈수록 3개 주산지 모두에서 동해 발생빈도가 줄어들어 2080년대에 이르러서는 현재에 비해 1/4 ~ 1/10에 불과할 것으로 예상되었다. 반면 위험도가 80% 이상으로 '심각한' 수준의 동해는 사라지지 않고 미래에도 발생할 것으로 예상되었으며, 발생시기는 전 기간에 걸쳐 발생하는 현재에 비해 미래에는 12월 ~ 1월 초순으로 제한될 것으로 전망이 되었다. 이러한 전망에 대한 가장 유력한 근거는 생리적 내동성 유지기간(최대 휴면심도 지속시간)의 단축이므로 전반적인 온난화 추세에도 불구하고 기후 연차변이 증폭이 예상되는 미래에는 극한기후로 인한 심각한 동해위험이 복숭아

표 5.1 현재의 파종 적기에 파종한 조·중·중만생 품종의 미래 기후(SRES A1B) 조건에서 생육기간과 생육온도 변화(이충근 등, 2011a)

성숙군	연도	파종일 (월.일)	출수기 (월.일)	생육기간(일)			생육온도(℃)	
				출수 전	출수 후	계	출수 전	출수 후
조생종	1971~2000	5.25	8.16	83	43	127	24.3	22.6
	2011~2040	5.25	8.13	80	38	118	25.4	24.4
	2041~2070	5.25	8.12	78	35	113	26.5	26.5
	2071~2100	5.25	8.11	78	34	112	27.8	28.2
	LSD(0.05)	-	-	2.4	0.2	2.5	0.68	0.08
중생종	1971~2000	5.13	8.17	96	43	139	23.6	22.6
	2011~2040	5.13	8.14	92	38	130	24.6	24.5
	2041~2070	5.13	8.11	89	35	124	25.8	26.8
	2071~2100	5.13	8.09	88	34	122	27.0	28.5
	LSD(0.05)	-	-	3.3	0.3	3.3	0.70	0.13
중만생종	1971~2000	4.27	8.19	114	44	158	22.7	22.5
	2011~2040	4.27	8.15	110	38	148	23.7	24.7
	2041~2070	4.27	8.12	107	34	141	24.8	27.0
	2071~2100	4.27	8.09	104	34	138	25.9	28.9
	LSD(0.05)	-	-	4.9	0.4	4.9	0.75	0.16

주산지 3곳에서 여전히 높을 것으로 판단되었다.

김호성 등(2010)은 극한가뭄의 시·공간적 변화에 대한 기후변화의 영향에 대한 분석을 하여 농업가뭄 특히 단기간 지속 가뭄의 경우 현재보다 미래의 기후조건에서 심화될 것으로 예측하였으며 수문학적 가뭄의 경우 기간에 상관없이 현재보다 미래에 심화될 것으로 예측하였다. 송성호 등(2013)은 농업용수의 지하수자원 의존성이 매우 크고 수문계 변화에 민감한 제주지역에 대하여 과거 기상자료와 기후변화에 따른 미래 예측자료(SRES A1B)를 이용하여 2011년부터 2100년까지 강수변화와 증발산량을 동시에 고려한 파머가뭄지수(Palmer drought severity index, PDSI)를 계산하였다. 제주지역은 전체적으로 강수량이 증가하지만 시간경과에 따른 증발산량 증가로 가뭄이 점점 심화되는 것으로 추정되었다. 특히 지역적으로는 북부와 서부지역이 남부지역에 비해 가뭄이 심해지는 것으로 분석되어, 이에 대한 용수 공급정책 수립이 필요할 것으로 판단된다고 하였다.

김민경 등(2010)은 A1B 기후변화 시나리오에 따르면 21세기 말에는 강우량이 17% 증가가 예상되어 밭토양의 단위면적당 토양유실량은 2003년 대비 7.6% 증가하고, 총 토양유실량은 2003년 대비 12.9% 증가할 것으로 예측하였다(그림 5.10).

윤성탁 등(2013)은 기후노출, 민감도, 적응능력 대용변수들을 선발하고 그 가중치를 도출하여 전국 232개 시군구의 농업 시설의 이상 기상에 대한 취약성을 평가하였는데, 이상 기상에 대한 재배시설들의 취약성이 미래의 기후 조건(SRES A1B)에서 크게 증가할 것으로 전망하였다.

5.3.1.3 식물계절(crop phenology)

식물계절은 기후 변화를 파악하는 중요한 지표이며 지구온난화에 따른 기온 상승의 영향이 뚜렷하게 반영된다. 기후 온난화에 따라서 배, 복숭아, 포도 등의 발아기, 개화기 등이 빨라지고 있는 것으로 관측 되었고(환경부, 2011), 미래의 기후에서도 이와 같은 변화가 지속될 것으로 예상되었다(조정건 등, 2012a;, Hur and Ahn, 2014).

조정건 등(2012a)은 사과, 배, 복숭아 및 포도에 대하여 미래의 기후 조건(RCP8.5)에서 개화기를 예측하였다. 사과 '후지'는 미래의 2090년까지 발아기와 만개기는 지속적으로 빨라져서 한반도의 사과 만개기는 기준년도인 1981 ~ 2010년 5월 상·중순에서 2090년대는 4월 하순으로 이동하였으며, 특히 남해안과 동해안 지역의 만개기가 빨라지는 것으로 추정하였다. 배 '신고'의 발아기와 만개기 또한 지속적으로 빨라져, 기준년도의 4월 하순에서 2090년에는 4월 상순으로 전국적으로 약 한달 정도 개화가 빨라질 것으로 예측하였

표 5.2 각 연대별 최적 파종에 파종한 조·중·중만생 품종의 미래 기후(SRES A1B) 조건에서 생육기간과 생육온도 변화(이충근 등, 2011a)

성숙군	연도	최적 파종일 (월.일)	출수기 (월.일)	생육기간(일)			생육온도(℃)	
				출수 전	출수 후	계	출수 전	출수 후
조생종	1971~2000	5.25	8.16	83	43	127	24.3	22.6
	2011~2040	6.07	8.23	77	43	121	26.3	22.6
	2041~2070	6.18	8.31	74	43	117	28.2	22.7
	2071~2100	6.25	9.07	74	43	117	29.8	22.7
	LSD(0.05)	-	-	1.8	ns	1.9	0.46	ns
중생종	1971~2000	5.13	8.17	96	43	139	23.6	22.6
	2011~2040	5.30	8.24	86	44	129	26.0	22.6
	2041~2070	6.12	9.01	81	44	125	28.0	22.6
	2071~2100	6.20	9.08	80	44	124	29.6	22.6
	LSD(0.05)	-	-	2.4	ns	2.5	0.46	ns
중만생종	1971~2000	4.27	9.19	114	44	158	22.7	22.5
	2011~2040	5.20	8.26	98	44	142	25.5	22.5
	2041~2070	6.04	9.03	91	44	135	27.7	22.5
	2071~2100	6.13	9.10	90	45	135	29.4	22.5
	LSD(0.05)	-	-	3.2	ns	3.3	0.46	ns

다. 경남지역과 전남 나주 지역 등의 경우 2090년대에는 대부분이 2월 하순에 만개가 되는 것으로 예측하였고, 일부 지역의 경우 겨울철 온도의 상승에 따라 저온요구도가 부족하여 개화하지 못할 것으로 예상되어 이에 대한 추가분석이 필요하다고 하였다. 포도 '캠벨얼리'를 대상으로 분석한 결과 발아기와 만개기가 지속적으로 빨라졌으며 만개기가 6월 중순에서 2090년에는 5월 하순으로 약 20여일 빨라졌다. 복숭아 '장호원황도' 품종을 대상으로 발아기와 만개기 예측을 한 결과 기준년도에는 전국적으로 평균 4월 하순 ~ 5월 상순이었던 만개기가 2090년에는 4월 중순으로 약 20일 정도 빨라질 것으로 예측되었다. 2090년대는 경북 남부지역과 경남지역은 4월 상순에 만개를 하고, 일부 지역은 3월 하순에 개화가 진행될 것으로 예측되었다. 2090년대 경기 이천, 충북 음성은 4월 중순 만개될 것으로 예측하였다 (조정건 등, 2012a).

한편, Hur and Ahn(2014)도 기상청의 식물계절 관측목을 대상으로 한 연구에서 미래의 기후 조건(RCP4.5와 RCP8.5)에서 현재(1986 ~ 2005년) 대비 복숭아는 각각 7.0 및 12.7일 개화가 빨라지고 배는 각각 6.7일 및 10.7일 개화가 빨라지는 것으로 예측하였다.

한편, 권영순 등(2012)은 참다래 '헤이워드' 품종의 휴면시계모형과 발육속도 모형을 작성하여 제주도의 현재와 미래기후(SRES A1B) 조건에서 개화일과 저온요구 충족도 변화를 모의한 결과 미래로 갈수록 현재 평년에 비해 개화일이 앞당겨지는 한편, 저온요구도의 부족으로 개화불량인 지역이 늘어날 것으로 추정된다고 하였다.

5.3.2 작물재배

한국 기후변화 영향 평가 보고서 2010에서는 여름작물인 벼, 콩의 미래 기후 조건에서의 생산성 변화, 밀, 보리, 감자, 과수 등의 재배 적지 변화, 벼의 기후학적인 재배적기 변화 등에 대하여 다루었다. 한국 기후변화 영향 평가 보고서 2010 이후 수집한 기후변화 관련 연구의 특징은 기후변화에 따른 작물의 생산성 변화 영향 평가 이외에 미래 기후 조건에서의 재배 적기, 재배 적지, 식량 생산 및 자급률 변화 등에 대한 연구가 시도되고 있다.

5.3.2.1 재배적기

이충근 등(2011a)은 미래 기후변화(SRES A1B) 및 그에 따른 재배시기 조정 여부가 우리나라 현재 벼 품종의 생태형별 생육기간과 생육온도에 미치는 영향을 분석하였다. 출수 후 40일간의 평균기온이 22.5℃(등숙 적온)가 되는 파종 일(최적파종일)을 벼 생육모델

ORYZA2000을 이용하여 추정하였다. 최적파종기는 생육기간이 짧은 조생종에서 비교적 늦고, 생육기간이 긴 중만생종에서 빠른 경향이었으며, 벼 생태형에 관계없이 지구온난화가 진전될수록 최적파종기가 늦어지는 경향이었다(표 5.2). 재배시기를 고정하였을 경우 지구온난화가 진전되면서 벼 출수기와 그에 따른 출수 전 생육일수가 빨라졌는데, 조·중생종에 비해 중만생종의 생육기간이 크게 단축되는 경향이었고, 출수 후 생육기간은 벼 생태형간 차이 없이 10일 정도 단축되었으며, 출수 전에 비해 출수 후 생육기간 단축 정도가 컸다(표 5.1).

최적파종기를 기준으로 벼 재배시기를 조정하였을 경우 지구온난화가 진전되면서 출수기는 늦어졌으며, 출수 후 생육기간 및 생육온도는 변화가 없었다. 재배시기를 고정하였을 때에 비해 출수 전 생육온도는 크게 상승하였고, 생육기간은 크게 단축되었는데, 조·중생종에 비해 중만생종에서 그 경향이 심하였으며, 생육온도에 비해 생육기간 변화의 지역 간 편차가 크게 나타났다. 결론적으로 지구온난화가 진점됨에 따라 벼 생육온도가 상승하고 생육기간이 단축되어 벼 수량성 및 품질 저하가 우려 되었는데, 특히 생육기간 단축이 큰 중만생종의 피해가 클 것으로 예상되었으며, 기후변화에 따른 재배시기 조정은 벼 수량성 및 품질 결정에 영향력이 큰 등숙기간의 온도환경을 개선할 수 있지만 출수 전 생육기간이 크게 단축되어 여전히 벼 수량성 감소를 경감시키는데 한계가 있어 미래 기후변화에 대응하여 더욱 적극적인 재배기술과 품종개발이 요구된다고 하였다(표 5.2).

5.3.2.2 재배적지

김대준 등(2012)은 미래 기후조건(RCP8.5)에서 가을보리의 품종군별 재배안전지대의 지리적 변화를 예측하였다. 2020년대에는 강원도와 북한 남부 대부분 지역에서 겉보리 재배가 가능해지며 남한 전역에서는 쌀보리 재배가 가능해질 것이고, 2040년대에는 북한 평야지대 거의 모든 벼논에서 쌀보리 이모작이 가능해질 것으로 예상하였다(그림 5.11). 감자의 경우 재배 작형에 따라 미래 기후조건에서 기후학적 재배적지에 대한 영향이 달라 봄감자와 가을감자의 경우는 온난화에 따라서 재배 적지가 크게 확대되나 여름감자의 재배 적지는 현저히 감소하여 2090년대가 되면 RCP8.5 기후변화 시나리오 조건에서는 재배 적지가 모두 사라질 것으로 전망된다(문경환 등, 2013).

조정건 등(2012b)은 국내 주요 온대 과수인 사과, 배, 포도, 복숭아, 단감, 떫은감을 대상으로 현재까지 연구되어온 재배적지 기준을 적용하여 미래기후(RCP8.5) 조건에서 변화를 전망하였다. 사과의 경우 고품질 사과재배지역 예측을 위하여 안토시아닌 함량, Hunter A 값, 과형지수를 이용한 예측식을 이용하였고, 배, 포도, 복숭아, 떫은감은 연평균기온, 1월 최저기온과 4월 및 4 ~ 10월의 생육기 온도를 이용하여 예측하였다. 사과의 기후적 재배 적지는 2020년대까지는 현재와 거의 비슷한 수준으로 유지되다가 2050년대와 2090년대에 급격히 재배면적이 감소할 것으로 추정되었는데, 2020년대는 전 국토면적 대비 약 48%가 재배적지로 예측되었으나, 2050년대 13%, 2090년대는 약 1%대로 감소할 것으로 예측하였다(그림 5.12).

배와 떫은감은 2020년까지 재배적지가 증가하다가, 그 이후 2090년대까지 지속적으로 감소할 것으로 추정하였다. 배는 현재 전 국토면적 대비 56%가 재배적지에 해당되며 2020년에는 강원도 일부를 제외한 전국(국토대비 77%)에서 재배가 가능할 것으로 예측되었고, 이후 2090년에는 15%까지 감소할 것으로 추정하였다. 떫은 감 역시 현재 60%에서 2020년까지 65%로 증가하나 그 이후 감소하다 2090년대는 10%대로 감소하는 것으로 추정되었다. 포도와 복숭아의 경우 2050년까지 꾸준히 재배면적이 증가하다가 2090년에 급격히 감소하는 것으로 추정하였는데. 포도의 경우 현재 전 국토 면적대비 28%에서 2050년까지 약 55%정도 재배적지가 꾸준히 증가하다가 2090년 약 8% 정도로 급격히 감소하는 것으로 추정하였다. 복숭아 재배적지는 현재 면적대비 약 38%에서 2050년까지 52%로 재배적지가 증가할 것으로 추정하였는데, 2050년대에는 경북 북부, 충청, 경기지역이 기후적으로 재배적지가 될 것으로 예상되지만 2090년경에는 전국적으로 급격히 감소하는 것으로 추정되었다(그림 5.13). 단감은 현

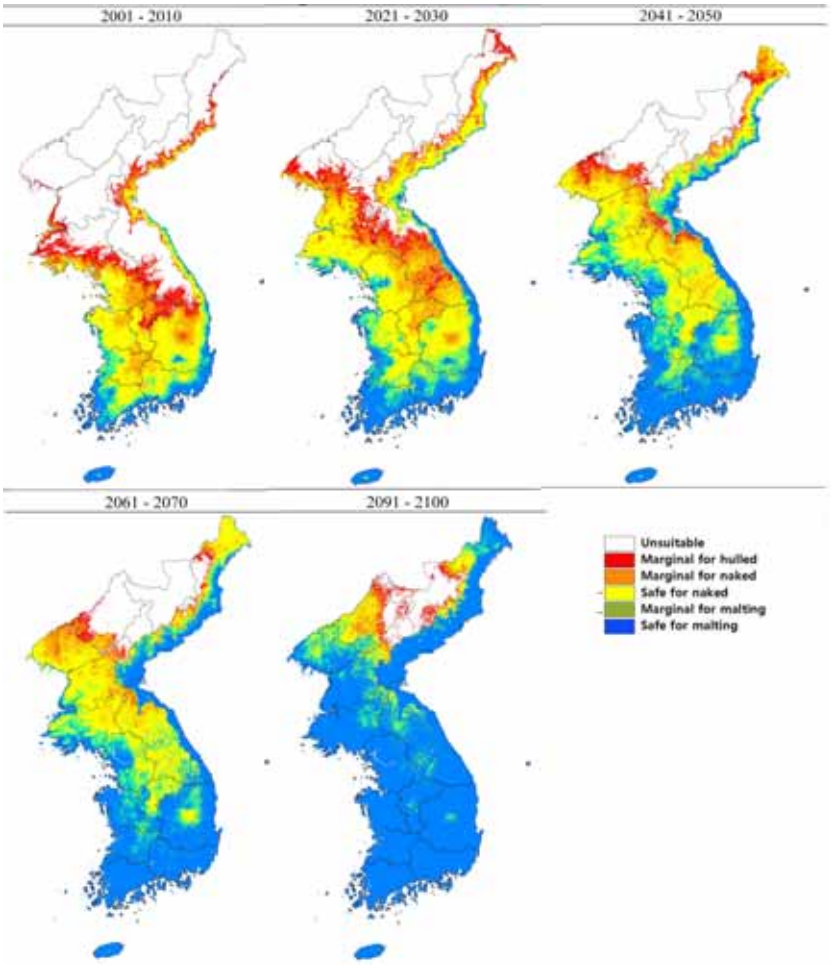


그림 5.11 현재 및 미래기후(RCP8.5) 조건에서 추파 겉보리, 쌀보리 및 맥주보리의 안전재배지대(김대준 등, 2012)

재 15%에서 2020년 19%, 2050년 19%로 완만히 증가한 후 2090년 7%로 감소할 것으로 추정하였다.

문경환 등(2013)과 권영순 등(2012)은 참다래 '헤이워드' 품종의 현재와 미래기후 조건에서 재배적지 변동을 예측하였다. 현재 참다래의 재배적지는 제주도와 남해안 지역의 일부로 평가되었으나 RCP 기후변화 시나리오 적용 시 겨울철 기온이 상승하면 참다래 재배에 적합한 지역은 동부해안 및 남부내륙지역으로 더욱 확대될 것으로 전망되는데 기후변화 시나리오별로는 RCP8.5, A1B, RCP4.5 순으로 재배적지의 증가가 클 것으로 예측된다고 하였다. 그러나 제주도의 경우 재배적지의 면적이 가까운 미래에는 증가하지만 먼 미래로 갈수록 급격히 줄어들어 A1B 기후변화 시나리오에서는 21세기 말에는 현재의 절반이 될 것이며, 같은 기간 재배적지는 해안지대로부터 해발 250m 정도의 한라산 방향으로 이동할 것으로 예측된다고 하였다.

문경환 등(2013)은 난지형 마늘과 한지형 마늘의 기후학적인 재배 적지 변화를 RCP8.5 기후변화 시나오에 근거하여 분석하였다(그림 5.14). 난지형 마늘은 겨울철 저온에 의한 동해 때문에 현재 남부의 해안지역에서만 재배가 가능하나 온난화에 따라서 점차 재배가능지역이 북상하여 2090년에는 현재보다 재배 가능지역이 약 8배 정도 확장될 것으로 전망하였다. 반면 5℃ 이하의 저온에서 100일이 경과하여야 마늘쪽 분화가 가능한 한지형 마늘의 경우는 재배 가능지역이 점차 축소되어 2090년대가 되면 현재 가능지역의 2% 정도에서만 재배가 가능할 것으로 추정하였다.

5.3.2.3 작물 생산성 및 생산량

5.3.2.3.1 식량작물 생산성과 품질

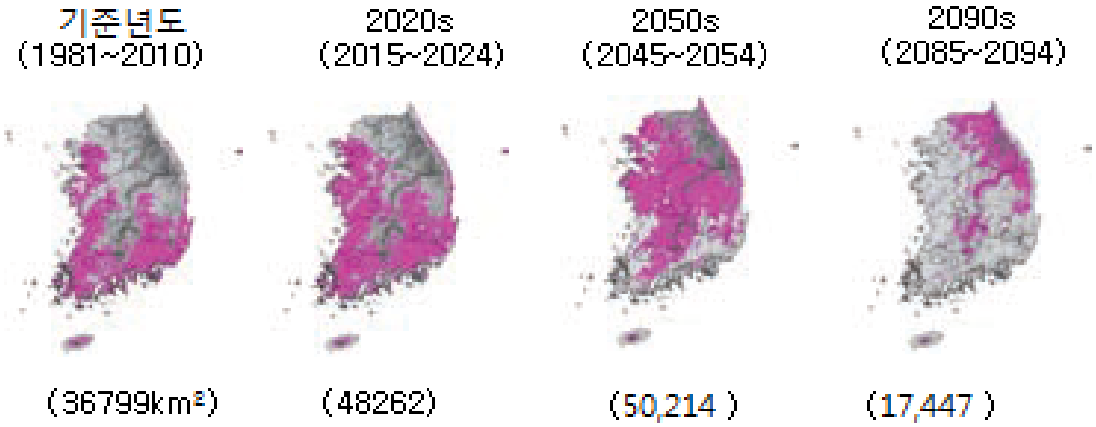


그림 5.12 미래 기후(RCP8.5) 조건에서 복숭아 재배적지 변동 전망(농촌진흥청, 2013)

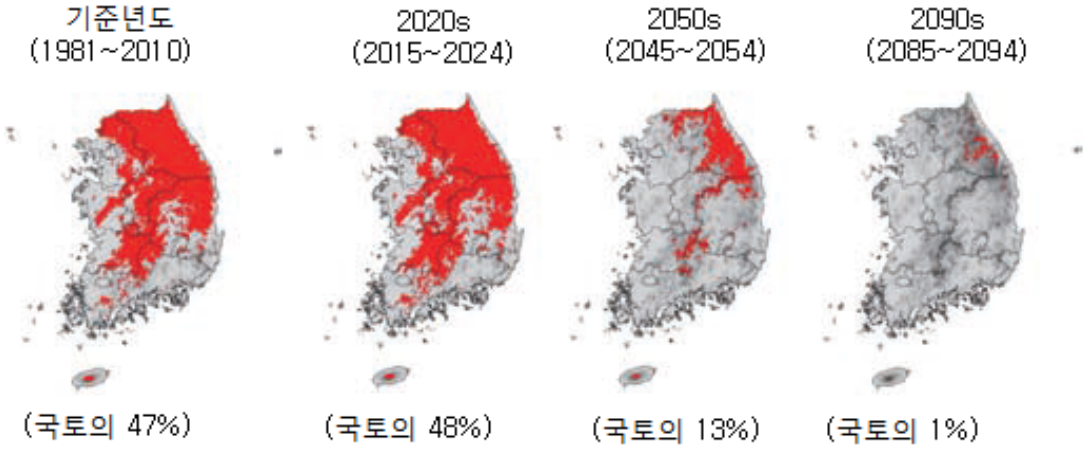


그림 5.13 미래 기후(RCP8.5) 조건에서 사과 재배적지 변동 전망(농촌진흥청, 2013)

5.3.2.3.1.1 벼

벼는 온도가 높아지면 벼 재배가능 기간과 지역이 확대되지만 현재 주산지의 수량성이 향상될 것이라는 보장은 없다. 온난화됨에 따라서 현재의 평년 기후조건에서 보다 먼 미래의 평년기후(2071 ~ 2100년) 조건에서는 영양생장기간과 등숙기간 모두 단축되어 벼 수량에 부정적인 영향을 미칠 것으로 예상되었다. 특히 등숙기간 단축이 커서 벼 입중에 의한 수량 감소가 클 것으로 예상된다. 벼 감수분열기와 개화기 고온으로 인한 불임률의 상승이 예상되는데(Nguyen 등, 2014), 향후 30년까지는 고온에 의한 불임의 영향은 크지 않을 것으로 예상이 되며 그 이후 불임률이 서서히 증가하여 2071 ~ 2100년이 되면 내륙 평야지를 중심으로 넓은 지역에서 10% 이상의 불임 발생이 예상된다. 현재의 기후 조건하에서는 대관령 등 고랭지에서는 벼 재배가 불가능하고 전국에서 벼의 2기작 재배가 불가능하지만 CO_2 농도 상승 조건 하에서는 작물재배가능기간이 30 ~ 50일이 연장되어 조생종 재배지대는 중만생종 재배지대로, 중만생종 재배지대는 만생종 재배지대로 변할 것이며 대관령 등 고랭지에서는 조생종 벼 재배가 가능하여지고 남부지방에서는 벼 2기작재배가 가능하여질 것으로 예상된다(한국 기후변화 영향 평가보고서 2010).

우리나라에서는 처음으로 기온과 이산화탄소 농도를 동시에 조절하여 벼의 생육, 수량 품질 변화에 대한 연구 결과가 보고되었다(김한용, 2011 ; 이충근 등, 2011b). 김한용(2011)은 전라남도 광주시(35°10′N, 126°53′E)에서 온도구배온실(Temperature gradient field chamber, TGFC)

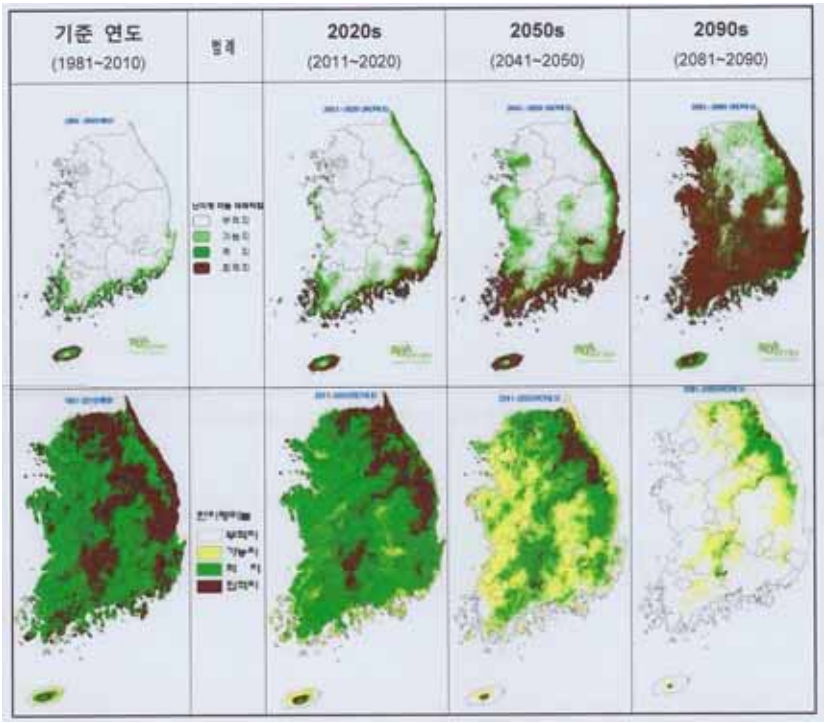


그림 5.14 RCP8.5 기후변화 시나리오에 따른 난지형 마늘(상)과 한지형 마늘(하)의 재배 적지 변동(문경환 등, 2013)

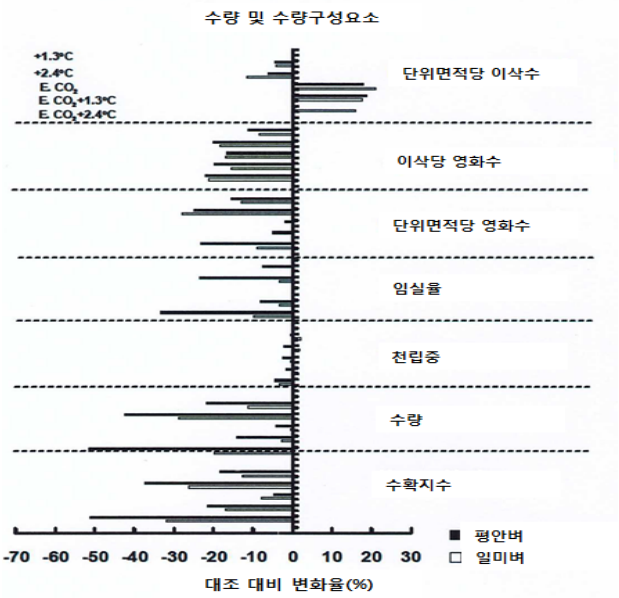


그림 5.15 기온 및 CO_2 농도 상승 처리에 따른 수량 및 수량구성요소의 현재의 기온 및 CO_2 농도 조건 대비 변화율(김한용, 2011)

실험을 통하여 대기 중의 CO_2 농도가 370ppm에서 650ppm으로 높아지고 기온이 현재(25.9℃)보다 1.3℃와 2.4℃ 높아질 경우 벼 수량 및 쌀 품질에 미치는 영향을 검토하였다. 대기 중의 CO_2 농도가 370ppm에서 650ppm으로 상승할 경우 출수기가 품종에 따라 2 ~ 4일 빨라지며 CO_2 농도와 함께 기온이 25.9℃에서 27.2℃로 동반 상승할 경우 출수기가 5 ~ 6일 빨라졌다. CO_2 농도 상승을 동반하지 않고 기온이 단독으로 상승할 경우 실험에 이용한 일미벼와 평안벼 모두 단위면적당 수수, 수당영화수, 임실율, 천립중 등 수량구성요소와 수량이 현저히 감소하였다. 그리고 그 감소 정도는 기온 상승폭이 클수록 그리고 일미벼보다 평안벼에서 현저하여 고온 감수성에 품종 간 차이가 있었다. 한편 대기 중 CO_2 농도 단독 상승 또는 온도 상승과 동반 상승할 경우 단위면적당 이삭수가 증가하였을 뿐 다른 수량구성요소와 수량이 크게 감소하였다. 기온 상승 또는 CO_2 농도와 기온의 동반 상승에 따른 수량 감소의 가장 큰 요인은 일미벼에서는 수당영화수 감소였으며 평안 벼에서는 수당영화수와 임실율 감소였다(그림 5.15).

한편 표 5.3에서 보는 바와 같이 기온 상승은 현미의 완전미율을 현저히 감소시키고 유백미 및 심백미와 같은 미숙립율을 크게 증가시키고, CO_2 농도 상승을 동

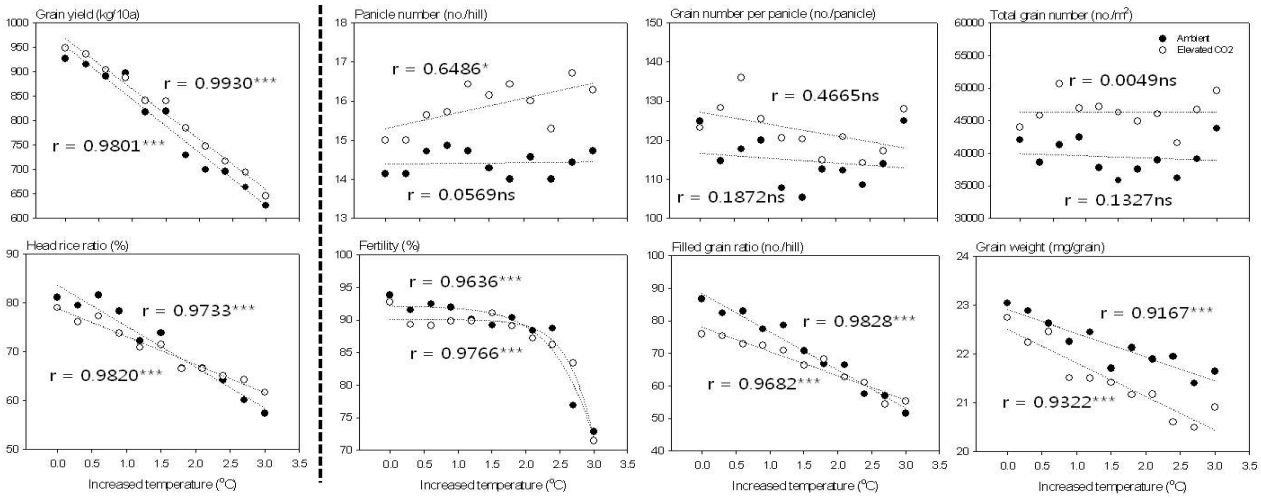


그림 5.16 2012년 수원의 온도구배형온실(TGFC)에서 기온과 CO_2 농도 상승 처리에 따른 안미벼의 수량 및 수량구성요소 변화(이충근 등, 2013)

표 5.3 기온 및 CO_2 농도 상승 처리에 따른 현미의 외관적 품위와 백미의 품질 변화(**: p≤0.01, *: p≤0.05, +: p≤0.1, ns: p>0.1)(김한용, 2011)

품종	CO2 (ppmV)	기온 처리	현미					백미		
			완전미 (%)	미숙립 (%)	손상립 (%)	유색립 (%)	사미 (%)	단백질 (%)	도요 식미치	현백율 (%)
일미벼	370	Ambient	74.0	19.1	5.3	0.5	1.1	6.2	81.4	90.5
		+1.3℃	64.8	22.2	10.7	1.6	0.8	6.4	82.0	89.7
		+2.4℃	60.2	25.8	12.2	0.6	1.1	6.3	78.5	89.3
	650	Ambient	67.6	23.0	7.6	0.9	0.9	5.9	84.1	90.0
		+1.3℃	54.5	29.7	10.5	3.1	2.1	5.8	85.2	88.3
		+2.4℃	40.2	38.7	17.1	2.1	1.4	6.2	81.9	88.8
평안벼	370	Ambient	48.6	31.9	14.0	2.9	2.4	6.0	88.9	90.3
		+1.3℃	47.3	32.4	14.1	3.8	2.4	5.8	85.6	89.9
		+2.4℃	46.2	34.2	14.4	4.0	1.1	6.3	86.8	89.7
	650	Ambient	46.3	30.0	18.1	2.3	3.2	5.5	88.0	88.9
		+1.3℃	34.6	42.1	13.2	4.2	6.0	5.7	84.0	88.4
		+2.4℃	26.2	47.6	13.8	8.0	4.3	6.7	84.0	88.7
ANOVA	CO2		0.064+	0.080+	0.186	0.042*	0.176	0.042*	0.731	0.054+
	기온		0.000**	0.000**	0.032*	0.000**	0.061+	0.014*	0.031*	0.019*
	품종		0.000**	0.000**	0.000**	0.000**	0.000**	0.013*	0.000**	0.583ns
	CO2×기온		0.007**	0.000**	0.200ns	0.001**	0.040*	0.097+	0.970ns	0.375ns
	CO2×품종		0.800ns	0.546ns	0.360ns	1.000ns	0.008**	0.033*	0.016*	0.261ns
	기온×품종		0.010**	0.445ns	0.000**	0.035*	0.311ns	0.001**	0.084+	0.328ns
	CO2×기온×품종		0.443ns	0.158ns	0.189ns	0.287ns	0.442ns	0.038*	0.857ns	0.807ns

반할 경우 현미의 품위가 더욱 악화 되었다. 기온이 상승함에 따라서 백미의 단백질 함량이 증가하고 도요식미치가 감소하였으나, CO_2 농도와 동반 상승할 경우 기온 상승에 따른 단백질함량 증가 효과가 경감되는 경향이라고 하였다.

이충근 등(2013)도 경기도 수원시 논에 설치된 온도구배형온실(TGFC)과 벼 작물모형(Oryza2000)을 이용하며 미래기후 조건에서 벼의 생육과 수량 변화를 검토

하였다. TGFC 실험 결과에 의하면 온도가 상승하면 출수 전 생육형질인 이삭수, 영화수, 건물중 등에는 큰 영향을 주지 않으나 등숙율, 천립중 등 등숙 관련 형질을 감소 시켜 수량 및 품질 저하를 야기하한다. 반면 CO_2 농도 증가는 출수 전 결정 형질을 증가시켜 수량 증대에 기여하지만 등숙율, 천립중, 완전미율 등 등숙 관련 형질에는 영향을 주지 못하거나 오히려 감소시켜 결국 수량 증대에 기여하지 못한다(그림 5.16). 그러나 작물모형을 이용한 영향 평가에서는 재배시기를 고정하였을 경우에는 온도 상승에 따른 부정적 효과가 CO_2 농도 증가에 따른 긍정적 효과를 상쇄하여 수량이 오히려 감소하였다. 따라서 재배시기를 조정할 경우 온도 상승에 따른 부정적 효과를 최소화하여 CO_2 농도 증가에 따라 등숙기 생육이 좋아져 수량이 오히려 높아지는 것으로 평가되었다. 이는 등숙기 CO_2 농도 반응이 TGFC 실험 결과와 상반되는 결과로 작물 모형을 이용한 기후변화 영향 평가를 위해서는 모델의 등숙기 CO_2 농도 반응에 대한 보정이 필요함을 지적하였다.

Kim et al.(2013)은 전라남도 광주시(35°10′N, 126°53′E)에서 2009년과 2010년도에 TGFC에서 세 품종, 세 온도 및 두 CO_2 농도 처리 조건에서의 실험결과를 이용하여 벼 작물모형(DSSAT4.0-CERES_rice)을 calibration 및 validation을 하여, 이를 이용하여 2050년대(2037 ~ 2062년) 및 2100년대(2087 ~ 2112년)의 벼 수량성 변화를 추정하였다. 광주의 미래 기후 조건에서는 CO_2 시비의 수량에 대한 긍정적 효과 보다 온도 상승에 따른 부정적 효과가 커서 수량이 유의하게 감소하지만(그림 5.17), 적절한 품종 선택 및 이앙시기 변경과 같은 재배법 변경에 의하여 수량성에 대한 부정적 효과가 완화될 수 있을 것이라고 하였다. 한편 미래 기후 변화가 벼 수량에 미치는 영향은 위도에 따라서 다르게 나타나(그림 5.18), 약 북위 34° ~ 42° 지역에서는 기온 상승의 부정적 영향이 상당 부분 CO_2 시비 효과에 의하여 상쇄되며, 북위 42o 이상의 지역에서는 기후변화의 벼 수량에 대한 긍정적 효과는 CO_2 시비 효과 보다는 주로 기온 상승의 긍정적 효과에 의한 것

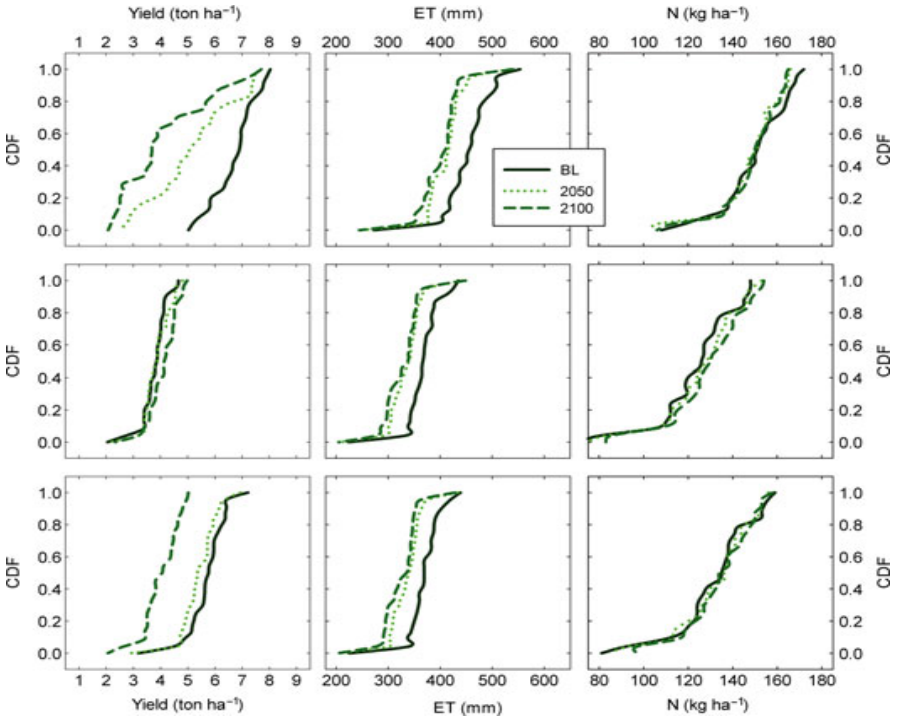


그림 5.17 기준년도(1986~2010)와 2050년대(2037~2062) 및 2100년대(2087~2112)의 미래기후(SRES A1B) 조건에서 벼 작물모델 CERES_rice로 모의한 벼 수량, 증발산(ET) 및 질소 흡수량(N)의 누적상대도수분포(CDF)(Kim et al, 2013). 상, 중, 하단은 각각 남평벼, 세계화벼 및 운광벼임.

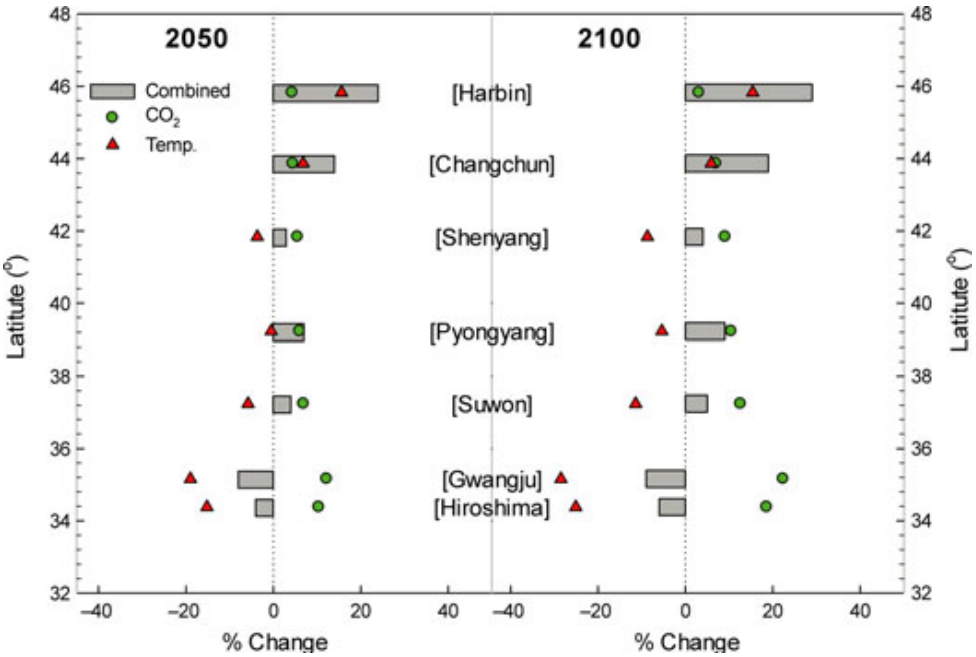


그림 5.18 동아시아 벼 재배지대에 대하여 벼 작물모델 CERES_rice로 모의한 벼 수량의 기준년도(1997 ~ 2008) 대비 2050년대(2044 ~ 2055) 및 2100년대(2094 ~ 2105)의 미래기후(SRES A1B) 조건에서의 변화(Kim et al, 2013)

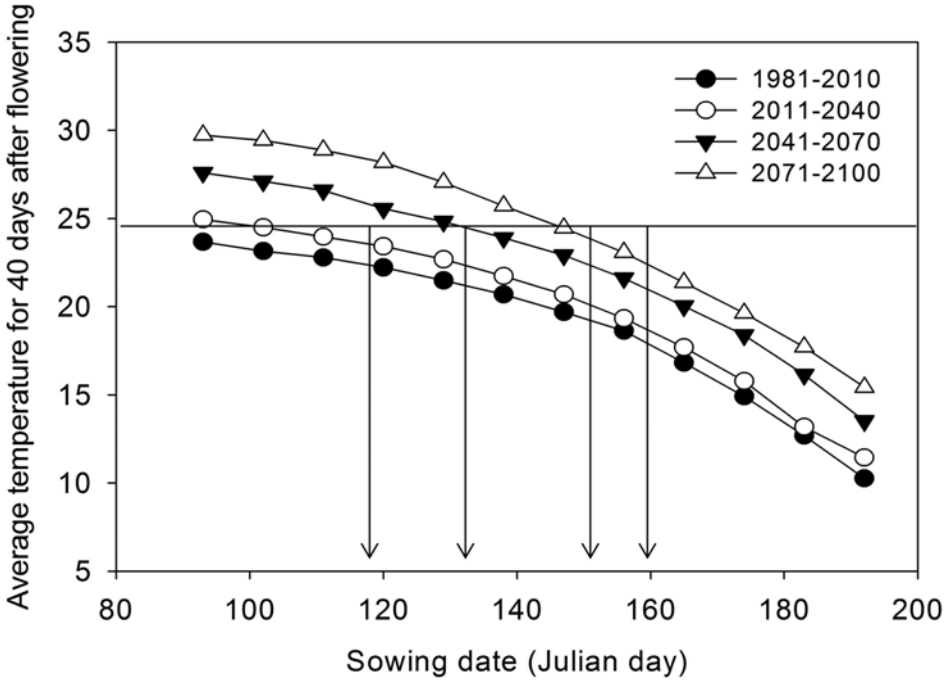


그림 5.19 현재와 미래기후(SRES A1B) 조건에서 중만생 벼 품종의 파종기 이동에 따른 출수 후 40일간 평균 등숙온도와 출수 후 40일 평균 등숙온도 22.5℃로 판단한 최적파종기의 변화(이충근 등, 2012)

이라고 하였다.

Choi et al.(2013)은 온도구배온실(TGFC)에서 세 온도(ambient, +1.2℃, +2.2/2.4℃)처리와 두 처리(ambient 및 660μl/l)를 조합한 처리에서 유수분화기, 수잉기 및 개화기에 10 ~ 14일간 자연광의 18%수준으로 차광처리를 하여 미래 기후 조건에서 이상기상 조건

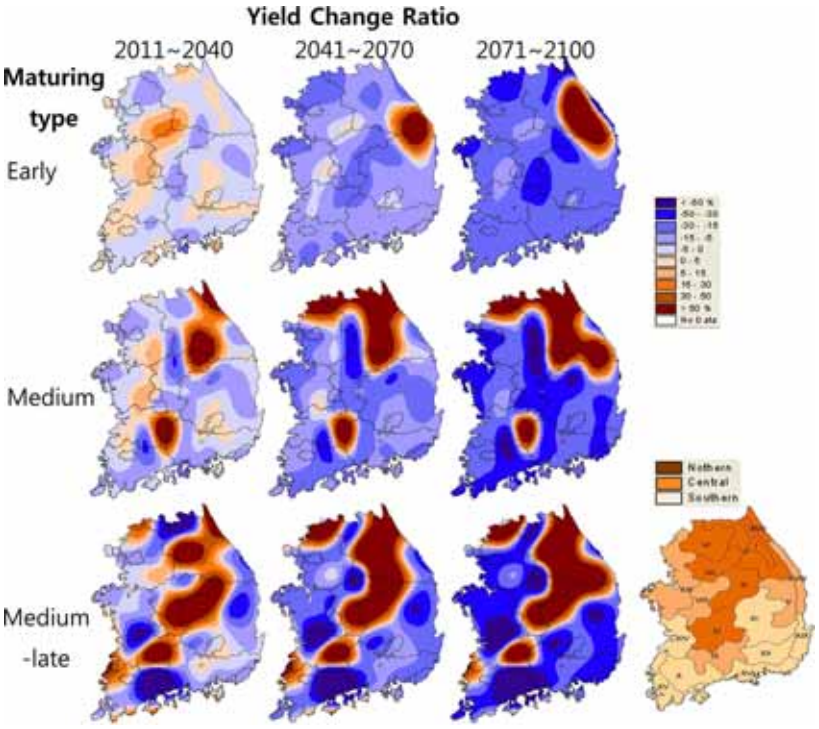


그림 5.20 벼 파종기를 평년기후(1981~2010)에서의 파종기로 고정할 경우 현재 평년기후 대비 미래기후(SRES A1B) 조건에서 벼 품종군 및 벼 재배지대별 수량 변화(이충근 등, 2012; 이충근 등, 2013)

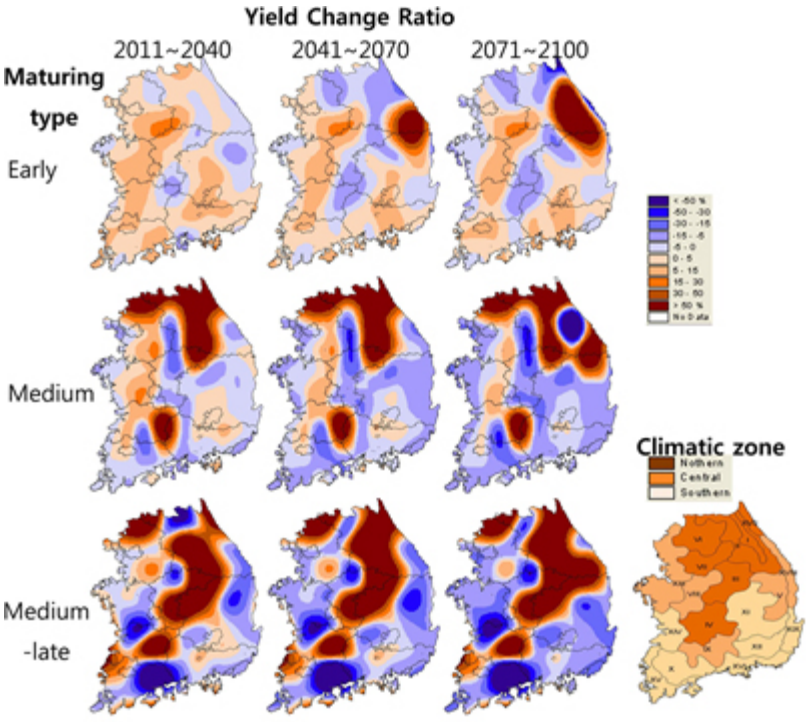


그림 5.21 파종기를 기후변화에 따른 최적 파종기로 변경할 경우 현재 평년기후(1981~2010) 대비 미래기후(SRES A1B) 조건에서 벼 품종군 및 벼 재배지대별 수량 변화(이충근 등, 2012; 이충근 등, 2013)

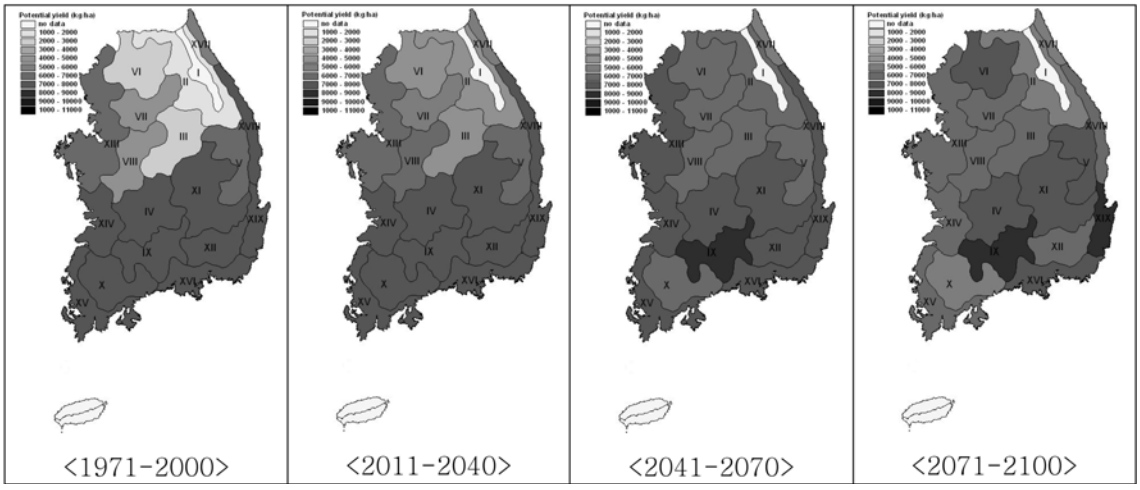


그림 5.22 기후 변화(IPCC SRES A1B 시나리오)가 농업지대별 가을보리 "새쌀보리"의 잠재 수량성 변화(심교문 등, 2011)

표 5.4 미래 기후 변화 시나리오(SRES A2 및 RCP8.5)에 따른 우리나라 쌀 공급 변화 예측(한국농촌경제연구원, 2012b)

구 분		평년	2010	2015	2020	2030	2040	2050
베이스라인 (KASMO)	재배면적(천 ha)	917	892	836	822	740	656	572
	단수(kg/10a)	498	482	501	504	509	514	519
	생산량(천 톤)	4,516	4,295	4,192	4,141	3,764	3,371	2,970
	수입량(천 톤)	297	327	409	409	677	828	1,087
	자급률(%)	95.7	83.0	90.4	91.0	84.8	80.3	73.3
시나리오1 (KASMO) RCP8.5	재배면적(천 ha)	917	892	837	825	732	627	522
	단수(kg/10a)	498	482	498	495	486	473	456
	생산량(천 톤)	4,516	4,295	4,166	4,087	3,560	2,967	2,379
	수입량(천 톤)	297	327	409	409	855	1,180	1,601
	자급률(%)	95.7	83.0	90.2	90.9	80.6	71.6	59.8
시나리오2 (CERES) A2	재배면적(천 ha)	917	892	836	824	730	624	519
	단수(kg/10a)	498	482	502	495	483	470	459
	생산량(천 톤)	4,516	4,295	4,195	4,082	3,524	2,937	2,379
	수입량(천 톤)	297	327	409	409	887	1,205	1,598
	자급률(%)	95.7	83.0	90.4	90.9	79.9	70.9	59.9
시나리오3 (CERES) RCP8.5	재배면적(천 ha)	917	892	836	825	726	613	501
	단수(kg/10a)	498	482	502	492	473	453	433
	생산량(천 톤)	4,516	4,295	4,195	4,062	3,429	2,776	2,168
	수입량(천 톤)	297	327	409	409	970	1,344	1,779
	자급률(%)	95.7	83.0	90.4	90.8	77.9	67.4	55.0

이 벼의 생장과 수량에 미치는 영향을 검토하였다. 현재의 CO_2 농도 상승은 차광에 의한 수량감소를 완화시키지만 온도 상승은 반대로 수량감소를 악화시킨다고 하였다. 따라서 미래 기후 변화가 미래 벼 생산성에 미치는 영향의 종합적 평가를 함에 있어서 극한 기상 현상에 대한 고려의 필요성을 언급하였다.

서로 다른 작물생육모델과 기후변화 시나리오를 이용하여 미래 기후 조건에서 우리나라 벼 생산성 변화를 예측하였다. 심교문 등(2010)은 벼 생육모델인 CERES_rice를 이용하여 미래 기후 조건에서 벼 생육 및 수량 변화를 예측 하였다. 온도가 2℃ 상승하였을 때는 출수기간이 7~8일 단축되는 것으로 모의되었고, 5.2℃ 상승하는 UKMO 기후시나리오를 적용하면 최대 16~18일 단축되는 것으로 추정되었다. 출수 기간은 출수생태형의 구분 없이 온도 상승에 따라 비슷하게 단축되는 것으로 분석되었지만, 벼 등숙 기간의 변화는 출수생태형에 따라 다른 경향을 나타내었다. 즉, 생육기간이 긴 중만생종의 출수 기간은 온도 상승 정도에

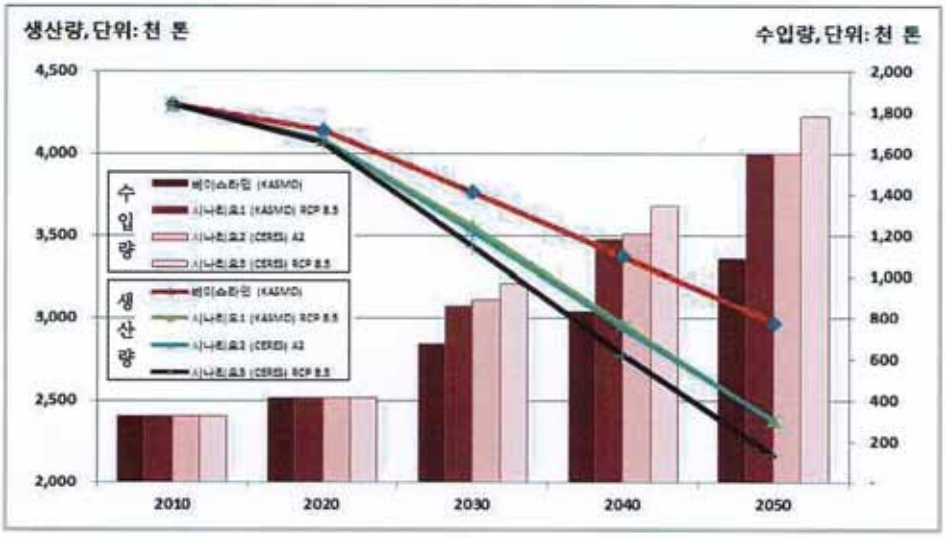


그림 5.23 미래 기후 변화 시나리오(SRES A2 및 RCP8.5)에 따른 우리나라 쌀 생산 및 수입량 변화 예측(한국농촌경제연구원, 2012a)

따라 14~18일 짧아졌는데 반하여, 생육 기간이 짧은 조생종의 경우에는 1~3일 짧아져, 단축 정도가 상대적으로 적은 것으로 조사되었다. 온도가 30년 평년 기후(1971~2000년)보다 2℃와 3℃ 상승하는 조건에서, 전국적인 평균 벼 수량은 평년 기후에 의해 추정된 것보다 각각 4.5%와 8.2% 감소하는 것으로 전망되었고, CO_2 배증에 따라 온도 상승을 가장 높게 예측하는 UKMO 전지구 기후변화모델을 적용하여, 전국적으로 벼 수량을 모의하였을 때는 평년기후에 적용하여 추정한 수량보다 전국 평균 14.9% 감소하는 것으로 추정하였다.

김대준 등(2012)은 미래기후조건(SRES A1B 및 RCP8.5)에서 벼 생육모델인 CERES-Rice를 이용해서 모의 하여 벼의 수량은 조생, 중생 및 중만생 모든 품종에서 줄어들 것으로 예상하였으며, 파종기를 조생종은 조기파종에 의해, 중만생종의 경우 지연파종에 의해 수량저하 현상을 어느 정도 완화시킬 수 있을 것이라고 하였다.

이충근 등(2012)은 미래 기후변화(SRES A1B) 및 그에 따른 재배시기 조정 여부가 우리나라 현재 벼 품종의 생태형별 생산성 변화에 미치는 영향을 영화수 및 임실율 모델에 종실중 및 등숙율 모듈을 추가하여 벼 수량결정 방법을 개선한 'ORYZA2000'을 사용하여 평가하였다. 벼 생태형별로 조생종은 오대벼, 중생종은 화성벼, 중만생종은 일품벼의 품종특성 모수를 사용하였으며, 생육모의 지역은 기상청 소속 기상대와 관측소가 소재하는 지역 중에 30년 이상 기상관측자료를 보유하고 있는 56개 지역이었으며, 이를 북부, 중부, 남부의 3개 기후지대로 구분하여 결과를 분석하였으며, 기후변화에 따른 재배시기 조정은 최적파종기를 기준으로 설정하였는데, 출수 후 40일간의 평균온도가 22.5℃가 되는 파종기를 지역별 최적파종기로 설정하였다(그림 5.19).

온도만 상승하는 경우 1℃ 온도 상승에 따라 벼 수량은 기준년도(1981 ~ 2010년) 대비 6.7 ~ 10.6%까지 감소하였으며 CO_2 농도만 증가하는 경우 100ppm 증가함에 따라 1.0 ~ 2.7% 증가하는 것으로 추정되었다. 기온과 CO_2 농도가 동반하여 상승하는 미래 기후 조건에서 벼 생산성은 벼 생태형 및 기후지대별로 다소 차이가 있어서 재배시기를 고정하였을 경우 수량의 증감율은 조생종에서 -0.3 ~ -23.4%, 중생종에서 -1.9 ~ -27.3%, 중만생종에서 -1.7 ~ -28.6%이었으며(그림 5.20), 재배시기를 최적 파종기로 조정하였을 때는 조생종에서 3.3~-0.2%, 중생종에서 1.8~-5.9%, 중만생종에서 2.3~-7.4%(그림 5.21)로 조·중생종에 비해 중만생종의 수량 감소율이 컸으며, 재배시기 조정여부에 따른 벼 생

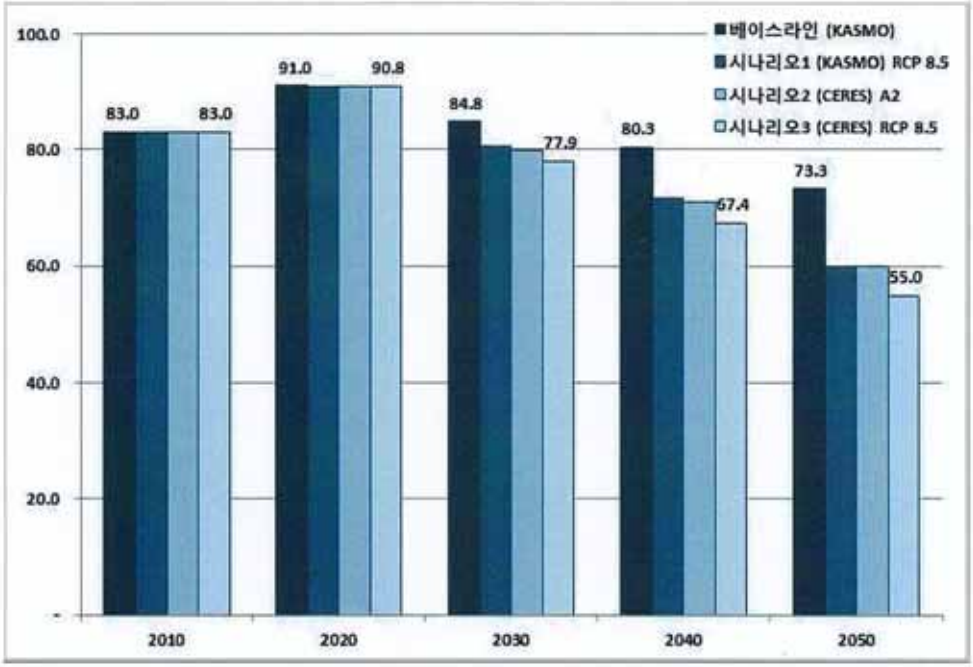


그림 5.24 미래 기후 변화 시나리오(SRES A2 및 RCP8.5)에 따른 우리나라 쌀 자급율 변화 예측(한국농촌경제연구원, 2012b)

산성 변화의 차이가 크다고 하였다. 남영식 등(2012)은 1991년부터 2011년까지 전국 79개 관측지점에서 측정된 기상자료와 전국 시군별 쌀 수량 자료를 이용하여 통계모델을 작성하여 미래 기후(RCP8.5) 조건에서 쌀 생산성 및 생산량 변화를 추정하는데, 장기적으로 쌀 생산성과 생산에 부정적인 영향을 미칠 것으로 예측하였다.

5.3.2.3.1.2 보리

월동 작물인 보리의 경우 미래의 기후 조건에서 생산성이 향상될 것으로 예측하였다. 보리 생육모형인 CERES-Barley를 이용하여 심교문 등(2011a, b)은 추파 겉보리와 쌀보리의 미래 기후 조건(SRES A1B)에 잠재 수량성을 예측하였는데, 평년(1971 ~ 2000년, 기준연도) 대비 2011 ~ 2040년, 2041 ~ 2070년, 2071 ~ 2100년의 미래 평년 기후 조건에서는 겉보리는 각각 13, 21, 19%, 쌀보리(그림 5.22)는 각각 8, 15, 13% 증가할 것으로 예측하였다. 김대준 등(2012)도 CERES-Barley를 이용하여 미래기후(SERES A1B, RCP8.5)에서 쌀보리, 겉보리 및 맥주 보리의 잠재 수량을 예측하여 위와 유사한 결과를 보고하였으며, 또한 현재의 파종기보다 조기 파종에 의해서 추가적인 수량 증대가 예상된다고 하였다(김대준 등, 2013). 최근 기후변화에 따른 올보리의 수량변화를 분석한 심교문 등(2002)의 연구 결과에서도 난동현상이 지속된 최근 14년(1987 ~ 2000년) 동안 올보리 품종의 평균수량은 과거 14년(1974 ~ 1986년) 평균보다 0.88 t/ha가 증수되었으며, 증수의 요인은 단위면적당 수수 확보이고, 1수립수의 증가도 다소 기여하였다고 보고하였다.

여름작물인 벼와 달리 월동 작물인 보리의 경우 기후가 온난화 되는 경우 수량성이 크게 향상될 것으로 예측되는데, 가을에 파종한 보리는 온도 상승에 따라서 출수기가 앞당겨 지지만 등숙기간의 단축이 일어나지 않는(김대준 등, 2012) 것이 중요한 이유 중의 하나인 것으로 판단된다. 가을에 파종한 보리가 온난화 조건에서도 등숙기간이 단축되지 않는 것은 기온 상승에 따라서 출수기가 앞당겨 지면 동시에 등숙기간이 보다 서늘한 계절로 이동하기 때문이다.

5.3.2.3.2 식량작물 생산량 및 자급률

앞에서 기술한 바와 같이 식량작물에 있어서 기후변화와 관련된 대부분의 연구는 기후변화가 생산성에 미치는 영향에 국한되어 있고, 기후변화가

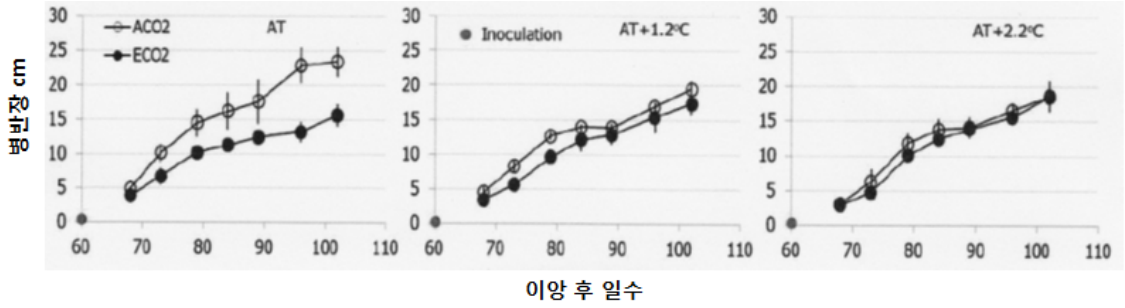


그림 5.25 벼 출수 전 지엽에 접종한 흰잎마름병 병반장의 진전 (김한용, 2011). AT=2010년도 벼 재배 기간 중 외기 온도, ACO_2=현재 대기 중 CO_2 조건(약 370ppmv), ECO_2= 상승 CO_2 조건(약 650ppmv)

식량작물의 공급에 미치는 영향을 종합적으로 분석한 결과는 드물다. 김창길 등(2012)은 기후변화에 따른 우리나라 주요 식량작물의 생산 잠재력을 파악하여, 기후변화가 식량공급에 미치는 영향의 체계적인 분석을 시도하였다. 이 연구에서는 기후변화에 따른 식량공급분석을 위해 작물모형과 한국농촌경제연구원의 농업시뮬레이션모형(KREI-KASMO, 이하 KASMO)을 연계하여 기후변화 식량공급분석 모의모형(Korea Agriculture Simulation Model for Climate-Food Relationship, SIMCFR)을 구축하여 식량작물의 국내 생산 및 수입량 등 수급 변화를 예측하였다. 벼, 보리, 콩을 대상작물로 하였으며, 미래 기후 변화 시나리오는 벼의 경우 SRES A2와 RCP8.5, 보리와 콩의 경우 SRES A2를 사용하였으며, 수량 추정에는 각 작물의 CERES모델과 한석호 등(2011)이 개발한 쌀 생산성 예측 통계모형(이하 KASMO 단수)을 사용하였다. KASMO 수량 베이스라인(baseline)은 2011년의 적산온도와 일교차, 평균기온, 일조시간이 2050년까지 동일하다는 가정 하에서 시간 추세변수를 이용하여 기술진보를 반영하였다. 한편 KASMO 모형의 수급 부문에서 재배면적에 영향을 미치는 정부 정책 변수로서는 직불제를 반영하였으며, 수입에 미치는 정책변수로서는 FTA가 반영되어 이에 따른 관세율과 TRQ가 적용되었다.

표 5.4에서 보는 바와 같이 쌀 단수의 경우 2050년에 베이스라인은 평년대비 4.2% 증가할 것으로 예측하였다. 그러나 CERES_rice로 추정한 쌀 수량은 SRES A2 시나리오(2050년까지 3.0℃ 상승)의 경우 평년(1971 ~

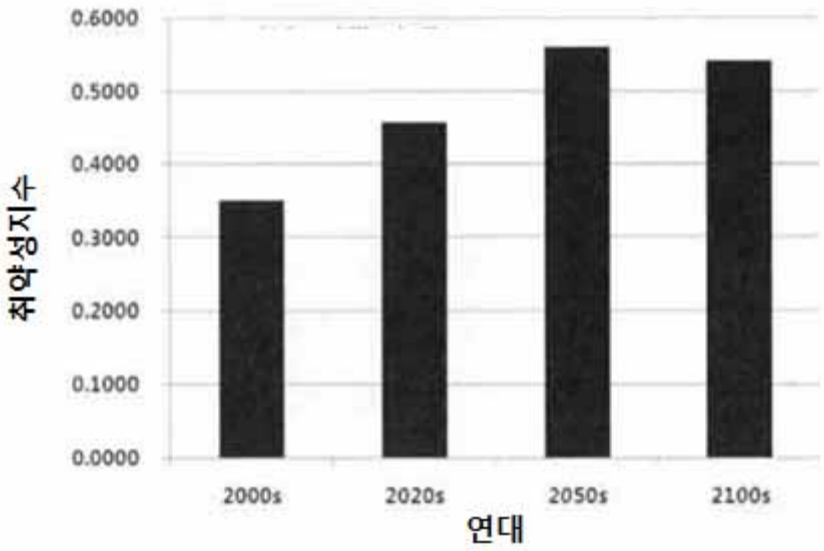


그림 5.26 기후변화(SRES A1B)에 따른 병해충에 대한 벼농사의 취약성 변화 (김명현 등, 2013)

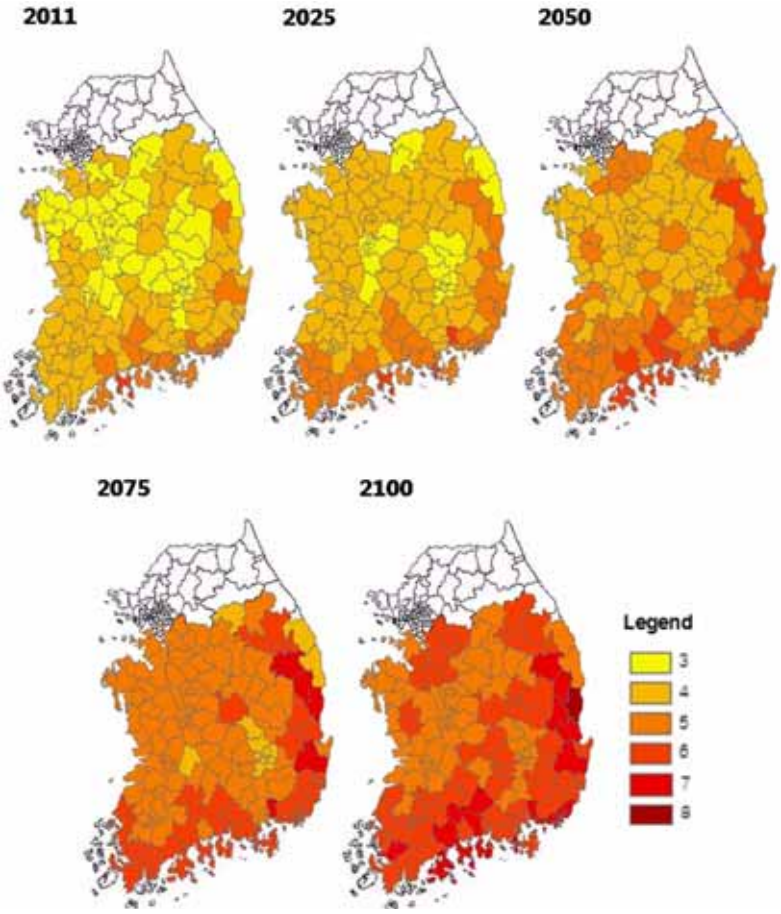


그림 5.27 기후변화(IPCC SRES A1B 시나리오)에 따른 고추 탄저병 감염위험도(방제 횟수)의 지역별 변화(신정욱과 윤성철, 2011)

2000년) 대비 2015년에는 0.7%, 2020년에는 -0.6%, 2030년에는 -3.1%, 2050년에는 -8.0%로 2020년 이후 지속적으로 감소하였고, RCP8.5 시나리오(2050년까지 3.2℃ 상승)의 경우 2015년에는 0.6%, 2020년 -1.2%, 2030년 -5.2%, 2050년 -13.1%로 추정되었다. SRES A2 시나리오를 기준으로 CERES_barley로 추정한 미래 보리 수량의 경우 2015년에는 0.8%, 2020년 -4.0%, 2030년 -10.0%, 2050년 -15.31%로 2020년 이후 수량이 크게 감소하는 것으로 추정하다. 이는 심교문 등(2011a, b), 김대준 등(2012, 2013)이 SRES A1B 및 RCP8.5 시나리오를 기준으로 CERES-barley로 보리 수량을 추정하여 미래의 기후 조건에서 우리나라 보리의 수량이 크게 향상될 것이라는 추정과는 상반되는 결과로 재검토할 필요가 있는 것으로 판단된다. 한편 콩의 경우는 벼의 작기와 비슷하다는 이유로 SRES A2 시나리오에 근거하여 CERES_rice로 예측한 평년대비 쌀의 증감률을 그대로 적용하였으나 콩은 벼와는 온도 적응성과 CO_2 반응 등이 달라 미래 기후 조건에서의 수량 변화가 벼와 현저히 다르다(환경부, 2011). 이와 같은 이유로 보리와 콩에 대한 수급변화 예측에 대해서는 수록을 하지 않았다.

벼 재배면적은 베이스라인과 세 가지 시나리오 모두 지속적으로 감소하는 것으로 추정되었다. 2050년 재배면적은 베이스라인에서 572천 ha로 평년 917천 ha 대비 37.6% 감소할 것으로 추정되었으며, RCP8.5에 근거하여 KASMO 단수 예측모델로 예측한 수량을 적용한 시나리오[이하 RCP8.5(KASMO)]에서는 43.2%, SRES A2 시나리오에 근거하여 CERES-Rice로 예측한 단수를 적용한 시나리오[이하 A2(CERES)]에서는 43.5%, RCP8.5 시나리오에 근거하여 CERES-Rice로 예측한 단수를 적용한 시나리오[이하 RCP8.5(CERES)]에서는 45.4% 감소는 것으로 예측되어 베이스라인 보

표 5.5 1916~2012 기간 중 기상재해 피해 순위(소방방재청, 2013)

순위	연도	총피해 (억원)	침수 (정보)	농경지 (억원)
1	2002	83,716	61,579	5,981
2	2003	59,060	51,412	1,567
3	2006	23,814	34,759	1,729
4	1987	21,894	300,453	1,398
5	1998	21,493	91,629	1,430
6	2001	17,146	20,012	141
7	1999	16,912	76,128	335
8	2004	15,541	56,903	261
9	2005	12,984	26,782	347
10	1990	13,081	124,276	905

다 기후변화 조건에서 시나리오에 따라 5.6~7.8% 더 감소하는 것으로 추정되었다.

이와 같은 기후변화에 따른 쌀 생산성과 재배면적 변화에 따라서 2050년 쌀 생산량은 베이스라인이 평년대비 34.2% 감소하는 것으로 추정되는데 비하여 A2(CERES)와 RCP8.5(KASMO)는 47.3%, RCP8.5(CERES)는 52.0% 감소할 것으로 추정되어 베이스라인보다 기후변화 조건에서 13.1~17.8% 더 감소할 것으로 추정되었다(그림 5.23).

기후 변화에 따라 쌀의 국내 생산량은 지속적으로 감소되고, 이에 따라 수입량은 지속적으로 증가하여 쌀 자급률은 베이스라인과 세 가지 시나리오 모두 지속적으로 감소할 것으로 추정하였다. 2050년의 쌀 자급률은 평년의 95.7% 대비 베이스라인은 22.4% 감소한 73.3%로 추정되는데 비하여 A2(CERES) 시나리오는 35.8% 감소한 59.9%, RCP8.5(KASMO) 시나리오는 35.9% 감소한 59.8%, RCP8.5(CERES) 시나리오는 40.7% 감소한 55.0%가 될 것으로 추정되어 베이스라인에 비하여 기후변화로 자급률이 18.3~23.3% 더 하락할 것으로 추정하였다(그림 5.24). 2050년의 쌀 수입량은 베이스라인이 평년대비 789천 톤 증가한데 비하여 A2(CERES) 시나리오는 1,301천 톤, RCP8.5(KASMO) 시나리오는 1,303천 톤, RCP8.5(CERES) 시나리오는 1,481천 톤 증가할 것으로 추정되어 베이스라인에 비하여 기후변화로 쌀 수입량이 512천 ~ 692천 톤 늘어날 것으로 추정하였다(그림 5.23).

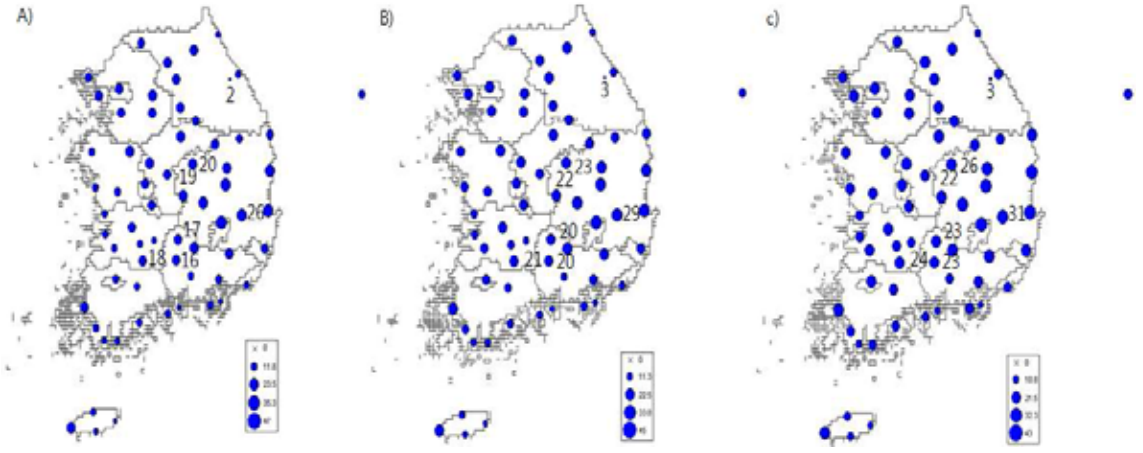


그림 5.28 현재(A), 1℃ 상승(B) 및 2℃ 상승(C) 조건에서 갈색여치의 분포 예측(방혜선, 2012)

5.3.2.3.3 채소의 생산성

우리나라에는 다양한 채소가 다양한 재배 환경 하에서 다양한 작형으로 재배되고 있어 미래의 기후는 채소

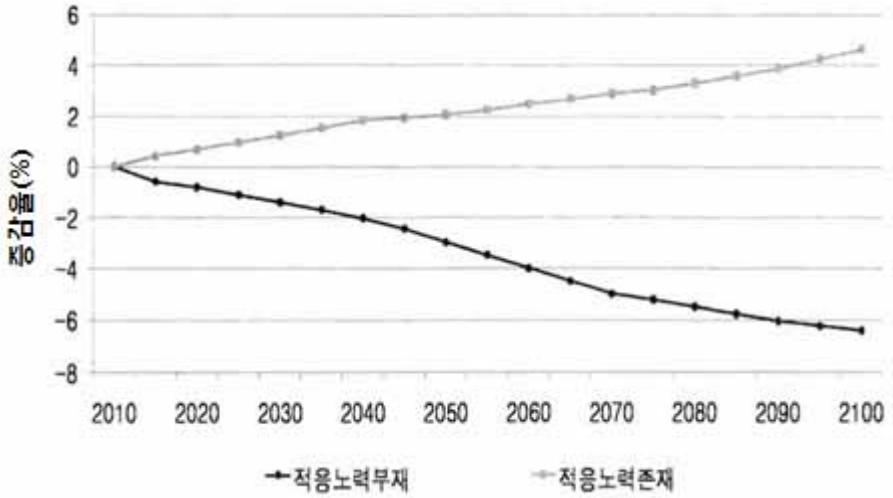


그림 5.29 기후변화(IPCC SRES A1B 시나리오)로 인한 농업분야 손실과 적응수단의 경제효과 분석(박경원과 권오상, 2011)

의 생산성과 품질에 다양한 영향을 미칠 것으로 예상된다. 그러나 이에 대한 연구는 매우 드물고 조재환 등(2012)이 RCP4.5 와 RCP8.5 시나리오하에서 노지 건고추 생산성 변화를 전망한 연구가 있을 뿐이다. 조재환 등(2012)은 22년(1980 ~ 2011년) 간의 매년 전국 9개도별 평균 건고추 수량과 이 기간 중의 기상 자료를 이용하여 건고추 수량 추정 패널모형을 만들었으며 이를 21세기 말의 노지 건고추 수량 예측에 적용하였다. 패널모형 분석 결과에 의하면 5, 6, 7월의 평균 기온이 상승하거나 7, 8월 강우량이 증가하면 노지 건고추 수량에 유의한 부의 영향을 미치고, 기온과 강수량이 모두 상승할 것으로 예상되는 RCP4.5와 RCP8.5 시나리오에 의한 21세기 말 기후 조건에서 노지 건고추 수량은 각각 25.4%와 35.4% 감소할 것으로 전망하였다.

5.3.3 병해충 발생

온대기후대에 속한 한반도는 온난화의 진행에 따라 점진적으로 아열대성 기후대로 변화하게 되어 우리나라에서 재배 가능한 농작물 종류 및 재배 작형이 변화되고 그에 따른 병.해충.잡초 발생양상도 달라질 것으로 전망된다. 그러나 미래 기후 조건에서 병.해충.잡초 발생 생태 및 병해충에 대한 작물의 취약성 변화에 대한 연구는 많지 않다.

김한용(2011)은 전라남도 광주시(35°10′N, 126°53′E)에서 온도구배온실(TGFC) 실험을 통하여 대기 중의 CO_2 농도가 370 ppm에서 650 ppm으로 높아지고 기온이 현재(25.9℃)보다 1.3℃와 2.2℃ 높아질 경우 벼 흰잎마름병 병 진전을 조사하였다. 벼 출수 전에 흰잎마름병원균 K3a를 접종하여 병반장 진전을 조사하였는데(그림 5.25), 현재의 CO_2 조건에서는 기온 상승에 따라서 병반장의 진전이 억제되는 경향이었으나, CO_2 농도와 기온이 동반 상승 하는 경우에는 온도 상승에 따른 병반장 진전 억제 효과가 경미하여, 온난화에 따른 적응형의 새로운 흰잎마름병균 레이스의 출현을 배제한다면, 현재 분포하는 흰잎마름병원균은 기후가 온난화 되더라도 그 발병이 현재 기후조건에서보다 크게 확대될 가능성은 낮다고 하였다.

주요 채소작물인 고추의 경우 미래 기후조건에서 세균병인 풋마름병과 점무늬병 발병이 상대적으로 더 극심해질 것으로 예상되며, 탄저병 및 역병도 온도와 국지적인 강우량 증대에 따라 지속적으로 증가될 것으로 예상된다(윤성철 등, 2010). Shin and Yun(2010)는 생장상을 이용하여 현재의 기후 조건과 예상되는 미래 기후 조건 하에서 고추 탄저병, 역병, 풋마름병 및 세균성 점무늬병의 접종 후 발병 진전을 비교 검토하였다. 고온 및 고 CO_2 조건에서 세균성 풋마름병 및 점무늬병은 유의하게 병 진전이 빨랐으나 탄저병과 역병은 유의한 차이가 없었다고 하였다. 한편 신정욱과 윤성철

(2011)은 A1B 기후변화 시나리오와 고추 탄저병 예찰 모형을 이용하여 고추 탄저병 감염위험도(IR) 변화를 평가하였다. 감염위험도는 탄저병 방제 횟수를 추정하는 것으로써 우리나라 전 지역에서 향후 탄저병 발병이 증가할 것으로 예측하였다. 상대적으로 탄저병 발병이 급증하리라 예측되는 지역은 경북의 영덕, 영양, 의성 등이었고 발병 증가가 완만하리라 기대되는 곳은 강원 횡성, 경남 함양 그리고 충남 태안 등이다. 현재 고추 주산지인 경북 동부지역은 미래 탄저병 발병압이 심각하게 증가되리라 예측되었다(그림 5.26).

농업 해충은 변온 동물이어서 기후변화 특히 온난화의 영향을 직·간접적으로 크게 받는다. 기후 변화에 따라서 일반적으로 발생 시기 및 생물계절(phenology)의 변화, 월동생존율 증가, 발생분포 및 범위확대 또는 변화를 보일 수 있다(이준호, 2010). 미래 기후 조건에서 국내 토착 해충의 발생 생태 변화 및 외래 해충의 국내 가능성 등에 대한 연구를 종합하였다.

벼 토착 해충이고 줄무늬잎마름병을 매개하는 애멸구에 대하여 김광호 등(2013) 및 정명표 등(2012)은 미래 기후(RCP8.5 시나리오)에서 세대수 및 발생일 변화를 예측하였다. 연간 세대수 변화식(Yamamura와 Kiritani, 1998)을 이용하여 애멸구의 연간 세대수 변화를, 유효적산온도법을 이용하여 애멸구 월동 후 1세대의 성충 50% 우화일을 산출하였는데, 애멸구의 세대수는 평년(1980 ~ 2010년) 대비 2050년에는 평균 2.0세대, 2100년에는 5.2세대 증가하며, 월동 후 1세대 성충 50% 우화일은 2050년대에는 평년 176.0±8.07일 대비 약 13일, 2090년대에는 약 32일 빨라질 것으로 추정하였다.

먹노린재는 1990년대 충청도 지방에 다량 발생하여 문제가 되기 시작했으며, 흡즙으로 인하여 반점미가 발생하는 등 심각한 피해를 유발하는 해충이다. 이효석과 이준호(2013)는 미래기후(RCP8.5)에서 먹노린재(Scotinophara lurida)의 발생 동태변화를 예측하였다. 온도 발육 실험을 통해 밝혀진 먹노린재의 개체군 동태 모델을 오픈소스 프로그램인 R을 활용하여 먹노린재의 발생 동태의 변화를 분석한 결과 현재(2001 ~ 2010년)보다 미래 기후(2051 ~ 2060년, 2091 ~ 2100년)에서 월동 성충의 유입 시기가 각각의 기간 동안 10 ~ 15일 빨라지고, 약충 및 성충의 발생 동태를 분석한 결과 각 영기별 발생 최성기도 16 ~ 21일 빨라지는 것으로 추정된다고 하였다.

Jung et al.(2013)은 미래기후(RCP8.5)에서 과수 나방류 해충인 복숭아심식나방, 복숭아순나방, 사과굴나방의 월동세대 전국 발생일과 연간 세대수 변화를 예측하였다. 복숭아심식나방의 월동세대 발생일은 2000년 175.5±0.79일 대비 2050년대에는 약 14.9±0.40일, 2090년대에는 40.0±0.75일, 복숭아순방 월동세대 발생일은 2000년 120.3±0.97일 대비 2050년대에는 약 16.9±0.40일, 2090년대에는 49.7±0.61일, 사과굴나방의 월동세대 발생일은 2000년 100.0±1.03일 대비 2050년대에는 약 20.5±0.58일, 2090년대에는 52.5±0.98일 앞당겨질 것으로 예측하였다. 한편 이들 나방의 연간 세대수는 2000년 대비 2050년대에는 복숭아순나방과 사과굴나방은 2세대 더 증가하고, 2090년대에는 복숭아심식나방 1세대, 복숭아순나방 4세대, 사과굴나방 6세대 더 증가할 것으로 예측하였다. 갈색여치는 2001년부터 충북 영동지역 과수원에 대발생하여 과수농가에 큰 피해를 주었고, 그 피해가 다른 지역으로 확산되어 피해가 계속되고 있는 해충이다.

방혜선(2012)은 Bioclimatic model을 이용하여 갈색여치 생태기후지수(Ecoclimatic index, EI)를 도출하여 온도상승에 따른 밀도 변화의 예측가능성을 검토하였다. 연평균 기온이 1℃ 상승할 경우 갈색여치의 EI는 전국적으로 3 ~ 4 범위로 상승하고, 연평균 기온이 2℃ 상승하면 갈색여치의 EI는 4 ~ 6 범위로 상승하는 경향을 보이고, 연평균 기온이 2℃ 이상 상승하면 전국 대부분 지역의 EI가 20이상을 보이기 때문에 갈색여치 밀도 증가의 직접적인 요인으로 작용할 것으로 예측된다고 하였다(그림 5.28).

윤태중 등(2010)은 온난화에 따른 기후변화는 식품해충의 발생 빈도를 증가시키고 분포범위의 확대를 초래할 수 있으며, 또한 세계화 추세로 외국과의 교역이 확대됨에 따라 아열대지역의 외래해충이 유입될 가능성이 크게 증가할 것으로 예측된다고 하였다. 한편 이윤정 등(2011)은 기후변화에 따른 해충유입 방지를 위

한 방충포장기법의 필요성을 보고하였다. 박창규와 정명표(2012)는 국제화와 농산물의 빈번한 수출입으로 인해 우발적으로 유입된 검역 해충들의 국내 정착 가능성 여부를 검토하였다. 오이총채벌레(Thrips palmi)등 2종의 기 침입 해충과 침입 가능성이 있는 나방 1종(Light brown apple moth, Epiphyas postvittana) 등 3종에 대하여 상용 프로그램인 CLIMEX®(version 3.0)와 문헌에 수록된 매개변수 값을 이용하여 68개 시군을 대상으로 평년과 미래 기후변화 조건에서 정착가능성을 분석하였다. 오이총채벌레는 제주도 서귀포 등 3개 지역, 미국선녀벌레(Metcalfa pruinosa)는 대구 등 47개 지역, Light brown apple moth(LBAM)는 제주도 고산 등 2개 지역에서 EI(Ecoclimatic index)값이 10 이상으로 보통의 정착 가능성이 있는 것으로 평가되었으나, 지중해과실파리(Ceratitis capitata)는 보통의 정착 가능성이 있는 곳이 한 지역도 없는 것으로 평가되었다.

기후변화가 농업생물에 미치는 영향에 대한 연구는 위에서 본 바와 같이 개별 종의 발생 생태와 위해성 변화에 대한 연구가 대부분이고 병해충에 대한 작물별 종합적인 취약성 변화에 대한 연구는 매우 미진하다. 김명현 등(2013)은 주요 병해충에 대한 벼 생산의 취약성을 현재(1996 ~ 2005년) 및 미래기후(SRES A1B) 조건에서 분석하였다. 취약성 분석은 전국 232개 시·군·구를 대상으로 하였으며, 인위적 방제가 필요하고 발생면적이 많은 줄무늬잎마름병, 흰잎마름병, 잎도열병, 이삭도열병, 잎집무늬마름병의 병 5종과 벼멸구, 혹명나방, 이화명나방(1화기), 이화명나방(2화기)의 해충 5종을 대상으로 하였다. 취약성지수는 기후노출지수, 민감도지수, 적응능력지수에 가중치를 부여하여 평가하였으며 카테고리 및 카테고리 내의 대용변수들의 가중치는 전문가대상 델파이 조사를 통하여 도출하였다. 전국 평균 취약성지수는 현재 0.350에서 2050년경에는 0.559로 60% 정도 높아지고 병해충에 대한 취약지역 면적이 증가할 것으로 평가 되었다(그림 5.29). 현재와 미래 기후에서 모두 제주도, 전라남도, 경상남도 등 남부지역을 중심으로 벼농사의 병해충에 대한 취약성이 클 것으로 평가되었다.

기후 온난화에 따른 잡초의 발생 변화에 대한 종합적인 연구는 거의 없다. 다만 논 잡초 1년생인 피, 물달개비와 다년생인 올방개, 벗풀에 대해 포장, 온실 및 생장상에서 실험을 실시하여 미래 온도 상승 조건에서 주요 논 잡초의 출아 및 초기생육이 촉진됨을 확인하였고, 이에 따라서 제초제의 처리시기를 현재보다 2~4일 이상 앞당겨서 실시해야 될 것으로 예측한 연구 결과가 있을 뿐이다(윤성철 등, 2010; Kim et al, 2010; Park et al, 2010).

5.3.4 농업경제

기후변화는 작물의 작부체계 변화, 작물의 생산성 및 품질의 변화, 작부 면적의 변화 등 농업의 다방면에 걸쳐서 영향을 미쳐 농업 및 국가 경제에 미치는 영향이 클 것이나 이에 대한 종합적인 연구가 많지 않다. 기후변화로 인한 농업부문 영향을 평가하기 위해서는 먼저 기후변화로 인해 발생할 것으로 예상되는 주요 농작물의 생산성 변화를 예측할 수가 있어야 한다. 이어서 그러한 생산성 변화를 경제적 가치로 환산하는 절차가 필요하지만, 기후변화가 농업 부문에 미칠 영향에 관한 국내 연구는 이상의 두 가지 면 모두에 있어 불확실성을 가지고 있어 추가 연구가 지속적으로 이루어질 필요가 있다(권오상과 이한빈, 2012). 박경원과 권오상(2011)은 동태화된 설증수리계획모형(PMP; positive mathematical program)을 이용하여 기후변화(SRES A1B 시나리오)로 인해 발생하는 농업부문 전체의 경제적 효과를 분석하였다. 분석결과 기후변화가 쌀 생산성에 미칠 영향은 상당한 수준이지만 생산자에게 자원의 품목별 배분을 허용할 경우 적극적인 품목 선택행위로 인해 생산성 감소율만큼 농업부문 이윤이 줄어들지 않아 2100년의 기후조건에서 농업 총 이윤이 6.42% 감소할 것으로 추정하였다. 그러나 작부시기 조절과 같은 적절한 적응조치가 따를 경우 기후변화는 오히려 농업부문의 총이윤을 늘리는 역할도 하는 것으로 분석하였다(그림 5.30).

그러나 PMP모형은 축차적 분석을 통한 최적화 기법으로 기후변화에 따른 농업부문의 경제적 영향분석이 가능하여 지역별 농업현황과 작목별 영향 분석과 농가

표 5.6 농림수산식품부문 기후변화 적응대책 추진 로드맵(한국농촌경제연구원, 2011)

구 분	기반구축단계(2011~2013)	도약단계(2014~2017)	정착단계(2018-2020)
기술개발 (R&D)	소비다수성·내열성 신품종 개발 시비·파종 등 재배기술 보 재배적지 및 작물분포도작성 조기경보시스템 개발 및 활용 재해대비 수자원관리시스템 개발	온난화 적응품종 보급 작물형질전환 평가연구 추진 조기경보시스템 정교화 물이용효율 최적화설비 활성화 재해대비 수자원관리시스템 활성화	온난화적응 시스템 구축 작물형질전환 평가 시스템 구축 조기경보시스템 구축 가뭄·홍수 등 재해대비 수자원관리시스템 활성화
기반시설 관리	논·밭 탄소감축 기술 보급 물 절약형 관개기준 설정 농업기반시설의 현대화 시설원예 에너지저감기술 보급	논·밭 탄소감축 활성화 물 절약형 관개기준 보급 농업용수관리자동화 구축 시설원예 에너지저감기술 확대	논·밭 탄소감축 활성화 TM/TC시스템 구축 시설원예 에너지 저감 융합기술 확대
경 제 적 수단	저탄소직불급 도입 절수 투자인센티브 도입 고효율 관개시스템 지원	저탄소 직불제 활성화 절수 투자인센티브 활성화 농업용수사용료 도입검토	저탄소직불제 정착 농업용수사용료 제도 운용
홍보 교육	위험관리 전문농업인육성 위험관리전문컨설턴트 육성 농작물 재해보험 및 농가 교육 확대	위험관리 전문농업인 육성 위험관리 전문컨설턴트 활용 온난화 적응 매뉴얼 보급 적응 교육시스템 구축	위험관리 전문농업인 육성 온난화 적응매뉴얼 보완 관련주체별 온난화적응 체계적 교육시스템 구축
모니터링	생산성 예측 및 생물상 변화 등 영향평가 모델 도입 농업생태계 모니터링 시스템 구축	생산성 예측 및 생물상 변화 등 영향평가 모델 활용 작물생육 환경영향평가 시스템 운용	대체 용수사용에 따른 작물 생육 및 환경영향평가 시스템 구축 국내·외식량수급 중장기 예측
농가적용 기술경영	작물 성장속도 조절 기후변화 적합한 작물재배 농가단위 용수관리설비 설치 위험회피 작물보험 활용	물이용 효율 제고 소득안정화 프로그램에 참여 작물다각화 등을 통한 농가소득원 다양화	최적의 재배적지 전환 물이용 효율 제고를 위한 관개스케줄 작성

소득 분석이 가능하지만 향후 수십 년의 기간 동안 이루어질 수 있는 기술변화의 효과를 반영하지 못한다는 점에서 한계가 있다. 또한 위 연구의 경우 쌀의 기후변화에 따른 생산성 변화만을 고려하였고 축산 부문은 고려하지 않았다는 한계점을 지니고있다(권오상과 이한빈, 2012).

권오상과 이한빈(2012)은 위의 연구에서 제외되었던 낙농 및 축산업을 포함한 농업부문 및 국가경제에 대한 기후변화의 장기적 영향을 분석하였다. 우선 작물 시뮬레이션 및 준모수적 분석법 등을 이용하여 쌀, 낙농 및 축산업의 미래기후(SRES A1B)에서 생산성 변화를 예측하고, 다음으로 축차적 동태 CGE(computable general equilibrium)모형을 이용하여 예측된 생산성 영향으로 유발되는 경제적 영향을 평가하였다. 분석결과 우선 미래 기후에서 낙농 및 축산업의 경우 지속적으로 생산성이 하락하는 것으로 예측되었고, 쌀의 경우 작물모형(CERES-Rice) 적용 시 지속적 생산성 하락이, 준모수적 분석법 적용 시 생산성이 상승한 후 다시 하락하는 것으로 예측되었다.

다음으로 쌀의 두 가지 예측결과를 기준으로 두 가지 시나리오를 설정하고 축차적 동태 CGE모형에 반영하여 경제적 영향을 평가한 결과, 2050년 연간 GDP 예상손실률이 시나리오에 따라 각각 0.2%, 0.02%로 나타났다. 관측되는 단수자료와 기후변수간의 함수관계 분석결과를 활용한 준모수적 방법에 의하여 쌀 생산성 변화를 예측한 경우 연간 GDP 예상손실율이 1/10로 낮아질 것으로 분석되었고, 이때의 피해는 주로 축산부문의 생산성 하락 때문에 발생한다고 하였다.

5.4 취약성의 주요 원인

5.4.1 농업기상 재해

1916년 통계 작성이 시작된 이래 연간 기상재해에

의한 재산피해액이 가장 컸던 10번 중 6번이 2001년 이후 발생하였다(표 5.5). 이와 같은 최근의 기상재해 증가는 기후변화에 따른 폭염, 폭설, 한파, 한발, 폭우 등의 기상이변의 발생이 늘어나고 있기 때문이다(기상청, 2011a).

미래의 기후조건에서는 폭염, 열대야 등 극한기후 현상이 증가하여(국립기상연구소, 2011 ; 기상청, 2011b) 농업기상 재해가 증가할 것으로 예상이 되나, 농업기상재해와 관련된 홍수, 한발, 폭염, 호우 등의 이상기상 발생과 이에 따른 기상재해 발생 예측에 대한 연구는 매우 드물다.

5.4.2 재배적지

생태환경 특히 온도는 작물의 재배 가능지와 재배 적지를 결정짓는 중요한 요소이다. 생장 적온 범위를 벗어나 온도가 낮아지거나 높아지면 생육 저해가 일어나고 심하면 식물이 생존할 수 없게 된다. 따라서 모든 작물은 기후 온난화에 의하여 재배 가능지와 적지가 북상하거나 고도가 높은 지역으로 이동할 것이다. 일년생 작물의 경우는 작물이나 품종을 교체 하거나 재배시기를 이동시키는 등의 조치에 의하여 비교적 용이하게 적응할 수 있다. 그러나 과수와 같은 영년생 작물의 경우에는 한번 작물과 품종을 선택하여 재배하게 되면 수십년간 생산을 유지해야 되고, 또한 품종을 교체하거나 새로운 작물로 교체하는 등 단기적으로 적응하는 데는 많은 비용이 든다.

겨울이 추운 지역에서 유래한 과수는 겨울이 되면 휴면에 들어가 겨울의 영하의 온도에서도 얼어 죽지 않고 견뎌낸다. 휴면기간 동안에는 모든 생리적 기능이 정지하거나 느려지고 또한 생육도 연기된다. 휴면상태에 있는 과수가 잎이 나고, 꽃이 펴서 과실을 맺기 위해서는 봄철에 생리적 기능이 다시 활성화되어야 한다(Samish, 1954). 과수가 동상해를 피하기 위해서는 동상해를 가져오는 계절이 끝난 시점에서 다시 생장을 시작하는 것이 무엇보다 중요한데, 나무는 온도를 감지하는 기작이 발달되어 있어서 온난기와 냉온기를 적산할 수 있다(Vegis, 1964). 즉, 나무는 '얼마나 오랫동안 어느 정도의 냉온에 처해 있었는지(chilling)'와 '얼마나 오랫동안 얼마나 따듯한 온도에 처해 있었는지(heat)'를 감지할 수 있다. 휴면에서 깨어나기 위해서는 일정한 냉온요구도(chilling requirement)와 열요구도(heat requirement)가 충족되어야 한다. 휴면타파에 필요한 냉온요구도는 과수의 종류와 품종에 따라서 다르기 때문에 개원하고자 하는 지역의 기후 조건에 맞는 과종과 품종을 선택하는 것은 매우 중요하다. 대기의 온실효과 증대에 따라서 온난화 되어가는 미래의 기후조건에서는 겨울철 chilling(winter chilling)의 손실을 야기하여 과수의 휴면 타파와 개화 시기 등 생물계절과 과수의 품질과 수량에 영향을 할 것이다. 기후 온난화에 따른 과수의 재배 적지와 주산지의 북상, 출아, 개화기, 과실 성숙기 등 식물계절 조기화, 기후 변화에 따른 기상 변동성 증대 등이 맞물려 월동 및 개화기 동·상해 피해와 과실 성숙기 고온 피해 등이 크게 증가될 것이고, 또한 온대 과수의 재배 적지가 크게 감소할 것이다.

5.4.3 작물생산성과 품질

작물의 광합성 등 생리적 반응과 생장은 온도의 지배를 받아 적온 범위를 벗어나면 생리적 기능과 생장이 감소하여 수량의 감소로 이어진다. 따라서 현재 작물의 생육 적온 범위에 있거나 더 높은 지역은 온난화에 따라서 수량이 감소할 것이며 적온 범위보다 낮은 지역은 온난화가 수량에 긍정적인 영향을 미칠 것이다. 또한 작물에 따라서 생육 적온이 다르기 때문에 기후 온난화의 영향은 작물에 따라서 다르게 나타날 것이다. 한편 작물의 생육기간은 온도와 밀접한 관련이 있다. 온도 상승은 작물의 호흡을 촉진시키므로 호흡에 의한 동화산물의 소비가 많아져 생산성에 부정적인 영향을 미친다. 특히 성숙기간 중의 온도 상승은 노화를 촉진하여 성숙기간을 단축시켜 수량을 감소시킨다. 또한, 대부분의 1년생 작물은 개화기에 짧은 시간의 고온 노출에도 민감하다. 작물과 품종에 따라 다르기는 하지만 짧은 기간 동안 일정 임계온도 이상의 개화기 고온은 임실율을 감소시켜 수량을 감소시킨다(Jadadish et al, 2007; Nguyen et al., 2014). 이와 같은 개화기 고온에 의한 수량 감소는 현재의 기후 조건에서도 지역에 따라 자연적인 기후 변동에 의해서 발생하고 있다. 우리나라의

경우도 2012년 여름철 이상고온이 발생하였는데 이상고온기에 발육단계가 화분모세포 감수분열기에 해당되었던 중생 및 중만생 벼 품종에서 심한 불임이 발생하였음이 보고되었다(Kim, 2013). 미래의 기후 조건에서는 이와 같은 이상고온 발생이 더욱 빈번하여질 것으로 예측되어 이에 대한 대비가 필요하다.

CO_2는 작물 생장에 필수적이지만 대기 중 CO_2 농도 증가는 식물에 긍정 및 부정적 영향을 동시에 미칠 수 있다. 현재 대기 중의 CO_2 농도는 광합성 포화점이하이기 때문에 CO_2 농도 증가는 광호흡을 줄이고 광합성을 증대시켜 작물 생장과 수량을 증대시킬 것이다. CO_2 증대에 따른 생장과 수량 증가는 벼와 같은 C3식물이 옥수수와 같은 C4식물보다 클 것이다(Parry et al., 2004). 그러나 CO_2 농도가 증가하면 식물체의 기공 수가 줄어들어(Woodward et al., 1995) 증산량이 저하되므로(Bert et al., 1997) 물 이용효율은 증가하지만 식물 체온이 높아져 고온 스트레스에 대한 취약성은 더 커진다(Hamilton et al., 2008). 앞에서 설명한 바와 같이 온도, 수분, 영양 상태 등이 적정 범위에 있을 때는 CO_2 농도 증가는 수량성을 증가시킬 것이지만, 이들이 적정 범위를 벗어나면 CO_2 시비 효과는 상쇄된다. 예를 들어 온도가 상승하여 적온 범위를 벗어나면 CO_2 농도 증가에 따른 수량증대 효과가 감소하고 또한 광합성 기간이 단축되어 적정 조건에서보다 수량증대 효과는 크게 감소할 것이다.

CO_2 증가에 따른 수량증대 효과를 감쇠 시키는 또 하나의 요인은 대류권의 O_3 증가이다. CO_2 배출은 작물 수량에 해를 끼치는 대류권 O_3 증가를 유발하는 전구물질을 동반한다(Morgan et al., 2006). CO_2처럼 O_3은 광합성 중에 기공을 통하여 흡수되지만 강력한 산화제인 O_3과 2차 부산물은 광합성과 그 외의 다른 생리적 기능을 저하시킴으로서 식물에 피해를 입히고 결과적으로 작물의 수량과 품질저하를 초래한다(Fuhrer, 2009). O_3의 배경농도는 산업화 이후로 증가하여 왔다. 산업화 이후에 증가한 오존은 밀과 콩의 수량을 약 10% 정도 감소 시켰으며 쌀과 옥수수의 수량은 3~5% 감소시킨 것으로 추정된다(Van Dingenen et al., 2009).

한편 온도와 CO_2 농도 증가는 작물의 품질에도 영향을 미칠 것이다. 예를 들어 고농도의 CO_2는 식미를 좌우하는 중요한 요인인 쌀의 amylose 함량이 증대 되어 밥맛이 떨어질 수 있으며 쌀의 영양에 중요한 철과 아연의 함량이 낮아질 수 있다(IPCC, 2007). 또한 온도와 CO_2 농도가 높아지는 경우 완전미율이 저하하고, 심복백미, 유백미 등 미숙립 비율이 증가하여 도정 품질과 외관적 품질도 저하한다(이충근 등, 2011; 김한용, 2011)

5.4.4 병해충 및 잡초 발생

방제를 하지 않은 조건에서 해충과 병원균으로 인한 주요 작물의 수량 손실은 각각 18%와 16% 정도이다(Oerke, 2006). 기후변화는 병해충에 의한 잠재적 손실에 변화를 초래할 것이다. 기후변화는 특정 작물재배 지역에서 특정 곤충 종과 질병의 지리적 분포에 영향을 미칠 것으로 예상된다. 예컨데, 이동성 곤충들이 온도 상승으로 인해 더 넓은 범위에 걸쳐 작물에 대량 서식할 수 있으며 그 결과로 수량의 감소가 일어날 수 있다(Cannon, 1998). 온대기후대에 속한 한반도는 온난화의 진행에 따라 점진적으로 아열대성 기후대로 변화하게 되어 우리나라에서 재배 가능한 농작물 종류 및 재배 작형이 변화되고 그에 따른 병해충 발생양상도 달라질 것으로 전망된다. 지구 온난화에 따른 기후 변화는 따듯한 월동환경, 식물체 피복기간 연장, 장마 변동 등으로 월동 병해충의 증가와 토착화 가능성 확대, 수입 농산물을 따라 국외로부터 들어오는 아열대성 병해충의 출현 등 유해생물군의 돌발적 발생과 규모화가 큰 문제로 대두될 것이다(환경부, 2011).

기후와 CO_2 농도 변화는 농업적으로 중요한 외래 잡초의 분포를 넓히고 경쟁력을 높일 것이며 일부 제초제의 효과를 낮출 수도 있을 것으로 예상된다(IPCC, 2014). 예를 들어 캐나다 엉겅퀴(Cirsium arvense)의 경우 CO_2 증가는 뿌리 생물량을 증대시키고 이는 제초제의 유효 성분의 희석과 연계되어 화학적 방제의 효과를 떨어뜨린다(Ziska 2010).

5.5 적응옵션

기후변화에 따라서 농업기후자원의 변화와 이에 따른 식물계절, 작물의 재배적기 및 재배적지, 기상재해 및 병해충·잡초 발생 양상 등에 많은 변화가 관측되었으며, 미래에는 더 빠른 속도로 변화될 것으로 전망된다. 따라서 이러한 변화에 따른 피해를 줄이고 변화가 우리나라 농업 및 국가 경제에 유리할 수 있도록 적응 전략과 정책을 수립하여 착실히 이행하여야 한다.

이상민 등(2009)에서는 2020년을 목표로 단기인 기반구축단계(2011 ~ 2013년), 중기인 도약단계(2014 ~ 2017년), 장기인 정착단계(2018 ~ 2020년) 등 3단계로 나누어 기술개발, 기반시설관리, 경제적 수단, 홍보 및 교육, 모니터링, 농가적용 기술경영 등 6개 분야로 나누어 농업부문 단계별 적응대책 추진 로드맵을 제시하였다(표 5.6). 이에 따르면 단계별 주요과제 중 기후변화 적응기술 개발은 기후변화 피해를 예방하고 최소화 할 수 있도록 모든 기간에 지속적으로 추진되어야 하고, 홍보와 교육도 기후변화 적응에 대한 공감대 형성을 위해 지속적으로 이루어 져야 한다. 모니터링 분야의 경우는 기후변화 여건을 반영한 중장기 세계식량수급 예측모형

표 5.7 분야별·단계별 기후변화 적응 연구개발 로드맵(한국농촌경제연구원, 2011)

구분	기반구축단계 (2011~2013)	도약단계 (2014~2017)	정착단계 (2018~2020)
작물 분야	기후변화 따른 농업형질동정 및 우량유전자원 탐색 온난화에 따른 재배작기 및 작형, 재배기술 개발 새로운 문제 병해충모니터링 및 예찰기술 개발 이상기상에 따른 식량작물재해 양상 및 경감기술 개발	고온등숙 품종 등 대응품종 및 품질유지기술 개발 온난화 단계별 재배관리기술 개발 기상재해 요인별 피해특성 구명 및 경감기술 개발	온난화 대응 육성 신품종의 농가 보급 및 작물별 산업화 육성 온난화 적응 재배기술 및 병해충 관리기술 보급 및 현장실증 이상기상에 따른 벼 피해 경감기술 개발
원예 분야	고온적응성, 내재해성 신품종 개발 유전자원 수집 평가 및 국내·외 국제공동연구 강화 원예작물 영향평가, 재배지대 설정 연구 채소·과수의 최적 재배적지 분포도 작성	고온적응설, 내재해성 유망계통 및 재배평가, 지역정응시험 실시 온난화 단계별 재배관리기술 개발 주요 채소, 과수 재배품종별 재배적지 변동 평가	고온적응성 및 내재해성 신품종 보급 기후변화 영향평가를 위한 주요 원예작물별 환경생리반응 연구 신재생에너지를 이용한 온난화 대응 저투입 고효율 재배기술 실용화
열대·아열대 분야	열대/아열대 유전자원 활용 신 소득작물 개발기반 구축 열대/아열대작물 수집 및 국제협력 체계 구축(오키나와, 미얀마 등) 최적 재배적지 분석 및 기후변화 변동 평가	열대/아열대 수집 유전자원 적응성 검토 및 선발 선발 작목의 지역적응 시험 및 재배관리기술 개발 열대/아열대의 기후적 재배적지 구분	개발 신소득 작목 재배확대를 위한 시범사업 및 브랜드 산업화 육성 기후변화 작물 취약성 지도 및 작물 재해지도 작성 개발도상국 열대/아열대 농업전문가 교육 및 교류
축산 분야	축종별 기후적응 형질 개발 가축개량 및 생산기술 개발 가축질병 대응기술 개발 목표유전자 집적기술 개발 권역별 사료작물 2~3모작 도입 연구	온난화 대응 증제·육질향상 기술 개발 고온기 생산성 향상 기술개발 우선 질병대상 예방기술 개발 내재해 사료맥류 신품종개발	혹서기 대응 가축사양 기술개발 및 보급 고온 스트레스 저감 첨가제 개발 내재해 양질 다수성 목초 품종 개발 및 보급
연구 인프라	기후변화 종합연구 연구동 건립 검토 및 추진	기후변화 연구동 건립 및 용	기후변화 연구동의 적응분야 연구 전진기지화

개발을 위해 단계적인 과제가 추진되어야 한다. 농가적용 기술·경영의 경우는 기술개발과 연계하여 적응기술이 농가에 실제로 보급될 수 있도록 단계별로 실효성 있는 프로그램 개발에 관한 연구가 필요하다고 하였다. 기술개발 분야의 경우 농업부문 기후변화 적응분야의 연구가 지속적으로 이루어지기 위해서 관련시설과 인력 등 연구 인프라가 기반구축단계에서 확실하게 이루어질 수 있도록 정책적 지원과 관심이 중요하며, 도약단계에는 기후변화 연구동이 운용됨으로써 향후 기후변화 연구의 전진기지로 활용될 수 있도록 해야 한다. 여기서는 기후변화 적응을 위한 재배기술, 품종, 병해충·잡초관리 기술 개발 분야에 대해서만 지금까지 보고된 내용을 종합하여 정리하여 다음과 같이 정리하였다.

5.5.1 식량작물

벼와 같은 여름작물은 온난화에 따라서 출수·개화가 빨라져 영양 생장기간이 단축되고 등숙 온도 상승에 따른 등숙불량으로 인해 수량과 품질 저하가 동시에 일어나고 있는 것으로 관측되고 있으며 이러한 현상은 앞으로 가속될 것으로 예측된다. 이러한 기후변화에 따른 변화에 적응하기 위해서는 지역 기후를 상세하게 파악하고 이를 근간으로 하는 작부체계 개발 및 보급, 작물의 재배시기 및 재배관리 표준의 재설정 및 보급, 적응품종 선정 등 지역별 최적 작부체계와 표준재배법에 대한 재검토와 보급이 조속히 이루어져야 한다. 예를 들어 서형호 등(2010)은 강원 지역에서의 최근 10년간(2000 ~ 2009년)의 기상환경을 평년(1971 ~ 2000년)과 비교하여 벼 재배의 기상환경 변화 추이에 따른 고품질 쌀의 안정 생산을 위한 대책을 제안하였다. 향후 기후 전망에 의하면 출수기는 빨라지고 등숙 온도는 올라갈 수 있으므로, 중생종이나 중만생종을 재배하거나, 이앙 시기의 조절이나 직파 재배와 같은 재배 관리를 통해 출수기를 늦추면 쌀 수량과 품질의 저하를 막을 수 있을 것이라 하였다. 또한 등숙 기간의 기온 상승과 일조량 감소, 강수량 증가 등의 변화된 기상 여건에 잘 적응하는 품종을 육성하거나 선발하여 보급 재배함으로써 고품질 쌀의 안정 생산을 이루어야 할 것이라고 하였다. 한편 구본일 등(2011) 온난화 조건에서 적응을 위한 방법 중의 하나로 벼의 2기작재배 가능성을 검토하였고, 이종희 등(2010)은 2기작재배를 위한 벼 극조기 재배 적응 유망계통을 선발하여 그 특성을 보고하였다.

기후 온난화에 따라서 출수개화기 고온에 의한 불임, 등숙기 고온에 의한 등숙불량, 영양 생장기간 단축에 의한 생육 부진 등으로 벼의 수량과 품질이 저하될 우려가 크므로 고온에 대한 내성을 가진 유전자원의 탐색 및 내성품종의 육종이 필요하다. 우리나라는 잠정적인 물 부족 국가로 분류되고 있고, 기후변화에 따라서 한발이 증가할 가능성이 있으며, 강우 강도의 증가 추세에 따라 침수피해 빈도 및 면적이 증가할 것으로 예상 되므로 내한발성, 내침수성 벼 등 내재해성 품종의 육종이 강화되어야 한다. 온난화에 따라 애멸구가 매개하는 줄무늬 잎마름병이 전국으로 확산되고 있어 애멸구와 줄무늬 잎마름병 저항성 품종 육성이 시급하다. 벼멸구 흰등멸구 등 비래해충이 온난화에 따라서 우리나라에서 월동이 가능해질 경우를 대비하여 이들에 의해서 매개되는 퉁그로 바이러스 병 등에 대한 저항성 품종 육종을 위한 유전자원 확보가 필요하다(조영찬 등, 2011).

온도 상승에 따라 고온 적응력이 높은 잡초가 번성할 가능성이 있다. 유해 병원균과 해충은 생육가능기간이 연장되고 겨울의 온도가 높고 짧아져 월동이 용이해지기 때문에 연중 발생 세대수가 증가되어 농업의 안정성을 위협할 것이다. 따라서 병해충 및 잡초 발생 정밀 예찰 시스템의 조기 개발 및 예방 대책 수립이 필요하다.

5.5.2 채소

기후변화에 적응하여 채소를 안정적으로 생산하기 위해서는 채소 재배의 최적지대 구분 및 한계지대 설정, 지역별 특성에 맞는 채소 및 재배 작형 선택, 온난화 적응 품종과 재배기술 개발, 기후 정보를 활용한 생육관리 기술 개발과 보급이 필요하다. 특히 채소는 국민경제와 밀접한 관계가 있으므로 안정적인 공급이 필수적이므로 기상재해별 대응기술 개발이 필요하다. 작물별로 이상기상 조건에 따른 수확량 예측 모델식 개발, 재배적지 변화 등 지속적인 연구가 필요하다. 또한 장기적으로 기상재해 시 안정적으로 재배할 수 있도록

작물별로 내습성, 내서성, 내동성 등 내재해성 품종육성이 시급하다(이상규, 2013). 고추의 경우 고온에서도 착과가 잘 되는 내서성 품종이면서 복합병 저항성인 품종육성, 배추는 고온과 가뭄에서도 결구가 잘되는 품종육성 및 보급이 필요하다. 마늘은 난지형 마늘 재배면적이 점차 늘어날 것으로 예상되기 때문에 다수성이면서 따뜻한 지역에서 재배가 잘되는 품종육성이 필요하다. 또한 제주도 및 남부 지역의 아열대화에 대비한 아열대 및 열대 채소 적응시험 및 재배기술 개발, 채소 재해방지 및 안정생산기반 조성 등에 대한 연구가 시급하게 요구되고 있다(강점순, 2013).

5.5.3 과수

기후 온난화에 따른 과수의 재배 적지와 주산지의 북상, 출아, 개화기, 과실 성숙기 등 식물계절 조기화, 기후 변화에 따른 기상 변동성 증대 등이 맞물려 월동 및 개화기 동·상해 피해와 과실 성숙기 고온 피해 등이 크게 증가되고 있다. 이와 같은 변화에 적응하기 위해서는 안전재배지역 설정과 기상재해 회피를 위한 재배적·화학적 조치뿐만 아니라 다양한 환경에 적응할 수 있는 내재해성 품종 개발이 시급히 요구되고 있다. 황재희 등(2012)은 과수작목은 기후변화에 따라 주산지의 변동이 발생하고 있으나 주산지의 분포가 재배적지의 급변에 신속히 대응하지 못하여, 재배적지 이탈로 인한 상품성 저하 등 부수적인 문제들에 대한 대응체계의 필요성을 제시하였다. 그리고 과수의 작목별 특화지역과 재배적지의 변동, 기상여건 변화 추이를 동시에 고려한 지역농업 특성화 전략 수립의 중요성과 그 방법을 제시하였다.

재배적인 측면에서 보면 사과는 과피색이 가장 큰 문제가 되므로 과피색을 향상시킬 수 있는 재배기술, 배는 밀증과 과육 연화를 경감시킬 수 있는 재배기술, 겨울철 동해, 개화기 서리 등 저온 피해, 우박, 태풍 등 많은 기상재해 사전예방을 위한 조기경보체계 구축과 사전·사후 관리기술, 돌발 병해충의 발생 예측, 주요 병해충의 발생시기 변화 모니터링 및 적기 방제체계 등의 조기 개발과 보급이 기후변화 적응을 위해서 중요하다(최인명 등, 2011).

기후변화에 대응한 과종별 개량 목표는 다음과 같다(황해성 등, 2011). 사과에서는 생육기 고온이 계속됨에 따라 만상피해가 가중되고 착색불량, 일소과 및 병해충 발생이 증가되므로 착색기 고온 하에서도 착색이 용이하여 착색관리가 불필요한 품종, 만기개화성이어서 늦서리나 동녹 등의 재해를 회피할 수 있는 품종육성이 필요하다. 배는 연평균 기온상승으로 겨울 휴면타파 저온요구기간이 부족하고 봄철 동해 위험지역이 증가되며 여름철 혹서기간 증가가 예상됨에 따라 저온요구도가 낮아 겨울 온난화 조건에서도 안정적인 생육이 가능한 품종, 개화기가 늦어 저온피해를 회피할 수 있는 품종 및 여름 고온에서도 품질변화가 적은 고품질 품종 개발이 필요하다. 내한성이 약한 복숭아는 최근 재배지가 강원도 원주, 양구까지 북상함에 따라 전체 재배면적 13,000 ha의 약 40%가 동해피해가 우려되고 있다. 이와 더불어 가뭄, 이상저온, 일조부족에 의한 생리장해 발생도 꾸준히 증가하고 있어, 휴면기 -20℃ 이하에서도 안전재배가 가능한 내한성 품종, 개화기 저온피해를 회피할 수 있는 만기개화성 또는 저온에 강한 품종, 세균성구멍병, 복숭아심식충 등 돌발병해충에 강한 내병충성 품종, 열대·아열대에서도 화아분화가 가능한 낮은 저온요구도 품종육성이 필요하다. 포도는 고온에서도 착색이 잘되는 품종, 개화기 저온에도 결실이 잘되는 품종, 내한성과 생물, 비생물적 스트레스에도 고품질 생산이 가능한 품종 육성이 필요하다. 참다래는 현재 우리나라 주요 재배품종이 겨울과 여름의 온도차이가 크지 않은 뉴질랜드 기후에서 육성된 품종으로, 우리나라의 겨울철 저온과 여름철 고온에서도 적색과 황색 발현 및 생육이 양호하며, 10월 말 이전에 수확이 가능한 조생종 품종과 불량환경에서도 안정 재배생산이 가능한 내동성, 내습성 대목 육성이 필요하다(황해성 등, 2011).

5.5.4 병해충·잡초 관리

기후변화에 따른 식물 병 발생에 효과적으로 대처하기 위해서는 첫째, 기후 변화에 따른 위해도가 크게 높아지는 병해를 중심으로 그 병해의 발생 환경조건을 갖추지 않고 기주식물의 생육에 적정한 환경조건을 갖춘

지역을 선정한 재식전략이 필요하다. 이를 위해서는 각 지역의 기후환경 특성과 병해의 발생 특성의 연구가 필요하고 또 환경과 특정 병해의 발생과의 관계가 구명되어야 한다. 둘째, 기후변화에 따른 병해의 위해도가 크게 상승할 가능성이 있는 병해 즉 바이러스, 선충 및 파이토플라스마에 대한 집중적인 연구로 이들 병해의 위해도를 절감할 수 있는 방법이 개발되어야 할 것이다. 이러한 병해들은 현재 국내에서는 잘 발견되고 있지 않기 때문에 외국으로부터 국내 도입을 차단을 위해 금지병해충목록에 추가하고 도입차단을 위한 검역업무를 철저히 하여야 할 필요성이 있다. 셋째, 기후변화에 따른 병 발생 특성 변화에 대처할 수 있는 새롭고 효율적인 방제법이 개발되어야 하며 기후변화에 따라 병원체 보다 더욱 생육과 증식이 높아질 천적이나 길항 미생물을 이용한 생물적 방제법 개발과 기존의 방제방법을 추가한 종합적 방제법을 개발함으로써 병발생의 위험도를 낮추어야 한다(김영호, 2010).

기후변화에 따른 온난화는 변온 생물인 농업해충의 발생시기변화, 월동생존율 증가, 세대수와 산란수 증가에 따른 개체군 밀도 증가 등 직접적인 영향을 줄 뿐만 아니라 기후 변화에 따른 식물과의 상호작용, 천적, 재배법 등의 변화에도 복합적으로 영향을 받는다. 또한 기후변화는 특정 생물종에게만 영향을 주는 국지적 현상이 아니라 생태계 전반에 걸쳐 광범위하게 영향을 주기 때문에 복잡계 연구를 기반으로 해충 관리 전략 및 방법을 수립해서 시행하여야 한다. 따라서 기존의 부분적이고, 현안 대응적인 정책은 장기적으로 큰 효과를 기대하기 어려우며 보다 장기적이고 체계적인 장기생태연구가 이루어져야 한다. 기후변화 대응한 해충 문제를 완화하기 위한 방안 마련을 위해서는 농업생태계 해충 및 천적상 정밀조사, 국가 간 해충발생정보 네트워크 구축 및 운영, 농업생태계 관리기술 개발, IPM 기술 수정 및 적용과 평가, 돌발 해충 발생 모델링, 작물 해충 천적 상호작용 연구, 고온적응성 천적의 탐색 및 개발, 해충과 천적의 농업생태계 장기생태연구 등이 필요하다(이준호, 2010).

잡초는 고온과 작물기간의 연장으로 농경지에서는 잡초의 번무가 더욱 극심해 질 것으로 예상된다. 또한 아열대 및 열대잡초가 침입하거나, 토착 잡초 가운데 월동이 가능한 것들이 생기고 숙근류의 상당수가 월동이 가능해지면, 잡초방제는 지금보다 훨씬 복잡하고 어려운 양상으로 변할 것이다. 지구온난화가 주도하는 기후변화는 어느 시간과 공간에 머물지 않고 계속 가속되어 진행될 것으로 예상되기 때문에 이에 따른 새로운 잡초종의 출현에 대한 대책을 마련하여야 할 것이다. 아열대 및 열대잡초 등 외래 잡초의 국내유입방지에도 한층 노력을 기울여야 할 것이다(윤성탁, 2005).

5.6 결론

5.6.1 시사점

농업은 자연 환경에 지배를 받는 산업이다. 따라서 지구 온난화에 수반된 기후 변화는 직·간접적인 영향을 통하여 농업기후자원, 식물계절, 재배 적기와 적지, 작물의 생산성, 안정성 및 품질, 병해충 및 잡초 발생 등 우리나라 농업의 다방면에 영향을 미치고 있음이 관측되고 있으며, 앞으로도 이와 같은 농업분야의 변화가 가속화될 것으로 전망된다. 이와 같은 변화를 조기에 정확하게 예측하여 기후변화에 따른 피해는 줄이고 기후변화를 농업에 유리한 쪽으로 이용할 수 있도록 적응전략을 수립·시행하여야 할 것이다.

기후가 온난화됨에 따라 노지 작물의 생육 가능 기간이 길어지고 있다(견고한 동의). 첫서리는 늦어지고 늦서리는 빨라져 무상기간이 뚜렷하게 길어지고 있다. 기후의 변동성이 커져서 폭염, 폭설, 한파, 한발, 폭우 등의 이상 기상의 발생과 그에 의한 농작물 피해가 급격히 늘어나고 있는 반면 이상저온의 연간 출현 빈도는 크게 감소하여 저온 관련 농업기후자원 특성이 과거에 비하여 많이 개선되었으나, 온난화에 따라 발아기, 개화기 등의 식물계절이 빨라짐으로 인하여 저온에 의한 피해 위험성은 상존할 것이다(중간적 동의).

온난화에 의한 기후자원 변화에 따라 작물의 재배 적기와 적지가 변하고 있다. 벼의 경우 기후학적인 벼 이앙 한계일은 빨라지고 가을에 저온 피해를 입지 않고 등숙에 가장 적합한 온도를 확보할 수 있는 적정 출수기는 늦어지고 있으며, 미래에도 이와 같은 경향이 지속될 것으로 예측되어 이앙시기 재조정 등 주기적인 표

준 재배법의 개선이 요구되고 있다(견고한 동의). 한편 농가에서는 자율적으로 적응을 하여 파종, 이식 등 재배 시기가 변하고 있는 것으로 관측되었다. 월동 작물의 재배 북방한계선은 작물의 내한성과 월동기간 중의 최저온도에 의하여 결정된다. 보리의 품종 개량에 의한 내한성 증대와 지구온난화에 따른 겨울철 기온 상승이 맞물려 보리 재배 북방한계선이 상승하고 있다(견고한 동의). 주요 과수의 경우도 재배적지가 북상하고 주산지가 변화되고 있다(중간적 동의). 온대과수인 사과는 온난화에 따라 재배적지가 북상하고 있을 뿐만 아니라 아열대 기후대가 증가하면서 재배적지 감소로 재배면적이 감소하는 추세이다(중간적 동의). 온난화가 지속되면 꽃눈 분화에 필요한 저온요구도 충족을 위해서 사과 등 온대 과수는 재배 적지가 점차 북상하거나 고도가 높은 곳으로 이동이 되고 금세기 말이 되면 우리나라 대부분의 지역에서 온대과수의 재배가 어려워질 것으로 전망된다(중간적 동의). 한편 아열대 과수로 제주도에서만 재배되었던 감귤이 전남, 경남 등으로 재배지역이 확대되고 있고, 참다래, 무화과의 경우도 재배 가능지역과 재배지역이 북상하고 있다(중간적 동의). 온난화로 인하여 여름철 채소의 주산지인 고랭지 채소재배 면적은 감소 추세이고, 작물 재배 가능지역이 고도가 높은 지역으로 확장되는 것으로 파악되고 있다(제한적 동의).

쌀을 비롯한 작물의 수량성은 지속적으로 증가하였으나 이와 같은 수량 변화에 기후변화가 정 또는 부의 방향으로 얼마나 기여하였는지는 불명확하다. 쌀의 경우 지금까지 상승 추세에 있는 기온이 쌀 수량 변화에 부정적인 영향을 미치진 않았지만 강수량 증가에 따른 일조 부족은 수량 변화에 부정적 영향을 미친 것으로 분석되었고, 지구온난화가 진전됨에 따라 벼 생육온도 상승에 따른 생육기간이 단축, 고온 불임 등 고온해로 인하여 벼 수량성 및 품질 저하가 우려된다(중간적 동의). 기후 변화에 따라 재배 적기로 재배시기를 조정하면 벼 수량성 및 품질 결정에 영향력이 큰 등숙기간의 온도환경을 개선할 수 있어 수량 감소를 어느 정도 완화할 수는 있지만 출수 전 생육기간이 크게 단축되어 여전히 벼 수량성 감소를 경감시키는데 한계가 있다(중간적 동의). 우리나라 벼의 수량성은 수량의 변동성이 특히 최근 들어 커지고 있으며 여기에는 최근 빈번히 발생하는 이상기후나 그에 따른 자연재해가 많은 영향을 미쳤을 것으로 분석되고 있다(중간적 동의).

월동 작물인 보리의 경우 기후가 온난화 되는 경우 수량성이 향상될 것으로 예측되고 있는데 이는 가을에 파종한 보리는 온도 상승에 따라서 출수기가 앞당겨 지지만 출수기가 앞당겨 지면 동시에 등숙기간이 보다 서늘한 계절로 이동이 되어 등숙 기간의 단축이 일어나지 않기 때문인 것으로 분석되고 있다(제한적 동의). 노지 건고추의 경우 5, 6, 7월의 기온 상승과 7, 8월의 강수량증가는 수량에 부정적인 영향을 미쳤으며 RCP 시나리오 하의 미래 기후에서 수량이 감소할 것으로 전망되었다(제한적 동의).

지구 온난화에 따른 기후 변화는 따뜻한 월동환경, 식물체 피복기간 연장, 장마 변동 등으로 월동해충의 증가와 토착화 가능성 확대 등과 맞물려 최근 돌발 병해충 발생이 크게 증가하고 있다(중간적 동의). 지금까지의 기후 변화는 논농사에서 벼물바구미, 혹명나방, 줄무늬잎마름병, 잎집무늬마름병 등의 피해를 확대시키는 쪽으로 작용하였으나 벼 재배에 있어 저항성 품종, 방제 및 시비에 관한 기술들이 지속적으로 발전되어 병해충 피해 면적이 감소한 것으로 분석되었다. 온대기후대에 속한 한반도는 이러한 온난화의 진행에 따라 점진적으로 아열대성 기후대로 변화하게 되어 우리나라에서 재배 가능한 농작물 종류 및 재배 작형이 변화되고 그에 따른 병해충·잡초 발생양상도 달라질 것으로 전망된다. 병해충에 대한 벼 생산의 취약성은 현재보다 미래 기후 조건에서 크게 높아지고 취약지역 면적도 증가할 것으로 전망된다(중간적 동의).

기후변화로 인한 농업기후자원의 변화와 이에 따른 식물계절, 작물의 재배적기 및 재배적지, 기상재해 및 병해충·잡초 발생 양상 등에 많은 변화가 관측되었으며, 미래에는 더 빠른 속도로 변화될 것으로 전망된다. 이와 같은 변화에 따른 피해는 줄이고 변화를 우리나라 농업 및 국가 경제에 유리하도록 적응 전략과 정책을 수립하여 착실히 이행하여야 한다. 지구 온난화로 발생 빈도와 심도가 증가할 것으로 예상되는 고온장해, 한

발, 침관수, 바람 등에 의한 기상재해 피해 기작 해석 및 저감 기술을 개발하여 기상재해에 의한 피해를 완화하여야 한다. 기후 온난화로 변화된 기상생태 환경에 적응할 수 있는 신품종 육성 및 외래 작물 도입, 고온.한발.침관수 등 미래의 기후변화로 빈발할 것으로 예상되는 기상재해 내성 품종 육성 등 기후변화 적응을 위한 새로운 작물 도입 및 신품종 육성을 통하여 농작물 생산의 안정성을 향상하여야 한다. 기후 온난화로 변화된 생태환경에 적응할 수 있는 작부체계, 재배시기, 재배관리기술, 잡초·병해충 관리기술과 온실기체발생 저감형 작물생산 기술의 개발을 통한 농작물 생산 안정성 및 기후변화 대응력을 향상하여야 한다.

5.6.2 향후 연구 방향

온난화에 따른 우리나라 농업기후자원 변화 예측과 이에 따른 농작물의 적응지역 및 생산성 변화, 잡초·병해충 발생 변화 등의 예측 및 영향평가 기술을 개발하여 기후변화 적응 전략수립을 위한 정책적 대응방안이 제시되어야 한다.

온난화로 발생 빈도와 심도가 증가할 것으로 예상되는 고온장해, 한발, 침관수, 바람 등에 의한 기상재해 피해 기작을 해석하고 저감 기술을 개발하여 기상재해에 의한 피해를 완화하여야 한다. 온난화로 변화된 기상생태 환경에 적응할 수 있는 신품종 육성 및 외래 작물 도입, 고온·한발·침관수 등 미래의 기후변화로 빈발할 것으로 예상되는 기상재해 내성 품종 육성 등 기후변화 적응을 위한 새로운 작물 도입 및 신품종 육성을 통하여 농작물 생산의 안정성을 향상하여야 한다.

기후변화에 대응하여 장기적인 농업부문 적응대책을 수립하기 위해서는 작물의 생산성, 품질, 재배적지 변화에 대한 과학적인 영향평가가 필요하며, 이를 위해서 인위적으로 기온과 CO_2 농도 등의 재배환경 조절이 가능하고 학제적으로 공동 연구를 수행할 수 있는 기후변화 종합연구시설이 마련되어야 하고, 또한 각 작물의 미래 기후 조건에서 생산성 변화를 예측할 수 있는 모델과 농업생태계 변화를 예측할 수 있는 모델 개발에 대한 연구가 활성화 되어야 한다.

한편 이 외에도 한국농촌경제연구원(2011)은 작물분야, 원예분야, 열대·아열대 분야 등의 온난화 대응 단계별 연구개발 로드맵을 표 5.7과 같이 제시하였다.

5.7 참고문헌

강기경, 이덕배, 나영은, 2011: 기후변화와 우리농업, RDA Interobang, 17, 20.

강기경, 이덕배, 나영은, 심교문, 최인명, 이충근, 박규현, 김진호, 2011: 기후변화와 우리농업(II) - 도전과 과제. RDA Interobang, 33, 27.

강점순, 2013: 채소작물 안정생산을 위한 기후변화 대응기술 개발. *원예과학기술지* 31(supp):39-39a.

구본일, 최민규, 강신구, 박태선, 김영두, 박홍규, 고재권, 이변우, 2011: 벼 2기작 재배를 위한 조기재배 환경에서 벼 생육 및 수량변화, *한국국제농업개발학회지*, 23(5), 520-530

구희성, 이승호, 2010: 강원도에서 고도별 우유생산량과 기후의 관계. 기후연구, 5(2), 131-147.

국립기상연구소, 2011: IPCC 5차 평가보고서 대응을 위한 기후변화 시나리오 보고서 2011.

국립산림과학원, 2007: 산림병해충 발생예찰조사 연보, 914pp.

국립식량과학원, 2013: 기후변화에 따른 벼 수량 및 품질저하 원인 구명과 기후변하 적응기술 개발.

권영순, 김수옥, 서형호, 문경환, 윤진일, 2012: 지구온난화에 따른 제주도 내 참다래 개화일의 지리적 이동. *한국농림기상학회지*, 14(4), 179-188.

권오상, 이한빈, 2012: 기후변화에 따른 농업생산성 변화의 일반균형효과 분석, 자원.환경경제연구, 21(4), 947-980.

기상청, 2011: 기후변화 시나리오 이해 및 활용사례집.

기상청, 2012: 2011년 이상기후 보고서, 관계부처 합동, 159pp.

기상청, 2013: 2012년 이상기후 보고서, 관계부처 합동, 162pp.

김건엽, 소규호, 정현철, 심교문, 이슬비, 이덕배, 2010: 고추재배에서 지구온난화잠재력 (Global Warming Potential)을 고려한 토성별 온실가스 발생량 종합평가, *한국토양비료학회지*, 43(6),

886-891.

김광호, 정명표, 심홍식, 박진우, 2013: 지구온난화에 따른 농작물 병해충 변화 예측 연구, 농촌진흥청 66.

김대준, 김수옥, 문경환, 윤진일, 2012: RCP8.5 기후조건의 작물생육모의에 근거한 우리나라 곡물생산 전망, *한국농림기상학회지,* 14(3), 132-141.

김대준, 김진희, 노재환, 윤진일, 2012: 신 기후변화시나리오에 따른 한반도 내 겨울보리 재배적지 이동, *한국농림기상학회지,* 14(4), 161-169.

김대준, 노재환, 김정곤, 윤진일, 2013: 파종일 변경이 기후변화 조건에서 곡물생산량에 미치는 영향, *한국농림기상학회지,* 15(2), 26-39.

김대준, 정유란, 윤진일, 2012: 식물계절모형 입력자료로서 확률추정 기상자료의 이용가능성, *한국농림기상학회지,* 14(1), 11-18.

김명현, 방혜선, 나영은, 김미란, 오영주, 강기경, 조광진, 2013: 기후변화에 따른 주요 벼 병해충에 의한 벼 생산의 취약성 평가. *한국환경복원기술학회지,* 16(1), 147-157.

김명현, 한민수, 강기경, 나영은, 방혜선, 2011: 기후변화에 따른 국내C4식물 목록과 분포 변화, *한국농림기상학회지*, 13(3), 123-139.

김민경, 허승오, 권순익, 정구복, 손연규, 하상건, 이덕배, 2010: 우리나라 강우량 변화 시나리오에 따른 밭토양의 토양 유실량 변화 예측. *한국토양비료학회지*, 34(6), 789-792.

김별, 임정수 조성백, 황옥화, 양승학, 2014: 온습도지수를 활용한 젖소의 기후변화 영향변동 예측. *축산시설환경*, 20(2), 49-56.

김선영, 이승호, 2011: 기후변화가 태백산맥 고랭지 농업지역의 변화에 미치는 영향, *기후연구,* 6(2); 100-1009.

김수옥, 김대준, 김진희, 윤진일, 2012: 신 기후변화시나리오 RCP8.5에 근거한 복숭아 주산지 세 곳의 동해위험도 평가, *한국농림기상학회지*, 14(3), 124-131.

김수옥, 김진희, 김대준, 윤진일, 2012: 신 기후변화시나리오에 따른 복숭아 주산지 동해위험 전망. 한국농림기상학회 학술발표논문집, 23-29.

김영호, 2010: 기후변화에 대한 농수산학 분야의 현황과 대책 -병리분야, 한림원연구보고서 66, 61-105.

김창길, 이상민, 2009: 기후변화가 농업부문에 미치는 경제적 영향분석, 농업경제, 50(2), 1-25.

김창길, 정학균, 한석호, 김정승, 문동형, 2012: 기후변화가 식량공급에 미치는 영향 분석과 대응방안. 연구보고서, 한국농촌경제연구원.

김한용, 2011: 기후변화에 노출된 논 생태계의 생물. 비생물 응답 해명, 농촌진흥청 과제완결보고서: 58.

김호성, 박진혁, 윤재영, 김상단, 2010: 극한가뭄의 시공간적 특성에 대한 기후변화의 영향을 평가하기 위한 SAD 곡선의 적용. *대한토목학회지,* 30(6B), 561-569.

김홍조, 오지연, 김동관, 윤홍태, 정우석, 홍점규, 김기덕, 2010: 콩의 품종, 파종시기 및 지역적 차이에 대한 병 발생 평가. 식물병연구, 16(2), 176-182.

남영식, 양승룡, 송용호, 박호정, 2012: 기후변화로 인한 한국 쌀(정곡) 생산 변화에 관한 연구, 농업경제연구, 53(4), 61-88.

노두진, 양정오, 문상래, 윤창만, 강신호, 안기수, 김길하, 2008: 갈색여치의 유인물질 탐색과 트랩개발. 농약과학회지 12(3), 256-261.

노재선, 권오상, 조승현, 2012: 기후변수와 쌀 단수간의 인과성 및 이상기후가 쌀 단수에 미치는 영향 분석. 농업경제연구 53(1), 21-39.

농촌진흥청, 2008: 벼 주요 병해진단 및 예찰.

농촌진흥청, 2011; 기후변화에 따른 농업의 사회.경제적 영향 평가에 관한 연구, 서울대학교.

농촌진흥청, 2012: 2011 농업과학기술개발사업 주요 연구성과. 통계자료를 활용한 감 재배지 공간분포 변동. 81.

농촌진흥청, 2013: 2012 농업과학기술개발사업 주요 연구성과. 기후변화대응 과수안정생산 기술, 72.

농촌진흥청, 2014: 가축에 대한 온난화 영향 예측 및

대응 연구, 국립축산과학원, 52pp.
문경환 등, 2013; 기후변화에 따른 주요 작물별 재배 적지변동 연구 최종 보고서. 농촌진흥청.
박갑주, 이병철, 이재석, 박찬선, 조명환, 2011: 온도변화에 기인한 토양미생물 우점종의 변화에 관한 연구, *환경생물학회*, 29(1), 52-60.
박경원, 권오상, 2011: 동태 실증수리계획법(PMP)을 이용한 기후변화의 경제적 효과 분석 : 쌀 생산성 변화를 중심으로, *한국농업경제학회*, 52(2), 51-76.
박창규, 정명표, 2012: CLIMEX®를 이용한 국내 침입 외래 해충의 정착 예측. 2012년도 한국응용곤충학회 정기총회 및 춘계학술발표회.
방혜선, 2012: 기후변화에 따른 돌발생물 대발생 원인 분석 및 피해확산 방지 대책 기술 개발, 농촌진흥청 국책기수사업보고서, 74.
방혜선, 나영은, 한민수, 김명현, 노기안, 이정택, 2008: 갈색여치(Paratranticus ussuriensis)의 산란 특성. *한국환경농학회지,* 27(3), 274-278.
서영호, 이안수, 조병욱, 강안석 정병찬, 정영상, 2010: 기후변화에 대한 강원지역 벼 재배의 적응. *한국농림기상학회지*, 12(2), 143-151.
서영호, 권영순, 조정건, 김소영, 서태철, 임태준, 최인명, 마경복, 2011; 온난화에 따른 주요 원예작물 재배지대 변동 평가, 농촌진흥청 국립원예특작과학원.
소규호, 이재길, 김건엽, 정현철, 유종희, 박정아, 이덕배, 2010: 콩의 생산과정에서 발생하는 탄소배출량 산정 및 전과정 평가, *한국토양비료학회지*, 43(6), 898-903.
소방방재청, 2013. 2012 재해연보.
송성호, 유승환, 배승종, 2013: 기후변화를 고려한 제주지역의 권역별 가뭄 평가 및 농업용수에의 영향 고찰, *한국환경과학회지* 22(5), 625-638.
신정욱, 윤성철, 2011: 한국의 2011-2100년 기후변화가 고추 탄저병 살균제살포에 미치는 영향, *한국농림기상학회지*, 13(1), 10-19.
심교문, 김건엽, 정현철, 이정택, 2008: 지구온난화에 따른 한반도의 농업환경 영향평가와 적응, *한국농림기상학회*, 17(1), 78-81.
심교문, 김용석, 정명표, 김석철, 민성현, 소규호, 2013: 한국의 농업기후지대별 이상기온 출현 특성 평가, *한국기후변화학회지* 4(2), 189-199.
심교문, 노기안, 소규, 김건엽, 정현철, 이덕배, 2010: 지구온난화에 따른 벼 생육 및 생산성 변화 예측. *한국기후변화학회지* 1(2), 121-131.
심교문, 민성현 이덕배, 김건엽, 이슬비, 강기경, 2011a: A1B 기후변화 시나리오가 국내 가을 쌀보리의 잠재수량에 미치는 영향 모사. *한국농림기상학회지,* 13(4), 192-203.
심교문, 윤성호, 정영상, 이정택, 황규홍, 2002: 최근의 기상환경 변화에 따른 가을보리의 수량 구성 요소 및 생육단계 변화, *한국농림기상학회지*, 4(1), 38-48.
심교문, 이덕배, 민성현, 김건엽, 정현철, 이슬비, 강기경, 2011b: A1B 기후변화시나리오에 따른 미래 겉보리 잠재생산성 변화 예측. *한국기후변화학회지,* 2(4), 317-331.
심홍식, 명인식, 홍성기, 이영기, 이상계, 이관석, 박홍현, 최홍수, 고현관, 2012: 기후변화에 따른 돌발병해충 발생현황과 피해. 2012 한국농약과학회 추계학술발표회 초록집, 11-18.
안기수, 양정오, 노두진, 윤창만, 김길하, 2007: 갈색여치에 대한 살충제 감수성. *농약과학회지,* 11(3), 194-200.
안중배, 허지나, 심교문, 2010: 수치예보모형을 이용한 역학적 규모축소 기법을 통한 농업기후지수 모사. *한국농림기상학회지*, 12(1), 1-10.
안중배, 홍자영, 심교문, 2010: 대기-해양-지면-해빙 접합 대순환 모형으로 모의된 이산화탄소 배증시 한반도 농업기후지수 변화 분석, *한국농림기상학회지*, 12(1), 11-22.
양승학, 조성백, 황옥화, 김별, 2014: 온습도지수를 이용한 RCP8.5 신시나리오의 젖소 열스트레스 영향 평가. 한국동물자원과학회 정기 학술발표논문집. 202.

유승환, 2009: 기후변화에 따른 미래 농업가뭄 특성 분석. 서울대학교 박사학위논문.

윤성철, 김도순, 조기종, 한민수, 2010: 온도상승에 따른 병해충, 잡초 영향평가 및 적응대책 연구, 2999년도 국가농업 R&D 시험연구사업보고서 Agenda 5, 기후변화대응 미래농업기술 개발.

윤성탁, 2005: 지구온난화가 농업생산에 미치는 영향과 대응책, *한국국제농업개발학회지* 17(3), 1225-8504.

윤성탁, 이용호, 홍선희, 김명현, 강기경, 나영은, 오영주, 2013: 이상기후에 의한 재배시설의 취약성 평가, *한국농림기상학회지* 15(4), 264-272.

윤태중, 조기종, 이미경, 정명섭, 배연재, 2010: 기후변화와 식품해충, 곤충연구지, 26, 27-30.

이기광, 고광근, 이중우, 2012: 농산물 생산량과 기상요소의 상관관계 분석, *한국환경과학회지*, 21(4), 461-470.

이덕배, 심교문, 2011: 기후변화가 농업에 미치는 영향과 대책, 농업전망 2011(Ⅰ), 319-344.

이상규, 여경환, 장윤아, 이준구, 남춘우, 이희주, 최장선, 엄영철, 2013: 무의 질소시비량에 따른 생육량 추정 모델식 개발, *원예과학기술지* 31(5), 531-537.

이상민, 정학균, 장정경, 이충근, 2009: 기후변화에 따른 농업부문 영향분석과 대응전략, 연구보고, 한국농촌경제연구원.

이상호, 2012: 기후변화에 따른 농업부문 적응능력의 다중속성 분석, 한국지역경제연구 22, 107-122.

이용환, 나동수, 예완해, 최효원, 명인식, 이세원, 이영훈, 한성숙, 심홍식, 2010: 1999-2008년도 벼 주요 병해 발생 개황. 식물병연구, 16(2), 183-190.

이윤정, 민세철, 나자현, 한재준, 2011: 기후변화에 따른 해충유입 방지를 위한 방충포장 기법의 필요성, *한국식품위생안전성학회*, 6(3), 24-30.

이인희, 2009: 기후변화에 대응한 농업 농촌 부문의 저탄소녹생성장 전략과 과제, *한국지역개발학회지*, 21(4), 41-70.

이정진,이준성,김종남,서자겸,조남철,박성민,기광석,서성원, 2013; 지구온난화에 따른 국내 기후변화와 젖소 착유우의 생산효율에 미치는 영향 평가: 모델 시뮬레이션을 이용한 접근, *한국유기농업학회지* 21(4), 711-723.

이정택, 심교문, 방혜선, 김명현, 강기경, 나영은, 한민수, 이덕배, 2010: 우리나라 1960년대 (1931-1960)와 2000년대 (1971-2000) 기후표를 이용한 벼 생육 및 재배기간 변화 분석, *한국토양비료학회지*, 43(5), 1018-1023.

이종희, 오성환, 김상열, 조준현, 이지윤, 여운상, 송유천, 최경진, 박태선, 강항원, 이학동, 2010: 벼 극조기 재배 적응 유망계통의 농업적 특성. *한국육종학회지*, 42(4), 407-412.

이충근, 곽강수, 김준환, 손지영, 양원하, 2011a: 미래 기후변화 및 그에 따른 재배시기 조정이 벼 생태형별 생육기간과 생육온도에 미치는 영향. *한국작물학회지* 56(3), 233-244.

이충근, 손지영, 김준환, 양원하, 김연규, 2011b: 온도구배형온실 및 작물모형을 이용한 기후변화에 따른 벼 생육반응분석, 2011 춘계 한국작물학회 학술발표대회 논문집, 18.

이충근, 김준환, 손지영, 양운호, 윤영환, 최경진, 김광수, 2012: 생육모의 연구에 의한 한반도에서의 기후변화에 따른 벼 생산성 및 적응기술 평가. *한국농림기상학회지,* 14(4), 207-221.

이충근, 손지영, 김준환, 양원하, 김연규, 2011: 온도구배형온실 및 작물모형을 이용한 기후변화에 따른 벼 생육반응분석, 2011 춘계 한국작물학회 학술발표대회 논문집, 18.

이회성 등 18인, 2011: 우리나라 기후변화의 경제학적 분석 Ⅰ·Ⅱ. 환경부.

이효석, 이준호, 2013: RCP 기후변화 시나리오에 따른 먹노린재(Scotinophara lurida Burmeister) (Hemiptera: Pentatomidae) 발생 동태의 변화, 2013 한국응용곤충학회 춘계학술발표회 초록집, 180.

장안철, 최지영, 이신우, 김동헌, 배신철, 2011: 기후변화에 대응한 농업생명공학의 기회와 도전. *Plant Biotechnol*, 38, 117-124.

정명표, 박홍현, 김광호, 이상계, 2012: 기후변화 시나리오 RCP8.5에 따른 애멸구 발생 예측, 한국응용곤충학회 학술발표회초록집, 99.

정준호, 김광배, 2012: 기후변수가 강원도의 농업에 미친 경제적 효과 분석. *한국경제지리학회지*, 15(2), 192-205.

정준호, 이승호, 2012: 극한 기후변수가 농업에 미친 경제적 효과 추정. *대한지리학회*, 7(3), 459-470.

정준호, 조창현, 장동호, 2012: 기후변수가 농업에 미친 경제적 효과 추정. *기후연구,* 7(2), 146-160.

정학균, 김창길, 문동현, 2014; 기후변화가 벼 병해충 피해면적 발생에 미치는 영향, *한국환경농학회지*, 33(1), 52-56.

조리나, 2008: 변화 기후변화가 농작물 생육시기에 미치는 영향 농사 일기를 사례로-, *기후연구* 3(2), 120-127.

조성진, 조창현, 2011: 농경사회의 기후변화 영향 및 적응에 관한 ABMS 활용 연구, *기후연구*, 6(2), 89-99.

조수진, 김해동, 김기영, 조미현, 추연혁, 2010: 대구지역의 기후변화가 농업생태계에 미치는 영향에 관한 연구, *환경과학논집*, 15, 86-95.

조영찬, 신영섭, 모영준, 이종희, 이상복, 서정필, 신문식, 김경보, 여운상, 김연구, 2011: 기후변화 대응 벼 안전 생산을 위한 육종전략, *한국육종학회지,* 43(1), 4.

조재환, 서정민, 강점순, 홍창오, 김진호, 이상규, 2012: 기온 및 강수량이 변동이 노지 건고추 단수에 미치는 영향, *한국환경과학회지,* 21(12), 1503-1510.

조정건, 김승희, 한점화, 도경란, 2012a: 신기후 변화 시나리오에 따른 주요 과수 발아기와 만개기 변화, *원예과학기술지*, 30(S2), 110.

조정건, 김승희, 한점화, 도경란, 2012b: 신기후 변화 시나리오에 따른 주요 과수 재배적지 변화, *원예과학기술지,* 30(S2), 108-109.

최덕수, 김도익, 고숙주, 강범용, 박종대, 김선곤, 최경주, 2012: 전남지역에서 꽃매미 부화시기 예측과 친환경 방제방법, *한응곤지* 51(2), 141-148.

최덕수, 김도익, 고숙주, 강범용, 이관석, 박종대, 최경주, 2012: 갈색날개매미충(신칭, Ricania sp.)의 발생생태와 친환경 방제자재 선발, *한응곤지,* 51(2), 141-148.

최용석, 황인수, 강태주, 임주락, 최광렬, 2011: 과수의 신종해충인 날개매미충 일종의 산란특성, *한국응용곤충학회지,* 50(4), 367-372.

최인명, 한점화, 김승희, 조정건, 손인창, 도경란, 2011: 기후변화에 따른 재배적지 이동과 재배적 대응 방안, *원예과학기술지,* 29(S1), 39-39.

한국과학기술한림원, 2010: 기후변화에 대한 농수산학 분야의 현황과 대책 -농업해충분야, 한국과학기술한림원 연구보고서 66, 107-108.

한국농촌경제연구원, 2011: 기후변화 대응을 위한 농림수산식품산업 전략수립연구.

한국농촌경제연구원, 2012a, 농업전망 2012(Ⅰ)- 도농상생을 위한 농업·농촌가치의 재발견, 1047-1074.

한국농촌경제연구원, 2012b: 기후변화가 식량공급에 미치는 영향분석과 대응방안, 189pp.

한석호, 이병훈, 박미성, 승준호, 양현석, 신성철, 2011: 기상요인을 고려한 단수예측모형 개발연구. 정책연구보고, 한국농촌경제연구원.

허인혜, 김선영, 이경미, 권원태, 이승호, 2008: 기후변화가 나주시 농업에 미치는 영향, *기후연구,* 3(1), 17-30.

환경부, 2011: 한국 기후변화 평가보고서 2010, 국립환경과학원.

황재희, 김현중, 이성우, 2012: 특화작목과 기후변화간 영향분석을 통한 지역농업 활성화 전략연구 - 과수를 중심으로-, *농촌계획,* 18(3), 149-164.

황해성, 신일섭, 권순일, 강삼석, 남은영, 노정호, 곽용범, 2011: 기후변화 대응 과수품종 육성방향, *원예과학기술지*, 29(S1), 38-39.

Bert, D., S.W. Leavitt, and J.L. Dupouey, 1997: Variations in wood δ13C and water-use efficiency of Abies alba during the last century.

Ecology 78, 1588-595.

Cannon, R.J.C. 1998: The implications of predicted climate change for insect pests in the UK, with emphasis on non-indigenous species. *Global Change Biology*, 4(7), 785-796.

Choi, Woo-Jung, Myoung-Seok Lee, Jae-Eul Choi, Sanghoo Yoon, and Han-Yong,Kim, 2013: How do weather extremes affect rice productivity in a changing climate? An answer to episodic lack of sunshine, *Global Change Biology*, 19(4), 1300-1310.

Fuhrer, J., 2009: Ozone risk for crops and pastures in present and future climates, Naturwissenschaften 96, 173-194.

Hamilton E.W, S.A. Heckathorn, P. Joshi, D. Wang, and D.Barua, 2008: Interactive effects of elevated CO_2 and growth temperature on the tolerance of photosynthesis to acute heat stress in C3 and C4 species, *Journal of Integrated Plant Biology* 50(11), 1375-1387.

Han, J.M., Kim, H., Lim, E.J., Lee, S., Kwon, Y.J., Cho, S., 2008: Lycorma delicatula (Hemiptera: Auchenorrhyncha: Fulgoridae: Aphaeninae), finally, but suddenly arrived in Korea, *Entomol. Res.* 38, 281-286.

Hur, J. and Ahn, J.-B. 2014: The change of first-flowering date over South Korea projected from downscaled IPCC AR5 simulation: peach and pear. International *Journal of Climatology*, DOI: 10.1002/joc.4098.

Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), 2007: Climate Change 2007: 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), 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.Jadadish, K., P.Q. Craufurd, and T.R. Wheeler, 2007: High temperature stress and spikelet fertility in rice (Oryza sativa L.). J. of Experimental Biology, 58, 1627-1635.

Jung, Myung-Pyo, Kwang-Ho Kim, Sang-Guei Lee and Hong-Hyun Park. 2013: Effect of climate change on the ℃currence of overwintered moths of orchards in South Korea, *Environmental Research* 43(2013), 177-182.

Kim, Da-Ik, 2013. Genotypic differences in spikelet sterility and grain-filling response to air temperature during reproductive stage of rice. M.S. Thesis, Seoul National University, KOREA.

Kim, Han-Yong, Jonghan Ko, Suchel Kang, and John Tenhunen, 2013: Impacts of climate change on paddy rice yield in a temperate climate. *Global Change Biology* 19(2), 548-562.

Kim, Han-Yong, Sang-Sun Lim, Jin-Hyeob Kwak, Dong-Suk Lee, Sang-Mo Lee, Hee-Myong Ro, and Woo-Jung Choi, 2010: Dry matter and nitrogen accumulation and partitioning in rice rice (Oryza sativa L.) exposed to experimental warmingwith elevated CO_2 , *Plant and Soil*, 342, 59-71.

Kim, Jin-Won, Byeong Chul Moon, Soo-Hyun Lim, J-Hoon Chung, and Do-Soon Kim, 2010. Prediction of Seedling Emergence and Early Growth of Ele℃haris kuroguwai Ohwi under

Elevated Temperature. Kor. *J. Weed Sci.* 30(2), 4-102.

Kim, Y.E., S.R. Kim and S.H. Lee. 2009: New record of an exotic flatid species, Metcalfa pruinosa(Say)(Hemiptera; Flatidae) in Korea. International symposium on climate change and insect pest, 117.

Lee, C.E., and Y.J. Kwon, 1977: leafhoppers and planthoppers (Auchenorrhyncha, Homoptera, Hemiptera), *Nature & Life*. 7(2), 98.

Morgan, P.B., T.A. Mies, G.A. Bollero, R.L. Nelson, and S.P. Long, 2006: Season long elevation of ozone concentration to projected 2050 levels under fully open air conditions substantially decreases the growth and production of soybean, *New Phytologist*, 170, 333-343.

Nguyen, D. N, K. J. Lee, D. I. Kim, A. T. Nguyen, and B. W. Lee. 2014. Modelling and identification of high-temperature induced spikelet sterility in rice. *Field Crops Research,* 156, 293-302.

Oerke, E.C., 2006: Crop losses to pest. *The Journal of Agricultural Science,* 144, 31-43.

Park, Min-Won, Jin-Won Kim, Soo-Hyun Lim, In-Yong Lee, and Do-Soon Kim, 2010. Prediction of Seedling Emergence and Early Growth of Mon℃horia vaginalis and Scirpus juncoides under Elevated Temperature, K. *J. Weed Sci,* 30(2), 103-110.

Parry, M., C. Rosenzweig, A. Iglesias, G. Fisher, and M. Livermore, 2004: Climate change and world food security: a new assessment, *Global environmental change,* 9(1), 551-567

Samish, R.M., 1954: Dormancy in woody plants. Annu. Rev. Plant Physiol. Plant Mol. Biol., 5 (1954), 183-204.

Shin, Jeong-Wook and Sung-Chul Yun, 2010: Elevated CO_2 and Temperature Effects on the Incidence of Four maior Chili Pepper Diseases, *The Plant Pathology Journal,* 26(2), 178-184

Van Dingenen, R.F. Dentener, F. Raes, M.C. Krol, L. Emerson, and J. Cofala, 2009: The global impact of ozone on agricultural crop yield under current and future air quality legislation. Atmospheric Environment, 43, 604-619.

Vegis, A., 1964: Dormancy in higher plants. Annu. Rev. Plant Physiol. Plant Mol. Biol., 15 (1964): 185-224.

Woodward, F.I. and C.K. Kelly, 1995: The influence of CO_2 concentration on stomatal density, *New Phytologist*, 131(3), 311-327.

Yamamura K, Kiritani K 1998: A simple method to estimate the potential increase in the number of generations under global warming in temperate zones, *Appl Entomol Zool,* 33, 289-298.

Ziska, L.H., 2010: Global climate change and carbon ioxide: Assessing weed biology and management. In Handbook of agro-ecosystems: Impacts, adaptation and mitigation [Rosenzweig, C. and D. Hillel (eds). Hackensack, N.J., 191-208.

제 6 장 해양 및 수산

6.1 서론

IPCC 제4차 평가보고서(AR4)에서는 기후변화를 설명하고 예측함에 있어서 대부분 육상과 대기에 초점을 맞추고 지구 표면적의 2/3를 차지하고 지구 기후를 조절하는데 가장 중요한 해양을 본격적으로 다루지 않아서 해양학계의 큰 반발을 불러 일으켰다. 하지만, 기후변화에서 해양의 중요성이 점점 강조되면서 제5차 평가보고서(AR5)에서는 해양을 본격적으로 다루게 되었는데, 해양의 물리적 현상에 대한 변화뿐만 아니라 지구환경의 변화에 따른 생물종의 변화를 심도 깊게 포함하였다. 즉, 지구온도의 상승으로 인하여 2050년까지 많은 수의 해양생물종이 멸종되어 생물종 다양성에 변화가 발생하고, 수온 상승에 따른 해양생태계 변화와 수산어류의 이동으로 인해 어업이 받게 될 영향도 매우 클 것으로 전망하고 있다.

AR4에서 해양과 직접 관련된 내용이 독립적으로 분리된 것은 WGⅠ, 제5장 "해양의 기후변화와 해수면"이 유일하지만, AR5에서는 모두 6 개 장(chapter)에서 해양과 직접 관련된 주제를 분리하여 다루고 있다. WGⅠ, 제3장 "해양(Oceans)", 제13장 "해수면 변화(Sea level change)", WGⅡ, 제5장 "연안과 저지대(Coastal systems and Low-lying areas)", 제6장 "해양시스템(Ocean systems)", 제28장 "극지(Polar regions)", 제30장 "해양(Oceans)"을 들 수 있다. 그 외에도 WGⅡ, 제7장 "식량생산체계와 식량안보(Food production systems and Food security)"에서 수산과 양식을 다루고 있으며, 제29장 "군소도서지역(Small islands)"에서도 해수면 상승 등이 중요한 주제이다.

AR5에 따르면 21세기부터 급속한 해수면의 상승으로 인하여 연안과 저지대 지역은 침수될 위험성이 커지고, 연안에서의 홍수와 해안 침식과 같은 영향을 더 많이 경험하게 될 것이라고 전망하였다. 또한, 기후변화 요인 이외에도 연안과 저지대에 거주하는 인구가 증가하고 경제발전과 도시화로 인한 연안의 개발이 가속화됨에 따라 연안생태계에 대한 인간의 영향이 증가할 것이라고 예측하였다. 기후변화에 대한 연안 개발의 투자와 적절한 적응대책의 미흡으로 인하여 수십 억 명의 인구가 홍수에 의한 재산피해를 받게 될 것이며, 토지 유실에 의한 거주지 이전을 경험하게 될 것이다. 이러한 피해는 경제적으로 개발도상국의 지위에 있는 동남아시아 국가에서 특히 클 것이라 예상하였다. 또한 동남아시아에는 작은 섬으로 이루어진 국가들이 많아 해수면 상승으로 매우 심각한 영향을 받을 것이기 때문에 이와 연관된 피해와 적응비용으로 매년 상당한 수준의 경비를 지불해야 할 것이라는 예측을 내놓았다. 동아시아에 위치한 우리나라도 이러한 위험으로부터 크게 벗어나 있는 것은 아니므로 치밀한 준비가 필요하다.

IPCC의 AR5에서는 기후변화가 연안지역에 거주하는 인간에게 미칠 영향뿐만 아니라 해양 환경의 변화와 이에 반응하는 생태계에 대해서도 예측하였다. 기후변화 시나리오 RCP8.5를 적용한 연구에서는 2100년에 외양에서 순일차 생산량이 현재와는 다른 양상으로 나타나고, 전 지구적으로는 감소한다는 전망을 내놓았다. 식물플랑크톤에 의한 1차생산량의 변동은 2차생산자인 동물플랑크톤의 변동을 야기하고, 순차적으로 작은 어류와 어획의 대상이 되는 커다란 어류까지 영향을 준다. 궁극적으로 기후변화는 해양의 어류생산력을 좌우하고, 그 결과는 인간사회의 경제와 국가의 정책에도 큰 변화를 미치게 된다.

금세기에 발생할 해양의 변화는 크게 해수의 온난화(warming)와 이에 따른 해류의 변동, 해수면 상승, 해양산성화(acidification), 빈산소화(hypoxia) 혹은 탈산소화/저산소화(deoxygenation) 해역의 확대 등을 들 수 있다. 이러한 변화는 해양생태계에 큰 영향을 끼쳐 적응하지 못하는 취약한 생물군들의 쇠락이 뒤따르고, 전 해양생태계의 구조와 기능이 재편되리라 전망한다. 해양에서의 어업(capture fishery)은 자연으로부터 야생동식물을 포획하는 행위이다. 해양야생동물의 가장 큰 부분을 차지하는 것이 해양어류이고 이들은 해양의 전 수층에서 서식한다. 특히 온난화 현상은 많은

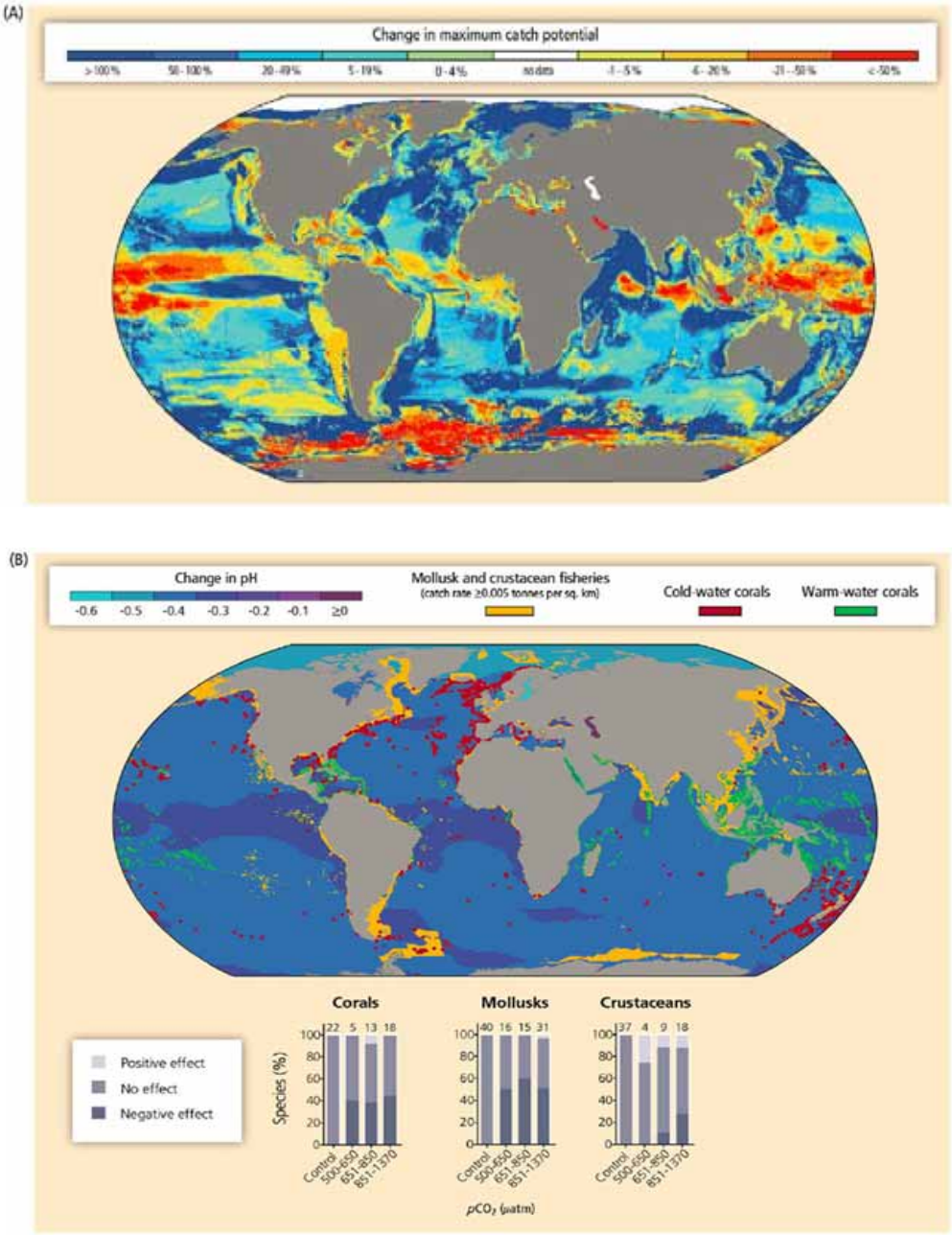


그림 6.1 수산업에 대한 기후변화 리스크. (a) 주요 포획 어류와 무척추동물 1,000 종에 대한 최대 잠재어획량의 2001~2010년과 2051~2060년의 각 10년 평균을 비교한 전 지구적 재 분포 전망(SRES A1B (RCP6.0) 사용, 산업화 이전 대비 2℃ 상승 기준, 남획의 잠재적 영향 분석 배제), (b) 해양 연체류 및 갑각류 어장(예상 어획률 0.005 톤/km² 이상)과 난류와 한류 산호의 알려진 서식지를 RCP8.5 하에서 2100년의 해양산성화 분포를 세계지도 상에 함께 표시(IPCC, 2013)

해양어류가 새로운 서식지를 찾아 이동하게 하는 이유가 되는데, 이들은 적합한 수온을 찾기 위하여 더욱 깊이 들어가거나 고위도 해역으로 이동한다. 해양어류의 수평적 이동으로 인하여 중위도와 고위도 해역의 생물종 수는 증가하는 반면, 열대 해역에서는 종의 수가 감소하는 현상이 나타날 것이고, 이에 따른 수산생물자원의 잠재 어획생산량에 대한 변화가 야기되어 인류의 식량안보에 새로운 시사점을 안기게 될 것이다(그림

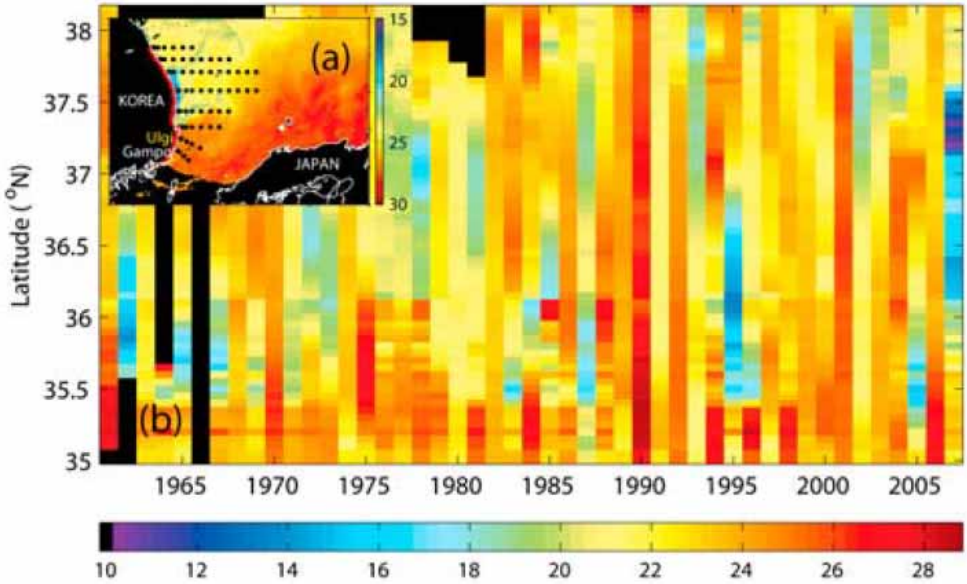


그림 6.2 해면수온 연변화 (a) 2007년 8월 11일 해면수온(SST) 분포, (b) 한국연안(그림 a 빨간선)(Park and Kim, 2010)

6.1a). 중위도에 서식하는 해양생물은 고위도 해역으로 이동하고, 열대 해역과 반폐쇄 해역에서는 대체로 생물종의 수가 감소할 것이며, 지역적으로 멸종하는 생물종의 수가 증가할 것이다.

해양의 환경 변화에서 가장 큰 문제가 되고 있는 해양의 산성화는 전지구적인 온난화 현상과 용존산소 감소와 더불어 나타나기도 하며, 지역적으로는 오염물질(pollutants)의 배출과 부영양화(eutrophication)에 의하여 발생하기도 한다. 온난화, 산성화와 같은 환경요인이 동시에 발생하면 생물에게 상호작용적이고 복잡한, 또한 증폭된 영향이 발생할 수 있다. 산성화는 생물의 생리현상, 행동양식 그리고 개체역학관계에 미치는 영향과 결합하여 생태계, 특히 극지 생태계와 산호초 생태계에 큰 위협으로 작용하고 있다. 탄산칼슘을 이용하여 껍질을 구성하는 연체동물과 극피동물, 산호초를 이루는 산호는 갑각류나 어류보다도 해수의 산성화에 민감하게 반응한다(그림 6.1b). 산호초의 감소는 산호초 생태계의 붕괴와 함께 그 지역의 어업과 어민 생계에 잠재적인 위협으로 작용할 것이다.

앞서 언급한 해수면 상승에 의한 해양 주변부와 저지대 주민의 피해, 해수온 상승으로 인한 생물종의 이동, 해양의 산성화 등 여러 기후변화에 의한 문제들은 결론적으로 수산업 생산량의 변동에 영향을 주는 문제들로 인식되고 있다. 어업생산량의 변화는 수산업 전반에 걸쳐 수산업 자체의 재편을 야기하게 될 것이고, 특히 해양 수산업을 담당하는 각국 정부에게 오염, 매립, 남획 등의 비기후성 스트레스 요인에 의한 어업생산량 변동 위협에 기후변화라는 또 다른 위협을 추가하였다. 이렇게 생태계와 인간사회가 복잡하게 얽혀있는 사회-생태학적 체계(social-ecological system)에서 해양생태계에 대한 연구결과를 바탕으로 화석연료사용으로 발생하는 이산화탄소 배출을 제한하거나 완화시키는 적응대책을 수립하지 않는다면 가까운 미래에 우리가 식당에서 주문한 해산물 음식의 종류가 지금과 많이 다를 수도 있을 것이다.

우리나라의 표층생태계는 중위도권역에 위치하고 있으므로 남쪽으로부터 온수성 어류의 유입이 더욱 가속될 것이며, 연어와 같은 냉수성 어류의 입지는 더욱 좁아 질 것으로 예상한다. 또한, 우리나라 해역의 경우 해양의 깊은 곳에는 대구, 명태, 청어, 말쥐치 등이 서식하고, 상층에는 정어리, 고등어, 멸치, 살오징어 등이 서식한다. 특히 표층에 사는 소형의 어류를 소형표층어류(small pelagic fish)라고 하는데, 이들은 수명이 짧고 무리를 이루어 사는 특징이 있다. 소형표층어류는 대형

동물플랑크톤과 함께 생태계 먹이그물의 중간에 위치한다. 위쪽으로는 커다란 포식자의 먹이가 되고 아래로는 작은 동물플랑크톤을 섭식하는 포식자의 위치를 차지한다. 기후가 온난해지면서 해양의 상층은 하층에 비하여 더욱 따뜻하게 되어 두 층의 수온 차이가 심해지고, 두 층에 서식하는 생물체들의 교류도 힘들어진다. 상층과 심층 사이의 영양염, 용존기체 등의 물질교환이 점점 어려워져 각 생태계에 서식하고 있는 생물군들은 지구온난화가 진행되면서 큰 영향을 받을 것이다. 수산생물군들이 환경변화에 어떠한 반응을 보이는지 파악하고, 해양생태계가 어떠한 모습으로 재편될지 예측하는 것이 21세기 해양생태학자들에게 주어진 숙제이다.

2010년에 발간된 한국 기후변화 평가보고서에서는 해양의 물리화학적 변화뿐만 아니라 태풍해일, 파랑 등에 대한 현재의 상황과 기후변화의 영향에 대한 취약성 평가와 적응 정책에 대한 제언을 하였다. 해양 표층의 온난화와 어획되는 생물의 변화는 이미 나타나고 있으며, 어종과 어업방법, 어업 해역에 따라 긍정적인 면과 부정적인 면이 함께 나타날 것이라 예상하였다. 하지만 우리나라 기후의 미래전망도 아직 분명히 예상되지 못했고, 더 나아가 해양 상태의 전망은 많은 불확실성을 가지고 있다. 따라서 기후변동의 영향이 해양생태계를 어떻게 변화시킬지 모르는 상태에서, 생태계를 구성하는 각 생물종의 번성과 분포에 대한 예측은 아직 과학적인 근거가 결여되어 있다. 특히 각 생물종에 대한 기본 생물학 지식의 결여는 우리의 분석을 정성분석의 수준에 머물게 하였다. 무엇보다도, 아직 물리현상과 생물현상을 연결하는 물리-생물 접합모형의 개발이 시도되지 않아, 우리 학자들에 의한 수산생물 개체군 변동 예측이나 어업의 미래를 예측하는데 한계가 있다.

어업자원을 포함하는 생태계의 변화를 예측하는 분야도 수산업 발전에 중요한 요소이겠지만, 인간 활동의 지속적 발전의 관점에서 보면 연안지역 정주조건과 이에 연관된 사회경제 활동도 매우 중요하다. 하지만 우리나라에서 수산업과 기후변화의 연관성에 대한 연구는 매우 미약하였다. 이 보고서는 우리나라 해역에서 현재까지 연구된 해양환경의 변화 현상을 간략히 정리하고, 해양생태계의 변화와 수산업에서의 적응 전략이 어떻게 수립되어져야 하는지 숙고하며 기술하였다. 이미 이전 보고서에서 우리나라 주변해역의 어획량 감소 원인과 기후변화의 변동을 함께 다루면서 향후 수산업에 미치는 기후변화의 영향을 평가하기 위한 로드맵을 만들 것을 제안하였으나, 4년이 지난 현재까지도 기후변화에 대한 취약성 평가와 적응방안 마련은 이루어지지 않고 있다. 아직 우리나라 연안에 대한 자료가 많지 않아서 종합적인 영향의 평가와 취약성 평가에 어려움이 있고, 기후변화 적응의 방법에 대한 노력이 부족하므로 이에 대한 획기적인 대책이 필요하다.

6.2 관측된 영향

6.2.1 해양환경

6.2.1.1 해면수온 상승

우리나라 주변 해역의 온난화 경향은 주로 해면수온(sea surface temperature)을 이용하여 연구하였으며 전체 해양 평균에 비해 변화의 속도가 비교적 높은 것으로 밝혀졌다(Yeh et al., 2010; Yeh and Kim, 2010; Park et al., 2012). 즉, 동해와 동중국해에서 1982년부터 2006년 사이의 온난화 추세는 전 세계 해양에서도 매우 높은 수준이며, 겨울 수온 증가가 특히 뚜렷하다. 그러나 국지적으로는 오히려 수온이 낮아지는 현상이 나타나기도 한다. 예를 들면, 2007년 여름에 1961년 이후 가장 찬 냉수가 동해연안에 나타났다(Park and Kim, 2010). 이 현상은 동해연안을 따라 남쪽에서 북쪽을 향해 부는 남풍이 유발한 에크만 수송에 의하여 용승(upwelling)이 강화되었기 때문으로 추정하였으며(그림 6.2), 2007년 여름에 발생한 강한 남풍은 열대저기압과 북태평양고기압이 관련되어 있다고 주장하였다. 이 연구에서는 미국립해양대기청(NOAA)에서 제공하는 1.1 ㎞ 해면수온 인공위성 관측 자료와 더불어 수온 장기변화를 살펴보기 위하여 한국해양자료센터(KODC)의 1961년에서 2007년까지 수온과 염분 8월 자료, 국립해양조사원 일일 수온자료, 미국항공우주국 QuikSCAT 바람자료 등을 사용하였다. 동해연안 용승에 의한 표층 냉각은 지난 수십 년간 강화된 추세에 있고, 이는 북태평양고기압이 서쪽으로 확장되는 경향과 열대저기압 지속 기간이 증가함과 관련이 있다.

지구온난화로 수온이 증가하는 동해 외해와는 달리 용승이 일어나는 연안에서 수온이 감소하는 현상은 연안 환경이 외해의 장기적인 대규모 변화에 의해서 영향을 받음을 시사하고 있다.

또한, 한반도 주변해역의 온난화 경향은 주로 대기에 의한 영향이라는 주장이 많지만(Yeh et al., 2010; Yeh and Kim, 2010), 최근에는 대기와 해양의 순환과정이 모두 영향을 미치고 그 상대적 중요성은 장소와 시기에 따라 다르다는 주장이 제기되었다. 즉, 북서태평양 해면수온 변화는 해양과 대기가 모두 영향을 주는데, 장소와 시기에 따라 그 역할이 변해왔다(Park et al., 2012). 즉 1970~1989년 사이에는 시베리아고기압에 크게 영향을 받은 동아시아몬순이, 1990~2005년에는 해양이 더 큰 역할을 하였다. 급격한 온난화는 시베리아고기압의 약화로 인한 동아시아 몬순 약화와 해양의 역할이 증가하여 생긴 변화임을 보고하였다.

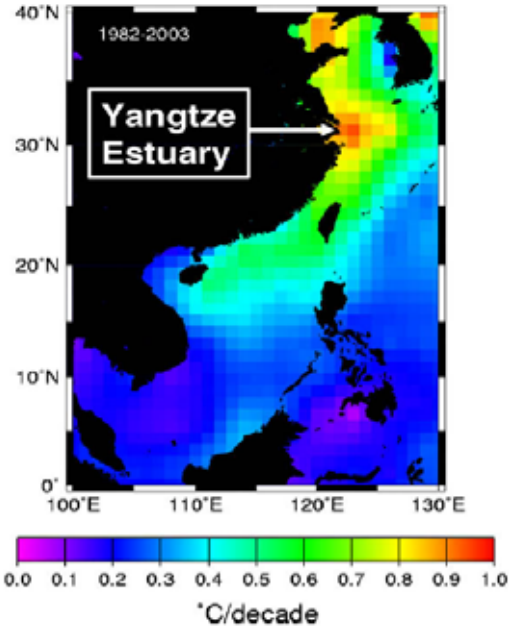


그림 6.3 Pathfinder AVHRR 월평균 자료에서 구한 중국해 및 황해의 1982~2003년 사이 평균 해면수온 상승경향. 장강 주변 해역 온난화(1.0℃/10년) 경향은 전지구 평균(0.133℃/10년)의 약 8배(Belkin, 2009)

전지구적으로 대륙 주변부의 해양에서 유사한 생태학적 특징을 보이는 연근해 해역을 광역해양생태계(LME: Large Marine Ecosystem)라고 명명하고 연구를 수행하기도 한다. 광역해양생태계(LME) 영역에서 전지구 기후변화의 국지효과에 대한 이해가 매우 필요함을 강조하면서 한 가지 예로 해면수온 변화 경향을 살펴보았다(Belkin, 2009). 해면수온 변화율은 지역적으로 크게 다르게 나타났는데 1982~2006년 사이에 온난화가 급격하게 진행된 해역은 아북극권 순환류(subpolar gyre), 유럽의 해양, 즉 북동대서양, 동아시아 해에 국한된다. 이들 LME 해역의 온난화 경향은 전지구 평균에 비해 2~4배에 이른다.

가장 급격한 온난화는 육지로 둘러싸이거나 반폐쇄 해역인 유럽 및 동아시아 해역(발트해, 북해, 흑해, 동해, 동중국해)과 뉴펀들랜드-래브라도(Newfoundland and Labrador) 대륙붕에서 관측되었다. 인도양 LME에서 온난화 경향은 느린 반면 주요한 두 용승해역인 캘리포니아 및 훔볼트 해류역에서는 오히려 약간 냉각하는 경향이 있었다. 아북극권 순환류의 온난화는 북대서양진동과 관련된 자연변동성에 의해 발생했을 가능성이 있다. 유럽과 동아시아에서 강물의 영향을 받는 해역은 온난화 효과가 국지적으로 완화되거나 가속화되는 것으로 판단된다. 특히 장강(양자강) 유역에서 온난화 경향이 커서(Belkin, 2009; 그림 6.3) 10년에 약 1.0 ℃ 가 상승하여 전지구 평균보다 약 8배 의 빠르기로 온난화가 진행되고 있다. 이는 장강 담수에 의한 성층 강화도 온난화 경향에 일부 기여했을 가능성이 있다(Park et al., 2011).

일반적으로 말하는 해양의 수온상승은 해양 표층수온의 상승을 의미하고, 대기와의 상호작용에 의하여 발생하는 것으로 알려져 있다. 하지만 대기-해양의 상호작용에 의한 수온상승은 큰 규모의 대양에서 일어나는 경우가 대부분이고 우리나라 근해의 경우에는 해류의 영향이 더 큰 것으로 나타났다. 전지구적인 해류순환의 변화가 우리나라 주변 해역의 수온상승을 주도하고 있으며, 표층수온의 상승정도는 전세계의 평균보다 높게 나타나고 있다.

6.2.1.2 해수면 상승

우리나라 주변 해역의 해수면 높이 변화에 관한 연구결과를 살펴보면, 우리나라 7개 조위관측소에서

1968년부터 2007년까지 약 40년의 관측 자료를 바탕으로 우리나라 해수면이 평균 2.16±1.71 mm/yr 상승하였다고 보고하였다(김경호 등, 2009). 이와 같은 상승은 비슷한 기간에 측정된 세계 평균 상승률(1.8±0.5 mm/yr)보다 높았으며, 특히 제주도 북쪽해안의 경우 1964~2008년 사이에 해수면상승률이 5.3 mm/yr로 44년 동안 총 23cm 상승하였다. 조위관측소에서 얻은 1960~2002년의 자료로 해수면 변화를 파악한 결과 역시 우리나라 해수면이 전반적으로 상승하는 경향이 나타나고, 특히 제주도 주변 해역의 상승률이 높았다고 설명하였다(Jeon, 2008). 지난 수십 년 동안 제주부근 연안 수위가 특별히 더 많이 상승한 것은 지구온난화로 인하여 우리나라로 유입되는 쿠로시오 지류의 이동경로가 제주도 쪽으로 이동되었기 때문으로 추정하였다.

1960년대부터 관측결과를 바탕으로 절대해수면 변화를 제시한 국립해양조사원의 보고서에서는 우리나라 연안에서 서해는 평균 1.3 mm/yr, 동해는 평균 2.2 mm/yr 그리고 남해는 평균 2.0 mm/yr 상승하는 것으로 나타났으며, 한반도 근해는 평균 약 2.5 mm/yr 상승한 것으로 보고하였다(국립해양조사원, 2010).

해수면 높이 관측기록이 25년 이상 확보된 17 개 조위관측소에서 1960-2010년간의 해수면 자료를 바탕으로 동해는 평균 2.0 mm/yr, 남해는 평균 3.2 mm/yr, 서해는 1.3 mm/yr상승하였다고 보고하였다(윤종주와 김상익, 2012). 이 값은 과거에 제시된 상승률과 거의 유사하였으며, 남해의 경우 다소 높게 나타났으나, 이는 가장 높은 상승률을 보이는 제주해역이 포함되었기 때문이다(국립해양조사원, 2010). 특히 제주, 서귀포, 거문도가 상대적으로 높았으며, 제주해역 평균은 5.6 mm/yr로 전 세계 평균보다 약 3 배 높은 상승을 보였다.

해수면 높이의 변화양상 역시 해양의 표층수온의 상승과 비슷하게 우리나라 주변해역의 상승폭이 전지구 평균보다 더 크게 나타나고 있다. 특히 제주도 해역의 해수면 높이 상승폭이 크게 나타났는데, 학자들은 이러한 현상을 제주도 부근에 영향을 주는 해류의 흐름과 연관 지어 설명하고 있다.

6.2.1.3 해양산성화 (Ocean acidification)

국내 연안과 근해에서 해양환경에 대해 관측 자료가 보고되고 있지만 물리적 요인(주로, 수온) 외에는 신빙성 있는 결과를 도출하기에 자료의 양도 부족하고, 질적인 면에서 보완되어져야 할 부분도 있다. 본 보고서에서는 일부 보고된 자료를 바탕으로 살펴보고자 한다.

우리나라 주변해역에서 해양산성화에 대한 관측 자료는 대부분이 동해에서 얻은 것인데, 그동안 보고된 동해의 해양산성화에 대한 진단은 전해양의 해양산성화 진행 속도보다 다소 빠르다는데 일치하고 있다(Park et al., 2006; Park et al., 2008; Kim et al., 2014). 1999년 동해 전해역에서 측정한 총 알카리도(TA)와 pH자료로부터 동해의 인류기원 이산화탄소 흡수량은 약 0.40±0.06 Pg C 규모이며, 이로 인해 선석(aragonite)와 방해석(calcite)의 포화수심이 각각 80~220 m, 500~700 m 상승하였고 이는 북태평양에 비해 약 5배 빠른 변화이다(Park et al., 2006). 동해에서 대규모 해양 조사가 실시된 1992년, 1999년 그리고 2007년에 관측된 탄소계 인자의 분포 특성과 시간에 따른 변화를 이용하여 15년(1992~2007년) 동안 동해에 축적된 인류기원 이산화탄소의 변화량도 1992~1999년 사이에 평균 0.6±0.4 mol C/m²/yr 이었으나, 1999~2007년 사이에는 0.3±0.2 mol C m²/yr 로 약 50% 감소한 것으로 보고하였다(Park et al., 2008). 해수의 이산화탄소 흡수율의 급격한 감소는 매우 놀라운 결과이며, 이는 동해에서 인류기원 이산화탄소를 표층에서 심층으로 이동시키는 것과 관련된 역전순환(overturning circulation)의 약화가 그 원인인 것으로 유추하였다. 또한 동해의 울릉분지와 남서해역에서 1995년부터 2004년 까지 표층 해수의 수온, 염분, 이산화탄소분압(fCO_2), 총 알카리도(TA), pH 등을 12회 관측한 결과, 계절에 따라 다르긴 하지만, 울릉해분이 대기 중 이산화탄소의 흡수처의 역할을 하고 있음을 밝혔다(Kim et al. 2014). 대기와 표층수의 fCO_2는 각각 1.97 μatm/yr과 3.36 μatm/yr로서, 지구평균인 1.5 μatm/yr보다 많이 높았다. 해양산성화 경향은 10 년에 0.04로서, 세계해양의 평균치인 0.02 보다 두 배 이다. 이상의 연구들로부터 동해는 빠르게

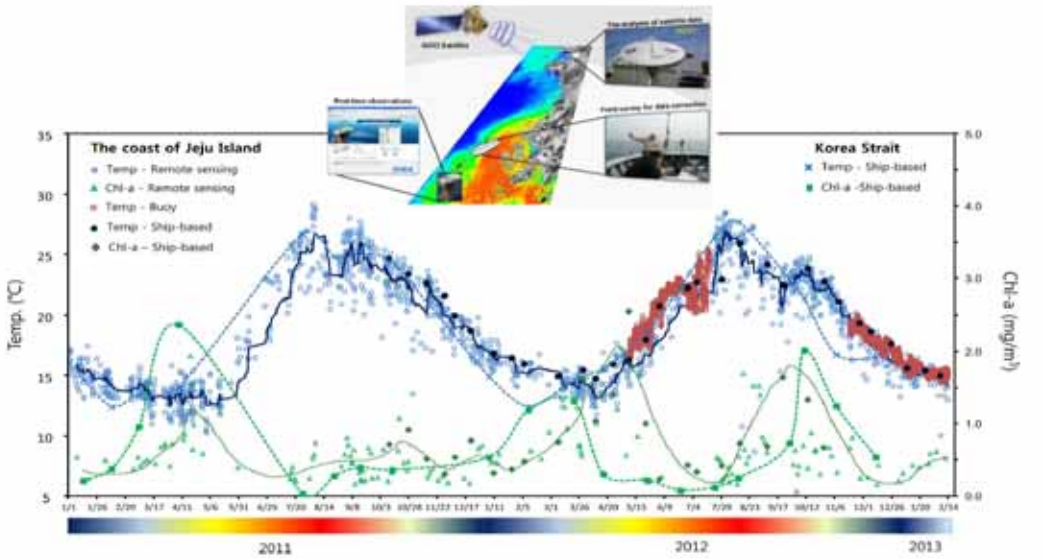


그림 6.4 다양한 측정방법(선박을 이용한 현장관측, 위성 수신, 부이를 이용한 실시간 관측)을 통해 얻은 수온과 엽록소의 장기 변화 예시(주세종과 김세주, 2013)

산성화되어 가고 있는 것을 알 수 있었으며, 이러한 경향은 해역별 특성에 따른 정도의 차이는 있겠으나, 수온상승 경향 등을 고려하면 우리나라 주변해 전체에 확대 적용할 수 있을 것으로 판단된다.

6.2.1.3 해양 저산소화 (Deoxygenation)

표층 수온의 상승으로 강화된 해양의 성층현상(stratification)은 표층과 심층의 수직혼합을 약화시켜, 저층으로의 산소공급을 감소시킨다. 이로 인한 표층아래 수층에서 나타나는 저산소화 현상은 해양생물의 호흡과 해양생지화학순환에 영향을 미칠 것으로 예상된다. 우리나라 근해를 장기 관측한 국립수산과학원의 정선해양관측자료로부터 1968년부터 2005년까지 관측된 용존산소자료를 분석하였다(Jung, 2008). 용존산소는 전체수심에서 심각하게 감소하는 경향을 보였으며 이는 수온상승에 따른 기체용해도 감소가 하나의 원인일 것으로 추정하였다. 그러나 수온에 의한 기체용해도 효과가 배제된 용존산소 포화도 또한 감소하는 것으로 나타났다. 특히, 기온상승에 따른 용존산소 감소율은 표층에서 -0.165 ml/L/ ℃$_{air\ temp}$에서 100m 수심에서는 -0.289 ml/L/ ℃$_{air\ temp}$ 로 수심이 깊을수록 산소감소율도 높았다(Jung, 2008). 용존산소 감소율이 깊은 수심에서 높았던 이유를 설명하지 않았지만, 표층 수온이 상승하고 밀도약층(pycnocline)이 얕아진 것으로 보아, 성층강화로 인해 심층으로 용존산소 공급이 감소하여 저층에 저산소화가 더 심화된 것으로 추정하였다(Jung, 2008).

동해에서도 약 40년(1932~1996년) 동안 수온상승과 용존산소감소 현상이 나타났다는 연구결과가 있다(Kim et al., 2001). 특히 산소최소층(OML; Oxygen Minimum Layer)이 1960년대 후반에는 수백 미터 수심에 위치하였으나 1990년 중반에는 1500 m 이하로 깊어졌다고 하였으며, 심층수의 용존산소가 20 μM 이상 감소하였다고 하였다. 이상에서 동해를 비롯한 우리나라 모든 해역에서 용존산소가 감소하는 저산소화 현상을 관측하였으나, 지속적인 관측과 집중 연구를 통해 정량적인 변화량을 제시할 필요가 있다.

6.2.2 해양생물과 생태계

해양의 물리·화학적 변화는 해양생태계를 변화시킨다고 알려져 있다. 그 중에서 가장 처음으로 변화하는 것은 해수의 물리적 성질(수온, 혼합층 깊이)과 화학적 성질(산성화, 영양염)의 변화에 의한 일차생산량의 변화이다. 해양의 일차생산은 주로 해수 표층에 분포하는 식물플랑크톤이 담당하는데, 향후 기후변화에 의해 변화할 일차생산량의 증감을 예측하는 연구가 수행되고

있다(주세종과 김세주, 2013; 그림 6.4). 이와 같은 연구가 수행되기 위해서는 다양한 방면의 연구가 함께 추진되어야 한다.

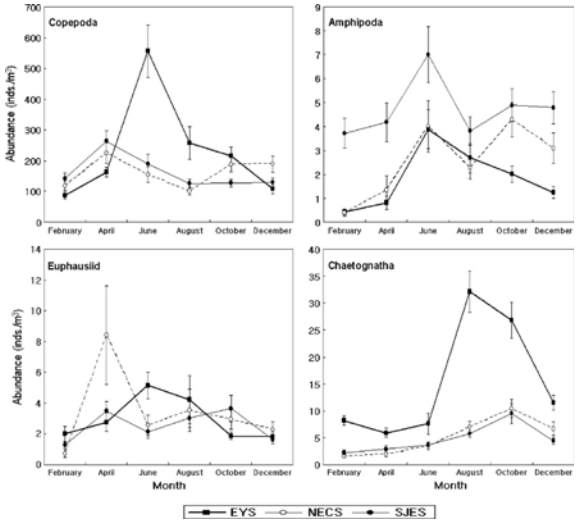


그림 6.5 황해 동부(EYS), 동중국해 북부(NECS), 동해 남서부(SJES) 해역의 동물플랑크톤 네 분류군(copepods, euphausiids, amphipods, and chaetognaths)에 대한 계절별 생물량 평균치와 표준편차 변동(Kang et al., 2012)

엔소(ENSO: El Niño-Southern Oscillation, 엘니뇨남방진동)가 우리나라 주변 해역에 미치는 영향은 해양보다는 주로 대기를 통해 나타나는 것으로 보인다(Park et al., 2014; Park et al., 2012; Yeh et al., 2010). 예를 들면, ENSO가 황해와 동중국해의 염분과 식물플랑크톤 경년변화[2)]에 중요한 기여를 하고 있음이 밝혀졌다(Park et al., 2014). 즉 ENSO가 일어난 그 다음 해 여름에 중국 양자강 유역에 강수량이 증가하여 담수유출량이 늘어나 염분이 낮아지는 경향이 있음을 수치모형과 관측 자료를 이용해 밝혔으며, 양자강 담수유출량의 증가에 따른 영양염 증가가 해양의 식물플랑크톤 번성에 기여하는 것도 함께 밝혔다.

해양의 장기적인 변화를 살펴보면, 특정한 시기에 갑작스럽게 해양의 물리·화학적 성질이 변화하면서 생태계의 변화가 나타나는 경우가 있다. 이러한 변화를 해양의 체제변환(regime shift)이라 부르며, 많은 경우에 기후체제변환(climate regime shift)에 의하여 해양과 해양생태계의 속성이 변화한다. 전 세계적으로 해양의 체제변환에 의하여 생태계의 반응을 연구하여 미래의 환경변화를 예측하고자 하는 연구도 활발하게 진행되고 있으며, 우리나라에서도 10여 년 전부터 이러한 연구가 추진되고 있다. 기후체제변환에 대한 우리나라 근해생태계의 반응을 연구한 결과, 한반도 근해생태계에서는 1989년과 1998년의 체제변환에 따라, 수온, 염분, 동물플랑크톤이 함께 변동하는 것으로 나타났으며, 수산어획량도 연동하고 있었다(Kang et al., 2012; 그림 6.5). 해양의 체제변환은 작은 동물플랑크톤뿐만 아니라 어류까지 영향을 미쳐서 주요 어업대상 어종이 변화하는 경우도 나타난다.

해양산성화로 해양생물들에게 가장 큰 영향을 미치는 것 중 하나는 탄산염광물성분의 패각형성 저해이며, 이는 탄산염광물의 포화도로 측정할 수 있다. 진해만에서 탄산염 중 선석(aragonite) 포화도(Ω_{arag})를 계절별로 측정한 결과, 진해만의 여름 저층해수는 Ω_{arag}가 약 1.15로 매우 낮았다. 이로 인해 여름 저층의 경우 조개와 굴류의 패각 형성이 상당히 저해될 것으로 추정하였다. 그러나 진해만과 같이 부영양화가 오랫동안 지속된 폐쇄성 내만에서 파악되는 낮은 탄산염광물 포화도는 해양산성화에 기인한 것이기 보다는 오랫동안 지속된 부영양화, 빈산소, 육상 오염물질 축적 등에 의한 영향이 더 크게 작용하였을 가능성도 높다. 생물 개체별로 해양산성화에 대한 영향을 파악한 연구는 최근 많이 진행되고 있으나, 보고된 사례는 많지 않다. 해양생물 중 식물플랑크톤과 성게, 갯지렁이에 대한 자료가 있으며, 양식생물로는 참굴과 넙치, 감성돔에 대한 결과가 있다.

6.2.3 수산

6.2.3.1 어획량 변화

해양 환경이 변화하면 수산자원의 양이 증감 하거나

2) 경년변화: 기상학과 해양학에서 의미하는 것에 약간의 차이가 있을 수 있다. 기상학에서는 경년변화(secular change)를 수십 년 또는 수백 년 동안에 걸쳐 기후요소의 관측값이 변화 또는 변동하는 것을 말하며, 인근 연도의 변화값보다는 그들을 통해서 나타나는 보다 큰 변화(경향)에 비중을 둔다. 영년변화 또는 장기 변동이라고 부르기도 한다(출처: 기상청, 기상백과). 하지만, 해양학에서는 많은 경우에 경년변화를 몇 년 사이에 차이가 발생하는 interannual variability를 의미하는 경우가 많다.

서식 해역의 변화가 나타난다. 정상적인 상황에서는 어류가 선택한 서식처에서의 생존과 성장이 높게 나타난다. 하지만 돌발적으로 진행되는 환경 변화는 해양의 생산력을 변화시키거나, 생태계의 구조를 변화시켜서 치어의 사망률이 높아지는 결과가 나타나기도 하고, 플랑크톤 생태계에 기반을 둔 어류의 가입이론은 해양 및 기후환경의 변동이라는 변수에 크게 좌우 될 수 있다(김수암, 2003).

해양환경의 변화는 상업대상 어종의 연간 성장에도 큰 영향을 미치는 것으로 나타났다. Seo et al.(2006)은 우리나라 동해안에서 방류하는 연어의 성장을 연구하였는데, 동해의 수온이 차가웠던 1980년대에 방류된 연어 치어의 성장률은 수온이 따뜻했던 1990년대의 치어 성장률에 비하여 낮았다. 이는 1990년대에 동해의 동물플랑크톤 생체량이 급격히 증가하여 연어의 치어가 동해에 머무는 동안에 성장을 잘 할 수 있는 환경이 조성되었기 때문이라 추측하였다(그림 6.6).

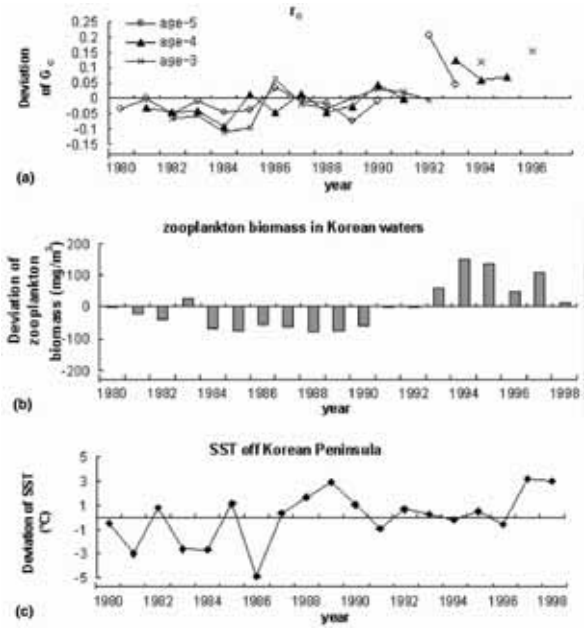


그림 6.6 동해에서의 연도별 연어 치어 성장률과 서식환경변화. (a) 치어 성장률, (b) 동물플랑크톤 생체량, (c) 동해의 표층수온(Seo et al., 2006)

연어의 회귀율과 해양환경의 변화를 함께 연구한 결과로 Urbach et al.(2012)에서 1984년부터 2008년까지 산란을 위하여 남대천으로 소상하는 연어의 체장과 비늘 자료를 이용하여 성장상태를 조사하였고, 이들의 성장과 태평양순년진동지수(PDOI), 알류샨저기압지수(ALPI), 해면수온(SST), 그리고 1980년부터 2008년 사이의 동물플랑크톤 생체량과의 관계를 분석하였다. 남대천에서 어획된 수컷과 암컷 연어들의 성숙 연령, 성숙 크기 등을 분석한 결과 1988~1989년의 기후체제 변환이 아주 큰 영향을 미친 것으로 분석되었다(그림 6.7). 이에 해양환경의 변동은 해양생물의 전 생애를 특징지을 수 있다는 결론에 도달하게 된다.

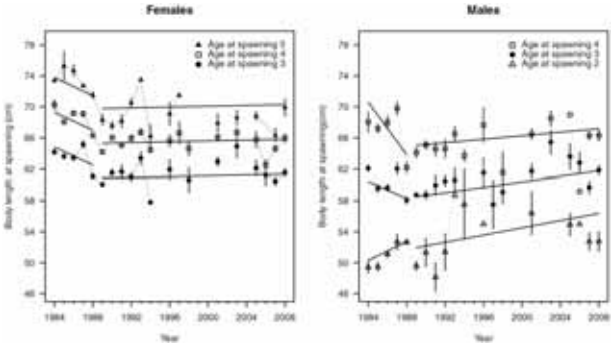


그림 6.7 1989년 기후체제변환에 의해 변화하는 연어의 암컷과 수컷의 체장(Urbach et al., 2012)

기후변화와 지구 온난화에 따른 제주 주변 해역 해양환경과 생태계 변동을 평가하기 위해 우리나라에서 과거 약 40년 동안 제주 주변해역(북위 33°00'~34°00', 동경 125°30' ~127°30', 그림 6.8)에서 수행해왔던 관련 관측 자료를 발굴 정리하여 분석하였다(Jung et al., 2013). 분석은 제주 주변 해역 수산생물 군집이 1982~1983년과 1990~1993년 사이에 유의한 체제변환을 겪었음을 보여주었다. 우점종을 보면 1981~1992년은 말쥐치(*Thamnaconus modestus*), 고등어(*Scomber japonicus)*, 참조기(*Larimichthys polyactis*) 정어리(*Sardinops sagax*) 순이었으나 1993~2007년은 고등어, 갈치(*Trichiurus lepturus*), 참조기, 전갱이(*Trachurus japonicus*) 순으로 바뀌어, 1990년대 들어와서 말쥐치가 거의 사라진 것이 뚜렷한 특징이었다. 단위노력당 어획량(CPUE)을 보면 고등어는 장기적으로 일정하였으나, 말쥐치가 1990년대 이후 크게 줄어들면서 최근에는 우점종을 유지하고 있다. 갈치, 살오징어(*Todarodes pacificus*), 방어(*Seriola quinqueradiata*)는 장기적으로 어획량(CPUE)이 증가하고 있으나, 말쥐치, 꽃게(*Portunus trituberculatus*), 참조기, 정어리, 삼치

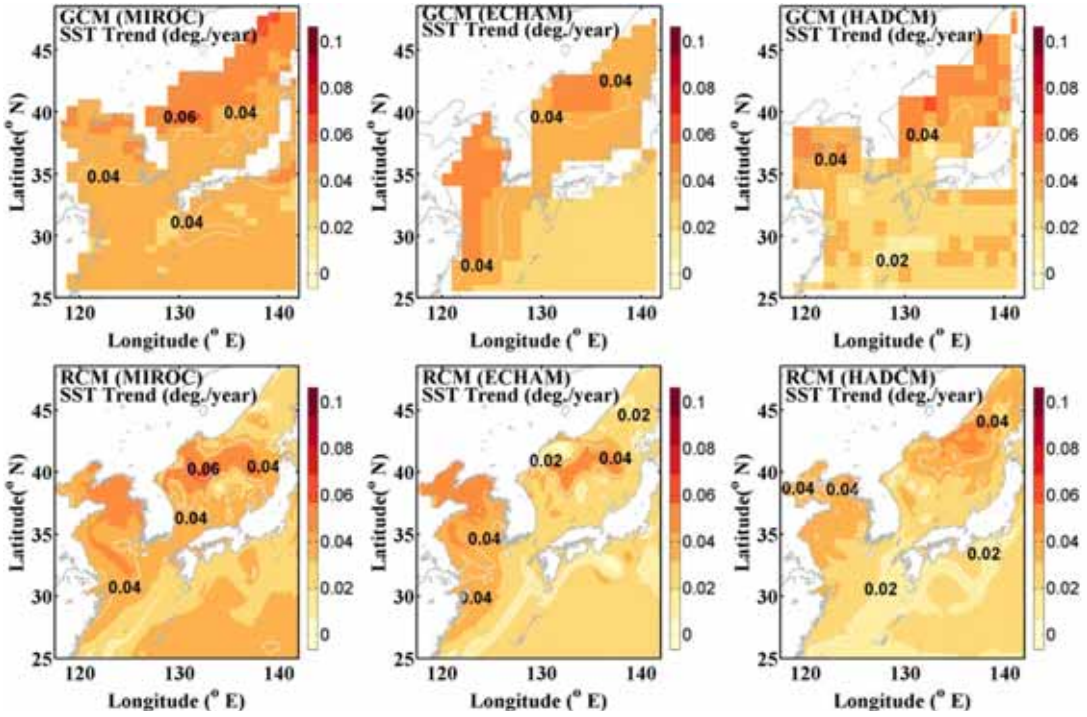


그림 6.8 GCMs(위)와 RCMs(아래)를 이용하여 재현한 2010년부터 2100년까지의 연간 평균 해면수온 상승 경향. MIROC(왼쪽), ECHAM(중간), HADCM(오른쪽)(Seo et al., 2014)

(*Scomberomorus niphonius*) 등은 감소하고 있는 추세로 나타났다.

주요 어종별 어업 구성을 보면, 고등어는 대부분 대형선망어업(purse seine net)이 차지했고, 말쥐치는 대형선망어업이 75.1%, 대형트롤어업이 21.1%를 차지했으며, 갈치는 대형선망어업이 56.2%, 중형쌍끌이어업이 31.3%, 대형트롤어업이 11.4%를 차지했다. 그 밖에 정어리와 삼치는 99% 이상이 대형선망으로 잡혔다. 어업별 어획량을 전체적으로 보면 대형선망어업이 어획량의 대부분을 차지했으나 말쥐치를 주로 잡았던 대형트롤어업(otter trawl)이 1984년 많은 감소를 보인 것이 특징이었다. 이는 제주도 주변 해역 어류 군집 변화에서 가장 큰 변화는 1990년 이후 말쥐치가 크게 줄어들면서 대형트롤어업이 제주도 주변해역에서 거의 사라진 점이다.

정준대응분석과 STARS 분석 결과를 정리해보면, 제주 주변 해역 수산생물 군집 변동에는 제주 주변 동중국해, 대한해협, 황해 상층부(0~50 m) 수온과 염분 변화가 유의한 상관관계를 보였으며, 특히 대한해협 표층(0~10 m) 수온과 대한해협 저층수 유입량 변화가 중요한 것으로 나타났다. 해양환경에서는 1989년 생태계 체제변환이 가장 뚜렷하게 나타났는데 이는 지난 20년 동안 이루어진 많은 북태평양 생태계 체제변환 연구 결과와 잘 일치 한다(Chiba and Saino, 2002; Kang et al., 2012; Rebstock and Kang, 2003; Tian et al., 2008; Zhang et al., 2004). 제주도 주변 어류 군집은 1989년 변화에 즉각적으로 반응하지 않고 2~4년의 시간 지연을 두고 반응한 것으로 보이는데, 이는 대상 해역 주요 어종들이 이런 생태계 변화에 가장 민감한 시기는 난자치어 시기이므로 이들이 가입되어 어획대상으로 자라는 데 걸리는 2~4년의 기간을 반영한 것으로 짐작할 수 있다(Houde, 1987). 또 1989년 체제변환과 대한해협 저층 냉수 유입량 변화 사이에도 3~4년의 시간 지연이 나타났는데 이 부분은 앞으로 기상학과 해양물리학 분야 연구자들이 공동으로 검토하여 연구해볼 수 있을 것으로 본다.

앞선 연구결과에서 나타난 제주도 주변 해역 어류 군집의 가장 큰 변화는 1990년 이후 말쥐치가 제주도 주변 해역을 비롯한 우리나라 연근해에서 거의 사라지게 된 점이다. 말쥐치 어획량이 크게 준 이유는 관련

연구가 부족하여 알기 힘드나, 국내 일부 수산학자들은 남획을 그 중요 또는 부분적인 원인으로 꼽아왔다(Kim et al., 2007). 그러나, 남획 때문에 말쥐치 가입이 줄어들었다는 것을 정량적으로 분석한 관련 연구 논문은 거의 전무하여 이런 남획 가설을 지금 직접 검정할 수는 없다(Jung et al., 2013).

한편, 말쥐치에 대한 어획강도가 우리나라와 비교했을 때 그렇게 높지 않다고 볼 수 있는 일본 태평양 연안쪽인 도쿄만에서도 본 연구와 비슷하게 1979~1988년에는 말쥐치가 우점하였으나, 1989년 이후 거의 사라졌다(Kodama et al., 2010). 일본에서도 말쥐치가 어획되어왔으나 통계보고체계가 잡힌 것은 1995년 이후로 보인다(일본 서해구수산연구소, 2010 년도 말쥐치 동해 · 동중국계군 자원평가, http://abchan.job.affrc.go.jp/digests22/details/2267.pdf). 세계식량기구(FAO)의 어획량 통계를 보면, 대부분이 말쥐치일 것으로 보이는 쥐치과(Monacanthidae) 어획량은 우리나라와 중국이 대부분을 차지하고 대만에서 소량을 보고해오고 있는데, 우리나라에서는 1990 년 이후 쥐치과 어획고가 크게 감소하였으나, 중국에서는 1984~1991년 기간에 30만 톤 수준을 보이다가 1992~1995년 사이에 10만 톤 수준까지 큰 폭으로 줄었다가 다시 1996년 이후로는 약 20만 톤 내외의 어획고를 유지하고 있다. 즉, 제주도 주변해역과는 달리 남중국해와 동중국해에서는 중국 어선에 의한 말쥐치 어획이 1990년대 이후에도 활발히 지속되고 있는 것으로 보인다.

만약 우리나라 주변해역에서 말쥐치 어획고가 줄어든 중요한 이유가 남획 때문이었다고 한다면 1990년대 이후 중국측 말쥐치 어획고도 크게 줄어들었을 것이고, 남획이 일어났다고 보기 힘든 일본 도쿄만에서는 적어도 말쥐치가 1990년 이전 수준은 유지하고 있어야 할 것이다. 그러나 우리가 보아온 현상은 이런 남획 가설에 따른 기대와는 정반대이다. 즉, 중국측 말쥐치 FAO 어획고 통계자료를 보면, 1990년대 이후 이전에 비교해서 약간 줄어들었지만 여전히 지속적인 어업이 이루어지고 있으며, 오히려 어업강도가 훨씬 낮을 것으로 보는 일본 도쿄만에서는 제주 주변해역처럼 1990년대 이후 말쥐치가 거의 사라졌다.

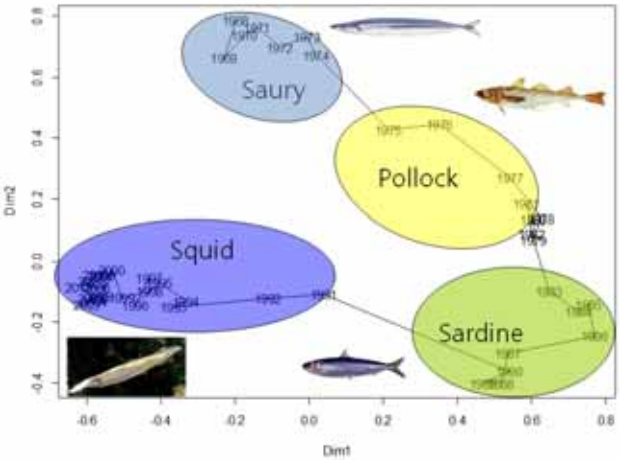


그림 6.9 1968년부터 2013년까지 한국근해에서 어획된 어종 구성의 대응분석. 그림안의 어종 이름은 각기 다른 네 번의 해양체제기간동안에 대표적으로 어획되었던 어종을 표현함(Jung et al., 2007 수정 및 보완)

말쥐치가 남중국해, 동중국해, 대한해협, 동해, 류큐열도에서 홋카이도까지 일본 연안을 따라 분포하는 것을 감안한다면 1990년 이후 우리나라와 일본 연안에서 말쥐치가 크게 줄어든 것은 한 때 동해 북쪽까지 이르렀던 그 분포범위가(Beamish et al., 1999; Epur, 2009), 1990년대 이후 남쪽으로 수축되었음을 시사하고 있다. 기후변화에 따른 말쥐치 분포 범위 수축과 확장은 앞으로 더 많은 연구가 필요할 것으로 보인다(Maekawa, 1989). 특히 대마 난류 변동이나 대한해협 저층 냉수의 확장 수축(Kim et al., 2006b)과 관련하여 말쥐치를 비롯한 주요 수산어종의 생태와 가입, 그리고 그 분포 변화 메커니즘을 밝히기 위해서는 해양물리학자들과 수산학자들 사이에 학제간 협동 연구가 필수적이다.

1920년대와 1930년대에는 선망어업과 트롤어업을 중심으로 정어리와 명태를 우점적으로 어획하였으며, 1950년대와 1960년대에는 낮은 어획량의 대부분을 참조기가 차지하였고, 1970년대에는 다시 꽁치가 우점적으로 어획되었으며, 1980년대에는 명태, 말쥐치, 정어리가 우점적으로 어획되었고, 1990년대 이후에는 멸치, 고등어, 살오징어, 청어, 대구가 우점적으로 어획되었다(Jung et al., 2007; 그림 6.9). 이런 우점종의 변화는 기후변화에 따른 해양생태계 체제변환(regime

표 6.1 1984-2010년 기간 동안 주요어종의 중심어장에 대한 평균위도와 대한해협(**126°20′–129°20′E, 33°30′–35°00′N) 각 수심에서의 연평균 수온, 연간 어획량, 국제원유가격,** 그리고 어업별 어획조성에 대한 대응분석으로부터 추출한 두 개의 dimension 사이의 상관계수(*: p < 0.05, **: p < 0.01., Jung et al., 2014)

Fish	Depth (m) -specific water temperature							Catch size	Oil price	Dimension 1	Dimension 2
	0	10	20	30	50	75	100				
Anchovy	-0.55**	-0.51*						-0.47*			-0.68**
Chub mackerel											0.42*
Horse mackerel			0.48*		0.48*	0.43*				-0.47*	
Herring	-0.60*							-0.63*	-0.59*		
Sardine											
Squid								0.46*			
Spanish mackerel	0.51**										
Yellowtail	0.51*										
Hairtail	0.48*						-0.41*	-0.65**		0.69**	
Yellow croaker	0.50*	0.44*							0.62**		0.61**
Filefish											
Red horsehead											

shift)이 가장 중요한 요인인 것으로 보인다(Gong et al., 2007; Gong and Choi, 2008; Jung and Cha, 2013; Jung, 2014; Kim et al., 2007; Zhang et al., 2004; Zhang et al., 2007).

우리나라 주요 수산 어종 변화에는 대마 난류와 대한해협 저층 냉수 변동이 가장 큰 영향을 주는 것으로 생각된다. 대마 난류 영향권인 대한해협과 동해 어획고의 종구성을 보면 약 수심 100 m 까지의 표층에서는 수온 상승에 따라 비교적 냉수종인 정어리가 1980년대 우점하다가 1990년대 들어서는 멸치, 고등어, 살오징어와 같은 온수종이 우점하고 있으며, 100 m 보다 깊은 층에서는 수온이 오히려 내려가면서 1980년대에는 아열대어종인 말쥐치가 우점하다가 1990년대 후반 이후로는 냉수종인 청어와 대구가 많이 어획되고 있다(Hwang and Jung, 2012; Jung and Cha, 2013; Jung and Na., 2013; Jung, 2014; Tian et al., 2011). 그러나 이와는 반대로 일본쪽 동해 남부 저층에서는 냉수종이 감소하는 경향이 보고되기도 했다(Tian et al., 2011).

6.2.3.2 어장위치의 변화

우리나라 대한해협에서 어획되는 주요 어종들 중 그 어획 위치 자료가 지난 40년 동안 적어도 5년 이상 축적된 12 개 어종을 대상으로 그 중심 어장이 수온변화에 따라 북상 또는 남하를 하는지 분석한 결과 12 개 어종 중 7 개 어종이 지난 40년 동안 중심 어장 위도와 수온 사이에 유의한 상관관계를 보였다(Jung et al., 2014). 그러나 선박 연료값 등 사회 경제적인 요인, 그리고 어획량 등 다른 요인을 고려했을 때는 12 개 어종 중 6 어종이 수온에 따라 북상하는 경향이, 1 종은 남하하는 경향을 보였다(표 6.1). 수온 상승에 따라 북상하는 어종은 전갱이, 정어리, 살오징어, 삼치, 방어였으며 남하하는 어종은 멸치였다(표 6.1). 특히 대형부어류인 삼치와 방어의 북상 경향이 가장 두드러졌다(그림 6.8). 일부에서 북상한다고 보고했던 고등어는 0~75 m 깊이 수온과 유의한 양의 상관관계를 보였으나 어법 변화 등을 고려했을 때는 유의한 관계를 보이지 않았다.

해양환경의 변화는 수산업의 대상이 되는 생물의 서식환경이 변화하는 것을 의미한다. 서식 환경의 변화는 빠르게 이동할 수 있는 어류들의 서식장소와 회유경로, 회유시기와 같은 생물학적 특성을 변화시키게 된다. 이와 같은 변화는 결국 수산업에 큰 영향을 주어서 어획량의 증감, 수산생물의 가격 변동을 초래하므로 해양환경과 해양생물의 특성 변화를 좀 더 주의 깊게 관찰해야 할 필요가 있다.

6.3 영향전망

6.3.1 해양환경

한반도 주변해역의 미래 변화에 대한 연구는 전지구모형 결과를 이용한 결과가 주를 이루었으나(Jang et al., 2011; 박영규 등, 2012), 최근에는 고해상도 지역기후모형을 이용한 연구가 진행되고 있다(민홍식과 김철호, 2012; Seo et al., 2014). 상세 내용은 다음과 같다.

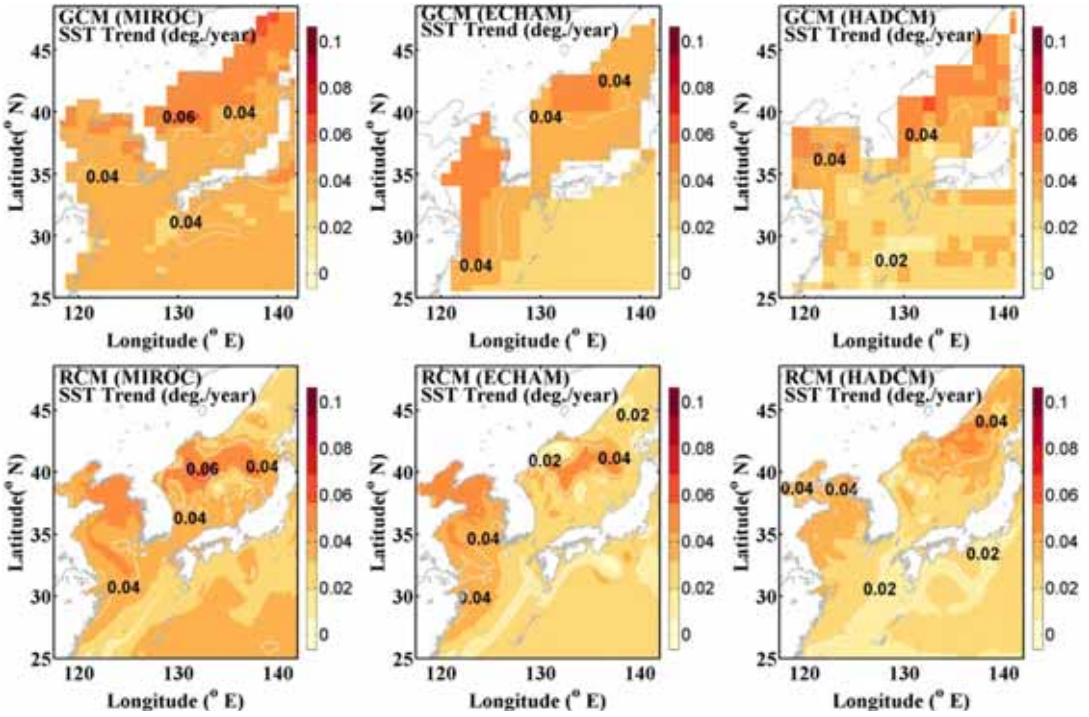


그림 6.10 GCMs(위)와 RCMs(아래)를 이용하여 재현한 2010년부터 2100년까지의 연간 평균 해면 수온 상승 경향. MIROC(왼쪽), ECHAM(중간), HADCM(오른쪽)(Seo et al, 2014)

6.3.1.1 해면수온 상승

한편, 3개 CMIP3모형을 적용하여 해면수온 온난화 경향을 모사한 연구에서는 동해 북부에서 온난화 경향이 가장 크게 나타나고(그림 6.10), 대마난류 수송량도 증가할 것임을 전망하였다. 또한 황해생태계에서 중요한 역할을 하는 것으로 알려진 황해저층냉수도 온난화함에 따라 점차 줄어들 것을 전망하였다(Seo et al., 2014; 그림 6.11).

6.3.1.2 해수면 상승

여러 기후예측모형(IPCC AR4)을 이용하여 한반도 근해의 미래 해수면 상승을 예측하였다(Oh et al., 2011). 그 중 MPI_ECHAM5와 GFDL_CM2.1모형에서 이산화탄소 농도 증가 시나리오(A1B)에 따른 열팽창을 고려하였을 때, 한반도 근해는 향후 100년 동안 각각 27 cm와 31 cm 상승하는 것으로 예측하였다. 그에 반하여 IPCC 기후변화 제5차 보고서에서 처음 제시된 새로운 기후변화 시나리오(RCP8.5와 RCP4.5)를 사용하여 우리나라 주변해역의 해수면 상승을 예측한 결과 동해안에서 1 m가 넘는 가장 큰 해수면 상승이 예상되고 남해안과 서해안 역시 1 m에 가까운 상승이 예상되었다(국립기상연구소, 2012).

앞서 소개한 두 연구결과(오상명 등; 국립기상연구소, 2012)의 미래 해수면 상승 전망은 3배 넘는 차이를 보였다. 이는 미래를 예측하는 모형의 종류, 적용되는 상수와 계수, 미래 기후 시나리오의 불확실성 등 다양한 원인이 작용하였을 것으로 파악되며, 많은 연구를 통해 이러한 차이를 줄여나가고 정확한 전망을 통해 연안지역 설계와 공간 활용 정책에 반영하여 해수면 상승으로 인한 피해를 대비해야 할 것이다.

특히 우리나라 연안역은 많은 어류의 산란장과 서식장의 역할을 한다. 수심 20 m 이내의 천해역이 전체 남한해역의 30%인 21,362 ㎢로 국토면적의 21.5%에 해당되는데, 이 중 약 100,000 ha에 달하는 패류와 어류 양식장이 개발되어 우리나라 전체 수산물의 30%를 공급한다(장학봉과 홍기훈, 1991). 따라서 이들 어장들이 해수면 상승으로 영향을 받을 경우, 수산물 공급 및 양식산업에 어떤 영향을 미칠지에 대한 연구가 시급하다고 주장하였다.

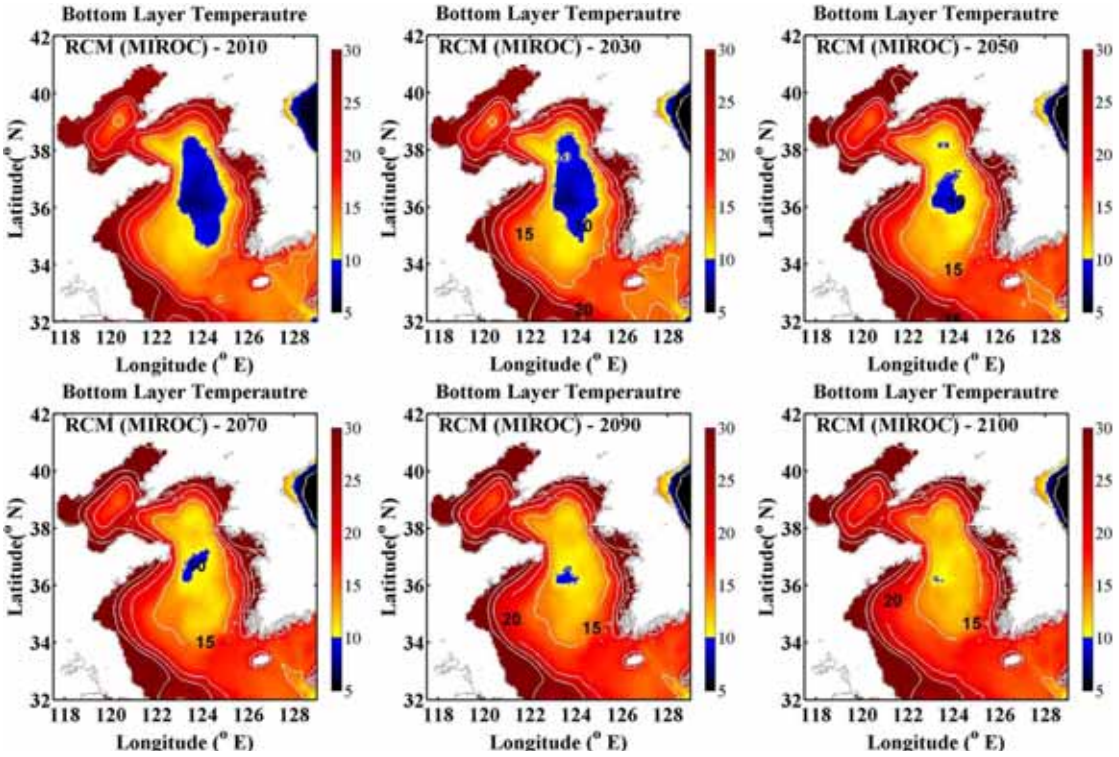


그림 6.11 RCM-MIROC을 이용하여 추정한 2010, 2030, 2050, 2070, 2090, and 2100년 8월의 황해 저층수온의 점진적인 변화(Seo et al, 2014)

6.2.3.3 해양산성화

우리나라 주변해역에 대한 해양산성화는 비록 동해에 한정된 관측이지만 빠르게 진행되는 것으로 나타났다. 남해와 서해는 동해보다 수심이 얕고, 인접한 육지로 인하여 연안의 특성을 보이는 해역으로 분류되며, 해양산성화의 진행이 동해와는 다르게 진행될 가능성이 있다.

IPCC 4차보고서에 사용한 CM2.1 모형에 TOPAZ (Tracers for Ocean Phytoplankton with Allometric Zooplankton)라는 해양생태계 모형을 추가하여 2001년부터 2020년 사이 동중국해와 황해에 대한 표층의 이산화탄소 분압에 대해 연구하였다(박영규 등, 2011; 그림 6.12). 대기 이산화탄소 농도 A1B 시나리오를 적용하였을 때, 북서태평양에서 동중국해로 접어들면서 이산화탄소 분압은 낮아지는데, 이는 용존무기탄소(DIC: dissolved inorganic carbon) 감소와 알칼리도 감소가 서로 상쇄되어 수온의 영향이 더 크게 작용한 결과이며, 황해로 접어들면서 이산화탄소분압이 증가하는 것은 수온과 용존무기탄소 감소보다 알칼리도 감소의 영향이라고 하였다. 그리고 장강(양자강)입구와 황해 북동부에서 이산화탄소 분압이 주변보다 다소 낮은 것은 용존무기탄소 감소의 영향으로 평가하였다. 결국 동중국해의 이산화탄소 분압은 대양의 특성을 나타내는 대륙사면 부분에서는 수온에 의해, 황해에서는 알칼리도에 의해, 그리고 강 하구에서는 용존무기탄소에 의해 주로 결정된다고 제시하였다. 그 결과 2001년에서 2020년 사이 해당 해역은 대기의 이산화탄소를 흡수하는 것으로 나타났으며, 최대 흡수해역은 대륙붕 끝단을 따르는 대만-대마난류계를 따라 나타난다고 보고하였다.

앞선 연구를 바탕으로 같은 해역에 대해 2100년 까지 이산화탄소의 분압변화를 모의한 결과(박영규 등, 2012), 시간에 따라 지속적으로 증가하는 경향은 수온이나 엽록소 등과 달리 장주기 변동성이나 연간변화를 보이지 않고, 대기 이산화탄소 농도변화에 주로 결정되어 2100년에 약 680 ppm에 도달할 것이라고 예측하였다(그림 6.13). 이 같은 결과는 결국 동중국해와 황해

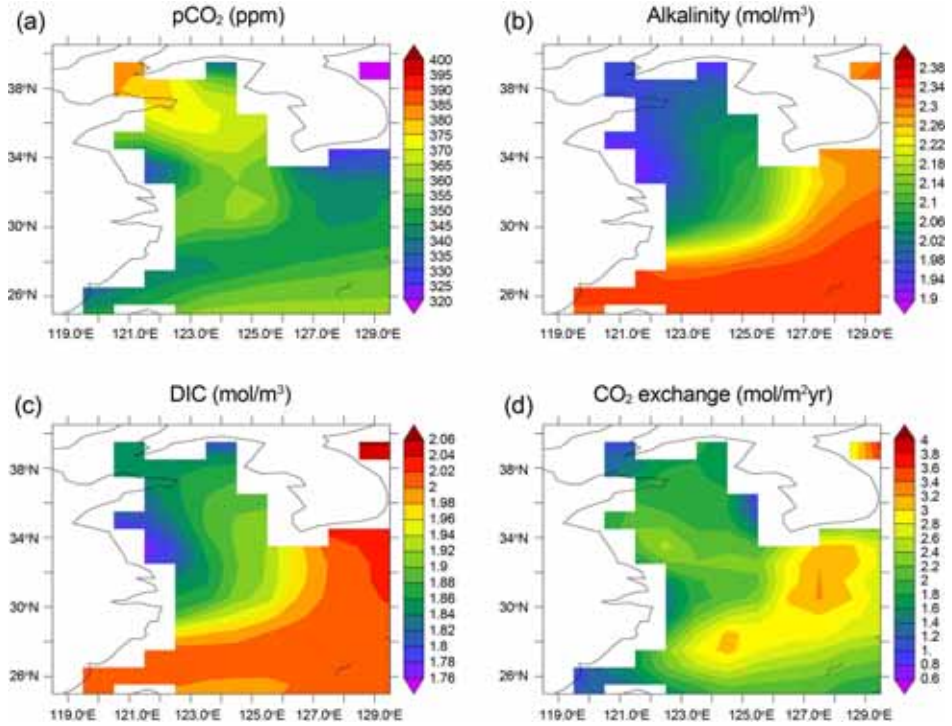


그림 6.12 2001년부터 2020년까지 황해 해양특성치 평균 (a) 해수표면 pCO2, (b) 알칼리도, (c) DIC, (d) 대기-해양 CO_2 교환량(박영규 등, 2011)

에서도 표층수의 이산화탄소 증가로 인해 해양의 산성화가 상당히 진행될 것이고, 동중국해를 통과하는 대마난류는 남해와 동해에도 비슷한 영향을 미칠 것이므로 결국 우리나라 주변해역의 산성화는 당분간 미래에도 지속될 것으로 예상된다.

한편, 해양산성화가 진행되고 있는 동해에 대해 탄산칼슘 포화도의 수심변화를 정밀하게 관측하여 탄산염광물을 포함하는 해양생물의 분포와 생지화학순환 변화를 파악하고 예측하는데 활용해야 할 것이다(Kim et al., 2013).

6.2.3.4 해양 저산소화(deoxygenation)

국내에서 기후변화로 인한 수직혼합의 약화와 기체 용해도 감소 등으로 해양 심층의 용존산소가 감소하는 현상을 대상으로 한 연구는 거의 수행되지 않았다. 그러나 용존산소의 경우, 해양의 물리현상 뿐 아니라 생지화학현상에도 깊이 관련되므로, 기본 자료로 관측되는 경우가 대부분이다. 해양의 저산소화는 일부 연구에서 관측결과를 통해 진행되는 것으로 유추되나, 미래에 어떤 규모로 진행될 지는 해양의 물리순환과 생지화학 순환을 동시에 고려해야 할 것이다.

동해에서 MBBM(Moving-Boundary Box Model)모델을 적용하여 동해 심층의 산소 변화를 전망하는 연구를 하였다(Kang et al., 2004). 동해의 물리적 순환변화로 저층수의 용존산소 농도는 점점 감소 하지만, 산소가 풍부한 상층수(upper layer)의 확장으로 미래 동해는 산소가 풍부한 환경을 유지할 것으로 예측하였으며, 현재는 산소 최소층이 심층수(ESDW)에 존재하지만, 미래에는 점점 깊어져 동해저층수(ESBW)로 이동할 것으로 예측하였다.

동중국해와 남해에서도 지구시스템 모형으로 2100년까지 용존산소변화를 모사하였을 때, 수온이 상승할수록 용존산소가 전 수층에서 감소하는 것으로 나타났으며, 특히 표층과 심층에서 감소폭이 두드러졌다(박영규 등, 2012, 그림 6.14). 표층에서는 용해도의 감소가 심층에선 수직혼합의 약화가 작용한 것으로 판단된다.

6.2.3.5 혼합층 깊이와 열수송량의 변화

해수의 혼합층 깊이는 영양염의 순환과 산소의 공급 등과 함께 일차생산량을 결정하는 중요한 요소가 된다.

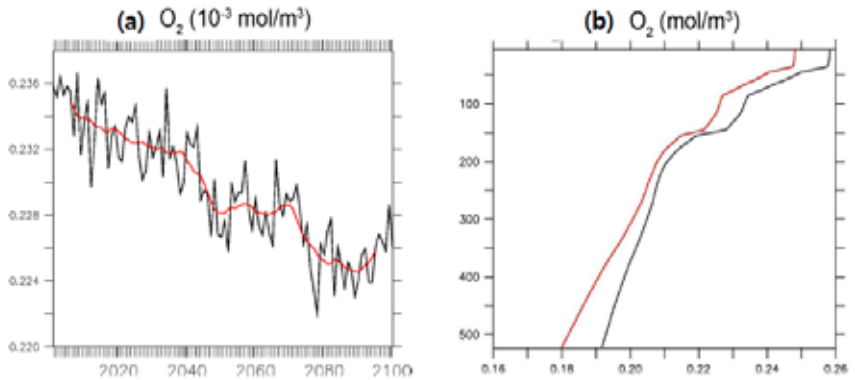


그림 6.13 (a) A1B 시나리오를 이용하여 모사한 동중국해 수심 0~100m의 O_2 변화. 검은 선은 연평균, 붉은 선은 10년 이동평균 (b) 동중국해 3월의 수심에 따른 O_2 변화. 검은 선은 2001~2020년의 평균, 붉은 선은 2081~2100년의 평균(박영규 등, 2012 수정)

이와 같은 혼합층의 깊이를 예측하는 연구에는 CMIP3, CMIP5등 모형을 이용하여 해양을 모사한 연구가 주를 이루고 있다. CMIP3 모형을 이용한 연구에서는 20세기 말에는 겨울철 혼합층의 깊이가 감소할 것으로 전망하였고(Jang et al., 2011), 지구시스템모형을 이용한 결과에서는 지구온난화가 진행됨에 따라 성층이 강화되어 저층에서 표층으로 공급되는 영양염의 양이 감소하며, 이로 인해 동중국해 엽록소는 계절주기 변동경향은 유지하면서 정량적인 양은 감소함을 전망하였다(박영규 등, 2012). 4개의 기후 모형(CMIP5 모형)을 이용하여 대마 난류의 수송량과 수온, 열수송량 특성을 파악한 결과, MIROC-ESM 모형에서는 미래기후에 대마난류의 수송량이 0.18 Sv 가량 감소하였으나, 다른 3개의 모형에서는 0.16 Sv에서 0.39 Sv까지 증가하였다. 모든 모형의 수온과 열수송량은 각각 1.4~2.5℃, 0.02~0.06 PW 사이에서 증가할 것으로 예상되었다(최아라 등, 2013).

4개의 기후모형 중에서 CSIRO-Mk3.6.0 모형을 이용한 결과에서 가장 큰 폭의 열수송량의 증가가 나타났다(그림 6.15) CSIRO-Mk3.6.0과 HadGEM2-CC 모형은 대한해협을 지나는 대마난류 수송량의 계절주기와 크기를 관측과 유사하게 모의한 모형인데, 이를 이용하여 미래를 모사한 결과, 대한해협의 대마난류 수송량과 수온 증가에 따라 동해로 유입되는 열이 증가하였다. 두 모형 모두 후반기(2050~2099년)보다 전반기(2010~2049년)의 증가율이 컸다. 또한 20세기와 21세기 실험결과에서 두 모형 모두 동해 북서쪽의 표층수온과 수직 적분한 열함량이 가장 많이 증가하였다. 한편, 미래기후에서 해양에서 대기로 방출되는 순 표층 열손실은 지속적으로 증가하여 동해의 수온을 감소시키는 역할을 하지만, 대한해협을 통해 동해로 유입된 열수송량이 더 빠르게 증가하여 동해의 수온 상승을 일으킨다고 하였다.

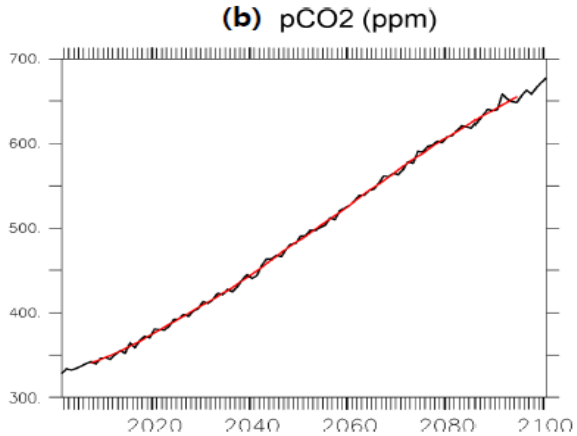


그림 6.14 2001~2100년 동안 동중국해에서의 pCO_2 평균에 대한 모사. 검은 선은 연평균, 붉은 선은 10년 이동평균(박영규 등, 2012 수정)

6.2.3.6 그 외 환경인자(영양염 등) 변화

MBBM모델로 동해 심층수에서 인산염 분포변화를 예측한 결과, 동해의 큰 순환(conveyor-belt system) 중 북부해역의 저층수(bottom water) 형성이 약화 또

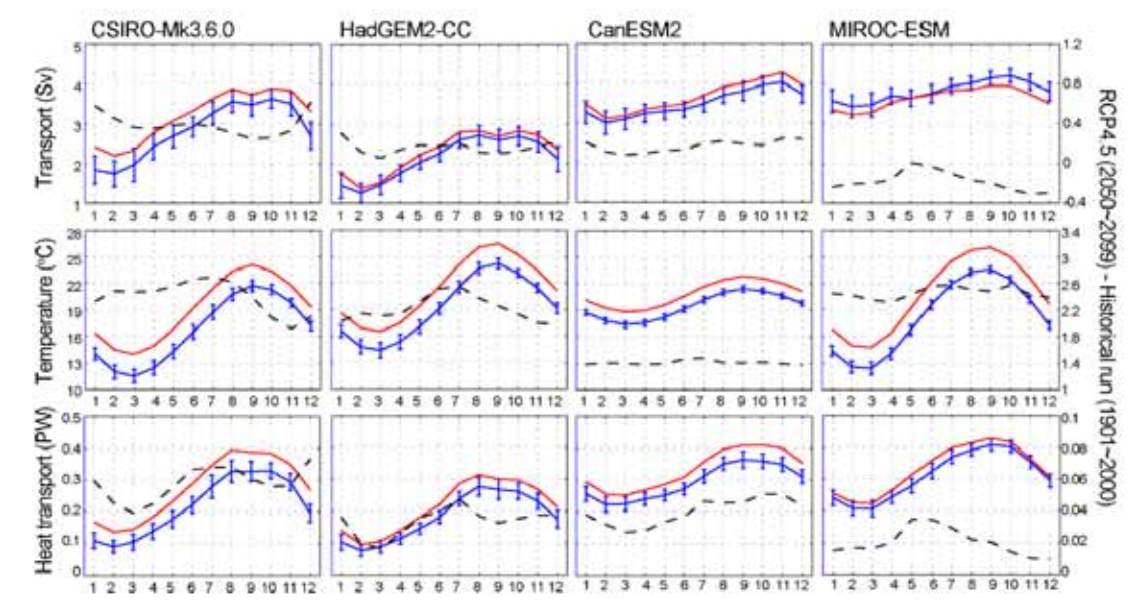


그림 6.15 4개의 CMIP5 모형에서의 대한해협의 해양특성 전망. (상단) 월평균 수송량, (중간) 수온, (하단) 열수송량. 1901~2000년의 과거 기후 모의실험 결과(파란선), 2050~2099년의 RCP4.5 시나리오 미래 예측 실험결과(빨강선), 둘의 편차(점선)(최아라 등, 2013)

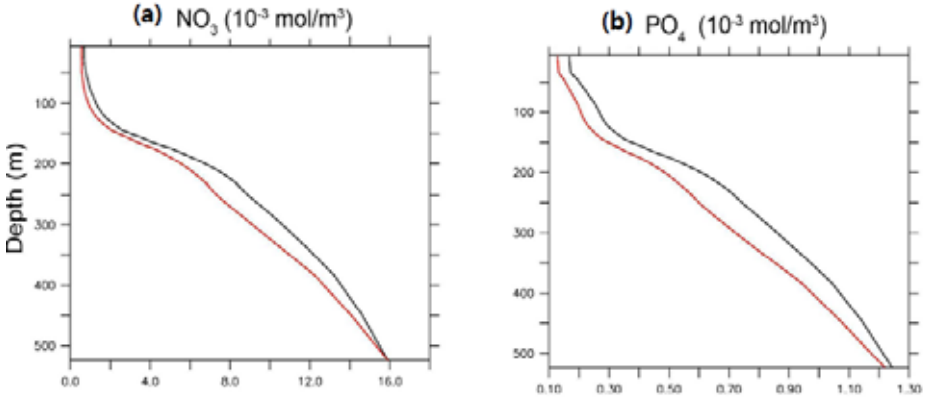


그림 6.16 동중국해 3월의 영양염 수직분포. 검은 선은 2001~2020년의 평균, 붉은 선은 2081~2100년의 평균. (a) NO_3, (b) PO_4(박영규 등, 2012)

는 단기간 중단으로 인해 상층수(upper water)형성이 상대적으로 증가하게 된다(Kang et al., 2004). 이 과정에서 동해 중층수(East Sea Central Water)에서 인산염의 재영양염화가 증가하여 수온약층의 영양염 구배가 심화되고, 이로 인해 표층으로 더 많은 인산염이 공급될 것으로 예측하였다. 이는 표층의 생물생산을 증가시켜서 미래에는 동해의 생물펌프(biological pump)가 활발해 질 것으로 예상된다.

그러나 동중국해와 남해에서는 미래 영양염의 농도가 전 수층에서 감소할 것으로 예상되었다(박영규 등, 2012). 지구온난화가 진행됨에 따라 성층이 강화되어 수직혼합이 약화됨에 따라 표층으로 공급되는 영양염이 지속적으로 감소하는 것으로 나타났으며, 그 결과 일차생산도 감소한다고 보고하였다(그림 6.16). 그러나 해양의 십 년 이상 주기의 변동성이나 연간변동성으로 인해 지구온난화의 영향이 이와 같은 자연변동에 의한 영향보다 커지려면 수십 년이 지나야 한다고 보았으므로, 몇 년 정도의 짧은 기간의 관측 자료를 이용하여

올바른 온난화 경향을 파악하기 어렵다고 판단하였다.

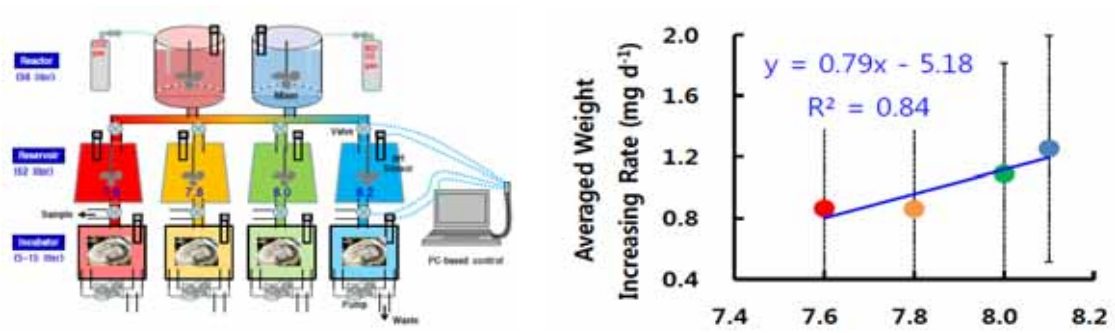


그림 6.17 해양산성화 배양 시스템 모식도와 pH에 따른 어린 굴의 성장률 변화(국립수산과학원, 2013)

향후 50년 혹은 100년 후에는 해양의 표층수온 뿐만 아니라 심층수온도 함께 상승하게 될 전망이다. 그리고 우리나라 남해를 거쳐 동해로 유입되는 난류의 양이 증가하면서 동해의 전반적인 수온상승도 예상되고 있다. 해양의 산성화와 저산소화 현상이 현재보다 더욱 심각하게 나타날 것으로 예상된다. 또한 해양의 성층이 심화되면서 해양의 표층과 저층 상이의 혼합이 약해 질 것이라는 연구 결과도 있다. 미래의 해양환경변화는 이미 우리가 겪어온 것 보다 더욱 급격하게 진행될 전망이고 해양생물에게 미치는 영향은 지금보다 더 심각할 것이라고 판단된다.

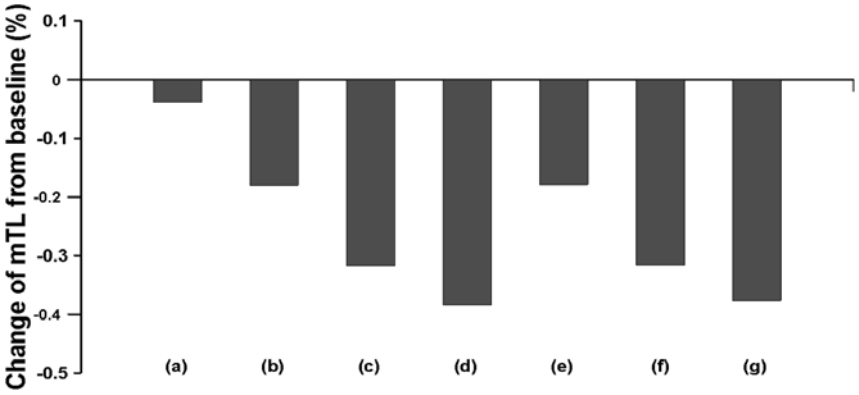


그림 6.18 2020~2100년 영양단계의 상대적인 생물량 변화 (a) 일차생산만 고려한 경우, (b)~(d) 해양산성화만 고려한 경우(b: conservative급, c: medium급, d: large급), (e)~(g) 일차생산과 해양산성화가 복합적으로 고려된 경우(e: conservative급, f: medium급, g: large급). Conservative, medium, large는 해양산성화의 정도를 의미함(강윤호 등, 2012)

6.3.2 해양 생물과 생태계

6.3.2.1 해양산성화에 따른 생태계전망

해양의 산성화로 발생하는 여러 물질들의 상태변화(분리, 반응)는 생체필수원소들의 농도변화 및 독성화 등을 통해 해양생물의 생체에도 영향을 미친다. 해양산성화가 국내 해양생물과 생태계에 미치는 영향에 관한 연구는 최근 들어 증가하고 있으나, 종합적이고 의미있는 결과를 제시하기에 아직 부족하다. 그러나 외국 연구결과와의 비교/검정을 통해 우리 현실에 맞게 적용할 수 있을 것으로 생각된다. 해양생태계 변화는 생지화학 또는 영양 모형을 통한 모사결과가 있으며 생물개체에 대한 영향은 실내외의 해양산성화 환경에서 생물반응실험을 통한 결과가 있다. 일부 생물개체를 제외하고는 우리나라 생태계와 생물개체는 대부분이 해양산성화에 대해 취약한 것으로 나타났다. 그 결과 생태계는 생체량과 종다양성 등이 감소하는 경향이었으며, 생물 각 개체는 부화율, 생존율, 성장률 등이 감소하는 것으로 나타났다.

남해 신지도 근해에서 기후변화에 따른 일차생산량

변화와 해양산성화 현상이 해양먹이망 변동에 어떤 영향을 미치는지를 영양흐름모형(EwE)으로 파악하였다(강윤호 등, 2012). 이 연구는 A1B배출 시나리오를 적용하여 2020년부터 2100년까지 모의하였으며, 주요 결과는 (1) 기후변화로 인해 어떤 생물종은 증가하는 반면 어떤 종은 감소한다는 것, (2) 기후요인이 복합적으로 작용하는 결과는 독립적인 영향을 적용한 결과와 다르게 나타날 수 있다는 것이다. 즉 기후변화로 일차생산자 혹은 무척추동물의 생체량이 직접적으로 감소하는 경우와 생태계 먹이망에서 포식관계를 통해 간접효과로 생체량의 감소하는 경우가 발생한다고 설명하였다.

모의 결과로 설명하면, 해양산성화만 고려한 경우, 양태, 홍어, 장어그룹은 60% 이상, 베도라치는 100% 감소하여 어류는 평균 66% 감소한 반면 동물플랑크톤과 다모류 그룹은 증가하는 것으로 나타났다. 그러나 일차생산량과 해양산성화가 복합된 경우 일차생산량 단일 요인에 비해 무척추동물은 2.2~4.2배, 어류는 5.6~11.2배 생체량이 더 감소하는 것으로 나타났다(그림 6.17). 하지만 장기 연구는 어획이 배제된 환경을 모의한 것이므로 결과의 적용에 세심한 주의가 필요할 것으로 생각된다.

한편 우리나라 남해안에 대한 기존자료를 분석한 결과 기후변화(수온상승과 산성화)에 취약한 연안은 마산, 진해만, 부산 앞바다, 제주 조천 앞바다였으며, 비교적 완만하게 영향을 받은 연안은 고흥, 진도, 완도 연안, 득량만 등으로 나타났다(주세종과 김세주, 2013). 이 같은 결과는 하나의 큰 권역 내에서도 연안 특성에 따라 담수유입, 주요 서식생물, 수산/양식 활동 등에 의해 산성화의 영향이 달리 나타날 수 있음을 의미하므로, 연안과 인접한 수산/양식자원을 보호하기 위해 주요 해역에 대해 장기관측이 필요할 것으로 생각된다.

해양산성화가 식물플랑크톤 성장 등에 미치는 영향을 파악하기 위해 메조코즘(mesocosm)실험 장치로 이산화탄소 250, 400, 750 μatm(각각 25, 41, 76 Pa) 농도를 14일간 유지하고 현장 식물플랑크톤 군집(*microflagellates, cryptomonads*, *Skeletonema costatum, Nitzchia spp.* 가 군집의 90%를 차지하였음)의 성장에 미치는 영향을 살펴보았다(Kim et al., 2006a). 실험기간 영양염이 고갈된 9~14일 기간에 *S. costatum*와 *Nitzchia spp.* 만 다소 성장하였으며, 이산화탄소농도 증가에 따라 성장률이 증가한 종은 유일하게 *S. costatum* 이였다고 하였다. 따라서 한국 연안의 식물플랑크톤 군집은 이산화탄소농도에 모두 민감한 것은 아니라고 설명하였다.

극피동물인 성게 2 종에 대해 해양산성화 영향을 파악한 결과에서는 수정률에서 매우 민감한 반응을 나타냈다(Sung et al., 2014). 성게 *Strongylocentrotus nudus*는 pCO_2농도 380~6000ppmv 범위에 노출하였을 때 수정률이 급격히 감소하였다(그림 6.18). 반면, *Hemicentrotus pulcherrimus*는 750ppmv 정도에도 수정률이 크게 변화하지 않았다. 같은 분류군에서도 해양산성화의 영향은 종별로 다르게 나타나므로 주요 해양생물 종에 대해서는 종별, 발달단계별로 정밀한 평가가 필요함을 의미한다.

해양산성화로 야기되는 탄산염($CaCO_3$포함 광물)형성 저해는 산호/패류 등과 같이 탄산염으로 골격, 패각을 형성하는 생물들에 가장 큰 피해를 입힐 것이다. 우리나라에서 가장 많이 양식되는 패류인 참굴(*Crassostrea gigas*)에 대한 영향을 다양한 실험방법으로 파악하였다(국립수산과학원, 2013). 굴 치패를 pH 8.1(대조구), 8.0, 7.8, 7.6에서 20~40여일 실내 배양한 결과, pH 8.1에서 생체 중량 증가가 가장 높았으며, pH가 낮아질수록 중량 증가율이 점차 낮아지는 경향을 보였다(그림 6.19, r^2=0.84). pH 7.6과 7.8에서 배양한 굴은 대조구(pH 8.1)에 비해 중량증가가 30~40% 감소하였으며, pH 8.0에서는 약 15% 감소하였다. 굴 치패의 패각을 전자현미경에서 50~1000 배 확대한 결과, pH 8.1에서 배양된 패각은 손상되지 않은 정상상태의 패각구조를 가진 반면, 낮은 pH에서 배양된 패각은 그 구조가 균일하지 않고 구멍(hole)이 생기거나, 부식 등으로 깨어진 구조가 많이 나타나는 것으로 보고하였다. 이는 산성화 환경이 어린 굴의 성장뿐만 아니라 패각 형성에도 나쁜 영향을 미칠 가능성을 의미한다.

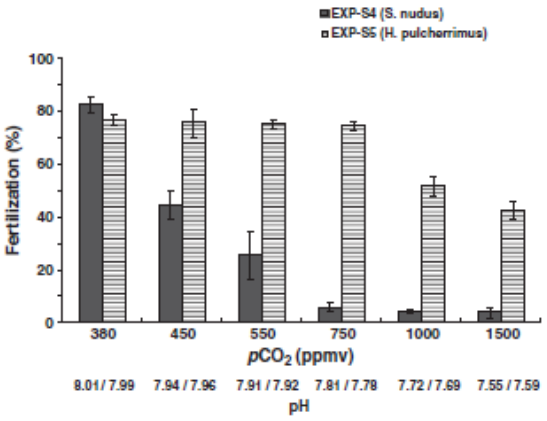


그림 6.19 성게 두 종(*Strongylocentrotus nudus*와 *Hemicentrotus pulcherrimus*)의 수정성공률의 비교 (Sung et al., 2014)

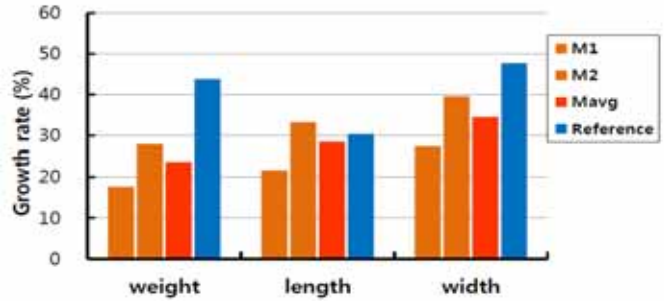


그림 6.20 메조코즘 산성화 환경에서 굴 치패의 체중 및 패각 성장률 변화(산성화 실험구: M1과 M2(평균: Mavg), 대조구: Reference)(국립수산과학원, 2013)

적으로 산성화 환경을 조성한 실험구(M1과 M2, pH 7.6~7.8)의 개체 중량 증가는 17.6~ 27.9% 인 반면, 대조구(pH 8.1)는 43.8% 증가하여 실험구보다 약 1.85배 더 성장한 것으로 나타났다(그림 6.20). 이 연구에서는 산성화 환경에서 굴 치패 성장이 저해되는 결과를 바탕으로 굴(수하식) 양식의 경영수지 변동을 분석하였다. 해양산성화가 진행되면 양식이익률은 현재 20.9%에서 pH 7.6 이 되면 -14.4%로 낮아지는 것으로 나타났으며, pH 7.8 이하의 산성화 환경에서는 굴 양식으로 손해를 보는 것으로 나타났다. 이는 굴이 본양성 이전의 치패단계에서 평가된 결과로 수하식 본양성시기에 대한 평가도 추가하여 양식 전체단계에 대한 종합적인 진단을 할 필요가 있을 것으로 생각된다.

어류에 대한 해양산성화 영향 결과는 국내·외 연구에서 나쁜 영향을 미치는 경우와 오히려 좋은 영향을 미치는 경우가 혼재하여 나타난다. 어류의 경우 단세포나 무척추동물에 비해 생체 내 복잡한 생리화학반응에 의해 해양산성화로 인한 영향을 단편적으로 평가하기 힘들기 때문인 것으로 생각된다. 국내 중요한 양식어류 중의 하나인 감성돔(*Acanthopagrus schlegelii)*을 수정부터 자치어단계까지 3주간 이산화탄소 농도 400~1550 ppm에 노출하였을 때, 개체의 체장과 체중은 산성화 환경에서 감소하는 것으로 나타났다(심정희 등, 2013). 반면 감성돔 체내의 칼슘농도는 오히려 산

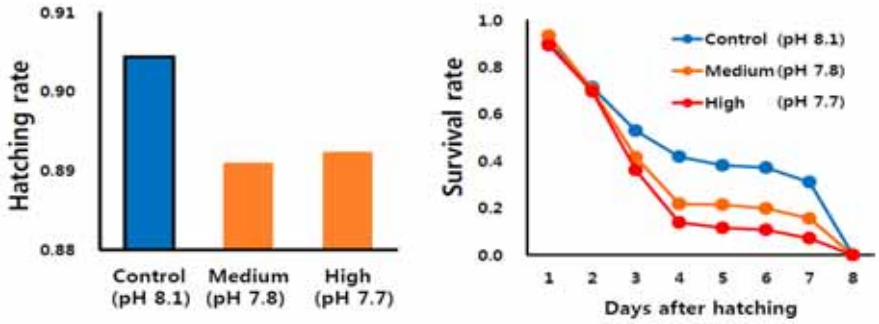


그림 6.21 해양산성화 환경에서 넙치의 부화율과 생존율 변화(국립수산과학원, 2013)

한편, 인위적인 실내배양환경이 아닌 메조코즘 장치를 이용하여 양식현장에서 얻은 결과도 실내에서와 마찬가지로 산성화 환경에서 성장이 둔화되는 것을 보였다(국립수산과학원, 2013). 부산시 눌차 해역에서 인위

성화 환경에서 증가하는 것으로 나타나, 한 개체 내에서도 생리활성별 반응이 다름을 보고하였다. 한편 넙치의 경우는 산성화 환경에서 오히려 체중과 체장 성장율이 더 증가하는 것으로 나타났다(국립수산과학원,

2013). 반면, 넙치 치어의 골밀도는 산성화 환경에서 현저히 낮은 것으로 나타났으며, 수정란의 부화율과 생존율도 유의하게 감소하는 것을 확인하였다($p<0.05$, 그림 6.21). 이처럼 해양산성화는 넙치 수정란의 부화율과 부화 후 생존에 나쁜 영향을 미쳐 양식생산성이 낮아질 가능성이 있지만, 자어에서 치어로 성장하는 단계에서는 더 잘 성장하므로 어느 단계의 영향이 양식생산성에 더 큰 영향을 미칠지 확인하기 위한 추가적인 연구가 필요할 것으로 생각된다. 이처럼 해양산성화로 생물(특히, 어류)의 성장 등이 오히려 촉진되는 결과는 국외 다른 연구에서도 보고된 사례도 있으며, 이는 어류의 산-염기조절 능력이 하나의 원인으로 제시되고 있다.

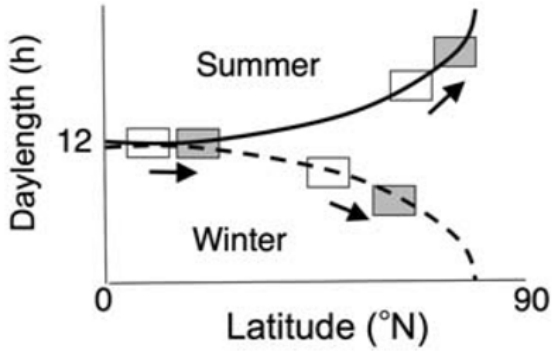


그림 6.22 지구온난화에 의한 산란장의 이동과 계절에 의한 낮 길이변화 모식도(Shoji et al., 2011)

지를 평가하는 값으로 비교적 짧은 기간의 독성 노출에도 그 영향이 나타나는 특징이 있다. 두토막눈썹참갯지렁이 청충을 7일간 0.39~30.1 mM 이산화탄소 농도를 갖는 해수에 노출시킨 결과, 이산화탄소 농도가 증가할수록 CEA가 감소하는 것으로 나타났다. 이는 이산화탄소는 해수 중 pH를 낮추어 실험생물에 스트레스를 증가시키고 세포내 에너지 할당 변화에 영향을 미친 것으로 판단된다. 한편, 갯지렁이와 같은 저서성 요각류(*Tigriopus japonicus*)도 이산화탄소 농도가 증가할수록 성체보다 유생이 더 큰 영향을 받았으며, 이산화탄소 농도 1550ppm에서 생존율이 크게 감소한 것으로 나타났으며, 퇴적층에 서식하는 석회질 와편모조류의 휴면포자도 산성화 환경에서 형태 변이가 발생하는 것으로 나타났다(주세종과 김세주, 2013). 이를 통해 해수뿐만 아니라 연안역 해저 퇴적물의 산성화는 저서성 생물의 생존/성장에 영향을 미칠 것으로 파악할 수 있다.

이산화탄소 포집 및 저장기술(CCS: Carbon dioxide Capture and Storage)의 일환으로 이산화탄소를 해양지중에 영구히 격리하였을 때 저장된 이산화탄소가 해양환경으로 누출될 경우에 대비하여 해양생물에 미치는 영향에 대한 생태영향기준을 제시하였다(김병모 등, 2014). 해양생물에 대한 이산화탄소 노출 영향 pH 범위는 6.61~8.22 이었으며, 수집된 자료로부터 무영향관찰농도(NOEC: No Observed Effect Concentration)를 추정하고 종민감도분포(SSD: Species Sensitivity Distribution)를 이용하여 상위 95%의 생물종을 보호할 수 있는 δpH가 0.137임을 추정하였다. 본 연구에 의한 값(δpH=0.137)을 바탕으로 추후 여러 종의 실험결과를 추가하고 정밀한 검증을 거

표 6.2 IPCC AR4 A1B 시나리오를 근간으로 하는 2000년대와 2030년대의 대한해협 수심별 수온변화전망과 1968~2010년 동안의 관찰기록과 GCM을 이용한 수심별 수온상승 경향(Jung et al., 2014)

Depth (m)	2000~2009 (A)	2030~2039 (B)	Difference (B - A)	Rate (℃/yr)(C)	Observed rate (1968~2010) (℃/yr)(D)
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

해산 갯지렁이(두토막눈썹참갯지렁이)를 대상으로 해수 이산화탄소 농도 증가가 세포내 에너지 할당(CEA: Cellular Energy Allocation)에 미치는 영향을 측정하였다(문성대 등, 2013). CEA는 생물의 세포수준에서 일어나는 과정에서 흡수된 에너지의 양과 소비되는 에너지의 양 사이의 균형이 어느 정도 이루어지는

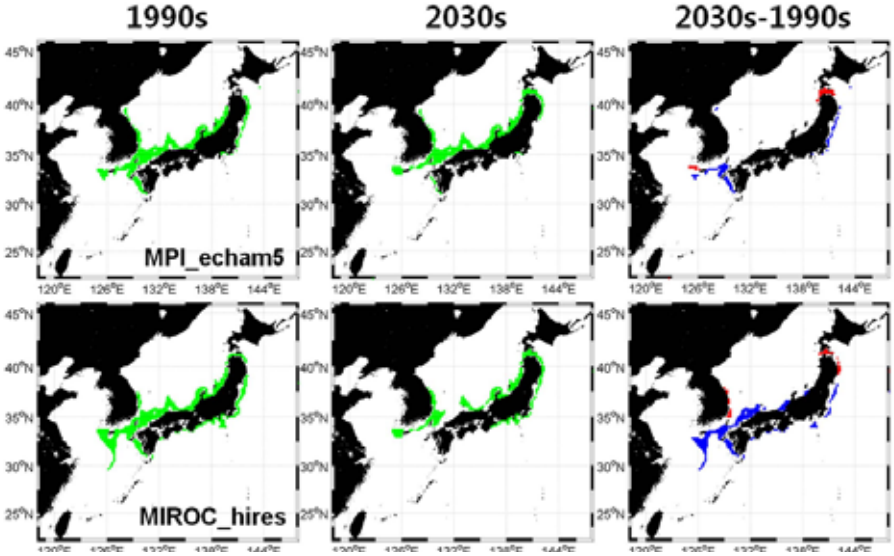


그림 6.23 두 기후모델로 추정한 1990년대, 2030년대 살오징어 가을 산란장 위치(김중진 등, 2012)

치면, CCS 상용화 시기 뿐 아니라 일반 연안과 해양생물에 대한 해양산성화영향을 평가하는 기준으로도 활용할 수 있을 것으로 생각된다.

6.3.2.2 해수온 상승에 따른 생태계 전망

해양환경의 변화와 해양생물의 분포를 연구함에 있어서 가장 주요하게 연구되는 분야는 지구온난화로부터 야기되는 해수온의 상승이 어떻게 어류의 성장률, 산란시기, 산란장의 변화에 영향을 주는지 파악하고 예측하는 것이다.

전반적인 해수온의 상승에 대하여 어류는 산란장을 극 쪽으로 이동시켜서 고수온을 피할 수 있지만, 이러한 변화는 어류 유생이 겪는 낮 길이의 변화를 동반하여 생존율에 영향을 준다고 하였다(Shoji et al., 2011). 어류 가입에 대한 지구온난화의 영향을 이해하기 위하여 서부태평양의 볼락류 black rockfish(Sebastes cheni)를 대상으로, 수온과 낮 길이의 차이가 어류의 성장, 일일 먹이섭취량, 성장 효율 등에 미치는 영향에 대하여 자연조건과 실험실 실험을 하였다. 실험대상 어류의 성장률은 11.1~21.3 ℃ 사이의 수온에서 증진되었고, 성장은 16 ℃ 에서 가장 좋았다. 그림 6.22는 산란장이 고위도로 옮겨지면 광주기가 달라져서 생물들이 겪는 낮 길이가 달라지는데, 여름철에 성장하는 초기생활사 어류와 겨울철에 성장하는 초기생활사 어류는 정반대의 효과를 겪을 것임을 나타낸다. 지구온난화의 영향으로 산란장은 무색 사각형에서 회색 사각형으로 위치를 옮길 것이며(즉, 고위도에 산란장이 형성될 것이며), 여름철에 성장하는 어류들은 더 긴 낮 시간을, 겨울철에 성장하는 어류들 더욱 짧은 낮 시간을 경험하게 될 것이며, 이러한 효과는 고위도로 갈수록 더욱 현저하게 나타난다.

어업 대상이 되는 생물의 서식 위치뿐만 아니라 산란해역 역시 변화할 것으로 예상된다. IPCC 기후변화 시나리오에 따른 살오징어 산란해역의 변동을 예측하는 연구를 수행한 결과도 있다. AR4에 사용된 기후모형(MPI_echam5, MIROC_hires)에 A1B 시나리오 예측 결과를 해수순환모델(MOM ver.3)의 표층 경계조건으로 이용하여 북서태평양의 미래 해양환경 변화를 모의하고, 이 결과를 바탕으로 2030년대의 살오징어 산란해역의 변동을 추정하였다(김중진 등, 2012; 그림 6.23). 동중국해와 동해의 가을과 겨울철 살오징어 산란해역은 모두 북쪽으로 이동하고 산란해역의 면적은 1990년대에 비하여 가을과 겨울 각각 11.6~30.8% 및 3.0~18.2% 감소하는 것으로 나타났다.

앞으로 20년 뒤인 2030년대 어장 분포 위도 변화를 전망하기 위해 IPCC AR4 A1B 기후변화 시나리오에

따라 대한해협 수온이 어떻게 바뀔 것인지를 Regional Ocean Modelling System(ROMS)으로 예측하였다. 그 결과 2030년대에는 대한해협 저층 수온이 표층보다 더 빨리 상승하여 수온약층이 없어지는 것으로 전망되었다(Jung et al., 2014; 표 6.2). 이렇게 전망된 수온 변화로 수온과 유의한 관계를 보인 6 개 어종의 중심 어장 위도 변화를 예측하였는데 예측된 이동 범위는 17~71 km 이었다(표 6.3). 어류의 이동 평균 속도는 2000~2030년 동안 1.26 km/yr 이었는데, 이는 미국 북동부 연안 대륙붕보다는 2.3 배(Nye et al. 2009), 유럽 북해에서 보고된 평균 속도 보다는 5.7 배 느린 것이다(Perry et al. 2005). 이렇게 느린 이유로 북해와 북대서양은 북쪽으로 바다가 열려 있는 반면에 우리나라 바다가 있는 북서태평양은 북쪽으로 아시아 대륙과 일본 열도로 거의 닫혀 있어 어종의 북상에 한계가 있을 수밖에 없다는 지형적인 요인 때문으로 유추했다(Jung et al., 2014). 그러나 지구 육상 생물의 북상 속도 평균인 0.61 km/yr(Parmesan and Yohe, 2003)에 비교해서 우리나라 대한해협 6 개 어종의 북상 속도는 여전히 2 배 이상 빠른 것이다.

지금보다 더 변화한 환경에 서식하게 된 해양생물의 반응은 각 생물에 따라 다르게 나타날 것으로 예상된다. 해수온의 변화에 의하여 서식장소를 옮겨가는 어류와 같은 생물들이 있는 반면, 이동하지 못하는 생물들은 해양의 변화를 고스란히 받아들여야만 한다. 이동할 수 있는 생물들은 서식장소와 어획장소의 중심이 이동하게 될 전망이고, 이동할 수 없는 생물들은 산란에서부터 성장에 이르는 모든 과정에서 환경변화에 의한 영향을 크게 받을 것으로 예상된다. 이동할 수 없는 혹은 이동능력이 미미한 생물의 경우에도 환경의 변화(특히 해양산성화)에 의해 영향을 크게 받아서 미래의 생존이 걱정되는 생물 종이 있는가 하면, 큰 영향을 받지 않는 생물들도 있다. 이와 같이 해양환경변화에 의한 생물의 반응을 일반화 시킬 수가 없으므로 이에 대한 더 많은 연구가 진행되어야 한다.

6.3.3 수산업

기후변화에 의한 수온상승이 굴양식의 경제성에 미치는 영향을 분석하였는데, 2100년까지 수온상승에 따른 할인율을 5.5%로 적용하였을 때, 1 ha 당 순현가(NPV)누계와 편익비용비율(BCR)이 모두 경제성이 있는 것으로 나타났으나, 수온상승의 영향이 없을 때보다는 감소하는 것으로 나타났다. 결국 수온상승을 반영할 경우 순현재가치 차액이 1 ha 당 약 2,513만원이 감소하여, 경제적 손실이 발생하였다. 따라서 기후변화로 인한 수온상승은 양식산업에도 직접적인 영향을 미친다는 것을 확인하였다(최종두와 최영준, 2014).

6.4 취약성의 주요원인

해양부문의 연구는 주로 정부의 재정지원 아래에 수행되었으나, 재원이 서로 다르고 기관별 연구의 성격이 다르기 때문에 전체적으로 보아 균형이 잡힌 연구가 된 것 같지 않다. 해양 부문의 공통적인 취약성과 연구제언은 아래와 같다.

연구해역의 편중성: 우리나라 해역은 서로 성격이 크게 다른 세 해역으로 나뉘어져 있는데, 기후변화 연구에 대해서는 지역적으로 동해에 관한 연구가 서해와 남해(혹은 동중국해) 연구보다 상대적으로 많다. 동해의 연구결과가 많은 이유가 동해가 대양의 축소판(miniature ocean)의 특성을 가지고 있기 때문에 여러 연구자들이 지속적인 연구를 추진한 점도 있으나, 동해의 이름(East Sea) 문제가 한국과 일본 사이에 첨예한 외교적 쟁점이 되어 세간의 관심을 받은 이유도 있다. 향후, 서해와 남해에서도 동해에 버금가는 연구활동을 수행하여 각 해역에서의 자연현상 규명에 대한 연구가 함께 발전되어야 한다.

국제 공동연구 체제의 미비: 대기와 해양연구는 작은 지역(local area)에서의 현상과 더불어 중규모(meso-scale 혹은 regional scale)와 전지구적(global scale) 연구를 병행해야 한다. 한반도는 중국, 러시아, 일본 등에 의하여 둘러싸여 있으므로, 우리의 해양/기후 연구도 이들과 공조체제를 갖추어야 한다. 현재, 해양연구나 기후관련 연구에서도 한반도 주위의 양국 혹은 다국간 공동연구는 매우 제한적이다. 해양과 기후자료의 생산과 교환, 해양과 대기관측자료의 공유,

생태계와 수산자원의 공동 관리, 정기적인 학술회의 개최 등이 선행되지 않으면, 북서태평양 전체 지역에 대한 기후변화 특징을 파악하기가 어려우므로 올바른 제안과 정책이 도출될 수 없다. 특히 수산자원 연구를 위해서는, 양국 배타적경제수역(EEZ) 에서의 공동수산자원 조사, 수산자료의 통일과 교환, 적정 어획량의 합리적 설정, 어류의 회유경로 파악 등 기후 외적인 문제와 더불어 기후변화의 영향을 함께 고려해야 한다.

Big data의 생산과 운영체제의 미비: 기후, 해양, 생물 등의 해양생태계의 변화에 대한 time-series data를 수집하고 활용할 수 있는 슈퍼컴퓨터 센터의 설립이 제안되고 있다. 현재 이용되는 기후모형 중, 우리나라 해양의 물리적 특징을 잘 재현하는 기후모형을 확인하여야 하지만, 해수의 성질과 해류의 흐름에 대한 정밀한 관측기록이 많지 않아, 어떤 기후모형이 우리 해양에 가장 적합한지 판단하기가 어렵다. 해양 분야에서는 외해역, 연안역, 하구역 scale까지 예측 가능한 다단계 해역상세화 기후변화 모델 개발이 필요하며, 궁극적으로 해양-대기 접합 지역해 모델이 개발되어야 한다. 특히 연안역 적응 대책 수립을 위하여 하구역 모델의 경우 수평 해상도가 100 m 이하 정도로 고해상도가 되어야 한다. 현재 기상청의 지역 기후모델은 그 초점이 육상에 맞추어져 있으므로 연안역 대책, 외해역 수산자원 예측 등을 위하여는 그 적용성에 한계가 있다. 더욱이 전지구적으로 신뢰성 있게 통용되는 모형이라 하더라도, 우리나라 부근 해역에서 잘 적응되도록 상세화(downscaling)하려는 노력이 아직 충분하지 않아 생태계 현상을 설명하는데 어려움이 있다. 또한 환경-생물자료를 활용할 수 있는 접합모형(bio-physics coupling model)의 개발, web-기반 소프트웨어 프로그램 등이 필요하다.

적응대책의 결여: 기후변화현상과 해양현상이 예측되면, 이에 대한 우리의 적응(adaptation) 대책을 각 분야별로 시급히 수립하여야 한다. 특히, 연안 침식과 오염, 갯벌 천이, 염하구 특성 변화 등에 관한 적응대책이 결여되어 있으며, 외력 변화에 대한 연안역 대응 방안은 부처 합동 기후변화 과제에 포함되어 있는 사항으로 이를 위하여는 초정밀 지역해양모델 결과를 기반으로 파랑 예측, 퇴적물 이동 예측 등이 이루어져야 한다. 수산의 경우 어떤 생물종들은 변화된 환경에 적응하며 살기도 하겠지만, 많은 유영생물종들은 살기에 적합한 해역으로 이동할 것이며, 이 결과는 궁극적으로 어업비용의 차이를 유발한다. 해양생태학적 변화를 사회경제학적 영향의 관점에서 조명하여야 할 것이다. 기후변화의 영향이 수산업에 얼마나 위험한 영향을 미치는지 분석하는 위험분석(risk analysis), 경제적 손익 분기점의 변화는 어떠한지, 수산정책 수립방향이 타 분야 사업의 정책과 충돌되지 않는지 등을 검토하여 효율적인 적응대책을 수립하여야 한다. 기후변화가 우리나라 수산업에 미치는 영향을 평가하고 전망하기 위해서는 기후변화와 관련하여 ① 관측과 생태계 영향 평가, ② 수산어종과 수산업 변화 예측과 전망, ③ 수산업 분야 취약성 평가와 적응 방안 마련의 순서로 관련 연구자들과 정부 정책 개발자들이 협력하여 로드맵을 만들고 적응 종합계획을 마련해왔지만, 우리나라의 관련 연구 수준은 1번 관측과 과거 자료에 기초한 영향 평가 정도만 어느 정도 이루어지고 있는 실정이다. 아직 예측과 전망, 취약성 평가는 초보적인 수준에 머물고 있으므로 앞으로는 예측과 전망에 기초한 취약성 평가에 집중적인 연구와 투자를 할 필요가 있다. 기후변화에 대비한 수산자원관리 방안 마련을 위해서 최근 수산 생태계 지표들이 개발되고 있는 중이며, 이런 지표에 기반한 각 해역별, 업종별로 취약성을 평가할 필요가 있다.

확고한 연구/교육/홍보 체제의 결여: 여러 분야(즉, 해양물리, 해양화학, 기후학, 수산학) 학자들과 공동연구를 수행할 수 있는 대규모 연구과제가 결여되어 있으므로, 각 분야별 조각 그림은 있으나 이들을 통합(integration)적으로 엮을 수 있는 메커니즘이 결여되어 있다. 그리고 이 분야 학문을 효율적으로 수행하기 위해서는 컴퓨터 모델링과 같은 신학문을 빠르게 습득할 수 있는 젊은 학자들을 양성하여야 한다(capacity building). 아울러 연구진의 연구결과를 일반 국민들에게 이해하기 쉬운 방법으로 홍보할 수 있는 통로가 있어야 연구자의 활동이 사회로부터 인정을 받고 지속적으로 후원을 받을 수 있지만(out-reach program), 우리나라에서는 아직 이러한 제도가 공고하게 만들어지지 않았

다.

기타 세부 연구 주제: 아래와 같은 세부 연구주제들이 체계적으로 연구되지 않아 해양의 변화와 생태계의 반응기작에 대하여 이해하는데 한계가 있다. 우리나라 해양학, 수산학의 학문적 취약성을 열거하면 다음과 같다.

많은 연구가 해양 표층에서의 변화에 치우쳐 있어, 해양 전체적으로 어떠한 현상이 발생하였는지 파악하는데 어려움이 있다. 수중(subsurface)에서의 순환과 해수 이동연구가 수행되어 3차원적 변동을 파악할 수 있어야 한다.

해양산성화의 경우, 현 상황에 대한 정밀한 진단과 미래 예측을 위해 필요한 신뢰성 있는 관측결과가 부족하다는 점이 있다. 또한 해양산성화의 영향은 생물의 종별, 발생단계별, 생리활성 부위별로 달리 나타나므로 정확한 진단을 위해서는, 주요 생물에 대한 정밀 영향 평가가 부족한 점이 있다.

장주기 변동이 지구온난화와 관련된 것인지 아니면 수십 년 이상 주기의 자연변동성에 의한 것인지는 확실치 않아 추가 연구가 필요하다.

남해와 동중국해 연구에서는 기후변화와 더불어 장강 담수의 영향을 해양-대기 상호작용을 고려하여야 할 것이다. 다양한 기후인자에 따라 변동하는 대마난류의 확장 범위와 수온 변동에 대한 연구는 대마난류 수산생물의 가입과정을 풀 수 있는 중요한 열쇠가 될 것이다.

임해공단 부근에서의 빈산소(hypoxia)현상에 대한 연구는 일부 학자들에 의하여 시작되었으나, 외양에서의 저산소화(deoxygenation)에 대한 연구가 결여되어 있다.

동해의 온난화 현상에 대한 물리적, 화학적 과정에 대해서는 비교적 잘 설명하고 있으나, 그 영향이 생물과 생태계에 미치는 영향과 변화할 생태계에 대한 연구는 미흡하다. 해양/기후환경의 변화가 생태계에 미치는 영향, 즉 생물-물리 접합과정연구(bio-physics coupling processes)가 필요하다.

생태계 과정(ecological processes)과 생태계 모델링(ecosystem modeling)에 대한 연구가 매우 낙후되어 있어, 기후변화에 따른 생태계의 변화에 대한 예측이 거의 불가능하다.

기후변화와 해양온난화와 산성화에 따른 미래 어류자원의 분포, 변화한 해양에서 생물의 생존율 등을 규명하기 위하여, 해양물리학자들과 수산학자들 사이에 학제간 협동 연구가 필수적이다. 더 나아가 사회학자와 경제학자들과 함께, 변화할 생태계에서 수산업이 적응할 수 있는 방안을 모색하여야 한다.

대마난류에 서식하는 소형표층어류는 우리나라 수산물의 70% 이상을 차지하는 중요한 어류군 임에도 불구하고, 이들에 대한 기초연구(즉, 산란장 위치, 성장, 수명 등)는 미흡하다. 동중국해에서의 세밀한 연구조사가 우선적으로 필요하다.

황해저층 냉수괴는 향후 더욱 위축될 것으로 생각되는데, 이 수괴에 서식하고 있는 대구, 청어 등의 어업은 황해 온난화로 인하여 직접적인 영향을 받을 것이다.

동해에 서식하는 냉수성 어종(명태, 대구, 연어 등)의 경우, 지구 온난화의 영향이 매우 심각하리라 생각하지만, 아직 이에 대한 구체적 대비책이 마련되지 않았다.

현재 양식 분야에서는 해양의 변화(해수의 온난화, 해양산성화, 빈산소화)에 대한 고려가 거의 없으므로, 따듯한 수온에 적합한 품종의 개발, 빈산소 수괴의 출현, 산성화와 해양생물의 반응 등에 대한 연구를 시작하는 것이 필요하다.

한반도 해역의 생태계 변화를 잘 반영하는 기후지수(Climate index)의 개발이 필요하다.

기후변화에 대한 동해, 서해, 남해 연안역 냉수대 반응예측. 동해의 한류 남하와 연안 용승, 서해와 남해의 조석 혼합 등으로 연안 냉수대가 발달하며, 냉수대는 해무 발생, 어장 환경 조성, 높은 생물생산성 유지 등 기후변화와 관련된 해양학적으로 매우 중요한 현상이다. 기존 연구는 냉수역에서 수온 상승이 외해역에 비해 낮으며, 장기적으로 이는 연안과 외해역의 수온 차이를 크게 만들어 연안의 해류와 환경에 큰 영향을 미칠 가능성이 높다. 이에 대한 지속적인 모니터링과 연구가 필요하다.

기후변화를 이해하는데 있어 해양-대기 상호작용과

표 6.3 2000년대부터 2030년대까지 주요 어류 종에 대한 고위도 해역으로의 이동 예측. 어종의 평균위도와 특정수심에서의 수온의 회귀계수와 IPCC A1B 시나리오를 근간으로 하여 GCM으로 전망된 수온변화를 곱하여 산출된 극 방향 이동 정도와 연간 이동속도(Jung et al., 2014)

Fish	Predictor temperature depth	Regression coefficient (/℃)	Projected temperature change (℃)	Projected poleward shift (km)	Speed (km/yr)
Anchovy	10 m	-0.13	1.55	-23	-0.75
Horse mackerel	30 m	0.08	3.01	26	0.86
Pacific sardine	75 m	0.05	3.60	19	0.63
Common squid	10 m	0.29	1.55	50	1.65
Spanish mackerel	1 m	0.41	1.57	71	2.37
Yellowtail	1 m	0.22	1.57	39	1.30

되먹임 작용은 매우 중요한 반면에 국내에서는 체계적인 연구가 되어 있지 않다. 기후변화 대응을 위하여 주요 연안역에 대한 생태계 지표(물리, 화학, 지질학적 환경지표 및 생물학적 지표; ecosystem indicator) 개발이 시급하다. 기후변화로 인한 태풍, 해일 등 extreme events의 발생 빈도와 강도 변화 등에 대한 연구가 필요하다. 자연과학과 인문과학을 접목한 융합과학 측면에서 기후변화에 따른 사회, 경제적 영향 평가 등이 필요하다.

6.5 적응옵션

해양의 변화는 우리 인간사회에 지대한 영향을 미치고 있다. 해양은 기후를 조절하는 가장 중요한 요소 중의 하나이지만, 동시에 기후의 변화에 따라 직접적으로 영향을 받는 대상이기도 하며, 그 영향이 직접 인간사회에 미친다. 지구온난화의 영향으로 세계의 곳곳에서 수온 변화, 해수면 높이의 변화, 해류의 흐름 변경과 세기 변화, 해빙 분포의 변화, 영양염 공급의 변화, 해양 산성화와 탈산소화와 같은 변화가 이미 감지되고 있고, 향후 이러한 변화는 더욱 가속될 것으로 예상한다. 기후가 바뀜에 따라 해면수온이 직접적으로 영향을 받으며, 이에 따라 해양에 서식하는 생물들의 자원량과 서식처 변화 등이 동반될 것이다. 기후가 변화하는 것에 대하여 우리 인간은 효과적인 조절방법을 아직 찾지 못하고 있으며, 변화한 환경에 순응하거나 적응하며 생존에 대처할 수 있는 방법을 찾아야 한다.

기후변화는 우리의 생활에 긍정적인 효과를 주기도 하지만, 변화의 속도가 빠를 경우에는 적응을 하기 위한 충분한 시간 여유가 없기 때문에 부정적으로 작용하는 경우가 많다. 해변에서의 여가산업의 경우, 길어진 휴양기간은 지방경제에 큰 힘이 되며, 온난화에 의한 북극항로의 개발은 국가경제에 큰 이득을 줄 것이다. 반면, 잦은 폭풍과 재해에 의한 연안역에서의 인명손실과 재산피해는 기후변화의 커다란 불안요인이다. 해양의 온난화에 따라 해양관련 산업은 나름대로 대책을 강구하고 있지만, 본 보고서에서는 해양의 다양한 산업 중에서 해양생태계의 변화와 직접적인 관련이 있는 수산업의 적응방안에 대하여 구체적으로 토의하려 한다.

해양수산업의 경우, 면밀한 주의와 심도 깊은 연구가 진행되어야 기후변화에 의한 수산자원의 변화예측이 더욱 정밀해 질 것이다. 수산(fisheries)은 다양한 형태의 모습을 지니고 있다. 자연과학적 측면에서 본다면 해양생태계의 일원으로서의 수산생물이 해양의 환경과 반응하는 현상과 과정, 이렇게 변화하는 환경 속에서 이들의 분포, 생산력, 가입량에 어떠한 변화가 발생할 것인지를 예측하는 생태학적인 접근을 생각할 수 있다. 또한 인위적인 노력을 통하여 이들의 생산을 증진시키며, 더욱 효율적인 생산을 위한 공학기술의 활용과 개발, 어획된 생물을 우리가 활용하기에 적합한 식품으로 가공하는 분야도 수산의 응용분야로서 뺄 수 없다. 더욱이 생물자원을 취득하여 경제적 이득을 얻으려 한다면 수산생물자원을 잘 관리하고 시장의 동향을 잘 알아야 하는데, 수산생물자원이 여러 국가에 걸쳐 이동을 하거나, 국제적인 무역의 대상이 되는 경우에는 국

제규범에 따라 처리되어야 한다. 즉, 수산은 수산생물이 대상이지만, 이로부터 파급되는 인류의 식량안보(food security), 고용과 소득을 높이는 사회경제적 활동, 인류의 기아와 국민보건을 고려하는 식량안전(food safety), 인류 공영의 발전을 위하여 함께 숙의하는 국제성 등을 포함하는 다면적 얼굴을 가지고 있다. 이러한 다양한 분야에 걸쳐 있는 수산업은 기후변화에 큰 영향을 받고 있으며, 이들을 잘 관리하기 위해서는 생태계 지식을 기반으로 하는 관리, 즉 생태계기반 수산자원관리(ecosystem-based fisheries management)가 필요하다. 특히 최근 들어 생물자원이 급격하게 변화하는 환경 속에 있을 때, 혹은 새로운 어장에서 인간의 어업활동이 자원보호를 확신할 수 없을 때, 우리는 수산자원 고갈을 방지하기 위하여 조기경보체제(early warning system)를 갖추거나, 사전예방조치(precautionary approach)를 시행하여 수산자원을 보호해야 한다.

수산분야에서도 환경변화에 따른 수산업 피해방지 대책을 수립하여야 하는데, 자연에 미치는 스트레스를 완화시키는 것이 중요하다. 안정적인 수산식량자원을 확보하기 위하여 바다목장과 수중림을 조성하여 생태계 내에서 수산생물자원의 회복력에 도움을 주어야 하며, 기후변화를 고려하여 새로운 양식기술을 개발하거나 수산자원의 분포를 예측하는 학문을 발전시켜야 한다. 또한 수산업을 건강하게 지속시키기 위해서 환경-생물 상호작용과 반응 메커니즘을 파악하는 것도 중요하지만, 그 변화를 조기에 감지할 수 있는 관측 네트워크를 구축하는 것이 중요하다. 따라서 우리나라의 동해, 서해, 남해를 대표할 수 있는 지점에서 지속적인 관측이 필요하며, 연안에 따라 중요한 해역(산성화와 저산소화가 심한 해역, 양식활동이 많은 해역 등)에도 지속적인 관측이 필요하다.

한편, 장기적으로 이산화탄소 배출을 저감시켜 지구온난화의 상승률을 줄이고 탄소세도 적게 지불하여야 한다. 이산화탄소 배출 저감 활동의 일환으로 해중림 조성이 제기되기도 하며, 버려지는 굴과 패각 등을 재활용 하자는 아이디어도 있으나, 현장 적용을 위해서는 각 분야의 연구자와 관계기관 간의 협력을 통해, 철저한 검정과 환경영향평가, 경제성 평가가 필요하다.

환경변동에 따라 새로운 어종이 출현하여 새로운 어장이 형성된다면, 어민들의 경제적 여건이 많이 향상될 것이다. 하지만 기후변화가 항상 긍정적으로 작용하는 것은 아니다. 기후환경의 변화에 따라서 특정어종이 사라질 수 있고, 기존 어업이 폐쇄될 수 있는데, 시대적으로 다른 어종의 변천에 따라 어선 세력이 조정되거나 사용하는 어구에도 변화가 필요한 것이다. 또한 기후변화로 인하여 어장이 형성되는 위치가 기후변화가 발생하기 이전보다 항구에서 멀어진다면, 생산단가가 상승하여 어업경영에 영향을 미친다. 이에 따라 가까운 어항을 개설하거나, 저비용 생산시설로 전환을 하는 노력이 필요하다.

6.6 결론

IPCC 제5차 평가보고서에서 기후변화와 해양은 밀접한 관련이 있으며, 해양의 변화는 기후변화와 함께 발생하는 문제라는 것을 인식하였듯이, 본 보고서에서는 기후변화에 따른 해양의 변화 상황과 더 나아가 해양생물의 반응과 환경변동에 대한 인간의 적응방안에 대하여 간략하게 기술하였다. 해양에서는 기후온난화에 의한 해수면 상승, 해양산성화와 화학적 조성의 변화, 해류의 변화와 같은 다양한 변화가 감지되고 있다. 이러한 변화가 해양생물에게 주는 영향은 지대한데, AR5에서 제기된 해양에서 발생하는 다양한 문제들은 우리나라 해역에서도 비슷하게 적용될 수 있다. 해양환경의 변화는 곧 해양생물이 서식하는 생태계 환경의 변화를 의미하고, 이것을 해양생물의 분포, 이동, 성장, 산란과 같은 생물특성의 변화를 수반하게 된다. 해양생물의 분포가 변화하고, 전통적인 어장에서의 어획고가 감소하거나 새로운 해역에서의 어획량이 증가하는 현상들이 나타나고 있다. 이와 같은 해양생물의 생물학적 특성의 변화는 수산업과 직결되는 중대한 사회 경제적 문제이기도 하다. 다음은 기후변화에 따른 한반도 부근 해역에서의 변화 예측과 이에 대한 신뢰도 정도를 평가한 내용이다. 예산과 시간적 제약으로 인하여 객관적인 신뢰도 평가 과정을 거치지 못하였고, 여기에서 수행한 신뢰도 평가는 본 연구진의 주관적 평가임을 밝힌다.

해양 온난화는 여러 해양산업에 부정적 혹은 긍정적인 영향을 미칠 수 있다. 해빙으로 북극항로의 개발, 해수욕장 등 하계 해양레저사업의 연장운영 등은 산업적인 측면에서 도움이 될 수 있지만, 태풍, 연안침식 등 재해로 인한 연안지역에서의 인명손실과 재산피해는 국가경제에 상당한 불안요인으로 작용할 수 있다. 해양수산업의 경우에도 면밀한 주의와 심도 깊은 연구가 진행되어야 기후변화에 의한 수산자원의 변화예측도 정밀해 질 것이다. 북반구의 중위도권에 위치한 우리나라는 최근에 들어와 수온이 매우 가파르게 상승하였으며, 동물플랑크톤 생물량도 급격하게 증가하였다. 이러한 결과는 해양의 표층에 서식하는 어류들의 번성에 유리하게 작용한 것으로 보인다(제한적 동의). 우리나라 해역에서 어획되는 어류의 구성을 분석해보니 소형표층어류의 비율이 지난 30년 전에 비하여 두 배 가까이 증가하였다. 한편, 우리나라 연안 전 해역 표층생태계에는 남쪽으로부터 어류를 포함한 아열대성 생물의 유입이 더욱 증가하였으며, 앞으로도 이러한 외래종의 출현은 더욱 가속화 할 것처럼 보인다. 반면, 연어와 같은 냉수성 어류의 입지는 더욱 어려워 질 것으로 예상한다(제한적 동의).

기후변화로 인해 우리나라 주변해역에서도 전지구 해양에서 관찰되는 해양산성화와 저산소화 현상이 일부해역에서 관측되고 있으며, 오히려 전지구 평균보다 빠르게 진행되는 것으로 판단된다(확고한 동의). 이에 대한 미래 예측과 대비를 위한 정책결정을 위해, 종합적이고 지속적인 해양 관측과 생물영향 평가가 필요할 것이다. 변화한 해양에 인간이 잘 적응하기 위해서는 지속적으로 해양환경의 변화를 관측하여 많은 데이터를 축적하고, 그 데이터를 이용하여 과거와 현재의 상황이 어떻게 달라지고 있는지를 파악할 수 있어야 한다. 또한 데이터를 분석하는 장비와 기법이 우리나라 실정에 맞게 개발되고 운용 되어야 적절한 우리나라의 수산업적 측면의 적응이 가능할 것이다.

전반적으로 우리나라 해역에서 온난화 현상이 지속적으로 나타나리라 예측한다(견고한 동의). 또한 동해에서의 해양산성화는 이미 상당히 진행되었으며 앞으로도 가속화 될 것으로 파악되나(중간적 동의), 남해와 황해, 동중국해에 대한 산성화 경향의 지속평가는 일부 모형에서만 평가한 실정이다(제한적 동의). 해양산성화로 말미암은 생물의 생존, 생식, 성장 등에 미치는 영향은 일부 어류를 제외하고는 나쁜 영향을 미치는 것으로 파악된다(중간적 동의). 해양의 용존산소가 감소하는 저산소화에 대한 관측결과는 우리나라 전반에서 파악된 바는 있으나(중간적 동의), 그 진행정도를 정량적으로 파악하고 생물에 미치는 영향 등을 파악하기 위해서는 정밀한 관측과 집중연구가 필요하다(제한적 동의). 그 외 해양환경인자 변화에 대해서는 일부해역에서는 증가하지만 다른 해역에서는 감소하는 경향을 보여, 해역 특성 차이에 의한 것인지를 파악할 근거가 부족한 실정이다(제한적 동의).

우리나라도 지구 온난화에 따라 지난 40년 동안 남한 지표면 기온은 약 1.3 ℃, 해양 표층 수온은 약 1.0 ℃ 상승하여, 세계에서 수온 상승이 가장 빠른 곳 중의 하나로 알려져 있다(견고한 동의). 이에 따라서 남획과 함께 기후변화에 따른 생태계 변화로 수산업 부문에 많은 피해가 예상되며 수산물에 의존하는 우리나라 국민들 식생활 문화를 보았을 때 수산업 분야에 큰 피해가 예상된다(중간적 동의). 기후변화는 일부 어종과 업종에는 긍정적인 영향을 줄 수도 있을 것으로 낙관할 수도 있으나 대부분 어종과 업종에서는 예측하여 대응하기 힘든 큰 변화를 수반할 것이기 때문에 수산 분야에서는 전반적으로 부정적인 영향을 많이 미칠 것으로 보인다(중간적 동의).

지구 온난화에 따른 우리나라 연근해 표층 수온 증가가 연근해 수산업에 미치는 영향을 간단히 정리해보면 전체적인 어획고는 큰 변화가 없으나 어종, 어업방법, 해역에 따라 다음과 같은 긍정적인 면과 부정적인 면이 교차할 것으로 전망된다(제한적 동의).

1.상대적으로 저어류 어획고가 감소하고 부어류 어획고는 증가(중간적 동의)

2.연안 어업 어획고는 감소하나 근해 어업 어획고는 증가(제한적 동의)

3.지금 주요 어획 대상인 부어류 분포가 북상하는 대신 새로운 아열대성 어종 어획고 증가(중간적 동의)

4.지금 주요 어획 대상인 저어류 분포는 대체적으로

남하하거나 현 상태를 유지(제한적 동의)

동해에서 일본 어선에 의해 어획된 방어 자료를 토대로 20 세기 어획고 변동과 수온 관계를 분석하였는데, 방어 어획고는 1911, 1931, 1950, 1973, 1989 그리고 2000년에 큰 변화를 겪은 것으로 나타났다. 이 시기는 표층수온 변화 시기와 일치한다. 동해에서 표층수온과 방어 사이 양의 상관관계는 앞으로 대마 난류 해역에서 수온 상승에 따라 가입이 증가하고 그 중심 어장도 북상할 것을 예상하였다. 방어 적정 서식지 수온 분포 변화를 보면 따뜻했던 1990년대 동해에서 방어의 서식지와 월동장이 북상했음을 나타내었는데 앞으로 기후변화와 지구 온난화에 따라 방어 서식지와 월동장이 북상할 것으로 전망하였다(견고한 동의).

우리나라 대한해협에서 어획되는 주요 12 개 어종의 중심 어장이 수온변화에 따라 북상 또는 남하를 하는지 분석한 결과, 12 개 어종 중 6 어종이 수온에 따라 북상하는 경향이, 1 종은 남하하는 경향을 보였다. 대형 부어류인 삼치와 방어의 북상 경향이 가장 두드러졌다(그림 6.8; 중간적 동의). 일부에서 북상한다고 보고했던 고등어는 0~75 m 깊이 수온과 유의한 양의 상관관계를 보였으나 어법 변화등을 고려했을 때는 유의한 관계를 보이지 않았다(제한적 동의).

2030년대 어장 분포 위도 변화를 전망하기 위해 IPCC AR4 A1B 기후변화 시나리오에 따라 대한해협 수온을 Regional Ocean Modelling System(ROMS)으로 예측한 결과, 저층 수온이 표층보다 더 빨리 상승하여 수온약층이 없어지는 것으로 전망되었고, 수온변화에 의하여 중심어장의 이동이 뚜렷하게 나타난 6 개 어종의 예측 중심 어장 위도의 이동 범위는 17~71 ㎞ 이었다(표 6.3)(제한적 동의). 어류의 이동 평균 속도는 1.26 ㎞/yr 이었는데, 우리나라 바다가 있는 북서태평양은 북쪽으로 아시아 대륙과 일본 열도로 거의 닫혀 있어 어종의 북상에 한계가 있을 수밖에 없다는 지형적인 요인 때문으로 유추했다(제한적 동의).

6.7 참고문헌

강윤호, 주세종, 박영규, 2012: 기후변화로 인한 신지도 근해 해양먹이망 변동예측, *Ocean and Polar Research*, 34(2), 239-251.

국립수산과학원, 2013: “해양산성화가 어류 및 패류의 성장에 미치는 영향 연구” 사업 완료보고서, 74.

국립기상연구소 (NIMR), 2012: IPCC 5차 평가보고서 대응을 위한 기후변화 시나리오 보고서 2011. 국립기상연구소 기후연구과, 117.

국립해양조사원, 2010; 해수면 변동 정밀분석 및 예측(2차) 결과 보고서, ㈜미래해양.

김경호, 신지연, 고은희, 고기원, 이강근, 2009: 지구온난화에 따른 제주도 근해의 해수면 상승과 제주도 동부 지역 지하수의 염수대 변화, *한국지하수토양환경학회지*, 14(3), 68-79.

김병모, 최태섭, 이정석, 박영규, 강성길, 전의찬, 2014: 이산화탄소 증가로 인한 해수 산성화가 해양생물에 미치는 영향평가 및 생태영향기준 도출, *한국해양환경・에너지학회지*, 17(2), 153-165.

김수암, 2003: 어류자원의 변동에 미치는 해양환경의 영향, *한국수산자원학회지*, 6, 11-20.

김중진, 민홍식, 김철호, 윤진희, 김수암, 2012: IPCC 기후변화 시나리오(A1B)에 따른 살오징어(*Todarodes pacificus*) 산란장의 변동 예측, *Ocean and Polar Research*, 34(2), 253-264.

문성대, 이지혜, 성찬경, 최태섭, 이규태, 이정석, 강성길, 2013: 해수 중 용존 이산화탄소 농도 증가가 두토막눈썹참갯지렁이(*Perinereis aibuhitensis*)의 세포내 에너지 할당에 미치는 영향, *한국해양환경・에너지학회지*, 16(1), 9-16.

민홍식, 김철호, 2012: 기후변화에 따른 동중국해 해양 순환 변화 예측에 대한 수치 실험 연구, *Ocean and Polar Research*, 34(4), 447-455.

박영규, 최상화, 김철호, 2011: 지구시스템모형을 이용한 황동중국해 이산화탄소분압 분포 특성 평가, *Ocean and Polar Research*, 33(4), 447-455.

박영규, 최상화, 김선동, 김철호, 2012: 지구시스템모형을 이용한 21세기 동중국해와 남해의 수온과 일차생산 변화 평가, *Ocean and Polar Research*, 34(2), 229-237.

심정희, 김경수, 김수암, 2013: 해수 중 이산화탄소의 증가가 감성돔(*Acanthopagrus schlegelii*)의 초기성장에 미치는 영향, *한국수산과학회지*, 46(6), 862-867.

오상명, 권석재, 문일주, 이은일, 2011: 지구온난화에 의한 북서태평양 및 한반도 근해의 해수면상승, *한국해안·해양공학회논문집*, 23(3), 236-247.

윤종주, 김상익, 2012: 우리나라 조위관측소의 장기간 해수면 변화 분석, *한국방재학회논문집*, 12(3), 299-305.

장학봉, 홍기훈, 1991: 해수면상승과 연안역에의 영향, *해양정책연구*, 6(2), 407-432.

주세종, 김세주, 2013: 기후변화가 남해(북부 동중국해 포함) 해양생태계에 미치는 영향평가 시범 연구 II, *Ocean and Polar Research*, 35(2), 123-125.

최아라, 박영규, 최희진, 2013: 기후모델에 나타난 미래기후에서 대마난류의 변화와 그 영향, *Ocean and Polar Research*, 35(2), 127-134.

최종두, 최영준, 2014: 기후변화로 인한 수온상승이 굴양식 본양성 생산방식의 경제성에 미치는 영향 분석, *Ocean and Polar Research*, 36(2), 157-163.

Beamish RJ, Leask KD, Ivanov OA, Balanov AA, Orlov AM, and Sinclair B., 1999: The ecology, distribution, and abundance of midwater fishes of the Subarctic Pacific gyres., *Progress in Oceanography*, 43(2), 399-442.

Belkin I. M., 2009: Rapid warming of Large Marine Ecosystems, *Progress in Oceanography*, 81(1-4), 207-213.

Chiba S and Saino T., 2002: Interdecadal change in the upper water column environment and spring diatom community structure in the japan sea: An early summer hypothesis, *Marine Ecology Progress Series*, 231, 23-35.

Chung, I.K., J.H. Oak, J.A. Lee, J.A. Shin, J.G. Kim and K.-S. Park, 2013: Installing kelp forests/seaweed beds for mitigation and adaptation against global warming: Korean Project Overview, *ICES, Journal of Marine Science*, 70(5), 1038-1044.

Epur I.V., 2009: Ecological and zoogeographic characterization of the ichthyofauna of Sivuch'ya Bay (Peter the Great Bay, Sea of Japan), *Russian Journal of Marine Biology*, 35(2), 117-26.

Gong Y. and Choi K.H.., 2008: Fluctuations in abundance of common squid, Todarodes pacificus in the far east, *Journal of Environmental Biology*, 29(4), 449-52.

Gong Y., Jeong H.D., Suh Y.S., Park J.W., Seong K.T., Kim S.W., Choi K.H., and Han I., 2007: Fluctuations of pelagic fish populations and climate shifts in the far-east regions, *Journal of Ecology and Field Biology*, 30(1), 23-38.

Houde ED., 1987: Fish early life dynamics and recruitment variability, *American Fisheries Society Symposium*, 2, 17-29.

Hwang K and Jung S. 2012: Decadal changes in fish assemblages in waters near the ieodo ocean research station (East China Sea) in relation to climate change from 1984 to 2010, *Ocean Science Journal*, 47(2), 83-94.

IPCC, 2013: Summary for Policymakers. 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 [Stocker, T.F., D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S. K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex and P.M. Midgley (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.

Jang, C. J., J. Park, T. Park, and S. Yoo., 2011: Response of the ocean mixed layer depth to global warming and its impact on primary production: a case for the North Pacific Ocean,

ICES Journal of Marine Science, 68(6), 996-1007.

Jeon D., 2008: Relative sea-level change around the Korean Peninsula, *Ocean and Polar Research*, 30(4), 373-378.

Jung, S., 2008: Spatial variability in long-term changes of climate and oceanographic conditions in Korea, *Journal of Environmental Biology*, 29(4), 519-529.

Jung S., 2014: Asynchronous responses of fish assemblages to climate-driven ocean regime shifts between the upper and deep layer in the ulleung basin of the east sea from 1986 to 2010, *Ocean Science Journal*, 49(1), 1-10.

Jung S and Cha HK., 2013: Fishing vs. climate change: An example of filefish (*Thamnaconus modestus*) in the northern East China Sea, *Journal of Marine Science and Technology*, 21(Supplementary), 15-22.

Jung S, Ha S, and Na H., 2013: Multi-decadal changes in fish communities Jeju Island in relation to climate change, *Korean Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, 46(2), 186-94.

Jung S, Kang Y. S., Suh Y.-S., Yang J.-Y., and Kim J., 2007: Spatial variability in oceanographic conditions of sea waters off korea in relation to the regional climate changes during the past 40 years. International council for the exploration of the sea, *annual science conference Helsinki*, Abstract book, CM2007/B:01

Jung S., I-C. Pang, J-H. Lee, I. Choi, and H. K. Cha., 2014: Latitudinal shifts in the distribution of exploited fishes in Korean waters during the last 30 years: a consequence of climate change, *Reviews in Fish Biology and Fisheries,* 24(2), 443-462.

Kang, D.J., K. Kim and K.R. Kim., 2004: The past, present and future of the East/Japan Sea in change: a simple moving-boundary box model approach, *Progress in Oceanography*, 61, 175-191.

Kang YS, Jung S, Zuenko Y, Choi I, Dolganova N., 2012: Regional differences in response of mesozooplankton to long-term oceanographic changes (regime shifts) in the northeastern Asian marginal seas, *Progress in Oceanography*, 97-100, 120-34.

Kim, D., S.-H. Choi, E.-J. Yang, K.-H. Kim, J.-H. Jeong and Y.O. Kim. 2013: Biologically mediated seasonality of aragonite saturation states in Jinhae Bay, Korea., Journal of Coastal Research, 29(6), 1420-1426.

Kim J.-M., K. Lee, K. Shin, J.-H. Kang, H.-W. Lee, M. Kim, P.-G. Jang and M.-C. Jang, 2006a: The effect of seawater CO_2 concentration on growth of a natural phytoplankton assemblage in a controlled mesocosm experiment, *Limnology and Oceanography*, 51(4), 1629-1636.

Kim, J.-Y., Kang, D.-J., Lee, T. and Kim, K.-R., 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 K, K.-R. Kim, D.-H. Min, Y. Volkov, J.-H. Yoon and M. Takematsu, 2001: Warming and structural changes in the East(Japan) Sea: A clue to future changes in global oceans?, *Geophysical Research Letters*, 28(17), 3293-3296.

Kim S, Zhang C, Kim J, Oh J, Kang S, and Lee JB, 2007: Climate variability and its effects on major fisheries in korea, *Ocean Science Journal*, 42(3), 179-92.

Kim YH, Kim YB, Kim K, Chang KI, Lyu SJ, Cho YK, and Teague WJ., 2006b: Seasonal variation of the korea strait bottom cold water and its

relation to the bottom current, *Geophysical Research Letters,* 33, L24604, doi:10.1029/2006GL027625.

Kodama K, Oyama M, Lee J, Kume G, Yamaguchi A, Shibata Y, Shiraishi H, Morita M, Shimizu M, and Horiguchi T., 2010: Drastic and synchronous changes in megabenthic community structure concurrent with environmental variations in a eutrophic coastal bay, *Progress in Oceanography*, 87(1-4), 157-67.

Maekawa C., 1989: Relationship between water temperature and catch quantity of filefish *Thamnaconus modestus* (in japanese), *Bulletin of the Kanagawa Prefectural Fisheries Experiment Station*, 89(152), 27-30.

Nye JA, Link JS, Hare JA, and Overholtz WJ., 2009: Changing spatial distribution of fish stocks in relation to climate and population size on the northeast united states continental shelf, *Marine Ecology Progress Series*, 393, 111-29.

Oh S.M., Kwon S. J., Moon I. J. and Lee E. I. , 2011: Sea level rise due to global warming in the Northwestern Pacific and seas around the Korean Peninsula. Korean Society of Coastal Ocean Engineers, 23(3), 236-247

Park., T., C. J. Jang, M. Kwon, H. Na, and K.-Y. Kim. 2014: An effect of ENSO on summer surface salinity in the Yellow and East China Seas, *Journal of Marine Systems,* in press.

Park, K.-A., and K.-R. Kim., 2010: Unprecedented coastal upwelling in the East/Japan Sea and linkage to long-term large scale variations, *Geophysical Research Letters*, 37, L09603, doi:10.1029/2009GL042231.

Park., T., C. J. Jang, J. H. Jungclaus, H. Haak, W. Park, and I. S. Oh, 2011: Effects of the Changjiang river discharge on sea surface warming in the Yellow and East China Seas in summer, *Continental Shelf Research*, 31(1), 15-22.

Park, G.-H., K. Lee and P. Tishchenko, 2008. Sudden, considerable reduction in recent uptake of anthropogenic CO_2 by the East/Japan Sea, *Geophysical Research Letters*, 35, L23611, doi:10.1029/2008GL036118.

Park, G.-H., K. Lee, P. Tishchenko, D.-H. Min, M.J. Warner, L.D. Talley, D.-J. Kang and K.-R. Kim, 2006: Large accumulation of anthropogenic CO_2 in the East(Japan) Sea and its significant impact on carbonate chemistry, *Global Biogeochemical Cycles,* 20, GB4013, doi:10.1029/2005GB002676.

Park, Y.-H., J.-H. Yoon, Y.-H. Yoon, and F. Vivier, 2012: Recent warming in the western North Pacific in relation 1 to rapid changes in the atmospheric circulation of the Siberian High and Aleutian Low systems, *Journal of Climate*, 25(10), 3476-3493.

Parmesan C and Yohe G. 2003: A globally coherent fingerprint of climate change impacts across natural systems, *Nature*, 421(6918), 37-42.

Perry AL, Low PJ, Ellis JR, and Reynolds JD, 2005: Climate change and distribution shifts in marine fishes, *Science,* 308(5730), 1912-1915.

Rebstock GA and Kang YS, 2003: A comparison of three marine ecosystems surrounding the korean peninsula: Responses to climate change, *Progress in Oceanography*, 59(4), 357-379.

Seo, H., S. Kim, K. Seong, and S. Kang, 2006: Variability in scale growth rates of chum salmon (*Oncorhynchus keta*) in relation to climate changes in the late 1980s, *Progress in Oceanography*, 68, 205-216.

Seo, G.-H., Y.-K. Cho, B.-J. Choi, K.-Y. Kim, B.-g. Kim, and Y.-j. Tak, 2014: Climate change projection in the Northwest Pacific marginal

seas through dynamic downscaling, *Journal of Geophysical Research-Ocean.*, 119, 3497-3516.

Shoji, J., S. Toshito, K. Mizuno, Y. Kamimura, M. Hori, and K. Hirakawa, 2011: Possible effects of global warming on fish recruitment: shifts in spawning season and latitudinal distribution can alter growth of fish early life stages through changes in daylength, *ICES Journal of Marine Science*, 68, 1165-1169.

Sung, C.-G, T.W. Kim, Y.-G. Park, S.-G. Kang, K. Inaba, K. Shiba, T.S. Choi, S.-D. Moon, S. Litvin, K.-T. Lee and J.-S. Lee, 2014: Species and gamete-specific fertilization success of two sea urchins under near future levels of pCO_2, *Journal of Marine Systems*, 137, 67-73.

Tian Y., Kidokoro H., and Fujino T., 2011: Interannual-decadal variability of demersal fish assemblages in the tsushima warm current region of the japan sea: Impacts of climate regime shifts and trawl fisheries with implications for ecosystem-based management, *Fisheries Research*, 112(3), 140-153.

Tian Y, Kidokoro H, Watanabe T, and Iguchi N., 2008: The late 1980s regime shift in the ecosystem of tsushima warm current in the Japan/East sea: Evidence from historical data and possible mechanisms. *Progress in Oceanography*, 77(2-3), 127-145.

Urbach, D., M. Kang, S. Kang, K.B. Seong, S. Kim, U. Dieckmann, and M. Heino, 2012: Growth and maturation of Korean chum salmon under changing environmental conditions, *Fisheries Research*, 134-136, 104-112.

Yeh, S.-W., and C.-H. Kim, 2010: Recent warming in the Yellow/East China Sea during winter and the associated atmospheric circulation, *Continental Shelf Research*, 30(13), 1428-1434

Yeh, S.-W, Y.-G. Park, H.S. Min, C.-H. Kim, and J.-H. Lee, 2010. Analysis of characteristics in the sea surface temperature variability in the East/Japan Sea, *Progress in Oceanography*, 85(3), 213-223.

Zhang C.I., Lee J.B., Seo Y.I., Yoon S.C., and Kim S, 2004: Variations in the abundance of fisheries resources and ecosystem structure in the Japan/East sea, *Progress in Oceanography*, 61(2-4), 245-265.

Zhang C.I., Yoon S.C., and Lee J.B., 2007: Effects of the 1988/89 climatic regime shift on the structure and function of the southwestern Japan/East sea ecosystem, *Journal of Marine Systems*, 67(3-4), 225-235.

제 7 장 산업 및 에너지

7.1 서론

지난 100년간 우리나라의 기온 상승은 1.5℃로 세계 평균 0.74℃의 2배에 이르며, 금세기 말에는 6.4℃ 상승이 예상되고 있다. 또한 제주지역의 해수면은 40년간 22cm 상승하여 세계 평균 7.2Cm의 약 3배에 이르렀다. 이러한 급격한 변화로 인해 국내에서는 기후변화에 관한 연구가 계속해서 수행되어 오고 있으며, 최근 세계적인 관심사인 온실가스 감축과 관련하여 그 연구활동과 정책적인 변화에 대한 목소리가 높아지고 있다. 지난 2007년 발표된 IPCC 4차 평가보고서에서도 인류가 발생하는 온실가스를 감소한다고 하더라도 이미 배출된 많은 양의 온실가스로 인한 영향을 피할 수 없다는 것을 직시해야하며 이를 위해서는 다양한 부문에서의 기후변화에 대한 적응이 필요하다고 강조하였다.

우리나라는 기후변화에 의한 현상에 매우 취약하고 직접적인 영향을 받고 있는 것으로 평가되고 있다. 또한 기후변화로 인한 세계적인 경제적 손실이 매년 세계 GDP의 5~20% 정도로 예측되는 등 기후변화가 우리 삶에 미치는 직·간접적인 영향에 대해 부문별로 연구가 이루어지는 경향이 있다. 하지만 산업부문의 경우 특성이 상이한 다양한 산업과 업종이 산업 내부에 존재하고, 각 산업마다 기후변화의 영향이 다르게 나타남에도 불구하고 업종의 특성을 반영한 연구는 활발하게 이루어지지 못하고 있으며, 산업과 긴밀하게 연관되어 있는 에너지 분야에서의 연구도 부족한 실정이다.

산업은 기후변화에 직·간접적으로 영향을 받는 부문이다. 직접적으로는 기후변화로 인한 자연재해 등을 의미한다. 기후변화에 직접적으로 영향을 받는 농업으로부터 산업은 간접적으로 영향을 받을 수 있다. 권오상 등(2012)에 따르면 이상기후로 인해 우리나라의 23개 산업이 입을 수 있는 피해액은 전력, 가스 및 수도건설 등을 포함하여 3조 3,125억 원의 손실이 발생할 것으로 추정하고 있다. 또한 기후변화의 원인이 되는 온실가스가 누적되어 그 영향을 피할 수 없고, 기후변화를 억제하기 위해 당장에 온실가스 배출을 획기적으로 감축할 수도 없다는 점을 고려할 때, 산업분야에서 기후변화에 어떻게 적응하고 대응해 나가야 할지를 연구하는 것은 상당히 중요한 일이다. 에너지 부문에서도 기후변화는 중요한 문제이다. 기후변화는 에너지 수요의 변동을 수반하며 특히 계절 변화에 따른 에너지 사용량 증가가 크게 나타나고 있다. 한 예로 여름철 냉방일수 증가와 겨울철 난방일수 감소는 기후변화가 에너지 수요에 미치는 영향을 단적으로 드러낸다. 지식경제부에 의하면 우리나라의 에너지 수요 전망은 매년 증가하여 2030년에는 544백만TOE에 이를 것이라고 한다.

이러한 배경 하에 본 연구에서는 1차 보고서에 이어 국내 산업 및 에너지 부문의 취약성 평가 및 적응 방안 등에 대한 이론적 고찰을 통하여 지자체 차원의 적응대책 수립의 가이드라인을 제공함으로써 지자체의 기후변화 영향에 대한 적응 역량을 강화할 수 있게 하고자 한다.

7.2 관측된 영향

지난 100년간(1912~2008년) 한반도의 기온은 1.7℃, 강수량은 19% 증가하였는데, 2100년까지 기후변화로 인한 누적피해액은 약 2,800조 원으로 전망하고 있다. 2013년 우리나라는 국지적이지만 강력한 바람과 호우에 의한 산업시설 피해가 발생하였으며, 여름철 기온 패턴의 변화로 소비패턴의 변화가 나타나고 있다(기상청, 2014).

7.2.1 기상산업

기후변화로 인하여 기상산업의 급성장이 이루어지고 있다. 세계경제의 80%는 기상변화에 직·간접적으로 영향을 받고 있으며, 우리나라는 날씨에 영향을 받는 산업의 비중이 GDP의 52%로 미국 42%보다 높은 상황이다.

우리나라의 기상산업 2011년 매출은 1,069억 원에 이르렀으며, 기상산업 이외의 기상정보를 유통하거나 기상정보를 활용하는 금융 등 연관 산업 분야까지 포함

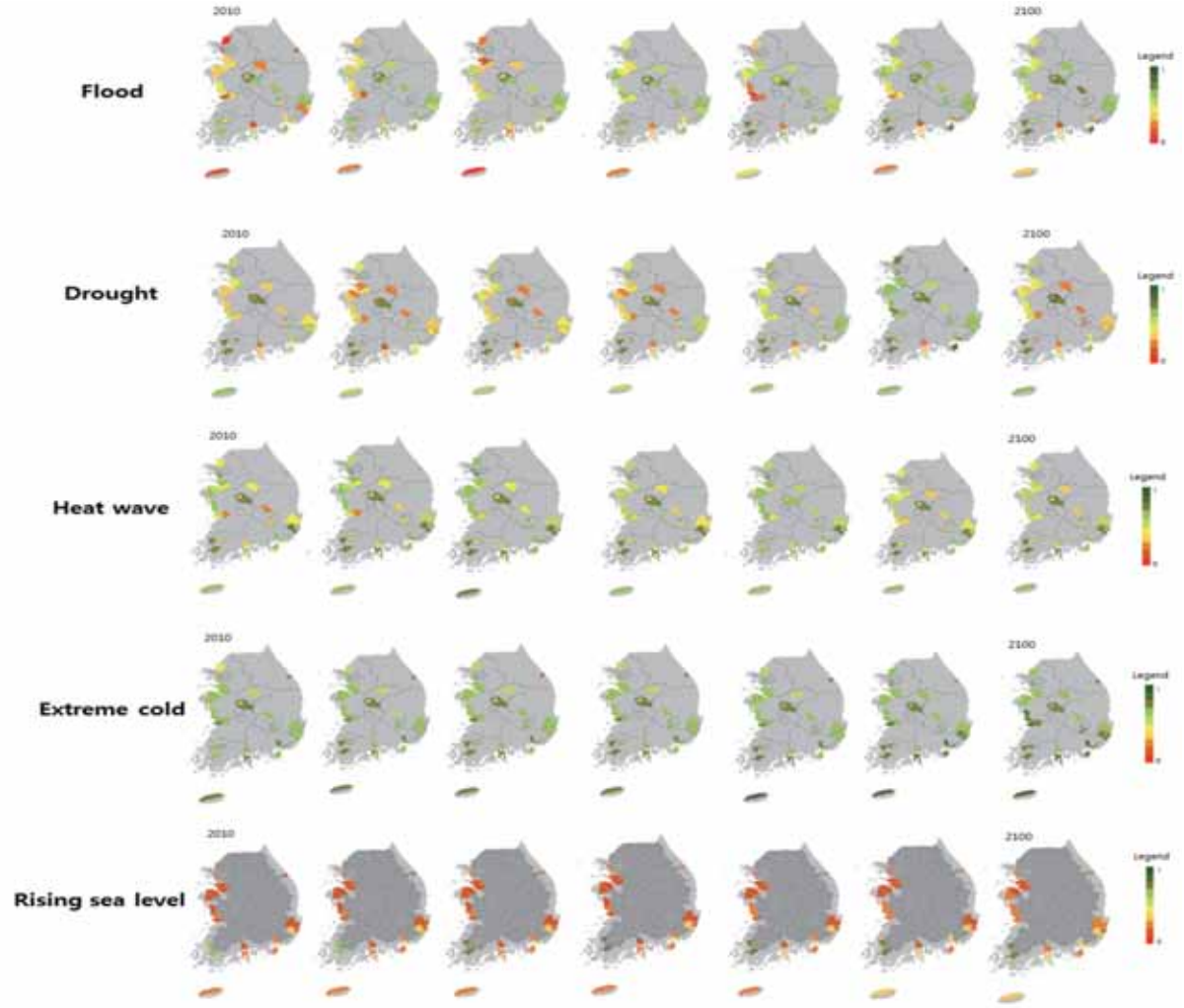


그림 7.1 산업단지 취약성 지도(김윤정 등, 2013)

한다면 2,219억 원이 이를 것으로 전망하고 있다(경기개발연구원, 2012). 2012년 상반기까지 기상산업의 시장규모는 1,850억 원에 이를 것으로 보인다.

7.2.2 유통/식품

기후변화로 인하여 유통과 식품산업에서도 변화가 나타나고 있다. 기후변화로 인하여 농산물의 주산지가 변화하고 있고, 이에 따른 식자재의 매출이 변화하고 있으며, 온난화로 인하여 여름 계절상품의 매출액이 증가하고 있다.

2012년 1~5월기간의 매출 변화는 과일매출의 경우 국산 가격이 상승함에 따라서 수입과일 수요가 증가하였는데, 국산 과일 매출이 3.1%증가한 반면 수입과일 매출은 20.5% 증가하였다. 또한 이른 여름 더위로 인하여 5월 여름 계절상품인 캠핑용품, 선풍기, 살충제 등의 매출액이 20~40% 증가하였으며, 2013년에는 전국적으로 가을모기가 극성을 부리면서 대형마트의 살충제 매출이 2012년 동 기간에 비해 15%이상 증가하는 현상을 보였다(기상청, 2014). 반대로 2012년 12월에는 때 이른 폭설로 차량 체인 등 월동장비 판매가 급증했다(기상청, 2013).

대형유통업체는 기후변화와 관련하여 매출 분석을 통해 유통 키워드로 이상기후(Abnormal climate)를 선정하였다. 키워드의 선정과 기후변화와 관련하여 다각적인 분석을 통해 유통 산업에 적용하고 있다.

표 7.1 1, 2, 3차 산업 및 전체산업의 생산량 변화(류문현 등, 2012)

시나리오	1차 산업	2차 산업	3차 산업	총합
1(2002년)	98.7	101.45	99.5	101.47
2(2003년)	97.05	101.8	99.08	101.04
3(2006년)	95.8	100.75	98.74	100.69

7.2.3 산업단지

국가산업단지는 홍수, 해수면 상승에 영향을 받는 것으로 나타났다(국토연구원, 2012). 홍수로 침수, 사면붕괴가 나타나며 산업생산의 피해가 함께 나타난다. 하천변 저지대, 급경사지, 불투수율이 높은 지역이 취약지역이다.

해수면 상승으로 침수, 영구적 기능상실이 나타날 수 있으며 해안변, 하구역 주변 저지대가 취약지역이다. 기후변화에 의한 산업단지의 취약성은 지역별로 다르게 나타난다.

7.2.4 제조업

제조업에서도 기후변화에 적응하기 위한 활동이 이어지고 있다. 제조업 분야에서 기후변화는 상품 생산의 변화로 이어지고 있다. 여름철의 무더위로 인하여 음료 제조업과 여름 계절용품 제조업계의 생산량이 크게 증가하였다. 특히, 조선업계에서는 날씨정보를 적극적으로 활용하여 작업 공정을 조정하고 기상여건에 따라 휴무일을 조정하여 연간 47억 원의 원가 절감을 이루었다.

여름철에는 석유화학업체가 순간 정전으로 인한 생산차질로 수억 원의 피해를 본 것으로 나타났다. 또한 집중호우로 공장침수, 축대붕괴, 토사유출에 따른 지반침하와 설비파손으로 공장 가동이 중지되었다(관계부처합동, 2013). 2012년 12월에는 중부지역에 폭설과 한파가 몰아치면서 교통과 물류가 마비되어 지역 제조업체의 납품지연 등의 문제가 발생하였다(관계부처합동, 2013).

7.2.5 교통

교통분야는 기후변화로 큰 피해가 나타났다. 철도는 여름철 집중호우 및 태풍의 영향으로 피해가 나타났으며, 항공 분야에서도 폭우와 폭설로 인한 공항운영과 항공기 운항에 악영향을 미쳤다(기상청, 2012).

2012년에는 8월 중순 집중호우로 서해안과 영서지방에 산사태와 차량 침수가 발생하였으며 도로가 통제되었다. 같은 해 7월부터 9월 중순까지 태풍의 영향이 있었으며, 이중 3개가 연이어 한반도에 상륙하여 도로와 버스터미널 침수, 운전자 사망 등의 영향이 있었다(기상청, 2013). 교통혼잡에 의한 경제적 손실 중 기후변화로 인해 발생하는 교통혼잡은 전체의 18%이며, 교통혼잡비용은 약 7조 2,670억 원 정도로 예상되고 있다(한국교통연구원, 2012). 기후변화로 인한 교통혼잡으로 육로운송 의존도가 높은 물류·홈쇼핑·온라인쇼핑·화학·정유·가전 등 각종 산업분야의 피해가 속출하고 있다(기상청, 2012).

7.2.6 에너지

기후변화는 에너지부문에서도 다양한 피해를 발생시키고 있다. 집중호우로 인해 경기, 서울, 인천, 강원, 부산 등에서 정전피해가 있으며(기상청, 2012), 강풍에 의한 에너지 공급의 차질도 빚어지고 있다. 강풍으로 인해 크레인이 붕괴되고, 전신주 피해와 정전으로 인한 생산 차질이 나타나고 있다. 또한 태풍의 영향으로 주요 산업단지의 280여개 기업에서 변압기 파손, 전봇대 유실로 인한 정전 피해가 발생하였다(기상청, 2013).

또한 여름철 에너지 예상 사용량이 높을 것으로 예측되는 시간대에는 기업의 생산시간 조절, 절전 등을 유도하여 에너지 사용량을 조절하고 있다.

7.3 영향전망

기후변화는 산업 및 에너지의 특성에 따라 그 형태나 영향이 다르게 나타날 수 있다. 기후변화는 다양한 산업에서 상이한 영향을 미칠 것으로 보인다. 또한 기후변화에 따른 재해를 가정할 때, 국내 산업단지의 규모와 현황, 업종에 따라 기후변화의 영향을 받는 정도

가 다르게 나타난다(배채영 등, 2013).

기후변화로 인한 자연재해가 발생하고 이로 인한 피해의 경제적 파급효과가 크게 나타난다. 1999~2008년 발생한 자연재해 중 피해가 가장 크게 나타났던 2002, 2003, 2006을 시나리오로 설정하여 자연재해 피해를 추정한 결과, 1차 산업의 생산량과 3차 산업의 생산량은 비교적 감소한 반면 2차 산업의 생산량은 약 1% 증가하는 것으로 나타났다. 이는 자연재해로 인해 자본량은 감소하였으나 노동가격이 하락하여 생산요소의 투입이 증가하여 생산량이 증가하기 때문인 것으로 판단된다(류문현 등, 2012).

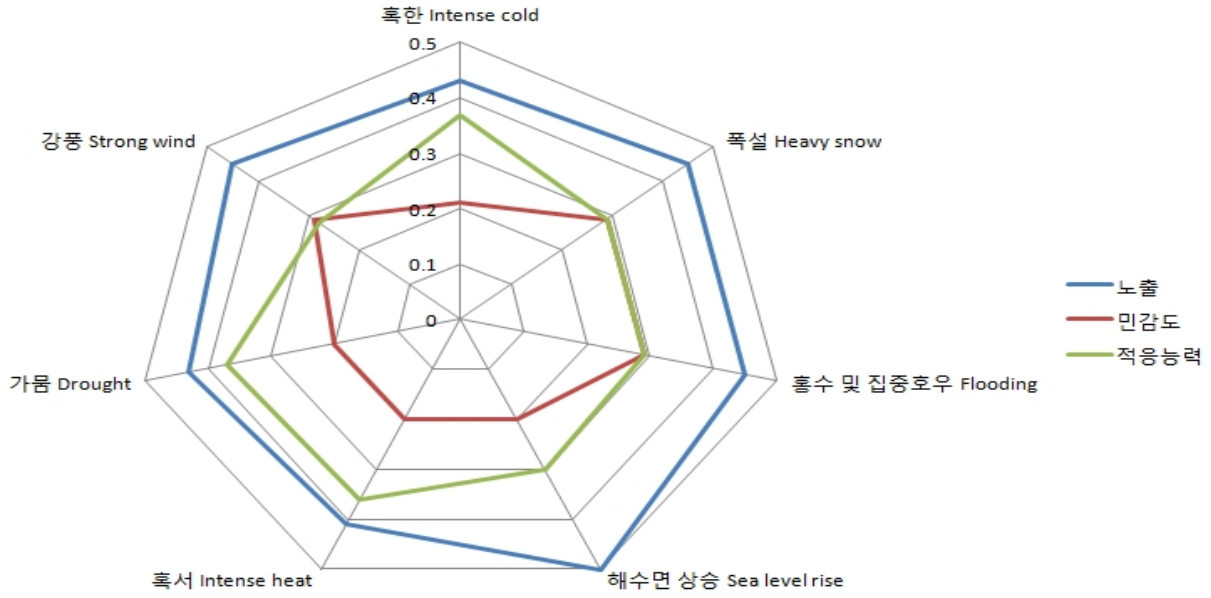


그림 7.2 기후별 지표 가중치(배채영 등, 2013)

지금까지 우리나라에서 수행된 산업분야에 대한 연구에서는 기후변화에 따른 각 부문 별 취약성 평가가 수행되고 있으나, 향후 산업이 다양한 분야의 수많은 업종으로 구성된 점을 고려하여 각 산업의 업종 특성을 반영한 기후변화 적응능력 평가 연구가 수행되어야 할 것이다.

현재 산업계 전반에 걸친 기후변화 적응에 관한 보고서는 그 중요성에 비해 산업 분야의 특성상 다른 분야들과의 복합적인 연계성 때문인지 기후변화로 인한 산업 부문의 취약성과 영향 평가는 상대적으로 부족한 상황이다.

반면에 에너지 분야는 동일본 후쿠시마 원전사고와 화석연료에 따른 세계적인 대체에너지의 관심수준에 따라 연구가 매우 활발히 진행되고 있는 추세이나, 주로 적응 기술보다는 각 분야별 상용화에 대한 연구가 진행 중이라는 점에서 한계가 있다.

7.3.1 산업전반

산업분야는 그 분야별 적응정책의 특성을 구분 짓기가 매우 모호하며, 국내 연구도 각 산업별 정책으로 나누어져 연구가 진행되고 있지 않은 실정이다. 기후변화 적응을 위한 기초연구로는 국립환경과학원(2008)의 신산업 육성에 대한 기초연구가 있다. 기후산업에 대한 경제적 파급효과로 신재생에너지산업은 1원의 생산량 증가를 통해 1.1644원, 부가가치의 경우 0.3544원의 증가를 가져오는 것으로 나타났다(홍준석 등, 2012). 또한 기후변화 인식 확산에 대한 연구가 진행되었으나(지식경제부, 2011) 산업계와 보다 긴밀하게 연관하여 추가적인 연구가 필요한 상황이다.

산업계 기후변화에 대한 경쟁력을 기후위험, 기후성과, 시장기회, 정책협력의 4가지로 구분하여 금속, 발전, 요업, 화공 등의 업종을 대상으로 측정하였을 때 기후변화에 대응하는 정도의 우리나라 기업의 평균 점수는 100점 만점에 36.3점으로 낮은 점수를 보였다(이명균과 김호석, 2010).

표 7.2 취약성 평가결과(김수영과 변병설, 2014)

구 분	취약지역	취약 문화재
산사태로 인한 취약성	고양동	벽제관, 연산군시대금표비 등
	효자동	북한산중흥사지, 봉성암 전성능대사부도, 흥국사괘불 등
	행주동	행주산성, 행주대첩비, 행주서원지 등
곤충에 의한 취약성	송산동	송포백송
	효자동	덕암사 목조보살좌상, 흥국사 목조아미타여래좌상 등
	탄현동	고양 원각사 수륙무차평등재촬요, 고양 원각사 차문경훈 등

표 7.3 기후변화의 잠재적 관광영향(문화관광부, 2009)

구분	잠재적 관광영향
기온상승	스키장의 강설량 감소, 영업일수 감소, 인공재설비용 상승 등으로 경영여건 악화, 골프장의 영업일수 증가 휴가시즌이 여름 집중에서 봄/가을 분산, 휴가 목적지가 바다/해수욕장 중심에서 산악/계곡으로 분산, 겨울축제 등 자연자원 활용 지역축제의 취소 및 개최시기 변화
기상재해	홍수, 태풍, 산불 등에 의한 관광자원의 훼손, 항공기의 결항 증가 및 관광인프라의 파괴 여행보험 상품 증가, 여행예약 취소 및 분쟁증가
물 부족	관광산업과 농업 등 타 산업간 물 이용 갈등 발생 워터파크 등 물 사용량이 많은 사업체의 원가와 사용요금 상승
해수면 상승	연안침식, 모래사장 감소 등 관광매력 감소 워터프론트 개발 및 규제 강화 해파리, 갯녹음 증가 등으로 다이브, 스킨스쿠버 등 해양관광수요 감소
생태계 변화	동식물 분포, 농특산품 재배 변화로 지역관광자원 변화 지역 특산물 이용 축제의 주제 및 개최시기 변화
기 타	냉난방, 관수, 인공제설비용 증가 등 관광사업자의 원가 상승, 소비자 이용요금 상승 도보, 자전거, 기차 여행, 재생에너지 사용 숙박시설 선호 등 지속가능한 생태여행 증가 기후여행이 틈새시장으로 등장, 북극여행 등 돔 투어(doom tour) 증가

산업 및 에너지 분야는 다양한 보고서 및 학술 논문의 내용들을 면밀히 검토하여 세분화하는 작업이 추후에 진행되어져야 할 것으로 판단되며, 해외사례는 국내보다는 나은 실정이므로, 해외 사례 분석을 통한 국내의 적용방안을 수립하는 것을 연구하는 것이 바람직할 것으로 생각된다.

7.3.1.1 제조업

산업의 제조업 부문에서는 기후변화로 인하여 제조업이 받는 영향을 5가지로 구분하였다. 그리고 기후변화의 영향별로 이에 대처하는 국내·외 선진기업들의 대응사례를 분석하였으며 이를 기초로 한국 산업계의 대응방안에 대하여 제시하였다. 연구에서는 아직 초보수준인 국내기업의 업무연속성 유지를 위한 재해경감 활동계획 수립 및 실행에 대한 방향을 제시하며, 조기대응체계 구축을 통하여 어떠한 재난에도 안전을 기할 수 있는 기업 연속성 유지 방안을 모색하였다. 이를 실현하기 위하여 국내 재난관리 표준으로 채택된 사고대비 및 업무연속성관리 가이드라인을 분석하였고, 국내기업에 쉽게 적용할 수 있는 실행지침을 제언하였으며, A기업을 대상으로 재해경감활동계획수립 및 정보기술을 활용하는 방안이 제시되었다.

7.3.1.2 교통

교통부문은 도시교통과 철도부문의 연구가 진행되었으며, 국내 철도분야의 기후변화 적응역량 강화전략으로 기후변화대응 중장기 로드맵 수립을 목표로 이루어졌다. 국내 철도분야의 연간 에너지 소비량을 기반으로 주요 온실가스 배출원에 대한 배출량을 산출하였다. 이를 기반으로 2020년까지 온실가스 배출추이를 시나

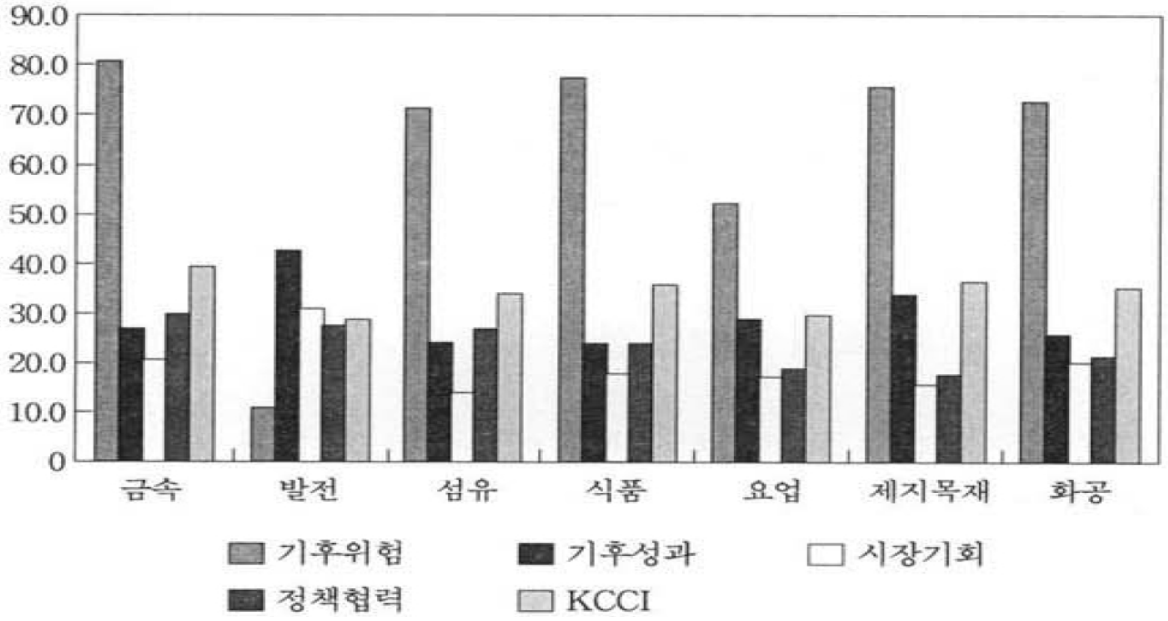


그림 7.3 기후변화경쟁력지수 부문별 산정결과 비교(이명균과 김호석, 2010).

리오별 BAU를 예측하여 최종적인 감축목표와 감축계획, 감축효과를 산출하여 국내 철도분야의 온실가스 감축 가이드라인을 제시하였다는데 의의가 있다.

교통부문 중 철도분야는 국가 온실가스 중기 감축목표에 따라 BAU대비 30% 감축목표를 적용하는 것은 달성이 어려울 것으로 예측하였으며 철도분야의 수송분담율 증대에 따라 기여도와 실현가능한 감축활동을 고려하여 최종적으로 2020년까지 BAU대비 10% 감축목표(312천 tCO_2)를 설정하였다.

온도는 철도에서 레일관리에 중요한 요소이다. 레일온도에 대기온도는 높은 상관관계를 가지고 있다. 하지만 대기온도가 최고가 될 때, 반드시 레일온도가 최고온도가 되는 것은 아니기 때문에 다양한 기후요소를 반영할 필요가 있다(최진유 등, 2010).

도시교통 부분에서는 기후변화로 인해 도시교통에 미치는 영향으로 서울지역에서는 폭설로 인한 도시교통의 피해와 이로 인한 통행자의 불편익이 증가하는 것으로 나타났다. 교통불편익을 최소화하는 융설시스템(Snow Melting System) 방재시설물 설치를 통해 기후변화로 인해 발생하는 불편익을 감소시켜나가는 것이 필요하다(손지언 등, 2010).

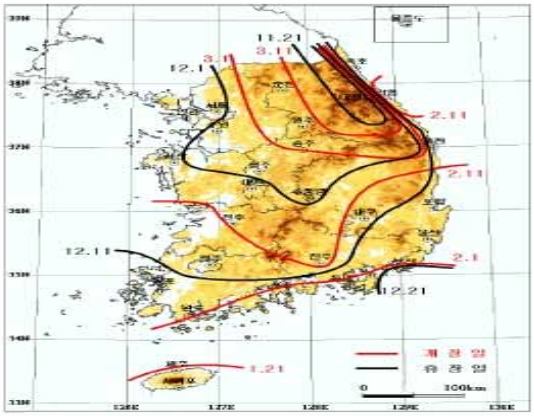
기후변화에 대응하기 위하여 친환경 운전문화 확산 방안마련이 함께 필요하다. 친환경 운전문화의 확산이 체계적으로 이루어질 경우 에너지 절감, 이산화탄소 저감, 교통사고 감소 등의 다양한 추가적인 효과를 얻을 수 있을 것으로 예상된다(환경부, 2009a).

7.3.1.3 유통

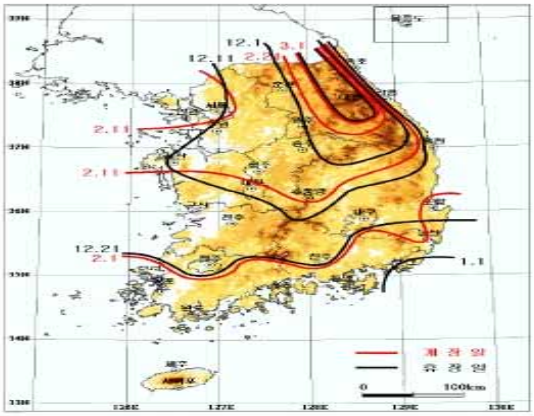
유통부문에서는 크게 3가지 주제에 대하여 연구가 진행되고 있다. 식품안전관리에 따른 수입식품과 수출국의 이상기후와의 연계성 연구, 위기관리 관점에서의 기후변화 대응 전략, 기상요인과 재해요인 분석을 통한 기상정보 3주체의 역할이다. 식품안전관리에 따른 수입식품과 수출국의 이상기후와의 연계성을 검토해야 할 필요성이 있다. 국내 식품안전 관련 규정 및 체계를 보완하고, 식중독 발생 사례와 기후변화와의 연계성을 분석하고, 참고국가의 기후변화 대응 시스템을 조사하고 우리나라와 비교하여 개선이 필요하다(, 한국보건사회연구원, 2011).

유통업 분야에서 위기관리를 위하여 사업연속성계획화(BCP)를 활용한 기후변화에 대응하는 방안을 마련해야 한다. 이에 대하여 위험완화전략, 위험전가전략과 탄력성 및 유연성 확보전략 등이 있다(신언명, 2011).

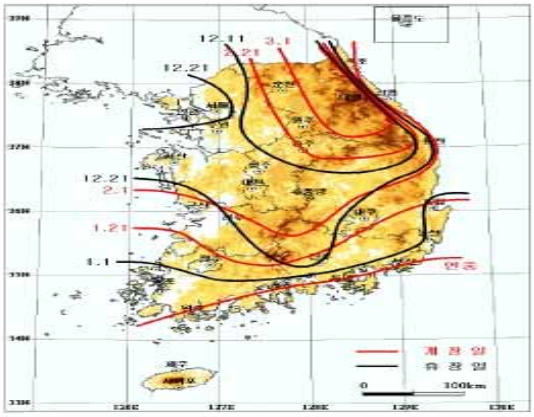
기후변화에 따른 유통산업의 핵심적인 기상요인과 재해요인을 조사하여 이에 따라 유통산업종사자와 기상정보3주체(기상청, 한국기상산업진흥원, 기상사업



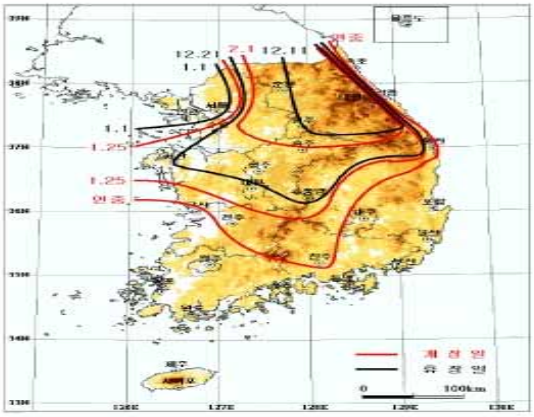
〈그림 28〉 기준년대의 개 · 휴장일 분포



〈그림 29〉 2020년대의 개 · 휴장일 분포



〈그림 30〉 2050년대의 개 · 휴장일 분포



〈그림 31〉 2080년대의 개 · 휴장일 분포

그림 7.4 A1B 시나리오에 따른 연대별 골프장 개·휴장일 분포(임근욱 등, 2010)

자)간에 역할과 임무에 대해 전략적으로 협력해야 한다(이중우, 2010).

7.3.1.4 관광산업

관광은 기후변화 원인인 동시에 피해자이다. 관광은 에너지 다소비 산업으로서 다량의 온실가스를 배출하며, 관광개발은 녹지면적을 감소시켜 지구생태계의 탄소흡수를 감소시키기 때문이다. 기후변화로 관광의 활동과 목적지에 대한 소비자의 선호가 바뀌고 국내·외 관광이동의 흐름이 계절적, 지리적으로 재편될 것이다(문화관광부, 2009).

기후변화는 관광산업에 직접적으로 큰 영향을 미치는 요인이다.

경기도 고양시 지역을 LCCGIS를 활용하여 관광자원의 기후변화 취약성 평가를 한 결과 산사태와 곤충으로 인한 취약성이 높은 것으로 나타났다. 산사태는 북한산과 덕양산, 한강이 인접하여 지형적으로 산사태에 노출되어 있는 고양동, 효자동, 행주동, 장항1동, 송포동 지역의 위험도가 높았고 송산동, 탄현동, 효자동이 주변에 논과 근린공원 등이 위치하여 생태계가 활발하고 곤충서식지로 적합하여 곤충에 의한 피해가 예상되었다(김수영과 변병설, 2014).

해운대 지역은 항공 LiDAR자료를 활용하여 제작된 DEM과 과거 관측 자료를 이용하여 산정된 해일고를 통해 IPCC SRES 시나리오별 해수면 상승에 따른 침수피해를 평가하였다. 그 결과 가장 작은 해일고인 181cm의 경우 침수 가능면적이 7.19ha로 주택과 식당, 경찰서가 침수위험 건물로 나타났으며, 해수면이

20cm 상승 시에는 침수 가능 건물의 수가 약 2배로 증가하였다. 특히 해수면이 60cm 상승 시에는 해수욕장 뒤쪽의 호텔에도 영향을 미칠 수 있는 것으로 나타나 피해가 증가할 것이다(맹다혜와 장동호, 2011). 제주도 역시 해수면 상승에 따라 항만시설과 도로, 주택, 관광지 등 주요 건축시설물이 침수피해의 영향을 받는 것으로 나타났다(이동욱과 부양수, 2011).

기후변화가 해외 관광객의 한국 관광수요에 미치는 영향이 있는 것으로 분석된다. 특히 일본인의 한국관광수요가 기후지수에 따라 관광수요에 정(+)의 관계를 가질 수 있지만 기후변동성의 증가는 관광수요에 부(-)의 관계를 가질 수 있음을 확인하였다(신범철 등, 2013). 다만, 중국인의 한국관광수요가 기후변화에 따라 영향이 있는 것으로 나타났으나 기후변화의 요인보다는 사회경제적 요인인 여행비용, 환율, GDP의 영향이 상대적으로 크게 나타났다(황윤섭 등, 2014).

7.3.1.5 레저산업

기후변화는 계절에 따라 관광산업에 다른 영향을 미치게 된다. 겨울철 관광산업의 대표는 스키산업이다. 겨울철 기후변화에 따른 기온 상승은 관광객 스키어 수를 감소시켜 겨울철 관광산업에 부정적인 영향을 미치며, 이러한 취약성을 극복하기 위하여 TCI분석을 활용하는 방안이 있다(조리나, 2009).

스키 리조트를 운영하는 부분에서 최저기온이 1980년대 이후 다소 하락하는 모습을 보였으나 일최고기온에 따른 스키 폐장일 관리와 보강제설의 어려움으로 중부지방의 스키장, 수도권 지역의 스키장 운영이 어려워질 것으로 예상된다(허인혜와 이승호, 2010).

미래기온 상승에 의해 스키장을 개장할 수 있는 기간과 스키활동에 적합한 설질을 유지할 수 있는 제설작업의 어려움으로 인하여 경제적인 관리가 어려워 질 것으로 전망된다(허인혜와 이승호, 2012). 지역적으로 북부산간지역인 용평스키리조트가 가장 유리한 지역이며, 남부의 에덴벨리리조트는 스키산업을 유지하기에 불리한 기후지역으로 예상된다. 장기적인 관점에서 한국은 인공설에 많은 의지를 하고 있는 환경이므로 무분별한 스키리조트의 개발보다 자연환경을 고려하여 장기적으로 유리할 수 있는 지역에 스키리조트를 활성화하는 것이 요구된다.

스키장의 초기 제설과 기후변화에 대한 부분에서는 용평스키장을 사례로 인접한 대관령의 기상 관측 지점의 기후 자료를 이용하여 스키장의 초기 제설에 영향을 미칠 수 있는 기후 요소를 파악하였다. 스키장의 개장 시기는 1990년대 들어서면서 일러져 11월 중순 개장이 가능하였으나 일최저기온이 -1°C 이하인 날 중 평균 상대습도가 60~80%이하인 날은 10년에 2.8일씩 통계적으로 유의하게 감소하여 스키장 경영 관리 측면에서 초기 제설 작업 조건이 점점 불리해지고 있음을 확인하였다(허인혜와 이승호, 2008).

겨울철 관광의 대표가 스키라면 계절적 요인을 벗어난 골프에 대한 영향도 분석되었다. 골프는 야외에서 진행되는 레저산업으로 기후와 기상에 큰 영향을 받는 산업이다. 서울과 경기지역의 골프장을 중심으로 1971년부터 30년 단위의 기후변화로 인한 영향을 IPCC의 A1B 시나리오를 사용하여 분석결과 2020년대에는 현재보다 약 4%, 2050년에는 약 9% 증가하여 기후변화로 인해 골프가능일수가 점차 증가하는 것으로 나타났다(임근욱 등, 2010).

레저산업은 기후변화로 인해 스키산업이 어려워질 것으로 전망하는 것에 비하여, 골프산업은 연중 개장일수가 늘어날 것으로 전망되고 있어, 기후변화로 인한 영향이 극명하게 대비되고 있다.

7.3.1.6 중소기업

우리나라는 사업체 수를 기준으로 할 때, 기업 중 중소기업이 차지하는 비율은 99%로 우리나라 산업의 근간을 이루고 있다. 하지만 기후변화가 중소기업에 어떠한 영향을 미치는지와 그 취약성에 대한 부분은 이제 막 시작한 걸음마 단계이다.

우리나라는 2010년 4월 저탄소녹색성장 기본법이 시행됨에 따라 온실가스·에너지 목표관리제가 도입되었으며 기업의 온실가스감축이 의무화가 시작되었다. 이에 대하여 대기업은 이미 수년전부터 지속가능경영 및 환경경영을 위한 전략을 수립하였고 대응방안을 마련하였으나 중소기업에서는 기후변화대응에 대한 인식

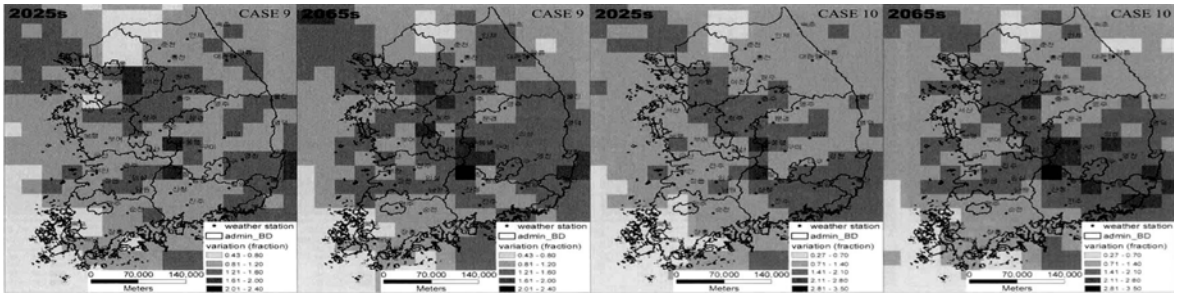


그림 7.5 A2 시나리오에 따른 극치호우사상 발생일수의 변화율 분포(배덕효 등, 2008)

및 정보력 부족과 인력의 부재, 기술개발 및 온실가스 감축을 위한 기술력 및 자금부족 등으로 기후변화 대응과 적응 능력이 상대적으로 열악한 수준이다(지식경제부c, 2010).

한국표준산업 제조업 중분류로 층화한 중소제조업체 55,892개 사업체 중 조사업체는 중소기업 500개, 대기업 300개 기업을 목표로 총 800개 기업을 대상으로 조사를 수행하였으며 설문응답 결과 종업원 규모 300인 이하의 중소기업이 차지하는 비율이 80.8%, 대기업이 약 20% 비율을 차지하였다. 연구 결과 기후변화가 산업에 미치는 영향에 대해서는 80.0%의 기업이 위기라고 생각하고 있었으나 대기업, 목표관리제에 해당하는 기업일수록 기후변화를 '기회'로 인식하고 있다. 기후변화 대응 수준에는 대기업이 28.4%의 인벤토리 구축율을 보이는데 반해 중소기업은 5.3%에 불과하며, 중소기업의 온실가스 배출량 산정의 가장 큰 어려움은 인력 및 정보의 부족인 것으로 나타났다. 또한 기업에서 임직원을 대상으로 온실가스 관련 교육을 실시하는 비율에서는 응답기업의 27.7%만이 교육을 실시하고 있다고 응답하였으나 대기업, 목표관리제 해당기업의 경우 50% 이상의 높은 교육률을 보이지만 중소기업, 목표관리제 비해당 기업은 15~17%수준으로 기후변화 대응과 적응을 위한 인력에 있어 큰 차이를 보인다. 따라서 정부의 정책지원은 온실가스감축 컨설팅 지원, 재직자 온실가스 전문가양성 등 전문가 풀의 제공과 전문인력 양성 등을 중심으로 온실가스감축 설비·기술 지원, 에너지 생산성 평가모델 개발 및 보급과 Program CDM 지원 등이 유용할 것이다.

7.3.1.7 건설/빌딩

옥외에서 이루어지는 건설부문에서 기후변화는 상당히 중요한 요소이다. IPCC SRES A2 시나리오에 의하여 2025s(2011~2040년), 2065s(2051~2080년)의 2기간으로 나누어 분석한 결과 2기간 모두 작업가능 일수는 증가할 것으로 나타났다. 이러한 결과는 기온의 증가와 강수일수의 감소에서 비롯된다(배덕효 등, 2008).

건물부문에서 미래기후에 대응하고 취약성을 평가하기 위하여 IPCC SRES 및 지역기후모델에서 예측하는 우리나라 온도 상승 등과 같은 미래 기후변화를 제시하고, 기상청데이터 및 PRECIS QUMP 등을 활용하여 미래의 기후변화를 예측하였다. 서울 및 울산지역 오피스 건물의 동적해석 시뮬레이션 결과, 냉난방부하가 증가하였고 특히 여름철 냉방부하가 상당히 증가하였으며 울산지역보다 서울지역이 기후변화에 더 취약하다(이관호, 2013).

건설부문에서는 기후변화에 따라서 건설업계가 받는 영향 및 이에 따른 건설업계의 변화를 예측하였으나, 적응 전략이 중심이 아닌 온실가스 저감 정책 위주의 연구가 진행되었다. 기후변화 대응방안에 대한 연구는 환경부(2009b), 국토해양부(2009)의 연구가 있으나 아직은 연구성과가 부족한 실정이다.

IPCC 보고서에서 건축물 부문의 온실가스 감축 잠재량이 다른 부문에 비해 가장 높은 것으로 보고하였다. IPCC의 DDC에서 제공하는 기후시나리오, HadCM3, 영국 틴달센타(Tyndall Center)의 기상자료 및 기상데이터를 활용한 연구결과처럼 우리나라의 연평균 기온 상승은 세계의 평균치보다 높을 것으로 예측되며 특히 서울 및 수도권 지역의 온도상승이 다른 지역보다 높기 때문에 더 많은 문제가 일어날 것으로 보인다(이관호, 2008). 건축물분야에서의 온실가스 감축

표 7.4 제주도의 시나리오별 해수면 상승고(이동욱과 부양수, 2011)

	2040	2070	2100a	2100b
제주시	46.2㎝	95.3㎝	111.3㎝	150.3㎝
서귀포시	64.8㎝	122.8㎝	139.8㎝	182.8㎝

을 위한 노력이 국가 정책의 차원에서 시작되어야 할 것이다.

7.3.2 에너지

에너지 분야의 경우 일본 원전사태로 인해 핵에너지에 대한 안전성 문제와 더불어 화석연료의 고갈에 따른 대체에너지 개발 분야에 매우 관심이 높은 상황이다. 또한 기후변화에 따른 전력사용과 관련한 문제로 지식경제부(2010b)의 스마트그리드, 발전, 에너지효율 증진방안(지식경제부, 2010d) 등과 관련한 연구가 이어지고 있다. 반면에 신재생에너지의 경우 아직까지 상용화가 이루어진 에너지원이 많지 않기 때문에 개발에 관한 연구 및 적용가능성에 대한 연구로 치우쳐져 있으며, 이에 대한 취약성 평가 및 적응성에 관한 연구는 미흡한 실정이다.

7.3.2.1 발전

일본의 원자력 발전소 사건 이전에는 환경과 기후변화의 대응방안의 하나로 원자력 발전이 많은 지지를 받을 수 있었다(김경신과 윤순진, 2010). 하지만 일본 원전사태 이후에는 원자력 발전에 대한 지지보다는 원전에 대한 연구보다는 다른 발전 방안에 대한 대안마련이 이어지고 있다.

환경효율성을 정의하고 그 지표를 DEA(Data Envelope Analysis) 모형을 이용하여 도출하려는 시도가 있다. 분석 대상인 DMU(Decision Making Unit)

표 7.5 홍수에 대한 산업단지의 등급별 적응대책(국토연구원, 2012)

등급	취약정도	적응대책
I	안전	• 현재의 방재시설물 유지 · 관리
II	주의	• 현재의 방재시설물 유지 · 관리 • 하수관거, 펌프장 등의 설계용량 증대 및 신규 대책 검토
III	다소 위험	• 현재의 방재시설물 유지 · 관리 • 하수관거, 펌프장 등의 설계용량 증대 및 신규 대책 검토 • 기존 및 신규 방재시설물 연계운영방안 검토
IV	위험	• 현재의 방재시설물 유지 · 관리 • 하수관거, 펌프장 등의 설계용량 증대 및 신규 대책 검토 • 기존 및 신규 방재시설물 연계운영방안 검토 • 산업단지내 및 주변지역에 다양한 우수유출저감대책(저류지, 녹지조성, 투수성 포장 등) 확충방안 검토 • 상습침수구역을 상대적으로 피해가 적은 주차장이나 공원 등으로 용도변경 방안 및 건축구조(필로티 등) 변경 검토
V	매우 위험	• 현재의 방재시설물 유지 · 관리 • 하수관거, 펌프장 등의 설계용량 증대 및 신규 대책 검토 • 기존 및 신규 방재시설물 연계운영방안 검토 • 산업단지내 및 주변지역에 다양한 우수유출저감대책(저류지, 녹지조성, 투수성 포장 등) 확충방안 검토 • 상습침수구역을 상대적으로 피해가 적은 주차장이나 공원 등으로 용도변경 방안 및 건축구조(필로티 등) 변경 검토 • 산업단지의 이전방향 모색

는 2007년 국내 26개 발전소의 CO_2방출량, N_2O방출량, CH_4방출량과 생산된 총 발전량이다, 최적의 경영효율성과 환경효율성을 보이는 발전소를 선정하여 평가한 결과 발전소의 효율성 정도가 다소 높은 것으로 나타났다(심홍석과 어성윤, 2009).

기후변화가 에너지에 미치는 영향에 대한 중요성을 강조하면서, 에너지 안보와 기후변화 대책을 동시에 고려한 발전구성비에 대해 고려해야 한다(류하늬 등, 2011). 특히 발전구성비를 고려하는 부분에서 환경 기술의 도입, 평가, 비용 산정시 에너지안보개선의 효과를 고려해야 할 것으로 보인다. 당분간은 화석연료의 사용이 신재생에너지보다 더 나은 효율을 가질 것으로 보았는데, 신재생에너지의 확대가 현재 비용 측면에서 경쟁적이지 않다(류하늬 등, 2011).

7.3.2.2 대체에너지

대체에너지는 기후변화에 대응하기 위한 새로운 방안으로 부상하고 있다. 산업은 기후변화를 야기는 온실가스를 배출하는 것과 동시에 온실가스로 인한 기후변화의 영향을 받고 있기 때문이다.

도시차원에서 기후변화에 대처하기 위한 에너지관리에 관한 국내·외 연구동향과 시행사례를 고찰하고 에너지 측면에서 자립형 그린 홈타운을 위한 신재생에너지 기술로서 건물일체형 태양광시스템, 태양열 시스템, 신재생 하이브리드 시스템을 도입하는 것을 검토할 필요가 있다(이종호, 2010). 이러한 방법들을 도시의 특성에 맞게 우선순위를 정해서 투자의 효율성과 효과성을 높여야 한다.

신재생에너지 분야에 대한 종합적이고 정확하고 신뢰할 수 있는 정보를 제공하기 위한 자원지도시스템의 GIS기반 평가절차를 마련, 관련한 데이터를 생성하고 이를 적용한 평가를 제공하여 활용할 수 있도록 하는 방안이 필요하다(김광득, 2012).

태양광 시설 설치에 있어 계획단계에서 입지분석을 위한 방법론이 필요할 것이다. 특히 태양광시설에 영향을 미치는 기후요소가 부산과 같은 인구가 많은 대도시일수록 중요한 요소이기 때문이다(이지영, 2010).

7.3.2.3 송/배전

기후변화의 영향에 대해서 전력에너지 분야인 송·배전은 에너지의 수요와 공급, 자연재해와 관련된 측면에서 검토되고 있다. 기후변화가 국내 에너지 부문의 공급과 수요에 미치는 영향을 고찰하고, 부정적 영향에 대한 효과적 대응을 위해 필요한 전략적 방향 수립이 필요하다. 전략적 방향을 실현하기 위한 세부과제도 도출하였으며, 세부과제는 그 성격에 따라 정책과제와 연구과제로 구분하고 시간적 범위에 따라 중·단기 과제와 장기과제로 구분하여 추진해야 한다(안영환과 오인하, 2010).

기후변화에 따른 도시지역의 자연재해시 복구차원의 임시주거의 개념을 포함한 건물자체로 재난에 대비되어진 안전가옥 및 안전주거의 개념을 도입해야 할 필요가 있다(남경목 등, 2010). 건물의 기능유지 뿐만 아니라 도시의 건물간 비상시 에너지 수급의 우선순위적인 위계를 살펴보고, 비상 에너지 확보와 수급체계에 대한 도시단위의 관리 시스템으로서 안전지구 및 안전가옥의 기초자료를 활용하여 체계적인 접근을 해야 할 것이다.

7.4 취약성의 주요원인

산업 측면에서는 기후변화 그 자체로 취약성의 원인이 될 수 있다. 앞서 기온의 상승과 강수일수의 감소는 옥외 활동인 건설 등의 작업가능일수를 증가시키지만 집중호우 같은 극치호우사상이 0.03 day/yr 증가하는 것으로 나타났는데 현장침수와 건설자재의 유실, 안전사고 등의 피해로 이어질 수 있다(배덕효 등, 2008).

기후변화에 적극적으로 대응하지 못하는 경우 기후변화에 그대로 노출되어 취약성이 커질 가능성이 있다. 조사 결과 국내 산업 중 발전과 화공 업종이 기후변화에 따라 부정적인 영향이 있을 것으로 인식하며, 금속산업은 부정적인 영향이 낮을 것으로 예상하고 있었다. 기업은 기후변화에 따라 부정적 영향이 있을 것으로 예상하는 기업의 경우 기후경영체계나 기후 관련 전담 조직을 구성하는 성과가 높은 것으로 조사되었다(이명균과 김호석, 2010). 기후변화에 대한 기업의 소극적인 대응은 기후변화의 취약성을 높이는 원인이 될 것이다.

관광은 기후와 환경에 밀접한 관련성을 갖기 때문에

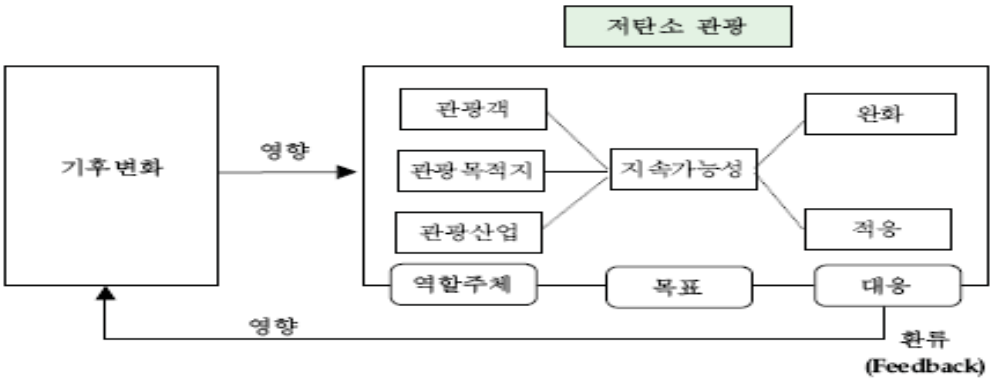


그림 7.6 관광부문 저탄소 프레임 워크(이성은 등, 2010)

기후변화의 영향을 직간접적인 경로를 통해 받게 된다. 기후변화는 직접적으로 관광자원을 변화시키고 간접적으로는 자연환경, 사회경제, 정책의 변화를 유발함으로써 관광객의 선호와 흐름에 영향을 미친다. 기후변화가 관광산업에 미치는 영향력은 업종에 따라 다르다. 일반적으로 고정자산에 투자가 많은 기업일수록, 연안과 도서, 산악 지역 등 기후에 의존도가 높은 지역일수록 기후변화에 취약하다(문화관광부, 2009).

특히, 제주도는 우리나라의 주요관광지로서 해수면 상승으로 인한 영향을 받을 것이다. 제주도의 해수면 상승시나리오에 따라 2010년 대비 해수면이 지속적으로 상승할 것으로 예측되었다.

해안지역은 해수면의 상승에 따라 침수, 문화재 손실, 항만시설 피해 등이 나타날 것이다.

해수면의 상승은 경제적 피해를 야기하게 된다. 부산의 경우 1m 해수면 상승시에 3,963억 원의 경제적 손실이 나타나게 된다(이수연과 최진무, 2011).

7.5 적응옵션

산업과 에너지 부문은 적응을 하기 위해 다양한 연구가 시도되고 있으며, 정부차원에서도 기후변화 대응을 위한 정책적 노력을 하고 있다.

산업부문 기후변화 취약성 및 리스크 평가 방법론(지표) 개발 및 보급, 주요기업 대상 산업계 기후변화경쟁력지수 조사·실시 평가, 취약시기별 안전관리대책 수립 및 안전점검을 실시하고 있다(기상청, 2014).

7.5.1 산업 부문의 기후변화 적응

기후변화에 대한 적응의 방안으로서 다양한 방안이 있다. 하지만 각 산업별 특성이 다르고, 기후변화가 반드시 불리하게만 작용하지 않는 산업이 있는 관계로 기후변화에 대한 각 산업별 적응방안은 다르게 나타나고 있다. 이러한 산업의 특성은 영향과 취약성을 중점적으로 검토하는 산업과 반대로 적응하는 전략에 대한 부분이 중요하게 다루어지는 산업이 다르게 나타나고 있다. 관광산업은 기후변화의 영향과 적응방안이 동시에 다뤄지고 있는 반면에 산업단지, 패션과 섬유산업은 기후변화에 적응하기 위한 방안이 주로 연구되고 있다.

7.5.1.1 산업단지

산업단지에 관한 연구는 기후변화와 관련하여 운영전략을 도출하고 이를 바탕으로 기후변화에 적응하려는 시도가 주로 이루어지고 있다. 홍수에 대한 산업단지의 적응대책을 제시하였다(국토연구원, 2012). 우리나라의 산업단지와 관련된 기후변화에 대한 검토는 임해, 익산, 구미산업단지를 중심으로 다루고 있다. 먼저, 임해산업단지에서는 기후변화에 대한 대응이 미흡한 것으로 나타났다. 따라서 기후변화 적응 전략을 수립할 필요가 있다. 관리체계를 수립하고, 구조물을 활용하는 등 산업계 내부적인 노력과 함께 정책적인 지원과 지속적인 연구, 이해관계자들의 참여가 필요하다(최광림, 2009).

다음으로, 익산산업단지(1, 2산단)에서는 운전방법개선, 설비개선, 배기가스 열 회수, 가열설비, 열처리개선

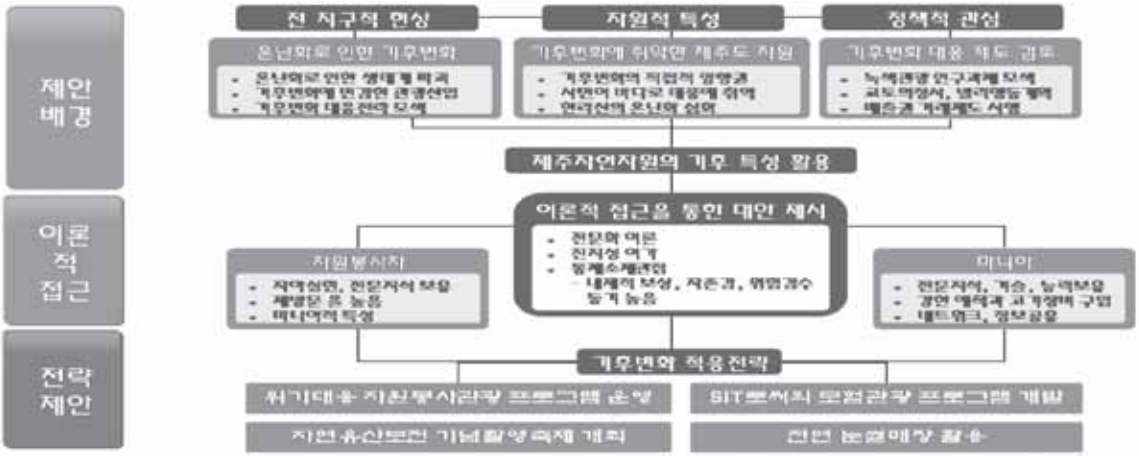


그림 7.7 기후변화를 역이용한 관광적응전략(이영진 등, 2011).

을 통한 온실가스 저감이 경제적·환경적·기술적 측면에서는 에너지다소비업체의 공정개선, 기업 간 공생적 네트워크를 형성함으로써 자원순환의 극대화를 통한 미활용 및 재생에너지 네트워크 구축(생태산업단지구축)을 통하여 경제적 이득과 온실가스 저감 방안이 가능할 것이다(박성순 등, 2012).

7.5.1.2 중소기업

중소기업은 자금력, 기술력 등 기후변화에 적응할 수 있는 능력에 한계가 있다. 따라서 이에 대한 관심을 가지고 사회 전체적으로 기후변화에 함께 적응해 나갈 수 있는 방안이 필요하다.

기후변화가 기업에 미치는 영향은 물리적인 영향이외에 다양한 요인이 존재한다. 기후변화가 기업의 경쟁력에 미치는 영향을 측정하였다. 기후위험, 기후성과, 시장기회, 정책협력의 4개 부문으로 측정한 결과 매출액이 클수록 기후변화에 잘 대응하고 있는 것으로 분석되고 있다(이명균과 김호석, 2010). 대기업에 비하여 상대적으로 매출액이 적은 중소기업이 기후변화 대응과 적응에 취약하다는 반증이다.

중소기업은 탄소발자국 제도(Carbon footprint system)를 통해 이를 바탕으로 기후변화에 대한 대응 및 적응전략이 될 수 있을 것으로 보인다(조성한과 남혜정, 2011). 탄소 발자국이란 제품의 생산 및 사람의 일상생활 등 인위적인 일련의 과정에서 발생되는 온실가스의 발생정도를 수치로 계량화하여 제품에 라벨로 부착하거나 표기하는 제도로써 제품을 구입하는 소비자에게 온실가스 배출을 인식시키고 온실가스 배출량이 적은 제품의 소비를 유도하여 시장 주도적으로 산업계의 온실가스 저감활동을 활성화하는데 그 목적을 두고 있다. 또한 탄소 발자국을 중소기업의 온실가스 감축 방안으로 제시하며 중소기업의 탄소 발자국 활용이 저탄소 제품의 시장경쟁력을 확보하는 동시에 지구환경개선에 기여할 수 있을 것이다.

기업들이 기후변화에 적극적으로 대응할 수 있도록 유도해야 할 것이다.

7.5.1.3 관광산업

관광부문에서는 기후변화에 대해 적극적으로 이용하고자 하는 움직임이 나타나고 있다. 관광부문은 기후변화에 따라 가장 극적으로 영향을 받는 부문이기 때문이다. 기후변화에 따른 해수면의 상승이 관광지를 사라지게 만드는 가능성이 상존하며, 과거의 관광지가 더 이상의 관광지로 기능을 할 수 없게 만드는 원인이 되고 있기 때문이다.

이에 따라 관광자원이 밀집되어 있는 지역은 기후변화를 적극적으로 역이용하여 기후변화에 대응하려는 움직임이 필요하다. 제주도는 기후변화로 인한 재해 발생 시 이를 이용하여 기후변화 등 변화와 관련된 마니아층과 자원봉사와 결합된 관광적응전략을 개발할 필요가 있다(이영진 등, 2011).

기후변화가 제주도에 미치는 영향을 분석하고 기후

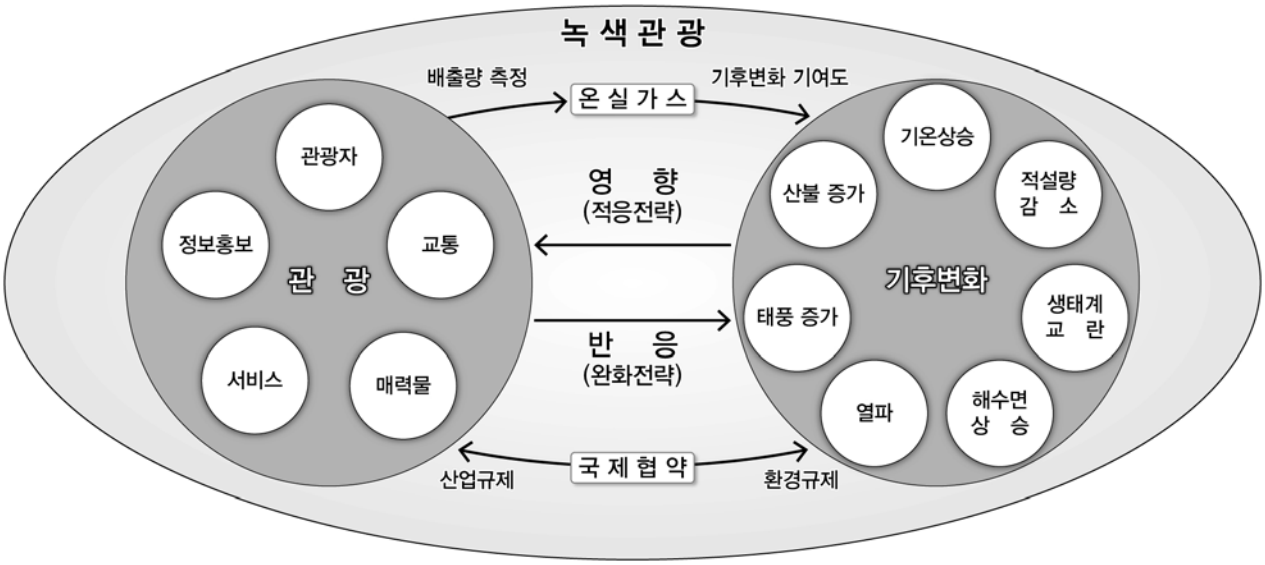


그림 7.8 관광부문 녹색관광(김남조 등, 2009).

변화 중에서 기후재난이 닥쳤을 경우 이를 적극적으로 활용하는 방안이 검토되었다.

관광산업에서 이루어진 연구에서는 기후변화와 관광이 상호간에 영향을 주고받는 것으로 인식하고 있으며, 기후변화에 대한 적응 전략으로서 저탄소관광을 제시하고 있다.

관광산업의 기후변화에 대응하기 위한 다양한 방안 제시가 필요하다. 향후 녹색관광이 추진해야 할 방향은 크게 '기후변화가 관광에 미치는 영향과 적응전략, 관광이 기후변화에 미치는 영향과 온실가스 완화전략, 관광부문에서의 온실가스배출량과 측정방법, 기후변화 관련 국제협약에서 비롯된 강제이행사항이 국내 관광산업과 관광객에 미치는 산업규제와 환경규제'로 방향을 설정하고 이에 관한 세부방안을 마련하는 것이 바람직할 것이다(이성은 등, 2010).

입지선정, 계획수립, 공사시행, 관리운영 등 관광자원개발 사업의 시행과정에 있어서 온실가스 감축 및 기후변화 적응을 위한 고려사항인 기후변화 대응 관광자원개발 지표를 통해 관광자원을 개발하려는 시도가 있어왔다(김성진, 2009).

국제적인 저탄소 녹색성장형 관광단지로 조성하기 위하여 문헌 및 사례분석과 전문가 조사, 델파이(Delphi) 기법 등을 사용한 방안이 마련 중이다. 지속가능한 토지이용, 녹색교통, 저탄소 녹색관광경영, 청정수자원, 에너지 자립부문에 대한 계획지표로 핵심지표 55개와 권장지표 77개를 확정하고 조성계획 수립단계, 실시계획 수립단계, 운영관리 단계별로 지표를 구분하여 추진하고 있다(김대관 등, 2010).

녹색관광은 여행과 관광에 있어서 지속가능한 개발 개념에 대한 응용이라고 평가하고, 자연환경 보호 및 보전이 가능한 관광산업이다. 또한 지구 온난화 현상과 도시화, 산업화로 인한 관광환경의 변화에 대응하기 위하여 녹색관광과 녹색경영이 요구된다(김재민과 김경희, 2011).

7.5.1.4 패션, 섬유산업

패션 및 섬유산업은 기후변화 중 기온상승에 적응하기 위한 의생활의 변화를 시도하고 있다. 여름이 길어지고 기온이 높은 날이 많아지는 기후변화에 적응하기 위한 수단으로 새로운 옷감 소재의 개발과 기존의 복장보다 시원함을 느낄 수 있는 스타일, 디자인의 변화를 추구하고 있다. 옷차림의 변화를 통해 실내온도를 2℃ 가량 낮출 수 있어, 에너지를 절감하고 기후변화에 적응할 수 있는 방안으로 활용되고 있다. 또한 패션 업계에서는 아쿠아 슈즈, 방수기능 가방 등의 상품에 반응생산시스템 구축을 시도하고 이를 통해 기후변화 대응 아이템 생산을 시작하고 있다(경기개발연구원, 2012).

표 7.6 홍수에 대한 도로의 등급별 적응대책(국토연구원, 2012)

등급	취약정도	적응대책
Ⅰ	안전	• 현재의 방재시설물 유지 · 관리
Ⅱ	주의	• 현재의 방재시설물 유지 · 관리 • 하수관거, 펌프장 등의 설계용량 증대 및 일부 방재시설물 신설방향 모색
Ⅲ	다소 위험	• 현재의 방재시설물 유지 · 관리 • 하수관거, 펌프장 등의 설계용량 증대 및 일부 방재시설물 신설방향 모색 • 하수관거, 펌프장, 사방시설물 등 다양한 방재시설물의 기능을 고려하여 연계운영 방안 검토
Ⅳ	위험	• 현재의 방재시설물 유지 · 관리 • 하수관거, 펌프장 등의 설계용량 증대 및 일부 방재시설물 신설방향 모색 • 하수관거, 펌프장, 사방시설물 등 다양한 방재시설물의 기능을 고려하여 연계운영 방안 검토 • 도로 및 주변지역에 우수유출저감대책(저류지, 녹지조성, 투수성포장 등) 확충
Ⅴ	매우 위험	• 현재의 방재시설물 유지 · 관리 • 하수관거, 펌프장 등의 설계용량 증대 및 일부 방재시설물 신설방향 모색 • 하수관거, 펌프장, 사방시설물 등 다양한 방재시설물의 기능을 고려하여 연계운영 방안 검토 • 도로 및 주변지역에 우수유출저감대책(저류지, 녹지조성, 투수성포장 등) 확충 • 장기적으로는 노선변경 방향 검토

기후변화에 따른 의상디자인과 소재의 변화를 널리 받아들이게 하기 위하여 다양한 정책 수단과 홍포캠페인이 필요하다는 점을 강조하고 있다. 기후변화에 적응하기 위한 다기능 패션 디자인에 관한 연구에서 기후변화로 나타나고 있는 패션의 변화로 경량감을 지닌 소재의 증가와, 환경을 의식한 버려진 옷이나 폐 원단 등 재활용소재와 오가닉 소재에 대해 관심이 기울여지고 있다(이현영과 박혜원, 2009). 폐기물 감축을 위한 다기능 패션으로서 소재를 다시 활용하는 자원 절약적인 소비패턴과 수공예적 기법을 활용한 느린 디자인으로 공정상의 낭비나 대량생산과 대량폐기의 문제점을 개선하고, 다기능성 디자인으로 실용성과 기능면의 유연성을 통해 기후변화에 대응할 수 있는 패션 디자인이 필요함을 제기하였다.

정부차원에서 기후변화 대응을 위하여 쿨맵시(cool-mapsi)라는 기후 적응형 비즈니스웨어를 개발하고 확산하는 생활문화 혁신운동을 시작하였다. 쿨맵시는 2009년부터 정부에서 대국민 공모를 통해 시원하고 멋스러운 의미인 '쿨(Cool)'과 옷 모양새를 의미하는 순우리말 '맵시'의 복합어로 시원하면서 예절, 건강, 패션까지 고려한 의미이다. 쿨맵시(cool-mapsi)를 착용하고 실내 냉방온도를 2℃ 낮출 경우 연간 160~290만 톤의 이산화탄소를 감소시키고 약 3,000억 원의 비용 절감이 예상되며, 쿨맵시가 활성화되기 위해서는 단순히 패션스타일의 변화에 그치지 않고 산업적 측면, 생활적 측면, 미의식적인 측면까지 전방위 영역의 혁신이 필요하다(이민선, 2010). 또한 쿨맵시의 확산은 개인의 자율성과 더불어 창의적인 조직문화를 구축하는데 큰 의미가 있을 것이다.

또 다른 연구에서는 기후변화에 따른 남성셔츠 디자인 개발 사례를 통해 기후변화 적응의 한 방법으로서 의생활을 저탄소형으로 변화시키는 것이 매우 효과적일 것으로 보았다. 하지만 시원한 남성 정장 캠페인 등 친환경 패션 문화의 확산이 충분히 이루어지지 않고 있으므로 친환경 패션이 활성화되기 위해서 시장성이 큰 마켓을 발굴하고 소비자의 요구에 부응하여 자연스러운 선택을 유도하게끔 디자인의 개발이 필요하다(이민선, 2011).

7.5.1.5 금융

금융부문에서는 주로 기후변화와 관련하여 금융상품 개발에 대한 부분이 다뤄지고 있다. 지구온난화에 대처하기 위한 방안으로 녹색금융을 들 수 있다. 금융시장에서 기온상승에 적응을 가능하게 하는 능동적 형태로 주목받고 있다. 서울을 중심으로 일별평균기온의 특성을 파악하여 기온 예측모형을 설정하고 기온옵션의 일종인 CDD옵션가격과 HDD옵션가격을 시뮬레이션 분석한 결과로 CDD 콜옵션과 HDD 풋옵션의 위험중립가치가 시간이 지남에 따라 상승한 것으로 나타났다(손동희 등, 2012). 이는 기온상승의 추세를 금융시장에서 정량적으로 파악할 수 있으며, Vasicek 모형에 기반한 CDD 콜옵션가치 분석 시 특정 행사가격 이상에서 옵션의 가치가 존재하므로 기온상승위험 회피를 위한 금융상품으로서 활용이 가능할 것으로 보인다. 끝으로 파생금융상품을 통해 기후변화에 대한 녹색금융 측면의 대응 노력을 강화할 필요가 있다.

7.5.1.6 교통

교통부문에서는 도로와 철도의 기후변화 영향을 분석하였다(국토연구원, 2012). 먼저 도로는 하천변 저지대, 급경사지, 불투수율이 높은 지역이 취약지역이다. 도로교통에 적용될 수 있는 기후위험은 홍수, 폭염, 폭설, 해수면 상승이다. 폭염은 태양복사열 노출이 심한 도심도로에 영향을 미치며 지반침하 교통사고의 위험증가가 나타날 수 있다. 폭설에 취약한 곳은 구릉지 도로, 산악이고 교통사고의 위험증가, 교통두절이 나타난다. 홍수와 해수면 상승으로 침수, 기능상실이 나타날 수 있고 해안변과 하구역 저지대가 취약지역으로 지목되었다.

철도는 홍수와 폭염, 폭설에 영향을 받는다. 홍수와 폭설은 도로와 같은 영향이 발생할 것으로 예측되나 폭염의 경우 레일이 휘거나 철도전선 처짐현상, 사고위험 증가가 나타날 것으로 보았다. 기후변화로 교통부문에서는 장기적으로 취약지역에 대한 노선변경을 검토해

표 7.7 홍수에 대한 철도의 등급별 적응대책(국토연구원, 2012)

등급	취약정도	적응대책
I	안전	• 현재의 방재시설물 유지 · 관리
II	주의	• 현재의 방재시설물 유지 · 관리 • 하수관거, 펌프장 등의 설계용량 증대와 역사 또는 선로에 빗물유입 방지시설물 신설방향 모색
III	다소 위험	• 현재의 방재시설물 유지 · 관리 • 하수관거, 펌프장 등의 설계용량 증대와 역사 또는 선로에 빗물유입 방지시설물 신설방향 모색 • 하수관거, 펌프장, 빗물유입 방지시설물, 사방시설물 등 다양한 기존 및 신규 방재시설물 연계운영방안 검토
IV	위험	• 현재의 방재시설물 유지 · 관리 • 하수관거, 펌프장 등의 설계용량 증대와 역사 또는 선로에 빗물유입 방지시설물 신설방향 모색 • 하수관거, 펌프장, 빗물유입 방지시설물, 사방시설물 등 다양한 기존 및 신규 방재시설물 연계운영방안 검토 • 철도 주변지역에 저류지, 녹지조성 등 우수유출저감대책 확충 검토
V	매우 위험	• 현재의 방재시설물 유지 · 관리 • 하수관거, 펌프장 등의 설계용량 증대와 역사 또는 선로에 빗물유입 방지시설물 신설방향 모색 • 하수관거, 펌프장, 빗물유입 방지시설물, 사방시설물 등 다양한 기존 및 신규 방재시설물 연계운영방안 검토 • 철도 주변지역에 저류지, 녹지조성 등 우수유출저감대책 확충 검토 • 장기적으로 노선변경 검토

야 할 것으로 보았다. 또한 기후변화에 따른 영향을 5단계로 분류하고 각 단계에 따른 대응방안을 제시하였다. Ⅰ등급은 안전이고 Ⅴ등급은 매우 위험 등급이다.

철도는 홍수, 폭염, 폭설에 영향을 받는 것으로 나타났으며, 이에 대한 적응 대책을 제시하였다. 도로와 같이 5등급으로 구분하였다.

7.5.2 기후변화와 에너지 적응 방안

에너지 부문도 산업과 같은 형태이다. 기후변화가 에너지 부문에 전반적으로 영향을 미칠 것이라는 부분에 동의하나 그 해결방안에 대해서는 에너지원보다는 발전원에 중심을 두고 있는 상황이다. 전통적인 에너지원인 석유, 전기, 가스, 석탄 등의 에너지에서 지속가능한 에너지원으로서 신재생에너지, 효율을 높이기 위한 집단에너지시설에 대한 관심이 높아지고 있다.

전통에너지인 도시가스 측면에서도, 기후변화가 에너지에 큰 영향을 줄 것이라는 인식은 있으나, 그에 대한 대응이 부족한 실정이다. 적응방안으로 기후변화 대응 매뉴얼을 제정하고 연료전지, 태양광 등 향후 새로운 공급시스템 구축이 도시가스에서도 가능하도록 전략적 R&D에 노력할 필요가 있다(강희정, 2014).

또한 정부차원에서는 에너지 관련 대국민 홍보 사업의 일환으로 “100W 줄이기! 착한바람” 운동을 실시하며 이상기후에 따른 전력 공급의 불안정과 수요 급증에 대비하기 위한 정책을 도입하고 있다(기상청, 2014).

7.5.2.1 신재생 및 대체에너지

대체에너지 부문에서 기후변화에 적응하기 위한 방안으로 제시된 사례는 연료에너지 분야이다. 정부는 신재생에너지 사업 육성을 통해 기후변화에 적응하기 위한 수단으로 적극 활용하고 있다.

정부의 신재생에너지 산업 육성의 일환인 가정용 연료전지에 대한 경제성 평가와 민감도를 분석하였다. 대표가정을 서울의 난방면적 100m²인 아파트로 전제하고, 국내에서 상용화된 1KWh급 가정용 연료전지설비를 기준으로 할 때, 연료전지가 갖는 열병합 시스템의 특성을 감안하여 시간대별 열, 전기부하를 산출하고 열추종, 전기추종방식과 이에 따른 복합추종방식을 시뮬레이션한 결과 복합추종 시 연간 1,110,955원의 변동비기 발생하며 연간이용 평균율은 61.6%로 추정된다(류승현과 김수덕, 2011).

연료전지 이용 시 연간 이산화탄소 저감량은 557 kgCO_2/yr로 분석되었다. 또한 B/C ratio의 결과는 0.44로 경제성이 없는 것으로 분석되었으며, 가격조건을 검토결과 할인율 5.5%인 경우 현재 비용의 55%이상의 가격하락이 필요할 것이다(류승현과 김수덕, 2011).

지열에너지는 최근 EGS 기술의 발전으로 부존가능성, 높은 청정도, 연중 24시간 전력 및 난방에너지 공급가능성 등 고유의 장점이 있다. 신재생에너지는 화석연료와 달리 환경 친화적이라는 장점을 갖는 동시에 산업의 특성상 기후변화에 가장 효과적인 대비책이 될 것이다(최인호, 2011).

바이오에너지도 하나의 방안이 될 수 있다(진상현과 조성훈, 2008). 축산분뇨 등을 활용한 바이오에너지를 활용한다면 농촌지역의 축산폐기물을 자원으로 활용하여 기후변화에 적응할 수 있는 방안이 될 것이다.

에너지부문에서는 기후변화에 대응하기 위하여 해외사례의 분석과 이를 통한 국내 도입방안을 제시하는 것이 필요하다. 대표적으로 환경정책에 있어 에너지 효율을 높이기 위한 방안으로 지역난방사업을 활발하게 이용하고 있는 지역을 대상으로 집단에너지 사업의 운영사례 및 정책의 시사점을 도출하여 국내에 적용할 필요가 있다(양지연, 2011). 유럽의 집단에너지 사업은 1954년 유럽 난방공급사업자 연합(UNICHAL: the Union of European Heat Distributors)의 등장과 함께 시작되었다. 1950년대에 원자력을 이용한 전력 생산 방식이 도입되었으나 원자력이 가지고 있는 치명적인 위험 요인으로 인해 집단에너지 방식이 더 주목받기 시작하였고, 현재 유럽의 집단에너지시스템은 전기발전 후의 여열을 재활용하고 지열과 바이오매스 등의 신재생에너지원을 사용하고 있으며 미미하지만 꾸준히 그 비중을 늘리고 있다고 보았다. 연구의 시사점으로는 첫째, 에너지 기업들이 적극적인 기술혁신의 노력을 통해 여열 및 소각열의 사용을 보다 적극적으로 활용 할 필요가 있으며 신재생에너지원의 비중을 늘리려는 노

력이 필요함을 언급하였고 둘째, 정부는 규제뿐만 아니라 에너지 세금, 세제 혜택, 보조금 등의 다양한 정책적 수단을 활용하여 기술혁신을 통한 고효율 설비개발, 신재생에너지 개발 및 사용 확대를 유도하여야 할 필요성이 있다.

7.5.2.2 에너지효율 향상

기후변화에 적응하기 위한 수단의 일환으로서 에너지효율을 높이는 방안이 있다. 에너지효율을 높이는 방안을 위한 법적 제도화 논의와 분산형 전원의 확산이 논의되고 있다(허은녕, 2011).

분산형전원이란 기존의 전력회사의 대규모 집중형 전원과는 달리 소규모로서 소비지 근방에 분산배치가 가능한 전원을 일컫는다(에너지경제연구원, 2009). 분산전원은 산업사회의 급증하고 있는 전력수요에 대응하여 에너지 안정성을 확보하고 친환경적인 에너지를 생산하는 것과 같은 환경적 측면의 이점뿐만 아니라 전력수급의 지역간 불균형 해소 등 다양한 효과를 기대할 수 있는 전력공급시스템으로 평가되고 있다. 신재생에너지원의 경우 전력시장이 필요로 하는 자원수급의 적정성을 확보하기가 어려우며 일사량, 풍속 등 외부적 조건의 영향을 크게 받고, 집단에너지원의 경우 기술적 측면의 효율성에 논란이 있음에도 불구하고 정부가 지속적인 지원을 진행하고 있다.

산업계의 에너지효율 향상 기반 대응전략을 주제로 합리적 에너지효율 지표 개발 및 법제화 방안에 대한 검토가 필요하다.

7.6 결론

기후변화는 산업과 에너지 분야에 직·간접적으로 영향을 미치며, 그 영향은 개인 및 국가경제에 막대한 피해를 입힐 수 있다.

기후변화로 인해 발생하는 영향과 적응, 대응에 산업과 에너지는 많은 영향을 주고 받는 관계이다. 기후변화는 산업과 에너지에 동시에 영향을 미치고, 에너지는 산업에 산업은 다시 에너지에 영향을 미치는 구조이다.

그러므로 각 산업의 차원에서 기후변화의 영향을 완화시킬 수 있는 대응책을 마련하고, 변화된 기후에 적응하여 그 피해를 최소화하는 연구가 필요하다. 또한 이러한 연구에 앞서 각 산업에서 나타날 수 있는 다양한 기후변화의 영향과 기업 및 산업이 기후변화에 대응·적응하고 있는 정도에 대한 진단이 이루어져야 한다.

우리나라는 현재 산업부문에서 기후변화 위험평가 및 대응·적응에 대한 연구가 진행되고 있으나, 연구가 활발하게 이루어지지 않고 있다. 뿐만 아니라 산업 내에서의 연구수준 정도에 있어서도 큰 차이가 나타나 관광, 레저, 건설 등의 산업 부문에서는 비교적 많은 연구가 이루어지고 다양한 기후변화 적응 방안을 제시하고 있는 반면 유통, 식품, 중소기업 등의 산업부문에서는 선행된 연구가 적으며 연구에서 제시한 기후변화에 대한 적응·대응 방안도 비교적 제한적이다.

특히 산업부문의 경우 다양한 분야의 많은 업종으로 구성되어 있음에도 불구하고, 각 산업의 특성을 반영한 연구는 전반적으로 부족한 실정이며, 산업의 종류와 특성을 반영한 연구가 추진되어야 할 것이다. 동일한 산업 내에서도 산업의 규모, 입지, 생산방식 등에 따라 기후변화 영향의 형태와 정도가 차이가 상이하고, 산업부문은 다수의 전·후 산업이 얽혀 있는 매우 복잡한 구조를 취하고 있으므로 어떤 특정 산업에서의 기후변화 영향이 다른 산업에 영향을 미칠 가능성도 매우 크다. 따라서 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 연구, 산업의 구조를 반영한 기후변화의 영향 평가 등 향후 다양한 연구와 타당하고 현실적인 기후변화 적응 방안의 제시가 필요하다.

에너지부문도 산업과 크게 다르지 않다. 기후변화가 에너지 소비에 큰 영향을 미치고 있지만 에너지 부문의 연구는 아직 걸음마 단계이다.

이에 대한 활발한 연구가 이루어져 기후변화로 발생하는 영향과 적응방안에 대한 제시가 이루어져야 할 것이다.

7.7 참고문헌

강희정, 2014: 천연가스산업의 기후변화 적응대책에 대한 연구, 한국경영공학회지 19(1), 93-103.

경기개발연구원, 2012: 기후변화에 따른 부의 변화, 이슈&진단 69호.

국립환경과학원, 2008: 기후변화 적응관련 신사업 육성방안 마련연구: 기초연구.

국토연구원, 2012: 기후변화에 따른 국토취약성 분석과 적응방안 -국토민감성 분석과 향후 정책방향-.

국토해양부, 2009: 기후변화 대응 건축물의 온실가스 감축방안 연구, 한국건설기술연구원, 223.

국토해양부, 2010: 기후변화대응 철도분야 온실가스 저감방안 연구, 한국철도기술연구원, 112.

권오상, 노재선, 서영, 2012: 기상이변에 따른 농업생산 손실의 경제적 효과: 투입산출 및 CGE 분석, 농업경제연구, 53(2), 1-31.

기상청, 2012: 2011년 이상기후 보고서, 관계부처 합동, 159pp.

기상청, 2013: 2012년 이상기후 보고서, 관계부처 합동, 162pp.

기상청, 2014: 2013년 이상기후 보고서, 관계부처 합동, 168pp.

김경신, 윤순진, 2010: 틀짓기 효과에 따른 기후변화 대응책으로서 원자력발전에 대한 수용도 변화와 정책적 함의에 대한 탐색적 연구, 환경정책, 18(1), 91-129.

김광득, 2012: 신재생에너지자원평가 및 활용도구 자원지도시스템, 전력전자학회지, 17(4), 44-49

김남조, 2009: 기후변화에 대응하는 녹색관광의 연구과제 모색, 관광학연구, 33(4), 85-104.

김대관, 성민정, 김학준, 2010: 기후변화 대응 새만금 국제관광단지 계획지표 개발에 관한 연구, 관광・레저연구, 22(6), 139-158.

김성진, 2009: 기후변화에 대응한 관광자원개발 지표의 개발, 관광학연구, 33(7), 227-244.

김수영, 변병설, 2014: 관광자원의 기후변화 취약성 평가에 관한 연구, 국토지리학회지, 48(1), 109-118.

김윤정, 이동근, 서창완, 류지은, 채여라, 백경혜, 배채영, 2013: 산업단지의 입지적 요건을 고려한 기후변화 취약성 평가, 한국환경영향평가학회지, 22(6), 627-637.

김재민, 김경희, 2011: 기후 변화에 대응한 녹생관광의 탐구, 호텔리조트연구, 10(2), 31-46.

남경목, 김주영, 홍원화, 2010: 도시지역 기후변화 재해시 에너지 수급에 대한 안전가구 및 안전지구 도입에 관한 연구, 대한건축학회 논문집, 26(1), 369-377.

류문현, 조승국, 김정인, 2012: CGE모형을 이용한 자연재해의 경제적 파급효과 분석, 환경정책, 20(1), 1-21.

류승현, 김수덕, 2011: 기후변화 대응을 위한 가정용 연료전지 시스템의 시간대별 최적화 운전방안 제시와 경제성 평가 및 민감도 분석, 에너지경제연구, 10(1), 25-48.

류하늬, 김규남, 김연배, 2011: 에너지 안보 및 기후변화 대책을 고려한 발전구성비의 도출: 정책 목표간 상호보완성을 중심으로, 자원・환경경제연구, 20(4), 761-796.

맹다혜, 장동호, 2011: 해운대 지역의 기후변화에 의한 해일고 변동에 따른 침수피해 평가, 한국지형학회지, 18(4), 141-152.

문화관광부, 2009: 저탄소 녹색 관광자원개발 가이드라인, 한국문화관광연구원, 45.

박성순, 강공언, 박비오, 2012: 익산산업단지 온실가스 감축 중・장기 로드맵 수립, 한국환경분석학회지, 15(1), 55-60.

배덕효, 이병주, 정일원, 2008: 기후변화에 의한 건설시공환경 변화 분석, 대한토목학회 논문집, 28(4D), 513-521.

배채영, 오윤경, 백경혜, 최광림, 이시형, 이동근, 2013: 산업부문 기후변화 취약성 평가지표 및 가중치 연구 -석유 및 자동차 산업을 중심으로-, 대한국토・도시계획학회지, 48(2), 313-328.

손동희, 임형준, 전용일, 2012: 기후변화의 위험헷지와 기온파생상품, 자원・환경경제연구, 21(3),

465-491.
손지언, 이승재, 김주영, 김창균, 2010: 기후변화에 따른 교통불편익산정에 관한 연구, 한국방재학회 논문집, 10(3), 45-52.
신범철, 황윤섭, 2013: 기후변화가 일본인의 한국 관광수요에 미치는 효과 분석, 무역학회지, 38(2), 179-204.
신언명, 2011: 기후변화에 따른 유통업의 위기관리 연구: 사업연속성계획의 활용, 한국유통경영학회지, 14(2), 85-105.
심홍석, 어성윤, 2009: DEA 모형을 이용한 기후변화대응 국내 화력발전소의 경영효율성과 환경효율성 분석, 한국에너지공학회, 44.
안영환, 오인하, 2010: 에너지 부문의 기후변화 적응전략에 대한 탐색적 연구, 에너지경제연구, 9(2), 153-185.
양지연, 2011: 기후변화협약에 따른 유럽연합의 대응정책과 시사점: 집단에너지 사업을 중심으로, 유럽연구 29(2), 193-216.
에너지경제연구원, 2009: 기후변화 대응을 위한 분산형 전원의 경쟁력 강화전략.
이관호, 2008: 건물 및 재생에너지에 관한 미래의 기후변화 예측, 한국태양에너지학회 논문집, 28(1), 57-64.
이관호, 2013: 기후변화 시나리오에 따른 건물부분의 영향, 한국태양에너지학회 논문집, 33(2), 64-69.
이동욱, 부양수, 2011: 해수면 상승 시나리오에 따른 제주연안지역 건설시설물의 영향 분석, 대한토목학회 논문집, 31(2), 267-274.
이명관, 2008: 인문생태와 산업의 관점에서 본 기후변화의 영향, 한국학논집, 36, 91-138.
이명균, 김호석, 2010: 기업경쟁력에 미치는 기후변화의 영향: 경쟁력 결정요인과 측정지표 개발, 자원・환경경제연구, 19(2), 383-411.
이민선, 2010, 쿨맵시 남성복 비즈니스웨어 경향에 관한 연구, 한국패션디자인학회지, 10(4), 69-81.
이민선, 2011: 기후변화에 따른 남성셔츠 디자인 개발 사례 연구, 한국디자인문화학회지, 17(4), 399-408.
이성은, 최환석, 2010: 저탄소 관광의 개념적 프레임워크 개발 -개념화 과정을 통한 개념정의와 측정방법 검토, 관광경영연구, 42, 109-129.
이수연, 최진무, 2011: 해수면 상승에 따른 경제적 손실 분석-부산시 해운대구를 사례로-, 대한지리학회지, 46(5), 597-607.
이영진, 송영민, 윤지환, 2011: 기후변화에 따른 제주도 관광 분야 적응전략에 대한 탐색적 연구 -진지성여가, 전문화 이론, 통제소재 관점을 중심으로-, 관광연구저널, 25(4), 313-328.
이은영, 정순희, 2009: 기후변화 대응을 위한 에너지 효율화 정책 연구, 한국전과정평가학회지, 11(1), 13-27.
이종호, 2010: 기후변화대처를 위한 도시에너지 관리, 한국사회과학연구, 32(2), 93-116.
이중우, 고광근, 전진환, 2010: 기후변화에 따른 유통산업의 핵심 기상요인과 기업의 경제적 효율성, 한국환경과학회지, 19(6), 787-797.
이지영, 강인준, 2010: GIS 기술을 활용한 태양광시설 입지선정에 관한 연구, 한국지형공간정보학회지, 18(2), 99-105.
이현영, 박혜원, 2009: 다기능 패션디자인에 관한 연구 -기후변화 및 환경의식을 중심으로-, 패션비지니스, 13(2), 123-135.
임근욱, 권영아, 권원태, 부경온, 2010: 골프시즌에 대한 기후 변화의 영향, 관광・레저연구, 22(5), 399-417.
조리나, 2009: 기후변화가 겨울철 관광산업에 미치는 영향 -해외연구 동향분석, 기후연구, 4(2), 118-127.
조성한, 남혜정, 2011: 기후변화와 중소기업의 대응전략, 중소기업연구, 33(4), 95-114.
지식경제부, 2010a: 기후변화대응을 위한 신재생에너지 로드맵 및 지원체계 연계 전략, 에너지경제연구원, 9.
지식경제부, 2010b: 스마트그리드의 효율적 구축과 기후대응방안 연구, 아주대학교 산학협력단, 195.

지식경제부, 2010c: 중소기업 기후변화 대응 실태조사, 한국생산성본부, 166.

지식경제부, 2010d: 기후변화대비 산업계 에너지효율 증진방안 연구, 에너지경제연구원, 86.

지식경제부, 2011: 산업계 기후변화대응 인식확산 방안 연구, 연세대학교 산학협력단, 10.

진상현, 조성훈, 2008: 축산분뇨를 이용한 바이오에너지 사업의 경제적 타당성에 관한 연구, 환경정책, 16(1), 87-113.

최인호, 2011: 국내 심부 지열에너지 개발의 제반 법적・제도적 문제점, 환경법연구, 33(1), 253-309.

최광림, 장현숙, 임은정, 문승재, 강영라, 2009: 산업계 기후변화적응전략 수립연구 -임해산업단지를 중심으로-, 한국전과정평가학회지, 10(1), 63-71.

최진유, 이규세, 배현웅, 박범호, 임남형, 2010: 기후변화에 대비한 장대레일 온도특성 연구, 한국철도학회 논문집, 13(2), 179-185.

한국교통연구원, 2012: 2009년 교통혼잡비용 추정과 추이 분석, 79.

한국보건사회연구원, 2011: 식품안전 환경변화에 대응하기 위한 국가 아젠다 개발 등 추진전략 수립, 한국보건사회연구원.

허은녕, 2011: 국내・외 에너지환경 변화와 우리나라 에너지 믹스 전략 수립과정에의 시사점, 에너지경제연구, 10(2), 187-205.

허인혜, 이승호, 2008: 스키장 초기 제설과 기후 변화에 관한 연구 -용평스키장을 사례로-, 기후연구, 3(2), 55-63.

허인혜, 이승호, 2010: 기후변화가 우리나라 중부지방의 스키산업에 미치는 영향 -용평・양지・지산 스키리조트를 사례로-, 대한지리학회지, 45(4), 444-460.

허인혜, 이승호, 2012: 미래 기후자료에 의한 한국의 지역별 스키산업 전망 -A1B 시나리오를 이용하여-, 기후연구, 7(1), 69-81.

홍준석, 박성환, 박중구, 2012: 한국 기후산업의 경제적 파급효과에 관한 연구 -신재생에너지산업을 중심으로-, 에너지공학, 21(1), 109-117.

환경부, 2009a: 기후변화 대응 및 에너지 절약을 위한 친환경 운전문화 확산 방안 마련 연구, 대림대학 산학협력단, 172.

환경부, 2009b: 건축물 부문의 기후변화 대응방안 연구, 대한주택공사 주택도시연구원, 171.

황윤섭, 이윤, 심창섭, 최영준, 2014: 기후변화가 한국 관광경영에 미치는 영향, 기업경영연구, 21(3), 57-70.

제 8 장 보건

8.1 서론

기후변화가 건강에 미치는 영향은 직접적인 경로로는 극단적인 기상재해나, 폭염, 해수면상승, 강수량 등의 기상패턴의 변화로 인해 발생하며, 간접적으로는 물, 공기, 식량의 질과 양, 생태계, 농업, 주거 및 기반시설의 변화를 통해 발생한다. 이러한 직·간접적인 건강영향은 사망, 질병, 장애 및 고통의 증가 등으로 나타날 수 있다(그림 8.1).

이처럼 기후변화로 인한 건강영향은 다양한 경로를 통해 일어난다. 감염병 매개체 분포의 변화, 꽃가루 알레르기의 계절적 분포의 변화, 영양실조와 후천성 장애의 증가, 어린이 성장과 발달에 대한 영향, 폭염, 홍수, 태풍, 화재, 가뭄 등으로 인한 질병과 사망의 증가, 상해로부터 고통 받는 사람들의 증가, 설사나 말라리아, 뎅기열 같은 질병의 증가, 오존과 관련된 심혈관계 질병 유병률과 사망률의 증가 등이 기후변화의 건강영향이라고 할 수 있다.

IPCC 5차 보고서에 따르면 우리나라를 포함한 아시아 지역은 홍수로 인한 기반시설 피해, 폭염관련 사망, 물과 식량 부족이 미래의 주요한 기후변화 위험이 될 것으로 전망하고 있다. 이로 인해 사망, 부상, 질병 악화 등 건강피해의 위험이 특히 아시아 개도국에 영향을 미칠 것으로 예측하고 있다(IPCC, 2014).

국내의 경우, 기후변화에 의한 건강영향 피해가 폭염, 기상재해, 알레르기, 감염병 등 다양한 분야에서 나타나고 있음이 최근 연구들을 통해 규명되고 있다.

기후변화 건강영향의 연구들을 종합평가한 결과, 폭염분야는 다른 분야에 비해 상대적으로 연구들이 활발히 진행되었다. 고온현상과 사망률 등 구체적인 건강영향과의 상관성, 열관련 질환과 온도와의 관계를 보는 연구가 진행되고 있었다.

기상재해분야는 주로 재해 특성에 따른 사망과 손상 등의 피해규모와 변화추세를 파악하는 연구 등이 보고되었으며, 그밖에도 사망원인 및 감염병, PTSD 등 간접적인 건강영향을 파악하는 연구가 시작되고 있다.

대기질과 알레르기 분야는 기후변화에 따른 꽃가루, 알레르기원, 대기오염의 변화를 관찰하고 이들이 천식, 뇌졸중, 알레르기 발생 및 악화에 미치는 관련성을 확인하는 연구들이 진행되고 있다.

곤충 및 설치류 매개, 수인성 및 식품매개 감염병 분야는 기후요소에 따른 질환의 발생 규모를 파악하고, 특히 기후변화에 따른 취약성을 평가하기 위한 연구가 시도되고 있다.

기타 적응역량, 적응전략 수립, 취약인구집단 관리 등에 대한 연구와 기후변화로 인한 사회보건 분야의 취약성을 평가하는 연구들도 진행되는 등 1차 기후변화 평가보고서에 비해 관측된 영향 및 영향 예측의 신뢰성이 증가하였다.

8.2 관측된 영향

8.2.1 폭염

기후변화는 지구온난화라고도 하는데, 이는 다시 말해 여름철의 기온 역시 더욱 증가할 수 있음을 의미한다. 기온 증가에 의한 건강영향은 일정 온도까지는 잘 나타나지 않다가 일정 온도를 넘어서면 그 영향의 크기가 급격히 증가하는 양상으로 나타나는 경우가 많다. 건강피해가 급증하기 시작하는 역치온도를 넘어서는 폭염은 지금까지 꾸준하게 발생빈도가 증가하고 있으며, 앞으로도 더욱 증가할 것으로 예측된다.

폭염은 일반적으로 주로 일 최고기온을 기준으로 정의되기는 하지만, 일 평균기온이나 일 최저기온 등이 사용될 수도 있고 기온 외에도 열지수(HI), 일별최고기온, 온열쾌적감(PMV) 등 여러 가지가 사용될 수 있다(김지영 등, 2006).

그러나 이중 특정 지표가 우위에 있는 것은 아니며 각 지역의 기상상황, 분석 대상이 되는 건강 영향의 특성 등을 고려한 온도 변수를 선택하는 것이 필요하다(Kim et al., 2012).

폭염이 사람의 건강에 미치는 영향은 열에 의한 손상과 같이 직접적인 영향과, 기저 질환의 악화, 대기질

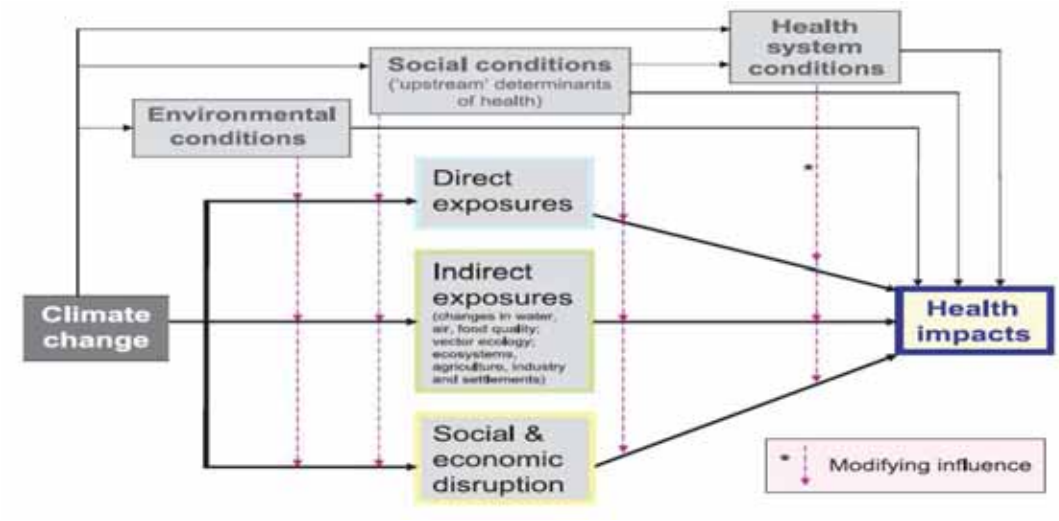


그림 8.1 기후변화로 인한 건강영향 경로(IPCC, 2007)

악화 등과 같은 간접적인 영향으로 나누어질 수 있다(조수남 등, 2012, 양지훈과 하종식 등, 2013, 유성진 등, 2012). 특히 사망은 이러한 직·간접적인 영향이 모두 작용하여 나타날 수 있는데, 직접적인 영향으로 열사병 등 열 관련 질환에 의한 사망 사례가 감시체계를 통해 집계된 바 있다(조수남 등, 2012).

높은 기온이 심혈관계 질환 등의 기저질환에 어떻게 영향을 끼치는지에 대한 명확한 규명은 없지만, 온도 증가에 따라 체온 증가 및 혈압 변화가 발생하고(Kim et al., 2012), 노인의 경우 심박수, 호흡 양상 뿐 아니라 근기능 역시 변화한다는 보고가 있는 등, 높은 기온에 따른 생리학적 변화와 순환기계 부담 증가가 있을 것으로 생각된다(박석 등, 2010).

많은 연구에서 이러한 사망의 증가에 대한 폭염의 영향을 정량적으로 평가하기 위한 노력이 있었다. 국내 7개의 대도시에서 온도가 높은 기간 동안의 사망자가 평소보다 4.1% 증가하였으며 서울에서는 특히 8.4%까지 증가하는 것을 보고하였고(Son et al., 2013), 최고 기온이 1℃ 증가함에 따라 서울시 총사망률이 2.99% 증가한다는 것을 밝혀내었다(Kim et al., 2011).

이러한 현상은 인구집단의 특성에 따라 달라질 수 있다. 역치 온도 이상에서 1℃가 증가하면 사망률이 5.36% 증가하며 이러한 현상은 65세 이상에서, 또한 초여름보다 늦여름에 더욱 잘 나타난다고 보고하고 있다(양지훈과 하종식 등, 2013). 1994년 여름에 발생한 폭염 기간 동안에는 65세 이상의 노인에서 사망이 30% 이상 증가한 것으로 나타났으며(최광용, 2010), 심장질환자 역시 역치 온도 이상에서 1℃ 증가 시 사망률이 28.4% 가량 증가하는 것으로 보고되었다.

폭염은 사망 뿐 아니라 질병 발생의 증가도 야기할 수 있다. 가장 직접적으로는 열 관련 질환이 있을 수가 있다. 열 관련 질환이란 고온이 직접적인 발생 원인이 되는 열사병, 열탈진, 열부종, 열경련, 열실신 등을 일컫는다. 이에 대비하여 질병관리본부는 2011년도부터 응급의료기관을 기반으로 열 관련 환자의 피해 현황을 집계하였으며, 이를 통해 2011년도 폭염 기간 동안 온열 손상 환자가 하루 15.7명으로 평소보다 4배 이상 크게 증가하였음을 밝혀내었다(조수남 등, 2012). 또한 2012년 발생한 폭염 기간 동안 본 감시체계를 통해 보고된 환자 자료를 분석한 결과, 온열 손상 환자는 역치 온도인 일 최고 온도 31.2℃ 이상에서 69.1%씩 증가하는 것으로 나타났다. 각 시도별 역치 온도 및 역치 온도 이상에서의 상대적 위험도는 표 8.1과 같다(Na et al., 2013).

열관련 질환 중 열사병, 열탈진은 다른 열 관련 질환에 비해 중증의 경과를 보이는데, 2012년 폭염 시 전국 14개 응급의료기관 표본 감시를 통해 수집한 중증 열 관련 질환자의 분석을 통해 전국 발생 규모를 추정한 결과 2012년 하절기동안 약 894명의 중증 열 관련 질환자가 발생한 것으로 추정되었다(질병관리본부, 2012).

표 8.1 각 시도별 온열 손상에 대한 역치 온도 및 상대적 위험도(Na et al. 등, 2013)

		위도	역치온도(℃)	상대적 위험도	95% CI	p value
특별시·광역시			32.2	1.704	1.618~1.794	<0.001
	서울	37 ˚ 34 ´	33.9	1.915	1.751~2.094	<0.001
	인천	37 ˚ 28 ´	33.8	1.725	1.500~1.984	<0.001
	대전	36 ˚ 22 ´	31.4	1.675	1.434~1.957	<0.001
	대구	35 ˚ 53 ´	33.9	1.583	1.375~1.823	<0.001
	울산	35 ˚ 33 ´	33.6	1.329	1.165~1.517	<0.001
	광주	35 ˚ 10 ´	32.8	1.531	1.336~1.754	<0.001
	부산	35 ˚ 06 ´	33.1	1.610	1.381~1.876	<0.001
지방도			30.5	1.687	1.626~1.751	<0.001
	강원	37 ˚ 54 ´	28.8	1.527	1.326~1.757	<0.001
	경기	37 ˚ 16 ´	31.9	1.799	1.658~1.953	<0.001
	충북	36 ˚ 38 ´	30.9	1.655	1.470~1.863	<0.001
	충남	36 ˚ 22 ´	34.0	1.706	1.552~1.876	<0.001
	경북	35 ˚ 53 ´	31.4	1.663	1.483~1.865	<0.001
	전북	35 ˚ 49 ´	31.8	1.672	1.476~1.894	<0.001
	경남	35 ˚ 10 ´	31.3	1.678	1.496~1.883	<0.001
	전남	35 ˚ 10 ´	30.0	1.698	1.569~1.837	<0.001
	제주	33 ˚ 30 ´	29.6	1.803	1.375~2.364	<0.001

이러한 직접적인 피해 외에도 폭염은 대기오염을 악화시켜 건강 피해를 일으킬 수 있는데, 특히 고온은 오존 농도의 증가를 유발할 수 있고 이는 사망자 증가와 관련이 높다는 연구가 있다(배현주 등, 2010).

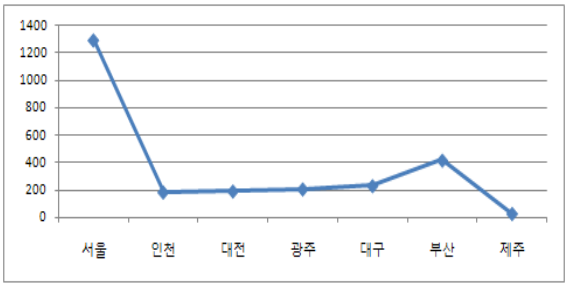


그림 8.2 전국 7대 광역대도시의 폭염에 따른 잠재 위험 인구밀도(인/km²)(환경부, 2009)

이러한 폭염의 건강영향은 여러 사회적 변수에 의해 달라질 수 있다. 특히 우리나라는 다른 나라에 비해 고층·고밀도의 개발이 이루어져 녹지가 상대적으로 부족하고 바람통로가 차단되어 폭염에 취약하다고 생각할 수 있다. 실제 우리나라 대도시의 경우 도시구조와 건물밀집도, 인구밀도 등이 폭염의 영향을 심화시킨다는 보고가 있고(환경부, 2009), 서울에서는 녹지가 없는 지역이 도시 외곽에 비해 최대 4℃까지 차이가 날 수 있는 것으로 조사되었다(최광용, 2010). 이러한 특성을 생각할 때, 우리나라의 도시 지역은 폭염에 매우 취약하다고 볼 수 있는데, 인구밀도가 2,600(인/km²) 이상인 서울, 인천, 대전, 광주, 대구, 부산 등 6개 대도시에서 폭염에 의한 잠재 위험인구는 대부분 200명(/km²) 이상이었으며 특히 서울은 1,295명(/km²), 부산은 420명(/km²)으로 높게 나타났다(환경부, 2009, 그림 8.2).

반면, 고온에 의한 사망자의 증가가 점차 감소하고 있으며 이러한 현상이 심혈관계 질환 관련 사망에서 더 두드러지게 나타난다는 연구를 토대로 볼 때(양지훈과 하종식 등, 2013), 폭염에 대한 적응정책, 의료 환경 및 기술의 발달 등 역시 폭염의 건강 영향을 결정하는 요인이 될 수 있는 것으로 생각할 수 있다.

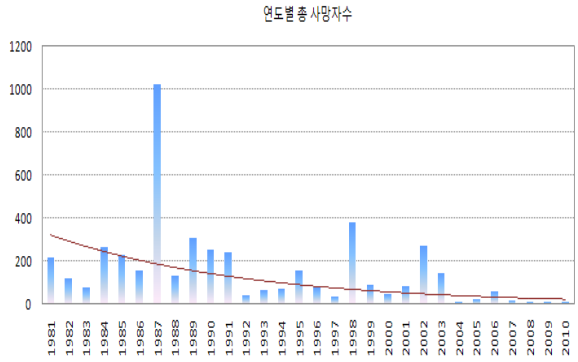


그림 8.3 연도별 기상재해에 따른 총사망자수(장재연 등, 2008)

표 8.2 재해우형별 발생건수, 사망, 재해당 사망자수(1981~2010년)(장재연 등, 2008)

기간	재해 유형	발생건수	사망 (실종포함:명)	재해당 사망자수 (실종포함:명)
1981~1990년	태풍	18	844	46.9
	호우	74	1,328	17.9
	폭풍	88	536	6.1
	설해	12	49	4.1
	기타	30	27	0.9
	합계	222	2,784	12.5
1991~2000년	태풍	19	441	23.2
	호우	54	542	10.0
	폭풍	53	185	3.5
	설해	18	44	2.4
	기타	17	4	0.2
	합계	161	1,216	7.6
2001~2010년	태풍	9	453	50.3
	호우	23	176	7.7
	폭풍	1	2	2.0
	설해	9	8	0.9
	기타	6	0	0.0
	합계	48	639	13.3

* 태풍 - 태풍+태풍호우
* 폭풍 - 폭풍+폭풍우
* 설해 - 폭풍설+대설
* 기타 - 우박, 한파, 해수범람, 낙뢰, 해일

8.2.2 기상재해

1981년부터 2010년까지 기상재해로 인한 피해 특성과 변화 추세를 기상재해 유형별로 분석한 결과, 전체 사망자 수는 80년대에 2,784명, 90년대에 1,216명, 2000년대에 639명으로 매 십년 당 현저한 감소를 보였다. 재해의 빈도 역시 80년대에 222건, 90년대에 161건, 2000년대에 48건으로 감소하는 경향을 보였다(표 8.2, 그림 8.3).

그러나 연도별 재해 당 평균 사망자수는 1980년대에서 1990년대까지는 감소하는 경향을 보이다가(그림 8.4) 1990년대에서 2000년대로 가면서 다시 증가하는 경향을 보였다(그림 8.5). 재해에 대한 예보 및 적응능력 등이 향상되면서 총사망자수가 감소하고 있음에도 불구하고 재해 당 평균 사망자수가 증가하고 있는 것은 대형재해가 증가하고 있는 것을 의미한다. 재해 유형별로 살펴보면, 사망자는 호우(홍수)로 가장 많이 발생하였다. 80년대에 1,328명, 90년대에 542명, 2000년대에 176명으로 총 2046명이 호우로 사망했으며, 이는 전체 사망자(4,639명)의 44.0%를 차지한다. 대한민국에서 홍수의 원인은 호우 외에는 거의 없기 때문에(2010년 2월 강원도 태백시의 광동댐에서 눈 녹은 물로 월류가 발생한 것이 유일한 예외로 알려져 있다) 홍수와 호우는 같은 개념으로 다룰 수 있다. 두 번째로 많은 사망자를 발생시킨 기상재해는 태풍으로, 전체 재해로 인한 사망자의 37.5%에 해당하였다. 태풍의 발생빈도는 80년대에 18회, 90년대에 19회, 2000년대에 9회로 감소하였다. 이는 1904년~1922년 기간의 십년 평균 30건(과학기술정책관리연구소, 1996)과 비교할 때 현저하게 감소한 숫자이다. 그러나 태풍의 경우는 다른 기상재해와 달리 재해 당 사망자수가 90년대 23.2명에서 2000년대에 50.3명으로 크게 증가하였다(표 8.2).

기상재해로 인한 건강영향의 규모와 피해정도를 파악한 연구로는 기상재해 발생 후 감염병 발생양상을 분석한 질병관리본부(2012)의 연구가 있다. 기후변화와 기상재해와 관련되어 있는 것으로 알려진 감염병을 대상으로 2001년부터 2009년까지 분석한 결과, 비브리오패혈증은 재해 후 4주 동안 166% 증가, 세균성이질

은 재해 후 4주 동안 215% 증가하는 것으로 나타났다(그림 8.6).

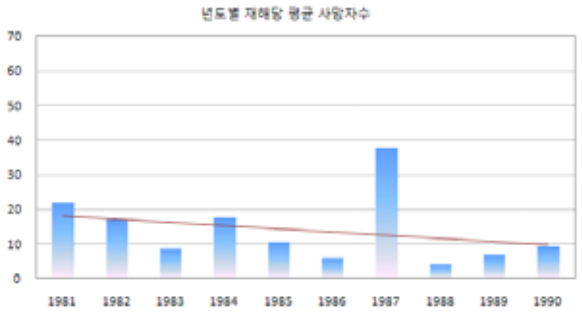


그림 8.4 년도별 기상재해 당 평균 사망자수(1981~1990)

그림 8.5 년도별 기상재해 당 평균 사망자수(1991~2010)

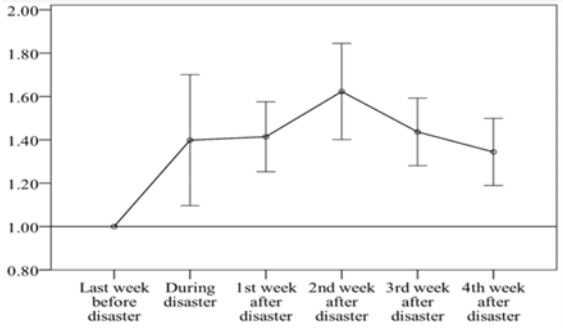


그림 8.6 비브리오패혈증의 기상재해 후 발생비 추이(장재연 등, 2012)

이상의 통계에서는 한파, 가뭄 등에 관한 내용을 포함시키지 못했다. 대한민국의 역사상 기상재해로 인한 피해는 가뭄이 가장 심했다고 인정됨에도 불구하고(강만길, 1984), 다른 재해와는 통계 처리하는 방법과 내용이 달라 함께 비교하기 어렵기 때문이다(과학기술정책관리연구소, 1996). 더구나 표 8.2의 기간 동안 대한민국에는 큰 가뭄이 없었다. 1982, 1994, 2001년에 소규모의 가뭄이 있었지만, 이는 1941년 전후의 3년여에 걸친 중규모 가뭄이나 1901년에 중심을 둔 29년간의 극대 가뭄과는 비교도 할 수 없는 약한 것 이었다(변희룡 등, 2008). 중규모 또는 대규모 가뭄이 38년 또는 124년 주기로 발생하는데 최근 온실가스로 인한 기후변화는 이 주기에 들지 않았으므로, 기후변화의 효과가 가뭄재해에 반영된 예는 없었다고 할 수 있다.

한파의 경우 기후변화와 관련된 한랭손상 및 저체온증 조사감시체계를 개발하여 시범 적용한 연구(송경준 등, 2012)가 진행되었고, 이 결과를 바탕으로 2013년부터 질병관리본부에서는 전국 응급의료기관을 기반으로 한파로 인한 한랭질환 감시체계가 운영되기 시작했다. 향후 감시체계를 통해 축적된 데이터들을 연구에 활용할 수 있을 것이다.

8.2.3 대기질과 알레르기

기상요소, 특히 기온과 강수는 대기오염물질의 생성, 이동, 확산 및 침적에 중요한 역할을 한다. 대기오염물질 중에서도 오존은 지구온난화에 의해 가장 영향을 많이 받을 것으로 예상되고 있다. 대기 중 오존 농도의 증가는 곧바로 초과사망률 발생, 호흡기질환 환자의 증가 등을 초래할 수 있다(성주헌 등, 2001).

기후변화로 인한 대기오염물질의 건강영향을 평가하려면 기후변화에 따른 대기오염도의 변화를 예측하고 변화된 대기오염도에 따른 건강영향평가가 이루어져야 한다. 하지만 국내에서는 최근에서야 한반도의 기후변화를 예측하기 시작하였고, 이에 따른 대기오염도의 변화예측이 일부 연구자를 중심으로 시도되고 있다(배현주 등, 2010). 따라서 대기오염도 변화에 따른 종합적인 건강영향평가가 이루어지려면 보다 많은 연구가 이루어진 다음에야 수행될 수 있을 것으로 판단된다.

다만 성주헌 등(2001)은 기상요소(특히 고온)가 대기오염물질(특히 오존)의 건강영향평가에 미치는 영향을 평가한 바 있다. 이에 따르면 오존과 폭염은 유의한 교호작용이 있기 때문에 오존이 심혈관계 및 호흡기계의 초과사망에 미치는 영향이 폭염에 의해 크기가 좌우될 수 있다. 또한 폭염기간 동안 도시에서의 초과사망 발생이 농촌 지역에 비해 상대적으로 높았던 것은 도시지역

의 높은 오존농도가 일부 기여한 것이었을 수 있다. 즉, 고온에 의한 심혈관계의 부담이 이미 상당 수준에 이르고 있을 때, 추가로 오존이 일정수준을 초과하는 것이 치명 적인 부담으로 작용할 수 있다. 최근 여름철 PM 의 건강영향을 평가 한 바 있다(Yi et al, 2010). 이에 따르면 PM 10 ㎍/㎥ 증가에 따른 각 계절 별 초과사망률과 병원내원율의 변화를 비교한 결과 여름철의 영향이 겨울보다 더 높았다. 즉 폭염기 미세먼지의 건강영향은 그렇지 않을 때보다 더 높을 수 있음을 시사해준다. 국내 7개 도시를 대상으로 2002년부터 2008년까지 대기 중 미세먼지와 심혈관질환 사망률을 조사한 연구(하경화 등, 2011)에서, 평균 미세먼지 농도가 사분위수 범위 증가할수록 심혈관계 질환으로 인한 사망이 0.7% 증가하는 것으로 나타났다. 국내 8개 도시의 자료를 이용해 대기오염물질이 병원 입원에 미치는 단기 효과를 연구하였다(Son et al., 2013). 그 결과, 미세먼지(PM), 오존, 이산화질소가 알레르기 질환, 천식, 호흡기질환, 심혈관질환으로 인한 병원 입원과 연관이 있는 것으로 나타났다. 또한 아황산가스는 호흡기질환, 심혈관질환과 연관이 있었고, 이산화탄소는 심혈관질환과 연관이 있는 것으로 나타났다. 계절 별 패턴에서는 여름철에 미세먼지와 이산화질소 농도가 높을수록 알레르기질환, 천식, 호흡기질환으로 인한 병원 입원이 증가하였다.

기후변화는 알레르기질환에도 영향을 주는 것으로 알려져 있다. 기후변화의 진행과 더불어 대표적인 호흡기 알레르기질환인 천식은 최근 수십 년간 전세계적으로 유병률이 증가하였다(Eder et al., 2006). 우리나라 역시 세계적인 추세처럼 천식의 유병률이 꾸준히 증가하는 양상을 보였다. 또한 알레르기비염의 유병률 역시 지난 수십 년간 전세계적으로 증가하였다(김상헌 등, 2011). 아토피피부염의 경우, 우리나라는 과거와 현재의 비교 자료가 거의 없기 때문에 단정하기는 어렵지만 일부 자료에 의하면 아토피피부염의 유병률이 다소 증가하는 추세로 보인다. 하지만 역학 자료로만 보면 기후변화가 아토피피부염의 국내 유병률을 반드시 증가시킨다고 확언하기는 어려운 것 같다(김규한, 2011).

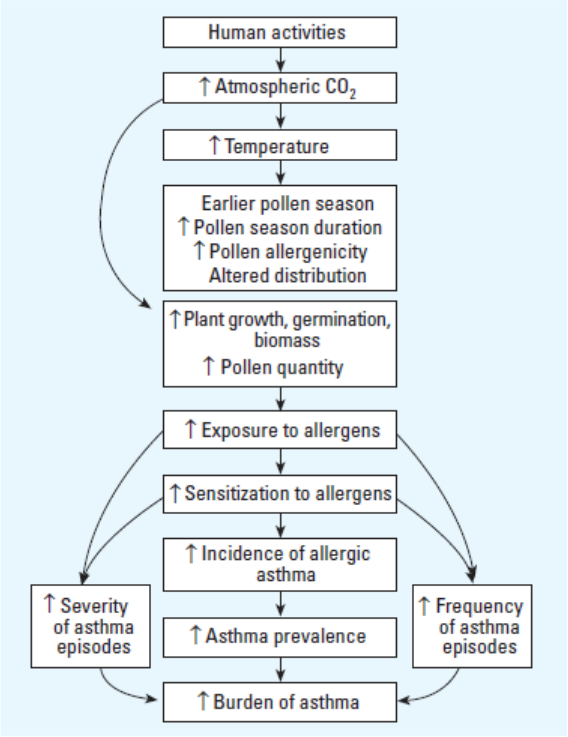


그림 8.7 기후변화와 천식의 유병율 및 중증도 사이의 관계 모식도(식물과 꽃가루에 의한 영향을 중심으로)(Beggs and Bambrick, 2005).

기후변화가 알레르기질환의 발생과 유병률 증가에 영향을 주는데 중요한 역할을 하는 것이 대기 중 꽃가루 농도와 대기오염물질이다(Beggs and Bambrick, 2005). 인간의 활동으로 인해 대기 중 이산화탄소 농도가 높아지고, 그로 인해 기온이 상승하면 천식과 같은 알레르기질환의 원인 물질인 꽃가루에 여러 방식으로 영향을 줄 수 있다(Beggs and Bambrick, 2005, 그림 8.7). 즉, 기후변화로 인해 꽃가루 계절이 좀 더 일찍 시작되어 꽃가루에 노출되는 기간이 길어지며, 꽃가루의 알레르기성이 증가하고, 식물의 성장을 촉진하여 꽃가루 양이 많아지게 된다. 이와 같은 현상은 꽃가루에 노출될 수 있는 기회를 높일 뿐만 아니라 감작률을 상승시켜, 결국 알레르기 질환이 더 많이 발생할 수 있다. 최근 국내 연구진이 보고한 바에 따르면, 수목 화분과 잡초 화분들이 이러한 기후 변화에 민감한데, 특히 가을철 환삼 덩굴화분 내 알레르기 성분이 증가함을 보고하였다(Jin et al., 2013). 즉, 국내 환경에서도 이러한 화분 알레르기의 증가 현상에 대한 준비와 정책 수립이

필요하리라 생각한다.

기상연구소와 화분연구회의 자료를 분석한 연구 결과(장재연 등, 2008), 수목류는 '조심'과 '위험'을 요하는 정도의 화분 발생빈도가 연도별로 증가하는 경향을 보였다. 이중 목초류는 '조심'은 증가하고 '위험'은 감소하는 경향을, 잡초류는 '조심', '위험', '매우위험'이 모두 증가하는 것으로 나타났다. 화분량 변화는 기온, 강수, 일조 시간 등 다양한 기상 요소와 긴밀한 관계가 있다. 기상 요소와 화분량과의 다중회귀식을 산출해 본 결과 매년 각기 다른 기상 요소가 화분량 변화에 영향을 미치는 것으로 나타났다. 특히, 기온과 강수는 화분량을 결정하는데 주요 기상요소로 작용한다(오재원, 2009).

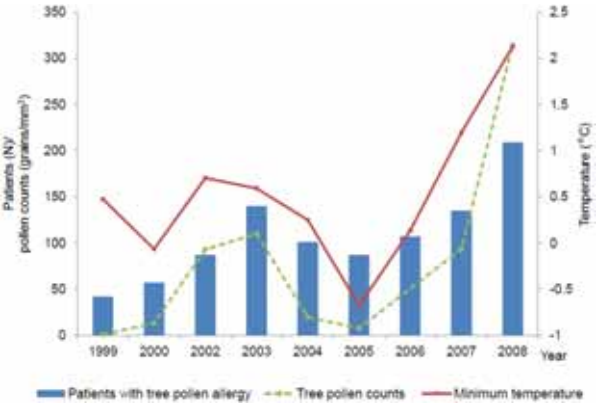


그림 8.8 최저기온과 tree pollen 환자의 연도별 추이 (kim et al., 2011).

화분량 변화는 알레르기 질환 발생 및 증상 악화와 밀접한 관계가 있다. 잡초류 중 돼지풀의 화분량의 증가와 함께 소아 감작률도 의미있게 증가하는 경향을 보였다(오재원, 2009). 기상요인, 꽃가루, 알레르기 환자 자료를 이용해 연구한 결과(Kim et al, 2011), 시간 차이를 두고 최저기온과 수목류 꽃가루 농도, 꽃가루 알레르기 환자 사이에 유의한 양의 상관관계가 있는 것으로 나타났다(그림 8.8). 또한 환자의 연령과 성별, 대기오염을 보정하고 분석한 결과, 3월 최저기온이 1℃ 높아지면 수목류 꽃가루 환자가 14% 증가하는 것으로 나타났다. 광주전남 지역에서 시행된 연구에서도 흡입성 항원에 대한 감작률이 2003년부터 2008년까지 유의하게 증가하였고, 수목꽃가루와 목초꽃가루에 대한 감작률이 기온과 양의 상관관계를 나타냈다(윤병조 등, 2011).

대기오염물질은 그 자체가 호흡기에 직접적인 손상을 초래하고, 이로 인하여 흡입성 항원 침투와 감작을 촉진시키거나 꽃가루에 작용하여 항원성을 증가시키는 작용을 통해 호흡기 알레르기질환의 발생을 일으키기도 한다. 또한 연소분진은 꽃가루 등의 알레르기항원을 이동시키는 매개체로 작용하여 알레르기항원을 기도로 전달하기도 한다(김상헌, 2011).

8.2.4 곤충 및 설치류 매개 감염병

매개체는 모기를 비롯한 진드기, 설치류를 말하며 이 매개체로 인해 전파되는 질병을 매개체 감염병으로 정의한다. 매개체 감염병은 생태계에 서식하고 있는 매개체가 기후요소에 의해 밀접하게 영향을 받고 이로 인해 질병발생의 양상도 변하고 있다. 하지만 매개체 밀도가 기후요소에 얼마나 영향을 받는지에 대해서는 연구 결과가 미흡한 상태이다.

기후변화에 영향을 받을 매개체 감염병에 대해 질병관리본부 감염병 웹통계에 의해 2001년 이후 연도별 발생 추이를 분석한 결과는 다음과 같다. 우선 모기 매개 삼일열 말라리아의 경우 93년까지 퇴치수준이었는데 1명이 보고되면서 재유행하기 시작되었다. 2000년 4,142명으로 정점을 이루다가 2013년 425명으로 감소하였다. 하지만 2005년부터 2013년까지 보고된 해외유입 사례는 년 50여명으로 약 50%를 차지하는 사례는 아프리카 지역에서 만연하는 열대열 말라리아로 한반도 기후대가 아열대로 변하고 있는 제주 지역을 포함한 경남, 호남지역으로 열대열 말라리아 발생도 예측할 수 있다.

설치류 매개 감염병 중 렙토스피라증은 매년100여명 발생하였는데 2007년 태풍의 영향으로 감염노출이 2배로 증가하였지만 점차 감소하여 2013년 50명으로 보고되었다(장재연등, 2008). 신증후군 출혈열은 매해 300여명에서 400여명으로 증가와 감소를 반복하면서 지속적으로 발생하여 2013년에는 563명으로 증가하였다. 하지만 이들 질환도 질병전파에 영향을 미치는 기후요소에 따라 발생 차이를 보일 것으로 예측된다.

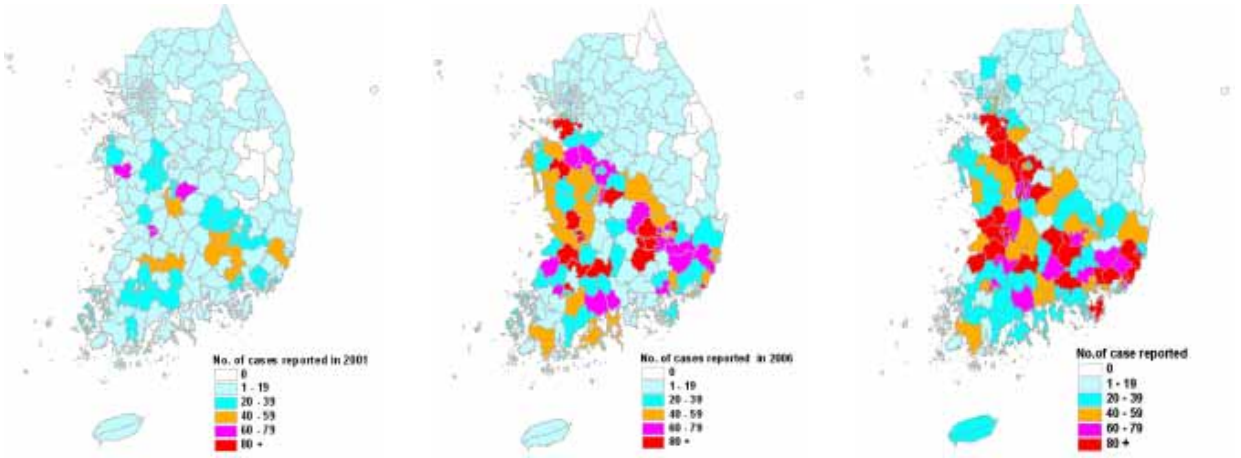


그림 8.9 쯔쯔가무시증 환자 분포(2001~2012)(질병관리본부 통계)

특히 털진드기 매개 쯔쯔가무시증의 경우 2001년부터 매년 환자 발생지역이 넓어지고 발생 시기는 털진드기의 유충에서 성충이 되는 가을철로 일치하고 있다(이인용 등, 1993; 박옥과 최보율, 2007). 또한 쯔쯔가무시증은 국가 기후변화적응 정책에서 가장 시급성이 요구되는 매개체 감염병으로 매해 증가하여(2,637명('01) → 6,480명('06) → 10,345명('13)) 만 명이 초과되었다(그림 8.9). 또한 이 질병의 사회경제적 손실도 큰 감염병으로 김진현 등(2009)은 연간 690억원의 손실액을 추정하였다. 쯔쯔가무시증은 환자의 대부분이 농촌지역의 취약 계층인 노인층이며 주요 매개종인 활순 털진드기 분포가 점차 북상(1997년 군산~포항에서 2008년 화성~포항)하여 발생이 확산되고있다는 과학적 증거를 뒷받침하여 그 심각성이 증가하고 있다(Lee et al, 2011).

모기가 매개하는 질환 중 기후변화에 의해 우리나라에서 발생이 증가하거나 새롭게 발생하리라 예상되는 감염병에는 말라리아, 일본뇌염을 들수 있다. 또한 해외유입 가능성이 높은 뎅기열, 황열, 웨스트나일열, 치쿤구니야열, 열대열 등이 있다.

말라리아의 경우 강수량 증가에 의해 모기 밀도를 증가시켜 말라리아 발생이 증가되고, 온도 상승이 말라리아 전파를 연장시켜 발생을 증가시킨다는 보고는 있지만 대부분 환자 발생과의 상관관계로 분석되었다.

2001년에서 2009년 까지 삼일열 말라리아(Plasmodium vivax)의 발생을 기후요소들과 Poission model과 Distributed Lag Nonlinear Model(DLNM)로 조정하여 온도, 상대습도, 일조량, 강우량을 분석한 결과는 다음과 같다(Kim et al., 2012). 삼일열말라리아 환자가 95% 신뢰구간에서 온도가 1도 상승할 때 3주 후에 환자가 17.7%(95% 신뢰구간)증가하고, 상대 습도가 10% 증가 할 때 7주 후에 삼일열말라리아 환자가 40.7% 감소하였다. 1주에 일조량이 10시간 증가하면 2주 후에 삼일열말라리아 환자가 5.1% 감소하는 결과를 보여 주었다. 350mm 강수량을 기준으로 10mm 증가하면 2주후에 누적상대위험도가 최대 10주에 DLNM기준으로 3.61로 나타났다. 즉 말라리아 전파에 있어서 온도가 삼일열 말라리아 발생에 가장 영향을 주는 기후요소이며, 강수량으로 인한 삼일열말라리아의 발생 간격의 추정은 원충이 모기에서 증식하는데 필요한 시간과 일치하였다. 또한 모기의 경우 하절기에 강수가 집중되고 기온이 높아짐으로 모기 발생원이 증가 할 뿐만 아니라 말라리라 감염바의 예측모델에서 한반도의 기후요소를 반영한 결과 모기의 출현시작시기와 종료시기를 연장하여 감염 노출이 늘어 날것으로 시사하였다(Nah et al, 2010). 2005년부터 2007년 동안 전국의 AWS(Automatic Weather Station)에서 최고기곤, 최저기온, 평균기온, 일강수량 자료와 연도별 시군구 말라리아 발생자수를 분석한 결과 0.8도, 20.2도, 31.2도의 변곡점을 나타내는 M자 형 모델에서 두 번째 변곡점인 20.2도 이후의 경우 기온이 1도 상승하면 주간 시군구단위 환자 수가 0.212(95% 신뢰구간)명 증가 할 것으로 예측하였다(신호성 등, 2011).

일본뇌염의 경우 동물이나 모기 등에서 바이러스 활동이 지속되고 있으나 백신으로 예방되고 있는 상황이다. 그러나 기후변화 등의 환경 및 생태계 변화로 모기의 숙주 특이성과 서식 밀도가 증가하면 삼일열 말라리아와 마찬가지로 자연계에 병원체 활동이 증가하여 사람이 감염될 가능성이 높을 수 있다. 다만 삼일열 말라리아와 달리 백신의 효과적 대책이 있어 다른 모기 매개 감염병 보다 발병률은 낮을 것으로 예상된다.

진드기 매개 및 설치류 매개 감염병을 2001년부터 2008년 월별 환자수와 기후요소 중 연중기온, 습도, 강수량 변화 양상을 조사한 결과 계절성이 뚜렷하지만 양의 상관관계를 나타내지 않았다(질병관리본부, 2010). 즉 쯔쯔가무시증10~11월과 신증후군 출혈열,10~12월 렙토스피라증 9~11월 특정 계절성을 보였다. 이는 매개체의 발생 시기와 매우 일치하는 결과이다. 쯔쯔가무시증을 매개하는 털진드기가 유충시기에 숙주에 기생하여 체액을 섭취하는데 가을철에 성충으로 발육하므로 계절적 특성이 나타며, 설치류 등 매개체 활동 시기 이외에 추수기로 인한 가을철 작업과 야외활동으로 인한 사회적 요인도 관련되어 있다.

하지만 환자 다발생 기간의 다발생 지역의 월평균 기후요소의 상관 관계는 다음과 같다. 쯔쯔가무시증은 주로 여름철 기후요소인 8월 평균 기온과, 6월과7월 습도와 양의 상관관계(각각 r= 0.721, p=0.044; r= 0.755, p=0.03; r= 0.723, p=0.043)를 나타냈으며 1월 강수량과는 음의 상관성을 보였다.

신증후군출열열은 11월의 강수량과 양의 상관성(r= 0.756, p=0.03)을 보였다. 렙토스피라증은 2월의 평균 기온, 최고 기온, 최저 기온, 습도(각각 r= 0.866, p=0.005; r= 0.800, p=0.017; r= 0.884, p=0.004; r= 0.732, p=0.039등 상관성이 높았으며 5월의 최저 기온과 양의 상관성(r= 0.821, p=0.012)을 보였다. 여름철 기온과 습도가 높으면 식생에 영향을 주면서 등줄쥐가 생활하기 적합한 환경이 조성이 되어 이들 감염병 발생에 영향을 미칠 가능성이 높다.

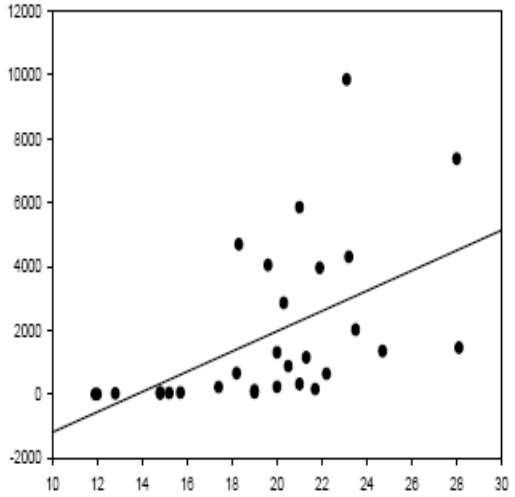


그림 8.10 기온(x축)과 모기 개체수(y축)의 상관관계 (R=0.520, P=0.004)(장재연 등, 2003)

감염병의 매개 모기는Anopheles, Culex, Aedes속에 속하며 진드기는 Leptotrombidium, Ixodes, Haemaphysalis, Amblyomma 속에 속하며 이들 매개체인 모기와 진드기가 질병을 전파함에 있어 생활사에 영향을 미치는 온도와 강수량, 습도 등 기후요소로 매개체 밀도와의 상관관계를 분석한 연구 결과는 매우 미흡하다.

일본뇌염을 매개하는 작은 빨간집모기(Culex pipiens pallens) 개체수는 점차 증가할 것으로 예측되었다(Kim et al, 2014). 이 연구에서 모기 개체는 1999년부터 2012년까지 14년간 국내 10개(부산, 경기, 강원, 충북, 충남, 전북, 전남, 경북, 경남, 제주)지역에 유문등을 설치하여 채집된 모기 결과는 주별 일일평균(mosquitoes/trap/night)으로 산출하여 분석하였다. 동 기간 중 주간 최고치를 기준으로 할 때, 전체 모기 개체 수는 2009년 이후 점차 증가하여 2011년 7만 마리에 이르렀다. 작은 빨간집 모기의 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 2만5천 마리 수준으로 급격히 증가한 후 약간 감소하지만 2016년에는 1만8천 마리로 높은 수준을 유지할 것으로 보인다.

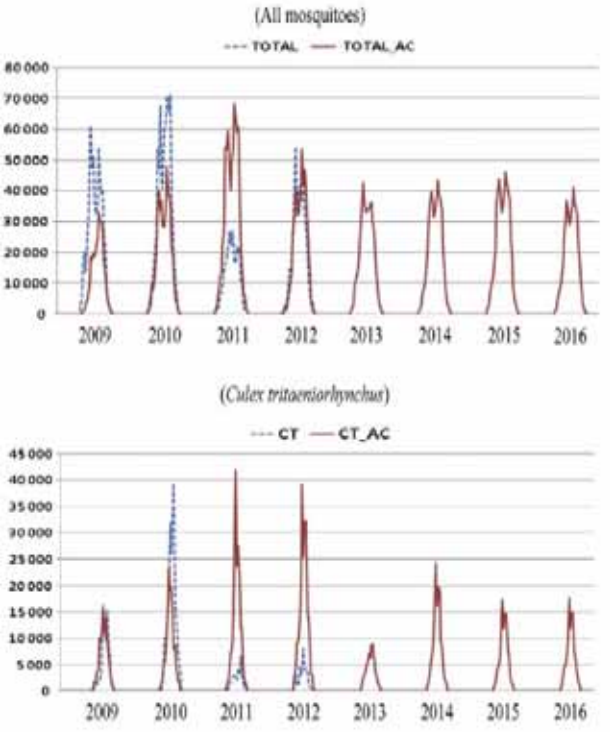


그림 8.11 모기 개체 수 예측(전체 모기, 작은 빨간집모기, 2013년~2016년)(Kim et al, 2011)

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 기후 및 환경 변화에 의한 매개모기 밀도 증가 등으로 인해 일본 뇌염이 재유행할 가능성이 있으므로 지속적인 예방활동과 유행예측을 실시해야한다.

우리나라에서 발생하고 있는 가장 대표적인 모기 매개 질환인 말라리아의 경우 기후 및 환경 조건은 모기 수명과 모기 체내에서의 열원충 분화(10~14일 소요)에 큰 영향을 미친다. 따라서 기후 조건은 말라리아의 전파를 좌우하고 또한 말라리아 발생의 계절적 변동을 가져온다. 기후 조건 중 말라리아 발생에 가장 중요한 인자는 온도와 습도이다. 적당한 기온은 20~30℃이며 더운 지방에서 감염이 만연하는 것은 기온이 높은 점과 밀접한 관계가 있다. 기온이 낮아져 평균 기온 16℃ 이하가 되면 모기는 활동을 중단하고 월동에 들어간다. 그리고 25~30℃에서 모기의 개체 수 증가나 활동이 최고조에 달한다. 이 정도의 온도에서는 모기의 분화, 성숙에 걸리는 기간도 단축될 뿐만 아니라 모기 체내의 열원충의 분화도 빨라진다. 우리나라의 여름철 기온이 이에 해당한다. 기온이 더 높아져 30℃ 이상이 되면 모기의 활력은 오히려 감소한다. 한편 습도도 높으면 모기나 열원충의 생존에 유리하며, 특히 상대 습도가 60% 이상 되면 모기의 생존 기간이 늘어나 여러 사람에게 감염을 전파하는 데 유리한 환경이 조성된다. 일본뇌염이나 웨스트나일열을 매개하는 genus Culex의 일종인 빨간집모기(Culex pipiens pallens)의 경우 활동하는 시기의 기온과 습도는 각각 17.6℃ ~ 32.4℃와 75 ~ 88%이며 사라지는 기온과 습도는 0.8~18.3℃와 38 ~ 90%이다.

여러 기후 인자 중 우리나라에서 모기 밀도와 가장 유의한 상관관계를 나타내는 인자는 기온이다. 특히 우리나라의 경우 여름철의 평균 기온이 대개는 28℃ 미만이므로 기온이 상승함에 따라 모기 개체수가 유의하게 증가하는 상관관계를 보인다(그림 8.11). 모기뿐 만 아니라 질환 자체도 기온과 상관관계를 가지고 있었는데 주로 5~10월에 발생하는 말라리아의 경우 최고기온, 최저기온이 유의한 변수로 나타났다. 강수량의 경우 좀 더 복잡한 영향을 나타낸다. 강수량이 적을 경우 모기의 유충 서식에 필요한 충분한 습지가 제공되지 않아 모기 개체수는 감소하게 된다. 강수량이 많을 경우 상황에 따라 양가의 영향을 나타낸다. 강수량이 적은 늦봄과 초가을에 강수량이 많을 경우 유충 서식에 필요한 습지가 지속적으로 제공되어 모기 개체수가 증가하게 된다. 그러나 여름철 집중 호우 등으로 인해 단기간에 강수량이 많이 증가하면 오히려 모기 유충이 쓸려가게 됨에 따라 강수 이후 한동안 모기 개체수는 평소보다 감소하게 된다. 태풍이나 집중호우가 잦았던 해의 모기 개체수가 예년에 비해 적은 이유도 이 때문이다.

삼일열 말라리아의 경우 이미 국내에서 지속적으로 발생하고 있기 때문에 이 같은 기후 인자와 모기 개체수 간의 관계에 의해 영향을 받을 가능성이 있다. 특히 많은 환자들이 북한으로부터 넘어오는 말라리아 감염 모기에 의해 감염되는 것으로 추정되기 때문에 휴전선에 인접한 북한 지역의 기후 인자 및 모기 개체수가 발생 규모를 결정짓는 중요한 요소이다.

쯔쯔가무시증을 매개하는 털진드기의 밀도와 겨울 평균 기온을 비교하였을 때 아래의 그림 8.12처럼 2006~2007년 겨울 온도가 2005~2006년에 비해 높았을 때 통계학적으로 유의하지 않지만 2007년 진드기 유충지수에 영향을 주는 것으로 나타났다(Lee et al, 2011).

진드기 매개 질환 중 아나플라즈마(Anaplasma phagocytophilum)와 에르리키아(Ehrlichia chaffeensis)를 매개하는 진드기를 야생설치류와 풀숲에서 채집하여 진드기 밀도를 조사한 결과, 가을철에 밀도가 가장 높았으며 연평균 강수량이 증가할수록, 습도가 증가할수록, 일평균 일조량이 감소할수록 밀도가 감소하는 것으로 나타났다(Oh et al., 2008).

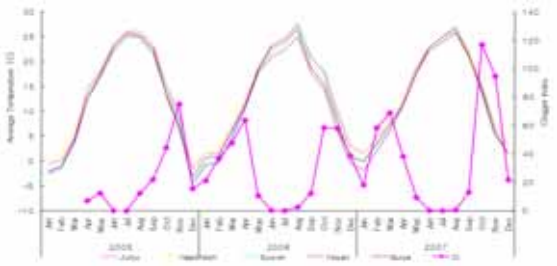


그림 8.12 쯔쯔가무시증 다발 지역에서의 진드기 밀도와 평균 기온과의 상관관계(Lee et al., 2008)

8.2.5 수인성 및 식품 매개 감염병

수인성 및 식품매개 감염병은 오염된 물이나 식품을 매개로 입을 통해 병원성 미생물에 감염되어 발생하는 소화기계 질병이다. 질병을 일으키는 바이러스, 세균, 원충생물은 기후변화에 의해 영양분과 기온, 습도, 강수량, 해양온도, 염도, 생태환경 등이 변화하면 생존, 증식, 새로운 종의 출현 등에 많은 변화를 겪을 수 있다.

현재까지 국내에서 수인성 및 식품매개 감염병과 기후요인의 관련성을 조사한 연구의 결과는 아래와 같다.

질병관리본부가 2007~2009년 3년 동안 국내 발생한 수인성·식품매개질환 유행을 분석한 결과 6~9월의 발생이 전체발생 건수의 44.2%, 유증상자 수의 45.2%를 차지하여 기온과 습도가 높은 계절에 병원체 증식이 활발한 시기에 질병발생이 증가하는 양상을 보여주었다(질병관리본부 2009, 2010). 원인 병원체의 월별 양상을 보면 기온과 습도가 높은 5~9월에 Salmonella 78.8%, 병원성 대장균 76.0%, 황색포도상균 68.0%로 이들의 감염이 집중되었다. 장염비브리오균은 8~9월에 전체의 65.6%가 집중 발생하였고 해수 온도의 18℃ 이상 상승 및 해양생태 변화(유기물의 증가와 플랭크톤의 증식)와 밀접한 관련을 보였다. 반면 국내 주요 식품매개질환의 원인 병원체 노로바이러스는 기온이 낮은(평균 10℃이하) 11월~3월에 56.3%가 발생하여 세균 병원체와 대조를 보여주고 있다.

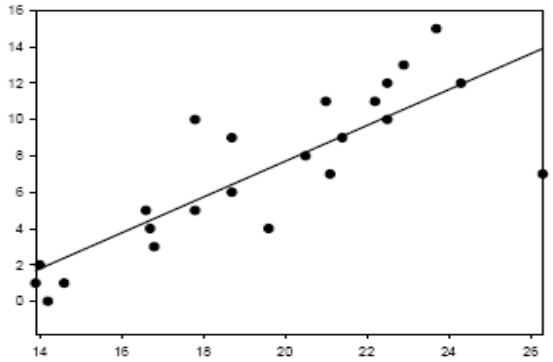


그림 8.13 해수면 온도와 비브리오 검출건수의 상관관계(R=0.824, P=0.000)(장재연 등, 2003)

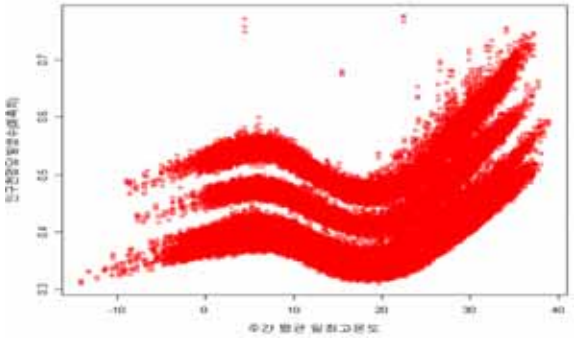


그림 8.14 주간 평균 일최고온도와 설사질환 발생률과의 관계(채수미 등, 2011)

해수온도와 비브리오균 검출 간의 관련성을 분석한 연구가 장재연 등(2003)에 의해 이루어졌다. 2000년 4월부터 2002년 10월까지 부산 보건환경원에서 이루어진 연안해수 비브리오균 생태 조사결과를 이용하여 분석한 결과, 해수온도와 비브리오균 검출 간의 관계는 계절적 패턴이 비슷하게 나타나며 상관관계는 피어슨 상관계수 값이 0.824로 매우 높은 상관관계를 나타낸

다고 보고하였다(그림 8.13).

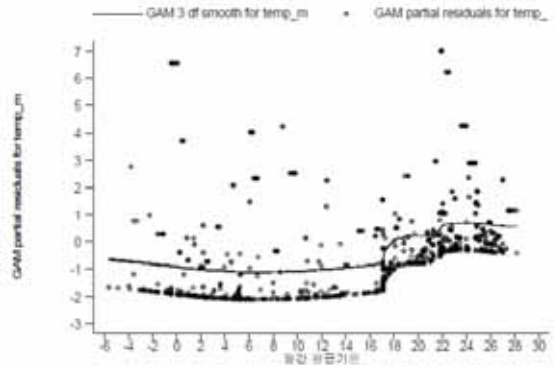


그림 8.15 월평균기온과 식중독 환자수(김동진 등, 2012)

여러 자료원을 이용하여 설사질환 전체 혹은 식중독 전체와 기후와의 관련성을 분석한 국내 연구로는 건강보험심사평가원 청구자료를 이용한 김동진 등의 연구(2012), 식중독 발생 감시자료를 이용한 식품의약안전청(2008) 연구와 채수미 등(2011) 연구가 있다. 건강보험심사평가원 청구자료를 이용하여 산출한 전체 설사환자 발생률과 기후요인과의 관련성을 일반부가모형(Generalized Additive Model, GAM)을 이용하여 평가한 결과, 기온 증가에 따라 설사질환이 증가하다가 5.7℃ 이상에서는 기온 증가에 따라 감소하며 20.7℃ 이상 구간에서는 다시 증가하는 패턴을 나타냈다(그림 8.14). 전체 기울기를 나타낸 결과, 기온 1℃ 상승시 시군구별 주별 환자발생수가 인구천명당 0.0051명 증가하는 것으로 나타났다.

식중독 발생 감시자료를 이용하여 산출한 전체 식중독 발생건수와 기후요인과의 관련성을 일반 선형 포아송 분석을 이용하여 평가한 결과 단위기온 상승 당 5.27~5.99%의 식중독 발생수가 증가하는 것으로 나타났다. 윤시몬 등(2013)에서 전체 식중독 발생건수와 기후요인과의 관련성을 GAM으로 분석한 결과 월평균기온 증가에 따라 식중독 환자수가 증가하고 역치가 22℃ 정도에서 존재하는 것으로 나타났다(그림 8.15). GAM 분석 결과 단위 기온 상승 당 식중독 발생수가 7.4% 증가하고, 포아송 회귀분석으로 분석한 결과 단위 기온 상승 당 식중독 발생수가 6.1% 증가하는 것으로 나타났다.

표 8.3 기후요인과 수인성 및 식품매개 감염병 연관성 국내 연구 현황

질환	통계 분석법	연구 편수
전체 설사질환	GAM	1편(김동진 등, 2012)
전체 식중독	GAM, 포아송	2편(이수형, 2009; 윤시몬, 2013)
비브리오패혈증	상관분석	1편(장재연 등, 2003)
세균성 이질	GAM	1편(채수미 등, 2011)
노로바이러스 감염증	일반화 선형모델	1편(윤시몬, 2013)
황색포도상구균 감염증	일반화 선형모델	
병원성 대장균 감염증	일반화 선형모델	
살모넬라 감염증	일반화 선형모델	

개별 감염병 별로 기후와의 관련성을 분석한 국내 연구로는 법정감염병 신고데이터를 이용하여 상관분석을 시행한 김시헌 등의 연구(2010), 건강보험청구 데이터를 이용하여 GAM으로 분석한 김동진 등(2012)의 연구, 식중독 보고데이터를 이용하여 일반화 선형모델로 분석한 식품의약안전청의 연구(2009)가 있다. 김시헌 등의 연구 결과 7월부터 9월까지의 비브리오패혈증 발생률은 당해 봄철 및 7월 강수량과 양의 상관관계를 보였다. 이러한 결과가 나타난 원인은 비브리오패혈증 원인균의 성장률이 해수의 염도가 낮을수록 높기 때문에, 강수량이 많으면 강하구에 인접한 해안의 해수 염도가 낮아져 균 성장에 좋은 환경이 만들어지기 때문일 것으로 추정하였다. 김동진 등(2012)의 연구 결과 월 평균기온 1℃ 상승에 따라 같은 달의 세균성 이질이 7%(95% 신뢰구간 5~9%) 상승하는 것으로 나타났다. 식품의약안전청의 연구(2009) 결과 1개월 전의 월 평균온도 1℃ 상승시 노로바이러스 식중독 발생건수가 약 28.6% 감소하고 황색포도상구균 식중독 발생건수는 약 5.4% 증가하며, 1개월 전의 월평균 강수량 1mm 증가 시 병원성 대장균 식중독 발생건수가 약 15.1% 감소하고, 1개월 전 월평균 최고 온도 1℃ 증가시 살모넬라 식중독 발생건수가 약 47.8% 증가하는 것으로 나타났다.

국내에서 수인성 및 식품매개 감염병과 기후요인과의 관련성을 통계적으로 평가한 연구를 표 8.3에 정리하였다.

8.3 영향전망

8.3.1 폭염

건강 영향의 크기는 노출의 크기와 민감도 및 적응 능력의 정도에 의해 결정된다(IPCC, 2007). 앞에서 밝힌 바와 같이 기후변화에 따른 폭염 발생의 빈도 및 강도의 증가는 필연적이라 할 수 있다. 서울지역의 경우 2032년 이후에 고온에 의한 사망이 발생할 수 있는 일평균 기온 28.1℃ 이상의 일수가 연평균 55.1일이고(박정임 등, 2005), 2090년 이후에는 평균 60일 이상에 달할 것으로 예측되었다(김은영 등, 2012; 그림 8.16).

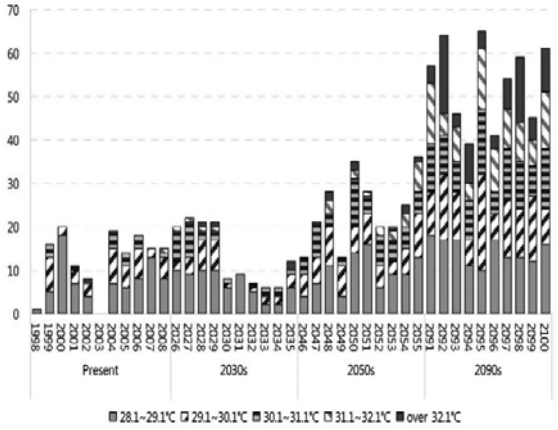


그림 8.16 서울시 여름철 일 평균 기온이 28.1℃ 이상의 일 수(김은영 등, 2012)

전국적인 폭염 취약 지역도 남부지방에서 중부지방까지, 저지대에서 낮은 산간지까지 확대될 수 있을 것으로 예측된 바 있다(유성진 등, 2011). 이러한 상황에서 각 인구집단의 민감도와 적응 능력은 폭염에 의한 건강영향을 결정하는 중요한 요인이 될 수 있다.

예를 들면, 급속히 진행되고 있는 도시화는 민감도와 적응 능력 모두에 영향을 끼칠 수 있다. 인구 고령화와 도시화가 가속되고 있는 우리나라 대도시의 경우 고층, 고밀도로 개발된 도시 구조가 폭염 민감도를 높이고 대응 및 회피수단 부족을 초래하여 장애인, 노약자, 영유아, 환자, 임산부, 특정 작업환경의 노동자 등에서 취약성이 높아질 것이라고 예측하였다(환경부).

폭염이 유발할 수 있는 오존 농도 증가로 인한 건강피해에 있어 노령화 등 인구학적 특성, 노출 정도, 적응 능력 등을 고려했을 때 서울과 대구 지역이 현재 뿐 아니라 미래에도 가장 취약할 것으로 예측하였고, 장기적인 미래에는 노출이 크게 증가하는 인천 지역이 가장 취약한 지역이 될 수 있다고 주장하였다(이재범 등, 2011).

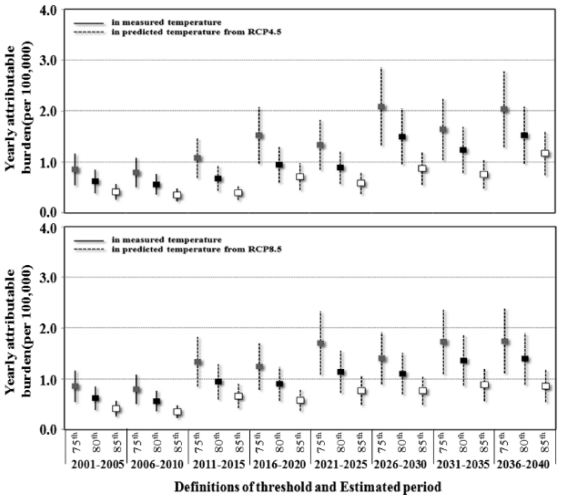


그림 8.17 역치온도(75, 80, 85 백분위 일평균 온도)에 따른 2001~2040년의 연간 사망 부담(양지훈 등, 2013)

노인 인구수, 거주형태, 경제적 변수, 녹지 비율 등을 고려하여>? 미래 기후 시나리오에 따른 서울 각 지역의 폭염 취약성을 분석하였다(김은영 등, 2012). 이에 따르면 폭염에 가장 취약한 지역으로 송파구, 강남구, 영등포구가 지적되었으며 이에 대한 대책으로 녹지 확보 등 중장기적 대책이 필요하다고 주장하였다. 상대적으로 폭염영향이 낮은 도봉구, 종로구, 관악구 등은 취약계층의 비율이 상대적으로 높으므로 이들을 대상으로 하는 적응 대책 수립이 필요하다.

그림 8.17은 폭염에 의한 사망부담을 예측한 것이다. 2001년부터 2010년까지 인구 10만 명당 0.7명에서 2036년에서 2040년 인구 10만 명 당 약 1.5명까지 증가할 수 있음을 나타내고 있다(양지훈 등, 2013).

8.3.2 기상재해

향후 기후변화의 영향으로 인해 한국의 강수량과 강수 집중도는 증가할 것으로 예측된다(기상청, 2013). A1B 시나리오에 따르면 강수집중도의 증가는 소규모 가뭄의 발생빈도 감소, 그리고 대규모 가뭄의 빈도와 강도의 증가로 나타날 것으로 예상하였다(최기선 등, 2009). 이는 가뭄재해의 빈도는 줄겠지만 한번 발생한 재해가 대형화 하고, 피해가 커질 것을 의미하며, 이에 따라 사회경제적 피해액 또한 커질 것임을 의미한다.

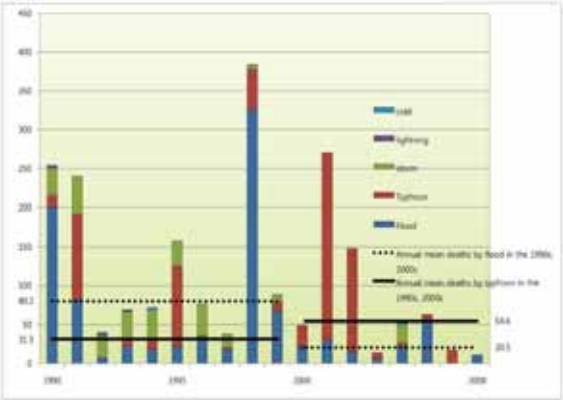


그림 8.18 기상재해로 인한 연평균 사망자수 변화(Myung and Jang, 2011)

따라서 기후변화와 연관되어 발생할 피해는 앞서 설명한 태풍과 함께, 가뭄의 강도변화도 중요할 것으로 보인다. 태풍으로 인한 인명의 피해(사망 외에 건강 피해까지 포함)는 호우와 강풍으로 주로 직접적인 피해가 발생하며 그 피해는 단기적이고 가시적이다. 반면에 가뭄으로 인한 피해는 장기적이고 광범위하게 나타날 수 있다. 수자원 부족으로 수질악화를 초래할 것이며 이는 여러 가지 건강문제의 원인으로 작용할 것이다. 폭염은 가뭄과 동반되는 현상으로 최근 피해가 증가하고 있는 바 앞으로 계속 더 중요한 문제로 대두 될 것이다.

1990년부터 2008년 동안 기상재해로 인한 연평균 사망자수의 변화를 10년 단위로 관찰한 연구(Myung and Jang, 2011)에 의하면 호우는 3.9배 감소하였고, 태풍은 1.7배 증가하여 우리나라에서 가장 많은 사망자를 일으킨 재해는 호우였지만, 점차 태풍으로 변화하고 있는 것으로 나타났다(그림 8.18). 이러한 변화는 그 동안 가장 많은 인명피해를 발생시킨 호우에 대한 적응력 강화 및 예방대책의 발전으로 사망자수가 감소하였으나, 상대적으로 태풍에 대한 대비책은 미흡하였다는 것을 보여준다. 이는 향후 기상재해로 인한 예방 대책 수립시 관리해야 할 중점대상이 변화하였다는 것을 시사한다.

기상재해로 인한 가족과의 사별, 재산손실, 사회 붕괴는 정신건강과 관련한 문제를 증가시킨다. 국내에서는 아직까지 재해 후 외상 스트레스성장애(Post-traumatic stress disorder, PTSD)에 대한 연구 논문은 미흡하지만, 이미 외국에서는 일부 연구들을 통해 재해 이후 스트레스성 장애의 증가가 관찰되어왔다. 태풍 피해자들이 신체적으로 복통, 심계항진, 두통의 신체 증상을 겪었고, 우울증 및 외상후 스트레스 장애도 겪은 것을 확인하였다(정순돌 등, 2010). 2011년 7월에 발생했던 중부지역 집중호우에 대하여 사망자 유가족의 PTSD를 측정한 조사 결과 68%가 고위험군인 것으로 나타났다(질병관리본부, 2012).

향후 기상재해로 인한 피해가 젊은 연령층에 비해 노년층이 더 클 것으로 예상된다(IPCC, 2014). 그 이유는 향후 50년간 많은 인구들이 노령화될 것인데, 노년층이 젊은 연령 집단들에 비해 폭염, 태풍 및 호우와 같은 기상 이변들에 의해 발생하는 피해에 더 취약하기 때문이다.

8.3.3 대기질과 알레르기

기후변화로 인한 건강영향평가에서 대기오염물질은 주로 폭염의 영향을 고려할 때 혼란변수로서 간주되었고 기후변화에 따른 대기오염의 변화와 그에 따른 질환의 영향과 사망자수의 변화에 대한 직접적인 연구는 이루어지지 못하고 있다.

이를 위해서는 각 계절 별 기후변화에 따른 대기질의 변화 예측이 선행되어야 하고 이를 토대로 대기질 변화에 따른 종합적인 건강영향 평가가 이루어져야 할 것이다.

특히 여름철 오존농도 증가는 기후변화 관련 대기질 악화 및 그로 인한 건강영향평가에 주요 대기오염물질로 작용할 것으로 예상된다.

더불어 21세기 말에 이르면 이산화탄소 농도가 약 2

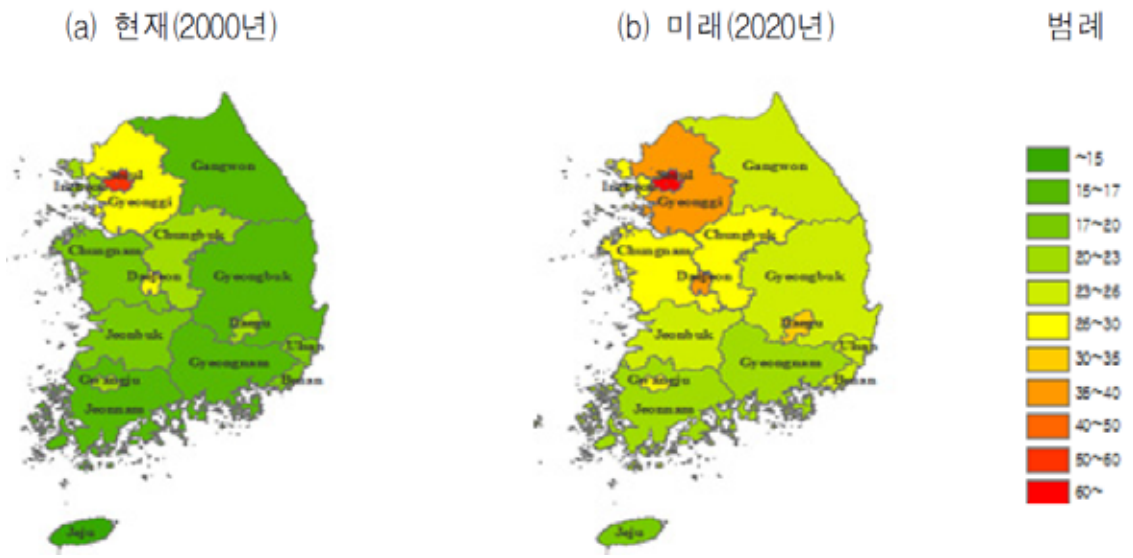


그림 8.19 SRES A1B시나리오에 따른 24시간 초미세먼지(PM2.5)의 2000년과 2020년 비교(국립환경과학원, 2013)

배가 될 것으로 예측되어, 자작나무의 꽃가루 시기가 약 1개월 빨라지고 그 농도는 약 50% 증가할 것으로 예측된다(Gracia-Mozo et al., 2006). 그리고 초미세먼지(PM2.5)의 농도도 SRES A1B 시나리오에 따라 수도권지역에서 큰 증가를 보이고 있다(그림 8.19; 국립환경과학원, 2013). 따라서 기후변화로 인한 나무 및 초본의 꽃가루 시기가 증가하고 노출이 증가되어 알레르기 질환이 증가할 뿐만 아니라 증상의 강도와 기간 증가로 인한 질병 부담이 증가할 것으로 예상된다(Hong et al., 2011).

8.3.4 곤충 및 설치류 매개 감염병

현재 전 세계적으로 진행되고 있는 기후변화로 인해 질병 발생 양상도 많은 영향을 받을 것으로 예측되고 있다. 국내에서도 기후변화 관련 질병이 급증하고, 사라졌던 질병이 다시 발생하는 등 기후변화가 건강에 영향을 미치고 있는 것이 여러 분야에서 확인되고 있고, 그런 영향은 향후 계속 증가할 것으로 예상되고 있다.

특히 곤충 매개 질병이 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 기후 변화로 인한 기온의 상승은 낮은 기온으로 인해 현재는 원충의 분화, 성숙이 불가능한 지역에서의 원충의 생장을 가능케 한다. 따라서 위험지역 경계부나 위험지역 내 고산 지대, 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.

한편 뎅기열 발생 위험지역은 1월 평균기온이 10℃ 이상인 지역이다. 현재 국내에서는 이와 같은 지역을 찾기는 어려우나 기후변화로 인한 기온상승으로 뎅기열 바이러스의 주 매개모기인 Aedes aegypti 또는 Aedes albopictus 등의 서식조건이 형성되면 국내에서도 뎅기열이나 이와 매개모기가 같은 치쿤구니야열 바이러스의 전파가 가능할 것으로 예상된다.

상기한 바와 같이 기후변화에 의해 우리나라에서 발생이 증가하리라고 예상되는 말라리아는 삼일열 말라리아이다. 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.

뎅기열이나 황열, 웨스트나일열 등의 모기 매개 질환은 전 세계적으로 발생이 증가하고 우리나라의 해외 여행객도 증가함에 따라 수입형 사례들이 지속적으로 증가할 것으로 예상된다. 뎅기열이나 황열 등이 토착화하기 위해서는 영장류나 원숭이에 의한 jungle cycle이 존재해야 하는데 우리나라의 경우는 단기간에 이같은 일이 현실화하기는 힘들다. 그러나 상기한 바와 같이 우리나라 대부분의 해안 지역이 아열대화할 경우 jungle cycle이 생겨날 가능성을 배제할 수 없다. 또한 일부 뎅기열의 경우 감염된 사람에서 높은 바이러스 역가로 바이러스 혈증이 유발되어 사람 간 전파(모기 매개)가 가능하므로 jungle이 없다 하더라도 주의가 요망된다. 웨스트나일열의 경우 사람이나 영장류 뿐만 아니라 조류, 말 등 다른 동물도 광범위하게 감염시킬 수 있으므로 이들 동물에 의한 해외유입형 사례에 의해 광범위하게 퍼질 가능성이 있으며 이는 미국에서 충분히 입증된 바 있다. 특히 국내외 교류가 점점 활발해져가는 우리나라의 특성을 고려하면 이러한 위험성이 항상 존재하고 있다.

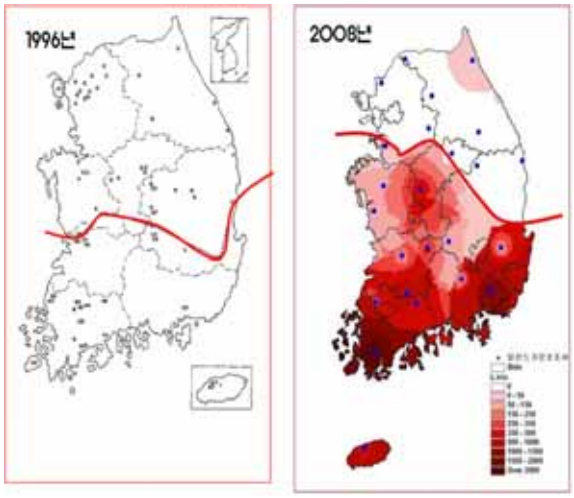


그림 8.20 활순털진드기(Leptotrombidium scutrellare)의 분포지 확대(질병관리본부, 2010)

기후변화로 인해 말라리아, 뎅기열뿐만 아니라 현재에는 국내에서 나타나고 있지 않지만 기후변화로 인해 아열대성 기후로 변한다면 웨스트나일열, 치쿤구니야열 등이 해외에서 유입되어 국내에 확산 될 우려가 있다. 또한 라임병, 진드기뇌염, 중증 열성혈소판감소 증후군, 바베시아 등 참진드기 매개 질병들이 재출현 혹은 병원체의 다양성으로 위협 받을 수 있을 것으로 보인다.

특히 쯔쯔가무시증을 매개하는 주요종인 활순 털진드기의 분포가 1996년에 비해(Lee et al., 2011) 2008년에는 충청지역에서 경기도 지역까지 북상한 것이 확인된 것에서 볼 수 있듯이 털진드기 등을 매개체로 하

는 질병들도 공간적 분포가 확산될 것이고, 이에 따라 건강부분에 있어서 취약계층의 더 많은 사람들이 영향을 받을 것으로 예측된다(그림 8.20).

8.3.5 수인성 및 식품매개 감염병

국내 기온 상승이 IPCC scenario A2를 따를 경우 국내 식중독 환자수는 22.2% 증가할 것으로 예측하였다(한국보건사회연구원, 2008). GAM 분석을 통해 예측한 결과, 국내 기온 상승이 IPCC scenario A2를 따를 경우 세균성이질이 2050년에는 25%가 증가하고, 2090년에는 49% 증가할 것으로 보았다. 예측 모형을 이용하여 2050년대에 기온이 3℃, 2080년대에 5℃ 상승하면 식중독의 발생은 각각 15.8%, 26.4%의 증가가 전망되고 환자 수는 각각 35.3%, 49.4%가 증가하는 것으로 예측하였다(채수미 등, 2011). 식중독 발생건수는 2050년에 273.8건, 2080년에 297.4건이 증가하고 식중독 발생환자의 수는 온도의 상승에 따라 2020년 35.3%, 2050년 49.4%로 증가할 것으로 예측하였다.

현재의 식중독으로 인한 사회경제적 비용을 추정한 연구가 이수형 등(2010)에 의해 이루어졌다. 이 연구에서는 조건부가기측정법(contingent valuation method) 중 이중경계 양분선택형 질문법(double ~ bounded dichotomous choice)을 이용하여 식중독 발생 감소에 대한 지불의사금액을 추정하였다. 식중독 발생으로 인한 사회·경제적 잠재적 손실비용은 연간 1조 579억원에서 1조 2,279억원으로 추정되었다. 이계임(2007), 이수형 등(2010) 등의 연구는 모두 COI 방법을 이용하여 식중독 발생에 따른 연간 손실비용을 추정하였는데 최대 1조 5천억원(이계임 등) 최소 1조 743억원(이수형 등, 2010)으로 추정하였다.

2005~2008년도 설사질환으로 청구된 건강보험공단 자료와 기후변화정보센터에서 제공하는 기후변화 시나리오자료를 이용하고 기존 연구에서 제시된 기후와 설사 질환의 관련성 지표를 적용하여 2038년, 2058년도의 환자 발생 및 진료비 상승을 예측한 결과, 2038년과 2058년에 환자 발생이 각각 0.9~2.4% 및 4.2~11.2%, 연간 진료비가 각각 60~160억원 및 290~760억원 상승할 것으로 추정하였다(채수미 등, 2011).

8.4 취약성의 주요원인

8.4.1 폭염

폭염에 대한 취약성은 폭염에 대해 노출이 클수록, 민감도가 높을수록, 또한 적응능력이 낮을수록 높아진다고 볼 수 있다.

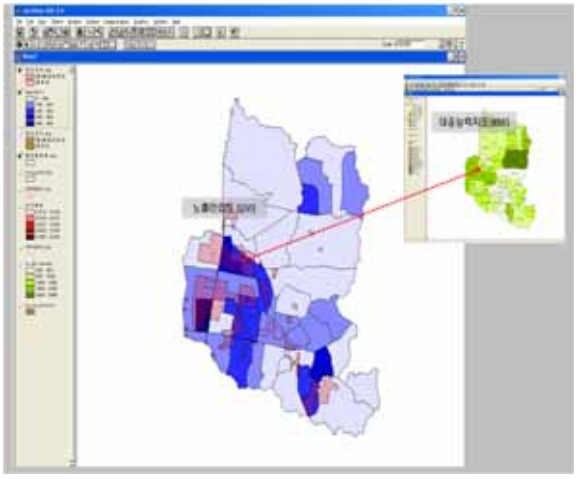


그림 8.21 부천시 폭염 취약성 평가지도(환경부, 2009)

노출에 대해서는 지리적 위치나 지형, 토지 이용 및 녹지율, 도시 구조와의 배치, 건물 밀도 등이 중요한 역할을 하고 있으며 따라서 고층, 고밀도로 개발된 도시지역이 도시근교나 농촌에 비해 폭염의 강도가 높다(WHO, 2003). 또한 외부의 기온에 더 많이 노출되는 활동이 높을 것으로 예상되는 남성에서, 폭염 기간 동안의 열 관련 질환 발생이 더 높았다(조수남 등, 2012, Na et al., 2013).

일반적으로 노인의 경우 경제활동이 없기 때문에 노출이 더 많다고 볼 수는 없으나, 민감도와 적응능력 면에서 취약계층으로 분류될 수 있을 것이다. 65세 이상의 노인에서 폭염에 의한 사망률 증가가 더 높게 나타났으며(양지훈과 하종식, 2013), 온열 손상도 다른 연령층에 비해 중증도가 더 높았다(Na et al., 2013).

사회경제적 요인 역시 취약성을 결정하는 요인이 된다. 교육 수준이 낮을수록 폭염이 사망에 미치는 영향이 더 큰 것으로 나타났는데(Son et al, 2012), 이는 적응능력의 차이로 인해 나타나는 취약성이라고 볼 수 있다.

각 지역별로 이러한 취약성을 분석하는 것은 효과적이고 효율적인 폭염 대책을 수립하는 데 중요하다. 전

그림 8.22 서울시의 폭염 취약 요인 분포도(김은영 등, 2012)

국 단위에서는 경남, 경북, 부산, 전남 등의 남부 지방에서 폭염에 대한 취약성이 높은 것으로 분석되었다(신호성 등, 2012). 또한, 그림 8.20과 같이 부천을 대상으로 거주 인구 통계, 도시구조, 토지이용, 사회기반시설 등의 정보를 이용한 취약성 평가지도가 작성된 바 있으며(환경부 2009), 서울시에서도 온도 시나리오, 폭염 취약요인, 폭염 적응 요인 등의 지표를 이용하여 각 지역별 취약성을 평가하였다(김은영 등, 2012, 그림 8.21).

8.4.2 기상재해

기상재해 유형별 연평균 피해액은 태풍과 호우에서 가장 크게 나타나며, 지역별로는 강원도, 경상남도, 경상북도 순이였다(박종길 등, 2005). 1987년부터 2003년까지의 자료를 분석한 결과, 강원도, 경상남도, 경상북도 세 곳의 행정구역 모두 태풍 피해액이 가장 높았다. 강원도의 경우 전체 태풍 피해액 약 3조 3,388억 중에서 태풍 루사에 의한 피해액이 약 2조 5천억이며, 경남은 약 2조 9,155억 중 태풍 매미가 약 1조 9천억을 차지하였다. 그에 비해 호우로 인한 피해액은 경기도, 강원도, 경상남도가 높은 순으로 나타났다(박종길 등, 2005). 1981년부터 2010년까지 최근 30년 동안 기상재해 빈도수는 감소하는데 비해 피해액은 전체적으로 증가한 것으로 나타났다(성지혜 등, 2011). 사망자수는 집중호우가 있었던 1998년이 384명으로 가장 많은 것으로 나타났고, 루사가 발생했던 2002년이 350명으로 두 번째인 것으로 나타났다. 호우와 태풍으로 인한 총 피해액 지역별 순위는 강원, 경남, 경북 순서로 높게 나타났으며 경기도의 경우 피해액에 비해 인명피해가 훨씬 높았다(성지혜 등, 2011).

1990년에서 2008년 동안 우리나라에서 발생한 기상재해로 인한 사망자의 인구학적, 지리학적 특성과 사망원인을 분석하였다(명형남과 장재연, 2011). 사망원인은 익사가 1,237명으로 가장 많았고, 성별로는 남자가 인구 100만명당 3.11명으로 여자에 비해 1.9배 높은 것으로 나타났다. 특히 남자는 여자에 비해 '하천에서의 익사'와 '배의 침몰에 의한 익사'가 높은 것으로 나타났다. 이는 급류로 불어난 하천을 무모하게 건너는 시도 등의 위험한 행동들을 남자가 더 많이 시도한 결과로 추정할 수 있다. '배의 침몰에 의한 익사'에 남자가 취약한 것은 생계형 고기잡이 배로 조업 중에 침몰하는 경우가 많은 우리나라의 상황이 반영되어 나타난 것이다. 연령별로는 노령일수록 증가하는 경향을 보였고, 지역별 연평균사망자 비율은 지방 해안지역이 인구 100만명당 6.19명으로 가장 높은 것으로 나타났다(표 8.5). 기후변화로 인한 해수면 상승, 해수면 온도의 상승 심화, 열대성 싸이클론의 강화, 태풍 해일 특성의 변화 등은 극심한 기상재해를 일으키는데, 이로 인해 해안 지역 사람들의 건강피해 및 사회경제적 피해를 가중시킬 수 있다는 국외연구의 결과(Church, 2001 Emanuel, 2005; Webster et al., 2002; Meehl et al., 2007)와 부합되었다.

국외에서는 기상재해로 인한 피해에 미치는 요인을 이해하는 하나의 열쇠로서 취약성 평가 연구를 진행하고 있다(Heinz, 2002; Vale and Campanella, 2005; Li and Li, 2011). 그러나 우리나라의 경우 취약성의 원인들을 분석한 연구는 거의 찾아보기 어렵다. 기상재해에 대한 취약성의 요인은 개인의 특징(그들이 거주하

는 장소, 나이, 소득, 교육 및 장애)과 사회 및 환경적 요소들에(재해 대비의 수준, 건강부분의 대응 및 환경 붕괴) 의해 좌우된다(IPCC, 2007). 따라서 향후 기상재해로 인한 인명 피해 예방 및 적절한 적응방안 수립을 위해서는 이러한 연구들이 필요하다.

간 평균 오존 농도의 환경기준치 초과 빈도 증가를 보면 영남권 13.1일, 충청권 9.1일, 강원권 8.4일, 수도권 7.8일, 호남권 3.1일이었다. 일산화탄소(CO)의 경우, 기후변화로 인하여 수도권에서 11.74 ppb 상승하여 가장 높은 농도의 증가율을 보였다. 이산화질소(NO)

표 8.4 식품매개질환 하위 20개 지역의 취약성 하부요소 분포(신호성 등, 2012)

시군구명	기상요소	질환분포	환경요소	취약계층	사회여건	보건의료체계
울산남구	7	9	3	3	4	3
경북울진군	9	1	3	8	6	7
부산동래구	7	8	1	3	7	9
경북영덕군	9	1	2	8	7	5
제주서귀포시	8	5	9	8	6	4
경기가평군	8	6	9	9	3	3
전남보성군	9	4	3	8	7	1
전남고흥군	5	1	9	9	3	6
전남산청군	7	1	9	9	9	6
경남하동군	9	1	7	9	6	8
부산중구	4	9	3	4	9	0
경북영주시	3	9	9	8	6	5
전북군산시	0	9	6	8	0	8
경기성남시분당구	8	9	1	1	0	2
부산수영구	8	9	0	2	7	8
전남순천시	9	9	9	7	1	0
경기양평군	9	5	8	6	4	9
인천중구	2	9	9	9	6	8
경북영천시	9	7	8	8	8	4
경기포천시	9	9	9	7	2	9
하위 20개 지역 평균	6.95	6.05	5.85	6.7	5.05	5.25
상위 20개 지역 평균	1.7	2.3	3.2	2.9	4.6	4.2
차이	5.25	3.75	2.65	3.8	0.45	1.05

표 8.5 기상재해 유형별 지역 사망자 비율(Myung and Jang, 2011)

재해 유형		전체인구	홍수	태풍	폭풍	한파	낙뢰	합계
광역도시	내륙지역	15,593,082	0.29	0.26	0.00	0.00	0.00	0.55
	해안지역	7,382,500	0.35	0.39	0.20	0.00	0.00	0.94
지방	내륙지역	16,374,713	2.47	0.73	0.01	0.00	0.02	3.23
	해안지역	7,314,474	0.84	3.11	2.17	0.06	0.01	6.19

8.4.3 대기질과 알레르기

IPCC SERES AIB 시나리오에 따라 2055년의 우리나라 기후변화를 예측하고 이에 따른 대기질 변화를 여름철에 한정하여 수행한 결과, 2055년에는 1995년 대비 CO는 2.9%, NOx는 2.8%, O 은 4.8% 증가할 것으로 예측되었다(배현주 등 , 2010). 여름기간 동안 8시

는 수도권 지역에서 약 1.04 ppb 상승하여 가장 높은 농도의 증가율을 보였으며, 충청권과 영남권의 경우도 각각 0.17 ppb와 0.15 ppb 가량 상승하였다. 수도권에서 일산화탄소 및 이산화질소의 농도 증가폭이 큰 것은 수도권에 자동차가 많아 이들 오염물질의 배출이 많은 것을 반영하고 있기 때문이다. 따라서, 해당 연구 결과를 해석할 때에는, 기후변화에 의한 영향과 대기오염

물질 배출원 증가로 인한 영향이 혼재된 결과라는 점을 고려해야 한다.

GIS를 이용해 기후변화 취약성을 평가한 결과, 오존 농도는 대구분지 주변이 다른 지역에 비해 높게 나타났으며, 서울을 포함한 6개 광역 대도시권에서 높게 나타났다(유성진 등, 2012, 그림 8.22a). 대구 지역은 다른 지역에 비해 자동차 수가 많고, 분지 지형으로 인해 바람이 상대적으로 적게 불어 고농도 오존에 의한 피해가 증가될 수 있다. 미래에는 취약지역이 내륙 지방에서 해안 지방으로 확대되어 높아지는 경향을 볼 수 있다(그림 8.22b).

여름철 대도시를 중심으로 오존, 일산화탄소, 질소산화물 등 대기오염물질의 농도 증가는 이들 물질에 취약한 질환, 즉 천식 등 호흡기 질환, 심혈관 질환, 저체중아 발생의 증가 및 초과 사망을 야기할 수 있다. 특히 고령인구는 호흡기 질환 이환율도 높고 대기오염물질의 영향도 큰 것으로 보고되고 있어(이미영 등, 2000). 기후변화에 따른 건강영향에 보다 취약할 것으로 파악된다.

서울지역의 사회경제적 지위가 낮은 집단에서는 높은 집단에 비해 PM 이 47.37 ㎍/㎥ 증가할 때 천식발작을 일으킬 위험이 5.3% 더 컸고, 오존은 7.7% 더 높았다. 즉 대기오염이 천식 발작이 발생할 위험을 높이는데 이러한 위험은 사회경제적 지위가 낮은 사람들에게 더 크게 작용한다고 할 수 있다.

간접적으로 대기오염이 사회경제적 지위에 따라 다르게 작용할 수 있음을 보여주고 있는 연구결과가 있다(김지영 등, 2006). 즉 고온의 영향을 평가할 때 대기오염물질을 혼란요인으로 보정한 경우와 하지 않은 경우를 비교해 보면, 저소득층의 경우 대기오염물질을 보정하지 않은 경우는 기온 1℃ 증가로 인한 초과사망률이 높게 나왔는데 이는 저소득층이 대기오염물질로 인한 건강영향을 상대적으로 더 많이 받고 있다는 유추가 가능하다. 이러한 현상은 특히 고온(30.5℃이상과 31.7℃ 이상)에서 더 많이 나타난다. 따라서 지구온난화로 여름철 온도가 증가하면 저소득층은 고온에 의한 직접적인 건강영향에 더불어 증가된 대기오염의 영향 또한 더 크게 받을 가능성이 높을 수 있음을 시사하고 있다.

국내의 알레르기질환에 대한 취약집단을 규명한 일부 연구에서 취약지역 및 성별에 대한 보고를 한 바 있다. 2010년에 시행한 국내 어린이와 청소년의 알레르기질환 유병률 조사 결과를 살펴보면(안강모 등, 2011), 천식의 경우 통계적으로 유의하지는 않았지만 초등학생에서는 농촌지역이 높고 중학생에서는 농촌지역이 낮게 나타났다. 이는 초등학생과 중학생에서 천식의 위험요인이 다르게 작용할 수 있다는 점을 시사하는 소견이지만 추후 연구가 필요한 부분이다.

8.4.4 곤충 및 설치류 매개 감염병

기후변화 취약성 평가를 GIS 기반 시공간 정보를 이용하여 매개체 감염병을 분석한 결과는 다음과 같다(유성진, 2012). 민감도 지표로 인구비율과 농경지 분포, 농업인구, 적응지표로 10만명당 의료기관수와 천명당 의료 종사자수 등, 노출지표로 7,8월과 10, 11월 기후요소를 적용하였다. 즉 건강 피해를 직접적 영향을 미치는 기후요소 뿐만 아니라 사회, 경제, 환경적인자를 도입하였다. 지역 특이성이 높은 말라리아는 군사분계선 근방인 경기도(강화군)와 강원도 북부(철원군, 연천군)의 농촌지역이 취약성이 높게 나타냈다. 2030년에는 취약성 지역이 기존지역에서 주변으로 확대되는 경향을 나타내 기온 상승으로 인한 모기 서식처가 증가할 것으로 해석하였다. 쯔쯔가무시증은 남서 평야지대인 전라도와 충청도에서 취약성이 높게 나타났으며 미래에는 취약 지역이 남부지방에서 중부 지방으로 , 해안지방에서 내륙지방으로 확대되는 것으로 예측하였다. 연령층으로는 쯔쯔가무시증은 65세 이상, 말라리아 20~64세로 외부활동이 높은 연령이 취약하였다. 이 연구를 통한 건강 피해를 최소화하기 위해 의료체계의 개선과 의료 인프라 구축, 생활환경 개선을 강조하였으며, 감염병을 매개하는 숙주 의 생태에 관련한 생물기상학의 정보가 축적되어야 할 것을 강조하였다.

쯔쯔가무시증의 취약성 평가를 위한 시공간 분포 파악을 위해 2006~2010년 건강보험 청구자료를 이용하였다(신호성 등, 2012). 기후변화 취약성 지표의 신뢰도와 타당성을 분석하기 위해 사용된 변수는 기상자료, 질병발생율, 기후변화 영향 관련 환경요인, 취약계층

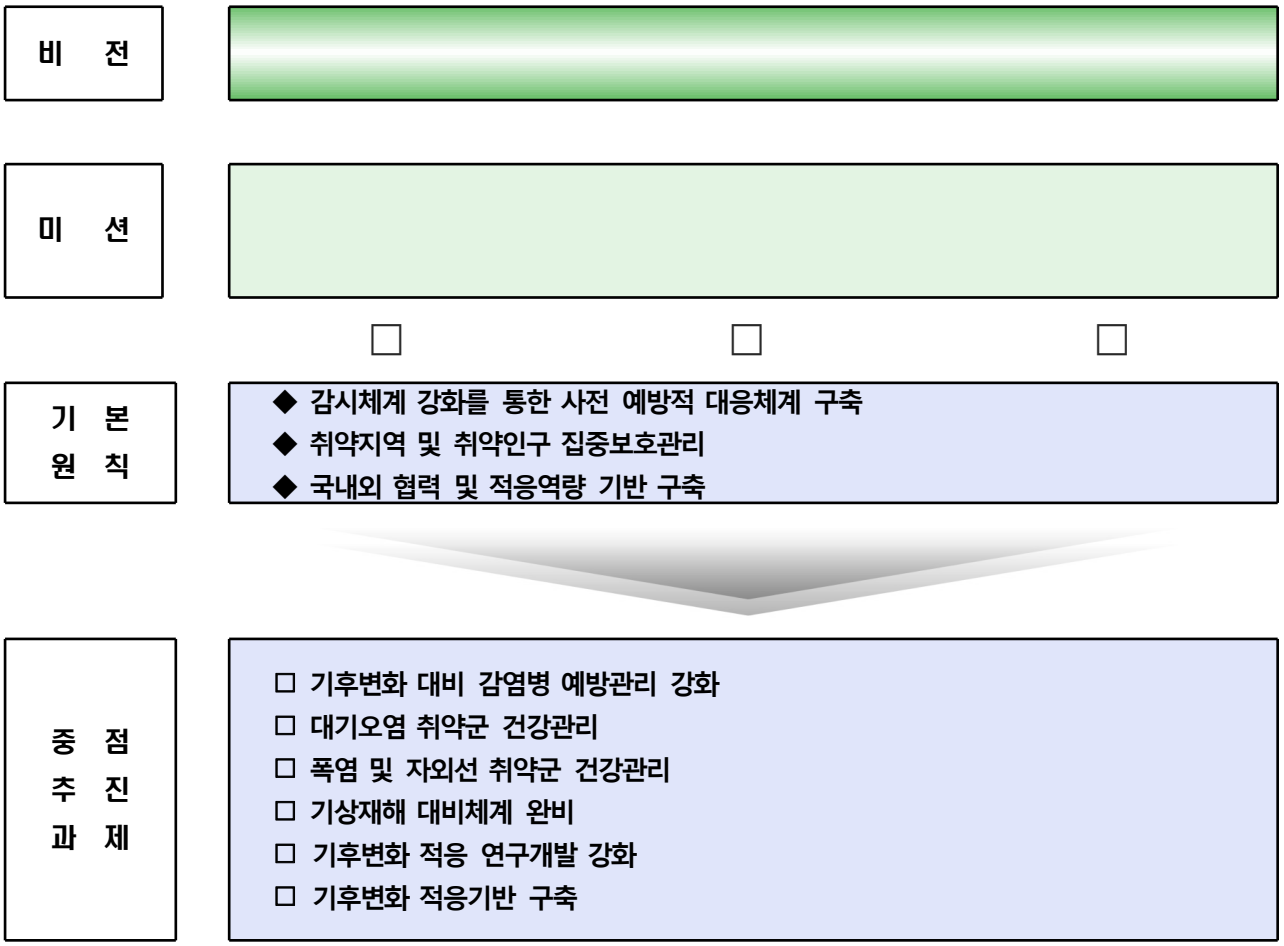


그림 8.23 「기후변화 적응 건강관리대책(2011 ~ 2015)」의 개요(질병관리본부, 2010)

분포, 사회적여건, 보건의료제도로 6개 영역을 사용하였다. 그 결과 쯔쯔가무시증의 상대위험비는 경기, 충북, 충남, 강원대 일대와 경북지역이 전국 평균보다 높았으며, 취약지역은 전라남북도, 경상남도 취약성이 집중되었다고 부산광역시의 경우 4개구가 취약한 것으로 나타났다.

8.4.5 수인성 및 식품매개 감염병

인구집단별 수인성 및 식품매개 감염병 발생 수준을 비교하여 질병발생에 대해 취약한 인구를 파악하고, 인구집단별 기후요인과 질병발생간의 연관성을 분석 비교함으로써 기후변화에 따라 질병발생 위험이 특히 높은 취약 인구집단을 탐색할 수 있다. 건강보험심사평가원 청구자료를 이용한 김동진 등의 연구(2012) 결과, 남녀 모두에서 19세 미만의 설사질환 유병률이 다른 연령에 비해 높게 나타났고, 단위온도 증가에 따른 설사질환 발생률 변화의 정도를 연령구간별로 산출하여 비교한 결과 큰 차이를 나타내지 않았다.

더 나아가 기후변화에 따른 수인성 및 식품매개 감염병 발생의 취약인구를 종합적인 취약성 지표를 개발하여 파악하는 연구를 수행하였다(신호성 등, 2012). 이 연구에서는 수인성 및 식품매개질환의 기후변화에 따른 취약성을 지역별로 평가하기 위한 지표를 개발하고 이 지표가 하위 20%에 해당하는 취약지역을 파악하였다. 취약성 평가지표로는 기상요소, 질환분포, 환경영향, 질환 발생 및 적응능력을 고려한 취약계층, 사회여건/건강발현 요소, 보건의료체계를 포함하였다. 분석 결과 수인성 및 식품매개질환에 취약한 하위 20개 지역은 경기도 포천시, 성남시 분당구, 양평군, 가평군과 경남 산청시, 하동군, 경북 영천시, 울진군, 영주시, 영덕군, 부산 수영구, 동래구, 중구, 울산 남구, 인천 중구, 전남 보성군, 순천시 고흥군, 전북 군산시, 제주 서귀포시로 나타났다. 하위 20개 지역

의 취약성 하부요소 분포는 표 8.5와 같다.

8.5 적응옵션

8.5.1. 기후변화 건강적응정책

8.5.1.1 추진경과

국내 기후변화 적응대책은 2007년 제4차 기후변화대응 종합대책부터 추진하기 시작하였다. 2008년 기후변화대응 종합기본계획을 수립하였으며, 국가 기후변화 적응 종합계획 수립을 명시한 이후 적극적으로 진행되었다. 건강분야 대응대책을 위해 2007년 질병관리본부에 기후변화대응 TF설치하였고 2008년 11월 '기후변화건강포럼'을 결성하여 기후변화적응 건강관리 정책의 기초 마련, 민간 전문가 및 부처 간 교류와 협력체계를 마련하였다. 2009년 6월 '녹색성장 국가전략 및 5개년 계획'의 10대 정책과제 중 기후변화 적응역량 강화부문에 '기후변화대응 국민건강관리 강화' 계획으로 보건복지부의 건강관리대책(안)이 반영되었다. 2010년에는 저탄소 녹색성장기본법 시행에 따른 기후변화 적응 기본 5개년 계획으로 범정부 차원의 국가 기후변화 적응 기본대책('11~'15)을 수립하였다. 2010년 11월에는 '기후변화 건강영향 자문위원회'를 구성하였고, 12월에는 '기후변화적응 건강관리대책('11~'15)을 수립하여 그림 8.23과 같이 기후변화대응 역량을 강화하고 있다. 국내의 기후변화로 인한 건강영향을 평가하고 적응대책 수립을 제안하기 위한 연구는 한반도 기후변화 영향평가 및 적응프로그램 마련 연구(장재연 등, 2003)를 시작으로 2008년 이후 집중적으로 이루어졌다.

국가차원의 분야별 기후변화 적응대책 수립연구로 국가기후변화 적응 마스터플랜 수립 연구가 시행되었으며(환경부 등, 2008b) 보건복지부(장재연과 김시헌, 2008), 환경부(장재연 등, 2008) 등 건강영향과 관련된 정부부처의 적응대책 수립의 근거를 마련하는 연구가 시행되었다. 지방자치단체별로는 서울, 부산, 인천, 강원도 등에 연구가 진행되었다.

기후변화로 인한 건강적응대책은 새로운 제도나 시스템으로 달성되는 것이 아니라 기존의 보건의료시스템의 강화를 통해서 상당부분 달성될 수 있다. 또한 기후변화에 적응하기 위해 계획된 것이 아니더라도 기후변화 건강적응대책으로 유용한 프로그램이 다수 있을 수 있다(장재연과 김시헌, 2008).

또한 적응대책을 수립 및 실시할 때는 정부부처 간, 다학제 간, 학문분야 간의 원활한 공조체계를 바탕으로 수립하여야 한다. 적응대책을 성공적으로 수행하기 위해서 관련 부처와 공동연구 추진 방안 모색이 필요하며, 아울러 국민과 적극적인 의사소통을 통해 정책실현의 효율성을 증진시켜야 한다. 기후변화 건강분야에서는 기후변화건강포럼이 결성, 운영되어 이런 역할을 수행해왔다. 기후변화건강포럼은 담당 정부부처 및 다양한 학문영역, 시민단체, 학계, 기업 등 약 240여명의 전문가들과 약 400여명의 온라인 회원들이 참여하고 있는 모임으로 2008년 11월 창립한 이래 2013년 현재까지 총 32차 월례포럼과 5차례의 종합학술대회, 1차례의 국제학술대회, 전문가 강연, 미래세대 학술지원, 지자체 공무원 교육 등을 통하여 여론 환기, 정책 제안 등 활동을 꾸준히 하고 있다.

8.5.1.2 건강분야별 추진사업

기후변화에 대한 취약성들을 감소시키기 위해서는 적응사업이 필요한데, 조기경보시스템 구축, 교육 및 홍보, 캠페인, 모니터링 등의 다양한 적응프로그램을 통해 피해를 예측하고, 이를 예방하거나, 최소화시키기 위해 노력하고 있다.

기후변화 건강 적응사업으로 보건복지부에서는 2010년 기후변화 건강영향 감시체계 구축에 대한 기획연구를 시작으로 이를 실용화하기 위한 연구를 진행하고 있다. 또한 기후변화로 인한 건강영향을 파악하고 예측 및 관리를 위한 연구 및 사업을 본격적으로 진행하고 있다.

폭염으로 인한 건강피해를 줄이기 위한 적응 대책으로 기상청에서 기온과 열지수를 고려한 폭염예보제를 2008년부터 본격 시행하고 있으며, 2009년에는 초과사망을 고려한 '고온건강경보시스템'을 운영하고 있다. 단기대책으로는 매년 소방방재청 중앙안전재난관리본부에서 매년 폭염종합대책을 수립하여 부처별 역할을 부여하여 폭염으로 인한 건강피해에 대응하고 있다(소방방재청, 2009). 중앙안전재난대책본부에서는 부처 간의

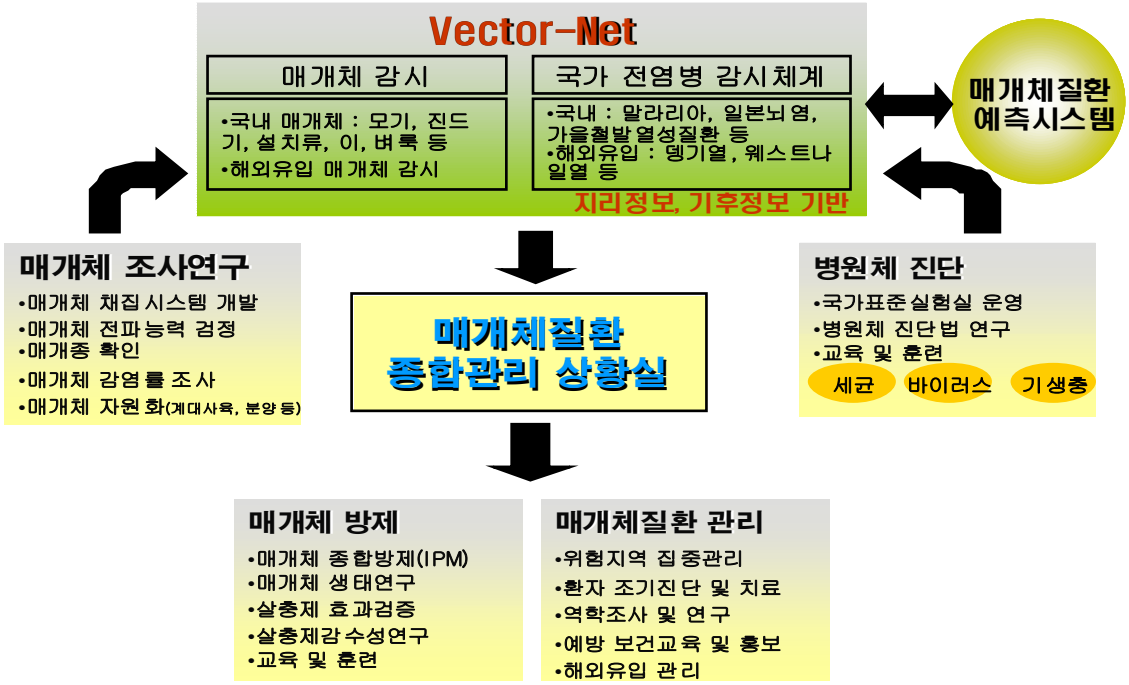


그림 8.24 매개체질환 종합 관리체계(환경부, 2008b)

협조체계유지와 연계·운영의 강화를 통한 폭염상황관리 체계의 확립 및 관계부처 합동지침을 중심으로 노인 등 취약계층을 위한 특별보호 대책과 폭염특보제 시행에 따른 국민행동요령 홍보 등 한발 빠른 대비 등을 기본방침으로 추진되고 있다(소방방재청, 2009). 세부추진사항으로 무더위쉼터, 무더위휴식시간제, 취약계층방문건강관리프로그램, 폭염특수구급대 등을 운영하고 있다(소방방재청, 2009). 폭염에 따른 건강영향을 최소화하기 위해서는 지자체 관리자 및 취약계층을 직접 관리하는 실무자가 폭염시 대처방식을 정확히 알아야 한다. 보건복지가족부에는 2010년부터 폭염특보에 따른 연령별, 질환별 건강을 연령별, 질환별, 기관별 건강관리지침, 보육시설, 요양시설 등 기관별 대응매뉴얼 및 폭염도우미 행동요령 등을 제작하여 배포하고 있다. 또한 응급의료기관(460여개)대상으로 폭염피해 감시체계를 운영함으로써 폭염피해로 추정되는 건강피해 현황을 파악하여 적응정책의 근거자료로 활용하고 있다. 중·장기 대책으로 도시 폭염현상을 줄이기 위해 환경 친화적 건축계획, 도로포장교체, 바람길·녹지 확보, 도시하천 복원 등을 추진 및 실행하고 있다(환경부, 2008a).

대기오염의 경우 오존 예·경보제를 1995년부터 실시하고 있고, 미세먼지 예·경보시스템, 황사 예·특보제 등을 운영하여 건강피해를 최소화 하는데 노력을 기울이고 있다. 아토피 및 천식에 대한 건강예보제는 2008년 12월에 시범사업을 추진하고 2009년부터 공식적으로 운영하고 있다. 천식지수 모형의 정확성을 향상시키기 위한 대기오염, 꽃가루지수, 기후요소와 연관된 질병이환 양상 및 사망률 조사감시체계를 구축 중에 있다. 아토피, 천식 예방관리수칙 제정·보급, 교육정보센터 설치를 통한 정보제공 및 지역사회, 학교 중심 예방관리사업 도입, 중앙·지자체 교육 홍보 활동을 진행하고 있다. 또한 국민건강영양조사에서 조사 항목을 확대하였고, 원인규명, 환자관리방안 마련 등 코호트 연구, 임상연구 등 아토피, 천식 조사감시 및 연구사업을 시행하고 있다.

질병매개체 적응대책으로 조사.감시 시스템을 통해 효율적인 방제와 환자 관리 도모, 기후변화로 인한 전염병의 발생 특성을 종합적으로 분석하여 대비체계 완비, 기상청, 농림수산식품부, 환경부와 협력하여 포괄적인 건강관리 대책 추진을 기본적인 추진전략으로 수립하였다.

복지부에서는 단기적으로는 지리정보시스템(GIS)을 활용하여 환자 다발지역, 매개체 고밀도지역을 파악하고 이를 기후변화와 연계하여 발생 예측모델을 개발하고 있고, 중기적으로는 매개체질환 종합감시체계(Vector-Net)를 구축하여 체계적으로 모니터링을 실시하여 건강피해를 최소화 하고자 하였다(그림 8.24). 말라리아, 쯔쯔가무시증 환자 다발생시군 집중관리 및 지자체 보건요원의 교육 등을 통해 역량을 강화하고 있다. 일본뇌염경보체계를 운영하고 있으며 국가필수예방접종사업 등으로 매년 환자수 10명 미만을 목표로 관리하고 있다. 또한 장기적으로는 언젠가 국내에 정착이 가능한 열대모기 매개전염병인 뎅기열, 웨스트나일열 등에 대한 사전 유입 가능성을 분석하고 이들 질환에 대한 국내환자발생 및 매개체 감시를 동시에 수행하고 있다.

수인성, 식품매개 질환에 대한 실시간 보고체계, 연중 비상방역체계 가동 및 역학조사, 감염병 관리체계를 운영하고 있으면 병원체 감시체계인 VibrioNet, EnterNet을 운영하고 있다.

8.5.2 시사점 및 향후 연구방향

1차 기후변화 평가보고서에서 기후변화가 건강에 미치는 영향에 관한 연구는 매우 제한적이고 미흡한 수준이였다. 이미 사망과의 관련성이 분명하게 밝혀진 폭염연구는 상대적으로 활발하게 진행 중이였으나 기상재해, 대기질과 알레르기, 곤충 및 설치류 매개, 수인성, 식품 매개 감염병 분야의 경우는 연구가 시작되고 있는 초기 단계였다. 2차 기후변화 평가보고서에는 2010년 이후 발표된 기후변화가 건강에 미치는 영향 연구들이 다수 포함되었다. 폭염분야는 1차 기후변화 평가보고서에서는 고온현상과 사망률의 관련성 분석과 취약계층을 정의하는 연구가 주를 이루었다.

그러나 2차 기후변화 평가 보고서에서는 고온현상과 다양한 건강영향과의 상관성 분석 연구, 지역별 취약계층별 건강영향 분석 연구 등이 포함되었다.

2011년부터 질병관리본부에서는 여름철 폭염 감시체계를 실시함으로써 폭염으로 인한 온열손상환자의 자료를 수집하였다. 수집된 자료를 이용하여 온열손상환자의 규모와 인구학적, 지리학적 취약성을 파악하는 연구가 진행될 수 있었다. 또한 전국 단위의 기후변화 취약성 평가에 대한 연구를 통해 지역별 취약계층별 건강영향 분석 연구가 진행되었다.

현재까지의 연구는 주로 기온, 습도, 바람 등 기상요소에 국한되어 이루어졌으나, 향후 건강피해 기전과 사회경제학적 요인들을 종합적으로 고찰하는 연구가 필요하다.

기상재해의 경우 1차 기후변화평가 보고서에서 재해특성에 따른 사망과 손상을 중심으로 피해규모와 변화추세를 파악하는 연구가 많이 포함되었다. 기상재해로 인한 취약집단이나 사망원인 규명에 대한 연구는 국내에서 거의 수행되지 않았거나 초기 단계였다.

2차 기후변화평가 보고서에서는 기상재해의 사망원인 및 인구학적 지리학적 취약성 분석, PTSD 등 다양한 건강영향을 파악하는 연구가 시작되고 있으나 아직 미흡한 상황이다. 향후 정책 수립의 근거 자료로 활용될 수 있도록 기상재해로 인한 사망, 손상, 구체적인 건강영향의 종류 및 피해 규모, 기간 등을 파악할 수 있는 연구들이 진행되어야 한다.

대기질과 알레르기 분야는 1차 기후변화평가 보고서에서 기후변화와 대기질의 변화를 확인하고, 그에 따라 건강에 영향이 있을 가능성을 확인하는 수준이었다. 2차 기후변화 평가 보고서에서는 기후변화에 따른 꽃가루, 알레르기원, 대기오염의 변화를 관찰하고 이들이 천식, 뇌졸중, 알레르기 발생 및 악화에 관련성이 있음을 구체적으로 확인하는 연구들이 포함되었다. 알레르기질환에 대한 유병률과 취약집단을 규명한 연구도 일부 있었지만 아직까지 충분하지 않기 때문에 추후 관련된 연구들이 필요하다. 그리고 기후변화에 따른 화분량과 소아 감작률의 증가 사이의 상관관계에 대한 지속적인 연구가 필요하다.

곤충 및 설치류 매개 감염병 분야는 1차 기후변화평가 보고서 당시에는 감염병 발생, 매개체, 기상요인 간의 연관성에 대한 연구는 거의 없는 실정이였다. 2차 기후변화 평가보고서에서 환자발생과 매개체 밀도 증가와 연계하여 기후요소의 영향을 모델링을 통해 해석하는 연구들이 포함되었다. 특히 일본뇌염의 경우 DMZ내 일반인 거주지에서 조사한 작은 빨간 집모기의

바이러스 검출 결과로 지역 내의 일본뇌염 바이러스 보유 확률과 새로운 매개 모기종을 밝혀 환자 발생의 증가를 시사하였다. 2010년 이후의 곤충 설치류매개 감염병의 연구는 모기 매개 감염병으로 국내에서 문제가 되고 있는 말라리아 연구가 다수 발표되었다.

우리나라는 기후 변화의 영향을 가장 크게 받는 지역에 위치해 있다. 이러한 지리적 여건과 더불어 급증하고 있는 해외 교류는 새로운 모기 매개 질환 발생 가능성을 한층 높이는 요인으로 작용한다. 기후 변화로 인해 삼일열 말라리아뿐만 아니라, 현재에는 국내에서 발생하지 않지만 기후변화로 인해 아열대성 기후로 변한다면 열대열 말라리아, 웨스트나일열, 뎅기열, 황열 등과 같은 질병들이 발생할 수 있을 것으로 보인다. 따라서 향후 일본뇌염모기 및 해외유입가능성이 높은 뎅기열과 웨스트나일열 연구가 진행되어야 한다. 최근 기후변화와 관련성이 높은 질환들이 증가하는 추세를 보이고 있다. 이에 따라 기후요소에 따른 질환의 발생 규모 및 취약집단을 구체적으로 파악하는 연구도 필요하다.

수인성 및 식품 매개 감염병 분야는 1차 기후변화평가 보고서에서 수인성, 식품 매개 감염병의 현황 파악과 예측 연구가 포함되었다. 2차 기후변화평가 보고서에서도 이전과 비슷한 수준의 연구들이 포함되었다. 식품 해충의 발생 예측 연구, 기후변화가 설사병 발생에 미치는 영향을 분석하기 위해 온도와 설사병 발생과의 관계를 모델링하여 향후 기후변화에 따른 설사병 발생 양상 변화를 예측한 논문이 일부 있었다. 이 분야도 향후 기상요인에 따른 질환 발생과의 관련성 및 취약성을 파악하는 연구부터 심도 있게 진행될 필요가 있다.

8.6 결론

기후변화 건강영향 분야별 연구결과의 신뢰도를 논문의 수와 의견의 일치되는 정도 등을 기준으로 견고한 동의, 중간적 동의, 제한적 동의의 3단계로 구분하여 평가하였다.

8.6.1 폭염

폭염이 건강영향을 일으킬 수 있다는 점에 대해 견고한 동의를 하는 것에는 의심의 여지가 없을 것이다. 그 크기에 대해서는 각 연구자들이 예측을 내놓고 있는데, 분석 지표나 대상 인구집단, 통계 모델 등에 따라 결과가 달라질 수 있으므로 더 연구가 필요하다.

폭염에 대한 취약성은 주로 노인이나 기저질환 동반 환자, 또한 저소득층이나 교육 수준이 낮은 사회적 약자에서 크다는 것에 대해서도 각 연구자들은 견고한 동의를 이룬다. 그러나 각 지역별로 취약성을 평가하고 예측하는 것은 분석 변수의 종류와 가중치 등에 따라 달라질 수 있고 아직 그 연구가 충분하지 않아서 동의가 제한적이라고 볼 수 있다.

미래에는 폭염이 더욱 빈번하고 강력하게 나타날 것이라는 것은 견고한 동의를 이룬다. 그러나 그 건강영향은 미래 사회의 적응 능력의 변화 및 민감도의 변화에 따라 달라질 수 있다. 미래에 더욱 진행될 것으로 생각되는 고령화와 도시 개발 등이 폭염 피해를 더욱 증가시킬 수 있는 한편, 적응 정책의 시행, 의료 수준 발달 등으로 인한 피해 저감 효과도 기대할 수 있기 때문이다. 따라서 폭염의 건강 피해에 대한 미래 예측에 대해서는 연구자들 사이에서 제한적 동의가 이루어지고 있다. 앞으로 폭염이 건강에 영향을 주는 기전을 정확히 반영하는 여러 기후적, 사회학적, 의학적 요인 등을 토대로 향후 미래의 건강 피해 예측 및 그 대응책에 관한 연구가 더욱 활발히 수행되어야 할 것이다.

8.6.2 기상재해

기후변화가 기상요소의 패턴을 변화시켜 극단적인 기상현상을 일으키고 이로 인해 인명피해가 증가한다는 것은 국내외 연구를 통해 입증되었다. 전문가들은 기후변화가 향후 지속될수록 대형재해가 증가하여 그에 따른 사망자와 질환자가 증가할 것이라는 면에서 일치된 의견을 보이고 있어 견고한 동의 수준으로 평가될 수 있다.

기후변화와 기상재해에 관한 보건학적 측면에서의 국내연구는 아직 활발하게 이루어지지 않고 있다. 1차 기후변화평가 보고서에서는 재해 특성에 따른 사망과 손상을 중심으로 피해와 변화추세를 파악하는 연구가 진행되었다. 2차 기후변화평가 보고서에서는 1차 보고

서와 비슷한 경향을 보였으나, 기후변화의 관점에서 재해로 인한 인명피해(사망, 감염병 등 질병발생), 외상 후 스트레스 장애 등 구체적인 건강영향을 파악하고 기상재해로 인한 취약집단이나 사망원인 규명, 지역별 사망률에 미치는 요인 등에 대한 연구가 시작되고 있었다.

8.6.3 대기질과 알레르기

대기질 악화가 심혈관질환, 호흡기질환을 비롯해 건강에 나쁜 영향을 주는 것은 국내외에서 진행된 많은 연구를 통해 입증된 바 있다. 그러나 기후변화가 대기질에 미치는 영향은 오존 이외에는 불확실성이 많다.

기후변화와 알레르기 질환에 관한 국내 연구는 활발하게 이루어지지 않고 있다. 하지만 외국 연구에 의하면 기후변화가 알레르기 질환을 악화시킬 수 있다는 근거가 충분하고, 국내 일부 연구에서 기상요인이 꽃가루 농도와 알레르기성에 영향을 주며, 이에 따라 알레르기 질환에 영향을 준다고 밝힌바 있어 중간적 동의 수준이라고 평가할 수 있다. 향후 국내 연구가 활발하게 진행되어 기후변화와 알레르기 질환 사이의 관계를 명확하게 입증할 필요가 있다.

8.6.4 곤충 및 설치류 매개 감염병

기후변화로 인해 매개체 및 매개체 감염병이 확산될 가능성은 매우 높다. 매개체 밀도가 기후요소에 의해 생활사에 미치는 영향이 크고 이로 인해 감염병 발생에 영향을 미치기 때문이다. 쯔쯔가무시증 등 말라리아 발생율을 근거로 온도, 강수량, 습도에 의해 양의 상관 관계를 나타내며 연구 결과는 견고한 수준으로 평가될 수 있다. 한편 매개체 밀도와 분포에 영향을 미치는 기후요소 상관관계의 연구는 지속적인 연구기간이 소요되기 때문에 그 결과의 신뢰성을 평가하기에는 아직 미흡하다.

매개체 감시의 영역은 생태계를 감안한 국가 주도의 감시망과 해외유입을 고려한 주변국과의 연계성도 매우 필요하다.

매개체 감염병은 기후변화 건강적응대책의 구심점으로 국가적 감시체계를 통한 예.경보 체계를 운영하고, 건강영향별 민감. 취약 계층의 기준설정과 DB구축을 기반으로한 관리 정책이 요구된다. 또한 실태조사 결과 기후변화 인식 정도가 높은 지역이 기후변화 적응방법에 대한 실행도 잘되므로 매개체 감염병 피해저감을 위한 정보제공 시스템이 좀더 적극적으로 이루어지고 교육 홍보를 강화하는 것이 정책효과를 극대화 할 것이다.

8.6.5 수인성 및 식품매개 감염병

현재까지 국내에서 수인성 및 식품매개 감염병과 기후요인과의 관련성을 통계적으로 평가한 연구는 아직 소수에 불과하며, 개별 질환에 대한 기후요인과의 관련성을 분석한 연구는 3편에 불과하다. 따라서 모든 수인성 및 식품매개 감염병에 대하여 기후 요인과의 관련성에 대한 국내 연구의 수준은 제한적 동의에 해당한다고 결론내릴 수 있다.

기후변화가 미치는 영향은 수인성 및 식품매개 감염병의 원인체에 따라 다르게 나타날 수 있으므로 개별 질환과 기후요인과의 관련성을 살펴보는 국내 연구가 여러 자료원과 분석방법을 이용하여 다양하게 이루어질 필요가 있다. 다양한 연구 결과들이 축적되면 이를 기반으로 국내 수인성 및 식품매개 감염병과 기후요인과의 관련성에 대한 판단이 타당하게 이루어질 수 있을 것이다.

8.7 참고문헌

고재경, 2011: 지방자치단체 기후변화 취약성 유형 및 적응방안 연구_ 경기도 사례를 중심으로, 한국사회와 행정연구, 22(2), 93-118.

공우석, 신이현, 이희일, 황태성, 김현희, 이난영, 성지혜, 이슬기, 윤광희, 2007: 쯔쯔가무시증의 시·공간적 분포와 환경생태요인, 대한지리학회지, 42(6), 863-878.

국립기상연구소, 2011: PCC 5차 평가보고서 대응을 위한 기후변화 시나리오 보고서.

국립환경과학원, 2013, 대기환경부문 기후변화 취약성 연구(Ⅲ), 국립환경과학원.

권영아, 2009: 보건분야에서 기후변화 대응: 서울시 사례, 보건복지포럼 통권 154, 39-50.

권호장, 조수헌, 1999: 서울시의 대기오염과 일별 사망자 수의 관련성에 대한 시계열적 연구, 예방의학회지, 32(2), 191-199.

기상청, 2013: 2012년 이상기후 보고서, 관계부처 합동, 162pp.

김규한, 2011: 기후변화와 아토피피부염, 대한의사협회지, 54(2), 169-174.

김동진, 2009: 기후변화에 따른 전염병관리 분야 적응대책, 보건복지포럼 통권 154, 23-38.

김동진, 신호성, 채수미, 2012: 기후변화가 설사병 발생에 미치는 영향 분석, 보건사회연구, 32(1), 281-297.

김상헌, 윤호주, 2011, 기후변화와 호흡기 알레르기질환, 대한의사협회지, 54(2), 161-168.

김시헌, 장재연, 2010: 국내 기후변화 관련 감염병과 기상요인간의 상관성, 예방의학회, 43(5), 436-444.

김수진, 김주현, 2013: Incidence and mortality rates of disasters and mass casualty incidents in Korea: a population-based cross-sectional study, Occupation & Environmental Medicine, 28(5): 658-666.

김양수, 2006: 홍수예보현황, 물과 미래, 39(7), 24-28.

김은영, 전성우, 이정원, 박용하, 이동근, 2012: 서울시 기후변화 영향평가 및 적응대책수립: 폭염영향을 중심으로, 한국환경영향평가학회, 21(1), 71-80.

김지영, 최병철, 박일수, 김규랑, 이대근, 2006: 여름철의 주요 기상재해로서의 폭염, 한국기상학회, 346-347.

김지영, 이대근, 박일수, 최병철, 김정식, 2006: 한반도에서 여름철 폭염이 일 사망률에 미치는 영향, 한국기상학회, 16(4), 269-278.

류성호, 송양숙, 정수용, 2003: 한국 야생들쥐의 Orientia tsutusgamushi 감염에 대한 역학적 조사, *Journal of Bacteriology and Virology*, 33(2), 131-137.

박석, 이영준, 이종우, 라경환, 백승옥, 하민수, 이천호, 2010: 여름철 폭염주의보 수준의 열 스트레스가 여성노인의 심폐체력 및 면역기능에 미치는 영향, 한국사회체육학회, 39(2), 683-692.

박석, 이천호, 백승옥, 신용업, 김정석, 조영웅, 이영준, 2010: 열스트레스가 여성노인들의 근기능 및 근손상에 미치는 영향, 한국노년학, 30(3), 793-802.

박옥, 최보율, 2007: 전염병 감시체계 소개 및 평가, 대한예방의학회지, 40(4), 259-264.

박정임, 2005: 기후변화가 건강에 미치는 영향 및 적응대책마련, 한국환경정책・평가연구원.

박재원, 2011: Changing Transmission Pattern of Plasmodium vivax Malaria in the Republic of Korea: Relationship with Climate Change, Environmental Health and Xixicology. 26, 1-6

박종길, 2005: 한반도에서 발생되는 기상재해 분석, 한국환경과학회지, 14(6), 613-619.

박종길, 정우식, 김은별, 2008: 폭염이 일사망자수에 미치는 영향에 관한 연구, 한국대기환경학회지, 24(5): 523-537.

변희룡, 최기선, 김도우, 2008: 한국여름가뭄과 북서태평양 태풍활동의 연관성, 한국대기학회, 18(4): 279-286.

보건복지부, 2013: 기후변화 건강피해 최소화 법적 제도적 전략개발연구, 아주대학교 산학협력단. 15-20.

보건복지가족부, 2008: 기후변화에 따른 건강피해 모니터링 및 위험인구 감소전략 개발 연구, 아주대학교, 40-89.

보건복지가족부, 2009: 폭염에 따른 위기대응 및 건강관리 방안개발, 아주대학교, 90-95.

보건복지가족부, 2008: 기후변화에 따른 건강분야 적응대책 수립 방안 연구, 아주대학교. 57-120.

배현주, 하종식, 최민지, 김호, 2010: 기후변화와 대기오염이 환경성질환에 미치는 영향, 한국환경정책・평가연구원, 56-80.

성주헌, 김호, 조수현, 2001: 1994년 하절기의 심혈관계 및 호흡기계 초과사망-이상고온 및 대기오염의 영향을 중심으로, 예방의학회지, 34(4):

316-322.
성지혜, 김동훈, 한상옥, 2011: 최근 우리나라 기상재해 피해 현황 분석, 한국기상학회, 244-245.
설동일, 2011: 우리나라 남해안의 기상재해 특성분석, 해양환경안전학회, 117-118.
소방방재청, 2009: 부처별 폭염종합관리대책.
식품의약품안전청, 2008: 국제 기후변화에 따른 식품안전 관리대책 추진 방안, 한국보건사회연구원,
신호성, 2011: 기상요소와 지역 말라리아 발생자수의 상관관계, 보건사회연구, 31(1), 217-237.
신호성, 배현주, 임종한, 이수형, 2012: 사회보건분야 기후변화 취약성 평가 및 적응 역량강화, 한국보건사회연구, 137-151.
질병관리본부, 2012: 응급실 기반 한랭손상 및 저체온증 조사감시체계 도구개발 및 시범적용사업. 서울대학교병원 의생명연구원. 86pp.
안강모, 김지현, 권호장, 채유미, 함명일, 이기재, 박용민, 이소연, 한만용, 김우경, 2011: 2010년 한국 어린이,청소년의 천식, 알레르기 비결막염, 아토피피부염 증상 유병률 조사: 복합표본설계를 이용한 전국 서베이, J Korean Med Assoc, 54(7), 769-778.
양지훈, 하종식, 2013: 기후변화로 인한 고온의 미래 사망부담 추정, 한국환경보건학회지, 39(1): 19-31.
오재원, 2009: 대기 중 알레르기 화분(꽃가루) 농도 예보제 개발, 대한의사협회지, 52(6): 579-591.
유성진, 이우균, 오수현, 변정연, 2012: GIS기반 시공간정보를 이용한 건강부문의 기후변화 취약성 평가, *한국공간정보학회지*, 20(2), 13-24.
윤시몬, 2013: 기후변화가 식중독 및 수인성 질병에 미치는 영향에 대한 잠재적 영향 분석. 보건복지포럼.
윤병조, 김상훈, 김동현, 고영일, 2011: 광주, 전남지역 알레르기 환자에서 흡입성 항원에 대한 감작률의 종적 변화와 기온과의 관련성 분석, 천식 및 알레르기, 31(2), 93-104.
윤태중, 조기종, 이미경, 정명섭, 배연재, 2010: 기후변화와 식품해충, 한국곤충연구소, 26, 27-30.
이계임, 2007: 식품 중 위해물질의 위해관리를 위한 risk / benefit 분석 model 개발. 식품의약품안전청.
이대근, 김지영, 최병철, 2007: 1994년7월 부산지역의 폭염으로 인한 일사망률 특성연구, Atmosphere, 17(4): 463-470.
이대근, 김규랑, 최영진, 2010: 공간기단분류 알고리즘에 기반한 고온건강경보시스템의 폭염위험도 사례 진단분석, 한국기상학회, 306-307.
이대근, 변재영, 최영진, 김규랑, 2010: 인지온도를 이용한 여름철 폭염 스트레스와 일사망률 증가와의 관련성 연구, 한국대기환경학회지, 26(3), 253-264.
이미영, 이충원, 서석권, 2000: 대구시의 대기오염이 일별 사망에 미치는 영향(1993~1997), *대한직업환경의학회지,* 12(2), 235-248.
이석민, 배윤신, 김한샘, 2011: 서울시 기상이변에 대한 고찰과 분석, 서울도시연구, 12(2), 1-17.
이수형, 2009: 기후변화와 식중독 발새예측, 보건사회연구, 29(1), 143-162.
이수형, 신호성, 2010: 식중독 발생 감소에 대한 지불의사금약 추정-조건부 가치측정법을 이용하여-. *한국보건경제와 정책연구*, 16(1), 1-22.
이인용, 이한일, 홍한기, 1993: 국내 털진드기의 계절적 소장 및 지리적 분포 조사, *동물학회지*, 122, 408-415.
이재범, 이현주, 문경정, 홍성철, 김덕래, 송창근, 홍유덕, 2011: 기후변화에 따른 보건 분야의 취약성 평가: 오존을 중심으로, Journal of Korean Society for Atmospheric Environment, 28(1), 22-38.
장재연, 김시헌, 2008: 기후변화와 건강, 대한보건연구, 34(1), 38-53.
장재연, 조승헌, 2003: 기후변화로 인한 건강피해 가능성 조사 및 피해 저감정책 방향에 관한 연구. 아주대학교, 한국환경정책・평가연구원.
정순돌, 김은정, 2010: physical and Mental Health of

Disaster Victims: A Comparative Study on Typhoon and Oil Spill Disasters, 대한예방의학회, 43(5), 387-395.

조수남, 김시헌, 김선자, 정성훈, 이윤환, 나원웅, 장재연, 송경준, 2012: 2011년 여름철 폭염으로 인한 응급실 내원 온열질환자의 특성 분석, 대한응급의학회, 23(5), 687-695.

질병관리본부, 2010: 기후변화 건강영향 및 감시체계 개발 연구, 아주대학교 산학협력단, 32-50.

질병관리본부, 2012: 기상재해에 의한 건강영향과 취약성 분석, 아주대학교 산학협력단, 101-125.

채수미, 윤석준, 2011: 기후변화로 인한 설사질환의 부담, 한국보건사회연구원, 보건복지포럼, 84-92.

채수미, 2012: Health Adaptation to Climate Change in Local Government: Perception of Public Health Center Directors and Staffs, 보건복지포럼, 통권 제 190호, 70-79.

최광용, 2010: 지난 100년 동안 서울시에 발생한 강한 열파 패턴과 노인사망자에 미치는 영향, 대한지리학회지, 45(5), 573-591.

최기선, 김도우, 이지선, 변희룡, 2009: 한국5월 가뭄과 북태평양진동의 연관성, *Atmosphere*, 19(1), 67-78.

최은진, 2008: 기후변화에 대한 보건부문의 적응대책, 보건복지포럼.

한국보건산업진흥원, 2009: 기후변화에 따른 식중독 발생 영향 분석 및 관리체계 연구. 한국보건사회연구원.

홍성길, 1996: 강수관련 기상재해 경감을 위한 정책적 대응방안에 관한연구, 과학기술정책관리연구소, 364pp.

환경부, 2003: 한반도기후변화 영향평가 및 적응프로그램마련, 한국환경정책・평가연구원, 34-90.

환경부, 2008a: 기후변화 적응을 위한 환경보건 중장기 대책수립, 아주대학교 산학협력단, 86-101.

환경부, 2008b: 국가기후변화 적응 마스터 플랜 수립 연구, 한국환경정책・평가연구원, 125-143.

환경부, 2009: 대도시 인구밀집지역의 기상이변(혹서, 혹한, 폭우)에 따른 취약성 지표 및 평가체계 개발, 협성대학교 산학협력단-차세대핵심 환경기술개발새업 보고서

Beggs, Paul John, Hilary Jane BambrickIs, 2005: the Global Rise of Asthma an Early Impact of Anthropogenic Climate Change?, Environ Health Perspect, 113(8), 915-919.

Church JA, 2001: Climate change: How fast are sea levels rising?, Science, 294, 802-803.

Eder W, Ege MJ, von Mutius E, 2006: The asthma epidemic, *N Engl J Med*, 355:2226-2235.

Emanuel K, 2005: Increasing destructiveness of tropical cyclones over the past 30 years, Nature, 436, 686-688.

Garcia-Mozo H, Galan C, Jato V, Belmonte J, de la Guardia C, Fernandez D, Gutierrez M, Aira M, Roure J, Ruiz L, Trigo M, Dominguez-Vilches E, 2006: Quercus pollen season dynamics in the Iberian peninsula: response to meteorological parameters and possible consequences of climate change, Ann Agric Environ Med, 13: 209-224.

Heinz Center, 2002: Human Links to Coastal Disasters, The H. John Heinz III Center for Science, Economics and the Environment, 11-24.

Hong, S.J., Ju-Hee Seo, 2011: Climate change and human health, J Korean Med Assoc, 54(2), 149-155.

Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), 2007; Climate Change 2007: 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),

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.

Jung, J.H., Gil Soon, Shin Yoo-Seob, Kim, Joo-Hee, Kim Jeong-Eun, Ye Young-Min, Park Hae-Sim, 2013: The Allergenic Potency of Japanese Hop Pollen Is Increasing With Environmental Changes in Korea, *Allergy Asthma Immunol Res,* 5(5), 309-314.

Kim, H. C., Terry A. Klein, Ratree Takhampunya, Brian P. Evans, Sirima Mingmongkolchai, Ampornpan Kengluecha, John Grieco, Penny Masuoka, Myung-Soon Kim, Sung-Tae Chong, Jong-Koo Lee, and Won-Ja Lee, 2011: Japanese encephalitis virus in culicine mosquitoes (Diptera: Culicidae) collected at Daeseongdong, a village in the demilitarized zone of the Republic of Korea, *Journal of Medical Entomology, 48* (6), 1250-1256.

Kim, N.H., Wook-Gyo Lee, E-Hyun Shin, Jong Yul Roh, Hae-Chun Rhee, Mi Yeoun Park, 2014: Prediction Forecast for Culex tritaeniorhynchus Populations in Korea, Osong Public Health Res Perspect, 5(3), 131-137.

Kim Si-Heon, Park Hae-Sim, Jang Jae-Yeon, 2011: Impact of meteorological variation on hospital visit of patients with tree pollen allergy, *BMC Public Health*, 11, 890.

Kim YM, Park JW, Cheong HK, 2012: Estimated Effect of Climatic Variables on the Transmission of Plasmodium vivax Malaria in the Republic of Korea, Environmental Health Perspectives, 120(91), 1314-1319.

Lee H.I., Shim SK, Song BG, Choi EN, Hwang KJ, Park MY, Park C, Shin EH, 2011: Detection of Orientia tsutsugamushi, the causative agent of scrub typhus, in a novel mite species, Eushoengastia koreaensis, in Korea, Vector Borne Zoonotic Dis, 11(3), 209-214.

Li K, Li GS, 2011: Vulnerability assessment of storm surges in the coastal area of Guangdong Province, Nat. Hazards Earth Syst. Sci.

Meehl G, Stocker T, Collins W, Friedlingstein P, Gaye A, Gregory J, Kitoh A, Knutti R, Murphy, 2007: Global climate projections, Intergovernmental Panel on Climate Change, 111-130.

Myung H.N., Jang JY, 2011: Causes of death and demographic characteristics of victims of meteorological disasters in Korea from 1990 to 2008, *Environ Health*, 10, 82.

Nah, K.A., Yongkuk Kim, Jung Min Lee, 2011: The dilution effect of the domestic animal population on the transmission of P. vivax malaria, Journal of theoretical biology, 266(2), 299-306.

Na W.1., Jang J.Y., Lee K.E., Kim H, Jun B, Kwon J.W., Jo S.N., 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, *J Prev Med Public Health,* 46, 19-27.

Oh Jae Young, Moon Bong-Chun, Bae Bo Kyoung, Shin E-Hyun, Hwan Ko Young ; Kim Young-Joo, Park Yong Ho, Chae Joon-Seok, 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.

Son, ji-Young, Lee, jong-Tae, Park, Yoon Hyeong, Bell, Michelle L, 2013: Short-Term Effects of Air Pollution on Hospital Admissions in Korea, Epidemiology, 24(4), 545-554.

Vale LJ and Campanella TJ: The Resilient City, 2005: How Modern Cities Recover from Disaster, New York, Oxford University Press, 10-76.

Webster MD, Babiker M, Mayer M, Reilly JM, Harnisch J, Hyman R, Sarofim MC, Wang C, 2002: Uncertainty in emissions projections for climate models, Atmos Environ, 36, 3659-3670.

WHO, 2003: The World Health Report.

Yi, Okhee, Yun-Chul Hong, Ho Kim, 2010: Seasonal effect of PM10 concentrations on morbidity in Seoul, Korea: A temperature-matched case-crossover analysis, Environmental Research, 110, 89-95.

제 9 장 인간정주공간 및 복지

9.1 서론

최근 산업화, 도시화, 온실효과 등에 따른 기후변화의 영향으로 이상기후 현상이 전 세계적으로 나타나고 있다. 우리나라의 기온 변동형태를 보면, 1960년대 이전에는 대체적으로 자연변동인 반면, 1960년대 이후에는 산업화, 도시화로 인한 인위적인 변동 추세로, 특히 대도시의 관측기온 상승폭이 크게 나타나며(국립기상연구소, 2005), 우리나라의 기온 상승에는 지구온난화와 도시화로 인한 국지적인 상승경향이 내포되어 있다(한국환경정책·평가연구원, 2007; 한국환경정책·평가연구원 2009; 오성남 등, 2010; 박명희 등, 2012).

2010년 1월 서울에서는 1937년 관측 이래 최대인 25.8㎝의 폭설이 내려 수도권 전철 운행이 중단되었으며, 9월초 태풍 곤파스가 수도권에 상륙하여 많은 피해를 입혔고, 9월 일강수량 259.5㎜의 집중호우로 광화문광장을 비롯하여 주요 도심지역이 침수되었으며, 3월과 11월에는 황사가 강하게 발생하였고, 12월에는 한파가 지속되었다. 특히 2011년 7월 집중호우로 인한 우면산의 산사태는 많은 인명과 재산피해를 입혔다. 기후변화로 인한 이러한 기상이변은 앞으로 더욱 강하게 나타날 것으로 예상된다(기상청, 2010a).

전 세계 인구의 절반정도가 도시에 거주하고, 전체 지구에너지의 60~80%를 소비하며 이산화탄소를 50% 가까이 배출하고 있다. 우리나라는 전체 인구의 90% 이상이 도시에 거주하고 있어 기후변화에 따른 재해위험에 매우 취약하며, 농촌의 경우 농업인구의 감소와 고령화, 환경오염, 자유경제시장의 논리에 의한 농산물시장의 위축에 못지않게 기후변화가 근본적이고 광범위한 영향을 끼칠 것으로 예상된다. 따라서 도시와 농촌에서 이러한 기후변화에 통합적으로 대처할 수 있는 방안으로서 기후변화 대응의 실천력을 제고하기 위한 지역의 차별화된 실천방안 마련의 중요성이 부각되고 있으며, 특히 지역중심의 '도시'차원 접근의 중요함이 거듭 강조되고 있다. 이미 노팅엄 선언(Nottingham Declaration, 2000)과 후쿠다 비전(Hukuda Vision, 2008), 2009년 12월 15일 코펜하겐 정상(Copenhagen Summit)같은 기후정상회담들을 통해 전 세계적으로 기후변화 대응의 실질적인 이행을 위해 지역도시 공간단위의 접근이 시급하다는 공감대가 형성되고 있다(국토연구원, 2010c).

이러한 기후변화에의 적응능력은 지역, 사회, 계층에 따라 다양하며, 특히 소득수준이 낮은 저소득빈곤층이나 노인들은 매우 취약하여 이에 대한 대책의 강구가 필요하다. 또한 기후변화 대응과정에서 개인, 지역, 산업, 정부부처 등 이해당사자간 갈등이 첨예화될 것으로 예상되어 이로 인한 사회적 비용이 크게 증가될 것으로 보여 사회갈등 예방 및 정책방안 마련이 필요하다.

9.2 관측된 현황

9.2.1 도시

도시는 인구, 건물, 교통시설을 비롯한 공공시설이 집약되어 있어 에너지 소모율이 높고, 다량의 온실가스를 배출하고 있어 지구온난화의 주범으로 기후변화에 지대한 영향을 미친다. 한국에서 도시화 현상이 처음 나타나기 시작한 시점은 1920년대로 추정되며, 일제강점기와 한국전쟁이 끝난 1960년대부터 도시화가 본격적으로 가속화되어 36.8%이던 도시화율이 1990년대까지 가파르게 상승하여 82.6%로 40%가 넘는 증가율을 보였다. 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 평균이하로 크게 감소하였다(국토연구원, 2013a). 수도권으로의 집중도 더욱 가속화되어 1960년 전국대비 20.8%이던 인구가 1990년 42.8%로 거의 절반에 가까운 인구가 수도권에 집중되었다. 1990년대 이후에는 큰 변화가 일어나지 않았으나 꾸준한 증가로 2006년 현재 도시화율은 90.3%로 유지되고 있다<표 9.1>(국토해양부, 2008b; 국토연구원, 2010a; 국토연구원, 2011a). 지역별로 보면 도시지역 면적과 도시화율 모

표 9.1 도시지역 면적 및 도시화율 현황(건설교통부, 2007) (단위:㎢, %)

연도	면적			인구(천명)			
	국토	도시계획구역	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	47,964	42,375	5,589	88.3
2006	99,678	17,043	17.1	48,297	44,233	4,759	90.3

두 특·광역시과 그 주변지역이 인구비율의 증가와 함께 높게 나타나고 있다<그림 9.1>.

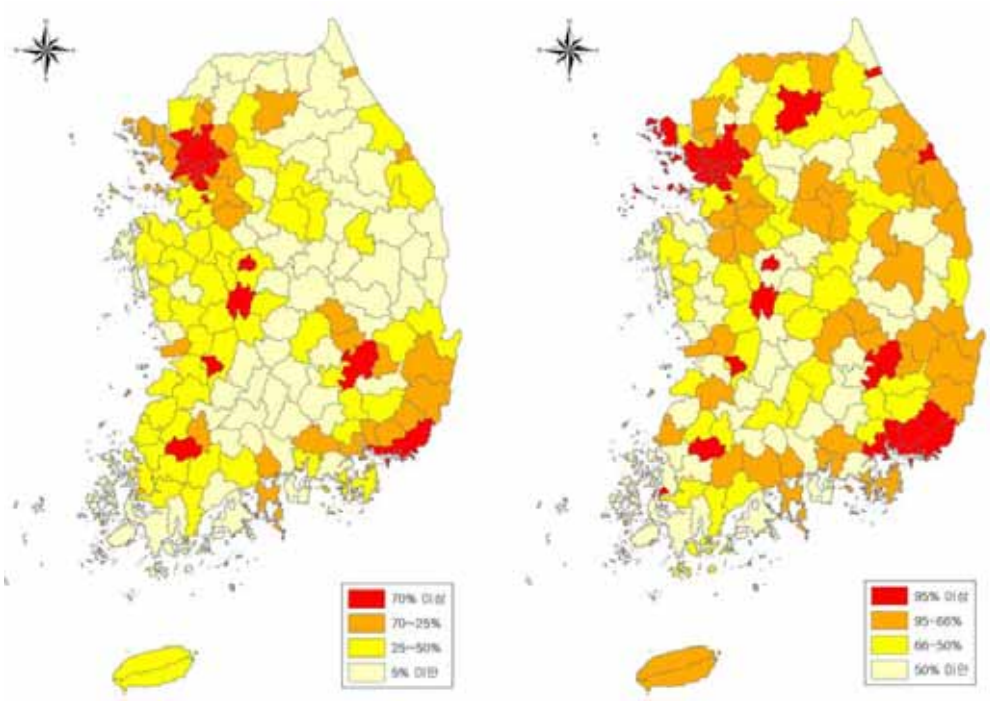


그림 9.1 도시지역 면적 비율(좌)과 도시화율(우)(국토해양부, 2008a)

도시화지역 중 국토의 11.7%를 차지하며, 2009년 전국 인구와 국가 GDP의 절반 가까이 차지하고 있는 서울 대도시권의 시가지는 1971년 300㎢에서 2007년 2,073㎢로 6.9배 증가했으며, 개발제한 구역을 사이에 두고 비연속적인 경로로 개발되어 왔다. 이는 특히 1990년대 건설된 5개의 신도시와 관련이 깊다. 이러한 도시 고밀화의 주된 원인 중 하나인 주거의 형태는 공동주택중 하나인 아파트의 비율이 전체 약 59%를 차지하고 있으며, 단독주택의 비율은 30% 이하를 밑돌고 있다. 광역시도의 평균적인 통행거리는 광역도 지역에 비해 상대적으로 짧아 도시의 압축성이 높게 나타났다. 광역시도의 교통수단 분담비율은 지하철이 잘 보급된 서울, 부산, 인천시의 경우만 자동차 분담비율이 40% 미만이었고, 지하철이 잘 보급되지 않은 타 광역시도는 자동차 분담비율이 50%를 크게 상회하는 것으로 나타났다(국토연구원, 2013d).

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. 지

방소도시의 경우 기성시가지 공동화와 높은 고령화율에 따른 경기침체에 의해 도시쇠퇴가 가속화되고 있으며, 대도시의 경우 인구 저성장과 경기둔화에 의해 개발압력과 함께 기성시가지의 활력이 점차 감소되고 있는 실정이다.

지난 수십 년간 생활수준의 향상, 도시화 추세, 산업부문의 확대는 한국을 에너지 소비적인 경제로 만드는데 크게 기여하였다. 국토연구원(2013a)에 따르면 한국은 2008년 OECD 국가 가운데 에너지 소비국 10위로 기록됐고, 총에너지자급율은 19.7%에 불과했다. 하지만 에너지 사용량의 증가에 따라 한국의 온실가스 배출량은 1990~2005년 사이 두 배로 급증하여 OECD 국가 중 가장 높은 증가율을 기록했다. 온실가스 배출량은 전 세계 배출량의 1.3%를 차지하여 전 세계에서 15위, OECD 국가 중 9위를 기록했다.

도시들의 직접적 에너지 소비 증가는 대기오염의 증가로 이어졌다. 1999~2007년 사이 전체 대기오염물질이 6.4% 증가하고 화석연료의 이용으로 인한 질소산화물배출은 10.9% 증가하였다. 지난 반세기 동안 도시, 특히 수도권지역의 급격한 공간확장이 CO_2 배출과 오염도 증가를 이끌었다. 서울의 대기질은 OECD 국가 대비 아직 열악한 수준이나, GDP 규모대비 배출강도 측면에서 큰 진전을 보였다. 대기오염은 다른 OECD 도시들과 마찬가지로 대부분 에너지 소비와 관련되는데, 산업용 연료 소비량에 대해서는 엄격한 규제가 시행되고 있기 때문에 현재 대기오염 수치는 대부분 교통부분에 기인한다고 볼 수 있다.

도시는 기후변화로 인한 영향에 대해서 취약점을 지니는 동시에, 기후변화 현상을 유발시키는 탄소배출에서도 큰 비중을 차지하고 있다. 경기도 31개 시· 군을 대상으로 탄소 배출량과 오염원의 회귀분석을 수행한 결과, 자동차 등 도로 교통에 의한 오염원이 탄소배출에 가장 큰 영향을 미치고 있으며, 둘째, 가스, 전기 등 도시 생활에 의한 오염원과 셋째, 폐기물 처리, 제조업 등 산업에 의한 오염원이 전체 탄소 배출에 영향을 미치는 것으로 나타났다(유윤진 등, 2013). 또한, 공간적인 관점에서 탄소배출과 깊은 연관성을 지닌 에너지수요를 살펴보면, 우리나라에서 전력에너지의 생산과 소비 공간의 분포는 특정지역에 집중하고 있는 현상이 나타나는데, 생산은 원자력과 화력발전소가 입지한 지역에, 소비는 수도권의 산업중심지역, 업무중심지역과 광역시지역에 집중되고 있다. 특히, 생산은 상위 30개 지역이 98.2%를, 소비는 44.3%정도를 차지하는 것으로 나타났다. 또한 전력을 생산하지 않는 지역이 전국에 140개 지역으로 에너지자립측면에서 약점으로 판단된다. 전력소비는 수요자인 가구수, 사업체수가 많은 지역일수록 증가하고, 도시화율과 행정구역면적이 넓을수록 증가하는 것으로 나타났다. 이는 앞으로 도시공간계획에 에너지의 생산과 소비까지 고려해야 저탄소 녹색도시를 이루는 데 도움이 될 것임을 시사하고 있다(토지주택연구원, 2011).

9.2.2 농촌

우리나라의 농촌·도시의 구분은 통상 행정구역에 기초하였다. 행정구역상 읍·면이 농촌이고 동이 도시인데, 이 기준에 의한 농촌은 면적으로는 전 국토의 90%를 차지하고 인구구성에서는 2005년 인구 및 주택총조사 기준으로 전 국민의 18.5%가 거주하는 공간이다. 농촌과 도시는 대체로 여러 측면에서 대조를 이룬다. 주요 산업, 인구 집중도, 주민들의 생활 스타일, 환경과 경관 등에서 확연하게 농촌과 도시를 구분할 수가 있다. 그런데 최근 농촌·도시로 양분하기 어려운 지역들이 등장하고 있다. 행정구역상 농촌으로 분류되는 지역에 도시민의 귀농.귀촌이 대폭 증가하거나 실질적으로 도시적 주거 및 산업 공간으로 변모하는 곳이 증가하는 것이다.

한국농촌경제연구원(2011)에 따르면 앞으로 인구고령화와 저성장, 교통통신 발달, 국민들의 가치관 변화로 거주지 교외화 현상 가속화, 귀농.귀촌에 의한 역도시화 등이 촉진됨으로써 농촌과 도시로 뚜렷하게 구분할 수 있는 지역은 그리 많지 않게 될 것으로 보고 있다. 국토연구원(2009c)은 2020년 도시화율을 95%로 보고 전 국토가 '도시지역화'될 것이라고 전망하였다. 이때 도시화는 특정 몇몇 도시로의 인구집중보다는 도시의 외연이 확장됨으로써 도농통합적 성격의 지역이 많아진다는 의미이다. 그것은 다른 각도로 국토 전체에

현재와 같이 확연한 모습의 도시는 점차 감소할 것이라는 전망과도 그 맥을 같이 한다. 농촌마을 수는 1960년 131,936개에서 2007년 105,377개로 20%나 감소했다 <그림 9.2>(한국농촌경제연구원, 2012).

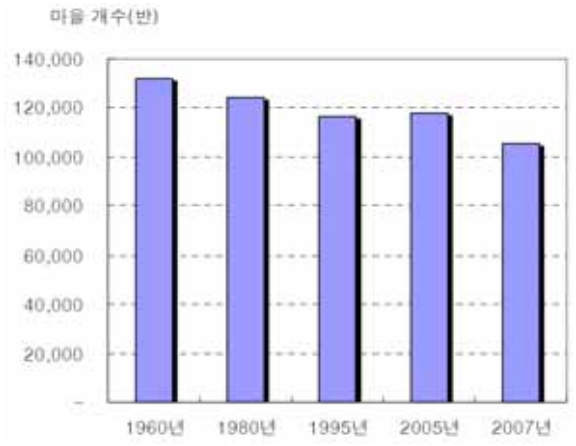
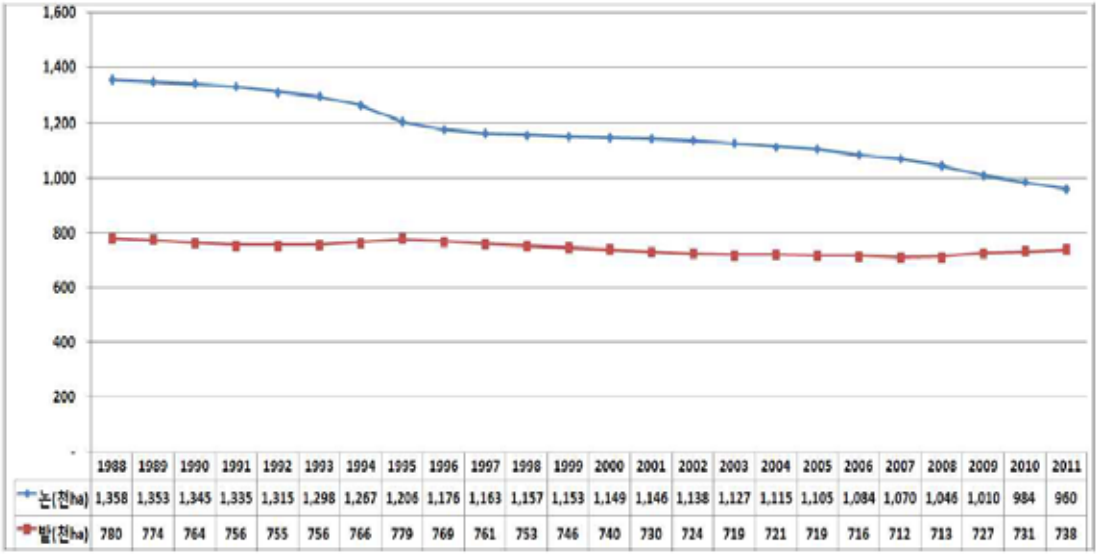


그림 9.2 농촌의 마을 수 변수 추이

주인구를 대거 흡수하면서 인구가 더욱 증가하고, 경관적으로는 전원주택단지형으로 발달하게 될 것이다. 그러나 보다 많은 수의 농촌마을은 현재보다 인구가 축소되거나 해체, 소멸되는 마을이 상당 수 나타날 것이다. 다만, 5~10호 정도가 연접해 있으나 전통적 의미의 마을로 보기는 어려운 형태의 동호인 주택단지, 별장 주택단지 등 새로운 마을들이 증가할 것이다. 더불어 전업적 농업마을, 문화예술 창작촌, 은퇴자마을, 생태마을, 여행목적지, 캠핑촌 등 매우 다양한 마을의 특화된 형태가 구체화될 것이다. 특히 농촌마을의 축소와 일상생활 서비스 전달 비용 절감 및 새로운 전원 공간 수요 등에 대응하기 위해 다양한 형태의 농촌형 뉴타운이 등장할 가능성도 매우 높다.

국내 식량생산의 기반이 되는 농경지 면적의 변화추이를 살펴보면 1968년을 정점으로 지속적인 감소추세이며, 1988년 약 214만ha에서 2011년 약 170만ha로



	1988	1989	1990	1991	1992	1993	1994	1995	1996	1997	1998	1999	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011
논(천ha)	1,358	1,353	1,345	1,335	1,315	1,298	1,267	1,206	1,176	1,163	1,157	1,153	1,149	1,146	1,138	1,127	1,115	1,105	1,084	1,070	1,046	1,010	984	960
밭(천ha)	780	774	764	756	755	756	766	779	769	761	753	746	740	730	724	719	721	719	716	712	713	727	731	738

그림 9.3 논과 밭의 경지 면적 변화 추이(자료: 통계청, 국가통계포털(http://kosis.kr)

농촌마을당 평균 거주 인구는 1960년 136명에서 2007년 74명으로 절반수준으로 감소했다. 1~3명을 한 가구원수로 보면 농촌마을 당 평균 호수는 약 30~35호 정도로 추정된다. 지금까지 추세와 최근의 공간선호를 감안하여 평균적으로 접근하면 미래 농촌마을은 양극화의 길을 걷게 될 것으로 전망된다. 도시 주변에 위치한 농촌마을은 전원생활을 동경하는 도시로의 통근 인구 및 입지자유업 내지 재택근무 등을 하는 거

매년 1% 정도 감소한 것으로 나타났다<그림 9.2>. 특히 논 면적은 매년 지속적인 감소세를 보이고, 밭면적은 감소세에서 최근 반등하여 미약하게 증가하는 것으로 나타났다<그림 9.3>.

9.2.3 복지

현재 우리나라 국가단위 기후변화 취약계층 관련 지원대책은 총 44개로 건강분야와 재난/재해분야가 가장 많은 비중을 차지하고 있으며<표 9.2>, 부처로는 보건

표 9.2 국가단위 종합 기후변화 취약계층 적응대책 분포현황(한국환경정책·평가연구원, 2013c)

구분		건강	농수산	물관리	재난/재해	산림/생태계	국토/연안	총계
총계	수(계)	21	5	2	11	3	2	44
	비율(%)	47.73	11.36	4.55	25.00	6.82	4.55	100.00

복지부가 가장 많은 대책을 소관하고 있다. 또한 집중호우, 홍수, 태풍 등의 풍수해와 관련된 대책과 취약지역 관련 대책이 절반 이상을 차지하고 있다. 정책수립단계로는 실제 적용되는 이행단계의 정책이 70%이상이며, 시설설치, 조성 및 정비 등에 해당하는 구조적 대책이 가장 많았다. 취약계층 지원형태로는 취약계층을 직접적으로 지원하는 대책과 사전 예방적 성격의 대책이 많은 것으로 분석 되었다(한국환경정책·평가연구원, 2013c).

우리나라의 복지시설은 모든 국민들을 대상으로 하는 다른 생활인프라와는 달리 특정 취약계층을 주요 대상으로 하고 있다는 점에서 차별된다. 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).

기후변화로 영향을 받는 취약계층은 기후의 특성과 공간에 따라서 다르게 나타났다(경기개발연구원, 2013). 경기도 사례를 통해서 보면, 부천시, 성남시, 안산시, 의정부시, 고양시, 남양주시, 포천시 등에 경기도 기후변화 홍수 취약계층이 많이 분포하고 있으며, 폭염 취약계층에 대한 영향은 부천시, 용인시, 화성시, 고양시, 성남시에서 높게 나타나고 있다. 대표적인 취약계층인 어린이를 대상으로 대기질 기준 초과지역은 수원시, 포천시, 양주시, 화성시, 안산시, 의정부시, 군포시 등이 높았고, 노인 취약계층은 수원시, 포천시, 양주시, 화성시, 군포시 등에서 높게 나타나 어린이와 노인 취약계층이 비슷한 패턴을 보임을 알 수 있었다.

9.3 영향전망

9.3.1 도시

최근 우리나라는 세계에서 유래를 찾기 힘들 정도로 빠르게 진행되고 있는 저출산·고령화, 1~2인 소형가구의 증가 등을 경험 중이다. 통계청 '2010년 인구주택총조사'와 국토해양부·통계개발원의 시도별 인구추계 등에 따르면 2020년까지 인구 및 가구수는 지속 증가하나 증가율은 점차 둔화될 것으로 점쳐지고 있다(국토연구원, 2011d).

국토연구원(2009c)에 의하면 2030년 우리나라의 국토여건은 GDP기준 세계 10위의 경제대국이 될 것이며, 1인당 GDP 5만 달러 내외의 선진국가가 될 것으로 전망된다. 인구는 2018년 4,934만 명을 정점으로 감소하여 2030년 4,863만 명 수준으로 추정된다. 기대수명은 83.1세로 증가하며, 65세 이상 인구가 전체 인구의 24.3%를 차지하는 초고령 장수사회가 되고, 가구의 소규모화가 가속화되어 1인 가구 비율이 25%이상으로 증가할 것으로 추정된다. 외국인 체류자수는 306만 명으로 총인구의 6%에 이르고, 결혼 이민자 및 그 자녀의 인구수는 122만 명으로 총인구의 2.5%를 차지하여 본격적으로 다문화사회가 전개될 전망이다. 2030년 남북한 인구는 7,495만 명이며, 통일을 가정했을 때 1인당 GDP는 4만 달러 내외로 추정되고, 한반도 통일로 생산가능 인구가 증가하고, 고령화 추세는 둔화될 것으로 전망된다.

기존의 지역계획 및 정책에서 추구하는 양적 성장 및 하드웨어 위주의 지역발전 한계를 극복하고 글로벌

화, 기후변화, 안정된 성장, 다양화, 과학기술 발달 등에 따라 변화하게 될 지역의 미래모습을 수도권, 충청권, 호남권, 대경권, 동남권, 강원권 및 제주권의 지역별로 예측해 본 결과 표 9.3과 같이 전망 되었다. 미래 국토 트랜드 및 이슈들 중 국토의 아열대화로 인한 지구온난화는 기온 및 강수의 변화와 이상기후를 초래하고, 동식물, 농작물, 어류 등 자연생태계에 직접적으로 영향을 준다. 이는 다시 농업 등 식량생산, 인간 건강과 정주, 경제 등의 각 분야에 2차적 영향을 미친다. 결국 기후변화로 인한 한반도의 아열대화는 생태계의 변화를 가져와서 농업, 수산업, 관광 등 국토 이용의 전반에 영향을 미치게 된다. 동시에 기상이변으로 인한 재해와 전염병 등 질병 발생이 많아질 것으로 예측된다(국토연구원, 2009c). 주거, 산업, 교통, 토지이용 등 국토분야별로 미래를 전망해보면, 특히 미래의 토지이용 및 수자원 분야의 예측에서는 이상기후와 자연재해가 자주 발생할 것으로 전망되었다. 2030년 우리나라의 기온은 과거 30년(1971~2000)에 비해 2℃ 내외로 증가하고,

표 9.3 지역별 국토여건 변화 전망(국토연구원, 2011e)

지역	전망내용
수도권	기존 주택의 스펙 높이기와 소규모 전원주거지 조성
	소득, 국적에 다른 거주형태 다양화
	국제업무·금융기능 강화
	지식기반산업 집적과 첨단복합형 산업공간 증가
	출퇴근 교통정체 완화와 첨두교통시간대 변화
	도시농업 및 관광, 수변공간 활성화
	접경지역 활성화와 남북 연계축 형성
	수도권의 초(超)광역화 등
충청권	일자리 결합형 주택공급 증가와 주택수요의 다양화
	대전, 오송의 원천기술 개발과 충청권 북부지역의 첨단신산업 집적
	충청권의 전국적 접근성 제고
	충청권의 국제교류기능 강화
	대전~세종~청주 대도시권 부상 등
호남권	신규 주택공급과 도심재생 증가
	전주~새만금권 및 광주권 중심의 첨단신산업 집적
	호남평야의 부활과 첨단바이오식품산업의 발달
	지리·덕유산 지역의 다문화·다기능 모자이크화
	서·남해안 해양 및 도서 이용의 고도화
	해안~내륙 연결형 대도시권 형성 등
대경권	노후 아파트 개보수 및 도심재생 증가
	구미, 대구, 포항 중심의 첨단신산업 집적
	동해안지역 및 울릉도·독도의 다목적 활용
	경북 북부지역의 명상 및 정신문화 활성화
	대경권 남부와 북부간 대비 부각 등
동남권	도심재생 및 전원주택 증가
	남해안의 국제적 다문화 사회 본격화 및 다지역거주 증가
	동남권 산업벨트의 첨단신산업으로 고도화
	부산의 국제금융·물류 및 관광기능 강화
	첨단신산업과 관광중심의 동남권 연안 메갈로폴리스 강화 등
강원권	농촌 공가(空家) 재생 및 전원주택 증가
	자원기반형 산업과 바이오메디컬 산업의 발달
	4계절 레포테인먼트 거점화
	국제교류 및 협력 확대와 관문도시 발달
	사다리꼴 공간구조 형성 등
제주권	거주자 및 장기체류자 증가
	동북아 MICE 산업의 중심
	아열대화로 관광 및 농수산업의 변화
	해양관광, 자원 및 에너지 개발의 활성화
	해안~산지 연계형 공간구조 형성 등

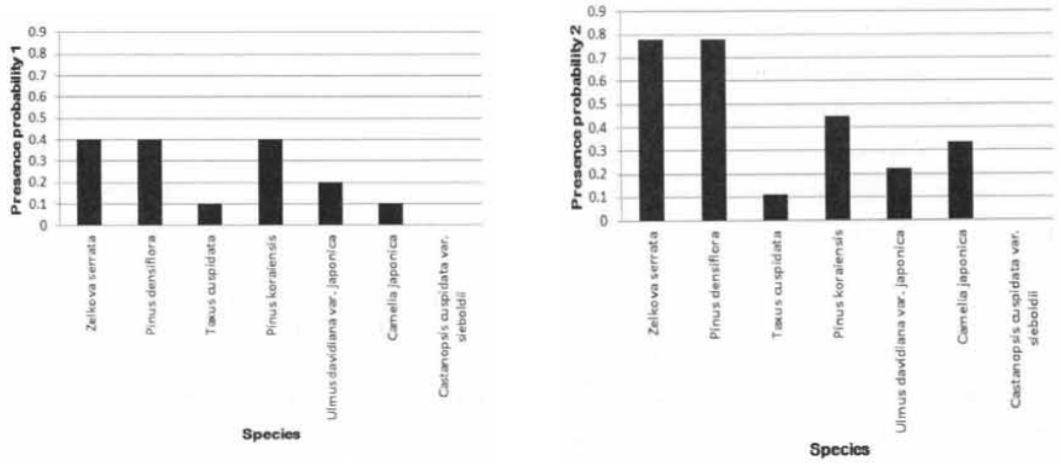


그림 9.4 기후변화에 따른 도시수종의 출현가능성(김윤정 등, 2013a)(좌 : 현재, 우 : 더 높은 온량지수 적용 시)

강수량은 6% 가량 증가할 것으로 전망된다(국토연구원, 2010d).

최근 스마트성장, 녹색성장 등 기후변화와 관련한 새로운 도시정책 패러다임을 적용할 경우, 주요 도시를 대상으로 2020, 2030, 2040년에 토지이용이 어떻게 바뀔 것인가를 예측해본 결과 도시별 인구 및 토지수요량 등의 토지이용 패턴이 다르게 나타났다(국토연구원, 2011a). RCP4.5와 8.5 시나리오의 스토리라인을 기반으로 토지이용 및 피복 변화 시나리오를 설정하여 시나리오별 도시성장을 예측한 결과, 2020년부터 2050년까지 도시지역은 꾸준한 증가세를 보였고, RCP8.5 시나리오의 도시면적 증가율이 RCP4.5 시나리오보다 더 높게 나타났다. 도시지역의 면적 증가는 주로 농지면적 훼손에 의해 발생되는 것으로 예측되었다. 특히, RCP4.5 시나리오보다 RCP8.5 시나리오에서 농지뿐만 아니라 산지면적 훼손이 더욱 증가되는 것으로 예측되었다. 이러한 농지와 산지의 면적 감소는 지방도시에 비하여 광역도시에서 더 높게 나타났다(김진수와 박소영, 2013). 서울시를 비롯한 경기도의 주요 거점 도시와 서해안지역으로 도시가 성장해 2030년에는 수도권 전역이 거대 도시화되고 수도권 전체 면적에서 도시가 차지하는 비율이 23.9%까지 증가하여 농지면적을 앞지를 것으로 예측되며, 2020년에는 2005년 대비 0.31°C, 2050년에는 4°C의 추가적인 평균기온 상승이 있을 것으로 예측된다(김현수 등, 2010; 김현수 등, 2012).

A1B시나리오를 이용하여 미래 한반도의 아열대 기후구의 변화를 전망해 본 결과 2100년에는 태백산맥과 소백산맥을 중심으로 한 산지 주변을 제외하고 도서지역, 해안지역, 도시지역 모두는 아열대 기후지역에 포함될 것으로 예측되었다(권영아 등, 2007). 기후변화로 인한 온도상승에 따른 도시지역의 수목의 적합성을 기후변화 시나리오 RCP8.5를 이용하여 평가한 결과, 서울지역에서 주목과 느릅나무가 낮은 기후적합성을 보였으며, 온대수종인 느티나무(Zelkova serrata)와 소나무(Pinus densiflora)는 넓은 기후서식지(niche)를 가지고 있어 미래 기후변화상황에서도 높은 생존성을 가지는 것으로 나타났으며, 아열대 수종인 동백나무(Camellia japonica)와 메밀잣밤나무(Castanopsis cuspidata)는 미래에 서리에 대한 적절한 대책만 강구된다면 생존율이 높을 것으로 예상되었다<그림 9.4>(김윤정 등, 2013a).

기후변화가 국토공간계획에서 토지이용 및 교통에 미치는 영향으로는 도시 및 지역의 구조가 에너지 절약적이고 온실가스 배출이 적은 구조로 변화하며, 환경공생주택이나 에너지 절약형 건축형태가 발달할 것으로 예상되었다. 또한 해수면 상승으로 간척·매립을 통한 국토확장 정책의 변화가 필요하며, 임해공업도시 및 연

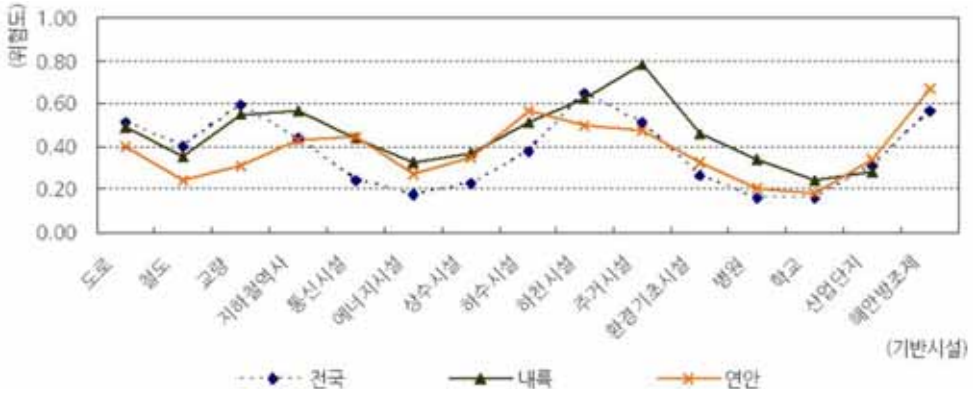


그림 9.5 지역유형별 사회기반시설의 기후변화 영향별 위험도(한국환경정책·평가연구원, 2010b)

표 9.4 기후사상별 상위 10순위 취약 사회기반시설(한국환경정책·평가연구원, 2010b)

기후사상 순위	평균기온상승	해수면 상승	태풍 및 폭풍	홍수 및 집중호우	가뭄	혹한	혹서
1	스키장	항만	항만	하천시설	상수시설	상수시설	주거시설
2	하천시설	해수욕장	하천시설	도로	관개시설	하수시설	의료·교육
3	주거시설	하천시설	도로	주거시설	하천시설	주거시설	철도
4	항만	발전시설	철도	철도	주거시설	관개시설	도로
5	발전시설	주거시설	주거시설	하수시설	발전시설	의료·교육	저장시설
6	관개시설	하수시설	전송시설	관개시설	의료·교육	발전시설	발전시설
7	저장시설	도로	공항	항만	국립공원	하천시설	상수시설
8	산업단지	관개시설	유·무선통신	공항	하수시설	공항	산업단지
9	의료·교육	산업단지	해수욕장	상수시설	산업단지	도로	공항
10	상수시설	저장시설	발전시설	유·무선통신	스키장	저장시설	관개시설

안지역의 산업단지 육성정책에 제약과 교통체계의 변화 및 도시·지역의 입지형태 및 구조가 변화하고, 대체에너지의 이용과 자동차나 철도의 수요가 증가할 것으로 예상되었다(국토해양부, 2008b).

기후변화가 도시 시스템에 미치는 영향에 가장 취약한 공간은 도시의 해안, 하천변, 지하공간, 구릉지이며, 이러한 취약공간에 위치한 도시기반시설, 건축물, 시민은 기후변화로 인한 재해 위험성은 더욱 높아지게 된다. 해안도시는 강수량이 많고 남해안, 동해안을 중심으로 태풍에 의해 홍수피해가 많이 발생할 것으로 예상된다. 해수면 상승에 대한 영향이 클 것으로 예상되는 해안저지대 등 취약지역에 거주하는 시민의 위험성은 높아지고 이주가능성 역시 증가할 것으로 전망된다. 내륙도시는 영남 및 호남 내륙을 중심으로 최고기온이 높기 때문에 열대야 등 열파에 의한 스트레스와 고령자 등 취약계층의 사망위험이 증가하고, 강원, 영남내륙지역은 가뭄으로 물부족 스트레스가 증가할 것이며, 지리산, 대관령 등 내륙산간지역은 홍수와 산사태의 위험이 높고 이주가능성이 증가할 것으로 예상하였다. 또한 사회기반시설은 해안도시, 내륙도시에 관계없이 산업형 도시에 집중되어 있고, 산업형 도시에는 도로, 철도 등 교통시설, 물, 전기 공급을 위한 파이프라인시설, 산업단지가 다른 도시유형에 비해 밀집되어 있어 기후변화에 영향이 클 것으로 전망되어 이로 인한 경제적 손실 또한 클 것으로 예상된다(김윤정 등, 2013b). 해안도시는 해수면 상승에 대한 영향이 높고, 특히 남해안, 동해안을 중심으로 태풍에 의한 홍수피해가 많이 발생하고 있기 때문에 해안변 도로, 철도, 항만 등의 기반시설의

표 9.5 일상생활 가뭄피해액 산정 기준 및 피해금액(최충익, 2010)

피해 항목	산정 기준	피해금액(원)
세탁을 위해 발생한 택배비 또는 교통비	일주일 평균 피해금액 × 피해세대수 × 12주	832,702,500
부식 구입비용	일주일 평균 피해금액 × 피해세대 수 × 12주	2,172,659,933
일회용품 구입비용	일주일 평균 피해금액 × 피해세대 수 × 12주	616,657,020
난방시설 수리 또는 교체비용	평균 피해금액 × 피해세대수	3,124,064,664
추가적인 가스비용	월 평균 피해금액 × 피해세대수 × 3개월	196,934,468
추가적인 전기요금	월 평균 피해금액 × 피해세대수 × 3개월	297,608,527
병원 진료비	평균 피해금액 × 피해세대수	91,393,072
위생문제 해결비용	일주일 평균 피해금액 × 피해세대 수 × 12주	920,646,334
용기 구입비용	평균 피해금액 × 피해세대수	385,422,011
화초 가격	평균 피해금액 × 피해세대수	129,723,947
추가된 월 통신요금	월 평균 피해금액 × 피해세대수 × 3개월	167,174,007
용수확보를 위한 차량유지비 (월)	월 평균 피해금액 × 피해세대수 × 3개월	470,083,093
생활용품 구입비(월)	월 평균 피해금액 × 피해세대수 × 3개월	270,704,725
이웃의 가뭄극복을 위해 지원한 금액	평균 지원 금액 × 피해세대 수	161,720,187
사랑의 생명수 지원금액	세대당 보급개수 × 용량별 단가 × 피해세대 수	3,589,307,100
총 피해금액		13,426,801,588

침수, 파손, 이전 가능성이 증대할 것이고, 물, 전기공급시설 등에 미치는 영향이 클 것으로 전망된다. 내륙도시는 영남 및 호남지역을 중심으로 열파로 인해 도로, 철도 등의 교통시설 피해가 증가하고, 하천수량 부족이 심화되며, 물 부족에 따른 수력발전 여력이 감소하고 물 공급에 영향이 미칠 것으로 전망하였다(국토연구원, 2009b).

SRES A2 기후변화시나리오와 고해상도 RCM 모형을 이용하여 미래(2001~2100)의 일 강우량을 모의한 후, 극한변동지수(Extreme Volatility Index, EVI), 인간위험지수(Human Risk Index, HRI), 그리고 재해영향지수(Disaster Impact Index, DII)를 산정하여 한반도의 시공간 분포를 비교 분석하여 미래의 기후변화 시 극한강우의 발생이 한반도의 재해위험에 미치는 영향을 평가한 결과, 극한변동지수는 경상도와 전라도 지역이 크게 나타났고, 인간위험지수는 7대 광역도시 및 수도권에서 크게 나타났으며, 재해영향지수는 서해안 일대, 경상도와 전라도 경계에 위치한 지역 등이 크게 나타나, 향후 기후변화에 의한 수재해 영향이 증가 될 것으로 분석 되었다(장대원 등, 2012).

한국환경정책·평가연구원(2010b)에 의하면 우리나라의 주요 사회기반시설에 대한 기후변화에 대한 취약성평가를 관련전문가를 대상으로 설문조사를 통해, A1B 기후시나리오를 바탕으로 평균기온 상승, 해수면 상승, 태풍 및 폭풍, 홍수 및 집중호우, 가뭄, 혹한, 혹서에 대해 2015년, 2045년, 2075년의 공간분석 수행한 결과, 평균기온뿐만 아니라 혹한 및 혹서와 관련된 연중 최저온도와 최고온도도 상승할 것으로 전망되며, 강우량도 전반적으로 상승할 것으로 나타났다. 또한 강우강도와 가뭄도 증가할 것으로 전망되었다. 각 기후사상별 발생가능성은 평균기온은 상승하고, 홍수 및 집중호우의 가능성은 상대적으로 높게 나타났다. 반면 혹한은 낮게 나타났다.

기후변화 취약성 측면에서는 기반시설군 전체적으로 홍수 및 집중호우와 태풍 및 폭풍에 대한 취약성이 높게 나타났다. 기반시설별로는 하천시설, 주거, 관개시설이 기후변화에 전반적으로 취약한 것으로 나타났고, 개별 기후사상별 기반시설의 취약성은 홍수 및 집

표 9.6 기후변화 현상과 그 영향(국립기상연구소, 2008)

기후변화 현상	가능성	농업/산림/생태계	수자원	상업/거주지/사회경제
저온일 감소 고온일 증가	거의 확실	고위도: 생산성 증대 저위도: 생산성 감소 병충해 증가	증발산 증가	난방감소 냉방증가 대기질 악화 겨울수송 양호 겨울관광 영향
육지에서 열파 증가	매우 높음	온난지역 생산량감소 산불 증가	수자원 수요증가 수질 악화	온난지역 주거환경악화 빈곤층 영향
호우 증가	매우 높음	곡물피해 토양유실 경작지 감소	수질 악화 수자원 부족	홍수피해 증가 재해보험 필요성 증대
가뭄지역 증가	높음	토질악화 생산량 감소 가축 감소 산불 증가	수자원 스트레스 증가	수자원 스트레스 수력발전 감소 인구이동 가능성
태풍강도 증가	높음	곡물피해 산림파괴 산호피해	전력수급차질로 인하 수자원 공급 위험	홍수/강풍 피해 보험기피 증가 인구이동
해수면 상승	높음	염수 피해	담수자원의 감소	연안방재 및 개발지용 인구이동 사회간접자본피해 보험기피

중호우에서의 하천시설, 태풍 및 폭풍에서의 항만, 해수면상승의 항만, 홍수 및 집중호우에서 도로 등의 순으로 취약한 것으로 나타났다(표9.4). 사회기반시설의 기후변화 취약성을 홍수 및 태풍을 중심으로 평가하면, 연안지역이 내륙지역보다 높은 취약성을 보였다. 이는 연안지역이 기후인자에 대한 노출이 높은 것과 관련이 있다. 지역유형별 사회기반시설의 기후변화 위험도는 내륙의 경우 주거시설이 높고 연안지역의 경우는 해안방조제가 높게 나타났으며, 하천시설과 주거시설은 두 지역유형 모두에서 위험도가 높게 나타났다(그림 9.5).

기후변화로 인한 경제적 손실을 평가하는 시도로서 도시 가뭄재해의 피해액을 산정하는 방법이 연구되었으며, 도시가뭄으로 인한 산업피해와 이에 대응하는 공공부문의 비용뿐만 아니라, 주민들의 일상생활의 불편함과 같은 시장외적 영향까지 항목화를 통하여 정량화하고자 하였다(최충익, 2010; 표 9.5).

9.3.2 농촌

우리나라는 인구성장세가 둔화되어 2030년 이후에는 인구감소가 예상되는 가운데 지역간 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, 2012a; 국토연구원, 2013b). 지역정주공간으로서 농촌의 미래전망은 인구감소와 고령화로 농산업 중심의 농지와 산지이용이 줄어들고, 여가관광 공간으로 활용될 것으로 예측되어 산과 수변공간을 여가관광 및 주거공간(세컨하우스)으로 활용하는 수요가 높아질 것으로 전망되므로 구릉지와 수변을 활용한 전원주택 공급이 필요할 것이다(국토연구원, 2011f).

농촌에서는 기후변화로 인하여 농작물생산이 가장 크게 영향을 받을 것으로 예상되는데 그 이유는 다음과 같다. 첫 번째, 저온일이 감소하고 고온일이 증가하게 되면, 고위도는 생산성이 증대되며, 저위도는 생산성이 감소될 수 있다. 또한 높은 온도는 병충해를 증가시킨다. 두 번째, 기후변화로 인한 집중호우와 같은 극한 강우의 증가는 토양유실로 인한 경작지 감소 및 곡물에도

피해를 준다. 또한 태풍으로 인한 피해도 증가될 것으로 예측된다. 세 번째, 해수면상승으로 인한 연안농업지역의 경우 염수피해를 받을 가능성이 높아진다(국립기상연구소, 2008; 표 9.6). 기후변화가 농업생태계에 미치는 영향은 긍정적 측면과 부정적 측면 모두를 가지고 있는데, 긍정적 측면은 작물재배기간의 증가, 시설난방비 절감, 벼 이모작 재배, 보리 재배 시 동해피해 감소와 수량 증가, 열대작물 도입 가능성 제고 등이며, 부정적 측면은 재배적지 변화, 적응성, 병충해, 기상재해, 생산성 및 품질 저하 등으로 들 수 있다(이인희, 2009).

정부·민간 합동작업단(2006)은 비전2030을 통하여 농촌지역의 생활환경이 개선되면 2020년경부터 현재의 지방 중소도시 수준으로 생활기초시설이 정비되고 교통·통신 등 도시와의 접근성을 개선하여 농촌지역의 의료·복지수준이 도시수준으로 정비될 것으로 예측하였다. 20만 명 정도의 중견 농업인이 지역농업 지도자로 성장하여 자영업자 수준의 소득 및 생활수준을 실현하고, 이러한 농촌생활환경의 개선 및 농업 활성화는 자연적으로 농업생산력의 향상으로 연결될 것으로 보인다. 2030년까지 농촌에는 전국민의 15% 이상이 거주함으로써 농업인의 생활공간으로서의 기능을 담당하는 동시에 농촌주민의 정주공간으로서의 역할을 수행하도록 유도한다면 전반적으로 식량생산량은 향상될 것이고, 이에 따라 식량주권 확보가 가능하게 될 것이다. 기후변화를 저감하기 위한 방안 중 하나로 이산화탄소 배출이 없는 청정에너지원 개발에 대한 정부투자가 지속적으로 증가할 것으로 예상된다. 특히 바이오에너지는 식물에서 생산되어 이산화탄소의 절감 및 에너지 산출이라는 일석이조의 효과를 가지므로 각광받는 에너지기술로 성장할 것으로 보고 있다. 2050년에는 저탄소사회로의 실현을 위한 사회·경제구조의 체질 전환에 진전을 보일 것이다. 또한 온실가스에 대한 사후처리기술의 한계를 인식하게 되어 사전예방기술 및 전략수립에 집중하게 될 것이다. 우리나라의 경우, 농경지는 온실가스 배출비중은 적지만, 온실가스 저감에는 효과적인 특성을 잘 활용 및 발전시켜야 할 것이다. 기후변화에 대한 적절한 대응 및 적응을 통하여 농업과 농촌의 변화가 바람직한 방향으로 진행될 경우, 농업이 첨단기술·자본·정보가 집약된 지식산업으로 발전하고 전후방산업을 능률적으로 연계하여 고부가가치 복합산업이 실현될 것이며, 유전공학, 전자통신기술 등이 농업분야에 광범위하게 활용됨으로써 생산성은 비약적으로 향상될 것으로 보고 있다(한국농촌경제연구원, 2010a).

9.3.3 복지

기후변화로 인한 기온, 강우, 해수면 등의 변화는 자연생태계에 직접적인 영향을 미치는 것뿐만 아니라, 인간사회에도 직접적인 보건, 인명, 재산피해와 사회갈등을 유발시켜 간접적으로 영향을 미칠 수 있을 것으로 판단된다(한국환경정책·평가연구원, 2010c).

기후변화로 인한 강우에 의한 피해의 정도는 공간적인 요소뿐만 아니라 소득, 연령과 같은 사회적인 요소와도 관계를 가진다. 한국환경정책·평가연구원(2011b)의 연구에 따르면, 호남지역이 풍수해 피해와 관련된 재해위험지구 및 상습수해지역이면서 기초생활보장수급자가 상대적으로 밀집하여 거주하는 지역으로 나타났다. 또한 60세 이상의 인구가 밀집도가 높으며, 대부분 농어촌지역에 거주하고 있는 것으로 나타나, 폭염과 같은 극한 기후변화현상에 매우 취약한 것으로 나타났다. 또한 농어촌지역에서는 저가의 에너지 접근성이 매우 취약하기 때문에 기후변화로 인한 에너지 사용증가로 농어촌지역의 소득역진성이 악화될 뿐만 아니라 저가의 에너지 사용으로부터 배제되는 상황이 발생할 가능성이 있는 것으로 보았다.

사회경제적 취약계층에 미치는 영향을 좀 더 살펴보면 풍수해 피해와 관련하여 수도권지역에서 저소득계층이 상대적으로 밀집거주하고 있는 지역에 풍수해 발생빈도가 유의하게 크게 나타났다. 즉, 하천연변이나 저지대에 위치해 있는, 풍수해에 상대적으로 취약한 단독주택의 지하 또는 반지하 시설에 거주하고 있는 저소득계층은 집중호우 등 극한기후현상에 매우 취약한 것으로 나타났다. 폭염으로 인한 건강피해와 관련하여 거동이 불편한 노인, 어린이, 저소득계층, 심혈관계 질환자 등 사회경제적 취약계층이 폭염과 같은 극한 기후변

그림 9.6 기후변화 취약계층 사례지역 선정을 위한 지표 구축

화 현상에 매우 취약한 것으로 나타났다. 또한, 저소득계층은 에너지 절약 및 온실가스 감축정책으로 인한 에너지 가격변동으로 경제적 부담이 상대적으로 가중되는 등 기후변화 대책에 취약할 수밖에 없다. 이에 저소득계층이 부담해야할 에너지 비용의 증가는 현재의 에너지 빈곤상황을 더욱 악화 시킬 것으로 보인다. 그리고 농어촌지역에서는 저가의 에너지 접근성이 매우 취약하여, 기후변화로 인한 에너지 사용증가는 농어촌지역 저소득층에게 소득역진성을 가져다주며, 저가 에너지 사용이 어려워지는 상황이 발생할 수도 있을 것으로 예상된다(한국환경정책·평가연구원, 2010d).

국토연구원(2012c)은 기후변화 취약계층을 기후변화에 취약한 지역에 거주하는 사회경제적 취약계층으로 정의하고, 이러한 계층이 밀집하여 거주하고 있는 지역을 대상으로 폭염과 한파에 대한 심도 있는 분석을 실시한 결과, 기후변화 취약계층 관련 지표를 통해서 사례지역을 선정한 까닭에 상대적으로 기후변화에 취약한 생물학적, 사회경제적 취약계층 비율이 높았으며, 주변에 비해 기후노출에 의해 더 많은 자극을 받고 있는 것으로 나타났다. 이는 취약계층이 거주하고 있는 지역의 외부환경과 주택상황이 크게 영향을 미치고 있는 것으로 추정된다(그림 9.6).

기후변화로 인한 현상에 대해 대응을 하는 과정에서 간접적으로 사회갈등 유발 가능성을 분류하면 다음과 같다. 첫째, 조력발전소 건설, 풍력 발전소, 태양광 발전시설 등의 신재생에너지 보급·확대로 인한 갈등, 둘째, 수리권 관리 및 배분, 대체상수원 확보, 관할권한, 가뭄 그리고 국책사업과 관련된 수자원 분배를 둘러싼 갈등, 셋째, 온실가스 배출권할당을 둘러싼 갈등, 넷째, 온실가스 감축정책과 산업·지역·노사 간의 갈등, 마지막으로 자연자원의존형 산업과 보건·건강 부문의 기후변화 영향 및 잠재적 사회갈등을 들 수 있다(한국환경정책·평가연구원, 2010c).

또한, 기후변화 대응을 둘러싼 이해와 갈등 양상은 크게 여론 수렴과정에서 드러나는 이해관계자의 갈등(산업계와 환경단체), 여론 수렴과정에서 드러나지 않는 잠재적 갈등이 있다. 특히, 후자가 현 시점에서 다른 여타 사회집단이나 사회구성원들이 기후변화문제를 자신의 문제로 받아들일 정도로 인식하고 있지 못하며 논의의 과정에 제대로 참여하지 못하고 배제되었기 때문에 보다 다양한 의견이 제시되지 않았을 가능성을 제기할 수 있다. 잠재적 갈등의 이해당사자는 산업계의 노동자들과 농민들, 그리고 소비자들이다. 이 중 소비자들은 기후변화로 인해 야기될 다양한 영향들을 직접 경험하게 될 것이기에 기후변화에 대한 중요한 이해당사자라고 할 수 있다(윤순진, 2009).

미래 한반도의 대부분의 지역은 아열대기후대에 포함되고 도시의 해안, 하천변, 지하공간 등의 취약공간에 위치한 기반시설, 건축물, 시민들은 기후변화로 인한 재해위험성이 높아지고 저소득층이 밀집한 거주지

역에서는 풍수해의 피해가 커질 전망이다. 하지만 농촌 지역에 대해서는 공간적 측면보다 주로 에너지측면에서 예측하고 있다.

9.4 취약성의 주요원인

9.4.1 도시

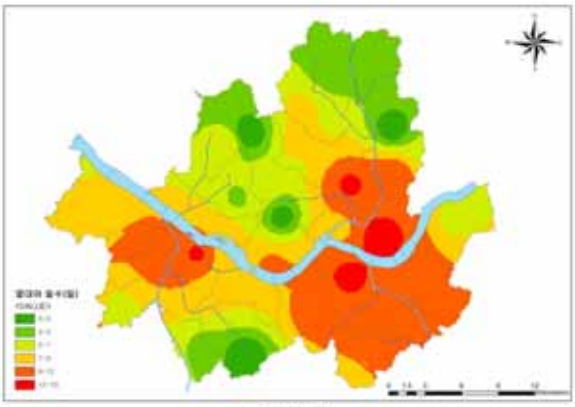


그림 9.7 2008년 서울시 구별 열대야 일수 분포(서울시정개발연구원, 2010)

최근 국내에도 기후변화로 인한 여러 현상들이 나타나고 있으며, 다양한 영향을 끼치고 있다. 우리나라에 직접적으로 많은 피해를 주는 강우의 경우, 최근 10년간(1999~2008) 우리나라의 1일 100㎜ 이상 집중호우 발생빈도가 385회로 1970~1980년간 221회에 비교하여 1.7배 증가하였다. 1920년대와 1990년대의 우리나라 남부지역의 강수패턴을 비교해 보면, 강수일수는 14% 감소하였지만, 강수량은 7% 증가하여 강수강도는 18% 증가하였다(기상청, 2009). 그리고 온도상승으로 인한 표층수온의 증가는 파괴력이 강한 태풍의 발생빈도를 증가시키고, 한반도가 속한 중위도지역은 수온상승이 가파르기 때문에 같은 빈도라도 태풍의 강도는 더 세지고 있다. 지난 37년간(1970 ~ 2006) 최대 순간풍속의 극값은 계속 증가하였고, 특히 역대 가장 풍속이 강했던 4위까지의 기록이 모두 2000년대에 발생하였다. 한편 태풍의 피해를 많이 입는 지역으로는 전남, 경남, 부산, 경북, 강원 등 태풍의 이동경로에 있는 지역들이다. 또한 이러한 강우의 형태는 산사태의 발생과 밀접한 관계를 가진다(한국환경정책·평가연구원, 2013d)

도시 내 연대별 자연재해 실제 피해 현황을 살펴보면, 인명피해는 줄고 있으나 재산피해액은 과거 40년 전에 비해 약 19배 증가하고, 2000년의 경우 1990년에 비해 3.7배 증가했다(소방방재청 2006). 도시지역은 단순히 태풍과 같은 극한강우만의 이유로 피해가 발생하는 것은 아니라 인간의 개발로 인한 여러 가지 영향으로 인해서 피해가 가중되고 있다. 서울시의 경우, 침수피해 발생원인은 일차적으로 배수시설의 설계용량을 초과하는 강우량이 비교적 단시간에 집중된 것도 있지만, 노면수의 저지대 집중, 하수관거의 요량이나 통수능력 부족, 경사불량, 펌프용량 부족, 토사유출에 의한 배수불량 등이 복합적으로 작용하였다. 아울러 하천의 계획홍수위보다 낮은 지역이 18.1%나 되며, 불투수지역이 65.3%에 이르는 등 도시화 면적의 확대와 고밀화에 따라 수해에 취약한 공간이 증가한 것이 보다 근본적인 문제이다(서울시정개발연구원, 2011; 강정은과 이명진 2012). 특히, 항만, 공항과 같은 점적인 형태와 도로, 철도와 같은 선형의 중요 기반시설들이 위험률이 높다(국토연구원, 2011c: 표 9.7).

표 9.7 재해에 따른 위험성이 높은 중요 기반시설 목록(국토연구원, 2011c)

구 분	중요 기반시설
점형(3)	항만, 공항, 수질오염방지시설
선형(9)	도로, 철도, 수도공급설비, 전기공급설비, 가스공급설비, 열공급설비, 방송통신시설, 유류저장 및 송유설비, 하수도

도시에서 재해 피해를 가중시키는 주요 원인은 재해취약지역(하천변.해안변 저지대, 급경사지 주변 등)의 밀집, 거주와 같이 방재개념이 미흡한 도시의 이용 및 개발, 토지이용, 건물배치 그리고 도시지역 지표면의 우수저류.침투시스템 미흡 등으로 진단할 수 있다(박민규 등, 2012). 또한 기후변화 영향에 따라 도시에서 발생하는 홍수 등 재해규모가 대형화되고, 도시는 홍수, 폭설, 폭염, 해수면 상승 등 다양한 재해, 새로운 위험에 노출될 것으로 전망되어 기후변화가 일상화되고, 재해는 대형화, 다양화 되고 있으므로 도시방재의 패러다임 전환이 필요하다(심우배 등, 2011).

또한 도시의 고밀도화, 불투수지역 등에 의해 여름

온도상승으로 인하여 국내 열대야 평균일수는 4.1일로 지난 30년간(1971 ~ 2000) 발생일수인 3.8일보다 0.3일 증가하였다. 국내 도시열섬현상은 맑은 날에 주로 발생하는 해외 여러 도시와 달리, 고온다습한 북태평양 기단의 영향으로 일사가 상당량 차단된 흐린 날에도 발생하는 특징을 보인다. 특히, 기후변화로 인해 장마철이 점차 짧아지고 집중호우가 더 자주 발생하면서 고온다습한 흐린 날이 늘어나 이러한 현상을 심화시키고 있다. 관측 자료를 바탕으로 맑은 날의 도시열섬현상은 고도, 건물의 종횡비, 풍속, 녹지면적이 도시열섬현상 발생의 주요한 요인으로 나타났으며, 주간풍속의 경우 건폐율과 천공률 인자가 풍속변동에 가장 큰 영향력을 지니는 것으로 나타났다(김용진 등, 2011; 여인애와 윤성환, 2011). 이러한 도시지역의 열섬현상 등은 폭염을 악화시키는 요인이 되고, 지역별로 다양하게 나타나며(그림 9.7), 노년층과 빈곤층이 많은 지역일수록 폭염에 취약성이 높아진다.

대설주의보 및 경보발생횟수는 최근 산악지역에서 증가하고 있으며, 주로 강원 산간지역, 호남 서해지역, 충청 및 경기지역 순으로 많이 발효된다(기상청, 2007). 한반도와 인접한 중국과 몽골의 사막화는 지구온난화로 더욱 가속화되어, 향후 수도권을 중심으로 황사가 발생할 가능성이 높으며, 황사의 빈도와 농도도 증가할 것으로 보인다(기상청, 2010b).

최충익 등(2012)은 기후변화로 인한 불확실성과 위험이 높은 지역인 연안도시를 대상으로 기후변화 적응의 측면에서 법률과 공간계획 지침을 검토해본 결과, 관련 법률들이 기후변화의 요인은 별도로 고려하지 않고 있으나, 이들 법률 각각은 연안지역 기후변화 적응에 대비할 수 있는 수단에 관한 규정을 포함하고 있었다. 공간계획 지침에 대한 검토는 대부분의 지침이 부분적인 기후변화 적응기준은 확보하고 있었으나 기후변화 및 연안지역의 특수성에 대한 고려는 이루어지지 않고 있는 것으로 나타났다(표 9.8).

표 9.8 연안도시의 기후변화 적응을 위한 관련 공간계획 지침의 검토 결과(최충익 등, 2012)

지 침	기후변화 적응 불확실성	기후변화 적응수단	연안지역 특수성
도시기본계획수립지침	×	○	×
도시관리계획수립지침	△	○	×
광역도시계획수립지침	×	○	×
제1종지구단위계획수립지침	×	×	×
제2종지구단위계획수립지침	×	△	×
저탄소 녹색도시 조성을 위한 도시계획 수립지침	○	△	×

4.2 농촌

기후변화에서 농촌부문과 관련해서는 농업부문과 더불어 주로 에너지 관련 연구가 진행되고 있다. 농업부문의 에너지소비량이 상대적으로 적다고 할지라도 에너지소비 당 이산화탄소 배출이 상대적으로 높다. 또한 농업폐기물에서 메탄이 배출되며, 비료의 사용과정에서 아산화질소가 배출된다. 이제껏 친환경 농업 혹은 지속가능한 농업을 주로 농약과 화학비료의 저투입이라는 시각에서 접근하였으나 기후변화의 진행으로, 친환경농업개념은 에너지 투입과 이산화탄소 배출 및 흡수의 관점에서 보완되어야 한다. 또한 기계화를 통한 대농육성은 에너지소비의 증가를 수반하므로 기후변화 문제와의 연관 속에서 신중한 검토가 필요하다(윤순진,

표 9.9 2007년 농업분야 에너지원별 사용실태(지식경제부, 2008) (단위:천TOE)

구분	연탄	석유류	가스	전력	신탄	신・재생 에너지	계
사용량	158	1,516	6.0	406	1.0	0	2,086
비중(%)	7.6	72.7	0.3	19.4	-	0	100

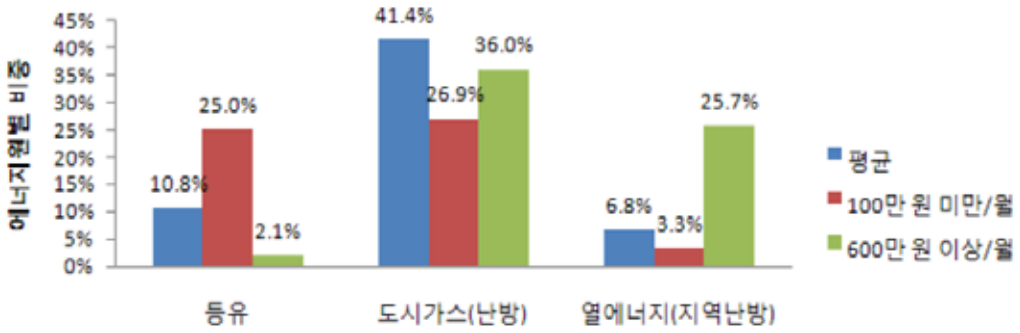


그림 9.8 저소득계층과 고소득계층의 에너지 이용 불평등(한국환경정책·평가연구원, 2010d)

2007).

산업부문 에너지소비부문에서 농(림어)업부문이 차지하는 비중은 1981년 4.3%에서 약간 증가 추세를 보이다가 2005년에는 3.6%로 다소 낮아졌다. 농업부문은 농가인구와 생산활동 자체가 지속적으로 축소되면서 에너지소비도 감소하는 추세이다. 농업분야의 2007년 에너지 소비량은 2,086천TOE이다. 이중 석유류가 1,516천TOE(72.7%), 전력이 406천TOE(19.4%), 연탄이 158천TOE(7.6%)이며, 신·재생에너지는 사용실적이 거의 없다(표 9.9). 그러나 향후 유가가 상승할 경우 석유류 소비량은 감소하고 신·재생에너지 소비량이 증가할 것으로 보인다(한국농촌경제연구원, 2010c).

김충실과 이현근(2009)의 연구에서도 농업부문에서의 이산화탄소 배출은 경유 소비로 인한 것이 가장 큰 것으로 나타났다. 세부작물별로는 채소부문의 이산화탄소 배출량이 가장 많았고, 벼가 두 번째로 많은 것으로 추정되었다. 이는 시설재배 시 난방을 위하여 연탄, 경유 등의 에너지 투입량이 많고 농기계의 투입에 따른 경유의 소비량이 많기 때문인 것으로 판단된다.

9.4.3 복지

기후변화 영향은 1차적으로 지구의 물리적 시스템과 생물시스템에 대한 영향, 그리고 지구의 물리적 시스템과 생물시스템의 변화가 자연생태계 및 인간사회에 미치는 2차적 영향, 다음으로 기후변화 완화 및 적응을 하기 위한 인간의 활동에 의해서 정책과 제도, 사회관계 및 생활양식 전반에 미치는 3차적인 영향으로 구성된다. 기후변화에 의한 사회갈등은 이러한 2차적인 영향과 3차적인 영향에 의한 갈등으로 구분될 수 있다. 첫 번째 범주는 영향지역의 지리 및 사회경제적 여건과의 상호작용과정에서 사회갈등이 상이하게 발생하며, 두 번째 범주는 기후변화에 대응한 일련의 정책의 입안과 집행과정에서 발생하거나 잠재적인 위험성을 말한다(한국환경정책·평가연구원, 2010c). 3차적인 영향과 관련하여 기후변화에 대응하기 위한 정책입안 시, 소득불균형으로 초래되는 에너지 소비, 거주환경 등의 차이를 고려해야 할 것이다. 에너지 소비량을 예로 들면, 2008년 우리나라의 가구당 연간 평균 에너지 소비량은 평균 11,895.4천 Kcal인데 반해 100만원 미만 가구는 8,963.9천 Kcal에 불과하고, 100만원~200만원 미만 가구도 10,805.5천 Kcal로 평균에 못 미친다. 이에 600만원 이상의 고소득계층은 100만원 미만 가구에 비해 약 1.8배의 에너지를 사용하고 있다. 기후변화의 완화를 위해 정책수단으로 에너지 가격의 정상화 즉 상향조정을 논의되고 있는 데, 이는 저소득층 등 사회경제적 약자의 에너지 접근성을 저하시키는 또 다른 사회문제를 야기할 가능성이 높다. 통계청의 「소득 10분위별 가구당 월평균 가계지구」에 따르면, 2004부터 2008년까지 5년간 경상소득에서 에너지 비용이 차지하는 비중이 평균 2.9~3.2%를 나타내지만 소득 1분위에서 3분위에 속한 계층은 각 12.4~14.7%, 6.5~7.0%, 4.5~5.4%로 타나난 반면, 소득 10분위 계층은 평균보다 낮은 2%미만에 머물고 있다. 그리고 소득계층별 에너지원별 비중을 살펴보면 저소득계층은 상대적으로 비싼 등유를 이용하는 가구비율이 높은 반면, 고소득계층은 상대적으로 저렴한 도시가스 및 열에너지(지방난방)를 이용하는 비율이 높게 나타났다(한국환경정책·평가연구원, 2010d; 그림 9.8).

기후변화의 영향으로 도시에서 발생하는 홍수, 폭염, 폭설 등 재해규모가 대형화, 다양화 되고 있으며, 도시에서 재해피해를 가중시키는 주요 요인으로는 방재개념이 미흡한 도시의 이용 및 개발 그리고 토지이용 등을 들 수 있다. 또한 소득불균형에 따른 에너지 소비의 차이가 저소득층 등 취약계층의 피해를 가중시키는 것으로 나타났다.

9.5 적응옵션

9.5.1 도시

미래 기후변화에 대한 도시의 적응에 관한 연구는, 주로 도시에서 발생하며 앞으로 더욱 그 피해가 커질 것으로 예상되는 재해들에 대한 연구로 집중되는 경향을 보였다. 특히, 물부족, 침수피해에 대한 연구가 다수 진행되었으며, 이전부터 관심주제인 탄소중립도시와 관련된 연구도 꾸준히 진행되고 있었다. 그리고 기후변화 완화대책과 적응대책을 모두 고려하는 방안에 관한 연구도 나타나고 있었다. 적응은 기후변화의 직접적인 영향을 받는 시스템에서 일어나므로 공간적 범위가 지역으로 한정되어 있고 즉각적으로 효과가 일어나고 비용과 편익이 지역으로 귀속된다는 점을 감안할 때 보다 적극적인 대응이 필요하다(고재경과 박년배, 2008; 채정은과 변병설, 2010).

국토연구원(2011e)은 향후 국토 미래상의 창조를 위해 추진되어야 하는 기후관련 미래정책과제로 기후변화에 대응하기 위하여 자연재해에 강한 지역 만들기, 공간구조의 에너지절약형 재편, 식량안보를 위한 최소경지 확보, 첨단 녹색형 국토이용 관련제도 정비 등이 추진을 제시하였다. 주로 국토 전체적인 맥락에서의 지역특성을 고려한 기후변화에 대한 국토공간계획 대응과제를 열거하면 다음과 같다(국토해양부, 2008b). ① 저탄소 도시공간구조로의 전환을 위해 탄소중립 시범도시 선정 및 지원, 저탄소 도시조성을 위한 도시계획 수립, 탄소저감형 친환경 신도시를 개발한다. ② 탄소흡수원 확보를 위한 녹색국토 구현으로 도시 개발 시 녹지·친수공간 확보(배민기 등, 2009; 한국환경정책·평가연구원, 2010a; 국토연구원, 2011b; 한국환경정책·평가연구원, 2011a; 성형찬과 황소영, 2013), 산림을 체계적으로 관리한다. ③ 안전 국토 지향의 기후변화 적응시스템 구축으로 기후변화에 따른 국토취약성 평가와 적응시스템 구축(국토연구원, 2012b; 심우배 등, 2013), 기후변화에 따른 이상기상에 대비하여 시설물 방재능력 강화, 공간구조를 고려한 도시 계획적 재해관리(심우배 등, 2013, 국토연구원, 2013e; 이정호 등 2013), 주민의 안전한 대피체계 마련, 재해관리를 위한 상시 모니터링 시스템 구축, 예방적 방재체계를 강화한다(심재헌 등, 2012). ④ 기후변화 대응을 위한 국토·도시 분야 DB를 확보하여 지역별 온실가스 배출량 산정 및 감축 잠재량 분석, 국토에너지 기후지도 작성 및 지자체별 온실가스 감축목표제 도입을 검토한다(국토해양부, 2010). ⑤도시 및 지역계획 수단 도입을 통한 기후변화 대응 산업 육성으로 신재생에너지의 확대를 위한 제도 개선, 신재생에너지 국토입지적정 검토와 설치유도, 신재생에너지산업 전용 임대산업용지 공급, 생태산업단지로 개선 및 조성, 국토·도시 분야 CDM 개발, 중장기적으로 지역·도시간 탄소배출권 거래제 도입에 대한 대응체계를 구축한다.

탄소배출의 상당한 부분을 차지하고 있는 공간인 도시에 대해서는 저탄소배출 방안, 도시 내 흡수원의 역할, 전략환경평가에서의 고려 등 단순히 도시 내 탄소

표 9.10 탄소저감형 신도시 토지이용을 위한 공간적 적용단위 별 계획요소(충북개발연구원, 2010)

공간적 적용단위(개)	계획요소
소생활권(6)	친환경적 건축물 배치, 자연지반보존, 도시농업, 교통정온화, 입체녹화
소-중생활권 연계(6)	적정생활권설정, 업종간 인접배치 및 입지배분, 보행자전용도로체계 구축, 친수공간 조성, 생태통로확보, 그린웨이
중생활권(6)	집약적토지이용, 대중교통중심체계, 친환경교통수단도입, 자전거전용도로체계구축, 생태면적률 도입, 저탄소공원·녹지조성
중-대생활권 연계(4)	복합용도개발, 대중교통중심개발(TOD), 바람길, 대중교통전용지구
대생활권(4)	밀도계획, 비오톱 조성, 공원·녹지율, 그린메트릭스

배출의 현황이 아닌 공간적인 해결방안 등에 대한 연구들이 진행되었다(여인애와 윤성환, 2011; 정태웅 등, 2012; 노경식 등 2013, 유선철 등 2013). 탄소중립도시를 위한 도시계획기법으로 첫째로 탄소배출 억제를 위한 도시계획 및 설계로서 분산적 집중화된 공간구조, 대중교통중심의 교통구조, 신·재생에너지 이용과 에너지 절약을 위한 도시설계를 들 수 있고, 둘째로는 기후변화 적응을 위한 도시계획으로 도시의 열부하 분석, 기후분석과 기후도 작성, 도시의 바람길 조성을 들 수 있다(한국환경정책·평가연구원, 2012a). 또한 고효율 단열재, 고효율 창호, LED조명 등 공공건축물의 저탄소 녹색화를 특화하여 적용할 수 있는 다양한 저탄소 계획요소의 검토가 필요할 것으로 보인다(김영환과 어상진 2013; 권혁삼 등 2013).

톱 등의 계획요소는 공공용지 우선분양권, 입찰시 가산점 부여, 지방세 감면, 거주자 세금 감면 등의 방안을 적용할 수 있다(국토연구원, 2009a; 반영운 등, 2008). 그리고 신도시 토지이용계획과정에서는 탄소저감형 토지이용계획 모델을 구축하기 위해, 소-중생활권연계, 중생활권, 중-소생활권연계, 대생활권으로 구분하여, 각 공간단위별 또는 연계하였을 때의 계획요소를 도출하였다. 공간단위별로 적용될 수 있는 탄소저감방안이 상이할 수 있으며(서울시정개발연구원, 2009), 다차원 척도법을 통해 공간단위별 계획요소간 연계성을 바탕으로 신도시 토지이용계획 과정에서 탄소저감을 의도할 수가 있다(충북개발연구원, 2010; 표 9.10; 그림 9.9). 그리고 녹색교통 및 대중교통의 확대, 물 수요관리, 에너지 절약 등의 정책은 녹색사고에 의한 국민의

표 9.11 도시재생에 관한 연구

구분		연구목적	주요 내용
도시재생	국토 연구원 (2008a)	• 지속적인 자생력 확보를 위한 특성화된 사회 · 경제 · 물리적 환경을 종합적으로 고려한 도시재생 정책 전략 제시	• 도시재생 개념정립 • 도시차원에서의 중심시가지 변화유형 분석 • 중심시가지 실태분석을 위한 진단지표 설정 • 유형별 사례도시 중심지 실태분석 • 해외 도시재생 사례분석 • 중심시가지 도시재생 과제 도출
기후변화 대응도시 재생	국토 연구원 (2013c)	• 기존의 도시재생과 기후변화 정책이 갖고 있는 한계를 극복하기 위해 도시재생 유형별 기후변화 대응 계획요소를 도출, 유형별 차별화된 정책방안 제시	• 기후변화 대응 도시재생 논의 • 국내 기후변화 관련 연구 및 정책 현황 검토 • 국외 기후변화를 고려한 도시재생 사례 조사 • 도시재생 사업 유형별 기후변화 대응 심층 분석 • 기후변화 대응 도시재생 정책방향 제시 • 기후변화 대응 도시재생 전략 제시
	김영환 · 박상준 (2014)	• 저탄소 지향형 도시재생의 도시설계적 방안 모색을 위해 청주시를 사례로 저탄소 녹색 계획요소 활용방안 모색과 탄소저감 효과 분석	• 저탄소 녹색 도시재생의 이론적 고찰 • 도시재생에서의 저탄소 녹색 계획요소 도출 • 사례연구를 통한 탄소저감 효과 분석

이를 위한 계획요소를 살펴보면, 탄소저감을 위한 신재생에너지 확보, 에너지 절약, 자원순환, 폐기물 저감 등의 계획요소는 용적률 완화, 건설비용 지원, 분양가 추가 보전, 설치비 융자 등의 방안을 적용할 수 있다. 또한 탄소흡수를 위한 단지 녹화, 입체녹화, 그린네트워크, 수순환체계(이정민과 김종림 2012; 한국환경정책·평가연구원, 2012b; 강나래 등, 2013), 수생비오

자발적 참여가 전제되어야 한다. 따라서 모든 정책의 바탕에는 국민적 합의와 홍보, 교육정책을 병행할 때 소기의 성과를 거둘 수 있을 것이다(국토연구원, 2009a). 또한 최근 사회경제적 여건과 도시정책 패러다임의 변화로 도시 내 쇠퇴지역의 경우 기후변화에 대한 대응력이 약하고 도시재해에 따른 피해가 상대적으로 크며 에너지시설 노후화에 따른 에너지 비효율화가

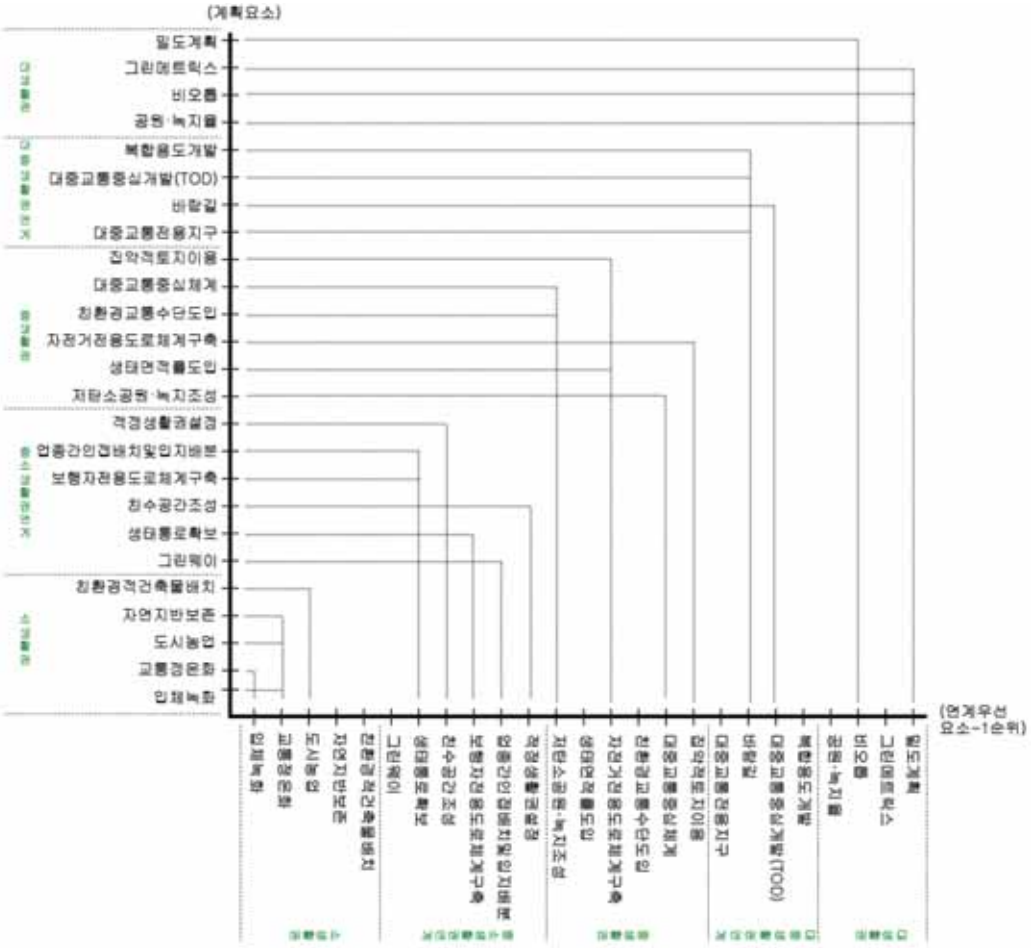


그림 9.9 신도시 토지이용 계획 차원의 탄소저감을 위한 공간단위 별 계획요소의 1순위 연계 적용 요소(충북개발연구원, 2010)

심각하므로 향후 도시재생의 정책은 현재 '도시재생 특별법'에서 제시하고 있는 도시재생 계획체계에서 기후변화 대응계획이 반영될 수 있도록 유도하고 중앙정부와 지자체에서 추진하고 있는 기후변화정책이 서로 정합성을 확보할 수 있도록 유도한다(국토연구원, 2013c; 표 9.11).

기후변화 적응형 공간계획은 불확실성을 줄이고 미래를 판단하는 형성적 계획으로 그 도구로 시나리오 전략을 활용하여 공간에서의 회복력을 확보하고 경제적 효율성보다는 미래에 대한 대응을 추구하는 것으로 의사소통과정에 의해 실현가능한 합의된 미래를 도출하는 것을 목표로 한다. 이를 위해 공감적 통치관리체계(anticipatory governance), 커뮤니티 통치관리체계(community governance), 다층적 통치관리체계(multilevel governance)를 통해 접근한다. 한국환경정책·평가연구원(2013a)는 기후변화 적응형 공간계획의 정책적 틀을 도출하기 위해 기후변화 적응과 관련된 15개 법정계획 공간계획을 검토하여 "① 과학적 자료를 기반으로 합의된 통치관리체계의 미래를 만들어 낼 것, ② 회복력의 개념에 기반한 계획의 전략을 도출할 것, ③ 지역발전과 기후변화 적응이 계획내에서 통합될 수 있도록 할 것, ④ 참여자와 의사소통을 기반으로 한 계획과정을 통하여 적응역량을 높일 것, ⑤ 참여자들의 논의와 합의를 통하여 창조적인 계획대안을 만들어 낼 것"을 기본 원칙으로 개발하였다.

구체적으로 서울시를 대상으로 한 기후변화적응 도시계획요소에는 앞으로 기후변화로 인하여 변화가 발생할 것으로 예상되는 건강, 기반시설, 물 관리, 생태계 측면에서 부정적인 영향을 파악하고, 이를 줄이는 방안의 정책수립을 제안하였다(서울시정개발연구원, 2010;

표 9.12). 취약요소로는 고령화 사회, 저소득층, 대기오염, 황사, 전염병 등 기후변화에 적응하는 데 있어 취약점으로 작용할 수 있는 도시의 물리적, 사회경제적 요소들을 도출하였다. 그리고 기후변화 적응 종합기본계획 수립, 기후변화관련 기상관측, 대기오염 관측 등 기초정보 인프라 구축, 기후변화 취약성 평가지표 개발, 취약성 평가지도 제작 등 기후변화의 예측 및 사전대응체계 측면과 적응제도를 강화하는 전략이 필요함을 주장하였다.

표 9.12 서울시의 기후변화 적응요소와 취약요인(서울시정개발연구원, 2010)

구 분		내 용
적응요소	건 강	기후변화로 인한 기온, 강수량 등의 변화로 인한 직접적 영향 생태계나 대기오염의 변화 또는 질병의 숙주 내 서식 등의 변화를 통한 간접적 영향
	기반시설	전기시설과 유선통신망 및 공항, 도시편의시설 등에 영향을 미침
	물 관 리	수문시스템에 가장 큰 영향을 미쳐, 유역변화, 수력발전 능력, 용수공급 문제, 수질문제, 홍수 및 가뭄 등 자연재해의 취약성을 증가시키는 요인
	생 태 계	기온상승, 강우패턴 변화, 해충 및 잡초 확산, 외래종 침입, 산불, 해수면 사승 등에 의해 부정적 영향을 받음
취약요인	고령화 사회	65세 이상 고령자 인구 비율증가, 노인단독가구 증가
	저소득층	국민기초생활보자 수급자 등 취약계층에 대한 적응수요의 차별적 대응 필요
	건강위해도	최고기온 30℃~32℃부터 사망자가 급격히 증가, 최고기온 29.9℃에서 1℃상승할 때마다 사망률 3%증가, 폭염 7일 이상 지속시 사망률 9%이상 증가
	대기오염	폭염기간 동안 오존농도 2배정도 증가
	황 사	황사발생일 수 계속 증가
	전 염 병	인구밀집과 빈번한 해외교류로 전염병에 취약한 사회구조
	자연재해	침수피해가 가장 크게 차지함

도시 내 사회기반시설에 대한 적응방안으로는 ① 취약성 분석결과를 바탕으로 우선 조치 사회기반시설을 중심으로 관리 및 투자를 해야 하고, 투자는 피해수준과 적응시급성이 높은 시설물을 우선시해야 할 것이나, 투자규모가 상대적으로 작은 기반시설을 중심으로 조치를 취하는 방안 고려 ② 기후변화로 인한 부정적 효과가 발생했을 때 사회적 파급성이 큰 사회기반시설에 대해서는 영향평가제도를 강화하며, 그러한 시설물에 대해 시설기준의 상향조정 및 특별기준을 제정하고 피해저감공법을 개발하여 시설물의 안전성을 제고하는 방안 마련 ③ 지속적으로 기후변화 취약성을 평가하고 모니터링하면서 기존 사회기반시설물을 보강하여 관리 ④ 기후변화로 인해 잦아질 자연재해 관리체계의 효율화를 위해 기후 및 재해관련 연구와 관련 정보관리 및 지원을 수행하는 재해에 대한 종합적 대응기구 구축을 제시하였다(한국환경정책·평가연구원, 2011a).

특정 재해를 대상으로 적응대책을 연구한 사례는 가뭄, 침수피해에 대한 연구가 있으며, 특정 대상시설에 대한 연구로는 사회기반시설을 강화하는 적응대책에 대한 연구가 있다. 가뭄에 대해서는 대부분 특별시, 광역시와 수도권 지자체와 같이 도시 지역에 인구 집중도가 높고, 불투수 포장 등 도시화 진전이 높은 지역이면서 기후노출지수가 높은 지역이 주요 연구 대상으로 선정되었다. 적응방안으로는 공간계획의 계획영역 즉, 공간구조, 토지이용, 기반시설, 단지 조성, 건축물 등의 다양한 부문에서 도시의 온도를 낮추고, 도시의 보수 및 유수기능을 강화하여 건전한 물·순환체계를 구축하는 것 등을 제시하고 있다. 특히, 자연적 입지 및 지형조건을 고려하여 적절한 토지이용 및 건물 배치를 통해 자연 기후·순환시스템을 구축하고, 녹지공간을 확대하며, 우수 및 오수의 재활용 시스템을 구축하는 적응방안의 필요성을 강조하였다(심우배, 2011).

서울시의 경우 기후변화에 따른 극한강우의 증가로 인해 앞으로 방재 성능 목표는 시간당 100mm강우에도 침수피해를 방지할 수 있을 정도로 조정할 필요가 있다고 한다. 그리고 각종 개발사업 추진 시 재해위험도를 평가하여 계획에 반영해야하며, 특히 저류시설 등

은 가급적 평상시 활용을 고려하여 설치되도록 제시하였다(서울시정개발연구원, 2011). 기상청의 미래 기후변화 시나리오 RCP8.5를 이용하여, 도시지역에 옥상녹화 및 투수성 포장과 같은 저영향개발기술(LID)을 도입함으로써 미래 기후에 대한 지표유출량 저감효과를 분석한 연구결과, LID 적용 시 지표유출량에 있어 현재, 2020년대, 2050년대, 2080년대의 평균 일강우량에서 모두 약 38%의 유출저감효과를 나타냈다. 이 중 옥상녹화에서 35%의 높은 유출저감효과가 있음을 확인 할 수 있었다. 또한, 특정년도를 선택하여 지표유출량을 분석해 본 결과 300mm이상의 일강우량에서 유출저감효과가 급격히 떨어짐을 확인 할 수 있었다. 즉, LID에 의한 도시설계는 300mm이상의 일강우량에서는 유출저감효과가 다소 떨어지는 결과를 보였으나 0~200mm의 호우주의보 수준의 일강우량에서는 단지 내의 투수면적을 최대한 확보함으로써 유역 내 침투면적을 증대시켜 지표유출량 저감에 기여할 수 있다고 한다(배채영 등, 2012; 신동수 등 2013). 이러한 LID기법의 장점은 도시 공간의 가치 증대, 재개발 잠재력 확보, 새로운 성장동력 확보, 생태서식처 제공, 도시화로 인한 열섬효과 감소, 에너지 절감, 스모그 감소, 습지 보존, 홍수 방지 등에서 다양하게 찾을 수 있다(강두기, 2009).

기후변화와 관련하여 지속가능한 국토, 도시를 만들기 위한 대책으로 기후변화에 대응하기 위해 국가정책으로 추진하고 녹색성장, 지속가능한 개발을 실천하기 위해서는 보다 구체적인 전략이나 제도적인 장치가 필요하다. 개발이익 극대화라는 시장의 논리에서 고려하지 못하고 있는 '생태계 훼손비용부담금'이나 신규 개발을 기개발지 인근으로 유인하는 등 구체적인 정책이 필요하다(국토연구원, 2011a). 또한, 기후변화에 대응한 지속가능한 국토관리 전략의 추진과제로 기후변화 대응을 위한 관련 통계 구축을 위한 지침서 작성, 시군구 지역 수준에서 온실가스 인벤토리 구축을 위한 가이드라인 설정, 상관성 분석에서 제시된 영향 인자를 중심으로 지역 유형별 온실가스 배출량 예측, 다중회귀분석을 통하여 온실가스 배출량에 영향을 주는 지표 선정, 전국단위를 대상으로 지역유형을 고려한 토지용도별 이산화탄소 배출원단위 산정, 중앙 및 지자체 정책 추진 평가 및 시뮬레이션 작업 등이 요구된다(국토연구원, 2008b).

국토해양부에서 추진하고 있는 저탄소 녹색시범마을인 동탄 제2신도시, 검단, 탕정신도시 그리고 송산그린시티의 탄소저감과 탄소흡수 측면의 적용목표를 시나리오를 만들어 시나리오별 탄소감축률을 분석하였다. 이 연구에서는 신도시에서 배출되는 탄소량을 산출하기 위해 가계, 수송, 폐기물부분을 선정하였으며, 탄소감축량을 산정하기 위해 도입되는 녹색시범마을 계획요소를 시나리오 작성 시 고려하였다. 부문별 계획요소를 보면, 가계부문에는 패시브하우스, 재생에너지 시스템이, 수송부문에는 대중교통활성화, 녹색교통, 자전거도로 등이, 폐기물부문에는 쓰레기 재활용이 포함되었다. 탄소흡수의 경우는 공원 및 녹지에 의한 탄소흡수를 고려하여 산정하였다. 연구결과 소극적 시나리오만으로 정부목표인 30%를 달성할 수 있었으며, 적극적인 시나리오는 60%가량 감축할 수 있을 것으로 나타났다. 하지만 탄소감축효과가 낮은 도시를 감안하여 적극적인 시나리오의 목표로 추진해야함을 주장하였다(이재준과 김도영, 2011). 그리고 이러한 신도시계획 수립 시 기후변화에 대응하기 위한 목표들을 전략환경평가에 담아야 한다는 의견도 제시하였다. 이 때, 저감뿐만 아니라 적응까지도 포함하는 평가 목표와 지표선정이 필요하다. 또한, 국토해양부의 상위계획인 광역도시계획, 도시기본계획에 대한 전략환경평가와 도시관리계획에 대한 전략환경평가의 긴밀한 연계가 필요하다고 주장하였다(이종호, 2011).

기후변화적응에 대한 계획적 요소로서 재해에 대한 제도적 방안의 예로 다음과 같은 것을 제시 하였다<표 9.13>(국토연구원, 2010e). ① 현행 수해 중심의 단편적인 도시계획 지침을 기후변화와 관련된 다양한 재해를 고려할 수 있도록 하며, 도시계획의 공간범위와 도시입지를 고려한 차별적 지침으로 개선한다. ② 기후변화에 따라 다양한 재해 중에서 우리나라 재해특성상 특히 고려해야 하는 홍수재해에 보다 효과적으로 대응할 수 있도록「지속가능한 도시우수관리 지침(안)」을 수립한다. ③ 국토의 계획 및 이용에 관한 법률」을 개정하

표 9.13 재해유형에 따라 적합한 계획요소(국토연구원, 2010e)

계획영역	세부항목	계획요소	기후변화 관련 재해유형					
			홍수	가뭄	폭염	폭설	강풍	해수면 상승
공간구조	자연환경 요소 활용	산악, 녹지, 공원 등을 활용한 녹지축	●	●	●		▲	
		하천 및 자연적인 우수유출경로를 활용한 수변축	●		●			
		지형, 풍향 등을 고려한 바람길축	▲		●			
	방재거점 및 방재축 설정	간선교통, 공원/녹지, 하천 등을 활용한 광역방재거점 및 방채축	●	●	●	●	●	●
토지이용	용도배치	재해위험지역 보전용도 부여(보전녹지지역, 보전관리지역, 자연환경보전지역, 방재지구 등)	●	▲	▲	●	▲	●
	하천변 및 연안역 관리	Blue & Green 네트워크	●	●	●			
		하천변 및 연안역 이격(setback) 및 완충지대	●	▲				●
		수퍼 제방	●					
	개발관리	재해위험지역 시가지 정비(상습침수지역, 해일위험지역 등)	●					●
		반복적인 재해발생 취락지역 이전사업 추진	●					●
		재해위험지역 보전용 토지 매입	●	▲	▲	▲	▲	●
		바람길을 고려한 용도배치 및 개발밀도관리	▲		●		▲	
		도시열섬지역(hotspot) 관리 및 정비	▲		●			
기반시설	방재시설	하천 부장능력 향상(제방승고, 하도·호안정비 등)	●	▲				▲
		댐, 유수지(천변, 지하), 지하저류하천	●	●				
		저지대 내수배제기능 향상 및 내수성 강화	●					●
		복개하천 복원	●	▲	●			
		방조시설 정비(해안방호벽, 방파제, 해안침식방지 등)	▲				▲	●
		해안 및 강풍지역 방풍림 조성					●	▲
		사방시설 정비	●	▲				
	수자원	우·오수 처리 및 재활용 용출수 및 지하수 보전		●	▲			
	하수시설	하수도 용량 증대	●			▲		
		환경친화적 배수체계(LID, SUDS 등)	●	●	●	▲		
	공원/녹지	도시열섬 저감 및 방재거점 확보를 고려한 다목적 공원/녹지 공공공지(완충형, 차폐형 등)	●	●	●	●	●	●
		기후변화를 고려한 수종 다양화		●	●		●	
	교통시설	투수성/차열성 포장	●	●	●			
		가로수 확충 바람길을 고려한 가로망	▲		●			
		재해위험지역 내 교통노선, 역사 등 정비	●	▲	▲	●	●	●
		우·오수, 지하수, 폐열 등을 이용한 도로 결빙방지 및 제설				●		
		도로변 급경사지 스노우펜스(snow fence)				●		
	모니터링 및 비상대응 체계	수도, 전력, 통신, 에너지 등 비상공급을 위한 백업(backup)체계 극한 기상조건에 대비한 비상대응 및 대피체계	●	●	●	●	●	●
		취약계층을 위한 냉방센터				●		

주) ● 적합성 높음, ▲ 적합성 보통

<표 계속> 재해 유형에 따라 적합한 계획요소(국토연구원, 2010e)

계획 영역	세부항목	계획요소	기후변화 관련 재해유형					
			홍수	가뭄	폭염	폭설	강풍	해수면상승
단지 조성	지형적 요소	구릉지개발 억제 및 식재	●	▲		▲	▲	▲
		산사태위험지역 선형 조정 및 개발규제	●			●		●
		자연지형 순응형 단지개발	●				▲	▲
		저지대 지반고 승고(elevation)	●					●
		급경사지 스노우펜스(snow fence)				●		
	조경 및 식재	건폐면적 및 불투수 포장면적 최소화	●	●	●			
		학교 교정, 운동장 녹화	▲	▲	●			
		지역의 기후특성 및 물소비를 고려한 사막정원		●	▲			
		홍수 및 강릉에 견딜 수 있는 심근성 수종 식재	▲				●	▲
	우수유출 관리	개별 단지 내 저류시설(연못, 실개천 등) 및 침투시설(정원 등)	●	●	●			
		자연적인 우수유출경로 보전 및 활용	●	▲	▲			
	건물배치	일조, 바람길, 태풍, 폭설 등을 고려한 건물배치(위치, 높이, 방향)			●	●	●	
		공개공지	▲	▲	▲	▲	▲	▲
건축물	건축구조	필로티(piloti) 건축	●					●
		재해위험을 고려한 건축물 및 층별 용도 배치	●		▲		▲	●
		지붕 및 벽면 녹화	▲		●			
		자연적/인위적 캐노피(canopy)			●			
		재해위험을 고려한 건축재료(지붕, 벽면) 벽면, 창호 등의 단열개선 및 내후화(weatherization)	▲		●	●	▲	▲
	건축설비	자연형(passive) 냉·난방 시스템 생활하수, 우수 등의 재활용을 이용한 냉·난방시스템			●	▲		
		생활하수, 우수등의 재활용을 위한 중수도시스템		●				

주) ● 적합성 높음, ▲ 적합성 보통

여 시행령에 규정되어 있는 방재에 관한 사항을 명시하고, 기후변화 적응의 중요성이 고려될 수 있도록 법률의 기본방향을 명시함으로써 기후변화에 대응하여 도시계획 내 방재계획의 위상을 높인다. ④ 현행 유명무실한 방재지구의 실효성 확보를 위해 「자연재해대책법」의 자연재해 위험지구를 우선적으로 검토하여 방재지구로 지정하도록 하고, 방재지구 유형을 상습침수구역, 폭염지구 등으로 세분화하여 체계적 정비 및 관리가 가능하도록 「국토의 계획 및 이용에 관한 법률」의 개선이 필요하다.

국토교통부는 우면산 산사태, 강남역 주변 침수 등을 계기로 피할 수 없는 기상이변에 대응하는 도시방재정책을 적극 마련하면서, 광역도시계획, 도시기본계획, 도시관리계획 등 도시계획수립지침을 개정하여 재해취약성 분석을 도입(2012년 7월 1일 시행)하였고 재해취약성 분석 제도는 도시계획을 수립、변경하는 과정에서 기후변화에 따른 재해취약성분석을 시행하고 이를 토지이용, 기반시설 등 도시계획의 각 부문별계획에 반영하고 있다.

국토교통부(2013a)는 광역도시계획수립, 도시기본계획수립, 도시관리계획수립의 경우에 다음과 같은 기후변화 취약성 분석을 통한 계획을 수립하도록 규정하였다. 광역도시계획 수립지침에서 기후변화에 따른 재해 취약성 분석을 통해 광역계획권의 다양한 재해위험을 파악하고, 부문별 계획 수립시 반영하여 재해피해를 최소화하여야 하도록 정하고 있다. 도시기본계획 수립지침에서는 기후변화에 따른 재해 취약성 분석을 통해 도시의 다양한 재해위험을 파악하여 부문별 계획 수립시 반영하고, 재해 취약성 저감방안을 제시하여야 하도록 하고 있다. 도시관리계획 수립지침에서는 도시관리

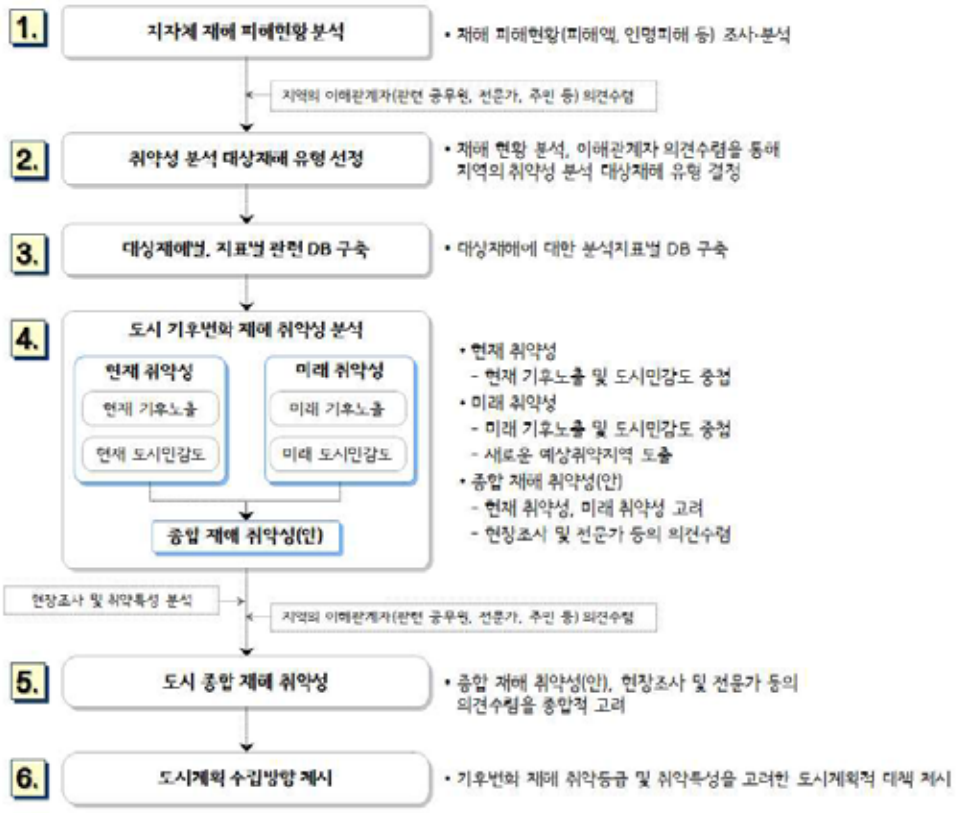


그림 9.10 도시의 기후변화 재해 취약성 분석 절차(국토교통부, 2013b)

계획은 기후변화 재해 취약성 분석을 수행한 후 수립하고, 취약성 분석 결과를 토지이용, 기반시설 배치계획 등 부문별 계획에 반영하도록 하고 있다(그림 9.10).

또한 도시 기후변화 재해 취약성 분석 매뉴얼(2013. 8)을 만들어 도시의 기후변화 재해 취약성 분석 대상재해는 폭우(홍수、산사태), 폭염, 폭설, 강풍, 가뭄, 해수면상승의 6개 재해로 구분하였다(국토교통부 2013b). 도시 기후변화 재해 취약성 분석은 IPCC(2007) 기후변화 취약성 분석의 골격을 유지하면서 기후노출(Exposure)과 도시민감도(Sensitivity)를 고려하며, 지자체 내 최소 공간범위(인구센서스조사의 집계구, 보통 읍면동의 1/23정도)에 대한 상대평가를 통해 재해취약지역을 도출하도록 하고 있다. 마지막으로 지역특성 분석 없이 수립되는 적응부분 실천계획은 실효성 없는 계획으로 끝날 우려가 있으므로 이에 대한 지역특성분석이 먼저 수행되고 이에 맞는 적응 실천계획 수립이 진행되어야 한다고 주장하였다. 특히 기후변화 대응 완화와 적응계획은 상호보완적으로 전략이 수립될 때, 온실가스 배출의 근원지이며 기후변화 영향의 직접적인 당사자인 지역에서 실현화 될 수 있다(국토연구원, 2010c). 이러한 완화와 적응정책에 대하여 에너지, 녹색건축·인프라, 녹색교통, 산림·녹지·토지이용, 농업, 물관리, 교육·홍보 등 7개 부문에 대하여 상호관계를 파악하고 통합적으로 검토할 수 있는 체크리스트, 도시계획 및 개발사업에 기후변화 취약성 평가 반영, 환경영향평가 등 평가제도 개선 등을 제안하였다(고재경과 김희선, 2012). 국내의 저탄소 도시계획 수준은 해외사례에 비해 전반적으로 취약함을 알 수 있었으며, 이를 개선하기 위해서는 도시계획의 수립단계에서는 정책 및 제도적 장치가 마련되어 지역적 특색에 맞는 계획의 도입이 이루어져야 하며, 설계 및 운영 단계에서는 이를 구체화시켜 실행할 수 있는 다양한 접근방법이 필요하며, 유지·관리단계에서는 통치관리체계 수립 등 다양한 이해관계자들의 참여와 관리방안이 필요함을 알 수 있다(오덕성, 2013).

표 9.14 녹색성장 국가전략 중 농업·농촌과 관련된 내용(녹색성장위원회, 2009)

정책과제	추진전략	내용
저탄소 사회 구축(효율적 온실가스 감축)	탄소를 줄여가는 사회	○ Green IT, 축산・작물・폐기물 바이오매스, 저탄소 농업기술, 산림・해양의 탄소 흡수원 확충, 범국민 녹색생활운동 등 추진
	탄소를 순환 흡수하는 사회	○ 대규모 토지이용계획시 신규 탄소 흡수원 조성 및 농산촌 연료 20% 목재 팰릿으로 대체(‘20) ○ 화학비료・농약의 최소 사용, 최소 경운 등 친환경 농법 확산 및 저탄소 농업기술 개발・보급
탈석유・에너지 자립 강화	청정에너지 보급 확대	○ 열부문, 연료부문 보급(폐자원 및 바이오매스 등) 확대
기후변화 적응 역량 강화	기후변화 대응 국민건강관리 강화	○ 근로자, 농어민 및 노약자 등 취약계층이 신속하고 효율적으로 대응하기 위한 매뉴얼 마련 및 국민 교육・홍보
	국가식량안보체계 확립	○ 기후변화 대응을 위한 식량생산 기반 마련 ・ 기후변화 관련 식량 생산량 변동 예측시스템 마련 ・ 고부가가치 우량자원, 재배・사육・양식 기술 등 개발・보급 ・ 자동화 농업기술, 도시민 생활 밀착형 농업기술 등 개발・보급 ○ 식량안보체계 확립을 위한 국내 역량을 강화 ・ 농업 종합정보체계를 구축, 안정적인 수급환경 조성 ・ 집단화・규모화된 우량농지 확보 등 안정적 식량생산 토대 마련 ・ 식생활 개선운동과 연계한 우수 전통 식생활 확산 및 농업생산・자원 전문가 등 유역단위 재결성 ○ 국제협력을 통한 안정적 식량 수급체계 구축 ・ 국제 식량수급현황 파악 및 예측 기반 마련 ・ 해외 플랜테이션을 확대하여 바이오에너지 작물을 재배하고 비상시 식량안보를 위한 수단으로 활용
	기후변화대응 재해관리 강화	○ 극한홍수 등 기후변화에 대비하기 위한 재해예방사업 추진 ○ 피해 최소화를 위한 긴급 대응체계 개발 및 국민 위기대응능력 강화
산업의 녹색화 및 녹색산업 육성	산업별 녹색전환 및 혁신 확산	○ 친환경 농식품 산업 육성 ・ 빌딩농장 확산, 화학비료・농약절감 등 친환경 농업생산체계 구축 및 친환경 어구개발, 자연친화적 신소재 및 고부가 종자 산업화

9.5.2 농촌

녹색성장위원회(2009)는 녹색성장을 위한 10대 정책과제 중 최소 4개 정책과제의 7개 추진전략에 농업 및 농촌에 관한 내용을 담았다. 농업부문 녹생성장은 지속가능농업보다는 포괄적인 개념으로 농업생태계의 환경을 고려하여 환경적으로 건전하고, 경제적으로 수익성이 보장되는 성장으로 이해할 수 있다. 현실적으로 농업부문 녹색성장은 지역별·수계별 환경용량을 고려하여 재배기술과 농법전환, 환경 친화적 저탄소농업을 통한 성장을 의미한다. 녹색성장의 목표는 친환경농업과 저탄소농업 확대 등 지속가능한 농업체계로의 전환과 환경친화적 농업·농촌 기반정비 등을 통해 달성될 수 있다(한국농촌경제연구원, 2010b). 표 9.14에서 보는 바와 같이 모두 기후변화와 직간접적으로 관련이 있어 향후 농업 및 농촌의 저탄소사회화를 촉진할 수 있는 효율적 연료사용 및 기술개발을 통한 저탄소 농업, 청정바이오(바이오에너지), 그리고 국가식량안보 대응 등 크게 3가지로 요약할 수 있다.

또한 정부·민간 합동작업단(2006)은 비전2030을 통하여 농촌지역 생활환경 개선을 위하여 농가소득 안정화, 농업체질 강화, 규모화 및 전문화, 그리고 농촌 생활인프라 확충 등이 필요하다고 제안하면서 이 내용들

또한 기후변화와 직간접적으로 관련이 있다고 제시하였다. 특히 재해보험가입율 및 배수개선율 등의 향상은 기후변화로 인한 단기 집중강우를 염두에 둔 것으로 생각된다. 이와 함께 규모화 및 전문화는 바이오연료로의 활용 및 농촌인구 감소 가능성을 고려한 것으로 파악된다.

농촌부문에서 기후변화에 대한 대응으로 주로 온실가스배출 저감과 관련된 연구들이 진행되었다. 우리나라의 농촌부문은 종사인구의 고령화와 대농의 증가에 따른 기계화의 진행 등으로 에너지 투입이 증가할 개연성이 높기 때문에 에너지 투입 관점에서 접근할 필요가 있다(윤순진, 2007).

이산화탄소 배출 저감방안으로 윤순진(2007)은 4가지의 전략으로 "① 에너지에 대한 의존을 되도록 줄일 수 있는 환경농업의 확대 등 농업경영방식의 변화를 모색한다. ② 농민들의 고령화로 인해 기계화가 불가피한 측면에서 에너지 효율향상을 통해 석유소비량을 줄여 나가거나 석유를 이산화탄소 배출에 중립적인 바이오디젤이나 바이오에탄올 같은 재생가능에너지로 전환한다. ③ 직접적인 에너지 투입을 감소시켜 나가면서 비료나 농약사용을 통한 간접적인 석유소비를 줄여 나가기 위해 유기농업을 확대한다. ④ 농업기계용이나 기타 설비비용으로 사용이 증가하고 있는 전력 또한 바이오매스를 그대로 연소시키거나 축산분뇨를 활용하여 바이오가스를 생산한다. 또한, 열병합발전방식으로 전력과 열을 동시에 생산함으로써 전력은 물론 온수와 난방까지 해결할 수 있다."고 제시하였다.

그리고 이인희(2009)도 온실가스 저감전략으로 총 9가지의 대책으로 "① 온실가스 배출 및 환경부하를 최소화하는 생태효율성 증대를 위해서는 현재 추진되고 있는 농업구조정책, 농업생산기반정책, 농산물유통정책, 농가소득정책, 축산정책, 농촌개발정책 등 농정 전반의 프로그램에 대한 환경성평가를 통한 저탄소 정책과의 통합·조정이 필요하다. ② 지열, 태양열, LED와 같은 녹색기술을 농촌과 농업적 이용에 결합함으로써 에너지 효율화와 청정에너지 기술보급을 확대한다. ③ 유채와 해바라기 등 바이오작물 재배단지 조성계획 시 경제성을 고려한 정부, 지자체의 보조정책을 수립하고 추진한다. ④ 바이오매스를 이용한 바이오 에너지에 대한 심층적 연구를 통해 우리의 실정에 맞는 기술과 설비를 개발·보급한다. ⑤ 에너지 자립마을 조성사업과 관련하여 국내 유기성 폐기물의 성상, 경제성, 환경성, 시설운영의 안전성 등을 감안하여 국내에 적용 가능한 운영시스템을 제시한다. ⑥ 농촌 그린홈사업의 경우, 우선순위를 조정하여 농촌에서 많이 사용하고 있는 심야전기보일러를 등유보일러 혹은 탄소중립에 가까운 간벌재 펠릿보일러나 신재생에너지로 전환하는 '심야전기주택의 그린홈사업'을 추진한다. ⑦ 소수력 발전시설구축의 경우 그 입지와 주변지역 환경생태에의 영향을 고려한다. ⑧ 지자체에 예산재량권을 부여함으로써 보급사업 추진의 유연성과 참여의식을 제고하고 단기 전시행정사업을 탈피한 중장기 계획을 수립할 수 있도록 지자체의 신재생에너지 보급패러다임을 전환하는 것이 필요하다. ⑨ 시민사회, 공공부문, 기업 등 각 주체들 간의 원활하고 효율적인 상호 소통이 이루어져야 한다고 주장하였다.

신재생에너지 중 태양광에너지의 경우 태양광 발전시설의 설치에 대한 정부의 보조금 확대, 유가상승에 의한 전력 판매 단가의 상승, 그리고 할인율의 변동 등이 있을 경우, 지역별 약간의 차이는 있으나 우리나라 대부분의 농촌지역에 태양광 발전시설의 사용은 충분히 경제성이 있을 것으로 평가되며, 또한 기후변화 시나리오를 고려하면, 농촌공간에 대한 태양에너지의 활용은 더욱 더 경제성이 있을 것으로 보았다(김대식과 왕영두, 2013). 또한 농업부문 주요 온실가스 배출원에 기여하는 바이오매스에 대해서, 바이오매스를 활용한 대체 에너지 개발의 필요성이 강조되고 있으며, 이는 기후변화협약에 따른 청정개발제로서는 물론 농촌경제를 활성화시키는 자원순환형 친환경농업의 경쟁력 제고차원에서 중요하다(신중두 등, 2006).

또한 농촌/농업 부문의 지속적인 발전을 위하여 농촌의 에너지 소비 개선, 정부 각 부처에서 시행한 농촌에너지자립 관련 사업의 모니터링, 정부 각 부처에서 시행하는 농촌 에너지자립 관련 정책의 통합적 실현, 체계적·효율적인 에너지자립형마을 계획의 마스터플랜과 행동계획의 수립이 필요함을 지적하였다(충남발전

표 9.15 사회경제적 및 고용 취약가구별 도시와 농촌간 기후변화 적응역량강화 관련정책수요 비교(한국환경정책·평가연구원, 2010d)

영 역	도시지역 정책수요	농어촌지역 정책수요
기후노출·영향	주택 및 시설 피해방지 시설 생활비용 증가부담 완화 및 건강보호 지원책(고용 취약가구 확대)	방재시설 등 인프라 구축사업 상수도 등 사회경제적 취약가구 밀집지역 시설건설 우선사업 사회경제적 취약가구 우선대상 주택 및 시설 피해예방 및 피해 부담 경감 지원책 농업 및 어업 피해예방 및 피해부담 경감 지원책
민감도	사회경제적 취약가구 우선대상 주거공간 환경개선 및 냉난방 효율 제고	겨울철난방대책 혹서/혹한 등 사회경제적 취약가구 우선 대상 건강영향 대책 마련
적응능력	기후변화 정보 사각지대 해소책 기후변화 정보 습득채널 다변화 자연재해 대응 이동수단 확충 - 지역생태계 및 환경보전 정책 - 주택시설 개선 지원책 기후변화대응 공공시설 확충 주민소득 증대·고용 창출을 위한 공공사업 확대 지원책	고용 취약가구 우선대상 에너지사용증가 비용부담 경감대책 기후변화 정보 사각지대 해소책 기후변화 정보 습득채널 다변화 기술 및 품종 개발, 병해충 피해 및 기상재해 방지 지원책 지역생태계 및 환경보전 정책 주택시설 개선 지원책 지역(광역) 및 마을 간이 상수도 시설 확충

연구원, 2011). 그 내용으로는 ① 전국 폐자원 및 바이오매스 가용량을 기반으로 현실성 있는 목표를 제시할 필요가 있으며, 마을단위 기초 에너지 이용 및 보급 현황에 관한 에너지 통계조사, 폐자원과 바이오매스 관련 가용 에너지자원 조사가 필요하다. ② 바이오매스 관련 사업은 먼저 마을의 물질 순환과 운영에 대한 체계적인 분석이 필요하다. ③ 과도한 집중투자와 과잉 투자에서 분산투자로 전환하여야 하며, 공간적, 사회경제적 특성에 따른 차별화된 전략 도출 및 통합적 접근이 필요하다. ④ 시설 위주의 하드웨어적인 접근에서 벗어나 주민참여와 교육 등 소프트웨어 프로그램을 결합한 내생적 지속가능발전 모델을 창출하여야 하며, 이를 위해 주민참여 활성화 및 지역사회 역량 강화 프로그램을 운영하여야 하다. ⑤ 주민들의 에너지 절약, 효율향상, 재생가능 에너지 확대라는 3 가지 요소가 모두 실현되도록 주민참여와 운영방식을 결정한 이후 마을에 적합한 신·재생가능 에너지 시설을 설치하는 단계적 접근이 필요하다. ⑥ 신·재생에너지, 그린 홈 보급, 주택 개·보수, 복지, 사회적 기업, 커뮤니티 비즈니스, 저탄소 생활양식, 기후변화 적응 등의 통합적 접근을 취하여 저탄소 녹색 프로그램이 아니라 지역의 지속가능한 발전 과제 해결 수단으로 접근하여야 한다.

기후변화에 따라 농촌환경에 보다 많은 피해를 입힐 것으로 예상되는 비점오염원의 저감방안으로 '비점오염 저감사업', '축산분뇨 처리시설사업', '친환경비료 지원사업', '친환경농업 직접지불제' 등을 제시하였다(이경진과 차정우, 2013). 그리고 가뭄시 고랭지 농업의 피해를 저감하기 위한 방법으로 빗물저장탱크나 조류조시설 등의 소규모 빗물 이용시설의 적용 가능성을 제안하였다(전계원 등, 2013).

9.5.3 복지

사회 취약계층을 위한 기후변화적응전략은 사회적, 공간적 환경에 따라 다른 전략을 수립해야 할 필요성이 있다. 우선 사회경제적 취약계층에 대한 사회적 문제와 관련된 기후변화 대응 추진전략으로 ① '저탄소 녹색성장 기본법'에 관련조항 도입 등 관련법규의 도입을 통한 제도화, ② 기후변화 적응역량 배가를 위한 종합정

책세트로서 기후복지제도의 도입, ③ 홍수·가뭄 등 극한 기후 현상별로 고위험인구에 대한 응급구조체계 구축 및 집중관리, ④ 시민들의 자발적인 참여를 통한 사회적 자본의 창출에 근거하여 저소득계층 기후변화 대응을 위한 사회적 안전망 구축, ⑤ 저소득층 기후변화 적응능력실태 조사 및 DB 구축 등이 필요하다(한국환경정책·평가연구원, 2010d). 영역별 정책 및 사업으로서는 상습침수 등 극한 기후현상에 취약하고 저소득계층이 밀집 거주하는 지역을 대상으로 기후친화 시범마을 건설, 저지대 주택 또는 지하주택 건축 금지 및 이주정책과 저류장 등 도시시설 설치 등을 포함한 상습침수지역 풍수해방지 대책강화, 실내주거환경개선 및 건강복지사업 연계한 통합형 저소득층 주택에너지 효율화사업을 통한 '건강안전 주택지원 사업', 노인건강보호를 위한 무더위 쉼터 여건 개선 및 다변화 등 폭염대비안전관리대책 개선, 한 부모가구, 조손가구 등 저소득가구 어린이보호사업" 등을 제안하였다(표 9.15).

응정책 강화, 주거복잡도 등 열악한 정주시설 개선 및 녹지시설 확충, 농어촌지역은 혹한에 대비할 수 있도록 생물학적 취약가구의 노후 된 정주시설 개선, 물적 인프라 확충 등을 위한 정책과 사업이 추진될 필요가 있는 것으로 나타났다(한국환경정책·평가연구원, 2011b). 가구(개인)의 경우 첫째, 기후변화와 관련된 비용 증가 현상의 소득 역진적 효과를 완화할 수 있는 정책이 필요하다. 둘째, 농어촌 지역 특성상 저소득 노인인구를 대상으로 건강증진사업, 주거시설개선 및 시설설치 등을 포함한 패키지형태의 사업이 필요하다. 셋째, 도시지역의 경우 풍수해에 대응하는 주거개선사업, 농어촌지역의 경우 기온(폭염 또는 혹한)에 대응하는 주거개선사업을 확대할 필요하다. 넷째, 도시지역은 지역사회 인프라 구축 및 사회적 자본 확충, 농어촌지역은 저렴한 난방시설의 보급 및 정보접근성을 강화해야 하는 것으로 나타났다.

21세기 사회가 나아갈 방향으로서 복지국가건설에

표 9.16 어린이/산모·영유아 및 노령자 대상 기후환경복지 정책(한국환경정책·평가연구원, 2013b)

구분	어린이/산모・영유아	노령자
기반연구	○ 어린이 환경복지 관련 기초 연구 수행 ○ 어린이 화학물질 위해성평가 사업 및 관리기준 마련	○ 노령인구 건강 및 환경노출 DB 구축 및 관리 ○ 노령자의 환경위험 인식조 조사 ○ 노령자 환경보건 지표 및 지수 개발
제도적 기반	○ 환경부내 어린이 환경보건 전담부서 설치 ○ 학교의 안전한 환경지원사업 ・ 학교내 환경 지원사업 ・ 학교 주변 환경개선 지원 및 학교 입지 가이드라인 개발 ○ 어린이집/지역아동보호센터에 대한 건강한 환경감시체계 구축	○ 노령자 다중 이용시설에 대한 실내공기질 개선
통치관리체계 구축	○ 어린이 환경보건 정책의 중앙부처간 통합 ○ 다학제간 어린이 환경보건네트워크 구성	○ 노인 친화적 Built Environment와 Healthy Community 구축
환경복지 서비스 제공	○ 건강나누리 캠프 확대 ○ 아토피・천식 안심학교/어린이집 확대 조성	○ 환경성 질환/만성질환자 맞춤형 운동프로그램 및 환경보건 프로그램 제공 ○ 노인의 환경보건 정보 격차 해소를 위한 정보통신기술(ICT) 활성화 방안
교육・홍보/참ㅇ(참여?	○ 학교 환경보건 교육 강화 및 학교 환경보건교육사 신설・운영 ○ 환경보건 예방교육 및 유해인자별 회피방안 맞춤형 교육 실시	○ 어르신 참여형 환경복지사회 조성 프로그램 개발 및 운영 지원

지역사회의 공간적 특징에 따른 대응전략으로는, 도시지역은 주택침수·파손 등 물리적인 피해 예방 및 대

서의 복지는 단지 사회적 복지뿐만 아니라 기후환경적 측면에서의 복지도 포함되는데, 이 사회에서 소외되거

나 환경오염 피해에 민감한 취약계층(생물학적 및 사회경제적 취약계층)에 대한 선택적인 복지정책이 필요하다. 이러한 취약계층으로 산모·영유아/어린이와 노령자로 구분하여 이들의 특성을 고려하여 환경복지정책을 제시하였다<표 9.16>(한국환경정책·평가연구원, 2013b).

또한 기후변화로 인한 사회갈등의 예방과 사회통합을 위한 정책과제로서, ① 기후변화 문제에 대한 국민 이해도 제고를 위한 교육훈련 및 홍보사업을 추진, ② 기후변화 통치관리체계 체계 구축, ③ 피해구제와 책임분담의 형평성 보장 정책 및 제도를 도입, ④자원의 공평한 분배 보장 정책 및 제도를 도입, ⑤ 취약 산업 및 종사자 지원정책을 추진, ⑥ 취약계층에 대한 맞춤형 특별대책을 추진, ⑦ 기후변화 사회갈등의 여타 갈등으로 전이 및 확산 방지대책 추진을 제안하였다(한국환경정책·평가연구원, 2010c).

도시는 기후변화 현상을 유발하는 탄소배출의 많은 비중을 차지하는 동시에 기후변화로 인한 영향에 대해 취약점을 지니고 있으므로 단순히 탄소배출 현황보다 공간적인 해결방안에 대한 연구들이 진행되고 있다. 지역에 맞는 평가도구들을 통해 적응부분의 실효성 있는 이행가능한 실천계획을 수립하는 것이 필요하다.

9.6 결론

앞에서 살펴본 바와 같이 기후변화는 도시나 농촌과 같은 인간의 정주공간과 복지 분야에 많은 영향을 미칠 것으로 예상되었다. 그리고 이러한 영향을 최소화하기 위한 적응전략들이 국가적, 지자체 단위에서 공간계획이나 설계, 그리고 제도적인 측면에서 마련되고 있는 것을 볼 수 있었으며, 이를 살펴보면 다음과 같다.

전 세계 인구의 절반정도가 도시에 거주하고, 전체 지구에너지의 60~80%를 소비하며 이산화탄소를 50% 가까이 배출하고 있다. 우리나라는 전체 인구의 90% 이상이 도시에 거주하고 있어 기후변화에 따른 재해위험에 매우 취약하다. 도시는 기후변화로 인한 영향에 대해서 취약점을 지니는 동시에 기후변화 현상을 유발시키는 탄소배출에서도 도시가 큰 비중을 차지하고 있다. 미래 한반도의 아열대 기후구의 변화를 전망해 본 결과 도시지역 모두는 아열대 기후지역에 포함될 것으로 예측된다(견고한 동의).

기후변화 영향에 따라 도시에서 발생하는 홍수 등 재해규모가 대형화되고, 도시는 홍수, 폭설, 폭염, 해수면 상승 등 다양한 재해, 새로운 위험에 노출될 것으로 전망되어 기후변화가 일상화되고, 재해는 대형화, 다양화 되고 있다. 기후변화가 도시 시스템에 미치는 영향에 대해 가장 취약한 공간은 도시의 해안, 하천변, 지하공간, 산기슭으로써 이러한 취약공간에 위치한 도시기반시설, 건축물, 시민은 기후변화로 인한 재해 위험성이 더욱 높아지게 된다. 기후변화 취약성 측면에서는 기반시설군 전체적으로 홍수 및 집중호우와 태풍 및 폭풍에 대한 취약성이 높게 나타났다(중간적 동의).

기후변화적응 도시계획기법으로 첫째로 탄소배출 억제를 위한 도시계획 및 설계로서 분산적 집중화된 공간구조, 대중교통중심의 교통구조, 신·재생에너지 이용과 에너지 절약을 위한 도시설계를 들 수 있고, 둘째로는 기후변화 적응을 위한 도시계획으로 도시의 열부하 분석, 기후분석과 기후도 작성, 도시의 바람길 조성을 들 수 있다. 그 외 도시 내 사회기반시설에 대한 적응방안과 제도적인 방안들을 제시하였다(중간적 동의).

국내 식량생산의 기반이 되는 농경지 면적의 변화추이를 살펴보면 1968년을 정점으로 지속적인 감소추세이다. 지역정주공간으로서 농촌의 미래전망은 인구감소와 고령화로 농산업중심의 농지와 산지이용이 줄어들고, 여가관광 공간으로 활용될 것으로 예측되며, 지역간 인구이동은 크게 진정되고, 인구유동이 상대적으로 확대될 것으로 전망된다. 농촌에서는 기후변화로 인하여 농작물생산이 가장 크게 영향을 받을 것으로 예상되며, 우리나라의 경우, 농경지는 온실가스 배출비중은 적지만 기후변화를 저감하기 위한 방안 중 하나로 이산화탄소 배출이 없는 청정에너지원 개발에 대한 정부투자가 지속적으로 증가할 것으로 예상된다(중간적 동의).

향후 농업 및 농촌의 저탄소사회화를 촉진할 수 있게 효율적 연료사용 및 기술개발로 저탄소 농업, 청정바이오(바이오에너지)의 사용을 통하여 친환경농업과 저탄소농업 확대 등 지속가능한 농업체계로의 전환과

환경친화적 농업·농촌 기반을 조성하고, 농촌지역 생활환경 개선을 위하여 농가소득 안정화, 농업체질 강화, 규모화 및 전문화, 그리고 농촌 생활인프라 확충 등을 통해 기후변화에 직간접적으로 대응할 것으로 전망된다(중간적 동의).

기후변화로 인한 취약계층의 피해 정도는 공간적인 요소뿐만 아니라 소득, 연령과 같은 사회적인 요소와도 관계를 가진다. 풍수해 피해와 관련하여 수도권지역에서 저소득계층이 상대적으로 밀집거주하고 있는 지역에 풍수해 발생빈도가 유의하게 크게 나타난다(중간적 동의).

사회 취약계층을 위한 기후변화적응전략은 사회적, 공간적 환경에 따라 다른 전략을 수립해야 할 필요성이 있다. 우선 사회경제적 취약계층에 대한 사회적 문제와 관련된 기후변화 대응 추진전략으로 기후복지제도의 도입, 극한 기후 현상별로 고위험인구에 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 취약가구의 노후 된 정주시설 개선, 물적 인프라 확충 등을 위한 정책과 사업이 추진될 필요가 있는 것으로 나타났다(중간적 동의).

전체적으로 인간정주공간과 복지부문은 도시와 관련된 연구가 많으며, 미래의 기후영향이나 취약성평가보다는 주로 적응대책을 수립하는데 그 목적을 두고 있었다. 농촌의 경우는 대부분의 연구가 농업부분에 많이 치우치고 있어 농촌에 대한 연구가 미비하며, 에너지나 일부 공간계획과 관련된 적응 전략만을 다루고 있었다. 복지부문의 경우, 사회소외계층, 경제적인 저소득층 등을 중심으로 한 기후변화 연구는 도시의 기반시설이나 보건분야에서도 함께 고려되므로, 독립적인 부문으로의 연구는 우리나라의 경우 연구초기단계에 있었다. 그리고 대부분의 연구가 현재 상태의 분석과 과거자료를 이용한 전문가의 판단을 통한 간단한 추세, 추정을 이용하고 있고, 기후변화 시나리오를 직접 적용한 연구는 극히 일부분으로 자료의 많은 부분이 보고서의 형태로 작성된 것이 많은 것을 볼 수 있었다. 따라서 향후 복지부문과 함께 인간정주공간에서 농촌부문에 대한 연구가 보다 많이 필요한 것을 알 수 있었다.

9.7 참고문헌

강나래, 이건행, 노희성, 김형수, 2013: 기후변화 시나리오(RCP)를 이용한 도시지역 빗물펌프장의 미래 필요용량 산정, *한국방재학회논문*, 13(2), 299-309.

강두기, 2009: 저영향개발, *대한토목학회지*, 57(7), 95-100.

강정은, 이명진 2012: 퍼지모형과 GIS를 활용한 기후변화 홍수취약성 평가-서울시 사례를 중심으로-, *한국지리정보학회*, 15(3), 119-136.

건설교통부, 2007: 건설교통통계연보.

경기개발연구원, 2013: 경기도 생활환경복지 지표개발 연구.

고재경, 김희선, 2013: 기후변화 완화와 적응 통합에 관한 시론적 연구, *환경정책*, 21(1), 29-59.

고재경, 박년배, 2008: 기초자치단체 온실가스 배출량 산정에 관한 연구-경기도 시・군 지자체를 중심으로-, *환경정책*, 16(1), 29-61.

국립기상연구소, 2005: 한반도기후 100년 변화와 미래전망.

국립기상연구소, 2008: 기후변화 전망 및 대책.

국립기상연구소, 2009: 기후변화 이해하기III-서울의 기후변화.

국토교통부, 2013a: 2012년 국가도시방재연구센터 운영연구, 국토연구원.

국토교통부, 2013b: 도시 기후변화 재해취약성분석 매뉴얼(VER 3.0).

국토연구원, 2008a: 중심시가지 환경개선을 위한 도시재생전략 연구 : 지방중소도시의 유형별 전략설정을 중심으로, 331.

국토연구원, 2008b: 기후변화에 대응한 지속가능한 국토관리 전략(Ⅰ), 288.

국토연구원, 2009a, 기후변화에 대응한 지속가능한 국

토관리 전략(Ⅱ), 210.
국토연구원, 2009b: 기후변화에 안전한 재해통합대응 도시 구축방안 연구(Ⅰ), 279.
국토연구원, 2009c: 국토 대예측 연구(Ⅰ), 284.
국토연구원, 2010a: 한국의 도시화 과정과 정부정책에 관한 연구.
국토연구원, 2010c: 기후변화에 대응한 지속가능한 국토관리 전략(Ⅲ), 169.
국토연구원, 2010d: 국토 대예측 연구(Ⅱ), 350.
국토연구원, 2010e, 기후변화에 안전한 재해통합대응 도시 구축방안 연구(Ⅱ), 164.
국토연구원, 2011a: 도시정책 시나리오에 따른 토지이용변화 예측연구, 106.
국토연구원, 2011b: 이상기후에 대비한 하천의 체계적 관리방안, 98.
국토연구원, 2011c: 기후변화 대응 물관리 정책방안 연구-국토의 가뭄 취약성 및 정책방안을 중심으로, 154.
국토연구원, 2011d: 사회・경제구조 전환기의 주택정책 패러다임 정립방안 연구, 224.
국토연구원, 2011e: 국토 대예측 연구(Ⅲ), 455.
국토연구원, 2011f: 100세 시대를 대비한 국토 및 도시 정책 방향과 과제, 188.
국토연구원, 2012a: 인구저성장시대의 도・농 상생발전 전략 연구, 324.
국토연구원, 2012b: 기후변화에 따른 국토취약성 분석과 적응방안-국토민감성 분석과 향후 정책방향-, 354.
국토연구원, 2012c: 기후변화 취약계층을 위한 녹색도시정책 연구, 168pp.
국토연구원, 2013a: OECD URBAN POLICY REVIEW, 213.
국토연구원, 2013b: 도농교류시대의 농촌지역의 특성과 정책 방안, 324.
국토연구원, 2013c: 기후변화 대응 도시재생 정책과제 및 계획수립 방안 연구, 206.
국토연구원, 2013d: 한국 컴팩시티 정책의 현황 및 과제 연구, 185.
국토연구원, 2013e: 기후변화에 대응한 도시홍수 방재체계 개선방안 연구, 208.
국토해양부, 2008a: 도시 침수피해 방지를 위한 효율적 실행방안 연구.
국토해양부, 2008b: 기후변화 대응 국토공간계획 평가 및 과제, 199.
국토해양부, 2010: 기후변화에 대비한 공간정보 활용방안 연구, 232.
권영아, 권원태, 부경온, 최영은, 2007: A1B시나리오 자료를 이용한 우리나라 아열대 기후구 전망, *대한지리학회*, 42(3), 355-367.
권혁삼, 김지현, 김정곤, 2013: 기후변화에 대응한 녹색건축인증기준 개선을 위한 조사연구:공동주택 외부환경을 중심으로, LHI *Journal of land housing, and urban affairs*, 4(4), 435-447.
기상청, 2007: 기상특보제도 개편을 위한 정책연구.
기상청, 2009: 기후변화 이해하기Ⅱ.
기상청, 2010a: 2010년 5호 황사의 특징, 보도자료 (2010.3.21.).
기상청, 2010b: 제트기류의 강한 저지(블로킹)현상-올여름 지구촌 폭염과 홍수의 주원인, 보도자료 (2010.8.23.).
김대식, 왕영두, 2013: 기후변화를 고려한 농촌지역 그린빌리지의 태양에너지 활용에 관한 경제성 분석, *농촌계획*, 19(3), 25-36.
김영환, 박상준, 2014: 도시재생사업에서 저탄소 녹색계획요소 활용 및 탄소저감 효과에 관한 연구 : 청주시 도심부를 중심으로, *한국도시설계학회지*, 15(1), 167-182.
김영환, 어상진, 2013: 공공건축물의 저탄소 계획요소의 활용 및 탄소감축 효과분석 -충북 청주시 사례를 중심으로-, *한국산학기술학회논문지*, 14(6), 3043-3051.
김용진, 강동화, 안건혁, 2011: 기후변화에 따른 도시열섬현상 특성 변화와 도시설계적 대안 모색에 관한 기초연구, *한국도시설계학회*, 12(3), 5-14.
김윤정, 이동근, 박찬, 2013a: 기후변화에 따른 도시수종의 기후 적합성 평가모델 -서울시를 대상으

로-, *한국환경복원기술학회*, 16(1), 159-179.

김윤정, 이동근, 서창완, 류지은, 채여라, 백경혜, 배채영, 2013b: 산업단지의 입지적 요건을 고려한 기후변화 취약성 평가-지자체 및 산업단지의 물리적·경제적 특성에 집중하여-, *한국환경영향평가학회*, 22(6), 627-637.

김진수, 박소영, 2013: 기후변화시나리오의 사회경제 발전 양상을 고려한 행정구역별 도시성장 예측, *한국지형공간정보학회지*, 21(2), 53-62.

김충실, 이현근, 2009: 농업무문 에너지 소비의 CO_2 배출량 분석, *농촌경제*, 32(1), 41-61.

김현수, 정주희, 김유근, 2012: 미래 도시성장 시나리오에 따른 수도권 기후변화 예측 변동성 분석, *한국대기환경학회지*, 28(3), 261-272.

김현수, 정주희, 오인보, 김유근, 2010: 도시성장모델을 적용한 수도권 미래 기후변화 예측, *한국대기환경학회지*, 26(4), 367-379.

노경식, 왕광익, 유선철, 민경주, 이건원, 김세용, 권용우, 2013: 탄소저감 도시계획 수립을 위한 모델구상 및 적용방안 연구, *국토지리학회지*, 7(1), 1-10.

녹색성장위원회, 2009: 녹색성장 국가전략.

박명희, 이준수, 안지숙, 서영상, 한인성, 김해동, 2012: 부산의 도시기후 변화 경향과 도시화 효과에 관한 연구, *한국환경과학회지*, 21(4), 401-409.

박민규, 송영석, 김상단, 박무종, 2012: 수해취약성인자를 이용한 고위험 도시침수지역의 평가기법에 대한 연구, *한국방재학회논문집*, 12(2), 245-253.

반영운, 이재준, 김정곤, 오용선, 설영선, 최정석, 2008: 기후변화에 대응한 국토 및 도시개발전략, *대한국토·도시정보*, 318, 3-17.

배민기, 정환도, 손영모, 2009: 기후변화대응을 위한 도시내 녹지공간의 역할 -대전광역시를 사례로-, *환경정책*, 17(2), 181-199.

배채영, 박찬, 길승호, 최일기, 이동근, 2012: 저영향개발(LID)적용에 따른 도시지역 유출 분석 -옥상녹화 및 투수성 포장을 중심으로-, *대한국토도시계획학회*, 47(6), 39-47.

서울시정개발연구원, 2009: 기성시가지 내 신도시 개발지역의 탄소 중립도시 조성방향 연구, 73.

서울시정개발연구원, 2010: 서울시 기후변화 고도적응 방안 연구, 43.

서울시정개발연구원, 2011: 기상이변에 대응한 서울의 수해방지 전략, 2-9.

성현찬, 황소영, 2013: 도시공원녹지의 생태성 및 기후변화 대응성 평가 기초 연구, *한국환경복원기술학회*, 16(3), 107-117.

소방방재청, 2006: 재해연보. 715pp

신동수, 박재범, 강두기, 조덕준, 2013: SWMM-LID를 이용한 상습침수유역 내 유출저감효과 분석, *한국방재학회논문집*, 13(4), 303-309.

신중두, 소규호, 남재작, 이정책, 김충회, 조강제, 최홍림, 이명선, 2006: 농업관련 바이오매스를 이용한 신재생에너지 전환기술방향, *유지물자원화*, 14(4), 46-54.

심우배, 한우석, 구형수, 지승희 등, 2011: 기후변화에 안전한 도시 조성방안 연구-도시의 기후변화 취약성 평가방법정립 및 취약성 평가(1차년도), 84-89.

심우배, 이병재, 이찬희, 김재호, 2013: 재해예방형 도시계획 수립 지원을 위한 도시의 기후변화 재해 취약성 분석방법 연구, *한국방재학회논문집*, 13(6), 239-247.

심재헌, 김자은, 이성호, 2012: 기후변화 대응을 위한 광역도시권 차원의 자연재해 저감방안 연구-자연재해 취약성에 따른 수도권 도시의 유형화-, *한국산학기술학회논문지*, 13(11), 5534-5541.

여인애, 윤성환, 2011: 건축밀도계획에 따른 도시기후변화의 정량적 분석, *대한건축학회*, 27(7), 209-218.

오덕성, 성재욱, 이서정, 2013: 저탄소 도시계획의 단계별 평가지표 설정 및 적용 연구 -도시계획 수립, 설계 및 운영, 유지·관리 단계를 중심으로-, *한국산학기술학회논문지*, 14(9), 4560-4571.

오성남 , 주옥정, 문영서, 이규석, 2010: 기후변화와 한반도 도시지역의 기온증가, *한국환경영향평가학회*, 19(2), 169-177.

유선철, 왕광익, 민경주, 노경식, 김세용, 2013: 도시통합모형을 활용한 도시계획부문 온실가스 배출량 산정에 관한 연구: 서울시를 대상으로, *국토지리학회지*, 7(2), 217-228.

유윤진, 김도년, 손세형, 2013: 저탄소 녹색도시 구현을 위한 탄소배출영향요인의 분석, *한국도시설계학회지*, 14(2), 149-159.

윤순진, 2007: 농업과 기후변화의 완화 에너지 소비와 생산을 중심으로, *농촌사회*, 17(1), 91-129.

윤순진, 2009: 기후변화 대응을 둘러싼 사회갈등 예방과 완화를 위한 거버넌스 모색, *국정관리연구*, 4(2), 125-160.

이경진, 차정우, 2013: 기후변화에 따른 농촌지역 영향 및 대응방안 연구-예산군을 대상으로-, *농촌계획*, 19(4), 115-123.

이인희, 2009: 기후변화에 대응한 농업, 농촌부문의 저탄소 녹색성장전략과 과제, *한국지역개발학회지*, 21(4), 41-70.

이인희, 2012: 농어업부문 기후변화 적응대책. *열린충남*, 61, 16-22.

이재준, 김도영, 2011: 신도시 내 저탄소 녹색시범마을 시나리오별 탄소감축률 분석, *대한국토도시계획학회*, 46(6), 163-173.

이정민, 김종림, 2012: 녹색도시 물순환 계획요소 및 수문순환 모의, LHI *Journal of land housing, and urban affairs*, 3(3), 271-278.

이정호, 송양호, 조덕준, 2013: SWMM 매개변수 민감도를 고려한 도시 지하저류조 최적위치 선정, *한국방재학회논문집*1 3(4), 295-301.

이종호, 2011: 기후변화대응 도시계획과 전략환경평가, *한국환경영향평가학회*, 20(6), 937-952.

장대원 등, 2012: 기후변화로 인한 극한 강우가 재해에 미치는 영향의 정량화, *한국방재학회논문집*, 12(4), 169-178.

전계원, 장창덕, 정승권, 전병희, 2013: 고랭지 농업 용수확보를 위한 소규모 빗물 이용시설 적용방안-강원도 태백시를 중심으로-, *한국위기관리논집*, 9(8), 139-150.

정부・민간 합동작업단, 2006: 함께하는 희망한국 VISION 2030.

정태웅, 문수정, 김윤관, 구지희, 2012: U-City 시스템 도입에 따른 탄소배출량 저감 효과 분석, 한국공간정보학회지, 20(1), 19-26.

조판기, 민범식, 손경환, 박제훈, 김성수, 2013: 생활인프라 실태의 도시간 비교분석 및 정비방안, 국토연구원, 236.

지식경제부, 2008: 에너지 총조사 보고서.

채정은, 변병설, 2010: 광역도시의 기후변화대응계획 평가-인천광역시와 울산광역시를 대상으로-, *국토지리학회지,* 44(2), 167-179,

최충익, 임월시, 이숙희, 김준형, 2012: 연안도시 기후변화 적응을 위한 법제도적 고찰, *한국도시행정학회*, 25(1), 325-346.

최충익, 2010: 도시가뭄재해 피해액 산정에 관한 기초연구 -태백 가뭄을 사례로-, *대한국토도시계획학회*, 45(4), 171-181.

충남발전연구원, 2011: 농촌에너지 자립형 마을 조성방안.

충북개발연구원, 2010: 탄소저감형 신도시 토지이용계획 모델 구축 방안, 60.

토지주택연구원, 2011: 전력에너지의 공간분포와 도시특성과의 관계.

통계청, 2012: 국가통계포털(http://kosis.kr).

한국농촌경제연구원, 2010a: 전문가들이 보는 2050: 농업-농촌의 미래, 399.

한국농촌경제연구원, 2010b: [농업-농촌부문] 녹색성장 추진 전략 개발(1), 303.

한국농촌경제연구원, 2010c: [농업전망 2010(1)] 녹색성장과 농업-농촌의 새로운 활로, 1082.

한국농촌경제연구원, 2011: [농업전망 2011(1)] 농업-농촌과 농식품산업: 새로운 시장과 기회, 1099.

한국농촌경제연구원, 2012: 기후변화가 식량공급에 미치는 영향분석과 대응방안, 189.

한국환경정책・평가연구원, 2007: 기후변화 영향평가 및 적응 시스템 구축(Ⅲ), 450.

한국환경정책・평가연구원, 2009: 도시지역의 기후변

화 적응을 위한 열섬현상 완화방안 연구, 37.
한국환경정책·평가연구원, 2010a: 기후변화 대응을 위한 적정 하천공간 확보 방안 II, 195.
한국환경정책·평가연구원, 2010b: 기후변화 적응 강화를 위한 사회기반시설의 취약성 분석 및 대응방안 연구(II), 180.
한국환경정책·평가연구원, 2010c: 기후변화와 사회통합에 관한 정책과제개발 연구(Ⅰ), 97.
한국환경정책·평가연구원, 2010d: 저소득계층의 기후변화 적응역량 강화를 위한 정책방안 연구(Ⅰ), 195.
한국환경정책·평가연구원, 2011a: 기후변화 적응형 도시 리뉴얼 전략 수립-그린인프라의 방재효과 및 적용방안-, 224.
한국환경정책·평가연구원, 2011b: 저소득계층의 기후변화 적응역량 강화를 위한 정책방안 연구(II), 197.
한국환경정책·평가연구원, 2012a: 기후변화 적응형 도시수현을 위한 그린인프라 전략 수립, 240.
한국환경정책·평가연구원, 2012b: 상하수도시스템의 기후변화 적응전략 및 적응비용 추정 연구, 97.
한국환경정책·평가연구원, 2013a: 기후변화 적응형 공간계획방법의 개발과 모의적용 연구(Ⅰ), 298.
한국환경정책·평가연구원, 2013b: 기후환경 취약계층의 환경복지 정책연구(1), 241.
한국환경정책·평가연구원, 2013c: 기후변화 적응관련 취약계층 지원대책 현황조사 및 분석 연구, 130.
한국환경정책·평가연구원, 2013d: 기후변화에 따른 도심지역 지질재해 리스크 체계 마련, 65.
Tommy Kim, 2012; Hukuda Vision - Japan's Solar Cell Industry Meets Favorable Wind for Economic Takeoff, SNE Research.

제 10 장 적응전략

10.1 서론

우리나라에서 기후변화 대책이 추진되기 시작한 것은 교토의정서가 채택된 이후인 1999년 기후변화 대책 위원회가 설치되면서부터이다(김정식, 2009). 그 후 정부 주도 하에 4차에 걸친 종합대책이 추진되었는데, 제3차 종합대책(2005~2007)에 이르러서야 적응기반 과제가 포함되었다. 2008년에 정부는 기후변화 적응을 다루는 국가 기후변화 적응마스터플랜을 마련하였다. 2010년 제정된 '저탄소 녹색성장 기본법(이후 녹색성장기본법)' 제48조 및 동법 시행령 제38조에 따라 최초의 법정 계획인 국가기후변화적응대책(2011~2015)이 환경부 주관하에 수립되었다. 즉, 기후변화 적응에 대한 본격적인 논의는 제3차 종합대책(2005~2007)에 이르러서야 시작되었고, 2008년의 국가 기후변화 적응마스터플랜(2008)과 녹색성장기본법에 따른 국가기후변화적응대책(2011~2015)으로 발전하였다(견고한 동의).

이러한 국가적응대책의 이행을 위해 중앙부처와 광역지자체에서는 기후변화 적응대책 세부시행계획을 마련하였다. 2012년 12월 기초지자체 적응대책 수립·시행을 위한 근거규정을 마련하고 2015년부터 시행토록 하였다. 이에 따라 현재와 같은 국가 - 광역지자체 - 기초지자체의 기후변화 적응체계가 마련되었다. 기후변화 적응대책은 기후변화로 인해 발생하는 피해와 영향을 줄이고 새로운 기회는 활용하고 적응능력을 높이기 위하여 국가 및 지자체에서 수립하는 5년 단위 행동계획이라 할 수 있다.

위와 같이 우리나라 적응대책은 국가에서 지자체까지 일관된 수립과 지원체계로 구성되어 있으나, 적응대책 수립 및 이행이 현실화되고 실효를 거두기 위해서는 적응 인식 제고와 실질적 이행을 위한 장애요소들을 극복하여야 한다. 본 장에서는 우리나라 기후변화 적응에 따른 체계적인 계획 수립과 이행을 위한 첫 단계로 국가 및 지자체로 구분하여 적응대책 수립 현황을 이해하고 국가 및 지자체 적응전략 측면에서 관련 현황과 발전방향을 살펴보고자 한다.

10.2 국가기후변화 적응대책 수립

10.2.1 개관

국가 기후변화 적응대책은 2008년 최초의 적응대책이 마련된 이후 과학적 기반 강화, 세부시행계획 수립 등 과학적, 제도적 측면에서 계속 발전하고 있다(견고한 동의). 정부는 2008년 국가 기후변화 적응 종합계획을 마련하였고, 그 이후 녹색성장기본법에 근거하여 국가기후변화 적응대책(2011~2015) 및 이의 수정·보완 대책을 수립·운용하여 현재에 이르고 있다.

10.2.2 국가 기후변화 적응종합계획

2008년 환경부 등 13개 부처는 최초의 국가 적응계획인 '국가 기후변화 적응종합계획'을 마련하였다(관계부처합동, 2008). 본 계획은 국가 적응정책의 비전과 방향을 제시하는 국가 기본계획이며, 국가 장기 비전인 저탄소 녹색성장의 주요 행동계획으로서 범부처 참여

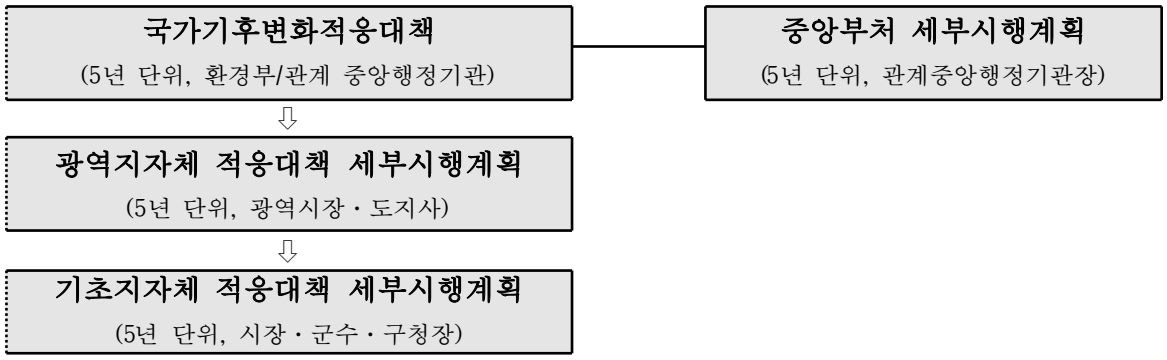


그림 10.1 우리나라 기후변화 적응대책 수립체계(환경부, 2013c)

형 종합계획의 성격을 가진다. 전체 계획기간은 2009~2030년인데, 단기(2009~2012년)적으로 취약성 평가 및 기반조성 등 우선적으로 필요한 사업을 중점 추진하고, 중장기(2013~2030년)적으로 기후변화로 인한 피해 최소화 사업 추진, 기회 극대화 및 성장동력으로의 발전을 제시하였다. 이 계획의 비전은 '기후변화 적응을 통한 안전사회 구축 및 녹색성장 지원'이며, 세부목표를 단기목표와 장기목표로 구분하였다. 단기목표(~2012)는 종합적이고 체계적인 기후변화 적응역량 강화(한반도 시.공간적 취약성 지도 100% 작성, 예측.감시 기술 수준 선진국 대비 70% 달성)였고, 장기목표(~2030)는 기후변화 위험 감소 및 기회의 현실화(과거 10년(1996~2005) 대비 기상재해피해 10% 감소, 기후변화 적응 관련 생산 GDP 대비 1% 달성)이다. 이를 위한 추진전략으로 과학적이고 종합적인 기후변화 위험 평가 체계 구축, 비용 효과적이고 지속가능한 적응 프로그램 마련, 적응역량 강화 및 인식제고를 위한 국내 파트너십 구축, 국제협력과 기여를 통한 글로벌 리더십 확보, 적응행동 이행 강화를 위한 제도적 기반 확보를 제시하였다.

10.2.3 국가 기후변화 적응대책

2010년에는 환경부를 포함하여 13개 관계부처 합동으로 '국가 기후변화 적응대책(2011~2015)'을 수립하였다(관계부처합동, 2010). 해당 대책의 특징은 ① 저탄소녹색기본법 시행('10.4)에 따른 최초의 법정계획이며 ② 정부 및 지자체 세부시행계획 수립을 위한 기본계획(master plan), ③ 기후변화 영향의 불확실성을 감안한 5년 단위 연동계획(rolling plan)이다. 건강, 재난/재해, 농업, 산림, 해양/수산업, 물관리, 생태계, 기후변화 감시 및 예측, 적응산업, 교육·홍보 및 국제협력의 10개 부문 87개 세부과제(261개 세세부과제)를 마련하였다. 본 대책은 '기후변화 적응을 통한 안전사회 구축 및 녹색성장 지원'을 비전으로 제시하였고, 이를 토대로 10개 부문별 목표를 마련하였다. 분야별 목표를 살펴보면, 폭염, 전염병, 대기오염 등으로부터 국민 생명 보호(건강), 적응을 고려한 방재·사회기반 강화 및 사회기반시설 구축(재난/재해), 기후적응 농업생산체제로 전환하여 피해저감 및 기회창출(농업), 산림건강성·생산성 증진 및 산림재해 저감(산림), 해수면 상승 대응 및 안정적 수산식량자원 확보(해양/수산업), 홍수·가뭄 등 기후변화로부터 안전한 물관리 체계 구축(물관리), 생태계 보호·복원을 통한 생물다양성 확보(생태계), 기후변화 적응 기초자료 제공 및 불확실성 저감(기후변화감시 및 예측), 산업별 기후변화 적응유도 및 신사업·유망사업 발굴(적응산업/에너지), 국내·외 적응정책 추진기반 확립(교육.홍보 및 국제협력) 등이다.

2012년 12월 기상청에서 발표한 기후변화 新시나리오(RCP)를 계기로 국가기후변화 적응대책 수정·보완이 이루어졌다(관계부처합동, 2012). 구체적으로 적응대책 수정·보안은 두 가지 측면에서 이루어졌는데, 우선 기후변화 新시나리오를 고려하여 기존 대책 중 존속시킬 과제와 폐지해야 할 과제를 구분하고 성격이 유사한 과제를 통·폐합하였다. 다음으로 취약계층 보호대책, 기후변화 유망산업 발굴, 기업의 적응역량 강화 지원 등 새로운 정책수요에 따른 적응대책을 추가·보완하였다. 최종적으로 건강, 농수산, 물관리, 재난/재해, 산림/생태, 국토/연안, 산림, 인프라/국제협력, 기후변화 감시·예측의 9개 부문의 67개 세부과제로 정리되었다.

국가 기후변화 적응대책의 이행을 위해 소관 부처별로 세부시행계획을 마련하였다. 그래서 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 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 공통적으로 각 세부과제별로 담당부처의 업무담당자와 상세한 사업내용을 같이 서술함으로써 세부시행계획에 대한 책임성과 이행성을 높이고자 노력하였다.

표 10.1 우리나라 국가 기후변화 적응계획 현황 및 특징

구분	국가 기후변화 적응 종합계획	국가기후변화 적응대책	국가 기후변화 적응대책 수정 보완
비전	기후변화 적응을 통한 안전사회 구축 및 녹색성장 지원	기후변화 적응을 통한 안전사회 구축 및 녹색성장 지원	기후변화 적응을 통한 안전사회 구축 및 녹색성장 지원
체계			
주요 내용 (추진 과제)	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
계획기간	2009~2030	2011~2015	2013~2015(2012.12)
수립 주체	환경부 등 13개 부처	환경부 등 13개 부처	환경부 등 13개 부처
특징	우리나라 최초의 적응대책(행정계획 성격) - 국가적응정책 기본계획 - 저탄소 녹색성장 주요 행동계획 - 범부처 참여형 종합계획	우리나라 최초의 법정계획(저탄소 녹색성장기본법) 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
중앙부처 세부시행계획	해당 없음	세부시행계획(2011~2015)	세부시행계획(2013~2015)
		국가기후변화 적응대책 이행 각 세부과제별 소관부처 및 사업개요, 추진실적과 함께 연차별 사업내용 및 소요예산, 기대효과 제시, 세부과제별 담당자 명시	국가기후변화 적응대책 수정·보완 이행 각 세부과제별 소관부처 및 사업개요, 추진실적과 함께 연차별 사업내용 및 소요예산, 기대효과 제시, 세부과제별 담당자 명시
		2011. 6월 마련	2013. 12월 마련

표 10.2 기후변화대응종합계획에서 제시된 적응 정책 수립 현황(환경부, 2012a)

구분	기후변화 현황	기후변화로 인한 영향	취약성 평가 여부	정책수립 현황	적응부문						
					건강	재난/재해	농업	산림	해양/수산	물관리	생태계
광주	○	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×
대구	○	○	○	○	○	○	×	×	×	○	×
대전	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×
부산	○	○	×	○	○	○	×	×	○	△	×
울산	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×
인천	○	○	○	○	○	○	△	△	△	○	○
강원	×	×	×	○	○	○	○	○	○	△	○
경기	○	○	○	○	○	○	○	○	×	○	△
경남	×	×	○	○	○	○	△	△	×	○	○
경북	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
전남	○	○	○	○	○	○	△	△	×	○	○
전북	○	○	○	○	○	△	○	△	○	○	○
충남	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×
충북	×	×	○	○	△	○	×	○	×	×	×
제주	○	○	×	×	×	×	×	×	×	×	×
계	9/15	8/15	8/15	10/15	10/15	10/15	7/15	8/15	6/15	9/15	7/15

(주 : ○ 정책 수립, ×: 정책 미수립, △: 정책이 수립되었으나 다른 분야에 포함되어 있음)

10.3 지방자치단체 기후변화 적응대책 수립

지방자치단체 기후변화 적응대책 세부시행계획은 녹색성장기본법에 법적 근거를 두고 있으며, 국가 기후변화 적응대책 이행을 위한 광역 및 기초 지자체 단위의 실행계획 성격을 지닌다. 이러한 지자체 적응대책에서는 의사결정권자의 관심과 인지도 제고, 취약성 평가 개선, 지역 특성에 맞는 사업도출 유도 등이 중요한 것으로 나타났다(견고한 동의).

10.3.1 광역지자체 적응정책 수립현황

녹색성장기본법 시행 이전 16개 광역시·도 단위에서 기후변화 대응을 목적으로 수립된 「기후변화 대응종합계획」을 살펴보고, 저탄소 녹색성장법에 근거한 「광역지자체 적응대책 세부시행계획」을 검토하였다.

10.3.1.1 기후변화 대응종합계획의 적응정책 현황

우리나라는 국가기후변화대응 종합기본계획(2008.9월)을 수립하였고, 녹색성장기본법 시행과 함께 기후변화대응 기본계획을 수립하고 있다. 기후변화대응 기본계획은 녹색성장기본법 제40조에 근거하여 20년을 계획기간으로 매 5년마다 수립·시행한다. 국가기후변화대응 종합계획은 녹색성장기본법의 기후변화대응 기본계획과 유사하지만 녹색성장 기본법 이전에 수립된 비법정계획이다.

2008년의 국가기후변화대응 종합기본계획 수립에 따라 환경부는 지자체 차원의 능동적인 기후변화 대응을 위하여 광역지자체 기후변화대응 종합계획 수립을 추진하였다. 이에 따라 16개 광역지자체는 2010년 지역별 기후변화 현황, 온실가스 저감, 기후변화 적응 등을 포함한 기후변화대응 종합계획을 수립하고 관련 조례를 마련(서울, 인천, 광주 등)하는 등 지자체 별로 기후변화 대응을 위한 노력을 진행하였다(환경부, 2012a).

광역지자체 기후변화대응종합계획은 온실가스 저감에 관한 내용을 중점적으로 다루고 있으나 적응 관련 내용도 포함하고 있다. 구체적으로 서울시를 제외한 15개 광역지자체를 대상으로 광역지자체 기후변화 대응 종합계획 현황을 살펴보면, 경기도 등 6개 광역지자체는 '기후변화 현황→기후변화 영향→취약성평가→대책수립'으로 이어지는 체계를 보여 과학적 근거를 토대로 적응대책을 수립하고자 노력하였다. 기후변화 현황은 과거 기온, 강수량 등의 변화 추이를 살펴보았고 기후변화 영향은 과거부터 현재까지 기후변화로 인한 피해 등의 영향을 분석하였다. 취약성 평가는 대부분 기

표 10.3 광역지자체 기후변화 적응대책 세부시행계획 과정별 분석방법

구분	기후변화 현황	기후변화 전망	영향・취약성평가	비전/목표 설정
서울	기상자료 분석	A1B, A2시나리오 이용	CCGIS 기반 적응 이슈별 가중치 및 평가항목 선정	종합분석
부산	기상자료 분석	A1B, A2시나리오 이용	CCGIS 기반 (정성적 평가+정량적 평가)	종합분석
대구	기상자료 분석	A1B 시나리오 이용	지수산정식에 의한 취약성평가와 CCGIS의 결과 비교	종합분석
인천	기상자료 분석 (클라이모그래프)	A1B 시나리오 이용	CCGIS 기반 절충형(상향식+하향식) 평가	종합분석
광주	기상자료 분석	A1B 시나리오 이용	CCGIS 기반 절충형(상향식+하향식) 평가	종합분석
대전	기상자료 및 피해현황분석	A1B 및 RCP4.5 시나리오 비교	A1B시나리오 이용 지수산정식에 의한 취약성 평가	종합분석
울산	기상자료 분석	A1B 시나리오 이용	CCGIS 기반 취약성평가	종합분석
경기	기상자료 분석	(판단 불가)	CCGIS 기반 (정량적평가+정성적평가) 적응 이슈별 매트릭스 활용	SWOT
충남	기상자료 분석	A1B 및 RCP8.5 시나리오 비교	CCGIS 기반 취약성평가	종합분석
충북	기상자료 분석	A1B 시나리오 이용	CCGIS 기반 취약성평가	종합분석
강원	기상자료 분석	A1B 시나리오 이용	지수산정식에 의한 취약성평가와 CCGIS의 결과 비교	SWOT
경남	기상자료 및 피해현황분석	A1B 시나리오 이용	AHP로 대체	SWOT
경북	기상자료 및 피해현황분석	A1B 시나리오 이용	CCGIS 기반 절충형(상향식+하향식) 평가	종합분석
전남	기상자료 및 피해현황분석	A1B 시나리오 이용	CCGIS 기반 취약성평가	종합분석
전북	기상자료 분석	A2, A1B,B1,B2 시나리오별 분석	CCGIS 기반 절충형(상향식+하향식+지표식) 평가	종합분석
제주	기상자료 분석	(판단 불가)	CCGIS 기반 취약성평가	종합분석

후노출, 민감도, 적응능력 지표를 통한 VRI(Vulnerability Resilience Index) 방법을 사용하였다. 적응대책을 수립한 10개 광역지자체를 대상으로 기후변화대응종합계획에서 제시된 적응대책 분야를 살펴보면, 10개 광역지자체 모두에서 건강과 재난/재해 분야에 대한 정책을 수립하였고, 물관리와 산림, 농업 및 생태계 등도 많이 다루고 있다.

광역지자체 기후변화 대응종합계획은 녹색성장기본법 시행 이전에 광역지자체 단위에서 수립된 적응정책으로서의 의의가 있으나, 지역 특성을 반영한 구체적인 적응대책 수립으로 보기에는 한계가 있다.

10.3.1.2 광역지자체 기후변화 적응대책 세부시행계획

녹색성장기본법에 근거한 광역지자체 적응대책 세부시행 계획의 수립주체는 시·도지사이며, 5년 단위로 수립·시행한다. 녹색성장기본법 시행령 제38조 제2항에서는 광역지자체 세부시행계획의 내용과 관련하여 국가단위 적응대책 중 광역지자체에 해당하는 소관사항에 대하여 수립한다.

광역지자체 적응대책 세부시행계획은 16개 광역지자체(세종시 제외) 모두 2012년 수립이 완료되었다. 이들 광역지자체 적응대책 세부시행계획을 대상으로 기후변화 영향 및 취약성 분석 등 분석방법과 거버넌스,

표 10.4 적응대책 수립을 위한 의견수렴 방법

구분	현황, 피해, 전망	취약성평가, 중점분야	세부시행계획 수립
서울	(언급 없음)	설문조사 ④ / 회의 ③	정책협의 ③
부산	자료제공 ③	회의 ③	정책협의 ③
대구	(언급 없음)	적응능력 조사 ①, ②, ④	설문조사 ②, ③
인천	(언급 없음)	(언급 없음)	회의 ③
광주	(언급 없음)	설문조사 ② / 회의 ③, ④	회의 ③
대전	(언급 없음)	설문조사 ②, ④ / 회의 ③	회의 ③
울산	(언급 없음)	회의 ①,③ / 설문조사 ①, ④	회의 ③, ④
경기	방문 및 인터뷰 ② / 인식조사 ②	회의 ③, ④	회의 ③
충남	(언급 없음)	회의 ① / 설문조사 ①, ④	회의 ③
충북	(언급 없음)	회의③	설문조사 ① / 중점세부과제 ④
강원	(언급 없음)	회의 ③	설문조사 ①, ②
경남	(언급 없음)	회의 ③	설문조사 ①
경북	(언급 없음)	(언급 없음)	설문조사 ②, ④
전남	(언급 없음)	회의 ③	(언급 없음)
전북	(언급 없음)	(언급 없음)	설문조사 ①, ④
제주	(언급 없음)	회의 ③	(언급 없음)

(주 : 공무원, ② 주민, ③ TFT/위원회, ④ 학계 및 전문가, ⑤ 시민단체, ⑥ 중앙정부/공공기관 및 연구소)

적응대책 주요 내용 및 재원, 사업유형을 살펴보았다.

10.3.1.2.1 대책 수립을 위한 분석방법

광역지자체 세부시행계획 수립을 위한 주요 분석방법은 <표 10.3>과 같이 대부분 유사한 것으로 나타났다. 기후변화 현황 부분에서는 기상청에서 제공하는 기상자료를 대부분 활용하고 있으며, 대전광역시, 경상남도, 경상북도, 전라남도에서는 피해현황을 별도로 조사하였고, 인천광역시의 경우 클라이모그래프를 활용하여 이해를 돕도록 하였다. 기후변화 전망 부문에서는 A1B, A2 시나리오를 이용하여 전망하였으며, 대전광역시와 충청남도는 A1B 시나리오와 RCP8.5 시나리오를 비교하였다. 기후변화 영향 및 취약성평가 부분에서는 대부분의 광역지자체가 CCGIS를 활용하였고, 대전광역시는 A1B 시나리오 기반 지수산정식으로 취약성을 평가하였고, 경상남도에서는 취약성평가를 수행하지 않는 대신 AHP 설문조사를 통해 중점분야를 선정하여 과업을 수행하였다. 비전/목표 수립 과정에서는 대부분의 지자체가 전 과정에 있는 분석결과를 종합하여 방향을 설정하였고, 경기도와 강원도, 경상남도는 SWOT분석을 활용하였다.

10.3.1.2.2 대책 수립을 위한 의견수렴 방법

광역지자체 기후변화 적응대책 세부시행계획 수립 과정에 참여한 주체와 참여형태는 <표 10.4>와 같다. 우선 기후변화 현황·피해·전망 과정에서 구체적인 언급이 없었으나 대부분 공무원을 통한 자료수집이 있었을 것이라고 판단된다. 취약성 평가와 중점분야 선정, 세부시행계획 수립 과정에서는 대부분 설문조사와 회의 진행을 거쳤다. 공무원과 주민, TFT, 학계 및 전문가 등이 참여하였고, 특히 공무원과 해당 전문가, 시민단체 등으로 구성된 TFT의 활동이 두드러졌던 것으로 분석되었다.

10.3.1.2.3 적응대책 부문별 주요 내용

광역지자체 기후변화 적응대책 세부시행계획에서 건강, 재난/재해, 농업, 산림, 물관리, 해양/수산, 생태계 분야의 7개 부문을 대부분 다루고 있지만, 적응산업/에너지, 적응기반, 교육홍보 및 국제협력, 기후변화 감시예측 부분은 상대적으로 낮게 나타났다. 그리고 광역지자체 기후변화 적응대책 세부시행계획에서는 주로 예방·관리와 관련된 사업을 주로 다루었다. 특히 건강,

표 10.5 광역 지자체 적응대책 세부시행계획 수립부문과 주요 내용 분석

구분	기후변화 적응대책 부문											기후변화 적응대책 주요 내용				
	건강	재난/재해	농업	산림	물관리	해양/수산	생태계	적응산업/에너지	적응기반	교육홍보 및 국제협력	기후변화 감시 및 예측	예방·관리	피해복구	평가 및 감시체계	제도개선	연구개발
서울	○	○		○	○							105	10	31	15	12
부산	○	○		○	○	○	○			○	○	22	1	19	2	24
대구	○	○	○	○	○	○		○		○		37	2	18	1	31
인천	○	○	○	○	○	○		○				16	1	5		
광주	○	○	○	○	○		○					17	1	9		6
대전	○	○	○	○	○		○			○		28		4	1	4
울산	○				○				○			22	1	7	3	6
경기	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	24	2	11	7	24
충남	○	○	○	○	○	○	○			○		36	3	11	4	12
충북	○	○	○	○	○			○		○	○	78	5	17	19	36
강원	○	○	○	○	○	○	○	○		○		53	4	10	8	42
경남	○	○	○	○	○	○	○	○				84	18	10	23	29
경북	○	○	○	○	○	○	○	○		○	○	35	2	17	5	27
전남	○	○	○	○	○	○	○					33	1	12	5	42
전북	○	○	○	○	○	○			○			8	1	15	2	11
제주	○	○	○		○	○	○					29	1	18	5	37
합계	16	15	13	14	16	10	10	6	3	7	3	627	53	214	100	343

(단위 : 건수)

표 10.6 광역지자체별·사업별 기후변화 적응대책 재원 및 사업유형

구분	적응대책 세부시행계획 재원유형(단위 : 억원)			
	국비	시・도비	구・군비	기타
광역지자체 현황	840	940	449	227
구분	적응대책 세부시행계획 사업유형(단위 : 개소)			
	신규 사업	기존 사업	기존보완 사업	
광역지자체 현황	380	659	258	

(주 : 서울시는 재원유형이 제시되지 않아 분석에서 제외함)

재난/재해, 물관리 부분의 예방·관리 사업이 많이 진행되고 있으며, 서울특별시가 가장 많은 사업을 제시하고 있다. 이와 대조적으로 피해복구는 관련 사업이 가장 적게 제시되어 있다. 연구개발 부분은 농업. 해양/수산, 적응산업/에너지 부문에서, 그리고 광역시보다는 전남과 충북, 강원, 경남 등과 같은 광역도(道)에서 주로 제시하고 있다(<표 10.5> 참고)

10.3.1.2.4 적응대책 재원 및 사업유형

광역지자체의 사업별 재원을 살펴보면, 광역시 또는 도(道)에서 자체적으로 조달하고 있고, 그 다음으로 국비의 지원을 받고 있는 것으로 분석되었다. 구·군비는 시·도비의 절반 수준이고, 그 외 민자 등의 재원 비중은 가장 낮은 것으로 나타났다. 광역지자체의 사업 유형은 기존 사업이 가장 많았으며, 그 다음 신규 사업, 기존 보완사업 순으로 나타났다(<표 10.6> 참조).

10.3.1.3. 기후변화 적응대책 세부시행계획 수립 기반과 장애요소

환경부는 지자체단위의 적응대책 수립 지원과 실질적인 계획 수립 효과를 도모하고자 인천과 서울시를 대상으로 한 시범사업(환경부, 2010e; 환경부, 2010f)을

통해 지자체 적응대책 수립을 위한 가이드라인(환경부, 2010g; 환경부, 2012d)을 작성하였다. 시범지자체를 제외한 전국 14개 광역시·도(세종시 제외)는 녹색성장 기본법 시행령에 따라 기후변화 적응대책 세부시행계획을 수립 완료(2012년)하였으며, 주요 수립내용은 기후변화 영향 및 취약성 평가, 비전 및 목표 설정, 적응대책 및 중점과제 선정, 분야 및 전략별 적응대책 등이다. 또한 국립환경과학원(2012)은 지자체 기후변화 적응대책 세부시행계획 수립 시 필요한 기후변화 영향평가 및 취약성 분석을 지원하기 위해 평가 도구인 CCGIS (Climate Change adaptation toolkit based on GIS)를 활용하여 전국을 대상으로 취약성 평가를 분석하고 그 결과를 광역 지자체에 제공하였다.

기후변화 적응대책 수립을 위해서는 해당 계획에 대한 인식과 해당 지자체의 기본현황을 파악하고 이를 토대로 지원 방향과 전략을 마련하는 것이 바람직하다. 광역지자체 적응대책 세부시행계획 담당 공무원 및 연구진을 대상으로 적응관련 인식, 세부시행계획의 필요성, 관심도 등과 관련한 의견조사를 총 2회 실시하여 광역지자체의 적응대책 수립과 관련 현황을 파악한 결과(환경부, 2012a)에 따르면, 광역지자체 적응대책 세부시행계획 수립 담당자 및 연구진들은 기후변화 문제를 심각하게 인지하였다. 또한 기후변화와 관련한 영향이 현재보다 미래에 커질 것으로 예상하고 있었으며, 기후변화 대응주체로서 지자체, 중앙정부, 전지구 차원의 노력이 필요하다고 응답한 것으로 나타나 광역지자체 단위 적응대책 수립 필요성에 대한 기초적인 공감대는 형성되어 있었다. 또한 적응대책 세부시행계획 수립 초기단계에서 실시한 의견조사에서는 기후변화 적응 개념에 대하여 절반 정도만이 이해한다고 응답하였으나 적응대책 수립이 진행되는 과정에서는 자신뿐 아니라 기후변화에 대한 관심도가 향상된 것으로 나타나 세부시행계획 수립을 통해 지자체 적응에 대한 인식제고가 있었음을 확인할 수 있었다.

하지만 기후변화 적응대책 수립 관련자들은 지자체 차원의 준비가 부족하다는 의견을 보였다. 적응대책 세부시행대책 수립에 있어 지자체 장의 정책의지가 중요함에도 불구하고, 조사결과 광역지자체장의 관심은 높지 않은 것으로 파악되어 적응대책 세부시행계획의 원활한 추진을 위해서는 의사결정권자 및 관련 부서의 적응 인식 제고와 관심유도가 절실한 것으로 나타났다(견고한 동의, 환경부, 2012a). 실제 적응대책 수립에 있어 타부서와의 정보교환 및 정책연계 업무의 중요도가 높음에도 불구하고, 적응대책 세부시행계획 수립과정에서 타부서의 업무협조가 원활하지 않았던 것으로 나타났다. 또한 지역 내 기후변화 적응 관련 기관이나 전문단체의 파트너십 구축도 일부 지자체에서만 볼 수 있었다.

10.3.2 기초지자체 적응대책 수립현황

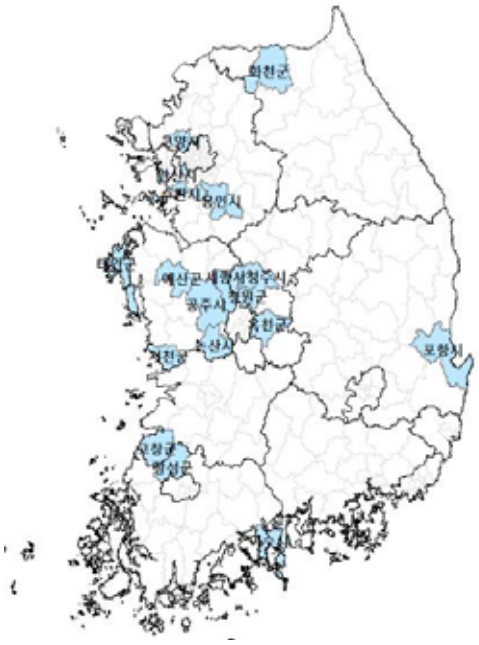
2015년 기초지자체 적응대책 수립 의무화를 앞두고 35개 기초지자체에 대한 시범사업(2012 ~ 2013년)을 통해 기초지자체 적응경험을 축적하고 설명회, 가이드라인 마련 등을 통해 수립기반 강화를 위해 노력하고 있다.

기초지자체 시범지역은 전국 기초지자체를 대상으로 적응대책 세부시행계획 수립 시범사업에 대한 수요조사를 실시(2011.9 ~ 2012.2)하고, 신청 지자체를 대상으로 지역 취약성 현황 및 지역적 안배, 예산확보 가능성 등의 기준을 토대로 총 35개 지역을 선정하였다(환경부, 2013d; 환경부 2014b). 기초지자체 기후변화 적응대책 세부시행계획 수립 시범지역 현황 및 분포는 그림 10.2와 같다.

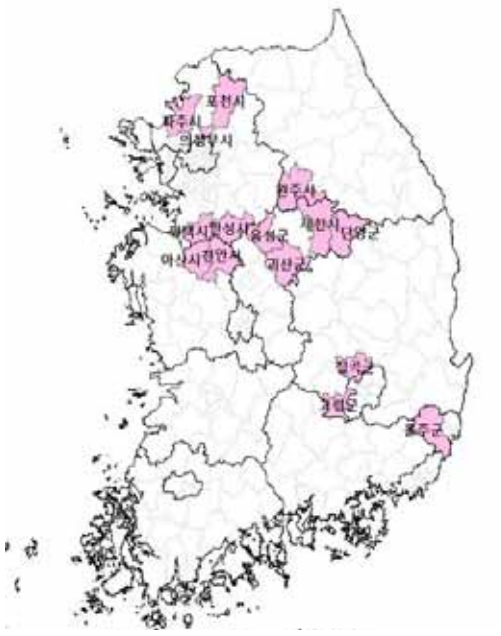
35개 시범 기초지자체는 기후변화 적응대책 세부시행계획 수립과 관련하여 연구용역을 발주하고 이를 바탕으로 적응대책을 수립하였다. 2014년 2월말 기준으로 22개 지역에서 연구용역이 완료되었으며(2012년 시범지역 20개 지역 중 16개 지자체, 2013년 시범지역 15개 지역 중 6개 지자체) 전체 35개 시범지역의 연구용역은 2014년 9월 완료 예정이다.

10.3.2.1 기초지자체 적응대책 세부시행계획 수립현황

기초지자체 적응대책 세부시행계획은 국가에서 제공된 계획수립 관련 표준내용을 준용하여 [계획준비]→[계획수립]→[계획이행] 3단계를 거쳐 추진되었다. 구



년 시범지역 개 지자체



2013년 시범지역 : 15개 지자체

그림 10.2 기초지자체 적응대책 세부시행계획 시범사업 지자체 분포현황(환경부, 2014b)

체적으로 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 년차별 세부시행계획 작성 및 확정(승인) → ⑦ 공표 및 이행체계 마련의 7개 세부절차를 제시하였다. 이를 토대로 기후변화 적응대책 세부시행계획을 수립한다.

환경부(2014c)는 18개 기초지자체(고창군, 공주시, 광명시, 괴산군, 논산시, 수원시, 아산시, 안산시, 인천연수구, 예산군, 옥천군, 용인시, 울주군, 장성군, 제천시, 태안군, 평택시, 포항시)를 대상으로 기후변화 적응대책 세부시행계획에 포함된 세부대책사업의 전체 현황 및 수준과 지역별/사업유형별 특성 등을 파악하여 향후 기초 지자체의 기후변화 적응대책 이행 및 정책추진을 위한 기초자료로 활용하고자 하였다. 시범지역 세부시행계획은 최소 24개~최대 104개까지 세부대책사업을 제시하고 있으며 분야별로는 건강, 재난/재해, 농업 순으로 대책사업 수가 많고, 해양/수산분야의 대책사업이 가장 적은 것으로 분석되었다. 또한 18개 지역 중 4개 지자체(광명시, 수원시, 아산시, 포항시)는 2개 이상의 적응대책 분야가 복합된 성격의 사업을 제시하고 있다. 시범지역의 세부대책사업을 유형별로 살펴보면 신규사업이 320개(37.2%)로 가장 많고, 기존/보완사업 317개(36.9%), 기존사업 223개(25.9%) 순으로 나타났다.

일부 지역에서는 적응대책 분야를 구분함에 있어 국가 기후변화 적응대책상의 10개 분야[3] 외에 지역현황과 특성을 고려하여 새로운 분류체계를 제시하기도 했다. 아산시는 기후기반, 기후복지, 기후안전, 기후경제로 구분하여 분야별 목표와 주요내용, 세부대책사업을 제시하였으며(아산시, 2014), 고창군은 총괄분야로서 적응인프라, 적응 프로그램, 협력체계, 교육/홍보와 관련된 세부대책사업을 제시하였다(고창군, 2013). 이 외에도 옥천군의 농축수산업, 기반분야(옥천군, 2013), 청원군 및 청주시의 협력적 거버넌스 분야(청원군, 2014;청주시, 2014), 화천군의 관광 및 인식제고 분야(화천군, 2014), 고양시의 산업/관광/레저와 기반시설(에너지, 건설/토목/건축, 교통/통신) 분야(고양시, 2014) 등이 기존 국가 기후변화 적응대책과 달리 새롭게 제시되었다. 이는 기초 지자체인 시·군·구의 지역적 특성 및 여건이 구체적으로 반영된 결과로 해석할 수

3) 건강, 재난/재해, 농업, 산림, 생태계, 물관리, 해양/수산, 기후변화 감시 및 예측, 적응산업/에너지, 교육·홍보 및 국제협력

표 10.7 기초지자체 별 과업수립 장애요소(환경부, 2014b)

구 분	해당 장애요소에 대해 응답을 한 지자체
데이터(통계자료) 미흡	고양시, 고창군, 장성군, 울주군, 평택시, 제천시, 아산시, 청주시(청원군)
취약성평가 신뢰도 부족	고양시, 안산시, 광명시, 옥천군, 고창군, 포항시, 평택시, 제천시, 아산시
인식/이해도 부족(공무원, 주민)	화천군, 옥천군, 포항시, 울주군, 평택시, 청주시(청원군)
부서 간 협조 미비	화천군, 옥천군, 고창군, 장성군, 울주군, 평택시
전문인력 부족	수원시, 옥천군, 포항시, 울주군
예산 부족/예산 불확실	안산시, 화천군, 고창군, 장성군, 포항시, 아산시, 청주시(청원군)
표준화된 조사양식 필요(설문지)	제천시
적응대책사업 기준 필요	제천시

있는 동시에 국가 및 광역시·도 단위 적응대책보다 세분화된 대책 마련이 필요함을 시사하고 있다.

10.3.2.2 기후변화 적응세부시행계획 수립 기반과 장애요소

기초 지자체 적응대책 수립과 관련하여 환경부는 지자체 기후변화 적응대책 총괄기관으로서 한국환경정책·평가연구원(국가기후변화적응센터)과 함께 2012년 및 2013년 시범지역의 기후변화 적응대책 세부시행계획 수립에 대하여 국가차원의 운영·지원을 총괄하고 기상청, 국립환경과학원 등 관련기관과의 협력을 추진하는 운영·지원에 관한 보고서를 발간하였다(환경부, 2013d; 환경부, 2014b). 국가차원의 시범 기초지자체 기후변화 적응대책 세부시행계획 수립과 관련한 운영·지원은 시범지역의 적응대책 수립 과정을 고려하여 관련 표준내용 작성·제공, 관계기관 정보제공 및 공유·역량강화, 계획수립 수시지원 및 운영, 계획수립 모니터링, 자문단(컨설팅) 운영 등 목적 및 성격별 5개 전략에 따라 이루어졌다(환경부, 2014b).

기초단위 적응대책 수립 시범사업 운영·지원과 더불어 환경부(2013c)는 기초지자체 단위 기후변화 적응대책 세부시행계획 수립 의무화에 대비하여 이제까지 우리나라 지자체 단위에서 적용되어온 기후변화 적응대책 세부시행계획 수립 체계 및 기반을 검토, 그 간의 문제점과 개선사항을 반영한 지자체 단위 기후변화 적응대책 수립 체계(절차 및 방법)를 제안하였다. 기초지자체 단위 적응대책 세부시행계획은 [준비]→[수립]→[시행]의 3단계로 구성하되, [준비] 단계는 기후변화 적응 인식 형성, 적응대책 수립 T/F 구성의 적응대책 수립 기반체계를 마련하는 단계이다. [수립] 단계는 ① 지역 현황 및 기후변화 영향(지역현황 및 특성, 기후변화 현황 및 전망, 기후변화 영향·취약성 평가, 종합분석 및 중점분야 선정)→② 계획 목표 및 세부전략(적응대책 비전 및 목표 설정)→③ 적응대책 발굴 및 세부시행계획 수립(분야별 적응대책 발굴 및 선정, 연차별 세부시행계획 마련)→④ 계획의 집행 및 관리(이행 추진기반 마련, 이행평가 및 모니터링 계획)→⑤ 계획의 확정 및 공표의 5개 세부절차이며, 각 절차별로 주요 고려사항을 제시하였다. 이를 바탕으로 기초지자체 적응대책 세부시행계획 수립에 적용·활용하기 위한 가이드라인(안)을 마련하였다(환경부, 2014a).

그리고 기초지자체 적응대책 세부시행계획에 대한 장애요소로는 취약성평가를 수행하기 위한 데이터(통계자료) 미흡과 취약성평가 방법의 신뢰도 부족이 가장 큰 것으로 판단되었다(견고한 동의, 환경부, 2014b). 그리고 지자체 주민뿐만 아니라 담당 공무원들의 기후변화 인식과 이해도 부족, 부서 간 협조 미비, 전문 인력 미비, 예산 부족 및 불확실, 사업도출 기준 부재 등이 주요 장애요소로 제시되었다. 이들 대부분은 기초지자체 적응대책 수립을 위한 시범단계에 기인하여 나타나는 것으로 판단된다. 취약성 평가의 보완을 위해서는 데이터 구축방안과 LCCGIS의 수정 및 보완(산정식 재검토) 등이 필요하고, 기후변화 적응 인지도 향상 및 전문성 확보를 위해서는 지역 네트워크를 활용한 교육 및

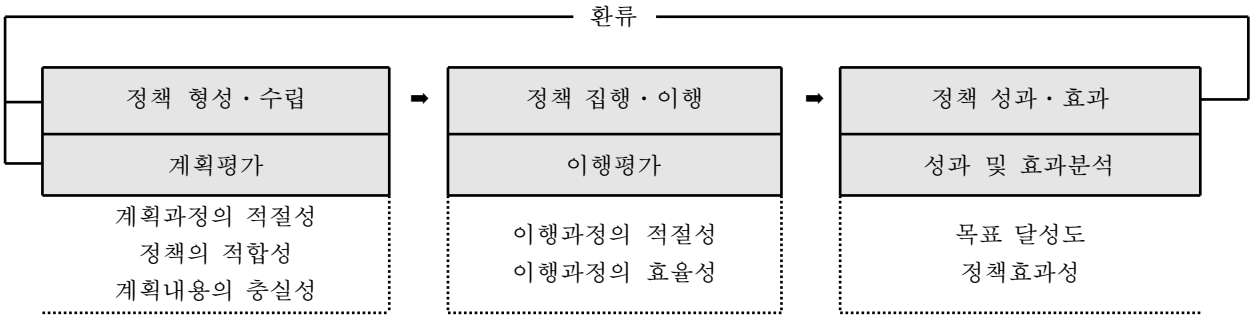


그림 10.3 정책단계별 평가내용(환경부, 2011b)

홍보활동, 공무원 업무 매뉴얼 제공, 선진사례지 연수 등이 필요하다. 지역 특성에 맞는 사업 도출을 위해서는 관련 공무원과 주민 등의 역량 강화가 전제되어야 하며, 특히 지역에 필요한 사업을 수행할 수 있도록 사업발굴 체계와 이행평가에서 오는 불이익을 완화할 수 있는 제도적 장치가 필요하고 예산확보를 위한 정부부처 연결 등 행정적 지원이 뒷받침 되어야 한다.

10.4 기후변화 적응전략 및 적응기법 연구

10.4.1 적응대책 수립 절차 및 이행 효과성

국가 적응대책의 이행평가에 대한 논의는 제한적이었고, 2012년 수립 완료된 광역지자체에 대한 이행평가는 거의 없었기 때문에 이에 대한 관심이 필요하다(견고한 동의). 녹색성장기본법 시행령 제38조 및 국가 기후변화 적응대책에 근거하여 관계 중앙행정기관 및 지자체 적응대책에 대해 매년 그 실적을 점검할 수 있다.

기후변화 적응정책 평가는 형성·수립, 집행·이행, 성과·효과에 따라 계획평가, 이행평가, 성과 및 효과분석으로 이루어진다(환경부, 2011b). 계획평가의 경우, 상위계획과의 부합성, 세부내용 및 구성체계의 적절성과 충실성, 실제 추진여부 및 가능성에 대한 정성적 평가가 이루어진다. 이행평가에서는 추진일정의 충실성, 협조노력, 홍보 및 교육, 조치 및 수정사항과 같은 평가지표를 검토하게 된다.

국가 기후변화 적응대책의 실효성 제고를 위해서는 이행평가 점검 및 이행효과성에 대한 체계적인 검토가 중요하다. 적응정책의 효과성 저해요인으로 적응정책의 내용, 거버넌스, 적응주체, 예산, 적응정책 평가, 법제도를 들 수 있다(명수정 등, 2013b). 국가 기후변화 적응대책의 이행점검을 위해 대책이행도 및 성과달성도에 대한 평가지표와 함께 이행평가 체계를 마련하여 '국가기후변화 적응대책 이행점검 및 추진현황 작성 지침'을 제시하였다(환경부, 2013f). 2014년 현재 2013년도 적응대책에 대한 이행점검이 수행중이다.

10.4.2 취약성 및 리스크 평가

현실성 있고 실효성 있는 적응대책 수립을 위해서는 불확실성을 줄이는 것이 중요하므로 이를 위한 관련 자료를 생산하고 지속적으로 축적하는 것이 필요하다(견고한 동의). 기후변화 적응대책은 기후변화에 대한 취약성/리스크, 미래 시나리오에 따른 전망과 예측 등을 토대로 계획되므로 불확실성을 내포하고 있기 때문이다.

국립환경과학원(2013)은 2012년 시범사업 16개 지역을 대상으로 취약현황과 특성 등을 고려하여 중점분야를 사전 검토 및 선정(scoping)하고 RCP8.5 시나리오를 기반으로 취약성 평가를 실시하여 취약성 지도 및 평가도구(LCCGIS, Local government Climate Change adaptation toolkit based on GIS)를 작성·배포하였다. 환경부(2013a)는 기후변화에 따른 자연생태적, 사회경제적 취약성을 결정하는 지역인자를 파악하여 취약계층, 취약분야, 취약지역 관리대책 수립을 위한 기초지자체 의사결정을 지원하고 취약성 평가 표준화 기반을 구축하였다.

환경부(2014b)는 지자체 단위 기후변화 적응대책 수립을 운영·지원하는 과정에서 계획수립 관련 애로사항을 수립 기간 동안 정기적으로 조사하였는데, 그 결과 지자체는 취약성 평가와 관련하여 관련 자료 부재와 수집의 어려움, 국가제공 취약성 평가 결과의 한계점 등을

애로사항으로 지적하였다. 이러한 관점에서 살펴볼 때 기후변화 취약성 평가와 관련하여 지역차원의 평가 방법론 뿐 아니라 지자체 단위의 취약성 평가를 위한 관련 자료의 생산, 구축, 공유를 위한 체계 마련이 필요하다.

기후변화 리스크에 대해서는 기후변화 리스크 관리를 위한 기후변화 적응역량 구축·평가(한국환경정책·평가연구원, 2012), 기후변화 최소화를 위한 부문별 국내·외 리스크 요인파악 및 관리방안 분석(한국환경정책·평가연구원, 2013), 국가별 기후변화 적응전략에 따른 우리나라 리스크 대응방안 연구(한국환경정책·평가연구원, 2013) 등이 최근에 수행되어 기후변화 리스크 목록 구축, 다차원평가기법 개발, 식량 등 국제 리스크 검토 등이 이루어졌다. 산업계 및 공기업을 대상으로 기후변화 리스크 관리도구 개발 및 시범적용도 이루어졌다(환경부, 2013b). IPCC AT5 WGⅡ에서 기후변화 적응을 위한 리스크 관리를 강조하고 있어 향후에도 국가 및 지자체, 산업계, 사회기반시설 등 다양한 부문을 대상으로 지속적이고 체계적인 연구가 추진될 필요가 있다.

10.4.3 거버넌스 참여

기후변화는 온실가스 배출 완화 뿐만 아니라 기후변화의 부정적 영향을 확인하고 이를 최소화하면서 사회의 대응 역량을 높여가는 적응 또한 중요하다. 이를 위해서는 기후변화 적응을 위한 사회적 공론화와 합의과정, 의사결정 구조에 대한 정책적 관심과 연구가 중요하다(견고한 동의).

기후변화 대응에 있어 결정해야 할 문제들이 산적해 있으며, 이러한 문제들에 대한 사회 제 집단들의 이해는 다를 수밖에 없기 때문에 문제제기와 해결과정에서 상당한 사회적 갈등과 대립이 야기될 가능성이 높다(윤순진, 2009). 그리고 정부가 환경 속에서 발생하는 주요한 사회문제들을 탐색하고 해결하는데 유일한 중요 행위자가 아니기 때문에(배재현, 2010) 거버넌스 접근과 참여가 강조된다. 거버넌스가 협력과 참여를 통하여 새로운 사회문제해결을 위한 조정 기제로써 작동하기 위해서는(배재현, 2010) 중앙정부, 지자체, 시민 등 수직적, 수평적 파트너십을 통해 정책효과를 이루어내야 한다. 기후변화로 인해 나타나는 요인별로 해당되는 주체들이 다양하게 변하기 때문에 거버넌스 구성에서 충분한 검토와 이해당사자의 충분한 참여와 실질적 역할이 중요하다(한국환경정책·평가연구원, 2009). 또한, 한국행정연구원(2009)은 민간의 참여가 중요시 된다고 해도 정부의 정책추진체계와 조정체계가 안정이 되지 않으면 성공이 불가능하기 때문에, 실효성 있는 정책추진체계와 조정체계를 우선적으로 확립하고, 이를 바탕으로 국민들의 실생활에 직접 영향을 주고 홍보할 수 있는 민간구성원들을 참여시키는 협력적 거버넌스가 만들어져야 비로소 기후변화정책이 성공 토대를 갖출 수 있다고 하였다.

10.4.4 기후변화 적응 경제성 및 우선순위 평가

10.4.4.1 기후변화 적응의 경제성 평가

미래 기후변화 적응대책 수립 및 의사결정을 위해서는 비용과 손실, 편익 산출 등에 대한 경제학적 분석이 중요하지만, 현재는 관련 문헌 분석과 농업 등 일부 분야에 대한 검토에 머무르고 있다(중간정도 동의). World Bank(2010a; 2010b; 2010c; 2010d)는 기후변화 적응의 경제학적 분석 방법론을 마련하고 베트남, 방글라데시 등에 적용하였다.

채여라와 염유나(2010)는 효율적 기후변화 적응대책 수립을 위한 기후변화의 경제학적 분석을 수행하였다. 여기에서는 기존 연구들이 분석한 기후변화의 경제학적 비용 및 농업, 건강 등과 같은 부문별로 기후변화의 경제학적 분석을 위한 지표들을 살펴보고, 기후변화 적응정책에 대한 연구현황을 통하여 적응정책의 발전과정과 미래 연구방향을 제안하였다.

10.4.4.2 적응대책 우선순위 결정

기후변화 적응을 위한 첫 단계는 적응대책의 우선순위를 설정하는 것인데, 설문조사, 취약성분석(CGGIS 등), 지자체 특성 및 유형분석 등을 토대로 사전예방 원칙에 근거한 낮은 유감(low-regret)의 의사결정이 이루어져야 한다(견고한 동의).

기후변화 적응대책의 우선순위 선정은 3단계 평가과정을 거칠 수 있다(채여라와 조현주, 2013). 1단계 평

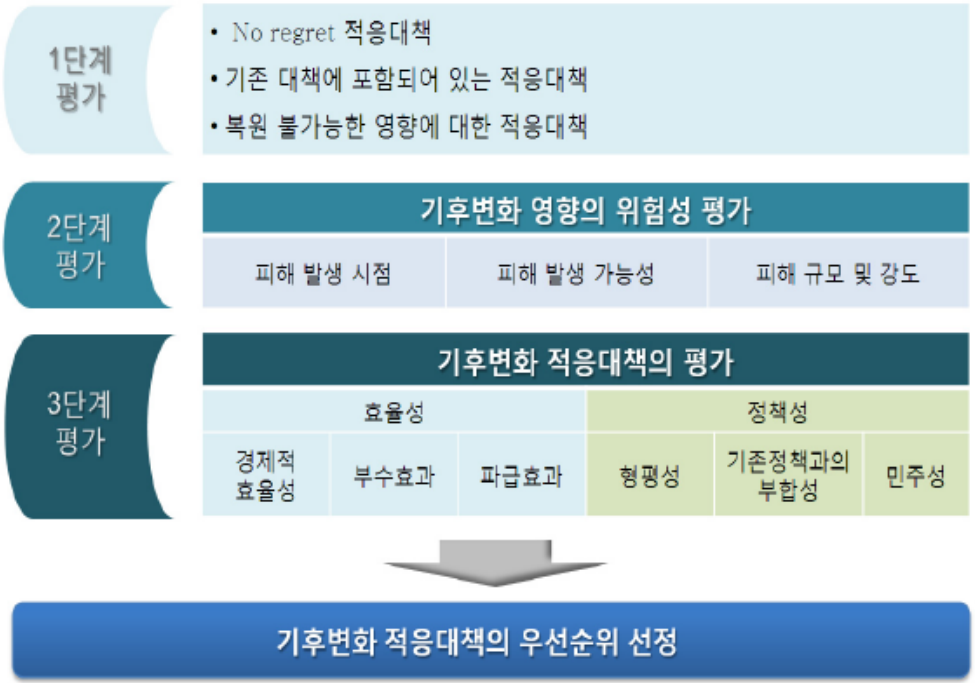


그림 10.4 기후변화 적응대책의 단계별 우선순위 평가방법(채여라와 조현주, 2013)

가에서는 No-regret 적응대책, 기존대책에 포함된 적응대책, 복원 불가능 영향에 대한 적응대책을 검토하고, 2·3단계에서는 기후변화 위험성, 정책성 및 효율성을 검토한다. 기후변화 위험성의 세부지표로는 피해발생시점, 피해발생 가능성, 피해강도가 포함되며, 효율성에는 경제적 효율성, 부수효과, 파급효과가 포함된다. 그리고 정책성은 형평성, 기존 정책과의 부합성, 민주성으로 구성된다. 그러나 실제 지방자치단체의 경우, 기후변화에 따른 위험관리 전략으로서 예방투자전략이 효과적이지만 의사결정단계에 이르게 되면 예방투자정책과 복구투자정책 사이의 우선순위는 복구투자로 기울어지는 경향을 갖게 된다(이충국, 2011).

10.4.5 기후변화 취약계층 영향과 대응

기후변화 취약계층은 비기후적 요인 등에 따른 다차원적 불평등과 적응능력의 한계로 인해 기후변화 위험에 보다 쉽게 노출되고 더 많은 영향을 받을 우려가 있어 체계적인 지원노력이 필요하다(견고한 동의). 정부는 국가기후변화 적응대책 등을 통해 저소득계층 등 사회경제적 취약계층의 적응역량의 강화를 위한 대책을 제시하고 있다(왕광익 등, 2012; 환경부, 2012c).

추장민 등(2010)은 저소득계층의 기후변화 적응역량 강화를 위한 정책방안 연구를 통해 저소득계층의 기후변화 영향, 적응능력 실태를 조사·평가하고 도시와 농어촌 지역의 저소득계층 적응역량 강화를 위한 정책방안을 제시하였다. 농어촌 지역의 사회·경제적 취약계층은 폭염과 같은 극한 기후변화 현상에 매우 취약하며 기후변화로 인한 에너지 사용증가로 소득역진성 악화와 저가(低價) 에너지 사용 배제가 나타날 수 있음을 보여주었다. 도시지역은 주택침수, 파손 등 물리적 피해예방 및 대응정책 강화, 주거복잡도 등 열악한 정주시설 개선 및 녹지시설 확충이 필요하고, 농어촌지역은 혹한에 대비할 수 있는 생물학적 취약가구의 노후한 정주시설 개선, 물적 인프라 확충 등을 위한 정책과 사업 추진 필요한 것으로 조사되었다. 또한 기후변화 적응관련 취약계층 지원현황 조사 및 분석 연구(신지영 등, 2013), 기후변화 취약계층 적응대책 개발 및 시범적용 연구(환경부, 2013a)등이 수행되었다.

10.4.6 기후변화 적응을 위한 공간 계획기법

기후변화 적응을 위한 공간계획적 노력은 시작단계로 볼 수 있는데, 관련 연구에서는 기후변화 적응도시

기후변화 적응도시 모델 개발 김운수 등 김정곤 기후변화 적응형 공간계획방법론 김동현 등

그림 10.5 기후변화 적응형 공간계획을 위한 모델 및 방법론

모델 및 방법론과 그린 인프라에 기초한 적응방안을 제시하고 있다(제한적 동의).

기후변화 적응도시라는 개념 및 관련 사례분석을 토대로 기후변화 적응도시 모델을 제시하였다(김정곤, 2012). 기후변화 적응도시는 기존 도시계획의 부문별, 개별적 수립에서 탈피하여 녹지, 토지이용, 에너지 등 6개 전략을 연계하여 분야별 계획적 실천방안을 마련하고, 감축과 적응이 서로 연계되어 도시의 물질순환체계(urban Metabolism)를 구축해야 한다. 다음으로 기후변화의 외적 조건을 공간계획에서 내재화하여 실질적인 적응으로 나타나게 할 수 있는 공간계획방법을 커뮤니티 수준에서 마련하였다(김동현 등, 2013). 기후변화 적응형 공간계획은 기후변화로 인한 외생적 조건의 변화에 대응하고자 도시와 커뮤니티 미래에 대한 적응 시나리오를 통합적으로 구성하고 회복력 있고 중첩적인 전략을 수립하는, 참여에 기반한 의사소통적 계획과정으로 정의할 수 있다. 기후변화 적응형 공간계획이 전통적 공간계획과 가장 구분되는 것은 공간에서의 회복력을 확보하고 미래에 대한 대응을 하는 데 있다. 즉, 회복력, 적응역량 제고 등 5가지 원칙을 토대로 공간계획방법과 19개 계획시트를 제시하고 있다. 마지막으로 도시계획의 중요한 요소로 활용되지만 기후변화 적응형 도시리뉴얼 전략으로 사용되기 미흡했던 그린인프라 정책을 점검하고 방재효과를 실증적으로 확인하였다(강정은 외, 2011; 2012).

10.4.7 지자체 기후변화 적응능력 평가

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 한다(견고한 동의). 적응대책 설정을 위해 설문조사, 취약성 평가도구(LCCGIS 등), 취약성 분석, DPSIR 체계 등을 활용하고 있다.

한국환경정책·평가연구원(2010)은 지자체 기후변화 적응능력 평가를 위한 지표체계 개발 및 적용을 통해 기후변화 적응의 시급성과 미래 적응전략 수립의 용이함 등을 위해 광역지자체별 기후변화 적응 능력 평가지표를 개발하여 적응정책 우선순위를 제시하였다. 이 연구에서는 IPCC 제5차 평가보고서 WG II의 영향 범주 구분과 DPSIR 체계 분류에 의거, 37개의 기후변화 영향 지표 및 73개의 적응 지표를 산정하고, 자연재해 부문에 대한 16개 광역자치단체의 영향 및 적응능력을 평가하였다.

기초지자체 기후변화 인식조사를 통한 적응대책 수립방안에서는 기초지자체(강원도 영월군)의 기후변화 부문별 인식도 조사결과와 기후변화 취약성 평가결과를 비교 분석하였다(채희문 등, 2011). 이를 통해 물관리와 재해 부문의 취약성이 상대적으로 높음을 제시하고, 적응대책의 경우 시급함에 쫓겨 근시안적 정책을 펼치기보다는 장기적인 계획을 가지고 기후변화 적응 정책을 펼쳐야 함을 강조하였다. 고재경(2011a)은 경

기도 31개 지자체를 대상으로 기후변화 취약성 지수를 분석하여 기후변화의 잠재적 영향과 적응능력을 기준으로 4가지 유형으로 구분하고 유형별 적응방안을 제시하였다. Ⅰ유형은 잠재적 영향이 크고 적응능력이 낮은 유형이므로 적응 촉진을 위한 집중적인 투자와 지원이 필요하다. Ⅱ유형은 잠재적 영향이 작고 적응능력이 낮은 유형으로 기후변화에 대한 관심이 낮아 교육과 홍보, 정보제공 등 사회적 자본을 형성하는 것이 중요하다. Ⅲ유형은 잠재적 유형이 크고 적응능력이 높은 유형이므로 지역의 자연환경적, 사회경제적 여건과 특성을 고려하여 적응정책의 우선순위와 분야를 차별화할 필요가 있다. Ⅳ유형은 잠재적 영향이 낮고 적응능력이 높은 유형으로 기후변화 취약성이 가장 낮은 그룹에 속한다. 기존의 정책기반을 최대한 활용하면서 부문간 통합 및 연계가 가능한 정책을 발굴하는 등 적응 인벤토리 매뉴얼을 작성하고 발전시킬 필요가 있다.

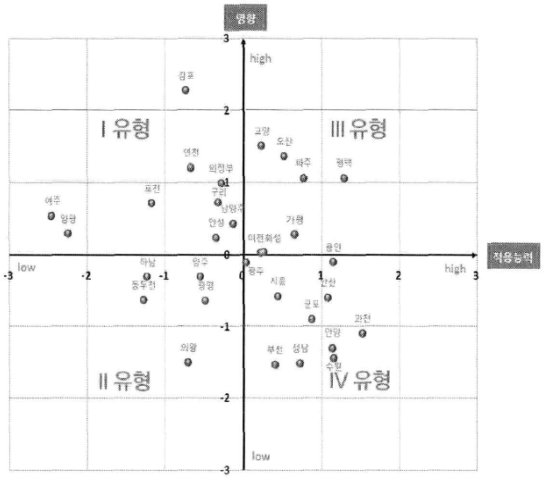


그림 10.6 경기도 지자체 기후변화 취약성 분석 지도(고재경, 2011a)

10.4.8 기후변화 적응인식조사

기후변화 적응대책과 이행은 사회적 가치와 목적, 그리고 위험에 따른 인식에 따라 다르게 적용되기 때문에 기후변화 적응 거버넌스 및 인식제고에 대한 관심이 계속 요구된다(견고한 동의).

기후변화 대책에 대한 국민인식조사(환경부, 2012b)에서는 국민의 80% 이상이 기후변화로 인한 위험이 존재한다고 응답하였는데, 이는 국민들이 기후변화에 대해서 인식하고 있고 기후변화 적응 수요(needs)를 가지고 있음을 보여준다. 기후변화 적응정책을 담당하고 있는 공무원 인식조사(고재경 등, 2011b)에서는 대부분의 지방공무원은 적응정책의 필요성을 인식하고 있지만 적응정책을 기후변화 대응책으로서 느끼고 있을 뿐 이 정책이 왜 지역적 차원에서 필요한 지에 대한 충분한 이해가 부족하다고 지적한다. 프로빗 모형 추정결과, 지방공무원들의 기후변화 적응정책 필요성 인식은 기후변화 심각성 인식 및 경기도 피해의식만이 통계적으로 유의한 변수로 나타났다. 지방 공무원들의 기후변화 인지는 기후변화 인지, 소속기관, 학력, 기후변화 수혜여부, 직급의 순으로 영향을 주는 것으로 나타나 기후변화에 대한 정확한 정보 제공과 관련 교육이 중요함을 시사한다.

10.4.9 감축과 적응 상호관계 분석

감축과 적응 사이 공동편익에 대한 검토가 이론적 수준에 머물러 있어 적응대책 수립과정 등에서 이에 대한 충분한 검토가 필요하다(견고한 동의). 적응과 완화 사이에, 그리고 서로 다른 적응 대상 사이에 공동편익, 상승효과 및 상충(trade-off)이 존재할 수 있다. 에너지 효율성 및 청정에너지 개선, 도시 녹색화, 물 재사용, 농업과 임업 등은 기후변화 적응과 완화 모두에 도움이 된다. IPCC 제5차 평가보고서 WG2에서는 기후변화와 그 영향을 줄이기 위하여 적응과 완화를 결합한 기후회복경로(climate-resilient path)를 제시하고 있다(IPCC, 2014).

기후변화 완화 및 적응정책의 통합은 시너지 효과가 있는 정책을 우선으로 추진하되, 완화와 적응에 모두 부정적이거나 완화와 적응이 서로 상충되는 정책은 사전조정이 바람직하다(경기개발연구원, 2011; 고재경과 김희선, 2013). 따라서 그림 10.7에서는 시너지가 효과가 직접적이고 즉각적인 M1S, A1S의 우선순위가 가장 높다. 여기에는 단열개선 등 녹색건축, 산림 복원, 에너지 효율 개선 투자, 자전거 이용 등 녹색교통수단, 분산형 재생에너지 보급, 물절약 및 이용효율성 제고, 열섬 완화를 위한 그린 인프라, 도시농업, 로컬 푸드, 농업경관 조성, 습지복원 등이 해당된다.

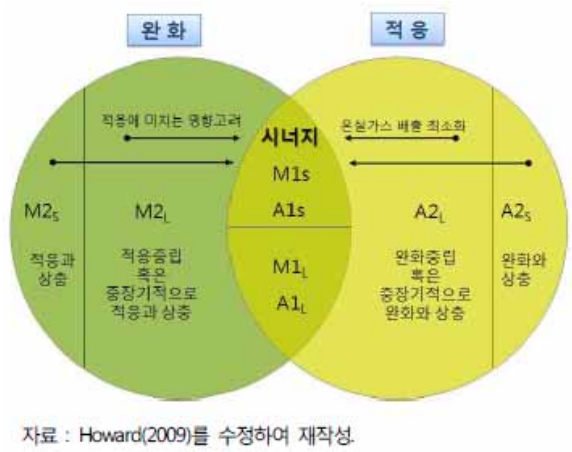


그림 10.7 완화와 적응 상호관계를 고려한 정책유형과 우선순위(고재경과 김희선, 2013)

10.4.10 기후변화 적응전략 및 기법의 발전 방향

2010년 녹색성장기본법 제정과 국가 기후변화 적응대책국가 기후변화 적응대책

수립, 중앙정부 및 광역지자체 적응대책 세부시행계획이 마련되면서 적응전략에 대한 연구가 본격적으로 시작되었다고 볼 수 있다. 그럼에도 불구하고 적응전략에 관련한 충분한 연구가 수행되지 않아 다양한 분석결과가 체계적으로 축적되어져 있지 못한 실정이므로 향후에도 지속적인 연구와 정책적 관심이 요구된다(견고한 동의). 특히, 국가 및 지자체 적응정책 수립을 위한 적응전략 발전을 위해서는 다음과 같은 다양한 연구들을 충분히 검토할 필요가 있겠다.

- 기후변화에 따른 사회·경제적 영향과 기후변화 적응의 경제학적 분석
- 국가 및 지자체 이행평가체계 구축 및 기후변화 적응 지표와 모니터링
- 기후변화 리스크 평가지표 및 평가체계 마련
- 기후변화 리스크에 기초한 관리지역(hot spot) 및 우선순위 도출 기법 개발
- 기후변화 리스크 저감을 위한 노출 및 취약성 관리계획 마련
- 기후변화 취약계층 및 취약시설, 취약지역 등에 대한 적응형 공간계획 기법 개발
- 기후변화 적응 인식제고와 적응행동 강화 매커니즘 분석, 적응 거버넌스 구축
- 감축과 적응의 연계 수단과 기후회복경로 구축

10.5 참고문헌

강정은, 이명진, 구유성, 조광우, 이재욱, 2011: 기후변화 적응형 도시 리뉴얼 전략 수립: 방재효과 및 적용방안, 한국환경정책・평가연구원.

강정은, 배현주, 최희선, 이명진, 강윤원, 엄정희, 박재철, 2012: 기후변화 적응형 도시구현을 위한 그린인프라 전략 수립, 한국환경정책・평가연구원.

경기개발연구원, 2011: 기후변화 완화와 적응정책 통합방안 연구, 경기개발연구원.

고양시, 2014: 고양시 기후변화 적응대책 세부시행계획(2014~2018).

고재경, 2011a: 지방자치단체 기후변화 취약성 유형 및 적응방안 연구 : 경기도 사례를 중심으로, *한국사회와 행정연구*, 22(2) : 93-118.

고재경, 2011b: 지방공무원들은 기후변화 적응정책의 필요성으로 인식하고 있는가, 도시행정학보, 24(3) : 51-72.

고재경, 김지현, 2011b: 지방공무원들은 기후변화 적응정책의 필요성으로 인식하고 있는가, 도시행정학보, 24(3) : 51-72.

고재경, 김희선, 2013: 기후변화 완화와 적응 통합에 관한 시론적 연구, *환경정책*, 21(1) 2013. 3: 29-59.

고창군, 2013: 고창군 기후변화 적응대책 세부시행계획(2014~2018).

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.

괴산군, 2014: 괴산군 기후변화 적응대책 세부시행계획(2014~2018).

국립환경과학원, 2012: 지자체 기후변화 적응세부시행계획 수립 지원을 위한 기후변화 부문별 취약성 지도.

국립환경과학원, 2013: 기초지자체 적응 세부시행계획 수립 시범사업 지원을 위한 기후변화 취약성 지도.

김동현, 이수재, 이명진, 서혜정, 2013: 기후변화 적응형 공간계획방법의 개발과 모의적용 연구(Ⅰ), 한국환경정책・평가연구원.

김정곤, 2012: 기후변화 적응도시 모델개발을 위한 계획기법 및 사례 분석, *한국생태환경건축학회 논문집*, 12(4): 13-19.

김정식, 2009: 기후변화 적응 필요성 및 국가적응정책, *한국방재학회지*, 9(4), 25-33.

김정해, 조성한, 윤경준, 이혜영, 김도균, 2009: 기후변화대응을 위한 정부대응체계 구축 : 녹색거버넌스 구축을 중심으로, 한국행정연구원.

단양군, 2014: 단양군 기후변화 적응대책 세부시행계획(2014~2018).

배재현, 2010: 지방정부의 네트워크 거버넌스에 관한 연구 : 부산시 하천환경개선 사업을 중심으로, *행정논총*, 48(3), 195-221.

신지영, 임영신, 홍남희, 김나영, 배채영, 2013: 기후변화 적응관련 취약계층 지원현황 및 분석 연구, 한국한국환경정책・평가연구원.

아산시, 2014: 아산시 기후변화 적응대책 세부시행계획(2014~2018).

옥천군, 2013: 옥천군 기후변화 적응대책 세부시행계획(2014~2018) : 총괄편.

옥천군, 2014: 옥천군 기후변화 적응대책 세부시행계획(2014~2018).

왕광익, 정윤희, 이진희, 박근현, 2012: 기후변화 취약계층을 위한 녹색도시정책 연구, 국토연구원.

윤순진, 2009: 기후변화 대응을 둘러싼 사회 갈등 예방과 완화를 위한 거버넌스 모색, *국제사회학회*, 4(2), 125-160.

음성군, 2014: 음성군 기후변화 적응대책 세부시행계획(2014~2018).

이수재, 박창석, 강정은, 명수정, 김도현, 김유정, 윤기란, 임미영, 서지예, 이동근, 박지영, 2012: 국가 리스크 관리를 위한 기후변화적응역량 구축・평가, 한국환경정책・평가연구원.

이충국, 2011: 지방자치단체 기후변화 적응정책의 의사결정 과정과 함의, *행정학보*, 45(1), 257-274.

채여라・염유나, 2010: 효율적 기후변화 적응대책 수립을 위한 기후변화의 경제학적 분석, *대한환경공학회지* 32(9), 818-829.

채여라・조현주, 2013: 기후변화 적응대책 우선순위 선정을 위한 방법론 분석, *환경정책연구* 12(4), 23-44.

채희문, 이상신, 이현주, 2011: 기초지자체 기후변화 인식조사를 통한 적응대책 수립방안에 관한 연구, *한국방재학회논문집*. 11(6), 131-138.

청원군, 2014: 청원군 기후변화 적응대책 세부시행계획(2014~2018).

청주시, 2014: 청원군 기후변화 적응대책 세부시행계획(2014~2018).

청주시, 2014: 청주시・청원군 기후변화 적응대책 세부시행계획(2014~2018).

태안군, 2014: 태안군 기후변화 적응대책 세부시행계획(2014~2018).

한국행정연구원, 2009: 기후변화대응을 위한 정부대응체계 구축 : 녹색거버넌스 구축을 중심으로, 한국행정연구원.

한국환경정책・평가연구원, 2009: 기후변화 대응과 녹색성장을 위한 새로운 환경거버넌스 구축방향, (사)시민환경연구소

한국환경정책・평가연구원, 2010: 지자체 기후변화 적응능력 평가를 위한 지표체계 개발 및 시범적용, 한국환경정책・평가연구원.

한국환경정책・평가연구원., 2013: 국가 리스크 최소화를 위한 부문별 리스크 요인 파악 및 관리방안 분석, 한국환경정책・평가연구원.

한국환경정책・평가연구원, 2013: 국가별 기후변화 적응전략에 따른 우리나라의 리스크 대응방안 연구, 한국환경정책・평가연구원.

화천군, 2014: 화천군 기후변화 적응대책 세부시행계획

(2014~2018).
환경부, 2008: 국가기후변화 적응 마스터 플랜 수립연구, 한국환경정책·평가연구원, 125-143.
환경부, 2010a: 국가 기후변화 적응 기본계획(2011~2015) 수립 연구.
환경부, 2010b: 기후변화 적응 기반구축 및 교육·홍보.
환경부, 2010c: 기후변화 적응 정보전달 체계 구축.
환경부, 2010d: 기후변화 적응정책 평가 및 통합모형 개발.
환경부, 2010e: 서울시 기후변화 영향평가 및 적응대책 세부시행계획 수립: 건강 및 재난.
환경부, 2010f: 인천시 기후변화 영향평가 및 적응대책 세부시행계획 수립: 해양생태계 및 해양재난.
환경부, 2010g: 지자체 기후변화 적응대책 세부시행계획 수립 매뉴얼 개발(Ⅰ).
환경부, 2011a: 기후변화 적응 정보 확산.
환경부, 2011b: 기후변화 적응정책 평가 및 인벤토리 구축.
환경부, 2011c: 우리나라 기후변화의 경제학적 분석(II).
환경부, 2011d: 기후변화 적응정책 평가 및 인벤토리 구축.
환경부, 2012a: 광역지자체 적응 세부시행계획 수립 지원.
환경부, 2012b: 기후변화 적응 정보 확산.
환경부, 2012c: 기후변화적응정책 평가 및 인벤토리 구축: 기후변화 취약지역 및 취약계층 실태조사.
환경부, 2012d: 지자체 기후변화 적응대책 세부시행계획 수립 매뉴얼 개발(II).
환경부, 2013a: 기후변화 취약계층 적응대책 개발 및 시범적용 연구.
환경부, 2013b: 산업계 및 공기업 기후변화 적응을 위한 리스크 관리 도구개발 및 시범적용.
환경부, 2013c: 적응대책 수립체계 및 방법론 기반 구축 연구.
환경부, 2013d: 지자체 기후변화 적응 세부시행계획 수립지원.
환경부, 2013e: 지자체 취약성 평가지원.
환경부, 2013f: 국가기후변화적응대책 이행점검 및 환류시스템 제도화 지원연구.
환경부, 2014a: 기초지자체 기후변화 적응대책 세부시행계획 수립 가이드라인.
환경부, 2014b: 시범 기초지자체 적응대책 수립 운영 및 지원.
환경부, 2014c: 지자체 기후변화 적응대책 모니터링.
한국환경정책·평가연구원, 2010: 저소득계층의 기후변화 적응역량 강화를 위한 정책방안 연구(Ⅰ), 한국환경정책·평가연구원.
한국환경정책·평가연구원, 2011: 기후변화 적응대책 우선순위 평가 방법론 분석, 한국환경정책·평가연구원.
한국환경정책·평가연구원, 2011: 저소득계층의 기후변화 적응역량 강화를 위한 정책방안 연구(II), 한국환경정책·평가연구원.
한국환경정책·평가연구원, 2012: 부문별 기후변화 적응대책 우선순위 평가 연구, 한국환경정책·평가연구원.
한국환경정책·평가연구원, 2013a: 국가와 지자체의 기후변화 적응대책 실효성 제고를 위한 연계강화 방안, 한국환경정책·평가연구원.
한국환경정책·평가연구원, 2013b: 기후변화 적응정책 이행의 효과성 제고방안, 한국환경정책·평가연구원.
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.World Bank, 2010a: Economics of Adaptation to Climate Change : Synthesis Report. WorldBank, Washington D.C.
World Bank, 2010b: Mai nreport, Vol.1 of Bangladech - Economics of Adaptationto Climate Change. World Bank, Washington, D.C.
World Bank, 2010c: Samoa - Economics of Adaptation to Climate Change. WorldBank, Washington,D.C.
World Bank, 2010d: Vietnam - Economics of Adaptation to Climate Change. WorldBank, Washington,D.C.

찾아보기

감귤/16
감자/121
강수량/6
강우강도/7
거버넌스/23
건강영향/9
건강영향 감시체계/241
겉보리/134
경년변화/173
경제성 분석/15
경향성 분석/30
고산/8
고온건강경보시스템/241
곤충/9
공간계획/3
공동편익/298
광역해양생태계/170
국가 기후변화 적응대책/20
기후변화건강포럼/241
기후생산력지수/121
기후체제변환/173
꽃가루/9
나비/70
노령인구/255
농촌/15
대기질/220
뎅기열/220
도시/15
도시계획/19
도시화/6
동물생태계/79
등숙기/8
렙토스피라증/79
리스크 평가/20
마늘/121
말라리아/19
매개체질환 종합감시체계(Vector-Net)/243
무상기간/121
무화과/16
바이오매스/16
배출시나리오/10
백두산/74
벼/8
보리/16
복숭아/121
복지/15
부영양화/8
북한/52
불임률/136
불확실성 저감/285
불확실성 평가/3
비브리오패혈증/79
사과/16
사회기반시설/19
산림병해충/8
산림재해/8
산불/8
산사태/8
상세화기법/14
상승효과/298
생물계절/68
생산량/8
생육기간/8
생활주기/71
수산자원/17
수온/8
수자원 전망/36
식물계절/15

식물기간/8
식물생태계/78
식생/7
식중독/84
신재생에너지/154
신증후군출혈열/79
아고산/8
알레르기/19
양식/129
어류/17
어장/167
연안/6
연안침식/193
열사병/19
영양생장기간/136
영향 및 취약성/1
유효적산온도/131
이행평가/293
임상도/106
작물기간/8
작물생육모델/142
작부체계/17
장염/230
재배적지/16
재해/1
저소득계층/20
저탄소 녹색성장/20
적응 경제성 평가/20
적응전략/16
조류/8
증발산량/6
지자체 기후변화 적응대책/20
지표수/7
지하수/7
집중호우/7
쯔쯔가무시증/72
참다래/16
초과사망자/9
출수기/16
취약계층/20
취약생태계/8
취약성/1
친환경농업/20
콩/8
탄소저장량/87
탄소흡수량/92
토지이용/3
토지이용계획/112
포도/125
폭염/9
풍수기/39
한발/8
해면수온/168
해양 빈산소화/303
해양 저산소화/172
해양산성화/166
해양생태계/13
해양의 체제변환/173
해충화/100
홍수피해/33
휴면/78

한국 기후변화 평가 보고서 2014

- 기후변화 영향 및 적응 -

총 괄 : 홍지형

편 집 : 김상균, 김대곤, 홍성철, 이재범, 문경정, 차준석, 홍준석, 마영일, 김승연 (국립환경과학원), 정휘철(한국환경정책·평가연구원), 최영은(건국대학교)

저 자 : 이동근(서울대학교)

발행일 : 2015년 1월

(404-708) 인천광역시 서구 환경로 42번지
국립환경과학원 기후대기 연구부 지구환경연구과
- Tel: 032-560-7300
- Fax: 032-568-2042
- Web: http://www.nier.go.kr

ISBN 978-89-6558-262-5 93530
발간등록번호 11-1480523-002031-01
NIER 번호 NIER-GP2014-159

한국 기후변화 평가보고서 2014

환경부

국립환경과학원
National Institute of Environmental Research

ISBN 978-89-6558-262-5 93530