

ISBN 978-89-954715-3-1

정책결정자를 위한 요약서

한국 기후변화 평가보고서 2014

- 기후변화 과학적 근거 -



Korean Climate Change Assessment Report 2014



기상청 Korea
Meteorological
Administration

ISBN 978-89-954715-3-1

한국 기후변화 평가보고서 2014

- 기후변화 과학적 근거 -

정책결정자를 위한 요약서



한국 기후변화 평가보고서 2014

- 기후변화 과학적 근거 -

정책결정자를 위한 요약서

편집

유희동

(기상청 기후과학국장)

김 준

(연세대학교)

안중배

(부산대학교)

이동근

(서울대학교)

정휘철

(한국환경정책·평가연구원)

박훈, 정해정, 김경하, 송정미

(기상청 기후과학국)

최영은

(건국대학교)

ISBN 978-89-954715-3-1

기 상 청

서 문

IPCC(Intergovernmental Panel on Climate Change) 제1실무그룹(Working Group I, WG I)은 5차 평가보고서(AR5)에서 기후 시스템의 관측값, 고기후 기록, 기후과정의 이론연구 및 기후모델을 이용한 모의 등을 총망라하는 다양한 과학적 분석결과를 근거로 기후변화에 대한 새로운 증거들을 조사하였습니다. 이 보고서의 Key Message는 “인간활동으로 인해 기후가 변하고 있으며”, “지구 기후 시스템의 온난화는 명백하다”는 것이었습니다.

본 보고서는 IPCC 5차 평가보고서를 바탕으로 한반도 및 동아시아 지역을 대상으로 한반도 기후변화의 과거를 이해하고 현재를 분석하여 미래 기후변화를 전망하고자 하였습니다. 이에 ‘한국 기후변화 평가보고서 2010’(국립환경과학원, 2011) 발간 이후 2012년부터 환경부 국립환경과학원과 후속보고서 발간을 위한 작업을 시작하여 본 보고서를 공동 발간하게 되었습니다.

본 보고서는 IPCC 제1실무그룹(WG I)에 해당하는 ‘기후변화의 과학적 근거’를 참조하여 2010년부터 최근까지 진행된 연구결과를 다루었으며, 서론을 포함하여 기후변화 관측, 고기후, 탄소순환과 생지화학순환, 구름과 에어로졸, 인위적 및 자연적 복사강제력, 기후모델 평가, 기후변화의 탐지와 원인규명, 기후변화 전망 등 총 10장으로 구성하였습니다. 또한, 각 장에서는 분야별 전문가 의견 수렴을 통해 연구결과의 신뢰도를 3단계(견고한 동의, 중간적 동의, 제한적 동의)로 평가하여 제시하였습니다.

본 보고서는 한반도를 대상으로 한 1,000여 편의 국내·외 논문 및 보고서의 연구결과를 이용하였고 각 분야별 전문가 70여명이 참여하여 집필하였습니다. 보고서가 발간되기까지 수 많은 자료를 수집하고 정리하신 모든 저자분과 기상청 관련부서에 아낌없는 감사를 드립니다.

본 보고서가 담고 있는 한반도 기후변화 관측 및 예측에 대한 연구결과와 기후변화의 불확실성을 포함한 과학적 근거를 통해 국가 기후변화 정책 수립 등에 적극 활용되기를 바랍니다.

2014. 12.
고윤화 기상청장

머리말

IPCC에서는 지난 1990년 이후 총 5회에 걸쳐 기후변화 평가보고서를 출간하였습니다. 제5차 평가보고서는 2013년도 제1실무그룹(WG I)의 ‘과학적 근거(The Physical Science Basis)’를 시작으로 2014년도에는 제2실무그룹(WG II)의 ‘영향, 적응 및 취약성(Impacts, Adaptation and Vulnerability)’, 제3실무그룹(WG III) ‘기후변화의 완화(Mitigation of Climate Change)’와 ‘종합보고서(Synthesis Report)’가 발간되었습니다.

기후변화는 인간의 활동으로 인해 발생하는 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 ‘한국 기후변화 평가보고서 2010’을 2011년에 발간한 바 있으며, 2010년 이후의 연구결과들을 기반으로 한 ‘한국 기후변화 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 실무그룹을 구성하고 학계와 정부, 연구기관의 전문가 중 집필진을 구성하였습니다. 또한 한반도를 대상으로 발표된 국내·외 논문 및 보고서의 연구결과를 분석·평가하여 한국 기후변화 연구동향과 전망을 집대성하였습니다.

특히 기존 보고서와 달리 해양과 빙권, 고기후 부분을 단독 장으로 구성하였고, 미래 예측의 유용한 도구인 ‘기후모델 평가’를 추가하였습니다. 또한 정책결정자를 위한 요약 보고서를 추가로 작성하였으며, 종합적인 전문가 평가를 통하여 연구결과의 불확실성에 대한 판단을 포함한 연구결과의 신뢰도를 3단계로 제시하였습니다.

본 보고서에는 많은 연구자료의 축적으로 견고한 과학적 근거가 제시된 부분도 있으나 연구 자료의 부족으로 제한적인 동의에 그친 분야도 있습니다. 이 보고서를 통해 기후변화 현상을 이해하고 아울러 미진한 연구 분야가 활성화되길 바랍니다. 또한 정책결정자들에게는 미래 기후변화에 대비한 정책 수립에 과학적 근거로 활용되길 기대합니다.

목 차

서론	i
머리말	ii
1. 서론	1
1.1. 배경 및 절차	1
1.2. 「한국 기후변화 평가보고서 2010」 Part I 요약	1
1.3. IPCC WGI 5차 평가보고서의 주요 결론	2
2. 관측: 대기과 지표	4
2.1. 대기조성 및 복사수지의 변화	4
2.2. 기온의 변화	5
2.3. 물순환의 변화	5
2.4. 극한현상의 변화	6
2.5. 대기대순환과 변동 패턴의 변화	7
3. 관측: 해양과 빙권	8
3.1. 해양	8
3.2. 빙권	9
4. 고기후 기록에 의한 정보	11
4.1. 식물(화분)	11
4.2. 동물	11
4.3. 연륜	12
4.4. 고문헌	12
5. 탄소순환과 기타 생지화학순환	13
5.1. 탄소순환	13
5.2. 기타 생지화학순환	14
6. 구름과 에어로졸	16
6.1. 구름	16
6.2. 에어로졸	16
6.3. 구름과 에어로졸의 상호작용	17
6.4. 복사강제력과 유효복사강제력	18
6.5. 강수변화의 과정	18

7. 인위적 및 자연적 복사강제력	19
7.1. 대기화학	19
7.2. 인위적 복사강제력	20
7.3. 자연적 복사강제력	20
7.4. 배출량 매트릭스	21
8. 기후모델 평가	22
8.1. 기후모델과 특성	22
8.2. 기후모델의 성능평가	22
9. 기후변화의 탐지와 원인규명	25
9.1. 방법론의 평가	25
9.2. 기온과 강수량	25
9.3. 몬순 시스템	26
9.4. 열대성 저기압	26
9.5. 엘니뇨와 한반도 기후	27
9.6. 북극진동	27
9.7. 계절안 변동성	28
10. 단기 및 장기 기후변화 전망	29
10.1. 대기와 지표	29
10.2. 해양과 빙권	30

1. 서론

1.1. 배경 및 절차

본 보고서인 「한국 기후변화 평가보고서 2014-과학적 근거」는 기후 시스템의 관측, 기후과정의 이론연구, 기후모델을 이용한 모의 및 전망, 탐지와 원인규명 등 한반도 및 동아시아 지역에 대한 기후변화 관측 및 예측에 대한 연구결과와 새로운 증거를 과학적 관점에서 평가하였다. 「한국 기후변화 평가보고서 2014」는 「한국 기후변화 평가보고서 2010」의 part I과 IPCC 제 5차 평가보고서를 바탕으로 작성하였으며, 2010~2014년에 발간된 한반도 기후변화 관측 및 예측분야의 1,000여 편의 논문과 보고서의 결과가 심도있게 분석되었다.

이 정책결정자를 위한 요약보고서(Summary for Policy Makers, SPM)는 본 보고서(The underlying report)의 구성과 내용을 근거로 작성하였다. 종합적인 연구결과의 평가를 위해 불확실성에 대한 판단을 포함한 연구결과의 신뢰도를 3단계로 제시하였다(표 1.1).

표 1.1. 연구결과 신뢰도 평가(동의수준)의 구분

- | |
|--|
| <p>① 견고한 동의: 관련 분야 논문의 수가 어느 정도 되고 서로 배치되는 내용이 없이 일치되는 경우 혹은 전문가들의 의견이 일치하는 경우</p> <p>② 중간적 동의: 논문의 수가 어느 정도 되지만 소수의견 등으로 증거를 판단하기 어렵거나 전문가 사이에서도 소수이지만 다른 의견이 있는 경우</p> <p>③ 제한적 동의: 논문의 수가 아주 적거나 논문의 내용 혹은 전문가 사이에서도 의견이 서로 달라서 신뢰도를 판단하기가 어려운 경우</p> |
|--|

SPM 주요 내용에 대한 근거는 본 보고서의 각 장별 절에 수록되어 있다. 본 보고서 참고자료는 종괄호를 사용하여 표시하였다.

1.2. 「한국 기후변화 평가보고서 2010」

Part I 요약

2011년에 발간된 「한국 기후변화 평가보고서 2010」에 따르면 전지구적으로 나타나는 기온 상승 현상이 한반도 관측 자료에도 나타났다. 수도권 일대, 원주, 청주, 대전, 대구 등지에서 기온 상승폭이 매우 크게 나타났으며, 이 같은 한반도 내의 지역적 기온 상승률의 차이는 일부 인구 증가율이나 도시 성장률 등의 영향을 받는 것으로 밝혀졌다. 한반도 주변 해역의 해수면온도는 지구 평균 해수면온도에 비해 크게 상승하고 있다. 한반도의 여름철 강수량은 전 지역에 걸쳐 크게 증가하였고, 특히 중서부 지역에서 8월 강수량의 증가가 뚜렷하였다.

강수일수는 점차 감소하는 추세이지만 강수량은 증가하고 있어서, 호우일수(일강수량 80mm 이상)는 종전 20일에 비해 28일로 크게 증가하였다. 가뭄의 경우 이전에 비해 1960년대 이후에 여름과 봄 가뭄의 빈도가 모두 감소하였고, 특히 봄 가뭄과 연관된 대기 순환 패턴의 중심이 1980년대 중반을 기점으로 대륙에서 해양으로 이동하였다. 이 또한 해수면온도 상승으로 인한 기후 시스템 변화와 관련되어 있을 가능성이 제시되었다.

동아시아 겨울 몬순의 변화는 시베리아 고기압의 변화나 한파의 변화로 나타나는데 최근 시베리아 고기압의 평균 강도는 약화되었고, 동아시아 겨울철 평균 온도 상승과 맞물려 극한기온의 발생 빈도도 감소하였다. 북반구 대표적인 기후 변동의 하나인 북극진동(Arctic Oscillation, AO)의 봄철 변동은 동아시아 여름 몬순 강수와 음의 상관관계를 보이고, 12월 북대서양진동(North Atlantic Oscillation, NAO) 또한 한국 및 남중국의 여름 강수량과는 음의 상관관계를 나타냈다. 1970년대 후반 이후 AO와 북중국 및 한국 지역의 상관관계는 더욱 증가하고, 남중국지역 상관관계는 감소하였다.

기후 시스템과 생지물리/생지화학 과정의 현실적인 결합을 통해 기후 시스템 내의 상호작용을 이해하고 나아가 향후의 변화과정을 예측하고자 많은 연구들이 진행되었다. 하지만 국내에서는 생지화학순환과 관련하여 직접 관측한 자료나 위성 자료를 이용한 연구는 부족하다.

한반도와 그 주변의 기후 관련 구름과 에어로졸 연구는 상대적으로 매우 적었다. 2001년에 수행된 ACE(Aerosol Characterization Experiment)-Asia 가 동북아에서의 본격적인 에어로졸, 구름 연구의 시작이라고 할 수 있다. 2009년까지 구름과 에어로졸 분야에서 한반도를 포함하는 동북아 지역의 구름과 에어로졸에 대해 다룬 주요 연구는 대체로 에어로졸의 광학적, 물리적 성질 관측 연구가 활발히 진행된 반면 구름 관측 연구는 미흡했으며 수치모델을 이용한 에어로졸의 직접적, 간접적 효과 연구나 구름-강수 상호작용 연구도 수행된 바 있으나 아주 활발하지는 못했다.

1990년대 이후 우리나라에서는 기상현상뿐만 아니라 관측 분야에 따라 온실가스(6종), 반응가스(지표오존, 일산화탄소 등), 에어로졸(산란계수, 흡수계수 등), 대기복사(태양복사, 지구복사 등), 강수화학(산성도, 전기전도도, 이온량), 자외선 등 각 분야별 세부 항목으로 분류하고 관측을 실시하여 기후변화를 감시하였다. 하지만 관측기간이 짧다 보니 장기간의 기후변화에 대해 논하기에는 어려움이 있었다.

한반도 지역 대기 조성 성분의 경우, 안면도에서 관측된 이산화탄소 농도의 증가율은 지구 평균 증가율보다 높았으며, 그 변동 폭 또한 크게 나타났다. 반면 메탄 농도는 전지구 평균보다 다소 낮은 것으로 관측되었다. 한편 한반도 평균 지표 기온 상승률은 전지구 평균보다 높게 나타났다. 이는 온실가스의 증가에 도시화 효과가 더해진 결과이다. 계절적으로는 겨울철의 상승이 뚜렷했고, 여름철은 거의 변화가 없었다.

지난 50년 동안 한반도와 양쯔강을 포함한 중국 중부지역의 강수량은 증가하였고, 대만 및 일본 남서부, 중국 북부 황하지역, 산둥반도와 그 북쪽 연안의 강수량은 감소하였다. 한반도의 경우 1990년대 이후 6~7월 장마 기간 동안의 강수량은 감소하고, 대체로 북서태평양 고기압권에 놓이게 되는 8월에 강수량이 증가하는 추세이며, 9월에 나타나는 가을장마와 태풍에 의한 강수량은 감소경향을 보였다.

열대 지방의 계절내 변동 모드인 매든-줄리안 진동은 해수면온도의 상승으로 인하여 변동폭이 증가하는 것으로 보고되었다. 최근에 발생빈도가 증가하고 있는 엘니뇨의 다른 형태인 중태평양 엘니뇨(Central Pacific El Niño)는 미래에 더욱 증

가할 것으로 전망되고 있는데, 이러한 엘니뇨는 기존의 엘니뇨와는 다른 형태로 한반도 기후에 영향을 주었다.

최근 수십 년 동안 과거와 비교하여 한반도의 거의 모든 지역에서 극한저온의 빈도수는 현저히 감소하였고, 극한고온의 빈도수는 증가하였다. 더불어 서리일수도 크게 감소하였다. 강수의 변화와 관련하여 한반도에서는 집중호우 현상이 증가하는 것으로 보고되었다. 한편 중국 북부의 경우 가뭄 일수의 증가가 뚜렷하게 나타나 중국의 사막화가 가속되고 있음을 입증하였다. 한반도의 경우도 특히 남부지방의 가뭄일수가 증가하는 추세로 나타났다. 한편 온난화는 한반도에 상륙하는 태풍의 강도를 점차 강하게 유지하는 원인으로 작용하였고, 또한 이는 집중호우의 증가를 유도하였다.

전지구기후모델에서 생산한 기후 정보로부터 상세하고 지역적인 기후 특성을 추출하기 위한 규모축소(downscaling) 방안에 대한 연구가 활발하게 이루어졌다. 전지구 규모의 광역기후 자료로부터 지역 기후 자료를 추출하는 규모축소 기법을 크게 3가지로 분류하였다. 첫째는 직접 내삽법으로서 전지구기후모델 또는 분석 자료의 광역기후를 특정 지역의 기후 자료로 내·외삽하여 직접 해석하는 것이며, 둘째는 광역기후 자료에서 상대적으로 정확하게 예측한 변수를 이용하여 통계적인 방법으로 지역 기후의 상세한 특징을 추정하는 통계적 규모축소 기법이고, 셋째는 역학적 방법으로써 기후를 결정하는 역학적·물리적 과정을 모두 반영한 지역기후모델을 사용하는 방법이다.

1.3. IPCC WG I 5차 평가보고서의 주요 결론

2013년 발간된 IPCC 5차 평가보고서에 따르면 기후 시스템의 온난화는 명백하며, 1950년 이후 관측된 많은 변화들은 지난 수십 년에서 수천 년간 전례가 없었다. 대기와 해양은 따뜻해지고, 눈과 빙하의 양은 줄어들고 해수면은 상승하였으며 온실가스의 농도는 증가하였다. 1850년 이래로 최근 30년 동안 10년 평균 전지구 지표온도는 과거의 어떤 10년 평균보다 온난했다. 북반구의 경우 1983~2012년은 지난 1,400년 중에서도 가장 온난한 30년일 가능성이 높다.

대기와 지표면에서 관측되는 주요 기후 변수들

에 대한 광범위한 분석 결과들은 전세계적으로 해수면온도를 포함한 지표면기온이 상승하고 강수량이 증가하는 형태가 공통적으로 나타나며, 집중호우, 태풍, 폭풍 등 극한현상의 빈도와 강도가 증가하고 있는 것으로 나타났다.

해양 온난화는 기후 시스템 내에 저장된 에너지 증가가 중요한 요인으로 1971~2010년에 축적된 에너지의 90% 이상을 차지한다. 해양 상층부(0~700m)가 1971~2010년에 온난해진 것은 사실상 확실하며, 1870년대와 1971년 사이에도 온난화되었을 가능성이 높다. 지난 20년간 그린란드와 남극 빙상의 질량이 감소하였고, 전지구적으로 빙하는 지속적으로 감소되었으며, 북극해 해빙과 북반구의 봄철 적설면적도 지속적으로 감소하고 있다. 19세기 중반 이후 해수면 상승률은 과거 2000년의 평균보다 컸다. 전지구 평균해수면은 1901~2010년에 0.19[0.17~0.21]m 상승했다.

대기 중 이산화탄소, 메탄, 아산화질소의 농도는 최소한 지난 800,000년간 전례없는 수준으로 높게 나타났다. 이산화탄소 농도는 산업화 이후 일차적으로는 화석연료 사용으로 인한 배출과 2차적으로는 순토지 이용변화로 인한 배출로 40% 정도 증가하였다. 해양은 인위적으로 배출된 이산화탄소의 30%를 흡수했으며 이는 해양산성화의 주요 원인이 되었다.

1750년 이후 대기 중 이산화탄소 농도의 증가가 총 복사강제력 변화에 가장 크게 기여하였다. 에어로졸 효과에는 여러 가지 불확실성이 존재하지만 에어로졸이 온실가스의 효과를 감쇠하는 것은 확실하다. 1750년을 기준으로 한 2100년에 대한 인위적인 총 복사강제력(Radiative Forcing, RF)은 2.29[1.13~3.33] Wm^{-2} 이며, 1970년 이후에는 그 이전보다 더 빠르게 증가했다. 이것은 대부분 온실가스 농도의 지속적인 증가와 약한 순냉각 효과(음의 RF)를 나타내는 에어로졸로 인한 강제력의 추정치가 개선되어 발생한다. 동일 기준에 대한 잘 혼합된 온실가스(CO_2 , CH_4 , N_2O , 할로카본)의 배출로부터 산출한 RF는 3.00[2.22~3.78] Wm^{-2} 이다. CO_2 배출량은 단독으로 1.68[1.33~2.03] Wm^{-2} 의 RF를, CH_4 배출량은 단독으로 0.97[0.74~1.20] Wm^{-2} 의 RF를, 성층권 오존을 파괴하는 할로카본의 배출은 0.18[0.01~0.35] Wm^{-2} 정도로 순 양의 RF로 작용하여 단기적으로 체류하는(short-lived) 가스의 배출이

인위적 총 RF에 영향을 미쳤다.

기후 시스템에 대한 인류의 영향은 명백하다. 이 사실은 대기 중 온실가스의 농도 증가, 양의 복사강제력, 관측된 온난화, 기후 시스템의 이해를 고려했을 때 분명하다. 기후모델은 4차 평가보고서 이후 개선되었고, 많은 모델이 생지화학적 순환을 포함하는 지구시스템 모델로 확장되었다. 기후모델들은 20세기 중반 이후의 급속한 온난화와 대형 화산분화 직후 일어난 냉각화를 포함하여 지난 수십 년간 대륙 규모에서 관측된 지표온도 패턴과 경향성을 잘 재현하고 있다. 하지만 강수 모의 능력은 온도 모의에 비해 큰 개선효과를 보이지 않는다는 점이 한계로 지적되었다.

4차 평가보고서 이후 인간의 영향을 증명하는 증거는 점점 더 많아지고 있다. 20세기 중반 이후 관측된 지구온난화의 주요 원인이 인간의 영향이었을 가능성이 대단히 높다. 도시화가 전지구 평균기온 상승에 영향을 미쳤을 가능성이 매우 낮지만, 중국 동부지역과 같이 급격한 산업화를 겪은 일부 지역에서는 기온변화 추세에 기여하였을 것이라고 보고되었다. 전지구적인 온난화에도 불구하고 겨울철 폭한은 지속적으로 나타날 것으로 전망하였다.

현재 추세로 온실가스를 저감 없이 배출한다면(RCP8.5 시나리오), 금세기 말(2081~2100년)의 전지구 평균기온은 3.7°C 상승, 해수면은 63cm 상승, 강수량은 4.1~8.1% 증가할 것으로 예상하였다. 그러나 온실가스 저감 정책이 상당히 실현되는 경우(RCP4.5), 금세기말 전지구 평균기온은 1.8°C 상승, 해수면은 47cm 상승, 강수량은 2.7~5.5% 증가에 그칠 것으로 보인다. 주지할 사실은 온난화가 균질하게 일어나지 않고 지역적 차이가 클 수 있다는 것이다. 건조지역과 습윤지역의 계절 강수량 차이가 커지고, 고위도와 적도 태평양의 경우에 강수량 증가 가능성이 매우 높을 것으로 전망했다. 전지구 평균 지표온도가 상승했기 때문에 21세기에는 북극의 해빙면적이 지속적으로 줄어들고 얇아질 것이며 북반구 봄철 적설면적이 줄어들 가능성이 매우 높다. 전지구 빙하 부피는 더 감소할 것으로 전망하였다.

2. 관측: 대기과 지표

이 절에서는 한반도에서 최근 관측된 대기과 지표의 변화를 크게 대기조성, 복사수지, 기온, 물순환, 극한현상 및 대기대순환 변동 패턴의 변화를 중심으로 수록하였다.

2.1. 대기조성 및 복사수지의 변화

1999~2013년까지 이산화탄소, 메탄, 아산화질소 등 온실가스의 농도는 변동성이 존재하기는 하지만 증가하고 있다. 하지만 주요 화학반응가스의 농도는 반응물질에 따라 다른 경향을 보였다(중간적 동의).

한반도 배경대기(안면도)에서의 이산화탄소(CO₂)는 2013년 402.4ppm으로 전지구 평균치(2012년 기준 393.1ppm)보다 약간 높게 나타났으며, 전지구 평균 증가율(2.02ppm/년)과 유사하게 1999~2013년 기간에 2.1ppm/년의 평균 증가율로 증가한 것으로 나타났다. 특히 2012년 1월 이산화탄소 농도 평균값이 400.2 ppm을 기록한 이래로 6~10월을 제외한 기간에 월평균 농도가 400ppm을 넘는 것으로 관측되었다(그림 2.1).

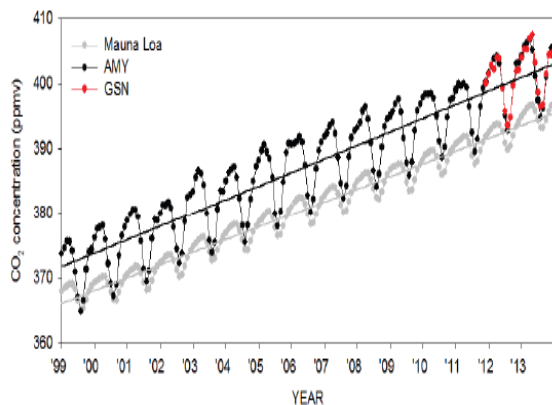


그림 2.1. 1999~2013년 안면도(AMY), 고산(GSN), 마우나로아(Mauna Loa)에서 관측된 이산화탄소의 농도 변화 {그림 2.2}.

지난 15년간(1999~2013년) 안면도에서 관측된 한반도 배경대기의 메탄(CH₄) 평균농도는 관측이 시작된 1999년에 1,883ppb에서 2003년에 1,899ppb로 증가했다가 2008년에 1,888ppb까지 감소했으

나 이후 꾸준히 증가하여 2012년에는 1,938ppb, 2013년에는 1,957ppb를 기록하였다. 특히 2000년대 후반 들어 농도의 증가가 다소 뚜렷해져 매년 1~20ppb씩 증가하는 것으로 나타났다. 특히 2007년 이후 증가율이 커져서 1999~2013년 평균 증가율은 약 4.7ppb/년으로 같은 기간 전지구 평균 증가율 2.99ppb/년에 비하여 크다.

안면도에서 측정된 아산화질소(N₂O)는 전지구와 유사하게 증가하고 있으며 1999년에는 314.0ppb였으나 2012년에는 325.9ppb, 2013년에 326.1ppb로 뚜렷한 증가율을 보였다(견고한 동의). 염화불화탄소(CFC)는 100% 인위적인 요인에 의해서 발생, 배출되고 성층권에서 제거된다. 2011년 기준으로는 안면도에서 CFC-11 농도는 245.4ppt, CFC-12 농도는 519.9ppt, CFC-113 농도는 77.3ppt로서 IPCC 5차 평가보고서에서 제시한 전지구 평균 237.7ppt, 528.4ppt, 74.3ppt에 비해 각각 +7.7ppt, -8.5ppt, +3.0ppt 차이를 보였다(제한적 동의).

육불화황(SF₆)은 안면도에서 측정이 시작된 2007년에는 6.65ppt로 당시 마우나로아(Mauna Loa) 관측치보다 0.4ppt 높았고, 2012년에는 8.24ppt, 2013년에는 8.6ppt로 증가하여 2013년 마우나로아에서의 연평균 8.0ppt보다 0.6ppt 높은 값을 보였다. 다만 최근 들어 한반도 배경대기에서 SF₆ 농도의 증가율은 0.1ppt/년 미만의 수준으로 낮아져 안정화된 양상을 보였다. 2011년 기준으로는 8.1ppt로서 전지구 평균 농도인 7.28ppt보다 약 0.8ppt(11%) 높은 수준을 나타내고 있다(제한적 동의).

연평균 오존(O₃)농도는 2011년까지는 대체로 약한 증가 추세를 보였으나, 2012년부터 2013년(연평균 농도 39.6ppb)까지 감소하여 뚜렷한 증가경향을 가지지 않았다(제한적 동의). 2004년 이래 안면도에서 측정된 일산화탄소(CO) 연평균 농도의 경우 2007년까지 감소하다가 2008년부터 증가하는 추세를 보이고 있다(제한적 동의). 안면도에서 측정된 질소산화물(NO_x)의 2012년 연평균 농도는 6.1ppb로 나타나 2011년의 7.5ppb보다 1.4ppb 낮았으며 2013년에는 연평균 농도가 6.3ppb로 0.2ppb 증가하였다(제한적 동의). 이산화황(SO₂)의 경우 그 동안 대기오염감소 노력에 의해 농도가 줄어들고 있는 실정이다(제한적 동의). 한반도 배경대기의 주요 화학반응 가스들의 농도는 반응물

질에 따라 다른 경향을 보이는 것으로 나타났다(중간적 동의).

태양복사(단파복사)와 지구복사(장파복사) 모두에 대해 하향값과 상향값의 차이를 구한 순복사량(안면도)은 2013년 연평균 74.1Wm^{-2} 로 장기간 평균 보다 낮았으며 연변화경향은 1999~2003년 기간에 낮아지다가 2004년 증가한 이후 비슷한 수준을 보였다. 복사수지의 경우 하향 태양 복사량, 하향 장파 복사량 및 순복사수지의 변화는 최근에 변동성이 적고 그 양이 일정한 것으로 나타났다(중간적 동의, 그림 2.2.).

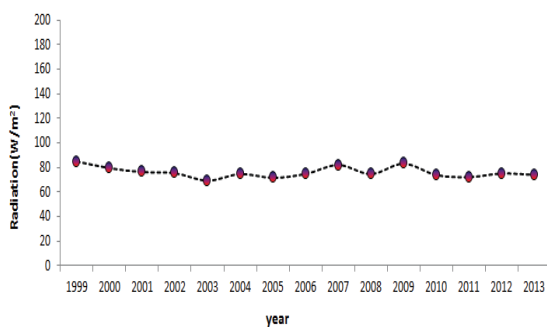


그림 2.2. 안면도 연평균 순복사량 {그림 2.18}.

2.2. 기온의 변화

한반도의 연평균 기온은 꾸준히 상승하고 있다. 1954~1999년에는 $0.23\text{°C}/10\text{년}$, 1981~2010년에는 $0.41\text{°C}/10\text{년}$, 2001~2010년에는 $0.5\text{°C}/10\text{년}$ 증가하여 온난화가 강화되고 있다(제한적 동의).

전지구 평균기온은 20세기 이후 꾸준히 상승하였으나, 전기간 동안 증가경향을 나타낸 것은 아니다. 최근 15년(1998~2012년)에는 전지구 평균기온의 상승세가 매우 약해져, 온난화의 “중단(hiatus)”기간이라고 까지 여겨지고 있다. 이 기간에 전지구 평균기온은 $0.04\text{°C}/10\text{년}$ 정도의 상승경향을 나타냈는데, 이는 1951~2012년 기간의 상승률인 $0.11\text{°C}/10\text{년}$ 의 1/3 정도에 지나지 않는다. 기후 시스템의 수십 년 주기 내부 변동성, 에어로졸의 영향, 극진동 및 엘니뇨와 같은 대규모 기후 변동성과의 관련성 등이 그 원인으로 제시되었으나, 아직 그 명확한 원인은 밝혀지지 않고 있다.

우리나라의 연평균 기온은 20세기 동안 전구 평균 변화보다 큰 상승세를 보여 1954~1999년에

$0.23\text{°C}/10\text{년}$ 의 변화율을 나타냈고, 최근 1981~2010년에 $0.41\text{°C}/10\text{년}$, 2001~2010년에 $0.5\text{°C}/10\text{년}$ 의 변화율을 보이고 있어 온난화가 더욱 강화되고 있다. 특히 증가율은 수도권을 비롯한 내륙지역에서 강하고, 호남 남서해안에서 상대적으로 약하게 나타났다(제한적 동의, 그림 2.3).



그림 2.3. 한반도 연평균기온 변화율의 공간분포 [$\text{°C}/10\text{년}$] {그림 2.20}.

북한의 경우 연평균 기온이 1981~2010년에 1.4°C 상승($0.45\text{°C}/10\text{년}$)하여 남한보다 기온 상승 현상이 뚜렷하며, 특히 여름철 기온 상승이 $0.39\text{°C}/10\text{년}$ 으로 남한에 비해 매우 크게 나타난다. 우리나라 및 동아시아 지역의 기온 변화 양상은 전구 평균 변화 양상과 상당부분 비슷하나 일부 지역에서는 극한(extreme)값 변화에서 독특한 양상을 나타낸다. 극한온난지수의 경우 한반도에서 전반적으로 증가한 것으로 나타났다. 한랭지수의 경우 최근 10여 년간 한파 발생의 빈도가 증가했는데 이는 대규모 대기순환장이 조성되어, 한파 발생의 빈도와 그 지속기간이 증가한 것으로 보인다.

2.3. 물순환의 변화

여름철 강수량의 증가로 우리나라 2001~2010년의 연평균 강수량은 $1,412\text{mm}$ 로 지난 30년 평균보다 7.4% 증가하였다(중간적 동의).

61개 우리나라 관측소 강수량을 토대로 한 최근 10년(2001~2010년) 평균 연강수량은 약 1,412mm로 지난 30년 평균 연강수량(약 1,315mm)에 비하여 약 7.4% 증가하였다(중간적 동의). 최근 10년 우리나라 연강수량의 증가는 여름철 증가가 가장 큰 부분을 차지하며(중간적 동의), 특히 장마 기간인 7월의 증가가 가장 큰 부분을 차지한다. 우리나라의 여름철 강수량 증가는 시기적으로 1990년대 후반 이후에 뚜렷하게 나타나며 1998년 이후 여름철 강수량이 유의하게 증가하였다(그림 2.4). 이러한 증가는 호우의 증가와 관련이 있다는 것을 제시하였으며, 이와 관련하여 우리나라를 지나가는 태풍 수가 1998년 이후 크게 증가하였다.

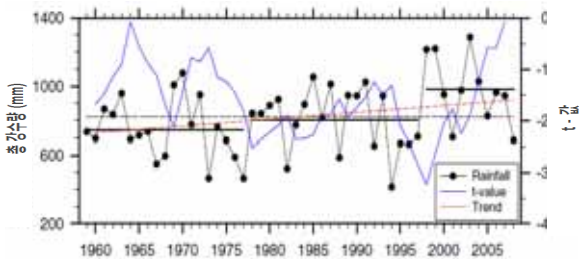


그림 2.4. 6월부터 9월까지의 한반도 12개 관측소 강수량의 경년 변동성. 두꺼운 실선, 점선, 파란 실선, 그리고 빨간 점선은 각각 기간 평균, 50년 평균, 변화시점 분석에 대한 t값, 그리고 선형 경향을 의미함 {그림 2.25}.

지구온난화와 관련하여 전구 비습은 지난 20세기 동안 증가하는 경향을 보였지만, 전지구적으로 대류권의 상대습도의 변화는 유의하지 않았다. 한반도 및 주변의 운량은 2001년부터 2008년까지의 기간에 대하여 변화 경향성이 없었다. 육지 지역의 증발산은 수문 및 탄소순환에 중요한 요소이다. 육지 지역 연강수량의 약 60%는 육지 지역의 증발산을 통해 대기로 돌아간다. 1982년부터 2008년까지 기간에 대하여 관측된 증발산량은 증가하는 경향이 있으나, 최근 기간 즉 1998년부터 2008년까지 기간에 대해서는 감소하는 경향이 있다고 보고된 바 있다.

2.4. 극한현상의 변화

극한저온현상은 뚜렷하게 감소하지만, 극한고온현상은 상대적으로 약하게 증가하는 변화양상이 나타났다(중간적 동의). 호우일수와 강수강도도 증가하고 있다(제한적 동의).

지난 20세기 우리나라 극한기온현상은 전 세계적으로 나타나는 변화와 유사하게 나타났다(그림 2.5). 1980년대 후반을 기점으로 우리나라 대부분의 관측지점에 걸쳐 극한저온현상은 뚜렷하게 감소하지만, 극한고온현상은 상대적으로 약하게 증가하는 변화양상이 나타났다(중간적 동의). 특히 일최고기온을 기준으로 정의된 주간 극한기온현상 보다는 일최저기온을 기준으로 정의된 야간 극한기온현상의 변화추세가 더 뚜렷하게 나타났다. 다른 계절에 비하여 여름철에는 강수 증가 현상이 나타나 주간 극한고온현상의 변화경향은 뚜렷하게 나타나지 않았다. 극한기온을 나타내는 주요 기후지수들의 장기간 변화 추세와 경년 변동성은 한반도 기후현상에 영향을 미치는 주요 대규모 대기현상인 동아시아 몬순, 북극진동 또는 엘니뇨의 변화 또는 변동과 상관성이 있는 것으로 추정되어 향후 지속적인 연구가 필요하다.

전지구적 규모에서 극한강수현상의 변화 양상은 지역에 따라 상이한 변화를 보이지만, 지난 20세기 후반에 우리나라에서는 호우현상이 증가하는 지역적 특성을 보였다. 여러 연구들에 의하면 우리나라에서 호우일의 발생빈도가 증가하고 있으며, 강수량을 강수일수로 나눈 강수강도도 증가하고 있다(제한적 동의).

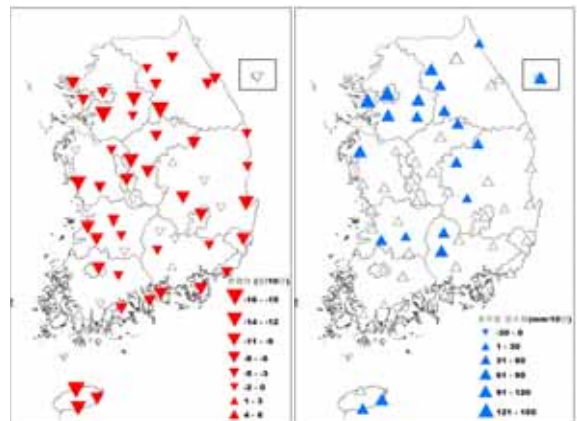


그림 2.5. 최근 40년간(1973~2012년) 연누적 한랭야(상위 10분위) (왼쪽), 호우일(상위 5분위) 누적강수량(오른쪽) 변화 추세. 색이 포함된 역삼각형(감소)과 정삼각형(증가)은 95%이상의 통계적 유의성을 지닌 변화를 가리킴 {그림 2.30, 그림 2.32}.

2.5. 대기대순환과 변동 패턴의 변화

겨울 몬순의 경우에는 십년 이상의 장주기 변동 경향이 뚜렷하게 나타나고(중간적 동의), 여름 몬순은 1980년대까지 약화되었다가 회복되고 있다(제한적 동의).

한반도에 영향을 주는 대기대순환의 변동 패턴의 경우에 십년 이상의 장주기 변동 경향이 뚜렷한 것으로 나타났다(중간적 동의). 한반도의 기후는 몬순으로 대표되는 대기순환에 의해 크게 좌우된다. 동아시아 여름 몬순은 1960년대에서 1980년대까지 점차 약화되었다가 최근 들어 회복되기 시작했다(제한적 동의). 겨울 몬순에 영향을 주는 시베리아 고기압의 강도 또한 수십 년 주기의 변동이 뚜렷한 것으로 나타났다(제한적 동의).

한반도 기후에 영향을 미치는 대기순환으로 20세기 동안 공통적으로 일치했던 워커순환의 약화는 최근 20년 동안은 다시 강화되는 것으로 관측되었다(제한적 동의). 해들리순환의 강도 변화는 여전히 서로 다른 결과가 공존하고 있다.

열대 해양에서 연평균 강수량의 변화는 해수면 온도가 다른 지역에 비해 더 많이 상승하는 지역에서 강수가 증가한다고 하였다. 열대수렴대(Intertropical Convergence Zone, ITCZ) 강수의 증가도 “wet-get-wetter” 패턴으로, 적도면 강수의 증가는 적도 해수면온도의 상승 패턴(warmer-get-wetter)으로 설명되었다. 인도양 전체모드로 대표되는 인도양 해수면온도는 20세기 동안 꾸준히 상승하여 왔고, 대부분의 기후모델도 이런 경향성을 잘 모의하고 있다. 하지만, 북인도양의 해수면온도 상승은 다른 지역에 비해 현저하게 낮게 나타나는데 이는 에어로졸에 의한 태양복사 차단 효과로 설명되고 있다.

북극진동은 양의 위상에서의 경향성이 관측되었으나, 1990년대 중반부터 2000년대까지 다시 원상태로 돌아가는 양상을 보여 수십 년 및 장주기 변동성이 뚜렷한 것으로 나타났다(제한적 동의). 북반구의 제트는 대부분의 지역에서 북상하였다는 증거가 제시되었고, 북태평양 제트의 세기는 강화되는 경향으로 나타났다. 북태평양의 알루산 저기압은 1970년대부터 2000년까지 그 중심이 동쪽으로 이동하는 경향성을 보였으며, 이는 2000년대

이후에도 지속되었다. 이로 인해, 북태평양의 대표적인 패턴인 태평양 북아메리카(Pacific North America, PNA) 패턴도 최근 기간 동안 동쪽으로 이동하여 위치하는 특징을 보였다.

3. 관측: 해양과 빙권

해양은 지구상에서 물과 에너지의 가장 큰 저장소로서 기후변화의 조절자 역할을 한다. 또한 해양은 해양-대기 경계면을 통해 매일 약 2천만 톤의 이산화탄소를 흡수하고 인간활동에 의해 대기로 추가 방출되는 이산화탄소의 약 1/4을 흡수하여 대기의 온실효과를 억제하는 등 기후변화 속도의 완급을 조절하고 있다.

빙권은 전지구 기후 시스템의 표면에너지, 물순환, 1차 생산, 온실가스 상호작용, 해수면 변화에 중요한 역할을 한다. 특히 외부의 에너지 변화에 민감하게 작용하는 눈과 얼음으로 구성되어 있기 때문에 온실가스의 증가에 대해 다른 지역에 비해 온도 변화가 더 크게 나타난다.

기후과학 관측 분야의 하나로 해양과 빙권을 구분하여 정리하였다. 해양부분에서는 우리나라 인접 해양에 대한 변화의 연구 결과를 검토, 요약하였다. 빙권 부분은 빙권이 지구 기후 시스템에 차지하는 비중이 크기 때문에 국내의 전문가들에 의한 연구 결과를 정리하여 대외적으로 국내 기후변화 연구의 위상이 정확하게 인지되도록 하는데 수록의 의미가 있다.

3.1. 해양

우리나라 주변 바다에서 수온과 해수면은 지속적으로 상승하고 있으며, 동해에는 해양산성화가 진행되고 있다(견고한 동의).

우리나라 주변 해양의 변화를 분석하는데 가장 큰 제약은 경향성을 보기 위한 장기간의 관측 자료가 거의 없다는 점이다. 이를 해결하기 위한 차선책으로 수치모델링 결과로 생산되는 재분석 자료를 이용할 수 있지만, 국내에서 재분석 자료를 생산할 수 있는 모델링 수준이 아직은 높지 않은 실정이다. 이러한 자료의 제약성 때문에 우리나라 주변 해양의 경향성 분석은 극히 제한된 분야에서만 연구가 되고 있으며, 관측의 기회가 많아진 최근의 변화경향을 분석한 경우가 대부분이다.

우리나라 주변 해양에서의 수온과 해수면은 지속적으로 상승하고 있으며, 상승률은 전지구 해양

평균보다 약 2~3배 높은 것으로 나타났다(그림 3.1). 또한, 동해에서 표층 이산화탄소의 증가도 전지구 해양의 평균보다 약 2배 높아 해양산성화가 진행 중인 것으로 보고되었다(그림 3.2). 이러한 경향은 관련 연구의 모든 논문들에서 제시하고 있어 견고한 동의수준의 신뢰도를 보여주고 있다.

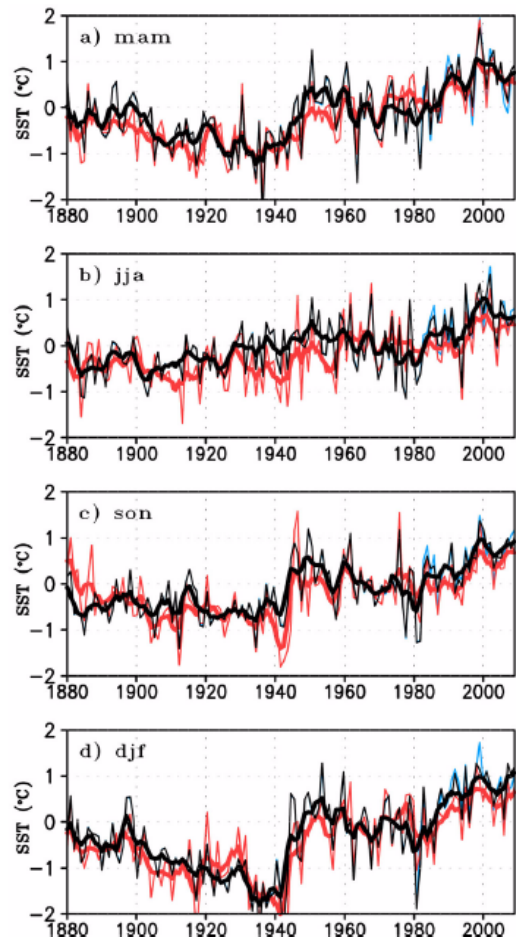


그림 3.1. 우리나라 주변해역(122.5~132.5°E, 31.5~39.5°N)의 계절별 해수면온도 시계열 (그림 3.4).

해양의 변화경향 연구를 보면 내용의 차이는 크게 세 가지로 나타났다. 첫째, 변화경향 분석에 재분석 자료의 활용이 증가하였다. 우리나라의 경우 해양에서의 관측 자료는 절대적으로 부족하여, 해수면온도 분야에서 외국의 여러 기관의 기후 재분석 자료를 이용한 장기 경향 분석이 증가하였다. 재분석 자료의 분석 결과는 일치된 결과를 제시하고 있어 견고한 동의 수준의 신뢰를 보인다. 둘째, 인공위성 관측 자료 이용의 확대이다. 위성 관측 해수면온도 관측과 위성 고도계를 이용한 해수면 고도 관측에 이어 우리나라 주변해역에 대한 해석

(ocean color) 관측이 수행되어 생지화학 분야의 단기 변화경향을 탐지도 가능한 상황이다. 셋째, 변화경향에 대한 원인 분석의 증가다. 대부분 해면 기압계 배치, 특히, 대부분의 관련 논문에서 겨울철 대기순환의 변화에 따른 북풍 약화의 영향을 제시하고 있어 견고한 동의 수준의 해석으로 볼 수 있다. 그러나 서태평양으로부터의 해양을 통한 온난화 신호의 유입 가능성도 제시되고는 있지만 이에 관한 해양역학 해석의 일관성은 보여주지 않아 이의 신뢰도는 아직은 제한적 동의 수준이라고 평가된다.

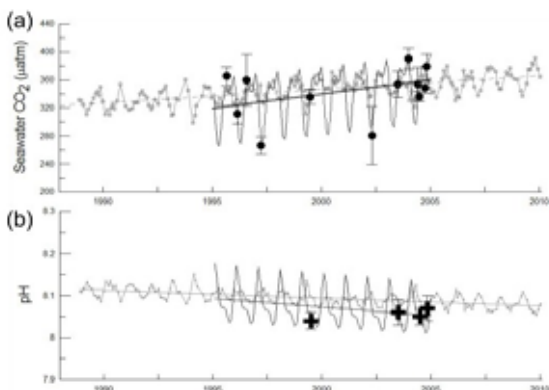


그림 3.2. 동해 울릉분지 표층해수의 (a)CO₂ (●) 및 (b)pH (+). 회색으로 표시한 장기 시계열 자료는 북태평양 ALOHA 관측지점 자료임 {그림 3.15}.

변화경향에 대한 발표 논문 편수가 통계적 분석이 가능할 만큼 많지 않기 때문에 신뢰도나 불확실성 분석은 가능하지 않지만 대체적인 경향은 IPCC 5차 평가보고서에 제시된 해역(서태평양과 인근 연해)에서의 변화경향에 벗어나지는 않기 때문에 전반적인 신뢰수준은 낮지 않은 것으로 판단된다. 수온과 해수면 변화의 경우 우리나라 해역에서도 해역별 편차가 있고, 특히, 해수면 변화의 정량적 크기는 분석 기간에 따라서도 단주기 변화가 커서 변화경향의 정량적 수치의 이용에 유의하여야 할 것이다.

3.2. 빙권

북극의 기온은 전지구 평균에 비하여 빠르게 상승하고 있으며, 이와 연동하여 해빙의 면적도 감소하고 있다(견고한 동의).

지난 30년간 북극 기온은 10년간 약 0.7°C씩 상승하여 전지구 평균에 비해 견고한 동의 수준에서 빠른 속도로 온난화가 진행 중이며 계절적으로 가을의 기온 상승이 가장 크게 나타난다. 기온변화의 공간분포를 보면, 가을철 가장 큰 기온 상승은 척치해를 중심으로 한 서북극해에서 나타나는데 반해, 겨울의 기온 상승은 카라해 부근에서 크게 나타난다(그림 3.3). 남극은 관측자료의 부족으로 확실성이 낮은 편이지만, 기후변화의 경향이 지역에 따라 다른 양상으로 나타나며 온난화의 시공간적 변동이 크다. 남극 반도를 포함한 서남극에서는 견고한 동의 수준에서 기온이 증가하는데 반해, 동남극에서는 제한적 동의 수준에서 일부 지역에서는 기온이 약간 감소하나 대부분은 온도변화가 거의 나타나지 않고 있다. 2009년 최초의 국적 쇄빙연구선 아라온호의 건조와 함께 우리나라의 빙권 지역 해양관측이 본격적으로 시작되었다. 아라온호에서 2010년부터 2012년까지 획득된 해양관측 자료와 해양수치모델 결과를 융합하여, 세계에서 가장 빠르게 녹아내리고 있는 서남극 지역 아문젠해에 위치한 파인아일랜드 빙하(Pine Island Glacier)가 해양과 접촉하여 녹는 용빙과정이 규명되었다. 지구온난화로 인해서 빙하의 용빙속도가 가속될 것으로 막연히 추측하지만, 최근 3년 동안(2010~2012년) 빙봉의 용빙속도는 과거 대비 거의 절반으로 급격하게 감소한 것으로 밝혀졌고, 빙봉 밑으로 유입되는 따뜻한 해수가 감소한 게 그 원인이었다.

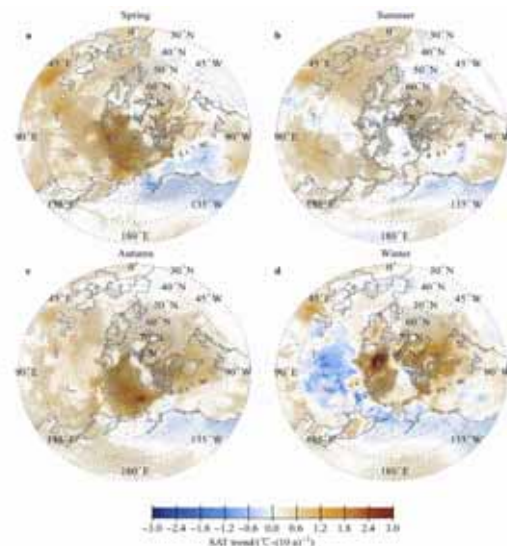


그림 3.3. 1979년부터 2012년까지 북극 기온의 변화경향 (°C/10년) {그림 3.16}.

대기의 기온변화와 연동하여 북극의 해빙은 견고한 동적 수준에서 감소하고 있는데 가을철 가장 큰 해빙 감소는 적치해에서 나타나며, 시베리아해와 카라/바렌츠해까지 큰 감소 경향이 나타난다(그림 3.4).

전지구 기후변화에 빙권 변화의 영향이 매우 중요한 요소로 인식되고 있으나, 접근성 및 험난한 환경으로 인하여 주로 인공위성 원격탐사를 통한 빙권 감시 연구만이 활발히 진행되었다. 그 결과에 따르면, 남극에서 가장 큰 빙붕 중 하나인 서남극 로스 빙붕에 유입되는 주변의 빙하 및 빙붕 자체의 이동속도가 최근에 급격히 빨라지는 양상을 보여주고 있다.

동토층의 변화는 지구온난화에 기인한 것으로 동토의 온도 변화, 동토층 저하, 계절동토의 변화, 동토내부 미생물 메커니즘 변화, 영구동토층의 지질정보, 영구동토층의 공학적 특성분석 연구 등 종합적 연구의 대상이 되고 있다. 남극에서는 영구동토의 온도가 -23.6°C 로 관측되었고 북극의 경우 -15°C 로 관측되었다. 영구동토의 온도는 1970년대 이후 최대 2°C 상승하는 경향을 보이고 있다.

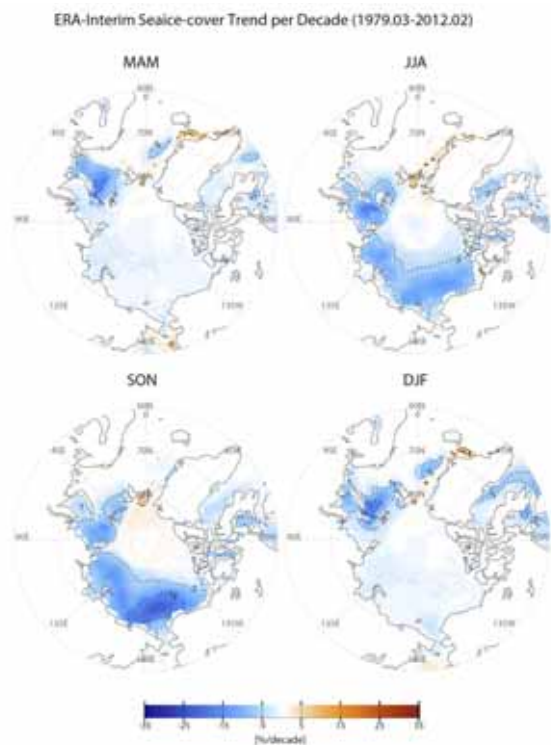


그림 3.4. 1979년부터 2012년까지 북극 해빙의 변화경향 (%/10년) {그림 3.18}.

4. 고기후 기록에 의한 정보

고기후 기록 정보에 의한 기온 변화(제한적 동의)와 강수 변화(중간적 동의) 연구 결과는 대리자료에 따른 일치 정도가 높지 않아 향후 추가 연구가 필요하다.

이 절에서는 고기후를 복원할 수 있는 단초가 되는 대리자료(proxy data) 가운데 식물, 동물, 연륜(나이테), 고문헌 자료를 바탕으로 분석한 우리나라의 고기후 연구결과를 정리하였다.

과거 기온 변화는 화분, 동물화석, 연륜자료를 바탕으로 부분적으로 추정할 수 있으나 대리자료에 따라서 일치하는 정도가 높지 않아 제한적 동의가 현실적이다. 과거 강수변화는 연륜, 고문헌에 기초하여 중간적 동의 수준을 제시할 수 있으나 신뢰도를 높이기 위해서는 추가적인 연구가 필요하다. 대리자료를 통한 고기후에 대한 연구 결과는 제한적 동의 수준을 제시할 수 있으며 신뢰도를 높이기 위해서는 추가적인 연구가 필요하다.

4.1. 식물(화분)

식물화석을 이용한 우리나라의 화분분석 결과에 따르면 최대빙하기말(Last Glacial Maximum, LGM)(26,100~20,100년 전) 동안 중부내륙지역은 오늘날보다 온도는 5~6°C 더 낮았으며, 연평균 강수량도 40% 정도 적었다. 해빙기의 영향 하에서 남서부지역의 기후는 습윤한 냉온대였고 오늘날보다는 더 추웠을 것으로 생각된다. 그러나 홀로세 초기 시작되면서 한반도 주변에는 해침의 영향으로 남서부 지역은 더 습윤해졌다.

후빙기(홀로세) 전기 동안에는 점차 온난 습윤한 조건으로 변화하였다. 홀로세 중기(약 8,000~5,500년 전)에는 동아시아 여름몬순이 지금보다도 더 강화되어 우리나라는 아열대성 기후였을 것으로 본다. 홀로세 중기 이후에는 동아시아 겨울몬순이 강화되면서 다시 한랭건조한 기후로 변화하였다. 1,000~400년 전까지는 중세 온난기(medieval warm period)와 대비되는 온난 습윤한 기후였으나, 약 400년 전 이후로 중세 온난기가 끝나고 소빙기(little ice age)로 접어들었다.

4.2. 동물

동물화석을 분석한 결과 중기 플라이스토세 짧은 기간 동안 나타나는 동물 유물을 가지고 당시의 기후변화를 상세히 알 수는 없지만 중기 플라이스토세의 기후는 온난한 편으로 보인다(그림 4.1). 플라이스토세 후기로 들어오면서도 초기에는 플라이스토세 중기의 동물상의 양상이 그대로 나타나지만 후기로 접어들면서 추운 기후의 동물들이 출현하여 당시가 한대성 기후였던 것으로 본다. 하지만 마지막 빙하기의 가장 추운 때에도 극심한 추위를 보여주는 동물은 나타나지 않아 당시에 기후가 추워지기는 하지만 매우 추운 기후는 아니었다고 판단된다.

다양한 사멸종이 서식했던 플라이스토세와는 달리 모두 현생종으로만 구성된 홀로세의 동물군은 이 시기의 문화단계별로 커다란 차이를 보이지 않는다. 그러나 홀로세 초기의 일부 지역에서 발견되는 물소의 존재는 이 시기의 기후가 다른 때보다 온난했음을 보여준다.



그림 4.1. 우리나라의 플라이스토세에 출토되는 대표적인 동물과 기후 {그림 4.5}.

4.3. 연륵

연륵분석으로 설악산 소나무 연륵을 이용하여 253년간의 영동지방 5~6월 강수량을 복원한 결과 영동지방의 건습주기는 단주기로는 3년, 장주기로는 60~80년이었고, 복원된 기간 중에 가장 극심한 건조기는 17세기 말이었다(그림 4.2). 특히 19세기 말과 20세기 초의 건조현상은 우리나라 일부에서만 발생된 국지적 현상이 아닌 전국적인 현상이었다. 설악산 잣나무에서 복원된 2~4월 평균기온에 따르면, 1720~1740년과 1820~1860년의 기온이 복원된 기간 중에서 가장 낮은 것으로 조사되었다(그림 4.3). 설악산 잣나무 생재만을 이용하여 1700년대까지 복원한 7~8월 평균기온에서도 낮은 기온이 관찰되었다. 또한 1960년대 이후로 온난화되는 경향이 나타났다.

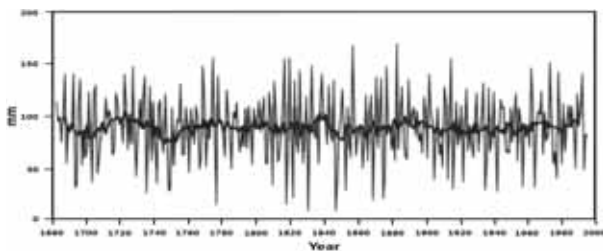


그림 4.2. 소나무 연륵연대기를 이용하여 복원된 설악산 서부 지역의 5월 강수량 {그림 4.7}.



그림 4.3. 잣나무 연륵연대기를 이용한 강릉 및 중국 Dunhua지역의 2~4월 평균기온: 복원 기간 중 1720~1740년과 1820~1860년의 기온이 가장 낮으며 1960년 이후로 온난화가 관찰되었다 {그림 4.8}.

4.4. 고문헌

고려시대는 고려사, 조선시대는 조선왕조실록, 승정원일기, 일성록, 측우기 자료, 각사등록 등에 기초하여 기후를 복원하였다. 고려시대에 강수량은 5, 6, 7월에 집중되었다. 강수의 경우 측우기로 관측한 19세기의 강수량은 현재에 비해 적은 편이

다. 최대 강수량은 19세기에는 2월, 3월, 5월, 8월, 9월에 많이 나타났으며, 4월, 6월, 10월, 11월은 현재에 비해 적게 나타났다.

승정원일기와 일성록에 의한 1800년대의 서울 강수량은 봄, 여름, 가을철 모두 뚜렷한 감소추세를 보였으며, 감소율은 여름철에 가장 크게, 봄철에 가장 작게 나타났다. 조선왕조실록에 기록된 강수량에 따르면 1440년 무렵, 1540년, 1600년 전후, 1770년과 1800년 무렵에 극심한 건조기였으며, 1410년대 1520년대, 1560년 무렵, 1660년대와 1730년 무렵에는 습윤한 시기였다. 1777년에서 1883년은 습윤기 1시기, 1884년에서 1907년은 건조기, 1908년에서 1996년은 습윤기 2시기로 구분되었다. 19세기에 연강수량의 극값이 나타나는 해는 태양흑점의 극값이 나타나는 해와 일치하는 경우가 많다. 1700년대와 1900년대의 연강수량이 매우 낮게 나타난 시기와 겨울철 강설일수가 낮은 시기의 패턴이 일치하였다.

가뭄은 한 해에 평균 4~5차례에 걸쳐 자주 발생하는데, 이는 홍수에 비해 빈도가 높은 편이며 각 시기에 걸쳐 고르게 나타났다. 삼국시대의 가뭄은 신라가 백제와 고구려에 비해 많이 나타났고, 크게 가뭄었던 시기는 백제가 신라나 고구려보다 횡수가 많았다. 고려시대에는 약 475년간 69회로 가뭄 기록이 있었는데, 고려 초보다는 고려 후의 가뭄빈도가 높았다. 조선시대인 15세기에는 100년 동안 총 276회의 가뭄이 발생하였으며, 1년 평균 2.76회의 빈도로 조선시대 전체 평균보다 높았다. 특히 1430년대와 1450년대의 가뭄 발생 빈도가 높으며, 1460년대는 가장 낮았다. 홍수는 삼국시대에는 27.9년 혹은 28.8년마다 1번씩 발생한 것으로 나타났다. 고려시대에는 평균 7.1년에 약 1회 큰 물난리가 있었던 것으로 알려졌다. 조선시대의 홍수는 총 707회 발생하였고, 10년 당 평균 14.14회 정도였다. 15세기에는 100년 간 총 148회의 홍수가 발생하였다.

고려시대인 1000~1250년까지 대체적으로 온난하였으며, 1250~1400년 사이에는 상대적으로 한랭하였다. 조선시대에 포함되는 소빙기는 길게는 1450~1850년, 짧게는 1500~1750년으로 보았다.

우리나라에서 황사현상에 관련된 기록은 삼국사기에 처음 나타났다. 고려시대에 황사현상이 관측된 것은 12세기에 가장 많으며, 조선시대에는 16세기에 가장 많은 황사 기록이 있었다.

5. 탄소순환과 기타 생지화학순환

이 절에서는 기후 시스템에 대한 주요 생지화학적 되먹임의 중요성과 추세 및 이해수준의 평가를 목적으로 한반도의 기후 시스템과 생지물리 및 생지화학과정의 이해수준에 대하여 요약하였다.

5.1. 탄소순환

화석연료의 연소와 토지이용의 변화로 인한 CO₂ 방출의 증가가 관측된 대기 중 CO₂ 농도 증가의 주요 원인이다(견고한 동의).

우리나라와 주변 지역의 탄소순환에 대한 장기 관측은 매우 제한적이나, 한반도 중부에 위치한 온대산림생태계와 복잡농경지에서 10년 이상의 CO₂, 물 및 에너지 플럭스 관측자료는 그 동안 알려지지 않았던 육상탄소순환에 대한 다양한 정보를 제공하고 있다. 식물의 생장이 가장 활발한 여름 기간에 우리나라에 영향을 주는 장마로 인하여 복사에너지가 감소하면서 생태계와 대기간의 되먹임 과정이 달라진다. 이러한 여름 성장 기간의 장마와 이에 다르게 반응하는 생태계의 광합성과 호흡의 변화가 생태계의 대기 중 CO₂의 흡수를 감소시키고, 이로 인하여 총일차생산량과 순생태계교환량이 연중 두 번의 극값을 가지는 형태를 보인다.

여름 장마 등으로 인한 자연적 교란과 더불어 산림 및 농경지 관리에 따른 인위적 교란으로 인해 탄소순환모델들은 동아시아 주요생태계의 엽면적 지수, 총일차생산량, 생태계호흡 등의 계절변화를 제대로 모의하지 못하고 있는 실정이다. 이러한 특성들이 다른 지역과 비교했을 때 미래 기후 변화 시나리오에 대한 동아시아만의 특별한 육상 탄소 생태계의 특징을 만들어 냈다(그림 5.1).

국립기상연구소에서 NOAA-ESRL과의 협력으로 개발한 아시아탄소추적시스템(CarbonTracker-Asia)은 아시아에 중점을 두고 전구 영역의 탄소를 추적한다(www.nimr.go.kr/2/carbontracker). 탄소추적시스템은 대기 중 CO₂ 방출 및 배출량 감축 활동의 효과를 감시하고 평가하는 독립적인 체계로 사용될 수 있다. 아시아탄소추적시스템에서 산출된 최적화된 플럭스는 관측과 적절한 일치

성이 있음을 보였고, CO₂ 농도 증가율도 관측값을 전반적으로 잘 모의하였다. 화석연료의 연소와 토지 사용의 변화로 인한 CO₂ 방출의 증가가 관측된 대기 중 CO₂ 농도 증가의 주요 원인으로 나타났다(견고한 동의). 2001~2012년 동안 CO₂ 농도는 증가했고, 그 분포는 흡수·배출 변동 때문에 지역적으로 다르게 나타난다(그림 5.2). 화석연료의 연소에 의해 생성되는 CO₂의 배출량은 거의 선형적으로 증가하면서 약간의 경년 변동을 보여준다(그림 5.3). 2001~2012년 기간 동안 대기로 방출된 화석연료 연소에 의한 CO₂는 연간 8.30PgC이었다.

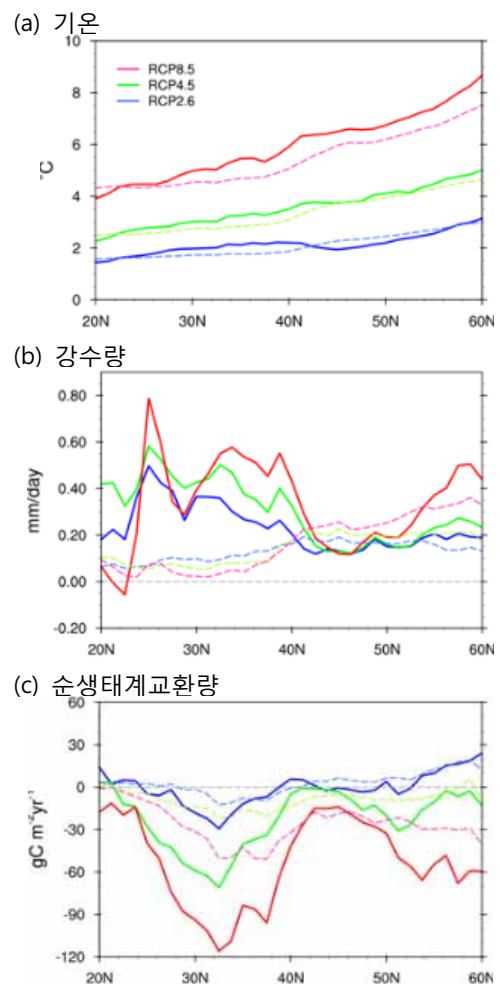


그림 5.1. 북위 20~60° 지역 평균 (a)기온, (b)강수, (c) 순생태계교환량의 다양한 RCP 시나리오 상에서의 변화. 1981~2005년 평균값과 2075~2099년 평균값과의 차이. 점선은 전구 평균값, 실선은 동아시아의 값 {그림 5.5}.

기후변화는 대기 중 CO₂ 증가에 의해 야기된 전지구 육상/해양생태계의 탄소 흡원을 부분적으

로 상쇄시킬 것이다(견고한 동의). 영양소의 부족이 증가하는 대기 중 CO₂가 미래 육상탄소 흡원에 미치는 효과를 제한할 것이다(견고한 동의). 습지생태계로부터의 메탄 방출은 CO₂ 증가와 따뜻한 기후로 인해 더 증가할 것이다(중간적 동의). 토양으로부터의 N₂O 방출은 늘어나는 부양/식량 및 농업의 질소비료 의존도 때문에 증가할 것이다(중간적 동의). 국내 연구 결과도 이를 뒷받침한다.

육상 및 해양의 물리적, 생지화학적 탄소순환은 21세기 동안 야기될 대기 중 CO₂의 증가와 기후변화에 반응을 계속할 것이다(견고한 동의). 기후의 변화와 CO₂ 증가에 따른 자연적 탄소 저장소의 반응의 크기와 방향은 시간규모의 차이에 따라 크게 달라진다. 자연적 과정에 의해서 대기로부터 인위적으로 방출된 CO₂를 제거하려면 수십만 년이 걸릴 것이다(견고한 동의). 이와 관련하여, 국내 산림생태계가 인위적인 CO₂ 방출의 약 3% 정도를 흡수하는 것으로 추정, 보고되었다.

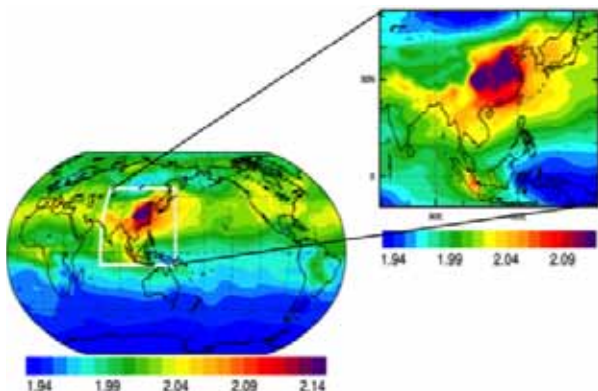


그림 5.2. 2001~2012년 동안 연직 평균 CO₂ 농도 증가율의 분포 {그림 5.9}.

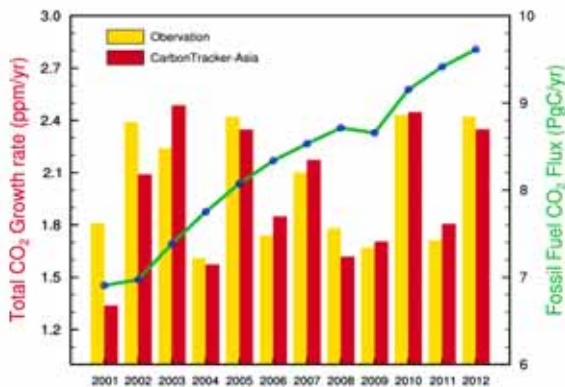


그림 5.3. 대기 CO₂ 농도 증가율. NOAA ESRL에서 산출한 관측 대기 전지구 평균 CO₂ 농도 증가율과 아시아 탄소추적시스템에서 산출한 농도 증가율의 비교. 실선은 화석연료 연배출량 {그림 5.10}.

대기 중 CO₂를 대규모로 제거하는 비재래식 방법인 이산화탄소 제거(carbon dioxide removal, CDR) 방법은 이론적으로는 대기 중 CO₂ 농도를 감소시킬 수 있으나, 생지화학적/기술적 한계와 부작용으로 인해 신뢰도가 낮다. 또한 CDR에 의한 CO₂ 제거가 육상 및 해양생태계로부터의 CO₂ 방출로 인해 부분적으로 상쇄될 것이다(견고한 동의).

5.2. 기타 생지화학적순환

2010년의 인위적인 반응성 질소의 생성은 자연적인 육상생태계의 생성률보다 적어도 두 배 이상 크다(중간적 동의).

IPCC 5차 평가보고서에 따르면 대기 중 아산화질소의 농도는 지난 800,000년간 전례없는 수준을 나타냈으며, 인위적인 활동으로 인해, 2011년에 324ppb로 산업화 이전보다 약 20% 높아졌다. 산업시대 이전에는 N₂를 제외한 모든 질소성분, 즉 반응성질소(reactive nitrogen, Nr) 성분은 주로 대기 방전에 의한 번개와 생물학적 질소고정(biological nitrogen fixation, BNF)이라는 두 가지 자연적 과정에 의해 발생하였다. BNF는 미생물이 관여하여 N₂를 NH₃로 전환시키는 과정이다.

산업시대 이후, 인간에 의한 Nr 생성이 자연발생량보다 훨씬 더 많아졌다. 인위적으로 배출되는 N₂O의 총량은 지표의 자연 배출원에서 배출되는 양과 거의 같은 수준이다. 대기로 배출되는 Nr의 경우 NH₃와 NO_x 성분들이며 주로 농업과 화석연료 연소에 기인한다. N₂O의 농도가 지난 30년 동안 0.73±0.03ppb의 연 증가율을 보였다(중간적 동의). 인위적인 2010년의 반응성 질소의 생성은 자연적인 육상생태계의 생성률 보다 적어도 두 배 이상 크다(중간적 동의). N₂O의 경우, 국내 관측자료도 비슷한 크기의 범위를 보인다.

아산화질소(N₂O)의 대기농도는 인구증가에 따른 식량 증산으로 급증한 농업활동의 결과가 주요 원인이다. 하버-보슈공정을 통해 생산된 합성비료와 가축분뇨의 농경지 사용이 토양과 침전물 내의 N₂O 생성을 높이며, 질화(nitrification)와 탈질화(denitrification)과정을 통해 대기로의 N₂O 배출을 증가시킨다. 토양수분과의 밀접한 연관성에도

불구하고 지표 N_2O 배출량 변화에 대한 정량적 이해의 수준은 여전히 매우 낮다.

질소의 생지화학순환의 경우, 인류가 넘어서는 안 될 한계를 이미 넘어섰으며 온실가스인 N_2O 의 농도 증가는 주로 화학비료와 축분 사용에 따른 인위적 활동이 주요 원인이다. 2000년부터 전북 군산과 익산의 농경지의 경우, 폐쇄형 플렉스챔버를 사용하여 수시로 집중관측을 통해 주요 발작물인 깨, 콩, 파, 배추 등의 재배에 따른 NO 와 N_2O 배출량이 측정되었고, 작물과 토양의 물리화학적 특성(토양수분, 토양의 질소성분량 및 유기물함량, 토양 pH), 계절별 기후특성에 따른 배출량이 평가되었다. 배추 밭에서 N_2O 의 평균 배출량은 $1.12 \pm 0.14 \text{mgm}^{-2}\text{h}^{-1}$ 로서 0.08에서 $8.40 \text{mgm}^{-2}\text{h}^{-1}$ 의 범위를 나타냈다. 가장 높았던 5월의 배출량은 $4.47 \pm 2.59 \text{mgm}^{-2}\text{h}^{-1}$ 였으며, 토양온도와 토양질소량이 높은 기간이었다.

논에서 측정된 NO 와 N_2O 의 평균배출량은 각각 0.76 과 $15.3 \text{ng-Nm}^{-2}\text{s}^{-1}$ 으로 밭에서의 배출량인 82.1 과 $66.9 \text{ng-Nm}^{-2}\text{s}^{-1}$ 에 비해 상대적으로 낮았다. 경작지와는 다른 생태환경인 습지의 경우, 저수지에서 측정된 CH_4 배출량의 평균은 $0.155 \pm 0.29 \text{mgm}^{-2}\text{h}^{-1}$ 이었으나 그 범위는 -0.054 에서 $0.942 \text{mgm}^{-2}\text{h}^{-1}$ 로서 습지환경에 따라 흡수되기도 하였다. 갯벌에서는 평균 CH_4 배출량은 $0.002 \pm 0.08 \text{mgm}^{-2}\text{h}^{-1}$ ($-0.164 \sim 0.219 \text{mgm}^{-2}\text{h}^{-1}$)이었다. N_2O 의 경우, $-0.017 \sim 0.03 \text{mgm}^{-2}\text{h}^{-1}$ 로 과거 군산 갯벌의 측정 결과($-0.02 \pm 0.666 \text{mgm}^{-2}\text{h}^{-1}$)와 유사하였다. 도시 인근 산림의 경우, 경기도 광주 태화산에 위치한 서울대학교 학술림의 잣나무 숲의 경우, 연간 배출량이 N_2O 배출은 304.4kg/년 , CH_4 흡수는 -131.0kg/년 으로 추정되었다.

반응성이 낮고 대기 중 체류 기간이 긴 CO_2 , CH_4 , N_2O 는 대표적인 온실가스로서 기후에 직접 또는 간접적으로 영향을 준다. 이들 기체보다 반응성이 크고 농도가 더 낮은 휘발성유기탄소화합물(Volatile organic carbon compounds, VOCs), 질소산화물(NO_x), 황산화물(SO_2) 등은 대기 중에서 산화되며 오존과 에어로졸을 생성한다. 인간 활동의 결과로 온실가스 뿐만 아니라 반응성 기체와 더불어 이차생성물인 오존과 에어로졸의 농도가 크게 증가하여 지역적 대기질의 저하 뿐만 아니라 전지구적으로 기후변화를 유발시키고 있다. 이 중에서 오존과 에어로졸은 일반 온실가스

와는 달리 대기 중 수명이 일주일 정도로 짧아 단수명 기후변화 유발물질로 취급 된다.

단수명 기후변화 유발물질인 오존과 에어로졸 그리고 이들의 전구물질로 반응성이 큰 탄소 질소 황 화합물 VOCs, NO_x , SO_2 등의 생지화학순환을 간략히 살펴보았다. VOCs는 O_3 가 광분해되어 만들어진 OH 라디칼과 O_3 , NO_x 등에 의해 산화되는데 그 과정에서 O_3 가 재생성 되고 더불어 에어로졸이 생성된다. 생물기원의 휘발성유기화합물(BVOCs)의 경우, 인위적인 기원의 휘발성유기화합물(AVOCs)에 비해 그 중요성이 늦게 알려졌다. 전지구적인 규모에서 BVOCs가 AVOCs에 비해 배출량이 10배 이상 크며, 반응성도 더 크기 때문에 광화학 오존 생성에 대한 이정표적인 발견이 되었다.

대기 중 오존과 이차 유기 에어로졸(Secondary Organic Aerosol, SOA)의 변화과정에 대한 이해는 아직 매우 부족하다. 이는 결국 기후변화 대응과 대기환경 개선을 위한 정책 수립 시 큰 불확도를 제공하는 원인이 되므로 이에 대한 연구가 매우 절실하다. 우리나라도 BVOCs의 배출 및 광화학 과정에 대한 이해를 높이기 위해 최근 국립환경과학원에서 태화산에 위치한 서울대학교 학술림에 관측소와 타워를 설치하였다. 더불어 이러한 연구를 국제적인 협력의 틀 안에서 수행하기 위하여 iLEAPS (integrated Land Ecosystem Atmosphere Process study) Korea가 2013년 8월 AsiaFlux의 지원으로 발족하였으며 본격적인 연구가 이제 시작되었다.

6. 구름과 에어로졸

이 절에서는 국내외 연구진이 수행한 한반도와 그 주변에 대한 구름과 에어로졸 연구에 대해 에어로졸 측정 연구, 수치모델을 이용한 구름과 에어로졸 연구 등을 요약하였다.

6.1. 구름

구름 관측은 항공기를 이용한 직접관측과 레이더, 라디오미터 등을 이용한 원격탐사로 이루어진다. 국내에 기상 관측·연구용 항공기는 아직 도입되지 않았고, 구름 레이더는 도입된 지 얼마 되지 않아 구름 관측 연구는 아직 미미한 실정이다. 해남 위험기상 집중관측센터에 설치된 마이크로파 라디오미터를 통해 가강수량과 연직 누적 구름수함량의 분포 특성을 파악하여 이로부터 운량을 관측할 수 있는 가능성이 제시되었다. 하지만 관측 연구는 매우 적어 결과의 신뢰도를 논하는 것조차 부적절하다고 할 수 있다.

안개는 최근 몇몇 학자들에 의해 연구된 것으로 1961~2010년 동안 한반도의 안개 발생 및 지속시간의 변화를 분석하여 제시하였고 한반도 서해안에서 해무가 발생하는 기상조건에 대해 분석하였다.

수치 모델을 이용해 기후변화에 미치는 구름의 역할을 모의하기 위해 Weather Research and Forecast(WRF) 모델의 새로운 미세물리방안인 Double-Moment 6-class(WDM6)를 개발하여 중규모 모델에서 구름을 좀 더 실제와 가깝게 모의할 수 있도록 하였다. 또한 상세 미세물리(spectral bin microphysics) 모델인 Takahashi 구름모델에서의 쌍락논과 우박의 수적과의 충돌효율(collision efficiency) 값을 개선하여 얼음입자를 포함하는 찬 구름의 발달과정을 좀 더 현실적으로 모사할 수 있도록 하였다. 수치모델을 이용한 안개발생에 대한 연구로 3차원 모델인 WRF 모델에 1차원 모델인 PArmeterized FOG(PAFOG) 모델을 결합하여 한반도 서해안의 안개 발생과정에 대해 분석하였다.

6.2. 에어로졸

제주 고산이나 안면도에서 측정한 에어로졸 산란계수와 흡수계수, 수농도는 비슷한 오염 수준을 가진 아시아 다른 지역의 값과 유사한 수준이지만, 세계의 다른 청정 지역보다는 매우 높았다(견고한 동의).

에어로졸의 크기는 약 수백 나노미터부터 수십 마이크로미터에 이르기까지 그 범위가 넓으며, 불규칙한 친수성, 광학적 특성, 다른 종류의 에어로졸과 혼합 등의 복잡한 과정을 거치기 때문에 그 특성을 파악하기가 어렵다. 에어로졸은 크게 화석연료 연소나 생체소각(biomass burning) 등에 의하여 발생하는 인류기원 에어로졸과, 화산, 해염입자, 황사처럼 인간의 개입 없이 발생하는 자연기원 에어로졸로 나눌 수 있다. 에어로졸의 종류는 황산염, 질산염, 검댕, 유기에어로졸, 갈색탄소, 황사, 해염입자 등이 있고 이들은 대기 중에 직접 배출되거나 또는 대기 중에서 화학적 결합에 의하여 만들어지기도 한다. 1주일 내외의 짧은 에어로졸의 잔류시간으로 인하여 에어로졸의 시공간적 분포는 오염배출원을 중심으로 매우 크다. 대기 중의 에어로졸은 강수를 동반한 습식침착이나 중력이나 지면과의 상호작용 등에 의해서 제거되는 건식침착 등으로 대기 중에서 제거된다.

에어로졸 수농도는 고산기후관측소에서 세 차례 측정된 값과, 백령도집중관측소에서 측정된 값이 각각 $4,697 \pm 1,823 \text{cm}^{-3}$, $4,217 \pm 1,514 \text{cm}^{-3}$, $3,890 \pm 1,808 \text{cm}^{-3}$, $5,117 \pm 1,880 \text{cm}^{-3}$ 로 나타났다. 그림 6.1은 서울을 비롯하여 한반도와 그 주변 지역에서 관측된 에어로졸과 구름응결핵의 수농도 분포를 정리한 것이다.

제주 고산이나 안면도에서 측정한 에어로졸 산란계수와 흡수계수, 수농도는 비슷한 오염 수준을 가진 아시아 다른 지역의 값과 유사한 수준이지만 세계의 다른 청정지역의 값과 비교하면 매우 높은데 이러한 결과는 매우 합당하다고 할 수 있으므로 신뢰도는 견고한 동의에 해당한다.

선포토미터 및 라이다 등의 지상원격탐사를 이용한 에어로졸 관측은 세계적인 관측프로그램의 일환으로 수행된 것을 비롯해 높은 수준의 연구 결과를 보였다(견고한 동의). Geostationary Ocean

6.3. 구름과 에어로졸의 상호작용

구름과 에어로졸의 상호작용에 대한 이해도가 증가하고 있다(견고한 동의).

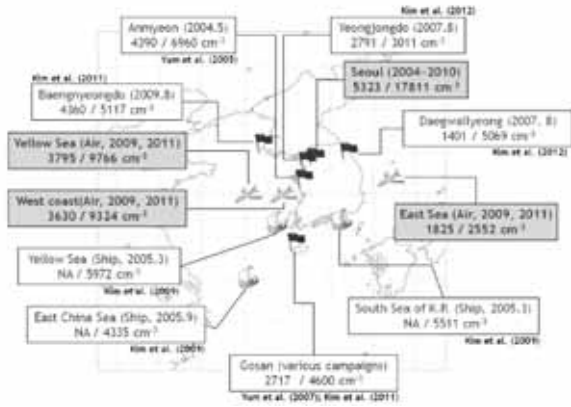


그림 6.1. 한반도와 주변에서의 에어로졸과 구름응결 핵 수농도 분포. 깃발은 지상관측 장소를 나타냄. 항공관측 결과는 1,100m 고도 이하의 값을 평균하여 나타냄 {그림 6.2}.

Color Imager(GOCI)의 에어로졸 광학 두께 값을 확인하는 차원에서 고산 선포토타미터의 에어로졸 광학 두께 값과 비교해 본 결과 0.99의 상관관계를 가진다는 보고가 있다.

활발한 경제활동과 높은 인구 및 자동차 밀도 등으로 인하여 한반도 내에서 많은 양의 에어로졸 및 오염물질들이 배출된다. 또한 많은 양의 에어로졸이 중국 등에서 장거리 수송되기 때문에 한반도의 에어로졸 분포를 재현하기 위해 장거리 수송, 기상, 화재 등 여러 변수와 관련된 에어로졸에 대한 연구가 수행되어 왔다.

황사는 한반도의 기후에 영향을 많이 미치는 중요한 에어로졸 성분이다. 최근에 황사를 대상으로 한 모델 연구가 많이 수행되었는데 전구규모 모델, 지역규모 모델, 라그랑지안 모델 등 여러 종류의 모델들이 황사를 재현할 수 있음을 보였다. 최근에는 ADAM2 모델을 이용하여 모의한 중국에서 발생한 황사현상을 관측값과 비교하여 그 통계결과를 보고하였다. 한반도에서 확률적 재현도는 79%, 예상 적중률은 83%, 거짓 경보율은 27%로 나타났다.

수치모델을 이용한 한반도 에어로졸의 배출원 산정이나 황사 재현 실험의 결과는 비교할 연구가 많지 않아 제한적 동의를 신뢰도를 갖는다. 에어로졸 분포의 국지성을 감안할 때 제주 지역의 복사강제력 산정 결과는 매우 큰 의미를 갖는데 관련 연구 논문이 많지 않으므로 중간적 동의를 신뢰도를 갖는다.

관측기술의 지속적인 진보에 의해 구름과 에어로졸의 상호작용에 대한 이해도가 증가하고 있다. 위성원격관측 및 항공관측 자료를 이용한 에어로졸-구름 상호작용 연구에서는 에어로졸 증가에 따른 운량의 증가가 발생하고 대기하층 안정도, 구름 내 빙정함량, 구름의 형태, 구름방울 수농도 등 여러 조건에 따라 다양한 결과를 보인다. 수치모델을 이용한 에어로졸-구름-강수 상호작용 연구 논문에서는 에어로졸의 증가에 의해 야기되는 구름발달과 강수의 변화를 조사하였는데, 약한 대류를 일으키는 구름에서는 에어로졸의 증가가 강수의 감소를 가져오는 반면, 강한 대류를 일으켜 빙정과정의 활발한 구름에서는 강수의 증대를 가져온다는 결과를 거의 공통적으로 보여줬으며(그림 6.2와 6.3), 이는 IPCC 5차 평가보고서에 기여한 다른 여러 연구 결과와도 일관성을 갖는다. 이런 의미에서 견고한 동의의 신뢰도를 갖는다고 할 수 있다.

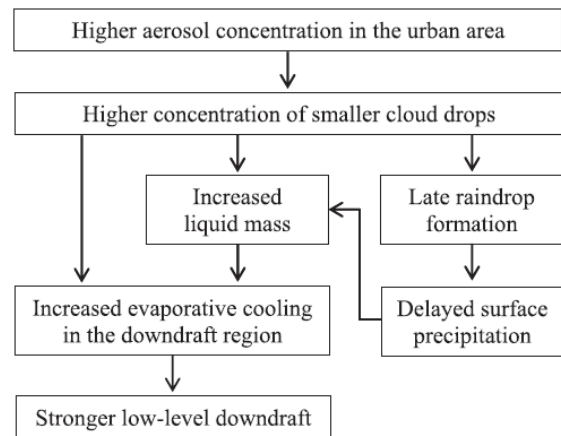


그림 6.2. 도시 지역의 에어로졸이 낮은 고도의 구름에 미치는 영향 {그림 6.3}.

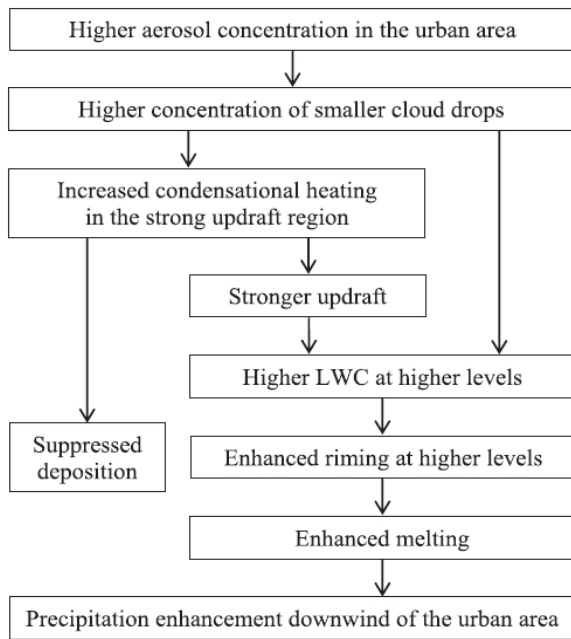


그림 6.3. 도시 지역의 에어로졸이 깊은 대류운에 미치는 영향 {그림 6.4}.

6.4. 복사강제력과 유효복사강제력

1994년부터 2007년까지 고산 지역의 연간 총 에어로졸 복사강제력은 $-4.48 \sim +0.53 \text{Wm}^{-2}$ 으로 나타났으며 황산이온 농도의 감소 및 원소 탄소(Elemental Carbon) 농도의 증가로 인해 에어로졸 복사강제력이 증가하는 추세가 나타났다. 7년간 선포토미터와 라이다의 관측을 통해 고산의 에어로졸 광학두께와 복사강제력을 비교 분석하였다. 맑은 날의 연평균 복사강제력(복사강제효율성)은 지표에서 $-27.55 \pm 9.21 \text{Wm}^{-2}$ ($-91.95 \pm 11.12 \text{Wm}^{-2}/\tau$), 대기 상부에서 $-15.79 \pm 4.44 \text{Wm}^{-2}$ ($-53.76 \pm 6.70 \text{Wm}^{-2}/\tau$)로 관측되어, 총 대기흡수가 $11.76 \pm 5.82 \text{Wm}^{-2}$ 임을 밝혔다. 검댕으로 인한 대기 강제력은 총 에어로졸로 인한 대기 온난화보다 88% 더 기여한다고 보고되었다.

에어로졸에 의해 산란된 태양복사에너지는 주로 우주로 되돌아가기 때문에 지구 대기 상단에서는 음의 값의 복사강제력을 가진다. 하지만 태양복사를 흡수하는 검댕과 황사 같은 에어로졸에 의해 대기층 복사강제력은 양의 값을 가지기도 한다. 이 보고서에 인용된 연구들도 이와 일관성이 있는 결과를 보고하고 있으나, 큰 편차와 불확실성은 여전히 존재한다.

비록 연구대상 설정, 사용모델, 기간 등 연구 방

식의 차이는 있지만, 여러 연구가 아시아 지역에 초점을 맞춘 종합적인 에어로졸의 직접, 준직접, 또는 간접효과 연구결과를 보고하였다.

6.5. 강수변화의 과정

전지구적 기후예측에 있어서 에어로졸 간접효과가 갖는 중요성이 부각된 이후로 에어로졸-구름-강수 상호작용에 대한 연구가 비약적으로 증가하고 있다. 최근에는 에어로졸이 강수에 미치는 영향에 있어서 다량의 에어로졸에 의해 크기가 감소한 구름방울의 충돌병합 효율 감소에 따른 강수 감소 현상이 다양한 관측을 통해 확인되고 있지만 상반되는 관측결과 및 해석을 내놓는 연구들도 있다. 국내에서는 한반도를 포함한 동북아시아 지역에서 에어로졸-구름-강수 상호작용 이해를 위하여 관측적인 접근의 문제점과 제한, 연구의 한계와 최선의 연구접근 방법, 그리고 대기 안정도, 습윤 조건, 구름단열도 등의 구름주변의 환경에 따라 에어로졸-구름-강수 상호작용 메커니즘 관측 및 해석 등에 대해 방법론적인 고찰을 수행한 바 있다.

7. 인위적 및 자연적 복사강제력

인간의 활동과 자연적인 원인에 의한 대기 조성의 변화는 에너지 균형을 변화시키고 기후 되먹임을 유발하여 결과적으로 지구의 기후변화를 유도하는 동력원이다. 복사강제력(RF)은 외부적으로 추가된 온실가스 등에 의해 발생하는 에너지 균형의 변화를 정량화하기 위하여 사용되며, 양의 RF는 온난화를, 음의 RF는 냉각화를 의미한다. 이 절에서는 한반도를 중심으로 한 동아시아 지역의 각 성분 에 의한 복사강제력을 인위적 요인과 자연적 요인으로 나누어 간략히 요약하였다. 아울러 연구 자료의 한계로 한반도 및 동아시아의 복사강제력의 불확실성은 제시하기가 어렵다고 판단되어 전지구에 대하여 정성적으로 나타내었다.

7.1. 대기화학

과거 20년간의 동아시아지역 봄철 오존농도 증가의 30%가 기상요소의 변동성에 의해 설명될 수 있음이 보고되었다(제한적 동의).

오존은 화학과 복사가 동시에 활성을 띠는 물질로 주요한 단기-기후 강제자이다. 한반도에서의 오존농도는 전구물질의 배출량의 증가와 중국의 영향 외에 기후변화에 따른 영향을 동시에 받는다. 우리나라의 오존 농도의 연변화는 오존의 최저농도가 겨울철(11~2월)에, 최고농도는 봄철(3~6월)에 나타나며, 여름철(7~8월)에는 잦은 강수로 인한 전구물질과 일사량의 감소로 낮은 농도를 보인다 일사가 다시 강해지는 가을철(9~10월)에 농도가 증가하는 쌍봉형 분포를 보였다. 평균적인 오존의 공간분포는 NO₂의 공간분포와 반대 양상을 나타내며, 오염원이 밀집된 수도권 및 대도시에서 낮고 상대적으로 청정하며 해륙풍의 영향을 많이 받는 해안도시에서 높은 경향을 보인다(그림 7.1).

모델 연구를 통해 과거 20년간의 동아시아지역 봄철 오존농도 증가의 30%가 기상요소의 변동성에 의해 설명될 수 있음이 보고되었다(제한적 동의). 국내 환경부 및 기상청 자료를 이용한 연구에 따르면 기상요소에 의한 오존농도의 변동은 주로

일사량과 기온에 의해 영향을 받는 것으로 나타났으며 주로 수도권 및 내륙지역에서 일사량과 기온 영향이 높게 나타났다. 고농도 오존이 관측되는 5~10월, 수도권지역에서 ‘오존의 8시간 평균농도가 대기환경기준인 60ppbv를 초과할 확률’은 일최고기온이 4°C 상승할 때 마다 두 배씩 증가하고 있었다(중간적 동의, 그림 7.2). 따라서, 미래 한반도 기온의 증가는 향후 한국의 대기질에도 지속적인 영향을 미칠 것으로 예상된다. 한반도의 이산화탄소, 메탄, 아산화질소 등의 온실가스량(2013년 기준: 402.4ppm, 1,957ppb, 326.1ppb)은 전지구 평균 온실가스량(2011년 기준: 390.5ppm, 1,803ppb, 324.2ppb)에 비해 비교적 높게 나타나고 있기 때문에 이로 인한 복사강제력도 전지구의 복사강제력과 유사하거나 다소 높게 나타날 것으로 추정된다.

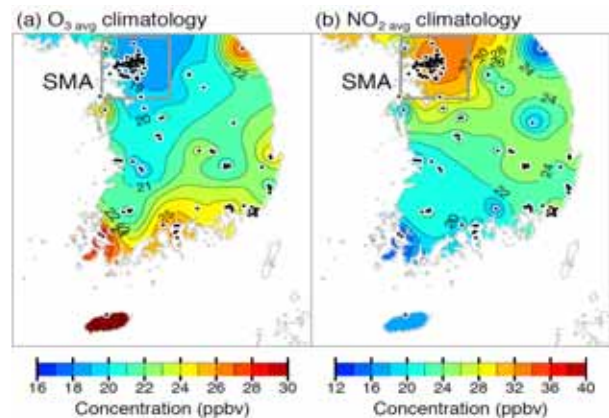


그림 7.1. 1999~2010년 평균 (a)일평균 O₃과 (b)일평균 NO₂농도의 공간분포 {그림 7.3}.

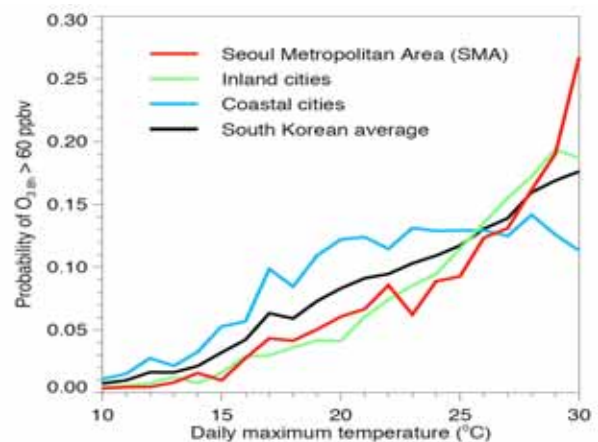


그림 7.2. 일최고기온에 따라 오존의 8시간 평균농도가 대기환경기준(60ppb)을 초과할 확률의 수도권(적색), 내륙도시(녹색), 해안도시(청색) 및 남한지역(검정)에 대한 평균 {그림 7.9}.

7.2. 인위적 복사강제력

동아시아 지역의 검댕에 의한 복사강제력은 $+2.1(1.2\sim 2.3)Wm^{-2}$ 로 이산화탄소에 의한 전지구 복사강제력($1.82Wm^{-2}$)에 상응하는 값으로 추정된다(제한적 동의)

한반도 및 동아시아 지역의 온실가스에 의한 복사강제력 산출 연구가 부족하나, 우리나라의 온실가스량은 전지구 평균 온실가스량에 비해 높게 나타나고 있어, 이에 인위적 복사강제력도 유사하거나 다소 높게 나타날 것으로 추정된다. 한반도 서울지역 상공의 오존전량은 1990년대 평균인 323DU에서 2000년대의 328DU로 5DU가 증가하였으며, 포항 상공의 오존전량은 1990년대의 309.7DU에서 2000년대는 316.0DU로 증가하였다. 비록 지역적인 차이는 있으나 한반도 상공의 오존전량은 꾸준히 증가하는 경향을 뚜렷하게 나타내었다. 한반도의 대류권 오존 증가도 주어진 기상조건 하에서 중국으로부터 장거리 수송에 의해 최대 25% 기여할 수 있음을 보여주었다(그림 7.3). 이러한 수송에 의한 대류권 오존 변화에 따른 복사강제력 변화는 $34\sim 48Wm^{-2}DU^{-1}$ 로 나타난다.

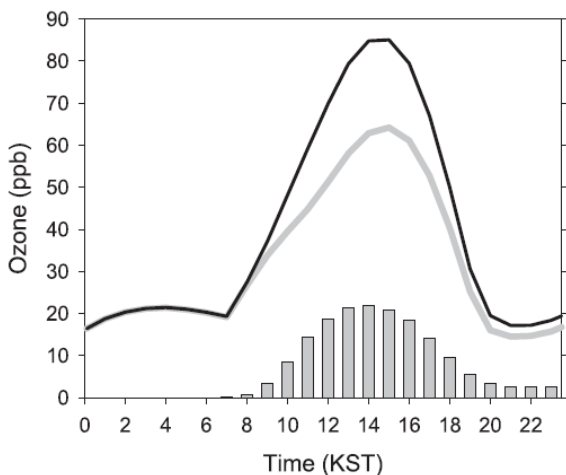


그림 7.3. 지표면 오존 농도의 시간에 따른 변화. 검은 실선은 중국 기원의 배출이 한반도 오존량에의 기여를 고려한 것이며 회색실선은 고려하지 않은 것이다. 막대그래프는 이 둘의 차이임 {그림 7.11}.

시공간적인 변화가 크고, 비교적 많은 연구결과가 있는 한반도를 포함하는 동아시아 에어로졸 복사강제력의 가장 근접한 추정치는 $-1.3Wm^{-2}$ 로

볼 수 있으며 전지구 평균 복사강제력 $-0.35Wm^{-2}$ 에 비해 매우 크게 나타난다. 그러나 계산을 위한 모델 입력 자료에 따라서 매우 큰 불확실성 범위 $-1.1\sim -2.3Wm^{-2}$ 를 가진다. 동아시아 지역의 검댕에 의한 복사강제력은 $+2.1(1.2\sim 2.3)Wm^{-2}$ 로 이산화탄소에 의한 전지구 복사강제력($1.82Wm^{-2}$)에 상응하는 값으로 추정된다(제한적 동의).

7.3. 자연적 복사강제력

기후변화를 야기하는 자연적 요인들 중 대표적인 것으로 태양활동의 변화와 화산활동에 의한 것을 들 수 있다. 1750년부터 2011년까지 태양복사량의 총량(Total Solar Irradiance, TSI) 변화에 기인한 복사강제력에 대한 최선의 추정치는 $0.05Wm^{-2}$ 이다(중간적 동의). TSI 복사강제력 변화가 향후 수십 년 동안의 온실가스로 인한 복사강제력 증가 전망치에 비해서는 훨씬 낮을 것이라 사실에 대한 신뢰도는 매우 높은 편이다. 지난 30년 동안 자외선의 변화는 태양활동의 TSI 변화의 약 30%를 설명 할 수 있는 것으로 알려져 왔다. 하지만, 최근 연구 결과는 TSI 변화에 대한 400nm 이하의 자외선 영역의 변동성에 의한 기여가 30~90%에 이를 수 있고, 약 60% 정도가 될 것이라고 보여준다.

화산폭발에 의한 복사강제력은 그 과학적 이해도가 높은 편이며, 분출 후 2년 동안 영향을 줄 수 있다. 2008~2011년 기간 동안에 발생한 소규모 화산폭발에 의한 복사강제력은 $-0.11[-0.15\sim -0.08]Wm^{-2}$ 로 추정되지만(중간적 동의), 산업화 기간 동안을 비교해 보면 인위적 복사강제력에 비해서 무시할 수 있을 정도로 작다. 태양복사와 화산활동에 의한 복사강제력을 위성관측을 기반으로 추정한 결과, 1980년부터 2011년까지의 인위적 복사강제력 증가($1.0Wm^{-2}$, 범위는 $0.7\sim 1.3Wm^{-2}$ 정도임)에 비하여 자연적 복사강제력은 거의 0에 가까운 변화(범위는 $-0.1\sim +0.1Wm^{-2}$)를 보였다. 최근 15년 동안의 자연적 복사강제력 크기는 인위적 복사강제력 크기의 최소한 30% 정도를 차지한 것으로 밝혀졌다.

현재 한반도 또는 동아시아 지역에 대해서 복사강제력의 신뢰수준을 논의하기는 매우 이르다. 그 이유는 아직까지는 지역규모의 연구 결과가 충분

히 도출되지 않았기 때문이다.

7.4. 배출량 매트릭스

메트릭스는 각각의 다른 물질의 배출이 기후변화에 기여하는 바를 정량화하기 위해 사용된다. 국내에서는 2010년 1월 1일부터 개발사업에 대한 사전환경성검토 및 환경영향평가 시 온실가스 항목에 대한 평가를 실시하고 있으며, 온실가스 환경영향평가 시 배출량 매트릭스인 지구온난화 지수(Global Warming Potential, GWP)가 직접 사용된다.

그림 7.4는 선택된 주요 물질들의 인간활동에 의한 전지구 배출총량에 의하여 추정된 매트릭스로 나타낸 기후 영향을 보여준다. 시간 수평선은 예시로써 선택되었고, 이러한 물질들이 기준 기체의 영향에 비교하여 상대적으로 어느 정도의 영향을 줄 것인지 매개변수의 함수(GWP에서 적분된 RF나 GTP의 종점 온도)로써 판단할 수 있다. 예를 들면, CH₄의 경우에는 10년의 시간규모에 대하여 GWP나 GTP의 값이 CO₂에 필적하거나 능가하지만, 시간규모가 커짐에 따라 그 기후영향이 작음을 확인할 수 있다. 이는 대기 중 잔류시간(수명)이 짧기 때문이다. WMGHGs의 배출량은 배출 부문에 따라 크게 변하는 반면에, 이 기체들의 기후 영향들은 배출부문에는 크게 의존하지 않는다. 기후 영향의 측면에서 화학적으로 활동적이고 단수명인 물질들의 경우에는 이러한 배출 부문에 의존하게 되어 배출되는 위치(위도)에 따라 기후 영향이 달라지게 된다.

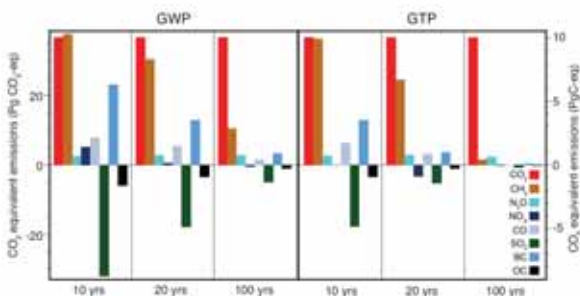


그림 7.4. 다양한 시간규모에 대해 GWP와 GTP로 측정된 전지구 인간활동에 의한 특정물질의 배출이 미치는 기후영향(에어로졸-구름 상호작용이 불포함된 결과임). 현재의 배출 자료는 최신 자료를 이용하였고, 단위는 'CO₂ 등가 총배출량'이다 {그림 7.19}.

8. 기후모델 평가

불확실성은 구체적으로 제시할 수 없지만 각 모델의 특성과 성능의 차이는 있으나 대체로 현재 기후에 대한 우수한 모의 성능을 보였다.

기후모델은 과거 및 현재의 기후를 재현하고 미래의 기후를 예측하기 위한 도구로써 지구 대기, 해양, 지면 및 빙권에 대해 운동방정식, 열역학 방정식, 질량 및 수분 보존 방정식을 수치적으로 계산하며 이를 통해 기후를 재현 또는 예측해 낸다. 기후모델 결과를 사용하여 미래변화를 평가하기 위해서는 현재 기후모델의 한계와 성능의 수준을 파악하는 것이 중요하며, 또한 이를 개선하기 위한 방안들에 대해서도 고려해 보아야 한다. 이 절에서는 IPCC 5차 평가보고서에 사용된 기후모델의 특성과 한반도를 중심으로 한 동아시아 지역에서의 모델연구 결과들을 정리하였다.

8.1. 기후모델과 특성

최근 선진국에서는 국공립 연구기관을 중심으로 10개국의 20여개에 이르는 대기-해양 결합모델 (Atmosphere-Ocean General Circulation Models, AOGCMs)을 개발해왔고 대기 중 에어로졸, 탄소순환, 화학 과정들을 포함하는 지구 시스템 모델(Earth System Models, ESMs)이 개발되고 있다. IPCC 5차 평가보고서에서는 이러한 결합 모델간의 비교 프로젝트(Coupled Model Intercomparison Project Phase 5, CMIP5)에 참여한 기후모델들이 포함되었으며 이들은 CMIP3에 참여한 모델들에 비해 대기와 해양 모델의 해상도가 증가되었다. 지구 시스템 모델에 있어서는 CMIP3에서는 영국과 일본 모델시스템들이 에어로졸 과정을 포함하고 프랑스 모델에서만 화학과정이 포함되어 있었던 반면, CMIP5에서는 거의 대부분의 모델시스템들이 에어로졸 모델을 포함하고 있으며 화학과정도 11개 모델에 장착되어 있다.

국내에서는 HadGEM2-AO 모델을 이용한 대기-해양 접합모델 시스템이 CMIP5에 참여하였다. 기상청/국립기상연구소에서 주도하여 운영된 이 모델은 대기 부분이 HadGEM2로 구성되어 있으며 경도방향으로 1.875°, 위도방향으로 1.25°의 수평

해상도를 가진다(N96). 연직방향으로는 60개 층을 가지며 최상층 고도는 84,132.439m이다. 대기와 상호작용을 하는 에어로졸 계산 부분이 포함되어 있으며 해양 모델은 대기 모델과 같은 수평 해상도를 가진다.

상세한 지역적 기후 정보를 얻기 위해 차수내림(downscaling)을 사용한 지역기후모델을 운영하고 있다. 한반도 지역을 중심으로 한 동아시아 지역에서의 지역기후모델 차수내림은 기상청/국립기상연구소에서 수행된 HadGEM2-AO 모델의 현재 기후 모의 결과 및 RCP 시나리오에 따라 얻은 미래 기후 자료를 이용하여 진행되어 왔다. 지역기후모델의 영역으로는 COordinate Regional climate Downscaling EXperiment(CORDEX)의 동아시아지역이 채택되었고 50km 해상도를 가지며 한반도를 포함, 서쪽으로는 인도양을 포함한 인도 몬순지역까지 확장되어 있다. 한반도 중심의 상세한 지역기후정보를 얻기 위해 한반도 주변 지역을 중심으로 12.5km의 해상도를 가지는 영역에 대하여 차수내림이 진행되었다.

8.2. 기후모델의 성능평가

IPCC 5차 평가보고서에 사용된 CMIP5 모델들은 CMIP3 모델들에 비하여 대기 및 해양 모델 해상도가 증가하였고 다양한 화학과정 및 에어로졸 과정이 포함되었다. 전구기후모델의 성능을 평가하기 위하여 동아시아 몬순 시스템 및 엘니뇨 남방진동(El Niño/Southern Oscillation, ENSO)의 모의 수준을 파악해 보았다. 전반적으로 이전 CMIP3 결과에 비교해 볼 때 CMIP5 모델의 결과가 극적으로 개선되지는 않았다는 점은 몇몇 연구에서 공통적으로 나타났다. 하지만, ENSO의 경우 모델들 간의 ENSO 진폭의 차이, 바람 응력의 모의 등이 개선되었으며 동아시아 여름 몬순의 경우 20세기 현재 기후에 대하여 CMIP5에서의 강수 결과가 CMIP3에 비해 관측과의 높은 공간 상관도를 보였다. 아시아 몬순의 경우도 CMIP5 결과를 이용하여 미래 기후변화를 연구할 수 있는 신뢰성을 제시하였다(그림 8.1).

국립기상연구소는 IPCC 5차 평가보고서 대응을 위한 전지구 기후변화 보고서를 발간하여 RCP 2.6/4.5/6.0/8.5에 따른 기후변화 전망을 제시하

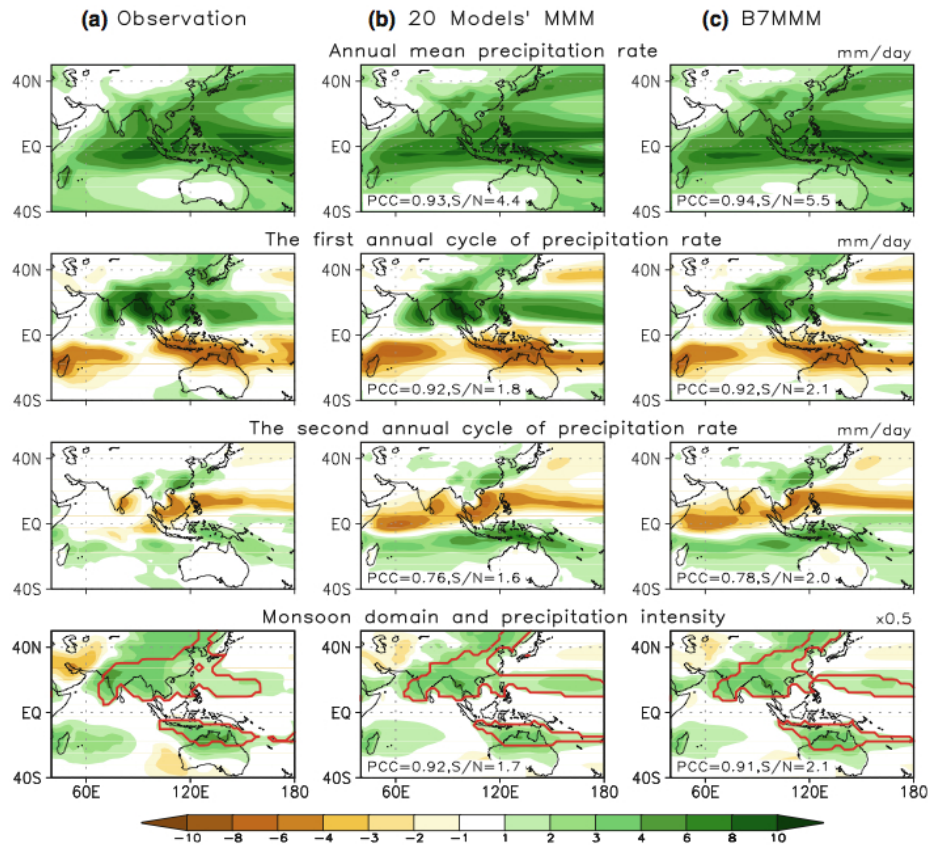


그림 8.1. 1980년에서 2005년까지의 연평균 강수량(mm/일). 첫 번째 연간 순환 모드(하동지 모드, JJAS - DJFM), 두 번째 연간 순환 모드(춘추분 비대칭 모드, AM - ON), 몬순 영역과 강수 강도. (a)는 관측(CMAP과 GPCP 통합)이며, (b)와 (c)는 모의된 몬순 기후 값으로 각각 20개 모델의 평균(MMM) 및 상위 7개 모델의 평균(B7MMM)값이다 (그림 8.8).

였다. 그림 8.2는 국립기상연구소에서 수행한 HadGEM2-AO결과와 IPCC 5차 평가보고서에 참여한 모델의 성능평가 결과를 나타낸 것이다. 전반적으로 HadGEM2-AO이 다른 CMIP5 모델 중에서 우수한 성능을 보이는 모델군에 포함됨을 확인할 수 있다.

미래 기후 시나리오를 지역기후모델로 차수내림하는 연구는 한반도 지역에서도 이루어져왔다. 경계자료로는 전구 결합 모델인 HadGEM2-AO이 사용되었으며 지역기후모델은 GRIMs-RMP, RegCM4, SNURCM, WRF 모델이 사용되었다. 각 모델의 특성과 성능의 차이는 다르지만 대체로 현재 기후에 대한 우수한 모의 성능을 보였다(그림 8.3). 이를 바탕으로 모의된 미래 기후 정보에 대한 신뢰성을 판단할 수 있었다. 한반도를 대상으로 한 차수내림은 50km의 CORDEX-동아시아 영역과 12.5km의 한반도 영역에 대하여 이루어졌다.

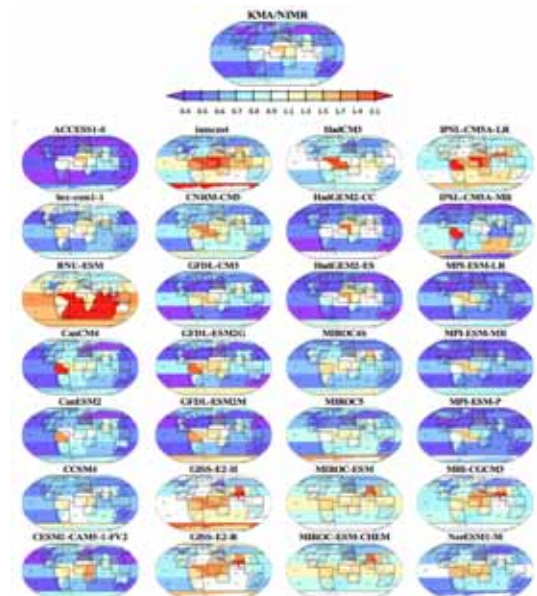


그림 8.2. 기후모델과 관측과의 편차를 이용한 성능평가 결과 비교. 가장 위쪽 결과가 국립기상연구소 HadGEM2-AO의 결과이며 나머지는 IPCC 5차 평가보고서 작성에 참여한 모델의 성능평가 결과임 (그림 8.4).

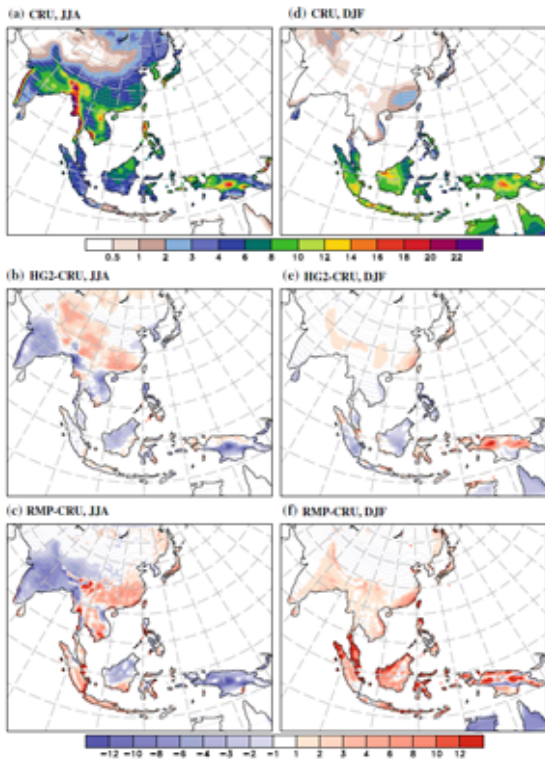


그림 8.3. 1980년에서 2005년까지의 계절 평균된 강수량. (a)는 관측, (b)는 HG2, (c)는 RMP의 여름철(JJA) 결과이다. (d), (e), (f)는 (a), (b), (c)에 해당하는 겨울철(DJF) 결과 {그림 8.11}.

9. 기후변화의 탐지와 원인규명

이 절에서는 한반도를 포함한 동아시아의 과거 기후변화를 장기추세 및 경년변동성 그리고 계절안 변동성의 변화에 대하여 평가하였다. 장기추세의 경우 온실가스 증가로 인한 지구온난화의 영향이 한반도 및 동아시아 기후에 미치는 영향을 조사하였으며 경년/수십 년 변동성은 문순 시스템, 태풍, 엘니뇨, 북극진동, 그리고 계절안변동성의 영향이 한반도에 미치는 영향을 평가하였다.

9.1. 방법론의 평가

온실가스를 포함한 모델결과는 관측과 유사한 경향을 보이지만, 자연강제력 실험은 관측을 잘 재현하지 못한다. 따라서 한반도 연평균기온은 1980년대 이후로 뚜렷하게 상승하였는데 아시아 및 동아시아 지역의 온난화를 일으킨 온실가스 증가가 한반도의 온난화에도 상당한 영향을 미친 것으로 평가되었다(견고한 동의).

최근 기후변화 탐지 및 원인규명 연구는 더 작은 공간규모(지역적 또는 국지적 변화) 그리고 극한현상의 변화에 대한 분석 쪽으로 활발하게 진행이 되어 왔다. 분석방법은 선형회귀를 바탕으로 한 지문법과 각 격자점에서 장기추세를 비교하는 방식이 주로 이용되었으며 모든 경우에서 내부변동성의 정확한 추정이 매우 중요한 요인으로 평가되었다. 동아시아 지역에 대한 탐지 및 원인규명 연구는 매우 드물게 진행이 되었다. 최근 극한기온 증가에 대한 탐지 연구가 실시되어 온실가스 증가에 따른 인간의 영향을 탐지한 결과들이 보고되었으나 한반도를 포함한 동아시아 지역의 강수 변화 및 극한강수에 대한 원인규명 분석은 거의 이루어지지 않았다. 또한 대량 앙상블 모의실험을 수행하고 결과를 확률적으로 비교하는 극한현상의 원인규명 연구가 현재 활발히 진행되고 있으며, 이를 동아시아 지역에 대해 적용한 연구가 요구된다.

그림 9.1은 지난 50년간 동아시아 지역의 연최고 일최저기온(TNx)의 변화를 HadEX2 관측과 8개 CMIP5 모델자료와 비교하여 나타낸 그림이다. 온실가스 증가를 포함한 모델결과(ALL, GHG)가

관측(OBS)과 유사한 증가추세를 보여주고 있으나 온실가스를 제외한 자연강제력 실험(NAT)은 관측을 재현하지 못함을 알 수 있다. 따라서 한반도 연평균기온은 80년대 이후로 뚜렷하게 상승하였는데 아시아 및 동아시아 지역의 온난화를 일으킨 온실가스 증가가 한반도의 온난화에도 상당한 영향을 미친 것으로 평가되었다(견고한 동의).

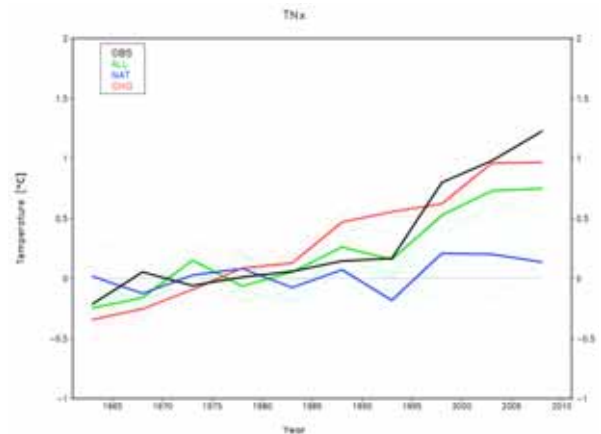


그림 9.1. 동아시아 지역 기온극한의 변화: 1961~2010년간 연최고 일최저기온(TNx) 동아시아 지역평균아노말리의 5년 평균시계열. HadEX2 관측자료(OBS, 검정색)와 8개 CMIP5 모든 강제력(ALL, 녹색), 자연 강제력(NAT, 파란색), 온실가스 강제력 실험(GHG, 빨간색) 앙상블 평균결과 {그림 9.1}.

9.2. 기온과 강수량

1990년대 북태평양 고기압의 세력이 서쪽으로 확장하여 한반도 8월 강수량이 증가하였다(중간적 동의). 한파는 북극진동과 관련성이 커서 1980년대 후반을 기점으로 감소하다가 최근 10년간 빈도가 증가하였다(중간적 동의).

베이지안 변화시점 추정법을 이용한 우리나라의 연평균 기온, 연평균 최고기온, 연평균 최저기온의 변화 시점은 모두 1980년대 후반에 나타났다. 계절 중에는 겨울철 평균기온 상승률(0.5°C/10년)이 가장 큰 것으로 밝혀졌는데 우리나라의 겨울철 기온의 변화 시점은 1980년대 중반을 전후로 탐지되었다. 이 시기 이후 우리나라뿐만 아니라 동아시아 지역에서 겨울철 평균기온의 온난화 경향이 뚜렷하게 나타났다. 이는 북반구 대기순환 지수 중 북극진동(Arctic Oscillation, AO)은 우리나라

와 중국의 겨울철 기온 변화와 관련한 주요 인자로 밝혀졌으며, 겨울철뿐만 아니라 봄철과 여름철에도 영향을 미친다. 이러한 북극진동의 경향성은 동아시아의 20세기 후반기 동안의 온난화 추세에 부분적으로 기여한 것으로 판단된다.

연강수량은 수도권과 강원도에서 크게 증가하였고, 계절 중 여름철 강수량(55.2mm/10년)이 유의한 증가 경향을 보였는데 이는 여름철 호우의 빈도 및 강도의 증가가 크게 기여한 것으로 조사되었다. 여름철 강수량은 1990년대를 기점으로 변화시점이 발생하였다. 이는 장마기간 보다는 8월 강수량의 변화가 큰 기여를 하였는데, 90년대 이후 북서태평양 고기압 세력이 서쪽으로 확장한 것이 원인 중의 하나임이 분석되었다(중간적 동의).

한파는 북극진동지수와 관련성이 크며 1980년대 후반을 기점으로 크게 감소하였다가 최근 10년간 빈도가 증가하였으며, 호우는 90년대 후반에 증가하는 변화점이 뚜렷했고 우리나라 연강수량 증가에 크게 기여하였다(중간적 동의).

9.3. 몬순 시스템

다양한 경년 변동 요인에 의해서 최근 한반도 장마 강수의 최대치가 나타나는 시기가 빨라지고, 총 강수량도 증가하고 있다(제한적 동의).

한반도 장마를 포함하는 동아시아 몬순 강수량은 매년 큰 폭으로 변동한다. 이는 종관규모 요란 및 30~80일 간격의 계절내 진동에서부터 경년 변동 및 수십 년 주기의 장주기 변동까지 여러 가지 변동 성분이 복합적으로 영향을 준 결과다. 최근의 연구에 따르면, 동아시아 몬순의 경년 변동은 필리핀 해의 대류활동을 포함하는 북서태평양 몬순, 북대서양 진동, 인도양 해수면온도 변화, 중앙태평양 엘니뇨, 유라시아 눈덮임 등에 영향을 받는 것으로 밝혀졌다(제한적 동의). 또한 몬순의 장기 변동은 태평양 수십 년 주기 변동(PDO)과 1994년을 기점으로 서태평양 해수면온도가 증가한 현상에 의해 주요하게 영향을 받는 것으로 알려져 있다. 그 결과 최근 한반도 장마 강수량의 최대값이 나타나는 시기가 예년에 비해 1주일 정도 빨라지고, 총 강수량 역시 증가 추세에 있는 것으로 보고되고 있다(제한적 동의). 동아시아 몬순의 수

십 년 주기 변동이 1994년 근처에서 발생하였음을 보였으며 동아시아 몬순과 북서태평양 몬순과의 음의 상관성이 괄목할 정도로 증가함을 보였다. 또한 한반도 여름철 강수는 1998년을 기점으로 뚜렷한 증가가 있음을 보고하고 있으며 최근의 한반도 장마 강수의 최대치가 나타나는 시기가 앞당겨지고 있음에 주목하고 있다.

9.4. 열대성 저기압

1970년대 이후 한반도에 영향을 미치는 열대성 저기압의 강도가 증가하고 있지만, 이것이 인위적으로 유발되는 기후변화 때문인지는 확실하지 않다(제한적 동의).

선행연구들에 따르면 열대성 저기압의 발생지역과 이동경로는 열대 해수면온도의 공간적 변화경향에 따른 열역학적 변화와 함께, 태평양 워커순환의 강도의 감소와 같은 역학적 변화에 민감하게 변화하는 것으로 제시하고 있다. 한편, 대기환경 및 에어로졸이 미치는 인도양 및 대서양에서의 열대성 저기압의 변동에 대한 연구는 아직까지 북서태평양에서 이루어지지 않았다. 남아시아에서의 검댕과 에어로졸의 인위적 배출량 증가로 인하여, 북인도양에서의 해수면온도 경도가 감소하고, 연직 바람쉬어가 감소할 수 있음이 제시된 바 있고, 바람쉬어의 감소에 따라 아라비아해의 강한 열대성 저기압의 발생빈도가 증가할 수 있음이 제시되었다.

열대성 저기압의 발생 및 이동은 대기-해양의 기후변동 모드와 밀접한 영향을 가지는 것으로 나타났다. ENSO 및 PI 원격상관패턴 등의 변화에 따라 북서태평양에서는 발생 지역 및 주 이동경로의 변화, 최대 강도 등이 영향을 받는 것으로 나타났다. 최신 연구들은 한반도에 영향을 미치는 열대성 저기압의 강도가 증가하는 것으로 제시하고 있으며, 특히 1970년대 후반 이후 증가의 경향이 나타나고 있다(제한적 동의). 그러나, 이러한 결과가 열대성 저기압의 내재적인 변동성에 따른 수십 년 주기의 변동 때문인지, 아니면 인위적으로 유발되는 기후변화 때문인지는 확실하지 않다.

9.5. 엘니뇨와 한반도 기후

두 가지 형태의 엘니뇨가 계절별로 서로 다르게 한반도 기후에 영향을 준다(제한적 동의).

엘니뇨는 열대 태평양의 현상이지만, 한반도 기후와 밀접한 연관을 가지고 있다(그림 9.2). 1990년대 이후 중태평양의 해수면온도가 동태평양의 해수면온도보다 높은 엘니뇨가 빈번하게 발생하면서 두 가지 형태의 엘니뇨의 존재가 보고되고 있는데 이들 엘니뇨는 계절별로 서로 다르게 한반도 기후에 영향을 주는 것으로 밝혀졌다(중간적 동의).

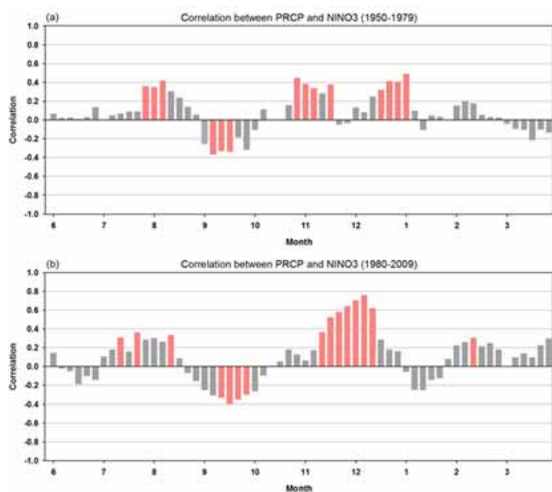


그림 9.2. NDJ NINO3 지수와 25일 이동평균 한반도 강수와의 계절에 따른 상관관계 (a)1950~1979년 기간, (b) 1980~2009년 기간. 빨간색 막대는 90%이상 신뢰값 표시 {그림 9.8}.

엘니뇨는 대부분 서태평양의 강수 변동을 통해 한반도 기후에 영향을 주는데, 서태평양 강수에 대한 대기의 원격상관 패턴은 계절별로 매우 다르게 나타난다(중간적 동의). 대부분의 연구에서 한반도 겨울철 기온은 엘니뇨/라니냐와 밀접한 관련성이 있다고 알려져 있고, 특히 초겨울에 한반도 기후는 엘니뇨 시기에는 따뜻하고, 라니냐 시기에는 상대적으로 추운 경향이 나타났다. 반면, 엘니뇨/라니냐 현상과 우리나라 여름철 강수, 장마와의 상관관계는 엘니뇨/라니냐 현상의 정의, 분석 기간에 따라 서로 상이한 결과를 나타내었다. 엘니뇨가 한반도에 미치는 영향은 북서태평양의 순환 변화를 통해 이루어진다. 또한, 엘니뇨/라니냐 변동은 북서태평양의 대기 및 해양의 상태를 변화시키며 발달기와 소멸기에 따라 대기순환장이 달라진다.

9.6. 북극진동

북극진동이 음의 위상일 때 겨울 몬순의 강도는 강화되고, 한파 발생빈도는 증가하여 평년보다 기온이 낮아진다(중간적 동의).

북극진동은 북반구 대기순환에서 나타나는 지배적 변동성으로 그 위상 변화에 따라 중, 고위도 지역에서 대류권 제트, 블로킹, 스톱 트랙과 같은 북반구 대규모 대기순환장의 변동이 나타나며, 북반구 전체의 기온, 강수량, 북극 해빙, 해수면온도 등의 뚜렷한 변화를 일으킨다. 특히 북극진동이 음의 위상일 때 동아시아 지역에는 몬순 순환의 강화 및 한파 발생의 증가로 평년보다 낮은 온도가 나타난다(중간적 동의, 그림 9.3). 북극진동은 20세기 후반기 동안 양의 경향성을 보이다 1990년대 중반 이후 음의 경향성을 나타내고 있으며, 특히 최근 수년간은 강한 강도의 음의 북극진동이 자주 나타나고 있다. 이 시기동안 동아시아를 포함한 중위도 많은 지역에서 연이어 발생했던 기록적인 한파들은 이러한 북극진동의 장기변동과 관련되어 있다고 제시되고 있다(제한적 동의).

북극진동의 영향은 고위도는 물론 북반구 중위도 전역에 걸쳐 나타난다. 특히 동아시아 지역의 한파 발생 빈도 및 동아시아 겨울 몬순의 강도는 북극진동지수와 매우 높은 통계적 상관성을 보인다. 일반적으로 음의 북극진동 시기에는 겨울철 동아시아 대부분 지역, 특히 중국 동북부와 한반도에서 동아시아 겨울 몬순 순환의 강화에 따른 한파 발생의 증가로 지표면 기온이 평년보다 낮게 나타나고 양의 북극진동 시기에는 이와 반대의 경향으로 온난한 겨울이 나타난다.

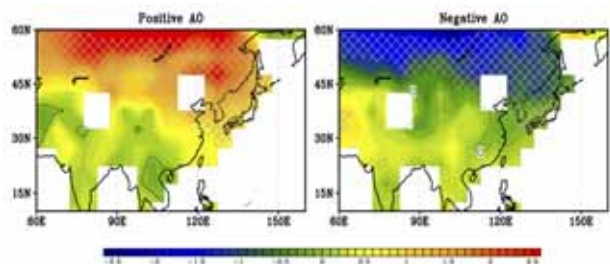


그림 9.3. 북극진동지수가 평년변동성의 1표준편차 이상(좌), 이하(우)일 때 동아시아 지역의 겨울철(11월~3월) 지표면 온도의 평년편차 합성도. 빛금은 통계적으로 95% 이상 신뢰도인 값들을 나타냄 {그림 9.12}.

9.7. 계절안 변동성

최근에 관측되는 MJO의 수십 년 변동이 지구 온난화의 영향인지에 대한 과학적 입증은 아직 부족한 상태이지만, 지구온난화로 MJO의 강도가 강해지고, 발생빈도가 증가할 것이다(제한적 동의).

계절안 변동은 종관 규모 날씨 현상과 계절 기후 변동성의 연결고리 역할을 하며, 주요 변동 성분에는 MJO(Madden-Julian Oscillation)와 BSISO(Boreal Summer Intraseasonal Oscillation)가 있다. MJO에 의해 발현된 로스비 파는 한반도를 포함하는 중위도의 기후 및 열대 저기압 생성·소멸에 영향을 미치며, BSISO는 장마의 시종 및 강도에 영향을 준다. 계절안 변동 예측은 대기 초기 조건의 영향 범주를 넘어서지만 해양 변동의 영향을 받기에는 짧은 시간 범위에 들기 때문에 예측하기 어려운 시간 범위로 간주되고 있다. MJO는 약 40일까지의 예측성이 있는 것으로 알려져 있으며, 최신 기술의 대기-해양 모델을 이용할 경우 20일에서 30일 사이의 예측 기술이 있는 것으로 알려져 있다. 1970년대 후반 이후로 MJO의 강도가 40% 정도 강해졌으며, 그 발생 빈도 또한 증가하였다. 이는 최근 인도양과 서태평양의 해수면온도가 상승하여 수증기 가용량이 증가한 것에 기인하는 것으로 보인다(중간적 동의). 하지만 최근 관측되는 MJO의 수십 년 변동이 자연적인 변동인지 인위적인 지구온난화 영향인지에 대한 과학적 입증이 아직 부족한 상태이다. 지구온난화에 따라 차후 MJO의 강도가 세지고 발생 빈도가 높아질 가능성이 제시되고 있다(제한적 동의).

10. 단기 및 장기 기후변화 전망

이 절에서는 IPCC 5차 평가보고서에 참여하는 전지구기후모델과 지역기후모델을 이용하여 수행된 연구 결과들을 중심으로 한반도 기후변화 및 그와 관련 있는 대기, 해양, 빙권의 변화를 단기(2050년 이전)와 장기(2050년 이후)로 나누어 각각 기후 전망을 살펴보았다.

10.1. 대기와 지표

미래 한반도 연평균 기온은 RCP 4.5에서는 2°C 이상, RCP 8.5에서는 4°C 이상 상승할 것으로 전망된다(견고한 동의). 강수량은 지역적 차이가 클 것으로 전망된다(중간적 동의).

2050년 이전의 단기 전망을 기온, 강수량, 극한 기후에 대해 살펴보았다. 2035년까지는 대규모의 화산 분출이나 태양 복사 변화 등에 의한 자연 변동이 단기 전망에 영향을 줄 수 있으나, 그 이후에는 대기 내의 온실가스 증가에 따른 지구온난화 영향이 더 클 것으로 추정된다. 한반도를 포함하는 동아시아 지역의 현재 기온과 강수를 더 잘 모의하는 5개 전지구모델(B5MME)을 선정하여 5개 모델 평균의 현재(1979~2005년)와 단기 기온(2006~2025년)의 차이를 나타낸 결과, 한반도는 평균적으로 겨울철(여름철) 기온이 2006~2024년에는 $0.5 \pm 0.3(0.5 \pm 0.3)^\circ\text{C}$ 그리고 2025~2049년에는 $1.2 \pm 0.8(1.2 \pm 0.7)^\circ\text{C}$ 변화가 예상된다. 강수의 경우, 여름철 강수 증가가 겨울철보다 더 뚜렷하고, 한반도는 평균적으로 겨울철(여름철) 강수가 2006~2024년에는 $3.0 \pm 10.0(2.8 \pm 7.0)\%$ 그리고 2025~2049년에는 $7.2 \pm 15.0(5.6 \pm 5.0)\%$ 증가할 것으로 예상된다(그림 10.1).

고해상도 모델, 통계적, 역학적 규모축소법을 적용한 모델 결과를 통해 한반도의 극한기후 변화를 전망한 결과, 미래 기후변화 시나리오에 따른 기온과 강수의 극한기후가 증가함을 제시하였는데, 단기 미래(2006~2050년)에 열파 발생의 빈도수가 131%와 111%까지 증가함을 RCP8.5와 RCP4.5 시나리오를 이용해 보였고, 호우의 빈도수는 RCP8.5에서 31.5% 증가하고, RCP4.5에서 24.8% 감소할 것으로 전망하였다.

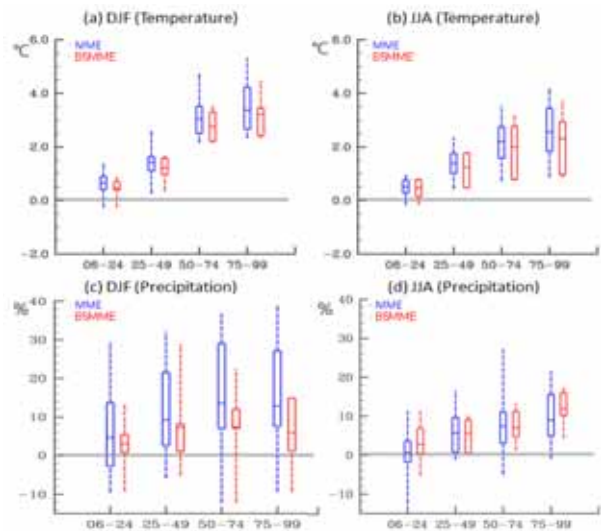


그림 10.1. 한반도 지역의 겨울철(왼쪽)과 여름철(오른쪽)의 미래 기온(위)와 강수(아래)의 영역평균 결과. 점선은 모델 편차를 나타내고, 상자는 각 모델들의 25~75%를 나타냄 {그림 10.4}

한반도 평균기온 상승은 전지구 평균 상승 보다 다소 높을 것으로 예상된다(견고한 동의). 시나리오와 사용 모델별로 변화량 및 불확실성은 차이가 있으나 한반도 연평균 기온 상승은 RCP4.5에서는 2°C 이상, RCP8.5에서는 4°C 이상 될 것으로 추정된다(견고한 동의). 한반도 평균 강수량도 전지구 평균 상승보다 클 것으로 예상되나 불확실성이 매우 크다(중간적 동의). 강수의 증가는 지역적 차이가 크고, 겨울보다 여름철 강수증가가 더 클 것으로 예상된다(중간적 동의, 그림 10.2).

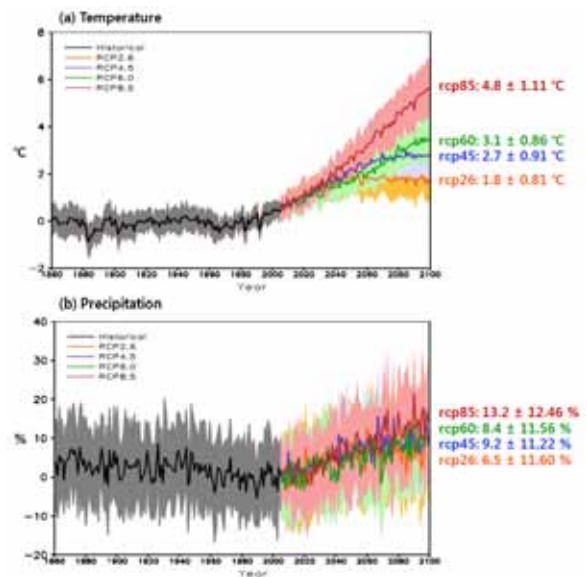


그림 10.2. 한반도 영역 연 (a)기온 및 (b)강수량 변화 시계열(1861~2100년). 음영은 표준 편차를 의미함. 제시된 값은 과거 기후(1971~2000년) 대비 미래 기후(2071~2100년) 변화±표준편차 {그림 10.2}.

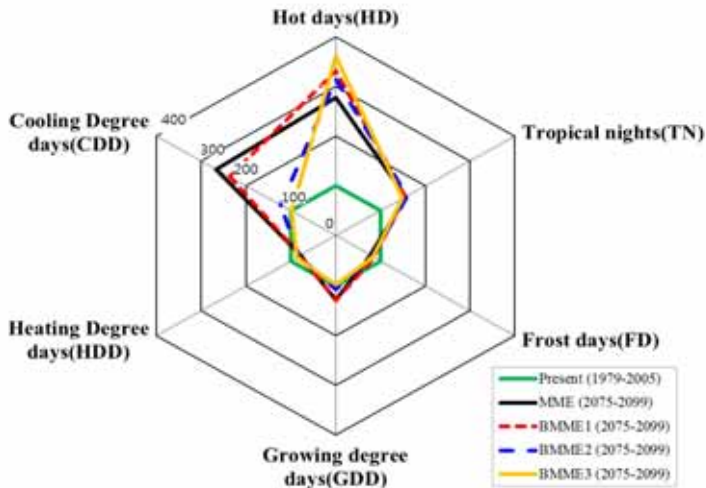


그림 10.3. 1979~2005년 대비 2075~2099년 극한기후지수의 변화율(%). 각 선은 다중모델앙상블 (MME)과 Taylor diagram 으로 선정된 best 모델 그룹 (BMME1), relative entropy를 통해 선정된 best 모델 그룹(BMME2), 확률밀도함수를 통해 선정된 best 모델 그룹 (BMME3)을 나타냄 {그림 10.13}

한반도 극한기온의 변화는 일최고기온에 비해 일최저기온의 상승이 더 클 것으로 예상된다(RCP4.5 시나리오에 의하면 2071~2100년에 각 2.8과 3.1°C의 변화를 보임). 극한기후의 변화는 호우일수(+0.7일), 폭염일수(+5.8일), 열대야일수(+10.8일), 냉방도일, 성장도일은 증가하는 반면, 서리일수, 결빙일수, 난방도일의 감소가 전망되었다(견고한 동의, 그림 10.3). 특히 열대야일수의 변화가 가장 큰 변화를 나타내었으나, 불확실성 역시 가장 큼을 보였다(제한적 동의).

선 북부에서는 깊어질 것으로 전망된다(중간적 동의). 동해 수온은 상승할 것이며(중간적 동의, 그림 10.4) 이는 대기온난화 이외에 대마난류가 동해로 수송하는 열이 증가하기 때문으로 보고 있다(중간적 동의). 황해 생태계에 중요한 영향을 미치는 황해저층냉수는 2100년까지 수온이 서서히 상승할 것으로 전망된다(제한적 동의).

한반도 주변해 해수면 상승은 지구 평균에 비해 클 것으로 전망되지만(중간적 동의), 그 크기는 2100년에 약 70~138cm로 시나리오와 해역에 따라 전망 변화폭이 상당히 크다(그림 10.5).

10.2. 해양과 빙권

동해 수온은 상승할 것이며 이는 대기온난화 이외에 대마난류가 동해로 수송하는 열이 증가하기 때문이다(중간적 동의).

우리나라 주변해에 대한 미래전망 연구는 고해상도 지역해양기후모델을 이용한 규모축소 적용 등에 대한 연구가 부족하여, 전구규모 변화 전망 연구에 비해 매우 제한적이지만, 연구결과를 정리하여 다음과 같이 요약할 수 있다.

북태평양 자이어 순환의 남쪽은 강해지고 북쪽은 약해질 것으로 전망되며, 쿠로시오 확장 해역의 전선 및 제트가 강화될 것으로 전망된다(중간적 동의). 북태평양에서 겨울 해양혼합층은 21세기 말, 쿠로시오 확장해역에서는 바람 세기와 겨울철 냉각의 약화로 얕아지는 반면, 쿠로시오 전

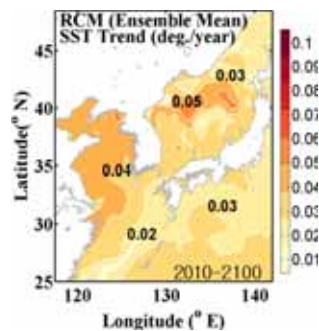


그림 10.4. 2010~2100년에 대해 모사된 연평균해수면수온의 선형경사. 여러 개의 전구모델자료를 이용한 역학적 규모축소에 기반한 지역기후 다중 모델평균 {그림 10.20}

유의파고는 RCP4.5 시나리오에서 현재 기후에 비해 2~7% 정도, RCP8.5 시나리오에서는 4~11% 정도 감소하는 것으로 나타났다(제한적 동의).

지구온난화에 따라 ENSO-PDO 사이의 선형관계 즉, 같은 위상에 있게 되는 경향이 더욱 강해질 것으로 전망되며(중간적 동의), ENSO 강도가 21세기 전반에는 증가하나 후반에는 감소할 것으로 전망되는데, 동태평양과 동인도양-서태평양 해역의 온난화율 차이가 변화하기 때문으로 판단된

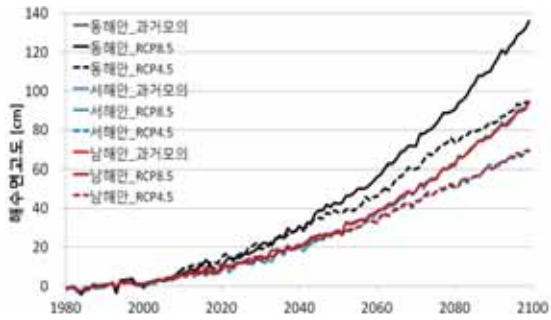


그림 10.5. 우리나라 연안 해역의 해수면 상승 예측(cm). 실선은 과거기후(1980~2005년)와 RCP8.5 (2006~2099년), 점선은 RCP4.5 시나리오 결과이며 열팽창과 육빙녹음 효과를 모두 포함하며, 현재 기후 1980~1999년(20년)에 대한 상대적인 변화임 {그림 10.25}.

다(제한적 동의). RCP4.5 시나리오에서 ENSO와 인도양 사이의 상관관계, 북서태평양-동아시아 몬순과의 원격상관이 다소 강화될 것으로 전망된다(중간적 동의). IPCC 5차 평가보고서에 따르면 지구온난화로 북극 해빙면적이 급속히 감소하여 21세기 말 여름에는 북극 해빙 대부분이 사라질 것으로 전망되며, 남극은 22세기 이전에 얼음이 모두 녹는 상태가 시작될 것으로 전망된다(제한적 동의).

한국 기후변화 평가보고서 2014

- 기후변화 과학적 근거 -

정책결정자를 위한 요약서

총괄 : 유희동

편집 : 박훈, 정해정, 김경하, 송정미(기상청)
김준(연세대학교), 안중배(부산대학교), 정휘철(한국환경정책·평가연구원),
이동근(서울대학교)

저자 : 최영은(건국대학교)

발행일 : 2014년 12월

(156-720) 서울특별시 동작구 여의대방로16길 61번지
기상청 기후과학국 기후정책과
- Tel: 02-2181-0392
- Fax: 02-2181-0469
- Web: <http://www.kma.go.kr>

ISBN 978-89-954715-3-1



한국 기후변화 평가보고서 2014



기상청 Korea
Meteorological
Administration

ISBN 978-89-954715-3-1