

정책결정자를 위한 요약서

한국 기후변화 평가보고서 2020

- 기후변화 과학적 근거 -

Korean Climate Change Assessment Report 2020



한국 기후변화 평가보고서 2020

- 기후변화 과학적 근거 -

정책결정자를 위한 요약서



기상청

Korea Meteorological
Administration

서문

기상청은 기후변화를 일으키는 온실가스 감시부터 기후변화 시나리오 생산, 영향 분석에 이르기까지 여러 분야에서 '기후변화과학'을 주도하고 있습니다. 특히, 온실가스 배출에 따라 2100년까지 기후가 어떻게 변화할지 예측한 기후변화 시나리오를 생산함으로써, 국가와 지자체 기후변화 적응대책 수립에 활용할 수 있는 과학적 근거를 제공하고 있습니다.

더 나아가 한반도 기후변화의 과학적 근거와 이와 관련된 영향을 이해하고 국가 기후변화 적응대책 수립을 지원하고자, 2011년부터 「한국 기후변화 평가보고서」를 발간하고 있습니다.

올해는 '제3차 국가 기후변화 적응대책(21~25)' 수립을 위해, 앞서 발간되었던 「한국 기후변화 평가보고서 2014」를 바탕으로 최근의 연구 결과들을 반영·보완한 「한국 기후변화 평가보고서 2020」을 환경부와 공동으로 발간했습니다. 이번 보고서는 기본적으로 IPCC 보고서를 참고하여 우리나라 실정에 맞게 구성하였습니다. 특히, IPCC 1.5°C 특별보고서 관련 내용을 '10장 단기 및 장기 기후변화 전망'에 포함하였고, 미래예측의 유용한 도구인 '8장 기후모델 평가'에서는 전구기후모델, 지역기후모델, 지역결합모델 등으로 세분화하여 작성하였습니다. 또한, 종합적인 전문가 평가를 통하여 연구 결과의 신뢰도를 3단계(견고한 동의, 중간적 동의, 제한적 동의)로 제시하였습니다.

이번 보고서는 최근(2014년~2019년) 1,156편의 국내·외 논문 및 국가기관 보고서의 연구 결과를 이용하였고, 분야별 전문가 70여 명이 참여하였습니다. 보고서가 발간되기까지 자료를 수집하고 정리하신 모든 저자분과 기상청 관련 부서에 감사드립니다.

「한국 기후변화 평가보고서 2020」을 통해 기후변화 현상을 이해하는 한편, 연구자료의 부족으로 제한적 동의에 그친 분야는 더욱 활성화될 수 있길 바랍니다. 또한, 정책결정자에게는 미래 기후변화에 대비한 정책 수립의 과학적 근거로 활용되길 기대합니다.

2020. 7.

기상청장 김 종 석

목 차

서문	i
<hr/>	
1. 소개	1
1.1. 배경 및 절차	1
1.2. 「한국 기후변화 평가보고서 2014」 요약	2
1.3. 국립기상과학원 「IPCC 6차 평가보고서 대응 전지구 기후전망」 주요 결과	3
<hr/>	
2. 관측: 대기과 지표	4
2.1. 서론	4
2.2. 대기조성 및 복사수지의 변화	4
2.3. 기온과 지표의 변화	4
2.4. 물순환의 변화	5
2.5. 극한현상의 변화	5
2.6. 대기대순환과 기후변동의 변화	6
<hr/>	
3. 관측: 해양 및 빙권	7
3.1. 서론	7
3.2. 해양	7
3.3. 빙권	8
<hr/>	
4. 고기후기록에 의한 정보	10
4.1. 서론	10
4.2. 화분에 의한 고기후	10
4.3. 동물화석에 의한 고기후	10
4.4. 연륜에 의한 고기후	11
4.5. 고문헌에 의한 고기후	12
<hr/>	
5. 탄소순환과 기타 생지화학순환	13
5.1. 서론	13
5.2. 탄소순환	13
5.3. 기타 생지화학순환	16

목 차

6. 구름과 에어로졸	17
6.1. 서론	17
6.2. 구름	17
6.3. 에어로졸	17
6.4. 구름과 에어로졸의 상호작용	18
6.5. 복사강제력과 유효복사강제력	19
6.6. 강수변화의 과정	19

7. 인위적 및 자연적 복사강제력	20
7.1. 서론	20
7.2. 대류권 오존	20
7.3. 인위적 복사강제력	21
7.4. 자연적 복사강제력	22
7.5. 배출량 매트릭스	22

8. 기후모델 평가	24
8.1. 서론	24
8.2. 전구기후모델	24
8.3. 지역기후모델 상세화	25
8.4. 지역결합모델	25
8.5. 극한 현상 모의	26

9. 기후변화의 탐지 및 한반도 기상재해의 변화	27
9.1. 서론	27
9.2. 동아시아와 한반도 기온과 강수 변화	27
9.3. 기후변동성 변화와 한반도	27
9.4. 한반도 기상재해의 변화	29

10. 단기 및 장기 기후변화 전망	30
10.1. 서론	30
10.2. 대기와 지표	30
10.3. 해양과 빙권	33
10.4. 1.5°C 기후변화전망	33

1. 소개



1.1 배경 및 절차

기후변화 적응 및 피해 저감을 위해 IPCC (Intergovernmental Panels on Climate Change)는 전 세계 기후변화 관련 최신 연구 결과를 집대성하여 5~6년 간격으로 보고서를 발간하고 있다.

우리나라에서는 국가 기후변화 적응대책 수립 등 국가 정책을 지원하기 위해 IPCC 평가보고서 등을 바탕으로 2011년부터 매 5년마다 한반도에 대한 기후변화 연구 결과를 집대성한 한국 기후변화 평가보고서를 발간하고 있다.

제 3차 국가 기후변화 적응 대책(21~25) 수립을 위해 한반도 기후변화 평가의 필요성이 대두되어 「한국 기후변화 평가보고서 2014」를 바탕으로 최근의 연구 결과들을 반영·보완한 「한국 기후변화 평가보고서 2020」 발간이 필요하게 되었다.

그러므로 한반도의 기후변화 관련 최신 연구를 집대성한 본 보고서를 통해서 우리나라 기후변화 적응대책 수립 등 국가 정책 지원을 도모하며, IPCC 6차 평가보고서 작성 과정에서 한반도 기후변화 연구 결과를 반영하는 등 6차 평가보고서 작성에도 기여하고자 한다.

「한국 기후변화 평가보고서 2020」을 작성하기 위해서 기상청은 제1실무그룹(과학적 근거), 환경부는 제2실무그룹(영향 및 적응)을 담당하였다. 「한국 기후변화 평가보고서 2020」의 과학적 근거 분야의 집필진은 다음의 보고서 주요 작성 지침에 따라 보고서를 작성하였다:

- 장 제목은 「한국 기후변화 평가보고서 2014」와 같으나, 주관기관과 협의를 통해 9장의 제목을 변경함. IPCC 1.5°C 특별 보고서 관련 내용을 '10장 단기 및 장기 기후 변화 전망'에 포함함.
- 장별 본문 작성은 연구 결과를 주제별로 구성하여 작성함. 각 장의 절 초반에 「한국 기후변화 평가보고서 2014」내용을 요약하고, 2014~2019년의 연구내용을 새롭게 추가함.
- 각 장의 결론에 연구 결과의 동의수준을 표 1.1과 같이

3단계로 평가함.

- 참고문헌은 2014년 이후에 출판된 논문 또는 국가 기관의 보고서로 한정하되, 「한국 기후변화 평가보고서 2014」에서 누락된 문헌은 인용 가능함. 한반도 대상의 연구 결과를 인용하나, 한반도 이외 지역에 대한 국내 연구자의 연구 결과도 인용 가능함.

표 1.1. 연구결과의 신뢰도 평가(동의수준)의 구분

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

한국 기후변화 평가보고서는 기본적으로 IPCC 보고서를 참고하여, 우리나라 실정에 맞게 구성하였다. 「한국 기후변화 평가보고서 2020」의 각 장은 '1장 소개', '2장 관측: 대기와 지표', '3장 관측: 해양과 빙권', '4장 고기후 기록에 의한 정보', '5장 탄소순환과 기타 생지화학순환', '6장 구름과 에어로졸', '7장 인위적 및 자연적 복사강제력', '8장 기후모델 평가', '9장 기후변화의 탐지 및 한반도 기상재해의 변화', '10장 단기 및 장기 기후변화 전망'이다.

평가보고서는 다음의 한계점을 가지고 있다. 관측 연구와 관련된 장(예, '제5장 탄소순환 및 기타 생지화학 순환', '제6장 구름과 에어로졸' 등)들은 「한국 기후변화 평가보고서 2014」 이후 국내 연구 결과가 부족하여 제한된 자료를 바탕으로 연구 결과를 정리하고 신뢰도를 평가하였다. 향후 체계적이고 지속적인 관측 기반의 연구가 요구된다.

기후변화 관련 연구 및 정책결정에 도움이 될 수 있도록,

각 장의 결론에 연구 결과의 동의수준(표 1.1)을 나타내는데, 이는 전적으로 논문의 수 및 저자들의 판단, 전문가 의견 수렴에 의해 결정된다. 기후변화와 이에 대한 적응을 위한 정책 결정에 활용되는 중요성을 감안할 때 객관화된 판단을 할 수 있는 기준이 필요하다.

1.2. 「한국 기후변화 평가보고서 2014」 요약

2004~2013년 동안 한반도 배경대기의 대표적 온실가스인 이산화탄소와 아산화질소의 대기 중 농도의 증가율이 뚜렷하다. 2001~2010년까지 우리나라의 평균 연강수량은 지난 30년 동안의 값에 비해 약 7.4% 증가하였으며 여름철이 가장 뚜렷하게 증가하였다. 동아시아 여름 몬순은 1980년대까지 약화되었으나 2010년대 이후 그 강도가 회복되고 있다. 겨울 몬순에 영향을 주는 시베리아 고기압의 강도 또한 수십 년 주기의 변동이 뚜렷하였다.

우리나라 주변 해양의 수온과 해수면이 지속적으로 상승 중이며, 상승률은 전 지구 해양 평균보다 약 2~3배 높았다. 북극 지역은 전 지구 온난화와 연관된 지면 대기온도의 급격한 상승경향이 2013년까지 약 30년간 약 0.7°C로 나타났으며, 이러한 상승 경향은 가을철에 가장 컸다. 8월에 남극반도의 서쪽에서 온난화 경향이 나타났다.

화분분석을 통해 플라이스토세 최후 빙기 최성기부터 현재까지의 기후에 따른 낙엽활엽수림과 침엽수림의 변화를 보여주었다. 소나무로 작성된 국내 최장 연륜연대기(1178년~현재)를 소개하고, 이를 이용한 국내 기후복원 연구사례를 최초 발표 논문부터 정리하였다. 2014년까지 발표된 연구 중에 가장 긴 온도 복원 연구는 1595년부터 복원된 것이며, 강수량 복원 연구는 1682년부터 복원된 것이었다.

탄소순환은 기후시스템의 중추적 구성요소로서 기후변화와 관련된 다양한 규모의 복합적 강제력, 비선형 반응, 되먹임 등과 관련되어 있다. 또한 다른 생지화학순환과 연결되어 생태계의 건강과 오염 및 대기질에 심각한 영향을 미칠 수 있음을 지적하였다.

에어로졸의 광학적, 물리적 성질 관측 연구가 활발히 진행된 반면에, 구름 관측 연구는 미흡했다. 수치모형을

이용한 에어로졸의 직접적, 간접적 효과 연구나 구름-강수 상호작용 연구도 수행된 바 있으나 아주 활발하지는 못했다.

인위적·자연적 복사강제력 관련하여 과거 20년간의 동아시아 지역 봄철 오존농도 증가의 30%가 기상요소의 변동성에 의해 설명될 수 있음이 연구되었다. 동아시아 지역이 검댕에 의한 복사강제력은 +2.1 Wm⁻²로 이산화탄소에 의한 전 지구 복사강제력(1.82 Wm⁻²)에 상응하는 값으로 추정되었다. 국내에서는 2010년부터 온실가스 환경영향 평가 시 지구온난화지수를 사용하고 있음이 보고되었다.

「한국 기후변화 평가보고서 2014」는 IPCC 5차 평가 보고서에 참여한 모델들의 평가를 주로 다루었다. 시나리오 생산을 위한 전구 모델이 CMIP3에서 CMIP5 군으로 개선되면서 대기과 해양 모델의 해상도가 향상되었으며, 지구시스템 모델링을 추구하면서 에어로졸 과정과 지표 및 해양에서의 탄소순환이 포함되는 방향으로 개선되었다. 전반적으로 지표온도의 모의 능력 향상을 보였으나 강수 모의 능력은 큰 개선 효과를 보이지 않았다. 지역기후 모델에 대해서는 World Climate Research Program (WRCP)에서 진행하는 COordinated Regional climate Downscaling Experiment (CORDEX) 프로젝트에서 도출된 결과가 주를 이루었다. 지역기후모델 연구는 전구모델 연구에 비해서는 CMIP3의 결과를 이용한 연구가 여전히 비중을 차지하고 있었다.

한반도 연평균 기온은 1980년대 이후로 뚜렷이 증가하였다. 연강수량은 증가 추세를 보였는데 이는 여름철 강수량의 증가가 크게 기여했다. 한반도 장마 강수량의 최댓값이 나타나는 시기가 예년에 비해 1주일 정도 빨라졌다. 한반도에 영향을 미치는 태풍의 강도가 증가하는 것으로 제시하였다. 두 가지 형태의 엘니뇨가 계절별로 서로 다르게 원격상관 패턴을 유도하여 한반도 기후에 영향을 주는 것으로 밝혀졌다. 북극진동이 음의 위상일 때 동아시아 지역에는 겨울 몬순 순환의 강화 및 한파 발생의 증가가 나타난다. 1970년대 후반 이후로 열대 계절내진동의 강도가 강해졌으며, 발생빈도 또한 증가하였다.

한반도 연평균기온은 현재 대비 21세기 후반에 RCP 4.5에서는 2°C 이상, RCP 8.5에서는 4°C 이상 될 것으로 추정하였다. 한반도 평균 강수량의 경우 불확실성이 매우 크고 강수량의 증가는 지역적 차이가 크며, 겨울보다

여름철 강수량 증가가 더 클 것으로 예상되었다. 한반도 극한기온의 변화는 일최고기온에 비해 일최저기온의 증가가 더 클 것으로 예상되었다. 호우일수, 폭염일수, 열대야일수, 냉방도일, 성장도일은 증가하는 반면, 서리일수, 결빙일수, 난방도일은 감소할 것으로 전망되었다.

1.3 국립기상과학원 「IPCC 6차 평가 보고서 대응 전지구 기후전망」 주요 결과

IPCC 6차 평가보고서와 관련하여, IPCC와 세계기상기구(WMO, World Meteorological Organization) 공동 주관의 세계기후연구프로그램(WCRP, World Climate Research Program) 산하 결합모델실무그룹(WGCM, Working Group on Coupled Model)은 2014년부터 전 지구 시나리오 산출 및 비교 평가를 위한 6번째 프로젝트인 CMIP6 (Coupled Model Intercomparison Project Phase 6)을 추진하여 왔다. CMIP6의 주된 논의는 새로운 온실가스 미래 경로를 포함한 기후강제력의 산출·제공 및 과학적인 실험 디자인 구축, 각 국에서 산출되는 모델 자료의 활용성을 높이기 위한 모델 자료 후처리 과정의 표준화였다. 국립기상과학원도 이러한 표준화를 따라서 기후변화 시나리오를 산출하였다.

CMIP6에서 사용한 기후강제력은 크게 기후모델의 기초 성능 평가를 위해 이루어지는 기준실험, 과거기후 모의실험, 2015년부터 2100년에 대한 미래전망을 모의하기 위한 실험으로 구분하여 사용된다. 각 기간에 대한 기후강제력은 크게 이산화탄소를 포함한 온실가스 경로와 에어로졸 변화, 지표변화 등 인위적 강제력과 태양복사와 화산활동 등의 자연적 강제력으로 제공된다.

IPCC 6차 평가보고서에서는 공통사회경제경로(SSP, Shared Socio-economic Pathways)라 불리는 시나리오를 새로이 구성하였다. SSP는 사회경제 구조변화와 온실가스 감축 정책의 묶음으로 구성되며, 미래 기후변화에 따른 인구, 경제, 토지이용, 에너지 사용 등 사회·경제 지표의 정량적인 변화를 포함하고 있다. 특히 CMIP6는 IPCC 5차 평가보고서에 사용된 대표농도경로(RCP, Representative Concentration Pathways)와의 연계 및 다양한 미래

사회상의 반영을 위해 4종의 표준 SSP 경로를 우선 설정하였으며, 국립기상과학원은 이 중 온실가스 저배출과 고배출의 SSP1-2.6과 SSP5-8.5 2종의 시나리오에 대한 전 지구 미래전망 결과를 분석하여, 「IPCC AR6 대응 전 지구 기후변화 전망보고서」를 발간하였다.

미래전망 산출을 위해 국립기상과학원에서 사용한 기후모델은 두 가지이며, IPCC 5차 평가보고서에서 사용하였던 HadGEM2-AO를 개선하여 국립기상과학원에서 개발한 K-ACE와 영국기상청과의 협력을 통해 공동 활용 중에 있는 UKESM1이다.

SSP를 반영하여 새로이 생산한 미래전망 결과에서 21세기 말의 전 지구 평균기온은 온실가스 배출 정도에 따라 현재 대비 약 +1.9~5.2℃ 상승하는 것으로 나타난다. 이는 과거 HadGEM2-AO 모델에서 생산된 21세기 말 RCP 2.6과 RCP 8.5의 평균기온 변화인 +1.3~3.7℃ 폭을 상회한다.

전 지구 연평균강수량은 현재 대비 약 +5~10% 증가하는 것으로 나타났다. 특히 강수량의 증가 지역은 기온 상승이 가장 큰 극 지역과 강수량 최다 지역인 적도에서 증가 폭이 컸다. 또한 동아시아 몬순은 5~9월 사이에 최대 20%의 강수량 증가 경향을 보였다.

해빙과 해양의 경우, 21세기 말의 전 지구 평균 해수면 온도는 현재 대비 약 +1.4~3.7℃ 상승하는 것으로 전망되며, 21세기 말의 전 지구 해수면 상승은 현재 대비 약 +52~91 cm 상승하는 것으로 전망되었다. 특히 북극의 해빙 감소 속도가 빨라 21세기 중반 이후엔 여름철 북극 해빙이 거의 사라지는 것으로 전망되었으며, SSP5-8.5에서는 21세기 말 여름철 남극 해빙도 사라질 것으로 전망되었다.

전 지구 육지 지역의 극한기후에 대해 SSP5-8.5에서 온난일은 10년 당 약 +15일씩 크게 증가하며 한랭일은 10년 당 약 4일씩 줄어드는 것으로 나타났다. 21세기 말의 강수/무강수 일수의 변화는 뚜렷하지 않으나, 극한강수의 빈도와 강도는 상대적으로 커지는 것으로 전망되었다. 특히 SSP5-8.5 시나리오에 의하면, 5일 최대 강수량은 약 29%가 증가하고, 95퍼센타일 극한강수의 발생일수는 약 1.5배 증가할 것으로 예상되었다.

상세한 사항은 「IPCC 6차 평가보고서 대응 전 지구 기후변화 전망보고서」에서 확인 가능하다.

2. 관측: 대기과 지표



2.1. 서론

최근 한반도의 기온 및 강수 변동성은 전 지구적인 온난화 현상 및 장기적 기후 변동성에 직접적인 영향을 받고 있다. 이 장에서는 2010년대 중반 이후 시기 한반도에서 관측된 대기과 지표의 변화를 크게 대기조성, 기온과 지표, 물순환, 극한현상 및 대기대순환과 기후변동 중심으로 수록하였다.

2.2. 대기조성 및 복사수지의 변화

한반도 배경대기의 대표적 온실가스 중 이산화탄소와 메탄은 지난 10년간(2008~2018년) 대기 중 농도의 증가율이 뚜렷한 것으로 나타났으며(견고한 동의) 주요 화학반응 가스들(오존, 일산화탄소, 질소산화물 및 이산화황)의 농도 변화는 서로 다른 경향성을 보였다(중간적 동의).

안면도에서 측정된 한반도 배경대기의 이산화탄소 농도는 2018년에 415.2 ppm을 기록하였으며 안면도에서 처음 이산화탄소 농도를 관측한 1999년 연평균 농도 371.2 ppm과 비교하여 19년간 44 ppm 증가하였다. 지난 10년간 안면도에서 관측된 이산화탄소 농도는 연평균 2.4 ppm/년 증가하였으며 지난 10년간 전 지구 평균 이산화탄소 증가율 2.2 ppm/년보다 약간 높다(그림 2.1).

안면도에서 관측된 메탄의 2018년 연평균 농도는 1974 ppb로 전 지구 평균보다 115 ppb 높고, 북반구 마우나로아의 평균인 1874 ppb보다 100 ppb 높다. 2018년 안면도의 메탄 농도는 최초 관측을 시작했던 1999년에 비해 113 ppb 증가하였다. 육불화황의 농도는 꾸준히 증가하고 있으나 염화불화탄소는 최근 들어 감소추세를 보이고 있다. 그리고 한반도 배경대기의 주요 화학반응 가스들(오존, 일산화탄소,

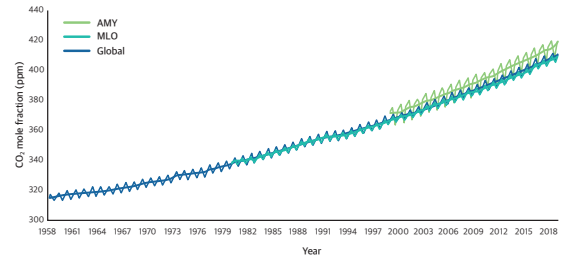


그림 2.1. 안면도(검은색, AMY), 마우나로아(파란색, MLO), 전지구(빨간색, Global)의 이산화탄소 농도 변화 (기상청, 2019).

질소산화물 및 이산화황)의 농도 변화는 서로 다른 경향성을 보였다. 오존은 1997년까지는 큰 폭으로 증가하다가 1998년 이후로는 증가세가 둔화되었으나 여전히 꾸준한 증가세를 보이고 있다. 일산화탄소는 지속적으로 감소하고 있는 반면 질소산화물은 연간농도는 큰 변화가 없고 이산화황은 1990년대 이후로 최근까지 지속적으로 감소하는 추세이다.

한편 복사수지의 경우에는 태양하향복사량, 및 순복사수지의 변화는 최근에 큰 변동성을 보이지 않고 그 양이 일정하였다.

2.3. 기온과 지표의 변화

2010년대(2011~2017년) 연평균기온이 13.0°C로, 이전(1980년대: 12.2°C, 1990년대: 12.6°C, 2000년대: 12.8°C)에 비해 가장 높아 온난화가 여전히 지속되고 있는 것으로 나타났다(견고한 동의). 한반도 기온은 거의 모든 지역에서 상승하는 것으로 나타났으며 온난화의 공간분포 특성이 뚜렷하게 나타나지는 않지만, 도시화 효과로 대도시에서의 온난화 경향이 좀 더 크게 나타났다(제한적 동의).

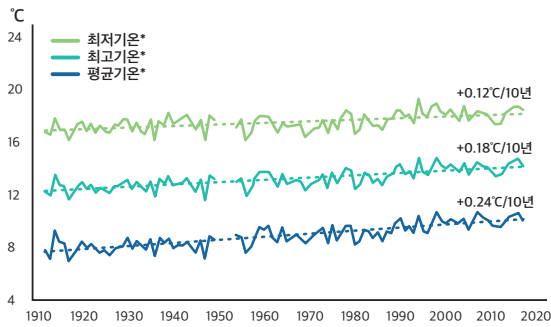


그림 2.2. 1912~2017년 기간 동안 우리나라 연평균 최고, 평균, 최저기온 변화(국립기상과학원, 2018).

우리나라 평균 지표기온은 1998년 13.5°C(1973년 이래 상위 2위)를 기록한 이후 전반적으로 증가 추세가 다소 약화되는 것으로 보아(그림 2.2), 전 지구 연평균 지표기온에서 1998~2013년까지 나타난 온난화의 둔화 현상이 우리나라 연평균 지표기온(6개 지점 평균 및 45개 관측소 평균)에서 나타나는 것으로 판단된다. 하지만 그 이후 2015년 상위 3위, 2016년 상위 1위를 기록하면서 온난화가 지속되고 있음을 확인할 수 있다.

우리나라 지표기온 추세의 공간적 분포를 보면, 관측 지점에 따라 그 강도의 차이는 있지만, 경북과 문경을 제외한 전국 모든 관측 지점에서 1973년 이래로 온난화 경향(-0.04~0.61°C/10년)이 뚜렷하다. 지형분포, 남북 및 동서의 차이, 해안과 내륙의 차이 등과 같은 조직화된 온난화의 공간분포 특성이 뚜렷하게 나타나지는 않지만 1973년 이후 도시화나 인구 증가가 급격하게 진행된 도시들에서 온난화 추세가 더 강한 경향이 있다

우리나라를 포함하는 동아시아 지역 토양수분의 감소는 여름철 두드러지는데, 1996~2010년 기간의 위성 및 지상 관측자료 그리고 재분석자료의 여름철 토양수분 추세를 상호 비교한 결과, 중국 북부지역에서의 통계적으로 유의한 수준의 감소 추세가 나타났으며 우리나라 지역에서도 감소 추세가 나타나지만 통계적으로 유의하지는 않은 수준인 것으로 판단된다.

2.4. 물순환의 변화

우리나라의 강수량 증가 경향은 여름철에 뚜렷했으며 (1912~2017년 동안 +11.6 mm/10년) 가을과 봄철 및 겨울철은 그 변화 경향이 뚜렷하지 않았다(중간적 동의).

우리나라의 강수량 경향성을 계절별로 살펴보면, 특히 여름철에 증가 경향이 뚜렷하게 나타났다. 1912~2017년 여름철 강수량 증가 경향은 +11.6 mm/10년이며, 가을과 봄철 강수량은 각각 여름철에 비해 상대적으로 적은 +3.9 mm/10년, +1.9 mm/10년으로 관측되었으며, 겨울철 강수량의 선형변화량은 -0.9 mm/10년으로 증가 경향이 뚜렷하게 나타나지 않았다. 기후변화로 인해 평균 강수량 뿐 아니라, 한반도 여름철 강수의 경년변동성의 강도와 이를 결정짓는 주요 인자 역시 변화할 수 있으나 아직까지 한반도 지역의 기후변화로 인한 강수량 변동성의 변화는 뚜렷하지 않은 것으로 나타났다.

한반도 수증기량의 변화를 유도할 수 있는 수증기속(water vapor flux)의 변화는 그 경향성이 뚜렷하지 않으며, 한반도 수증기량을 결정짓는 주요한 인자 중 하나인 북태평양 수증기속의 강도는 1983~2017년의 기간에 그 경향성이 뚜렷하게 나타나지 않았다. 나아가 한반도 내의 증발산 변화에 대한 연구가 극히 드물고 지역에 따라 경향성도 상이하여 일관된 결론을 도출하기 힘들다.

2.5. 극한현상의 변화

2010년대 중반 이후 우리나라 5월을 포함하는 봄철의 이상고온 현상의 빈도 및 강도가 증가하였다(견고한 동의). 극한고온 현상의 빈도는 1990년대 중반 이후, 특히 2010년대 중반 이후로 빠르게 증가하고 있는 것으로 나타났다(중간적 동의). 또한 우리나라의 극한저온 현상의 강도가 2000년대 이후 강해지는 경향을 보였다(제한적 동의).

2000년대 이전의 우리나라 연평균 기온의 상승률은 주로 겨울철 기온의 상승에 의해 주도되었다. 그러나 2000년대

이후에는 겨울철의 기온 변화가 음의 추세로 반전되면서 여름 평균 기온의 상승 추세가 두드러지고 있다(표 2.1).

표 2.1. 1960~2012년 동안 11개 관측소 평균 계절별 기온 추세 (°C/10년)(Min et al., 2015). *표시는 95% 유의한 추세를 나타냄.

	1960~2012	1960~1999	2000~2012
Annual T _{mean}	0.23	0.27	0.17
Winter T _{mean}	0.32	0.50*	-0.85
Summer T _{mean}	0.09	0.03	0.65

최근 10년간 월평균 관점에서도 이상고온 경향이 뚜렷하다. 주목할 만한 점은 5월 평균기온이 2012년에 최고치를 기록한 데 이어 2014~2017년에 걸쳐 매해 역대 기록을 경신하였고, 2019년 5월 기온이 역대 2위로 기록되면서, 5월 평균기온이 가장 높았던 해의 1~5위가 모두 2014년 이후에 집중적으로 나타나고 있다. 나아가 여름철 평균기온 및 열파의 빈도 증가가 1990년대 중반을 기점으로 뚜렷해지는 추세는 우리나라뿐만 아니라 동아시아에서 공통적으로 관측된다.

우리나라 겨울철 평균기온의 온난화 추세는 2000년대 이후 음의 추세로 반전되었으며 극한저온 현상의 강도가 오히려 커지고 있다. 극한저온 현상의 추세에서 1980년대와 2000년대를 기점으로 나타난 변화는 다른 동아시아 지역에서도 유사하게 관측되었으며 2000년대 이후에 들어서 우리나라 및 동아시아 지역 겨울철 온난화 추세의 반전을 가져온 원인으로, 음의 북극진동의 발달, 성층권 극외도 순환의 약화, 우랄 블로킹의 발생 빈도 증가가 제시되고 있다.

1990년대 중반 이후에 우리나라에서 뚜렷하게 관측되는 여름철 강수의 증가는 동아시아 지역에서도 유사하게 나타나고 있지만, 전반적인 여름철 강수의 장기적인 증가 추세에도 불구하고, 2010년대 중반 이후의 강수 패턴은 과거와 또 다른 양상을 나타내어 주목할 필요가 있다.

2.6. 대기대순환과 기후변동의 변화

동아시아 겨울몬순은 2000년대 초 이후 지난 10년 동안 강화되었으며 이는 시베리아 고기압의 강도의

변화 및 유라시아 지역의 눈덮힘, 극지역의 변화와 관련성이 있는 것으로 나타났다(중간적 동의). 2000년대 후반 이후 엘니뇨의 발생 빈도가 증가하였다(중간적 동의). 우리나라 기후에 영향을 주는 인도양 해수면 온도가 지속적으로 증가하고 있는 반면에 대서양 자오면 해수 순환의 강도는 감소하고 있는 것으로 나타났다(견고한 동의).

동아시아 겨울몬순은 1980년대 후반부터 약화되었다고 알려져 있으나 2000년대 초 이후 지난 10년 동안은 반대로 동아시아 전역에서 혹독한 겨울이 자주 관측되어 동아시아 겨울몬순이 강화되었음을 보여주고 있다. 2000년대의 강한 동아시아 겨울몬순은 시베리아 지역의 음의 표면온도 이상을 특징으로 주로 동아시아의 북부에 국한되어 있다. 관련 대기순환은 유라시아 상공을 지나는 원격상관 패턴으로 설명될 수 있다.

최근 대서양 자오면 해수순환이 점차 약화되고 있다는 주요 연구 결과가 보고되고 있는데 대서양 표층수온은 특히 그린란드 근처 북대서양 지역에서 냉각 추세가 관찰되었으며 이러한 추세는 대서양 자오면 해수순환의 약화와 연결되었다는 결과가 보고되었다.

해빙 감소 추세는 최근에도 여전히 발생하고 있으며 그 정도는 6월 기준 매 10년마다 4.1%정도로 나타났다(그림 2.3). 남극 해빙의 경우, 비록 동아시아 기후와의 연관성이 발견된 바 없지만, 지속적으로 2014년까지 꾸준히 증가하는 추세를 보였는데, 그 이후로 현재까지 매우 빠르게 감소하는 경향을 보인다.

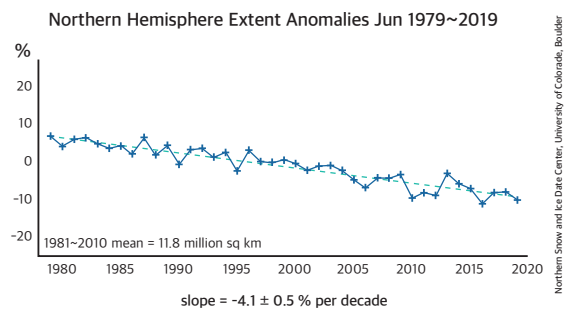


그림 2.3. 북극 해빙 면적 이상의 6월 추세(NOAA NSIDC: https://nsidc.org/data/seice_index/compare_trends).

3. 관측: 해양과 빙권



3.1. 서론

해양 및 빙권 특별보고서(IPCC, 2019)는 지구온난화를 해양온난화로 표현할 정도로 기후변화에 대한 해양과 빙권의 반응과 영향의 중요성을 강조하였다. 양극해 해빙의 감소와 빙하의 체적도 더욱 축소되고, 해수면 상승은 기존의 기후변화 평가보고서들의 예측치보다 더 높을 것으로 보고하였다. 해양열용량의 지속적인 증가와 함께 해양 기인 극한 현상의 발생 빈도가 증가할 것임을 제시하였다. 빙권은 외부의 강제력 변화에 민감하게 작용하는 눈과 얼음으로 구성되어 있기 때문에 온실가스의 증가에도 다른 기후변화 구성 성분에 비해 더 크게 반응한다. 본 장에서는 기후과학 관측 분야의 하나로 해양과 빙권을 구분하여 수록하였다.

3.2. 해양

우리나라 주변 해양의 해표면수온과 해수면은 전지구 평균보다 높은 변화율로 상승하고 있으며, 해양 산성화가 지속되었다(견고한 동의). 또한, 최근 들어 수온 양극화 등 해양 극한 현상 출현 빈도가 증가하고 있는 것으로 나타났다(중간적 동의).

우리나라 주변 해양에서의 해표면수온과 해수면은 「한국 기후변화 평가보고서 2014」와 마찬가지로 지속적으로 상승하고 있는 것으로 나타났다. 변화율은 여전히 전 지구 해양의 평균보다 높은 것으로 보고되었다. 이러한 경향은 관련 연구의 모든 논문들에서 공통적으로 제시하고 있어 견고한 동의 수준의 신뢰도를 보여주고 있다. 해표면수온과 해수면 변화율의 정량적인 수치는 자료 분석 기간과 해역에 따라 다르게 제시되고 있지만, 해역별 상대적 크기는 해수면

상승률의 경우 동해와 제주도에서 높고 서해가 낮았다.

지속적인 장기 해양온난화와 함께 수반되는 수온의 중장기 변화가 보고되었고, 이의 원인으로 1970~1980년대에는 동아시아 겨울 몬순이 쿠로시오 재순환 해역의 겨울철 해수면수온 경년 변동을 좌우한 반면 1990년대 이후에는 봄철의 재출현 과정이 주요한 것으로 나타났다. 동해에서의 심층해수 생성과정도 뚜렷한 중장기 변화를 보였는데, 1990년대의 중앙수 부피 확장과 대조적으로 2000년대 이후에 저층수 생성 재활성 과정이 발견되었으며, 상층 열용량과 중층수 특성에서도 십년 규모의 유의미한 변동이 보고되었다. 서해에서는 수온 상승과 함께 연직 성층 강화 추세가 보고되었고, 동중국해 영역에서도 해양-대기 열교환과 해상풍의 변화로 설명되는 십년 규모의 중장기 수온 변동을 확인하였다.

우리나라 해역에서의 극한 현상(수온 양극화, 극한 수온, 여름철 바람장 변화 경향에 따른 동해 연안 용승 출현 경향, 여름철 양자강 유역강우 증가에 따른 동중국해 표층 저염분수 분포 등) 빈도 증가는 최근 들어 두드러지고 있다(예, 표층수온 양극화, 그림 3.1). 특히, IPCC의 해양 및 빙권 특별보고서(2019)에서는 2016년에 동중국해, 2017년에 서해와 동해에서 해표면수온이 평균보다 2~7℃ 높은 극한 수온 현상이 있었음이 등재되었다.

해양 생지화학적 변화에서 해양 산성화가 지속되고 있다. 한편, 영양염의 변화로 우리나라 주변을 포함한 북서태평양 해역의 해표면 질산염 농도와 질소와 인의 비율이 점차 증가하는 것으로 나타났다. 다만 이의 원인을 기후변화에 따른 변동보다는 주변국의 급격한 산업화로 인한 대기 배출 질소산화물의 해양유입으로 보고하였다.

해양 생물학적 변화는 기후변화에 따른 한반도 전역의 거시적 생태 변화보다는 동해 일부 해역에서의 군집 구조 및 종의 지리적 분포 변화 등을 제시하였다. 이는 관측에 기반한 해양 생태계의 광역적, 장기적 변화에 대한 자료 부족과 환경 변화에 따른 생물 반응은 시간차가 있고 복합적이기

때문이다. 2015년부터 한반도 전 해역을 대상으로 운영 중인 “국가해양생태계종합조사” 자료가 축적되면 기후변화에 따른 해양생물학적 변화를 유추할 수 있을 것으로 판단된다.

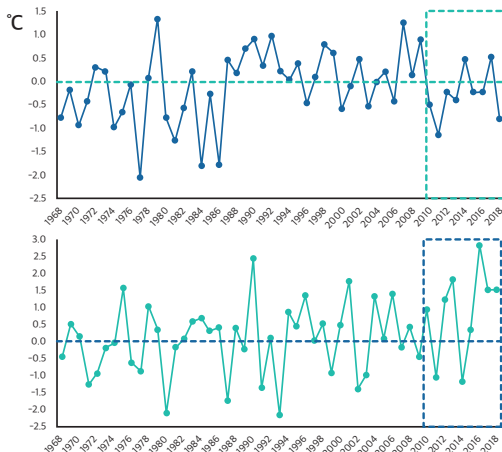


그림 3.1. 1968~2017년 사이 최근 50년간 2월(상) 및 8월(하)의 표층의 평년수온 편차 변동 경향(해양수산부, 2019).

3.3. 빙권

북극 지역에서 급격한 온도 상승이 나타났다(견고한 동의). 북극의 온난화가 동아시아 및 북미 지역의 한랭화를 유발할 수 있는 것으로 나타났다(제한적 동의). 북극의 해빙 면적과 두께는 최근에 뚜렷이 감소하고 있었다(견고한 동의). 남극의 해빙 면적은 증가추세가 있었으나 2015년 이후 증가 추세가 둔화되었다(중간적 동의).

65°N 이상의 북극 지역의 연평균 온도는 여러 재분석 자료와 전구지면온도 자료에서 공통적으로 1980년부터 2015년까지 지속적인 온도 상승 경향을 보이며, 특히 최근 겨울철 급격한 온도 상승 경향이 나타나고 있다. 중위도에서 북극으로 수송되는 열과 수증기의 증가, 북극지역 해빙의 감소와 이에 따른 하향 장파복사 증가가 이러한 북극 지역의 온도 변화의 주요 원인임을 제시하고 있다. 한편 남극 지역의 대기 온도의 경우 이 기간 동안 뚜렷한 변화 경향성보다는 큰 시공간적 변동성이 나타나고 있다.

겨울철 북극의 급격한 해빙 감소와 온도 상승과 대조적으로 동아시아, 북미 등 중위도 지역은 한랭화를 겪고 있으며, 이러한 “따뜻한 북극, 차가운 대륙(Warm Arctic, Cold Continents)” 현상의 원인, 영향, 예측에 대한 다양한 국내 연구가 수행되고 있다. 여러 연구 결과들은 북극의 급격한 온난화 및 해빙의 감소가 북반구 지역 대기 순환장 변화를 통해 동아시아 및 북미 지역의 겨울철 한랭화 현상을 유발시킬 수 있음(그림 3.2)을 제시하고 있다. 하지만 한편으로 이러한 북극-중위도의 대조적인 온도 변화가 기후시스템에 내재된 자연변동성에 의하여 발현될 수 있다는 대립적인 관점 역시 일부 연구에 의해 제시되고 있다.

북극 척치해 태평양 여름수의 경우 2012년에 가장 넓게 분포하다가 점차 약화되어 2017년에 최소화 되었고, 태평양 겨울수의 경우 2017년에 최소로 분포하였다가 2018년에 다시 회복되어 새로 유입되는 것으로 나타났다. 전체적으로 1980년부터 2015년까지 척치해 인근의 해수는 상층 60~80미터 깊이에서 10년에 약 0.5°C 정도 수온이 올라가는 경향을 보이고 있고, 같은 기간 염분은 0.5 psu정도 감소 추세에 있다. 서남극 빙봉의 용해는 지속적으로 꾸준히 일어나는 것이 아니라 간헐적이고 불연속적으로 일어남에도 불구하고 대륙붕에 온난한 심층수가 많이 존재한 시기에 빙하가 더 많이 녹는 경향을 보이고 있다. 전체적으로 북극해의 표면 수온은 서서히 상승하는 경향을 보이는데 반해, 남극해 표면 수온은 약한 하강 경향을 보인다. 하지만 이는 재분석 자료를 바탕으로 한 것으로 추후 현장 관측 자료를 바탕으로 한 수온변화 경향의 정확한 정량화가 요구된다.

1979~2018년 기간 북극(65°N 이북) 해빙 면적은 4계절 모두 뚜렷한 감소 추세에 있다. 계절별로 기후평균(1981~2010년) 대비 표준화된 해빙면적 편차의 경향(%/10년)은 봄, 여름, 가을, 겨울 각각 -1.6±0.5, -8.1±1.3, -9.3±1.8, -2.0±0.7로 나타났는데, 가을의 감소 경향이 가장 뚜렷하다. 북극의 평균 해빙두께도 해빙면적과 마찬가지로 꾸준한 감소 추세에 있는데, 1979~2018년 기간 기후평균(1981~2010년) 대비 표준화된 해빙두께 편차의 감소 경향(%/10년)을 보면 최대 계절인 봄에 가장 느린 -9.5±1.2, 최소 계절인 가을에 가장 빠른 -22.1±2.9로 나타났다.

남극(60°S 이남)의 연평균 해빙면적은 북극과 달리 약간

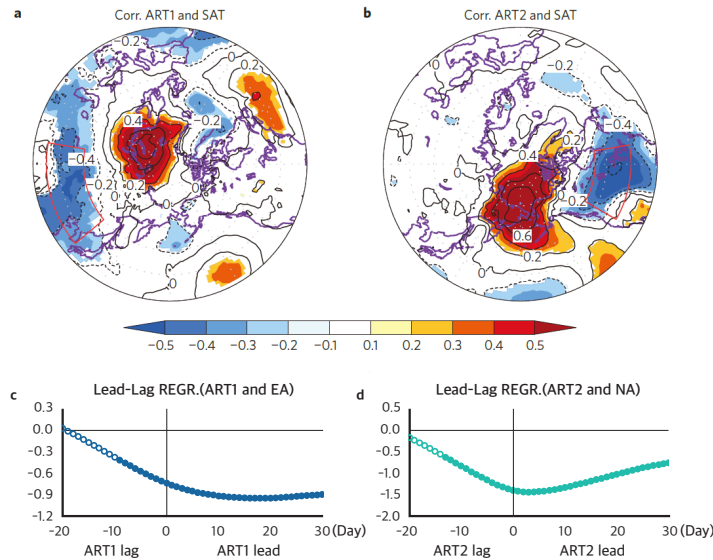


그림 3.2. 북극 온도와 연관된 중위도 지역의 온도 변화(Kug et al., 2015).

증가 추세가 있으나, 2015년 이후 남극 전체 해빙면적의 급격한 감소가 나타나 증가 추세가 상당히 둔화되었다. 지난 보고서의 1979~2012년 기간 대비 1979~2018년 기간에는 남반구 여름과 가을의 증가 경향이 크게 둔화되었는데, 특히 여름의 증가 추세가 2/3 수준으로 크게 둔 것 이 주목할 만하다. 증가 경향 둔화에 대한 해석별 기여를 살펴보면 로스해의 증가 경향이 여름과 가을에 모두 뚜렷하게 둔화된 것이 절대적이고 여름에는 인도양 섹터의 증가 경향 둔화도 일부 기여하였다. 남극의 평균 해빙두께는 관측자료가 부족하여 정확도가 떨어지나 분석장의 장기 두께변화 경향을 보면 약간의 두꺼워지는 경향이 있다.

남극 빙상 질량은 1992~2018년간 약 3조 톤이 소실되었으며, 이는 7.6 mm의 전 지구 해수면 상승을 유발한 것으로 추정된다. 총 증가분의 약 40%가 최근 5년 사이 급격히 발생했으며, 대부분 서남극 지역 빙상 유실이 기여한 것으로 보고되었다. 증가 추세를 살펴보면 최근 10년(2009~2017년) 사이 연간 얼음 소실량이 1979~1989년간보다 약 6배 빠르게 증가하였다. 최근 MISI(Marine Ice Shelf Instability), 빙봉 기울기 및 하부 용융에 따른 안정도 변화 등에 관한 새로운 물리현상이 제시되어 남극 빙상에서 비롯된 미래 해수면 변동 예측 불확실성 완화에 크게 기여하였으나, 여전히 부족한 관측자료 문제를 해결하기 위한 국제 협력 연구의 필요성 또한 강조되고 있다.

평균 영구동토층 온도는 1980년대 이후 대부분 북극권

지역에서 상승하고 있으며, 대체로 불연속 영구동토층보다 연속 영구동토층에서 더 강한 추세를 보이고 있다. 전 지구 동토 관측망 자료에 따르면 북반구 동토층 온도는 최근 10년간 평균적으로 $0.29 \pm 0.12^\circ\text{C}$ 상승했는데 특히 추운 지역에서 더 큰 온도상승이 일어나고 있다. 남극 영구 동토에서도 $0.37 \pm 0.10^\circ\text{C}$ 의 온난화 추세가 나타나 전 지구적으로 영구동토층 온도가 상승하고 있다. 동토층 온도 상승과 더불어 활성층 두께가 증가하고 있으며 영구동토층의 남쪽 가장자리, 즉 상대적으로 따뜻한 동토 지역에서 더 빠르게 증가하고 있다. 영구동토층 남쪽에서 부터 동토층이 퇴화하면서 동토층 면적도 감소하고 있다.

북반구에서 적설면적은 1, 2월에 4,500만 km^2 를 넘었다가 8월에는 300만 km^2 미만으로 줄어든다. 1967년부터 2018년까지 자료에서 봄철 적설면적이 지속적으로 감소하고 있으며, 가을철에도 감소 추세가 나타나는데 다만 자료 간 일치도는 봄철보다 낮다. 가령 6월 적설면적은 10년당 $13.4 \pm 5.4\%$ 씩 감소하여 전체기간으로 볼 때 총면적 약 250만 km^2 이 감소하였다. 적설면적 감소와 더불어 적설지속기간이 감소하고 있다. 특히 유라시아 지역에서는 1920~2010년에 대한 장기 추세가 일관되게 감소 추세로 나타난다. 한반도 적설량에 대한 최근 연구 결과 1980년부터 2000년까지 대체적으로 적설이 감소하는 추세였으나 2000년 이후에 적설의 변동폭이 커지면서 연 0.7 cm 비율로 증가하는 추세를 보였다.

4. 고기후기록에 의한 정보



4.1. 서론

국지적, 지구적으로 장기간 고기후 비교자료의 확보와 구축에 대한 필요성이 높아짐에 따라 대용자료(proxy data)로서 육상이나 해양의 퇴적물, 동식물의 화석, 나무의 나이테 등의 지구물리·생물학적 자료와 고대의 그림과 문자, 각종 기록, 연대기, 역사적 기록물 등 인문·사회학적인 자료가 활용되고 있다.

그러나 지구물리·생물학적 자료는 지사의 시간 규모로 그 기간이 너무 길어 시간 해상도가 낮기 때문에 상대적으로 최근이라 할 수 있는 인간 활동이 활발히 이루어지던 전근대의 역사시대 당시 날씨와 기상, 기후적 특성을 파악하는 데에는 한계가 있다. 또한 고문헌 역시 과학적인 관측기기를 이용한 현대의 기상 관측 자료와 차이가 크고 자료가 균질하지 않아 고기후를 복원하는데 제한적이고 고기후의 변화 경향을 짐작하는 정도의 수준에 그치고 있다. 여기에서는 우리나라의 고기후를 여러 대용자료에 기초하여 분석하였다.

ka drought) 등이 한반도에도 나타난 것으로 밝혀졌다. 동해 해양퇴적물의 연구로 약 50,000년 전(후기 플라이스토세)까지의 한반도의 기후 및 식생변화를 새롭게 알 수 있게 되었다.

후기 플라이스토세 동안, 대부분 한랭·건조한 기후 때문에 산록지에는 아한대 침엽수림의 번성 및 평탄지에는 개방형 초지가 넓게 발달하였다. 홀로세에 들어오면서 한반도의 해수면 상승은 기후 및 식물생태에 많은 영향을 미쳤다.

서해 연안퇴적물에 대한 고해상도의 화분기록 분석에 의하면, 홀로세 전기(8,300~8,000년 전) 동안 한반도에 갑자기 한랭건조한 기후가 있었던 것으로 처음으로 확인되었다. 이것은 북반구 전역에 기후 한랭화를 불러왔던 8.2 ka cold event가 한반도에도 큰 영향을 미쳤음을 잘 반영한다. 홀로세 초기-중기(8,000~6,500년 전) 동안에는 한반도 전역에 낙엽-상록활엽수림이 번성한 반면에 건조를 견디는 초본류 등은 점차적으로 감소하였다. 이런 식생 천이는 홀로세 기후 최적기(Holocene climatic optimum) 동안 동아시아 여름 몬순이 강화되어 온난 습윤한 기후가 지속되었음을 잘 나타낸다.

4.2. 화분에 의한 고기후

화분연구 결과에서 전 지구와 동아시아지역에서 잘 알려진 기후변화의 지질학적 역사기록이 잘 나타났다는 (견고한 동의).

최근에는 퇴적층의 시추기술 및 절대연대측정기술의 획기적인 발달로 고해상도와 양질의 화분연구결과를 얻었다. 그 결과, 퇴적층에 기록되어 보존된 과거 기후변화 및 식생천이 역사를 보다 상세하게 해석할 수 있게 되었다.

특히, 고해상도의 화분연구로 전 지구규모 기후사건(예, 8.2 ka cold event) 또는 동아시아몬순규모 기후사건(예 4.2

4.3. 동물화석에 의한 고기후

분석이 주로 동물화석이 많이 나오는 강원도의 석회암지대 일대를 중심으로 이루어졌고 시대대 대부분이 플라이스토세의 후기에 속하는 것이라는 시간적 제약이 있지만 전체적인 환경과 기후의 변화가 잘 나타났다는(견고한 동의).

후기 플라이스토세에 속하는 동굴유적들은 약 20여 군데이며 이곳에서 출토된 동물로 본 이시기의 특징은 다음과 같이 정리할 수 있다. 먼저 다양한 동물들의 출현이다. 앞선

중기 플라이스토세 시기(30여종)보다 훨씬 많은 50여종의 동물이 보고되었으며, 이러한 증가가 가장 두드러진 짐승들이 식육류이다. 호랑이, 동굴사자, 곰 등의 대형 식육류부터 하이에나, 늑대, 여우, 너구리 오소리 등의 중형 동물, 족제비, 수달 등의 소형 식육류들이 나타나고 있는데 이들의 증가는 당시의 기후가 오랫동안 산림이 우거진 온대성의 기후였음을 나타낸다.

후기 플라이스토세의 늦은 시기로 오면서 매머드, 털코뿔소, 사향노루 등의 존재가 확인되는데 이들은 전체적으로 추운 기후를 상징하는 동물들로 최후빙기 최성기와 맞물리는 것으로 판단된다. 하지만 인류 활동과의 관계에서 보면 당시 사람들의 주된 사냥의 대상은 사슴과 동물들이었음이 출토동물화석의 양적 비교에서 보면 알 수 있다. 일부 유적에서는 전체 동물화석의 출토량의 90% 이상이 사슴의 뼈대였음이 밝혀지고 있기 때문이다.

동물상에 가장 많은 변화가 온 것은 역시 플라이스토세에서 홀로세로 이행된 시기이다. 홀로세의 동물들의 큰 특징은 많은 동물들이 사라지게 되며 특히 뷔름 빙하기의 상징적인 한대성의 대형동물들이 사라지게 되었다.

홀로세에 들어와 주로 패총이나 주거지 그리고 약간의 동굴에서 찾아지는 동물들은 대개 온난하고 숲지성의 중형 또는 소형 동물군으로 이루어졌다. 특히 중형의 식육류들은 신석기, 청동기 시대까지 활발하게 서식했다. 한편 매머드, 털코뿔소 등의 대형 포유류들의 절멸은 시기의 변화를 잘 말하여 주는 것으로 플라이스토세의 마지막 시기인 뷔름빙하기의 기후가 끝나고 후빙기의 온난한 기후로 변화함을 보여준다.

4.4. 연륜에 의한 고기후

세포연륜연대기와 산소동위원소연륜연대기로 밝혀진 복원 가능한 고기후 요소는 다양한 국제 논문에서 검증된 방법을 따라 분석되었다(견고한 동의).

연륜을 이용한 고기후 복원 연구는 발표되지 않았으나, 연륜을 구성하고 있는 목재세포의 크기(이하 세포연륜

연대기) 또는 각 연륜에서 측정된 산소동위원소 비율 ($\delta^{18}O$)(이하 산소동위원소연륜연대기)이 국내 고기후 복원 연구에 활용 가능한지를 확인하는 연구들이 최근 3년간 발표되었다. 이러한 연구들을 통해 연륜폭에서 찾을 수 없는 새로운 고기후 요소들도 복원될 수 있음이 확인되었다. 또한 한 연륜에서 목재세포 크기나 동위원소가 함께 조사된다면 여러 계절에 대한 고기후 복원이 가능성도 확인되었다. 경우에 따라 연륜폭 자료를 이용한 고기후 결과보다 통계적으로 신뢰성 높은 결과도 도출되었다.

국내에서 처음으로 작성된 세포연륜연대기는 속리산 고산지대에 있는 신갈나무 도관내강면적으로 작성된 것이다.

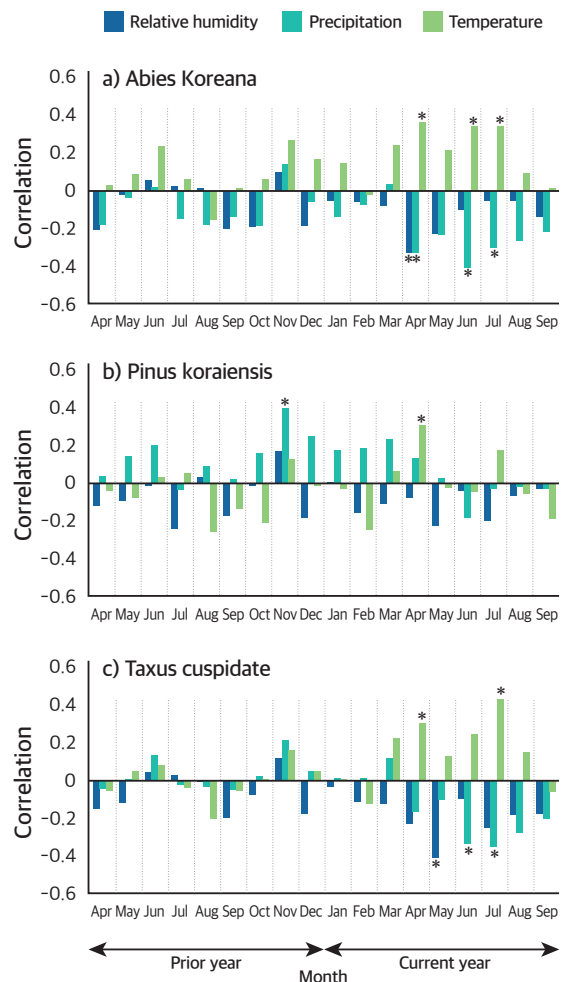


그림 4.1. 구상나무(*Abieskoreana*), 잣나무(*Pinuskoraiensis*), 주목(*Taxus cuspidata*) 산소동위원소연대기와 전년도 4월부터 당년 9월까지 월평균 기온 및 강수량과의 상관관계(Seo et al., 2019).

연구 결과에 따르면 신갈나무 도관내강면적으로 작성된 세포연륜연대기는 겨울철 강수량과 통계적으로 신뢰성 있는 정의 상관을 나타내 겨울철 강수량 복원에 적합한 것으로 확인되었다. 산소동위원소연륜연대기는 지리산 고산지대 있는 주목, 잣나무, 구상나무, 신갈나무를 대상으로 작성되었다. 작성된 산소동위원소연륜연대기와 기후요소와 상관분석을 실시한 결과 전체적으로 봄부터 여름철 온도와는 통계적으로 신뢰성 있는 양의 상관을 나타냈으며, 같은 기간 강수량과는 음의 상관을 나타냈다(그림 4.1). 특히 강수량의 경우 일본 서부지역에서 발생한 5~7월 강수량과도 신뢰성 높은 음의 상관을 나타내 동아시아 몬순 복원에 활용 가능성이 확인되었다. 이상의 연구를 통해 235년(1780~2014년)간의 세포연륜연대기와 152년(1864~2015년)간의 산소동위원소연륜연대기가 마련되었다.

4.5. 고문헌에 의한 고기후

이전의 연구의 성과들이 단순 횡수를 활용한 통계에 그쳤다면 이후에 발표된 연구 결과들은 횡수와 더불어 동시에 고려할 수 있는 다양한 요소들을 통해 좀더 구체적인 정교함을 갖추었다(견고한 동의).

조선왕조실록, 승정원일기, 관수일기 등의 고문헌 기록을 통해 맑음, 흐림, 강우, 강설과 같은 기상현상뿐만 아니라 가뭄, 황사, 서리 등과 같은 기상재해에 대하여 고문헌을 통해 과거 기후를 복원하는 다양하고 정교한 방식의 연구 성과들이 있었다.

맑음과 흐림의 일수는 현대의 평년값에 비해 맑음은 많았으며, 흐림의 일수는 적게 나타났다. 강수는 1710년대를 전후로 19.5일에서 63.8일로 큰 차이를 보인다. 또한 1771~1800년의 연강우량은 평균 941.5 mm로 현대의 연강수량 평년값(1450.6 mm)보다 35.1%나 적은 것으로 나타났다. 이 시기의 강수일수가 다른 시기에 비해 가장 많았음을 고려할 때, 1770년 이전의 기간은 상대적으로 훨씬 더 건조했던 것으로 판단된다. 1623~1770년에 기후제의 기록 횡수 역시 다수 확인되었다. 이러한 결과는

해당 시기의 서울을 비롯한 한반도의 기후가 주로 한랭한 소빙기의 영향 하에 있었기 때문으로 보인다.

강설에 경우도 10월에 눈의 기록이 있는 1623~1650년, 1711~1740년, 1771~1800년에 강설이 평년보다 이르게 그리고 봄에는 늦게까지 내린 것으로 기록되어 겨울이 길고 더 한랭하였던 것으로 보인다. 가뭄에 대한 기록과 기후제를 비롯한 가뭄에 따른 여러 조치들이 시행된 기록을 함께 살펴봐도 조선 후기보다 초기에 이에 대한 기록들이 많이 확인되었다.

서리는 17세기에서 19세기로 올수록 첫서리의 기록일이 점점 늦춰졌다는 점과 월별 서리 기록 횡수가 현대 평년값보다 빈번하다는 점에서 17세기에 기후가 19세기의 조선 후기보다 더욱 한랭하였다는 것을 의미한다.

각 연구들의 내용을 종합하여 분석하였을 때 많은 기상, 기후 현상들이 17세기 한랭한 소빙기의 상황을 보여준다고 할 수 있다.

5. 탄소순환과 기타 생지화학순환



5.1. 서론

탄소순환은 기후시스템의 중추적 구성요소이다. 기후 변화와 관련된 복합적 강제력, 비선형 반응, 되먹임 등을 통합할 뿐 아니라 다른 생지화학순환과 연결되어 생태-사회시스템의 건강과 오염 및 대기의 질에 심각한 영향을 미치기 때문에 모든 기후변화평가 관련 실무그룹들과 종합적 분석에 있어서 매우 중요하다.

탄소순환과 기타 생지화학순환을 다룬 IPCC 5차 평가 보고서의 경우, 이산화탄소, 메탄, 아산화질소의 생지화학 순환에 미치는 인위적인 교란과 더불어, 기후변동과 연동 되어 온 생지화학순환의 현재까지의 변화 추세와 미래 시나리오에 따른 변화에 대한 모델링 기반의 예측에 대하여 다루고 있다. 본 장에서는 이와 관련하여 그동안 국내에서 수행되었거나 또는 현재 진행 중인 연구들 중에서 출판된 결과를 중심으로 보완하고 요약하였다. 그러나 많은 국내 연구가 그동안 중단되었거나 비교적 최근에 시작되어 충분한 자료가 축적되지 않은 경우가 많았다. 예외로 장기간 관측된 자료가 축적되어 있는 경우에도 관련 메타 자료의 부재로 분석이 어렵거나 현재 분석이 진행 중이어서 포함되지 못했다.

2014년 보고서 이후 5년이 지난 지금도 여전히 국내에서 자체 생산된 연구 결과가 턱없이 부족하다. 국제적인 프로그램의 자발적 참여를 통한 연구력 제고를 통해 지속되고 있는 일부 관측 연구를 제외하고는 대부분의 생지화학순환 관련 관측은 오히려 퇴보한 것으로 평가된다. 탄소순환 및 기타 생지화학순환의 체계적인 모니터링을 위한 시스템 차원의 장기적이고 종합적인 관측 기반의 연구가 절실히 요구된다.

이 장에 요약된 내용은 대부분이 국지적이고, 산발적인 단기 관측과 과정 수준의 연구 결과이다. 최근에 들어서,

일부 모델링/알고리즘 개발 및 비교 검증과 기계학습에 기반을 두어 관측과 모델링을 융합하는 연구들이 보고되기 시작하였다. 이러한 예비 결과를 기반으로 한반도, 동아시아 및 극지의 탄소순환과 주요 생지화학적 되먹임의 중요성, 추세, 이해 수준 및 관측 현황을 요약하였다.

5.2. 탄소순환

화석연료 연소와 토지이용 변화로 인한 이산화탄소 방출의 증가가 대기 중 이산화탄소 농도 증가의 주요 원인으로 나타났다(견고한 동의). 기후변화와 영양소의 부족은 증가하는 대기 중 이산화탄소에 의해 야기된 육상생태계의 탄소 흡원을 부분적으로 상쇄시키는 것으로 나타났다(견고한 동의). 육상의 물리적, 생지화학적 탄소순환은 21세기 동안 야기될 대기 중 이산화탄소의 증가와 기후변화에 반응을 계속할 것으로 예상되었다(견고한 동의). 관측에 의하면, 1990년 초반부터 십여 년간 안정되었던 메탄 농도가 2007년부터 증가함을 보였다(중간적 동의). 습지생태계의 메탄 방출은 증가하는 이산화탄소와 따뜻한 기후로 인해 더 증가할 것으로 나타났다(중간적 동의).

국내 산림생태계의 경우, 최근 들어 산림 면적의 감소율은 줄어들었으나, 목재 자급률 증가를 위한 벌채량이 증가하고 있다. 간벌의 경우, 그 강도와 간벌재 수집 방법, 이후 관리 방법에 따라 탄소 축적에 미치는 영향이 차이를 보였다. 노령림화가 진행되고 있고, 소나무 재선충, 산불과 같은 교란으로 인해 산림생태계는 이산화탄소 흡원으로서의 역할에 변화가 일어나고 있으며, 흡원의 강도가

감소할 것으로 예상된다. 또한 겨울철 휴면기의 산림 토양의 관리가 탄소 방출에 중요한 영향을 미치는 것으로 보고되었다. 산림생태계는 인위적인 이산화탄소 방출의 약 3%를 흡수하는 것으로 추정되며, 향후 국내 산림탄소의 축적량은 감소할 것으로 예측되었다. 그러나 5차기와 6차기 국가산림자원 조사에 대한 다양하고 심도 깊은 연구와 관측 및 모델링의 연계가 앞으로의 산림관리 전략과 새로운 조림 수종 제안에 이용되고 있고, 중장령림에 대한 관리와 재조림 이후에 초기 산림 작업이 탄소순환에 미치는 영향에 대한 연구의 고도화가 진행되고 있어 고무적이다.

국내 농업생태계의 경우, 일반적으로 이산화탄소 중립으로 인식되어 있는 것과는 달리 이산화탄소의 발원인이 보고되었다. 농경지가 이산화탄소를 비롯한 온실가스의

흡원 또는 발원인지를 평가하기 위해서는 비경작기간을 포함한 1년 전체를 고려해야 하며, 온실기체뿐만 아니라 수확을 통해 농경지 외부로 이동되어 소비되는 양까지 함께 고려해야 한다. 농업생태계가 일반적으로 이산화탄소 중립으로 인식되는 이유는 수확물이 소비 또는 분해되어 다시 대기 중으로 방출되기 때문이다. 국내의 벼 단작지 또는 보리-벼 이모작지가 모두 년 단위로 이를 평가했을 때 이산화탄소와 메탄의 발원으로 보고되었다. 국내에서 일반적으로 수행되고 있는 중간낙수를 포함한 간헐적 관개가 아산화질소 방출을 증가시키는 것으로 보고되어 있어서, 논외의 경우 온실가스의 발원으로 평가되고 있다. 그러나 사과 과수원과 같은 임목의 농업생태계의 경우 이산화탄소 흡원으로 기능하는 것으로 보고되었다. 이에

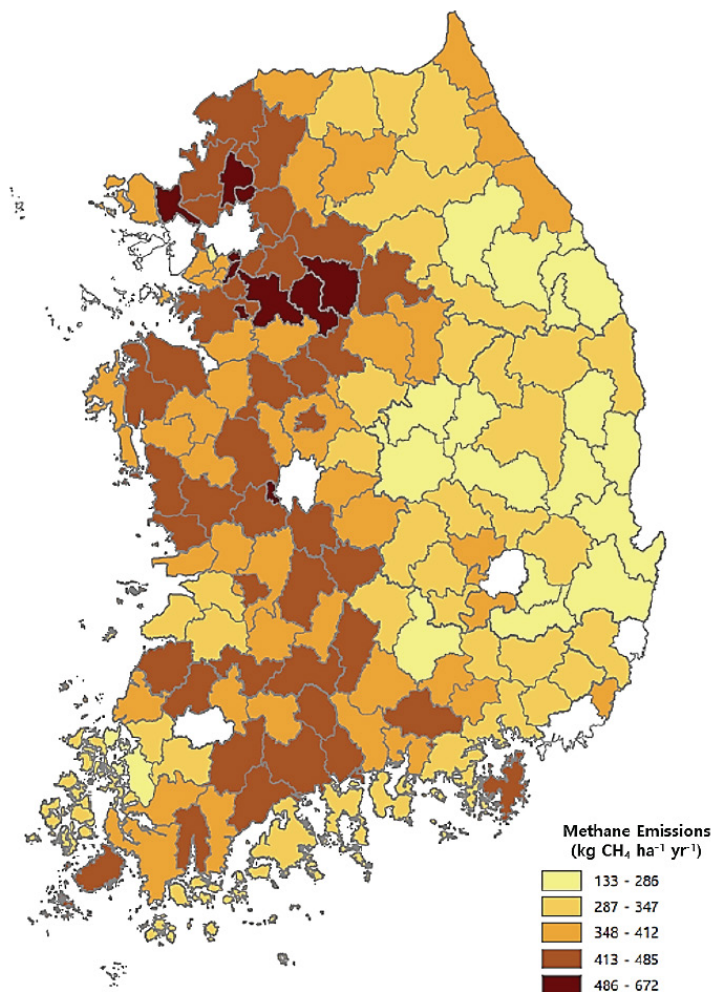


그림 5.1. 2010년 농림어업총조사의 전수자료, 개선된 물관리 보정인자 및 IPCC 지침을 이용하여 산정한 전국 시군 논외 단위 면적당 메탄 방출량(최성원 등, 2018).

대한 정확한 평가와 완화 전략을 위해서는 전 과정 평가에 필요한 지속적인 관측 자료의 구축이 절실히 요구된다. 한편, 국내 논에서의 메탄 배출량이 과소평가된 것으로 보고되어 배출계수의 재고가 필요하다. 개선된 물관리 보정인자와 2010년 농림어업총조사의 전수자료, 그리고 2006 IPCC 지침의 메탄 배출량 산정법 및 계산 프로그램을 이용하여, 전국 시군별 벼 재배 논에서 발생하는 메탄 배출량을 산정한 결과(그림 5.1), 단위 면적 당 메탄 배출량의 전국 평균은 $380 \pm 74 \text{ kg ha}^{-1} \text{ yr}^{-1}$ 였으며, 물관리보정이 되지 않은 국가배출계수를 사용하여 보고된 메탄 배출량보다 많을 뿐만 아니라 큰 차이를 보였다.

국내 담수생태계의 경우, 하천의 유기탄소 및 무기탄소 유출량이 연간 총 905 Gg으로 한국 산림의 NEP 추정값의 1/4에 이르는 것으로 보고되어 지속적인 모니터링이 필요한 것으로 나타났다. 한강 유역의 하천과 호소의 경우, 이산화탄소와 메탄은 유기물이 많이 축적된 호소 퇴적층과 하수처리장의 영향을 많이 받는 한강 하류와 그 지류에서 다량 배출되고 있는 것으로 나타났다. 국내의 수많은 댐과 소규모 농업 저수지에 퇴적된 유기물은 탄소 저장과 온실가스 배출원이라는 양면적 기능을 가지고 있으나, 현재까지 연구된 결과만으로는 국내 호소환경의 탄소 수지를 예측하는 것은 불가능한 실정이다. 향후 정확한 탄소수지 예측을 위한 기초조사와 더불어, 저수지 수명이나 가뭄과 홍수 같은 계절적 환경 변화로 인한 온실가스

배출량의 변화를 제대로 파악하기 위한 지속적이고 체계적인 현장조사가 절실히 필요함이 지적되었다.

극지생태계의 경우, 북극의 온난화에 따른 영구동토(permafrost, 2년 이상 연속적으로 얼어있는 땅)를 포함한 툰드라 생태계의 온실가스 피드백이 기후변화 예측에 매우 중요한 것으로 보고되었다. 지난 십년간 극지연구소를 포함한 국내 연구자들이 북극과 알래스카 툰드라 생태계 및 남극에서 수행한 연구 결과가 보고서에 추가되었다. 최근 북극 및 알래스카의 습윤 툰드라에서 관측된 결과에 따르면, 영구동토의 해동에 따른 지형 및 강수 패턴의 변화가 토양수분 분포의 변화를 가져와 탄소 교환에 상당한 영향을 미칠 것으로 예상된다. 선행연구들이 영구동토층이 녹을 경우 토양이 더 습해져서 오래된 탄소의 분해속도가 증가할 것으로 경고한 반면에, 영구동토층이 녹으면서 건조한 지역이 생길 경우 이를 상쇄할 수도 있음을 보여준다.

국립기상과학원에서 개발한 아시아탄소추적시스템은 아시아에 중점을 두고 전구 영역의 탄소를 추적한다. 이 시스템은 대기 중 이산화탄소 방출 및 배출량 감축 활동의 효과를 감시하고 평가하는 독립적인 체계로서, 관측과 적절한 일치성을 보였고, 이산화탄소 농도 증가율도 관측값을 전반적으로 잘 모의하였다. 2001년부터 현재까지 이산화탄소 농도는 증가했고, 그 분포는 흡수·배출 변동 때문에 지역적으로 다르게 나타난다. 화석연료의 연소에 의해 생성되는 이산화탄소의 배출량은 거의

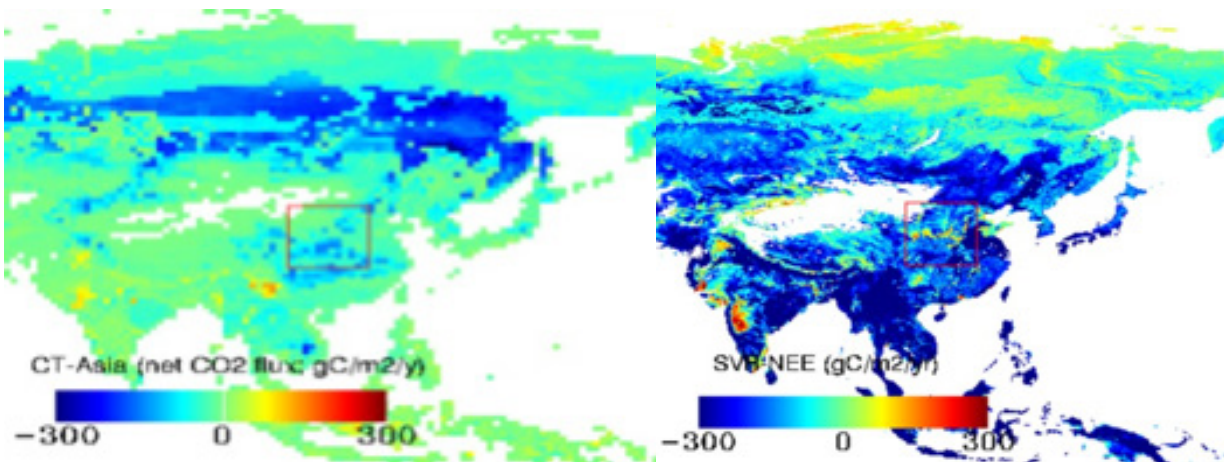


그림 5.2. (좌)아시아탄소추적시스템의 $1^\circ \times 1^\circ$ 순 생물군계 생산량(net biome productivity, NBP)와 (우)Support Vector Regression 기반의 기계 학습 방법으로 도출된 $0.25^\circ \times 0.25^\circ$ 순 생태계 교환량(net ecosystem exchange, NEE) (Kim et al., 2018).

선형적으로 증가하면서 약간의 경년 변동을 보였다. 자료동화 모수의 최적화와 항공 및 위성 자료의 동화 체계를 새로이 구축한 결과, 인버스 모델링과 관측 기반의 추정값 간의 비교에서 개선된 지표 이산화탄소 플럭스 추정값을 제시하였다(그림 5.2). 시베리아 관측 자료의 중요성과 더불어, 불확실도가 큰 아시아 지역에 더 많은 지상 관측지가 필요함이 지적되었다.

5.3. 기타 생지화학순환

아산화질소의 농도가 지난 30년 동안 0.73 ± 0.03 ppb/년의 증가율을 보였다(중간적 동의). 토양으로부터의 아산화질소 방출은 늘어나는 부양/식량 및 농업의 질소비료 의존도 때문에 증가하는 것으로 나타났다(중간적 동의). 인간 활동의 결과로 온실가스, 반응성 기체 및 이차 생성물인 오존과 미세먼지를 포함한 에어로졸의 농도가 크게 증가하여 지역 규모에서 대기질의 저하를 가져왔다(중간적 동의).

질소의 생지화학순환의 경우, 인류가 넘어서는 안 될 한계를 이미 넘어섰으며, 아산화질소의 농도는 산업화 이전보다 약 20% 높아졌고 주로 화학비료와 축분 사용에 따른 인위적 활동이 주요 원인이다. 질소 순환에 관련된 국내 연구의 경우, 농경지로부터의 아산화질소 배출량 산출과 IPCC 지침에 따른 국가고유배출계수 개발을 위한 연구 위주로 수행되었다. 한편, 경작지와는 다른 생태환경인 습지의 경우, 탄소와 질소의 생지화학순환의 고리 역할을 하며, 온실가스 수지에 기여함에도 불구하고 국내 온실가스 배출량 산정과정에서 현장 측정을 통한 자료축적이 거의 없는 실정이다. 농업은 인간 활동에 의해 배출되는 아산화질소 연간 배출량의 2/3를 차지하는 것으로 추정된다. 농경지 토양의 아산화질소 배출에 비해서는 적은 양이지만, 농경지 유출수나 도시 하수의 영향을 많이 받는 하천과 호수의 아산화질소 배출이 최근 크게 증가하여 인위적으로 배출되는 아산화질소의 10%에 육박하는 것으로 추정된다. 국내 하천과 호소에서 배출되는 아산화질소에 대하여

한강 유역에서 실시된 소수 현장조사 결과에 따르면, 질소 농도가 높은 댐 구간이나 한강 하류에서 아산화질소 농도가 비교적 높게 나타났다. 한강 하류의 경우 하수처리장 방류수가 아산화질소의 주요 배출원으로 지목되었으나, 하류의 하천수나 퇴적물에서 어떤 환경 조건에서 아산화질소 배출이 결정되는지에 대한 추가 연구와 지속적인 모니터링이 필요하다.

단수명 기후변화유발물질 순환의 경우, 국토의 약 2/3가 산림이며, 도시 숲이 증가하는 추세에 있어서 자연적으로 발생하는 휘발성유기화합물에 대한 정확한 진단과 오존 및 에어로졸의 생성에 미치는 영향과 되먹임 작용에 대한 이해가 필요하다. 이들의 배출량 추정값은 모형을 활용해 산출된 것이어서 휘발성유기화합물의 농도와 배출 및 광화학 과정에 대한 이해가 매우 미흡한 실정이다. 현재 미세먼지 저감을 위한 연구와 대책 마련의 일환으로 중앙 정부와 지자체를 중심으로 도시 숲 조성이 확대될 전망이다. 도시 숲은 기후변화 적응 측면에서 효과가 큰 것으로 받아들여지고 있으나 가뭄이나 고온이 지속되는 경우 휘발성유기화합물 배출이 증가할 것이므로 이에 따른 되먹임 효과를 예측하기가 어렵다. 또한 휘발성유기화합물은 주변에서 배출되는 질소화합물이나 이산화황과 섞일 때 오존과 미세먼지를 잘 생성할 수 있다. 휘발성유기화합물이 다양한 조건에서 오존과 미세먼지를 생성하는 상세 기작을 연구하고 그 결과에 근거한 과학적 정책 수립이 요구된다. 따라서 오존과 미세먼지, 대기질과 기후변화의 통합 차원에서 반응성 탄소, 질소, 황 화합물의 종합적이고 장기적인 생지화학순환 관측 연구가 절실히 필요하다.

6. 구름과 에어로졸



6.1. 서론

2014~2019년에 출판된 구름과 에어로졸 관련 연구를 요약한 이번 보고서에서는 2014년 보고서와 마찬가지로 국내 연구기관 소속의 연구자가 집필한 논문과 국외 연구기관에 소속된 한국인 연구자가 수행한 한반도를 포함하는 동북아 지역의 구름과 에어로졸에 대한 주요 연구를 요약하였다. 이번 보고서를 위해 조사된 각 절별 논문을 정리하면 표 6.1과 같다.

표 6.1. 2014~2019년 동안 구름과 에어로졸 분야에 대해 국내 소속기관의 저자에 의해 연구되었거나, 국외 소속기관에 소속된 저자가 동북아 지역을 대상으로 연구한 논문의 수. 괄호는 국외 소속기관 저자에 의해 작성된 논문을 의미함.

절	국외 학술지	국내 학술지	총계
구름	30(4)	6	36
에어로졸	75(10)	1	76
구름과 에어로졸의 상호작용	17(5)	2	19
복사강제력과 유효복사강제력	20(12)	0	20
강수변화의 과정	4(3)	1	5

6.2. 구름

구름 관측 연구는 매우 적어 결과의 신뢰도를 논하는 것조차 부적절하다고 할 수 있다(제한적 동의).

2014년도 이후의 구름 직접관측 연구는 2017년 기상청의 기상항공기 도입에도 불구하고 경험과 기술 축적의 한계가 있어 아직은 외국에서 수행한 항공기 관측 캠페인 자료에 대한 연구가 대부분이었다. 여러 지역에서 수행한 액체상,

혼합상, 얼음상 구름의 항공기 관측을 분석하여 구름 위에서 유입된 건조공기로 인해 발생하는 유입-혼합과정이 구름의 미세물리 특성에 미치는 영향, 온도의 함수인 빙정의 종횡비, 대류에서 발생하는 깊은 대류구름에서의 빙정 생성의 주요 기작인 균질결빙에 의한 빙정의 생성, 남극해 낮은 층운 구름의 미세물리적 특징 규명 등의 연구가 수행되었다. 2013년에 국립기상과학원에 구름레이더가 도입된 이후 이를 이용한 구름 관측 연구도 활발히 진행되고 있다. 구름레이더 반사도와 구름수함량 사이의 관계, 레이더 반사도-강우율, 감쇠-강우율 간의 관계식을 도출하였다. 위성을 이용한 구름 관측은 2017년에 발사된 천리안 2호 위성의 구름 산출물 개발 사업으로 양적으로 성장하였다.

구름 수치모형 연구는 주로 구름분해 모형(cloud resolving model)의 계산과정 개선을 통한 구름 모의의 신뢰도 향상에 대한 것이 주를 이루었다. 구름입자 활성화 과정 계산의 개선, 난류에 의한 충돌효율의 강화 고려, 구름방울의 자기 전환(autoconversion) 과정 모수화 방안 제안 등의 연구가 이루어졌다. 또한 구름방울의 성장 경로를 추적할 수 있는 Lagrangian Cloud Model (LCM)을 이용한 연구도 활발히 진행되고 있다. 구름씨 뿌리기를 통한 강수증대 수치 모의 실험 결과도 발표된 바 있는데, 구름씨 물질인 AgI에 의한 얼음핵화과정(ice nucleation process)을 모수화하는 모듈을 개발, WRF 모형에 적용하여 겨울철 강원도 산악 지형에서의 구름씨 뿌리기 실험을 재현하였으며, 항공기를 이용한 구름씨 뿌리기 실험도 재현하였다.

6.3. 에어로졸

제주 고산이나 안면도에서 측정된 에어로졸 산란 계수와 흡수계수, 수농도는 비슷한 오염 수준을 가진 아시아 다른 지역의 값과 유사한 수준이지만 세계의 다른 청정지역의 값과 비교하면 매우 높았다(견고한

동의). 수치모형을 이용한 한반도 에어로졸의 배출원 산정이나 황사 재현 실험의 결과는 비교할 연구가 많지 않다(제한적 동의).

에어로졸 관측 분야는 이번 보고서에서도 가장 활발한 연구가 이루어졌으며, 특히 국제공동연구를 통한 연구 수준의 제고가 주목할 만하다. 에어로졸의 광학적 산란 특성 관측은 기존 제주 고산에서의 지속적인 관측은 물론 서해안이나 서울과 같이 자체 오염원과 장거리 수송 오염 영향 지역으로 지상 관측 연구가 확장되었다. 또한 중국 등 외부에서 발생한 에어로졸이 한반도로 수송되면서 2차 에어로졸 생성 과정을 거쳐 광학 특성이 변형되는 것으로 관측되었다. 에어로졸 크기분포와 구름응결핵 연구도 비교적 활발히 이루어져 서해상에서의 선박관측 캠페인, Megacity Air Pollution Studies-Seoul (MAPS-Seoul) 캠페인, Korea-US Air Quality (KORUS-AQ) 캠페인을 통해 지상, 선박, 항공기를 이용한 종합적인 에어로졸/구름응결핵 관측이 이루어졌다. 이에 더하여 세계 여러 지역에서 장기간 관측된 에어로졸 분포와 구름응결핵 수농도 자료를 집대성한 논문에서 서울의 장기관측 자료가 포함되었다. 또한 극 지역 에어로졸 관측이 활발히 이루어진 것도 주목할 만하다. 한편, 지상/위성 원격탐사를 통해서 장기간 넓은 공간범위에 대한 에어로졸의 분포 및 변화 특성을 파악하는 연구도 활발히 이루어졌다. 2004년부터 2014년까지 10년 동안 중국의 에어로졸 광학 깊이는 증가하였고 입자 크기는 작아졌으나, 한반도에서는 모두 뚜렷한 증가/감소 추세가 나타나지 않았다. 천리안 위성을 통해 기존 저궤도 위성보다 높은 시간 해상도로 동아시아 에어로졸을 관측할 수 있게 되었고, 이는 장거리 수송 특성이나 자체 오염원의 수송 특성 분석을 높은 시간 해상도로 가능케 하였다.

에어로졸의 수치모형 연구는 관측이 완벽하게 이루어지지 않는 상황에서 많은 중요 정보를 제공해주고 있다. 특히 최근 5년간 한국에서 가장 관심을 갖고 있는 에어로졸의 발생원과 수송 경향에 대해서 여러 지역/전구 화학 모델의 연구 결과들이 제시되었는데 대부분의 미세먼지 고농도 사례의 경우, 중국에서 배출한 다량의 에어로졸이 수송되어 오는 것으로 나타난 반면 평상시에는 국내 자체적인 기여를 무시하기 어렵다는 결과로 정리된다. 에어로졸의 물리

화학적 특성과 관련해서는 이산화황, 질소산화물과 같은 기체상 오염물질이 특정 상황에서 화학적 반응을 일으켜 입자상의 물질로 변하는 2차 생성과정의 중요성이 크게 부각되었다. 황사에 대한 연구는 과거에 비해서 다소 줄어들었는데 이것은 한반도로 유입되는 황사 사례가 과거에 비해 줄어든 것과 관련이 있으며, 그 이유는 최근 바람장 및 관련된 중규모 기압 배치 특성이 한반도 지역에 황사 바람이 이동되는 정도를 약화시키기 때문인 것으로 추정된다.

6.4. 구름과 에어로졸의 상호작용

에어로졸-구름-강수 상호작용에 대해서는 최근의 다양한 연구 활동이 진행되고 있지만 아직 그 수가 적었다(제한적 동의). 이 주제에 대한 수치모형 연구 결과도 상당수 발표되었으나 일관성이 크지 않았다(중간적 동의).

에어로졸-구름 상호작용 연구는 에어로졸과 구름뿐만 아니라 강수를 포함한 피드백, 경계층과의 상호작용, 그리고 기후 규모에서는 몬순 순환 및 수문기상에 미치는 영향까지 범위가 확장되고 있다. 에어로졸-구름-강수 상호작용은 자체 비선형 피드백 메커니즘과 에어로졸 농도 변화에 따른 복잡한 구름 반응(response)들이 얽혀 있기 때문에 관측 기술의 지속적인 진보에도 불구하고 에어로졸 간접효과의 정량적인 산정에 한계가 있다. 그러나 동북아시아 지역은 중국의 급속한 산업화와 경제발전으로 연무가 빈번히 발생하고 있기 때문에 전 세계 다른 지역에 비해 에어로졸-구름-강수 상호작용에 대한 연구가 활발하게 이루어졌다.

수치모형 연구는 에어로졸이 구름의 발달 및 강수에 어떻게 영향을 미치는지에 대한 연구와 기후모형으로 전구적인 규모에서의 에어로졸 분포 변화의 영향을 산정하는 연구로 구분된다. 에어로졸 수농도에 따른 강수량 변화는 일관적이지 않았으며, 최대의 강수량을 보이는 에어로졸 수농도가 존재할 수 있다는 연구 결과도 발표되었다. 대규모 순환의 관점에서는 동아시아의 인위적 에어로졸 증가가 복사수지에 영향을 미쳐 동아시아 몬순의 발달을

억제시킬 수 있다는 연구도 발표되었다(그림 6.1).

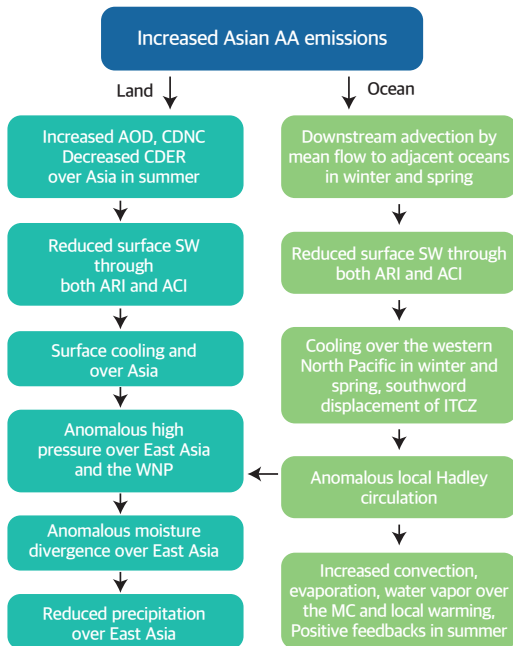


그림 6.1. 아시아의 인위적 에어로졸 배출에 따른 동아시아 여름 몬순과 강수의 변화 기작을 설명하는 모식도 (Dong et al., 2019).

6.5. 복사강제력과 유효복사강제력

에어로졸 분포의 국지성을 감안할 때 제주 지역의 복사강제력 산정 결과는 매우 큰 의미를 갖지만 관련 연구 논문이 많지 않았다(중간적 동의). 수치모형 연구를 바탕으로 추정된 황사 복사강제력의 증감 특성은 여러 연구가 유사성을 보이거나 아직 정량적인 수치가 다소 수렴되지 못한 부분이 있었다(중간적 동의). 전 세계적으로 볼 때 구름 복사 효과와 관련한 이해도는 지난 수십 년간의 관측기술 발달과 개선에 따라 지속적으로 향상되었다(중간적 동의).

2006~2012년 기간 동안의 위성 자료와 모델 모의 결과를 바탕으로 동아시아 에어로졸 광학두께를 분석한 바에 의하면, 산불 기원 에어로졸이 황사보다 2배 정도 강하게 대기를 가열시키고 지면은 냉각시키는 것으로 나타났다. 또한 1980~2012년 기간에 봄철 지상 복사에너지가 약 10

Wm^{-2} 감소하였음이 제시되었다. 황사, 혼합형, 그리고 인위적인 에어로졸의 복사효율은 지상에서 각각 -101.0 , -112.9 , $-98.3 Wm^{-2} t^{-1}$, 대기 꼭대기에서는 각각 -42.3 , -22.5 , $-39.8 Wm^{-2} t^{-1}$, 그리고 대기 중에서는 58.7 , 90.3 , $58.5 Wm^{-2} t^{-1}$ 이었다. 황사 먼지와 인위 에어로졸의 혼합은 지상을 냉각시키고, 대기를 가열시키는 효과를 나타내어 대기를 안정화시키고 대기오염을 강화시키는 효과가 있다고 주장하였다. AEROSOL ROBOTIC NETWORK (AERONET) 관측 자료를 활용한 연구에서 복사강제력은 에어로졸 양에 의해 결정되지만 효율은 에어로졸의 형태와 복사-지표면 상호작용에 따라 크게 달라짐을 보였다. 특히 지표면 반사도가 크게 영향을 미치는데, 에어로졸 광학두께와 지표면 반사도에 따라 2001년 봄철 황사사례기간의 복사강제력이 $-84\sim-69.3 Wm^{-2}$, 여름철 러시아 산불은 $-86.3\sim-3.1 Wm^{-2}$ 이었다. 황사로 인한 한반도 복사 강제력 변화 수치모형 연구는 대기 상한에서는 냉각, 대기는 가열되는 양상을 나타내고 있으나, 아직 정량적인 수치는 좀 더 여러 실험을 통해 수렴하는 값을 찾아야 할 것으로 보인다.

6.6. 강수변화의 과정

에어로졸 증가에 따른 강수 감소는 결빙에 의한 잠열 방출과 증발에 의한 잠열 흡수의 증가를 통해 구름 열역학과 역학 구조를 바꾸고, 급기야 대류와 관련된 구름계 조직을 변화시킨다는 에어로졸-미세물리-역학 간 되먹임 과정이 최근에 활발히 연구되고 있다. 즉 미세물리과정 자체에만 치중하는 전통적 간접효과 연구에서 에어로졸-미세물리-역학 간 되먹임과정 연구로 그 중심이 이동하는 경향이 나타나고 있다.

구름-에어로졸-강수 상호작용은 기후변화 예측에 있어 매우 중요하여 전 세계적으로 연구가 활발히 진행되고 있으나 그 불확실성은 여전히 크며, 이 분야에 대한 국내 연구는 매우 적다. 에어로졸-구름-강수 상호작용이 강수변화 과정에 미치는 영향에 대한 의미 있는 결과 도출을 위해서는 더 많은 연구가 필요하다. 특히, 국내에서는 수치모형 연구에만 국한되어 있고, 관측 연구는 전무하다. 그러나 에어로졸-구름-강수 상호작용의 이해 증진을 위한 첫 번째 단계로서, 체계적이고 지속적인 관측 기반 연구가 필요한 실정이다.

7. 인위적 및 자연적 복사강제력



7.1. 서론

인간 활동에 기인한 인위적 요인과 자연적인 원인에 의한 대기 조성의 변화는 지구복사에너지 수지의 변화를 일으키며, 기후시스템 내의 다양한 피드백을 통해 기후변화를 유발하는 근원이다. 복사강제력(Radiative Forcing, RF)은 이러한 인위적 요인에 의해 대기 중 농도가 증가한 온실가스나 에어로졸 등에 의해 발생하는 지구복사에너지 균형의 변화를 정량화하기 위해 사용되고 있다. 이 장에서는 한반도를 중심으로 한 동아시아 지역의 기후변화에 의한 복사강제력을 인위적 요인과 자연적 요인으로 나누어 간략히 요약하였다. 한반도 및 동아시아 지역에서의 인위적·자연적 복사강제력 산정 연구 자료의 한계로 복사강제력의 불확실성은 정량적으로 제시하기가 어려운 실정하기에 전 지구에 대비하여 정성적으로 기술하였다.

7.2. 대류권 오존

동아시아 및 한반도 지역은 지속적인 전구물질의 배출 변화로 지표 오존농도가 지속적으로 증가하고 있으며, 고농도 오존 발생빈도가 증가하는 추세를 보였다(견고한 동의).

대류권 오존은 전구물질의 시·공간적인 배출이나 기상장에 큰 영향을 받는 대표적인 온실가스이자 중요한 대기오염 물질로 지역 기후변화에 상당히 민감한 것으로 알려진 단수명 기후 강제자이다. 미국이나 유럽과는 달리, 동아시아 지역은 지속적인 전구물질의 배출 증가로 지표 오존농도가 지속적으로 증가하고 있다. 국내의 경우, 오존 주의보 발령 일수는 2007년 22일에서 2018년 66일로 크게 증가

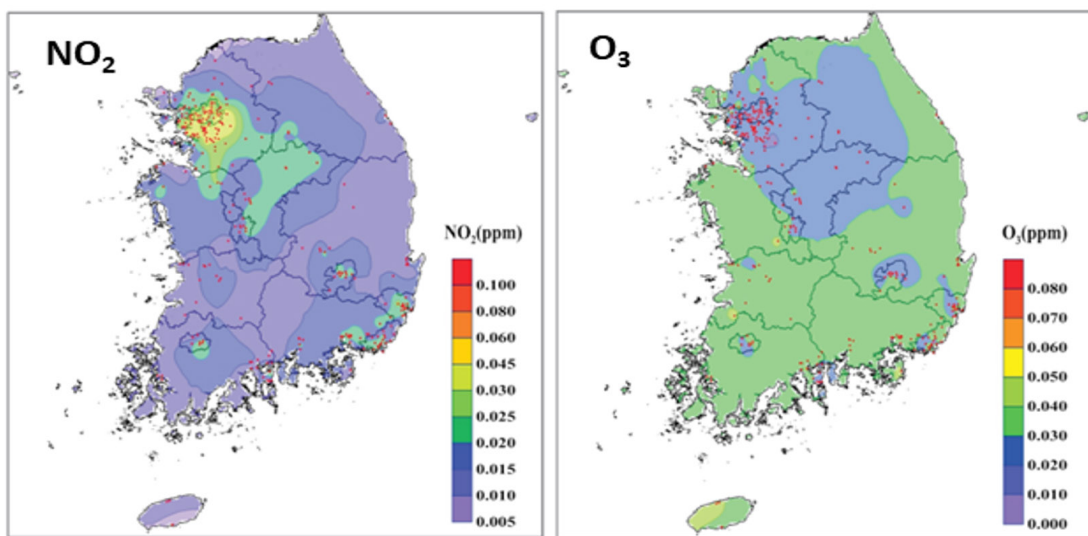


그림 7.1. 이산화질소와 오존의 2017년 기준 연평균 농도 분포. 대기오염측정망을 붉은 점으로 표기함 (국립환경과학원, 2018).

하였으며, 오존 주의보 발령횟수 역시 2006년 52회에서 2018년 489회로 10배 가까이 증가하였다.

우리나라 오존은 겨울철(11~2월)에 최저농도를, 봄철(4~6월)에 최고 농도를 보이며, 여름철(7~8월)에는 잦은 강수로 인한 전구물질과 일사량의 감소로 봄철과 비교하여 상대적으로 낮은 농도를 보인다. 시간대별로는 높은 기온과 강한 일사로 인해 광화학반응이 활발한 오후 2시에서 5시 사이에 가장 높은 농도가 나타나고, 오전 7시에서 8시 사이에 가장 낮은 농도가 나타난다. 그림 7.1은 연평균 오존의 공간분포를 나타낸 것으로 이산화질소의 공간 분포와 뚜렷한 반대 패턴이 나타나며, 대기오염물질의 발생원이 밀집된 수도권 및 대도시에서 낮고 해륙풍의 영향을 많이 받는 해안 도시에서 높은 경향을 보인다.

모델 연구를 통해 동아시아 지역 오존농도 증가가 기상 요소의 변동성에 의해서 영향을 받는 것으로 밝혀졌다. 그러나 도심지역 장기적인 오존 증가는 기상요소보다 자동차에서 배출되는 질소화합물의 오존 적정효과에 상당히 기인한 것으로 보고되었다(그림 7.2).

한편, 미세먼지 저감 정책으로 인한 초미세먼지 농도 감소가 일부 도시 지역의 오존농도 증가에 기여하는 것으로 보고되고 있어, 향후 지역 기후변화와 중국 배출량의 변화

경향에 따른 미래 지표 오존 변화에 관한 체계적 연구가 요구된다.

7.3. 인위적 복사강제력

한반도에서 관측된 이산화탄소와 메탄의 농도는 전 지구 평균 관측농도보다 약 5~8 ppm과 100 ppb 높게 나타나며, 이들에 의한 복사강제력도 전지구의 복사강제력과 유사하거나 다소 높게 나타난 것으로 추정되었다(견고한 동의). 또한, 대기 중 오존 전량의 증가 경향이 뚜렷하게 나타나고 있어, 오존의 복사강제력이 지속적으로 증가할 것으로 추정되었다(견고한 동의).

온실가스 농도 증가로 인한 전 지구 총 복사강제력은 2.83(2.54-3.12)Wm⁻²로 추정된다. 온실가스 중 가장 큰 기여도를 갖는 기체인 이산화탄소의 복사강제력은 1.68(1.33~2.03)Wm⁻²이다. 메탄과 아산화질소의 복사강제력은 각각 0.48(±0.05)Wm⁻², 0.17(0.14~0.20)Wm⁻²이다. 성층권 오존을 파괴하는 할로 카본의 복사강제력은

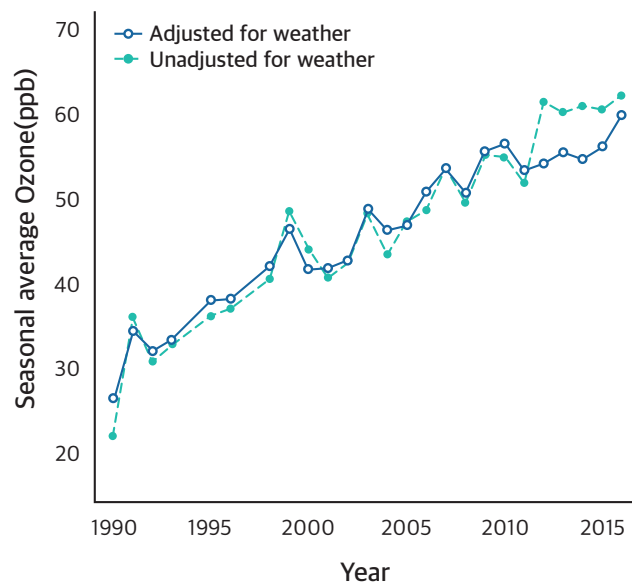


그림 7.2. 1990년부터 2016년까지 여름철 8시간 최고 오존농도 변화 추이(긴 실선: 관측된 오존 증가추세, 짧은 실선: 기상영향을 제거한 오존 증가추세)(김정환 등, 2017).

약 $0.18(0.01\sim 0.35)Wm^{-2}$ 이다.

한반도 및 동아시아 지역의 온실가스에 의한 복사강제력을 산정한 최근 연구가 부족하여 이들에 의한 정량적인 복사강제력을 제시하기는 어려운 실정이다. 그러나 한반도에서 관측된 이산화탄소와 메탄의 농도를 전 지구 평균 관측 농도와 비교하면 약 5-8 ppm와 100 ppb 가량 높게 나타나며, 아산화질소는 전 지구 평균농도와 유사한 수준임을 볼 때, 한반도 지역에서의 온실가스에 의한 인위적 복사강제력이 전 지구 평균 복사강제력과 유사하거나 다소 높게 나타날 것으로 추정된다. 다만, 최근 온실가스 증가 추세를 고려한다면 향후 한반도 및 동아시아 지역에서 온실가스에 의한 인위적 복사강제력이 지금보다 더 크게 나타날 가능성 역시 고려할 필요가 있을 것이다.

1985년부터 2018년까지의 서울 지역의 평균 오존 전량은 325 DU로 나타났으며, 3월에 최대인 361 DU, 10월에 최소인 290 DU로 월평균 기준으로 연교차가 71 DU이고 연평균 오존 전량 기준으로 22%의 변동폭을 보였다. 서울 지역 오존 전량의 1990년대 평균인 323 DU에서 2000년대(2001~2010년)의 328 DU로 5 DU가 증가하였으며, 포항 상공의 오존 전량은 1990년대의 309.7 DU에서 2000년대는 316.0 DU로 증가하였다. 비록 한반도 내에서 지역적인 차이는 있으나, 지표면 오존의 증가와 대기 중의 오존 전량은 꾸준히 증가하는 경향이 뚜렷하게 나타나고 있어, 오존의 복사강제력이 지속적으로 증가할 것으로 추정할 수 있다. 다만 최근 북극 오존층 파괴가 과거보다 자주 보고되고 있어 한반도 및 동아시아 지역의 성층권 오존 감소로 인한 복사강제력 변화가 단발적으로 발생할 가능성 역시 배제하기 어렵다.

한반도를 포함하는 동아시아 에어로졸 복사강제력은 대략 $-1\sim -3Wm^{-2}$ 정도 범위로 최근 연구결과들에서 보고되고 있으며, 전 지구 평균 복사강제력 $-0.35 Wm^{-2}$ 에 비해 매우 크게 나타났다. 이는 한반도 및 동아시아의 대기 중 에어로졸 농도가 감소 추세에도 불구하고 여전히 세계적으로 높은 수준임을 의미한다. 2016년 5~6월 한반도 중심으로 수행된 한-미 대기질 공동 조사(KORUS-AQ) 캠페인 결과에 의하면, 블랙카본에 의한 대기 상한에서의 직접적 복사강제력이 약 $1.0(0.5\text{에서 } 1.9)Wm^{-2}$ 이며, 복사강제력 변화가 기상장 변화에 의해 크게 영향 받음을

보고하였다. 관측 자료를 활용한 모델 결과에 따르면, 지표와 대기 중에서의 블랙카본에 의한 복사강제력은 각각 $-26\sim -39 Wm^{-2}$ 및 $32\sim 51 Wm^{-2}$ 의 범위를 갖는 것으로 나타났다. 최근에는 유기탄소(organic carbon)에 의한 복사강제력의 연구 역시 활발하게 진행되고 있다. 유기탄소에 의한 복사강제력은 블랙카본에 비해 작은 편이지만 갈색탄소(brown carbon) 의한 단파 복사 흡수는 매우 독특하고 뚜렷한 편이라 향후 보다 정량적인 분석을 면밀하게 할 필요가 있을 것으로 보고 있다.

7.4. 자연적 복사강제력

기후변화를 유발하는 자연적 요인 중 대표적인 것이 태양 활동 변화와 화산활동에 의한 복사강제력이다. 두 요인에 의한 자연적 복사강제력은 인위적인 영향에 비해 거의 0에 가까운 변화를 보였다.

1750년부터의 태양복사량의 총량(Total Solar Irradiance, TSI) 관측 자료에 기초하여 추정된 복사강제력은 $0.05 Wm^{-2}$ 이며, 그 중 60%가 자외선 변동성에 의한 기여이다. 태양 활동의 변화는 대류권에서는 북반구 겨울철 양의 북극 진동을 변화시키고, 잠재적으로 태양 활동-오존층의 관계성에도 영향을 줄 것으로 전망하고 있다.

화산활동에 의한 복사강제력은 $-0.11 Wm^{-2}$ 로 추정되나, 그 강제력의 변동성은 사례가 나타날 때 지역적으로 단기간에 걸쳐 매우 큰 강제효과를 가지는 특징을 가진다. 그러나 전구적인 영향을 주는 수준의 강한 화산활동의 출현빈도는 매우 낮다. 전구적 복사강제력 효과가 컸던 최근 사례는 2010년 Eyjafjallajökull 화산의 분화에 의한 효과로, 발생한 화산재에 의한 전구 평균 복사강제력은 $-0.5 mWm^{-2}$ 로 나타났으나, 인위적 복사강제력에 비해 무시할 수 있을 정도로 작은 수준이다.

7.5. 배출량 매트릭스

배출량 매트릭스는 대기로 배출되는 다양한 기후변화 유발물질이 기후에 미치는 영향을 정량화하여 나타낸

지표이다. 그 중 가장 대중적인 지표인 온난화지수(Global Warming Potential, GWP)와 Global Temperature change Potential (GTP)를 활용한 연구들이 지속적으로 수행되고 있다.

우리나라에서도 2010년부터 에너지 산업, 제조업, 건설업 등에 대한 사전 환경성 검토 및 환경영향평가 시 온실가스의 기후 평가를 실시하고 있으며, GWP를 적용하여 사용하는 관계로 여러 산업의 GWP를 추산하여 산정한 연구가 진행되고 있다. 하지만 우리나라에서 GWP를 포함한 배출량 메트릭스의 특성, 한계, 개선점 등에 대한 연구는 매우 저조한 편이다.

국제적으로는 GWP와 GTP가 지니는 한계와 불확실성에 관련된 연구가 활발히 이루어지고 있으며, 멀티모델과 앙상블 모의를 통한 추산이 이루어지고 있다. GWP와 GTP 모두 추산 모형에 따라 큰 차이를 보이지만 지역별, 계절별 편차에 따른 크기는 일관되게 나타나기 때문에 지역에 따른 GWP와 GTP의 분포는 유의한 결과를 보인다고 보고 되었다.

GWP와 GTP의 정확한 계산을 위한 여러 가지 방법들이 고안되었음에도 불구하고, 기후-탄소 피드백 등을 고려할 수 없는 근본적인 한계로 인하여 새로운 지수의 필요성이 대두되었다.

Neubauer and Megonigal (2015)은 이러한 문제를 해결하기 위하여 새로운 지수인 지속적인 플럭스의 잠재 가열 지수(sustained-flux global warming potential; SGWP)를 제안하였다. SGWP에서 모형은 여러 가스상 물질의 배출과 소비(uptake)에 대해 고려하게 되며 이를 기존의 GWP의 계산과는 다르게 배출이나 소비가 한 번에 일어나는 것이 아닌 지속적인 플럭스의 형태로 나타나는 것으로 가정한다. 이러한 가정을 통해 배출이 일어나는 경우는 SGWP가 GWP와 유사한 의미를 지니게 되며, 소비를 고려하는 시나리오의 경우 지구가 얼마나 효과적으로 복사강제력을 제거하는지를 나타내는 sustained-flux global cooling potential (SGCP)의 값을 나타내게 된다.

SGWP, SGCP가 제안된 이후로 이 두 메트릭스는 생태계 영향을 고려한 여러 물질의 기후적 효과를 파악하는 대표적인 메트릭스로 자리 잡았다. SGWP와 SCWP는

기존의 GWP에 비하여는 많은 정보를 제공하지만 기존의 GWP와 마찬가지로 역학적 모델링을 이용한 지수들에 비해서는 제한적인 정보만을 제공할 수 있으므로 여전히 한계를 지니고 있어 새로운 지수들이 지속적으로 개발될 것으로 판단된다.

8. 기후모델 평가



8.1. 서론

기후모델은 미래 기후변화 시나리오에 따른 기후장을 생산할 수 있는 주요한 도구이다. 기후모델의 성능을 개선하기 위하여 모델의 해상도를 높이고 모델에 포함된 권역(대기, 해양, 빙권, 에어로졸, 생물권)을 늘려 실제 지구 대기에 영향을 미치는 권역 간 상호작용을 추가 고려할 수 있는 방향으로 개발이 진행되고 있다. 이 장에서는 2014년 이후 기후모델 모의 수준에 관한 연구들을 통해 기후모델을 사용하여 미래기후를 예측하고 분석하는 것에 대한 가능성을 판단하고자 하였다.

8.2. 전구기후모델

전구기후모델의 현재기후 모의 성능은 모델마다 편차는 존재하지만 대체로 우수하게 나타났다(견고한 동의).

전구기후모델은 전 지구를 계산 영역으로 고려하기 때문에 동서 방향이 공간적으로 연속적이라는 특징을 가진다. 한 지점에서의 미래 예측을 위하여 주변 지점의 정보가 필요하다는 점에서 전구기후모델이 온전히 미래를 예측할 수 있다는 특징을 가진다. 이 과정에서 대기에 복사 및 지면 강제력을 작용할 수 있는 요소들을 고려하여 미래기후를 예측한다. 2014년 보고서가 다루었던 IPCC 5차 보고서 이후에는 CMIP의 3단계 결과(CMIP3)와 5단계 결과(CMIP5)가 널리 사용되고 있었으며 최근 CMIP 6단계(CMIP6) 결과가 제시되고 있다. 5단계 결과는 3단계 결과에 비해 수평 해상도가 향상되었다. 또한 5단계에서는 지구시스템 모델링의 개념이 강화된 것이 특징이다. 3단계가 주로 해양-해빙-대기 상호작용을 다루었다면 5단계에서는 여기에

에어로졸, 대기화학, 지면 탄소, 해양 생지화학 상호작용이 추가되었다. CMIP3에서는 온실가스 배출량 시나리오(SRES)가 사용되었던 반면 CMIP5에서는 대표농도경로(Representative Concentration Pathways, RCP)가 새로운 시나리오 강제력으로 사용되었다. CMIP6는 사회 경제적 요소를 고려한 Shared Socio-Economic Pathways (SSPs) 시나리오를 강제력으로 사용한다. 하지만 이제 CMIP6가 생산되어 배포되기 시작한 상황에서 동아시아 몬순에 대한 CMIP6의 평가 연구는 진행 중이므로 본 보고서에서는 다루어지지 않았다.

그림 8.1은 CMIP3와 CMIP5의 앙상블 결과에 대한 강수 확률분포함수(PDF) skill score를 표현한 것이다. 전반적으로 CMIP5가 CMIP3에 비해 skill score가 높게 나타나는데, 두 앙상블 간 차이를 통해 전구에 걸쳐 성능이 향상되었음을 확인할 수 있다. 두 모델 모두 북반구 중, 고위도 지역에서 높은 모의 성능을 보였는데 전반적으로 CMIP5에서는 0.9 이상의 skill score를 보인다. 95 percentile에서는 강한 강도의 강수에 대한 성능을 확인할 수 있는데 전체 강수에 대한 경우보다 강한 강수에서 성능 향상이 뚜렷하게 나타나는 것을 볼 수 있다. 지면 부근 기온과 해수면 장기

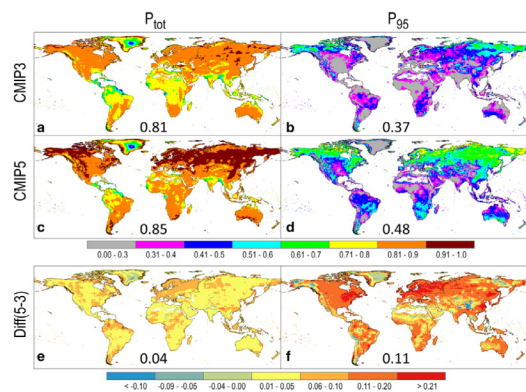


그림 8.1. CMIP3와 CMIP5의 평년 이상 강수(Ptot) 및 상위 5%(P95)에 대한 PDF skill score (Koutroulis et al., 2016).

변동성에서도 CMIP3보다 CMIP5가 향상된 결과를 생산하는 것을 볼 수 있었다. 또한 분석 대상을 동아시아 문순으로 집중하여 분석한 연구들에서도 CMIP5의 성능 향상을 보였다. 하지만 이러한 개선에도 불구하고 CMIP5에서 장마 기간 강수의 남북 이동과 같은 현상들의 구체적인 특성들을 온전히 모의하지는 못하는 것은 한계로 나타났다.

8.3. 지역기후모델 상세화

상세 해상도를 가진 지역기후모델은 전반적으로 작은 규모에서의 동아시아의 현상들을 잘 모의하였다 (견고한 동의).

전구기후모델의 경우 상대적으로 낮은 해상도로 인해 특정 지역에서 나타나는 지역기후변화를 확인하는 데에 어려움이 있다. 이 같은 이유로 상세한 지역 규모의 기후변화를 확인하기 위하여 지역기후모델을 이용한 연구가 활발히 진행되고 있다. 유사한 수행영역에 대하여 서로 다른 지역기후모델의 결과를 비교 분석하기 위한 프로젝트 중의 하나로 World Climate Research Program (WRCP) 산하의 COordinated Regional climate Downscaling Experiment (CORDEX) 프로젝트를 들 수 있다. CORDEX는 전 지구의 서로 다른 14개의 지역에 대해 지역기후모델을 이용하여 기후변화정보를 산출하는 프로젝트로 다양한 지역기후모델의 결과자료를 비교하여 불확실성을 평가하고 신뢰도 높은 지역기후변화 정보를 생산을 그 목적으로 한다. 특히 CORDEX-East Asia (EA) 프로젝트에서는 동아시아 지역에 대하여 CMIP5에 참여한 전구기후모델을 경계조건으로 수행된 다양한 지역기후모델의 결과를 비교, 분석하는 연구가 진행되고 있다.

안중배 등 (2018)은 CORDEX-EA 프로젝트의 2단계 역학적 상세화 결과 중 WRF(Weather Research and Forecasting Model)를 이용하여 현재 기후에서 여름철과 겨울철 강수의 공간분포를 관측값과 비교 분석하였다 (그림 8.2). 여름철 강수의 경우 인도차이나 반도를 포함한 동남아시아 지역에서는 관측에 비해 강수를 과대모의 하는 것으로 나타난다. 반면 한반도 및 일본 남부지역에는 관측에

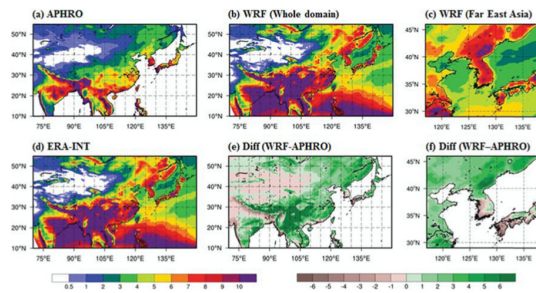


그림 8.2. 다음 각각에 대한 동아시아 여름 (JJA) 강수의 기후 값 (a) AHPRODITE, (b) WRF (Whole domain), (c)WRF (Far East Asia), (d)ERA-INT 및 AHPRODITE에 대한 편차 (e) WRF (Whole domain), (f) WRF (Far East Asia) (안중배 등 2018).

비해 강수를 과소모의하였다. 하지만 전반적으로 동아시아 문순 특성을 잘 나타내고 있음을 보여 지역기후모델이 상세 기후 정보를 생산하는데 유용한 도구임을 확인할 수 있었다.

상세 해상도를 가지는 지역기후모델 결과는 태풍과 같은 상대적으로 작은 규모 현상들을 잘 재현해 낼 수 있다는 장점을 가진다. CORDEX-EA에 참가한 지역기후모델들의 결과를 분석한 결과 모델마다 편차는 크게 나타났지만 관측된 태풍의 발생 분포와 숫자를 비교적 잘 표현할 수 있음을 보였다.

8.4. 지역결합모델

지역 규모에서의 대기-해양결합은 지역결합모델의 동아시아에서의 전반적인 예측성능을 향상시키는 것으로 나타났다(견고한 동의).

최근 연구들에 따르면 지역적 대기-해양 결합은 동아시아 지역에서 매우 의미있게 영향을 준다고 알려져 왔다. 특히, 대기 지역 모델만을 사용할 경우보다 대기-해양 결합모형을 사용할 경우 동아시아 문순 강수 및 순환장 모의에 더 높은 예측성능을 보인다고 여러 연구에서 밝혀진 바 있다.

Ham et al. (2016)은 지역 대기-해양 결합모델과 대기 모델을 사용하여 동아시아 지역의 25년 과거재현기후의 모의 성능을 평가하였다. 전구 모델에서의 대기-해양 결합은 해수면 온도의 오차를 가져옴에도 불구하고, 대기 열속 및

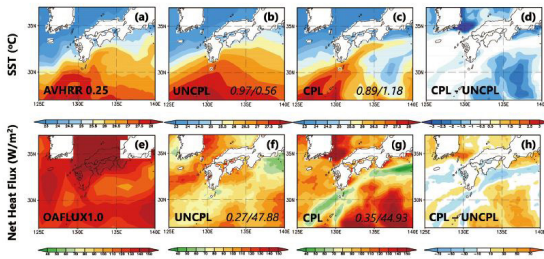


그림 8.3. 관측, 대기모델(UNCPL), 결합모델(CPL)로부터의 1987년 7월 평균 해수면온도, 순열속, 그리고 두 모델간의 차이. 우측하단에 나타낸 숫자는 공간상관계수 및 RMSE를 나타낸다(Ham et al. 2016).

적도태평양 강수대의 큰 개선을 가져오는 것으로 알려져 있지만, 지역 대기-해양 결합에서는 눈에 띄만한 큰 개선을 보이지는 않는다. 하지만, 고해상도 지역 결합 모의 결과는 특히 해안 주변 지역에서 해양순환의 개선에 의한 해수면온도 및 순열속의 개선을 가져 온다(그림 8.3). 그럼에도 불구하고 여전히 대기-해양 결합은 해수면온도 오차를 가져오기 때문에 결합 모델의 필요성에 관한 논쟁이 있지만, 해수면온도와 복사플럭스, 강수와의 상호작용을 고려하는 것은 결국 대기 순환에서의 현실적인 모의를 가져올 수 있기 때문에 중요하다고 할 수 있다. 다만, 해수면온도의 오차를 줄이기 위해서는 구름-복사 과정을 계속해서 개선하는 것이 필수적이라 할 수 있다.

8.5. 극한 현상 모의

미래 기후변화에 대한 연구에서 평균장이 어떻게 변화해 가는 것인지를 제시하는 것만큼이나 극한 현상 발생의 변화 가능성에 대하여 제시하는 것도 중요하다고 볼 수 있다. 이를 평가하기 위하여 모델이 극한 현상들을 어떤 수준으로 생산할 수 있는지, 그 특성은 무엇인지를 파악하는 것은 중요하다. Park et al. (2016)은 CORDEX-EA에 참여한 5개의 지역기후모델에 대하여 현재 기후의 극한 모의 능력을 평가한 결과, 전반적으로 극한 현상을 지역기후 모델이 관측과 유사하게 모의 할 수 있음을 보였다. 고해상도의 모델 결과가 극한현상 발생 모의에 적절한 성능을 가지고 있음으로 분석할 수 있다. 또한, 이 결과에서 중요하게 이해할

수 있는 내용은 두 실험 모두가 유사한 관측 편차 패턴을 보였으며 결과 차이가 크지 않다는 점이다. 이는 전혀 다른 성격의 대기 강제력이 사용되었다 하더라도 지역 모델에서 생산하는 결과는 일반적으로 생각되는 것보다 그 영향이 절대적이지 않다는 것을 의미한다. 이는 지역 모델이 상세 기후 정보를 생산하는 데 있어 작은 규모의 현상들을 모델 스스로 생산하는 능력이 많이 반영된다는 점을 시사한다. 지역 모델의 성능이 강제력에 비견할 만큼, 또는 더 강한 영향을 미친다는 점에서 미래기후 시나리오를 평가하는 데 있어 다양한 전구 모델 결과를 사용하는 것만큼이나 다양한 지역기후모델을 사용하는 것이 상세한 지역의 미래기후 정보를 생산하는 데 중요하다는 점을 보여준다.

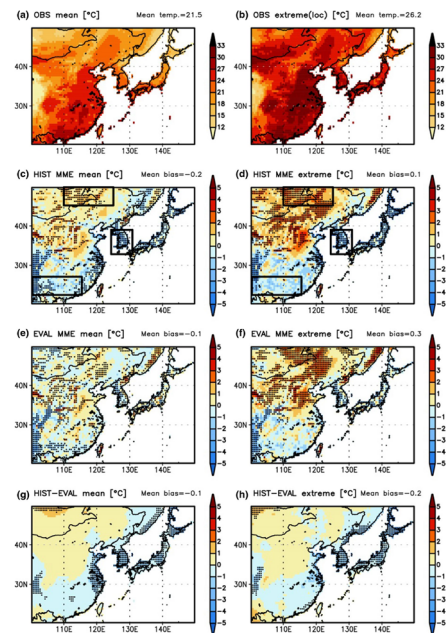


그림 8.4. (a, b) 관측된 지면 부근 온도의 기후값, (c, d) HadGEM2-AO를 상세화 한 지역 모델 앙상블 결과의 관측 편차 (HIST), (e, f) ERA-Interim을 상세화 한 지역 모델 앙상블 결과의 관측 편차 (EVAL), (g, h) 강제력이 다른 지역 모델 결과의 차이 (HIST - EVAL). 점으로 표현된 영역은 각 모델들이 편차나 차이가 같은 부호를 가지는 지역을 의미한다(Park et al., 2016).

9. 기후변화의 탐지 및 한반도 기상재해의 변화



9.1 서론

이 절에서는 한반도를 포함한 동아시아의 기후변화 추세와 기후 현상의 변화를 분석하고 그 원인을 평가하였다. 먼저 동아시아 관측 자료를 기반으로 기온과 강수 변화를 통계적으로 탐지(detection)하고 인위적 영향에 대한 원인규명(attribution)을 적용한 연구 결과를 평가하였다. 한반도 기후와 밀접하게 연관된 엘니뇨, 몬순, 북극 기후변동, 계절내 진동과 같은 기후변동성의 변화와 폭염, 가뭄, 한파, 집중호우, 태풍과 같은 한반도 기상재해 현상의 변화에 대한 연구 결과를 정리하여 기술하였다.

9.2. 동아시아와 한반도 기온과 강수변화

동아시아 이상고온 지수는 증가하였으며(견고한 동의), 극한강수는 일부 지역에서 증가하는 추세가 나타났다(제한적 동의).

동아시아 지역 극한기온의 강도, 빈도, 지속기간의 추세를 보면 1950년대 이후 고온관련 지수는 증가하고 저온관련 지수는 감소하는 경향이 뚜렷하게 나타났으며, 인위적인 온실가스 증가가 그 원인임이 밝혀졌다. 동아시아 지역에서 최근 관측된 여름철 이상고온 현상들은 인위적 강제력이 있을 때 그 발생확률이 커짐이 확인되었다. 극한강수의 추세는 일부지역에서 일최대 강수량이 증가하는 추세가 나타났지만 ENSO (El-Niño Southern Oscillation)와 같은 자연변동성과 관련성이 커서 인위적 강제력의 영향을 평가하기는 어렵다.

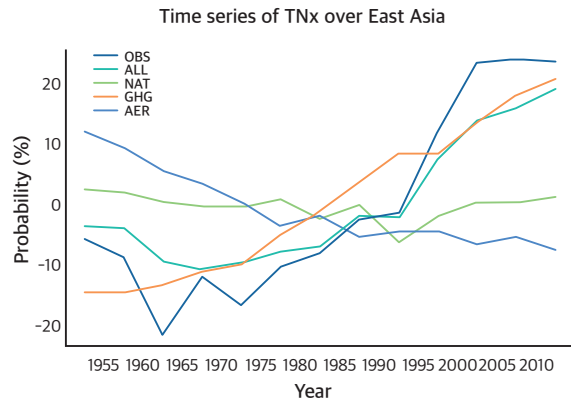


그림 9.1. 동아시아 지역(100-157E, 20-50N)의 연최고 일최저기온(TNx)의 1951~2015년간 5년 평균 시계열. HadEX3 관측자료(OBS, 검정색), CMIP6 모든 강제력(ALL, 녹색), 자연 강제력(NAT, 파란색), 온실가스 강제력(GHG, 빨간색), 에어로졸 강제력 실험(AER, 보라색)의 앙상블 평균 결과(Kim et al., 2016).

9.3. 기후변동성 변화와 한반도

엘니뇨의 한반도 기후에 대한 영향은 아직 명확하지 않았다(제한적 동의). 여름몬순에 의한 강수량은 최근 감소경향이 나타났다(중간적 동의). 최근 강화된 겨울 몬순이 한파 발생에 기여하였다(제한적 동의). 북극진동에 따른 겨울 기온은 최근에 다시 증가하였다(견고한 동의). 계절내 진동의 영향은 있지만 그 원인은 아직 명확하지 않았다(제한적 동의).

엘니뇨의 한반도 기후에 대한 영향은 계절 및 엘니뇨 위상에 따라 다르게 나타난다. 서태평양과 아열대 지역의 강수와 해수면온도 변동이 동아시아 기후를 연결시켜주는 핵심 원인 과정으로 새롭게 제시되었다. 엘니뇨 다양성의 전

지구 및 한반도 영향은 여전히 명확하지 않다. 인도양과 대서양 변동이 한반도 기후에 미치는 영향이 일부 확인되었다.

동아시아 여름몬순은 기존의 밝혀진 원인들에 더불어 열대 대서양 해수면 온도, 아시아 대륙 저기압 및 상층 제트기류, 남아시아 몬순의 경년 변동성과 북대서양, 열대 인도-태평양 지역의 다양한 수십 년 변동의 영향을 받는 것으로 새롭게 확인되었다. 동아시아 여름몬순의 장기 변동성과 연동되어 우리나라 여름철 강수량은 7월과 8월을 중심으로 1970년부터 2010년대 전반까지 꾸준히 증가했으나 최근 감소경향이 나타나고 있다.

동아시아 겨울몬순은 시베리아 지역의 한랭 기단 유입 및 북극진동 변동성과 큰 관련을 가지는 북방모드와 ENSO와

관련되어 동아시아 지역 기압골 및 몽골 고기압 변동으로 특징지어지는 남방 모드로 크게 구분할 수 있다. 주 모드들은 시베리아 고기압, 북태평양 진동, 태평양 수십 년 진동 등의 영향으로 수십년 주기의 장기 변동성을 가진다. 동아시아 겨울몬순은 1970년대 중반부터 2000년대 중반까지 약화되었다가 그 이후 강화되는 경향을 보이며, 최근 강화된 동아시아 겨울몬순이 한반도 한파 발생 증가에 기여할 수 있음이 제시되었다.

북극진동 지수는 1990년대 말부터 2000년대까지 꾸준히 감소하다, 최근 10년간 뚜렷한 변화가 없다. 북극 해빙과 관련된 WACE (Warm Arctic Cold Eurasia) 모드는 최근 북극 해빙의 감소에도 불구하고 경향성이 뚜렷하지 않다. 이에 따른 한반도 겨울철 기온은 1990년부터 2010년대

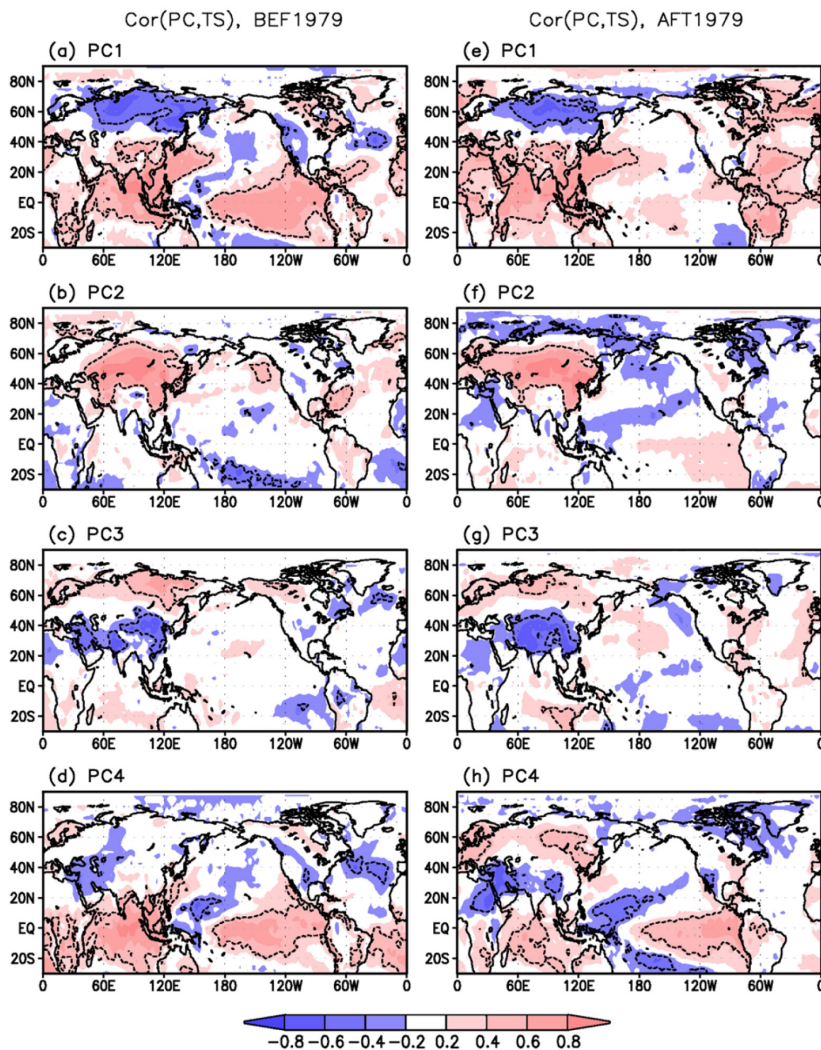


그림 9.2. 동아시아 겨울 몬순의 주요한 4개 변동 모드와 해수면 온도 및 대륙 지표기온 변동과의 상관관계. 파선은 통계적으로 95% 유의한 상관계수를 나타냄(Yun et al., 2014).

초반까지 감소하다, 최근 다시 증가하는 비선형적 특징을 보인다.

지난 약 50년 동안 동아시아 지역에서 여름철 10~20일 주기와 30~60일 주기 계절내 진동의 진폭이 점차 증가하고 있다. 특히 10~20일 주기 계절내 진동 강화가 동아시아 지역에서 크게 나타난다. 하지만 그 원인은 명확하지 않으며 추가 연구가 필요하다.

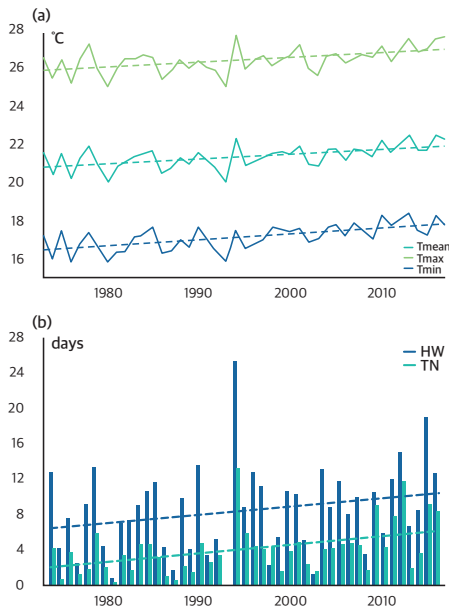


그림 9.3. (a) 1973~2017년 기간 한반도(남북한 평균) 일평균(검정), 일최고(빨강), 일최저(파랑) 기온 시계열과 (b) 동기간 5~9월 폭염(빨강) 및 열대야(파랑) 발생 빈도(Choi and Lee, 2019).

9.4. 한반도 기상재해의 변화

여름철 열대야의 발생이 뚜렷이 증가하였다(견고한 동의). 겨울과 봄 가뭄은 심해지고 있었지만(제한적 동의), 집중호우도 또한 증가하고 있었다(중간적 동의). 한반도 주변의 태풍활동은 빈도와 강도 모두 증가하였다(중간적 동의).

한반도 폭염 발생 빈도, 강도, 지속성은 1970년대 이후 증가하고 있으며, 특히 열대야의 발생빈도는 뚜렷하게 증가

하고 있다. 최근 한반도에서 강하게 발달했던 폭염 사례들에서 온실가스 증가에 의한 인위적 영향이 탐지되었다. 한반도 폭염은 국지적, 종관적 원인 이외에도 대규모 대기순환 및 다양한 원격상관 현상에 의해 영향을 받는 것이 확인되었다.

한반도 연강수량은 최근 수십년간 증가하고 있으나 상당한 계절성이 존재한다. 이에 따라 여름철에는 가뭄의 빈도가 감소하였으나, 겨울과 봄철에는 가뭄이 오히려 심화되는 추세도 나타난다.

한반도 한랭일 및 한파의 빈도수가 1990년대 후반부터 2000년대 후반까지 증가했다. 그러나 그 이후의 변화가 뚜렷하지 않아 이에 대한 원인 규명과 한반도 한파의 종관 구조에 대한 이해가 필요하다.

한반도 집중호우 빈도와 강도는 1990년 중반 이후 증가하는 경향을 보이며, 이는 열대 원격상관 변화, 한반도 주변의 종관장 변화, 그리고 태풍활동 증가와 연관된 것으로 확인되었다.

북서태평양의 태풍활동은 최근 감소하는 추세를 갖는데 북서태평양 해수면 온도의 변화, 열대 상층 기압골의 이동, 북대서양의 해수면 온도 상승 등과 연관됨이 새롭게 밝혀졌다. 한반도 주변의 태풍 활동은 1990년대 중반 이후 빈도와 강도 모두 증가하였으며, 이는 한반도 주변의 연직바람쉬어의 약화, 북서태평양 고기압의 서쪽 이동, 한반도 주변의 해수면 온도 상승 등과 연관이 있다.

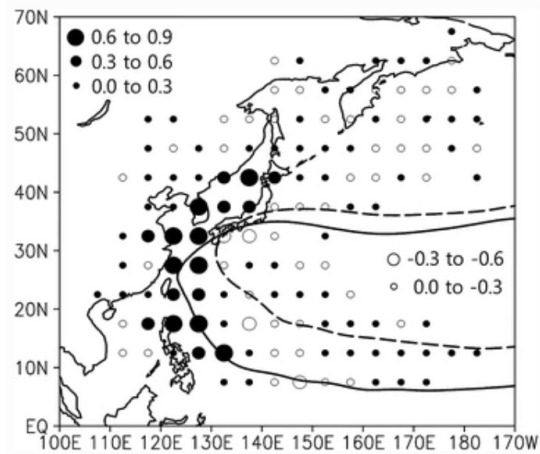


그림 9.4. 두 개의 기간(P1: 1965~1983년, P2: 1984~2004년) 사이의태풍진로밀도의 변화. 실선과 점선은 P2와 P1 기간의 5860 gpm 등고선을 나타냄(Choi et al., 2017).

10. 단기 및 장기 기후변화 전망



10.1. 서론

이 절에서는 IPCC 5차 평가보고서에 참여하는 전지구 기후모델과 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. 그리고 범지구적 대응 강화를 목표로 1.5°C 온난화 수준으로 안정화 될 경우 예상되는 한반도 기후의 미래전망을 평가하였다.

2050년 이전의 단기 전망을 기온, 강수량, 극한기후에 대해 살펴보았다. 전 지구 모델(HadGEM2-AO)과 5개의 다중 지역기후예측모델(RegCM, MM5, SNURCM, WRF, RSM)을 이용하여 단기(2026~2050년) 기후변화를 예측한 결과 한반도 평균기온은 모든 시나리오에서 +1.33~+1.93°C, 지역기후모델은 +1.05~+1.95°C 범위로 1981~2005년 기온 대비 증가를 예상하였다. 5개의 지역기후모델은 단기 전망에서 서로 다른 온난화 패턴을 보였지만 이들의 다중모델 결과는 RCP 2.6/4.5/6.0/8.5 시나리오에서 각각 +1.54°C/+1.68°C/+1.17°C/+1.75°C의 기온 상승을 제시하였다. 한편, 한반도 연강수량에 대한 지역기후모델들의 단기 전망은 모델에 따라 차이가 크지만 현재 대비 21세기 전반기(2021~2040년)에 RCP 2.6에서는 +6.0% 증가, RCP 4.5에서는 -5.6% 감소, RCP 6.0에서는 +0.2% 증가, RCP 8.5에서는 -0.7% 감소할 것으로 전망하여 변동성이 크게 나타났다(그림 10.1). 한반도의 단기 온난화 전망에 따라 폭염일수, 열대야일수, 여름일수와 같은 고온 관련 극한 지수는 증가하고, 한파일수, 결빙일수, 서리일수와 같은 저온 관련 지수는 감소할 것으로 전망하였고 강수량의 변동성

10.2. 대기와 지표

미래 한반도 연평균 기온은 21세기 말 RCP 4.5에서는 2°C 이상, RCP 8.5에서는 4°C 이상 상승할 것으로 전망되었다(견고한 동의). 강수량은 21세기 말 RCP 4.5와 8.5에서 모두 증가할 것으로 전망되지만 증가추세는 차이가 있었다(중간적 동의).

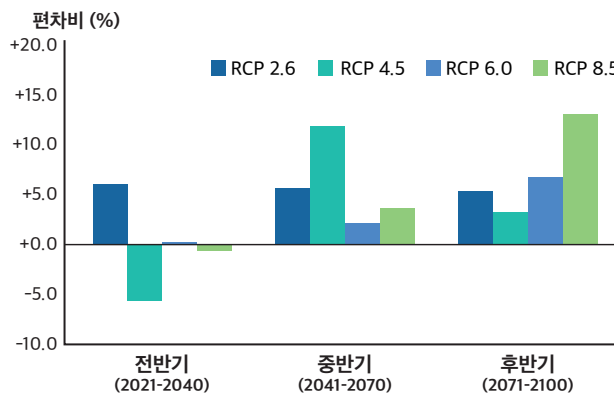


그림 10.1. 시나리오별 21세기 전반기, 중반기, 후반기의 한반도의 연강수량 편차비(1981~2010년 모델 기후값 대비) 전망(%) (기상청, 2018).

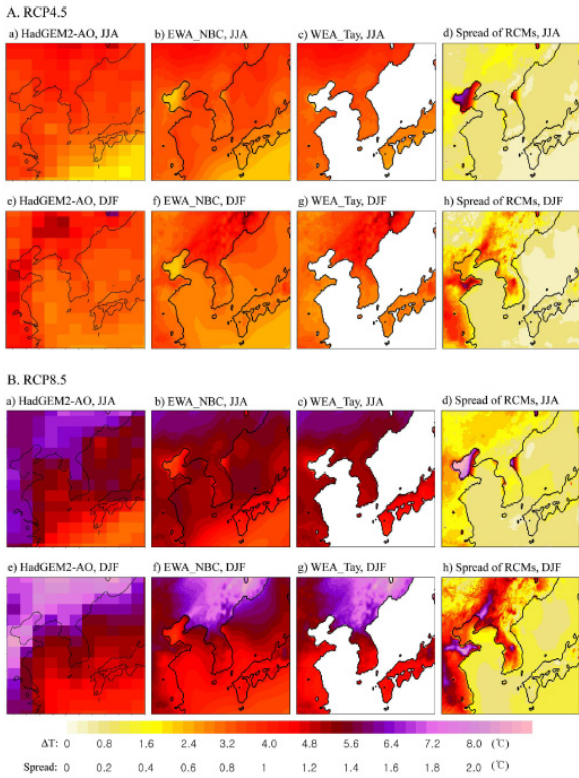


그림 10.2. RCP 4.5와 RCP 8.5 시나리오에서 나타나는 지역기후모델을 이용한 동아시아 지상기온의 21세기 후반(2076~2100년) 전망 및 지역기후 모델 간 차이(Suh et al., 2016).

증가로 인해 가뭄과 호우와 같은 극한강수 현상이 빈번해질 것으로 전망하였다.

2050년 이후의 장기 전망을 기온, 강수량, 극한기후에 대해 살펴보았다. 전 지구 모델(HadGEM2-AO)과 5개의 다중 지역기후예측모델(RegCM, MM5, SNURCM, WRF, RSM)을 이용하여 장기(2071~2100) 기후변화를 예측한 결과 한반도 평균기온은 현재 기후(1981~2010년) 대비 RCP 4.5에서 약 2.9℃, RCP 8.5에서 약 4.7℃ 증가할 것으로 전망하였다(그림 10.2). 계절적으로는 겨울철이 여름철에 비하여 증가율이 높다.

강수량의 미래 장기 전망은 상대적으로 기온에 비하여 모델 간 차이가 크게 나타나 불확실성이 더 크다. CMIP5 기후모델에 따르면 21세기 후반에 RCP 4.5(RCP 8.5) 시나리오에서 약 16%(18%) 증가하는 것으로 전망되어 다소 모델 간 전망치가 다르지만 증가 추세는 RCP 8.5 시나리오에서 더 강하게 나타났다. RCP 8.5 시나리오에

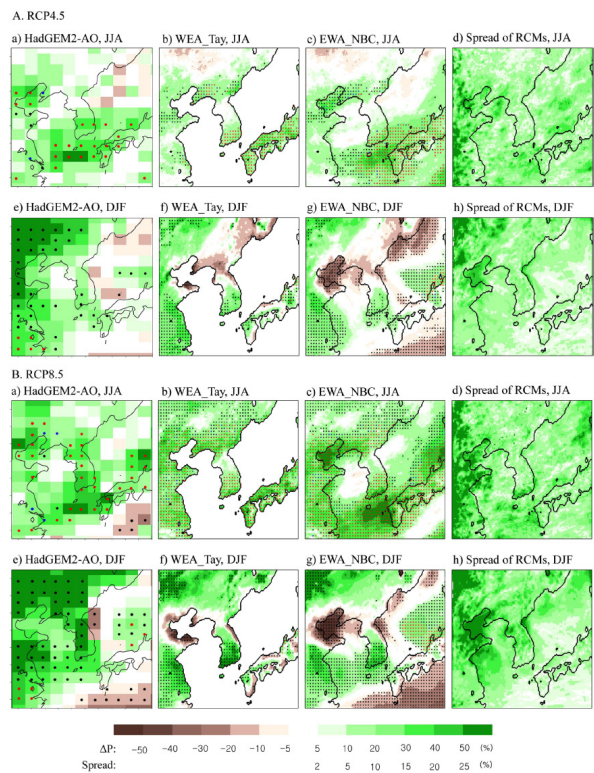


그림 10.3. RCP 4.5와 RCP 8.5 시나리오에서 나타나는 지역기후모델을 이용한 동아시아 강수량의 21세기 후반(2076~2100년) 전망 및 지역기후 모델 간 차이(Oh et al., 2016).

근거하여 지역기후모델을 앙상블한 결과 한반도의 연강수량, 여름철 강수량, 그리고 겨울철 강수량은 21세기 후반 각각 19.1%, 20.5%, 그리고 33.3% 증가하는 것으로 전망되었다(그림 10.3).

21세기 말 폭염의 강도와 빈도는 모두 증가할 것으로 전망되었다. 특히, 모의 성능이 상대적으로 좋은 5개의 CMIP5 모델이 RCP 4.5 시나리오에서 현재기후(1979~2005년) 대비 21세기 후반 미래(2075~2099년)에 폭염발생빈도지수는 약 52.5일 증가하고, 폭염지속기간 지수는 약 44.5일 증가하며, 폭염의 강도지수는 약 2.2℃ 증가할 것이라고 전망하였다(그림 10.4). 극한강수의 미래변화는 평균 강수량의 증가 뿐만 아니라 극한 강수와 빈도도 RCP 4.5와 RCP 8.5 시나리오에서 모두 증가하는 것으로 전망하였고 최대 가능 강수량 또한 증가하는 것으로 나타났다.

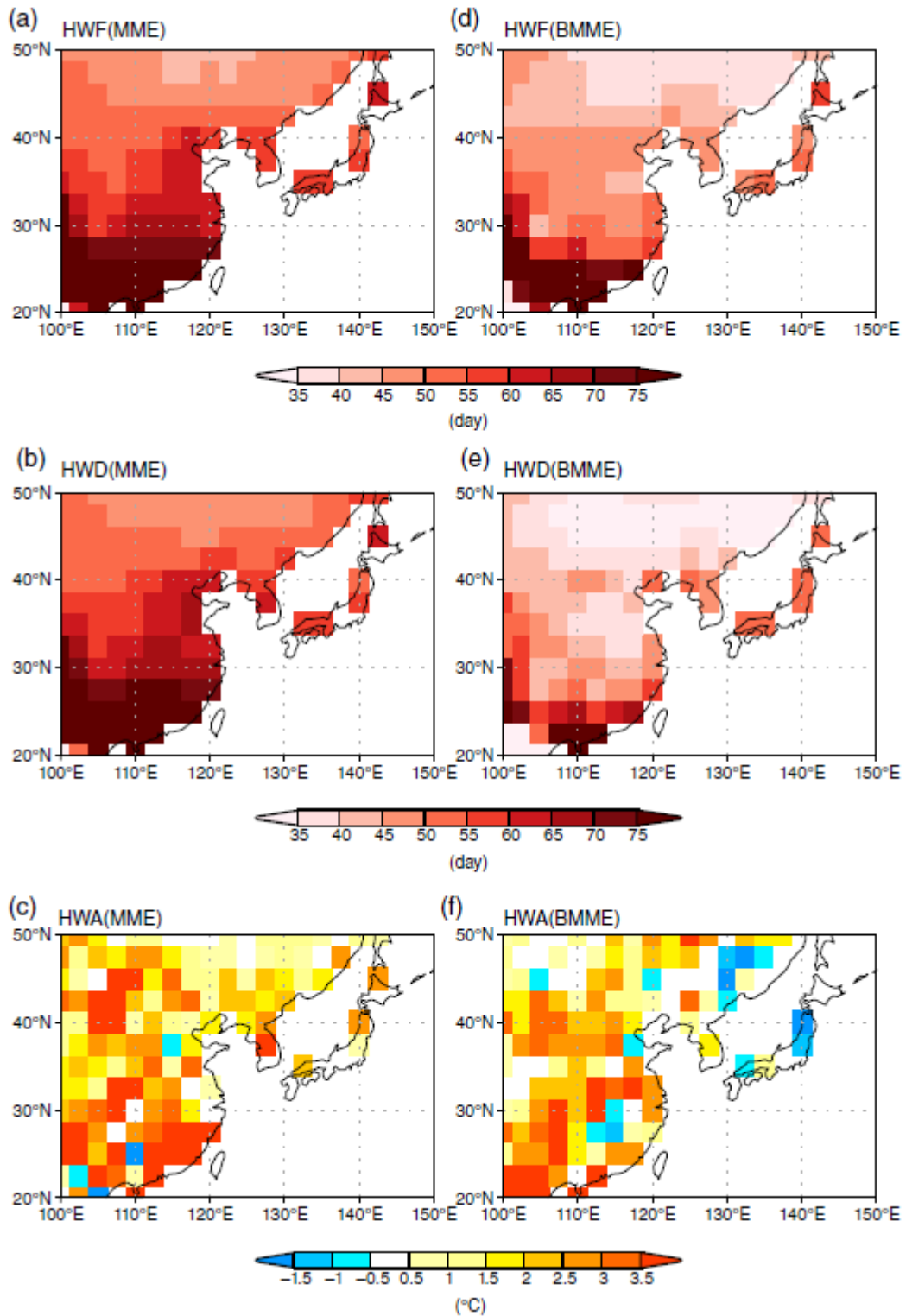


그림 10.4. 폭염지수 (a),(d) HWF(폭염일수의 연 총합), (b),(e) HWD(가장 긴 폭염 지속기간), (c),(f) HWA(가장 강한 폭염시기의 온도) for MME and BMME(Seo et al., 2018).

10.3. 해양과 빙권

대마난류에 의한 동해로의 열 수송 증가로 동해 수온은 지구온난화로 인해 지속적으로 증가할 것으로 예상되었으며, 황해 생태계에 중요한 영향을 미치는 황해저층냉수는 2100년까지 수온이 서서히 증가할 것으로 전망되었다(견고한 동의). 우리나라 평균 해수면은 2100년까지 RCP 2.6에서 37.8 cm, RCP 4.5에서는 48.1 cm, RCP 6.0에서는 47.7 cm, 그리고 RCP 8.5에서는 65.0 cm 상승하는 것으로 전망되어, 전 지구 평균보다 근소하게 낮게 나타났다(견고한 동의). 남극 빙상용융을 고려한 모델에서는 시나리오에 따라 130 cm 이상 상승할 수 있음이 보고되었다(제한적 동의). 북극 해빙 면적 및 두께의 급격한 감소추세가 이어지고 있으며, 이러한 경향성은 21세기 전반에 걸쳐 이어져 가을철 해빙의 경우 2050년 경에 모두 사라질 것으로 예상되었다(중간적 동의).

CMIP5 모델 중 한반도 주변 해를 어느 정도 모의하는 모델을 분석한 결과, 동해로 유입되는 해수의 양과 수온이 증가하여 동해수온이 상승할 것으로 전망된다.

동한난류의 경우, 고위도 해역까지 더 많이 북상하면 표층수온이 더 많이 올라갈 것으로 예상되어 미래전망에 있어 동한난류가 향후 동해수온변화 경향을 연구할 때 중요하게 고려되어야 할 항목이다.

한반도 해역의 평균 해수면은 최근 40년 동안 약 10 cm 상승했다. 우리나라에서는 1989년부터 2017년까지 최근 29년간 매년 2.9 mm 상승률을 보여 전 지구 평균에 비해 다소 빠른 상승 추세를 보이고 있으며, 지역적으로는 제주 부근(4.44 mm)이 가장 높고 동해안(3.70 mm), 남해안(2.41 mm), 서해안(2.07 mm) 순으로 나타났다.

21세기 말 우리나라의 평균해수면은 RCP 2.6, 4.5, 6.0, 8.5에 대해 각각 37.8, 48.1, 47.7, 65.0 cm 상승하는 것으로 전망되어, 온실가스 배출량 증가에 비례하여 상승하며 RCP 8.5를 제외하고는 전 지구 평균보다 근소하게 낮다. 해역별 차이를 보면 모든 시나리오에서 남해 지역이 다른 지역에 비해 해수면 상승이 높고 서해안 지역이 다른 지역에 비해

해수면 상승이 다소 낮은 것으로 전망된다.

현재와 같은 추세로 온실가스를 배출하였을 때 남극 빙상용융을 고려하는 모델로 전망한 2100년에 지구 평균해수면 상승은 130 cm에 이를 것으로 예측되고 있으며 우리나라의 경우 연안지역 해수면이 1 m 상승할 경우 한반도 면적의 1.2%(여의도의 300배)가 침수될 것으로 예측되고 있다.

관측에 의하면 9월 북극 해빙 면적은 누적 이산화탄소 배출량과 선형 관계가 있음이 밝혀졌는데, 이산화탄소 배출 1 톤당 해빙 면적은 $3 \pm 0.3 \text{ m}^2$ 줄어들었다. 이 관계를 바탕으로 앞으로 1000기가 톤의 이산화탄소가 추가 배출될 때 9월 북극 해빙은 거의 사라질 것으로 추정해 볼 수 있는데, 현재 연간 35기가 톤 배출이 유지될 경우 21세기 중반 이전에 사라질 것으로 예상된다.

10.4. 1.5°C 기후변화 전망

1.5°C의 지구온난화에 도달하는 미래 기후(2091~2100년)에 동아시아 및 한반도의 기온 변화는 전 지구적 규모와 비슷한 수준으로, 강수량은 전 지구에 비해 조금 더 강하게 나타날 것으로 전망되었다(견고한 동의).

1.5°C 온난화에 평형을 이루는 100개 이상의 앙상블 멤버를 가지는 기후모델 5개를 이용해 우리나라의 기후 및 극한기상의 변화를 전망하였다. 산업화 이전 대비 전지구 기온이 1.5도 상승하는 경우, 한반도는 현재기후보다 월 평균기온은 0.8°C, 월 최고기온은 0.89°C, 월 최저기온은 0.91°C 상승하고 강수량은 62.26 mm 상승할 것으로 전망하였다.

극한기온 및 강수는 표준편차가 커져 확률분포함수가 넓어지는 쪽으로 움직이는 경향을 보이며 90퍼센타일이 넘는 높은 극한기온/강수는 현재 대비 약 10% 증가하며 10퍼센타일 이하의 낮은 기온/강수에서의 확률은 감소할 것으로 나타났다. 확률 비율 변화는 월 평균기온에서의 경향보다 월최대/최소에서의 극한 변화가 훨씬 뚜렷하게 나타났다.

정책결정자를 위한 요약서

한국 기후변화 평가보고서 2020
- 기후변화 과학적 근거 -

발행인 기상청장
총괄편집 기상청 (김남욱, 이정환, 조구희, 김상훈)
발행일 2020년 7월

(07062) 서울시 동작구 여의대방로16길 61, 기상청 기후과학국 기후정책과
T. (02)2181-0393, 0404 F. 02-2181-0469 W. <http://www.kma.go.kr>

ISBN 978-89-954715-8-6

정책결정자를 위한 요약서

한국 기후변화 평가보고서 2020

- 기후변화 과학적 근거 -



기상청

Korea Meteorological
Administration

ISBN 978-89-954715-8-6