

정책결정자를 위한 요약서

한국 기후위기 평가보고서 2025

- 기후위기 과학적 근거 -



존경하는 국민 여러분, 그리고 기후변화 연구에 헌신해 주신 전문가 여러분,

최근 전 세계적으로 기후변화에 따른 이상기후와 극한기상 현상이 더욱 빈번하고 강하게 나타나고 있습니다. 매년 반복되고 있는 기록적인 폭염과 집중호우, 이른 시기의 이상고온 현상은 우리 사회 전반에 걸쳐 기후위기의 심각성을 다시금 일깨워 주었습니다. 이러한 변화는 국민의 안전과 건강은 물론, 산업과 생태계 전반에 커다란 영향을 미치고 있으며, 이에 대한 과학적 근거에 기반한 대응의 필요성이 그 어느 때보다 강조되고 있습니다.

기상청은 온실가스 감시에서부터 기후변화 시나리오 생산, 미래 기후전망 제시 등 다양한 연구를 수행하며, 우리나라 기후변화 현상과 추세를 과학적으로 규명해 왔습니다. 이번 「한국 기후위기 평가보고서 2025」의 과학적 근거 부문은 지난 5년간 축적된 최신 연구 성과를 종합하여, 점차 심각해지는 우리나라의 기후변화 실태를 제시합니다. 이를 통해 국가와 지자체가 과학적 사실에 기반한 효과적인 적응대책을 마련하는 것이 시급하다는 경고를 담고 있습니다.

특히 이번 보고서에는 온실가스 농도 변화와 기온 상승 추세, 한반도의 폭염·한파 등 극한기상 현상의 변화, 해양·빙권 및 탄소순환, 구름·에어로졸 등 기후시스템 전반에 관한 과학적 분석이 포함되어 있습니다. 아울러 다양한 기후모델 시뮬레이션을 토대로 한 미래 기후전망을 제시함으로써, 국민 생활과 밀접한 분야에서 기후위기 대응에 실질적으로 기여할 수 있는 과학적 근거를 제공하고자 합니다.

이 과정에는 최근(2020년부터 2025년 초까지) 총 1,222편의 국내외 논문 및 보고서를 분석하였으며, 국내외 연구자와 전문가 63명이 참여하여 집필과 검토에 힘써 주셨습니다. 보고서가 완성되기까지 노고를 아끼지 않으신 모든 집필진과 관계자분들께 깊이 감사드립니다.

「한국 기후위기 평가보고서 2025」가 과학적 근거에 기반하여 기후변화 현상을 명확히 이해하고, 정책결정자와 국민 모두가 기후위기 대응을 준비하는 데 중요한 자료로 활용되기를 기대합니다. 앞으로도 기상청은 국민의 안전과 삶의 질 향상을 위해 과학적 근거에 입각한 기후변화 예측과 감시, 분석 역량을 더욱 강화해 나가겠습니다.

2025년 9월
기상청장 이 미 선

서문 i

제 1 장 소개 1

- 1.1. 배경 및 목적 1
- 1.2. 보고서 발간 절차 및 구성 1
- 1.3. 「한국 기후위기 평가보고서 2025」 주요 결과 2

제 2 장 관측: 대기과 지표 5

- 2.1. 서론 5
- 2.2. 대기조성 및 복사수지의 변화 5
- 2.3. 대규모 평균 기후 변화 6
- 2.4. 기후변동모드의 변화 7

제 3 장 관측: 해양 및 빙권 9

- 3.1. 서론 9
- 3.2. 해양 9
- 3.3. 빙권 10

제 4 장 고기후기록에 의한 정보 13

- 4.1. 서론 13
- 4.2. 화분에 의한 고기후 13
- 4.3. 동물화석에 의한 고기후 13
- 4.4. 연륜에 의한 고기후 14
- 4.5. 고문헌에 의한 고기후 15

기후정보포털



제 5 장	탄소순환과 기타 생지화학순환	16
5.1. 서론		16
5.2. 탄소 관측 및 모델링		16
5.3. 기후 시스템에서의 탄소순환		17
5.4. 메탄흡배출		18
5.5. 질소순환		18
5.6. 미래 탄소		18
제 6 장	구름과 에어로졸	20
6.1. 서론		20
6.2. 구름		20
6.3. 에어로졸		21
6.4. 구름과 에어로졸의 상호작용		22
6.5. 복사강제력과 유효복사강제력		22
6.6. 강수변화의 과정		23
제 7 장	인위적 및 자연적 복사강제력	24
7.1. 서론		24
7.2. 대류권 오존		24
7.3. 인위적 복사강제력		25
7.4. 자연적 복사강제력		26
7.5. 배출량 매트릭스		26

제 8 장	기후모델 평가	27
	8.1. 서론	27
	8.2. 전구기후모델	27
	8.3. 지역기후모델 상세화	28
	8.4. 고해상도 대류허용모델	28
	8.5. 극한 현상 모의	29
제 9 장	기후변화의 탐지 및 한반도 기상재해의 변화	30
	9.1 서론	30
	9.2. 동아시아와 한반도 기온과 강수변화	30
	9.3. 기후변동성 변화와 한반도	31
	9.4. 한반도 기상재해의 변화	32
제 10 장	단기 및 장기 기후변화 전망	34
	10.1. 서론	34
	10.2. 대기와 지표	34
	10.3. 해양과 빙권	36

제 1 장 소개



1.1. 배경 및 목적

IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change)는 기후변화에 대한 사전 대응을 위해 전 세계 연구를 종합하여 관측, 예측, 감시를 포함한 과학적 정보를 제공하고, 영향과 리스크를 분석하며, 완화 방안을 제시한다. 이 내용은 약 5~7년 간격으로 발간되는 평가보고서에 집대성된다. 최근 제6차 평가보고서(AR6, 2015~2023)에서는 네 개의 본보고서, 세 개의 특별보고서, 한 개의 방법론보고서가 발간되었으며, 마지막 종합보고서(Synthesis Report) 발간으로 AR6 주기가 마무리되었다(IPCC, 2023).

우리나라는 IPCC 제1실무그룹 보고서를 바탕으로 한반도 기후변화 연구를 종합한 한국 기후변화 평가보고서를 발간해오고 있으며, 이는 과학적 정보 접근성 향상과 더불어 국가 기후변화 적응대책 수립을 지원하는 데 목적이 있다.

첫 번째 보고서는 IPCC AR4를 바탕으로 2011년에 발간되었고, 두 번째 보고서는 AR5를 참고하여 2015년에 발간되었다. 세 번째 보고서인 2020년 보고서는 2015~2019년 한반도 기후 연구를 반영하여 제3차 국가 적응대책 수립에 활용되었다.

최근 IPCC AR6 발간과 함께, 최신 기후 특성과 전망을 반영한 연구 성과를 체계적으로 정리할 필요성이 제기되었으며, 이에 따라 2020년 보고서 이후 진행된 연구들을 기반으로 2025년 보고서의 발간이 진행되었다. 이 보고서는 한반도 기후변화 관련 최신 연구를 바탕으로 국가 정책을 지원하고, 더 나아가 향후 IPCC 제7차 평가보고서의 작성에 기여하는 것을 목표로 한다.

1.2. 보고서 발간 절차 및 구성

기상청과 환경부는 공동으로 「한국 기후위기 평가보고서 2025」를 작성하였으며, 기상청은 제1실무그룹(과학적 근거), 환경부는 제2실무그룹(영향 및 적응)을 맡았다. ‘과학적 근거’ 분야의 집필진은 2023년 사전 기획연구를 통해 선정되었고, 2020년 보고서 이후 5년이 지나 7장을 제외한 모든 장에서 주저자가 교체되었다.

2020년 보고서에서 3장, 9장, 10장은 2명의 주저자가 참여했으나, 2025년 보고서에서는 해양과 빙권이라는 독립적인 내용을 다루는 3장을 제외하고는 모든 장에 1명의 주저자만 배정되었다. 각 주저자는 기여저자를 선정하고, 함께 집필 범위와 내용을 논의하였으며, 다음과 같은 집필 지침에 따라 보고서를 작성하였다.

- 본문은 장-절-소절-항의 구조로 작성하며, 장 제목은 「2020 평가보고서」와 동일하게 유지함. 단, 필요시 주관기관과 협의하여 수정 가능함.
- 각 장은 IPCC 제6차 평가보고서의 구조를 고려하여 관련 내용을 적절히 반영함.
- 본문은 참고문헌의 단순 나열을 지양하고, 분석 중심으로 서술함. 각 절의 서두에는 2020 보고서 내용을 요약하고, 이후 2020~2025년 연구 성과를 반영함. 단, 3장은 해양과 빙권을 각각 소절로 다뤄 각 소절에 2020 요약을 포함함.
- 보고서 최종본 및 국·영문 요약에서는 결론 부분에 대해 연구 결과의 동의 수준을 3단계로 평가함(표 1.1).
- 참고문헌은 원칙적으로 2020년 이후 출판된 논문 및 국가기관 보고서로 제한하며, 비공식 자료나 학위논문 등은 제외함. 한반도 연구를 우선하되, 필요한 경우 동아시아 연구도 포함 가능함.

표 1.1 연구결과의 신뢰도 평가(동의 수준)의 구분

1 견고한 동의	관련 분야 논문의 수가 충분하며 서로 배치되는 내용이 없이 일치되는 경우 혹은 전문가들의 의견이 일치하는 경우
2 중간적 동의	논문의 수가 어느 정도이지만 소수의견 등으로 증거를 판단하기 어렵거나 전문가 사이에서도 소수이지만 다른 의견이 있는 경우
3 제한적 동의	논문의 수가 아주 적거나 논문의 내용 혹은 전문가 사이에서도 의견이 서로 달라서 신뢰도를 판단하기가 어려운 경우

본 보고서는 총 10개의 장으로 구성되어 있으며, 각 장의 제목은 「한국 기후변화 평가보고서 2020」과 동일하다. 하지만 본 보고서에서는 동일한 장별 제목 하에 IPCC 6차 보고서 제1실무그룹의 과학적 근거의 각 장의 내용을 최대한 반영하여 각 장의 내용을 구성하였다.

각 장별로 인용한 참고문헌의 수와 출처(논문 또는 보고서)를 정리하여 표 1.2에 나타내었다.

표 1.2 한국 기후위기 평가보고서 2025에 사용된 참고 문헌 수.

장	2020 보고서		2025 보고서	
	논문	보고서	논문	보고서
1장	3	8	-	7
2장	166	10	162	20
3장	124	22	145	15
4장	46	14	69	5
5장	132	8	242	15
6장	157	-	171	1
7장	70	3	95	6
8장	20	-	37	5
9장	264	3	169	2
10장	98	8	42	14
합계	1,080	76	1,132	90

1.3. 「한국 기후위기 평가보고서 2025」 주요 결과

「한국 기후변화 평가보고서 2020」 이후 우리나라의 대기와 지표에 대한 관측 연구 결과에 따르면, 대기조성에서 주요 온실기체 농도가 전 세계 평균보다 높으며, 오존은 증가하고 일부 대기오염물질은 감소하는 경향을 보였다. 복사수지는 최근 10년간 감소 추세를 나타냈고, 동아시아 및 한반도에서는 도시화에 따른 산림 감소와 농지 증가가 관측되었다. 지표 기온은 전지구 및 우리나라 모두에서 상승하고 있으며, 특히 여름과 가을보다 봄과 겨울에 더 뚜렷한 온난화가 나타났다. 토양수분은 동아시아 내 일부 지역에서 감소 추세가 보이며, 한반도 강수는 7~8월 증가, 6월 감소하는 양상이다. 또한 해들리 순환의 확장, 제트기류의 이동 등 대기 대순환의 변화가 뚜렷하였다. 몬순과 해양 장주기 변동은 기후변화와 연관된 장기적 변동성을 보이고 있으며, 최근에는 극한고온과 극한강수 현상이 더욱 빈번하고 강해지는 경향이 확인되었다. 특히 여름철 폭염과 집중호우의 극단적 양상이 강해지고, 겨울철 이상고온 및 급격한 온도변동도 찾아지고 있다.

「한국 기후위기 평가보고서 2025」에서는 우리나라 주변 해역에서의 해양 환경 변화에 대한 최근 연구들을 통해 2020 평가보고서 발간 이후에도 여전히 해양 온난화, 해수면 상승, 해양 극한 현상들이 최근까지 꾸준히 지속되고 있음을 보였다. 빙권 분야에서도 2020년 이후 최근 연구에서도 이전과 마찬가지로 북극 온난화, 북극 해빙과 영구 동토층의 감소 등 기후변화와 관련된 현상이 지속적으로 일어나고 있음을 보였다. 또한 북극의 변화로 인한 중위도로의 원격상관도 뚜렷이 나타나고 있음을 보였다.

동해 해저 퇴적물에 대한 화분 연구는 지난 250만 년 동안의 기후변화와 이에 따른 식생 변화를 정량적으로 잘 반영하고 있다. 연구에서는 기후 지표종의 시간별 출현 빈도와 일사량 변화를 비교하여 약 10만 년 주기의 장기적 기후변화를 성공적으로 복원했다. 이 기간 동안 한반도 지역의 지표 환경과 식생 변화는 단순한 기후변화뿐만 아니라 지구조 운동 등 지질학적 요인의 영향도 받은 것으로 나타났다. 홀로세 시기 동안 한반도 남부에서는 전 지구적

기후 변화, 동아시아 몬순의 변동, 엘니뇨 남방진동, 그리고 쿠로시오 해류 유입 강도에 따라 지표 생태계와 퇴적 환경, 식생 구조에 변화가 나타났다.

「한국 기후위기 평가보고서 2025」의 탄소순환과 생지화학 순환에 대한 내용은 관측, 모델링, 메탄과 질소의 흡·배출, 미래 전망 등을 아우른다. 국내에서는 다양한 탄소 관측 장비와 위성을 통해 이산화탄소와 메탄의 시공간적 변동을 정밀하게 추적하고 있으며, 도심 지역에서는 플렉스 타워를 통해 배출 특성도 평가되고 있다. 산림과 농경지, 담수생태계, 산업·폐기물 부문에서의 탄소 순환 연구도 활발히 이루어지고 있으며, 메탄은 주로 석유화학·도시가스·매립지에서 배출되는 것으로 나타났다. 질소순환 연구는 아산화질소 배출에 중점을 두었고, 수계에서의 추가 관측 필요성이 제기되었다. 기후모델은 21세기 동안 해양과 육지는 계속해서 탄소 흡수원으로 작용할 것을 전망했으며, 배출 시나리오에 따라 탄소 흡수량의 규모가 달라질 것으로 예측하였다.

「한국 기후위기 평가보고서 2025」의 구름 및 에어로졸 연구에 대해 에어로졸-구름-강수 간 상호작용에 대한 이해는 여전히 부족하며, 관련 논문 수가 적어 연구 신뢰도 평가에 한계가 있다. 그러나 기상청의 관측 장비와 국제 협력 프로젝트를 통해 구름의 미세물리 특성 연구가 진전되었고, 인공 강우 실험과 수치 모형을 활용한 연구도 확대되고 있다. 한반도와 동아시아에서는 에어로졸의 물리적·광학적 특성에 대한 이해가 향상되었으며, 위성 자료와 AI 모델링을 통해 복사강제력 예측 연구가 활발히 이루어지고 있다. 에어로졸-구름-강수 간의 복잡한 상호작용은 정량적 평가가 어렵지만, 동북아 산업화 영향 등을 고려한 연구가 확장되고 있다. 국내에서는 드론과 로켓을 활용한 인공강우 실험, 수치모형을 통한 분석이 진행 중이며, 에어로졸이 몬순 약화와 강수량 변화에 영향을 미친다는 연구 결과도 보고되었다. 다만, 국내는 관측자료가 부족해 상호작용의 영향 분석에 어려움이 존재한다.

「한국 기후위기 평가보고서 2025」에서도 2020 보고서와 마찬가지로 한반도 및 동아시아 지역의 인위적·자연적 복사 강제력에 대한 연구는 여전히 부족하여, 해당 지역의 복사 강제력을 정량적으로 산정하는 데에는 많은 불확실성이 존재한다. 이에 따라 보고서는 전 지구 평균과의 비교를

통해 정성적으로 평가 결과를 제시하였다. 최근 한반도에서는 이산화탄소, 메탄, 오존 등의 농도가 지속적으로 증가하며 전 지구 수준 이상의 복사강제력이 추정되며, 에어로졸 감소와 오존 증가가 주요 영향을 미치고 있다. 복사강제력 정량화를 위한 배출량 메트릭스 연구는 국내에서 아직 초기 단계지만, 기후 반응과 온난화 기여도를 정확히 반영하는 새로운 지표 도입의 필요성이 커지고 있으며, 향후 기후정책 수립을 위한 과학적 기반 확보가 요구된다.

「한국 기후위기 평가보고서 2025」의 기후모델 평가에 대한 내용은 2020년 보고서 이후 기후모델 성능 평가의 발전을 반영하여, 전지구 및 지역 수준에서 기후모델의 모의 능력을 보다 정밀하게 분석하였다. 2020년 보고서에서는 주로 CMIP5 모델과 수십 km 해상도의 지역기후모델을 활용하였으나, 2025년 보고서에서는 CMIP6 기반의 전지구 기후모델과 고해상도 대류허용모델까지 포함되어 모델 해상도와 복잡성이 한층 향상되었다. 특히 K-ACE, KIOST-ESM, UKESM1 등 최신 모델들은 동아시아의 극한 기후지수 재현에서 전반적으로 개선된 성능을 보였고, 고해상도 대류허용모델은 집중호우와 국지 강수 재현에서 기존 RCM보다 뛰어난 성과를 나타냈다. CORDEX 프로젝트를 통한 지역 기후모델의 상세화 실험도 25km 이하의 해상도로 확대되어, 한반도와 같은 복잡한 지형에 대한 기후 예측력을 강화하였다. 이처럼, 2025 보고서는 2020년 대비 기후모델의 공간 해상도, 물리과정 표현, 극한현상 재현 측면에서 전반적인 진전이 이루어졌음을 보여주며, 향후 기후위험 대응과 정책 수립에 보다 신뢰도 높은 과학적 기반을 제공하고 있다.

기후변화 탐지 및 한반도 기상재해의 변화에 대해서 「한국 기후변화 평가보고서 2025」는 동아시아와 한반도에서의 장기 기후변화 추세와 기상재해의 변화를 종합적으로 분석하였다. 극한 고온은 증가하고 극한 저온은 감소하며, 특히 폭염과 열대야는 통계적으로 유의한 증가 경향을 보였다. 집중호우와 태풍, 가뭄의 강도와 빈도도 증가하고 있으며, 이러한 변화는 온실기체 증가와 대기 순환의 변화 등 인위적 강제력에 의한 영향으로 설명된다. 여름 몬순과 겨울 몬순, 엘니뇨, 북극기후변동성 등 기후요인의 변동성도 한반도 기후에 큰 영향을 미치며, 인공지능 기반 탐지 및 원인 규명 연구가 활발히 진행 중이다. 전반적으로, 기후변화로 인한

기상재해는 더욱 빈번하고 강력해지고 있어 이에 대한 과학적 대응과 정책 수립이 시급하다.

「한국 기후위기 평가보고서 2025」의 단기 및 장기 기후 변화 전망은 SSP 시나리오를 활용해 한반도의 단기(2050년 이전) 및 장기(2050년 이후) 기후변화 전망을 종합적으로 정리하였다. 기온은 모든 시나리오에서 상승하며, 한반도 평균기온은 SSP5-8.5 시나리오에서 최대 7℃까지 오를 것으로 예측되는데, 이는 2020 보고서에서 제시된 전망치보다 0.5~1.5℃ 높은 수준이다. 강수량은 전체적으로 증가하지만, 약한 강수는 줄고 강한 강수는 증가하는 양극화 경향이 강화되며, 폭염·열대야·극한강수는 고탄소 시나리오에서 뚜렷한 증가세를 보인다. 해수면 상승 또한 이전보다 높은 수치가 예측되며, 2100년까지 최대 82cm 상승이 예상되어, 이는 2020 보고서 대비 약 9cm 높다. 북극 해빙, 영구 동토 감소, AMOC 약화 등 지구시스템 변화도 구체적으로 반영되었다.

「한국 기후위기 평가보고서 2025」는 2020년 보고서 이후 축적된 국내 연구성과를 중심으로, 한반도 및 동아시아 지역의 기후변화를 더욱 정밀하게 진단하고 미래 전망을 정리하였다. 대기, 해양, 빙권, 고기후, 탄소순환, 에어로졸, 복사강제력, 기후모델, 기상재해 등 전 분야에서 고해상도 자료와 최신 시나리오(SSP)를 적용하여 분석 수준을 높였으며, 특히 온실기체 배출에 따른 기온 상승, 강수의 양극화, 극한현상의 증가, 해수면 상승과 같은 기후위험이 보다 구체적으로 예측되었다. 2025년 보고서는 과거보다 향상된 기후모델 성능과 관측 기반의 분석을 통해 기후변화 대응에 필요한 과학적 기반을 제시하며, 탄소 감축과 재해 대응, 적응 전략 수립의 필요성을 더욱 강조하고 있다.

제 2 장 관측: 대기과 지표



2.1. 서론

최근 우리나라의 기온 및 강수 변동성은 전 지구적인 온난화 현상 및 장기적 기후 변동성에 직접적인 영향을 받고 있다. 이 장에서는 「한국 기후변화 평가보고서 2020」 발간 이후 보고된 연구들을 중심으로 우리나라에서 최근 관측된 대기과 지표 변화를 크게 대기조성 및 복사수지, 대규모 평균 기후, 기후변동 모드의 변화로 나누어 수록하였다.

2.2. 대기조성 및 복사수지의 변화

안면도, 고산, 울릉도 세 지역의 2024년 연평균 이산화탄소, 메탄, 아산화질소, 육불화황은 전 세계 평균보다 높게 나타났고, 염화불화탄소는 안면도의 경우 전 세계 평균과 유사했다(건고한 동의). 1989년부터 2022년까지 관측된 오존의 농도는 증가추세를 보이며, 일산화탄소, 이산화질소, 이산화황의 농도는 감소 추세에 있다(건고한 동의). 월별 순복사수지는 2013~2022년의 값이 2008~2017년에 비해 7월의 최댓값은 약 8%, 12월의 최솟값은 약 10% 감소하였다(중간적 동의). 동아시아 지역의 산림 면적은 2000년부터 2020년 사이에 약 1.1% 감소하였고, 농지 면적은 약 20년 사이 약 8.2% 증가하였다(건고한 동의).

2024년 국내에서 관측된 이산화탄소 농도는 안면도 430.7ppm, 고산 429.0ppm, 울릉도 428.0ppm으로 세 지역 모두 전 지구 평균 농도보다 약 5.2~7.9ppm 높게 나타났다. 한반도에서 2024년 농도 증가율은 3.4ppm으로 최근 10년(2014~2023)의 연평균 증가율 2.4ppm에 비해 굉장히 높았다.

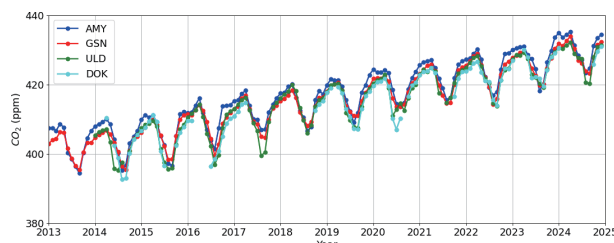


그림 2.1 2013~2024년의 기간 동안 안면도(AMY), 고산(GSN), 울릉도(ULD), 독도(DOK)의 이산화탄소 배경농도(국립기상과학원, 2025).

메탄 농도는 안면도 2030ppb, 고산 2010ppb, 울릉도 2022ppb로 전 지구 평균과 비교해 약 80~100ppb 높고, 아산화질소 농도는 안면도 339.6ppb, 고산 339.8ppb, 울릉도 339.0ppb로 전 지구 평균과 비교해 약 1.3~2.1ppb 높게 나타났다. 육불화황 농도는 안면도 12.1ppt, 고산 12.2ppt, 울릉도 12.3ppt로 전 지구 평균 농도인 11.8ppt 보다 약 0.3~0.5ppt 높게 나타났다. 1990년대 이후로 남한의 오존 농도는 꾸준한 증가 추세를 보이고 있고, 일산화탄소와 이산화황의 농도는 지속적으로 감소하고 있으며, 이산화질소 농도는 0.02~0.03ppm 사이를 꾸준히 유지하다가 2010년대 중반 이후로 감소하는 추세에 있다.

2023년 기준 안면도의 태양상향복사는 최대 45.5Wm^{-2} (6월), 최소 19.6Wm^{-2} (12월)이다. 태양하향복사 월평균 최대 값은 253.3Wm^{-2} (6월), 최소 70.9Wm^{-2} (12월)이고, 고산은 최대 245.2Wm^{-2} (7월), 최소 73.3Wm^{-2} (12월)이다. 안면도에서의 순복사 월평균 최대값은 144.4Wm^{-2} (6월), 최소 8.8Wm^{-2} (12월)로 나타났다(그림 2.1). 2023년 안면도의 순복사는 최근 10년과 비슷한 월변동을 보였다.

우리나라는 도시개발에 따른 산림면적 감소가 나타나며, 특히 수도권 중심으로 변화가 확인된다. 농지면적은 증가하였는데, 이는 도시화로 인해 상실된 농지를 보충하기 위한 것으로 보인다.

2.3. 대규모 평균 기후 변화

1951~2023년 전지구 평균 지표 기온 변화율은 $0.15^{\circ}\text{C}/10\text{년}$ 으로 1951~2018년의 변화율과 유사한 수준으로 진행되고 있는 것으로 판단된다(견고한 동의). 우리나라 지표 기온은 1912년부터 2024년까지 $0.21^{\circ}\text{C}/10\text{년}$ 의 기온 변화율로 뚜렷하게 상승하였으며, 1912~2017년 기간 동안의 기온 변화율($0.18^{\circ}\text{C}/10\text{년}$)에 비해 다소 강해졌다(중간적 동의). 한반도 평균 강수량은 7월과 8월에는 증가 추세, 6월에는 감소 추세가 나타났다(견고한 동의). 6~8월 평균 강수의 증가폭은 50년 기간 동안 0.65mmday^{-1} 로 나타났으며 95% 신뢰수준에서 유의하지 않은 것으로 나타났다(중간적 동의). 한반도 수증기의 선형 추세 변화는 뚜렷하지 않았으나, 동아시아 주변 바다 위의 선형추세는 전지구 선형추세를 크게 상회하였다(중간적 동의). 인도양-서태평양 해수면 온도의 상승은 겨울철 우리나라 동쪽에 고기압성 순환을 유도하여, 우리나라 강수량을 증가시킬 수 있다(중간적 동의).

1901~2023년까지 전 지구적으로 기온의 상승이 나타나며, 해양에 비해 육지에서의 기온 상승이 뚜렷하다. 우리나라 지표 기온은 1912년부터 관측 자료가 존재하는 6개 지점(서울, 인천, 강릉, 대구, 부산, 목포) 평균을 기준으로 2024년까지 $0.21^{\circ}\text{C}/10\text{년}$ 으로 뚜렷하게 상승하였다(그림 2.2).

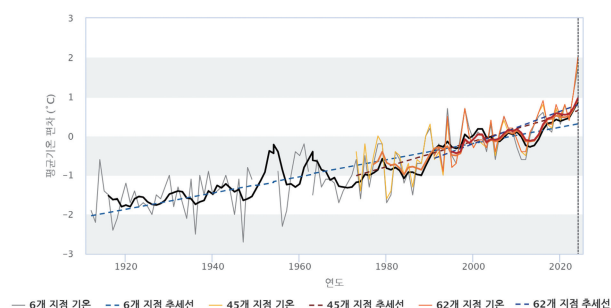


그림 2.2 우리나라 기간별(1912~2024년, 1973~2024년, 1991~2024년) 평균 기온 시계열 및 선형추세(기상청, 2025).

토양수분은 만주, 몽골 북부, 중국 내륙 지역에서 유의미한 건조 추세를 나타내고, 중국 서쪽 지역 일부에서 증가 추세를 나타낸다. 여름철 한반도 강수 강도는 여러 연구를 통해 6월에는 감소 추세를, 7월과 8월에는 증가 추세가 나타나는 것을 확인하였다. 1979~2018년 겨울철 동아시아 가강수량은 2000년대 감소 후 2010년 이후 증가했으며, 바렌츠-카라해의 해빙 감소가 수증기 변화에 영향을 주는 것으로 나타났다. 1951~2015년 대기의 강(Atmospheric River, AR) 빈도는 통계적으로 유의하지 않았으며, AR 관련 강수는 영동지역에서만 뚜렷한 감소 추세가 나타났다.

해들리 순환은 지난 수십 년 동안 강화되었으며, 중위도 제트는 각각 북극, 남극 방향으로 이동하고 있다. 온대 저기압의 경로 또한 중위도 제트의 극방향 이동에 따라 동반 이동할 것으로 예상되며, 1950년부터 2021년까지 온대 저기압의 강도가 상당히 증가했다. 특히 북태평양 폭풍의 수가 증가했고, 북태평양 온대 저기압의 경우 강수 극값이 증가한 것으로 확인되었다.

인도-열대 서태평양 지역의 해수면 온도 상승이 지속되고 있으며, 이는 겨울철 우리나라 동쪽의 고기압성 순환을 유도하여 우리나라 강수량을 증가시키는 경향이 있다. 우리나라 연근해의 해수면 온도 변화는 주로 동중국해와 우리나라 남해가 상대적으로 우세하며, 우리나라 서해 및 동해의 해수면 온도의 변화는 남해에 비해 크지 않다. 쿠로시오 해류는 약 $0.238^{\circ}\pm 0.168^{\circ}/10\text{년}$ 의 속도로 극 방향으로 이동하고 있는데, 남해는 쿠로시오 해류의 복진의 영향을 받는 지역으로 남해의 열이류는 1998~1997년 대비 1998~2017년 기간에 대해 $5\times 10^{-7}^{\circ}\text{C s}^{-1}$ 증가하였다.

2.4. 기후변동모드의 변화

동아시아 여름철 몬순은 1970년대 후반 이후 약화되었고, 겨울철 몬순은 1980년대 중반 이후 위상이 변화하며 장주기 변동을 보이고 있다(중간적 동의). 강한 엘니뇨는 2015/16년과 2023/24년에 두 차례 발생하였으며, 특히 2023/24 엘니뇨는 전 지구 지표 온도 상승에 일부 기여하였다(견고한 동의). 지난 100년간 10번의 다년간 라니냐가 있었고, 이 중 5번이 2000년 이후 발생하였다(중간적 동의). 극한저온현상은 1980년대 후반 이후 감소하다가 2000년대 후반~2010년대 초반에 다시 증가하였다(중간적 동의). 최근에는 겨울철 이상고온 발생도 빈번하게 관측되었다(제한적 동의). 지구 온난화는 봄-가을철의 극한고온현상에 더 큰 영향을 미치며(중간적 동의), 최근 10년(2015~2024)간의 평균 폭염 일수는 15.6일로 역대 최고치를 기록하였다(견고한 동의). 여름철 극한강수는 동아시아 몬순과 태풍의 장기 변동과 연계되어, 1970년대 중반과 1990년대 중반을 전후로 계단식 증가를 나타냈다(중간적 동의).

동아시아 여름 몬순은 1970년대 후반 이후 강도가 약화되었고, 동남아시아 여름 몬순도 1950년대 이후 감소 추세를 보인다. 동아시아 겨울 몬순은 1980년대 중반에 약화되고, 2000년대 초반에 강화되는데, 각각 북풍의 강도와 지표 온도에 영향을 미친다(그림 2.3). 또한 한반도를 포함하는 중위도 지역의 날씨나 기후 변동성에 영향을 미치는 주요한 중위도 대기 변동 및 대기 원격상관 순환들은 North Atlantic Oscillation (NAO), Arctic Oscillation (AO), Pacific North American pattern (PNA), Western Pacific pattern (WP), Scandinavian pattern 및 Circumglobal Teleconnection pattern (CGT)이 있는데, NAO 지수는 2010년대 중반까지 여름철에 전반적으로 음의 값을 가졌으나, 이후 양의 위상에 대한 빈도수가 많아졌다. NAO 지수와 유사한 변동 특성을

보이는 AO 지수는 2017년 이후 양의 위상이 매우 우세하게 나타나고 있다. Scandinavian pattern 또한 한반도와 상관성이 높아지고 있는데, 2000년대 초반 음의 위상이 우세하였으나, 이후 양의 위상이 점차 우세하였으며, 그 강도 또한 증가 경향을 보이고 있다. PNA 지수는 1990년대 후반 이후에는 양의 위상이 우세하게 나타났지만, 2010년대 후반 이후로는 양의 위상과 음의 위상이 경년 변동하는 것을 알 수 있다.

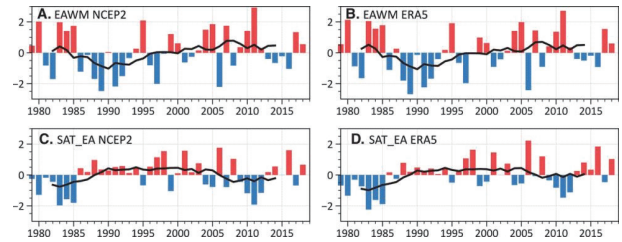


그림 2.3 (A, B) 표준화된 동아시아 겨울철 몬순 지수(EAWM)와 (C, D) 1979~2018년 동아시아 겨울 평균 지표면 온도(SAT) 시계열. EAWM 지수와 SAT는 각각 NCEP2 데이터셋(A, C)과 ERA5 데이터셋(B, D)을 사용하여 계산되었으며, 실선 검정색 선은 9년 이동 평균을 나타냄(Ma and Chen, 2021).

엘니뇨는 2015/16년과 2023/24년 두 차례 강하게 발생하였으며, 그 중 2023년은 가장 전지구 기온이 높은 해로 기록되었는데, 강한 엘니뇨가 일정 부분 기여한 것으로 알려져 있다. 지난 100년 동안 발생한 총 10회의 다년간 라니냐 중 5회가 2000년 이후 발생하였다. 다년간 라니냐는 단년 라니냐에 비해 통상 큰 강도를 가지므로 더 많은 피해를 유발한다고 알려져 있다. 1990년대 후반 이후 십년 주기 태평양 진동이 우세한 음의 위상을 나타냄에 따라 북서-북중 태평양 지역 해수면 온도는 평년보다 매우 높은 값을 보이고 있다.

1973~2023년 기간을 기준으로 우리나라의 장기적인 한파일수는 유의한 수준의 감소세를 보이고 있으며, 최근 몇 년 동안에는 가을철 이상고온의 증가 양상이 뚜렷해지고 있다. 여름철 극한고온 기록은 2018년에 전국 평균 폭염 일수가 최장 기록을 갱신하였고, 2015~2024년의 폭염일수 평균값은 15.6일로 역대 가장 높은 수치였다(그림 2.4). 우리나라 여름철 극한강수는 1970년대 중반과 1990년대 중반을 전후로 2차례의 계단형 증가를 나타낸 것으로 알려져 있으나,

2010년대에는 악화되는 경향을 나타내었고, 2020년대에 들어서며 다시 복합적인 변화 양상을 나타내고 있다.

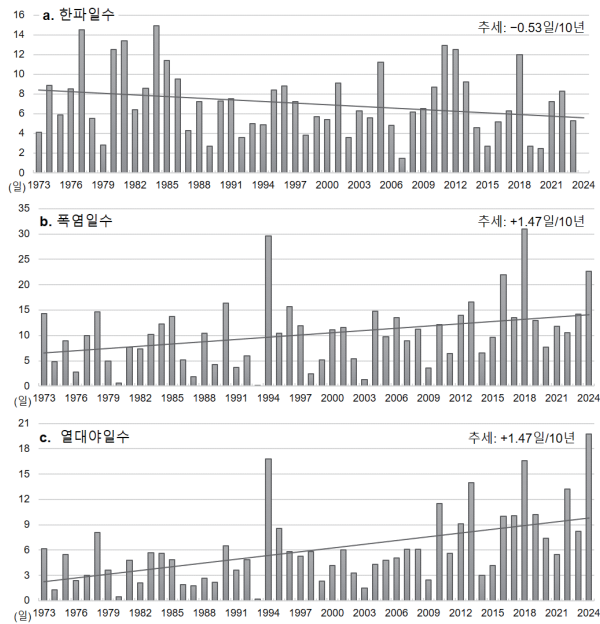


그림 2.4 우리나라 1973~2024년 전국 평균 연간 (a) 한파일수, (b) 폭염일수, (c) 열대야일수(자료: 기상청 기상자료개방포털, 한파일수: 아침 최저 기온이 영하 12℃ 이하인 날의 수/ 폭염일수: 일 최고기온이 33℃ 이상인 날의 수/ 열대야: 밤 최저 기온이 25℃ 이상인 날).

제 3 장 관측: 해양 및 빙권



3.1. 서론

기후변화에 대한 해양과 빙권의 반응과 영향은 매우 중요하며(IPCC, 2019), 세계기상기구(WMO)에 따르면, 2024년에는 2023년에 비해 16 ± 8 ZJ만큼의 추가적인 해양열함량 증가로 다시 역대 최고치 갱신이 이루어져 최근 20년 동안 더 많은 양의 열이 해양에 흡수되고 있는 것으로 밝혀졌다(WMO, 2023; 2024). 해양 온난화와 함께 해수면 상승은 지속되거나 심화하고 있으며, 해양열파를 포함한 해양 극한 현상들의 빈도와 강도에도 유의한 변화가 발생하고 있다. 또, 해수 중 이산화탄소 증가로 인한 해양 산성화와 온난화에 따른 빈산소화 및 영양염 감소가 지속되면서 해양 생태계에 미칠 영향이 점점 심화하고 있다. 빙권에서 대해서는 최근 수십 년간 지구온난화로 인해 빙하, 해빙, 적설, 동토 등이 전 세계적으로 감소하고 있으며, 인간 활동의 영향 가능성이 매우 높다. 특히 북극의 변화는 한반도 기후에도 영향을 미칠 수 있어 이에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다.

3.2. 해양

해양 환경 변화에 관한 최신 연구 결과는 해양 온난화, 해수면 상승, 해양 극한 현상이 최근까지 지속됨을 일관되게 보여주고 있다(견고한 동의). 이 해역에서 나타나는 주요 수괴의 생성 과정과 해양 순환의 변동에 따라 해역·시기·수심별로 수온 장기 변화 추세와 해수면 상승률의 변화를 보였다(견고한 동의). 전 지구적 상승 속도에 비해 전반적으로 더 빠른 온난화와 해수면 상승이 지속되었으며(견고한 동의), 일반적 타 해역에 비해 상대적으로 더 강하고 오래 지속되고 있는 해양열파(중간적 동의)가 계절과 해역에 따라 다른 양상의 변동 특성을 보이는 점(중간적 동의), 일부 해역의 냉수대 일수가 증가한 점(제한적 동의), 빈산소 수괴가 매년 발생하고 있는 점(중간적 동의), 해양탄산염계의 유의한 변화(제한적 동의)와 장강 저염 확산에 따른 염분 및 영양염, 나아가 해양생태계 전반 영향(견고한 동의)이 제시되었다.

우리나라 주변 해양의 수온과 해수면은 「한국 기후변화 평가보고서 2014」 및 「한국 기후변화 평가보고서 2020」과 마찬가지로 지속 상승 중이며, 그 상승률은 전 지구 해양 평균보다 높은 것으로 평가된다. 이러한 경향은 관련 모든 연구에서 공통 제시하고 있어 견고한 동의 수준의 신뢰도를 보여주고 있다. 해표면 수온과 해수면 변화율의 정량적인 수치는 자료 분석 기간과 해역에 따라 다르게 제시되고 있지만, 해역별 상대적 크기는 해수면 상승률의 경우 동해와 제주도에서 높고 황해에서 대체로 낮았다.

우리나라 해역의 표층 수온은 1968~2023년 기간 동안 1.44°C 상승하여 같은 기간 전 세계 평균(0.7°C 상승)에 비해

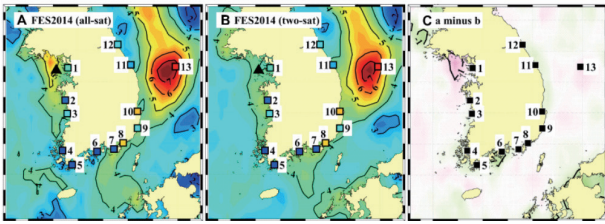


그림 3.1 인공위성 고도계 기반의 한반도 주변 해역 해수면 상승률 분포 예. (좌) 모든 고도계 합성 결과. (중) 주요 2개 고도계 합성 결과. (우) 두 결과의 차이 (Lee et al., 2022).

약 2배 이상 높은 상승률을 보였으며(국립수산과학원, 2024), 특히 동해 일부 해역(울릉도 부근)은 1993~2019년 기간 동안 7mmyr^{-1} 이상의 매우 높은 연평균 해수면 상승률을 보이는 등 해수면 상승 속도도 일반적 타 해역에 비해 매우 빠른 것으로 평가되었다. 이번 「한국 기후위기 평가보고서 2025」는 우리나라 주변 해역에 해당하는 동해 및 황해와 동중국해 해수의 물리적 특성과 해양 순환 변화, 해수면과 해양 상층 구조 변화에 관한 최신 연구 결과를 요약하여 보고했다.

또, 이번 보고서는 해양 온난화, 해수면 상승 외에도 해양 열파, 냉수대, 빈산소, 장강 저염수의 4가지 해양 극한 현상에 관한 최신 연구 결과를 소개했다. 특히 해역과 계절에 따라 그 발생 기작을 달리하는 해양열파가 다른 해역에 비해 전반적으로 더 강하고 오래 지속되는 특성을 보였다. 냉수대(연안 용승) 발생 일수의 변화와 거의 매년 발생하는 빈산소 수괴에 대한 연구 결과를 포함했으며, 장강 저염수 확산은 해양열파의 연변화에도 영향을 미치며, 영양염과 식물플랑크톤 등 해양 생물다양성과 생태계 전반에 영향을 미칠 수 있음이 밝혀졌다.

마지막으로, 플랑크톤을 비롯한 해양 생물의 성장과 생태계 생산성 유지에 필수적인 영양염의 장기 변화 연구 결과는 해역에 따른 증감 추세의 차이를 보였으며, 대기 중 이산화탄소 농도 증가에 따른 해수 중 탄산염계의 변화로 해양생태계에 부정적 영향을 미칠 것으로 예상되는 해양 산성화도 우리나라 해역에서 수집된 관측 자료의 분석 결과로부터 확인하여 구체적인 수치를 제시할 수 있었다.

3.3. 빙권

20세기 후반부터 나타난 북극 전지역과 서남극 지역 표층대기의 온난화 경향은 지속되고 있다(견고한 동의). 북극과 남극의 해양 온난화 경향은 뚜렷하지 않다(제한적 동의). 북극 해빙은 지속적으로 감소하고 있으며, 남극 지역 해빙의 증가 추세는 둔화되었다(견고한 동의). 서남극 지역 빙상의 감소 경향은 지속적으로 확인되며(견고한 동의), 동토 지역의 온난화 경향과 활성층 두께의 증가가 관찰되나 경향성을 확인하기에는 연구가 더 필요하다(중간적 동의).

전지구 온난화에 비하여 북극 지역에서 강한 온난화가 발생하는 북극 온난화 증폭(Arctic Amplification) 현상은 지속적으로 나타나며, 1979년부터 2021년까지 북극 지역의 표층온도 상승 속도는 10년당 약 0.75°C 로 이는 전 지구 평균 상승 속도 대비 약 4배에 달한다. 이러한 북극 지역의 온난화 경향은 가을철 북극해 유라시아 지역, 스발바드 및 노바야젬라 지역에서 크게 기여하고 있다. 중위도 기압계에

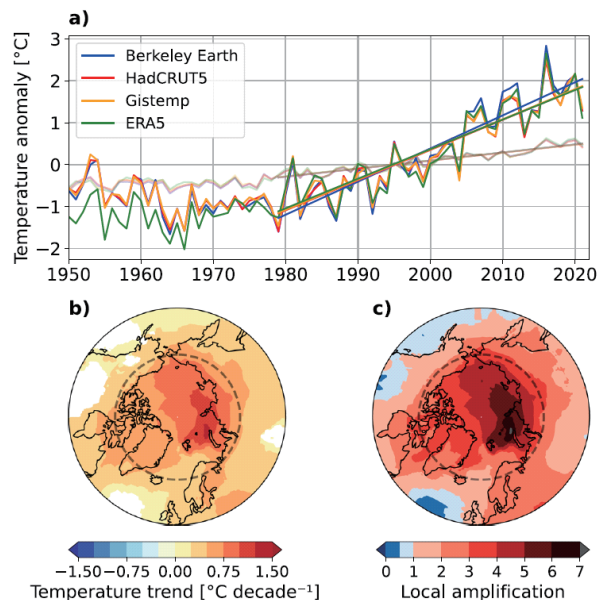


그림 3.2 북극 지역의 1950년부터 2021년까지의 온도 상승 경향과 국지적 온도 상승 증폭 경향 (Rantanen et al., 2022).

영향을 미치는 북반구 지역의 주요 대기변동성인 북극 진동 역시 양의 위상으로 장기 변화 추세가 나타나고 있으며 이러한 장기적 변화 추세는 열대 인도양 지역의 해수면온도 상승의 영향을 받고 있음이 확인되었다.

남극 지역에서는 서남극과 남극반도를 중심으로 강한 온난화가 관찰된 반면, 동남극은 시기와 지역에 따라 온도 감소 경향도 나타나 남극 지역의 기후 변화 양상이 북극과는 다른 복합적 특성을 보이고 있다. 서남극 지역의 온난화는 1958년부터 2012년까지의 온도복원자료에서도 뚜렷하게 나타나는데, 이는 서남극과 동남극의 고도가 다른 지형적 특성에 영향을 받음이 확인되었다. 남극점에서도 최근 30년간 10년당 0.61°C 상승하는 강한 온난화가 관측되었으며, 남방 진동(Southern Annular Mode; SAM)과 태평양 지역의 장주기 변동성의 영향을 받은 것으로 분석되었다.

북극 온난화와 중위도 지역의 한랭화가 동시에 나타나는 따뜻한 북극 차가운 대륙(Warm Arctic-Cold Continent; WACC) 현상은 여전히 자연변동성과 북극 온난화에 대한 중위도의 반응이라는 두 상반된 논점에 대한 여러 연구 결과들이 제시되고 있다. 북극 지역 온난화가 중위도 지역 겨울 한파를 약화시킬 것이라는 기존 예상과 달리 최근 북미 지역에서는 오히려 한파 발생이 증가하는 경향에 대한 연구 결과가 제시된 바 있으며, 이러한 기작에는 한파 발생 시 북극 온도는 상승했지만 중위도 기온은 변화가 없는 것으로 나타나 북극 온난화가 대기 순환을 통해 한파를 강화할 수 있음이 제시되었다. 다만 최근 연구에서는 북반구 겨울철 온도 분산 감소와 비대칭도, 침도 변화가 한파 약화를 초래할 수 있다는 분석도 있어 북극-중위도 기후 연결 고리에 대한 연구가 여전히 필요함이 강조되고 있으며, 최근 제시된 열대 지역의 대류 활동이 북극과 동아시아 온도의 원격지 상관에 영향을 미칠 수 있는 연구 결과는 이러한 지속적 연구의 필요성을 뒷받침하고 있다.

북극해에서는 대서양에서 기원한 해수의 유입 증가에 따른 해빙 감소가 발생하는 ‘대서양화(Atlantification)’의 진행이 보고되고 있다. 대서양 해수의 유입 증가로 북극해 염분약층이 약화되고, 이로 인해 따뜻한 물이 표층으로 접근하면서 해빙 감소가 가속화되고 있음이 관측되고 있으며, 특히 척치해 지역에서는 대서양 해수 유입으로 표층

영양염 농도가 높아져 여름 동안 식물성 플랑크톤 번성 현상이 나타나기도 하였다.

남극해에서는 서남극의 빙봉이 빠르게 감소하고 있으며 이러한 빙봉에 따라 서남극해의 해양 특성 변화가 관찰되고 있다. 남극순환 심층수(Circumpolar Deep Water; CDW)가 남극 대륙붕으로 유입되면서 빙봉 하부 용빙을 촉진시킬 수 있음이 알려져 있는데, 최근 관측에서는 이러한 남극순환 심층수의 유입과 연관된 변동성이 확인되고 있으며 수치모델 실험들은 이러한 관측 결과를 뒷받침하고 있다. 특히 남극해 지역의 해류 강도 변동과 대기 바람 변화가 빙봉 용빙량을 조절하는 주요 요인임을 밝혀내고 있으며, 이러한 국지적 요인들에 대한 엘니뇨 등 열대 해양의 원격지 영향에 대한 확인이 진행되고 있다. 한편 서남극 아문젠해의 스웨이츠와 파인아일랜드 빙봉 감소의 경우 해수면 상승에 미칠 수 있는 지대한 영향에 따라 서남극해 연안에서의 용빙에 따른 해양의 변화 특성에 대한 다양한 연구가 진행 중이며, 최근 용빙수 유출에 따른 해양 특성 변화가 빙봉 하부 용빙율에 영향을 미칠 수 있음이 확인되고 있다.

북극 및 남극 지역의 1979~2023년 기간의 계절별 해빙면적 경향을 살펴보면 지난 「한국 기후변화 평가보고서 2020」의 40년(1979~2018년)에 5년 정도의 기간이 추가되었음에도 불구하고 남극에서는 기존의 증가-중립 추세에서 중립-감소 추세로 뚜렷한 변화가 나타나며, 북극에서는 추세가 전반적으로 약화되지만, 여전히 뚜렷한 감소 추세가 유지됨을 확인할 수 있다. 즉 북극지역 해빙의 경우 1979년 이후 해빙 면적이 전반적으로 감소하고 있으며, 최근 감소 속도는 다소 둔화되었지만, 장기적 감소 추세는 여전히 뚜렷하다. 특히 기후모델과 최근 연구들은 북극이 여름철에 얼음이 거의 없는 상태(Sea Ice-Free Arctic)가 2050년 이전에 나타날 가능성이 높다고 예측하고 있다. 남극에서는 과거 1980~2015년까지 해빙 면적이 증가하는 경향이 있었으나 2016년 이후 급격한 해빙 감소가 발생하였고 최근 이러한 감소 경향이 둔화되었다. 2016년 이후 급격한 감소는 열대 대류, 남극 성층권 변화, 남방진동 등의 복합적인 대기-해양 요소의 영향임이 여러 연구결과에서 확인되었으나, 남극 지역 관측 및 수치재현 자료의 큰 불확실성으로 인해 인간활동에 따른

온난화의 영향 여부의 판단은 여전히 어려운 상황이다.

남극 빙상은 최근 18년간 매년 약 1,200억 톤의 질량을 잃고 있으며, 특히 서남극 스웨이트 빙하와 파인아일랜드 빙하에서 대규모 유실이 집중적으로 나타나고 있다. 이러한 서남극 지역의 빙상 질량의 감소는 남빙양 해수 온난화, 남극 대륙 기온 상승, 강설량 감소 등이 주요 원인으로 지목되었으며, 한편 강한 엘니뇨가 서남극 강설량 증가를 유발하여 일시적으로 빙상 감소를 지연시킬 수 있음이 제시된 바 있다. 한편 남극 빙하 감소에 따른 용빙수의 증가는 전 지구 해수면 상승에 직접적으로 기여할 뿐만 아니라, 전지구 해양 순환과 동아시아 기후에도 영향을 미칠 수 있어 이에 따른 원격상관 기작 연구가 활발히 진행되고 있다.

북반구 동토는 지속적인 온난화와 함께 활성층 두께가 증가하고 있으며, 시베리아, 알래스카, 몽골고원 지역을 중심으로 동토 면적이 빠르게 감소하고 있다. 특히 한랭동토(-2°C 이하 동토) 지역의 경우 다른 온난 동토보다 3배 이상 빠른 속도로 온난화가 진행되고 있다. 또한 해저동토 용해가 가속화되면서 메탄 등 온실기체 방출에 대한 우려도 커지고 있으며, IPCC 6차 보고서에서는 지구 평균기온이 1°C 상승하면 지표 3m 이내 동토가 약 25% 감소할 것으로 전망하였다. 북반구 봄철 적설면적은 지속적으로 감소하고 있으며 감소 폭은 최근 들어 더욱 커지고 있다. MODIS 위성 자료 분석에 따르면, 2000~2022년 동안 전 세계 적설면적이 연평균 약 5.1% 감소했으며, 아시아와 유럽 지역에서 감소 폭이 특히 크게 나타났다. 한반도에서도 지난 50년간 전국 평균 일최심신적설은 10년당 약 2.3cm, 눈 현상일수는 10년당 약 0.96일 감소하는 추세를 보이고 있다. 이러한 눈 현상일수의 감소에는 강설시작일은 점점 늦어지고 강설종료일은 점점 빨라지는 추세가 모두 기여하고 있다.

제 4 장 고기후기록에 의한 정보



4.1. 서론

고기후 연구는 과거의 기후와 환경 변화를 이해하는 중요한 분야로, 다양한 데이터와 분석 방법을 통해 진행되고 있다. 우리나라의 경우도 고기후 연구를 통하여 한반도의 기후 변동을 복원하여 과거 생태계와 인류 활동에 대한 정보를 제공하고 있다. 본 장에서는 화분, 동물 화석, 연륜, 고문헌, 동굴생성물을 활용한 연구의 성과와 중요성을 다루었다. 화분 연구는 기후변화의 지질학적 역사 기록을, 동물 화석은 플라이스토세 후기에서 홀로세의 기후 변동을 보여주고 있다. 연륜폭과 산소동위원소는 고기후 복원에 활용되고 있으며, 고문헌에 기록된 정보는 이를 보완하기 위해 활용되고 있다.

4.2. 화분에 의한 고기후

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

동해 해양저 퇴적물에서 수행된 화분 연구는 지난 250만 년 동안의 기후 변화와 이에 따른 식생 변화를 정량적으로 잘 반영하고 있다. 기후 지표종의 시계열적 출현 빈도와 일사량 변화를 비교한 결과, 약 10만 년 주기의 장주기적 기후 변화를 성공적으로 복원하였다. 특히, 이 기간 동안 한반도의 지표와 식생 반응은 기후 변화뿐만 아니라 지질학적인 지구조 운동에 의해 조절되는 것으로 나타났다.

홀로세 기간 동안 한반도 남부지역에서는 전 지구적 기후 변화, 동아시아 몬순 변화, 엘니뇨 남방진동, 그리고 쿠로시오 해류의 유입 세기 변화에 따라 지표생태 환경, 퇴적 환경,

그리고 식생천이가 발생하였다. 고해상도의 화분분석을 통해 홀로세 기후 최적기(HCO)와 전 지구적 한랭 기후 이벤트(예: 8.2ka 냉각 사건, 4.2ka 냉각 사건) 등이 한반도에 영향을 미쳤음을 확인할 수 있었다.

최근에는 화분기반 정량적 고수문기후변화를 복원함으로써 국제적으로 요구되는 자료를 생산하는 데 성공하였다. 이러한 복원 자료를 통해 한반도에서 발생한 홍수나 가뭄과 같은 재해성 극한 기후 사건을 인지할 수 있게 되었다.

4.3. 동물화석에 의한 고기후

플라이스토세 후기에는 기온 변동 폭이 컸지만, 홀로세에 들어와서는 기후가 점차 안정화됐는데, 이러한 고기후 변동은 동물화석 분석을 통해 충분히 파악할 수 있다(견고한 동의).

한데 유적(야외 유적)에서도 동물화석이 매우 드물게 발견되기는 하지만 한반도에서 발굴된 플라이스토세(구석기 시대) 동물 화석의 대부분은 동굴에서 발견된다. 충북 제천시 송학면 점말 동굴(용굴) 유적에서 출토된 동물화석은 플라이스토세 중기와 후기의 기후를 엿볼 수 있게 한다. 쌍코뿔아·원숭아·하이에나·사자 등의 동물들이 출토된 4만 년 전에는 마지막 간빙기로 따뜻한 기후 환경과 맞물려 동물들도 생활하기에 적합한 시기였을 것으로 추정되었다. 국내 플라이스토세 후기의 기후는 동물상 분포를 바탕으로 재구성하였을 때 전체적으로 온화하였던 시기로 추정되고 있다.

약 2만 년 전에는 말사슴·북쪽오소리·동굴곰·산양 등 전형적인 한대 기후의 동물들이 나타났다. 마지막 빙하기 말기의 가장 추웠던 시기인 최후빙하극성기(LGM)의 기온은 현재 온도보다 낮았을 것으로 추정할 수 있다. 이 시기에 새로

나타나는 북쪽오소리·족제비 등은 추운 기후로의 변화를 알려주고 있다. 초식동물에서도 고라니·산양 등의 산지성의 좁고 건조한 기후의 동물들이 많이 보이는 것을 알 수 있다.

홀로세에 들어와 한반도 기후는 점차 안정되고 요즈음과 유사한 기후환경이 자리 잡은 것으로 이해된다. 이에 따라 플라이스토세의 변화하는 환경, 특히 추운 환경에 적응해 커다란 몸집을 지녔던 동물들도 홀로세에 이르러 사멸하고 중간 크기의 다양한 동물이 그 자리를 차지하게 된다.

강원도 영월군 북면 공기리 굴앞마을에 자리한 공기 2굴에서 출토된 큰 포유류의 구성은 모두 현생종이면서, 대부분이 온대성 기후대에 분포하는 동물들이다. 5,000~6,000년 전 당시의 공기 2굴 일대의 환경은 다양한 짐승들이 살기에 좋은 온난한 기후환경이었을 것으로 판단된다.

플라이스토세의 산양 서식지는 현재보다 넓었지만 현재는 서식지가 크게 축소되었다. 홀로세 이후 기후 온난화와 구석기 시대 사람의 사냥을 포함한 인간의 방해로 인해 한반도에서 산양은 더 높은 고도와 가파른 경사로 이동하였을 수도 있다.

4.4. 연륜에 의한 고기후

연륜폭과 산소동위원소를 이용하여 새로운 연대기가 작성되었으며, 이를 활용한 고기후 복원 가능성이 다양한 국제 논문에 발표되어 향후 고기후복원 연구에 중요한 기초자료를 마련하였다(견고한 동의).

연륜을 이용한 고기후 연구를 위해선 각 연륜에 생육 연도가 부여된 장기간의 연대기(이하, 연륜연대기)가 있어야 한다. 2018년부터 2022년까지 경주 동부사적지역(월성 및 발천)에서 출토된 목재를 이용하여 307~441년에 해당하는 산소동위원소연륜연대기와 307~438년에 해당하는 연륜연대기가 새롭게 작성되어 삼국시대 기후를 연륜으로 연구할 수 있는 새로운 기초자료를 마련하였다.

연륜으로 복원이 가능한 고기후 인자를 확인하기 위해 전국에서 수집된 소나무(*Pinus densiflora*) 연륜폭과 각 연륜에서 측정된 산소동위원소로 연대기를 작성하여 분석하였다.

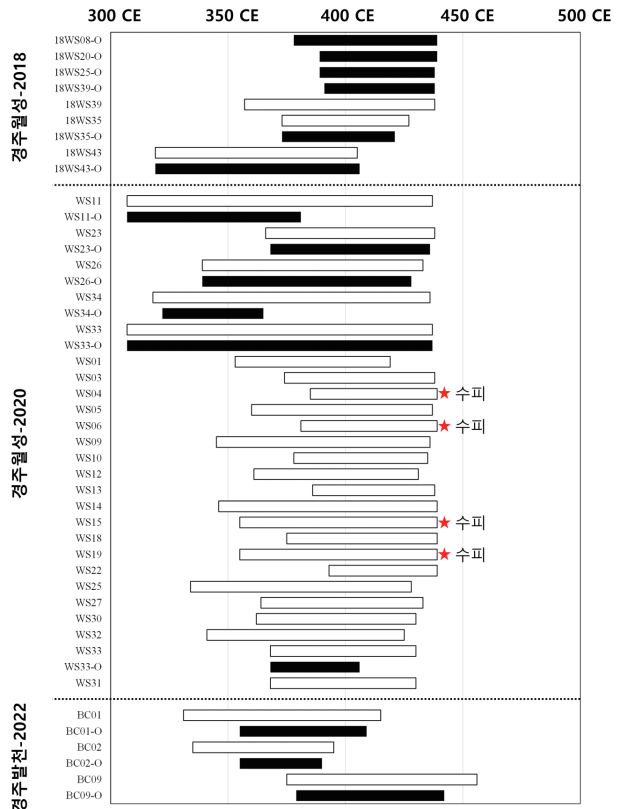


그림 4.1 연도 부여가 완성된 경주 동부사적지역 고목재 연륜폭(□) 및 산소동위원소(■) 연륜연대기 (서정욱, 2023).

그 결과, 연륜폭의 경우 겨울 또는 이른 봄의 온도 및 봄 또는 여름 강수량 복원에 적합한 것으로 조사되었다. 특히, 우리나라 남부에 위치한 무등산과 월출산 소나무의 연륜폭은 동아시아 지역온도 및 몬순 강수량 또는 북서태평양 지역 해수면 온도 복원에 활용 가능성이 제시되었다. 한라산 고산지대 분포하고 있는 관목인 산철쭉(*Rhododendron yedoense*)과 털진달래(*R. mucronulatum*) 연륜폭을 이용하여 8월 온도와 7~9월 강수량 복원이 가능함을 확인한 연구 결과는 고기후 복원 연구에 고산지대 관목 연륜의 활용성을 제시하였다.

산소동위원소연륜연대기로 복원이 가능한 기후인자는 7월 온도, 5~9월 강수량, 7~8월 표준화된 강수증발산지수(standardized precipitation-evapotranspiration index)였다. 특히 온도의 경우 연구 지역을 포함한 한반도 및 우리나라와 인접한 중국 일부 지역을 산소동위원소연륜연대기로 설명 가능한 것으로 확인되었으며, 강수량 및 표준화된 강수증발산

지수는 연구 지역을 중심으로 남동방향에 위치한 일본까지 설명이 가능한 것으로 확인되었다. 본 결과를 통해 지역별 국내 산소동위원소연륜연대기를 이용하면 해당 지역 및 중국 서부 일부 지역의 여름철 온도와 해당 지역 및 일본 지역의 여름철 강수량 관련 정보를 복원할 수 있는 것으로 확인되었다.

4.5. 고문헌에 의한 고기후

단순히 고문헌에 기록된 기상·재해 기록과 기후를 복원하는 것을 넘어 시·공간적 범위를 확대하여 동아시아 지역의 고문헌 분석 결과 및 다양한 대체 자료를 활용하여 기존 연구를 고찰·보완하였다 (중간적 동의).

2020년 이후 고문헌을 활용한 고기후 복원 연구 성과는 많지 않으나, 최근 고문헌을 활용한 고기후 복원 연구는 다각적으로 확대되며 개선되고 있다. 공간적 범위가 동아시아 지역으로 확대되었으며, 시간적으로도 여러 대체 자료를 활용하여 조선 이전 8~9세기 신라시대 및 10~13세기 고려시대 고기후 분석을 보완하였다. 또한 『기우제등록』의 수표 자료를 상세하게 분석한 연구가 이루어졌다.

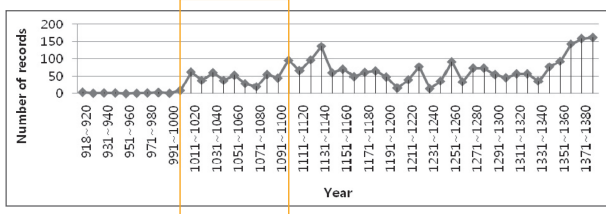


그림 4.2 고려시대 자연재해 발생 기록 빈도(김문기, 2021).

중국과 한국, 일본의 고문헌 및 대체 자료를 통한 고기후 복원 연구 결과를 종합하여 동아시아 기후변동에 대해 살펴 본 결과 11세기 한반도와 동아시아에서도 전 세계적인 중세 온난기가 있었음이 인정되었다. 한편 17세기에는 동아시아 중국, 한국, 일본 세 국가도 흉작과 기근, 폭동, 반란, 여름철

이상저온현상 등을 겪었다는 점에서 전 지구적인 소빙하기의 영향 아래 있었다는 것을 밝혔다.

조선 이전 시기에 대한 고기후 분석은 다음과 같다. 『삼국사기』에 기록된 기상현상과 천재지변을 계량화하여 분석한 기존 연구 결과를 활용하여 8~9세기 신라시대의 기후를 보완한 결과 9세기 초 한반도는 한랭한 기후 환경이었으며, 이는 여러 대체자료를 통해서도 확인되었다. 또한 10~13세기 고려시대 『고려사』 기록을 분석한 연구 결과와 대체자료를 함께 종합적으로 고찰함으로써 당시 온난과 한랭, 건조와 습윤이 반복되었으며, 특히 10~11세기가 다소 온난한 소기후 적기였음을 확인하였다. 이러한 종합 결론은 앞서 동아시아 중국, 한국, 일본 각 국의 10~13세기 기후를 중세온난기로 보았던 연구 결과와도 일치한다.

고문헌의 기록을 상세 분석한 최근 수행된 『기우제등록』 수표 분석 연구에서는 1680년부터 1778년까지 속종 40년간과 영조 30년간 두 번의 수위가 가장 높았던 시기가 있었으며, 이를 각각 제1차, 제2차 강우최고조기로 분석하였다. 또한 해당 고문헌에 대한 다른 기후 데이터(가뭄 등) 분석 후속 연구가 필요하다는 점을 밝혔다.

최근 수행된 연구들은 직접 고문헌을 분석한 것은 아니지만 한반도에 기후를 주변국의 고문헌 기록 분석 결과와 기존 고문헌 분석 결과 및 대체자료 등을 종합적으로 활용해 이전 연구 결과들을 보완했다는 점에서 의의가 있다. 특히 한반도 고기후에 대한 연구 뿐만 아니라 이를 위한 문헌자료 및 대체자료가 부족하다는 절대적인 한계를 고려할 때, 시·공간적 범위를 확대하고 다양한 대체자료를 검토하여 종합적으로 당시 고기후를 복원을 보완했다는 점에서 매우 의의가 있다.

제 5 장 탄소순환과 기타 생지화학순환



5.1. 서론

본 장은 주로 기후 시스템에 대한 주요 생지화학적 되먹임의 중요성 및 이해수준의 평가를 목적으로 그동안 국내에서 추가로 이루어진 연구들을 다루었다. 탄소순환과 기타 생지화학순환의 두 개의 절로 나누었던 지난 보고서와 달리 「한국 기후위기 평가보고서 2025」에서는 탄소순환에 대해서 관측 및 모델링에 대한 내용을 추가로 정리하였고, 다양한 기후 시스템에서의 탄소순환, 그리고 메탄에 대한 내용을 따로 분리하였다. 더 나아가 미래에서의 탄소순환을 다루고자 각 내용을 분리하여 독립된 절로 구성하였다.

5.2. 탄소 관측 및 모델링

지구대기감시소와 서울·수도권을 중심으로 대기 중 탄소 농도, 기주평균 농도, 플렉스를 정밀하게 관측하며, CO₂ 농도는 고정 및 이동 관측을 통해 측정되고 있다(견고한 동의). 탄소 및 메탄 관측 위성은 시공간 해상도에 따라 대규모 또는 소규모 배출원 감시에 유용하며, GHGSat 등 고해상도 위성은 점 배출원의 배출량 추정에 특히 효과적이다(견고한 동의).

국내에서는 안면도, 고산, 울릉도, 독도를 포함한 지구대기 감시소에서 배경대기를 대상으로 탄소 관측이 주로 이루어져 왔다. 인간 및 식생 활동이 활발한 내륙 지역을 대상으로 한 탄소 관측은 2018년 이후 서울 수도권을 중심으로 확대되고 있다. 최근 국내에서는 대기 중 이산화탄소 특성을 파악하기 위해 CO₂ 농도, 기주평균 CO₂ 농도(XCO₂), CO₂ 플렉스를 관측하고 있다.

다부처 온실기체 관측 협의체에서 측정된 CO₂ 농도 자료에 대한 Park et al. (2021)의 분석에 따르면, 서울 수도권 내 관측소는 인근의 인간 활동량과 식생 활동에 따라 CO₂ 농도가 최대 26.9ppm까지 차이를 보였다. 또한, 동일한 지역 내에서도 측정 고도에 따라 CO₂ 농도가 최대 19.9ppm까지 차이가 발생한 것으로 나타났다(Park et al., 2022). 이는 국내 내륙 지역에서 대기 중 CO₂ 농도의 변동성이 매우 크며, 다양한 지역을 대상으로 한 CO₂ 농도 관측소 구축의 필요성을 강조한다.

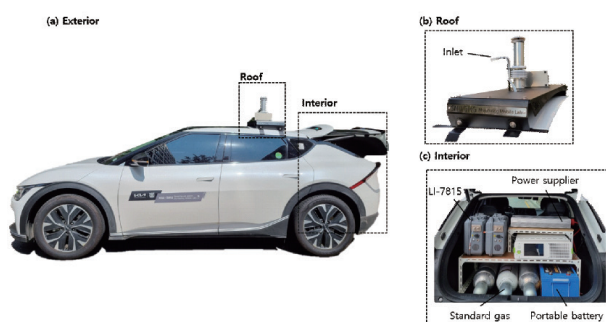


그림 5.1 CO₂ 농도 이동 관측 시스템 (a) 외부, (b) 상부, (c) 내부 사진(Park et al., 2023b).

기주평균 CO₂ 농도(XCO₂)는 CO₂ 농도 관측과 비교하여 관측 반경이 크기 때문에, 넓은 지역을 대표하는 CO₂ 농도 측정이 가능하다. 현재 국내에서는 EM27/SUN 분광기를 활용한 내륙 지역의 XCO₂ 측정이 2020년부터 이루어지고 있다(Gisi et al., 2012).

서울 수도권 내에는 국립기상과학원이 관리하는 총 13개의 플렉스 타워가 설치되어 있다. 국립기상과학원의 도시 플렉스 타워는 2015년부터 2017년 사이에 단계적으로 구축되었다. 이 타워들은 상업, 구도심 주거, 신도심 주거, 도심 식생지 등 다양한 지면 특성을 반영한 위치에 설치되어 있다.

Park et al. (2022)에서는 국립기상과학원의 플렉스 타워 중 9개의 관측소 자료를 활용하여 각 도심 지면 특성별

CO₂ 배출 및 흡수 특성을 평가하였다. 연구에 따르면, 서울 수도권의 CO₂ 플렉스는 해안가 인근 송도 관측소에서 최소 1.09kgCm⁻²yr⁻¹, 구도심 주거지역인 성남 관측소에서 최대 16.28kgCm⁻²yr⁻¹에 이르며, 지역별로 큰 차이를 보였다.

탄소순환을 이해함에 있어 이산화탄소 및 메탄의 시공간 분포를 파악하는 것이 중요하다. 이를 위해 전지구적 지상 관측 네트워크가 운영되고 있으나 지리적으로 편중되어 있고 지표면고도에서의 정보만을 제공한다는 한계점으로 인해 위성 관측의 필요성이 대두되었다. 이에 2009년 발사된 일본의 GOSAT 위성을 필두로 미국의 OCO-2 (2014), OCO-3 (2019), 중국의 Tansat (2016), 유럽의 Sentinel-5P (2017), 일본의 GOSAT-2 (2018) 등 전세계적으로 다양한 탄소 관측 위성들이 발사되어 운영되고 있다. 이들 위성들은 공통적으로 지구로부터 반사된 단파적외선 파장대의 복사 에너지를 높은 분광해상도의 센서를 이용하여 관측함으로써 온실기체에 대한 정보를 얻는다.

탄소 플렉스를 산정하는 방법에는 크게 상향식(bottom-up) 방법과 하향식(top-down) 방법이 있다. 상향식 방법은 주로 활동자료 기반 데이터(화석연료 소비, 산업 활동, 교통, 농업 등) 또는 토지 이용 및 토지 피복 데이터를 사용하여 탄소 배출량 및 흡수량 플렉스를 산정한다. 하향식 방법은 지상, 항공, 위성 등에서 얻은 대기 중 탄소 농도 및 대기 수송 모형을 사용하여 플렉스를 역산출하며, 대표적으로 대기 인버스 모델링이 포함된다. 인버스 모델링을 통해 상향식 방법으로 산정된 플렉스 자료를 독립적으로 검증할 수 있으며, 실제값에 가까운 관측값을 사용함에 따라 기존의 플렉스 자료의 불확실성을 줄일 수 있다.

5.3. 기후 시스템에서의 탄소순환

국내 산림의 탄소 순환 연구는 개체목, 임분, 경관, 국가 차원에서 이루어졌으며, 국가산림자원조사(NFI)에서 다년간 고정 표본점 데이터를 분석해 산림 바이오매스량과 탄소 수지에 관한 연구가 발전하고 있다(견고한 등의).

국내 산림의 탄소 순환에 대한 연구는 개체목, 임분, 경관 그리고 국가 등의 다양한 범위에서 수행되었으며, 특히 국가 산림자원조사(NFI, National Forest Inventory)에서 고정 표본점을 대상으로 제5차(2006~2010년), 제6차(2011~2015년), 제7차(2016~2020년)를 비교하는 연구들과 제5차 NFI에서 수행된 연륜생장 자료를 분석하는 연구들을 통해 산림 바이오매스량에 대한 연구가 고도화 되고 있으며, LiDAR, 에디공분산 등의 첨단기기화, 인공지능과 같은 IT 기술에 힘입어 바이오매스량, 탄소수지 및 모형에 대한 연구의 정확성이 증가하고 있다.

「한국 기후변화 평가보고서 2014」와 「한국 기후변화 평가 보고서 2020」에서는 농경지 토양탄소에 대한 연구결과가 독립된 장으로 다루어지지 않았다. 이들 보고서에서는 「농업생태계 탄소순환」이라는 장에서 농경생태계의 이산화탄소와 메탄 플렉스 관측을 통한 탄소수지를 다루었다. 즉, 연간 탄소플렉스 관측을 통해 농업생태계가 온실기체의 흡수원인지 배출원인지를 평가하는 주제에 집중했다고 할 수 있다. 하지만 「한국 기후위기 평가보고서 2025」에서는 농경지 토양탄소를 별도의 장으로 나누어 자세히 기술하고자 한다. 이는 전지구 탄소 순환에 있어서 육상생태계의 가장 큰 저장고로서 토양탄소의 중요성에 대한 인식이 매우 커졌기 때문이다(그림 5.2).

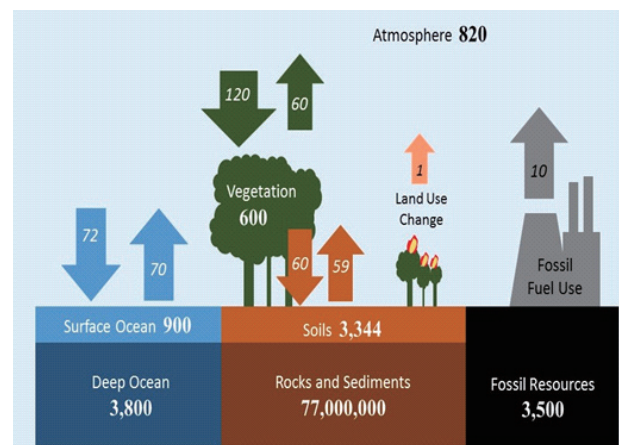


그림 5.2 전지구 탄소 저장고 및 흐름(Covitt et al., 2020).

담수생태계는 하천과 호소를 포함하며, 이동 방향에 따라 수평적(lateral) 이동량과 수직적(vertical) 이동량으로 나눌 수

있고, 수평적 이동량은 탄소유출량으로, 수직적 이동량은 하천 표면으로부터 위쪽 대기로 이동하는 탄소량(gas evasion)과 아래쪽 하천 바닥으로 퇴적되는 탄소량으로 구분할 수 있다(오능환, 2016). 담수생태계 탄소는 성상에 따라 액체상(용존), 고체상(입자성), 기체상으로 나눌 수 있고, 각각을 다시 유기탄소와 무기탄소로 나눌 수 있다. 따라서, 담수생태계로부터 이동하는 탄소화합물을 용존유기탄소(dissolved organic carbon: DOC), 용존무기탄소(dissolved inorganic carbon: DIC), 입자성유기탄소(particulate organic carbon: POC), 입자성무기탄소(particulate inorganic carbon: PIC), 기체 중에서는 농도가 상대적으로 높은 CO₂와 CH₄로 구분한다.

5.4. 메탄 흡수배출

한국의 산업 및 폐기물 부문에서 발생하는 메탄 배출량은 도시 메탄 배출에서 중요한 기여를 하며, 그 모니터링과 관리는 온실기체 감축의 핵심 과제로 부각되고 있다(견고한 동의).

국내 산업 부문의 메탄 배출은 석유화학 산업 시설을 포함한, 석유 및 천연가스를 연료로 사용하는 산업 시설의 불완전 연소와 누출, 도시가스 운송망을 포함한 산업단지 내외의 운송수단으로 천연가스를 연료로 하는 차량 및 선박의 이용 중에 발생하며, 메탄 누출의 정도는 연료 사용량과 시설의 노후와 정도에 비례하는 것으로 보고되고 있다.

폐기물 매립지는 주요 메탄 배출원 중 하나로, 농업과 화석 연료 사용으로 배출량 다음으로 세 번째로 많은 양으로, 전 세계 인위적 메탄 배출량 중 폐기물 매립에 의한 배출량이 약 19%를 차지한다(Saunois et al., 2024). 국내의 경우 국가 온실가스 인벤토리에 따르면 고형 폐기물 매립에 의한 메탄 배출량은 2021년 기준 7,529.3GgCO₂eq로 전체 배출량 중 가장 많은 27%를 차지하고 있다(국가온실기체 센터, 2024). 따라서 효과적인 온실기체 감축을 위해서는 매립지에서의 메탄 발생을 이해하고 이를 관리의 필요성을 시사한다.

5.5. 질소순환

질소순환과 인간 활동의 영향을 다루며, 아산화질소 배출을 중심으로 농경지, 습지, 산림 등의 배출 현황과 온실기체 인벤토리 개선 노력을 소개하였다. 질소 비료 사용 등 인위적 활동이 수생태계 부영양화와 대기 오염을 초래하고 아산화질소 배출을 증가시켜 기후변화에 기여하고 있다(견고한 동의).

「한국 기후변화 평가보고서 2014」와 「한국 기후변화 평가보고서 2020」에서는 전지구 질소순환과 인간 활동이 이에 미치는 영향을 서술하고 국내 관련 연구 결과를 요약하였다. 국내 연구는 질소순환 과정에서 발생하는 주요 온실기체인 아산화질소에 초점을 맞춰 소개하였다. 국내 논, 밭, 습지, 산림 토양에서 배출되는 아산화질소 국내 관측 결과를 소개하였으며, 이를 기반으로 한 국가 온실가스 인벤토리 개선 노력에 대해 서술하였다. 또한 한강 유역에서의 아산화질소 배출 관측 결과를 사례로 소개하며 하천, 호소 등 수계에서 배출되는 아산화질소의 추가 관측의 필요성을 강조하였다.

5.6. 미래 탄소

해양 및 육지는 향후 대기 중 이산화탄소 농도 증가에 따라 지속적으로 탄소를 흡수할 것으로 예상된다. 시나리오에 따라 해양과 육지의 탄소 흡수량은 다르게 예측되며, 특히 SSP5-8.5 시나리오에서 탄소 흡수량이 최고치에 도달할 것으로 보인다. 육지는 온난화로 인한 생장 계절 변화, 물 사용 효율성 향상, 이산화탄소 비료 효과 등의 이유로 탄소 흡수가 증가할 수 있지만, 극단적 기상현상과 모델 간 차이로 인해 예측에는 불확실성이 크다. 동아시아와 한국의 경우에도 탄소 흡수 증가가 예상된다(중간적 동의).

기후변화에 관한 정부 간 협의체의 6차 평가보고서에

따르면, 지구시스템모형 결과는 대기 중 이산화탄소 농도가 증가될수록 해양 및 육지 탄소 흡수는 계속 커질 것으로 전망되며 이는 높은 신뢰도를 갖는다. 육지와 해양의 탄소 흡수량을 비교해 보면, 모형 평균값 관점에서는 큰 차이가 없으며 대기 중 이산화탄소 농도가 증가할수록 그 추세를 따라 흡수량도 비슷하게 증가한다. 즉, 21세기 동안 육지와 해양 모두 지속적인 흡수원의 역할을 할 것으로 기대된다. 구체적으로는 Shared Socioeconomic Pathway (SSP)1-2.6 시나리오의 경우 2100년에 해양에 의한 탄소흡수량이 $0.6 \pm 0.2 \text{ GtCyr}^{-1}$ 로 감소하게 되지만, SSP5-8.5 시나리오의 경우 2080년에 $5.4 \pm 0.4 \text{ GtCyr}^{-1}$ 로 최댓값을 갖는다. 육지 탄소흡수량은 $0.4 \pm 1.0 \text{ GtCyr}^{-1}$ 로 감소하게 되지만, SSP5-8.5 시나리오의 경우 $5.6 \pm 3.7 \text{ GtCyr}^{-1}$ 로 최댓값을 갖는다.

제 6 장 구름과 에어로졸



6.1. 서론

2020년 이후 국내 구름 관측 분야 연구는 기상항공기, 구름레이더, 위성 등 다양한 관측 수단을 활용해 구름 특성을 분석한 연구가 증가하였고, 최근에는 국립기상과학원이 한국형 구름물리실험챔버를 완공하고 운영을 시작함에 따라, 에어로졸-구름 미세물리 과정 관측 및 모델링 연구가 확대되고 있는 상황이다. 또한 의도적으로 에어로졸-구름을 상호작용시키는 기상조절실험(인공강우 및 강설) 연구가 활발하게 진행중에 있다. 한편 기후복사 측면에서의 에어로졸 중요성이 부각됨에 따라 배경대기지역(고산, 안면도)에서의 직접 관측뿐만 아니라 집중 장기 관측에 기반하여 에어로졸의 광산란 및 광흡수 특성 분석 연구는 지속적으로 증가하고 있고, 특히 검댕과 갈색탄소의 광흡수 기여도에 대한 연구들이 눈에 띄게 증가하였다.

이번 장에서는 한반도 주변 에어로졸과 구름 관련한 2020년 이후 연구결과와 에어로졸-구름 상호작용 그리고 나아가 강수에 미치는 영향 등의 다양한 연구결과 및 향후 전망을 정리하였다.

6.2. 구름

구름 관측 및 수치모의에 관한 연구는 국내외 다양한 관측자료와 실험장비 발전에 따라 정량적 분석 기반을 확장하고 있다. 항공기, 드론, 위성, 구름레이더, 구름물리실험챔버 등 다양한 플랫폼을 활용한 정밀 관측이 수행되었으며, 이를 통해 구름의 미세물리 및 열역학적 특성, 입자 성장과 혼합 과정에 대한 이해가 심화되었다(견고한 동의). 수치모형 기반 구름 모의 연구에서는 미세물리 과정의 모수화 개선과 관측 기반 검증을 통해 신뢰도 향상에 기여하고 있다(중간적 동의).

국내외 항공기 기반 집중 관측 캠페인을 통해 열대 권운 내 작은 빙정의 복사 특성 영향, 언 구름방울 및 부착물의 단일 산란 특성, 혼합층 내 비균질 혼합 등의 핵심 주제가 규명되었다. 특히 2018년 평창에서 수행된 ICE-POP 국제 공동 관측 캠페인은 동해안 강설 구름의 열역학 구조, 바람 및 지형에 따른 눈 입자 성장 기작, 강설량 예측 정확도 향상을 위한 자료 제공 측면에서 중대한 기여를 하였다. 2017년 다목적 기상항공기 나라호 도입 이후 인공증우(설) 실험이 본격화되었고, 무인항공기, 드론, 로켓 등을 활용하는 기상 조절 실험 기법도 개발되었다. 2022년 국립기상과학원이 구축한 한국형 구름물리실험챔버(K-CPEC)는 통제된 조건에서의 실험 기반 연구를 가능하게 하며, 구름 미세물리 연구의 핵심 기반으로 주목된다.

구름레이더를 이용한 구름 특성 분석, 융해고도 기반 열역학 구조 추정, 위성 관측 기반 야간 하층운 탐지 및 구름 분류, CNN (Convolutional Neural Network)을 활용한 전운량 추정 등의 관측 기술도 고도화되었다. 위성 자료 기반 인공 증우 적합 구름 판별과 다중 자료 활용 위성 융합 분석

기법은 구름 물리 특성의 정량적 파악에 기여하고 있다.

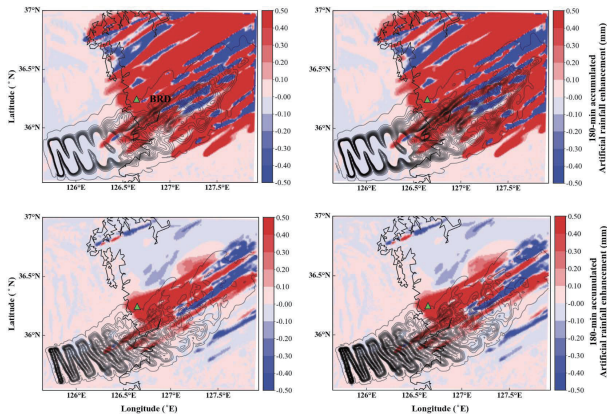


그림 6.1 CaCl₂를 구름씨 뿌리기 물질로 사용한 인공증우 실험 모의의 증우량 공간분포. 구름씨 뿌리기 물질의 양을 고정하고 지속시간을 (a) 2배, (b) 3배 증가시킨 경우와 지속시간을 고정하고 양을 (c) 2배, (d) 3배 증가시킨 경우(강채연 등, 2023).

수치모형 기반 연구에서는 라그랑지안 구름 모형 및 LES 기반 미세물리 모의 고도화를 통해 구름 입자 성장, 자동변환, 결착 등의 핵심 물리과정을 정교하게 모사하였으며, WRF 기반 구름미세물리 모수화 방안 개선을 통해 고체 유형 대기수상의 수농도 예산 및 싸락눈의 밀도 예산이 가능해졌다. 또한, 해무와 적운 등 다양한 구름 유형을 대상으로 신뢰도 높은 모의 결과가 제시되었으며, 인공강우 실험 설계를 위한 씨뿌리기 조건의 민감도 분석과 구름 반응 특성에 대한 정량적 평가도 수행되었다.

6.3. 에어로졸

국내 배경대기지역인 안면도와 고산에서 관측된 에어로졸의 산란계수, 흡수계수, 수농도는 다른 전지구 배경대기지역과 비교하여 상대적으로 높은 수준을 나타냈다(견고한 동의). 한반도의 연평균 에어로졸 광학적 두께는 점진적인 감소 경향을 보였으며, 이러한 경향성은 지상에서 측정된 PM_{2.5} 및 PM₁₀ 농도 감소 추세와 일관성을 보였다(견고한 동의). 황사 예측 모델은 상당한 정확도 개선을 이루었으나, 특정 토양 유형에 대한 과대 모의 현상이 여전히 해결 과제로 남아있다(중간적 동의). 위성 관측 자료의 동화 기법 적용과 인공지능 기반 예측 알고리즘 개발 등의 연구를 통해 황사 및 대기질 모의의 예측 정확도가 현저하게 향상되었다(중간적 동의).

배경대기지역과 도심지역에서의 집중 관측을 통해 에어로졸의 계절적 변동성, 배출원, 농도 황사와 미세먼지 사례의 발생 메커니즘에 대한 이해가 향상되었으며, 관측기반 에어로졸 연구뿐만 아니라 모델링 기반 배출원 추정과 인공지능 기법을 활용한 예측 성능 향상이 주목할 만한 성과를 보였다.

에어로졸 광학 특성 연구에서는 검댕뿐만 아니라 바이오매스 연소에서 기원한 갈색탄소의 광흡수 중요성이 과학적으로 부각되었다. 안면도, 제주 고산과 같은 국내 배경대기 지역에서 측정된 에어로졸 광산란 계수와 광흡수 계수는 다른 전지구 배경대기지역보다 상대적으로 높은 수치를 나타냈으나, 유럽과 북미지역과 달리 통계적으로 유의미한 수준의 뚜렷한 장기 감소 추세는 관찰되지 않았다. 입자생성 및 성장 현상 연구에서는 한반도 주변 지역의 입자 형성이 주로 중국 북부 지역 공기괴가 유입될 때 가장 빈번하게 관측되었으며, COVID-19 봉쇄 기간 동안에는 핵형성 및 축적 모드 입자의 수농도가 감소하는 현상이 과학적으로 규명되었다.

지상 원격 탐사 및 위성 관측 결과는 공통적으로 한반도

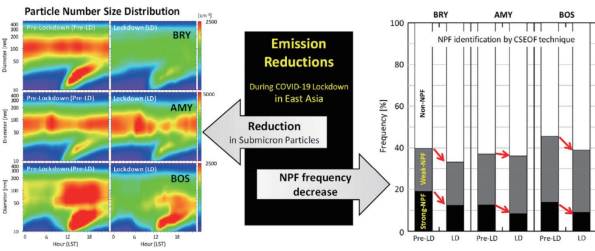


그림 6.2 COVID-19 기간 한반도 배경대기지역(백령도, 안면도, 제주도)에서 관측된 입자생성 및 성장 현상의 감소(Park et al., 2023).

연평균 에어로졸 광학적 두께(AOD)의 지속적 감소 경향을 제시하였으며, 이는 지상에서 측정된 PM_{2.5}와 PM₁₀ 농도의 감소 추세와 일관성을 보였다. 라이다 관측을 통해서도 에어로졸 소산계수의 수직 분포와 대기경계층 고도에 관한 체계적인 연구가 수행되었다.

수치 모델링에 기초한 국내 PM_{2.5} 농도에 대한 배출 부문별 기여도 분석 연구가 활발히 진행되었으며, 역궤적 모델을 활용하여 국외 유입이 국내 PM_{2.5} 농도에 미치는 영향을 정량화한 연구들이 발표되었다. 대기질 예측 정확도 향상을 위해 위성 관측 자료동화 기법과 인공지능 기반 예측 모델 개발이 시도되었으며, 황사 예측 모델의 중국 황사발원지에서의 모의 성능이 현저하게 향상되었다.

6.4. 구름과 에어로졸의 상호작용

최근 에어로졸에 의한 구름 및 강수 변화가 기상 조건의 변화를 유발하여 연무 악화를 유발하거나, 에어로졸 농도 변화에 따른 몬순의 변화를 유발하는 것을 제시하였으나 모두 사례 연구로써 추가 연구가 필요하다(제한적 동의). 반면에 기후변화에 따른 가뭄이나 산불 등의 재해기상이 빈발함에 따라 기상 조절 실험연구가 다양한 측면에서 진행되고 있다. 최근 기상과학원에 설치된 구름챔버 활용과 더불어 시딩물질의 개발이나, 다양한 시딩방법 개선, 시딩 실험 검증을 위한 구름상세모의 기반의 인공강우(설) 모델링 연구 등이 있었다(제한적 동의).

에어로졸-구름 상호작용에 의해 구름 방울 수 농도와 액체수함량이 증가하고, 이는 태양복사량 감소로 이어지면 온도와 경계층 고도를 낮추며 대기 안정도를 강화한다. 이러한 기상조건의 변화는 미세먼지 농도 증가 및 대기오염 악화를 유발한다. 또한, 에어로졸에 의한 태양복사 약화는 아시아 몬순 순환을 변화시키고 강수대를 이동시키거나 강수량을 줄이는 결과를 초래한다. 나아가 고농도 에어로졸은 강수 시간 연장과 강수 강도 변화를 일으키며, 약한 강수를 줄이는 대신 집중 호우 발생 빈도를 증가시켜 재해 기상에도 영향을 미친다. 에어로졸의 농도와 공간적 분포는 한반도에서 상승 기류와 집중 호우 발생을 유발할 수 있으며, 이러한 복합적인 간접효과는 기후와 강수 패턴의 변화에 중요한 역할을 한다. 그러나 이러한 구름-에어로졸 상호작용의 효과는 지역과 기상조건에 따라 민감하게 반응하여 다르게 나타날 수 있다.

이와 같은 의도치 않은 에어로졸-구름 상호작용 이외에 의도적으로 에어로졸-구름-강수 상호작용을 유발하여 다양한 기상변화를 초래하게 되는 데, 대표적인 것이 바로 기상조절실험이다. 2020년 이후 기상조절 실험 및 연구결과들이 크게 증가하였다.

6.5. 복사강제력과 유효복사강제력

흡수성 에어로졸의 복사강제력에 대한 최근 연구는 검은탄소, 갈색탄소, 광물성 분진 등 흡수성 에어로졸이 지표 냉각과 대기 가열을 통해 복사수지에 영향을 미치며, 전지구 및 지역 기후변화에 기여함을 일관되게 보고하고 있다. 에어로졸 복사강제력은 광학적 특성, 혼합 상태, 입자 크기 및 성분에 따라 달라지며, 복사효율은 지역-계절별로 상이한 양상을 보인다(중간적 동의).

관측 기반 연구에서는 AERONET, 라이다, 위성 자료와 결합한 복사전달모형을 활용해 황사, 산불, 도시 연무 등 다양한 기원의 에어로졸 복사강제력이 정량화되었다.

혼합형 에어로졸은 단일 성분보다 더 높은 강제력을 유발하며, 흡수성 에어로졸은 자외선 영역에서도 강한 복사 효과를 보여 광화학 반응에 영향을 미치는 것으로 나타났다. 특히 대기 상층과 하층에서의 복사 효과 차이는 지역별 에너지 수지 구조 차이를 유발하는 주요 원인으로 작용한다.

수치모형 기반 연구에서는 에어로졸 복사강제력의 시공간 변동성이 분석되었다. 분진은 봄·여름철 대기 상층에서 양의 복사강제력을 통해 가열 효과를, 강한 흡수 특성을 지닌 검댕은 가을·겨울철 중층에서 복사효율 증가를 유도하였다. 운량 조건은 복사효과 증폭 또는 감쇠 요인으로 작용하며, 구름-에어로졸 간 비선형 상호작용에 대한 연구도 병행되고 있다. 흡습도나 에어로졸의 물리·화학적 변화 역시 복사효과의 방향성과 강도에 영향을 미치는 것으로 확인되었다.

모형 상호비교 프로젝트에서는 동아시아 지역의 복사강제력과 대기질·기후에 미치는 영향을 종합 분석하고 있으며, 흡수성 에어로졸의 증가는 지표 온도 저하, 경계층 높이 감소, 풍속 약화, 몬순 순환 저해 등 기후변동성의 주요 요인으로 평가된다. 그러나 에어로졸의 간접효과에 대한 정량 평가는 여전히 높은 불확실성을 가지며, 수치모형 결과를 검증할 수 있는 고정밀 관측 기반 비교 연구는 부족하다. 이에 따라 향후에는 장기 연속 관측과 고해상도 모형을 통합한 다학제적 분석 체계 구축이 요구된다.

6.6. 강수변화의 과정

에어로졸 증가에 의한 복사효과는 지표면 온도를 감소시키는 반면에 대기 상층 온도는 증가시켜 대기경계층 높이를 낮춘다. 그리고 대류 구름의 시작 및 발달을 지연시키거나 억제시킬 수 있으며, 에어로졸 미세물리적 효과는 주로 층운형 구름의 강수는 억제하고, 대류형 구름은 활성화시켜 강한 강수를 유발할 수 있다(중간적 동의).

에어로졸의 직간접 복사효과에 따른 강수 변화는 물순환 및 몬순에 영향을 주어 대기순환이나 수렴대 및 강수 구역을 변화시킬 수 있다(제한적 동의).

고농도 에어로졸에 의한 구름 및 강수 변화와, 그에 따른 안정한 기상조건(혼합고 저하와 안정도 증가)으로 인한 연무의 악화 현상은 일부 사례에서 확인되었지만, 에어로졸-구름-강수 상호작용의 비선형성과 프로세스 간의 복잡성으로 인해 보다 많은 사례들에 대한 검토가 필요하다. 그리고 기후변화에 따른 가뭄이나 산불 등의 재해기상이 빈발함에 따라 의도적인 에어로졸-구름-강수 상호작용이라고 할 수 있는 기상조절 실험연구가 다양한 측면에서 진행되고 있다. 구름챔버 실험과 더불어 시딩물질의 개발, 다양한 시딩기술 개선, 구름미세물리 모수화 기반의 인공강우(설) 모델링 연구 등도 수행되고 있다.

미세물리 측면 뿐만 아니라 거시적이고 역학적 측면에서 에어로졸의 직접적인 복사효과나 간접 복사효과(에어로졸-구름 상호작용)에 의한 냉각으로 인해 강수량이 감소하면서 몬순이 약화되고 강수대가 이동하는 등의 대기 순환에도 영향을 줄 수 있다는 결과들도 보고되고 있다.

마지막으로, 국내에 관측 항공기와 구름 챔버가 설치되어 도입기 단계에 있으나, 현재 전문가들에 의한 기술 축적이 이루어진 만큼, 머지않아 국내에서도 구름물리 챔버와 관측 항공기를 기반으로 한 기초 구름물리 연구가 본격적으로 활성화될 것으로 기대된다.

제 7 장 인위적 및 자연적 복사강제력



7.1. 서론

인간 활동과 자연적인 원인에 의한 대기 조성의 변화는 지구복사에너지 수지의 변화를 일으키며, 기후시스템 내의 다양한 피드백을 통해 기후변화를 유발하는 근원이다. 복사강제력(Radiative Forcing, RF)은 자연적·인위적 요인에 의해 대기 중 농도가 증가한 온실기체나 에어로졸 등에 의해 발생하는 지구 복사에너지 균형의 변화를 정량화하기 위하여 사용된다. 이 장에서는 한반도를 중심으로 한 동아시아 지역의 대기 조성 변화에 따른 복사강제력을 인위적 요인과 자연적 요인으로 나누어 간략히 요약하였다. 한반도 및 동아시아 지역에서의 인위적·자연적 복사강제력 산정 연구 자료의 한계로 복사강제력의 불확실성은 정량적으로 제시하기가 어려운 실정이기에 전 지구에 대비하여 정성적으로 기술하였다.

7.2. 대류권 오존

한반도를 포함한 동아시아 지역에서는 기온 증가 및 전구물질 배출의 변화로 인해 지표면 오존 농도가 지속해서 증가하고 있다(견고한 동의).

대류권 오존(O_3)은 질소 산화물(NO_x)과 휘발성 유기화합물(VOCs) 등의 전구물질, 그리고 기상 조건 등의 영향을 받아 생성되며, 짧은 대기 수명과 강한 온난화 효과를 가지는 단기체류 기후변화 유발물질(SLCP)로 분류된다. 오존은 지역적 기후변화와 생태계에 민감하게 반응하며, 농작물 피해와 식량 안보에도 영향을 준다. 최근 남한의 지표면 오존 농도는 2012년 전국 평균 0.025ppm에서 2021년 0.032ppm으로 뚜렷한 증가 추세를 보인다. 오존 평균 농도의

증가와 함께 고농도 오존 현상도 증가 추세를 보인다. 남한에서 오존 주의보(0.12ppm 이상) 발령 일수는 2010년 25일에서 2021년 67일, 2022년 63일로 증가했으며, 오존 주의보 발령 횟수 역시 2010년 83회에서 2021년 400회, 2022년 406회로 약 5배 가까이 증가하였다.

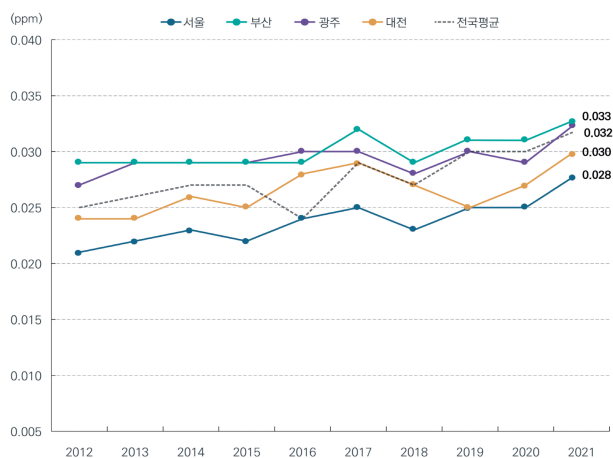


그림 7.1 2012년부터 2021년까지 우리나라의 연평균 오존 농도 변화 추이(환경부, 2023).

지표면 오존 평균 농도는 계절과 지역에 따라 큰 차이를 나타내는 특성을 가진다. 오존 생성은 햇빛이 강하고 기온이 높으며 상대습도가 낮고 바람이 약한 조건에서 가장 활발하므로, 남한의 경우 대체로 장마가 시작되기 전인 초여름(5~6월)에 오존 농도가 최고치를 기록하는 경우가 많다. 반대로 일사량이 약한 겨울철이나 강수량이 잦은 여름철에는 상대적으로 낮은 농도를 보인다. 지역적으로는 오존 전구물질 배출원이 밀집한 도심보다 교외나 배경지역에서 오존 농도가 높게 나타나는데, 이는 도심에서 배출되는 NO 가 오존과 반응하여 오존을 소모하는 NO_x 적정(NO_x titration) 효과 때문이며, 이로 인해 도심에서는 낮은 오존이 관측된다.

남한에서 최근 오존 농도 증가의 주요한 원인으로는 기상 요인과 인위적 배출 요인이 복합적으로 작용한 결과로 분석된다. 최근 기후변화로 인한 기온 상승과 강한 일사 조건이

복합적으로 작용하여 오존 생성에 유리한 환경이 조성되고 있다(Lee et al., 2024). 또한 중국과 남한의 배출량 변화 역시 남한 오존 농도 증가에 중요하게 작용하였는데, 중국으로부터의 직접적인 오존 유입과 더불어 VOC 제한 상태(VOC-limited regime)에서 국내 NOx 배출량 감소가 수도권 봄철 오존 농도 증가에 기여함을 제시하였다(Colombi et al., 2023). 따라서 오존 관리를 위해서는 NOx와 VOCs 등의 국내외 전구물질뿐만 아니라 기상 변화 영향에 관한 체계적인 연구가 요구된다.

7.3. 인위적 복사강제력

한반도에서 관측된 이산화탄소와 메탄의 농도는 전지구 평균 관측농도보다 약 5~8ppm과 100ppb 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).

한반도에서 관측된 이산화탄소와 메탄 농도는 전지구 평균보다 각각 6~8ppm, 80~102ppb 높지만, 유사한 증가 추세를 보이고 있다. 아산화질소는 매년 0.7~0.9ppb 증가하며, 전지구 평균보다 1.12ppb 높게 관측되었다. 이러한 온실기체로 인한 복사강제력은 전지구 수준과 유사하거나 더 높을 것으로 추정된다.

한반도의 오존전량은 1990년대보다 2000년대에 약 5DU 증가했다. 2023년 서울 지역의 평균 오존전량은 324.4DU로, 3월에 최대(361.4DU), 10월에 최소(289.8DU)를 기록하며 연평균 기준 22%의 변동 폭을 보였다. 지역적 차이는 있으나, 지표면 오존과 대기 기주의 오존 전량이 뚜렷하게 증가하는 추세로 오존의 복사강제력이 지속적으로 증가할 것으로 예상된다.

동아시아에서 중국과 한국을 중심으로 미세먼지 문제

해결 노력이 이어지면서 대기 중 에어로졸 농도가 감소하고, 그에 따른 복사강제력의 영향도 약화되고 있다. 최근 연구는 에어로졸 유형에 더 주목하고 있으며, 지표 부근에서는 입자 유형과 관계없이 음의 복사강제력(냉각효과)이 나타나지만, 대기상한(TOA)에서는 복사흡수성이 강한 에어로졸이 존재할 경우 양의 복사강제력으로 전환될 수 있음을 확인했다. 다만 연구 방법론에 따라 정량적 수치에 차이가 있어 더 정밀한 측정이 필요하다. 구름복사 강제력에 관한 국내 연구는 매우 부족하므로 이 분야에 더 많은 관심과 심층 연구가 요구된다.

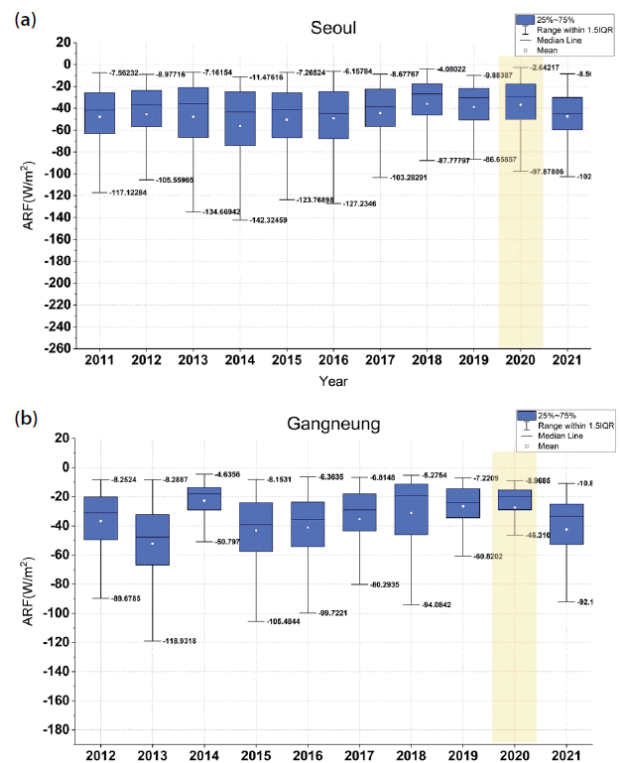


그림 7.2 서울(a) 및 강릉(b)에서 추정된 지표 에어로졸 복사강제력 값의 연간 변동성 비교 결과 (Pyo and Lee, 2022).

7.4. 자연적 복사강제력

자연적 복사강제력 중, 태양 활동에 의한 복사강제력은 단기와 장기 기간 모두 유의미하지 않은 것으로 추정되었다(견고한 동의).

1980년부터 2021년까지의 태양복사의 경향은 $-0.004 \pm 0.004 \text{ Wm}^{-2} \text{ yr}^{-1}$ 로 추정하며, 단기의 복사강제력은 유의미하지 않은 것으로 평가되었다(Montillet et al., 2022). 1700년 이후의 태양 활동에 의한 복사강제력은 $-0.13\text{--}0.07 \text{ Wm}^{-2}$ 으로 태양복사강제력의 추정치는 인위적인 활동에 의한 복사강제력 변화에 비해 그 변화가 유의미하지 않은 것으로 분석되었다(Lockwood and Ball, 2020).

화산활동에 의한 복사강제력에 대해 산업화 전후의 비교를 수행하지 않으며, 특정 화산 사례가 발생한 기간을 중심으로 사례별 복사강제력을 추정한다. 2014~2022년 동안의 화산 활동 복사강제력은 -0.18 Wm^{-2} 로 나타났으며, Pinatubo 화산에 의한 영향으로 화산활동에 의한 복사강제력이 매우 강했던 1990년대의 40% 수준인 것으로 분석하였다(Yu et al., 2023). 다만, 화산활동을 통해 배출된 수증기와 황산염 입자의 총질량 추정 차이에 따른 의존성이 있어 여전히 높은 불확실도가 존재한다.

7.5. 배출량 메트릭스

배출량 메트릭스는 기후변화 유발 물질의 영향을 정량적으로 비교하기 위한 지표이다. 국내의 경우 전 세계적으로 과거부터 널리 사용되어 오던 지표인 100년 기준의 지구 온난화지수(GWP-100)를 중심으로 관련된 연구가 진행되고 있다. 특히, 한국표준연구원에서는 온실기체의 복사 측정 기술을 개선하여 지표를 모르는 온실기체의 GWP-100을 추정하거나 기준 온실기체의 GWP-100의 값을 정교화할 수 있는 국제 표준 절차를 제안하기도 하는 등 배출량 메트릭스 산정에 국제적으로 기여하였다. 그러나 전반적으로 국내의 배출량 메트릭스 연구는 미미한 수준이다.

한편 국제적으로 최근 연구 동향은 기존 메트릭스의 한계를 보완하기 위해 기후 민감도, 탄소 순환 피드백 등을 반영한 새로운 개념과 메트릭스를 개발하고 있다. 특히 복사강제력과 온도 변화뿐만 아니라, 강수량과 해수면 상승 등 다양한 물리적 변화를 고려한 지표들이 등장했다. 또한 각 물질의 정확한 복사 특성 및 대기 중 잔류시간의 재평가가 진행되었으며, CO_2 와 CH_4 , N_2O 등 주요 온실기체의 유효 복사 효율(ERF) 계산이 크게 개선되었다.

탄소 순환 반응 및 간접적 기여 효과의 이해도 증진되어, 비 CO_2 온실기체에 의한 간접적 CO_2 배출이 메트릭스 산정에 포함되기 시작하였다. 또한 SLGHG(단기 체류 온실기체)와 LLGHG(장기 체류 온실기체)의 배출 효과 차이를 명확히 하는 단계적 배출 개념을 적용한 메트릭스(CGTP, GWP)가 제안되었다. 이러한 메트릭스는 시간 지평선에 따른 왜곡을 줄이고 배출 변화와 온난화 효과의 관계를 명확히 할 수 있다.

파리 협정에서의 ‘넷제로(net zero)’ 배출 정의에 있어 배출량 메트릭의 선택이 중요해졌으며, 선택된 메트릭이 향후 온도 변화 예측 및 정책적 형평성에 큰 영향을 준다. 최근 연구는 net zero 달성 이후 온도 안정화를 위한 최적의 메트릭 선택을 탐구하고 있으며, 특히 CGTP 및 GWP 등의 배출을 기반 메트릭이 현실적인 온난화 추세와 더 밀접한 연관성을 보이는 것으로 나타났다. 따라서 메트릭 선택의 중요성과 이에 따른 민감도 평가의 필요성이 강조되고 있다.

제 8 장 기후모델 평가



8.1. 서론

기후변화는 인류 생존과 번영에 심각한 위협이 되고 있으며, 과학적 예측정보를 활용한 효율적 대응이 요구된다. 기후 모델은 과거와 현재의 기후를 재현하고 미래를 예측하는 도구지만, 수치적 불안전성과 해상도 한계로 인해 불확실성을 내포한다. 동아시아 지역은 몬순 영향이 뚜렷하고, 인구밀도와 온실기체 배출량이 높아 인간활동에 따른 기후변동성이 크다. 집중호우, 폭염, 태풍 등 극한기후현상이 빈번히 발생하며, 기후변화에 따라 그 특성이 변하고 있다. 따라서 미래 기후 전망의 신뢰성을 확보하기 위해 현재 기후에 대한 기후모델의 모의 성능 평가가 필요하다. 특히 극한현상과 몬순 시스템에 대한 재현 능력, 대류허용모델의 모의 성능 검증이 중요하다. 8장에서는 IPCC 6차 보고서 기반 SSP 시나리오를 활용해 전지구 및 지역기후모델의 현재 기후 모의 성능을 분석한다. 또한 극한 기후현상과 관련된 모델 성능을 종합적으로 평가한다.

8.2. 전지구기후모델

전지구기후모델의 현재기후 모의 성능은 모델마다 편차는 존재하지만 대체로 우수하게 나타났고, 기존 (CMIP5)에 비하여 대체로 개선된 성능을 보였다 (견고한 동의).

전지구기후모델(Global Climate Models, GCMs)의 현재 기후 모의 성능을 평가한다. CMIP5 모델을 중심으로 평가한 기존과 달리 IPCC 6차 평가보고서에 참여한 CMIP6 모델 기반 연구를 중심으로 다룬다. 국립기상과학원과 기상청은 K-ACE 모델을 개발하여 지표면온도와 기압면 변수 등에서

관측과 높은 일치도를 보이며 우수한 모의 성능을 입증했다 (Lee et al., 2020). K-ACE와 UKESM1을 앙상블 평균한 NIMS-KMA CMIP6 모델은 CMIP5 모델 대비 향상된 성능을 보였으며, 미래 기후 예측의 불확실성을 줄이는 데 기여할 것으로 평가되었다. 또한 극한기후지수 모의에서는 일부 과소 및 과대모의가 나타났으나, 대체로 신뢰할 수 있는 결과를 보였다. KIOST-ESM 모델도 SST 및 열대 지역 변동성 모의에서 개선된 성능을 보였다(Pak et al., 2021). 고해상도 CESM 모델은 남한 지역 극한 강수 모의에서 관측자료와 높은 일치도를 보이며, 고해상도 모델의 강점이 확인되었다. CMIP6 모델은 폭염 모의 성능에서도 CMIP5 대비 향상된 모습을 보였고, 동아시아 지역의 극한기온과 강수 지수에 대해서도 전반적으로 개선된 재현성을 나타냈다.

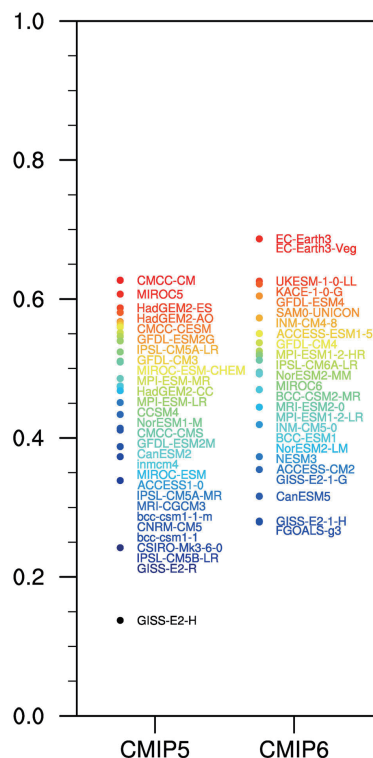


그림 8.1 CMIP5와 CMIP6 Total Ranking의 분포 (Kim et al., 2020).

다만, 여전히 여름철 강수 과소모의, 특정 지역의 편차 문제 등이 존재하며, 극한 현상에 대한 예측력 향상을 위해 추가적인 해상도 증대와 물리과정 개선이 여전히 요구된다.

8.3. 지역기후모델 상세화

고해상도 지역기후모델을 이용한 상세화를 통해 작은 규모의 동아시아 기후 현상 모의를 향상시킬 수 있다(견고한 동의).

지역기후모델(RCM)의 중요성과 성능 평가한다. 기후변화의 영향은 지역별로 다르게 나타나기 때문에, 전구기후모델(GCM)만으로는 복잡한 지형과 해양 경계를 가진 한반도와 같은 지역의 세밀한 기후 특성을 충분히 반영하기 어렵다. 전구기후모델은 대개 100km 이상의 해상도를 가지지만, 지역기후모델은 수십 km에서 수 km까지 고해상도 예측이 가능하여 세밀한 기상현상, 특히 산악 지형이나 해안선 주변 기후 변동성을 보다 정확하게 모의할 수 있다. 이는 집중호우, 폭염, 태풍과 같은 극한기후현상 예측에 특히 중요하며, 재난 대비와 리스크 관리에도 필수적이다.

세계기후연구프로그램(WCRP) 산하 CORDEX (Coordinated Regional Climate Downscaling Experiment) 프로젝트는 이러한 지역기후 상세화를 목표로 다양한 지역에 대해 고해상도 기후 예측 자료를 생산하고 있으며, 한국은 CORDEX-East Asia에 참여하고 있다. CORDEX 1단계에서는 50km 수평해상도로, 2단계에서는 25km 해상도로 상세화가 진행되었고, 수 km 해상도의 대류허용모델 실험도 이루어지고 있다.

정책 수립과 대응전략 수립에 필수적 요인 중 하나인 상세화 결과의 신뢰도 분석을 위한 검증을 현재 기후의 관측 자료 등과 비교 분석하였다. 과거 관측자료와 비교를 통해 지역기후모델의 성능을 평가한 결과 높은 해상도와 상세한 지형 조건의 활용으로 인하여 한반도와 동아시아 지역의 복잡한 기후를 전구지구모델에 비하여 개선할 수 있다는 부가가치(added value)를 생산할 수 있다는 것을 확인하였다

(Kim et al., 2021; Seo et al., 2023).

이러한 고해상도 지역기후모델을 이용한 상세화는 향후 재생에너지, 농업, 수자원 관리 등 다양한 분야에 과학적 근거를 제공할 것으로 기대된다.

8.4. 고해상도 대류허용모델

수 km 수평해상도의 대류허용모델은 한반도의 극한 호우 현상을 현실적으로 모의할 수 있다(중간적 동의).

「한국 기후변화 평가보고서 2020」에서는 주로 수십 km 해상도의 지역기후모델을 기반으로 한 평가가 이루어졌으나, 이러한 해상도는 대규모 대기 흐름을 모의하는 데는 적합해도 국지적 강수, 대류현상과 같은 세밀한 기상현상 모의에는 한계가 있었다. 이를 극복하기 위해 모델의 수평 해상도를 4km 이하로 설정하여 적은 모수화 없이 깊은 대류를 직접 모의할 수 있는 고해상도 대류허용모델(Convection Permitting Model, CPM) 연구가 활발히 진행되고 있다.

Lee et al. (2011)은 남한을 대상으로 다양한 해상도(27, 9, 3, 1km) 설정을 통해 민감도 실험을 수행했고, 해상도가 높을수록 강수 모의 성능이 개선됨을 보였다. 서가영과 안중배(2020)는 WRF 모델을 이용해 적은 모수화 사용 여부에 따른 여름철 강수 모의 성능을 비교하였고, 적은 모수화를 사용하지 않은 대류허용모델이 평균 및 극한 강수 모두에서 더 나은 결과를 나타냈음을 확인했다.

이처럼 고해상도 대류허용모델은 기존 지역기후모델 대비 국지적 강수, 극한 강수, 집중호우 재현에서 현저한 성능 개선을 보이며, 향후 기후변화 영향 연구, 재난 대응 전략 수립 등에 중요한 역할을 할 것으로 기대된다.

8.5. 극한 현상 모의

전지구기후모델, 지역기후모델, 대류허용모델 각각의 평균 및 극한 기후 모의 성능을 평가한 결과, 모든 모델에서 기존에 비해 성능이 고도화되어 보다 신뢰할 수 있는 기후변화 전망 산출이 가능함이 확인되었다. 다만, 여전히 불확실성 요인이 완전히 제거되지는 않았다(견고한 동의).

IPCC 제6차 평가보고서는 지구온난화가 가속화되면서 폭염, 홍수, 가뭄, 태풍 등의 극한 현상이 전 세계적으로 더욱 빈번하고 강력해질 것이라고 경고하였다. 이러한 극한현상은 인명 피해뿐 아니라 경제적, 사회적 손실을 유발하기 때문에, 기후모델을 통한 신뢰성 있는 극한현상 전망이 필요하며, 이를 위해 현재 기후에 대한 극한현상 모의 성능 평가가 필수적이다.

다양한 모델 실험을 통해 동아시아 및 한반도에서의 극한 현상 모의 능력이 평가되었다. 예를 들어, 변재영 등(2022)은 CORDEX-East Asia 2단계 프로젝트의 HadGEM3-RA 지역 기후모델을 활용하여 동아시아 여름철 강수에 대한 모의 성능을 검토하였다. 이 모델은 전지구모델 UKESM을 경계장으로 사용하였으며, 수평 해상도는 25km로 설정되었다. 분석 결과는 관측 자료(APHRODITE 등)와 비교적 높은 일치도를 보이며 신뢰할 수 있는 수준의 강수 모의를 수행함을 보여주었다.

극한 폭염에 대한 미래 전망도 주요 주제로 다뤄졌다. Kim et al. (2023)은 CORDEX-East Asia Phase 2의 다중 지역기후 모델-전지구기후모델 앙상블을 활용하여 21세기 말까지의 동아시아 폭염 변화를 분석하였다. 연구 결과, 고탄소 시나리오(RCP8.5 및 SSP5-8.5)에서 폭염의 강도와 지속시간이 모두 크게 증가할 것으로 예측되었으며, 평균 지속시간은 2~3주, 최대 지속기간은 22일 이상, 심지어 9월까지 폭염이 지속될 가능성도 제기되었다. 특히 극한 폭염 발생 비율은 과거 5% 수준에서 SSP5-8.5 시나리오에서는 약 35%까지 증가할 수 있으며, 이는 에너지 수요 증가와 취약계층 보호 문제 등 사회적 대응을 요구한다.

극한 강수의 발생 특성에 대한 분석도 이루어졌다. Seo and Ahn (2023)은 남한 지역 여름철 극한강수 이벤트를 군집화하고, WRF 모델을 통해 적운 모수화 사용 여부에 따른 강수 재현 능력을 비교하였다. 적운 모수화(CU_ON)를 사용한 실험은 지속 시간이 긴 약한 강수에서는 성능이 우수했으나, 짧은 시간 내 강도 높은 강수에서는 과소모의 되었다. 이는 Kain-Fritsch 적운 모수화 방안이 전반적으로 약한 강수를 자주 발생시켜 온도·습도 증가를 억제하고 깊은 대류 발생을 제한하는 경향이 있기 때문으로 분석되었다. 반면, 적운 모수화를 배제한 대류허용모델(CU_OFF)은 강도 높은 단시간 강수 재현에서 더 뛰어난 성능을 나타냈다.

이와 같은 평가들은 극한현상의 지역적 특성과 메커니즘에 따라 모델 구조 및 물리 과정의 선택이 결과에 큰 영향을 미칠 수 있음을 시사한다. 특히 대류허용모델 및 고해상도 지역기후모델의 도입은 극한현상 재현의 정밀도를 높이는 데 필수적인 요소로 강조되며, 향후 기후변화 대응과 리스크 관리, 재난 예방에 있어 중요한 역할을 할 것으로 기대된다.

제 9 장 기후변화의 탐지 및 한반도 기상재해의 변화



9.1 서론

이 장에서는 한반도를 포함한 동아시아 지역에서 발생한 장기간의 기후변화 추세와 한반도 기상재해 현상들의 변화를 평가하였다. 동아시아 지역에 대한 장기간의 기후변화 추세 및 극한지수의 변화에 대한 최근 제언 및 적용된 방법론과 해당 연구결과들을 정리하였으며, 열대 및 북극기원 기후 변동성과 여름과 겨울몬순이 한반도에 미치는 영향과 그 변화를 평가하였다. 지난 2020년 보고서와 마찬가지로 한반도에서 발생한 최근 기상재해 현상에 대한 변동성 및 원인규명 연구들을 기온관련 재해(폭염, 한파)와 강수관련 재해(호우, 태풍, 가뭄)의 순서로 정리하였다.

9.2. 동아시아와 한반도 기온과 강수변화

동아시아 극한 고온 지수의 뚜렷한 증가 추세와 한반도 극한 고온 발생 확률의 증가는 인위적 온실 기체 증가 때문이다(견고한 동의). 동아시아 극한 강수에 대한 탐지가 시도되었고, 온실기체 강제력이 주요 원인으로 식별되었다(제한적 동의).

최근 기후변화 탐지 및 원인규명 방법론은 기존에 연구 방법을 개선하는 방향으로 진행되고 있으며, 인공지능을 이용하여 대기의 비선형적 변화를 고려하여 인위적 강제력 탐지를 시도하는 연구들이 증가하는 추세이다.

관측에서 극한 고온 관련 지수는 증가하는 반면 극한 저온 관련 지수는 감소하는 경향이 뚜렷하게 나타났다(견고한 동의). 이러한 추세 변화는 인간 활동에 따른 온실기체 증가에 의해 설명될 수 있다(견고한 동의). 동아시아를 포함한 넓은 지역에서는 극한 강수량에 대한 탐지가 시도되었고, 온실

기체 강제력이 주요 원인으로 식별되었으나(제한적 동의), 동아시아 지역에 대한 구체적인 연구는 여전히 도전 과제로 남아있다.

한반도에서 발생한 극한 기온 현상의 원인규명은 '확률 기반' 접근법을 활용하여 주로 연구되었다. 한반도에서 관측된 극한 기온 현상은 인위적 강제력에 의해 발생했을 가능성이 높은 것으로 평가되었다(견고한 동의). 극한 강수에 대한 연구는 '스토리라인 기반' 접근법을 통해 주로 수행되었다. 중국과 일본에서 발생한 극한 호우 사례에서는 역학 과정보다 지구 온난화로 인한 열역학적 기여가 더 큰 것으로 나타났다(제한적 동의).

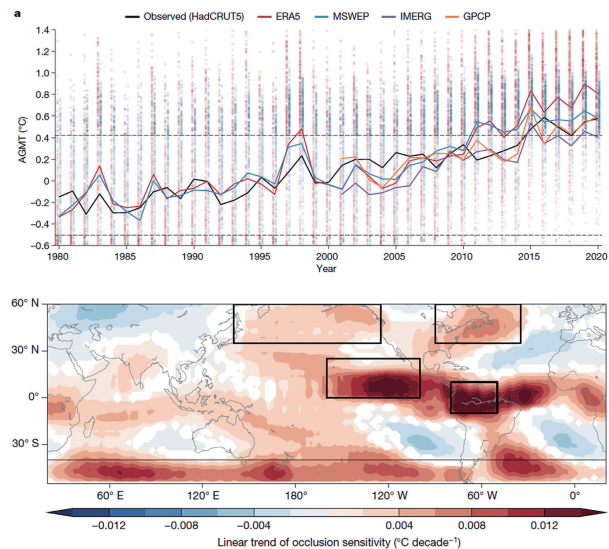


그림 9.1 (위) 1980년부터 2020년까지 관측된 연 평균 전 지구 기온 편차(검정색)와 위성 및 재분석 일 강수량으로부터 딥러닝 방법으로 추정한 결과와의 비교 시계열. (아래) 10일 고주파 필터된 일 강수량 (ERA5와 MSWEP 평균)에 대한 전지구 기온 오클루전 민감도의 선형 추세(Ham et al., 2023).

9.3. 기후변동성 변화와 한반도

엘니뇨의 한반도 기후 영향은 계절내에서도 매우 다양하게 나타나며(건고한 동의), 열대 지역 강수, 아열대 지역의 해수면온도, 북대서양과 인도양의 변동성과 연관되어 있다(중간적 동의). 동아시아 전역에 걸쳐 집중호우가 뚜렷하게 증가하고 있으며(중간적 동의), 동아시아 여름몬순의 장기 변동성과 연동되어 한반도 7-8월 강수 증가가 크게 나타났다(중간적 동의). 한반도를 포함한 동아시아 지역에서 한파와 극한 고온이 교차하는 계절내 변동성이 증가하고 있다(중간적 동의).

엘니뇨의 한반도 기후에 미치는 영향은 엘니뇨의 위상에 따라 계절내에서도 매우 다양하게 나타난다(건고한 동의). 열대 지역 강수, 아열대 지역의 해수면온도, 북대서양과 인도양의 변동성이 이러한 엘니뇨의 다양한 한반도 영향과 연관되어 있음이 제시되었다(중간적 동의).

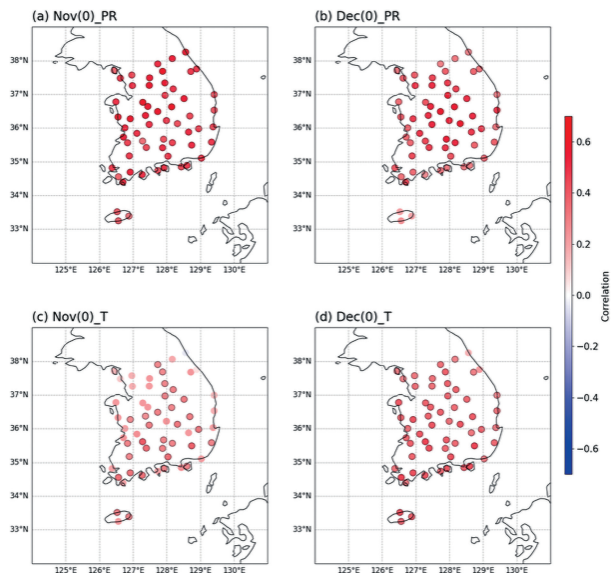


그림 9.2 Nino3 지수와 한반도 11월, 12월 온도, 강수와의 상관관계(1980~2023년). 90% 유의수준에서 유의미한 관련성은 닫힌원으로 표시.

동아시아 여름몬순의 경년 변동은 기존에 알려진 엘니뇨-남방진동, 필리핀해의 대류활동을 포함하는 북서태평양 몬순,

북대서양 진동, 인도양 해수면온도 변화, 유라시아 눈덮임 이외에도 열대 대서양 해수면 온도, 아시아 대륙 저기압 및 상층 제트기류, 남아시아 몬순 변동성의 영향을 받는 것으로 밝혀졌다. 수십년 주기 변동의 경우 태평양 수십 년 주기 변동과 서태평양 온수역의 장기 변화 외에, 대서양 수십년 진동과 인도양-서태평양 지역 해수면 온도의 장기 변화가 영향을 줄 수 있음이 밝혀졌다. 동아시아 여름몬순의 장기 변동성과 연동되어 우리나라 여름철 강수량은 1970년 이후 꾸준히 증가하고 있으며 7월과 8월 강수 증가가 크게 나타났다(중간적 동의). 특히 집중호우의 증가는 동아시아 전역에 걸쳐 뚜렷한 양상을 보이고 있다(중간적 동의).

동아시아 겨울몬순은 지구온난화에 따른 장기적인 약화 추세와 더불어 뚜렷한 수십 년 주기의 변동성을 보이며, 이에 따라 한반도를 포함한 동아시아 지역의 한파 발생도 변동하였다(중간적 동의). 동아시아 겨울몬순의 강도는 2000년대에 급강화 이후 2010년대 중반부터 다시 약화하는 형태를 보였으며, 이에 따라 동아시아 지역에 극한 고온 현상이 자주 나타났으며 한랭과 고온이 잇달아 나타나는 계절내 변동성이 증가하였다(중간적 동의).

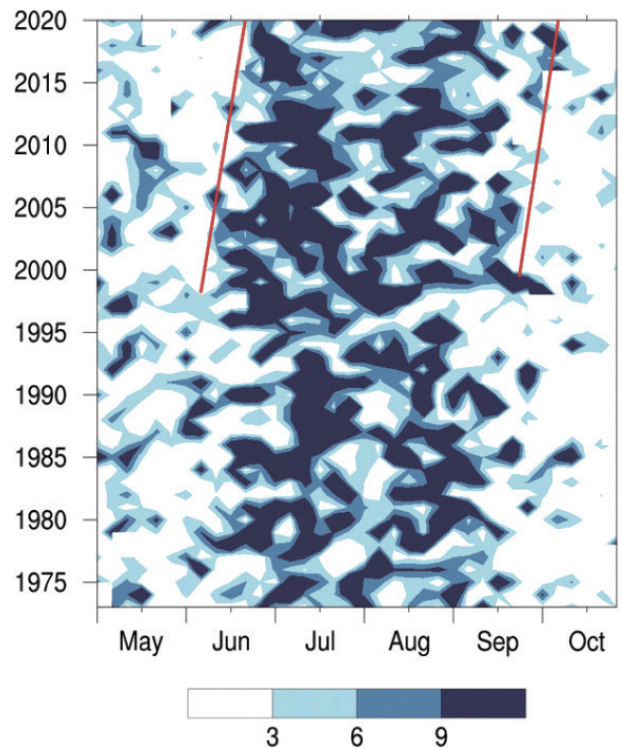


그림 9.3 한반도 56개 관측소 평균 5일 평균 강수량(서경환 등, 2022).

9.4. 한반도 기상재해의 변화

한반도 폭염과 열대야 발생 빈도와 강도가 더욱 뚜렷해졌으며(견고한 동의), 한파 발생 빈도는 감소하는 경향을 보인다(중간적 동의). 여름철 집중호우의 증가 경향이 뚜렷해졌으며 (중간적 동의), 호우의 경년변동성이 크게 증가하였다(제한적 동의). 북서태평양 해양상층의 온난화(견고한 동의)에 따라, 태풍 최대강도 위도가 북쪽으로 이동하고 동아시아 해안지역의 태풍 극한강수가 증가하였다(중간적 동의). 봄, 가을, 겨울철의 습도 변동성 증가로 가뭄 발생의 위험성이 높아졌고, 여름철 폭염형 급성가뭄이 뚜렷하게 증가하였다(중간적 동의).

우리나라에서 폭염과 열대야의 발생 빈도와 강도의 증가가 더욱 뚜렷해지고 있으며, 이것은 전지구적으로 보고되는 증가 경향성과 일치한다. 한반도 전역에서 폭염 발생일수는 통계적으로 유의한 수준으로 증가하는 경향을 뚜렷하게 보인다(견고한 동의). 야간 기온의 증가로 인한 열대야 일수의 증가는 더욱 뚜렷해지고 있으며 폭염 발생빈도 증가보다 더 급격하다(견고한 동의). 열대야 일수 증가는 온실기체와 대기 중 수증기 증가로 인하여 그 원인이 설명된다.

한반도의 한파 발생은 과거에 비해 통계적으로 유의하게 감소하는 경향을 보이며(중간적 동의), 이것은 전지구적인 경향성과 부합된다. 일부 연구들은 한반도 겨울철 기온의 변동성이 온난화 경향에 따라 시간규모가 길어지고 있으며, 이에 따라 한파의 발생빈도와 재현주기가 달라질 수 있음을 제시하고 있다(제한적 동의).

한반도 전역에서 여름철 집중호우의 강도 및 빈도가 증가하는 경향이 최근 들어 더욱 뚜렷해졌으며(중간적 동의), 이와 함께 호우의 경년 변동성 또한 크게 증가해(제한적 동의) 집중호우에 대한 대비가 더욱 어려워지고 있다. 지역 기후모형 실험을 통해 21세기 한반도의 집중호우의 강도와 빈도가 대류 불안정으로 인해 증가할 것이라고 보고하고 있다.

북서태평양의 태풍활동의 최근 감소 경향은 해수면온도

수십년 변동성의 영향이 지배적이며 외부강제력의 영향은 제한적으로 밝혀졌다(중간적 동의). 온실기체 증가에 의한 동중국해를 포함한 북서태평양 해양상층의 온난화(견고한 동의)에 따라, 태풍 최대강도 위도가 북쪽으로 이동하고 한반도를 포함한 동아시아 해안지역의 태풍 극한강수가 증가하였다(중간적 동의).

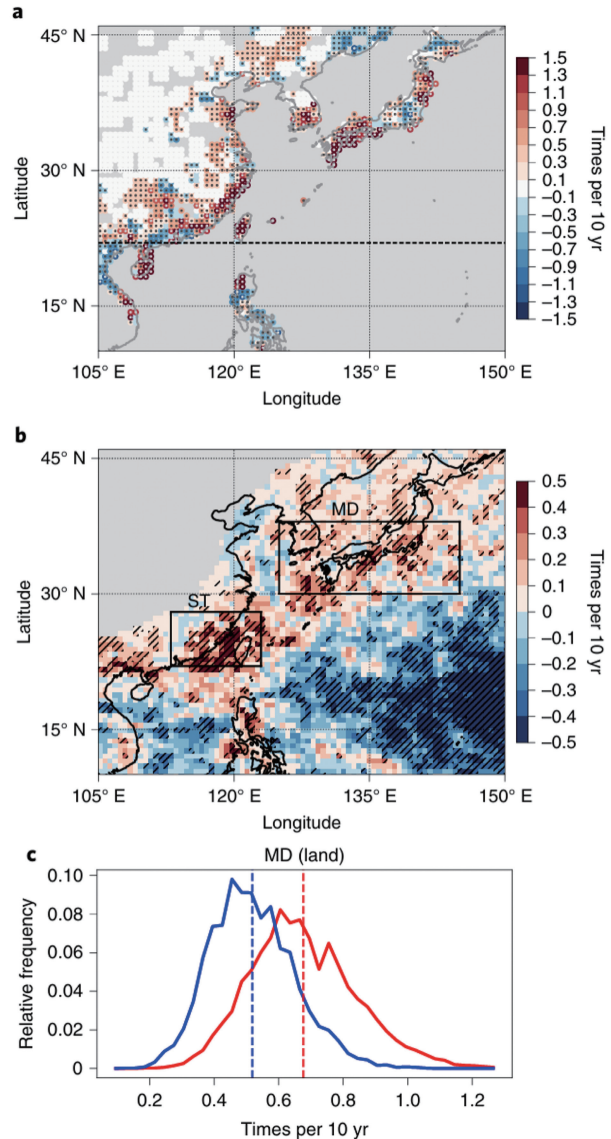


그림 9.4 (a) 관측된 태풍 극한강수 빈도에 대한 최근(1986~2015)과 과거 기간(1961~1985) 차이. (b) 모든 강제력과 자연 강제력 실험(기간: 1990~2010년)에 나타난 태풍 극한강수 빈도 차이. (c) 중위도(MD) 지역에 대한 태풍 극한강수 빈도의 상대적인 빈도 분포(파랑: 자연 강제력, 빨강: 모든 강제력 실험) (Utsumi and Kim, 2022).

겨울철에 건조해지는 경향과 봄철과 가을철에 상대습도와 비습의 변동성이 크게 증가하고 있어 가뭄발생의 위험성이 높아지고 있다(중간적 동의). 한반도 지역의 급성가뭄 빈도가 증가하였으며, 특히 여름철 폭염에 의한 증발산 증가로 발생하는 ‘폭염형 급성가뭄’의 발생 증가가 뚜렷하게 나타났다(중간적 동의).

제 10 장 단기 및 장기 기후변화 전망



10.1. 서론

기후변화 시나리오는 산업화 이후 빠르게 진행되고 있는 지구온난화와 관련된 다양한 미래 변화를 예측하고, 그에 대응하기 위한 과학적 근거를 제공한다. 기후변화에 따른 자연재해뿐만 아니라 사회, 환경, 경제 등 여러 분야에 미치는 영향을 평가하고, 국가와 지역 단위에서 효과적인 기후변화 대응 전략을 수립하는 데 핵심적인 역할을 한다.

이 장에서는 IPCC 6차 평가보고서에 참여하는 전구기후 모델과 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. 탄소배출량에 따른 한반도 기후의 미래전망을 평가하였다.

10.2. 대기와 지표

미래 한반도 평균 기온은 단기(2021~2040년)에 1.6~1.8°C 상승하고, 장기(2081~2100년)에는 SSP1-2.6에서 2.3°C, SSP5-8.5에서 7.0°C까지 상승할 전망이다(견고한 동의). 미래 한반도 강수량은 단기적으로 1~7% 증가하며, 장기적으로는 SSP1-2.6에서 6.7%, SSP5-8.5에서 12.6% 증가할 전망이다(견고한 동의). 폭염·열대야는 단기적으로 각각 2배·4배 증가하고 장기적으로는 SSP5-8.5에서 9배·21배까지 증가하며, 한파·서리일수는 단기적으로도 감소하다가 장기적으로는 SSP5-8.5에서 최대 90%까지 감소할 것으로 전망된다. 극한강수는 장기적으로 5일 최대강수량이 SSP1-2.6에서 15%, SSP5-8.5에서 31% 증가하는 등 고탄소 배출 시나리오일수록 극한현상의 변화가 심화될 것으로 예상된다(중간적 동의).

한반도와 동아시아 지역의 단기 기온 전망에서는 온실기체 배출 시나리오에 따른 상승폭이 유사하게 나타난다. 동아시아 평균기온은 SSP1-2.6부터 SSP5-8.5까지 각각 +1.8°C, +2.3°C, +2.6°C, +2.8°C 상승할 것으로 예측되며, 이는 전지구 평균보다 0.5~1.0°C 높은 수치이다. 한반도 평균기온은 1.6°C(±0.1°C)~1.8°C(±0.2°C) 상승하여 1.5°C 온난화 수준을 초과할 전망이다. 지역적으로는 한반도 북부와 중부지역에서 상승폭이 크고(2.4~6.5°C), 제주권(2.2~5.8°C)은 상대적으로 낮을 것으로 예상된다. 또한 계절적으로는 여름철 기온 상승폭(1.4~2.4°C)이 겨울철(1.3~1.8°C)보다 클 것으로 전망된다.

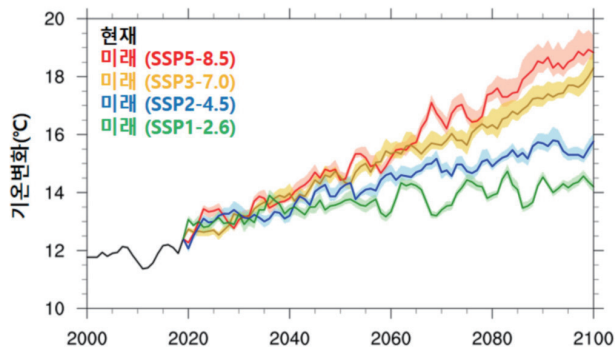


그림 10.1 현재(2000~2019년) 대비 2000~2100년의 우리나라 연평균기온의 변화(°C). 실선은 앙상블 평균값을 의미하며, 음영은 5개 모델 앙상블 범주를 의미함(국립기상과학원, 2022).

장기 전망에서는 온실기체 배출량에 따라 기온 상승폭의 차이가 뚜렷하게 나타났다. 동아시아 지역의 기온은 SSP1-2.6부터 SSP5-8.5까지 각각 +2.4°C, +3.6°C, +5.3°C, +6.2°C 상승할 것으로 예측되었다(김진욱 등, 2022). 한반도에서는 2.3°C(±0.1°C)에서 7.0°C(±0.5°C)까지 상승할 것으로 전망되며, 이는 「한국 기후변화 평가보고서 2020」의 전망치보다 0.5~1.5°C 높은 수치였다. 공간적으로는 북부 지역, 충청권, 그리고 태백산맥과 개마고원 같은 고지대에서 상승폭이 더 클 것으로 예상되었다(허지나 등, 2024). 현재 -12.2~+28.8°C인 일평균기온 범위는 SSP5-8.5에서 -3.9~+38.5°C로 확대되어 30°C 이상 극한 고온 발생 빈도가 급격히 증가할 가능성이 높았다.

한반도 강수량은 단기적으로 SSP1-2.6에서 약 3% 증가, SSP5-8.5에서 약 1% 감소할 것으로 전망되어, 탄소배출량이 평균 강수량에 미치는 영향이 크지 않을 것으로 보였다. 남한 상세 시나리오에서는 SSP1-2.6부터 SSP3-7.0까지 각각 5%, 7%, 6% 증가하고, SSP5-8.5에서는 1% 증가할 것으로 예측되어 동아시아 전체보다 다소 높은 증가폭을 보였다. 공간적으로는 CODEX Phase2를 이용한 남한상세 시나리오의 경우 SSP1-2.6과 SSP5-8.5에서는 한반도 남부 전역의 강수율이 감소하고 관북 지역은 증가하며, SSP2-4.5와 SSP3-7.0에서는 영동지방의 강수율이 감소할 것으로 예상되었다(국립기상과학원, 2022).

장기적으로는 탄소 배출량에 따른 강수량 변화가 뚜렷해져,

21세기 후반(2080~2100년)에는 SSP1-2.6에서 6.7%, SSP2-4.5에서 7.2%, SSP3-7.0에서 10.3%, SSP5-8.5에서 12.6% 증가할 것으로 전망되었다(김진욱 등, 2022). 남한 지역은 SSP1-2.6에서 약 2%, SSP5-8.5에서 약 13% 증가할 것으로 예측되며, 수도권 중심으로 강수량이 증가하고 고탄소 시나리오에서만 충남, 전북, 경상도 내륙 지방에서 감소할 가능성을 보였다. 일강수량 분포에서는 1mm 미만의 약한 강수는 감소하고 40mm 이상의 강한 강수는 증가하여 강수의 양극화가 심화될 것으로 전망되었다. 한반도 강수 증가율은 동아시아 육지 평균(17%)보다 작고, 전지구 육지 평균(7%)보다 높은 수준이었다.

일 최고기온 33°C를 초과하는 날인 폭염의 발생 일수는 단기적으로 현재(8.8일) 대비 8.0~9.7일 증가하여 2배 가량 증가하고, 장기적으로는 저탄소 시나리오(SSP1-2.6)와 고탄소 시나리오(SSP5-8.5) 간 차이가 현저해져 후자에서 최대 9배 까지 증가할 전망이다. 일 최저기온 25°C 초과하는 열대야의 발생일수는 단기적으로 현재(3.2일) 대비 12.3~13.2일로 약 4배 가량 증가하고, 장기적으로는 SSP5-8.5에서 최대 21배 증가하여 여름철 밤 온도 상승이 두드러질 것으로 예상되었다(국립기상과학원, 2022). 지역적으로는 폭염일수는 충청권, 열대야일수는 전라권, 온난야일수는 수도권에서 증가폭이

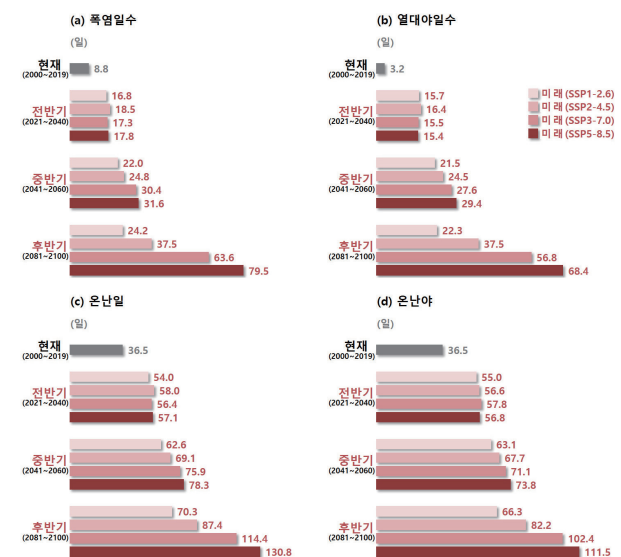


그림 10.2 현재(2000~2019년)와 미래 기간별 우리나라 (a) 폭염일과 (b) 열대야일, (c) 온난일과 (d) 온난야 발생일 변화(국립기상과학원, 2022).

클 것으로 예측되어 지역별 취약성에 차이를 보였다(김진욱 등, 2022).

일 최저기온 -12°C 이하인 한파일수는 단기적으로 현재(10.2일) 대비 0.1~3.2일 감소하고, 장기적으로는 시나리오별 차이가 뚜렷해져 저탄소 시나리오에서 약 50%, 고탄소 시나리오에서는 약 90%까지 감소할 것으로 전망되었다. 일 최저기온 0°C 미만인 서리일의 발생일수는 단기적으로 현재(104.1일) 대비 14.2~18.7일(14~18%) 감소하고, 한랭일수와 한랭야도 단기에는 각각 4~13.8일, 4.6~12.5일 감소할 것으로 예상되었다(국립기상과학원, 2022). 지역적으로는 서리일수가 강원권에서 감소폭이 클 것으로 전망되는데, 이러한 극한 저온 현상의 감소는 겨울철 에너지 소비 감소에 긍정적 영향을 줄 수 있으나, 병해충 월동 증가와 농업 환경 변화에 영향을 미칠 것으로 예상되었다.

극한 강수 현상은 단기전망에서 시나리오별 큰 차이가 없으나, 장기전망에서는 5일 최대 강수량이 SSP1-2.6에서 15%, SSP5-8.5에서 31% 증가하여 탄소 배출량이 높을수록 극한 강수량이 증가할 것으로 전망되었다(국립기상과학원, 2022). 일 강수량 80mm 이상에 해당하는 상위5% 극한 강수일과 호우일수도 저탄소 시나리오에서는 단기와 장기 전망의 변화가 작으나, 고탄소 시나리오에서는 장기적으로 뚜렷하게 증가할 것으로 예상되었다. 100년 재현빈도 강수량은 저탄소 시나리오에서는 전/중/후반기에 31%, 31%, 29%, 고탄소 시나리오에서는 29%, 46%, 53% 증가하여 후반기로 갈수록 시나리오 간 차이가 커질 전망이다.

10.3. 해양과 빙권

온난화로 대마난류의 동해 유입이 증가해 한반도의 온난화가 가속될 전망이다(견고한 동의). 대서양 자오면 순환은 온난화된 기후에서 SSP1-2.6에서 17~36% 감소하고, SSP5-8.5에서는 29~61% 감소할 것으로 예측되었다(견고한 동의). 남극 해빙은 2023년 최저치를 기록했다(제한적 동의). 서남극 빙상은 주로 동역학적 과정에 의해 해수면 상승에 기여하며, 온도 변화에 크게 민감하지 않아 배출 시나리오와 관계없이 해수면 상승 기여도가 지속될 전망이다(견고한 동의). 전지구 평균 해수면은 장기적으로 SSP1-2.6에서 0.47m, SSP2-4.5에서 0.56m, SSP5-8.5에서 0.76m 상승할 것으로 전망되며, 이는 CMIP5 예측보다 2~3cm 높은 수치였다(견고한 동의). 우리나라 해역의 해수면은 SSP1-2.6에서 2100년까지 47cm, SSP5-8.5에서 82cm 상승할 것으로 예측되나, 모델 간 편차가 커서 불확실성이 컸다(제한적 동의).

SSP 시나리오 기반 미래 전망에서 쿠로시오 해류는 지구 온난화에 따라 강화되어 북서태평양에서 북동아시아로의 난류 수송이 증가할 것으로 나타났다. 제로-바람회전응력의 위도가 북상함에 따라 한반도 주변 중위도 지역의 온난화가 가속화될 것이라 전망되었다. 한편, 대서양 자오면 순환(Atlantic Meridional Overturning Circulation, AMOC)은 CMIP6 모델 분석 결과, 현재 기후 대비 2100년까지 SSP1-2.6에서 17~36%, SSP5-8.5에서 29~61% 감소할 것으로 예측되었다(Weijer et al., 2020). 이러한 AMOC 약화는 멕시코 만류의 약 29% 감소와 깊은 서안경계류 강도의 약 47% 감소를 동반하여, 북반구 기후 패턴에 중대한 영향을 미칠 것으로 전망되었다. 또한 고해상도 기후모형에서는 저해상도 모형보다 AMOC 감소가 더 크게 나타나 기후적 영향에도 차이를 보일 수 있다.

기후변화에 따른 해양 생지화학과정의 변화는 기후-피드백을 강화하거나 약화시킬 수 있다. CMIP6 기후모형을 활용한 미래 전망에서 황해 및 동중국해의 식물성 플랑크톤

양이 변화할 것으로 예상되지만, 모델 간 큰 차이를 보였다. 이는 식물성 플랑크톤 성장에 중요한 인산염 모의가 모델 별로 크게 다르기 때문이다. SSP 시나리오에 따른 온난화로 북극해로의 담수유입 증가가 북극해 식물성 플랑크톤 양의 패턴 변화를 유도한다고 보고했다(Park et al., 2023). 황해와 동중국해의 DMS(Dimethyl Sulfide) 플렉스가 현재 기후보다 SSP 시나리오에서 증가할 것으로 전망되었으며, 이는 바람 패턴 변화가 해류 수송량을 증가시켜 식물성 플랑크톤과 DMS 플렉스 증가의 원인이 될 수 있다고 제안했다.

북극 해빙은 정체 양상을 보이는 반면, 남극 해빙은 2023년에 위성 관측 이래 최저 면적(981만km²)을 기록하며 감소가 가속화되고 있다. 남극 해빙은 남극반도와 벨링스하우젠해에서 급속히 감소하는 반면, 아문젠해와 로스해에서는 증가하는 등 지역적 차이를 보이며, 이는 저층대기 기압패턴 변화와 관련이 있었다. 2021~2050년 사이 남극 빙상은 13.1±6.8mm, 그린란드 빙상은 22.9±7.6mm의 해수면 상승에 기여할 것으로 예측되었다. 서남극 빙상은 주로 동역학적 과정에 의해 해수면 상승에 기여하며, 온도 변화에 덜 민감하게 반응하여 배출 시나리오에 관계없이 유사한 기여를 할 것으로 보인다. SSP5-8.5 시나리오에서 2100년까지 북극 해빙은 9월에 거의 사라질 것으로 전망되며, 영구동토층은 현재 대비 최대 81%까지 감소할 가능성이 있다.

우리나라 주변 해역의 해수면은 전 지구 평균보다 빠른 상승 추세를 보이고 있다. 최근 1989년부터 2023년에 해당하는 기간 동안 우리나라 해역 전체의 평균 해수면 상승률은 3.06mmyr⁻¹이며, 해역별 평균 해수면은 동해안은 3.46mmyr⁻¹, 남해안은 2.74mmyr⁻¹, 서해안은 3.20mmyr⁻¹ 상승한 것으로 나타났으며 각 관측지점별로는 울릉도의 변동률이 5.11mmyr⁻¹로 다른 해역보다 상대적으로 높게 나타났다(국립해양조사원, 2024). SSP 시나리오 기반 미래 전망에서는 SSP1-2.6 시나리오에서 2050년까지 20cm, 2100년까지 47cm 상승하고, SSP5-8.5 시나리오에서는 2050년까지 25cm, 2100년까지 82cm 상승할 것으로 예측되었다(국립해양조사원, 2023). 이는 IPCC 제5차 평가보고서의 RCP8.5 시나리오보다 약 9cm 더 높다. 한반도 주변 해수면 온도는 전 지구 평균보다 높은 상승률을 보일 것으로 전망되며, SSP5-8.5에서 동해와 서해는 10년당

0.59°C, 남해는 0.49°C 상승할 것으로 예측되었다.

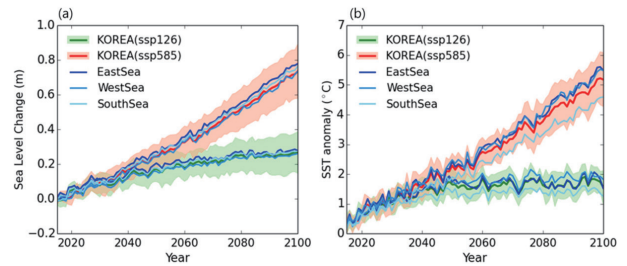


그림 10.3 현재 기후 대비 한반도 평균(SSP1-2.6: 녹색선, SSP5-8.5: 빨간선), 동해(진한 파란선), 서해(파란선), 남해(밝은 파란선)에서의 (a) 해수면 높이와 (b) 해수면 온도의 변화 시계열. 색칠한 부분은 9개의 CMIP6 모델로부터 구해진 5~95% 신뢰구간을 나타낸다(Sung et al., 2021).

정책결정자를 위한 요약서

한국 기후위기 평가보고서 2025

- 기후위기 과학적 근거 -

발 행 인 기상청장

총괄편집 기상청(김현경, 원재광, 손윤석, 임나영)

발 간 일 2025년 9월

주 소 대전 (35208) 대전광역시 서구 청사로 189 정부대전청사 1동 11~14층
서울 (07062) 서울특별시 동작구 여의대방로16길 61

연 락 처 Tel. 042-481-7386 Fax. 044-201-6386

누 리 집 기후정보포털(www.climate.go.kr)

I S B N 979-11-6988-591-1(93450)



본 보고서의 내용 사용시 출처를 표시해야 하며
비영리 목적으로만 이용할 수 있습니다.