

METEOROLOGICAL TECHNOLOGY & POLICY

기상
기술
정책

기상 기술 정책

METEOROLOGICAL TECHNOLOGY & POLICY

2023.12

2023.

12

특집 기후전망·기상조절 기술동향 및 선진국 투자 동향

칼럼 | 기후위기 시대, 더욱 안전한 국민의 나라를 위한 기상청의 역할 |

정책초점 | 신속하게, 정의로운 저탄소사회로 전환을 위한 미래 기후전망의 활용과 제언 |
| IPCC 6차 기후변화 평가보고서 기반 한반도 상세 기후변화 전망 |
| 기상조절기술 현황 및 전망 |
| 구름물리실험: 미래로 전진을 위한 실험실 |

포커스 | 기상선진국 미국의 기상 관련 예산 분석 |

Volume 16, Number 2

33, Seohobuk-ro, Seogwipo-si, Jeju-do, 63568, Korea
TEL. 064-780-6545 | FAX. 064-738-6513
<http://www.kma.go.kr>

기
상
청



『기상기술정책』지는 범정부적인 기상·기후 분야의 정책 수요에 적극적으로 부응하고, 창의적인 기상기술 혁신을 위한 전문적인 연구 조사를 통해 기상·기후업무 관련 분야의 발전에 기여할 목적으로 발간 기획되었습니다.

본 『기상기술정책』지는 기상·기후 분야의 주요 정책적 이슈나 현안에 대하여 집중적으로 논의하고, 이와 관련된 해외 정책동향과 연구 자료를 신속하고 체계적으로 수집하여 제공함으로써 기상 정책입안과 연구개발 전략 수립에 기여하고자 정기적으로 발행되고 있습니다.

본지에 실린 내용은 집필자 자신의 개인 의견이며, 기상청의 공식의견이 아님을 밝힙니다. 본지에 게재된 내용은 출처와 저자를 밝히는 한 부분적으로 발췌 또는 인용될 수 있습니다.

원고모집

『기상기술정책』에서는 기상과 기후분야의 정책이나 기술 혁신과 관련된 원고를 모집하고 있습니다. 뜻있는 분들의 많은 참여를 부탁드립니다. 편집위원회의 심사를 통하여 채택된 원고에 대해서는 소정의 원고료를 지급하고 있습니다.

▶ 원고매수: A4 용지 10매 내외

▶ 원고마감: 수시접수

▶ 보내실 곳 및 문의사항은 발행처를 참고 바랍니다.

☞ 더 자세한 투고방법은 맨 뒷편의 투고요령을 참고바랍니다.

『기상기술정책』편집위원회

발행인: 유희동

편집기획: 국립기상과학원(책임운영기관) 연구기획과

편집위원장: 박영연

편집위원: 박영연, 나득균, 원재광,

변영화, 이용희, 원덕진

편집간사: 박혜숙, 이대근, 김인점

발행처

주소: (63568) 제주특별자치도 서귀포시 서호북로 33

국립기상과학원(책임운영기관)

전화: 064-780-6545 팩스: 064-738-6513

E-mail: dglee7@korea.kr

CONTENTS

특집: 기후전망·기상조절 기술동향 및 선진국 투자 동향

칼럼 03 _ 기후위기 시대, 더욱 안전한 국민의 나라를 위한 기상청의 역할 / 유희동

정책초점 08 _ 신속하게, 정의로운 저탄소사회로 전환을 위한 미래 기후전망의 활용과 제언 / 최영은

23 _ IPCC 6차 기후변화 평가보고서 기반 한반도 상세 기후변화 전망 / 차동현

36 _ 기상조절기술 현황 및 전망 / 김병곤

49 _ 구름물리챔버: 미래로 전진을 위한 실험실 / 엄준식

포커스 68 _ 기상선진국 미국의 기상 관련 예산 분석 / 김득갑

기후위기 시대, 더욱 안전한 국민의 나라를 위한 기상청의 역할



유희동
기상청장

“가엾은 우리 백성들이 무슨 죄가 있단 말인가.
아, 허물은 나에게 있는데 어째서 재앙은 백성들에게 내린단 말인가.”

위는 「조선왕조실록-현종실록」에 1670년 5월 2일 기록된 기사의 일부로서 1670년(경술년)~1671년(신해년)에 있었던 경신대기근을 겪은 군주의 고통과 고뇌, 애민의 마음이 서려 있다. 경신대기근은 15세기부터 19세기 초반까지 북반구의 연평균 기온이 1℃ 낮아진 소빙하기의 발현이 원인인 것으로 알려져 있다. 유럽과 동아시아의 사료들에서 찾아볼 수 있는 과거의 기상이변들은 기상·기후 재난에 대한 과학적 예측·대응 역량을 갖추지 못한 당시 사람들에게 엄청난 피해를 안겼다.

최근 전 지구적으로 기후변화가 급격히 이루어지고 있으며, 우리나라에서도 기후변화의 신호가 관측되고 있다. 2023년 전지구 평균기온이 14.98℃로 산업화 이래 가장 높았던 가운데, 우리나라도 작년 연평균기온이 평년(12.5±0.2)보다 1.2℃ 높은 13.7℃로 역대 1위를 기록하였다. 이는 종전 1위였던 2016년보다도 0.3℃ 높은 값이다. 이 같은 기후변화 상황으로부터 생태계와 기후체계를 보호하고

공공복리를 증진하기 위한 목적으로 지난해 10월, 「기후·기후변화감시 및 예측 등에 관한 법률」이 제정되었다. 기후변화로부터 우리의 소중한 터전을 지키기 위하여 관련 기상업무에 박차를 가해야 할 시점이다.

그동안 전 세계는 산업발달에 따른 도시화와 지구온난화가 맞물린 상황에서 대형 인명·재산 피해를 수차례 겪어 왔다. 과거 대자연의 변동성에 따른 1℃의 변화보다 훨씬 가파르고 급격한 현재의 변화는 우리를 감히 짐작하기도 힘든 미래의 위험기상·기후재해 상황으로 이끌고 있다. 전례 없는 기후변화에 대응하기 위해서는 정책결정자들이 현명한 의사결정을 내려야 하고, 올바른 의사결정을 위해서는 과학적 근거자료가 필요하다.

대표적인 과학적 자료로 다양한 시나리오에 따라 미래기후를 전망하는 기후변화시나리오가 있다. 특히 상세 기후변화시나리오는 온실가스 배출 시나리오를 기반으로 전지구 기후모델 적분과 역학적·통계적 상세화를 거쳐 우리나라에 적합한 고해상도 정보(기온, 강수량, 바람, 습도 등)를 제공하며, 기상청에서 생산·서비스하고 있다. 더 나은 의사결정을 지원하기 위해 향후에는 시나리오 수요자의 가장 큰 요구사항인 예측에 대한 과학적인 근거를 제시하여 신뢰도를 높이고 불확실성을 명확하게 제시할 필요가 있다. 그렇게 생성된 고품질 정보는 기후변화의 양상과 규모를 정확하게 진단함으로써 효율적·효과적인 자원 배분과 대응 역량 강화를 뒷받침할 것이다.

기후변화시나리오가 소극적 개념의 정책 지원 수단이라면, 기상조절은 산불 및 홍수 예방, 수자원 확보, 미세먼지 저감 등에 이바지할 수 있는 적극적인 재해 회피 수단이라 할 수 있다. 미국의 수자원 확보를 위한 'SNOWIE' 실험, 일본의 위험기상 제어 및 조절을 목적으로 한 'Moonshot Goal 8' 프로젝트 등 선진국에서는 빈발하는 위험기상으로 인한 피해를 완화하기 위해 다양한 도전적 시도를 계획하고 있다. 기상청도 수증기가 충분히 존재하는 불안정한 대기에 구름씨앗인 응결핵을

살포하여 비를 내리는 인공강우(설) 기술 개발을 진행해 오고 있다. 체계적인 연구개발을 위해 국내 최초 구름물리실험챔버를 구축하는 등 산불 저감 및 가뭄 해결 지원을 위한 목표를 향해 매진 중이다.

과거 현종 임금의 가슴 아파했던 백성들은 현대에 이르러서는 저개발 국가의 국민들, 그리고 미래를 헤쳐 나갈 다음 세대 아이들로 투영될 수 있다. IPCC 보고서는 우리나라를 포함한 선진국의 온실가스 배출이 전지구적 기후변화의 중요 원인이라고 말한다. 여기에는 과거를 영위했고, 현대를 살아가고 있는 기성세대들에게 분명한 책임이 있을 것이다. 기상청은 경신대기근 시대 현종의 마음을 새기며 기후변화 시대에 대응해 더욱 안전한 국민의 나라를 구축하기 위해 할 수 있는 최선의 노력을 할 것임을 기상인의 한 사람으로서 다짐하고, 후배들에게도 당부하는 바이다.

정책 초점

신속하게, 정의로운 저탄소사회로 전환을 위한 미래 기후전망의 활용과 제언

| 최영은

IPCC 6차 기후변화 평가보고서 기반 한반도 상세 기후변화 전망

| 차동현

기상조절기술 현황 및 전망

| 김병곤

구름물리챔버: 미래로 전진을 위한 실험실

| 엄준식

신속하게, 정의로운 저탄소사회로 전환을 위한 미래 기후전망의 활용과 제언

최영은 건국대학교 교수 yechoi@konkuk.ac.kr

- I. 기후정책과 기준시나리오의 선정
- II. 기후변화시나리오의 필요성과 유형
- III. 최신 미래 기후전망의 활용과 기후영향지표
(Climate Impact Drivers, CIDs)
- IV. 마치며

효율적인 기후정책을 수립하려면 다양한 범위의 미래 기후전망과 기후변화시나리오에 대한 이해가 필요하다. 적응정책은 국가나 지역 단위로 수립하고, 완화정책은 파리협약과 같이 전세계가 협력하여 추진해야 한다. 신속하게, 정의로운 저탄소사회로 전환하려면 기후법안이나 규제와 구조변화가 필요하고, 이를 위한 다양한 미래 기후전망이 제공되어야 한다. ■

“ SSP5-8.5
시나리오는
실효성이 낮다는
주장이 제기됨 ”

I. 기후정책과 기준시나리오의 선정

코페르니쿠스 기후변화 서비스(the Copernicus Climate Change Service; C3S)의 최신 월간보고서(Monthly Climate Bulletin)에 따르면, 2023년 6월부터 11월까지 6개월 연속으로 월평균기온의 최고값이 경신되었다¹⁾. 이로 인해 2023년 북반구의 여름과 가을은 1940년 이후 가장 기온이 높은 계절로 기록되었다. 그 결과로 2023년은 지구기온이 가장 높은 해가 될 것으로 예측된다. 또한, 산업혁명 이전(1850-1900년 평균)보다 일평균 지구지표기온이 1.5°C를 넘는 날이 2023년에 120일 이상 발생했고, 2°C를 초과한 날도 11월에 2일이 나타났다(그림 1). 2023년 현재 적도 태평양에 다소 강력한 엘니뇨가 발달해 있지만, 그 강도가 1997/98과 2015/16년에 비하여 크지 않다. 자연변동성을 고려하더라도 2023년에도 온난화는 계속 되고, 이런 상황을 벗어나는 가장 효율적인 방법은 가능한 빨리 탄소제로에 도달하는 것이다.

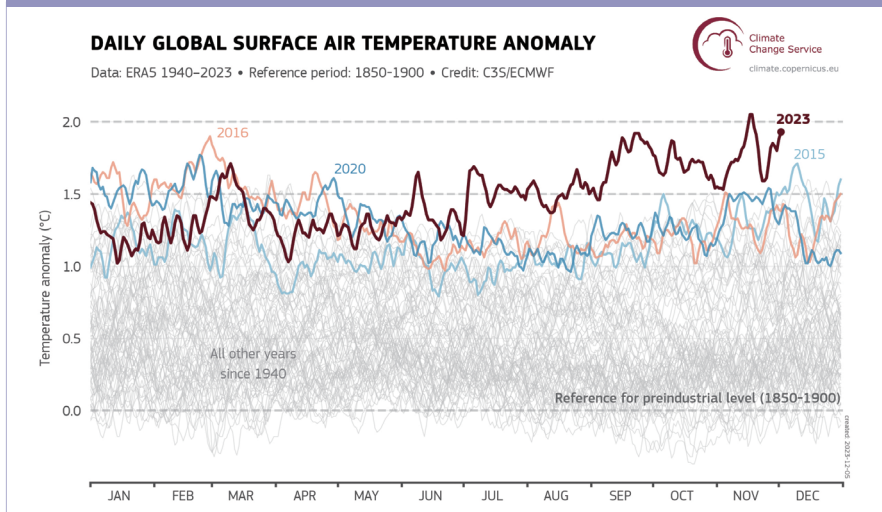
기후정책(climate policy)은 적응정책과 완화정책으로 구분한다. 적응정책은 기후변화의 부정적 영향을 파악하여 그로 인한 피해를 방지하거나 최소화하려는 전략이고, 국가나 지역 단위로 수립한다. 완화정책은 온난화 강도를 낮추기 위해서 온실가스의 배출량을 줄이는 전략으로 파리협약과 같이 전세계가 협력하여 추진해야 한다. 효율적인 기후정책을 수립하려면 다양한 범위의 미래 기후전망 자료와 기후변화시나리오에 대한 이해가 필요하다. 예를 들어, IPCC AR6 시나리오 중에 SSP5-8.5 (Shared Socioeconomic Pathways) 시나리오는 고탄소 배출량 경로로서 2100년에 온난화 강도가 가장 높고, 기준시나리오로 활용된다. 2015년 파리협약 체결로 전세계 기후변화 완화정책이 수립·이행되면서 이산화탄소(CO₂) 배출량이 '매우 높음' 상태인 SSP5-8.5 시나리오는 온난화 강도가 너무 커서 실효성이 낮아 보인다는 주장이 나오고 있다. 기준시나리오를 이산화탄소 배출량이 '높음' 단계인 SSP3-7.0 시나리오로 바꿔야 한다는 의견이 제기되었다. 이는 온난화 강

1) C3C의 ERA5는 1940년부터 기후자료가 존재한다.

“ SSP3-7.0 시나리오는 고배출 에어로졸을 가정하여 설계 ”

도만을 고려하면 타당한 이야기처럼 보일 수 있다. Shiogama et al.(2023)에 따르면, SSP3-7.0 시나리오는 다양성을 확보하기 위해서 다른 시나리오와는 다른 특성을 기반으로 설계되었다. SSP3-7.0 시나리오를 제외한 나머지 SSP 시나리오(SSP1-2.6, SSP2-4.5, SSP5-8.5)와 RCP 시나리오(RCP2.6, RCP4.6, RCP6.0, RCP8.5) 모두는 강력한 대기오염물질의 규제를 적용한다. 하지만, SSP3-7.0 시나리오에서는 에어로졸이 감소하지 않고, 변화가 거의 없거나 소폭 증가하는 관대한 대기질 정책을 가정하고 있다. SSP3-7.0 시나리오는 높은 에어로졸의 농도가 기후에 미치는 영향을 파악할 수 있도록 고배출 에어로졸을 가정하여 설계된 것이다. 또한, SSP3-7.0 시나리오는 대규모 토지이용과 피복의 변화가 기후에 미치는 영향을 이해하는 데에도 도움이 된다. 따라서, 에어로졸과 토지이용의 극한시나리오인 SSP3-7.0 시나리오는 기준시나리오로 활용할 때 유의해야 한다. SSP3-7.0 시나리오에서 온도 상승 폭은 다른 고배출량 시나리오와 같이 높지만, 강수량 변화는 SSP2-4.5 시나리오와 유사하다. 에어로졸의 배출량이 증가하면 온실가스로 인한 강수량의 증가를

[그림 1] 1850-1900년 기준 일평균 지구지표기온(Daily global average surface temperature)의 아노말리 변화. 기온이 가장 높았던 2015년, 2016년, 2020년, 2023년을 분리하여 표시함(<https://climate.copernicus.eu/surface-air-temperature-november-2023>).



상쇄시킨다. 기준시나리오로 SSP3-7.0 시나리오를 사용하려면 SSP5-8.5 시나리오를 함께 분석하여 비교하는 것이 추천된다.

북반구 중위도에 위치한 우리나라는 여름은 열대와 같이 무덥고 습하며, 겨울은 한대와 같이 춥고 건조하다. 지구기온 상승으로 인하여 우리나라 여름은 더 극심하게 더워지고 길어지며 겨울은 온화하고 짧아질 것이다. 한겨울은 여전히 춥지만, 추위의 극한성은 크게 약화될 전망이다. 이와 같은 기후환경의 변화는 사람에게도 위협이 되지만 오랜 시간 한반도를 지켜온 생태계에도 심각한 영향을 미칠 것이다. 여기에서는 기후변화시나리오의 필요성과 유형에 대해서 간략하게 설명하고, 기후위기 적응과 완화정책 수립에 필요한 미래 기후전망의 활용에 대해서 알아보하고자 한다.

“ SSP3-7.0 시나리오를 기준으로 사용하려면 SSP5-8.5 시나리오와 함께 비교·분석 필요 ”

II. 기후변화시나리오의 필요성과 유형

1. 기후변화시나리오의 정의와 필요성

미래 기후전망을 생산하기 위해서는 기후변화시나리오가 필요하다. 좁은 의미의 기후변화시나리오는 온실가스, 에어로졸, 토지이용 변화 등 인위적인 원인으로 발생한 복사강제력 변화를 지구시스템모델(Earth System Models)에 적용하여 산출한 미래 기후전망 정보(기온, 강수량, 바람, 습도 등)이다(기상청 홈페이지). 기후변화시나리오는 협의를 통해 미래 기후전망으로 정의된 것이다. 하지만, 넓은 의미의 기후변화시나리오는 사회경제시나리오, 온실가스와 에어로졸 배출량시나리오, 온실가스 농도시나리오, 기후전망시나리오, 기후변화영향평가시나리오를 포함한다. 또한, 기후변화시나리오는 단순히 미래 기후를 예측하는 것이 아니라 '광범위하게 발생할 수 있는 모든 범위의 미래를 제공하여 신뢰할 수 있는 의사결정을 지원할 수 있어야 한다. 기후변화시나리오는 기후변화로 인해 발생할 수 있는 다양한 부문 의 영향, 취약성을 평가하여 기후정책 수립에 필요한 필수적인 정보이다. 여기에서

“ 우리나라는
고해상도 미래
기후전망이
반드시 필요 ”

는 기후변화시나리오를 미래 기후전망으로 한정하여 사용하였다.

1850년을 기준으로 2100년까지 온도 상승 폭을 파리협약의 목표인 2.0°C와 1.5°C로 제한하기 위해서는 2020년부터 전 세계가 이산화탄소의 배출량을 각각 연 4.0%와 8.0%씩 감축해야 한다. 2020년 팬데믹의 영향으로 2019년 대비 세계 이산화탄소 배출량은 약 5.7% 감소했지만, 2021년에는 다시 4.8% 증가로 반등하였다 (Liu et al., 2022). 현재와 같은 온실가스 저감 노력으로는 파리협약의 1.5°C 제한 목표를 달성하기 어려워 보인다. 대대적으로 대기 중에 온실가스를 제거하는 강력한 음의 배출량 감축이 필요하지만, 갈 길이 멀어 보인다.

초기의 파리협약은 '산업혁명 이후 2100년까지 기온 상승 폭을 2.0°C 이하로 제한'하는 것을 목표로 하였다. 2.0°C 온난화 강도는 식량안정성과 생태계가 적응할 수 있는 시간을 확보하고, 세계 경제사회시스템이 지속가능한 발전을 유지할 수 있는 최소한의 조건으로 설정되었다. 이후 1.5°C 제한으로 하는 새로운 목표가 제시되었는데, 이는 온난화 강도의 완화를 위해 전 세계가 협력해야 가능한 도전이다. 설정된 목표 온도와 다양한 감축 노력에 대한 미래 기후전망 정보를 확보하는 것은 기후정책 수립에 필수적인 요소이다. 특히, 우리나라와 같이 지형이 복잡하고, 다양한 해양의 특성이 나타나는 지역에서는 고해상도의 미래 기후전망이 반드시 필요하다.

2. 기후변화시나리오의 유형

대기 중에 이산화탄소의 농도가 증가하면 복사강제력이 증가하고, 이는 지구온도를 상승시켜서 지역기후에 영향을 미친다. 온실가스의 배출량이 많을수록 지구 온난화 강도(Global Warming Level, GWL)는 강해지며 자연과 사회경제시스템에 대한 부정적 영향도 커지게 될 것이다. IPCC 제6차 평가보고서에 따르면 산업혁명 이후 2015년까지 연평균 지구온도는 약 1.07(0.8~1.3)°C 상승하였지만, 지역 규모에서는 그 양상과 규모가 달라진다. 세계적으로 온난화를 완화하기 위한 다양한 노력들이 행해지고 있지만, 화석연료에 대한 의존도가 높은 현재의 사회경제시스템

“ IPCC 제6차
평가 보고서에
'공통사회경제경로'
시나리오 도입 ”

을 고려할 때 그 전망은 그리 낙관적이지 않다.

IPCC 제6차 평가보고서에서는 RCP 시나리오와 SSP 시나리오를 조합한 최신 시나리오를 사용하고 있다. RCP는 대표농도경로(Representative Concentration Pathways: RCP) 시나리오로 IPCC 제5차 평가보고서에서 사용되었다. RCP2.6, RCP4.5, RCP6.0, RCP8.5 시나리오 등 4개가 감축, 안정화, 고배출량 시나리오로 구분되어 대표시나리오로 선정되었다²⁾. RCP2.6 시나리오는 온실가스 감축정책이 잘 추진되어 2100년에 이산화탄소 농도가 420ppm으로 안정화되어 기온 상승 폭을 1.5℃ 정도로 전망한다. 반면, RCP8.5 시나리오는 적극적인 기후정책의 이행 없이 화석연료의 의존도가 계속 높게 유지된 결과 2100년 이산화탄소 농도가 940ppm까지 증가하고 지구온도는 3.7℃까지 상승하게 된다(van Vuuren et al., 2011).

IPCC 제6차 평가보고서에서는 인위적 온실가스와 에어로졸 배출량, 토지이용의 변화 등을 고려하여 구축한 공통사회경제경로(SSP) 시나리오가 도입되었다. 세계 인구수, 경제 상태, 교육 수준, 도시화 등 다양한 사회경제시스템을 고려하여 미래 온실가스 배출량의 경로를 보다 정교하게 가정하여 5개 배출량시나리오(SSP1, SSP2, SSP3, SSP4, SSP5)가 선정되었다. SSP1 시나리오는 현재 시점에서 지속 가능한 개발이 빠른 속도로 진행되어 저탄소에너지원의 사용 비율이 높은 친환경사회를 전제로 한다. 그 결과, 미래 적응과 온실가스 감축에 필요한 비용 또는 도전이 크지 않다고 가정한다. SSP3 시나리오는 인구수는 증가하지만, 경제성장이 둔화되고 에너지 분야의 기술이 느리게 성장하여 미래 온실가스 감축을 위한 비용이 커진다. 또한, 낮은 인적 투자와 불균등이 심화되어 기후위기 적응을 위한 비용도 커진다고 가정한다. SSP4 시나리오는 주요 선진국에서는 기술 개발로 온실가스 감축 능력이 크지만, 경제성장의 불균등으로 최빈국이나 개발도상국에서는 적응 능력이 낮다고 가정한다. SSP5 시나리오는 높은 경제성장으로 기후위기 적응역량은 높으나, 기후정책의 부재로 미래 온실가스 감축을 위한 노력과 비용이 커진다고 가정

2) RCP 다음에 표시된 숫자는 각 시나리오에서 가정된 온실가스 배출량의 변화에 반응하여 2100년에 도달하게 되는 복사강제력을 의미한다.

“ 각 시나리오
배출량은
사회경제적 발달
단계, 기후변화
완화 노력에 따라
달라진다. ”

한다. SSP2 시나리오는 위에 언급한 4개 시나리오의 중간 사례에 해당된다(Riahl et al., 2017).

복사강제력과 배출량시나리오를 조합하면, SSP1-1.9와 SSP1-2.6 시나리오에서는 재생에너지 기술 발달로 화석연료 사용이 최소화되고 친환경적으로 지속가능한 경제성장을 이룰 것으로 가정한다. 반면에, SSP5-8.5 시나리오에서는 산업기술의 빠른 발전에 중점을 두어 화석연료 사용 비율이 높고 무분별한 개발이 확대될 것으로 가정한다. 온실가스 배출량이 ‘매우 낮음’인 SSP1-1.9 시나리오와 ‘낮음’인 SSP1-2.6 시나리오에서는 이산화탄소 배출량이 2050년경 또는 그 이후에 넷 제로(Net Zero)³⁾에 도달한 후 순 음(-)의 배출량을 달성하는 것으로 가정한다. ‘중간’ 배출량 시나리오인 SSP2-4.5는 이산화탄소 배출량이 21세기 중반까지 현재 수준으로 유지될 것으로 가정한다. 온실가스의 배출량이 ‘높음’인 SSP3-7.0 시나리오와 ‘매우 높음’인 SSP5-8.5 시나리오에서 이산화탄소 배출량은 2100년과 2050년에 각각 현재의 약 2배로 증가할 것으로 전망된다. 각 시나리오의 배출량은 사회경제적 발달 단계, 기후변화 완화 노력에 따라 달라지며, 에어로졸과 메탄 외 오존 전구물질은 대기오염 억제 노력에 따라 달라진다. SSP2-4.5 시나리오는 기후변화의 완화 노력과 사회경제 발전 정도를 중간 단계로 가정한다.

III. 최신 미래 기후전망의 활용과 기후영향지표(Climatic Impact Drivers, CIDs)

1. 우리나라 미래 기후전망과 생태계에 미치는 영향

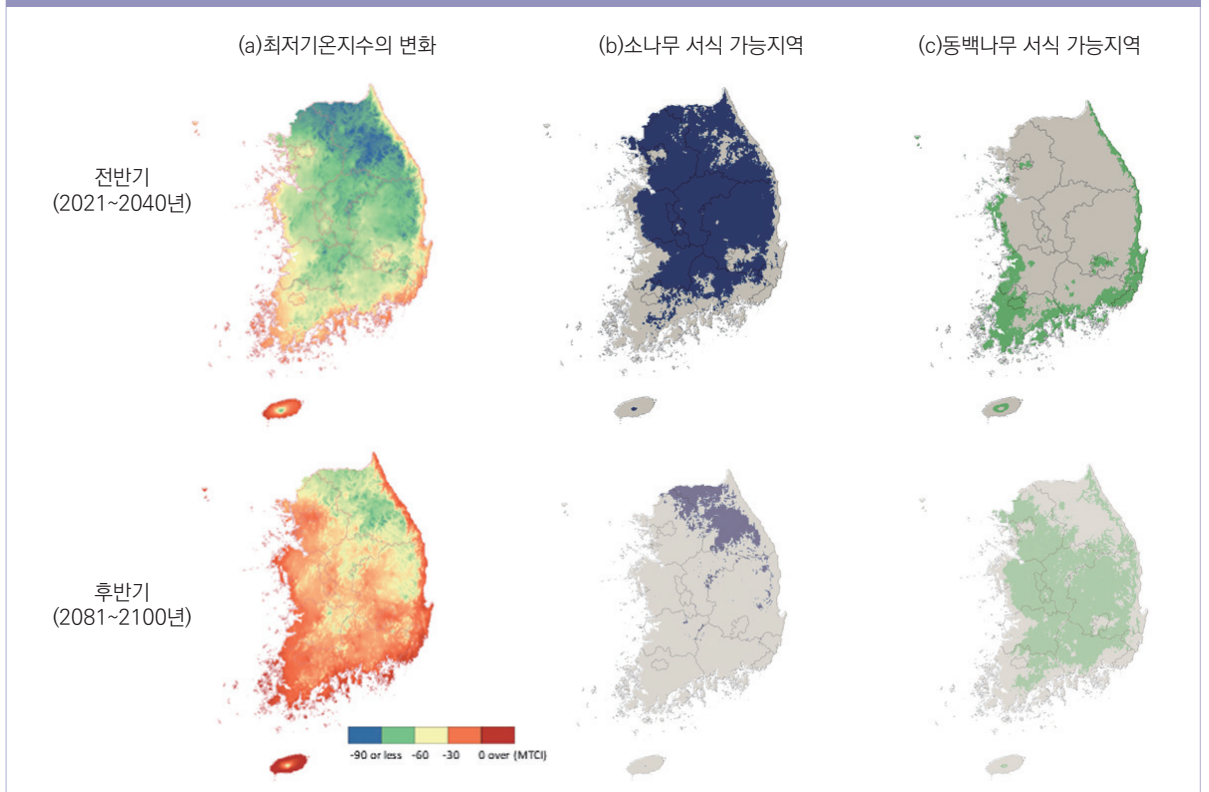
지구기온의 상승으로 인해서 우리나라가 다양한 부문에서 어떤 변화를 겪게 될지 평가가 필요하다. 지구온난화로 인해 우리나라에서 뚜렷하게 보이는 변화 징후는 덜 추운 겨울이다. 최저기온지수(Minimum Temperature Index of the

3) 인위적으로 배출된 온실가스의 양과 자연적으로 제거된 양이 균형을 이루어 순배출량이 0이 됨을 의미한다.

“ 21세기 후반
서식지가 가장 크게
감소하는 수종은
상록침엽수 ”

Coldest Month)는 최한월⁴⁾의 추위 정도를 보여주는 지수로 수종에 따라 최적 최저기온지수의 범위가 달라진다(민숙주 외, 2022). 예를 들어, 소나무는 최저기온지수가 -82.7~-37.5에서 최적으로 성장하고, 난대성 수목인 동백나무는 -33.5~-5.9에서 건강하게 자랄 수 있다. 우리나라에서 흔한 상수리나무의 최저기온지수는 -68.8~-35.4로 소나무보다 추위에 약하다. SSP5-8.5 시나리오 기반으로 21세기 후반기에 서식이 가능한 지역이 가장 크게 감소하는 수종은 상록침엽수인 소나무이다. 현재 기후에서는 전국 73% 면적에서 서식이 가능하지만, SSP1-2.6 시나리오에서는 16%, SSP5-8.5 시나리오에서는 59%가 축소될 전망이다. 후반기에 서식 가능 지역이 가장 크게 확장하는 수종은 상록활엽수인 동백나무이다. 현재 기후에

[그림 2] SSP5-8.5 시나리오 기반 21세기 전반기(2021~2040년)와 후반기(2081~2100년)의 우리나라 (a)최저기온지수의 변화, (b)소나무와 (c)동백나무 서식 가능지역의 전망(민숙주 외, 2022)



4) 우리나라에서 평균기온의 최한월은 보통 1월이지만, 12~2월 사이에 나타날 수 있다.

“ IPCC는 지역
단위에서 기후
영향과 위험성
평가 정보로
기후영향지표
(CIDs) 제시 ”

서는 전국 11%에서 분포 가능하지만, SSP1-2.6 시나리오에서는 18%, SSP5-8.5 시나리오에서 46%가 확대될 전망이다(그림 2). 온실가스 배출량을 감소시키지 않으면 한반도에서 친근한 소나무, 상수리나무, 아까시나무 등은 자연 서식이 어려워지는 기후를 갖게 될 것이다. 여기에 강수량, 상대습도, 토양수분을 고려하면 상황은 더욱 악화될 것이다. 이와 같이 기후변화시나리오를 적용하여 온난화 강도에 따른 우리나라 미래의 생태계 변화를 전망하여 다양한 문제를 예측하고 이에 대응할 수 있는 정보를 제공할 수 있어야 한다.

2. 기후영향지표(CIDs)에 기반한 미래 전망의 활용

국가와 지역 단위에서 기후변화의 양상과 규모를 정확하게 파악하는 것은 효율적인 기후변화 영향과 위험성 평가에 필수적인 정보이다. IPCC(2021)는 지역 단위에서 기후영향과 위험성 평가를 위한 기후변화 정보로 기후영향지표(CIDs)를 제시하였다. CIDs는 사회경제시스템과 생태계에 영향을 미칠 수 있는 기후시스템의 물리적 상태를 의미하여, 간단하게는 지구온난화로 인한 기후요소의 평균 또는 극한 상태의 변화로 정의하여 산출한다. 지구평균지표온도(Global Mean Surface Temperature, GMST)의 상승은 지구 전체 온난화의 강도를 나타낸다. 하지만 지역 단위에서는 그 양상과 규모가 달라질 수 있고, 극지역에서 온난화 속도는 지구 전체보다 2배 이상 빠르다(IPCC, 2021). 도시와 사회기반시설, 보건, 생태계, 농업 등 다양한 부문에서 활용되는 고온과 저온 임계치는 현재 기후에 기반하여 정해진다(표 1). 미래에 온난해진 기후를 반영하여 적절한 기후 적응대책을 수립하기 위해서는 이에 대한 전면적인 재검토가 필요하다. 예를 들어, 현재 기후를 고려하여 옥외에 기존 설치된 송전선은 SSP5-8.5 시나리오에서와 같이 온난해지는 기후에서는 효율성이 떨어질 것이다. 더욱 심각하게는 현재 발전설비로는 전력생산 자체가 불가능해 질 수도 있기 때문이다.

다양한 부문에서 활용되고 있는 고온과 저온 임계온도의 예를(표 2)에 제시하였다. The Boeing Company(2014)의 ‘Flight Crew Operations Manual’에 따

르면 기온이 49.0°C가 넘어서면 연료의 성능과 안정성을 고려하여 비행기 이착륙이 제한된다. 2022년 기준 우리나라 국가기술표준원은 전기 설비의 온도 기준을 제시하고 있다. 전선의 효율이 떨어지는 온도의 기준은 기중 40°C, 지중 30°C(매설 깊이 1.2m)이다. 한국철도공사 고속열차 운전취급 세칙 개정(2018)에서 레일 온도

〈표 1〉 도시와 사회기반시설, 보건, 생태계, 농업 부문 정책에서 고려해야 할 기준온도의 예(IPCC, 2021)

도시와 사회기반시설	
T _{trans}	전선의 효율성이 떨어지는 온도
T _{aircraft}	비행기 착륙 시 하중이 제한되는 온도
T _{hotroads}	도로가 휘는 온도
T _{stream}	하천이 냉각수로 사용 불가능한 온도
CDD _{min}	냉방도일 산출에 사용되는 최저 기준온도
HDD _{max}	난방도일 산출에 사용되는 최고 기준온도
T _{ice}	도로 결빙에 위협이 되는 온도
\bar{T} _{permafrost}	기준 깊이에서 영구동토대가 녹는 계절평균온도
T _{colddroads}	아스팔트의 성능이 떨어지는 온도
보건	
T _{deadly}	노출이 길어지면 치명적일 수 있는 온도(열지수는 습도 영향 포함)
\bar{T} _{blooms}	유해한 조류 또는 시안박테리아가 창궐하는 평균온도
T _{danger}	위험한 추위 강도(체감온도에 바람과 함께 사용)
T _{overwinter}	질병 매개종(vector species)이 월동할 수 없는 온도
생태계	
T _{hotlim} 과 T _{colddlim}	특정 종에 대한 최고와 최저온도의 범위
T _{frost}	서리 기준온도
\bar{T} _{max} 와 \bar{T} _{min}	특정 종 서식에 적절한 연평균온도와 최고 최저 범위
T _{crit}	특정 종이 스트레스를 받는 온도
농업	
T _{hotlim}	작물이나 가축이 사망하는 온도
T _{hotpest}	해충, 질병, 잡초가 생존할 수 없는 최고 또는 치명 온도
T _{crit}	작물의 생산성이 떨어지는 온도
\bar{T} _{opt}	특정 작물의 생산성 최적 평균온도
GDD _{min}	식물성장을 결정하는 생육도일의 기준온도
T _{chill}	저온요구도(chilling units)를 누적하는 기준온도
T _{frost}	서리가 발생하는 온도
T _{hfrost}	굳은 서리(hard frost)가 작물이나 가축을 위협하는 온도
T _{colddpest}	농업에 영향을 주는 특정 해충이 생존할 수 없는 겨울 최저온도
T _{colddlim}	특정 작물이 생존할 수 없는 최저온도

“ 겨울철 기온이 상승하면서 저온 임계온도를 밑도는 빈도는 감소하게 될 것 ”

〈표 2〉 다양한 부문에서 사용하고 있는 고온과 저온 관련 기준온도의 예

	기준온도	내용	참고자료
고온	49℃ 이상	비행기 이·착륙에 제한이 되는 기온	Flight Crew Operations Manual The Boeing Company(2014), p. 642
	42.2℃	PG 76-22 최고 포장 설계 온도	아스팔트 콘크리트 포장 시공 지침 (국토부, 2021), pp.10~11
	35.5℃	PG 64-22 최고 포장 설계 온도	아스팔트 콘크리트 포장 시공 지침 (국토부, 2021), pp.10~11
	40℃	전선의 효율이 떨어지는 온도(기중) 열차 레일 온도 64℃ 이상일 경우 운행중지	국가기술표준원(2022), 고속열차 운전 취급 세칙 개정 (한국철도공사, 2018)
	35℃ ⁵⁾	하천이 냉각수로 사용 불가능한 온도	김동룡(2019)
저온	-1~0℃	도로 결빙에 위험이 되는 노면온도	이영미 외(2018)
	-12℃	기상청 한파주의보 기준	
	-12.2℃	아스팔트 최저 포장 설계온도	아스팔트 콘크리트 포장 시공 지침 (국토교통부 2021), pp.10~11
	-20℃	아스팔트 성능이 떨어지는 온도	권승준 외(2001), 김백조 외(2021)
	-35~-20℃	작물이 생존할 수 없는 최저온도 (사과, 배, 복숭아, 살구)	농촌진흥청(2020)

가 64℃ 이상일 경우 열차의 운행을 중지하고 있고 60℃ 이상 64℃ 미만일 경우 70 km/h 이하 운전을 규정하고 있다. 대기 온도 40℃에서 레일 온도는 60℃로 추정하고 있다. 따라서 기온 40℃ 이상일 경우 열차는 70km/h 이하로 운전하여 정상 속도를 내지 못하고, 기온이 그 이상으로 상승할 경우 운행은 중지되어야 한다. 우리나라에서 기온이 공식적으로 40℃를 넘은 날은 극히 적다. 저온과 관련된 기준으로 기온이 -12~-11℃ 범위에서 아스팔트 도로의 성능이 떨어진다. 국토교통부(2021) 아스팔트 콘크리트 포장 시공지침에 따르면 PG 64-22와 PG 76-22의 최저 포장 설계 온도가 -22℃이다. 포장온도 -22℃일 때 기온은 약 -12.2℃이다. 기상청 한파 일수의 기준온도도 -12℃ 이하이다. 동파의 위험이 증가할 뿐만 아니라, 도로포장에도 문제가 발생하는 임계온도이다. 겨울철 기온이 상승하면서 저온 임계온도를 밑도는 빈도는 감소하게 될 것이다. 농업기술길잡이(2020)는 우리나라에서 사과, 배, 복숭아, 살구나무가 생존할 수 없는 최저온도를 각각 -35~-30℃, -30~-20℃, -25~-20℃, -25~-20℃로 정의했다. 농작물은 겨울 최저온도 임계온도도 중요하지

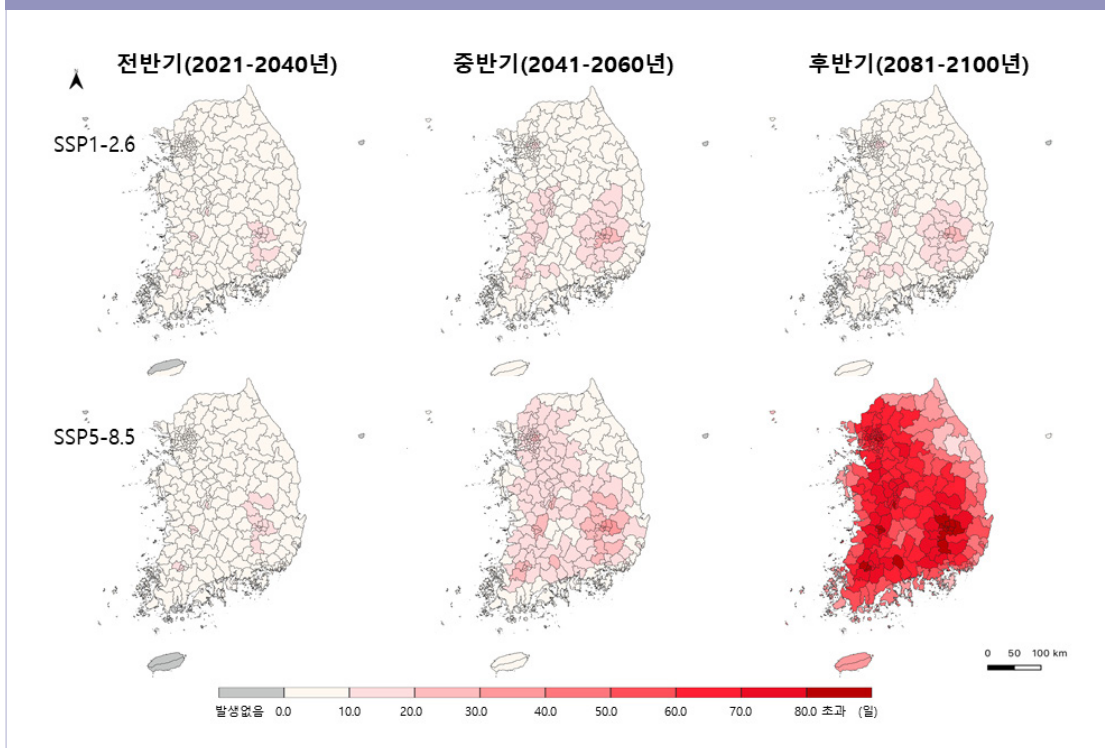
5) 이전 5일 일최고기온 평균 35℃ 이상

만, 고온으로 인한 겨울 해충의 월동도 심각한 문제가 될 것이다.

국도교통부(2021)에 따르면 우리나라 아스팔트 콘크리트 포장 시공 지침에 따르면 PG 64-22 포장재의 고온 임계 기준은 약 35.5°C이다. SSP1-2.6 시나리오 기반으로 21세기 전반기에 대구와 일부 경상도 지역을 제외하면 기온이 35.5°C가 넘는 날은 10회 미만이다. 중반기로 가면서 10회 이상 지역이 확대되지만, 후반기가 되면 다시 축소된다. 하지만, SSP5-8.5 시나리오에서 21세기 후반기에는 35.5°C를 넘는 날이 대부분 지역에서 50일을 넘어서고, 서울을 포함한 대도시와 일부 지역에서는 80일을 초과할 전망이다(그림 3). 현재에는 발생빈도가 높지 않아 크게 문제가 되지 않는 고온 임계기준이 미래에는 빈번하게 발생하여 기후 적응 대책에 반영이 필요하게 되는 것이다. 어떤 시나리오를 고려하느냐에 따라 정책 결정과 이행을 위한 비용이 크게 달라지게 될 것이다.

“ SSP5-8.5 시나리오에서 21세기 후반 35.5°C 초과일수는 대부분 지역에서 50일 이상 ”

[그림 3] SSP1-2.6과 SSP5-8.5 시나리오에 기반한 전반기, 중반기, 후반기의 우리나라 시군구별 일최고기온 35.5°C 이상인 날의 빈도 전망



“ 효율적, 체계적
기후적응대책
수립/이행 위해
기후영향지표
개발이 필수적 ”

IV. 마치며

기후변화 대응 대책은 전세계가 협력해야 가능한 온실가스 감축 정책과 국가 단위 이하에서 이행할 수 있는 적응 정책으로 나눌 수 있다. 물론, 온실가스 배출량의 극적인 감축만이 현재 진행되는 기후 재앙을 막고, 인류가 생존할 수 있는 방안이다. 하지만 세계 온실가스의 배출량은 줄어들지 않고 오히려 증가하고 있다. 지구온난화의 속도를 늦추고, 강도를 낮추어서 기후시스템의 변화를 최소화할 수 있는 모든 방법을 강구해야 한다. 2100년에 온도 상승 폭을 산업혁명 이전 기준 1.5°C 이내로 제한하기 위해 세계는 2030년까지의 감축목표와 이행을 약속했고, 보다 장기적으로는 21세기 중반에 온실가스 넷제로 배출량을 위해서 노력하겠다고 했다. 과거에는 야심찬 감축목표를 설정하는 것에 관심이 있었다면, 현재는 이행 방안과 개입에 점점 초점이 맞춰지고 있다. 하지만 공허한 맹세에서 실제 이행으로의 전환은 복잡하고 어렵다. 정책결정자들은 단시간의 이익과 손실을 따지므로, 명백한 과학적 결과를 직면하고도 이행을 위한 소통이 쉽지 않다. 또한, 국가들이 약속한 감축량을 성실하게 이행하리라는 보장도 없다(Rogelj et al., 2023). 감축목표와 정책에 대한 신뢰도가 평가되면 온실가스 배출량 감축과 온난화 강도를 합리적으로 추정할 수 있을 것이다. 보다 정확한 미래 온실가스 배출량 시나리오는 우리가 안전한 기후 미래에서 얼마나 멀리 있는지 알려줄 수 있다.

국가 단위 또는 더 작은 공간규모에서 적응 대책은 새로운 기후시스템으로의 변화로 인한 피해를 최소화하는 방향으로 진행되어야 한다. 감축 노력에 따라 결정되는 기후시스템의 온난해지는 규모, 즉 온난화 강도에 따라 지역의 특성을 반영한 부정적인 영향을 최소화하려는 노력이 필요하다. 효율적이고 체계적인 기후변화 적응 대책 수립과 이행을 위하여 온난화 강도에 따라 달라질 기후시스템을 정확하고, 상세하여 전망하여 다양한 시간 규모(단기, 중기, 장기)와 공간 규모(기초지자체, 광역시도, 국가 단위), 부문(보건, 농업, 어업, 에너지, 수자원, 도시계획)에서 활용도가 높은 미래 기후전망 특히, 사회경제시스템의 변화에 필수적으로 반영되어야 할 기후영향지표를 개발하는 것이 필수적이다. 또한, 일반 시민들은 기후변

화 적응과 이행정책을 파악하고, 비판적으로 조사할 수 있는 지식과 기술에 대한 접근성이 부족하다(Svarstad et al., 2023). 민주적인 글로벌 시민으로서 기후위기의 문제를 해결하기 위한 비판적 기후교육(critical climate education)이 필요하고, 이를 위한 객관적이고, 종합적인 기후변화 정보의 제공이 필요하다. 이와 함께 신속하게 정의로운 탈탄소사회로 전환하려면 기후법안이나 규제와 구조변화도 세심하게 고려되어야 한다.

참고문헌

- 국가기술표준원, 2022: 저압 전기설비 제5-52부: 전기기기의 선정 및 설치.
- 국토교통부, 2021: 아스팔트 콘크리트 포장 시공 지침.
- 권승준, 도영수, 김광우, 2001: 포아슨 비의 변화를 고려한 수정 ECM 모델 개발 및 아스팔트 콘크리트의 저온 특성 연구, 한국도로포장공학회지, 3(1), 185-197.
- 김동룡, 2019: 건축물 냉방 활용을 위한 한강 수온 특성 분석, 한국지열에너지학회논문집, 15(4), 1-7. <https://doi.org/10.17664/ksgee.2019.15.4.001>
- 김백조, 남형구, 하태룡, 김지완, 이용희, 2021: 겨울철 도로기상 및 노면온도의 시·공간 변화 특성에 관한 연구*Journal of the Korean Data Analysis Society23(5), 2419-2430. <https://doi.org/10.37727/jkdas.2021.23.5.2419>
- 농촌진흥청, 2020: 농업기술집잡이.
- 민숙주, 최영은, 허인혜, 최다솜, 편도의, 김정용, 이도영, 2022: 우리나라 겨울철 온난화가 미래 산림 분포의 변화에 미치는 영향, 기후연구, 17(3), 171~186.
- 이영미, 오상률, 이수정, 2018: 제주지역 도로결빙 예측에 관한 연구, Journal of Environmental Science International, 27(7), 531-541. <https://doi.org/10.5322/JESI.2018.27.7.531>
- 한국철도공사, 2018: 고속철도 운전 취급 세칙 개정.
- Boeing Company, 2014: Flight Crew Operations Manual: Caribbean Airlines Limited.
- IPCC, Summary for Policymakers. In: Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Masson-Delmotte, V., Zhai, P., Pirani, A., Connors, S. L., Péan, C., Berger, S. Caud, N., Chen, Y., Goldfarb, L. Gomis, M.I., Huang, M., Leitzell, K. Lonnoy, E., Matthews, J.B.R., Maycock, T.K., Waterfield, T., Yelekçi, O., Yu, R., and Zhou, B.(eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 3-32, doi:10.1017/9781009157896.001, 2021.
- Liu, Z., Deng, Z., Davis, S. J., Giron, C., and Ciais, P., 2022: Monitoring global carbon emissions in 2021, Nature Reviews Earth & Environment, 3(4), 217-219.
- Riahi, K., van Vuuren, D. P., Kriegler, E., Edmonds, J., O'Neill, B., Fujimori, S., Bauer, N., Calvin, K., Dellink, R., Fricko, O., Lutz, W., Popp, A., Cuaresma, J. C., KC, S.,

- Leimbach, M., Jiang, L., Kram, T., Rao, S., Emmerling, J., Ebi, K., and Tavoni, M., 2017: The Shared Socioeconomic Pathways and their energy, land use, and greenhouse gas emissions implications: An overview, *Global Environmental Change*, 42, 153-168.
- Rogelj, J., Fransen, T., den Elzen, M.G.J., Lamboll, R.D., Schumer, C., Kuramochi, T., Hans, F., Moldijk, S., 2023: Credibility gap in net-zero climate targets leaves world at high risk, *Science*, 380(6649) 1014-1016.
- Shiogama, H., Fujimori, S., Hasegawa, T., Hayashi, M., Hirabayashi, Y., Ogura, T., Iizumi, T., Takahashi, K. and Takemura, T., 2023: Important distinctiveness of SSP3-7.0 for use in impact assessments, *Nature Climate Change*, 13, 1276-1278, <https://doi.org/10.1038/s41558-023-01883-2>.
- Svarstad, H., Jornet, A., Peters, G. P., Griffiths T. G. and Benjaminsen, T. A., 2023: Critical climate education is crucial for fast and just transformations, *Nature Climate Change*, 13(12), 1274-1275.
- Trewartha, G., *An Introduction to Climate*, McGraw-Hill, 1980.
- van Vuuren, D. P., Edmonds, J., Kainuma, M., Riahi, K., Thomson, A., Hibbard, K., Hurtt, G. C., Kram, T., Krey, V., Lamarque, J.-F., Masui, T., Meinshausen, M., Nakicenovic, N., Smith, S. J. and Rose, S. K., 2011: The representative concentration pathways: an overview, *Climatic Change*, 109, 5-31. DOI 10.1007/s10584-011-0148-z.

IPCC 6차 기후변화 평가보고서 기반 한반도 상세 기후변화 전망

차동현 울산과학기술원 지구환경도시건설공학과 dhcha@unist.ac.kr

- I. 한반도 상세 기후변화시나리오
- II. 기온의 변화
- III. 강수의 변화
- IV. 태풍의 변화
- V. 결론

IPCC 6차 기후변화 평가보고서 기반 상세 기후변화시나리오에서 전망된 한반도 지역 기후변화를 분석하였다. 한반도의 미래 기온은 고탄소 시나리오에서 현재 기후 대비 남한 평균 약 7°C까지 상승해 폭염과 열대야 등이 현저히 증가할 것으로 전망되었다. 강수의 경우 호우와 연관된 고강도 극한강수지수가 고탄소 시나리오에서 하층 대기의 열역학적 요인의 변화로 인해 뚜렷하게 증가할 것으로 전망되었다. 모든 시나리오에서 미래 한반도 주변의 해수면 온도 상승과 연직바람시어의 감소로 인해 중위도로 태풍이 북상할 확률은 증가하고, 강도도 강화될 것으로 전망되었다. 이처럼 미래 한반도에서는 위험기상 현상의 발생 빈도가 더 잦아지고 강도도 더 강화될 가능성이 크기 때문에, 미래 지역 기후변화 과학 정보를 적극적으로 활용해 효율적인 중장기 기후변화 적응 및 완화 정책을 수립해야 할 것이다. ■

“ 효율적 기후변화 대응 위해 최신 AR6 기반 상세 기후변화시나리오 전망과 대응 정책 수립이 필요 ”

I. 한반도 상세 기후변화시나리오

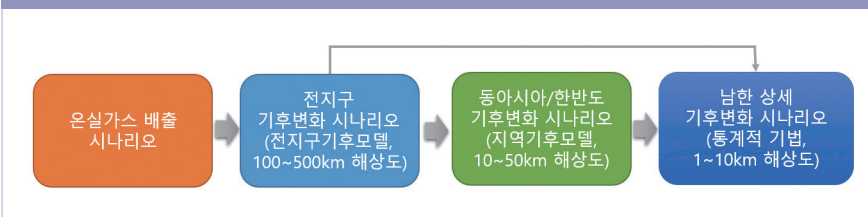
기후변화에 관한 정부 간 협의체(Intergovernmental Panel on Climate Change, IPCC)는 기후변화에 대한 과학적 이해와 적응 및 완화 대응 체계를 수립하기 위해 약 7년마다 기후변화 평가보고서를 출간하고 있고, 2021년에는 가장 최신인 6차 기후변화 평가보고서(Assessment Report 6; AR6, Climate Change 2021: The Physical Science Basis, IPCC Working Group I)가 출간되었다(IPCC, 2021). AR6에는 과학적으로 산출된 다양한 기후변화 전망 정보가 포함되어 있는데, 이는 세계기후연구프로그램(World Climate Research Program; WCRP)이 추진하는 접합모델 상호 비교 프로젝트(Coupled Model Intercomparison Project, CMIP)에 참여한 다양한 전지구 기후모델의 결과들이다. 하지만 전지구 기후모델들은 상대적으로 낮은 해상도를 갖기 때문에 상세한 지역 기후변화를 전망하기에 부족함이 있다. 이를 극복하기 위해 WCRP는 지역기후모델로 14개 지역에 대해 역학적 상세화를 수행하는 CORDEX (Coordinated Regional Climate Downscaling Experiment) 프로젝트를 추진하고 있고, 우리나라도 기상청과 국내대학들이 CORDEX 프로젝트에 참여해 AR6 기반 동아시아 상세 기후변화시나리오를 산출하였다. 효율적인 기후변화 대응을 위해서는 최신 AR6 기반 상세 기후변화시나리오에서 전망된 한반도 지역 기후의 변화를 분석하고 이에 맞게 대응 정책을 수립할 필요가 있다. 이에 본 연구에서는 최신 AR6 기반 한반도 상세 기후변화시나리오에서 전망된 미래 온도, 강수, 태풍의 변화를 분석하였다.

IPCC는 세계 유수기관에서 수치모델과 슈퍼컴퓨터를 활용해 생산된 시나리오 결과들을 기반으로 미래 변화 전망치를 제시하고 있다. 생산된 기후변화시나리오를 기반으로 IPCC Working Group 1 (WG1)에서 전지구 및 지역 기후변화 특성과 미래 전망을 과학적으로 분석하고 있다. 우리나라에서는 기상청과 국립기상과학원이 기후변화 과학 연구를 주도적으로 담당하고 있는데, 국내 대학들과 협업하여 관측 자료 기반의 기후변화 근거를 분석하는 한편, 역학적/통계적 방법을 기반으로 한반도 상세 기후변화 전망도 산출해 제공하고 있다. 기후변화시나리오는 [그

“역학적 상세화 결과를 통계적 상세화하여 초고해상도 기후변화 시나리오 생산”

림 1]과 같이 여러 단계를 거쳐 산출된다. 우선 다양한 기후변화 대응 정책과 기후 기술을 가정해 지구온난화의 주원인인 온실가스의 미래 배출량 변화에 대한 여러 종류의 시나리오를 산출한다. 이후 여러 미래 시나리오에 따른 온실가스 배출량 또는 대기 중 농도값에 기반하여 현재부터 미래까지 장기간의 모델 적분을 통해 전지구 기후변화시나리오를 산출한다. 하지만 IPCC에 참여하는 대부분의 전지구 기후 모델은 100km 이상의 수평해상도를 갖기 때문에 기후변화 응용 연구를 수행하기에는 해상도가 너무 낮아 이를 보완할 수 있는 고해상도 기후변화시나리오가 필요하다. 따라서 기후변화시나리오의 해상도를 높이기 위해 역학적/통계적 상세화 기법이 적용된다. 전지구 기후모델 결과를 대규모 강제자료로 활용한 지역기후모델로 역학적 상세화를 수행해 동아시아 지역과 한반도 지역에 대한 수십 킬로미터 이내 수평해상도의 기후변화시나리오를 생산한다. 지역기후모델을 이용한 역학적 상세화는 일반적으로 태풍, 집중호우와 같은 극단적인 기상현상 모의에 유리하다는 장점이 있는 것으로 알려져 있다. 이후 관측자료와 현재기후에 대한 지역기후모델 결과 사이의 통계적 관계를 이용해 1km 해상도의 남한지역 기후변화시나리오를 산출한다. 즉, 역학적 상세화 결과를 다시 통계적으로 상세화하여 초고해상도 기후변화시나리오를 생산한다.

[그림 1] 남한 상세 기후변화시나리오 산출 방법



미래 기후변화 전망 정보를 산출하기 위해 반드시 필요한 것이 온실가스 배출 시나리오이다. 온실가스가 미래에 어떻게 변할지를 가정하는 온실가스 배출 시나리오는 산업화 정도와 저감 정책 수준 등에 따라 다시 세부적으로 구분된다. 2021년에 출간된 IPCC AR6에서는 기존 5차 보고서의 대표농도경로(Representative Concentration Pathway; RCP) 배출 시나리오에 사회·경제적 정책 및 인간 활동

“ KMA와 NIMS는 UKESM 자료를 기반으로 동아시아 지역 기후변화 시나리오를 산출 ”

의 영향이 반영된 공통사회경제경로(Shared Socioeconomic Pathways; SSP) 배출 시나리오가 활용되고 있다<표 1>. SSP 배출 시나리오 종류에 따라 2100년까지 배출될 온실가스의 양이 다르기 때문에, 배출 정도에 따라 기후변화 정도를 예측하는 연구가 반드시 필요하다.

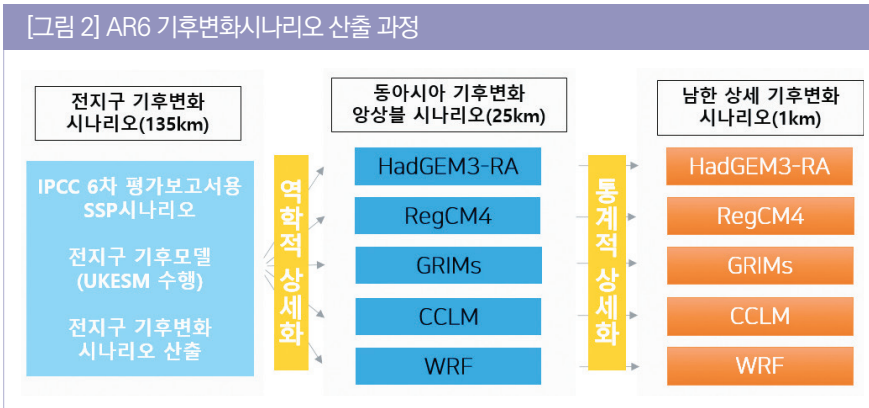
<표 1> SSP 온실가스 배출 시나리오의 종류

종류	의미	CO2 농도 (2100년, ppm)
SSP1-2.6	재생에너지 기술 발달로 화석연료 사용이 최소화되고 친환경적으로 지속가능한 경제성장을 이룰 것으로 가정하는 경우	445.6
SSP2-4.5	기후변화 완화 및 사회·경제 발전 정도가 중간 단계를 가정하는 경우	602.8
SSP3-7.0	기후변화 완화 정책에 소극적이며 기술개발이 늦어 기후변화에 취약한 사회구조를 가정하는 경우	867.2
SSP5-8.5	산업기술의 빠른 발전에 중점을 두어 화석연료 사용이 높고 도시 위주의 무분별한 개발이 확대될 것으로 가정하는 경우	1135.2

온실가스 배출 시나리오가 결정되면 이를 이용하여 전지구 기후모델을 적분함으로써 저해상도 기후변화시나리오를 산출한다. 이후 전지구 기후변화시나리오에 내재되어 있는 부가정보(added values)를 산출하기 위해 지역기후모델로 역학적 상세화를 수행하고, 이에 대해 통계적 상세화를 적용해 남한지역의 초고해상도(1 km) 기후변화시나리오를 산출한다. 우리나라에서는 기상청, 국립기상과학원, 대학들이 협업하여 4차 기후변화 평가보고서부터 기후변화시나리오를 산출하고 있다. AR6를 위해서 기상청과 국립기상과학원은 SSP 배출 시나리오를 바탕으로 자체개발모델 K-ACE(KMA Advanced Community Earth-system model) 및 영국기상청 협력모델 UKESM(UK Earth System Model)을 사용하여 전지구 기후변화시나리오를 산출하였고, 이 중 UKESM 자료를 기반으로 국내 대학과 함께 5개의 지역기후모델로 역학적 상세화하여 25km 수평해상도의 동아시아 지역 기후변화시나리오를 산출하였다<그림 2>.

본 연구에서는 배출 시나리오 중 저탄소 시나리오인 SSP1-2.6과 고탄소 시나리오인 SSP5-8.5를 기반으로 산출된 25km 해상도의 역학적 상세 기후변화시나리오의 결과를 사용하여 미래 한반도의 기온, 강수, 태풍 변화를 분석하였다.

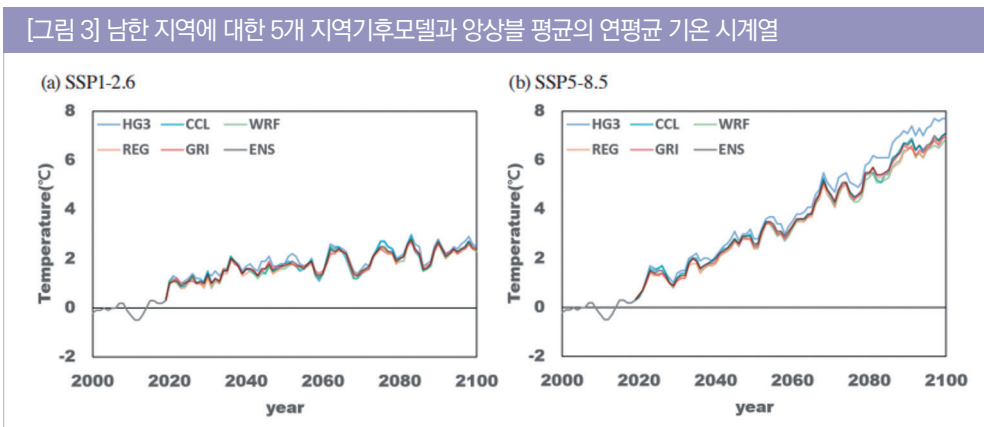
[그림 2] AR6 기후변화시나리오 산출 과정



II. 기온의 변화

미래 남한의 기온 변화를 예측하기 위해 IPCC AR6에 참여한 5개의 상세 기후변화시나리오 결과와 앙상블 평균 기온을 분석하였다. 전지구 기후모델 자료를 지역 기후모델로 역학적 상세화할 때 불확실성이 추가될 수 있으므로 이 때 발생하는 계통오차를 줄여주기 위해 분산과 평균을 보정해 주는 Variance Scaling 편의보정

[그림 3] 남한 지역에 대한 5개 지역기후모델과 앙상블 평균의 연평균 기온 시계열

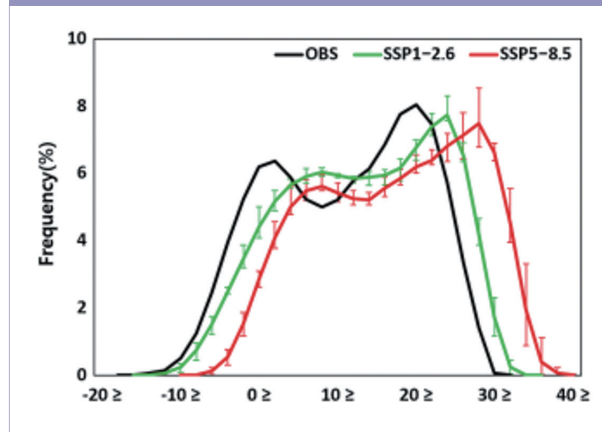


“ 21세기 후반
배출량에 따라
기온 상승폭이
커질 것으로
전망 ”

기법을 적용하였다. 5개 지역기후모델의 현재기후 실험(Historical 실험) 일기온 자료에 Variance Scaling 기법을 적용하여 관측과 모델 자료 사이의 통계적 관계를 계산하고, 이를 SSP 실험의 미래 전망에 적용하였다(Kim et al. 2020).

[그림 3]은 1979-2100년 동안 5개 모델 결과와 그 앙상블을 평균한 남한의 기온 변화를 보이고 있다. 저탄소 시나리오인 SSP1-2.6에서는 남한의 연평균 기온이 2100년까지 서서히 증가하는 경향을 보이고, 모델 간의 변화 경향 차이도 크지 않다. 반면 고탄소 시나리오인 SSP5-8.5에서는 2100년까지 현재 대비 약 7℃ 까지 급격히 증가하는 추세를 나타내고 있으며, 2050년대 이후 모델 간의 증가 경향 차이도 상대적으로 크다. 즉, 21세기 후반으로 가면서 탄소 배출량에 따라 기온 상승폭이 커질 것으로 전망된다.

[그림 4] 현재기후(1995-2014)와 21세기 후반(2081-2100) 남한 지역에 대한 일평균 기온의 구간별 발생 빈도



[그림 4]는 현재기후 관측 자료와 21세기 후반 시나리오 자료의 남한 지역 기온의 확률밀도 함수를 보여준다. 21세기 후반 저탄소 시나리오의 기온 분포 평균값이 현재기후 관측의 평균보다 다소 우측으로 치우쳐 저탄소 시나리

오에서조차 21세기 후반 기온이 상승할 수 있다는 것을 알 수 있다. 고탄소 시나리오의 기온 평균은 저탄소 시나리오의 평균보다 더 우측으로 치우쳐 있어 탄소 배출량에 따라 기온 평균이 상승할 것으로 전망할 수 있다. 또한, 폭염 등의 극한기온 현상과 관련될 수 있는 상위 10%의 기온에서 현재기후 관측은 24℃이지만, 저탄소와 고탄소 시나리오에서 각각 26℃, 30℃로 상승해 탄소 배출량이 많을수록 폭염과 같은 극한기온 현상의 발생 가능성이 높다는 것을 알 수 있다.

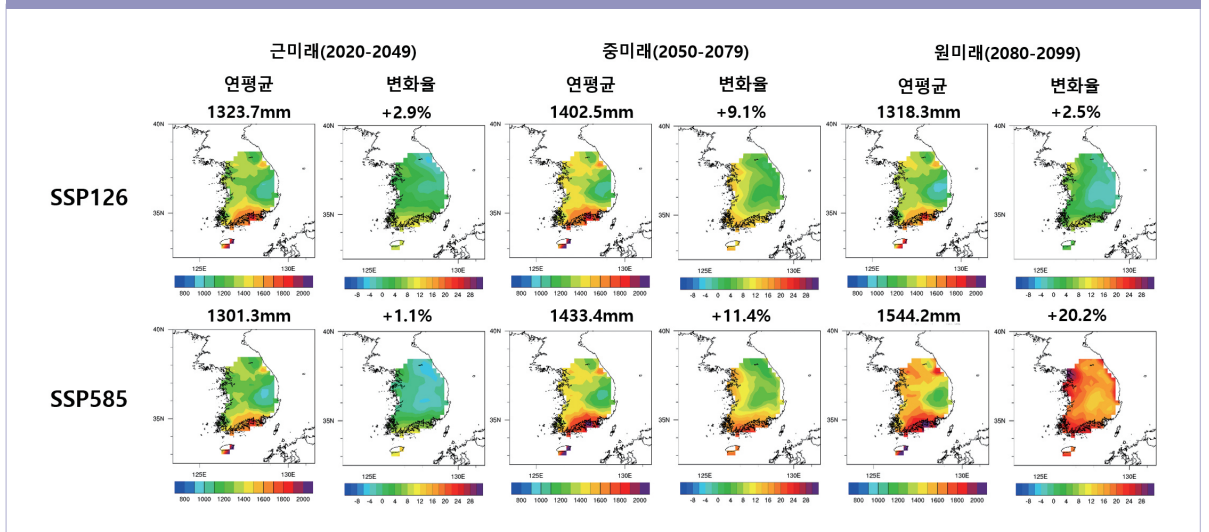
“ 배출 시나리오에 따라 미래 연강수량 변화는 지역적 차이 ”

III. 강수의 변화

미래 남한의 강수 변화를 전망하기 위해 [그림 2]에서 보인 AR6에 참여한 5개의 상세 기후변화시나리오 결과의 앙상블 평균을 분석하였다. 역학적 상세화 때 발생하는 계통오차를 줄여 미래 변화 전망의 신뢰도를 높이기 위해 강수 자료에 편의보정을 적용하였다. 이때 강수 자료에 적합한 편의보정인 Quantile Mapping for the Entire periods (QME) 기법을 5개 지역기후모델의 현재기후 실험 일강수량 자료에 각각 적용하여 관측 자료와 모델 자료 사이의 통계적 관계를 산출하고, 이를 SSP 실험의 미래 일강수량 전망에 적용함으로써 편의보정을 완료하였다.

기후변화로 인한 강수 변화를 분석하기 위해 미래 80년을 근미래(2020-2049), 중미래(2050-2079), 원미래(2080-2099)로 나눠 각 기간에 평균값과 현재기후

[그림 5] 미래 기간 별 연평균 강수량(mm)과 현재기후(1979-2014) 대비 변화율(%)



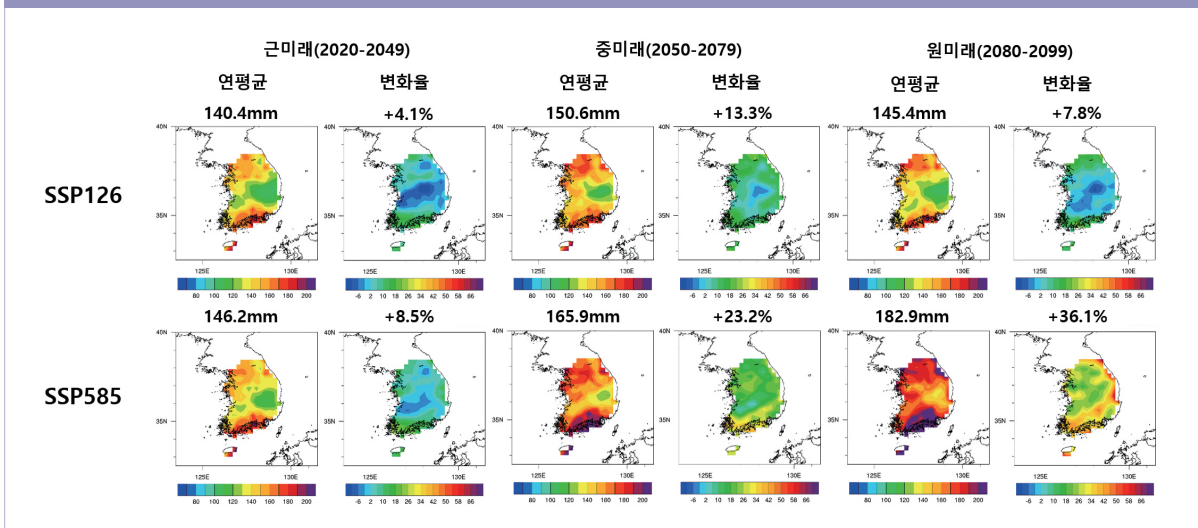
(1979-2014) 대비 변화율을 각각 산출하였다. 미래 연평균 강수량의 공간분포는 현재기후 특성과 크게 다르지 않다[그림 5]. 즉, 제주, 남해안과 중부지역의 강수량이 상대적으로 많고 경북지역은 적은 분포가 유지된다. 하지만 탄소배출 시나리오에 따라 미래 연강수량 변화 차이는 지역적으로 다르게 나타난다. 저탄소 시나리오(SSP1-2.6)의 경우 근미래보다 중미래에서 남한전체 강수량이 약 9% 정도 증가

“ 적응 전략의
효율적 수립
위해 고강도
극한강수지수
변화 정보
활용 필요 ”

하지만, 원미래에는 근미래 변화율과 비슷한 정도를 보인다. 반면, 고탄소 시나리오(SSP5-8.5)에서는 근미래의 변화율은 크지 않지만, 중미래, 원미래로 갈수록 남해 연평균 강수량이 약 10%씩 더 증가하게 된다. 이러한 결과를 토대로 저탄소 시나리오를 달성할 경우 연강수량이 기후변화의 영향을 덜 받게 되지만, 탄소배출 완화에 실패한 고탄소 시나리오를 따를 경우 연강수량이 기후변화의 영향을 받아 크게 증가한다는 것을 알 수 있다.

설계기준을 넘는 고강도 호우가 발생할 경우 방재시설이 제 기능을 발휘하지 못해 극심한 재난 피해를 초래한다. 따라서, 미래 기후변화 적응 전략을 효율적으로 수립하기 위해서는 고강도 극한강수지수의 변화 정보를 적극 활용할 필요가 있다. 미래 고강도 극한강수지수의 변화를 확인하기 위해서 연중 일 최대강수량인 RX1day를 분석하였다(그림 6). 미래 모든 기간에서 RX1day는 남해안, 제주, 경기 북부 지역에서 높고, 경북과 전라 서부 지역에서 비교적 낮은 분포를 갖는다. 저탄소 시나리오에서는 원미래의 변화율이 중미래보다 낮은 특징을 보이는데 이는 저탄소 시나리오를 달성할 경우 온난화로 인한 집중호우의 강도 증가가 저감될 수 있다는 것을 의미한다. 반면 고탄소 시나리오에서는 미래에 지속적으로 증가하는 경향이 나타나며 남해안 지역에서는 21세기 후반인 원미래에 200mm가 넘는 곳도 나

[그림 6] 미래 RX1day의 연평균값(mm)과 현재기후(1979-2014) 대비 변화율(%)

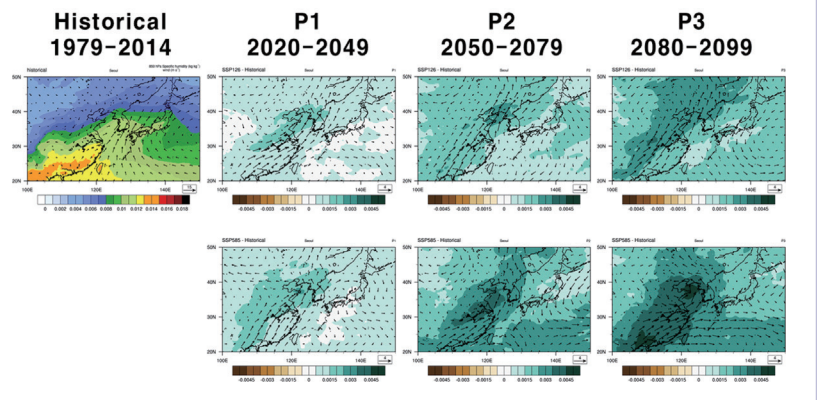


“ 모든 시나리오와 미래 기간에서 하층 바람은 더욱 강해지고, 수증기량은 증가 ”

타날 것으로 전망되었다. 특히, 고탄소 시나리오에서 시간에 따른 증가 경향이 평균 강수에 비해 더 뚜렷하게 증가하는 특징이 나타나는데 이는 극한강수에 대한 온난화의 영향이 평균 강수보다 더 크다는 것을 의미한다.

극한강수지수의 미래 변화 원인을 조사하기 위하여 서울에서 RX1day가 나타난 날들만을 평균한 한반도 주변의 하층 바람과 수증기량(비습) 합성장의 미래 변화를 분석하였다(그림 7). 서울의 RX1day가 발생하는 날들은 대부분 여름철에 분포하고 있어 동아시아 여름철의 고유한 기후 현상인 몬순의 영향을 받게 된다. 따라서 현재기후의 한반도 주변 하층에서는 동아시아 여름 몬순으로 인해 남서풍이 강하게 불게 되고, 이는 아열대 지역의 따뜻하고 습한 공기를 우리나라로 유입시켜 한반도 주변의 대기 불안정도를 높여 집중호우 발생 확률을 높인다. 미래에 몬순으로 인한 하층 남서풍이 강하게 될 경우 이러한 물리적 기작의 강화로 인해 극한강수가 더 증가할 수 있다. 모든 배출 시나리오와 미래 기간에

[그림 7] 현재기후 동안 서울 지역의 RX1day 발생 날짜에 대한 850hpa 고도의 바람 (m s⁻¹, vector)과 비습(kg kg⁻¹, shading)의 합성장과 미래 기간별 현재기후 대비 변화(위: SSP1-2.6, 아래: SSP5-8.5)



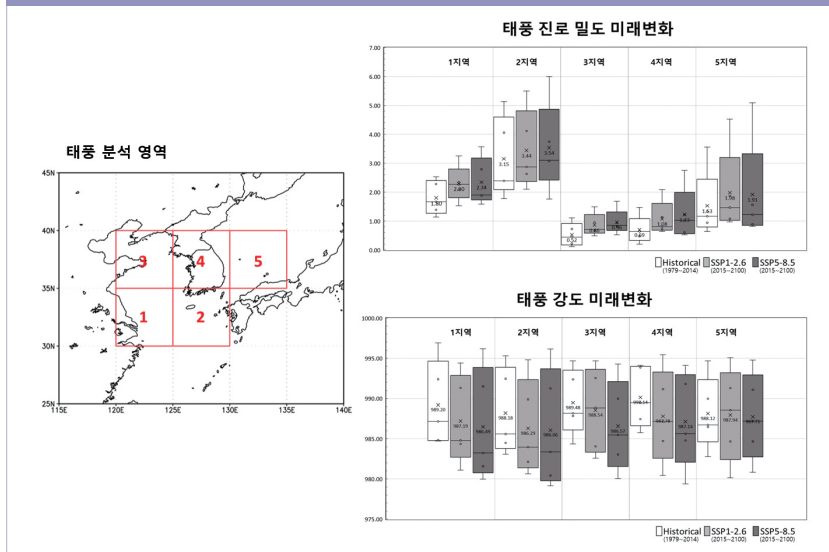
서 몬순에 의한 하층 바람은 더욱 강해지고, 수증기량은 증가하는 경향이 전망된다. 수증기량의 경우 저탄소와 고탄소 시나리오 모두 미래 점진적으로 증가하는 경향이 나타나는데, 고탄소 시나리오에서 그 경향이 더욱 뚜렷하다. 따라서 고탄소 시나리오에서 원미래에 한반도 주변 하층에서 강화된 남서풍과 증가한 수증기량으로 인해 RX1day와 연관된 집중호우 발생이 증가하게 되는 것이다. 이처럼 고탄소 시나리오에서 두드러지게 하층 남서풍과 수증기가 증가한 것은 온난화로 인한 아열대 지역의 해수온 상승과 연관될 수 있는데, 해수온 상승은 하층 대기의 온도를 높일 뿐만 아니라, Clausius-Clapeyron 관계를 통해 수증기량도 증가시키게 된다.

“ 한반도 영향
태풍 진로밀도는
현재기후 대비
전 기간에 증가
할 것으로
예상 ”

IV. 태풍의 변화

SSP 배출 시나리오를 기반으로 한 5개 지역기후모델의 동아시아 기후변화시나리오를 분석하여 태풍의 미래 변화를 전망하였다. 모든 지역기후모델은 25km 수평 해상도를 갖고 있으며, 모의영역은 동아시아 전역과 대부분의 북서태평양 태풍 발생 지점을 포함하고 있어 태풍 미래 전망에 적합하다. 개별 모델의 태풍 변화를 우선 분석한 후 이를 평균한 결과를 활용하였다. 한반도 주변의 미래 태풍활동 변화

[그림 8] 지역별 현재(1979-2014) 대비 미래 태풍 진로밀도와 강도 전망(흰색: 현재 기후, 연회색: 저탄소 시나리오, 진회색: 고탄소 시나리오)(이은정 외, 2023)



를 분석하기 위해 우리나라를 포함하여 주변 해역을 5개 지역으로 구분하여 각 지역을 지나가는 태풍진로밀도에 대한 미래(2015-2100년) 변화를 분석하였다(그림 8). 한반도 영향 태풍진로밀도는 불확실성이 매우 커지고 있어 전망이 더욱 어려워지고 있지만, 현재기후 대비 전 기간에 대해 증가할 것으로 예상된다. 고탄소 시나리오의 경우, 미래의 태풍진로밀도는 현재기

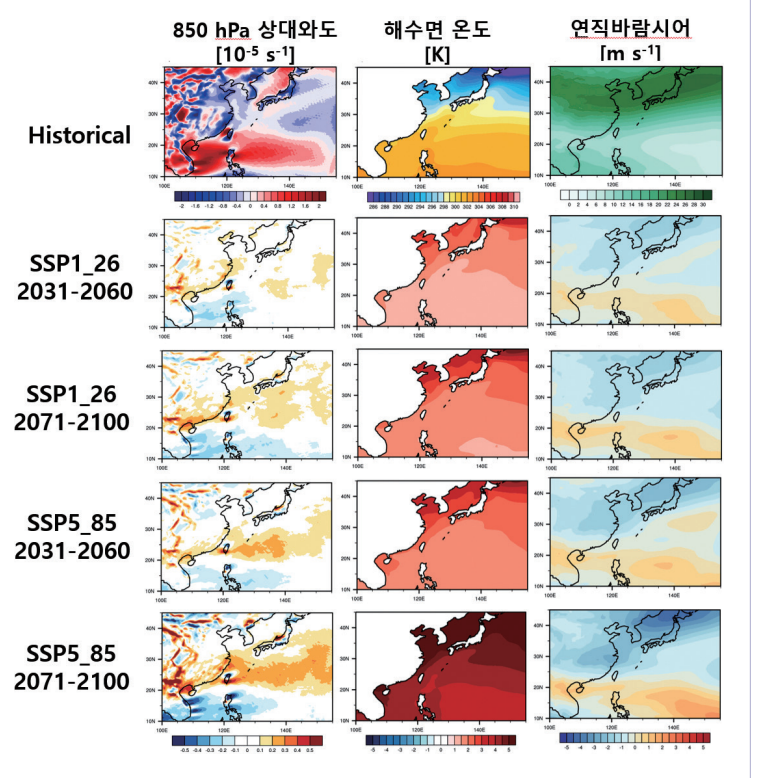
후(1979-2014년) 대비 21세기(2015-2100년)에 최대 85%까지 증가할 것으로 전망된다. 특히 한반도 주변 지역을 지나가는 태풍진로밀도는 현재 기후 대비 적게는 12%, 많게는 85%까지 영향이 증가할 것으로 보인다. 지역별로는 서해의 증가가 동해와 남해보다 더 뚜렷할 것으로 전망되었다. 저탄소 시나리오의 경우, 미래의 태풍진로밀도는 현재 대비 21세기에 적게는 9%, 많게는 65%까지 증가하고, 지역적으로 서해에서 증가 경향이 크게 전망되었다. 주목할 점은 두 가지 탄소배출 시나리오에서 현재 대비 상승폭은 고위도(서해, 내륙, 동해) 지역에서 더 크게 나타난다는 점이다. 태풍 강도의 경우 고탄소와 저탄소 시나리오 모두 한반도 인근 주변 해역 5개

“ 여러 배경장의 미래 변화가 중위도 태풍 활동 증가에 유리 ”

지역에 대한 태풍의 중심기압을 현재 대비 더욱 낮게 전망하고 있어 미래 한반도는 더욱 강한 태풍의 영향을 받을 것으로 예상된다. 특히, 저탄소 시나리오에서보다 탄소 배출이 많은 고탄소 시나리오에서 더욱 감소폭이 크므로, 더 강한 태풍이 빈번해 질 것으로 전망된다.

미래 태풍 변화 원인을 규명하기 위해 태풍 활동에 영향을 미치는 배경장의 변화를 분석하였다(그림 9). 온실가스 배출을 규제해 온난화 경향이 크지 않은 저탄소 시나리오의 근미래와 원미래에서 북위 20~30도 주변의 미래 하층 상대와도가 증가하지만, 북위 20도 이하의 저위도 지역에서는 감소하는 경향이 나타난다. 이러한 상대와도의 미래 변화는 태풍 발생 지점이 현재보다 더 북쪽으로 이동할 수 있다는 것을 의미한다. 또한, 저탄소 시나리오에서 근미래와 원미래 모두 온난화로 인하여 해수면 온도가 상승한다. 특히 저위도보다 중위도에서의 증가가 더 뚜렷해 태풍이 중위도로 북상할 때, 해수면으로부터 많은 에너지를 공급받아 지속시간을 계속 유지할 수 있는 원인이 된다. 또한, 미래 중위도 지역의 연직바람시어가 감소해 태풍의 관성안정도가 유지되는 조건이 형성되므로 태풍 활동 증가에 호조건이 될 수 있다. 이러한 여러 배경장의 미래 변화가 중위도 태풍 활동 증가에 유리하게 변하기 때문에 저탄소 시나리오에서조차 한반도 주변의 태풍 활동이 증가하게 된다. 저탄소 시나리오에 비해 온실가스 배출이 많아 온난화 경향이 큰 고탄소 시나리오에서 이러한 배경장의 변

[그림 9] 태풍 활동과 연관된 배경장(위: 현재기후(1979-2014) 모의 결과, 아래: 기후변화시나리오/기간 별 미래 변화)



화

“ 한반도 발생
극한기상 현상
대부분의 발생
빈도와 강도가
강화될 전망 ”

화 경향이 더 크게 나타난다. 즉, 근미래와 원미래 모두 저탄소 시나리오에 비해 고탄소 시나리오에서 중위도의 하층상대외도 증가, 해수면 온도 상승, 연직바람시어 감소 경향이 더 뚜렷하게 나타났다. 이 때문에 [그림 9]에서 보인 것처럼 저탄소 시나리오에 비해 고탄소 시나리오에서 근미래와 원미래 모두 한반도 주변의 태풍 진로밀도 함수가 더 증가했고 강도도 강해졌다고 할 수 있다. 이는 온난화가 더 심해지면 한반도 주변 배경장의 변화로 더 강한 태풍 활동이 증가해 재해 피해가 더 늘어날 수 있다는 것을 의미한다.

V. 결론

IPCC의 AR6 기반 상세 기후변화시나리오에서 전망된 미래 한반도의 지역 기후 변화를 분석하였다. 기상청과 국립기상과학원이 UKESM 기후모델로 산출한 전지구 기후변화시나리오를 5개 지역기후모델로 역학적 상세화한 고해상도(25km 수평 해상도) 기후변화시나리오의 미래 한반도 지역 기후 변화를 조사하였다.

한반도의 미래 기온은 고탄소 시나리오에서 현재기후 대비 남한 평균 약 7°C까지 증가하게 된다. 이로 인해 일최고온도와 최저온도의 최고값이 크게 상승하게 되고, 폭염과 열대야 발생일수가 현저히 증가하게 된다. 호우와 연관된 고강도 극한강수지수가 고탄소 시나리오에서 하층 대기의 열역학적 요인의 변화로 인해 뚜렷하게 증가하게 예측되었다. 모든 시나리오에서 한반도가 위치한 중위도로 태풍이 북상할 확률이 증가하고, 강도도 강화될 것으로 전망되었다. 이러한 태풍의 변화는 미래 한반도 주변의 해수면 온도 상승과 연직바람시어의 감소와 연관될 수 있다. 이처럼 AR6 기반의 상세 기후변화시나리오를 활용해 동아시아의 지역 기후변화를 분석한 결과, 한반도에서 발생하는 극한기상 현상 대부분의 발생빈도가 더 잦아지고 강도도 더 강화될 가능성이 크다고 전망되었다. 따라서 이와 같은 미래 지역 기후변화 정보를 적극적으로 활용해 보다 효율적이고 신뢰할 수 있는 중장기 기후변화 적응 및 완화 정책을 수립할 필요가 있다.

“ AR7에서는 배출
중심 시나리오,
CPM 활용 등
신뢰도 향상
노력이 필요 ”

본 연구에서 사용된 상세 기후변화시나리오는 기후변화 과학뿐만 아니라, 적응/정책/완화 등 기후변화 연구의 기반이 되는 자료로 활용되고 있다. 따라서 시나리오 수요자의 가장 큰 요구사항인 신뢰도를 높이거나 불확실성을 명확하게 제시하는 것이 향후 기후변화 연구에서는 반드시 고려되어야 한다. AR6까지는 대기 중 온실가스 농도를 기준으로 하는 기후변화시나리오가 중심을 이루었다. 하지만 기후예측모델의 발달로 탄소 순환의 예측이 가능해졌기 때문에, 농도 기준이 아니라 배출 중심의 시나리오 산출이 AR7에서는 고려될 필요가 있다. 현재 국내에서 AR6를 위해 산출된 상세 기후변화시나리오는 하나의 전지구 기후모델 (UKESM)을 이용해 5개의 지역기후모델로 역학적 상세화하였기에 불확실성을 분석하기에 한계가 있다. 따라서 다중 전지구 기후변화시나리오를 다수의 지역기후모델로 상세화하는 Multi GCM-Multi RCM Chain 연구가 향후 추진되어야 한다.

이외에도 역학적 상세화에 활용되는 지역기후모델의 고도화가 추진되어야 한다. AR5와 AR6에 적용된 모델들의 해상도는 12.5~50km이기 때문에, 중규모대류계나 태풍 중심의 강한 대류와 같은 중규모 현상들을 모델 격자 규모에서 직접 모의하는 것이 불가능하다. 최근 컴퓨팅 자원의 급격한 발달로 모델이 대류를 직접 모의할 수 있는 Convection Permitting Model (CPM)을 AR7 기반 시나리오 산출에 활용할 필요가 있다. 또한, 대륙과 해양의 경계에 위치한 한반도의 지역 기후를 현실적으로 모의하기 위해서는 대기-해양-지면 모델이 접합되어 있는 지역 지구시스템 모델을 개발해 시나리오 생산에 활용해야 할 것이다.

참고문헌

- 이은정, 이우섭, 김선태, 차동현, 김은지, 변영화, 김진욱, 김정식, 2023: 기후변화에 따른 한반도 태풍 진로 변화 및 영향. 2023년 한국기상학회 봄학술대회 논문집.
- Masson-Delmotte, V., Zhai, P., Pirani, A., Connors, S. L., Péan, C., Berger, S., ... and Zhou, B., 2021: Climate change 2021: the physical science basis. Contribution of working group I to the sixth assessment report of the intergovernmental panel on climate change, 2.
- Kim, G., Cha, D. H., Lee, G., Park, C., Jin, C. S., Lee, D. K., ... and Kim, J., 2020: Projection of future precipitation change over South Korea by regional climate models and bias correction methods. Theoretical and Applied Climatology, 141, 1415-1429.

기상조절기술 현황 및 전망

김병곤 강릉원주대학교 대기환경과학과 bgk@gwnu.ac.kr

- I. 개요
- II. 기상 조절실험 현황
- III. 국내 인공증설 실험
- IV. 전망 및 제언

최근 구름물리 관측기술 및 모델링 기술의 지속적인 발전에 따라 수자원 확보 및 가뭄 예방을 위한 기상조절기술의 성공 사례들이 학계에서 보고되고 있다. 이와 더불어 전 세계적으로 진행되는 기후변화에 따른 폭염과 가뭄으로 인한 산불 발화 및 물 부족, 슈퍼 태풍의 발생, 도시 집중호우, 선형(linear) 폭우 등의 재해 기상이 빈발함에 따라 전통적인 방식의 인공강우(설)실험 이외에도 재해기상 완화 및 조절 방안들이 연구되고 있는 실정이다. 여기에서는 세계 기상조절실험의 현황 및 향후 전망을 소개하고 국내 적용방안을 소개하고자 한다. ■

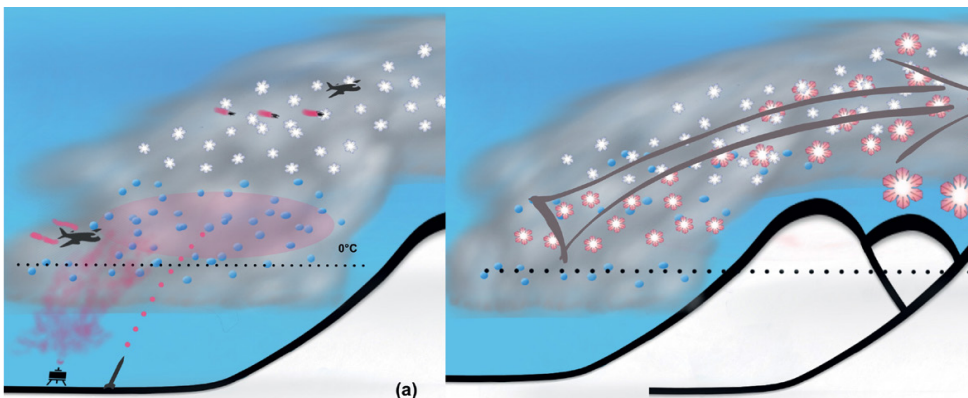
“ 가장 널리 활용되는 기상조절실험은 대기에 응결핵 살포로 강수를 발생시키는 것 ”

1. 개요

역사적으로 살펴볼 때 기상조절실험은 아주 오래 전부터 인류가 가뭄을 극복하거나 농경사회에서 수자원 확보를 위해 산상발화(山上發火)와 같은 기우제를 지내면서부터 시작되었다고 할 수 있다. 물론 이 당시는 과학적인 기반에서의 실험이라기 보다는 생존을 위한 주술 성격이 강했으며, 그야말로 비과학적인 부족의 집단 행동이었다고 할 수 있다. 하지만 다른 측면에서 보면, 산상발화의 경우에는 연소 과정에서 구름 씨앗을 대기 중에 제공하는 것이기 때문에 현대 인공강우(설) 실험에서 기본적으로 활용하는 구름씨 뿌리기와 유사하다고 할 수 있다. 자연 요인에 따른 물부족 이외에도 세계 인구의 지속적인 증가와 물 사용량 증대, 물 수요 확대 등으로 인하여 특정 지역에서는 수자원 확보문제가 심각하게 대두되고 있다 (Rasmussen et al., 2011).

가장 기본적이고 널리 활용되고 있는 기상조절실험은 수증기가 충분히 존재하고 불안정한 대기에 구름의 씨앗인 응결핵(혹은 빙정핵)을 살포하여 구름방울을 생성 및 성장시켜 강수에 이르게 하는 것이다. 그중에서도 세계기상기구(WMO)에서 가장 성공 확률이 높다고 추천하는 실험은 겨울철 지형성(oro-graphic) 인공강설 실험

[그림 1] (a) 겨울철 지형성 구름에 대한 인공강설 실험 모식도(빨간색 음영 처리 부분은 과냉각 구름 영역에 대한 씨뿌리기 영역임). (b) (a)에 의해 예상되는 시딩효과(빙정핵이 부러질 때 빙정이 생성되고, 빙정핵에 의해 성장하고 결착(riming) 과정을 거쳐 눈결정을 형성하는 과정을 보여줌)(Flossman et al., 2019)



“ 겨울철 수행되는
빙정핵 시딩은
여러 실험에서
과학적으로
검증 ”

협이다(Flossman et al., 2019). [그림 1]은 산악지역에서 발달하는 지형성 구름에 인공강설 실험을 수행할 때 구름 및 강설 발달과정을 설명하는 모식도이다. 기본 가설은 과냉각수적(0°C 이하의 수적)이 존재하는 구름에 빙정핵(주로 AgI)을 살포하여 빙정을 생성시킨 후, 이들이 이미 존재하는 과냉각수적과의 포화수증기압 차이에 의해 수적에서 증발된 수증기가 빙정에 침적(deposition)되면서 빙정이 성장하게 된다는 가설이다. 이를 빙정설 혹은 Wegener-Bergeron-Findeison 이론이라고 부른다(Bergeron, 1935; Findeisen, 1938). 겨울철에 수행되고 있는 빙정핵 씨 뿌리기(시딩) 방법은 여러 인공강설 실험에서 이미 활용되고 과학적으로 검증된 바 있다(French et al., 2018; Tessendorf et al., 2019).

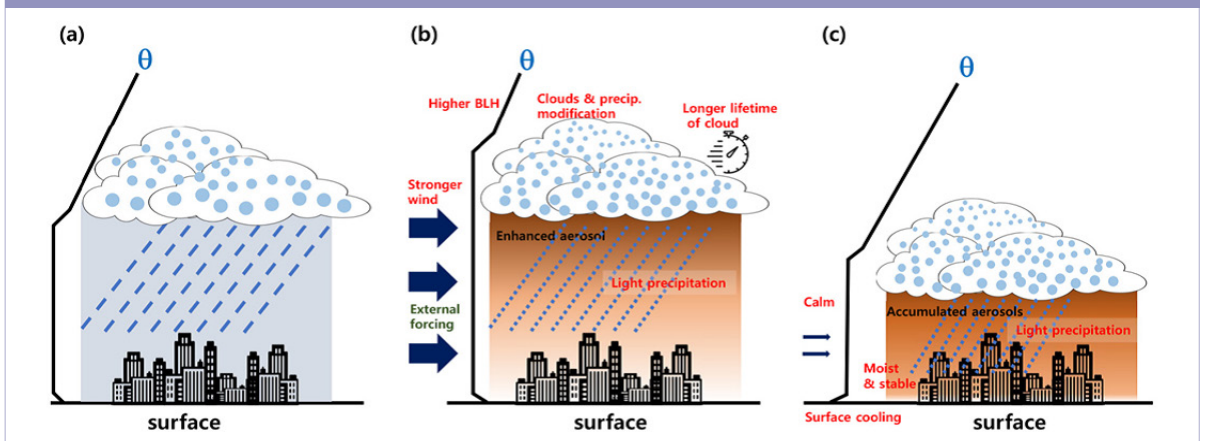
인공강우(설) 실험의 과학적 검증이 이루어지고 있는 한편, 전 세계에서는 기후 변화에 따른 각종 재해기상이 빈발하고 있다. 예를 들면, 지구기온 상승과 가뭄에 의해 세계적으로 산불이 빈발하고 있는데, 2023년 5월에 캐나다 북서부 지역에서 발생한 산불이 9월까지 동부로 확장하는 등 캐나다 전역이 산불로 인한 큰 피해를 겪었다. 2022년 여름에는 서울 도심에 발생한 집중호우로 인명 및 재산 피해가 발생한 바 있고, 2023년 충북 오송 지하차도에서 갑자기 쏟아진 폭우로 무고한 시민들이 생명을 잃는 어이없는 사건이 일어난 바도 있다. 이와 같이 최근 기후변화로 인한 여름철 집중호우의 강도가 이전 보다 강해지고 이에 의한 피해 역시 급증하고 있다. 즉, 인류는 지구적인 규모에서 다양한 기후위기를 직면하고 있는 상황인데, 그나마 다행스러운 점은 현대 과학기술의 발전은 인류에게 닥친 각종 재해기상을 조절하고 완화시킬 수 있는 수단을 제공할 수 있는 수준에 이르렀다.

기상조절실험은 인류가 원하지 않는 기상상태에 의도적으로(advertent) 구름 씨앗을 뿌려서 구름방울을 성장시켜 강수를 유발하게 하는 반면에, 현재 진행중인 기후변화는 인류가 고의로(의도적인) 지구온실가스를 배출하여 유발한 것이 아닌 문명이 발전하는 과정에서 다량의 화석연료를 사용하면서 의도하지 않은 산업활동의 부산물인 것이다. 이와 같이 자연계에서는 의도하지 않았던 인류의 사회경제적 활동에 의해 여러 기상 및 대기환경 변화가 발생하고 있다. 일례로 중국의 급

“ 에어로졸-구름-강수 상호작용은 국내 배출 대기 오염물질의 추가적 축적을 초래함 ”

속한 경제 발전으로 대기오염물질이 대기 중으로 배출되고 있으며 이들의 부산물인 에어로졸이 풍하측인 한반도로 장거리 이동되어 한반도에 극심한 연무를 일으켰던 적이 있다(이규민 등, 2017). 또한, 구름 방울의 씨앗 역할을 하는 에어로졸은 장거리 이동하는 과정에서 습윤한 조건과 만나게 되면 구름미세물리 특성(구름방울 크기와 개수)을 변화시키고 강수에도 영향을 줄 수 있다. 2013년 1월에는 의도하지 않았던 에어로졸과 날씨와의 상호작용이 관측된 바 있다. Eun et al., (2016)에 의하면 중국으로부터 발생한 고농도 에어로졸(PM2.5 & PM10)이 한반도 중부 지방으로 유입되면서 하층 구름의 미세물리과정을 변화시키게 되는데, 다량의 에어로졸 유입에 의한 구름방울 크기는 감소하면서 개수농도는 증가하여 결국은 강수를 억제하게 된다. 강수과정이 지연되면서 강수 강도 역시 약해지고 강수 시간은 길어지게 되는 것이다. 나아가 약한 강수와 함께 운량이 증가하기 때문에 지면에 도달하는 태양복사가 줄어들고 지표면 온도 하강 역시 초래하게 된다. 궁극적으로 에어로졸-구름-강수 상호작용으로 하층의 습윤화, 안정도 증가, 그리고 혼합도 감소 등의 기상조건 변화를 유도하게 되고, 나아가 국내에서 배출된 대기오염물질의 추가적인 축적(accumulation)을 초래하게 된다(Eun et al., 2021). 이러한 에어로졸-구름-강수-경계층 상호작용의 간략한 모식도를 [그림 2]에 제시하였다. 이는

[그림 2] 에어로졸-구름-강수-경계층 상호작용을 나타내는 모식도((a) 대기오염 및 기상 평균 상태, (b) 외부로부터 장거리 이동 에어로졸의 영향을 받는 조건에서 구름 및 강수의 변화를 보여주는 상태, (c) 고농도 에어로졸에 의해 지연된 강수에 의해 하층 습윤화 및 안정화로 에어로졸 농도가 축적되는 상태)(Eun et al., 2021)



“ 각 국가가 직면한 다양한 문제 해결, 실용적 필요로 기상조절실험이 활발히 수행 중 ”

인류의 의도하지 않은 사회경제적인 활동이 날씨와 대기환경에 어떤 변화를 일으킬 수 있는 지를 잘 보여주는 대표적인 사례라고 할 수 있다.

II. 기상조절실험 현황

일반적인 기상조절실험은 수자원 확보나 가뭄 예방을 위해 인공강우 혹은 인공강설 실험 방식으로 대다수 국가에서 보편적으로 진행되고 있으며, 이와 더불어 넓은 농지를 보유한 중국, 소련, 미국 등의 국가에서는 농작물 보호를 위하여 오랜 기간 우박 억제실험이 수행되고 있다. 이밖에도 건조한 사막지역에서는 수자원 확보를 위해서(아랍, 이스라엘 등), 산악지역에서는 건기의 식수 및 수자원 확보를 위해서(미국 서부), 산불 예방을 위해서(시베리아), 그리고 대기오염이 심각한 국가에서는 미세먼지 저감을 위하여(태국) 기상조절실험이 등이 수행되고 있다. 결국 각 국가가 직면하고 있는 다양한 문제 해결과 실용적인 필요에 의해 기상조절실험이 활발히 수행되고 있는 것이다. 이러한 기상조절실험은 과학적인 분석과 구체적인 검증과정도 함께 진행되기도 하지만, 어떤 경우는 각 지역의 시급한 목적 달성(인공강우(설), 우박 억제, 미세먼지 저감, 안개 소산 등)을 위해 실험이 지속적으로 운영되고 있다. 한편 'I. 개요'에서도 언급한 바와 같이 기후변화에 따른 가뭄 혹은 산불, 집중호우, 도심 선상(linear)폭우, 슈퍼태풍 발생 등의 위험기상이 빈발하고 있고, 구름물리 학문의 진보와 더불어 구름 관측 및 공학 기술 역시 발전함에 따라 빈발하는 위험기상 현상을 완화하고 조절하는 실험에 대한 수요 역시 증가하고 있는 상황이다.

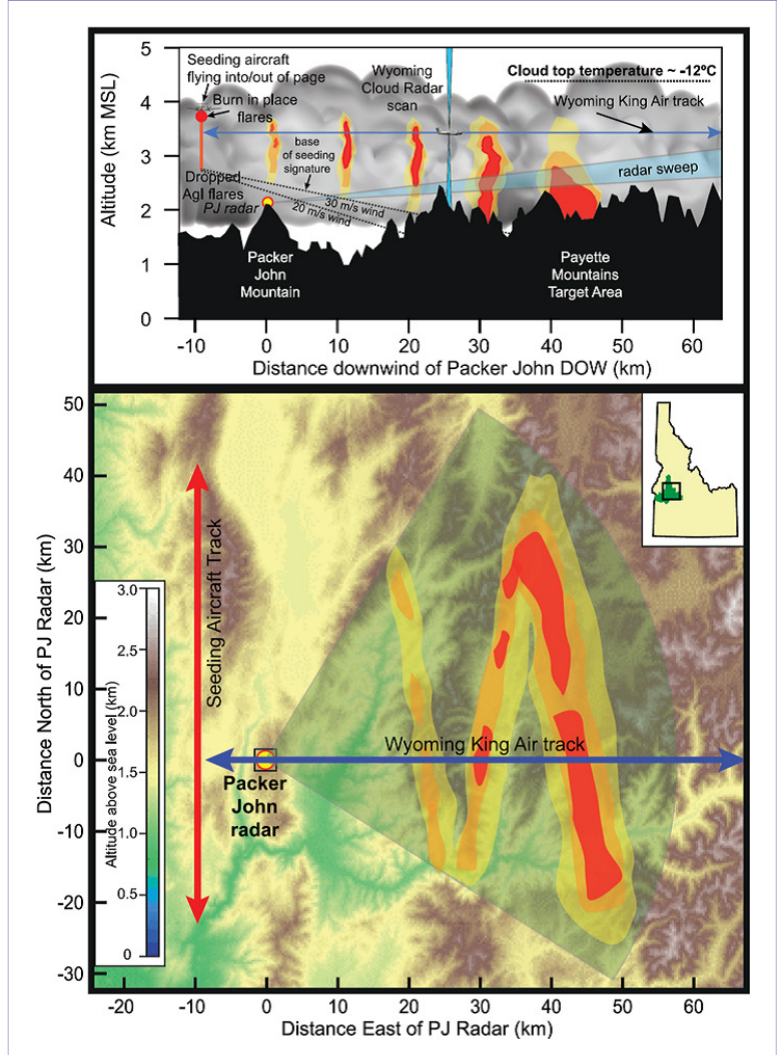
미국에서는 1962-83년까지 「Stormfury 프로젝트」를 통해서 허리케인 강도를 약화시키는 실험을 수행한 바 있다. 이 실험 역시 기본 가설은 태풍의 눈 주변에 구름씨앗을 살포하여 구름이 높게 발달하기 이전에 강수로 내리게 하여 허리케인의 강도를 약화시키는 것이다. 하지만 그 당시에는 관측기술의 부족으로 실험 효과를 과학적으로 검증하지 못했고, 실험에 대한 부작용 우려가 대두되면서 사업이

“ 미국 SNOWIE
실험은 세계 기상
조절실험 및 연구
촉진의 계기가 됨 ”

중요하게 된다. 이후 국가적 지원을 받는 기상조절실험은 지지부진하게 되지만, 미국 중서부 지역에서는 지역적 특수성으로 인해 인공강우(설) 및 우박억제 실험이 꾸준히 진행되었다. 그 중에서도 미국 아이다호에서 수행된 실험(Seeded and

Natural Orographic Wintertime Clouds: The Idaho Experiment: SNOWIE)은 세계기상조절실험 및 연구를 다시 촉진하는 계기가 되었다 (Tessendorf et al., 2019). SNOWIE 실험은 미국 아이다호 주변 산악지역에서 겨울철 수자원 확보를 위하여 시딩 실험을 수행하고, 구름 및 강수의 변화를 다양한 방법으로 관측하여 실험의 정량적 성과를 제시하였다. [그림 3]은 SNOWIE 실험의 결과를 보여주는 가설을 한눈에 볼 수 있게 정리한 모식도이다. [그림 3] 아래쪽의 빨간 화살표는 시딩 항공기가 남북방향으로 비행하면서 빙정핵을 살포하는 경로를 제시한 것이고, 파란색 화살표는 시딩에 의한 구름 및 강수의 변화를 관측하기 위하여 관측항공기(Wyoming King Air)가 동서방향으로 비행하는 경로를 보여주는 것이다. 참고로 아이다호 지역의 주풍은 서풍이다. 이밖에도 지상에는 Snowbank 지점에 이동식 레이더

[그림 3] SNOWIE 실험에서 시딩실험에 대한 기대되는 관측결과와 모식도 (노랑-오렌지-붉은 영역은 레이더 반사도를 의미. 위: 관측항공기 비행경로상의 연직 단면도로서 시딩에 의해 구름입자가 낙하하면서 성장하는 과정을 보여줌, 아래: 노란색 점은 지상 레이더, 빨간색 실선은 시딩항공기의 궤적, 파란색 실선은 관측항공기의 궤적을 의미)(Tessendorf et al., 2019)

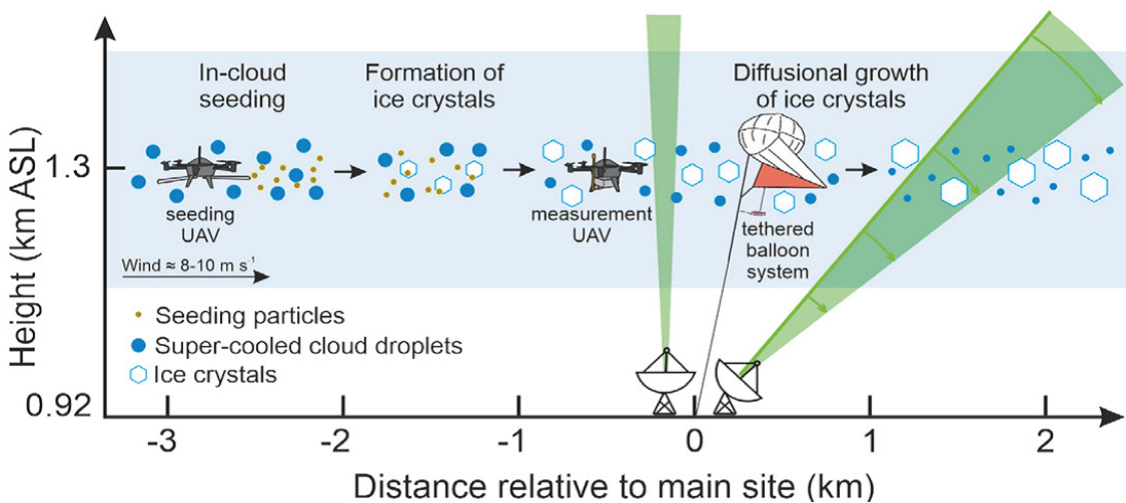


“ 실험 가설이
SNOWIE 캠페인
통해 시딩
성가로 확인 ”

와 Packer John 지점에 레이더가 구름의 수평적인 분포를 모니터링할 수 있게 설치되었다. 그 결과 시딩 항공기가 이동하는 과정에서 먼저 뿌려진 빙정핵 연기가 동쪽 방향으로 이루어지기 때문에, [그림 3]과 같이 수평 방향으로 지그재그 패턴의 구름 반사도 증가가 나타나게 된다. 그리고 풍하측으로 멀어질수록 구름방울 크기가 증가하기 때문에, 구름 반사도 역시 증가(빨간색)하는 것을 확인할 수 있다. [그림 3](위)는 실험 지역에서 관측항공기가 풍하측으로 비행하면서 연직(위 아래 동시) 스캔한 것인데, 수평분포와 같이 시딩한 플룸이 통과하는 지점에서 아래쪽으로 구름 반사도 증가가 뚜렷한 것을 알 수 있고, 풍하측으로 멀어질수록 반사도 역시 증가하는 것을 확인할 수 있다. 이러한 실험 가설은 실제 SNOWIE 캠페인을 통해 시딩 실험의 성과로써 확인되었고, 여러 관측 및 모델링 연구결과와 함께 소개된 바 있다 (French et al., 2018; Tessendorf et al., 2019).

상대적으로 기상조절실험이 활발하지 않았던 유럽에서도 최근(2021-2023년) 인공증설 실험(CloudLab)을 수행하고 있는데, 본 실험은 빙정핵(Ice Nuclei)을 살포

[그림 4] CloudLab 실험 동안 구름시딩실험 전반적인 개요(드론을 이용하여 과냉각수적이 포함된 하층 층운에 드론을 이용하여 시딩함으로써 비균질 핵화과정을 통한 빙정의 생성을 유도함. 새롭게 생성된 빙정은 수증기 확산에 의해 성장하고 빙정 설에 의해 과냉각 수적은 증가하고 빙정은 성장하게 됨. 다양한 시딩 영향은 관측드론, 테더존데, 연직지향 구름레이더, 스캐닝 구름레이더 등을 통해 관측됨)(Henneberger et al., 2023)



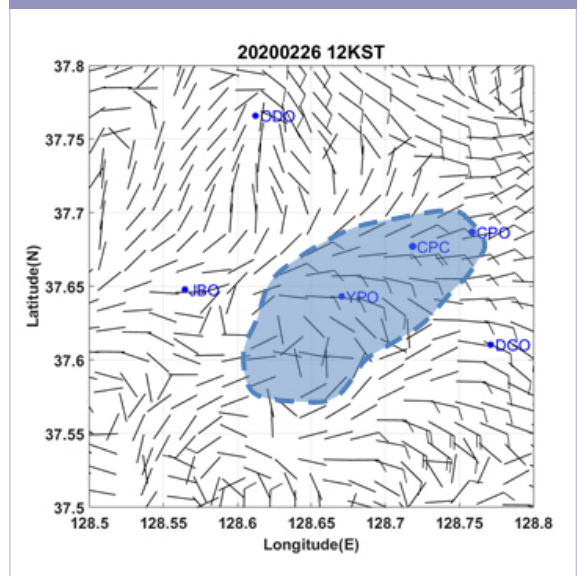
“ 스위스 CloudLab 캠페인은 기초적 빙정 성장 과정의 과학적 이해가 목적 ”

하여 기초적인 빙정 성장 과정의 과학적인 이해에 목적을 두고 있다(Henneberger et al., 2023). CloudLab 캠페인은 스위스 Reiswill 근처 고원지역에서 수행되는 인공증설 실험인데, 주로 과냉각수적을 다량 함유한 층운형 구름을 대상으로 하고 있다. 특이한 점은 무인항공기(드론)을 활용하여 구름속에 직접 빙정핵 씨뿌리기를 하고 있으며, 다른 무인항공기와 테더(Theethered) 존대를 활용하여 기상조건이나 구름 미세물리 특성 등을 직접 관측하고 있다. 연구자들은 과냉각수적에 빙정핵 씨뿌리기를 함으로써 빙정을 발생시키고, 이미 존재하는 과냉각수적과의 포화 수증기압 차이에 의한 빙정 성장과정을 정밀하게 관측하고 이해하고자 한다. 즉, 빙정핵에 의해 빙정이 생성된 이후에는 과냉각수적은 증발하고 증발된 수증기가 과포화상태인 빙정에 침적되면서 빙정이 성장하게 되는 과정을 자연실험실에서 확인하는 것이다. [그림 4]는 CloudLab 캠페인을 통해 얻고자 하는 빙정핵 시딩과 빙정의 생성 및 성장과정을 수평적인 공간 해상도와 함께 모식도로 제시한 것이다.

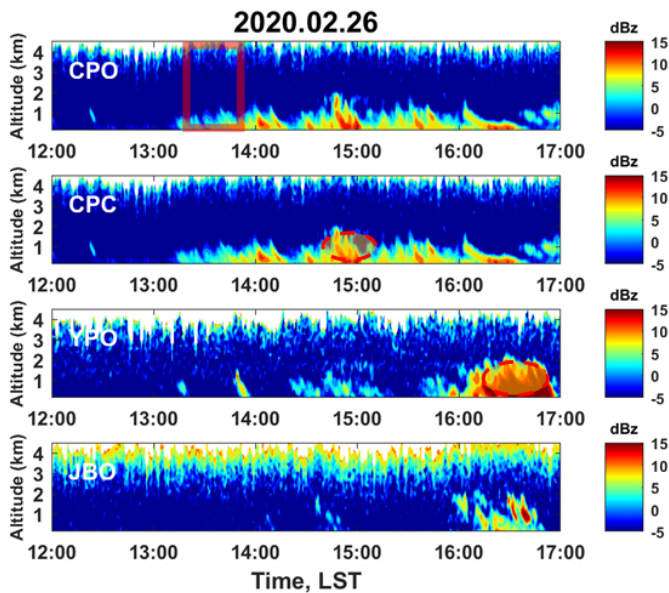
III. 국내 인공증설 실험

국내에서도 국립기상과학원을 중심으로 산불/가뭏에 방, 안개 및 미세먼지 저감 등을 목적으로 다양한 지역에서 기상조절실험이 수행되고 있다. 시딩실험 방법도 기상항공기, 지상연소 실험장치, 로켓, 드론 등을 활용하여 구름씨 뿌리기를 수행하고 있고, 실험 검증을 위하여 최적의 관측망 구성 및 첨단장비 등을 꾸준히 도입하여 체계적인 인공강우(설)실험을 수행하고 있다(기상청, 2022). 여기에서는 강원 영동 대관령 지역에서 수행된 인공증설실험 결과를 간략하게 소개하고자 한다. 대관령 지역에는 겨울철 수자원 확보 및 산불 예방을 위해 인공증설실험을 수행하고 있는데, 시딩 지점을 포함

[그림 5] 대관령 주변 6개 관측소 배치와 인공증설실험이 수행된 2020년 2월 26일 12시의 바람장(음영처리된 부분은 CPO 지점에서 AgI 연소실험 이후 시딩물질의 확산 방향을 나타냄)



[그림 6] 2020년 2월 26일 CPO(구 대관령 기상대) 지점에서 AgI 시딩 실험을 한 이후 풍하측에 나타나는 Micro Rain Radar 구름반사도 비교(시딩 실험 이후 1시간 경과한 이후 CPC(현 대관령 기상대) 지점과 약 2시간 경과한 이후 YPO(용평) 지점에서 강수입자 크기 분포 증가 뚜렷함(붉은 점선). 대조지점인 JBO(진부)에서는 배경 반사도 수준의 반응을 보임)



하여 6개 관측소가 구성되어 있다(그림 5). 구 대관령기상대 지점인 CPO 지점에서 AgI 지상연소실험을 수행하고 있는데, 2020년 2월 26일 시딩 실험 이후 풍하측 4km 지점(CPC: 현 대관령기상대)에서 Micro Rain Radar (MRR)와 Parsivel, 그리고 Multi-Angle Snowflake Camera (MASC) 등을 이용하여 시딩효과를 정량적으로 분석하였다. 실험 기간동안 LDAPS 분석장의 바람 분석결과(그림 5) 동풍계열 바람이 유입되고 시딩물질이 풍하측으로 천천히 확산 및 구름속에 유입되면서 이동 방향을 따라 한 시간 이후에는 CPC(대관령 기상대), 두 시간 이후에는 YPO(용평)에서 구름 반사도 증가가 순

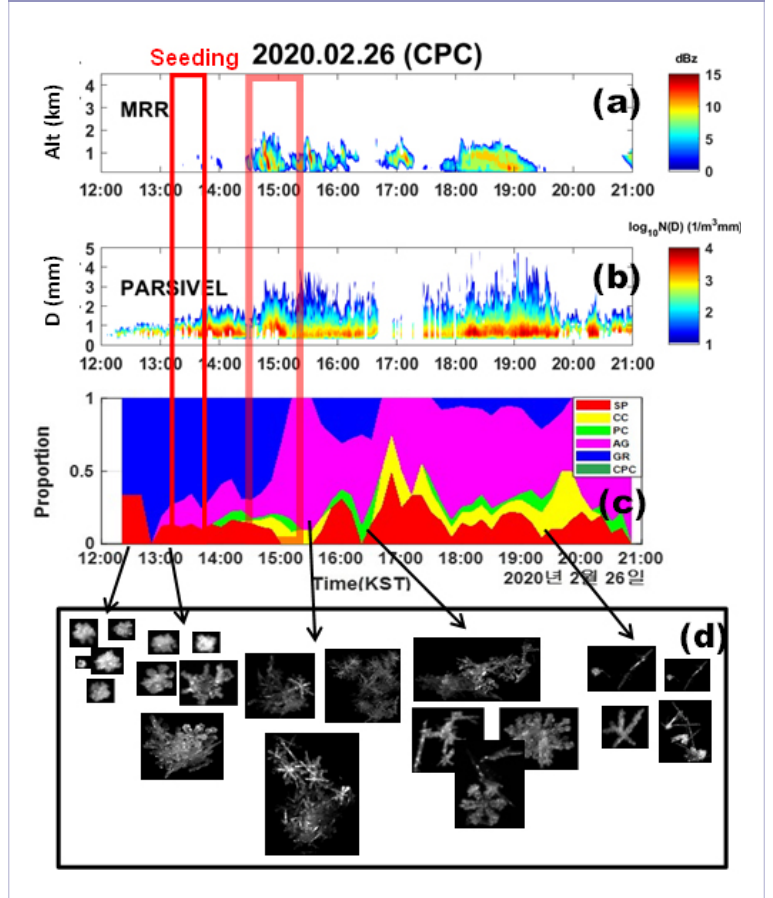
차적으로 나타난 것을 MRR 분석결과 잘 확인할 수 있다(그림 6). 반면에 시딩물질이 이동·확산되지 않은 JBO(진부 지점)에서는 시딩에 의한 뚜렷한 변화가 나타나지 않았다. [그림 6]에서 빨간색 네모 박스는 시딩시간을 의미하고, CPC와 YPO의 빨간색 파선은 시딩에 의해 순차적으로 나타난 구름반사도 증가(구름방울 크기 증가)를 잘 보여주고 있다. 다만, 지상 강수량(1h 해상도)의 변화는 의미있는 수준의 차이를 보이지 않았는데, 이는 AgI 시딩 시간이 30분 정도로 짧기 때문에, 나타나는 반응 시간도 비례적으로 한 시간 이내에 그치고 있기 때문으로 판단된다. 그래서 향후 의미 있는 증설시험 효과를 보여주기 위해서는 실험 조건이 맞는 대기환경과 구름상태에서는 시딩 시간을 최대한 증가시키는 게 필요하다.

[그림 7]은 CPC(현 대관령 기상대) 지점에서 시딩 이후 1시간이 경과한 시점에서

MRR 구름반사도 증가와 함께 Parsivel 구름입자 크기 증가가 뚜렷하게 나타나고 있어 시딩에 의한 구름입자 크기 증가로 판단된다. 무엇보다 흥미로운 점은 시딩실험이 진행되고, 이후 반응이 일어나는 시간대 사이에 결착형 얼음입자들이 다량으로 MASC[그림 7아래]에서 포착된 것을 알 수 있다. 결착형 얼음입자는 과냉각수적이 빙정과 충돌하는 과정에서 발생되기 때문에, 이는 2절에서 언급된 SNOWIE나 CloudLab 프로젝트에서 주요 실험 대상(target)으로 설정하고 있는 과냉각수적이 함유된 혼합상(mixed-phase) 구름이 대관령 실험에서도 존재하였음을 의미하는 것이다. 그리고 이후 시딩효과가 나타나는 시기(연한 빨간색 박스)에 부착형으로 습성변화가 뚜렷하게 나타나고 있다. 이와 같이 시공간적으로 정밀한 관측망과 고해상도 관측기기를 통해서만 정량적으로 유의미한 수준에서 인공증설 효과를 확인할 수 있다. 하지만 SNOWIE 나 CloudLab 실험과 같이 구름미세물리(구름방울 크기 및 개수농도) 상세 관측, 구름레이더 수평 및 연직 스캔, 시딩 항공기와 관측항공기의 분리 운영 그리고 드론(무인 항공기)을 활용한 구름내부 직접 시딩과 같은 선행 실험 경험을 국내에도 도입한다면 시딩효과를 좀 더 정량적으로 증명할 수 있을 것이고, 나아가 실험 목적 달성이 훨씬 용이할 것으로 판단된다. 또한, 인공강설 실험 효과

“ 구름미세물리 상세 관측, 구름레이더 수평/연직 스캔 등을 국내 도입한다면 시딩효과와 정량적 증명이 가능할 것 ”

[그림 7] CPO(구 대관령기상대)에서 AgI 시딩 실험 이후 CPC(현 대관령 기상대) 지점에서 (a) MRR로 관측한 구름 반사도, (b) Parsivel로 관측한 강수 입자 크기 분포, (c) 강설입자의 습성(habit), (d) MASC로 촬영한 눈결정 사진(진한 붉은색 박스는 CPO 지점에서 시딩기간, 연한 붉은색 박스는 CPC 지점에서 시딩 효과가 나타난 기간을 의미함)



“ 2050년까지
추진되는 일본의
기상조절프로젝트
'Moonshot
Goal 8' ”

를 극대화하기 위해서는 시딩가능한(seedable) 대기환경 및 기상조건에서 연속적이고 상시 실험이 가능한 운영체계를 구축하고 장시간 실험이 가능하도록 운영되어야 할 것이다.

IV. 전망 및 제언

지금까지 국내외에서 수행되고 있는 기상조절 실험의 현황과 주요 결과를 간략하게 소개하였다. 전반적으로 기상조절실험은 구름의 씨앗이라 할 수 있는 응결핵(Cloud Condensation Nuclei) 혹은 빙정핵(Ice Nuclei)을 살포하여 구름방울을 생성 및 성장시켜 강수(비나 눈)에 이르게 하는 것이 가장 기본적인 이론이라고 할 수 있다. 세계 여러 국가에서는 수자원 확보나 산불 예방, 안개 저감, 우박 억제와 같은 전통적인 목적을 위해 인공강우(설) 실험을 운영하고 있다. 그리고 SNOWIE나 CloudLab과 같은 과학적으로 잘 짜여진 관측망, 고해상도 정밀 관측기기들과 구름상세 모델링 등을 통해 인공증설실험의 정량적인 성과가 제시되면서 구름물리 분야 이론도 계속 진보하고 있다.

이러한 기상조절실험 분야의 발전에 발맞춰 최근 일본에서는 위험기상의 제어 및 조절을 목적으로 하는 야심찬 기상조절 프로젝트가 추진 중에 있다. 이 프로젝트의 이름은 'Moonshot Goal 8'으로 일본 문부과학성의 전폭적인 지원하에 2050년까지 추진되는 장기 국가 연구사업 중의 하나이다(Takemasa, 2023). 일본은 한국과 마찬가지로 여름철 태풍의 직접적인 피해와 선상(linear)폭우 그리고 도시지역 폭우로 인한 막대한 인명 및 재산 피해를 겪고 있다. 주요 연구주제는 기후변화에 따른 위험기상의 빈발로 발생하는 각종 피해를 줄이기 위해 사회적 정책 결정을 위한 날씨와 사회의 조절기능 연구, 고립된 대류계의 집중호우나 선상강수 밴드에 의한 집중호우 조절 연구, 안전한 사회 건설을 위한 태풍 및 강풍 조절 연구 등이 있다. 향후 30여년 동안 일본에서 이러한 대규모 프로젝트가 꾸준히 수행된다면 일본에서 완화시킨 기상현상이 인접국가인 한반도에 부작용(side effect)으로 증폭

“ 인간의 의도적인 개입이 원하는 결과만을 제공하지 않을 수 있음을 명심해야 할 것 ”

되면서 재해기상으로 발전할 수도 있다. 또한, 태풍 조절과 관련하여 태풍의 진로 변경이 인접국가에게 오히려 막대한 피해를 초래할 가능성도 배제할 수 없다. 당연히 국내에서도 이에 대비한 적절한 대응 연구사업이 신속히 준비되어야 할 것이다.

지구온난화를 완화시키려는 노력의 일환으로 수행되는 지구공학(geoengineering) 실험도 기상조절실험의 한 종류라고 할 수 있다. 지구공학실험은 다양한 시나리오별로 이론에 기반한 수치모의 실험을 수행하는 데에 머물렀지만, 최근 작은 규모에서 지구공학(geoengineering) 실험이 수행되고 있다. 호주 북동부 해양은 전 세계에서 산호초가 가장 아름다운 곳(Great Barrier Reef)으로 널리 알려져 있어 수많은 관광객들을 불러 모으는 곳이다. 하지만 최근 기후변화에 따른 수온 상승으로 산호초가 하얗게 폐사하는(bleaching) 일이 벌어지고 있다. 이에 과학자들은 해양성 층적운에 구름씨앗(해염)을 다량 살포함으로써 구름방울 크기는 감소하면서 개수농도가 증가하여 태양복사에 대한 구름 반사도를 증가시키는 실험(Marine Cloud Brightening)을 하고 있다(Harrison, 2023). 구름의 반사도 증가는 해수면에 도달하는 태양복사 에너지를 줄임으로써 해수면 온도를 하락시키게 된다. 아직까지 뚜렷한 성과를 제시하고 있지는 않지만, 작은 규모일지라도 최초의 지구공학 테스트베드 역할을 한다고 할 수 있다.

이와 같이 전 세계는 진행중인 기후변화 환경에서 각 국가의 필요사항을 해소하고, 빈발하고 있는 자연재해를 완화시키기 위하여 다양한 방법으로 기상조절실험을 수행 및 계획 중에 있다. 하지만 인간의 자연계에 대한 의도적인 개입이 인류가 원하는 결과만을 제공하지 않을 수 있다는 점을 명심하고 실험 계획 및 준비가 수행되어야 할 것이다. 대기에는 제한된 물이 세 가지 상(phase)으로 존재하고, 총 물의 양은 보존될 것이다. 인간의 의도적인 개입으로 어느 지역에 강수를 내리게 할 경우, 원래 강수의 혜택을 누리던 지역은 그러지 못할 가능성이 크다. 또한, 에너지 역시 보존되기 때문에 시딩 실험을 통한 인위적인 개입이 구름생성 및 발달 과정에서 에너지 재분배가 어떻게 변화하는 지도 엄밀히 검토될 필요가 있다. 또한, 세계 여러 지역에서 운영 중인 기상조절실험의 성공과 지속적인 발전을 위해서는 단순

히 실험에 그치지 말고 실험 결과에 기반한 구름물리 과정의 기초적인 이해와 과학적인 분석도 함께 수행되어야 할 것이다.

참고문헌

- 기상청, 2022: 2023년도 인공강우 시행계획, 34pp.
- 이규민, 은승희, 김병곤, 장문정, 박진수, 안준영, 정경원, 박일수, 2017: 2011-2013년 한반도에서 관측된 다양한 연무의 분류 및 광학특성. 대기, 27(2), 225-233.
- Bergeron, T., 1935: On the physics of cloud and precipitation. Proc. Fifth Assembly U.G.G.I. Lisbon, Vol. 2, Lisbon, Portugal, Union Geodesique et Geophysique Internationale, 156.178.
- Eun, S.-H., B.-G. Kim, K.-M Lee, J.-S. Park, 2016: Characteristics of recent severe haze events in Korea and possible inadvertent weather modification. SOLA, 12, 32-36, <https://doi.org/10.2151/sola.2016-007>.
- Eun, S.-H., S.M. Park, B.-G. Kim, J.S. Park, K.H. Chang, 2021: Observational Analysis of Aerosol-Meteorology Interactions for the Severe Haze Episode in Korea. Atmosphere, 12(1), 33, <https://doi.org/10.3390/atmos12010033>.
- Findeisen, W., 1938: Die kolloidmeteorologischen Vorgänge bei der Niederschlagsbildung (Colloidal meteorological processes in the formation of precipitation). Meteor. Z., 55, 121.133, <https://doi.org/10.1127/metz/2015/0675>.
- Flossmann, A.I., M. Manton, A. Abshaev, R. Brientjes, M. Murakami, T. Prabhakaran, and Z. Yao, 2019: Review of advances in precipitation enhancement research. Bull. Amer. Meteor. Soc., <https://doi.org/10.1175/BAMS-D-18-0160.1>.
- French, J. R., and Coauthors, 2018: Precipitation formation from orographic cloud seeding. Proc. Nat. Acad. Sci., 115 (6), 1168.1173, <https://doi.org/10.1073/pnas.1716995115>.
- Harrison, D., 2023: Marine cloud brightening, could it mitigate coral bleaching on the Great Barrier Reef? EGU General Assembly 2023, Vienna, Austria, 24-28 Apr 2023, EGU23-17057, <https://doi.org/10.5194/egusphere-egu23-17057>, 2023.
- Rasmussen, R., and Coauthors, 2011: High-resolution coupled climate runoff simulations of seasonal snowfall over Colorado: A process study of current and warmer climate. J. Climate, 24, 3015.3048, <https://doi.org/10.1175/2010JCLI3985.1>.
- Takemasa, M., 2023: Moonshot Goal8 Overview. International Symposium on Theory of Weather Controllability.
- Tessendorf, S.A. and Coauthors, 2019: Transformational approach to winter orographic weather modification research: The SNOWIE Project. Bull. Amer. Meteor. Soc., 100, 71.92, <https://doi.org/10.1175/BAMS-D-17-0152.1>.

구름물리챔버: 미래로 전진을 위한 실험실

엄준식 부산대학교 대기환경과학과, 부산대학교 환경연구원 jjunum@pusan.ac.kr

- I. 인공강우와 구름물리챔버
- II. 전 세계 구름물리챔버 현황과 한국형 구름물리실험챔버
- III. 기본에서 시작되는 구름물리챔버의 활용
- IV. 맺음말

구름물리챔버는 대기중에서 구름이 생성, 발달, 소멸하는 구름물리 미세과정을 실험실에서 재현할 수 있는 실험시설이다. 기상청은 구름물리 과정, 구름-에어로졸-강수 상호작용, 인공강우 물리과정 이해 증진 및 연구역량 강화의 목적과 더불어 관측장비 내구성 평가를 위해 2022년 국립기상과학원에 한국형 구름물리실험챔버를 순수 국내 기술을 사용하여 완공·운영하고 있다. 이 목적을 달성하기 위해서는 구름방울 활성화, 균질 및 비균질 핵화, 충돌병합, 상고대화, 부착 등 미세물리 각 과정에 관한 개별적 이해와 이들의 물리적 연결고리를 파악할 수 있는 반복 실험이 정확하고 안정적인 챔버 운영을 통한 재현성 확보 아래 수행되어야 한다. 구름물리에 대한 본질적인 이해 증진은 자연스레 인공강우의 효율성 증진 및 기술 개발로 이어진다. 기상청 구름물리챔버는 기상청 항공기와 더불어 인공강우와 구름물리 연구 분야에서 미래로의 전진을 이룩할 귀중한 실험실이다. 지속적이고 안정적인 연구 수행을 통해 대한민국 기상청이 전 세계 구름물리 분야의 성지로 자리매김하기 위한 기상청과 유관부처의 아낌없는 지원과 기다림을 기대한다. ■

“ 드라이아이스
활용하여 챔버내
과냉각수적이
빙정으로 변환된
것이 인공강우의
기념비적
한걸음 ”

I. 인공강우와 구름물리챔버

제2차 세계대전 중 미국 General Electric (GE) 연구소 소속 연구원인 Vincent Joseph Schaefer (1906-1993) [그림 1]는 Irving Langmuir (1881-1957)의 조수로서 가스 마스크의 연기 여과, 잠수함 탐지를 위한 이중 음향 사용, 인공 안개 형성 등의 군사문제와 관련된 연구를 수행했다. 그리고 개인적으로는 눈송이 복제품을 만드는 방법 개발(Schaefer, 1941)과 이를 겨울철에 발생하는 폭풍 연구에 활용하는 연구(Schaefer, 1942) 등 구름 안에 존재하는 빙정(ice crystal)과 관련된 연구를 수행하였다. 그와 동료의 임무는 1943년을 기점으로 실험을 기반으로 하는 강수 공전(precipitation static), 항공기 결빙, 빙정핵(ice nuclei), 구름물리로 전환되었다. 그러나 빙정핵으로 작용하는 얼음 결정체를 만들어내는 물질을 찾기 위해 탄소, 흑연, 기름, 황, 산화마그네슘, 화산재, 활석, 규산염, 규조토 등 다양한

[그림 1] 구름 챔버와 Vincent Joseph Schaefer(앞), Bernard Vonnegut(오른쪽 뒤), Irving Langmuir(왼쪽 뒤)(Langmuir는 1932년 노벨 화학상 수상자이다.) (출처: GE Research Lab Photographs)



물질에 대한 챔버 실험을 수행하였으나 뚜렷한 성과를 내지 못했다. 1946년 7월 14일 실험을 계속하기에는 챔버의 온도가 너무 높았기 때문에 챔버의 온도를 낮추고자 드라이아이스 조각을 챔버 안에 넣었는데, 이때 과냉각수적(supercooled water droplet)이 매우 빠르게 빙정으로 변환된 것을 발견하였다(Schaefer, 1946). 인공강우를 위한 기념비적인 한 걸음이었다.

Schaefer가 발견한 것은 드라이아이스가 주변 공기의 온도를 급격히 낮춰 과냉각수적을 얼리는

“ 챔버 실험실에서의
성과는 즉시
항공기 실험으로
이어졌다. ”

방법이지만, 같은 연구실 동료인 Bernard Vonnegut (1914-1997)은 빙정핵으로 직접 작용할 수 있는 물질을 찾는 연구에 매진하였다. 문헌조사를 통해 얼음과 유사한 AgI과 PbI₂을 후보군으로 찾아내고 이론적인 계산을 하였다. 1946년 11월 14일 수행한 챔버 실험에서 AgI이 -3°C의 높은 온도에서도 빙정핵으로 작용한다는 놀라운 사실을 발견했고, 일정량의 AgI으로부터 다량의 빙정핵을 만들어 내는 방법 또한 제안했다(Vonnegut, 1947). 인공적인 구름씨뿌리기(cloud seeding)의 시작이었다.

챔버를 활용한 실험실에서의 괄목할 성과는 즉시 실제 대기에 존재하는 과냉각 구름에 대한 항공기 실험으로 이어졌다. 1946년 11월 13일 Schaefer는 항공기로 미국 매사추세츠 주 서부에 있는 Berkshire 산맥의 Greylock 산 위 약 4.3km 상공을 비행하던 중 과냉각수적을 포함하고 있는 렌즈형 층적운에 1.5kg의 드라이아이스 분말을 살포하였다. 5분이 채 안 돼서 구름 아래로 눈이 내리는 것을 관측하였고, 이는 구름 아래로 약 600m까지 내려온 이후 승화되어 사라졌다. 인류가 항공기를 사용하여 자연상태의 구름에 실행한 최초의 과학적인 인공강우 실험이었으며, 태고 때부터 이어져 오던 인공강우에 대한 인류의 오랜 꿈을 실현하기 위한 여정이 시작되는 순간이었다.

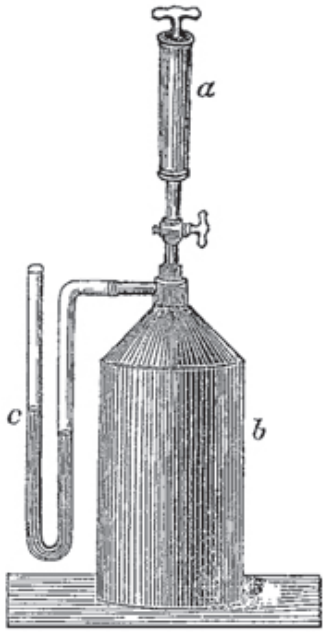
1940년대 GE 연구소에서 이루어 낸 일련의 눈부신 성과는 챔버를 활용한 실험의 결과로부터 이루어졌으며, 또한 이전 반세기 동안 구름물리 연구 분야에서 이룬 혁혁한 성과가 있었기에 가능했다. 이 중 가장 중요한 결과로는 액체와 고체 상태의 물에 대한 포화 수증기압의 차이에 따라 혼합상(mixed phase) 구름 안에서 과냉각수적은 증발하여 수증기가 되고 이 수증기가 빙정에 침착되면서 빙정이 빠르게 성장하게 되는 빙정과정(Wegener-Bergeron-Findeisen process)을 꼽을 수 있다. 구름 성장의 중요한 물리적 메커니즘을 설명하는 빙정과정은 Alfred Lothar Wegener (1880- 1930), Tor Bergeron (1891-1977), Walter Findeisen (1909-1945) 세 명의 과학자들의 끈질긴 관측과 정립한 이론을 검증할 챔버 실험이 있었기에 가능했다.

“ 구름물리챔버는 팽창식, 확산식, 혼합식 챔버로 구분된다. ”

II. 전 세계 구름물리챔버 현황과 한국형 구름물리실험챔버

1. 구름물리챔버의 태동

[그림 2] James Pollard Espy의 nephelescope (Espy, 1841) ((a) 압축펌프, (b) 원통, (c) 기압계)



챔버(chamber)는 대기과학, 물리학, 생물학, 재료공학 등 다양한 분야의 연구 수행에 사용되는 밀폐된 공간으로 온도, 습도, 압력 등 내부의 환경을 조절할 수 있는 실험시설이다. 우리가 일상생활에서 사용하고 있는 냉장고와 냉동고 또한 넓은 범위에서 챔버라고 할 수 있으며, 액화천연가스 운반선, 타이어 회사, 생리대 및 기저귀 회사 등에서도 연구 및 개발을 위해 사용하고 있다. 본문에서 챔버에 대한 설명은 대기과학 분야에서 구름 생성과 구름씨앗으로 작용하는 에어로졸에 대한 실험을 목적으로 하는 구름물리챔버로 그 범위를 한정하며, 대기 중의 화학 반응, 특히 광화학 스모그 형성 관련 연구 수행 목적의 스모그 챔버는 제외한다.

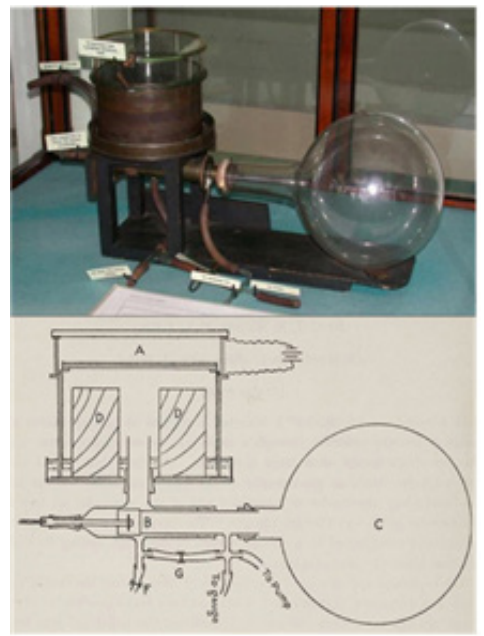
구름 생성, 발달, 소멸의 구름물리 과정 재현을 목적으로 하는 구름물리챔버는 작동 방법에 따라 크게 감압 팽창을 통해 과포화를 만드는 팽창(expansion)식 챔버, 온도구배를 통한 확산으로 과포화를 만드는 확산(diffusion)식 챔버, 차가운 공기와 따뜻한 공기를 혼합하여 과포화를 만드는 혼합(mixing)식 챔버로 구분된다. 최초의 구름물리챔버 기원은 미국의 기상학자 James Pollard Espy (1785-1860)가 개발한 원통에 압축펌프와 기압계가 연결된 nephelescope라 불리는 장치다(Espy, 1841)[그림 2]. 그는 이 장치를 통해 충분한 수증기가 존재할 때 팽창이 이루어지면 구름이 생성된다는 사실을 발견하였으나, 에어로졸에 수증기가 응결되어 구름이 생성된다는 사실은 인지하지 못했다(McMurry, 2000). 대기 중에서 에어로졸이 구름응결핵으로 작용하여 구름이 생성된다는 사실은 이후 Paul-Jean Coulier (1824-1890)와 John Aitken (1839-1919)의 실험을 통해 알려졌다(Mason, 2006). 두 사람 모두 팽창식 챔버를 실험에 사용하였다. Aitken은 Coulier의 실험결과(Coulier, 1875a; 1875b)를 알지 못한 채 챔버 실험을 진행하여 비슷한 실험결과(Aitken, 1880a; 1880b)를 도출했

“ Wilson 챔버는 입자 검출기로서 입자 물리학 및 핵물리학 분야에서 주목을 받기 시작 ”

다(Spurny, 2000). Aitken의 챔버는 추가적인 개조를 거치면서 훗날 Aitken dust counter로 널리 알려진 구름응결핵 계수기의 원형이 된다.

본격적인 구름 생성 연구의 기반을 마련한 챔버는 영국의 기상학자이자 물리학자인 Charles Thomson Rees Wilson (1869-1959)이 1911년에 개발한 Wilson 구름챔버다(그림 3). 그는 영국 Ben Nevis 산에 있는 기상대에서 근무하던 중 광륜(glory) 현상인 브로켄 유령(Brocken spectre)을 목격한 것에 감명을 받아 구름 생성과 광학 현상에 관한 연구를 위해 구름챔버를 개발하였다. 그가 개발한 챔버는 원통 모양의 챔버 안에 수증기 또는 기체 상태의 알코올을 주입하고 챔버와 연결된 피스톤을 사용하여 내부 공기를 단열팽창시켜 구름을 생성시키는 원리로 작동하는 팽창형 챔버였다. 구름 생성 연구를 목적으로 개발한 Wilson의 의도와는 다르게 그의 챔버는 새로운 입자의 종류, 에너지, 방향 등을 연구하는데 유용한 입자 검출기로 입자 물리학 및 핵물리학 분야에서 주목을 받기 시작했다. 과포화 상태의 챔버에 고에너지 입자가 입사하게 되면 입자의 경로를 따라서 주변 공기 분자가 이온화된다. 이 이온화 과정이 일으킨 수증기의 응결은 수적을 형성하게 되고, 이 수적의 관측이 바로 입사한 입자의 경로를 시각화하는 것이다. 그 공로를 인정받아 Wilson은 Arthur Holly Compton (1892-1962)과 함께 1927년 노벨 물리학상을 받았다. Wilson 챔버는 지속해서 새로운 입자의 발견에 사용되었다. James Chadwick (1891-1974)은 중성자 발견으로 1932년 노벨 물리학상을 받았고, Carl David Anderson (1905-1991)은 Wilson 챔버를 사용하여 1932년 양전자와 1936년에는 뮤온을 발견하여 1936년 노벨 물리학상을 받았다. Patrick Blackett (1897-1974)은 Wilson 챔버를 활용하여 우주선(cosmic ray)의 존재를 증명한 공로로 1948년 노벨 물리학상을 받았다. 구름 챔버를 우주선 연구에 활용하는 연구는 현재까지 계속되고 있으며, CERN (European

[그림 3] Wilson 구름챔버(출처: Linda Hall Library)



[그림 4] Findeisen 구름 챔버(Podzimek, 1957)



Council for Nuclear Research) CLOUD (Cosmics Leaving OUtdoor Droplets) 챔버에서 가장 활발히 수행되고 있다.

20세기 초반 대기과학 분야에서 순수 구름물리학 연구를 위해서 사용했던 가장 유명한 챔버는 Findeisen 챔버이다(Podzimek, 1957)[그림 4]. Findeisen은 빙정과정 연구와 더불어 안개에 관한 연구를 위해 챔버 실험을 수행하였다. 또한, 그는 제2차 세계대전 동안 독일의 Luftwaffe 공항 기상대에 근무하며 1942년 독일이 점령 중이던 체코슬로바키아 상공에서 반복적으로 항공기를 사용한 구름씨뿌리기 실험을 수행한 것으로 알려져 있다.

2. 구름물리챔버의 작동 원리와 운영 현황

자연에서 구름이 만들어지기 위해서는 습윤공기, 구름응결핵으로 작용할 에어로졸, 그리고 습윤공기가 포화 상태에 이르기 위한 적절한 환경조건이 필요하다. 습윤공기가 단열적으로 상승을 하면 주변의 압력이 낮아지고, 공기는 팽창하고, 온도가 하강하며 어느 순간에는 (과)포화 상태에 도달하게 된다. 또한, 서로 다른 두 불포화 습윤공기가 혼합할 때도 (과)포화가 일어난다. 습윤공기의 압력을 유지한 채 온도만을 하강시키는 방법 또한 습윤공기를 포화시키는 다른 방법이다. 이 과정을 재현해 내는 것을 주목적으로 하는 챔버를 구름물리챔버라 하며, 구름 생성에 사용한 방법에 따라 챔버의 유형이 구분된다.

〈표 1〉은 전 세계에서 현재 운영 중인 구름물리챔버의 현황을 보인다. Wilson 챔버와 같은 팽창식 챔버가 가장 오래된 형태이며, 대부분의 구름물리챔버들이 이 원리를 기본으로 작동한다. 독일 KIT (Karlsruhe Institute of Technology)에서 운영하고 있는 AIDAc (Aerosol Interaction and Dynamics in the Atmosphere classic) 챔버가 대표적인 팽창식 구름물리챔버이다. 팽창식 챔버를 만들기 위해서는 공기를 담을 수 있는 밀폐된 공간과 내부 압력을 조절할 수 있는 장치가 필요하다. 팽창식 챔버를 만드는 방법은 매우 간단해서 온라인으로도 쉽게 얻을 수 있다.

“ 이중 구조 챔버와 성능 좋은 단열재 사용을 통해 열전달 최소화 방법으로 구름물리챔버가 운영 ”

팽창식 챔버는 자연상태에서 불포화 공기가 상승할 때 겪는 단열팽창 과정을 재현한다. 하지만 이때 챔버 외부와의 열교환이 없는 단열 조건을 만들어 내기는 쉽지 않다. 챔버 내부의 감압을 통한 공기의 팽창은 공기 온도의 하강을 일으키며, 이는 챔버 외부와 내부의 온도 차이를 만들어 낸다. 결과적으로 성능이 좋은 단열재로 챔버 내부와 외부를 열적으로 분리하지 않는 이상 상대적으로 온도가 높은 챔버 외부로부터 내부로의 열전달은 불가피하여 챔버 내부의 공기 온도를 조절하는데 문제가 발생한다.

압력의 조절 없이 불포화 습윤공기의 온도를 낮추는 방법 또한 습윤공기를 포화 상태에 이르게 하는 방법이다. 새벽에 이슬이 맺히는 이유이며 냉동고의 작동 원리이기도 하다. 이는 챔버에서 챔버 벽면을 따라 냉매를 순환시키는 방식으로 응용된다. 팽창 챔버에서 발생하는 열전달을 냉매 순환을 통한 챔버 벽면 온도 조절로 상쇄 가능한 것이다. 하지만 실제로는 이 두 효과의 상쇄를 통해 챔버 내부 온도를 조절하는 방법이 아닌, 이중 구조의 챔버와 성능 좋은 단열재 사용을 통해 열전달을 최소화하는 방법으로 구름물리챔버가 운영된다. CERN CLOUD, KIT AIDAd (dynamic), 일본

〈표 1〉 전 세계 구름물리챔버 현황

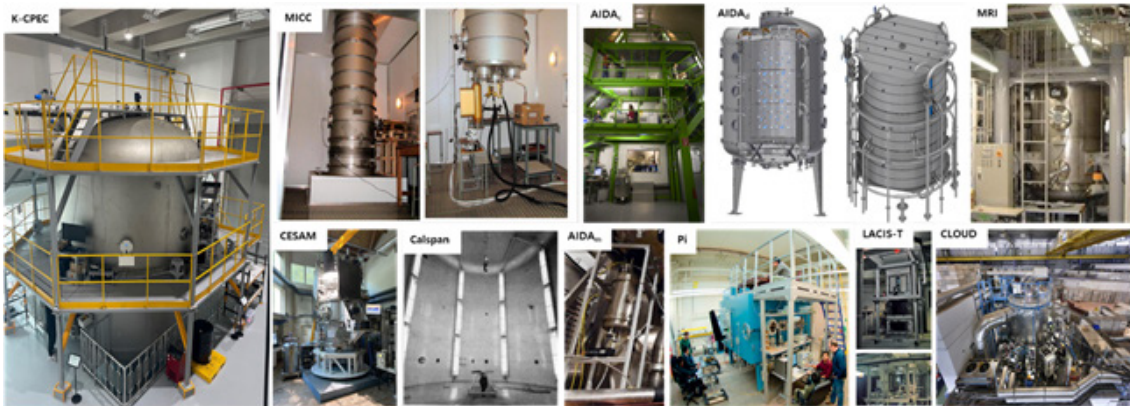
유형	챔버 명	부피 (m³)	국가(기관)	운영 기간
팽창식 챔버	AIDAc	84.5	독일(Karlsruhe Institute of Technology)	1996-현재
	AIDAm	0.02	독일(Karlsruhe Institute of Technology)	2020-현재
	BACIC	70	중국(Beijing Weather Modification Office)	2017-현재
	Big Climate Chamber	3,200	러시아(Institute of Experimental Meteorology)	1963-현재
	Calspan	590	미국(Calspan Corporation)	1980-현재
벽면 온도 조절이 가능한 팽창식 챔버	AIDAd	3.8	독일(Karlsruhe Institute of Technology)	2020-현재
	CESAM	4.2	프랑스(Interuniversity Laboratory of Atmospheric Systems)	2009-현재
	CLOUD	26.1	스위스(European Organization for Nuclear Research)	2006-현재
	K-CPEC	21	한국(National Institute of Meteorological Sciences)	2022-현재
대류 챔버/ 벽면 온도 조절이 가능한 팽창식 챔버	MRI	1.4	일본(Meteorological Research Institute)	2005-현재
	chamber	3.14	미국(Michigan Tech University)	2015-현재
자유 낙하 챔버/ 팽창식 챔버	MICC	18	영국(Manchester University)	2009-현재
혼합 풍동 챔버	LACIS-T	0.32	독일(Tropospheric Research)	2018-현재

“ 대류식 챔버는 구름이 오래 지속되고, 구름 내부 난류 영향 연구가 가능 ”

MRI (Meteorological Research Institute) 챔버 등이 벽면 온도 조절이 가능한 팽창식 챔버이다.

미국 Michigan Technological University에서 운영하고 있는 챔버는 내부 부피가 3.14m³이기 때문에 Pi (π) 챔버라고 명명됐다. Pi 챔버는 벽면 온도 조절이 가능하며 팽창식으로도 작동할 수 있지만, 구름을 생성시키는 주된 작동 방법은 불안정한 환경조건 아래서 발생하는 대류를 통한 구름의 생성이다. 챔버의 바닥과 천장의 온도 조절을 통해 만들어진 바닥의 상대적으로 따뜻한 습윤공기와 천장의 차가운 습윤공기는 불안정한 대기 조건을 형성하고, 그 결과 Rayleigh-Bénard 대류가 발생하여 공기가 혼합되고 구름이 생성된다. 자연에서 따뜻한 호수 위로 차가운 공기가 지나가며 안개 또는 구름이 생성되는 원리이다. 팽창식 챔버는 감압을 통한 팽창과정 동안만 구름이 존재할 수 있기 때문에 구름의 유지 시간이 상대적으로 짧지만, Pi 챔버와 같은 대류식 챔버는 챔버 상하부의 온도 차이를 유지하는 동안 구름이 오래 지속된다는 장점을 갖고 있다. 또한, 구름 내부에서 발생하는 난류에 대한 영향을 연구할 수 있다는 장점을 가지고 있다. 하지만 대류식 챔버가 팽창식 챔버 보다 우월하다는 의미는 아니다. 단지 구름이 생성되는 여러 물리과정 중 어떤 물리과정을 재현하는 것을 목적으로 하느냐에 따라서 챔버의 구동 방식이 다를 뿐이다. [그림 5]는 현재 전 세계에서 운영 중인 구름물리챔버들이다.

[그림 5] 전 세계에서 운영 중인 구름물리챔버



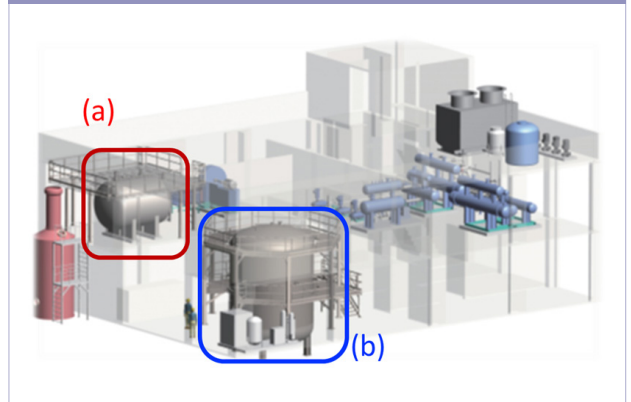
“ 기상청은 한국형 구름물리실험챔버 K-CPEC를 운영 중 ”

3. 한국형 구름물리실험챔버 K-CPEC

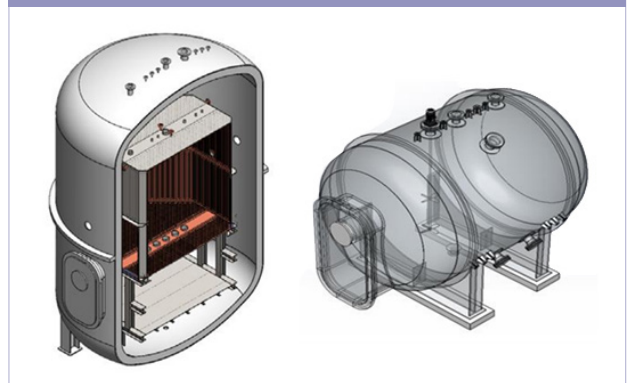
기상청은 기본적인 구름물리 과정, 구름-에어로졸-강수 상호작용, 인공강우 물리과정 이해 증진과 연구역량 강화의 목적과 관측장비 내구성 평가 등을 위해 2022년 제주도 소재의 국립기상과학원에 한국형 구름물리실험챔버 K-CPEC (Korea Cloud Physics Experimental Chamber) 을 순수 국내 기술을 사용하여 완공하고 운영 중에 있다[그림 6]. 기상청 구름물리실험챔버는 벽면 온도 조절이 가능한 팽창식 구름챔버와 에어로졸 챔버로 구성되어 있다[그림 7]. 또한, 항공기로 수행하는 구름씨뿌리기를 재현하기 위해 구름씨로 사용되는 물질을 연소하는 연소기(combustor)와 연소한 구름씨를 항공기 속도에 맞추어 챔버에 주입할 수 있는 풍동기(wind tunnel)를 갖추고 있으며, 밀폐된 챔버 내부에서 일어나는 현상을 관측하기 위한 다양한 최신의 관측장비들이 설치되어 있다.

구름챔버는 내부챔버와 외부챔버의 이중구조로 이루어져 있다[그림 7]. 외부 챔버는 직경과 높이가 5m × 5m의 원기둥 형태로 스테인리스강으로 만들어졌고, 연결된 진공 펌프를 사용하여 챔버 내부 압력을 30hpa ~ 1,013hpa (±0.3hpa) 범위에서 조절할 수 있다. 내부 챔버는 지름과 높이가 3m × 3m 인 팔각형 기둥 형태로 챔버 내부 벽면으로 흐르는 냉매를 사용하여 온도를 제어하여 챔버 내부 온도의 비균질을 최소화한다. 사용하는 1차 냉매는 R-23/R-507이고, 더 낮은 온도(-30℃ 이하) 재현을 위해서 2차 냉매인 Novec 7200을 사용하여 +60℃ ~ -70℃(±0.3℃)의 온도 범위를 제어할 수 있

[그림 6] 국립기상과학원에서 운영중인 한국형 구름물리실험 챔버(K-CPEC)의 구조 모식도. (a)에어로졸 챔버, (b)구름 챔버(출처: 국립기상과학원)



[그림 7] 한국형 구름물리실험챔버의 구름챔버(좌)와 에어로졸 챔버(우) 모식도(출처: 국립기상과학원)



“ 에어로졸 챔버는 에어로졸의 특성 연구와 구름 챔버에서 사용할 에어로졸 생성에 활용 ”

다. 열전달 효율을 극대화하고 낮은 압력에서도 견딜 수 있도록 구리와 스테인리스강 이중 재료로 건설되었다.

에어로졸 챔버는 지름과 높이가 3m × 3m 원기둥 형태로 스테인리스강으로 이루어져 있다. 내부 압력은 구름챔버와 같이 진공펌프를 사용하여 30hpa ~ 1,013hpa (±0.3hpa) 범위에서 조절할 수 있다. 에어로졸 챔버의 주된 목적은 구름응결핵 또는 빙정핵으로 작용하는 에어로졸의 특성 연구와 실제 구름챔버에서 사용할 에어로졸을 생성하는 것이다. 에어로졸 챔버는 외부 공기를 직접 빨아들여 에어로졸 특

〈표 2〉 K-CPEC을 구성하는 구름 챔버와 에어로졸 챔버의 제원과 환경변수 조절범위(출처: 국립기상과학원)

구분	구름 챔버		에어로졸 챔버
	외부챔버	내부챔버	-
크기	5m × 5m	3m × 3m	3m × 3m
형태	원통형 기둥	팔각형 기둥	원통형 기둥
소재	스테인리스강	스테인리스강 + 구리	스테인리스강
온도	조절범위(오차)	-70 ~ +60℃ (±0.3℃)	-
압력	조절범위(오차)	30hpa ~ 1013hpa (±0.3hpa)	30hpa ~ 1013hpa (±0.3hpa)
상대습도	조절범위(오차)	0% ~ 100% (±2%)	-

성연구를 수행할 수도 있도록 설계되어 있다. 에어로졸 챔버와 구름챔버는 관으로 연결되어 있으며 두 챔버 간의 압력 차이를 이용해 에어로졸 챔버에서 구름챔버로 에어로졸이 전달된다. 에어로졸 챔버를 거치지 않고 구름챔버에서 에어로졸을 직접 투입하는 것도 가능하다(표 2).

구름챔버와 에어로졸챔버는 외부와 철저히 단절되어 있다. 따라서 외부에서 챔버 내부에서 일어나고 있는 현상을 확인하기 위해서는 온도, 습도, 압력들의 내부 환경변수, 구름응결핵 또는 빙정핵으로 작용하도록 주입하는 에어로졸의 성분 및 크기분포, 발생한 구름입자들의 열역학적 상(액체 또는 고체), 크기분포, 움직임 등의 특징을 정확히 관측할 수 있는 다양한 종류의 장비가 필요하다. 또한, 에어로졸과 습윤공기 생성을 위한 장비로 에어로졸 발생기와 습윤공기 발생기(nafion tube)가 필요하다. 〈표 3〉은 K-CPEC에 설치된 관측장비 정보를 보여준다. 에어로졸의 수농도와 크기분포는 응결 입자 계수기(CPC), 광학 입자 계수기(OPC), 나노

“ 에어로졸 특성은
CCNC, PINE
활용하여 분석 ”

입자 계수기(SMPS)를 사용하여 관측한다. 모든 에어로졸이 구름응결핵 또는 빙정핵으로 작용하는 것은 아니기 때문에, 구름응결핵 계수기(CCNC)와 빙정핵 계수기(PINE)를 별도로 사용하여 그 특성을 분석한다. 생성된 구름입자의 크기분포, 모양, 열역학적 상, 움직임은 OPC, 구름입자 이미징 시스템(CPI), 3차원 입자영상유속계(PIV), 탈분극 구름-에어로졸-강수 분광분석기(CAPS-DPOL)를 사용하여 관측한다. 챔버 내부의 습도는 냉각거울 습도계(chilled-mirror hygrometer)와 CO₂/H₂O 분석기를 사용하여 관측한다. 챔버 내부 온도는 총 12개의 온도계를 사용하여 관측한다. 여섯 개의 온도계는 챔버 내부 벽면에 부착되어 있고, 나머지는 챔버 내부 벽면으로부터 10~30cm 떨어져 있거나 챔버 중앙에 설치되어 있다. 일반적인 구름 생성 실험의 절차는 다음과 같다(김정규 외, 2023).

- 가. 챔버 내부 세척: 챔버 내부에 에어로졸 등 이물질의 제거하는 단계로 CPC로 관측하여 입자 수농도가 10/cm³ 이상이면 급격한 감압을 통해 챔버 내부를 반복 세척한다.
- 나. 실험 초기조건 설정: 실험 수행을 위한 초기조건 설정 단계로 챔버 내부의 습도와 에어로졸 수농도를 조정한다. 외부의 공기를 빨아들여 압축, 수증기 응결, 건조과정을 통한 건조공기와 물을 분리, 헤파필터를 이용한 불순물 제거과정을 거쳐 건조공기를 챔버 내부로 주입한다. 이후 습윤공기 발생기를 가동하여 수증기를 공급하여 챔버 내부를 습윤공기로 채운다. 에어로졸 발생기 또는 에어로졸 챔버로부터 구름응결핵으로 작용할 황산암모늄 등의 에어로졸을 주입한 후 OPC와 CPC 관측을 통해 목표한 에어로졸 수농도를 조절한다.
- 다. 구름 생성 환경 조건 설정: 액체상 구름 또는 얼음상 구름, 균질 결빙 또는 비균질 결빙 등 실험 목적에 따라 챔버 내부 공기의 온도와 습도를 기준으로 구름이 생성될 목표 온도를 설정하는 과정으로 챔버 벽면 1차 냉매 순환을 통해 냉각이 이루어진다. 이때 추가적인 수증기와 에어로졸 재주입 등의 추가적인 조정이 이루어진다.
- 라. 감압 팽창을 통한 구름 생성 및 관측: 1차 냉매를 사용한 냉각과 더불어 진공

〈표 3〉 K-CPEC에서 운용중인 관측장비 목록

장비	관측목적	운영기간	장비외관
Condensation Particle Counter (CPC, 응결 입자 계수기)	에어로졸 수농도 관측	2021-현재	
Optical Particle Counter (OPC, 광학 입자 계수기)	에어로졸, 구름입자 크기분포 관측	2021-현재	
Chilled-mirror Hygrometer (냉각거울 노점온도계)	챔버 내부 이슬점온도 관측	2021-현재	
Aerosol generator for solid particle (고체상 에어로졸 발생기)	고체상 에어로졸 발생 및 주입	2021-현재	
Aerosol generator for liquid particle (액체상 에어로졸 발생기)	액체상 에어로졸 발생 및 주입	2022-현재	
Cloud Condensation Nuclei Counter (CCNC, 구름응결핵 계수기)	구름응결핵 수농도 관측	2022-현재	

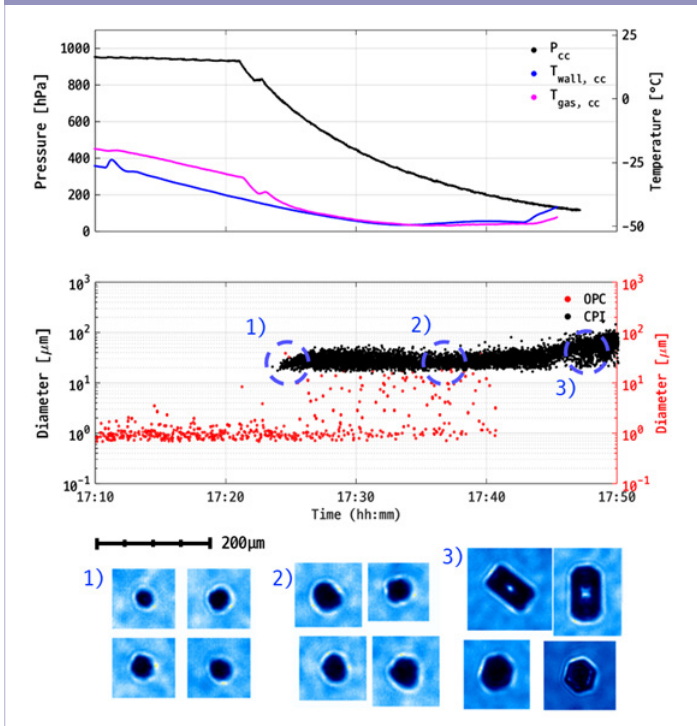
장비	관측목적	운영기간	장비외관
Cloud Particle Imager (CPI, 구름입자 이미징 시스템)	구름입자 이미지 촬영	2022-현재	
Scanning Mobility Particle Sizer (SMPS, 나노입자 계수기)	나노 크기의 입자 크기분포 관측	2022-현재	
Nafion tube (습윤공기 발생기)	챔버 내부 습윤공기 주입을 통한 상대습도 조절	2023-현재	
Particle Image Velocimetry (PIV, 3차원 입자영상유속계)	챔버 내부 입자의 유동 관측	2023-현재	
Portable Ice Nuclei Experiment (PINE, 빙정핵 계수기)	빙정핵 입자크기별 수농도 측정	2023-현재	
Cloud, Aerosol and Precipitation Spectrometer with Depolarization (CAPS-DPOL, 탈분극 구름-에어로졸-강수 분광분석기)	구름 입자의 크기분포 및 상(phase) 관측	2023-현재	
CO ₂ /H ₂ O Analyzer (CO ₂ /H ₂ O 분석기)	챔버 내부 수증기 관측	2023-현재	

“ 약 50여 개국이
수자원 확보 위한
인공강우
R&D 중 ”

펌프로 챔버 내부의 공기를 빨아내어 챔버 내부 공기의 단열팽창을 유도한다. 자연 상태에서 상승하는 공기를 재현하는 과정이다. 공기 온도가 이슬점 온도까지 하강하면 포화에 도달하여 생성된 구름을 OPC, CPI, CAPS-DPOL 등의 구름입자 관측기기로 관측한다.

마. 실험종료 및 챔버 세척: 실험 목적 또는 후속 실험에 따라 실험 종료 방법을 선택한다. 다음 실험을 위한 챔버 세척을 수행한다.

[그림 8] K-CPEC의 구름 챔버를 활용하여 수행한 구름발생 실험의 결과(위: 실험동안 기압(P_{cc})과 챔버 내부 벽면온도($T_{wall, cc}$) 및 공기온도($T_{gas, cc}$)의 변화, 중간: 실험동안 OPC와 CPI로 관측한 구름입자의 크기분포, 아래: 실험동안 CPI로 관측한 빙정의 이미지)



[그림 8]은 위 과정을 따라 K-CPEC으로 수행한 구름 생성 실험의 결과를 보인다. 준구형과 육각형 판형 및 기둥형 모양의 빙정이 CPI로 관측되었다.

III. 기본에서 시작되는 구름물리챔버의 활용

기후변화는 더는 먼 위협이 아니라, 광범위한 결과를 초래하는 현실이다. 상승하는 기온, 빈번해진 가뭄, 산불, 홍수, 극한 기상 현상, 변화하는 생태계가 지구의 모든 구석을 강타하여 우리에게 적응하고 회복력을 키우도록 요구하고 있다. IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change) 보고서는 기후변화로 인한 심각한

한 물부족 문제에 대해 적극적인 대응이 필요하다고 촉구하고 있다(IPCC, 2023). 수자원 확보를 위한 방안으로 구름씨뿌리기를 통한 인공강우를 연구하고 개발하는 국가는 약 50여 개국에 달하지만, 지상 또는 항공기를 사용한 구름씨뿌리기로 수행하는 인공강우의 효과성(efficacy)과 효율성(efficiency)에 대한 논쟁은 최근까

지 계속됐다. 하지만 최근 아랍에미리트의 UAEREP (Research Program for Rain Enhancement Science)의 장기간 연구결과(Wehbe et al., 2023), 구름씨뿌리기 신물질 개발(Tai et al., 2017), 미국에서 수행한 SNOWIE (Seeded and Natural Orographic Wintertime Clouds: The Idaho Experiment) (Tessendorf et al., 2019; Friedrich et al., 2020)와 WWMPP (Wyoming Weather Modification Pilot Project) (Breed et al., 2014; Rasmussen et al., 2018) 등의 연구결과는 인공 강우 생성에서 구름씨뿌리기 효과를 입증하였다.

이제는 인공강우의 효과성을 논의할 단계가 아니라 그 효율성을 증진할 방법에 관한 연구가 필요하다. 이를 위해서는 구름물리, 즉 구름-에어로졸-강수 상호작용에 관한 본질적인 연구가 필요하며 그 중심에는 구름물리챔버가 있다. 슈퍼컴퓨터를 비롯한 계산 자원의 증가와 그에 발맞춘 수치모형의 개발은 구름물리 분야를 포함한 대기과학 전반에 눈부신 발전을 견인했다. 하지만 현재 구름과 강수 현상에 대한 인류의 진보는 지금까지 해왔던 방법으로는 넘어설 수 없는 벽을 마주하고 있다. 모수화 개발 등 활발히 진행되어온 다른 구름물리 연구분야와 비교하면 추가적인 실험시설과 더 많은 시간 및 예산이 필요한 관측 기반 실험실 연구는 매우 더디게 진행되었다. 결과적으로 발생한 구름과 강수 입자에 큰 영향을 미치는 미세물리(microphysics) 각 과정에 대한 부정확한 우리의 이해는 수치예보와 기후시뮬레이션에 가장 큰 불확실성으로 인지되고 있으며, 그 해결을 위해서 챔버 실험을 포함한 관측의 중요성이 강조되고 있다(Morrison et al., 2020). 인공강우의 효율성을 증진한다는 것은 결국 구름-에어로졸-강수 상호작용의 여러 미세물리과정에 대한 본질적인 이해를 높이는 것이며, 그런 의미에서 기상청 구름물리실험챔버는 이상적인 실험실이다. 현재 우리가 이해하고 있는 각 미세물리 과정들은 지난 수십 년 동안 전 세계에서 산발적으로 수행된 실험결과를 기반으로 하고 있다. 현재 수치모형에 적용된 많은 미세물리 모수화 방법은 이러한 오래되고 빈약한 실험결과들을 기반으로 개발되었다. 따라서 구름방울 활성화, 균질 및 비균질 핵화, 충돌병합, 상고대화, 부착 등 미세물리 각 과정에 관한 개별적 이해와 이들의 물리적 연결고리를

“이제는 인공강우
효과성이 아니라
효율성 증진할
방법 연구가
필요”

“ 기상청의 구름물리
실험챔버 건설은
전 세계 대기과학
분야에서
환영 ”

파악할 수 있는 반복 실험이 구름물리챔버에서 수행되어야 하며, 이를 위해서는 정확하고 안정적인 챔버 운영을 통한 재현성 확보가 이루어져야 한다. 구름물리에 대한 본질적인 이해 증진은 자연스레 인공강우의 효율성 증진 및 기술 개발로 이어진다. 현재 인공강우 분야에 선진국으로 여겨지는 나라들 또한 구름물리 분야의 기본적인 연구에 오랜 시간과 노력을 투자했음을 잊어서는 안 된다.

IV. 맺음말

‘시작이 반이다’라는 말이 있다. 기상청의 구름물리실험챔버의 건설은 전 세계 대기과학계에서 두 팔 벌려 환영받고 있다. 어려운 시작을 했으니 이제 남은 반을 채워야 한다. 챔버와 같은 큰 규모의 연구시설이 기대와는 달리 단명하는 사례들이 빈번하다. 연구시설은 건설도 중요하지만, 지속적인 유지와 활용이 더욱 중요하다. 다른 실험시설과 마찬가지로 구름물리실험챔버 또한 앞으로 실험수행을 위한 유지 및 보수작업과 함께 최적화를 위한 부분적인 개조작업이 지속해서 필요하다. 전문 인력과 예산 확보가 필수적이다. 당연한 말이지만, 그 당연한 말이 실행되지 않는 경우가 부지기수다. 구름물리 분야 전문인력 확보와 양성뿐만 아니라, 챔버 운영을 전담할 전기, 전자, 기계, 계측 분야의 전문인력 또한 필수적이다. 독일과 미국 등에서 도출해낸 훌륭한 구름물리챔버 연구결과는 두터운 전문인력이 밑받침되었기에 가능했다.

날씨예보에 있어 하드웨어 격인 슈퍼컴퓨터의 성능만큼 소프트웨어인 수치모형이 중요하듯이 구름물리챔버의 성능뿐만 아니라, 챔버 내부의 현상을 관측하는 장비가 매우 중요하다. 실제 관측장비를 비롯한 실험장비 구매 예산이 구름물리실험챔버 제작 예산을 웃돈다. 관측장비는 정밀도와 성능 유지를 통한 신뢰도 높은 관측결과를 생산하기 위해 지속적인 검교정이 수행되어야 한다. 대부분 장비의 검교정을 위해서는 국외에 있는 제작사로 보내거나 전문인력을 국내로 초청해야 하므로, 이 또한 예산 확보가 중요하다. 또한, 관측장비를 운영할 전문인력 확보와 더불어

“ 구름물리실험챔버는
이상적인 구름씨앗
신물질 개발
실험실 ”

어 관측장비 개발에 대한 노력에 힘을 기울여야 한다. 구름물리챔버 연구를 가장 활발하게 수행하고 있는 독일의 KIT는 여러 종류의 관측장비를 자체 개발하였다. 이는 25년이 넘는 기간 동안 구름물리챔버를 운영하며 얻은 지식의 결정체다. 자체 개발한 장비를 사용하여 다른 챔버에서는 할 수 없는 희소가치가 높은 중요한 실험 결과를 만들어 내는 것이다.

구름물리실험챔버는 환경변수의 조절이 가능한 상태에서 구름을 생성할 수 있기 때문에, 구름응결핵 또는 빙정핵으로 작용하는 구름씨앗이 될 새로운 물질을 개발하고 실험하기에 매우 이상적인 실험실이다. 아랍에미리트에서 최근 개발한 겹질 구조의 TiO₂/NaCl (Tai et al., 2017)이 좋은 예이다. 신물질의 개발에는 대기과학을 비롯한 재료공학 및 화학 등 다학제 공동연구가 필수적이다. 이는 기상청 내에서는 해결할 수 없는 문제이며, 학계 및 타 연구소와의 긴밀한 협업이 필요하다. 극한소재연구센터가 있는 한국과학기술연구원(KIST)은 신물질 개발 공동연구를 수행하기에 좋은 후보이다. 우연히도 한국과학기술연구원 또한 팽창식 또는 대류식으로 운영이 가능한 구름물리챔버를 2024년 말 완공을 목표로 구축 중이다. 구름물리챔버 실험과 신물질 개발 연구에 기상청과 한국과학기술원의 시너지 효과를 기대해 본다.

구름물리실험챔버의 활용을 극대화하기 위해서는 국내뿐만 아니라, 국외 연구자에게도 실험시설의 개방과 연구결과의 공유가 필수적이다. 이를 위해서는 구름물리실험챔버의 안정적인 운영이 선행되어야 하며, 연구결과 발표와 더불어 적극적인 홍보가 필요하다. 때마침 구름과 강수 연구 분야에서 가장 명망 있는 학회인 ICCP (International Conference on Clouds and Precipitation)가 2024년 7월 14일-19일에 제주국제컨벤션센터에서 열린다(<https://iccp2024.kr/>). 또한, 본 학회 전 7월 12일-14일에는 국립기상과학원에서 구름챔버 워크숍과 구름 관측장비 워크숍 개최가 예정되어 있다. 전 세계 구름물리 분야 전문가들이 모이는 자리이므로 기상청 구름물리실험챔버를 소개하고 인공강우 연구결과를 공유하여 국제협력연구 수행을 위한 초석을 마련하기에는 더할 나위 없는 기회이며 기상청의 아

“ 구름물리챔버는
항공기와 함께
인공강우와 구름
물리 연구 분야의
귀중한 실험실 ”

킴없는 지원이 필요하다.

우리는 지금 빠르게 변화하고 있는 제4차 산업혁명 시대를 살아가고 있다. 인공지능, 사물인터넷, 빅데이터, 클라우드 컴퓨팅, 모바일 등 눈에 보이지 않는 것이 강조되고 있다. 하지만 제조업을 통한 기본적인 물품의 생산이 없이는 우리가 살아갈 수 없는 것처럼 대기과학분야, 특히 구름물리 분야에서 사람이 직접 수행해야 하는 실험은 변하지 않는 기본 중의 기본이며, 이 탄탄한 기본 위에서 비로소 괄목할 만한 성과가 만들어진다. 기상청 구름물리챔버는 기상청 항공기와 더불어 인공강우와 구름물리 연구 분야에서 미래로의 전진을 이룩할 귀중한 실험실이다. 지속적이고 안정적인 연구 수행과 우수한 연구결과로 대한민국 기상청이 전 세계 구름물리 분야의 성지로 자리매김하기 위한 기상청과 유관부처의 아낌없는 지원과 기대를 기대한다.

참고문헌

- 김정규, 박성민, 박민수, 엄준식, 염성수, 차주완, 서표석, 안찬우, Belorid Miloslav, 김부요, 이경미, 2023: 한국형 구름물리실험챔버(K-CPEC) 구름발생실험 예비결과 분석. 2023년 (사)한국환경과학회 정기학술대회.
- Aitken, J., 1880a: On Dusts, Fogs and Clouds. Proc. Roy. Soc. 11, 14-18.
- Aitken, J., 1880b: On Dusts, Fogs and Clouds. Nature Feb. 384-385.
- Breed, D., R. Rasmussen, C. Weeks, B. Boe, and T. Deshler, 2014: Evaluating winter orographic cloud seeding: design of the Wyoming Weather Modification Pilot Project (WWMPP). Journal of the Applied Meteorology and Climatology, 53, 282-299.
- Coulier, P. J., 1875a: Note sur une nouvelle propriete de l'air. J. de Pharmacie et de Chimie, Paris, Ser. 4, 22, 165-173.
- Coulier, P. J., 1875b: Note sur un nouvelle propriete de l'air. J. de Pharmacie et de Chimie, Paris, Ser. 4, 22, 254-255.
- Espy, J. P., 1841: Philosophy of Storms. Charles C. Little and James Brown, Boston, MA.
- Friedrich, K. et al., 2020: Quantifying snowfall from orographic cloud seeding. Proceeding of the National Academy of Sciences United States of America, 117, 5190-5195.
- IPCC, 2023: Climate Change 2023: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Core Writing Team, H. Lee and J. Romero (eds.)]. IPCC, Geneva, Switzerland, pp. 35-115, doi: 10.59327/IPCC/AR6-9789291691647.
- Mason, B. J., 2006: The cloud chamber as a tool in cloud physics. Contemporary Physics, 4(1),

27-48.

- McMurry, P. H., 2000: The history of condensation nucleus counters. *Aerosol Science and Technology*, 33, 297-322.
- Morrison, H. et al., 2020: Confronting the challenge of modeling cloud and precipitation microphysics. *Journal of Advances in Modeling Earth System*, 12, e2019MS001689.
- Podzimek, J., 1957: Die Ergebnisse der Ersten Kondensationsversuche in der Unterdruckapparatur. – *Geofisica pura e applicata* 36, 76-85.011.
- Rasmussen, R. M. et al., 2018: Evaluation of the Wyoming Weather Modification Pilot Project (WWMPP) using two approaches: traditional statistics and ensemble modeling. *Journal of the Applied Meteorology and Climatology*, 57, 2639-2660.
- Schaefer, V. J., 1941: A method for making snowflake replicas. *Science*, 93(2410), 239-240.
- Schaefer, V. J., 1942: Use of snowflake replicas for studying winter storms. *Nature*, 149(3768), 81-81.
- Schaefer, V. J., 1946: The production of ice crystals in a cloud of supercooled water droplets. *Science*, 104(2707), 457-459.
- Spurny, K. R., 2000: Atmospheric condensation nuclei P. J. Coulter 1875 and J. Aitken 1880 (Historical Review). *Aerosol Science and Technology*. 32, 243-248.
- Tai, Y., H. Liang, A. Zaki, N. E. Hadri, A. M. Abshaev, B. M. Huchunaev, S. Griffiths, M. Jouiad, and Zou, 2017: Core/shell microstructure induced synergistic effect for efficient water-droplet formation and cloud-seeding application. *ACS Nano*, 11, 12318-12325.
- Tessendorf, S. A. et al., 2019: A transformational approach to winter orographic weather modification research: the SNOWIE project. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 100, 71-92.
- Vonnegut, B., 1947: The nucleation of ice formation by silver iodide. *Journal of applied physics*, 18(7), 593-595.
- Wehbe, Y., S. Griffiths, A. A. Mazrouei, O. A. Yazeedi, and A. A. Mansous, 2023: Rethinking water security in a warming climate: rainfall enhancement as an innovative augmentation technique. *Npj Climate and Atmospheric Science*, 6, 171.

기상선진국 미국의 기상 관련 예산 분석

김득갑 연세대학교 동서문제연구원 교수 europe726@yonsei.ac.kr



- I. 미국의 기상 관련 예산 연구의 필요성
- II. 미국 해양대기청(NOAA)의 기상 관련 예산
- III. 연방정부기관
- IV. 주정부의 기상 관련 예산
- V. 미국 기상청(NWS)의 위상 및 역할 변화
- VI. 한국-미국 기상 관련 예산 비교
- VII. 결론 및 정책적 제언

기상청 예산의 적정성을 평가하기 위해 선행연구에서는 NOAA (National Oceanic and Atmospheric Administration) 산하의 NWS (National Weather Service), NOS (National Ocean Service), NESDIS (National Environmental Satellite, Data, and Information Service), OAR (Office of Oceanic and Atmospheric Research) 예산을 기상청과 비교하였다. 본 연구에서는 선행연구의 분석에서 나아가 NOAA는 물론 연방정부기관들과 주정부의 기상 관련 실제 예산을 파악하여 기상청 예산의 적정성을 살펴보고 기상청의 위상과 역할, 그리고 향후 발전 방향을 제시했다. 그 결과, ①기후변화의 심각성을 인식하고 기후위기에 대한 선제적 대응을 주요 국가과제로 삼아 국가전략 전반에 반영, ②기상청은 기후위기 대응을 위한 선도적 역할에 필요한 조직 강화 및 예산 확대를 지속적으로 추진, ③기상청의 발전방향 수립 시 NOAA의 위상 변화를 고려, ④기상청은 정부부처들의 기후변화 대응정책을 총괄·조율하는 범부처 조직에서 중심적인 역할을 수행, ⑤기상청은 기후변화 감시 및 예측 활동을 강화하되, 기상레이더/위성 관측 및 해양기상 관측 관련 투자를 확대, ⑥기상청은 기후위기 증가에 선제적으로 대응하기 위한 국가적 차원의 인프라 확충의 필요성을 전파하고 관련 정보를 제공하는 역할 강화, ⑦ 기상청은 기상 및 기후산업 육성을 위한 산업생태계의 구축 및 강화 노력에 주도적 참여를 제안하였다. ■



I. 미국의 기상 관련 예산 연구의 필요성

우리나라 기상청(Korea Meteorological Administration; KMA)의 2023년 예산은 전년대비 3.5% 증가한 4,697억 원으로 정부 전체 예산의 0.074%에 머물러 있다. 정부기관 중 다른 외청의 예산과 비교하더라도 기상청의 예산은 최하위 수준이며, 산림청, 농업진흥청, 특허청, 소방청 등의 최근 5년간 예산 증가율과 비교할 경우 기상청의 증가율은 21%로 가장 낮은 편이다. 하지만 기상청 예산 규모의 적정성을 둘러싸고 상반된 견해가 맞서 있다. 미국 기상청(National Weather Service; NWS)의 2023년 예산은 13억 2,000만 달러(한화 1조 7,204억 원)로 연방정부 예산의 0.08%를 차지하고 있음을 근거로 기상청의 예산이 경제규모 대비 크게 작지 않다는 견해가 있다. 반면, 기상청의 다양한 역할과 기능을 고려할 경우 NWS가 아닌, 보다 상위 조직인 NOAA (National Oceanic and Atmospheric Administration)와 비교해야 예산 규모의 적정성을 정확히 평가할 수 있다는 견해가 있다.

이에 따라 기상청 예산의 적정성을 평가하기 위해 김득갑 외(2023)에서는 NOAA 산하에 속해 있으면서 기상청과 유사한 역할을 수행하는 4개 기관(NWS, NOS, NESDIS, OAR)의 예산을 살펴보았다. 분석 결과, NOAA 산하 4개 기관의 2023년 예산은 51억 달러(한화 6조 6,312억 원)로 기상청 예산 대비 14배에 이르는 것으로 산출되었다. 기상예보 업무를 맡고 있는 NWS의 예산과 비교하더라도 기상청 예산은 27.3%에 불과하였다. 또한 실질적인 기상 관련 예산을 비교하기 위해 기상청과 NOAA 소속 4개 기관의 프로그램 및 단위사업을 매핑(mapping)하여 분석하였다. 분석 결과, 미국의 순수 기상 관련 예산은 29억 8,000만 달러(한화 3조 8,799억 원)로 기상청 예산의 8.2배로 산출되었다.

하지만 김득갑 외(2023)는 세 가지 한계점을 지니고 있다. 첫째, 기상청이 수행하고 있는 지진/화산 업무의 경우 미국은 지질조사국(U.S. Geological Survey; USGS)에서 맡고 있어 미국의 기상 관련 예산 산출에서 빠져 있다. 그리고 미국의 R&D 사업을 총괄하는 국립과학재단(National Science Foundation; NSF)에서 NCAR/UCAR (National Center for Atmospheric Research/University Corporation for Atmospheric Reserach)를 통해 기상 R&D를 지원하는 예산도 누락되어 있다. 그러므로 기상청의 기능들을 수행하는 미국의 모든 관련 부처들의 ‘숨어 있는 예산’을 포함해 비교할 필요가 있다. 둘째, 이전 연구는 연방정부 차원의 예산 분석이

어서 주정부 차원의 기상 관련 예산은 반영하지 못하는 한계가 있다. 극한 기상현상이 국지적으로 발생하고 있어 미국은 연방정부와 주정부 간 협력사업을 확대하고 있고 주정부 차원의 독자적인 기상/기후 관련 예산도 적지 않을 것으로 판단되어 주정부 단위의 기상 관련 예산까지 반영해야 한·미 간에 진정한 예산 비교가 가능할 것으로 보인다. 셋째, 이전 연구에서는 2023년의 예산만을 비교했으나 기상청의 현주소를 정확히 진단하기 위해서는 일정기간 동안의 누적 총예산을 비교할 필요가 있다. 기상선진국인 미국의 경우 2011년「기상-대비 국가(Weather Ready Nation: WRN)」전략을 제시한 이후 기상 예산을 꾸준히 늘려왔음을 감안할 때, 기상 관련 누적 예산을 비교해야 기상청 예산 규모의 적정성을 정확히 진단할 수 있을 것이다.

이러한 한계점들을 보완하기 위해 후속 연구로 NOAA는 물론 연방정부기관들과 주정부의 기상 관련 실제 예산을 파악하여 기상청 예산의 적정성을 살펴보고 기상청의 위상과 역할, 그리고 향후 발전 방향을 제시해 보고자 한다.

II. 미국 해양대기청(NOAA)의 기상 관련 예산

NOAA의 2023년 예산(정부요청 기준)은 68억 8,000만 달러로 2014년 대비 26.3%, 14억 4,000만 달러 증가했다. 이는 연평균 3.9% 증가한 셈이다. 참고로 정부예산은 정부 요청(request) 기준과 의회 승인(Congress enacted) 기준으로 나눌 수 있는데, 통상적으로 정부(백악관)가 요청한 예산은 의회 승인 과정에서 줄어드는 게 일반적이다. 하지만 2018-2021년 트럼프 정부에서 NOAA의 예산은 정부요청 기준보다 의회 승인 기준이 오히려 많았다. 이는 기상 관련 예산 편성에 있어 공화당 정부보다 민주당 정부가 적극적임을 보여준다.

NOAA 산하 6개 기관의 예산을 살펴보면, NWS는 매년 NOAA 전체 예산의 18~24%를 차지하며 가장 많은 예산을 사용하고 있다. 지난 10년간 6개 산하기관들의 예산 추이를 살펴보면, NESDIS (National Environmental Satellite, Data, and Information Service; 118% 증가), OAR (Office of Oceanic and Atmospheric Research; 64% 증가), NOS (National Ocean Service; 36% 증가)의 순으로 높은 증가율을 보였으며, 같은 기간 중 NWS의 예산은 32.2% 증가하였다.



1. 미국 기상청(NWS)

NWS의 2023년 예산은 2014년 대비 32.3% 증가한 13억 2,000만 달러로, 지난 10년간 연평균 3.2% 증가하였다. 반면, 인력은 250여명 감소했는데, 이는 슈퍼컴퓨터의 발전과 인공지능과 같은 첨단기술의 발전으로 인력 수요가 감소한데 기인한다.

2. 해양대기연구소(OAR)

OAR의 2023년 예산은 7억 7,000만 달러로 2014년 대비 64% 증가했으며, 지난 10년간 연평균 9.3% 증가하였다. 인력은 860명으로 11% 증가하였다.

3. 환경위성데이터정보국(NESDIS)

NESDIS의 2023년 예산은 2014년 대비 5.4% 증가한 22억 8,000만 달러이다. NOAA에서 운영하고 상업적으로 획득한 국내·외 위성 및 비NOAA 위성에서 정확하고 신뢰할 수 있는 위성 관측 및 통합서비스를 제공하기 위해 2억 5,000만 달러와 286명의 인력을 배정하고 있다. NESDIS에서 예비비로 편성하고 있는 18억 7,000만 달러는 대부분 신규위성 개발 및 위성시스템 구입 자금이다.

4. 해양청(NOS)

NOS의 2023년 예산은 2014년 대비 36% 증가한 7억 2,000만 달러이며, 지난 10년간 연평균 8.8% 증가하였다. 인력은 1,246명 수준을 유지하고 있다.

5. 해양항공관리청(Office of Marine and Aviation Operations; OMAO)

OMAO의 2023년 예산은 4억 5,000만 달러로 2014년 대비 79.5%가 증가했으며, 지난 10년간 연평균 11.4%가 증가하였다. 인력은 1,088명으로 2014년 대비 50여명 증가했다. 2021년부터 무인자율 기술운영과 NOAA 위원회 협력을 위한 예산을 점차 확대하고 있다.

6. 해양수산청(National Marine Fisheries Service; NMFS)

NMFS의 2023년 예산은 11억 4,000만 달러로 2014년 대비 22.5% 증가했으며, 인력은 0.9% 증가하는데 그쳤다.

〈표 1〉 NOAA 산하기관별 예산 및 인력 추이

구분	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022	2023
NWS										
예산(백만달러)	1,008.3	1,063.3	1,098.9	1,119.3	1,058.1	1,052.8	1,081.9	1,120.3	1,226.0	1,323.4
NOAA 예산 대비 비중	18.5%	19.3%	18.4%	19.1%	22.2%	23.1%	24.2%	24.2%	17.6%	19.2%
인원수(명)	4,546	4,617	4,540	4,549	4,322	4,087	4,174	4,048	4,350	4,379
OAR										
예산(백만달러)	472.4	462.2	507.0	519.8	350.0	321.7	335.1	326.7	597.8	774.8
NOAA 예산 대비 비중	8.7%	8.4%	8.5%	8.9%	7.3%	7.0%	7.5%	7.1%	8.6%	11.3%
인원수(명)	769	724	740	744	660	679	682	663	817	860
NESDIS										
예산(백만달러)	188.1	190.6	190.3	240.0	234.6	239.3	271.6	270.0	288.9	409.1
NOAA 예산 대비 비중	3.5%	3.5%	3.2%	4.1%	4.9%	5.2%	6.1%	5.8%	4.1%	5.9%
인원수(명)	786	909	885	889	791	786	778	972	782	808
NOS										
예산(백만달러)	529.2	519.4	550.8	569.9	414.8	406.3	374.1	555.6	884.6	719.8
NOAA 예산 대비 비중	9.7%	9.4%	9.2%	9.7%	8.7%	8.9%	8.4%	12.0%	12.7%	10.5%
인원수(명)	1,248	1,262	1,200	1,058	1,108	1,125	1,074	1,188	1,275	1,246
OMAO										
예산(백만달러)	249.9	244.0	369.8	258.0	330.1	333.8	348.8	362.2	636.9	448.7
NOAA 예산 대비 비중	4.6%	4.4%	6.2%	4.4%	6.9%	7.3%	7.8%	7.8%	9.1%	6.5%
인원수(명)	1,030	949	953	955	957	970	973	952	1,082	1,088
NMFS										
예산(백만달러)	929.5	916.8	990.1	1,015.9	844.8	836.9	842.3	863.7	1,132.1	1,138.4
NOAA 예산 대비 비중	17.1%	16.7%	16.5%	17.4%	17.7%	18.3%	18.9%	18.6%	16.2%	16.5%
인원수(명)	2,836	2,954	2,981	2,986	2,899	2,953	2,954	2,959	2,791	2,851
합계(예산)	3,377.5	3,396.3	3,707.0	3,722.9	3,232.3	3,190.8	3,253.8	3,498.5	4,766.4	4,814.3
합계(인원)	11,215	11,415	11,299	11,181	10,737	10,600	10,635	10,782	11,097	11,232
1인당 예산(만 달러)	30.1	29.8	32.8	33.3	30.1	30.1	30.6	32.4	43.0	42.9



III. 연방정부기관

1. 국립과학재단(NSF)

NSF의 예산은 2021년 79억 5,000만 달러에서 2023년 106억 6,000만 달러로 증가하였다. 2023년 R&D 세부 프로그램별 비중을 살펴보면, 수학/물리학(Mathematical and Physical Sciences; MPS) 20.7%, 지구과학(Geosciences; GEO) 14.7%, 컴퓨터/정보공학(Computer and Information Science and Engineering; CISE) 13.7%, 생물학(Biological Sciences; BIO) 11.5%의 순으로 높다. 지구, 대기, 해양, 극지방 변화 연구를 지원하는 GEO 예산은 지난 3년간 48.1% 증가하였다.

대기/지구우주과학(Atmospheric and Geospace Sciences; AGS) 및 USGCRP (U.S. Global Change Reserch Program) 예산으로 대표되는 기상 및 기후변화 관련 예산은 2021년 4억 5,000만 달러에서 2022년 11억 달러, 2023년 12억 1,000만 달러로 꾸준히 증가하고 있다. AGS는 지구 대기의 변화와 태양과의 상호작용은 물론 우주 기상, 대류권 기상, 기후 및 대기 질과 같은 분야도 연구하고 있다. AGS 예산은 대기, 지구과학, NCAR/시설 등 3개 부문으로 구성되어 있는데, 2021년 2억 3,500만 달러에서 2022년 3억 4,000만 달러, 2023년 3억 달러로 증가하였다. 이 예산에는 NCAR 운영 위탁기관인 UCAR에 3년간 지원하는 총 3억 2,400만 달러가 포함되어 있다. 한편, USGCRP는 ①연방정부 전반에 걸친 글로벌 변화 연구 조정, ②연구 결과 생성 및 확산, ③의사결정 지원, ④국제 연구조정 촉진 등 네 가지 역할을 수행하고 있다. USGCRP 예산은 2021년 2억 1,700만 달러에서 2023년 9억 1,300만 달러로 4배 이상 증가하였다. 이는 바이든 정부의 기후변화 대응 의지가 잘 반영된 결과로 여겨진다.

2. 대기과학연구대학협의체(UCAR)

UCAR는 전체 예산의 90% 이상을 연방정부에 의존하고 있다. NSF와의 협약(5년 단위)에 의거하여 지원되는 정부 예산(NSF 및 기타 연방정부기관)이 1억 3,000만 달러로 전체 예산의 약 50%를 차지한다. 협약은 NCAR 위탁운영 대가로 5년간 총 6억 3,000만 달러를 지원하는 것을 내용으로 한다. 또한 NSF 이외에 국방부, NOAA, NASA (National Aeronautics and Space Administration), DOE (Department of Energy), FAA (Federal Aviation Administration),

EPA (Environmental Protection Agency) 등 다른 연방정부기관으로부터 매년 약 1억 달러를 지원받고 있다. NSF 협력협정에 따른 예산과 함께 기타 연방정부의 예산까지 모두 포함하면 연방정부의 비중은 약 90%에 달한다. 한편, UCAR의 전체 지출에서 NCAR에 대한 지출이 약 80%를 차지하고 있다. 2022년 기준 UCAR의 인력은 총 1,505명에 이른다. UCAR 인력 중 NCAR 실행조직 인력이 전체의 60%(908명)를 차지하고 UCAR/NCAR 본부인력도 246명에 달한다.

3. 국립대기연구센터(NCAR)

NSF의 NCAR 예산은 2021년 1억 달러에서 2022년 1억 400만 달러, 2023년 1억 1,600만 달러로 증가하였다. 2023년 예산은 연구 및 교육 지원(3,950만 달러), 컴퓨터 인프라 투자(3,800만 달러), 기타 시설 지원(2,600만 달러), NCAR C-130 항공기 지원(1,250만 달러)에 사용되었다. NSF는 극한 기상현상 예측에 획기적인 차세대 공중위상배열 레이더(Active Phased Array Radar; APAR) 개발 자금으로 9,200만 달러를 지원할 예정이다.

4. 지질조사국(USGS)

USGS의 2023년 예산은 17억 8,000만 달러로 2021년 대비 83.1% 증가했으며, 2023년 전체 인력은 8,344명으로 2021년 대비 23% 증가하였다. 내무부(Department of the Interior; DoI)의 전체 예산에서 USGS가 차지하는 비중이 2022년 8%에서 2023년 9%로 증가했는데, 이는 USGS 역할의 중요성이 갈수록 커지고 있음을 보여준다. 한편, 기상청과 직접 관련 있는 지진 및 화산 위험 프로그램의 예산은 지난 3년간 51.9% 증가하였다.

5. 항공우주국(NASA)

NASA의 2023년 예산은 260억 달러로 연방정부 전체 예산의 0.45%를 차지하고 있으며, 2021년 예산(252억 달러)에 비해 소폭 증가하였다. NASA 예산 중 기상·기후 관련 예산은 과학국 산하 지구과학부(Earth Science Division; ESD)에 대부분 배정되어 있다. 지구과학부 예산은 2021년에 17억 7,000만 달러, 2022년에 22억 5,000만 달러, 2023년에 24억 1,000만 달러로 꾸준히 증가하였다. 기상 관련 프로그램 예산은 2021년 10억 5,000만 달러에서 2022년 12억 1,000만 달러, 2023년 12억 3,000만 달러로 증가세를 보이고 있다.



6. 연방재난관리청(Federal Emergency Management Agency; FEMA)

FEMA의 2023년 예산은 295억 달러로 국토안보부 전체 예산의 30%를 차지하고 있다. 기후 변화로 인한 자연재해 증가로 예산이 지난 3년간 2배 이상 증가하였다. FEMA는 2014년부터 5년간 뉴욕주 메소넷(New York State Mesonet; NYSM) 구축을 위해 3,100만 달러를 지원한 바 있으며, 최근 2년간 홍수위험 매핑 및 분석을 위해 총 9,100만 달러를 지원하였다. 하지만 FEMA는 재난 복구에 집중하고 있어 기상과 직접 관련된 예산은 미미하다.

7. 환경보호청(EPA)

EPA의 2023년 예산은 118억 8,000만 달러로 2021년 대비 78.4% 증가하였다. 환경프로그램 및 관리 예산이 약 38억 달러로 EPA 예산의 32%를 차지하고 있다. 대기 및 기후보호 프로그램 예산은 2021년 1,450만 달러에서 2022년 1억 1,400만 달러, 2023년 1억 3,500만 달러로 증가하였다.

8. 연방항공청(FAA)

FAA의 2023년 예산은 약 185억 5,000만 달러로 연방예산의 0.32%에 이른다. 기후변화와 대기 질에 대한 항공의 영향을 완화하는 데 초점을 맞춘 프로그램에 1억 1,300만 달러를 배정하였다. 이 중 5,000만 달러는 지속가능 연료, 무연 연료, 항공기 기술개발을 위한 예산이다.

9. 농무부(U.S. Department of Agriculture; USDA)

USDA의 2023년 예산은 3,005억 달러로 2021년 대비 33% 증가하였다. 기후변화 대응이 예산 편성의 우선순위 중 하나로 기후변화를 위한 투자를 확대하고 있다.

10. 국방부(Department of Defense; DoD)

DoD의 2023년 예산은 7,730억 달러로 미 경제규모(GDP) 대비 3% 내외의 비율을 유지하고 있으며 매년 증가하는 추세다. 국방부의 기상 관련 예산은 공군과 해군에 집중되어 있다. 미 공군은 2015년 3월에 공군기상청(Air Force Weather Agency; AFWA)을 제557기상비행단으로 개편했으며, 현재 557기상비행단이 공군의 기상센터 역할을 수행하고 있다. 557기상비행단

의 전체 인력은 약 1,500명에 달하며, 연간 예산은 약 1억 7,500만 달러로 알려져 있다. 미 공군의 기상 관련 직접 예산(프로그램 배정)은 2021년 7,200만 달러, 2022년 8,500만 달러, 2023년 7,200만 달러이나, ICAMS (Interagency Council for Advancing Meteorological Services)에 보고된 공군의 기상 관련 총 예산은 1억 4,000만 달러(2020년), 2억 달러(2021년), 2억 2,000만 달러(2022년)로 보고되고 있다.

해군의 2023년 기상·해양 분야(Naval Meteorology and Oceanography Command; NMOC)와 관련된 예산은 약 4억 4,000만 달러이며 인력은 2,550명에 달한다. 이중 기상과 관련된 예산은 약 6,500만 달러로 추정된다. NMOC는 향후 5년간 1억 달러 규모의 기상·해양학 관련 IT 지원서비스 계약을 발주할 계획이다. 해군은 해군연구부(Office of Naval Research; ONR), 해군연구소(Naval Research Laboratory; NRL), 해양기상학 연구부(NRL-MRY)로 이어지는 기상 연구조직을 두고 있다. NRL의 2021년 예산은 11억 달러로 ONR에서 3억 5,000만 달러를 지원받고, 나머지는 해군, 공군, 기타(육군, 연방기관, 민간 등)에 의존하고 있다. NMOC와 연구조직들(ONR, NRL)이 수행하는 대기과학 관련 예산을 모두 종합할 경우, 미 해군은 기상서비스 분야에 매년 1억 2,000만 달러 이상을 투자하는 것으로 파악된다.

IV. 주정부의 기상 관련 예산

미국의 10개 주를 선정하여 기상 관련 예산을 조사·분석하였다. 분석대상 주를 선정하기 위해 기후변화위기 정도와 지역 대표성을 고려하였다. 기후변화 위기가 가장 심각한 주는 남부지역과 해안지역에 주로 분포되어 있었다. 기후위기 정도와 권역 분류체계를 고려하여 북동부지역 1개(뉴욕), 남동부지역 2개(플로리다, 사우스캐롤라이나), 중부지역 2개(미주리, 인디애나), 남부지역 2개(미시시피, 오클라호마), 서부지역 2개(캘리포니아, 애리조나), 태평양 도서지역 1개(하와이)를 선정하였다.

1. 오클라호마

오클라호마대학교의 노먼 캠퍼스에는 1981년에 설립된 대기·지리과학대학이 자리 잡고 있다. 오클라호마 주정부는 25개 주립 대학과 대학교를 지원·관리하고 있는데, 노먼 캠퍼스에 가



장 많은 예산을 지원하고 있다. 2022 회계연도에 연방정부 1억 3,700만 달러(53%), 주정부/지역 정부 6,800만 달러(27%), 재단기금 4,000만 달러(16%)의 순으로 R&D 예산이 지원되고 있다. 연방정부기관 중에는 NASA, NOAA, NSF의 순으로 예산을 많이 지원하고 있다. 2021년 10월 NOAA는 오클라호마대학교 협력연구소(Cooperative Institute for Severe and High-Impact Weather Research and Operations: CIWRO)와 업무협약을 체결하고 5년간 총 2억 800만 달러를 지원하기로 하였다. 또한 오클라호마 주정부는 극한기상 연구를 강화하기 위해 2,000만 달러를 투자해 국립기상센터(National Weather Center: NWC)를 대폭 확장할 계획이다. 오클라호마 주정부는 연방정부 예산과는 별도로 노먼 캠퍼스의 대기과학 연구 및 교육, NWC 지원, 오클라호마 메소넷 등 기상 관련 활동을 위해 2022년에 1,290만 달러, 2023년 1,340만 달러를 지원하고 있다. 또한 오클라호마 주정부는 레이더 설치를 위해 160만 달러를 책정하였다.

2. 미주리와 인디애나

미주리 주의 2023년 예산은 467억 달러로 2021년 대비 50% 정도 증가하였다. 하지만 프로그램별 예산을 분석해 보면 기상이나 기후 관련 예산은 전무하다. 인디애나 주는 오대호 남쪽에 위치하며 중부의 팝 벨트와 오대호 연안의 러스트 벨트가 교차하는 지역이다. 인디애나 주정부의 2023년 예산은 426억 2,000만 달러이며, 기상 및 기후 관련 예산은 전무한 편이다.

3. 미시시피

미시시피 주의 예산은 200~240억 달러에서 매년 편차를 보이는데 이는 재난대응 예산의 변동에 기인한다. 교육과 사회복지 예산이 전체 예산의 70~80%를 차지하며, 이들 분야의 예산은 매년 꾸준히 증가하는 추세다. 환경의 질, 자연 생태계, 해양자원 등의 보존을 위한 예산도 꾸준히 증가하고 있다.

4. 하와이

하와이 주정부의 2023년 예산은 172억 달러로 미미한 수준이다. 하와이 주정부는 기후변화 대응을 위한 부처로 토지천연자원부(Department of Land and Natural Resources: DLNR)를 두고 자연재해 예방 프로그램을 운영하고 있다. 하와이 주정부는 연간 300만 달러 내외의 예산을 매년 자연재해 예방 프로그램을 위해 편성하고 있다. 하와이 주정부는 기후변화 대응 및 천

연자원 보존을 위해 1억 달러를 투자할 방침이다. 또한 기후영향기금을 바탕으로 기후 및 청정 에너지 정책도 적극 추진할 계획이다. NSF는 하와이 지역의 기상관측 네트워크 확충(기상관측소 84개 신규 설치)을 위해 3년간 총 133만 달러를 지원하고 있다. 하와이 전역에 설치되는 기상관측소는 강수량, 대기온도, 습도, 풍향 및 풍속, 방사선, 토양 습도 및 온도, 기압 등 20여 개 항목을 실시간으로 측정하여 15분마다 전송하여 기상 예측에 활용할 예정이다.

5. 뉴욕

2023년 뉴욕 주정부 예산은 2,125억 달러로 2021년 대비 14.7% 증가하였다. 주정부는 기후변화에 대한 선도적 대응과 지역사회의 복원력 강화에 역점을 두고 있고 있으며, 이를 위해 환경 보존, 복원력 강화, 재생에너지, 탄소 없는 운송에 5년간 330억 달러를 투자할 계획이다.

6. 사우스캐롤라이나

사우스캐롤라이나 주정부의 2023년 예산은 344억 달러다. 주정부는 허리케인과 홍수에 대응하기 위해 2018년에 사우스캐롤라이나 홍수위원회(The South Carolina Floodwater Commission)를 설립하였다. 그리고 홍수 대응을 통합하기 위해 2020년에 사우스캐롤라이나 복원력사무소(South Carolina Office of Resilience)를 설립하고 연방, 주, 지방 및 비정부기관이 참여하는 복원력 강화 및 재해복구 노력을 전개하고 있다.

7. 플로리다

2023년 플로리다 주정부 예산은 1,170억 달러로 2021년 대비 15.2% 증가하였다. 여기에는 기후변화와 위기대응 예산이 다수 포함되어 있는데, 기후변화에 의한 해수면 상승, 해안 범람, 허리케인과 집중호우 등에 대비하기 위한 정책사업이 남부 플로리다를 중심으로 추진되고 있다. 주정부는 자연재해 대응과 복구를 위해 환경보호국(Department of Environmental Protection; DEP)에 연방정부와 주정부가 마련한 신탁펀드(16억 달러)를 지원하고 있다. 주정부는 도서지역의 비상용 발전기 확보를 위해 400만 달러의 펀드 예산을 지원한 바 있다.

8. 애리조나

애리조나 주정부의 2023년 예산은 618억 달러로 2021년 대비 33% 증가하였다. 보건의로



(35%), 교육(16.7%) 분야에 가장 많은 예산이 지출되며, 기상 관련 예산은 전체 예산의 1.4%(8억 9,000만 달러)에 불과하다.

9. 캘리포니아

캘리포니아 주정부의 2023년 예산은 3,064억 달러로 전체 예산의 약 70%를 보건복지서비스와 교육이 차지하고 있다. 캘리포니아는 폭염, 홍수, 산불 등 극단적 날씨가 주 전역에 영향을 미치고 있어 기후변화 관련 예산의 갈수록 증가하고 있다. 주정부는 2022년에 폭염행동계획(Extreme Heat Action Plan)을 발표하고 '환경, 천연자원, 재난 대비'를 강조하는 기후 아젠다를 추진하기 위해 5년간 약 540억 달러를 할당하였다. 주정부는 물 복원력, 산불 및 산림 복원력, 기후 탄력성, 무공해 차량, 에너지 등 5개 분야에서 다양한 프로그램을 운영하고 있다. 2023년에는 산불 및 산림 복원력 패키지에 27억 달러, 홍수위험 감소 패키지에 2억 9,000만 달러, 기후 탄력성 프로그램에 11억 달러를 지원하였다.

10. 주정부 기상 관련 예산 평가

선정된 10개 주의 예산을 분석한 결과, 주정부의 기후 관련 예산은 대부분 재난복구 위주로 편성되어 있음을 확인할 수 있었다. 지난 10년간 연방정부 차원의 WRN 구현을 위한 투자로 인해 주정부 차원의 기상 관련 예산은 그리 많지 않은 것으로 파악된다. 현재 여러 주정부가 참여하는 국가메소넷프로그램(National Mesonet Program; NMP)이나 CAP/RISA 프로그램도 대부분 연방정부 예산으로 추진되고 있다. 기상관측소 설치 및 운용, 기상 관련 기관 지원 등 몇몇 예외적인 경우도 있지만, 주정부가 추진하는 기상레이더 설치, 홍수대비 활동, 기후변화 대응 등의 활동은 대부분 일회성 성격의 예산으로 이루어지고 있다.

V. 미국 기상청(NWS)의 위상 및 역할 변화

1. 기상 관측 및 예보 강화를 위한 투자와 혁신

1974년 4월 슈퍼 토네이도로 인해 막대한 재산과 인명 피해가 발생하자 미국 정부는 NWS의 역할을 강화하기 위해 현대화 및 구조조정(Modernization and Associated Restructuring, MAR)에 나섰다. 이를 위해 미 정부는 1989-2000년 동안 NWS 현대화 및 구조개혁에 총 45억 달러를 투자하였다. NWS의 현대화를 위해 5가지 핵심 기술이 도입되었다¹⁾.

NOAA는 기후변화로 인해 증가하는 기상재해에 대비하기 위해 2011년 7월에 WRN 전략을 채택하였다. 그리고 NWS는 이를 위한 구체적인 실행방안을 담은 WRN 1차 로드맵(2012.4)에 이어 2차 로드맵(2013.4)을 제시하였다. WRN 전략은 정확한 기상예보가 의사결정자에게 신속히 전달되어 기상이변에 즉시 대응할 수 있는 체제를 갖추는 것을 명시하고 있다. 이를 위해 기상예보 및 경보 발령 시 사람과 사회적 요인을 우선적으로 고려하는 영향 기반 의사결정 지원서비스(Impact-based Decision Support Services, IDSS) 개념을 도입하였다.

이후 2017년에 「기상연구 및 예측 혁신법(Weather Research and Forecasting Innovation Act of 2017)」이 제정되었다. 법안은 가뭄, 산불, 폭염, 홍수, 해안 복원력(해수면 상승) 등의 영향이 큰 날씨 관측, 분석, 모델링 능력 향상, 계절별 및 sub-seasonal 예측 혁신의 필요성을 강조하고 있다. 이를 위해 IDSS 제공 의무화, OAR 역할 강화, WPO (Weather Program Office) 역할 등을 명시하고 있다. 또한 연방정부 내 관련 기상 연구 및 예측 혁신 활동의 조율을 위해 OSTP (Office of Science and Technology Policy) 내에 기상서비스 발전을 위한 부처간 위원회(Interagency Council for Advancing Weather Services; ICAWS)의 설립을 명시하고 있다.

1) ① ASOS(Automated Surface Observing System): 수작업으로 하던 기상관측을 컴퓨터 작업으로 전면 교체

② NEXRAD(Next Generation Weather Radar): 토네이도, 우박, 폭우와 같은 악천후를 예측하는 리드 타임을 향상시키기 위한 첨단 도플러 레이더(Doppler radars) 네트워크 구축

③ GOES(Geostationary Operational Environmental Satellite) I-H System: 장기 예측에 필요한 기상정보 개선을 위해 새로운 인공위성을 발사

④ AWIPS(Advanced Weather Interactive Processing System): 예보 사무소 간 통신, 중앙에서 수집된 데이터의 이용, 현장 예보관에게 다른 신기술이 제공하는 데이터 액세스가 가능하도록 지원

⑤ 내셔널 센터를 지원하기 위해 컴퓨팅 성능을 10배로 증가시킨 고급 컴퓨터시스템 도입



2. 기후변화로 인해 기후서비스 요구 증가

현재 기후변화 대응의 중요성과 시급성이 갈수록 커지고 있다. 현재 기후서비스 기능은 NOAA 산하 라인조직(NESDIS, OAR, NWS 등)은 물론 다른 연방정부기관에서 나눠 수행되고 있다. NESDIS 산하에 기상-기후 관련 모든 데이터를 관리하고 서비스를 제공하는 국립환경정보센터(National Centers for Environmental Information, NCEI)가 있으며, NCEI에는 6개 지역기후센터(Regional Climate Center)가 운영되고 있다. NWS는 내부조직으로 Climate Services Branch (CSB) 및 Climate Prediction Center (CPC)를 운영하고 있다. CSB는 NWS의 기후서비스프로그램을 관장하고 기후 예측활동 계획, 정책, 절차 등을 담당하고 있다. CPC는 CAP/RISA 프로그램과도 연결되어 있다. OAR에는 기후연구프로그램을 맡아 수행하는 CPO(Climate Program Office)가 있으며 CAP/RISA²⁾ 프로그램을 측면 지원하고 있다. CAP/RISA 프로그램은 기후 변동성 확대 및 기후변화와 관련된 다양한 도전과제를 이해관계자들이 이해하고 대응할 수 있도록 도와주는 혁신적인 메커니즘으로 평가된다. 현재 미국에는 12개의 CAP/RISA 프로그램이 가동되고 있다.

NOAA의 역할은 기상서비스를 넘어 기후서비스로 확장되는 추세다. 기상 관측 및 예보는 물론 기후변화 예측(climate prediction & climate projection)-영향 연구-적응(adaptation)으로 점차 확대되고 있다. 연구범위도 지상-해상-해안-대기권에 이어 우주시스템으로 확장되는 추세다. 이에 따라 2017년 IDSS 의무화를 계기로 NOAA의 역할이 단순한 기상정보 서비스가 아닌, 기후변화의 영향과 적응을 지원하는 현장 중심형 정보 제공의 필요성이 강조되고 있다. 대표적인 예가 OAR의 CPO로서 기후변화 완화 및 적응에 기여하는 역할을 하고 있다. 기상 이변을 포함한 날씨를 예측하려면 기후 변동성과 변화를 포괄적으로 이해해야 하므로 CPO는 기후에 대한 이해와 예측 향상 및 대응을 지원하고 있다. CPO는 1990년 「지구변화연구법(Global Change Research Act)」에서 명시한 ‘국가기후평가(U.S. National Climate Assessment)’ 작업(4년마다 작성 의무화)을 지원하고 있다. 2021년에 제정된 「초당적 인프라법(Bipartisan Infrastructure Law; BIL)」은 CPO가 관리하는 CAP 프로그램을 위해 5년간 총 30억 달러를 지원할 것을 명시하고 있다. 지역 단위의 기후변동성 및 변화 이해, 기후변화에 대한 적응능력 향상을 지원하는 것이 주된 목적이다.

2) NOAA는 1995년에 출범한 RISA(Regional Integrated Sciences and Assessment) Program을 2022년에 Climate Adaptation Partnerships(CAP) Program으로 변경하였다.

2022년 7월에 NOAA는 「기후-대비 국가(Climate-Ready Nation; CRN)」를 중기(2022-2026년) 전략으로 채택하였다. BIL과 인플레이션감축법(Inflation Reduction Act; IRA)은 기후 적응 및 복원 전략을 위해 NOAA에 60억 달러 이상을 지원할 예정이다. BIL은 5년간 NOAA에 총 30억 달러를 투자하여 기후데이터 및 서비스, 기후-대비 해안, 어류 및 보호자원 등을 지원할 계획이다. 기후데이터 및 서비스에 대해 총 9억 달러를 지원할 계획인데, 홍수 및 범람 매핑 및 예측(NWS, 5년간 4억 9,000만 달러), 해양 및 해안 관측시스템(NWS, 2022년 5,000만 달러), 연구용 슈퍼컴퓨팅, 토양 습도 및 설원 시범프로젝트, 산불연구사업 등이 포함되어 있다. 한편 IRA는 총 33억 달러를 지원하도록 명시하고 있으며 기후 대응 해안커뮤니티(26억 달러)과 기후데이터 및 서비스 개발(2억 달러), 인프라 확충 등의 사업을 지원할 예정이다.

3. 기후청 신설 및 NOAA의 독립기관화 추진 논의

2009년 10월 NOAA는 「기후서비스(Climate Service) 비전」을 발표하고, 2010년 2월에 새로운 산하조직으로 기후청(National Climate Service; NCS)의 설립을 제안하였다. 하지만 2011년 10월 NOAA가 기후서비스 전담조직으로 제안했던 NCS의 설립은 의회의 반대로 무산되었다³⁾.

이후 10년이 지난 최근에 NCS의 설립 및 NOAA의 독립기관화 논의가 다시 점화되고 있다. 기후 변동성의 확대와 기후변화로 인한 극한 기상현상의 증가, 이로 인한 인적·물적 피해가 증가함에 따라 기후와 관련된 데이터 수요가 급격히 증가하고 있다. 이에 따라 미 정부의 기후변화 관련 대책도 더욱 강화되고 있다. 현재 NOAA(NWS, NESDIS, OAR)는 물론 NASA, USGS, EPA 등 다수 기관에서 독자적으로 다양한 기후데이터를 수집하고 있다. 부처간 정책 조율 메커니즘이 작동하고 있음에도 불구하고 각 기관마다 수집·제공하는 기후 관련 정보가 다양하고 여러 곳에 분산되어 있다 보니 정책 당국과 이해관계자들(특히 산업계)은 기후변화에 대한 효율적인 대응이 어려운 상황이다. 이에 따라 최근 미국 내 학계와 정치권을 중심으로 기후 정보와 중장기 기후 예측을 총괄하는 전담조직으로 NCS의 설립이 논의되고 있다. 2021년 3월에 국립 과학·공학·의학 아카데미(National Academies of Sciences, Engineering and Medicine; NASEM) 산하의 대기과학·기후위원회(Board on Atmospheric Sciences and Climate; BASC)에서 이

3) 상원의 찬성에도 불구하고 공화당이 다수석을 차지하고 있던 하원은 기후청의 설립 대신 기후데이터 수집에 필요한 극궤도 위성시스템의 도입을 위한 예산을 승인하였다.



문제가 집중 논의되었다. 그리고 2021년 4월 하원의 과학·우주·기술·환경분과위원회에서 기후 서비스 현황 평가와 NCS의 설립 필요성에 대한 청문회가 열렸다. NCS의 설립은 과거에 비해 정치적으로 덜 민감한 사안으로 설립 필요성에 대한 공감대가 형성되어 있다. 기후변화의 심각성과 대응 필요성에 있어 전통적으로 민주당이 공화당보다 적극적이지만 과거에 비해 양당 간 견해차가 많이 좁혀진 상태이다.

한편, 미 하원에서는 NOAA를 상무부(Department of Commerce; DoC)에서 분리해 독립 기관으로 전환하는 법안(NOAA Organic Act)이 추진되고 있다. NASA처럼 NOAA를 상무부에서 분리해 독립기관으로 전환해 기후위기 대응의 전문성을 강화하자는 취지다. 2023년 6월에 오클라호마 하원의원(F. Lucas, 공화당)의 주도로 14명의 공화당 소속 의원들이 법안에 서명하여 「National Oceanic and Atmospheric Administration Act of 2023」을 발의하였다. 법안은 NOAA에 공식 행정기관의 지위를 부여할뿐만 아니라, 조직 효율성 제고를 위한 조직 개편, NOAA 산하 과학자문위원회(Science Advisory Board; SAB)에 5년마다 R&D 로드맵 작성·제출을 의무화하는 내용을 담고 있다. 법 시행 후 18개월 이내에 NOAA의 조직개편안을 제출할 것을 명시하고 있다.

2022년 7월에 공표된 CRN 전략을 추진하기 위해 앞으로 NOAA의 역할은 더욱 강화될 전망이다. 2024년 대선 이후 NCS의 설립 및 NOAA를 DoC에서 분리해 독립기관으로 전환하는 논의가 본격화될 것으로 예상된다.

VI. 한국-미국 기상 관련 예산 비교

1. 프로그램 및 사업 단위 매핑을 통한 기상 관련 예산 비교

기상선진국 미국의 기상 관련 예산을 종합적으로 파악하기 위해 NOAA는 물론 연방정부기관과 주정부 예산까지 분석하였다.

1단계 작업으로 NOAA 산하 기관들의 10년간(2014-2023년) 예산을 분석하였다. 지난 10년간의 NOAA 산하 6개 기관의 예산 누계와 기상청 예산 누계를 비교한 결과 NOAA의 예산이 기상청보다 17.3배 많은 것으로 파악되었다. 기상청 예산과 NOAA 예산의 격차는 2014년 19.9

배에서 2021년 14.5배로 줄었으나, 2023년에 18.5배로 다시 확대되었다. 트럼프 대통령의 집권기(2017.1.-2021.1.)에 기상 관련 예산이 연간 50억 달러 미만으로 삭감되어 기상청 예산과의 격차가 축소되었으나, 바이든 정부의 출범 이후 기상 관련 예산이 다시 증액되었기 때문이다. 지난 10년간 기상청의 예산은 34.5% 증가한 반면, NOAA 산하기관 중 OMAO는 79.5%, OAR은 64%, NOS는 36% 증가하였다. 이는 기후변화와 관련하여 해양 분야에 대한 투자와 연구개발 확대를 반영한 것이다. 한편 NWS의 예산은 지난 10년간 31.3% 증가하여 기상청의 증가율과 비슷한 수준이었다.

2단계 분석에서는 연방국가인 미국의 기상 관련 예산의 전체 규모를 파악하기 위해 NOAA 산하 6개 라인조직은 물론 연방정부기관과 기상 피해가 가장 많은 10개 주정부의 예산을 추출하여 프로그램 및 단위사업 별로 매핑(mapping)하여 기상청 예산과 비교하였다. 분석 결과, 미국의 기상 관련 실제 예산은 59억 1,000만 달러(2021년)에서 75억 7,000만 달러(2022년), 2023년에는 88억 1,000만 달러로 꾸준히 증가했음을 확인할 수 있었다(2021년 대비 2023년 예산 49.0% 증가). 따라서 미국의 기상 관련 예산은 기상청 대비 2021년 18.1배에서 2023년 24.4배로 격차가 확대되었다. 미국의 기상 관련 예산에서 NOAA와 연방정부기관의 예산이 대부분을 차지하며, 주정부 예산은 환경보호와 재난 복구에 집중된 관계로 기상 관련 예산은 미미한 수준으로 밝혀졌다. 연방정부기관 중에는 NSF, NASA, DoD, USGS의 순으로 기상 관련 예산이 많았다.

2. 분야별 한·미 예산 비교

2023년 기상 관련 예산을 프로그램별로 살펴보면, 기상청은 기상행정지원 29.4%, 기상관측 27.6%(지상/고층 기상관측 9.3%)의 순으로 큰 비중을 차지하는 반면, 미국은 기상관측 48.3%(기상레이더/위성 관측 27.1%), 책임행정기관 운영 30.2%의 순이었다⁴⁾. 2021년 대비 2023년 예산 증가율에서 기상청은 기상서비스진흥(75.1%), 기상예보(46.8%), 책임행정기관 운영(16.9%)의 순으로 크게 증가하였고 기상관측 증가율은 12.4%에 불과하였다. 반면, 미국은 기상연구(154.9%), 책임행정기관 운영(66.3%), 기후변화과학(48.7%)의 순이었으며, 지난 3년간 43.9% 증가한 기상관측의 세부 분야에서는 지진 관측(65.6%), 해양기상 관측(63.5%)이 가장 크게 증가하였다.

4) 관측 분야(특히 위성/레이더) 예산에 대한 매핑분석에서는 양국 간 예산구조 차이로 인한 오차가 존재할 수 있음



기상관측 예산을 비교한 결과, 미국의 기상관측 중 기상레이더/위성 관측이 전체 예산의 27.1%로 가장 높고, 지상 및 고층 기상관측은 5.2%에 불과하였다. 반면, 기상청은 지상 및 고층 기상관측이 9.3%로 높고 기상레이더 관측은 1.7%에 불과해 미국과 크게 대조적인 모습을 보이고 있다. 기상예보 분야에서 미국은 기상청보다 101배 많은 예산을 쓰고 있다. FAA, DoD의 모델링이나 날씨프로그램 예산이 추가되어 김득갑 외(2023) 연구 결과(76.5배로 추산)에 비해 격차가 더욱 확대되었다. 기후변화 과학에서 미국은 기상청보다 39.3배 많은 예산을 편성하고 있다. 기상청은 2021년 대비 2023년 예산 증가율이 13.3%에 불과하지만, 미국은 70.7%로 약 5.3배 높은 증가율을 보였다. 이러한 차이는 바이든 정부 출범 이후 기후변화 대응을 위해 FEMA, EPA, USGS, FAA 등 연방정부 차원에서 관련 예산을 집중 편성하는 등 기후변화 대응 활동을 활발히 추진하는데 기인한다. 기상서비스 진흥에 있어 미국은 기상청에 비해 79배 많은 예산을 편성하고 있다. 기상연구 분야의 경우 미국은 기상청보다 2.8배 많은 예산을 투자하고 있다. 기상청은 2021년 대비 2023년 예산이 3.6% 감소했지만 미국은 160.6% 증가하는 등 대조적인 모습을 보이고 있다. 책임행정기관 운영에 있어 미국은 기상청보다 51.2배 많은 예산을 편성하고 있다. 지난 3년간 예산 증가율을 보면 미국은 51.7%로 기상청(16.9%)에 비해 약 3배 많다. 이는 NCAR/UCAR와 관련된 NSF의 연구개발 활동, 오클라호마 주정부의 오클라호마대학교 지원, FAA의 예산이 반영된 결과로 김득갑 외(2023)의 결과보다 격차가 확대되었다.

VII. 결론 및 정책적 제언

1. 한국-미국 기상 관련 예산 비교 평가

본 연구에서는 선행연구의 한계점을 보완하기 위해 NOAA 산하의 6개 기관과 연방정부기관 및 주정부의 예산을 종합적으로 조사·분석하였다. 분석 결과, 미국의 기상 관련 총예산은 2023년 88억 1,000만 달러(한화 11조 4,504억 원)로 기상청 예산의 24.4배에 달하는 것으로 파악되었다. 그리고 인구 1인당 기상 관련 예산은 미국이 우리나라보다 3.7배 많은 것으로 집계되었다. 2023년 기준 1인당 GDP가 한국보다 2.4배 많은 미국은 지난 10년간 기상 관련 예산을 지속 투자하여 세계 최고의 기상선진국 입지를 공고히 하고 있음에도 불구하고, 매년 우리보다 3.7배 이

상의 기상 관련 투자를 지속하고 있다. 주정부 차원의 기상 관련 예산은 미미한 반면, NOAA(기상 관련 예산의 55.2%)와 연방정부기관(기상 예산의 44.6%)의 예산이 기상 관련 전체 예산의 99% 이상을 차지하고 있다.

2. 기상청의 발전방향과 관련한 정책 제언

기후법의 제정⁵⁾에 따라 앞으로 기상청의 기후변화에 대한 감시 및 예측 활동은 강화되어야 하므로 기상청의 역할 확대와 더불어 관련 예산을 확대할 필요가 있다. 이에 따라 기상선진국 미국

〈표 2〉 2023년 한국과 미국의 기상 관련 예산 비교

구분	미국		한국	비교
기상 관련 예산	1차 연구 (NOAA 산하 4개 기관)	6조 3,160억원 (4,858.5백만 달러)	4,696억원	13.4배
	연방정부기관 예산 포함	11조 4,205억원 (8,785.0백만 달러)		24.3배
	주정부 예산 포함	11조 4,504억원 (8,808.0백만 달러)		24.4배
인구수(천명)	335,537		51,565	6.5배
1인당 GDP(천달러)	8,004만 달러		33,393달러	2.4배
국민 1인당 기상 관련 예산	1차 연구	18,824원	9,107원	2.1배
	연방정부기관 예산 포함	34,036원		3.7배
	주정부 예산 포함	34,126원		3.7배

의 CRN 전략을 참고삼아 기상청의 발전방향을 진지하게 고민해야 할 시점이다. 미국의 기상·기후 관련 예산과 NOAA의 역할 변화가 기상청에게 주는 정책적 시사점을 제시하였다.

첫째, 기후변화의 심각성을 인식하고 기후위기에 대한 선제적 대응을 주요 국가과제로 삼아 국가전략 전반에 반영해야 한다. 기후위기로 인해 갈수록 커지는 피해 복구비용보다 위기 발생에 대비한 선제적 투자가 경제적이라는 사실을 유념할 필요가 있다.

둘째, 기상청은 기후위기 대응을 위한 선도적 역할에 필요한 조직 강화 및 예산확대를 지속적으로 추진해야 한다. 기후법의 제정을 계기로 기상청은 기후·기후변화에 대한 감시 및 예측 활동을 강화함으로써 기후위기 대응을 위한 선도적인 역할을 수행해야 한다. 미국의 경우 2010년 NOAA의 라인조직으로 NCS의 신설이 무산되었지만, NOAA는 NWS, OAR, NESDIS 등 기존

5) 「기후·기후변화 감시 및 예측 등에 관한 법률」제정안이 2023년 10월 6일에 국회 본회의를 통과했으며 1년 후 시행될 예정이다.



라인조직을 통해 기후변화 관련 역할을 수행하면서 예산을 지속적으로 확대해 왔다. 따라서 기상청도 기후위기 대응을 위한 선도적 역할을 수행하기 위해 필요한 예산 편성을 지속적으로 추진해야 한다. 기후기상청(가칭)의 전환을 추진하되 여의치 않을 경우에도 기존 조직을 통해 기후·기후변화 감시 및 예측 활동을 적극 수행해야 한다. 이를 위해 기상청은 미국의 CRN 실현을 위한 기상·기후 관련 사업의 중장기 예산 확대 계획을 참고할 필요가 있다.

〈표 3〉 미국의 기후-대비 국가 실현을 위한 기상·기후 관련 예산

구분	인플레이션감축법(IRA)	초당적 인프라법(BIL)
지원 사업	<ul style="list-style-type: none"> ① 극한기상 관측을 강화하기 위한 차세대 기상레이더(Phased Array Radar) 투자 ② 지역 기반의 기후정보 생산 및 확산 지원: 국가 통합 폭염건강 정보시스템(NIHHS), 기후 스마트커뮤니티 이니셔티브(CSCI), 기후 적응 파트너십/지역 통합 과학평가(CAP/RISA), 국가가용 정보시스템(NIDIS) 등 ③ 극한기상 및 기후 이벤트, 해양 및 생태계 변화에 대한 예측 개선을 위해 데이터 가공, 수치기상예보, 모델링 역량 강화 ④ 기후데이터 및 서비스 개선을 위한 민간기업의 제품 및 서비스 개발 지원 ⑤ 허리케인 및 대기천 연구를 위한 항공기 추가 구입 ⑥ 통합 해양관측 시스템(IOOS)을 통한 기후복원프로젝트 지원 	<ul style="list-style-type: none"> ① 홍수 범람 매핑 및 예측 ② 다양한 기후 관련 정보 제공을 위한 연구용 슈퍼컴퓨팅 지원 ③ 산불 연구 ④ 산불 인프라 지원 ⑤ 해양 및 해안 관측시스템 ⑥ 토양 습도 및 snowpack 감시사업(SMPP) ⑦ SMPP를 위한 데이터 확보

셋째, 기상청의 발전방향 수립 시 NOAA의 위상 변화를 고려할 필요가 있다. 미국의 CRN과 이를 위해 미 정치권에서 현재 진행되고 있는 논의를 종합해볼 때 2024년 11월 미국 대선 이후 NOAA의 위상에 상당한 변화가 있을 전망이다. NOAA의 위상 변화는 ①기존 체제 하에서 NOAA의 새로운 라인조직으로 NCS의 설립(민주당), ② NOAA를 DoC에서 분리하여 독립기관으로 전환(공화당) 중 하나가 선택되거나 두 가지가 결합될 가능성이 있다. 미국의 '기후변화 대응 강화'라는 국가적 과제에는 정파를 떠나 견해가 일치하므로 어떤 방식으로든 NOAA의 위상 강화가 예상된다. 따라서 NOAA의 위상 변화와 관련된 진행 상황을 모니터링하여 기상청의 중장기 발전방향을 수립하는데 참고할 필요가 있다.

넷째, 기상청은 정부부처들의 기후변화 대응정책을 총괄·조율하는 범부처 조직에서 중심적인 역할을 수행할 필요가 있다. 미국은 ICAMS를 통해 대기서비스를 제공하는 관련 부처들의 정책과 예산을 조율하고, USGCRP를 통해서도 기후변화 관련 부처간 정책과 예산을 조율함으로써 중복투자 방지 및 정책 집행의 효율성을 도모하고 있다. NOAA는 예산과 정책결정 측면에서 기상 및 기후 관련 정책 수립·총괄·조율하는 범부처 조직에서 중심적인 역할을 수행하고 있

다. 우리나라도 기후변화와 관련하여 부처 간 활동영역과 중복투자 문제를 사전 방지하기 위해 컨트롤타워를 범부처 조직으로 설립할 필요가 있다. 미국의 NOAA가 ICAMS나 USGCRP에서 수행하는 주도적 역할을 고려할 때 기상청도 새로 설립되는 범부처 조율기구에서 중심적인 역할을 수행할 수 있어야 한다.

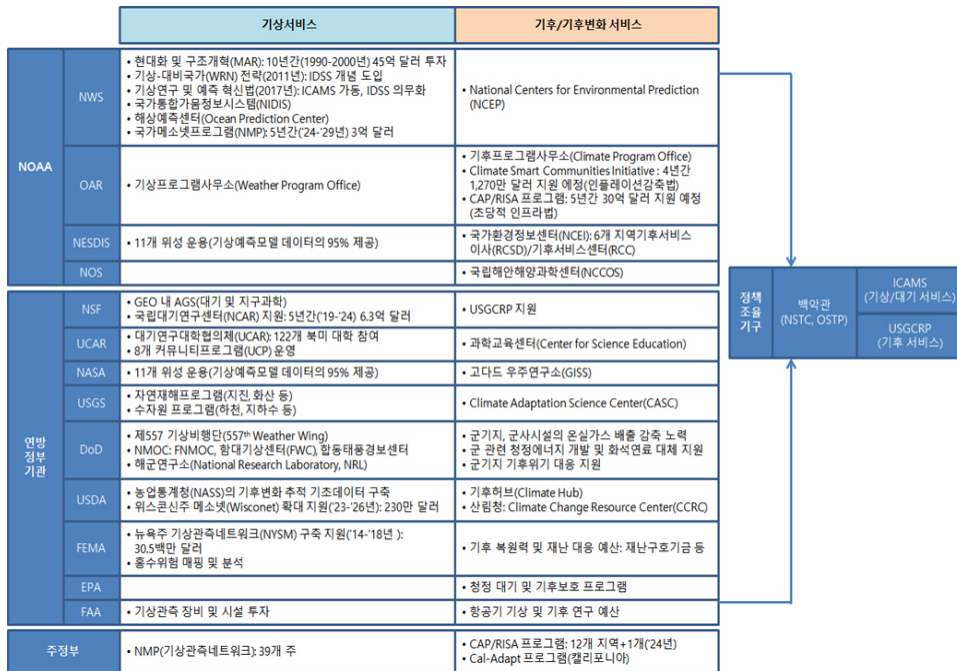
다섯째, 기상청은 기후변화 감시 및 예측 활동을 강화하되, 기상레이더/위성 관측 및 해양기상 관측 관련 투자를 확대할 필요가 있다. 우리나라의 기상관측 예산은 미국에 비해 턱없이 부족하며, 특히 기상레이더/위성 관측 및 해양기상 관측 분야에서 예산 격차가 가장 크다. 기후변화로 인해 극한기상 현상을 예측하기가 갈수록 어려워지고 있어 기상·기후변화 예측을 개선하기 위해서는 지상관측뿐만 아니라 위성 관측과 기상레이더 관측, 그리고 해양기상 관측을 결합한 총체적인 접근이 요구된다. 이들 분야에 대한 집중적인 투자가 필요한 이유다. 특히, 삼면이 바다인 우리나라의 지형 특성상 기후변화 감시 및 예측에 있어 해양기상 관측이 중요하므로 기상청도 해양환경의 변화(해양 산성화, 해수면 상승 등)에 대한 관측을 강화하기 위한 예산 확대가 필요하다. 이를 위해서는 해양수산부와의 역할 조정을 통한 유기적인 협조체제가 전제되어야 한다. 해양관측(현상)-해안과학(영향)-해양관리서비스(대응) 중에서 해양관측과 해안과학 분야는 기상청이 수행하고 해양관리서비스 분야는 해양수산부가 맡는 역할 조정이 바람직하다.

여섯째, 기상청은 기후위기 증가에 선제적으로 대응하기 위한 국가적 차원의 인프라 확충의 필요성을 전파하고 관련 정보를 제공하는 역할을 강화해야 한다. 미국은 NMP, CAP/RISA, BIL, IRA 등을 통해 기후변화로 인해 갈수록 증가하는 국지적 위험기상에 대응할 수 있는 체제를 구축하고 있다. 우리나라도 4대강 사업처럼 기후변화 대응을 위한 국가적인 인프라 확충사업을 전개할 필요가 있다. 이를 위해 기상청은 기후변화 시나리오와 영향 예측을 통해 기후위기에 대응할 수 있는 인프라 확충전략 수립 및 정부 사업을 지원할 수 있어야 한다.

일곱째, 기상청은 기상 및 기후산업 육성을 위한 산업생태계의 구축 및 강화 노력에도 주도적으로 참여해야 한다. 기상선진국 미국에는 NOAA뿐만 아니라, NSF, UCAR 및 NCAR, NASA, DoD(해군과 공군), USGS 등이 다양한 기상 및 대기서비스를 제공하고 있으며, 이러한 기상정보를 상업적으로 활용하는 기상 관련 전문기업들도 다수 활동하고 있다. 미국의 해군과 공군은 군사적 목적의 기상 임무를 수행해온 오랜 역사와 원천기술을 보유하고 있고, 기상 관련 전문인력을 정부기관과 민간기업에 공급하는 역할을 수행하고 있다. 또한 NCAR와 UCAR는 NSF

의 재정 지원을 받아 기상 및 기후변화와 관련한 연구개발 활동을 수행하는 한편, 기상 및 기후 변화의 중요성에 대한 홍보와 교육서비스를 제공하고 있다. 오클라호마대학교의 CIWRO는 연방정부와 주정부의 지원을 받아 NOAA의 NWC와 함께 극한기상 현상에 대한 연구 및 관련 활동을 수행하고 있다. 미국의 기상 및 기후변화 대응체제에는 연방정부와 주정부, 대학, 민간기업들이 참여하는 산·관·학 협력을 통해 예산 집행의 효율성과 정책 실효성을 제고하고 있다. 국가적으로 추진 중인 NMP, CAP/RISA 프로그램은 대학과 민간기업이 참여하는 민관파트너십(Public-Private Partnerships: PPP) 형태로 시행되고 있다. 따라서 우리나라도 기상 및 기후변화와 관련된 기관들로 구성된 산업생태계를 강화하여 기후위기에 효율적으로 대응하고 기후 산업을 선도적으로 육성할 필요가 있다. 이를 위해 기후법의 시행 주체인 기상청은 국내 산업생태계의 현황을 종합 분석·평가하고 중장기 발전전략을 제시할 필요가 있다.

[그림 1] 미국의 기상 및 기후변화 대응전략 추진체계



참고문헌

김득갑, 이종우, 최정원, 2023: 기상선진국 예산 구조분석-미 기상청 중심으로. 연세대학교 동서문제연구원.

기상기술정책지 발간 목록

창간호, 제1권 제1호(통권 창간호), 2008년 3월

칼 럼	• 기후변화 대응을 위한 기상청의 역할	권원태	3-11
정책초점	• 기후변화감시 발전 방향	김진석	12-18
	• 미국의 기상위성 개발현황과 향후전망	안명환	19-38
	• 기상산업의 위상과 성장가능성	김준모	39-45
	• 최적 일사 관측망 구축방안	이규태	46-57
	• 국가기상기술로드맵 수립의 배경과 의의	김백조, 김경립	58-61
논 단	• A New Generation of Heat Health Warning Systems for Seoul and Other Major Korean Cities	L.S. Kalkstein, S.C. Sheridan, Y.C.Au	62-68
해외기술동향	• 프랑스의 에어로솔 기후효과 관측 기술	김상우	69-79
	• 일본의 우주기상 기술	김지영, 신승숙	80-84

기상산업의 현황과 전략, 제1권 제2호(통권 제2호), 2008년 6월

칼 럼	• 기후변화시대, 기상산업 발전상	봉종헌	1-3
정책초점	• 기상산업의 중요성과 전략적 위치	이종우	5-13
	• 기후변화가 산업에 미치는 경제적 영향과 적응대책	한기주	14-22
	• 기후경제학의 대두와 대응 전략	임상수	23-33
	• 기후변화와 신재생에너지 산업	구영덕	34-45
	• 기상산업 육성을 위한 정책대안 모색	김준모, 이기식	46-54
	• 미국 남동부의 응용기상산업 현황	임영권	55-64
	• 최근 황사의 특성 및 산업에 미치는 영향	김지영	65-70
논 단	• A brief introduction to the European Cooperation in the field of Scientific and Technical Research (COST)	Radan Huth	71-81
	• 우주환경의 현황과 전망	안병호	82-92
해외기술동향	• 유럽의 기후변화 시나리오 불확실성 평가 : EU(유럽연합) 기후변화 프로젝트를 중심으로	임은순	93-103
	• 미국 NOAA의 지구 감시 현황	전영신	104-107

항공기 관측과 활용, 제1권 제3호(통권 제3호), 2008년 9월

칼 럼	• 기상 관측·연구용 항공기 도입과 활용	정순갑	1-4
정책초점	• 무인항공기 개발 현황 및 응용 방안	오수훈, 구삼옥	6-18
	• 해외 기상관측용 항공기 운영 및 활용 실태	김금란, 장기호	19-34
	• 항공기를 이용한 대기물리 관측 체계 수립 방안	오성남	35-45
	• 효과적인 항공기 유지 관리 방안	김영철	46-56
	• 공군에서의 항공관측 현황과 전망	김종석	57-66
	• 항공기를 이용한 대기환경 감시	김정수	67-74
	• 항공/위성 정보를 활용한 재해 피해 조사	최우정, 심재현	75-84
논 단	• 유/무인항공기를 이용한 기후변화 감시	윤순창, 김지영	85-93
해외기술동향	• 미국의 첨단 기상관측 항공기(HIAPER) 운영 현황	김지영, 박소연	94-99
	• 미국의 탄소 추적자 시스템 개발 현황 및 전략	조천호	100-108
	• 미국의 우주기상 예보와 발전 방향	곽영실	109-117
뉴스 포커스	• 한국, IPCC 부의장국에 진출	허은	118-119

기상기술정책지 발간 목록

전자구관측시스템 구축과 활용, 제1권 제4호(통권 제4호), 2008년 12월

칼 럼	• 전자구관측시스템(GEOSS) 구축과 이행의 중요성	정순갑	1-4
정책초점	• GEO/GEOSS 현황과 추진 계획	엄원근	6-21
	• GEOSS 구축을 위한 전략적 접근 방안	김병수	22-31
	• GEO 집행위원회에서의 리더십 강화 방안	허 은	32-39
	• 국내외 분야별 GEOSS 구축과 발전 방안	신동철	40-41
	- 재해 분야	박덕근	42-44
	- 보건 분야	이희일	45-47
	- 에너지자원 분야	황재홍, 이사로	48-50
	- 기상 및 기후 분야	이병렬	51-53
	- 수문 및 수자원 분야	조효섭	54-56
	- 생태계와 생물다양성 분야	장임석	57-58
	- 농업 분야	이정택	59-62
- 해양 분야	김태동	63-67	
- 우주 분야	김용승, 박종욱	68-71	
논 단	• Taking GEOSS to the next level	José Achache	72-75
해외기술동향	• GEOSS 공동 인프라(GCI) 구축 동향	강용성	76-83
	• 최근 주요 선진국의 GEO 구축 현황	이경미	84-95
뉴스 포커스	• 한국, GEO 집행 이사국 진출	이용섭	96-97

기상장비의 녹색산업화 전략, 제2권 제1호(통권 제5호), 2009년 3월

칼 럼	• 녹색산업으로서의 기상장비 산업 육성 정책 방향	전병성	1-2
정책초점	• 기상장비의 산업여건과 국산화 전략	김상조	4-13
	• 기상장비 수출 산업화를 위한 성공전략	이종국	14-21
	• 기상레이더 국산화 추진 방안	장기호, 석미경, 김정희	22-29
	• 기상레이더의 상용화 현황과 육성 방안	조성주	30-41
	• 기상장비의 시장성 확보 전략 및 방향	이부용	42-51
논 단	• 외국의 기상레이더 개발 동향과 제언	이규원	52-72
해외기술동향	• 유럽의 기상장비 산업 현황: 핀란드 바이살라를 중심으로	방기석	73-80
	• 세계의 기상장비 및 신기술 동향	김지영, 박소연	81-89

기후변화와 수문기상, 제2권 제2호(통권 제6호), 2009년 6월

칼 럼	• 기후변화에 따른 수문기상 정책 방향	전병성	1-2
정책초점	• 기후변화와 물환경정책	김영훈	4-15
	• 기후변화에 따른 물 관리 정책 방향	노재화	16-27
	• 기후변화에 따른 하천 설계빈도의 적정성 고찰	김문모, 정창삼, 여운광, 심재현	28-37
	• 수문기상정보를 활용한 확률강우량 산정 방안	문영일, 오태석	38-50
	• 수문기상학적 기후변화 추세	강부식	51-64
	• 기상정보 활용을 통한 미래의 물관리 정책	배덕호	65-77
	• 이상기름에 대응한 댐 운영 방안	차기욱	78-89
	논 단	• 기후변화의 불확실성 해소를 위한 대응방안	양용석
해외기술동향	• 미국의 기상-수자원 연계기술 동향	정창삼	111-121
	• NOAA의 수문기상 서비스 및 연구개발 현황	김지영·박소연	122-131
	• 제5차 세계 물포럼(World Water Forum) 참관기	김용상	132-140

기상기술정책지 발간 목록

기상·기후변화와 경제, 제2권 제3호(통권 제7호), 2009년 9월

칼 럼	• 기상정보의 경제적 가치 제고를 위한 정책 방향	전병성	1-2
정책초점	• 기후변화에 따른 에너지정책	박현종	4-18
	• 기후변화 대응이 경제에 미치는 영향	박종현	19-29
	• 기후변화가 농업경제에 미치는 영향	김창길	30-42
	• 기상 재난에 따른 경제적 비용 손실 추정	김정인	43-52
	• 기상산업 활성화와 과제	이만기	53-59
	• 날씨 경영과 기상산업 활성화를 위한 정책 제언	김동식	60-69
논 단	• 기후변화와 새로운 시장	이명균	70-78
해외기술동향	• 기상정보의 사회·경제적 가치와 편익 추정	김지영	79-85
	• 강수의 경제적 가치 평가 방법론	유승훈	86-96
뉴스 포커스	• 기상정보의 경제적 가치 평가 워크숍 개최 후기	이영곤	97-103

날씨·기후 공감, 제2권 제4호(통권 제8호), 2009년 12월

칼 럼	• 날씨공감포럼의 의의와 발전방향	전병성	1-2
정책초점	• [건강] 지구온난화가 건강에 미치는 영향	고상백	4-19
	• [해양] 기후변화에 있어서 해양의 중요성과 정책방향	이재학	20-29
	• [산림] 기후변화에 따른 산림의 영향과 정책방안	차두송	30-41
	• [관광] 기후변화 시대의 관광 활성화 정책방향	김익근	42-50
	• [도시기후] 대구의 도시 기후 및 열 환경 특성	조명희, 조유원, 김성재	51-60
	• [에너지] 태양에너지 소개와 보급의 필요성	김정배	61-72
	• [디자인] 생활디자인과 기후·기상과의 연계방안	김명주	73-88
논 단	• 국민과의 '소통' - 어떻게 할 것인가?	김연중	89-97
뉴스 포커스	• 날씨공감포럼 발전을 위한 정책 워크숍 개최 후기	김정윤	98-101

기후변화와 산업, 제3권 제1호(통권 제9호), 2010년 3월

칼 럼	• 기후변화에 따른 기상산업의 성장가능성과 육성정책	박광준	1-2
정책초점	• 기상이변의 경제학	이지훈	4-11
	• 기후변화 영향의 경제적 평가에 관한 소고	한기주	12-21
	• 기후변화 정책에 따른 산업계 영향 및 제언	이종인	22-32
	• 기후변화예측 관련 기술 동향 및 정책 방향	이상현, 정상기, 이상훈	33-45
	• 기후변화와 건설 산업	강운산	46-56
	• 코펜하겐 어코드와 탄소시장	노종환	57-66
	• 기후변화, 환경산업 그리고 환경경영	이서원	67-77
	• 이산화탄소(CO ₂) 저감기술 개발동향: DME 제조기술	조원준	78-84
논 단	• 기후변화와 정보통신 산업의 상관관계: 그린 IT를 중심으로	양용석	85-99
	• 기후변화 대응을 위한 산업계 및 소비자의 책임	김창섭	100-109
뉴스 포커스	• 기후변화미래포럼 개최 후기	김정윤	110-115

기상기술정책지 발간 목록

국가 기후정보 제공 및 활용 방안, 제3권 제2호(통권 제10호), 2010년 6월

칼 럼	• 국가기후자료 관리의 중요성	켄 크로포드	1-2
정책초점	• 기후변화통합영향평가에대한 국가기후정보의 역할	전성우	4-11
	• 친환경 도시 관리를 위한 기후 정보 구축 방안	권영아	12-22
	• 기상정보의 농업적 활용과 전망	심교문	23-32
	• 기상자료 활용에 의한 산불위험예보 실시간 웹서비스	원명수	33-45
	• 경기도의 기상·기후정보 활용	김동영	46-57
	• 국가기본풍속지도의 필요성	권순덕	58-62
	• 국가기후자료센터 구축과 기상산업 활성화	김병선	63-74
	• 국가기후자료센터 설립과 민간의 역할 분담	나성준	75-83
	• 가치있는 기후정보	김윤태, 정도준	84-99
논 단	• 기상청 기후자료 활용 증대 방안에 관한 제언	최영은	100-110
뉴스 포커스	• 국가기후자료센터의 역할	임용한	111-119

장기예보 정보의 사회경제적 가치와 활용, 제3권 제3호(통권 제11호), 2010년 9월

칼 럼	• 장기예보 투자 확대해야	박정규	1-2
정책초점	• 전력계통 운영 분야의 기상정보 활용	정응수	4-15
	• 기상 장기예보에 대한 소고	박창선	16-23
	• 패션머천다이징과 패션마케팅에서 기상 예보 정보의 활용	손미영	24-33
	• 장기예보의 사회·경제적 가치와 서비스 활성화 방안	김동식	34-43
	• 기상 장기예보의 농업적 가치와 활용	한점화	44-53
	• 장기예보 정보의 물관리 이수(利水) 측면에서의 가치와 활용	우수민, 김태국	54-64
	• 기상예보와 재해관리	박종윤, 신영섭	65-81
	• 장기예보 업무의 과거, 현재, 그리고 미래	김지영, 이현수	82-89
해외기술동향	• 영국기상청(Met Office) 해들리센터(Hadley Centre)의 기후 및 기후 영향에 관한 서비스 현황	조경숙	90-101
	• WMO 장기예보 다중모델 앙상블 선도센터(WMO LC-LRFMME)	윤원태	102-106
뉴스 포커스	• 영국기상청과의 계절예측시스템 공동 운영 협정 체결	이예숙	107-109

사회가 요구하는 미래기상서비스의 모습, 제3권 제4호(통권 제12호), 2010년 12월

칼 럼	• 시대의 요구에 부응하는 기상·기후서비스	권원태	1-3
정책초점	• 기상학의 역사	윤일희	6-16
	• 지질학에서 본 기후변동의 과거, 현재, 그리고 미래	이용일	17-29
	• 예보기술의 성장 촉진을 위한 광각렌즈	변희룡	30-44
	• 전쟁과 기상	반기성	45-55
	• 날씨와 선거	유현종	56-64
	• 기후변화와 문학	신문수	65-74
	• 기후변화와 문화 I (문명의 시작과 유럽문명을 중심으로)	오성남	75-87
	• 비타민 D의 새로운 조명	김상완	88-96
	• G20서울정상회담과 경호기상정보 생산을 위한 기상청의 역할	이선제	97-105
	논 단	• 기상정보의 축적과 유통 활성화를 통한 국부 창출	김영신
• 날씨의 심리학		최창호	116-122
해외기술동향	• 기상정보의 사회·경제적 평가에 관한 해외동향	김정윤, 김인겸	123-130

기상기술정책지 발간 목록

신규 시장 창출을 통한 기상산업 육성 방안, 제4권 제1호(통권 제13호), 2011년 6월

발간사	• G20 국가에 걸맞는 기상산업 발전 방향	조석준	1-3
칼럼	• 대학과 공공연구소의 기상기술 이전 활성화 및 사업화 촉진을 위한 기술이전센터(TLO) 발전 방안	박종복	4-13
	• 새로운 기상산업 시장창출과 연계된 금융시장 활성화에 대한 소고 - 보험산업의 입장에서	조재린, 황진태	14-23
정책초점	• 신규 기상시장 창출을 통한 기상산업 육성 방안 연구	국립기상연구소 정책연구과	26-63

도시기상관측 선진화방안, 제4권 제2호(통권 제14호), 2011년 12월

발간사	• 도시기상 선진화, 미래의 약속입니다.	조석준	1-3
칼럼	• 도시기후 연구의 과거, 현재, 미래	최광용	6-18
	• 기후변화로 인한 도시 재해기상의 특성 변화 및 기상관측 선진화 방안	박민규, 이석민	19-30
	• 도시열섬의 환경평가와 도시기상관측시스템 구축방안	김해동	31-42
	• 수치모델을 이용한 도시기상 연구의 현재와 한계	이순환	43-50
	• 도시 기상 관측 연구 현황	박영산	51-62
정책초점	• 도시기상 관측 선진화 방안 연구	이영곤	64-73

원격탐측기술(레이더, 위성, 고층) 융합정책 실용화 방안, 제5권 제1호(통권 제15호), 2012년 6월

칼럼	• 원격탐측의 융합정책과 기상자원 가치 확산	Kenneth Crawford	3-8
정책초점	• 레이더-위성 융합 강수정보 생산 기술	신동빈	10-18
	• 위성과 첨단기술 융합을 통한 미래 기상서비스 발전 방향	은종원	19-27
	• 라이더 관측기술 활용 방안	김덕현	28-41
	• 위성기술을 이용한 수문분야의 융합 정책	배덕호, 이병주	42-53
	• 위성자료의 해양 환경감시 활용	황재동	54-65
논단	• 우리나라의 융합기술발전 정책 방향	이상현	66-72
해외기술동향	• 일본의 원격탐사 활용 및 융합정책	윤보열, 장희욱, 임효숙	73-85
포커스	• 레이더 융합행정 포럼 : 레이더운영과	송원화	86-93

해양기상서비스의 현황 및 전망, 제5권 제2호(통권 제16호), 2012년 12월

칼럼	• 해양기상서비스의 의미 및 가치 확산	박관영	3-7
정책초점	• 해양기상 융합서비스의 필요성	김민수	10-20
	• 수자원 변동에 따른 해양기상서비스의 강화	김희용	21-29
	• 해양기상정보 관리의 선진화 방안	정일영	30-39
	• 해양기상·기후변화 대응을 위한 정책제언	양홍근	40-47
논단	• 해양기상서비스 현황과 정책 방향	김유근	48-57
해외기술동향	• 선진 해양기상기술 동향	우승범	58-67
포커스	• 제4차 WMO/IOC 해양학 및 해양기상 합동기술위원회(JCOMM) 총회	해양기상과	68-73

기상기술정책지 발간 목록

국민의 행복 증진을 위한 "기상기후서비스 3.0", 제6권 제1호(통권 제17호), 2013년 6월

칼 럼	• 국민이 원하는 기상기후서비스	이일수	3-4
정책초점	• 기상기후분야 과학과 서비스 발전 방향	전종갑	6-14
	• 지진조기경보 역량 강화를 위한 정책적 제언	최호선	15-30
	• 기상기후 서비스 혁신을 위한 기술경영 전략	박선영	31-47
	• 자연재해 대응 서비스 기술 및 정책변화	허종안, 손흥민	48-59
논 단	• 수요자 맞춤형 서비스를 위한 기상기술 고도화 방안	김영준	60-72
포 커 스	• 국민행복서비스 포럼 개최 후기	국립기상연구소 정책연구과	73-78

빅데이터 활용 기상융합서비스, 제6권 제2호(통권 제18호), 2013년 12월

칼 럼	• 정부3.0에 따른 기상기후 빅데이터 활용	고윤화	3-4
정책초점	• [정책] 정부3.0 지원을 위한 빅데이터 융합전략	안문석	6-13
	• [정보] 스마트국가 구현을 위한 빅데이터 활용방안	김현곤	14-31
	• [서비스] 빅데이터 분석 기반 기상예보의 신뢰도 향상 방안	이기광	32-46
	• [경영] 빅데이터 기반 날씨경영 성과 제고 방안 - 공항기상정보 활용사례 -	방기석	47-58
	• [농업] 기후변화시나리오 활용 농업 기상 과학 융합 전략	김창길, 정지훈	59-76
	• [재난] 재난관리의 새로운 해결방안, 빅데이터	최선화, 김진영, 이종국	77-87
논 단	• 기상기후데이터를 품은 빅데이터	이재원	88-97
	• 한국형 복지국가의 전략적 방향성안	안상훈	98-111

기상기후 빅데이터와 경제, 제7권 제1호(통권 제19호), 2014년 6월

칼 럼	• 기상기후 빅데이터를 활용한 날씨경영	고윤화	3-4
정책초점	• 기상기후정보의 사회경제적 역할	안중배	6-11
	• 미래 재난재해 해결을 위한 기상기후 서비스	김도우, 정재학	12-19
	• 빅데이터의 사회경제적 파급효과	김진화	20-30
	• 기상기후 빅데이터의 산업경영 활용과 전략	김정인	31-41
	• 기상기후 빅데이터 기반 기상산업육성	송근용	42-56
	논 단	• 빅데이터 기반의 미래 산업	황종성
• 기상기후정보 효율성 제고를 위한 융복합 연구		이성종	72-77
포 커 스	• 위험기상에 따른 기상기후 빅데이터 활용	국립기상연구소 정책연구과	78-93

위성 기술과 활용, 제7권 제2호(통권 제20호), 2014년 12월

칼 럼	• 위성을 활용한 전 지구적 관측 방안	고윤화	3-4
정책초점	• 기상위성 운영기술의 선진화 방안	김방업	6-15
	• 관측위성기술의 현황 및 전망	김병진	16-24
	• 연구개발용 위성의 현업 활용성 제고 방안	안명환	25-43
	• 위성을 이용한 국가재난감시 체계 구축	윤보열, 염종민, 한경수	44-56
	• 위성영상서비스 시장 빅뱅과 새로운 관점	조황희	57-67
	논 단	• 우주기상의 연구 현황 및 발전 방향	김용하
해외기술동향	• 기상위성 기술 정책 정보 동향	국가기상위성센터 위성기획과	82-92
	• 위성기반 작전기상 소개	안숙희, 김백조	93-100

기상기술정책지 발간 목록

장마의 사회경제적 영향, 제8권 제1호(통권 제21호), 2015년 6월

칼 럼	• 장마와 날씨경영	고윤화	3-5
정책초점	• 수자원 확보에 있어서 장마의 역할	박정수	8-16
	• 장마가 농업생산에 미치는 영향	최지현	17-24
	• 장마의 변동성과 예측성 향상	서경환	25-30
	• 장마기간 유통산업 영향 및 전략	김정윤	31-40
	• 장마철 유의해야할 건강 상식	이준석	41-51
논 단	• 장마-몬순 예측기술 향상 방안	하경자	52-59
해외기술동향	• 동아시아 여름강수 예측기술 현황	권민호	60-65

겨울철 위험기상의 영향과 대응, 제8권 제2호(통권 제22호), 2015년 12월

칼 럼	• 겨울철 위험기상 예보의 중요성	고윤화	3-4
정책초점	• 겨울철 위험기상을 위한 에너지 정책	김두천	6-17
	• 한국의 동절기 도로제설 현황	양충현	18-29
	• 한파가 농업에 미치는 영향	심교문	30-41
	• 겨울철 한파 대비 건강관리	송경준	42-56
	• 겨울철 위험기상의 예측능력 향상	김주홍	57-68
논 단	• 미래 겨울철 위험기상의 변화	차동현	69-75

영향예보의 현황 및 응용, 제9권 제1호(통권 제23호), 2016년 6월

칼 럼	• 영향예보를 통한 기상재해 리스크 경감	고윤화	3-4
정책초점	• 영향예보 비전과 추진 방향	정관영	6-22
	• 재해기상 영향예보시스템 현황 소개	최병철	23-31
	• 영향예보 지원을 위한 수치예보 개발 방향	김동준	32-40
	• 영향예보를 위한 수문기상정보 지원	이은정	41-51
	• 재해영향예보의 효과	손철, 김건후	52-63
포 커 스	• 확률 예보를 위한 앙상블예측 기술 소개 및 현황	강지순	64-74

인공지능을 접목한 기상 분야 활용, 제9권 제2호(통권 제24호), 2016년 12월

칼 럼	• 기상서비스를 변화시키는 인공지능	고윤화	3-4
정책초점	• 인공지능의 발달이 몰고 오는 변화상	진석용	6-20
	• 4차 산업혁명과 기상예보시스템의 혁신	최혜봉	21-30
	• 인공지능 시대를 살아가기 위한 인간 능력은?	구본권	31-50
	• 인공지능의 기상정책 개발 활용	국립기상과학원	51-63
	논 단	• 인공지능 도입으로 정확도를 혁신하는 기상예보	고한석

기상기술정책지 발간 목록

영향예보 서비스 확대, 제10권 제1호(통권 제25호), 2017년 6월

칼 럼	• 영향예보 서비스 개발과 활성화	고윤화	3-4
정책초점	• 영향예보 서비스 확대를 위한 제언	예상욱	6-17
	• 교통안전관리를 위한 도로기상정보 활용	손영태	18-30
	• 태풍 재해 리스크 관리를 위한 영향예보	이은주	31-40
	• 기상, 기후 그리고 숲과 사람	박주원	41-55
	• KISTI 재난대응 의사결정지원시스템(K-DMSS) 소개	조민수	56-70
논 단	• 기상예측정보를 활용한 농경지 물사용 영향예보	최진용, 홍민기, 이성학, 이승재	71-81
	• 화재 기상예보 서비스	류정우, 권성필	82-92
포 커 스	• 오픈데이터와 일본기상비즈니스 컨소시엄	정효정	93-107

4차 산업혁명과 미래 기상기술, 제10권 제2호(통권 제26호), 2017년 12월

칼 럼	• 기후변화 저감을 위한 미래 기상기술	남재철	3-4
정책초점	• 4차 산업혁명과 미래 기후변화 대응기술	김형주	6-15
	• 4차 산업혁명 시대의 기후변화 대응	채여라	16-25
	• 인공지능 기술 발전을 위한 제도 및 정책	김윤정	26-43
	• 기후변화 대응을 위한 에너지 정책	전재완	44-54
논 단	• 기후변화에 대응하기 위한 농업과 과학기술의 융합	이현숙	55-65
포 커 스	• 4차 산업혁명과 미래 전문직	윤상후	66-73

여름철 위험기상의 영향과 대응, 제11권 제1호(통권 제27호), 2018년 6월

칼 럼	• 국민의 안전을 위협하는 여름철 폭염과 대응	남재철	3-4
정책초점	• 기후변화로 심화되는 폭염 대응을 위한 경보체계의 개발	이명인	6-18
	• 재난정보관리 표준화 기술 개발	김병식	19-34
	• 지표홍반자와선정보 제공 및 향후 대응	박상서	35-43
	• 스마트 폭염대응을 위한 기상 전문가의 역할	권용석	44-53
	• 인공지능을 활용한 재해기상 저감-예측 기술	김동훈	54-69
논 단	• 미래 여름철 기온변화에 의한 건강영향 예측	이재영, 김호	70-77
포 커 스	• 폭염 피해와 정책 동향	김도우	78-85

기상정보 활용 확대와 기상청의 역할, 제12권 제1호(통권 제28호), 2019년 6월

칼 럼	• 날씨, 국민 생활의 시작과 끝	김종석	3-4
정책초점	• 기상조건에 따른 이동수요의 변화	이재호, 전재영	6-14
	• 기상데이터로 알려주는 국민건강 알람서비스	한성욱, 전예슬	15-23
	• 신재생에너지 발전량 예측에서의 기상정보 활용	이영미, 박다빈	24-32
	• ICT수목원과 기상기술	이상용	33-43
	• 기후변화가 농작물 생산에 미치는 영향과 대응	문경환	44-57
	• 4차 산업혁명 기술을 활용한 친환경 건축/도시 설계 기술	이호영	58-69
	• 실시간 수(水)재해 예측을 위한 기상정보 활용 방안	이병주	70-80
포 커 스	• 복합재난대응 연구사례 중 도심지 침수 현상을 중심으로	백용, 이동섭, 김형준	81-87

기상기술정책지 발간 목록

겨울철 위험기상의 사회경제적 영향, 제12권 제2호(통권 제29호), 2019년 12월

칼 럼	• 겨울철 안심사회 건설과 기상청의 기여	김종석	3-4
정책초점	• 도로에서의 기상정보 활용 및 시스템 구축 사례	윤덕근	6-16
	• 정확한 산불위험 예보를 위한 노력	이병두	17-24
	• 기해년 4월 산불 이후, 「산불극복 뉴딜 전략」 제안	김경남	25-39
	• 미세먼지 개선을 위한 국가 정책 및 기술 방향	심창섭	40-48
	• 2019년 겨울철 대설·한파 종합대책	최병진	49-59
	• 건강한 겨울나기, 겨울철 질환에 대한 예방 및 대응	임도선	60-68
논 단	• 서울시 미세먼지 저감정책의 효과: 차량 배출량 관점	허창희	69-80

중규모 대류계 기상현상의 이해와 대응, 제13권 제1호(통권 제30호), 2020년 6월

칼 럼	• 호우 피해, 아는 만큼 대비할 수 있다	김종석	3-4
정책초점	• 코로나, 4차 산업혁명, 그리고 대기 관측	홍진규	6-23
	• 도시 돌발홍수 관리를 위한 수문과 기상 기술의 융합	황석환, 이동률	24-40
	• 기후변화 대응과 소하천 계측기술	정태성	41-52
	• 돌발 기상 예보와 과제	이우진	53-65
논 단	• 중규모 대류계의 예측	이동규	66-79
	• 위성원격탐사 기반의 한반도 하계 강우특성 진단	손병주	80-90
	• 중규모 대류계 연구를 위한 국지기상관측 제언	이규원	91-105
포 커 스	• 집중호우 등 풍수재 사고와 담보보험	이보영	106-112

유관 부처 기상정보 관측·예측기술 현황, 제13권 제2호(통권 제31호), 2020년 12월

칼 럼	• 소금과 같은 기상서비스, 가치를 더하기 위해 부처협업이 필요한 때입니다	박광석	3-4
정책초점	• 국립해양조사원 해양예보서비스 현황	이준식	6-16
	• 동해연안 원전주변 해양환경변화 실시간 모니터링시스템	신종훈	17-31
	• 도로기상정보를 활용한 도로살얼음 사고예방 사례와 제언	경기원	32-43
	• 해양로봇을 활용한 해양 공간 조사와 활용	권오순	44-54
	• 국가대기오염측정망 운영과 명예대기관리원 제도	박지해	55-63
	• 식물계절 현장 관측자료를 활용한 산림생태계의 기후변화 영향 예측	손성원	64-72
	• 드론과 위성을 활용한 디지털 농업관측기술	홍석영	73-86
	• 홍수관리를 위한 기상 관측 및 정보 활용 현황	현명숙	87-98

미래 도심항공교통(UAM) 준비를 위한 지식·기술 그리고 정책, 제14권 제1호(통권 제32호), 2021년 6월

칼 럼	• 도심항공모빌리티(UAM) 성공을 위한 필수 정보 '기상정보'	박광석	3-4
정책초점	• 도심항공교통을 위한 기상관측 제언	이규원	6-19
	• 도심항공기상을 위한 중미기상학	강성락	20-31
	• 안전한 UAM을 향한 제언	홍진규	32-41
	• 도심항공교통(UAM) 안전을 위한 바람시어 및 돌풍감지시스템	박문수	42-55
논 단	• K-UAM 사업으로의 도시대기과학 연구 활용	김재진	56-66
포 커 스	• UAM 운항 지원을 위한 항공기상 자료 관련 제언	구성관	67-76

기상기술정책지 발간 목록

2050 탄소중립 대응 전략, 제14권 제2호(통권 제33호), 2021년 12월

칼 럼	• 탄소중립을 위한 청량음료 한 모금	박광석	3-4
정책초점	• 2050년 탄소중립 달성 전략	노동운	6-18
	• 2050 탄소중립 추진전략(에너지기술)	김현구	19-25
	• '2050 탄소중립'과 기후변화 과학	전의찬	26-32
	• 탄소중립 이행을 위한 신재생에너지 발전 분야의 이음새 없는(Seamless) 기후예측정보의 활용 제언	오지현	33-44
	• 2050 탄소중립 달성을 위한 생태계의 역할	이동근	45-55
포 커 스	• 탄소중립대응을 위한 탄소흡수원 관리	이우균	56-65
	• 기후위기 극복을 위한 탄소중립과 기후변화 적응	박진한	66-74

기상특보의 사회경제적 효과, 제15권 제1호(통권 제34호), 2022년 6월

칼 럼	• 기상재해 리스크 경감을 위한 기상청의 도전	유희동	3-4
정책초점	• 폭염특보 현황 및 선진화	이명인	6-20
	• 폭염과 건강영향, 그리고 대응정책	홍윤철	21-29
	• 폭염(열파)이 국민 건강에 미치는 영향을 고려한 폭염특보 개선 방향 제언	최광용	30-41
	• 호우특보와 재난관리	조재웅	42-54
	• 도시 기후변화 재해취약성분석 제도의 이해와 기상분야 과제	권용석	55-62
논 단	• 변화하는 기후에 달라지는 태풍: 시사점과 대응방안	문일주	63-73
포 커 스	• 자연재난에 안전한 지자체 구축을 위한 기상특보의 활용	허중배	74-83

지진·화산·지진해일 기술동향 및 추진방향, 제15권 제2호(통권 제35호), 2022년 12월

칼 럼	• 지진, 더 이상 남의 나라 얘기가 아니다	유희동	3-4
정책초점	• 3차원 속도구조 모델을 이용한 지진 분석과 지진동 예측	이준기	6-16
	• 우리나라 주변 해역에서 발생하는 지진	김광희	17-25
	• 지진해일 모델링의 새로운 도전과 과제	손상영	26-42
	• 지진해일 조기 탐지 및 예·경보를 위한 기술 동향 및 제언	신성원	43-55
	• 화산기술과 화산특화연구센터	윤성호	56-70
포 커 스	• 백두산 화산 재해	이윤수	71-81

선진 기술동향 및 미국 기상예산 분석, 제16권 제1호(통권 제36호), 2023년 6월

칼 럼	• 기상기술의 쿼텀점프를 가능케 할 양자컴퓨팅 기술	유희동	3-5
정책초점	• 메커니즘 기반의 장마 이해	장은철	8-19
	• 집중관측을 통한 한반도 중규모 강수과정 연구	이규원	20-35
	• 양자컴퓨팅과 일기예보: 장마와 집중호우를 중심으로	방승현	36-47
	• 수치해석기반 기상 및 기후예측을 위한 양자컴퓨팅의 실현 가능성 연구	안도현	48-58
포 커 스	• 미국 해양대기청(NOAA)의 예산구조 분석	김득갑	59-71

기상기술정책지 발간 목록

기후전망·기상조절 기술동향 및 선진국 투자 동향, 제16권 제2호(통권 제37호), 2023년 12월

칼 럼		유희동	3-5
정책초점	• 기후위기 시대, 더욱 안전한 국민의 나라를 위한 기상청의 역할	최영은	8-22
	• 신속하게, 정의로운 저탄소사회로 전환을 위한 미래 기후전망의 활용과 제언	차동현	23-35
	• IPCC 6차 기후변화 평가보고서 기반 한반도 상세 기후변화 전망	김병곤	36-48
	• 기상조절기술 현황 및 전망	엄준식	49-67
포 커 스	• 구름물리챔버: 미래로 전진을 위한 실험실	김득갑	68-89
	• 기상선진국 미국의 기상 관련 예산 분석		

『기상기술정책』 투고 안내

투고방법

1. 본 정책지는 기상기술 분야와 관련된 정책적 이슈나 최신 기술정보 동향을 다룬 글을 게재하며, 투고된 원고는 다른 간행물이나 단행본에서 발표되지 않은 것이어야 한다.
2. 원고의 특성에 따라 다음과 같은 5종류로 분류된다.
(1) 칼럼 (2) 정책초점 (3) 논단 (4) 해외기술동향 (5) 뉴스 포커스
3. 본 정책지는 연 2회(6월, 12월) 발간되며, 원고는 수시로 접수한다.
4. 원고를 투고할 때는 투고신청서, 인쇄된 원고 2부, 그림과 표를 포함한 원본의 내용이 담긴 파일(hwp 또는 doc)을 제출하며, 일단 제출된 원고는 반환하지 않는다. 원고접수는 E-mail을 통해서도 가능하다.

원고심사

1. 원고는 편집위원회의 검토를 통하여 게재여부를 결정한다.

원고작성 요령

1. 원고의 분량은 A4용지 10매 내외(단, 칼럼은 A4용지 3~5매 분량)로 다음의 양식에 따라 작성한다.
 - 1) 워드프로세서는 '아래한글' 또는 'MS Word' 사용
 - 2) 글꼴: 신명조
 - 3) 글자크기: 본문 11pt, 표·그림 10pt
 - 4) 줄간격: 160%
2. 원고는 국문 또는 영문으로 작성하되, 인명, 지명, 잡지명과 같이 어의가 혼동되기 쉬운 명칭은 영문 또는 한자를 혼용할 수 있다. 학술용어 및 물질명은 가능한 한 국문으로 표기한 후, 영문 또는 한문으로 삽입하여 표기한다. 숫자 및 단위의 표기는 SI규정에 따르며, 복합단위의 경우는 윗 첨자로 표시한다.
3. 원고 첫 페이지에 제목, 저자명, 소속, 직위, E-mail 등을 명기하고, 저자가 다수일 경우 제1저자를 맨 위에 기입하고, 나머지 저자는 그 아래에 순서대로 표시한다.
4. 원고의 계층을 나타내는 단락의 기호체계는 I, 1, 1), (1), ①의 순서를 따른다.
5. 표와 그림은 본문의 삽입위치에 기재한다. 표와 그림의 제목은 각각 원고 전편을 통하여 일련번호를 매겨 그림은 아래쪽, 표는 위쪽에 표기하며, 자료의 출처는 아랫부분에 밝힌다.
예) <표 1> <표 2> [그림 1] [그림 2]
6. 참고문헌(reference)
 - 1) 참고문헌 표기 양식
 - 참고문헌은 본문의 말미에 첨부하되 국내문헌(가나다 순), 외국문헌(알파벳 순)의 순서로 정리한다.
 - 저자가 3인 이상일 경우, '등' 또는 'et al.'을 사용한다.
 - 제1저자가 반복되는 경우 밑줄(_)로 표시하여 작성한다.
 - 2) 참고문헌 작성 양식
 - 단행본: 저자, 출판년도: 서명(영문은 이탤릭체), 출판사, 총 페이지 수.
 - 학술논문: 저자, 출판년도: 논문명, 게재지(영문은 이탤릭체), 권(호), 수록면.
 - 학술회의(또는 세미나) 발표논문: 저자, 발표년도: 논문명, 프로시딩명(영문은 이탤릭체), 수록면.
 - 인터넷자료: 웹 페이지 주소

