

기상기술·정책

Meteorological Technology & Policy

기후변화 대응의 시작, 지구대기감시



CONTENTS

기후변화 대응의 시작, 지구대기감시

칼럼

지구대기감시로 읽는 기후위기의 현재와 미래 / 이미선(기상청장)	04
---	----

정책초점

기후감시를 위한 BSRN 복사관측망 / 이규태(강원대학교 명예교수) 조일성(강원대학교 연구교수)	08
성층권 오존 감시와 기후변화 / 구자호(연세대학교 부교수)	23
기후위기 시대의 합성 온실기체와 대기 모니터링 / 박선영(경북대학교 교수)	38
국제 온실가스 감시 체계 WMO IG ³ IS와 기상청 고해상도 온실가스 추적 시스템 / 홍진규(연세대학교 교수)	50

기상기술·정책

Meteorological Technology & Policy

Vol.
19-1

포커스

지구대기감시의 중요성과 국내 인프라 소개
/ 김수민(국립기상과학원 기상연구관) 64

부록

기상기술·정책지 발간 목록 76

『기상기술정책』 편집위원회

발행인 이미선
편집기획 국립기상과학원 기획운영과
편집위원장 강현석
편집위원 이조한, 김상백, 부경은, 오하영
편집간사 김혜선, 이경미, 최경숙

발행처

주소 (63568) 제주특별자치도 서귀포시 서호북로 33
국립기상과학원(책임운영기관)
전화 064-780-6505 팩스: 064-738-9071
E-mail leekm80@korea.kr

본 정책지에 게재된 전문가의 의견은 다양한 정책적·학술적 관점을 소개하기 위한 것이며, 기상청의 공식 입장이나 정책 방향을 의미하지 않습니다.

지구대기감시로 읽는 기후위기의 현재와 미래

기후위기는 이제 미래의 경고가 아니라 현재 우리가 마주한 현실이 되고 있다. 세계 곳곳에서는 기록적인 폭염과 집중호우, 가뭄과 산불이 이어지고 있으며, 우리나라 역시 폭염과 집중호우 등 극한기상의 위험성이 높아지고 계절의 변화 양상 또한 과거와는 다른 모습을 보이고 있다. 기후변화는 사회·경제 전반에 영향을 미치는 전 지구적 과제로 자리 잡았으며, 이에 기후변화에 대한 과학적 이해와 대응 역량의 중요성은 더욱 커지고 있다.

기후변화에 효과적으로 대응하기 위해서는 먼저 지구 대기에서 어떤 변화가 일어나고 있는지를 정확하게 이해해야 한다. 과학적 진단이 선행되지 않는다면 기후변화에 대한 실효성 있는 대응 또한 기대하기 어렵다. 대기 중 온실가스 농도는 어떻게 변하고 있는지, 지구가 흡수하고 방출하는 에너지의 균형은 어떻게 달라지고 있는지, 성층권의 오존은 어떤 변동성을 보이고 있는지, 온실가스는 어디에서 배출되고 어디에서 흡수되고 있는지에 대한 지속적인 관측과 분석이 이루어져야 한다.

이러한 역할을 하는 것이 바로 지구대기감시이다. 지구대기감시는 온실가스와 에어로졸, 복사, 오존 등 다양한 대기 성분과 물리량을 장기간에 걸쳐 정밀하게 관측함으로써, 기후시스템의 변화를 진단하고 미래를 전망하기 위한 과학적 토대를 제공한다. 특히 최근에는 단순히 농도를 관측하는 것을 넘어 관측자료와 수치모델을 결합하여 온실가스의 배출원과 흡수원을 추적하고, 이를 통해 국가 기후변화 대응 정책을 지원하고 있다.

현재 세계기상기구(WMO)는 지구대기감시(Global Atmosphere Watch, GAW) 프로그램을 통해 지구대기감시 체계를 지속적으로 강화하며, 기후변화의 원인과 영향을 과학적으로 진단하고 있다. 통합 전지구 온실가스 정보시스템(Integrated Global Greenhouse Gas Information System, IG³IS), 국제 복사관측망(Baseline Surface Radiation Network, BSRN), 성층권 오존 감시 활동 등도 기후변화의 원인과 영향을 과학적으로 진단하기 위한 국제적인 노력의 일환이다.

이미선
기상청장



구체적으로 온실가스 감시는 강력한 온실효과를 갖는 인위적 배출가스의 변화를 추적하며, 온실가스 감시체계는 배출량과 흡수량을 검증하는 기반을 제공한다. 아울러 복사 관측은 지구 에너지 수지의 변화를 규명하는 핵심 자료를 생산하고, 성층권 오존 감시는 기후변화와 대기조성 변화 간의 상호작용을 이해하는 데 중요한 역할을 한다. 관측 대상과 방법은 서로 다르지만, 이는 모두 기후위기의 현주소를 진단하고 미래를 전망하기 위한 과학적 기반을 다진다는 하나의 줄기로 연결된다.

우리나라도 이러한 국제적 흐름에 발맞추어 지구대기감시 역량을 꾸준히 확대하고 있다. 기상청은 국립기상과학원을 중심으로 온실가스와 복사, 오존 등 다양한 대기 성분에 대한 관측과 분석을 수행 중이며, 국제 관측망과의 협력을 통해 기후변화 감시체계를 고도화하고 있다. 또한 고해상도 온실가스 감시·추적 기술과 기후변화 진단·분석 기술을 개발하여, 국가의 탄소중립 정책과 기후위기 대응을 지원하고자 노력하고 있다.

기후위기는 눈으로 직접 볼 수 없으며, 하루아침에 드러나는 현상도 아니다. 그러나 장기간의 관측과 분석을 통해 우리는 대기 속에 축적된 변화의 신호를 읽어낼 수 있다. 지구대기감시는 신뢰할 수 있는 관측을 통해 기후위기의 현재를 읽어내고 미래를 준비하는, 기후변화 대응의 출발점이자 미래를 향한 나침반이다. 앞으로도 기상청은 지구대기감시 역량을 강화하여 기후변화에 대한 이해를 높이고, 국민의 안전과 지속가능한 미래를 위한 과학적 기반을 마련해 나갈 것이다.

정책초점

기후감시를 위한 BSRN 복사관측망 /
이규태(강원대학교 명예교수), 조일성(강원대학교 연구교수)

성층권 오존 감시와 기후변화 /
구자호(연세대학교 부교수)

기후위기 시대의 합성 온실기체와 대기 모니터링 /
박선영(경북대학교 교수)

국제 온실가스 감시 체계 WMO IG³IS와 기상청 고해상도 온실가스 추적 시스템 /
홍진규(연세대학교 교수)



기후감시를 위한 BSRN 복사관측망

이규태 강원대학교 명예교수 ktleee@kangwon.ac.kr
조일성 강원대학교 연구교수 zoilsung@kangwon.ac.kr

- Ⅰ 서론: 기후변화와 BSRN
- Ⅱ BSRN 개요
- Ⅲ BSRN 자료의 활용
- Ⅳ 국내 복사 관측에 관한 제안
- Ⅴ 결론

지구대기 기후는 대기 성분과 지표면 변화에 크게 의존되고 그에 따른 복사 변화는 지구 및 지구대기의 에너지 수지 변화를 동반한다. 따라서 기후변화 감시를 위해서는 지구 및 지구대기의 장기적 에너지 수지 분석이 필수적이고 이러한 목적을 위하여 국제 복사관측망 BSRN (Baseline Surface Radiation Network)은 양질의 태양 및 적외복사 관측 자료를 전 세계에 제공해 오고 있다. 이러한 BSRN 관측자료는 기후의 감시와 분석 이외에 수치모델과 위성 알고리즘 검증, 재생에너지 분석 그리고 농업업과 건축 등 다양한 분야에서 매우 중요하게 사용됨에도 불구하고 우리나라는 아직 BSRN 활동에 적극적으로 참여하지 못하고 있기 때문에 정밀한 복사관측 자료를 생산 및 활용하지 못하는 실정이다. 따라서 전 지구적 기후변화에 대하여 능동적으로 대처하기 위해서 국내 복사관측망을 개선하여 선진화된 BSRN 활동에 동참하는 것이 시급하고 이러한 결과는 국내 과학기술 향상과 생산되는 양질의 관측자료 활용에 따라 국가와 국민의 안전 확보 및 경제적 이익에 중요하게 기여할 수 있을 것이다.

I 서론: 기후변화와 BSRN

1.1차원적 기후변화: 복사 연구의 필요성

지구와 지구대기가 태양복사 에너지를 받고 적외복사 에너지를 우주로 방출하는 과정과 그 양을 이해하는 것은 기후변화 분석의 1차원적 출발점(그림 1 참조)이고 우리나라에서는 Zo et al. (2023)이 한반도 부근과 중위도에 대한 에너지 수지를 비교 분석하였다. 이러한 복사 에너지는 대기 순환, 해양 열수송, 수문순환, 생태계 반응 그리고 인간 사회가 체감하는 기후 위험의 신호를 보내고 있으나 기후변화 논의에서 복사는 기후모델과 에너지 수지 계산을 위한 제한적 영향으로 이해될 뿐이며 실제 관심은 기온 상승, 폭염, 가뭄, 집중호우, 해수면 상승 등의 결과에 집중되는 경향이 있다(IPCC, 2021).

복사 변화는 기후변화의 원인이자 결과로서 대기 중 온실가스의 증가는 장파 복사량을 변화시키고 에어로졸의 증가는 단파 복사량을 변화시키며 구름과 수증기의 변화는 복사 피드백을 만들어 낸다(Wild, 2009; Ohmura, 2009). 즉, 복사는 기후 연구에서 중요한 관측 요소로 구성되어야 하고 이러한 자료는 지표면 에너지 수지의 기준으로 활용될 뿐만 아니라 기온, 가뭄, 구름, 대기 안정도 등과 매우 높은 관련성(Garcia et al., 2019)을 가지고 있기 때문에, 지표면의 태양 및 적외 복사를 정확하게 관측하여 장기간의 품질 보증된

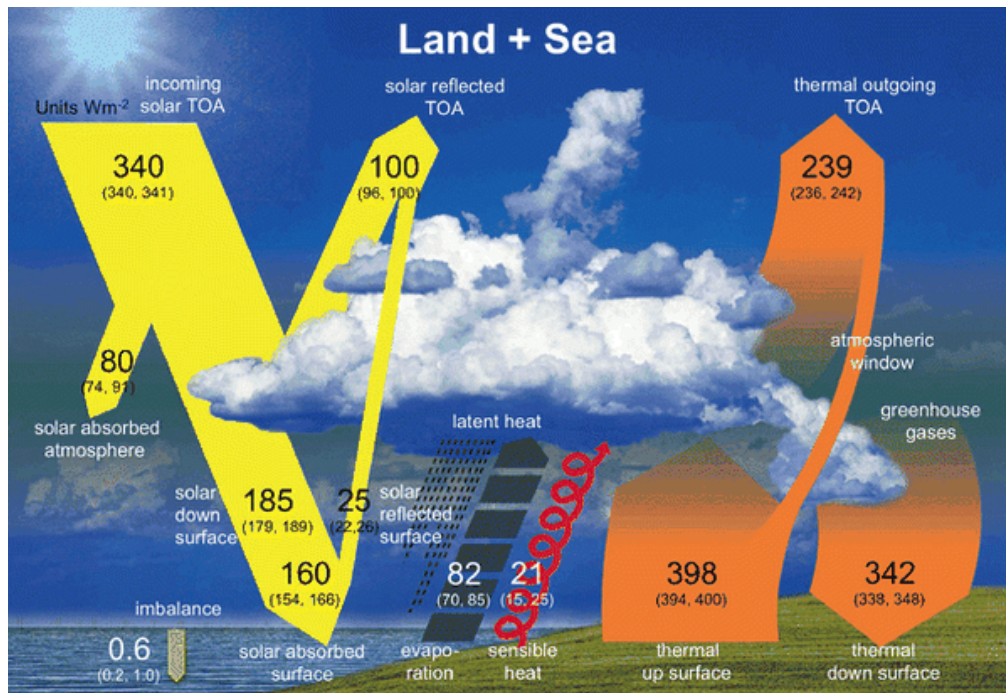


그림 1. ERA5 재분석자료 기반 최신 전지구 에너지 수지(출처: <https://cds.climate.copernicus.eu>)

자료를 생산하고 이를 기후 연구에 활용하는 것은 매우 중요하다(Stanhill and Cohen, 2001; Zo et al., 2017). 기후 연구는 장기간의 자료 분석을 통해 지구가 변화하는 상태를 이해하고 평가하는 과정이나, 관측된 자료 변화가 실제 기후변화에 의한 것인지 아니면 기상관측장비의 오차 및 검·교정 문제 또는 자료 불연속성이나 환경 변화에 따른 영향 등에 의한 것인지를 구분하기 위해서는 관측의 명확한 기준이 설정되어 있어야 한다(Driemel et al., 2018). 이러한 문제 해결을 위해서는 관측의 장기간 지속성과 국제적 표준화 및 체계적인 품질관리가 필요하고 이에 대한 국제적 논의의 결과로 BSRN (Baseline Surface Radiation Network)이 설립되어 운영되고 있는 것이다(Heimo et al., 1993).

2. BSRN (Baseline Surface Radiation Network)

1980년대 후반부터 기후변화 연구는 단순히 평균기온의 상승과 하강에 따른 영향뿐만 아니라 지구 에너지 수지(radiation budget)와 복사강제력(radiative forcing)에 기반한 정밀한 분석이 필요하다는 인식이 확산되었다. 즉, 복사강제력, 구름-복사 상호작용, 에어로졸 효과 그리고 온실기체 증가에 따른 복사 불균형 문제 등이 기후학계에서 본격적으로 이슈화되면서 지표면에서 장기적으로 운영되는 고품질의 기준 복사 관측 필요성이 대두되었다. 이러한 필요성을 바탕으로 WCRP(World Climate Research Programme) 및 GEWEX(Global Energy and Water Exchanges) 체계 안에서 지표면 복사 관측의 기준이 되는 국제 네트워크로 BSRN이 설립(Ohmura et al., 1998)되었고, BSRN은 지표면에서 고품질의 태양 및 적외 복사 관측자료를 장기간 생산하여 기후 연구에 필수적인 기준자료로 활용하고자 하는 것이 중요한 목적이다(Long, 2018). 따라서 BSRN의 목표는 다음과 같이 세 가지로 구성된다.

첫째, 지표면 복사 플럭스에 대해 국제적으로 비교할 수 있는 최고 수준의 관측자료를 제공한다.

둘째, 장기적 기후변화를 해석할 수 있는 기준자료를 축적한다.

셋째, 위성·모델·재분석 자료의 정확성을 검증할 수 있는 독립적인 자료를 생산한다.

전 세계의 대표적인 정밀 복사 관측소들로 운영되는 BSRN은 그림 2와 같이 2026년 총 70여 개의 관측소가 등록·운영되고 있으며 우리나라가 속한 동아시아에서는 일본과 대만 및 중국이 BSRN 관측소를 운영하고 있다. 일본은 기존 2개소의 운영을 종료하고 현재 남극기지를 포함하여 5개소를 운영하고 있으며 대만은 2018년부터 2개소를 운영하고 있다. 중국은 기존 관측소의 운영을 2016년에 종료한 뒤 2023년부터 신규 관측소 1개소를 운영하고 있다(표 1 참조). BSRN은 관측소 수를 무분별하게 확대하기보다 관측소별로 엄격한 장비 기준과 품질관리 절차를 만족하여 최고급 복사자료를 수집할 수 있는 관측소를 구성하는 데 큰 비중을 두고 있다. 최근 다양한 위성이 전 지구를 모니터링하고 기후와

복사 관련 재분석 자료를 과거 수십 년 전부터 현재까지의 연속적으로 제공할 뿐만 아니라 기후모델에 의한 예측 결과들도 다양하게 제공되고 있기 때문에 이들 자료를 검증할 수 있는 기준 복사관측 자료 중요성이 더욱 증가하고 있으며 이러한 요구를 만족할 수 있는 자료가 BSRN 생산 자료이다.

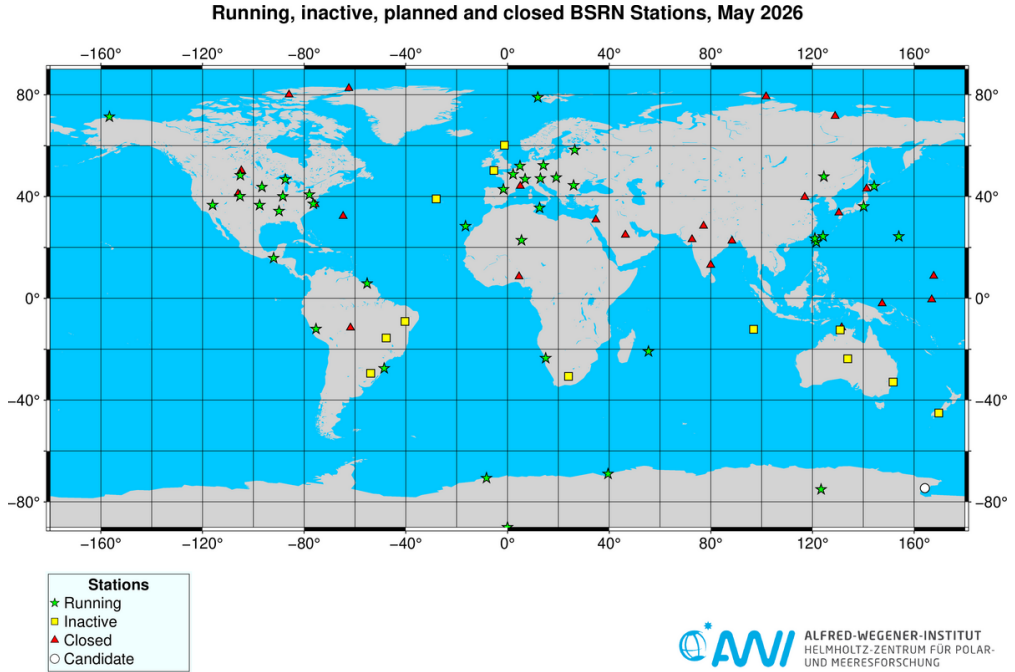


그림 2. 2026년 기준 전지구 BSRN 관측소(출처: <https://bsrn.awi.de>)

표 1. 동아시아 BSRN 관측소 정보

국가	관측소명	운영기간	비고
일본	Abashiri (ABS)	2021~현재	SAP 관측소 대체
	Fukuoka (FUA)	2010~2024	운영 종료
	Ishigakijima (ISH)	2010~현재	-
	Minamitorishima (MNM)	2010~현재	-
	Sapporo (SAP)	2010~2020	운영 종료
	Syowa (SYO)	1994~현재	남극기지
	Tateno (TAT)	1996~현재	-
대만	Lanyu Island (LYU)	2018~현재	-
	Yushan (YUS)	2018~현재	-
중국	Qiqihar (QIQ)	2023~현재	신규 관측소
	Xianghe (XIA)	2005~2016	운영 종료

II BSRN 개요

1. BSRN 관측요소

BSRN은 지표면에 도달하거나 지표면에서 방출·반사되는 복사를 정확하게 측정하기 위한 관측망으로서 중요 관측 요소들은 다음과 같이 정리된다. 하향태양복사(downward surface solar radiation)는 태양으로부터 지표면에 도달하는 태양복사량을 관측하는 요소로 구름, 에어로졸, 태양고도(태양 천정각, θ), 수증기 오존, 혼합기체 등에 의해 변화하고 전천일사(I_{Glo} , Global solar radiation)와 직달일사(I_{Dir} , Direct solar radiation) 및 산란일사(I_{Dif} , Diffuse solar radiation) 구분되며 이들은 식 (1)과 같은 관계로 구성된다.

$$I_{Glo} = I_{Dir} \times \cos\theta + I_{Dif} \quad (1)$$

하향적외복사(downward surface longwave radiation)는 기온과 높은 관련성을 보이나 수증기, 구름, 온실기체 등이 변수로 작용하기 때문에 기후변화 연구에서 매우 중요한 요소이다. 그리고 지표면의 에너지 수지 연구를 위한 상향태양복사(upward solar radiation)와 상향적외복사(upward longwave radiation)는 지표 반사도와 온도, 적설, 토지피복 변화, 식생 상태 그리고 사막화 등의 특성을 정밀하게 평가할 수 있는 요소이다.

이상과 같이 설명된 복사요소들 중 하향태양복사 3종과 하향적외복사는 BSRN 규정에 의하여 하나의 태양추적장치(sun-tracker)에 설치되어 운영되고 있고 그 이유는 동일한 장소와 환경에서 각 복사 요소들이 동시에 측정되는 것이 매우 중요하기 때문이다. 특히, 전천일사계(pyranometer)는 태양추적장치 플레이트에 수평이 유지된 상태로 고정되어야 하고 차폐봉(shading ball)의 설치 유무에 따라 전천일사량과 산란일사량을 관측한다. 그리고 직달일사계(pyrheliometer)는 태양추적장치의 측면에 설치되며 정확한 태양에너지를 측정하기 위해 선 센서(sun-sensor)와 함께 운영되어야 하고, 적외복사계(pyrgeometer)는 전천일사계와 동일한 방식으로 설치되며 강한 태양복사량에 의해 센서 민감도가 영향을 받을 수 있기 때문에 차폐봉을 함께 설치하여 운영한다. 또한 태양추적장치 플레이트에 설치된 전천일사계와 적외복사계는 모두 통풍장치(ventilation)를 장착하여 미세먼지와 황사 및 이슬 등이 돐에 부착되는 것을 막고 정확한 측정이 될 수 있도록 구성되어야 한다.



그림 3. BSRN 관측소에 설치된 복사계(좌: 중국 Qiqihar, 우: 남극 Dome C)

BSRN에서 측정되는 모든 복사 요소 자료는 1초 단위로 관측되어야 하고 1분 평균값, 최댓값, 최솟값으로 저장되는데 이들 자료는 지정된 플랫폼(<https://dataportals.pangaea.de/bsrn/>)을 통해 월 단위로 연구자들에게 제공된다. 또한 복사 관측자료 이외에도 일부 관측소에서는 에어로졸과 오존 및 존데 자료도 함께 제공하고 있어 다양한 기상·기후 연구에 중요한 자료로 활용되고 있다.

2. BSRN의 품질관리

BSRN 관측소는 일반 관측소와 구별되는 품질관리 시스템을 기반으로 높은 정확도와 시간해상도 및 장기 지속성의 특성을 가진다. 그리고 BSRN 관측소는 환경 및 장비 관리와 실시간 자료 품질관리 및 이상 감지 시 신속한 대응 등이 가능하도록 1명 이상의 복사 전문가가 상주하여 관리한다. 또한 규정된 BSRN 품질관리(QC, Quality control) 절차를 분 단위로 처리하고 자료에 대한 정밀한 평가를 수행함으로써 일반 관측자료와 구별되는 고품질 자료를 제공하고 있으며 품질관리는 다음과 같이 물리적으로 가능한 관측값의 한계범위(Physically Possible Limit)와 관측자료 간 비교 검사(Comparison Test)로 구성된다

1) 물리적으로 가능한 관측값의 한계범위(Physically Possible Limit)

Physically Possible Limit은 특정 관측 위치 정보(위·경도)와 시간 및 대기 조건에서 물리적으로 가능한 복사량의 상한과 하한을 의미한다. 즉, 관측값이 물리적으로 가능한 범위 내에 있는지를 판단함으로써 장비 또는 관측 환경에 문제가 발생했는지 평가하는 기준이다. 태양복사의 경우, 맑은 날 물리적으로 관측이 가능한 최댓값은 태양상수(S_0 , Solar constant = 1367Wm^{-2})와 이심률(E_0 , Eccentricity) 및 태양 천정각(θ , Solar zenith angle)을 통해 계산된다. 즉, 식 (2)~(4)는 각각 전천일사량과 직달일사량 및 산란일사량에 대한 Physically Possible Limit의 최댓값을 산출하는 식이다. 또한 식 (5)는 태양복사량의

최솟값을 의미하며 일사계의 thermal offset¹⁾ 영향에 따라 밤 동안 관측될 수 있는 태양복사량의 하한값을 나타낸다. 국내의 경우 3종의 태양복사 관측을 모두 수행하는 지점이 많지 않기 때문에 그림 4에는 강원대학교 복사관측소에서 관측된 복사자료를 이용하여 산출한 Physically Possible Limit 분석 결과를 예로서 제시하였다.

$$Max_{Glo} = S_o E_0 \cdot 1.5 \cdot \cos \theta^{1.2} + 100 \text{ } Wm^{-2} \quad (2)$$

$$Max_{Dir} = S_o \text{ } Wm^{-2} \quad (3)$$

$$Max_{Dif} = S_o \cdot 0.95 \cdot \cos \theta^{1.2} + 50 \text{ } Wm^{-2} \quad (4)$$

$$Min = -4 \text{ } Wm^{-2} \quad (5)$$

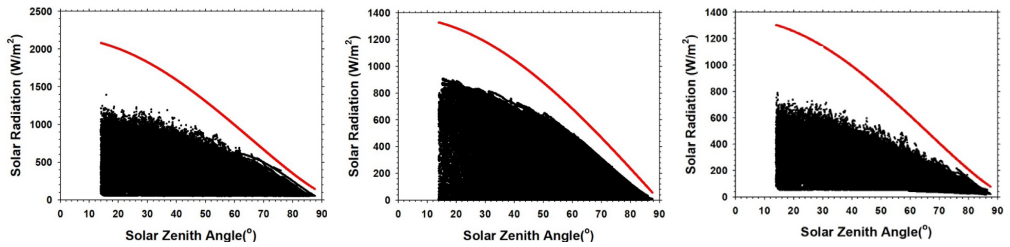


그림 4. 강원대학교 태양복사 관측자료를 활용한 BSRN physically possible limit 산출 결과(왼쪽에서 오른쪽으로 각각 직달일사, 전천일사, 산란일사)

적외복사의 경우도 유사한 방법으로 Physically Possible Limit를 산출하고 기온과 수증기 및 구름 등에 따라 물리적으로 관측이 가능한 범위가 결정된다. 식 (6)과 식 (7)은 각각 적외복사량에 대한 Physically Possible Limit의 최댓값과 최솟값을 의미한다.

$$Max_{IR} = 700 \text{ } Wm^{-2} \quad (6)$$

$$Min_{IR} = 40 \text{ } Wm^{-2} \quad (7)$$

2) 관측자료 간 비교 검사(Comparison Test)

1차적으로 Physically Possible Limit 품질검사를 통해 장비가 측정할 수 있는 물리적 범위를 벗어난 자료를 점검하고 2차적으로는 Comparison Test를 통해 관측자료 간의 비교를 수행함으로써 발생 가능한 오차를 확인한다. 태양복사의 경우 식 (8)과 같이 관측된 전천일사량과 식 (1)을 이용하여 직달일사량 및 산란일사량으로부터 산출된 계산 전천일사량(=Sum SW) 사이의 편차를 평가한다. 이때, 태양 천정각 75°이하의 높은 일사량

1) thermal offset: 일사계가 태양복사량 이외에 장비 자체의 관측 방법에 따른 오차가 발생하는 현상으로 주변 온도변화가 반영되어 밤동안 일사계가 기온보다 낮은 온도를 보이면서 음(-)의 전류 발생

범위와 75°이상의 낮은 일사량 범위로 구분하여 평가를 수행하고 평가 결과가 기준 범위를 초과하는 경우 세 가지 태양복사 관측 요소 중 하나 이상의 요소에 문제가 발생하고 있음을 의미한다. 또한, 식 (9)와 같이 전천일사량과 산란일사량의 비율을 이용하여 두 관측값의 적정성을 평가한다. 전천일사량과 산란일사량은 동일한 종류의 전천일사계를 이용하여 측정되나 산란일사량은 차폐봉을 통해 직달일사가 제거된 산란 요소만을 관측한 값이므로 산란일사 관측값은 전천일사 관측값보다 클 수 없다. 그리고 식 (8)과 마찬가지로 높은 일사량 범위와 낮은 일사량 범위는 태양 천정각 75°를 기준으로 구분하여 평가된다. 그림 5의 좌측과 우측은 각각 식 (8)과 식 (9)를 강원대학교 복사관측자료에 적용한 결과를 나타낸 것이다.

$$Global / Sum SW (= Direct \cdot \cos \theta + Diffuse) \quad (8)$$

$$\blacktriangleright \theta < 75^\circ : \pm 8\%$$

$$\blacktriangleright 75^\circ < \theta < 93^\circ : \pm 15\%$$

$$Diffuse / Global \quad (9)$$

$$\blacktriangleright \theta < 75^\circ : 5\%$$

$$\blacktriangleright 75^\circ < \theta < 93^\circ : 10\%$$

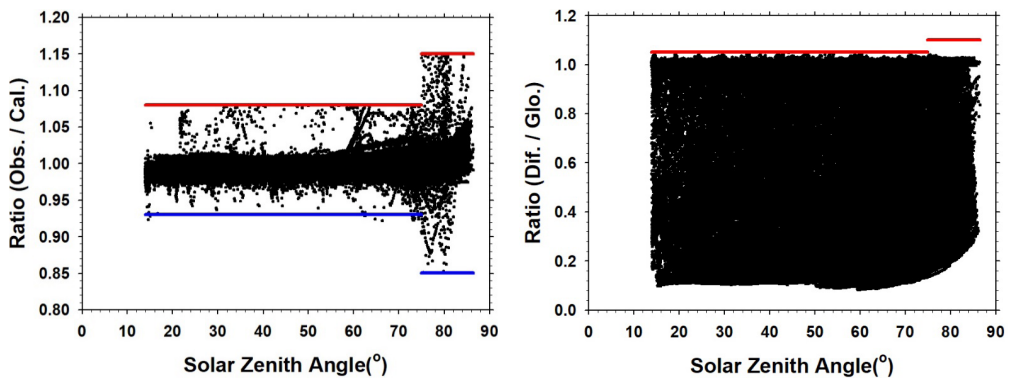


그림 5. 강원대학교 태양복사 관측자료를 활용한 BSRN comparison test 산출 결과(왼쪽은 식 (8)의 결과이고 오른쪽은 식 (9)의 결과)

적외복사의 Comparison Test는 기온(T_a)의 함수로 표현되는 Stefan-Boltzmann 흑체 법칙을 이용하여 수행되고 최댓값과 최솟값은 각각 식 (10)과 식 (11)을 이용하여 산출된다. 그림 6은 강원대학교 복사관측소에서 관측된 적외복사량(검정색 점선)과 기온값을 이용해 산출한 Comparison Test의 최댓값(빨간색 점선)과 최솟값(파란색 점선)을 나타낸 것이다.

$$Max_{IR} = \sigma T_a^4 + 25 \text{ } Wm^{-2} \quad (10)$$

$$Min_{IR} = 0.4 \sigma T_a^4 \text{ } Wm^{-2} \quad (11)$$

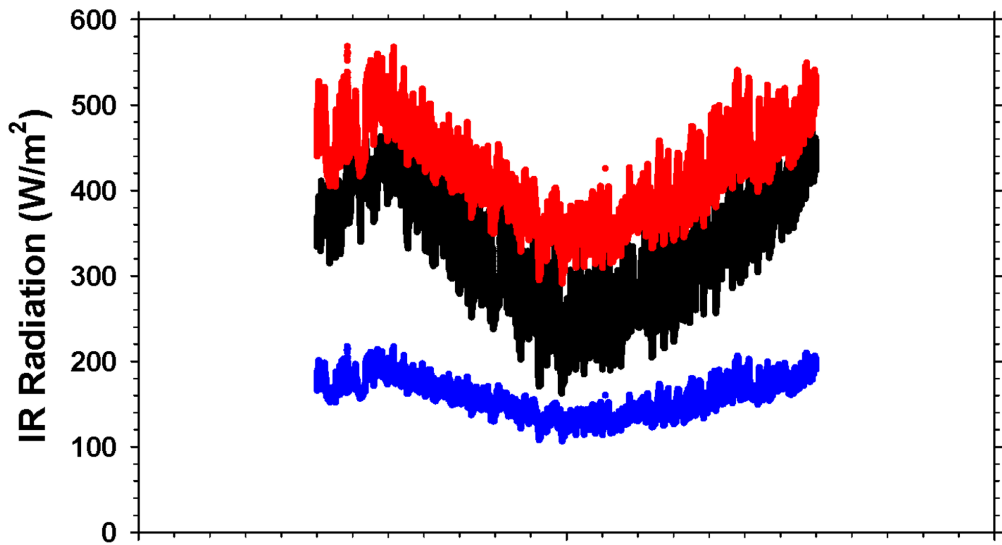


그림 6. 강원대학교 적외복사 관측자료를 활용한 BSRN comparison test 산출 결과(검정색 점선은 적외복사량, 빨간색 점선과 파란색 점선은 각각 최댓값과 최솟값을 의미함)

위에서 설명된 두 종류의 품질검사 이외에도 BSRN 관측소의 특성상 발생할 수 있는 문제에 대해서는 자체적인 품질관리를 추가로 운영하며 관련 정보는 QC flag를 활용해 제공된다. 예를 들어, 관측소 주변이 국립공원으로 지정되어 있어 벌목이 어려운 경우에는 수목으로 인해 차폐가 발생하는 시간을 flag 형식으로 제공한다. 또한 관측소가 섬에 위치하여 부득이하게 무인으로 유지되어야 하는 기간에는 자동 청결 시스템을 개발하여 동일한 시간에 복사계의 돔을 청소하고 해당 시간의 자료에는 flag 형식으로 추가 정보를 제공한다. 이와 같이, BSRN 관측자료는 상세한 정보를 제공함으로써 최고의 품질 유지를 위한 연구자의 노력이 함께 포함되어 있는 것이다.

III BSRN 자료의 활용

BSRN 자료는 “고품질·시간적 고해상도·장기 지속성”이라는 장점을 바탕으로 다양한 분야에서 활용되고 있고 최근 2022년 이후 BSRN 자료를 활용한 연구 결과를 분야별로 요약하여 표 2에 나타내었다. BSRN 자료는 수치예보모델 평가, 위성자료 검증, 에어로졸 복사강제력 분석, 지표면 특성 평가 그리고 태양광 발전 등 다양한 분야에서 기준자료로 활용되고 있으며 국내에서도 한국형수치예보모델(KIM, Korean Integrated Model)과

정지궤도기상위성 천리안 2호(GK-2A, Geostationary Korea Multi Purpose Satellite-2A) 및 기후모델 등의 검증 및 평가에 활용이 가능하다.

표 2. 최근 분야별 BSRN 자료 활용 요약

분야	자료 활용	주요 참고문헌
수치예보모델 평가 (NWP Model Evaluation)	- 수치예보모델의 복사 편향(radiative bias) 검증 - 극지역에 위치한 BSRN 관측자료를 이용한 PA (Polar Amplification) 분석	Cavaliere et al., 2025 Stamatis et al., 2022
위성 자료 검증 (Satellite Validation)	- 지표면 복사 산출물 검증 - 높은 시간해상도 기반 시공간 불일치(spatio-temporal mismatch) 평가	He et al., 2025 Urraca et al., 2024
에어로졸 복사강제력 (Aerosol Radiative Forcing)	- 에어로졸의 복사강제력 효과 정량화 연구 - BSRN 관측자료 기반 AOD 추정 연구	Logothetis et al., 2024 Garcia et al., 2023
지표면 특성 (Surface Properties)	- 알베도 변화가 복사 수지와 기후변화에 미치는 영향 - 위성 데이터 기반 지표 특성 검증	Riihela et al., 2024 Tuomiranta et al., 2022
태양광 발전 (Solar Energy)	1분 단위의 일사량의 변화 예측	Kreuwel et al., 2023

위에서 요약한 BSRN 자료의 활용 내용 중 수치예보모델 평가와 위성자료 검증은 가장 핵심적인 분야에 해당하며 이에 관련하여 구체적으로 진행되고 있는 연구내용은 다음과 같다.

1. 수치예보모델 자료 검증

수치예보모델의 경우 역학적 열개 안에서 수증기 피드백, 구름의 생성과 소멸, 에어로졸-복사 상호작용 그리고 지표 특성 변화 등을 고려하여 지표면 복사량을 산출한다. 즉, 수치예보모델에서 산출된 지표면 복사량의 정확성은 복사 모수화 하나의 영역이 아니라 구름, 수증기, 에어로졸, 지표 특성 등 다양한 물리적 특성 모수화 성능에 따라 좌우된다. 그리고 하향태양복사가 과대 모의되면 지표 가열이 가속화되어 현열과 잠열의 변화에 영향을 미치며 하향적외복사가 과소 모의되면 야간 지표 냉각이 가속화되어 경계층의 안정도와 일교차에 오차를 유발할 수 있다. 따라서 수치예보모델의 결과 검증 및 정확성 향상을 위하여 BSRN 복사관측 자료와 다양한 비교 연구가 이루어지고 있다.

2. 위성 자료 검증

위성은 전 지구를 반복적으로 관측할 수 있고 측정 장비를 이용한 실측이 어려운 해양, 사막, 극지 그리고 도서 지역 등의 자료를 수집할 수 있는 장점을 가지고 있으나 센서가 측정한 값을 복사전달모델과 보조 자료를 이용해 산출한 경험적 결과이므로 정확성 검증이

매우 중요하다. 특히, 위성은 파장에 따라 서로 다른 특성이 나타나고 구름의 광학 특성 변화, 에어로졸 조성 변화, 수증기량 추정 오차 그리고 표면 반사도 등에 따라 산출값 오차가 발생할 수 있다. 이러한 문제 때문에 발생하는 오차의 감증을 위해서 기준이 될 수 있는 지상 복사 관측 자료가 필수적이며 BSRN은 이러한 문제의 해결책으로 제시될 수 있다. 즉, 체계적인 품질관리 및 시간적 고해상도를 가진 BSRN 자료는 공간적 상세성이 높은 위성 자료와 상호 보완될 수 있고 또한 기후변화 분석을 비롯해 기상, 농업, 수문, 재생에너지 등 다양한 분야에서 활용성이 매우 높다.

IV 국내 복사 관측에 관한 제안

1. 복사 관측 요소의 확대

국내 복사 관측은 기상청 주도로 2000년대까지는 20여 개 기상청 관측소에서 수행되어 오다가 재생에너지 확대 등에 따라 현재의 기상청 복사 관측소는 50여 개소까지 확대되었다. 그러나 대부분의 복사 관측소에는 전천일사계만 설치 운영되고 있고 지구대기감시소인 안면도와 고산 관측소 정도만이 태양복사계 3종(전천, 직달, 산란)과 적외복사계가 함께 운용되고 있는 실정이다. 기후변화에서 온실기체 효과가 차지하는 비중이 큰 만큼 그 효과를 명확히 분석하기 위해서 적외복사 관측이 중요하기 때문에 BSRN에서는 이러한 적외복사 설치 운영을 필수로 지정하고 있다. 또한 태양광 발전량 산정에 활용하기 위해서는 전천일사뿐만 아니라 태양광 패널면의 경사각과 동일한 면에서 측정된 일사 자료가 필요하고 이러한 요소는 직달일사량과 산란일사량 그리고 태양광 패널의 방위각 및 경사각을 이용하여 산출될 수 있기 때문에 기상청 복사관측소에서는 전천일사량뿐만 아니라 다양한 복사 요소를 측정할 수 있도록 장비 확대가 요구된다.

2. BSRN급 관측소 운영

기후 연구는 단기간의 인프라 확충만으로 좋은 성과를 얻기 어렵고 장기간의 지속적인 투자가 필요하고, 기후모델 정확성 향상을 위해서 모델 자체의 성능뿐만 아니라 정확한 관측자료를 이용한 검증 및 물리 모수화 튜닝이 요구된다. 그에 따라 운영되고 있는 전 세계적 국제 관측망이 BSRN이나 우리나라는 아직 BSRN 수준의 관측소를 운영하지 못하고 있는 실정이므로 국내 관측소의 환경 개선과 장비 확대 및 전문 인력 양성 등이 시급하다. 이러한 관측소는 단순히 장비를 설치 운영하는 수준이 아니라 장기간 정확한 기후 감시자료를 생산해야 하기 때문에 관측소 선정 단계에서부터 주변의 태양광 차폐 여부, 지표 피복 특성, 도시화 영향, 해안·산악·도서 등 지형적 특성 그리고 장기 운영 가능성 등을

종합적으로 검토해서 관측소의 대표성을 유지되도록 해야 한다. 즉 이러한 대표성이 확보된 관측소에서 생산된 복사자료는 특정 관측 지역의 국지적 특성만 분석하는 것이 아니라 국내 기후 특성과 동아시아 지역의 복사 환경을 해석할 수 있는 기준자료로 활용되기 위한 전제 조건이다. 우리나라는 다른 기상 선진국에 비해 면적은 작으나 몬순·ENSO·AO 등의 계절적 영향, 삼면이 바다로 둘러싸인 지리적 조건, 복잡한 지형으로부터 발생하는 기상현상 그리고 주변 국가로부터 방출되는 물질의 영향 등 지역적 특성에 매우 민감한 지역이다. 즉, 이러한 특성에 적합한 기후 진단 및 예측에 활용할 수 있는 관측소는 BSRN이 추구하는 관측망이기 때문에 조속히 국내 복사 관측소를 개선하여 BSRN에 등록함으로써 전 세계 우수 관측소들과 어깨를 나란히 하고 기후 예측 및 분석에 중요한 자료를 생산 공급하기 위한 준비와 노력이 절실하다.

V 결론

지구 및 지구대기가 획득하는 태양복사와 우주로 방출하는 적외복사는 기후시스템의 핵심 요소이고 기후변화의 원인이자 결과이며 기온, 강수, 구름, 에어로졸, 수문순환 그리고 지표 특성 등 다양한 요소들과 밀접하게 연결된다. 기후변화를 정확히 이해하기 위해서는 기후변화의 결과로 나타나는 현상뿐만 아니라 그 원인과 과정을 설명하는데 중요하게 일조하는 복사 에너지 변화를 장기간 정밀하게 관측하는 것이 필요하다.

BSRN은 이러한 필요성에 따라 구축된 국제 기준 관측망으로 지표면에서의 태양 및 적외 복사 자료를 국제적으로 표준화된 장비와 품질관리 체계에 따라 생산 및 공급하는 관측소이다. 이러한 BSRN 자료는 수치모델의 복사 편향 평가, 위성 자료 검증, 에어로졸 복사강제력 분석 그리고 지표면 특성 평가 등 다양한 분야에서 기준자료로 활용되고 특히, 최근에 널리 활용되는 기후모델 결과와 위성 자료의 정확성을 독립적으로 검증하기 위한 고품질 기준자료로서의 중요성이 증대되고 있다.

그러나 우리나라에서는 복사 관측이 아직 전천일사량 중심으로 운영되고 있고 태양복사와 적외복사 관련 요소들이 충분하게 측정되는 관측소는 극히 제한적이다. 따라서 국내 지구대기감시 역량 확대를 위해서 복사 관측 요소를 확대하고 장비 검·교정, 관측 환경 관리, 품질관리 절차, 전문 인력 확대 운영을 포함한 BSRN급 관측체계 구축이 시급하다. 즉, 국내 주요 기후 관측소를 대상으로 BSRN 등록을 추진하여 한반도를 포함한 동아시아 기후 감시 자료를 생산함으로써 기후모델과 위성 자료 검증 및 다양한 서비스 고도화를 추진해야하는 것이 중요한 시점에 도달해 있다.

참고문헌

- Cavaliere, A., C. Frangipani, D. Baracchi, M. Busetto, A. Lupi, M. Mazzola, S. Pulimeno, V. Vitale, and D. Shullani, 2025: Surface Broadband Radiation Data from a Bipolar Perspective: Assessing Climate Change Through Machine Learning. *Climate*, 13, 147, doi:10.3390/cli13070147.
- Driemel A. J. Augustine, K. Behrens, S. Colle, C. Cox, E. Cuevas-Agullo, F.M. Denn, T. Duprat, M. Fukuda, H. Grobe, M. Haeffelin, G. Hodges, N. Hyett, O. Ijima, A. Kallis, W. Knap, V. Kustov, C.N. Long, D. Longenecker, A. Lupi, M. Maturilli, M. Mimouni, L. Ntsangwane, H. Ogihara, X. Olano, M. Olefs, M. Omori, L. Passamani, E.B. Pereira, H. Schmithusen, S. Schumacher, R. Sieger, J. Tamlyn, R. Vogt, L. Vuilleumier, X. Xia, A. Ohmura, and G. Konig-Langlo, 2018: Baseline Surface Radiation Network (BSRN): structure and data description (1992-2017), *Earth Syst. Sci. Data*, 10, 1491-1501, doi:10.5194/essd-10-1491-2018.
- Garcia, R.D., E. Cuevas, R. Ramos, V.E. Cachorro, A. Redondas, and J.A. Moreno-Ruiz, 2019: Description of the Baseline Surface Radiation Network (BSRN) station at the Izana Observatory (2009-2017): measurements and quality control/assurance procedures, *Geosci. Instrum. Method. Data Syst.*, 8, 77-96, doi:10.5194/gi-8-77-2019.
- Garcia, R.D., O.E. Garcia, O.E., E. Cuevas-Agullo, A. Barreto, V.E. Cachorro, C. Marrero, F. Almansa, R. Ramos, and M. Po, 2023: Spectral Aerosol Radiative Forcing and Efficiency of the La Palma Volcanic Plume over the Izana Observatory. *Remote Sens.* 2023, 15, 173, doi:10.3390/rs15010173.
- He, J., L. Hong, B. Hu, and W. Tang, 2025: Comparative evaluation of thirteen satellite-derived surface solar radiation products over China. *Sci. Remote Sens.*, 12, 100291, doi:10.1016/j.srs.2025.100291
- Heimo A., A. Vernez, and P. Wasserfallen, 1993: Baseline Surface Radiation Network (BSRN). Concept and Implementation of a BSRN Station. WMO/TD-No. 579, WCRP/WMO.
- IPCC, 2021: The Earth's Energy Budget, Climate Feedbacks, and Climate Sensitivity. 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., P. Zhai, A. Pirani, S.L. Connors, C. Péan, S. Berger, N. Caud, Y. Chen, L. Goldfarb, M.I. Gomis, M. Huang, K. Leitzell, E. Lonnoy, J.B.R.

- Matthews, T.K. Maycock, T. Waterfield, O. Yelekci, R. Yu, and B. Zhou (eds.)). Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, pp. 923-1054, doi: 10.1017/9781009157896.009.
- Kreuwel, F.P.M., W. Knap, M. Schmeits, A.J. Vila-Guerau, and C.C. van Heerwaarden, 2023: Forecasting day-ahead 1-minute irradiance variability from Numerical Weather Predictions. *Sol. Eng.*, 258, 57-71, doi:10.1016/j.solener.2023.04.050.
- Logothetis S-A., V. Salamalikis, and A. Kazantzidis, 2024: A Machine Learning Approach to Retrieving Aerosol Optical Depth Using Solar Radiation Measurements. *Remote Sens.*, 16(7),1132, doi:10.3390/rs16071132.
- Long, C.N., 2018: 15th Baseline Surface Radiation Network (BSRN) Scientific Review and Workshop. WCRP Report 20/2018; World Climate Research Programme (WCRP): Geneva, Switzerland; 36 pp.
- Ohmura, A., 2009: Observed decadal variations in surface solar radiation and their causes. *J. Geophys. Res.*, 114, D00D05, doi:10.1029/2008JD011290.
- Ohmura, A., E.G. Dutton, B. Forgan, C. Frohlich, H. Gilgen, H. Hegner, A. Heimo, G. Konig-Langlo, B. McArthur, G. Muller, R. Philipona, R. Pinker, C.H. Whitlock, K. Dehne, and M. Wild, 1998: Baseline Surface Radiation Network (BSRN/WRMC), a new precision radiometry for climate research. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 79(10), 2115 - 2136, doi:10.1175/1520-0477(1998)079<2115:bsrnbw>2.0.CO;2.
- Riihela, A., E. Jaaskelainen, and V. Kallio-Myers, 2024: Four decades of global surface albedo estimates in the third edition of the CM SAF cLOUD, Albedo and surface Radiation (CLARA) climate data record. *Earth Syst. Sci. Data*, 16, 1007-1028, doi:10.5194/essd-16-1007-2024.
- Stanhill, G., and S. Cohen, 2001: Global dimming: a review of the evidence for a widespread and significant reduction in global radiation with discussion of its probable causes and possible agricultural consequences. *Agric. For. Meteorol.*, 107(4), 255-278, [https://doi.org/10.1016/S0168-1923\(00\)00241-0](https://doi.org/10.1016/S0168-1923(00)00241-0).
- Stamatis, M., N. Hatzianastassiou, M.B. Korras-Carraca, C. Matsoukas, M. Wild, and I. Vardavas, 2022: Interdecadal Changes of the MERRA-2 Incoming Surface Solar Radiation (SSR) and Evaluation against GEBA & BSRN Stations. *Appl. Sci.*, 12, 10176, doi:10.3390/app121910176.
- Tuomiranta, A., P.-J. Alet, C. Ballif, and H. Ghedira, 2022: Calibration of ground surface albedo models, *Sol. Energy*, 237, 239-252, doi:10.1016/j.solener.2022.03.047.

- Urraca, R., C. Lanconelli, and V. Gobron, 2024: Impact of the spatio-temporal mismatch between satellite and in situ measurements on validations of surface solar radiation. J. Geophys. Res. Atmos., 129, e2024JD041007, doi:10.1029/2024JD041007.
- Wild, M., 2009: Global dimming and brightening: A review, J. Geophys. Res., 114, D00D16, doi:10.1029/2008JD011470.
- Zo, I.S., J.B. Jee, B.Y. Kim, and K.T. Lee, 2017: Baseline Surface Radiation Network (BSRN) quality control of solar radiation data on the Gangneung-Wonju National University radiation station. Asia-Pacific J. Atmos. Sci. , 53, 11-19, doi:10.1007/s13143-016-0029-5.
- Zo, I.S., J.B. Jee, K.T. Lee, K.H. Lee, M.Y. Lee, and Y.S. Kwon, 2023: Radiative Energy Budget for Asia Based on GK-2A/AMI Observation Data. Remote Sens., 15(6), 1558: doi:10.3390/rs15061558.

성층권 오존 감시와 기후변화

구자호 연세대학교 부교수 zach45@yonsei.ac.kr

- Ⅰ 성층권 오존 감시의 필요성: 과거
- Ⅱ 성층권 오존 감시의 필요성: 현재 및 미래
- Ⅲ 한국의 성층권 오존 감시 역사
- Ⅳ 성층권 오존 감시 기반 기후변화 연구 방향 및 로드맵
- Ⅴ 기대 및 파급효과

인류의 건강과 생태계 환경에 밀접한 관련성을 가지는 성층권 오존층 파괴 현상은 전세계적으로 가장 심각하게 여겨졌던 대기화학적 문제 중 하나였으나 몬트리올 의정서를 기반으로 하는 인류의 적극적인 노력을 통해 다행히도 해소 국면을 맞이하고 있다. 하지만 최근 연구들은 성층권 오존의 변동성 자체가 기후변화 및 대류권 대기오염 현상과 관련성을 크게 갖는 특성을 보여주고 있다. 게다가 기존에 큰 특징을 보이지 않던 북극 성층권 오존이 정확한 원인을 설명할 수 없는 높은 변동성을 보이고 있어 성층권 오존과 기후변화 사이의 피드백 과정에 대한 깊은 이해를 요구하고 있다. 하지만 국내에서 성층권 및 관련되는 대류권 상층의 오존을 중심으로 하는 기상/기후 연구는 다른 연구 분야에 비해 주목도가 낮은 탓에 많은 부분들이 베일에 가려져 있는 상황이다. 이에 중장기 로드맵을 갖는 연구를 통해 오존 감시를 기반으로 하는 기후변화 진단분석 기술을 개발, 구축해 나갈 필요성이 크게 요구된다.

I 성층권 오존 감시의 필요성: 과거

1. 성층권 오존층의 가치

지구에 유입되는 태양복사는 자외선과 가시광선으로 구성된다. 복사에너지는 파장이 짧을수록 에너지가 강력해지는 특성이 있기 때문에 가시광선에 비해 짧은 파장을 갖는 자외선은 인간의 건강 및 생태계 현상에 큰 영향을 줄 수 있다. 자외선의 강한 복사에너지에 오래 노출될 경우 피부의 세포 및 DNA 파괴 및 변형이 발생할 수 있고, 작물의 성장에도 저하가 발생할 수 있다는 사실은 여러 연구를 통해 밝혀진 바 있다(Park et al., 2019). 다행스럽게도 지구대기의 성층권에는 오존층이 존재하여 이러한 유해 자외선의 대부분을 흡수해주어 지구 생태계를 보호해주는 긍정적 역할을 해주고 있다.

2. 성층권 오존층 파괴 및 대응

그런데 1970년대부터 급격하게 성층권 오존 농도가 감소하는 것이 여러 곳에서 관측되기 시작했다. 초기엔 일시적인 현상 또는 관측 오차로 여겨졌지만 오랜 감시 활동을 통해 결국 1985년에 공식적으로 특히 남극의 봄철 성층권 파괴가 심각하게 발생하고 있음이 발표되었다(Farman et al., 1985). 연구 결과 냉장고, 에어컨 등에서 냉매로 활용하는 염화불화탄소가 성층권에 유입되어 오존층 파괴 물질로 작용하고 있음이 밝혀졌다(Solomon et al., 1986). 이에 전 세계가 긴급하게 대응하여 염화불화탄소 활용 규제를 골자로 하는 몬트리올 의정서를 채택하였고, 이후 오랜 기간 이 몬트리올 의정서를 따르면서 성층권 오존 농도 변화를 추적, 감시하는 연구가 수행되어 왔다. 다행스럽게도 2000년대 들어서면서 오존 농도 감소현상이 둔화되기 시작했고, 심지어 회복세를 나타내는 것이 확인되었다. 성층권 오존 파괴 메커니즘을 제시했던 Susan Solomon 박사(현 MIT 교수)는 30년이 지나 남극 성층권 오존층의 회복세가 확인된다는 연구 결과를 공식적으로 발표하였고(Solomon et al., 2016), 이에 대해 전세계 과학자들이 추가적으로 신중하게 검토한 결과 결국 UN과 세계기상기구는 2023년 1월 공식적으로 성층권 오존층의 회복세를 발표하게 된다.

II 성층권 오존 감시의 필요성: 현재 및 미래

몬트리올 의정서의 성공적인 이행 덕분에 남극 오존층 파괴가 약해지면서 결국 최근 남극 오존층 회복까지 발표되게 되었다. 그러나 이로 인해 성층권 오존 감시 및 관련 연구의 필요성이 축소되었다고 볼 수 없다. 성층권 오존 파괴가 기후변화의 여러 측면과 연관됨이 밝혀짐과 동시에 동아시아 지역 대기 환경 문제와도 관련될 가능성이 확인되고 있기 때문이다.

1. 성층권 오존층과 기후변화의 연관성

2000년대 들어오면서 몬트리올 의정서를 준수하는 전 세계의 노력이 효과를 보이면서 성층권 오존 농도 감소가 둔화되는 와중에, 과학자들은 성층권 오존의 변동성이 기후 변동성과 밀접한 영향을 가질 수 있다는 새로운 사실을 발견하게 된다. 남극 대류권 기온 변화가 동서 방향으로 대조되는 특성을 보이고 있는데 그것이 남극 주변의 대기 순환 특성과 관련이 되고 그것이 남극/남반구 성층권 오존 농도의 변동성과 밀접한 관계를 갖는다는 사실이 발표되면서(Thompson and Solomon, 2002) 성층권 오존이 기후변화 특징을 알려주는 지시자로서, 더 나아가 기후피드백을 구성하는 주요 요소로서 간주될 필요성이 있음을 확인한 것이다. 이러한 관점은 과거 성층권을 중요하게 다루지 않았던 기후모델에서 성층권 오존 변동성을 처방해 주었을 때 그 결과가 크게 달라진다는 것을 확인하면서(Son et al., 2008) 그 중요성이 더 크게 부각되게 된다. 심지어 성층권 오존 변화에 따라 해류의 변화도 존재할 수 있다는 가설이 제시되는 등(Thompson et al., 2011), 성층권 오존의 변동성이 기후변화 및 지역 기상/기후 특성을 이해하는 데 있어 중요한 역할을 하고 있다는 연구 결과가 지속적으로 발표되는 중이다.

게다가 현재 기후변화의 가장 대표적 원인인 온실기체의 증가는 지표, 대류권의 온도를 증가시키는 것과는 달리 오히려 성층권 온도를 낮추는 데 기여하는 것으로 알려져 있다(Cohen et al., 2026). 성층권 기온의 하강은 극성층권구름의 발생을 보다 빈번하게 일으킬 수 있다는 점에서 성층권 오존 변동성과 관련될 가능성이 있는 현상이다. 이러한 연구 결과들은 성층권 오존 특성을 정확하게 다루지 않은 기상, 기후 모델링 결과를 기반으로 한 분석 내용에 대해 재고의 여지가 필요함을 의미한다고 볼 수 있다. 문제는 여전히 많은 모델링에서 성층권 오존 특성이 정확하게 반영되지 못하고 있다는 점인데, 그나마 기후모델링에서는 조금씩 보완이 되고 있으나 지역 규모 수치모델에서는 아직도 부족한 면이 많고, 모델링 결과에 대한 검증, 평가도 활발하지 못한 편이다. 기후변화 및 이상기상 특성의 이해를 높이기 위한 여러 요소들로서 성층권 오존도 중요하게 간주할 필요성이 높다는 점을 인식할 필요가 있다.

2. 북극 성층권 오존층의 특성 변화

2010년대까지 성층권 오존층에 대한 문제는 남극 중심으로 논의되어 왔다. 이는 오존층 파괴와 관련한 화학적 과정이 대기 중 입자상 물질이 존재하는 비균질상(heterogeneous phase)에서 크게 활발해지기 때문이다. 성층권은 대류권과 잘 섞이지 않기 때문에 대류권에서 대부분 발생하는 에어로졸(미세먼지)이 유입될 수 없고, 수증기량이 매우 낮아서 구름이 거의 발생하지 않으므로 보통 입자상 물질이 존재하지 않으나 기온이 섭씨 영하 80도 정도까지 낮아지면 포화수증기압이 극도로 낮아져 구름이 생길 수 있다. 이를 극성층권구름(polar stratospheric cloud)이라고 하며 이 때 오존층 파괴 반응이 크게 나타날 수 있다.

남극은 극소용돌이(polar vortex) 현상이 강하게 발생하여 극지와 중위도 지역 공기의 교환이 매우 제한되기 때문에 극지 성층권 기온이 매우 낮아져서 극성층권구름 발생이 잘 나타난다. 반면 북극은 산악중력과 등의 발생 빈도가 높은 편이라 상대적으로 극소용돌이 강도가 약해서 극성층권구름이 잘 발생하지 못한다. 이런 이유로 북극 성층권 오존층 파괴는 남극에 비해 훨씬 약한 상황이었는데, 2011년에 남극 수준의 오존층 파괴가 발생하여 전세계를 놀라게 한 이후(Manney et al., 2011) 2020년에도 이례적으로 오존층 파괴가 크게 일어났다(Lawrence et al., 2020). 남극 성층권 오존 파괴가 해결되어 가는 동향과는 반대로 북극에서는 성층권 오존의 이례적인 파괴가 나타나고 있다는 점은 여전히 성층권 오존층 파괴 문제가 완벽하게 이해되지 못했음을 의미한다. 게다가 심지어 2024년에는 오히려 반대로 북극 성층권 농도가 이례적으로 높게 나타나는 등(Newman et al., 2024), 최근 북극 성층권 오존층의 변동성이 기존과 다르게 대단히 크게 나타나고 있음이 확인된다.

왜 이런 일이 일어나고 있는지에 대해서는 정확하게 이해되지 못한 상황이지만, 기후변화가 대기를 불안정하게 만들고, 변동성을 크게 증폭시키는 경향이 있음을 감안할 때 최근 북극 및 북반구의 기후변화와 관련하여 생각할 필요가 있는 것으로 여겨진다. 전 세계 인구의 70%가 북반구에 거주하는데다가 남반구와는 달리 북반구에서는 고위도 지역에도 상주하는 인구가 많기 때문에 북극 성층권 오존량의 큰 변동성은 기존의 남극 오존층 파괴보다 더 큰 여파를 일으킬 수 있다는 점에서 문제의 심각성을 엿볼 수 있다.

3. 성층권 오존과 대류권 상층 및 성층권 하층 대기 변동성과의 관계

최근 제트류 세기의 변화가 북반구 여러 이상기상 현상의 이해와 관련하여 중요하게 연구되고 있다. 일반적으로 북극 증폭(Arctic amplification)으로 알려져 있는 북극 지역 기온의 빠른 증가 현상이 남북 방향 기온 및 기압 경도를 약하게 하면서 제트류의 사행(meandering)을 유발할 수 있는 것으로 설명되는데(Francis and Vavrus, 2015), 최근 연구를

보면 이런 제트류의 사행이 극소용돌이 패턴에도 영향을 줄 수 있음이 발표되어(Barpanda and Nakamura, 2025) 북반구 성층권 오존의 시공간 변동성과 제트류의 특성을 연계해서 살펴볼 필요성이 확인되고 있다. 실제로 제트류 움직임을 경계로 동아시아 지역 오존전량 농도가 북극과 중위도 사이 대비되는 점이 잘 나타나고 있음이 자료 분석 결과 확인되었던 바가 있었는데(Park et al., 2012), 제트류의 사행 및 위치 변화가 최근 동아시아 및 유럽, 북미 지역의 한파 또는 폭염현상과 관련된다는 점을 감안할 때(Rousi et al., 2022) 성층권 오존의 변동성을 아시아 및 중위도 지역의 이상기상 현상과 연계하여 살펴볼 필요는 충분히 있어 보인다. 실제로 최근 동아시아 지역 대류권 상층 및 성층권 하층(Upper troposphere and lower stratosphere, 이하 UTLS) 오존의 변동성의 주요 인자를 살펴보면 유라시아 패턴, 서태평양 패턴과 같은 알려진 기후변동성의 특징 등으로 2/3 가량 설명되는 것이 확인되어(Park et al., 2025a) UTLS 고도상에서의 오존이 기후변동성과 갖는 관계가 꽤 중요하게 나타나고 있다.

4. 동아시아 대류권 오존 문제와의 관련성

일반적으로 기온 연직 분포 차이에 의해서 성층권과 대류권의 대기는 잘 섞이지 않는다. 다만 앞서 언급한 제트류의 변화라든지 강한 대류의 발생, 또는 강한 산불 및 화산 폭발과 같은 특이 상황이 발생하는 경우 성층권과 대류권의 경계(대류권계면)가 접히거나 찢어지면서 성층권-대류권 대기 교환(stratosphere - troposphere exchange, 이하 STE) 현상이 나타나게 된다. 이는 성층권 오존의 대류권 침투 가능성을 의미한다.

그런데 현재 동아시아 지역, 특히 한국과 중국은 대류권 오존 농도가 매우 높게 나타나는 특이한 현상이 나타나고 있다. 2016년 한국-미국 공동 대기질 조사(KOREA-US air quality campaign, 이하 KORUS-AQ) 기간 미국 연구팀의 항공관측 결과 가장 놀라운 발견으로 알려진 것이 한반도 상공 약 7~8km 고도의 자유대류권까지도 높은 오존 혼합비가 나타나는 관측 결과였는데(Crawford et al., 2021) 그 원인에 대해서는 아직까지 정확하게 이해되지 못하고 있다. 여러 가능성 높은 가설 중에 최근 성층권 오존의 하강이 한반도 지역 대류권 오존 농도 증가에 기여할 가능성이 높다는 연구 결과가(Columbi et al., 2026) 발표되어 주목을 받고 있으며, 실제 국내에서도 이와 유사한 분석 결과가 발표되고 있다(구자호 외, 2024).

만약 이러한 가설이 중요한 역할을 하는 것으로 밝혀진다면 성층권 오존 감시는 대류권 대기오염을 더 잘 이해하기 위해서도 필요할 수 있다는 의미가 되며, 기후 변동성 및 대기 순환 특성을 감안하여 성층권과 대류권 오존의 관계를 분석해야 함을 시사한다. 특히 현재 한국과 중국의 지표 오존 오염이 갈수록 심각해지는 와중에(Lee et al., 2022), 최근 지표 오존의 증가 추이가 통상적인 광화학 작용이 활발한 여름이 아닌 겨울에 훨씬 더 뚜렷하게

나타나는 사실이 발표되면서(Li et al., 2025) 한반도를 비롯한 동아시아 지역 대류권 오존 문제를 성층권 오존의 유입이라는 관점에서 살펴봐야할 필요성이 더 높아진 상황이다. 다만 여전히 성층권 오존의 기여도가 그렇게 크지 않다는 연구 결과 역시 존재하기 때문에(Chen et al., 2024), 많은 연구를 통해 보다 더 이해도를 높여야 할 필요가 존재한다.

5. 북반구 열대, 중위도 지역 성층권 하층 오존의 지속적 감소

앞서 성층권 오존 파괴 물질의 감소로 인하여 성층권 오존 파괴가 약해져서 오존층 회복세로 접어들었음이 세계기상기구 등에 의해 공식적으로 발표되었음을 언급하였다. 그런데 일부 지역에서는 여전히 성층권 오존 감소가 꾸준히 나타나는 경우가 있는데 특이하게도 북반구 열대 및 중위도 지역의 성층권 하층에서 이런 오존 감소 추이가 계속해서 나타나고 있다(Ball et al., 2018). 이와 관련해서 일부 아시아 지역에서 오존 파괴 물질의 불법 배출, 또는 몬트리올 의정서 상에서 규제되지 않는 디클로로메탄과 같은 오존 파괴 물질의 배출 증가 특성이 의심되어 왔다(Hossaini et al., 2017). 그런데 실제로 기상청 관측 자료를 통해 규제되어야 할 염화불화탄소 물질의 농도가 한반도 상공에서 증가하고 있음이 확인된 바 있다. 게다가 2022년 8월 미국 연구팀에 의해 한반도 및 동아시아 UTLS 지역 최초의 항공관측이 수행된 ACCLIP (Asian Summer Monsoon Chemical & Climate Impact Project) 캠페인에서 전 세계적으로 유례가 없을 정도의 높은 디클로로메탄이 동아시아 상공 UTLS에서 포착되어 발표되었다(Pan et al., 2024). 이는 동아시아 지역이 아직 성층권 오존 및 오존 파괴 물질의 감시를 등한시해서는 안된다는 점을 의미하며, 오존 파괴 물질의 높은 농도와 중위도 성층권 하층에서의 오존 감소 트렌드가 어떤 관계를 갖는지에 대해서도 아직 이해가 부족하기 때문에 추가 연구가 시급하게 필요한 상황이다.

이와 같이 최근 한반도 및 동아시아 지역 기후변화, 이상기상 및 대기환경 특성과 성층권 오존의 변동성이 관련될 수 있는 여러 징후들이 발견되고 있다. 하지만 아직 이런 특징의 원인이나 여파에 대해서 알려진 바가 크지 않기 때문에 이런 특성을 보다 정확하게 이해하기 위한 추가 연구를 수행하고 이를 통해 기상, 기후 정책에 참고할 수 있는 정보를 한반도, 동아시아 범위에서 추출하는 과정이 크게 요구되는 상황이다.

III 한국의 성층권 오존 감시 역사

한국은 아시아에서 일본 다음으로 성층권 오존 감시 문제를 빠르게 인지하여 감시 활동까지 성공적으로 이어나간 역사를 갖고 있다. 세계기상기구의 지구대기감시(Global Atmospheric Watch, 이하 GAW) 프로그램에서 성층권 오존 감시를 위해 활용하는 표준 관측기기 중 하나인 돕슨 분광광도계(Dobson spectrophotometer)를 1984년에 연세대학교 천문기상학과에서 도입함으로써 한반도 성층권 오존 감시의 서막을 열었다. 전 세계적으로 남극 오존홀 이슈가 공식적으로 발표된 것이 1985년임을 감안할 때 상당히 빠른 대응이 있었다는 것을 확인할 수 있다. 이 연세대학교의 성층권 오존감시 업무는 꾸준히 수행되어 세계 오존 및 자외선 자료 센터(World Ozone and Ultraviolet Radiation Data Center, 이하 WOUDC)를 통해 전 세계 연구자들에게 제공되어 왔으며 2004년부터는 기상청의 위탁관측망으로 공식 지정되어 현재까지 운영되고 있다. 2024년에는 서울 연세대 관측소의 성층권 오존 감시 업무는 40주년을 맞이하게 되었고 이에 40년 지상 관측 자료를 기반으로한 한반도 성층권 오존의 기후학적 특성이(그림 1) 논문으로도 발표되었다(박상서 외, 2025). 아시아에서 이렇게 장기간 대기감시를 꾸준히 이어오고 있는 관측소는 손에 꼽을 정도로 드물다는 점에서 높은 가치를 갖고 있다. 2016년부터는 NASA에서도 동일한 장소에서 판도라 분광계(Pandora spectrometer)로 오존전량 관측을 수행하고 있어서 서로 다른 관측 자료를 비교 검증할 수 있는 틀도 구축되어 있는 상황이다.

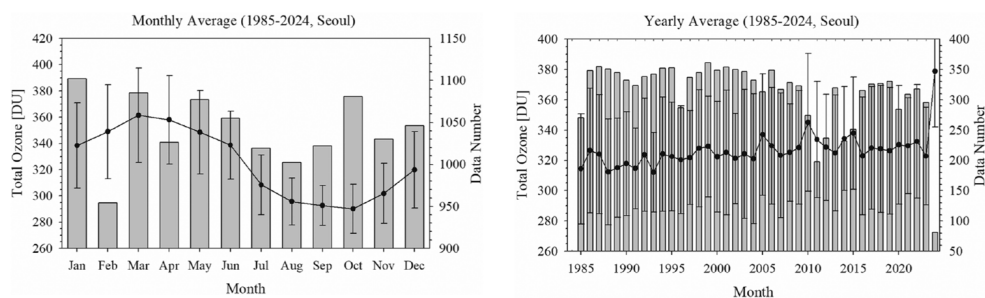


그림 1. 서울 연세대 위탁관측소에서 40년간(1985~2024) 관측한 자료를 기반으로 얻은 성층권 오존전량의 월별 변동(왼쪽) 및 연간 변동(오른쪽) 추이

또한 기상청은 2000년대 들어 안면도 및 제주 고산에서 또 다른 표준 기기인 브루어 분광광도계(Brewer spectrophotometer)를 이용하여 한반도 성층권 오존 감시 업무를 수행해오고 있으며 90년대 후반부터는 포항 기상대에서 매주 1회 오존존데(ozonesonde) 관측을 수행하여 연직 오존 프로파일 정보도 꾸준히 축적하고 있다. 동아시아 지역에서 직접관측을 통해 오존 연직 구조를 상시적으로 감시하고 있는 관측소는 10여개 수준이고

그 중에서도 20년 이상 장기 관측을 수행한 관측소는 손에 꼽을 수준임을 감안할 때 포항 오존존데 관측은 한반도 뿐만 아니라 전 지구적인 범위에서 꾸준한 오존 관측을 수행한다는 점에서도 매우 큰 의미를 가진다고 볼 수 있다. 이런 꾸준한 노력이 좋은 평가를 받아서 2021년에는 국내 오존 연구자들과 국립기상과학원의 지원을 바탕으로 전 세계 오존 과학자들이 4년마다 모여 오존 연구 내용을 공유하고 논의하는 Quadrennial Ozone Symposium을 유치하여 1주일간 성공리에 진행하기도 했다.

21세기 들어서면서 위성 관측 기술이 향상함에 따라 위성 자료를 기반으로 성층권 오존 감시를 수행할 수 있게 되었다. 특히 오존전량은 위성에서 산출되는 여러 대기 성분 정보들 중에서도 상대적으로 높은 정확도를 갖고 있는 편이라 지상 관측이 부족한 지역에서 대체 자료로 활용할 수 있는 가치가 매우 높은 편이다. 위성은 약 300-400 km 고도에서 지구를 매일 여러 번 돌며 전 지구 대기를 관측하는 저궤도 위성과 약 30,000 km 이상 고도에서 지구 자전을 따라가면서 특정 지역의 대기를 하루에 수시간씩 꾸준히 관측하는 정지궤도 위성으로 나뉜다. 현재까지는 상대적으로 저렴하고 운영이 쉬운 저궤도 위성을 통해 오존 감시 업무를 수행하였으나 하루에 1회 관측만 가능하다는 단점이 있었다. 그런데 최근 한국에서 세계 최초로 대기환경 감시 목적으로 준비된 정지궤도 위성 GEMS (Geostationary Environment Monitoring Spectrometer) 프로젝트가 성공적으로 시작되면서(Kim et al., 2020) 이제 한국에서 하루에 최대 10시간 정도 오존전량 자료를 얻을 수 있게 되었다. GEMS 오존전량 자료의 품질이 검증 과정을 통해 충분히 개선되어 온 만큼(Bak et al., 2026) 향후 한반도 및 동아시아 성층권 오존 감시에도 큰 역할을 할 수 있으리라 생각된다.

IV 성층권 오존 감시 기반 기후변화 연구 방향 및 로드맵

국내에서 한반도 성층권 오존 감시가 긴 역사를 갖고 잘 수행되어 온 것에 비해 이를 기후변화와 연계하여 연구된 바는 그렇게 많지 않다. 앞서 살펴보았던 성층권 오존이 최근 한반도/동아시아 지역 기후변화, 이상기상, 그리고 대기환경 이슈들에 관련될 수 있을 가능성이 높음을 감안할 때 대류권 상층까지 포함한 UTLS 지역의 오존 감시 자료를 이용하여 한반도, 동아시아 및 북극 지역 기상 및 기후 특성과의 관계를 진단, 분석할 필요가 있다고 여겨진다.

1. 한반도, 동아시아 범위 UTLS 오존과 기후변화 연구 필요성

1) 기상, 기후 모델링 과정에서 성층권 오존의 역할이 중요하다는 것이 여러 연구로 밝혀지고 있으나 동아시아 지역 범위에서 구체적으로 어떤 특성이 나타나는지 살펴본 바가 거의 없다. 특히 동아시아 지역은 제트류의 사행이 크게 일어나는 지역인데다 북극 대기가 침투하여 내려올 수 있는 지역이기 때문에 이런 특성이 UTLS 오존 변동성에 반영되어 나타날 가능성이 매우 높다. 예컨대 제트류의 사행이 강해져서 북극 성층권 오존이 중위도 대류권으로 좀 더 많이 유입될 가능성 등을 살펴볼 필요가 있다.

2) 오존의 대기 복사 흡수 특성을 좀 더 잘 이해할 필요성이 대두되고 있다. 기본적으로 오존은 태양복사 흡수력이 크기 때문에 성층권 오존의 분포 특성에 따라 기온 및 기압 분포의 변화가 나타날 가능성이 높다. 실제 최근 국내 연구는 2000년대 이전과 이후 북극 성층권 오존 분포 형태가 달라지면서 태양복사 흡수에 따른 기압 패턴의 변화가 나타나고, 이것이 멀리 떨어진 태평양 지역의 엘니뇨/라니냐와의 원격 상관성의 변화로도 이어질 수 있음을 장기 자료 분석을 통해 밝힌 바 있다(Park et al., 2025b). 최근 미세먼지가 태양복사를 산란시키는 효과가 약화되고 있고 특히 이 특성이 동아시아 지역에서 두드러지게 나타나고 있음을 감안하면 성층권 오존에 의한 태양복사강제력 변화에 좀 더 무게를 두고 살펴볼 필요가 있다.

3) 앞서 언급했듯이, 위성 관측 자료는 상당히 높은 품질의 오존전량 자료를 생산하고 있다. 위성 관측의 특성을 감안하면, 성층권 오존의 시공간 분포 지도가 장기간에 대해 잘 구축되어 있음을 의미한다. 이는 위성 오존자료를 재분석자료처럼 이용하여 기후변화 연구에 활용할 수 있음을 의미한다. 위성자료 그 자체를 통계분석 등에 활용하는 연구와 기상, 기후 모델의 초기장으로 활용할 수 있게 가공하는 연구 모두 가능성이 있고, 이 두 연구는 현재 한반도, 동아시아 범위에서 잘 이루어지지 못했기에 결과의 활용도가 높다고 볼 수 있다.

2. 향후 추진 가능한 주요 연구 주제

1) 상시 및 집중관측자료 분석을 통한 한반도/동아시아 오존의 시공간 분포 이해: 기상청 관측망에서 획득한 자료 및 관련하여 활용할 수 있는 모든 오존 관측 자료를 취합하여 한반도 UTLS 오존의 시공간 분포 특성을 3차원 관점에서 분석할 수 있는 데이터베이스를 구축할 필요가 있다. 오존전량의 경우 전구 네트워크 및 서울 연세대 위탁관측소의 (그림 2) 40년 이상 장기 오존전량 감시자료를 기초삼아 안면도, 고산 지상 원격 탐사 자료 및 위성 자료를 함께 이용하여 한반도, 동아시아 지역 지도 구축까지 모색해 볼 수 있다. 오존의 연직분포의 경우 포항 기상대 오존존데 자료 이외에도 돕슨 및 브루어 분광광도계의 움케어(Umkehr) 모드 자료를 통해 성층권 오존 연직 분포 자료 획득이 가능하며 위성에서도 오존의 연직 분포 정보가 제공되고 있기 때문에 비교 검증을 통해

활용 가능성을 높일 수 있다. 여기에 기상과학원의 항공 및 선박관측을 통해 획득한 자유대류권의 오존 자료 활용성을 좀 더 높일 필요가 있다.

2) 재분석 자료 기반 UTLS 지역 기상/기후 변동 특성 분석 및 자료 품질 개선: 재분석 자료는 격자화된 오존자료를 제공해준다는 점에서 기후변화와 관련한 연구에 높은 활용성을 갖는다. 다만 오존의 경우 다양한 재분석자료에서 생산되고 있는데 아직 검증이 충분하게 이루어지지 못했기에 지상 및 위성 관측자료를 이용하여 좀 더 구체적인 검증을 진행할 필요가 있다. 자료의 검증이 이루어지면 UTLS 지역 오존과 기상장의 관련성을 설명해줄 수 있는 여러 변수의 추정이 가능해질 것으로 보이는데, 대표적으로 대기안정도나 잠재와도 기반 대류권계면 높이 정보 등을 꼽을 수 있다.

3) 성층권-대류권 대기교환 과정에 대한 과학적 이해 기반 구축: 성층권과 대류권 물질 교환 과정은 그 중요성에 비해 연구가 많이 미흡한데, 아직까지 어떤 변수가 가장 성층권-대류권 대기교환 과정을 잘 설명해줄 수 있는지에 대해 명확하게 제시된 바가 많지 않다. 기존에 알려진 오존의 대류권 하강 수송 정도를 나타내는 물리량들이 연구 대상 지역 및 시기에 따라 적용성이 달라지는 바가 큰 것으로 알려져 있어서 한반도, 동아시아 범위에서 변수의 특성을 검증할 필요가 크게 존재한다. 이를 통해 합리적인 방법론이 구축된다면 성층권-대류권 대기교환 과정의 특성을 한반도, 동아시아 범위에서 다각도로 살펴볼 수 있을 것으로 기대된다.

4) 한반도, 동아시아, 북극 범위 재난 기상 및 주요 기후변동성 이해 고도화: 제트류의 변화가 한반도, 동아시아 지역 한파 및 폭염 현상과 관련성이 큰데 이 제트류의 변화를 UTLS 지역 오존의 변화로 표현가능하며 동시에 제트류에 영향을 주는 잠재 요인들을 추적함에 활용할 가능성도 높다. 이에 UTLS 오존 자료를 지시자로 활용하여 한반도, 동아시아, 심지어 북극 지역의 여러 기후변화 요인들과 연계 지어 분석하면 기존에 찾지 못했던 새로운 영향변수를 찾을 수 있을 것으로 예상된다. 북극 해빙 변화 및 태평양 지역 엘니뇨/라니냐와의 연관성 분석이 대표적인 예시로 여겨진다.

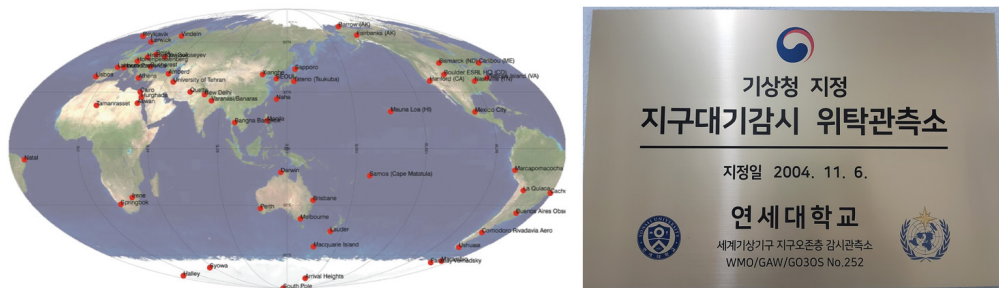


그림 2. 전구 돕슨 분광광도계 관측소 위치 지도(왼쪽) 및 연세대 기상청 지정 지구대기감시 위탁관측소 현판(오른쪽)

3. 추진 로드맵

UTLS 오존 감시 역량을 바탕으로 하는 기후변화 연구는 약 5년 정도 연구기간을 거치면 어느 정도 진단분석 기술을 구축할 수 있을 것으로 예상된다. 대략 자료의 구축 및 비교 검증을 통해 자료의 품질을 개선하고, 기후변화 연구에 활용할 수 있는 수준으로 자료를 가다듬는 전반기 연구기간을 2년 정도 필요로 하고, 이후 3년간의 후반기 연구기간을 통해 구체적인 변수 및 통계값 추출을 통해 기존 가설의 진단성을 살펴보고 가장 UTLS 오존과 기후변화의 관계를 잘 설명하는 방법론을 구축하는 단계로 진행할 수 있으리라 생각된다. 최종적으로는 UTLS 오존 관련 정보들에 기반하여 한반도, 동아시아 및 북극지역 UTLS 주요 대기 패턴들을 설명하는 메커니즘을 발굴하고 이를 설명할 수 있는 가설을 제시하는 데 목표를 두고자 한다.

V 기대 및 파급효과

1) 과학기술적 측면: UTLS 오존 특성 및 대기 물리화학적 특성에 대한 부족한 이해도가 높아지면 성층권이 대류권에 미치는 영향을 보다 더 잘 나타낼 수 있을 것인데, 이 과정을 통해 현재 기상예보 및 기후변화 시나리오를 다루는 모델링 품질 개선에 유의미한 정보를 제공해주는 기반이 확충될 것으로 기대된다. 앞서 언급했듯이 한반도 대류권 상층의 오존 농도가 다른 국가에 비해 높은 수준으로 나타나고 있고 심지어 증가 추이도 발견되는데, 오존은 높은 반응성으로 보건, 환경에 위협을 주는 물질이기에 이 고농도/증가 추이는 해결해야 하는 문제이나 현재 그 원인을 정확하게 파악하고 있지 못하는 문제가 있고, 특히 기존의 대기오염물질의 배출 및 화학과정만으로는 설명되기 어려운 많은 특성이 존재한다는 것이 현재 난점으로 꼽히고 있다. 이런 측면에서 UTLS 오존 연구는 대기환경 분야에서 오존이라는 물질의 시공간 분포를 이해하는 데 큰 역할을 할 것으로 여겨진다. 또한 현재 기상, 기후 연구에서 빈번하게 활용되고 있는 재분석 자료의 경우 여전히 검증을 요하는 부분이 많은데, 특히 오존과 같은 대기 조성 물질의 경우 정확도 평가 연구가 매우 부족하다. 본 연구를 통해 동아시아 지역에서 재분석자료의 품질을 평가가 집중적으로 이루어진다면, 그리하여 이 결과가 세계 주요 연구 기관의 모델링 등에 반영된다면 동아시아 지역 기후변화 평가 및 미래 예측 결과의 성능을 높이는 데도 크게 기여할 수 있다고 생각된다.

2) 사회경제적 측면: UTLS 지역은 대기과학 분야에서 아직 이해도가 그리 높은 곳이 아니기 때문에 인공지능을 통해 새로운 정보를 찾아내기 가장 적합한 분야로도 볼 수 있다. 이 과제를 통해 UTLS 지역 이해도를 향상시키면 기상/기후분야 인공지능 산업 발전에도 기여할 것으로 기대된다. 다만, 결국에는 학술적 이론을 통한 논리적인 이해의 단계로 이어져야 한다. 실제 기계학습 기술 개발 및 활용에 있어서 단순한 인공지능 기술의 적용을 넘어 이론적 이해를 기반으로 하는 학습 방법 구축이 중요하다는 관점이 중요하게 대두되고 있으나 현재 한반도/동아시아 UTLS 지역은 이를 가능하게 하는 이론적 이해가 매우 부족한 상황이므로 이 연구에서 제시하는 메커니즘과 가설 등이 많은 도움이 될 것으로 생각된다. 또한 본 연구가 성공적으로 수행되면 한반도에서 그동안 관측된 다양한 3차원 자료들이 품질 검증을 마치고 국제적인 데이터 센터에 등록될 것인데 이는 대한민국이 지구과학 분야에서 가장 근간이 되는 관측 자료를 전세계 연구자들이 활용할 수 있게 제공하는 폭을 넓힌다는 점에서 국가 과학기술 수준을 알릴 수 있는 중요한 계기가 될 것으로 기대된다.

참고문헌

- 구자호, 김주완, 이동희, 이나현, 이다영, 박민주, ... & 이원진. (2024). 오존존데 관측을 활용한 2021~ 2022 년 여름철 안면도 대류권 오존 분석. 한국대기환경학회지 (국문), 40(3), 373-383.
- 박상서, 김준, 구자호, 이윤곤, 문경정, 정옥교, ... & 김수민. (2025). 연세대학교 월봉 관측소의 돕슨 분광광도계 오존 관측 40 년 (1985~ 2024). 대기, 35(3), 413-431.
- Bak, J., Keppens, A., Choi, D., Hong, S., Kim, J. H., Kim, C. H., ... & Lee, W. J. (2026). GEMS ozone profile retrieval: impact and validation of version 3.0 improvements. Atmospheric Measurement Techniques, 19(1), 119-134.
- Ball, W. T., Alsing, J., Mortlock, D. J., Staehelin, J., Haigh, J. D., Peter, T., ... & Rozanov, E. V. (2018). Evidence for a continuous decline in lower stratospheric ozone offsetting ozone layer recovery. Atmospheric Chemistry and Physics, 18(2), 1379-1394.
- Barpanda, P., & Nakamura, N. (2025). Local wave activity analysis of atmospheric blocks in the northern hemisphere winter. Journal of Climate, 38(18), 4653-4675.
- Chen, Z., Liu, J., Qie, X., Cheng, X., Yang, M., Shu, L., & Zang, Z. (2024). Stratospheric influence on surface ozone pollution in China. Nature Communications, 15(1), 4064.
- Cohen, S., Pincus, R., & Polvani, L. M. (2026). Stratospheric cooling and amplification of radiative forcing with rising carbon dioxide. Nature Geoscience, 1-6.
- Colombi, N. K., Jacob, D. J., Ye, X., Yantosca, R. M., Bates, K. H., Pendergrass, D. C., ... & Liao, H. (2026). Large and increasing stratospheric contribution to tropospheric ozone over East Asia. Atmospheric Chemistry and Physics, 26(4), 2623-2633.
- Crawford, J. H., Ahn, J. Y., Al-Saadi, J., Chang, L., Emmons, L. K., Kim, J., ... & Kim, Y. P. (2021). The Korea-United States air quality (KORUS-AQ) field study. Elem Sci Anth, 9(1), 00163.
- Farman, J. C., Gardiner, B. G., & Shanklin, J. D. (1985). Large losses of total ozone in Antarctica reveal seasonal ClO_x/NO_x interaction. Nature, 315(6016), 207-210.
- Francis, J. A., & Vavrus, S. J. (2015). Evidence for a wavier jet stream in response to rapid Arctic warming. Environmental Research Letters, 10(1), 014005.
- Hossaini, R., Chipperfield, M. P., Montzka, S. A., Leeson, A. A., Dhomse, S. S., & Pyle,

- J. A. (2017). The increasing threat to stratospheric ozone from dichloromethane. *Nature Communications*, 8(1), 15962.
- Kim, J., Jeong, U., Ahn, M. H., Kim, J. H., Park, R. J., Lee, H., ... & Choi, Y. (2020). New era of air quality monitoring from space: Geostationary Environment Monitoring Spectrometer (GEMS). *Bulletin of the American Meteorological Society*, 101(1), E1-E22.
- Lawrence, Z. D., Perlwitz, J., Butler, A. H., Manney, G. L., Newman, P. A., Lee, S. H., & Nash, E. R. (2020). The remarkably strong Arctic stratospheric polar vortex of winter 2020: Links to record-breaking Arctic oscillation and ozone loss. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 125(22), e2020JD033271.
- Lee, T., Go, S., Lee, Y. G., Park, S. S., Park, J., & Koo, J. H. (2022). Temporal variability of surface air pollutants in megacities of South Korea. *Frontiers in Environmental Science*, 10, 915531.
- Li, K., Tan, R., Qiao, W., Lee, T., Wang, Y., Zhang, D., ... & Koo, J. H. (2025). Surface and tropospheric ozone over East Asia and Southeast Asia from observations: distributions, trends, and variability. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 25(19), 11575-11596.
- Manney, G. L., Santee, M. L., Rex, M., Livesey, N. J., Pitts, M. C., Veefkind, P., ... & Zinoviev, N. S. (2011). Unprecedented Arctic ozone loss in 2011. *Nature*, 478(7370), 469-475.
- Newman, P. A., Lait, L. R., Kramarova, N. A., Coy, L., Frith, S. M., Oman, L. D., & Dhomse, S. S. (2024). Record high march 2024 Arctic total column ozone. *Geophysical Research Letters*, 51(18), e2024GL110924.
- Pan, L. L., Atlas, E. L., Honomichl, S. B., Smith, W. P., Kinnison, D. E., Solomon, S., ... & Newman, P. A. (2024). East Asian summer monsoon delivers large abundances of very short-lived organic chlorine substances to the lower stratosphere. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 121(12), e2318716121.
- Park, J. H., Lee, S. J., Lee, T., Park, S. S., Kwak, K. H., Kim, J., ... & Koo, J. H. (2025a). Variability of upper troposphere-lower stratosphere ozone over East Asia from a perspective of atmospheric stationary waves. *Environmental Research Letters*, 20(4), 044051.
- Park, J. H., Koo, J. H., Kug, J. S., Lee, S. J., Sung, M. K., Kim, J., ... & An, S. I. (2025b). Arctic stratospheric ozone as a precursor of ENSO events since 2000s. *npj Climate and Atmospheric Science*, 8(1), 338.

- Park, S. S., Kim, J., Cho, H. K., Lee, H., Lee, Y., & Miyagawa, K. (2012). Sudden increase in the total ozone density due to secondary ozone peaks and its effect on total ozone trends over Korea. *Atmospheric environment*, 47, 226-235.
- Park, S. S., Lee, Y. G., Kim, M., Kim, J., Koo, J. H., Kim, C. K., ... & Yoon, J. (2019). Simulation of threshold UV exposure time for vitamin D synthesis in South Korea. *Advances in Meteorology*, 2019(1), 4328151.
- Rousi, E., Kornhuber, K., Beobide-Arsuaga, G., Luo, F., & Coumou, D. (2022). Accelerated western European heatwave trends linked to more-persistent double jets over Eurasia. *Nature communications*, 13(1), 3851.
- Solomon, S., Garcia, R. R., Rowland, F. S., & Wuebbles, D. J. (1986). On the depletion of Antarctic ozone. *Nature*, 321(6072), 755-758.
- Solomon, S., Ivy, D. J., Kinnison, D., Mills, M. J., Neely III, R. R., & Schmidt, A. (2016). Emergence of healing in the Antarctic ozone layer. *Science*, 353(6296), 269-274.
- Son, S. W., Polvani, L. M., Waugh, D. W., Akiyoshi, H., Garcia, R., Kinnison, D., ... & Shibata, K. (2008). The impact of stratospheric ozone recovery on the Southern Hemisphere westerly jet. *Science*, 320(5882), 1486-1489.
- Thompson, D. W., & Solomon, S. (2002). Interpretation of recent Southern Hemisphere climate change. *Science*, 296(5569), 895-899.
- Thompson, D. W., Solomon, S., Kushner, P. J., England, M. H., Grise, K. M., & Karoly, D. J. (2011). Signatures of the Antarctic ozone hole in Southern Hemisphere surface climate change. *Nature geoscience*, 4(11), 741-749.

기후위기 시대의 합성 온실기체와 대기 모니터링

박선영 경북대학교 교수 sparky@knu.ac.kr

- Ⅰ 기후위기와 합성 온실기체의 부상
- Ⅱ 대기 모니터링
- Ⅲ 공공기관과 정책 연구자를 위한 방향성

합성 온실기체는 대기 중 농도는 낮지만, 극도로 높은 복사강제력을 가지며, 현대 산업 구조와 긴밀히 연결된 핵심 기후변화 인자이다. 따라서, 기후위기 대응의 핵심은 단순한 배출량 통계 보고를 넘어 실제 대기 중의 농도 변화를 정밀하게 관측하고 검증하는 역량을 확보하는 데 있다. 이러한 고정밀 대기 관측과 역추정 모델링에 기반한 통합 분석 체계는 국제 환경협약 이행 여부를 검증할 뿐만 아니라 국가 기후정책의 신뢰성과 독립성을 확보하는 핵심 기반이 된다.

I 기후위기와 합성 온실기체의 부상

1.1 합성 온실기체

우리는 흔히 기후변화를 이야기할 때 이산화탄소(CO₂)를 먼저 떠올린다. 산업혁명 이후 석탄과 석유, 천연가스를 연소하면서 대기 중 이산화탄소 농도가 급격히 증가했고, 이는 지구 평균기온 상승의 가장 중요한 원인으로 자리 잡았다. 그러나 실제 대기과학과 기후정책의 세계로 들어가 보면, 기후위기는 결코 이산화탄소 하나만의 문제가 아니라는 사실을 마주하게 된다.

대기 중에는 극미량으로 존재하지만, 분자 하나당 매우 큰 복사강제력을 가지는 합성 온실기체(synthetic greenhouse gases)들이 존재한다. 대표적인 합성 온실기체로는 할로젠화합물 기반의 CFCs (Chlorofluorocarbons, 염화불화탄소), HCFCs (Hydrochlorofluorocarbons, 수소염화불화탄소), HFCs (Hydrofluorocarbons, 수소불화탄소), PFCs (Perfluorocarbons, 과불화탄소), SF₆ (Sulfur hexafluoride, 육불화황), NF₃ (Nitrogen trifluoride, 삼불화질소) 등이 있으며, 일반 시민들에게는 이름조차 낯설지만, 실제로는 지구의 복사 균형과 미래 기후를 흔드는 핵심 물질들이다.

이러한 할로젠 기반 합성 온실기체는 인간 산업 활동이 만들어낸 대표적인 인공 화학물질이다. 냉장고와 에어컨의 냉매, 발포제, 반도체 공정, 디스플레이 제조, 전력 시스템 절연 설비 등 현대 산업 문명을 유지하는 거의 모든 첨단 산업 영역에 이들 물질이 사용된다. 문제는 이 물질들이 단순한 산업 재료가 아니라 매우 강력한 “슈퍼 온실기체”라는 점이다. 일부 물질은 이산화탄소보다 수천 배에서 수만 배 높은 지구온난화지수(Global Warming Potential, GWP)를 가진다. 예를 들어 HFC-23 (CHF₃)의 GWP는 이산화탄소 대비 약 14,700배 수준이며, SF₆의 경우, 100년 기준 약 25,000배 이상의 온난화 효과를 보인다. 더욱 심각한 것은 합성 온실기체들 상당수가 수백 년에서 수만 년에 이르는 긴 대기 체류시간을 가진다는 점이다. 대기 중 체류시간이 길다는 것은 단순히 오랜 기간 존재한다는 의미를 넘어 미래 세대까지 영향을 지속시킨다는 뜻이다. 실제로 이미 2010년 전 세계적으로 생산과 사용이 중단된 CFCs조차 현재까지 대기 중에 상당량 존재하며 성층권 오존층 회복과 기후 시스템에 영향을 미치고 있다.

1.2 온실기체의 두 얼굴

사실 온실기체 자체는 지구 생명체에게 필수적인 존재이다. 만약 대기 중 온실기체가 존재하지 않았다면 현재 지구 평균기온은 영하 수십 도 이하에 머물고 있을 것이며, 이 경우

지구의 H_2O 는 얼음으로만 존재하기 때문에 지구가 현재와 같은 생명체 중심 환경으로 진화하는 것은 불가능했을 것이다. 대기 중 수증기와 이산화탄소는 지구가 방출하는 적외선 에너지를 흡수하여 지표를 따뜻하게 유지한다.

문제는 이산화탄소를 포함한 메탄(CH_4), 아산화질소(N_2O)와 같은 자연적인 온실기체들의 생성과 소멸의 균형이 인간 활동에 의해 무너졌다는 점이다. 여기에 더해, 산업혁명 이후 다양한 화학 산업 발전은 자연 상태에서는 거의 존재하지 않던 새로운 합성 화합물들을 대량으로 대기 중에 배출하기 시작했다.

중요한 점은 이러한 합성 온실기체들이 대기의 “창문” 역할을 하는 적외선 파장 영역에서 강한 흡수 특성을 나타낸다는 사실이다. 대기창(atmospheric window)이라 불리는 8~13 μm 영역은 자연적 온실기체들과 수증기가 대부분의 적외선 파장을 흡수한 이후 남겨진 영역으로 지구 복사 에너지가 우주로 빠져나갈 수 있는 중요한 통로이다. 그러나 할로젠화합물들은 바로 이 영역에서 매우 강한 흡수 특성을 가진다. 결국, 인간은 합성 온실기체 배출을 통해 지구의 숨구멍과 같은 통로를 화학적으로 막기 시작한 셈이다.

1.3 몬트리올 의정서에서 키갈리 개정서까지

합성 온실기체에 대한 국제 규제는 오존층 보호와 기후변화 대응이라는 두 축을 중심으로 발전해 왔다. 환경 과학사에서 가장 충격적인 사건 중 하나는 1980년대 남극 오존 구멍의 발견일 것이다. 즉, 남극 상공 성층권 오존층이 급격히 파괴되고 있었으며, 원인은 냉매와 스프레이 그리고 다양한 추진제의 발포제로 사용되던 1세대 합성 온실기체인 CFCs가 성층권으로 유입되어 만들어내는 염소가 오존 파괴의 촉매제로 작용한 것이었다. 당시 국제사회는 비교적 빠르게 대응했다. 1987년 채택된 몬트리올 의정서는 성층권 오존층을 파괴하는 염소(Cl)와 브로민(Br)을 포함하는 CFCs, HCFCs 및 Halons의 생산과 사용을 단계적으로 규제하기 위한 국제 협약이었다.

몬트리올 의정서는 역사상 가장 성공적인 환경 협약 중 하나로 평가된다. 실제로 대기 중 CFCs 농도는 1990년대 이후 감소 추세로 전환되었으며, 성층권 오존층 회복 역시 점진적으로 진행되고 있다. 흥미로운 사실은 몬트리올 의정서가 단지 오존층만 보호한 것이 아니라는 점이다. 이후 연구들은 이 협약이 실제로 지구 온난화를 상당 부분 억제했다는 사실을 보여주었다. 즉, 몬트리올 의정서에 의한 합성 온실기체의 배출 억제와 복사강제력 감소 효과는 같은 기간 이산화탄소에 의한 온난화 증가 정도에 비견할 정도로 컸다(그림 1, Velders et al., 2012). 이러한 의미에서 몬트리올 의정서는 최초의 대규모 기후변화 대응 정책이었다고 볼 수도 있다.

그러나 문제는 여기서 끝나지 않았다. CFCs와 HCFCs를 대체하기 위해 개발된

3세대 냉매인 HFCs가 다시 새로운 기후문제를 만들어냈기 때문이다. 이들은 오존층을 파괴하지는 않지만 강력한 온난화 효과를 가진다. 즉, CFCs와 HCFCs 등의 규제에 급증하게 된 대체물질이 몬트리올 의정서로부터 얻은 기후 혜택을 상쇄시키는 상황을 만들어낸 셈이었다.

이에 따라 2016년 국제사회는 몬트리올 의정서 체계 안에서 HFCs를 규제하는 키갈리 개정 의정서(Kigali Amendment)를 채택하였고, HFCs의 단계적 감축이 국제적으로 합의되었다. 키갈리 개정 의정서는 2100년까지 약 0.5°C 수준의 추가 온난화를 억제할 수 있는 것으로 평가된다. 이는 파리협정에서 설정한 기후 온난화 2°C 억제 목표의 4분의 1을 달성하는 양이다(그림 2, WMO, 2022). 한국 역시 Article 5 Group 1 국가로서 2024년부터 HFC 감축 의무를 이행하고 있으며, 2045년까지 최근 소비량 대비 약 80% 감축을 목표로 하고 있다.

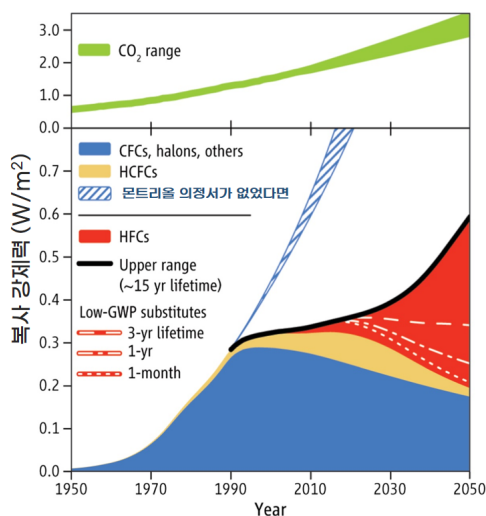


그림 1. 몬트리올 의정서의 합성 온실기체 규제에 따른 기후 혜택(Velder et al., 2012)

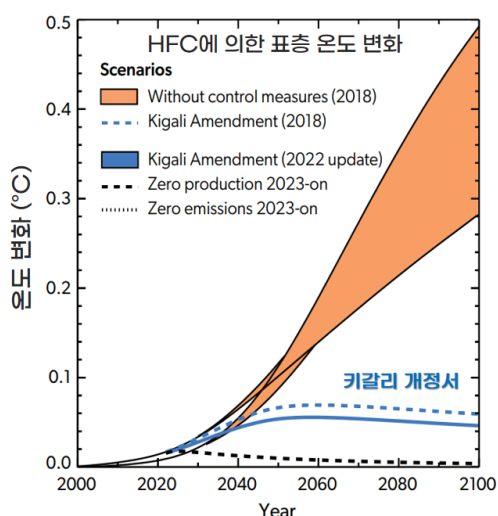


그림 2. 키갈리 개정 의정서 채택에 따른 3세대 합성 온실기체 HFCs의 규제와 예측되는 표층 온도변화(WMO, 2022)

여기서 F-gas (불소계 합성 온실기체)로 알려진 HFCs를 포함하여, PFCs, SF₆, 그리고 새롭게 추가된 NF₃들은 모두 파리협정(Paris Agreement)에 따라 UN 기후변화협약(United Nations Framework Convention on Climate Change, UNFCCC) 하에서 관리되는 합성 온실기체들로서, 파리협정은 UNFCCC 당사국들이 스스로 국가 온실가스 감축 목표(Nationally Determined Contribution, NDC)를 설정하고, 연 배출량(전체 7대 온실기체 배출을 CO₂ 기준으로 환산한 양)을 UN에 보고하도록 하는 방식으로 규제를 한다. 반면에 유엔 환경국(UN Environment Programme) 내 오존국(Ozone Secretariat)의 몬트리올 의정서나 키갈리 개정 의정서의 경우, 규제 대상 물질의 생산과 사용의 단계적 금지와

수출입 제한을 통해, 대체 기술 확보와 대체물질 개발에 대한 산업체들의 직접적인 변화 노력을 요구한다는 점에서 차이가 크다. 파리협정의 7대 온실기체 중 하나인 HFCs가 키갈리 의정서에 따라 UNEP 방식으로 규제된다는 것은 파리협정 목표 달성 측면에서도 전략적 의미가 매우 크다고 할 수 있다.

II 대기 모니터링

2.1 왜 대기 관측이 중요한가?

기후변화 대응의 핵심 요소 중 하나는 정확한 배출량(emissions 혹은 fluxes) 산정과 검증이다. 즉, 얼마나 배출했고, 얼마나 줄였으며, 실제로 대기 중 농도가 어떻게 변했는지를 정확히 알아야 한다. 현재 대부분 국가는 산업 활동자료 통계와 배출계수를 기반으로 온실기체 배출량을 산정하는 상향식(Bottom-up inventory) 방식을 사용하고 있지만, 산출방식의 한계뿐만 아니라 누락없는 배출원 확보의 어려움으로 실제 대기 중의 온실기체 농도에서 배출량을 역으로 추정하는 하향식(Top-down approach) 방식의 연구 필요성과 함께 상향식과 하향식 정보의 상호보완적 정보 활동에 대한 기대가 최근 높아지고 있다.

바로 이 지점에서 대기 모니터링의 중요성이 등장한다. 대기 관측은 단순한 연구가 아니라 국제 협약 이행 여부를 검증하는 과학적 증거 체계이다. 즉, “보고된 감축”이 아니라 “실제로 줄어든 농도와 배출”을 확인하는 과정인 셈이다.

2.2 대기 모니터링의 전략적 가치

대표적인 사례가 바로 제주도 고산에 위치한 경북대학교 온실기체 관측소이다. 국립기상과학원이 운영하는 제주고산 지구대기감시소는 동아시아 지역의 자연 및 합성 온실기체를 실시간으로 동시 연속 관측하며 동아시아 전역의 배경 대기를 감시하는 핵심 연구 인프라이다. 특히 중국 동부 산업지대와 한반도, 일본 열도를 잇는 기류의 길목에 위치해 있어, 동북아시아의 배출량 변화를 매우 민감하게 포착할 수 있다는 지리적 이점이 있다. 또한, 제주고산 지구대기감시소는 전 세계에서 가장 오래되고 규모가 큰 온실기체 관측 네트워크인 AGAGE (Advanced Global Atmospheric Gases Experiment)의 동아시아 대표 관측소이며, 미국 해양대기청(NOAA) 및 세계기상기구 지구대기감시(WMO-GAW) 네트워크와도 긴밀히 연계되어 있다. 이곳에서는 이산화탄소 및 메테인의 농도와 탄소

동위원소뿐만 아니라 극저온 농축 시스템인 Medusa와 질량분석기(GC-MS)를 결합한 첨단 분석 시스템을 운용한다. 이를 통해 60여 종 이상의 극미량 할로겐화합물 합성 온실기체들을 실시간 자동 분석할 수 있어, 국제적으로도 독보적인 가치를 인정받고 있다.

할로겐화합물 합성 온실기체들의 대기 중 농도는 이산화탄소와 비교했을 때 백만 분의 일에 불과한 ppt (part per trillion) 수준이다. 이는 공기 분자 1조 개 중 겨우 수 개에서 수백 개만 존재하는 초극미량 성분으로, 이러한 성분의 미세한 변동을 정밀하고 연속적으로 관측하는 것은 화학 분석의 관점에서 매우 정교한 기술을 요구하는 도전적인 과제이다. 현재 제주도 고산 관측소를 포함해 전 세계 AGAGE 내 10여 개의 제한된 관측지점에서만 할로겐 합성 온실기체들의 실시간 연속 시계열 모니터링이 수행되는 이유가 바로 여기에 있다.

동아시아는 세계 최대 제조업 중심지로 산업 구조가 급격하게 변화하는 중심에 있다. 특히 한국, 중국, 일본은 모두 대규모 냉매 및 반도체 산업을 보유하고 있어, 합성 온실기체 배출 관리 측면에서도 전 세계에서 가장 주목받는 핵심 지역이다. 이러한 맥락에서 제주도 고산 온실기체 관측소가 축적해 온 합성 온실기체의 장기 연속 관측자료는 단순한 농도 추세 파악을 넘어 실제 관측기반의 배출량 추정과 국제 기후협약 이행 검증에서 중추적 역할을 한다. 이처럼 고정밀·고해상도 관측자료에 대기 수송 모델을 결합한 역추정 모형(예, 경북대학교 FLEXINVERT-FLEXPART, 영국 Met office의 InTEM-NAME 등)을 적용함으로써, 특정 국가 및 산업 지역의 실제 배출량을 정량적으로 추정할 수 있게 된다(그림 3).

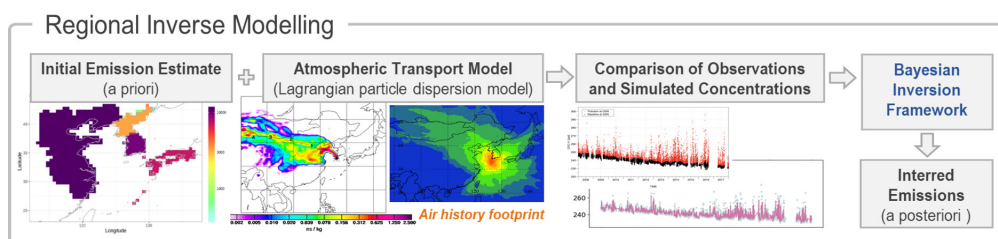


그림 3. 관측기반 역추정 모델링(inverse modeling)의 분석 체계

2.3 비보고 배출 탐지와 대기 관측의 역할

최근 온실기체 분야에서 가장 주목받은 사례 중 하나는, 2010년 이후 전 세계적으로 생산 및 사용이 전면 금지된 CFC-11(CCl_3F)의 예상치 못한 배출 증가였다. 몬트리올 의정서에 의거하여 전면 금지된 이후 대기 중 CFC-11 농도는 지속으로 감소해 왔으나, 2013년부터 그 감소 속도가 현저히 둔화하는 현상이 관측되었다. 이는 새로운 배출의 가능성을 시사한다는 점에서 학계와 국제사회의 큰 주목을 받았다(Montzka et al., 2018).

이에 따라 미스터리한 배출 증가의 원인과 배출 지역을 규명하는 것이 시급해졌고, 바로 이것이 제주고산 지구대기감시소의 장기 정밀 관측자료(그림 4)를 기반으로 한 추적 연구가 본격화한 시발점이 되었다. 관측 기반 역추정 분석에 따르면, 동아시아 지역에서의 새로운 배출 증가가 발생하고 있음이 확인되었으며, 해당 연구 결과(그림 5, Rigby et al., 2019; Park et al., 2021)는 수많은 국제 언론과 세계기상기구(WMO) 보고서 등에서 비중 있게 다루어졌다. 2014~2017년 기간 동안 나타난 CFC-11의 예기치 못한 생산·사용 사례는, 인류가 환경 문제를 해결하는 과정에서 도리어 또 다른 문제를 파생시킨 단적인 예이다. 즉, 이산화탄소 배출 저감을 위한 노력의 일환으로 신축 건물에 대한 단열재 사용이 강조되었고, 이에 따른 단열재 수요 급증이 고가의 HCFC-141b($C_2H_3Cl_2F$) 기반 발포제 대신 가격이 저렴하고 제조가 용이한 CFC-11의 생산과 사용을 초래한 것이다.

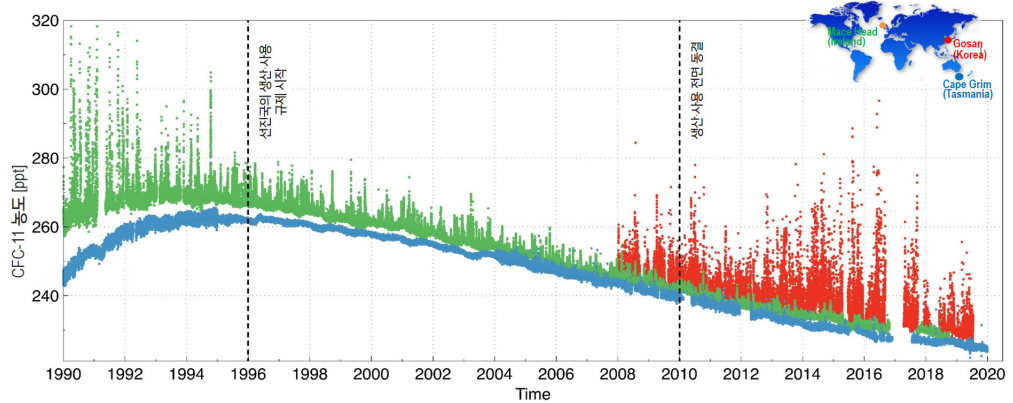


그림 4. 북반구와 남반구 배경대기와 제주도 고산 CFC-11 관측 농도의 비교

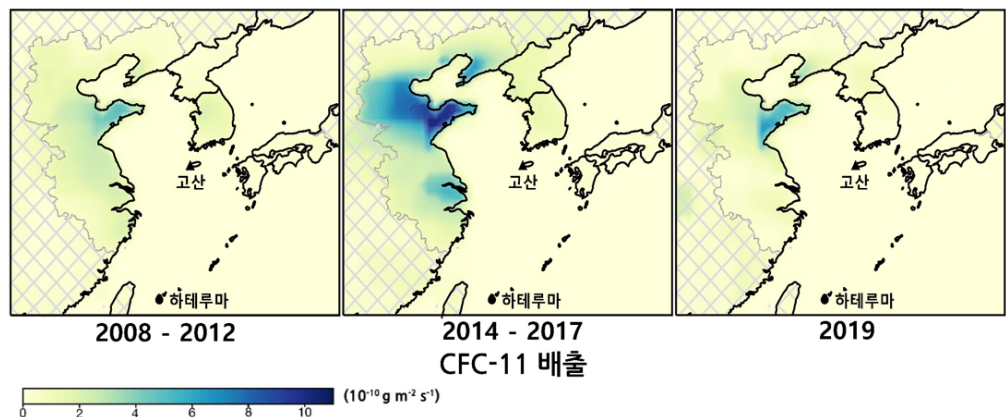


그림 5. 관측자료 기반 동아시아 CFC-11 배출의 공간 분포(2008~2019년)

제주고산 지구대기감시소에서는 CFC-11 뿐만 아니라, CFC-11 생산의 주원료인 사염화탄소 (CCl_4)와 생산과정에서 필연적으로 발생하는 부산물인 CFC-12 (CCl_2F_2)에 대한 대기 모니터링도 병행하고 있다. 덕분에 이들 성분의 대기 관측자료를 바탕으로 배출량 변동을 역추정할 수 있었으며, 세 성분의 배출량을 질량 균형(mass balance) 관점에서 종합 분석한 결과, 실제 생산된 CFC-11의 총량은 대기 중으로 방출된 양의 두 배에 달한다는 사실이 밝혀졌다(Park et al., 2021). 이 사례는 합성 온실기체의 '뱅크(banks)' 개념의 중요성을 드러냈다. 즉, 건물 단열재나 냉매 장비 내부에 잔존하는 CFCs가 향후 장기간에 걸쳐 잠재적 배출원으로 작용할 수 있음을 뜻하며, 이는 미래 기후 및 오존층 보호 정책 수립 시 반드시 고려해야 할 핵심 요소가 되었다. 다행히 2018년 이후 대기 관측 데이터에서 배출 증가세가 다시 꺾이는 추세가 확인되면서, 국가별 실제 규제 강화 및 관리 조치가 효과적으로 이행된 것으로 판단된다(그림 5).

한편, HFC-23(CHF_3)은 현재 알려진 HFC계 물질 중 가장 강력한 온실기체로, 이산화탄소 대비 약 14,700배에 달하는 지구온난화지수(GWP)를 가진다. 특정한 상업적 용도가 없음에도 주로 HCFC-22(CHClF_2) 생산 공정에서 부산물로 생성되는 특성이 있다. 이에 따라, 국제사회는 HCFC-22 제조공정 중 HFC-23 파괴·제거 기술을 적용하여, 대부분을 감축해 왔기에, 각국의 공식 배출량은 거의 '0'으로 보고되어 왔다. 그러나 실제 대기 중 농도 관측 결과에서는 지속적인 증가세가 나타나면서 미규명 배출원에 대한 우려가 깊어졌다. 최근 제주고산 지구대기감시소 자료를 기반으로 한 연구는 동아시아 지역, 특히 중국 동부지역의 배출량이 전 지구 배출량의 상당 부분을 차지한다는 실증적 결과를 제시했다(Park et al., 2023). 흥미로운 점은 이러한 HFC-23의 배출 증가가 HCFC-22 생산량 증가와 밀접하게 맞물려 있다는 사실을 밝혀낸 것이다. HCFC-22는 전통적인 냉매 용도로서의 소비는 줄어들고 있으나, PTFE(테플론, 고어텍스 등) 합성을 위한 산업용 원료(feedstock)로 수요가 다각화되면서 생산량 자체가 늘어난 것이 배출 증가로 이어진 것으로, 국가 온실기체 배출량 보고의 신뢰성에 대한 독립적인 검증이 대기 관측을 통해 이루어진 셈이다.

이러한 일련의 연구들은 대기 중 극미량 화학성분의 농도를 장기적으로 정밀 측정하고, 이를 공기 제척 수송모델과 결합하면 어느 지역에서 어떤 물질이 얼마나 배출되었는지를 명확히 추적할 수 있음을 입증했다. 이는 온실기체 대기 관측기반 과학이 단순한 학술적 탐구에 머무는 것이 아니라, 글로벌 환경 감시 체계의 핵심으로서, 국제 환경 협약의 이행 여부를 검증하고 감시하는 데 직접적으로 기여할 수 있음을 보여준 대표적인 사례였다. 결국, 대기 관측이 “보이지 않는 생산과 감춰진 배출”을 드러내는 역할을 수행한 셈이다.

2.4 한국의 합성 온실기체 배출

한국은 다양한 불소계 합성 온실기체(F-gases)를 대규모로 소비하는 산업 구조를 가지고

있다. 대표적으로 HFC-134a (CH_2FCF_3)는 차량용 냉매 시스템에 광범위하게 사용되어 왔으며, HFC-32 (CH_2F_2)와 HFC-125 (C_2HF_5)는 주거·상업용 에어컨 냉매인 R-410A의 핵심 성분으로서 장기적인 배출량 증가가 예견되어 왔다.

최근 대기 관측자료를 기반으로 한 동아시아 HFCs 연구(Choi et al., 2024)에 따르면, 한·중·일 3국의 배출 경향성의 특성을 확인한 바 있으며, 특히 한국의 대기 관측기반 HFCs 하향식(top-down) 배출량 추정값과 유엔기후변화협약(UNFCCC)에 제출된 국가 보고량(bottom-up) 사이에 상당한 격차가 존재함을 밝혔다(그림 6). 이를 통해 상향식과 하향식의 상호비교 보완연구의 필요성을 다시 한번 확인할 수 있었다.

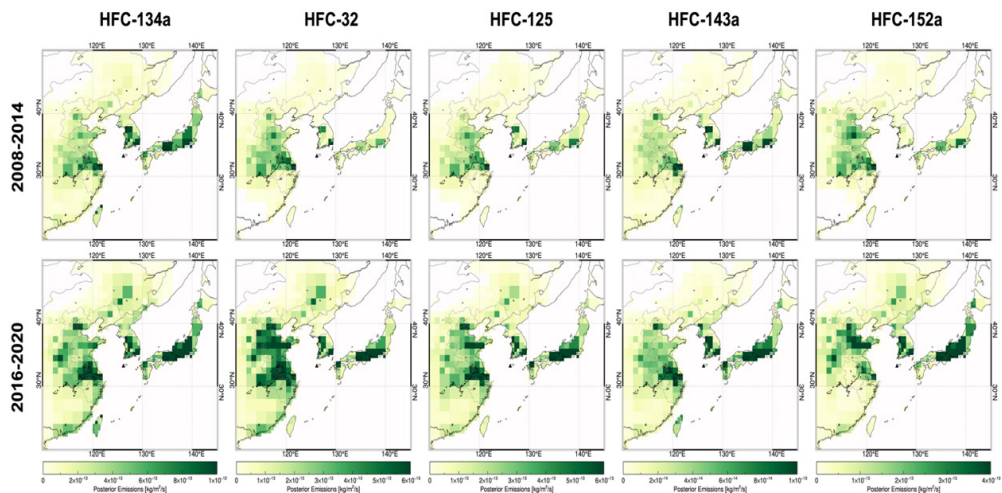


그림 6. 6종 HFCs의 대기 관측자료 기반 동아시아 배출 공간 분포(2008~2020년)

더불어 한국은 세계적인 반도체 및 디스플레이 산업 강국이라는 특성상, 공정 과정에서 삼불화질소(NF_3) 및 육불화황(SF_6)과 같은 초강력 합성 온실기체가 대량으로 배출될 우려를 동시에 안고 있다. NF_3 는 주로 반도체·디스플레이 공정의 챔버 세정가스로, SF_6 는 전력 절연 및 반도체 식각 공정 등에서 핵심적으로 활용된다. 문제는 이들 물질의 GWP가 극단적으로 높다는 점이다. 최신 대기 관측자료들은 이 물질들 역시 실제 배출량이 산업 통계 보고량보다 높을 가능성을 시사하고 있다. 결과적으로 한국은 첨단 산업의 지속적인 성장과 국제기준에 부합하는 온실기체 감축이라는 양대 과제를 동시에 달성해야 하는 고도의 정책적·기술적 전환기에 직면해 있음은 분명하다.

III 공공기관과 정책 연구자를 위한 방향성

앞으로의 기후정책은 이른바 “관측기반 정책”으로 전환되어야 한다. 단순히 산업 활동 보고자료를 취합하고 추정된 배출계수를 적용하는 통계적 방식을 넘어, 실제 대기 관측자료를 활용하여 정책의 실질적인 효과를 검증하는 체계로 나아가야 한다.

이를 실현하기 위해서는 다음과 같은 과제들이 선행되어야 한다.

첫째, 국제적 기준에 부합하는 장기 연속 관측자료를 확보할 수 있도록 지속적인 지원이 뒷받침되어야 한다. 여기서 요구되는 국제 수준의 관측 요건이란, (1) 결측이 없는 자료의 연속성과 일관성, (2) 첨단 분석 기술의 신속한 도입, (3) 국제 네트워크 공통의 보정 단위(calibration scale) 공유, 그리고 (4) 상호 비교 및 검증 체계 구축 등이다.

둘째, 캐니스터(canister) 기반의 시료 채취 및 공기 시료 장기 보관(Air archive) 체계를 구축하여, 대기 중으로 새롭게 유입되는 신물질의 탐지와 미래 관측 기술 발전에 선제적으로 대비해야 한다.

셋째, 위성, 항공기, 지상 관측을 유기적으로 통합하는 다중 플랫폼 관측 체계를 마련해야 한다.

넷째, 7대 온실기체를 구성하는 수십 종의 화학성분 전체를 완벽하게 모니터링하고 정량화할 수 있도록 분석 기술을 고도화해야 한다.

다섯째, 대기 관측과 역추정 모델링을 결합한 하향식 배출 보고-검증 시스템을 구축해야 한다. 이는 국가 온실기체 인벤토리 보고의 신뢰도를 높이는 핵심 기반이 된다.

여섯째, 합성 온실기체에 대한 국제 공동연구와 국제 표준화 작업 참여를 확대해야 한다.

특히 AGAGE 및 NOAA 네트워크와의 긴밀한 협력은 국가 과학 역량을 확보하는 측면에서도 매우 중요하다.

기후위기는 이미 현재 진행 중이며, 인류의 산업과 경제, 에너지 시스템 전반을 근본적으로 변화시키고 있다. 그리고 그 변화의 중심에는 눈에 보이지 않는 극미량 합성 온실기체들이 자리하고 있다. 우리는 오랫동안 이산화탄소의 감축에만 집중해 왔으나, 이제는 훨씬 복잡 다변화된 화학적·산업적 기후 시스템을 깊이 이해해야 하는 전환기를

맞아했다. 정확한 측정 없이는 실효성 있는 정책도 존재할 수 없다. 그런 의미에서 대기 관측은 단순한 과학 연구의 영역을 넘어, 미래 사회를 지탱할 핵심 “기후 인프라”로 인식되어야 한다. 결국 “측정할 수 없다면, 개선할 수 없다(To measure is to know)”는 켈빈 경(Lord Kelvin)의 격언이 향후 수립될 기후정책의 중요한 원칙이 되기를 바란다.

참고문헌

- Choi, H., Redington, A. L., Park, H., Kim, J., Thompson, R. L., Muhle, J., ... & Park, S. (2024) Revealing the significant acceleration of Hydrofluorocarbon (HFCs) emissions in eastern Asia through long-term atmospheric observations. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 24, 7309-7330.
- Montzka, S. A., Dutton, G. S., Yu, P., Ray, E., Portmann, R. W., Daniel, J. S., ... & Elkins, J. W. (2018) An unexpected and persistent increase in global emissions of ozone-depleting CFC-11. *Nature*, 557(7705), 413-417.
- Park, H., Kim, J., Choi, H., Geum, S., Kim, Y., Thompson, R. L., ... & Park, S. (2023) A rise in HFC-23 emissions from eastern Asia since 2015. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 23(16), 9401-9411.
- Park, S., Western, L. M., Saito, T., Redington, A. L., Henne, S., Fang, X., ... & Rigby, M. (2021) A decline in emissions of CFC-11 and related chemicals from eastern China. *Nature*, 590(7846), 433-437.
- Rigby, M., Park, S., Saito, T., Western, L. M., Redington, A. L., Fang, X., ... & Young, D. (2019). Increase in CFC-11 emissions from eastern China based on atmospheric observations. *Nature*, 569(7757), 546-550.
- Velders, G. J. M., Ravishankara, A. R., Miller, M. K., Molina, M. J., Alcamo, J., Daniel, J. S., Fahey, D. W., Montzka, S. A., Reimann, S. (2012) Preserving Montreal Protocol Climate Benefits by Limiting HFCs With no impending global controls on HFCs, the Montreal Protocol offers a near-term path to preserve its climate benefits. *Science*, 335(6071), 922-923, DOI: 10.1126/science.1216414
- WMO (World Meteorological Organization) (2018) Scientific assessment of ozone depletion: 2018. In: Global Ozone Research and Monitoring Project . Report No. 58, Geneva, Switzerland.

국제 온실가스 감시 체계 WMO IG³IS와 기상청 고해상도 온실가스 추적 시스템

홍진규 연세대학교 교수 jhong@yonsei.ac.kr

- Ⅰ 온실가스 기원 추적의 필요성과 어려움
- Ⅱ 기상청 온실가스 기원 추적 시스템
- Ⅲ 정책 활용을 위한 제언

온실가스는 기후위기의 핵심 원인으로 온실가스 배출량과 흡수량의 올바른 추적은 탄소중립 활동의 신뢰와 정당성 확보 측면에서 중요하다. 특히 기존 장부 기반 상향식 방법의 부족한 부분을 보완하고 지자체 및 기업 등의 이해당사자의 ESG 활동을 지원하기 위해서는 대기모델과 고정밀 온실가스 농도 자료의 자료동화에 기반한 하향식 방법이 유용하다. 이러한 필요성에 따라 기상청과 다양한 기관이 협력하여 국내 최초로 개발한 고해상도 온실가스 기원 추적 시스템과, 이를 지원하는 세계기상기구 WMO의 IG³IS 활동을 소개한다. 아울러 우리나라 탄소중립과 국익을 위한 온실가스 감시를 위한 제언을 제시하였다.

I 온실가스 기원 추적의 필요성과 어려움

1. 무색무취의 온실가스

인간을 포함한 생명체가 특정 물질을 악취로 인식하거나 반대로 좋은 향기로 인식하는 이유에 대한 다양한 설명 중에서 진화론적 관점에서는 악취를 위험 탐지 신호로서 설명한다. 어떤 물질에서 악취가 난다면 그 물질은 위험하니 가까이하지 말라는 강력한 경고 신호라는 것이다. 우리의 생존을 위협하는 위험 물질에서 발생한 특정 분자가 후각 수용체에 결합하여 불쾌감을 느끼는 개체들이 생존에 유리했을 것이고, 이는 자연선택을 통해서 유전되었을 것이기 때문이다. 썩은 계란 등에서 발생하여 악취가 있는 황화수소는 세포 호흡을 방해하는 독성 가스이며, 분변에서 발생하는 일부 유기화합물은 기생충 경고 역할을 하기도 한다.

온실가스는 대체로 우리 인간이 후각이나 시각으로 느낄 수 없는 색과 향이 없는 무색무취이다. 화석 연료 사용에 따른 온실가스 배출의 대부분을 차지하는 대표적 온실가스인 이산화탄소와 메탄이 대표적인 무색무취의 온실가스이다. 이산화탄소와 메탄은 지구의 역사 속에서 아주 오랫동안 우리 지구 대기에서 흔한 기체였다. 이산화탄소는 지구 태초부터 존재해왔으며, 일반 대기 농도에서는 직접 독성보다 기후영향이 핵심이지만, 밀폐공간에서 고농도가 되면 생리적 위해를 줄 수 있다. 메탄은 질식 가스이지만 자체 독성이 없고, 인류가 살아온 환경에서는 질식을 일으킬만한 고농도 상황을 마주할 일이 극히 드물었을 것이다. 더욱이 이산화탄소와 메탄은 인간의 호흡과 소화 과정에서 자연스럽게 배출하는 기체로 우리가 호흡하고 배설할때마다 나오는 이산화탄소와 메탄에 악취를 느꼈다면 우리 인류의 삶은 현재와는 매우 달라졌을 것이다. 결국 무색무취라는 온실가스의 특징은 수백만 년의 인류 진화의 역사에서 온실가스는 사실 우리 생존을 위협하는 기체는 아니라는 의미이다. 우리의 뇌는 많은 에너지를 사용하여 정보를 처리하고 있지만, 너무 많이 주어지는 정보를 모두 처리하기에는 한계가 있다. 따라서 진화의 핵심 원칙 중 하나인 생존에 필요한 정보에만 에너지를 집중한다는 관점에서 보면 이산화탄소와 메탄에서 악취를 느끼는 인류는 살아 남기가 어려웠을 것이다.

산업혁명 이후 지구 가열을 유발하는 온실가스에 악취¹⁾가 있다면, 산업혁명 이후 급격히 증가한 대기 중 온실가스 농도로 인한 악취로 전세계의 사회적 대응은 훨씬 빠르게

1) 이 글에서 말하는 ‘온실가스의 악취’는 실제 후각으로 맡을 수 있는 냄새가 아니라, 관측기기와 대기모델이 포착하는 농도 이상 신호를 비유적으로 표현한 것이다. 인간의 코는 온실가스를 감지하지 못하지만, 적외선 센서, 동위원소 분석, 대기수송모델과 자료동화 기술은 대기 중에 남은 온실가스의 흔적을 읽어낼 수 있다. 참고로 악취는 단위 부피당 악취 물질의 농도로 표현할 수 있다.

나타났을 것이다. 어서 빨리 저 냄새나는 온실가스를 치우라고 말이다. 아마도 우리는 아주 진작 탈탄소 사회를 실현하기 위한 노력을 기울였을 것이다. 온실가스의 악취는 우리가 처한 물리적 맥락과 환경을 통째로 바꿔서 우리 행동을 극적으로 변화시켰을지도 모를 일이다.

시각적으로도 태양으로부터의 복사에너지의 대부분을 차지하는 가시광선에 집중하여 물체를 식별하도록 진화한 우리의 눈은 가시광선에 비해 상대적으로 에너지가 적은 적외선과 자외선은 감지할 수 없다. 이산화탄소와 메탄은 분자 구조상 적외선 대역의 에너지를 흡수하는데, 만약 인류가 적외선을 볼 수 있는 눈을 가졌다면 이 가스들이 ‘색깔’을 가진 것으로 보였을 것이다.

2. 온실가스 농도 만으로는 알기 어려운 온실가스 배출원과 흡수원

이렇게 무색 무취인 온실가스의 성질 때문에 지금의 기후위기에 관한 가짜 뉴스가 만들어지기도 한다. 예를 들어, 인류의 화석 연료 배출로 대기 중으로 배출된 온실가스가 지구를 가열시킨다는 사실에 대해서 대기 중에 존재하는 이산화탄소나 메탄이 인간이 배출한 것인지, 식물이나 토양에서 배출된 것인지 알 수 없다는 주장이 대표적이다. 색도 없고 냄새도 없으니 알 도리가 없다는 주장은 얼핏 들으면 그럴듯해 보인다.

하지만 이는 사실과 거리가 멀다. 물리학과 화학 기술의 발전과 함께 우리는 온실가스의 색을 이용해 악취를 측정할 수 있게 되었고, 이러한 자료를 대기 모델과 자료동화 기술을 이용하여 대기과학은 그 배출원과 흡수원을 추적할 수 있는 기술을 개발하였다. 이 기술은 달에 사람을 보내는 것과는 비교할 수 없을 정도의 초정밀 기술과 첨단 기술이 결합되어있다.

온실가스의 색과 악취를 추적하는 기술은 온실가스의 색을 측정하는 것으로부터 시작한다. 가시광선 영역에서 모든 파장의 빛을 반사하는 물체는 흰색으로 보이고, 모두 흡수하면 검은색으로 보인다. 이와 유사하게 앞서 언급한 것처럼 이산화탄소와 메탄은 적외선 영역의 빛을 흡수하는데, 그 적외선 영역의 빛을 얼마나 많이 흡수하는지를 측정하는 센서를 인류는 개발했다. 그리고 온실가스 자체보다 더 극미량인 온실가스의 동위원소를 측정하여 그 온실가스가 생물에서 유래했는지 화석 연료 사용에서 유래했는지 밝혀낼 수 있는 기술을 가지고 있다. 이러한 기술을 이용하면 대기 중에 온실가스가 얼마나 많은지를(즉, 온실가스 농도: 단위 부피당 온실가스 부피) 측정할 수 있게 되고, 이를 시각화할 수 있으며 이는 온실가스의 악취를 측정하게 된다. 이러한 센서를 통해서 온실가스의 악취의 강도를 파악할 수 있는 것이다.

하지만 온실가스의 악취를 측정했다고 해서 그 온실가스가 어디서 유래되었는지를

반드시 알아낼 수 있는 것은 아니다. 이는 마치 우리가 회의를 위해 현재 회의실에 10명이 있는지, 아니면 20명이 있는지 그 숫자를 안다고 해서, 그 참석자가 어디서 출발해서 회의실에 모였는지는 알 수 없는 것과 같다. 안타깝지만 온실가스 농도인 악취 정보만으로는 그 온실가스가 어느 배출원에서 왔는지 직접 알 수 없다.

앞서 언급한 것처럼 온실가스의 동위원소는 그 출처에 관한 표시가 되어있어서, 그 온실가스가 생물 기원인지 화석 연료 기원인지는 알려줄 수 있다. 하지만 화석 연료 기원이란 것을 안다는 것은 기후변화의 원인을 파악하는 데 있어 매우 중요하지만, 탄소 중립 지원을 위한 국가 온실가스 배출량 산정이나 기업의 탄소 중립 활동 지원을 위해서는 다양한 화석 연료 배출원(예, 에너지 전환, 산업공정, 폐기물 처리 등)에서 얼마나 배출이 일어나는지 구분해야 한다. 그리고 경제 전망을 분기별로 비교하는 것처럼 분기별 경제 활동에 따른 화석 연료별 배출량을 구분하는 것도 매우 유용하다. 발전소와 같은 에너지 전환, 수송, 산업 공정, 건물 냉난방 등의 주요 배출원은 경제 활동과 연계되어, 그리고 탄소 중립 활동과 연계하여 다양한 방식으로, 다양한 시간에 걸쳐 온실가스를 배출하고, 가끔은 우리가 알지 못하는 방식으로 누출되기도 한다. 온실가스는 말이 없다, 하지만 악취를 측정한 이상, 이제는 대기 모델과 자료동화 기술이 나설 때다.

3. 온실가스 추적을 위한 하향식 방법과 상향식 방법

대기 중에 존재하는 입자는 발생원에서 대기 중으로 배출된 후에는 대기의 움직임인 바람에 의해 이동한다. 이러한 물질이 대기 수송 중에 화학 반응이 없거나 무시할 만하다면 우리는 정확한 바람 자료가 있다면 주어진 시간에 주어진 장소에 있는 온실가스가 어디서 나왔는지 이론적으로 알 수 있다. 이 방법은 하향식 방법으로 일컬으며, 크게 라그란지 방법과 오일러 방법으로 나눌 수 있다.

라그란지 방법을 이용한 온실가스 배출량 추정은 관측 지점에서 측정된 온실가스 농도 변동을 대기수송 과정과 연결해 배출원을 역산하는 접근법이다. 라그란지안 입자확산 모델을 이용해 관측 지점에서 공기 입자를 시간 역방향으로 추적하고, 각 입자가 지표면 부근 대기경계층에 체류한 시간과 위치를 계산한다. 이 정보는 관측 농도에 대한 지역별 배출 민감도, 즉 풋프린트로 해석된다. 이후 사전 배출 인벤토리와 관측 농도 차이를 베이지안 역추정 또는 자료동화 기법으로 결합해 배출량을 보정한다. 이 방법은 관측과 배출원의 source-receptor 관계를 명확히 제시할 수 있지만, 기상장, 난류 확산, 경계층 높이, 배경농도 설정, 역추적 시간 등에 따른 불확실성이 중요하다.

오일러 방법을 이용한 온실가스 배출량 추정은 대기를 고정된 3차원 격자체계로 나누고, 각 격자에서 온실가스 농도의 시간 변화를 계산하는 접근법이다. 대기질 예측에서 정확한 값을 알 수 없는 오염물 배출원의 위치와 배출 강도를 추정하는 데 오랫동안 사용되어

왔다. 화학수송모델 또는 대기수송모델은 바람장, 난류 확산, 대류권 혼합, 경계조건, 표면 플럭스를 이용해 농도장의 이류·확산·배출·흡수 과정을 해석한다. 관측 농도와 모델 농도의 차이는 사전 배출량의 오차로 해석되며, 4D-Var, 앙상블 칼만필터, 베이저안 역추정 등을 통해 격자별 온실가스 배출량을 보정한다. 이 방법은 넓은 영역의 시공간적 농도 분포와 배출량을 일관되게 산정하는 데 유리하지만, 격자 해상도, 수송모델 오차, 경계조건, 배경농도 설정에 민감하다.

이러한 하향식 방법을 사용하여 국가 수준의 온실가스 배출량을 추정하는 방법의 장점과 필요성을 언급한 세계 기상기구 WMO 보고서는 이러한 하향식 방법을 실제 적용한 독일, 미국, 호주, 뉴질랜드, 한국 등의 사례를 소개하며 그 유용성을 언급하고 있다(WMO, 2025a). 지금까지 각국의 온실가스 배출량은 연간 누적 배출량을 국가별로 보고하고 있으며, 이때 사용하는 방법은 각 배출원별로 정해진 배출계수와 기관별 회계 장부를 통해 보고하는 화석 연료 사용량에 기반하여 계산한다. 이러한 방법은 많은 장점에도 불구하고, 점점 중요해지는 지자체 단위 및 기업 등의 이해당사자의 탄소중립 노력을 지원하는 데는 보완이 필요하다. 하향식 온실가스 배출량 추정의 가장 큰 장점은 대기 중 온실가스 농도 관측을 직접 활용해 실제 배출·흡수 신호를 검증할 수 있다는 점이다. 상향식 인벤토리가 연료 사용량, 산업활동 자료, 배출계수에 의존하는 반면, 하향식 방법은 관측된 농도 변화와 대기수송모델을 결합해 배출량과 흡수량을 역산한다. 따라서 통계자료에서 누락되거나 과소평가된 배출원, 예를

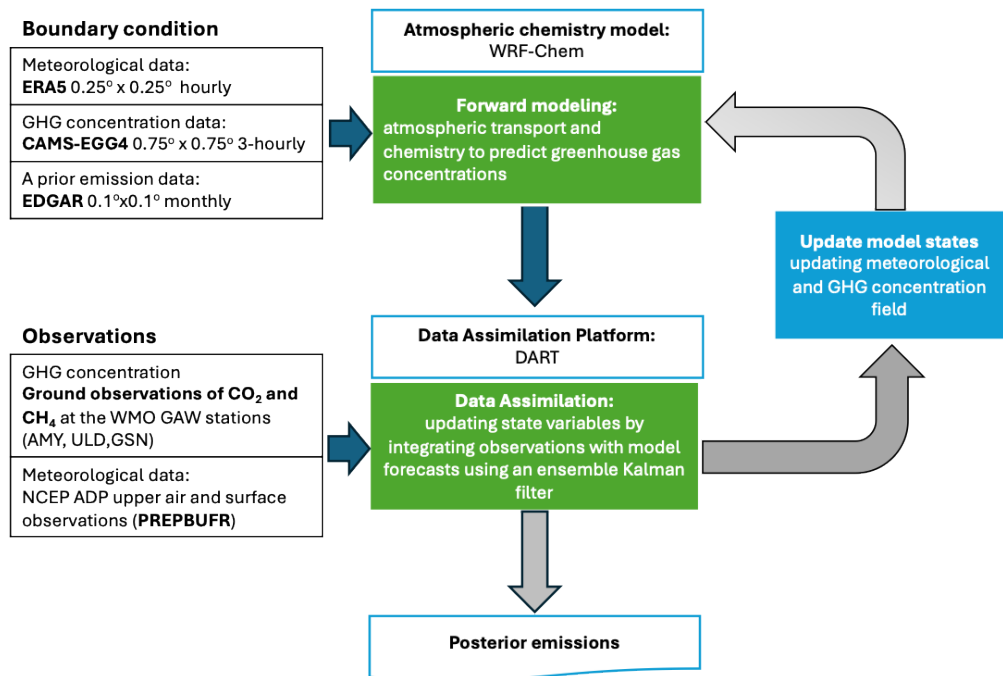


그림 1. 대기질 모형과 앙상블 칼만필터 자료 동화 기법을 통하여 온실가스 배출량을 추적하는 시스템 구조도(출처: WMO, 2025a; Hong et al., 2026)

들이 메탄 누출, 매립지, 축산 및 하수처리 배출 등을 탐지하는 데 유리하다. 또한 관측 기반으로 특정 지역이나 도시의 배출 특성을 독립적으로 평가할 수 있어, 감축 정책의 실제 효과를 검증하고 국가 온실가스 인벤토리의 신뢰성을 보완하는 데 중요한 역할을 한다. 특히 비이산화탄소 온실가스(예, 메탄, 불화가스 등)의 일시적이고 예상치 못한 누출을 탐지하는 데 있어서 큰 효용이 있다. 영국, 뉴질랜드 등에서는 상향식과 하향식 방법을 사용하여 각 방법의 결과에 대한 신뢰를 높이고 국가의 이익을 극대화하고 있다.

II 기상청 온실가스 기원 추적 시스템

1. 하향식 검증 체계의 국제적 표준: WMO IG³IS

세계기상기구(WMO)의 IG³IS (Integrated Global Greenhouse Gas Information System, 통합 전지구 온실가스 정보 시스템)는 대기 중 온실가스 관측 자료를 활용해 실제 배출원과 흡수원을 과학적으로 추적하고, 이를 기후정책에 활용하기 위한 국제적 정보 체계이다. 기존의 온실가스 인벤토리는 연료 사용량, 산업활동 통계, 배출계수 등을 바탕으로 배출량을 계산하는 ‘상향식’ 방식에 주로 의존한다²⁾. 반면 IG³IS는 지상 관측소, 위성, 항공기, 타워 관측 등에서 얻은 대기 중 온실가스 농도 자료와 기상·대기수송 모델, 역모델링 기법을 결합해 실제 대기에서 확인되는 배출과 흡수의 위치와 규모를 추정한다.

IG³IS의 목적은 기존 인벤토리를 대체하는 것이 아니라, 이를 독립적으로 검증하고 보완하는 데 있다. 특히 앞서 언급한 것처럼 메탄같은 비이산화탄소 온실가스처럼 배출원이 공간적으로 불균일하고, 누출 및 축산 과정, 폐기물 및 하수 처리 등에서 갑작스럽게 많이 배출될 수 있는 온실가스는 통계 기반 인벤토리만으로 정확히 파악하기 어렵다. IG³IS는 이러한 누락 배출원이나 과소평가된 배출원을 찾아내고, 감축 정책이 실제 대기 중 농도 변화로 이어졌는지 확인하는 데 중요한 역할을 한다. 이 체계의 중요성은 파리협정 이후 더욱 커졌다. 각국은 온실가스 감축목표를 제시하는 것뿐 아니라, 그 이행 결과를 투명하게 보고하고 검증받아야 한다. IG³IS는 이러한 국제적 투명성 체계를 과학적으로 뒷받침한다. 또한 국가 단위뿐 아니라 도시, 산업단지, 매립지, 축산지역, 산림, 농경지 등 지역 및 시설 단위의 배출과 흡수를 분석할 수 있어 탄소중립 정책의 실효성을 높이는 데 기여한다.

2) <https://ig3is.wmo.int/site/integrated-global-greenhouse-gas-information-system-ig3is>

다만 IG³IS가 모든 문제를 해결하는 것은 아니다. 관측망이 부족하거나 대기수송 모델의 오차가 크면 배출량 추정의 불확실성도 커진다. 따라서 IG³IS 결과는 하나의 확정값이 아니라 불확실성 범위를 가진 과학적 증거로 해석해야 한다. 그럼에도 IG³IS는 온실가스 감축을 단순한 선언이 아니라 관측과 모델로 검증 가능한 과학적 관리 체계로 바꾸는 핵심 기반이라고 할 수 있다.

2. 기상청 고해상도 온실가스 추적 시스템

기상청의 연구개발 투자와 국립기상과학원, 한국환경연구원, 포항공과대학교, 연세대학교 미기상학 연구실의 협력을 통하여 개발되어 2025년 기상청 슈퍼컴퓨터에 설치된 하향식 온실가스 추적시스템은 한국의 복잡 지형을 고려하는 오일러 기반의 추적 방식으로 그 의미가 매우 크다 (그림 1). 이 하향식 고해상도 온실가스 기원 추적 시스템은 국내 최초이며, 독자 기술 개발된 고해상도 온실가스 기원 추적과 농도 추정이 동시에 가능한 시스템으로, 역시 마찬가지로 국내 최초로 하향식 방법을 통하여 섹터별 연간 배출량과 3차원 농도장을 산정하는 단계에 이르렀다(그림 2-4) (WMO, 2025a; Hong et al., 2026). 대기질 예측에서 오염물 배출원을 추정하는 방법과 유사한 오일러 방법은 온실가스 농도 지도도 추가로 제작할 수 있으며, 온실가스 배출량 변화, 기상장 변화, 식생 흡수량 변화가 한반도 온실가스 농도 변화에 각각 어느 정도 기여했는지 추정할 수 있게 해준다. 무색무취의 온실가스의 색을 입히고 악취를 추적하여 그 발생원을 찾아내는 것이다.

그 근간은 대기화학 및 수송 모형인 WRF-Chem과 자료동화 플랫폼인 DART으로 앙상블 칼만 필터를 적용하여 공간해상도 9km로 기상청에서 안면도, 제주 고산, 울릉도/독도에서 수행하고 있는 초정밀 이산화탄소와 메탄 농도 측정 자료를 자료동화하여 최적화된 온실가스 배출량을 산정한다. 이 온실가스 추적 시스템은 먼저 ERA5 기상자료, CAMS 온실가스 농도장, EDGAR 사전 배출량 자료를 경계조건과 초기 입력자료로 사용해 WRF-Chem 기반의 대기 화학 수송 모델을 구동한다(그림 1). 모델은 대기 중 CO₂와 CH₄ 농도의 이동, 혼합과 확산 과정을 전방 모의한다. 이후 WMO GAW 관측소의 CO₂와 CH₄ 관측자료와 NCEP 기상 관측자료가 DART 자료동화 플랫폼에 입력되어 기상장과 온실가스 농도를 동시에 자료동화한다. DART는 앙상블 칼만필터를 이용해 모델 예측값과 관측값의 차이를 줄이도록 기상장과 온실가스 농도장을 갱신한다. 이렇게 보정된 모델 상태는 다시 WRF-Chem에 반영되며, 반복적인 모델링과 자료동화를 통해 최종적으로 사후 배출량을 산출한다. 특히 우리나라의 복잡한 지형 및 지표 특성을 고려하는 독자 모수화 기술을 접목하여 온실가스 확산에 영향을 주는 대기경계층의 확산 과정의 오차를 개선하여 온실가스 추적의 신뢰를 높였다(Lee et al., 2020).

이 국가연구개발 프로젝트는 고해상도 온실가스 추적 시스템 개발에만 머무르지않은

않는다. WMO IG³IS 등에서 권고하는 온실가스 추적 시스템 개발과 이를 기반으로 한 국내 탄소 순환 자료 생산을 위해 다양한 기술을 개발하고 적용하여 우리나라 온실가스의 배출원과 흡수원을 과학적으로 이음새없이(seamless) 감시 및 평가하는 것을 목표로 한다(표 1). 특별히 이 국가연구개발과제의 중요한 특징은 국지 규모에서 국가 규모까지 연결되는 다중 규모 분석 체계를 갖추고 있다는 점이다. 초고해상도 하향식 온실가스 추적 시스템은 WRF-Chem/DART가 담당하고, 앙상블 칼만 필터가 결합된 GEOS-Chem 전구 화학 모델은 전지구 이산화탄소 및 메탄 거동을 수치모사하며 동아시아는 25km 해상도 수준으로 역모델링을 통한 온실가스를 추적하는 시스템이다(WMO, 2025b; Do et al., 2026).

- 1) 국지 및 근린(neighborhood) 규모: 도시숲과 인구 밀집 도심 지역에서 에디공분산 관측을 수행하고, AI를 활용하여 도시 내부에서 탄소 흡수와 배출이 시간과 공간 변동성 분석
- 2) 도시 및 국가 규모: 초정밀 초고층 타워 관측과 WRF-Chem/DART를 이용한 도시 탄소 순환 분석
- 3) 동아시아 및 전구 규모: WRF-Chem/DART 기반의 하향식 온실가스 추적 시스템뿐만 아니라 GEOS-Chem과 앙상블 칼만 필터 기반의 하향식 온실가스 추적 시스템의 다중 추적 체계

이러한 이음새없는 추적 기술은 기상청 고정밀 온실가스 관측 자료 등을 활용하여 온실가스의 3차원 대기 수송과 이산화탄소, 메탄, 육불화황(SF₆)의 배출과 흡수 과정을 물리적으로 일관되게 추정할 수 있으며, 기존 상향식 배출 인벤토리에만 의존하지 않고, 실제 대기 중 CO₂와 CH₄ 농도 관측자료를 이용해 배출량을 독립적으로 검증하고 보완하는데 활용할 수 있는 체계를 구축하였다. 장기간의 연구개발의 성과로 개발된 이 기술은 궁극적으로 단순한 온실가스 농도 관측 뿐만 아니라, 국지 관측, 도시 플럭스 분석, 국가 규모 역모델링을 연결하는 한국형 온실가스 MMRV (Monitoring, Measurement, Reporting, and Verification) 기반 기술이다. 이는 탄소중립 정책의 효과를 관측 기반으로 검증하고, 메탄 등 비이산화탄소 온실가스의 누락 배출원을 찾아내며, 국가 및 지자체 온실가스 인벤토리의 신뢰성을 높이는 데 필요한 중요한 과학적 기반을 제공할 준비가 완료되었다. 다양한 부처에서 추진 중인 적절한 초정밀 관측 자료 네트워크와 비교정 플랫폼에서의 관측 자료와 적절한 통합 체계가 구축된다면 도시 및 산업지역의 세부 배출 특성뿐 아니라 한반도 전체의 시간별 배출량, 기존 인벤토리의 편차와 불확실성을 평가할 수 있다.

표 1. 기상청 국가연구개발과제로 구축한 온실가스 추적 체계

공간규모	방법론	비고
국지 및 근린 규모	에디공분산 방법, AI 및 통계기법	CO ₂ , CH ₄
도시 및 국가 규모	WRF-Chem/DART (9km), 위성자료 (10km)	CO ₂ , CH ₄ , SF ₆
동아시아 및 전구 규모	WRF-Chem/DART (9km), GEOS-Chem/EKF (25km)	CO ₂ , CH ₄ , SF ₆

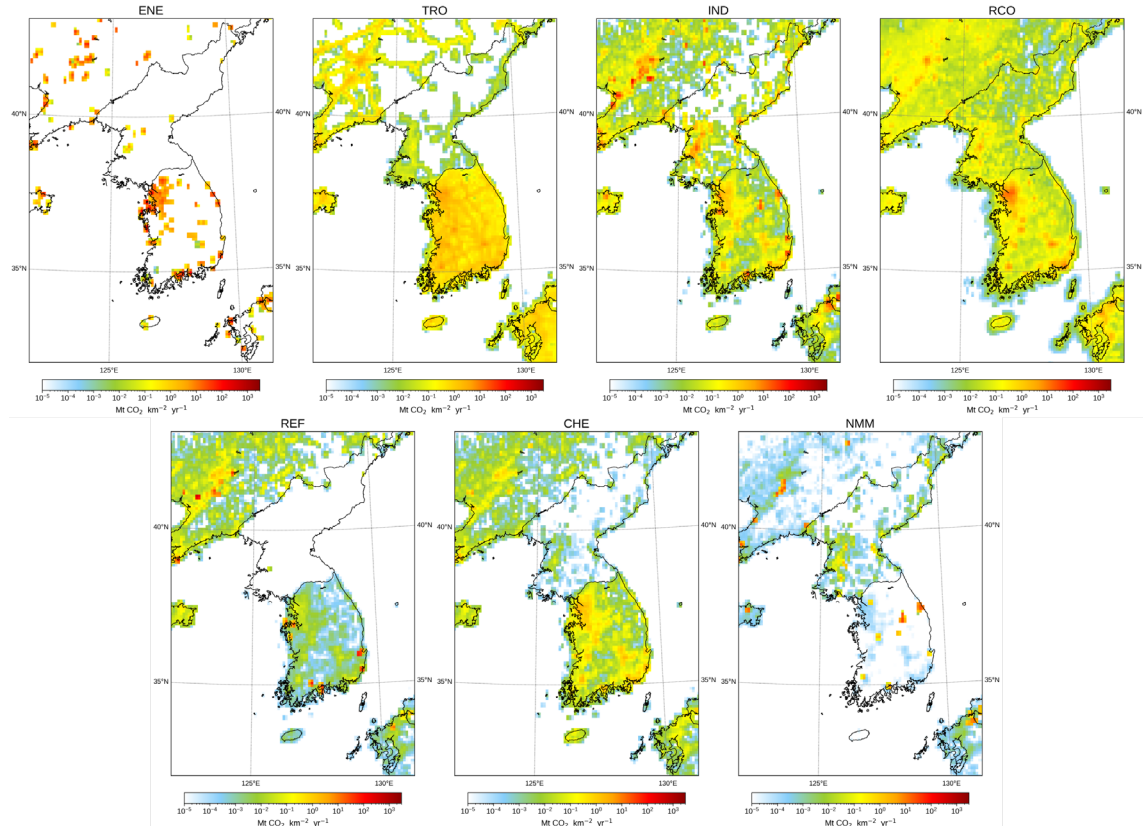


그림 2. WRF-Chem/DART 기반 하향식 온실가스 추적 시스템을 이용하여 추정한 2020년 섹터별 이산화탄소 연간 배출량 지도(출처: Hong et al., 2026). 섹터별 약자는 Hong et al. (2026) 참조

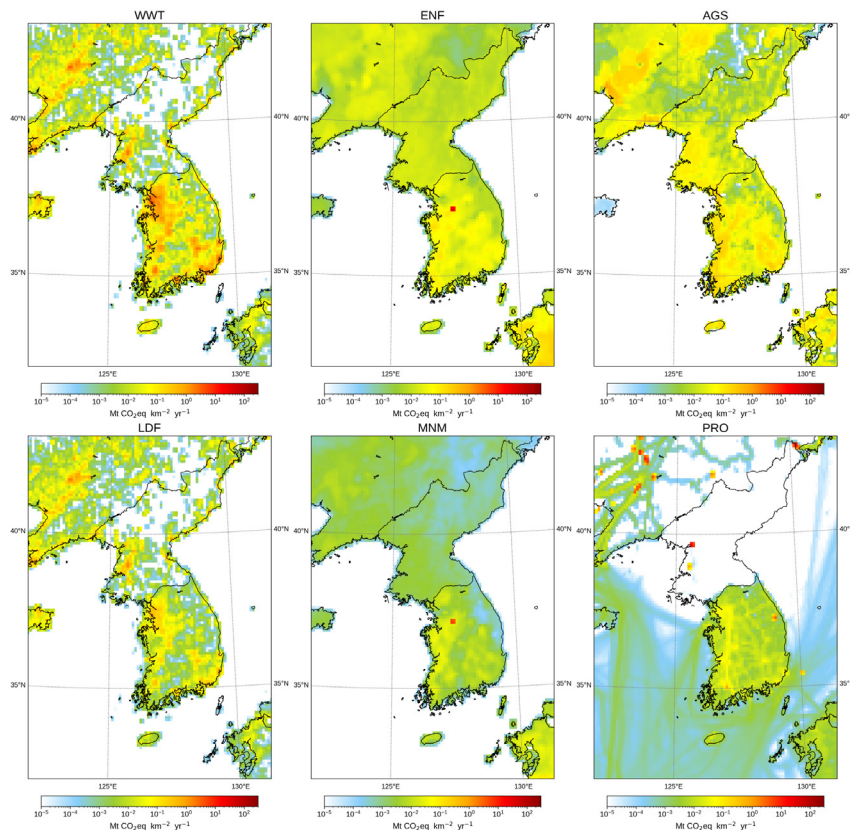


그림 3. WRF-Chem/DART 기반 하향식 온실가스 추적 시스템을 이용하여 추정한 2020년 섹터별 메탄 연간 배출량 지도 (출처: Hong et al., 2026). 섹터별 약자는 Hong et al. (2026) 참조

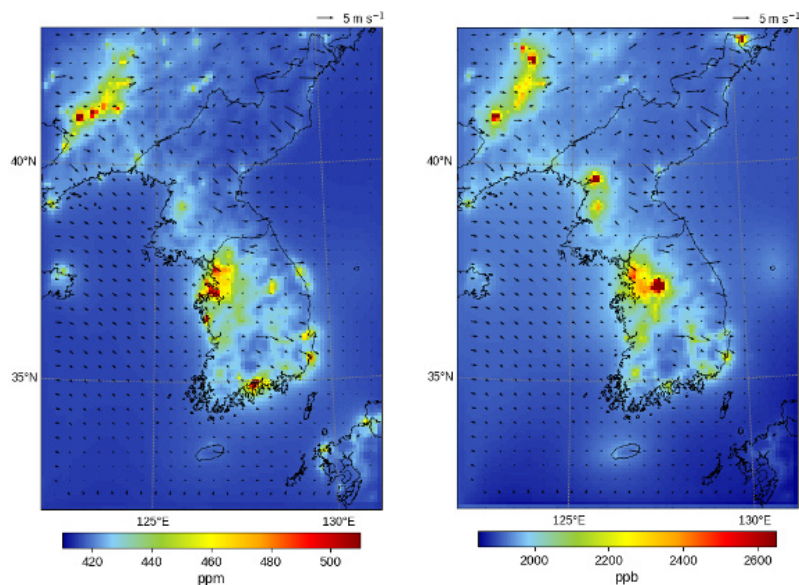


그림 4. 기상청 고해상도 하향식 온실가스 추적 시스템으로 계산한 2020년 연평균 CO₂농도 (좌)와 CH₄농도 (우)와 바람 벡터(화살표)

III 정책 활용을 위한 제언

온실가스 MMRV는 단순한 배출량 보고 체계를 넘어, 국가 탄소중립 정책의 효과를 과학적으로 검증하고 개선하는 순환형 관리 체계로 발전해야 하고, 우리나라의 온실가스 관리의 국제적 신뢰성을 높이도록 작동해야 한다. 지금까지 우리나라의 온실가스 산정은 주로 연료 사용량, 산업활동 통계, 배출계수에 기반한 상향식 인벤토리에 의존해 왔다. 이 방식은 국가 보고의 기본이고 유용한 체계이지만, 도시, 산업단지, 축산, 폐기물, 산림 등 복잡한 배출원과 흡수원의 시공간 변동성, 그리고 메탄과 같은 간헐적·누출성 배출을 충분히 반영하기 위해서는 추가 방법과 결과가 필요하다. 따라서, 앞으로의 MMRV는 상향식 인벤토리와 관측 기반 하향식 검증 체계를 결합해야 한다. 이러한 하향식 접근은 사전 인벤토리의 오차를 정량적으로 평가하고, 누락 배출원이나 과소평가된 배출 부문을 찾아내는 데 핵심적인 역할을 할 수 있기 때문이다. 우리나라 탄소중립 정책의 실효성과 국제적 정당성을 확보하고 국가 이익을 극대화하기 위해 다음 세 가지 사항을 제언한다.

1. 상향식 인벤토리 방법과 하향식 방법의 통합 및 Tier 3 배출 계수 고도화

특히 하향식 방법은 국내 온실가스 배출량 산정에서 주요 선진국에 비해 부족한 Tier 3 수준의 국가 고유 배출계수와 배출모델을 구축·검증하는 데 중요한 근거를 제공할 수 있다. Tier 3 체계는 단순한 기본 배출계수 적용을 넘어, 국가별 활동 특성, 시설 운영 조건, 계절성, 기술 수준, 관리 방식 등을 반영한 고도화된 산정 방법을 요구한다. 이렇게 산출한 배출 계수가 하향식 방법으로 추정된 온실가스 배출량과 실제 대기 중 농도 변화와 일치하는지는 독립적 검증이 이루어진다면 국가의 온실가스 배출 체계의 완결성 및 신뢰성에 크게 기여할 수 있는 것이다. 즉 관측 기반 하향식 방법의 결과는 발전소, 산업공장, 건물 냉난방, 교통, 축산, 매립지, 산림 흡수원 등 부문별 배출계수의 적정성을 평가하고, 특정 부문에서 체계적 과소 또는 과대 산정이 있는지 확인하고 보완할 수 있으며, 특히 과다 산정된 배출 계수를 보정하는 것은 국익에 기여할 수 있다. 이런 의미에서 기상청 국가연구개발 과제로 개발된 하향식 온실가스 추적 시스템과 각종 미기상학 관측 기술은 국지-도시-국가 규모를 연결하는 이음새없는 대기 관측 및 자료동화 기반 시스템은 한국형 MMRV의 핵심 인프라가 되어야 하만 하며 부처간 협력의 새로운 롤모델이 될 수 있다. 이는 배출량을 하나의 숫자로 확정하는 체계가 아니라, 불확실성을 정량화하고, Tier 3 배출계수와 국가 인벤토리를 지속적으로 개선하며, 정책 감축 효과를 검증하는 과학적 사회 기반으로 기능해야 한다.

2. OSSE 기반의 전략적이고 최적화된 관측망 설계

많은 장점에도 불구하고 하향식 방법은 과학기술적으로 그리고 사회제도적으로 개선하고 보완해야 할 점도 있다. 하향식 방법은 만능은 아니며, 오일러 및 라그란지 방법은 각각의 장단점이 존재하고, 상향식 방법의 장점도 많다. 이렇게 서로 다른 방법은 우리나라 국익에 기여하는 탄소 중립이라는 하나의 목표를 지원하기 위해서 서로 보완하고 협력할 수 있는 체계가 필요하다. 그리고 아무리 많은 온실가스 농도 관측소를 만든다고 해도, 복잡하고 좁은 우리나라의 지형과 토지 피복 상황을 모두 고려할 수 없다는 점을 고려할 때, 온실가스 농도 관측소를 늘리는 것은 신중히 개발된 하향식 방법 체계를 활용한 OSSE (Observing System Simulation Experiment)을 통해 결정되어야 한다. 특히 온실가스 기원 추적은 극미량의 온실가스 농도를 정확하게 측정해야 하고, 추가적으로 이렇게 매우 작은 극미량의 농도보다 훨씬 작은 농도의 변화도 측정할 수 있을 때만 그 온실가스 농도의 변화를 만들어낸 온실가스 발생 장소와 흡수 장소의 위치와 시간을 더욱 정확하게 특정지을 수 있다. 따라서 이러한 온실가스 관측소는 관리와 운영을 위한 전문 인력 및 유지 비용이 크기 때문에 관측소 선정에 있어서 다양한 전문가와 이해당사자의 협력이 이루어져야 한다.

3. 오픈 생태계 중심의 범부처 협력 모델 구축

현재 여러 정부 부처로 파편화되어 있는 온실가스 관측 체계와 데이터를 상호 투명하게 공개하고 공유하는 오픈 생태계가 마련되어야 상향식 방법과 하향식 방법의 장점을 극대화할 수 있다. 서로 다른 정부 부서로 나누어져 있는 관측 체계를 서로 공유하고, 기상청의 하향식 온실가스 추적 시스템을 범부처 표준 MMRV 인프라로 활용한다면 국가 탄소중립 비용 절감에 기여하고, 탄소 중립 활동에서 우리나라의 국제적 위상을 크게 높일 수 있을 것이며 새로운 정보 생산을 통하여 탄소 중립의 공론화 과정에도 기여할 수 있다.

참고문헌

- Do, S., C. Shim, J. Seo, S. Li, D. Shin, S. Joo, and S. Kim, and J. Hong, 2026: Evaluation of model-simulated atmospheric methane over South Korea using ground-based and aircraft observations, *Environmental Monitoring and Assessment*, 198, 426. <https://doi.org/10.1007/s10661-026-15220-5>
- Hong, J., C. Shim, B. Koo, D. Kwon, E. Saikawa, and A. Avramov, 2026: Datasets for top-down estimates of sectoral CO₂ and CH₄ emissions, terrestrial and ocean carbon exchange, and atmospheric concentrations over the Korean Peninsula, *Data in Brief*, <https://doi.org/10.1016/j.dib.2026.112868>.
- Lee, J., J. Hong, Y. Noh, and P. Jiménez, 2020: Implementation of a roughness sublayer parameterization in the Weather Research and Forecasting model (WRF version 3.7.1) and its validation for regional climate simulations, *Geoscientific Model Development*, 13, 521-536.
- World Meteorological Organization, 2025a: Integrated Global Greenhouse Gas Information System Good Practice Guidance for Estimating National-scale Greenhouse Gas Emissions using Atmospheric Observations, 2025 Edition, GAW Report No. 319.
- World Meteorological Organization, 2025b: Integrated Global Greenhouse Gas Information System: Urban Emission Observations and Monitoring Good Research Practice Guidelines, 2025 Edition, GAW Report No. 314.

포커스

지구대기감시의 중요성과 국내 인프라 소개 / 김수민(국립기상과학원 기상연구관)



지구대기감시의 중요성과 국내 인프라 소개

김수민 국립기상과학원 지구대기감시연구과 기상연구관 sulla@korea.kr

- Ⅰ 지구대기감시의 의미: 지구의 맥박을 잴다
- Ⅱ 지구대기감시가 정책으로 이어진 사례
- Ⅲ 우리나라 지구대기감시 인프라
- Ⅳ 지구대기감시 기반의 국제 협력
- Ⅴ 지구대기감시 강화를 통한 정책 지원

자연이 끊임없이 변화하는 것은 안정을 찾아가는 과정이다. 그러나 자연스럽지 않은 기후변화로 인해 이상기후가 잦아지고 있다. 기후변화에 관한 정부간 협의체(IPCC)는 그 원인을 과학적인 근거로 분석했고, 이를 바탕으로 미래가 어떻게 변할지 시나리오를 제공했다. IPCC 보고서가 AR1에서 AR6에 이르기까지 집요하게 확인한 것은 인위적인 배출이 지구의 온도를 상승시키며 기후변화를 일으키고 있다는 과학적 사실이다. 이 과학적 사실은 '정확한 관측'을 바탕으로 하며, 관측결과의 시간과 공간을 확장하고 여러 조건을 가정하여 미래 상황을 대비하는 출발선이 된다. 지구 공동체가 온실가스를 감축하면 그 결과는 대기중에 반영되기 때문에 일관된 방법과 품질로 계속 관측하는 것이 중요하다. 기상청은 30여 년 동안 정확한 관측의 기본을 한결같이 지켜왔고, 국제 협력을 통해 우리나라와 전지구 기후변화 현황을 진단하는 데 기여하고 있다. 앞으로도 탄소중립과 기후변화 대응의 정책을 적극적으로 지원하기 위해 지구대기감시를 꾸준히 강화해나갈 것이다.

I 지구대기감시의 의미: 지구의 맥박을 켜다

1. 지구대기감시의 중요성

1979년 제임스 러브록(James Lovelock)은 저서 『가이아(Gaia: A New Look at Life on Earth)』에서 지구를 대기, 해양, 생물권이 상호작용하며 스스로 환경을 조절하는 하나의 시스템으로 설명하였다. 그는 NASA의 화성 생명체 탐사 연구에 참여하면서 화성이나 금성의 대기는 화학평형 상태에 가깝지만, 지구 대기는 열역학적 평형에서 매우 멀리 떨어져있다는 점을 주목했다. 즉, 지구 대기에 산소와 메탄이 동시에 존재하는 것이 생명체가 지구대기의 조성을 지속적으로 유지하고 있는 증거로 해석했다. 산소(O_2)와 메탄(CH_4)은 화학적으로 반응하여 이산화탄소(CO_2)와 물(H_2O)로 바뀐다. 그런데 지구 대기는 식물의 광합성이 산소를 공급하고 습지, 토양미생물, 반추식물 등이 메탄을 공급하기 때문에 산소와 메탄이 오랜시간 동시에 존재하고 있는 것이다. 이러한 이유로 러브록은 대기를 관측하면 지구 시스템의 상태를 읽을 수 있다고 보았다. 오늘날의 지구대기감시는 이러한 생각을 실제 관측체계로 구현한 것이라 할 수 있다.

우리가 건강관리를 위해 체온, 혈압, 심박수와 같은 건강지표를 지속적으로 확인하듯이, 지구의 상태를 이해하기 위해서는 핵심 기후변수를 꾸준히 관측해야 한다. 온실가스, 에어로졸, 성층권 오존, 대기복사와 같은 요소들은 지구의 현재 상태와 변화를 가장 직접적으로 보여주는 신호이다. 지구대기감시는 곧 지구의 맥박을 읽는 과정이다.

2. WMO 지구대기감시 프로그램(GAW)

세계기상기구(WMO)는 1989년부터 지구대기감시(Global Atmosphere Watch, GAW) 프로그램을 운영하고 있다. GAW는 온실가스, 성층권 오존, 에어로졸, 반응가스 등을 국제 표준에 따라 관측하고 품질을 관리하는 전 지구 대기 관측체계이다.

현재 전 세계 800여 개 이상의 관측소가 GAW 네트워크에 참여하고 있으며, 지구급(Global)과 지역급(Regional) 관측소로 구성되어 있다. GAW의 핵심은 ‘정확성’과 ‘일관성’이다. 세계 곳곳에서 관측하더라도 동일한 기준으로 자료를 생산해야 지구환경 변화를 정확하게 이해할 수 있다.

WMO/GAW는 표준가스, 국제비교관측, 세계표준센터 운영 등을 통해 자료의 일관성을 확보하고 있다. 기상청 또한 국제 표준에 따라 관측과 품질관리를 수행하며 생산된 자료를 세계자료센터에 제공하고 있다. 특히 기상청은 온실가스 중 육불화황(SF_6) 세계표준센터를 운영하며 국제 품질관리 체계에 기여하고 있다.

이처럼 지구대기감시는 지구환경의 변화를 읽는 과학적 기반이며, 그 가치는 실제 국제환경정책으로 이어진 사례에서 더욱 분명하게 확인된다.

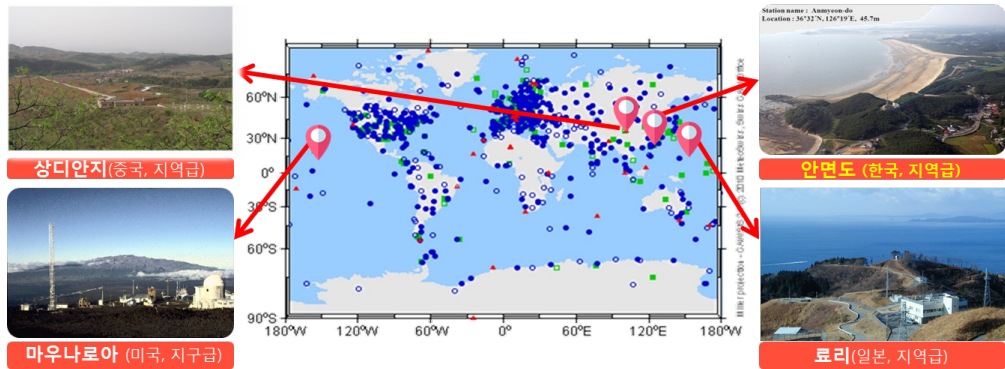


그림 1. WMO GAW 관측소 현황

기후변화는 국경을 구분하지 않는다. 어느 국가에서 배출된 온실가스과 에어로졸도 대기 순환을 통해 전 지구에 영향을 미친다. 따라서 세계 각국이 동일한 기준으로 생산한 장기 관측자료를 공유해야만 지구환경의 변화를 정확하게 이해할 수 있다.

오랜 기간의 관측자료를 볼 때 가장 중요한 것은 자료의 일관성이다. 수십 년에 걸친 관측에서는 장비와 분석 기술이 발전하더라도 자료의 연속성이 유지되어야 변화를 제대로 읽어낼 수 있다.

WMO/GAW는 표준가스, 국제비교관측, 세계표준센터 운영 등을 통해 전 세계 자료의 일관성을 확보하고 있다. 기상청 또한 국제 표준에 따라 관측과 품질관리를 수행하며, 생산된 자료를 세계자료센터에 제공하고 있다. 특히, 기상청은 온실가스 중 육불화황(SF_6)의 세계표준센터를 운영하고 있어 SF_6 뿐만 아니라 이산화탄소(CO_2), 메탄(CH_4) 등의 다른 요소뿐만 아니라 에어로졸 등의 다른 분야에 대해서도 GAW의 품질관리 체계를 현장에 적용하고 있다.

II 지구대기감시가 정책으로 이어진 사례

1. 온실가스가 보여주는 기후변화의 증거

대기 중 이산화탄소와 메탄 농도는 인간 활동의 영향을 가장 직접적으로 반영한다. 화석연료 사용과 산업활동, 농축산업의 확대는 온실가스 농도를 증가시키며, IPCC는 관측자료를 기반으로 온실가스의 지속적인 증가가 지구온난화의 주요 원인이라는 결론에 이르렀다.

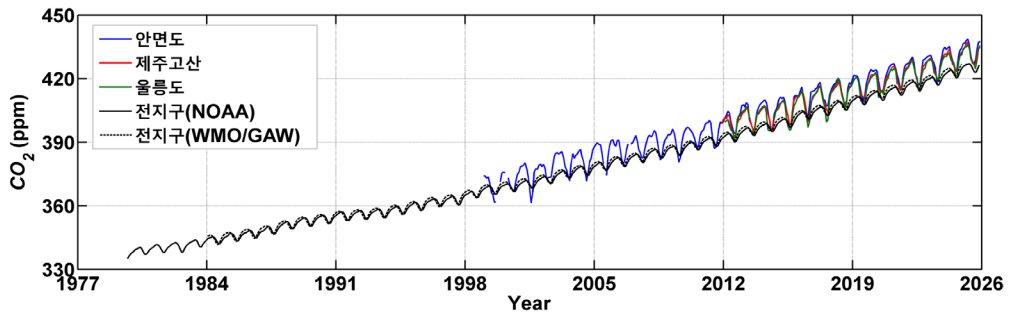


그림 2. 전지구와 우리나라의 대기중 이산화탄소 농도 변화 시계열

표 1. 전지구와 우리나라 주요 온실가스 농도 현황

구분	미국해양대기청(NOAA) (전지구)			우리나라(안면도)		
	CO ₂ [ppm]	CH ₄ [ppb]	N ₂ O[ppb]	CO ₂ [ppm]	CH ₄ [ppb]	N ₂ O[ppb]
2025년 평균	425.6	1936	338.9	434.0	2028	341.4
전년 대비 증가값	2.8	6	1.2	3.0	-2	1.8
10년 평균 증가율	2.6	10	1.1	2.6	10	-

※ 산업화 이전 농도: CO₂ 278.3ppm, CH₄ 729.2ppb, N₂O 270.1ppb

2. 성층권 오존과 염화불화탄소(CFCs)가 알려준 교훈

지구대기감시의 가치를 가장 잘 보여주는 사례는 성층권 오존층과 염화불화탄소(CFCs)이다. 1980년대 장기 관측자료는 남극 상공에서 오존층이 급격히 감소하고 있음을 보여주었다. 과학자들은 CFC가 성층권에서 오존을 파괴한다는 사실을 규명하였고, 국제사회는 1987년 몬트리올 의정서를 채택하여 CFC 사용을 단계적으로 규제하였다.

이후 수십 년간의 지구대기감시 자료는 대기 중 CFC 농도가 감소하고 있으며 오존층

또한 점진적으로 회복되고 있음을 보여주고 있다(WMO, 2022). 이는 정확한 관측이 환경문제를 발견하고, 정책 수립을 가능하게 하며, 정책 효과를 검증한 대표적인 사례이다.

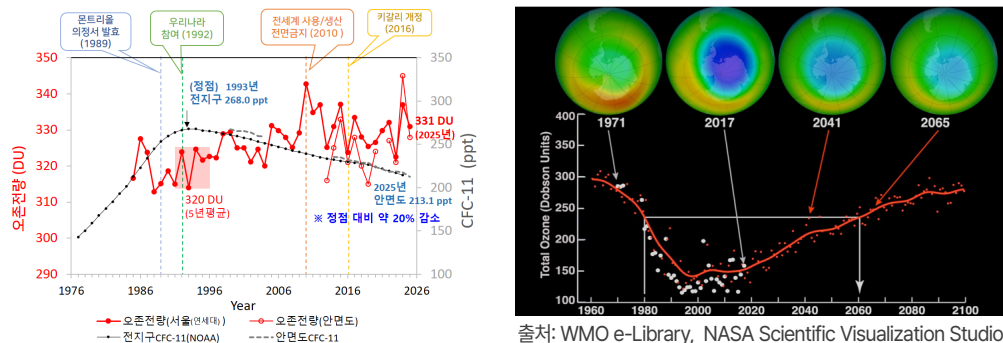


그림 3. CFC-11 농도변화와 성층권 오존농도 변화(좌), 성층권오존 농도 예측(우)

3. 관측에서 정책 검증으로

오늘날 지구대기감시의 역할은 단순한 농도 측정을 넘어 정책 효과를 평가하는 단계로 발전하고 있다. 온실가스 감축 정책이 성공한다면 대기 중 온실가스 증가율은 변화할 것이며, 대기오염 저감 정책은 에어로졸과 복사수지의 변화로 나타나고 기온의 변화로 이어질 것이다. 결국 정책의 성과는 대기 중에 기록되며, 지구대기감시는 그 변화를 가장 먼저 확인하는 과학적 수단이다.

III 우리나라 지구대기감시 인프라

1. 지역급 GAW 관측소

기상청은 안면도, 제주고산, 울릉도·독도, 포항에서 지구대기감시를 수행하고 있다. 안면도와 제주고산은 동북아시아에서 유입되는 공기를 감시하고, 울릉도·독도는 한반도를 지나 동해로 이동하는 공기를 감시한다. 포항은 성층권 오존과 자외선의 장기 변화를 관측하고 있다(국립기상과학원, 2026).

이들 관측소는 모두 WMO 지역급 GAW 관측소로 등록되어 있으며, 생산된 자료는 국제사회와 공유되고 있다.

2. 온실가스 입체 관측망 구축

기상청은 지상의 지구대기감시소를 중심으로 고층타워, 선박, 항공기를 연계한 입체 감시체계를 구축하였다. 서울 롯데월드타워(555m)와 보성 기상관측탑(300m)에서는 대기 상층에 따른 온실가스 변화를 실시간으로 관측하고 있으며, 기상관측선으로 우리나라 인근 해상의 대기를 관측한다. 또, 기상항공기로 지표면부터 상층대기까지의 온실가스 분포를 파악한다. 이를 통해 우리나라는 지상에서 상층대기까지 온실가스와 대기환경을 종합적으로 감시할 수 있는 기반을 갖추고 있다.

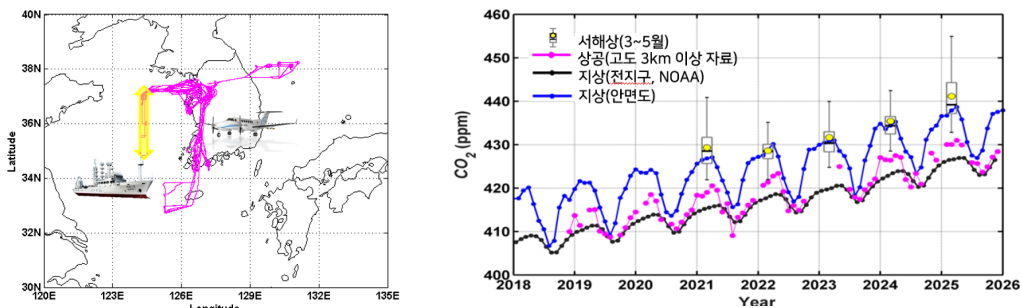


그림 4. 기상항공기와 기상관측선 관측경로(좌) 및 CO₂ 관측 결과(우)

3. 내륙 감시망 확대

현재 감시망은 해안과 도서 지역을 중심으로 구축되어 있으나, 향후 내륙 특성을 반영하는 지구대기감시를 확대할 예정이다. 내륙 관측은 한반도 내부의 탄소 배출과 흡수 특성을 보다 정밀하게 파악할 수 있게 하며, 온실가스 감축의 결과를 정확하게 확인하는 기반이 될 것이다. 또, 해안 지역보다 안개의 영향이 적고 맑은 날이 많아 대기복사와 온실가스, 에어로졸의 원격 관측을 수행하기에 적합하다. 내륙의 지구대기감시 자료들은 기존의 감시소 자료들과 함께 우리나라 대기조성의 변화를 깊이 있게 진단하고 정책의 효과를 신속하게 읽어내는 핵심적인 과학적 근거로 활용될 것이다.

IV 지구대기감시 기반의 국제 협력

1. IG³IS와 온실가스 기원추적

최근 WMO는 관측자료와 대기수송모델을 활용하여 국가 및 도시 규모의 온실가스 배출정보를 추정하기 위해 IG³IS (Integrated Global Greenhouse Gas Information System, 통합 전지구 온실가스 과학정보 시스템)를 추진하고 있다. 대기 중 온실가스 농도로부터 배출량 또는 흡수량을 추정하는 하향식(top-down) 방식은 통계기반의 상향식(2년 지연)보다 더 빠르게 자주 정보를 확인할 수 있고 통계로 산출할 수 없는 영역도 추정할 수 있어 탄소중립 및 기후변화 대응 정책에 필요한 배출·흡수 정보를 제때 효과적으로 제공할 수 있다. 이러한 방식은 2006년 국가 온실가스 인벤토리를 위한 IPCC 가이드라인이 2019년에 개정되면서 IG³IS 방식을 인벤토리의 보완 방법으로 채택이 되었고(IPCC, 2019), WMO GAW는 IG³IS 프로젝트를 수행하게 되었으며, 기상청은 영국, 뉴질랜드, 호주, 스위스에 이어 세계에서 5번째로 이 프로젝트에 참여하게 되었다.

기상청은 연세대학교, 포항공과대학교, 한국환경연구원 등 국내 연구기관과 협력하여 한반도 영역의 INVERSE-KOREA를 구축하고(주상원 등, 2022) 과거 자료에 대해 테스트를 완료하였다. 지상관측과 항공기·선박·고층타워 관측자료를 활용하여 우리나라 온실가스 배출·흡수정보를 정량적으로 산출하는 기술을 개발하고 있다.

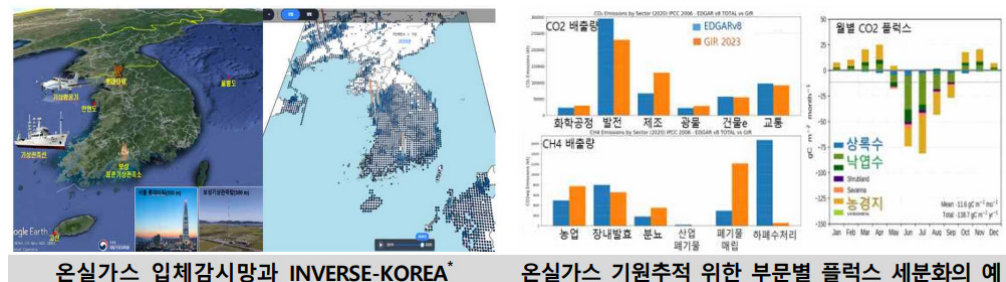


그림 5. 온실가스 입체감시망과 INVERSE-KOREA(좌), 온실가스 기원추적의 예(우)

2. WMO 전지구 온실가스감시(G3W)와의 협력

WMO는 현재 G3W (Global Greenhouse Gas Watch)를 추진하고 있다. G3W는 지상관측, 위성관측, 수치모델을 통합하여 2028년부터 전지구를 $1^\circ \times 1^\circ$ 격자 단위로 CO₂, CH₄, N₂O 순플럭스의 배출과 흡수를 실시간에 가깝게(월 단위) 산출하여 서비스할 준비를 하고 있다. G3W의 핵심요소는 관측자료(지상, 위성 등), 자료동화 기술, 역모델링 기술이다. G3W의 가장 큰 목적은 파리협정과 탄소중립 정책이 실제로 대기 중 온실가스 감소로 이어지는지

확인하는 데 있다. 각 나라들은 탄소중립을 위해 자발적인 감축량(NDC)을 정했고 2년 지연된 인벤토리를 UNFCCC에 보고하고 있다. 그러나 이 방법으로는 실제 배출량이 맞는지, 감축정책이 효과가 있는지 등을 적절한 시기에 확인하기가 어렵기 때문에 WMO는 관측자료 기반의 독립적인 체계를 구축하려는 것이다.

기상청은 지역급 GAW 관측소와 TCCON, 항공기 및 선박 관측자료를 생산하여 WMO G3W 구축에 기여하고 있으며, G3W의 결과를 INVERSE-KOREA의 입력자료로 활용하여 한반도 영역의 고해상도 정보로 정밀하게 산출할 수 있다. 이러한 협력 구조를 통해 기상청이 전지구 탄소수지와 정합성을 갖는 정보를 갖게 된다. 또, INVERSE-KOREA의 결과를 G3W 결과의 평가에 활용함으로써 전지구 플렉스 산출 정보의 정확도를 높이는데 기여할 수 있다.

따라서 기상청은 전지구 온실가스 감시 체계를 활용할 뿐만 아니라 지역 정보를 제공함으로써 WMO와 양방향 피드백 협력을 할 수 있으며, 국제사회에 투명성과 신뢰성 있는 정보를 제공할 수 있다.

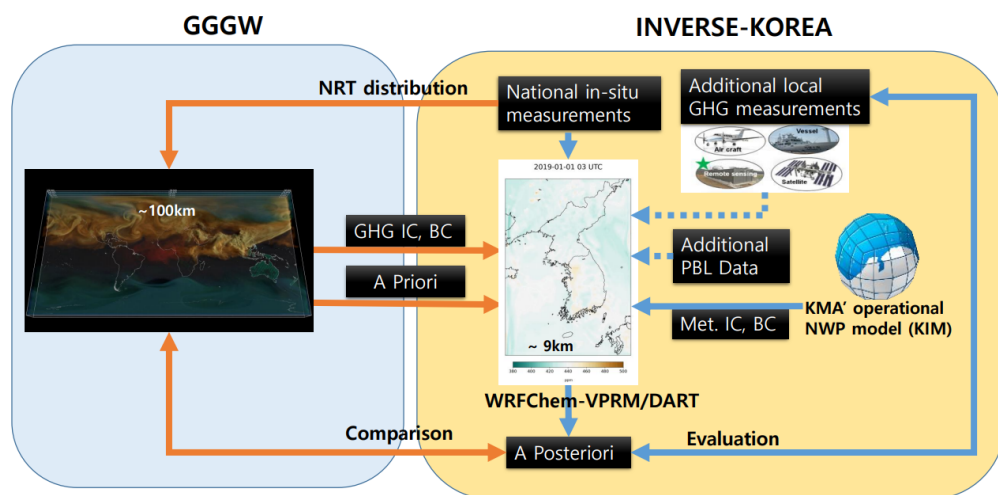


그림 6. WMO G3W와 INVERSE-KOREA의 순환 피드백 구조

V 지구대기감시 강화를 통한 정책 지원

1. 입체 관측망 확대와 관측 공백 해소

기후변화의 원인과 영향을 정확하게 파악하기 위해서는 지상관측뿐 아니라 고층타워, 항공기, 선박, 위성자료를 연계한 입체감시체계가 필요하다.

기상청은 현재 운영 중인 안면도, 제주고산, 울릉도·독도, 포항 관측망에 더하여 서울 롯데월드타워, 보성 기상관측탑, 항공기 및 선박 관측을 강화하고 있다. 또한 추풍령 등 내륙지역으로 감시망을 확대하여 한반도 내부의 온실가스 배출과 흡수 특성을 보다 정밀하게 파악할 계획이다.

2. 에어로졸과 복사강제력 관측 강화

기후변화는 온실가스뿐 아니라 에어로졸과 복사에너지 변화의 영향을 함께 받는다. 특히 에어로졸은 태양복사를 산란하거나 흡수하여 기후변화에 영향을 미치지만 여전히 불확실성이 큰 분야로 남아 있다.

기상청은 에어로졸의 물리·화학적 특성 관측을 강화하고, 온실가스와 에어로졸이 기후에 미치는 영향을 종합적으로 분석할 계획이다.

안면도와 제주고산 지구대기감시소에서 관측하는 대기복사는 일사(전천, 직달, 산란), 태양 상·하향복사, 지구 상·하향복사, 순복사이며 국내 연구기관에서 다양한 복사 관측은 지구대기감시소가 유일하다. 대기복사를 정밀하게 관측하는 국제 네트워크인 BSRN(Baseline Surface Radiation Network) 등록을 추진하여 국제 수준의 고품질 복사관측자료를 생산하고, 이를 기반으로 우리나라 복사강제력(Radiative Forcing)을 정량적으로 산출할 예정이다.

3. 동아시아 기후변화 감시 강화

동아시아는 세계에서 가장 활발한 산업활동과 에너지 소비가 이루어지는 지역 중 하나이며, 다양한 인위적 배출과 급격한 기후변화가 동시에 나타나고 있다. 따라서 우리나라의 지구대기감시는 국가 차원을 넘어 동아시아 기후변화를 진단하는 역할을 수행해야 한다. 기상청은 온실가스, 에어로졸, 대기복사 등 복사강제력에 영향을 주는 요소들을 통합적으로 관측하여 동아시아 기후변화의 원인과 영향을 보다 정확하게 분석할 계획이다.

4. 정책 효과를 검증하는 관측체계 구축

기후변화 대응 정책의 궁극적인 성과는 대기 중에 기록된다. 온실가스 감축 정책이 성공한다면 대기 중 온실가스 증가율은 변화할 것이며, 대기오염 저감 정책은 에어로졸과 반응가스 농도의 변화로 나타날 것이다.

기상청은 GAW, IG³IS, G3W와 연계하여 관측자료 기반의 온실가스 배출·흡수 정보를 정량화하고, 국가 탄소중립 정책과 기후변화 대응 정책의 효과를 과학적으로 검증할 수 있는 기반을 마련할 계획이다.

지구대기감시는 현재의 지구를 진단하는 도구인 동시에 미래 세대가 정책의 성과를 확인할 수 있도록 남겨두는 기록이다. 지구의 맥박을 정확하게 읽을 때, 우리는 보다 효과적인 기후변화 대응 정책을 수립하고 지속가능한 미래를 준비할 수 있을 것이다.

참고문헌

국립기상과학원, 2026: 2025 지구대기감시 보고서

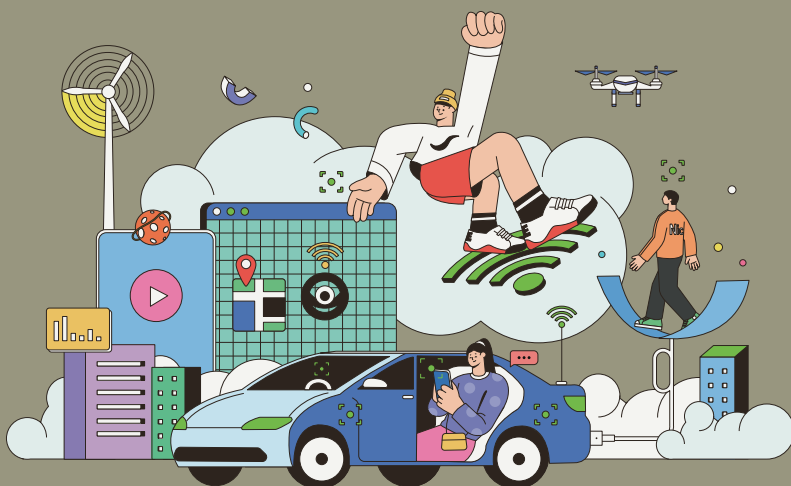
주상원, 이해영, 홍진규, 권도윤, 심창섭, 오영석, 이선란, Samuel Takele Kenea, 이수정, 김정은, 부경은, 2022: 탄소중립을 위한 하향식 온실가스 배출 분석기법 개발 및 활용방안, 한국대기환경학회, 38(6), 933-947.

IPCC, 2019: 2019 Refinement to the 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories

WMO GAW report 278, 2022: Scientific Assessment of Ozone Depletion 2022

부록

기상기술·정책지 발간 목록



기상기술·정책지 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	이중우	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)	임은순	93-103
	• 기후변화 프로젝트를 중심으로 • 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
	• 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	허 은	118-119

기상기술·정책지 발간 목록

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

칼 럼	• 전지구관측시스템(GEOSS) 구축과 이행의 중요성	정순갑	1-4
정책초점	• GEO/GEOSS 현황과 추진 계획 • GEOSS 구축을 위한 전략적 접근 방안 • GEO 집행위원회에서의 리더십 강화 방안 • 국내의 분야별 GEOSS 구축과 발전 방안 - 재해 분야 - 보건 분야 - 에너지자원 분야 - 기상 및 기후 분야 - 수문 및 수자원 분야 - 생태계와 생물다양성 분야 - 농업 분야 - 해양 분야 - 우주 분야	엄원근 김병수 허 은 신동철 박덕근 이희일 황재홍, 이사로 이병렬 조효섭 장임석 이정택 김태동 김용승, 박종욱	6-21 22-31 32-39 40-41 42-44 45-47 48-50 51-53 54-56 57-58 59-62 63-67 68-71
논 단	• Taking GEOSS to the next level	José Achache	72-75
해외기술동향	• GEOSS 공동 인프라(GCI) 구축 동향 • 최근 주요 선진국의 GEO 구축 현황	강용성 이경미	76-83 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 • 기상장비 수출 산업화를 위한 성공전략 • 기상레이더 국산화 추진 방안 • 기상레이더의 상용화 현황과 육성 방안 • 기상장비의 시장성 확보 전략 및 방향	김상조 이종국 장기호, 석미경, 김정희 조성주 이부용	4-13 14-21 22-29 30-41 42-51
논 단	• 외국의 기상레이더 개발 동향과 제언	이규원	52-72
해외기술동향	• 유럽의 기상장비 산업 현황: 핀란드 바이살라를 중심으로 • 세계의 기상장비 및 신기술 동향	방기석 김지영, 박소연	73-80 81-89

❖ 기후변화와 수문기상, 제2권 제2호(통권 제6호), 2009년 6월

칼 럼	• 기후변화에 따른 수문기상 정책 방향	전병성	1-2
정책초점	• 기후변화와 물환경정책 • 기후변화에 따른 물 관리 정책 방향 • 기후변화에 따른 하천 설계빈도의 적정성 고찰 • 수문기상정보를 활용한 확률강우량 산정 방안 • 수문기상학적 기후변화 추세 • 기상정보 활용을 통한 미래의 물관리 정책 • 이상가뭄에 대응한 댐 운영 방안	김영훈 노재화 김문모, 정창삼, 여운광, 심재현 문영일, 오태석 강부식 배덕호 차기욱	4-15 16-27 28-37 38-50 51-64 65-77 78-89
논 단	• 기후변화의 불확실성 해소를 위한 대응방안	양용석	90-110
해외기술동향	• 미국의 기상-수자원 연계기술 동향 • NOAA의 수문기상 서비스 및 연구개발 현황 • 제5차 세계 물포럼(World Water Forum) 참가기	정창삼 김지영, 박소연 김용상	111-121 122-131 132-140

기상기술·정책지 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 • 기후변화 대응이 경제에 미치는 영향 • 기후변화가 농업경제에 미치는 영향 • 기상 재난에 따른 경제적 비용 손실 추정 • 기상산업 활성화와 과제 • 날씨 경영과 기상산업 활성화를 위한 정책 제언	박현종 박종현 김창길 김정인 이만기 김동식	4-18 19-29 30-42 43-52 53-59 60-69
논 단	• 기후변화와 새로운 시장	이명균	70-78
해외기술동향	• 기상정보의 사회·경제적 가치와 편익 추정 • 강수의 경제적 가치 평가 방법론	김지영 유승훈	79-85 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 • [해양] 기후변화에 있어서 해양의 중요성과 정책방향 • [산림] 기후변화에 따른 산림의 영향과 정책방안 • [관광] 기후변화 시대의 관광 활성화 정책방향 • [도시기후] 대구의 도시 기후 및 열 환경 특성 • [에너지] 태양에너지 소개와 보급의 필요성 • [디자인] 생활디자인과 기후·기상과의 연계방안	고상백 이재학 차두송 김의근 조명희, 조운원, 김성재 김정배 김명주	4-19 20-29 30-41 42-50 51-60 61-72 73-88
논 단	• 국민과의 '소통' - 어떻게 할 것인가?	김연종	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 • 기후변화 영향의 경제적 평가에 관한 소고 • 기후변화 정책에 따른 산업계 영향 및 제언 • 기후변화예측 관련 기술 동향 및 정책 방향 • 기후변화와 건설 산업 • 코펜하겐 어코드와 탄소시장 • 기후변화, 환경산업 그리고 환경경영 • 이산화탄소(CO2) 저감기술 개발동향: DME 제조기술	이지훈 한기주 이종인 이상현, 정상기, 이상훈 강운산 노종환 이서원 조원준	4-11 12-21 22-32 33-45 46-56 57-66 67-77 78-84
논 단	• 기후변화와 정보통신 산업의 상관관계: 그린 IT를 중심으로 • 기후변화 대응을 위한 산업계 및 소비자의 책임	양용석 김창섭	85-99 100-109
뉴스 포커스	• 기후변화미래포럼 개최 후기	김정윤	110-115

기상기술·정책지 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

❖ 장기에보 정보의 사회·경제적 가치와 활용, 제3권 제3호(통권 제11호), 2010년 9월

칼 럼	• 장기에보 투자 확대해야	박정규	1-2
정책초점	• 전력계통 운영 분야의 기상정보 활용	정응수	4-15
	• 기상 장기에보에 대한 소고	박창선	16-23
	• 패션머천다이징과 패션마케팅에서 기상 예보 정보의 활용	손미영	24-33
	• 장기에보의 사회·경제적 가치와 서비스 활성화 방안	김동식	34-43
	• 기상 장기에보의 농업적 가치와 활용	한점화	44-53
	• 장기에보 정보의 물관리 이수(利水) 측면에서의 가치와 활용	우수민, 김태국	54-64
	• 기상예보와 재해관리	박종윤, 신영섭	65-81
	• 장기에보 업무의 과거, 현재, 그리고 미래	김지영, 이현수	82-89
해외기술동향	• 영국기상청(Met Office) 해들리센터(Hadley Centre)의 기후 및 기후영향에 관한 서비스 현황	조경숙	90-101
	• WMO 장기에보 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	106-115
	• 날씨의 심리학	최창호	116-122
해외기술동향	• 기상정보의 사회·경제적 평가에 관한 해외동향	김정윤, 김인겸	123-130

기상기술·정책지 발간 목록

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

발 간 사	• G20 국가에 걸맞는 기상산업 발전 방향	조석준	1-3
칼 럼	• 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

발 간 사	• 도시기상 선진화, 미래의 약속입니다.	조석준	1-3
칼 럼	• 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

칼 럼	• 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
	• 라이다 관측기술 활용 방안	김덕현	28-41
	• 위성기술을 이용한 수문분야의 융합 정책	배덕호, 이병주	42-53
	• 위성자료의 해양 환경감시 활용	황재동	54-65
논 단	• 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

칼 럼	• 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
논 단	• 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

기상기술·정책지 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 • 지진조기경보 역량 강화를 위한 정책적 제언 • 기상기후 서비스 혁신을 위한 기술경영 전략 • 자연재해 대응 서비스 기술 및 정책변화	전종갑 최호선 박선영 허종완, 손홍민	6-14 15-30 31-47 48-59
논 단	• 수요자 맞춤형 서비스를 위한 기상기술 고도화 방안	김영준	60-72
포커스	• 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 • [정보] 스마트국가 구현을 위한 빅데이터 활용방안 • [서비스] 빅데이터 분석 기반 기상예보의 신뢰도 향상 방안 • [경영] 빅데이터 기반 날씨경영 성과 제고 방안 - 공항기상정보 활용사례 - • [농업] 기후변화시나리오 활용 농업 기상 과학 융합 전략 • [재난] 재난관리의 새로운 해결방안, 빅데이터	안문석 김현곤 이기광 방기석 김창길, 정지훈 최선화, 김진영, 이종국	6-13 14-31 32-46 47-58 59-76 77-87
논 단	• 기상기후데이터를 품은 빅데이터 • 한국형 복지국가의 전략적 방향성안	이재원 안상훈	88-97 98-111

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

칼 럼	• 기상기후 빅데이터를 활용한 날씨경영	고윤화	3-4
정책초점	• 기상기후정보의 사회경제적 역할 • 미래 재난재해 해결을 위한 기상기후 서비스 • 빅데이터의 사회경제적 파급효과 • 기상기후 빅데이터의 산업경영 활용과 전략 • 기상기후 빅데이터 기반 기상산업육성	안중배 김도우, 정재학 김진화 김정인 송근용	6-11 12-19 20-30 31-41 42-56
논 단	• 빅데이터 기반의 미래 산업 • 기상기후정보 효율성 제고를 위한 융복합 연구	황중성 이성종	57-71 72-77
포커스	• 위험기상에 따른 기상기후 빅데이터 활용	국립기상연구소 정책연구과	78-93

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

칼 럼	• 위성을 활용한 전지구적 관측 방안	고윤화	3-4
정책초점	• 기상위성 운영기술의 선진화 방안 • 관측위성기술의 현황 및 전망 • 연구개발용 위성의 현업 활용성 제고 방안 • 위성을 이용한 국가재난감시 체계 구축 • 위성영상서비스 시장 빅뱅과 새로운 관점	김방엽 김병진 안명환 윤보열, 염종민, 한경수 조항희	6-15 16-24 25-43 44-56 57-67
논 단	• 우주기상의 연구 현황 및 발전 방향	김용	68-81
해외기술동향	• 기상위성 기술·정책 정보 동향 • 위성기반 작전기상 소개	국가기상위성센터 위성기획과 안숙희, 김백조	82-92 93-100

기상기술·정책지 발간 목록

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

칼 럼	• 장마와 날씨경영	고윤화	3-5
정책초점	• 수자원 확보에 있어서 장마의 역할 • 장마가 농업생산에 미치는 영향 • 장마의 변동성과 예측성 향상 • 장마기간 유통산업 영향 및 전략 • 장마철 유의해야할 건강 상식	박정수 최지현 서경환 김정윤 이준석	8-16 17-24 25-30 31-40 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 • 한국의 동절기 도로제설 현황 • 한파가 농업에 미치는 영향 • 겨울철 한파 대비 건강관리	김두천 양충헌 심교문 송경준	6-17 18-29 30-41 42-56
논 단	• 겨울철 위험기상의 예측능력 향상 • 미래 겨울철 위험기상의 변화	김주홍 차동헌	57-68 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 • 재해기상 영향예보시스템 현황 소개 • 영향예보 지원을 위한 수치예보 개발 방향 • 영향예보를 위한 수문기상정보 지원	정관영 최병철 김동준 이은정	6-22 23-31 32-40 41-51
논 단	• 재해영향예보의 효과	손철, 김건후	52-63
포커스	• 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 • 4차 산업혁명과 기상예보시스템의 혁신 • 인공지능 시대를 살아가기 위한 인간 능력은? • 인공지능의 기상정책 개발 활용	진석용 최혜봉 구본권 국립기상과학원	6-20 21-30 31-50 51-63
논 단	• 인공지능 도입으로 정확도를 혁신하는 기상예보	고한석	64-77

기상기술·정책지 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 • 교통안전관리를 위한 도로기상정보 활용 • 태풍 재해 리스크 관리를 위한 영향예보 • 기상, 기후 그리고 숲과 사람 • KISTI 재난대응 의사결정지원시스템(K-DMSS) 소개	예상욱 손영태 이은주 박주원 조민수	6-17 18-30 31-40 41-55 56-70
논 단	• 기상예측정보를 활용한 농경지 물사용 영향예보 • 화재 기상예보 서비스	최진용, 홍민기, 이성학, 이승재 류정우, 권성필	71-81 82-92
포커스	• 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 • 4차 산업혁명 시대의 기후변화 대응 • 인공지능 기술 발전을 위한 제도 및 정책 • 기후변화 대응을 위한 에너지 정책	김형주 채여라 김윤정 전재완	6-15 16-25 26-43 44-54
논 단	• 기후변화에 대응하기 위한 농업과 과학기술의 융합	이현숙	55-65
포커스	• 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 • 재난정보관리 표준화 기술 개발 • 지표홍반자와선정보 제공 및 향후 대응 • 스마트 폭염대응을 위한 기상 전문가의 역할 • 인공지능을 활용한 재해기상 저감·예측 기술	이명인 김병식 박상서 권용석 김동훈	6-18 19-34 35-43 44-53 54-69
논 단	• 미래 여름철 기온변화에 의한 건강영향 예측	이재영, 김호	70-77
포커스	• 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 • 기상데이터로 알려주는 국민건강 알람서비스 • 신재생에너지 발전량 예측에서의 기상정보 활용 • ICT수목원과 기상기술 • 기후변화가 농작물 생산에 미치는 영향과 대응 • 4차 산업혁명 기술을 활용한 친환경 건축/도시 설계 기술 • 실시간 수(水)재해 예측을 위한 기상정보 활용 방안	이재호, 전재영 한성욱, 전예슬 이영미, 박다빈 이상용 문경환 이호영 이병주	6-14 15-23 24-32 33-43 44-57 58-69 70-80
포커스	• 복합재난대응 연구사례 중 도심지 침수 현상을 중심으로	백용, 이동섭, 김형준	81-87

기상기술·정책지 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」 제언	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
논 단	• 돌발 기상 예보와 과제	이우진	53-65
	• 중규모 대류계의 예측	이동규	66-79
	• 위성원격탐사 기반의 한반도 하계 강우특성 진단	손병주	80-90
	• 중규모 대류계 연구를 위한 국지기상관측 제언	이규원	91-105
포커스	• 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	신충훈	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
포커스	• UAM 운항 지원을 위한 항공기상 자료 관련 제언	구성관	67-76

기상기술·정책지 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 • 2050 탄소중립 추진전략(에너지기술) • '2050 탄소중립'과 기후변화 과학 • 탄소중립 이행을 위한 신재생에너지 발전 분야의 이음새 없는(Seamless) 기후예측정보의 활용 제언 • 2050 탄소중립 달성을 위한 생태계의 역할 • 탄소중립대응을 위한 탄소흡수원 관리	노동운 김현구 전의찬 오지현 이동근 이우균	6-18 19-25 26-32 33-44 45-55 56-65
포커스	• 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 • 폭염과 건강영향, 그리고 대응정책 • 폭염(열파)이 국민 건강에 미치는 영향을 고려한 폭염특보 개선 방향 제언 • 호우특보와 재난관리 • 도시 기후변화 재해취약성분석 제도의 이해와 기상분야 과제	이명인 홍윤철 최광용 조재웅 권용석	6-20 21-29 30-41 42-54 55-62
논 단	• 변화하는 기후에 달라지는 태풍: 시사점과 대응방안	문일주	63-73
포커스	• 자연재난에 안전한 지자체 구축을 위한 기상특보의 활용	허종배	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 • 우리나라 주변 해역에서 발생하는 지진 • 지진해일 모델링의 새로운 도전과 과제 • 지진해일 조기 탐지 및 예·경보를 위한 기술 동향 및 제언 • 화산기술과 화산특화연구센터	이준기 김광희 손상영 신성원 윤성효	6-16 17-25 26-42 43-55 56-70
포커스	• 백두산 화산 재해	이윤수	71-81

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

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

기상기술·정책지 발간 목록

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

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

❖ 해양기후변화 대응과 해양 감시·관측 기술, 제17권 제1호(통권 제38호), 2024년 6월

칼 럼	• 미래를 위한 항해: 해양기상·기후 서비스 강화	유희동	3-5
정책초점	• 해양기후변화의 이해와 예측 • 아르고 플로트 기반 전지구 해양감시·관측 • 웨이브 글라이더(wave glider) 소개 및 활용 • 해양글라이더의 개발과 활용: 국내 사례 및 태풍 예측력 향상 방안	안중배	8-24
		김백조, 조형준, 이철규	25-35
		김대현	36-49
		박종진	50-69
포커스	• 수요자 중심의 해양기상서비스	박승균	70-83

❖ 인공강우 기술의 발전과 기후변화 대응을 위한 활용방안, 제17권 제2호(통권 제39호), 2024년 12월

칼 럼	• 비구름을 만드는 '인공강우', 산불 예방을 위한 새로운 대안	장동언	3-5
정책초점	• 인공강설실험의 물리·화학적 통합 검증 • 인공강우 시뮬레이션 연구 및 현업운영 방향 • 인공강우의 실질적인 효과들 • 모델링을 통해 살펴본 인공강우의 생태보호 효과 • 인공강우를 통한 미세먼지 저감 가능성 • 인공강우를 통한 우박억제 효과 • 인공강우 항공관측의 필요성 및 전망 • 구름물리실험첨배 연구성과	김병곤	8-21
		송상근	22-41
		유철상	42-58
		나우영	59-72
		박진수	73-85
		김경익	86-94
		엄준식	95-115
		박민수	116-129
해외기술동향	• 주요국가별 인공강우 기술 및 현황	차주완	130-137
포커스	• 기상조절 주요 현업국가의 조직과 예산	김영미	138-143

❖ 초단기부터 기후까지: AI 기반 기상예측 기술개발, 제18권 제1호(통권 제40호), 2025년 6월

칼 럼	• AI 예보 혁신, 국민 안전을 위한 기상청의 새로운 도전	장동언	4-5
정책초점	• AI 단중기 기상예측모델 • AI 기반 기후예측기술 개발 • 예보 지원을 위한 설명가능 인공지능: 신뢰성과 현업 활용성 강화를 위한 제언 • 예보관의 기상 업무 지원을 위한 인공지능기법 연구 방향	윤세영	8-19
		함유근	20-37
		최재식	38-56
		장은철	57-68
포커스	• AI 분야 국가전략기술 특화연구소	이혜숙	70-80

기상기술·정책지 발간 목록

❖ 기후위기 시대, 국가기후예측시스템을 통한 미래 예측, 제18권 제2호(통권 제41호), 2025년 12월

칼 럼	• 불확실한 기후를 예측 가능한 미래로 전환, 국가 기후예측의 전략적 도약	이미션	4-5
정책초점	• 국가기후예측시스템 개발 필요성과 전략 • AI-역학 하이브리드 기후모델의 활용가능성 • 세계 주요국의 기후예측시스템 개발 동향 • 사용자를 위한 기후예측 서비스 방향 • 국가기후예측시스템으로 여는 국가 기후정책 자립	이명인 윤진호 김혜미 유진호 조경숙	8-21 22-35 36-45 46-61 62-72

❖ 기후변화 대응의 시작, 지구대기감시, 제19권 제1호(통권 제42호), 2026년 6월

칼 럼	• 지구대기감시로 읽는 기후위기의 현재와 미래	이미션	4-5
정책초점	• 기후감시를 위한 BSRN 복사관측망 • 성층권 오존 감시와 기후변화 • 기후위기 시대의 합성 온실기체와 대기 모니터링 • 국제 온실가스 감시 체계 WMO IG³IS와 기상청 고해상도 온실가스 추적 시스템	이규태, 조일성 구자호 박선영 홍진규	8-22 23-37 38-49 50-62
포커스	• 지구대기감시의 중요성과 국내 인프라 소개	김수민	64-74



기상기술·정책

Vol.19, No.1

Meteorological Technology & Policy

Volume 19, Number 1

33, Seohobuk-ro, Seogwipo-si, Jeju-do, 63568, Korea

TEL. 064-780-6505 | FAX. 064-738-9071

<http://www.nims.go.kr>