

환경 및 응용기상 분과 / 환경 및 응용기상 6-1

남극 오존홀 발생 기간의 대류권계면 변화

박민주¹, 구자호¹, 최태진²

¹연세대학교 대기과학과

²해양수산부 극지연구소

남극 봄철에 발생하는 오존홀은 겨울철 극 순환(Polar Vortex)과 밀접한 관련이 있다. 극 순환으로 냉각된 성층권에 저장되어 있던 오존 파괴 물질(ODS, Ozone Depletion Substance)이 방출되어 오존홀이 형성되고, 그 형태는 극 순환의 경계와 일치하는 것으로 알려져있다. 극한 환경인 남극에서, 오존존데 자료로 산출된 대류권계면은 극 순환과 오존홀을 실측자료로 설명하는 지표로 활용할 수 있다. 본 연구에서는 남극 대륙 전역에 위치한 8개 기지의 오존존데 관측 자료로 기온과 오존혼합비에 근거한 2가지 대류권계면 고도를 산출하고 그 특징을 알아보았다. 남반구 계절상 봄인 9-11월에는 시간을 따라 대류권계면이 약 9.7km에서 8.8km으로 낮아지는 변화를 보였다. 경도에 따라서는 서남극에서 대류권계면이 동남극보다 높이 위치하는 경향이 있었으며, 이는 지역에 따른 오존전량 분포 차이와도 일치했다. 대류권계면 고도는 시공간에 따라 변화하지만 대기 불안정도(N^2)는 2.0-3.0 [$10^{-4} s^{-2}$] 사이의 값으로 일정한 범위 내에서 확인되었다. 대기의 연직 분포를 살펴보았을 때는 기압고도 100, 500 hPa 기온의 차이 (T_{diff})가 클수록, 고해상도 라디오존데 자료에서 산출된 대류권 난류향($\log_{10}e$)이 작을수록 대류권계면이 높았다. 위 결과는 극 순환에 의한 상/하층 대기조건 변화가 대류권계면 고도에 반영됨을 나타내며, 존데 자료를 통해 남극 성층권 오존량 변동을 설명하는 추후 연구에 활용하고자 한다.

Keywords: 대류권계면, 오존홀, 남극, 오존존데

※ 이 성과는 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임(RS-2023-00219830). 이 연구는 해양수산부의 재원으로 극지연구소의 지원을 받아 수행되었습니다(과제번호 : PE24030).

Event-based GEMS ozone evaluation using consecutive summertime ozonesonde measurements during ACCLIP

Hyungyu Kang¹, Subin Oh¹, Bak Juseon², Ja-Ho Koo³, Sang-Seo Park⁴, Won-Jin Lee⁵,
Sun-A Shin⁵, Jinsoo Park⁶, Joowan Kim¹

¹Department of Atmospheric Science, Kongju National University

²Institute of Environmental Studies, Pusan National University

³Department of Atmospheric Sciences, Yonsei University

⁴School of Urban and Environmental Engineering, Ulsan National Institute of Science and Technology

⁵Environmental Satellite Center, National Institute of Environmental Research

⁶Air Quality Research Division, National Institute of Environmental Research

This study evaluates the performance improvements of Geostationary Environment Monitoring Spectrometer (GEMS) ozone products using daily ozonesonde measurements during pre-ACCLIP (2021) and ACCLIP (2022) campaigns. The analysis uses a total of 62 ozonesonde profiles along with atmospheric reanalysis to better understand daily ozone variability and circulation change related to the Asian summer monsoon. Comprehensive validation against ozonesonde measurements demonstrates substantial quantitative improvements in GEMS version 3 compared to version 2. Regression slopes between GEMS and ozonesonde total column ozone increased from 0.78 to 1.14 in 2021 and from 0.48 to 0.83 in 2022, indicating significantly reduced systematic biases. The most pronounced improvements occur in the lower troposphere, where correlation coefficients improved from 0.56 to 0.74 in 2021 and from 0.18 to 0.66 in 2022, accompanied by reduced standard deviation from 3.49 to 2.36 (2021) and from 3.93 to 1.91 (2022). Enhanced performance is also evident in the upper troposphere-lower stratosphere, with correlations increasing from 0.83 to 0.95 (2021) and from 0.49 to 0.51 (2022). Process-based case studies during major meteorological events further validate these improvements, demonstrating GEMS version 3's enhanced capability to capture stratosphere-troposphere exchange events and typhoon-induced ozone depletion that were poorly represented in version 2. These dynamic ozone variations, closely related to Asian monsoon circulation and upper tropospheric anticyclones, highlight GEMS version 3's improved sensitivity to meteorological variability and its enhanced potential for monitoring atmospheric transport processes and regional air quality in East Asia.

Keywords: Ozonesonde, GEMS, Asian summer monsoon

※ This research was supported by National Institute of Environmental Research (NIER-2024-0555-01) of Ministry of Environment in South Korea and the Specialized university program for confluence analysis of Weather and Climate Data of the Korea Meteorological Institute (KMI) funded by the Korean government (KMA).

환경 및 응용기상 분과 / 환경 및 응용기상 6-3

CrIS 위성 기반 국내 암모니아 농도 시공간 분포 추정과
기상·배출 영향 분석유은진¹, 심창섭², 이형주¹¹포항공과대학교 환경공학부²한국환경연구원

대기 중 암모니아(NH₃)는 PM_{2.5}를 형성하는 주요 전구물질 중 하나이며, 암모니아의 시공간적 분포 및 특성을 이해하는 것이 중요하다. 하지만 다른 대기오염물질과는 달리 암모니아는 지상 측정소가 매우 제한적이어서 암모니아 농도의 분포와 계절성, 기상 변수의 영향을 파악하기 어려웠다. 따라서 본 연구는 CrIS 위성 관측(2013–2017)을 15 km×15 km 격자 월평균으로 재구성하고, 선형 혼합모형(LMM)과 일반화 가법 모형(GAM)을 결합해 NH₃의 시공간 패턴과 기상·배출 요인의 영향을 정량화했다. LMM은 로그 변환된 위성 기반 NH₃를 종속 변수로 온도·상대습도·풍속과 대기 정책 지원 시스템(CAPSS) 배출량 데이터를 독립변수로 두고, NH₃와 기상 변수 간 관계의 월별 이질성을 반영하기 위해 랜덤 효과를 부여했다. 이후 LMM이 설명하지 못한 월별 공통 공간 패턴을 포착하기 위해 LMM 잔차에 대해 GAM을 적합했으며, 이를 통해 배출량 데이터가 포착하지 못한 배출량 차이 혹은 다른 대기화학적 반응으로 인한 차이 등을 확인해볼 수 있다. 최종 예측값은 LMM 예측에 GAM 예측값을 더해 산출했다. 모델링 결과 R² = 0.77, RMSE = 0.2, MAE = 0.14이고 10-fold 교차검증 결과 R² = 0.73, RMSE = 0.21, MAE = 0.15로 과적합 없이 높은 성능을 보였다. 임실 지상관측 자료와의 비교에서도 위성 원자료 대비 오차가 감소해 예측의 정밀도가 향상되었음을 확인했다. 기상 변수의 영향은 월별로 다른 양상을 보여주었는데, 기온 1°C 상승 시 6월에 최대 18.9% 암모니아 농도 상승에 기여하였다. 상대습도의 경우 봄철 영향이 가장 컸으며 특히 3월이 상대습도 1% 증가 시 2.1% 암모니아 농도 상승으로 가장 컸다. 마지막으로 풍속의 경우 봄철 영향이 가장 컸는데, 그중에서 3월이 1m/s 증가당 암모니아 농도가 18.7% 감소되었다. GAM은 3–10월에 유의한 공간 잔차를 포착했으며, 일부 지역에서 LMM 대비 최대 약 71%(6월 기준 약 13.1ppb) 더 높은 농도를 보였으며, 예측 결과가 주요 암모니아 배출원 지역(가축 사육, 집약 농업)과 일치한다는 점에서 CAPSS 배출량의 한계점을 확인해볼 수 있다. 월별 암모니아 농도 예측을 살펴보면, 암모니아 농도는 3월부터 뚜렷이 상승해 6월에 최고점을 찍은 뒤 점차 하강했다. 3월에는 경기 남부와 전라북도를 중심으로 국지적 고농도 지역이 관찰되었고, 6월로 갈수록 전반적 농도 상승과 함께 고농도 지역 범위가 경기 북부는 물론 경상도 일대로 확대되었다. 이후 농도가 낮아지면서 고농도 지역의 공간 범위도 함께 축소되는 양상을 보였다. 본 연구는 위성 기반 NH₃ 공간 지도의 신뢰도를 높이고, 계절·지역별 관리 전략 수립에 근거를 제공할 것으로 보인다.

Keywords: CrIS, 암모니아(NH₃), 대기 오염, 기상 영향, 배출량

※ 이 연구는 기상청 「기후 및 기후변화 감시·예측정보 응용 기술개발 사업」(RS-2024-00404365)의 지원으로 수행되었습니다.

환경 및 응용기상 분과 / 환경 및 응용기상 6-4

현장실험 기반 확산계수 산정 및 검증을 통한 메탄 배출량 추정 모형 개선

이혁재, 정수종, 주재원

서울대학교 환경계획학과

메탄 배출량 산정 모형인 가우시안 플룸 확산 모형과 OTM-33A의 핵심 변수인 확산계수는 최초의 제어방출 실험인 Prairie Grass(1956) 결과를 토대로 정립되었으나, 평탄한 지형과 당시 관측 인프라 및 기상 특성을 전제로 해 현대 한국의 기상 특성을 충분히 반영하는 데 한계가 있다. 이에 본 연구는 한국의 기상 조건을 반영한 현장 실험 자료를 활용해 GPDM과 OTM-33A의 확산계수를 개선함으로써, 메탄 배출 추정 정확도를 향상하는 것을 목적으로 한다. 본 실험은 일정 유량의 메탄을 지속적으로 방출하며 온실가스 분석기(LI-7810, GLA131-MEA, GLA133-GGA)와 UAV로 풍하측 5-50 m, 고도 3-15 m에서 일정 간격의 고정·이동 관측을 수행하였다. 동시에 기상관측장비로 풍속·풍향 기상 변수를 수집하여 수평·연직 확산계수를 산정·정교화하고, 이를 기반으로 모형 성능을 평가하였다. 인천 LNG 발전소 관측자료에 대한 배출량 비교 결과, 개선된 확산계수를 적용한 모형의 배출 추정치는 2.61g/s였으며, 선행연구의 배출 추정 모형(Weller et al., 2019; Joo et al., 2024)을 적용할 경우 각각 3.04g/s와 1.30g/s로 산정되었다. 본 연구는 한국의 기상조건을 반영한 현장실험 기반 확산계수를 제시하고 이를 메탄 배출량 산정 모형에 적용하여 모형을 개선함으로써, 신뢰도 있는 메탄 배출량 산정에 기여한다.

Keywords: 온실가스, 메탄, 배출량 모형, 제어방출실험, 배출량 추정

※ 본 결과물은 환경부의 재원으로 한국환경산업기술원의 관측기반 온실가스 공간정보지도 구축 기술개발사업의 지원을 받아 연구되었습니다 (RS-2023-00232066)

This work was supported by Korea Environment Industry & Technology Institute(KEITI) through Project for developing an observation-based GHG emissions geospatial information map, funded by Korea Ministry of Environment(MOE) (RS-2023-00232066)

전국 호우재해 물리적 리스크 평가 방법론 소개 및 정책 제언

김성민, 김화량, 진민정, 유환규, 최해송, 양시은

한국기상산업기술원 산업지원본부 산업육성실

기후변화로 인한 극한 강수 현상은 국민 안전과 국가 산업 전반에 심각한 물리적·재무적 리스크를 초래하고 있다. 특히 호우로 인한 재난 피해는 기후변화의 진행 속도와 탄소 배출 경로에 따라 그 규모와 빈도가 크게 달라질 수 있다. 본 연구의 목적은 전국 단위에서 호우재해 피해를 정량적으로 평가하고, 기후변화 표준 시나리오(Shared Socioeconomic Pathways, SSP)에 기반한 장기 전망을 제시함으로써 정책·산업 분야의 기후 적응 전략 수립에 기여하는 것이다.

1998년부터 2020년까지의 강수량, 호우일수, 표준강수지수(SPI), 기온 등 주요 기후요소를 기상청 API 허브의 고해상도 격자자료에서 시·군·구 단위로 추출·정제하였다. 이를 기반으로 재난 피해액을 예측하는 머신러닝 모델을 구축하였으며, 유전 알고리즘을 활용해 예측 성능을 최적화한 100개 앙상블 멤버를 구성하여 모델 불확실성을 반영하였다. 미래 피해 전망은 SSP1-2.6, SSP2-4.5, SSP3-7.0, SSP5-8.5 시나리오를 적용해 2100년까지 분석하였다.

시나리오 분석 결과, 저탄소 시나리오(SSP1-2.6)에서는 피해액이 점진적으로 감소하는 경향을 보였으며, 중탄소 시나리오(SSP2-4.5, SSP3-7.0)는 변화 폭이 미미한 중립 양상을 나타냈다. 반면, 고탄소 시나리오(SSP5-8.5)에서는 피해액이 급격히 증가하는 추세가 확인되었다. 이는 저탄소 전환이 장기적으로 기후재해 피해를 완화하는 데 효과적임을 시사하며, 지역별 맞춤형 재난 대응 전략, 기후 리스크 기반 재정·보험 정책, 실시간 예측 시스템 고도화 등 정책적 대응의 필요성을 강조한다. 본 방법론은 기후변화로 인한 물리적 리스크를 정량화하고, 국가 및 산업 차원의 기후 적응 전략 수립에 활용 가능한 실증적 근거를 제공한다.

Keywords: 기후변화 물리적 리스크, 호우재해, SSP 시나리오 분석

※ 이 연구는 한국기상산업기술원 정관 제4조(사업) 제7항에 근거하여 수행되었습니다.

* Sung-Min Kim, Industry Development Division, Korea Meteorological Institute,
E-Mail : sungmin27@gmail.com

CMIP6 ScenarioMIPs의 기압장과 바람장 재현성 평가

양정아¹, 정임국²

¹건국대학교 사회환경공학부

²유역통합관리연구원 정책의사결정지원센터

기후변화에 따른 다양한 미래 기후 시나리오에 대해 파랑이나 폭풍해일과 같은 해양 기상의 변화를 예측하는 것은 연안 지역의 재해 예방 및 대응 전략 수립에 필수적이다. 이러한 예측은 수치 모델을 통해 수행되며, 이 과정에서 해상풍과 해면기압에 대한 기상장 자료가 핵심 입력으로 활용된다. 그러나 미래 기후에 따른 기상장은 적용하는 기후 시나리오와 자료 생산에 사용된 대기-해양 결합 일반순환모델 (AOGCM)의 특성에 따라 달라질 수 있다. 따라서 신뢰성 있는 예측을 위해서는 CMIP6 ScenarioMIP에 참여한 다양한 AOGCM이 생산한 기상장 자료를 바탕으로 해양 기상 모델링을 수행하는 것이 바람직하다. 다만, 이와 같은 접근은 막대한 계산 자원과 비용을 요구하는 제약이 존재한다. 본 연구에서는 ERA5 기상 재분석 자료를 기준으로 설정하고, 1979년부터 2014년까지의 과거 기후 기간 동안 CMIP6 ScenarioMIP에 참여한 총 58종의 AOGCM 중, 세 가지 대표 미래 시나리오 (SSP1-2.6, SSP2-4.5, SSP5-8.5)에 대해 해면기압과 해상풍 변수를 제공하는 21개 AOGCM을 대상으로 성능 평가를 수행하였다. 모델 성능은 해면기압, 남북 및 동서 방향 풍속의 세 가지 변수를 대상으로, 공간적 재현성과 시간적 재현성 측면에서 평가하였다. 공간적 재현성은 Pattern Correlation Coefficient와 Pattern RMSE, 시간적 재현성은 Temporal Correlation Coefficient와 temporal RMSE를 지표로 활용하였으며, Taylor diagram을 통해 기압장과 바람장 각각에 대한 모델별 시·공간 재현성을 평가하였다. 분석 결과, 기압장과 바람장의 시간적 재현성은 모든 AOGCM에서 낮은 성능을 보였으나, 공간적 재현성은 변수별로 모델 간 차이를 나타냈다. 종합적으로는 MIROC6가 가장 우수한 성능을 보였으며, 그 뒤를 MPI-ESM-1-2과 INM-CM-5-0이 잇는 것으로 나타났다.

Keywords: CMIP6 ScenarioMIP, 전지구 대기-해양 결합 모델, 기압장, 바람장

※ 이 연구는 상세 해양 기후변화 시나리오 산출기술 개발 사업(RS-2024-00404973)과 과학기술분야기초연구 사업(2022R1C1C2009205)의 지원으로 수행되었습니다.