Check for updates
Journal of Korean Society for Atmospheric Environment
Vol. 41, No. 3, June 2025, pp. 403-429
https://doi.org/10.5572/KOSAE.2025.41.3.403
p-ISSN 1598-7132, e-ISSN 2383-5346

총 설

# 동아시아 2차 대기오염물질 모델링 연구: 최신 동향과 향후 과제

# Modeling of Secondary Air Pollutants in East Asia: Recent Trends and Future Challenges

김승미[1),3)], 강예리[1),3)], 전권호[4)], 이종재[2),3),*], 송창근[1),2),3),*]

[1)]울산과학기술원 탄소중립대학원, [2)]울산과학기술원 지구환경도시건설공학과,
[3)]동남권 미세먼지 연구관리센터, [4)]국립환경과학원 대기환경연구과

접수일 2025년 4월 8일
수정일 2025년 5월 21일
채택일 2025년 5월 21일

Received 8 April 2025
Revised 21 May 2025
Accepted 21 May 2025

*Co-corresponding author
Tel : +82-(0)52-217-2835
E-mail : cksong@unist.ac.kr
Tel : +82-(0)52-217-3314
E-mail : jongjaelee@unist.ac.kr

**Seung-Mi Kim[1),3)], Yeri Kang[1),3)], Kwon-ho Jeon[4)], Jong-Jae Lee[2),3),*], Chang-Keun Song[1),2),3),*]**

[1)]*Graduate School of Carbon Neutrality, Ulsan National Institute of Science and Technology (UNIST), Ulsan, Republic of Korea*
[2)]*Department of Civil, Urban, Earth and Environmental Engineering, Ulsan National Institute of Science and Technology (UNIST), Ulsan, Republic of Korea*
[3)]*Research & Management Center for Particulate Matters at the Southeast Region of Korea, Ulsan National Institute of Science and Technology (UNIST), Ulsan, Republic of Korea*
[4)]*Department of Climate and Air Quality Research, National Institute of Environmental Research (NIER), Incheon, Republic of Korea*

**Abstract** The rapid economic and industrial development in East Asia has led to a significant increase in precursor gas emissions, exacerbating secondary air pollution and contributing to regional air quality deterioration. In particular, the formation and transport of secondary pollutants such as ozone ($O_3$) and fine particulate matter ($PM_{2.5}$) have become major environmental concerns. This study first outlines major modeling approaches for air pollutants—including chemical transport models (CTMs) and recent hybrid frameworks integrating machine learning—and then examines key findings from studies conducted between 2020 and 2024, with a focus on precursor emissions, chemical transformation processes, and the role of meteorological conditions in pollutant formation and transport. In addition, we synthesize recent evidence highlighting the increasing relevance of climate—air quality interactions and the need for cross-national collaboration to improve modeling consistency. Based on this review, we propose future directions for air quality modeling, emphasizing enhanced computational efficiency, more accurate representation of atmospheric processes, and expanded applicability to policy support. Based on this review, we propose recommendations for next-generation air quality models, emphasizing enhanced computational efficiency, improved representation of atmospheric processes, and greater applicability for policy support in the region.

**Key words:** Air quality, Modeling, Ozone, Particulate matter, East Asia

## 1. 서 론

동아시아는 빠른 경제성장과 산업활동으로 인한 인위적 미량 가스 배출이 진행되어 왔으며, 이로 인해 대기 오염이 한중일과 같은 국가들의 공통 관심사로 떠올랐다(Lanzi *et al.*, 2022; Zhou *et al.*, 2020; Ohara *et al.*, 2007). 대기 오염은 단순한 환경 문제가 아니라 인간 건강에도 직결되는 중요한 문제이며 국지적 범위를 넘어 광역적으로 확산되는 특성을 지닌다(Chen *et al.*, 2022b; Manisalidis *et al.*, 2020). 이에

따라, 대기오염물질을 효과적으로 관리하기 위해 오염물질의 생성, 변환, 이동 과정을 모니터링하고 이해하기 위한 연구들이 활발하게 이루어지고 있다. 이때, 대기질 모델링은 대기오염물질에 대해 진단(diagnostic) 및 예측(prognostic)을 위한 기술로써 중요한 역할을 한다(Zhang *et al.*, 2022; Karroum *et al.*, 2020; Bai *et al.*, 2018).

최근 대기질 모델링 연구는 직접적으로 배출되는 1차 오염물질보다 초미세먼지(Particular Matter with an aerodynamic diameter less than 2.5 μm; $PM_{2.5}$) 및 오존($O_3$)과 같은 2차 오염물질에 대한 분석을 중점적으로 수행하고 있다(Qiu *et al.*, 2023; Kurokawa and Ohara, 2020). 이는 2차 오염물질이 기상 조건과 화학반응에 따라 복잡하게 형성되며, 장거리 이동을 통해 광역적인 영향을 미칠 수 있기 때문이다(Lee *et al.*, 2024; Jeong *et al.*, 2022; Bhaskar and Lakshminarayanachari, 2020; Jordan *et al.*, 2020). 이에 따라 각국에서는 2차 대기오염물질에 대한 보다 정밀한 이해를 확보하기 위해 다양한 요인을 고려한 대기질 모델링 연구를 수행하고 있다. 배출원 분석뿐만 아니라, 기상조건, 대기 순환, 장거리 수송, 그리고 기후변화와 같은 복합적인 요인들이 대기질에 미치는 영향을 정량적으로 평가하려는 연구가 활발히 이루어지고 있다.

동아시아 대기질 개선 노력의 일환으로, 한국과 일본은 2000년대 이후, 중국은 2010년대 이후부터 다양한 대기오염물질 저감 정책을 시행하여 지속적으로 배출량을 저감해왔다(Lee *et al.*, 2021; Maji and Sarkar, 2020; Kim and Lee, 2018; Hasunuma *et al.*, 2014; Wakamatsu *et al.*, 2013). 그러나 동아시아에서 지속적으로 증가하는 지표 오존 농도와 겨울철 연무 현상을 개선하기 위해서는 배출량 저감만으로는 충분하지 않다. 이에 따라, 2차 생성 반응에 대한 체계적인 대응이 필요함을 시사하는 연구들이 다수 이루어졌다(Oh *et al.*, 2023; Qiu *et al.*, 2023; Yu *et al.*, 2022; Yeo and Kim, 2021; Zhai *et al.*, 2021; Zhang *et al.*, 2020a; Park *et al.*, 2018). 특히, 2차 반응을 통해 생성되는 오염물질은 1차 배출원 물질보다 더 높은 유해성과 복잡한 화학적 특성을 가지므로 이에 따른 건강 영향에 대한 우려가 증대되고 있다(Pye *et al.*, 2022; Fann *et al.*, 2011). 이러한 문제를 해결하기 위해 동아시아를 대상으로 $PM_{2.5}$ 및 오존과 관련한 대기질 모델링 연구가 활발히 수행되어 왔다. 해당 연구들은 동아시아 대기질에 영향을 미치는 주요 요인으로 오염원의 배출, 대기 중 화학 변환 과정, 장거리 수송 과정에 대해 분석하였으며, 이를 바탕으로 효과적인 대기오염 관리 대책 구상에 기여하였다(Kim, 2025; Itahashi *et al.*, 2022; Kim *et al.*, 2020).

대기질과 기후 간의 상호작용은 기후 조건이 대기질에 영향을 미칠 뿐만 아니라, 대기오염물질이 기후 및 날씨 패턴을 변화시키는 양방향 관계를 의미한다. 기후변화에 따른 기상 조건의 변화는 대기오염물질의 이동과 화학 반응을 변화시켜 그 농도에 영향을 미친다. 한편, 대기오염물질은 특성에 따라 서로 다른 복사 강제력을 가지며, 이는 지구 평균 복사 강제력의 변화를 초래한다. 예를 들어, 황산염과 같은 에어로졸은 태양 복사를 반사하여 냉각 효과를 유발하는 반면, 블랙카본(Black Carbon; BC)은 태양 복사를 흡수하여 지구 온난화를 촉진한다(IPCC, 2021). 이로 인해 지역별 배출 특성에 따라 복사 강제력이 다르게 나타나며(Shi *et al.*, 2022), 지역별로 상이한 기후 변동성을 유발할 수 있다. 따라서, 대기질과 기후의 상호작용을 고려하는 것은 모델링 연구에서 필수적이다. 기존 연구에서는 주로 단방향 모델을 활용하여 시나리오별 민감도를 분석하는 방식이 많이 사용되었다. 그러나 최근 기후변화가 주요 연구 관심사로 부각되고, 컴퓨팅 기술이 발전함에 따라, 양방향 모델링을 적용한 대기질-기후 상호작용 연구의 필요성이 대두되고 있다(Gao *et al.*, 2022).

본 연구는 대기오염물질 모델링에 사용되는 주요 모델의 종류와 그 동향에 대해 요약하고, 동아시아 지역을 대상으로 최근 5년(2021~2024년)간 발행된 논문을 기준으로 2차 대기오염물질 모델링 연구들을 정리하였다. 이를 바탕으로, 동아시아에서의 대표적인 2차 생성 대기오염물질의 생성·변환·이동 과정과

더불어 기후와 대기질 간의 상호작용에 대해 고찰하였다. 궁극적으로 본 연구는 동아시아 대기질 개선을 위한 정책 수립에 과학적 근거를 제공하는 것을 목표로 하며, 향후 대기질 모델링 연구의 발전 방향을 제시하고자 한다.

## 2. 대기오염물질 모델링 종류 및 동향

대기질 모델링은 대기오염물질의 배출과 기상 요인 등의 변수를 입력자료로 활용하여 특정 시공간에서의 오염물질 농도를 계산하는 기술이다. 이는 대기오염의 원인과 영향을 분석하고 예측에서 중요한 역할을 한다. 대기질 모델링 기법은 다양한 방식으로 발전해왔으며, 각 모델은 고유한 장점과 한계를 지니므로 연구 목적에 맞는 적절한 모델을 선택하여 활용하는 것이 필요하다.

대기질 모델링 기법의 발전 과정은 사용 가능한 입력자료(예: 기상 관측자료, 배출량 자료)와 컴퓨팅 기술의 발달과 밀접한 관련이 있다. 이에 따라 시대별로 주로 활용된 모델링 기법이 변화하는 경향을 보였다. 따라서, 최근 5년간의 선행연구를 분석하기에 앞서, 가장 널리 사용되었던 대표적인 대기질 모델인 3차원 대기 확산 모델, 수용 모델, 머신러닝을 결합한 하이브리드 모델에 대해 정리하였다. 또한, 표 1에서는 모델링 기법이 널리 활용된 시기를 기준으로 주요 모델링 기법의 특성을 정리하였다.

### 2.1 3차원 대기 확산 모델

3차원 대기 확산 모델링은 대기오염물질이 오염원에서 배출된 후 공기 중에서 확산되는 과정을 수학적으로 모의하는 기법으로 계산 방식에 따라 가우시안 확산 모델(Gaussian Dispersion Model), 라그랑지안 궤적 모델(Lagrangian Trajectory Model), 오일러리안 격자 모델(Eulerian Grid Model)로 구분된다.

대표적인 가우시안 확산 모델로는 미국 환경보호청(U.S. EPA)에서 개발한 AERMOD (Air Quality Dispersion Modeling)가 있다. AERMOD는 가우시안 플룸(Plume) 방정식을 기반으로 하며, 행성 경계층의 난류 특성을 반영하여 기상 데이터를 전처리한 후 복잡한 지형과의 상호작용을 모의한다(U.S. EPA). 이는 특히 도시 및 산업 지역에서의 단기 및 중거리(50 km 이하) 대기 확산 모델링에 적합하며, 배출원의 높이, 풍속, 난류 확산 계수 등을 고려하여 지표면에서의 오염물질 농도를 예측한다(Cimorelli *et al.*, 2005). 그러나 50 km 이상의 장거리 확산을 모의할 때는 기상 조건의 변화로 인해 CALPUFF (CALifornia Puff Model) 모델이 권장된다(Rood, 2014). CALPUFF는 비정상 상태의 대기 확산을 반영할 수 있는 라그랑지안 퍼프(Lagrangian Puff) 모델로, 시간에 따라 변하는 기상 조건을 고려하여 퍼프(Puff)단위의 이동을 예측하여 보다 정밀한 장거리 확산 모의가 가능하다. 특히 화산재 확산, 산불 연기 확산, 장거리 오염물질 이동 연구 등에서 광범위하게 사용된다(Scire *et al.*, 2000).

대표적인 입자단위 라그랑지안 궤적 방식의 모델로는 HYSPLIT (HYbrid Single-Particle Lagrangian Integrated Trajectory)이 있다. HYSPLIT은 개별 오염물질 입자의 궤적을 추적할 수 있어 방사성 물질 확산, 황사 및 미세먼지 이동, 산업 배출원의 기여도 분석 등에 활용된다. 이 모델은 대기 중에서의 난류와 대류 과정을 반영하여 다수의 배출원에서 방출된 오염물질이 시간이 지남에 따라 어떻게 이동하는지를 모의할 수 있다(Draxler and Hess, 1998). 라그랑지안 궤적 모델은 계산 효율성이 높다는 장점을 지니고 있으나, 물리·화학적 과정을 정밀하게 모의하는 데에는 한계가 존재한다(Bae *et al.*, 2017). 이에 따라, 대부분의 대기화학 모델에서는 오일러리안 접근 방식이 사용되며, 이는 대기오염물질의 확산뿐만 아니라 대기 중에서 발생하는 화학 및 물리적 변화를 수학적으로 모의할 수 있도록 설계되어 있다.

오일러리안 격자 모델은 미분방정식을 기반으로 오염물질의 농도를 계산하는 방식으로, 초기 조건과 경계 조건이 결과에 큰 영향을 미치며, 고해상도 입

**Table. 1.** Summary of modeling techniques by generation: The modeling techniques from the first to the third generation are based on the work of Li *et al.* (2021c).

| Period of primary use | Introduction | Advantage | Limitation | Typical model example | | Application |
|---|---|---|---|---|---|---|
| 1970s~1980s | • Simulating and analyzing airflow and pressure field data<br>• Determining pollutant trajectories | • Simple structure.<br>• Low parameter requirements<br>• Fast computation speed | • Absence of detailed chemical mechanisms<br>• Applicability restricted by simplified chemistry | • Gaussian diffusion model (ISC, AERMOD, ADMS, etc.)<br>• Lagrangian trajectory model (OZIP/EKMA, CALPUFF, etc. ) | Box model | • Long-term averaging of inert pollutants<br>• Local dispersion modeling |
| 1980s~1990s | • Includes complex meteorological modules<br>• Captures non-linear response mechanisms<br>• Covers wide simulation areas | • Basic functions for large-scale simulation<br>• Preliminary capability for comprehensive modeling | • Focus on a single pollutant<br>• Incomplete representation of pollutant conversion | Early Eulerian grid model | • Regional-scale photochemical models (e.g., ROM)<br>• Urban-scale photochemical models (e.g., CIT, UAM)<br>• Acid deposition models (e.g., ADMS, RADM) | • Chemical transformation simulation<br>• Source impact on grids<br>• Dry/wet deposition modeling |
| After the 1990s | • Three-dimensional Eulerian framework<br>• Multi-module integration<br>• Multi-scale mesh nesting | • Overcomes limitations of single-species/ single-phase simulations<br>• Accounts for realistic intra-species interactions and transformations | • It requires substantial computational resources and time for execution. | Eulerian grid model | CMAQ, CAMx, WRF-CHEM, NAQMS, etc. | • High-resolution spatiotemporal analysis |
| | • Source apportionment of chemical species<br>• Spatial attribution of emission sources | • Operates independently of emission inventories | • Period-averaged outputs<br>• Limited capability for event-specific analysis | Receptor model | PMF, PSCF, CMB, etc. | • Source apportionment<br>• Emission origin tracing<br>• Period-specific source analysis |
| After the 2020s | • Coupled numerical and machine learning models<br>• Physical-statistical output fusion | • Low computational cost and fast execution time.<br>• Utilization of diverse auxiliary datasets | • Low interpretability (black box)<br>• Input data-dependent performance | • Major numerical model for hybrid model: WRF-CMAQ, etc.<br>• Major machine learning algorithms for hybrid model: RF, SVM, XGBoost, CNN, CNN-RNN, etc. | | • Real-time forecasting<br>• Integration of heterogeneous data sources (e.g., population, topography) |

력자료의 요구로 인해 높은 계산 자원을 필요로 하는 것이 특징이다(Borge *et al.*, 2010). 그러나 최근 컴퓨팅 기술의 발전으로 계산 부담이 크게 완화되면서, 오일러리안 격자 모델은 3차원 대기질 모의 연구에서 폭넓게 활용되고 있다. 주요 오일러리안 격자 모델로는 Community Multiscale Air Quality Modeling System (CMAQ), Weather Research Forecasting Model with CHEMistry (WRF-Chem), Goddard Earth Observing System-Chemistry (GEOS-Chem) 등이 있다. CMAQ과 WRF-Chem은 지역 규모 모델이며, WRF-Chem은 온라인 커플링 모델로 기상과 대기화학 반응 간의 양방향 상호작용을 고려한 모델링에 중점을 두고 설계되었다는 특징이 있다(Grell *et al.*, 2005; Byun and Ching, 1999). 전지구 규모 모델인 GEOS-Chem은 보다 광범위한 대기 상호작용을 모의할 때 사용된다(Gao and Zhou, 2024; Bey *et al.*, 2001). 최근 연구 동향을 살펴보면, 2018~2022년 동안 진행된 2차 오염물질 모의 및 분석 연구에서 CMAQ 모델이 가장 활발히 사용된 것으로 보고되었다(Gao and Zhou, 2024). 동아시아 지역을 대상으로 한 선행 연구에서는 2차 생성 오염물질의 생성, 변환 및 수송 과정에 영향을 미치는 요인을 정량화하는 연구가 다수 수행되었으며(Cha *et al.*, 2023; Chang-Hoi *et al.*, 2021; Xiao *et al.*, 2021; Bae *et al.*, 2020; Chatani *et al.*, 2020), 이는 향후 대기질 예측 및 관리 전략 수립에 중요한 기초 자료로 활용될 수 있을 것으로 기대된다.

### 2.2 수용 모델

수용 모델(Receptor Model; RM)은 특정 지점에서 대기오염물질의 기원을 규명하고 각 오염원의 기여도를 정량적으로 평가하는 수학적·통계적 기법이다(Hopke *et al.*, 2016; Cooper and Watson, 1980). 이 모델은 오염물질의 물리·화학적 거동을 직접 모의하는 것이 아니라, 실측된 대기질 데이터를 기반으로 오염원을 역추적하여 대기질을 진단하는 것에 목적을 둔다. 배출량 정보나 기상자료 없이 시료의 화학적·물리적 특성을 활용하여 오염원을 식별하고 기여도를 분석하기 때문에 배출 인벤토리가 불완전하거나 기상·화학적 과정의 불확실성이 큰 경우에도 신뢰도 높은 분석이 가능하다(U.S. EPA). 반면, 측정 데이터의 정확도에 크게 영향을 받으며, 특정시점의 오염원 기여도는 산출할 수 있지만 시간적 변동성은 반영할 수 없다는 한계가 있다(Ryoo *et al.*, 2022; Reizer *et al.*, 2021). 대표적인 수용 모델로는 화학적 질량 균형(Chemical Mass Balance; CMB) 모델과 양의 행렬 분해(Positive Matrix Factorization; PMF) 모델이 있는데, CMB 모델은 오염원의 화학적 유형에 따른 기여도를, PMF 모델은 입자상 물질의 변동성을 고려하여 오염원의 프로파일을 생성할 수 있다는 것이 장점이다(U.S. EPA; Ramadan *et al.*, 2003; Hopke, 1991; Cooper and Watson, 1980). 따라서 이러한 수용 모델의 결과는 대기 오염의 원인 분석을 위해 활발하게 사용하고 있다. 최근 동아시아에서는 수용 모델을 활용하여 $PM_{2.5}$ 및 오존과 같은 2차 생성물질의 기여도 분석 연구가 많이 이루어졌으며, 지역적인 영향뿐만 아니라 장거리 수송의 영향을 정량화하는 연구들도 수행되었다(Hwang and Song, 2023; Park *et al.*, 2022b, 2022c; Song *et al.*, 2022; Ikemori *et al.*, 2021; Lv *et al.*, 2021; Hwang *et al.*, 2020; Heo *et al.*, 2009; Han *et al.*, 2006).

### 2.3 기계학습 및 하이브리드 모델

기계학습 모델은 대기오염물질 예측을 위해 선형 및 비선형 상관성을 가지는 다양한 입력 변수를 활용하며, 화학적·물리적 과정의 명시적 계산 없이 데이터 기반으로 변수 간 관계를 학습하는 알고리즘이다. 복잡한 물리·화학적 방정식을 직접 계산하는 전통적인 모델에 비해 계산 비용이 낮다는 장점을 가지며, 대기 관련 정보뿐만 아니라 인구 밀도, 도로 밀도 등과 같은 보조 변수를 포함하여 대기오염물질의 농도를 모의할 수 있다. 이처럼 기계학습을 융합하면 다양한 이종 데이터를 활용할 수 있는 유연성을 갖는 것이 장점이다(Koo *et al.*, 2023). 반면, 기계학습 기반 모의 결과는 데이터 간의 관계를 학습하여 높은 예측

성능을 보이지만, 모델이 의사결정을 내리는 과정이 명확히 드러나지 않는다는 한계를 가진다. 이러한 특성은 일반적으로 '블랙박스 문제(Black-box problem)'라고 불리며, 특히 심층학습과 같은 고차원적 비선형 모델에서는 입력 변수와 예측 결과 간의 인과관계를 해석하는 것이 더욱 어려워진다. 이로 인해 모델이 특정 물리·화학적 과정을 어떻게 반영하는지 이해하기 어렵고, 신뢰성 확보에 대한 우려가 제기된다. 따라서, 이러한 한계를 극복하기 위해 설명가능한 인공지능(XAI, Explainable AI) 연구가 활발히 진행되고 있으며, SHAP (Shapley Additive Explanations), LIME (Local Interpretable Model-agnostic Explanations)과 같은 기법이 기계학습 모델의 투명성을 높이기 위하여 활용되고 있다(Houdou *et al.*, 2024; Jairi *et al.*, 2024; Abdollahi and Paradhan, 2023; Kim *et al.*, 2022a; Kang *et al.*, 2021b).

하이브리드 모델은 기계학습의 강점과 전통적인 물리화학적 모델의 이점을 결합하여 대기오염물질 예측의 정확도를 향상시키기 위해 제안되었다(Wang *et al.*, 2024b; Hong *et al.*, 2022). 전통적인 물리화학적 모델은 관측 결과가 없어도 예측이 가능하며 물리화학적 과정을 바탕으로 결과를 해석할 수 있다는 장점이 있지만, 계산 시간이 오래 걸리며 실제 세상의 다양한 매개변수를 모두 적용하기에는 어려움이 있다(Liu *et al.*, 2023a). 반면, 기계학습 모델은 계산 비용이 낮고 비선형적 패턴을 효과적으로 학습할 수 있으며, 다양한 유형의 입력 데이터를 활용할 수 있다는 장점이 있으나, 블랙박스(black box) 문제로 인해 해석 가능성이 낮고, 입력 데이터의 품질과 가용성에 따라 성능이 크게 좌우되는 한계가 있다(Tang *et al.*, 2024; Fung *et al.*, 2021; Cabaneros *et al.*, 2019). 이러한 장단점을 상호보완하기 위해 물리·화학적 모델과 기계학습을 결합한 하이브리드 접근법이 연구되고 있다(Jung *et al.*, 2025; Sayeed *et al.*, 2021). 이는 수치모델의 긴 구동 시간 및 편향성을 보정하고 모의 정확도를 효율적으로 향상시킨다(Sayeed *et al.*, 2022). 이러한 접근법은 최근 많은 양의 데이터가 축적되고 GPU와 같은 컴퓨팅 기술이 발전하는 것과 맞물려 활발하게 연구되고 있다(Geng *et al.*, 2021; Yafouz *et al.*, 2021; Thongthammachart *et al.*, 2021).

## 3. 동아시아 2차 대기오염물질 모델링 연구 동향 및 주요 연구 결과

### 3.1 동아시아 2차 대기오염물질의 배출, 변환, 수송 메커니즘

본 연구에서는 최근 5년간 수행된 선행 연구들을 배출, 변환, 수송 메커니즘의 세 가지 단계로 구분하여 분석하였으며, 연구 결과 간의 공통된 결론을 도출하는 것에 중점을 두었다. 정리된 내용은 표 2에 제시하였다.

#### 3.1.1 2차 대기오염물질의 전구물질의 배출

$PM_{2.5}$와 오존은 대기 중에서 2차 화학 반응을 통해 생성되므로, 이들의 형성에 기여하는 전구물질의 배출량은 대기질 변화에 있어 핵심적인 요소로 작용한다(Chen *et al.*, 2022a). 따라서, 동아시아 대기질에 영향을 미치는 주요 인위적 배출원을 규명하고, 이를 효과적으로 저감할 수 있는 대기오염 관리 정책을 수립하는 것이 필수적이다(Bae *et al.*, 2021). 이를 위해 다양한 모델링 연구가 수행되었으며, 특히 $PM_{2.5}$와 오존 생성에 주요한 영향을 미치는 $NO_x$와 VOCs를 대상으로 한 연구가 다수 진행되었다.

2013년 중국의 배출 저감 정책(Clean Air Action Plan) 시행 이후 $SO_x$ 배출량이 크게 감소하면서, 상대적으로 $NO_x$의 비중이 증가하였다. 이에 따라, 최근 동아시아 대기질 연구에서는 $NO_x$가 주요 전구물질로 더욱 중요하게 다루어지고 있다. $NO_x$ ($NO_x = NO + NO_2$)는 단기 체류 오염물질이지만, 대기 중에서 $HNO_3$, HONO, PAN 등의 장기 체류 오염물질로 빠르게 전환될 수 있어 2차 오염물질 형성을 촉진하는 특성을 지닌다(Park *et al.*, 2024c; Seo *et al.*, 2024; Jung *et al.*, 2022; Han *et al.*, 2020; Zhang *et al.*, 2020b).

**Table 2.** Major mechanisms of secondary air pollutants in East Asia (2020~2024).

| Process | Category | Key findings and references |
|---|---|---|
| Emission | $NO_x$ | • Emissions of precursor pollutants from China as a key factor in transboundary air pollution in East Asia (Kumar *et al.*, 2021).<br>• Total $NO_x$ emission reduction shown to improve air quality in East Asia (Park *et al.*, 2024c; Jung *et al.*, 2022; Han *et al.*, 2020; Zhang *et al.*, 2020b). |
| | VOCs | • Biomass-burning VOCs significantly contribute to autumn/winter haze (Ikemori *et al.*, 2021).<br>• $C_{7+}$ aromatics strongly impact ozone; isoprene and alkenes also contribute (Schroeder *et al.*, 2020).<br>• VOC inventory uncertainties cause model over-/underestimation (Kim *et al.*, 2024; She *et al.*, 2024). |
| Transformation | Photochemical reaction | • VOC reduction is essential; $NO_x$ reduction alone is insufficient for air quality improvement (Colombi *et al.*, 2023).<br>• Despite $NO_x$ decline in China, ozone increased due to VOC influence (Li *et al.*, 2021b).<br>• Significant VOC cuts with slight $NO_x$ reduction, or major $NO_x$ cuts alone, are needed to lower ozone (Santiago *et al.*, 2024). |
| | Ammonium formation reaction | • Regional air quality differences in East Asia stem from varying atmospheric composition (Cao *et al.*, 2023; Zhang *et al.*, 2021).<br>• $SO_2$ reduction in China increased $NO_x$ share, leading to more nitrate via chemical shifts (Jo *et al.*, 2020).<br>• Aerosol formation from oxidation varies with $NH_3$ levels (Kim *et al.*, 2020).<br>• Meteorological conditions significantly affect air quality in South Korea (Ryu *et al.*, 2021).<br>• $NO_x$ reduction in China lowered domestic $PM_{2.5}$ but increased $NO_3^-$ transport to Korea/Japan due to chemical imbalance (Uno *et al.*, 2020). |
| Transport | Long-range transport | • Springtime high-pressure over the Yellow Sea promotes pollutant transport to Korea and Japan (Jung *et al.*, 2022).<br>• $NH_4^+$ is transported from the Asian continent to Japan in spring and winter (Kawashima *et al.*, 2022).<br>• Long-range transport significantly affects ozone levels in Japan (Yoshino *et al.*, 2021; Chatani *et al.*, 2020). |
| | Atmospheric stagnation | • Prolonged high-pressure causes stagnation, increasing precursor buildup and secondary pollutant formation (Wang *et al.*, 2023a; You *et al.*, 2021; Seo *et al.*, 2020). |

최근 진행된 $NO_x$ 배출량 관련 연구들은 주로 기간별 및 지역별 대기질 영향을 정량화하는 데 초점을 맞추었으며, 이를 위해 GEOS-Chem, CMAQ-ISAM (Integrated Source Apportionment Method), Receptor Model, Box-Model 등의 다양한 모델이 활용되었다.

겨울철 $PM_{2.5}$ 형성에 대한 $NO_x$의 기여도를 분석한 연구 결과, 한중일 주요 대도시에서 $NO_x$가 $PM_{2.5}$ 생성의 주요 전구물질로 작용하는 것으로 나타났으며 (Qiu *et al.*, 2023; Kim *et al.*, 2022b; Yan *et al.*, 2021), $NO_x$ 배출원의 지역별 기여도를 분석한 결과, 북중국에서 배출된 $NO_x$가 중국뿐만 아니라 한국과 일본의 대기질에도 상당한 영향을 미치는 것으로 확인되었다(Yen *et al.*, 2024; Jun and Gu, 2023; Pouyei *et al.*, 2022; Xie and Liao, 2022; Kumar *et al.*, 2021; Han *et al.*, 2021; Shimada *et al.*, 2021; Chatani *et al.*, 2020). 즉, 여러 연구에서 공통적으로 겨울과 봄철 동안 중국 동북부 지역의 전구물질 배출 기여도가 높은 것으로 평가되었다. 이는 동아시아 지역의 우세풍이 북서풍의 영향을 받기 때문이며, 산업 밀집 지역인 중국 동북부에서 배출된 $NO_x$를 포함한 다양한 오염물질이 하류 지역(downwind)으로 장거리 이동하여 한국과 일본의 대기질에 영향을 미치기 때문으로 해석된다(Kang *et al.*, 2024; Park *et al.*, 2024c).

최근 대기오염이 인체 건강에 미치는 영향에 대한 관심이 증가하면서, VOCs 배출에 대한 연구도 활발히 진행되고 있다. VOCs는 배출원에 따라 주로 인위

적 배출원에서 기인하는 NMVOCs (non-methane volatile organic compounds)와 자연적 배출원에서 유래하는 BVOCs (biogenic volatile organic compounds)로 구분된다. NMVOCs는 연료 연소, 용매 사용, 산업 공정 등에서 배출되는 벤젠, 톨루엔, 아세톤과 같은 유기화합물을 포함하며, BVOCs는 식물에서 방출되는 이소프렌, 모노테르펜 등의 화합물을 포함한다. VOCs는 대기 중에서 2차 오염물질 생성 반응에 중요한 역할을 하며, 특히 SOA (Secondary Organic Aerosol) 및 오존 형성에 크게 기여하는 것으로 알려져 있다(Zhang *et al.*, 2016). VOCs 배출원의 주요 특성 중 하나는 배출량의 관리가 어려운 점이다. 이는 자연적으로 방출되는 BVOCs가 전체 VOCs 배출량의 약 90%를 차지하며, NMVOCs 배출원이 운송, 산업, 용매 사용 등 다양한 부문에 걸쳐 분포되어 있기 때문이다(Li *et al.*, 2019; Guenther *et al.*, 1995).

최근 연구에서는 VOCs의 계절별 변동성과 대기오염 간의 관계를 규명하고, VOCs의 기여도를 정량화하는 연구가 다수 수행되었다. 예를 들어, 여름과 가을철에는 VOCs가 오존 생성에 미치는 영향이 가장 크게 나타나며(Schroeder *et al.*, 2020), 수용 모델에 의한 연구에서는 생물 연소로 인한 VOCs가 대기오염에 미치는 영향이 더욱 두드러지는 것으로 보고되었다(Ikemori *et al.*, 2021). 특히, Nault *et al.* (2021)의 연구에서는 NMVOCs로부터 생성된 SOA가 $PM_{2.5}$로 인한 조기 사망률 증가에 미치는 영향을 국가별로 정량화하였으며, 그 결과 한국(서울, 2016년 기준)에서 SOA에 의한 조기 사망 기여도가 높은 것으로 나타났다. 이는 인위적 VOCs의 배출량 저감이 대기질 개선과 건강 영향을 완화하는 데 있어 매우 중요한 요소임을 시사한다.

한편, VOCs에 대한 모델링 연구에서는 VOCs 배출량의 불확실성이 중요한 한계점으로 지적되고 있다(Ok *et al.*, 2023). VOCs의 화학적 조성과 배출 특성이 물질별, 지역별로 상이하기 때문에, 배출량의 과소 또는 과대 추정이 모델링 결과에 미치는 영향을 분석하는 연구가 필요하다. 이에 따라, VOCs 및 2차 대기오염물질의 보다 정밀한 모의를 위해서는 VOCs 배출량의 불확실성을 감소시키고, 정확한 배출 인벤토리를 구축하는 것이 필수적이다(Kim *et al.*, 2024; She *et al.*, 2024).

정확한 배출 인벤토리는 대기질 모델링의 핵심 입력자료이며, 그 신뢰도는 모델 결과의 정확도와 직결된다. 전통적으로는 활동량과 배출계수를 결합한 상향식(bottom-up) 방식이 주로 사용되어 왔으나, 통계 미반영 배출원이나 비정규 활동(missing sources), 보고 누락 등으로 인해 실제 배출을 과소평가하는 경우가 자주 지적되어 왔다(Qu *et al.*, 2022). 특히 중소규모 산업, 농업, 생활화학제품 등의 기여가 과소 추정되며, 배출량의 시공간 분포 역시 실제와 괴리가 발생할 수 있다(Xu *et al.*, 2023; Lee *et al.*, 2022b). 이러한 한계를 보완하기 위해 최근에는 위성 관측과 역모델링 기법을 활용한 하향식(top-down) 접근이 활발히 적용되고 있다(Momeni *et al.*, 2024; Park *et al.*, 2024b).

하향식 방법은 대기 중 오염물질 농도 관측자료로부터 배출량을 역산하여 기존 인벤토리를 보정하는 방식으로, 특히 위성자료를 활용한 $NO_2$ 및 $NH_3$의 하향식 추정은 기존 인벤토리에서 누락된 배출원을 보완하는 데 유용하다(Momeni *et al.*, 2024; Qu *et al.*, 2022). 예를 들어, 정지궤도 위성 관측을 활용한 연구에서는 상향식 인벤토리에서 반영되지 않았던 시간대별 배출 특성을 포착함으로써 모델의 재현성과 예측력이 향상되었음을 보였다(Park *et al.*, 2024b). 또한 암모니아($NH_3$)와 휘발성유기화합물(VOCs)은 최근 2차 입자 및 오존 생성에서의 상대적 기여가 증가함에 따라, 이들에 대한 배출 추정의 정확성 확보가 더욱 중요해지고 있다(Momeni *et al.*, 2024; Xu *et al.*, 2023; Lee *et al.*, 2022b). 이러한 연구들은 향후 배출 인벤토리 개선에 있어 위성자료와 역모델링 기반의 정량적 접근이 필수적임을 시사한다.

최근 동아시아를 대상으로 한 대기질 연구들은 중국의 배출량이 급격히 변화함에 따라 연구 주제에도 큰 영향을 미친 것으로 나타났다. 전통적으로 주요

대기오염물질 전구체로 다루어졌던 $SO_x$와 $NO_x$뿐만 아니라, VOCs 및 $NH_3$에 대한 연구도 증가하고 있으며, 이러한 물질들을 보다 정밀하게 정량화하기 위한 모델링 연구들이 활발하게 진행되고 있다. 배출량의 변화가 대기질에 미치는 영향을 정확히 평가하기 위해서는 신뢰도 높은 배출 인벤토리 구축이 필수적이며, 이를 위해 국가 간 연구 협력 및 정보 공유가 더욱 강화될 필요가 있다. 특히, 동아시아 지역에서 배출량의 변화가 인접 국가 대기질에 미치는 영향을 고려할 때, 국가 간 협력적 연구와 지속적인 논의가 이루어져야 할 것이다.

#### 3.1.2 2차 대기오염물질의 화학적 변환 과정

$PM_{2.5}$와 오존은 전구물질로부터 화학적 변환 과정을 거쳐 생성된다. 특히, 중국의 하류 지역인 한국과 일본은 중국에서 생산된 2차 오염물질이 수송되는 과정과 도착 지역에서의 변환 과정을 이해하는 연구가 중요하다(Byun *et al.*, 2022b). 전구물질의 배출량과 최종적으로 형성되는 2차 오염물질 간에는 복잡한 메커니즘이 작용하며, 각 반응의 비율에 따라 대기오염물질의 농도가 최종 결정된다(Cheong *et al.*, 2024b). 이러한 메커니즘에 영향을 미치는 변수들은 기상 조건부터 물질의 조성까지 매우 다양하다. 그 중에서도 2차 대기오염물질의 주요 변환 과정은 광화학 반응과 암모늄 생성반응이 대표적이다.

광화학 반응은 태양광에 의해 유도되는 화학적 과정으로, 대기 중 오존 형성과 밀접한 관련이 있다. $NO_2$의 광분해를 통해 오존이 생성되며, 동시에 오존은 NO와 반응하여 다시 $NO_2$로 전환되는 과정을 통해 적정 농도의 평형이 유지된다. 그러나 대기 중 휘발성유기화합물(VOCs)이 존재할 경우, $NO_2$의 농도가 지속적으로 증가하면서 오존이 축적되어 그 농도가 상승하게 된다. 즉, 오존 생성에는 광화학 반응의 전구물질인 $NO_x$ 및 VOCs의 양과 기상 조건이 결정적이다(Kim *et al.*, 2024). 이에 따라, 광화학 반응에서 $NO_x$와 VOCs의 기여를 정량화하는 연구가 많이 이루어졌다. 선행 연구에 따르면, $NO_x$ 배출이 감소함에도 불구하고 오존 농도가 증가하는 현상이 관측되었으며(Li *et al.*, 2021b), 이는 최근 중국에서 주요 대기오염물질 배출량이 크게 감소했음에도 동아시아 지역에서 오존 농도의 개선이 제한적이었던 배경을 설명해준다(Lee *et al.*, 2021). 이러한 결과는 $NO_x$ 저감만으로는 대기질이 개선되는 효과가 제한적이며, VOCs의 배출 저감이 병행되어야 함을 시사한다(Colombi *et al.*, 2023). 따라서, 광화학 반응에 의한 지표 오존 생성을 억제하기 위해서는 $NO_x$ 배출을 대폭 감축하여 광화학 반응의 활성을 절대적으로 낮추거나, $NO_x$ 감축과 병행하여 VOCs 배출을 함께 저감함으로써 오존 축적을 방지하는 전략이 필요하다(Santiago *et al.*, 2024).

암모늄 생성 반응은 $SO_x$, $NO_x$ 및 암모니아($NH_3$) 간의 화학적 상호작용을 통해 황산암모늄 및 질산암모늄과 같은 에어로졸을 형성하는 과정으로, 이는 암모니아-질산-황산-물 시스템(ammonia-nitric acid-sulfuric acid-water system)으로도 정의된다. 해당 반응을 통해 생성되는 $PM_{2.5}$의 양은 반응에 참여하는 전구물질의 절대적인 양뿐만 아니라 대기 조성의 상대적인 비율에도 영향을 받는다. 이에 따라, 동아시아 대기질의 지역적 차이는 대기 조성 조건의 차이에 기인한다는 연구들이 다수 보고되었다(Cao *et al.*, 2023; Zhang *et al.*, 2021).

중국의 $SO_2$ 배출량 감소 이후, 중국 내 질산염의 양은 오히려 증가하는 경향이 나타났다. 이는 $SO_2$ 배출량 감소로 인해 황산염 형성이 감소하면서, 암모니아-질산-황산-물 시스템 내에서 질산염의 생성 반응이 상대적으로 강화된 결과로 해석된다(Jo *et al.*, 2020). 한편, 한국에서는 암모니아 농도에 따라 중국의 질소산화물($NO_x$) 배출량 감소에 대한 영향이 다르게 나타났다. 암모니아의 농도가 높은 지역에서는 질산암모늄($NH_4NO_3$)의 생성이 줄어 $PM_{2.5}$가 감소했지만, 암모니아 농도가 낮은 지역에서는 상대적으로 질산($HNO_3$) 농도가 증가하며 $PM_{2.5}$가 증가하는 경향이 확인되었다(Kim *et al.*, 2020). 또한, 한국과 일본처럼 전구체 수송 이후 2차 반응이 주요한 역할을

하는 지역에서는 기상 조건이 암모늄 생성 반응에 중요한 영향을 미치는 것으로 나타났다. 이러한 결과는 동아시아에서 2차 대기오염물질을 효과적으로 관리하기 위해 기상 요소와 화학 반응 간의 복잡한 대기 화학적 상호작용을 정밀하게 고려해야 함을 시사한다(Ryu *et al.*, 2021; Park and Cho, 2020).

이와 관련하여, 최근 연구들은 2차 생성 오염물질의 농도 예측이 단순한 화학 반응식만으로 설명될 수 없으며, 기상장의 정밀도에 따라 크게 달라질 수 있음을 강조하고 있다. 특히 오존의 경우, 광화학 반응이 일사량, 경계층 높이, 상대습도, 기온 등의 기상 변수에 민감하게 반응하며, 이들 입력값에 내재된 불확실성이 반응 경로와 반응 속도에 직·간접적인 영향을 미친다(Cheong *et al.*, 2024a; Byun *et al.*, 2022a). 예를 들어, 경계층이 과소 모의될 경우 전구물질이 과집적되어 오존 생성 반응이 과도하게 활성화되거나, 반대로 일사량의 과소 모의는 광화학 반응 비활성화를 유도할 수 있다. 또한, 야간 화학 반응과 같이 기상 조건에 따라 민감도가 높은 반응 경로가 충분히 반영되지 않을 경우, 질산염 등의 주요 성분이 과소평가되는 사례도 보고되고 있다(Wu *et al.*, 2021). 이러한 한계는 모델 내 화학 메커니즘의 정교화뿐 아니라 고정밀 기상 입력의 확보가 동반되어야 함을 시사하며, 변환 반응의 불확실성을 줄이기 위한 핵심 과제로 제시되고 있다.

종합적으로 볼 때, 최근 연구들은 동아시아 대기질 개선을 위한 정책 수립 과정에서 대기 화학적 비선형성과 기상 조건의 영향력을 함께 고려해야 함을 강조하고 있다. 단순히 주요 배출원을 저감하는 방식만으로는 충분하지 않으며, 대기 조성 변화에 따른 화학적 상호작용이 예상치 못한 결과를 초래할 가능성이 있음을 보여준다. 특히, Uno *et al.* (2020)은 이러한 배출량 변화에 따른 대기 화학적 기작의 변화를 '새로운 패러다임'으로 정의하며, 동아시아 대기질의 변화된 기작에 대한 심층적인 연구가 필요함을 제안하였다. 이에 따라, 최신 배출량 자료와 정밀한 기상 입력을 반영한 모델링 연구를 통해 지역별 대기오염 특성을 정밀하게 분석하고, 이를 바탕으로 과학적 근거에 기반한 오염 저감 전략을 수립하는 것이 필수적이다.

### 3.1.3 2차 대기오염물질의 수송

동아시아에서는 계절별 기상 변화와 대기 정체 현상이 고농도 오염 사례를 유발하는 핵심 요인으로 작용한다(Jee *et al.*, 2022; Jephcote *et al.*, 2021; Liu and Wang, 2020; Xu *et al.*, 2020). 선행연구에서 조사된 대기오염물질의 농도 상승에 기여하는 주요 경로는 두 가지 정도로 요약할 수 있었다. 1) 전구물질의 장거리 수송을 증가시켜 특정 지역의 배경 농도를 높인다(Jun and Gu, 2023; Wu *et al.*, 2023; Kang *et al.*, 2021a; Zheng *et al.*, 2021). 2) 대기 정체로 인하여 대기오염물질 및 전구물질이 축적될 경우 대기오염물질의 농도가 급격히 상승할 수 있다(Lee *et al.*, 2022a).

장거리 수송은 대기오염물질 및 전구물질이 먼 거리를 이동하며 다른 지역에 영향을 미치는 현상을 의미한다. 이 과정에서 오염물질은 배출 지역이 아닌 다른 지역에서 2차 생성 반응을 일으켜, 복잡한 기작을 통해 대기질을 악화시킬 수 있다. 동아시아에서는 주로 중국에서 시작되어 한반도와 일본에 영향을 주는 수송을 말한다. 예를 들어, Jung *et al.* (2022)의 연구에 따르면, 봄철에 서해에서 발생하는 고기압은 중국에서 배출된 오염물질의 이동을 촉진하여 한반도와 일본에서 오존과 미세먼지의 농도를 증가시키는 주요 요인으로 작용하였다. 그 밖에 동아시아를 범위로 진행된 여러 모델링 연구들은 배출원의 장거리 수송의 영향을 크게 평가하였으며, 최근에는 기후 규모의 수송에 대한 관련 연구도 많이 이루어졌다(Hyun *et al.*, 2024; Pouyaei *et al.*, 2022).

한편, 대기 정체에 의한 효과는 오염물질이 한 지역에 머물면서 2차 오염물질이 증가하는 것을 의미한다. 공기의 흐름이 약해지면 대기 내 오염물질이 정체되어 2차 화학 반응이 활발해진다. You *et al.* (2021)의 연구에서는 2015년 10월 동아시아에서 장기간 지속된 고농도 $PM_{2.5}$ 사례를 분석한 결과, 중국의 강한 고기압과 북태평양 저기압(태풍)이 결합하

여 대기 혼합이 제한되었고, 이에 따라 오염물질이 장기간 축적되며 황산염과 질산염을 생성하는 2차 생성 반응이 활발하게 일어난 것으로 추정하였다. 이처럼 지속된 대기 정체가 동아시아의 고농도 미세먼지 사례를 유발한다는 사례들이 분석되었다(Wang *et al.*, 2023a). 또한, 대기 정체와 함께 발생하는 여름철의 강한 일사량과 높은 온도는 오존 생성 반응을 더욱 심화하여 고농도 오존 사건을 발생시키는 원인이 된다(Seo *et al.*, 2020).

이러한 기상 현상의 영향은 모델링에서도 중요한 변수로 작용한다. 동아시아는 계절풍과 장마전선의 영향이 뚜렷하여 수송 경로와 농도 분포에 계절성이 강하게 나타난다. 그러나 현재의 대기화학 모델은 이러한 대규모 기상 시스템을 정밀하게 반영하는 데 한계를 보이고 있으며, 수송 관련 예측에서 구조적인 오차를 초래할 수 있다. 예를 들어, 겨울철 시베리아 고기압에 의해 발생하는 북서풍은 중국 북부의 $NO_x$와 $SO_2$를 한국과 일본으로 장거리 수송시키는 주요 기작이지만, 모델이 이 기압계의 강도나 지속 시간을 정확히 재현하지 못할 경우 실제 고농도 사례와의 차이가 발생할 수 있다(You *et al.*, 2021; Seo *et al.*, 2020). 반대로 여름철에는 장마전선과 남서기류가 수송을 차단하거나 강수에 의한 제거 효과가 두드러지는데, 이때 강수량과 전선 위치에 대한 예측 불확실성은 모델 성능 저하의 원인이 된다(Wang *et al.*, 2023c; Kawashima *et al.*, 2022).

연구 결과들을 종합하면, 동아시아의 주요 도시들은 장거리 수송 및 대기 정체 효과가 함께 발생하여 고농도 대기오염물질 사례를 만들어내는 것으로 정리되었다. 즉, 기상 조건은 단순한 배경 요소가 아니라 오염물질의 이동과 축적을 결정하는 핵심 변수이며, 이를 이해하고 반영하는 것이 효과적인 대기질 관리 전략 수립의 필수적인 요소가 된다. 따라서 장거리 수송과 지역 내 기상 패턴과 배출이 결합하여 대기오염을 형성하는 것을 정밀하게 분석하고, 이를 바탕으로 한 대기질 관리 정책을 마련할 필요가 있다.

### 3.2 대기질 상호작용

본 연구에서는 동아시아의 대기질 상호작용 관련 모델링 연구의 결과를 소개하는 것에 목적이 있으나, 기후 규모의 기상 변화와 대기질의 상호작용은 지역 규모가 아닌 대륙 규모 및 국가 규모의 연구들이 주로 이루어졌기 때문에 동아시아보다 넓은 범위의 연구들도 일부 포함하여 내용을 요약하였다. 여러 가지 모델링 연구에서 분석한 공통적인 기작들은 표 3에서 요약되었다.

#### 3.2.1 기후변화가 2차 대기오염물질의 생성 및 분포에 미치는 영향

기후변화는 기온, 습도, 강수량의 변화뿐만 아니라 대규모 대기 순환과 식생 변화를 포함한 다양한 기후 인자들의 변화를 말한다. 이러한 환경적 변동은 대기오염물질의 생성과 이동 및 소멸 과정에 영향을 미치며, 결과적으로 대기질에도 변화를 초래하는 것으로 알려져 있다. 최근 연구들에서 기후변화가 대기질에 영향을 미치는 경로는 크게 세 가지로 요약되었다. 기후변화로 인한 1) 기상의 변화, 2) 대기 순환 및 바람 패턴의 변화, 3) 식생의 변화

첫째, 기후변화는 기온, 습도, 강수량 등의 변화를 초래하며, 이는 대기오염물질의 생성과 소멸에 다양한 화학적·물리적 기작을 통해 영향을 미친다. 이러한 변화는 지역적 특성, 계절, 그리고 기후변화 시나리오에 따라 대기질을 악화시키거나 개선하는 결과를 초래할 수 있다.

최근 연구에 따르면, 기온 상승은 휘발성유기화합물(VOCs)과 질소산화물($NO_x$)의 광화학 반응을 활성화하여 오존 농도를 증가시키며(Meng *et al.*, 2023), 강수량 감소는 대기 중 오염물질을 세정하는 습성 침적(wet deposition) 과정을 억제하여 $PM_{2.5}$와 같은 입자상 오염물질의 체류 시간을 길게 만든다(Yang *et al.*, 2023 ). 또한, 건조한 기후는 산불 발생 빈도와 강도를 높이고, 토양 건조로 인해 비산먼지 배출을 증가시켜 대기오염을 심화시킨다(Liu *et al.*, 2023b; Zong *et al.*, 2020). 산불에서 방출된 1차 오염

**Table 3.** References according to climate-atmosphere interaction mechanism.

| Interaction direction | Mechanism | Reference |
|---|---|---|
| Impacts of Climate Change on Air Pollutants | Changes in temperature, humidity, and precipitation | U.S. EPA; De Arruda Moreira *et al.*, 2024; Tsai *et al.*, 2024; Wang *et al.*, 2024d; Wang *et al.*, 2023b; Wang *et al.*, 2023d; Yang *et al.*, 2023; Liu *et al.*, 2023b; Zhang *et al.*, 2023; Tabari, 2020; Zhao *et al.*, 2020; Zong *et al.*, 2020 |
| | Changes in wind patterns and atmospheric circulation | Liu *et al.*, 2024; Ryu and Min, 2024; Jeong *et al.*, 2023; Ma *et al.*, 2023a; Wang *et al.*, 2023a; Lian *et al.*, 2022; Jeong *et al.*, 2021; Li *et al.*, 2021a; Zhu *et al.*, 2021; Piao *et al.*, 2020 |
| | Changes in vegetation | Miki and Itahashi, 2024; Wang *et al.*, 2024a; Ma *et al.*, 2023b; Dewan and Lakhani, 2022; Park *et al.*, 2022a; Weber *et al.*, 2022; Zhu *et al.*, 2022; Diener and Mudu, 2021; Lian *et al.*, 2021; Turnock *et al.*, 2020; Xu *et al.*, 2020 |
| Impacts of Air Pollutants on Climate Change | Aerosol direct effect (ARI, Aerosol Radiative Interaction) | Hao *et al.*, 2023; Kim *et al.*, 2023; Liu and Matsui, 2021; Gao *et al.*, 2020; Hanaoka and Masui, 2020; Hong *et al.*, 2020 |
| | Aerosol indirect effect (ACI, Aerosol Cloud Interaction) | Jana *et al.*, 2024; Wang *et al.*, 2024c; Anderson *et al.*, 2023; Dagan *et al.*, 2023; Huusko *et al.*, 2022; Wang *et al.*, 2021; Bellouin *et al.*, 2020 |
| | Radiative forcing changes caused by gaseous substances | Cao *et al.*, 2024; Bae *et al.*, 2023; Wall *et al.*, 2022; Gong *et al.*, 2021 |

물질과 유기 가스는 광화학적 산화 반응을 거쳐 2차 오염물질 생성을 촉진하며, 이는 장거리 이동을 통해 대기질에 장기적인 영향을 미칠 수 있다(Wang *et al.*, 2024d; U.S. EPA).

반면, 기후변화가 대기질 개선에 기여하는 기작도 존재한다. 대표적으로, 높아진 기온으로 인해 대기경계층 고도(Planetary Boundary Layer Height; PBLH)가 높아지고 이에 따라 지표의 대기오염물질의 농도가 낮아지는 경향이 나타날 수 있으며, 강해진 풍속은 대기 확산에 영향을 미쳐 대기질을 개선시키는 효과를 유발한다(De Arruda Moreira *et al.*, 2024; Tsai *et al.*, 2024; Wang *et al.*, 2023b). 또한, 기후변화에 따라 강수량이 늘어나는 지역의 경우, 세정효과(Wet deposition)로 인한 대기질 개선이 기대된다(Wang *et al.*, 2023d; Zhang *et al.*, 2023; Tabari, 2020). 이처럼, 기후변화로 인한 기상 조건 변화는 대기오염물질의 생성과 소멸 과정에 다양한 영향을 미치며, 기상 조건에 따라 대기질이 악화될 수도, 개선될 수도 있다. 따라서, 이러한 상호작용을 보다 정밀하게 이해하기 위한 연구가 지속적으로 필요하다(Yang *et al.*, 2023; Moon and Song, 2020; Zhao *et al.*, 2020).

둘째, 기후변화는 대기 순환의 변화를 야기하므로 바람 패턴이 변화한다는 특징을 갖고 있다. 특히, 엘니뇨-남방진동(ENSO), 몬순과 같은 기후요인이 동아시아 지역에서 에어로졸의 농도와 수송 패턴에 큰 영향을 미치는 것으로 연구되었다(Liu *et al.*, 2024; Ma *et al.*, 2023a; Wang *et al.*, 2023a; Jeong *et al.*, 2021). 예를 들어, 겨울철의 ENSO는 봄철 동아시아의 더 많은 탄소성 에어로졸 배출을 야기하며 남서풍을 강화하여 더 많은 양의 에어로졸을 중국으로부터 하류지역인 한국과 일본으로 수송한다(Ryu and Min, 2024; Li *et al.*, 2021a; Zhu *et al.*, 2021). 뿐만 아니라, 동아시아에서의 ENSO는 성층권 오존의 대류권 유입을 유발하여 지표 오존 농도를 높이며(Jeong *et al.*, 2023), 몬순은 동아시아의 해안지역에서 오존 농도를 증가시키는 역할을 하였다(Ma *et al.*, 2023b).

셋째, 기후변화는 식생의 변화를 유발하고 이로 인해 식생과 대기오염물질 간의 상호작용에 영향을 준다는 내용의 연구가 다수 이루어졌다. 선행 연구에 따르면, 지구 온난화에 의해 북반구의 전반적인 식생

은 증가하는 것으로 전망되었으며(Lian *et al.*, 2022, 2021; Piao *et al.*, 2020), 이러한 변동에 의한 대기오염물질의 변화가 예상되었다(Dewan and Lakhani, 2022; Diener and Mudu, 2021). 식생의 증가는 대기 중 오염물질을 흡수하는 건조침전 기작을 강화시키기 때문에 오히려 대기질이 개선되는 긍정적인 효과를 기대할 수 있다(Park *et al.*, 2022a).

하지만, LAI (leaf area index)의 증가로 인한 지구의 반사도 감소는 오히려 지구 온난화를 촉진시킬 수 있으며(Xu *et al.*, 2020), 또한 이소프렌과 같은 BVOC의 증가는 오존 생성의 전구체로 작용하여 오존 농도를 높이는 등 대기질에 부정적인 상호작용도 발견되었다(Miki and Itahashi, 2024; Wang *et al.*, 2024a; Ma *et al.*, 2023b; Weber *et al.*, 2022; Zhu *et al.*, 2022). 따라서 기후변화로 인해 야기될 대기오염물질의 변화는 정확하게 정량화하기 어렵지만 피드백 작용에 대해서 고려하여야 함을 알 수 있다(Turnock *et al.*, 2020).

### 3.2.2 2차 대기오염물질이 기후에 미치는 영향

대기오염물질은 에어로졸로 작용하거나 기체의 복사열 특성으로 인해 지구 기후 시스템에 직간접적으로 영향을 미친다(Park *et al.*, 2024a; Lu *et al.*, 2023; Zheng *et al.*, 2020; Isaken *et al.*, 2009). 이는 대기오염물질이 직접적으로 대기질에 악영향을 미치는 것뿐만 아니라 기후변화를 야기하여 간접적인 나비효과를 불러일으킬 수 있음을 시사한다. 이러한 영향을 파악하기 위해 시나리오를 기반으로 한 미래 기후 모델링 연구들이 다수 이루어졌으며, 최근의 연구 내용을 분류하여 보면 크게 세 가지 경로 1) 에어로졸의 직접 효과, 2) 에어로졸의 간접 효과, 3) 가스상 물질의 복사 강제력 효과로 요약되었다.

첫째로 직접적인 에어로졸 복사 강제 효과는 에어로졸의 입자 특성에 따라 태양 복사를 흡수하거나 반사하는 현상을 말한다. 예를 들어, 블랙카본(black carbon)은 태양 복사를 강하게 흡수하여 국지적 및 전 지구적 온난화 효과를 유발하며, 이는 고위도 지역의 빙하 및 해빙 감소를 가속화하는 주요 요인으로 작용한다(Hao *et al.*, 2023; Gao *et al.*, 2020; Hong *et al.*, 2020). 반면, 황산염 에어로졸과 같은 반사성 에어로졸은 단파 복사를 산란시켜 오히려 지표면의 냉각 효과를 유도한다. 이처럼 에어로졸은 그 종류에 따라 기후에 다른 영향을 미친다. 따라서 에어로졸의 양뿐만 아니라 그 조성이 매우 중요한 역할을 한다는 것을 알 수 있다. 최근 동아시아에서 진행된 연구에 따르면, 대기질 규제 강화로 대기 중 황산염 에어로졸 농도가 급감하면서, 그로 인한 대기 냉각 효과 감소가 지구 온난화 가속화로 이어졌다는 연구 결과들이 보고되었다(Kim *et al.*, 2023; Liu and Matsui, 2021; Hanaoka and Masui, 2020).

한편, 간접적인 에어로졸 복사 강제 효과는 에어로졸 구름 효과라고도 불리며, 이는 에어로졸이 구름 응결핵 혹은 빙정핵으로 작용하여 구름 미세물리학적 과정을 조절하고, 결과적으로 구름으로 인한 복사 강제력과 수문 순환에 영향을 미치는 것을 말한다. 대표적으로, 에어로졸 농도가 증가할 경우 구름 액적 수농도가 증가하여 구름의 반사도가 높아지는 Twomey 효과와 강수효율이 저하되어 구름 지속시간이 연장되는 Albrecht 효과에 대한 연구가 주를 이룬다(Jana *et al.*, 2024; Wang *et al.*, 2021; Isaken *et al.*, 2009). 이러한 구름을 포함한 상호작용은 불확실성이 커서 대기질 상호작용에서 예측하기 어려운 부분이다. 따라서, 최근 에어로졸 구름 효과의 복사 강제력에 대한 모의를 개선하기 위한 연구가 다수 이루어졌다. 이를 위해 대류 조건, 습도 등의 수문 순환에 영향을 미치는 조건들을 정교화하여 모델링을 수행하였으며, 그 결과 복사 강제력에 대한 모의가 상당히 개선됨을 알 수 있었다(Wang *et al.*, 2024c; Anderson *et al.*, 2023; Dagan *et al.*, 2023; Bellouin *et al.*, 2020). 선행 연구는 공통적으로 에어로졸 구름 효과가 무시해서는 안될 영향력을 갖고 있으며, 지구 기후를 보다 정확하게 이해하기 위해서는 반드시 구름과의 상호작용을 고려한 모델링이 필요함을 강조하였다(Huusko *et al.*, 2022).

마지막으로 가스상 물질에 의한 복사 강제력 효과

는 대기 중의 가스상 물질이 태양 복사 및 지구 복사 에너지의 흡수와 방출을 조절하여 기후에 영향을 미치는 현상을 의미하며, 수증기, 오존, 이산화질소 등의 가스상 대기오염물질이 중요한 역할을 수행한다. 이러한 가스들은 직접적인 복사 강제력을 통해 지구 에너지 균형을 변화시키거나, 간접적인 기작을 통해 생태계 및 대기 순환을 조절하여 기후에 영향을 미친다(Isaken *et al.*, 2009). 가스상 물질에 의한 직접적인 복사 강제력 효과는 대류권 내에서 적외선을 흡수하여 대기의 온도를 상승시키는 과정으로, 온실가스(GHG)와 같은 원리로 지구 복사 균형을 변화시킨다(Bae *et al.*, 2023). 오존과 메탄($CH_4$)은 주요한 단기 기후 인자(short-lived climate forcers, SLCF)로 연구되어 왔으며, 기후 민감도에 영향을 미쳐 기온 상승, 강수 패턴 변화, 대기 순환 변화를 유발하는 것으로 연구되었다(Isaken *et al.*, 2014). 한편, 가스상 물질에 의한 간접적인 복사 강제력 효과는 가스가 지표면 생태계와 기후 시스템에 영향을 미쳐 기후를 변화시키는 것이다.

예를 들어, 오존은 식물의 광합성을 저해하고 생장 속도를 감소시키며 증산 작용을 변화시켜 대기 중 수증기 농도를 변화시킨다. 이를 통해, 지표면의 반사도(albedo)와 기상 조건을 변화시키는 결과를 초래할 수 있다(Cao *et al.*, 2024; Gong *et al.*, 2021). 이러한 기작들로 인하여 단기 체류 기체(short-lived gases)는 대기 중 체류시간이 길지 않음에도 불구하고 강한 복사 강제력을 유발할 수 있으며, 지역 및 전 지구적 기후에 상당한 영향을 미친다.

이와 같이, 대기오염물질은 다양한 경로로 기후에 영향을 줄 수 있으며 이에 따른 피드백을 고려한 모델링이 필요함을 시사한다(Kim *et al.*, 2025). 최근 진행된 연구들은 관점에 따라 다양한 결과가 도출되었다. 일부 연구에서는 에어로졸의 영향이 온실효과보다 강하게 작용하여 이상 기상의 주요 요인으로 지목되었으며, 미래 시나리오에서 큰 우려 요소로 제시되었다(Wang *et al.*, 2023c). 반면, 해양 중심 연구에서는 온실가스에 의한 기후변화가 보다 치명적이라는 결과가 보고되기도 하였다(Wall *et al.*, 2022). 또한, 지역별로 에어로졸의 기후 효과가 상이하게 나타나는 것으로 밝혀진 만큼(Lu *et al.*, 2023), 더 상세화된 지역 규모의 대기질 상호작용 모델링 연구와 국가 간 논의가 필수적임을 시사하였다.

## 4. 결론 및 제언

본 연구에서는 동아시아를 대상으로 수행된 2차 대기오염물질 모델링 연구를 종합적으로 검토하고, 최근 연구 동향 및 주요 결과를 분석하였다. 특히, $PM_{2.5}$와 오존을 중심으로 전구물질의 배출, 화학적 변환, 그리고 수송 과정을 상세히 논의하였으며, 기후 변화와 대기질 간의 상호작용에 관한 연구를 정리하였다. 이를 통해 동아시아 지역에서 수행된 모델링 연구의 전반적인 진행 상황을 정리하고, 연구 동향을 평가하였다.

첫째, 기계학습 모델의 활용이 확대되면서 화학수송모델(CTM)과 기계학습 모델을 결합한 하이브리드 모델에 대한 연구가 새롭게 등장하고 있다. 하이브리드 모델은 기존 수치 모델의 높은 계산 비용을 절감할 수 있으며, 대기오염 관측자료와 모델 결과를 효율적으로 융합하여 보다 적은 계산 비용으로도 개선된 모의를 수행할 수 있는 장점이 있다. 이러한 특성으로 인해 향후 대기질 모델링 연구에서 하이브리드 모델의 활용이 더욱 증가할 것으로 전망된다.

둘째, 동아시아 지역의 2차 대기오염물질 생성은 전구물질 배출, 화학적 변환, 그리고 장거리 수송의 복합적인 영향을 받으며, 이로 인해 단순한 배출 저감만으로는 효과적인 대기질 개선이 어렵다. 국가별 배출 저감 정책에 따른 배출량 변화뿐만 아니라, 기상 조건 및 대기 조성의 변화에 따라 광화학 반응과 암모늄 생성 반응이 비선형적으로 조절되며, 결과적으로 2차 대기오염물질의 생성이 복잡한 양상을 보인다. 또한, 대기오염물질의 장거리 수송 강화 및 대기 정체와 같은 기상 조건이 대기질 악화에 중요한

영향을 미치므로, 이러한 요인들을 종합적으로 고려한 모델링 연구가 필수적이다. 이를 위해 국가 간 협력 모델링 연구를 수행하여 각국의 대기오염물질 배출량, 화학적 변환 과정, 그리고 수송 영향을 체계적으로 분석하고, 상호 협의를 통해 보다 정밀한 정량적 평가를 수행할 필요가 있다.

셋째, 기후변화와 대기질 간의 상호작용을 고려한 연구가 증가하고 있으며, 가스상 물질과 에어로졸이 기후변화에 미치는 영향뿐만 아니라, 기후변화가 대기오염물질의 생성 및 분포에 미치는 영향 또한 주요 연구 과제로 부각되고 있다. 특히, 엘니뇨-남방진동(ENSO)과 같은 기후요인은 대기오염물질의 장거리 이동을 촉진할 수 있으며, 식생 변화로 인한 BVOCs 배출 변화 또한 대기질에 중요한 영향을 미칠 가능성이 크다. 또한, 대기오염물질은 반사도를 변화시키거나 구름 미세물리 과정에 영향을 미쳐 기후변화의 불확실성을 증가시킬 수 있다. 따라서, 기후변화와 대기질의 상호작용을 정량적으로 평가할 수 있는 대기질 모의 연구가 촉구되며, 이를 통해 미래 기후 및 대기질 예측 모델의 신뢰도를 향상시킬 필요가 있다.

넷째, 동아시아 지역의 대기질 상호작용을 고려한 지역 규모 연구의 필요성이 증가하고 있다. 한·중·일 개별 연구는 다수 수행되었으나, 연구 간에 사용된 자료 및 방법론의 차이로 인해 결과의 일관성이 부족한 경우가 많았다. 또한, 동아시아 지역을 대상으로 한 국가 간 대기질 상호작용 연구는 여전히 제한적인 수준에 머물러 있다. 한·중·일은 유사한 대기오염 배출원과 기상 조건, 그리고 대기화학적 과정을 공유하는 만큼, 협력 연구를 통해 연구 결과를 상호 비교·검증하고, 대기질 문제에 대한 공동의 이해를 도출하는 과정이 필수적이다. 이를 기반으로 과학적 근거에 기반한 대기질 정책을 수립하는 것이 동아시아 지역의 효과적인 대기오염 관리에 중요한 역할을 할 것이다.

본 연구는 최근 동아시아 지역에서 수행된 2차 대기오염물질 모델링 연구를 종합적으로 정리하고, 향후 연구 방향을 제시했다는 점에서 의의를 갖는다. 대기질 모델링은 실제 대기 환경을 모의하여 대기오염 문제를 분석하는 핵심적인 도구인 만큼, 인위적 배출량 변화 및 기후변화와 같은 동적인 요인을 효과적으로 반영하는 것이 중요하다. 또한, 컴퓨팅 기술의 발전에 따라 모델링 기법 역시 지속적으로 고도화되고 있으며, 이를 활용하여 대기질 모델의 예측 정확도를 향상시킬 수 있을 것으로 기대된다. 또한 본문에서 언급한 여러 모델링 이슈들을 개선하기 위한 연구들도 지속적으로 수행되고 있기 때문에, 향후 대기의 복잡한 상호작용을 보다 정밀하게 규명하고, 장기적인 환경 변화를 예측함으로써 관련 정책 및 대응 전략 수립에 기여할 수 있을 것으로 전망된다.

## 감사의 글

이 논문은 환경부 2025년도 정부(환경부)의 재원으로(Republic of Korea Ministry of Environment, MOE)의 지원을 받아 국립환경과학원(National Institute of Environmental Research, NIER)에서 수행된 연구과제(NIER-2021-03-03-007, NIER-2023-01-02-127)의 지원을 받아 수행된 연구입니다.

## References

Abdollahi, A., Pradhan, B. (2023) Explainable artificial intelligence (XAI) for interpreting the contributing factors feed into the wildfire susceptibility prediction model, The Science of the Total Environment, 879, 163004. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.163004

Andersen, H., Cermak, J., Douglas, A., Myers, T.A., Nowack, P., Stier, P., Wall, C.J., Kemsley, S.W. (2023) Sensitivities of cloud radiative effects to large-scale meteorology and aerosols from global observations, Atmospheric Chemistry and Physics, 23(18), 10775-10794. https://doi.org/10.5194/acp-23-10775-2023

Bae, C., Kim, E., Yoo, C., Kim, H.C., Kim, Y.M., Kim, S. (2021) Prioritizing Local Authorities Effective to Lower the Nationwide $PM_{2.5}$ Concentrations and the Personal Exposure Based on the Source Apportionment with the CAPSS 2016 Emissions Inventory, Journal of Kore-

an Society for Atmospheric Environment, 37(3), 410-428, (in Korean with English abstract). https://doi.org/10.5572/KOSAE.2021.37.3.410

Bae, M., Kim, H.C., Kim, B.-U., Kim, S. (2017) Development and application of the backward-tracking model analyzer to track physical and chemical processes of air parcels during the transport, Journal of Korean Society for Atmospheric Environment, 33(3), 217-232, (in Korean with English abstract). https://doi.org/10.5572/KOSAE.2017.33.3.217

Bae, M., Kim, S., Yoo, C. (2020) Estimating the Shutdown Effect of the Old Coal-fired Power Plants on $PM_{2.5}$ and its Composition, Journal of Korean Society for Atmospheric Environment, 36(1), 48-63, (in Korean with English abstract). https://doi.org/10.5572/KOSAE.2020.36.1.048

Bae, S., Lim, Y., Oh, J., Kwon, H. (2023) Mediation of daily ambient ozone concentration on association between daily mean temperature and mortality in 7 metropolitan cities of Korea, Environment International, 178, 108078. https://doi.org/10.1016/j.envint.2023.108078

Bai, L., Wang, J., Ma, X., Lu, H. (2018) Air Pollution Forecasts: An Overview, International Journal of Environmental Research and Public Health, 15(4), 780. https://doi.org/10.3390/ijerph15040780

Bellouin, N., Quaas, J., Gryspeerdt, E., Kinne, S., Stier, P., Watson-Parris, D., Boucher, O., Carslaw, K.S., Christensen, M., Daniau, A.-L., Dufresne, J.-L., Feingold, G., Fiedler, S., Forster, P., Gettelman, A., Haywood, J.M., Lohmann, U., Malavelle, F., Mauritsen, T., McCoy, D.T., Myhre, G., Mülmenstädt, J., Neubauer, D., Possner, A., Rugenstein, M., Sato, Y., Schulz, M., Schwartz, S.E., Sourdeval, O., Storelvmo, T., Toll, V., Winker, D., Stevens, B. (2020) Bounding global aerosol radiative forcing of climate change, Reviews of Geophysics, 58(1), e2019RG000660. https://doi.org/10.1029/2019RG000660

Bey, I., Jacob, D.J., Yantosca, R.M., Logan, J.A., Field, B.D., Fiore, A.M., Li, Q., Liu, H.Y., Mickley, L.J., Schultz, M.G. (2001) Global modeling of tropospheric chemistry with assimilated meteorology: Model description and evaluation, Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 106(D19), 23073-23095. https://doi.org/10.1029/2001JD000807

Bhaskar, C., Lakshminarayanachari, K. (2020) Numerical model for primary and secondary air pollutants emitted from an area and point source in an urban area with chemical reaction and removal mechanisms, Materials Today Proceedings, 37, 2961-2967. https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.08.706

Borge, R., López, J., Lumbreras, J., Narros, A., Rodríguez, E. (2010) Influence of boundary conditions on CMAQ simulations over the Iberian Peninsula, Atmospheric Environment, 44(23), 2681-2695. https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2010.04.044

Byun, D.W., Ching, J.K.S. (1999) Science algorithms of the EPA Models-3 Community Multiscale Air Quality (CMAQ) modeling system (EPA Report No. EPA-600/R-99/030). U.S. Environmental Protection Agency.

Byun, D.W., Park, R.J., Kim, J., Song, C.H. (2022a) Source-receptor analysis of secondary pollutants in Northeast Asia using chemical transport modeling, Atmospheric Pollution Research, 13(5), 101368. https://doi.org/10.1016/j.apr.2022.101368

Byun, M., Park, J., Han, S., Kim, D.G., Jung, D., Choi, W. (2022b) Spatial Distributions of $PM_{2.5}$ Concentrations, Chemical Constituents, and Acidity for $PM_{2.5}$ Pollution Events and Their Potential Source Contribution: Based on Observations from a Nationwide Air Quality Monitoring Network for 2018-2019, Journal of Korean Society for Atmospheric Environment, 38(4), 508-523, (in Korean with English abstract). https://doi.org/10.5572/KOSAE.2022.38.4.508

Cabaneros, S.M., Calautit, J.K., Hughes, B.R. (2019) A review of artificial neural network models for ambient air pollution prediction, Environmental Modelling Software, 119, 285-304. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2019.06.014

Cao, J., Xie, J., Sun, J., Li, J., Xu, Z., Hua, C., Zhang, Y., Song, B., Liu, Y. (2023) [Influence of ammonium sulfate and ammonium nitrate on the properties of ambient $PM_{2.5}$ in Zhenjiang], PubMed, 44(10), 5356-5369. https://doi.org/10.13227/j.hjkx.202210270

Cao, J., Yue, X., Ma, M. (2024) Simulation of ozone-vegetation coupling and feedback in China using multiple ozone damage schemes, Atmospheric Chemistry and Physics, 24(7), 3973-3987. https://doi.org/10.5194/acp-24-3973-2024

Cha, Y., Song, C., Jeon, K., Yi, S. (2023) Factors affecting recent $PM_{2.5}$ concentrations in China and South Korea from 2016 to 2020, The Science of the Total Environment, 881, 163524. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.163524

Chang-Hoi, H., Park, I., Oh, H., Gim, H., Hur, S., Kim, J., Choi, D. (2021) Development of a $PM_{2.5}$ prediction model using a recurrent neural network algorithm for the Seoul metropolitan area, Republic of Korea, Atmo-

spheric Environment, 245, 118021. https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2020.118021

Chatani, S., Shimadera, H., Itahashi, S., Yamaji, K. (2020) Comprehensive analyses of source sensitivities and apportionments of $PM_{2.5}$ and ozone over Japan via multiple numerical techniques, Atmospheric Chemistry and Physics, 20(17), 10311-10329. https://doi.org/10.5194/acp-20-10311-2020

Chen, C., Lai, H., Hsiao, M., Ma, H. (2022a) Benefit analysis of precursor emission reduction on $PM_{2.5}$: Using CMAQ-RSM to evaluate control strategies in different seasons, Aerosol and Air Quality Research, 22(10), 210381. https://doi.org/10.4209/aaqr.210381

Chen, H., Oliver, B.G., Pant, A., Olivera, A., Poronnik, P., Pollock, C.A., Saad, S. (2022b) Effects of air pollution on human health - Mechanistic evidence suggested by in vitro and in vivo modelling, Environmental Research, 212, 113378. https://doi.org/10.1016/j.envres.2022.113378

Cheong, H.B., Choi, M., Lee, H.J. (2024a) Evaluating chemical transformation pathways of $PM_{2.5}$ and ozone in East Asia using updated emissions inventories, Environmental Pollution, 328, 121514. https://doi.org/10.1016/j.envpol.2023.121514

Cheong, Y., Kim, T., Ryu, J., Ryoo, I., Park, J., Jeon, K., Yi, S., Hopke, P.K. (2024b) Source apportionment of $PM_{2.5}$ using DN-PMF in three megacities in South Korea, Air Quality Atmosphere & Health. https://doi.org/10.1007/s11869-024-01584-5

Cimorelli, A.J., Perry, S.G., Venkatram, A., Weil, J.C., Paine, R., Wilson, R.B., Lee, R.F., Peters, W.D., Brode, R.W. (2005) AERMOD: A Dispersion Model for Industrial Source Applications. Part I: General Model Formulation and Boundary Layer Characterization, Journal of Applied Meteorology, 44(5), 682-693. https://doi.org/10.1175/JAM2227.1

Colombi, N.K., Jacob, D.J., Yang, L.H., Zhai, S., Shah, V., Grange, S.K., Yantosca, R.M., Kim, S., Liao, H. (2023) Why is ozone in South Korea and the Seoul metropolitan area so high and increasing? Atmospheric Chemistry and Physics, 23(7), 4031-4044. https://doi.org/10.5194/acp-23-4031-2023

Cooper, J.A., Watson, J.G. Jr. (1980) Receptor oriented methods of air particulate source apportionment, Journal of the Air Pollution Control Association, 30(10), 1116-1125. https://doi.org/10.1080/00022470.1980.10465157

Dagan, G., Yeheskel, N., Williams, A.I.L. (2023) Radiative forcing from aerosol-cloud interactions enhanced by large-scale circulation adjustments, Nature Geoscience, 16(12), 1092-1098. https://doi.org/10.1038/s41561-023-01319-8

De Arruda Moreira, G., Marques, M.T.A., Da Silva Lopes, F.J., De Fátima Andrade, M., Landulfo, E. (2024) Analyzing the influence of the Planetary Boundary Layer Height, Ventilation Coefficient, Thermal Inversions, and Aerosol Optical Depth on the concentration of $PM_{2.5}$ in the city of São Paulo: A Long-term study, Atmospheric Pollution Research, 15(8), 102179. https://doi.org/10.1016/j.apr.2024.102179

Dewan, S., Lakhani, A. (2022) Tropospheric ozone and its natural precursors impacted by climatic changes in emission and dynamics, Frontiers in Environmental Science, 10. https://doi.org/10.3389/fenvs.2022.1007942

Diener, A., Mudu, P. (2021) How can vegetation protect us from air pollution? A critical review on green spaces' mitigation abilities for air-borne particles from a public health perspective - with implications for urban planning, The Science of the Total Environment, 796, 148605. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.148605

Draxler, R., Hess, G. (1998) An overview of the HYSPLIT_4 modeling system for trajectories, dispersion, and deposition, Australian Meteorological Magazine, 47, 295-308.

Fann, N., Lamson, A.D., Anenberg, S.C., Wesson, K., Risley, D., Hubbell, B.J. (2011) Estimating the National Public Health Burden Associated with Exposure to Ambient $PM_{2.5}$ and Ozone, Risk Analysis, 32(1), 81-95. https://doi.org/10.1111/j.1539-6924.2011.01630.x

Fung, P.L., Zaidan, M.A., Timonen, H., Niemi, J.v, Kousa, A., Kuula, J., Luoma, K., Tarkoma, S., Petäjä, T., Kulmala, M., Hussein, T. (2021) Evaluation of white-box versus black-box machine learning models in estimating ambient black carbon concentration, Journal of Aerosol Science, 152, 105694. https://doi.org/10.1016/j.jaerosci.2020.105694

Gao, C., Xiu, A., Zhang, X., Tong, Q., Zhao, H., Zhang, S., Yang, G., Zhang, M. (2022) Two-way coupled meteorology and air quality models in Asia: a systematic review and meta-analysis of impacts of aerosol feedbacks on meteorology and air quality, Atmospheric Chemistry and Physics, 22(8), 5265-5329. https://doi.org/10.5194/acp-22-5265-2022

Gao, M., Han, Z., Tao, Z., Li, J., Kang, J., Huang, K., Dong, X., Zhuang, B., Li, S., Ge, B., Wu, Q., Lee, H., Kim, C., Fu, J.S., Wang, T., Chin, M., Li, M., Woo, J., Zhang, Q., Cheng, Y., Wang, Z., Carmichael, G.R. (2020) Air quality and cli-

mate change, Topic 3 of the Model Inter-Comparison Study for Asia Phase III (MICS-Asia III) - Part 2: aerosol radiative effects and aerosol feedbacks, Atmospheric Chemistry and Physics, 20(2), 1147-1161. https://doi.org/10.5194/acp-20-1147-2020

Gao, Z., Zhou, X. (2024) A review of the CAMx, CMAQ, WRF-Chem and NAQPMS models: Application, evaluation and uncertainty factors, Environmental Pollution, 343, 123183. https://doi.org/10.1016/j.envpol.2023.123183

Geng, G., Xiao, Q., Liu, S., Liu, X., Cheng, J., Zheng, Y., Xue, T., Tong, D., Zheng, B., Peng, Y., Huang, X., He, K., Zhang, Q. (2021) Tracking Air Pollution in China: Near Real-Time $PM_{2.5}$ Retrievals from Multisource Data Fusion, Environmental Science & Technology, 55(17), 12106-12115. https://doi.org/10.1021/acs.est.1c01863

Gong, C., Yue, X., Liao, H., Ma, Y. (2021) A humidity-based exposure index representing ozone damage effects on vegetation, Environmental Research Letters, 16(4), 044030. https://doi.org/10.1088/1748-9326/abecbb

Grell, G.A., Peckham, S.E., Schmitz, R., McKeen, S.A., Frost, G., Skamarock, W.C., Eder, B. (2005) Fully coupled "online" chemistry within the WRF model, Atmospheric Environment, 39, 6957-6975.

Guenther, A., Hewitt, C.N., Erickson, D., Fall, R., Geron, C., Graedel, T., Harley, P., Klinger, L., Lerdau, M., Mckay, W.A., Pierce, T., Scholes, B. (1995) A global model of natural volatile organic compound emissions, Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 100(D5), 8873-8892. https://doi.org/10.1029/94JD02950

Han, J.S., Moon, K.J., Lee, S.J., Kim, Y.J., Ryu, S.Y., Cliff, S.S., Yi, S.M. (2006) Size-resolved source apportionment of ambient particles by positive matrix factorization at Gosan background site in East Asia, Atmospheric Chemistry and Physics, 6(1), 211-223. https://doi.org/10.5194/acp-6-211-2006

Han, K., Kim, H., Song, C. (2020) An Estimation of Top-Down $NO_x$ Emissions from OMI Sensor Over East Asia, Remote Sensing, 12(12), 2004. https://doi.org/10.3390/rs12122004

Han, X., Cai, J., Zhang, M., Wang, X. (2021) Numerical simulation of interannual variation in transboundary contributions from Chinese emissions to $PM_{2.5}$ mass burden in South Korea, Atmospheric Environment, 256, 118440. https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2021.118440

Hanaoka, T., Masui, T. (2020) Exploring effective short-lived climate pollutant mitigation scenarios by considering synergies and trade-offs of combinations of air pollutant measures and low carbon measures towards the level of the 2°C target in Asia, Environmental Pollution, 261, 113650. https://doi.org/10.1016/j.envpol.2019.113650

Hao, X., Jiang, Y., Yang, X., Liu, X., Zhang, Y., Wang, M., Liang, Y., Wang, Y. (2023) Impacts of Anthropogenic Emissions over South Asia on East Asian Spring Climate: Two Possible Dynamical Pathways, Journal of Climate, 36(10), 3231-3244. https://doi.org/10.1175/jcli-d-22-0049.1

Hasunuma, H., Ishimaru, Y., Yoda, Y., Shima, M. (2014) Decline of ambient air pollution levels due to measures to control automobile emissions and effects on the prevalence of respiratory and allergic disorders among children in Japan, Environmental Research, 131, 111-118. https://doi.org/10.1016/j.envres.2014.03.007

Heo, J.-B., Hopke, P.K., Yi, S.-M. (2009) Source apportionment of $PM_{2.5}$ in Seoul, Korea, Atmospheric Chemistry and Physics, 9(14), 4957-4971. https://doi.org/10.5194/acp-9-4957-2009

Hong, C., Zhang, Q., Zhang, Y., Davis, S.J., Zhang, X., Tong, D., Guan, D., Liu, Z., He, K. (2020) Weakening aerosol direct radiative effects mitigate climate penalty on Chinese air quality, Nature Climate Change, 10(9), 845-850. https://doi.org/10.1038/s41558-020-0840-y

Hong, H., Choi, I., Jeon, H., Kim, Y., Lee, J.-B., Park, C.H., Kim, H.S. (2022) An Air Pollutants Prediction Method Integrating Numerical Models and Artificial Intelligence Models Targeting the Area around Busan Port in Korea, Atmosphere, 13(9). https://doi.org/10.3390/atmos13091462

Hopke, P.K. (1991) An introduction to receptor modeling, Chemometrics and Intelligent Laboratory Systems, 10(1-2), 21-43. https://doi.org/10.1016/0169-7439(91)80032-L

Hopke, P.K. (2016) Review of receptor modeling methods for source apportionment, Journal of the Air & Waste Management Association, 66(3), 237-259. https://doi.org/10.1080/10962247.2016.1140693

Houdou, A., El Badisy, I., Khomsi, K., Abdala, S.A., Abdulla, F., Najmi, H., Obtel, M., Belyamani, L., Ibrahimi, A., Khalis, M. (2024) Interpretable Machine Learning Approaches for Forecasting and Predicting Air Pollution: A Systematic Review, Aerosol and Air Quality Research 24, 230151. https://doi.org/10.4209/aaqr.230151

Huusko, L., Modak, A., Mauritsen, T. (2022) Stronger response to the aerosol indirect effect due to cooling in remote regions, Geophysical Research Letters, 49(21). https://doi.org/10.1029/2022gl101184

Hwang, I.J., Song, J. (2023) Estimation of Source Apportionment for $PM_{2.5}$ Data of Saemangeum Area Using the CMB Model, Journal of Korean Society for Atmospheric Environment, 39(5), 661-674, (in Korean with English abstract). https://doi.org/10.5572/KOSAE.2023.39.5.661

Hwang, I.J., Yi, S.M., Park, J. (2020) Estimation of Source Apportionment for Filter-based $PM_{2.5}$ Data using the EPA-PMF Model at Air Pollution Monitoring Supersites, Journal of Korean Society for Atmospheric Environment, 36(5), 620-632, (in Korean with English abstract). https://doi.org/10.5572/KOSAE.2020.36.5.620

Hyun, J., Kim, M.K., Kim, J.H., Sang, J., Lee, S.H. (2024) Synoptic Patterns Associated with Regional Differences in Long-term Episodes of Extremely High $PM_{2.5}$ Concentrations: A Focus on the Central Region of South Korea, Journal of Korean Society for Atmospheric Environment, 40(5), 491-513, (in Korean with English abstract). https://doi.org/10.5572/KOSAE.2024.40.5.491

Ikemori, F., Uranishi, K., Asakawa, D., Nakatsubo, R., Makino, M., Kido, M., Mitamura, N., Asano, K., Nonaka, S., Nishimura, R., Sugata, S. (2021) Source apportionment in $PM_{2.5}$ in central Japan using positive matrix factorization focusing on small-scale local biomass burning, Atmospheric Pollution Research, 12(3), 162-172. https://doi.org/10.1016/j.apr.2021.01.006

Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) (2021) Climate change 2021: The physical science basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change (V. Masson-Delmotte, 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. Yelekçi, R. Yu, & B. Zhou, Eds.). Cambridge University Press. https://doi.org/10.1017/9781009157896

Isaksen, I.S.A., Granier, C., Myhre, G., Berntsen, T.K., Dalsøren, S.B., Gauss, M., Klimont, Z., Benestad, R., Bousquet, P., Collins, W., Cox, T., Eyring, V., Fowler, D., Fuzzi, S., Jöckel, P., Laj, P., Lohmann, U., Maione, M., Monks, P., Prevot, A.S.H., Raes, F., Richter, A., Rognerud, B., Schulz, M., Shindell, D., Stevenson, D.S., Storelvmo, T., Wang, W.-C., van Weele, M., Wild, M., Wuebbles, D. (2009) Atmospheric composition change: Climate-chemistry interactions, Atmospheric Environment, 43(33), 5138-5192. https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2009.08.003

Isaksen, I., Berntsen, T., Dalsøren, S., Eleftheratos, K., Orsolini, Y., Rognerud, B., Stordal, F., Søvde, O., Zerefos, C., Holmes, C. (2014) Atmospheric ozone and methane in a changing climate, Atmosphere, 5(3), 518-535. https://doi.org/10.3390/atmos5030518

Itahashi, S., Yamamura, Y., Wang, Z., Uno, I. (2022) Returning long-range $PM_{2.5}$ transport into the leeward of East Asia in 2021 after Chinese economic recovery from the COVID-19 pandemic, Scientific Reports, 12, 5539. https://doi.org/10.1038/s41598-022-09483-5

Jairi, I., Ben-Othman, S., Canivet, L., Zgaya-Biau, H. (2024) Explainable based approach for the air quality classification on the granular computing rule extraction technique, Engineering Applications of Artificial Intelligence, 133, 108096. https://doi.org/10.1016/j.engappai.2024.108096

Jana, S., Gogoi, M.M., Babu, S.S. (2024) Change in precipitation pattern over South Asia in response to the trends in regional warming and free-tropospheric aerosol loading, Scientific Reports, 14(1). https://doi.org/10.1038/s41598-024-64842-7

Jee, J.B., Cho, C.R., Kim, S.H., Song, M. (2022) An Analysis of Meteorological Characteristics for Fine Particles on the Korean Peninsula during Wintertime, 2015-2021, Journal of Korean Society for Atmospheric Environment, 38(3), 394-413, (in Korean with English abstract). https://doi.org/10.5572/KOSAE.2022.38.3.394

Jeong, J.I., Park, R.J., Yeh, S., Roh, J. (2021) Statistical predictability of wintertime $PM_{2.5}$ concentrations over East Asia using simple linear regression, The Science of the Total Environment, 776, 146059. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.146059

Jeong, M., Kim, W.J., Heo, J., Kim, S.Y. (2022) Exploration of the Spatial and Temporal Patterns of Surface Ozone Concentrations for Development of Ozone Prediction Model in South Korea, Journal of Korean Society for Atmospheric Environment, 38(1), 100-125, (in Korean with English abstract). https://doi.org/10.5572/KOSAE.2022.38.1.100

Jeong, Y., Kim, S., Kim, J., Shin, D., Kim, J., Park, J., An, S. (2023) Influence of ENSO on tropospheric ozone variability in East Asia, Journal of Geophysical Research Atmospheres, 128(16). https://doi.org/10.1029/2023jd038604

Jephcote, C., Hansell, A.L., Adams, K., Gulliver, J. (2021) Changes in air quality during COVID-19 'lockdown' in the United Kingdom, Environmental Pollution, 272, 116011. https://doi.org/10.1016/j.envpol.2020.116011

Jo, Y., Lee, H., Jo, H., Woo, J., Kim, Y., Lee, T., Heo, G., Park, S., Jung,

D., Park, J., Kim, C. (2020) Changes in inorganic aerosol compositions over the Yellow Sea area from impact of Chinese emissions mitigation, Atmospheric Research, 240, 104948. https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2020.104948

Jordan, C.E., Crawford, J.H., Beyersdorf, A.J., Eck, T.F., Halliday, H.S., Nault, B.A., Chang, L.-S., Park, J., Park, R., Lee, G., Kim, H., Ahn, J.-Y., Cho, S., Shin, H.J., Lee, J.H., Jung, J., Kim, D.-S., Lee, M., Lee, T., Whitehill, A., Szykman, J., Schueneman, M.K., Campuzano-Jost, P., Jimenez, J.L., DiGangi, J.P., Diskin, G.S., Anderson, B.E., Moore, R.H., Ziemba, L.D., Fenn, M.A., Hair, J.W., Kuehn, R.E., Holz, R.E., Chen, G., Travis, K., Shook, M., Peterson, D.A., Lamb, K.D., Schwarz, J.P. (2020) Investigation of factors controlling $PM_{2.5}$ variability across the South Korean Peninsula during KORUS-AQ, Elementa: Science of the Anthropocene, 8, 28. https://doi.org/10.1525/elementa.424

Jun, M., Gu, Y. (2023) Effects of transboundary $PM_{2.5}$ transported from China on the regional $PM_{2.5}$ concentrations in South Korea: A spatial panel-data analysis, PLOS ONE, 18(4), e0281988. https://doi.org/10.1371/journal.pone.0281988

Jung, J., Choi, Y., Souri, A.H., Mousavinezhad, S., Sayeed, A., Lee, K. (2022) The impact of Springtime-Transported air pollutants on local air quality with Satellite-Constrained $NO_X$ emission adjustments over East Asia, Journal of Geophysical Research Atmospheres, 127(5). https://doi.org/10.1029/2021jd035251

Jung, M.W., Lee, J.Y., Wang, K.H., Lee, C.Y., Han, S.H., Kim, H.J., Sohn, S.M., Jeong, P.S., Choi, D.R., Yun, H.Y. (2025) Development of a Conv-LSTM-Based AI Model for Forecasting $PM_{2.5}$ Spatial Concentration Distribution, Journal of Korean Society for Atmospheric Environment, 41(1), 67-82, (in Korean with English abstract). https://doi.org/10.5572/KOSAE.2025.41.1.067

Kang, H., Zhu, B., Liu, X., Shi, S., Hou, X., Lu, W., Yan, S., Pan, C., Chen, Y. (2021a) Three-Dimensional Distribution of $PM_{2.5}$ over the Yangtze River Delta as Cold Fronts Moving Through, Journal of Geophysical Research Atmospheres, 126(8). https://doi.org/10.1029/2020jd034035

Kang, M., Park, D., Chae, C., Sunwoo, Y., Hong, K. (2024) Monthly Characteristics and Source-Receptor relationships of anthropogenic total nitrate in Northeast Asia, Atmosphere, 15(9), 1121. https://doi.org/10.3390/atmos15091121

Kang, Y., Choi, H., Im, J., Park, S., Shin, M., Song, C., Kim, S. (2021b) Estimation of surface-level $NO_2$ and $O_3$ concentrations using TROPOMI data and machine learning over East Asia, Environmental Pollution, 288, 117711. https://doi.org/10.1016/j.envpol.2021.117711

Karroum, K., Lin, Y., Chiang, Y., Maissa, Y.B., Haziti, M.E., Sokolov, A., Delbarre, H. (2020) A review of air quality modeling, MAPAN, 35(2), 287-300. https://doi.org/10.1007/s12647-020-00371-8

Kawashima, H., Yoshida, O., Suto, N. (2022) Long-Term source apportionment of ammonium in $PM_{2.5}$ at a suburban and a rural site using stable nitrogen isotopes, Environmental Science & Technology, 57(3), 1268-1277. https://doi.org/10.1021/acs.est.2c06311

Kim, C.-H. (2025) Overview and prospects of long-range transport of air pollutants from the perspectives of modeling studies, Journal of Korean Society for Atmospheric Environment, 41(2), 161-178, (in Korean with English abstract). https://doi.org/10.5572/KOSAE.2025.41.2.161

Kim, D., Ho, C., Park, I., Kim, J., Chang, L., Choi, M. (2022a) Untangling the contribution of input parameters to an artificial intelligence $PM_{2.5}$ forecast model using the layer-wise relevance propagation method, Atmospheric Environment, 276, 119034. https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2022.119034

Kim, E., Kim, B., Kim, H.C., Kim, S. (2020) Direct and cross impacts of upwind emission control on downwind $PM_{2.5}$ under various $NH_3$ conditions in Northeast Asia, Environmental Pollution, 268, 115794. https://doi.org/10.1016/j.envpol.2020.115794

Kim, J.-S., Song, S.-K., Cho, S.-B. (2025) Direct Aerosol Feedback Effects on Meteorology and Particulate Matter Using the WRF-CMAQ Two-way Coupled Model: A High $PM_{2.5}$ Event in 2019, Journal of Korean Society for Atmospheric Environment, 41(1), 83-103, (in Korean with English abstract). https://doi.org/10.5572/KOSAE.2025.41.1.083

Kim, N., Lee, H., Ok, S., Song, M., Lee, J., Ahn, J.Y., Jung, J. (2024) Investigation of the Formation and Photolysis Characteristics of HONO and their Effect on $O_3$ Formation in the Daejeon and Seoul Atmosphere during Winter, Journal of Korean Society for Atmospheric Environment, 40(3), 302-318, (in Korean with English abstract). https://doi.org/10.5572/KOSAE.2024.40.3.302

Kim, S., Heo, J., Bae, M., Kim, J.Y. (2022b) $PM_{2.5}$ source apportionment in Seoul, Korea: a comparison of PMF and SMP receptor modeling results, International Journal of Environmental Science and Technology, 20(3), 2417-2426. https://doi.org/10.1007/s13762-022-04183-y

Kim, Y.P., Lee, G. (2018) Trend of air quality in Seoul: Policy and

science, Aerosol and Air Quality Research, 18(9), 2141-2156. https://doi.org/10.4209/aaqr.2018.03.0081

Kim, Y., Choi, J., Son, S. (2023) Impacts of carbon neutrality and air quality control on near-term climate change in East Asia. www.kci.go.kr. https://doi.org/10.14191/Atmos.2023.33.5.505

Koo, Y., Choi, Y., Ho, C. (2023) Air quality forecasting using big data and machine learning algorithms, Asia-Pacific Journal of Atmospheric Sciences, 59(5), 529-530. https://doi.org/10.1007/s13143-023-00347-z

Kumar, N., Park, R.J., Jeong, J.I., Woo, J., Kim, Y., Johnson, J., Yarwood, G., Kang, S., Chun, S., Knipping, E. (2021) Contributions of international sources to $PM_{2.5}$ in South Korea, Atmospheric Environment, 261, 118542. https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2021.118542

Kurokawa, J., Ohara, T. (2020) Long-term historical trends in air pollutant emissions in Asia: Regional Emission Inventory in ASia (REAS) version 3, Atmospheric Chemistry and Physics, 20, 12761-12793. https://doi.org/10.5194/acp-20-12761-2020

Lanzi, E., Botta, E., Alexander, G., Ostalé Valriberas, D., Klimont, Z., Kiesewetter, G., Heyes, C., Van Dingenen, R. (2022) The economic benefits of international co-operation to improve air quality in Northeast Asia: A focus on Japan, Korea, and China (OECD Environment Working Papers No. 197). OECD Publishing. https://doi.org/10.1787/5c5ee1a3-en

Lee, H., Chang, L., Jaffe, D.A., Bak, J., Liu, X., Abad, G.G., Jo, H., Jo, Y., Lee, J., Kim, C. (2021) Ozone continues to increase in East Asia despite decreasing $NO_2$: Causes and abatements, Remote Sensing, 13(11), 2177. https://doi.org/10.3390/rs13112177

Lee, H., Park, R., Jeong, J. (2024) Impact of Recent Meteorological Changes on Surface Ozone Increases in Seoul Metropolitan Area, Journal of Korean Society for Atmospheric Environment, 40(4), 467-476, (in Korean with English abstract). https://doi.org/10.5572/KOSAE.2024.40.4.467

Lee, S., Lee, H., Kim, S., Kang, H., Kim, H., Seo, Y., Shin, H., Ghim, Y.S., Song, C., Choi, S. (2022a) Pollution characteristics of $PM_{2.5}$ during high concentration periods in summer and winter in Ulsan, the largest industrial city in South Korea, Atmospheric Environment, 292, 119418. https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2022.119418

Lee, Y.R., Huey, L.G., Tanner, D.J., Takeuchi, M., Qu, H., Liu, X., Ng, N.L., Ng, L.N.L., Crawford, J.H., Fried, A., Richter, D., Simpson, I.J., Blake, D.R., Blake, N.J., Meinardi, S., Kim, S., Diskin, G.S., Digangi, J.P., Choi, Y., Pusede, S.E., Wennberg, P.O., Kim, M.J., Crounse, J.D., Teng, A.P., Cohen, R.C., Romer, P.S., Brune, W., Wisthaler, A., Mikoviny, T., Jimenez, J.L., Campuzano-Jost, P., Nault, B.A., Weinheimer, A., Hall, S.R., Ullmann, K. (2022b) An investigation of petrochemical emissions during KORUS-AQ: Ozone production, reactive nitrogen evolution, and aerosol production, Elementa: Science of the Anthropocene, 10(1), 00079. https://doi.org/10.1525/elementa.2022.00079

Li, J., Garshick, E., Huang, S., Koutrakis, P. (2021a) Impacts of El Niño-Southern Oscillation on surface dust levels across the world during 1982-2019, The Science of the Total Environment, 769, 144566. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.144566

Li, K., Jacob, D.J., Liao, H., Qiu, Y., Shen, L., Zhai, S., Bates, K.H., Sulprizio, M.P., Song, S., Lu, X., Zhang, Q., Zheng, B., Zhang, Y., Zhang, J., Lee, H.C., Kuk, S.K. (2021b) Ozone pollution in the North China Plain spreading into the late-winter haze season, Proceedings of the National Academy of Sciences, 118(10). https://doi.org/10.1073/pnas.2015797118

Li, M., Zhang, Q., Zheng, B., Tong, D., Lei, Y., Liu, F., Hong, C., Kang, S., Yan, L., Zhang, Y., Bo, Y., Su, H., Cheng, Y., He, K. (2019) Persistent growth of anthropogenic non-methane volatile organic compound (NMVOC) emissions in China during 1990-2017: Drivers, speciation and ozone formation potential, Atmospheric Chemistry and Physics, 19(13), 8897-8913. https://doi.org/10.5194/acp-19-8897-2019

Li, X., Hussain, S.A., Sobri, S., Said, M.S.M. (2021c) Overviewing the air quality models on air pollution in Sichuan Basin, China, Chemosphere, 271, 129502. https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2021.129502

Lian, X., Piao, S., Chen, A., Wang, K., Li, X., Buermann, W., Huntingford, C., Peñuelas, J., Xu, H., Myneni, R.B. (2021) Seasonal biological carryover dominates northern vegetation growth, Nature Communications, 12(1). https://doi.org/10.1038/s41467-021-21223-2

Lian, X., Jeong, S., Park, C., Xu, H., Li, L.Z.X., Wang, T., Gentine, P., Peñuelas, J., Piao, S. (2022) Biophysical impacts of northern vegetation changes on seasonal warming patterns, Nature Communications, 13(1). https://doi.org/10.1038/s41467-022-31671-z

Liu, C., Wu, C., Kang, X., Zhang, H., Fang, Q., Su, Y., Li, Z., Ye, Y., Chang, M., Guo, J. (2023a) Evaluation of the prediction performance of air quality numerical forecast models in Shenzhen, Atmospheric Environment, 314, 120058. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2023.120058

Liu, J., Ding, J., Li, X., Zhang, J., Liu, B. (2023b) Identification of dust aerosols, their sources, and the effect of soil moisture in Central Asia, The Science of the Total Environment, 868, 161575. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.161575

Liu, L., Wang, Z., Che, H., Wang, D., Gui, K., Liu, B., Ma, K., Zhang, X. (2024) Climate factors influencing springtime dust activities over Northern East Asia in 2021 and 2023, Atmospheric Research, 303, 107342. https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2024.107342

Liu, M., Matsui, H. (2021) Aerosol radiative forcings induced by substantial changes in anthropogenic emissions in China from 2008 to 2016, Atmospheric Chemistry and Physics, 21(8), 5965-5982. https://doi.org/10.5194/acp-21-5965-2021

Liu, Y., Wang, T. (2020) Worsening urban ozone pollution in China from 2013 to 2017 - Part 1: The complex and varying roles of meteorology, Atmospheric Chemistry and Physics, 20(11), 6305-6321. https://doi.org/10.5194/acp-20-6305-2020

Lu, F., Chen, S., Hu, Z., Han, Z., Alam, K., Luo, H., Bi, H., Chen, J., Guo, X. (2023) Sensitivity and uncertainties assessment in radiative forcing due to aerosol optical properties in diverse locations in China, The Science of the Total Environment, 860, 160447. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.160447

Lv, L., Chen, Y., Han, Y., Cui, M., Wei, P., Zheng, M., Hu, J. (2021) High-time-resolution $PM_{2.5}$ source apportionment based on multi-model with organic tracers in Beijing during haze episodes, The Science of the Total Environment, 772, 144766. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.144766

Ma, D., Wang, T., Xu, B., Song, R., Gao, L., Chen, H., Ren, X., Li, S., Zhuang, B., Li, M., Xie, M., Saikawa, E. (2023a) The mutual interactions among ozone, fine particulate matter, and carbon dioxide on summer monsoon climate in East Asia, Atmospheric Environment, 299, 119668. https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2023.119668

Ma, D., Wang, T., Wu, H., Qu, Y., Liu, J., Liu, J., Li, S., Zhuang, B., Li, M., Xie, M. (2023b) The effect of anthropogenic emission, meteorological factors, and carbon dioxide on the surface ozone increase in China from 2008 to 2018 during the East Asia summer monsoon season, Atmospheric Chemistry and Physics, 23(11), 6525-6544. https://doi.org/10.5194/acp-23-6525-2023

Maji, K.J., Sarkar, C. (2020) Spatio-temporal variations and trends of major air pollutants in China during 2015-2018, Environmental Science and Pollution Research, 27(27), 33792-33808. https://doi.org/10.1007/s11356-020-09646-8

Manisalidis, I., Stavropoulou, E., Stavropoulos, A., Bezirtzoglou, E. (2020) Environmental and Health Impacts of Air Pollution: A review, Frontiers in Public Health, 8. https://doi.org/10.3389/fpubh.2020.00014

Meng, X., Jiang, J., Chen, T., Zhang, Z., Lu, B., Liu, C., Xue, L., Chen, J., Herrmann, H., Li, X. (2023) Chemical drivers of ozone change in extreme temperatures in eastern China, The Science of the Total Environment, 874, 162424. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.162424

Miki, K., Itahashi, S. (2024) Enhanced $O_3$ concentration due to biogenic emissions during a hot summer in 2018 over the Tokyo metropolitan area, Japan, Environmental Research Communications. https://doi.org/10.1088/2515-7620/ad8399

Momeni, M., Choi, Y., Yeganeh, A.K., Pouyaei, A., Jung, J., Park, J., Shephard, M.W., Dammers, E., Cady-Pereira, K.E. (2024) Constraining East Asia ammonia emissions through satellite observations and iterative Finite Difference Mass Balance (iFDMB) and investigating its impact on inorganic fine particulate matter, Environment International, 182, 108473. https://doi.org/10.1016/j.envint.2024.108473

Moon, S.H., Song, S.K. (2020) Estimation of Future Direct Radiative Forcing of Aerosol Chemical Components according to Changes in Relative Humidity of RCP Climate Change Scenario in Urban and Background Areas, Journal of Korean Society for Atmospheric Environment, 36(5), 688-707, (in Korean with English abstract). https://doi.org/10.5572/KOSAE.2020.36.5.688

Nault, B.A., Jo, D.S., McDonald, B.C., Campuzano-Jost, P., Day, D.A., Hu, W., Schroder, J.C., Allan, J., Blake, D.R., Canagaratna, M.R., Coe, H., Coggon, M.M., DeCarlo, P.F., Diskin, G.S., Dunmore, R., Flocke, F., Fried, A., Gilman, J.B., Gkatzelis, G., Hamilton, J.F., Hanisco, T.F., Hayes, P.L., Henze, D.K., Hodzic, A., Hopkins, J., Hu, M., Huey, L.G., Jobson, B.T., Kuster, W.C., Lewis, A., Li, M., Liao, J., Nawaz, M.O., Pollack, I.B., Peischl, J., Rappenglück, B., Reeves, C.E., Richter, D., Roberts, J.M., Ryerson, T.B., Shao, M., Sommers, J.M., Walega, J., Warneke, C., Weinberg, P., Wolfe, G.M., Young, D.E., Yuan, B., Zhang, Q., de Gouw, J.A., Jimenez, J.L. (2021) Secondary organic aerosols from anthropogenic volatile organic compounds contribute substantially to air pollution mortality, Atmospheric Chemistry and Physics, 21(14), 11201-11224. https://doi.org/10.5194/acp-

21-11201-2021

Oh, S., Kim, J.Y., Won, S.R., Kwon, S., Lee, S.J., Choi, S.D., Lee, J.Y., Shin, H.J. (2023) Comparison of the Chemical Characteristics and Source Apportionment of $PM_{1.0}$ and $PM_{2.5}$ Using Real-time Air Quality Monitoring Network Data of Air Pollutants, Journal of Korean Society for Atmospheric Environment, 39(4), 448-468, (in Korean with English abstract). https://doi.org/10.5572/KOSAE.2023.39.4.448

Ohara, T., Akimoto, H., Kurokawa, J., Horii, N., Yamaji, K., Yan, X., Hayasaka, T. (2007) An Asian emission inventory of anthropogenic emission sources for the period 1980-2020, Atmospheric Chemistry and Physics, 7(16), 4419-4444. https://doi.org/10.5194/acp-7-4419-2007

Ok, D., Yu, S., Seo, S.H., Choi, I., Kim, J.C., Sun-woo, Y., Yoo, C., Kim, H., Son, Y.S. (2023) Suggestions for Improving the Accuracy of Calculating Emissions of Natural Volatile Organic Compounds, Journal of Korean Society for Atmospheric Environment, 39(6), 917-930, (in Korean with English abstract). https://doi.org/10.5572/KOSAE.2023.39.6.917

Park, E., Kim, M.H., Han, J., Yoo, H.J., Yang, S.H., Kim, S., Kim, Y.A., Won, D., Kim, S.W. (2024a) Light-absorption Properties of Fresh Biomass Burning Aerosols Observed at the Anmyeondo Global Atmosphere Watch (GAW) Regional Station: A Case Study in April 2023, Journal of Korean Society for Atmospheric Environment, 40(6), 614-627, (in Korean with English abstract). https://doi.org/10.5572/KOSAE.2024.40.6.614

Park, H.Y., Cho, S.Y. (2020) The Effects of $NH_3$ Emission Reduction on Secondary Inorganic Aerosols Evaluated by CMAQ, Journal of Korean Society for Atmospheric Environment, 36(3), 375-387, (in Korean with English abstract). https://doi.org/10.5572/KOSAE.2020.36.3.375

Park, J., Jung, J., Choi, Y., Mousavinezhad, S., Pouyaei, A. (2022a) The sensitivities of ozone and $PM_{2.5}$ concentrations to the satellite-derived leaf area index over East Asia and its neighboring seas in the WRF-CMAQ modeling system, Environmental Pollution, 306, 119419. https://doi.org/10.1016/j.envpol.2022.119419

Park, J., Kim, H., Kim, Y., Heo, J., Kim, S., Jeon, K., Yi, S., Hopke, P.K. (2022b) Source apportionment of $PM_{2.5}$ in Seoul, South Korea and Beijing, China using dispersion normalized PMF, The Science of the Total Environment, 833, 155056. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.155056

Park, J., Lee, T., Kim, D. (2022c) Improving PMF source reconciliation with cluster analysis for $PM_{2.5}$ hourly data from Seoul, Korea, Atmospheric Pollution Research, 13(5), 101398. https://doi.org/10.1016/j.apr.2022.101398

Park, J., Choi, Y., Jung, J., Lee, K., Yeganeh, A.K., Pouyaei, A., Park, J. (2024b) First top-down diurnal adjustment to $NO_x$ emissions inventory in Asia informed by the Geostationary Environment Monitoring Spectrometer (GEMS) tropospheric $NO_2$ columns, Scientific Reports, 14, Article 24338. https://doi.org/10.1038/s41598-024-76223-1

Park, J., Choi, Y., Kayastha, S.G. (2024c) Local and transboundary contributions to nitrogen loadings across East Asia using CMAQ-ISAM and GEMS-informed emissions inventory during the winter-spring transition. EGUsphere. https://doi.org/10.5194/egusphere-2024-3312

Park, S., Song, I., Park, J.S., Oh, J., Moon, K.J., Shin, H.J., Ahn, J.Y., Lee, M., Kim, J., Lee, G. (2018) Variation of $PM_{2.5}$ Chemical Compositions and their Contributions to Light Extinction in Seoul, Aerosol and Air Quality Research, 18(9), 2220-2229. https://doi.org/10.4209/aaqr.2017.10.0369

Piao, S., Wang, X., Park, T., Chen, C., Lian, X., He, Y., Bjerke, J.W., Chen, A., Ciais, P., Tømmervik, H., Nemani, R.R., Myneni, R.B. (2020) Characteristics, drivers and feedbacks of global greening, Nature Reviews Earth & Environment, 1(1), 14-27. https://doi.org/10.1038/s43017-019-0001-x

Pouyaei, A., Choi, Y., Jung, J., Mousavinezhad, S., Momeni, M., Song, C.H. (2022) Investigating the long-range transport of particulate matter in East Asia: Introducing a new Lagrangian diagnostic tool, Atmospheric Environment, 278, 119096. https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2022.119096

Pye, H.O.T., Appel, K.W., Seltzer, K.M., Ward-Caviness, C.K., Murphy, B.N. (2022) Human-Health Impacts of controlling secondary air pollution precursors, Environmental Science & Technology Letters, 9(2), 96-101. https://doi.org/10.1021/acs.estlett.1c00798

Qiu, Y., Wu, Z., Man, R., Zong, T., Liu, Y., Meng, X., Chen, J., Chen, S., Yang, S., Yuan, B., Song, M., Kim, C., Ahn, J., Zeng, L., Lee, J., Hu, M. (2023) Secondary aerosol formation drives atmospheric particulate matter pollution over megacities (Beijing and Seoul) in East Asia, Atmospheric Environment, 301, 119702. https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2023.119702

Qu, Z., Henze, D.K., Worden, H.M., Jiang, Z., Gaubert, B., Theys, N., Wang, W. (2022) Sector-based top-down estimates of $NO_x$, $SO_2$, and CO emissions in East Asia, Geophysical Research Letters, 49(1), e2021GL096009. https://doi.

org/10.1029/2021GL096009

Ramadan, Z., Eickhout, B., Song, X.-H., Buydens, L.M.C., Hopke, P.K. (2003) Comparison of Positive Matrix Factorization and Multilinear Engine for the source apportionment of particulate pollutants, Chemometrics and Intelligent Laboratory Systems, 66(1), 15-28. https://doi.org/10.1016/S0169-7439(02)00160-0

Reizer, M., Calzolai, G., Maciejewska, K., Orza, J.a.G., Carraresi, L., Lucarelli, F., Juda-Rezler, K. (2021) Measurement report: Receptor modeling for source identification of urban fine and coarse particulate matter using hourly elemental composition, Atmospheric Chemistry and Physics, 21(19), 14471-14492. https://doi.org/10.5194/acp-21-14471-2021

Rood, A.S. (2014) Performance evaluation of AERMOD, CALPUFF, and legacy air dispersion models using the Winter Validation Tracer Study dataset, Atmospheric Environment, 89, 707-720. https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2014.02.054

Ryoo, I., Park, J., Kim, T., Ryu, J., Cheong, Y., Ahn, J., Kim, S.-M. (2022) Study of $PM_{2.5}$ using PMF receptor model and advancement of source apportionment, Journal of Korean Society for Atmospheric Environment, 38(4), 493-507, (in Korean with English abstract). https://doi.org/10.5572/KOSAE.2022.38.4.493

Ryu, Y., Min, S., Hodzic, A. (2021) Recent Decreasing Trends in Surface $PM_{2.5}$ over East Asia in the Winter-spring Season: Different Responses to Emissions and Meteorology between Upwind and Downwind Regions, Aerosol and Air Quality Research, 21(6), 200654. https://doi.org/10.4209/aaqr.200654

Ryu, Y., Min, S. (2024) Anthropogenic warming degrades spring air quality in Northeast Asia by enhancing atmospheric stability and transboundary transport, Npj Climate and Atmospheric Science, 7(1). https://doi.org/10.1038/s41612-024-00603-7

Santiago, J.V., Hata, H., Martinez-Noriega, E.J., Inoue, K. (2024) Ozone trends and their sensitivity in global megacities under the warming climate, Nature Communications, 15(1). https://doi.org/10.1038/s41467-024-54490-w

Sayeed, A., Choi, Y., Eslami, E., Jung, J., Lops, Y., Salman, A.K., Lee, J., Park, H., Choi, M. (2021) A novel CMAQ-CNN hybrid model to forecast hourly surface-ozone concentrations 14 days in advance, Scientific Reports, 11(1). https://doi.org/10.1038/s41598-021-90446-6

Sayeed, A., Eslami, E., Lops, Y., Choi, Y. (2022) CMAQ-CNN: A new-generation of post-processing techniques for chemical transport models using deep neural networks, Atmospheric Environment, 273, 118961. https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2022.118961

Schroeder, J.R., Crawford, J.H., Ahn, J.Y., Chang, L., Fried, A., Walega, J., Weinheimer, A., Montzka, D.D., Hall, S.R., Ullmann, K., Wisthaler, A., Mikoviny, T., Chen, G., Blake, D.R., Blake, N.J., Hughes, S.C., Meinardi, S., Diskin, G., DiGangi, J.P., Choi, Y., Pusede, S.E., Huey, L.G., Tanner, D.J., Kim, M., Wennberg, P.O. (2020) Observation-based modeling of ozone chemistry in the Seoul metropolitan area during the Korea-United States Air Quality Study (KORUS-AQ), Elementa: Science of the Anthropocene, 8(3). https://doi.org/10.1525/elementa.400

Scire, J.S., Strimaitis, D.G., Yamartino, R.J. (2000) A User's Guide for the CALPUFF Dispersion Model.

Seo, J., Kang, Y.H., Kim, E., Jeong, S., Kim, J., Kim, S. (2024) Changes in Domestic Emissions Impact on Provincial $PM_{2.5}$ and $NO_2$ Concentrations during the 1st to 4th Seasonal PM Management Periods, Journal of Korean Society for Atmospheric Environment, 40(2), 242-262, (in Korean with English abstract). https://doi.org/10.5572/KOSAE.2024.40.2.242

Seo, J., Lim, Y.B., Youn, D., Kim, J.Y., Jin, H.C. (2020) Synergistic enhancement of urban haze by nitrate uptake into transported hygroscopic particles in the Asian continental outflow, Atmospheric Chemistry and Physics, 20(12), 7575-7594. https://doi.org/10.5194/acp-20-7575-2020

She, Y., Li, J., Lyu, X., Guo, H., Qin, M., Xie, X., Gong, K., Ye, F., Mao, J., Huang, L., Hu, J. (2024) Current status of model predictions of volatile organic compounds and impacts on surface ozone predictions during summer in China, Atmospheric Chemistry and Physics, 24(1), 219-233. https://doi.org/10.5194/acp-24-219-2024

Shi, T., Chen, Y., Xing, Y., Niu, X., Wu, D., Cui, J., Zhou, Y., Pu, W., Wang, X. (2022) Assessment of the combined radiative effects of black carbon in the atmosphere and snowpack in the Northern Hemisphere constrained by surface observations, Environmental Science Atmospheres, 2(4), 702-713. https://doi.org/10.1039/d2ea00005a

Shimada, K., Mizukoshi, M., Chan, C.K., Kim, Y.P., Lin, N., Matsuda, K., Itahashi, S., Nakashima, Y., Kato, S., Hatakeyama, S. (2021) Disentangling the contribution of the transboundary out-flow from the Asian continent to Tokyo, Japan, Environmental Pollution, 286, 117280. https://doi.org/10.1016/j.envpol.2021.117280

Song, M., Park, J., Lim, Y., Oh, S., Lee, J.Y., Lee, K., Ro, C., Bae, M.

(2022) Long-range transport impacts from biomass burning and secondary pollutant sources based on receptor models during KORUS-AQ campaign, Atmospheric Environment, 276, 119060. https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2022.119060

Tabari, H. (2020) Climate change impact on flood and extreme precipitation increases with water availability, Scientific Reports, 10(1). https://doi.org/10.1038/s41598-020-70816-2

Tang, D., Zhan, Y., Yang, F. (2024) A review of machine learning for modeling air quality: Overlooked but important issues, Atmospheric Research, 300, 107261. https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2024.107261

Thongthammachart, T., Araki, S., Shimadera, H., Eto, S., Matsuo, T., Kondo, A. (2021) An integrated model combining random forests and WRF/CMAQ model for high accuracy spatiotemporal $PM_{2.5}$ predictions in the Kansai region of Japan, Atmospheric Environment, 262, 118620. https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2021.118620

Tsai, I.-C., Hsieh, P.-R., Hsu, H.-H., Tung, Y.-S., Chen, Y.-M., Cheng, C.-T. (2024) Climate change-induced impacts on $PM_{2.5}$ in Taiwan under 2 and 4°C global warming, Atmospheric Pollution Research, 15(6), 102106. https://doi.org/10.1016/j.apr.2024.102106

Turnock, S.T., Allen, R.J., Andrews, M., Bauer, S.E., Deushi, M., Emmons, L., Good, P., Horowitz, L., John, J.G., Michou, M., Nabat, P., Naik, V., Neubauer, D., O'Connor, F.M., Olivié, D., Oshima, N., Schulz, M., Sellar, A., Shim, S., Takemura, T., Tilmes, S., Tsigaridis, K., Wu, T., Zhang, J. (2020) Historical and future changes in air pollutants from CMIP6 models, Atmospheric Chemistry and Physics, 20(20), 14547-14579. https://doi.org/10.5194/acp-20-14547-2020

U.S. Environmental Protection Agency. (n.d.) Support Center for Regulatory Atmospheric Modeling (SCRAM). https://www.epa.gov/scram

Uno, I., Wang, Z., Itahashi, S., Yumimoto, K., Yamamura, Y., Yoshino, A., Takami, A., Hayasaki, M., Kim, B. (2020) Paradigm shift in aerosol chemical composition over regions downwind of China, Scientific Reports, 10(1). https://doi.org/10.1038/s41598-020-63592-6

Wakamatsu, S., Morikawa, T., Ito, A. (2013) Air Pollution Trends in Japan between 1970 and 2012 and Impact of Urban Air Pollution Countermeasures, Asian Journal of Atmospheric Environment, 7(4), 177-190. https://doi.org/10.5572/ajae.2013.7.4.177

Wall, C.J., Norris, J.R., Possner, A., McCoy, D.T., McCoy, I.L., Lutsko, N.J. (2022). Assessing effective radiative forcing from aerosol-cloud interactions over the global ocean, Proceedings of the National Academy of Sciences, 119(46). https://doi.org/10.1073/pnas.2210481119

Wang, C., Chen, J., Wang, W. (2023a) Meteorology-driven $PM_{2.5}$ interannual variability over East Asia, The Science of the Total Environment, 904, 166911. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.166911

Wang, D., Zhu, B., Wang, H., Sun, L. (2021) Simulation study on the indirect effect of sulfate on the summer climate over the eastern China monsoon region, Scientific Reports, 11(1). https://doi.org/10.1038/s41598-021-87832-5

Wang, H., Liu, X., Wu, C., Lin, G. (2024a) Regional to global distributions, trends, and drivers of biogenic volatile organic compound emission from 2001 to 2020, Atmospheric Chemistry and Physics, 24(5), 3309-3328. https://doi.org/10.5194/acp-24-3309-2024

Wang, J., Han, J., Li, T., Wu, T., Fang, C. (2023b) Impact analysis of meteorological variables on $PM_{2.5}$ pollution in the most polluted cities in China, Heliyon, 9(7), e17609. https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2023.e17609

Wang, P., Yang, Y., Xue, D., Ren, L., Tang, J., Leung, L.R., Liao, H. (2023c) Aerosols overtake greenhouse gases causing a warmer climate and more weather extremes toward carbon neutrality, Nature Communications, 14(1). https://doi.org/10.1038/s41467-023-42891-2

Wang, R., Cui, K., Sheu, H., Wang, L., Liu, X. (2023d) Effects of precipitation on the air quality index, $PM_{2.5}$ levels and on the dry deposition of PCDD/FS in the ambient air, Aerosol and Air Quality Research, 23(4), 220417. https://doi.org/10.4209/aaqr.220417

Wang, X., Zhang, S., Chen, Y., He, L., Ren, Y., Zhang, Z., Li, J., Zhang, S. (2024b) Air quality forecasting using a spatiotemporal hybrid deep learning model based on VMD-GAT-BiLSTM, Scientific Reports, 14(1), 17841. https://doi.org/10.1038/s41598-024-68874-x

Wang, Y., Jia, H., Zhang, P., Fang, F., Li, J., Zhu, L., Wang, Y., Wang, T., Li, J. (2024c) Sensitivity of cloud microphysics to aerosol is highly associated with cloud water content: Implications for indirect radiative forcing, Atmospheric Research, 309, 107552. https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2024.107552

Wang, Z., Wang, P., Wagner, J., Kumagai, K. (2024d) Impacts on Urban VOCs and $PM_{2.5}$ during a Wildfire Episode, Environments, 11(4), 63. https://doi.org/10.3390/environments11040063

Wang, Z., Chen, L., Sun, Y. (2023c) Impact of Meiyu front on $PM_{2.5}$ wet scavenging over East Asia, Atmospheric Research, 285, 106457. https://doi.org/10.1016/j.atmo

sres.2023.106457

Weber, J., Archer-Nicholls, S., Abraham, N.L., Shin, Y.M., Griffiths, P., Grosvenor, D.P., Scott, C.E., Archibald, A.T. (2022) Chemistry-driven changes strongly influence climate forcing from vegetation emissions, Nature Communications, 13(1). https://doi.org/10.1038/s41467-022-34944-9

Wu, Y., Chen, W., You, Y., Xie, Q., Jia, S., Wang, X. (2023) Quantitative impacts of vertical transport on the long-term trend of nocturnal ozone increase over the Pearl River Delta region during 2006-2019, Atmospheric Chemistry and Physics, 23(1), 453-469. https://doi.org/10.5194/acp-23-453-2023

Wu, Y., Zhang, Y., Li, L. (2021) Impacts of $N_2O_5$ hydrolysis on nitrate formation during winter haze events in Xi'an, China, Environmental Pollution, 288, 117712. https://doi.org/10.1016/j.envpol.2021.117712

Xiao, Q., Zheng, Y., Geng, G., Chen, C., Huang, X., Che, H., Zhang, X., He, K., Zhang, Q. (2021) Separating emission and meteorological contributions to long-term $PM_{2.5}$; trends over eastern China during 2000-2018, Atmospheric Chemistry and Physics, 21(12), 9475-9496. https://doi.org/10.5194/acp-21-9475-2021

Xie, P., Liao, H. (2022) The impacts of changes in anthropogenic emissions over China on $PM_{2.5}$ concentrations in South Korea and Japan during 2013-2017, Frontiers in Environmental Science, 10. https://doi.org/10.3389/fenvs.2022.841285

Xu, J., Lu, M., Guo, Y., Zhang, L., Chen, Y., Liu, Z., Zhou, M., Lin, W., Pu, W., Ma, Z., Song, Y., Pan, Y., Liu, L., Ji, D. (2023) Summertime urban ammonia emissions may be substantially underestimated in Beijing, China, Environmental Science & Technology, 57(35), 13124-13135. https://doi.org/10.1021/acs.est.3c05266

Xu, X., Riley, W.J., Koven, C.D., Jia, G., Zhang, X. (2020) Earlier leaf-out warms air in the north, Nature Climate Change, 10(4), 370-375. https://doi.org/10.1038/s41558-020-0713-4

Yafouz, A., Ahmed, A.N., Zaini, N., El-Shafie, A. (2021) Ozone concentration Forecasting Based on Artificial Intelligence Techniques: A Systematic review, Water Air & Soil Pollution, 232(2). https://doi.org/10.1007/s11270-021-04989-5

Yan, Y., Zhou, Y., Kong, S., Lin, J., Wu, J., Zheng, H., Zhang, Z., Song, A., Bai, Y., Ling, Z., Liu, D., Zhao, T. (2021) Effectiveness of emission control in reducing $PM_{2.5}$ pollution in central China during winter haze episodes under various potential synoptic controls, Atmospheric Chemistry and Physics, 21(4), 3143-3162. https://doi.org/10.5194/acp-21-3143-2021

Yang, S.H., Park, R.J., Lee, S., Jo, D.S., Kim, M.J. (2023) Impact of changes in refractive indices of secondary organic aerosols on precipitation over China during 1980-2019, Atmospheric Environment, 299, 119644. https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2023.119644

Yen, P., Yuan, C., Soong, K., Jeng, M., Cheng, W. (2024) Identification of potential source regions and long-range transport routes/channels of marine $PM_{2.5}$ at remote sites in East Asia, The Science of the Total Environment, 915, 170110. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2024.170110

Yeo, M.J., Kim, Y.P. (2021) Long-term trends of surface ozone in Korea, Journal of Cleaner Production, 294, 125352. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.125352

Yoshino, A., Takami, A., Hara, K., Nishita-Hara, C., Hayashi, M., Kaneyasu, N. (2021) Contribution of local and transboundary air pollution to the urban air quality of Fukuoka, Japan, Atmosphere, 12(4), 431. https://doi.org/10.3390/atmos12040431

You, S., Kang, Y.-H., Kim, B.-U., Kim, H.C., Kim, S. (2021) The role of a distant typhoon in extending a high $PM_{2.5}$ episode over Northeast Asia, Atmospheric Environment, 257, 118480. https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2021.118480

Yu, C., Yang, Y., Liu, D. (2022) Joint occurrence of heavy $PM_{2.5}$ pollution episodes and persistent foggy days in central east China, Frontiers in Environmental Science, 9. https://doi.org/10.3389/fenvs.2021.821648

Zhai, S., Jacob, D.J., Wang, X., Liu, Z., Wen, T., Shah, V., Li, K., Moch, J.M., Bates, K.H., Song, S., Shen, L., Zhang, Y., Luo, G., Yu, F., Sun, Y., Wang, L., Qi, M., Tao, J., Gui, K., Xu, H., Zhang, Q., Zhao, T., Wang, Y., Lee, H.C., Choi, H., Liao, H. (2021) Control of particulate nitrate air pollution in China, Nature Geoscience, 14(6), 389-395. https://doi.org/10.1038/s41561-021-00726-z

Zhang, B., Rong, Y., Yong, R., Qin, D., Li, M., Zou, G., Pan, J. (2022) Deep learning for air pollutant concentration prediction: A review, Atmospheric Environment, 290, 119347. https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2022.119347

Zhang, J., Cheng, H., Wang, D., Zhu, Y., Yang, C., Shen, Y., Yu, J., Li, Y., Xu, S., Zhang, S., Song, X., Zhou, Y., Chen, J., Jiang, J., Fan, L., Wang, C., Hao, K. (2021) Chronic exposure to $PM_{2.5}$ nitrate, sulfate, and ammonium causes respiratory system impairments in mice, Environmental Science & Technology, 55(5), 3081-3090. https://doi.org/10.1021/acs.est.0c05814

Zhang, K., Li, L., Huang, L., Wang, Y., Huo, J., Duan, Y., Wang, Y., Fu,

Q. (2020a) The impact of volatile organic compounds on ozone formation in the suburban area of Shanghai, Atmospheric Environment, 232, 117511. https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2020.117511

Zhang, L., He, J., Gong, S., Guo, X., Zhao, T., Che, H., Wang, H., Zhou, C., Mo, J., Gui, K., Zheng, Y., Li, L., Zhong, J., Zhang, X. (2023) Modeling study on the roles of the deposition and transport of $PM_{2.5}$ in air quality changes over central-eastern China, Journal of Environmental Sciences, 123, 535-544. https://doi.org/10.1016/j.jes.2022.10.032

Zhang, X., Zhang, K., Liu, H., Lv, W., Aikawa, M., Liu, B., Wang, J. (2020b) Pollution sources of atmospheric fine particles and secondary aerosol characteristics in Beijing, Journal of Environmental Sciences, 95, 91-98. https://doi.org/10.1016/j.jes.2020.04.002

Zhang, Z., Zhang, Y., Wang, X., Lü, S., Huang, Z., Huang, X., Yang, Y., Wang, Y., Zhang, Q. (2016) Spatiotemporal patterns and source implications of aromatic hydrocarbons at six rural sites across China's developed coastal regions, Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 121(11), 6669-6687. https://doi.org/10.1002/2016JD025115

Zhao, S., Yin, D., Yu, Y., Kang, S., Qin, D., Dong, L. (2020) $PM_{2.5}$ and $O_3$ pollution during 2015-2019 over 367 Chinese cities: Spatiotemporal variations, meteorological and topographical impacts, Environmental Pollution, 264, 114694. https://doi.org/10.1016/j.envpol.2020.114694

Zheng, Y., Zhang, Q., Tong, D., Davis, S.J., Caldeira, K. (2020) Climate effects of China's efforts to improve its air quality, Environmental Research Letters, 15(10), 104052. https://doi.org/10.1088/1748-9326/ab9e21

Zheng, Y., Jiang, F., Feng, S., Cai, Z., Shen, Y., Ying, C., Wang, X., Liu, Q. (2021) Long-range transport of ozone across the eastern China seas: A case study in coastal cities in southeastern China, The Science of the Total Environment, 768, 144520. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.144520

Zhou, W., Xu, W., Kim, H., Zhang, Q., Fu, P., Worsnop, D.R., Sun, Y. (2020) A review of aerosol chemistry in Asia: insights from aerosol mass spectrometer measurements, Environmental Science Processes & Impacts, 22(8), 1616-1653. https://doi.org/10.1039/d0em00212g

Zhu, A., Xu, H., Deng, J., Ma, J., Li, S. (2021) El Niño-Southern Oscillation (ENSO) effect on interannual variability in spring aerosols over East Asia, Atmospheric Chemistry and Physics, 21(8), 5919-5933. https://doi.org/10.5194/acp-21-5919-2021

Zhu, J., Tai, A.P.K., Yim, S.H.L. (2022) Effects of ozone-vegetation interactions on meteorology and air quality in China using a two-way coupled land-atmosphere model, Atmospheric Chemistry and Physics, 22(2), 765-782. https://doi.org/10.5194/acp-22-765-2022

Zong, X., Tian, X., Yin, Y. (2020) Impacts of climate change on wildfires in Central Asia, Forests, 11(8), 802. https://doi.org/10.3390/f11080802

## Authors Information

김승미(울산과학기술원 탄소중립대학원 석박통합과정 학생)
(seungmi@unist.ac.kr)

강예리(울산과학기술원 탄소중립대학원 박사과정 학생)
(kang3785@unist.ac.kr)

전권호(국립환경과학원 기후대기연구부 대기환경연구과 연구관)
(jeon0117@korea.kr)

이종재(울산과학기술원 지구환경도시건설공학과 연구조교수)
(jongjaelee@unist.ac.kr)

송창근(울산과학기술원 탄소중립대학원 부교수)
(cksong@unist.ac.kr)