



총 설

모델링 연구 관점에서 살펴본 대기오염물질 장거리이동 연구와 전망

Overview and Prospects of Long-range Transport of Air Pollutants from the Perspectives of Modeling Studies

김철희*

부산대학교 대기환경과학과

Cheol-Hee Kim*

Department of Atmospheric Sciences, Pusan National University, Busan, Republic of Korea

접수일 2025년 3월 19일
수정일 2025년 3월 29일
채택일 2025년 3월 29일

Received 19 March 2025
Revised 29 March 2025
Accepted 29 March 2025

*Corresponding author
Tel : +82-(0)51-510-3687
E-mail : chkim2@pusan.ac.kr

Abstract Research papers in the field of Long-range Transport (LRT) of air pollutants over the past 40 years have been comprehensively summarized from the perspective of modeling studies, based on publications in KOSAE journals, including Journal of Korean Society for Atmospheric Environment and Journal of the Korea Air Pollution Research Association. In addition to reviewing research trends, future directions for atmospheric environmental research are also discussed. The results indicate that the target pollutants addressed in LRT studies published in these journals have undergone significant shifts over time, with key pollutants of interest evolving from acid rain, sulfur, and ozone to fine particulate matter and greenhouse gases. Looking ahead, with the rapid advancement of modeling and measurement technologies, research on LRT of pollutants over Northeast Asia is expected to accelerate, particularly from a modeling perspective.

Key words: Long-range transport, KOSAE journals, Atmospheric modeling studies, Asia Pacific Journal of Atmospheric Sciences

1. 서 론

국경을 넘나드는 대기오염물질의 장거리이동(Long-Range Transport; 이하 LRT)에 관한 연구 역사는 배출량 저감정책 등 여러 면에서 대단히 중요하다. 이 주제는 특히 동북아시아 국가의 최대 관심사이기도 하여서 최근까지 한·중·일 3국을 포함한 동북아시아 국가에서의 대기오염물질 LRT에 대한 연구 결과는 전 세계적으로도 많은 주목을 받았으며, 국내의 경우 대기환경학회지 등 여러 저널에서 관련 논문이 지금도 활발하게 출판되고 있다. 현재까지 대기환경학회지(Korean Society for Atmospheric Environment;

이하 KOSAE)에서 출판되는 학술지 저널의 역사가 40여 년 지속되면서 대기오염물질의 연구 역사를 시간적 흐름으로 그 경향과 시대적 특성을 살펴보는 것은 주제에 대한 학술지의 역사를 정리한다는 차원을 넘어 관련 연구의 방향을 전망할 수 있다는 점에서도 후속 연구자들에게는 매우 중요한 연구자료가 될 수 있다. KOSAE 학술지에서 출판되는 연구 논문들은 대기오염물질 특성 분석이나 저감 정책적 제안 등 다양하게 다루고 있으나, LRT와 같은 특정 주제에 한정하여 그 역사를 정리하는 것은 매우 의미 있는 연구라 할 수 있다.

장거리 이동되는 대기오염물질의 연구 범위를 정

하는 것은 대기오염물질의 화학적 구성 및 물리적 특성 등을 모두 고려해 볼 때 그 범위가 매우 광범위하다. 우선 연구의 대상이 되는 대기오염물질에 황사와 같은 자연적 오염물질을 포함할 것인지 아니면 인위적 대기오염물질만을 대상으로 할 것인가에 따라 대기오염물질의 LRT 관련 연구 범위와 접근 방법이 복잡해진다. 최근까지 문제가 되었던 (초)미세먼지의 LRT 현상에 한정할 경우에도 측정분석 기반의 진단적 연구 내용을 대상으로 할 것인지 아니면 예측 모델링이나 국가별 기여율 등을 포함한 모델링 연구를 대상으로 할 것인지의 다양한 범위설정과 연구접근 방법이 존재하므로 대상이 되는 범위를 정하는 것은 중요한 기준이 될 수 있다.

본 연구에서는 KOSAE 학술지 저널에서 투고된 논문 중에서 대기오염물질 LRT 연구 내용에 대하여 과거에서 현재까지의 시대적 경향을 파악하는 것을 주요 목적으로 설정하되, 연구 관점을 대기오염 모델링 연구로 범위를 좁히고 연구 대상을 40여 년간 KOSAE에서 출판된 국문 학술지를 중심으로 하였다. 즉, 학술지 논문에 출판된 논문 중에서 대기오염물질의 LRT 모델링 연구와 연관되는 주제를 다룬 논문을 수집하여 이를 시대적으로 파악하고, 수집된 모든 논문을 대기오염물질 분야 및 연구 내용별로 다시 세분하여 그 내용을 보다 자세히 기술하고자 한다.

따라서 연구 범위를 LRT 현상 자체에 무게를 두었으므로 대상 오염물질의 종류는 특정하지 않았고 기체상 물질인 황이나 질소 산화물뿐만 아니라 (초)미세먼지와 같은 입자상 물질을 모두 포함하여 조사하였다. 다만 내용면에서 측정 분석적 연구는 본 고의 주요 연구 대상에 포함하지 않았고, 차후 모델링 분야가 아닌 측정기반 연구 내용이 LRT 연구 내용에 통합된다면 보다 체계적인 변천사 연구가 완성될 수 있을 것으로 판단된다. KOSAE 학술지 논문 전체를 대상으로 LRT에 관한 연구 주제를 역으로 추적하여 미래의 연구 방향을 가늠하는 것은 KOSAE 학회 차원에서 상당한 역사적 의미가 있을 것으로 판단되며, 향후 유사한 주제로 후속 연구가 진행되면 연구 방향

과 접근 방법을 효과적으로 가늠하는 데에도 중요하게 사용될 수 있을 것으로 판단된다. 본 연구를 통해서 도출된 결과가 대기오염물질 LRT 연구를 통괄적으로 이해하는 데 도움이 되고 나아가 향후 추가적인 연구에도 중요한 기초 자료로 이용될 수 있기를 기대해 본다.

2. 연구 방법

KOSAE 학술지는 첫 논문으로 1985년 대기보전학회지가 발행되었고, 1999년 대기환경학회지로 개명되어 지금까지 사용되고 있다. 본 연구에서는 두 학술지 (대기보전학회지와 대기환경학회지)에서 출판된 국내 논문에서 우선 대기오염물질의 LRT 분야를 선별하였으며, LRT 대상 오염물질로는 (초)미세먼지, 황, 오존, 온실기체 등 모든 오염물질을 포함하였다. 이후 선별된 논문 중에서 특별히 외부(예: 중국)에서 유입되는 현상을 3차원 대기질 모델링으로 연구한 논문을 중심으로 그 내용과 특성을 파악하는 데 주력하였다. 선별 과정에서 특히 대기오염 모델링 분야에 국한하더라도 이와 연관된 단순화된 모델(예: 박스모델) 등의 결과를 다루는 해석상의 연구들, 예를 들어, 오존과 (초)미세먼지(에어로졸) 등의 일부 박스모델 결과의 분석적 연구는 본 연구에 포함하였고, 모델 결과의 해석 논문, 예를 들어 대기오염의 유흐리를 해석하는 국지기상이나 종관기상현상 등의 이동 특징을 서술한 분석적 논문, 최근 급증하였던 (초)미세먼지의 LRT와 연관되는 위성자료 분석 논문은 모델링 연구와 어느정도 거리가 있다고 판단되더라도 최근의 LRT 경향을 설명하기 위하여 본 연구의 통계조사에 포함시켰다.

분석 기간은 최근까지 약 40년(1985~2024년까지)으로서 출판된 논문 중에서 대기오염 LRT와 연관되는 논문을 선별하고 선별된 논문의 수량을 고려하여 이를 상세분야로 재정리하였다. 그 결과 4개 상세분야: ① 대기오염 LRT 모델 개발 및 적용, ② LRT 대기

오염물질의 기여율 산정 연구, ③ 캠페인 및 위성 연구와 연관된 연구, ④ 기타 LRT 연구로 세분화였다. 이상의 상세분야의 내용은 시대별 특징을 구분하여 내용과 연구방법을 정리하였고, 마지막으로 최근의 연구 동향 및 향후 전망을 제시하였다. 최종 정리된 상세분야 내용들을 요약하면 다음과 같다.

상세분야 ①은 대기오염 LRT 모델 개발 및 적용 분야로서 배출, 이동, 대기화학, 침적 과정이 모두 포함된 3차원 대기질 모델링 연구가 핵심이며, 여러 통계 모형들(예를 들어 PMF 등)의 적용연구 또한 통계조사에 포함시켰다. 상세분야 ②에는 LRT 대기오염물질의 기여율 산정 연구 분야로서 3차원 대기질 모델 연구로 계산되는 미세먼지, 오존 등의 LRT 기여도 산정 기법과 그 결과에 대한 해석을 포함하였으며 각 방법 간 장단점 및 도출된 최근의 기여율을 정리하였다. 상세분야 ③에는 캠페인 및 위성 연구와 연관된 연구분야로서 대규모 캠페인 연구와 연관된 LRT 모델링 연구를 포함시켰으며, 아울러 정지위성을 포함한 위성 자료로부터 연구되는 오존 및 (초)미세먼지의 LRT 관련 연구들을 정리하였다. 마지막으로 상세분야 ④에서는 기타 연구 분야로서 황사를 제외한 대기오염 모델링과 연관성을 다루는 여러 연구, 예를 들어, 오존과 미세먼지(에어로졸) 등의 LRT 현상과 연관되는 국지 및 종관기상을 이용한 오염물질 이동 경로(trajecory) 연구, 지상 원격관측 활용 연구, 최근의 온실기체 LRT 연구 등 LRT와 연관된다고 판단되는 연구는 상세분야 ④ 영역에 포함시켰다.

LRT 연구를 위한 측정 분석적 연구(예를 들어 황해상에서의 항공기 관측 및 분석연구), 2000년 초반부터 자주 발생했던 황사 관련 연구 등은 KOSAE 학술지에 다수의 논문이 출판되었으나 시대적 통계조사에만 포함시켰을 뿐 상세분야 연구에서는 제외하였다. 또한 시대별 연구쟁점 정리 과정에서 당시의 연구 특성을 반영하기에 KOSAE 국내 학술지 논문만으로 부족하다고 판단되는 경우 국외 SCIE 저널에 출판된 논문들도 본 연구에 부분적으로 인용하였다.

3. 결 과

3.1 대상 오염물질의 시대별 특징

위에서 기술한 연구방법에 따라 선별된 논문의 총수는 초창기~2000년까지 약 36편, 2001~2010년 22편, 2011~2020년 93편, 2021년 이후 4년간 55편으로 조사되었다. 주요 대기오염 LRT에 관한 연구내용은 표 1에 요약하였고, 시대별 대상 오염물질의 LRT 통계 결과는 그림 1에 제시하였다. 그 결과 대기오염물질의 LRT 연구는 발행 초창기에도 활발하였음을 알 수 있고 LRT 연구가 가장 활발하였던 기간은 2011~2020년이었으며, 2021년 이후에는 4년의 짧은 기간임에도 불구하고 적지 않은 논문 편수가 출판되었음을 알 수 있다(그림 1).

시대별 LRT 대상물질의 특징으로서, 1990년대 이전 포함 2000년까지의 주요 주제는 산성침적(acid deposition)으로서 황이 포함된 산성비를 주제로 다룬 연구가 전체 비율 중 제일 높은 36%로 나타났다(그림 1). 당시 중국에서 배출된 대기오염물질, 특히 공장 등 산업부문 점오염원으로부터 주로 배출되는 황의 LRT 현상을 다룬 논문이 활발하게 발표되었다(Chun *et al.*, 1994; Koo *et al.*, 1989; Park *et al.*, 1989; Shin *et al.*, 1986). 국내에서는 1990년 이후 저황유 사용 등 정부의 노력으로 일부 공단을 제외하고는 아황산가스 농도가 연평균 10 ppb 이하의 낮은 수준을 보였으므로 자체 기여도가 아닌 외부에서 유입되는 LRT 연구(예: Chung and Kim, 1991)가 핵심 주제였음을 알 수 있다(표 1과 그림 1).

1990년대의 모델링 연구로서 산성침적의 LRT 기작을 모의하기 위한 3차원 모델의 개발과 관련된 논문, 예를 들어 STEM-II(Sulfur Transport Eulerian Model-II), RAINS-ASIA(Regional Air pollution INformation and Simulation-Asia) 등의 모델링 연구가 발표되었으며(Lee *et al.*, 1995; Lee *et al.*, 1994), 2000년대에 와서도 계속되었다(Yeo and Kim, 2005; Kim *et al.*, 2003a). 모델 연구와 병행하여 항공기 관측과 같은 측정기반 연구도 1990년대 후반부터 2000년

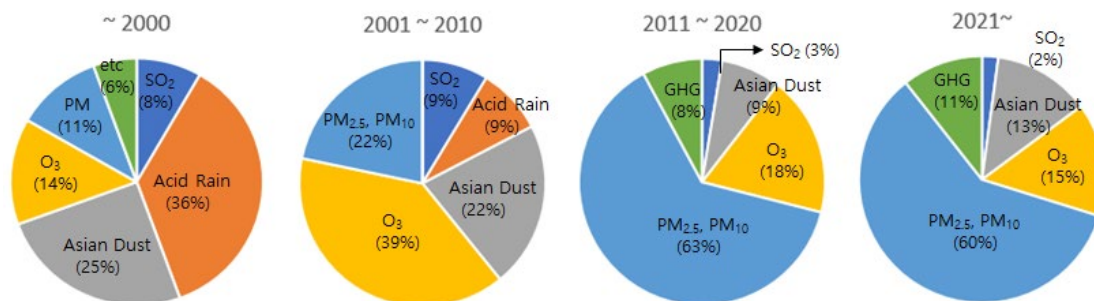


Fig. 1. Percentage distribution of KOSAE manuscripts on long-range transport processes in modeling studies, divided into four periods: through 2000, 2001~2010, 2011~2020, and after 2020.

중반까지 산성침적 연구가 활발하였음을 논문을 통해 확인할 수 있다(Han *et al.*, 2006a; Kim *et al.*, 1999a; Hong *et al.*, 1997; Kim *et al.*, 1997). 1990년대의 동아시아 영역을 대상으로 산성비의 LRT 국외 연구는 EANET (Acid Deposition Monitoring Network in East Asia) 등 측정 분석적 연구가 시작되었으며(Endo *et al.*, 2011), 한국 모델링 연구를 중심으로 진행된 장거리 이동 오염물질사업 (Long-range Transboundary Pollutants over NortheaSt Asia; LTP) 또한 이 시기에 다루어졌다(Park *et al.*, 2005). 당시의 동아시아 시대적 상황에서의 주 핵심 의제는 황에 의한 산성침적을 주제로 하는 배출원-수용지 관계(Source-Receptor Relationship; SRR)였으며 이후에도 연구의 핵심은 한중일 3 국가 간 황의 LRT 현상과 침적량에 대한 SRR 계산이었다(Kim *et al.*, 2012a).

1990년대 후반에 접어들면서 전 세계적으로는 고농도 오존과 오존의 LRT 현상이 주목받았다. 오존-해륙풍과 같은 국지 순환과 연동, 특히 해안가에 있는 큰 항구도시에서 고농도 오존 생성과정이 많이 다루었으며, 성층권 유입 등의 문제도 지적되면서 오존의 LRT 연구가 주목받았다. 국내 연구에서도 1990년 후반부터 2010년까지는 오존(39%), 미세먼지(22%) 및 황사(22%) 등 다양하게 진행되었고, 반면 산성비 혹은 산성침적을 대상으로 하는 연구는 9%에 그쳤다(그림 1). 이 기간 오존 문제가 부상하면서 오존의 LRT 연구가 크게 부상하였고 이후에도 지속되었다(Kang and Kim, 2013; Han *et al.*, 2006a; Oh and Kim,

2004). 이 기간에는 국내 대도시 중심의 고농도 오존 해결을 위한 전구물질들, 즉 질소산화물이나 휘발성 유기화합물의 저감 선별 문제 등이 모델링 연구를 통해 많이 다루었고 이에 따른 도심지에서의 VOC 현황, 광화학 스모그에 의한 오존의 생성 원인 등의 연구 결과들이 측정기반 연구와 함께 2000년 초반까지 논문의 주류를 이루었다(Han *et al.*, 2006b; Kim *et al.*, 2003b; Kim and Ghim, 2001; Shin and Lee, 2001; Jeon and Kim, 1999).

2010년대의 주요 LRT 이슈는 단연 (초)미세먼지(PM₁₀ 혹은 PM_{2.5}) 주제가 주류를 이루었다. 특히 PM_{2.5}의 현업 예보제 도입 등 사회적 관심이 높아지면서 학술지의 PM_{2.5} 논문 편수는 전체의 60% 이상을 차지하였고(그림 1), 반면 산성침적 연구 논문은 전무하였다(그림 1). 특히 수도권에서 PM_{2.5} 고농도 사례가 증가하면서 LRT 모델링 연구와 저감정책을 위한 SRR 연구가 활발하였음은 논문 편수에서도 확연히 드러났다(표 1). PM_{2.5}는 1차와 2차 오염물질이 동시에 섞여 있고 그 전구물질이 암모니아까지 포함되면서 지역별 최적의 해법을 찾기 위한 연구가 큰 이슈였으며, LRT 모델링을 이용한 민감도 연구 논문도 자주 등장하였다(Park and Cho, 2020; Song *et al.*, 2020).

2021년 이후에도 PM_{2.5}의 LRT 연구는 계속되고 있다. 측정 분석적 측면에서 COVID-19를 지나면서 PM_{2.5} 고농도 사례가 급감하고 있고 그 농도 또한 감소하였으나 여전히 LRT 연구의 주요 대상물질은

Table 1. List of long-range air pollutant transport studies over the past 40 years published in the KOSAE journal.

Year	Target pollutants	Research summary	References
~1990	SO ₂ Acid rain	• Basic Researches on Acid Deposition • LRT¹⁾ Impact Assessments of Asian Dust	• Shin <i>et al.</i> (1986), Park <i>et al.</i> (1989) • Lee <i>et al.</i> (1986), Kim (1990)
1991~2000	SO ₂ Acid rain Asian dust O ₃ TSP	• Model Developments for LRT of Acid Deposition • Basic Researches on LRT process over Northeast Asia • Aircraft measurement for SO₂ LRT Studies • Case Studies on LRT of Asian Dust • Diagnostic Model Studies on O₃ LRT	• Lee <i>et al.</i> (1994), Lee <i>et al.</i> (1995) • Kang <i>et al.</i> (1993), Chung and Kim (1991) • Kim <i>et al.</i> (1997), Kim <i>et al.</i> (1999a) • Yoon and Park (1991), Kwon <i>et al.</i> (1995) • Kim <i>et al.</i> (1999b)
2001~2010	PM ₁₀ /PM _{2.5} Asian dust O ₃	• LRT Model development for Acid Deposition and PM • SRR²⁾ modeling Studies • LRT Monitoring of SO₂ • LRT Modeling of O₃ • Modeling Studies on Asian Dust transport • LRT Studies from Aircraft/Ships/Remote Sensing	• Kim <i>et al.</i> (2003a), Yeo and Kim (2005) • Shin <i>et al.</i> (2006), Lee <i>et al.</i> (2009) • Han <i>et al.</i> (2004) • Kim <i>et al.</i> (2003b), Oh and Kim (2004) • Shin <i>et al.</i> (2006), Kim <i>et al.</i> (2010) • Han <i>et al.</i> (2004), Han <i>et al.</i> (2006a)
2011~2020	PM ₁₀ /PM _{2.5} Asian dust O ₃	• 3D Modeling for LRT of PM₁₀/PM_{2.5} • SRR analysis modeling Studies on PM₁₀/PM_{2.5} • LRT Modeling Studies on O₃ • Modeling Studies on Asian Dust transport • LRT Studies from Aircraft/Ships/Remote Sensing	• Choi and Koo (2013), Park <i>et al.</i> (2015), Choi <i>et al.</i> (2018) • Kim <i>et al.</i> (2016a), Kim <i>et al.</i> (2017), Nam <i>et al.</i> (2019) • Kang and Kim (2013), Kim <i>et al.</i> (2016b) • Shin <i>et al.</i> (2012), Choi <i>et al.</i> (2016) • Oh <i>et al.</i> (2017), Noh (2018), Noh (2020)
2021~	PM ₁₀ /PM _{2.5} Asian dust O ₃ , GHS	• 3D Modeling with machine learning • SRR analysis modeling • LRT Studies on O₃ • Modeling Studies on Asian Dust transport • LRT Studies from Satellite/Aircraft/Ships/Remote Sensing • LRT Studies on Greenhouse Gases	• Kim <i>et al.</i> (2022b), Kim and Lee (2023), Kim <i>et al.</i> (2023) • Park <i>et al.</i> (2023a), Ryoo <i>et al.</i> (2022) • Koo <i>et al.</i> (2024), Lee and Bae (2023) • Jeong <i>et al.</i> (2023), Kang and Lee (2023) • Lee and Bae (2023), Chang <i>et al.</i> (2023), Lee <i>et al.</i> (2024a) • Lee <i>et al.</i> (2024b), Kim <i>et al.</i> (2024a), Kim <i>et al.</i> (2024b), Lee and Kim (2024)

¹⁾LRT: Long Range transport²⁾SRR: Source-Receptor Relationship

PM_{2.5}임을 알 수 있다(그림 1). 이와 아울러 PM_{2.5} 관련 위성연구 논문 급증 및 오존 연구가 활발해지는 경향을 보인 것은 주목할 만하였다(그림 1). 위성 논문의 증가는 PM_{2.5} 현업 예보와 함께 위성자료, 환경정지위성 GEMS(Geostationary Environmental Monitoring Spectrometer)의 등장과 직접적으로 관계가 있을 것으로 판단된다(Chang *et al.*, 2023; Lee and Bae, 2023). 최근에는 이산화탄소, 메탄 등 온실기체의 증가가 지속되고 있어서(Lee *et al.*, 2024b), 온실기체의 LRT 연구는 전 지구적인 모델과 연동하여(Kim *et al.*, 2024a, 2024b) 진행되고 있음을 확인할 수 있다(그림 1과 표 1).

결론적으로 학술지의 국내 LRT 관련 연구논문의 역사는 1차 대기오염물질인 황에서 2차 오염물질인 오존 혹은 PM_{2.5}로 그 대상이 변천되었고, 주요 LRT 오염물질의 변화에 따라 계절 특성 혹은 저감 우선순위 등의 연구 주제 또한 변천사를 주도하였음을 확인할 수 있다.

3.2 상세분야별 연구 결과

3.2.1 모델 개발 및 적용 연구

KOSAE 학술지 초창기부터 통계 기반의 여러 모형 혹은 측정자료를 이용한 분석기법들, 예를 들어 수용

모델인 CMB (Chemical Mass Balance) 모형, 측정성분 기반의 분석기법인 PMF (Positive Matrix factorization)를 이용하여 고농도 사례의 원인 해석 및 기여도 추정 연구 등이 진행되었다. 이러한 모형들은 어느 한 대기오염물질에 특정되지 않고 다양하게 적용되었고 최근에도 그 원인 해석에 자주 사용되었다 (Ryoo *et al.*, 2022; Hwang *et al.*, 2020; Han *et al.*, 2006b; Moon *et al.*, 2006; Shin *et al.*, 2006; Hwang and Kim, 2003). 반면 국내 3차원 기상역학 기반의 격자 모델링 연구는 이때까지 국내 학술지 논문은 초창기에는 전무하였음을 확인할 수 있었다.

중규모 3차원 기상 모델에 화학반응까지 고려한 모델링 연구는 1990년대 후반부터 확인된다 (Koo *et al.*, 1989). STEM-II 모델의 개발 (Lee *et al.*, 1995, 1994), RADM (Regional Acid Deposition Model) (Chang *et al.*, 1987), ADOM (Acid Deposition and Oxidant Model) (Venkatram *et al.*, 1988), RAINS-ASIA 모델의 적용 연구 (Yeo and Kim, 2005)는 산성 침적현상을 모의하기 위한 대표적인 연구이다. 그러나, 당시 3차원 모델링 결과는 배출량 자료의 불확도 등 여러 요인으로 인하여 중국 동부의 황의 배출량을 2배, 5배 등 증가시키는 시나리오 연구를 많이 수행하였으며, SO_2 , NO_x , HNO_3 측정 농도 등의 부재로 검증이 어려웠던 시기로 분류할 수 있을 것이다.

2000년대에 와서 LRT 모델 연구에서 주목할 만한 사실은 3차원 공용모델 (community model)인 CMAQ (The Community Multiscale Air Quality Modeling System)의 국내 저변 확대이다. 공용모델 CMAQ의 등장으로 국내 모델링 연구뿐만 아니라 국제협력 연구, 예를 들어 MICS-Asia (Model Intercomparison Study-Asia) (Carmichael *et al.*, 2002), LTP 연구 사업 등의 모델링 연구에도 공용모델이 중요한 도구로 활용되었다 (Kim *et al.*, 2021a, 2011). 이에 따라 CMAQ 모델 등 3차원 대기질 모델을 사용한 황의 LRT 및 산화과정 연구가 구체적으로 수행되었는데, 그 대표적인 주제가 LRT 과정에서 산화된 황의 비율에 대한 모델링 연구이다. 그림 2(a)에서 제시한 것처럼

한국, 중국, 일본의 지상 배경 농도 측정소에 측정된 각 나라별 SO_2 와 SO_4^{2-} 의 비(ratio)를 모델링 연구를 통해 도출하는 것이 당시의 주요 관심사였고 (Park *et al.*, 2012), 연구 결과, 즉 $\text{SO}_4^{2-}/\text{SO}_2$ 값은 한국의 경우 중국의 약 1/4 수준을, 그리고 일본은 한국의 1/2 수준이 당시의 결과였다. 이와 병행하여 황산화물의 SRR 계산이 주요한 관심 의제로 연구가 시작하였으며 2010년에 와서는 고농도 $\text{PM}_{2.5}$ 의 주요 성분인 질소산화물로 급격히 전환되었다.

2011~2020년도의 LRT 모델링 연구는 동북아시아 기상장 정확도를 높이기 위하여 기상 관측자료를 동화(assimilation)하여 실제로 가깝게 그 입력자료를 고도화하는 연구 (Choi *et al.*, 2019; Kim *et al.*, 2019; Park *et al.*, 2015), 현업 기상모델과 직접 커플링하거나, 배출량 개선을 위한 인버스 모델링 기법을 도입하여 배출량을 보정하는 연구 (Choi *et al.*, 2018) 등 다양한 연구내용이 확인된다. 모델링뿐만 아니라 측정 분야에서도 $\text{PM}_{2.5}$ 의 질량농도와 황과 질소산화물 성분을 감시하는 연구가 활발하였고, 그 생성과정과 원인물질 특성 연구 등 다양한 기체 및 입자상 물질의 물리 및 화학적 특성을 연구한 결과가 출판되었다 (Noh, 2020, 2018; Lim *et al.*, 2018). 공용모델인 CMAQ 모델링 연구뿐만 아니라 오픈소스 모델인 CAMx (Comprehensive Air Quality Model with Extension)을 이용한 $\text{PM}_{2.5}$ 연구 등이 등장하였고(예: Choi *et al.*, 2018; Ju *et al.*, 2018), 전지구규모 대기화학 모형인 GEOS-Chem (Goddard Earth Observing System-Chemistry)을 이용한 연구 또한 주목할 만하였다. 즉, 전지구규모 GEOS-Chem의 모델 결과를 지역모델인 CMAQ의 경계조건으로 접합하여 동아시아 미세먼지 혹은 오존농도 모의에 미치는 영향을 정량적으로 연구하거나 (Choi and Koo, 2013) 시베리아 산불과 같은 사건이 한반도에 미치는 영향을 분석하는 연구 등이 수행되었다 (Park *et al.*, 2009; Lee *et al.*, 2004).

2016년에는 국립환경과학원과 미국 NASA와 공동으로 KORUS-AQ (KORea-United States Air Quality)

캠페인이 수행되면서 항공기 관측을 이용한 상층 대기오염물질 측정자료를 확보할 수 있었으며, 캠페인 기간의 기상 관측선 기상 1호 등 해양에서의 에어로졸 및 미세먼지의 다양한 화학성분 등의 관측 연구가 수행되었다 (Cha *et al.*, 2016; Park *et al.*, 2016). KORUS-AQ 캠페인 연구는 PM_{2.5}의 LRT 연구가 가속화되는 계기가 되었고, 캠페인 연구에서 측정된 항공기 및 기상 관측선 등 대기 및 해양에서의 PM_{2.5}의 물리화학적 자료는 3차원 모델링 연구와 연동함으로써 LRT 모델에 필요한 배출량 개선연구 등이 수행된 바 있다.

2020년 이후에는 COVID-19 기간을 지내면서 PM_{2.5} 농도 감소에도 불구하고 연구의 핵심 대상 오염물질은 여전히 PM_{2.5}로 나타났으며, 2000년대 후반부터 오존 연구가 15% 이상의 꾸준한 증가 경향을 보였다 (그림 1). PM_{2.5} 기여도 연구는 공용모델인 CMAQ 모델링뿐만 아니라 CAMx 모델링 연구가 급증하였음을 확인할 수 있는데, CAMx 모델링 연구의 핵심은 동북아 국가 간 LRT 연구보다는 수도권을 포함한 국내 지자체별 PM_{2.5} 기여도 분석 연구가 주류를 이루었다 (Park *et al.*, 2023a; Bae *et al.*, 2021a; Bae *et al.*, 2021b; Kang *et al.*, 2021). 최근에는 위성 자료로부터 대기오염물질의 LRT 특성을 규명하는 연구가 급격히 증가하는 양상을 보였으며 (그림 1), 향후 기후변화에 대한 사회적 관심과 더불어 기후변화에 직간접적으로 영향을 끼치는 대기오염물질의 감소 정책이 주목된다.

3.2.2 기여율 산정 연구

국가별 혹은 지역별 장거리 이동되는 대기오염물질의 기여도를 정량적으로 도출하는 SRR 연구는 국내에서도 자주 수행되었다. SRR 관계는 SRR (i, j) 행렬로 나타내는데, 배출 지역을 i 개, 수용 지역을 j 개로 분류하였을 때 각 행렬 성분을 모델링으로 계산하게 되면 배출원-수용지 간 기여도 SRR (i, j) 관계가 완성된다. SRR (i, j) 계산을 위하여 3차원 모델을 이용할 경우 민감도 (Sensitivity) 방법과 표식자 (Tagging) 방

법으로 구분된다.

민감도 계산 방법에는 각 배출원의 배출량에 변화를 주어 나타나는 수용지에서의 농도 변화를 토대로 기여도를 유추하는 방법으로, 지금까지 가장 많이 사용해 온 대표적인 방식은 BFM (Brute Force Method), DDM (Decoupled Direct Method), HDDM (High-order Decoupled Direct Method) 방식이 있다. BFM 방식은 배출원의 배출량을 강제로 줄여서 수용지의 영향을 계산하는 방법으로서 배출원의 배출량을 제로로 하는 Zero-out 기반의 방식이 오래전부터 모델링 연구에 사용되어 왔다 (Kajino *et al.*, 2011; Lin *et al.*, 2008). 그러나 이 방법은 비선형 반응 때문에 오존이나 PM_{2.5} 연구에는 과소평가된다는 단점이 지적되기도 하여 배출량 감축량을 100% (Zero-out)가 아니라 적절한 삭감율을 결정하는 연구가 국내에서도 수행되었다 (Nam *et al.*, 2019). DDM 혹은 HDDM 방법은 오존과 미세먼지의 비선형성을 완화하기 위하여 배출량-농도 사이의 민감도 계수를 추정하여, 배출량 변화 대비 농도 변화를 수학적으로 정밀하게 계산하는 방법이다. 1차 민감도 계수만을 고려하는 방법이 DDM이고 2차 계수까지 고려하면 HDDM인데, 공용모델인 CMAQ에서도 DDM 혹은 HDDM 모듈의 사용이 가능해지면서 국내에서도 이를 이용한 다수의 연구논문이 발표되었다 (Bae *et al.*, 2018; Kim *et al.*, 2016a).

표식자 (Tagging) 방법은 배출 단계에서 배출원에 표식을 붙여 이동 및 생성에 따른 농도 변화를 추적한다. 현재 상용모델인 CMAx 모델에 탑재된 미세먼지 기여율 계산용 PSAT (Particle source apportionment technology)과 OSAT (Ozone source apportionment technology) 방법이 표식자 방법으로 분류된다. 특히 CAMx의 PSAT 모듈은 한국뿐만 아니라 중국, 일본, 대만 등 국내외 연구자들에 의해 동아시아 황산염 혹은 질산염 에어로졸의 SRR (i, j) 계산이 사용되어 왔다 (Park *et al.*, 2023a; Nam *et al.*, 2019; Choi *et al.*, 2018; Itahashi *et al.*, 2017; Kim *et al.*, 2016a). 국내 연구 결과에 따르면 동북아시아 영역에서 배출원 구

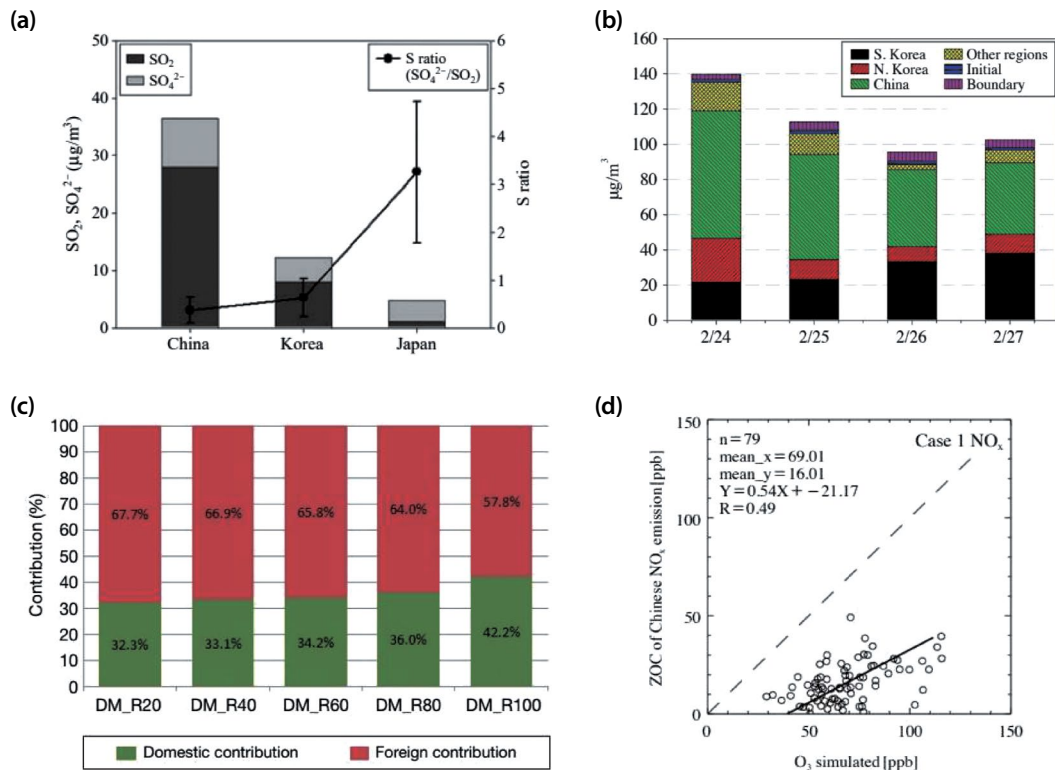


Fig. 2. Distribution patterns of: (a) SO_2 , SO_4^{2-} and the sulfur ratio ($\text{SO}_2/\text{SO}_4^{2-}$) among three countries: China, Korea, and Japan (Park *et al.*, 2012); (b) $\text{PM}_{2.5}$ contributions from emission source regions in Northeast Asia to Seoul Metropolitan Area (SMA) during a high $\text{PM}_{2.5}$ concentration period in February 2014 (Kim *et al.*, 2016a); (c) domestic and foreign contributions to $\text{PM}_{2.5}$ concentrations due to variations in anthropogenic emissions (Nam *et al.*, 2019); and (d) scatter plots between simulated daily maximum 1-hour O_3 concentrations and zero-out concentrations (ZOC) of Chinese NO_x emissions from INTEX-B over the SMA during May to July 2014 (Kim *et al.*, 2017).

분을 남한, 북한, 중국 등 6개로 구분하여 수용지에서서의 SRR 계산 결과는 기여율이 중국 약 52%, 북한 18%, 남한 자체 기여율(2014년 2월 24~27일 기준) 21%를 도출한 바 있으며(그림 2(b)), BFM의 비선형성에 기여하는 오차를 추정된 논문, 즉, 배출원 배출량을 20%, 40%, 60%, 80%, 100% 삭감한 각 모델링 결과를 통해 그 차이를 약 10% 이하의 정량화한 연구 등이 확인되었다(그림 2(c)). 반면, CAMx-PSAT 방법과 유사한 표식자 방법인 ISAM (The Integrated Source Apportionment Method) 모델이 CMAQ 모델에 탑재된 CMAQ-ISAM 모델이 국외 특히 중국을 중심으로 지역 $\text{PM}_{2.5}$ 기여도 연구에 많이 사용되었으나(예: Kwok *et al.*, 2013), KOSAE 논문에서는 CMAQ-

ISAM을 이용한 연구 결과는 보고되지 않은 것으로 확인된다.

오존의 저감 정책을 위한 SRR 연구로서 CMAQ-HDDM 방법으로 수도권 시간평균 오존농도에 대한 외부의 기여도를 추정해 본 결과 중국의 기여도는(2014년 5~7월 INTEX-B 배출량 기준) NO_x 배출량 기여도 36~39% (그림 2(d)), VOC 배출량 기여도 18~20% 등으로 계산되었고, 오존농도의 중국 전체 기여도는 50% 정도임을 도출한 바 있다(Kim *et al.*, 2017). 향후에도 정확한 저감 정책을 도출하기 위하여 보다 정교하고 심도있는 SRR 계산 방법론 및 그 적용 연구가 더 필요할 것으로 판단된다.

3.2.3 위성 및 대규모 캠페인 연구

인공위성 연구는 GEMS 자료가 생산되기 이전에도 자주 활용되었다. 그 예로 NASA의 Aura 위성에 탑재된 Ozone Monitoring Instrument (OMI), Terra 및 Aqua 위성에 탑재된 Moderate Resolution Imaging Spectro-radiometer (MODIS) 등의 연구가 확인된다 (Lee and Bae, 2023; Kim *et al.*, 2012b). 2010년 후반에는 미세먼지 현업 예보가 위성자료를 활용하면서 동북아시아 미세먼지 진단, 측정 분석적 연구 등의 결과가 학술지에 게재되기 시작하였다. 특히 GEMS는 세계 최초 정지궤도 환경위성이라는 점에서 전 세계적으로 주목을 받았으며, GEMS 산출물은 현재 대기 질 정보 14종(에어로졸, 이산화질소, 이산화황, 오존 등)의 자료가 2021년부터 공개되었다. 이후 포름알데히드 등 7종의 정보가 추가 공개되면서 실시간 대기 질 감시에 활용이 가능해졌으며 (Chang *et al.*, 2023), 동북아시아의 대기질, 산불감시, 기후변화 유발물질 감시 등을 위한 중요한 도구로 활용되었다 (Lee and Kim, 2024; Lee and Bae, 2023; Chang *et al.*, 2022).

GEMS 위성자료의 활용 및 검증 연구는 KORUS-AQ와 그 후속 캠페인 GMAP (the GEMS Map of Air Pollution campaign) (Chang *et al.*, 2022) 등의 연구와 연동되어 LRT 연구 또한 상호보완적으로 수행되었다. 캠페인 기간에는 GEMS 위성자료 검증을 위한 항공기 관측뿐만 아니라 지상 원격 관측장비인 Max-DOAS를 설치하여 GEMS 환경 위성 검증에 필요한 기체상 오염물질(NO_2 , O_3 , HCHO)의 농도를 상세히 측정할 수 있었고, 2021년에는 신규 관측장비인 Car-DOAS를 이용하여 수도권 대기오염물질 배출량과 미량기체의 공간 비균질성에 대한 관측을 진행하여 위성자료와 비교하였다 (Chang *et al.*, 2022). 이후 여러 후속 캠페인을 통해 대기질 모델링 연구와 위성연구가 연동되어 검증 및 상호 보완 연구가 지속되고 있다.

국내에서는 KORUS-AQ와 같은 항공기 관측 연구 이외에도 서해상 관측 공백을 해소하기 위하여 2018년부터 수행된 '지상-선박-위성-항공기' 동시 관측하

는 서해상 대기질 입체관측 캠페인 (Yellow Sea-Air Quality; YES-AQ)을 매년 수행해 오고 있다 (Kim *et al.*, 2022a; Shin *et al.*, 2022). 이 캠페인을 통해 서해상 에어로졸의 물리적(수농도, 크기분포), 화학적(질량농도, 화학 조성), 광학적(산란계수, 흡수계수) 특성과 이들 황해상 공간분포 및 고농도 사례들에 대한 상세 분석이 수행되고 있는데, 향후에도 항공기 관측과 연관된 연구가 수행될 것으로 기대된다 (Park *et al.*, 2023b).

3.2.4 기타 장거리 이동 연구

동아시아는 편서풍 지대에 속하여 한·중·일 3국을 포함한 동북아시아 지역을 대상으로 기상에 따른 LRT의 영향을 파악하기 위하여, 역궤적 (Backward trajectory) 분석을 이용한 LRT 연구가 많이 시도되었다. 그 예로 HYSPLIT 모델 (Hybrid single-particle lagrangian integrated trajectory)을 이용하여 역궤적을 분석한 연구 (Kim *et al.*, 2018; Bae *et al.*, 2017; Park *et al.*, 2012), 국가 측정소 혹은 대도시 중심으로 기상 영향만을 고려하여 대기오염물질의 역궤적을 다루는 연구들이 초창기부터 수행되었고 (Chung, 1996; Kang *et al.*, 1993; Yoon and Park, 1991), 역궤적 기반의 군집분석 (Cluster analysis)과 PSCF (Potential source contribution function) 분석 등 (Oh *et al.*, 2017; Cheong and Lee, 2006) 대기오염물질의 LRT 특성 연구가 다양하게 다루어졌다. 최근에 와서는 LRT와 직접 연관되지는 않으나 위성 관측자료 기반의 (초)미세먼지의 광학적 특성 등을 다루는 연구 혹은 위성 산출을 위한 알고리즘 연구들은 최근까지 활발하였으며 (Lee and Bae, 2023; Zhai *et al.*, 2021), 이러한 연구 결과들은 향후 LRT 연구에 매우 활용 가능성이 높을 것으로 판단된다.

2000년 이후의 지상 원격 측정 연구가 활발해지면서, 이를 이용한 대기오염물질 감시 연구가 꾸준히 수행되었다. 예를 들어 AERONET 선포도메터, 스카이라디오미터, 네펠로메터 등 지상 원격장비를 활용한 에어로졸 특성이나 광학깊이 분석 등의 연구 결과

가 많으며 입자상 대기질의 LRT의 지역 특성을 파악하는 데 활용되었다(Kim *et al.*, 2021b; Noh, 2020; Lim *et al.*, 2018). 특히 2000년 이후 다양한 관측기반 연구가 구체화되면서 이러한 원격탐사 연구들은 KORUS-AQ 캠페인 등과 연동되었으며 항공기 관측 자료에 나타난 입자상 오염물질의 화학성분별 자료가 수집되면서 국내뿐만 아니라 외국 SCIE 저널에 다수 게재된 것으로 확인된다.

이 외에도 본고에서는 제외하였으나 황사 관련 연구는 지금까지 꾸준히 수행되었으며, 최근에는 온실기체 모니터링 연구(Kim *et al.*, 2024a, 2024b), 머신러닝 기법을 이용한 모델링 및 모니터링 연구가 급증하고 있으며(예: Kim *et al.*, 2023, 2022b), 오존 존데를 이용한 오존의 연직 구조 연구(Koo *et al.*, 2024) 등 연구 방법 또한 다양해지고 있다.

4. 장거리 이동 연구의 미래 연구 전망

우리나라는 중위도 편서풍 지대에 위치하고 있어서 대기오염물질의 LRT 연구는 계속될 것으로 예상된다. 최근에는 대규모 캠페인, 위성자료, 지상 원격 관측자료와 함께 모델링 연구가 통합적으로 이루어질 것으로 전망됨에 따라 독립적인 개별 연구보다는 통합적 연구가 탄력을 받을 것으로 전망된다. 또한 지금보다 더 정교한 지상 원격측정장비가 개발되거나 보편화될 것으로 예상되어 스카이라디오미터를 활용한 에어로졸 광학적·물리적 특성 연구, 초분광계(hyperspectrometer)를 활용한 지상 관측 장비 등이 광역적으로 활용될 가능성이 크고, Pandora, Max-DOAS, Car-DOAS와 같은 지상 원격측정 연구가 상층 항공 측정기기(GCAS, GeoTASO)와 입체적으로 연동하여 다양한 LRT 오염물질 농도를 산출하는 연구가 가속화될 것으로 전망된다. 최근 동아시아를 중심으로 구축된 Pandora Asia Network (PAN) 및 SIJAQ 캠페인 기간의 GeoTASO 항공 관측 실험, 그리고 개발중인 한국형 GeoTASO (EMSA)의 관측 결

과는 향후 주요 대기오염 배출원 지역의 상세 시·공간 농도 특성 변화뿐만 아니라 대기질 모델의 모의 결과가 개선될 전망이며 최신 장비에 의한 위성, 항공기 등의 관측 분석, 모델링 개선연구 등이 계속 수행될 전망이다(그림 3(a)).

또한 위성 기술의 발달로 인하여 동북아시아 규모에서 확장하여 전 지구적 규모의 환경 모니터링 연구 또한 지금보다 더욱 확대될 것으로 전망된다. 최근의 GEMS 정지위성 연구 결과에 의하면 기존의 극궤도 환경위성에서 제공하지 못하던 다양한 대기환경에서의 일변화 정보를 제공하고 있으며, 이를 통해 대기 오염 LRT 연구에도 계속 활용될 것으로 판단된다(Chang *et al.*, 2022; Baek *et al.*, 2017). 특히 GEMS를 시작으로 한 일련의 정지궤도 대기질 관측 위성들, 즉 동아시아 지역을 대상으로 하는 GEMS를 시작으로, 북미 지역의 NASA TEMPO, 유럽 지역의 ESA Sentinel-4가 발사되었거나 발사될 예정이어서 북반구 주요 고농도 대기오염 지역을 포괄하게되므로(그림 3(b))(Kim *et al.*, 2020) 대기오염 LRT 연구의 대상 범위는 동아시아를 넘어서 더욱 넓은 대륙 간 LRT 현상으로 연구영역이 확대될 전망이다

아울러, 최근 기후변화에 대한 사회적 관심이 높아지고 있으며, 온실기체 배출량이 가장 많은 동아시아 지역에서는 온실기체 감소 정책이 계속 주목을 받을 것으로 전망된다. 기후변화에 의한 기온의 증가 현상은 장거리 이동되는 오염물질 중에서 특히 기온에 민감한 오존이 주목받을 것으로 전망되며, 기후변화가 진행됨에 따라 메탄 등 온실기체에 대한 감시 연구가 현재 활발해지고 있으며(Lee *et al.*, 2024b; Kim *et al.*, 2024a, 2024b), 온실기체의 LRT 감시 연구가 점차 강화될 것으로 전망된다. 따라서 동북아시아 지역기후에 미치는 종합적인 LRT 영향 연구를 위하여 대기 중 체류기간(life time)이 짧음에도 불구하고 단기체류 기후변화 유발물질(Short Lived Climate Pollutants)의 지역 내 이동에 대한 연구 또한 주목받을 것으로 전망된다.

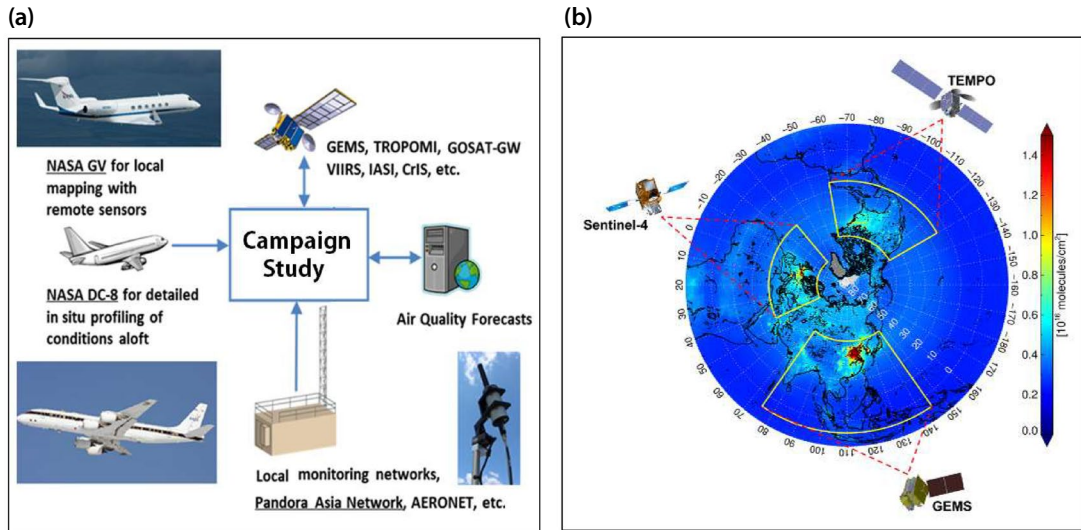


Fig. 3. Schematic of (a) ASIA-AQ (post-KORUS-AQ) campaign (Source: James Crawford, CEOS AC-VC-18 meeting)(left panel); and (b) Geostationary Air Quality Constellation, covering most polluted regions in the Northern Hemisphere, showing the spatial coverage of GEMS over Asia, TEMPO over North America, and Sentinel-4 over Europe (right panel) (Kim et al., 2020).

5. 결 론

본 연구에서는 과거 40년간 KOSAE 학술지에 출판된 대기오염물질 LRT 모델 개발 및 적용 결과들을 중심으로 그 현황과 변천사를 요약하였다. 대기오염물질의 LRT 분야를 4개의 세부분야: 모델 개발 및 적용, 대기오염물질 기여율 산정, 캠페인 및 위성 연구, 기타 연구분야로 나누어 각 세부분야별 대기보전학회지와 대기환경학회지에 게재된 논문을 검토하여 시대별 변천사와 LRT 모델링 연구내용을 세부분야별로 정리하였고, 최근의 연구 추세와 함께 향후 연구전망을 조망하였다.

그 결과, 모델링 분야 LRT 연구 결과들은 시대에 따라 뚜렷한 변화를 거쳐 왔으며, 시대 순서대로 산성침적 또는 이와 연관된 황, 오존, 미세먼지, 온실기체 순서로 LRT 대상 물질이 변화하였음을 알 수 있었다. 최근의 연구논문 현황을 토대로 향후 LRT 연구를 전망해 본 결과, 환경정지위성인 GEMS의 결과물 활용 연구가 심화되고 있으며, 이에 따른 각종 알콜리듬 및 위성자료 활용연구는 계속될 전망이다. 원격탐사 영역에서는 최첨단 대기환경 측정장비가 매우 빠

른 속도로 발전하고 있으며 이에 따른 한반도 혹은 동아시아 대기질 LRT 연구 또한 대기질 모델링 연구와 연동되어 큰 시너지 효과를 낼 것으로 전망된다. 최근에는 기후변화에 대한 사회적 관심이 높아지고 있으며, 메탄 혹은 단기체류 기후변화 유발물질과 같은 대기오염물질이 새로운 LRT 연구대상 오염물질로 주목을 받을 것으로 전망된다. 급격히 변화하는 대기환경분야의 최근 현황 및 미래 연구 흐름에 발맞추어 향후 대기환경 모델링 분야에서의 성공적인 연구를 기대해 본다.

감사의 글

본 논문은 부산대학교 기본연구지원사업 (2년)의 지원을 받아 수행되었습니다.

References

- Bae, C.-H., Kim, B.-U., Kim, H.-C., Kim, S.-T. (2018) Quantitative assessment on contributions of foreign NO_x and

- VOC emission to ozone concentrations over Gwangyang Bay with CMAQ-HDDM simulations, *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment*, 34(5), 708-726, (in Korean with English abstract). <https://doi.org/10.5572/KOSAE.2018.34.5.708>
- Bae, C., Kim, E., Yoo, C., Kim, H.-C., Kim, Y.M., Kim, S. (2021a) 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 Korean 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, E., You, S., Son, K., Kang, Y.-H., Kim, S. (2021b) Local Authority Level Source Apportionments of PM_{2.5} Concentrations based on the CAPSS 2016: (VII) Seoul, *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment*, 37(3), 466-486, (in Korean with English abstract). <https://doi.org/10.5572/KOSAE.2021.37.3.466>
- Bae, M.-A., Kim, C.-H., Kim, B.-U., Kim, S.-T. (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>
- Baek, K., Kim, J.H., Herman, J.R., Haffner, D.P., Kim, J. (2017) Validation of Brewer and Pandora measurements using OMI total ozone, *Atmospheric Environment*, 160, 165-175. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2017.03.034>
- Carmichael, G.R., Calori, G., Hayami, H., Uno, I., Cho, S.Y., Engardt, M., Kim, S.-B., Ichikawa, Y., Ikeda, Y., Woo, J.-H., Ueda, H., Amann, M. (2002) The MICS-Asia study: model intercomparison of long-range transport and sulfur deposition in East Asia, *Atmospheric Environment*, 36(2), 175-199. [https://doi.org/10.1016/S1352-2310\(01\)00448-4](https://doi.org/10.1016/S1352-2310(01)00448-4)
- Cha, J.W., Ko, H.-J., Shin, B., Lee, H.-J., Kim, J.E., Ahn, B., Ryoo, S.-B. (2016) Characteristics of aerosol mass concentration and chemical composition of the Yellow and South sea around the Korean peninsula using a Gisang 1 research vessel, *Atmosphere*, 26(3), 357-372, (in Korean with English abstract). <https://doi.org/10.14191/ATMOS.2016.26.3.357>
- Chang, J.S., Brost, R.A., Isaksen, I.S.A., Madronich, S., Middleton, P., Stockwell, W.R., Walcek, C.J. (1987) A three-dimensional eulerian model: physical concepts and formulation, *Journal of Geophysical Research*, 92, 14681. <https://doi.org/10.1029/JD092iD12p14681>
- Chang, L.-S., Kim, D., Hong, H., Kim, D.-R., Yu, J.-A., Lee, K., Lee, H., Kim, D., Hong, J., Jo, H.-Y., Kim, C.-H. (2022) Evaluation of correlated Pandora column NO₂ and in situ surface NO₂ measurements during GMAP campaign, *Atmospheric Chemistry and Physics*, 22, 10703-10720. <https://doi.org/10.5194/acp-22-10703-2022>
- Chang, L.-S., Yu, J.-A., Jeong, J.-H., Lee, W.-J., Kang, K.-H., Lee, D.-W. (2023) Status of Development and Utilization of Geostationary Environmental Satellites, *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment*, 39(5), 763-774, (in Korean with English abstract). <https://doi.org/10.5572/KOSAE.2023.39.5.763>
- Cheong, J.-P., Lee, S.-H. (2006) Development of PSCF model and determination of proper values of control parameters, *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment*, 22(1), 135-143, (in Korean with English abstract).
- Choi, D.-R., Koo, Y.-S. (2013) An evaluation of the influence of boundary conditions from GEOS-Chem on CMAQ simulations over East Asia, *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment*, 29(2), 186-198, (in Korean with English abstract). <https://doi.org/10.5572/KOSAE.2013.29.2.186>
- Choi, D.-R., Koo, Y.-S., Jo, J.-S., Jang, Y.-K., Lee, J.-B., Park, H.-J. (2016) The Effect of Dust Emissions on PM₁₀ Concentration in East Asia, *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment*, 32(1), 32-45, (in Korean with English abstract). <https://doi.org/10.5572/KOSAE.2016.32.1.032>
- Choi, D.-R., Yun, H.-Y., Koo, Y.-S. (2018) A Development of Particulate Matter Forecasting System with Inverse Modeling using Source Contribution, *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment*, 34(6), 889-910, (in Korean with English abstract). <https://doi.org/10.5572/KOSAE.2018.34.6.889>
- Choi, D.-R., Yun, H.-Y., Koo, Y.-S. (2019) A Development of Air Quality Forecasting System with Data Assimilation using Surface Measurements in East Asia, *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment*, 35(1), 60-85, (in Korean with English abstract). <https://doi.org/10.5572/KOSAE.2019.35.1.060>
- Chun, Y.-S., Cho, H.-M., Kwon, W.-T. (1994) Trajectory Analysis on Acid Rain Observed in the Central Part of Korea During 1992 to 1993, *Journal of the Korea Air Pollution Research Association*, 10(3), 175-182, (in Korean with English abstract).

- Chung, K.-Y. (1996) Assessment of Long-Range Transport of Atmospheric Pollutants using a Trajectory Model with the Puff Concept, *Journal of the Korea Air Pollution Research Association*, 12(2), 167-177, (in Korean with English abstract).
- Chung, Y.-S., Kim, T.K. (1991) On the Sources of Acid Rain Observed in the West Coast of Korea, *Journal of the Korea Air Pollution Research Association*, 7(3), 203-207, (in Korean with English abstract).
- Endo, T., Yagoh, H., Sato, K., Matsuda, K., Hayashi, K., Noguchi, I., Sawada, K. (2011) Regional characteristics of dry deposition of sulfur and nitrogen compounds at EANET sites in Japan from 2003 to 2008, *Atmospheric Environment*, 45(6), 1259-1267. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2010.12.003>
- Han, J.-S., Ahn, J.-Y., Hong, Y.-D., Kong, B.-J., Lee, S.-J., Sunwoo, Y. (2004) The vertical distribution patterns of long-range transported SO₂ in Korea Peninsula, *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment*, 20(5), 671-683, (in Korean with English abstract).
- Han, J.-S., Kim, Y.-M., Ahn, J.-Y., Kong, B.-J., Choi, J.-S., Lee, S.-J. (2006a) Spatial distribution and variation of long-range transboundary air pollutants flux during 1997-2004, *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment*, 22(1), 99-106, (in Korean with English abstract).
- Han, J.-S., Moon, K.-J., Kim, R.-H., Shin, S.-A., Hong, Y.-D., Jung, I.-R. (2006b) Preliminary source apportionment of ambient VOCs measured in Seoul Metropolitan Area by positive matrix factorization, *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment*, 22(1), 85-97, (in Korean with English abstract).
- Hong, M.-S., Kim, S.-T., Lee, D.-S. (1997) A Study on the Quantitative Analysis of SO₂ Dry Deposition in the Northeastern Asia, *Journal of the Korea Air Pollution Research Association*, 13(3), 231-241, (in Korean with English abstract).
- Hwang, I.-J., Kim, D.-S. (2003) Source identification of ambient PM-10 using the PMF model, *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment*, 19(6), 701-717, (in Korean with English abstract).
- Hwang, I.-J., Yi, S.-M., Park, J.-S. (2020) Estimation of Source Apportionment for Filter-based PM_{2.5} Data using the EPA-PMF Model at Air Pollution Monitoring Super-sites, *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>
- Itahashi, S., Hayamo, H., Yumimoto, K., Uno, I. (2017) Chinese province-scale source apportionments for sulfate aerosol in 2005 evaluated by the tagged tracer method, *Environmental Pollution*, 220, 1366-1375. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2016.10.098>
- Jeon, E.C., Kim, J.W. (1999) Development of a Short-term Model for Ozone Using OPI, *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment*, 15(5), 545-554, (in Korean with English abstract).
- Jeong, M.J., Yoo, H.-J., Oh, S.M., Joo, S.J., Boo, K.-O. (2023) Analysis of Asian Dust outbreaks and correlation with meteorological factors using Erdene dust monitoring tower, *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment*, 39(2), 190-201, (in Korean with English abstract). <https://doi.org/10.5572/KOSAE.2023.39.2.190>
- Ju, H., Bae, C., Kim, B.-U., Kim, H.-C., Yoo, C., Kim, S. (2018) PM_{2.5} Source Apportionment Analysis to Investigate Contributions of the Major Source Areas in the South-eastern Region of South Korea, *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment*, 34(4), 517-533, (in Korean with English abstract). <https://doi.org/10.5572/KOSAE.2018.34.4.517>
- Kajino, M., Ueda, H., Sato, K., Sakurai, T. (2011) Spatial distribution of the source-receptor relationship of sulfur in Northeast Asia, *Atmospheric Chemistry and Physics*, 11(13), 6475-6491. <https://doi.org/10.5194/acp-11-6475-2011>
- Kang, D.-K., Kim, S.-T., Kim, J.-W. (1993) A Study on the Long-Range Transport of Air Pollutants in the North East Asia, *Journal of the Korea Air Pollution Research Association*, 9(4), 329-339, (in Korean with English abstract).
- Kang, J.-E., Kim, C.-H. (2013) A study on the effect of cumulus parameterization and microphysics on ozone simulations during long-range transport process over Northeast Asia, *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment*, 29(2), 135-151, (in Korean with English abstract). <https://doi.org/10.5572/KOSAE.2013.29.2.135>
- Kang, M., Lee, W. (2023) Assessment of Asian Dust Aerosol Model 3 Based on an Asian Dust Case of December 2022, *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment*, 39(3), 381-399, (in Korean with English abstract). <https://doi.org/10.5572/KOSAE.2023.39.3.381>
- Kang, Y.-H., You, S., Kim, E., Bea, M., Son, K., Kim, S. (2021) Local Authority-Level Source Apportionments of PM_{2.5} Concentrations based on the CAPSS 2016: (VIII) Busan and Gyeongnam, *Journal of Korean Society for*

- Atmospheric Environment, 37(6), 871-890, (in Korean with English abstract). <https://doi.org/10.5572/KOSAE.2021.37.6.871>
- Kim, B.-G., Cha, J.-S., Han, J.-S., Park, I.-S., Kim, J.-S., Na, J.-G., Choi, D.-I., Ahn, J.-Y., Kang, C.-G. (1997) Aircraft Measurement of SO₂, NO_x over Yellow Sea Area, Journal of the Korea Air Pollution Research Association, 13(5), 361-369, (in Korean with English abstract).
- Kim, B.-G., Ahn, J.-Y., Kim, J.-H., Park, C.-J., Han, J.-S., Na, J.-G., Choi, R.-I. (1999a) A Survey on the Long-range Transport of Sulfur Compounds by Aircraft Measurement over the Yellow Sea in 1998, Journal of Korean Society for Atmospheric Environment, 15(6), 713-725, (in Korean with English abstract).
- Kim, C.-H., Chang, L.-S., Kim, J.-S., Meng, F., Kajino, M., Ueda, H., Zhang, Y., Son, H.-Y., He, Y., Xu, J., Sato, K., Song, C.-K., Ban, S.-J., Sakurai, T., Han, Z., Duan, L., Lee, S.-J., Shim, S.-K., Sunwoo, Y., Lee, T.-Y. (2011) Long-term Simulations of the Sulfur Concentrations over the China, Japan, and Korea: A Model Comparison Study, Asia-Pacific Journal of Atmospheric Sciences, 47(4), 399-411. <https://doi.org/10.1007/s13143-011-0025-8>
- Kim, C.-H., Chang, L.-S., Meng, F., Kajino, M., Ueda, H., Zhang, Y., Son, H.-Y., Lee, J.-J., He, Y., Xu, J., Sato, K., Sakurai, T., Han, Z., Duan, L., Kim, J.-S., Lee, S.-J., Song, C.-K., Ban, S.-J., Shim, S.-G., Sunwoo, Y., Lee, T.-Y. (2012a) Sulfur deposition simulations over China, Japan, and Korea: a model intercomparison study for abating sulfur emission, Environmental Science and Pollution Research, 19, 4073-4089. <https://doi.org/10.1007/s11356-012-1071-1>
- Kim, C.-H., Lee, H.-J., Kang, J.-E., Jo, H.-Y., Park, S.-Y., Jo, Y.-J., Lee, J.-J., Yang, G.-H., Park, T., Lee, T. (2018) Meteorological overview and signatures of long-range transport processes during the MAPS-Seoul 2015 campaign, Aerosol Air Quality Research, 18(9), 2173-2184. <https://doi.org/10.4209/aaqr.2017.10.0398>
- Kim, C.-H., Meng, F., Kajino, M., Lim, J., Tang, W., Lee, J.-J., Kiriya, Y., Woo, J.-H., Sato, K., Kitada, T., Minoura, H., Kim, J., Lee, K.-B., Roh, S., Jo, H.-Y., Jo, Y.-J. (2021a) Comparative numerical study of PM_{2.5} in exit-and-entrance areas associated with transboundary transport over China, Japan, and Korea, Atmosphere, 12(4), 469. <https://doi.org/10.3390/atmos12040469>
- Kim, D.-R., Choi, W.-J., Lee, J.-S., Kim, S.-Y., Hong, H.-J., Song, S.-K. (2012b) Analysis of NO₂ over the Korean Peninsula from ozone monitoring instrument satellite measurements, Journal of Korean Society for Atmospheric Environment, 28(3), 249-260, (in Korean with English abstract). <https://doi.org/10.5572/KOSAE.2012.28.3.249>
- Kim, D.R., Kim, J.S., Ban, S.-J. (2010) A Study on the Characteristics of Soil in the Asian Dust Source Regions of Mongolia, Journal of Korean Society for Atmospheric Environment, 26(6), 606-615, (in Korean with English abstract).
- Kim, D.-S. (1990) Basic research on the quantitative estimation of Yellow Sand, Journal of the Korea Air Pollution Research Association, 1(30), 11-21, (in Korean with English abstract).
- Kim, J., Jeong, U., Ahn, M.-H., Kim, J.H., Park, R.J., Lee, H., Song, C.H., Choi, Y.-S. (2020) New Era of Air Quality Monitoring from Space: Geostationary Environment Monitoring Spectrometer (GEMS), Bulletin of The American Meteorological Society, 101, E1-E22. <https://doi.org/10.1175/BAMS-D-18-0013.1>
- Kim, J.-E., Jung, W.-S., Seok, W., Lee, S.-R., Oh, S.-M., Shin, D.-G., Ko, H.-J., Yoo, H.-J., Chung, C.-Y., Kim, Y.-H. (2022a) Characteristics of Asian Dust Observed over the Yellow Sea during YES-AQ Campaign in March, 2021 based on Vessel and Aircraft Measurement, Journal of Korean Society for Atmospheric Environment, 38(4), 557-576, (in Korean with English abstract). <https://doi.org/10.5572/KOSAE.2022.38.4.557>
- Kim, J.-H., Choi, D.-R., Koo, Y.-S., Lee, J.-B., Park, H.-J. (2016a) Analysis of domestic and foreign contributions using DDM in CMAQ during particulate matter episode period of February 2014 in Seoul, Journal of Korean Society for Atmospheric Environment, 32(1), 82-99, (in Korean with English abstract). <https://doi.org/10.5572/KOSAE.2016.32.1.082>
- Kim, J.Y., Ghim, Y.S. (2001) Modeling the 1997 High-Ozone Episode in the Greater Seoul Area with Densely-Distributed Meteorological Observations, Journal of Korean Society for Atmospheric Environment, 17(1), 1-17, (in Korean with English abstract).
- Kim, M.-H., Oh, Y.-S., Ahn, M.-H., Kang, M., Shi, H., Park, R., Joo, S., Kim, S.-W. (2024a) Retrieving the vertical profile of greenhouse gas using Fourier Transform Spectrometer (FTS) - Part I: Carbon Dioxide (CO₂). Journal of Korean Society for Atmospheric Environment, 40(3), 349-360, (in Korean with English abstract). <https://doi.org/10.5572/KOSAE.2024.40.3.349>
- Kim, M.-H., Oh, Y.-S., Ahn, M.-H., Kang, M., Shi, H., Park, R., Oh, S., Joo, S., Kim, S.-W. (2024b) Retrieving the vertical profile of greenhouse gas using Fourier Transform Spectrometer (FTS) - Part II: Methane (CH₄), Journal of Korean Society for Atmospheric Environment,

- 40(3), 361-372, (in Korean with English abstract). <https://doi.org/10.5572/KOSAE.2024.40.3.361>
- Kim, S.M., Koo, J.H., Lee, H., Mok, J., Choi, M., Go, S., Lee, S., Cho, Y., Hong, J., Seo, S., Lee, J., Hong, J.W., Kim, J. (2021b) Comparison of PM_{2.5} in Seoul, Korea Estimated from the Various Ground-Based and Satellited AOD, *Applied Sciences*, 11(22), 10755. <https://doi.org/10.3390/app112210755>
- Kim, S.-T., Bae, C.-H., Kim, E.-H., You, S., Bae, M.-A., Lee, J.-B., Seo, I.-S., Lee, Y.-J., Kim, B.-U., Kim, C.-H., Woo, J.-H. (2017) Domestic ozone sensitivity to Chinese emissions inventories: A comparison between MICS-Asia 2010 and INTEx-B 2006, *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment*, 33(5), 480-496, (in Korean with English abstract). <https://doi.org/10.5572/KOSAE.2017.33.5.480>
- Kim, S.-T., Hong, M.-S., Moon, S.-H., Choi, J.-I. (2003a) Prediction of Temporal Variation of Ion Concentrations in Rainwater, *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment*, 19(2), 191-204, (in Korean with English abstract).
- Kim, T.H., Myoung, J.S., Lee, Y.h., Suh, I.S., Jang, L.S. (2019) A Study on Influence of Meteorological Patterns on Data Assimilation Effect using the Air Quality Prediction Model, *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment*, 35(1), 49-59, (in Korean with English abstract). <https://doi.org/10.5572/KOSAE.2019.35.1.049>
- Kim, T.-H., Kim, Y.-K., Shon, Z.-H., Jeong, J.-H. (2016b) Sensitivity analysis of ozone simulation according to the impact of meteorological nudging, *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment*, 32(4), 372-383, (in Korean with English abstract). <https://doi.org/10.5572/KOSAE.2016.32.4.372>
- Kim, Y.-I., Lee, K.-H., Lee, K.-T. (2022b) Evaluation and Prediction of Column Aerosol by Using the Time Series Machine Learning Technique, *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment*, 38(1), 57-73, (in Korean with English abstract). <https://doi.org/10.5572/KOSAE.2022.38.1.57>
- Kim, Y.-I., Lee, K.-H., Park, S.-H. (2023) Application and Evaluation of Machine Learning Techniques for Real-time Short-term Prediction of Air Pollutants, *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment*, 39(1), 107-127, (in Korean with English abstract). <https://doi.org/10.5572/KOSAE.2023.39.1.107>
- Kim, Y.-I., Lee, K.-H. (2023) Accuracy Analysis of Machine Learning Methods for Predicting PM Concentration, *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment*, 39(2), 149-164, (in Korean with English abstract). <https://doi.org/10.5572/KOSAE.2023.39.2.149>
- Kim, Y.-K., Oh, I.-B., Hwang, M.-K. (2003b) Numerical simulation of high ozone episodes in Busan using UAM-V, *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment*, 19(1), 1-11, (in Korean with English abstract).
- Kim, Y.-K., Sohn, K.-T., Moon, Y.-S., Oh, I.-B. (1999b) Development of a Transfer Function Model to Forecast Ground-level Ozone Concentration in Seoul, *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment*, 15(6), 779-789, (in Korean with English abstract).
- Koo, J.-H., Kim, J., Lee, D., Lee, N., Lee, D., Park, M., Lee, S.-J., Kim, S.J., Kang, H., Kim, H.-G., Park, J., Lee, W.-J. (2024) The analysis of summertime tropospheric ozone at Anmyeon using ozonesonde measurements in 2021-2022. *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment*, 40(3), 373-383, (in Korean with English abstract). <https://doi.org/10.5572/KOSAE.2024.40.3.373>
- Koo, J.-K., Ko, S.-O., Kim, M.-Y. (1989) Acid Rain Model Development Considering Altitudinal Precipitation Rate, *Journal of the Korea Air Pollution Research Association*, 5(1), 43-51, (in Korean with English abstract).
- Kwok, R., Napelenok, S., Baker, K. (2013) Implementation and evaluation of PM_{2.5} source contribution analysis in a photochemical model, *Atmospheric Environment*, 80, 398-407. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2013.08.017>
- Kwon, S., Iwasaka, Y., Shibata, T., Kim, Y.H. (1995) Properties of Yellow Sand with a Lidar Measurement in Spring 1994, *Journal of the Korea Air Pollution Research Association*, 11(4), 315-321, (in Korean with English abstract).
- Lee, H.-W., Lee, T.-J., Kim, D.-S. (2009) Identifying Ambient PM_{2.5} Sources and Estimating their Contributions by Using PMF : Separation of Gasoline and Diesel Automobile Sources by Analyzing ECs and OCs, *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment*, 25(1), 75-89, (in Korean with English abstract).
- Lee, K.-H., Bae, M.-S. (2023) Satellite Observation Based Air Quality Study, *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment*, 39(5), 571-587, (in Korean with English abstract). <https://doi.org/10.5572/KOSAE.2023.39.5.571>
- Lee, K.-H., Kim, J.-E., Kim, Y.-J., Kim, J. (2004) Impact of the smoke aerosol from Russian forest fires on the atmospheric environment over Korea during May 2003, *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment*, 20(5), 603-613, (in Korean with English abstract).

- Lee, K.-H., Kim, K. (2024) Monitoring and forecasting XCO₂ using OCO-2 satellite data and deep learning, *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment*, 40(5), 572-584, (in Korean with English abstract).
- Lee, K.-H., Kim, K., Lee, D., Ha, J.-S., Kim, H. (2024a) Simultaneous monitoring of wildfire and smoke using geostationary satellite infrared channel observations, *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment*, 40(3), 337-348, (in Korean with English abstract). <https://doi.org/10.5572/KOSAE.2024.40.3.337>
- Lee, M.-H., Han, E.-J., Won, Y.-S. (1986) Yellow Sand Phenomena influence to the atmosphere in Korea, *Journal of the Korea Air Pollution Research Association*, 2(3), 34-44, (in Korean with English abstract).
- Lee, S.-R., Cho, S.-Y., Shim, S.-G. (1994) Application of the STEM II to air pollutant transport/chemistry/deposition in the Korea and Eastern China Area - I. Data preparation and Model verification, *Journal of the Korea Air Pollution Research Association*, 10(4), 260-280, (in Korean with English abstract).
- Lee, S.-R., Cho, S.-Y., Shim, S.-G. (1995) Application of the STEM II to air pollutant transport/chemistry/deposition in the Korea and Eastern China Area II. Transport of SO₂ and sulfate between the Korea and Eastern China Area, *Journal of the Korea Air Pollution Research Association*, 11(2), 163-170, (in Korean with English abstract).
- Lee, S.-R., Shin, D.-G., Joo, S.-W., Seo, W., Kim, S. (2024b) Analysis of Carbon Dioxide Growth Rate Observed at Anmyeon-do, Korea, and Globally over the Last Decade, *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment*, 40(6), 601-613, (in Korean with English abstract). <https://doi.org/10.5572/KOSAE.2024.40.6.601>
- Lim, B.J., Lee, M.D., Choi, J.Y., Park, S.M., Lee, S.B., Song, M.J. (2018) New Particle Formation and Growth at Baengnyeong Island in 2016, *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment*, 34(6), 831-840, (in Korean with English abstract). <https://doi.org/10.5572/KOSAE.2018.34.6.831>
- Lin, M., Oki, T., Bengtsson, M., Kanae, S., Holloway, T., Streets, D.G. (2008) Long-range transport of acidifying substances in East Asia-Part II: Source-receptor relationships, *Atmospheric Environment*, 42(24), 5956-5967. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2008.03.039>
- Moon, K.-J., Han, J.-S., Kong, B.-J., Jung, I.-R., Cliff, S.S., Cahill, T.A., Perry, K.D. (2006) Size-resolved source apportionment of ambient particles by positive matrix factorization at Gosan, Jeju Island during ACE-Asia, *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment*, 22(5), 590-603, (in Korean with English abstract).
- Nam, K.-P., Lee, H.-S., Lee, J.-J., Park, H.-J., Choi, J.-Y., Lee, D.-G. (2019) A Study on the Method of Calculation of Domestic and Foreign Contribution on PM_{2.5} using Brute-Force Method, *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment*, 35(1), 86-96, (in Korean with English abstract). <https://doi.org/10.5572/KOSAE.2019.35.1.086>
- Noh, Y.-M. (2018) A study on the variation of aerosol optical depth according to aerosol types in Northeast Asia using AERONET Sun/Sky radiometer data, *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment*, 34(5), 668-676, (in Korean with English abstract). <https://doi.org/10.5572/KOSAE.2018.34.5.668>
- Noh, Y.M. (2020) A Study on the Variation of Aerosol Lidar Ratio according to Aerosol Types on Korea Based on AERONET Sun/Sky Radiometer Data, *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment*, 36(1), 84-92, (in Korean with English abstract). <https://doi.org/10.5572/KOSAE.2020.36.1.084>
- Oh, I.-B., Kim, Y.-K. (2004) The influence of long-range transport on springtime nocturnal ozone enhancement in Seoul, *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment*, 20(4), 503-514, (in Korean with English abstract).
- Oh, S.-H., Kim, J., Shon, Z.-H., Bae, M.-S. (2017) Assessing the Altitudinal Potential Source Contribution Function of Aerosol Optical Depth in the West Coast of Korean Peninsula during the DRAGON-KORUS-AQ Campaign, *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment*, 33(1), 19-30, (in Korean with English abstract). <https://doi.org/10.5572/KOSAE.2017.33.1.019>
- Park, H.-Y., Cho, S.-Y. (2020) The Effects of NH₃ 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).
- Park, I.-S., Choi, W.-J., Lee, T.-Y., Lee, S.-J., Han, J.-S., Kim, C.-H. (2005) Simulation of long-range transport of air pollutants over Northeast Asia using a comprehensive acid deposition model, *Atmospheric Environment*, 39(22), 4075-4085. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2005.03.038>
- Park, M., Yum, S.S., Kim, N.J., Cha, J.W., Ryoo, S.-B. (2016) Characteristics of aerosol and cloud condensation nuclei concentrations measured over the Yellow sea on a

- meteorological research vessel, GISANG 1, Atmosphere, 26(2), 243-256, (in Korean with English abstract). <https://doi.org/10.14191/ATMOS.2016.26.2.243>
- Park, R.J., Jeong, J., Youn, I.D. (2009) A study of the effects of Siberian wildfires on ozone concentrations over East Asia in spring 2003, Atmosphere, 19(3), 227-235, (in Korean with English abstract).
- Park, S.-B., Park, S.-H., Kim, M.-Y., Kang, H.-G., Kim, Y.-G., Lee, S.-Y. (1989) Studies on the Present State of Acid Precipitation in Seoul Area, Journal of the Korea Air Pollution Research Association, 5(2), 42-52, (in Korean with English abstract).
- Park, S.-K., Kim, H.-C., Kim, J.-H., Oh, H.-S. Kim, S., Yoo, C, Bae, C. (2023a) A Study on Estimating the Contributions by Emission Source Sector and Province Based on CAMx-PSAT for the Region-Specific Analysis of the Causes of High PM_{2.5} Concentrations, Journal of Korean Society for Atmospheric Environment, 39(5), 842-865, (in Korean with English abstract). <https://doi.org/10.5572/KOSAE.2023.39.5.842>
- Park, S.-Y., Kim, Y.-J., Kim, C.-H. (2012) Characteristics of long-range transport of air pollutants due to different transport patterns over Northeast Asia, Journal of Korean Society for Atmospheric Environment, 28(2), 142-158, (in Korean with English abstract). <https://doi.org/10.5572/KOSAE.2012.28.2.142>
- Park, T.-H., Ban, J.-H., Ahn, J.-Y., Lee, T.-H., Park, J.-S. (2023b) Review and Recommendations of Domestic and International Research on Aircraft-based Measurements for Air Pollutants, Journal of Korean Society for Atmospheric Environment, 39(5), 723-750, (in Korean with English abstract). <https://doi.org/10.5572/KOSAE.2023.39.5.723>
- Park, Y.-S., Jang, I.-S., Cho, S.-Y. (2015) An analysis on effects of the initial condition and emission on PM₁₀ forecasting with data assimilation, Journal of Korean Society for Atmospheric Environment, 31(5), 430-436, (in Korean with English abstract). <https://doi.org/10.5572/KOSAE.2015.31.5.430>
- Ryoo, I.-H., Park, J., Kim, T.-Y., Ryu, J., Cheong, Y., Ahn, J.-Y., Yi, 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>
- Shin, D., Kim, J.E., Chung, C.-Y., Yoo, H.-J. (2022) Aerosol physical characteristics over the Yellow sea using optical particle counter measurement data onboard Gisang1 vessel during the YES-AQ campaign, Journal of Korean Society for Atmospheric Environment, 38(2), 203-219, (in Korean with English abstract). <https://doi.org/10.5572/KOSAE.2022.38.2.203>
- Shin, D.-Y., Lee, Y.-J. (2001) Atmospheric Concentrations of Volatile Organic Compounds (VOC) of Day/Night Periods During the Summer Season in Kwangju, Journal of Korean Society for Atmospheric Environment, 17(2), 169-177, (in Korean with English abstract).
- Shin, E.-B., Lee, S.-K., Ahn, K.-H. (1986) Investigation on Source Strength to Acid Rain in the Seoul Area, Journal of Korea Air Pollution Research Association, 2(2), 66-74, (in Korean with English abstract).
- Shin, S.-A., Han, J.-S., Kim, S.-D. (2006) Source apportionment and the origin of Asian dust observed in Korea by receptor modelling (CMB), Journal of Korean Society for Atmospheric Environment, 22(2), 157-166, (in Korean with English abstract).
- Shin, S., Shin, D., Lee, K., Noh, Y. (2012) Classification of Dust/Non-dust Particle from the Asian Dust Plumes and Retrieval of Microphysical Properties using Raman Lidar System, Journal of Korean Society for Atmospheric Environment, 28(6), 5688-696, (in Korean with English abstract). <https://doi.org/10.5572/KOSAE.2012.28.6.688>
- Song, M.-K., Kim, M.-S., Kim, M.-W., Lee, K.-H., Bae, M.-S. (2020) Relationship between Long-range Transport of Ammonia and Ammonium in Wintertime in Suburban Area, Journal of Korean Society for Atmospheric Environment, 36(4), 543-557, (in Korean with English abstract). <https://doi.org/10.5572/KOSAE.2020.36.4.543>
- Venkatram, A., Karamchandani, P.K., Misra, P.K. (1988) Testing a comprehensive acid deposition model, Atmospheric Environment, 22, 737-747. [https://doi.org/10.1016/0004-6981\(88\)90011-X](https://doi.org/10.1016/0004-6981(88)90011-X)
- Yeo, M.-J., Kim, Y.-P. (2005) Effects of regional SO₂ emission change due to the Western development in China on the deposition of sulfur in East Asia: Analysis using the RAINS-Asia model, Journal of Korean Society for Atmospheric Environment, 21(1), 73-81, (in Korean with English abstract).
- Yoon, S.-C., Park, K.-S. (1991) Isentropic Analysis for the Long Range Trajectories of Yellow Sands, Journal of the Korea Air Pollution Research Association, 7(2), 89-95, (in Korean with English abstract).
- Zhai, S., Jacob, D.J., Brewer, J.F., Li, K., Moch, J.M., Kim, J., Lee, S., Lim, H., Lee, H.C., Kuk, S.K., et al. (2021) Interpretation

of geostationary satellite aerosol optical depth (AOD) over East Asia in relation to fine particulate matter ($PM_{2.5}$): Insights from the KORUS-AQ aircraft campaign and seasonality, *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2021, 1-24. <https://doi.org/10.5194/acp-21-16775-2021>

Authors Information

김철희 (부산대학교 대기환경과학과 교수)
(chkim2@pusan.ac.kr)