



논문

WRF-CMAQ 양방향 결합모델을 이용한 남한 에어로졸 배출량 저감에 따른 기상 및 직접적 복사강제력 영향 연구

Effects of Aerosol Emission Reductions on Meteorology and Aerosol Direct Radiative Forcing over South Korea Using the WRF-CMAQ Two-way Coupled Model

김진승¹⁾, 송상근^{1),2),*}, 조성빈²⁾

¹⁾제주대학교 지구해양융합학부 지구해양과학전공, ²⁾제주대학교 지구해양학과

Jin-Seung Kim¹⁾, Sang-Keun Song^{1),2),*}, Seong-Bin Cho²⁾

¹⁾Faculty of Earth and Marine Convergence/Earth and Marine Science Major, Jeju National University, Jeju, Republic of Korea

²⁾Department of Earth and Marine Sciences, Jeju National University, Jeju, Republic of Korea

접수일 2025년 10월 9일
수정일 2025년 10월 24일
채택일 2025년 10월 24일

Received 9 October 2025
Revised 24 October 2025
Accepted 24 October 2025

*Corresponding author
Tel : +82-(0)64-754-3431
E-mail : songsk@jejunu.ac.kr

Abstract This study investigates the effects of aerosol emission reductions on meteorology and aerosol direct radiative forcing (DRF) over South Korea during a severe haze episode (February 17~March 15, 2019) using the WRF-CMAQ two-way coupled model. One control simulation (CTRL) and two emission reduction scenarios (ER50% and ER25%) were performed, reducing emissions of primary particles (BC, OC, PM₁₀, PM_{2.5}, and TSP), precursors (NO_x, SO₂, VOCs, and NH₃), and biogenic compounds (e.g., isoprene and terpenes) by 50% and 25%, respectively. Under the ER50%, mean downward shortwave radiation over South Korea increased by 1.03%, while downward longwave radiation slightly decreased by 0.03% compared to the CTRL. Aerosol emission reductions had more pronounced impacts on regional meteorology and PM concentrations over land than over the ocean. The radiative changes over land led to increases in air temperature (+0.38% on average), planetary boundary layer height (+0.88%), and wind speed (+0.37%), along with a decrease in relative humidity (-0.46%). These meteorological changes, together with emission reductions, contributed to decreases in PM₁₀ and PM_{2.5} concentrations over land (-30.8% and -38.4%, respectively). Regarding the DRFs, the forcing at the top of atmosphere (DRF_{TOA}) and the surface (DRF_{SUR}) between the CTRL and ER50% in the study area were negative (-0.23 and -4.8 W m⁻², respectively), resulting in a positive atmospheric DRF (DRF_{ATM}) of +4.55 W m⁻² and an increase in atmospheric heating of 0.13 K day⁻¹. Under the 25%, the effects on meteorological variables, PM concentrations, DRFs, and atmospheric heating were weaker than those under the ER50% by factors of 1-6, 4.6, 2-4, and 2.2, respectively. However, unlike the ER50%, secondary inorganic aerosols in PM_{2.5} increased by 16.5% (2.9% over land), likely due to the gas-to-particle conversion of NH₄NO₃ under cold conditions and competitive reactions among NH₃, H₂SO₄, and HNO₃.

Key words: Aerosol emission reduction, Direct radiative forcing, Radiation, PM concentrations, WRF-CMAQ two-way coupled model

1. 서론

일반적으로 대기 중 에어로졸은 태양 복사와의 상호작용을 통한 에어로졸 직접효과(direct effect)와 구름응결핵으로 작용하여 구름의 광학적 특성과 강수를

변화시키는 에어로졸 간접효과(indirect effect)를 통해 기상 및 기후에 중요한 영향을 미친다(Yoo *et al.*, 2019; Yu *et al.*, 2014; IPCC, 2007; Penner *et al.*, 2001). 이러한 에어로졸은 여러 인위적 요인(산업시설, 차량 등)과 자연적 요인(황사, 해염입자 등)에 의해 발생하

며, 배출원에서 직접 방출되는 1차 에어로졸과 광화학 반응 및 산화 과정을 통해 생성되는 2차 에어로졸로 구분된다(KMA, 2024; Seinfeld and Pandis, 2016; Hallquist *et al.*, 2009). 에어로졸의 대부분은 태양복사를 산란시켜 음의 직접적 복사강제력(Direct radiative forcing, DRF)을 유발함으로써 지구냉각화에 기여하는 반면, 블랙 카본(Black carbon, BC)과 같이 흡수성이 강한 에어로졸은 양의 DRF를 일으켜 지구온난화에 기여한다(IPCC, 2007). 한편, 최근 국내에서는 배출량 관리 정책의 시행에 따라 가스상 및 입자상 오염물질의 배출량이 감소하는 추세를 보이고 있다(NAIR, 2025; NIER, 2018). 예를 들어, 2015년의 배출량은 각각 3,610,734 ton과 952,160 ton이었으나, 2022년에는 다소 감소하여 각각 3,086,120 ton과 604,320 ton이 대기 중으로 배출되었다. 이와 같은 에어로졸은 대기 중에서 복잡한 상호작용을 통해 기상 및 기후환경에 영향을 미치므로, 에어로졸 배출에 따른 기상 및 농도 변화, 그리고 DRF의 변화를 정량적으로 평가하는 연구는 매우 중요하다.

그동안 국내외 많은 연구자들은 에어로졸에 의한 DRF를 정량화하기 위해 다양한 수직모의 연구를 시도해왔다. 대표적으로 에어로졸 광학모델 OPAC(Optical Properties of Aerosols and Clouds)과 복사전달모델 SBDART(Santa Barbara DISORT Atmospheric Radiative Transfer)를 이용하여 에어로졸의 DRF와 이로 인한 대기가열률을 추정하였다(Tiwary *et al.*, 2024; Gupta *et al.*, 2023; Song *et al.*, 2017; Kedia *et al.*, 2010). Tiwary *et al.* (2024)은 2022~2023년 동안 히말라야 지역에서 BC에 의한 대기 중 평균 DRF와 대기가열률을 각각 $+13.4 \text{ W m}^{-2}$ 와 $+0.36 \text{ K day}^{-1}$ 로 추정하였으며, 특히 여름철($+14.3 \text{ W m}^{-2}$, $+0.37 \text{ K day}^{-1}$)이 겨울철($+12.0 \text{ W m}^{-2}$, $+0.34 \text{ K day}^{-1}$)에 비해 약 1.1~1.2배 더 크게 나타났음을 밝혔다. 또한, 2016년 7월부터 2019년 12월까지 인도-갠지스 분지에 위치한 아그라 지역에서 BC 농도에 의한 대기 상단(Top of the Atmosphere, TOA), 지표면(Surface level, SUR), 대기 중(Atmosphere, ATM) 평균 DRF는 각각 $+18.3 \text{ W}$

m^{-2} , -42.4 W m^{-2} , $+59.1 \text{ W m}^{-2}$ 로 추정되었다(Gupta *et al.*, 2023). 국내를 대상으로 수행한 DRF 추정 연구를 살펴보면, 2010년 서울 도시지역에서 PM_{2.5} 관측자료를 기반으로 추정된 에어로졸 성분별(water-soluble, BC, insoluble, sea-salt) DRF는 각각 $+15.2 \text{ W m}^{-2}$, $+41.4 \text{ W m}^{-2}$, $+7.1 \text{ W m}^{-2}$, $+0.38 \text{ W m}^{-2}$ 로 추정되었으며, 이에 따른 대기가열률은 각각 0.9 K day^{-1} , 2.9 K day^{-1} , 0.5 K day^{-1} , $\leq 0.001 \text{ K day}^{-1}$ 로 나타났다(Song *et al.*, 2017). So *et al.* (2020)은 부산과 제주에서 연무발생 기간 동안 TOA 및 SUR의 DRF가 비발생 기간에 비해 약 1.8~2.4배 크게 나타났음을 밝혔다. 이외에도 Moon and Song (2020)은 서울과 부산을 대상으로 RCP8.5 기후변화시나리오를 이용하여 추정된 미래(2021~2100년) DRF가 기준연도(2016년)에 비해 각각 $-29 \sim -34 \text{ W m}^{-2}$ 와 $-20 \sim 228 \text{ W m}^{-2}$ 정도 증가하는 것으로 전망되었다.

기존 선행 연구에서 주로 사용된 OPAC과 SBDART 모델은 하나의 관측지점을 기반으로 광학특성과 DRF만을 추정할 수 있어, 공간적으로 넓은 영역을 해석하는 데 한계가 있다. 이러한 한계를 보완하기 위해, 3차원 모델인 WRF-Chem(Weather Research and Forecasting model coupled with Chemistry)을 이용하여 DRF와 대기가열률을 산정한 연구들이 다수 수행되었다(Dehshiri and Firoozabadi, 2024; Mamun *et al.*, 2021; Huang *et al.*, 2015; Gao *et al.*, 2014). 이들 연구는 주로 산불, 황사, 연무 등 특정 사례를 대상으로, 기존 배출량 실험과 함께 바이오매스 연소(biomass burning) 또는 황사 배출량을 추가한 실험을 통해 에어로졸의 DRF를 분석하였다. 그러나 에어로졸 및 전구물질 배출량을 정량적으로 저감하여 기상과 농도, 그리고 DRF 변화를 종합적으로 평가한 연구는 매우 드물다. 특히, 대기질 평가 연구에서 주로 활용되는 CMAQ(Community Multiscale Air Quality) 모델 기반의 기상-대기질 양방향 결합모델을 통해 DRF를 정량적으로 분석한 사례는 거의 전무하다. 앞서 언급한 바와 같이, 에어로졸 변화는 기후와 환경에 중대한 영향을 미친다. 이에 본 연구에서는 2019년 2~3월에 발생한 극

심한 연무사례를 대상으로, WRF-CMAQ 양방향 결합 모델을 활용하여 남한지역에서의 에어로졸 및 전구물질 배출량 저감에 따른 기상 및 미세먼지 농도 변화를 분석하였다. 또한 이와 연계된 에어로졸 DRF 변화를 정량적으로 평가하고, 이를 바탕으로 대기가열률을 추정하였다.

2. 자료 및 방법

2.1 대상지역 및 연구기간

우리나라는 편서풍대에 위치해 있으며, 중국의 대규모 배출원의 풍하측에 놓여 있다(그림 1). 이에 따라 고농도 대기오염물질(PM_{10} , $PM_{2.5}$ 등)의 장거리 수송으로 인한 직·간접적 영향을 받을 뿐만 아니라, 국내의 자체 배출(인위적 및 자연적)도 동시에 작용하고 있어, 국내의 요인이 복합적으로 대기질에 영향을 미치는 지역이다(Cho *et al.*, 2023; Oh *et al.*, 2015; Song *et al.*, 2010). 연구기간(2019년 2~3월)이 포함된 2019년은 최근 10년 내 가장 극심한 고농도 연무 사례가 발생한 해로, 초미세먼지 주의보 및 경보 발령 일수가 다른

연도에 비해 약 1.1~10배 많았으며, 국내 모든 대기질 관측소에서 $PM_{2.5}$ 농도가 대기환경 기준(일평균 $35 \mu\text{g m}^{-3}$ 이하)을 초과하였다(NIER, 2020). 또한 환경부 국가미세먼지정보센터(<https://www.air.go.kr/>)의 보고서에 따르면(NIER, 2022), 2019년 배출목록 기준 입자상 오염물질(PM_{10} , $PM_{2.5}$, BC, TSP)의 배출량은 각각 $14,211 \text{ ton yr}^{-1}$, $207,866 \text{ ton yr}^{-1}$, $87,618 \text{ ton yr}^{-1}$, $484,527 \text{ ton yr}^{-1}$ 로 산정되었으며, 이는 1999년부터 2022년까지의 기간 중 다섯 번째로 높은 수치였다. 특히, 연구기간인 2019년 2~3월 사이에는 황사 및 강수 현상이 발생하지 않았으며, 고기압 조건하에서 남한 대부분 지역의 1시간 $PM_{2.5}$ 농도가 $120 \mu\text{g m}^{-3}$ 이상으로 관측되었다.

2.2 연구 방법 및 자료

본 연구에서는 에어로졸 배출량 저감이 기상 및 에어로졸의 DRF에 미치는 효과를 분석하기 위해, 남한 지역 내 55개의 기상청 종관기상관측시스템(Automated Synoptic Observing System, ASOS)과 환경부 도시 대기측정망에서 시간별 기상요소(일사, 기온, 풍속, 상대습도)와 미세먼지 농도(PM_{10} , $PM_{2.5}$)를 수집하였다

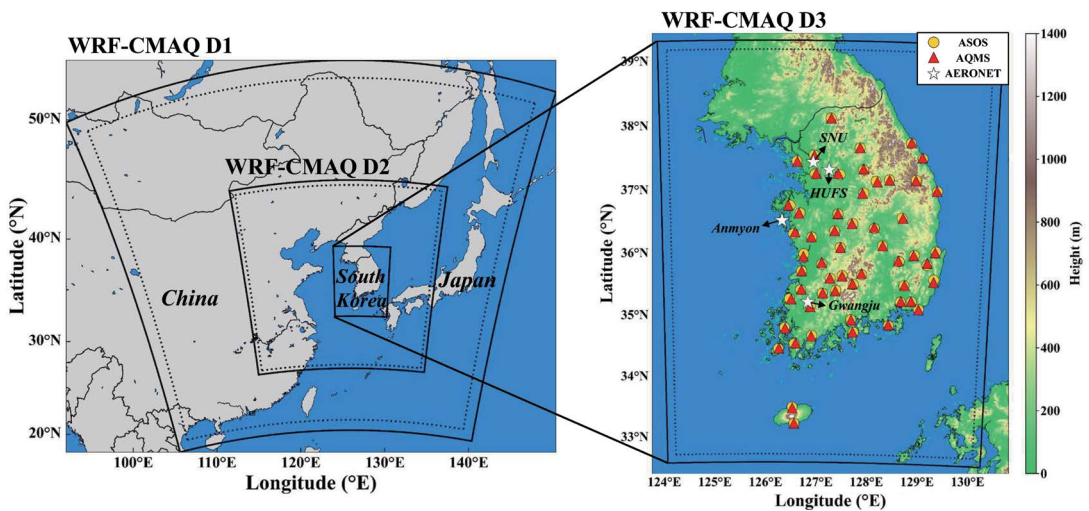


Fig. 1. The nested domain for the WRF-CMAQ two-way coupled model simulations and the geographical locations of 55 monitoring sites for meteorological variables (ASOS, circles), 55 monitoring sites for particulate matter concentrations (AQMS, triangles), and four AERONET sites (SNU, HUFs, Anmyon, and Gwangju) for aerosol optical depth (AERONET, stars). "SNU" and "HUFs" stand for Seoul National University and Hankuk University of Foreign Studies, respectively.

(그림 1). 기상 및 대기질 관측지점은 서로 5 km 이내의 가까운 거리에 위치하며, 주변 반경 2 km 내에 높은 산이나 아파트·고층건물 등 지형적 장애요인이 없는 곳으로 선정하였다(Cho *et al.*, 2025, 2021; Kim *et al.*, 2024; Song *et al.*, 2014). 이 외에도 에어로졸 광학 특성의 시공간 분포를 비교하기 위해, MODIS (Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer) Terra와 AERONET (Aerosol Robotic Network) Sun photometer의 에어로졸 광학두께 (Aerosol optical depth, AOD) 자료를 활용하였다. MODIS Terra의 AOD는 Terra 위성에 탑재된 MODIS 센서로부터 산출된 550 nm 파장 기반 전구 자료로 (Savtchenko *et al.*, 2004), 본 연구기간에 대해 0.1° 수평해상도의 8일 합성장을 평균하여 사용하였다 (<https://neo.gsfc.nasa.gov/>). AERONET Sun photometer는 복사 연구에 있어 가장 빈번하게 사용되는 지상 기반의 원격탐사 방법으로, 태양 복사 관측을 통해 직접 산출된 AOD를 제공한다 (Dubovik and King, 2000; Holben *et al.*, 1998). 국내에서는 AERONET Sun photometer 관측이 여러 지점에서 이루어졌으나, 일부 지점은 특정 캠페인 (KORUS-AQ 등) 기간에만 수행되었으며, 현재는 관측이 지속되지 않고 있다. 따라서 본 연구에서는 연구기간 (2019년 2~3월) 동안 관측이 수행된 지점 중 자료가 존재하는 서울대학교 (SNU, 37.5°N, 127.0°E), 한국외국어대학교 (HUFS, 37.3°N, 127.3°E), 안면도 (Anmyon, 36.5°N, 126.3°E), 광주 (Gwangju, 35.2°N, 126.8°E) 지점을 선정하였으며 (그림 1), 각 지점에서 500 nm 파장의 일평균 AOD 자료를 이용하였다.

에어로졸에 의한 DRF는 에어로졸 유무에 따른 순 복사 플럭스의 차이를 통해 산정된다. 그러나 에어로졸 및 그 전구물질의 모든 배출량을 제거한 시나리오 (즉, 에어로졸이 없는 대기 조건)는 기술적으로 대기 질 모델 실행이 가능하지만, 물리적으로 비현실적이므로 과학적 타당성이 부족하다. 이에 본 연구에서는 배출량을 조절하지 않은 실험 (CTRL)과 배출량을 각각 50%와 25% 저감한 실험 (Emission reduction; ER50%, ER25%) 간의 순 복사 플럭스 차이를 이용하여, 배출량

저감에 따른 DRF를 추정하였다 (식 1). 이러한 배출량 조절에 대한 세부적인 설명 및 실험 설계는 2.3절에 제시하였다. 한편, DRF 추정은 맑은 하늘 조건을 대상으로 수행하였으며 (So *et al.*, 2020; Lee *et al.*, 2017; Park *et al.*, 2017), 이에 해당하는 WRF 복사 플럭스 변수를 사용하였다. 이는 구름의 영향을 배제하여 에어로졸의 직접적 복사 효과만을 분리하여 분석하기 위함이다 (Choi *et al.*, 2020; Song *et al.*, 2017). 본 연구에서 TOA에서의 DRF (DRF_{TOA})는 다음과 같은 식으로 계산된다 (식 1).

$$\begin{aligned} DRF_{TOA} &= [DSWT_{CTRL} - USWT_{CTRL} + DLWT_{CTRL} - ULWT_{CTRL}] \\ &\quad - [DSWT_{ER50\%,ER25\%} - USWT_{ER50\%,ER25\%} \\ &\quad + DLWT_{ER50\%,ER25\%} - ULWT_{ER50\%,ER25\%}] \end{aligned} \quad (1)$$

여기서, 복사 플럭스 변수 (DSWT, USWT, DLWT, ULWT) 중 첫 글자 (D, U)는 복사의 방향 (하향, 상향)을, 가운데 두 글자 (SW, LW)는 파장의 종류 (단파, 장파)를, 마지막 글자 (T)는 TOA를 의미한다. SUR에서의 DRF (DRF_{SUR}) 추정은 TOA와 동일한 방식으로 식 (1)을 이용하여 산정하였다. 대기 DRF (DRF_{ATM})의 경우, TOA와 SUR에서의 DRF 차이 ($DRF_{TOA} - DRF_{SUR}$)를 통해 계산하였다.

에어로졸 배출량 조절에 따른 DRF_{ATM} 을 기반으로 대기가열률 (Atmospheric heating rate)을 분석하였으며 이는 다음 식을 통해 산출된다 (식 2).

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \frac{g}{C_p} \frac{\Delta F_{ATM}}{\Delta P} \quad (2)$$

여기서 $\partial T / \partial t$ 는 대기가열률, g 는 중력가속도 (9.8 m s^{-2}), C_p 는 정압비열 ($1004 \text{ J kg}^{-1} \text{ K}^{-1}$), ΔF_{ATM} 와 ΔP 는 각각 두 층 (TOA, SUR)의 DRF와 기압 차이를 나타낸다. 대기 중 에어로졸이 주로 지표에서 약 3 km 고도 (약 700 hPa) 이내에 집중된다는 선행 연구 결과를 참고하여, 본 연구에서는 ΔP 를 300 hPa로 설정하였다 (Tiwary *et al.*, 2024; Kedia *et al.*, 2010; Ramanathan *et al.*, 2001). 이 외에도 연구기간 동안 관측된 기상요소

(일사, 기온, 풍속, 상대습도)와 미세먼지(PM_{10} , $PM_{2.5}$) 농도를 모델 결과와 비교하여 WRF-CMAQ 양방향 결합모델의 예측 성능을 통계적 매개변수 (IOA (index of agreement), RMSE (root mean square error), MBE (mean bias error))를 이용하여 평가하였다.

2.3 모델 구성

본 연구에서는 배출량 저감에 따른 에어로졸의 DRF를 추정하기 위해, 기상-대기질 양방향 결합모델링 시스템을 적용하였다. 양방향 결합모델에 이용된 기상 및 대기질 모델은 WRF version 4.3 (<http://www.mmm.ucar.edu/wrf/users>)과 CMAQ version 5.3.3 (<https://www.cmascenter.org/cmaq/>)이다. WRF-CMAQ 양방향 결합모델은 일반적인 단방향 모델에서 기상장을 CMAQ 모델에 입력자로 형태로 변환해주는 MCIP을 포함한 “aqprep” 과정과 CMAQ에서 모의된 에어로졸 성분 및 질량, 크기 분포 등을 WRF에 전달하는 “feedback” 과정을 수행함으로써, 결합모델 내에서 에어로졸 피드백 효과를 모의할 수 있다(Wong *et al.*, 2012). DRF를 추정하기 위해 고농도 미세먼지 사례와 초기적응시간 (72시간)을 포함하여 2019년 2월 13일 00 UTC부터 3월 16일 00 UTC까지 결합모델링을 수행하였다. 결합모델 내 WRF와 CMAQ의 수치모의 적분 시간 비율은 여러 선행연구를 참고하여 5:1로 설정하였다(Kim *et al.*, 2025; Yoo *et al.*, 2019; Wong *et al.*, 2012). 모델 도메인은 국외 및 국내에서 배출되는 대기오염물질의 영향을 모두 고려하기 위해, 동아시아 영역(D1, 27 km), 중국 동부 및 한반도 영역(D2, 9 km), 남한 영역(D3, 3 km)으로 구성하였다(그림 1). 양방향 결합모델링에서 복사(단파 및 장파) 및 대기경계층(Planetary boundary layer, PBL) 모수화는 각각 RRTMG scheme (Iacono *et al.*, 2008)과 ACM2 PBL scheme (Pleim, 2007a, 2007b)을 적용하였다. 또한 결합모델링에서 CMAQ 모델 내 화학 메커니즘과 에어로졸 모듈은 각각 CB6r3_aq (Luecken *et al.*, 2019)와 AERO7 (Appel *et al.*, 2020)을 사용하였다. 본 연구에 사용된 WRF-CMAQ 양방향 결합모델의 구성(적분 시간, 초기 및 경계조건, 토지피

복, 지형고도 등)에 대한 자세한 사항은 선행연구(Kim *et al.*, 2025)에 제시되어 있다.

대기질 모델링을 위해 사용된 인위적 배출량 자료는 D1 및 D2에 대해서는 EDGAR (Emissions Database for Global Atmospheric Research) version 6.1 ($0.1^\circ \times 0.1^\circ$ 수평해상도) 배출목록을, D3에 대해서는 환경부 CAPSS (Clean Air Policy Supporting System) 2019년 배출목록 자료($1 \text{ km} \times 1 \text{ km}$ 해상도)를 사용하였다(NIER, 2022). 자연적 배출량은 모든 도메인에 대해 MEGAN (Model of Emissions of Gases and Aerosols from Nature) version 2.1을 이용하여 산정하였다. 한편, 본 연구에서 수행한 CTRL 실험은 인위적 및 자연적 배출량 저감을 적용하지 않은 대기 조건을 모의한 것이며, 두 가지 배출량 저감 실험인 ER50%와 ER25%는 인위적 배출목록(EDGAR 및 CAPSS)에 포함된 모든 입자상 물질(BC, OC, PM_{10} , $PM_{2.5}$, TSP)과 이들의 2차 에어로졸 생성을 유도하는 전구물질(NO_x , SO_2 , VOCs, NH_3)의 배출량을 각각 50% 및 25% 저감한 조건을 모의한 것이다. 또한 에어로졸, 특히 2차 유기 에어로졸(Secondary organic aerosol, SOA)은 biogenic VOCs 등 자연적 요인에 의해서도 생성되므로, MEGAN에서 산정된 isoprene, terpenes 등의 배출량에 동일한 저감률(50%, 25%)을 적용하여 모의를 수행하였다. 일부 자연기원 NO 배출에 대해서도 같은 방식으로 저감률을 적용하였다.

3. 결과 및 토의

3.1 에어로졸 배출량 저감에 따른 기상 및 에어로졸 농도 영향

본 연구에서는 에어로졸(전구물질 포함) 배출량 저감에 따른 DRF 변화에 대해 살펴보기 전에, 기상 및 에어로졸 농도 변화에 미치는 영향을 분석하였다. 그림 2는 본 연구의 분석 기간(2019년 2월 17일~3월 15일) 동안 ER50% 및 CTRL 실험 간 기상요소의 평균 공간분포 차이를 나타낸다. 비교된 기상요소에는

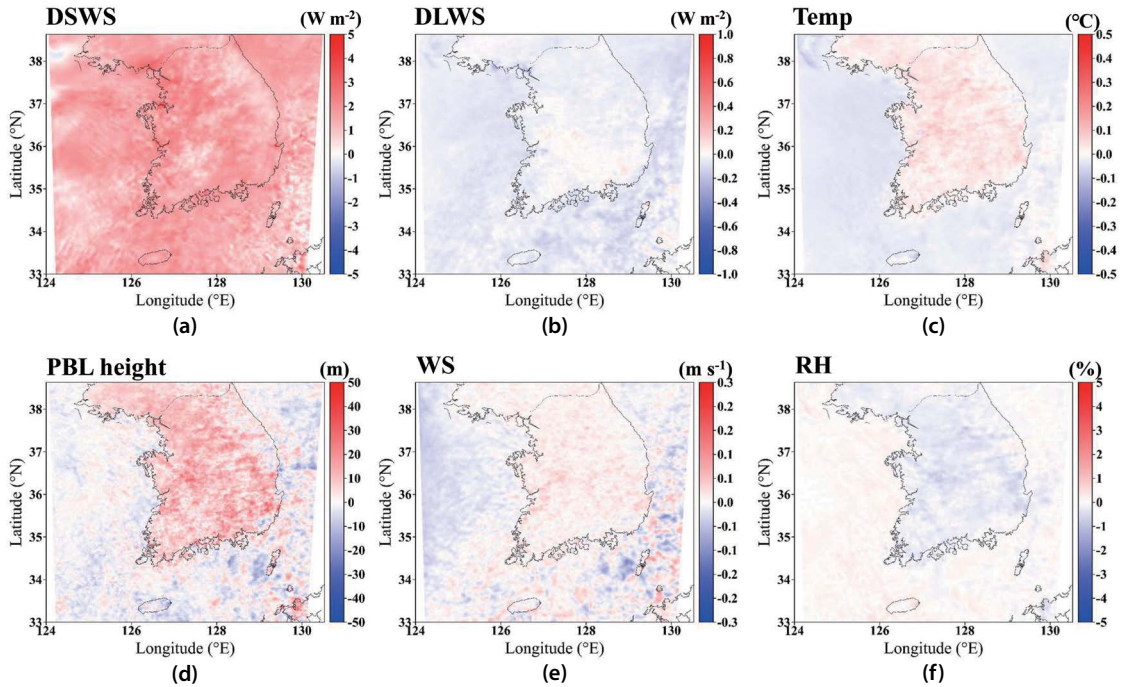


Fig. 2. Spatial distributions of the differences in meteorological variables between CTRL and ER50% simulations: (a) downward shortwave radiation flux at the surface (DSWS), (b) downward longwave radiation flux at the surface (DLWS), (c) air temperature (Temp), (d) planetary boundary layer (PBL) height, (e) wind speed (WS), and (f) relative humidity (RH).

지표면 하향 단파복사(DSWS), 지표면 하향 장파복사(DLWS), 기온, PBL 고도, 풍속, 상대습도가 포함된다. DSWS와 DLWS의 공간분포를 살펴보면(그림 2(a)와 2(b)), 배출량을 50% 저감한 경우 DSWS는 전체적으로 뚜렷한 증가 경향(+5.5 W m⁻², CTRL 대비 +1.03%)을 보인 반면, DLWS는 약한 감소 경향(-0.08 W m⁻², CTRL 대비 -0.03%)을 나타냈다(표 1). 일반적으로 대기 중 에어로졸은 태양복사(단파복사)를 산란 및 흡수하여 지표면에 도달하는 복사에너지에 영향을 미친다. 에어로졸 배출량이 감소하면 대기 중 에어로졸 농도가 낮아져 산란에 의해 차단되는 단파복사량이 줄어들고, 그 결과 지표면에 도달하는 DSWS가 증가한 것으로 사료된다(Power, 2003). 이와 달리 지표면으로 향하는 장파복사는 태양으로부터 직접 지표로 도달하기도 하지만, 대부분 대기 중의 온실기체나 BC에 의해 흡수된 후 재방출되므로, 에어로졸(특히, BC)

농도가 감소하면 재복사과정이 약화되어 지표면으로 유입되는 DLWS가 감소한 것으로 사료된다(Zhou and Savijrvi, 2014; Liou, 2002). 이 외에도 육지와 해양으로 구분하여 살펴본 결과, ER50% 실험에서는 두 영역에서 DSWS가 CTRL 대비 각각 +0.99%, +1.06% 증가한 반면, DLWS는 두 영역 모두 -0.01%, -0.04%가 나타났다. 한편, ER25% 실험에서는 ER50%에 비해 변화 폭이 작았으며, DSWS는 CTRL 대비 1.4 W m⁻²(+0.27%) 증가하였고(육지: +0.28%, 해양: +0.26%), DLWS는 CTRL 대비 0.04 W m⁻²(-0.02%) 감소하였다(육지: -0.01%, 해양: -0.02%)(표 1).

대기 중 에어로졸에 의한 일사 변화는 연구대상 지역(육지 및 해양)의 기온과 PBL 고도에 영향을 줄 수 있다(Kim *et al.*, 2025; Jung *et al.*, 2019; Wang *et al.*, 2014). 먼저 기온의 경우 DSWS와 마찬가지로(그림 2(a)), 육지역역에서는 ER50% 및 CTRL 실험 간 평균

Table 1. Summary of changes in meteorological variables, particulate pollutant concentrations, and aerosol optical properties (AOD and SSA) under aerosol emission reduction scenarios (ER50% and ER25%).

	CTRL	ER50%	ER25%	
Meteorological variables	DSWS ^a (W m ⁻²)	535/539/535 ^c	540 (1.03%) ^d /544 (0.99%)/540 (1.06%)	536 (0.27%)/540 (0.28%)/536 (0.26%)
	DLWS ^b (W m ⁻²)	251/241/257	251 (-0.03%)/241 (-0.01%)/257 (-0.04%)	251 (-0.02%)/241 (-0.01%)/257 (-0.02%)
	Temp (°C)	8.49/7.51/9.27	8.48 (-0.07%)/7.54 (0.38%)/9.24 (-0.25%)	8.48 (-0.08%)/7.51 (0.06%)/9.25 (-0.13%)
	PBLH (m)	833/965/783	835 (0.28%)/972 (0.88%)/782 (-0.08%)	833 (0.09%)/967 (0.29%)/783 (-0.02%)
	WS (m s ⁻¹)	4.90/3.11/5.82	4.90 (-0.02%)/3.12 (0.37%)/5.81 (-0.11%)	4.90 (-0.04%)/3.11 (0.13%)/5.81 (-0.08%)
	RH (%)	59.0/48.9/64.6	58.9 (-0.08%)/48.7 (-0.46%)/64.6 (0.05%)	59.0 (-0.01%)/48.8 (-0.14%)/64.6 (0.02%)
Particulate air pollutants	PM ₁₀ (μg m ⁻³)	35.4/38.3/34.6	26.3 (-25.9%)/26.5 (-30.8%)/26.2 (-24.3%)	34.7 (-2.19%)/35.8 (-6.67%)/34.3 (-0.80%)
	PM _{2.5} (μg m ⁻³)	23.3/25.5/22.6	15.4 (-33.8%)/15.7 (-38.4%)/15.3 (-32.3%)	22.5 (-3.19%)/23.4 (-8.27%)/22.2 (-1.61%)
	PM _{2.5-BC} (μg m ⁻³)	1.05/1.02/1.06	0.52 (-50.1%)/0.51 (-50.2%)/0.53 (-50.0%)	0.77 (-26.2%)/0.75 (-26.5%)/0.78 (-26.0%)
	PM _{2.5-SIA} (μg m ⁻³)	10.6/13.5/9.68	7.88 (-25.8%)/8.69 (-35.4%)/7.57 (-21.8%)	12.4 (16.5%)/13.8 (2.88%)/11.8 (22.0%)
	PM _{2.5-SOA} (μg m ⁻³)	6.30/6.29/6.41	3.80 (-39.7%)/3.58 (-43.1%)/3.93 (-38.6%)	5.26 (-16.6%)/5.09 (-19.1%)/5.39 (-15.8%)
Aerosol optical properties	AOD ^e	0.30/0.31/0.31	0.23 (-23.1%)/0.23 (-24.8%)/0.23 (-23.0%)	0.30 (-0.40%)/0.30 (-1.84%)/0.30 (-0.22%)
	SSA ^f	0.76/0.73/0.77	0.82 (8.14%)/0.79 (7.69%)/0.83 (7.99%)	0.81 (6.44%)/0.78 (5.78%)/0.82 (6.49%)

^aDownward shortwave radiation flux at the surface.

^bDownward longwave radiation flux at the surface.

^cAll/land/ocean.

^dThe values in parentheses represent the percentage change relative to the CTRL simulation.

^eAOD: aerosol optical depth; SSA: single scattering albedo.

0.03°C (CTRL 대비 +0.38%) 증가하는 경향을 보였으며(그림 2(c)), 기온의 영향을 받는 PBL 고도 또한 8.5 m (+0.88%)로 증가하였다(그림 2(d)). 한편, 육지영역과 달리 해양영역에서의 기온과 PBL 고도는 각각 CTRL 대비 -0.25%, -0.08% 정도 감소하는 경향이였다. 육지와 해양 간 이러한 차이는 두 영역의 열적 성질(비열, 열관성 등)과 DLWS 변화 차이(그림 2(b))로 인한 대기 가열 효과의 차이로 설명할 수 있다(Kim *et al.*, 2025; Jung *et al.*, 2019). 일반적으로 해양은 육지보다 비열과 열관성이 크기 때문에, 배출량 저감 시 DLWS 감소 폭이 육지(평균 -0.01%)에 비해 해양(-0.04%)에서 더 크게 나타나 가열 효과가 상대적으로 약화되었고, 이로 인해 기온 및 PBL 고도가 감소한 것으로 판단된다. 추가적으로, ER25% 실험에서는 기온(육지: +0.06%, 해양: -0.13%)과 PBL 고도(육지: +0.29%, 해양: -0.02%)의 변화 폭이 ER50% 실험에 비해 작게 나타났다.

ER50% 실험에서 풍속은 기온과 PBL 고도와 유사한 변화 경향을 보였다(그림 2(e)). 육지영역에서는 풍속이 평균 약 0.01 m s^{-1} 증가(CTRL 대비 +0.37%)한 반면, 해양영역에서는 약 0.01 m s^{-1} 정도 감소(CTRL 대비 -0.11%)하는 경향이 나타났다. 이는 에어로졸 배출량 저감으로 인한 육지영역의 일사량 증가가 기온과 PBL 고도를 상승시키고, 이에 따라 대기 내 혼합·확산이 활발해져 풍속이 증가한 것으로 사료된다. 반면, 해양영역에서는 육지보다 상대적으로 큰 DLWS 감소가 발생하며(그림 2(b)), 이로 인해 PBL 고도가 낮아지고 풍속도 함께 감소한 것으로 판단된다(Stjern *et al.*, 2023). 한편, 상대습도는 기온과 반대되는 변화를 보이며, 육지영역에서는 0.2% 정도 감소(CTRL 대비 -0.46%), 해양영역에서는 0.03% 정도 증가(CTRL 대비 0.05%)가 나타났다(그림 2(f)). 이러한 변화는 상대습도가 실제 수증기량과 포화수증기량의 비로 계산되며, 포화수증기량은 기온에 민감하게 의존하기 때문이다. 즉, 기온이 상승하면 포화수증기량이 증가해 상대습도는 낮아지고, 반대로 기온이 하강하면 상대습도는 증가하게 된다(Bencloski, 1982). ER25% 실험의 경우, 풍속과 상대습도의 변화는 전반적으로

ER50% 실험에 비해 작게 나타났는데, 육지영역에서는 풍속이 CTRL 대비 +0.13%, 상대습도는 -0.14%의 변화를, 해양영역에서는 각각 -0.08%, +0.02%의 변화를 나타냈다.

본 연구에서 에어로졸 배출량 감소는 대상지역 내 미세먼지 및 성분 농도의 뚜렷한 변화를 유발하였다. 그림 3은 전체 연구기간 동안 남한지역 미세먼지(PM_{10} , $\text{PM}_{2.5}$)와 $\text{PM}_{2.5}$ 성분 중 BC, SOA, 2차 무기 에어로졸(Secondary inorganic aerosol, SIA)에 대해 ER50% 및 CTRL 실험 간 공간분포 차이를 나타낸다. 우선 PM_{10} 과 $\text{PM}_{2.5}$ 를 살펴보면(그림 3(a)), 에어로졸 배출량을 50% 저감 시 남한의 서쪽 및 주요 산업지역(평택, 당진, 포항, 광양 등)을 중심으로 농도의 감소가 뚜렷하게 나타났다. 두 물질(PM_{10} , $\text{PM}_{2.5}$)의 공간 평균 농도는 CTRL 대비 각각 $-9.1 \mu\text{g m}^{-3}$, $-7.9 \mu\text{g m}^{-3}$ (각각 -25.9%, -33.8%) 감소하였으며, $\text{PM}_{2.5}$ 가 더 큰 감소율을 보여 배출 저감에 대한 민감도가 더 높은 것으로 나타났다. 이는 $\text{PM}_{2.5}$ 가 전구물질(SO_2 , NO_x , NH_3 등)의 비선형적(nonlinear) 화학반응에 따른 2차 생성과 기상조건(풍속, 습도, 일사량 등)의 복합적인 영향에 기인한 것으로 사료된다(Wang *et al.*, 2024; Shon *et al.*, 2012). 한편, 육지영역에서 PM_{10} 과 $\text{PM}_{2.5}$ 농도는 CTRL 대비 각각 -30.8%, -38.4% 감소하였으며, 해양영역에서는 육지영역에 비해 약 6% 더 작은 감소폭을 보였다. 이는 육지영역에 산업시설, 공장, 차량, 비산먼지 등 다양한 배출원들이 밀집해 있어 배출량 저감의 효과가 해양영역보다 더 크게 나타난 것으로 사료된다. 이 외에도 ER25% 실험에서는 ER50%에 비해 감소 폭이 매우 작았으며, 남한 전역에서 PM_{10} 의 공간 평균 농도는 CTRL 대비 $-0.7 \mu\text{g m}^{-3}$ (-2.2%) 감소하였으며(육지: -6.7%, 해양: -0.8%), $\text{PM}_{2.5}$ 는 $-0.8 \mu\text{g m}^{-3}$ (-3.2%) 감소하는(육지: -8.3%, 해양: -1.6%) 경향을 보였다(그림 제외).

본 연구에서는 배출량 저감 영향을 더 크게 받은 $\text{PM}_{2.5}$ 에 대해, ER50% 및 CTRL 실험 간 구성 성분(BC, SIA, SOA)의 농도 변화를 추가적으로 분석하였다(그림 3(b)). 배출량 저감(50%)에 따른 BC와 SIA의 농도는 각각 평균 $-0.53 \mu\text{g m}^{-3}$, $-2.72 \mu\text{g m}^{-3}$ 감소하여

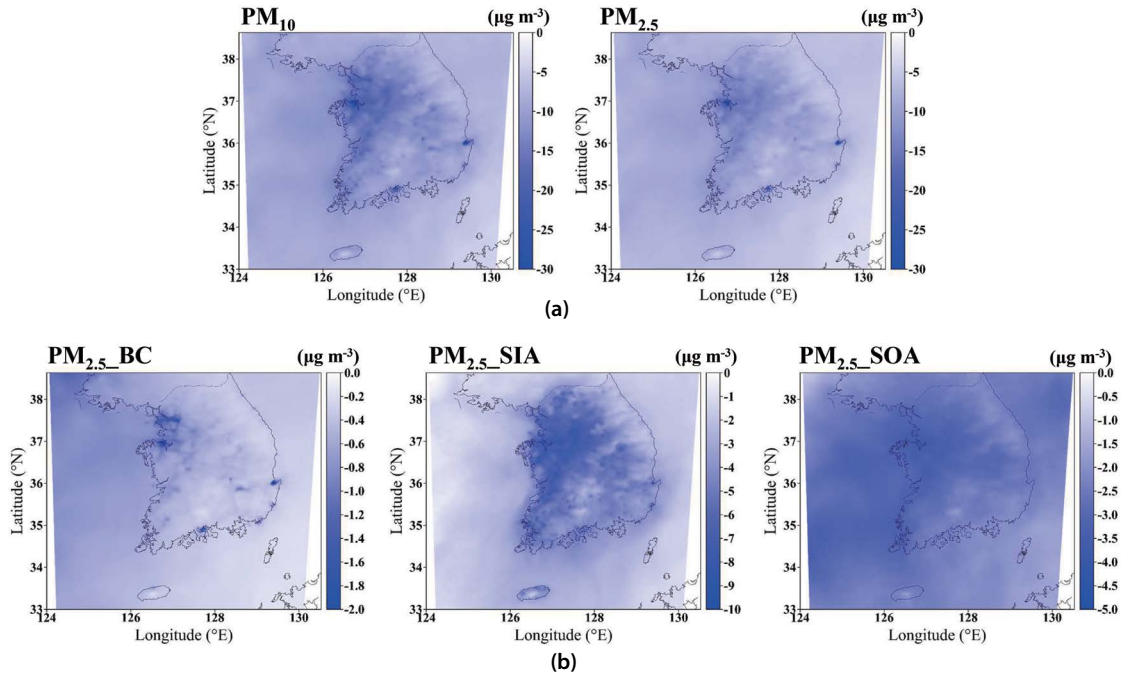


Fig. 3. Spatial distributions of the differences in concentrations of (a) particulate matters (PM_{10} and $PM_{2.5}$) and (b) aerosol chemical components in $PM_{2.5}$ (black carbon (BC), secondary inorganic aerosol (SIA), and secondary organic aerosol (SOA)) between CTRL and ER50% simulations.

CTRL 대비 -50.1% , -25.8% 감소율을 보였으며, PM_{10} 과 $PM_{2.5}$ 의 공간분포와 유사하게 수도권을 포함한 남한 서부 지역과 오염물질의 고배출 지역을 중심으로 크게 나타났다. BC는 1차 대기오염물질로, 대기 중에서 다른 화학적 물질로 전환되지 않는 비교적 안정한 입자이기 때문에, 배출량의 저감이 농도 감소에 직접적으로 반영되어 서로 유사하게 감소가 나타난 것으로 사료된다(Avino, 2022). 육지와 해양영역을 비교해보면, BC 농도는 두 영역에서 거의 비슷한 수준(-50.2% , -50.0%)의 감소가 나타났으나, SIA 농도는 육지역(-35.4%)이 해양(-21.8%)에 비해 더 크게 감소하는 경향이였다. 한편, ER25% 실험에서는 BC 농도가 ER50% 실험의 절반 수준인 -26.2% 감소한 반면, SIA 농도는 오히려 증가하여 $+16.5\%$ 로 나타났다(육지: $+2.88\%$, 해양: $+22.0\%$). SIA 성분 중 황산염(SO_4^{2-}) 농도는 CTRL 대비 평균 -7.3% 정도 감소하였으나, 질산염(NO_3^-)과 암모늄(NH_4^+) 농도는 각각 $+35.0\%$,

$+17.5\%$ 증가하였다. 이러한 질산염과 암모늄의 농도 증가는, ER25% 실험에서 SO_2 배출량 감소로 황산(H_2SO_4) 생성이 제한되었고, 이로 인해 대기 중 암모니아(NH_3)가 황산 대신 질산(HNO_3)과 반응하여 질산암모늄(NH_4NO_3) 생성에 더 크게 기여한 결과로 해석된다(Seinfeld and Pandis, 2016). 또한 연구기간(2~3월)의 평균 기온이 $8.5^\circ C$ 로 낮은 겨울철 조건이 NH_4NO_3 의 응축을 강화시켜, SIA 전구물질(NO_x , NH_3 등)의 배출량을 동일하게 저감했음에도 불구하고, 이들 농도는 오히려 증가한 것으로 판단된다(Shah *et al.*, 2018; Guo *et al.*, 2016; Seinfeld and Pandis, 2016). 즉, ER25% 실험에서 SIA 농도가 증가한 것은 단순한 배출량 저감의 절대적인 크기보다 이들의 생성을 유도한 화학반응의 영향이 더 크게 작용하였기 때문으로 해석할 수 있다.

SOA의 경우, ER50% 실험에서 평균 $-2.5 \mu g m^{-3}$ 감소가 나타났으며, CTRL 대비 -39.7% 의 감소율을 보였

다. 다른 오염물질(PM_{10} , $PM_{2.5}$, BC, SIA)들이 주로 고배출 지역을 중심으로 큰 감소를 보인 것과 달리, SOA는 넓은 영역에 걸쳐 감소하는 분포를 나타냈다. 이는 전구물질인 인위적 및 자연적 VOCs가 대기 중에서 복잡한 광화학적 산화 경로를 통해 SOA를 생성하기 때문에, 고배출 지역에 국한되지 않고 광범위한 지역에서 생성 및 저감이 발생했기 때문으로 사료된다(De Gouw and Jimenez, 2009; Hallquist *et al.*, 2009). 육지와 해양영역으로 구분하여 살펴보면, 각각 -43.1%, -38.6% 감소하였으며, 저감률의 차이는 4.5%로 다른 오염물질(BC 제외)에 비해 영역 간 편차가 작게 나타났다. 한편, ER25% 실험에서는 SOA가 육지와 해양영역에서 각각 CTRL 대비 -19.1%, -15.8% 감소하였다. 결과적으로, 에어로졸 배출량 변화로 인한 기상 조건, 미세먼지 및 $PM_{2.5}$ 성분 농도의 변화는 에어로졸 피드백 과정을 통해 이들 요소 간 지속적으로 상호작용하여 영향을 미친다.

본 연구에서 이용한 수치모델의 성능을 검증하기 위해, 연구 지역 내 55개의 기상 및 대기질 관측지점을 대상으로 기상요소와 미세먼지(PM_{10} , $PM_{2.5}$) 농도에 대한 통계적 분석을 수행하였다. ER50% 및 ER25% 실험은 배출량을 저감한 가상 시나리오이므로, 모델의 예측정확도 평가는 기준 실험인 CTRL에 대해 수행하였다. 통계 분석 결과, 기상요소(일사, 기온, 풍속, 상대습도)의 IOA는 각각 0.93, 0.95, 0.73, 0.90으로 나타났으며, RMSE는 각각 0.47 MJ m^{-2} , 2.24°C , 1.57 m s^{-1} , 14.4%로 평가되었다(표 2). 미세먼지(PM_{10} , $PM_{2.5}$)의 IOA는 각각 0.75와 0.77, RMSE는 각각 $35.4 \mu\text{g m}^{-3}$ 와 $26.2 \mu\text{g m}^{-3}$ 로 계산되었다. 이 외에도 기온과 PM 농도(PM_{10} , $PM_{2.5}$)는 과소모의(음의 MBE), 반면 일사, 풍속, 상대습도는 약한 과대모의(양의 MBE) 경향을 보였다. 이러한 결과는 WRF-CMAQ 양방향 결합모델을 사용한 여러 선행 연구의 통계적 분석 결과와 유사한 수준이다(Kim *et al.*, 2025; Yoo *et al.*, 2024, 2019; Jung *et al.*, 2021). 따라서 본 연구의 수치모의 결과는 에어로졸 배출량 저감에 따른 기상 변화 및 DRF 영향을 합리적으로 추정할 수 있음을 시사한다.

Table 2. Statistical evaluation of the several meteorological variables and the concentrations of particulate matter (PM_{10} and $PM_{2.5}$) between observed and simulated values obtained from CTRL simulations.

		IOA	RMSE	MBE
Meteorological variables	Solar radiation (MJ m^{-2})	0.93	0.47	0.19
	Temp ^a ($^\circ\text{C}$)	0.95	2.24	-0.49
	WS ^b (m s^{-1})	0.73	1.57	0.89
	RH ^c (%)	0.90	14.4	1.60
Particulate air pollutants	PM_{10} ($\mu\text{g m}^{-3}$)	0.75	35.4	-21.6
	$PM_{2.5}$ ($\mu\text{g m}^{-3}$)	0.77	26.2	-14.3

^{a,b,c}Temp: Air temperature; WS: Wind speed; and RH: Relative humidity.

3.2 에어로졸 배출량 저감에 따른 DRF 변화 분석

그림 4는 CTRL 및 ER50% 실험을 통해 추정된 TOA, SUR, ATM에서의 에어로졸 DRF (2.2절 식 (1) 참조)의 공간분포를 나타낸다. 에어로졸 배출량을 50% 저감할 경우, 남한 전역에서 두 실험 간 순 복사량 차이로 계산된 DRF_{TOA} 와 DRF_{SUR} 는 각각 평균 -0.23 W m^{-2} , -4.78 W m^{-2} 로 나타났다(그림 4, 표 3). 일반적으로 DRF의 공간분포는 에어로졸 및 구성 성분의 농도와 주요 광학특성(AOD, 단일산란알베도(Single scattering albedo, SSA) 등)의 공간 분포와 밀접한 관련이 있다(Choi *et al.*, 2020; Song *et al.*, 2017; Song and Shon, 2014). 이에 따라 본 연구에서는 ER50%와 CTRL 실험을 기반으로, 배출량 저감에 따른 주요 광학특성(AOD, SSA)의 공간분포 차이를 분석하였다(그림 5). 대기 중 에어로졸 농도와 AOD는 직·간접적으로 연관이 있으므로 ER50% 실험에서 에어로졸(PM_{10} , $PM_{2.5}$) 농도의 감소(그림 3)에 따라 AOD도 CTRL 대비 평균 약 0.07 감소(-23%)하는 분포를 보였다. 반면, 에어로졸에 의한 빛의 산란과 흡수 비율을 나타내는 SSA(=산란계수/소산계수)는 AOD와 반대로 CTRL 대비 평균 약 0.06(+8%) 증가하는 경향을 보였다. 이는 에어로졸이 빛을 흡수하는 정도가 상대적으로 감소했기 때문에, 결과적으로 SSA가 증가한 것으로 해석된다(그림 5(b)).

그림 3(a)와 5(a)에서 알 수 있듯이, DRF_{SUR} 는 에어로졸 농도 및 AOD의 감소가 뚜렷한 남한 서부지역에

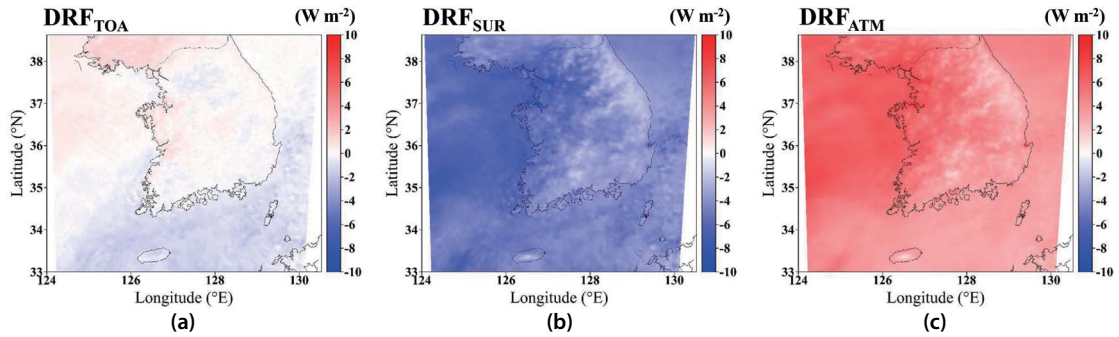


Fig. 4. Spatial distributions of aerosol direct radiative forcing (DRF) at the top of atmosphere (TOA), the surface level (SUR), and in the atmosphere (ATM) between CTRL and ER50% simulations.

Table 3. Summary of changes in aerosol direct radiative forcing (DRF) at the top of atmosphere (TOA), the surface (SUR), and in the atmosphere (ATM), along with changes in atmospheric heating rate under two aerosol emission reduction scenarios.

	DRF _{TOA} (W m ⁻²)	DRF _{SUR} (W m ⁻²)	DRF _{ATM} (W m ⁻²)	Heating rate (K day ⁻¹)
ER50%	-0.23/0.04/-0.49 ^a	-4.78/-4.28/-5.09	4.55/4.32/4.59	0.13/0.12/0.13
ER25%	0.96/0.92/0.92	-1.21/-1.21/-1.22	2.17/2.13/2.15	0.06/0.06/0.06

^aAll/land/ocean.

서 강한 음의 값으로 나타나 서로 유사한 공간분포를 보였다. 이는 에어로졸 농도와 AOD가 감소함에 따라 빛의 산란 및 흡수 효과가 줄어들고, 그 결과 더 많은 단파복사가 지표면에 도달하여 CTRL 대비 ER50% 실험에서 복사량이 증가했기 때문으로 해석된다. 다만, 에어로졸 배출량 저감에 따른 복사량(단파와 장파), 에어로졸 농도, 광학특성 등의 변화는 선형적이지 않기 때문에, DRF 또한 비선형적인 변화를 나타낸 것으로 판단된다. 세부적으로 보면, 육지역에서의 DRF_{TOA}와 DRF_{SUR}는 각각 평균 +0.04 W m⁻², -4.28 W m⁻², 해양영역에서는 평균 -0.49 W m⁻², -5.09 W m⁻²로 추정되었다. 그러나 남한 서해안 인근 일부 지역에서는 양의 DRF_{TOA}가 나타났으며(그림 4(a)), 이는 강한 흡수 특성을 지닌 BC보다 산란 효과가 강한 SIA의 농도가 더 많이 감소한 것으로 나타나, 다른 지역에 비해 대기 중 빛을 흡수하는 성분의 비율이 상대적으로 산란하는 성분의 비율보다 높아졌기 때문으로 판단된다(그림 3(b)). 여기에 AOD 감소 효과(그림 5(a))까지 복합적으로 작용하면서 해당 지역에서 DRF_{TOA}가 양(+)의 값을 보인 것으로 추정된다.

에어로졸 배출량을 25% 저감한 실험에서는 CTRL과 ER25% 실험 간 차이로 계산된 DRF가 CTRL과 ER50% 실험 간 DRF와는 다른 양상을 보였다. ER25% 실험에서 DRF_{TOA}는 남한 전역뿐만 아니라 육지 및 해양영역 모두에서 양의 값(각각 +0.96 W m⁻², +0.92 W m⁻², +0.92 W m⁻²)을 나타냈다(표 3). 이러한 결과는 앞서 설명한 바와 같이, 단순한 배출량 저감 효과보다 오히려 화학반응의 영향으로 인한 SIA(특히 질산염 및 암모늄) 농도의 증가가 더 큰 영향을 미친데 기인한 것으로 판단된다(표 1). 이에 따라 TOA에서 산란에 의한 상향 단파복사(USWT; 식 (1))가 CTRL 대비 조금 증가(평균 약 0.95 W m⁻²)하여 이 실험에서 양의 DRF_{TOA}가 나타난 것으로 추정된다(그림 제외). 이외에도 ER25% 실험에서의 DRF_{SUR}는 ER50% 실험과 마찬가지로 에어로졸 배출량, 농도, 그리고 AOD의 감소로 인해, 남한 전역, 육지 및 해양영역에서 모두 음의 값을 나타냈으며, 각각 -1.21 W m⁻², -1.21 W m⁻², -1.22 W m⁻²로 추정되었다. 이는 ER50% 실험에 비해 에어로졸 배출량과 광학특성의 변화 폭이 작아, DRF_{SUR}가 약 3~4배 작은 수준으로 나타났다.

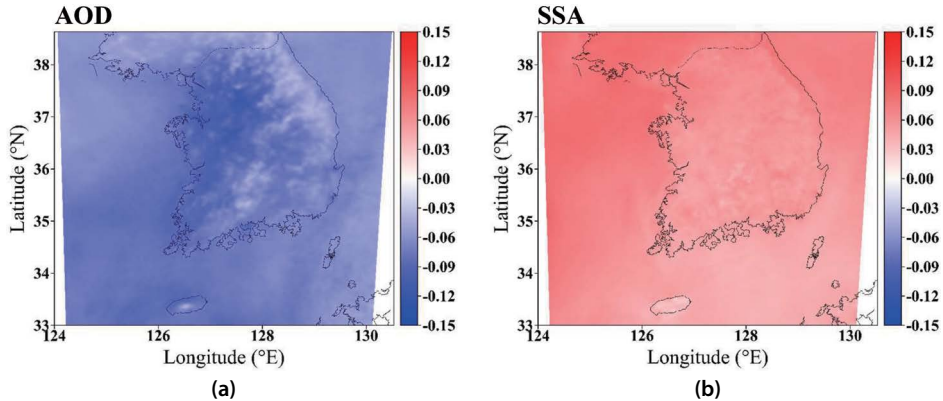


Fig. 5. Spatial distributions of the differences in (a) aerosol optical depth (AOD) and (b) single scattering albedo (SSA) between CTRL and ER50% simulations.

그림 6은 WRF-CMAQ 양방향 결합모델과 관측 (MODIS, Sun photometer) 자료 간 AOD의 시·공간적 분포를 비교한 결과를 나타낸다. MODIS AOD는 구름 및 위성 경로의 영향으로 일부 지역에서 결측이 존재했지만, 전반적으로 결합모델 AOD와 유사한 공간 분포를 나타냈다(그림 6(a)). 특히, 고농도 배출원이 위치한 중국 동부지역(37°N, 116°E)에서는 MODIS와 결합모델 모두 AOD 0.8 이상의 값을 재현하였다. 국내 Sun photometer 관측지점(SNU, HUFs, Anmyon, Gwangju)에서의 일평균 AOD와 결합모델 AOD 간의 상관계수는 0.816 (P -value < 0.001)로 높게 나타났으며(그림 6(b)), 지점별 상관관계는 각각 0.895, 0.854, 0.866, 0.698로 나타났다(P -value < 0.003). 비록 서로 다른 파장의 AOD를 사용했음에도 불구하고(Sun photometer: 500 nm, 결합모델: 550 nm), 선행연구(Song *et al.*, 2021, 2017)에서 제시한 상관계수 범위(0.506~0.670)보다 더 높은 값을 보였다. 이러한 차이는 본 연구에서 사용한 양방향 결합모델과 선행연구에서 주로 사용한 OPAC 모델과의 공간 해상도 차이와 서로 다른 관측지점 및 연구기간 등의 환경조건이 다르기 때문인 것으로 판단된다. 따라서, 본 연구에서 대상지역의 DRF 분석을 위해 활용한 결합모델의 AOD 결과는 충분한 타당성과 설득력을 갖는다고 할 수 있다.

DRF_{TOA}와 DRF_{SUR}의 차이로 계산된 DRF_{ATM}은 두 가지 배출량 저감 실험 모두에서 양(+)의 값을 나타

냈으며, 음(-)의 DRF가 나타난 DRF_{SUR}와 유사한 공간분포 특성을 보였다. 남한 전역에서의 DRF_{ATM}은 ER50% 실험에서 평균 +4.55 W m⁻²(그림 4(c), 표 3), ER25% 실험에서는 평균 +2.17 W m⁻²로 추정되었다(표 3). 이를 육지와 해양영역으로 구분할 경우, 육지에서는 ER50%와 ER25%에서 각각 +4.32 W m⁻², +2.13 W m⁻², 해양에서는 각각 +4.59 W m⁻², +2.15 W m⁻²로 나타났다(표 3). 이 외에도, DRF_{ATM}을 기반으로 산출한 대기가열률(2.2절 식 (2) 참조)은 ER50% 실험에서 평균 +0.13 K day⁻¹, ER25% 실험에서는 +0.06 K day⁻¹로 추정되었다(표 3). 이러한 대기가열률의 변화는 육지(ER50%: +0.12 K day⁻¹, ER25%: +0.06 K day⁻¹)와 해양(ER50%: +0.13 K day⁻¹, ER25%: +0.06 K day⁻¹)에서도 일관된 양상을 보였다. 다만, 본 연구에서 산출된 DRF_{ATM}과 대기가열률은 여러 선행연구의 결과(각각 10~60 W m⁻², 0.3~6 K day⁻¹)에 비해 낮은 수준으로 나타났다(Tiwary *et al.*, 2024; Song *et al.*, 2017; Kedia *et al.*, 2010). 이러한 차이는 선행연구와 본 연구에서 사용된 모델 구성 및 에어로졸 조건의 차이에 기인한 것으로 판단된다. 선행연구에서는 OPAC과 SBDART 모델을 활용하여 주로 단일지점에서의 DRF 및 대기가열률을 추정한 반면, 본 연구는 WRF-CMAQ 양방향 결합모델을 이용하여 광범위한 영역에 대한 평균값을 산출하였다. 또한, 선행연구에서는 대기 중 에어로졸 유무에 따른 영향을 평가한 반면, 본 연구는

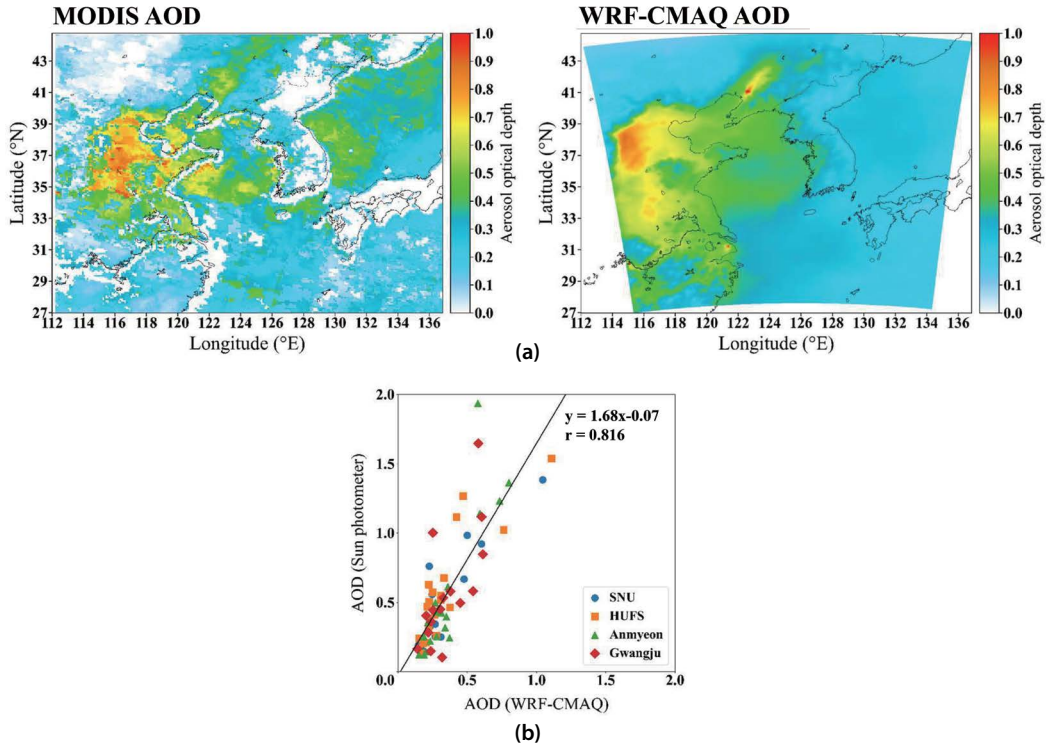


Fig. 6. (a) Spatial distributions of aerosol optical depth (AOD) at 550 nm from MODIS observations and WRF-CMAQ two-way coupled simulations and (b) comparison of daily mean AOD between the coupled model (550 nm) and Sun photometer observations (500 nm) (SNU, HUFS, Anmyeon, and Gwangju sites) provided by the AERONET program (<http://aeronet.gsfc.nasa.gov/>).

에어로졸 배출량이 있는 조건(CTRL)과 저감한 조건(ER50%, ER25%) 간의 차이를 기반으로 영향을 분석하였다.

4. 요약 및 결론

본 연구에서는 연구기간(2019년 2월 17일~3월 15일) 동안 WRF-CMAQ 양방향 결합모델을 이용하여 에어로졸 배출량 저감(ER50%, ER25%)에 따른 기상, 에어로졸 농도, 그리고 DRF 변화를 정량적으로 평가하였다. 두 가지 에어로졸 배출량 저감은 대상지역에서 하향 단파복사를 증가시키고, 하향 장파복사를 감소시켰다. 이러한 복사 플럭스 변화는 주로 육지영역에서 기온, PBL 고도, 풍속의 증가와 상대습도의 감소로 이어졌다. 또한, 에어로졸 배출량 저감 시 PM 농도

는 전반적으로 감소하였으며, 다양한 배출원(예, 산업 시설, 차량 등)이 많은 육지영역에서의 감소 폭이 해양영역보다 더 크게 나타났다. 한편, ER50% 실험과 달리 ER25%에서는 배출량 저감의 절대적인 크기보다 오히려 SIA 생성을 유도하는 화학반응의 효과가 더 크게 작용하여 SIA (특히 질산염과 암모늄) 농도가 더 크게(CTRL 대비 +16.5%) 나타났다. DRF 변화를 살펴보면, DRF_{TOA} 는 ER50% 실험에서 전반적으로 음의 값을 보였으나, ER25%에서는 양의 값으로 추정되었다. 이는 단순한 배출량 저감 효과보다는, 화학반응으로 인한 SIA 농도 증가에 따라 TOA에서 산란에 의한 상향 단파복사가 증가한 영향으로 해석할 수 있다. DRF_{SUR} 은 두 실험 모두에서 음의 값을 나타냈으며, DRF_{TOA} 와 DRF_{SUR} 의 차이로 산출된 DRF_{ATM} 은 양의 값을 보였다. 에어로졸 배출량 저감과 DRF 크기 간의 관계는 선형적이지 않았지만, 대체로 저감 폭이 클수록 DRF의 절

대값이 더 크게 나타나는 경향이였다. 또한, 두 가지 저감 실험에서 DRF_{ATM} 은 대기 가열에 효율적으로 작용하여 평균 대기가열률이 ER50% 실험에서 약 $+0.13 \text{ K day}^{-1}$, ER25% 실험에서는 $+0.06 \text{ K day}^{-1}$ 로 추정되었다.

본 연구를 통해 에어로졸 배출량 저감이 기상, 에어로졸 농도, 광학특성 및 DRE, 그리고 대기가열률에 영향을 미친다는 사실을 확인하였다. 특히, 배출량-농도-일사량 간의 상호작용으로 인해 이러한 영향은 대부분 비선형적인 양상을 나타냈다. 한편, SIA 농도와 DRF_{TOA} 는 배출량 저감에 따른 변화가 다른 변수들과는 상이한 특성을 나타냈다. 이러한 원인을 보다 명확하게 규명하기 위해서는 에어로졸 화학성분별 영향 분석이 필요하나, 본 연구에 사용된 RRTMG scheme 기반의 WRF-CMAQ 양방향 결합모델은 전체 에어로졸에 대해 통합된 복사효과 및 광학특성만을 제공하는 한계가 있었다. 또한 본 연구는 공장 가동시간, 교통활동 등 실제 배출 특성의 변화를 반영하기보다는 단순한 스케일링 기반의 배출량 저감 시나리오를 적용하였기 때문에, 실제 상황을 정밀하게 모의하는 데에는 한계가 존재한다. 향후 이러한 한계점을 보완하여 다양한 사례 연구를 수행한다면, 배출량 저감에 따른 대기환경 변화를 보다 신뢰성 있게 규명할 수 있을 것이며, 실효성 있는 대기질 개선 정책 수립을 위한 과학적 근거를 제공할 수 있을 것으로 기대된다.

감사의 글

이 논문은 2025년도 제주대학교 교원성과지원사업에 의하여 연구되었음.

References

- Appel, K.W., Bash, J.O., Fahey, K.M., Foley, K.M., Gilliam, R.C., Hogrefe, C., Hutzell, W.T., Kang, D., Mathur, R., Murphy, B.N., Napelenok, S.L., Nolte, C.G., Pleim, J.E., Pouliot, G.A., Pye, H.O.T., Ran, L., Roselle, S.J., Sarwar, G., Schwede, D.B., Sidi, F.I., Spero, T.L., Wong, D.C. (2020) The Community Multiscale Air Quality (CMAQ) Model Versions 5.3 and 5.3.1: System Updates and Evaluation, *Geoscientific Model Development Discussions*, 2020, 1-41. <https://doi.org/10.5194/gmd-14-2867-2021>
- Avino, P. (2022) Black Carbon in Atmosphere: Instrumentation, Chemical-physical Behavior, Human Health Implications, *Atmosphere*, 13(12), 2087. <https://doi.org/10.3390/atmos13122087>
- Bencloski, J.W. (1982) Air Temperature and Relative Humidity: A Simulation, *Journal of Geography*, 81(2), 64-65. <https://doi.org/10.1080/00221348208980713>
- Cho, S.-B., Song, S.-K., Moon, S.-H. (2021) Effect of Analysis Nudging Data Assimilation on the $PM_{2.5}$ Concentration Simulation during a Haze Event in the Seoul Metropolitan Area in 2019, *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment*, 37(2), 231-247, (in Korean with English abstract). <https://doi.org/10.5572/KOSAE.2021.37.2.231>
- Cho, S.-B., Song, S.-K., Shon, Z.-H., Kim, J.-S., Lee, S.-B. (2025) Inter-comparison of Health Impacts from Nationwide $PM_{2.5}$ Pollution using Observations and Modeling: A Case Study of the Worst Event in Recent Decades, *Chemosphere*, 377, 144317. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2025.144317>
- Cho, S.-B., Song, S.-K., Shon, Z.-H., Moon, S.-H. (2023) Evaluation of Air Quality Simulation with a Coupled Atmosphere-ocean Model: A Case Study on Natural Marine and Biogenic Emissions, *Science of The Total Environment*, 882, 163021. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.163021>
- Choi, Y.-N., Song, S.-K., Lee, S.H., Moon, J.-H. (2020) Estimation of Marine Dimethyl Sulfide Emissions from East Asian seas and Their Impact on Natural Direct Radiative Forcing, *Atmospheric Environment*, 222, 117165. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2019.117165>
- De Gouw, J., Jimenez, J.L. (2009) Organic Aerosols in the Earth's Atmosphere, *Environmental Science and Technology*, 43(20), 7614-7618. <https://doi.org/10.1021/es9006004>
- Dehshiri, S.S.H., Firoozabadi, B. (2024) Dust Emission, Transport, and Deposition in Central Iran and Their Radiative Forcing effects: A Numerical Simulation, *Atmospheric Pollution Research*, 15(11), 102267. <https://doi.org/10.1016/j.apr.2024.102267>
- Dubovik, O., King, M.D. (2000) A Flexible Inversion Algorithm for Retrieval of Aerosol Optical Properties from Sun and Sky Radiance Measurements, *Journal of Geophysical Research: Atmosphere*, 105, 20673-20696. <https://doi.org/10.1029/1999JD000001>

- doi.org/10.1029/2000JD900282
- Gao, Y., Zhao, C., Liu, X., Zhang, M., Leung, L.R. (2014) WRF-Chem Simulations of Aerosols and Anthropogenic Aerosol Radiative Forcing in East Asia, *Atmospheric Environment*, 92, 250-266. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2014.04.038>
- Guo, H., Sullivan, A.P., Campuzano-Jost, P., Schroder, J.C., Lopez-Hilfiker, F.D., Dibb, J.E., Jimenez, J.L., Thornton, J.A., Brown, S.S., Nene, A., Weber, R.J. (2016) Fine Particle pH and the Partitioning of Nitric Acid during Winter in the Northeastern United States, *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 121(17), 10355-10376. <https://doi.org/10.1002/2016JD025311>
- Gupta, P., Jangid, A., Kumar, R. (2023) Assessment of Aerosol Optical and Physical Properties and Implications for Radiative Effects over the Semi-arid Region of Indo-Gangetic Basin, *Geological Journal*, 58(12), 4319-4332. <https://doi.org/10.1002/gj.4857>
- Hallquist, M., Wenger, J.C., Baltensperger, U., Rudich, Y., Simpson, D., Claeys, M., Dommen, J., Donahue, N.M., George, C., Goldstein, A.H., Hamilton, J.F., Herrmann, H., Hoffmann, T., Iinuma, Y., Jang, M., Jenkin, M.E., Jimenez, J.L., Kiendler-Scharr, A., Maenhaut, W., McFiggans, G., Mentel, Th.F., Monod, A., Prevot, A.S.H., Seinfeld, J.H., Surratt, J.D., Szmigielski, R., Wildt, J. (2009) The Formation, Properties and Impact of Secondary Organic Aerosol: Current and Emerging Issues, *Atmospheric Chemistry and Physics*, 9(14), 5155-5236. <https://doi.org/10.5194/acp-9-5155-2009>
- Holben, B.N., Eck, T.F., Slutsker, I.A., Tanre, D., Buis, J.P., Setzer, A., Vermote, E., Reagan, J.A., Kaufman, Y.J., Nakajima, T., Lavenu, F., Jankowiak, I., Smirnov, A. (1998) AERONET - A Federated Instrument Network and Data Archive for Aerosol Characterization, *Remote Sensing of Environment*, 66(1), 1-16. [https://doi.org/10.1016/S0034-4257\(98\)00031-5](https://doi.org/10.1016/S0034-4257(98)00031-5)
- Huang, X., Song, Y., Zhao, C., Cai, X., Zhang, H., Zhu, T. (2015) Direct Radiative Effect by Multicomponent Aerosol over China, *Journal of Climate*, 28(9), 3472-3495. <https://doi.org/10.1175/JCLI-D-14-00365.1>
- Iacono, M.J., Delamere, J.S., Mlawer, E.J., Shephard, M.W., Clough, S.A., Collins, W.D. (2008) Radiative Forcing by Long-lived Greenhouse Gases: Calculations with the AER Radiative Transfer Models, *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 113(D13). <https://doi.org/10.1029/2008JD009944>
- Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) (2007) *Climate change 2007: The Physical Science Basis*, Cambridge University Press, Cambridge and New York, 996pp.
- Jung, J., Choi, Y., Wong, D.C., Nelson, D., Lee, S. (2021) Role of Sea Fog Over the Yellow Sea on Air Quality With the Direct Effect of Aerosols, *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 126(5), e2020JD033498. <https://doi.org/10.1029/2020JD033498>
- Jung, J., Souri, A.H., Wong, D.C., Lee, S., Jeon, W., Kim, J., Choi, Y. (2019) The Impact of the Direct Effect of Aerosols on Meteorology and Air Quality Using Aerosol Optical Depth Assimilation During the KORUS-AQ Campaign, *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 124(14), 8303-8319. <https://doi.org/10.1029/2019JD030641>
- Kedia, S., Ramachandran, S., Kumar, A., Sarin, M.M. (2010) Spatio-temporal Gradients in Aerosol Radiative Forcing and Heating Rate over Bay of Bengal and Arabian Sea Derived on the Basis of Optical, Physical, and Chemical Properties, *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 115(D7). <https://doi.org/10.1029/2009JD013136>
- 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, J.-S., Song, S.-K., Lee, S.-B., Cho, S.-B. (2024) Long-Term Variations and Relationships between Urban Heat Island and Air Pollutants in Seoul over the Past 20 Years, *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment*, 40(2), 209-224, (in Korean with English abstract). <https://doi.org/10.5572/KOSAE.2024.40.2.209>
- Korea Meteorological Administration (KMA) (2024) *Report of Global Atmosphere Watch 2023*, KMA, 134pp.
- Lee, S.-J., Song, S.-K., Han, S.-B. (2017) Influence of Greenhouse Gases on Radiative Forcing at Urban Center and Background Sites on Jeju Island using the Atmospheric Radiative Transfer Model, *Atmosphere*, 27(4), 423-433, (in Korean with English abstract). <https://doi.org/10.14191/Atmos.2017.27.4.423>
- Liou, K.N. (2002) *An introduction to atmospheric radiation* (Vol. 84). Elsevier.
- Luecken, D.J., Yarwood, G., Hutzell, W.T. (2019) Multipollutant Modeling of Ozone, Reactive Nitrogen and HAPs across the Continental US with CMAQ-CB6, *Atmospheric Environment*, 201, 62-72. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2018.11.060>
- Mamun, A., Chen, Y., Liang, J. (2021) Radiative and Cloud Microphysical Effects of the Saharan Dust Simulated by the WRF-Chem model, *Journal of Atmospheric and Solar-*

- Terrestrial Physics, 219, 105646. <https://doi.org/10.1016/j.jastp.2021.105646>
- 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>
- National Air Emission Inventory and Research Center (NAIR) (2025) 2022 National Air Pollutant Emissions Inventory, Osong, Republic of Korea. <https://www.air.go.kr/article/view.do?boardId=7&articleId=489&boardId=7&menuId=48¤tPageNo=1>
- National Institute of Environmental Research (NIER) (2018) 2015 National Air Pollutant Emissions Inventory. <https://www.air.go.kr/article/view.do?boardId=7&articleId=132&boardId=7&menuId=48¤tPageNo=1>
- National Institute of Environmental Research (NIER) (2020) Annual Report of Air Quality in Korea 2019. https://www.air-korea.or.kr/web/detailViewDown?pMENU_NO=125
- National Institute of Environmental Research (NIER) (2022) 2019 National Air Pollutant Emissions Inventory. <https://www.air.go.kr/main.do>
- Oh, H.-R., Ho, C.-H., Kim, J., Chen, D., Lee, S., Choi, Y.-S., Chang, L.-S., Song, C.-K. (2015) Long-range Transport of Air Pollutants Originating in China: A Possible Major Cause of Multi-day High-PM₁₀ Episodes during Cold Season in Seoul, Korea, *Atmospheric Environment*, 109, 23-30. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2015.03.005>
- Park, Y.-H., Song, S.-K., Kang, C.-H., Song, J.-M. (2017) Estimations of the Optical Properties and Direct Radiative Forcing of Aerosol Chemical Components in PM_{2.5} Measured at Aewol Intensive Air Monitoring Site on Jeju Island, *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment*, 33(5), 458-472, (in Korean with English abstract). <https://doi.org/10.5572/KOSAE.2017.33.5.458>
- Penner, J.E., Andreae, M.O., Annegarn, H., Barrie, L., Feichter, J., Hegg, D., Jayaraman, A., Leaitch, R., Murphy, D., Nganga, J., Pitari, G. (2001) Aerosols, their Direct and Indirect Effects, *Climate Change 2001: The Scientific Basis, Contribution of Working Group I to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* (pp. 289-348), Cambridge, UK, and New York, NY, USA: Cambridge University Press.
- Pleim, J.E. (2007a) A Combined Local and Nonlocal Closure Model for the Atmospheric Boundary Layer. Part I: Model Description and Testing, *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 46(9), 1383-1395. <https://doi.org/10.1175/JAM2539.1>
- Pleim, J.E. (2007b) A Combined Local and Nonlocal Closure Model for the Atmospheric Boundary Layer. Part II: Application and Evaluation in a Mesoscale Meteorological Model, *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 46(9), 1396-1409. <https://doi.org/10.1175/JAM2534.1>
- Power, H.C. (2003) Trends in Solar Radiation over Germany and An Assessment of the Role of Aerosols and Sunshine Duration, *Theoretical and Applied Climatology*, 76(1), 47-63. <https://doi.org/10.1007/s00704-003-0005-8>
- Ramanathan, V., Crutzen, P.J., Lelieveld, J., Mitra, A.P., Althausen, D., Anderson, J., Andreae, M.O., Cantrell, W., Cass, G.R., Chung, C.E., Clarke, A.D., Coakley, J.A., Collins, W.D., Conant, W.C., Dulac, F., Heintzenberg, J., Heymsfield, A.J., Holben, B., Howell, S., Hudson, J., Jayaraman, A., Kidhl, J.T., Krishnamurti, T.N., Lubin, D., McFarquhar, G., Novakov, T., Ogren, J.A., Podgorov, I.A., Prather, K., Priestley, K., Prospero, J.M., Quinn, P.K., Rajeev, K., Rasch, P., Rupert, S., Sadourny, R., Satheesh, S.K., Shaw, G.E., Sheridan, P., Valero, F.P.J. (2001) Indian Ocean Experiment: An Integrated Analysis of the Climate Forcing and effects of the Great Indo-Asian haze, *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 106(D22), 28371-28398. <https://doi.org/10.1029/2001JD900133>
- Savtchenko, A., Ouzounov, D., Ahmad, S., Acker, J., Leptoukh, G., Koziana, J., Nickless, D. (2004) Terra and Aqua MODIS Products Available from NASA GES DAAC, *Advances in Space Research*, 34(4), 710-714. <https://doi.org/10.1016/j.asr.2004.03.012>
- Seinfeld, J.H., Pandis, S.N. (2016) *Atmospheric Chemistry and Physics: From Air Pollution to Climate Change*, second ed. John Wiley & Sons, New Jersey, p. 1152.
- Shah, V., Jaegle, L., Thornton, J.A., Lopez-Hilfiker, F.D., Lee, B.H., Schroder, J.C., Campuzano-Jost, P., Jimenez, J.L., Guo, H., Sullivan, A.P., Weber, R.J., Green, J.R., Fiddler, M.N., Bililign, S., Campos, T.L., Stell, M., Weinheimer, A.J., Montzka, D.D., Brown, S.S. (2018) Chemical Feedbacks Weaken the Wintertime Response of Particulate Sulfate and Nitrate to Emissions Reductions over the Eastern United States, *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 115(32), 8110-8115. <https://doi.org/10.1073/pnas.1803295115>
- Shon, Z.-H., Kim, K.-H., Song, S.-K., Jung, K., Kim, N.-J., Lee, J.-B. (2012) Relationship between water-soluble ions in PM_{2.5} and their precursor gases in Seoul megacity, *Atmospheric Environment*, 59, 540-550. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2012.04.033>
- So, Y.-Y., Song, S.-K., Han, S.-B. (2020) Characteristics of Concentrations of Aerosol Chemical Components and their

- Direct Radiative Forcing Estimates in the Haze Events during 2013-2016, *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment*, 36(2), 198-215, (in Korean with English abstract). <https://doi.org/10.5572/KOSAE.2020.36.2.198>
- Song, S.-K., Choi, Y.-N., Choi, Y., Flynn, J., Sadeghi, B. (2021) Characteristics of Aerosol Chemical Components and Their Impacts on Direct Radiative Forcing at Urban and Suburban Locations in Southeast Texas, *Atmospheric Environment*, 246, 118151. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2020.118151>
- Song, S.-K., Han, S.-B., Kim, S.-W. (2014) Analysis of Meteorological Characteristics Related to Changes in Atmospheric Environment on Jeju Island during 2010-2012, *Journal of Environmental Science International*, 3(11), 1889-1907, (in Korean with English abstract). <https://doi.org/10.5322/JESI.2014.23.11.1889>
- Song, S.-K., Shon, Z.-H. (2014) Temporal Variations in Optical Properties and Direct Radiative Forcing of Different Aerosol Chemical Components in Seoul using Hourly Aerosol Sampling, *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment*, 30(1), 1-17, (in Korean with English abstract). <https://doi.org/10.5572/KOSAE.2014.30.1.001>
- Song, S.-K., Shon, Z.-H., Kim, Y.-K., Kang, Y.-H., Oh, I.-B., Jung, C.-H. (2010) Influence of Ship Emissions on Ozone Concentrations around Coastal Areas during Summer Season, *Atmospheric Environment*, 44(5), 713-723. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2009.11.010>
- Song, S.-K., Shon, Z.-H., Park, Y.-H. (2017) Diurnal and Seasonal Characteristics of the Optical Properties and Direct Radiative Forcing of Different Aerosol Components in Seoul Megacity, *Science of The Total Environment*, 599, 400-412. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.04.195>
- Stjern, C.W., Hodnebrog, Ø., Myhre, G., Pissis, I. (2023) The Turbulent Future Brings a Breath of Fresh Air, *Nature Communications*, 14(1), 3735. <https://doi.org/10.1038/s41467-023-39298-4>
- Tiwary, P., Kukreti, S., Shridhar, V., Abhinav, A., Rana, S., Arunachalam, K., Singh, V. (2024) Assessment of Black Carbon, Optical Properties and Aerosol Radiative Forcing at Pranmati basin Himalayan Critical Zone Observatory, *Science of The Total Environment*, 933, 173050. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2024.173050>
- Wang, J., Wang, S., Jiang, J., Ding, A., Zheng, M., Zhao, B., Wong, D.C., Zhou, W., Zheng, G., Wang, L., Pleim, J.E., Hao, J. (2014) Impact of Aerosol-Meteorology Interactions on Fine Particle Pollution during China's Severe Haze Episode in January 2013, *Environmental Research Letters*, 9(9), 094002. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/9/9/094002>
- Wang, W., Wang, X., Li, X., Chen, C., Wang, Y., Xing, Z., Li, K., Wei, M., Sui, X., Liu, H. (2024) Seasonal Particle Size Distribution and Its Influencing Factors in a Typical Polluted City in North China, *Aerosol and Air Quality Research*, 24(6), 230127. <https://doi.org/10.4209/aaqr.230127>
- Wong, D.C., Pleim, J., Mathur, R., Binkowski, F., Otte, T., Gilliam, R., Pouliot, G., Xiu, A., Young, J.O., Kang, D. (2012) WRF-CMAQ Two-way Coupled System with Aerosol Feedback: Software Development and Preliminary Results, *Geoscientific Model Development Discussions*, 5, 299-312. <https://doi.org/10.5194/gmd-5-299-2012>
- Yoo, J.W., Jeon, W., Park, S.Y., Park, C., Jung, J., Lee, S.H., Lee, H.W. (2019) Investigating the Regional Difference of Aerosol Feedback Effects over South Korea using the WRF-CMAQ Two-way Coupled Modeling System, *Atmospheric Environment*, 218, 116968. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2019.116968>
- Yoo, J.W., Park, S.Y., Jeon, W., Jung, J., Park, J., Mun, J., Kim, D., Lee, S.H. (2024) Understanding the Physical Mechanisms of PM_{2.5} Formation in Seoul, Korea: Assessing the Role of Aerosol Direct Effects using the WRF-CMAQ Model, *Air Quality, Atmosphere & Health*, 17, 1701-1714. <https://doi.org/10.1007/s11869-024-01538-x>
- Yu, S., Mathur, R., Pleim, J., Wong, D., Gilliam, R., Alapaty, K., Zhao, C., Liu, X. (2014) Aerosol Indirect Effect on the Grid-scale Clouds in the Two-way Coupled WRF-CMAQ: Model Description, Development, Evaluation and Regional Analysis, *Atmospheric Chemistry and Physics*, 14(20), 11247-11285. <https://doi.org/10.5194/acp-14-11247-2014>
- Zhou, Y., Savijärvi, H. (2014) The Effect of Aerosols on Long Wave Radiation and Global Warming, *Atmospheric Research*, 135, 102-111. <https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2013.08.009>

Authors Information

김진승(제주대학교 지구해양융합학부 지구해양과학전공 박사과정 학생) (wlstmd98@stu.jejunu.ac.kr)

송상근(제주대학교 지구해양과학과 교수) (songsk@jejunu.ac.kr)

조성빈(제주대학교 지구해양과학과 박사후연구원) (cho2285@jejunu.ac.kr)