

논문

WRF-CMAQ 양방향 결합모델을 이용한 에어로졸 직접 피드백 효과가 기상 및 미세먼지에 미치는 영향: 2019년 고농도 PM_{2.5} 사례

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

김진승¹⁾, 송상근^{1),2),*}, 조성빈¹⁾

¹⁾제주대학교 지구해양융합학부 지구해양전공, ²⁾제주대학교 지구해양과학과

Jin-Seung Kim¹⁾, Sang-Keun Song^{1),2),*}, Seong-Bin Cho¹⁾

¹⁾Faculty of Earth and Marine Convergence/Earth and Marine Science Major, Jeju National University, Jeju 63243, Republic of Korea

²⁾Department of Earth and Marine Sciences, Jeju National University, Jeju 63243, Republic of Korea

접수일 2024년 11월 6일
수정일 2025년 1월 17일
채택일 2025년 2월 9일

Received 6 November 2024

Revised 17 January 2025

Accepted 9 February 2025

*Corresponding author

Tel : +82-(0)64-754-3431

E-mail : songsk@jejunu.ac.kr

Abstract This study investigated the impact of direct aerosol feedback (DAF) on meteorology and particulate matter (PM₁₀ and PM_{2.5}) using the WRF-CMAQ two-way coupled model during a high PM_{2.5} event observed in South Korea from February 17 to March 15, 2019. The impact was quantified by analyzing differences in meteorological variables and PM concentrations between simulations that included DAF (i.e., YF) and those that did not include DAF (i.e., NF). Overall, the effect of DAF (YF minus NF) was more pronounced as the PM concentration in the air increased. The DAF effect was generally stronger in the northwestern and/or western regions of South Korea than in the eastern regions. In the study area, primarily over land, the DAF effect was found to decrease solar radiation, planetary boundary layer height, air temperature, and wind speed, with average changes of -0.54 MJ m^{-2} , -29 m , -0.14°C , and -0.04 m s^{-1} , respectively, while increasing relative humidity by an average of $+0.8\%$. These changes in meteorological variables due to the DAF effect resulted in an average increase in PM₁₀ and PM_{2.5} concentrations ($0.25 \mu\text{g m}^{-3}$ and $0.49 \mu\text{g m}^{-3}$, respectively) over land in South Korea. Interestingly, in the southern regions, the DAF effect led to a decrease in PM concentrations, primarily due to a reduction in the concentrations of secondary aerosols (mainly NO_3^-) and precursors (mainly HNO_3) and partly due to differences in meteorological conditions (small changes in wind speed and relative humidity). In addition, the magnitude of the DAF effect in ocean areas was found to be mostly lower than that in land areas.

Key words: Direct aerosol feedback, Solar radiation, WRF-CMAQ two-way coupled model, Particulate matter, High PM_{2.5} event

1. 서 론

일반적으로 에어로졸은 대기 중 고체 및 액체의 형태로 부유하는 작은 입자(수 nm~수십 μm)를 의미하며, 해염, 토양 먼지 등의 자연적 요인과 산업시설, 자동차 등의 인위적 요인에 의해 발생한다(KMA, 2024). 에어로졸은 태양복사를 흡수하거나 산란시켜

지표면과 대기의 온도에 영향을 주는 직접 효과(direct effect)와 구름응결핵 역할을 하여 구름의 광학특성과 강수에 영향을 미치는 간접 효과(indirect effect)를 통해 기상 및 기후 변화를 야기시킨다(Yoo *et al.*, 2019; Yu *et al.*, 2014; IPCC, 2007; Penner *et al.*, 2001). 또한 에어로졸은 다른 대기오염물질과 결합하여 스모그, 시정감소 등 대기질 악화의 원인이 될 뿐

만 아니라 호흡기 및 심혈관 질환 등 인체 건강에 영향을 줄 수 있다(KMA, 2024). 그러나 에어로졸이 기상 및 대기질 간의 상호작용에 미치는 영향은 매우 복잡하여 정확한 예측 및 분석이 어렵다(Yoo *et al.*, 2019; Jacob and Winner, 2009). 따라서 에어로졸과 기상, 대기질 그리고 기후와의 상호작용에 대해 면밀히 평가하고 이에 따른 영향을 정량적으로 평가하는 것은 매우 중요한 과제이다. 이러한 에어로졸의 특성 분석 및 정량적 평가를 위해서 국내외 많은 연구자들은 기상 및 대기질 수치모의를 이용한 다양한 연구들을 수행해 왔다(Sun *et al.*, 2023; Li *et al.*, 2022; Cho *et al.*, 2021). 그러나 과거 대부분 연구에서는 기상과 대기질 모델 사이의 양방향 피드백이 고려되지 않는 기상장을 이용하여 대기질 모의를 수행하였고, 모델결과와 관측값과의 검증 및 지역 대기오염 분포를 평가해 왔다.

에어로졸과 기상 및 대기질 사이의 상호작용 연구에 대한 한계점을 보완하기 위해, 기상모델 WRF (Weather Research and Forecasting)와 대기질 모델 CMAQ (Community Multiscale Air Quality)을 결합한 WRF-CMAQ 양방향(two-way) 결합모델이 개발되었다(Wong *et al.*, 2012). 기상과 대기오염물질 사이의 피드백이 고려되는(상호작용 고려) WRF-CMAQ 양방향 결합모델이 개발된 이후 에어로졸 피드백 효과에 따른 기상 및 대기질 변화에 관한 많은 연구가 수행되어왔다(Yoo *et al.*, 2024; Huang *et al.*, 2023; Montgomery *et al.*, 2023; Jung *et al.*, 2021; Wang *et al.*, 2014). Huang *et al.* (2023)은 동남아시아의 주요 배출원 중 하나인 바이오매스 연소(biomass burning)를 고려한 에어로졸 피드백 효과가 평균 지표면 태양복사를 감소시켰고(2015년 3월과 4월에 각각 65.4 W m^{-2} , 33.6 W m^{-2} 감소), 이로 인해 대기경계층(Planetary boundary layer, PBL) 고도 또한 최대 91.2 m 정도 감소하였음을 밝혔다. 또한 2013년 1월 중국에서는 에어로졸 피드백 효과가 일평균 태양복사와 PBL 고도를 각각 53%와 15% 감소시켰으며, 이러한 기상 변화는 대기안정도를 증가시켜 결국 고농도 $\text{PM}_{2.5}$

(최고 $140 \mu\text{g m}^{-3}$) 생성에 영향을 주었음을 밝혔다(Wang *et al.*, 2014). 이 외에도 2017년 겨울 국내 대기 오염 사례에 대하여 에어로졸 피드백 효과가 단파복사, 기온, 풍속 및 PBL 고도를 각각 21.5 W m^{-2} , 1.5°C , 0.2 m s^{-1} 및 92 m 감소시켰으며, 이는 대기의 수평/연직 확산의 감소와 대기안정도 증가를 초래하게 되고 $\text{PM}_{2.5}$ 농도 또한 증가시켰다(Yoo *et al.*, 2024). Jung *et al.* (2021)은 2016년 봄철 서해 해무 사례에 대해 에어로졸 피드백 효과가 해상의 온도 역전을 강화시켜 이로 인해 해무의 강도가 강화되었음을 밝힌 바 있다.

앞서 언급하였듯이, 국내외적으로 에어로졸 피드백 효과가 기상 및 미세먼지 농도에 미치는 영향과 관련하여 다양한 연구들이 수행되었다. 그러나 대부분의 기상-대기질 결합모델링 연구에서는 모델 도메인을 동아시아(수평해상도 12 km 이상) 하나로만 설정하여 에어로졸의 직접적 피드백 효과를 분석하고 평가하였다. 또한 보다 상세한 기상 및 대기질 변화를 파악할 수 있는 고해상도 결합모델을 활용한 연구 사례도 거의 없었다(Montgomery *et al.*, 2023). 한편, 우리나라는 최근 20여 년간 미세먼지 농도가 감소하는 추세를 보였으나, 중국의 대규모 오염원으로부터의 장거리 수송과 국내 배출의 영향으로 인해 여전히 고농도 미세먼지 사례가 빈번히 발생하고 있다(Kim *et al.*, 2024; NIER, 2023; Baek *et al.*, 2022; Cho *et al.*, 2021; Song *et al.*, 2010). 따라서 본 연구에서는 최근 10년 중 가장 극심한 미세먼지 오염 현상이 나타났던 2019년 2~3월을 대상으로, 고해상도 WRF-CMAQ two-way 결합모델(수평해상도 3 km)을 이용하여 에어로졸의 직접적 피드백 효과가 남한지역의 기상과 미세먼지 농도에 미치는 영향을 평가하였다. 또한 이러한 에어로졸 피드백 효과의 지역적 차이에 대해 정량적으로 분석하였다.

2. 자료 및 방법

2.1 연구 대상 기간

삼면이 바다로 둘러싸인 남한지역은 중국 대규모

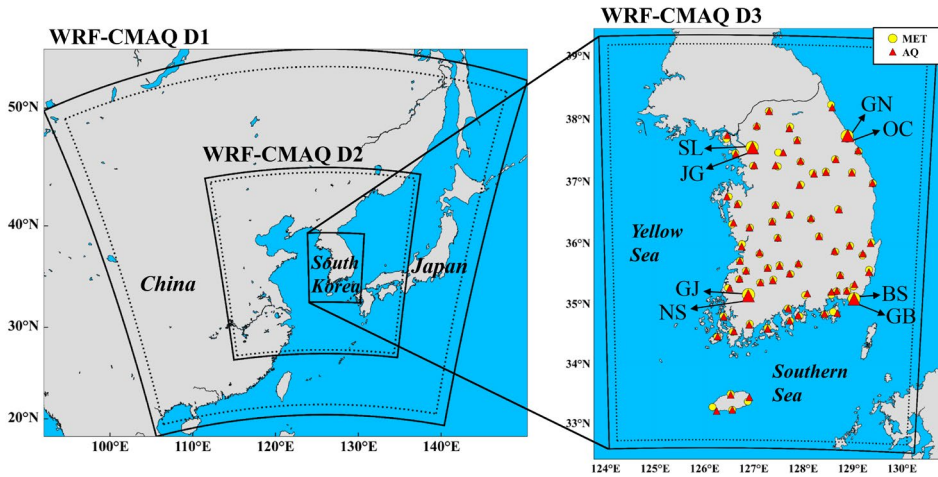


Fig. 1. The nested model domain for the WRF-CMAQ two-way coupled model simulations and the geographical locations of 70 monitoring sites for meteorological variables (MET, circles) and 70 monitoring sites for particulate matter concentrations (AQ, triangles). "JG", "NS", "GB", and "OC" in the figure represent four air quality monitoring sites in South Korea: Jung-gu (JG) in Seoul, Nongseong-dong (NS) in Gwangju, Gwangbok-dong (GB) in Busan, and Okcheon-dong (OC) in Gangneung. "SL", "GJ", "BS", and "GN" in the figure represent meteorological monitoring sites in Seoul, Gwangju, Busan, and Gangneung, respectively, and these sites are located within 5 km of their respective air quality monitoring sites.

배출원의 풍하측에 위치해 있어, 편서풍을 따라 유입되는 대기오염물질 (PM, NO_x, VOCs 등)의 장거리 수송과 국내 자체 배출이 복합적으로 영향을 미치는 지역이다 (Cho *et al.*, 2023; Oh *et al.*, 2015; Lee *et al.*, 2013; Song *et al.*, 2010). 최근 10년 동안의 미세먼지 농도 변화를 살펴보면 (NIER, 2023), 2019년이 가장 극심한 미세먼지 오염이 발생한 해로 나타났다. 이해에 초미세먼지의 "매우 나쁨" 일수는 서울에서 9일, 전국적으로는 6일로 나타났으며, 2019년을 제외한 다른 해에는 서울과 전국에서 각각 4일 이하, 2일 이하로 나타났다. 또한 2019년에는 PM_{2.5} 주의보 및 경보가 각각 77일과 10일 발령되었다 (NIER, 2023). 이와 더불어, 총 366개의 대기질 관측지점 중 단 7개의 지점만 연간 PM_{2.5} 대기환경기준 (평균 15 $\mu\text{g m}^{-3}$ 이하)을 달성하였으며, 모든 지점에서 일간 PM_{2.5} 기준 (평균 35 $\mu\text{g m}^{-3}$ 이하)을 초과하였다 (NIER, 2020). 따라서 본 연구에서는 에어로졸의 직접적 피드백 효과를 분석하기 위해, 2019년 늦겨울 동안 남한 전역에서 고농도 미세먼지가 발생한 2월 17일~3월 15일

을 사례 기간으로 선정하였다. 이 사례는 황사가 관측되지 않았음에도 불구하고 남한 대부분 지역에서 1시간 PM_{2.5} 농도가 120 $\mu\text{g m}^{-3}$ 이상을 기록했으며, 특히 3월 5일에는 전라도 지역에서 최고 235 $\mu\text{g m}^{-3}$ 까지 관측된 고농도 사례이다.

2.2 대상지역 및 자료

본 연구에서는 기상 및 대기질에 영향을 미치는 에어로졸의 직접적 피드백 효과를 분석하기 위해, 시간별 기상요소 (일사, 기온, 풍속, 상대습도)와 시간별 PM₁₀ 및 PM_{2.5} 농도 자료를 이용하였다. 연구에 사용된 기상 및 미세먼지 자료는 남한지역 내 70개의 기상청 종관기상관측시스템 (Automated Synoptic Observing System, ASOS)과 70개의 환경부 도시대기측정망에서 수집하였다 (그림 1). 기상요소 중 일사 자료는 ASOS 관측지점 70개 중 관측이 수행된 31개 지점을 대상으로 분석하였다. 또한 보다 정확한 해석을 위해, 기상 및 대기질 측정지점은 서로 5 km 이내의 가까운 거리로 위치하고, 장애물의 영향을 최소화한

곳으로 선정하였다(Cho *et al.*, 2021; Song *et al.*, 2014).

에어로졸 피드백 효과의 지역적 차이를 세부적으로 분석하기 위해, 전체 관측지점(각각 70개) 중에서 4개의 기상 및 4개의 대기질 지점을 대표로 선정하였다. 기상요소 관측지점은 남한의 북서, 남서, 북동, 남동 지역을 대표하는 ASOS 지점으로, 서울(SL, 37.57°N, 126.96°E, 해발 86 m), 광주(GJ, 35.17°N, 126.89°E, 해발 70 m), 강릉(GN, 37.75°N, 128.89°E, 해발 27 m), 부산(BS, 35.10°N, 129.03°E, 해발 70 m) 지점을 선정하였다. 대기질 관측지점으로는 서울 중구(JG, 37.56°N, 126.97°E), 광주 농성동(NS, 35.15°N, 126.89°E), 강릉 옥천동(OC, 37.76°N, 128.90°E), 부산 광복동(GB, 35.10°N, 129.03°E) 지점을 선정하였다. JG 및 NS와 같이 남한의 서쪽에 위치한 지점들은 중국의 대규모 배출원으로부터 장거리 수송 영향을 직접적으로 받는 지역이고, OC 및 GB와 같이 남한의 동쪽에 위치한 지점들은 상대적으로 중국으로부터의 외부 수송 영향이 적은 지역이다(Yoo *et al.*, 2019).

본 연구에서는 에어로졸 피드백 효과가 적용된 실험(YF)과 적용되지 않은 실험(NF)을 수행한 후, 두 실험 간의 기상 및 미세먼지 농도 차이를 비교하여 에어로졸의 직접적 피드백 효과가 기상 및 미세먼지에 미치는 영향을 평가하였다. 이러한 에어로졸의 직접적 효과는 주로 일사에 큰 영향을 미치기 때문에 주간 기상 및 미세먼지 자료를 이용하였으며, 지역별 일출과 일몰의 시간 차이를 고려하여 하루 중 08시부터 18시까지를 주간으로 설정하여 분석하였다. 본 연구에 사용된 WRF-CMAQ 양방향 결합모델의 구성과 모델 입력 자료에 대한 자세한 내용은 2.3절에 제시하였다.

2.3 모델 구성 및 입력 자료

본 연구의 양방향 결합모델에 이용된 기상 및 대기질 모델은 각각 WRF version 4.3 (<http://www.mmm.ucar.edu/wrf/users>)과 CMAQ version 5.3.3 (<https://www.cmascenter.org/cmaq/>) 모델이다. 먼저 WRF 모

델은 완전 압축성 비정수계 방정식을 이용한 모델로 미국 NCAR (National Center of Atmospheric Research)와 NCEP (National Centers for Environmental Prediction)에서 공동 개발하였다. CMAQ 모델은 미국 EPA (Environmental Protection Agency)에서 개발하였으며, 대류권 내 대기오염물질의 수송, 축적, 제거 등 물리적 과정과 대기 중 광화학을 포함한 상세 화학반응 모듈을 통해 다양한 기체 및 입자상 오염물질을 모의할 수 있는 3차원 Eulerian 광화학 수송모델이다(Byun and Schere, 2006; Byun and Ching, 1999). WRF-CMAQ 양방향 결합모델은 WRF와 CMAQ 모델을 커플러를 통해 서로 연결해주며, 기상장을 CMAQ 모델의 입력 형태로 변환해주는 MCIP (Meteorological Chemistry Interface Processor)을 포함한 “aqprep” 과정과 모의된 에어로졸의 성분 및 질량, 크기 분포 등을 기상모델에 전달하는 “feedback” 과정을 통해 결합모델링에서 에어로졸의 피드백 효과가 적용된다(Wong *et al.*, 2012).

본 연구에서는 외부에서 장거리 수송되는 오염물질의 체류시간을 고려하여 모델 영역을 동아시아 영역(D1, 수평해상도 27 km), 중국 동부 및 한반도 영역(D2, 9 km), 남한 영역(D3, 3 km)으로 구성하였다(그림 1). WRF-CMAQ 양방향 결합모델 수행에 앞서, 단일 WRF와 CMAQ 모델링에 필요한 입력 자료(초기 및 경계 조건, 배출량 등)를 사전에 준비한 후, 각 도메인에 대해 결합모델링을 수행하였다(Montgomery *et al.*, 2023). 결합모델링의 입력 자료 중 기상장의 초기 및 경계 조건은 NCEP GDAS/FNL (Global Data Assimilation System/Final analysis) 0.25° × 0.25° 해상도의 6시간 간격 재분석 자료를 이용하였으며, 토지피복과 지형고도는 각각 MODIS_IGBP (International Geosphere-Biosphere Programme)의 20개 유형 land-use 30초 자료(Friedl *et al.*, 2010)와 GMTED 2010 (Global Multi-resolution Terrain Elevation Data 2010) 30초 자료(Danielson and Gesch, 2011)를 이용하였다. 또한 CMAQ 초기 및 경계 조건의 경우, D1 도메인에서는 CMAQ에서 기본적으로 제공하는

“default profile” 자료를 이용하였고, D2 도메인에서는 상위 도메인 D1의 결합모델 결과를, D3에 대해서는 상위 도메인 D2의 결합모델 결과를 각각 초기 및 경계 조건으로 구성하였다.

결합모델링의 CMAQ 모의를 위한 배출량 자료는 동아시아(D1) 및 한반도(D2) 영역에 대해 인위적 배출량으로 EDGAR (Emissions Database for Global Atmospheric Research) version 6.1 (0.1° × 0.1° 수평해상도) 배출목록(Crippa *et al.*, 2022)을 이용하였고, 남한 영역(D3)에서는 환경부에서 제공하는 CAPSS (Clean Air Policy Supporting System) 2019년 자료(1 km × 1 km 해상도)를 이용하였다(NIER, 2022). EDGAR 배출량은 10가지 인위적 오염물질(CO, NO_x, NMVOC, CH₄, NO₃, SO₂, PM₁₀, PM_{2.5}, BC, OC)에 대해 1년 단위로 제공되며, CAPSS 배출량은 환경부의 13개 대분류 배출원 분류 코드에 따라 9가지 오염물질(NO_x, SO_x, PM₁₀, PM_{2.5}, CO, OC, VOC, NH₃, TSP)을 1년 단위로 제공한다. 모든 도메인에 대한 자연적 배출량은 MEGAN (Model of Emissions of Gases and Aerosols from Nature) version 2.1을 이용하여 산정되었으며, 이는 isoprene, terpene, NO 등 오염물질의 배출 계수를 포함한다(Guenther *et al.*, 2012). 이러한 오염물질의 배출은 국지기상 조건(예, 기온과 풍속)에 따라 배출 강도가 달라지고 오염물질의 확산 또는 축적에 영향을 미치므로 기상과 밀접한 관련이 있다(Li *et al.*, 2022; Song *et al.*, 2013). 따라서 1년 단위로 제공되는 배출량 자료는 CMAQ 모델의 시간별 입력 자료로 활용하기 위해서, 월별, 일별, 시간별로 할당하는 과정이 필요하다(Batterman *et al.*, 2015; Kim *et al.*, 2008). 본 연구에서는 단일 WRF 모델에서 생성된 시간별 기상장과 각 오염원(예, 산업, 수송 등)의 시간 할당 계수를 이용하여 시간별 배출량 자료를 생성하였다(Adelman and Baek, 2012; Kim *et al.*, 2008). 각 시간별 오염물질의 배출량은 계산 프로그램(Python 등)을 활용해 인위적 배출량과 자연적 배출량을 합산하여 구성하였으며, 이를 CMAQ 모델 입력 자료 형식으로 변환하여 각 도메인 영역에

맞게 적용하였다.

본 연구에서 결합모델링 수행 기간은 고농도 미세먼지 사례를 포함하고 72시간의 초기적응시간(spin-up time)을 고려하여 2019년 2월 13일 00 UTC부터 3월 16일 00 UTC까지로 설정하였다. 각 도메인(D1~D3)의 WRF 수치모의 적분 시간(time step)은 각각 90, 30, 10초로 설정하였으며, 결합모델 내 WRF와 CMAQ의 수치모의 적분 시간 비율은 5:1로 설정하였다(Yoo *et al.*, 2019; Wong *et al.*, 2012). 이는 WRF 모델이 5회 수행된 후 CMAQ 모델이 1회 수행됨을 의미한다. 적분 시간 비율을 줄이면 결합모델 수행 중 각 모델 간 자료(기상 및 에어로졸 정보)의 피드백이 더 빈번히 이루어져 모델의 정확도가 향상될 수 있지만, CMAQ 호출 빈도가 증가함에 따라 결합모델의 수행시간이 길어지는 단점이 있다(Wong *et al.*, 2012). 이에 본 연구에서는 여러 선행연구를 참고하여 계산 환경과 수치모의 정확도를 모두 고려한 5:1의 적분 시간 비율을 설정하여 결합모델을 수행하였다. 또한 WRF 기상장 경계에서의 오차를 줄이기 위해 동서남북 각각 5개의 격자를 제거한 후 WRF-CMAQ 양방향 결합모델을 수행하였다(Wong *et al.*, 2012). 이 외에도 결합모델의 예측정확도를 평가하기 위해 연구기간 동안 기상 및 미세먼지 관측값과 모델값을 이용하여 통계적 분석을 수행하였으며, 이용된 통계적 매개변수로는 IOA (index of agreement), RMSE (root mean square error), MBE (mean bias error)가 있다.

표 1은 WRF-CMAQ 양방향 결합모델에 사용된 모델의 수평 격자 및 해상도, 물리적 옵션들을 나타낸다. 단파 및 장파 복사 모수화는 에어로졸의 직접적 복사 효과를 구현한 RRTMG scheme (Iacono *et al.*, 2008)을 이용하였으며, 여기서 CMAQ에서 모의된 에어로졸의 조성 및 크기 정보를 바탕으로 14개 파장 영역에 대한 에어로졸 광학특성(소산계수, 단일 산란 알베도, 비대칭 변수 등)을 계산한다. 대기경계층과 지표면 모수화는 각각 ACM2 PBL scheme (Pleim, 2007a, 2007b)과 Pleim-Xiu LSM (Xiu and Pleim,

Table 1. Details of the grids and physical options used in the WRF-CMAQ two-way coupled model.

[A] WRF model

	D1	D2	D3
Horizontal grid	140 × 146	220 × 223	247 × 193
Horizontal resolution (km)	27	9	3
Vertical layers	30	30	30
Microphysics	WSM3 for D1	WDM6 for D2~D3	
Longwave and shortwave radiation	RRTMG (Iacono <i>et al.</i> , 2008)		
Land surface	Pleim-Xiu LSM (Xiu and Pleim, 2001)		
Surface layer	Pleim-Xiu surface layer (Pleim, 2006)		
Planetary boundary layer	ACM2 PBL scheme (Pleim, 2007a, 2007b)		
Cumulus	Kain-Fritsch scheme (Kain, 2004)		

[B] CMAQ model

	D1	D2	D3
Horizontal grid	129 × 135	209 × 212	236 × 182
Horizontal resolution (km)	27	9	3
Vertical layers	30	30	30
Chemical mechanism	Cb6r3_aq		
Aerosol module	AERO7		
Diffusion (horizontal/vertical)	Multiscale/ACM_M3Dry		
3-D advection	WRF_CONS		
Gas-phase chemistry	Euler Backward Iterative (EBI) solver		

2001)을 이용하였으며, 지표면 물리와 관련하여 Pleim-Xiu surface layer scheme (Pleim, 2006)을 적용하였다. 또한 결합모델링의 CMAQ 모델 내 화학 메커니즘은 Cb6r3_aq (Luecken *et al.*, 2019), 에어로졸 산정 모듈은 AERO7 (Appel *et al.*, 2020)을 사용하였다.

3. 결과 및 토의

3.1 에어로졸 직접 피드백 효과에 따른 기상변화 분석

본 연구에서는 에어로졸의 직접적 피드백 효과가 기상에 미치는 영향을 분석하기 위해, 연구기간(2019년 2월 17일~3월 15일) 동안 피드백 효과를 고려한 YF 실험과 고려하지 않은 NF 실험을 수행하였으며, 두 실험 간 기상요소(일사, 기온, PBL 고도, 풍속, 상

대습도)의 차이를 공간적으로 비교하였다(그림 2). 연구기간 동안의 주간 평균 일사의 공간분포 차이(YF-NF)를 살펴보면(그림 2(a)), 에어로졸의 직접적 피드백 효과로 인해 전반적으로 일사의 감소 경향이 뚜렷하였다(육지는 평균 -0.54 MJ m^{-2} , NF 대비 3.3% 감소; 해양은 평균 -0.55 MJ m^{-2} , NF 대비 3.5% 감소). 일반적으로 에어로졸은 빛을 산란하거나 흡수하는 특성을 가지며, 태양복사에 의한 에어로졸의 산란계수는 흡수계수에 비해 훨씬 크다(단, 블랙카본 제외) (So *et al.*, 2019; Song *et al.*, 2017). 따라서 일사의 감소는 태양복사가 대기층을 통과하여 지표에 도달하는 과정에서 대기 중 에어로졸에 의해 주로 산란되고 일부는 흡수됨으로써, 최종적으로 지표에 도달하는 일사량이 감소한 것으로 사료된다(Yoo *et al.*, 2024; Jung *et al.*, 2019; Wang *et al.*, 2014; Wong *et al.*, 2012). 또한 남한의 북서쪽 또는 서쪽 지역에서는 에어로졸 피드백 효과로 인한 일사의 감소가 대체로 동

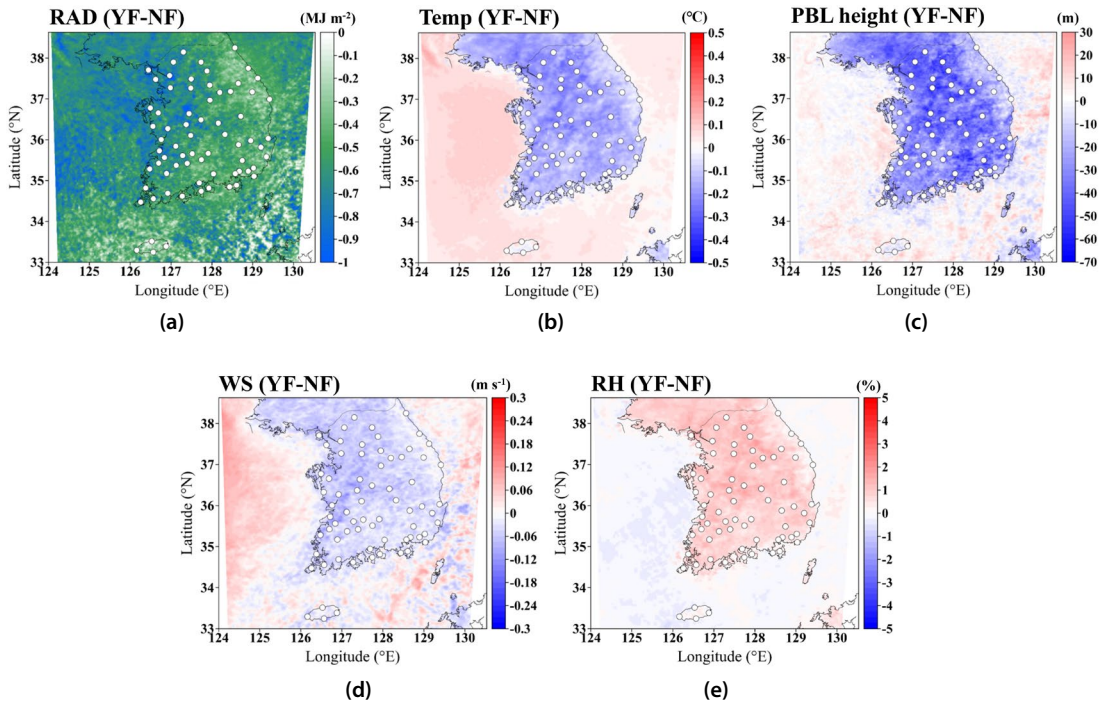


Fig. 2. Spatial distributions of the difference in meteorological variables ((a) solar radiation (RAD), (b) air temperature (Temp), (c) planetary boundary layer (PBL) height, (d) wind speed (WS), and (e) relative humidity (RH)) between YF and NF (YF minus NF) during the daytime of entire simulation period (February 17~March 15, 2019).

쪽(북동, 남동) 지역에 비해 더 크게 나타났다. 이러한 분포 차이는 연구기간 동안 두 실험에서 모의된 미세먼지(PM₁₀ 및 PM_{2.5})의 공간분포 패턴과 유사하며(그림 3), 고농도 미세먼지가 나타나는 지역과 일사의 큰 감소 지역이 서로 거의 일치함을 보여준다(Yoo *et al.*, 2017). 이는 미세먼지의 공간분포 차이에 따라 에어로졸의 피드백 효과가 지역적으로 다르게 나타날 수 있음을 시사한다. 에어로졸 직접 효과로 인한 기상변화가 미세먼지 농도 변화에 미치는 영향, 상호 피드백, 이와 관련된 상관성 분석은 3.2절에서 자세히 설명하였다.

일반적으로 에어로졸의 직접 효과(주로 산란)로 인한 일사 감소는 대기의 가열량을 줄이며, 이는 지표 부근의 기온과 PBL 고도의 감소를 유발한다(Jung *et al.*, 2019; Wang *et al.*, 2014). 육지영역에서는 일사의 공간분포와 유사하게 기온과 PBL 고도가 감소하

는 패턴을 보였으며, 평균적으로 각각 -0.14°C (NF 대비 1.8% 감소)와 -29 m (NF 대비 3.0% 감소) 정도였다(그림 2(b)와 2(c)). 반면, 해양영역에서는 기온과 PBL 고도의 변화가 거의 없거나 미미한 증가 패턴을 보였다(기온 $+0.04^{\circ}\text{C}$ 로 약 0.5% 증가, PBL 고도 $+2\text{ m}$ 로 약 0.2% 증가). 이러한 차이는 두 실험(YF-NF)에서 육지와 해양 간의 열적 성질(즉, 현열) 차이와 장파복사로 인한 대기 가열의 차이로 설명할 수 있다(그림 제외). 즉, 해양은 비열과 열관성성이 크기 때문에 육지에 비해 현열 플럭스 감소가 훨씬 적었으며(육지: 평균 -0.04 MJ m^{-2} , 해양: 평균 -0.002 MJ m^{-2}), 상대적으로 큰 장파복사(육지: 평균 -0.1 MJ m^{-2} , 해양: 평균 $+0.1\text{ MJ m}^{-2}$)로 인해 에너지 공급이 증가하여 해양 대기가 더 많이 가열되어 나타났다(Jung *et al.*, 2019). 이러한 복합적인 효과로 인해, 육지와 해양 모두 감소한 일사의 공간 패턴과는 달리,

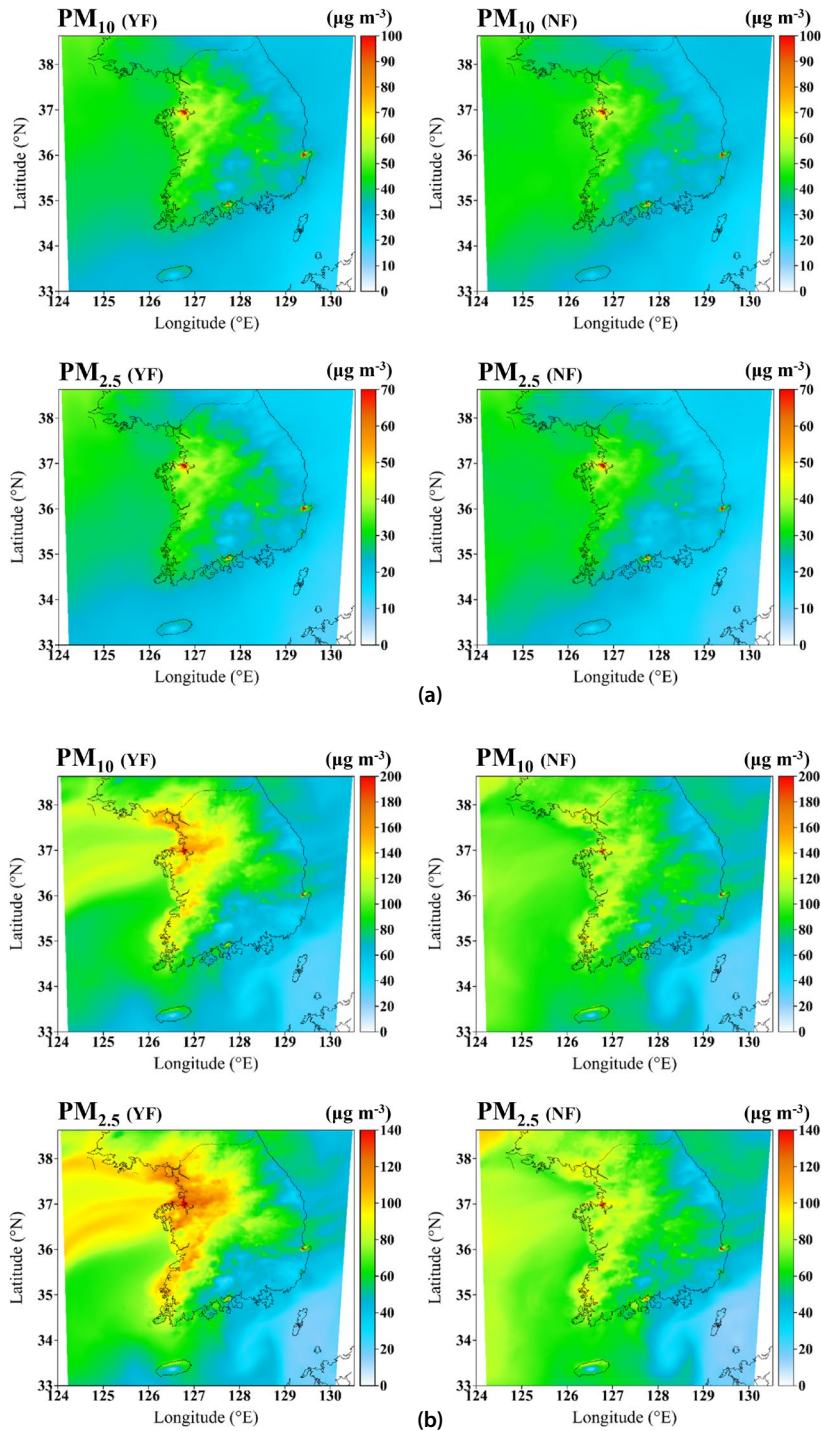


Fig. 3. Spatial distributions of mean concentrations of PM_{10} and $PM_{2.5}$ for YF and NF simulations during (a) the daytime of entire simulation period (February 17~March 15, 2019) and (b) the daytime of the highest $PM_{2.5}$ concentration day (March 5, 2019).

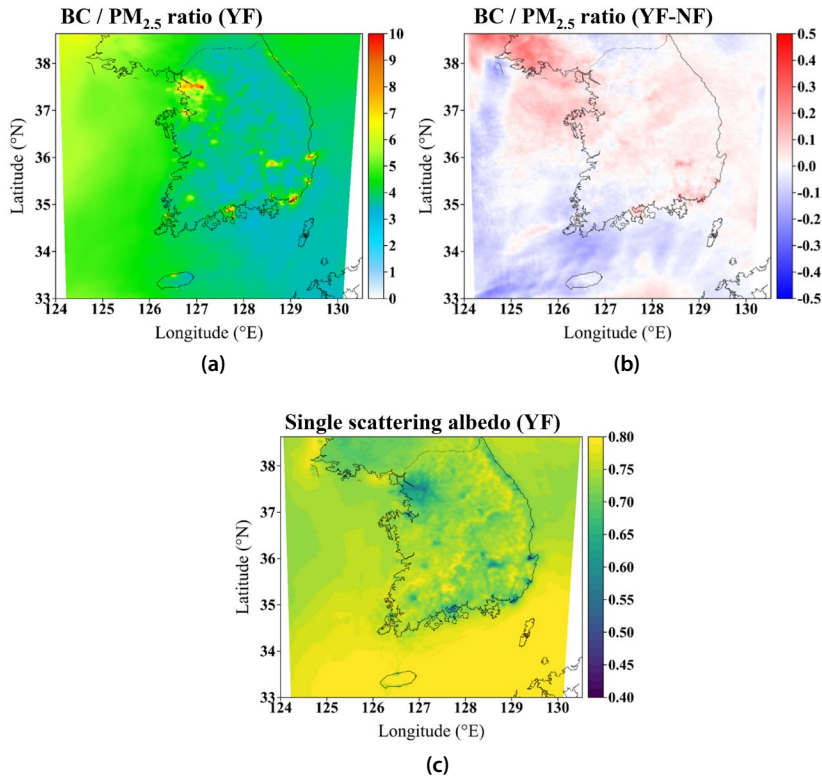


Fig. 4. Spatial distributions of (a) BC/PM_{2.5} ratios in YF simulation, (b) their differences between YF and NF simulations, and (c) single scattering albedo in YF simulation during the daytime of entire simulation period (February 17~March 15, 2019).

해양에서는 기온과 PBL 고도의 미미한 증가가 초래된 것으로 추정된다. 이 외에도 해양의 해역별로 자세히 살펴보면, 서해가 다른 해역에 비해 기온 증가가 약간 더 크게 나타났다(그림 2(b)). 이는 앞서 설명한 해양의 열적 성질과 장파복사 차이로 인한 기온 증가 외에도, 해역별 미세먼지(PM₁₀, PM_{2.5}) 및 블랙카본 농도의 분포와 연관이 있는 것으로 판단된다(그림 3과 4). 즉, 서해는 다른 해역에 비해 PM_{2.5} 중 블랙카본의 비율이 상대적으로 높고 에어로졸에 의한 산란과 흡수의 비를 나타내는 단일산란 알베도가 낮아서, 이로 인해 서해에서 상대적으로 빛의 흡수가 커져 기온 증가가 약간 더 크게 나타난 것으로 사료된다(Song *et al.*, 2017).

두 실험 간 풍속 차이를 평균적으로 살펴보면(그림 2(d)), 육지영역에서는 약간 감소(평균 -0.04

m s⁻¹, NF 대비 1.4% 감소)가, 해양영역에서는 미미한 증가(평균 +0.01 m s⁻¹, NF 대비 0.2% 증가)가 나타났다. 육지에서는 일사 감소로 인해 PBL 고도가 낮아지면서 대기안정도가 증가하고, 이에 따라 PBL 내 대기의 혼합 및 확산이 억제되며 풍속이 감소한 것으로 추정된다(Yoo *et al.*, 2024; Wang *et al.*, 2014). 이는 육지에서의 기상변화로 인해 미세먼지 농도가 증가할 가능성을 시사한다. 한편, 상대습도는 기온과 반대로 육지에서는 증가하는 경향(평균 +0.8%, NF 대비 1.7%)을 보였으며, 해양에서는 매우 미미한 감소(평균 -0.08%, NF 대비 0.1%)가 나타났다(그림 2(e)). 이는 일반적으로 포화수증기량이 기온에 따라 달라지기 때문으로, 기온이 높아지면 증발이 활발히 일어나 포화수증기량이 증가하여 상대습도가 낮아지고, 반대로 기온이 낮아지면 포화수증기량이 줄어들어 상

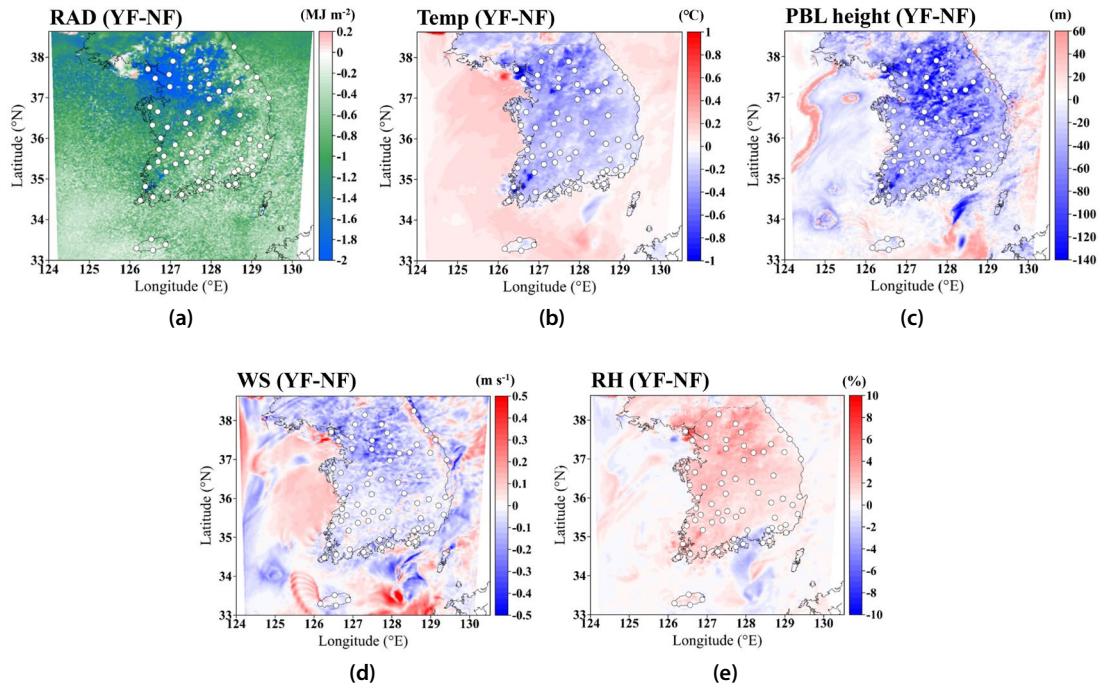


Fig. 5. Spatial distributions of the difference in meteorological variables ((a) solar radiation (RAD), (b) air temperature (Temp), (c) planetary boundary layer (PBL) height, (d) wind speed (WS), and (e) relative humidity (RH)) between YF and NF (YF minus NF) during the daytime of the highest $PM_{2.5}$ concentration day (March 5, 2019).

대습도가 높아지기 때문이다(Bencloski, 1982).

에어로졸 피드백 효과에 의한 기상 변화를 보다 자세히 살펴보기 위해, 연구기간 중 $PM_{2.5}$ 농도가 가장 높았던 3월 5일(최고 농도일)에 대해 추가적인 분석을 수행하였다(그림 5). 최고 농도일의 에어로졸 피드백이 기상에 미치는 영향(YF-NF)은 전체 연구기간의 공간분포와 유사하였으나, 그 영향의 크기는 더 크게 나타났다. 예를 들어, 최고 농도일 육지에서의 일사, 기온, PBL 고도, 풍속의 차이는 각각 평균 $-1.0 MJ m^{-2}$, $-0.2^{\circ}C$, $-50 m$, $-0.06 m s^{-1}$ 로 전체 연구기간($-0.54 MJ m^{-2}$, $-0.14^{\circ}C$, $-29 m$, $-0.04 m s^{-1}$)에 비해 약 1.5~2배 더 감소하였다. 한편, 최고 농도일 육지에서의 상대습도 차이는 $+1.6\%$ 로 전체 연구기간($+0.8\%$)에 비해 약 2배 정도 더 증가한 것으로 나타났다. 해양영역에서도 육지와 마찬가지로, 에어로졸 피드백 효과로 인한 기상 변화는 전체 연구기간과 유

사한 공간분포를 보였으며, 그 영향의 크기는 전체 연구기간에 비해 약간 높게(약 0.03~1.3배) 나타났다. 한편, 남한의 북서쪽(인천 인근) 해양 지역에서 일사의 약한 증가가 나타났는데, 이는 해당 지역의 기온, PBL 고도, 풍속의 증가와 상대습도의 감소에 영향을 미친 것으로 판단된다. 에어로졸의 피드백 효과에도 불구하고 해당 지역에서 일사의 약한 증가가 나타난 것은 이 지역의 에어로졸 단일산란 알베도와 비대칭 변수(asymmetry parameter, 산란의 방향성에 대한 지표)의 높은 수치와 일부 연관이 있는 것으로 보인다(그림 제외). 즉, 대기 중에서 빛이 산란될 때 해당 지역에서 비대칭 변수의 수치가 높게 나타나, 지표로의 전방산란이 많아져 지표 일사량이 증가한 것으로 추정된다(Song *et al.*, 2017; Seinfeld and Pandis, 2016; Lee and Kim, 2008). 그러나 해당 지역 주변의 관련 자료가 부족하여 에어로졸 피드백 효과로 인

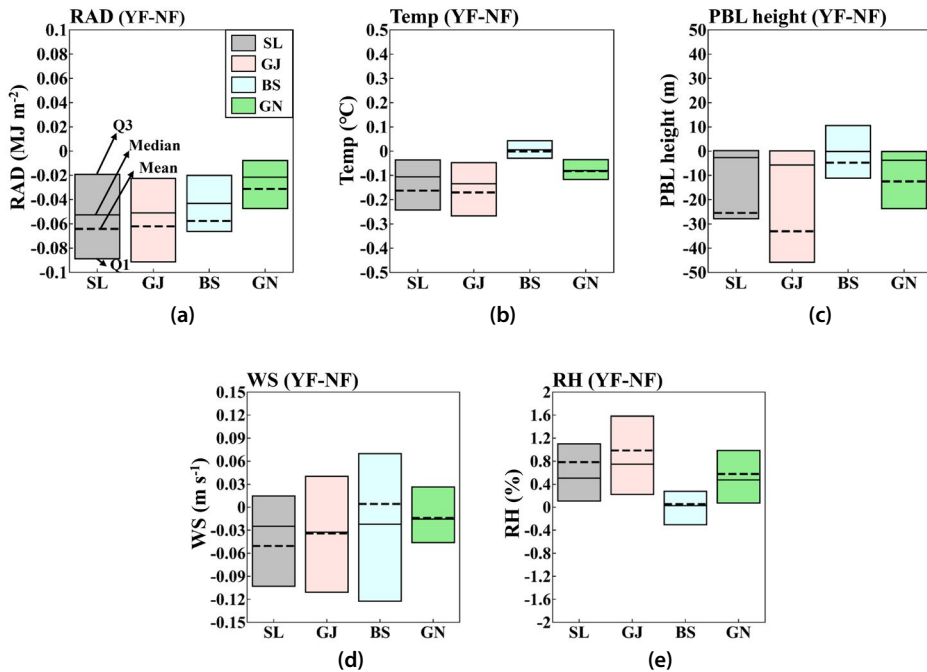


Fig. 6. Box plots of the meteorological variables ((a) solar radiation (RAD), (b) air temperature (Temp), (c) planetary boundary layer (PBL) height, (d) wind speed (WS), and (e) relative humidity (RH)) at four meteorological monitoring sites (SL, GJ, BS, and GN, Fig. 1) derived from the differences between YF and NF simulations (YF minus NF) during the daytime of entire simulation period (February 17~March 15, 2019). "Q1" and "Q3" within the box plots indicate the 25th and 75th percentiles, respectively.

한 일사 등 기상변화의 정확한 원인을 규명하는 데 여전히 한계가 있다.

그림 2와 5에서 나타난 바와 같이, 육지영역에서 에어로졸 피드백 효과에 의한 기상요소의 증감은 일부 지역에서 다르게 나타났다. 이에 지역적 피드백 효과의 차이를 세부적으로 분석하기 위해, 연구기간 동안 4개의 기상 관측지점에서 기상요소(일사, 기온, PBL 고도, 풍속, 상대습도)의 변화를 분석하였다(그림 6). 전반적으로, 남한의 서쪽(북서, 남서)에 위치한 SL과 GJ 지점에서의 에어로졸 피드백 효과에 따른 기상 영향이 동쪽(북동, 남동)에 위치한 GN과 BS 지점에 비해 더 크게 나타났다. 일사의 경우, SL과 GJ 지점에서는 각각 평균 -0.064 MJ m^{-2} , -0.062 MJ m^{-2} 감소하였으며, BS와 GN 지점에서는 각각 평균 -0.058 MJ m^{-2} , -0.031 MJ m^{-2} 감소하여 서쪽 지역에서 더 크게 감소한 경향을 보였다. 또한 나머지 기상요소

중 기온, PBL 고도, 상대습도는 서쪽에 위치한 SL(각각 평균 -0.16°C , -25.5 m , $+0.8\%$)과 GJ(-0.17°C , -33.1 m , $+1.0\%$)에서 동쪽에 위치한 GN(-0.08°C , -12.5 m , $+0.6\%$)과 BS(-0.001°C , -4.8 m , $+0.05\%$)에 비해 에어로졸 피드백 효과에 의한 증감이 더 크게 나타났다. 풍속의 경우도 마찬가지로 서쪽에 위치한 SL(-0.05 m s^{-1})과 GJ(-0.03 m s^{-1})에서 동쪽에 위치한 GN(-0.01 m s^{-1})에 비해 더 큰 감소가 나타났으며, 반면 BS 지점은 에어로졸 피드백 효과에 의한 풍속 변화가 거의 없었다.

3.2 에어로졸 직접 효과에 의한 기상변화가 미세먼지 농도에 미치는 영향

그림 7은 전체 연구기간과 최고 농도일에 대해 두 실험 간 미세먼지 농도 차이(YF-NF)의 공간분포를 나타낸다. 두 실험 간 PM₁₀과 PM_{2.5} 농도 차이의 공

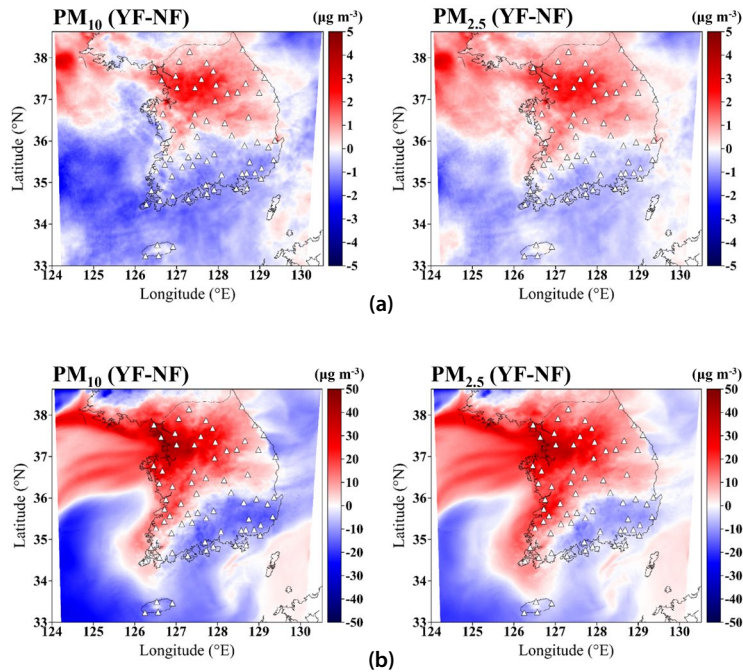


Fig. 7. Spatial distributions of the differences in PM₁₀ and PM_{2.5} concentrations between YF and NF simulations (YF minus NF) during (a) the daytime of entire simulation period (February 17~March 15, 2019) and (b) the daytime of the highest PM_{2.5} concentration day (March 5, 2019).

간분포는 서로 유사하였으며, 남한 대부분(북서쪽 지역이 가장 큼)에서 미세먼지(PM₁₀과 PM_{2.5}) 농도 차이가 증가하는 반면, 남쪽 지역(남서부 제외)에서는 감소하는 모습을 보였다. 전체 연구기간 동안, 남한 육지영역에서의 PM₁₀과 PM_{2.5} 평균 농도 차이는 각각 $+0.25 \mu\text{g m}^{-3}$ (NF 대비 약 1.0% 증가)와 $+0.49 \mu\text{g m}^{-3}$ (NF 대비 약 2.0% 증가) 증가하였다(그림 7(a)). 최고 농도일의 PM₁₀과 PM_{2.5} 평균 농도 차이는 각각 $+6.3 \mu\text{g m}^{-3}$ 와 $+8.8 \mu\text{g m}^{-3}$ 증가하였고(그림 7(b)), 이는 전체 연구기간의 평균 농도 차이에 비해 각각 약 25배와 18배 수준이었다. 전체 연구기간과 최고 농도일의 비교를 통해, 남한의 대부분 지역(주로 육지)에서 미세먼지 농도가 높을수록 에어로졸의 직접적 피드백 효과가 더 크게 나타나는 것을 알 수 있었다(Nguyen *et al.*, 2019; Yoo *et al.*, 2019). 이러한 미세먼지 농도 증가는 에어로졸 피드백 효과로 인한 기상 변화, 즉 일사의 감소에 영향을 미쳐 기온 및 PBL 고

도의 감소를 초래하고, 풍속 감소 및 상대습도 증가로 이어져 대기 중 오염물질의 축적과 확산 저지, 그리고 미세먼지의 흡습 성장(빠른 가스-입자 전환)이 주요 원인으로 작용하는 것으로 판단된다(Jung *et al.*, 2019; Seinfeld and Pandis, 2016; Wang *et al.*, 2014). 에어로졸 피드백 과정이 반복되면서 이러한 기상변화와 미세먼지 농도 변화는 지속적으로 상호 작용하여 영향을 미친다. 참고로, 본 연구에서는 YF와 NF 실험 모두 동일한 조건(초기 및 경계 조건, 배출량)에서 에어로졸 피드백 효과의 적용 여부만을 고려하였으므로 두 실험 간 바람장(풍향, 풍속) 차이는 크게 나타나지 않아(그림 제외), 미세먼지 농도 증가는 편서풍에 의한 수송 영향보다는 기상 및 농도 변화 간 피드백 효과가 주된 원인으로 판단된다.

그림 5와 7에서 알 수 있듯이, 최고 농도일의 남한 남서쪽 지역의 미세먼지 농도 증가는 북서쪽 지역에 비해 약 절반 수준인 반면(북서쪽 $30\sim 50 \mu\text{g m}^{-3}$ vs.

Table 2. Correlations of differences in meteorological variables and air pollutant concentrations between YF and NF simulations (YF minus NF) over land and ocean areas during the daytime of entire simulation period (February 17~March 15, 2019).

[A] Land area

	RAD (MJ m ⁻²)	Temp (°C)	PBL height (m)	WS (m s ⁻¹)	RH (%)
PM ₁₀ (μg m ⁻³)	-0.296**	-0.486**	-0.348**	-0.346**	0.455**
PM _{2.5} (μg m ⁻³)	-0.377**	-0.497**	-0.345**	-0.415**	0.482**
NO ₃ ⁻ (μg m ⁻³)	-0.311**	-0.533**	-0.409**	-0.360**	0.475**
SO ₄ ²⁻ (μg m ⁻³)	-0.525**	-0.379**	-0.188**	-0.470**	0.423**
NH ₄ ⁺ (μg m ⁻³)	-0.457**	-0.535**	-0.362**	-0.465**	0.517**
HNO ₃ (ppb)	0.038**	-0.092**	-0.019*	-0.043**	0.157**
NO _x (ppb)	-0.472**	-0.370**	-0.244**	-0.351**	0.295**

[B] Ocean area

	RAD (MJ m ⁻²)	Temp (°C)	PBL height (m)	WS (m s ⁻¹)	RH (%)
PM ₁₀ (μg m ⁻³)	0.034**	-0.022**	-0.094**	0.035**	0.143**
PM _{2.5} (μg m ⁻³)	-0.084**	0.191**	-0.075**	0.082**	0.018**
NO ₃ ⁻ (μg m ⁻³)	0.108**	-0.248**	-0.062**	-0.188**	0.149**
SO ₄ ²⁻ (μg m ⁻³)	-0.322**	0.579**	-0.002	0.335**	-0.184**
NH ₄ ⁺ (μg m ⁻³)	-0.234**	0.358**	-0.047**	0.228**	-0.036**
HNO ₃ (ppb)	-0.131**	0.104**	-0.071**	0.158**	0.129**
NO _x (ppb)	-0.150**	0.369**	-0.035**	0.161**	-0.100**

RAD: Solar radiation; Temp: Air temperature; PBL height: Planetary boundary layer height; WS: Wind speed; and RH: Relative humidity.

*,** Correlation is significant at 0.05 and 0.01 levels, respectively.

남서쪽 10~25 μg m⁻³), 에어로졸 피드백 효과로 인한 기상요소의 변화는 상대적으로 더 약한 수준이었다 (특히 풍속과 상대습도). 이날 북서쪽 지역의 풍속 감소는 -0.15~-0.45 m s⁻¹, 남서쪽 지역은 -0.05~-0.15 m s⁻¹로 나타났으며, 상대습도 증가는 각각 2~8%와 1~5% 정도였다. 남서쪽 지역에서 풍속 감소와 상대습도 증가의 크기는 더 작았지만, 이는 육지영역의 전체 평균보다 높은 수준이었다. 이러한 차이는 북서쪽 지역에 비해 남서쪽 지역의 미세먼지 농도가 상대적으로 낮아 에어로졸 피드백 효과가 더 작게 나타났기 때문으로 판단된다. 이에 따라 북서쪽 지역에 비해 일사의 감소가 작았고, 이로 인해 기온 및 PBL 고도의 감소도 상대적으로 더 작게 나타나, 결국 남서쪽 지역에서는 풍속 감소가 더 적었고(대기확산 억제 약화), 기온 감소에 따른 상대습도 증가도 더 약한 변화를 보인 것으로 사료된다.

본 연구에서 분석한 두 실험 간 기상 및 미세먼지

농도 차이를 살펴보면, 육지영역에서는 대체로 일사, 기온, PBL 고도, 풍속의 감소와 상대습도의 증가, 그리고 미세먼지 (PM₁₀ 및 PM_{2.5}) 농도가 증가하는 패턴을 보였다(남쪽 제외). 반면, 해양영역에서는 일사와 상대습도의 감소, 기온, PBL 고도, 풍속의 약한 증가, 그리고 미세먼지 농도의 감소와 증가가 모두 나타나는 패턴이었다. 이러한 공간분포 특성을 보다 명확히 해석하기 위해, 본 연구에서는 에어로졸 피드백 효과에 따른 기상요소와 미세먼지 농도 차이 간의 상관성을 분석하였다(표 2). 전반적으로, 두 실험 간 기상요소와 미세먼지 농도 차이에 대한 상관성(양 또는 음의 상관)은 각 변수의 공간분포 패턴과 대부분 잘 일치하는 경향을 보였다. 예를 들어, 육지영역에서 미세먼지 농도는 일사, 기온, PBL 고도, 풍속과는 음의 상관(-0.296 ≤ r ≤ -0.497), 상대습도와는 양의 상관(0.455 ≤ r ≤ 0.482)을 보였으며, 이는 유의수준 0.01과 0.05에서 통계적으로 유의하게 나타났다. 한편, 해

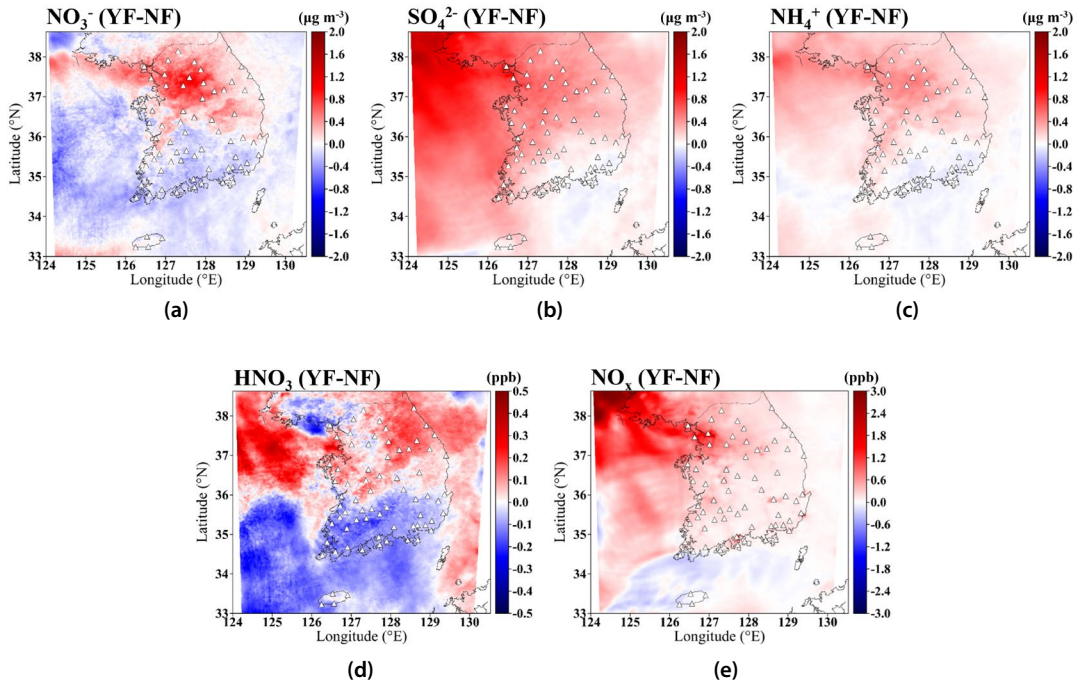


Fig. 8. Spatial distributions of the differences in secondary inorganic aerosols ((a) NO_3^- , (b) SO_4^{2-} , and (c) NH_4^+) and precursors ((d) HNO_3 and (e) NO_x) between YF and NF simulations (YF minus NF) during the daytime of entire simulation period (February 17~March 15, 2019).

양영역에서는 미세먼지 농도 차이가 크게 나타났지만, 기상요소의 차이는 비교적 작아 이들 간 상관관계가 육지영역보다 약하게 나타났으며, 통계적으로 유의하였다(표 2).

본 연구에서는 에어로졸 피드백 효과(YF-NF)로 인해 육지의 남쪽 지역에 나타난 미세먼지 농도 감소의 원인을 살펴보기 위해, 두 실험 간 $\text{PM}_{2.5}$ 구성 성분 중 2차 무기 에어로졸인 질산염(NO_3^-), 황산염(SO_4^{2-}), 암모늄(NH_4^+)과 질산염의 기체상 전구물질인 질산(HNO_3), 질소산화물(NO_x)의 농도 차이의 공간분포를 분석하였다(그림 8). 전반적으로, 남쪽 지역에서 2차 무기 성분 중 NO_3^- 의 농도 감소가 $\text{PM}_{2.5}$ 의 농도 패턴 및 크기에 가장 크게 기여한 것으로 나타났다. 또한 NO_3^- 전구물질의 공간분포를 보면, HNO_3 이 NO_3^- 와 매우 유사한 공간분포를 보여 남쪽 지역에서 HNO_3 의 농도 감소가 NO_3^- 의 농도 패턴에 영향을 준 것으로 나타났다. 일반적으로 동일한 오염

물질 배출량에서 풍속 감소와 상대습도 증가는 주변 기체 분자와의 화학반응을 가속화하여(빠른 가스-입자 전환) 입자 크기의 성장률을 높이고, 결과적으로 2차 미세먼지 농도를 증가시킬 수 있다(Song *et al.*, 2021; Shon *et al.*, 2013). 그림 2(d)와 2(e)를 보면, 남한의 북쪽에 비해 남쪽 지역에서 풍속의 감소 폭과 상대습도의 증가 폭이 매우 작게 나타났는데, 이는 남쪽 지역의 미세먼지 농도 증가 폭을 줄이는데 기여했을 것으로 보인다. 결론적으로, 남쪽 지역의 미세먼지 농도 감소는 주로 NO_3^- 및 HNO_3 의 농도 감소와 일부 기상조건 차이(풍속 및 상대습도 변화 폭)가 복합적으로 작용한 것으로 판단된다. 에어로졸 피드백 과정이 반복되면서 이러한 성분별 농도 및 기상요소의 변화는 다시 미세먼지 농도 감소에 영향을 미친다. 한편, 남한 전역에 나타난 SO_4^{2-} 와 NH_4^+ 의 농도 증가는 $\text{PM}_{2.5}$ 와 PM_{10} 농도 증가에 일부 영향을 미친 것으로 사료된다. 이 외에도 성분별(NO_3^- , SO_4^{2-} ,

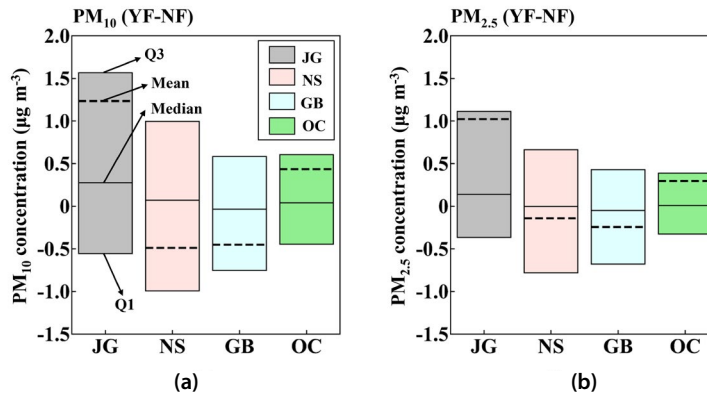


Fig. 9. Box plots of particulate matter (a) PM₁₀ and (b) PM_{2.5} at four air quality monitoring sites (JG, NS, GB, and OC, Fig. 1) derived from the differences between YF and NF simulations (YF minus NF) during the daytime of entire simulation period (February 17~March 15, 2019). "Q1" and "Q3" within the box plots indicate the 25th and 75th percentiles, respectively.

NH₄⁺) 및 전구물질 농도 차이와 기상요소(풍속, 상대습도) 차이의 공간분포는 상관분석 결과와 대체로 일치하였다. 육지에서는 모든 물질이 풍속과 음의 상관 ($-0.043 \leq r \leq -0.470$), 상대습도와 양의 상관 ($0.157 \leq r \leq 0.517$)을 보였다. 해양에서는 NO₃⁻가 풍속과 음의 상관 ($r = -0.188$), 상대습도와 양의 상관 ($r = 0.149$)을 보였으며, 나머지 성분들은 대체로 풍속과 양의 상관 ($0.158 \leq r \leq 0.335$), 상대습도와 음의 상관 ($-0.036 \leq r \leq -0.184$)을 나타냈다. 모든 결과는 유의수준 0.01과 0.05에서 통계적으로 유의하였다.

그림 7에서 알 수 있듯이, 에어로졸 피드백 효과(YF-NF)에 의한 미세먼지 농도 변화는 지역별로 다른 양상을 보였다. 이러한 지역적 차이를 세부적으로 분석하기 위해 4개의 대기질 관측지점(그림 1)에서 PM₁₀ 및 PM_{2.5}의 농도 변화를 살펴보았다(그림 9). 에어로졸 피드백 효과에 의한 PM₁₀과 PM_{2.5} 농도 변화를 보면, 남한의 북쪽에 위치한 서울 JG와 강릉 OC 지점에서는 평균 농도가 증가하고(JG에서 가장 크게 증가), 남쪽의 광주 NS와 부산 GB 지점에서는 평균 농도가 비슷하게 감소하는 패턴을 보였다. 예를 들어, JG 지점은 PM₁₀과 PM_{2.5}의 평균 농도가 각각 $+1.23 \mu\text{g m}^{-3}$, $+1.02 \mu\text{g m}^{-3}$ 정도 증가하고, OC 지점은 각각 $+0.44 \mu\text{g m}^{-3}$, $+0.30 \mu\text{g m}^{-3}$ 로 증가하였다. 반면,

NS 지점은 평균적으로 $-0.49 \mu\text{g m}^{-3}$, $-0.14 \mu\text{g m}^{-3}$ 정도, GB 지점은 각각 $-0.45 \mu\text{g m}^{-3}$, $-0.24 \mu\text{g m}^{-3}$ 정도 감소하였다. 이러한 지역적 차이는 앞서 설명한 바와 같이 대상지역의 기상조건(일사, PBL 고도, 풍속 등)의 차이와 2차 이온성분 및 전구물질(특히, NO₃⁻와 HNO₃)의 농도 차이가 복합적으로 영향을 준 것으로 사료된다.

본 연구에서는 에어로졸 직접적 피드백 효과에 대한 수치모델링(YF와 NF 실험)의 검증에 정량적으로 분석하였다. 대상지역 내 각 70개의 기상(SL, GJ, BS, GN 포함) 및 대기질 관측지점(JG, NS, GB, OC 포함)을 대상으로 기상요소(일사, 기온, 풍속, 상대습도)와 미세먼지(PM₁₀, PM_{2.5}) 농도에 대한 통계적 분석(IOA, RMSE, MBE)을 수행하였다(표 3). 전반적으로 모든 지점("All")에서의 기상요소 및 미세먼지 농도는 에어로졸 피드백 효과를 고려한 YF 실험이 고려하지 않은 NF 실험에 비해 관측값에 좀 더 가깝게 모의되었다. 모든 지점에서 YF 실험에 대한 일사, 기온, 풍속, 상대습도의 RMSE는 각각 0.49 MJ m^{-2} , 3.41°C , 1.60 m s^{-1} , 17.5% 이하로, NF 실험에서는 각각 0.56 MJ m^{-2} , 3.48°C , 1.70 m s^{-1} , 18.0% 이하로 나타나 YF 실험에서 더 낮은 오차를 보였다. 또한 모든 지점에서 YF 실험에 대한 PM₁₀과 PM_{2.5}의 RMSE는 각각

Table 3. Statistical evaluation of the several meteorological variables and the concentrations of particulate matter (PM₁₀ and PM_{2.5}) between observed and simulated values obtained from both YF and NF simulations. The results were compared using observations from several monitoring sites ("All", 70 sites for both meteorological variables (including SL, GJ, BS, and GN) and PM (including JG, NS, GB, and OC), as shown in Fig. 1) during the entire simulation period (February 17~March 15, 2019).

[A] Meteorological variables

Sites	RAD (MJ m ⁻²)			Temp (°C)			WS (m s ⁻¹)			RH (%)		
	IOA ^a	RMSE ^b	MBE ^c	IOA ^a	RMSE ^b	MBE ^c	IOA ^a	RMSE ^b	MBE ^c	IOA ^a	RMSE ^b	MBE ^c
SL	0.98/0.92 ^d	0.42/0.52	0.20/0.27	0.91/0.91	3.08/3.12	-2.00/-1.92	0.70/0.68	1.18/1.26	0.52/0.58	0.86/0.85	17.5/18.0	9.28/8.99
GJ	0.98/0.92	0.45/0.54	0.10/0.16	0.93/0.93	2.52/2.60	-0.68/-0.63	0.67/0.67	1.38/1.48	0.77/0.85	0.89/0.88	15.9/16.6	4.79/4.37
BS	0.98/0.95	0.42/0.47	0.10/0.16	0.94/0.94	1.76/1.79	-0.89/-0.85	0.67/0.66	1.55/1.61	0.56/0.60	0.88/0.86	13.0/13.8	4.11/3.62
GN	0.98/0.95	0.38/0.43	0.14/0.18	0.87/0.87	3.41/3.48	-2.20/-2.21	0.67/0.64	1.33/1.43	0.01/-0.03	0.87/0.87	15.2/15.6	6.29/6.37
All	0.93/0.91	0.49/0.56	0.21/0.26	0.95/0.95	2.21/2.29	-0.52/-0.47	0.74/0.72	1.60/1.70	0.90/0.95	0.90/0.89	14.3/15.1	1.43/0.81

[B] Particulate matter

Sites	PM ₁₀ (μg m ⁻³)			PM _{2.5} (μg m ⁻³)		
	IOA ^a	RMSE ^b	MBE ^c	IOA ^a	RMSE ^b	MBE ^c
JG	0.80/0.76 ^d	32.67/35.25	-18.71/-20.87	0.83/0.79	23.49/25.09	-12.18/-14.12
NS	0.75/0.74	40.93/43.55	-29.37/-30.41	0.77/0.74	31.64/34.60	-20.06/-21.47
GB	0.67/0.66	28.52/29.62	-19.65/-20.43	0.70/0.68	20.77/22.01	-13.46/-14.25
OC	0.69/0.66	29.48/31.98	-19.09/-20.32	0.75/0.69	20.38/22.57	-13.25/-14.32
All	0.76/0.73	34.87/37.23	-21.42/-22.54	0.79/0.75	25.40/27.70	-13.70/-14.96

RAD: Solar radiation; Temp: Air temperature; WS: Wind speed; and RH: Relative humidity.

^{a,b,c}IOA: index of agreement, RMSE: root mean square error, and MBE: mean bias error.

^dYF/NF.

40.9 μg m⁻³과 31.6 μg m⁻³ 이하로, NF 실험에서는 각각 43.6 μg m⁻³과 34.6 μg m⁻³ 이하로 나타나 YF 실험에서 오차가 작게 나타났다. IOA의 경우, 모든 지점의 YF 실험에서는 4개 기상요소에 대해 0.67 (풍속)~0.98 (일사), 미세먼지 농도에 대해 0.67 (PM₁₀)~0.83 (PM_{2.5})로 나타났고, NF 실험에서는 기상요소에 대해 0.64 (풍속)~0.95 (일사), 미세먼지 농도에 대해 0.66 (PM₁₀)~0.79 (PM_{2.5})로 모의되었다. 이 외에도 두 실험 모두 기상요소 중 일사, 풍속, 상대습도는 대부분 과대모의, 그리고 기온, PM₁₀, PM_{2.5}는 과소모의가 나타났으며, 에어로졸 피드백 효과를 고려한 YF 실험에서 과대모의 및 과소모의 경향이 일부 완화되는 모습을 확인하였다.

본 연구에서 수행된 두 실험 간 기상요소(일사, 기온, 풍속, 습도)와 미세먼지(PM₁₀, PM_{2.5})의 통계분석에서 RMSE 차이가 크지 않아 (예: 0.07 MJ m⁻²,

0.07°C, 0.1 m s⁻¹, 0.5%, 2.7 μg m⁻³, 3.0 μg m⁻³), YF 실험 결과가 충분히 향상된 모의 수준인지는 명확하지 않은 것으로 사료된다. 따라서 각 요소별 두 실험에 대한 통계적 유의성을 검증하기 위해 T-test를 추가로 수행하였다(표 제외). 그 결과, 일사, 기온, 습도의 P-value는 모두 < 0.001로 추정되었으며, 풍속과 PM_{2.5}의 P-value는 각각 8.78 × 10⁻³과 1.57 × 10⁻²로 나타나 두 실험 간 오차 차이는 작지만 통계적으로 유의미한 것으로 판단된다. 반면, PM₁₀의 P-value는 0.876으로 추정되어 두 실험 간 오차 차이가 통계적으로 유의미하지 않은 것으로 나타났다. 또한 PM₁₀의 경우, 관측값과 모의값 간 농도 차이에 대한 상관계수는 0.978로 매우 높았으며 (P-value는 < 0.001), 두 실험 간 농도 차이는 오차가 거의 없는 매우 높은 선형관계를 보였다. 또한 본 연구의 수치모델링 검증은 WRF-CMAQ 양방향 결합모델을 사용한 여러 선

행연구의 결과와 유사한 수준으로 나타났다(Yoo *et al.*, 2024, 2019; Jung *et al.*, 2021). Yoo *et al.* (2019)의 연구결과에 따르면, 일사, 기온, 풍속의 RMSE는 YF 실험에서 0.45 MJ m^{-2} , 1.96°C , 1.82 m s^{-1} , NF 실험에서 0.58 MJ m^{-2} , 2.01°C , 1.85 m s^{-1} 으로 나타나, 각각 0.13 MJ m^{-2} , 0.05°C 와 0.03 m s^{-1} 차이만큼 향상되었다. Yoo *et al.* (2024)의 연구에서는 두 실험 간 기온의 IOA는 0.93으로 같았고 풍속의 IOA 차이는 0.01 정도였다(YF: 0.73, NF: 0.72). 또한 Jung *et al.* (2021) 연구에 의하면, PM_{2.5}의 IOA는 YF 실험에서 0.61~0.79, NF 실험에서 0.61~0.77로 나타나 두 실험 간 차이는 미미하였다. 따라서 본 연구의 수치모의 결과는 통계적 검증과 선행연구와의 비교를 통해 에어로졸의 직접적 피드백 효과가 기상과 미세먼지에 미치는 영향을 분석하는 데 합리적인 것으로 판단된다.

4. 요약 및 결론

본 연구에서는 고해상도 WRF-CMAQ 양방향 결합모델을 이용하여 남한지역의 고농도 PM_{2.5} 사례 시(2019년 2월 17일~3월 15일) 에어로졸의 직접 피드백 효과가 기상 및 미세먼지(PM₁₀, PM_{2.5}) 농도에 미치는 영향을 분석하였다. 이러한 분석은 에어로졸 피드백 효과를 고려한 YF 실험과 고려하지 않은 NF 실험과의 기상요소 및 미세먼지 농도 차이를 계산하여 정량화하였다. 연구기간 동안 에어로졸의 피드백 효과(YF-NF)는 대상지역에서 태양복사의 소산으로 인한 일사의 감소에 영향을 주었으며, 주로 육지영역(특히 북서쪽)에서 기온, PBL 고도, 풍속의 감소와 상대습도의 증가를 유발시켰다. 이러한 기상변화는 오염물질의 대기확산을 저지시켜 남한의 대부분(특히, 수도권) 지역에서 미세먼지(PM₁₀, PM_{2.5}) 농도를 증가시키는 데 기여하였다. 또한 최고 농도일(3월 5일)에 대한 에어로졸의 피드백 효과는 기상 및 미세먼지 모두 전체 연구기간에 비해 더 크게 나타났다. 이 외에도 남한의 남쪽 지역은 에어로졸 피드백 효과로 인

해 오히려 미세먼지 농도의 감소가 나타났는데, 이는 해당지역의 NO₃⁻와 HNO₃와 같은 2차 에어로졸 및 전구물질의 농도 감소와 함께 일부 기상조건(풍속과 상대습도의 작은 변화폭)의 차이가 복합적으로 영향을 준 것으로 사료된다.

본 연구를 통해 에어로졸의 피드백 효과는 대상지역의 기상 및 미세먼지 농도 변화에 직·간접적으로 영향을 준다는 것을 확인하였으며, 특히 일사, 기온, PBL 고도 등에 미치는 효과는 해양영역에 비해 육지영역에서 상대적으로 훨씬 크게 나타난 것을 알 수 있었다. 이는 육지와 해양 사이의 열적 성질 차이와 장파복사에 의한 대기 가열의 차이 등 복합적 영향에 기인한 것으로 사료된다. 또한 대기 중 미세먼지 농도가 높을수록(특히, 북서쪽 지역) 에어로졸의 피드백 효과가 더 크게 나타났으며, 지역에 따라 그 효과가 다소 차이가 있음을 확인하였다. 이러한 분석에 있어 다양한 자료를 이용하여 객관성을 더 높이고 싶었으나, 해양에서의 관측망 부족과 에어로졸 성분 농도 및 연직 관측 자료 등 자료 수집의 한계로 인해 에어로졸의 직접적 효과에 따른 기상과 미세먼지 영향을 명확하게 이해하는 데 어려움이 있었다. 이 외에도 본 연구에서 사용된 WRF-CMAQ 양방향 결합모델은 현재 에어로졸의 직접 효과만 고려할 수 있도록 설계되어 있어, 에어로졸의 간접 효과를 반영하지 못하는 한계점이 있다. 향후 이러한 한계점을 보완하고 보다 향상된 모델 입력변수(기상장, 배출량 등)를 구축하여 여러 지역에 대한 사례 연구를 수행한다면, 대기 중 에어로졸의 직접 효과와 기상·기후 및 오염물질과의 상호 피드백 영향을 이해함에 있어 보다 신뢰성 있는 결과를 확보할 수 있을 것으로 기대된다.

감사의 글

이 논문은 2020년도 정부(미래창조과학부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업임(NRF-2020R1A2C2011081). 또한 이 논문은

2023년도 해양수산부 재원으로 해양수산과학기술진흥원의 지원을 받아 수행된 연구임 (RS-2023-00256330, 쿠로시오 해류로 인한 한반도 해양위기 대응기술 개발).

References

- Adelman, Z., Baek, B.H. (2012) Methods for Estimating Meteorology-based Emissions Temporal Profiles for Livestock and Residential Wood Combustion Sources. Institute for the Environment. University of North Carolina at Chapel Hill, 1-25.
- 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>
- Baek, J.-Y., Song, S.-K., Han, S.-B., Cho, S.-B. (2022) Contributions of Emissions and Atmospheric Physical and Chemical Process to High PM_{2.5} Concentrations on Jeju Island during Spring 2018, *Journal of Environmental Science International*, 31(7), 637-652, (in Korean with English abstract). <https://doi.org/10.5322/JESI.2022.31.7.637>
- Batterman, S., Cook, R., Justin, T. (2015) Temporal Variation of Traffic on Highways and the Development of Accurate Temporal Allocation Factors for Air Pollution Analyses, *Atmospheric Environment*, 107, 351-363. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2015.02.047>
- Bencloski, J.W. (1982) Air Temperature and Relative Humidity: A Simulation, *Journal of Geography*, 81(2), 64-65. <https://doi.org/10.1080/00221348208980713>
- Byun, D., Ching, J.K.S. (1999) Science Algorithms of The EPA Models-3 Community Multiscale Air Quality (CMAQ) Modeling System, U.S. Environmental Protection Agency (US EPA), EPA/600/R-99, 30.
- Byun, D., Schere, K.L. (2006) Review of The Governing Equations, Computational Algorithms, and Other Components of The Models-3 Community Multiscale Air Quality (CMAQ) Modeling System, *Applied Mechanics Reviews*, 59(2), 51-77. <https://doi.org/10.1115/1.2128636>
- 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., 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>
- Crippa, M., Guizzardi, D., Muntean, M., Schaaf, E., Monforti-Ferrario, F., Banja, M., Pagani, F., Solazzo, E. (2022) EDG AR v6.1 global air pollutant emissions.
- Danielson, J.J., Gesch, D.B. (2011) Global Multi-resolution Terrain Elevation Data 2010 (GMTED2010) (USGS Numbered Series No. 2011-1073), Open-File Report.
- Friedl, M.A., Sulla-Menashe, D., Tan, B., Schneider, A., Ramankutty, N., Sibley, A., Huang, X. (2010) MODIS Collection 5 Global Land Cover: Algorithm Refinements and Characterization of New Datasets, *Remote Sensing of Environment*, 114(1), 168-182. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2009.08.016>
- Guenther, A.B., Jiang, X., Heald, C.L., Sakulyanontvittaya, T., Duhl, T.A., Emmons, L.K., Wang, X. (2012) The Model of Emissions of Gases and Aerosols from Nature version 2.1 (MEGAN2.1): An Extended and Updated Framework for Modeling Biogenic Emissions, *Geoscientific Model Development*, 5(6), 1471-1492. <https://doi.org/10.5194/gmd-5-1471-2012>
- Huang, Y., Lu, X., Fung, J.C., Wong, D.C., Li, Z., Chen, Y., Chen, W. (2023) Investigating Southeast Asian biomass burning by the WRF-CMAQ two-way coupled model: Emission and direct aerosol radiative effects, *Atmospheric Environment*, 294, 119521. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2022.119521>
- 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.

- Jacob, D.J., Winner, D.A. (2009) Effect of Climate Change on Air Quality, *Atmospheric Environment*, 43, 51-63. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2008.09.051>
- 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>
- Kain, J.S. (2004) The Kain-Fritsch Convective Parameterization : An Update, *Journal of Applied Meteorology*, 43(1), 170-181. [https://doi.org/10.1175/1520-0450\(2004\)043<0170:TKCPAU>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0450(2004)043<0170:TKCPAU>2.0.CO;2)
- 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>
- Kim, S., Moon, N., Byun, D.W. (2008) Korea Emissions Inventory Processing Using the US EPA's SMOKE System, *Asian Journal of Atmospheric Environment*, 2(1), 34-46.
- Korea Meteorological Administration (KMA) (2024) Report of Global Atmosphere Watch 2023, KMA, 134pp.
- Lee, K.H., Kim, Y.J. (2008) Sensitivity of COMS/GOCI measured top-of-atmosphere reflectances to atmospheric aerosol properties, *Korean Journal of Remote Sensing*, 24(6), 559-569, (in Korean with English abstract). <https://doi.org/10.7780/kjrs.2008.24.6.559>
- Lee, S., Ho, C.H., Lee, Y.G., Choi, H.J., Song, C.K. (2013) Influence of Transboundary Air Pollutants from China on the High-PM₁₀ Episode in Seoul, Korea for the Period October 16-20, 2008, *Atmospheric Environment*, 77, 430-439. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2013.05.006>
- Li, J., Yu, S., Chen, X., Zhang, Y., Li, M., Li, Z., Song, Z., Liu, W., Li, P., Xie, M., Xing, J. (2022) Evaluation of the WRF-CMAQ Model Performances on Air Quality in China with the Impacts of the Observation Nudging on Meteorology, *Aerosol and Air Quality Research*, 22(4), 220023. <https://doi.org/10.4209/aaqr.220023>
- 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>
- Montgomery, A., Schnell, J.L., Adelman, Z., Janssen, M., Horton, D.E. (2023) Simulation of Neighborhood-Scale Air Quality With Two-Way Coupled WRF-CMAQ Over Southern Lake Michigan-Chicago Region, *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 128, e2022JD037942. <https://doi.org/10.1029/2022JD037942>
- National Institute of Environmental Research (NIER) (2020) Annual Report of Air Quality in Korea 2019, https://www.airkorea.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>
- National Institute of Environmental Research (NIER) (2023) Annual Report of Air Quality in Korea 2022, https://www.airkorea.or.kr/web/detailViewDown?pMENU_NO=125
- Nguyen, G.T.H., Shimadera, H., Sekiguchi, A., Matsuo, T., Kondo, A. (2019) Investigation of Aerosol Direct Effects on Meteorology and Air Quality in East Asia by Using an Online Coupled Modeling System, *Atmospheric Environment*, 207, 182-196. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2019.03.017>
- 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>
- Penner, J.E., Andreae, M.O., Annegarn, H., Barrie, L., Feichter, J., Hegg, D. (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 Meteorology

- logical Model, *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 46(9), 1396-1409. <https://doi.org/10.1175/JAM2534.1>
- Pleim, J.E. (2006) A Simple, Efficient Solution of Flux-Profile Relationships in the Atmospheric Surface Layer, *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 45(2), 341-347. <https://doi.org/10.1175/JAM2339.1>
- 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.
- Shon, Z.-H., Ghosh, S., Kim, K.-H., Song, S.-K., Jung, K., Kim, N.-J. (2013) Analysis of Water-soluble Ions and Their Precursor Gases over Diurnal Cycle, *Atmospheric research*, 132, 309-321. <https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2013.06.003>
- So, Y.-Y., Song, S.-K., Choi, Y.-N. (2019). Comparison of the Concentration Characteristics and Optical Properties of Aerosol Chemical Components in Different Regions, *Journal of Environmental Science International*, 28(1), 107-123, (in Korean with English abstract). <https://doi.org/10.5322/JESI.2019.28.1.107>
- 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., 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., Kim, Y.-K., Kang, Y.-H., Jung, J.-H. (2013) Influence of an Enhanced Traffic Volume around Beaches in the Short Period of Summer on Ozone, *Atmospheric Environment*, 71, 376-388. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2013.02.003>
- 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>
- Sun, D.-H., Song, S.-K., Cho, S.-B., Moon, S.-H. (2023) Long-term Trend Analysis in Biomass Burning Emissions and Their Impacts on Aerosols and CO Concentrations in South Korea, *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment*, 39(3), 351-371, (in Korean with English abstract). <https://doi.org/10.5572/KOSAE.2023.39.3.351>
- 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>
- 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>
- Xiu, A., Pleim, J.E. (2001) Development of a Land Surface Model. Part I: Application in a Mesoscale Meteorological Model, *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 40(2), 192-209. [https://doi.org/10.1175/1520-0450\(2001\)040%3C0192:DOALSM%3E2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0450(2001)040%3C0192:DOALSM%3E2.0.CO;2)
- 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*, 1-14. <https://doi.org/10.1007/s11869-024-01538-x>
- Yoo, J.-W., Park, S.-Y., Jeon, W.-B., Kim, D.-H., Lee, H. W., Lee, S.-H., Kim, H.-G. (2017) Effect of Aerosol Feedback on Solar Radiation in the Korean Peninsula using WRF-CMAQ Two-way Coupled Model, *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment*, 33(5), 435-444, (in Korean with English abstract). <https://doi.org/10.5572/KOSAE.2017.33.5.435>
- 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>

Authors Information

김진승 (제주대학교 지구해양융합학부 지구해양전공 석사과정)
(jins1503@jejunu.ac.kr)

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

조성빈 (제주대학교 지구해양융합학부 지구해양전공 석박사통합과정) (cho2285@jejunu.ac.kr)