

논문

시도별 PM_{2.5} 농도에 대한 지형효과 분석

Terrain Effect on Provincial PM_{2.5} Concentrations in South Korea

정성은, 강윤희¹⁾, 김은혜^{1,2)}, 김순태^{3),*}

아주대학교 환경공학과, ¹⁾아주대학교 환경연구소,
²⁾국립군산대학교 환경공학과, ³⁾아주대학교 환경안전공학과

접수일 2024년 9월 28일
수정일 2024년 11월 12일
채택일 2024년 11월 13일

Received 28 September 2024
Revised 12 November 2024
Accepted 13 November 2024

Seongeun Jeong, Yoon-Hee Kang¹⁾, Eunhye Kim^{1),2)}, Soontae Kim^{3),*}

Department of Environmental Engineering, Ajou University, Suwon, Republic of Korea

¹⁾Environmental Research Institute, Ajou University, Suwon, Republic of Korea

²⁾Environmental Engineering, Kunsan National University, Gunsan, Republic of Korea

³⁾Department of Environmental and Safety Engineering, Ajou University, Suwon, Republic of Korea

*Corresponding author

Tel : +82-(0)31-219-2511

E-mail : soontaeim@ajou.ac.kr

Abstract In this study, we investigated the terrain effect on PM_{2.5} concentrations across provinces in South Korea, focusing on the winter season, when PM_{2.5} levels typically increase. South Korea's terrain, characterized by lower elevations in the west and higher elevations in the east, can significantly influence PM_{2.5} concentrations during the winter when prevailing winds are northwesterly. We employed the Community Multiscale Air Quality model coupled with the Weather Research and Forecasting model to simulate two scenarios: one with actual terrain heights and another with terrain flattened to 50 meters. The terrain affected dispersion and transport of air pollutants, leading to changes in PM_{2.5} concentrations across provinces, ranging from -7.6%~3.0%. Specifically, PM_{2.5} concentrations increased in northwestern provinces, such as the Seoul Metropolitan Area, while they decreased in southeastern provinces. The terrain effect on the local emissions impact (LEI) of PM_{2.5} concentrations in South Korea ranged from -11.3% to 6.3%, which was relatively more significant compared to the impact of long-range transport (LTI; -8.7% to 2.3%). However, in terms of absolute concentration changes, the LEI varied from -1.1 µg/m³ to 0.6 µg/m³, while the LTI ranged from -1.8 µg/m³ to 0.6 µg/m³, indicating that the LTI had a greater overall impact under the given conditions during the study period. Interestingly, in some provinces, PM_{2.5} concentrations decreased despite reduced ventilation. These results suggest that terrain plays a crucial role not only in the dilution and dispersion of locally emitted air pollutants but also in the transport of both transboundary and inter-provincial air pollutants. By hindering the northwesterly-to-southeasterly transport, particularly on elevated PM_{2.5} days (> 35 µg/m³), the terrain in South Korea reduced the nation-wide, population-weighted PM_{2.5} concentration by 16%. Considering the decrease in LTI, and as the LEI becomes more significant in the future, understanding the role of terrain will be crucial for effectively reducing PM_{2.5} levels and minimizing human exposure.

Key words: Terrain effect, Dispersion and transport, Long-range transport impact, Local emissions impact, Population exposure

1. 서론

국내 초미세먼지 (Particulate Matter with an aerodynamic diameter less than 2.5 µm; PM_{2.5}) 농도는 2019년 이후 감소 추세를 보이거나, 2022년에 관측된 연평

군 PM_{2.5} 농도는 18 µg/m³로 WHO (Worldwide Health Organization)의 권고치 (5 µg/m³)는 물론 국내 대기환경기준 (15 µg/m³)을 초과하였다 (KMOE, 2023). PM_{2.5} 농도 개선을 위해서는 대기질 대책 수립에 앞서, 농도에 영향을 미치는 배출과 기상과 같은

동인의 역할을 정량적으로 이해하는 것이 중요하다 (Bae *et al.*, 2022b; Seo *et al.*, 2018; Kim *et al.*, 2017). 특히, 기상 요인은 PM_{2.5} 농도의 증가와 감소에 모두 영향을 줄 수 있는 사례가 보고된 바 있다 (Cha *et al.*, 2023; Bae *et al.*, 2021a). 이처럼 풍속과 혼합고 등 다양한 기상 변수는 시간에 따른 변동을 보이며 대기질에 직간접적인 영향을 미친다.

이에 반해 지형 및 토지 피복과 같은 요인들은 단기적인 시간 변동성은 작으나 다른 요인들과 마찬가지로 기상과 대기질에 영향을 미친다 (Wen *et al.*, 2022; Park, 2021; Kim *et al.*, 2017). 국내 지형은 동해안의 경우 백두대간이 남북 방향으로 뻗어 있어 전반적으로 해발 고도가 높다. 이에 반해 서해안 지역은 해발 고도가 낮으며, 평지가 많이 분포한다. 이러한 ‘동고서저’ 형태의 국내 지형은 기상 조건은 물론 지역별 PM_{2.5} 농도에도 영향을 미칠 수 있다 (Nam *et al.*, 2023). 지형은 대기정체 현상과 관련되어 있으며 (Ryoo *et al.*, 2019), 소백산맥을 비롯한 여러 시도를 가로지르는 산맥은 시도 간 PM_{2.5}의 이송을 방해할 수 있음이 언급되었다 (Allabakash *et al.*, 2022). 이에 국내 지형에 의한 대기정체 및 확산 조건의 변화가 시도별 PM_{2.5}의 희석에 미치는 영향은 시도별로 상이할 것으로 예상되나, 기존 연구에서는 산맥 등 지형이 PM_{2.5} 농도에 미치는 영향이 직접적으로 분석된 바 없다.

국내 대기오염물질의 배출량의 경우, 부산 및 울산 등을 제외하면 수도권과 충남 등 북서 지역에서 많은 대기오염물질이 배출된다. 수도권의 경우 인구 밀집과 자동차 등 이동 오염원의 영향이 높고, 충남의 경우 다수의 발전 시설과 산업단지 등이 위치한다 (Bae *et al.*, 2021b; Choi *et al.*, 2021). 북서쪽에 위치한 시도에서 배출되는 대기오염물질은 자체 지역은 물론, 겨울철 동안에는 북서풍을 따라 풍하 지역으로 이동하면서 다른 시도의 대기질에도 영향을 미칠 수 있다 (Kim *et al.*, 2019). 한편, 국내 PM_{2.5} 농도는 국내 배출뿐만 아니라 장거리 이동에 의한 국외 배출영향을 동시에 받는다 (Lee *et al.*, 2021a; Bae *et al.*, 2020; Kim *et*

al., 2018). 이러한 대기오염물질의 거동과 관련하여 ‘동고서저’ 형태의 국내 지형은 지역별 PM_{2.5} 농도에 미치는 영향이 작지 않을 것으로 예상되나, 자체 배출과 국내외 지역 간 이동 관점에서 그 영향을 분석한 연구는 드물다.

본 연구에서는 국내 시도별 PM_{2.5} 농도에 대한 국내 지형의 영향을 정량적으로 분석하기 위하여 실제 국내 지형과 임의로 평탄화한 지형 자료를 준비하고 기상과 대기질 모사 수행에 이용하였다. 또한, 국내 지형의 영향을 국외 및 국내 배출영향으로 분리하여 분석하고, 그 결과를 국내 시도별로 정리하였다. 시도별 PM_{2.5} 농도와 함께, 인구가중농도를 계산하여 국내 지형이 인체노출에 미치는 실질적인 영향을 검토하였다. 이러한 분석은 대기오염물질의 농도 결정 과정에서 국내 지형의 영향을 이해하고 향후 대기질 관리 및 인구 노출 관점에서 시도별 지형 조건을 고려해야 하는 필요성을 설명할 수 있다.

2. 연구 방법

2.1 대상 지역 및 대상 기간

본 연구에서는 시도별 국내 PM_{2.5} 농도에 대한 지형 영향을 분석하기 위해 제주도를 제외한 16개 시도를 연구 대상으로 설정하였다. 제주도의 경우 평지에 비해 산지 비율이 높고, 바다에 둘러싸여 있어 대기오염물질의 거동이 국내 내륙 지역과 다를 수 있으므로 분석에서 제외하였다. 분석 대상 기간으로 2019년 1월부터 3월까지의 겨울철 기간을 선정하였다. 선행 연구에 따르면, 이 기간 동안 PM_{2.5} 고농도가 빈번하게 발생하였으며 (Park *et al.*, 2024; Seo *et al.*, 2024b; Han *et al.*, 2022), 특히 서울에서 48시간 이상 연속 PM_{2.5} 주의보가 유지된 사례가 매달 발생하였다 (Park *et al.*, 2023). 이러한 고농도 현상은 국내 배출은 물론 국외 유입 영향에 의한 것으로 (Park *et al.*, 2023; Shim *et al.*, 2022), 국내 지형에 의한 대기오염물질의 거동을 파악하는 데 적절한 것으로 판단하였다.

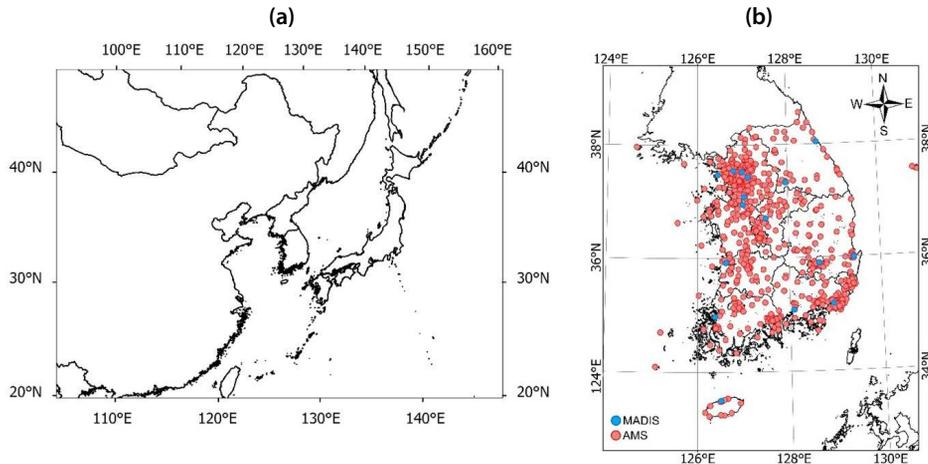


Fig. 1. The modeling domains at horizontal grid resolution of (a) 27-km and (b) 9-km. The blue and red dots portray the locations of meteorological assimilation and data ingest system (MADIS) and air pollutants measurement sites (AMS) respectively in South Korea.

2.2 실제 지형 모사

실제 지형 고도를 이용한 기상 및 대기질 모사(이하 'REAL')는 다음과 같이 구성하였다. 대기질 모사를 위한 기상 입력 자료는 Weather Research and Forecasting (WRF; Skamarock *et al.*, 2008) model version 3.9.1을 이용해 생성하였다. 실제 지형 고도와 평탄 지형을 가정한 고도 정보를 이용한 기상 모사 결과를 비교하기 위해 WRF 수행 시 자료동화 기법은 이용하지 않았다. WRF 모사를 수행하기 위한 초기 및 경계 조건은 National Centers for Environmental Prediction의 FNL Operational Global Analyses 1-degree 자료를 이용하였다. WRF 모사를 통해 계산된 시간별 기상인자는 the Meteorology-Chemistry Interface Processor version 4.3을 이용하여 대기질 모사에 필요한 자료 형식으로 전환하였다.

대기질 모사 수행 시, 인위적 배출목록은 국외에 대해서는 Korea-United States Air Quality version 5 (Jang *et al.*, 2020)를, 국내에 대해서는 Clean Air Policy Support System 2017 (Choi *et al.*, 2021)을 이용하였다. 인위적 배출량의 처리는 Sparse Matrix Operator Kernel Emission version 4.8을, 자연 배출량 산정은 Model of Emission of Gases and Aerosols from

Nature version 2.04를 이용하였다 (Guenther *et al.*, 2006).

대기질 모사는 Community Multiscale Air Quality Modeling System (CMAQ) version 5.3.1을 이용하여 수행하였다. WRF와 CMAQ의 기타 자세한 물리화학 옵션은 Jeong *et al.* (2024)에서 확인할 수 있다. 대기질 모사는 중국 등을 포함한 27-km 수평 해상도의 동북아 영역과 국내와 북한 일부를 포함하는 9-km 수평 해상도의 영역에서 수행되었다(그림 1). 27-km 모사는 국내 풍상에 위치한 중국 등의 배출영향을 고려하기 위한 것으로, 9-km 모사 시 경계조건으로 사용하였다. 모사 재현성 평가를 위해 REAL 모사 결과를 관측치와 비교하였다. 기상 모사 수행평가를 위해 기상 관측자료 (Meteorological Assimilation and Data Ingest System)의 2-m 기온과 10-m 풍속 자료, 대기질 모사 수행평가를 위해 도시대기 측정망 (<https://www.airkorea.or.kr>)의 PM_{2.5} 농도 자료를 사용하였으며, 1시간 단위의 측정자료를 일평균하여 모사자료와 비교하였다.

2.3 평탄 지형 모사

국내 PM_{2.5} 농도에 대한 실제 지형의 영향을 산정

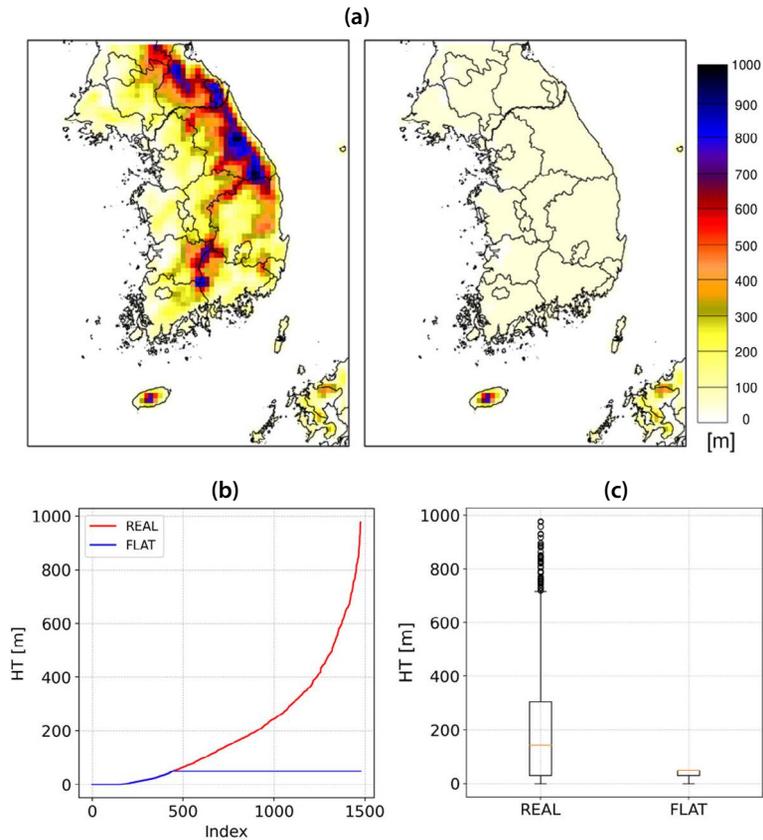


Fig. 2. (a) Spatial distributions, (b) line plot of sorted data, and (c) box plots with standard 1.5 IQR whiskers and outliers of terrain height used for the REAL and FLAT simulations in South Korea, respectively. Each dataset used in the line plots and box plots represent a cell located in South Korea at a 9-km resolution. The orange line in the box plots indicates the median value of the data.

하기 위해 실제 지형을 반영한 REAL 모사 외에 국내 지역에 대해 이상적인 평탄 지형을 가정하고(이하 'FLAT') 기상 및 대기질 모사를 추가로 수행하였다. FLAT 모사 시에는 WPS의 'geogrid' 단계에서 격자별 지형 고도가 50m가 넘지 않도록 수정하였다. 이러한 지형 고도의 가정은 연구 대상 기간 동안 주 풍향인 북서풍을 통해 유입되는 국외 배출영향이 주로 지형 고도가 낮은 서해안 지역을 통해 유입되는 점을 고려하였다(그림 2(a)). 그림 2(b)의 REAL 모사에서 서해안 지역의 경우 지형 고도가 50m가 넘지 않는 격자들을 확인할 수 있으며, 이는 국내 전체 격자의 30%에 해당한다. 지형 고도의 변화는 그림 2에 보인 동북

아 영역에 대해서도 동일하게 적용하였다. REAL 모사에서는 태백산맥과 소백산맥 등지에서 지형 고도가 1,000 m 이상인 격자가 있었으나, FLAT 모사에서 모두 50 m 이하로 수정되었다(그림 2(b)와 (c)). REAL 모사에서 500 m 이상의 고도를 보이던 격자는 10.6%를 차지하였으며, 국내 평균 지형 고도가 202.8 m였으나, FLAT 모사에서는 38.9 m로 낮아졌다. 지형 고도를 제외하면, FLAT 모사에서 이용된 모든 기상 및 대기질 모사 옵션은 REAL 모사와 동일하다.

2.4 지형효과 분석 방법

기상 변수와 PM_{2.5}를 포함한 대기오염물질의 농도

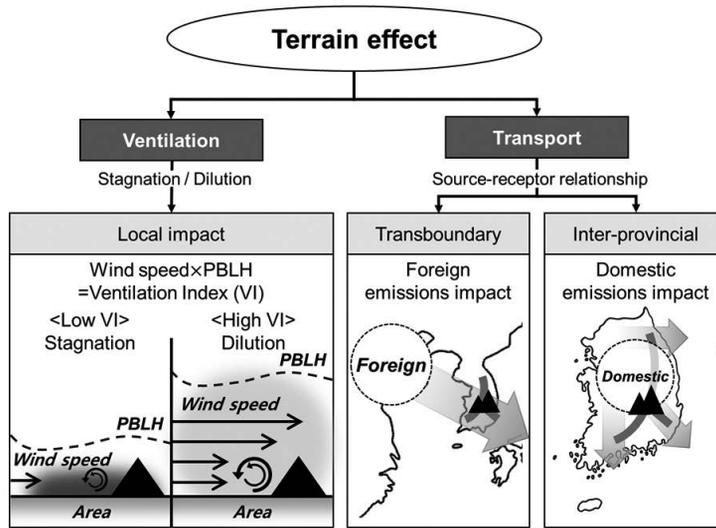


Fig. 3. Illustrative of the analytical approach used to evaluate the terrain effect on meteorological conditions and air pollutant concentrations in South Korea.

에 대한 지형의 영향을 정량적으로 분석하기 위해 REAL 모사와 FLAT 모사의 차이(REAL-FLAT)로부터 ‘지형효과’를 계산하였다. 이러한 지형효과에는 격자별 지형 고도의 차이에 의한 영향뿐만 아니라 국내 평균 지형 고도가 낮아지는 영향이 동시에 포함된다. 이때 결과 분석에 사용된 대기오염물질의 농도는 인체 노출 관점에서 접근하기 위해 각 모사의 지표 최하층의 농도 자료를 활용하였다. 대기오염물질에 대한 지형효과는 ‘환기(Ventilation)’와 ‘이동(Transport)’ 두 가지 측면에서 분석하였으며, 자세한 설명은 다음 절에 설명하였다(그림 3). 시도별 지형효과를 평가할 때, 각 시도에 대해 1) 전 면적을 대상으로 한 분석과, 2) 도시대기측정망이 위치한 격자만을 선별한 분석을 수행하였다. 이러한 접근은 시도 평균과 시도별 인구 밀집 지역에 보이는 지형효과를 구분하기 위한 것이다. 도시대기측정망은 인구수에 비례하여 설치되며, 대기환경기준 달성 여부 등을 판단하는데 이용되므로, 지형이 건강 등에 미치는 악영향을 살펴보는 것에 유용하다. $PM_{2.5}$ 농도에 대한 지형효과를 인체 노출 관점에서 접근하기 위해 $PM_{2.5}$ 인구가중농도(Population-weighted Concentration; PWC)

를 이용하였다(Son *et al.*, 2020; Anun *et al.*, 2018). PWC 계산에는 그림 1(b)에 보인 9-km 해상도 격자(j) 당 인구수(P_j)와 $PM_{2.5}$ 농도(C_j)를 이용하였다(식 (1)).

$$PWC = \frac{\sum_{j=1}^N P_j \times C_j}{\sum_{j=1}^N P_j} \quad (1)$$

2.4.1 한 지역의 환기 측면에서의 지형효과

지형은 풍속, 혼합고, 기온 등에 영향을 미치며, 지형에 의한 풍속과 혼합고의 변화는 한 지역에서 배출되는 대기오염물질의 희석 또는 정체 조건과 연관된다(Jeong *et al.*, 2024; Cheng *et al.*, 2022; Hu *et al.*, 2020). 지형은 원활한 환기를 도와 대기오염의 부하를 낮출 수 있는 반면(i.e., 고산지대), 대기정체를 유발하여 대기오염물질의 농도를 높이기도 한다(i.e., 분지지형). 본 연구에서는 대기오염물질의 정체 정도를 설명하기 위하여 대기정체지수(Ventilation Index, 이하 ‘VI’)를 이용하여 한 지역에서 배출된 대기오염물질이 지형에 의해 얼마나 빨리 희석되어 농도가 낮아지는지를 배출지역 관점에서 검토하였다. 풍속과 혼합고의 곱으로 계산되는 VI가 커질수록 대기오염

물질의 확산이 원활하여 자체 배출영향이 낮아지고, 낮을수록 대기정체가 가중되어 자체 배출영향이 증가하는 것으로 알려져 있다(Jeong *et al.*, 2024; Kim *et al.*, 2022; Lee *et al.*, 2021b).

2.4.2 지역 간 이동 측면에서의 지형효과

지형은 대기정체를 유도하여 한 지역의 국지 배출 영향을 높일 수 있는 동시에(Ryoo *et al.*, 2019), 대기 오염물질의 지역 간 이동에도 영향을 미칠 수 있다(Seo *et al.*, 2024a). 예를 들어, 영서와 영동 지역을 가로지르는 태백산맥이나 충청과 영남 중간에 위치하는 소백산맥의 경우 대기오염물질의 지역 간 이동을 방해할 수 있으며, 이런 경우 한 지역의 배출영향은 다른 지역에서 산맥에 의해 평탄 지형에 비해 낮아질 수 있다. 본 연구에서는 국내 지형이 대기오염물질의 이동에 미치는 영향을 예시하기 위해 다음과 같은 접근을 시도하였다(그림 3). 첫 번째, 국내 지형이 PM_{2.5}의 국외 배출영향에 미치는 영향을 추정하기 위해 REAL과 FLAT 모사에 대해 각각 추정된 국외 배출영향의 차이를 이용하였다. 국외 배출영향은 풍상으로부터 장거리 이동되어 나타나므로 국내 지형에 의한 국외 배출영향의 변화는 국내 지형으로 인한 환기 및 정체 영향보다 이동 영향이 중요한 것으로 간주하였다(Jeong *et al.*, 2024). 두 번째, 국내 지형이 PM_{2.5} 배출영향에 미치는 효과를 위와 동일한 방법으로 분석하였다. 다만, 국내 배출영향은 한 시도의 자체 배출영향에 대한 희석효과와 배출영향의 시도 간 이동효과가 혼재되어 나타날 수 있다. 이에 본 연구에서는 배출지뿐만 아니라 주변 지역에서의 PM_{2.5} 농도 변화를 함께 살펴보았다. 배출지역과 주변 수용지역의 PM_{2.5} 농도 변화가 다른 방향으로 전개된다면(i.e., 한 지역에서는 농도 증가, 다른 지역에서는 농도 감소), 이는 대기오염물질의 이동 측면이 상대적으로 중요한 것으로 간주하였다.

국내외 배출영향은 Brute Force Method (BFM)을 이용하여 추정하였다. BFM은 배출량 변화 전후의 모사 농도의 변화를 기반으로 배출영향을 산정하는 방

법으로, 여러 선행연구에서 이용된 바 있다(Sun *et al.*, 2023; Bae *et al.*, 2022a; Han *et al.*, 2021). 배출영향은 모든 배출량을 그대로 적용한 모사와 국외 또는 국내 배출량을 50% 삭감한 모사를 통해 식 (2)와 같이 산정하였다. 식 (2)에서 Zero-out contribution (ZOC, 이하 ‘배출영향’)는 배출량을 삭감한 지역에 대한 배출영향이 된다. 국외와 국내 배출영향 산정 시에는 각각 국외와 국내에 해당하는 격자의 배출량을 삭감하였다. 식 (2)에서 $C_{E,100\%}$ 은 전체 배출량을 이용한 모사 농도, $C_{E,\Delta\epsilon}$ 은 대상 지역의 배출량을 삭감한 후 수행된 모사 농도이다. 본 논문에서는 삭감 비율인 $\Delta\epsilon$ 를 50%로 정하였다.

$$ZOC = (C_{E,100\%} - C_{E,\Delta\epsilon}) \times \frac{100\%}{\Delta\epsilon (\%)} \quad (2)$$

3. 결 과

3.1 지형효과에 의한 기상 및 대기질 변화

기상과 PM_{2.5} 농도에 미치는 지형효과를 살펴보기에 앞서, 실제 지형을 이용한 REAL 모사에서 도출된 기상 변수와 대기오염물질 농도를 관측치와 비교하였다(표 1과 그림 4). 대상 기간 평균 2-m 기온과 10-m 풍속은 국내 관측치를 각각 0.1°C, 0.1 m/s 과대 모사하였다. 또한, PM_{2.5} 모사 농도는 35.0 µg/m³로 도시대기측정망에서의 관측 농도(35.8 µg/m³)를 0.8 µg/m³ 과소 모사하였다. REAL 모사의 해당 변수들은 선행연구에서 제시한 기상 및 대기질 모사의 통계 기준을 만족하였다(Huang *et al.*, 2021; Emery *et al.*, 2017; Emery and Tai, 2001).

REAL 모사에서 10-m 풍속은 수도권, 충남 등 지형 고도가 낮은 지역에 비해 산지가 많은 강원, 경북 등에서 높았다(그림 5(a)). 반면, 평탄한 지형을 가정한 FLAT 모사에서는 대부분 지역에서 풍속이 감소하였으며(그림 5(a)), 10-m 풍속에 대한 지형효과는 전국 평균 1.3% (0.1 m/s) 낮아졌으며, 시도별로는 -12.1% ~ 5.3% (-0.3 m/s ~ 0.2 m/s) 범위에서 변화하였다. 또

Table 1. Model performance statistics for 2-m temperature, 10-m wind speed and PM_{2.5} concentration from meteorological and air quality simulations in South Korea from January to March 2019.

	Observed mean	Modeled mean	Mean bias	Gross error	RMSE	Index of agreement
2-m temperature	3.4°C	3.5°C	0.1°C	0.5°C	0.6°C	1.0
10-m wind speed	3.0 m/s	3.1 m/s	0.1 m/s	0.2 m/s	0.2 m/s	0.9
	Observed mean	Modeled mean	Mean bias	NMB	NME	Correlation coefficient
PM _{2.5}	35.8 µg/m ³	35.0 µg/m ³	-0.9 µg/m ³	-2.7%	17.7%	0.9

Emery *et al.* (2001) benchmarks for 2-m temperature: Mean Bias $\leq \pm 0.5$ K, gross error ≤ 2 K, IOA ≥ 0.8

Emery *et al.* (2001) benchmark for 10-m wind speed: Mean Bias $\leq \pm 0.5$ m/s, RMSE ≤ 2 m/s, IOA ≥ 0

Emery *et al.* (2017) goals for 24-h PM_{2.5}: R ≥ 0.7 , NMB $\leq \pm 10\%$, NME $\leq 35\%$

한, 선행연구와 마찬가지로 지형 고도가 낮은 지역에 비해 높은 지역에서 지형효과에 의해 10-m 풍속의 변화가 두드러지게 나타났다 (Lee *et al.*, 2020; Ngo and Letchford, 2008).

혼합고 (above the ground level)는 FLAT 모사 대비 REAL 모사에서 전국 평균 2.9% (15.4 m) 높았으며 (그림 5(b)), 시도별로는 -9.8%~4.8% (-41.8 m~25.6 m) 범위에서 변화하였다. FLAT 모사의 경우 지면 고도가 낮아짐에 따라 지표면 온도가 상대적으로 높아지는 영향이 포함될 수 있다. 10-m 풍속과 달리 혼합고의 변화는 두 모사간의 지형 고도 변화와 비례하지 않았다. 지형효과에 의해 부울경 지역에서는 대체로 혼합고가 높아졌으며, 그 외 지역에서는 혼합고가 낮게 모사하였다. 전체적으로 볼 때, 지형 고도 변화에 따른 10-m 풍속과 혼합고의 변화는 지역별로 상이하였으나, 전국 평균적으로는 지역별 증감이 상쇄되었다.

10-m 풍속 및 혼합고의 변화는 정체 및 환기 조건의 변화로 인해 대기오염물질의 농도 변화로 이어질 수 있다 (Kwak *et al.*, 2021; Kang *et al.*, 2020; Kim *et al.*, 2017). REAL 모사에서 VI는 높은 풍속으로 인해 산지에서 높게 산정되었다 (그림 5(c)). 그림 5(c)에서 백두대간을 비롯한 산맥에서 다른 지역에 비해 뚜렷하게 높은 VI를 볼 수 있으며, 이는 지형이 10-m 풍속에 미치는 영향과 유사하였다. 수도권을 비롯한 국내 북서 지역에서는 지형효과에 의해 VI가 감소하였다. 이는 국내 지형이 해당 지역의 환기를 저해함을

의미한다. 지형효과에 의한 혼합고 변화 역시 VI에 영향을 미칠 수 있으나, 풍속 변화에 비해 그 영향이 작은 것을 그림 5에서 확인할 수 있다.

REAL 모사에서 국내 PM_{2.5} 농도는 다른 시도에 비해 수도권과 충청에서 높았다 (그림 5(d)). FLAT 모사에서도 이러한 공간 분포는 유지되나, 해당 시도의 PM_{2.5} 모사 농도는 지형효과에 의해 더욱 가중되는 것으로 보인다. 반대로 설악산과 지리산 등 고도가 높은 지역에서는 PM_{2.5} 농도가 지형효과에 의해 낮아졌다. 이는 국립공원 등이 위치한 지역의 경우 대기오염물질의 배출이 낮은 동시에, 산악 지형이 타 지역으로부터의 유입을 방해했기 때문이다. 대상 기간 평균 시도별 PM_{2.5} 농도는 지형효과에 의해 -7.6%~3.0% (-2.2 µg/m³~1.2 µg/m³) 정도 영향을 받는 것으로 모사되었다. 이와 같이 지형효과에 의한 지역별 PM_{2.5} 농도 변화의 증감이 상이한 이유는 PM_{2.5} 농도에 미치는 자체 및 외부 배출영향이 다르기 때문으로 판단된다. 지형효과에 의한 시도별 차이는 3.2절과 3.3절에서 논의하였다.

3.2 지형에 의한 정체 영향

REAL 모사와 FLAT 모사의 차이를 이용하여 시도별 평균 VI와 PM_{2.5} 농도에 대한 지형효과를 그림 6(a)에 비교하였다. 그림 6(a)의 제2사분면에 있는 시도들의 경우 지형효과에 의해 대기정체가 높아져 대상기간 평균 PM_{2.5} 농도는 1.7%~3.0% 가중되었다. 이에 반해, 제4사분면에 있는 시도들의 경우 지형효과

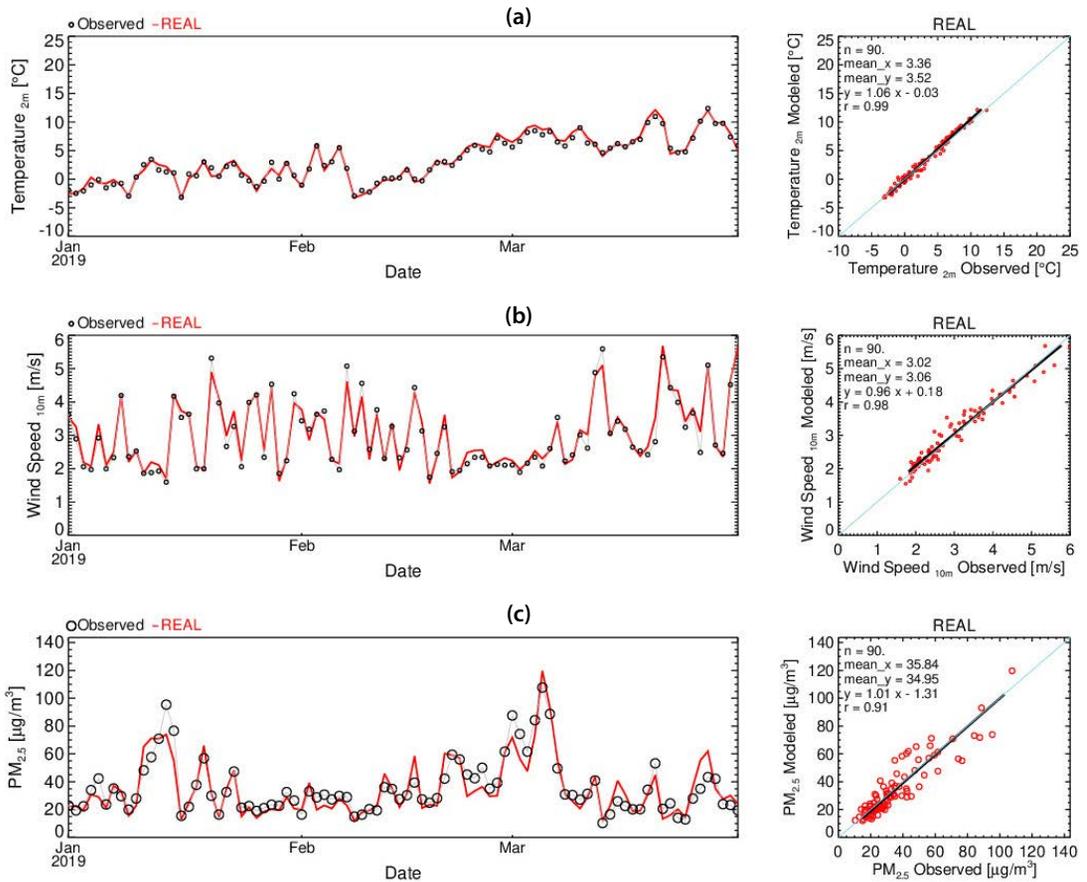


Fig. 4. Time series and scatter plots comparing observed and simulated daily averages in REAL and FLAT simulations for (a) 2-m temperature, (b) 10-m wind speed at weather stations, and (c) PM_{2.5} concentration at air quality monitoring sites in South Korea from January to March 2019.

에 의해 PM_{2.5} 농도가 0.3%~5.9% 낮아졌다. 국내 전체적으로 볼 때 지형효과에 의해 VI가 10% 감소할 경우 PM_{2.5} 농도는 3.3% 증가하였다. 다만, 제3사분면에 포함된 시도들의 경우 지형효과에 의해 대기정체가 높아졌음에도 불구하고 PM_{2.5} 농도는 1.3%~7.6% 낮아졌다. 국내 전 지역을 대상으로 살펴보면, 대기정체가 증가했음에도 불구하고 평균 PM_{2.5} 농도는 1.5% (0.5 µg/m³) 낮아졌다. 이러한 PM_{2.5} 농도 변화는 지형효과에 의한 자체 배출영향의 증감만으로 설명되지 않는다. 특히, 제3사분면에 해당하는 시도들(충북, 전남, 광주, 강원, 경북)의 경우 타 시도에 비해 배출밀도가 낮거나 배출밀도가 높은 지역(i.e., 수도권)

과 접하고 있다. 이런 점에서 제3사분면의 시도들의 경우 지형효과가 자체 배출영향보다는 주변 지역 간 유출입에 더 큰 영향을 미친 것으로 유추된다. 지형효과가 대기오염물질의 지역 간 이동에 미치는 영향은 다음 절에서 자세히 논의하였다.

그림 6(a)와는 별도로 도시대기측정망이 위치한 격자만을 선별하여 동일하게 수행한 분석 결과를 그림 6(b)에 제시하였다. 도시대기측정망은 인구집중 지역에 위치한다고 가정할 경우, 시도별 PM_{2.5} 농도는 인구 밀집 지역에서 지형효과에 의해 -5.2%~3.8% (-1.6 µg/m³~1.5 µg/m³) 변화하였다. 대부분의 시도에서 VI에 대한 지형효과는 인구 밀집 지역에서 더

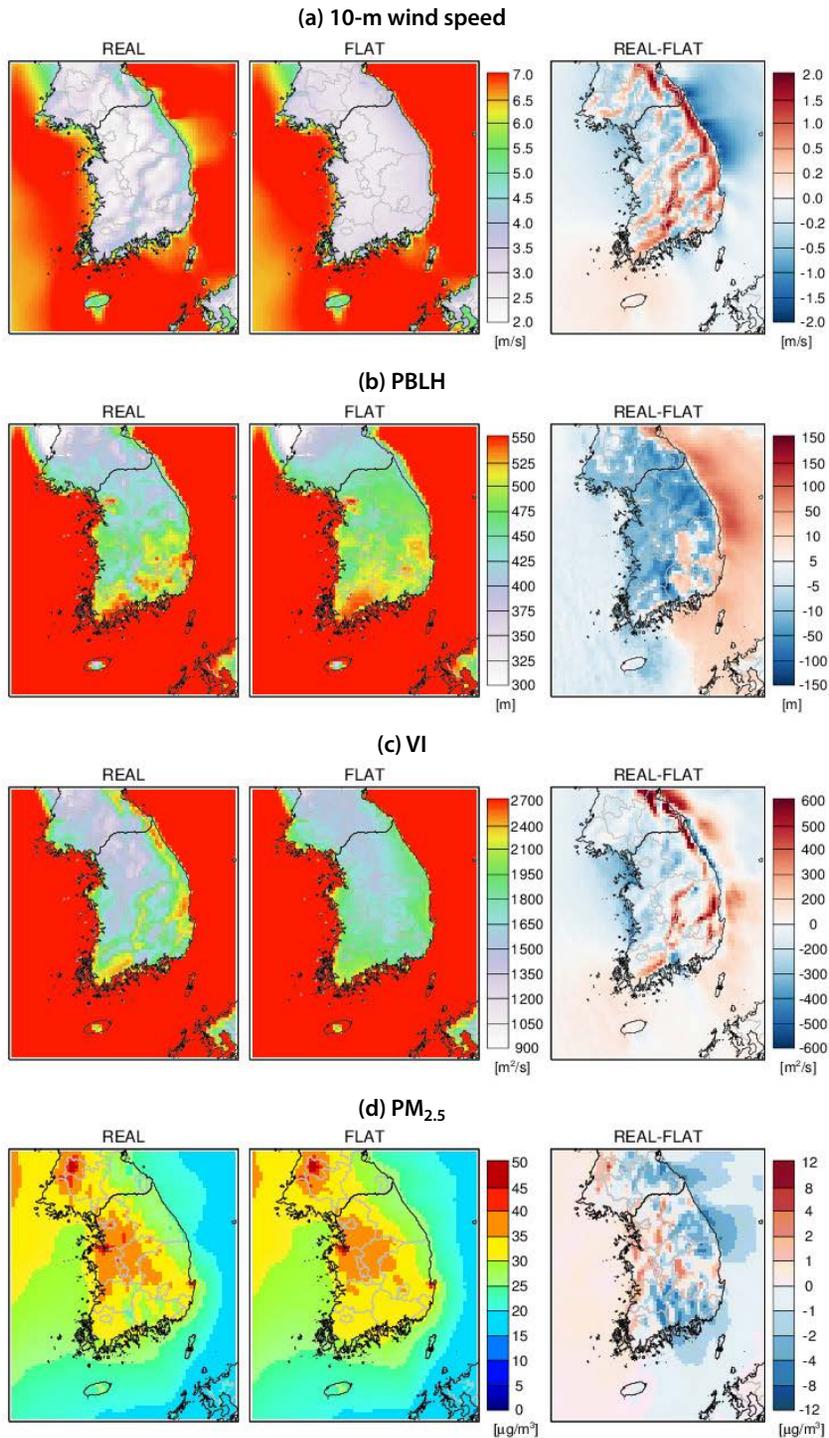


Fig. 5. Spatial distributions of terrain effect on (a) 10-m wind speed, (b) PBLH, (c) VI and (d) PM_{2.5} concentration in South Korea from January to March 2019.

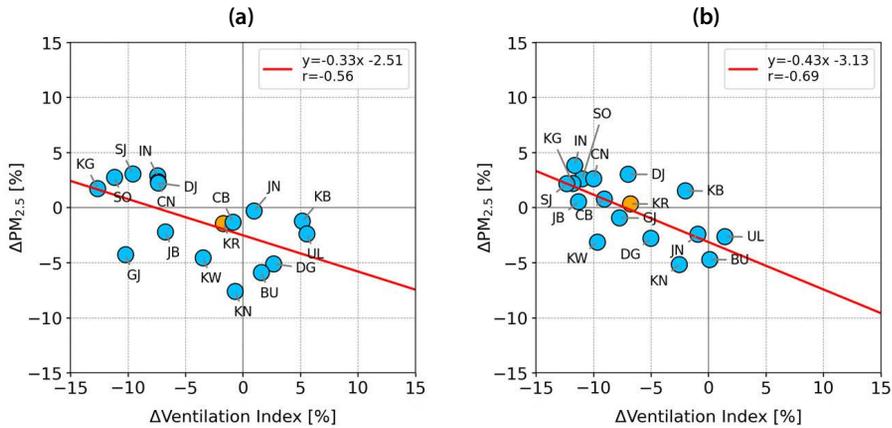


Fig. 6. Scatter plots showing the relationship between terrain effect on VI and PM_{2.5} concentrations across (a) all grids and (b) at the urban air quality monitoring station's locations in South Korea and its 16 provinces from January to March 2019. The red lines represent the linear regression analysis performed with data excluding 'KR'.

높아졌다. 시도별로 전 지역을 평균한 그림 6(a)와 비교하여 인구 밀집 지역만을 선별하여 평균할 경우 울산 제외하면 지형효과에 의해 VI는 모든 시도에서 감소하였으며, PM_{2.5} 농도가 높아지는 시도의 수 역시 증가하였다(그림 6(b)). 이러한 결과는 인구가 밀집된 도시들이 대부분 고도가 낮은 분지에 위치하여 발달했기 때문으로 판단된다. 하지만, VI가 감소했음에도 PM_{2.5} 농도는 인구 밀집 지역에서 감소하는 시도가 여전히 존재하였다.

3.3 지형이 지역 간 이동에 미치는 영향

연구 기간 동안 주풍향인 북서풍에 의해 국외에서 국내로 유입되는 국외 배출영향은 황해상에서 높게 모사되었다(그림 7(a)). 국외 배출영향은 백령도를 지나면서 차츰 낮아졌으며, 국내 유입 후 내륙에서는 수도권과 충남 서해안 지역을 중심으로 높았고, 남동 방향으로 점차 낮아졌다. REAL 모사에서 인천 부근의 서해상과 부산 부근의 남해상에서의 국외 배출영향은 10 µg/m³ 이상 차이를 보였다. 국외 배출영향의 지역 간 차이는 국내 내륙에서도 뚜렷하였는데, 충남 서해안 지역에서는 27 µg/m³ 이상이었던 반면, 부산 등 동남권에서는 21 µg/m³ 이하로 낮아졌다.

FLAT 모사에서도 국외 배출영향은 국내 북서 지역

에서 높고 남동 방향으로 순차적으로 낮아졌으나, REAL 모사에 비해 내륙에서 등농도선이 매끄러워졌다(그림 7(b)). 그림 7(c)에서 지형효과에 의해 국외 배출영향은 서해와 접하고 있는 수도권과 충남 해안 지역에서는 높아졌으며, 동해와 남해와 인접한 지역에서는 낮아졌다. 특히, 지형효과에 의해 국외 배출영향은 설악산과 지리산 등이 위치한 지역에서 다른 지역에 비해 낮았는데, 이는 국외 유입 영향이 해당 지역으로 이동하는 것을 높은 산악지형이 막아주었기 때문이다.

REAL과 FLAT 모사에서 국내 배출영향은 서해안 및 북서쪽의 시도에서 높았던 국외 배출영향과 달리 부산 등 동남권역에서 높았다(그림 7(d)와 (e)). 이는 북서풍의 영향으로 국내 배출영향이 주로 남동 방향으로 전달되었기 때문이다. 지형효과에 의해 국내 배출영향은 수도권 및 충북 등에서는 증가하였고, 설악산과 지리산 인근 지역에서는 감소하였다(그림 7(f)). 앞서 언급한 것처럼, 설악산 및 지리산의 경우 자체 배출이 작다. 따라서, 해당 지역에서 지형 변화에 따라 달라진 국내 배출영향은 자체 배출영향보다는 주변 시도의 배출영향 변화에 기인한 것으로 이해된다. 전반적으로 지형효과에 의한 국내 배출영향 및 국외 배출영향의 변화는 북서 지역에서는 높아지고,

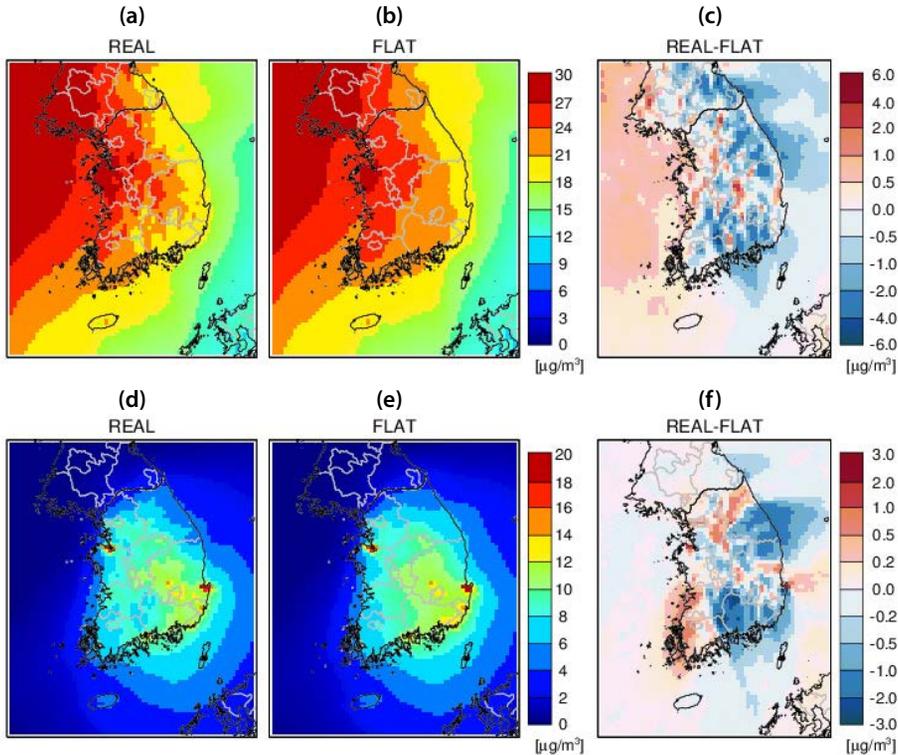


Fig. 7. Spatial distributions of terrain effect in the REAL and FLAT simulations, and their differences, on long-range transport impact (LTI) (upper panel: (a), (b), and (c)) and local emissions impacts (LEI) (bottom panel: (d), (e), and (f)) in South Korea from January to March 2019.

남동 지역에서는 낮아지는 유사한 공간 분포를 보였다(그림 7(c)와 (f)).

국외 배출영향에 대한 지형효과를 살펴보면, 시도별 전면적 대비로는 $-8.7\% \sim 2.3\%$ ($-1.8 \mu\text{g}/\text{m}^3 \sim 0.6 \mu\text{g}/\text{m}^3$) 차이를 보였으며(그림 8(a)), 인구 밀집 지역에서의 차이는 $-6.4\% \sim 1.8\%$ ($-1.4 \mu\text{g}/\text{m}^3 \sim 0.5 \mu\text{g}/\text{m}^3$)이었다(그림 8(b)). 지형효과에 의한 국내 배출영향은 대부분 국외 배출영향이 증가한 시도에서는 증가하였고, 국외 배출영향이 감소한 시도에서는 감소를 보였다. 국내 배출영향에 대한 지형효과는 시도별로 전면적 대비 $-11.3\% \sim 6.3\%$ ($-1.1 \mu\text{g}/\text{m}^3 \sim 0.6 \mu\text{g}/\text{m}^3$), 인구 밀집 지역에서는 $-6.4\% \sim 6.4\%$ ($-0.7 \mu\text{g}/\text{m}^3 \sim 0.6 \mu\text{g}/\text{m}^3$)의 차이를 유발하였다. 절대 농도 측면에서 지형효과는 국외 배출영향에서 더 큰 변화를 보였지만, 상대적인 변화율은 국내 배출영향에서 더 크게 나타

났다.

국외와 국내 배출영향에 대한 지형효과를 동과 서로 쉽게 양분할 수는 없었으나, 대부분 서편에 있는 시도에서의 국내외 배출영향은 지형효과에 의해 증가하였으며, 동편에 위치한 시도에서 감소하였다. 따라서 국내 지형은 서편에 위치한 시도에서 국내외 배출영향을 가중시켜 $\text{PM}_{2.5}$ 농도를 높이고, 동편에 위치한 시도에서는 $\text{PM}_{2.5}$ 농도에 대한 국내외 배출영향을 낮추었다.

주목할 점은 지형효과에 의해 VI는 각 시도별 평균 변화에서 증가와 감소가 모두 나타났으나(그림 8(a)), 인구 밀집 지역에서는 대부분의 시도에서 VI가 감소하였다(그림 8(b)). 그림 8(b)와 같이 환기 감소는 배출영향의 증가로 이어져야 하나, 일부 시도에서는 환기 감소에도 불구하고 국외 및 국내 배출영향이

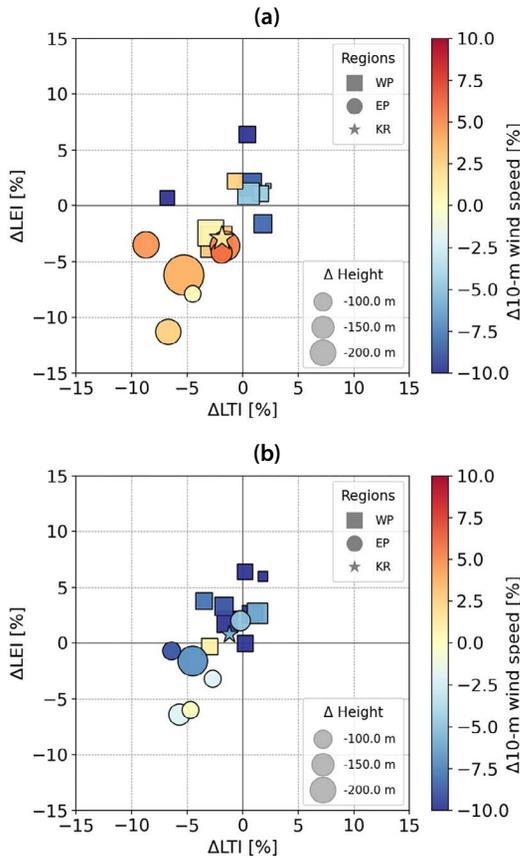


Fig. 8. Scatter plots showing the relative effect of terrain on provincial long-range transport impact (LTI) and local emissions impact (LEI) calculated (a) across all grids and (b) at urban air quality monitoring station locations in South Korea from January to March 2019. The sizes and colors of symbols represent changes in terrain height and 10-m wind speed averaged for each province. Circles and squares were used for eastern and western provinces, respectively. A positive value indicates that the concentration or wind speed has increased due to the actual terrain. A star symbol represents the national average.

오히려 감소하였다. 이는 앞서 설명한 바와 같이, 풍속 등 기상 변화에 미치는 지형효과는 희석에 의한 자체 배출영향뿐만 아니라, 대기오염물질의 지역 간 이동에도 큰 영향을 미치기 때문으로 이해된다.

지형효과에 의한 시도별 국외 배출영향의 경우, 전 지역과 인구 밀집 지역에서 증가와 감소의 방향은 동일한 것으로 분석되었다(그림 9(a)). 지형으로 인한

전 지역의 국외 배출영향은 수도권과 충남에 대해 대상 기간 동안 각각 0.3 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, 0.4 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 증가하였으나, 그 외 시도에서는 평균 0.9 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 감소하였다. 이러한 시도별 PM_{2.5} 농도에 대한 국외 배출영향의 변화에서 지형효과는 국내 평균적인 국외 배출영향을 낮추는 방향으로 작용하였다.

지형효과에 의한 시도별 국내 배출영향은 국외 배출영향에 비해 불리하게 작용하였으며, 특히, 인구 밀집 지역에서 국내 배출영향 증가가 뚜렷하게 나타났다(그림 9(b)). 경남, 부산, 울산 등을 제외하면 많은 시도의 인구 밀집 지역에서 국내 배출영향이 증가하였는데, 이는 상층으로 장거리 이동되는 국외 배출영향과는 달리 국내 배출영향은 주로 지표 가까이에서 높기 때문으로, 대도시 등 인구 밀집 지역에서 높은 배출량이 복합적으로 작용한 것으로 보인다. 이러한 결과는 국내 지형이 시도별 PM_{2.5} 농도에 미치는 영향과는 상이하게 인구노출에 보다 높은 악영향을 미칠 수 있음을 의미한다. 다음 절에서는 국내 지형이 시도별 인구노출에 미치는 영향을 PWC를 이용하여 논의하였다.

3.4 PM_{2.5} 인구 가중 농도 변화

국내 지형에 의해 PWC는 북서쪽 시도(서울, 경기, 인천, 충남, 세종, 대전)에서는 PM_{2.5} 농도 상승으로 인해 증가한 반면, 남동쪽에 위치한 나머지 시도에서는 감소하였다(그림 10). 지형효과에 의한 국내 시도별 PWC 변화 폭은 $-2.4 \mu\text{g}/\text{m}^3 \sim 1.5 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 로, PM_{2.5} 농도 변화($-2.2 \mu\text{g}/\text{m}^3 \sim 1.2 \mu\text{g}/\text{m}^3$)와 비슷하였다. 지형에 의해 PM_{2.5} 농도가 낮아진 남동쪽 시도들에서 PWC 감소는 평균 $-1.7 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 PM_{2.5} 농도 감소($-1.3 \mu\text{g}/\text{m}^3$)보다 컸다. 이는 해당 시도에서 국내 지형은 PM_{2.5} 농도 감소와 인구 노출면에서 유리하게 작용함을 의미한다. 예를 들어 부산의 경우, 지형효과에 의해 PM_{2.5} 농도는 1.8 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 감소하였으며, PWC는 2.4 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 감소하였다. 반대로, 인천의 경우 지형효과로 인해 PM_{2.5} 농도와 PWC는 각각 0.9 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, 1.5 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 증가하여 인체 영향 측면에서 국내 지형은 불

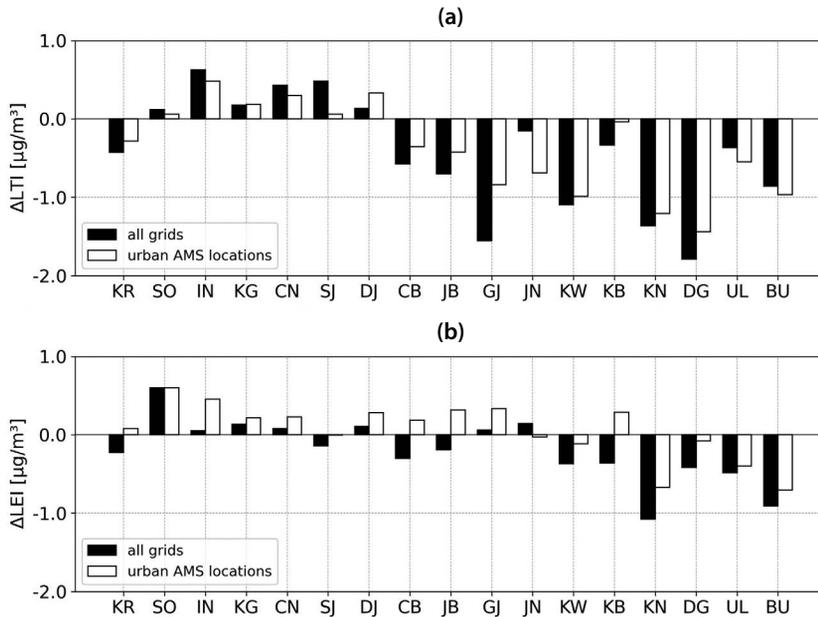


Fig. 9. Terrain effect on (a) long-range transport impact (LTI) and (b) local emissions impact (LEI) calculated across all grids (black bars) and at the urban air quality monitoring station's locations (white bars) in South Korea and its 16 provinces from January to March 2019.

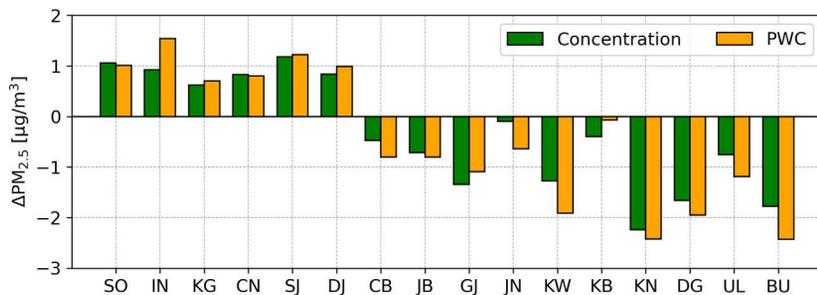


Fig. 10. Terrain effect on $\text{PM}_{2.5}$ concentrations across all grids (green bars) and population-weighted concentrations (orange bars) in 16 provinces of South Korea from January to March 2019. Population data from 2017 at the Dong level was used in the calculations.

리하게 작용하였다.

국내 지형이 인구 노출에 미치는 영향을 일평균 $\text{PM}_{2.5}$ 농도 수준에 따라 구분하여 살펴보면, 북서쪽 시도의 경우, 지형효과에 의한 PWC 변화는 저농도일 ($1.0 \mu\text{g}/\text{m}^3$)과 고농도일 ($1.1 \mu\text{g}/\text{m}^3$) 간에 큰 차이를 보이지 않았다(그림 11(a)와 (b)). 그러나, 국내 지형에 의해 $\text{PM}_{2.5}$ 농도가 감소하는 남동쪽 시도의 경우,

PWC 변화에 대한 지형효과는 저농도일 ($-0.8 \mu\text{g}/\text{m}^3$)과 고농도일 ($-2.2 \mu\text{g}/\text{m}^3$) 간에 $1.4 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 의 차이를 보였다. 이러한 결과를 정리하면, 고농도 $\text{PM}_{2.5}$ 발생 시 지형효과로 인해 일부 지역에서는 $\text{PM}_{2.5}$ 농도와 PWC가 가중되는 반면, 다른 지역에서는 $\text{PM}_{2.5}$ 농도와 PWC가 감소하였으며, 국내 전체 PWC를 낮추는 방향으로 작용하였다. $\text{PM}_{2.5}$ 농도보다 PWC가 지형

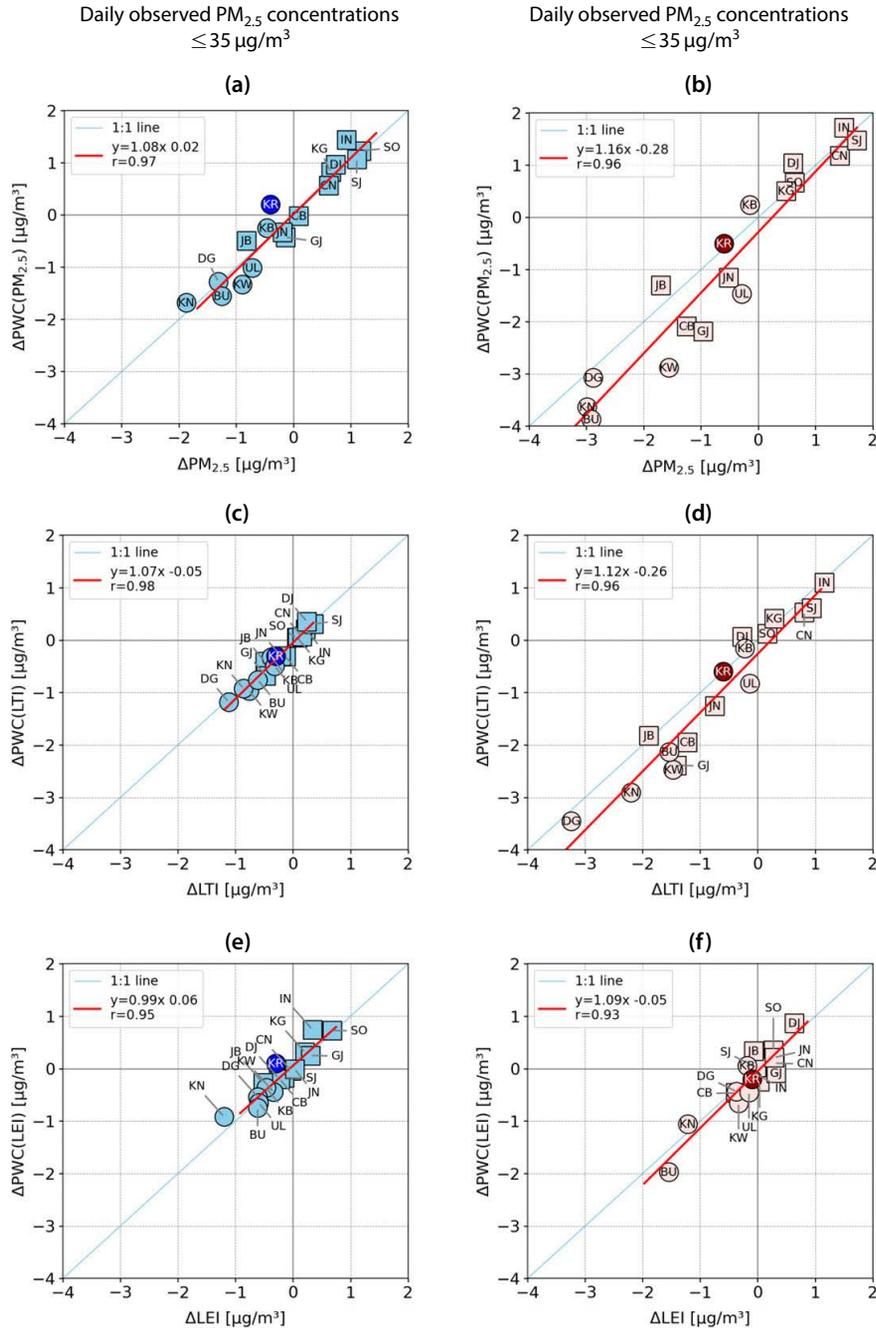


Fig. 11. Scatter plots depicting the terrain effect on PM_{2.5} concentrations and its PWC, long-range transport impact (LTI), and local emissions impact (LEI) in South Korea and its 16 provinces. The left panels ((a), (c), (e)) show data for days with observed daily PM_{2.5} concentrations below 35 µg/m³, while the right panels ((b), (d), (f)) represent days with observed daily PM_{2.5} concentrations above 35 µg/m³, from January to March 2019. Concentration data were calculated across all grids within each province. Population data from 2017 at the Dong level were used for the PWC calculations. The linear regression line, drawn in red, was calculated using the data from 16 provinces, excluding 'KR'.

효과에 더 민감하게 반응하는 것은 산포도의 선형회귀식에서도 확인할 수 있다. 그림 11(a)와 (b)의 선형회귀식에서 기울기는 각각 1.08과 1.16으로, 지형효과에 의한 $PM_{2.5}$ 농도 변화 대비 PWC 변화가 저농도일과 고농도일에 대해 각각 8%와 16% 더 컸다.

국내 배출에 의해 가중되는 PWC에 대한 지형효과는 부산을 제외하면 저농도일과 고농도일에서 큰 차이를 보이지 않았다(그림 11(e)와 (f)). 반면, 지형효과가 국외 배출영향에 의한 시도별 PWC 변화에 미치는 범위는 $PM_{2.5}$ 저농도일에 대해 $-1.2 \mu\text{g}/\text{m}^3 \sim 0.4 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 범위였으나, 고농도일의 경우 $-3.4 \mu\text{g}/\text{m}^3 \sim 1.1 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 증가하였다. 따라서, $PM_{2.5}$ 고농도일 동안 지형효과에 의한 시도별 PWC 변화는 국내 배출영향보다는 국외 배출영향에서 기인함을 알 수 있다. 이는 고농도 $PM_{2.5}$ 발생 시 국외 배출영향이 국내 배출영향보다 상대적으로 크게 나타나며 (Bae *et al.*, 2023; Kumar *et al.*, 2021; Lee *et al.*, 2021a), 이러한 국외 배출영향의 이동이 국내 지형에 의해 방해되기 때문이다. 종합하면, 고농도 발생시 국내 지형은 국외 배출영향의 북서쪽에서 남동쪽으로의 이동을 저해하여 국내 $PM_{2.5}$ 인구 노출에 긍정적인 역할을 한다.

4. 결 론

본 연구는 겨울철을 대상으로 국내 지형이 시도별 $PM_{2.5}$ 농도에 미치는 영향을 수치 모사를 통해 분석하였다. 실제 지형과 평탄 지형을 대상으로 기상 및 대기화학 모사를 각각 수행하였으며, $PM_{2.5}$ 농도에 나타나는 지형효과를 국외 배출영향과 국내 배출영향으로 구분하여 분석하였다. 풍속과 대기정체지수 등 기상 인자와 $PM_{2.5}$ 농도에 미치는 지형효과는 시도별로 상이하였다. 수도권 및 충청권 등 국내 북서부에 위치한 시도에서는 국내 지형으로 인해 $PM_{2.5}$ 농도가 대상 기간 동안 1.7%~3.0% 증가한 반면, 남동부 시도에서는 1.3%~7.6% 감소하였다. 특히, 지형효과에 의한 시도별 절대적인 $PM_{2.5}$ 농도 변화는 국외

배출영향($-1.8 \mu\text{g}/\text{m}^3 \sim 0.6 \mu\text{g}/\text{m}^3$)이 국내 배출영향($-1.1 \mu\text{g}/\text{m}^3 \sim 0.6 \mu\text{g}/\text{m}^3$)보다 컸으나, 상대적인 변화율은 국내 배출영향($-11.3\% \sim 6.3\%$)이 국외 배출영향($-8.7\% \sim 2.3\%$)보다 높았다.

일부 시도에서는 지형효과로 인해 대기정체가 증가함에도 불구하고 국외 및 국내 배출영향이 감소하는 현상이 관찰되었다. 이는 국내 지형이 한 지역에서 배출되는 대기오염물질의 희석뿐만 아니라, 지역 간 이동에도 중요한 역할을 담당한다는 것을 의미한다. 국외 배출영향의 경우 도시와 비도시를 구분하지 않고 한 시도 내에서 유사한 지형효과를 보였으나, 국내 배출영향의 경우 인구 밀집 지역인 도시에서 더 높은 지형효과가 나타났다.

국내 지형은 $PM_{2.5}$ 농도에 영향을 미쳐, 북서부 시도에서는 인체 노출을 증가시키고, 남동부 시도에서는 이를 감소시키는 방향으로 작용하였다. 이는 고농도 $PM_{2.5}$ 발생 시 상대적으로 국내 배출영향에 비해 국외 배출영향이 주요하기 때문으로, 국외 배출영향은 국내 지형에 의해 남동부로 이동이 제한되었다. 그 결과, 국내 지형은 $PM_{2.5}$ 농도에 비해 인구 가중농도를 일평균 $35 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 기준으로, 저농도일에는 8%, 고농도일에는 16% 더 민감하게 변화시켰다. 다만, 최근 국외 배출량의 감소 추세를 고려할 때, 향후 국내 배출영향은 $PM_{2.5}$ 농도 결정에 더욱 중요해질 것으로 예상된다. 따라서 도시를 비롯한 인구 밀집 지역에서는 국내 배출영향의 중요도가 더욱 높아질 것으로 보인다. 이러한 점에서 상대적으로 국외 배출영향보다 민감하게 반응하는 국내 배출영향에 대한 지형효과의 면밀한 분석이 필요하다. 이는 대기오염물질 농도뿐만 아니라 인구 노출 개선 측면에서도 중요하다. 끝으로, 본 연구는 $PM_{2.5}$ 고농도가 빈번하게 발생하는 겨울철을 중심으로 지형효과를 분석하였다. 다만 여름철 등 계절에 따라 주풍향이 변화하고, 2차 대기오염물질의 경우 전구물질의 배출과 이동의 변화에 따라 생성이 달라질 수 있으므로, 향후 국내 지역별 지형효과에 대한 연구는 지속적으로 연계되어야 할 것으로 판단된다.

References

Allabakash, S., Lim, S., Chong, K.-S., Yamada, T.J. (2022) Particulate Matter Concentrations over South Korea: Impact of Meteorology and Other Pollutants, *Remote Sensing*, 14(10), 4849.

Aunan, K., Ma, Q., Lund, M.T., Wang, S. (2018) Population-weighted exposure to PM_{2.5} pollution in China: An integrated approach, *Environment International*, 120, 111-120.

Bae, C., Kim, B.-U., Kim, H.C., Yoo, C., Kim, S. (2020) Long-Range Transport Influence on Key Chemical Components of PM_{2.5} in the Seoul Metropolitan Area, South Korea, during the Years 2012-2016, *Atmosphere*, 11(1), 48.

Bae, M., Kang, Y.-H., Kim, E., Kim, S., Kim, S. (2023) A multifaceted approach to explain short- and long-term PM_{2.5} concentration changes in Northeast Asia in the month of January during 2016-2021, *Science of The Total Environment*, 880, 163309.

Bae, M., Kim, B.-U., Kim, H.C., Woo, J.H., Kim, S. (2022a) An observation-based adjustment method of regional contribution estimation from upwind emissions to downwind PM_{2.5} concentrations, *Environment International*, 163, 107214.

Bae, M., Kim, S., Kim, S. (2022b) Quantitative Evaluation on the Drivers of PM_{2.5} Concentration Change in South Korea during the 1st-3rd Seasonal PM_{2.5} Management Periods, *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment*, 38(6), 610-623.

Bae, M., Kim, B.-U., Kim, H.C., Kim, J., Kim, S. (2021a) Role of emissions and meteorology in the recent PM_{2.5} changes in China and South Korea from 2015 to 2018, *Environmental Pollution*, 270, 116233.

Bae, M., Kim, E., You, S., Son, K., Kang, Y.-H., Kim, S. (2021b) Local Authority Level Source Apportionments of PM_{2.5} Concentrations based on the CAPSS 2016: (VII) Seoul, *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment*, 37(5), 466-486.

Cha, Y., Song, C.-K., Jeon, K.-h., Yi, S.-M. (2023) Factors affecting recent PM_{2.5} concentrations in China and South Korea from 2016 to 2020, *Science of The Total Environment*, 881, 163524.

Cheng, F.Y., Wang, Y.T., Huang, M.Q., Lin, P.L., Lin, C.H., Lin, P.H., Wang, S.H., Tsuang, B.J. (2022) Boundary Layer Characteristics Over Complex Terrain in Central Taiwan: Observations and Numerical Modeling, *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 127(1).

Choi, S.-w., Bae, C.-h., Kim, H.-c., Kim, T., Lee, H.-k., Song, S.-j., Jang, J.-p., Lee, K.-b., Choi, S.-a., Lee, H.-j., Park, Y., Park, S.-y., Kim, Y.-m., Yoo, C. (2021) Analysis of the National Air Pollutant Emissions Inventory (CAPSS 2017) Data and Assessment of Emissions based on Air Quality Modeling in the Republic of Korea, *Asian Journal of Atmospheric Environment*, 15, 2021064.

Emery, C., Liu, Z., Russell, A.G., Odman, M.T., Yarwood, G., Kumar, N. (2017) Recommendations on statistics and benchmarks to assess photochemical model performance, *Journal of the Air & Waste Management Association*, 67(6), 582-598.

Emery, C., Tai, E. (2001) Enhanced Meteorological Modeling and Performance Evaluation for Two Texas Ozone Episodes.

Guenther, A., Karl, T., Harley, P., Wiedinmyer, C., Palmer, P.I., Geron, C. (2006) Estimates of global terrestrial isoprene emissions using MEGAN (Model of Emissions of Gases and Aerosols from Nature), *Atmospheric Chemistry Physics*, 6, 3181-3210.

Han, S.-B., Song, S.-K., Moon, S.-H. (2022) Concentration Characteristics of PM_{2.5} and the Contributions of Physical and Chemical Processes to its Production during 2019 PM_{2.5} Episodes in Seoul, *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment*, 38(2), 220-236.

Han, S.-B., Song, S.-K., Shon, Z.-H., Kang, Y.-H., Bang, J.-H., Oh, I. (2021) Comprehensive study of a long-lasting severe haze in Seoul megacity and its impacts on fine particulate matter and health, *Chemosphere*, 268, 129369.

Hu, W., Zhao, T., Bai, Y., Shen, L., Sun, X., Gu, Y. (2020) Contribution of Regional PM_{2.5} Transport to Air Pollution Enhanced by Sub-Basin Topography: A Modeling Case over Central China, *Atmosphere*, 11(9).

Huang, L., Zhu, Y., Zhai, H., Xue, S., Zhu, T., Shao, Y., Liu, Z., Emery, C., Yarwood, G., Wang, Y., Fu, J., Zhang, K., Li, L. (2021) Recommendations on benchmarks for numerical air quality model applications in China - Part 1: PM_{2.5} and chemical species, *Atmospheric Chemistry and Physics*, 21(5), 2725-2743.

Jang, Y., Lee, Y., Kim, J., Kim, Y., Woo, J.-H. (2020) Improvement China Point Source for Improving Bottom-Up Emission Inventory, *Asia-Pacific Journal of Atmospheric Sciences*, 56, 107-118.

Jeong, S., Kang, Y.-H., Kim, E., Kim, S. (2024) Role of air stagnation in determining daily average PM_{2.5} concentrations in areas with significant impact of long-range transport, *Atmospheric Pollution Research*, 15(1), 102147.

Kang, Y.-H., You, S., Bae, M., Kim, E., Son, K., Bae, C., Kim, Y., Kim, B.-U., Kim, H.C., Kim, S. (2020) The impacts of COV-

- ID-19, meteorology, and emission control policies on PM_{2.5} drops in Northeast Asia, *Scientific Reports*, 10, 22112.
- Kim, E., Kim, H.C., Kim, B.-U., Kim, S. (2019) PM_{2.5} Simulations for the Seoul Metropolitan Area: (VI) Estimating Influence of Sectoral Emissions from Chungcheongnam-do, *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment*, 35(3), 226-248.
- Kim, H., Zhang, Q., Heo, J. (2018) Influence of intense secondary aerosol formation and long-range transport on aerosol chemistry and properties in the Seoul Metropolitan Area during spring time: results from KORUS-AQ, *Atmospheric Chemistry and Physics*, 18(10), 7149-7168.
- Kim, H.C., Kim, S., Kim, B.-U., Jin, C.-S., Hong, S., Park, R., Son, S.-W., Bae, C., Bae, M., Song, C.-K., Stein, A. (2017) Recent increase of surface particulate matter concentrations in the Seoul Metropolitan Area, Korea, *Scientific Reports*, 7, 4710.
- Kim, Y.-U., Do, H.-S., Kim, J.-H., Kwak, K.-H., Ahn, J., Kim, H. (2022) Applicability Study of Atmospheric Circulation and Ventilation Indices to Analysis of PM_{2.5} Episode in March 2018, *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment*, 38(6), 542-556.
- Korea Ministry of Environment (KMOE) (2023) Ultra-fine dust bad day in 2022, the fewest since observation, <https://www.me.go.kr/home/web/board/read.do?boardMasterId=1&boardId=1574330&menuId=10525> (Accessed on Nov. 9, 2023).
- Kumar, N., Park, R.J., Jeong, J.I., Woo, J.-H., Kim, Y., Johnson, J., Yarwood, G., Kang, S., Chun, S., Knipping, E. (2021) Contributions of international sources to PM_{2.5} in South Korea, *Atmospheric Environment*, 261, 118542.
- Kwak, K.-H., Han, B.-S., Park, K., Moon, S., Jin, H.-G., Park, S.-B., Baik, J.-J. (2021) Inter- and intra-city comparisons of PM_{2.5} concentration changes under COVID-19 social distancing in seven major cities of South Korea, *Air Quality, Atmosphere & Health*, 14(9), 1155-1168.
- Lee, J., Seo, J.M., Baik, J.-J., Park, S.-B., Han, B.-S. (2020) A Numerical Study of Windstorms in the Lee of the Taebaek Mountains, South Korea: Characteristics and Generation Mechanisms, *Atmosphere*, 11(5), 431.
- Lee, S., Kim, M., Kim, S.-Y., Lee, D.-W., Lee, H., Kim, J., Le, S., Liu, Y. (2021a) Assessment of long-range transboundary aerosols in Seoul, South Korea from Geostationary Ocean Color Imager (GOCI) and ground-based observations, *Environmental Pollution*, 269, 115924.
- Lee, S., Lee, S.-J., Kang, J.-H., Jang, E.-S. (2021b) Spatial and Temporal Variations in Atmospheric Ventilation Index Coupled with Particulate Matter Concentration in South Korea, *Sustainability*, 13(4), 8954.
- Nam, T.-C., Ryoo, J.-Y., Ryou, J.-W., Kim, H.-H., Park, J.-Y., Kang, H.-J., Kim, H.-Y., Kang, K.-S., Mun, D.-H., Choi, J.-h., Kim, H.-J. (2023) A Study on the Characteristics of PM_{2.5} and Estimation of Source Identification in Jeollabuk-do: Focused on Iksan City, *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment*, 39(6), 985-1006.
- Ngo, T., Letchford, C. (2008) A comparison of topographic effects on gust wind speed, *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 96(10), 2273-2293.
- Park, H., Ahn, J.-Y., Park, J., Cho, S. (2023) Characteristics of Multi-day PM_{2.5} Episode from 2015 to 2021 in Seoul, *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment*, 39(6), 1022-1037.
- Park, J., Kim, E., Kang, Y.-H., Kim, S. (2024) Assessment of Provincial Air Quality based on Air Quality Index during 2016~2022, *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment*, 40(2), 225-241.
- Park, S.K. (2021) Seasonal Variations of Fine Particulate Matter and Mortality Rate in Seoul, Korea with a Focus on the Short-Term Impact of Meteorological Extremes on Human Health, *Atmosphere*, 12(1), 151.
- Ryoo, J.-Y., Kwon, T.-H., Kang, I.-S., Lee, K.-S., Jo, C.-W., Kim, J.-S., Kim, H.-H., Jang, W., Park, J.-J., Yoo, T.-S. (2019) A Study for Characteristics of Fine Particulate Matter and Atmospheric Stagnation Considering Elevation and Backward Trajectory, *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment*, 35(5), 701-712.
- Seo, J., Gweon, J., Kim, J.B., Youn, D., Kim, K.H., Lee, K., Kim, J.Y. (2024a) Spatial Correlation Analysis on PM_{2.5} Local Variability in the Chungcheong Area, *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment*, 40(1), 131-148.
- Seo, J., Kang, Y.-H., Kim, E., Jeong, S., Kim, J., Kim, S. (2024b) Changes in Domestic Emissions Impact on Provincial PM_{2.5} and NO₂ Concentrations during the 1st to 4th Seasonal PM Management Periods, *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment*, 40(2), 242-262.
- Seo, J., Park, D.S.R., Kim, J.Y., Youn, D., Lim, Y.B., Kim, Y. (2018) Effects of meteorology and emissions on urban air quality: a quantitative statistical approach to long-term records (1999-2016) in Seoul, South Korea, *Atmospheric Chemistry Physics*, 18(12), 16121-16137.
- Shim, K., Kim, M.-H., Lee, H.-J., Nishizawa, T., Shimizu, A., Kobayashi, H., Kim, C.-H., Kim, S.-W. (2022) Exacerbation of PM_{2.5} concentration due to unpredictable

- weak Asian dust storm: A case study of an extraordinarily long-lasting spring haze episode in Seoul, Korea, *Atmospheric Environment*, 287, 119261.
- Skamarock, W.C., Klemp, J., Dudhia, J., Gill, D.O., Barker, D., Wang, W., Powers, J.G. (2008) A Description of the Advanced Research WRF Version 3. 27, 3-27.
- Son, K., Kim, E., Bae, M., You, S., Kang, Y.-H., Kim, H.C., Kim, B.-U., Kim, S. (2020) Evaluations on PM_{2.5} Concentrations and the Population Exposure Levels for Local Authorities in South Korea during 2015-2017, *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment*, 36(6), 806-819.
- 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.
- Wen, Y., Xiao, J., Yang, J., Cai, S., Liang, M., Zhou, P. (2022) Quantitatively Disentangling the Geographical Impacts of Topography on PM_{2.5} Pollution in China, *Remote Sensing*, 14(20), 6309.

감사의 글

본 연구는 국가미세먼지정보센터의 지원을 받아 수행되었습니다.

Authors Information

- 정성은 (아주대학교 환경공학과 석사과정)
(atmos1214@ajou.ac.kr)
- 강윤희 (아주대학교 환경연구소 연구조교수)
(ykang@ajou.ac.kr)
- 김은혜 (아주대학교 환경연구소 연구조교수,
군산대학교 환경공학과 조교수)
(ekim@kunsan.ac.kr)
- 김순태 (아주대학교 환경안전공학과 교수)
(soontaekim@ajou.ac.kr)