

논문

사업장 배출형태에 따른 주변 지역 초미세먼지 농도 영향: 비민수용무연탄 배출원 사례 연구

The Importance of Plant Emission Type on PM_{2.5} Impact Estimation: A Case Study of Nonpublic Anthracite Burning Facilities

유승희, 강윤희¹⁾, 김형천²⁾, 유 철²⁾, 김순태*

아주대학교 환경안전공학과, ¹⁾아주대학교 환경연구소, ²⁾국가미세먼지정보센터

Seunghee You, Yoon-hee Kang¹⁾, Hyungcheon Kim²⁾, Chul Yoo²⁾, Soontae Kim*

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

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

²⁾Emission Inventory Management Team, National Center for Fine Dust Information, Cheongju, Republic of Korea

접수일 2022년 8월 13일
수정일 2022년 9월 26일
채택일 2022년 10월 10일

Received 13 August 2022
Revised 26 September 2022
Accepted 10 October 2022

*Corresponding author
Tel : +82-(0)31-219-2511
E-mail : soontaekim@ajou.ac.kr

Abstract Emission impacts of nonpublic anthracite burning facilities in Dangjin, Pohang, and Gwangyang before and after vertical reallocation of low-level emissions to elevated emissions on PM_{2.5} concentration were estimated with Community Multiscale Air Quality Modeling System (CMAQ) model simulations during the Korea-US Air Quality Study 2016. When CAPSS 2016, anthropogenic emissions inventory in South Korea, was examined, the low-level emissions explained more than 96% of the total primary PM_{2.5} and SO₂ emissions, possibly due to uncontrolled emission factors applied during the emission estimate. Consequently, CMAQ simulations including the low-level emissions over-predicted PM_{2.5} and SO₂ concentrations by up to 7.5 times and 9.2 times respectively of the observed concentrations at adjacent air quality monitoring stations. When the low-level emissions were vertically reallocated into elevated ones emitted from large stacks, their impacts on surface PM_{2.5} concentrations in surrounding areas decreased by up to 66~82%. In addition, the vertical reallocation lowered modeled PM_{2.5} concentrations by one-fifth, making them more comparable to the surface observations. The simulated SO₂ concentrations at airborne measurement altitudes (300~500 m) increased only by a few ppb which is a fairly small change compared to the surface-level SO₂ change after the vertical reallocation (i.e., a 28.5 ppb decrease of simulated SO₂ concentrations in Gwangyang). It implies that not only the emission rates of air pollutants but also their precise release information should be prepared together prior to developing emission reduction plans and evaluating the effects on air pollution alleviation. Moreover, emission reduction plans should be evaluated in terms of ambient concentration rather than emission itself.

Key words: Point source, Low-level emissions, Vertical reallocation, PM_{2.5}, SO₂

1. 서론

PM_{2.5} (Particulate Matter less than 2.5 μm in diameter)는 심혈관 및 호흡기 질환 등 건강에 악영향을 미친다(Yim *et al.*, 2019; Han *et al.*, 2018; Liu *et al.*, 2018; Zhang *et al.*, 2017). 최근 빈번하게 발생하는 고농도

PM_{2.5} 사례는 국민들의 관심과 불안감을 가중시켰다(Yeo and Kim, 2019; Kim *et al.*, 2015). 정부에서는 고농도 PM_{2.5} 발생 빈도와 농도 감소를 위해 ‘미세먼지 관리 종합대책 (ME, 2017)’ 및 ‘미세먼지 계절관리제 (ME, 2019)’ 등 PM_{2.5} 관련 배출 저감정책을 수립하고 이행 중에 있다.

국내 대기질 개선 정책 수립 시에는 환경부에서 제공하는 국가 배출목록(Clean Air Policy Support System; CAPSS)이 주로 이용된다(Bae *et al.*, 2017; Kim *et al.*, 2017b; Jin *et al.*, 2012). 하지만, 현재 배출목록에서는 일부 배출지역과 배출부문에 대한 배출량의 과대 산정 및 누락 등이 보고되고 있다(Kang *et al.*, 2021a; Kim *et al.*, 2020a; You *et al.*, 2020). 특히, 대형 점 오염원이 위치하거나 배출이 밀집된 산업단지에서 PM_{2.5}, NO₂ 및 SO₂ 농도의 과대 및 과소 모사는 대기질 현황 이해, 농도 개선을 위한 대책 수립과 정책 효과 분석 시 불확도의 원인이 될 수 있다(Kang *et al.*, 2021b; Kim *et al.*, 2021; Nam *et al.*, 2018; Kim *et al.*, 2017b). Kim *et al.* (2020c)에 따르면 당진 지역의 대형 점 오염원에 대하여 하향식(Top-down)으로 산정된 배출량이 기존 상향식(Bottom-up) 방식의 배출량에 비해 높았다.

또한 대형 배출시설에서 대기오염물질이 배출될 시, 점 또는 면 배출과 같이 어떤 형태로 대기 중으로 배출되는지에 따라 주변 지역에 미치는 농도 영향은 크게 달라진다(Kim *et al.*, 2020c; Ju *et al.*, 2019a; Lee and Park, 2019). 따라서, 배출량은 물론 배출형태, 배출조건 등에 대한 정확한 정보는 해당 오염원이 주변 대기질에 미치는 영향 분석과 배출량 삭감에 따른 농도 개선 평가 시에 중요한 입력자료가 된다. 그럼에도 불구하고 현재 CAPSS 작성 시에는 배출 관련 상세 정보들이 누락되어 있다(Kim *et al.*, 2020b).

이와 관련하여 배출량 규모에서 국내 Primary PM_{2.5}와 SO₂의 25%, 12%를 차지하는 비민수용무연탄 이용 사업장의 경우 배출량과 관련 불확도는 기존 연구에서도 언급된 바 있으나(Kim *et al.*, 2021; Park *et al.*, 2021; Ju *et al.*, 2018), 면과 점 배출형태에 따른 농도 영향을 한 사업장 또는 배출지역에 대해 직접 비교한 연구는 진행되지 못하였다. 환경부 자료에 따르면, 미세먼지 계절관리제 등 국내 배출량 삭감에 따른 PM_{2.5} 농도 저감효과가 해당 사업장이 위치한 지역에서 뚜렷하게 높다(ME, 2020).

본 연구에서는 배출량 저감정책에서 PM_{2.5} 농도 감

소 효과가 크게 나타나는 비민수용무연탄 관련 사업장의 배출 영향 분석 시 배출량과는 별도로 배출형태의 중요도를 검토하였다. 이를 위해 비민수용무연탄 배출량이 많은 지역에서 해당 오염원을 대상으로 면과 점 등 배출형태에 따른 PM_{2.5} 농도 영향을 정량적으로 분석하였다. 또한, 배출형태별 모사 농도를 지표 및 항공 관측 농도와 비교하여 배출량과 배출 고도 등 배출 정보의 중요성을 제시하고자 하였다. 이러한 연구 결과는 효과적인 대기질 개선 정책 수립과 정확한 평가를 위한 배출 정보 고도화의 필요성과 함께, 향후 미세먼지 계절관리제 등 PM_{2.5} 농도 저감 노력 시 배출량 중심의 관리에서 벗어나, 농도 중심의 관리로 전환되어야 하는 근거로 활용될 수 있을 것으로 기대된다.

2. 연구 방법

2.1 대기질 모사 방법

비민수용무연탄 관련 오염원을 대상으로 면과 점 배출형태에 따른 주변 지역 대기질 영향을 분석하기 위해 대기질 모사를 수행하였다. 연구 기간은 지표 관측과 항공 관측자료를 동시에 확보할 수 있는 Korea-US Air Quality Study 2016 (KORUS-AQ 2016, <https://www-air.larc.nasa.gov/missions/korus-aq/>) 기간인 2016년 5월 1일부터 6월 15일까지로(pre-run 기간 15일) 설정하였다. 모사 영역은 국외 대기오염물질 배출에 의한 영향을 고려할 수 있도록 27 km 수평 격자 해상도의 동북아 모사 영역(그림 1(a))과 9 km 수평 격자 해상도의 한반도 모사 영역(그림 1(b))을 포함한다. 비민수용무연탄 관련 배출량이 높은 당진(Kim and Jang, 2014), 포항 및 광양이 포함된 개별적인 3 km 수평 격자 해상도의 모사 영역(그림 1(c)~(e))을 구성하였으며, 상위 영역에 대한 모사 결과를 경계조건으로 활용하였다. 기상 입력자료는 WRF (Weather Research and Forecasting) 모델 version 3.9.1을 이용하여 준비하였다. 이때 FNL Operational model Global

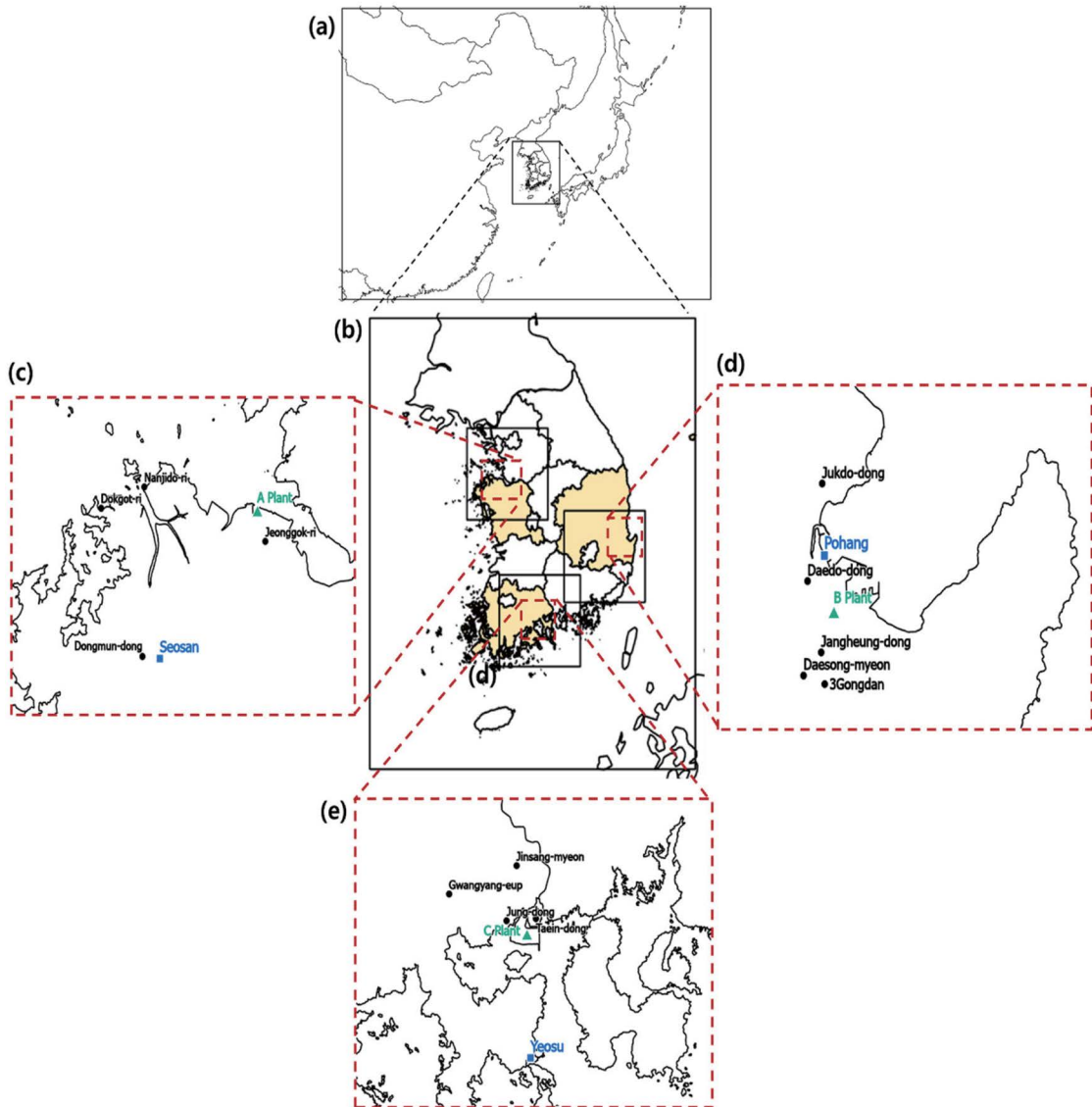


Fig. 1. Research area overview: modeling domains at horizontal grid resolutions of (a) 27-km, (b) 9-km, and 3-km over (c) Dangjin, (d) Pohang, and (e) Gwangyang. Black circles and blue squares represent the locations of AMS and weather stations, respectively. Green triangles indicate the locations of the large point sources targeted in this study.

tropospheric analyses 자료를 WRF 모사의 초기/경계 장으로 이용하였다. WRF 모사 결과는 MCIP (Meteorology-Chemistry Interface Processor) version 4.3 을 통해 CMAQ의 입력자료 형식으로 변환하였다.

인위적 배출량은 국외의 경우 CREATE 2015 (Com-

prehensive Regional Emissions inventory for Atmospheric Transport Experiment 2015; Woo *et al.* (2020))를, 국내에 대해서는 2016년을 대상으로 산정된 국가 배출 목록 (이하, 'CAPSS 2016', NAIR, 2018)을 이용하였으며, SMOKE (Sparse Matrix Operator Kernel Emission)

version 3.1을 통해 시공간 할당 및 화학종 분배를 수행하였다. 본 연구에서 이용된 CAPSS 2016은 ‘미세먼지 관리 종합대책’ 및 ‘미세먼지 계절관리제’ 등 미세먼지 저감정책 수립 시 이용된 배출목록과 동일하다. 또한, 자연적 배출량은 MEGAN (Model of Emissions of Gases and Aerosols from Nature) version 2.04 (Guenther *et al.*, 2006)를 통해 생성하였다. 대기오염물질 배출형태에 따른 주변 지역 PM_{2.5} 및 대기오염물질의 농도 영향을 평가하고자 마련된 기상 및 배출량을 CMAQ (Community Multi-scale Air Quality) version 5.3.2 (US EPA, 2020) 구동 시 입력자료로 이용하였다. 이때, 대기질 모사는 총 22개의 수직층으로 구성하였다. 지표 1층의 높이(full height)는 모사 영역에서 평균 32 m이다. 대기질 모사에서 점 형태 배출이 영향을 미칠 수 있는 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9층의 높이는 각각 80, 162, 243, 326, 409, 493, 577, 748 m이며, 1 km 고도 이내에 10개의 수직층이 존재한다.

2.2 지표 및 항공 관측자료

기상 모사 결과에 대한 재현성 평가는 그림 1(c)~(e)에 제시한 당진, 포항 및 광양 사업장 인근의 서산, 포항, 여수의 종관기상관측자료 (ASOS, Automated Synoptic Observing System)를 이용하였고, 지상 2-m 기온과, 지상 10-m 풍속에 대해 모사 결과와 관측값을 비교하였다.

대기질 모사의 경우 PM_{2.5}, NO_x, SO₂에 대하여 관측 농도와 모사 농도를 비교하였다. 관측 농도는 대상 지역과 인접한 지역에 위치한 도시대기측정망 자료 (<https://www.airkorea.or.kr>)를 사용하였다. 일평균 농도 분석 시, 도시대기 측정망 자료 중 24시간 동안 관측된 자료의 개수가 75% 미만인 경우 결측으로 간주하였다. 또한, 대상지역의 사업장 위치에서 상층 농도를 살펴보기 위하여 2016년 5월부터 6월까지 수행된 KORUS-AQ 2016 기간 동안의 한서 King Air 관측자료를 활용하였다. 항공 관측은 1초 간격으로 측정된 SO₂ 자료를 이용하였으며, 대상기간은 대상지역과 인접한 지역을 비행한 기간 중 상층 관측 농도와 배출형

태 전환 영향을 비교할 수 있는 2016년 5월 11일(광양)과 2016년 5월 22일(당진)에 대해 분석하였다.

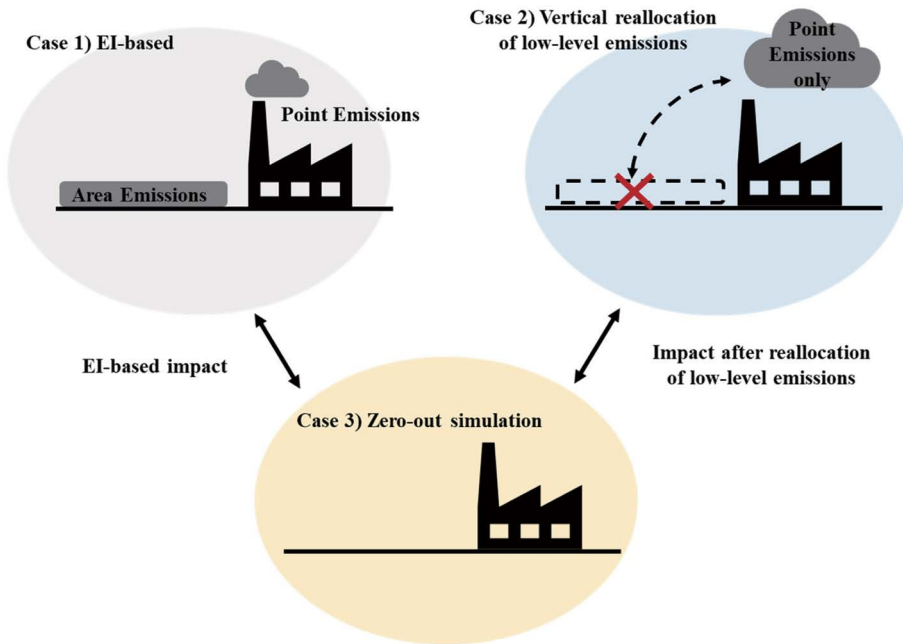
2.3 배출형태 차이에 따른 농도 영향

현재 CAPSS에서는 연료 연소와 관련된 면 및 점 오염원에 대한 배출량을 다음과 같이 산정한다. 우선, 점 형태의 배출량은 대기배출원관리시스템인 SEMS (Stack Emission Management System)를 기반으로 산정된다. 점 형태로 배출되는 대기오염물질은 오염원에서 발생된 후 대기 중으로 배출되기 이전에 방지시설이 적용된다 (Controlled emission). 방지시설에 의해 제거된 대기오염물질 발생량은 배출량 산정에서 제외된다 (Jang *et al.*, 2011). 반면, 면 형태의 배출량은 앞서 설명한 점 형태의 배출량에서 SEMS에서 보고되지 않은 잔여 연료분에 대해 배출계수를 적용하여 산정된다. 주목할 점은 CAPSS에서는 면 형태의 배출량 산정은 점 형태의 배출량과 다르게 대기오염물질의 발생량에 대한 별도의 제어 장치가 적용되지 않는 것으로 가정한다 (Uncontrolled emission). 이는 SEMS 기반으로 점 형태의 배출량 산정 시에는 방지시설의 대기오염물질 저감효율이 적용되어 배출량은 발생량에 비해 현저히 낮아진다 (발생량 < 배출량). 반면, 면 형태의 배출량은 배출계수와 활동도를 기반으로 발생량이 산정되며, 추가적인 방지시설은 설치되지 않은 것으로 가정된다 (발생량 = 배출량). 본 연구에서는 비민수용무연탄 관련 배출원이 위치한 지역을 대상 지역으로 선정하였다. 선행 연구에서 해당 배출원이 위치하는 경북 포항, 전남 광양 지역의 PM_{2.5}, SO₂ 모사 농도는 관측 농도를 수 배 이상 과대 평가를 지적한 바 있다 (Kim *et al.*, 2022; Kim *et al.*, 2021).

점과 면 배출형태별 오염원 주변 지역에 대한 대기오염물질의 농도 영향을 분석하기 위하여 표 1과 같이 대기질 모사를 구성하였다. Case 1은 CAPSS 2016에 기반한 모사로, 비민수용무연탄 오염원의 점과 면 형태 배출이 모두 포함된다 (이하, ‘배출목록 기반 모사’; EI-based simulation). 다만, 앞서 설명한 바와 같이 면 형태의 발생량에는 배출량 제어시설이 적용되지 않

Table 1. A list of CMAQ simulations operated in this study.

Run	Description	Emission type
Case 1	EI-based simulation	Point and area
Case 2	Simulation after vertical reallocation of low-level area emissions in the nonpublic anthracite burning facility	Point only
Case 3	Simulation after a 100% emission reduction for nonpublic anthracite burning facility	No emission

**Fig. 2.** A conceptual diagram of air quality simulations adopted in this study.

때문에 점 형태보다는 면 형태의 배출량이 높다.

Case 2는 당진, 포항, 당진 세 지역에 대한 Case 1 모사에 적용된 비민수용무연탄 배출량 중 면 형태 배출을 점 형태로 전환한 후 대기질 모사(이하, '수직 재분배 모사'; Vertical reallocation simulation)이다. 유효 굴뚝 높이가 낮을수록 지표에 미치는 배출 영향이 커지며, 높을수록 그 영향은 작아진다(Ghim and Son, 1993). 이에 본 연구에서는 Case 2 모사에 필요한 배출량 마련 시에 필요한 굴뚝 제한(e.g., 굴뚝 높이, 직경 등)은 해당 사업장의 굴뚝들 가운데 가장 높은 굴뚝(당진, 포항 150 m, 광양 120 m)을 가정하였다(부록 표 S1 참조). 이러한 대형 굴뚝의 선택에서 면 형태 배출과 점 형태 배출 차이에 따른 가장 대조적인 농도

영향이 제시될 수 있으며, 이러한 결과를 통해 올바른 배출조건의 중요성이 부각될 수 있다. 면 형태의 배출량을 점 형태의 배출량으로 전환 시에는 별도의 방지 시설 등 배출량 변화는 고려하지 않고, 동일한 배출량에 대한 배출형태의 전환만을 가정하였다. 마지막으로 배출형태 전환 전후(Case 1과 Case 2)의 대기질 모사 농도와 주변 지역에 대한 농도 영향 변화를 분석하기 위해 해당 지역의 비민수용무연탄 관련 오염원에서 배출되는 대기오염물질 배출량을 100% 제외한 민감도 모사(Case 3)를 추가적으로 수행하였다. 이때, 세 가지 대기질 모사(Case 1~3) 모두 동일한 기상 입력자료를 사용하였다.

3. 연구 결과

3.1 주요 비민수용무연탄 배출량

무연탄을 사용하는 사업장에서는 1차 PM_{2.5} (Primary PM_{2.5}; PPM_{2.5}) 외에 PM_{2.5}의 전구물질인 NO_x, SO₂, VOC, NH₃ 등을 대기 중으로 배출한다. 해당 전구물질은 광화학 반응을 통해 2차 PM_{2.5}를 생성하여 주변 지역의 대기질에 영향을 미칠 수 있다 (Ju *et al.*, 2019; Seinfeld and Pandis, 2006). CAPSS에서는 발전 등 공공 목적의 배출원을 제외한 민간 사업장에서 이용되는 무연탄을 ‘비민수용무연탄’으로 정의하고 있다 (NAIR, <https://www.air.go.kr/>). CAPSS 2016 기반 국내 전체 배출량 대비 비민수용무연탄 관련 배출량의 점유율은 NO_x 2.9% (36,307 ton/year), SO₂ 14.7% (52,705 ton/year), PPM_{2.5} 34.1% (34,199 ton/year), VOC 0.1% (1,099 ton/year), NH₃ 0.1% (2 ton/year)였다. 비민수용무연탄 관련 국내 NO_x 배출량을 시도별로 살펴보면, 충남 36.9%, 경북 35.1%, 전남 21.1%를 차지하며, 이외 지역의 배출량 합은 약 6.9%이다.

당진의 비민수용무연탄 관련 PPM_{2.5} 배출량 가운데 면 형태의 배출량(이하 ‘면 배출량’)은 12,226 ton/year였으며, 점 형태의 배출량(이하 ‘점 배출량’)은 86 ton/year로, 점 배출량 대비 면 배출량이 142배가량 높다(그림 3). SO₂의 경우, 배출형태에 따라 40배(면: 18,090 ton/year, 점: 443 ton/year) 차이를 보였다. 충남 뿐 아니라 경북에 위치한 포항 및 전남 광양에서도 배출형태에 따른 차이를 보였다. 포항에서는 SO₂의 면/점 배출량 비가 95.5(면: 20,239 ton/year, 점: 212 ton/year)였으며, 광양에서는 24.3(면: 10,203 ton/year, 점: 419 ton/year)이었다. CAPSS 2016에서 비민수용무연탄 PPM_{2.5} 배출량 중 면 배출량이 포항에서는 99%, 광양에서는 96%로 대부분을 차지하였다. 앞서 언급한 바와 같이 점 배출량에 비해 월등히 높은 면 배출량은 대기질 모사를 통한 대기오염물질의 영향 분석 시, 주변 지역에 대한 과대 모사를 유발할 수 있다.

3.2 기상 및 대기질 기본모사 평가

기상 모사의 재현성 평가를 위해 기상 관측소에서

관측된 지상 2-m 기온 및 지상 10-m 풍속을 모사 결과와 비교하였다(부록 그림 S1, S2 참조). 지상 2-m 기온의 경우, 세 곳의 기상대에서 관측된 기온(서산: 18.9°C, 포항: 20.3°C, 여수: 19.6°C)과 모사 기온(서산: 18.6°C, 포항: 20.1°C, 여수: 19.5°C)은 0.1~0.3°C의 차이를 보였다. 또한, 대상기간 관측된 지상 10-m 평균 풍속은 세 곳에서 2.2, 2.6, 2.8 m/s이며, 모사 풍속은 2.6, 2.7, 2.7 m/s로 0.1~0.4 m/s 차이를 보였다.

대기질 모사(Case 1) 평가는 대상지역에 위치한 도시대기측정망 자료를 이용하여 수행하였다(그림 1 참조). 2016년 기준 충남에 위치한 7곳의 관측소 평균 PM_{2.5} 농도는 대상기간 동안 26.8 µg/m³으로 관측되었으며, 모사 농도는 25.1 µg/m³으로 1.7 µg/m³ 과소 모사하였다. 이 중 당진 정곡리의 경우, 대상기간 동안 관측된 평균 PM_{2.5} 농도는 29.4 µg/m³이었으나, 모사 농도는 43.3 µg/m³으로 1.5배 과대 모사하였다. 같은 지점에서 SO₂ 농도는 4배가량 과대 모사하였다(관측 농도: 3.1 ppb, 모사 농도: 12.7 ppb; 그림 4(a) 및 부록 표 S2).

포항의 경우, 대상 기간 평균 PM_{2.5} 관측 농도는 22.7 µg/m³, 모사 농도는 50.7 µg/m³ 2배가량 과대 모사하였다. 이를 각 측정소별로 살펴보면, 장항동에서 PM_{2.5} 관측 농도는 21.7 µg/m³, 모사 농도는 161.7 µg/m³으로, 7.5배 이상 과대 모사하였다. 이외에도 죽도동 및 대도동에서도 2배가량 과대 모사하였다(죽도동: 관측 13.1 µg/m³, 모사 21.1 µg/m³; 대도동: 관측 18.5 µg/m³, 모사 45.8 µg/m³; 그림 4(b) 및 부록 표 S2). PM_{2.5}뿐만 아니라 장항동의 경우, SO₂ 관측 농도는 9.3 ppb, 모사 농도는 85.2 ppb로 9배가량 과대 모사하였으며, 대도동 역시 4배 정도 과대 모사를 보였다(관측 농도: 5.3 ppb, 모사 농도: 21.3 ppb). 광양 4곳의 측정소에 대한 PM_{2.5} 및 SO₂ 모사 농도는 관측 농도를 1~3배 가량 과대 평가하였다. 그중 태인동에서 대상기간 평균 PM_{2.5} 관측 농도는 27.9 µg/m³, 모사 농도는 85.3 µg/m³으로 3배가량 과대 모사하였다(그림 4(c) 및 부록 표 S2(c)).

세 지역에 위치한 9곳의 측정소 중 몇몇 지점에서는 기준성 대기오염물질의 관측 농도를 수 배 초과하

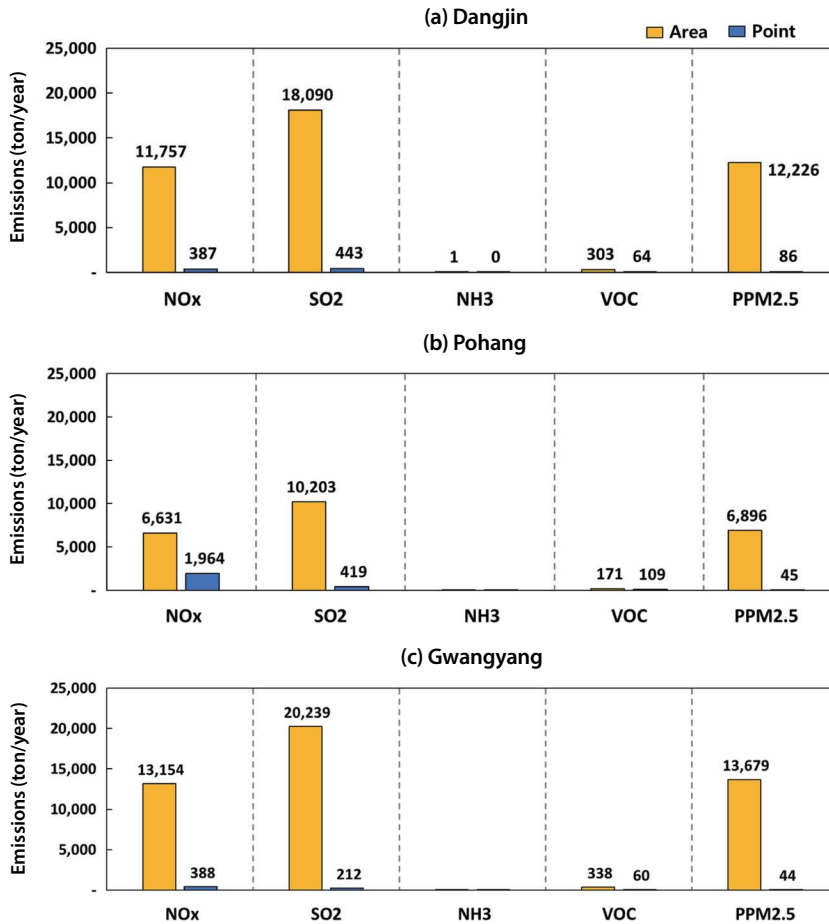


Fig. 3. Annual emission rates of NO_x, SO₂, NH₃, VOC, and Primary PM_{2.5} (PPM_{2.5}) emissions from anthracite-burning nonpublic facilities located in (a) Dangjin, (b) Pohang, and (c) Gwangyang in CAPSS 2016.

여 모사되었다. 특히, PM_{2.5}와 SO₂에 대한 과대 모사가 두드러졌으며, 과대 모사를 보인 측정소 주변에는 비민수용무연탄을 사용하는 대형 사업장이 위치하는 공통점이 나타났다. 이는 3.1절에서 언급한 바와 같이 이들 오염원에서 PPM_{2.5}와 SO₂ 면 배출량이 높게 나타났음을 함께 고려할 수 있다.

이를 정리하면, 대상 지역에서 PM_{2.5} 및 SO₂ 농도는 최대 7.5배, 9.2배 과대 모사되었다. 이는 입력자료인 CAPSS 2016의 배출량 또는 배출형태 등의 불확도에서 기인하는 것으로 사료된다. 특히, 3.1절에서 보인 바와 같이 면 배출량이 점 배출량보다 월등히 많은 점

을 고려하면, 해당 배출량의 산정 절차에 대한 검토와 산정된 배출량에 대한 평가가 필요하다.

3.3 배출형태에 따른 PM_{2.5} 영향 비교

그림 5(a)와 (b)는 대상 비민수용무연탄 배출원의 면 배출량을 그림 2에 보인 바와 같이 수직 재분배 전 (배출목록 기반 모사, Case 1)과 후(수직 재분배 모사, Case 2) 대기질 모사 결과이며, 대상기간 동안 PM_{2.5} 농도 영향을 확인하고자 지상 1층에 대하여 수평적인 공간분포를 제시하였다.

당진의 경우, 대상 배출원 주변 지역에 대한 PM_{2.5}

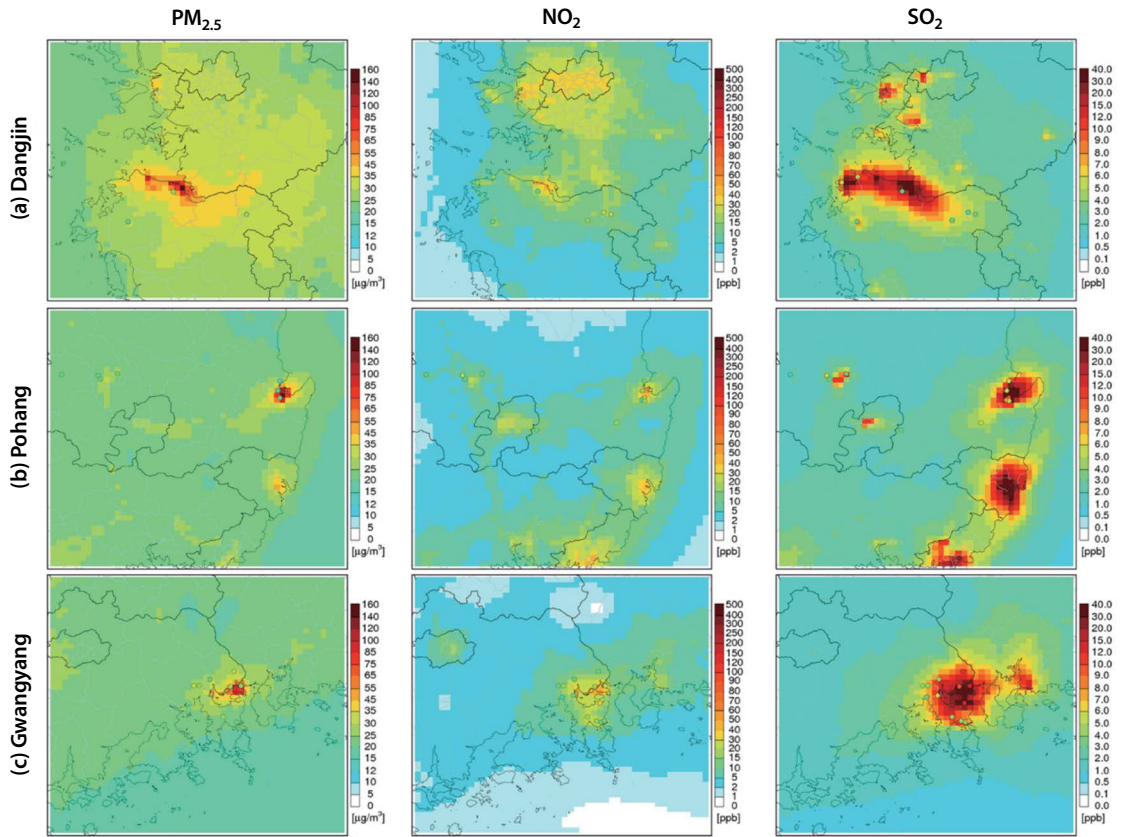


Fig. 4. Spatial distributions of period mean PM_{2.5}, NO₂, and SO₂ concentrations simulated in and around (a) Dangjin, (b) Pohang, and (c) Gwangyang based on the EI-based simulation (Case 1). The colored circles indicate the observed concentrations at the air quality monitoring stations.

농도 영향은 배출목록 기반 모사(Case 1)에서는 2.6 µg/m³ (격자별 영향: 0.3~113.0 µg/m³), 수직 재분배 모사(Case 2)에서는 1.1 µg/m³ (격자별 영향: 0.1~20.8 µg/m³)로 대상 지역 평균 58% 감소하였으며, 격자별 최대 배출 영향은 82% 감소하였다. 이는 지표에서 배출되던 대기오염물질이 배출량 수직 재분배 후 150 m 굴뚝을 통해 배출되면서 지상 1층 PM_{2.5} 농도가 감소한 것으로 설명된다.

포항과 광양에서도 비민수용무연탄 관련 배출에 의한 주변 지역 평균 PM_{2.5} 배출 영향은 수직 재분배 후 각각 1.0 µg/m³ (차이 전, Case 1: 1.7 → 차이 후, Case 2: 0.7 µg/m³), 0.1 µg/m³ (차이 전, Case 1: 1.2 → 차이 후, Case 2: 0.9 µg/m³) 감소하여 평균 58.8%, 25.0% 감

소를 보였다. 특히, 수직 재분배 차이 전후의 격자별 최대 배출 영향은 포항에서는 136.0 µg/m³에서 35.1 µg/m³으로, 광양에서는 56.0 µg/m³에서 18.6 µg/m³으로 각각 74.2%, 66.8% 감소하였다. 이러한 결과에서, 대기오염물질은 ‘얼마나 배출되는가’와 함께 ‘어떻게 배출되는가’에 따라 주변 지역에 미치는 PM_{2.5} 농도 영향이 크게 차이를 보일 수 있다.

3.4 배출 및 농도의 수직 재분배

그림 6은 대상지역에서 먼 배출을 점 배출로, 수직 재분배 전후 NO₂, SO₂, PPM_{2.5} 배출의 고도 변화를 비민수용무연탄 배출원을 중심으로 보인 것이다(그림 5 참조). 세 지역의 PPM_{2.5}, NO_x, SO₂ 배출량은 먼 → 점

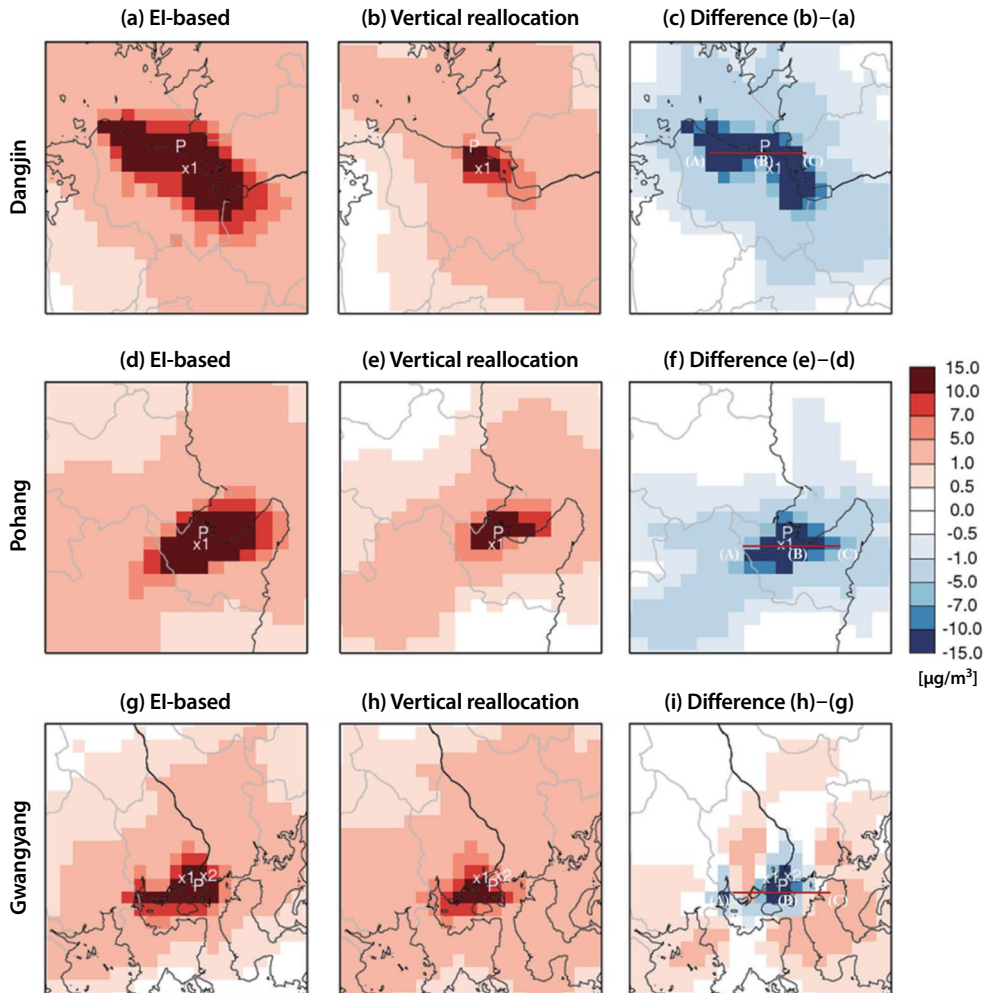


Fig. 5. Impacts of the anthracite-burning nonpublic facilities estimated from the EI-based (Case 1) and vertical reallocation (Case 2) simulations on $PM_{2.5}$ concentrations, and the difference (right) in and around Dangjin (top), Pohang (middle), and Gwangyang (bottom) during the simulation period. 'P' and 'x' represent the locations of plants and adjacent air quality monitoring stations, respectively. Red lines show the locations of curtain plots in Section 3.4.

형태로 배출 고도가 높아지면서 지상 1층(0~32 m)에서 감소하며, 평균적인 유효 연돌고에 해당하는 3~5층(약 80~326 m)에서 증가한다(그림 6). 3차원 광화학 모델에서 유효 연돌고의 결정은 기상 조건에 따라 매시간 달라지며, 이로 인해 점 배출량의 배출 고도는 시간에 따라 변화한다. 면 배출량의 경우 공간 할당계수를 이용하여 격자에 분배되며, 많은 경우 하나의 격자가 아닌, 해당 시군 내의 복수 격자에 할당된다

(Kim *et al.*, 2008). 이러한 이유로 그림 6에서 지상 1층 배출량은 대상 배출원을 중심으로 두 개 이상의 복수 격자에서 감소한다.

그림 7에서는 면 배출량을 점 배출량으로 수직 재분배 전후의 수직적 $PM_{2.5}$ 모사 농도 변화를 살펴보았다. 세 지역 모두 배출량의 수직 분포 변화에 따라 $PM_{2.5}$ 농도의 증감을 보였다. 전체적으로 배출량이 증가한 고도에서는 $PM_{2.5}$ 농도가 증가하고, 반대로 배출

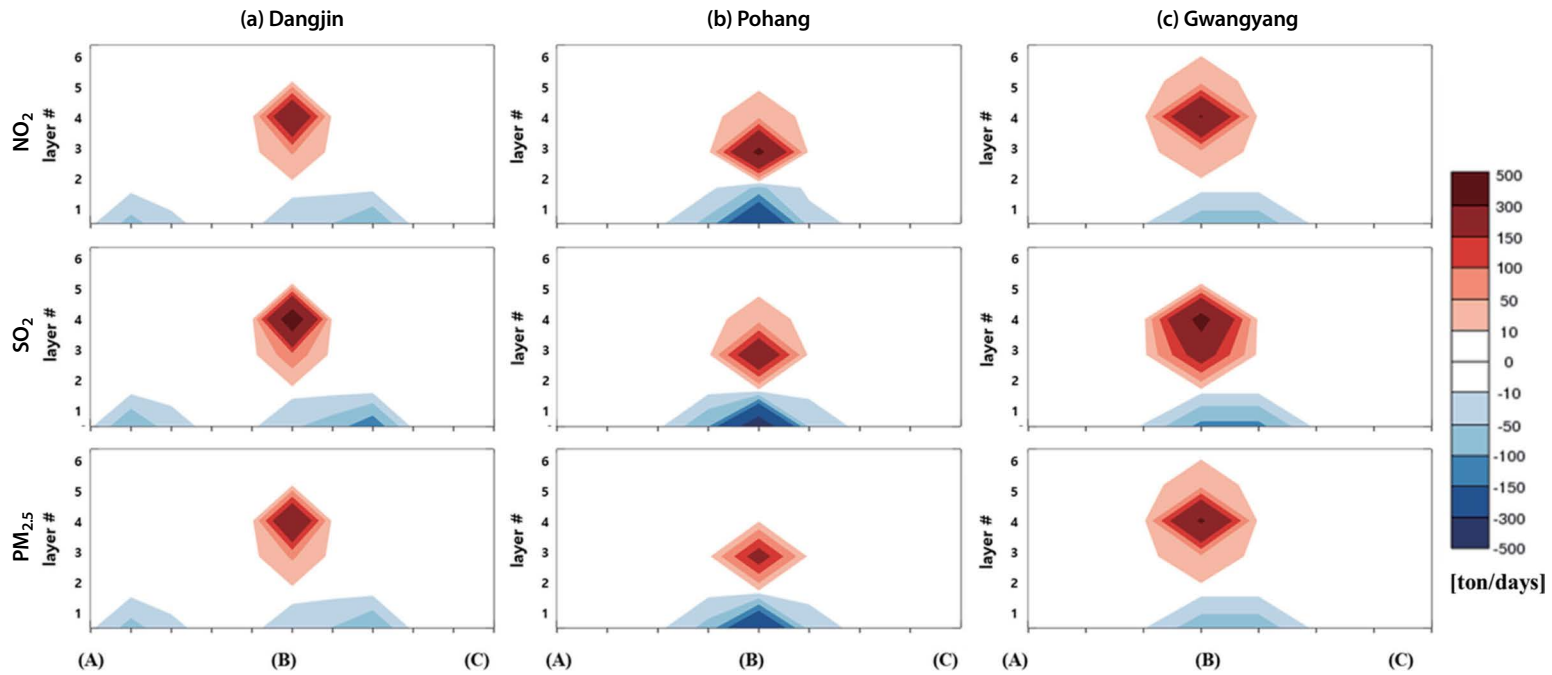


Fig. 6. Differences in vertical distributions of NO_2 , SO_2 , and $\text{PM}_{2.5}$ emissions between before and after vertical reallocation of low-level emissions from anthracite-burning facilities in (a) Dangjin, (b) Pohang, and (c) Gwangyang. X-axis represents the curtain plot locations indicated by the red line in Fig. 5.

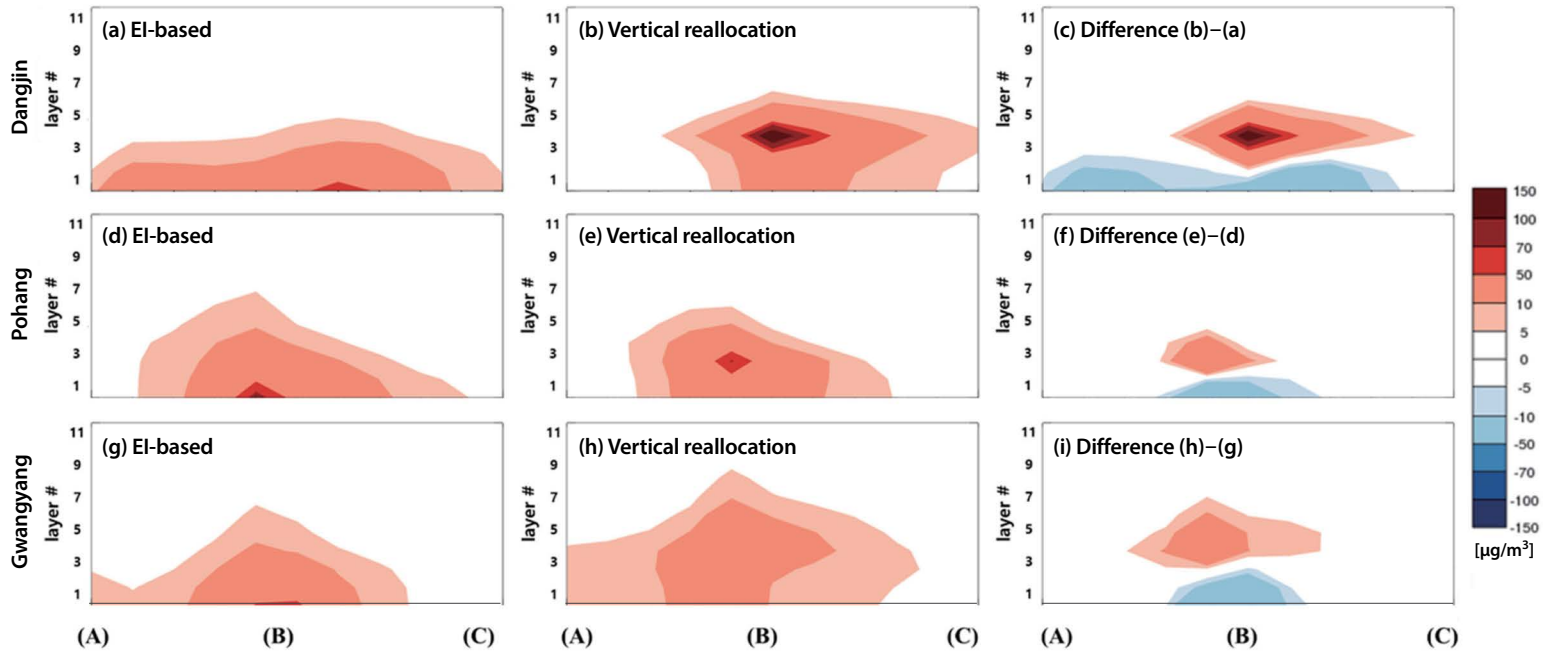


Fig. 7. Period mean vertical distributions of PM_{2.5} concentrations from the El-based (left), vertical reallocation (center) simulations, and the differences (right) in Dangjin, Pohang, and Gwangyang. X-axis represents the curtain plot locations indicated by the red line in Fig. 5.

량이 감소한 고도에서는 PM_{2.5} 농도가 낮아진다. 한 가지 주목할 점은 해당 배출량이 면 형태에서 점 형태로 변화할 시, 주변 지역 지상 1층의 PM_{2.5} 농도는 크게 감소한다.

포항과 광양에서 배출형태 차이 시 1~2층(80 m 이내)에서 PM_{2.5} 농도의 4.8~24.5 µg/m³, 14.5~29.6 µg/m³ 감소하였으며, 면 형태의 배출을 점 오염원으로 배출형태 차이 시 80 m 이상 높이에서 PM_{2.5} 농도가 6.9~21.6 µg/m³, 1.0~16.7 µg/m³으로 증가하였다. 당진의 경우, 배출량 수직 재분배 후 PM_{2.5} 모사 농도는 80 m 이내의 높이에서 8.0~17.5 µg/m³ 감소하였으며, 160~240 m (3~4층에 해당)에서 3.1~22.6 µg/m³ 증가하였다.

3.5 지표 관측 농도와와의 비교

그림 8에서는 배출형태 전환 전후의 PM_{2.5} 및 SO₂ 모사 농도를 대상지역에 위치한 측정소의 관측 농도와 비교하였다. 3.1절에서 논의한 바와 같이 CAPSS

내에서는 비민수용무연탄 이용 배출원에서는 PPM_{2.5}와 SO₂의 배출량이 다른 배출물질에 비해 크게 나타났다. 그림 8의 배출목록 기반 모사(Case 1) 결과를 보면, 포항 증흥동과 광양 태인동에서 PM_{2.5}와 SO₂의 과대 평가가 두드러진다.

배출형태 차이에 따른 배출 영향 변화가 가장 뚜렷했던 포항 증흥동의 경우, 배출목록 기반 모사(Case 1)에서는 PM_{2.5}와 SO₂ 농도가 각각 161.7 µg/m³과 85.2 ppb로 관측에 비해 높으나, 수직 재분배 모사(Case 2)에서는 37.6 µg/m³, 20.6 ppb로 낮아져 RMSE (Root Mean Square Error)가 PM_{2.5}에 대해서는 149.9 µg/m³에서 28.0 µg/m³으로, SO₂는 81.4 ppb에서 11.7 ppb로 낮아졌다. 모사 농도 변화는 포항 죽도동과 대도동에서도 유사한 결과를 보였다.

광양의 경우 태인동에서 대상 기간 평균 PM_{2.5} 농도는 배출목록 기반 모사(Case 1)에서는 관측 농도를 3.1배(관측: 27.9 µg/m³, Case 1: 85.3 µg/m³) 과대 평가하였으며, SO₂ 농도 역시 2.9배(관측: 14.2 ppb, Case 1:

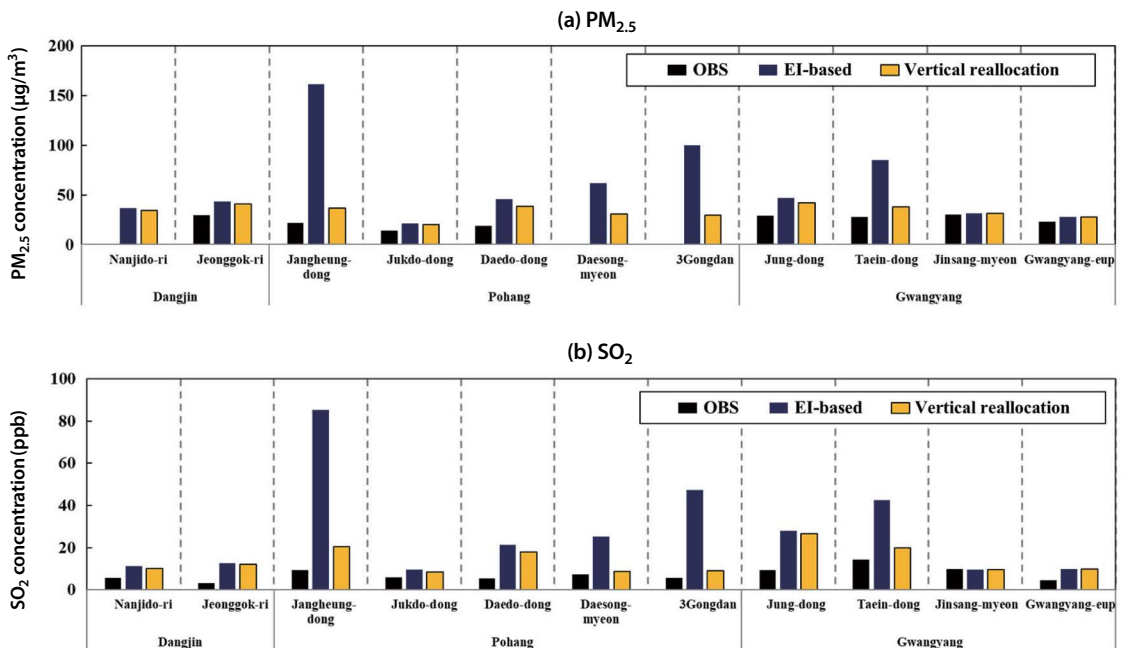


Fig. 8. Comparison of (a) PM_{2.5} and (b) SO₂ concentrations, EI-based and vertical reallocation simulations with observations at selected stations in Dangjin, Pohang, and Gwangyang during the simulation period average.

42.5 ppb) 과대 모사하였다. 수직 재분배 후, 태인동의 PM_{2.5} 모사 농도는 38.1 µg/m³으로 여전히 과대 모사 하였으나, mean bias가 57.4 µg/m³에서 10.2 µg/m³, NMB (Normalized Mean Bias)는 205.9%에서 45.5%로 개선되었다. 수직 재분배 후 SO₂ 모사 농도는 19.7 ppb로 배출기반 모사에 비해 28.5 ppb 낮아졌으며, mean bias는 28.3 ppb에서 14.3 ppb로 감소하였다.

당진 정곡리의 경우, 배출형태 전환 후 PM_{2.5}와 SO₂ 모사 농도가 2.7 µg/m³, 0.8 ppb 낮아지나, 배출형태 전환 전후의 모사 농도 개선 폭은 광양과 포항에 비해 작았다. 이러한 지속적인 과대 모사의 원인 중 하나는 해당 관측소의 경우 대상 사업장 외의 인접 지역에 위치한 산업단지과 사업장에서 배출되는 대기오염물질의 영향을 받았기 때문이다. 당진의 경우, 주변에 발전 등 화석 연료를 이용하는 다른 대형 점오염원이 많이 존재한다 (Ju *et al.*, 2019; Park *et al.*, 2019; Kim *et al.*, 2016). 이용된 배출목록에서 당진의 대상 오염원에서 배출되는 SO₂ 배출량은 충남 전체 SO₂ 배출량의 42%를 차지하였다. 또한, 당진의 경우 기본 모사에서 SO₂ 농도에 대한 과대 모사 정도가 다른 두 지역에 비해 작으며, 이로 인해 배출형태 차이에 따른 농도 변화 역시 작은 것으로 유추된다. 다만, 배출형태 차이에 따른 농도 영향 변화는 대상 사업장의 배출량에 따라 달라질 수 있으므로, 3.7절에서 단위 배출량당 농도 영향(전환율)을 비교하였다.

이를 정리하면 당진을 제외한 포항과 광양의 경우, 사업장 배출형태 전환 후 모사에서 PM_{2.5} 및 SO₂ 지표 관측 농도의 재현성이 향상되었다. 이러한 결과는 한 배출원에 대한 배출량 평가, 주변 지역에 미치는 영향 평가 및 대책 효과 분석 시, 배출량뿐 아니라 배출형태 등 정확한 추가적인 정보가 함께 마련되어야 하는 이유를 설명한다.

3.6 항공 관측 농도와와의 비교

배출형태에 따른 배출물질의 농도 변화는 지표뿐만 아니라 상층에서도 나타날 수 있다. 본 절에서는 KORUS-AQ 2016 관측자료를 이용하여 배출형태 전

환에 따른 지표 및 상층 SO₂ 모사 농도 변화를 함께 검토하였다. 대기질 모사와 항공 관측자료와의 비교는 기상 조건에 따라 결정되는 배출원 기원 플룸(plume)과 항공 관측의 비행경로가 교차하는 지점을 대상으로 하였다.

5월 11일의 비행관측은 광양 배출원으로부터 남쪽으로 약 60 km가량 떨어져 있는 지점에서 이루어졌다. 관측 시각 풍향이 북풍인 점을 고려하여 남해안을 따라 관측된 자료를 모사 비교에 활용하였다. 그림 9에서 대상 오염원으로부터 배출된 SO₂의 확산(dispersion) 경로 및 농도 범위를 확인할 수 있다. 배출형태 전환 전후 모사에서 광양 오염원의 SO₂ 배출 영향은 비행 경로상에서 각각 평균 1.8 ppb(최대 3.9 ppb), 2.0 ppb(최대 4.7 ppb)로 나타났다. SO₂ 모사 농도가 가장 높은 지점은 관측과 비교하여 약 30 km가량 동쪽에 나타나는데, 이는 실제 풍향과 모사 풍향의 차이가 기여한 것으로 추정된다.

전반적인 SO₂ 모사 농도는 관측 농도(2.8 ppb)에 비해 낮으며(그림 9(a) 좌측), 플룸 외곽에서도 관측 농도에 비해 모사 농도가 낮은 점으로 미뤄보아, 대상 배출원 외에 주변 지역에서 배출되는 SO₂ 배출 영향이 대기질 모사에 제대로 반영되지 못한 것으로 보인다. 먼 배출량의 영향을 크게 받는 지상 1층에서 수직 재분배 후 SO₂ 모사 농도는 태인동 관측 지점에서 28.5 ppb 낮아진 반면, 비행관측 고도에서는 평균 0.2 ppb, 최대 0.8 ppb까지 증가하였다. 광양 지역의 비민 수용무연탄 배출원에 대한 먼 배출량의 수직 재분배는 지표 부근에서의 과대 모사를 크게 개선하였다. 또한, 상층 모사 농도의 변화는 지표에 비해 상대적으로 작으나, 비행 관측 농도와의 차이를 줄이는 방향으로 변화하였다.

5월 22일은 서해상에서 비행관측이 350 m 고도에서 이뤄졌으며, 앞선 분석과 동일하게 당진을 중심으로 비교하였다. 당진 오염원 주변 관측 시 풍향은 남동풍이었으며, 배출원 풍하 지점에서 SO₂ 항공관측 농도는 평균 11.5 ppb(5.1~29.3 ppb)로 배출형태와 관계없이 모사 농도에 비해 2배가량 높았다. 대상 오염

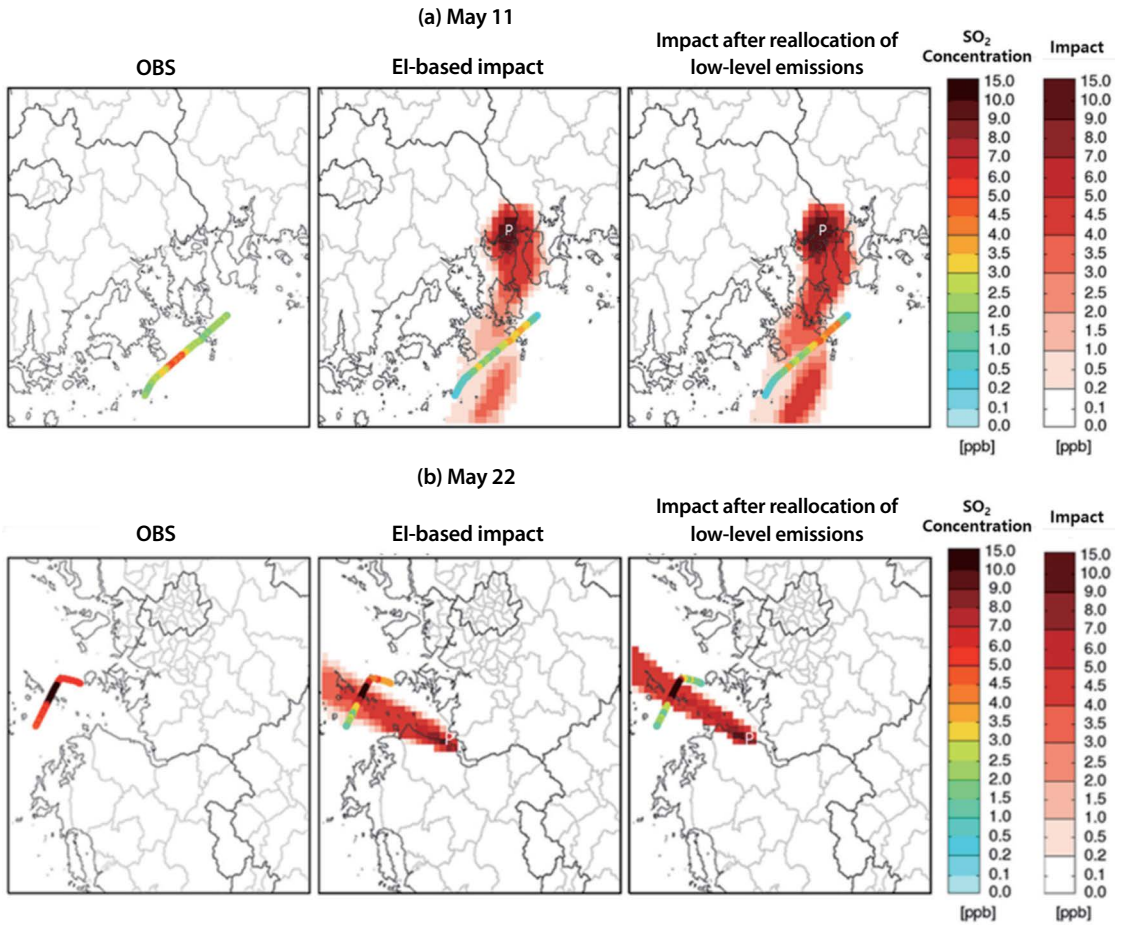


Fig. 9. Comparisons of airborne SO₂ concentrations observed from Hanseo King Air (left), and the EI-based (center) and vertical reallocation (right) simulations in (a) Gwangyang on May 11, 2016, and (b) Dangjin on May 22, 2016. Plume depicts the simulated impacts of SO₂ emissions from the target plants ('P').

원의 배출 영향을 받지 않는 지점(플룸 외곽)에서의 SO₂ 관측 농도 역시 모사 농도에 비해 높은 점을 고려하면, SO₂ 모사 농도는 광양과 마찬가지로 주변에서 배출된 SO₂ 배출 영향을 제대로 반영하지 못하고 있다. 당진 비민수용무연탄 배출량에 대한 수직 재분배 후 SO₂ 모사 농도는 평균 6.6 ppb (0.7~18.5 ppb)로, 배출량 수직 재분배 전에 비해 평균 SO₂ 배출 영향이 22% (최대 농도는 52%) 증가하였다. 대상기간 지표면에서의 SO₂ 배출형태에 따라 지표에서의 농도 변화 폭에(11.5 → 6.7 ppb, 약 4.8 ppb 감소) 비해 상층에서

의 농도 변화 폭이(5.4 → 6.6 ppb 변화, 약 1.2 ppb 증가) 크다.

이러한 결과에서 먼 배출형태의 비민수용무연탄 관련 배출량의 수직 재분배는 지표면에서의 과대 모사를 개선하는 동시에, 상층에서의 과소 모사를 일부 개선하였다. 또한, 수직 재분배 후 상층에서의 농도 변화는 지표에서의 농도 변화에 비해 작았다. 이는 상층에서는 지표에 비해 빠른 풍속에 의한 환기 효과에 의해 급속하게 희석되었기 때문으로 사료된다 (Ju *et al.*, 2019; Kim *et al.*, 2019). 배출량 수직 재분배 후 플룸의

Table 2. The emission-to-concentration conversion rates of PPM_{2.5}, SO₂, and NO_x estimated from the EI-based and vertical reallocation simulations during the simulation period.

Receptor	Case	PPM _{2.5} to PPM _{2.5} ($\mu\text{g}/\text{m}^3/\text{MTPY}$)	SO ₂ to Sulfate ($\mu\text{g}/\text{m}^3/\text{MTPY}$)	NO _x to Nitrate ($\mu\text{g}/\text{m}^3/\text{MTPY}$)
Dangjin	EI-based	283.3	29.7	11.6
	Vertical reallocation	137.8	12.4	5.0
Pohang	EI-based	272.3	54.7	12.5
	Vertical reallocation	114.9	22.3	8.5
Gwangyang	EI-based	365.2	39.2	14.8
	Vertical reallocation	142.9	16.4	6.4

이동 방향은 지표 배출에 비해 북쪽으로 조금 이동하며, 비행 관측에서 고농도 SO₂가 관측된 지점을 통과하는 것이 그림 9(b)에서 확인된다.

3.7 배출형태에 따른 배출-농도 전환율

그림 5에서 배출형태 전환에 따른 주변 지역에 대한 PM_{2.5} 농도 영향의 차이는 뚜렷하게 나타나며, 어느 고도에서 대기오염물질이 배출되는지에 따라 지표 PM_{2.5} 농도에 미치는 영향이 크게 달라진다(Bae *et al.*, 2017; Kim *et al.*, 2017a; Seinfeld and Pandis, 2006). 이러한 배출 고도에 따라 달라지는 단위 배출량당 PM_{2.5} 농도 영향을 비교하기 위하여 본 절에서는 PPM_{2.5}, NO_x, SO₂ 배출량의 PM_{2.5} 농도 전환율(= 영향/배출량)을 그림 5에 보인 영역에 대해 산정하였다.

PPM_{2.5}(→ PPM_{2.5}) 및 SO₂(→ Sulfate)에 대한 배출-농도 전환율은 대상지역인 당진, 포항, 광양에서 점 형태로 배출 시에는 면 형태의 배출 대비 39~49% 수준으로 낮아졌다. 이는 대기오염물질의 배출 고도가 높아지면서 단위 배출량이 지표 PM_{2.5} 농도에 미치는 영향이 낮아지는 것을 의미한다. PPM_{2.5} 배출-농도 전환율은 면 형태 배출 시 272.3~365.2 $\mu\text{g}/\text{m}^3/\text{MTPY}$ (Million Tons Per Year)였으나, 점 형태 배출 시에는 114.9~142.9 $\mu\text{g}/\text{m}^3/\text{MTPY}$ 로 낮아졌다. 마찬가지로 SO₂ 배출-농도 전환율은 면 형태 배출 시 29.7~54.7 $\mu\text{g}/\text{m}^3/\text{MTPY}$, 점 형태 배출 시 12.4~22.4 $\mu\text{g}/\text{m}^3/\text{MTPY}$ 이다.

NO_x(→ Nitrate)의 배출-농도 전환율은 지역별 차

이를 보였는데, 당진, 광양에서는 점 형태 배출은 면 형태 배출에 비해 해당 전환율이 43% 정도로 감소하였으나, 포항에서의 점 형태 배출 시 해당 전환율은 면 형태 배출의 68% 정도 낮아졌다(표 2). 이러한 결과에서 동일 규모의 배출량이더라도 배출형태에 따라 배출량당 지표 PM_{2.5} 농도에 미치는 영향은 2배 이상 차이를 보일 수 있다. 다만, 배출에 따른 대기 중 농도 전환율은 지역 및 기간에 따라 달라질 수 있으므로(ENVIRON, 2014) 폭 넓은 검토가 필요하다.

4. 결 론

본 연구에서는 기존 연구에서 PM_{2.5}와 SO₂의 과대모사가 제시되었던 비민수용무연탄 관련 사업장을 대상으로 배출형태 차이에 따른 PM_{2.5} 농도 영향을 대기질 모사를 통해 살펴보았다. 대기오염물질의 배출형태에 따른 농도 영향을 간접적으로 평가한 연구는 기존에도 수행된 바 있으나(Ju *et al.*, 2019; Kim *et al.*, 2017c), 한 사업장 또는 배출지역에 대한 농도 영향을 정량적으로 직접 비교한 연구는 드물다. 이런 점에서 본 연구는 한 배출원이 주변 지역의 농도에 미치는 영향을 올바르게 평가하기 위해서는 배출량뿐 아니라 점, 면 등 배출형태에 대한 정보가 중요한 점을 비민수용무연탄 관련 오염원에 대상으로 제시하여 설명하였다. 비민수용무연탄 관련 배출량이 많은 충남 당진, 경북 포항, 전남 광양이 대상 지역으로 선정되었으며,

대기질 모사는 2016년 KORUS-AQ 기간으로 설정하였다.

대상기간 동안 기본 모사 결과와 관측 농도 비교 시, 대상 배출원과 인접한 일부 측정소에서 PM_{2.5} 농도는 최대 7.5배, SO₂ 농도는 9.2배 과대 모사하였다. 이러한 과대 모사는 먼 형태의 배출량이 주된 원인으로 작용하였으며, 해당 먼 배출을 점 형태의 배출로 전환한 후 수행한 대기질 모사에서는 주변 지역에 대한 PM_{2.5} 농도 영향은 최대 66~82% 감소하였다. 포항과 광양의 경우 일부 과대 모사가 나타난 지표 관측 지점에서 PM_{2.5} 및 SO₂ 모사 농도는 기본 모사 대비 1/5 수준으로 낮아졌으며, 관측 농도와 유사한 수준으로 모사되었다. 지표와는 달리, 항공 관측이 이뤄진 300~500 m 고도에서는 배출형태 차이에 따른 SO₂ 모사 농도의 변화 폭은 수 ppb 정도로 작았으나, 관측 농도와 차이는 감소하였다. 아울러 먼 형태의 배출과 점 형태의 배출에 따른 전환율은 세 곳 모두에서 2배 이상의 차이를 보였다.

제시된 결과와 같이, 배출량뿐 아니라 배출형태에 따라 주변 지역에 미치는 농도 영향은 크게 달라질 수 있다. 이런 점에서 한 배출원 또는 배출지역이 주변 농도에 미치는 영향을 과대 또는 과소 평가하지 않기 위해서는 올바른 배출량 정보 제공(배출량과 굴뚝 높이와 내경, 배출가스의 속도 및 온도 등) 및 이를 평가할 수 있는 장기적인 지표 및 상층 관측자료의 추가 확보가 필요하다.

본 연구에서는 사업장과 같은 주요 배출원이 주변 지역에 미치는 농도 영향 분석 시, 먼과 점 배출형태의 중요도를 비민수용무연탄 배출원을 통해 예시하였다. 다만, 본 연구는 단기간에 대한 대기질 모사 결과를 제시한 것으로 대상 배출원에 대한 농도 영향과 전환율 자체에 큰 의미를 두기보다는 향후 국내 PM_{2.5} 개선 정책 수립 시 배출량이 아닌, 농도 중심의 평가 필요성을 설명하였다. 끝으로, 대기질 모사에서 계산되는 농도 영향과 전환율은 평가에 이용되는 대기질 모델을 포함하여 기상과 배출 입력자료의 정확도, 경계 조건, 대상 기간 및 지역에 따라 달라질 수 있다. 따

라서, 대기질 모사를 활용한 배출량과 배출형태에 따른 농도 영향의 정확한 관계 규명과 이해 증진을 위해서는 이를 객관화하고 평가할 수 있는 3차원적인 관측자료의 확보와 다른 장단기 기간에 대한 추가적인 연구가 요구된다.

감사의 글

본 논문은 국가미세먼지정보센터의 지원을 받아 수행되었으며, 이에 감사를 드립니다.

References

Bae, C., Yoo, C., Kim, B.-U., Kim, H.C., Kim, S. (2017) PM_{2.5} Simulations for the Seoul Metropolitan Area: (III) Application of the Modeled and Observed PM_{2.5} Ratio on the Contribution Estimation, *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment*, 33(5), 445-457. <https://doi.org/10.5572/kosae.2017.33.5.445>

ENVIRON, A. (2014) User's guide to the comprehensive air quality model with extensions (CAMx).

Ghim, Y.-S., Son, J.-E. (1993) Comments on Air Quality Impact Analysis of Point and Area Sources, *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment*, 9(3), 255-256.

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 and Physics*, 6(11), 3181-3210.

Han, C., Kim, S., Lim, Y.-H., Bae, H.-J., Hong, Y.-C. (2018) Spatial and temporal trends of number of deaths attributable to ambient PM_{2.5} in the Korea, *Journal of Korean Medical Science*, 33(30), e193.

Jang, K.-W., Kim, H.-C., Lee, Y.-M., Song, D.-J., Jung, N.-E., Kim, S.-K., Hong, J.-H., Lee, S.-J., Han, J.-S. (2011) Estimating PM emission factor from coal-fired power plants in Korea, *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment*, 27(5), 485-493.

Jin, H.-A., Lee, J.-H., Lee, K.-M., Lee, H.-K., Kim, B.-E., Lee, D.-W., Hong, Y.-D. (2012) The estimation of PM_{2.5} emissions and their contribution analysis by source categories in Korea, *Journal of Korean Society for Atmospheric*

- Environment, 28(2), 211-221.
- Ju, H., Kim, H.C., Kim, B.-U., Ghim, Y.S., Shin, H.J., Kim, S. (2018) Long-term trend analysis of key criteria air pollutants over air quality control regions in South Korea using observation data and air quality simulation, *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment*, 34(1), 101-119.
- Ju, H., Yoo, C., Kim, B.-U., Kim, H.C., Kim, S. (2019) Impact of Stack Parameters on Modeled PM_{2.5} Conversion Rates: A Case Study of Chungnam during the KORUS-AQ 2016, *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment*, 35(5), 593-608. <https://doi.org/10.5572/kosae.2019.35.5.593>
- Kang, Y.-H., Kim, E., You, S., Bae, M., Son, K., Kim, B.-U., Kim, H.C., Kim, S. (2021a) Source Sectoral Impacts on Provincial PM_{2.5} Concentrations based on the CAPSS 2016 using the CMAQ Model, *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment*, 37, 17-44. <https://doi.org/10.5572/KOSAE.2021.37.1.017>
- Kang, Y.-H., You, S., Son, K., Kim, E., Bae, M., Kim, S. (2021b) Municipality-Level Source Apportionment of PM_{2.5} Concentrations based on the CAPSS 2016: (V) Ulsan, *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment*, 37(3), 487-511. <https://doi.org/10.5572/kosae.2021.37.3.487>
- Kim, B.-U., Kim, O., Kim, H.C., Kim, S. (2016) Influence of fossil-fuel power plant emissions on the surface fine particulate matter in the Seoul Capital Area, South Korea, *Journal of the Air & Waste Management Association*, 66(9), 863-873.
- 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(2), 226-248. <https://doi.org/10.5572/kosae.2019.35.2.226>
- Kim, H.C., Kim, S., Lee, S.-H., Kim, B.-U., Lee, P. (2020a) Fine-Scale Columnar and Surface NO_x Concentrations over South Korea: Comparison of Surface Monitors, TROPOMI, CMAQ and CAPSS Inventory, *Atmosphere*, 11(1), 101.
- Kim, J., Jang, Y.-K. (2014) Uncertainty Assessment for CAPSS Emission Inventory by DARS, *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment*, 30(1), 26-36.
- Kim, O., Bae, M., Kim, S. (2020b) Evaluation on Provincial NO_x and SO₂ Emission in CAPSS 2016 Based on Photochemical Model Simulation, *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment*, 36, 64-82.
- Kim, S., Bae, C., Kim, B.-U., Kim, H.C. (2017a) PM_{2.5} Simulations for the Seoul Metropolitan Area: (I) Contributions of Precursor Emissions in the 2013 CAPSS Emissions Inventory, *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment*, 33(2), 139-158. <https://doi.org/10.5572/kosae.2017.33.2.139>
- Kim, S., Kim, O., Kim, B.-U., Kim, H. C. (2017b) Impact of emissions from major point sources in Chungcheongnam-do on surface fine particulate matter concentration in the surrounding area, *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment*, 33(2), 159-173.
- Kim, S., Bae, C., Yoo, C., Kim, B.-U., Kim, H.C., Moon, N. (2017c) PM_{2.5} Simulations for the Seoul Metropolitan Area: (II) Estimation of Self-Contributions and Emission-to-PM_{2.5} Conversion Rates for Each Source Category, *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment*, 33(4), 377-392.
- 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. <https://doi.org/10.5572/ajae.2008.2.1.034>
- Kim, S., Son, K., You, S., Bae, M., Kang, Y.-H., Kim, E., Kim, S. (2022) Municipality-Level Source Apportionment of PM_{2.5} Concentrations based on the CAPSS 2016: (IX) Gyeongsangbuk-do, *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment*, 38(2), 237-257. <https://doi.org/10.5572/kosae.2022.38.2.237>
- Kim, S., You, S., Kim, E., Kang, Y.-H., Bae, M., Son, K. (2021) Municipality-Level Source Apportionment of PM_{2.5} Concentrations based on the CAPSS 2016: (III) Jeollanamdo, *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment*, 37(2), 206-330. <https://doi.org/10.5572/KOSAE.2021.37.2.206>
- Kim, Y.-W., Lee, H.S., Jang, Y.J., Lee, H.J. (2015) How does media construct particulate matter risks?: A news frame and source analysis on particulate matter risks, *Korean Journal of Journalism & Communication Studies*, 59(2), 121-154.
- Kim, Y.P., Kim, S., Kim, J., Lee, T. (2020c) Estimation of SO₂ emissions in large point sources at Dangjin City using airborne measurements, *Particle and Aerosol Research*, 16(4), 107-117.
- Lee, B., Park, S. (2019) Temporal and spatial variabilities of concentrations of criteria air pollutants during early summer in 2018 in South Chungcheong Province, *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment*, 35(2), 265-281.
- Liu, H.-Y., Dunea, D., Iordache, S., Pohoata, A. (2018) A review of airborne particulate matter effects on young children's respiratory symptoms and diseases. *Atmo-*

- sphere, 9(4), 150.
- Ministry of Environment (ME) (2017) Comprehensive Plan Report, Ministry of Environment. <http://www.me.go.kr/home/file/readDownloadFile.do?fileId=152146&fileSeq=1> (Assessed on Sep 26, 2017).
- Ministry of Environment (ME) (2019) Seasonal PM_{2.5} Management System, Ministry of Environment. <http://www.me.go.kr/home/web/board/read.do?menuId=10392&boardMasterId=713&boardCategoryId=&boardId=109496> (Assessed on Nov 26, 2019).
- Ministry of Environment (ME) (2020) <https://www.me.go.kr/home/web/board/read.do?boardMasterId=1&boardId=1454600&menuId=286> (Assessed on Nov 30, 2020).
- Nam, K.-P., Lee, D.-G., Lee, J.-B., Choi, K.-C., Jang, L.-S., Choi, K.-H. (2018) A Study on the Utilization of Air Quality Model to Establish Efficient Air Policies: Focusing on the Improvement Effect of PM_{2.5} in Chungcheongnam-do due to Coal-fired Power Plants Shutdown, *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment*, 34(5), 687-696.
- National Air Emission Inventory and Research Center (NAIR) (2018) National Air Pollutants Emission 2018.
- Park, S., Bae, C., Kim, H., Heo, G., Yoo, C., Kim, J. (2021) Emission Improvement and Contribution Analysis for Regional Air-quality Implementation Plans of Chungcheongnam-do, Proceedings of the Korea Air Pollution Research Association Conference, 167. <http://www.dbpia.co.kr/journal/articleDetail?nodeId=NODE10665038>
- Park, T., Ban, J., Kang, S., Sarkar, C., Wong, G., Seo, B.-K., Jung, D., Kim, K., Park, G., Kim, J. (2019) Aircraft-based measurements of composition and chemical revolution of Organic matter on the large point sources in Korea. Paper presented at the AGU Fall Meeting Abstracts.
- Seinfeld, J.H., Pandis, S.N. (2006) *Atmospheric Chemistry and Physics: From Air Pollution to Climate Change*. 2nd Edition, John Wiley & Sons, New York.
- United States Environmental Protection Agency (US EPA) (2020) CMAQ (Version 5.3.2) [Software]. Available from <https://doi.org/10.5281/zenodo.4081737>
- Woo, J.-H., Kim, Y., Kim, H.-K., Choi, K.-C., Eum, J.-H., Lee, J.-B., Lim, J.-H., Kim, J., Seong, M. (2020) Development of the CREATE inventory in support of integrated climate and air quality modeling for Asia, *Sustainability*, 12(19), 7930.
- Yeo, M., Kim, Y. (2019) Trends of the PM₁₀ concentrations and high PM₁₀ concentration cases in Korea, *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment*, 35(2), 249-264.
- Yim, S.H.L., Gu, Y., Shapiro, M.A., Stephens, B. (2019) Air quality and acid deposition impacts of local emissions and transboundary air pollution in Japan and South Korea, *Atmospheric Chemistry & Physics*, 19(20), 13309-13323.
- You, S., Bae, C., Kim, H., Yoo, C., Kim, S. (2020) Municipality-Level Source Apportionment of PM_{2.5} Concentrations based on the CAPSS 2016: (I) Gyeonggi Province. *Korean Society for Atmospheric Environment*, 36(6), 785-805. <https://doi.org/10.5572/KOSAE.2020.36.6.785>
- Zhang, Q., Jiang, X., Tong, D., Davis, S.J., Zhao, H., Geng, G., Feng, T., Zheng, B., Lu, Z., Streets, D.G. (2017) Transboundary health impacts of transported global air pollution and international trade, *Nature*, 543(7647), 705-709.

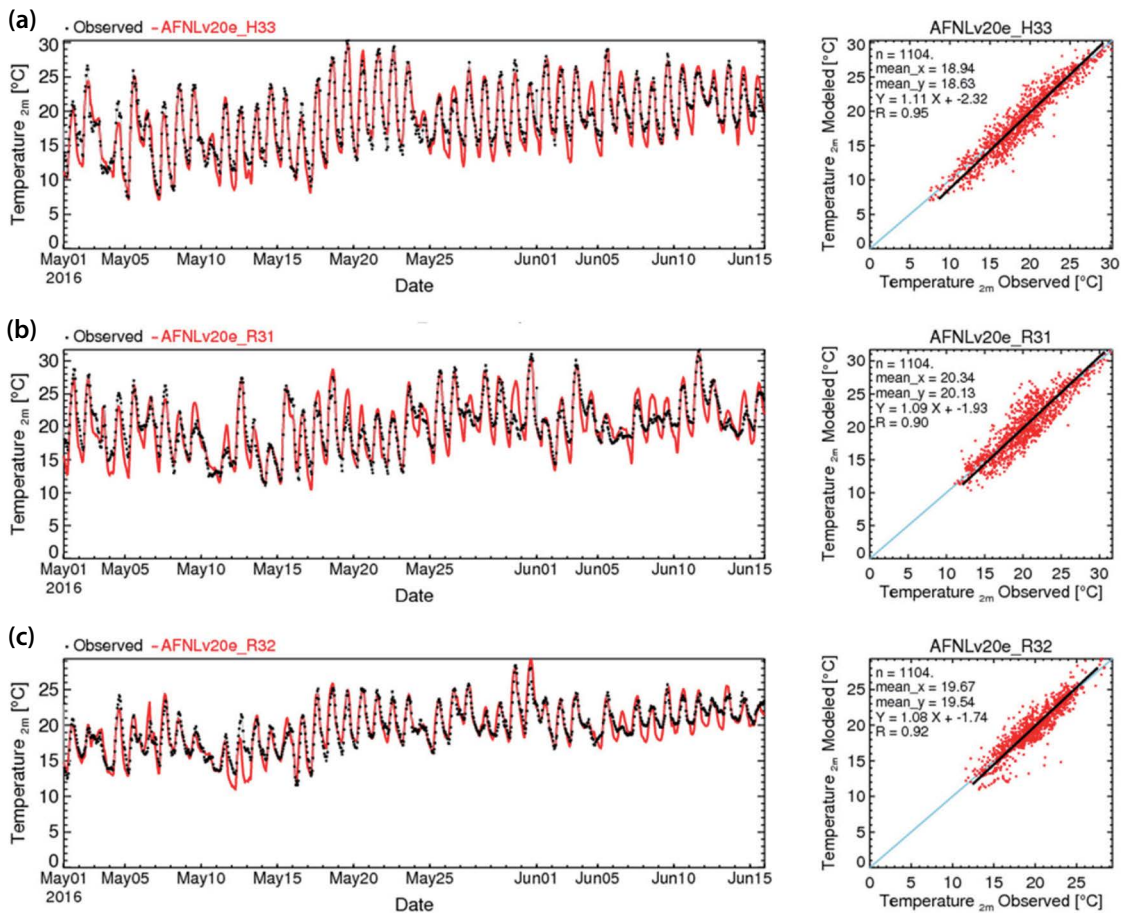
Authors Information

- 유승희 (아주대학교 환경공학과 연구원)
(annabelle58@ajou.ac.kr)
- 강윤희 (아주대학교 환경연구소 연구조교수)
(ykang@ajou.ac.kr)
- 김형천 (국가미세먼지정보센터 배출량조사팀 환경연구사)
(khwing@korea.kr)
- 유철 (국가미세먼지정보센터 배출량조사팀 팀장)
(s7424yoo@korea.kr)
- 김순태 (아주대학교 환경안전공학과 교수)
(soontaekim@ajou.ac.kr)

Supplementary Materials

Table S1. Point source stack information selected for vertical reallocation of low-level emissions in this study.

Num	Plant	Stack height (m)	Stack diameter (m)	Latitude (Lat)	Longitude (Lon)
1	Dangjin	150	8	36.9842	126.7257
2	Pohang	120	6.4	36.0256	129.3985
3	Gwangyang	150	6.4	34.9184	127.7099

**Fig. S1.** Comparison between the mean ASOS measurement data and meteorological Simulation in (a) Seosan, (b) Pohang, and (c) Yeosu for hourly 2-m temperature.

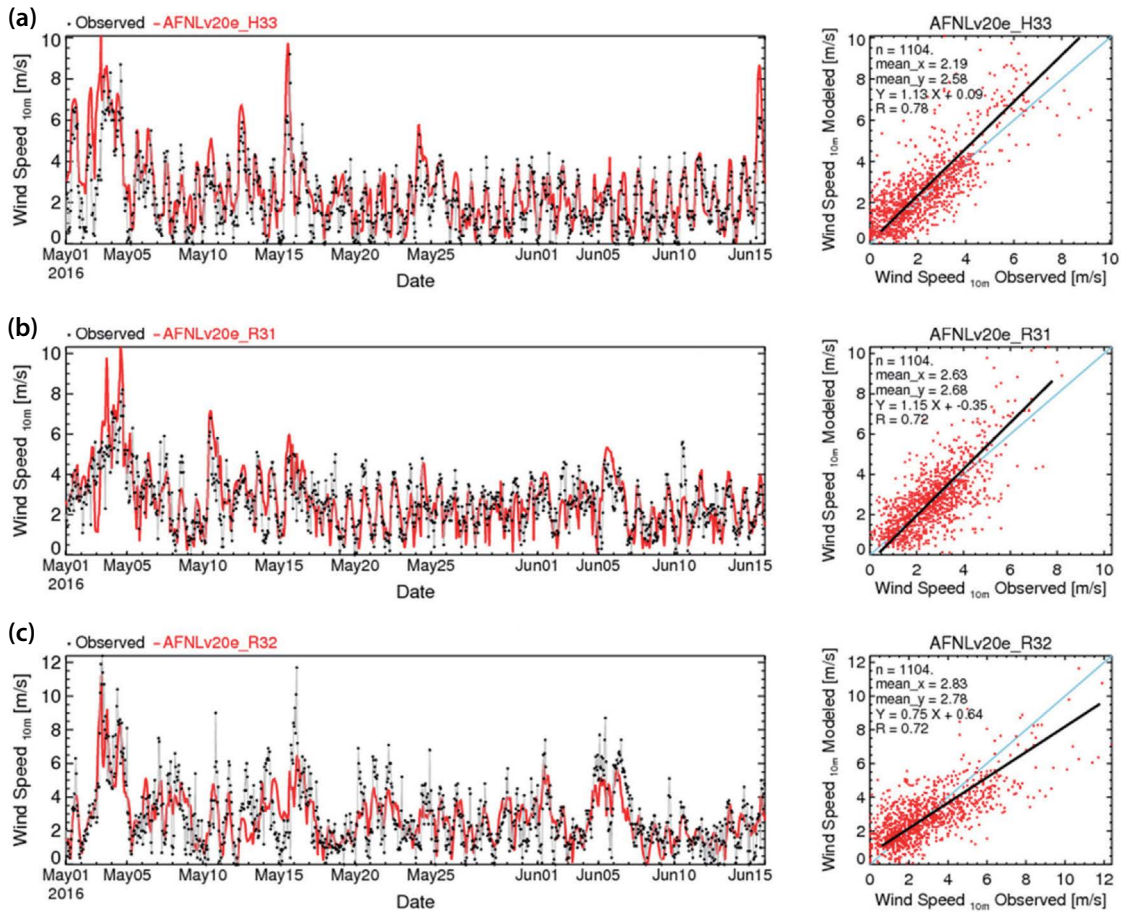


Fig. S2. Comparison between the mean ASOS measurement data and meteorological Simulation in (a) Seosan, (b) Pohang, and (c) Yeosu for hourly 10-m wind speed.

Table S2. Statistics of the model performance evaluations for daily mean (a) PM_{2.5}, (b) NO₂, and (c) SO₂ concentrations at the individual urban air quality monitoring stations during the simulation period.

(a) PM _{2.5}							
Dong	# of data	Observed	Modeled	Bias	Error	RMSE	R
Dangjin							
Nanjido-ri	–	–	36.5	–	–	–	–
Jeonggok-ri	46	29.4	43.3	13.9	15.5	19.8	0.7
Pohang							
Jangheung-dong	15	21.7	161.7	140.0	140.0	149.9	0.5
Jukdo-dong	13	14.0	21.1	7.2	8.8	11.3	0.7
Daedo-dong	14	18.5	45.8	27.3	27.3	34.9	0.5
Gwangyang							
Jung-dong	46	28.7	46.8	18.1	19.3	23.9	0.7
Taein-dong	46	27.9	85.3	57.4	57.4	67.2	0.5
Jinsang-myeon	44	29.9	31.5	1.6	10.6	13.8	0.7
Gwangyang-eup	35	23.0	27.9	4.9	9.9	13.2	0.7
(b) NO ₂							
Dong	# of data	Observed	Modeled	Bias	Error	RMSE	R
Dangjin							
Nanjido-ri	46	15.1	8.1	-7.0	7.1	9.1	0.4
Jeonggok-ri	46	13.3	15.2	1.9	5.5	7.2	0.7
Pohang							
Jangheung-dong	46	19.5	48.0	28.5	28.5	29.7	0.6
Jukdo-dong	46	14.4	15.0	0.6	5.3	7.0	0.7
Daedo-dong	46	15.8	31.1	15.3	15.5	18.2	0.7
Daesong-myeon	46	7.4	23.6	16.1	16.1	20.1	0.7
3Gongdan	46	16.0	38.3	22.3	22.3	23.3	0.8
Gwangyang							
Jung-dong	46	17.5	34.1	16.6	16.7	18.6	0.7
Taein-dong	44	20.8	36.6	15.8	16.3	20.0	0.4
Jinsang-myeon	46	12.3	13.8	1.5	5.4	7.0	0.5
Gwangyang-eup	35	15.2	17.5	2.3	7.2	9.5	0.3
(c) SO ₂							
Dong	# of data	Observed	Modeled	Bias	Error	RMSE	R
Dangjin							
Nanjido-ri	46	5.7	11.3	5.6	6.1	7.7	0.6
Jeonggok-ri	46	3.1	12.7	9.6	9.7	13.1	0.7
Pohang							
Jangheung-dong	46	9.3	85.2	75.9	75.9	81.4	0.2
Jukdo-dong	46	6.0	9.4	3.4	5.7	8.6	0.5
Daedo-dong	44	5.3	21.3	16.0	16.0	19.6	0.7
Daesong-myeon	46	7.3	25.1	17.9	17.9	25.1	0.7
3Gongdan	46	5.6	47.3	41.7	41.7	47.3	0.6
Gwangyang							
Jung-dong	46	9.3	28.0	18.7	18.8	23.8	0.5
Taein-dong	46	14.2	42.5	28.3	28.3	34.5	0.4
Jinsang-myeon	46	9.8	9.6	-0.3	5.0	5.9	0.5
Gwangyang-eup	35	4.6	9.7	5.1	5.5	7.5	0.5