

## 지역맞춤형 초미세먼지 원인 진단을 위한 3차원 광화학 대기질 모델링 기반(CAMx-PSAT) 지역별 배출부문별 기여도 추정 연구

# A Study on Estimating the Contributions by Emission Source Sector and Province Based on CAMx-PSAT for the Region-Specific Analysis of the Causes of High PM<sub>2.5</sub> Concentrations

박성규, 김형천, 김지현, 오효숙, 김세기, 유 철, 배창한\*

환경부 국가미세먼지정보센터 배출량조사팀

Sung-Kyu Park, Hyung-Chun Kim, Ji-Hyun Kim, Hyo Sook Oh, Segi Kim, Chul Yoo, Changhan Bae\*

Emission Inventory Management Team, National Air Emission Inventory and Research Center, Cheongju, Republic of Korea

접수일 2023년 7월 31일  
수정일 2023년 9월 11일  
채택일 2023년 9월 26일

Received 31 July 2023  
Revised 11 September 2023  
Accepted 26 September 2023

\*Corresponding author  
Tel : +82-(0)43-279-4580  
E-mail : chbae1210@korea.kr

**Abstract** In order to efficiently establishment PM<sub>2.5</sub> management policies in Korea, we conducted an analysis of emission source sectors and regional contributions to PM<sub>2.5</sub> concentrations using the latest air pollutant emissions data. The contributions were estimated using the Comprehensive Air Quality Model with Extensions (CAMx) and the Particulate Source Apportionment Technology (PSAT) for 17 provinces and 13 Source Classification Code (SCC) source categories. In 2021, the domestic contributions to the nationwide annual mean PM<sub>2.5</sub> concentrations by source sector and province were as follows; Road Transport (4.6%), Agriculture (4.0%) in Gyeonggi, and Industrial Processes (3.9%) in Chungnam. The top 21 emissions source sectors accounted for half of the domestic contributions, with 11 of them located in the Seoul Metropolitan Area and Chungnam. For a more detailed analysis, the same methodology was applied to each province (Seoul, Incheon, Gyeonggi). Representatively, in Seoul, the source sectoral contributions to the Seoul PM<sub>2.5</sub> concentrations were the highest compared to other provinces (15% for Fugitive Dust, 12% for Non-road Transport, and 10% for Others), which lead to large self-contribution. On the other hand, the contributions to PM<sub>2.5</sub> concentrations in Seoul from surrounding regions were most significant from Road Transport in Gyeonggi (6%), Industrial Processes in Chungnam (3%), and Non-road Transport in Incheon (3%). This study presents the major emission sources and regions contributing to PM<sub>2.5</sub> concentrations at the national and regional levels. The results of this study can be equally applied to other regions. It is expected that by conducting future analyses that consider emission reduction technologies, costs, and exposure levels, efficient PM<sub>2.5</sub> management policies can be established.

**Key words:** CAPSS, NEAS, CAMx-PSAT, PM<sub>2.5</sub>, Contribution

## 1. 서 론

초미세먼지 (Particulate Matters of which diameter is equal to or less than 2.5 micrometers; 이후 'PM<sub>2.5</sub>'로 표기)는 호흡기, 심혈관계 등 인체에 다양한 영향을 미치는 물질이다(Kuo *et al.*, 2021; Han *et al.*, 2018; Lim *et al.*, 2016; Apte *et al.*, 2015). 환경부에서는 2011년부

터 PM<sub>2.5</sub>를 기준성 대기오염물질로 지정하였으며, 농도 측정이 시작된 2015년 26 µg/m<sup>3</sup>이 관측된 이후 2017년 25 µg/m<sup>3</sup>, 2019년 23 µg/m<sup>3</sup>, 2022년 18 µg/m<sup>3</sup>으로 지속적 감소 추세를 보이고 있다(NIER, 2023, 2020, 2018, 2016; MOE, 2022a). 하지만 연평균 PM<sub>2.5</sub> 대기환경기준(연간 15 µg/m<sup>3</sup> 이하)을 여전히 달성하지 못하고 있다. PM<sub>2.5</sub> 농도 저감을 위해서는 우선적으로 배

출량과 농도 사이의 관계를 명확하게 파악할 필요가 있다. 또한, 국내의 경우 2차 생성  $PM_{2.5}$ 의 비율이 높고 다양한 배출원이 혼재되어 있으므로 (Son *et al.*, 2021; Jin *et al.*, 2012), 이를 구분하여 해석할 수 있는 3차원 광화학 대기질 모델 기반 연구가 다수 수행되고 있다 (Kim *et al.*, 2022; Kumar *et al.*, 2022; Bae *et al.*, 2021a; Kang *et al.*, 2021a, 2021b; Kim *et al.*, 2017).

선행 연구에 따르면 수도권 지역에서는 도로 이동 오염원, 비도로 이동 오염원, 농업 부문이, 세종과 울산, 충남 지역에서는 제조업 연소, 생산 공정, 농업 부문이  $PM_{2.5}$  농도 생성에 기여하는 상위 배출원으로 지목되었다 (Kang *et al.*, 2021a). 최근 시행된 제4차 계절관리제 (2022년 12월~2023년 3월)에서도 수송과 산업 부문에 해당하는 대책이 전체 목표 감축량의 대부분 (Primary  $PM_{2.5}$  83%,  $NO_x$  100%,  $SO_x$  98%, VOCs 56%)을 차지하였다 (MOE, 2023). 단, 선행 연구들은 공통적으로 배출량 불확도가 기여도 분석 결과의 불확도를 유발할 수 있다는 것을 언급하였으며, 이는 배출량 현행화의 필요성을 의미한다 (Kumar *et al.*, 2022; Huang *et al.* 2021; Bae *et al.*, 2017). 국내의 경우 공식적으로 대기오염물질 배출량 (Clean Air Policy Support System; CAPSS)이 매년 산정 및 공표되고 있으며, 배출량 산정방법 개선, 오류 수정 등 다양한 개선 사항이 지속적으로 반영되고 있다 (NAIR, 2022). 특히, 2019년 이후에는 13건의 개선 사항이 적용되었기에, 이를 바탕으로 배출원별 기여도를 재검토할 필요가 있다 (NAIR, 2023). 또한,  $PM_{2.5}$  농도 관리는 국가 단위 외에도 지자체 (권역 또는 시도)별 맞춤형 대책을 수립 및 시행하고 있다. 따라서 지자체에서도 활용할 수 있는 정보를 제공하기 위해서는 기여도 분석 수행 시 가능한 상세하게 지역을 구분하여 배출원별 기여도를 제시할 필요가 있다.

이에 본 연구에서는 제3차 대기환경개선 종합계획 수립을 위해 준비된 최신의 배출량과 3차원 광화학 대기질 모델을 이용하여 지역별, 배출부문별 기여도 분석을 수행하였다. 이를 통해 배출량 현행화에 따른 배출원별 기여도를 재검토하였으며, 국가 또는 지

체에서  $PM_{2.5}$  농도 관리를 위한 정책 수립 시 참고할 수 있는 기초자료를 생산하고자 한다.

## 2. 연구 방법

### 2.1 기상·배출량·대기질 모델

본 연구에서는 지역별, 배출부문별 기여도 분석을 위해 국가미세먼지정보센터 (이후 ‘정보센터’로 표기)에서 구축 및 운영 중인 대기질영향예측시스템 (National Emission Assessment System; NEAS)을 이용하였다. NEAS는 기상, 배출량, 대기질 모델로 구성된 시스템으로써 정보센터에서 다양한 업무에 활용하고 있다 (MOE, 2023, 2022a, 2022b). 2021년 1월 1일부터 2021년 12월 31일까지 총 1년을 대상으로 동아시아 (27 km)-한반도 (9 km)-남한 (3 km) 영역 (그림 1)에서의 대기질 모사를 진행하였다. 기상 모델은 NCAR (National Center for Atmospheric Research)에서 개발한 WRF (Weather Research and Forecasting; Skamarock *et al.*, 2008) v3.9.1을 이용하였으며, 초기 및 경계 조건으로는 수평 격자 간격이  $0.25^\circ \times 0.25^\circ$ 인 NCEP (National Centers for Environmental Prediction) FNL 분석장을 이용하였다. WRF 모사 결과는 배출량 모델 및 대기질 모델에서 이용하기 위해 MCIP (Meteorol-

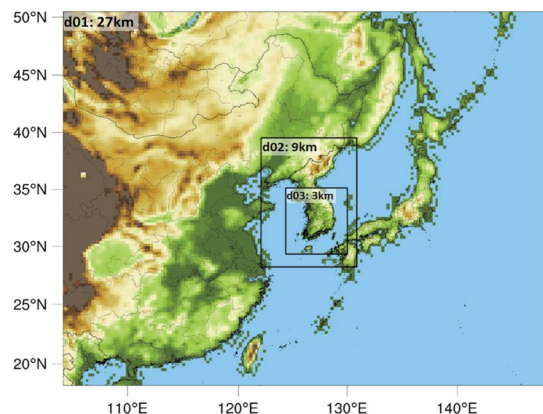


Fig. 1. Modeling domains with horizontal resolutions of 27 km (d01), 9 km (d02) and 3 km (d03).

ogy-Chemistry Interface Processor) v4.3을 이용하여 후처리과정을 수행하였다. 인위적 배출량의 경우 국내 배출목록은 CAPSS 2019를 기반으로 재산정 및 현행화한 2021년 잠정 CAPSS 배출량(이후 ‘2021년 잠정배출량’으로 표기)을 이용하였고, 국외 배출은 SIJAQv2 (Satellite Integrated Joint monitoring of Air Quality version 2; NIER, 2022) 배출량을 입력자료로 사용하였다. 2021년 잠정배출량의 상세한 내용은 다음 절에 후술하였다. 대기질 모델 입력용 인위적 배출량 자료 가공을 위해 SMOKE (Sparse Matrix Operator Kernel Emission; Benje *et al.*, 2001) v3.1을 이용하여 시공간 할당 및 화학종 분배를 수행하였다. 자연적 배출량의 경우, MEGAN (Model of Emissions of Gases and Aerosols from Nature; Guenther *et al.*, 2006) v2.07을 이용하였다. 대기질 모델은 CAMx (Comprehensive Air Quality Model with Extensions; ENVIRON International Corporation, 2014) v6.2를 이용하였으며, 화학 메커니즘은 SAPRC99 (1999 version of the Statewide Air Pollution Research Center chemistry; Carter, 2000), 에어로졸 모델은 CF (Coarse/fine; ENVIRON International Corporation, 2014)를 이용하였다. 기상, 배출량 그리고 대기질 모델의 세부적인 옵션은 표 1에 제시하였다.

## 2.2 국내 배출목록

국내 대기오염물질 공식 배출량(CAPSS)은 정보센터를 통해 매년 공표되고 있으며, 연구 수행 시점 기준으로 2019년 CAPSS 배출량이 가장 최신 자료이다. 그러나 제3차 대기환경개선 종합계획 수립을 위해 정보센터에서는 2019년 CAPSS 배출량이 가지고 있는 여러 제한점을 개선하여 2021년 잠정배출량을 산정하였다. 이에 보다 정확한 기여도 분석을 위해서는 다양한 배출량 개선사항이 반영된 2021년 잠정배출량을 이용하는 것이 바람직하다고 판단하였다. 또한 국가 단위에서 수행되는 대기환경개선 종합계획과 동일한 입력자료를 사용하여 기여도 분석 결과를 제시하는 것이 본 연구 결과의 활용성 증가 측면에서도 필요할 것으로 판단하였다.

2021년 잠정배출량은 정보센터에서 운영하는 배출정보관리위원회 심의를 통과한 배출량 개선사항 13건을 반영하였다. 대표적인 변경사항으로는 제철용 무연탄 활동도 개선, Euro6 경유 화물·승합(소형) 배출계수 신규 산정, 비산먼지-축산활동-닭-육계 미세먼지 배출계수 개선 등이 있으며, 세부적인 변경사항은 표 2에 제시하였다. 배출량 산정체계 개선, 이용되는 활동도 자료 변경 등 배출원별 세부적인 변동사항은 정보센터 홈페이지를 참고할 수 있다 (<https://air.>

**Table 1.** Summary of WRF and CAMx modeling configurations.

Model configurations	
<b>WRF</b>	
Version	3.9.1
Initial condition	NCEP GDAS/FNL analysis (6-hourly, $0.25^\circ \times 0.25^\circ$ )
Microphysics	WSM 6-class graupel scheme (Hong <i>et al.</i> , 2004)
PBL scheme	YSU scheme (Hong <i>et al.</i> , 2006)
<b>CAMx</b>	
Version	6.2
Horizontal advection solver	Piecewise Parabolic Method (Colella and Woodward, 1984)
Gas-phase chemical solver	Euler-Backward Iterative (Hertel <i>et al.</i> , 1993)
Gas-phase chemical mechanism	1999 version of the Statewide Air Pollution Research Center chemistry (Carter, 2000)
Particulate Matter chemistry	Inorganic aqueous chemistry (Chang <i>et al.</i> , 1987)
	Inorganic gas-aerosol partitioning (Nenes <i>et al.</i> , 1998)
	Organic gas-aerosol partitioning and oxidation (Strader <i>et al.</i> , 1999)
	Static two-mode coarse/fine (CF) scheme (ENVIRON International Corporation, 2014)

**Table 2.** Improvements made in the 2019 CAPSS emissions to estimate 2021 provisional emissions.

Improvements
Improve the activity data of anthracite used for iron industry
Newly develop emission factors for diesel and freight cars, van (small-scale)
Newly develop emission factors for petrol and LPG cars (starting from 2016)
Newly develop emission factors applied to PM emitted from CNG buses and cargo vehicles (Euro 5~6 standards)
Newly develop emission factors for diesel cars (Euro6d-TEMP), which are subject to regulations
Response to new emission standards (Euro4) and the current status of emission factors for domestic two-wheeled vehicles
Correct errors of emission factors due to speed level misapplication
Apply the changed basic data on the operation hours of construction machinery
Improve the year of the dump trucks and concrete mixer trucks
Correct errors in emission factors applied to energy transport and storage sector and gas stations
Improve emission factors applied to NH <sub>3</sub> from agriculture, manure management, pig, and growing pigs
Change the activity data on fugitive dust and vacant land
Change activity data on biomass burning, meat and fish grilling

go.kr). 또한, 사업장 부분의 배출량은 한국환경공단에서 제공하는 2021년 실시간 TMS (Tele-Monitoring System) 굴뚝 배출량 자료를 적용하여 현행하였다.

2021년 잠정배출량은 2019년 CAPSS 배출량 대비 PPM<sub>2.5</sub> (Primary PM<sub>2.5</sub>) -30.3%, NO<sub>x</sub> 29.2%, SO<sub>x</sub> -25.0%, VOCs -0.5%, NH<sub>3</sub> -15.3%의 변화를 보였다. 시도별로 배출량을 비교하면, PPM<sub>2.5</sub>와 NO<sub>x</sub> 배출량은 충남 지역에서 각각 61.3%, 21.7%로 가장 많은 감소율을 보였고, SO<sub>x</sub> 배출량은 경북에서 55.8%, NH<sub>3</sub> 배출량은 전북에서 25.6%로 가장 많은 감소율을 보였다(부록 1 참조).

SCC (Source Classification Code) 대분류(표 3)로 구분하여 2021년 잠정배출량과 2019년 CAPSS 배출량을 비교해 보았을 때(부록 2 참조), PPM<sub>2.5</sub>와 NO<sub>x</sub>, SO<sub>x</sub> 배출량은 제조업 연소에서 각각 24,639 ton, 43,298 ton, 37,141 ton 감소하였고, NH<sub>3</sub> 배출량은 농업에서 48,345 ton, VOCs 배출량은 에너지 수송 및 저장에서 3,927 ton 감소하였다. 특히, 제조업 연소의 PPM<sub>2.5</sub> 배출량은 2019년 CAPSS 대비 90.9% 감소하였는데, 이러한 배출량 감소는 주로 제철용 무연탄의 활동도가 개선되면서 감소한 것으로 보인다. 또한, 농업-분뇨관리-돼지-육성돈 및 비육돈의 NH<sub>3</sub> 배출계수 개선으로 농업 부분의 NH<sub>3</sub> 배출량이 감소하였고, 에너지 수송 및 저장-주유소의 배출계수 오류 수정 등으로 VOCs 배출량이 감소하였다.

**Table 3.** Source Classification Code (SCC) by emission source of 2021 provisional emissions.

SCC	Emission Source
01	Energy Production
02	Non-Industry
03	Manufacturing Industry
04	Industrial Processes
05	Energy Transport and Storage
06	Solvent Use
07	Road Transport
08	Non-road Transport
09	Waste
10	Agriculture
11	Other
12	Fugitive Dust
13	Biomass Burning

### 2.3 기여도 분석

지역별, 배출부문별 기여도 분석을 위해 CAMx 모델의 PSAT (Particulate Source Apportionment Technology; Yarwood *et al.*, 2007)을 활용하였다. PSAT은 분석하고자 하는 지역 혹은 배출부문의 배출량에 표식을 부여하여 이동 및 물리-화학반응을 거쳐 미세먼지가 되기까지의 과정을 추적하고, 오염물질 농도에 기여하는 정도를 정량적으로 분석할 수 있는 기여도 분석 방법이다(Bae *et al.*, 2021a; You *et al.*, 2020).

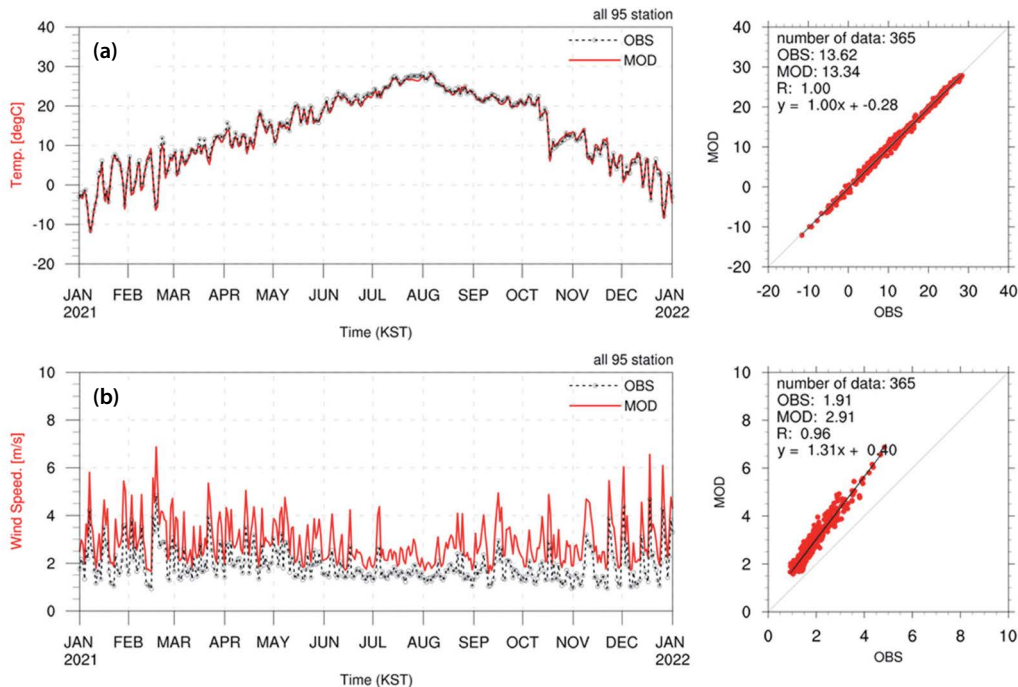
본 연구에서는 국내 모든 광역 지자체(17개 시도+바다) 및 모든 SCC 대분류(13개)를 대상으로 CAMx-

PSAT 모사를 수행하여 국내  $PM_{2.5}$  농도에 대한 시도별, 배출부문별 기여도를 구하였다.  $PM_{2.5}$  농도에 대한 국내·외 영향을 구분하기 위해 국내 모든 배출부문의 기여도를 모두 합한  $PM_{2.5}$  모사농도를 국내 기여도로 정의하였고,  $PM_{2.5}$  모사농도에서 국내 기여도를 뺀 나머지 부분을 국외 기여도로 정의하였다. 또한, 대상 지역을 선정하여 해당 지역의  $PM_{2.5}$  농도 중 자체 배출영향과 주변 지역의 배출영향을 분석하기 위해 시도별로 모든 배출부문의 기여도를 모두 합하여 대상 지역에 대한 시도별 기여도(타 지자체 배출영향)를 구하였다. 본 연구에서는 먼저 전국을 대상으로 시도별, 배출부문별 기여도 분석을 수행하였다. 또한, 시도별 자체 배출영향과 타 지자체 배출영향을 구분하여 분석하기 위해 우선적으로 수도권(서울, 인천, 경기)을 대상으로 분석을 수행하였고, 후속 연구를 통해 그 외 지역을 대상으로 추가적인 분석을 수행할 계획이다.

### 3. 결 과

#### 3.1 모사 수행평가

$PM_{2.5}$  농도에 대한 지역별, 배출원별 기여도 분석에 앞서 모사의 신뢰성 검토를 위해 관측자료와 모사 결과를 비교한 통계분석을 수행하였으며, 기상 모사는 Emery *et al.* (2001), 대기질 모사는 Huang *et al.* (2021)을 참고하여 통계값이 모사를 신뢰할 만한 범위에 있는지 검토하였다(부록 3 참조). 기상 모사의 경우, 기상청에서 제공하는 전국 95개 관측 지점의 ASOS (Automated Synoptic Observing System) 자료를 이용하여 2m 기온과 10m 풍속에 대해 통계분석을 수행하였다. 2021년 관측된 전국 연평균 기온은  $13.62^{\circ}\text{C}$ 였으며, 이에 대한 연평균 모사 기온은  $13.34^{\circ}\text{C}$ 였다. 전국 모사 및 관측 기온의 Bias는  $-0.28^{\circ}\text{C}$ 로 약한 한랭 편차(cold bias)를 보였으며(그림 2(a)), 평균 상관계수(R; Correlation Coefficient)와 IOA (Index Of Agree-



**Fig. 2.** Daily time series (left) of simulated (red solid line) and observed (black dotted line with circle mark) 2 m Temperature (a) and 10 m Wind speed (b), and scatter plots (right) between observation and simulation in 2021.



ment)는 모두 1.00으로 관측과 모사가 유사하게 나타나는 것을 확인할 수 있다. 모사된 2021년 전국 연평균 풍속은 2.91 m/s로 관측된 풍속(1.91 m/s) 대비 1 m/s 과대 모사하였다(그림 2(b)). 풍속의 과대 모사는 대기오염물질의 이류 및 확산에 영향을 주어 농도의 과소 모사를 야기할 수 있다(Bae and Kim, 2022). 전국 관측 및 모사된 풍속의 평균 상관계수와 IOA는 각각 0.96, 0.72였으며, RMSE (Root Mean Square Error)는 1.05 m/s로 나타났다. 본 연구에서 모사한 기온과 풍속의 통계분석 결과는 대부분 Emery *et al.* (2001)에서 제시한 권장 수준(기온:  $IOA \geq 0.7$ ,  $Bias \leq \pm 0.5^{\circ}C$ ; 풍속:  $IOA \geq 0.6$ ,  $RMSE \leq 2.0$  m/s,  $Bias \leq \pm 0.5$  m/s)을 만족하였다.

본 연구의 경우, 배출원별 기여도를 지역별로 분석하였기에 관측자료와 모사 결과를 비교한 통계분석 또한 지역별로 수행하였다. 기온의 지역별 결과를 살펴보면, 서울, 인천, 경기 모두 관측과 모사 결과의 상관계수와 IOA가 1.00의 상관성을 보였다. 서울과 경기 지역 기온의 Bias는 각각  $+0.24^{\circ}C$ ,  $+0.29^{\circ}C$ 로 약한 온난 편차(warm bias)를 보였으며, 인천에서는 Bias가  $-0.17^{\circ}C$ 로 약한 한랭 편차가 나타났다. 풍속의 경우, 서울(0.18 m/s)과 경기(0.90 m/s)에서 과대 모사하였고, 인천(0.36 m/s)에서는 과소 모사하였다. 또한, 풍속 RMSE의 경우에는 0.52 (서울)~0.97 m/s (경기) 범위를 보였다. 2 m 기온과 10 m 풍속에 대해 통계분석 결과는 표 4에 제시하였다.

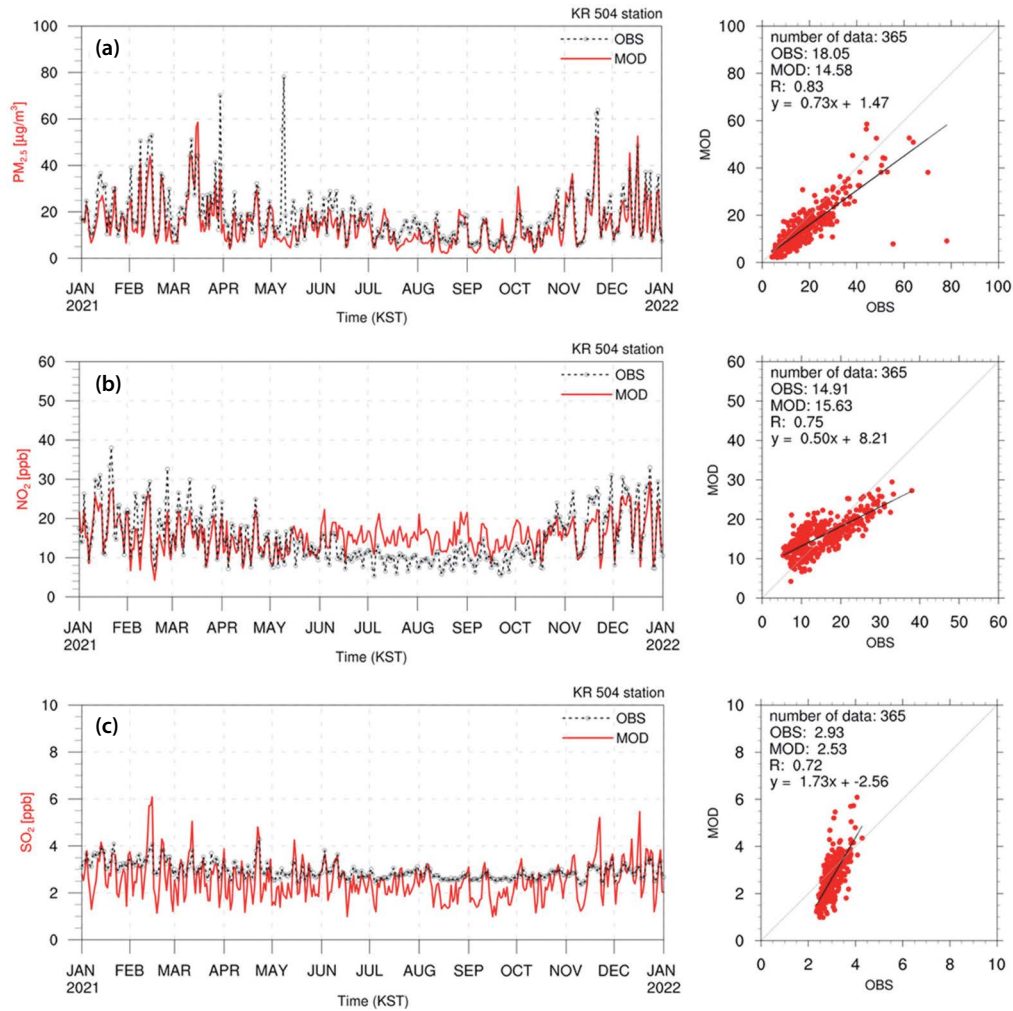
대기질 모사의 경우, 전국 504개 도시대기 측정망 자료를 이용하여 기준성 대기오염물질인  $PM_{2.5}$ ,  $NO_2$ ,  $SO_2$ 의 관측농도와 모사농도를 비교하였다(<http://www.airkorea.or.kr>).

2021년 기준 전국 연평균  $PM_{2.5}$  모사농도는  $14.58 \mu g/m^3$ 으로 관측농도( $18.05 \mu g/m^3$ ) 대비  $3.47 \mu g/m^3$  과소 모사하였다(그림 3(a)). 관측농도와 모사농도의 R, IOA, NME (Normalized mean error), FE (Fractional error)는 각각 0.83, 0.88, 25%, 31%로 Huang *et al.* (2021)에서 제시한  $PM_{2.5}$  농도의 모사 권장 수준( $R > 0.7$ ,  $IOA > 0.8$ ,  $NME < 35\%$ ,  $FE < 40\%$ )을 모두 만족하였다. 전국 연평균  $NO_2$  모사농도(15.63 ppb)는 관측농도(14.91 ppb) 대비 0.72 ppb 과대 모사하였으며, 다른 계절에 비해 여름철 과대 모사가 두드러졌다(그림 3(b)). 현재 사용하고 있는 기상 및 대기질 모델에는 난류(Meneveau, 2010), 구름과 입자의 상호작용(Tao *et al.*, 2012) 등의 불확도로 인해 모사된 강수량에 불확도가 존재하며(Cuo *et al.*, 2011; Pielke and Downton, 2000), 이는 여름철  $NO_2$  과대 모사가 다른 계절에 비해 뚜렷하게 나타난 이유 중 하나일 수 있다. 반면 전국 연평균  $SO_2$  모사농도는 2.53 ppb로, 관측농도(2.93 ppb)에 비해 0.40 ppb 과소 모사하였다(그림 3(c)).  $PM_{2.5}$ ,  $NO_2$ ,  $SO_2$ 에 대한 관측과 모사의 통계분석 결과는 표 5에 정리하였다.

지역별로 살펴보면, 서울, 인천, 경기 지역의  $PM_{2.5}$  모사농도는 관측농도 대비  $2.19 \sim 3.60 \mu g/m^3$  과소 모사하였으며, 경기 지역의 FB (Fractional Bias)를 제외하고 대부분 통계 결과에서 Huang *et al.* (2021)의 모사 권장 수준을 만족하는 것으로 확인하였다(표 6). 인천의  $NO_2$ ,  $SO_2$  모사농도는 관측농도에 비해 6.04, 0.14 ppb 과대 모사하였으며, 서울과 경기의  $NO_2$  모사농도는 과대 모사(10.15, 1.65 ppb),  $SO_2$  모사농도는 과소 모사하였다(1.58, 1.13 ppb). 이와 같이 국내의 경우,

**Table 4.** Model Performance Evaluation (MPE) results for 2 m Temperature and 10 m Wind speed in South Korea and Seoul Metropolitan area.

Region	2 m Temperature ( $^{\circ}C$ )				10 m Wind speed (m/s)			
	R	RMSE	IOA	Bias	R	RMSE	IOA	Bias
South Korea	1.00	0.70	1.00	-0.28	0.96	1.05	0.70	1.00
Seoul	1.00	1.12	1.00	0.24	0.89	0.52	0.89	0.18
Incheon	1.00	1.04	1.00	-0.17	0.89	0.62	0.91	-0.36
Gyeonggi	1.00	0.95	1.00	0.29	0.93	0.97	0.68	0.90



**Fig. 3.** Daily time series (left) of simulated (red solid line) and observed (black dotted line with circle mark) surface PM<sub>2.5</sub> concentration (a), NO<sub>2</sub> concentration (b) and SO<sub>2</sub> concentration (c), and scatter plots (right) between observation and simulation in 2021.

**Table 5.** MPE results for PM<sub>2.5</sub>, NO<sub>2</sub>, SO<sub>2</sub> concentration in South Korea.

Pollutants	OBS	MOD	R	IOA	NME	FB	FE
PM <sub>2.5</sub> (μg/m <sup>3</sup> )	18.05	14.58	0.83	0.88	25%	-25%	31%
NO <sub>2</sub> (ppb)	14.91	15.63	0.75	0.83	25%	9%	26%
SO <sub>2</sub> (ppb)	2.93	2.53	0.72	0.62	21%	-19%	25%

지역별로 모사 정확도가 상이하게 나타나는 것을 확인하였고, 이에 본 연구에서는 서울, 인천, 경기도를 포함한 17개 광역 지자체에 대한 통계분석을 수행하였

다. PM<sub>2.5</sub> 모사농도는 관측농도에 비해 모든 지역에서 과소 모사가 나타났고, 지역별로 11~27% (1.68~5.10 μg/m<sup>3</sup>)의 범위를 보였다. NO<sub>2</sub>와 SO<sub>2</sub> 모사농도의 경

**Table 6.** MPE results for PM<sub>2.5</sub>, NO<sub>2</sub>, SO<sub>2</sub> concentration in Seoul (SO), Incheon (IN), Gyeonggi (GG) and Baengneung-do (BN).

Region	Pollutant	OBS	MOD	R	IOA	NME	FB	FE
SO	PM <sub>2.5</sub> (μg/m <sup>3</sup> )	19.77	17.59	0.83	0.90	25%	-12%	29%
	NO <sub>2</sub> (ppb)	23.50	33.65	0.68	0.69	46%	40%	42%
	SO <sub>2</sub> (ppb)	3.09	1.51	0.73	0.40	52%	-79%	79%
IN	PM <sub>2.5</sub> (μg/m <sup>3</sup> )	20.19	17.96	0.80	0.89	25%	-13%	27%
	NO <sub>2</sub> (ppb)	20.22	26.26	0.69	0.75	37%	30%	36%
	SO <sub>2</sub> (ppb)	3.29	3.43	0.74	0.71	25%	-3%	26%
GG	PM <sub>2.5</sub> (μg/m <sup>3</sup> )	20.64	17.04	0.81	0.87	28%	-21%	33%
	NO <sub>2</sub> (ppb)	19.10	20.75	0.77	0.84	26%	14%	28%
	SO <sub>2</sub> (ppb)	2.97	1.84	0.60	0.39	41%	-55%	57%
BN	PM <sub>2.5</sub> (μg/m <sup>3</sup> )	20.68	11.46	0.80	0.75	46%	-68%	70%
	NO <sub>2</sub> (ppb)	4.68	1.17	0.38	0.22	76%	-115%	117%
	SO <sub>2</sub> (ppb)	1.68	0.69	0.28	0.21	62%	-95%	98%

우, 지역별로 과대·과소 모사가 혼재되어 나타났다. 특히, 충남과 경북 지역의 SO<sub>2</sub> 모사농도와 관측농도의 차이는 각각 -1.13, -0.93 ppb (-30%, -29%)로, 2016년 CAPSS 배출량을 활용한 선행 연구(충남: +130%, 경북: +290%)와 비교하여 개선된 것을 확인할 수 있었다(Kim *et al.*, 2022; Kim *et al.*, 2020). 이는 제철용 무연탄(비민수용무연탄)과 관련된 배출량이 높은 두 지역에서 제철용 무연탄 활동도 개선에 의한 SO<sub>2</sub> 배출량 감소가 크게 작용할 것일 수 있다(You *et al.*, 2022). 이 외 지역별 통계분석 결과는 부록 4에 제시하였다.

국내 대기오염물질 농도는 국내 자체 영향뿐만 아니라 국외 영향이 함께 나타난다(Bae and Kim, 2022; Kim, 2006). 이에 기여도 분석 시 신뢰성 확보를 위해서는 국외 기여도에 대한 평가가 필요하다. 본 연구에서는 국외 영향이 상당 부분을 차지하는 것으로 알려진 백령도 국가배경농도 측정망 자료를 활용하여 국외 기여도에 대한 간접적인 평가를 수행하였다(Son *et al.*, 2021; Nam *et al.*, 2019; Ban *et al.*, 2018). 2021년 연평균 백령도 PM<sub>2.5</sub> 모사농도는 11.46 μg/m<sup>3</sup>으로, 관측농도(20.68 μg/m<sup>3</sup>)에 비해 9.22 μg/m<sup>3</sup> (45%) 과소 모사하였다. 이는 현재 모델 입력자료로 사용된 국외 배출량이 과소 평가되었을 가능성이 있음을 의미하며, 국외 배출량에 대한 불확도를 보완하기 위해 다양한 보정 방법론이 개발되고 있다(Kang *et al.*, 2023;

Bae and Kim, 2022). 다만, 본 연구는 정책 수립의 기초자료로 활용할 목적을 가지므로, 배출원과 농도 관계를 설명할 수 있는 상향식 배출량 목록에 기반하여 결과를 도출하고자 한다.

### 3.2 배출지역별(국내·외 및 자체) 기여율

본 연구에서는 우선적으로 자체적인 배출량 감축을 통해 저감할 수 있는 PM<sub>2.5</sub> 농도 수준을 가늠하기 위해 국내·외 기여도 분석을 수행하였다. 2021년 전국 연평균 PM<sub>2.5</sub> 농도에 대한 국내 기여율은 49%, 국외 기여율은 51%로 국내·외 기여율이 유사하게 나타났다(그림 4). 시도별로 살펴보면, 국내 기여율이 30~60% 수준으로 나타났다. 강원과 제주에서의 국내 기여율은 각각 38%, 30%로 가장 낮게 모사되었으며, 울산에서 60%로 가장 높게 모사되었다. 국내 기여도는 수도권, 동남권 지역 등에서 상대적으로 높게 나타났고, 서부 해안지역에 위치한 전라도, 광주, 충남 등에서는 국외 기여율이 타 시도에 비해 상대적으로 높았다. 이는 기존 연구에서도 유사하게 나타난 것으로 위 지역들이 지리적으로 국외 배출의 영향을 받기 용이하기 때문으로 보고된다(Bae and Kim, 2022). 다만 앞서 모사 수행평가에서 제시한 백령도 지점에서의 PM<sub>2.5</sub> 과소 모사를 고려할 때, 본 연구에서 제시하고 있는 국외 기여율은 일부 과소평가되었을 가능성이



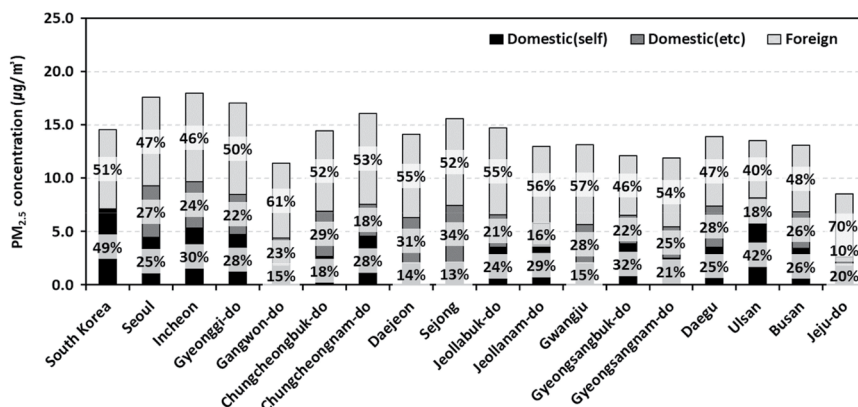


Fig. 4. Domestic (black and dark grey) and foreign (light grey) contribution rate to nationwide and provincial simulated  $PM_{2.5}$  concentration.

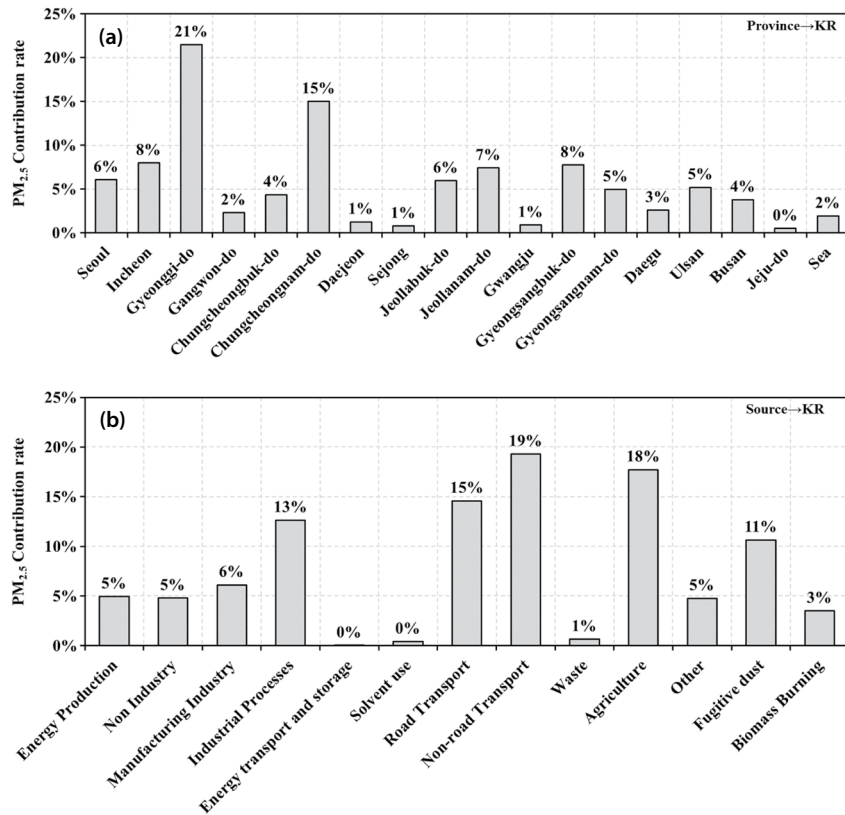
있다. 국내 전체  $PM_{2.5}$  연평균 모사농도에 대한 과소 모사의 원인을 모두 국외 배출량의 과소평가에서 기인하는 것으로 가정해볼 경우, 국외 기여율은 60% 수준까지 증가될 수 있다. 그러나 이와 유사한 수준의 국외 기여율(46~58%)이 제시되었던 Bae *et al.* (2023) 에서도 국내  $PM_{2.5}$  농도 대기환경기준은 국외 배출량 저감만으로는 달성하기 어려운 것으로 보고하였다. 또한, 국내의  $PM_{2.5}$  농도 감소는 전구물질 배출량 감축 비율이 0~50% 구간보다 50~100% 구간에서 더욱 크게 나타난다는 점을 고려할 때 국내 배출량 감축 및 효율적인 정책 수립을 위한 주요 배출원에 대한 분석 필요성은 여전히 존재한다고 판단된다 (Kang and Kim, 2022).

국내 기여도를 기준으로 시도별 자체 기여도와 타 지자체의 기여도를 구분하면, 지역에 따라 자체 기여율이 뚜렷한 차이를 보인다. 울산의 경우, 자체 기여율(42%)이 타 지자체의 기여율(18%)보다 2.3배가량 높게 나타났으며, 충남, 인천 지역에서도 자체 기여가 타 지자체의 기여보다 높게 나타났다. 이와 반대로 충북, 대전, 세종, 광주 등은 자체 기여가 타 지자체의 기여보다 낮게 나타났다. 이는 지역에 따라  $PM_{2.5}$  정책 수립 방향이 자체적인 배출원 관리를 우선시할 것인지, 외부유입 감소를 위한 대응 방안을 마련할 것인지와 같이 서로 다를 수 있다는 것을 의미한다. 따라서 선

행 연구에서 제시되었듯 일부 시도를 제외하면 광역적인 관리가 필요하다는 것을 다시 한번 확인할 수 있다(Bae *et al.*, 2021b; You *et al.*, 2020).

### 3.3 전국 $PM_{2.5}$ 농도 관리를 위한 주요 배출원 분석

본 절에서는 전국  $PM_{2.5}$  농도에 주된 기여를 하고 있는 배출지역과 배출원을 분석하였다. 아래는 전국  $PM_{2.5}$  농도 중 국내 기여도를 기준으로 대상(배출지역 혹은 배출부문) 기여도의 상대적인 비율을 정리한 것이다. 배출지역별로 살펴보면, 경기 지역이 21%로 가장 높은 기여율을 보였으며, 인천과 서울 지역 또한 각각 8%, 6%로 높은 기여율을 보여 수도권이 전체 1/3 이상(35%)을 차지하였다(그림 5(a)). 배출부문별로 구분하면 비도로 이동 오염원, 농업, 도로 이동 오염원 순으로 각각 19%, 18%, 15%를 차지하였으며, 생산 공정과 비산먼지는 각각 13%, 11%의 기여율을 보였다(그림 5(b)). 전국  $PM_{2.5}$  농도를 대상으로 2016년 CAPSS와 CMAQ-BFM을 이용하여 배출원별 기여도 분석을 수행한 Kang *et al.* (2021a)과 비교해보니 농업 부문을 제외한 상위 5개 배출원은 동일하게 나타났다. 다만, 상대적인 순서는 다소 차이를 보였는데, 선행 연구에서는 도로 이동 오염원, 제조업 연소, 비도로 이동 오염원 순으로 기여도가 높았으나, 본 연구에서

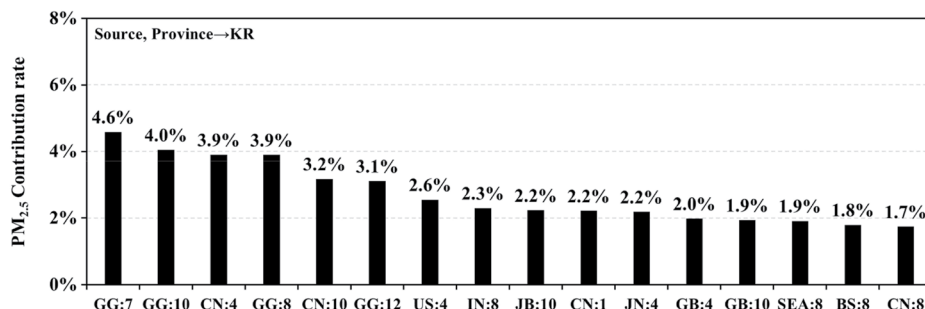


**Fig. 5.** Contribution rate by province (a) and source sector (b) to the domestic contribution of nationwide PM<sub>2.5</sub> concentration.

는 비도로 이동 오염원, 도로 이동 오염원, 생산 공정 순으로 기여도가 높았다. 배출량 관점에서 보면, 2016년 CAPSS 대비 제조업 연소 부문의 배출량이 PPM<sub>2.5</sub> 93%, NO<sub>x</sub> 28%, SO<sub>x</sub> 67% 감소하였으며, 도로 이동 오염원 부문의 경우에는 PPM<sub>2.5</sub> 40%, NO<sub>x</sub> 22% 감소하였기에 선행 연구보다 제조업 연소와 도로 이동 오염원 기여도의 상대적 크기가 작아진 것으로 판단된다. 기여도 변화는 분석 방법론이나 기상 조건의 차이 등에 의해서도 발생할 수 있으나, 예시로 든 두 배출부문의 경우, 뚜렷한 배출량 감소가 나타났기에 배출량 변화가 기여도의 차이를 유발한 가장 주요한 요인으로 추정하였다.

그림 6은 각 배출지역(광역 지자체)에 대해서 배출 부문별로 세분화하여 전국 PM<sub>2.5</sub> 농도에 대한 기여율

이 큰 순서대로 나열한 그래프이다. 배출지역명은 부록 1의 시도별 약어를 사용하였고, 배출부문명은 표 3의 배출 분류 코드(SCC)를 사용하여 표현하였다. 전국 PM<sub>2.5</sub> 농도에 대한 기여율을 살펴보면, 경기: 도로 이동 오염원이 4.6%로 가장 높은 기여율을 보였으며, 경기: 농업에서 4.0%, 충남: 생산 공정에서 3.9% 순으로 높았다. 특징적으로 울산: 생산 공정, 전북: 농업, 전남: 생산 공정의 경우, 지역별 기여도 분석에서는 순위가 상대적으로 낮으나 배출부문별로 세분화할 경우에는 기여율이 상대적으로 높게 나타나는 경우가 존재하였다. 따라서, 전국 PM<sub>2.5</sub> 농도 관리를 위해서는 상대적으로 기여율이 낮은 지역이라 하더라도 주요 배출원의 기여도를 파악하고 관리 필요성을 검토해봐야 할 것이다. 본 연구에서는 시도별, 배출원별로 구분된



**Fig. 6.** Contribution rate of each source sector by province to domestic contribution of nationwide PM<sub>2.5</sub> concentration (refer to Appendix 1 and Table 3 for names of provinces and source sectors).

배출량과 PM<sub>2.5</sub> 농도 기여도를 비교하였으며, 각 요소들이 동등한 배출 수준을 가지지 않는다. 그러나 미세먼지 관리 종합계획, 권역별 대기환경관리 기본계획 등 대기질 관리계획의 시행이 최종적으로는 시도 단위로 이루어짐을 고려하여 시도별, 배출원별 기여도 분석 결과를 제시하였다(MOE, 2020).

### 3.4 수도권 PM<sub>2.5</sub> 농도 관리를 위한

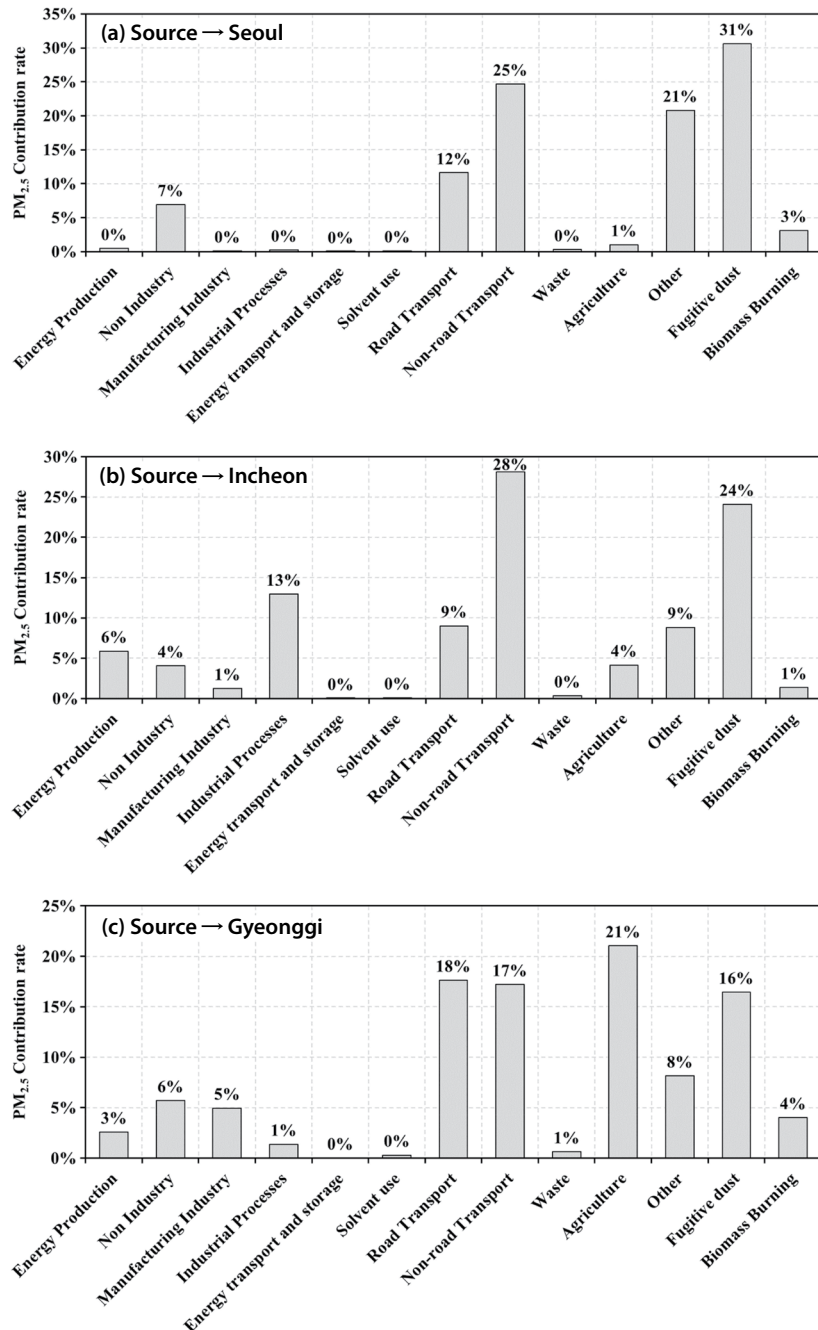
#### 주요 배출원 분석

시도 단위의 PM<sub>2.5</sub> 농도 관리는 해당 지자체의 자구적인 노력을 통한 개선과 광역적 관리를 통한 타 지자체와의 협력체계 구축을 구분하여 정책을 수립할 수 있도록 자체 배출영향과 타 지자체 유입영향으로 구분하여 검토하였다. 분석 대상 지역은 인구, 배출량 PM<sub>2.5</sub> 농도가 타 지자체에 비해 상대적으로 높은 수도권(서울, 인천, 경기) 지역으로 선정하였다.

먼저 서울 지역 PM<sub>2.5</sub> 농도에 대한 자체 배출영향은 비산먼지(31%), 비도로 이동 오염원(25%), 기타면 오염원(21%) 순으로 높게 나타났다(그림 7(a)). 비산먼지와 비도로 이동 오염원의 경우, 서울 지역 PPM<sub>2.5</sub> 배출량(부록 4 참조)의 각각 42%, 35%를 차지하고 있으며, 비도로 이동 오염원은 이와 더불어 NO<sub>x</sub>와 SO<sub>x</sub> 배출량의 각각 28%, 17%를 차지하고 있어 서울 지역 PM<sub>2.5</sub> 농도에 높은 기여를 보이는 것으로 판단된다. 또한, 기타면오염원의 경우 동물과 산불 및 화재 배출원을 포함하고 있는데, 이러한 배출원에는 사람으로

인해 배출되는 암모니아 배출이 포함되어 있다. 따라서 인구 밀도가 높은 서울 지역은 기타면오염원의 암모니아 배출에 의한 기여도가 높게 나타난 것으로 판단된다. 인천 지역의 경우, 비도로 이동 오염원(28%), 비산먼지(24%), 생산 공정(13%) 순으로 인천 지역의 PM<sub>2.5</sub> 농도에 기여하였다(그림 7(b)). 배출량과 함께 살펴보면, 비도로 이동 오염원은 PM<sub>2.5</sub> (35%)와 SO<sub>x</sub> (32%)의 경우에는 두 번째로, NO<sub>x</sub> (38%)는 첫 번째로 많이 차지하고 있으며, 비산먼지는 PM<sub>2.5</sub> (36%) 배출량 중 가장 많이 차지하고 있다. 생산 공정의 경우, NH<sub>3</sub> (61%) 배출량의 대부분을 차지하고 있어 기여도가 높게 나타난 것으로 판단된다. 마지막으로 경기 지역의 PM<sub>2.5</sub> 농도의 자체 배출영향은 농업(21%), 도로 이동 오염원(18%), 비도로 이동 오염원(17%), 비산먼지(16%) 순으로 높게 나타났다(그림 7(c)). 배출량과 함께 살펴보면, NH<sub>3</sub> 배출량 중 농업에서 84%로 대부분을 차지하고, 도로 및 비도로 이동 오염원에서 PM<sub>2.5</sub> (15%, 23%), NO<sub>x</sub> (55%, 23%) 배출량의 상당량을 차지하고 있는 것을 확인할 수 있다. 또한, 비산먼지 부문에서 PM<sub>2.5</sub> 배출량의 1/3 이상(36%)으로 배출부문 중에서 가장 많이 차지하고 있다. 종합하면 수도권에서는 자체 배출원의 경우, PM<sub>2.5</sub> 직접 배출에 의한 영향이 중요하였으며, 배출부문별 전구물질 배출량과 배출부문별 기여도 순위가 대체로 유사하게 나타나는 것을 확인하였다.

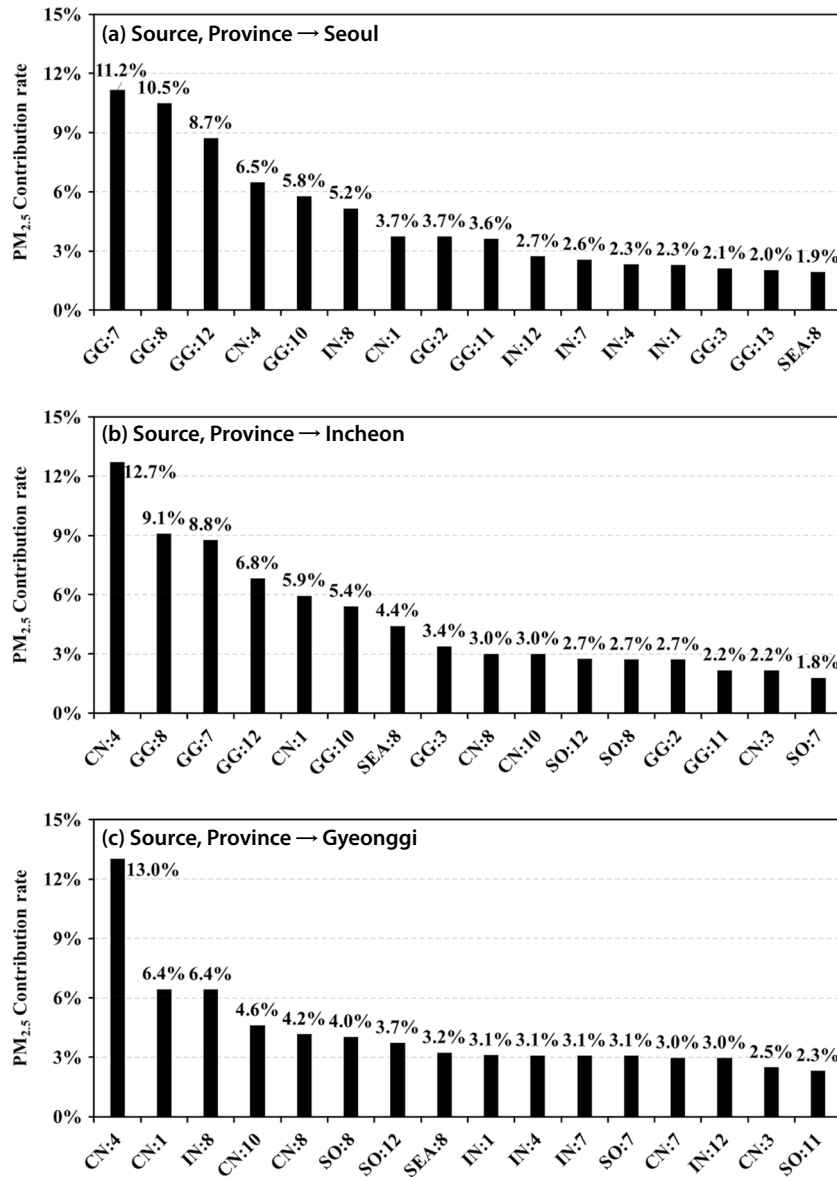
다음으로 타 지자체의 배출량이 수도권 지역에 미



**Fig. 7.** Contribution rate by source sector to the self-contribution of Seoul (a), Incheon (b), and Gyeonggi (c)  $PM_{2.5}$  concentration.

치는 기여도를 배출부문별로 살펴보았다(그림 8). 서울의  $PM_{2.5}$  국내 기여도 중에서 경기: 도로 및 비도로

이동 오염원이 각각 11.2%와 10.5%로 가장 높은 기여율을 보였으며, 그 외에도 경기: 비산먼지(8.7%), 충

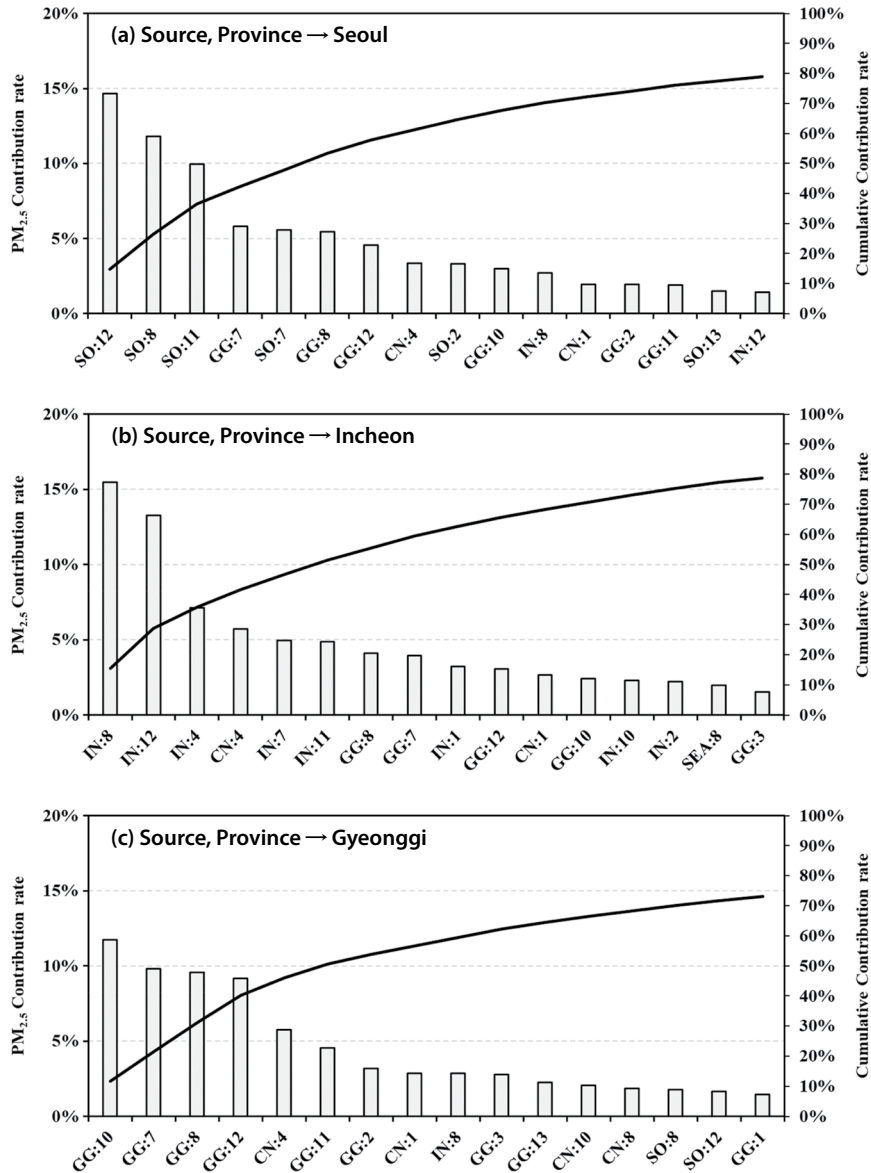


**Fig. 8.** Contribution rate of each source sector by province to domestic contribution (without self-contribution) of PM<sub>2.5</sub> concentration in Seoul (a), Incheon (b), and Gyeonggi (c).

남: 생산 공정 (6.5%) 순으로 높았다(그림 8(a)). 다음으로 인천 지역 PM<sub>2.5</sub> 국내 기여도 중에서는 충남: 생산 공정이 12.7%, 경기: 비도로 이동 오염원이 9.1%, 경기: 도로 이동 오염원이 8.8% 순으로 기여율이 높은 것을 볼 수 있다(그림 8(b)). 또한, 특징적으로 해상 선

박의 기여율이 상위 7번째(4.4%)로 나타난 것을 확인할 수 있다. 마지막으로 경기 지역 PM<sub>2.5</sub> 국내 기여도에서 충남: 생산 공정이 13.0%로 가장 높은 기여율을 보였으며, 다음으로 충남: 에너지산업 연소(6.4%), 인천: 비도로 이동 오염원(6.4%), 충남: 농업(4.6%) 순으





**Fig. 9.** PM<sub>2.5</sub> contribution rate of each source sector by province (bar graph) and cumulative contribution rate (solid line) among the domestic contributions in the Seoul (a), Incheon (b), and Gyeonggi (c).

로 높게 나타났다(그림 8 (c)). 종합해보면 수도권 지역에서는 충남: 생산 공정 배출량 저감을 위한 협력 체계 구축이 가장 시급하며, 서울과 인천의 경우에는 경기 지역의 이동오염원과 비산먼지 배출량 관리를 우선적으로 검토할 필요가 있을 것으로 판단된다.

그림 7과 8을 종합하면, 서울은 국내 기여도의 약 48%가 상위 5개 배출부문(서울: 비산먼지, 서울: 비도로 이동 오염원, 서울: 기타면오염원, 경기: 도로 이동 오염원, 서울: 도로 이동 오염원)에서 기여하고 있는 것을 볼 수 있다(그림 9(a)). 특히, 상위 3개의 배출부

문에서 기여율이 10% 이상으로 높게 나타나고 있어 서울 지역에서는 자체 영향 분석이 추가적으로 이루어져야 할 것으로 사료된다. 인천은 국내 기여도의 약 47%가 상위 5개 부문(인천: 비도로 이동 오염원, 인천: 비산먼지, 인천: 생산 공정, 충남: 생산 공정, 인천: 도로 이동 오염원)에서 기여하고 있다(그림 9(b)). 인천의 경우에는 상위 2개의 배출부문에서 기여율이 13% 이상으로 나타나고, 그 이후는 상대적으로 낮은 기여율을 보이고 있어 인천 자체 기여 중 비도로 이동 오염원과 비산먼지 부문에 대한 영향 분석이 필요할 것으로 사료된다. 마지막으로 경기도는 국내 기여도의 약 46%가 상위 5개 부문(경기: 농업, 경기: 도로 이동 오염원, 경기: 비도로 이동 오염원, 경기: 비산먼지, 충남: 생산 공정)에서 기여하고 있다(그림 9(c)). 경기도의 경우, 상위 4개 부문이 자체 기여율이고, 국내 기여도의 약 40%를 차지하여 서울 지역과 마찬가지로 자체 영향 분석이 추가적으로 이루어져야 할 것으로 사료된다. 수도권외의 경우, 자체적인  $PM_{2.5}$  농도 개선 및 타 지자체를 고려한 광역적 관리를 위해서는 공통적으로 기여율이 높게 나타나는 도로 및 비도로 이동 오염원과 비산먼지, 생산 공정 등을 우선적으로 관리할 필요가 있을 것으로 사료된다.

#### 4. 결 론

본 연구에서는 최근 대기오염물질 배출량 산정방법 개선 결과를 반영하여 지역별, 배출부문별 대기오염물질 배출량과  $PM_{2.5}$  농도 관계를 모델링을 통해 분석하였다. 연구에 사용된 2021년 잠정배출량은 기초가 된 2019년 CAPSS 배출량과 비교해서  $PPM_{2.5}$  30.3%,  $NO_x$  9.2%,  $SO_x$  25.0%,  $NH_3$  15.3%, VOCs 0.5% 감소하였다. 특징적으로 감소폭이 크게 나타난 경우는 제조업 연소 부문에서  $PPM_{2.5}$  90.9% (24,639 ton),  $NO_x$  25.6% (43,298 ton),  $SO_x$  56.5% (37,141 ton), 농업 부문에서  $NH_3$  19.2% (48,345 ton), 에너지 수송 및 저장 부문에서 VOCs 13.5% (3,927 ton) 감소하였다. 이로 인

해 충남에서  $PPM_{2.5}$  61.3%,  $NO_x$  21.7%, 경북에서  $SO_x$  55.8%, 전북에서  $NH_3$  25.6%의 배출량이 감소하였다. 그동안 다수의 연구에서 국내  $PM_{2.5}$  농도에 주요한 요인으로 지목되어 왔던 농업, 제조업 연소 배출원과 충남 지역 배출량에 상당한 변화가 있었으며, 이는 기존에 정책 수립의 기초자료로 사용되었던 배출원-농도 관계에도 변화가 발생할 가능성이 있다는 것을 짐작할 수 있다.

본 연구에서 수행된 모사에서 국내  $PM_{2.5}$  농도에 대한 배출부문별 기여도는 비도로 이동 오염원, 농업, 도로 이동 오염원, 생산 공정, 비산먼지, 제조업 연소 순이었으며, 이는 제조업 연소 부문의 기여도가 3순위 안에 언급되던 기존 연구와 다소 차이를 보인다(Kang et al., 2021a). 배출원 관리 정책 수립 시에는 기여도의 크기 외에도 실효성 있는 관리 방안의 유무, 배출량 감축 시 소모되는 비용, 사회·경제적 상황 등 다양한 부문을 고려해야 한다. 따라서 기여도의 상대적 크기와 배출원 감축 우선 순위를 동일하게 볼 수는 없지만, 정책 수립계획 단계에서 우선적으로 관리 방안을 검토해볼 필요가 있다고 판단된다. 또한, 정책 시행의 효과도 기존과 다르게 나타날 수 있다. 이러한 점을 고려해볼 때, 기여도의 상대적 크기가 기존 연구와 차이를 보이는 것은 향후 정책 수립 시 배출량 개선사항이 반영된 이후의 배출목록을 이용하는 것이 필수적일 것으로 판단된다.

본 연구는 제 3차 미세먼지 종합계획 수립을 위해 최신화된 국내 배출량을 사용하여 기여도 분석을 수행한 첫 번째 연구 결과이므로, 국내 전체, 시도 단위에서 이용할 수 있는 기여도의 상대적 순위를 제시하는 것에도 의미가 있다 판단된다. 국가 단위에서는 주로 경기(도로 이동, 농업)와 충남(생산 공정) 지역의 배출부문의 기여율이 상대적으로 높았으며, 추가로 울산, 전남 지역의 생산 공정과 전북의 농업 배출원 또한 기여율이 높게 나타났다. 서울을 대상으로 한 지역 단위 분석의 경우 서울의 비산먼지, 도로·비도로 이동, 기타면오염원과 주변 지역인 경기: 도로 이동, 충남: 생산 공정, 에너지산업 연소 오염원의 기여율이 상대적

으로 높았다. 본 연구와 같이 PM<sub>2.5</sub> 주요 배출원은 국가 단위와 시도 단위 분석에서 상당한 차이를 보였다. 이는 지역별 PM<sub>2.5</sub> 관리대책 마련을 위해서 대상 지역별로 배출원-농도 관계를 검토할 필요성이 있음을 의미한다. 하지만 현재 이러한 분석 체계가 충분히 갖추어지지 못한 지역이 많아, 배출량 업데이트와 같이 정책수립에 이용되는 기초자료가 변화되는 상황에도 즉각적인 대처가 어려운 것이 현실이다. 따라서 지역 단위에서는 일차적으로는 환경부에서 제공하는 지역 단위 분석 결과를 검토하고, 환경부-지역 보건연구원의 연구 협력체계 구축, 지역 단위 PM<sub>2.5</sub> 발생원인 분석 시스템을 구축하는 과정이 필요할 것으로 판단된다.

다만, 앞서 모사 수행평가와 국내·외 기여도 분석에서도 언급하였듯 기여도 분석은 모델과 분석 방법론의 선택, 국내·외 배출량 입력자료, 기상 입력자료의 정확도 등에 따라 본 연구에서 제시한 결과와 차이가 발생할 수 있다. 특히 지역으로 세분화하여 살펴볼 경우, 모사 불확도가 더욱 커지는 경향이 있기에 기여도 분석 결과의 정확도 향상을 위해서는 추후 다양한 관측자료를 통한 모사 결과의 검증과 개선과정이 필요할 것으로 판단된다. 이와 함께 배출량 저감 기술, 비율, 노출도 등을 연계하여 보다 실효성 있는 대책 수립을 위한 연구가 필요할 것으로 판단된다.

## References

- Apte, J.S., Marshall, J.D., Cohen, A.J., Brauer, M. (2015) Addressing Global Mortality from Ambient PM<sub>2.5</sub>, *Environmental Science & Technology*, 49, 8057-8066. <https://doi.org/10.1021/acs.est.5b01236>
- Bae, C., Kim, E., Yoo, C., Kim, H.-C., Kim, Y.M., Kim, S. (2021a) Prioritizing Local Authorities Effective to Lower the Nationwide PM<sub>2.5</sub> Concentrations and the Personal Exposure Based on the Source Apportionment with the CAPSS 2016 Emissions Inventory, *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment*, 37(3), 410-428, (in Korean with English abstract).
- Bae, C., Yoo, C., Kim, B.-U., Kim, H.-C., Kim, S. (2017) PM<sub>2.5</sub> Simulations for the Seoul Metropolitan Area: (III) Application of the Modeled and Observed PM<sub>2.5</sub> Ratio on the Contribution Estimation, *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment*, 33(5), 445-457, (in Korean with English abstract).
- Bae, M., Kim, E., You, S., Son, K., Kang, Y.-H., Kim, S. (2021b) Local Authority Level Source Apportionments of PM<sub>2.5</sub> Concentrations based on the CAPSS 2016: (VII) Seoul, *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment*, 37(3), 466-486, (in Korean with English abstract).
- Bae, M., Kim, S. (2022) Adjustment of Foreign Emission Impacts on Provincial PM<sub>2.5</sub> Concentrations in South Korea based on Upwind Observations and Estimation of Domestic Emission Uncertainty, *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment*, 38(4), 624-636, (in Korean with English abstract).
- Bae, M., Woo, J.-H., Kim, S. (2023) Seasonal PM Management: (II) How Low PM<sub>2.5</sub> Concentration in South Korea can be Achieved?, *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment*, 39(1), 9-23, (in Korean with English abstract).
- Ban, J., Park, T., Park, S.M., Shin, H.-J., Lim, Y.-J., Choi, J., Lee, M.-D., Lee, S.-B., Kim, J., Lee, T. (2018) The Ionic Composition and Acidity of PM<sub>2.5</sub> at Baengnyeong Island during the High Concentration Episodes (2013-2014), *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment*, 34(6), 780-791, (in Korean with English abstract). <https://doi.org/10.5572/KOSAE.2018.34.6.780>
- Benjey, W., Houyoux, M., Susick, J. (2001) Implementation of the SMOKE emission data processor and SMOKE tool input data processor in models-3, US EPA.
- Carter, W.P. (2000) Implementation of the SAPRC-99 Chemical mechanism into the Models-3 framework. Report to the United States Environmental Protection Agency, 29 January 2000.
- Chang, J.S., Brost, R.A., Isaksen, I.S.A., Madronich, S., Middleton, P., Stockwell, W.R., Walcek, C.J. (1987) A three-dimensional Eulerian acid deposition model: Physical concepts and formulation, *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 92(D12), 14681-14700.
- Colella, P., Woodward, P.R. (1984) The piecewise parabolic method (PPM) for gas-dynamical simulations, *Journal of Computational Physics*, 54(1), 174-201.
- Cuo, L., Pagano, T.C., Wang, Q.J. (2011) A review of quantitative precipitation forecasts and their use in short- to medium-range streamflow forecasting, *Journal of Hydro-meteorology*, 12(5), 713-728. <https://doi.org/10.1175/2011JHM1347.1>

- Emery, C., Tai, E., Yarwood, G. (2001) Enhanced meteorological modeling and performance evaluation for two Texas ozone episodes, Prepared for the Texas Natural Resource Conservation Commission. ENVIRON International Corporation, Novato, CA.
- ENVIRON International Corporation (2014) User's Guide: COMPREHENSIVE AIR QUALITY MODEL with EXTENSIONS Version 6.2.
- 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, 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<sub>2.5</sub> in the Korea, *Journal of Korean Medical Science*, 33(30), 1-14. <https://doi.org/10.3346/jkms.2018.33.e193>
- Hertel, O., Berkowicz, R., Christensen, J., Hov, Ø. (1993) Test of two numerical schemes for use in atmospheric transport-chemistry models, *Atmospheric Environment*, 27(16), 2591-2611.
- Hong, S.Y., Dudhia, J., Chen, S.H. (2004) A revised approach to ice microphysical processes for the bulk parameterization of clouds and precipitation, *Monthly Weather Review*, 132(1), 103-120.
- Hong, S.Y., Noh, Y., Dudhia, J. (2006) A new vertical diffusion package with an explicit treatment of entrainment processes, *Monthly Weather Review*, 134(9), 2318-2341.
- 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<sub>2.5</sub> and chemical species, *Atmospheric Chemistry and Physics*, 21, 2725-2743.
- Jin, H.-A., Lee, J.-H., Lee, K.-M., Lee, H.-K., Kim, B.-E., Lee, D.-W., Hong, Y. (2012) The Estimation of PM<sub>2.5</sub> Emissions and Their Contribution Analysis by Source Categories in Korea, *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment*, 28(2), 211-221, (in Korean with English abstract).
- 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<sub>2.5</sub> Concentrations based on the CAPSS 2016 using the CMAQ Model, *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment*, 37(1), 17-44, (in Korean with English abstract).
- Kang, Y.-H., Kim, S. (2022) Seasonal PM Management: (I) What Emissions Should be Reduced?, *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment*, 38(5), 746-763, (in Korean with English abstract).
- Kang, Y.-H., Son, K., Kim, B.-U., Chang, Y.W., Kim, H.-C., Schwarz, J.P., Kim, S. (2023) Adjusting elemental carbon emissions in Northeast Asia using observed surface concentrations of downwind area and simulated contributions, *Environment International*, 178, 108069. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2023.108069>
- Kang, Y.-H., You, S., Son, K., Kim, E., Bae, M., Kim, S. (2021b) Municipality-Level Source Apportionment of PM<sub>2.5</sub> Concentrations based on the CAPSS 2016: (V) Ulsan, *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment*, 37(3), 487-511, (in Korean with English abstract).
- Kim, H.-C., Kim, E., Bae, C., Cho, J.-H., Kim, B.-U., Kim, S. (2017) Regional contributions to particulate matter concentration in the Seoul metropolitan area, South Korea: seasonal variation and sensitivity to meteorology and emissions inventory, *Atmospheric Chemistry and Physics*, 17, 10315-10332.
- Kim, O., Bae, M., Kim, S. (2020) Evaluation on Provincial NOx and SO<sub>2</sub> Emission in CAPSS 2016 Based on Photochemical Model Simulation, *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment*, 36(1), 64-83, (in Korean with English abstract).
- Kim, S., Son, K., You, S., Bae, M., Kang, Y.-H., Kim, E., Kim, S. (2022) Municipality-Level Source Apportionment of PM<sub>2.5</sub> Concentrations based on the CAPSS 2016: (IX) Gyeongsangbuk-do, *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment*, 38(2), 237-257, (in Korean with English abstract).
- Kim, Y.P. (2006) Air Pollution in Seoul Caused by Aerosols, *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment*, 22, 535-553.
- Kumar, N., Johnson, J., Yarwood, G., Woo, J.-H., Kim, Y., Park, R.J., Jeong, J.I., Kang, S., Chun, S., Knipping, E. (2022) Contributions of domestic source to PM<sub>2.5</sub> in South Korea, *Atmospheric Environment*, 287, 119273.
- Kuo, C.-P., Fu, J.S., Wu, P.-C., Cheng, T.-J., Chiu, T.-Y., Huang, C.-S., Wu, C.-F., Lai, L.-W., Lai, H.-C., Liang, C.-K. (2021) Quantifying spatial heterogeneity of vulnerability to short-term PM<sub>2.5</sub> exposure with data fusion framework, *Environmental Pollution*, 285, 117266.
- Lim, C., Guak, S., Lee, K., Hong, Y.-C. (2016) Time-activity Patterns and PM<sub>2.5</sub> Exposure of the Elderly in Ura and Rural Areas, *Korean Journal of Environmental Health Sciences*, 42, 1-9, (in Korean with English abstract). <https://doi.org/10.5668/jehs.2016.42.1.1>
- Meneveau, C. (2010) Turbulence: Subgrid-Scale Modeling, Schol-

- arperia, 5, 9489. <https://doi.org/10.4249/scholarpedia.9489>
- Ministry of Environment (MOE) (2020) Special act on the improvement of air control in air control zones, (in Korean). <http://www.me.go.kr/home/web/board/read.do?pagerOffset=0&maxPageItems=10&maxIndexPages=10&searchKey=title&searchValue=%EA%B6%8C%EC%97%AD%EB%B3%84&menuId=286&orgCd=&boardId=1362850&boardMasterId=1&boardCategoryId=39&decorator=> (accessed on Apr. 2, 2020).
- Ministry of Environment (MOE) (2022a) The 3rd comprehensive plans to improve the atmospheric environment, (in Korean). <https://me.go.kr/home/web/board/read.do?pagerOffset=10&maxPageItems=10&maxIndexPages=10&searchKey=title&searchValue=%EA%B1%B4%EA%B0%95&menuId=286&orgCd=&boardId=1570460&boardMasterId=1&boardCategoryId=39&decorator=> (accessed on Dec. 27, 2022).
- Ministry of Environment (MOE) (2022b) The 3rd seasonal management period for fine dust, (in Korean). <http://me.go.kr/home/web/board/read.do?pagerOffset=0&maxPageItems=10&maxIndexPages=10&searchKey=title&searchValue=%EA%B3%84%EC%A0%88%EA%B4%80%EB%A6%AC%EC%A0%9C&menuId=286&orgCd=&boardId=1528700&boardMasterId=1&boardCategoryId=39&decorator=> (accessed on Jun. 2, 2022).
- Ministry of Environment (MOE) (2023) The 4th seasonal management period for fine dust, (in Korean). <http://me.go.kr/home/web/board/read.do?pagerOffset=0&maxPageItems=10&maxIndexPages=10&searchKey=title&searchValue=%EA%B3%84%EC%A0%88%EA%B4%80%EB%A6%AC%EC%A0%9C&menuId=286&orgCd=&boardId=1602020&boardMasterId=1&boardCategoryId=39&decorator=> (accessed on May 22, 2023).
- Nam, K.-P., Lee, D.-G., Jang, L.-S. (2019) Analysis of PM<sub>2.5</sub> Concentration and Contribution Characteristics in South Korea according to Seasonal Weather Patterns in East Asia: Focusing on the Intensive Measurement Periods in 2015, *Journal of Environmental Impact Assessment*, 28(3), 183-200, (in Korean with English abstract).
- National Air Emission Inventory and Research Center (NAIR) (2022) Handbook of estimation methods for national air pollutant emissions V, (in Korean). <https://air.go.kr/article/view.do?boardId=8&articleId=238&boardId=8&menuId=49&currentPageNo=1> (accessed on Oct. 12, 2022).
- National Air Emission Inventory and Research Center (NAIR) (2023) National Air Pollutant Emission in 2020 and Recalculations of National Air Pollutant Emissions for the Past Years 2016 to 2019, (in Korean). <https://air.go.kr/article/view.do?boardId=7&articleId=335&boardId=7&menuId=48&currentPageNo=1> (accessed on Aug. 7, 2023).
- National Institute of Environmental Research (NIER) (2016) Annual Report of Ambient Air Quality in Korea, (in Korean). [https://www.airkorea.or.kr/web/detailViewDown?pMENU\\_NO=125](https://www.airkorea.or.kr/web/detailViewDown?pMENU_NO=125) (accessed on Aug. 25, 2023).
- National Institute of Environmental Research (NIER) (2018) Annual Report of Ambient Air Quality in Korea, (in Korean). [https://www.airkorea.or.kr/web/detailViewDown?pMENU\\_NO=125](https://www.airkorea.or.kr/web/detailViewDown?pMENU_NO=125) (accessed on Aug. 25, 2023).
- National Institute of Environmental Research (NIER) (2020) Annual Report of Ambient Air Quality in Korea, (in Korean). [https://www.airkorea.or.kr/web/detailViewDown?pMENU\\_NO=125](https://www.airkorea.or.kr/web/detailViewDown?pMENU_NO=125) (accessed on Aug. 25, 2023).
- National Institute of Environmental Research (NIER) (2022) Satellite Integrated Joint monitoring of Air Quality (SIJAQ) (II): Remote, satellite and modeling focused, Final Report (in Korean).
- National Institute of Environmental Research (NIER) (2023) Annual Report of Ambient Air Quality in Korea, (in Korean). [https://www.airkorea.or.kr/web/detailViewDown?pMENU\\_NO=125](https://www.airkorea.or.kr/web/detailViewDown?pMENU_NO=125) (accessed on Aug. 25, 2023).
- Nenes, A., Pandis, S.N., Pilinis, C. (1998) ISOPROPIA: A new thermodynamic equilibrium model for multiphase multicomponent inorganic aerosols, *Aquatic Geochemistry*, 4(1), 123-152.
- Pielke, J., Downton, M.W. (2000) Precipitation and damaging floods: Trends in the United States, 1932-97, *Journal of Climate*, 13(20), 3625-3637.
- Skamarock, W.C., Klemp, J.B., Dudhia, J., Gill, D.O., Barker, D.M., Duda, M.G., Huang, X.-Y., Wang, W., Powers, J.G. (2008) A Description of the Advanced Research WRF Version 3, NCAR Tech. Note NCAR/TN-475+STR, 113 pp.
- Son, K., Kang, Y.-H., You, S., Kim, E., Bae, M., Kim, S. (2021) Municipality-Level Source Apportionment of PM<sub>2.5</sub> Concentrations based on the CAPSS 2016: (VI) Chungcheongbuk-do, *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment*, 37(3), 429-455, (in Korean with English abstract).
- Strader, R., Lurmann, F., Pandis, S.N. (1999) Evaluation of secondary organic aerosol formation in winter, *Atmospheric Environment*, 33(29), 4849-4863.
- Tao, W.K., Chen, J.P., Li, Z., Wang, C., Zhang, C. (2012) Impact of aerosols on convective clouds and precipitation, *Reviews of Geophysics*, 50(2). <https://doi.org/10.1029/2011RG000369>



- Yarwood, G., Morris, R.E., Wilson, G.M. (2007) Particulate matter source apportionment technology (PSAT) in the CAMx photochemical grid model, *Air Pollution Modeling and its Application*, X VII, 478-492.
- You, S., Bae, C., Kim, H., Yoo, C., Kim, S. (2020) Municipality-Level Source Apportionment of PM<sub>2.5</sub> Concentrations based on the CAPSS 2016: (I) Gyeonggi Province, *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment*, 36(6), 785-805, (in Korean with English abstract).
- You, S., Kang, Y.-H., Kim, H., Yoo, C., Kim, S. (2022) The Importance of Plant Emission Type on PM<sub>2.5</sub> Impact Estimation: A Case Study of Nonpublic Anthracite Burning Facilities, *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment*, 38(6), 802-822, (in Korean with English abstract).

## Authors Information

- 박성규 (환경부 국가미세먼지정보센터 배출량조사팀 전문연구원)  
(psk0393@korea.kr)
- 김형천 (환경부 국가미세먼지정보센터 배출량조사팀 환경연구사)  
(khcwing@korea.kr)
- 김지현 (환경부 국가미세먼지정보센터 배출량조사팀 전문연구원)  
(jhi2d@korea.kr)
- 오효숙 (환경부 국가미세먼지정보센터 배출량조사팀 전문연구원)  
(hyos0502@korea.kr)
- 김세기 (환경부 국가미세먼지정보센터 배출량조사팀 전문연구원)  
(tprlska@korea.kr)
- 유 철 (환경부 국가미세먼지정보센터 배출량조사팀 팀장)  
(s7424yoo@korea.kr)
- 배창한 (환경부 국가미세먼지정보센터 배출량조사팀 환경연구사)  
(chbae1210@korea.krr)

## Supplementary Materials

**Appendix 1.** Comparison of emissions in 2019 and provisional emissions in 2021 by province.

Region	PPM <sub>2.5</sub> (ton/year)			NOx (ton/year)			SOx (ton/year)			NH <sub>3</sub> (ton/year)			VOCs (ton/year)		
	2019	2021	Change	2019	2021	Change	2019	2021	Change	2019	2021	Change	2019	2021	Change
South Korea (KR)	87,618	61,083	-30.3%	1,086,862	987,090	-9.2%	272,859	204,551	-25.0%	316,299	267,950	-15.3%	1,020,216	1,015,374	-0.5%
Seoul (SO)	2,732	2,714	-0.7%	71,009	69,067	-2.7%	998	780	-21.8%	3,547	3,547	0.0%	63,690	63,923	0.4%
Incheon (IN)	2,548	2,470	-3.1%	52,899	49,998	-5.5%	11,301	8,727	-22.8%	6,676	6,518	-2.4%	52,915	53,005	0.2%
Gyeonggi-do (GG)	9,880	9,699	-1.8%	170,701	163,162	-4.4%	9,027	8,145	-9.8%	47,434	39,909	-15.9%	188,412	187,488	-0.5%
Gangwon-do (GW)	4,153	4,042	-2.7%	74,973	60,721	-19.0%	13,159	12,095	-8.1%	15,024	13,063	-13.1%	29,312	28,877	-1.5%
Chungcheongbuk-do (CB)	3,469	3,378	-2.6%	55,624	52,682	-5.3%	7,181	6,781	-5.6%	16,568	13,466	-18.7%	39,872	39,541	-0.8%
Chungcheongnam-do (CN)	15,314	5,932	-61.3%	96,950	75,938	-21.7%	62,332	37,536	-39.8%	53,469	44,023	-17.7%	74,724	74,044	-0.9%
Daejeon (DJ)	569	558	-2.1%	14,593	13,875	-4.9%	284	230	-18.9%	742	734	-1.1%	15,706	15,564	-0.9%
Sejong (SJ)	306	306	-0.1%	4,768	4,794	0.5%	81	79	-1.5%	2,836	2,579	-9.1%	5,165	5,106	-1.1%
Jeollabuk-do (JB)	3,627	3,398	-6.3%	37,705	35,786	-5.1%	4,849	3,677	-24.2%	35,167	26,178	-25.6%	77,927	77,569	-0.5%
Jeollanam-do (JN)	11,205	6,422	-42.7%	98,254	86,259	-12.2%	48,938	38,672	-21.0%	44,230	38,147	-13.8%	97,641	97,316	-0.3%
Gwangju (GJ)	604	586	-2.9%	12,588	11,842	-5.9%	135	132	-2.7%	964	909	-5.8%	16,791	16,605	-1.1%
Gyeongsangbuk-do (GB)	18,560	7,712	-58.5%	98,051	80,009	-18.4%	33,111	14,649	-55.8%	36,811	31,308	-14.9%	85,515	84,520	-1.2%
Gyeongsangnam-do (GN)	4,331	3,864	-10.8%	65,023	57,425	-11.7%	16,624	10,393	-37.5%	27,304	23,474	-14.0%	90,865	90,260	-0.7%
Daegu (DG)	1,335	1,314	-1.5%	27,681	26,590	-3.9%	2,292	2,302	0.4%	1,651	1,629	-1.4%	33,251	33,280	0.1%
Ulsan (US)	2,185	2,043	-6.5%	50,650	46,304	-8.6%	40,654	38,682	-4.9%	14,540	14,449	-0.6%	89,002	88,958	0.0%
Busan (BS)	2,523	2,457	-2.6%	48,553	47,371	-2.4%	9,113	9,022	-1.0%	1,603	1,575	-1.8%	35,719	35,781	0.2%
Jeju-do (JJ)	991	899	-9.3%	17,027	15,454	-9.2%	1,619	1,486	-8.2%	7,724	6,437	-16.7%	8,243	8,073	-2.1%
Sea	3,288	3,288	0.0%	89,812	89,812	0.0%	11,162	11,162	0.0%	8	8	0.0%	15,465	15,465	0.0%

**Appendix 2.** Comparison of emissions in 2019 and provisional emissions in 2021 by source sectors.

SCC	PPM <sub>2.5</sub> (ton/year)			NOx (ton/year)			SOx (ton/year)			NH <sub>3</sub> (ton/year)			VOCs (ton/year)		
	2019	2021	Change	2019	2021	Change	2019	2021	Change	2019	2021	Change	2019	2021	Change
01	2,813	2,521	-10.4%	75,513	51,462	-31.9%	45,297	30,489	-32.7%	1,422	1,422	0.0%	8,434	8,434	0.0%
02	857	856	-0.1%	85,814	85,698	-0.1%	15,869	15,794	-0.5%	1,350	1,350	0.0%	2,828	2,828	0.0%
03	27,118	2,479	-90.9%	169,221	125,923	-25.6%	65,730	28,589	-56.5%	717	715	-0.3%	3,404	2,895	-14.9%
04	5,139	4,885	-4.9%	51,705	39,936	-22.8%	105,699	90,419	-14.5%	44,630	44,630	0.0%	186,292	186,292	0.0%
05	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	29,062	25,135	-13.5%
06	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	545,244	545,244	0.0%
07	6,182	5,811	-6.0%	371,851	352,775	-5.1%	308	308	0.0%	2,615	2,615	0.0%	36,663	36,062	-1.6%
08	15,989	16,045	0.3%	311,748	311,760	0.0%	37,555	37,552	0.0%	122	121	-1.3%	63,951	64,119	0.3%
09	228	257	12.7%	12,332	10,854	-12.0%	2,326	1,324	-43.1%	22	22	0.0%	59,537	59,537	0.0%
10	-	-	-	-	-	-	-	-	-	252,444	204,099	-19.2%	-	-	-
11	539	539	0.0%	271	271	0.0%	-	-	-	12,962	12,962	0.0%	1,281	1,281	0.0%
12	17,272	16,102	-6.8%	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
13	11,482	11,587	0.9%	8,407	8,409	0.0%	75	76	0.6%	15	15	0.0%	83,521	83,549	0.0%

**Appendix 3.** Simulated model performance evaluation criteria and goal value presented in Emery *et al.* (2001) and Huang *et al.* (2021).

	RMSE	Bias	R		IOA		NME (%)		FB (%)		FE (%)	
			Goal	Criteria	Goal	Criteria	Goal	Criteria	Goal	Criteria	Goal	Criteria
Wind speed (m/s)	≤ 2	≤ ± 0.5	-	-	≥ 0.6	-	-	-	-	-	-	-
Temperature (°C)	-	≤ ± 0.5	-	-	≥ 0.8	-	-	-	-	-	-	-
PM <sub>2.5</sub> (μg/m <sup>3</sup> )	-	-	> 0.7	> 0.4	> 0.8	> 0.7	< 35	< 45	< ± 15	< ± 25	< 40	< 55

**Appendix 4.** Model Performance Evaluation (MPE) results for PM<sub>2.5</sub>, NO<sub>2</sub>, SO<sub>2</sub> concentration by province.

Region	Pollutant	OBS	MOD	R	IOA	NME	FB	FE
Seoul	PM <sub>2.5</sub> (μg/m <sup>3</sup> )	19.77	17.59	0.83	0.90	25%	-0.12	0.29
	NO <sub>2</sub> (ppb)	23.50	33.65	0.68	0.69	46%	0.40	0.42
	SO <sub>2</sub> (ppb)	3.09	1.51	0.73	0.40	52%	-0.79	0.79
Incheon	PM <sub>2.5</sub> (μg/m <sup>3</sup> )	20.19	17.96	0.80	0.89	25%	-0.13	0.27
	NO <sub>2</sub> (ppb)	20.84	27.30	0.69	0.75	38%	0.31	0.36
	SO <sub>2</sub> (ppb)	3.29	3.43	0.74	0.71	25%	-0.03	0.26
Gyeonggi-do	PM <sub>2.5</sub> (μg/m <sup>3</sup> )	20.64	17.04	0.81	0.87	28%	-0.21	0.33
	NO <sub>2</sub> (ppb)	19.10	20.75	0.77	0.84	26%	0.14	0.28
	SO <sub>2</sub> (ppb)	2.97	1.84	0.60	0.39	41%	-0.55	0.57
Gangwon-do	PM <sub>2.5</sub> (μg/m <sup>3</sup> )	14.59	11.38	0.80	0.86	29%	-0.33	0.40
	NO <sub>2</sub> (ppb)	9.38	6.36	0.79	0.71	34%	-0.35	0.38
	SO <sub>2</sub> (ppb)	2.42	1.16	0.71	0.37	52%	-0.77	0.77
Chungcheongbuk-do	PM <sub>2.5</sub> (μg/m <sup>3</sup> )	19.56	14.46	0.77	0.84	34%	-0.37	0.44
	NO <sub>2</sub> (ppb)	13.57	8.84	0.72	0.69	37%	-0.43	0.45
	SO <sub>2</sub> (ppb)	2.35	1.35	0.58	0.46	44%	-0.60	0.61
Chungcheongnam-do	PM <sub>2.5</sub> (μg/m <sup>3</sup> )	21.03	16.09	0.80	0.85	31%	-0.31	0.38
	NO <sub>2</sub> (ppb)	12.47	9.71	0.75	0.79	29%	-0.24	0.33
	SO <sub>2</sub> (ppb)	3.76	2.63	0.46	0.36	38%	-0.44	0.51
Daejeon	PM <sub>2.5</sub> (μg/m <sup>3</sup> )	16.25	14.11	0.75	0.85	31%	-0.24	0.39
	NO <sub>2</sub> (ppb)	16.96	16.19	0.81	0.88	24%	0.00	0.26
	SO <sub>2</sub> (ppb)	3.06	1.05	0.56	0.28	66%	-1.05	1.05
Sejong	PM <sub>2.5</sub> (μg/m <sup>3</sup> )	17.96	15.60	0.76	0.86	34%	-0.19	0.40
	NO <sub>2</sub> (ppb)	16.12	10.22	0.75	0.70	39%	-0.44	0.48
	SO <sub>2</sub> (ppb)	3.38	1.03	0.27	0.22	70%	-1.14	1.14
Jeollabuk-do	PM <sub>2.5</sub> (μg/m <sup>3</sup> )	19.26	14.70	0.77	0.84	31%	-0.31	0.39
	NO <sub>2</sub> (ppb)	10.61	7.64	0.71	0.71	32%	-0.30	0.37
	SO <sub>2</sub> (ppb)	2.69	1.20	0.61	0.27	55%	-0.83	0.83
Jeollanam-do	PM <sub>2.5</sub> (μg/m <sup>3</sup> )	14.76	12.97	0.74	0.85	27%	-0.18	0.31
	NO <sub>2</sub> (ppb)	9.34	10.92	0.58	0.71	35%	0.21	0.34
	SO <sub>2</sub> (ppb)	2.85	4.81	0.69	0.34	71%	0.44	0.47
Gwangju	PM <sub>2.5</sub> (μg/m <sup>3</sup> )	18.03	13.12	0.75	0.81	34%	-0.36	0.44
	NO <sub>2</sub> (ppb)	13.85	14.13	0.71	0.80	32%	0.09	0.34
	SO <sub>2</sub> (ppb)	2.94	0.93	0.25	0.23	69%	-1.10	1.11
Gyeongsangbuk-do	PM <sub>2.5</sub> (μg/m <sup>3</sup> )	16.56	12.13	0.80	0.84	31%	-0.38	0.42
	NO <sub>2</sub> (ppb)	10.52	8.92	0.67	0.75	26%	-0.14	0.27
	SO <sub>2</sub> (ppb)	3.17	2.24	0.44	0.43	31%	-0.37	0.39
Gyeongsangnam-do	PM <sub>2.5</sub> (μg/m <sup>3</sup> )	15.10	11.91	0.75	0.83	30%	-0.32	0.39
	NO <sub>2</sub> (ppb)	13.37	9.61	0.70	0.66	33%	-0.28	0.35
	SO <sub>2</sub> (ppb)	3.05	1.93	0.61	0.39	38%	-0.51	0.52
Daegu	PM <sub>2.5</sub> (μg/m <sup>3</sup> )	17.66	13.90	0.82	0.87	29%	-0.27	0.36
	NO <sub>2</sub> (ppb)	16.04	21.48	0.78	0.79	41%	0.37	0.42
	SO <sub>2</sub> (ppb)	1.96	3.30	0.58	0.42	73%	0.41	0.47

## Appendix 4. Continued.

Region	Pollutant	OBS	MOD	R	IOA	NME	FB	FE
Ulsan	PM <sub>2.5</sub> (μg/m <sup>3</sup> )	15.22	13.54	0.72	0.84	30%	-0.16	0.34
	NO <sub>2</sub> (ppb)	17.28	23.69	0.57	0.64	41%	0.33	0.36
	SO <sub>2</sub> (ppb)	3.32	5.96	0.51	0.36	81%	0.50	0.52
Busan	PM <sub>2.5</sub> (μg/m <sup>3</sup> )	15.26	13.06	0.73	0.83	28%	-0.20	0.33
	NO <sub>2</sub> (ppb)	15.39	22.89	0.70	0.66	50%	0.43	0.44
	SO <sub>2</sub> (ppb)	2.84	6.66	0.36	0.19	135%	0.75	0.76
Jeju-do	PM <sub>2.5</sub> (μg/m <sup>3</sup> )	13.53	8.54	0.75	0.77	41%	-0.57	0.60
	NO <sub>2</sub> (ppb)	7.40	6.37	0.67	0.78	24%	-0.17	0.28
	SO <sub>2</sub> (ppb)	1.43	1.01	0.61	0.58	34%	-0.41	0.45

## Appendix 5. Emissions by source sectors in nationwide and Seoul metropolitan area.

	SCC	PPM <sub>2.5</sub> (ton/yr)	NOx (ton/yr)	SOx (ton/yr)	NH <sub>3</sub> (ton/yr)	VOCs (ton/yr)
South Korea	01	2,521	51,462	30,489	1,422	8,434
	02	856	85,698	15,794	1,350	2,828
	03	2,479	125,923	28,589	715	2,895
	04	4,885	39,936	90,419	44,630	186,292
	05	-	-	-	-	25,135
	06	-	-	-	-	545,244
	07	5,811	352,775	308	2,615	36,062
	08	16,045	311,760	37,552	121	64,119
	09	257	10,854	1,324	22	59,537
	10	-	-	-	204,099	-
	11	539	271	-	12,962	1,281
	12	16,102	-	-	-	-
	13	11,587	8,409	76	15	83,549
	Total	61,083	987,090	204,551	267,950	1,015,374
Seoul	01	11	401	3	17	65
	02	135	19,315	564	248	664
	03	1	308	2	3	9
	04	-	-	-	36	-
	05	-	-	-	-	671
	06	-	-	-	-	53,177
	07	307	28,789	27	274	5,956
	08	940	19,683	132	8	2,467
	09	9	544	51	3	753
	10	-	-	-	526	-
	11	32	21	-	2,432	73
	12	1,149	-	-	-	-
	13	130	6	1	0	89
	Total	2,714	69,067	780	3,547	63,923



## Appendix 5. Continued.

	SCC	PPM <sub>2.5</sub> (ton/yr)	NOx (ton/yr)	SOx (ton/yr)	NH <sub>3</sub> (ton/yr)	VOCs (ton/yr)
Incheon	01	280	6,027	3,763	209	1,265
	02	31	4,385	1,017	65	160
	03	13	1,591	63	31	103
	04	63	641	1,016	3,978	13,898
	05	–	–	–	–	1,402
	06	–	–	–	–	26,897
	07	206	17,792	17	140	2,430
	08	862	19,126	2,801	4	3,499
	09	7	336	49	1	2,770
	10	–	–	–	1,351	–
	11	9	5	–	739	19
	12	888	–	–	–	–
	13	111	93	1	0	562
	Total	2,470	49,998	8,727	6,518	53,005
Gyeonggi	01	410	7,037	771	597	2,419
	02	146	18,161	2,706	272	647
	03	288	7,161	2,674	109	324
	04	21	855	986	1,310	7,999
	05	–	–	–	–	5,549
	06	–	–	–	–	133,570
	07	1,432	89,388	77	653	8,539
	08	2,260	37,972	698	19	10,494
	09	32	1,777	223	6	11,779
	10	–	–	–	33,631	–
	11	56	35	–	3,310	126
	12	3,462	–	–	–	–
	13	1,592	776	9	1	6,044
	Total	9,699	163,162	8,145	39,909	187,488