



# 배출량 목록에 따른 수도권 PM<sub>10</sub> 예보 정확도 및 국내외 기여도 분석

## Impact of Emission Inventory Choices on PM<sub>10</sub> Forecast Accuracy and Contributions in the Seoul Metropolitan Area

배창한 · 김은혜 · 김병욱<sup>1)</sup> · 김현철<sup>2),3)</sup> · 우정현<sup>4)</sup> · 문광주<sup>5)</sup>  
신혜정<sup>5)</sup> · 송인호<sup>5)</sup> · 김순태\*

아주대학교 환경공학과, <sup>1)</sup>미국 조지아주 환경청, <sup>2)</sup>미국 국립해양대기청,  
<sup>3)</sup>매릴랜드대학 기후·위성 연구소, <sup>4)</sup>건국대학교 신기술융합학과, <sup>5)</sup>국립환경과학원 대기환경연구과  
(2017년 9월 2일 접수, 2017년 10월 10일 수정, 2017년 10월 16일 채택)

Changhan Bae, Eunhye Kim, Byeong-Uk Kim<sup>1)</sup>, Hyun Cheol Kim<sup>2),3)</sup>, Jung-Hun Woo<sup>4)</sup>,  
Kwang-Joo Moon<sup>5)</sup>, Hye-Jung Shin<sup>5)</sup>, In Ho Song<sup>5)</sup> and Soontae Kim\*

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

<sup>1)</sup>*Georgia Environmental Protection Division, Atlanta, GA, 30354, USA*

<sup>2)</sup>*Air Resources Laboratory, National Oceanic and Atmospheric Administration,  
College Park, MD, 20740, USA*

<sup>3)</sup>*Cooperative Institute for Climate and Satellites, University of Maryland,  
College Park, MD, 20740, USA*

<sup>4)</sup>*Department of Advanced Technology Fusion, Konkuk University, Seoul, Korea*

<sup>5)</sup>*National Institute of Environmental Research, Incheon, Korea*

(Received 2 September 2017, revised 10 October 2017, accepted 16 October 2017)

### Abstract

This study quantitatively analyzes the effects of emission inventory choices on the simulated particulate matter (PM) concentrations and the domestic/foreign contributions in the Seoul Metropolitan Area (SMA) with an air quality forecasting system. The forecasting system is composed of Weather Research and Forecasting (WRF)-Sparse Matrix Operator Kernel Emissions (SMOKE)-Community Multi-Scale Air Quality (CMAQ). Different domestic and foreign emission inventories were selectively adopted to set up four sets of emissions inputs for air quality simulations in this study. All modeling cases showed that model performance statistics satisfied the criteria levels (correlation coefficient >0.7, fractional error <50%) suggested by previous studies. Notwithstanding the apparently good model performance of total PM concentrations by all emission cases, annual average concentrations of simulated total PM concentrations varied up to 20  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  (160%) depending on the combination of emission inventories. In detail, the difference in simulated annual average concentrations of the primary PM coarse (PMC) was up to 25.2  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  (6.5 times) compared with other cases. Furthermore, model performance analyses on PM

\*Corresponding author.

Tel : +82-(0)31-219-2511, E-mail : soontaeim@ajou.ac.kr

species showed that the difference in the simulated primary PMC led to gross model overestimation in general, which indicates that the primary PMC emissions need to be improved. The contribution analysis using model direct outputs indicated that the domestic contributions to the annual average PM concentrations in the SMA vary from 44% to 67%. To account for the uncertainty of the simulated concentration, the contribution correction factor method proposed by Bae *et al.* (2017) was applied, which resulted in converged contributions (from 48% to 57%). We believe this study shows that it is necessary to improve the simulated concentrations of PM components in order to enhance the accuracy of the forecasting model. It is deemed that these improvements will provide more accurate contribution results.

**Key words** : Air quality forecasting, PM<sub>10</sub>, PM<sub>2.5</sub>, Emissions inventories, Relative contribution

## 1. 서 론

환경부 및 지자체에서는 국민들이 야외 활동 시 인체에 유해한 PM<sub>10</sub> (PM<sub>10</sub>, Particulate Matter of which diameter is 10 μm or less) 노출을 고려하여 일상 활동 여부를 결정하는 것을 돕고자 대기질 예보시스템을 운영하여 PM<sub>10</sub> 정보를 제공하고 있다(MOE, 2012). 현재 PM<sub>10</sub> 예보는 당일 및 익일에 대하여 일평균 농도를 “좋음”(0~30 μg/m<sup>3</sup>), “보통”(31~80 μg/m<sup>3</sup>), “나쁨”(81~150 μg/m<sup>3</sup>), “매우 나쁨”(151 μg/m<sup>3</sup> 이상)의 네 가지 농도 등급을 제공하고 있다. 특히, 매우 나쁨 수준의 PM<sub>10</sub>이 예측된 경우에는 보다 능동적인 PM<sub>10</sub> 농도 감소를 위해 원인이 되는 배출원을 제어하는 비상저감 대책의 시행이 검토된다(MOE, 2017). 이 과정에서 예보 모델은 농도의 예측뿐 아니라 고농도 발현에 지대한 기여를 하는 배출원 분석에도 이용되고 있어 예보 모델의 농도 예측 능력과 기여도 분석 능력이 중요하게 부각되고 있다.

국내에서 PM<sub>10</sub> 관련 예보 모사결과를 보면 예측농도는 관측농도에 비해 과소모사되는 경향이 나타난다(MSIP, 2015; NIER, 2011a). 일반적으로 대기질 모델의 과소모사 이유는 기상 입력자료(Kim *et al.*, 2017a; Jeong *et al.*, 2007)와 배출량 자료(Digar *et al.*, 2011)가 주요한 원인으로 지목된다. 배출량 자료 중에서도 현재 예보모델에서 대상으로 하고 있는 동북아시아 지역의 경우 비산먼지 및 생물성 연소에 의한 primary (1차) PM<sub>10</sub> 배출량 부족(In and Kim, 2010), 중국 황산화물 배출량의 과소평가(Bae *et al.*, 2015) 등이 전반적인 과소모사의 원인으로 보고된 바 있다. 현재 PM<sub>10</sub> 예보는 배출량 목록이 가지는 불확실성을 최종

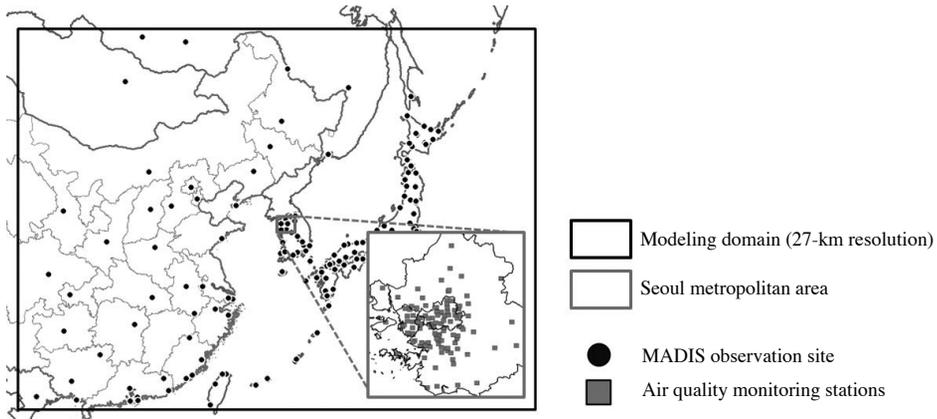
예보에 고려하기 위하여 다양한 배출량 목록을 앙상블 예보 멤버의 구성요소로 이용하여 수행되고 있다(NIER, 2015). 그러나, 배출량 목록 선택에 따른 PM<sub>10</sub> 모사농도의 차이에 대한 보다 체계적인 원인 분석과 기여도 범위에 대한 연구는 아직 미흡한 실정이다.

본 연구에서는 다양한 배출량 목록을 바탕으로 수행한 대기질 예보결과 평가와 아울러 PM<sub>10</sub> 구성 성분별 모사농도 분석을 통해 배출량 목록 선택에 따른 PM<sub>10</sub> 총 질량농도 및 성분농도의 모사 정합도를 살펴보았다. 또한, BFM(Brute Force Method)를 이용하여 배출량 목록 선택에 따라 달라질 수 있는 수도권 PM<sub>10</sub> 농도에 대한 국내외 배출량의 기여도 범위를 추정하고자 하였다. 본 연구의 결과는 향후 PM<sub>10</sub> 예보 개선을 위한 예비용 배출량 입력자료 개선 및 비상저감 대응책 마련을 위한 대기질 예보모델의 기여도 결과 이용 시 기초자료가 될 수 있을 것으로 판단된다.

## 2. 연구 방법

### 2.1 모사기간 및 대상 지역

본 연구의 대상기간은 비교적 최근 년도이면서 확정된 성분 관측자료의 이용이 가능한 2014년 1월 1일~12월 31일로 정하였다. 모사영역은 27-km 수평해상도를 바탕으로 한반도, 일본 및 중국 대부분 지역이 포함되도록 설정하였다. 본 연구에서 수행한 모사의 모사영역 및 모사 정합도 평가를 위해 이용된 측정망의 위치는 그림 1과 같다. 모사 정합도 평가를 위해 기상 관측자료는 MADIS (Meteorological Assimilation Data Ingest System; NOAA, 2005)를 이용하였으며, 대기질



**Fig. 1.** CMAQ modeling domain with a 27-km horizontal resolution used in the study. The inset map shows the Seoul Metropolitan Area (SMA). Black dots represent MADIS monitors and gray squares inside the SMA represent Air Monitoring Stations.

관측자료는 수도권 지역의 111개 AMS (Air quality Monitoring Station) 자료를 이용하였다.

### 2.2 기상 입력자료

기상 입력자료는 WRF (Weather Research and Forecast; Skamarock *et al.*, 2008) version 3.5.1을 이용한 모사를 통해 원자료를 생성하였으며, MCIP (Meteorology-Chemistry Interface Processor) version 3.6을 이용하여 배출량 산정 및 대기질 모델의 입력자료 형태로 준비하였다. 기상 초기장 및 경계장의 경우 NCEP (National Centers for Environmental Prediction)에서 제공되는 0.5°×0.5°GFS (Global Forecasting System) 자료를 이용하였다. 지형자료의 경우 SRTM (Shuttle Radar Topography Mission)을 통해 작성된 90 m 해상도의 DEM (Digital Elevation Model) 자료를 이용하였으며, 토지이용자료로는 환경부 중분류 자료를 이용하였다. 수직 격자 구조는 30층으로 구성하였다. WRF 모델 구동에 이용된 세부 옵션은 표 1에 제시하였다.

### 2.3 배출량 입력자료

본 연구에서는 국내의 인위적 배출량 목록 이용에 따른 농도 및 기여도 분석을 위한 모사를 표 2와 같이 수행하였다. 국외에 대하여는 INTEX-B 2006 (the Intercontinental Chemical Transport Experiment-Phase B 2006; Zhang *et al.*, 2009)과 MICS-Asia 2010 (Model

**Table 1.** The configuration of the WRF modeling used in this study.

	Description
WRF	Version 3.5.1
Micro Physics	WSM6
Cumulus Scheme	Kain-Fritsch
Long Wave Radiation	RRTM
Short Wave Radiation	Dudhia
PBL Scheme	YSU
LSM Scheme	NOAH

Inter-Comparison Study for Asia; Li *et al.*, 2017) 배출량 목록을 이용하였다. 국내에 대하여는 INTEX-B 2006 및 CAPSS (Clean Air Policy Supporting System) 2007, CAPSS 2010 자료를 이용하였다. 국내/외의 연간 배출량 목록은 SMOKE (Sparse Matrix Operation Kernel Emissions; Benjey *et al.*, 2001) version 3.1을 이용하여 처리하였으며, SCC (Source Classification Code) 별 시간 및 공간 분배계수를 할당하여 (Kim *et al.*, 2008) 대기질 모델 입력용 인위적 배출량으로 변환하였다. 단, MICS-Asia 2010의 경우 degree(도) 단위 격자 자료를 본 연구의 도메인에 맞게 재격자화 하였으며, 배출부분별 특성에 따라 시간할당 및 화학종 분배를 수행하였다.

자연적 배출량의 경우 MEGAN (The Model of Emissions of Gases and Aerosols from Nature; Guen-

ther *et al.*, 2006) version 2.0.4 를 이용하여 마련하였으며, SAPRC99 (Statewide Air Pollution Research Center, Version 99; Carter *et al.*, 1999) 메커니즘을 바탕으로 화학종 분배를 수행하였다. 생성된 자연적 배출량은 표 2의 Case 1~Case 4의 배출량 목록 구성에 따라 생성된 인위적 배출량과 병합하여 대기질 모사를 위한 배출량 입력자료로 이용하였다.

표 3은 본 연구에 이용된 배출량 목록의 특성을 정리한 것으로, 그 내용은 다음과 같다. INTEX-B 2006은 NASA(National Aeronautics and Space Administration)의 INTEX-B 프로젝트에 의해 작성되었다. 대상 지역은 아시아 지역의 22개 국가를 포함하고 있다. 배출원은 주요 인위적 오염원(발전, 공업, 교통, 주거)을 포함하고 있으며, 28개의 세부적인 SCC로 구성되어 있다. 대상 오염물질은 이산화황(SO<sub>2</sub>, Sulfur dioxide), 질소산화물(NO<sub>x</sub>, Nitrogen oxides), PM<sub>10</sub>, PM<sub>2.5</sub>(Particulate matter of which diameter is 2.5 μm or less), 비메탄 휘발성 유기화합물(NMVOC, Non-methane volatile organic compound), 유기탄소(OC, Organic carbon), BC(Black Carbon), 일산화탄소(CO, Carbon oxide)로

구성되어 있다. MICS-Asia 2010은 아시아 지역에서 이용되는 다양한 배출량 목록이 혼합된 자료로, 중국에 대하여 MEIC(Multi-resolution Emission Inventory for China; <http://www.meicmodel.org>), 일본에 대하여 JATOP(Japan Auto-Oil Program) Emission Inventory-Data Base 2010, 인도에 대하여 Lu *et al.*(2011)의 자료가 이용되었으며, 나머지 아시아 지역에 대하여는 REAS(Regional Emission inventory in Asia; Kurokawa *et al.*, 2013) 자료를 바탕으로 작성되었다. 배출부문별로 발전, 공업, 교통, 주거에 대하여 이산화황, 질소산화물, 유기탄소, PM<sub>10</sub>, PM<sub>2.5</sub>, 비메탄 휘발성 유기화합물, 유기탄소, BC, 일산화탄소 성분이 포함되어 있으며, 농업(Agriculture) 부문의 경우 암모니아만 포함되어 있다. CAPSS는 국립환경과학원에서 제공하는 연간 국가 배출량 목록이다. 배출원 특성에 따라 대분류-중분류-소분류-세분류로 구분되어 있으며, 527개의 SCC로 구성되어 있다. 배출량은 행정구역(시, 군, 구) 단위로 이산화황, 질소산화물, 암모니아, TSP(Total suspended particles), PM<sub>10</sub>, PM<sub>2.5</sub>, 휘발성 유기화합물(VOC; Volatile organic compound), 일산화탄소 성분정보를 제공하고 있다(Lee *et al.*, 2011).

**Table 2. List of foreign and domestic emissions inventories for air quality simulations.**

	Emission regions	
	Foreign	Domestic
Case 1	INTEX-B 2006	INTEX-B 2006
Case 2	INTEX-B 2006	CAPSS 2007
Case 3	MICS-Asia 2010	CAPSS 2007
Case 4	MICS-Asia 2010	CAPSS 2010

**2.4 대기질 모사 & 기여도 분석 방법**

표 2의 배출량 목록 구성을 바탕으로 광화학 모델 CMAQ(Community Multiscale Air Quality; Byun and Schere, 2006) version 4.7.1을 이용하여 대기질 농도를 모사하였다. 에어로졸 모듈은 AERO5(Aerosol module version 5; Carlton *et al.*, 2010), 화학 메커니즘은 SAP

**Table 3. Major characteristics of INTEX-B 2006, MICS-Asia 2010 and CAPSS (2007 & 2010) emission inventories.**

	INTEX-B 2006	MICS-Asia 2010	CAPSS 2007 & 2010
Target region	22 countries and regions in Asia	29 countries and regions in Asia	South Korea
Representing Year	2006	2010	2007, 2010
Emission source	4 source categories; power plants, industry, residential, transportation (28 detail SCC)	5 source categories; power plants, industry, residential, transportation, agriculture (no detail scc)	12 upper levels, 54 intermediate levels and 312 lower levels source categories. (527 detail SCC)
Species	SO <sub>2</sub> , NO <sub>x</sub> , PM <sub>10</sub> , PM <sub>2.5</sub> , OC, NMVOC, CO, BC	SO <sub>2</sub> , NO <sub>x</sub> , NH <sub>3</sub> , PM <sub>10</sub> , PM <sub>2.5</sub> , OC, NMVOC, CO, BC	SO <sub>2</sub> , NO <sub>x</sub> , NH <sub>3</sub> , TSP, PM <sub>10</sub> , PM <sub>2.5</sub> , VOC, CO
Spatial resolution	30 min × 30 min	0.25° × 0.25°	Administrative districts in South Korea
Reference	Zhang <i>et al.</i> , 2009	Li <i>et al.</i> , 2017	Lee <i>et al.</i> , 2011

**Table 4. The configuration of the CMAQ modeling used in this study.**

Option	Description
CMAQ	Version 4.7.1 w/ BFM
Chemical mechanism	SAPRC99
Chemical solver	EBI
Aerosol module	AERO5
Boundary condition	Default profile
Advection scheme	YAMO
Horizontal diffusion	Multiscale
Vertical diffusion	Eddy
Cloud scheme	RADM

RC99을 이용하였다. 수직층은 15층으로 구성하였으며, 최하층의 높이는 32-m로 설정하였다. 대기질 모델의 세부 옵션은 표 4에 정리하여 수록하였다.

국내외 기여도 산정은 BFM 기법을 이용하였다. 이 기법은 기본 배출량 입력자료를 바탕으로 기본 모사를 수행한 결과와 일정 수준의 배출량이 감소된 수정 배출량 입력자료를 바탕으로 재모사된 결과를 이용하여 식(1)과 같이 민감도 계수를 계산하는 방법이다(Bartnicki, 1999). 식(1)에서  $S_i$ 는 배출원  $i$ 에 대한 민감도 계수,  $C_0$ 는 기본 모사농도,  $C_{i,x\%}$ 는 배출원  $i$ 에 대해 배출량을  $x\%$  변화시킨 후 재모사된 농도이며,  $e_{i,x\%}$ 는 배출원  $i$ 에 대한 배출량 변화율( $x/100$ )을 의미한다.

$$S_i = \frac{C_0 - C_{i,x\%}}{\Delta_{ei,x\%}} \quad (1)$$

배출원  $i$ 의 기여도(ZOC, Zero-Out Contribution)는 대상 지역 또는 배출원의 배출량 삭감비율을 100%로 가정하여 식(2)와 같이 계산될 수 있다.

$$ZOC_i = S_i \times 100 \quad (2)$$

단, 배출량-농도의 관계에서 비선형성이 나타나는 경우 ZOC산정을 위한 BFM 적용 시 배출량 삭감비율  $x$ 에 따라 최종 산출된 ZOC가 차이를 보일 수 있다(Bae *et al.*, 2016). 본 연구에서는 배출량 변화율이 매우 작을 때 발생할 수 있는 수치적 노이즈(Tonnesen and Dennis, 2000)와 실현 가능한 국내 배출량 저감계획 등을 고려하여, 국내 배출량을 50% 삭감하여 기여도 모사에 이용하였다.

### 3. 결 과

#### 3.1 기상모사 결과

기상모사에 대한 정확도 평가는 NOAA(National Oceanic and Atmospheric Administration)에서 제공하는 MADIS 관측자료를 이용하였다. 그림 2에 동북아시아 지역을 대상으로 모사 영역에 있는 MADIS 측정망 자료를 공간적으로 평균하여 일 평균 2-m 온도 및 10-m 풍속에 대한 시계열 및 산포도를 제시하였다. 표 5에 분기별 통계분석 결과를 보였다. 온도의 경우 분기별 상관계수(R)는 0.97 이상, 편차는 1°C 이하로 관측치와 매우 유의하게 모사되었으며, 풍속의 경우 상관계수가 0.75 이상으로 경향성은 유의하나 최대 2.0 m/s(59%) 과대모사 하였다.

#### 3.2 배출량 비교

그림 3은 본 연구에 이용된 배출량 목록에 따른 월별 배출량 변화를 중국(그림 3(a)) 및 국내 수도권(그림 3(b)) 지역에 대하여 보인 것이다. 오염물질의 연간 총량부터 살펴보면, 중국의 경우 황산화물은 MICS-Asia 2010과 INTEX-B 2006 배출량 목록의 차이가 2% 내외로 유사하게 산정되어있다. 반면, 질소산화물은 MICS-Asia 2010이 40% 크게, 암모니아는 INTEX-B 2006이 25% 크게 산정한다. 조대입자(PMC, Coarse Particulate Matter)는 INTEX-B 2006 배출량이 5% 크게, primary PM<sub>2.5</sub>는 MICS-Asia 2010 배출량이 9% 크게 산정한다.

국내 수도권 지역의 경우 황산화물은 INTEX-B 2006이 가장 크게 배출량을 산정하고 있으며, CAPSS 2007에 비해 190%, CAPSS 2010에 비해 410% 크다. 질소산화물은 CAPSS 2007이 가장 큰 배출량을 산정하고 있으며, INTEX-B 2006에 비해 7%, CAPSS 2010에 비해 40% 크다. 암모니아 또한 CAPSS 2007이 가장 큰 배출량을 산정하며, 다른 배출량 목록보다 70% 가량 크다. 조대입자는 CPASS 2010이 가장 큰 배출량을 산정하며, INTEX-B 2006에 비해 20%, CAPSS 2007에 비해 10% 크다. Primary PM<sub>2.5</sub>는 INTEX-B 2006이 가장 큰 배출량을 산정하며, CAPSS 2007에 비해 1,030%, CAPSS 2010에 비해 330% 크게 산정되어 있다. 황산화물과 primary PM<sub>2.5</sub> 배출량이 상대적으로 큰 차이를 보인 이유는 INTEX-B 2006 배출량 목록이

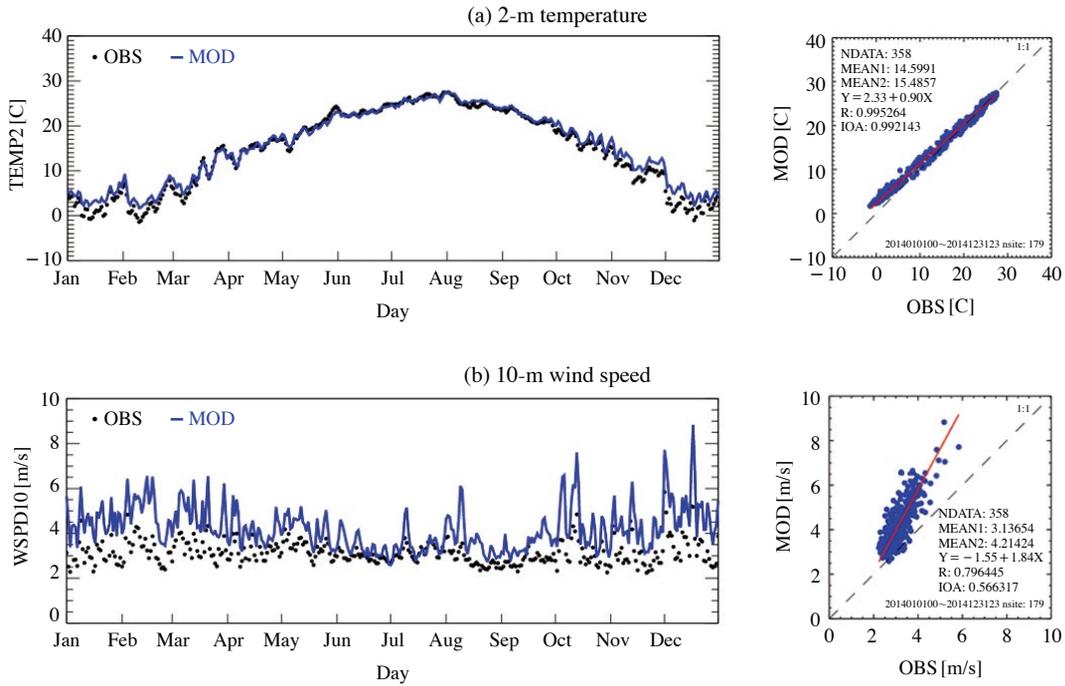


Fig. 2. Time series of observed and predicted 2-m temperatures and 10-m wind speeds in Northeast Asia.

Table 5. Performance statistics of the WRF simulation in this study for 2-m temperatures and 10-m wind speeds.

Variables	Statistics	Quarter 1	Quarter 2	Quarter 3	Quarter 4
2-m Temperature (°C)	Mean (observed)	4.8	18.7	24.2	10.0
	Mean (predicted)	5.2	17.7	23.7	10.9
	R <sup>1)</sup>	0.98	0.98	0.97	0.99
	IOA <sup>2)</sup>	0.98	0.95	0.98	0.99
	RMSE <sup>3)</sup>	1.11	1.10	0.84	1.31
	Bias	0.41	-0.79	-0.48	0.97
10-m Wind Speed (m/s)	Mean (observed)	3.4	3.3	3.0	3.4
	Mean (predicted)	5.4	4.4	4.0	5.2
	R	0.83	0.77	0.75	0.9
	IOA	0.53	0.66	0.65	0.65
	RMSE	2.32	1.64	1.47	2.23
	Bias	2.06	1.18	1.09	1.95

<sup>1)</sup>R : Correlation coefficient

<sup>2)</sup>IOA : Index of Agreement

<sup>3)</sup>RMSE : Root Mean Square Error

CAPSS에 비해 석탄화력발전소의 배출량을 크게 산정하기 때문에 판단된다. 조대입자의 경우 CAPSS 2010에서 비산먼지 배출량에 대한 보완이 이루어졌기 때문에 가장 큰 배출량이 산정된 것으로 판단된다.

배출량의 월간 변동성은 중국의 경우 INTEX-B

2006이 MICS-Asia 2010에 비해 상대적으로 더 뚜렷한 변화를 보인다. 월간 변동성의 차이는 배출량 목록에 따라 주요 배출원이 서로 상이하기 때문에 판단된다. 예를 들어, INTEX-B 2006의 경우 전체 황산화물 배출량의 50%, 전체 질소산화물 배출량의 40% 가량이

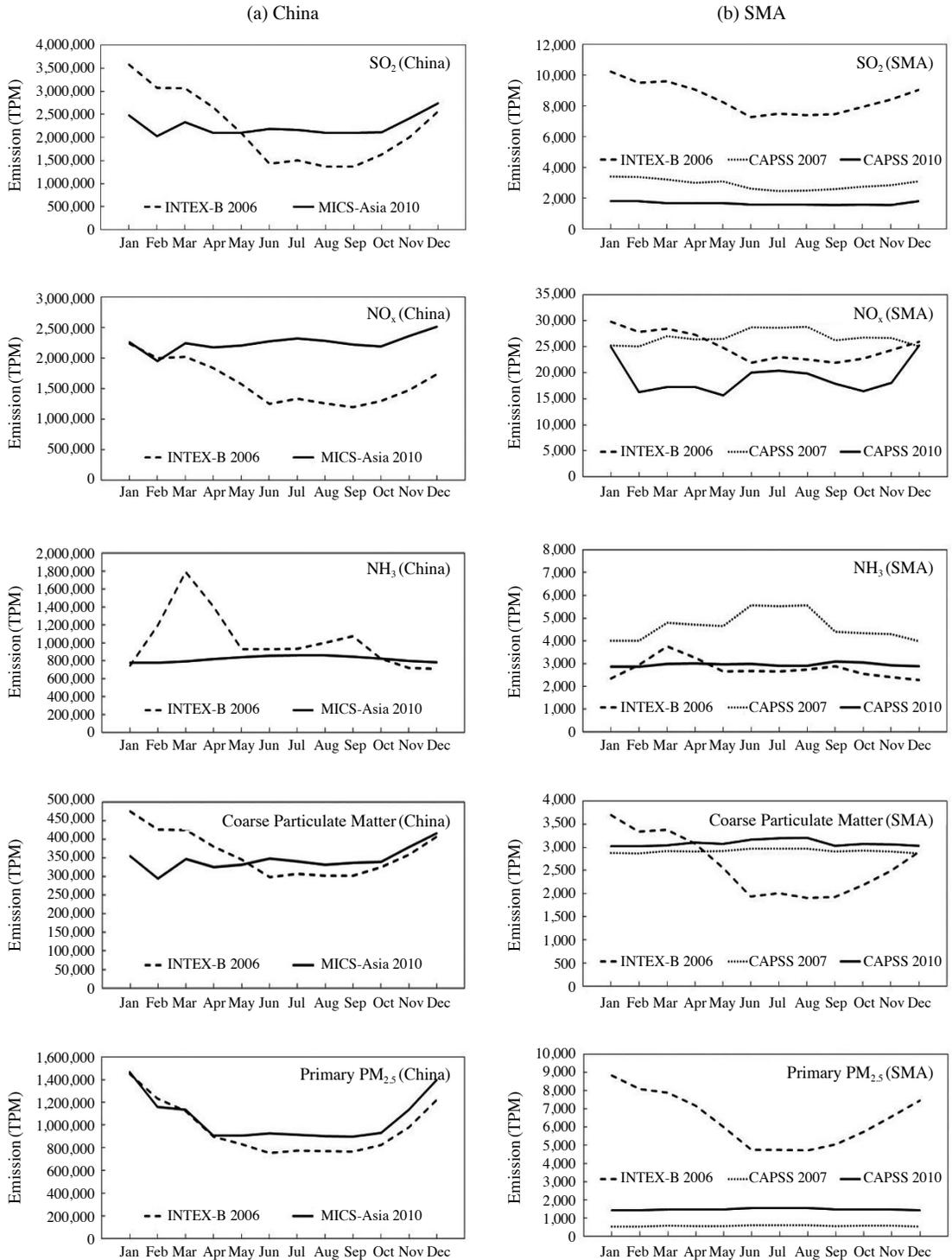


Fig. 3. Comparison of monthly SO<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub>, NH<sub>3</sub> and PPM (Coarse and Fine) emissions for each emission inventory over China and Seoul Metropolitan Area.

화력발전에서 배출되며, 화력발전 가동률이 높은 겨울철에 배출량이 높은 특성을 보인다. 암모니아에 대하여는 전체 암모니아 배출량의 50% 가량이 비료사용에 의해 배출되어, 비료사용이 많은 3월에 배출량이 월등하게 높다. 국내 배출량에 대한 월간 변동성 차이는 앞서 언급된 배출 특성에 의한 차이를 비롯하여 동일한 배출원에 대해 서로 다른 활동도가 적용되었기 때문인 것으로 판단된다. CAPSS 2010의 경우 질소산화물의 주요 배출원인 이동오염원에 대하여 NIER (2014)의 시간 할당계수가 새롭게 적용됨에 따라 겨울철에 배출량이 증가하는 특징을 보인다. 그림 3에서 알 수 있는 것은 서로 다른 배출량 목록에서 유사한 양의 연간 배출량이 산정되었더라도 모사를 위한 배출량 입력자료 처리과정에서 적용되는 분배계수에 따라 실제 대기질 모사에서 이용하는 계절별 배출량이 달라질 수 있으며, 이로 인해 최종 모사농도 또한 변할 수 있다는 점이다.

### 3.3 대기질 기본수행 평가

모사의 신뢰도를 가늠하기 위해 수도권 지역의 도시 대기 측정망 관측자료를 이용하여  $PM_{10}$  모사농도의 재현성을 평가하였다(표 6),  $PM_{10}$  모사농도 재현성 평가를 위해 Boylan and Russell (2006)가 제시한 FB(Fractional Bias)와 FE(Fractional Error)의 목표기준(goal)과 최소기준(criteria)을, Emery *et al.* (2016)에 제시된 상관계수에 대한 목표기준과 최소기준을 이용하였다(표 6의 하단 참조). 평가를 위해서 SMA의 모든 AMS 측정자료를 공간적으로 평균한 시계열 자료를 사용하였다. 도시대기 측정망에서의 연평균  $PM_{10}$  관측농도는  $49 \mu\text{g}/\text{m}^3$ , 모사농도는 각각  $54 \mu\text{g}/\text{m}^3$  (Case 1),  $32.8 \mu\text{g}/\text{m}^3$  (Case 2),  $34.4 \mu\text{g}/\text{m}^3$  (Case 3),  $36.0 \mu\text{g}/\text{m}^3$  (Case 4)으로 Case 1의 경우 관측치를 10% 가량 과대모사하였으며, Case 2~Case 4의 경우 각각 34%, 30%, 27% 과소모사하였다. 국내에 대하여 CAPSS 배출량 목록을 이용한 경우, 배출량 목록의 선택에 따른 수도권 지역의 연평균  $PM_{10}$  모사농도의 변화는 국외 배출량 목록에 대하여(Case 2 & Case 3) 그리고 국내 배출량 목록에 대하여(Case 3 & Case 4) 모두 동일하게  $1.6 \mu\text{g}/\text{m}^3$  차이를 보였다. 예보모델의 재현성은 Case 1의 경우 FB와 FE 모두 목표기준을 만족하였으며, 다소 과소모사를 보인 Case 2~4의 경우 FB 항목은 최소기준을, FE

항목은 목표기준을 만족하였다. 관측과 모사의 상관성은 모든 Case에서 목표기준 0.7 이상을 만족하였다.  $PM_{10}$  총 질량에 대한 모사는 통계적으로 모든 Case에서 일정 수준의 신뢰성이 확보된 것으로 판단된다.

이와 함께, 수도권 집중측정소(서울특별시 은평구 불광동)의 관측자료를 이용하여  $PM_{10}$ 와  $PM_{2.5}$  그리고 개별 성분에 대한 모사농도의 재현성을 평가하였다(표 6).  $PM_{10}$ 는 조대입자와  $PM_{2.5}$ 로 구분할 수 있으며,  $PM_{2.5}$ 는 황산염(Sulfate), 질산염(Nitrate), 암모늄(Ammonium), 무기탄소(EC, Elemental Carbon), 유기탄소 및 기타 성분(Others)으로 구분할 수 있다.

Case 간 모사농도 차이는 질산염, 유기탄소 및 기타 성분에서 상대적으로 크게(연평균  $1 \mu\text{g}/\text{m}^3$  이상) 나타났으며, 특히 Case 1의 기타 성분과 유기탄소 모사농도는 Case 2~4의 모사농도보다 2배 이상 높다. Case 1은 기타 성분을 연평균  $10 \mu\text{g}/\text{m}^3$  (NMB, Normalized Mean Bias: 272%) 과대모사하였으며, 기타 성분의 양의 편차가 그 외 무기성분의 음의 편차를 상쇄시키고도 남아 최종적으로는  $PM_{2.5}$ 를 과대모사하였다.

국내에 대하여 CAPSS 배출량 목록을 이용한 Case 2~Case 4의 경우, 모사농도의 차이는 Case 1의 차이에 비해 상대적으로 작지만, 일정한 경향성을 확인할 수 있다. 국외 배출량 목록으로 MICS-Asia 2010을 이용하면, INTEX-B 2006에 비해 secondary  $PM_{2.5}$ (황산염, 질산염, 암모늄)의 농도가  $2.2 \mu\text{g}/\text{m}^3$  증가하였으며, 기타 성분의 농도는  $1.3 \mu\text{g}/\text{m}^3$  감소하였다(Case 2 & Case 3). 반면, 국내 배출량 목록은 CAPSS 2010을 이용한 경우 CAPSS 2007에 비해 secondary  $PM_{2.5}$ 의 농도가  $1.7 \mu\text{g}/\text{m}^3$  감소하였으며, 기타 성분의 농도가  $1.6 \mu\text{g}/\text{m}^3$  증가하였다(Case 3 & Case 4).

$PM_{10}$  및  $PM_{2.5}$  총 질량에 대한 모사 재현성에 대한 평가는 표 6의 하단에 인용한 Emery *et al.* (2016)의 추천 값을 기준으로 삼았다. 상관성의 경우 목표 수준에 근사하였으며, 상대적인 편차의 경우 최소기준을 만족하여 전반적인 재현성이 확보된 것으로 판단된다. 성분 모사농도의 재현성은 secondary  $PM_{10}$ 의 경우 대부분 최소기준을(NMB 0.6 이하, 상관계수 0.6 이상) 만족하였다. 반면, primary  $PM_{10}$ (조대입자, 무기탄소, 기타성분 등)의 경우 NMB는 최소기준을 만족하나, 상관성은 대부분 0.5 이하로 추후 개선이 필요하다.

$PM_{10}$  및  $PM_{2.5}$  개별 성분에 대한 통계 분석결과는 두

**Table 6. Performance statistics for the modeled PM<sub>10</sub> concentrations spatially-averaged across all surface monitoring sites inside the SMA.**

Annual	Case 1	Case 2	Case 3	Case 4
Mean (Observed)	49.4	49.4	49.4	49.4
Mean (Predicted)	54.0	32.8	34.4	36.0
R (24-hr)	0.75	0.81	0.77	0.77
FB (24-hr)	5	-46	-40	-36
FE (24-hr)	30	48	43	41

Unit: mean (µg/m<sup>3</sup>), FB (%), FE (%)  
 Boylan and Russell (2006) goals for 24-hr total PM: FB < ±30%, FE < 50%  
 Boylan and Russell (2006) criteria for 24-hr total PM: FB < ±60%, FE < 75%.  
 Emery *et al.* (2016) goals and criteria for 24-hr PM<sub>2.5</sub>, Sulfate, and Ammonium: r > 0.70, r > 0.40.

**Table 7. Statistics for PM<sub>10</sub> and its component concentration at the Bulgwang super site in Seoul.**

		Case 1	Case 2	Case 3	Case 4
PM <sub>10</sub> * (56.3 µg/m <sup>3</sup> )	Mean	57.3	34.8	36.7	38.4
	R (24-hr)	0.62	0.77	0.75	0.73
	NMB (24-hr)	14%	-35%	-31%	-27%
PMC <sup>1)</sup> * (21.6 µg/m <sup>3</sup> )	Mean	10.0	9.9	10.4	10.9
	R (24-hr)	0.31	0.31	0.35	0.34
	NMB (24-hr)	-42%	-41%	-39%	-36%
PM <sub>2.5</sub> * (37.5 µg/m <sup>3</sup> )	Mean	48.5	25.7	26.8	27.9
	R (24-hr)	0.64	0.76	0.73	0.72
	NMB (24-hr)	49%	-32%	-27%	-22%
Sulfate * (8.1 µg/m <sup>3</sup> )	Mean	5.4	5.3	5.8	5.3
	R (24-hr)	0.60	0.60	0.63	0.67
	NMB (24-hr)	-9%	-20%	-11%	-19%
Nitrate * (8.6 µg/m <sup>3</sup> )	Mean	7.2	8.4	9.5	8.8
	R (24-hr)	0.69	0.69	0.65	0.66
	NMB (24-hr)	23%	55%	88%	61%
Ammonium * (5.4 µg/m <sup>3</sup> )	Mean	4.3	4.6	5.2	4.7
	R (24-hr)	0.68	0.69	0.69	0.70
	NMB (24-hr)	9%	12%	34%	21%
Elemental carbon * (1.6 µg/m <sup>3</sup> )	Mean	0.9	0.8	1.1	1.7
	R (24-hr)	0.49	0.53	0.57	0.56
	NMB (24-hr)	-36%	-40%	-23%	22%
Organic Carbon * (4.0 µg/m <sup>3</sup> )	Mean	4.3	2.3	2.1	2.7
	R (24-hr)	0.55	0.60	0.56	0.57
	NMB (24-hr)	20%	-37%	-44%	-24%
Others <sup>2)</sup> * (13.1 µg/m <sup>3</sup> )	Mean	30.0	6.1	4.8	6.4
	R (24-hr)	0.48	0.57	0.50	0.49
	NMB (24-hr)	189%	-45%	-54%	-37%

Unit: mean (µg/m<sup>3</sup>), NMB (%)  
 \* = Observed mean value  
<sup>1)</sup>PMC = PM<sub>10</sub> - PM<sub>2.5</sub>  
<sup>2)</sup>Others = PM<sub>2.5</sub> - Sulfate - Nitrate - Ammonium - EC - OC  
 Emery *et al.* (2016) goals and criteria for 24-hr PM<sub>2.5</sub>, Sulfate, and Ammonium: NMB < ±10%, NMB < ±30%;  
 24-hr Nitrate: NMB < ±15%, NMB < ±65%; 24-hr Organic Carbon: NMB < ±15%, NMB < ±50%;  
 24-hr Elemental Carbon: NMB < ±20%, NMB < ±40%.

가지 의미를 내포하고 있다. 첫째, 배출량 목록 선택에 따라 주요 성분의 모사 값이 크게 달라질 수 있으며 이는 주요 기여도 지역 및 오염원군이 달라질 수 있다는 것을 의미한다. 예를 들어, 생물학적 연소에서 많이 발

생하는 유기탄소의 경우 Case 1이 상대적으로 다른 모사에 비해 높아 생물학적 연소에 의한 기여도가 다른 모사 결과에 기반한 기여도 평가에 비해 크게 나타날 수 있다. 둘째, primary PM<sub>10</sub> 배출량 개선의 중요성이다. Primary PM<sub>10</sub>으로 판단이 가능한 조대입자, 무기탄소, 기타 성분은 관측농도 기준 PM<sub>10</sub>의 64%, PM<sub>2.5</sub>의 39%를 차지하고 있다. Primary PM<sub>10</sub>은 성분비가 높을 뿐만 아니라 예보 모델의 과소모사 비율 또한 -37% ~ -54% (Case 1 제외) 수준으로 높아 primary PM<sub>10</sub> 배출량의 우선적인 검토가 필요할 것으로 판단된다.

### 3.4 기여도 분석 및 상호 비교

본 절에서는 PM<sub>10</sub> 및 성분농도에 대한 분기별 국내의 기여도를 수도권과 중국의 primary 배출량 및 전구물질 배출량을 고려하여 분석하였다. 그림 4는 primary PM<sub>10</sub>에 대한 배출량과 기여도를 보인 것이다. 조대입자의 경우 연평균 국내 기여도는 모든 Case에서 7 µg/m<sup>3</sup> 가량으로 Case 상호 간 0.5 µg/m<sup>3</sup> 이내의 차이를 보이나, 분기별로는 최대 2.9 µg/m<sup>3</sup> 차이를 보였다. 그 이유는 앞 절에서 언급하였듯이 INTEX-B 배출량 목록과 CAPSS 배출량 목록의 배출량 월변화 패턴이 다르기 때문으로 판단된다. Case 1의 기타성분에 대한 국내 배출량의 기여도는 연평균 22.5 µg/m<sup>3</sup>으로 Case 2~4에 비해 20 µg/m<sup>3</sup> 가량 높게 나타났으며, 이는 INTEX-B 배출량 목록의 국내 primary PM<sub>2.5</sub> 배출량이 CAPSS 2007 배출량 목록에 비해 10배 가량 크게 산정되어 있기 때문으로 판단된다. Primary PM<sub>10</sub>의 경우 배출량과 농도의 관계가 비교적 선형적이므로 배출량의 차이와 월간 변화 패턴이 모사농도 및 기여도에 그대로 반영된 것으로 판단된다.

그림 5는 secondary PM<sub>10</sub>에 대한 전구물질 배출량과 기여도를 보인 것이다. 전반적으로 국내 기여도는 2분기와 3분기에 높게 모사되었으며, 국외 기여도는 1분기와 4분기에 높게 모사되어 서로 상반된 경향이 모사되었다. 그 이유는 첫째로 계절풍에 의해 풍상 지역으로부터 오염물질의 유입이 1분기와 4분기에 용이하다 (NIER, 2011b). 둘째로 INTEX-B 2006과 MICS-Asia 2010 배출량 목록에서 대체로 1분기와 4분기에 배출량이 높게 산정되어 있기 때문으로 판단된다.

황산염의 전구물질인 황산화물의 수도권 지역 배출

량은 INTEX-B 2006 배출량 목록에서 CAPSS 2007과 비교 시 3배 가량 크지만, 황산염에 대한 Case 1과 Case 2의 국내 기여도 차이는 연평균 17%로 배출량의 차이에 비해 상대적으로 작다. 반면, NO<sub>x</sub> 배출량의 경우 Case 1과 Case 2, 그리고 Case 3과 Case 4의 배출량 차이는 질산염의 국내 기여도 차이와 대체로 유사하였다. 암모늄의 경우 질소산화물, 황산화물, 암모니아가 복잡하게 상호작용하기 때문에 보다 다양한 검토가 필요하다. Kim *et al.* (2017b, c)에 따르면 모사되는 수도권 지역의 대기는 대기 중 암모니아가 질소산화물과 황산화물에 비해 충분히 많으며, 이로 인해 가스상 암모니아의 암모늄 전환은 암모니아 배출량보다는 질소산화물 배출량 변화에 종속될 것으로 보인다. 예를 들어 CAPSS 2007 배출량 목록을 이용 시 INTEX-B 2006과 CAPSS 2010을 이용한 모사보다 수도권 지역의 암모니아 농도가 2배 가량 크게 모의된 반면 암모늄의 기여도 변화는 작게 모의되었다. 이는 CAPSS 2007 배출량 목록의 암모니아 배출량이 다른 배출량 목록에 비해 70% 가량 크게 산정되어 있음에도 배출된 암모니아의 상당량이 암모늄으로 전환되지 못하고 가스상으로 존재하기 때문으로 판단된다.

국외 배출량 목록에 따른 기여도의 변화는 Case 2와 Case 3을 비교하여 확인할 수 있다. INTEX-B 2006에서 MICS-Asia 2010으로 배출량 목록이 바뀔 때 따라 1분기를 제외하면 황산염, 질산염, 암모늄 및 무기탄소 성분의 국외 기여도가 증가하는 경향을 보였다. 특히 3분기에 황산염의 국외 기여도가 1.8 µg/m<sup>3</sup>, 4분기에 질산염의 기여도가 1.9 µg/m<sup>3</sup> 증가하였다. 암모늄의 경우 전구물질인 암모니아 배출량이 감소하였음에도, 오히려 국외 기여도는 증가하였다. 이는 MICS-Asia 2010 배출량 목록이 상대적으로 많은 질소산화물과 황산화물 배출량을 산정하고 있어, 대기 중 음이온이 증가하여 가스상 암모니아의 암모늄으로의 전환이 용이한 조건이 형성되었기 때문으로 판단된다.

그림 6은 PM<sub>10</sub> 및 성분농도에 대한 분기별 국내/외 기여도(ZOC)의 상대적 비율인 기여율을 보인 것이다. 수도권 PM<sub>10</sub>의 경우 국내 기여율은 연평균 최대 67% (39 µg/m<sup>3</sup>, Case 1), 최소 44% (15 µg/m<sup>3</sup>, Case 2)로 모사되었으며, 국외 기여율은 최대 56% (22 µg/m<sup>3</sup>, Case 4), 최소 33% (19 µg/m<sup>3</sup>, Case 1)로 모사되었다. 개별 성분에 대한 국외 배출량의 기여도는 MICS-Asia 2010이

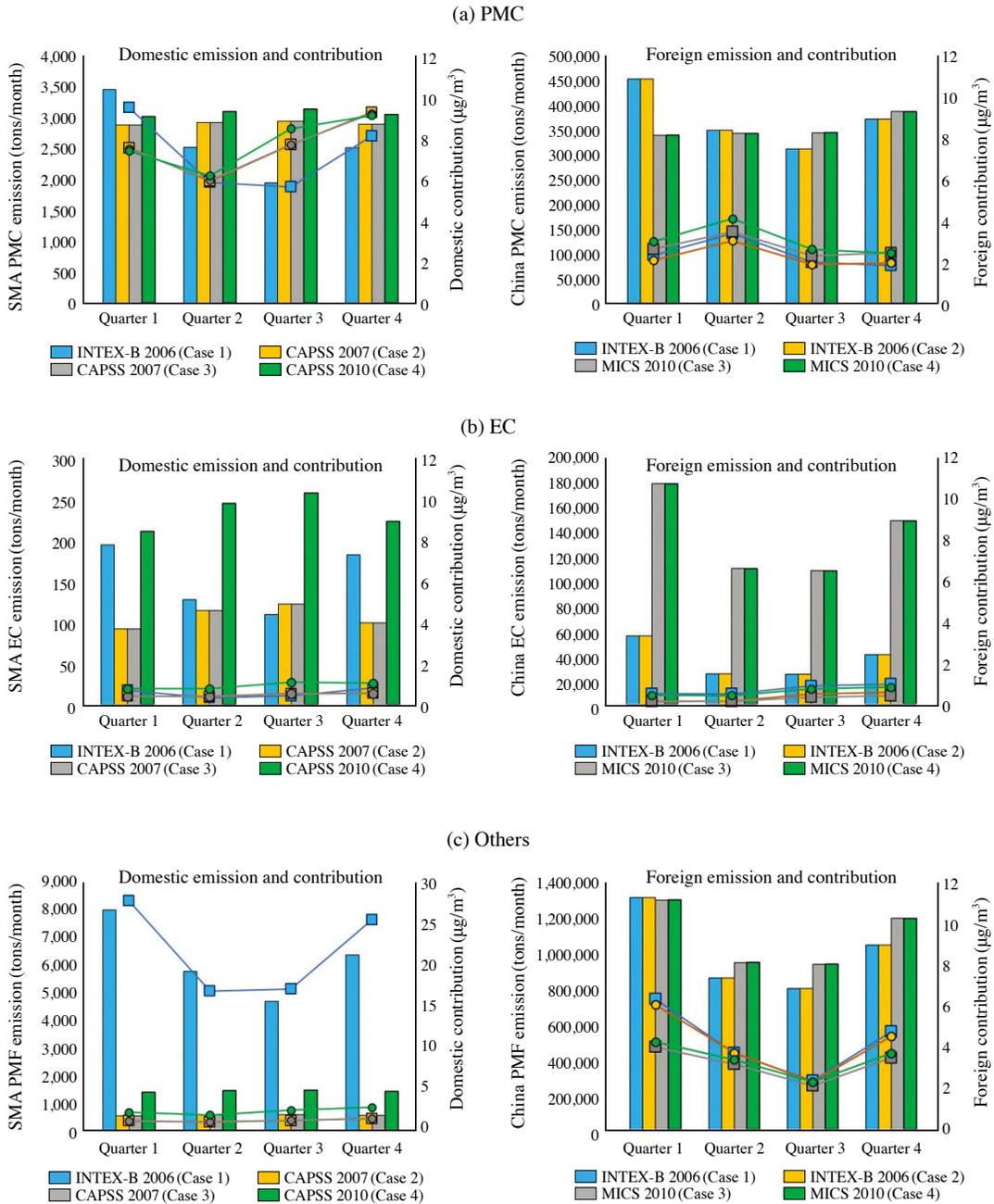


Fig. 4. Simulated contribution of quarterly mean (a) PMC, (b) EC and (c) Others for each case over the Bulgwang monitoring site. Bars represent amount of precursor emissions.

INTEX-B 2006에 비해 조대입자 및 황산염 기여율을 각각 3%, 5% 높게 모사하였으며, 질산염과 기타성분에 대한 기여율은 5% 가량 낮게 모사하였다. 국내에 대하

여는 INTEX-B 2006의 경우 primary PM<sub>2.5</sub> 배출량 차이로부터 기타성분에 대한 기여율이 다른 배출량 목록에 비해 40%~60% 가량 높게 모사되었다. CAPSS

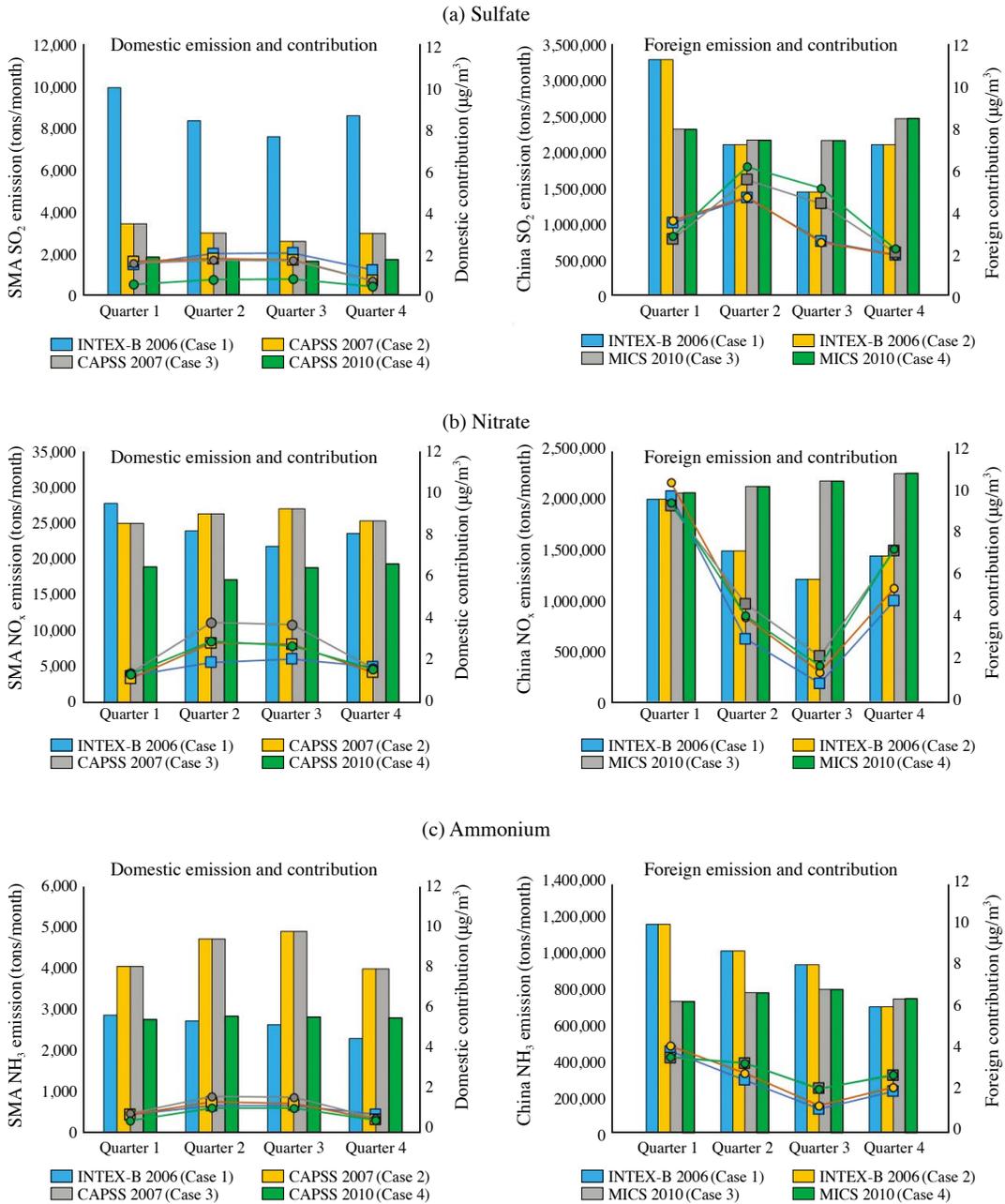


Fig. 5. Simulated contribution of quarterly mean (a) Sulfate, (b) Nitrate and (c) Ammonium for each case over the Bulgwang monitoring site. Bars represent amount of precursor emissions.

2010은 CAPSS 2007에 비해 무기탄소, 유기탄소, 기타 성분의 기여율은 각각 11%, 14%, 14% 크게 모사하였으나, 황산염, 질산염, 암모늄의 기여율은 각각 4%,

15%, 7% 낮게 모사하였다.

대기질 예보 모사를 이용한 PM<sub>10</sub>의 국내/외 기여도 분석은 이용되는 배출량 목록의 조합에 따라 연평균이

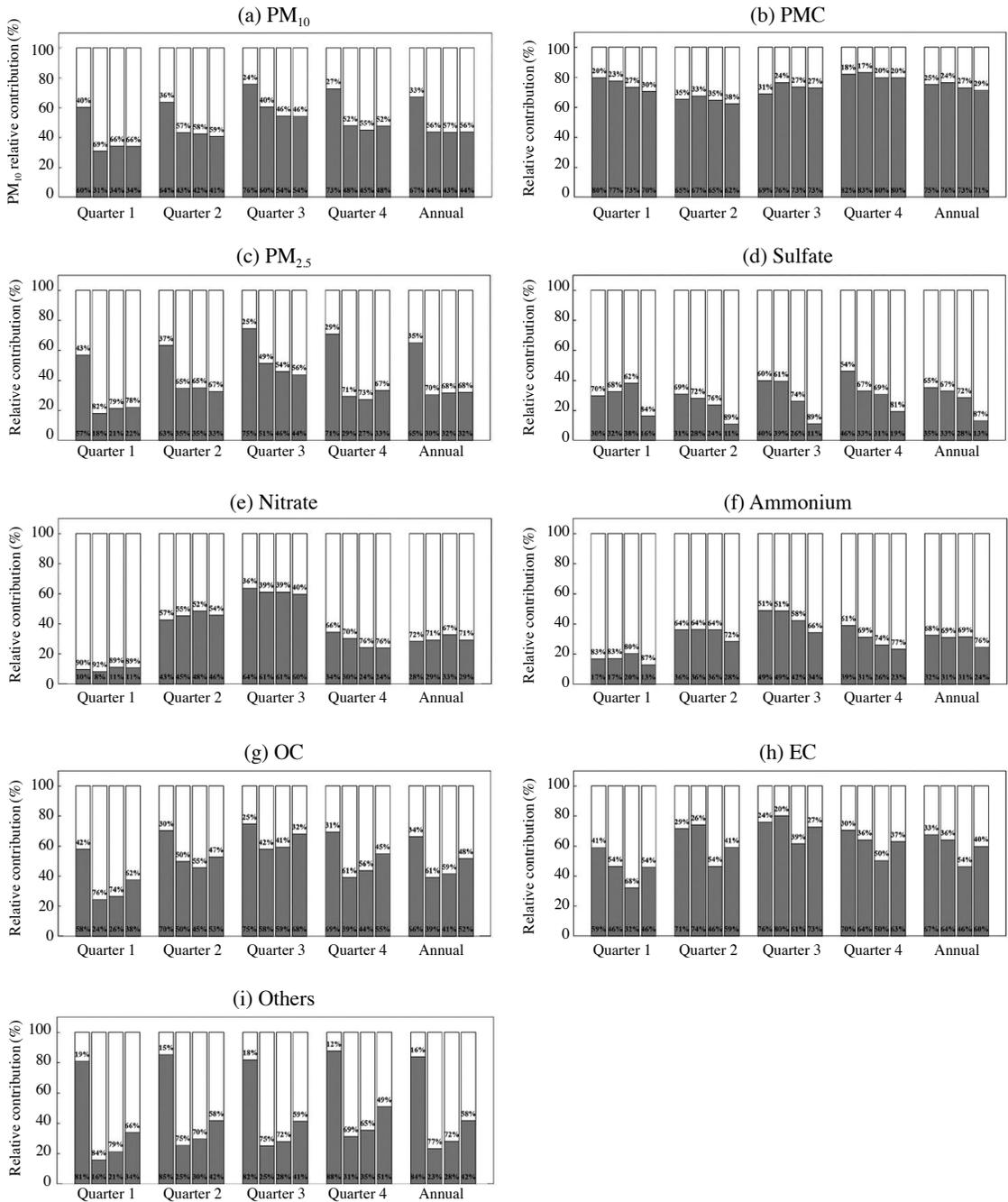


Fig. 6. Comparisons of quarterly and annual relative contributions by domestic and foreign emissions to the PM species.

최대 22%의 차이를 보였다. 차이를 유발한 가장 큰 요인은 Case 1이 Case 2~4보다 기타성분의 국내 기여도

를 20  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  가량 크게 모사하였기 때문이다.

**Table 8. Contribution correction factor of PM species in each case.**

	(a) PM coarse				(b) PM others				
	Case 1	Case 2	Case 3	Case 4	Case 1	Case 2	Case 3	Case 4	
Q1	1.7	2.1	2.0	1.9	Q1	0.5	2.2	3.1	2.5
Q2	2.7	2.8	2.7	2.5	Q2	0.5	2.8	3.2	2.5
Q3	2.3	1.8	1.8	1.6	Q3	0.5	2.1	2.2	1.6
Q4	2.1	1.9	1.8	1.8	Q4	0.3	1.6	1.9	1.3
	(c) Sulfate				(d) Nitrate				
	Case 1	Case 2	Case 3	Case 4	Case 1	Case 2	Case 3	Case 4	
Q1	1.6	1.5	1.8	2.4	Q1	0.9	0.9	1.0	1.0
Q2	1.3	1.4	1.2	1.3	Q2	1.6	1.2	1.0	1.1
Q3	1.8	1.8	1.2	1.3	Q3	1.7	1.2	0.8	1.1
Q4	1.1	1.4	1.3	1.4	Q4	1.1	1.1	0.8	0.8
	(e) Ammonium				(f) EC				
	Case 1	Case 2	Case 3	Case 4	Case 1	Case 2	Case 3	Case 4	
Q1	1.1	1.1	1.2	1.3	Q1	1.5	2.0	1.5	1.1
Q2	1.3	1.2	1.0	1.1	Q2	3.6	3.2	2.0	1.3
Q3	1.6	1.4	1.0	1.1	Q3	1.9	1.5	1.2	0.7
Q4	1.1	1.2	1.0	1.0	Q4	1.2	1.5	1.2	0.8
	(g) OC								
	Case 1	Case 2	Case 3	Case 4					
Q1	0.9	1.6	1.9	1.5					
Q2	1.4	2.3	2.2	1.7					
Q3	1.0	1.7	1.8	1.3					
Q4	0.7	1.5	1.9	1.3					

### 3.5 기여도 보정계수 적용에 따른 기여도 변화

본 연구에서 제시한 기여도는 기본모사와 이용된 방법론에 대한 불확실성을 포함하고 있으며, 관측치와 유사한 수준으로 모사농도가 개선될 경우 산정된 기여도 역시 달라질 수 있다. Bae *et al.* (2017)은 기본모사의 불확실성을 고려한 기여도 분석을 위해 기여도 보정계수(CCF, Contribution Correction Factor)를 제안하였다. 본 연구의 기본모사는 선행연구의 최소기준을 만족하는 수준이므로, 관측농도를 기반으로 모사농도를 보정하여, 국내외 기여도 변화를 살펴보았다. 기여도 보정계수는 기본 모사농도와 관측농도의 상대적인 비율로 각 Case별로 서로 다른 값을 가지며, 1보다 큰 값의 경우 과소모사로 인해 기여도가 증가되어야 하는 성분, 1보다 작은 값의 경우 과대모사로 인해 기여도가 감소되어야 하는 성분을 뜻한다. 표 8은 각 Case별 기여도 보정계수 값으로, 조대입자와 기타성분의 보정계수 값이 전반적으로 크게 나타났으며, Case 1의 기타성

분에 대한 보정계수 값은 과대모사 경향을 보완하기 위해 1보다 작은 값이 계산되었다.

기여도 보정계수 적용에 따라 수도권 지역 PM<sub>10</sub>의 국내 기여도는 보정 전 43%~67%에서 보정 후 48%~57%, PM<sub>2.5</sub>의 국내 기여도는 보정 전 31%~65%에서 보정 후 32%~47%로 변화하였다(그림 7 참조). 네 가지 Case의 국내외 기여율 차이는 보정 후 PM<sub>10</sub>의 경우 10% 이내, PM<sub>2.5</sub>의 경우 15% 이내로 간격이 좁아지는 경향을 보였다. 즉 기여도 보정계수 적용 후 여러 가지 배출량 조합에 의한 상대적인 기여율이 수렴하였다.

## 4. 결 론

본 연구에서는 PM<sub>10</sub> 예보 시스템에서 배출량 목록 이용에 따른 모사농도 및 국내외 배출량의 기여도 차이를 살펴보았다. 예보 모델에서 모사한 수도권 지역의 2014년 PM<sub>10</sub> 및 PM<sub>2.5</sub> 농도는 Case 1의 경우 54.0

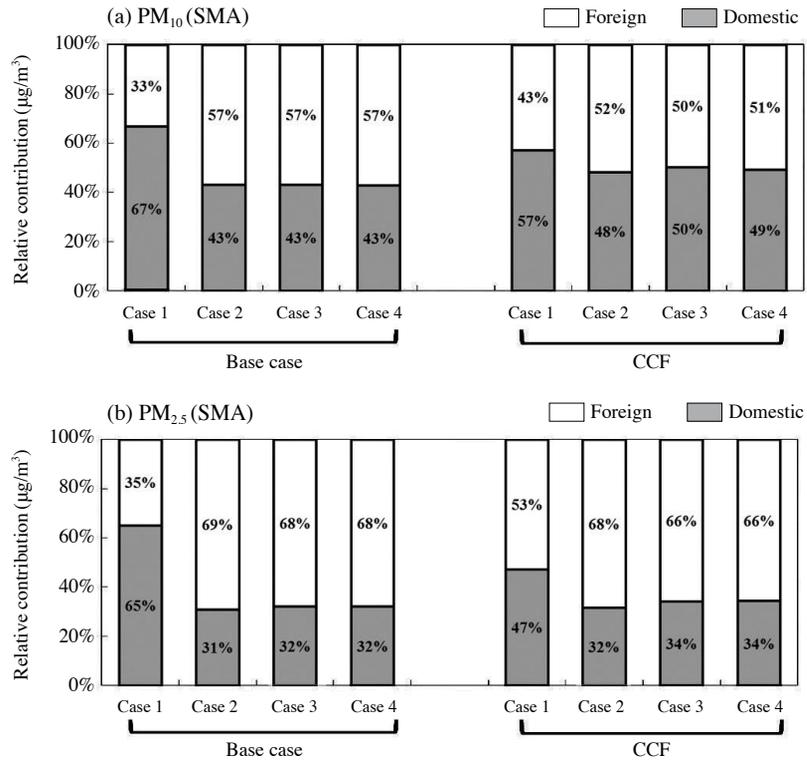


Fig. 7. Comparison of foreign and domestic relative contributions of (a) PM<sub>10</sub> and (b) PM<sub>2.5</sub> between base case (left) and CCF case (right) during the simulation period.

µg/m<sup>3</sup>, Case 2의 경우 32.8 µg/m<sup>3</sup>로 Case 간 최대 20 µg/m<sup>3</sup> 이상 차이를 보이기도 하였다. 기준에 제시된 정확도 평가방법론에 의하면 모든 Case가 일정 수준의 모사 재현성이 확보되었음에도, 배출량 목록의 선택에 따라 1.6 배 이상의 모사농도 차이가 나타날 수 있음을 확인하였다.

국내에 대하여 INTEX-B 2006 배출량 목록이 이용된 Case 1의 경우 관측치와 가장 유사한 수준의 PM<sub>10</sub> 농도를 모사하였으나, 기타 성분을 연평균 17 µg/m<sup>3</sup> 과대모사하였다. 국내에 대하여 CAPSS 배출량 목록이 이용된 Case 2~Case 4는 수도권 지역 PM<sub>10</sub>에 대하여 15 µg/m<sup>3</sup> 이상 과소모사하였는데, 조대입자 성분의 과소모사가 주요 원인인 것으로 확인되었다. 즉, 보다 정확한 대기질 예보를 위해 성분 모사농도의 정확도 개선이 필요할 것으로 판단되며, 특히 primary PM(조대입자, 기타 성분)의 과소모사는 연평균 17~20 µg/m<sup>3</sup> (Case 1 제외)으로 과소모사의 대부분을 차지하는 바,

primary PM 배출량 목록 개선을 위한 노력이 우선적으로 필요할 것으로 판단된다.

단, 본 연구에 이용된 PM<sub>10</sub>, PM<sub>2.5</sub> 모사 결과는 풍속에 대한 불확도를 포함하고 있다. 수도권 지역의 PM<sub>10</sub> 농도와 풍속의 상관성을 제시한 Kim *et al.* (2017d)의 연구에 따르면, 풍속이 1% 감소할 경우 PM<sub>10</sub> 농도는 2.1% 증가한다. 본 연구의 풍속 모사가 30% 가량 감소가 필요함을 고려하면, Case 2~Case 4의 PM<sub>10</sub> 과소모의 경향은 감소하고, Case 1은 오히려 과대모의 경향이 증가될 가능성이 있다.

예보모델에서 모사된 수도권 지역의 연평균 PM<sub>10</sub> 농도에 대한 상대적인 국내 기여도는 Case 1이 67%로 가장 높았으며, Case 2~Case 4는 44%로 유사한 기여도를 보였다. 농도 모사에 대한 불확실성을 고려하여 기여도 보정계수를 적용 시 PM<sub>10</sub>의 국내 기여도는 48%~57% 수준으로, PM<sub>2.5</sub>의 국내 기여도는 32%~47% 수준으로 모사되었다. 기여도 보정계수 적용 후

국내외의 기여율이 유사하게 변하는 이유는 과대 또는 과소 모의 경향이 두드러진 성분들의 기여도가 관측 농도 수준으로 보정되었기 때문으로, 성분별 모사 정확도의 개선이 모사농도 및 기여도 추정에 있어 중요할 것으로 판단된다. 또한, 기여도 보정계수의 적용 시에도 최소 수준의 모사 재현성이 요구되므로, 모사 재현성이 가장 부족하였던 조대입자와 기타 성분의 경우 배출량 목록의 개선이 우선적으로 필요할 것으로 판단된다.

본 연구에서는 배출량 목록의 선택이  $PM_{10}$  및  $PM_{2.5}$  모사농도에 미치는 영향을 정량적으로 제시하였으며, 이를 통해 추후  $PM_{10}$  예보 적중률 향상을 위해서 성분 모사농도의 정확도 개선을 위한 배출량 목록 개선이 필요함을 보였다. 또한, 향후 예보 모델의 적중률, 성분 모사 재현성 확보 및 모사오차를 고려한 기여도 보정계수의 적용을 통해 단기 대응책 마련을 위한 기여도 분석 결과를 제시할 수 있을 것으로 기대한다.

## 감사의 글

본 논문은 환경부의 재원으로 국립환경과학원의 지원을 받아 수행하였으며 (NIER-2017-01-02-047), 환경부의 환경정책기반공공기술개발 사업에서 지원받았습니다. 연구에 이용된 불광동 관측 자료는 국립환경과학원으로부터 제공받았습니다. 이에 감사를 포함합니다.

## References

- Bae, C.H., H.C. Kim, B.U. Kim, and S. Kim (2015) Improvement of PM forecast using PSAT based customized emission inventory over Northeast Asia, 14th Annual CMAS Models-3 Users' Conference, October 5-7, Chapel Hill, NC.
- Bae, C.H., B.U. Kim, H.C. Kim, C. You, and S. Kim (2016) Sensitivity of particulate matter in the Seoul Metropolitan Area to emission reduction from source sectors, 17th IUAPPA World Clean Air Congress and 9th CAA Better Air Quality Conference Clean Air for Cities Perspectives and Solutions.
- Bae, C.H., C. You, B.U. Kim, H.C. Kim, and S. Kim (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. (In Korean with English abstract).
- Bartnicki, J. (1999) Computing source-receptor matrices with the EMEP Eulerian acid deposition Model, EMEP MSC-W Note, 5, 99.
- Benjey, W., M. Houyoux, and J. Susick (2001) Implementation of the SMOKE emission data processor and SMOKE tool input data processor in Models-3, US EPA.
- Boylan, J.W. and A.G. Russell (2006) PM and light extinction model performance metrics, goals, and criteria for three-dimensional air quality models, Atmospheric Environment, 40, 4946-4959.
- Byun, D.W. and K.L. Schere (2006) Review of the governing equations, computational algorithms, and other components of the Models-3 Community Multiscale Air Quality (CMAQ) modeling system, Applied Mechanics Reviews, 59(2), 51-77.
- Carlton, A.G., P.V. Bhave, S.L. Napelenok, E.O. Edney, G. Sarwar, R.W. Pinder, G.A. Pouliot, and M. Houyoux (2010) Model representation of secondary organic aerosol in CMAQv4. 7, Environmental Science and Technology, 44(22), 8553-8560.
- Carter, W.P.L. (1999) Documentation of the SAPRC-99 chemical Mechanism for VOC reactivity assessment, Report to California Air Resources Board, Contracts 92-329 and 95-308.
- Digar, A., D.S. Cohan, and M.L. Bell (2011) Uncertainties influencing health-based prioritization of ozone abatement strategies, Environmental Science and Technology, 45, 7761-7767.
- Emery, C., Z. Liu, A.G. Russell, M.T. Odman, G. Yarwood, and N. Kumar (2016) Recommendations on statistics and benchmarks to assess photochemical model performance, Journal of the Air and Waste Management Association, <http://dx.doi.org/10.1080/10962247.2016.1265027>.
- Guenther, A., T. Karl, P. Harley, C. Wiedinmyer, P.I. Palmer, and C. Geron (2006) Estimates of global terrestrial isoprene emissions using MEGAN (Model of Emissions of Gases and Aerosols from Nature), Atmospheric Chemistry and Physics, 6(1), 107-173.
- In, H.J. and Y.P. Kim (2010) Estimation of the aerosol optical thickness distribution in the Northeast Asian forest fire episode in May 2003: Possible missing emissions, Atmospheric Research, 98(2), 261-273.

- Jeong, J.H., Y.K. Kim, Y.S. Moon, and M.K. Hwang (2007) Intercomparison of wind and air temperature fields of meteorological model for forecasting air quality in Seoul metropolitan area, *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment*, 23(6), 640-652. (In Korean with English abstract)
- Kim, B.U., C.H. Bae, H.C. Kim, E. Kim, and S. Kim (2017b) Spatially and chemically resolved source apportionment analysis: Case study of high particulate matter event, *Atmospheric Environment*, 162, 55-70, <http://dx.doi.org/10.1016/j.atmosenv.2017.05.006>.
- Kim, H.C., E. Kim, C.H. Bae, J.H. Cho, B.U. Kim, and S. Kim (2017a) Regional contributions to particulate matter concentration in the Seoul Metropolitan Area, Korea: seasonal variation and sensitivity to meteorology and emissions inventory, *Atmospheric Chemistry and Physics*, 17, 10315-10332, <https://doi.org/10.5194/acp-17-10315-2017>.
- Kim, H.C., S. Kim, B.U. Kim, C.S. Jin, S. Hong, R. Park, S.W. Son, C.H. Bae, M.A. Bae, C.K. Song, and A. Stein (2017d) Recent increase of surface particulate matter concentrations in the Seoul Metropolitan Area, Korea, *Scientific Reports*, 7.
- Kim, S., C.H. Bae, H.C. Kim, and B.-U. Kim (2017c) PM<sub>2.5</sub> simulations in the Seoul Metropolitan Area: (I) model contributions of precursor emissions in the CAPSS emissions inventory, *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment*, 33(2), 139-158. (In Korean with English abstract)
- Kim, S., N. Moon, and D.W. Byun (2008) Korea emissions inventory processing using the US EPA's SMOKE system, *Asian Journal of Atmospheric Environment*, 2(1), 34-46.
- Kurokawa, J., T. Ohara, T. Morikawa, S. Hanayama, G. Janssens-Maenhout, T. Fukui, and H. Akimoto (2013) Emissions of air pollutants and greenhouse gases over Asian regions during 2000-2008: Regional Emission inventory in ASia (REAS) version 2, *Atmospheric Chemistry and Physics*, 13(21), 11019-11058.
- Lee, D.-G., Y.-M. Lee, K. Jang, C. Yoo, K. Kang, J.-H. Lee, S. Jung, J. Park, S.-B. Lee, J. Han, J. Hong, and S. Lee (2011) Korean national emissions inventory system and 2007 air pollutant emissions, *Asian Journal of Atmospheric Environment*, 5(4), 278-291, doi:10.5572/ajae.2011.5.4.278.
- Li, M., Q. Zhang, J. Kurokawa, J.-H. Woo, K.B. He, Z. Lu, T. Ohara, Y. Song, D.G. Streets, G.R. Carmichael, Y.F. Cheng, C.P. Hong, H. Huo, X.J. Jiang, S.C. Kang, F. Liu, H. Su, and B. Zheng (2017) MIX: a mosaic Asian anthropogenic emission inventory for the MICS-Asia and the HTAP projects, *Atmospheric Chemistry and Physics*, 17(2), 935.
- Lu, Z., Q. Zhang, and D.G. Streets (2011) Sulfur dioxide and primary carbonaceous aerosol emissions in China and India, 1996-2010, *Atmospheric Chemistry and Physics*, 11, 9839-9864, doi:10.5194/acp-11-9839-2011.
- NIER (2011a) Study on the construction of high resolution weather-atmosphere modeling for urban scale fine dust forecasting (III). (in Korean)
- NIER (2011b) Evaluation of impacts of long-transport pollutants in Northeast Asia (II). (in Korean)
- NIER (2014) Improve accuracy of ozone forecasting and improve emission processing model (I). (in Korean)
- NIER (2015) National Institute of Environmental Research annual report. (in Korean)
- NOAA (2005) <https://madis.noaa.gov/> (accessed on Aug. 16, 2017).
- MOE (2012) A Study on Improvement and Expansion of Urban Scale PM<sub>2.5</sub> Forecasting System. (in Korean)
- MOE (2017) Emergency action plan for high-concentration PM in the Seoul metropolitan area, <http://www.me.go.kr/home/web/board/read.do?menuId=286&boardMasterId=1&boardCategoryId=39&boardId=762290> (accessed on Aug. 23, 2017). (in Korean)
- MSIP (2015) Development of Korean air quality simulation system for PM<sub>2.5</sub> forecasting. (in Korean)
- Skamarock, W.C., J.B. Klemp, J. Dudhia, D.O. Gill, D.M. Barker, M.G. Duda, X. Huang, W. Wang, and J.G. Powers (2008) A description of the advanced research WRF version 3, NCAR Tech. Note NCAR/TN-475+STR, National Center for Atmospheric Research, Boulder, CO, 125.
- Tonnesen, G.S. and R.L. Dennis (2000) Analysis of radical propagation efficiency to assess ozone sensitivity to hydrocarbons and NO<sub>x</sub>: 1. Local indicators of instantaneous odd oxygen production sensitivity, *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 105(D7), 9213-9225.
- Zhang, Q., D. Streets, G. Carmichael, K. He, H. Huo, A. Kanari, Z. Klimont, I. Park, S. Reddy, J. Fu, D. Chen, L. Duan, Y. Lei, L. Wang, and Z. Yao (2009) Asian emissions in 2006 for the NASA INTEX-B mission, *Atmospheric Chemistry and Physics Discussions*, 9(1), pp. 4081-4139.

Appendix. 기상 및 대기질 모델 결과 검증을 위한 지표 산정식.

Table 1. Statistical parameters and description.

Statistical parameters	Description	Range	Good value
Mean	$\frac{1}{n} \left( \sum_{i=1}^n P_i \right)$	$-\infty \sim \infty$	-
Bias	$\frac{1}{n} \left( \sum_{i=1}^n P_i - O_i \right)$	$-\infty \sim \infty$	0
Normalized mean bias (NMB)	$\left( \frac{\sum_{i=1}^n (P_i - O_i)}{\sum_{i=1}^n (O_i)} \right) \times 100$	$-100 \sim +100$	0
Correlation coefficient (R)	$\frac{\sum_{i=1}^n [(O_i - \bar{O}) \times (P_i - \bar{P})]}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})^2 \times \sum_{i=1}^n (P_i - \bar{P})^2}}$	$-1 \sim +1$	1
Index of agreement (IOA)	$1 - \frac{\sum_{i=1}^n (P_i - O_i)^2}{\sum_{i=1}^n ( P_i - \bar{P}  +  P_i - \bar{O} )^2}$	$0 \sim 1$	1
Root mean square error (RMSE)	$\sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (P_i - O_i)^2}{n}}$	$0 \sim \infty$	0
Fractional bias (FB)	$\frac{1}{n} \left( \frac{\sum_{i=1}^n (P_i - O_i)}{\frac{P_i + O_i}{2}} \right) \times 100$	$-100 \sim +100$	0
Fractional error (FE)	$\frac{1}{n} \left( \frac{\sum_{i=1}^n  P_i - O_i }{\frac{P_i + O_i}{2}} \right) \times 100$	$0 \sim +100$	0

P = Predicted concentrations  
 O = Observed concentrations