



대기질 예보 시스템의 입력 배출목록에 따른 PM_{2.5} 모의 성능 평가 - 중국 및 한국을 중심으로

Evaluation of the Simulated PM_{2.5} Concentrations using Air Quality Forecasting System according to Emission Inventories - Focused on China and South Korea

최기철 · 임용재 · 이재범* · 남기표 · 이한솔 · 이용희 · 명지수 · 김태희
장임석 · 김정수 · 우정현¹⁾ · 김순태²⁾ · 최광호³⁾

국립환경과학원 대기질통합예보센터, ¹⁾건국대학교 글로벌융합대학 융합인재학부,

²⁾아주대학교 환경공학과, ³⁾남서울대학교 교양과정부

(2018년 2월 9일 접수, 2018년 3월 4일 수정, 2018년 3월 5일 채택)

Ki-Chul Choi, Yongjae Lim, Jae-Bum Lee*, Kipyoo Nam, Hansol Lee,
Yonghee Lee, Jisu Myoung, Taehee Kim, Limseok Jang, Jeong Soo Kim,
Jung-Hun Woo¹⁾, Soontae Kim²⁾ and Kwang-Ho Choi³⁾

Air Quality Forecasting Center, National Institute of Environmental Research

¹⁾*College of Global Integrated Studies, Konkuk University*

²⁾*Department of Environmental & Safety Engineering, Ajou University*

³⁾*Department of General Education, Namseoul University*

(Received 9 February 2018, revised 4 March 2018, accepted 5 March 2018)

Abstract

Emission inventory is the essential component for improving the performance of air quality forecasting system. This study evaluated the simulated daily mean PM_{2.5} concentrations in South Korea and China for 1-year period (Sept. 2016~Aug. 2017) using air quality forecasting system which was applied by the emission inventory of E2015 (predicted CAPSS 2015 for South Korea and KORUS 2015 v1 for the other regions). To identify the impacts of emissions on the simulated PM_{2.5}, the emission inventory replaced by E2010 (CAPSS 2010 and MIX 2010) were also applied under the same forecasting conditions. These results showed that simulated daily mean PM_{2.5} concentrations had generally suitable performance with both emission data-sets for China (IOA > 0.87, R > 0.87) and South Korea (IOA > 0.84, R > 0.76). The impacts of the changes in emission inventories on simulated daily mean PM_{2.5} concentrations were quantitatively estimated. In China, normalized mean bias (NMB) showed 5.5% and 26.8% under E2010 and E2015, respectively. The tendency of overestimated concentrations was larger in North Central and Southeast China than other regions under both E2010 and E2015. Seasonal differences of NMB

*Corresponding author.

Tel : +82-(0)32-560-7721, E-mail : gercjlb@korea.kr

were higher in non-winter season (28.3% (E2010)~39.3% (E2015)) than winter season (-0.5% (E2010)~8.0% (E2015)). In South Korea, NMB showed -5.4% and 2.8% for all days, but -15.2% and -11.2% for days below 40 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ to minimize the impacts of long-range transport under E2010 and E2015, respectively. For all days, simulated PM_{2.5} concentrations were overestimated in Seoul, Incheon, Southern part of Gyeonggi and Daejeon, and underestimated in other regions such as Jeonbuk, Ulsan, Busan and Gyeongnam, regardless of what emission inventories were applied. Our results suggest that the updated emission inventory, which reflects current status of emission amounts and spatio-temporal allocations, is needed for improving the performance of air quality forecasting.

Key words : PM_{2.5}, Emission inventory, Air quality forecasting, CMAQ

1. 서 론

최근 대기오염물질, 특히 대기 중 미세먼지가 인체 및 자연 환경에 미치는 영향에 대한 관심과 우려가 증대됨에 따라 이에 대한 대응 및 대국민 정보 제공을 목적으로 2014년 2월 6일부터 국내 미세먼지 예보가 공식적으로 수행되고 있다. 2015년 1월 1일에는 PM₁₀뿐만 아니라 PM_{2.5}까지 예보 대상물질을 확대하였으며, 예보 대상 지역 역시 수도권을 포함하여 2016년 5월 이후 현재까지 전국 19개 권역으로 세분화하여 예보 정보를 제공하고 있다. 국내 미세먼지 예보는 관측 자료와 대기질 모델을 이용한 수치 예측 결과를 기반으로 예보관의 판단을 통해 최종적인 예보 등급을 결정하는 체계로 이행되고 있다. 미세먼지 예보의 정확도 향상을 위해서는 예보관의 최종등급 결정에 있어 중요한 요소가 되는 대기질 모델(AQM- Air Quality Model)의 예측성 향상이 매우 중요하다.

동아시아 대기질 모델링 기술의 현황과 발전 방향에 대한 총설 연구(Park *et al.*, 2013)에서는 대기질 모델링 시스템의 정확도 개선을 위한 방향으로 모델 자체의 성능 향상과 이와 연관된 배출량 및 배출 모델링, 기상 모델, 그리고 지상 및 인공위성 관측 자료 활용 등 관련/연관 기술의 개선 및 개발을 제시하였다. 일반적으로 대기질 모델의 예측 결과는 그 입력 자료인 기상예측정보와 함께 대기오염물질 배출량의 정확도 역시 영향을 받는 것으로 알려져 있다(Lee *et al.*, 2014). 중국과 국내에 대해 수행되었던 과거 초미세먼지 관련 모델 모의 연구 결과(Ghim *et al.*, 2017; Kanaya *et al.*, 2017)에서는 평균적으로 모델 모의 농도가 관측결과에 비해 과소예측하는 것으로 보고되고 있으며, 이러

한 원인 중 하나로 과소평가된 배출량이 지목된다(Kanaya *et al.*, 2017; Zhang *et al.*, 2017; Bae *et al.*, 2015).

최근 동아시아 지역의 빠른 대기오염물질 배출 현황을 반영하기 위하여, 이 지역에 대한 인위적 배출목록의 개선 및 최신화가 이루어지고 있다. 국내에 대해서는 국립환경과학원 대기보전정책지원시스템(Clean Air Policy Support System: CAPSS)을 통해 매년 기준연도 배출목록이 작성되고 있으며, 동북아시아의 경우 기존 INTEX-B 배출목록(Zhang *et al.*, 2009)의 중국부분을 개선하고, 최신화된 아시아 국가 및 지역 배출목록을 반영한 MIX(Li *et al.*, 2017) 배출목록이 2010년을 기준연도로 개발되어 활용되고 있다. 그러나 이러한 통계 기반 배출목록들은 배출량 산정에 필요한 관련 자료들을 수집·분석하기 위한 시간 소요로 인해 약 2~3년 과거 연도를 기반으로 작성되고 있다(NIER, 2014). 이러한 한계를 극복하기 위한 방안으로 과거 기준연도 배출목록으로부터 배출활동에 대한 통계 변화 및 저감 정책 등을 반영하여 현재를 추계한 배출목록이 대안으로 제시되고 있다. 국립환경과학원에서는 대기질 예보 지원을 위한 목적으로 국내 배출량에 대한 2015년 추계 배출목록을 산정하였으며, 국외 동북아시아 배출량의 경우 최근 국내 연구진을 통해 KORUS-AQ 항공관측 연구를 지원하기 위한 목적으로 2010년 CREATE 배출목록을 기반으로 작성된 KORUS 2015 v1 추계 배출목록(NIER, 2016a) 역시 개발된 바 있다.

본 연구에서는 현재 동북아시아 지역과 한국에 대해 과거 기준연도 배출목록의 대안으로 2015년을 기준으로 개발된 추계 배출목록들을 적용하여, 중국 및 국내

전체 권역별 미세먼지 예측 성능의 개선 효과와 예측 특성을 평가하였다. 개선 효과 평가를 위해 대조군으로 2010년을 기준연도로 개발된 국외 MIX 2010 배출 목록과 국내 CAPSS 2010년 배출목록을 적용한 대기질 모델 예측을 함께 수행하고, 그 결과는 중국 및 국내 지상측정망의 관측 농도와 비교를 통해 예측 성능을 평가하였다. 본 연구의 결과는 미세먼지 예보에 있어 대기질 모델의 예측결과를 활용한 예보관의 판단 근거로 활용될 수 있으며, 향후 개발될 동북아시아 및 국내 배출목록의 개발 방향 설계에 활용될 수 있을 것으로 기대한다.

2. 연구 방법

2.1 모델링 수행 개요

최근 중국 및 국내 PM_{2.5} 농도에 대해 최신 추계배출량 적용에 따른 대기질 모델의 예측 성능 평가를 위하여 최근 1년(2016년 9월~2017년 8월)을 대상으로 연구를 수행하였다. 대기질 모의를 위한 기상·배출량·대기질 모델의 도메인은 국립환경과학원의 대기질예보시스템에 적용된 체계를 기반으로 하였다. 그림 1은 모델의 적용 도메인을 나타낸 것으로, 동아시아 지역에 대해 27 km, 국내 9 km 해상도의 격자도메인을 적용하고, 연직 방향으로는 시그마 좌표계를 이용하여 15개 층으로 구분하였다. 지역기상모델은 WRF (Weather Research and Forecast) v3.3 (Skamarock and Klemp, 2008), 대기질 모델은 CMAQ v4.7 (Byun and Ching, 1999)을 적용하고, WRF 기상 모사 시 초기장은 기상청에서 예보에 활용하고 있는 UM (Unified Model, Davies *et al.*, 2005) 기상 자료를 이용하였다. WRF 모델의 산정 결과는 MCIP (Meteorology-Chemistry Interface Processor) v3.6을 통해 대기질 모델의 입력 자료로 변환하였고, 인위적 배출원 중 점오염원의 유효배출고도 할당과 자연배출량 산정에도 활용되었다. CMAQ 모델에서의 화학 메커니즘은 SAPRC99을 적용하였으며, 에어로졸 모사를 위해 AEROS가 적용되었다. 표 1에 WRF 및 CMAQ 모델의 모사를 위한 세부설정을 제시하였으며, 2010년 기준연도 배출목록과 2015년 추계 배출목록 적용에 따른 비교실험을 위하여 배출목록을 제외한 기상 및 대기질 모델 등 모든 모

델링 수행 조건은 동일하게 적용하였다.

대기질 모델의 예측 성능 평가는 일평균 PM_{2.5} 농도를 기준으로 중국과 국내 지상관측자료와 예측 결과를 비교하였으며, 공간적으로는 국가별, 지역별로, 시간적으로는 연간, 계절별로 분석하였다. 정량적인 모델 예측성 평가를 위하여 NMB (Normalized Mean Bias), RMSE (Root Mean Square Error), IOA (Index Of Agreement), R (Correlation)와 같은 통계지수들을 활용하였으며, 그 정의는 아래와 같다.

$$NMB = \frac{\sum_{i=1}^N (M_i - O_i)}{\sum_{i=1}^N (O_i)} \times 100 \quad (1)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (M_i - O_i)^2} \quad (2)$$

$$IOA = 1 - \frac{\sum_{i=1}^N (M_i - O_i)^2}{\sum_{i=1}^N (|M_i - \bar{O}| + |O_i - \bar{O}|)^2} \quad (3)$$

$$R = \frac{\sum_{i=1}^N (M_i - \bar{M}) \times (O_i - \bar{O})}{\sqrt{\sum_{i=1}^N (M_i - \bar{M})^2 \times \sum_{i=1}^N (O_i - \bar{O})^2}} \quad (4)$$

O_i is the observed concentrations for ith observation, and M_i is the model estimated concentrations, N is the total number of data.

상기 통계지수들은 상대적인 개념으로 NMB와 RMSE는 0에 근접할수록, IOA와 R은 1에 가까울수록 모델 예측이 실제 현상을 잘 모의하고 있음을 의미한다. 대기질 모의 결과의 평가 기준은 PM_{2.5} NMB ± 30% (Emery *et al.*, 2016), IOA 0.5 이상 (Hurley, 2001; Willmott, 1985) R 0.4 이상 (Emery *et al.*, 2016)일 경우 모델 예측이 현상을 적절하게 설명하는 것으로 판단하며, NMB ± 10% 이내, R 0.7 이상일 경우 성능이 우수한 것으로 판단한다 (Emery *et al.*, 2016).

2.2 관측 자료

대기질 모델의 PM_{2.5} 농도 예측성 평가를 위하여 중

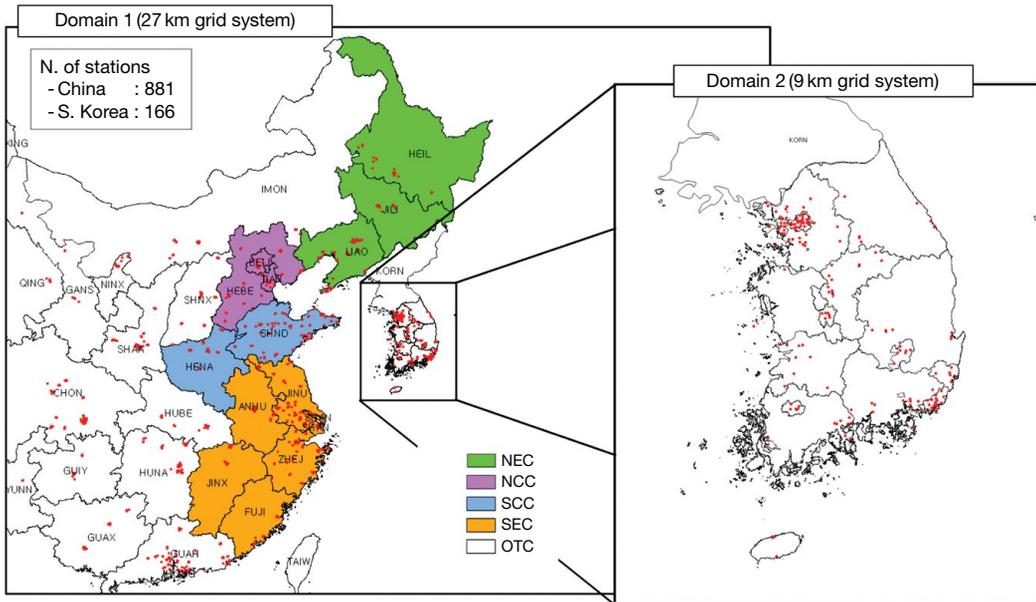


Fig. 1. Spatial coverage of the outer coarse domain (27 km resolution) for East Asia and the finer domain (9 km resolution) for South Korea. Location of the measurement stations (red dots) for China and South Korea with regional definitions are shown on the study area (NEC: North East China, NCC: North Central China, SCC: South Central China, SEC: South East China, OTC: OTher China, HEIL: Heilongjiang, JILI: Jilin, LIAO: Liaoning, BEIJ: Beijing, TIAN: Tianjin, HEBE: Hebei, SHND: Shandong, HENA: Henan, JINU: Jiangsu, SHAN: Shanghai, ANHU: Anhui, ZHEJ: Zhejiang, JINX: Jiangxi, FUJI: Fujian, IMON: Inner mongolia, SHNX: Shanxi, NINX: Ningxia, SHAA: Shaanxi, HUBE: Hubei, HUNA: Hunan, GUAH: Guangdong, GANS: Gansu, CHON: Sichuan & Chongqing GUIY: Guizou, GUAX: Guanxi).

국과 국내 총 1,047개의 지상 관측망 자료와의 비교를 수행하였다. 국내의 경우 도시대기측정망 자료 중, PM_{2.5} 농도 관측 결과를 연구대상기간 동안 제공 가능한 전국 166개 측정소별 관측 자료를 활용하였으며, 중국의 경우 중국환경모니터링센터에서 제공하는 각 성시별 지상관측소 실시간 관측자료 (<http://113.108.142.147:20035/emcpublish>) 중 모델 도메인 내에 해당되는 881개소 PM_{2.5} 농도 관측 결과를 활용하였다. 다만 지역별 검증의 경우, 지역 내 측정소 수가 작은 경우(국내 시도별 5개 미만, 중국 성시별 10개 미만) 해당 지역을 대표하는 데 한계가 있다고 판단하여 비교 대상에서 제외하였다. 그림 1에서는 중국과 국내 지상 관측소의 위치와 비교 대상 지역의 정의를 함께 나타내었다.

2.3 배출 입력 자료

최신 추계배출량 적용에 따른 대기질 모델의 PM_{2.5}

예측성 평가를 위하여 표 2와 같이 2가지 종류의 배출 입력자료를 준비하였다. 먼저 추계배출량 적용 실험 (E2015)의 경우 동북아시아 인위적 배출목록으로 KORUS 2015 v1 추계 배출목록(NIER, 2016a)을, 국내는 CAPSS 2015 추계배출량 자료를 이용하였다. 대조군 실험(E2010)의 경우 동북아시아 인위적 배출목록으로 가장 최신의 기준연도 배출목록으로 국내의 연구에서 널리 이용되고 있는 MIX 2010 배출목록(Li *et al.*, 2017)을, 국내는 CAPSS 2010 배출목록을 적용하였다. 모델 입력 배출량 작성은 SMOKE (Sparse Matrix Operator Kernel Emissions) 배출처리 모델을 기반으로 국내와 국외 배출목록 처리에 적합하게 개발된 기존 배출처리시스템(Woo *et al.*, 2012; Kim *et al.*, 2008)들을 활용하였으며, 중국의 점오염원 정보는 최근 업데이트된 연구 결과(NIER, 2016b)를 추가적으로 반영하였다. 다만 MIX 2010 배출목록의 경우 자체적으로 제공되는 월별 0.25도 격자 배출량 자료를 그림 1에 제

시한 연구 도메인에 맞추어 재격자화하고, 배출원별 시간할당 및 화학종분화를 수행하여 적용하였다.

식생배출량은 MEGAN (Model of Emissions of Gases and Aerosols from Nature) v2.04 (Guenther *et al.*, 2006) 모델을 기반으로 산정된 결과를 이용하였으며, 비교 대상인 인위적 배출목록을 제외한 식생배출량은 비교 대상 실험들에 모두 동일하게 대기질 모델에 반영하였다.

Table 1. Model configurations for WRF and CMAQ in this study.

WRF	
Model version	WRF v3.4
MET input	UM (Unified Model)
Micro physics	WRF Single-Moment 3-class scheme
Longwave radiation	RRTM scheme
Shortwave radiation	Goddard shortwave
Land surface	NOAH (Chen and Dudhia, 2001)
PBL scheme	YSU (Hong <i>et al.</i> , 2006)
CMAQ	
Model version	CMAQ v4.7
Chemical mechanism	SAPRC99
Aerosol module	AEROS
Chemical solver	EBI
Advection scheme	YAMO
Horizontal diffusion	Multiscale
Vertical diffusion	Eddy
Cloud scheme	ACM

3. 배출량 비교

3.1 국가별 전체 배출량

그림 2는 본 연구에 적용한 기준연도 2010년 배출목록과 2015년 추계배출목록에 대해 중국(그림 2(a))과 국내(그림 2(b)) 물질별 배출량을 주요 배출원별 기여도와 함께 나타낸 것이다. 중국의 경우 KORUS 2015 v1 추계 배출목록이 PM_{2.5} 배출량에 대해 약 17% 높은 수준이며, 모든 배출원에서 MIX 2010 배출목록 대비 큰 배출량을 산정하였기 때문이다. NH₃의 경우 주로 농업부문의 배출량이 크게 산정되면서 MIX 2010 대비 23% 높은 배출량을 제시하였으며, 기타 다른 물질들은 다소 작게 산정하고 있다(SO₂ -4%, NO_x -7%, VOC -4%). 다만 각 배출원별 증감 추이는 다르게 나타났다. SO₂의 경우 발전부문(POW)과 이동오염원(TRA)에서 각각 약 1.1배, 5.0배 가량 KORUS 2015 v1 추계 배출목록이 크게 산정하고 있으나, 산업부문(IND)과

Table 2. List of emission inventories used in this study for air quality simulations.

	Emission inventory	
	Northeast Asia	South Korea
E2010	MIX 2010	CAPSS 2010
E2015	KORUS 2015 Ver.1	CAPSS predicted for 2015

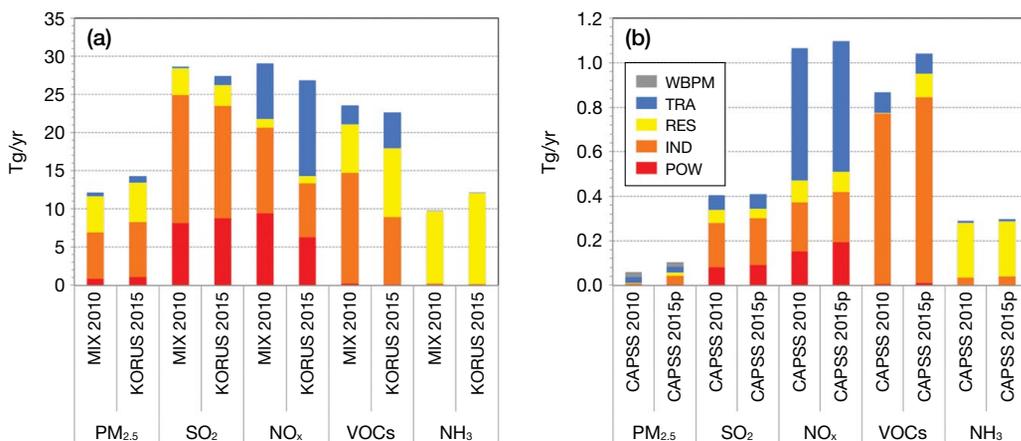


Fig. 2. Comparison results of anthropogenic emissions with major source contributions between predicted (year 2015) and base (year 2010) inventories for (a) China and (b) South Korea, respectively. CAPSS 2015p indicates predicted inventory for the year 2015 from CAPSS 2012 (POW: Power generation, IND: Industry, RES: Residential & Agriculture, TRA: Transportation, WBPM: Wind Blown PM).

가정 및 상업(RES)부분에서 각각 88%, 78% 수준으로 작게 산정하면서 총배출량이 작게 제시되었다. NO_x의 경우 산업부문(IND)과 발전부문(POW)에서 KORUS 2015 v1이 각각 약 62%, 67% 수준으로 작게 산정하였으며, 이동오염원(TRA)의 경우 1.7배 크게 산정하였다. VOC의 경우 KORUS 2015 v1에서 산업부문(IND)에서 61% 수준으로 작게, 이동오염원(TRA)의 경우 1.8배 크게 산정하면서 총배출량의 감소율을 상당부분 상쇄한 것으로 분석된다.

국내의 경우 CAPSS 2015 v1 추계배출목록이 CAPSS 2010의 PM_{2.5} 배출량 대비 약 74%로 큰 폭으로 증가하였으며, 이는 2011년 이후 공식적인 PM_{2.5} 배출량이 산정되면서 주로 발전부문(에너지산업 연소)과 산업부문(제조업 연소, 생산공정), 가정 및 상업부문(비산업 연소, 농업 및 생물성연소)의 배출량이 변화된 것으로 확인된다(NIER, 2014). VOC의 경우 2015 추계배출량에서 약 20% 높은 배출량을 제시하였으며, 대부분 가정 및 상업부문(RES)의 증가에 기인하였다. 이는 배출량의 증가보다는 미반영 되었던 비공식 배출원인 생물성 연소 부문 배출량이 추가되면서 주로 증가된 것으로 확인된다. NO_x 배출량의 경우 총 약 3%로 다소 증가하였으며, 주 원인으로는 발전부문(POW, CAPSS 분류 에너지산업 연소)에서 약 1.3배 증가하였기 때문인 것으로 확인된다. 이는 2015년 추계배출량 산정 과정에서 2012년 이후 제5,6차 전력수급계획 등의 활동도 변화와 추가 발전소 건설계획 등을 바탕으로 추산한 결과에 기인한 것으로 보인다. SO₂와 VOC 배출량은 큰 변화를 보이지 않았다.

그림 3은 본 연구에 적용된 배출처리시스템을 통해 산정된 모델입력 배출량 자료의 월간 변화율을 중국과 국내에 대해 물질별로 나타낸 것이다. 국내의 경우 CAPSS 2010과 CAPSS 2015 추계배출량 모두 월별할당 비율은 유사하게 나타났으며, NO_x를 제외한 대부분 월별 변화가 크지 않다. NO_x의 경우 겨울철 기간이 가장 높고, 여름철에 다소 증가하는 패턴을 보인다. 이는 NO_x의 주 배출원이며 겨울철에 가장 높고, 여름철에 다소 증가하는 변화를 보이는 이동오염원 부문과 겨울철에 증가하는 발전부문의 배출량 변화에 의한 것으로 풀이된다.

중국의 경우 SO₂와 NO_x는 계절별 할당 비율에 큰 차이는 없으나, PM_{2.5}와 VOC 배출량은 겨울철에 높게

발생하는 것으로 두 배출목록 모두 할당하고 있다. 두 배출목록에서 PM_{2.5}가 겨울철에 할당비율이 높은 이유는 타 계절에 비해 가정 및 상업부문(RES)의 할당비율이 커짐에 따른 것이다. 이는 겨울철 난방 수요 등에 따른 영향이 반영된 것으로 판단된다. 다만 KORUS 2015 v1에 적용한 가정 및 상업부문의 시간할당 계수(USEPA, 2008)는 계절별로 차등을 두었으나, MIX 2010의 경우 1월에 가장 높은 배출량을 할당하고 4월까지 감소한 이후, 다시 11월부터 증가하는 패턴(Li *et al.*, 2017)으로 다소 다른 월별 변화 패턴을 적용하였다. NH₃의 경우 두 배출목록 모두 겨울철에 낮으나, 가장 높은 배출량은 MIX 2010은 여름철, KORUS 2015 v1은 봄철에 할당하는 차이를 보였다. NH₃의 월별 변화의 주 원인은 두 배출목록 모두 농업부문에서의 비료 적용이나, KORUS 2015 v1에 적용된 시간할당계수는 작물의 파종과 비료 적용 시기를 3~6월로, MIX 2010의 경우 주요 작물(옥수수, 벼)의 파종 시기를 6월, 추가 비료 적용 시기를 8월로 반영함에 따라(Huang *et al.*, 2012) 차이가 발생한 것으로 분석된다.

3.2 지역별 배출량 변화

그림 4는 본 연구의 기준연도 배출량(E2010) 대비 추계배출량(E2015)의 중국 성시별, 국내 시도별 증감 비율을 물질별로 나타낸 것이다. 중국의 NH₃는 대부분의 지역에서 KORUS 2015 v1 추계배출량이 크게 산정하고 있으며, 중국 수도권(징진지)에 해당되는 중북(NCC) 지역의 경우 MIX 2010 대비 유사한 수준을 보였다. 한편, PM_{2.5}와 SO₂, NO_x, VOC는 중국 중북지역에 대해 MIX 2010 대비 VOC 1.1배 이상, PM_{2.5}와 SO₂는 1.5배 이상 높은 배출량을 제시하고 있으며, 그의 지역의 경우 물질별로 증감 추이가 다르게 나타났다. PM_{2.5}의 경우 중국 동북(NEC), 중북(NCC), 중남(SCC), 동남(SEC)지역 등 한반도 주변에 인접한 지역을 위주로 MIX 2010 대비 배출량이 증가하였으며, SO₂ 역시 유사하나 산동성(SHND) 지역의 배출량은 감소하여 차이를 보였다. VOC의 경우 동남지역을 제외한 나머지 한반도 인접지역에서 모두 증가하였으며, NO_x의 경우 모델 도메인 내 지역 중, 중북지역과 동남지역에서만 증가된 결과를 나타내었다. 중국의 수도권에 해당하는 중북지역은 NH₃를 제외한 대부분 배출량의 증가에 따라 KORUS 2015 v1 추계배출량을 적용한

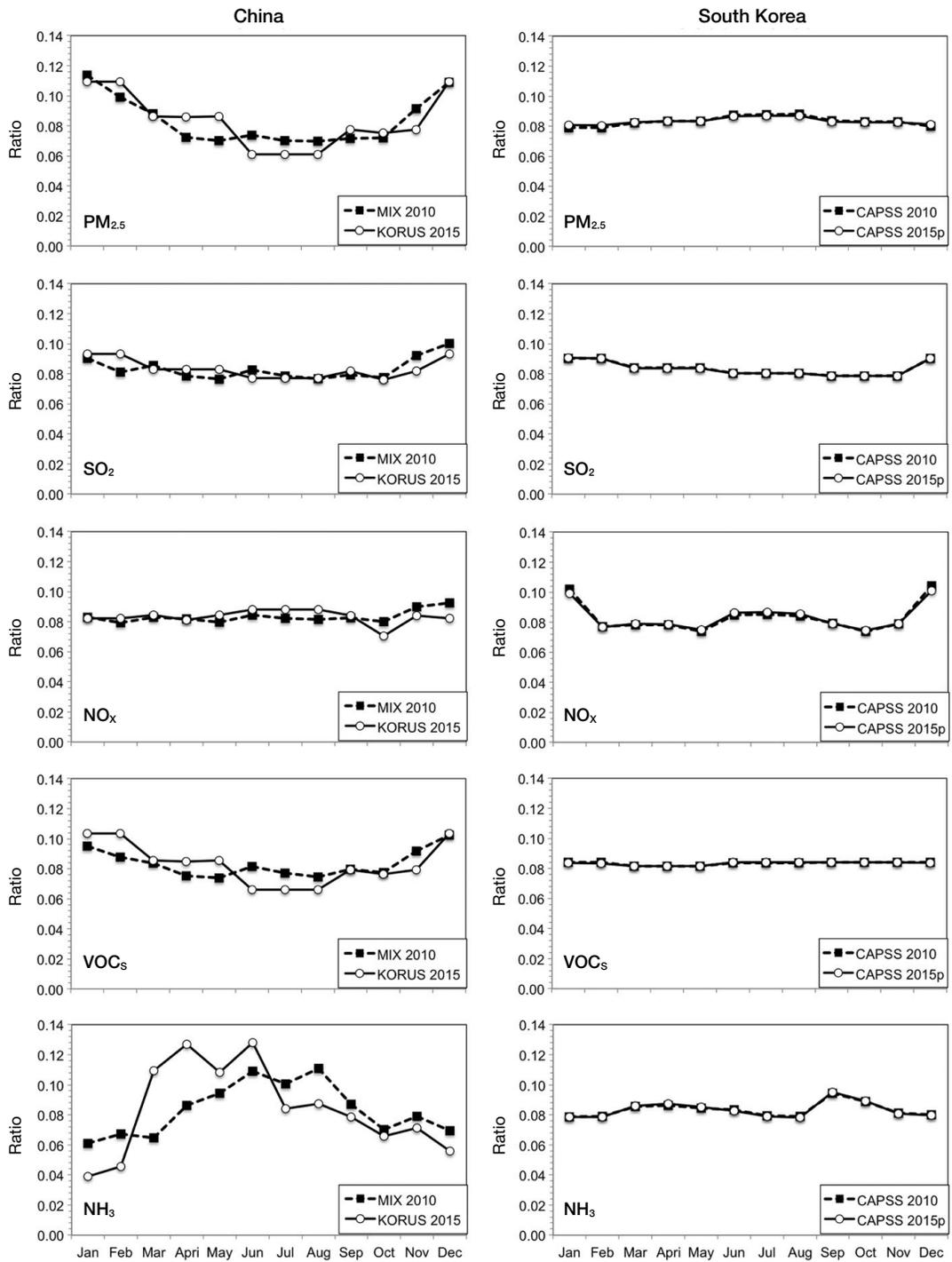


Fig. 3. Comparison of monthly variations of PM_{2.5}, SO₂, NO_x, VOC and NH₃ emissions between predicted (year 2015) and base (year 2010) inventories over China and South Korea.

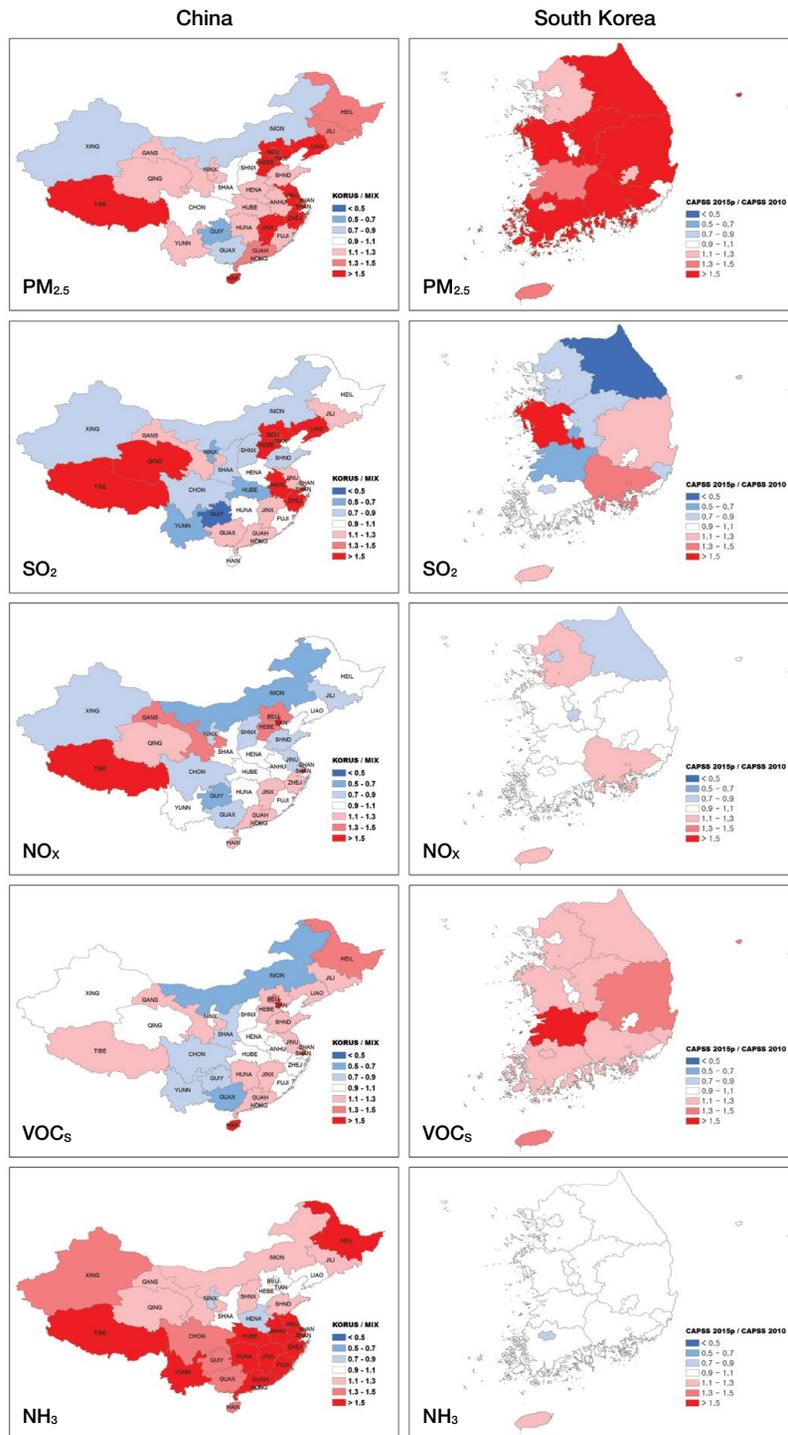


Fig. 4. The rates of change of PM_{2.5}, SO₂, NO_x, VOC_s and NH₃ from E2010 to E2015 (E2015/E2010) for each 1st-level administrations in China and South Korea (Sejong city is excluded in this analysis because of newly established in 2012).

모델 모의 시, 적지 않은 $PM_{2.5}$ 농도 증가가 예상되며, 중남지역과 동남지역 역시 전반적인 배출량 증가 영향을 받을 것으로 추정된다.

국내의 경우, 2010년도 $PM_{2.5}$ 배출량의 누락부분을 보완한 정식배출량이 2011년 이후부터 제공됨에 따라 대부분의 지역에서 큰 폭으로 증가하였으며, VOC의 경우 생물성원소 등 추가 배출원 반영에 따라 대부분의 대도시를 제외한 지역에서 증가하는 모습을 보였다. SO_2 는 국가 총배출량은 다소 감소하였으나, 경북과 경남지역은 각각 1.1배, 1.3배 이상, 중남지역의 경우 1.5배 이상 증가하는 모습을 보였다. 중남의 SO_2 배출량 증가는 대부분 산업부문(IND) 중 제조업 연소와 생산공정 부문의 증가에 따른 것으로, 특히 제조업 연소 부문은 CAPSS 2015 추계배출량이 CAPSS 2010에 비해 약 8배 이상 증가하였으며, 비민수용 무연탄 사용량의 급격한 증가에 따른 것으로 확인된다(NIER, 2014). 생산공정 부문은 약 2배 이상 증가하였으며, 대부분 석유제품산업과 제철제강업에서의 배출량 증가에 기인한다. NO_x 의 경우 경기도와 경남지역에서 약 1.1배 이상 증가하였으며, 두 지역 모두 발전부문(POW, CAPSS 분류 에너지산업 연소)의 증가가 주요 원인이나, 세부적으로는 각각 민간발전부문과 공공발전부문의 증가에 따른 것으로 차이가 있다. 경남지역의 경우 비도로 이동오염원 중 건설장비에서의 배출량이 약 1.7배 증가하면서 전체 배출량의 증가에 기여하였다. NH_3 배출량의 경우 지역별로 큰 차이는 없었다.

4. 배출목록 변화에 따른 모델 예측성 평가

4.1 국가별 예측성 평가

본 연구에서는 추계배출량 적용에 따른 최근 기간(2016년 9월~2017년 8월) 대기질 모델의 $PM_{2.5}$ 예측성 평가를 위하여 2015년 추계배출량과 2010년 기준 연도 국내의 배출량을 적용한 두 가지 모델 모의 실험(표 2 참고)을 진행하였으며, 중국과 국내 지상관측소 전체 일평균 농도를 모델 예측 결과와 비교한 결과를 그림 5에 나타내었다. 중국의 경우, 두 실험 모두 IOA, R 각각 0.87 이상으로 모델의 관측 농도 변화를 적절하게 모사하고 있는 것으로 확인되나, NMB는 2010년 기준연도 배출량 적용 실험(이하 E2010)과 2015년 추

계배출량 적용 실험(이하 E2015) 모두 각각 약 16.8%, 26.8%로 특히 E2015에서 모델의 농도 예측이 관측에 비해 평균적으로 과대모의하는 것으로 확인된다. 그러나 계절별로는 예측 성능이 다르게 나타났다. 표 3은 중국에 대해 겨울철(12월, 1월, 2월)과 그 외 기간으로 나누어 모델 예측성에 대한 통계지수를 정리하여 나타낸 것이다. 겨울철의 경우 NMB는 -0.5% (E2010), 8.0% (E2015)로 다른 기간에 비해 상대적으로 관측치와 유사한 농도 수준을 모델이 모사했으며, IOA와 R 모두 0.90 이상으로 우수한 예측성을 보여주었다. 반면 다른 기간의 경우 NMB는 28.3% (E2010), 39.3% (E2015)로 과대예측 경향을 나타내었다. 이러한 결과는, 본 연구에 적용된 MIX 2010과 KORUS 2015 v1 추계배출목록 모두 최신의 중국 배출 현황을 총배출량과 월별 시간배분 측면에서 충분히 반영하고 있지 못하였을 가능성이 높다는 것을 시사한다. 그림 6은 중국에 대해 모델에서 모의된 $PM_{2.5}$ 농도의 구성성분별 기여를 계절별로 나타낸 것으로, E2010 및 E2015 모두 겨울철 원소상 탄소(EC) 성분과 유기입자(OA) 성분의 기여가 증가하였으며, 이는 각각의 주요 원인물질인 $PM_{2.5}$ 와 VOC 배출량의 겨울철 할당 비율이 증가하는 것에 직접적인 영향을 받은 것으로 판단된다. 한편, 겨울철 황산염 기여율은 감소하였으며, 이는 계절별 할당된 SO_2 배출의 변화가 크지 않음을 감안할 때, 전구물질의 배출 영향보다는 기상학적 요인에 의한 대기화학 반응 조건의 변화에 의한 것으로 추정된다.

한편, 국내 도시대기측정망의 일평균 $PM_{2.5}$ 농도와 모델 예측 결과 비교 시, E2010과 E2015 모두 IOA와 R값이 0.76 이상으로 모델의 예측이 관측 현상을 적절하게 모의하고 있는 것으로 판단된다. NMB의 경우 E2010과 E2015 각각 -5.4% , 2.8% 로 연 평균적으로 과소예측 및 다소 과대예측하는 경향을 나타내었다. 그림 5(b)에 제시된 국내 일평균 $PM_{2.5}$ 농도에 대한 모델 및 관측의 시계열 변화를 살펴보면, 겨울철을 제외한 기간 동안 $40 \mu g/m^3$ 이상 농도 상승 시, 대부분 모델이 과대예측하는 모습을 나타내었다. 이는 국내 평균 수준 대비 고농도 사례 일들이 중국 등 국외 영향을 크게 받았을 가능성이 높다는 점(Kim *et al.*, 2017; Kim *et al.*, 2016)을 고려할 때, 중국 지역에서의 과대예측된 $PM_{2.5}$ 농도가 국내에 상당부분 기여하면서 국내 농도 역시 과대예측된 것으로 추정된다. 표 4는 모델 예측된

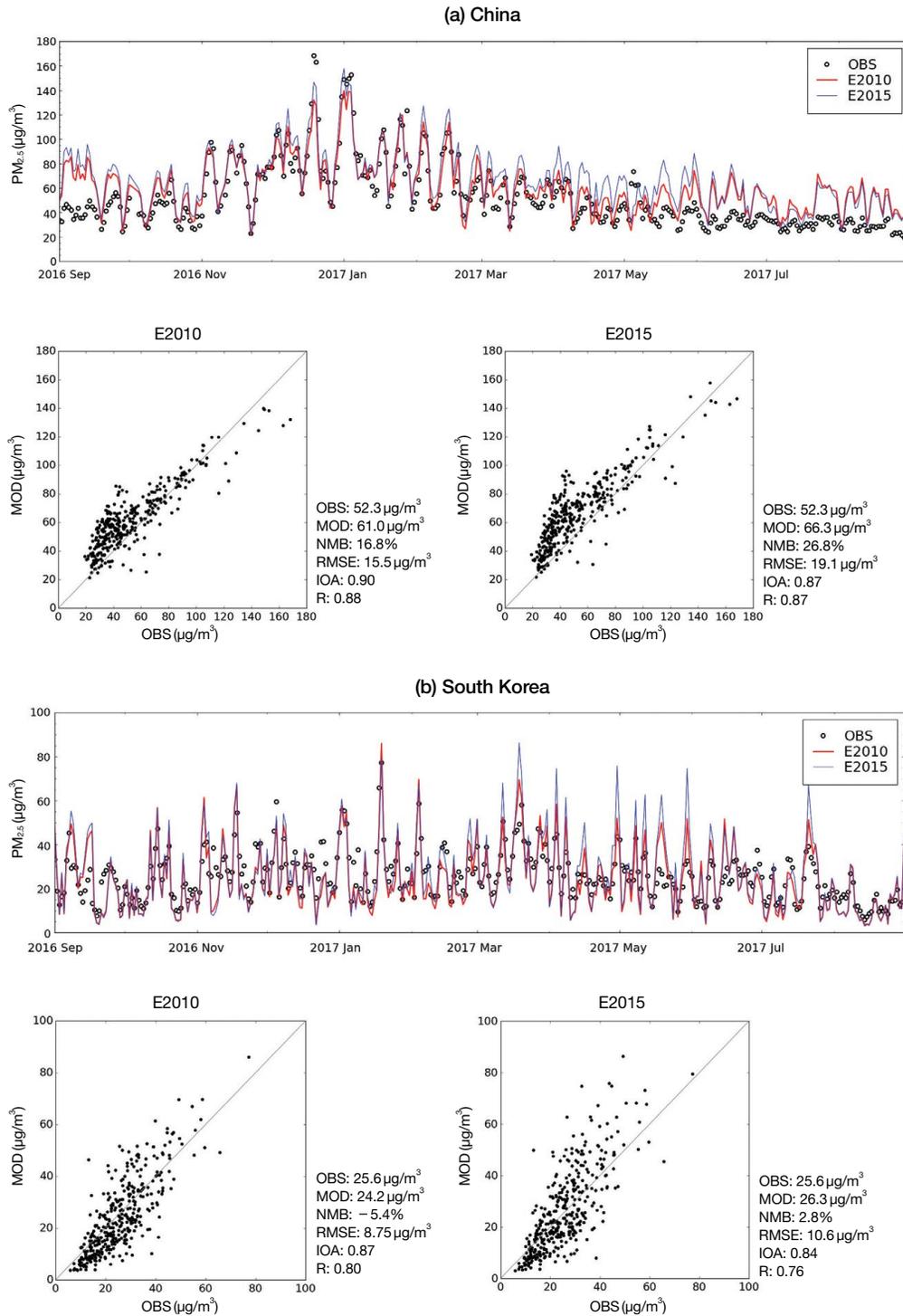


Fig. 5. Time series and scatter plots of observed and model simulated daily mean PM_{2.5} concentrations with performance statistics over (a) China and (b) South Korea.

국내 일평균 PM_{2.5} 농도 40 µg/m³ 이하에 대한 관측값과의 비교 시 성능 평가 지수들을 나타낸 것이다. 국외 영향을 강하게 받았을 가능성이 높은 날들을 제외한 결과로, E2010과 E2015 모두 NMB가 각각 -15.2%, -11.2%로 모델 예측 농도가 평균적으로 관측 대비 낮게 예측하고 있으며, 전반적인 추계 배출량(E2015) 증가 결과, E2010 대비 음의 오차가 다소 감소한 것으로 보인다. 현재 모델 실험 결과를 바탕으로 볼 때, 기상 및 대기질 모델에 의한 불확실성과 함께 국내 배출량의 저평가 가능성에 대해서 검토가 필요할 것으로

사료된다.

4.2 지역별 예측성 평가

그림 7은 관측대비 모델 예측 결과에 대한 NMB를 중국 성시별, 국내 시도별로 나타낸 것이다. 중국 동북 지역(NEC)의 경우, 헤이룽장성(HEIL)의 예측 결과가 E2010, E2015 모두 -30% 이하로 과소평가하고 있다. 그러나 헤이룽장성은 모델 도메인의 동북쪽 경계면에 위치한 지역으로, 보다 정확한 평가를 위해서는 도메인 경계조건의 영향을 현실적으로 고려할 수 있는 추가적인 실험이 필요할 것으로 판단된다. 전반적으로

Table 3. Performance statistics by Winter and Non-winter seasons over China.

	E2010		E2015	
	Winter	Non-winter	Winter	Non-winter
OBS	82.6 µg/m ³	42.0 µg/m ³	82.6 µg/m ³	42.0 µg/m ³
MOD	82.1 µg/m ³	54.0 µg/m ³	89.1 µg/m ³	58.5 µg/m ³
NMB	-0.5%	28.2%	8.0%	39.3%
RMSE	11.9 µg/m ³	16.6 µg/m ³	14.1 µg/m ³	20.5 µg/m ³
IOA	0.95	0.74	0.94	0.69
R	0.92	0.71	0.90	0.73

Winter: December, January and February

Table 4. Performance statistics for modeled daily mean PM_{2.5} concentrations below 40 µg/m³ over South Korea.

	E2010	E2015
OBS	22.9 µg/m ³	22.4 µg/m ³
MOD	19.4 µg/m ³	19.8 µg/m ³
NMB	-15.2%	-11.2%
RMSE	7.6 µg/m ³	7.8 µg/m ³
IOA	0.81	0.79
R	0.71	0.66

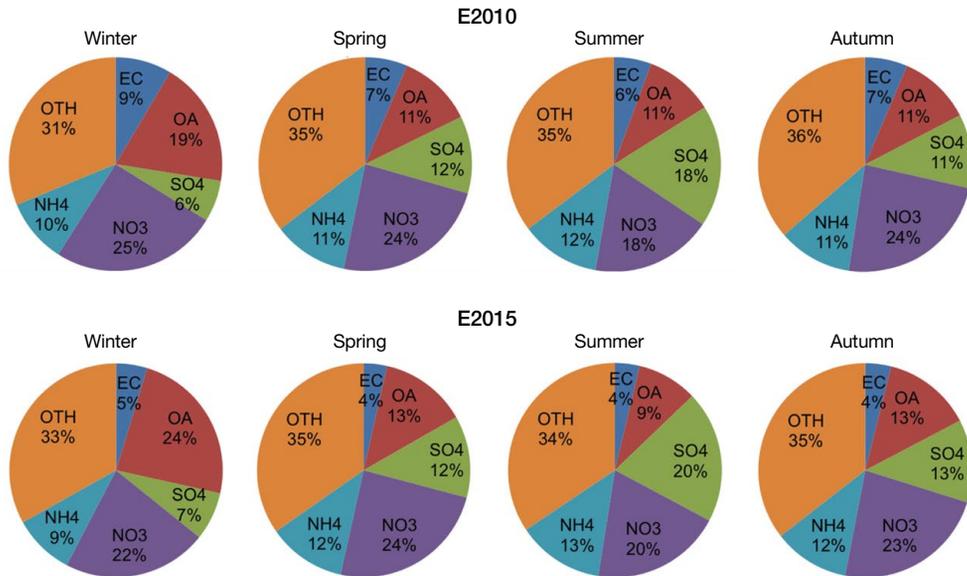


Fig. 6. The contribution of component species for model simulated PM_{2.5} concentrations for each seasons over China (EC: Elemental Carbons, OA: Organic Aerosols, SO₄: Sulfate, NO₃: Nitrate, NH₄: Ammonium, OTH: Other PM_{2.5} species).

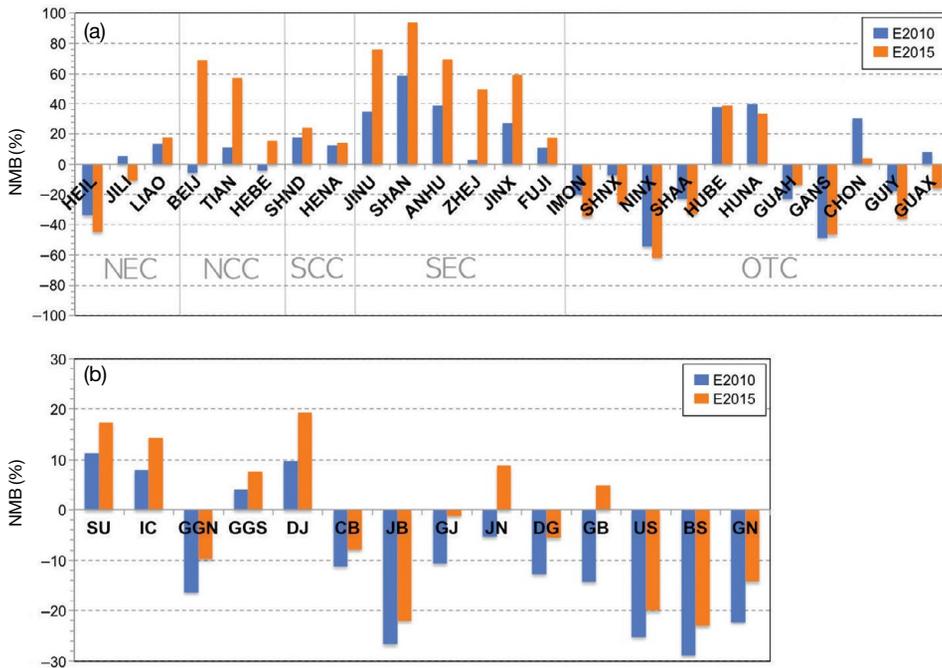


Fig. 7. The annual mean bias of model estimated concentration represented as NMB for each 1st-level administrations over (a) China and (b) South Korea (SU: Seoul, IC: Incheon, GGN: Gyeonggi-Northern, GGS: Gyeonggi-Southern, DJ: Daejeon, CB: Chungbuk, JB: Jeonbuk, GJ: Gwangju, JN: Jeonnam, DG: Daegu, GB: Gyeongbuk, US: Ulsan, BS: Busan, GN: Gyeongnam).

한반도에 인접한 중국 중북지역(NCC), 중남지역(SCC), 동남지역(SEC)에 대해서 E2010과 E2015 모두 과대예측하고 있으며, 이에 따라 국내에 미치는 국외 영향을 모델에서 과대 산정할 가능성이 높을 것으로 추정된다. 특히 중북지역의 경우 E2015에서 베이징(BEIJ)과 톈진(TIAN)에 대해 NMB 50% 이상으로 NMB -6~11%의 수준을 보인 E2010에 비해 과대예측 경향이 두드러진다. 중국 동남지역의 경우 E2010의 NMB가 3~58%, E2015의 NMB가 18~94%로 두 가지 배출목록 모두 과대예측 경향을 보이며, 특히 상하이(SHAN)에서 이러한 경향(E2010: 58%, E2015: 94%)이 두드러진다. 중북지역과 동남지역의 과대예측 결과에 따라 중국 전체 예측 농도가 과대예측된 것으로 판단되며, 반면 기타 중국(OTC) 지역의 경우 전반적으로 과소예측 경향을 보였다. 다만 일부 지역(HUBE, HUNA)의 경우 과대예측(HUBE 38~39%, HUNA 34~40%)하는 결과를 보였다.

본 연구에서 수행된 최근기간 중국의 PM_{2.5} 예측 성

능 평가 결과는, 추계배출량(E2015)이 기존의 배출목록(E2010) 자료에 비해 평균적으로 과대예측함에 따라 오히려 예측 성능이 다소 떨어지는 것으로 나타났다. 이는 추계 산정 방식의 한계일 수 있으나, 최근 빠르게 변화하는 중국의 대기환경 정세가 충분히 반영되지 않았기 때문일 가능성 역시 존재한다. 최근 국립환경과학원 한중 대기질공동연구단에서 발간한 중국 미세먼지 현황 보고서에 따르면(NIER, 2017), 중국 74개 주요 도시의 PM_{2.5} 연평균 농도는 2013년 72 µg/m³에서 2014년 64 µg/m³, 2015년 55 µg/m³, 2016년 50 µg/m³으로, 2013년 대비 2016년 31%가 감소하여 연평균 10% 이상 빠른 변화를 보이고 있다. 이 지역에 대한 PM_{2.5} 예측 성능을 높이기 위해서는 중국의 최신 환경정책을 배출목록 산정에 빠르게 반영하기 위한 노력이 필수적으로 수행되어야 할 것으로 보인다.

그림 7(b)의 국내 지역별 예측 오차의 경우, 전반적으로 수도권(SU, IC, GGS) 지역은 과대, 호남(JB, GJ, JN) 및 영남권(DG, GB, US, BS, GN)에서는 모델이 과

소예측하는 결과를 나타내었다. 추계 배출목록(E2015) 적용 결과, 모든 지역에서 모델 예측 농도가 증가하면서 호남 및 영남권에서는 과소예측 경향이 다소 개선되었으나, 수도권 지역 및 대전(DJ)의 경우 오히려 과대예측 경향이 두드러졌다. 관측 대비 가장 낮은 모델 예측을 보인 지역은 부산(BS)(NMB -23%(E2015)~-29%(E2010))이며, 가장 높은 모델 예측 편차는 E2010의 경우 서울(SU)(NMB 11%), E2015의 경우 대전(DJ)(NMB 19%)으로 나타났다.

5. 결 론

본 연구에서는 국내외 2015년 추계배출량(중국 등국의 KORUS 2015 v1 배출목록 및 한국 CAPSS 2015 추계 배출목록, 이하 E2015) 적용에 따른 중국 및 국내 PM_{2.5} 예측 성능을 2010년 기준연도 배출목록(중국 등국의 MIX 2010 배출목록 및 한국 CAPSS 2010 배출목록, 이하 E2010) 적용결과와 비교하여 분석하였다. 분석 기간은 최근 1년간(2016년 9월~2017년 8월)을 대상으로, 일평균 PM_{2.5} 예측 성능을 평가하였다. 전반적인 대기질 모델의 PM_{2.5} 예측 성능은 두 배출목록 모두 중국(IOA > 0.87, R > 0.87)과 한국(IOA > 0.84, R > 0.76)에 대해 적절한 수준을 보였다. 다만 적용 배출목록 변화에 따라 정량적 예측 수준에는 차이가 있다. 중국의 경우, E2010 대비 E2015에서 PM_{2.5} 배출량과 NH₃ 배출량을 각각 약 17%, 23% 크게 산정함에 따라, 중국 전체 모델 예측 평균 PM_{2.5} 농도는 61.0 µg/m³(E2010)에서 66.3 µg/m³(E2015)으로 변화하였다. 관측 대비 모델 예측 농도의 편차는 NMB(Normalized Mean Bias) 기준 16.8%(E2010)에서 26.8%(E2015)로 두 배출목록 모두 평균적으로 과대예측하며, 특히 E2015 적용에 따라 이러한 경향이 증가하였다. 이는 최근 중국의 강력한 환경정책에 따른 배출량 감소 경향이 충분히 반영되지 않았기 때문인 것으로 추정된다. 지역별로는 베이징, 톈진, 허베이성이 포함된 중국 중북지역과 상하이 지역 등 중국 동남지역에서 특히 과대예측하고 있다. 한편, 계절별 NMB 분석 결과, 겨울철(-0.5%(E2010)~8.0%(E2015))에 비해 그 외 기간(28.3%(E2010)~39.3%(E2015))의 과대예측 경향이 크게 나타났으며, 이를 개선하기 위해서는 기상 및

대기질 모델의 불확실성과 함께 중국의 월별 시간할당에 대한 검토 역시 함께 요구된다.

국내의 경우 E2010 대비 E2015에서 공식적인 PM_{2.5} 배출량 산정에 따라 총 배출량이 약 74% 증가하였으며, 생물성 연소 등 추가배출원 보완에 따라 VOC 배출량 역시 약 20% 가량 증가하였다. 국내 전체에 대한 일평균 PM_{2.5} 관측 대비 모델 예측 농도는 과소예측 수준(NMB -5.4%)에서 다소 과대예측(NMB 2.8%) 수준으로 변화하였다. 이는 국외 영향이 포함된 결과로, 과대예측된 중국의 모의 결과가 국내에 영향을 미칠 수 있음에 따라 국외 영향이 강하게 작용하였을 가능성이 높은 고농도 시기(모델예측 농도 40 µg/m³ 이상)를 제외한 기간에 대한 분석을 추가적으로 수행하였으며, 두 배출목록 기반 모델 예측 결과 모두 과소예측(NMB -11.2%(E2015)~-15.2%(E2010))하는 모습을 보였다. 전체 대상기간에 대한 평가 결과, 지역별로는 주로 수도권 지역(서울, 인천, 경기남부) 및 대전에서 과대예측(NMB 8~11%(E2010), 14~19%(E2015))하는 모습을 보였으며, 그 외 지역에서는 대부분 과소예측(NMB -29%~4%(E2010), -23%~8%(E2015))하는 모습을 보였다.

본 연구에서는 최신 추계배출량 적용에 따른 중국 및 국내 PM_{2.5} 예측 성능 분석을 수행하였다. 중국의 PM_{2.5} 농도 과대예측은, 대기질 모델 기반으로 우리나라에 미치는 대기오염물질 장거리 이동 영향 평가 시 주의가 필요함을 시사한다. 또한 PM_{2.5} 예측 성능을 높이기 위한 입력 배출목록의 개선 방안으로, 중국의 최신 환경 정책을 반영한 배출량 자료의 업데이트, 배출원별 시간할당 정보, 국내의 특히 과소예측되는 지역들을 위주로 한 배출량 자료의 검토가 필요함을 시사한다.

감사의 글

본 논문은 환경부의 재원으로 국립환경과학원의 지원을 받아 수행하였습니다(NIER-RP2016-247).

References

Bae, C.H., Kim, H.C., Kim, B.U., Kim, S. (2015) Improve-

- ment 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.
- Byun, D.W., Ching, J.K.S. (1999) Science algorithms of the EPA Models-3 community multi-scale air quality (CMAQ) modeling system, NERL, Research Triangle Park, NC.
- Chen, F., Dudhia, J. (2001) Coupling an advanced land surface-hydrology model with the Penn State-NCAR MM5 modeling system. Part I: Model implementation and sensitivity, *Monthly Weather Review*, 129(4), 569-585.
- Davies, T., Cullen, M.J.P., Malcolm, A.J., Mawson, M.H., Staniforth, A., White, A.A., Wood, N. (2005) A new dynamical core for the Met Office's global and regional modelling of the atmosphere, *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 131(608), 1759-1782.
- Emery, C., Liu, Z., Russell, A.G., Odman, M.T., Yarwood, G., Kumar, N. (2016) Recommendations on statistics and benchmarks to assess photochemical model performance, *Journal of the Air and Waste Management Association*, 67(5), 582-598.
- Ghim, Y.S., Choi, Y., Kim, S., Bae, C.H., Park, J., Shin, H.J. (2017) Evaluation of model performance for forecasting fine particle concentrations in Korea, *Aerosol and Air Quality Research*, 17(7), 1856-1864.
- 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.
- Hong, S., 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, X., Song, Y., Li, M., Li, J., Huo, Q., Cai, X., Zhu, T., Hu, M., Zhang, H. (2012) A high-resolution ammonia emission inventory in China, *Global Biogeochemical Cycles*, 26(1), 1-14.
- Hurley, P.J., Blockley, A., Rayner, K. (2001) Verification of a prognostic meteorological and air pollution model for year-long predictions in the Kwinana industrial region of Western Australia, *Atmospheric Environment*, 35(10), 1871-1880.
- Kanaya, Y., Matsui, H., Taketani, F., Pan, X., Komazaki, Y., Wang, Z., Chang, L., Kang, D., Choi, M., Kim, S.Y., Kang, C.H., Takami, A., Tanimoto, H., Ikeda, K., Yamaji, K. (2017) Observed and modeled mass concentrations of organic aerosols and PM_{2.5} at three remote sites around the East China Sea: Roles of chemical aging, *Aerosol and Air Quality Research*, 17(12), 3091-3105.
- 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(17), 10315-10332.
- Kim, J.-H., Choi, D.-R., Koo, Y.-S., Lee, J.-B., Park, H.-J. (2016) Analysis of Domestic and Foreign Contributions using DDM in CMAQ during Particulate Matter Episode Period of February 2014 in Seoul, *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment*, 32(1), 82-99. (in Korean with English abstract)
- 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.
- Lee, D., Kim, S., Kim, H., Ngan, F. (2014) Retrospective Air Quality Simulations of the TexAQS-II: Focused on Emissions Uncertainty, *Asian Journal of Atmospheric Environment*, 8(4), 212-224.
- Li, M., Zhang, Q., Kurokawa, J.I., Woo, J.H., He, K., Lu, Z., Ohara, T., Song, Y., Streets, D.G., Carmichael, G.R., Cheng, Y., Hong, C., Huo, H., Jiang, X., Kang, S., Liu, F., Su, H., Zheng, B. (2017) MIX: A mosaic Asian anthropogenic emission inventory under the international collaboration framework of the MICS-Asia and HTAP, *Atmospheric Chemistry and Physics*, 17(2), 935-963.
- National Institute of Environmental Research (NIER) (2014) National air pollutants emission 2012.
- National Institute of Environmental Research (NIER) (2016a) An international measurement campaign on megacity air pollution study (II) - Modeling study for investigation of source of urban air pollution and emission inventory verification.
- National Institute of Environmental Research (NIER) (2016b) Improvement of Ozone Forecast Accuracy and Emission Preparation Model (III).
- National Institute of Environmental Research (NIER) (2017) the status of particulate matter and current measures for China 2017.
- Park, R.S., Han, K.M., Song, C.H., Park, M.E., Lee, S.J., Hong,

- S.Y., Kim, J., Woo, J.-H. (2013) Current Status and Development of Modeling Techniques for Forecasting and Monitoring of Air Quality over East Asia, *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment*, 29(4), 407-438. (in Korean with English abstract)
- Skamarock, W.C., Klemp, J.B. (2008) A time-split nonhydrostatic atmospheric model for weather research and forecasting applications, *Journal of Computational Physics*, 227(7), 3465-3485.
- U.S. Environmental Protection Agency (US EPA) (2008) Technical Support Document: Preparation of Emissions Inventories for the 2002-based Platform, Version 3, Criteria Air Pollutants.
- Willmott, C.J., Ackleson, S.G., Davis, R.E., Feddema, J.J., Klink, K.M., Legates, D.R., O'Donnell, J., Rowe, C.M. (1985) Statistics for the evaluation and comparisons of models, *Journal of Geophysical Research*, 90(C5), 8995-9005.
- Woo, J.-H., Choi, K.-C., Kim, H.K., Baek, B.H., Jang, M., Eum, J.-H., Song, C.H., Ma, Y.-I., Sunwoo, Y., Chang, L.-S., Yoo, S.H. (2012) Development of an anthropogenic emissions processing system for Asia using SMOKE, *Atmospheric Environment*, 58, 5-13.
- Zhang, Q., Streets, D.G., Carmichael, G.R., He, K.B., Huo, H., Kannari, A., Klimont, Z., Park, I.S., Reddy, S., Fu, J.S., Chen, D., Duan, L., Lei, Y., Wang, L.T., Yao, Z.L. (2009) Asian emissions in 2006 for the NASA INTEX-B mission, *Atmospheric Chemistry and Physics*, 9(14), 5131-5153.
- Zhang, X., Wu, Y., Liu, X., Reis, S., Jin, J., Dragosits, U., Van Damme, M., Clarisse, L., Whitburn, S., Coheur, P.-F., Gu, B. (2017) Ammonia Emissions May Be Substantially Underestimated in China, *Environmental Science & Technology*, 51(21), 12089-12096.