

## 황사 배출량이 동아시아 지역 PM<sub>10</sub> 농도에 미치는 영향

### The Effect of Dust Emissions on PM<sub>10</sub> Concentration in East Asia

최대련 · 구윤서\* · 조진식 · 장영기<sup>1)</sup> · 이재범<sup>2)</sup> · 박현주<sup>2)</sup>

안양대학교 환경에너지공학과, <sup>1)</sup>수원대학교 환경에너지공학과

<sup>2)</sup>국립환경과학원 대기질통합예보센터

(2015년 11월 17일 접수, 2015년 12월 7일 수정, 2015년 12월 29일 채택)

Dae-Ryun Choi, Youn-Seo Koo\*, Jin-Sik Jo, Young-Kee Jang<sup>1)</sup>,  
Jae-Bum Lee<sup>2)</sup> and Hyun-Ju Park<sup>2)</sup>

*Department of Environmental and Energy Engineering, Anyang University*

<sup>1)</sup>*Department of Environmental and Energy Engineering, University of Suwon*

<sup>2)</sup>*Air Quality Forecasting Center, National Institute of Environmental Research*

(Received 17 November 2015, revised 7 December 2015, accepted 29 December 2015)

#### Abstract

The anthropogenic aerosols originated from the pollutant emissions in the eastern part of China and dust emitted in northwestern China in Yellow sand regions are subsequently transported via eastward wind to the Korean peninsula and then these aerosols induce high PM<sub>10</sub> concentrations in Korean peninsula.

In order to estimate air quality considering anthropogenic and dust emissions, Comprehensive Air-quality Model with extension (CAMx) was applied to simulate PM<sub>10</sub> concentration. The predicted PM<sub>10</sub> concentrations without/with dust emissions were compared with observations at ambient air quality monitoring sites in China and Korea for 2008.

The predicted PM<sub>10</sub> concentrations with dust emissions could depict the variation of measured PM<sub>10</sub> especially during Yellow sand events in Korea. The comparisons also showed that predicted PM<sub>10</sub> concentrations without dust emissions were under-predicted while predictions of PM<sub>10</sub> concentrations with dust emission were in good agreement with observations. This implied that dust emissions from desert and barren soil in southern Mongolia and northern China minimized the discrepancies in the PM<sub>10</sub> predictions in East Asia. The effect of dust emission on annual PM<sub>10</sub> concentrations in Korea Peninsula for year 2008 was 5~10 µg/m<sup>3</sup>, which were about 20% of observed annual PM<sub>10</sub> concentrations.

**Key words** : CAMx, PM, Dust emission, ADAM2

---

\*Corresponding author.

Tel : +82-(0)31-467-0893, E-mail : koo@anyang.ac.kr

## 1. 서 론

동아시아 지역은 급격한 산업화 및 도시화로 인해 인간활동에 의한 오염물질 배출이 증가하고 있으며, 세계에서 가장 큰 인위적 오염원을 배출하는 중국이 위치해 있다(Zhang *et al.*, 2009). 우리나라는 중국과 인접하여 있고, 지리적 특성상 편서풍이 지배적일 경우 풍하 측에 위치해 있으므로 중국으로부터 배출된 오염물질이 우리나라에 이류되어 고농도 미세먼지가 나타난다(Koo *et al.*, 2015, 2012, 2008; Lee *et al.*, 2013, 2011a; Park *et al.*, 2013). 최근 2013년 1월 중국 베이징에는 지역 배출량 및 대기의 강한 안정상태로 인해 강한 연무가 발생하였으며 PM<sub>2.5</sub> 시간 최대 농도가 베이징 지역에 1000  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 이 나타났다(Huang *et al.*, 2014; Ji *et al.*, 2014; Wang *et al.*, 2014a, 2014b). 이 기간 동안 베이징 지역에 발생한 강한 연무는 풍하 지역에 위치한 우리나라 및 일본 지역에 이류되어 약 200  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ , 50  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  이상의 고농도로 발생하였다(Park *et al.*, 2013).

또한 아시아 지역은 인위적인 배출량 외에 황사 발원지(자연 오염원)인 고비, 내몽골, 황토고원 및 만주 지역이 위치해 있으며, 발원지에서 발생하는 황사는 동아시아 및 우리나라 지역에 영향을 미친다. Lee and Park (2005)은 황사 배출량 산정 모듈인 ADAM1 (Asian Dust Aerosol Model 1)를 활용하여 2002년 3월 21~22일 및 4월 7~9일 고농도 황사 사례일에 대해 한반도 지역에서 관측된 1500  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  이상 미세먼지 농도를 적절히 모사하였으며, Park *et al.* (2010)은 Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) data 자료에 기반한 reduction factor를 고려하여 ADAM1을 개선한 ADAM2 모델을 이용하여 동아시아 지역을 대상으로 2007년 봄과 겨울철 황사 사례일을 평가하였으며, 황사 발원지 및 한반도 지역에 황사에 의한 미세먼지 영향을 평가하였다.

따라서 미세먼지는 인위적인 오염원에 의한 1차 및 가스상 전구물질을 통해 생성되는 2차 에어로졸뿐만 아니라 자연적으로 배출된 황사에 의해 형성되므로, 장기간 동아시아 지역에 미세먼지를 모사하기 위해서는 인위적 및 자연적 배출원을 함께 고려하여 대기환

경을 평가하는 것이 바람직하다.

이러한 점을 고려하여 Choi and Fernando (2008)은 Westphal dust 모듈을 이용하고 MM5-CMAQ 모델링 시스템을 구축하여 미국 및 멕시코 경계 지역을 대상으로 1999년 황사 사례일을 평가하였으며, Wang *et al.* (2012)은 2가지의 online dust emissions schemes (the Zender and Westphal schemes)를 Community Multi-scale Air Quality (CMAQ) modeling system version 4.7에 포함시켜 WRF/CMAQ-dust 모델링 시스템을 구축하고 환태평양 지역을 대상으로 2001년 4월을 대하여 dust의 영향을 평가하였다. 또한 Han *et al.* (2012)은 Gillette and Passi (1998)에 기반한 경험식(Han *et al.*, 2004)을 이용하여 RAMS-CMAQ 모델링 시스템을 구축하고 동아시아 지역을 대상으로 3월 황사 사례일을 평가하였다. Park *et al.* (2013)은 동아시아 지역을 대상으로 ADAM2 Dust 모듈을 기반으로 WRF-CMAQ 모델링 시스템을 구축하였고, 동아시아 강한 연무 이벤트 기간이었던 2013년 1월을 대상으로 동아시아 및 한반도 지역에 미세먼지 농도를 평가하였다.

그러나 황사 및 인위적인 배출량을 고려한 대부분의 사전 연구들은 황사 사례일을 대상으로 짧은 기간 동안 평가가 진행되었기 때문에 장기간 화학수송모델을 활용하여 대기질 평가 시 황사모델을 적용할 것인지에 대한 제시가 미흡하다.

황사의 공식적인 용어는 기상청에서 2시간 동안 400  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  이상이 지속되었을 때를 정의하고 있다. 국내에서 미세먼지와 관련된 대기질 평가 시에는 고농도의 황사 사례뿐만 아니라 비산먼지 형태의 약한 황사도 미세먼지가 미치는 영향을 고려해야 하기 때문에 본 연구에서는 아시아 지역에서 발생하는 모든 비산먼지를 황사라는 용어로 통일하여 사용하였다.

따라서 본 연구에서는 2008년 전 기간을 대상으로 기상청 황사예보 모델로 활용되는 ADAM2 dust 모델을 적용하였으며, 대기질 모델링시스템은 WRF-CAMx 구축하여 동아시아 및 한반도 지역에 대기질 모사를 수행하였다. 대기질 평가는 중국 및 국내 지역의 측정 자료를 활용하여 동아시아 지역에 전체에 황사 배출량 적용 전후의 정합도를 분석하고 이에 따른 개선효과 및 그 영향에 대해 검토하고자 한다.

## 2. 연구 방법

### 2.1 황사 배출량 모듈

ADAM 모델은 WMO 3시간 자료와 통계적인 방법을 이용하여 황사먼지 발생 조건을 결정하는 초기 연구를 통해 2003년에 개발되었다(In and Park, 2003, 2002). 초기 연구를 기반으로 황사 발원지의 실제 관측 자료를 활용하고 황사 발생량 산정에 중요한 인자인 임계 마찰 속도를 산정하였으며, 또한 상대습도, 기온 등의 황사 발생 조건을 개선 및 구체화하였다. 또한, 보다 현실적인 황사 배출량을 산정하기 위하여 발원지의 토지피복유형을 재분배하였다(Lee and Park, 2005). 최근에 ADAM1보다 넓은 지역을 대상으로 황사 배출량 및 예보자료를 제공하기 위하여 기존 모델 영역인 20~60°N, 90~150°E에서 5~60°N, 70~150°E로 확대하였으며, 식생에 따른 먼지 저감 및 발생량을 산정하기 위하여 Spot/Vegetation NDVI와 WMO 자료를 이용하여 ADAM2를 개발하였다(Park *et al.*, 2010).

$$F_a = \sum_{i=1}^i (1 - f_i R_i) \times 10^{-14} \times u_*^4 \quad \text{if } (u_* \geq u_{*i})$$

여기서,  $F_a$ 는 지표면의 황사 배출량 Flux (g/cm<sup>2</sup>/sec),  $u_*$ 는 마찰속도(m/s),  $u_{*i}$ 는 월 및 토양 유형별 임계속도(m/s),  $f_i$ 는 NDVI 자료의 격자별 식물 유형별(i)에 따른 비율, 그리고  $R_i$ 는 격자 내 감쇄인자를 나타낸다. 임계속도 및 감쇄인자에 대한 값은 Park *et al.* (2010)에 자세히 설명되어져 있다.

본 연구에서는 위에서 설명된 ADAM2 황사 배출량 모듈을 적용하여 황사 배출량을 산정하였다.

### 2.2 인위적 배출량

한국을 제외한 동아시아 배출량 자료는 0.5°×0.5° Intercontinental Chemical Transport Experiment-Phase B (INTEX-B)자료를 활용하였다(Zhang *et al.*, 2009). Electricity Generation, Industry, Residential, Transportation의 대분류 카테고리에 SO<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub>, CO, non-methane volatile organic compounds (NMVOCs), PM<sub>10</sub>, PM<sub>2.5</sub>, black carbon aerosol (BC) 및 organic carbon aerosol (OC)의 총 8개의 연간 배출량을 적용하였으며, 암모니아 배출량은 The NASA Transport and Chemical

Evolution over the Pacific (TRACE-P) 2000 배출량을 사용하였다.

국내 배출량은 국립환경과학원에서 개발된 대기보전정책지원시스템(Clean Air Policy Support System: CAPSS)을 사용하였다(Lee *et al.*, 2011b). 국내 CAPSS 2008 배출량은 비산먼지와 생체소각 카테고리 배출량이 지원되지 않아, 본 연구에서는 Jang and Kim(2011)의 국내 지역 비산먼지 생체연소 배출량 조사 자료를 기존 국내 배출량에 보완하였다. Jang and Kim(2011)의 연구에서는 비산먼지 산정은 포장 및 비도로, 건설 및 농업활동 분야에서 산정하였으며, 생체소각은 농업잔재물 노천소각, 나무연소 및 고기구이로부터 배출량을 산정하였다.

### 2.3 지역규모 모델링

본 연구에서 화학수송모델은 미국 ENVIRON사가 개발한 Comprehensive Air Quality Model with Extensions (CAMx) version 6.0을 적용하였다(ENVIRON 2012). 기상모델은 Weather Research Forecast version 3.4.1 (WRF v3.4.1)을 사용하였고(Skamarock and Klemp, 2008; Borge *et al.*, 2008), 배출량 데이터는 Sparse Matrix Operator Kernel Emissions (SMOKE) version 2.7에 의해 처리하였다.

WRF의 모델링 영역은 아시아 지역으로(82°~149°E, 18°~53°N) 그림 1과 같다. 모델링 격자는 27×27 km<sup>2</sup>이고, 격자수는 177×147로 구성하였으며, 서쪽 모

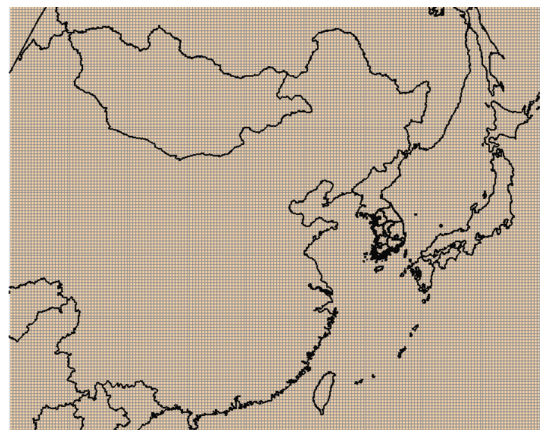


Fig. 1. The modeling domains to simulate the air quality in East Asia region.

델 경계면 근처에는 타클라마칸 사막이 위치해 있다. 연직 35층으로 입력되었으며, 모델 최상층 고도는 100 mb으로 설정하였다.

기상모델인 WRF의 주요 물리과정으로는 미세물리 과정은 WRF Single-Moent 6-class (WSM6) 모수화 방법, 장파, 단파 대기복사 과정은 Rapid Radiative Transfer Model (RRTM)과 Dudhia short radiation 모수화 방법, 행성경계층 모수화 방법으로는 Yonsei University (YSU), 그리고 적운 모수화 방법은 Kain-Fritsch (KF) 를 사용하였다. 또한 WRF 모델링에서 초기 및 경계조건은 National Centers for Environmental Prediction (NCEP)의 재분석자료를 사용하여 지역규모 모델링을 위한 기상입력자료를 작성하였으며, 기상장 모의능력을 향상시키기 위하여 WRF 영역 내에 Grid nudging을 수행하였고, 지역규모 모델링의 수치모의기간은 2008년 총 1년을 선정하였다.

화학수송모델은 기상모델인 WRF의 35층을 CAMx의 연직 층인 17개 층으로 내삽하고, CAMx의 첫 번째 층(35 m)을 WRF와 동일하게 입력하였다. 모델의 가스상 화학반응은 Carbon Bond-V (CBO5)을 입력하였고 (Yarwood *et al.*, 2005), 에어로졸 화학반응은 Coarse/Fine (CF)를 사용하였다. 또한, 이류과정에서 질량보전 방법은 Piecewise Parabolic Method (PPM) solver를 적

용하였다(표 1).

2.4 모델 평가를 위한 측정자료

중국에서는 중국 환경보호청 홈페이지 (<http://www.mep.gov.cn>)를 통해 API (Air Pollution Index) 지수를 이용한 각 지역별 매일의 대기오염 정보가 공개되고 있다. 중국 API 자료를 모델링 결과와 비교하여 평가하기 위해서 일별 API 지수를 일별 PM<sub>10</sub> 농도로 환산하였다(The China National Environmental Monitoring

Table 1. A summary of modeling option and emission data used in this study.

Model option	CAMx
Model version	Version 6.0
Horizontal resolution	27 km
Vertical layers	NZ = 17
Horizontal advection	PPM
Vertical advection	Implicit
Horizontal diffusion	K-theory
Vertical diffusion	Eddy
Gas-phase chemistry	CB6
Gas-phase chem. solver	EBI
Aerosol chemistry	CF/ISORROPIA1
Dry deposition	Wesely89
Emissions	2006 INTEX-B & 2008 CAPSS

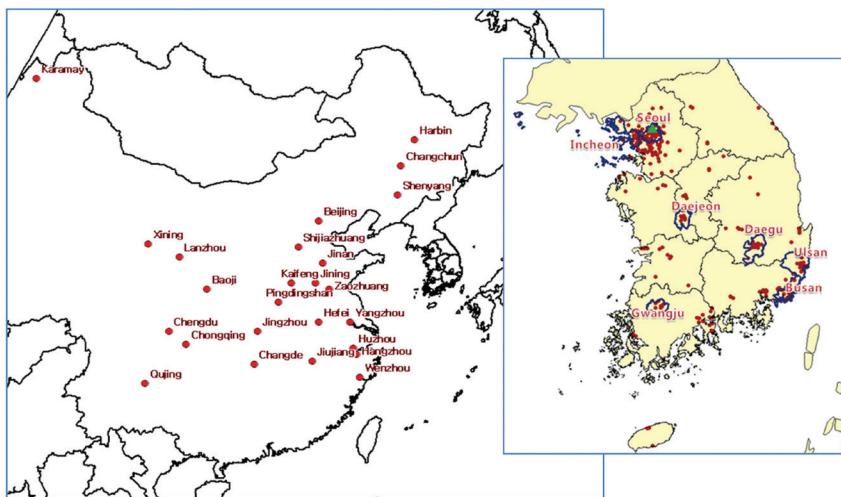


Fig. 2. Location of PM<sub>10</sub> observation sites of Air Pollution Index (API) in China and Air Quality Monitoring Stations (AAQMS) sites in Korea. Red circles in left map are API monitoring stations in China. Another red circles in right map are AAQMS and green triangle in right map is Seoul weather station in Korea.

Centre (2007)).

2008년 기준 중국 API 공개지점은 74지점을 확보하였으나 PM<sub>10</sub>이 주 오염물질이었던 기간이 연중 80% (292일) 이상인 지점만을 선별하여 26지점을 모델링 평가에 이용하였다. 또한, 국내 지역은 서울 27개, 부산 17개, 대구 11개, 인천 15개, 광주 7개, 대전 7개 및 울산 13개 지점으로 총 97개의 대기측정망 자료를 활용하였다(그림 2).

### 3. 연구 결과

#### 3.1 기상모델 결과 비교

대기질 모델의 검증에 앞서 기상모델 결과를 서울 정주기상대 측정값과 비교하여 정합도를 분석하였다. 비교 기상항목은 풍속, 기온, 습도이고, 통계분석을 위해 IOA (Index of Agreement), RMSE (Root Mean Square

Error), MBIAS (Mean Bias)를 사용하였다. 모델링 정합도 분석을 위한 통계분석에 관한 내용은 Willmott (1981), Willmott (1982) 및 EPA (2007)에 제시되어 있다.

시계열 및 통계분석 결과, 풍속, 온도 및 습도는 전체적으로 모델값이 측정값과 유사하게 각 기상변수들의 시간변화를 적절히 모사하고 있으며(그림 3), 온도와 습도는 각각 IOA가 0.99, 0.88, 풍속은 0.71로 기상모델의 정합도는 상당히 높은 것으로 판단된다(표 2).

#### 3.2 동아시아 지역 평가

황사 배출량이 아시아 대기질에 미치는 영향을 화학수송모델링을 이용하여 평가하였다. 황사 배출량을 고려한 대기질 평가를 위해 Harbin, Beijing, Hangzhou, Jingzhou 및 Chongqing 총 5지점의 중국 API 측정자료와 모델링 결과를 비교하였다.

그림 4는 중국 각 지점별 황사 배출량 보완 전후

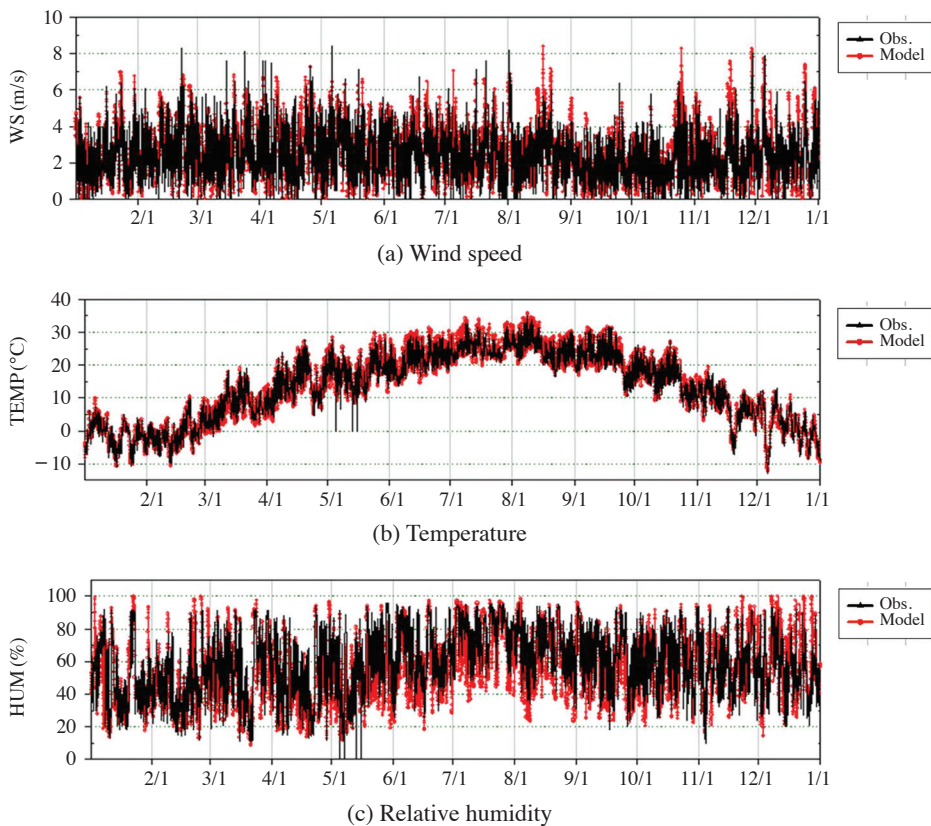


Fig. 3. Time series comparison of observed meteorological parameters with those predicted by the WRF in Seoul.

**Table 2. Performance statistics of the WRF for meteorological parameter in Seoul.**

	Mean Obs	Mean model	IOA	RMSE	MBIAS	NMB
Temp (°C)	16.13	16.29	0.99	1.45	0.16	1.01
WS (m/s)	2.50	2.66	0.71	1.51	0.16	6.28
RH (%)	59.44	55.32	0.88	13.20	-4.13	-6.94

**Table 3. Performance statistics of the CAMx for PM<sub>10</sub> in China.**

	Sites	Mean and Statistics			
		Obs. (µg/m <sup>3</sup> )	Model (µg/m <sup>3</sup> )	IOA	NMB (%)
w/o dust	Harbin	112.0	30.4	0.42	-72.9
	Beijing	143.0	82.8	0.46	-42.1
	Hangzhou	120.4	77.9	0.59	-35.3
	Jingzhou	98.5	44.9	0.48	-54.4
	Chongqing	118.3	85.4	0.65	-27.8
w/ dust	Harbin	112.0	50.6	0.50	-54.8
	Beijing	143.0	109.9	0.70	-23.2
	Hangzhou	120.4	84.2	0.66	-30.0
	Jingzhou	98.5	54.1	0.52	-45.1
	Chongqing	118.3	90.7	0.68	-23.4

PM<sub>10</sub> 모델링 결과를 측정값과 비교하여 시계열 그래프로 나타내었다. 중국 동쪽에 위치한 Beijing 및 Hangzhou 등은 봄철, 특히 5월에 황사 배출량 보완에 의한 개선효과가 뚜렷이 나타나나 황사 배출량 전후 모델값이 저평가되는 것을 알 수 있다. 내륙에 위치한 Jingzhou, Chongqing 등은 황사 배출량의 풍하측에 위치한 지점이 아니므로 황사 배출량 전후의 모델값이 크게 차이가 나타나지 않고 있다. 또한, 동북 지역에 위치한 Harbin는 2008년 동안 모델값이 크게 저평가되고 있으나 3~5월은 황사가 유입되어 과대모의하는 경향이 나타난다.

표 3은 중국 Harbin, Beijing, Hangzhou, Jingzhou, Chongqing 지점에 대한 황사 배출량 보완 전후 PM<sub>10</sub> 모델링 결과와 측정값에 대한 PM<sub>10</sub> 농도, Index Of Agreement (IOA), Normalized Mean Bias (NMB) 통계 분석 결과이다. 국내 지역에서와 마찬가지로 모델값이 모두 황사 배출량 보완 후에 정합도가 개선되고 측정값과의 편차가 감소하는 것으로 나타났으며, 과소 모의되는 PM<sub>10</sub> 농도가 황사 배출량 보완 후 대부분 보완되는 것을 알 수 있다.

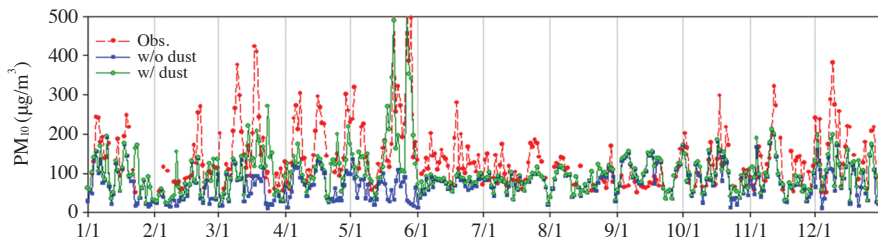
그림 5는 중국 API 26 지점에서의 모델값과 측정값의 NMB 값을 공간적으로 도시한 것이다. 황사 배출량

보완 후에 중국 지역에 PM<sub>10</sub> 농도가 대부분 지역에서 보완되는 것을 알 수 있으나 여전히 중국 동북부 및 서부 지역은 과소모의되고 있는 것을 알 수 있다. 이는 인위적인 배출량 또는 황사 배출량의 과소모의에 의한 영향으로 앞으로 동아시아 지역의 모델링 정합도를 향상시키기 위해 개선되어야 할 사항이다.

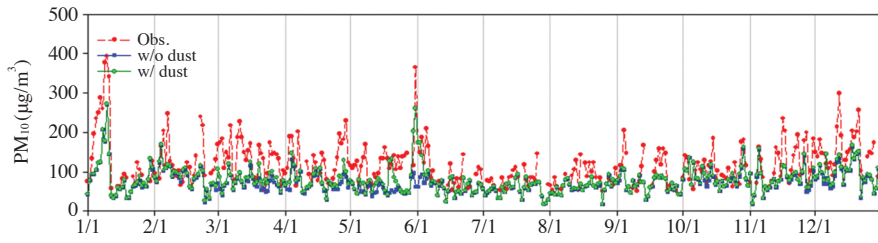
그림 6은 2008년 연평균 농도를 황사 배출량 보완 전, 황사 배출량 보완 후 그리고 황사 배출량 보완 전후의 차이로 구분하여 공간분포로 나타내었다. 중국 남부 및 내륙 지역은 황사 배출원의 풍하 지역에 위치하고 있지 않아 황사의 영향을 받지 않으며, 모델 경계 조건 부근의 타클라마칸 사막의 영향으로 중국 모델링 영역 서부에 50 µg/m<sup>3</sup> 이상의 차이가 나타난다. 또한 황사 배출원의 풍하측에 위치한 중국 동북 및 동부 지역에는 20~50 µg/m<sup>3</sup>의 황사 배출량에 의한 농도 영향이 나타났다. 마지막으로 국내 지역은 2008년에는 5~10 µg/m<sup>3</sup>의 황사 배출원에 의해 영향을 받았음을 알 수 있다.

### 3.3 국내 지역 평가

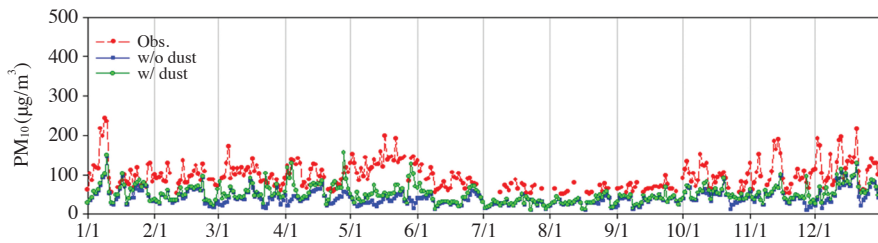
황사 배출량을 고려한 대기질 평가를 위해 국내 서울, 부산, 대구, 인천, 광주, 대전, 울산을 대상으로 2008



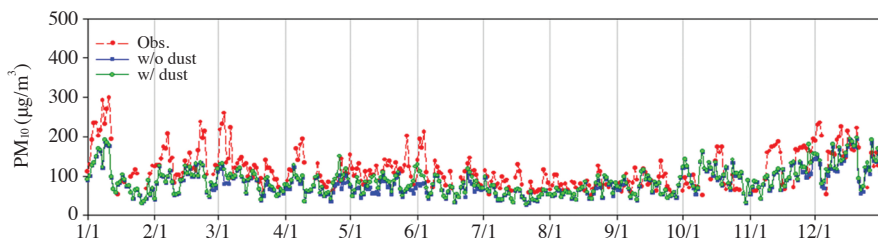
(a) Beijing



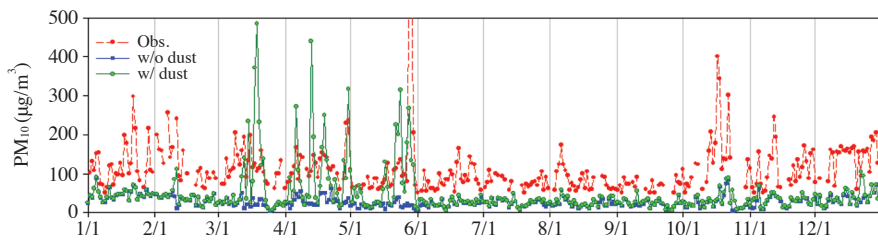
(b) Hangzhou



(c) Jingzhou

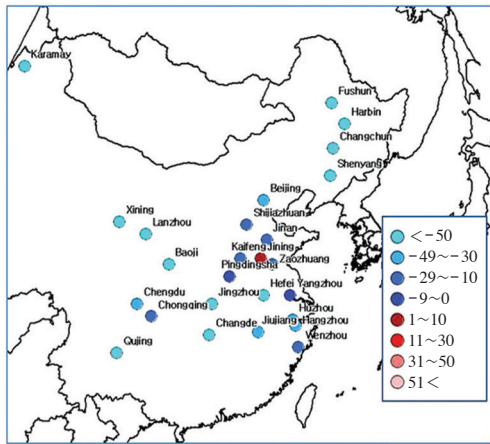


(d) Chongqing

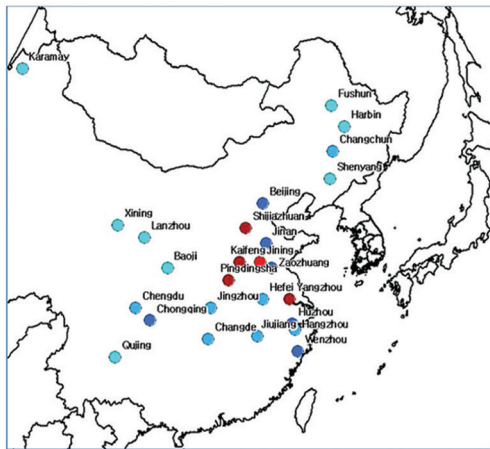


(e) Harbin

**Fig. 4.** Time series plots of measured and predicted daily PM<sub>10</sub> concentrations in (a) Beijing, (b) Hangzhou, (c) Jingzhou, (d) Chongqing and (e) Harbin.



(a) w/o dust

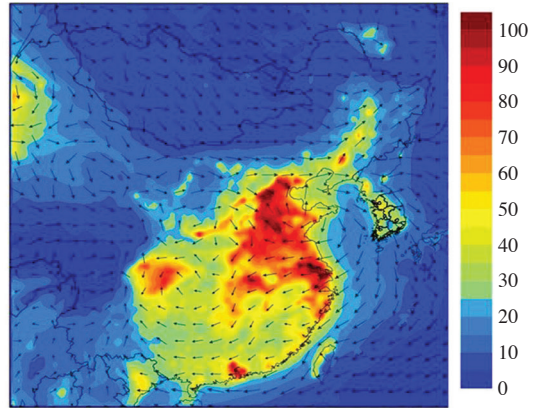


(b) w/ dust

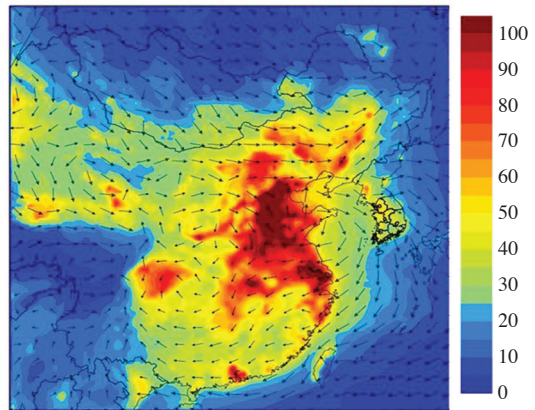
Fig. 5. A dot plot presents performance statistics value of NMB (%) (a) without dust and (b) with dust in China (26 stations).

년 전 기간에 대하여 도시대기측정망 측정자료와 화학수송모델결과의 일평균 농도를 통계 인자에 의한 분석을 하였으며, 서울 지역에 대해서는 시계열 및 상관도 분석을 나타내었다. 국내 기상청의 2008년 서울 지역 황사 관측일은 2월 12일, 3월 2~3일, 3월 2~3일 및 16일, 4월 3~4일, 5월 30~31일, 12월 2일 및 9~10일이었다(<http://www.kma.go.kr/>).

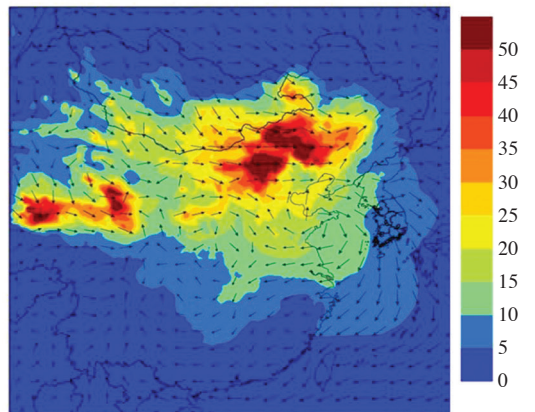
그림 7, 8은 서울 황사 배출량 보완 전후 PM<sub>10</sub> 모델링 결과를 측정값을 시계열 및 상관도를 나타낸 것이다. 서울 지역은 황사 관측일이 포함된 2월, 3월, 4월, 5



(a) w/o dust



(b) w/ dust



(c) w/ dust - w/o dust

Fig. 6. A spatial distribution of annual simulated PM<sub>10</sub> concentration (a) without dust and (b) with dust. (c) is difference of annual simulated PM<sub>10</sub> concentration in model domain (w/ dust - w/o dust).



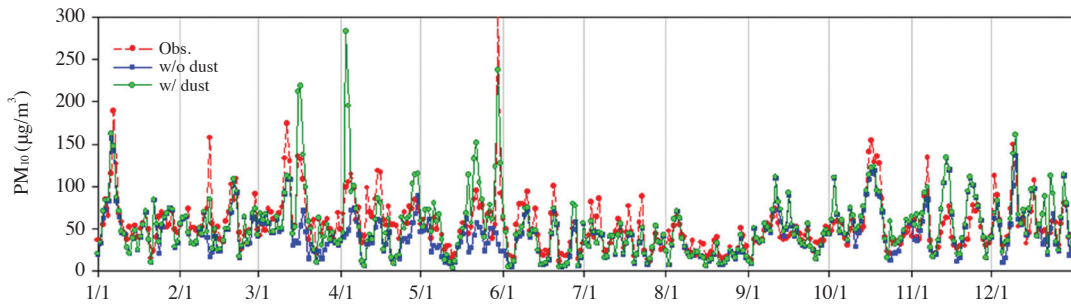


Fig. 7. Time series plots of measured and predicted daily PM<sub>10</sub> concentrations in Seoul.

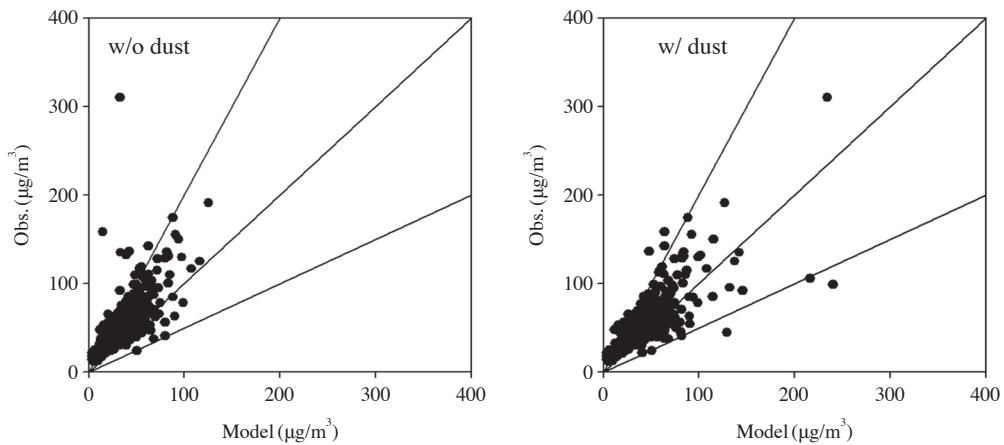


Fig. 8. Scatter plots of measured and predicted daily PM<sub>10</sub> concentrations in Seoul.

월, 12월 기간에 황사 배출량 보완 전 저평가되었던 PM<sub>10</sub> 농도가 보완 후 측정값과 모델값의 유사한 경향을 보이고 있다. 그러나 황사가 발생되었던 2월 12일, 5월 30~31일은 황사 배출량을 적용한 후에도 모델 값이 여전히 저평가되고 있으며, 3월 16일, 4월 3~4일은 황사 배출량의 과대평가로 인하여 모델 값이 과대평가하는 경향을 보이고 있다. 이러한 현상은 황사 배출량 산정 및 기상인자의 불확도에 따른 원인이라 판단되지만 황사 배출량 보완 전의 농도와 비교하였을 시 현재 대기환경을 적절히 모사하고 있는 것으로 판단된다.

그림 9는 국내 서울, 부산, 대구, 인천, 광주, 대전, 울산 지역에 대한 황사 배출량 보완 전후 PM<sub>10</sub> 모델링 결과와 측정값에 대한 PM<sub>10</sub> 농도, Index Of Agreement (IOA), Normalized Mean Bias (NMB) 통계분석 결과이다. 서울 지역 PM<sub>10</sub> 연평균 농도는 측정값이 55 µg/m<sup>3</sup>,

황사 배출량 적용 전이 44.4 µg/m<sup>3</sup>, 황사 배출량 적용 후가 54.2 µg/m<sup>3</sup>이었다. 서울 지역 IOA는 황사 배출량 적용 전이 0.75, 황사 배출량 적용 후가 0.86이었다. 서울 지역 NMB는 황사 배출량 적용 전이 -19.08%, 황사 배출량 적용 후가 -1.31%이었다. 대전 지역 PM<sub>10</sub> 농도는 측정값이 45 µg/m<sup>3</sup>, 황사 배출량 적용 전이 34.7 µg/m<sup>3</sup>, 황사 배출량 적용 후가 43.0 µg/m<sup>3</sup>이었다. 대전 지역 IOA는 황사 배출량 적용 전이 0.69, 황사 배출량 적용 후가 0.80이었다. 대전 지역 NMB는 황사 배출량 적용 전이 -23.6%, 황사 배출량 적용 후가 -5.2%이었다. 황사 배출량 보완 후에 정합도가 개선되고 측정값과의 편차가 감소하는 것으로 나타났다.

### 3.4 황사 사례일 평가

황사 배출량을 고려하여 장기간 대기질을 모사하

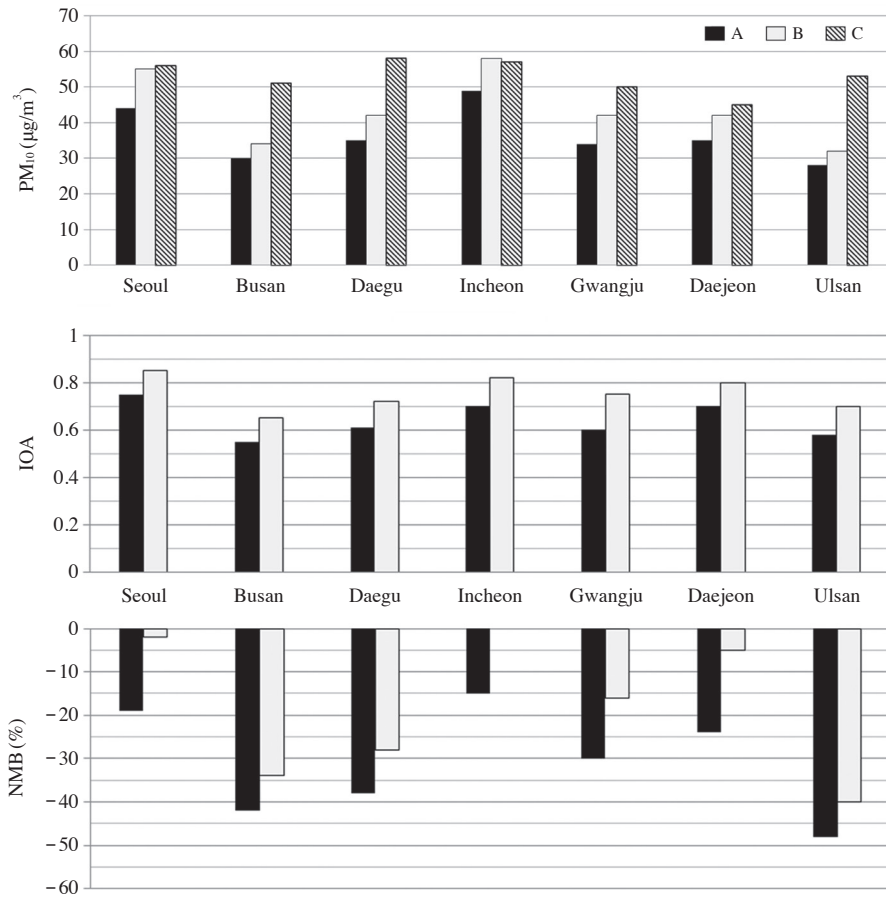


Fig. 9. PM<sub>10</sub> concentrations, IOA, NMB of daily PM<sub>10</sub> concentrations of major cities in Korea (A: w/o dust, B: w/ dust and C: Observation).

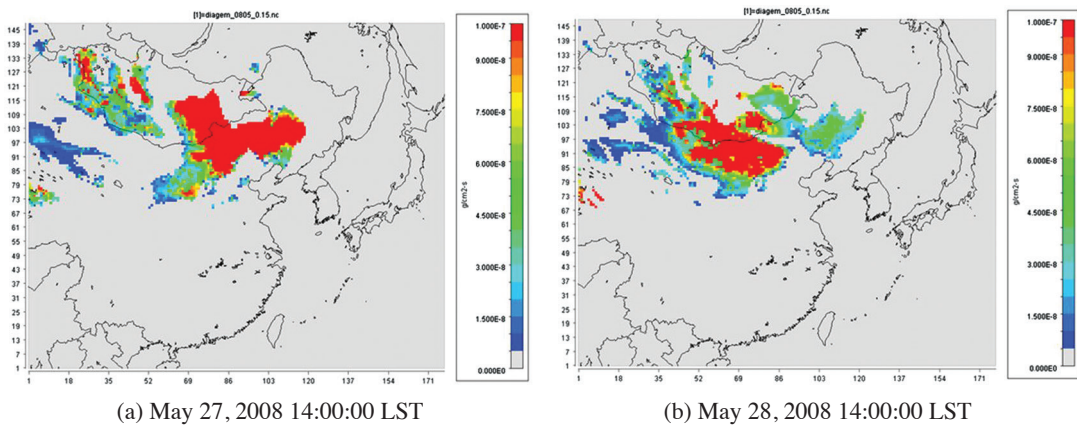


Fig. 10. Horizontal distribution of emission rate (g/cm<sup>2</sup>/s) of dust on May 27 14:00:00 LST and May 28 14:00:00 LST, 2008.

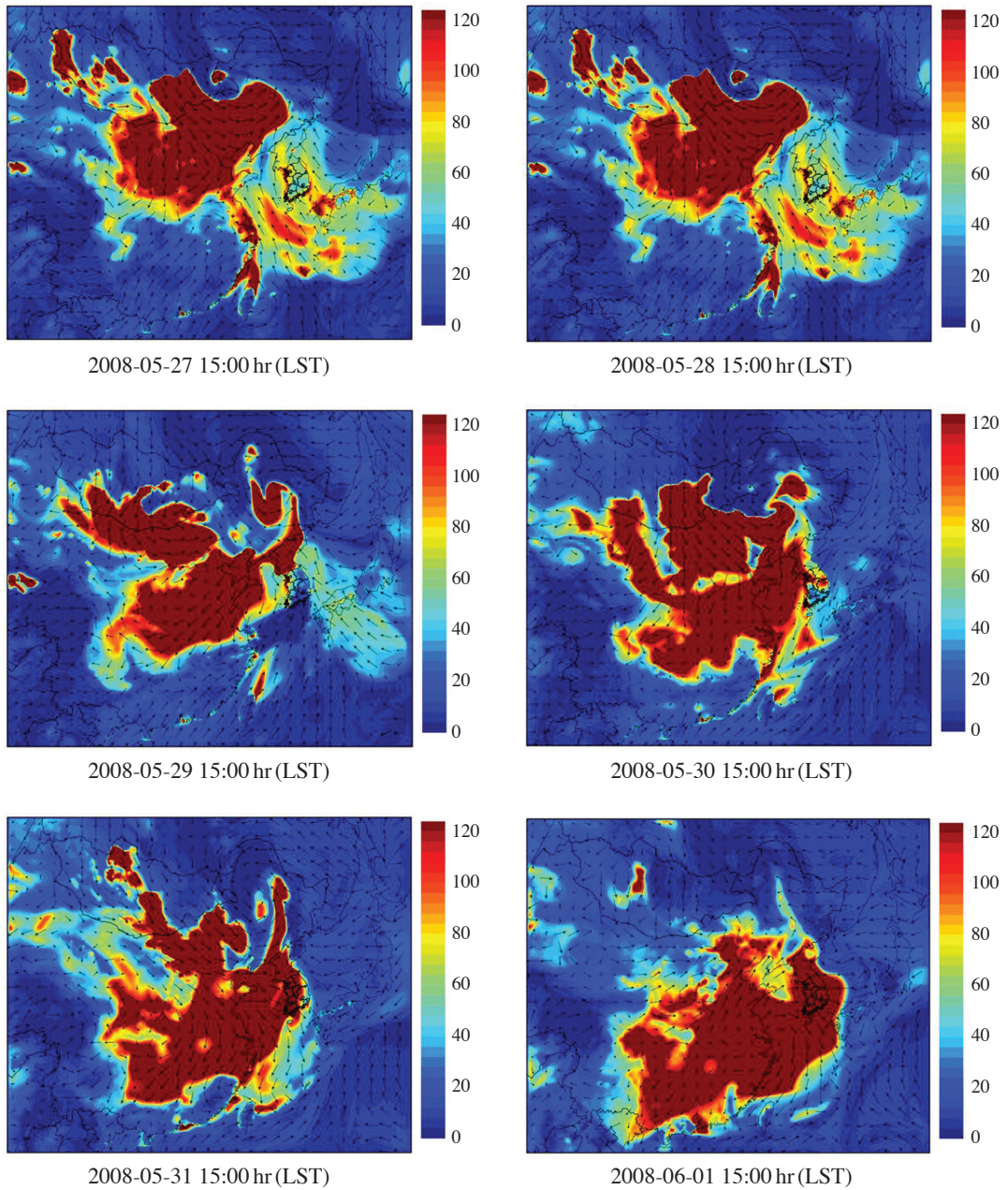


Fig. 11. Spatial distribution of simulated PM<sub>10</sub> concentration with dust for the period from 27 May to 01 June 2008 at 15:00 LST.

로써, 황사 및 비산먼지가 우리나라에 미치는 영향을 평가하고, 대기질 개선효과를 분석할 수 있었다. 본 장에서는 황사 사례일에 고농도 미세먼지 모사 능력을

분석하기 위하여, 기상청 황사보고서(National Institute of Meteorological Research (NIMR) (2009))의 황사 사례일인 2008년 5월 29일~31일(서울 지역 대상)을 선

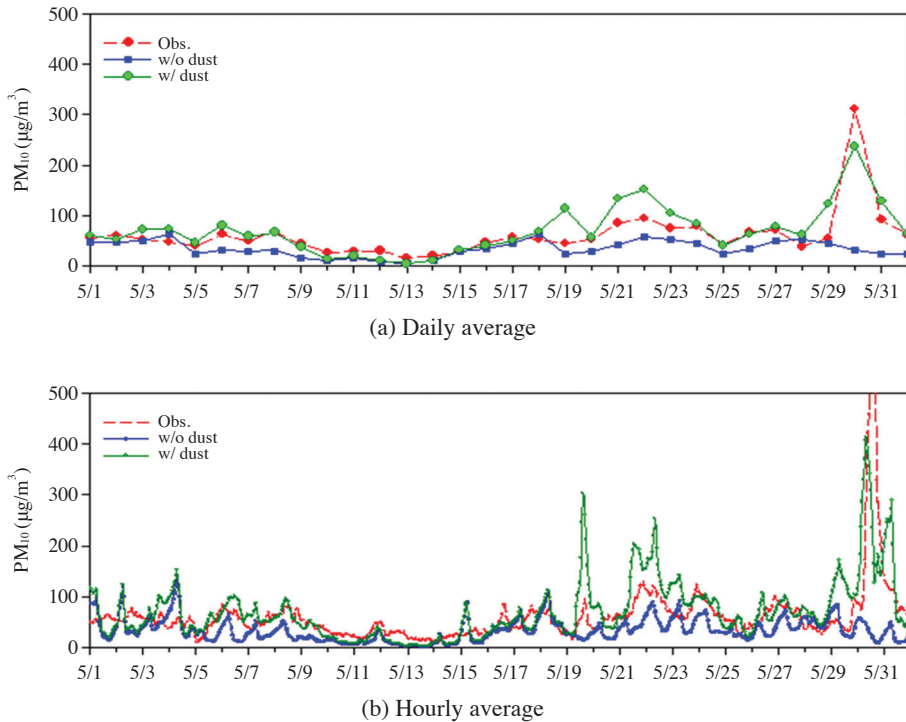


Fig. 12. Time series plots of measured and predicted daily and hourly PM<sub>10</sub> concentrations in Seoul.

정하였다. 서울 지역의 황사 지속시간은 59시간 25분이었으며, 고비에서 발원한 황사가 내몽골-만주-발해만을 통과하여 국내 중부 및 남부 지역에 짙은 황사가 발생하였다.

그림 10은 고농도 발생일인 2008년 5월 27일 14시, 28일 14시의 황사 배출량 공간분포를 나타낸 것으로 고비사막 인근에 황사가 발원되었으며, 이는 기상청 황사보고서(National Institute of Meteorological Research (NIMR) (2009))의 결과와 유사하게 나타났다.

그림 11은 황사 발생일인 2008년 5월 27일~6월 1일 동안에 PM<sub>10</sub> 농도 공간 분포를 나타낸 것으로 고비 지역에서 황사가 발생하여 북서풍에 의해 국내로 유입되어 고농도 PM<sub>10</sub> 농도가 발생하는 것을 잘 보여주고 있다.

그림 12는 서울 지역의 2008년 5월 동안 황사 배출량 전, 후의 모델 값 및 측정 농도와와의 PM<sub>10</sub> 24시간 및 1시간 평균농도 시계열을 나타내었다. 황사 배출량을 적용하였을 때 황사 관측일인 5월 29일~31일에 약 500 µg/m<sup>3</sup> 이상의 고농도 미세먼지 농도를 다소 저평

가하고 있지만, 황사발생에 따른 국내 유입의 시간 패턴 및 고농도를 적절히 모사하고 있다.

#### 4. 결 론

본 연구에서는 동아시아 지역의 황사 배출량을 산정하고 WRF-CAMx 화학수송 모델을 활용하여 2008년을 대상으로 전 기간 동안에 황사 배출원에 의한 국내 및 동아시아 지역의 영향을 분석하였다.

황사 배출량을 적용한 경우 국내 서울 지역의 황사 관측일인 2월, 3월, 4월, 5월, 12월에 저평가되던 PM<sub>10</sub> 농도가 개선되고 측정값과 모델값의 유의성이 높게 나타나는 것을 알 수 있었다. 황사 배출량 보완 후 모델링 결과는 배출량 보완 전의 결과보다 정합도가 개선되고 측정값과의 편차가 감소하는 것으로 나타났다.

아시아 대기질에 미치는 영향을 분석하기 위하여 Harbin, Beijing, Hangzhou, Jingzhou, Chongqing 등 5 지점의 중국 API 측정자료와 모델링 결과를 비교하였

다. 중국 동부에 위치한 Beijing, Hangzhou 등은 봄철, 특히 5월에 황사에 의해 큰 영향을 받으며, 황사 배출량 보완에 의한 PM<sub>10</sub> 농도 개선효과가 나타났으나 중국 내륙에 위치한 Jingzhou, Chongqing 등은 황사 배출량의 영향이 적었다. 또한, 만주 지역에 위치한 Harbin에서는 보완 전후의 모델값이 측정값에 비해 크게 저평가되고 있었다.

2008년 국내 황사 배출량이 가장 크게 나타난 5월 29일~31일을 대상으로 황사 발생 사례일을 분석하였다. 고비 지역에서 황사가 발생하여 북서풍에 의해 국내로 유입되어 고농도 PM<sub>10</sub> 농도가 발생하는 것을 잘 보여주고 있다.

본 연구에서는 국내 및 동아시아 지역에서 고려되지 않은 황사와 비산먼지 배출량을 대기질 모델에 적용하여 국내 및 동아시아 지역의 대기질을 장기간 평가하였으며, 저평가되던 미세먼지 농도가 보완되었으며, 정합도가 향상되었다. 그러나 기존 대기질 모델의 과소평가 원인은 고려되지 않은 황사 및 비산먼지 배출량 뿐만 아니라 동아시아 지역 인위적 배출량의 저평가 또한 중요한 요인 중 하나이기 때문에 향후 이에 대한 연구가 필요하다. 또한 황사 배출량은 경험식을 통해 자연적으로 배출되는 황사 발생량을 산정하기 때문에 황사가 발생하지 않았으나 황사가 발생하여 한반도 지역에 영향을 미치는 경우 또는 국내 지역에 황사가 나타났으나 황사가 배출되지 않는 경우 등 황사 배출량을 산정하는 데 불확실성을 내재하고 있다. 따라서 정확한 황사 영향을 파악하기 위하여 황사 배출량 산정에 정합도를 향상시킬 필요가 있다.

## 감사의 글

본 연구는 환경부 “차세대 핵심환경기술개발사업”으로 지원받은 과제임.

## References

- Borge, R., J. Lopez, J. Lumbreras, A. Narros, and E. Rodriguez (2010) Influence of boundary conditions on CMAQ simulations over the Iberian Peninsula, *Atmos. Environ.*, 44(23), 2681-2695.
- Choi, Y.J. and H.J.S. Fernando (2008) Implementation of a windblown dust parameterization into MODELS-3/CMAQ: Application to episodic PM events in the US/Mexico border, *Atmos. Environ.* 42(24), 6039-6046.
- ENVIRON (2012) User's guide to the Comprehensive Air Quality Model with Extensions (CAMx). Version 6.0. Available at: <http://www.camx.com>
- Gillette, D.A. and R. Passi (1988) Modeling dust emission caused by wind erosion, *J. Geophys. Res.*, 93(D11), 14233-14242, doi:10.1029/JD093iD11p14233.
- Han, X., C. Ge, J. Tao, M. Zhang, and R. Zhang (2012) Air Quality Modeling for a Strong Dust Event in East Asia in March 2010, *Aerosol Air Qual. Res.*, 12(4), 615-628, doi:10.4209/aaqr.2011.11.0191.
- Han, Z., H. Ueda, K. Matsuda, R. Zhang, K. Argo, Y. Kanai, and H. Hasome (2004) Model study on particle size segregation and deposition during Asian dust events in March 2002, *J. Geophys. Res.*, 109(D19), doi: 10.1029/2004JD004920.
- Huang, K., G. Zhuang, Q. Wang, J.S. Fu, Y. Lin, T. Liu, L. Han, and C. Deng (2014) Extreme haze pollution in Beijing during January 2013: chemical characteristics formation mechanism and role of fog processing, *Atmos. Chem. Phys. Discuss.*, 14, 7517-7556.
- In, H.J. and S.U. Park (2002) A simulation of long-range transport of Yellow Sand observed in April 1998 in Korea, *Atmos. Environ.*, 36(26), 4173-4187.
- In, H.J. and S.U. Park (2003) The soil particle size-dependent emission parameterization for an Asian dust (Yellow Sand) observed in Korea on April 2002, *Atmos. Environ.*, 37(33), 4625-4636.
- Jang, Y.G. and J. Kim (2011) Developing the PM emission inventories in Korea, *Air Quality Modeling in Asia*, 2011, 24-25.
- Ji, D., L. Liang, Y. Wang, J. Zhang, M. Cheng, Y. Sun, Z. Liu, L. Wang, G. Tang, B. Hu, N. Chao, and T. Wen (2014) The heaviest particulate air-pollution episodes occurred in northern China in January, 2013: Insights gained from observation, *Atmos. Environ.*, 92, 546-556.
- Koo, Y.S., S.T. Kim, H.Y. Yun, J.S. Han, J.Y. Lee, K.H. Kim, and E.C. Jeon (2008) The simulation of aerosol transport over East Asia region, *Atmos. Res.*, 90(2-4), 264-271.
- Koo, Y.S., S.T. Kim, J.S. Cho, and Y.K. Jang (2012) Performance evaluation of the updated air quality forecasting system for Seoul predicting PM<sub>10</sub>, *Atmos.*

- Environ., 58, 56-69.
- Koo, Y.S., D.R. Choi, H.Y. Kwon, J.Y. Jang, and J.S. Han (2015) Improvement of PM<sub>10</sub> prediction in East Asia using inverse modeling, *Atmos. Environ.*, 106, 318-328.
- Lee, D., Y. Lee, K. Jang, C. Yoo, K. Kang, J. Lee, S. Jung, J. Park, S. Lee, J. Han, J. Hong, and S. Lee (2011b) Korean National Emissions Inventory System and 2007 Air Pollutant Emissions, *Asian Journal of Atmos. Environ.*, 5(4), 278-291.
- Lee, E.H. and S.U. Park (2005) A numerical simulation of an Asian dust (Hwangsa) event observed in Korea on March 10-12, 2004 using the modified ADAM model, *Adv. Geosci.*, 5, 67-76.
- Lee, S., C.H. Ho, and Y.S. Choi (2011a) High-PM<sub>10</sub> concentration episodes in Seoul, Korea: background sources and related meteorological conditions. *Atmos. Environ.*, 45(39), 7240-7247. <http://dx.doi.org/10.1016/j.atmosenv.2011.08.071>
- Lee, S., C.H. Ho, Y.G. Lee, H.J. Choi, and C.K. Song (2013) Influence of transboundary air pollutants from China on the high PM<sub>10</sub> episode in Seoul, Korea for the period October 16-20, 2008, *Atmos. Environ.*, 77, 430-439. <http://dx.doi.org/10.1016/j.atmosenv.2013.05.006>
- National Institute of Meteorological Research (2009) Report of Hwangsa on 2008.
- Park, S.U., A. Choe, E.H. Lee, M.S. Park, and X. Song (2010) The Asian Dust Aerosol Model2 (ADAM2) with the use of Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) obtained from the Spot4/vegetation data, *Theor. Appl. Climatol.*, 101(1), 191-208, doi:10.1007/s00704-009-0244-4.
- Park, S.U., J.H. Cho, and M.S. Park (2013) Analyses of high aerosol concentration events (dense haze/mist) occurred in East Asia during 10-16 January 2013 using the data simulated by the Aerosol Modeling System, *Int. J. Chem.*, 2(3), 10-26.
- Skamarock, W.C. and J.B. Klemp (2008) A time-split non-hydrostatic atmospheric model for weather research and forecasting applications, *J. Comput. Phys.*, 227, 3465-3485.
- The China National Environmental Monitoring Centre (2007) Technological Rules Concerned "Ambient Air Quality Daily Report".
- U.S. Environmental Protection Agency (2007) Guidance on the Use of Models and Other Analyses for Demonstrating Attainment of Air Quality Goals for Ozone, PM<sub>2.5</sub>, and Regional Haze, Office of Air Quality Planning and Standards, Air Quality Analysis Division, Air Quality Modeling Group, Research Triangle Park, North Carolina.
- Wang, H., J. An, L. Shen, B. Zhu, C. Pan, L. Zirui, X. Liu, Q. Duan, X. Liu, and Y. Wang (2014b) Mechanism for the formation and microphysical characteristics of submicron aerosol during heavy haze pollution episode in the Yangtze River Delta, China, *Sci. Total Environ.*, 490, 501-508.
- Wang, K., Y. Zhang, A. Nenes, and C. Fountoukis (2012) Implementation of dust emission and chemistry into the Community Multiscale Air Quality modeling system and initial application to an Asian dust storm episode, *Atmos. Chem. Phys.*, 12, 10209-10237.
- Wang, Y., L. Yao, L. Wang, Z. Liu, D. Ji, G. Tnag, J. Zhang, Y. Sun, H. Bo, and J. Xin (2014a) Mechanism for the formation of the January 2013 heavy haze pollution episode over central and eastern China, *Science China, Earth Sciences*, 57(1), 14-25.
- Willmott, C.J. (1981) On the validation of models. *Phys. Geogr.*, 2, 184-194.
- Willmott, C.J. (1982) Some comments on the evaluation of model performance. *Bull. Amer. Meteorol. Soc.*, 63(11), 1309-1313.
- Yarwood, G., S. Rao, M. Yocke, and G. Whitten (2005) Updates to the carbon bond chemical mechanism: CB05. Final report to the U.S. EPA, RT-0400675.
- Zhang, Q., D.G. Streets, G.R. Carmichael, K.B. He, H. Huo, A. Kannari, Z. Klimont, I.S. Park, S. Reddys, J.S. Fu, D. Chem, L. Duan, Y. Lei, L.T. Wang, and Z.L. Yao (2009) Asian emission in 2006 for the NASA INTEX-B mission, *Atmos. Chem. Phys.*, 9, 5131-5153.