Journal of Korean Society for Atmospheric Environment
Vol. 34, No. 4, August 2018, pp. 517-533
https://doi.org/10.5572/KOSAE.2018.34.4.517
p-ISSN 1598-7132, e-ISSN 2383-5346

논 문

동남지역 주요 배출지역의 $PM_{2.5}$ 기여도 분석

$PM_{2.5}$ Source Apportionment Analysis to Investigate Contributions of the Major Source Areas in the Southeastern Region of South Korea

주혜지, 배창한, 김병욱[1], 김현철[2),3)], 유 철[4)], 김순태*
아주대학교 환경공학과, [1)]미국조지아주환경청
[2)]미국국립해양대기청, [3)]메릴랜드대학 기후위성 연구소
[4)]국립환경과학원 대기환경연구과

접수일 2018년 3월 2일
수정일 2018년 6월 21일
채택일 2018년 7월 16일

Received 2 March 2018
Revised 21 June 2018
Accepted 16 July 2018

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

Hyeji Ju, Changhan Bae, Byeong-Uk Kim[1)], Hyun Cheol Kim[2),3)], Chul Yoo[4)], Soontae Kim*
Department of Environmental and Safety Engineering, Ajou University
[1)]Georgia Environmental Protection Division
[2)]Air Resources Laboratory, National Oceanic and Atmospheric Administration
[3)]Cooperative Institute for Climate and Satellites, University of Maryland
[4)]Air Quality Research Division, National Institute of Environmental Research

Abstract We utilize the CAMx (Comprehensive Air Quality Model with eXtensions) system and the PSAT (Particulate Source Apportionment Technology) diagnostic tool to determine the $PM_{2.5}$ concentration and to perform its source apportionment in the southeastern region of South Korea. For a year-long simulation, eight local authorities in the region such as Pohang, Daegu, Gyeongju, Ulsan, Busan-Gimhae, Gosung-Changwon, Hadong, and all remaining areas in Gyeongsangnam-do, are selected as source areas based on the emission rates of NO_x, SO_x, VOC, and primary PM in CAPSS (Clean Air Policy Support System) 2013 emissions inventory. The CAMx-PSAT simulation shows that Pohang has the highest $PM_{2.5}$ self-contribution rate (25%), followed by Hadong (15%) and Busan-Gimhae (14%). With the exception of Pohang, which has intense fugitive dust emissions, other authorities are strongly affected by emissions from their neighboring areas. This may be measured as much as 1 to 2 times higher than that of the self-contribution rate. Based on these estimations, we conclude that the efficiency of emission reduction measures to mitigate $PM_{2.5}$ concentrations in the southeastern region of South Korea can be maximized when the efforts of local or regional emission controls are combined with those from neighboring regions. A comprehensive control policy planning based on the collaboration between neighboring jurisdictional boundaries is required.

Key words: $PM_{2.5}$, CAMx, PSAT, Self-contribution, Neighboring contribution, Air quality control region

1. 서 론

최근 고농도 미세먼지(Particulate Matter, PM) 사례가 빈번해지면서 PM_{10} (직경이 10 μm 이하인 PM) 뿐만 아니라 위해성이 높은 $PM_{2.5}$ (직경이 2.5 μm 이하인 PM)에 대한 관심이 급격히 높아지고 있다(Lee *et al.*, 2017; Leem *et al.*, 1998). 서울을 비롯한 수도권의 경우 대기질 개선 방안으로 수도권 대기환경관리 기본계획을 시행 중에 있으며, 다른 지자체에서도 실천계획과 같이 대기질 개선을 위한 배출량 저감대책

을 마련하고 있다(Kim *et al.*, 2017b; SMA, 2017; MOE, 2016). 국내 동남지역에 위치한 부산, 울산, 대구 및 경상남도의 경우(이하 '동남지역') 산업단지 및 발전시설뿐만 아니라 주거시설 또한 밀집해 있어, 이 지역 대기질에 대한 선행 연구들이 진행되어왔다. Jeon *et al.* (2014)은 2010년부터 2012년까지 3년간 부산의 봄철 PM_{10}과 $PM_{2.5}$ 질량 농도와 화학조성을 분석하였으며, 해당기간 동안 $PM_{2.5}$ 농도 중 금속 성분과 이온 성분의 구성비는 각각 14.2%, 43.1%로 보고하였다. Oh *et al.* (2016)은 울산 산업단지와 도시지역을 중심으로 고농도 O_3와 PM_{10}의 관리 필요성을 언급하였다. 또한 Jung *et al.* (2012)은 포항지역 PM_{10} 농도와 성분 측정을 통해 2차 생성되는 황산염의 분율이 높은 것으로 보고하였다.

$PM_{2.5}$는 대부분 대기 중에서 생성되고, 비선형적인 배출량-농도 관계(Bae *et al.*, 2017b; Kim *et al.*, 2017b; Zhang *et al.*, 2012; Dunker *et al.*, 2002)와 대기 중 체류시간을 고려할 때 장거리 이동도 가능하다(Bae *et al.*, 2017a; Ju *et al.*, 2017; Kim *et al.*, 2017d). 따라서, 국내 전 국토와 기초 지자체의 면적을 감안하면 국외 영향뿐만 아니라 인접한 지자체 간의 상호 영향 가능성도 매우 높다(Kim *et al.*, 2017e). 이러한 점을 고려하면 대기질 개선정책 마련 시, 자체 배출량에 대한 자체 기여도(이하 '자체 기여도') 분석과 함께, 인접한 지자체가 서로 주고받는 기여도 분석 역시 중요하다. 이와 관련된 연구로 Kim *et al.* (2017c)은 대기질 모의를 통해 수도권 지역의 지자체별 배출량에 대한 자체 기여도와 주변지역에 대한 상호 기여도를 분석하였으며, 국내 $PM_{2.5}$ 관리를 위한 관리권역 확대의 필요성을 논의하였다.

본 연구에서는 CAMx (Comprehensive Air quality Model with eXtensions) 모델의 PSAT (Particulate Source Apportionment Technology; Dunker *et al.*, 2002) 방법(이하 'CAMx-PSAT')을 이용하여 동남지역 주요 지자체의 $PM_{2.5}$ 농도에 대한 정량적인 자체 기여도와 상호 기여도를 분석하였다. 이를 통해 이 지역에서 $PM_{2.5}$ 농도에 대한 광역적인 관리 방식이 얼마나 효율적인지를 정량적으로 살펴보고자 하였다. 본 연구는 향후 동남지역에서의 $PM_{2.5}$ 등 대기질 개선대책 마련 시 필요한 상세 대기질 모의 분석에 앞서 개념적 모델링(Conceptual modeling) 결과 제시에 목적을 두었다.

2. 연구 방법

2.1 대기질 모의

모의기간은 2014년 1월부터 12월까지 1년으로 설정하고 초기 조건에 의한 영향을 최소화하고자 2013년 12월 22일부터 31일까지 10일을 pre-run 기간으로 설정하였다. 모의영역은 그림 1과 같이 한반도 전역

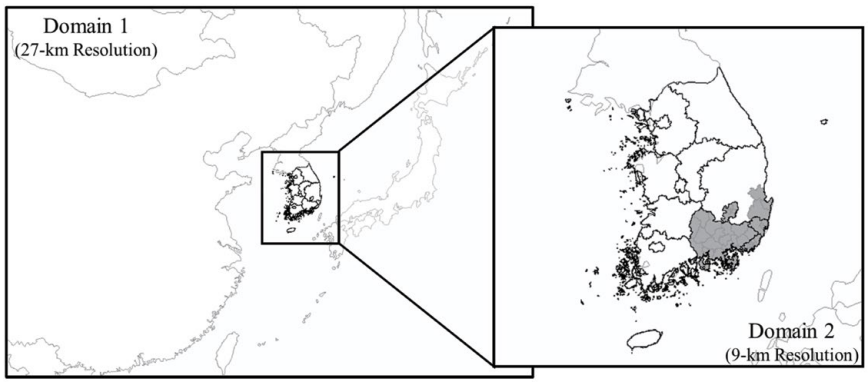

Fig. 1. Geographical coverages for CAMx 27-km and 9-km domains.

Table 1. Model physical option configurations for WRF and CAMx simulations.

WRF		CAMx	
Version	3.4.1	Version	6.1
Micro physics	WSM 6-class (Hong *et al.*, 2004)	Horizontal advection	PPM (Colella and Woodward, 1984)
Cumulus scheme	Kain-Fritsch (Kain, 2014)	Gas-phase chemical mechanism	SAPRC99 (Carter, 2016)
Long wave radiation	RRTM (Mlawer *et al.*, 1997)	Aerosol chemistry	RADM-AQ (Chang *et al.*, 1987) ISORROPIA (Nenes *et al.*, 1998) SOAP (Strader *et al.*, 1999)
Short wave	Goddard (Chou and Suarez, 1994)	Minimum vertical diffusivity	1.0 m^2/s
PBL scheme	YSU (Hong *et al.*, 2006)	PBL scheme	YSU (Hong *et al.*, 2006)
LSM scheme	NOAH Land (Chen and Dudhia, 2001)	Wet deposition	Scavenging model

에 대한 9-km 수평해상도로 모의를 수행하였으며, 27-km 수평해상도를 이용한 대기질 모의를 이용해 경계조건을 생성하였다.

대기질 모의를 위한 기상 입력자료는 미국해양대기청(National Oceanic and Atmospheric Administration)에서 제공하는 재분석 자료인 NCEP-FNL (National Centers for Environmental Prediction-Final)을 초기장으로 하여, 기상 모델인 WRF (Weather Research and Forecast; Skamarock *et al.*, 2008) version 3.4.1을 이용하였다. 모델은 50 mb까지 20층으로 구분하였으며, 최하층의 높이는 약 32 m 정도이다. 생산된 기상자료는 WRF2CAMx를 통해 수평적 공간보간하여 CAMx 입력자료 형태로 전환하였다.

배출량은 국내와 국외로 나누어, 국립환경과학원의 CAPSS (Clean Air Policy Supporting System) 2013과, CREATE (Comprehensive Regional Emissions inventory for Atmospheric Transport Experiments) 2010을 이용하였다. 이를 바탕으로 SMOKE (Sparse Matrix Operation Kernel Emission; Benjey *et al.*, 2001)를 이용해 시공간적으로 할당하였다. 자연 배출량 자료는 MEGAN (Model of Emissions of Gases and Aerosols from Nature; Guenther *et al.*, 2006) version 2.1을 이용하였으며, 인위적 배출량 입력자료와 병합하여 대기질 모의를 위한 배출량 입력자료로 활용하였다. 기본적인 대기질 모의는 CAMx 모델을 이용하였으며, 모델에 대한 자세한 정보는 표 1에 제시하였다.

2.2 기여도 분석

대기질 모의를 이용한 기여도 분석 방법은 크게 민감도를 이용하는 방법(sensitivity)과 배출원 표식 방법(tagging)으로 나눌 수 있다(Kim, 2011). 민감도를 이용한 방법의 대표적인 예로는 BFM (Brute Force Method)을 들 수 있다. BFM은 변화된 배출량에 따른 오염물질의 농도 변화, 즉 민감도를 산정하고, 이를 바탕으로 대상 배출원이 존재하지 않을 경우를 가정하여 ZOC (Zero-Out Contribution)을 산정한다(Kim *et al.*, 2017c). BFM의 경우 쉽게 적용 가능하나, 배출량과 농도의 비선형성을 고려하기 어려우며, 배출량 변화 정도에 따라 산정되는 기여도 값이 달라질 수 있다(Kim *et al.*, 2017b; ENVIRON, 2014). 또한, 분석하고자 하는 배출지역, 물질 등에 따라 반복적인 수행이 필요하다(Kim *et al.*, 2017b). 배출원 표식을 이용하여 기여도를 산정하는 방법의 대표적인 예로는 CAMx 모델의 분석 도구인 PSAT이 있다. PSAT은 분석 대상 오염원의 배출량을 추적하는 방법으로 2차 생성 등에 의한 기여도를 해당 배출량에 분배해주는 방법이다(EPA, 2011). 모사 시 배출물질의 물리적, 화

학적 변화를 모의하여 생성물질의 농도에 대한 배출물질의 기여도로 추적할 수 있으며, 반응 이전 물질로 표식 한 후 추적하기 때문에 2차 오염물질을 고려할 수 있다(Yarwood *et al.*, 2007). 또한, 격자별 PM 모의 농도에 대해 배출지역 또는 배출원별 기여도를 정량적으로 산정할 수 있다(Kim *et al.*, 2017a; Ramboll-Environ, 2016; Wagstrom *et al.*, 2008). Kim *et al.* (2017a)은 CAMx-PSAT을 이용하여 수도권의 미세먼지에 대한 중국과 국내 배출지역의 기여도를 분석하였으며, 베이징 근교와 국내의 기여도가 수도권의 미세먼지 농도에 가장 많이 기인한 것을 확인하였다.

본 연구에서는 CAMx-PSAT을 이용하여 동남지역의 배출지역별 기여도뿐 아니라, 배출 오염원별(점, 선, 면) 기여도까지 세부적으로 분석하였다. 대상지역은 포항(Pohang), 대구(Daegu), 경주(Gyeongju), 울산(Ulsan), 부산-김해(Busan-Gimhae), 고성-창원(Goseong-Changwon), 하동(Hadong)과 이를 제외한 경상남도 내 다른 지자체들(Rest of Gyeongsangnam-do; 이하 'RGSND'), 동남지역을 제외한 9-km 모의영역 내의 다른 지역(이하 'Other-domain')으로, 총 9개의 배출지역을 설정하였다(그림 2). 해당 지역을 배출지역으로 선택한 이유는 다음 절에 보다 자세히 기술하였다. 선택된 배출지역의 경우 대부분 인구가 밀집해 있어 이들 지역을 수용지역(Receptor)으로 활용하였다.

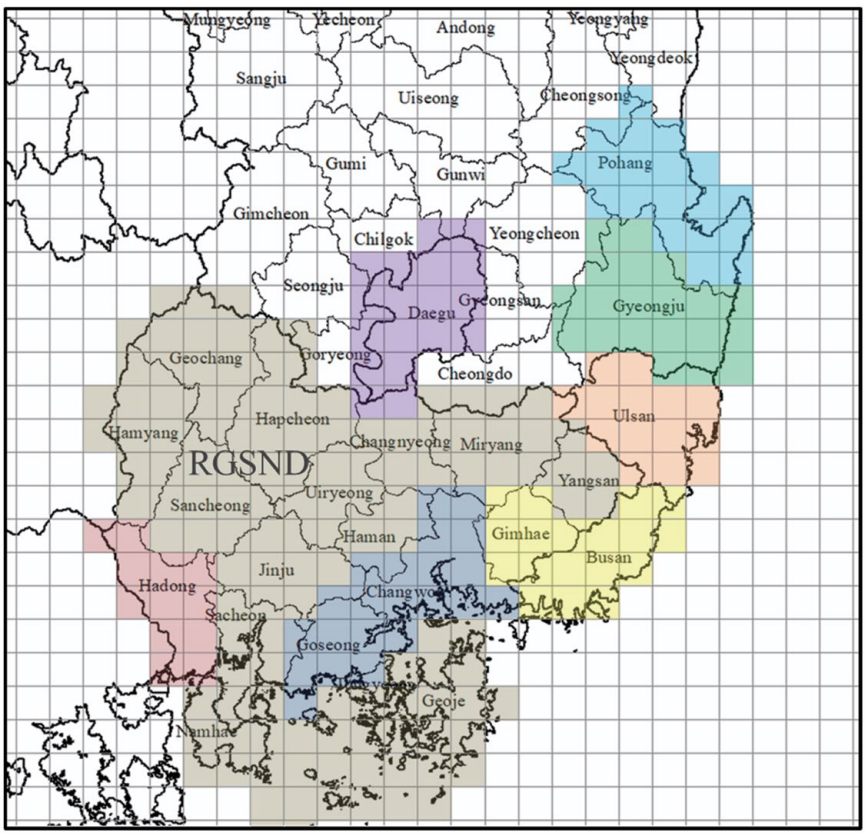

Fig. 2. CAMx-PSAT source regions defined for the study; Pohang, Daegu, Gyeongju, Ulsan, Busan-Gimhae, Goseong-Changwon, Hadong, and rest of Gyeongsangnam-do (RGSND). All other areas in the 9-km domain are assigned to the "Other-domain" group.

3. 결과 및 고찰

3.1 배출량 분석

그림 3은 CAPSS 2013을 바탕으로 경상북도 및 동남지역에 위치한 각 지자체별 PM_{10}, $PM_{2.5}$, NO_x, SO_x, CO, NH_3 배출량을 보인 것이다. 여기에서 $PM_{2.5}$와 PM_{10} 배출량은 1차(Primary) 배출량을 의미하며, 포항, 부산, 김해, 창원에서 3,000 ton/yr 이상, 울산, 경주에서 1,500~3,000 ton/yr으로 나타났다. $PM_{2.5}$와 PM_{10} 배출량의 대부분은 면오염원과 선오염원에서 기인하나, 산업시설 및 발전시설 등이 밀집해 있는 울산, 하동, 고성의 경우 점오염원에서도 높은 기여도를 보인다. NO_x 배출량은 대구, 포항, 울산, 부산, 고성에서 20,000 ton/yr 이상, 구미, 하동, 창원에서 10,000~20,000 ton/yr, 경주, 김천, 김해에서 5,000~10,000 ton/yr 배출되는 것으로 나타났다. NO_x 배출량은 대부분의 시군에서 선오염원>면오염원>점오염원 순을 보인 반면, 포항, 하동 고성의 경우 점오염원>면오염원>선오염원 순으로 많은 배출량을 보이며, 울산, 창원, 구미 또한 다른 지자체에 비해 점오염원의 배출 비율이 높은 것으로 나타났다. SO_x 배출량은 포항, 울산, 부산, 하동, 고성에서 10,000 ton/yr 이상으로 나타났으며, 구미, 문경, 대구, 경주, 거제에서도 다른 시군에 비해 높은 배출량을 보인다. SO_x 오염원별로는 대부분의 지자체가 면오염원의 배출비율이 높은 것으로 나타나나, 하동, 고성, 울산의 경우 화력발전소 및 대규모 산업단지들이 위치해 있어 점오염원이 차지하는 비율이 면오염원보다 높게 나타난다. CO의 경우 대부분의 지자체가 5,000 ton/yr 이상으로, 대부분의 지자체가 면오염원 및 선오염원의 배출비율이 높은 반면, 포항, 울산, 고성, 하동은 점오염원에서 높은 비율을 보인다. NH_3 배출량 또한 대부분의 지자체에서 2,000 ton/yr 이상의 배출량을 나타낸다. 배출원별로 NH_3 배출량을 분류할 시, 면오염원에서 주로 배출되나, 거제, 부산, 통영 등의 일부 지역에서는 선오염원의 배출비율 또한 높게 나타난다.

본 연구에서는 1차 $PM_{2.5}$ 배출량이 많은 포항, 경주, 대구, 울산, 부산, 김해와, 2차 $PM_{2.5}$의 전구물질인 NO_x, SO_x 배출량이 많고, 화력발전소가 위치한 하동, 고성, 창원을 개별 분석 대상지역으로 설정하였으며, RGSND와 Other-domain을 포함하여 기여도 분석 시, 배출지역으로 설정하였다.

3.2 모의 수행평가

그림 4와 표 2는 기상모의 수행평가를 보인 것으로 기상청의 AWS (Automatic Weather Station) 자료를 이용하였으며, 경상도와 부산, 대구, 울산의 일평균 관측값과 모의값을 통계적으로 분석하였다. 10 m 풍속의 경우, 관측값은 1.9 m/s인 반면, 모의 풍속은 3.4 m/s로, Emery *et al.* (2001)에서 제시한 기상 모델의 성능 평가 기준과 비교하였을 때, RMSE (Root Mean Square Error)는 기준을 만족하였으나 풍속의 과대모의가 현저하게 나타났다. Chaloulakou *et al.* (2003)에 따르면, 연평균 풍속과 $PM_{2.5}$는 $R=-0.54$로, 음의 상관관계를 갖는다. 정확한 상관계수는 지역에 따라 달라질 수 있으나, 이러한 풍속 과대 모의는 $PM_{2.5}$ 농도 과소 모의로 이어질 수 있다. 이는 실제 대기질 개선계획 수립 시에는 고려되어야 할 사항으로 기상 모의에 대한 개선 노력이 필요하며, 측정소 위치별 과대 모의정도 평가 및 대기질 모의 분석 시에는 직접적인 농도 변화 보다는 상대적인 농도 변화를 고려할 수 있는 방법 등이 이용될 수 있다(Bae *et al.*, 2017c). 2 m 평균 기온의 경우 관측값과 모의값이 거의 유사한 것으로 나타났으며, 강수의 경우 과소 모의하는 경향을 보였다. 기온에 대한 통계 분석 결과 Gross error와 IOA (Index of Agreement)는 Emery *et al.* (2001)에서 제시한 기준을 만족하는 것으로 나타났다. 상관계수인 R값은 풍속, 온도, 강수에 대해 각각 0.88, 0.99, 0.89로 높은 정합도를 보였다.

그림 5는 $PM_{2.5}$, O_3, NO_2, SO_2에 대한 경상도 및 부산, 대구, 울산의 2014년 관측값과 모의값를 비교한 것이다. $PM_{2.5}$의 경우 울산 집중측정소 자료를 이용하였으며, 다른 물질에 대해서는 도로변 측정망 자료는 제외하고 정합도 평가를 수행하였다. $PM_{2.5}$는 과

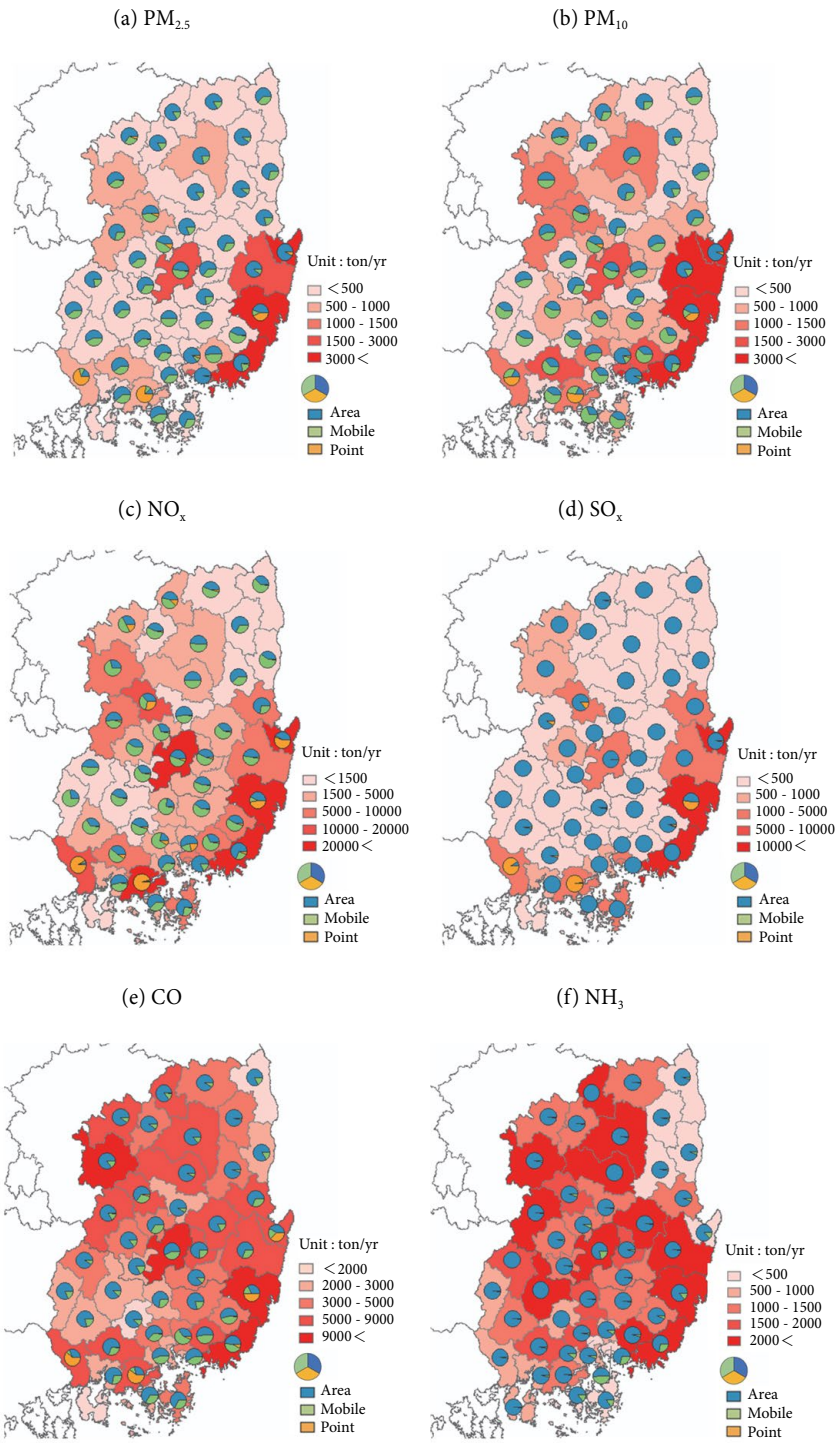

Fig. 3. Distribution of CAPSS 2013 emissions for (a) $PM_{2.5}$, (b) PM_{10}, (c) NO_x, (d) SO_x, (e) CO, and (f) NH_3. Pie charts indicate sectoral contributions from area (blue), mobile (green), and point sources (yellow).

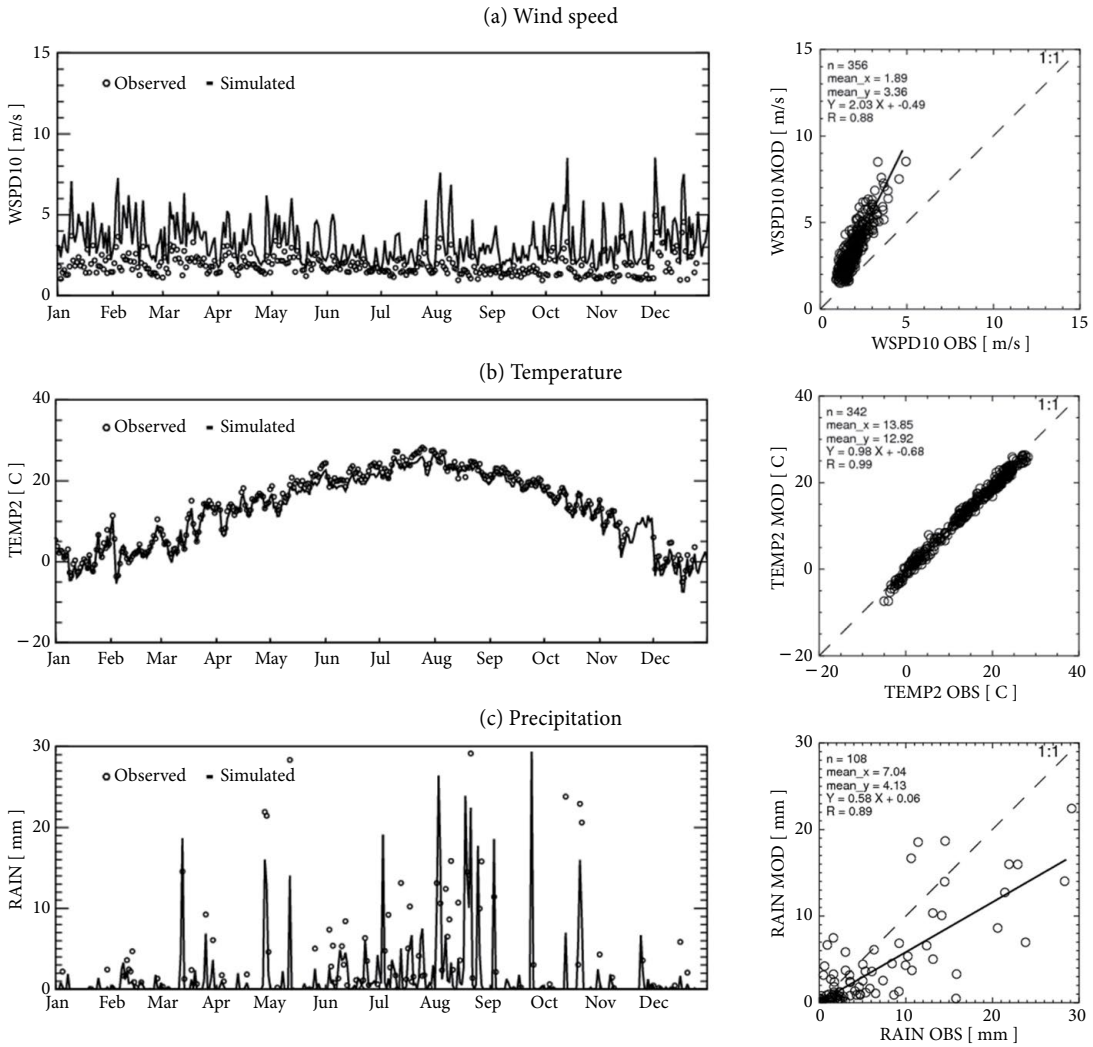

Fig. 4. Time series and scatter plots of meteorological simulations for (a) Wind speed, (b) 2-m Temperature, and (c) Precipitation at selected Korean Meteorological Administration Automatic Weather Stations in the Southeastern region during 2014. Lines indicate models and circles indicate observations.

소 모의하는 경향이 있으나, 관측값과 모의값은 R=0.88의 상관성을 보였다. 이와 관련하여 Bae *et al.* (2017a)은 Primary PM 배출량의 과소 평가 가능성을 제기하였으며, 풍속 과대 모의가 $PM_{2.5}$ 등의 과소 모의에 영향을 미쳤을 것으로 판단된다(Kim *et al.*, 2017f). $PM_{2.5}$의 과소 모의는 전반적인 기여도 과소 평가로 이어질 수 있으며 정량적인 결과에 영향을 미칠수 있으나, 본 연구는 자체 기여도 대비 상호 기여도의 영향을 비교하여 $PM_{2.5}$ 농도에 대한 광역적인 관리 필요성을 보이는 것으로, 이러한 결과 도출에는 큰 차이가 없을 것으로 판단하였다. 일 최대 1시간 O_3 농도는 여름철 과소 모의하며, R값은 0.89로 나타났다. NO_2는 겨울철에 과소 모의하고 여름철에 과대 모의하였으며, SO_2는 여름, 가을에 과대 모의하였다. 표 2에서는 오염물질별 정합도 통계치를 보였다. 본 연구에서 주요 분석대상인 $PM_{2.5}$는 Emery *et al.* (2017)

Table 2. Model performance statistics of meteorological simulations for Wind seed, Temperature, Precipitation in the Southeastern region during 2014.

	Mean (Observed)	Mean (Predicted)	RMSE	Gross error	Bias	IOA
Wind seed	1.9	3.4	1.7	1.5	1.5	0.6
Temperature	13.9	12.9	1.3	1.1	−0.9	1.0
Precipitation	7.0	4.1	6.8	3.7	−2.9	0.9

Unit: Wind speed (m/s), Temperature (°C) and Precipitation (mm)
Emery *et al.* (2001) benchmarks for wind speed (10 m): RMS ≤ 2 m/s, Bias ≤ ± 0.5 m/s, IOA ≥ 0.6
Emery *et al.* (2001) benchmarks for temperature (2 m): Gross error ≤ 2 K, Bias ≤ ± 0.5 K, IOA ≥ 0.8

Table 3. Model performance statistics for $PM_{2.5}$, O_3, NO_2, and SO_2 concentrations in the Southeastern region during 2014.

	Mean (Observed)	Mean (Simulated)	R	NMB	NME
$PM_{2.5}$	30.12	27.13	0.88	−9.94	21.30
O_3	49.31	45.79	0.89	−7.14	14.13
NO_2	20.61	21.36	0.51	3.64	28.38
SO_2	5.65	8.81	0.49	55.92	61.67

Unit: mean (μg/m³ for $PM_{2.5}$ and ppb for O_3, NO_2, SO_2), NMB (%), NME (%)
Emery *et al.* (2017) goals for 1-hr O_3: NMB < ± 5%, NME < 15%, r > 0.75.
Emery *et al.* (2017) criteria for 1-hr O_3: NMB < ± 15%, NME < 25%, > 0.50.
Emery *et al.* (2017) goals for 24-hr $PM_{2.5}$, Sulfate, and Ammonium: NMB < ± 10%, NME < 35%, r > 0.70
Emery *et al.* (2017) criteria for 24-hr $PM_{2.5}$, Sulfate, and Ammonium: NMB < ± 30%, NME < 50%, r > 0.40

이 권장한 NMB (Normalized Mean Bias), NME (Normalized Mean Error), R값의 목표기준을 만족하였으며, O_3는 최소기준을 만족하며, 목표기준에 근사한 값을 보였다. 단, 울산 집중측정소 관측 자료를 이용한 정합도 평가 결과가 각 지자체의 $PM_{2.5}$ 농도에 대한 모의 정합도 평가를 대표하기에는 한계가 있으며, 이로 인해 산정된 기여도 값에 불확도가 존재할 수 있음을 유의해야 한다.

3.3 $PM_{2.5}$ 기여도 산정

본 연구에서는 모의 시간 및 효율을 고려하여, 그림 2에 제시된 것과 같이 배출지역을 구분하여 CAMx-PSAT 모의를 수행하였다. 그림 6은 산정된 지자체별 기여도의 공간 범위를 우선적으로 분석한 것이다. 이를 통해 주요 지자체들의 배출량이 배출지역 및 주변지역의 $PM_{2.5}$ 농도에 미치는 영향 범위를 확인할 수 있다. 도시별로 살펴보면, 포항의 경우 자체 기여도는 약 9 μg/m³이며, 경주 등 인접한 지자체들까지 2.5~5.0 μg/m³, 부산, 울산 및 경상남도 일부 지역까지 약 0.5~1.0 μg/m³의 기여도를 보였다. 각 지자체별 배출량은 해당 지자체에서 가장 높은 기여도를 보였으며, 이를 중심으로 주변 지자체까지 영향을 미치는 것으로 나타났다.

그림 7은 각 수용지역 $PM_{2.5}$ 농도에 대해 배출지역별 기여율을 보인 것이다. 여기에서 Other-foreign은 기본 모의값에서 9-km 모의영역 내에 존재하는 배출영향을 제외한 값으로, 모의영역 외부의 중국, 일본 등 국외로부터 유입되는 오염물질에 의한 $PM_{2.5}$ 기여율이 포함된다. 포항의 경우, 자체 기여율이 25.4%, RGSND 0.7%, Other-domain 12.7%, Other-foreign 57.9%로, 모의 대상지역에서는 $PM_{2.5}$ 자체 기여율이 가장 높은 것으로 나타났다. 또한 경주에 대한 포항의 기여율은 각각 10.4%로 자체 기여율인 8.4%에 비해 높으며, 울산에 대한 포항의 기여율은 4.6%로, 포항이 인접한 지자체들에게 미치는 영향 또한 큰 것으로 나타났다. 포항의 높은 자체 기여율은 대기질 모의에 이용된 CAPSS 배출목록에서 포항에 대한 비산먼지 배출량을 높게 산정한 특성 때문인 것으로 판단된다. 대구의 경우, 자체 기여율이 7.7%로 다른 지자체 대비 낮은 자체 기여율을 보이며, 대구에 대한 Other-domain의 기여율(21.3%)이 다른 지자체에 비해 높은 것으로 나타났다. 이는 대구가 내륙에 위치하여 다른 지자체들보다 이들 지역으로부터 영향을 많이 받기 때문으로 판단된다. 하동의 경우, 포항 다음으로 높은 자체 기여도를 보였는데, 이는 하동에 위치한 대형 점오염원의 영향으로 추정된다. 또한 본 결과를 통해 동남지역에 위치한 각 지자체의 $PM_{2.5}$ 농도가 자체 배출량 영향보다 외부로부터의 유입으로 인한 영향을 많이 받음을 확인할 수 있다. 특정 수용지역에 대하여, 수용지역의 자체 기여율, Other-

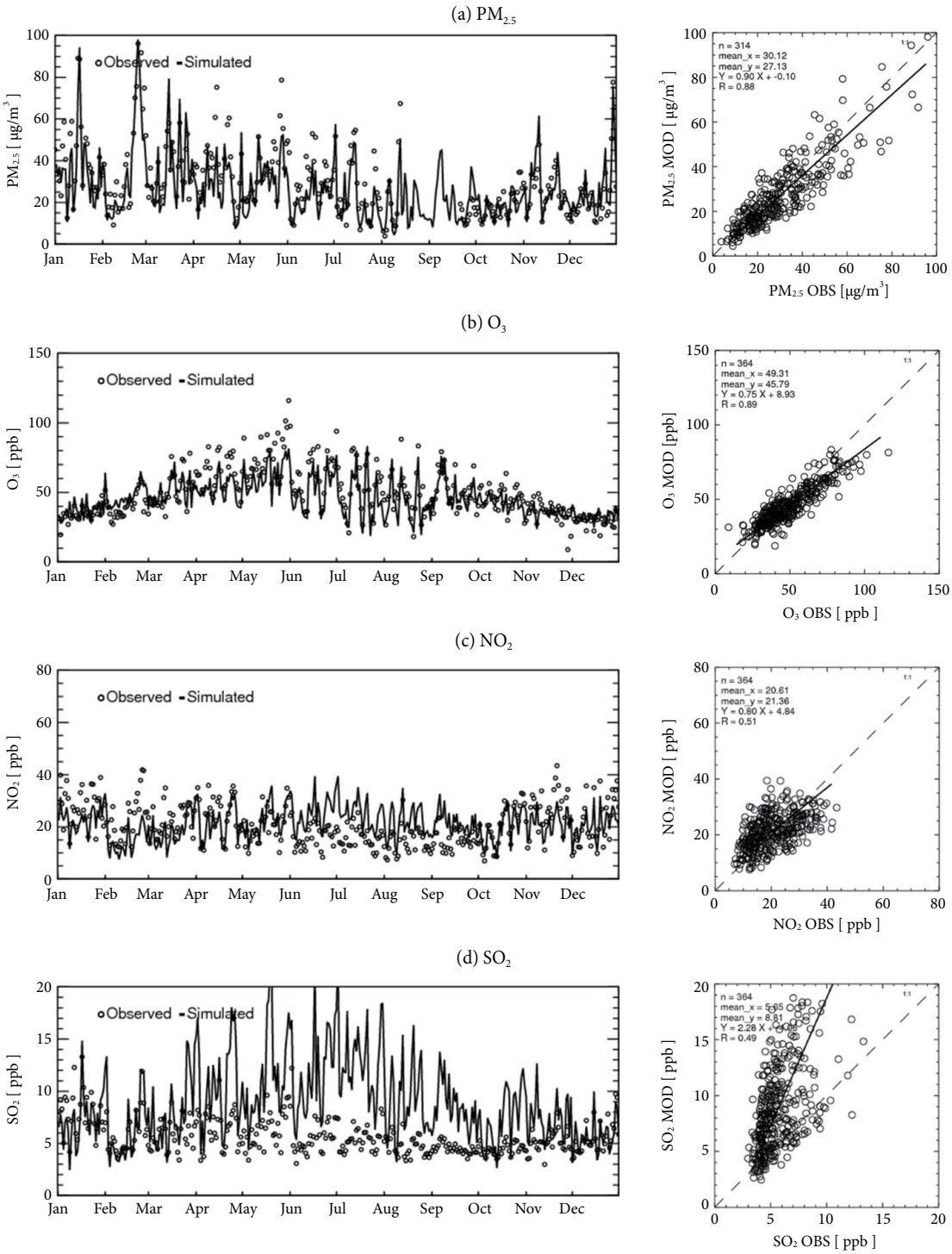

Fig. 5. Time series and scatter plots for (a) $PM_{2.5}$, (b) O_3, (c) NO_2, and (d) SO_2 concentrations at the air quality monitoring stations and Ulsan super site in the Southeastern region of South Korea during 2014. Lines indicate models and circles indicate observations.

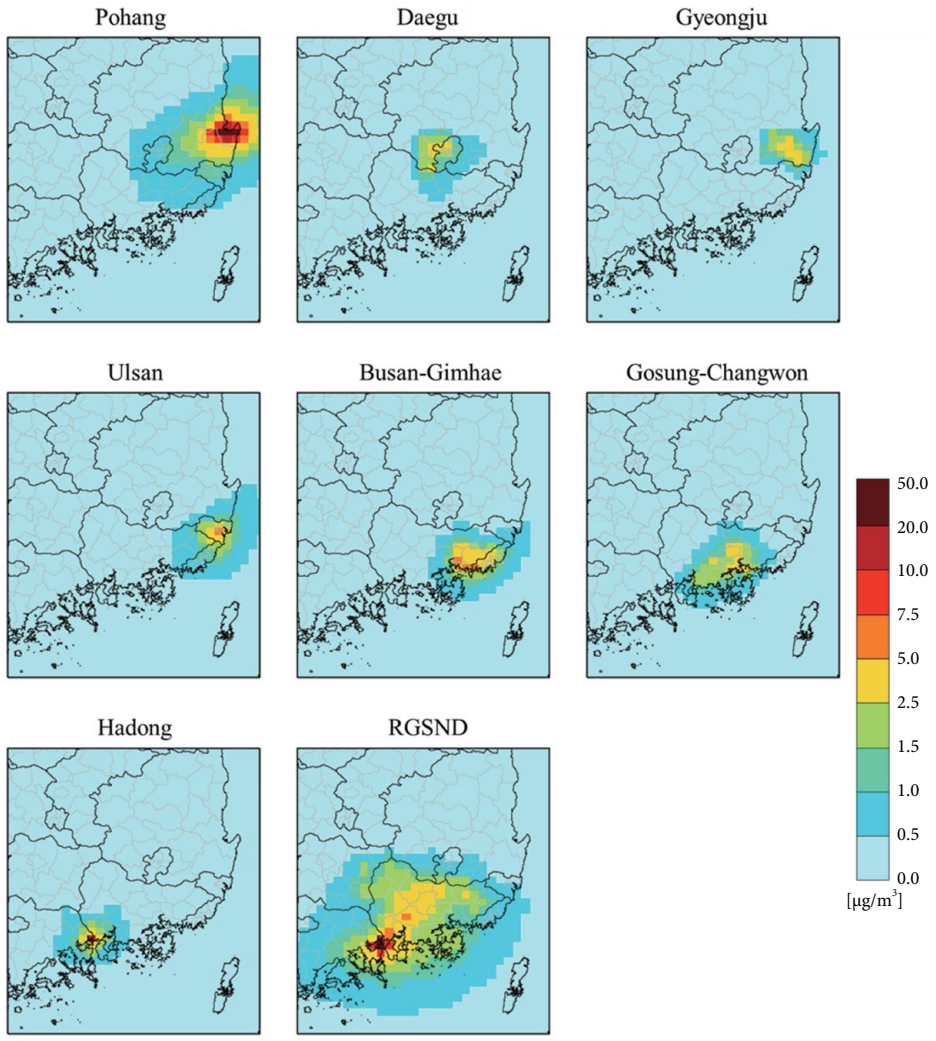

Fig. 6. Spatial distributions of annual mean $PM_{2.5}$ contributions from 8 source regions during 2014.

domain, Other-foreign의 기여율을 제외한 나머지 지자체들의 기여율 합을 주변 지자체들의 기여율이라고 하였을 때, 경주와 고성-창원 주변 지자체들의 기여율은 약 18%로, 자체 기여율에 비해 2배가량 높게 나타났다. 포항을 제외한 모든 지자체의 자체 기여율은 10% 안팎이며, 주변 지자체들의 기여율은 지자체별 배출량, 기상 등에 따라 차이를 보이긴 하나, 자체 기여율과 유사하거나 더 높은 수준으로 나타났다. 이는 그림 8에서 보다 명확하게 나타난다.

그림 8은 월평균 $PM_{2.5}$ 농도에 대하여 수용지역별로 자체 기여도와, 주변 지자체들의 기여도를 비교한 것이다. 포항의 월평균 자체 기여도는 여름철에 증가하고, 겨울철에 감소하는 것으로 나타났으며, 9월에 12.6 μg/m^3, 12월에 6.1 μg/m^{3}로, 6.5 μg/m^{3}의 최대 편차를 보였다. 하동도 동일한 계절적 특성이 나타나며, 7월(6.4 μg/m^3)과, 12월(1.4 μg/m^3)에 최대, 최소 자체 기여도를 보였다. 하동의 경우, 주변 지자체들의 기여도의 편차 또한 8.4 μg/m^{3}로, 다른 지자체들에 비해

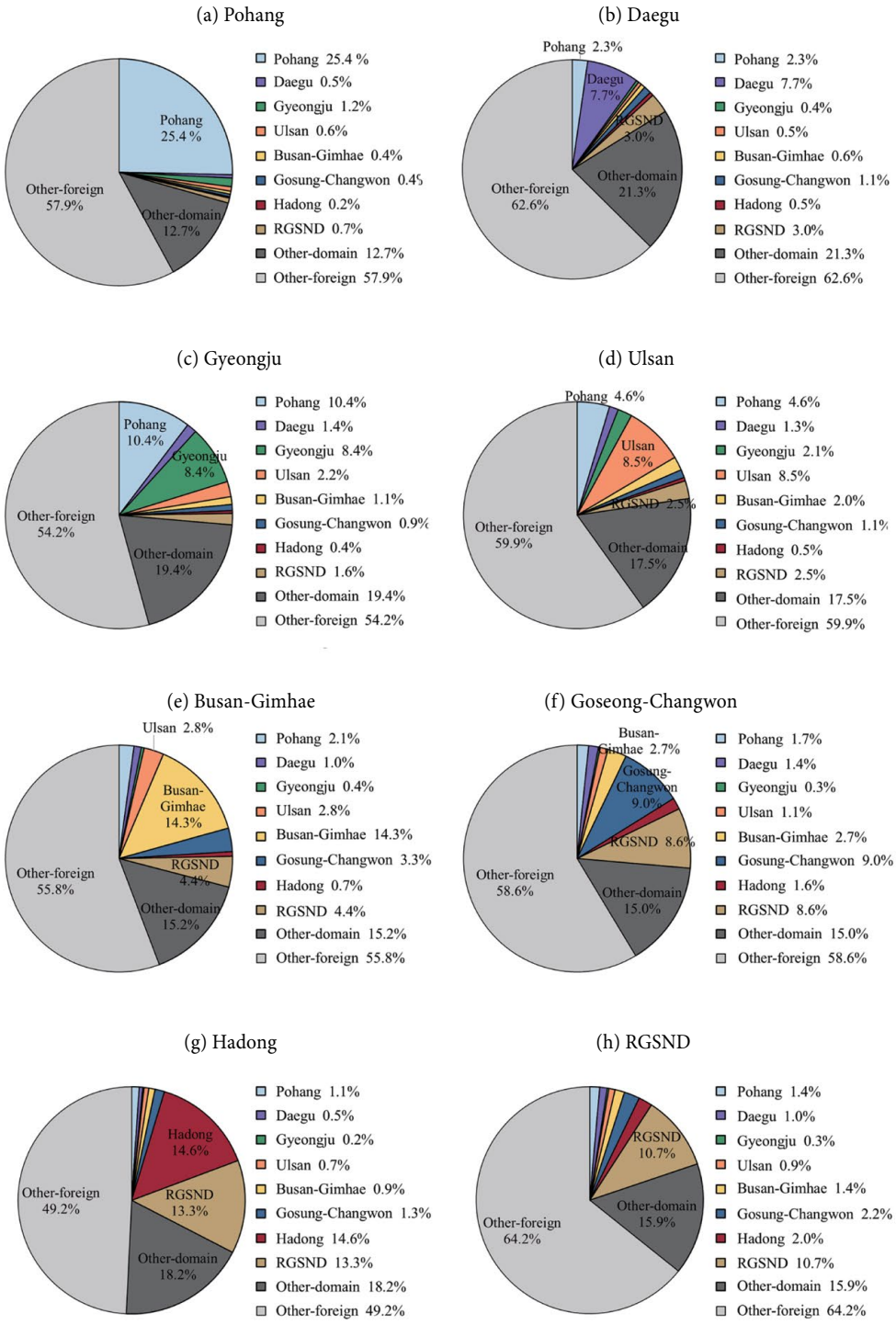

Fig. 7. Relative Contributions from regional emission sources to $PM_{2.5}$ concentrations in (a) Pohang, (b) Daegu, (C) Gyeongju, (d) Ulsan, (e) Busan-Gimhae, (f) Goseong-Changwon, (g) Hadong, and (h) RGSND.

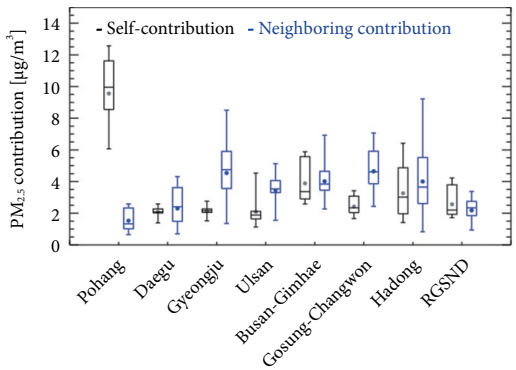

Fig. 8. Boxplot for self-contribution (Black) and neighboring contribution (Blue) of monthly $PM_{2.5}$ showing 75th, 50th, 25th percentiles, max., min., and mean (circle). Neighboring contribution is the sum of contributions from the rest of the region, excluding self-contribution.

계절에 따른 기여도 변화가 큰 것으로 나타났다. 경주에 대한 주변 지자체들의 기여도는 6월에 8.5 μg/m^3, 12월에 1.3 μg/m^{3}로 7.2 μg/m^3 가량의 편차를 보였다. 각 여름철에 자체 기여도 및 주변 지자체들의 기여도가 증가하는 것으로 나타났으며, 인접한 지자체들과 유사한 농도 변화를 보였다. 지자체에 따라 월별 기여도에는 차이가 존재할 수 있으나, 자체 기여도와 주변 지자체들의 기여도의 비는 계절과 관계없이 일정한 수준을 유지하는 것으로 판단된다. 월별 편차를 감안하더라도, 대구, 경주, 고성-창원, 하동의 경우 주변 지자체들의 기여도가 보다 큰 것으로 나타났으며, 포항을 제외한 다른 지자체들은 자체 기여도와 주변 지자체들의 기여도가 유사한 수준으로 나타났다. 이러한 결과를 종합해 보면, 한 지자체는 주변 지자체들과 영향을 주고받으며, 그 영향은 자체 기여도보다 크거나 같을 수 있다. 따라서 동남지역의 $PM_{2.5}$ 농도 관리 시, 지자체의 개별적인 저감 대책뿐 아니라 상호 영향을 미치는 지자체들을 권역으로 설정하여, 광역적 대기질 관리가 필요할 것으로 판단된다.

표 4는 지자체별 배출량에 의한 $PM_{2.5}$ 기여도 분석 결과를 배출지역-수용지역 관계에서 정리한 것으로 가로로 기여도를 합하면 수용지역의 $PM_{2.5}$ 농도가 된다. 각 수용지역별 자체 기여도는 포항이 9.56 μg/m^3 (25.4%)로 가장 높았으며, 대구, 경주, 울산, 부산-김해, 고성-창원, 하동, RGSND 순으로 각각 2.09 μg/m^3 (7.7%), 2.13 μg/m^3 (8.4%), 2.08 μg/m^3 (8.5%), 3.88 μg/m^3 (14.3%), 2.42 μg/m^3 (9.0%), 3.26 μg/m^3 (14.6%), 2.56 μg/m^3 (10.7%)의 기여도를 보였다. 또한, 모든 지역에서 Other-domain, Other-foreign의 기여도가 상대적으로 큰 것으로 나타났는데, 이는 국내 다른 지역들 및 중국 등과 같은 풍상지역의 영향으로 사료된다. 각 지자체별로 볼 때, 자체 기여율을 제외한 다른 지자체들의 기여율 합은 8~18%로, 자체 기여율의 1~2배 수준의 기여도를 보였다(포항 제외).

동남지역의 $PM_{2.5}$에 대한 선행 연구로 Han *et al.* (2008)은 2002년 9월부터 2004년 2월까지 역궤적 분석과 PSCF (Potential Source Contribution Function)를 통해 울산, 포항 및 남부 산업지역이 남한의 $PM_{2.5}$ 농도 증가에 영향을 미치는 중요한 배출지역이며, 울산의 $PM_{2.5}$ 농도는 울산 자체뿐 아니라, 국내 다른 지역들과, 중국 배출량에 주된 영향을 받는 것을 확인하였다. 본 연구결과 또한 선행연구와 유사하게 주요 지자체별 $PM_{2.5}$에 대한 국외 기여도가 절반가량으로 나타났으며, 자체 기여도뿐만 아니라, 동남지역의 다른 지자체들의 영향이 주요한 것으로 나타났다. 그림 7과 표 3을 종합해 보면 각 지자체의 $PM_{2.5}$ 농도는 자체 배출 영향도 중요하나, 주변지역에서 이동해오는 영향이 적지 않음을 볼 수 있다. 이러한 결과는 2차 오염물질인 $PM_{2.5}$ 관리가 각 지자체의 개별적인 배출량 저감 노력에 앞서 서로 영향을 주고받는 권역 전체에 대한 광범위한 계획이 수립되어야 함을 의미한다. 또한 이러한 권역 차원의 배출량 저감 노력은 각 지자체의 개별적인 노력에 의한 개선과 함께 주변지역의 배출량 저감에 따른 개선 영향 또한 상호적으로 받을 수 있다는 점에서 중요하다. 다만, 본 연구는 동남지역의 주요 배출지역에 대한 상호 기여도를 분석한 것으로 국내 다른 지역과의 상호 기여도 및 국외 기여도에 대한 연구가 추후 필요할 것으로 판단되며,

Table 4. Summary of $PM_{2.5}$ source contribution analysis (μg/m³(%)).

		Source region										
		Pohang	Daegu	Gyeongju	Ulsan	Busan Gimhae	Gosung Changwon	Hadong	RGSND	Other-domain	Other-foreign	Sum
Receptor	Pohang	9.56 (25.4)	0.18 (0.5)	0.46 (1.2)	0.24 (0.6)	0.16 (0.4)	0.14 (0.4)	0.07 (0.2)	0.27 (0.7)	4.79 (12.7)	21.84 (57.9)	37.71 (100)
	Daegu	0.62 (2.3)	2.09 (7.7)	0.11 (0.4)	0.13 (0.5)	0.18 (0.6)	0.30 (1.1)	0.15 (0.5)	0.81 (3.0)	5.79 (21.3)	17.02 (62.6)	27.20 (100)
	Gyeongju	2.62 (10.4)	0.36 (1.4)	2.13 (8.4)	0.55 (2.2)	0.28 (1.1)	0.22 (0.9)	0.10 (0.4)	0.41 (1.6)	4.90 (19.4)	13.73 (54.2)	25.30 (100)
	Ulsan	1.13 (4.6)	0.31 (1.3)	0.50 (2.1)	2.08 (8.5)	0.48 (2.0)	0.28 (1.1)	0.12 (0.5)	0.62 (2.5)	4.26 (17.5)	14.61 (59.9)	24.39 (100)
	Busan Gimhae	0.58 (2.1)	0.28 (1.0)	0.11 (0.4)	0.77 (2.8)	3.88 (14.3)	0.91 (3.3)	0.18 (0.7)	1.19 (4.4)	4.12 (15.2)	15.15 (55.8)	27.17 (100)
	Gosung Changwon	0.44 (1.7)	0.37 (1.4)	0.07 (0.3)	0.30 (1.1)	0.72 (2.7)	2.42 (9.0)	0.44 (1.6)	2.30 (8.6)	4.02 (15.0)	15.70 (58.6)	26.78 (100)
	Hadong	0.24 (1.1)	0.11 (0.5)	0.04 (0.2)	0.15 (0.7)	0.20 (0.9)	0.30 (1.3)	3.26 (14.6)	2.96 (13.3)	4.05 (18.2)	10.97 (49.2)	22.28 (100)
	RGSND	0.34 (1.4)	0.25 (1.0)	0.06 (0.3)	0.21 (0.9)	0.33 (1.4)	0.53 (2.2)	0.47 (2.0)	2.56 (10.7)	3.82 (15.9)	15.40 (64.2)	23.97 (100)

정량적인 결과는 대상 기간 및 분석 방법 등에 의해서 달라질 수 있으므로, 다양한 분석 방법을 이용한 연구가 진행되어야 할 것으로 사료된다.

그림 9에는 각 지자체별 배출원 부문별 기여율을 제시하였다. 포항 $PM_{2.5}$ 농도에 대한 자체 기여율 25.4% 중 면오염원의 기여율은 23.8%로, 면오염원이 자체 기여율의 대부분을 차지하는 것으로 나타났다. 점오염원과 선오염원의 기여율은 각각 1.2%, 0.3%로 면오염원에 비해 현저히 작은 기여율을 보이는데, 이는 그림 3에서 보인 것과 같이 포항에서 특히 산업시설이 밀집해 있는 남구의 SO_2, Primary $PM_{2.5}$ 배출량이 많기 때문인 것으로 사료된다. 이는 배출량 목록에 포항지역의 비산먼지가 높게 반영되었기 때문으로 판단된다. 반면, 울산의 자체 기여율 8.5% 중 점오염원 4.4%, 면오염원 3.2%, 이동오염원 0.9%로, 점오염원의 자체 기여율이 가장 높게 모의되었다. 이는 울산에 위치한 대규모 산업단지의 영향으로 보인다. 이외에 동남지역에 위치한 대부분의 지자체들은 면오염원이 기여율의 대부분을 차지하였으나, 대구, 부산-김해의 경우 1.8%, 2.0%로 다른 지자체들 대비 선오염원의 기여율이 높은 것으로 나타났다. RGSND의 자체기여율(10.7%)에서 점오염원, 면오염원, 선오염원의 기여율은 각각 3.1%, 6.6%, 1.0%로 면오염원의 기여율이 가장 높으나, 다른 지자체들의 오염원별 기여율과 비교하였을 때 점오염원과 선오염원에서 높은 기여율을 보인다. 이는 경상남도에 위치한 다른 지자체들의 발전시설 및 제조업 연소시설 등의 영향으로 사료된다. Other-domain의 경우, 동남지역에 위치한 각각의 지자체에 대한 기여율은 다르나, 배출원별 기여하는 비는 유사한 것으로 나타났다.

4. 결 론

본 연구에서는 CAMx-PSAT을 이용하여 동남지역에 위치한 각 지자체 $PM_{2.5}$ 농도의 자체 기여도 및 주변지역에 대한 영향 분석을 수행하였다. 각 지자체별로 보면, 자체 기여율은 포항이 약 25%로 가장 높으며, 그 다음으로 하동이 약 15%, 부산-김해가 14%의 자체 기여율을 보였다. 포항의 경우, 면오염원에서 높

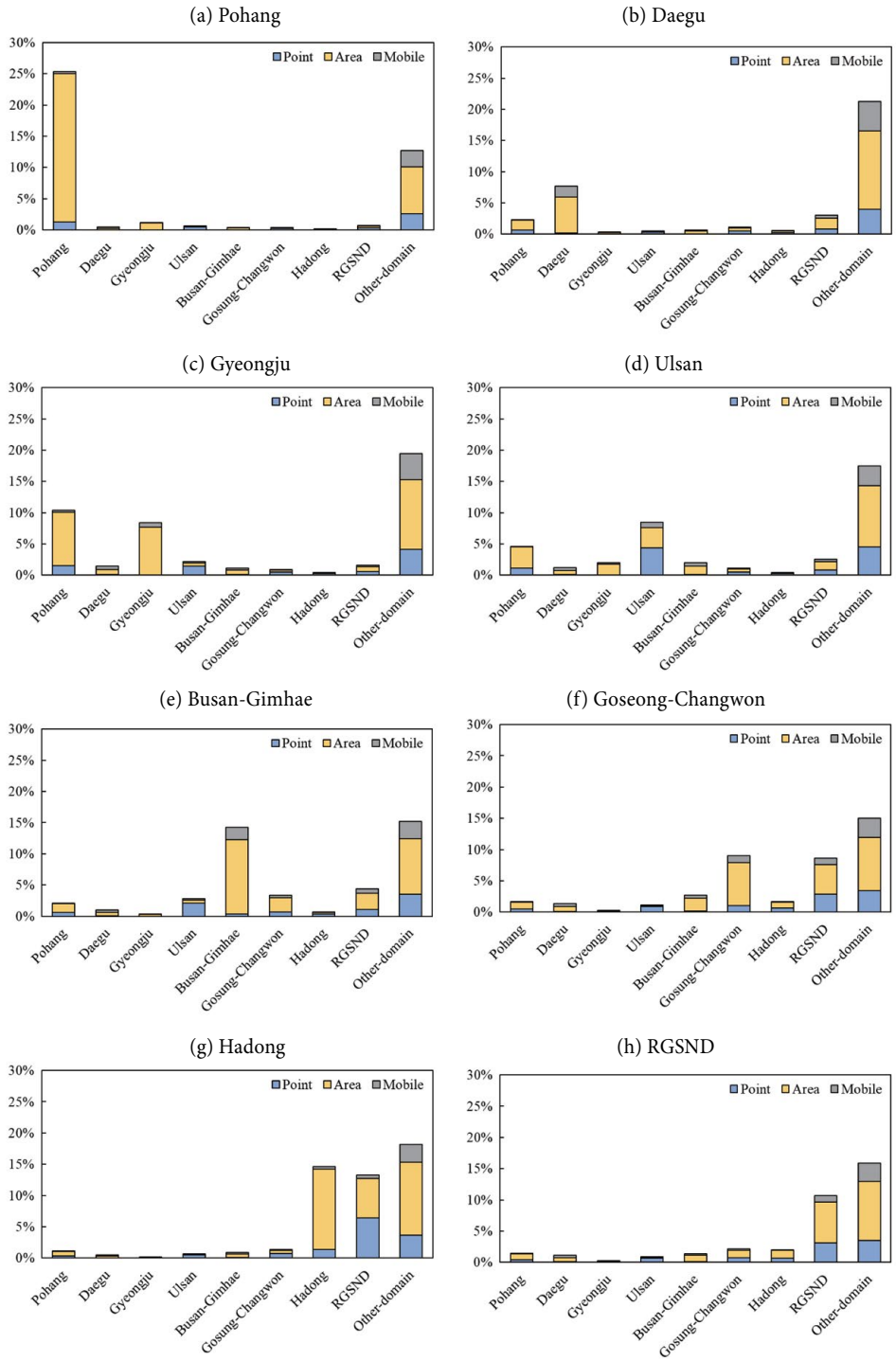

Fig. 9. Regional and sectoral contributions to $PM_{2.5}$ concentrations in (a) Pohang, (b) Daegu, (c) Gyeongju, (d) Ulsan, (e) Busan-Gimhae, (f) Goseong-Changwon, (g) Hadong, and (h) RGSND. Light blue, yellow and gray colors indicate contributions from point, are and mobiles sources, respectively.

은 기여율을 차지하는 것으로 나타났으며, 이는 산업시설이 밀집되어 있는 포항 남구의 Primary $PM_{2.5}$ 배출량이 다른 지역에 비해 높게 추정되었기 때문으로 판단된다. 포항 이외의 각 지자체들은 약 8~11%의 자체 기여율을 나타났다. 동남지역에 많은 발전시설 및 산업시설이 위치해 있음에도 불구하고, 포항을 제외하면 각 지자체별 인접 지자체들의 기여율 합은 약 8~18%로, 자체 기여율보다 1~2배가량 높게 모의되었다. 또한, 각 지자체의 배출원 부문별 기여율을 확인한 결과, 울산의 경우 점오염원과 면오염원의 기여율이 동일한 수준을 보였으며, 울산을 제외한 다른 지자체들의 경우 높은 면오염원의 기여율을 보였다. 이러한 정량적 분석 결과는 모의 방법 및 기간, 모의에 이용된 배출량 등 입력자료에 따라 차이를 보일 수 있다. 또한 동남지역의 복잡한 해안지형, 배출원 위치, 기상 조건 등을 보다 면밀히 분석하기 위해서는 향후 고해상도의 모의 검토가 필요할 것으로 판단된다. 다만 본 연구는 지자체 간 상호 협력적인 배출량 삭감 계획 수립이 대기질 개선 측면에서 유리함을 정량적인 결과를 통해 확인한 것에 의의가 있다.

연구 결과를 종합해 보면 $PM_{2.5}$ 모의 농도와 자체 기여도는 지자체별로 차이를 보이나, 대부분의 지자체에서 인접한 주변 배출량 영향이 높은 것을 확인할 수 있었다. 이는 한 기초 지자체의 대기질 개선을 위하여 주변지역의 배출량 영향이 함께 감소되어야 함을 의미한다. 즉, 목표농도 달성을 위해서는 각 지자체의 개별적인 배출량 저감 노력도 중요하나, 이에 앞서 대기질에 상호 영향을 미치는 관리권역 설정, 광역 지자체 간 협력 체계 구축 등이 요구된다. 이뿐 아니라, 정부차원 및 국제적 협력을 통한 국내 · 외 배출량 삭감노력 또한 필요하다. 한편, 국내의 대기오염물질 농도를 지역적으로 살펴보면, 많은 지자체에서 한 가지 이상의 대기오염물질이 대기환경기준을 초과하는 경우가 빈번하다. 대기 중 오염물질들은 화학반응 등을 통해 상호 농도에 영향을 미치므로, 하나의 대기오염물질에 대한 배출량 관리대책이 다른 대기오염물질의 농도 변화에 대해 영향을 미칠 가능성이 높다. 따라서, 목표농도에 도달하기 위해서는 배출 물질의 복합적인 관리가 요구될 수 있으며, 개별적 대기오염물질 관리 수단과 복합적 대기오염물질 관리 방안에 대한 선택이 필요할 경우, 대책 선택에 따른 종합적 대기질 개선 효과와 비용 등도 함께 검토되어야 할 것으로 판단된다.

감사의 글

이 연구는 환경부 연구용역사업(동남권역 지역별 대기오염물질 기여도 분석 연구)과 정부(과학기술정보통신부, 환경부, 보건복지부) 재원 한국연구재단-미세먼지 국가전략프로젝트사업(2017M3D8A1092020)의 일환으로 수행되었으며 이에 감사드립니다.

References

Bae, C., Kim, E., Kim, B.U., Kim, H.C., Woo, J.H., Moon, K.J., Shin, H.J., Song, I.H., Kim, S. (2017a) Impact of Emission Inventory Choices on PM_{10} Forecast Accuracy and Contributions in the Seoul Metropolitan Area, Journal of Korean Society for Atmospheric Environment, 33(5), 497-514. (in Korean with English abstract)

Bae, M., Kim, H.C., Kim, B.-U., Kim, S. (2017b) Development and Application of the Backward-tracking Model Analyzer to Track Physical and Chemical Processes of Air Parcels during the Transport, Journal of Korean Society for Atmospheric Environment, 33(3), 217-232. (in Korean with English abstract)

Bae, C., Yoo, C., Kim, B.-U., Kim, H.C., Kim, S. (2017c) $PM_{2.5}$ 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)

Benjey, W., Houyoux, M., Susick, J. (2001) Implementation of the SMOKE emission data processor and SMOKE tool input data processor in models-3, US EPA.

Carter, W.P.L. (2016) SAPRC-99 Mechanism Files and Associated Programs and Examples, http://www.engr.ucr.edu/~carter/SAPRC99/index (accessed on Nov. 13,

2016).

Chaloulakou, A., Kassomenos, K., Spyrellis, N., Demokritou, P., Koutrakis, P. (2003) Measurements of PM_{10} and $PM_{2.5}$ particle concentrations in Athens, Greece, Atmospheric Environment, 37, 649-660.

Chang, J.S., Brost, R.A., Isaksen, I.S.A., Madronich, S., Middleton, P., Stockwell, W.R., Walcek, C.J. (1987) A three-dimensional Eulerian acid deposition model: physical concepts and formulation, Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 14681-14700.

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.

Chou, M.D., Suarez, M.J. (1994) An efficient thermal infrared radiation parameterization for use in general circulation models, NASA Technical Memorandum, 104606 (3), 85.

Colella, P., Woodward, P.R. (1984) The piecewise parabolic method (PPM) for gas-dynamical simulations, Journal of Computational Physics, 54, 174-201.

Dunker, A.M., Yarwood, G., Ortmann, J.PW, Wilson, G.M. (2002) Comparison of source apportionment and source sensitivity of ozone in a three-dimensional air quality model, Environmental Science and Technology, 36(13), 2953-2964.

Emery, C., Tai, E., Yarwood, G. (2001) Enhanced Meteorological Modeling and Performance Evaluation for Two Texas Ozone Episodes, Prepared for the Texas Natural Resource Conservation Commission. ENVIRON International Corporation, Novato, CA.

Emery, C., Liu, Z., Russell, A.G., Odman, M.T., Yarwood, G., Kumar, N. (2017) Recommendations on statistics and benchmarks to assess photochemical model performance, Journal of the Air & Waste Management Association, 67(5), 582-598.

ENVIRON International Corporation (2014) User's Guide: COMPREHENSIVE AIR QUALITY MODEL with EXTENSIONS Version 6.1, http://www.camx.com.

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 Discussions, 6(1), 107-173.

Han, Y.-J., Kim, T.-S., Kim, H. (2008) Ionic constituents and source analysis of $PM_{2.5}$ in three Korean cities, Atmospheric Environment, 42, 4735-4746.

Hong, S.Y., Dudhia, J., Chen, S.H. (2004) A revised approach to ice microphysical processes for the bulk parameterization of clouds and precipitation, Monthly Weather Review, 132(1), 103-120.

Hong, S.-Y., Noh, Y., Dudhia, J. (2006) A new vertical diffusion package with an explicit treatment of entrainment processes, Monthly Weather Review, 134, 2318-2341. http://dx.doi.org/10.1175/MWR3199.1.

Jeon, B.-I., Hwang, Y.-S. (2014) Characteristic of Metallic and Ionic Concentrations in PM_{10} and $PM_{2.5}$, Journal of Environmental Science International, 23(5), 819-827. (in Korean with English abstract)

Ju, H., Kim, H.C., Kim, B.-U., Kim, Y.S., Shin, H.J., Kim, S. (2017) Long-term Trend Analysis of Key Criteria Air Pollutants over Air Quality Control Regions in South Korea using Observation Data and Air Quality Simulation, Journal of Korean Society for Atmospheric Environment, 34(1), 101-119. (in Korean with English abstract)

Jung, J.H., Lee, H.D., Jeon, S.B., Yoo, J.K., Shon, B.H. (2012) Chemical Characteristics and Particle Size Distribution of PM_{10} in Iron and Steel Industrial Complex, Journal of the Korea Academia-Industrial Cooperation Society, 13(11), 5601-5609.

Kain, J.S. (2014) The kain-fritsch convective parameterization: an update, Journal of Applied Meteorology, 43, 170-181.

Kim, S. (2011) Ozone Simulations over the Seoul Metropolitan Area for a 2007 June Episode, Part V: Application of CMAQ-HDDM to Predict Ozone Response to Emission Change, Journal of Korean Society for Atmospheric Environment, 27(6), 772-790. (in Korean with English abstract)

Kim, B.-U., Bae, C., Kim, H.C., Kim, E., Kim, S. (2017a) Spatially and chemically resolved source apportionment analysis: Case study of high particulate matter event, Atmospheric Environment, 162, 55-70.

Kim, S., Bae, C., Yu, C., Kim, B.-U., Kim, H.C., Moon, N. (2017b) $PM_{2.5}$ simulations for the Seoul Metropolitan Area: (II) estimation of self-contributions and emission to $PM_{2.5}$ conversion rates for each source category, Journal of Korean Society for Atmospheric Environment, 33(4), 377-392. (in Korean with English abstract)

Kim, S., Bae, C., Kim, B.-U., Kim, H.C. (2017c) $PM_{2.5}$ simulations for the Seoul Metropolitan Area: (I) contributions of precursor emissions in the 2013 CAPSS emissions inventory, Journal of Korean Society for Atmospheric Environment, 33(2), 139-158. (in Korean with English abstract)

Kim, S., Bae, C., Kim, E., You, Y.H., Bae, M., Lee, J.B., Seo, I.S., Lim, Y.J., Kim, B.U., Kim, H.C., Woo, J.H. (2017d) Domestic Ozone Sensitivity to Chinese Emissions Inventories: A Comparison between MICS-Asia 2010 and INTEX-B 2006, Journal of Korean Society for Atmospheric Environment, 33(5), 480-496. (in Korean with English abstract)

Kim, S., Kim, O., Kim, B.-U., Kim, H.C. (2017e) Impact of Emissions from Major Point Sources in Chungcheongnam-do on Surface Fine Particulate Matter Concentration in the Surrounding Area, Journal of Korean Society for Atmospheric Environment, 33(2), 159-173. (in Korean with English abstract)

Kim, H.C., Kim, S., Kim, B.-U., Jin, C.S., Hong, S.H., Park, R.J., Son, S.W., Bae, C., Bae, M., Song, C.K., Stein, A. (2017f) Recent increase of surface particulate matter concentrations in the Seoul Metropolitan Area, Korea, Scientific reports, 7, 4710, doi:10.1038/s41598-017-05092-8.

Lee, T.J., Jeon, W.-B., Lee, H.W. (2017) Analysis of meteorological patterns causing high concentration of PM_{10} in the Korean peninsula during the last 10 years, Proceedings of the Korea Environmental Sciences Society Conference, 26

Leem, J.H., Lee, J.T., Kim, D.G., Shin, D.C., Roh, J.H. (1998) Short-term- Effects of Air Pollution on Hospital Visits for Respiratory Diseases in Seoul, Korean Journal of Occupational and Environmental Medicine, 10(3), 333-342.

Ministry of Environment (MOE) (2016) Fine Dust Countermeasure Plan, http://www.me.go.kr/issue/finedust (accessed on Feb. 23, 2017).

Mlawer, E.J., Taubman, S.J., Brown, P.D., Iacono, M.J., Clough, S.A. (1997) Radiative transfer for inhomogeneous atmospheres: RRTM, a validated correlated-k model for the longwave, Journal of Geophysical Research : Atmospheres, 102(D14), 16663-16682.

Nenes, A., Pandis, S.N., Pilinis, C. (1998) ISORROPIA: A new thermodynamic equilibrium model for multiphase multicomponent inorganic aerosols, Aquatic Geochemistry, 4(1), 123-152.

Oh, I., Bang, J.H., Kim, S., Kim, E., Hwang, M.K., Kim, Y. (2016) Spatial Distribution of Air Pollution in the Ulsan Metropolitan Region, Journal of Korean Society for Atmospheric Environment, 32(3), 394-407. (in Korean with English abstract)

Ramboll-Environ (2016) Comprehensive Air Quality Model with Extensions, http://www.camx.com/ (accessed on Sep. 20, 2016).

Skamarock, W.C., Klemp, J.B., Dudhia, J., Gill, D.O., Barker, D.M., Duda, M.G., Huang, X., Wang, W., Powers, J.G. (2008) A description of the advanced research WRF version 3 (Note NCAR/TN-475+STR), National Center For Atmospheric Research Boulder Co Mesoscale and Microscale Meteorology Div.

SMA (2017) http://cleanair.seoul.go.kr/ (accessed on Feb. 23, 2017).

Strader, R., Lurmann, F., Pandis, S.N. (1999) Evaluation of secondary organic aerosol formation in winter, Atmospheric Environment, 33(29), 4849-4863.

United States Environmental Protection Agency (US EPA) (2011) Air Quality Modeling Technical Support Document: Source Sector Assessments, https://www3.epa.gov/scram001/reports/EPA454_R11_006.pdf (accessed on Aug. 2011).

Wagstrom, K.M., Pandis, S.N., Yarwood, G., Wilson, G.M., Morris, R.E. (2008) Development and application of a computationally efficient particulate matter apportionment algorithm in a three-dimensional chemical transport model, Atmospheric Environment, 42(22), 5650-5659.

Yarwood, G., Morris, R.E., Wilson, G.M. (2007) Particulate matter source apportionment technology (PSAT) in the CAMx photochemical grid model, Air Pollution Modeling and its Application XVII, 478-492.

Zhang, W., Capps, S.L., Hu, Y., Nenes, A., Napelenok, S.L., Russell, A.G. (2012) Development of the high-order decoupled direct method in three dimensions for particulate matter: enabling advanced sensitivity analysis in air quality models, Geoscientific Model Development, 5(2), 355-368.