

충남지역 대형 점오염원이 주변지역 초미세먼지 농도에 미치는 영향

Impact of Emissions from Major Point Sources in Chungcheongnam-do on Surface Fine Particulate Matter Concentration in the Surrounding Area

김순태* · 김옥길 · 김병욱¹⁾ · 김현철^{2,3)}

아주대학교 환경안전공학과, ¹⁾미국조지아주환경청,

²⁾미국국립해양대기청, ³⁾메릴랜드대학 기후·위성 연구소

(2017년 2월 3일 접수, 2017년 3월 16일 수정, 2017년 3월 18일 채택)

Soontae Kim*, Okgil Kim, Byeong-Uk Kim¹⁾ and Hyun Cheol Kim^{2,3)}

Department of Environment & Safety Engineering, Ajou University

¹⁾*Georgia Environmental Protection Division, Atlanta, GA, USA*

²⁾*NOAA/Air Resources Laboratory, College Park, MD, USA*

³⁾*UMD/Cooperative Institute for Climate and Satellites, College Park, MD, USA*

(Received 3 February 2017, revised 16 March 2017, accepted 18 March 2017)

Abstract

The Weather Research and Forecast (WRF) - Community Multiscale Air Quality (CMAQ) system was applied to investigate the influence of major point sources located in Chungcheongnam-do (CN) on surface PM_{2.5} (Particulate Matter of which diameter is 2.5 μm or less) concentrations in its surrounding areas. Uncertainties associated with contribution estimations were examined through cross-comparison of modeling results using various combinations of model inputs and setups; two meteorological datasets developed with WRF for 2010 and 2014, and two domestic emission inventories for 2010 and 2013 were used to estimate contributions of major point sources in CN. The results show that contributions of major point sources in CN to annual PM_{2.5} concentrations over Seoul, Incheon, Gyeonggi, and CN ranged 0.51~1.63 μg/m³, 0.71~1.62 μg/m³, 0.63~1.66 μg/m³, and 1.04~1.86 μg/m³, respectively, depending on meteorology and emission inventory choice. It indicates that the contributions over the surrounding areas can be affected by model inputs significantly. Nitrate was the most dominant PM_{2.5} component that was increased by major point sources in CN followed by sulfate, ammonium, and others. Based on the model simulations, it was estimated that primary PM_{2.5} (PPM)-to-PM_{2.5} conversion rates were 41.3~50.7 (10⁻⁶ μg/m³/TPY) for CN, and 12.4~18.3 (10⁻⁶ μg/m³/TPY) for Seoul, Incheon, and Gyeonggi, respectively. In addition, spatial gradients of PPM contributions show very steep trends. NO_x-to-nitrate conversion rates were 7.61~12.3 (10⁻⁶ μg/

*Corresponding author.

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

m^3/TPY) for CN, and $3.94\sim 11.3 (10^{-6} \mu\text{g}/\text{m}^3/\text{TPY})$ for the sub-regions in the SMA. SO_2 -to-sulfate conversion rates were $4.04\sim 5.28 (10^{-6} \mu\text{g}/\text{m}^3/\text{TPY})$ for CN, and $3.73\sim 4.43 (10^{-6} \mu\text{g}/\text{m}^3/\text{TPY})$ for the SMA, respectively.

Key words : $\text{PM}_{2.5}$, Large point sources, Chungcheongnam-do, CMAQ, Contribution

1. 서 론

미세먼지 (Particulate Matter)는 대기 중에 존재하는 입자상 물질(PM_{10})로 호흡기 질환을 유발하는 등 인체에 대한 영향이 문제시 되고 있다. 또한, 최근 직경 $2.5 \mu\text{m}$ 이하 초미세먼지($\text{PM}_{2.5}$)의 고농도 현상에 대한 국민들의 경각심이 높아짐에 따라 발생원인 분석 및 농도 저감 방안 연구 등이 활발하게 이루어지고 있다(Kim *et al.*, 2015; Leem *et al.*, 2015; Anderson *et al.*, 2012; Ristovski *et al.*, 2012). 초미세먼지는 도로, 산업 및 발전시설 등에서 직접 배출되는 1차 오염물질과 전구물질이 대기 중에서 반응하여 생성되는 2차 오염물질이 원인이 된다(Kim, 2006).

충남지역의 경우 국내 최대규모의 화력발전시설인 보령화력을 포함하여 당진, 태안, 서천화력과 인근에 위치한 제철소, 석유화학단지 등을 비롯한 대형 점오염원이 많이 위치하고 있다(Board of Audit and Inspection of Korea, 2016). 더욱이 일부 배출원의 경우 석탄발전 등으로 인해 초미세먼지의 전구물질인 질소산화물뿐만 아니라 황산화물을 대기 중으로 배출한다. 이러한 대형 점오염원에 의한 대기오염 배출은 공간적으로 볼 때 충남 및 수도권 등 인구 밀집지역에 대한 초미세먼지 노출을 가중시킬 것으로 예상된다.

Kim *et al.* (2016a)에 따르면 2010년 대기질 모사를 통해 국내 화력발전시설 배출량이 수도권 지역 $\text{PM}_{2.5}$ 연평균 농도를 기준으로 약 $0.63 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 를 기여하며, 화력발전시설 발전용량이 동일 조건으로 500 TWh 증가하면 수도권 $\text{PM}_{2.5}$ 농도가 $1 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 가량 증가할 것으로 예측하였다. 또한 GREENPEACE (2016)는 석탄 화력발전시설에 의해 발생하는 초미세먼지로 인해 매년 최대 1,600명의 조기사망자가 발생하며, 중설 계획 중인 발전소가 가동되면 최대 1,200명의 조기사망자 수가 증가할 것이라고 전망하였다.

다만, 이런 연구들은 단년도에 대한 대기질 모사로, 대상 기간이 변화함에 따라 석탄화력 등의 기여도는

다르게 평가될 수 있다. 특히 수도권 등 국내에서 장기간에 걸친 미세먼지 농도 변화는 풍속 등 기상요소의 영향을 크게 받는 점을 감안하면(Kim *et al.*, 2016b) 보다 장기간에 걸친 평가가 필요할 것이다. 이와 더불어 국립환경과학원의 배출목록 자료는 매년 주기적으로 업데이트되므로 최신 배출자료를 활용한 비교 평가도 필요할 것으로 판단된다.

이에 본 연구에서는 충남지역에 위치한 화력발전 등 대형 점오염원에 대한 기여도 분석을 서로 다른 모사기간과 배출목록 자료에 대해 수행하여, 모사 입력 조건 변화에 따른 기여도 차이를 정량적으로 평가하였다. 이를 위해 배출자료는 국립환경과학원의 2010년과 2013년 CAPSS (Clean Air Policy Support System) 배출목록을 이용하였고, 대상기간을 2010년과 2014년으로 정하였다. 또한, 오염물질 배출제어의 효용성을 평가하기 위한 한 방편으로 단위 배출량당 모사 기여농도 변화, 즉 전환율을 산정하였다.

2. 연구 방법

2.1 대상 모사기간 및 지역

본 연구의 모사기간은 기상장에 대한 차이를 검토하기 위해 2010년과 2014년을 모사 대상기간으로 설정하였다. 2010년의 경우 수도권 2차 기본계획 수립 시 기본년도로 이용되었으며, 2014년은 최근 년도 중 모사평가를 위해 관측값이 확보될 수 있는 기간을 선택하였다. 모사월은 계절을 대표할 수 있는 한 달씩을 대상으로 1월, 4월, 7월, 그리고 10월에 대해 수행하였다. 모사영역은 동북아 지역을 포함하는 27 km 격자 해상도와 한반도를 포함하는 9 km 격자 해상도로 설정하였다(그림 1). 기여도 분석은 화력발전을 포함하여 대형 점오염원이 위치하고 있는 충남지역 및 이와 인접하고 있으며 인구밀도가 높은 서울, 인천, 경기 등 수도권 지역을 대상으로 진행하였다.

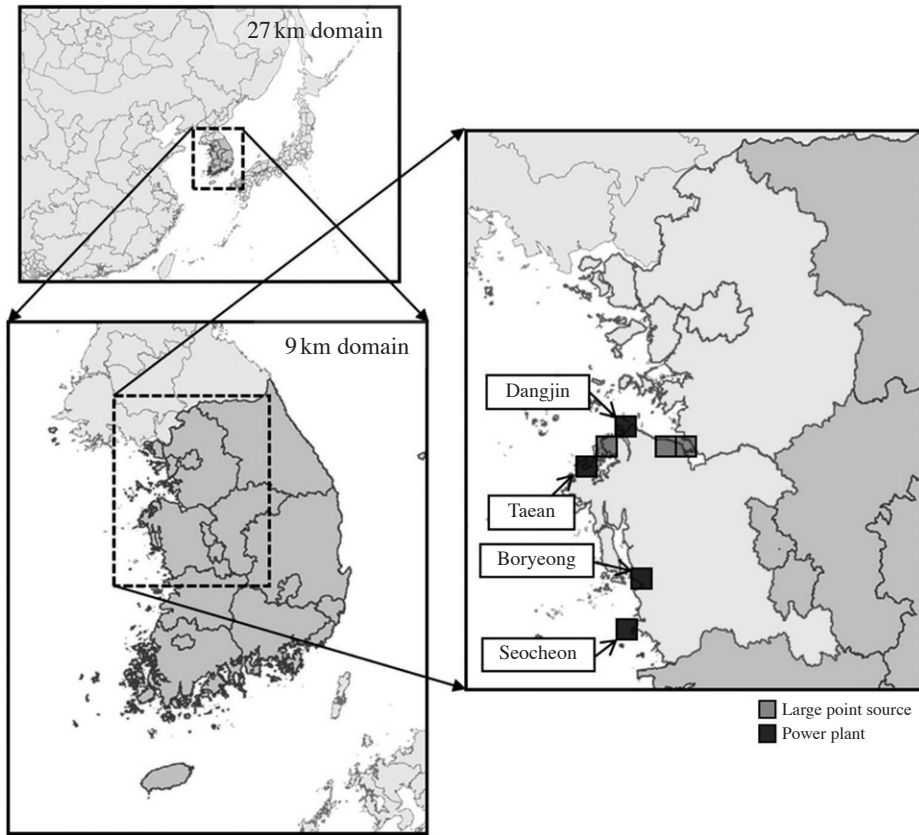


Fig. 1. CMAQ modeling domains at horizontal resolutions of 27 km and 9 km, and the locations of large point sources in Chungcheongnam-do (CN).

2.2 기상 입력자료

기상 입력자료 마련을 위해 NCEP (The National Center for Environmental Prediction)에서 제공하는 FNL (Final Operational Global Analysis data) 분석장을 이용하여 기상 모델인 WRF (Weather Research and Forecast; Skamarock *et al.*, 2008) version 3.4.1을 통해 기상자료를 마련하였다. 본 연구에서 사용한 상세 구성을 표 1에 정리하였다. 또한 도출된 결과를 대기질 모사에 적합한 기상자료로 전환하기 위해 MCIP (Meteorology-Chemistry Interface Processor) version 3.6을 이용하였다.

2.3 배출량 입력자료

모사에 이용된 배출량은 식생에서 발생하는 자연배출량과 산업 및 발전 등의 활동에 의해 발생하는 인위

적 배출량으로 나뉜다. 인위적 배출량의 경우에는 국내 배출원과 국외 배출원의 배출량으로 구분할 수 있다. 자연배출량은 MEGAN (Model of Emissions of Gases and Aerosols from Nature; Guenther *et al.*, 2006)을 통해 산정하였으며, 국내 인위적 배출량은 2010년과 2013년 CAPSS (Clean Air Policy Support System) 배출목록을 SMOKE (Sparse Matric Operator Kernel Emissions; Benjey *et al.*, 2001) 처리를 통해 시공간 할당 및 화학종을 분배하여 준비하였다. 국외 인위적 배출량의 경우, MICS-Asia (The Model Inter-Comparison Study for Asia) 2010과 CREATE (Comprehensive Regional Emissions inventory for Atmospheric Transport Experiments) 2010을 사용하여 산정하였다. 모사에 따른 자세한 배출량 이용은 표 2에 제시하였다.

Table 1. WRF and CMAQ configurations used in the study.

WRF		CMAQ	
Version	3.4.1	Version	4.7.1
Micro physics	WSM 6-class	Chemical mechanism	SAPRC99
Cumulus scheme	Kain-Fritsch	Aerosol module	AERO5
Long wave radiation	RRTM	Boundary condition	Default profile for the 27 km domain
Short wave	Goddard	Advection scheme	YAMO
PBL scheme	YSU	Horizontal diffusion	Multiscale
LSM scheme	NOAH Land	Vertical diffusion	Eddy
		Cloud scheme	RADM

Table 2. Descriptions of meteorology, emissions, and target years used for WRF-CMAQ simulations.

		Case 1	Case 2	Case 3
Meteorology (Initial data)		WRF w/ FNL & MCIP		
Emissions	Domestic	CAPSS 2010	CAPSS 2010	CAPSS 2013
	Foreign	MICS-Asia 2010	MICS-Asia 2010	CREATE 2010
Simulation year		2010	2014	2014

2.4 대기질 모사

충남 대형 점오염원의 영향을 분석하기 위한 대기질 모사는 3차원 광화학 모델인 CMAQ (Community Multiscale Air Quality; Byun and Ching, 1999) version 4.7.1을 통해 수행하였으며, 사용된 상세구성을 표 1에 보였다. 가스상 반응은 SAPRC99 (Statewide Air Pollution Research Center, Version 99; Carter, 2000) 화학 메커니즘을 사용하였으며 에어로졸 모듈은 AERO5 (fifth generation CMAQ aerosol module)을 이용하였다. 수직 확산의 경우에는 Eddy를 선택하고 구름 옵션은 RADM (Regional Acid Deposition Model)로 선정하여 모사를 수행하였다. 27-km 모사영역에 대한 경계조건은 프로파일(profile)을 이용하였으며, 9-km 모사영역에 대해서는 등지격자화를 통한 경계조건을 이용하였다. 각 모사월마다 10일의 스피업 (spin-up) 기간을 추가하였다.

2.5 기여도 분석

현재 대기질 모사의 결과를 이용한 기여도 분석은 Brute Force Method (BFM), Decoupled Direct Method (DDM), High-order Decoupled Direct Method (HDDM), Particulate Source Apportionment Technology (PSAT) 등의 다양한 방법으로 수행이 가능하다 (Kim *et al.*, 2016a, c; ENVIRON International Corpo-

ration, 2014; Kim, 2011; Cohan, 2004). 이 중 BFM은 일반적으로 사용되는 기여도 분석 방법으로 영향을 확인하고자 하는 하나의 변수를 선택, 수정하여 대상이 되는 변수의 영향을 확인하는 방법으로 The European Monitoring and Evaluation Programme (EMEP)에서는 BFM에 대하여 방법론을 제시하였다(Bartnicki, 1999).

본 연구에서는 충남지역의 대형 점오염원이 포함된 격자의 배출량을 EMEP에서 제시하는 두 번째 방법과 같이 20% 삭감하여 대기질 모사를 수행하였으며, 이를 수식화하여 식(1)에 보였다. 식(1)의 $A_{S,-20\%}$ 는 기여농도를 나타내며 C_B 는 기본 모사 농도, $C_{S,-20\%}$ 는 배출량을 삭감한 모사의 농도를 나타낸다. 20% 삭감한 배출량을 이용한 모사를 통해 민감도를 도출하고 그 값에 5를 곱하여 대상 배출원에 의한 기여농도를 계산하였다.

$$A_{S,-20\%} = 5 \times (C_B - C_{S,-20\%}) \tag{1}$$

충남지역 대형 점오염원의 기여도 분석을 위해 3가지 사례에 대하여 대기질 모사를 수행하였으며, 배출량과 기상자료를 기준으로 선정한 대상 사례에 대한 상세 정보를 표 2에 보였다. Case 1은 국내의 인위적 배출량으로 CAPSS 2010 배출목록을 사용하였으며, 국외 인위적 배출량으로 MICS-Asia 2010을 사용하여 2010년에 대한 대기질 모사를 수행한 사례이며, Case

Table 3. Emissions of target large point sources in CN (Unit: TPY).

	NO _x	SO ₂	NH ₃	PM ₁₀	PM _{2.5}	CO
2010	71,051	39,217	6,490	1,868	1,091	14,168
2013	78,776	52,605	7,534	3,203	2,281	17,100
Changes (2013~2010)	+7,725 (↑10.8%)	+13,387 (↑34.1%)	+1,044 (↑16.1%)	+1,335 (↑71.5%)	+1,189 (↑109%)	+2,931 (↑20.7%)

Table 4. Modeled performance statistics of observed and simulated 2-m temperature in the 9-km resolved domain.

	January		April		July		October	
	2010	2014	2010	2014	2010	2014	2010	2014
Mean observed temp (°C)	-1.65	0.42	9.62	13.01	25.07	24.72	14.41	14.77
Mean modeled temp (°C)	-1.79	0.41	8.88	12.40	23.76	23.46	13.93	14.59
R	0.97	0.96	0.97	0.98	0.93	0.94	0.98	0.97
Bias (°C)	-0.14	-0.01	-0.75	-0.69	-1.31	-1.26	-0.47	-0.18
RMSE (°C)	1.24	1.35	1.30	1.28	1.64	1.58	0.97	0.98
IOA	0.98	0.97	0.97	0.98	0.90	0.93	0.99	0.99

2는 국내외에 대하여 Case1과 동일한 배출목록을 사용하여 2014년 모사를 수행한 사례이다. Case 3은 Case 2와 동일한 기간에 대하여 국내 인위적 배출량으로 이용 가능한 최신의 배출목록인 CAPSS 2013를 사용하고 국외 인위적 배출량으로 CREATE 2010을 사용하여 대기질 모사를 수행한 사례이다. Case 1과 Case 2의 결과 비교를 통해 해당 연도의 기상 조건에 의한 기여도 차이를 보았으며 배출량에 의한 기여도 차이는 Case 2와 Case 3의 비교를 통하여 비교 분석하였다.

3. 결 과

3.1 배출량 분석

본 연구에서는 화력발전시설을 포함한 충남 대형 점오염원의 배출량을 9-km 모사영역에서 선정하였으며, 해당 배출원이 위치한 7개 격자를 그림 1에 보였다. 대형 점오염원 선별 기준은 모사에 이용된 CAPSS 배출목록에서 SCC (Source Classification Code)를 바탕으로 점오염원 중 1종과 2종 사업장을 대상으로 구분하였다. 본 연구에서는 대형 사업장과 동일 격자에 위치한 면오염원의 경우도 대형 점오염원 시설의 일부로 간주하여 민감도 분석에 포함하였다. 다만, 이 경우 대상 사업장 이외의 배출량이 포함될 수 있다. 대형 점오

염원의 배출량의 수직적 할당을 고려하여 배출격자에 대한 모든 층에 변화시켰다. 이러한 접근 방식은 다소 부정확한 배출량 정보가 이용될 소지가 있으나, 현재의 CAPSS 배출량 목록에서 대상 사업장을 명확히 구분하지 못하는 제한점을 해결하기 위한 방법으로 강구되었다. 분석 대상 격자의 NO_x와 SO₂ 배출량에 대하여 정량적으로 비교하여 표 3에 물질별로 정리하였다.

해당 격자의 배출량은 2010 CAPSS보다 2013 CAPSS에서 높은 값을 보였으며, 이는 신규 배출원 추가 등이 포함되었기 때문으로 생각된다. 각 배출물질별 변화를 보면 SO₂ 13,387톤/년, NO_x 7,725톤/년, NH₃ 1,044톤/년 및 CO 2,931톤/년 등이 증가하였다. 미세먼지 배출량의 경우, PM₁₀ 1,335톤/년, PM_{2.5} 1,189톤/년으로 2013년에 증가한 PM₁₀ 배출량 중 약 89%가 PM_{2.5}라는 것을 확인할 수 있다.

3.2 기상자료

기상 모사결과의 신뢰도 확보를 위해 기상청 관측값을 이용하여 2-m 온도 및 10-m 풍속에 대한 모사 수행 평가를 하여 표 4와 5에 통계값을 보였다. 2-m 온도는 계절별 차이가 뚜렷하게 나타났으며 R값이 0.93~0.98 사이로, 모사년도에 대한 차이는 1월과 4월에 2014년이 2010년에 비해 높은 온도가 관측, 모사되었다. 10-m 풍속은 모사기간 중 편차범위가 0.82~1.85 m/s로 전반적인 과대 모사를 보였으나 R값은 0.83~0.94

Table 5. Modeled performance statistics of observed and simulated 10-m wind speed in the 9-km resolved domain.

	January		April		July		October	
	2010	2014	2010	2014	2010	2014	2010	2014
Mean observed temp (m/s)	2.43	2.10	2.64	2.21	2.05	2.01	1.91	1.97
Mean modeled temp (m/s)	4.28	3.71	4.07	3.30	2.98	2.83	3.34	3.44
R	0.94	0.89	0.91	0.83	0.89	0.90	0.84	0.86
Bias (m/s)	1.85	1.61	1.43	1.09	0.94	0.82	1.43	1.47
RMSE (m/s)	1.95	1.77	1.73	1.34	1.08	1.01	1.61	1.72
IOA	0.63	0.64	0.75	0.71	0.72	0.78	0.65	0.64

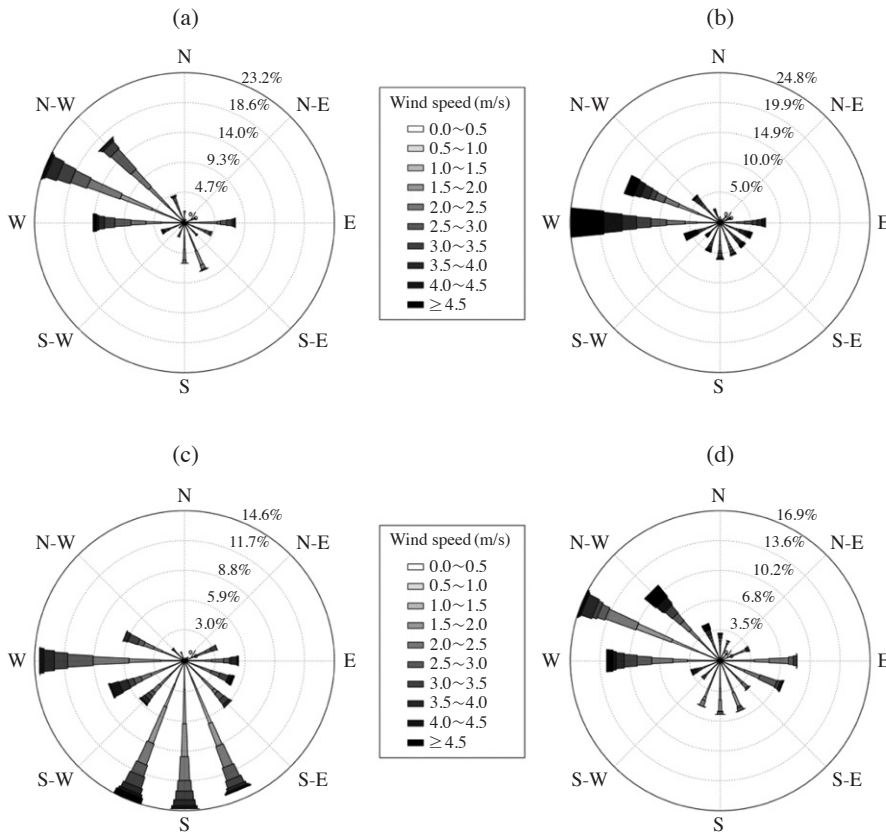


Fig. 2. Wind roses at Suwon for the modeled months; (a) January, (b) April, (c) July, and (d) October in 2010.

로 경향성은 유사하게 묘사되었다. 1월의 경우 2010년 10m 풍속은 평균적으로 1.85 m/s, 2014년에는 1.61 m/s 과대 묘사하여 대상기간 중 관측값과 가장 큰 차이를 보였다. 기온과 마찬가지로 1월과 4월에 2014년 10-m 풍속이 2010년에 비해 낮게 관측되었으며, 이러한 경향은 모델에서도 유사하게 나타난다.

그림 2와 3은 모사월별 주풍향 변화를 이해하기 위해 2010년과 2014년 모사월에 대하여 분석 대상 가운데 위치하는 기상청 수원기상대를 중심으로 바람 장미도를 보인 것이다. 1월의 경우 서~북서 계열의 바람이 집중적으로 나타나며, 4월의 경우 서풍이 차지하는 비율이 2010년 25%, 2014년 19% 정도를 보이며, 서북서

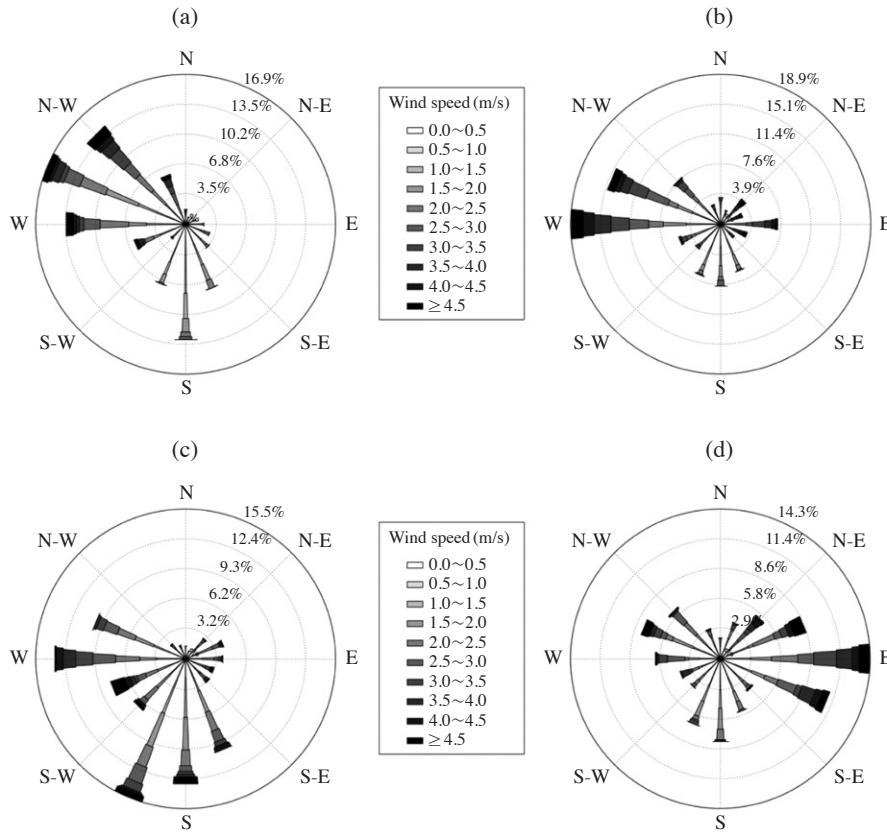


Fig. 3. Wind roses at Suwon for the modeled months; (a) January, (b) April, (c) July, and (d) October in 2014.

계열의 바람도 두 해 모두 15% 이상 나타난다. 7월의 경우 2010년과 2014년 모두 남풍계열이 바람이 두드러지는데, 이로 인해 충남지역의 바람에 의해 수도권 지역으로 이송되면서 영향을 미칠 가능성이 높을 것으로 판단된다. 2010년과 2014년 대해 가장 큰 풍향 차이를 보이는 모사월은 10월로, 2010년의 경우 1월과 유사하게 서풍~북서풍이 주를 이루는 반면, 2014년에는 동풍 계열이 주풍향으로 보이며, 남풍 계열과 서풍~북서풍이 나머지를 구성한다. 본문에는 보이지 않았으나 서울 기상대 분석자료도 유사한 계절 변화를 보인다.

대기질 모사의 수행평가를 위해 관측값과 모사값의 차이를 각 사례에 대하여 표 6에 정리하였다. 본 연구의 대상 물질인 PM_{2.5}에 대하여 대상기간 동안 수도권에서 이용 가능한 관측값을 모사값과 비교하였다. 2010년의 경우에는 불광, 구월, 고천, 석모, 심곡, 송정, 관인 및 강하 지역에 위치한 광화학 측정소 자료를 평

균하여 비교하였다. 2014년은 불광 집중측정소 관측자료가 이용 가능하여 이를 모사값과 비교하였다.

표 6에서 PM_{2.5} 모사값은 관측값과 비교하여 전반적으로 과소 모사하는 경향을 보였으며, 모든 사례에 대하여 10월에 가장 유사하게 나타났다. 1월과 4월에 과소 모사가 두드러지는 이유는 서풍이 우세한 시기로 고농도가 나타나며, 장거리 이동에 의한 영향이 증가하기 때문으로 판단된다. 이러한 계절별 모사특성은 선행연구에서도 언급되어 있다(Kim *et al.*, 2017). RMSE (Root Mean Square Error) 역시 10월에 2.45 μg/m³ (Case 1), 2.48 μg/m³ (Case 2) 및 2.68 μg/m³ (Case 3)로 가장 작게 나타났다. IOA (Index of Agreement)는 Case 1과 Case 2의 경우 10월에 각각 0.93, 0.89였으며, Case 3은 1월에 0.90를 보였다.

Case 2를 Case 1과 Case 3에 대해 비교해보면 전반적으로 Case 2는 동일한 배출량을 이용한 Case 1보다

Table 6. Modeled performance statistics of observed and simulated surface PM_{2.5} concentrations.

	Month											
	January			April			July			October		
	Case 1	Case 2	Case 3	Case 1	Case 2	Case 3	Case 1	Case 2	Case 3	Case 1	Case 2	Case 3
Mean observed PM _{2.5} (µg/m ³)	44.55	48.40	48.40	32.06	45.90	45.90	30.82	35.33	35.33	32.16	22.68	22.68
Mean modeled PM _{2.5} (µg/m ³)	30.61	39.71	44.86	24.21	29.15	29.87	18.66	30.88	29.56	27.76	23.67	21.36
Normalized mean bias (%)	-31	-18	-7	-24	-36	-35	-39	-12	-16	-14	4	-6
Gross error (µg/m ³)	0.33	0.22	0.23	0.25	0.37	0.37	0.43	0.30	0.33	0.20	0.32	0.32
Root mean square error (µg/m ³)	6.00	4.75	4.32	3.01	7.26	6.94	5.36	4.58	4.94	2.45	2.58	2.68
Coefficient of determination	0.48	0.77	0.71	0.79	0.75	0.75	0.42	0.59	0.55	0.84	0.65	0.60
Index of agreement	0.72	0.88	0.90	0.82	0.73	0.76	0.68	0.84	0.83	0.93	0.89	0.87

는 같은 기상자료를 이용한 Case 3과 보다 유사한 결과를 보이는데, 이는 모사기간 동안 배출량보다는 기상자료의 영향이 초미세먼지 모사농도에 크게 작용하는 것으로 보인다.

Case 2와 Case 3의 경우 2014년에 대한 모사로 2010년에 비해 1월과 4월의 낮은 풍속으로 인한 확산 감소 등으로 기여농도 또한 증가한 것으로 보인다. Case 3의 경우 Case 2에 비해 1월 PM_{2.5} 모사농도가 5 µg/m³ 가량 높게 모사된다. 이는 국내 배출량 변화에 의한 영향보다는 국외 배출량 변화에 의한 영향으로 파악되며, 기존연구에서 1월을 포함한 겨울철에 국외 영향이 크게 증가하는 것으로 보고되었다(Lee and Kim, 2007; He *et al.*, 2003). 장거리 이동 영향이 감소하는 다른 모사월에 대해서는 유사한 모사농도를 보인다. 10월의 경우 Case 1이 Case 2와 Case 3에 비해 PM_{2.5}를 높게 모사하였는데, 이는 월별 배출량 변화, 오염원 위치, 연돌 높이 등 배출 특성이 반영된 것으로 판단된다.

3.3 기여도 분석

그림 4에 각 사례별 PM_{2.5} 월평균 기여농도의 공간 분포를 보이며, 지역별 PM_{2.5} 월평균 및 연평균 기여농도를 표 7에 정리하였다. 다만 표 7의 경우 그림 4에서처럼 대상 오염원에 대한 영향이 크게 나타나는 충남과 수도권 지역에 한정하였다. 표 7에 보인 모사 기여도는 각 사례별 모사농도 대비 대상 오염원의 영향을 보인 것으로 중국 등 외부 요인에 의해 상대적인 기여도는 차이를 보일 수 있다. 앞서 언급한 바와 같이 각 모사사례는 동일한 배출량이 이용된 사례(Cases 1과 2)와 동일한 기상 조건이 적용된 사례(Cases 2와 3)로 나뉘 볼 수 있다. 배출량의 경우 Case 1 대비 Case 2에서

NO_x 10.8%, SO₂ 34.1%, PM_{2.5} 109% 증가가 있었으며(표 3 참조), 기상은 그림 2와 3에 제시된 바와 같이 10월에 대해 풍향 차이가 두드러진다.

기여농도 또한 동일한 기상자료를 이용한 Case 2와 Case 3에서 1월을 제외하면 유사하게 모사되었으며, 본 연구에서 대상이 된 배출원의 PM_{2.5} 기여농도는 배출량 변화보다는 기상자료 변화에 보다 민감한 차이를 보이는 것으로 모사되었다. 특히, 수도권에 대하여 연평균 기여농도는 Case 1에 비해 Case 2에서 3배 가량 높게 나타나며, 충남에 대해서도 50% 정도 높게 모사되었다. 이는 기여농도 산정이 기상 조건에 의해 크게 변화함을 보여주며, 모사기간 설정이 기여농도 산정에 있어 중요할 수 있음을 의미한다.

전반적인 PM_{2.5} 기여농도는 Case 3 > Case 2 > Case 1 순으로 모사되며, Case 1에서는 충남지역에 대한 기여도가 다른 수도권 지역에 비해 2배 정도 높게 제시되는 반면, Case 2와 Case 3의 경우 지역별 기여농도는 큰 차이를 보이지 않는다.

지역별 기여농도를 살펴보면 Case 1과 Case 3의 경우 충남지역에서의 연평균 기여농도가 각각 1.04 µg/m³, 1.86 µg/m³로 대상지역 중 가장 높게 나타난다. Case 2의 경우, 배출지역인 아닌 경기지역에서 1.53 µg/m³로 가장 높은 기여농도를 보이는데, 이는 PM_{2.5}와 같이 2차 생성이 중요한 대기오염물질의 경우 원인 분석 및 개선방안 마련을 위해서는 자체 배출량 외에 풍상의 영향을 고려할 수 있는 광역적인 접근이 필요함을 보인다. 보다 구체적으로 모사된 공간분포를 보면 모든 사례에서 충남지역을 포함하여 경기 남부, 충북 등 인근지역에서 뚜렷한 영향이 나타나며, 이는 향후 충남 배출원에 대한 관리는 충남 지역은 물론 수도

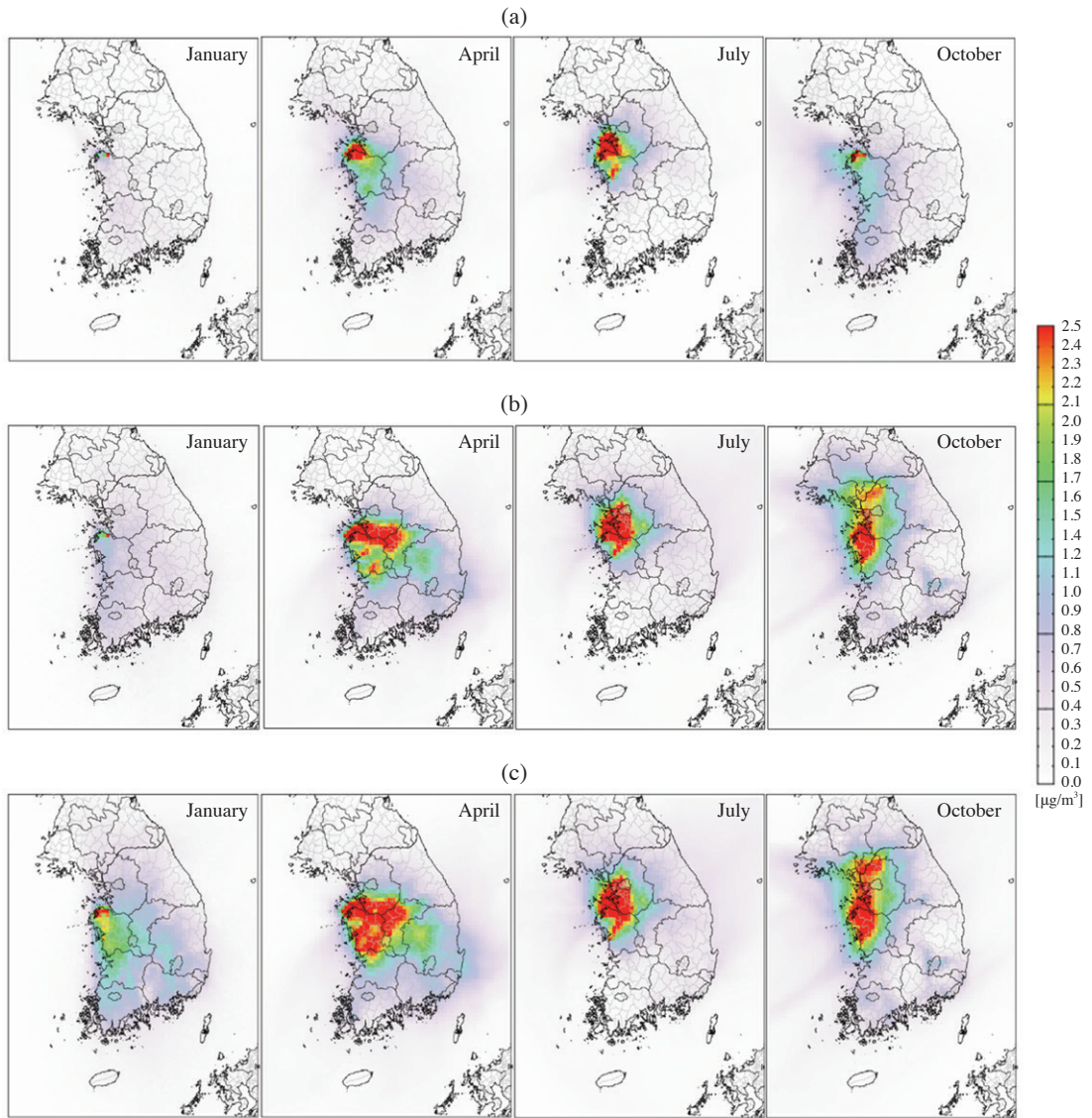


Fig. 4. Spatial distributions of monthly averaged contributions of CN large point sources on monthly PM_{2.5} concentrations for (a) Case 1, (b) Case 2, and (c) Case 3.

권, 충북 등 인근지역에 대한 대기질 개선을 도모할 수 있음을 의미한다.

모사월별 기여농도를 살펴보면 모든 사례에 대한 1월 평균 기여농도는 다른 모사월에 비해 낮게 나타나며, 이는 앞서 설명한 바와 같이 겨울철인 1월의 경우 낮은 기온으로 인해 대상 배출원에 의한 PM_{2.5} 2차 생성 영향이 낮기 때문으로 판단된다. 다만, 1월에 PM_{2.5}

농도가 높게 모사되는 것은 중국 등 국외로부터의 장거리 이동 영향이 크게 나타나기 때문으로 사료된다. 그림 2에서 1월 모사의 경우 주 풍향인 북서풍을 따라 남동쪽으로 배출원으로부터 초미세먼지 영향이 퍼져감을 볼 수 있다. 수도권 지역에 대한 1월 평균 기여농도는 0.51~1.66 µg/m³이며, 충남에 대한 기여도는 1.04~1.86 µg/m³로 수도권에 비해 높게 나타난다.

Table 7. Monthly and annual average contributions of PM_{2.5} from CN large point sources for (a) Case 1, (b) Case 2, and (c) Case 3 (Unit: µg/m³).

Month	Case #	Receptor			
		Seoul	Incheon	Gyeonggi	CN
January	1	0.12 (0.3%)	0.14 (0.4%)	0.15 (0.4%)	0.40 (1.3%)
	2	0.48 (1.1%)	0.40 (1.1%)	0.51 (1.3%)	0.76 (2.2%)
	3	0.77 (1.7%)	0.62 (1.5%)	0.83 (1.9%)	1.64 (4.2%)
April	1	0.47 (1.8%)	0.66 (2.5%)	0.68 (2.8%)	1.47 (7.1%)
	2	1.01 (3.4%)	0.99 (3.8%)	1.40 (4.9%)	2.21 (9.6%)
	3	1.15 (3.8%)	1.04 (4.0%)	1.45 (4.8%)	2.61 (9.8%)
July	1	1.09 (5.5%)	1.66 (7.9%)	1.31 (6.9%)	1.20 (9.8%)
	2	2.42 (8.6%)	2.43 (9.0%)	2.23 (8.5%)	1.37 (7.2%)
	3	2.48 (9.2%)	2.43 (9.5%)	2.26 (8.8%)	1.50 (7.7%)
October	1	0.35 (1.2%)	0.36 (1.2%)	0.39 (1.3%)	1.08 (4.3%)
	2	2.00 (8.2%)	2.28 (9.7%)	2.00 (8.7%)	1.59 (9.4%)
	3	2.11 (9.7%)	2.41 (11.5%)	2.09 (10.1%)	1.70 (10.2%)
Annual	1	0.51 (1.8%)	0.71 (2.5%)	0.63 (2.3%)	1.04 (4.7%)
	2	1.48 (4.8%)	1.52 (5.4%)	1.53 (5.2%)	1.48 (6.3%)
	3	1.63 (5.3%)	1.62 (5.7%)	1.66 (5.6%)	1.86 (7.3%)

4월은 충남, 충북 및 전북, 경북 일부와 경기 남부에서 1~2 µg/m³ 이상의 영향이 나타나며, 수도권에 대한 기여도는 0.47~1.45 µg/m³, 충남에 대한 기여도는 1.47~2.61 µg/m³로 1월에 비해 현저하게 증가함을 보인다.

7월에는 수도권에 대한 영향은 1.09~2.48 µg/m³로 4월에 비해 증가하며, 충남에 대한 영향은 1.20~1.50 µg/m³로 4월에 비해 감소하는 것으로 모사되었다. 이는 7월 동안 주풍향이 남태평양 고기압에 의해 충남의 1차 배출물질뿐 아니라 전구물질도 수도권으로 이동하면서 2차 PM_{2.5}를 생성하기 때문으로 분석된다. 특히, 지역평균으로 볼 때, 충남에 대한 기여도보다 수도권에 대한 기여도가 더 크게 나타난다.

Case 2와 Case 3의 경우 10월 모사에서 PM_{2.5} 기여농도 경기 북부지역까지 2 µg/m³ 이상 높게 나타나는 반면, Case 1의 경우 주로 충남과 서해 앞바다에 영향 범위가 확인되며 수도권에 대한 영향은 다른 사례에 비해 제한적으로 나타난다. 이는 2010년과 2014년의 10월에 대한 기상모사 차이에 인한 결과로 판단된다. 이러한 결과는 기여도 분석 시 이용되는 기상자료에 따라 산정되는 결과가 크게 변할 수 있는 가능성과 장기간에 걸친 기여도 분석이 필요성을 보여준다.

점오염원에서 배출되는 물질은 1차 미세먼지와 질소산화물, 황산화물과 같은 가스상 오염물질이 있으며,

이런 가스상 전구물질들은 대기 중에서 산화되어 미세 먼지를 구성하게 된다. 이러한 2차 생성은 배출, 기상, 주변 조건에 따라 달라질 수 있으므로, 구성 성분별 PM_{2.5} 기여도를 분석하고자 그림 5에 영향이 큰 충남 및 수도권의 행정구역별 PM_{2.5} 월평균 기여농도 및 PM_{2.5} 성분비를 증인하여 보였다.

그림 5에서 PM_{2.5} 구성성분 농도의 지역별, 계절별 차이가 보이나, 대체적으로 질산염의 비율이 가장 크게 모사되며, 그 외에 황산염과 1차 초미세먼지, elemental carbon, organic carbon 등도 충남 대형 점오염원에 의해 증가함을 볼 수 있다. 또한 암모늄 성분농도 또한 질산염과 황산염 증가와 함께 증가함을 확인할 수 있다. 다만, 암모늄의 경우 대상 오염원에서 직접 배출되어 기여농도를 증가시켰다고보다는 암모니아 농도가 풍부한 상태에서 (Kim *et al.*, 2017) 산성물질 증가에 따라 초미세먼지로 전환된 것으로 추정된다.

3.4 배출량-농도 전환율

충남지역 대형 점오염원의 배출량과 이로 인해 추가되는 PM_{2.5} 기여농도를 바탕으로 ‘배출량-농도 전환율’을 산정하고, 모사 사례별 차이를 비교하였다. 표 8은 NO_x, SO₂, 그리고 Primary PM_{2.5} (PPM) 배출량을 대상으로 PM_{2.5}로의 전환율을 산정한 결과로 주요 배출물

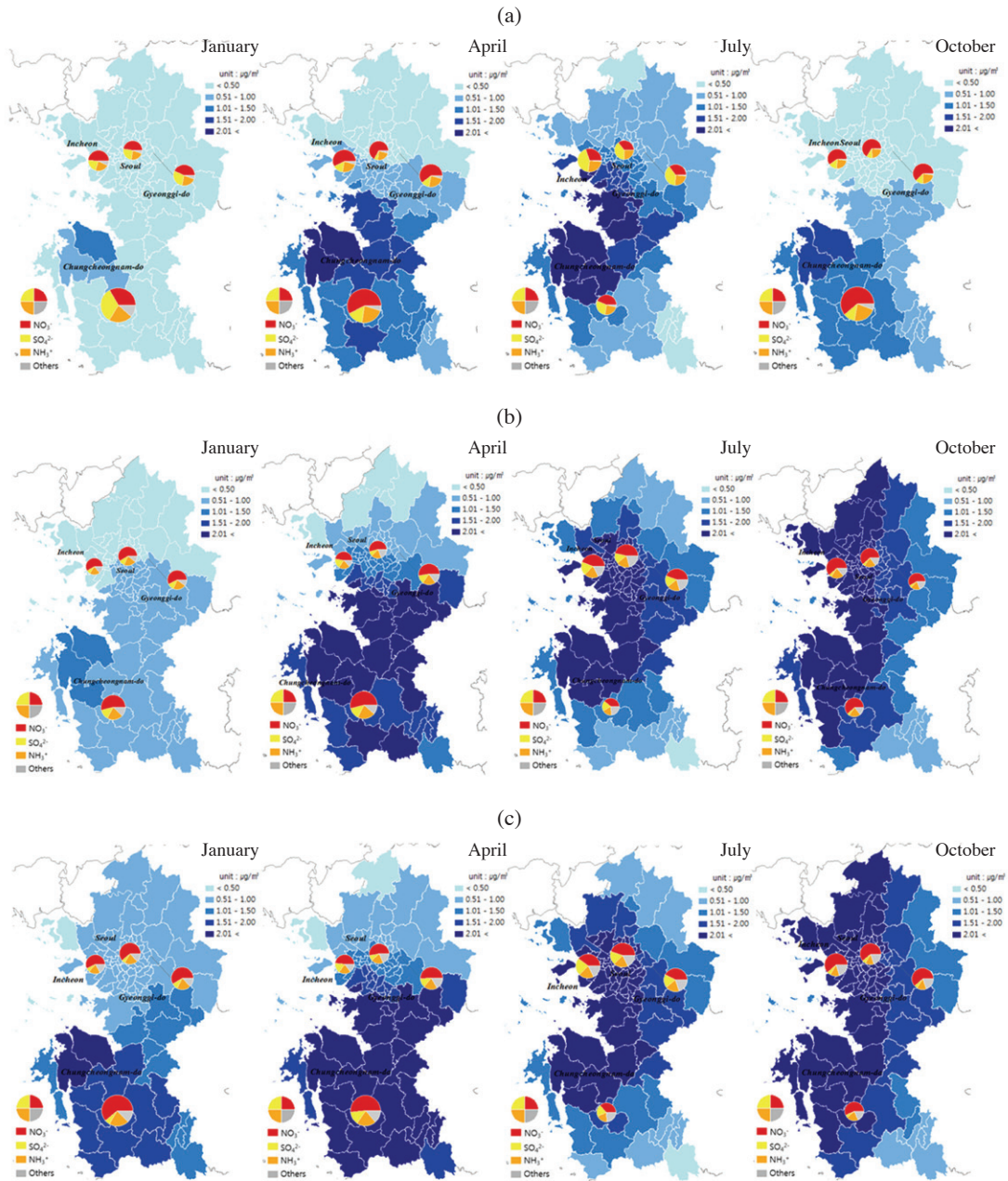


Fig. 5. Monthly averaged contributions of CN emissions to the total $\text{PM}_{2.5}$ concentrations and $\text{PM}_{2.5}$ components for jurisdictions in the Seoul Metropolitan Area and CN; (a) Case 1, (b) Case 2, and (c) Case 3. Sizes of pie charts represent relative monthly average $\text{PM}_{2.5}$ contributions among Seoul, Incheon, Gyeonggi, and CN.

질 중 직접 배출의 황산염과 질산염 농도에 따라 대기 중 기존 농도 영향을 받는 암모니아와 화력발전 등 연소과정에서 낮은 배출량을 보이는 휘발성 유기물질의

전환율은 제외하였다.

수도권과 충남지역의 $\text{PM}_{2.5}$ 로의 전환율 중 가장 큰 차이를 보이는 물질은 PPM이며, 충남지역이 수도권지

Table 8. Summary of emissions from CN large point sources, PM_{2.5} contributions, and emission-to-PM_{2.5} conversion rates for (a) Case 1, (b) Case 2, and (c) Case 3.

(a) Case 1 emissions (Unit: TPY)		PM _{2.5} contributions (Unit: µg/m ³)			Emissions-to-PM _{2.5} conversion rates (Unit: 10 ⁻⁶ µg/m ³ /TPY)		
			SMA	CN		SMA	CN
NO _x	71,051	Nitrate	0.280 (3.1%)	0.541 (6.3%)	NO _x -to-Nitrate	3.94	7.61
SO ₂	39,217	Sulfate	0.174 (6.7%)	0.207 (15.2%)	SO ₂ -to-Sulfate	4.43	5.28
Primary PM _{2.5}	1,091	Primary PM _{2.5}	0.014 (1.0%)	0.045 (2.5%)	Primary PM _{2.5} -to-PM _{2.5}	12.4	41.3
(b) Case 2 emissions (Unit: TPY)		PM _{2.5} contributions (Unit: µg/m ³)			Emissions-to-PM _{2.5} conversion rates (Unit: 10 ⁻⁶ µg/m ³ /TPY)		
			SMA	CN		SMA	CN
NO _x	71,051	Nitrate	0.801 (9.3%)	0.765 (9.4%)	NO _x -to-Nitrate	11.3	10.8
SO ₂	39,217	Sulfate	0.167 (15.4%)	0.184 (17.2%)	SO ₂ -to-Sulfate	4.26	4.68
Primary PM _{2.5}	1,091	Primary PM _{2.5}	0.014 (2.7%)	0.050 (3.3%)	Primary PM _{2.5} -to-PM _{2.5}	13.0	45.9
(c) Case 3 emissions (Unit: TPY)		PM _{2.5} contributions (Unit: µg/m ³)			Emissions-to-PM _{2.5} conversion rates (Unit: 10 ⁻⁶ µg/m ³ /TPY)		
			SMA	CN		SMA	CN
NO _x	78,776	Nitrate	0.856 (11.0%)	0.969 (12.8%)	NO _x -to-Nitrate	10.9	12.3
SO ₂	52,605	Sulfate	0.196 (14.6%)	0.213 (18.9%)	SO ₂ -to-Sulfate	3.73	4.04
Primary PM _{2.5}	2,281	Primary PM _{2.5}	0.042 (2.9%)	0.116 (3.8%)	Primary PM _{2.5} -to-PM _{2.5}	18.3	50.7

역보다 약 3배 정도 높은 값을 보인다. PPM의 경우, 2차적으로 생성되는 물질이 아니라 오염원으로부터 발생하는 1차 오염물질이기 때문에 대상 배출원이 위치한 충남지역에서 기여농도가 크게 나타나고, 전환율 역시 다른 물질과 비교하여 높게 나타난다. 실제 PPM-to-PM_{2.5} 전환율(이하 PPM 전환율)은 dilution factor 또는 dispersion factor에 가깝다.

SO₂-to-sulfate 전환율(이하 SO₂ 전환율)은 모든 사례에 대해 유사하게 나타나며, 지역에 따른 큰 차이는 보이지 않으나 배출지역인 충남에서 수도권 지역에 비해 10~20%가량 높은 값을 보인다.

NO_x-to-nitrate 전환율(이하 NO_x 전환율)은 Case 2와 Case 3에서는 SO₂ 전환율에 비해 2~3배 정도 높으며, 지역적인 차이는 10% 정도로 나타난다. 이에 비해 Case 1의 경우 충남 지역에서는 NO_x 전환율은 7.61 (10⁻⁶ µg/m³/TPY)으로 다른 모사와 유사한 수준인 반면, 수도권 지역에서는 3.94 (10⁻⁶ µg/m³/TPY)로 다른 모사의 1/3 수준을 보인다. 이로 미뤄보면 Case 1에서 10월의 PM_{2.5} 기여농도가 낮은 이유는 그림 5에서 볼 수 있듯이 PM_{2.5} 기여농도 중 많은 부분을 차지하는 질산염 기여 농도가 다른 모사에 비해 낮기 때문으로 이는 그림 2와 3에서처럼 풍속 등 기상변화에 따라 충남

대형 점오염원 배출량 중 NO_x 또는 전환된 질산염이 수도권으로 이동이 낮아졌기 때문으로 판단된다. 부연하면 충남에서의 NO_x 전환율은 다른 모사와 유사하게 나타났으나, 배출원 주변과는 다르게 바람 등의 이송 조건 변화가 중요한 풍향 지역의 수도권에서는 기상여건이 충남 대형 점오염원에의 기여도 및 전환율 결정에 영향을 주는 것으로 보인다.

모든 사례에서 질산염의 기여농도는 황산염에 비해 높은 반면, 기여율은 황산염이 높게 나타나는데, 이는 질산염의 경우 주변의 자동차 등 다양한 오염원으로부터 영향이 큰 반면, 황산염은 석탄을 이용하는 발전 등 대상 점오염원으로부터의 배출 비중이 높기 때문으로 판단된다. 또한 화력발전 등 대형 점오염원의 배출 특성상 PPM의 직접적인 기여율은 다른 2차 생성물질에 비해 높지 않음을 볼 수 있다.

모사결과에서 1차 미세먼지 전환율 대비 NO_x 전환율을 충남에 대해 비교해보면 4.12:1~5.42:1 범위를, 수도권에 대해서는 1.15:1~3.14:1의 비율을 보인다. 이는 풍하로의 이동거리가 멀어질수록 NO_x 단위 배출량 저감에 따른 PM_{2.5} 저감효과가 PPM 단위 배출량 저감과 유사한 수준으로 나타날 수 있다는 것을 의미한다. 즉, 배출원 부근에서는 PPM 전환율이 높은 반면, 표 8

에서와 같이 수도권처럼 이동거리가 멀어질수록 낮아지기 때문에 해석된다. Bolyan and Kim (2012)는 거리가 멀어짐에 따라 PPM 대비 NO_x와 SO₂ 전환율 비가 낮아짐을 보였다. PPM 전환율 대비 SO₂ 전환율은 충남에서 7.82:1~12.54:1, 수도권에서 2.79:1~4.90:1의 비를 보였으며, 수도권처럼 일정 거리 이상의 풍하지역에서 충남 대형 점오염원의 영향은 NO_x 및 SO₂처럼 가스상 오염물질 배출과 2차 생성이 중요함을 볼 수 있다.

4. 결 론

본 연구에서는 충남지역 대형 점오염원의 배출량이 배출지역 및 풍하지역 PM_{2.5} 농도에 미치는 영향 분석을 위해 3차원 광화학 모델을 이용한 대기질 모사를 수행하였다. 특히, 입력자료 변화에 따른 영향을 살펴보기 위해 배출목록으로는 2010 CAPSS와 2013 CAPSS를 이용하였으며, 모사기간에 설정에 따른 기상 변화를 고려하기 위해 2010년과 2014년에 대상으로 세 가지 사례에 대한 모사를 수행하였다.

세 가지 모사 사례에 대해 충남지역 대형 점오염원 배출량의 PM_{2.5} 연평균 기여농도는 수도권 평균 0.62 µg/m³~1.64 µg/m³ 범위에서 나타났으며, 크게는 3배 정도 차이를 보였다. 충남지역에 대하여는 1.04 µg/m³~1.86 µg/m³의 범위를 보였으며, 이러한 PM_{2.5} 기여농도는 2016년 6.3대책 (Ministry of Environment, 2016)에서 발표한 서울시 PM_{2.5} 농도 저감목표(23 µg/m³에서 20 µg/m³로 저감)를 고려하면 저감농도(3 µg/m³) 대비 30~50%를 차지할 수 있으며, 목표농도 대비 ~10%에 가까운 수치로 중요한 기여도로 판단된다.

한편 단위 배출량당 농도 변화를 통해 배출제어의 효율성을 보다 정량적으로 평가하기 위해 전환율을 산정하였다. 지역별 전환율 차이는 있으나, 충남 대형 점오염원의 영향은 SO₂보다는 NO_x 배출에 의한 영향이 크게 나타났으며, SO₂ 전환율은 NO_x 전환율에 비해 2~3배 정도 낮게 나타났다.

충남 대형 점오염원 배출의 수도권 지역 초미세먼지에 대한 영향은 2010년 10월 모사처럼 이송이 제한되는 경우 작아지는 것으로 모사되었으며, SO₂ 전환율 보다는 NO_x 전환율에서 확연한 차이를 보였는데, 이는 오염원의 배출특성과도 연관이 있을 것으로 사료된다. 지

역별로는 배출지역인 충남의 경우 1차 미세먼지와 같이 직접적인 배출의 영향이 높은 반면, 수도권처럼 일정 거리 이상의 풍하지역에서는 NO_x 및 SO₂ 전환에 의한 2차 생성이 보다 중요하게 모사된 것으로 판단된다.

모사월에 따라 배출지역인 충남보다는 수도권 지역에서 보다 높은 기여도를 보이는 것으로 모사되었는데, 이는 기상 및 배출조건에 의한 영향으로 판단된다. 특히, 월별 또는 계절별 기상변화를 보다 더 포괄적으로 고려하기 위해서는 장기간에 걸친 영향 분석이 향후 필요할 것으로 판단된다.

본 연구에서 도출된 물질별 기여농도 및 전환율은 추후 유사한 상황 및 대상 배출원에 대한 관리 및 배출량 저감 시나리오 수립 시, 저감하고자 하는 배출량이 대기질 농도에 미치는 영향 정도의 파악에 근거 자료로 이용될 수 있을 것으로 예상된다. 또한 수도권 및 충남지역의 대기질 개선을 위한 정책 수립 시 관리 대상의 중요도 및 우선순위 선정에 있어서 그 활용도가 높을 것으로 예상된다. 다만 앞서 언급한 바와 같이 입력자료에 따라 기여농도 및 전환율 산정이 달라질 수 있으므로 향후 기상 및 배출량 자체뿐 아니라 배출특성 즉 연돌 높이 및 배출원 위치 등 다양한 불확도에 대한 검토 및 개선이 필요하다.

향후 전력 생산면에서 화력발전의 건설은 불가피할 것으로 예상되나, 주변에 대한 영향이 작지 않으므로 환경비용 등을 고려한 입지 및 연료 선택, 건설 및 운영 등이 필요할 것으로 판단된다. 또한 발전시설 인근에는 전력 사용이 높은 산업단지나 도시 개발 등이 예상되는 바, 추가적인 대기오염을 방지할 수 있는 계획 수립이 필요할 것이다.

감사의 글

본 논문은 미래부의 “초미세먼지 예보를 위한 한국형 대기질 모사 시스템 개발”(NRF-2014M3C8A5030624)의 지원에 의해 연구되었으며 이에 감사 드립니다.

References

Anderson, J.O., J.G. Thundiyil, and A. Stolbach (2012) Clear-

- ing the air: a review of the effects of particulate matter air pollution on human health, *Journal of Medical Toxicology*, 8(2), 166-175.
- 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 emissions data processor and SMOKE tool input data processor in Models-3. U.S. EPA.
- Board of Audit and Inspection of Korea (2016) Audit Report: Air Quality Improvement Project Status over Seoul Metropolitan Area. <https://www.bai.go.kr/bai/cop/bbs> (accessed December 5, 2016)
- Boylan, J. and B.U. Kim (2012) Development of PM_{2.5} inter-pollutant trading ratio. Presented at 2012 Community Modeling & Analysis System (CMAS) Conference, Chapel Hill, NC, October 16, 2012.
- Byun, D.W. and J.K.S. Ching (1999) Science algorithms of the EPA Models-3 community multiscale air quality (CMAQ) modeling system. Washington, DC, USA: US Environmental Protection Agency, Office of Research and Development.
- Carter, W.P.L. (2000) Implementation of the SAPRC-99 chemical mechanism in the models-3 framework.
- Cohan, D.S. (2004) Applicability of CMAQ-DDM to Source Apportionment and Control Strategy Development. In 3rd Annual CMAS Models-3 Users' Conference, RTP, NC.
- ENVIRON International Corporation (2014) User's guide to the Comprehensive Air Quality Model with Extensions Version 6.1. http://www.camx.com/files/camxusersguide_v6-10.pdf (accessed 2016.12.07.)
- GREENPEACE (2016) Silent Killer Fine Particulate Matter - The health impacts of current and planned coal-fired power generation in South Korea and related current policy.
- 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 Discussions*, 6(1), 107-173.
- He, Z., Y.J. Kim, K.O. Ogunjobi, and C.S. Hong (2003) Characteristics of PM_{2.5} species and long-range transport of air masses at Taean background station, South Korea, *Atmospheric Environment*, 37(2), 219-230.
- Kim, B.U., O. Kim, H.C. Kim, and S. Kim (2016a) Influence of fossil-fuel power plant emissions on the surface fine particulate matter in the Seoul Capital Area, South Korea, *Journal of the Air and Waste Management Association*, 66(9), 863-873.
- Kim, J.H., D.R. Choi, Y.S. Koo, J.B. Lee, and H.J. Park (2016c) 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, K.H., E. Kabir, and S. Kabir (2015) A review on the human health impact of airborne particulate matter, *Environment international*, 74, 136-143.
- Kim, S. (2011) Ozone simulations over the Seoul Metropolitan Area for a 2007 June episode, Part I: evaluating volatile organic compounds emissions speciated for the SAPRC99 chemical mechanism, *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment*, 27(5), 580-602. (in Korean with English abstract)
- Kim, S., C.H. Bae, H.C. Kim, and B.U. Kim (2017) PM_{2.5} Simulations in the Seoul Metropolitan Area: (I) Model Contributions of Precursor Emissions in the CAPSS Emissions Inventory. *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment*, In Press. (in Korean with English abstract)
- Kim, S., H.C. Kim, B.U. Kim, C.H. Bae, E.H. Kim, S.H. You, M.A. Bae, O.G. Kim, and C.W. Park (2016b) CMAQ Simulation Study to Analyze the Long-term Variations of Criteria Air Pollutants in the Seoul Metropolitan Area during 2004~2015, 17th IUAPPA World Clean Air Congress and 9th CAA Better Air Quality Conference Clean Air for Cities Perspectives and Solutions.
- Kim, Y.P. (2006) Air Pollution in Seoul Caused by Aerosols, *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment*, 22(5), 535-553. (In Korean with English abstract)
- Lee, J.Y. and Y.P. Kim (2007) Source apportionment of the particulate PAHs at Seoul, Korea: impact of long range transport to a megacity, *Atmospheric Chemistry and Physics*, 7(13), 3587-3596.
- Leem, J.H., S. Kim, and H.C. Kim (2015) Public-health impact of outdoor air pollution for 2nd air pollution management policy in Seoul metropolitan area, Korea, *Annals of occupational and environmental medicine*, 27(1), 1.
- Ministry of Environment (2016) Fine dust countermeasure

- plan. <http://www.me.go.kr/issue/finedust2> (accessed December 5, 2016).
- Ristovski, Z.D., B. Miljevic, N.C. Surawski, L. Morawska, K.M. Fong, F. Goh, and I.A. Yang (2012) Respiratory health effects of diesel particulate matter, *Respirology*, 17(2), 201-212.
- 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 pp.