



수도권 초미세먼지 농도모사: (V) 북한 배출량 영향 추정

PM_{2.5} Simulations for the Seoul Metropolitan Area: (V) Estimation of North Korean Emission Contribution

배민아 · 김현철^{1,2)} · 김병욱³⁾ · 김순태*

아주대학교 환경안전공학과, ¹⁾미국국립해양대기청,

²⁾메릴랜드대학 기후·위성 연구소, ³⁾미국조지아주환경청

(2018년 1월 11일 접수, 2018년 2월 19일 수정, 2018년 2월 23일 채택)

Minah Bae, Hyun Cheol Kim^{1,2)}, Byeong-Uk Kim³⁾ and Soontae Kim*

Department of Environmental & Safety Engineering, Ajou University

¹⁾*Air Resources Laboratory, National Oceanic and Atmospheric Administration*

²⁾*Cooperative Institute for Climate and Satellites, University of Maryland*

³⁾*Georgia Environmental Protection Division*

(Received 11 January 2018, revised 19 February 2018, accepted 23 February 2018)

Abstract

Quantitative assessment on the impact from North Korean emissions to surface particulate matter (PM) concentration in the Seoul Metropolitan Area (SMA), South Korea is conducted using a 3-dimensional chemistry transport model. Transboundary transport of air pollutants and their precursors are important to understand regional air quality in East Asian countries. As North Korea locates in the middle of main transport pathways of Chinese pollutants, quantifiable estimation of its impact is essential for policy making in South Korean air quality management. In this study, the Community Multiscale Air Quality Modeling System is utilized to simulate regional air quality and its sensitivity, using the Comprehensive Regional Emissions inventory for Atmospheric Transport Experiment 2015 and the Clean Air Policy Support System 2013 emissions inventories for North and South Korea, respectively. Contributions were estimated by a brute force method, perturbing 50% of North and South Korean emissions. Simulations demonstrate that North Korean emissions contribute 3.89 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ of annual surface PM concentrations in the SMA, which accounts 14.7% of the region's average. Impacts are dominant in nitrate and organic carbon (OC) concentrations, attributing almost 40% of SMA OC concentration during January and February. Clear seasonal variations are also found in North Korean emissions contribution to South Korea (and vice versa) due to seasonal characteristics of synoptic weather, especially by the change of seasonal flow patterns.

Key words : Contribution, North Korean emission, South Korea, PM_{2.5}, BFM

*Corresponding author.

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

1. 서론

최근 연구에 따르면 북한에서의 초미세먼지에 의한 조기사망률이 세계에서 가장 높은 것으로 보고되었다 (Watts *et al.*, 2017). 조기사망률은 대기오염물질 농도를 비롯한 인구 분포, 경제적 상황, 질병 발병률 등 다양한 인자가 포함되며, 이러한 연구 결과는 북한의 대기질이 매우 악화된 상태로, 그 원인과 영향에 대한 정량적 분석이 필요하다는 점을 시사해준다. 북한은 풍상에 위치하는 중국으로부터의 대기오염물질 유입과 자체 배출량 및 대기질 관리의 부족으로 인해 대기오염 악화가 보고되고 있으며 (Jung and Lee, 2005), 또한 석탄화력과 바이오매스(Biomass) 에너지 등에 의존도가 높은 연료 사정으로 인해 대기질 저하가 우려되고 있다 (Kim *et al.*, 2011).

국내를 포함한 동북아 지역에서 고농도 초미세먼지 현상을 이해하기 위해서는 장거리 이동 영향분석이 중요하며 (Kim *et al.*, 2017a, b, c, 2016), 특히 월경성 대기오염현상에 대한 이해는 국가별 기여도 분석 등이 기초 자료가 된다. 기존 선행연구를 살펴보면 중국 배출량에 대한 국내 및 일본 등 장거리 이동 영향에 대해서는 많은 연구가 진행되어 왔다 (Kim *et al.*, 2017a, b; Itahashi *et al.*, 2013). 반면에 배출원 정보 및 배출량 자료, 대기질 현황 등과 같은 기초 자료의 공개가 매우 제한적인 북한과 관련된 연구는 주로 에너지 사용과 배출량 추정 (Kim *et al.*, 2011; Kim and Kim, 2008), 위성자료를 이용한 배출량 목록의 평가 (Kim *et al.*, 2014) 등의 연구 위주로 수행되어 왔다. Lee and Kim (2007)은 겨울철 서울의 polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) 농도에 대한 바이오매스 연소의 기여도가 높음을 확인하고 북한으로부터의 영향 가능성을 제기한 바 있다. Kim *et al.* (2013)은 서울 PAHs 관측값의 약 20%가 북한 배출량에 의해 기인했을 것으로 추정하였다. 그 외 여러 연구들을 통해 북한 배출량이 국내 대기질에 미칠 수 있는 가능성은 꾸준히 논의되었다 (Kim and Yeo, 2013). 남한의 경우 북한과 매우 인접해 있으며, 특히 휴전선과 가까운 수도권 지역의 대기질에 미치는 영향은 작지 않을 것으로 예상되나, 남북한 배출량의 상호영향에 대한 정량적인 분석은 미흡한 상태이다.

본 연구에서는 북한 배출량이 국내에 미치는 영향 및 북한의 대기질에 대한 외부 영향을 정량적으로 파

악하기 위하여 3차원 광화학 대기질 모델을 이용하였으며, 대상 물질은 PM_{2.5} 및 구성성분에 대하여 분석하였다. 기여도 추정은 Brute Force Method (BFM)를 이용하였으며, 연평균 및 월간 변화를 살펴보고, 추가적으로 남한 배출량이 인근 북한 지역에 미치는 영향을 분석하였다.

2. 연구 방법

2.1 대기질 모사 방법

대기질 모사의 입력자료를 마련하기 위하여 기상 모델로 WRF (Weather Research and Forecasting; Skamarock and Klemp, 2008) v3.4.1을 수행하고, 기상 초기장으로는 재분석 자료인 NCEP-FNL (National Centers for Environmental Prediction-Final)을 이용하였다. WRF 결과를 대기질 모사에서 필요로 하는 입력자료 형태로 변환하기 위하여 MCIP (Meteorology-Chemistry Interface Processor) v3.6을 이용하였다. 배출량 입력자료는 자연배출량과 인위적 배출량에 대하여 각각 MEGAN (The Model of Emissions of Gases and Aerosols from Nature, MEGAN; Guenther, 2006) v2.1과 SMOKE (Sparse Matrix Operator Kernel Emissions, SMOKE; Benjey *et al.*, 2001)를 수행하고 배출량 목록으로는 국내에 대하여 CAPSS (Clean Air Policy Support System) 2013, 그 외 동북아시아 지역에 대하여 CREATE (Comprehensive Regional Emissions inventory for Atmospheric Transport Experiment) 2015를 이용하였다. 3차원

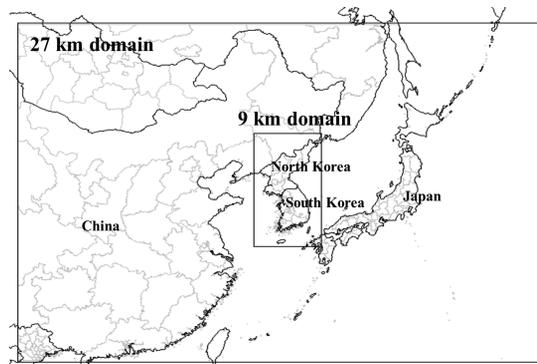


Fig. 1. Modeling domains for 27 km horizontal resolution and 9 km horizontal resolution.

광화학모델 CMAQ (Community Multiscale Air Quality; Byun and Schere, 2006) v.4.7.1을 통해 대기질 모사를 수행하였다. 화학 메커니즘은 SAPRC99, 에어로졸 모사는 AERO5를 이용하였다.

모사 영역은 그림 1에 나타낸 바와 같이 동북아시아 지역을 포함하는 영역에 대해 27 km 수평 해상도 격자와 남북한에 대해 9 km 수평 해상도 격자로 설정하였

다. 27 km 모사 영역의 경계조건은 profile을 사용하였으며, 9 km 모사 영역은 27 km 수평 해상도 격자의 모사 결과를 등지 격자화하여 이용하였다. 모사 기간은 spin-up 기간 11일을 포함하여 2015년 12월 21일~2016년 12월 31일로 설정하고, 2016년에 대해 분석하였다. 기상 및 대기질 모델에 사용한 모사 옵션을 표 1에 정리하였다.

Table 1. WRF and CMAQ simulation configurations.

WRF	Option	CMAQ	Option
Version	3.4.1	Version	4.7.1
Global MET inputs	FNL	Chemical mechanism and Aerosol module	SAPRC99, AERO5
Micro physics	WSM6	Boundary condition	Profile for 27 km, Nest down for 9 km simulation
Short wave radiation	Goddard	Advection scheme	YAMO scheme
Land-surface model	NOAH	Horizontal diffusion	Eddy scheme
PBL scheme	YSU	Cloud scheme	ACM

Table 2. Descriptions on emissions inventories for (a) South Korea (CAPSS 2013) and (b) North Korea (CREATE 2015).

(a) South Korean emission of CAPSS 2013 (Unit: Ton/year)

SCC	CO	NO _x	SO ₂	NH ₃	VOC	PM ₁₀	PM _{2.5}
Combustion in energy industries	63,457	177,220	97,566	1,745	8,545	4,524	3,573
Non-industrial combustion plants	87,532	88,771	31,101	1,392	2,784	1,955	1,226
Combustion in manufacturing industries	20,125	178,034	95,836	800	3,537	81,013	41,606
Production processes	24,912	55,189	107,835	35,051	174,028	6,279	4,852
Storage and distribution of fuels	-	-	-	-	27,209	-	-
Solvent use	-	-	-	-	562,072	-	-
Road transport	409,218	335,719	189	9,840	65,807	12,103	11,135
Other mobile sources and machinery	82,615	246,030	65,119	220	22,288	15,167	13,953
Waste treatment and disposal	1,957	9,529	6,517	23	46,495	243	202
Agriculture	-	-	-	230,919	-	-	-
Other sources & sinks	6,865	165	-	12,785	637	310	279
Combustion total	-	-	-	-	-	85,050	14,705
Mobile total	255,206	9,110	148	20	101,487	15,663	12,681
Total	951,888	1,099,766	404,310	292,796	1,014,889	222,306	104,210

(b) North Korean emission of CREATE 2015

SCC	CO	NO _x	SO ₂	NH ₃	VOC	PM ₁₀	PM _{2.5}
Stationary source fuel combustion	1,067,810	195,867	217,684	1,977	144,114	344,348	215,612
Mobile sources	39,942	32,357	66,173	73	1,506	74,458	45,305
Industrial processes	-	-	-	-	46,201	-	-
Solvent utilization	-	-	-	-	3,104	6,579	648
Storage and transport	20,160	101	108	-	-	4,560	4,195
Waste disposal, treatment, and recovery	69,718	215	230	77,730	8,663	15,865	10,640
Miscellaneous area sources	214,612	42,163	3,517	277	52,355	4,237	3,791
Total	1,412,242	270,704	287,713	80,056	255,943	450,047	280,191

2.2 남북한 배출량

북한을 비롯한 동아시아의 배출량은 CREATE 2015 배출량 목록을 이용하였으며, 남한의 배출량은 CAPSS 2013 배출량 목록을 이용하였다. 남한과 북한에 대한 Source Classification Code (SCC) 대분류별 배출오염 물질의 배출량을 표 2에 정리하였다. 남북한 배출량은 물질별로 다른 특성을 보이는데, NO_x, SO₂, NH₃의 경우 남한에서 각각 1,099 KTPY (Kton/year), 404 KTPY, 292 KTPY 배출되며, 이는 북한 배출량에 비하여 4.1배, 1.4배, 3.7배 많다. 반면 CO, PM₁₀ 및 PM_{2.5} 배출량은 북한이 1,412 KTPY, 450 KTPY, 280 KTPY로 남한 배출량보다 각각 1.5배, 2.0배, 2.7배 많이 배출된다.

남한의 CO와 NO_x는 이동오염원이 주 오염원이며, SO₂는 생산공정, NH₃ 농업, VOC 유기용제 사용, PM₁₀과 PM_{2.5}는 제조업 연소에서 주로 배출되었다. 반면 북한은 NH₃를 제외하고는 모두 고정오염원의 연료 연소 부문에서 배출되었다. NH₃의 경우 농업에서 주로 배출된 남한과 달리 폐기물처리 부문에서 대부분 배출되었다. CREATE 2015의 경우 북한에 대해서는 농업 부문의 대분류가 구분되어 있지 않았으며, 폐기물 매립지에서 발생하는 NH₃가 주를 이루는 것으로 사료된다.

2.3 기여도 분석을 위한 BFM

본 연구에서는 남한과 북한의 배출량 기여도를 추정하기 위하여 BFM을 이용하였다. BFM은 대기질 모사를 기반으로 하는 여러 기여도 분석 방법 중 하나 (Kim *et al.*, 2017d), 기본 모사 외에 분석 대상이 되는 배출량을 임의로 변화시킨 민감도 모사를 추가적으로 수행하여 농도 변화를 통해 기여도를 추정하는 방법이다. 본 연구에서 모사 기여도는 식(1)과 같이 Zero-Out Contribution (ZOC)를 이용하여 산정할 수 있다.

$$ZOC = (C_B - C_{S,\Delta E}) \times \frac{100\%}{\Delta E} \quad (1)$$

식(1)에서 C_B는 기본 모사 농도, C_{S,ΔE}은 배출량 변화 시 모사 농도, ΔE는 배출량 변화 정도를 의미한다. 기본 모사와 민감도 모사의 농도차에 기본 배출량 대비 삭감 배출량의 비를 곱하여 ZOC를 산정한다.

본 연구에서는 기본 모사 외에 남한과 북한의 상호 기여도 분석을 위하여 남한과 북한의 배출량을 각각 50% 삭감하여 모사하였으며, 기본 모사를 포함하여 총

3개의 모사를 수행하였다.

3. 결 과

3.1 모사수행평가

모델에 이용되는 입력자료에 대한 불확도 분석은 중요하며, 본 연구의 대기질 모사 결과에 대한 수행평가를 위하여 관측값과 모사값을 비교하였다. Emery *et al.* (2017)이 제시한 Normalized Mean Bias (NMB), Normalized Mean Error (NME) 및 상관계수(R)의 목표기준과 최소기준을 이용하였다. PM_{2.5}의 경우 R, NMB, NME 모두 목표기준을 충족하였으며, O₃에 대해서도 목표기준 또는 최소기준을 만족하였다. NO₂와 SO₂의 경우 O₃과 같은 기준을 적용하였을 때 모두 만족하여, 본 모사는 분석이 가능한 신뢰성을 가지는 것으로 판단하였다. 모사 수행 평가에 대한 자세한 내용은 표 3에 정리하였다.

본 연구의 분석 대상물질은 PM_{2.5}와 구성성분이므로 이에 대한 추가적인 모사 평가를 위해 서울 불광동 집중측정소의 관측자료를 이용하였다. 다만 성분별 관측값은 결측이 많아 하루 24시간 중 75%인 18시간 이상 자료가 확보된 날에 대해서만 비교를 수행하였다(그림 2). PM_{2.5}와 성분 농도에 대한 R값은 0.42~0.69이며, OC를 제외한 물질에 대해서는 11~51% 과대 모사하였

Table 3. Model performance statistics over 259 surface monitoring sites for NO₂, SO₂, O₃ and 178 sites for PM_{2.5} in South Korea.

	PM _{2.5} (24-hr)	NO ₂ (24-hr)	SO ₂ (24-hr)	O ₃ (1-hr)
Mean (Observed)	25.97	22.57	4.63	49.51
Mean (Predicted)	26.48	20.95	5.08	53.27
R	0.8	0.55	0.67	0.9
NMB	1.99	-7.17	9.88	7.59
NME	21.42	23.44	23.98	13.93

Unit: mean (μg/m³ for PM_{2.5} and ppb for O₃, NO₂, SO₂), NMB (%), NME (%)

Emery *et al.* (2017) goals for 1-hr O₃: NMB < ±5%, NME < 15%, r > 0.75.

Emery *et al.* (2017) criteria for 1-hr O₃: NMB < ±15%, NME < 25%, r > 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.

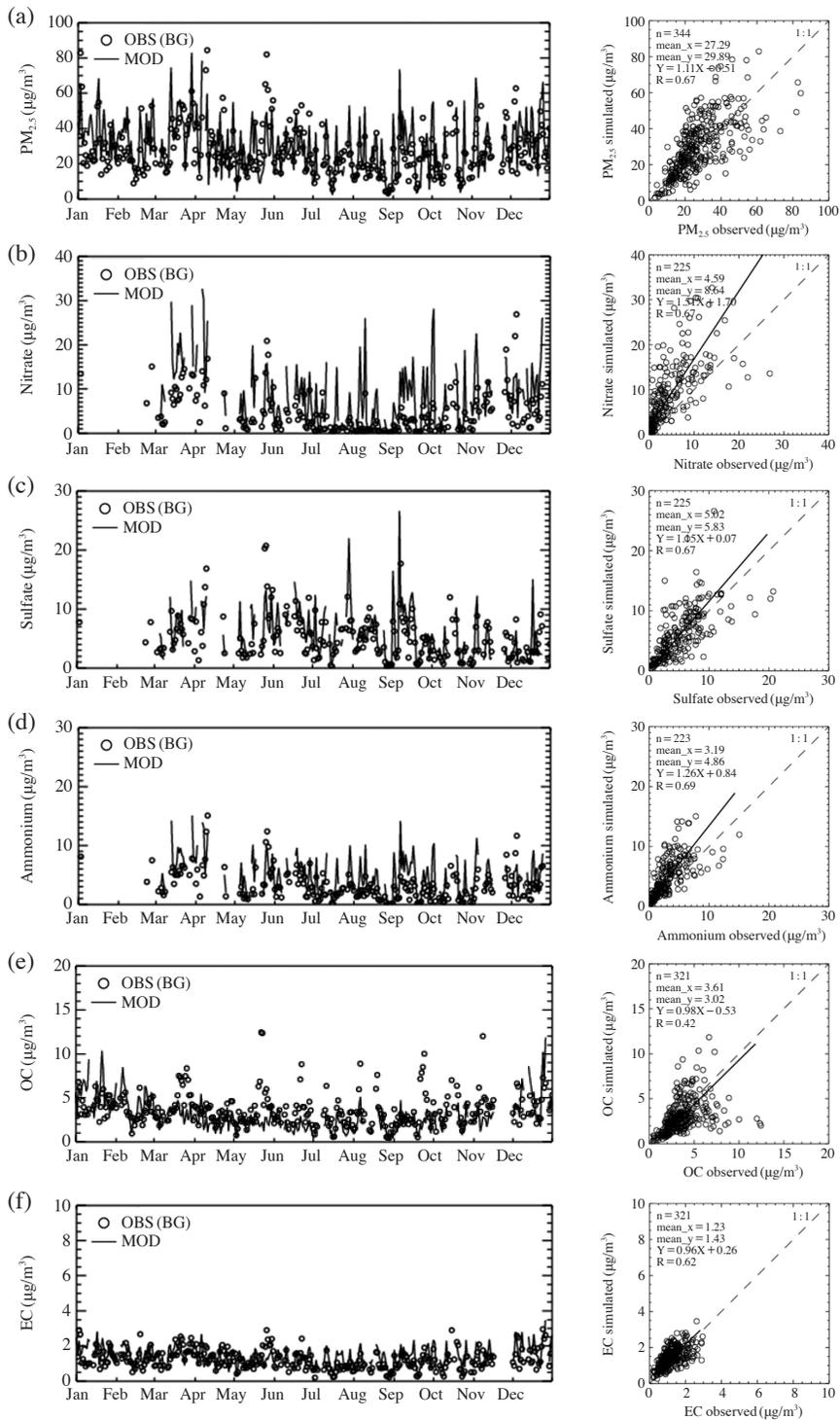


Fig. 2. Comparisons of observed and simulated concentrations of (a) PM_{2.5}, (b) nitrate, (c) sulfate, (d) ammonium, (e) OC, and (f) EC at Bulkwang-dong supersite during 2016.

고 OC의 경우 2% 과소 모사하였다. Ghim *et al.* (2017) 은 CMAQ을 이용한 2012년 5월~2014년 12월 예보 결과를 불광동 집중측정소 관측값과 비교하였는데 nitrate는 본 연구와 마찬가지로 과대 모사하였으나, sulfate와 ammonium은 과소 모사하였다. 이러한 차이는 Ghim *et al.* (2017)의 경우 예보 모사로 기상 초기장로서 GFS (Global Forecasting System)를 이용하였으나 본 연구에서는 FNL 재분석 자료가 이용되어 상대적으로 낮은 풍속이 모사된 영향과 모사기간 중 PM_{2.5} 농도가 높은 봄과 겨울철 동안 많은 결측일이 존재하기 때문으로 판단된다.

3.2 공기과 이동 과정 분석

남북한에 대하여 각각 서울 및 북한의 대기 유입 패턴을 분석하기 위해 HYSPLIT (Stein *et al.*, 2015a)을 수행하였다. 서울과 평양의 각 100 m 고도를 시작으로, 2016년 365일 동안 매일 정오 12시에 대하여 24시간 역으로 추적하였다. 365개의 궤적을 구분 (Clustering) 하여 서울과 평양에 대하여 각각 대기의 주요 유입 패턴을 파악하였으며, 그림 3에 나타내었다. Clustering은 여러 궤적을 유사한 공간적 이동을 보이는 것끼리 구분하는 것으로 Total Spatial Variance (TSV)를 고려하여 사용자가 구분의 개수를 선택할 수 있다 (Stein *et al.*, 2015b; Baker, 2010).

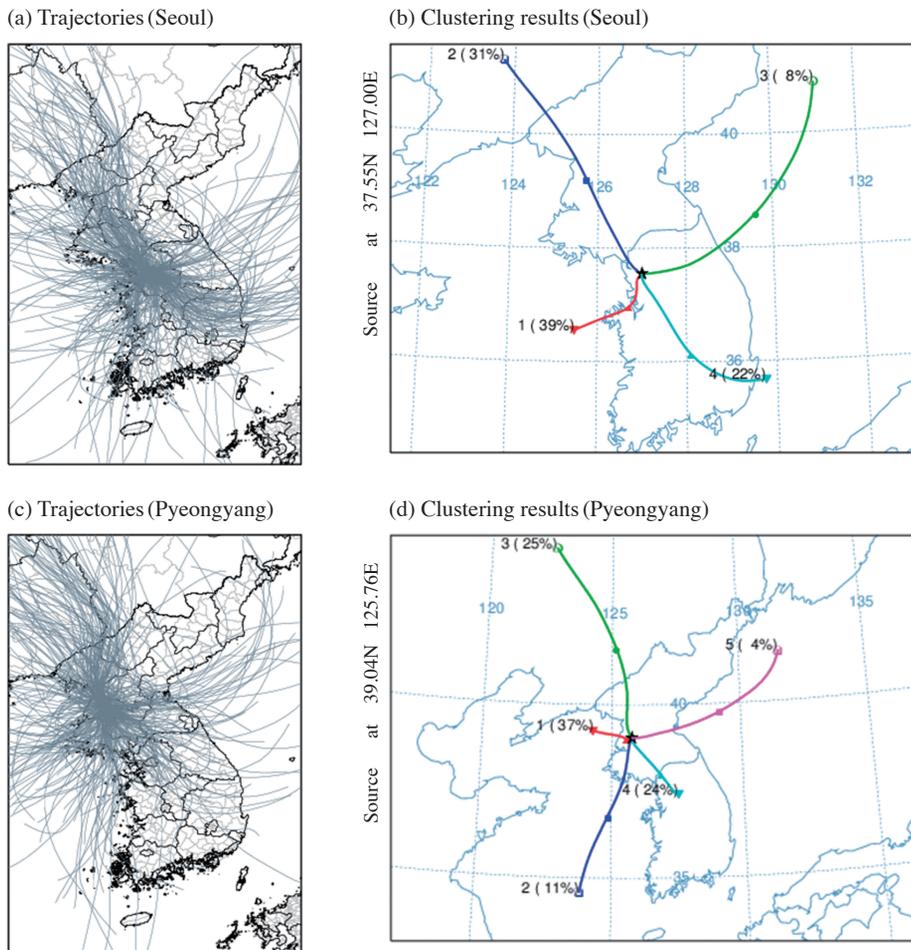


Fig. 3. HYSPLIT trajectories (left) and their clusters (right) arriving at 100 m altitude in Seoul (upper) and Pyeongyang (lower), at 12 pm local time each day in 2016.

서울 100 m 고도 대기의 39%는 서해상을 통해 유입되었으며, 31%의 궤적이 북한을 지나 서울로 이동하였다(그림 3a, b). 그림 3c와 d는 북한에 대한 결과로 서해상을 통해 유입된 비율이 37%로 가장 높았으며, 24%의 대기가 남한을 지나 유입되었다. 25%는 중국으로부터 이동하였다. 한반도는 북서풍의 영향을 주로 받아 서해상에서 유입되는 대기의 비율이 높은 것으로 보인다. 북한을 지나 서울로 유입되는 비율이 남한을 지나 평양으로 유입되는 대기의 비율보다 높게 나타났으며, 이 또한 북풍 계열의 풍향 때문이다. 서울과 평양의 고도 500 m와 1,000 m에 대해 동일한 분석을 수행하였으나, clustering 결과가 100 m와 유사하여 본문에는 생략하였다.

3.3 북한 배출량의 PM_{2.5} 및 성분별 기여도

PM_{2.5} 및 성분농도에 대한 북한 배출량의 공간적인 영향 범위와 정도를 그림 4에 보였다. 북한에서 배출량이 집중되어 있는 평양을 중심으로 높은 기여도를 보이며, 성분별로는 nitrate와 OC에 대한 기여도가 주요하게 나타났다. 북한 배출량 기여도는 한반도 동남쪽으로 넓은 영향이 모사되었으며, 이는 그림 3에 보인 유입패턴에서도 보이듯 북서풍의 영향에 의한 것으로 판단된다. 남한 전북 및 경북 일대까지 연평균 PM_{2.5}에 대하여 1 µg/m³ 이상, 그 외 지역은 그림에 보이지는 않으나 0.5 µg/m³ 이상으로 분석되었다. 특히 수도권에서 기여도가 높게 나타났으며, 이는 북한과 가까운 지리적 특성 때문으로 판단된다. 수도권 연평균 PM_{2.5} 농도에 대한 북한 배출량의 기여도와 연평균 농도 대비 기

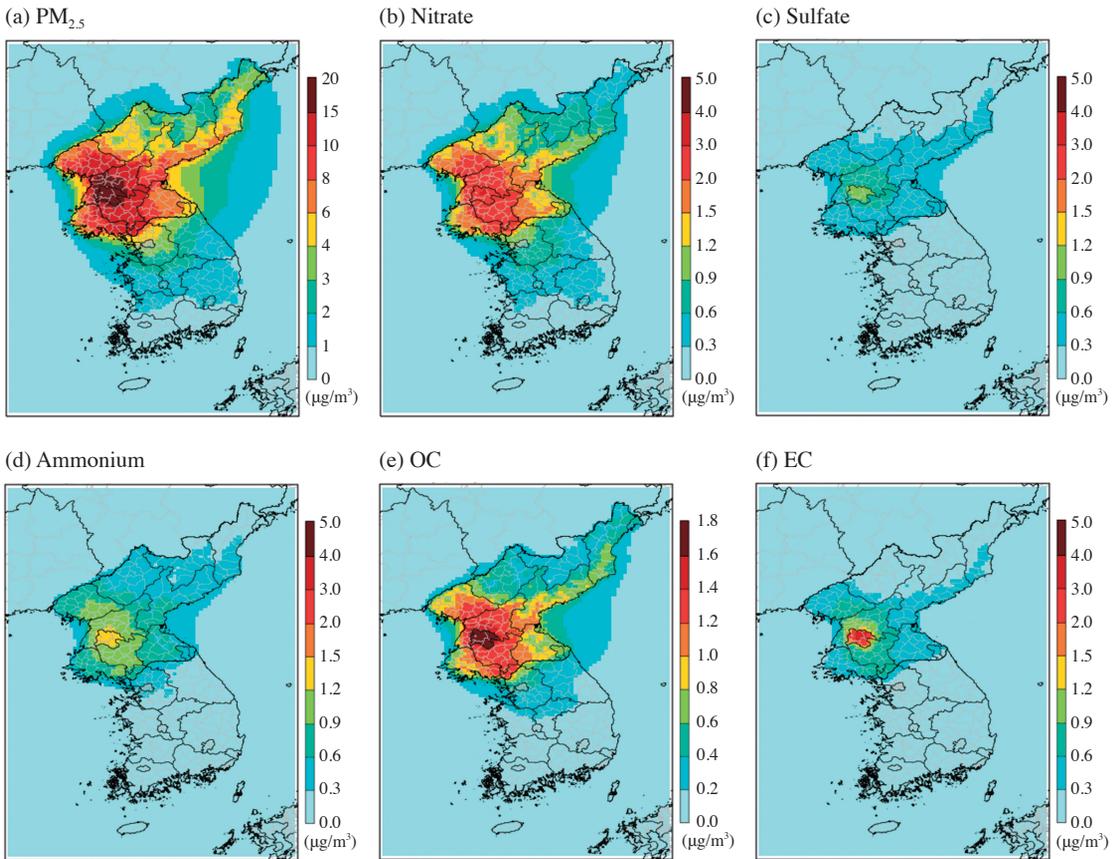


Fig. 4. Spatial distributions of annual mean North Korean emissions contribution to (a) PM_{2.5}, (b) nitrate, (c) sulfate, (d) ammonium, (e) OC, and (f) EC during 2016.

여율은 3.89 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ (14.7%)로, 성분별로는 nitrate 0.88 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ (11.7%), ammonium 0.35 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ (8.4%), sulfate 0.23 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ (4.6%), OC 0.68 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ (27.4%), EC 0.14 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ (15.8%)로 모사되었다. 수도권 $\text{PM}_{2.5}$ 의 일평균 최대 기여도는 29.95 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, 시간 최대 기여도는 47.25 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 분석되었다. 특히 북한과 인접한 경기 북부에서 4 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 이상의 기여도가 나타났으며, 이는 수도권 연평균 농도의 15% 이상이다. 미세먼지 관리 종합대책에 따른 2016년 대비 2022년 목표 농도를 위한 삭감량이 6 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 임을 감안하면 작지 않은 영향임을 알 수 있다 (MOE, 2017).

모사된 OC 성분은 배출원에서 직접 배출되는 primary organic carbon(POC)과 대기 중 생성되는 secondary organic carbon(SOC)으로 나뉠 수 있는데, 수도권

OC의 북한 기여도 중 POC는 91%로, 즉 수도권 POC 농도의 약 24%가 북한에 의한 기여도로 모사되었다. 이는 북한 배출량 중 POC가 차지하는 비율이 상대적으로 높기 때문이며, 북한의 에너지 의존도가 높은 바이오매스에서 OC가 많이 배출되기 때문으로 판단된다 (Kim *et al.*, 2011; Lee and Kim, 2007).

3.4 남한 배출량의 $\text{PM}_{2.5}$ 및 성분별 기여도

그림 5는 $\text{PM}_{2.5}$ 및 구성성분 농도에 대한 남한 배출량의 공간적 영향 범위와 정도를 보였다. $\text{PM}_{2.5}$ 농도에 대한 남한 배출량 기여도는 nitrate와 ammonium 성분에 대하여 가장 높게 모사되었으며, 이는 북한과 인접한 수도권 지역 등에서 NO_x 배출량이 높기 때문으로 사료된다. 남한 배출량의 기여도는 북한 평양의 연평

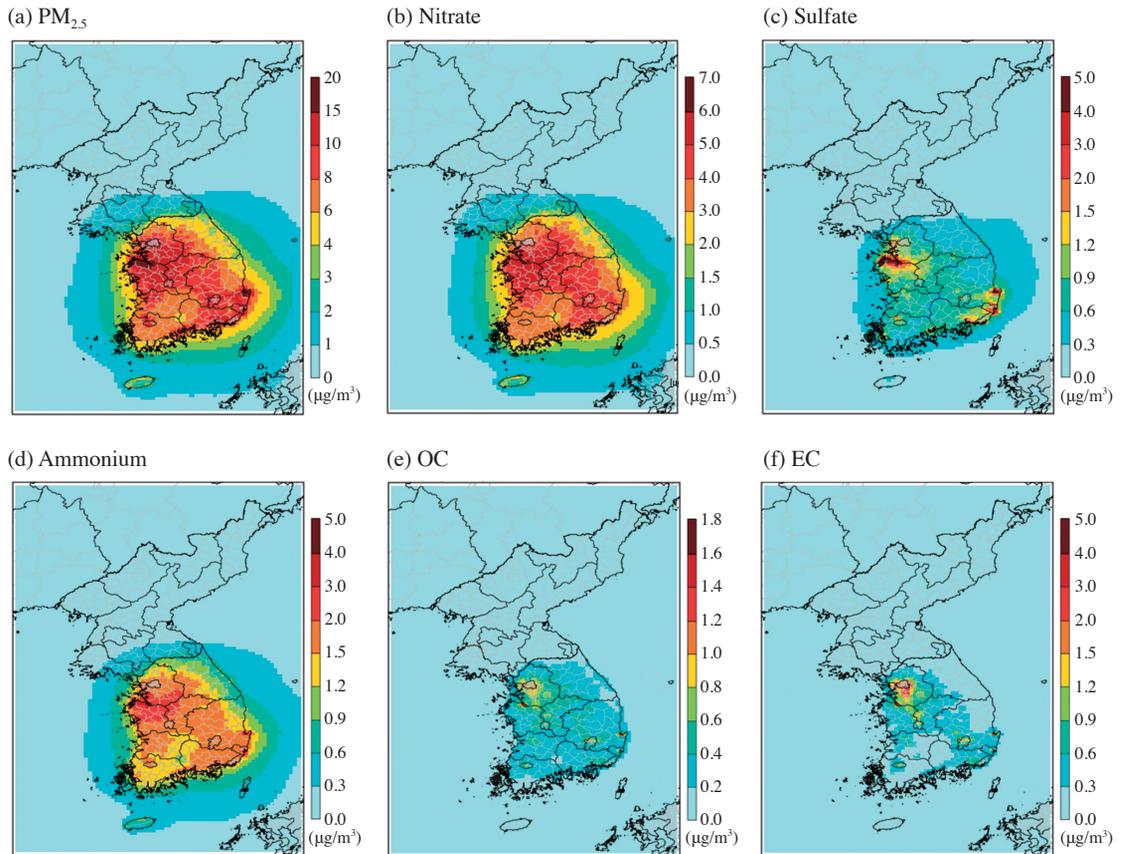


Fig. 5. Spatial distributions of annual mean South Korean emissions contribution to (a) $\text{PM}_{2.5}$, (b) nitrate, (c) sulfate, (d) ammonium, (e) OC, and (f) EC during 2016.

균 $PM_{2.5}$ 에 대하여 $0.94 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 로, 이는 평양 연평균 농도의 2.2%에 해당한다. 한편, 수도권 지역과 지리적으로 인접한 북한 개성 지역에 대해서는 $PM_{2.5}$ 기여도가 $3.78 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (13.7%)로 모사되었으며, 성분별로는 nitrate $1.76 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (29.6%), sulfate $0.39 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (8.4%), ammonium $0.70 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (20.0%), OC $0.30 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (8.7%), EC $0.13 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (14.4%)로, 2차 오염물질인 무기성 이온에 대해 기여도가 높게 분석되었다. 그 중, OC에 대한 남한 배출량의 영향은 POC의 비율이 58%로 북한 배출량이 수도권에 보이는 POC 비율(91%)에 비하여 낮다. 이는 primary $PM_{2.5}$ 배출량의 경우 북한이 남한보다 2.7배 많기 때문으로 판단된다(표 2).

일평균 및 시간 최대 기여도의 경우, 수도권에 대한 북한 배출량 기여도는 $29.95 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (일평균, 12월 26일), $47.25 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (1시간 평균, 12월 26일 19시)이며, 개성지역에 대한 남한 배출량 기여도는 $31.65 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (일평균, 1월 17일), $63.58 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (1시간 평균, 9월 27일 8시)로 모사되었다. 이로부터 북한의 영향이 상대적으로 높게 나타나는 연평균 기여도와 달리 일평균 혹은 1시간 최대 기여도와 같은 일시적인 영향은 남한 배출량이 개성 지역에 상당한 영향을 줄 수 있음을 확인하였다. 이는 남한 배출량이 북한 배출량에 비하여 많기 때문에 남풍계열의 바람이 주풍향일 때 일시적으로 남한 배출량이 북한에 미치는 기여도가 더 크게 나타날 수 있는 것으로 사료된다.

3.5 월별 $PM_{2.5}$ 및 성분별 기여도 변화

계절별 기여도 변화를 분석하기 위하여 수도권에 대한 남한, 북한, 그 외 지역 배출량의 기여도를 구분하여 월별로 살펴보았다(그림 6). 북서풍의 영향이 강해지는 겨울철은 sulfate를 제외한 물질에 대해 북한 배출량 기여도가 높아진다. 반면 여름철에는 남서풍 계열의 바람이 우세함에 따라 북한의 기여도는 낮으며, 남한의 자체 기여도가 높다. Sulfate는 겨울철보다는 여름철에 북한의 영향이 높게 나타났다. 이는 여름철에 활발한 광화학 반응으로 인해 SO_2 의 sulfate로의 전환율이 높아지기 때문으로 판단된다(Witting *et al.*, 2004). 수도권 $PM_{2.5}$ 농도의 1월 북한 배출량 기여도가 $8.9 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 1년 중 가장 높게 나타났으며, 이는 수도권 1월 평균 $PM_{2.5}$ 농도의 20% 수준이다. 이때 nitrate와 OC에 대한 북한 배출량 기여도는 각각 $1.7 \mu\text{g}/\text{m}^3$, $2.0 \mu\text{g}/\text{m}^3$

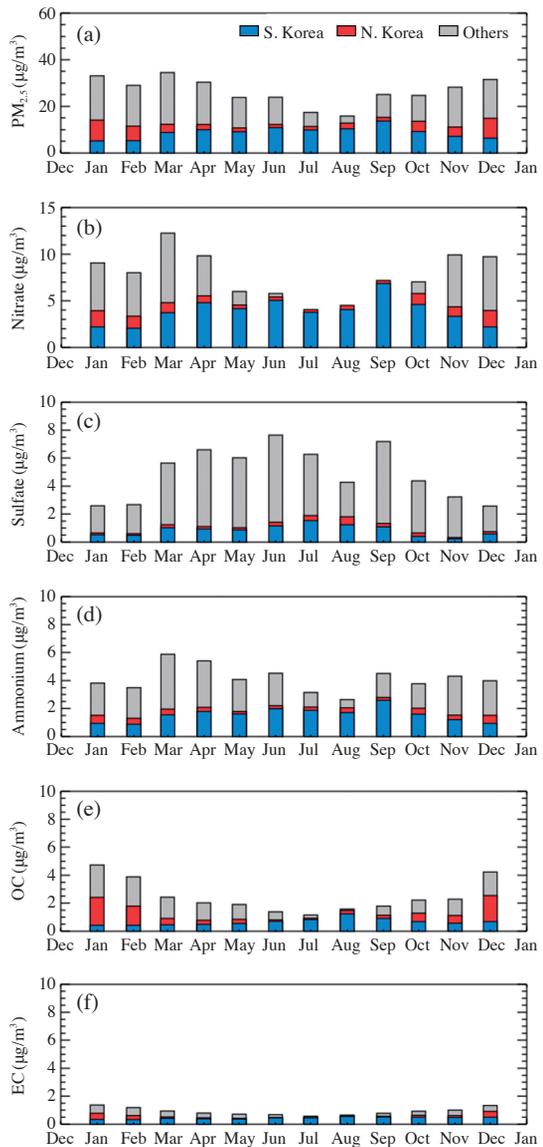


Fig. 6. Monthly contributions from regional emissions sources (S. Korea, N. Korea and others) on surface PM concentrations in the SMA, South Korea (a) $PM_{2.5}$, (b) nitrate, (c) sulfate, (d) ammonium, (e) OC, (f) EC.

로 모사되었으며, 이는 수도권 월평균 OC 농도의 42%에 해당한다. 따라서 겨울철 북한 배출량 기여도는 nitrate보다 OC 성분에 대하여 주요함을 확인하였다. 이는 앞서 설명하였듯이 OC를 포함하는 primary $PM_{2.5}$ 배출량이 북한에서 높기 때문으로 판단된다(표 2).

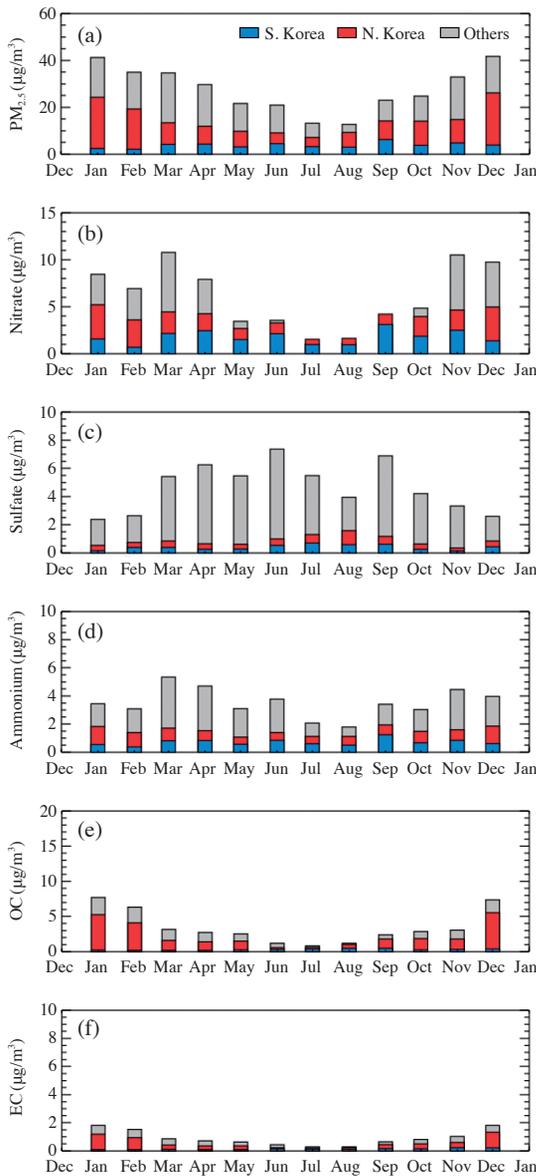


Fig. 7. Monthly contributions from regional emissions sources (S. Korea, N. Korea and others) on surface PM concentrations in Kaesong, North Korea (a) $\text{PM}_{2.5}$, (b) nitrate, (c) sulfate, (d) ammonium, (e) OC, (f) EC.

그림 7은 월별 개성 지역에 대한 남한, 북한 및 그 외 지역의 기여도를 나타낸 것으로, $\text{PM}_{2.5}$ 와 sulfate를 제외한 모든 성분에 대하여 북한의 자체기여도는 겨울철에 높게 모사되었다. 개성 지역 $\text{PM}_{2.5}$ 농도의 주요

성분은 OC와 nitrate로 나타났다. 개성은 남한의 배출량이 높은 경기도와 인접하여 $\text{PM}_{2.5}$ 에 대한 남한 배출량의 기여도는 월평균 $2.1\sim 6.3 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (5.9~27.3%)를 보이며, 기상의 영향으로 겨울철보다는 여름과 가을철에 높게 분석되었다. 남한 배출량 기여도는 무기성 이온에 대하여 영향을 보였는데, 특히 nitrate가 높게 모사되었다. 이는 수도권 지역에 높은 NO_x 배출량 때문으로 사료된다. 한편 sulfate의 경우 북한 자체기여도와 남한 배출량 기여도보다는 그 외 지역으로부터 기인한 것으로 분석되었으며, 이는 대부분 중국에 의한 것으로 추정된다.

4. 결 론

남한과 북한은 지리적으로 매우 인접해 있어 각국의 배출량이 상호 지역의 대기질에 영향을 줄 수 있다. 본 연구에서는 3차원 광화학 대기질 모델을 이용하여 2016년 1년 동안 남북한 배출량이 연평균 및 월평균 $\text{PM}_{2.5}$ 와 구성성분에 미치는 기여도를 분석하였다.

겨울철 북서풍, 여름철 남서풍이 강하게 나타나는 한반도 기상 특성에 따라 남한과 북한 배출량의 영향은 동남쪽으로 넓으며, 남한은 풍하지역에 위치하고 있기 때문에 북한 배출량 기여도가 공간적으로 넓게 나타났다. 북한 배출량은 남한지역의 $\text{PM}_{2.5}$ 에 대하여 연평균 최소 $0.5 \mu\text{g}/\text{m}^3$, 중부지방은 $1 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 이상의 기여도를 보이는 것으로 모사되었다. 특히 수도권 지역에 대한 $\text{PM}_{2.5}$ 기여도는 $3.8 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 연평균 농도의 14.7%가 북한의 영향으로 분석되었다. 성분별로는 nitrate와 OC가 각각 $0.88 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (11.7%), $0.68 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (27.4%)로 주요하게 나타났다. 북한 배출량의 영향은 1월 $\text{PM}_{2.5}$ 에 대하여 $8.9 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 가장 높았으며, 이는 수도권 지역 1월 평균 농도의 20% 수준이다. OC의 경우는 1월과 12월의 수도권 지역 농도의 40% 이상이 북한 배출량에 의한 영향인 것으로 추정된다.

반면 남한 배출량 기여도는 북한으로 그 범위가 지역적으로 넓게 나타나지는 않으나, 수도권 인근에 위치한 개성에 대하여 연평균 $\text{PM}_{2.5}$ 에 대하여 $3.78 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 연평균 농도의 13.7% 수준의 영향을 보였다. 성분별로는 nitrate와 ammonium이 주요하게 나타났으며, 남한 배출량의 높은 NO_x 배출량에 의한 것으로 판단된

다. 남한과 북한이 서로 수도권 및 개성에 미치는 연평균 $PM_{2.5}$ 의 기여도는 유사한 수준이나, 일평균 및 시간 최대 기여도는 남한배출량의 개성에 대한 영향이 상대적으로 크게 나타났다. 이는 남한 배출량이 북한 배출량에 비하여 많아, 남풍이 지배적인 기상 조건일 때에는 일시적으로 큰 영향을 보이기 때문으로 사료된다.

다만 국내 $PM_{2.5}$ 와 성분농도에 대하여 11~51% 과대모사를 보이는 바, 이에 따른 북한 및 남한 자체 배출량 기여도는 과대 평가되었을 가능성이 있다. 또한 대기질 모사에 이용되는 배출량 목록은 산정방식이나 대상지역 및 산정시기 등에 따라 많은 변화 가능성 및 불확도를 내포하고 있다. 이러한 배출량 산정 시 야기될 수 있는 불확도는 대기질 모사 결과에 영향을 미칠 수 있어 개선 및 검토가 필요할 것으로 판단된다. 특히 북한의 경우 배출량 산정에 필요한 오염원 종류 및 위치, 배출공정, 배출계수, 연료 및 재료 사용량, 방지설비 등(NIER, 2013)과 같은 정보의 사용이 제한적이기 때문에 배출량의 불확도가 클 것으로 예상된다. 따라서 추후 후속 연구를 통해 위성 관측자료를 이용한 북한 배출량 불확도를 검토하여 그에 따른 남한에 대한 북한 배출량의 기여도 변화를 살펴보고자 한다.

감사의 글

이 논문은 2017년도 정부(과학기술정보통신부, 환경부, 보건복지부)의 재원으로 한국연구재단-미세먼지 국가전략프로젝트사업(2017M3D8A1092020)의 지원을 받아 수행되었으며 이에 감사드립니다.

References

- Baker, J. (2010) A cluster analysis of long range air transport pathways and associated pollutant concentrations within the UK, *Atmospheric Environment*, 44(4), 563-571.
- 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.
- Byun, D., Schere, K.L. (2006) Review of the governing equations, computational algorithms, and other components of the Models-3 Community Multiscale Air Quality (CMAQ) modeling system, *Applied Mechanics Reviews*, 59(2), 51-77.
- 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.
- Ghim, Y.S., Choi, Y., Kim, S., Bae, C.H., Park, J., Shin, H.J. (2017) Model performance evaluation and bias correction effect analysis for forecasting $PM_{2.5}$ concentrations, *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment*, 33(1), 11-18. (in Korean with English abstract)
- Guenther, C.C. (2006) Estimates of global terrestrial isoprene emissions using MEGAN (Model of Emissions of Gases and Aerosols from Nature), *Atmospheric Chemistry and Physics*, 6, 3181-3210.
- Itahashi, S., Uno, I., Kim, S. (2013) Seasonal source contributions of tropospheric ozone over East Asia based on CMAQ-HDDM, *Atmospheric Environment*, 70, 204-217.
- Jung, H.S., Lee, S.S. (2005) Environmental problem and policy of North Korea, *PLANNING AND POLICY*. (in Korean)
- 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, H.C., Kim, S., Son, S.-W., Lee, P., Jin, C.-S., Kim, E., Kim, B.-U., Ngan, F., Bae, C., Song, C.-K., Stein, A. (2016) Synoptic perspectives on pollutant transport patterns observed by satellites over East Asia: Case studies with a conceptual model, *Atmospheric Chemistry and Physics Discussions*.
- Kim, H.C., Kim, E., Bae, C., Cho, J.H., Kim, B.-U., Kim, S. (2017b) Regional contributions to particulate matter concentration in the Seoul Metropolitan Area, Korea: Seasonal variation and sensitivity to meteorology and emissions inventory, *Atmospheric Chemistry and Physics*, 17(17), 10315-10332.
- Kim, H.C., Kim, S., Kim, B.-U., Jin, C.-S., Hong, S., Park, R., Son, S.-W., Bae, C., Bae, M., Song, C.-K., Stein, A. (2017c) Recent increase of surface particulate matter concentrations in the Seoul Metropolitan Area, Korea, *Scientific Reports*, 7.
- Kim, I.-S., Lee, J.-Y., Kim, Y.-P. (2011) Energy usage and emissions of air pollutants in North Korea, *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment*,

- 27(3), 303-312. (in Korean with English abstract)
- Kim, I.S., Lee, J.Y., Kim, Y.P. (2013) Impact of polycyclic aromatic hydrocarbon (PAH) emissions from North Korea to the air quality in the Seoul Metropolitan Area, South Korea, *Atmospheric Environment*, 70, 159-165.
- Kim, N.K., Kim, Y.P., Morino, Y., Kurokawa, J., Ohara, T. (2014) Verification of NO_x emission inventories over North Korea, *Environmental Pollution*, 195, 236-244.
- Kim, S., Bae, C., Yoo, C., Kim, B.-U., Kim, H.C., Moon, N. (2017d) 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, Y.M., Kim, J.W. (2008) A study on the estimation of air pollutants emission for North Korea, *Korea Environmental Policy and Administration Society*, 16(2), 151-177. (in Korean with English abstract)
- Kim, Y.P., Yeo, M.J. (2013) The trend of the concentrations of the criteria pollutants over Seoul, *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment*, 29(4), 369-377. (in Korean with English abstract)
- Lee, J.Y., Kim, Y.P. (2007) Source apportionment of the particulate PAHs at Seoul, Korea: impact of long range transport to a megacity, *Atmospheric Chemistry and Physics*, 7, 3587-3596.
- Ministry Of Environment (MOE) (2017) Comprehensive Plan Report, <http://www.me.go.kr/home/file/readDownloadFile.do?fileId=152146&fileSeq=1> (accessed on Dec. 22, 2017). (in Korean)
- National Institute of Environmental Research (NIER) (2013) Guidance for Developing National Emission Inventories of Criteria Air Pollutants in South Korea, <http://airemiss.nier.go.kr> (accessed on Dec. 22, 2017). (in Korean)
- 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.
- Stein, A.F., Draxler, R.R., Rolph, G.D., Stunder, B.J.B., Cohen, M.D., Ngan, F. (2015a) NOAA's HYSPLIT atmospheric transport and dispersion modeling system, *Bulletin of the American Meteorological Society*, 96, 2059-2077.
- Stein, A.F., Ngan, F., Draxler, R.R., Chai, T. (2015b) Potential use of transport and dispersion model ensembles for forecasting applications, *Weather and Forecasting*, 30(3), 639-655.
- Watts, N., Amann, M., Ayeb-Karlsson, S., Belesova, K., Bouley, T., Boykoff, M., Byass, P., Cai, W., Campbell-Lendrum, D., Chambers, J., Cox, P.M., Daly, M., Dasandi, N., Davies, M., Depledge, M., Depoux, A., Dominguez-Salas, P., Drummond, P., Ekins, P., Flahault, A., Frumkin, H., Georgeson, L., Ghanei, M., Grace, D., Graham, H., Grojsman, R., Haines, A., Hamilton, I., Hartinger, S., Johnson, A., Kelman, I., Kiesewetter, G., Kniveton, D., Liang, L., Lott, M., Lowe, R., Mace, G., Odhiambo Sewe, M., Maslin, M., Mikhaylov, S., Milner, J., Latifi, A.M., Moradi-Lakeh, M., Morrissey, K., Murray, K., Neville, T., Nilsson, M., Oreszczyn, T., Owfi, F., Pencheon, D., Pye, S., Rabbaniha, M., Robinson, E., Rocklöv, J., Schütte, S., Shumake-Guillemot, J., Steinbach, R., Tabatabaei, M., Wheeler, N., Wilkinson, P., Gong, P., Montgomery, H., Costello, A. (2017) The Lancet Countdown on health and climate change: from 25 years of inaction to a global transformation for public health, *The Lancet*, [http://www.thelancet.com/journals/lancet/article/PIIS0140-6736\(17\)32464-9/references](http://www.thelancet.com/journals/lancet/article/PIIS0140-6736(17)32464-9/references) (accessed on Dec. 12, 2017).
- Wittig, A.E., Takahama, S., Khlystov, A.Y., Pandis, S.N., Hering, S., Kirby, B., Davidson, C. (2004) Semi-continuous PM_{2.5} inorganic composition measurements during the Pittsburgh Air Quality Study, *Atmospheric Environment*, 38(20), 3201-3213.