

논문

정책 지원을 위한 지자체별 물질별 기여도 및 전환율 산정

Estimation of Contribution and Emission-to-PM_{2.5} Conversion Rate by Each Local Government for Policy Support

문난경*, 서지현, 김순태¹⁾

한국환경연구원, ¹⁾아주대학교 환경안전공학과

Nankyung Moon*, Jihyun Seo, Soontae Kim¹⁾

Korea Environment Institute, Sejong, Republic of Korea

¹⁾Department of Environmental and Safety Engineering, Ajou University,
Suwon, Republic of Korea

접수일 2021년 11월 3일

수정일 2021년 11월 22일

채택일 2021년 11월 23일

Received 3 November 2021

Revised 22 November 2021

Accepted 23 November 2021

*Corresponding author

Tel : +82-(0)44-415-7607

E-mail : nkmoon@kei.re.kr

Abstract Air quality has cumulative and complicated characteristics with emission, advection, diffusion and chemical reactions of air pollutants. For the implementation of a PM_{2.5} improvement plan for a local government, it is needed to understand PM_{2.5} contributions of the source from neighboring local governments as well as the target local government. To quantitatively estimate the PM_{2.5} contributions, conversion rates of the precursor emissions to PM_{2.5} concentrations for a local government can be applied. However, it is difficult for the policy maker to prepare the conversion rate between the emission and concentration when the complicated nonlinear behaviors of air pollutants are considered. In this study, the contribution of PM_{2.5} source categories (point, mobile and area) and pollutants (NO_x, SO_x, NH₃, VOC and PM_{2.5}) was analyzed using WRF and CMAQ/BFM for 17 local governments. From the results of these contribution concentration and emissions by local governments, the conversion rate of PM_{2.5} were estimated for each source category and each pollutant. The conversion rate that explains how much PM_{2.5} concentration is generated by one ton of the precursor emissions can be used to examine the effects of air quality policies such as emission controls. In addition, it can be usefully used in the pre-evaluation step before the complicated three-dimensional air quality modeling by quantitatively analyzing the influence of PM_{2.5} due to the changed emission.

Key words: PM_{2.5}, Conversion rate, PM_{2.5} precursors, CMAQ, Policy support

1. 서론

대기오염물질은 대기 중으로 배출되면 기상조건에 따라 이동하며 화학반응과 함께 확산되는 광역적인 특성을 갖기 때문에 실효성 있는 대기질 관리 정책을 위해서는 대상 지역과 더불어 인접 지역으로부터 배출되는 전구물질도 함께 관리되어야 한다. 이러한 이유로 정부는 대기관리권역법을 제정하고 권역별 대기관리를 위한 다양한 노력을 기울이고 있다. 지자체는 「미세먼지 저감 및 관리에 관한 특별법」에 근거하여

권역별 대기환경관리 기본계획 수립, 지자체별 미세먼지 기본계획 등을 수립하여야 한다.

대기질 개선 정책은 배출량을 저감하여 대기 중 대기오염물질 농도를 대기환경기준 또는 목표 수준 이하로 낮추어 국민 건강을 보호하는 데 목적이 있으며, 해당 물질 또는 전구물질의 배출량 감축 방법 및 감축량을 담게 된다. 국내에서 관측되는 초미세먼지를 구성 성분별로 보면 많은 부분이 2차적으로 생성되는 것으로 알려져 있어, 배출원에서의 1차 초미세먼지와 전구물질 배출량에 대한 관리가 중요하다. 특히, 점,

선, 먼 오염원으로 구분되는 배출 특성에 따라 동일 물질, 동일 배출량이 배출 지역 및 풍하 지역의 초미세먼지 농도에 미치는 영향이 달라진다. 또한, 대기 중 초미세먼지의 생성 과정은 발생원, 농도 조건, 상호 영향 등 비선형성으로 인해 배출 저감 대책에서 목표한 농도 달성 여부는 대개 3차원 광화학 모델을 통해 평가된다.

이와는 대조적으로 전반적인 저감 대책 설정 및 주요 오염원 파악 등 스크리닝(screening) 과정에서 전구물질 배출량이 초미세먼지 농도(emissions-to-PM_{2.5} concentration)로 발현되는 전환율 또는 전환계수를 사용하는 방법은 정밀도는 떨어지나, 다양한 배출 저감 시나리오를 검토할 수 있는 장점이 있다. 실제로, 유럽의 경우 지역 간/도시 간 배출량의 정량적인 상호 영향을 간소한 방법으로 추정하기 위해 광역 규모(예, 광역 지자체 등)에서 배출물질별 초미세먼지로의 전환율을 추정하고, 세분화된 상세 지역의 배출원별 기여도 추정을 위해 배출량 할당(Source allocation)을 이용하기도 한다(Clappier *et al.*, 2017; Thunis *et al.*, 2016). 미국의 경우 국내 통합환경관리와 같이 신규 배출원 또는 주요 배출설비 변경 시, 배출 규모에 따라 1차 초미세먼지 배출량뿐 아니라, SO_x, NO_x 배출량이 초미세먼지 농도로 전환되는 양을 대기질 모사를 통해 정량적으로 검토하도록 요구한다(EPA 2021).

지자체에서 PM_{2.5} 농도 개선을 위하여 어떤 오염원의 어떤 물질을 어느 정도 삭감하는 것이 효과적인지, 그리고 해당 지자체의 물질별, 오염원별 배출량이 대상 지역 및 주변 지역 대기질에 미치는 영향을 개략적으로 분석하는 사전평가 과정은 구체적인 정책 도출을 위하여 매우 유용할 것으로 사료된다.

이를 위해서는 배출되는 대기오염물질별 PM_{2.5}로 생성되는 전환율을 사용하는 것이 효과적일 것으로 예상된다. 그러나 비선형성을 가지는 배출량에 대한 농도 생성의 전환율 산정은 전문적이고 복잡한 3차원 광화학모델링 적용이 필요하여(Cheng *et al.*, 2013; Zhang *et al.*, 2012; Sciare *et al.*, 2010; Ying *et al.*, 2006;

Wang *et al.*, 1998), 지자체 또는 정책계획 수립 담당자가 수행하기는 현실적으로 쉽지 않다.

이에 본 연구에서는 전국 17개 지자체 단위로 오염원별(점, 선, 면), 물질별(NO_x, SO_x, NH₃, VOC, PM_{2.5}) 배출량이 해당 지역과 인접 지역에 미치는 PM_{2.5} 기여농도를 분석하고, 기여농도를 바탕으로 지자체별 대기오염물질 오염원별 배출량 1톤당 농도 전환율을 산정하였다. 이는 해당 지자체의 배출량 증가가 해당 지자체와 인근 지역의 PM_{2.5} 농도에 어느 정도 영향을 미치는지에 대한 사전 정보를 가질 수 있어 지자체 대기질 관리정책 도출 시 유용하게 활용할 수 있을 것으로 기대된다.

2. 연구 방법

2.1 대기질 모델링

3차원 대기질 모델링을 위하여 WRF (Weather Research and Forecasting) v3.6, SMOKE (The Sparse Matrix Operator Kernel Emissions) v3.1, CMAQ (Community Multi-Scale Air Quality) v4.7.1을 사용하였다. 모델링 대상 영역은 그림 1과 같이 27 km-9 km-3 km 해상도에 대하여 동지화(nesting) 기법을 적용하였다. 남한 대상 모델링의 경우 9 km 해상도를 적용하는 것이 일반적이거나 본 연구에서는 지자체별 기여도 분석을 위하여 3 km 해상도를 적용하였다(표 1 참조).

WRF v3.6.1 수행 시 사용한 물리 과정은 표 2와 같다. 모델의 초기 및 경계 입력 자료는 NCEP (National Centers for Environmental Prediction)에서 제공하는 수평 공간해상도 1°×1° 간격으로 6시간 단위의 FNL

Table 1. Description of three domains for WRF modeling.

	Domain 1	Domain 2	Domain 3
Horizontal grid resolution	27 km	9 km	3 km
East-West	181	76	187
North-South	143	97	232
Vertical layer		35	

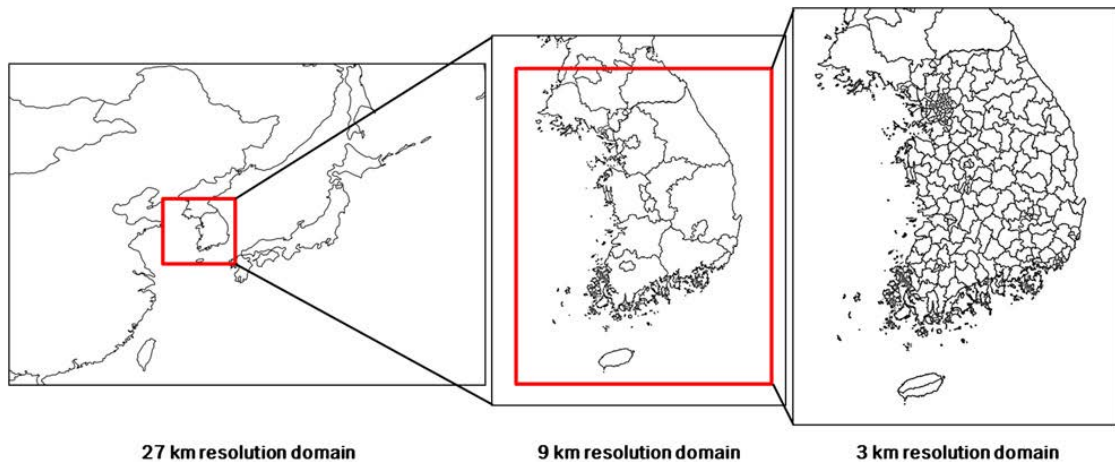


Fig. 1. Nested domains for WRF and CMAQ modeling.

Table 2. WRF model physics adopted in this study.

Physics	Option
Short-wave radiation option	Dudhia shortwave radiation (Dudhia, 1989)
Long-wave radiation option	RRTM scheme (Mlawer <i>et al.</i> , 1997)
Land-surface option	Unified NOAA land-surface model (Chen and Dudhia, 2001)
Boundary-layer option	Yonsei University (YSU) scheme (Hong <i>et al.</i> , 2006)
Cumulus option	Kain-Fritsch (new Eta) scheme (Kain, 2004)
Microphysics option	WSM 3-class simple ice scheme (Hong <i>et al.</i> , 2004; Hong <i>et al.</i> , 1998)

Table 3. CMAQ model options adopted in this study.

	Description
Chemical mechanism	SAPRC99
Emissions inventory	2013 CAPSS & 2015 CREATE
Boundary condition	Profile
Advection scheme	PPM
Horizontal diffusion	Multiscale
Vertical diffusion	Eddy
Cloud scheme	ACM

(Final) 자료를 사용하였으며, 대상 도메인의 지형과 토지이용자료는 선행연구인 Moon *et al.* (2012)에서 구축된 고해상도 3 s (90 m) DEM (Digital Elevation Model) 자료 및 환경부 중분류 자료를 이용하였다.

모사기간은 2015년 1년에 대하여 모사하였으며, 11일간 pre-run 기간을 설정하여 수행하였다. 대기질 모

텔링에 사용된 국내 배출량은 국립환경과학원의 CAPSS (Clean Air Policy Supporting System) 2013을, 국외 배출량은 CREATE (Comprehensive Regional Emissions inventory for Atmospheric Transport Experiment) 2015를 사용하였으며, 자연 배출량의 경우는 MEGAN (Model of Emissions of Gases and Aerosols from Nature)을 사용하여 산정하였다. 표 3은 CMAQ 모델링 적용 시 사용한 설계조건 및 물리 옵션을 정리한 것이다.

2.2 지자체별, 오염원별, 오염물질별 기여도 및 전환율 산정

미세먼지 기여도 및 전환율 산정을 위해서 BFM (Brute Force Method) 기법을 사용하였다. BFM은 현재 배출량에 대한 모사 농도와 변화된 배출량(현재

배출량에서 기여도를 알고 싶은 배출량을 삭감한 배출량에 대한 모사 농도의 차이를 통해 배출량 변화에 따른 민감도(기여농도)를 산정하는 방법이며, 다음의 식 1을 참고할 수 있다(Kim *et al.*, 2017a, b).

$$\text{기여농도 (ZOC, } \mu\text{g/m}^3\text{)} = \frac{C_b - C_{s, \text{ratio}}}{\Delta e_{i, \text{ratio}}} \quad (1)$$

여기에서,

ZOC = Zero-Out contribution

$C_{s, \text{ratio}}$ = Sensitivity simulation concentration

C_b = Base concentration

$\Delta e_{i, \text{ratio}}$ = Emission change ratio at i emission source

식 1의 C_b 는 기본 모사 농도이고, $C_{s, \text{ratio}}$ 는 배출량을 일정 비율(ratio) 삭감한 민감도 모사의 농도이며, ZOC는 기본 농도와 민감도 모사의 차를 $\Delta e_{i, \text{ratio}}$ 인 해당 배출원의 배출량 변화 비율(ratio)로 나눈 값이다. 식 1에서 산정된 지자체별 기여농도(ZOC)를 해당 배출량으로 나누면 지자체별, 오염원별, 물질별 배출량 1톤당 PM_{2.5}로의 농도 생성 전환율을 산정할 수 있다.

지자체별 대기오염물질 기여도 평가는 총 17개 지

자체에 대하여 오염원별(점, 선, 면) NO_x, SO_x, NH₃, VOC, PM_{2.5} 배출량을 대상으로 수행하였다. 17개 지자체에 대한 대기오염물질 기여도 분석을 위하여 각 지자체별로 15가지(점/선/면×5개 물질)의 경우가 필요하므로, 총 255회에 대한 대기질 모델링을 수행하였다. 지자체별 기여도 분석 및 전환율 산정을 위하여 전국에 대하여 3 km 격자 해상도로 모델링을 실시하였다.

3. 결 과

3.1 모델링 평가

그림 2는 2015년 전국 기상대 94곳의 기온 및 풍속의 관측값과 모의값을 나타낸 시계열 그래프와 산포도이다. 기온의 경우 전반적으로 관측값과 유사하게 모의되었으며, 풍속도 대체로 관측값의 패턴을 따라 나타나나 모델값이 일부 과대모의되는 경향을 보인다.

표 4는 같이 2-m 기온 및 10-m 풍속 관측값과 모델

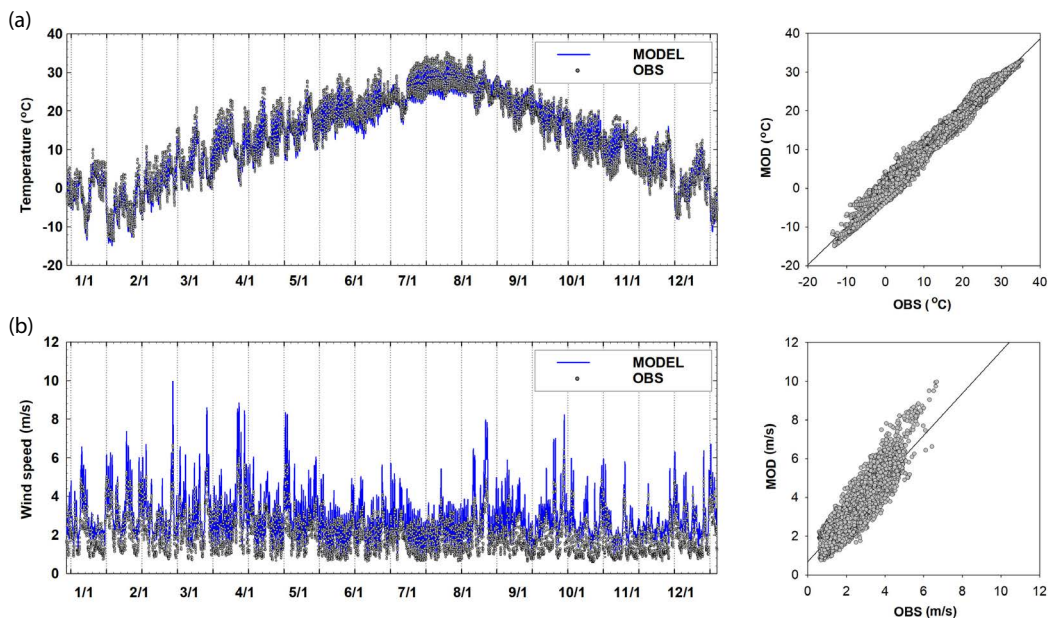


Fig. 2. Time series and scatter diagram of (a) temperature and (b) wind speed model simulations and observations for 2015.

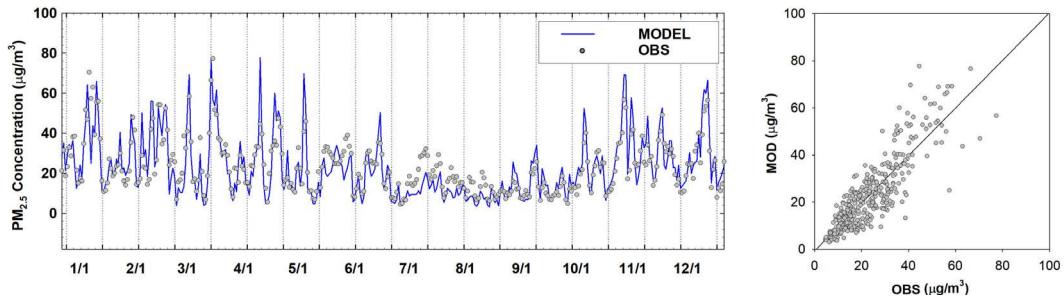


Fig. 3. Time series and scatter diagram PM_{2.5} model simulations and observations at 90 Air Korea stations in 2015.

Table 4. Statistics for (a) 2-m temperature, and (b) 10-m wind speed in 2015.

(a) 2-m temperature							(b) 10-m wind speed						
Mean (°C)		R	Bias	RMSE	IOA	Mean (m/s)		R	Bias	RMSE	IOA		
Observed	Modeled					Observed	Modeled						
Spring	12.9	11.9	0.95	−1.0	2.4	0.97	Spring	2.3	3.1	0.68	0.9	1.9	0.78
Summer	25.2	24.2	0.92	−1.0	2.2	0.95	Summer	1.9	2.6	0.66	0.7	1.6	0.77
Autumn	13.8	14.0	0.95	0.2	2.2	0.97	Autumn	1.7	2.7	0.64	1.0	1.8	0.73
Winter	0.2	−0.5	0.91	−0.7	2.8	0.95	Winter	2.2	3.0	0.65	0.8	1.9	0.77

Emery *et al.* (2001) benchmarks for wind speed (10 m): RMSE ≤ 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

값을 비교한 것이다. IOA, RMSE, R은 관측값과 모델값을 서로 비교하여 오차의 정도를 나타내는 값으로 IOA는 1에 가까울수록, RMSE는 0에 가까울수록 관측값과 모델값의 일치도가 높다는 것을 의미하며, R은 1 또는 -1에 가까울수록 높은 상관관계를 나타낸다. 기온의 경우 RMSE, IOA, R이 각각 2.2~2.8, 0.95~0.97, 0.91~0.95의 범위 값을 가지며, 모델값이 관측값을 잘 설명하고 있다. 풍속의 경우 RMSE, IOA, R이 각각 1.6~1.9, 0.73~0.78, 0.64~0.68의 범위로 산정되었다. 이상에서 산정된 통계분석 결과는 Emery *et al.* (2001)에서 제안한 Bias, Gross error, IOA, RMSE를 전반적으로 충족시켜 기상 모델링 결과의 신뢰성을 확인하였다.

그림 3은 전국 측정소 90곳의 PM_{2.5} 농도 관측값과 모델값의 일평균 농도를 시계열과 산포도로 나타낸 것으로 여름철을 제외하고 대체로 관측값과 유사하게 모의하는 것으로 나타났다.

Table 5. Statistics for PM_{2.5} at Metropolitan cities in 2015.

	Mean (μg/m³)		R	Bias	RMSE	IOA
	Observed	Modeled				
Spring	25.3	23.0	0.76	-2.4	12.4	0.85
Summer	18.7	12.3	0.69	-6.3	10.8	0.77
Autumn	19.5	21.5	0.78	2.0	10.3	0.86
Winter	26.5	29.6	0.78	3.1	11.4	0.86

Emery *et al.* (2017) goals for 24-hr PM_{2.5}: $r > 0.70$

Emery *et al.* (2017) criteria for 24-hr PM_{2.5}: $r > 0.40$

표 5는 광역시도의 PM_{2.5} 농도 모사 결과를 관측값과 비교한 것으로 RMSE, IOA, R이 각각 10.3~12.4, 0.77~0.86, 0.69~0.78의 범위 값을 가지며, 여름철에 상대적으로 가장 큰 편차(-6.3 μg/m³)를 보이지만 전반적으로 모델값이 관측값을 잘 설명하는 것으로 나타났다. 또한, Emery *et al.* (2017)에서 제안한 R 값의 기준을 전반적으로 충족시키는 것을 확인하였다.

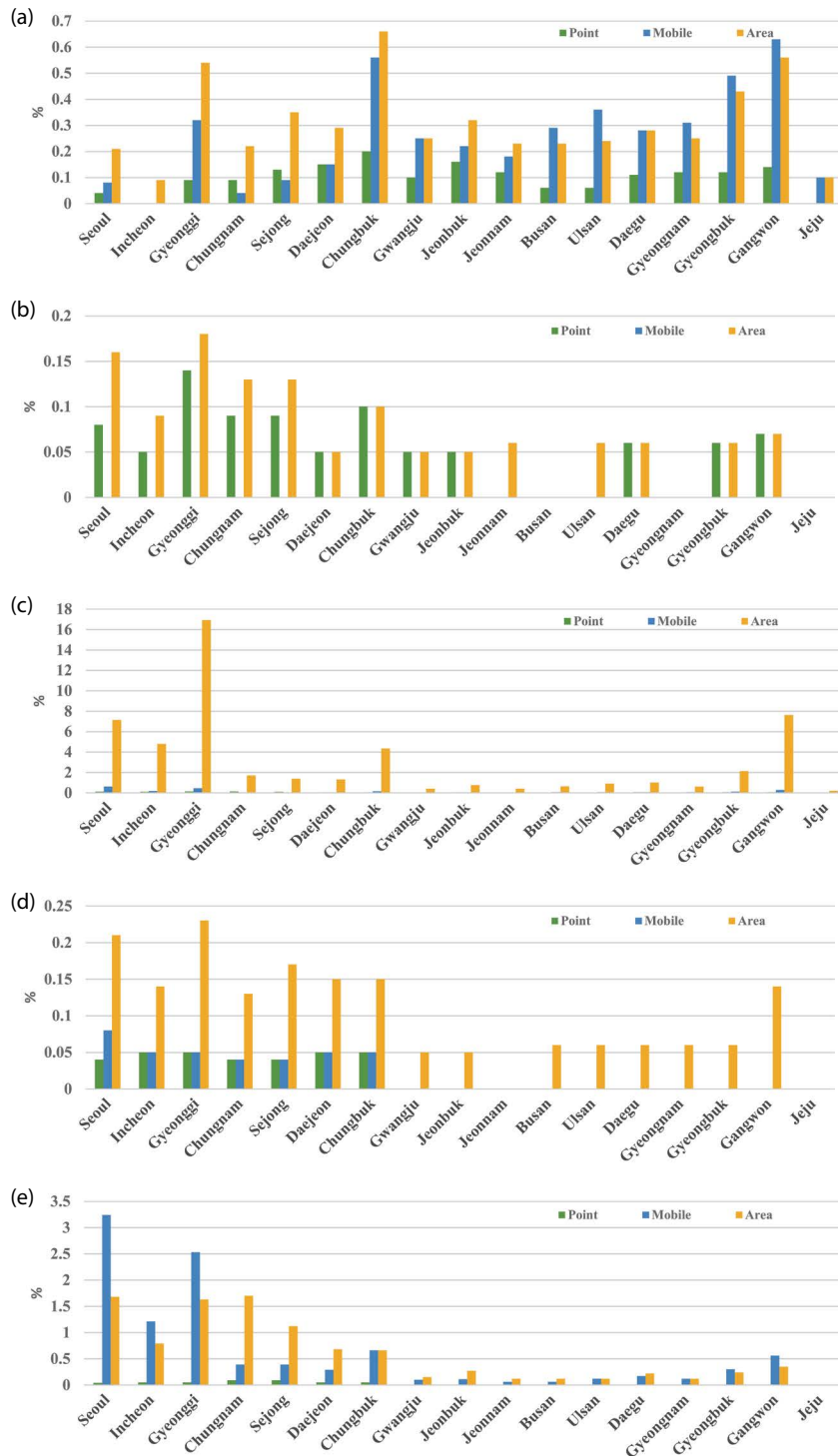


Fig. 4. Concentrations contribution rate of Gyeonggi-do (a) NO_x , (b) SO_x , (c) NH_3 , (d) VOC, (e) $PM_{2.5}$ emissions to annual mean $PM_{2.5}$ by source category over local governments during the simulation period in 2015.

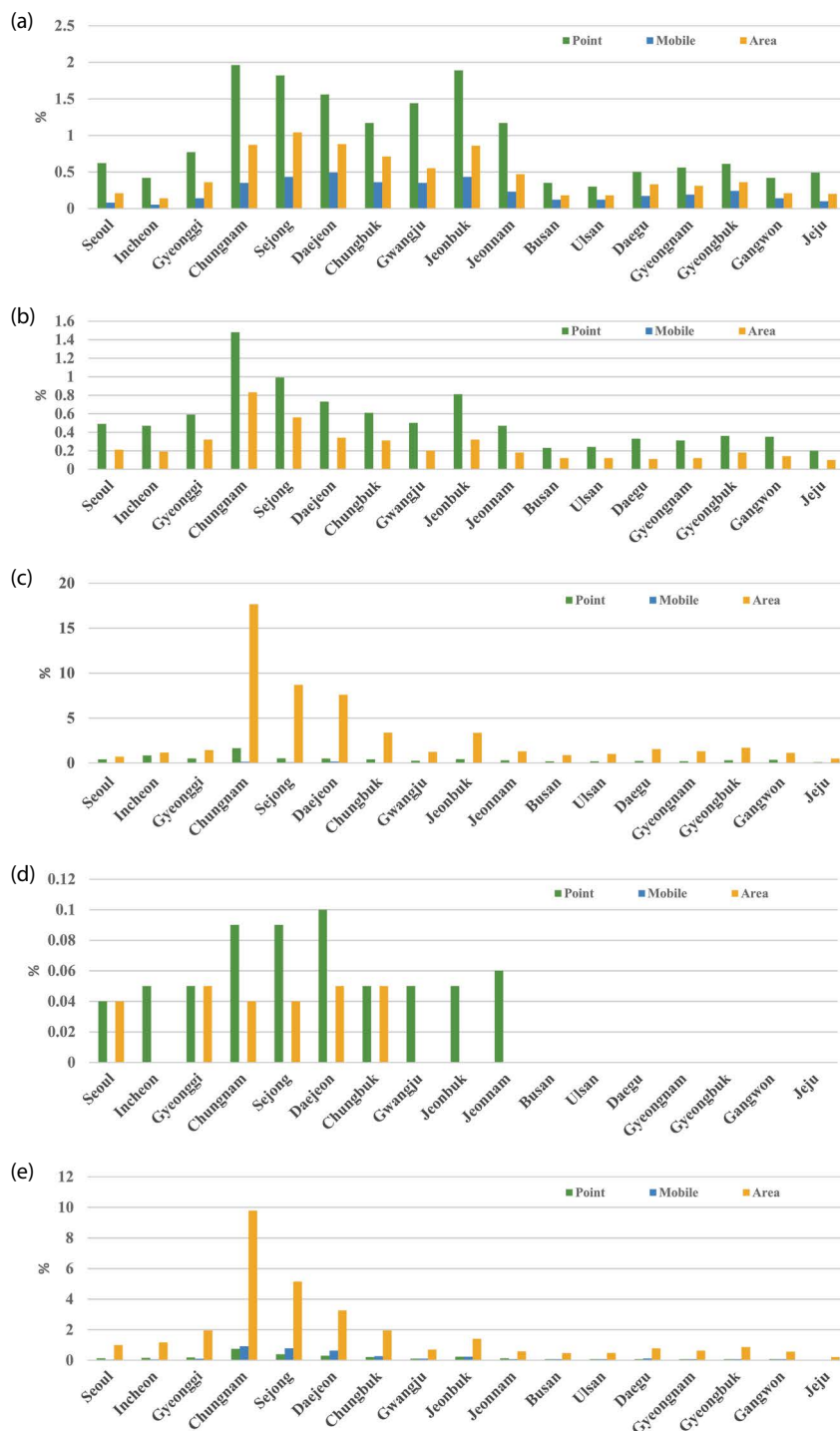


Fig. 5. Concentrations contribution rate of Chungcheongnam-do (a) NO_x, (b) SO_x, (c) NH₃, (d) VOC, (e) PM_{2.5} emissions to annual mean PM_{2.5} by source category over local governments during the simulation period in 2015.

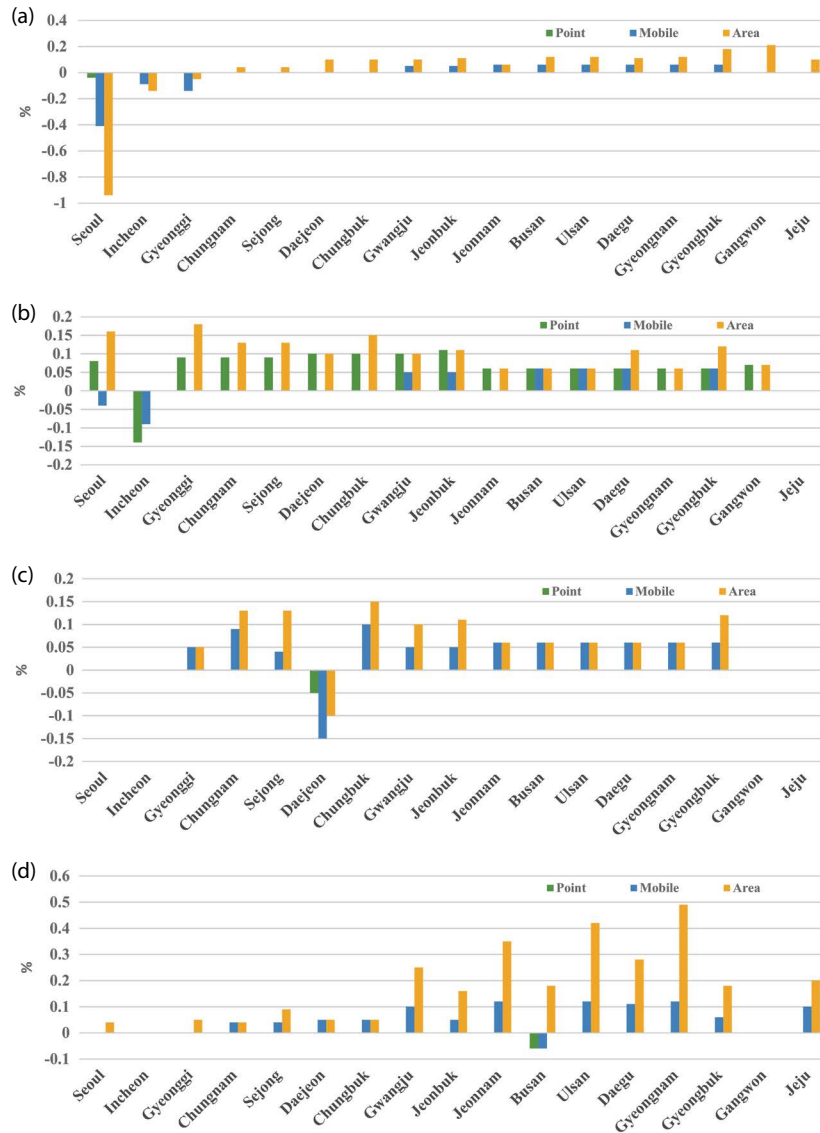


Fig. 6. Concentrations contribution rate of NO_x emissions from major metropolitan cities ((a) Seoul, (b) Incheon, (c) Daejeon, (d) Busan) to annual mean PM_{2.5} by source category over local governments during the simulation period in 2015.

3.2 지자체별 기여도 산정

17개 지자체의 오염원별 NO_x, SO_x, NH₃, VOC, PM_{2.5} 배출량이 자체 지역 및 주변 지역의 PM_{2.5} 농도에 미치는 영향을 살펴보았다. 그림 4와 5에는 경기도와 충청남도의 오염원별, 물질별 배출량의 연평균 PM_{2.5} 기여도를 나타내어 해당 지자체의 오염물질이

자체 및 인근 지자체 PM_{2.5} 농도에 어느 정도 기여하는지를 현황농도 대비 비율로 파악할 수 있도록 하였다. NO_x, SO_x, NH₃, VOC, PM_{2.5} 각 배출량이 자체 및 인근 지역에 미치는 PM_{2.5} 기여 농도를 분석한 결과, 경기도 NH₃ 배출량의 자체 지역 PM_{2.5} 생성 기여도가 17.5%, 충청남도 NH₃ 배출량의 자체 지역 PM_{2.5} 생성

기여도가 약 19.4%로 나타나는 등 5종의 배출물질 중 NH_3 의 미세먼지 기여도가 크게 나타났으며 이는 Kang *et al.* (2021) 등 기존 연구에서 분석한 바와 유사한 내용이다.

NH_3 는 질소산화물(NO , NO_2)과 아황산가스(SO_2)가 대기 중 오존(O_3), 수증기 등과 반응하여 생성된 황산(H_2SO_4), 질산(HNO_3) 등과 반응하여 황산암모늄($(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$), 질산암모늄(NH_4NO_3) 등의 2차 대기 오염물질을 생성한다(MOE, 2016). NH_3 의 국내 배출량은 CAPSS 자료에 의하면 축산 및 농업과 관련된 면 오염원 배출량이 전체 배출량의 약 90%를 차지한다(NIER, 2014). 이러한 결과는 국내 $\text{PM}_{2.5}$ 관리를 위해서는 면오염원의 NH_3 배출량 관리가 매우 중요함을 알 수 있다. $\text{PM}_{2.5}$ 관리에서 NH_3 의 중요성을 언급한 사례로 미국의 경우 NH_3 를 관리 대상 물질에서 제외하기 위해서는 NH_3 배출량이 $\text{PM}_{2.5}$ 농도에 미치는 영향이 크지 않음을 증명해야 한다(Kim *et al.*, 2017b; U.S. EPA, 2016).

그림 6은 국내 주요 도시의 NO_x 배출량이 국내 대기질에 미치는 기여도를 살펴본 것으로, NO_x 배출량

저감에 따라 $\text{PM}_{2.5}$ 농도가 증가하는 ‘ NO_x disbenefit’ 영향이 나타나는 특성을 보였다. 단위면적당 NO_x 배출량이 높은 대도시 지역에서 이러한 음의 기여도가 나타나고, 상대적으로 단위면적당 NO_x 배출량이 적은 도 단위의 지자체에서는 NO_x 배출량 저감에 따라 $\text{PM}_{2.5}$ 농도가 개선되는 것으로 나타났다. 이러한 특성은 Kim *et al.* (2017b)와 Lee *et al.* (2006)의 연구 결과에서 논의된 바와 같이 대도시 지역이 ‘ NO_x -rich’ 조건에서 NO_x 농도가 낮아지면 오히려 오존 생성 등 광화학 반응이 촉진되기 때문이다.

이와 관련하여 Moon *et al.* (2017) 연구에서 오염원별 국가 전체 NO_x 배출량이 $\text{PM}_{2.5}$ 농도에 미치는 영향에 관한 결과를 고려해 보면, 실제 대도시의 $\text{PM}_{2.5}$ 농도는 자체 영향만을 고려해서는 대기질 개선이 어려우며 인근 지자체 배출량의 영향까지 고려한 국가 전반적인 차원의 배출량 저감이 의미가 있음을 확인할 수 있다. 또한 Kim *et al.* (2017a)에서도 일정 수준 이상의 전국적인 NO_x 저감이 이루어질 경우, 수도권 지역만의 NO_x 저감에 따른 ‘ NO_x disbenefit’ 특성이 ‘ NO_x benefit’으로 변화 가능함을 보여 배출량 저감

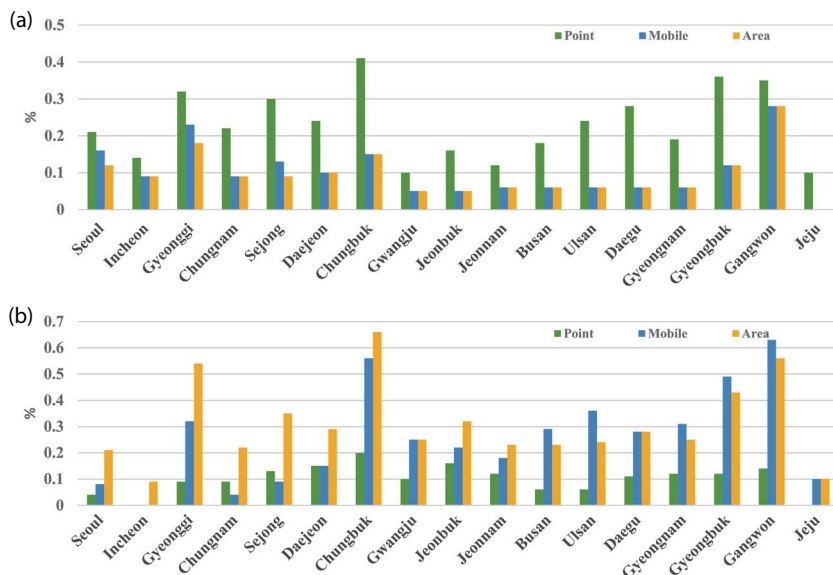


Fig. 7. Concentrations contribution rate of NO_x emissions from (a) Gangwon-do and (b) Gyeonggi-do to annual mean $\text{PM}_{2.5}$ by source category over local governments during the simulation period in 2015.

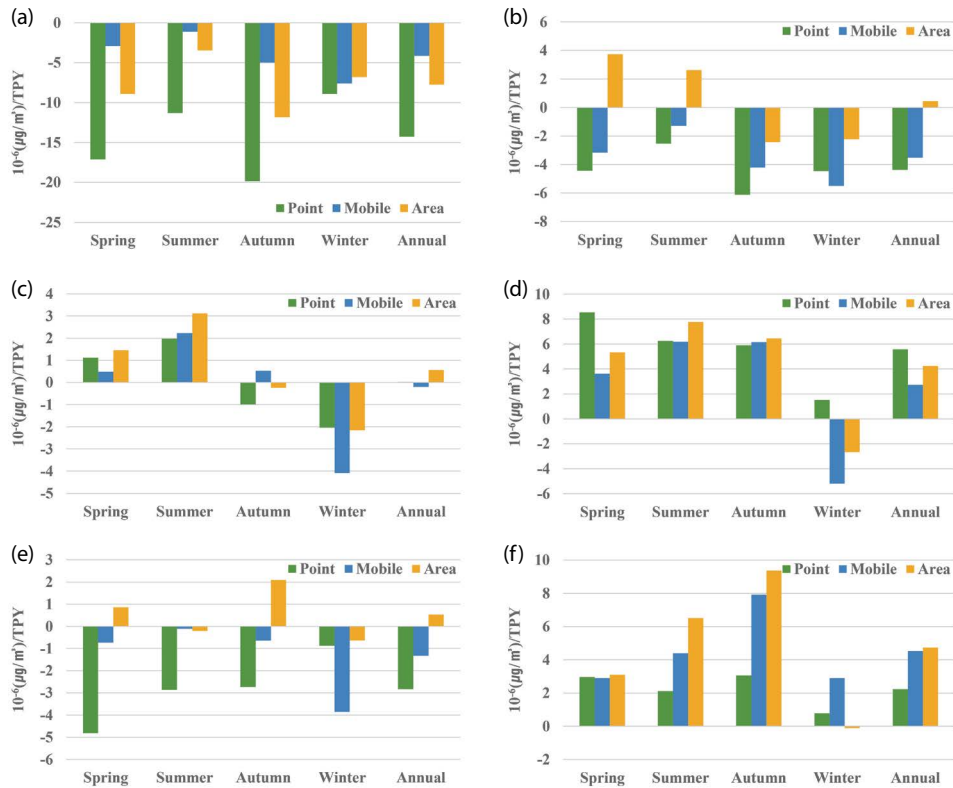


Fig. 8. Conversion rates of (a) Seoul, (b) Incheon, (c) Gyeonggi-do, (d) Chungcheongnam-do, (e) Busan, (f) Gangwon-do NOx emissions to seasonal average PM_{2.5} during the simulation period in 2015.

대상 지역의 선정이 중요함을 시사한 바 있다.

지자체별 대기오염물질의 PM_{2.5} 기여도를 살펴보면 주로 오염물질을 배출하는 지역 자체에 가장 크게 영향을 주지만, 그림 7과 같이 강원도와 경기도 등 일부 지자체의 경우는 해당 지자체 배출량이 자체 지역에 미치는 기여도보다 인근 지역에 미치는 기여도가 크게 나타남을 확인할 수 있다. 이는 배출원의 풍하측에 위치한 인접 지자체에 배출량이 이동하여 미세먼지를 생성한 것으로 추정된다. 이는 앞서 언급한 ‘NOx disbenefit’ 특성과 유사한 것으로 단순히 해당 지자체 내 배출원별 배출량 삭감만으로는 지역의 실질적 대기질 개선 효과를 기대하기 어려우며, 실효성 있는 대기 관리를 위해서는 지역별, 배출원별 각각의 배출량이 농도 생성에 미치는 과학적이고 정량적인 기여도 분석 자료를 활용한 대기 정책 수립이 필요함

을 보여준다.

3.3 지자체별 전환율 산정

3.2절에서 분석한 지자체별 기여농도 산정 결과를 활용하여 지자체별, 오염원별 (점, 선, 면), 물질별 (NOx, SOx, NH₃, VOC, PM_{2.5}) 배출량 1톤당 PM_{2.5}로의 농도 생성 전환율을 산정하였다. 그림 8~12는 지자체별 PM_{2.5} 전환율을 나타낸 것으로, NOx의 경우 서울, 부산을 제외하고 겨울철 미세먼지 전환율은 약 $-5 \sim -3 (10^{-6} (\mu\text{g}/\text{m}^3)/\text{TPY})$ 으로 다른 계절에 비하여 낮으며, 서울, 인천, 경기, 충남, 부산은 음의 기여도를 보인다. SOx의 경우 기여도가 작은 선 오염원을 제외한 점과 면 오염원은 전반적으로 여름과 가을에 전환율이 높으며, 면 오염원의 경우 인천, 경기, 부산은 여름에, 서울, 충남, 강원은 가을에 높은 전환율을 보인다.

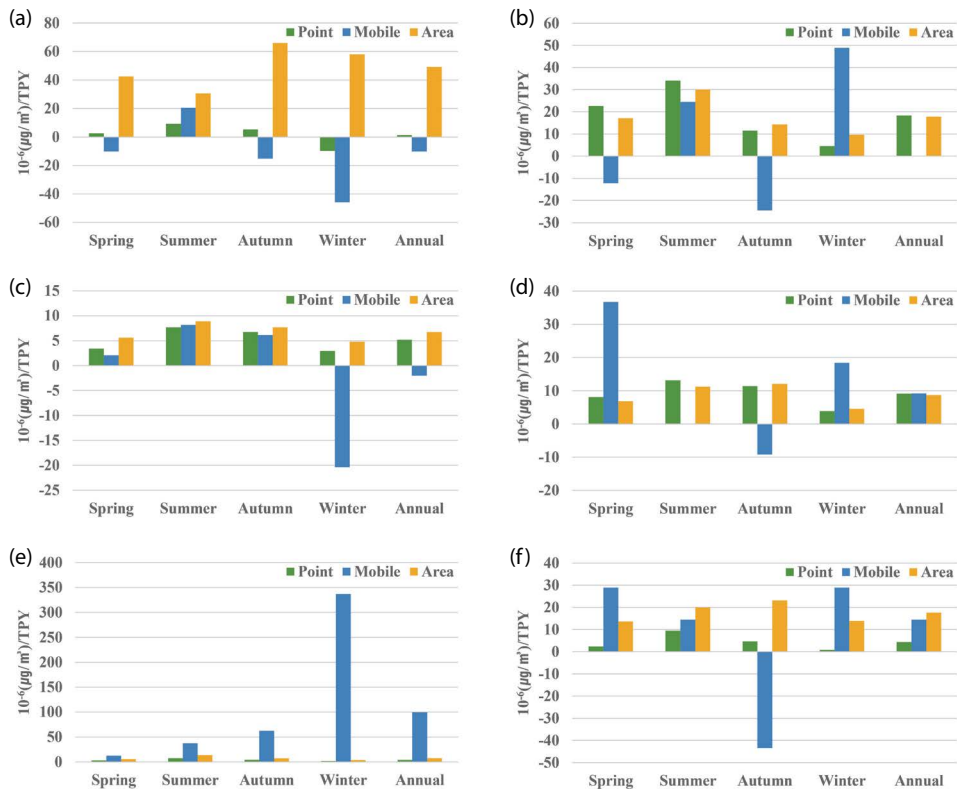


Fig. 9. Conversion rates of (a) Seoul, (b) Incheon, (c) Gyeonggi-do, (d) Chungcheongnam-do, (e) Busan, (f) Gangwon-do SOx emissions to seasonal average PM_{2.5} during the simulation period in 2015.

인천과 충남은 점 오염원의 연평균 전환율이 각각 약 18과 9 (10^{-6} ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)/TPY)로 높으며, 서울을 비롯한 경기, 강원 지역은 약 6~49 (10^{-6} ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)/TPY)로 먼 오염원의 전환율이 높게 나타났다. NH₃의 경우 인천, 경기도는 선오염원의 연평균 전환율이 약 26~173 (10^{-6} ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)/TPY)으로 높으며, 서울, 충남, 부산, 강원은 먼 오염원의 연평균 전환율이 약 35~225 (10^{-6} ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)/TPY)로 높게 나타났다. VOC의 경우 전반적으로 봄과 겨울에 높은 전환율을 보이며, 선 오염원의 전환율이 다른 오염원에 비해 높게 나타났다. PM_{2.5}의 경우 충남은 점 오염원의 전환율이 높고 그 외 인천, 경기, 부산 지역은 선오염원 전환율이, 서울, 강원 지역은 먼 오염원의 전환율이 높게 보인다.

전환율의 경우 기여농도에 배출량을 고려한 것으로

기여농도와 배출량의 비율에 따라 큰 폭으로 변할 수 있다. 예를 들어 기여농도가 크지 않더라도 해당하는 배출량이 극히 작은 경우는 전환율 값이 매우 크게 산정될 수 있다. 그러나 이 경우 배출량이 미미한 수준이므로 전환율이 크더라도 현실적으로 저감시킬 수 있는 배출량이 거의 없으므로 정책 반영에 관여될 확률이 매우 낮다. 즉, 각 지자체에 대한 배출원별, 오염물질별 전환율의 절대값을 비교하는 것보다 실제 배출량을 어느 정도 변화시킬 수 있는지가 중요하다. 또한 전환율은 동일한 배출량 조건이라 하더라도 기상 조건에 따라 다르게 산정된다. 이에 본 연구에서 산정한 전환율을 KEI_PM2.5_CT_V1.0으로 하고 최신 기상 및 배출량 자료로 KEI_PM2.5_CT_V2.0을 추가로 산정하였으며 향후 지속해서 갱신할 예정이다.

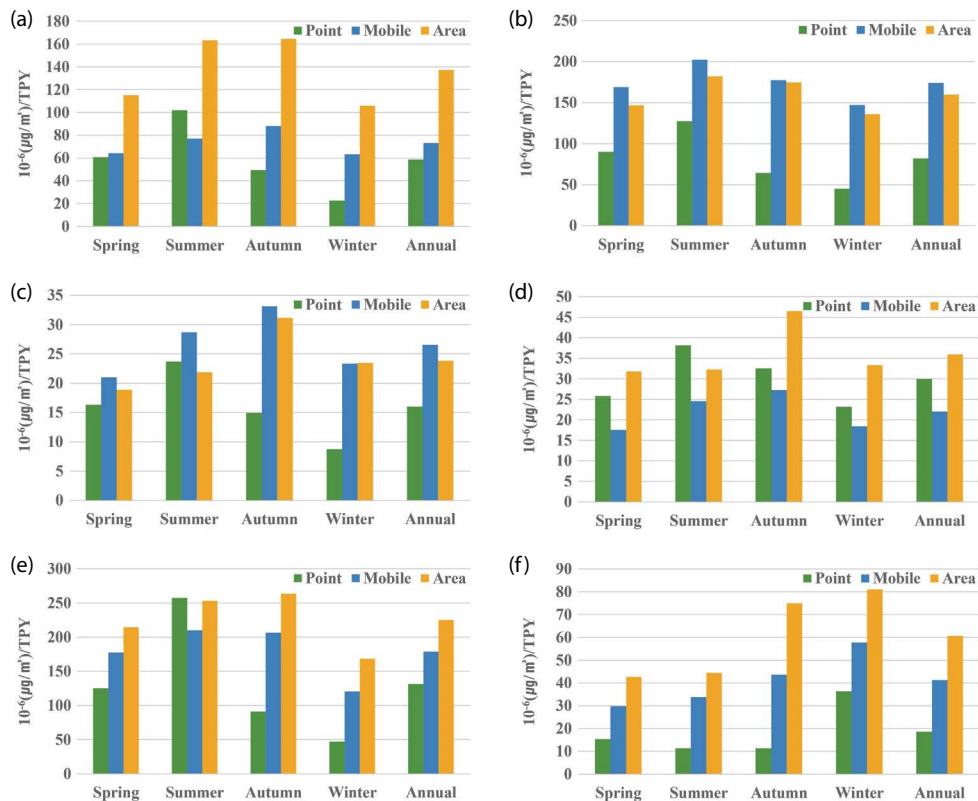


Fig. 10. Conversion rates of (a) Seoul, (b) Incheon, (c) Gyeonggi-do, (d) Chungcheongnam-do, (e) Busan, (f) Gangwon-do NH₃ emissions to seasonal average PM_{2.5} during the simulation period in 2015.

전환율 산정 과정에 있어 불확실성이 분명히 존재하지만, 해당 지자체의 대기 개선을 위한 배출량 저감 대책 마련 시 또는 개발 가능 용량 산정 시 스크리닝 단계에서 활용할 수 있다. 예를 들어 해당 지자체의 NO_x 배출량을 점 오염원에서 연간 1만 톤 감축할 경우 해당 지자체와 인근 지역의 PM_{2.5} 농도에 어느 정도 영향을 미치는지에 관한 사전 정보를 가질 수 있어 향후 산업단지 등 개발계획 적정성과 대기 개선을 위한 배출량 규제 등의 대기 관리정책 도출 시 개략적인 영향을 사전평가해 볼 수 있다(Moon *et al.*, 2017).

4. 요 약

본 연구에서는 17개 지자체별 배출원별(점, 선, 면

오염원), 물질별(NO_x, SO_x, NH₃, VOC, PM_{2.5}) 미세 먼지 기여도와 전환율을 산정하였다. 지자체별 미세 먼지 기여도 산정 결과로부터 몇 가지 특징을 살펴볼 수 있었다. 우선 미세먼지 주요 전구물질 중 NH₃의 민감도가 가장 크게 나타나 미세먼지의 효율적 저감을 위하여 국내 NH₃ 저감 정책에 대한 심도 있는 논의가 필요함을 알 수 있었다. 또한 자동차 이용이 많은 광역도시의 경우 'NO_x disbenefit'의 현상이 뚜렷하게 나타나 해당 지자체의 미세먼지 저감을 위한 도로이동오염원 배출량 삭감 계획 마련이 필요함을 재확인할 수 있었다. 아울러 국내 지자체 중 자체 배출원보다 인근 지자체에서 이동하여 생성되는 미세먼지 농도가 큰 경우가 확인되어 영향권 지자체를 하나의 관리권으로 고려할 필요가 있음을 확인할 수 있었다.

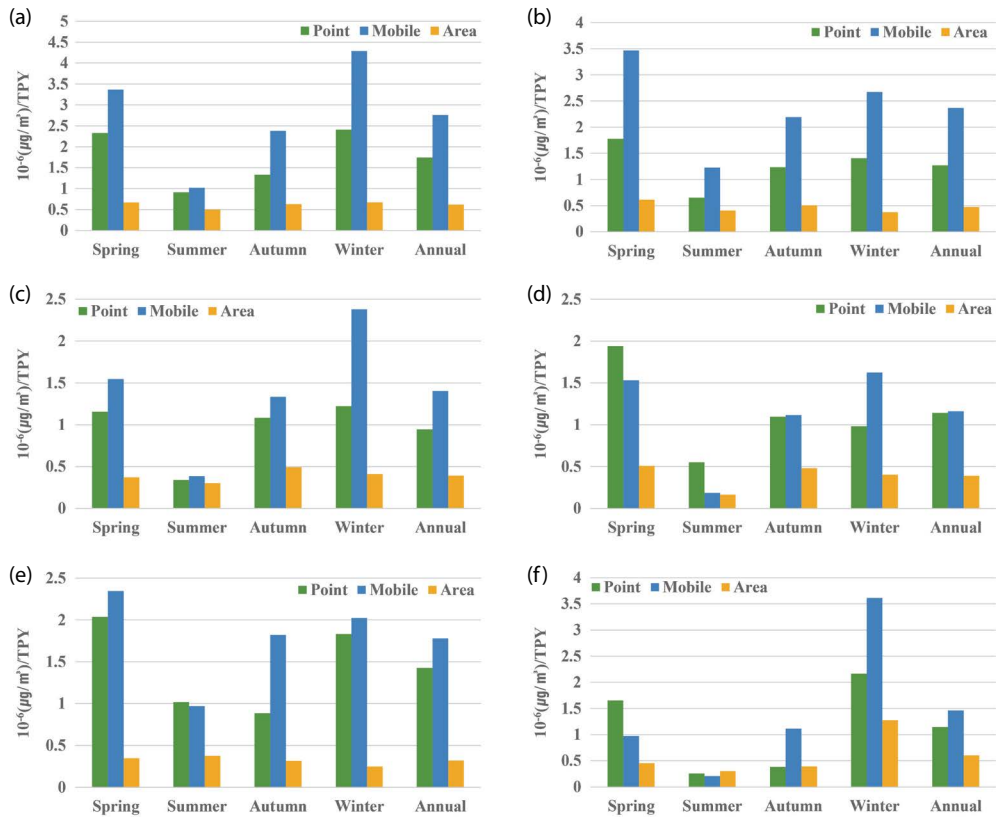


Fig. 11. Conversion rates of (a) seoul, (b) Incheon, (c) Gyeonggi-do, (d) Chungcheongnam-do, (e) Busan, (f) Gangwon-do VOC emissions to seasonal average PM_{2.5} during the simulation period in 2015.

이러한 결과들은 기존 연구에서도 확인된 사례가 있으며 본 연구를 통해 정량적으로 분석할 수 있었다.

본 연구에서 산출된 지자체별 PM_{2.5} 기여도 및 전환율을 이용하면 오염원별 배출물질 삭감에 따른 PM_{2.5} 농도 변화를 유추할 수 있다. 특히 본 연구에서 산정된 전환율은 전국 17개 지자체별, 물질별, 오염원별로 세분화되어 제공되므로 해당 지자체는 물론 주변 지자체의 배출 변화를 함께 평가할 수 있다. 또한, 이런 전환율의 적용은 현 조건에서의 PM_{2.5} 관련 배출량 변화에 따른 농도 변화를 추정할 수 있다. 이에 정책 입안자, 개발계획 수립자, 지자체 담당 공무원들에게 상당한 전문성과 시간이 필요한 복잡한 3차원 대기질 모델링 수행 없이도 사용할 수 있는 자료를 제

공할 수 있다는 데 큰 의미가 있다. 지자체별 전환율은 웹기반 서비스를 구축하여 http://eiareserch.kei.re.kr/analysis/PM2.5_conversion에서 배출량 변화 시나리오 적용 및 결과를 내려받을 수 있도록 하였다. 전환율은 기상 조건과 배출량 조건에 따라 다르게 산정되어 지속적인 업데이트 작업이 필요할 것으로 사료된다. 이에 본 연구에서 산정된 전환율을 KEI_PM2.5_CT_V1.0으로 하고 최신 기상 및 배출량 자료로 KEI_PM2.5_CT_V2.0을 추가로 산정하였으며 모든 자료는 웹기반 서비스에 공개할 예정이다.

그러나 본 연구에서 도출된 전환율은 각 물질별 민감도를 기반으로 산정된 것으로 자자체의 구체적인 미세먼지 개선대책에 대한 두 가지 이상의 배출량 변

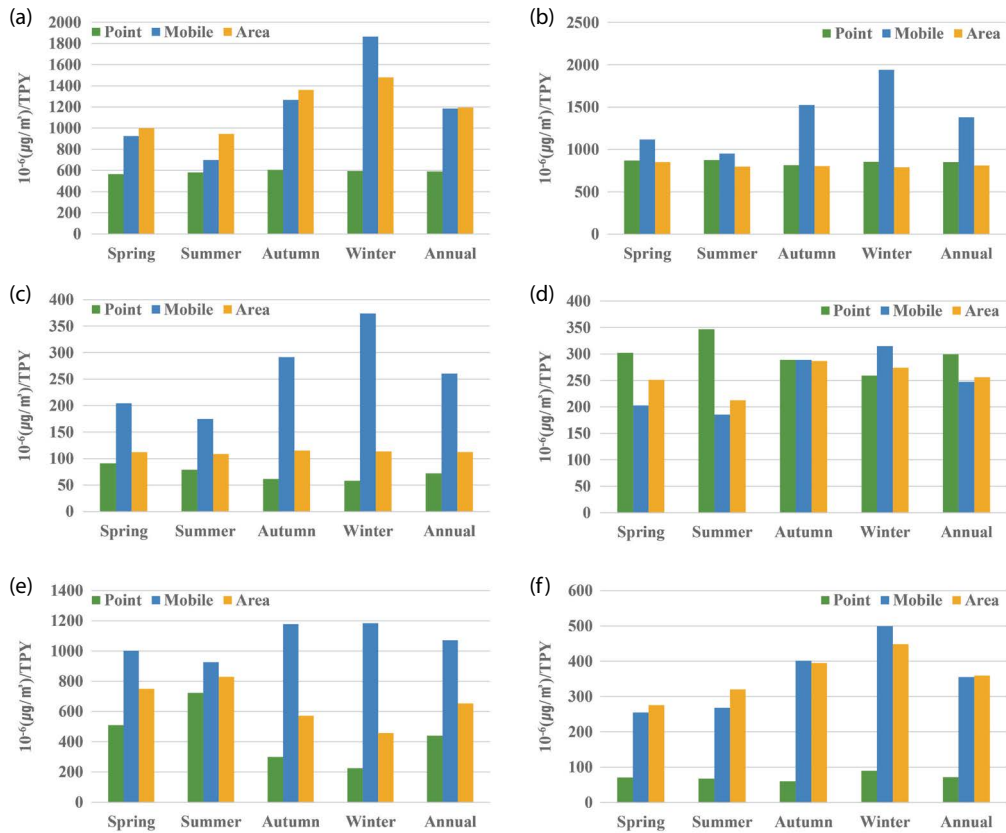


Fig. 12. Conversion rates of (a) Seoul, (b) Incheon, (c) Gyeonggi-do, (d) Chungcheongnam-do, (e) Busan, (f) Gangwon-do PM_{2.5} emissions to seasonal average PM_{2.5} during the simulation period in 2015.

화를 적용하여 산정한 미세먼지 예측 농도와 본 연구에서 도출된 전환율을 적용하여 예측한 미세먼지 농도는 상이할 수 있다. 또한 전환율 산정을 위하여 사용한 BFM 방법은 계산과정에서 발생하는 비선형성 영향으로 배출량 삭감량에 따라 저감되는 농도가 다르게 나타날 수 있다. 이러한 사유로 지자체의 세부 정책을 수립하거나 구체적인 정책 효과 분석을 위하여 전환율을 사용하는 것은 적절하지 않음을 분명히 밝혀둔다. 본 연구에서 산정한 기여도 및 전환율은 지자체에서 대기 개선 정책 수립 시 사전평가 단계에서 활용하고, 해당 지자체의 정책 수립은 사전평가 결과를 토대로 반드시 상세 모델링을 수행할 것을 권고한다.

감사의 글

본 논문은 한국환경연구원의 일반사업 (과제번호: GP2018-10)의 지원으로 수행되었습니다.

References

- 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. [https://doi.org/10.1175/1520-0493\(2001\)129<0569:CAALSH>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0493(2001)129<0569:CAALSH>2.0.CO;2)
- Cheng, S., Lang, J., Zhou, Y., Han, L., Wang, G., Chen, D. (2013) A

- new monitoring-simulation-source apportionment approach for investigating the vehicular emission contribution to the PM_{2.5} pollution in Beijing, China, *Atmospheric Environment*, 79, 308-316. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2013.06.043>
- Clappier, A., Fagerli, H., Thunis, P. (2017) Screening of the EMEP source receptor relationships: application to five European countries, *Air Quality, Atmosphere & Health* 2016, 10(4), 497-507. <https://doi.org/10.1007/s11869-016-0443-y>
- Dudhia, J. (1989) Numerical Study of Convection Observed During the Winter Monsoon Experiment Using a Mesoscale Two-Dimensional Model, *Journal of the Atmospheric Sciences*, 46, 3077-3107. [https://doi.org/10.1175/1520-0469\(1989\)046<3077:NSOCOD>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0469(1989)046<3077:NSOCOD>2.0.CO;2)
- 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. <https://doi.org/10.1080/10962247.2016.1265027>
- 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.
- Hong, S.Y., Juang, H.-M.H., Zhao, Q. (1998) Implementation of Prognostic Cloud Scheme for a Regional Spectral Model, *Monthly Weather Review*, 126, 2621-2639. [https://doi.org/10.1175/1520-0493\(1998\)126<2621:IOPCSF>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0493(1998)126<2621:IOPCSF>2.0.CO;2)
- 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. [https://doi.org/10.1175/1520-0493\(2004\)132<0103:ARATIM>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0493(2004)132<0103:ARATIM>2.0.CO;2)
- 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. <https://doi.org/10.1175/MWR3199.1>
- Kain, J.S. (2004) The Kain-Fritsch convective parameterization: an update, *Journal of Applied Meteorology*, 43, 170-181. [https://doi.org/10.1175/1520-0450\(2004\)043<0170:TKCPAU>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0450(2004)043<0170:TKCPAU>2.0.CO;2)
- Kang, Y.-H., Kim, E., You, S., Bae, M., Son, K., Kim, B.-U., Kim, H.-C., Kim, S. (2021) Source Sectoral Impacts on Provincial PM_{2.5} Concentrations based on the CAPSS 2016 using the CMAQ Model, *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment*, 37(1), 17-44, (in Korean with English abstract). <https://doi.org/10.5572/KOSAE.2021.37.1.017>
- Kim, S., Bae, C., Kim, B.-U., Kim, H.-C. (2017a) 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). <https://doi.org/10.5572/KOSAE.2017.33.2.139>
- Kim, S., Bae, C., Yoo, 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). <https://doi.org/10.5572/KOSAE.2017.33.4.377>
- Lee, S., Ghim, Y., Kim, Y.P., Kim, J.Y. (2006) Estimation of the Seasonal Variation of Particulate Nitrate and Sensitivity to the Emission Changes in the Greater Seoul Area, *Atmospheric Environment*, 40(20), 3724-3736. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2006.03.029>
- Ministry of Environment (MOE) (2016) What is fine dust?, <http://www.me.go.kr/daegu/web/board/read.do?menuId=724&boardId=629480&boardMasterId=167&condition.hideCate=1> (accessed on Oct. 12, 2021).
- 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. <https://doi.org/10.1029/97JD00237>
- Moon, N., Bong, C., Lee, Y., Shim, C., Seo, J., Hong, C., Kim, Y., Song, G., Kim, A. (2012) Establishment of data disclosure system to provide air quality modeling information data, National Institute of Environmental Research.
- Moon, N., Kim, S., Ha, J., Kim, Y., Seo, J. (2017) Analysis System for Regional Environmental Status to Support Environmental Assessment : Source Apportionment Analysis of Air Pollutants from Major Industrial Complexes and Local Governments, Korea Environment Institute, (in Korean with English abstract). <https://doi.org/10.23000/TRKO201800014374>
- National Institute of Environmental Research (NIER) (2014) Annual Report of Air Quality in Korea 2013, (in Korean).
- Sciare, J., d'Argouges, O., Zhang, Q.J., Sarda-Estève, R., Gaimoz, C., Gros, V., Beekmann, M., Sanchez, O. (2010) Comparison between simulated and observed chemical composition of fine aerosols in Paris (France) during

- springtime: contribution of regional versus continental emissions, *Atmospheric Chemistry and Physics*, 10(24), 11987-12004. <https://doi.org/10.5194/acp-10-11987-2010>
- Thunis, P., Degraeuwe, B., Pisoni, E., Ferrari, F., Clappier, A. (2016) On the design and assessment of regional air quality plans: The SHERPA approach, *Journal of Environmental Management*, 183(2016), 952-958. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2016.09.049>
- United States Environmental Protection Agency(U.S. EPA) (2016) PM_{2.5} Precursor Demonstration Guidance, <https://www.epa.gov/pm-pollution/draft-pm25-precursor-demonstration-guidance> (accessed in Oct. 12, 2021).
- United States Environmental Protection Agency(U.S. EPA) (2021) Revised Draft Guidance for Ozone and Fine Particulate Matter Permit Modeling, <https://www.epa.gov/scram/revised-draft-guidance-ozone-and-fine-particulate-matter-permit-modeling> (accessed in Nov. 17, 2021).
- Wang, Y., Jacob, D.J., Logan, J.A. (1998) Global simulation of tropospheric O₃-NO_x-hydrocarbon chemistry: 1. Model formulation, *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 103(D9), 10713-10725. <https://doi.org/10.1029/98JD00158>
- Ying, Q., Kleeman, M.J. (2006) Source contributions to the regional distribution of secondary particulate matter in California, *Atmospheric Environment*, 40(4), 736-752. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2005.10.007>
- 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. <https://doi.org/10.5194/gmd-5-355-2012>

Authors Information

문난경 (한국환경연구원 선임연구위원)
 서지현 (한국환경연구원 연구원)
 김순태 (아주대학교 환경안전공학과 교수)