



논문

# 수도권 초미세먼지 농도모사: (VI) 충남 배출 부문별 영향 추정 PM<sub>2.5</sub> Simulations for the Seoul Metropolitan Area: (VI) Estimating Influence of Sectoral Emissions from Chungcheongnam-do

김은혜, 김현철<sup>1,2)</sup>, 김병욱<sup>3)</sup>, 김순태<sup>4),\*</sup>

아주대학교 환경공학과, <sup>1)</sup>미국국립해양대기청

<sup>2)</sup>메릴랜드대학 기후·위성 연구소, <sup>3)</sup>미국조지아주환경청

<sup>4)</sup>아주대학교 환경안전공학과

접수일 2019년 3월 6일  
 수정일 2019년 4월 10일  
 채택일 2019년 4월 12일

Received 6 March 2019  
 Revised 10 April 2019  
 Accepted 12 April 2019

\*Corresponding author

Tel : +82-(0)31-219-2511

E-mail : soontae@ajou.ac.kr

Eunhye Kim, Hyun Cheol Kim<sup>1,2)</sup>, Byeong-Uk Kim<sup>3)</sup>, Soontae Kim<sup>4),\*</sup>

Department of Environmental Engineering, Ajou University

<sup>1)</sup>Air Resources Laboratory, National Oceanic and Atmospheric Administration

<sup>2)</sup>Cooperative Institute for Climate and Satellites, University of Maryland

<sup>3)</sup>Georgia Environmental Protection Division

<sup>4)</sup>Department of Environmental & Safety Engineering, Ajou University

**Abstract** We investigate the impact of Chungcheongnam-do (CCND) sectoral emissions to PM<sub>2.5</sub> concentrations in the Seoul Metropolitan Area (SMA), South Korea. As major suppliers of the SMA's power, CCND's energy generation units are known for important emissions sources to affect SMA air quality, however, the influences of other emission sectors in CCND are not fully addressed. Impacts from seven major emissions sectors (i.e. energy combustion, industrial combustion, industrial process, non-road, on-road, fugitive, and bio-combustion) in CCND are separated using a brute force method with Community Multi-scale Air Quality simulations for the year of 2015. Simulations suggest that seven major emission sectors in CCND contribute 1.74 µg/m<sup>3</sup> (6.6%) of annual SMA PM<sub>2.5</sub> concentrations, 26.42 µg/m<sup>3</sup>, with clear seasonal variation from meteorological effect. While three sectors, industrial combustion, industrial process, and energy combustion, are the most dominant contributors, the impacts from industrial combustion (0.93 µg/m<sup>3</sup>, 3.5%) and industrial process (0.36 µg/m<sup>3</sup>, 1.4%) are larger than that of energy combustion (0.23 µg/m<sup>3</sup>, 0.9%). We conclude that, in order to improve SMA air quality, collaborative control of emissions both from SMA and neighboring administrative region, as well as an additional focus on emissions from non-energy sectors are required.

**Key words:** Particulate matter, Sectoral emissions, Impact, Region-wide

## 1. 서론

‘수도권 대기환경관리 기본계획’, ‘수도권 미세먼지 특별대책’ 등 정부의 배출량 저감노력에도 불구하고 서울, 인천, 경기를 포함하는 수도권 지역의 연평균 PM<sub>2.5</sub> 농도는 2015년 기준 27 µg/m<sup>3</sup>을 기록했다(Air-Korea; <http://www.airkorea.or.kr>). 이는 PM<sub>2.5</sub>의 연평균 대기환경기준(2018년 3월 개정 전 25 µg/m<sup>3</sup>, 개정

후 15 µg/m<sup>3</sup>)을 초과하는 수치로, 수도권 대기질 개선을 위해 기존 수도권 중심의 배출량 저감 방법에서 탈피하여 광역적 농도 분포 특성을 고려한 접근이 요구됨을 시사한다.

미 환경청의 경우 광역적 PM<sub>2.5</sub> 농도 관리를 위해 청정대기법의 선린 조항(Good neighbor provision)을 바탕으로 ‘광역 대기오염법’(CSAPR; Cross-State Air Pollution Rule)을 제정하고 있으며(Kim *et al.*, 2018a),

이를 기반으로 농도 관리 대상 지역에 미치는 주변 지역의 배출량 관리를 수행한다. 한편, 국내에서는 Kim *et al.* (2017a)에 의해 국내 지자체별 기여도 분석을 통해 수도권 지역의  $PM_{2.5}$  농도 관리를 위한 배출량 관리 권역의 확대 필요성이 논의되었으며, Ju *et al.* (2018)은 지자체 간 협력을 통한 공동의 배출량 삭감 노력이 개별 지자체의 배출량 삭감보다 대기질 개선에 효과적임을 정량적으로 확인한 바 있다. 최근 정부에서 발표한 미세먼지 종합대책의 경우 전국적인 배출 저감을 목표로 하고 있으나, 광역 지자체 간 상호영향 및 개선 효과에 대한 상세 분석 결과는 도출된 바 없다.

이에 본 연구에서는 광역적 대기질 관리 수행을 위한 기초연구로서 수도권에 인접해 있으면서 배출량이 높은 충남 지역의 오염원 영향을 분석하고자 하였다. 충남 지역 배출 영향에 대한 선행 연구를 살펴보면, Nam *et al.* (2018)은 노후석탄화력발전소 가동 중지 때 따른 충남 지역  $PM_{2.5}$  농도 저감 효과를 예측하였으며, Kim *et al.* (2017b)은 충남 지역 대형 점오염원이 주변  $PM_{2.5}$  농도에 미치는 영향을 평가한 바 있다. 그러나 이러한 결과는 대상 배출원이 발전소 등 점오염원에 국한되어 특정 지자체에 대한 배출 오염원별 상대적 기여도와 인근 지자체에 미치는 영향 등은 파악하지 못하였다.

본 연구에서는 CAPSS (Clean Air Policy Support System) 배출량 목록의 SCC (Source Classification Code)를 바탕으로 충남 배출량을 대분류 수준에서 구분하여 수도권 지역  $PM_{2.5}$  농도 및 구성 성분 ( $SO_4^{2-}$ ,  $NO_3^-$ ,  $NH_4^+$ , EC, OC)에 대한 부문별 배출 영향을 추정한다. NOAA (National Oceanic and Atmospheric Administration)의 HYSPLIT을 이용하여 수도권  $PM_{2.5}$  농도에 대한 충남 지역의 배출 영향 가능성을 검토하며, CMAQ (Community Multi-scale Air Quality; Byun and Schere, 2006) 모형을 바탕으로 BFM (Brute Force Method)을 적용하여 부문별 배출 영향을 정량적으로 도출한다. 최종적으로 수도권 지역에 대한 배출 영향이 높은 부문을 선별하여 단위

배출량 당 농도 전환율을 산정함으로써 수도권  $PM_{2.5}$  농도 개선에 효과적일 것으로 판단되는 충남 지역의 배출 부문을 제시한다.

## 2. 연구 방법

### 2.1 모사기간 및 모사영역

국립환경과학원의 2013년 CAPSS 자료를 살펴보면, 충남은 당진~아산만을 중심으로 2차 미세먼지 생성에 주요한  $NO_x$ ,  $SO_x$ ,  $NH_3$  배출밀도가 국내에서 가장 높다(부록 1 참조). 이렇게 대기 중으로 배출된 물질은 해당 지역은 물론 바람에 따라 이동되는 풍하 지역의  $PM_{2.5}$  농도에 영향을 줄 수 있다(Kim *et al.*, 2017c). 본 연구에서는 서울(Seoul), 인천(Incheon), 경기(GG) 지역을 포함하는 수도권(SMA)을 중심으로  $PM_{2.5}$  농도에 대한 충남 지역의 배출부문별 영향을 살펴보기 위해 2015년을 대상으로 각 계절의 대표 월인 1월(겨울), 4월(봄), 7월(여름), 10월(가을)에 대해 대기질 모사를 수행하였다. 9 km 격자 해상도를 바탕으로 그림 1과 같이 남한 전체를 모사영역으로 설정하였으며, 배출 대상 지역으로 선정된 충청남도(CCND)를 제시하였다.

### 2.2 대기질 모사

기상 입력자료는 NCEP (National Centers for Environmental Prediction)의 FNL (Final Operational Global Analysis data)을 바탕으로 WRF (Weather Research and Forecast; Skamarock and Klemp, 2008) version 3.5.1을 수행하여 마련하였으며, MCIP (Meteorology-Chemistry Interface Processor; U.S. EPA, 1999)을 이용해 CMAQ 입력자료로 변환하였다. 배출량 입력자료는 인위적 배출량의 경우 국외에 대하여는 CREATE (Comprehensive Regional Emissions inventory for Atmospheric Transport Experiment; <http://aisl.konkuk.ac.kr/ais/emission/create.do>) 2015, 국내에 대하여는 CAPSS (Clean Air Policy Support System) 2013 배출목록을 바탕으로 SMOKE (Sparse Matrix Operator Ker-

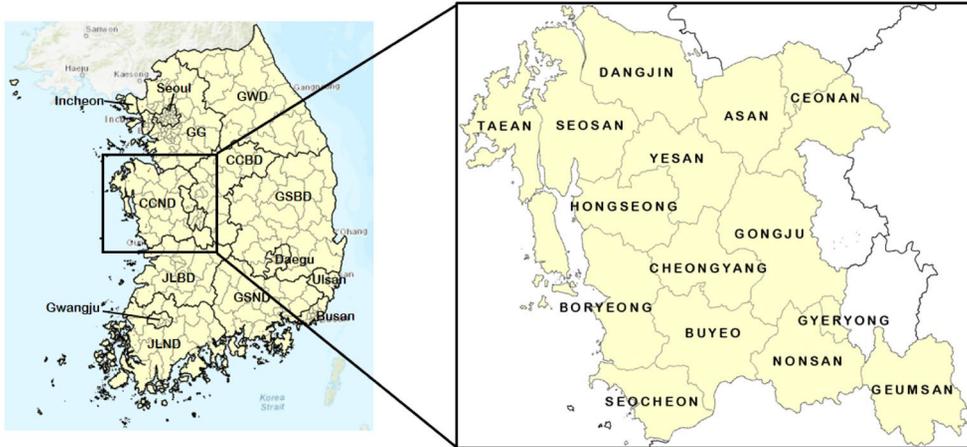


Fig. 1. The simulation domain at a horizontal resolution of 9 km adopted in this study (left), and the targeted source region (right).

nel Emission; Benjey *et al.*, 2001) version 3.1을 이용하여 처리하였다. 자연배출량의 경우 MEGAN (Model of Emissions of Gases and Aerosols from Nature; Guenther *et al.*, 2006) version 2.04를 이용하였으며, 화학 메커니즘으로는 SAPRC99 (Statewide Air Pollution Research Center, Version 99; Carter, 1999)을 이용하였다. 기상 및 배출량 입력자료를 바탕으로 광화학 모델인 CMAQ version 4.7.1을 수행하여 대기질을 모사하였으며, 국립환경과학원의 집중측정소 자료를 바탕으로 모사 평가를 수행하였다. 기상 및 대기질 모사를 위한 세부 옵션은 동반논문 (Bae *et al.*, 2017; Kim *et al.*, 2017a)을 참고할 수 있다.

### 2.3 배출 부문별 영향 추정

본 연구에서는 수도권  $PM_{2.5}$  농도에 대한 충남 배출량의 영향을 분석하기 위해 표 1과 같이 주요 부문을 선별하고, BFM 기반 대기질 모사를 수행하였다. 이를 바탕으로 기본모사 농도와 배출량 변화 후 모사된 농도의 차이로부터 식 1과 같이 '추정 기여도 (Zero-Out Contribution; ZOC)'를 산정하였다 (Bartnicki, 1999). 추정 기여도는 이용되는 배출량 목록 및 배출량 변화 비율에 따라 달라질 수 있으므로 (Kim *et al.*, 2017d), 변화율 선정 시 주의가 따른다. 본 연구에서는 현재 정부에서 논의되고 있는 배출량 삭감 정책 (예, 미세먼

Table 1. Emissions reduction scenario over CCND.

	Emissions sector	Reduction rate
Case 1 (Base)	All sectors	-
Case 2	Energy combustion	50%
Case 3	Industrial combustion	50%
Case 4	Industrial process	50%
Case 5	Non-road	50%
Case 6	On-road	50%
Case 7	Fugitive	50%
Case 8	Bio-combustion	50%

지 종합대책 35%)과 향후 제안될 수 있는 추가적인 삭감을 포함하여 기존 배출량 대비 최대 50% 가량이 감소하는 것으로 가정하였다.

$$ZOC = (C_{base} - C_{\Delta E_i}) / \Delta E_i \quad (1)$$

$C_{base}$ : 기본 배출량을 이용한 기본 모사 농도

$C_{\Delta E_i}$ :  $i$  부문 배출량 50% 삭감 후 모사 농도

$\Delta E_i$ :  $i$  배출 부문에 대한 배출량 삭감 비율 (0.5)

CAPSS 배출량 목록은 SCC 대분류 기준에 따라 13개 배출 부문 (에너지산업 연소; Energy Combustion, 비산업 연소; Non-Industrial Combustion, 제조업 연소; Industrial Combustion, 생산공정; Industrial Process, 에너지 수송 및 저장; Energy Transport and Storage, 유기용제 사용; Solvent Use, 도로 이동오염원; On-Road Mobile, 비도로 이동오염원; Non-Road

**Table 2.** Sectoral emission rates of primary PM and its precursors in CCND based on the CAPSS 2013 emissions inventory. (unit: ton/year)

	NO <sub>x</sub>	VOC	SO <sub>x</sub>	NH <sub>3</sub>	Primary PM <sub>2.5</sub>
Energy combustion	68,102	1,863	34,210	160	1,380
Non-industrial combustion <sup>1)</sup>	3,891	108	1,276	77	74
Industrial combustion	19,118	594	20,651	78	13,369
Industrial process	10,031	21,698	19,611	7,352	919
Energy transport and storage <sup>1)</sup>	-	2,458	-	-	-
Solvent use <sup>1)</sup>	-	29,060	-	-	-
On-road mobile	23,782	3,377	12	565	850
Non-road mobile	18,268	1,707	4,651	19	1,079
Waste disposal <sup>1)</sup>	304	2,104	75	2	11
Agricultural	-	-	-	36,767	-
Miscellaneous <sup>1)</sup>	10	37	-	512	16
Fugitive dust	-	-	-	-	1,234
Bio-combustion	923	9,108	17	2	1,286

<sup>1)</sup>Note that the impact of emission sectors to PM<sub>2.5</sub> are not estimated in this study.

Mobile, 폐기물 처리; Waste Disposal, 농업; Agriculture, 기타 면오염원; Miscellaneous, 비산먼지; Fugitive Dust, 생물성 연소; Bio-Combustion)으로 분류되나, 비산업 연소, 에너지 수송 및 저장, 폐기물 처리, 기타 면오염원 부문의 경우 PM<sub>2.5</sub>의 주요 전구물질로 알려진 NO<sub>x</sub>, SO<sub>x</sub>, NH<sub>3</sub> 및 Primary PM<sub>2.5</sub> 배출량이 낮게 나타나 고려하지 않았으며, 농업 부문의 경우 실제로 배출량을 저감하기 어려우므로 제외하였다. 한편, 유기용제 사용 부문의 경우 VOC 배출량이 주요한데, VOC는 배출량 및 대기질 모사를 위한 화학종 분류 과정에서의 불확도, 2차 유기탄소 성분의 낮은 모사 재현성, 자연 배출량 영향과 분리가 어려움 등의 한계가 있으며 대기 중 VOC 농도가 상대적으로 낮다는 점을 고려하여 PM<sub>2.5</sub> 농도에 대한 기여가 높지 않을 것으로 판단하고 분석에서 제외하였다. 표 1에 모사에 이용된 배출량을 정리하였다.

### 3. 결 과

#### 3.1 배출량 비교

국내 전체 배출량 중 충남 지역이 차지하는 비율은 배출물질별로 NO<sub>x</sub> 11.7%, SO<sub>x</sub> 22.0%, NH<sub>3</sub> 16.2%로

(CAPSS, 2013) 확인된다. 표 2는 CAPSS 2013 배출목록에서 충남 내에 위치하는 오염원의 배출량을 정리한 것이다. 물질별로 살펴보면, NO<sub>x</sub>의 경우 도로 및 비도로 이동오염원 등 차량운행뿐만 아니라 발전, 생산공정, 제조업 연소 부문에서의 배출이 복합적으로 나타나며, SO<sub>x</sub>의 경우 에너지산업 연소, 생산공정, 제조업 연소 부문에서 주로 배출된다. NH<sub>3</sub>의 경우 대부분 농업 부문에서 배출되나, 생산공정 부문의 배출 또한 연간 7,000 ton 이상으로 전체 NH<sub>3</sub> 배출량의 10% 가량을 차지한다. 한편, Primary PM<sub>2.5</sub>의 경우에는 제조업 연소에서의 배출이 두드러진다. 부문별로 살펴보면, 에너지산업 연소 부문의 경우 Primary PM<sub>2.5</sub> 배출량에 비해 NO<sub>x</sub> 배출량이 49배, SO<sub>x</sub> 배출량이 25배 가량 높아 배출량의 대부분을 차지한다. 생산공정 부문에서는 Primary PM<sub>2.5</sub> 배출량에 비해 NO<sub>x</sub> 배출량이 11배, SO<sub>x</sub> 배출량이 21배, NH<sub>3</sub> 배출량이 8배 가량 높으며, 제조업 연소 부문에서는 NO<sub>x</sub> 배출량이 1.4배, SO<sub>x</sub> 배출량이 1.5배로 Primary PM<sub>2.5</sub> 배출과 유사한 수준으로 나타난다. 도로 이동오염원 및 비도로 이동오염원 부문의 경우 NO<sub>x</sub> 배출량이 주요한데, 도로 이동오염원에서는 Primary PM<sub>2.5</sub> 배출량에 비해 NO<sub>x</sub> 배출량이 28배로 대부분을 차지하며, 비도로 이동오염원에서는 NO<sub>x</sub> 배출량이 17배, SO<sub>x</sub> 배

출량이 4배 가량 더 높다.

### 3.2 기본모사 수행평가

#### 3.2.1 기상모사 평가

동반 논문(Kim *et al.*, 2017a,c)에서는 시계열 및 통계값을 바탕으로 기상모사를 평가하였으며, 본 연구에서는 동일한 모사 결과에 대해 그림 2와 같이 10 m 풍속을 공간적으로 제시하여 관측치와의 유사성을 검토하였다. 한편, 3.3절에서는 유적선 분석을 통해 두 광역 지자체간 오염물질의 이동 가능성을 보였으며, 3차원 광화학 모사를 통해 자체 및 풍하 지역에서의 배출량-농도 관계를 정량적으로 살펴보았다. 그림 3은 10m 풍속 및 풍향에 대한 바람장미를 통해 충남 배출량의 수도권 영향 가능성을 검토한 것으로, 모사 기간인 2015년의 경우 북서풍이 주요한 1월(겨울)을 제외하고 4월(봄), 7월(여름), 10월(가을)에 남서풍 및 남풍이 주요하였다. 따라서, 지리적으로 수도권 지역의 남서쪽에 위치한 충남 배출량(그림 1)이 수도권으로 유입될 가능성이 높을 것으로 추정하였으며, 이웃한 광역 지자체 영향에 대한 고려가 필요할 것으로 판단하였다. 다만, 이러한 바람에 의한 유입 가능성은 계절 및 연간 변화를 보일 수 있다는 점에서 대상기간에 따라 차이가 있을 것으로 판단된다.

#### 3.2.2 PM<sub>2.5</sub> 중량 및 성분 농도 모사평가

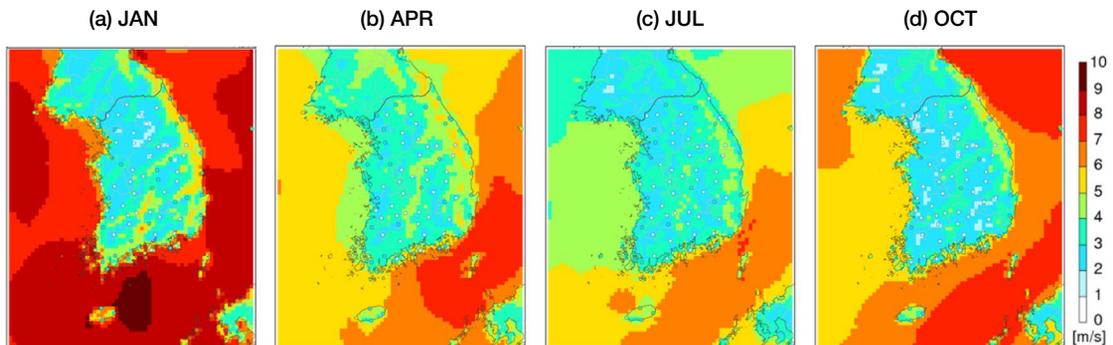
동반논문(Bae *et al.*, 2017; Kim *et al.*, 2017a)에서는

PM<sub>2.5</sub> 중량 농도와 구성 성분인 SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>, NO<sub>3</sub><sup>-</sup>, NH<sub>4</sub><sup>+</sup>, EC, OC의 모사농도 평가를 위해 수도권(불광동) 측정소에 대한 산포도 및 통계자료를 제시하였으며, Emery *et al.* (2017)이 제시한 권장 수준(상관계수 ≥ 0.7, NMB ≤ 10%)을 만족함을 보였다. 본 연구에서는 배출 지역인 충남과 수용지인 수도권 측정소의 월별 관측 및 모사농도를 비교하였다(그림 4). 충남과 수도권 지역은 모든 물질에 대하여 유사한 월별 변동성을 보였으며, 이는 이들 지역이 하나의 대기권역으로서 관리될 수 있음을 함의한다.

### 3.3 수도권 PM<sub>2.5</sub> 농도에 대한 충남 배출량의 영향 분석

#### 3.3.1 유적선 분석을 통한 영향 가능성 검토

충남에서 배출된 오염물질은 바람에 의해 수도권으로 이동될 수 있다. 이에 대한 유입 경로와 영향 가능성은 HYSPLIT 등 유적선 분석을 통하여 검토될 수 있다. HYSPLIT은 기상 입력자료를 기반으로 대상 지점에서의 공기괴가 이동할 것으로 예측되는 궤적(forward trajectory)과 대상 지점으로의 이동 과정을 추적하는 역궤적(backward trajectory)에 대한 분석이 가능하다(Stein *et al.*, 2015). 단, 공기괴의 이동을 추적하는 라그랑지안 모델의 특성상 화학반응을 고려하기 어려우므로, 주변 영향에 대한 정량적 분석 보다는 모사기간 동안 충남 배출량의 수도권 유입 가능성 검토에 활용하였다. 3차원 광화학 모델인



**Fig. 2.** Spatial distribution of simulated and observed 10-m wind speed over South Korea for (a) January, (b) April, (c) July and (d) October in 2015.

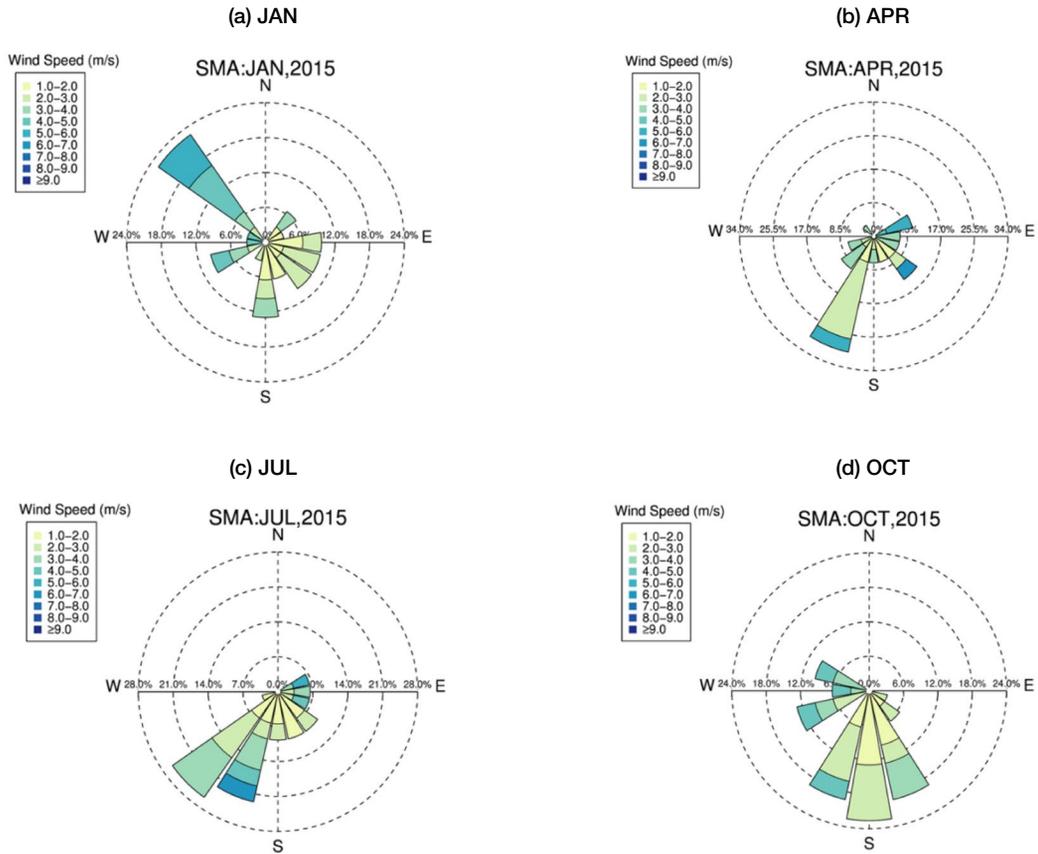


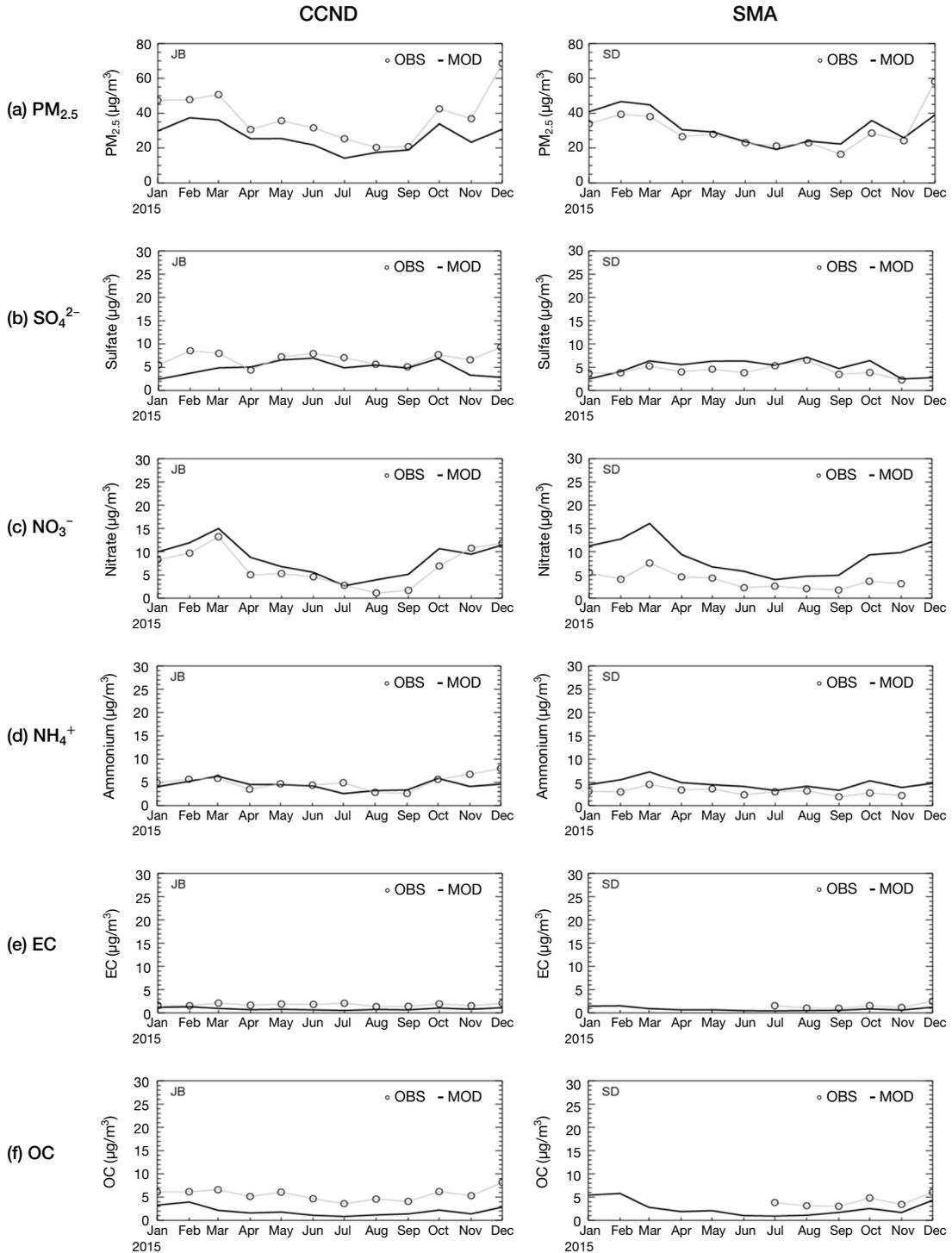
Fig. 3. Wind rose at Seoul for (a) January, (b) April, (c) July and (d) October in 2015. Hourly 10-m wind speed and wind direction observed at a KMA monitoring station in Seoul is used.

CMAQ을 이용한 모사 결과는 다음 절에 제시하였다.

점오염원의 배출 높이 (150 m 내외), 주간과 야간 동안의 혼합고 변화 등을 고려하여 유적선 분석의 시작 높이는 200 m로 설정하였다. 그림 5는 수도권 지역 중 서울 불광동 기준 24시간 역궤적 분석 결과로부터 모사월별 궤적 군집 (cluster)을 분류한 결과이며, 그림 6은 충남 지역 중 당진 기준의 24시간 궤적 분석 결과로부터 군집을 분류한 결과이다. 두 그림 모두에서 남풍계열의 바람이 우세한 7월에 충남 배출원의 수도권 유입 가능성이 높은 것으로 나타났으며, 10월의 경우 대기 정체로 자체 농도에 대한 영향이 클 것으로 추정하였다.

### 3.3.2 주요 SCC 부문에 대한 모사월 평균 공간적 영향 특성

CMAQ 모사 결과를 바탕으로 그림 7에 국내 PM<sub>2.5</sub> 농도에 대한 충남 지역의 배출부문별 추정 기여도를 모사월별로 제시하였으며, 무기성분 농도에 대한 추정 기여도는 부록 2~부록 4에 수록하였다. 그림 7에서 모든 부문에 대하여 1월에 비해 4월, 7월, 10월에 국내에 대한 추정 기여도가 상대적으로 높게 모사되었다. 이는 앞서 궤적 분석 결과에서 나타난 충남 지역으로부터의 대기 이류와 확산 영향 이외에도, 1월의 경우 전형적인 국외로부터의 유입 영향으로 PM<sub>2.5</sub> 농도 자체는 높으나 낮은 기온 등으로 2차 오염물질의 생성률이 낮아지기 때문인 것으로 판단된다(Kim



**Fig. 4.** Model performance evaluation of  $PM_{2.5}$  and its components at CCND (left) and SMA (right) super sites. Hourly data are averaged for each month. Monthly means are not shown when missing rates of hourly observations are higher than 25%.

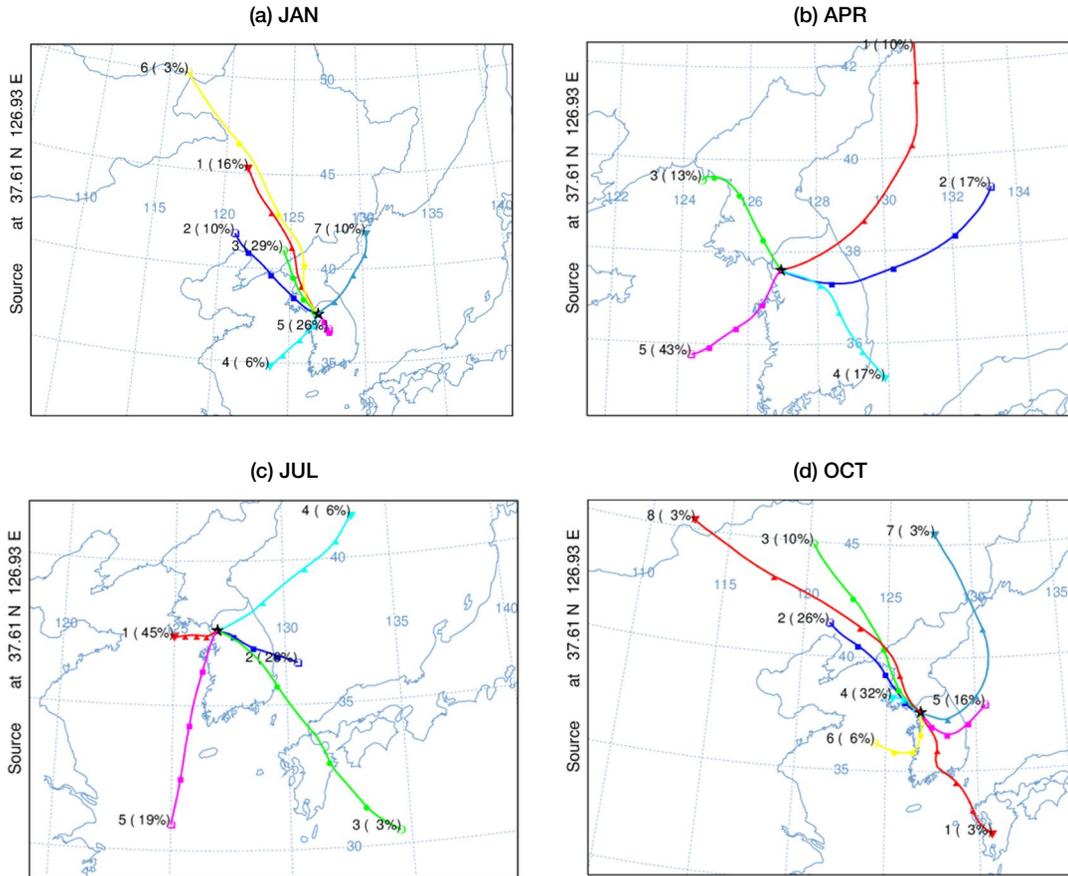


Fig. 5. HYSPLIT clustering of 24 hours backward trajectories at Seoul from 200 m altitude.

et al., 2017b). 한편, 4월, 7월, 10월의 경우 Kim et al. (2017b)의 연구 결과로부터 기온, 풍속, 풍향 등 이용되는 기상자료에 따라 영향 범위 및 영향 정도가 달라질 수 있을 것으로 사료된다. 배출 부문별로 살펴보면, 먼 및 이동오염원으로 분류되는 비도로 및 도로 이동오염원, 비산먼지, 생물성 연소 부문에 대한 PM<sub>2.5</sub> 추정 기여도의 경우 충남 지역을 중심으로 국지적인 영향이 나타나는 반면, 점오염원으로 분류되는 에너지산업 연소, 제조업 연소, 생산공정 부문의 경우 수도권을 포함해 주변 지역까지 영향이 넓게 나타났다. SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>, NO<sub>3</sub><sup>-</sup> 농도에 대한 추정 기여도 또한 배출 부문에 따라 영향 범위가 달라짐을 확인하였다 (부록 2~부록 4 참조). 이는 굴뚝이 있는 점 오염원의

특정상면 오염원이나 이동 오염원에 비해 대기 중에서 보다 넓은 범위로 확산이 이루어지기 때문인 것으로 사료되며, 향후 도시 계획 수립 시 고려되는 배출 부문에 대한 특성을 바탕으로 영향 평가가 이루어져야 할 것으로 판단된다.

### 3.3.3 주요 SCC 부문에 대한 시간적 영향 특성

그림 8은 충남 및 수도권 지역의 평균 PM<sub>2.5</sub> 농도에 대한 충남 7개 주요 SCC 부문 배출량의 일별 추정 기여도를 보인 것으로, 무기성분 농도에 대한 결과는 부록 5~부록 7에 수록하였다. 충남 지역 PM<sub>2.5</sub> 농도에 대한 자체 추정 기여도는 1월에 0.92 µg/m<sup>3</sup>~5.59 µg/m<sup>3</sup> (월평균 2.99 µg/m<sup>3</sup>, 10.1%), 4월에 1.66 µg/m<sup>3</sup>~9.41

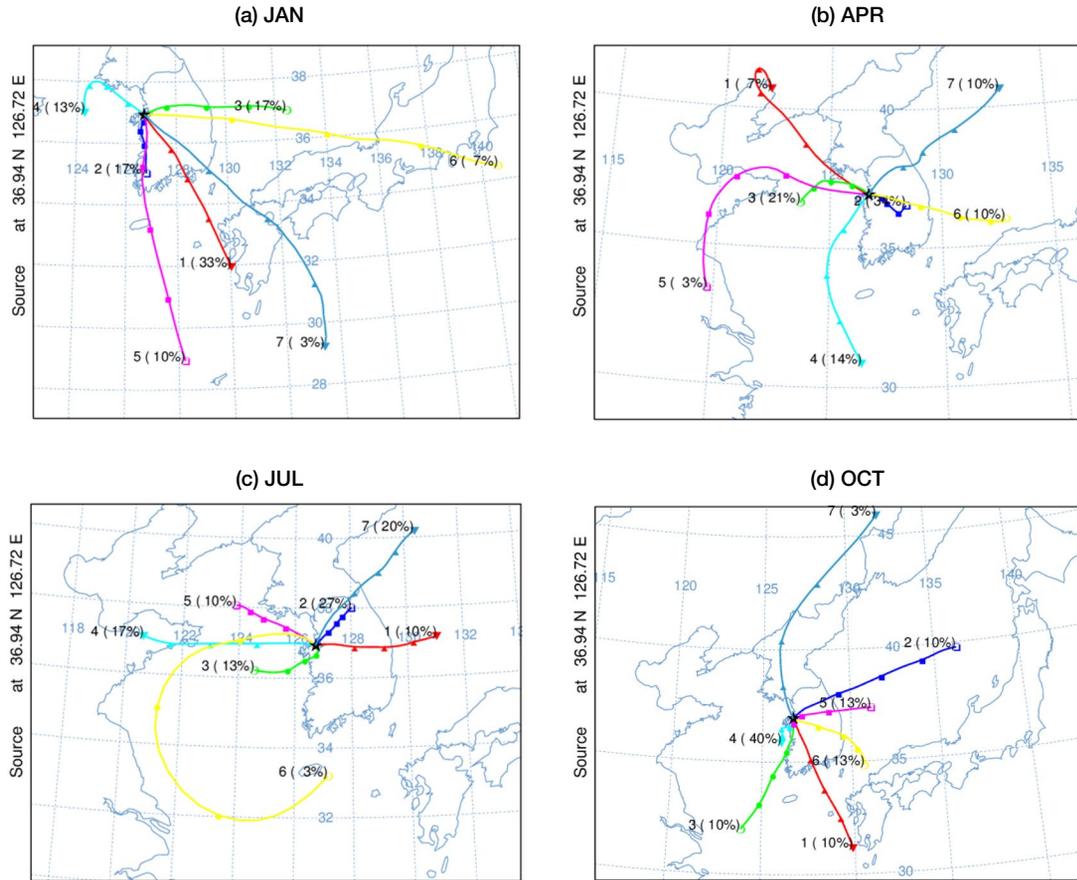


Fig. 6. HYSPLIT clustering of 24 hours forward trajectories at CCND from 200 m altitude.

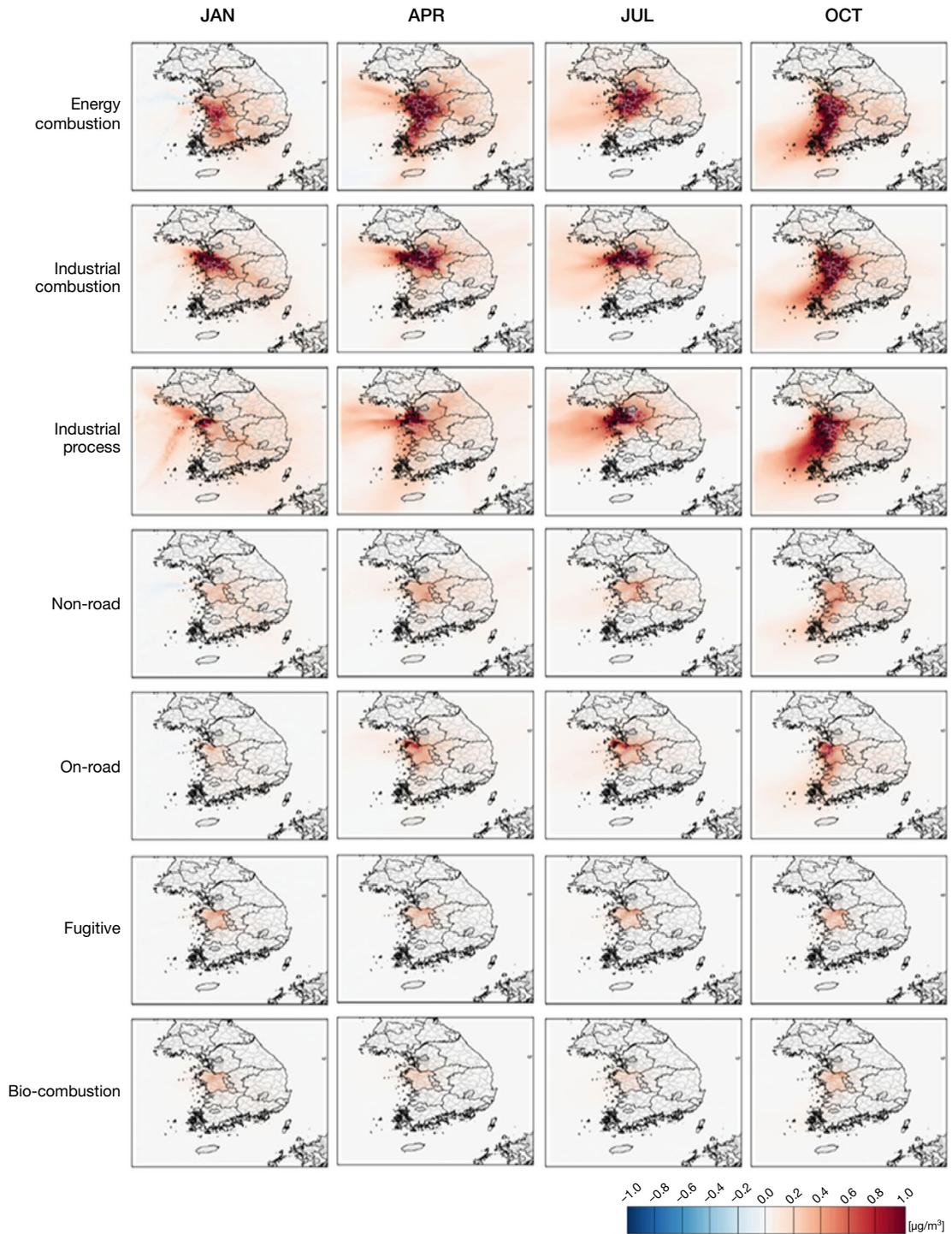
$\mu\text{g}/\text{m}^3$  (월평균  $4.54 \mu\text{g}/\text{m}^3$ , 16.6%), 7월에  $0.96 \mu\text{g}/\text{m}^3 \sim 9.68 \mu\text{g}/\text{m}^3$  (월평균  $4.23 \mu\text{g}/\text{m}^3$ , 27.3%), 10월에  $0.96 \mu\text{g}/\text{m}^3 \sim 12.69 \mu\text{g}/\text{m}^3$  (월평균  $4.63 \mu\text{g}/\text{m}^3$ , 13.9%)로 분석되었다. 자체 추정 기여도가 가장 높게 나타난 7월의 경우에도 전체  $\text{PM}_{2.5}$  농도의 27.3%에 그쳐, 충남 지역의 경우 자체 배출량 삭감만으로는 대기환경기준을 달성하기 어려울 것으로 판단하였다. 한편, 월별 자체 영향이 차이를 보이는 이유는 배출량의 월 변화가 크지 않음을 감안할 때, 기상 요인에 의한 것으로 볼 수 있다.

수도권 월평균  $\text{PM}_{2.5}$  농도에 대한 충남 배출량의 추정 기여도는 1월에  $0.07 \mu\text{g}/\text{m}^3 \sim 3.86 \mu\text{g}/\text{m}^3$  (월평균  $0.96 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ), 4월에  $0.60 \mu\text{g}/\text{m}^3 \sim 5.13 \mu\text{g}/\text{m}^3$  (월평균  $2.21 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ), 7월에  $0.48 \mu\text{g}/\text{m}^3 \sim 5.20 \mu\text{g}/\text{m}^3$  (월평균

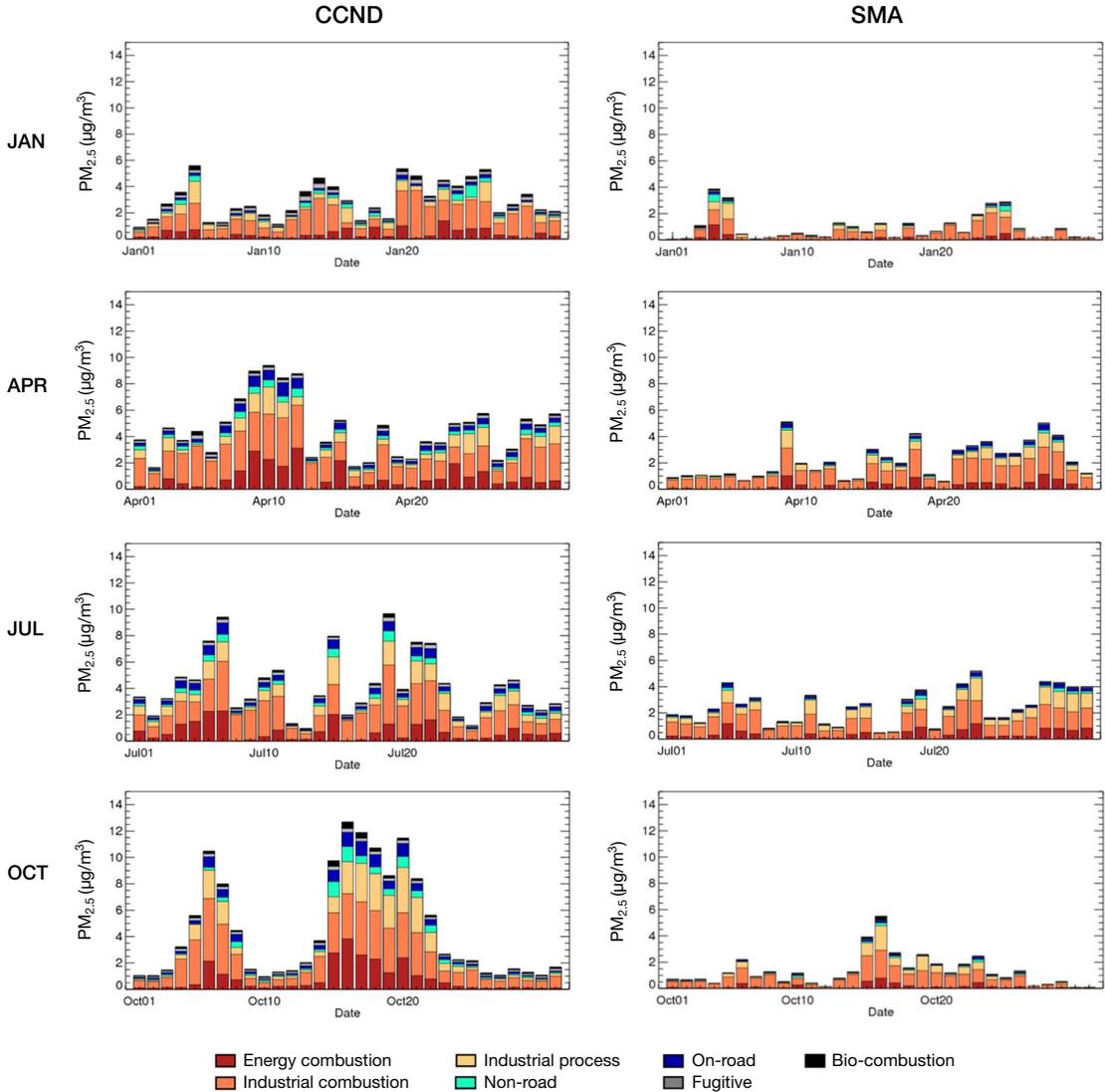
$2.43 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ), 10월에  $0.08 \mu\text{g}/\text{m}^3 \sim 5.52 \mu\text{g}/\text{m}^3$  (월평균  $1.35 \mu\text{g}/\text{m}^3$ )로 모사되었으며, 이는 수도권 월평균  $\text{PM}_{2.5}$  농도의 2.9% (1월), 7.8% (4월), 17.1% (7월), 4.6% (10월)에 해당한다. 수도권에서 7월 동안 충남 배출 영향이 높게 나타나는 원인은 Kim *et al.* (2017b) 연구에서 논의된 것처럼, 남태평양 고기압에 따른 남풍 계열 바람의 빈도가 높아짐에 따라 충남 배출  $\text{PM}_{2.5}$  및 전구물질이 수도권으로 유입되기 유리한 조건이 형성되기 때문으로 판단된다.

### 3.3.4 $\text{PM}_{2.5}$ 및 성분농도에 대한 부문별 영향 특성

$\text{PM}_{2.5}$  농도에 대한 충남 배출의 영향을 부문별로



**Fig. 7.** Zero-out contributions of CCND sectoral emissions to PM<sub>2.5</sub> concentrations averaged for January, April, July, and October in 2015.



**Fig. 8.** Daily contributions of CCND sectoral emissions to CCND (left) and SMA (right)  $PM_{2.5}$  concentrations for January, April, July and October in 2015.

살펴보면, 충남 지역의 경우 제조업 연소 배출에 의한 연평균  $PM_{2.5}$  농도 영향이  $1.81 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 가장 높았으며, 에너지산업 연소( $0.72 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ) 및 생산공정( $0.71 \mu\text{g}/\text{m}^3$ )에 의한 영향이 뒤를 이었다. 이러한 결과는 현재 배출원 관리 대상으로서 정책적 관심이 집중되는 발전 등의 에너지 산업 관련 배출량 못지 않게 산업 관련 배출량의 저감이 중요할 수 있음을 시사한다.

다만, 추정 기여도는 모사에 이용되는 배출량 목록에 의해 달라질 수 있으므로 해석에 주의해야 한다.

한편, 표 3으로부터 수도권 연평균  $PM_{2.5}$  농도에 주요한 영향을 미치는 충남 배출부문은 제조업 연소 ( $0.93 \mu\text{g}/\text{m}^3$ , 3.5%), 생산공정 ( $0.36 \mu\text{g}/\text{m}^3$ , 1.4%), 에너지산업 연소 ( $0.23 \mu\text{g}/\text{m}^3$ , 0.9%) 등으로 분석되었다. 다양한 산업에서 발생하는 배출량을 포함하는 제조업

**Table 3.** Top three Zero-out contributions by emission sectors to SMA  $SO_4^{2-}$ ,  $NO_3^-$ , primary  $PM_{2.5}$  and  $PM_{2.5}$  concentrations.

		Jan.	Apr.	Jul.	Oct.	Mean
$PM_{2.5}$	Industrial combustion	0.54	1.24	1.18	0.75	0.93
	Industrial process	0.18	0.39	0.59	0.29	0.36
	Energy combustion	0.11	0.30	0.38	0.14	0.23
$SO_4^{2-}$	Industrial combustion	0.07	0.14	0.18	0.10	0.12
	Industrial process	0.03	0.10	0.18	0.05	0.09
	Energy combustion	0.01	0.00	0.10	0.01	0.03
$NO_3^-$	Industrial process	0.09	0.17	0.22	0.15	0.16
	Energy combustion	0.07	0.22	0.18	0.08	0.14
	Non-road	0.03	0.05	0.05	0.03	0.04
Primary $PM_{2.5}$	Industrial combustion	0.46	0.96	0.90	0.62	0.74
	Fugitive	0.03	0.04	0.04	0.03	0.04
	Energy combustion	0.02	0.03	0.03	0.01	0.02

연소와 생산공정 부문의 경우 공공부문 성격의 에너지 산업 발전에 비해 수도권  $PM_{2.5}$  농도의 5배 이상 높은 영향을 미치므로 집중적인 관리가 필요할 것으로 사료된다. 앞에서 언급한 바와 같이 주요 오염원에 대한 정확한 기여도 및 영향 분석을 위해서는 실시간 배출량 자료 등을 이용한 보다 상세한 모사가 필요하다.

수도권 지역에 대한 충남 배출 부문의 기간 평균 성분별 추정 기여도를 살펴보면,  $SO_4^{2-}$ 의 경우 기간 평균 농도가  $4.72 \mu g/m^3$ 로 모사되었으며, 이 중 제조업 연소 ( $0.12 \mu g/m^3$ , 2.6%) > 생산공정 ( $0.09 \mu g/m^3$ , 1.9%) > 에너지산업 연소 ( $0.03 \mu g/m^3$ , 0.6%) 배출에 의한 영향이 크게 나타났다. 특히, 7월 말 등 일부 기간에 대해서는 배출지인 충남에 비해 수도권에서 더 높은  $SO_4^{2-}$  영향이 나타나는데, 남풍 계열 바람에 의해  $SO_2$  등  $SO_4^{2-}$ 의 전구물질이 수도권으로 이동되는 과정에서  $SO_4^{2-}$ 로 전환되기 때문으로 사료된다.  $NO_3^-$ 의 경우 기간 평균 농도  $7.03 \mu g/m^3$  중 생산공정 ( $0.16 \mu g/m^3$ , 2.2%)에 의한 영향이 가장 높았으며, 에너지산업 연소 ( $0.14 \mu g/m^3$ , 1.9%) > 비도로 이동오염원 ( $0.04 \mu g/m^3$ , 0.6%)에 의한 영향 또한 높게 분석되었다.

그림 9는 앞서 제시된 국내  $PM_{2.5}$  농도에 대한 충남 배출량의 추정 기여도를 전체 모사 기간에 대해 부문별로 평균하여 백분율로 보인 것이다. 충남 지역에 대해 자체 배출 부문별 상대적 추정 기여율은 제조업

연소 44.1%, 에너지산업 연소 17.5%, 생산공정 17.2%, 도로 이동오염원 7.7%, 비도로 이동오염원 5.9%, 비산먼지 4.1%, 생물성 연소 3.5%로 나타났다. 수도권 지역에 대한 충남 배출량의 상대적 추정 기여율은 제조업 연소 53.4%, 생산공정 20.9%, 에너지산업 연소 13.4%, 도로 이동오염원 5.0%, 비도로 이동오염원 3.7%, 생물성 연소 1.9%, 비산먼지 1.7% 순서로 높게 분석되었다. 결과로부터 충남과 수도권에서 모두 충남의 제조업 연소, 에너지산업 연소, 생산공정의 점유율이 높음을 확인하였다. 단, 충남의 경우 에너지산업 연소가 생산공정의 점유율보다 높게 모사된 반면, 수도권 지역에서는 생산공정이 에너지산업 연소의 점유율보다 높았다. 이러한 배출지와 수용지의 배출 부문별 점유율 차이는 추정 기여도의 산정 시, 주 풍향에 따른 대기의 이류 및 확산 영향 이외에 시공간적 배출 특성에 따른 대기 조성비, 대기 중 물리화학반응 등의 복합적 요인에서 기인한 것으로 사료된다.

### 3.4 충남 배출물질별 $PM_{2.5}$ 전환율

배출량 저감의 궁극적인 목적은 대기오염물질 농도 개선을 통한 국민 건강 보호이므로, 농도 개선 효과를 고려한 배출량 저감이 이루어져야 한다. 한 지역의 배출량 규제에 따른  $PM_{2.5}$  농도 개선 정도는 대상 오염원의 배출 특성에 따라 달라질 수 있다. 충남 지역의 부문별 단위 배출량 저감에 따른  $PM_{2.5}$  농도

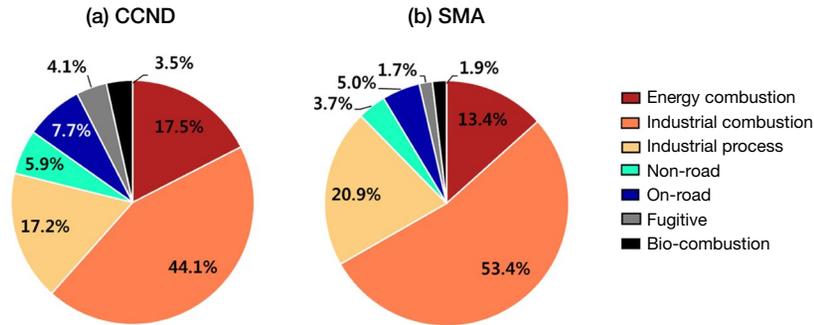


Fig. 9. Period-mean PM<sub>2.5</sub> relative Zero-out contributions of sectoral emissions from the CCND to PM<sub>2.5</sub> concentrations in 2015.

Table 4. Conversion rates of CCND precursor emissions to CCND and SMA PM<sub>2.5</sub> concentrations during the simulation period in 2015. (unit:  $\mu\text{g}/\text{m}^3/\text{KTPM}$ )

			Jan.	Apr.	Jul.	Oct.	Mean
SO <sub>2</sub> to SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	CCND	Industrial combustion	0.12	0.18	0.17	0.16	0.16
		Industrial process	0.04	0.11	0.12	0.07	0.09
		Energy combustion	0.00	0.01	0.05	0.02	0.02
	SMA	Industrial combustion	0.05	0.10	0.14	0.07	0.09
		Industrial process	0.01	0.05	0.10	0.02	0.05
		Energy combustion	0.00	0.00	0.04	0.01	0.01
NO <sub>x</sub> to NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	CCND	Industrial process	0.25	0.26	0.31	0.55	0.34
		Energy combustion	0.03	0.11	0.07	0.12	0.08
		Non-road	0.01	0.09	0.07	0.11	0.07
	SMA	Industrial process	0.10	0.19	0.24	0.16	0.17
		Energy combustion	0.01	0.04	0.03	0.02	0.03
		Non-road	0.01	0.03	0.03	0.02	0.02
Primary PM <sub>2.5</sub> to PM <sub>2.5</sub>	CCND	Industrial combustion	1.30	1.83	1.61	1.52	1.57
		Fugitive	1.67	1.36	1.19	1.53	1.44
		Energy combustion	0.48	0.54	0.46	0.58	0.52
	SMA	Industrial combustion	0.49	1.08	0.97	0.67	0.80
		Fugitive	0.25	0.31	0.27	0.25	0.27
		Energy combustion	0.10	0.21	0.23	0.14	0.17

의 개선 효과를 예측하기 위해 식(2)와 같이 BFM 모사 결과를 이용하여 단위 배출량 변화에 따른 PM<sub>2.5</sub> 농도 변화를 추정하였다.

$$\Delta PM_{2.5}^{receptor} \left( \frac{\mu\text{g}/\text{m}^3}{\text{MTPY}} \right) = \frac{(C_{base}^{receptor} - C_{perturbed,i}^{receptor})}{(E_{base}^{source} - E_{perturbed,i}^{source})} \quad (2)$$

: 수용지에서의 초미세먼지 농도 변화

$E_{base}$ : 기본 배출량

$E_{perturbed,i}$ :  $i$  배출 부문에 대한 삭감 후 배출량, 본 연구에서는 50% 삭감

$C_{base}$ :  $E_{base}$ 를 이용한 기본 모사 농도

$C_{perturbed,i}$ :  $E_{perturbed,i}$ 에 대한 모사농도

여기에서 분모의  $(E_{base}^{source} - E_{perturbed,i}^{source})$ 는 충남 지역 개별 배출 부문에서 대상 물질의 배출량 변화를 의미 하며(예를 들어 SO<sub>2</sub>), 분자의  $(C_{base}^{receptor} - C_{perturbed,i}^{receptor})$ 는 해당 배출량 변화에 따른 수용 지역의 PM<sub>2.5</sub> 중량 농도 또는 성분 농도 변화를 의미한다.

변화되는 배출량이 매우 작은 경우(예를 들어, 생물성 연소 부문의  $\text{SO}_2$  연간 배출량은 50% 삭감 시 8.5 ton 감소; 표 2 참조) 실제 기여도가 낮음에도 불구하고 전환율은 큰 값으로 계산되어 해석 시 오해를 가져올 우려가 있다. 따라서, 본 연구에서는 수도권  $\text{PM}_{2.5}$  및  $\text{SO}_4^{2-}$ ,  $\text{NO}_3^-$ , Primary  $\text{PM}_{2.5}$  농도에 높은 기여를 보이는 충남의 상위 3개 배출부문을 대상으로(표 3 참조), 표 4에 이들 전구물질의 단위 배출량 당 농도 전환율을 제시하였다.  $\text{SO}_4^{2-}$ 에 대하여는 제조업 연소(충남:  $0.16 \mu\text{g}/\text{m}^3/\text{KTPM}$ , 수도권:  $0.09 \mu\text{g}/\text{m}^3/\text{KTPM}$ ), 생산공정(충남:  $0.09 \mu\text{g}/\text{m}^3/\text{KTPM}$ , 수도권:  $0.05 \mu\text{g}/\text{m}^3/\text{KTPM}$ ), 에너지산업 연소(충남:  $0.02 \mu\text{g}/\text{m}^3/\text{KTPM}$ , 수도권:  $0.01 \mu\text{g}/\text{m}^3/\text{KTPM}$ ) 부문의 순서로 전환율이 크게 나타났으며,  $\text{NO}_3^-$ 의 경우 생산공정(충남:  $0.34 \mu\text{g}/\text{m}^3/\text{KTPM}$ , 수도권:  $0.17 \mu\text{g}/\text{m}^3/\text{KTPM}$ ) 부문의 영향이 에너지산업 연소(충남:  $0.08 \mu\text{g}/\text{m}^3/\text{KTPM}$ , 수도권:  $0.03 \mu\text{g}/\text{m}^3/\text{KTPM}$ ) 및 비도로 이동오염원(충남:  $0.07 \mu\text{g}/\text{m}^3/\text{KTPM}$ , 수도권:  $0.02 \mu\text{g}/\text{m}^3/\text{KTPM}$ ) 부문에 비해 높게 분석되었다. Primary  $\text{PM}_{2.5}$ 의 경우에는 제조업 연소(충남:  $1.57 \mu\text{g}/\text{m}^3/\text{KTPM}$ , 수도권:  $0.80 \mu\text{g}/\text{m}^3/\text{KTPM}$ ), 비산먼지(충남:  $0.52 \mu\text{g}/\text{m}^3/\text{KTPM}$ , 수도권:  $0.27 \mu\text{g}/\text{m}^3/\text{KTPM}$ ), 에너지산업 연소(충남:  $0.34 \mu\text{g}/\text{m}^3/\text{KTPM}$ , 수도권:  $0.17 \mu\text{g}/\text{m}^3/\text{KTPM}$ ) 부문의 순서로 높은 전환율을 보였다. 이러한 결과로부터 수도권 지역의  $\text{PM}_{2.5}$  농도 개선 시, 충남 지역의 제조업 연소, 생산공정, 에너지산업 연소, 비산먼지, 비도로 이동오염원 부문의 배출량 저감 효율이 높을 것으로 추정된다.

#### 4. 결 론

본 연구에서는 광역적 대기질 관리 수행을 위한 기초연구로서, 국내에서 배출량이 높은 충남 지역의 오염원별 배출량이 인구 밀집 지역인 수도권  $\text{PM}_{2.5}$  농도에 미치는 영향을 대기질 모사를 통해 추정하였다. 2015년 수도권의 연평균  $\text{PM}_{2.5}$  모사농도  $26.42 \mu\text{g}/\text{m}^3$

(관측농도  $26.70 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ) 중 충남 7개 배출 부문에 의한 추정 기여도는  $1.74 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 으로 이는 전체 수도권  $\text{PM}_{2.5}$  모사 농도의 6.6%에 해당한다. 계절별로 보면, 1월  $0.96 \mu\text{g}/\text{m}^3$  (2.9%), 4월  $2.21 \mu\text{g}/\text{m}^3$  (7.8%), 7월  $2.43 \mu\text{g}/\text{m}^3$  (17.1%), 10월  $1.35 \mu\text{g}/\text{m}^3$  (4.6%)로, 여름철인 7월에 높은 기여율을 보였다.

$\text{PM}_{2.5}$  추정 기여도를 충남의 배출 부문별로 살펴보면 충남 자체 지역에 대해 제조업 연소( $1.81 \mu\text{g}/\text{m}^3$ , 6.8%), 에너지산업 연소( $0.72 \mu\text{g}/\text{m}^3$ , 2.7%), 생산공정( $0.71 \mu\text{g}/\text{m}^3$ , 2.7%)의 순서로 높게 기여하며, 수도권에 대하여는 제조업 연소( $0.93 \mu\text{g}/\text{m}^3$ , 3.5%), 생산공정( $0.36 \mu\text{g}/\text{m}^3$ , 1.4%), 에너지산업 연소( $0.23 \mu\text{g}/\text{m}^3$ , 0.9%) 순서로 높게 모사되었다. 충남과 수도권 모두에서 제조업 연소 부문의 추정 기여도가 에너지산업 연소나 생산공정에 비해 2배 이상 높게 나타나, 제조업 연소 부문에 대한 관리가 중요할 것으로 판단된다. 충남 지역과 수도권 지역에 대한 추정 기여도의 차이는 배출 물질, 배출량, 배출 지점 등 배출 특성의 복합적 요인에 의해 나타나는 것으로 사료된다.

수도권  $\text{PM}_{2.5}$  농도에 대한 충남 배출량의 성분별 추정 기여도는  $\text{SO}_4^{2-}$   $0.32 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ,  $\text{NO}_3^-$   $0.70 \mu\text{g}/\text{m}^3$ , Primary  $\text{PM}_{2.5}$   $0.88 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 Primary  $\text{PM}_{2.5}$ 의 배출 영향이 가장 높은 것으로 분석되었다. 제조업 연소의 높은 기여율은 Primary  $\text{PM}_{2.5}$  배출량이 상대적으로 높게 배출되는 부문이기 때문이다. 개별 배출 성분에 대하여 단위 배출량 당  $\text{PM}_{2.5}$  농도로의 전환율은 충남 배출 부문에 따라 차이를 보였는데, 추정 기여도와 배출 부문별 전환율을 종합하여 볼 때 제조업 연소, 생산공정 등 산업 부문에 대한 배출량 관리가  $\text{PM}_{2.5}$  농도 개선에 효과적일 것으로 판단된다. 다만, 이러한 결과는 대기질 모사에 이용된 배출량 목록에 기반한 것으로, 배출 특성에 따라 단위 배출량 당 농도로의 전환 정도가 달라질 수 있는 점을 고려하여 정확한 배출 자료 확보가 필요하다. 이를 위해서는 Kim *et al.* (2018b)이 논의한 바와 같이 배출량 목록 작성 시부터 이해 당사자의 적극적인 참여가 독려되어야 한다.

본 연구에서는 충남 지역의 배출량이 수도권  $PM_{2.5}$  농도에 미치는 영향을 분석하여 발생된 배출량이 자체 지역 이외에 인접 지역의 대기오염 영향을 정량적으로 확인하였으며, 광역 지자체간 협력적인 농도 관리의 중요성을 제고하였다. 추후 배출량 저감 정책의 마련에 있어 실제적으로 저감이 가능한 배출량을 선별한 후 정책의 실효성 여부에 대해 검증하는 과정이 필요할 것으로 판단된다.

### 감사의 글

본 논문은 환경부의 재원으로 국립환경과학원 (NIER-2018-01-02-049)의 지원을 받았으며, 정부(과학기술정보통신부, 환경부, 보건복지부) 재원 한국연구재단 미세먼지 국가전략프로젝트사업 (2017M3-D8A1092020)의 일환으로 수행되었습니다. 이에 감사사를 드립니다.

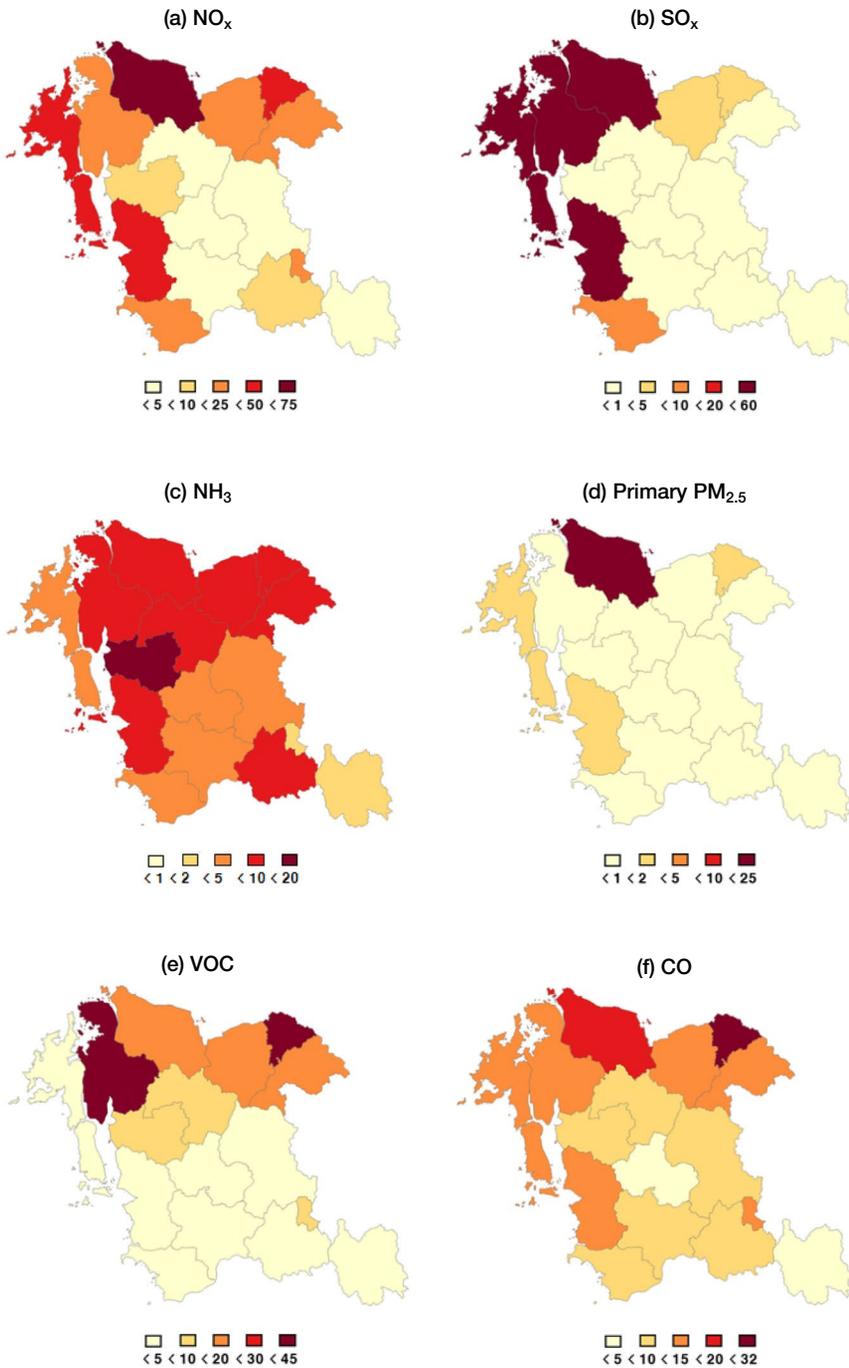
### References

- Ansari, A.S., Pandis, S.N. (1998) Response of inorganic PM to precursor concentrations, *Environmental Science and Technology*, 32(18), 2706-2714.
- Bae, C., Yoo, C., Kim, B.-U., Kim, H.C., Kim, S. (2017)  $PM_{2.5}$  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), DOI: 10.5572/KOSAE.2017.33.5.445.
- Bartnicki, J. (1999) Computing source-receptor matrices with the EMEP Eulerian Acid Deposition Model. EMEP MSC-W Note, 5, 99.
- Benjey, W., Houyoux, M., Susick, J. (2001) Implementation of the SMOKE Emission Data Processor and SMOKE Tool Input Data Processor in Models-3. 14.
- Byun, D.W., 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, DOI: 10.1115/1.2128636.
- Carter, W.P.L. (1999) Documentation of the SAPRC-99 Chemical Mechanism for VOC Reactivity Assessment, Report to California Air Resources Board, Contracts 92 (329), 95-308.
- 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 and Waste Management Association*, 67(5), 582-598, DOI: 10.1080/10962247.2016.1265027.
- 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*, European Geosciences Union, 6(11), 3181-3210.
- Ju, H., Bae, C., Kim, B.-U., Kim, H.C., Yoo, C., Kim, S. (2018)  $PM_{2.5}$  Source Apportionment Analysis to Investigate Contributions of the Major Source Areas in the South-eastern Region of South Korea, *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment*, 34(4), 517-533, (in Korean with English abstract), DOI: 10.5572/KOSAE.2018.34.4.517.
- Kim, B.-U., Kim, H.C., Kim, S. (2018a) Review of Particulate Matter Management in United States, *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment*, 34(4), 588-609, (in Korean with English abstract), DOI: 10.1080/10962247.2016.1265027.
- Kim, B.-U., Kim, H.C., Kim, S. (2018b) A Recently Improved Approach to Develop Effective Emission Inventory for Air Quality Planning in US, *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment*, 34(2), 342-355, (in Korean with English abstract), DOI: 10.5572/KOSAE.2018.34.2.342.
- 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), DOI: 10.5572/KOSAE.2017.33.2.139.
- Kim, S., Kim, O., Kim, B.-U., Kim, H.C. (2017b) 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), DOI: 10.5572/KOSAE.2017.33.2.159.
- Kim, S., Bae, C., Yoo, C., Kim, B.-U., Kim, H.C., Moon, N. (2017c)  $PM_{2.5}$  Simulations for the Seoul Metropolitan Area: (II) Estimation of Self-Contributions and Emission-to-

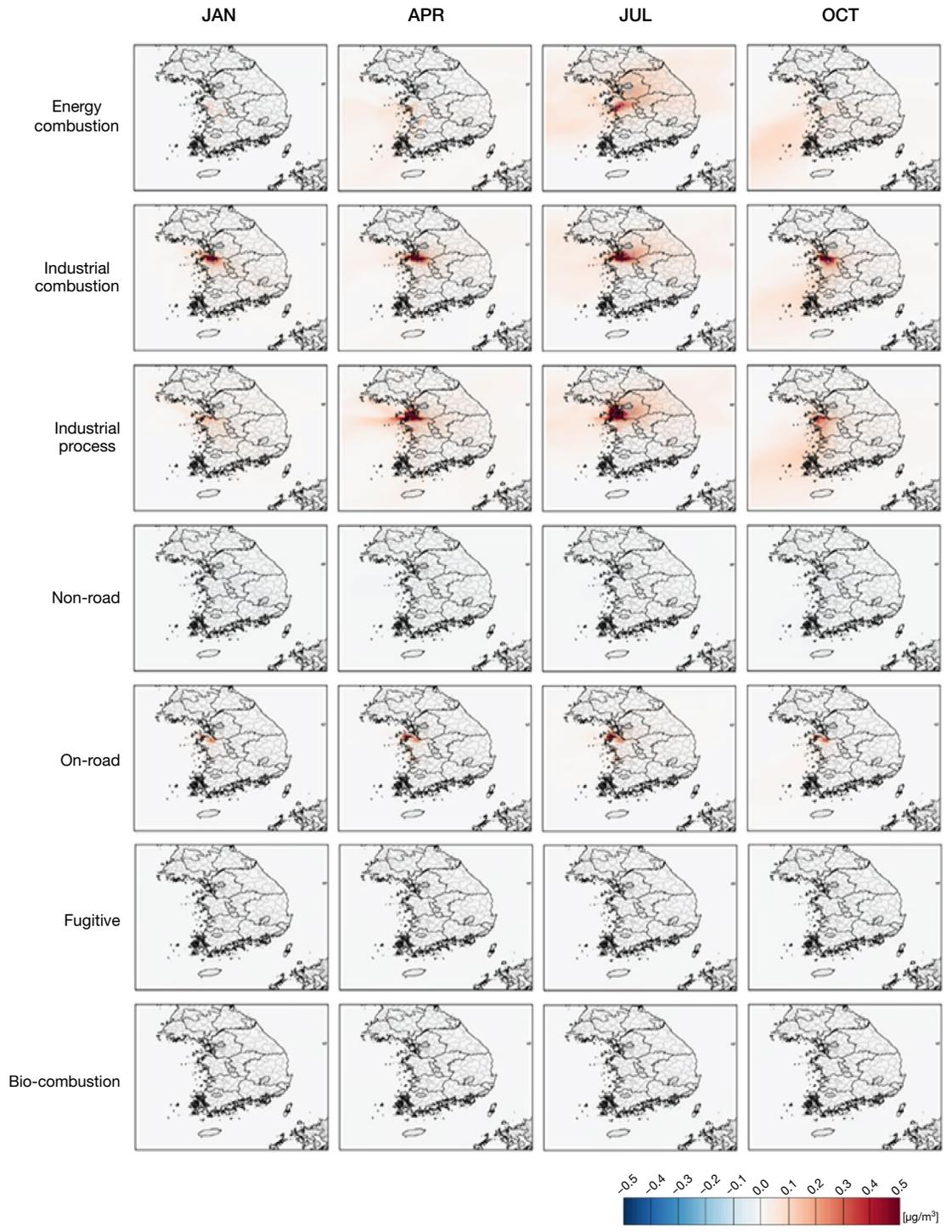
- PM<sub>2.5</sub> Conversion Rates for Each Source Category, *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment*, 33(4), 377-392, (in Korean with English abstract), DOI: 10.5572/KOSAE.2017.33.4.377.
- Kim, H.C., Kim, E., Bae, C., Cho, J.H., Kim, B.-U., Kim, S. (2017d) Regional contributions to particulate matter concentration in the Seoul metropolitan area, South Korea: seasonal variation and sensitivity to meteorology and emissions inventory, *Atmospheric Chemistry and Physics*, 17(17), 10315-10332, DOI: 10.5194/acp-17-10315-2017.
- Nam, K.-P., Lee, D.-G., Lee, J.-B., Choi, K.-C., Jang, L.-S., Choi, K.-H. (2018) A Study on the Utilization of Air Quality Model to Establish Efficient Air Policies: Focusing on the Improvement Effect of PM<sub>2.5</sub> in Chungcheongnam-do due to Coal-fired Power Plants Shutdown, *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment*, 34(5), 687-696, (in Korean with English abstract), DOI: 10.5572/KOSAE.2018.34.5.687.
- 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, DOI: 10.1016/j.jcp.2007.01.037.
- Stein, A.F., Draxler, R.R., Rolph, G.D., Stunder, B.J.B., Cohen, M.D., Ngan, F. (2015) NOAA's HYSPLIT Atmospheric Transport and Dispersion Modeling System, *Bulletin of the American Meteorological Society*, 96(12), 2059-2077, DOI: 10.1175/BAMS-D-14-00110.1.
- U.S. Environmental Protection Agency (US EPA) (1999) Meteorology-chemistry interface processor (MCIP) for Models-3 Community Multiscale Air Quality (CMAQ) modeling system, [https://www.researchgate.net/profile/Jonathan\\_Pleim/publication/251806454\\_Chapter\\_12\\_METEOROLOGY\\_CHEMISTRY\\_INTERFACE\\_PROCESSOR\\_MCIP\\_FOR\\_MODELS3\\_COMMUNITY\\_MULTISCALE\\_AIR\\_QUALITY\\_CMAQ\\_MODELING\\_SYSTEM/links/547623ee0cf29afed6141e21.pdf](https://www.researchgate.net/profile/Jonathan_Pleim/publication/251806454_Chapter_12_METEOROLOGY_CHEMISTRY_INTERFACE_PROCESSOR_MCIP_FOR_MODELS3_COMMUNITY_MULTISCALE_AIR_QUALITY_CMAQ_MODELING_SYSTEM/links/547623ee0cf29afed6141e21.pdf) (accessed on Mar. 02, 2019).

## Authors Information

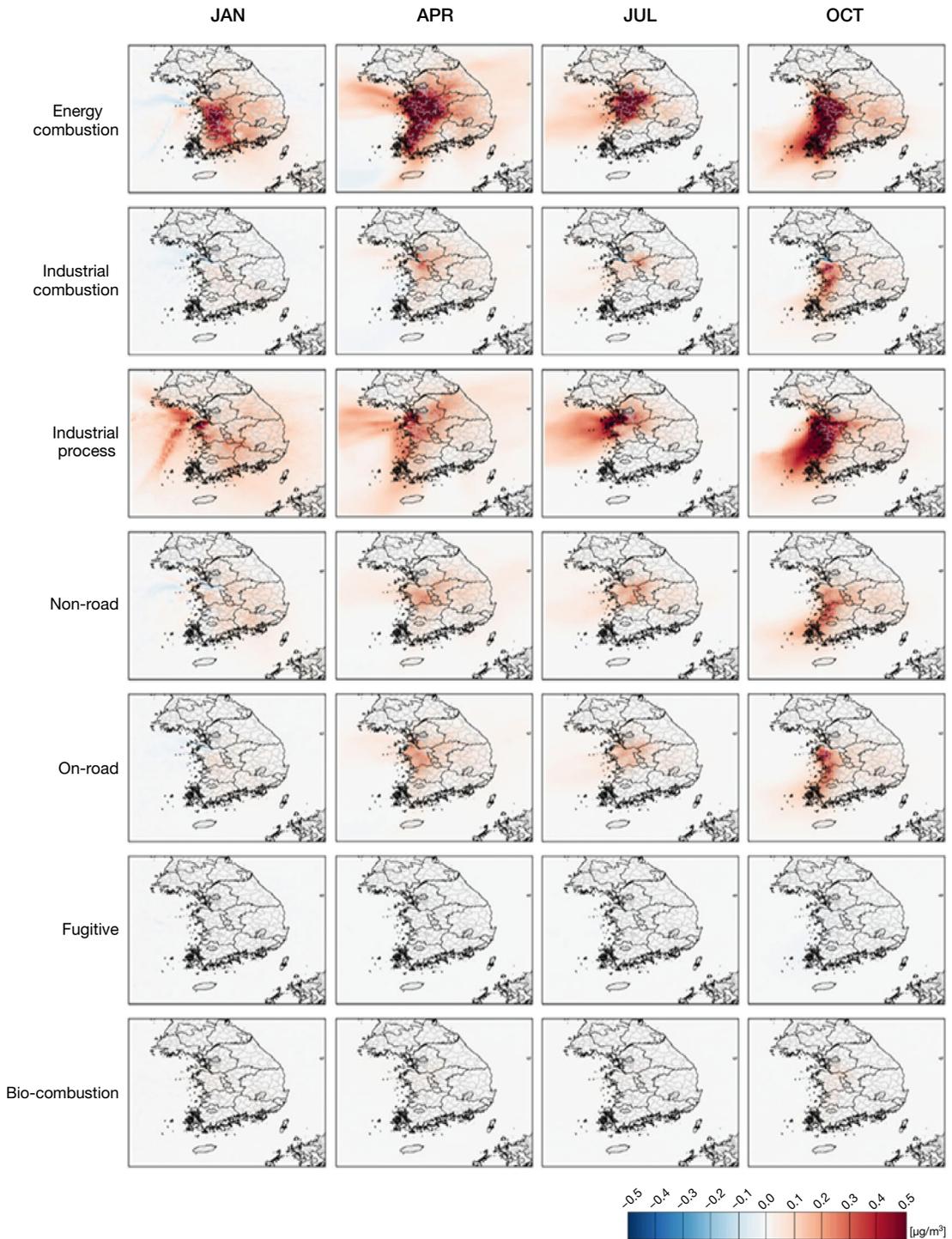
- 김은혜 (아주대학교 환경공학과 박사과정 학생)  
 김현철 (Research Scientist, Air Resources Laboratory, National Oceanic and Atmospheric Administration)  
 김병욱 (Unit Manager, Georgia Environmental Protection Division, Atlanta, GA, USA)  
 김순태 (아주대학교 환경안전공학과 교수)

**Appendix 1.** Air pollutant emissions per unit area in CCND based on the CAPSS 2013 emissions inventory (unit: TPY/km<sup>2</sup>).

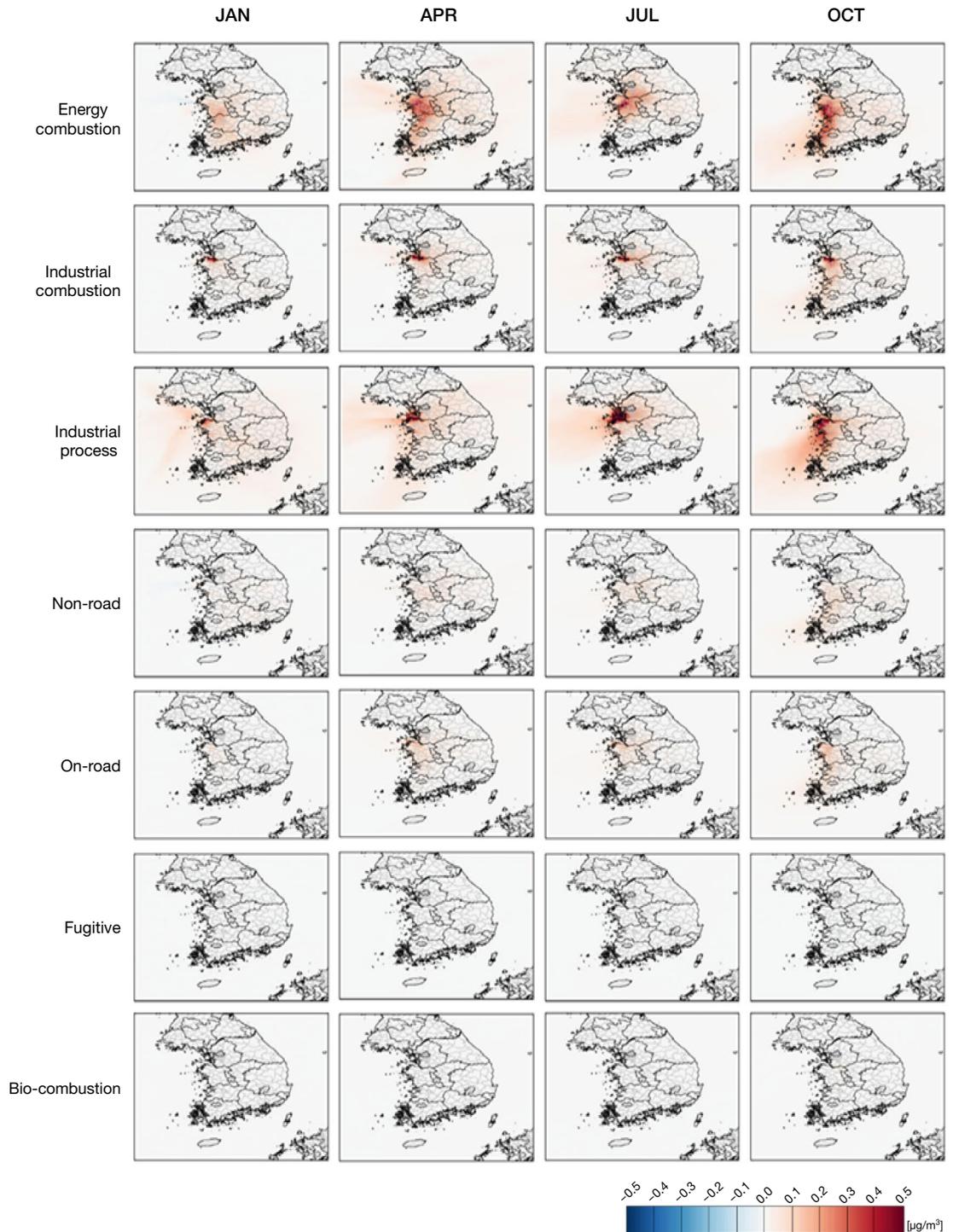
**Appendix 2.** Zero-out contributions of sectoral emissions from the CCND to  $\text{SO}_4^{2-}$  concentrations averaged for January, April, July and October in 2015.



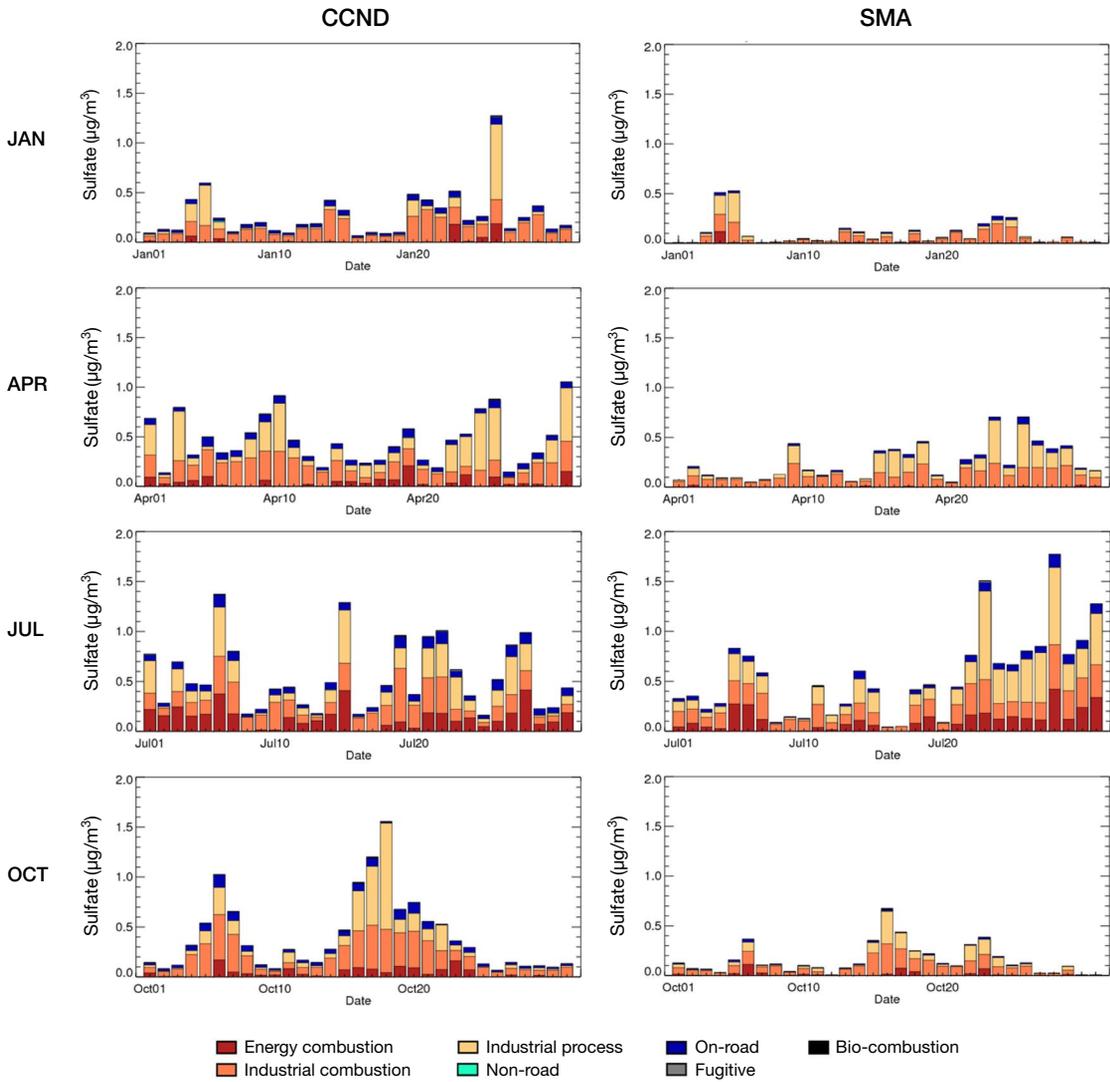
**Appendix 3.** Zero-out contributions of sectoral emissions from the CCND to  $\text{NO}_3^-$  concentrations averaged for January, April, July and October in 2015.



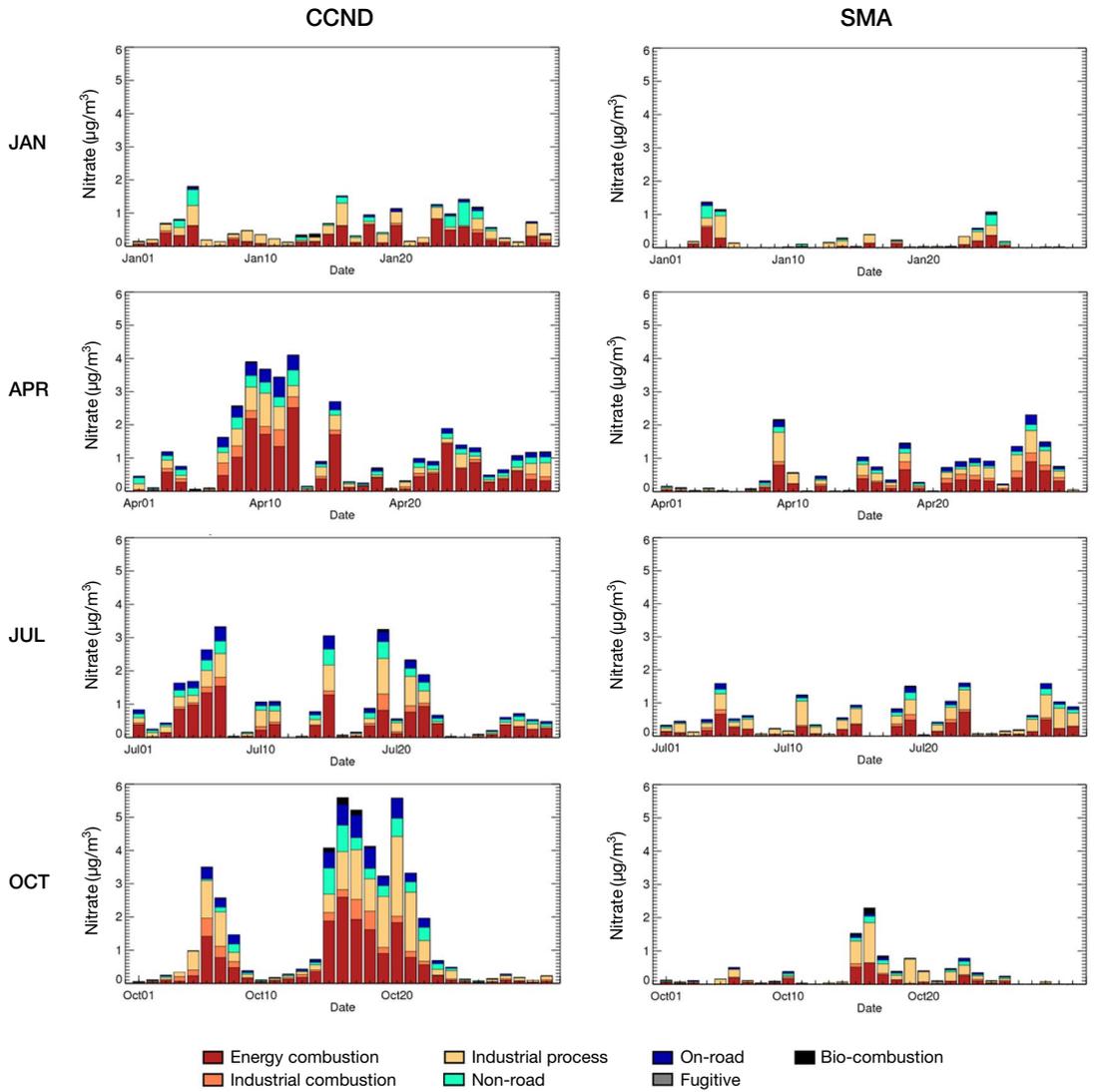
**Appendix 4.** Zero-out contributions of sectoral emissions from the CCND to  $\text{NH}_4^+$  concentrations averaged for January, April, July and October in 2015.



**Appendix 5.** Daily contributions of sectoral emissions from the CCND to CCND (left) and SMA (right)  $\text{SO}_4^{2-}$  concentrations for January, April, July and October in 2015.



**Appendix 6.** Daily contributions of sectoral emissions from the CCND to CCND (left) and SMA (right)  $\text{NO}_3^-$  concentrations for January, April, July and October in 2015.



**Appendix 7.** Daily contributions of sectoral emissions from the CCND to CCND (left) and SMA (right)  $\text{NH}_4^+$  concentrations for January, April, July and October in 2015.

