

논문

중국 원소탄소 배출량 보정에 따른 국내 농도 영향 추정 Adjusting Chinese Elemental Carbon Emissions and Estimating their Impacts on Ambient Concentrations in South Korea

강윤희, 김은혜, 김순태^{1),*}

아주대학교 환경연구소, ¹⁾아주대학교 환경안전공학과

Yoon-Hee Kang, Eunhye Kim, Soontae Kim^{1),*}

Environmental Institute, Ajou University, Suwon, Republic of Korea

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

접수일 2024년 1월 9일
수정일 2024년 2월 5일
채택일 2024년 2월 7일

Received 9 January 2024
Revised 5 February 2024
Accepted 7 February 2024

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

Abstract In this study, we performed emissions adjustment of elemental carbon (EC) emissions in five sub-regions in China by adopting two approaches (i.e., annual or monthly basis) and estimated their impacts on EC concentrations in South Korea using air quality modeling and observed EC concentrations at the Baengnyeong supersite (BN). In 2016, the observed annual mean EC concentration at BN was $0.85 \mu\text{g}/\text{m}^3$, while the simulated concentration before emissions adjustment was underestimated by $0.30 \mu\text{g}/\text{m}^3$. After applying the annual- and monthly-basis emissions adjustments, Chinese EC emissions increased by 36% and 53%, respectively, compared to the emission inventory. Showing better model performance with EC concentrations observed at BN, air quality simulations with those two emissions adjustments exhibited distinct characteristics. While preserving spatiotemporal variations of EC emissions in China, the annual-basis emissions adjustment reduced model bias between observed and simulated monthly mean EC concentrations by applying one adjusting factor per sub-region. This approach helps compensate for data scarcity in specific months. Conversely, the monthly-basis approach requires data availability for each month to adjust emissions, limiting its applicability. However, the modeled results utilizing this approach more closely align with the observations by improving mean bias and correlation. While Chinese EC emission impact during 2016 was $0.25 \mu\text{g}/\text{m}^3$ before the emissions adjustment, they increased to 0.38 and $0.48 \mu\text{g}/\text{m}^3$ after the emission adjustments, showing relatively larger increases in Seoul Metropolitan Area where half of the population of South Korea live. This suggests that accurate emissions in upwind areas are essential for better understanding air quality and establishing reliable air quality improvement plans in downwind areas such as in South Korea.

Key words: Elemental carbon, Emissions adjustment, Transboundary transport, Zero-out contribution, Surface observation

1. 서론

원소탄소 (elemental carbon; EC)는 초미세먼지 (Particulate Matters of which diameter is equal to or less than $2.5 \mu\text{m}$; $\text{PM}_{2.5}$) 구성 성분 중 하나이며, 구성비율은 다른 성분에 비해 높지 않으나 독성이 높아 건강에 악영향을 일으키는 주요 물질로 알려져 있다 (Luben *et al.*, 2017; Benbrahim-Tallaa *et al.*, 2012; Birch and Cary,

1996). EC는 측정 방법에 따라 블랙 카본 (black carbon)과 구별되나 (Kim *et al.*, 2018; Long *et al.*, 2013; Cheng *et al.*, 2011), 오염원에서 대기 중으로 배출된 후 2차 에어로졸의 생성 과정, 기여도 분석, 인체 위해성 등 다양한 분야에 걸친 역할에 대해서 최근 많은 관심이 모아지고 있다 (Chen *et al.*, 2023; Zhang *et al.*, 2023; Lim *et al.*, 2019; Park *et al.*, 2019; Long *et al.*, 2013).

선행연구를 살펴보면, EC 관측 농도는 국내 유입

지점인 백령과 제주에서 $0.7 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 정도였으며, 국내 내륙 지점에서는 $1\sim 2 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 내외의 농도를 보였다(Kang *et al.*, 2021a; Kim *et al.*, 2015; Lee *et al.*, 2015; Oh *et al.*, 2015). 관측 농도는 측정 방법뿐 아니라 측정 위치와 고도, 시간과 계절 등에 따라 달라질 수 있으나, 기존 연구를 토대로 국내 EC 농도는 국외로부터 유입되는 영향과 국내로부터 배출되는 영향을 함께 받는 것으로 이해할 수 있다. 이와 관련하여 Park and Han (2022)은 BC의 광흡수계수와 $\text{PM}_{2.5}$ 의 화학 조성을 이용하여 국지 및 외부 배출원의 기여도를 평가한 바 있다.

국내의 풍상에 위치한 중국의 경우 2006~2017년 사이 34개 측정소에서 관측된 BC 평균 농도는 $3.5 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 였으며, 계절적으로는 겨울철에 $4.8 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 가장 높았다(Zhang *et al.*, 2019). Liu *et al.* (2018)은 2015년 겨울철 동안 북경의 BC 농도를 $5.3 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 보고하였으며, 유사 연구에서도 중국 도시별 BC 농도는 시기에 따라 차이를 보이기는 하나, $2.0\sim 5.1 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 범위에서 관측되었다(Shen *et al.*, 2021).

Wang *et al.* (2012)에 따르면 중국의 BC 배출량은 1949년 이후 2000년대 초반까지 지속적으로 증가하였고, 2050년까지 저탄소 정책 등을 펼칠 경우 현재 예상 대비 절반 이하로 낮아질 것으로 예측하고 있다. Kanaya *et al.* (2020)은 관측과 배출목록 기반 대기질 모사를 통해 중국의 BC 배출량이 2009년 이후 감소하는 것으로 보고하였다. 그럼에도 불구하고 중국 주요 BC 배출 지역이 국내와 인접해 있는 점은 장거리 이동에 의한 국내 유입에 대한 높은 가능성을 의미한다(Wang *et al.*, 2012). 따라서 국내 유입 가능성이 높은 국외 배출 지역에 대한 EC 배출량 및 국내 유입 영향에 대한 검토가 필요하나, 이에 대해 많은 연구가 진행되지 못하고 있다.

EC는 1차 대기오염물질로 대기 중으로 배출된 후 장거리 이동이 가능하고(Kang *et al.*, 2021a), $\text{PM}_{2.5}$ 와 마찬가지로 3차원 광화학 모사를 통해 기여도 및 국내 유입 영향을 추정할 수 있다(Kang *et al.*, 2023; Son *et al.*, 2022). 다만, 이러한 국외 영향 추정에서 중요한

점은 도출된 결과에 대한 신뢰성이다. Son *et al.* (2022)은 EC 모사의 불확도를 보완하기 위하여 관측 농도와 모사 농도의 비를 대기질 모사를 통해 산정된 국외 배출 영향에 고려해주는 방법을 제안하였다. Kang *et al.* (2023)은 국내 EC 모사 농도의 재현성 확보를 위해 국외 및 국내 배출량을 보정하는 방안을 제시하였는데, 국외 EC 배출량의 경우 장거리 이동을 통한 국내 유입 지점인 백령 대기환경연구소의 관측농도를 이용하여 보정하였다. 다만 이 연구는 the Korea-United States Air Quality (KORUS-AQ) 2016 기간에 대해 진행되었으며, 중국의 EC 배출량의 계절 변화와 국내 유입 영향을 검토한 연구는 아직 수행되지 못했다.

본 연구에서는 국내의 풍상에 위치한 중국 EC 배출량을 대상으로 장기간에 걸친 보정과 기여도 분석을 통해 국내 EC 농도에 대한 국외 배출 영향의 계절별 변화를 추정하였다. 이를 위해 상향식 배출목록을 이용한 대기질 모사와 중국 5개 지역의 EC 배출에 대한 민감도 모사를 수행하였고, 그 결과를 토대로 중국 EC 배출량을 보정하였다. 중국 EC 배출량 보정은 연평균 및 월평균 EC 모사 농도의 편차를 최소화하는 방법으로 구분하여 적용하였다. 이를 통해 상시적인 관측 자료가 확보되지 않는 $\text{PM}_{2.5}$ 개별 성분에 대한 풍상 지역 배출량의 장·단기적 보정 방법에 대한 장단점을 설명하고, 향후 유사 연구에 활용 시 도움이 되고자 하였다. 또한, 보정 전후의 EC 배출량에 기반한 국외 배출 영향을 비교하고 장거리 이동이 가능한 대기오염물질의 국외 풍상 배출량의 현실화의 중요성을 논하였다.

2. 연구 방법

2.1 대상 지역 및 배출 특성

본 연구의 대상 지역은 서부 일부를 제외한 중국 전 지역과 우리나라를 포함한다. 그림 1에 보이는 모사 영역은 환경부의 대기질 예보 및 국내 많은 연구와 동일한 수평 범위를 가진다. Wang *et al.* (2012)에 따르면

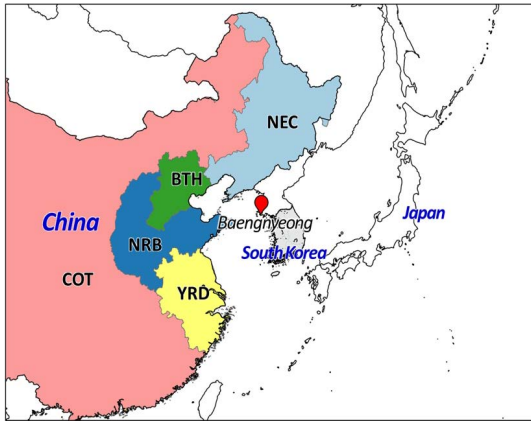


Fig. 1. A map of modeling domain at a horizontal grid resolution of 27 km to adjust and estimate impact of EC emissions in China. The location of Baengnyeong supersite is depicted with a red symbol. The map contains the definition of five analysis regions: Beijing-Tianjin-Hebei (BTH), Near Beijing (NRB), Yangtze River Delta (YRD), North-East China (NEC), and Other Chinese areas (COT) in the domain.

2007년 기준 중국의 BC 배출량은 본 연구의 모사 영역 내에 포함된 쓰촨 분지와 귀주 고원 동쪽 지역에서 90% 이상 배출된다($0.44 \text{ Mg/km}^2 \cdot \text{yr}$). 또한, 국내 BC 배출량은 2017년 기준으로 연간 15,555 metric tons으로 (Choi *et al.*, 2021), 단위 면적당 배출밀도로 환산하면 $0.16 \text{ Mg/km}^2 \cdot \text{yr}$ 에 해당한다. 따라서 상향식 배출 목록 기준으로 비교하면 국내 BC 배출밀도는 중국의 1/3 수준이다.

국외에서 국내로 유입되는 대기오염물질은 중위도 특성상 황해를 통해 유입된다. 백령 대기환경연구소의 경우 풍향에 따라 영향 지역이 변화하기는 하나, 중국 배출 영향을 꾸준히 받는 것으로 가정할 수 있다 (Ghim *et al.*, 2019). 백령 대기환경연구소에서는 $\text{PM}_{2.5}$ 질량 농도와 함께 EC 등 구성 성분을 관측하고 있으며, 본 연구에서는 중국 EC 배출량 보정을 위해 해당 관측 자료를 이용하였다. 백령도는 국내 최북서단에 위치하여 국내 배출원의 영향은 매우 작으며, 거리로는 북한과 인접해 있으나, 편서풍의 영향으로 북한 배출 영향을 크게 받지 않는다(Kang *et al.*, 2023; Kim *et al.*, 2021b).

2.2 대기질 모사 구성

EC 농도를 비롯한 대기질 모사는 Community Multi-scale Air Quality (CMAQ) ver.5.3.2 (U.S. EPA, 2020)을 이용하였다. CMAQ 모사 시 가스상 화학 메커니즘은 State Air Pollution Research Center 07TC (SAPRC 07TC; Hutzell *et al.*, 2012)를, 에어로졸 모듈은 AERO6 (Simon and Bhawe, 2012)를 이용하였다. CMAQ 모사 영역은 중국과 한국을 포함한 27 km 수평해상도의 동북아영역 (174×128 격자)이며, 모사 시 경계조건은 미 환경청의 북반구 CMAQ 모사로부터 추출된 결과를 이용하였다(U.S. EPA, 2024). 대기질 모사에 필요한 기상 입력 자료(1시간 간격의 격자별 기온, 풍향, 풍속, 기압, 상대습도 등)는 Weather Research & Forecasting (WRF; Skamarock *et al.*, 2008) ver.3.9.1 모델을 이용하여 준비하였으며, 기상 모사의 초기/경계조건은 Final (FNL) Operational Global Analysis 1 degree 자료(NCEP/NWS/NOAA, 2000)를 이용하였다. WRF 기상모사에 사용된 물리 역학 방안은 Kang and Kim (2022)에서 제시된 것과 동일하다. 모사 기간은 2016년 전체 기간을 대상으로 하였으며, 초기적응시간 (Spin-up time)을 위해 2015년 12월 16일부터 16일을 추가로 포함하였다. 대상 기간의 경우, 국내 $\text{PM}_{2.5}$ 성분농도에 대한 측정 자료가 확보된 KORUS-AQ (2016년 5월 1일~6월 10일) 캠페인 기간을 확장하여 설정하였다.

대기질 모사를 위한 인위적 배출량은 국외의 경우 Satellite Integrated Joint monitoring of Air Quality (SIJAQ) v2 배출목록을, 국내의 경우 Clean Air Policy Support System (CAPSS) 2021 추계 배출량 (NAIR, 2023)을 Sparse Matrix Operator Kernel Emissions (SMOKE) ver.4.8을 이용하여 준비하였다. 해당 배출 목록은 현재 기준 가장 최신의 배출목록이며, 대상년도 (2016년)의 국내외 배출목록의 불확도 (Bae *et al.*, 2022, 2021; Kim *et al.*, 2022; Kang *et al.*, 2021b, 2021c; Kim *et al.*, 2021a; Kim *et al.*, 2021b, 2021c; Son *et al.*, 2021; You *et al.*, 2020)와 향후 연구의 확장 가능성을 감안하여 선택되었다. 자연 배출량은 Model of Emis-

sions of Gases and Aerosols from Nature (MEGAN; Guenther *et al.*, 2006)를 이용하였다.

2.3 중국 EC 배출량 보정 방법

Kang *et al.* (2023)은 풍상과 풍하 지역을 구분하여 2 단계(two-step)에 걸친 국내의 EC 배출량을 보정하였다. 본 연구에서는 이와 유사하게 백령에서의 EC 관측 농도와 모사 농도를 이용하여 중국 EC 배출량을 보정하였다. 이를 위해 우선 이용 가능한 배출량 자료를 기반으로 기본 모사 농도(C_{Base})를 도출하고, 이를 관측 농도(C_{Obs})와 비교하였다. 모사 농도와 관측 농도의 편차($=C_{Base}-C_{Obs}$)는 다양한 이유에서 기인할 수 있으나, 본 연구에서는 중국 배출량이 최적화될 경우 이 편차가 최소화되는 것으로 가정하였다.

중국의 EC 배출량과 불확도는 지역(sub-region)마다 차이가 있을 수 있다. 본 연구에서는 중국을 BTH (Beijing-Tianjin-Hebei), NRB (Near Beijing), YRD (Yangtze River Delta), NEC (North-East China), COT (Other China)의 다섯 지역으로 구분하고, 이들 다섯 지역에 배출되는 EC 배출량에 의한 백령 관측 지점에서의 EC 기여도는 Brute Force Method (BFM)를 통해 계산하였다. 한 지역 i 배출에 대한 EC 기여도 (Zero-out contribution) 산정을 위해 대상 지역 배출량을 50% 삭감한 후 모사를 수행하고, 이를 식 (1)과 같이 이용하였다.

$$ZOC_i = (C_{Base,i} - C_{50\%,i}) \cdot 100\% / \Delta\epsilon_{50\%,i} \quad (1)$$

여기에서 $\Delta\epsilon_{50\%}$ 는 i 지역의 배출량 삭감 비율(본 연구에서는 50%), $C_{50\%,i}$ 는 i 지역의 배출량을 50% 삭감한 후 계산된 농도이며, ZOC_i 는 i 지역의 배출량에 의한 기여도 또는 배출영향이다. 중국의 풍하 위치에 있는 백령에서의 EC 관측 농도를 풍상 지역 배출 기여도의 합으로 식 (2)와 같이 나타낼 수 있다.

$$\sum ZOC_i \cdot AF_i = C_{OBS} - residual \quad (2)$$

여기에서 AF_i 는 i 지역 EC 배출량에 대한 보정계수 (Adjusting factor)이며, *residual*은 보정 후 잔차이다.

기본 모사에서 배출량 정보가 정확하다면 기여도의 합은 관측 농도와 일치한다. 반면, 대기질 모사에 이용된 배출량 자료의 불확도에 의해 모사 농도와 관측 농도의 편차가 발생할 경우 보정계수를 적용하여 해당 편차를 줄일 수 있으며, *residual*을 최소화하도록 AF_i 를 계산하였다. 배출량 보정 과정에 대한 자세한 내용은 Kang *et al.* (2023)을 참고할 수 있다.

본 연구에서는 식 (2)에서 보정계수를 구할 때, 두 가지 접근을 시도하였다. 첫 번째 방법은 지역별 기여도를 월평균 값으로 산정하고, 전체 기간(1년)에 적용할 수 있는 하나의 보정계수를 각 배출 지역별로 산정하였다(연 보정계수). 두 번째 방법은 배출량의 월별 보정을 위해 식 (2)에 일평균 기여도를 각 월별로 적용하였다(월 보정계수). 지역별 보정계수는 연 보정계수의 경우 대상 기간 동안 하나의 값을 이용하는 반면, 월 보정계수의 경우 월별로 달라질 수 있다. 두 가지 방법 적용에 의한 배출량 보정은 3.2절에서 비교하였다.

3. 연구 결과

3.1 상향식 배출목록 기반 중국 지역별 EC 기여도

그림 2는 중국 지역별 EC 기여도를 모사 영역에 대해 공간적으로 나타낸 것으로, 상향식 배출량을 이용하여 모사된 시간별 EC 기여도를 전체 연구 대상 기간(2016년)에 대해 평균하였다. 1차 대기오염물질 특성상 EC 기여도는 배출 지역에서 높게 나타난다. 예를 들어 그림 2(a)는 중국 BTH의 배출량에 의한 EC 기여도를 보인 것으로, 배출 지역인 BTH에서 $2 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 이상의 기여도가 나타나지만, 주변 지역에서는 EC 기여도가 급격하게 낮아진다. 중국 BTH 배출에 의한 국내 EC 기여도는 2016년 평균 $0.04 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 모사되었으나, 이는 배출량 보정 전 결과로 국내의 풍상에 해당하는 중국의 EC 배출량이 백령도 관측 자료를 기반으로 보정된 후에는 달라질 수 있다. 그림 2에서 중국

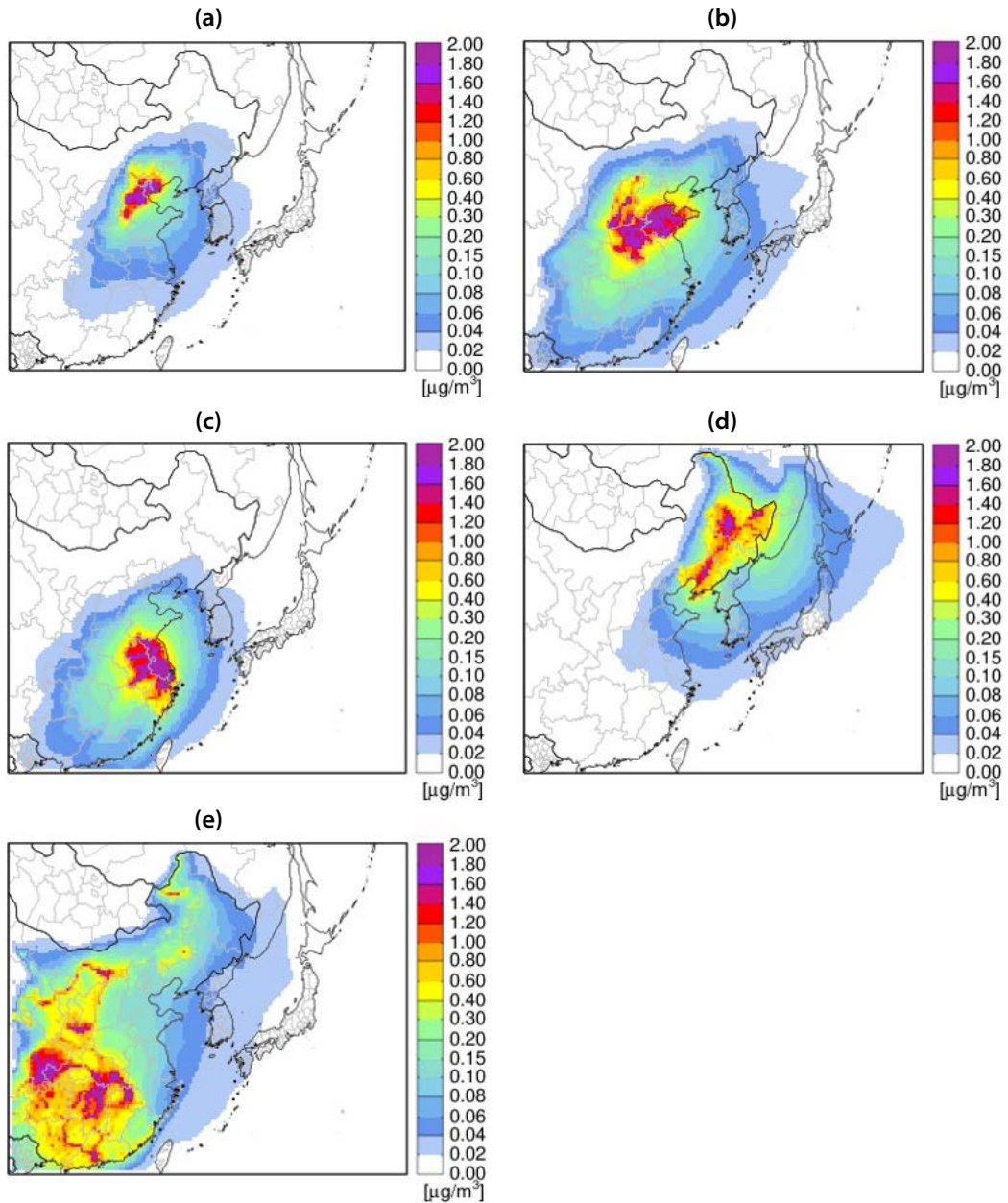


Fig. 2. Periodic mean zero-out contributions (ZOCs) of elemental carbon (EC) emissions from (a) BTH, (b) NRB, (c) YRD, (d) NEC, and (e) COT in China simulated using the base emissions for 2016.

다섯 지역의 배출에 의한 EC 기여도는 황해를 건너면 서 낮아지고, 국내 중에서는 중국과 가장 인접한 백령에서 상대적으로 높은 기여를 보였다.

2016년 평균 백령의 EC 농도에 대한 중국 지역별

기여도는 NEC가 $0.15 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 가장 높았으며, 그 다음은 NRB ($0.11 \mu\text{g}/\text{m}^3$), YRD ($0.07 \mu\text{g}/\text{m}^3$), BTH ($0.06 \mu\text{g}/\text{m}^3$), COT ($0.05 \mu\text{g}/\text{m}^3$) 순이었다. 이들 다섯 지역의 EC 배출량은 각각 COT가 15,125 tpy (tons/year)로 가

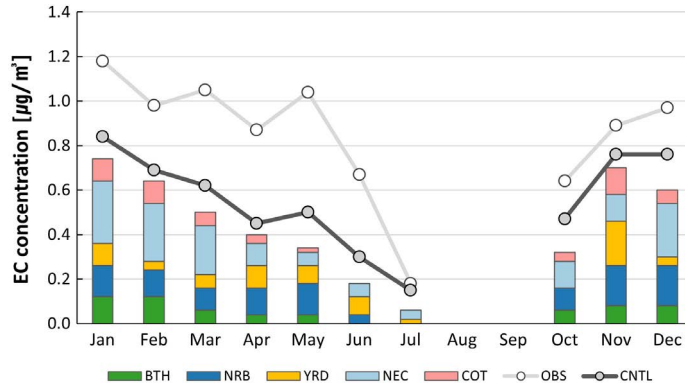


Fig. 3. Observed and simulated monthly mean EC concentrations at Baengnyeong supersite and the contributions of its emissions from five source regions in China during the simulation period of 2016.

장 높고, NRB 6,129 tpy, YRD 5,006 tpy, NEC 4,632 tpy, BTH 2,456 tpy 순이다. 따라서 기본 모사에서 단위 EC 배출량당 백령 측정소의 EC 농도에 대한 기여도는 NEC가 $0.032 \mu\text{g}/\text{m}^3/\text{ktpy}$ (kilotons/year)로 가장 높고, BTH, NRB, YRD는 각각 0.024 , 0.018 , $0.014 \mu\text{g}/\text{m}^3/\text{ktpy}$ 였다. 그에 반해 EC 배출량이 가장 많은 COT는 단위 배출량당 EC 기여도가 $0.004 \mu\text{g}/\text{m}^3/\text{ktpy}$ 로 다섯 지역 중 가장 낮았는데, 이는 백령으로부터 거리가 가장 멀리 떨어져 있기 때문이다. 이러한 결과에서 장거리 이동에 의해 국내 대기질에 영향을 미치는 풍상 1차 대기오염물질의 기여도는 배출량은 물론 국내와의 거리 등이 함께 중요하게 작용하는 것을 알 수 있다.

그림 3에서 2016년 백령의 EC 관측 농도는 $0.85 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 이며, 기본 모사 농도는 $0.55 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 로, $0.30 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 만큼 과소 모의하였다. 2016년 8월과 9월의 경우 관측 일이 부족하여 비교에서 제외하였으나 월평균 관측-모사 농도 간 상관관계수(r)는 0.84로 낮지 않다. 월평균 EC 관측 농도는 겨울철에 $1.0 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 이상으로 증가하고 여름철 동안 낮아지며, 모사 농도에서도 이러한 월별 변화를 유사하게 예측하였다. 그림 3에 함께 보인 중국의 5개 지역 가운데 백령에 대한 연평균 EC 배출 기여도가 가장 높았던 NEC의 월별 배출 기여도는 $0.04 \sim 0.28 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 사이에서, NRB와 YRD는 각각 $0.02 \sim 0.20 \mu\text{g}/\text{m}^3$, $0.00 \sim 0.18 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 범위에서 변화하였

다. 이러한 배출 기여도의 월별 변화에는 동북아 지역에서의 계절풍 변화와 같은 기상적 요인이 크게 작용했을 것으로 보인다.

중국 5개 지역의 기여도의 합은 대상기간 동안 월평균 모사 농도의 76% 정도를 차지하였다. 특히, EC 관측 농도가 증가하는 겨울철과 봄철에는 중국 배출 영향이 모사 농도의 79~93%를 차지하는 높은 기여율을 보였는데, 앞서 설명한 바와 같이 백령 측정소는 지리적 특성상 자체 배출을 제외하면 국내 타지역의 배출 기여는 국외 배출 기여와 비교하여 낮다(Kang *et al.*, 2023; Kim *et al.*, 2021b). 이러한 이유로 본 연구에서는 관측 농도와 모사 농도의 차이를 국외 배출량의 불확도에서 기인한 것으로 가정하였으며, 특히 본 연구에서는 중국 배출량의 불확도로 한정하였다.

3.2 배출량 보정 전후 중국 EC 배출량 비교

그림 4(a)는 기본 모사에서 이용된 중국 EC 배출량의 공간분포를 제시한 것으로 주로 국내와 인접한 중국 동부지역(예로, BTH, YRD, 산둥성 등)에서 높은 배출을 보인다. 한반도가 중위도 편서풍의 영향 하에 있음을 고려하면 이들 지역으로부터 배출된 대기오염 물질이 장거리 수송되어 국내로 유입될 가능성이 높다. 연 보정계수를 이용하는 경우(그림 4(b)와 (d)), 중국의 5개 지역 중 EC 배출량이 크게 증가하는 지역은

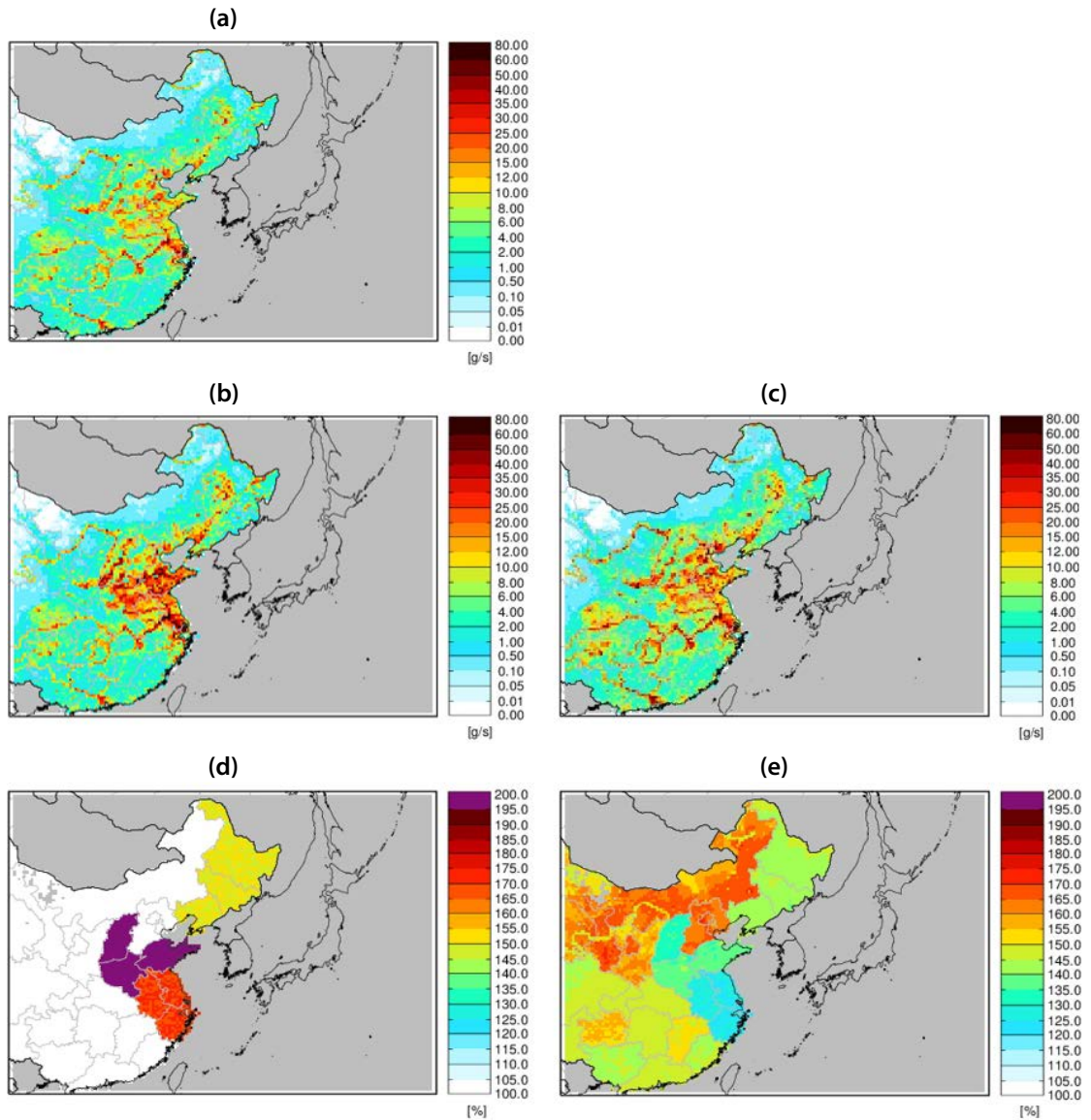


Fig. 4. Spatial distributions of EC emissions: (a) Base emissions, (b) adjusted emissions using yearly adjusting factors, (c) adjusted emissions using monthly adjusting factors, (d) relative emission changes based on yearly adjusting factors, and (e) relative emission changes based on monthly adjusting factors for 2016.

NRB로, 기본 모사 배출량의 210% 수준으로 증가하였다. YRD와 NEC는 각각 170%, 150%로 증가한 반면, BTH와 COT의 EC 배출량은 동일하였다. 보정된 배출량을 모사 영역 내 중국에 대해 평균하면 중국의 EC 배출량은 보정 전의 136% 수준으로 증가하였다.

월 보정계수를 적용할 경우(그림 4(c)와 (e))에는 연 보정계수를 이용 시에는 보정되지 않았던 BTH와 COT의 EC 배출량이 증가하여 2016년 대상 기간 평균 각각 150%, 140% 수준이 되었다. 또한, NRB의 EC 배출량은 120%, YRD와 NEC의 EC 배출량은 110%,

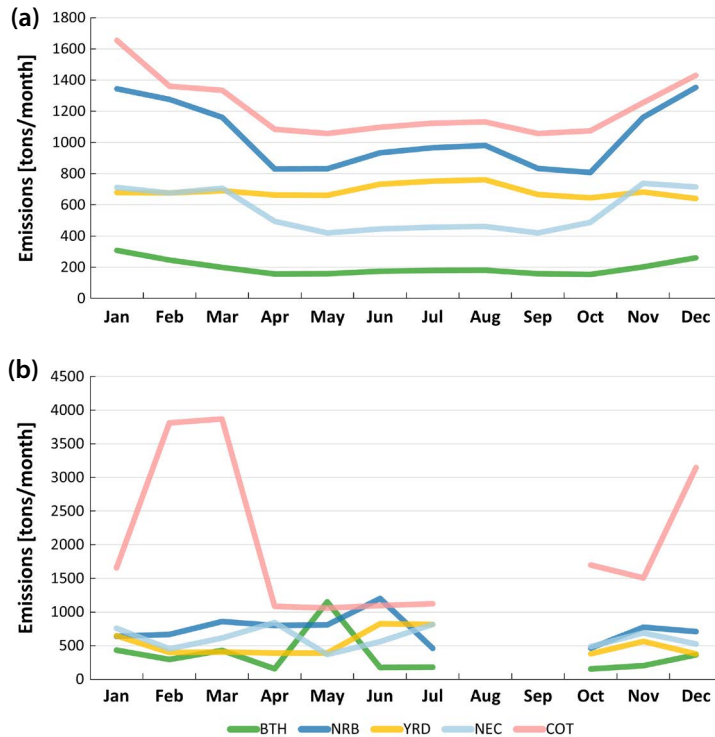


Fig. 5. Monthly EC emissions from five sub-regions in China after emissions adjustments based on (a) annual and (b) monthly adjusting factors for 2016. EC emissions utilizing monthly adjusting factors for August and September were not presented since there were not enough observations made for the months.

140%로 증가하였다. 월 보정계수가 산정되지 않은 8월과 9월을 제외하면 2016년에 대해 보정된 중국 EC 배출량은 기본 배출량의 153% 수준으로 증가하였다. 그림 4와 같이 보정된 EC 배출량의 차이는 백령 관측 농도와 중국 지역별 배출영향의 합의 편차를 최소화하는 과정에서 비롯된다. 예를 들어, 연 보정계수는 12개월 전체 기간을 대상으로 편차를 최소화하는 보정계수를 산정하는 반면, 월 보정계수는 해당 월의 편차만을 대상으로 접근하게 된다. 이러한 차이에 대해서는 그림 5와 6을 통해 보다 자세히 설명하였다.

그림 5(a)는 연 보정계수를 적용하여 보정된 EC 배출량의 월별 변화를 보인다. 이 경우 EC 배출량의 월별 변화는 상향식 배출량의 시간할당에 적용되는 월별 분배계수에 의해 결정된다. 따라서, 각 배출지역에 대한 연 보정계수는 월별 변화 패턴에는 관여하지 않

고, 기존 배출량 대비 보정 배출량의 평균적인 증감 정도를 의미한다. 연 보정계수가 적용된 월별 EC 배출량의 경우, YRD를 제외하면 대개 겨울철에 높고 여름철에 상대적으로 EC 배출량이 낮아지는데, 이는 상향식 배출량의 산정 또는 처리 과정에서 유도된 것으로 볼 수 있다. 연 보정계수를 적용하여 배출량을 보정할 경우, 2016년 8월과 9월의 경우와 같이 유효 관측 자료가 충분하지 않은 시기에 대해서도 배출량 보정이 가능하다는 장점이 있다.

이에 반해, 그림 5(b)에 제시된 월 보정계수가 적용된 EC 배출량은 월별 변화가 크다. 예를 들어, COT의 EC 배출량은 2016년 3월에는 3,869 tpm (tons per month)로 높다가 4월에는 1,084 tpm으로 크게 변화하고, 11월 1,506 tpm에서 12월에는 3,148 tpm으로 다시 2배 정도 높아진다. 이러한 급격한 배출량의 월 변화

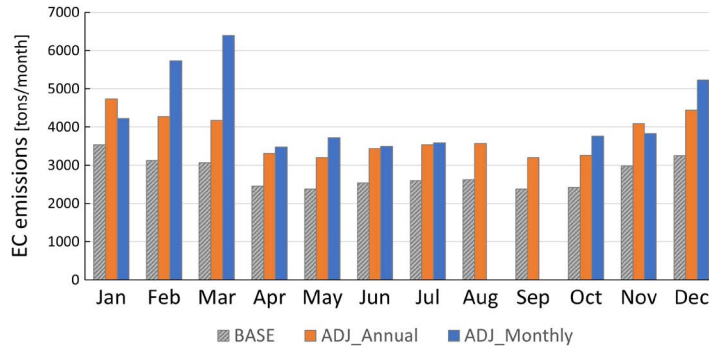


Fig. 6. Comparison of Chinses monthly EC emissions before and after emission adjustments for 2016.

는 월 보정계수가 해당 월의 일별 관측 농도와 모사 농도의 편차를 최소화하는 방식으로 산정되고 다른 월의 배출량 보정에는 영향을 주지 않기 때문이다. 또한, 월 보정계수 산정에 이용되는 지역별 배출 기여도는 해당 시기의 기상 조건에 크게 좌우되므로 기상의 월 변화도 배출량의 월 변화를 크게 만드는 요인이다.

COT의 경우, 백령으로부터의 거리가 멀기 때문에 배출 기여도가 상대적으로 낮다. 이 때문에 3월 COT의 EC 배출량은 월 보정계수 적용 전과 비교하여 적용 후 3배 증가(1,334 → 3,869 tpm)하였으나, 백령에 대한 기여도는 보정 전 $0.06 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 에서 보정 후 $0.17 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 타지역의 보정 후 배출 기여도와 비교하면 여전히 낮다. 예로, 상대적으로 백령과 가까운 NEC는 월 보정계수 적용 후 3월 EC 배출량이 614 tpm으로 COT의 16% 수준이지만, 백령에 대한 배출 기여도는 $0.64 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 COT보다 3.8배 높다. 이처럼 풍상 지역의 배출 기여도를 장거리 이동 지점에서 관측 농도로 보정하는 경우, 배출 지역과의 거리가 멀어질수록 단위 배출량당 기여도가 낮아지며, 이로 인해 근거리에 비해 원거리에 위치한 지역에 대한 배출량은 과대 산정될 가능성이 있다. 반대로, 국내로부터 먼 거리에 위치하는 지역의 배출 불확도는 해당 지역의 대기 중 농도에는 큰 영향을 미칠 수 있으나, 장거리 이동을 통해 국내 대기 중 농도에는 상대적으로 작은 영향을 미칠 것으로 판단된다.

그림 6에서 연 또는 월 단위로 보정된 모사영역 내

중국의 총 EC 배출량은 기존 상향식 배출량 대비 모든 월에서 증가하였다. 연 보정계수와는 달리 월 보정계수를 적용 시에는 보정 전 대비 보정 후 중국 EC 배출량이 19~108%의 월별 증가를 보였고, 특히, 2~3월, 5월, 12월은 기존 배출량 대비 60% 이상의 큰 증가를 보였다. 2~3월, 12월의 경우, COT의 배출량이 다른 월에 비해 높게 보정되었으며, 5월은 BTH의 배출량이 다른 월에 비해 크게 증가하였다(그림 5(b) 참조). 그 외의 월들의 경우 연 보정계수를 이용해 적용한 배출량과 유사하게 보정되었다.

3.3 배출량 보정 전후 백령 EC 모사 농도 및 중국 배출 기여 농도 비교

3.3.1 백령 EC 모사 농도 비교

그림 7(a)는 배출량 보정 전 대상 기간 평균 EC 모사 농도를 보이는 것으로, 2~3 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 의 EC 농도가 중국 동부 지역을 중심으로 나타났다. 같은 기간 동안 국내에 대한 EC 모사 농도는 기본 모사에서 $0.53 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 으로, 백령에 대한 모사 농도($0.55 \mu\text{g}/\text{m}^3$)와 비슷한 수준이다. 연 보정계수를 적용하여 보정된 EC 배출량을 이용한 모사 결과에서(그림 7(b)), 중국 동부의 EC 모사 농도는 3~4 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 수준으로 증가하였다. 이는 그림 4(d)에서 보인 것처럼 연 보정계수 적용 시 중국의 NRB와 YRD를 중심으로 EC 배출량이 증가하였기 때문이다. 중국 동부에서의 EC 모사 농도 증가는 황해상의 EC 모사 농도 증가로 이어졌으며, 이로 인해 백

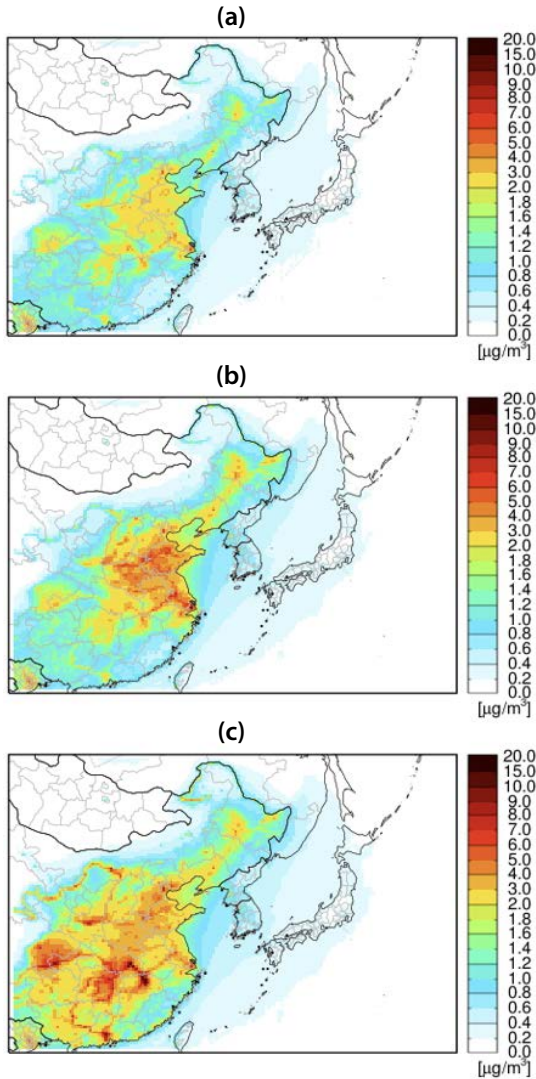


Fig. 7. Spatial distributions of simulated elemental carbon concentrations with (a) base bottom-up emissions, (b) adjusted emissions using annual emission adjusting factors, and (c) adjusted emission using monthly emission adjusting factors for five source regions in China during the simulation period of 2016.

령에서의 EC 모사 농도도 $0.80 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 으로 증가하였다.

월 보정계수를 적용하면 중국 NRB, YRD보다는 BTH, COT에서의 배출량 증가가 더 두드러졌다(그림 4(e) 참고). 그러한 배출량 증가가 반영된 EC 모사 농도(그림 7(c))를 보면, 중국 NRB에서의 EC 모사 농도

는 연 보정계수를 이용했을 때(그림 7(b))보다 낮은 반면, 모사영역의 남쪽과 서쪽에서는 EC 모사 농도가 크게 증가하였다. 이 때문에 연 보정계수를 적용한 EC 모사 농도에서는 중국 중부 연안 지역을 중심으로 상대적 고농도가 나타났다면, 월 보정계수를 적용한 경우에는 중국의 남부 내륙 지역을 중심으로 고농도가 모사되었다. 다만, 그림 7(b)와 (c)에서 백령을 포함한 황해상의 EC 모사 농도는 큰 차이가 없었다. 이는 앞서 설명한 바와 같이, 국내에서 먼거리에서 발생하는 배출량 불확도의 경우 국내를 포함한 주변 지역의 모사 농도에는 큰 영향을 주지 못하는 것으로 이해된다.

월 또는 연 단위 보정 후 중국의 EC 모사 농도는 Zhao *et al.* (2013)에서 제시된 BTH의 EC 관측 농도 ($3.87\sim 9.77 \mu\text{g}/\text{m}^3$), Cao *et al.* (2007)의 중국 14개 도시의 EC 관측 농도(겨울철 평균: $9.9 \mu\text{g}/\text{m}^3$, 여름철 평균: $3.6 \mu\text{g}/\text{m}^3$)와 비교하면 비슷한 수준이다. 하지만 1차 물질의 특성상 배출원 중심의 고농도와 농도 구배가 큰 점 등을 고려하면 중국에서의 EC 모사 불확도는 존재할 수 있고, 이 때문에 본 연구에서는 국내 EC 모사의 재현성 개선에 집중하여 분석을 진행하였다.

그림 8(a)에서 배출량 보정 후 백령에서의 월 평균 EC 모사 농도의 편차는 11월만 제외하고 모든 월에 대해 감소하는 것을 볼 수 있다. 백령 측정소에서 관측 자료가 확보되지 않은 2016년 8월과 9월을 제외한 기본 모사의 월별 모사 농도의 mean bias는 $0.29 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 였으나, 연 보정계수와 월 보정계수를 이용하여 중국의 EC 배출량을 보정한 후에는 각각 $-0.04 \mu\text{g}/\text{m}^3$, $-0.07 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 으로 감소하였다. 특히 관측-모사 간 상관계수는 월 보정계수를 이용할 경우 0.96으로(그림 8(c)), 연 보정계수를 이용한 보정(0.85)보다 향상되었다(그림 8(d)).

그림 8(a)에서 EC 배출량 보정 이후 관측-모사 농도의 편차가 줄어 들었으나, 특정 월에 대해서는 관측-모사 농도 간 차이가 여전히 존재하였다. 예를 들어, 2016년 4월과 5월은 월 보정계수를 적용하여도 EC 모사 농도의 편차가 -0.16 으로 여전히 과소 모사하였다.

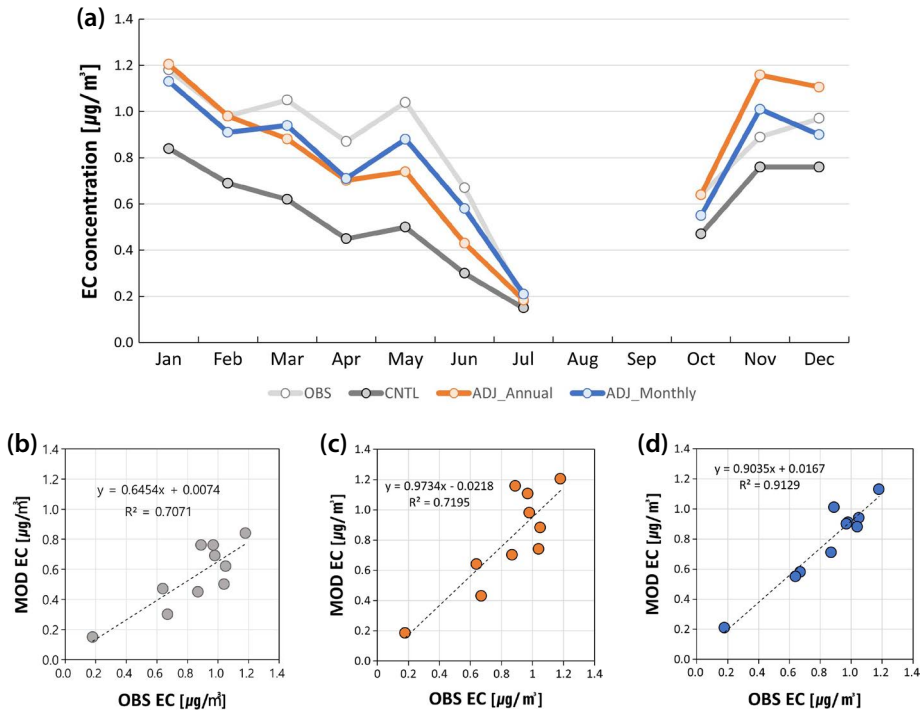


Fig. 8. (a) Time series of monthly mean EC concentrations using adjusted emissions, and scatter plots between observed and simulated monthly mean EC concentrations using (b) base emissions, (c) annual adjusting factor-based emissions, and (d) monthly adjusting factor-based emissions for 2016.

여기에는 여러 이유가 있을 수 있으나, 그중 하나는 본 연구에서 모사 농도의 편차를 중국 EC 배출량 불확도에 의한 것으로 가정하였으나, 시기에 따라 중국 외국의 지역의 배출량 불확도가 국내에 영향을 줄 수 있다. KORUS-AQ 2016 캠페인에서는 해당기간 동안 모사 영역 외의 러시아, 캐나다 등에서 발생한 산불 등의 외부 영향으로 인해 EC 농도가 증가한 사례가 보고되었다(Song *et al.*, 2022; Peterson *et al.*, 2019). 이러한 경우, 본 연구의 접근 방법만으로 해결하는 것이 제한적으로 향후 이를 위한 방안 모색이 필요하다.

3.3.2 중국 배출에 의한 EC 기여 농도 비교

본 연구에서 제안한 중국 EC 배출량 보정 전 대기 질 모사에서는 2016년 평균 국내 EC 모사 농도 중 0.25 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 가 중국으로부터 장거리 수송에 의한 영향으로 모사되었다(그림 9(a)). 반면 연 보정계수를 적용

할 경우, 국내 EC 농도에 대한 중국 배출 기여도는 0.38 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 보정 전과 비교하여 50%가량 증가하고, 월 보정계수를 적용 시에는 0.46 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 더 증가한다(단, 월 단위 보정 분석 시 8, 9월은 제외). 그림 9의 공간 분포에서 중국의 EC 배출 기여도가 국내 최대 인구 밀집 지역인 수도권을 중심으로 높게 나타난다는 점에서 국가 간 대기오염물질의 장거리 이동에 의한 영향은 앞으로도 지속적인 관심을 가질 필요가 있다.

그림 9(d)에서 국내 EC 농도에 대한 중국 배출 기여도는 중국의 월별 배출량 변화와 그에 따른 백령에서의 모사 농도 변화와 유사한 시간 변화를 보인다. 특히, 월 보정계수 적용에서 배출량이 크게 증가한 5월과 6월의 경우, 기존 배출량을 이용한 모사 대비 EC 농도에 대한 중국 배출 기여도는 각각 2.3, 3.7배 증가하는 것을 볼 수 있다. 이와 같은 결과에서 인체 건강과 밀접한 관련성이 있는 국내 EC 농도의 경우 국내

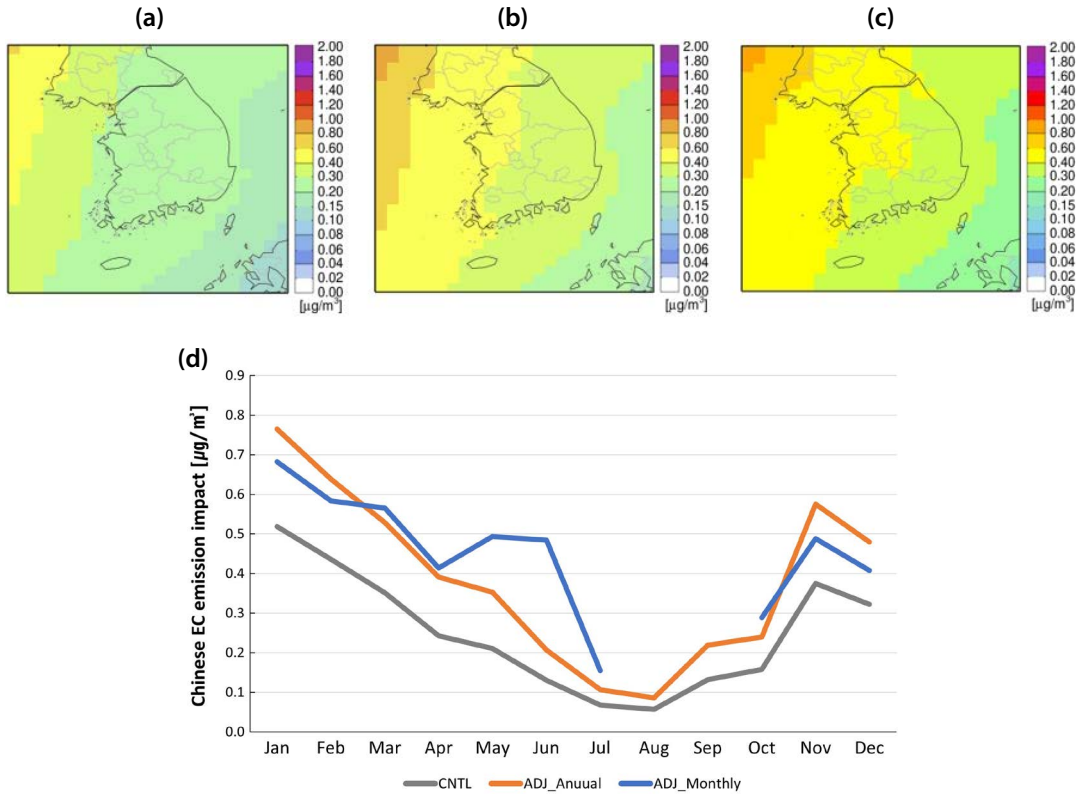


Fig. 9. Spatial plots of periodic mean EC emission impacts from China estimated using (a) base emissions, (b) annual adjusting factor-based emissions, and (c) monthly adjusting factor-based emissions, and (d) time series of monthly mean Chinese EC impacts on South Korea for 2016.

배출뿐 아니라, 국외 배출에 따라서도 크게 변화하며, 향후 국민들의 건강 관리 측면에서 풍상 국외 지역에 대한 배출량 현실화 및 유입 영향 추정이 매우 중요하다고 판단된다.

4. 결 론

본 연구에서는 $\text{PM}_{2.5}$ 성분 중에서도 인체 독성이 커 건강영향에 대한 관심이 높은 원소탄소(EC)를 대상으로, $\text{PM}_{2.5}$ 성분 농도에 대한 상시 관측 자료가 부족한 중국의 배출량 보정을 수행하고 국내 농도 영향을 살펴보았다. 중국 지역별 EC 배출량 보정을 위해 BTH, NRB, YRD, NEC, COT 등 5개 배출 지역을 설정

하였고, 1년 장기 모사 농도와 백령 대기환경연구소에서 관측된 EC 농도를 이용하여 두 가지 방법(연 단위 또는 월 단위)으로 접근하였다.

2016년 백령의 EC 관측 농도는 $0.85 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 였으며, 배출량 보정 전 모사 농도는 $0.55 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 $0.30 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 과소 모의하였다. 연 또는 월 단위로 EC 배출량 보정 후에는 관측-모사 농도 간 편차가 감소하였다(기준 $+0.29 \mu\text{g}/\text{m}^3$, 연 보정 $-0.04 \mu\text{g}/\text{m}^3$, 월 보정 $-0.07 \mu\text{g}/\text{m}^3$). 배출량 보정 결과에서 시간적 범위(연 또는 월) 설정에 따라 보정된 중국 EC 배출량의 월별 변화와 공간 분포는 차이를 보였는데, 상향식 배출량 대비 연 보정의 경우 연간 36% 증가하였고, 월 단위 보정에서는 53% 증가(단, 관측 자료가 부족한 8, 9월은 제외)와 함께 배출량의 월 변화폭이 커지는 특징을 보였다. 중

국 배출량 변화에 의해 중국 EC 배출에 의한 국내 기여 농도 또한 증가하였는데, 배출량 보정 전 $0.25 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 에서 연 보정과 월 보정 이후, 각각 $0.38, 0.46 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 계산되었고, 특히, 인구밀집지역인 수도권의 EC 기여농도 증가는 한국인의 EC 노출 증가에 기여할 것으로 판단된다. 따라서, 정확한 풍상 지역 배출량 자료의 확보는 국내 대기질 현황 이해는 물론 노출 평가를 위해 우선되어야 할 것으로 보인다.

연 단위 배출량 보정 방법은 상향식 배출량과 유사한 시공간 분포를 유지하되, 전체적인 배출량을 증가시키며 2016년 8~9월과 같이 관측 자료가 부족한 기간에 대해서도 적용이 가능하다는 장점이 있다. 반면 월 단위 배출량 보정 방법은 해당 월에 대한 유효 관측 자료가 충분한 경우에만 적용이 가능하고 중국 배출량의 월 변동이 커지는 단점이 있으나, 대상 기간에 대해 관측 농도와와의 편차와 상관성이 동시에 향상되었다.

본 연구에서 제안/검토한 장·단기 중국의 배출량 보정 방법들은 각기 장단점이 존재하였고, 상황에 맞게 적용될 시 제한된 풍상지역 $\text{PM}_{2.5}$ 성분 농도 및 유입 영향을 추정할 방안이 될 수 있다. 연구에서 제안한 백령 관측을 기반으로 한 풍상 배출량 보정은 EC 뿐 배출 지역에서의 상시 관측 자료의 확보가 어려운 다른 $\text{PM}_{2.5}$ 구성 성분(예, 무기성 이온, Primary OC 등)에 대해서도 적용될 수 있다. 다만, 이들 화학 반응을 통한 2차 생성되는 물질의 경우 보다 정교한 방법론 마련과 적용에 따른 검증 과정이 필요하다. 나아가 이러한 접근 방법은 최근 급변하고 있는 중국의 배출 변화와 국내 $\text{PM}_{2.5}$ 의 농도 감소 추세 속에서 국외 배출영향의 불확도를 최소화하여 국내 대기질 대책 효과를 보다 정확히 파악하는 데 활용될 것으로 기대된다.

감사의 글

본 연구는 국가미세먼지정보센터의 지원으로 수행

되었습니다. 관측 자료를 협조해주신 국립환경과학원 백령도 대기환경연구소에 감사드립니다.

References

- Bae, M., Kim, B.U., Kim, H.C., Woo, J.H., Kim, S. (2022) An observation-based adjustment method of regional contribution estimation from upwind emissions to downwind $\text{PM}_{2.5}$ concentrations, *Environment International*, 163, 107214. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2022.107214>
- Bae, M., Kim, E., You, S., Son, K., Kang, Y.-H., Kim, S. (2021) Local Authority Level Source Apportionments of $\text{PM}_{2.5}$ Concentrations based on the CAPSS 2016: (VII) Seoul, *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment*, 37(3), 466-486. <https://doi.org/10.5572/kosae.2021.37.3.466>
- Benbrahim-Tallaa, L., Baan, R.A., Grosse, Y., Lauby-Secretan, B., El Ghissassi, F., Bouvard, V., Guha, N., Loomis, D., Straif, K., International Agency for Research on Cancer Monograph Working Group (2012) Carcinogenicity of diesel-engine and gasoline-engine exhausts and some nitroarenes, *Lancet Oncology*, 13(7), 663-664. [https://doi.org/10.1016/s1470-2045\(12\)70280-2](https://doi.org/10.1016/s1470-2045(12)70280-2)
- Birch, M.E., Cary, R.A. (1996) Elemental Carbon-Based Method for Monitoring Occupational Exposures to Particulate Diesel Exhaust, *Aerosol Science and Technology*, 25(3), 221-241. <https://doi.org/10.1080/02786829608965393>
- Cao, J.J., Lee, S.C., Chow, J.C., Watson, J.G., Ho, K.F., Zhang, R.J., Jin, Z.D., Shen, Z.X., Chen, G.C., Kang, Y.M., Zou, S.C., Zhang, L.Z., Qi, S.H., Dai, M.H., Cheng, Y., Hu, K. (2007) Spatial and seasonal distributions of carbonaceous aerosols over China, *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 112(D22). <https://doi.org/10.1029/2006jd008205>
- Chen, J., Jiang, H., Chen, X., Wang, J., Huang, D., Lian, C., Wang, W., Ammann, M., Bao, F., Chen, C., Zhao, J. (2023) A Novel Mechanism for NO_2 -to-HONO Conversion on Soot: Synergistic Effect of Elemental Carbon and Organic Carbon, *Environmental Science & Technology Letters*, 10(10), 878-884. <https://doi.org/10.1021/acs.estlett.3c00624>
- Cheng, Y., He, K.B., Zheng, M., Duan, F.K., Du, Z.Y., Ma, Y.L., Tan, J.H., Yang, F.M., Liu, J.M., Zhang, X.L., Weber, R.J., Bergin, M.H., Russell, A.G. (2011) Mass absorption efficiency of elemental carbon and water-soluble organ-

- ic carbon in Beijing, China, *Atmospheric Chemistry and Physics*, 11(22), 11497-11510. <https://doi.org/10.5194/acp-11-11497-2011>
- Choi, S.-w., Bae, C.-h., Kim, H.-c., Kim, T., Lee, H.-k., Song, S.-j., Jang, J.-p., Lee, K.-b., Choi, S.-a., Lee, H.-j., Park, Y., Park, S.-y., Kim, Y.-m., Yoo, C. (2021) Analysis of the National Air Pollutant Emissions Inventory (CAPSS 2017) Data and Assessment of Emissions based on Air Quality Modeling in the Republic of Korea, *Asian Journal of Atmospheric Environment*, 15(4), 114-141. <https://doi.org/10.5572/ajae.2021.064>
- Ghim, Y.S., Choi, Y., Park, J., Kim, S., Bae, C.H., Seo, J., Shin, H.J., Lim, Y.J., Lyu, Y.S., Lee, Y.J. (2019) Overall Characteristics of Nationwide High PM_{2.5} Episodes during 2013-2016, *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment*, 35(5), 609-624. <https://doi.org/10.5572/kosae.2019.35.5.609>
- 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*, 6, 3181-3210. <https://doi.org/10.5194/acp-6-3181-2006>
- Hutzell, W.T., Luecken, D.J., Appel, K.W., Carter, W.P.L. (2012) Interpreting predictions from the SAPRC07 mechanism based on regional and continental simulations, *Atmospheric Environment*, 46, 417-429. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2011.09.030>
- Kanaya, Y., Yamaji, K., Miyakawa, T., Taketani, F., Zhu, C., Choi, Y., Komazaki, Y., Ikeda, K., Kondo, Y., Klimont, Z. (2020) Rapid reduction in black carbon emissions from China: evidence from 2009-2019 observations on Fukue Island, Japan, *Atmospheric Chemistry and Physics*, 20(11), 6339-6356. <https://doi.org/10.5194/acp-20-6339-2020>
- Kang, Y., Lim, S., Lee, M., Yoo, H.-J. (2021a) Vertical Distributions of Refractory Black Carbon over the Yellow Sea during the Spring 2020, *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment*, 37(5), 710-728. <https://doi.org/10.5572/kosae.2021.37.5.710>
- Kang, Y.-H., Kim, S. (2022) Seasonal PM Management: (I) What Emissions Should be Reduced? *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment*, 38(5), 746-763. <https://doi.org/10.5572/kosae.2022.38.5.746>
- Kang, Y.H., Son, K., Kim, B.U., Chang, Y., Kim, H.C., Schwarz, J.P., Kim, S. (2023) Adjusting elemental carbon emissions in Northeast Asia using observed surface concentrations of downwind area and simulated contributions, *Environment International*, 178, 108069. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2023.108069>
- Kang, Y.-H., You, S., Kim, E., Bae, M., Son, K., Kim, S. (2021b) Local Authority-Level Source Apportionments of PM_{2.5} Concentrations based on the CAPSS 2016: (VIII) Busan and Gyeongnam, *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment*, 37(6), 871-890. <https://doi.org/10.5572/kosae.2021.37.6.871>
- Kang, Y.-H., You, S., Son, K., Kim, E., Bae, M., Kim, S. (2021c) Municipality-Level Source Apportionment of PM_{2.5} Concentrations based on the CAPSS 2016: (V) Ulsan, *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment*, 37(3), 487-511. <https://doi.org/10.5572/kosae.2021.37.3.487>
- Kim, B.-U., Kim, H.C., Kim, S. (2018) Review of Particulate Matter Management in United States, *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment*, 34(4), 588-609. <https://doi.org/10.5572/kosae.2018.34.4.588>
- Kim, E., You, S., Bae, M., Kang, Y.-H., Son, K., Kim, S. (2021a) Municipality-Level Source Apportionment of PM_{2.5} Concentrations based on the CAPSS 2016: (IV) Jeollabuk-do, *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment*, 37(2), 292-309. <https://doi.org/10.5572/kosae.2021.37.2.292>
- Kim, H., Jung, J., Lee, J., Lee, S. (2015) Seasonal Characteristics of Organic Carbon and Elemental Carbon in PM_{2.5} in Daejeon, *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment*, 31(1), 28-40. <https://doi.org/10.5572/kosae.2015.31.1.028>
- Kim, S., Son, K., You, S., Bae, M., Kang, Y.-H., Kim, E., Kim, S. (2022) Municipality-Level Source Apportionment of PM_{2.5} Concentrations based on the CAPSS 2016: (IX) Gyeongsangbuk-do, *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment*, 38(2), 237-257. <https://doi.org/10.5572/kosae.2022.38.2.237>
- Kim, S., You, S., Kang, Y.-H., Kim, E., Bae, M., Son, K., Kim, Y., Kim, B.-U., Kim, H.C. (2021b) Municipality-Level Source Apportionment of PM_{2.5} Concentrations based on the CAPSS 2016: (II) Incheon, *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment*, 37(1), 144-168. <https://doi.org/10.5572/kosae.2021.37.1.144>
- Kim, S., You, S., Kim, E., Kang, Y.-H., Bae, M., Son, K. (2021c) Municipality-Level Source Apportionment of PM_{2.5} Concentrations based on the CAPSS 2016: (III) Jeollanamdo, *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment*, 37(2), 206-230. <https://doi.org/10.5572/kosae.2021.37.2.206>
- Lee, J., Jeong, B., Park, D.-J., Bae, M.-S. (2015) A Study of Black Carbon Measurement in Metropolitan Area and Suburban Area of the Korean Peninsula Performed during

- Pre KORea-US Air Quality Study (KORUS-AQ) Campaign, *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment*, 31(5), 472-481. <https://doi.org/10.5572/kosae.2015.31.5.472>
- Lim, S., Kang, Y., Lee, M., Yoo, H.-J., Lee, S.-S., Lee, G.-H. (2019) Mass Concentration and Size Distribution of Refractory Black Carbon in Seoul during Summer, *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment*, 35(6), 713-725. <https://doi.org/10.5572/kosae.2019.35.6.713>
- Liu, Y., Yan, C., Zheng, M. (2018) Source apportionment of black carbon during winter in Beijing, *Science of The Total Environment*, 618, 531-541. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.11.053>
- Long, C.M., Nascarella, M.A., Valberg, P.A. (2013) Carbon black vs. black carbon and other airborne materials containing elemental carbon: physical and chemical distinctions, *Environmental Pollution*, 181, 271-286. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2013.06.009>
- Luben, T.J., Nichols, J.L., Dutton, S.J., Kirrane, E., Owens, E.O., Datko-Williams, L., Madden, M., Sacks, J.D. (2017) A systematic review of cardiovascular emergency department visits, hospital admissions and mortality associated with ambient black carbon, *Environment International*, 107, 154-162. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2017.07.005>
- National Air Emission Inventory and Research Center (NAIR) (2023) <https://www.air.go.kr/capss/emission/year.do?menuId=29> (accessed on Mar. 01, 2024).
- National Centers for Environmental Prediction/National Weather Service/NOAA/U.S (NCEP/NWS/NOAA) (2000) Department of Commerce. 2000, updated daily. NCEP FNL Operational Model Global Tropospheric Analyses, continuing from July 1999, Research Data Archive at the National Center for Atmospheric Research, Computational and Information Systems Laboratory. <https://doi.org/10.5065/D6M043C6> (accessed on Mar. 01, 2024).
- Oh, J., Park, J., Lee, S., Ahn, J., Choi, J., Lee, S., Lee, Y., Kim, H., Hong, Y., Hong, J., Kim, J., Kim, S., Lee, G.-W. (2015) Characteristics of Black Carbon Particles in Ambient Air Using a Single Particle Soot Photometer (SP2) in May 2013, Jeju, Korea, *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment*, 31(3), 255-268. <https://doi.org/10.5572/kosae.2015.31.3.255>
- Park, J., Song, I., Kim, H., Lim, H., Park, S., Shin, S., Shin, H., Lee, S., Kim, J. (2019) The characteristics of black carbon of Seou, *Journal of Environmental Impact Assessment*, 28(2), 113-128.
- Park, S., Han, S. (2022) Source Apportionment of Black Carbon in PM_{2.5} Observed Using a Real-time Seven-wavelength Aethalometer at an Urban Site of Gwangju, *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment*, 38(5), 653-668. <https://doi.org/10.5572/kosae.2022.38.5.653>
- Peterson, D.A., Hyer, E.J., Han, S.-O., Crawford, J.H., Park, R.J., Holz, R., Kuehn, R.E., Eloranta, E., Knote, C., Jordan, C.E., Lefer, B.L. (2019) Meteorology influencing springtime air quality, pollution transport, and visibility in Korea, *Elementa: Science of the Anthropocene*, 7. <https://doi.org/10.1525/elementa.395>
- Shen, L., Wang, H., Kong, X., Zhang, C., Shi, S., Zhu, B. (2021) Characterization of black carbon aerosol in the Yangtze River Delta, China: Seasonal variation and source apportionment, *Atmospheric Pollution Research*, 12(1), 195-209. <https://doi.org/10.1016/j.apr.2020.08.035>
- Simon, H., Bhave, P.V. (2012) Simulating the degree of oxidation in atmospheric organic particles, *Environmental Science & Technology*, 46, 331-339. <https://doi.org/10.1021/es202361w>
- Skamarock, W.C., Klemp, J.B., Dudhia, J., Gill, D.O., Barker, D.M., Duda, M.G., Huang, X.-Y., Wang, W., Powers, J.G. (2008) A Description of the Advanced Research WRF Version 3. NCAR Tech. Note NCAR/TN-475+STR, 113pp.
- Son, K., Kang, Y.-H., You, S., Kim, E., Bae, M., Kim, S. (2021) Municipality-Level Source Apportionment of PM_{2.5} Concentrations based on the CAPSS 2016: (VI) Chungcheongbuk-do, *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment*, 37(3), 429-455. <https://doi.org/10.5572/kosae.2021.37.3.429>
- Son, K., Kim, B.-U., Kim, H.C., Kim, S. (2022) Source apportionment of ambient concentration and population exposure to elemental carbon in South Korea using a three-dimensional air quality model, *Air Quality, Atmosphere & Health*, 15, 1729-1744. <https://doi.org/10.1007/s11869-022-01213-z>
- Song, M., Park, J., Lim, Y., Oh, S.-H., Lee, J.Y., Lee, K.-H., Ro, C.-U., Bae, M.-S. (2022) Long-range transport impacts from biomass burning and secondary pollutant sources based on receptor models during KORUS-AQ campaign, *Atmospheric Environment*, 276. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2022.119060>
- United States Environmental Protection Agency (U.S. EPA) (2020) CMAQ (Version 5.3.2) [Software]. Available from <https://doi.org/10.5281/zenodo.4081737>
- United States Environmental Protection Agency (U.S. EPA) (2024) https://github.com/USEPA/CMAQ/blob/main/DOCS/Users_Guide/Tutorials/CMAQ_UG_tutorial_HCMAQ_IC_BC.md (accessed on Mar. 01, 2024).

- Wang, R., Tao, S., Wang, W., Liu, J., Shen, H., Shen, G., Wang, B., Liu, X., Li, W., Huang, Y., Zhang, Y., Lu, Y., Chen, H., Chen, Y., Wang, C., Zhu, D., Wang, X., Li, B., Liu, W., Ma, J. (2012) Black carbon emissions in China from 1949 to 2050, *Environmental Science & Technology*, 46(14), 7595-7603. <https://doi.org/10.1021/es3003684>
- Zhang, Y., Li, Y., Guo, J., Wang, Y., Chen, D., Chen, H. (2019) The climatology and trend of black carbon in China from 12-year ground observations, *Climate Dynamics*, 53(9-10), 5881-5892. <https://doi.org/10.1007/s00382-019-04903-0>
- Zhang, Y., Wu, N., Wang, J., Huang, X., Wang, Z., Liu, T., Geng, G., Qi, X., Nie, W., Chi, X., Zhang, Q., Ding, A. (2023) Strong haze-black carbon-climate connections observed across northern and eastern China, *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 128(16). <https://doi.org/10.1029/2023jd038505>
- Zhao, P.S., Dong, F., He, D., Zhao, X.J., Zhang, X.L., Zhang, W.Z., Yao, Q., Liu, H.Y. (2013) Characteristics of concentrations and chemical compositions for PM_{2.5} in the region of Beijing, Tianjin, and Hebei, China, *Atmospheric Chemistry and Physics*, 13(9), 4631-4644. <https://doi.org/10.5194/acp-13-4631-2013>

Authors Information

- 강윤희 (아주대학교 환경연구소 연구조교수)
(ykang@ajou.ac.kr)
- 김은혜 (아주대학교 환경연구소 연구조교수)
(kiesloveeh@ajou.ac.kr)
- 김순태 (아주대학교 환경안전공학과 교수)
(soontaekim@ajou.ac.kr)