

논문

대기오염물질의 지역별 배출분포가 농도 및 인구 노출에 미치는 영향 Impact of Regional Emission Distribution of Air Pollutants on Concentration and Population Exposure

박준흥, 김은혜^{1,2)}, 강윤희¹⁾, 김순태^{3),*}

아주대학교 환경공학과, ¹⁾아주대학교 환경연구소,
²⁾국립군산대학교 환경공학과, ³⁾아주대학교 환경안전공학과

Junheung Park, Eunhye Kim^{1,2)}, Yoon-Hee Kang¹⁾, Soontae Kim^{3),*}

Department of Environmental Engineering, Ajou University, Suwon, Republic of Korea
¹⁾Environmental Research Institute, Ajou University, Suwon, Republic of Korea
²⁾Department of Environmental and Engineering, Kunsan National University, Gunsan, Republic of Korea
³⁾Department of Environmental and Safety Engineering, Ajou University, Suwon, Republic of Korea

접수일 2024년 9월 28일
수정일 2024년 11월 12일
채택일 2024년 11월 16일

Received 28 September 2024
Revised 12 November 2024
Accepted 16 November 2024

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

Abstract To effectively manage air pollutant emissions, it is crucial to first analyze the impact of emissions on air pollutant concentrations and subsequent human exposure. This study utilized air quality simulations for March 2021, based on top-down emission estimates capable of reproducing observed concentrations of pollutants such as NO₂, SO₂, and CO in South Korea. The simulated concentrations were further used to calculate the Population Weighted Concentration (PWC). Additionally, a separate simulation was conducted to estimate changes in concentrations and PWC resulting from the removal of regional emission disparities, including emission hotspots. During the study period, the emission density of the top 10% emission hotspots was six times higher for NO_x, ten times higher for SO₂, and three times higher for CO compared to the national average. These hotspots accounted for 57.5% of the total national NO_x emissions, 89.7% of SO₂ emissions, and 36.9% of CO emissions. This indicates a high concentration of emissions in specific areas, raising concerns about exceeding air quality standards. Under current emission conditions, NO₂ and CO concentrations were highest in the Seoul Metropolitan Area (SMA), while SO₂ concentrations were highest in the Chungcheong region. In contrast, the PWC for all three pollutants was the highest in the SMA compared to other regions. Furthermore, the national average PWC for NO₂, SO₂, and CO was 2.5 times, 2.2 times, and 1.4 times higher, respectively, compared to the national average concentrations. This suggests that, despite improvements in national air quality, relatively high concentrations persist in densely populated areas. In the scenario with flattened emissions, the national average PWC for NO₂, SO₂, and CO decreased by 50%, 24%, and 23%, respectively. This finding underscores the importance of establishing air quality improvement plans aimed at reducing population exposure within regions, independent of total emission regulations, as strategic siting of emission sources can reduce PWC regardless of regional emission volumes.

Key words: Emission hotspot, Population weighted concentration, Air quality simulation, Emission management, Regional disparities

1. 서론

대기 중 오염물질의 농도는 기상과 배출량 등 다양한 요인에 의해 달라진다(Seinfeld and Pandis, 2016). 특정 지역의 대기오염물질 배출이 다른 지역보다 높

다면, 해당 지역의 대기 오염도와 그로 인한 인체 위해도 또한 상대적으로 높을 가능성이 크다. 따라서 대상 지역의 환기 용량을 고려하여 대기오염물질의 농도가 일정 수준을 초과하지 않도록 오염원을 제한하고 관리하는 것이 필요하다(Jeong *et al.*, 2024; Lee

et al., 2021).

국내에서 1차 대기오염물질에 해당하는 NO₂와 SO₂ 농도는 지속적인 배출량 관리에 의해 낮아지고 있으며, 많은 지역에서 대기환경기준을 충족하고 있다(NIER, 2023). 그러나, 이들 물질은 대기 중에서 잔류하며 2차 대기오염물질을 생성한다(Seinfeld and Pandis, 2016). 현재 국내에서 PM_{2.5}와 O₃ 등 2차 대기오염물질의 농도는 여전히 대기환경기준을 초과하고 있어(NIER, 2023), 이들 물질의 농도를 효과적으로 관리하기 위해서는 전구물질에 해당하는 1차 대기오염물질의 배출 또한 지속적으로 관리되어야 한다.

국내 시도별 1차 대기오염물질의 농도는 산업과 교통 등 오염원이 밀집한 지역에서 높게 관측된다. SO₂ 농도는 발전과 석탄 관련 이용 산업이 위치하는 울산, 충남, 인천 등의 지역에서 높게 관측되며, NO₂ 농도는 교통이 집중된 대도시에서 높게 관측된다(Choi et al., 2022). 대도시의 경우 인구 밀집 지역인 만큼 대기오염물질 농도를 신중히 관리할 필요가 있으나, 다양한 인위적 활동에 의해 대기오염물질의 배출이 높은 것이 현실이다.

환경부에 따르면, 2021년 기준 서울 및 6대 광역시(부산, 인천, 대구, 대전, 광주, 울산)의 NO_x와 SO₂ 배출량은 각각 국내 전체 배출량의 26.1%와 29.3%를 차지한다(NAIR, 2023). 이들 지역의 면적은 국토의 5.4%에 불과하며(KOSTAT, 2021), 따라서 대도시의 NO_x와 SO₂ 배출 밀도는 국내 평균보다 각각 4.4배, 3.8배 높다. 또한, 대도시의 인구는 국내 전체 인구의 40%를 차지하며, 수원, 울산, 용인, 고양, 창원 등을 포함한 상위 11개 도시에서 국내 인구의 51%가 거주하고 있다(KOSTAT, 2021). 이러한 대도시의 높은 배출 밀도와 인구 밀집도는 대기오염물질에 대한 인체 노출 위험을 더욱 악화시킬 수 있다.

2003년에 제정된 ‘수도권 대기환경개선에 관한 특별법’의 경우 인구가 많은 지역에서 주민들의 건강 피해를 줄이고 대기질을 개선하기 위해 마련되었다. 2019년에는 심도 있는 대기오염 관리를 타 지역으로 확대하기 위하여 ‘대기관리권역의 대기환경 개선에

관한 특별법’을 제정하였고, 2020년 4월부터 시행하였다. 또한, 2017년에는 다양한 배출 시설의 관리 효율성과 환경오염의 효과적인 예방을 목표로 ‘환경오염시설의 배출통합관리에 관한 법률’이 마련되었다(KMOE, 2020). 이러한 제도들의 공통점은 관리 대상 지역 지정, 배출 총량제와 환경영향평가 강화, 지역 및 사업장 맞춤형 관리, 정보 공개, ESG 관점에서의 협력 체계 구축 등을 주요 골자로 한다. 대기오염 관리를 효과적으로 수행하기 위해서는 배출과 농도 간의 관계를 이해하는 것이 중요하지만, 아직까지 지역별 대기오염물질 배출이 얼마나 농도와 인체 노출을 가중시키는지에 대한 연구는 제한적이다.

본 연구에서는 1차 대기오염물질을 중심으로 지역별 배출 분포가 농도 및 인구 노출 수준에 미치는 영향을 3차원 광화학 대기질 모사를 통해 분석하였다. 이를 위해 국내 배출량을 현재 배출 시나리오와 전국적으로 동일한 수평 분포를 가정한 배출 평탄화 시나리오 두 가지로 설정한 후 대기질 모사를 수행하였으며, 대기오염물질의 농도와 인구 노출의 변화를 분석하였다. 이러한 분석은 지역별로 상이한 대기오염물질 배출이 대기질에 미치는 영향을 분석하고, 인체 노출 저감과 지역 맞춤형 관리 방안 수립 등에 활용될 수 있다.

2. 방법론

2.1 대상 기간 및 지역

대기오염물질 농도가 다른 계절에 비해 높은 겨울철 중, 미세먼지 계절관리제 기간에 포함되는 2021년 3월을 연구 기간으로 선정하였다. 이 기간은 상대적으로 낮은 기온과 상대 습도로 인해 2차 PM_{2.5}의 생성률이 낮다(Bae et al., 2022; Bae et al. 2020). 연구 대상 물질은 기준성 대기오염물질인 NO_x, SO₂, CO로 선정하였다. 이들 물질은 대기 중 서로 다른 체류시간을 가지므로 지역별 배출-농도 특성을 분석하는 데 적합하다고 판단하였다. 또한, NO_x, SO₂는 2차 PM_{2.5}

생성에 중요한 물질로, 그동안 국내에서 시행된 미세먼지 계절관리제 등 관리 대책을 통해 많은 양이 감축된 바 있다(Kim *et al.*, 2024b).

국내의 경우, 권역별로 주요 배출원의 종류와 분포, 지형 및 기상 요인이 상이하다. 따라서 동일한 배출 밀도를 가정한 시나리오에서도 권역별로 농도 및 인구노출 변화가 다르게 나타날 것으로 예상된다. 본 연구에서는 국내를 수도권(서울, 경기, 인천), 충청권(대전, 세종, 충북, 충남), 강원권(강원), 호남권(광주, 전북, 전남, 제주), 영남권(부산, 대구, 울산, 경남, 경북)으로 구분하고, 환경부에서 제공하는 Clean Air Policy Support System (CAPSS) 2021 배출목록을 참고하여 주요 권역별 배출분포와 특성을 분석하였다. 또한, 배출량의 수평 분포에 따른 농도 및 인구 노출 변화를 각 권역과 지자체 관점에서 분석하였다.

2.2 대기질 모사

본 연구에서는 국내 배출량의 수평 분포 변화에 따라 대기오염물질 농도의 공간 분포가 어떻게 달라지는지를 분석하기 위해 기상, 배출량 및 대기질 모사 플랫폼을 활용하였다. 기상 모델로는 Weather Research and Forecasting (WRF; Skamarock and Klemp, 2008) version 3.9.1을 이용하였으며, 초기장은 NCEP의 Final (FNL) Operational Global Analysis 1도 자료를 이용하였다(NCEP, 2000). WRF 모사 결과는 Meteorology-Chemistry Interface Processor (MCIP) version 4.3을 통해 CMAQ 입력 자료 형식으로 변환하였다.

배출량 입력 자료의 경우 인위적 배출량은 CAPSS 2021 추계 배출목록을 Sparse Matrix Operator Kernel Emission (SMOKE) version 4.8을 통해 처리하였으며, 자연적 배출량은 The Model of Emissions of Gases and Aerosols from Nature (MEGAN)을 이용하여 계산하였다. 일반적으로 배출목록 및 모델 불확도 등으로 인해 NO₂, SO₂, PM_{2.5}와 같은 주요 대기오염물질의 모사 농도는 관측 농도와 차이를 보인다. 이러한 점을 감안하기 위해 본 연구에서는 국내 대기오염물

질 농도에 영향을 줄 수 있는 중국 및 국내 배출량을 순차적으로 보정한 배출량을 대기질 모사에 이용하였다. Kim *et al.* (2024b)은 상향식 배출목록을 이용한 모사 농도와 지표 관측 농도의 편차를 최소화할 수 있는 월별 보정계수를 마련하여 수정된 하향식 배출량을 산정한 바 있다. 이를 통해 국내 대기질에 영향을 줄 수 있는 배출량을 최근 기간까지 신속하게 추정하였으며, 보정 배출량 이용 시 NO_x, SO₂, CO 등 모사 농도가 관측 농도와 유사한 수준으로 재현됨을 확인하였다. 본 연구 대상기간에 대해 보정된 국내 배출량은 기존 배출목록 대비 NO_x 1.4배, SO₂ 2.3배, CO 12.8배 증가하였다. 하향식 배출량 보정과 관련된 자세한 내용은 Kim *et al.* (2024b)을 참고할 수 있다. 지역별 배출 분포 변화에 따른 농도 영향을 분석하기 위해 추가적으로 적용된 배출량 처리 과정은 다음 절에서 자세히 설명하였다.

대기질 모사는 3차원 광화학 모델인 Community Multiscale Air Quality (CMAQ; Byun and Schere, 2006) version 5.3.2을 이용하였다. 모사 영역은 국내 전 지역을 포함하여 9-km 수평 해상도로 구성하였으며, 이에 대한 경계 조건은 동북아를 포함하는 27-km 수평 해상도의 모사 영역을 통해 도출하였다. 대기질 모사 시 가스상 화학 메커니즘은 the State Air Pollution Research Center 07TC (SAPRC07TC; Hutzell *et al.*, 2012), 에어로졸 모듈은 AERO6를 이용하였다(Simon and Bhawe, 2012).

2.3 배출량의 수평 재분배

배출량의 수평 분포에 따른 대기오염물질 농도 변화를 분석하기 위해 본 연구에서는 두 종류의 배출 시나리오를 작성하였다. 첫 번째 시나리오의 경우, 현재 국가배출목록에서 제시하는 시군구별 배출량 차이를 그대로 반영하였으며, '실제 배출'(이하 'CNTL')로 명하였다. 두 번째 시나리오는 총 배출량은 첫 번째 시나리오와 동일하나, 전 국토에 대해 동일한 배출 밀도(단위 면적당 배출량)를 가지도록 배출량을 수정하였으며, 이를 '평탄 배출'(이하 'UNFM')로 명

하였다. 평탄 배출 시나리오를 준비하기 위해 시간별, 배출물질별 국내 총 배출량을 계산하고, 이를 격자별 국토 면적 비율에 따라 고르게 할당하였다. 해안이나 섬 지역과 같이 한 격자의 일부가 바다로 분류되는 경우, 해당 격자의 육지 면적의 비율을 산정하여 배출량을 할당하였다.

대형 점오염원의 경우 굴뚝 제원 등에 따라 대기오염물질이 배출되는 고도가 달라지며, 이러한 배출량의 수직 할당 과정에는 기상 조건이 함께 고려된다. 이러한 기상 조건은 지역에 따라 달라지기 때문에 대기오염물질의 수직 할당 결과 역시 지역별로 달라질 수 있다. 따라서, 배출량 수평 재배치 시 지역별로 상이한 기상 조건에 따른 수직 할당을 고려하기 어렵기 때문에 본 연구에서는 모든 다층 배출량을 단층 배출량으로 변환하여 이용하였다.

현실적으로 국내 모든 배출량을 산지나 도서 지역까지 고르게 분배하는 것은 어려우나, 현재와 같이 특정 지역에 밀집되어 배출되는 오염물질로 인한 인체 노출 영향을 파악하기 위하여 본 연구에서는 위의 두 가지 배출 시나리오를 이용하였다. 또한, 이러한 동일한 배출 밀도를 이용한 대기질 모사를 통해 지형과 기상 등 지역별 여건이 농도에 미치는 영향을 파악할 수 있다. 배출량 수평 분포 변화에 따른 농도 영향 분석에 앞서 CNTL 모사 결과에 대한 모사 수행 평가를 진행하였다. 이를 위해 대상 기간 동안 도시 대기측정망에서 관측된 농도를 대상으로 일평균 모사 농도를 비교하였다.

2.4 인구 노출 평가

배출량의 수평 재분배에 따라 달라지는 대기오염물질의 농도 변화와 그에 따른 인체 노출 변화를 평가하기 위해 본 연구에서는 총 인구 노출도 (Total Population Exposure, TPE)와 인구 가중 농도 (Population Weighted Concentration, PWC)를 이용하였다 (Son *et al.*, 2020).

$$TPE_i = \sum_{j=1}^N P_i^j \times D_i^j \quad (1)$$

TPE_i = Total population exposure (person × ppb, $\mu\text{g}/\text{m}^3$)

N = The number of lower-level authorities within authority i

P_i^j = Population at the j^{th} lower-level authority within authority i

D_i^j = Air pollutant mass concentration (ppb, $\mu\text{g}/\text{m}^3$)

$$PWC_i = \frac{TPE_i}{P_i} \quad (2)$$

PWC_i = Population Weighted Concentration at authority i (ppb, $\mu\text{g}/\text{m}^3$)

P_i = Total population at authority i ($= \sum_{j=1}^N P_i^j$)

TPE는 식(1)과 같이 한 광역 지자체 내의 하위 지자체별 인구 (P_i^j) 및 농도 (D_i^j)의 곱을 총합한 것으로, 농도와 총 인구에 비례한다. PWC는 식 (1)에서 산정된 TPE를 광역 지자체의 총 인구수로 나눈 값으로, 대기 오염도가 높은 하위 지자체에 많은 인구가 거주하는 경우 전체적인 노출도가 높아지기 때문에 수업체 중심으로 실질적인 노출 수준을 파악할 수 있다 (Son *et al.*, 2020). 본 연구에서는 배출량의 수평 재분배 전후의 대기질 모사에 대해 PWC를 산정하여, 배출량 분포가 인구 노출에 미치는 영향을 검토하였다.

3. 결 과

3.1 평탄화 전후 권역별 배출량

대상 기간 동안 평탄화 이전 배출량의 공간 분포를 살펴보면 (그림 1), 대기오염물질별 배출량은 NO_x 의 경우 영남권과 호남권에서 각각 1431.4 tons per day (TPD)와 1006.2 TPD로 가장 높았다. SO_2 는 영남권과 충청권에서 각각 357.9 TPD와 218.3 TPD, CO의 경우 영남권과 호남권에서 각각 8894.7 TPD와 5885.2 TPD로 다른 권역에 비해 높은 배출량을 보였다. 권역별 배출 밀도의 경우 NO_x 와 CO는 수도권에서 각각 $0.081 \text{ TPD}/\text{km}^2$ 와 $0.33 \text{ TPD}/\text{km}^2$ 로 가장 높았으며, SO_2 는 충청권에서 $0.013 \text{ TPD}/\text{km}^2$ 로 가장 높았다. 또한, 각 권역 내에서도 대기오염물질의 배출

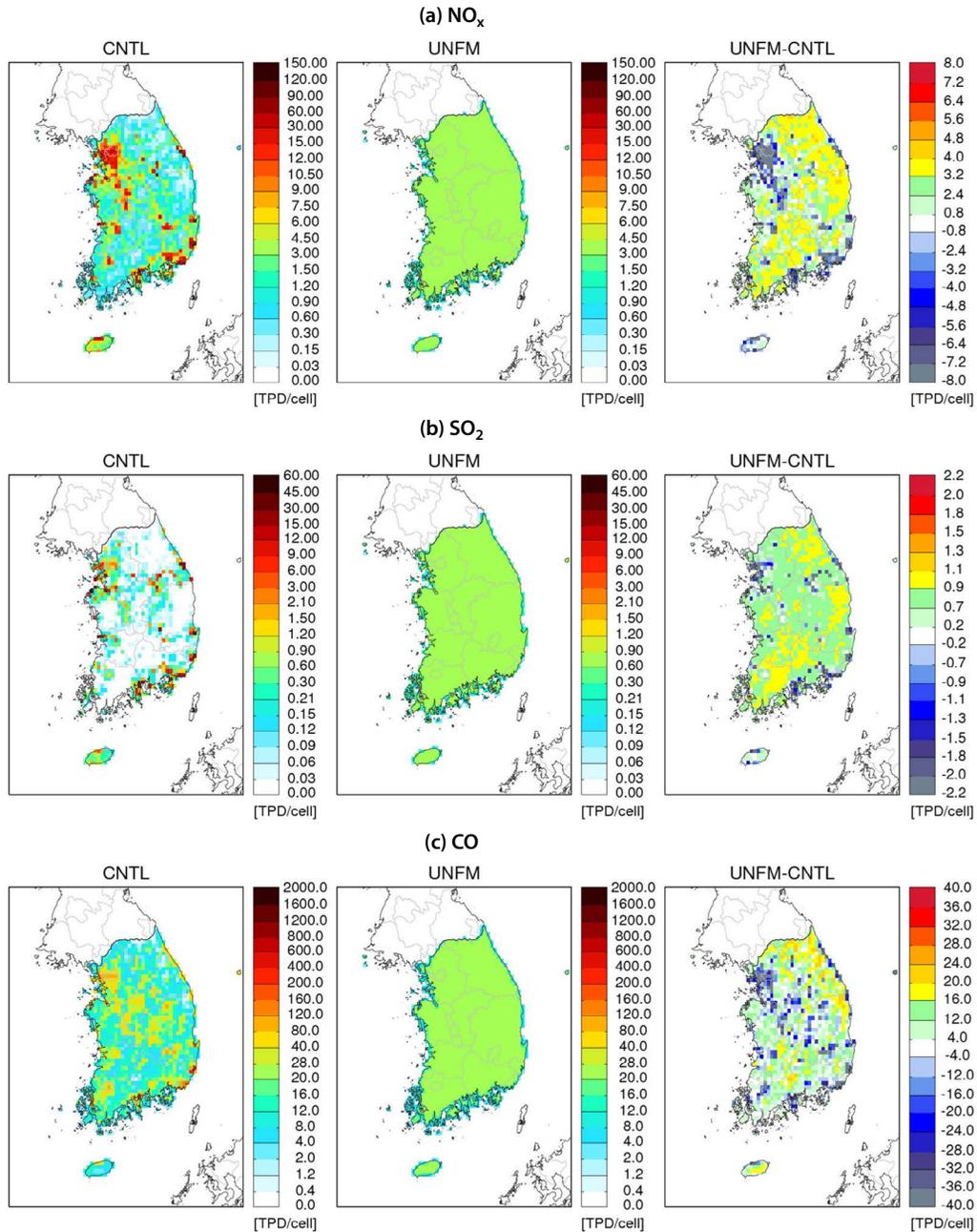


Fig. 1. The spatial distribution of emissions density of (a) NO_x , (b) SO_2 , and (c) CO for CNTL (left), UNFM (middle), and the difference (right) in South Korea for March 2021.

밀도는 시군구 등 하위 지자체별로 차이를 보였다. 이러한 공간적인 배출 밀도의 차이는 지역별 주요 배출원의 종류, 개수, 규모 등이 다르기 때문에 발생한

다. 그 예로, 국내에서 NO_x 배출 밀도는 도로 등 이동 오염원이 많은 대도시에서, SO_2 배출 밀도는 석탄 이용 산업과 화력 발전이 밀집된 지역에서 높게 나타난

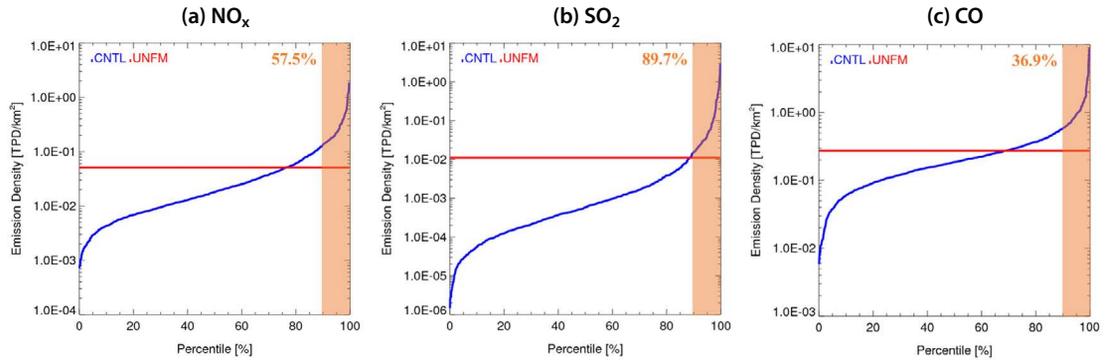


Fig. 2. The plots of sorted emissions density of (a) NO_x , (b) SO_2 , and (c) CO for CNTL and UNFM emissions in South Korea for March 2021. The blue and red lines are CNTL and UNFM emission density, respectively. The orange box highlights values above the 90th percentile, indicating the major emission areas within the top 10% of total emissions. The percentage at the top of each plot represents the share of total emissions contributed by these top 10% emission areas for each air pollutant.

다(Choi *et al.*, 2022).

평탄화 이전 격자별 배출 밀도의 평균값과 중앙값은 각각 NO_x 0.05, 0.02 TPD/ km^2 , SO_2 0.0108, 0.0006 TPD/ km^2 , CO 0.3, 0.2 TPD/ km^2 이었다. 격자별 배출 밀도의 평균값이 중앙값보다 높은 것은 특정 지역에 상대적으로 많은 배출량이 집중되어 있음을 의미한다. 물질별 상위 10%에 해당하는 지역 평균 배출 밀도는 NO_x 0.3 TPD/ km^2 , SO_2 0.1 TPD/ km^2 , CO 1.0 TPD/ km^2 로, 각각의 평균값 대비 NO_x 6배, SO_2 10배, CO 3배 높았다. 이처럼 특정 지역에 대해 배출량이 집중된 핫스팟(hotspot)의 경우 농도와 노출 가중으로 인해 건강에 악영향을 미칠 수 있다(그림 2).

배출 평탄화 시, 물질별 총량은 유지되지만 전국적으로 동일한 배출 밀도를 보인다. 기존에 가장 높은 배출 밀도를 보였던 권역을 중심으로 국내 배출량에 대한 평탄화 효과를 살펴보면, 수도권 NO_x 배출량은 965.8 TPD에서 570.2 TPD로 낮아졌고, 충청권 SO_2 배출량은 218.3 TPD에서 178.3 TPD로 감소하였다. CO 배출량은 수도권에서 3975.3 TPD에서 3053.4 TPD로 감소하였다. 반면, 기존에 낮은 배출량을 보였던 강원권에서는 배출 평탄화에 따라 NO_x , SO_2 , CO가 각각 282.8 TPD, 36.4 TPD, 1484.0 TPD 증가하였다. 이처럼 배출 평탄화 시, 기존에 배출량이 높던 지자체에서는 배출 밀도가 완화되었지만, 배출량이 낮

았던 지자체에서는 배출 밀도가 증가하여 국내 시도 간 배출 밀도의 편차는 사라진다(그림 1).

3.2 모사 수행 평가

관측농도와 CNTL 모사 농도를 비교하여 모사 재현성을 평가하였다(그림 3). NO_2 , SO_2 , CO에 대해 모사 수행 평가를 진행하였으며, 배출 평탄화에 따른 농도 변화를 살펴보기 위하여 추가적으로 UNFM 모사 농도도 함께 제시하였다.

모사 수행 평가 결과, 대상 기간 동안 NO_2 , SO_2 , CO의 평균 관측 농도와 모사 농도 간 상관계수는 각각 0.99, 0.71, 0.87로 산정되었다. NO_2 와 SO_2 의 Normalized Mean Bias (NMB)는 각각 8.0%, 29.0%으로 과대모사, CO는 -6.6%로 과소 모사되었다. Emery *et al.* (2017)에서 제시하는 O_3 기준을 적용하였을 때, 전반적으로 기준을 만족하였으나, SO_2 의 NMB가 기준을 초과하였다. 이는 SO_2 가 점오염원에서 배출되는 특성을 보이기 때문에 단층 배출량 변환 과정에서 지표에서의 배출량이 증가하여 기존 지표 농도보다 과대 산정되기 때문으로 보인다.

UNFM 모사 농도의 시간 변동성은 CNTL 모사와 유사하였으나, CNTL 모사 대비 UNFM 모사의 전국 평균 NO_2 , SO_2 , CO 농도는 각각 42.1%, 37.5%, 17.4% 감소하였다. 이는 배출 평탄화 시 관측 지점에서의

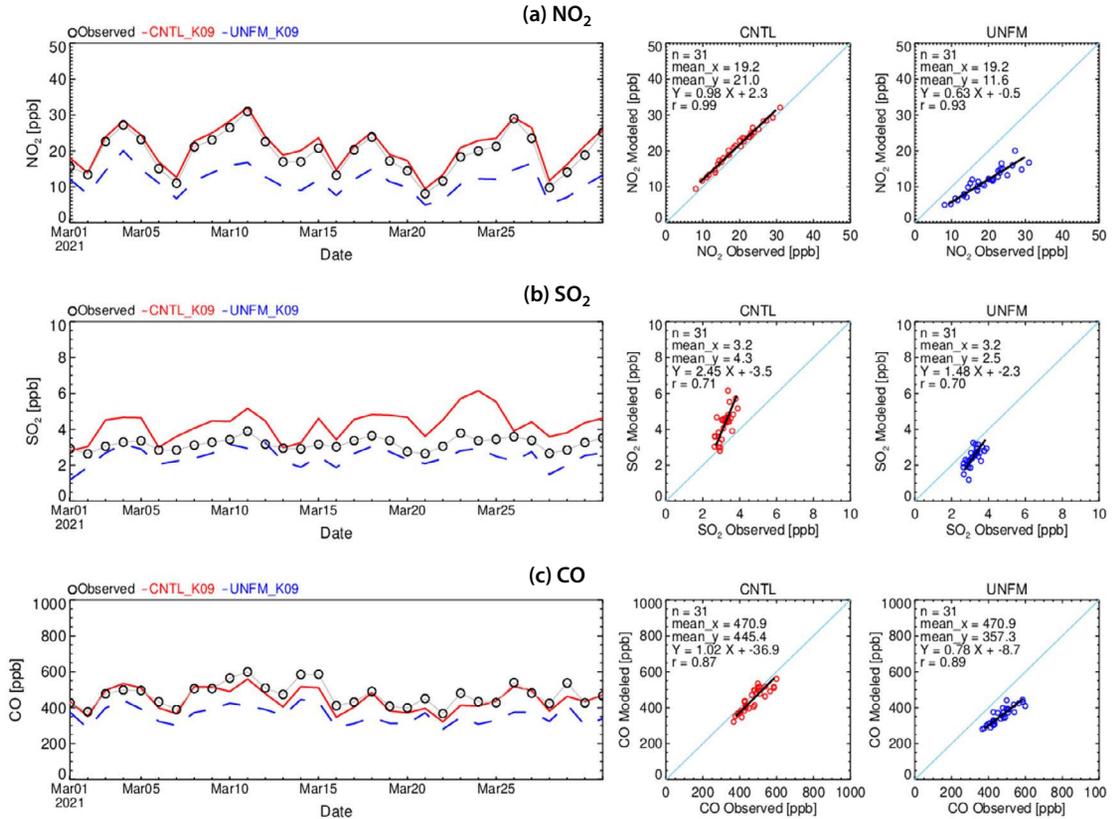


Fig. 3. Time series and scatter plots of daily mean concentrations of (a) NO_2 , (b) SO_2 , and (c) CO in South Korea for March 2021. Black open circles represent observed concentrations in time series. The red line in the time series and the red dots in the scatter plots represent the CNTL simulation. The blue dashed line in the time series and the blue dots in the scatter plots represent UNFM simulation.

이들 물질의 농도가 CNTL 모사에 비해 낮아짐을 의미한다. 또한, 대기오염측정망이 인구 밀집 지역을 중심으로 위치하므로, 배출 평탄화는 인구 노출을 개선할 수 있으며, 이에 대해서는 3.4절에서 설명하였다.

3.3 권역별 대기오염물질 농도 변화

앞서 설명한 바와 같이 CNTL 모사에서 주요 배출 지역을 중심으로 대기오염물질의 농도가 높았던 곳에서는 UNFM 모사에서 농도가 낮아졌다(그림 4). 그러나, 대상 기간 동안 국내 평균 CNTL 및 UNFM 모사 농도는 NO_2 의 경우 9.6 ppb와 9.9 ppb였으며, SO_2 는 2.2 ppb로 큰 차이가 없었다(그림 5). CO 농도는 337.6 ppb와 335.3 ppb로 두 모사에서 대상 물질별

전국 평균 농도 차이는 3% 이내였다. 이는 CNTL 모사에서 농도가 낮았던 지역의 경우 UNFM 모사에서 농도가 증가했기 때문이다.

이러한 농도 변화를 권역별로 살펴보면, CNTL 모사에서 NO_2 농도는 수도권에서 17 ppb로, SO_2 농도는 충청권에서 3.1 ppb로 가장 높았다. 이를 3.1절에 설명된 배출 밀도와 비교하면, 상대적으로 배출 밀도가 높은 권역에서 모사 농도 또한 높았다(Son *et al.*, 2022). CO 농도는 수도권과 충청권에서 428.2 ppb와 381.6 ppb로 높았으며, 영남권은 충청권과 배출 밀도가 유사했지만 314.8 ppb로 상대적으로 낮은 농도가 산정되었다. 이는 체류시간이 긴 CO의 특성상 국내 배출은 물론 국외 유입 영향을 함께 받기 때문이다

(Kim *et al.*, 2024a, 2024b; Park *et al.*, 2024).

배출량 평탄화 이후, 대상 물질별 모사 농도는 이전 대비 NO₂는 수도권에서 33.7%, SO₂는 충청권에서 19%, CO는 수도권에서 10.9% 낮아졌다(그림 4). 이처럼 CNTL 모사에서 고농도를 보이는 지역의 경우 UNFM 모사에서 농도가 감소한 반면, CNTL 모사에서 상대적으로 모사 농도가 낮았던 지역의 경우 UNFM 모사에서 배출량 증가로 인한 농도 증가가 확인되었다. 그 예로, 강원권은 CNTL 모사 대비 UNFM 모사에서 CO와 NO₂ 농도가 각각 11.9%, 42.5% 증가하였다. 다만, 그림 5에서 볼 수 있듯이 CNTL 모사에서 농도가 낮았던 지역의 경우(*i.e.*, 농도 하위 10% 격자), UNFM 모사에서 농도가 증가하기는 하나 대기환경기준을 여전히 만족하는 수준이었다.

그림 5에서 CNTL 모사에서 하위 농도 10%에 해당하는 격자들의 평균 농도와 전국 평균 농도 간의 비는 NO₂는 0.2, SO₂는 0.3, 그리고 CO는 0.7이었다. 반면, 상위 농도 10%에 해당하는 격자들에 대한 농도 비는 NO₂ 2.7, SO₂ 3.6, CO 1.5로 높아졌다. 그림 2에서 상위 10% 배출에 해당하는 격자에서 국내 전체 NO_x, SO₂, CO 배출량의 각각 57.5%, 89.7%, 36.9%를 차지하였으며, 배출 집중으로 인한 농도 부하가 특정 지역에 편중되는 것을 알 수 있다. 이렇게 배출량이 밀집된 hotspot 지역에서는 장단기 대기환경기준을 초과할 우려가 높다. 따라서, 이들 지역에 대한 배출 관리가 집중될 필요가 있다.

UNFM 모사에서 하위 농도 10%에 해당하는 격자들의 평균과 국내 평균 농도 간의 비는 NO₂ 0.3, SO₂ 0.3, CO 0.7로 CNTL 모사 결과와 유사하였다. 이에 반해, 상위 농도 10%에 해당하는 격자들에 대한 농도 비는 NO₂ 1.5, SO₂ 1.4, CO 1.2로 CNTL 모사 결과에 비해 낮아졌다. CNTL과 UNFM 모사에서 전국 평균 농도의 차이가 크지 않고 두 모사에서 하위 10% 격자의 평균 농도가 유사함을 고려할 때, CNTL 모사에서 고농도를 보이던 hotspot 격자들의 농도가 크게 감소했음을 알 수 있다.

배출 평탄화 전후의 모사 농도 범위를 비교하면, CNTL 모사에서 국내 격자별 NO₂ 농도는 0.9~47.3 ppb 사이였으나, UNFM 모사에서는 1.0~15.8 ppb 범위로 고농도가 크게 감소하였다(그림 5(a)). SO₂ 농도는 CNTL 모사에서 0.4~65.5 ppb, UNFM 모사에서는 0.4~3.4 ppb로 감소하여, 최대 농도가 CNTL 모사의 5% 수준이었다(그림 5(b)). SO₂의 배출 특성상 일부 지역에 집중된 배출을 보이는데(Kang and Kim, 2022), UNFM의 경우 전 격자에서 고르게 배출되면서, 해안가 등 환기가 잘되는 격자를 제외한 대부분의 격자에서 모사 농도가 유사해진 것으로 보인다. CO의 경우에도 CNTL 모사에서 223.7~866.4 ppb의 농도 범위를 보였지만, UNFM 모사에서 196.5~417.4 ppb로 고농도가 완화되었다(그림 5(c)). 다만, 대기 중 체류시간이 긴 CO의 경우 국내 배출에 의한 영향과 함께 장거리 이동에 의한 국외 유입의 영향이 높기 때문에(Kim *et al.*, 2024b), 국내 배출 평탄화에 따른 농도 변화가 NO₂와 SO₂에 비해 낮았다.

배출 평탄화에 의해 대부분의 격자에서 국내 평균에 가까운 농도를 보였지만, 상대적으로 모사 농도가 높은 격자들도 확인되었다. UNFM 모사에서 격자 간 모사 농도의 차이는 배출량에 의한 것 보다는, 지역별로 상이한 지형 및 기상 등의 요인에 의한 것으로 판단된다(Jeong *et al.*, 2024). 따라서, 그림 4에 제시된 UNFM 모사에서 상대적으로 고농도인 지역에 대해서는 향후 추가적인 배출 관리가 필요해 보인다.

그림 5에서 제시한 농도는 대상 기간인 2021년 3월에 대한 월평균 농도이기는 하나, CNTL 모사의 경우 상위 2.1%와 0.6%에 해당하는 격자들에서 NO₂와 SO₂ 모사 농도가 연평균 대기환경기준을 초과하였다. 이에 반해 UNFM 모사에서는 모든 격자에서 해당 대기환경기준을 만족하였다. 이러한 결과는 일부 고농도 격자에서 보이던 대기환경기준의 초과는 배출량이 hotspot 등 일부 지역에 편중된 결과로 이해되며, 이러한 문제점을 해결하기 위해서는, 지형 및 기상 특성을 고려하는 동시에, 대상 대기오염물질의 배출에 대한 적절한 지역 분배가 필요하다. 배출 평

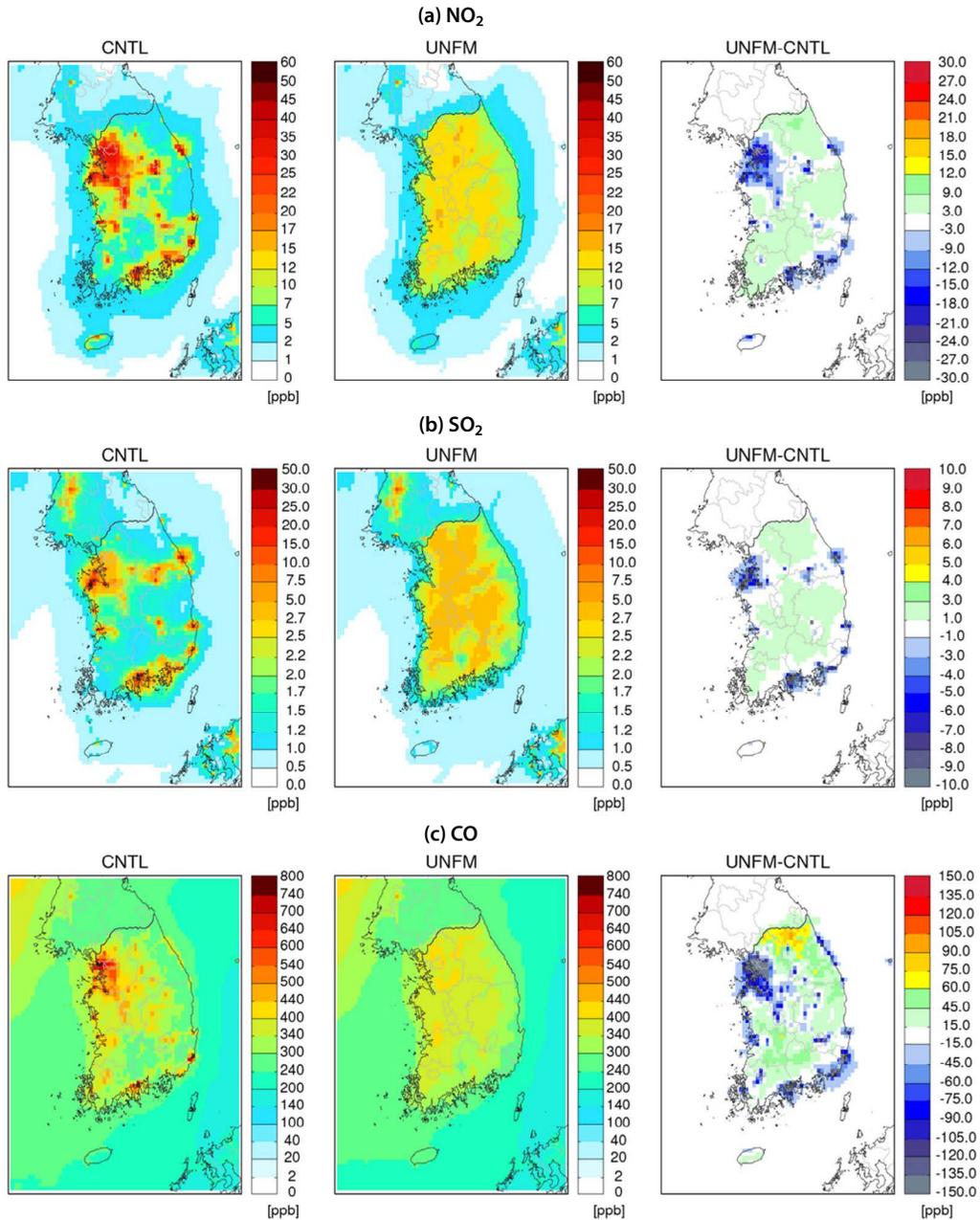


Fig. 4. The spatial distribution of monthly concentrations of (a) NO_2 , (b) SO_2 , (c) CO for CNTL (left), UNFM (middle), and the difference (right) in South Korea for March 2021.

탄화에 따른 대기오염물질의 농도 변화는 지역별 인구 분포에 따라서 인구 노출 변화로 이어질 수 있으며, 이에 따른 결과는 다음 절에서 논의하였다.

3.4 권역별 배출분포 변화에 따른 인구 노출 영향 분석

CNTL 모사의 경우 NO_2 와 CO의 PWC는 인구가

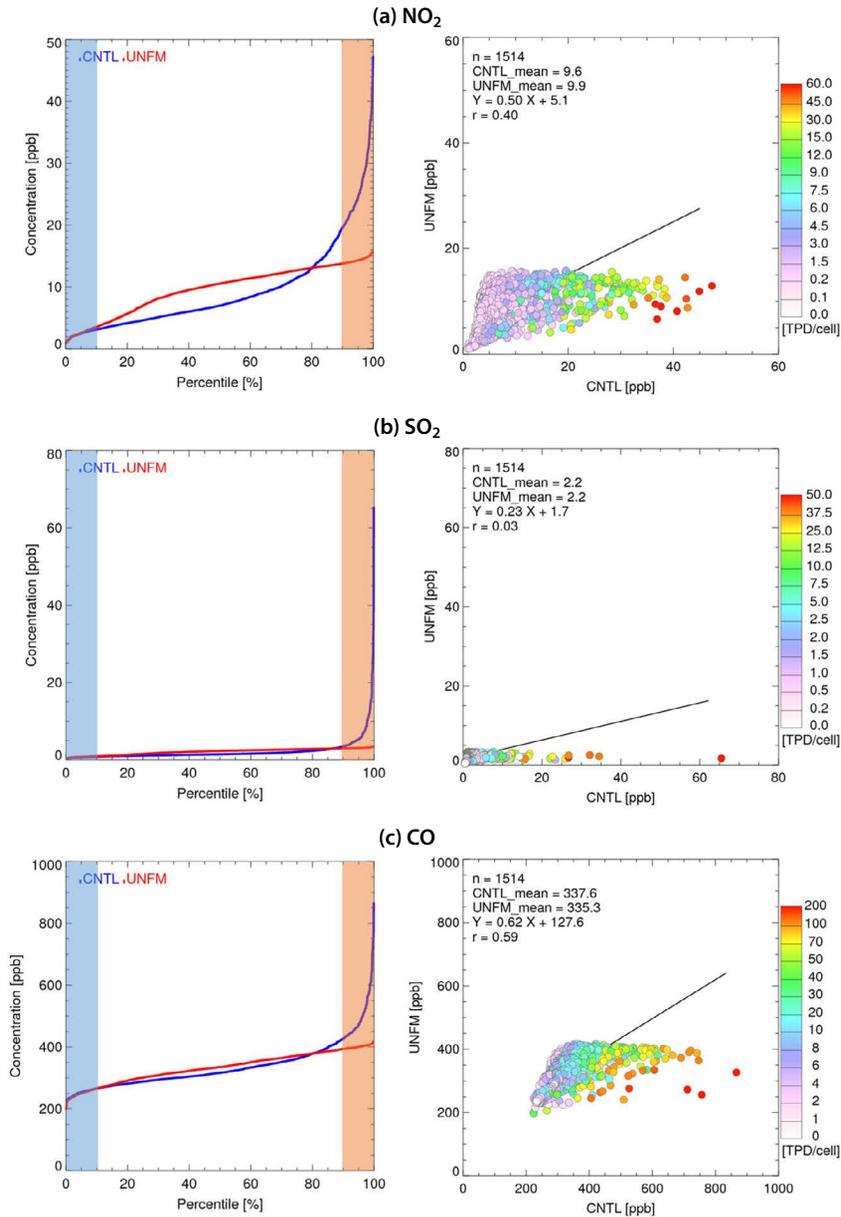


Fig. 5. Plots of Sorted monthly mean concentration for CNTL and UNFM simulations and Scatter plots of between CNTL and UNFM concentrations per grid in South Korea for (a) NO₂, (b) SO₂, (c) CO with colors indicating CNTL emission density. Blue and Orange box represent values above the 10th and 90th percentile, respectively. Separate line plots and scatter plots.

집중된 대도시를 중심으로 높았다(그림 6). 특히, 수도권권의 서울, 인천, 경기도는 대기오염물질의 농도가 높은 동시에(그림 4), 인구밀도 또한 각각 15,709명/km², 2,766명/km², 1,335명/km²으로 국내 평균(515

명/km²)에 비해 높기 때문에(표 S1 참조) PWC 또한 국내 평균 대비 각 1.3배, 1.2배 높았다(KOSTAT, 2021). 현재와 같이 대도시에 밀집된 배출과 인구는 대기오염물질에 대한 인체 노출의 취약성을 보인다.

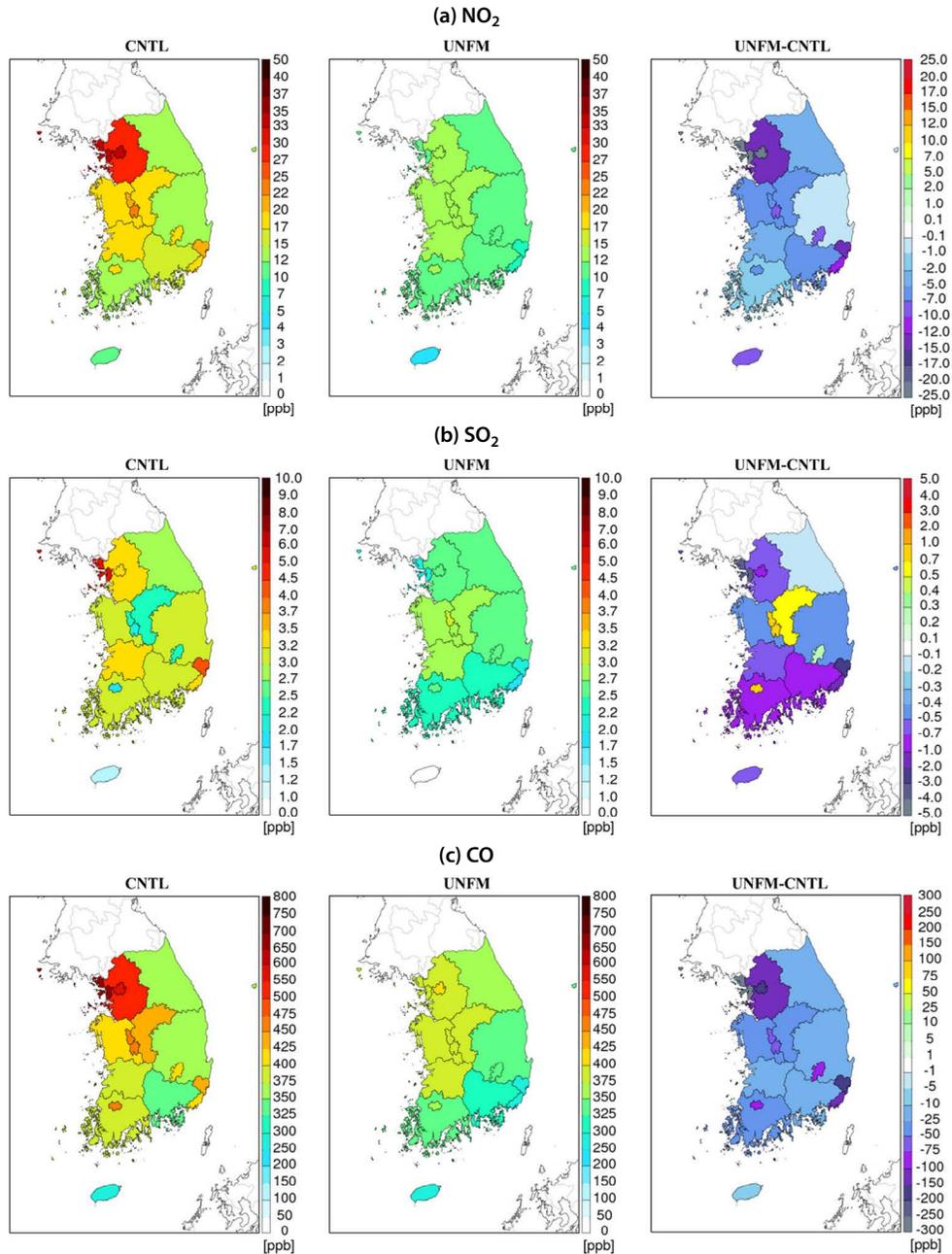


Fig. 6. The spatial distribution of monthly PWC of (a) NO_2 , (b) SO_2 , (c) CO for CNTL (left), UNFM (middle), and the difference (right) in South Korea for March 2021.

UNFM 모사에서 NO_2 및 CO PWC는 CNTL 모사 대비 수도권에서 60.3%와 23.0% 감소하였으며, 부산, 울산, 대구, 대전 등 대도시에서 감소하였다.

CNTL 모사에서 SO_2 농도는 주로 발전이나 석탄 이용 산업이 위치하는 지역에서 높았으며, 이 가운데 인구가 많은 인천과 울산에서 PWC가 높게 산정되었

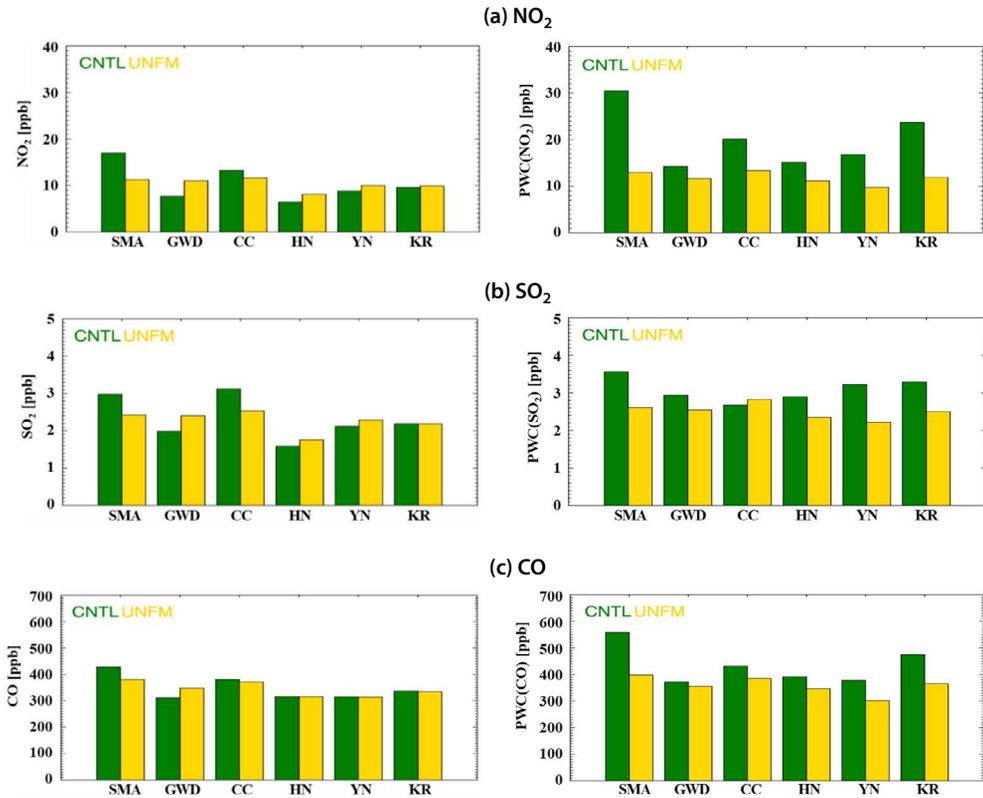


Fig. 7. Bar plots of monthly concentration (left) and PWC (right) of (a) NO₂, (b) SO₂, (c) CO each region for March 2021. Green and yellow boxes are CNTL and UNFM simulations, respectively.

다. UNFM 모사에서 SO₂ PWC는 CNTL 모사와 대비하여 인천과 울산에서 각각 58.9%, 54.8% 감소하였다. NO₂와 CO의 경우 UNFM 모사에서 17개 지자체 모두에서 PWC가 감소하였으나, SO₂의 경우 일부 시도에서는 CNTL 대비 UNFM 모사에서 PWC가 악화되었으며, 특히 충남을 제외한 충청 내륙 지역에서 증가를 보였다. 이는 주로 해안 지역에서 배출되는 SO₂가 배출 평탄화 후, 상대적으로 인구가 많은 내륙 지역으로 재분배되면서 발생한 것으로 보인다. 내륙 지역의 경우 해안에 비해 풍속이 낮아 상대적으로 환기에 불리한 조건이기 때문에 대기오염물질의 농도 및 PWC 증가 요인이 될 수 있다(Jeong *et al.*, 2024).

배출 평탄화에도 불구하고 UNFM 모사에서 수도권, 충청권, 그리고 전북 등에서는 타 시도에 비해 대

기오염물질의 모사 농도가 높았으며(그림 4), 그 결과는 PWC에도 영향을 미쳤다(그림 6). 이러한 결과는 동일한 배출 밀도 조건에서도 지역에 따라 대기오염물질의 농도는 지형과 기상 등의 영향을 받기 때문으로, 이들 지역에서는 단위 농도 저감을 위해 더 많은 배출량 감소가 필요함을 의미한다. 더욱이 이들 지역에는 많은 인구가 거주하는 점에서 배출량 변화에 따른 농도 변화의 올바른 이해와 PWC를 낮추기 위한 적극적인 대기질 대책 수립이 필요하다(Kang and Kim, 2022).

CNTL 모사에서 전국 평균 NO₂ PWC는 농도 대비 2.5배 높았으며, SO₂와 CO는 각각 2.2배, 1.4배 높았다(그림 7). 이는 국내에서 대상 대기오염물질이 인구가 밀집된 지역에서 많이 배출됨을 의미한다. 권역

별 PWC 역시 농도 대비 NO₂의 경우 1.5~2.3의 비를 보였으며, SO₂와 CO의 PWC와 농도 비도 각각 0.9~1.8, 1.1~1.3 사이에 변화하였다. 수도권의 PWC는 농도 대비 NO₂는 1.8배, CO는 1.3배 높았는데, 이는 해당 권역 내에서도 인구가 밀집된 곳에서 NO₂와 CO의 배출 및 농도가 더 높다는 것을 의미한다(그림 7(a)와 (c)). CNTL 모사에서 SO₂ 농도는 충청권에서 3.1 ppb로 가장 높았으나, PWC는 수도권에서 3.6 ppb로 가장 높았고, 충청권에서는 2.7 ppb로 오히려 타 권역에 비해 낮았다(그림 7(b)). 이는 수도권의 경우 인구가 밀집된 곳에서 SO₂ 농도가 높은 반면, 충청권에서는 고농도 hotspot과 인구 밀집 지역이 분리되어 있음을 의미한다.

배출을 평탄화한 UNFM 모사에서 권역별 농도와 PWC 간 차이는 CNTL 모사에 비해 감소하였다. UNFM 모사에서 전국 평균 농도 대비 PWC는 NO₂ 1.2배, SO₂와 CO는 1.1배 높았다. 이러한 결과에서 CNTL 모사 대비 UNFM 모사의 전국 평균 PWC는 NO₂의 경우 50% 감소하였고, SO₂와 CO는 24%, 23% 감소하였다. CNTL 대비 UNFM 모사에서 다른 물질에 비해 NO₂의 PWC 감소가 두드러졌으며, 권역별로도 수도권에서 58%, 그리고 영남권과 충청권에서는 각각 42%, 34% 감소하였다. SO₂ PWC는 CNTL 모사와 비교하여 UNFM 모사에서 충청권을 제외하면 모든 권역에서 감소하였다.

강원권, 호남권, 영남권에서 대상 물질의 농도는 CNTL 모사와 비교하여 UNFM 모사에서 유사하거나 높았으나, PWC는 CNTL 모사 대비 UNFM 모사에서 세 권역 평균 NO₂ 30%, SO₂ 20%, CO 10% 낮았다. 이러한 결과는 상대적으로 배출량이 낮은 권역에서도 대기오염물질은 주로 인구가 밀집된 지역에서 배출됨을 의미하며, 이들 권역에서도 배출 관리를 통해 인구 노출을 최소화할 수 있음을 의미한다. 특히, 대기관리권역 제도 수립 시 권역 내 배출 총량 규제와 함께, 인체 노출을 최소화할 수 있는 대기오염물질의 배출 설계가 중요해 보인다.

4. 결 론

본 연구에서는 관측 농도를 재현할 수 있는 하향식 배출량을 이용하여 국내 권역별 NO₂, SO₂, CO 농도와 인구 가중 농도(PWC)를 대기질 모사를 통해 비교하였다. 2021년 3월을 대상으로 현재 배출 조건에서 국내 평균 NO₂, SO₂, CO의 PWC는 각각의 농도 대비 2.5배, 1.5배, 1.4배 더 높게 나타났다. 주요 권역별로 살펴보면, NO₂ 농도는 수도권에 비해 1.3배 높았고, PWC도 1.5배 높게 산정되었다. 또한, SO₂ 농도는 충청권에서 3.1 ppb로 5개 권역 중 가장 높았으나, PWC는 수도권에서 3.6 ppb로 오히려 더 높았다. 이러한 결과는 최근 대기오염물질의 농도 감소 추세에도 불구하고, 인구 밀집 지역에서 여전히 높은 수준의 배출이 이루어지고 있음을 의미한다. 특히, 배출원이 인구 밀집 지역과 인접한 경우 인체 노출 측면에서 불리하게 작용할 수 있다는 점에서, 대도시 등 인구 밀집 지역에서 국민 건강 보호를 위해 보다 적극적인 배출 저감 노력이 필요해 보인다.

국내에서 대기오염물질의 배출 밀도가 균일하다고 가정할 경우, 모사된 국내 평균 농도는 기존 결과와 유사했으나, PWC는 NO₂의 경우 50% 감소하였고, SO₂와 CO는 각각 24%, 23% 감소하였다. 배출 평탄화로 인해 농도 ‘핫스팟’이 제거되었으며, 일부 지역에서는 농도가 증가했으나, 여전히 대기환경기준 이하로 유지되었다. 특히, 다른 권역에 비해 수도권과 같이 배출량이 많은 권역뿐만 아니라, 강원권과 같이 배출량이 낮은 권역에서도 배출 재분배에 따라 PWC가 낮아졌다. 따라서, 권역 내 배출 총량 규제와는 별도로, 인구 분포를 고려한 배출 저감 전략을 수립하여 실질적으로 인체 노출을 줄이는 방안을 마련하는 것이 중요해 보인다.

배출 평탄화 모사에서 서해안 일부 시도는 다른 시도에 비해 상대적으로 높은 농도가 모사되었다. 이는 동일한 규모의 배출량이라도 해당 시도에서는 고농도가 발생할 수 있음을 시사하며, 단위 농도를 개선하기 위해서는 더 많은 배출량 감축이 필요함을 의미

한다. 따라서 일관된 배출 총량을 설정하기보다는, 기상과 지형을 고려한 대기 환기 용량을 파악하고, 이를 기반으로 지역별 대기질 관리 계획 수립이 필요해 보인다. 본 연구에서는 지역별 배출량과 배출 밀도의 공간 분포에 따른 영향을 1차 대기오염물질을 중심으로 분석하였다. 최근 국내에서 문제가 되고 있는 초미세먼지와 오존 등 2차 대기오염물질의 경우, 1차 대기오염물질과는 달리 생성은 전구물질의 배출과 농도 조건에 따라 달라진다. 따라서, 향후 연구에서는 지역별 전구물질의 공간적 배출 분포에 따른 2차 대기오염물질의 농도 변화를 분석할 예정이다. 이를 통해 대상 물질의 지역별 맞춤형 대기질 관리를 통한 농도 개선은 물론, 인체 노출을 줄일 수 있는 방안을 함께 모색할 계획이다.

감사의 글

본 연구는 국가미세먼지정보센터의 지원을 받아 수행되었습니다.

References

- Bae, C., Kim, B.-U., Kim, H.C., Yoo, C., Kim, S. (2020) Long-range transport influence on key chemical components of PM_{2.5} in the Seoul Metropolitan Area, South Korea, during the years 2012-2016, *Atmosphere*, 11, 48. <https://doi.org/10.3390/atmos11010048>
- Bae, M., Kim, S., Kim, S. (2022) Quantitative Evaluation on the Drivers of PM_{2.5} Concentration Change in South Korea during the 1st - 3rd Seasonal PM_{2.5} Management Periods, *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment*, 38, 610-623. <https://doi.org/10.5572/KOSAE.2022.38.4.610>
- Byun, D., Schere, K.L. (2006) Review of the Governing Equations, Computational Algorithms, and Other Components of the Models-3 Community Multiscale Air Quality (CMAQ) Modeling System, *Applied Mechanics Reviews*, 59, 51-77. <https://doi.org/10.1115/1.2128636>
- Choi, S., Cho, H., Hong, Y., Jo, H., Park, M., Lee, H., Choi, Y., Shin, H., Lee, D., Shin, E., Baek, W., Park, S., Kim, E., Kim, H., Song, S., Park, Y., Kim, J., Baek, J., Kim, J., Yoo, C. (2022) Analysis of the National Air Pollutant Emissions Inventory (CAPSS 2018) Data and Assessment of Emissions Based on Air Quality Modeling in the Republic of Korea, *Asian Journal of Atmospheric Environment*, 16, 90-120. <https://doi.org/10.5572/ajae.2022.084>
- 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, 582-598. <https://doi.org/10.1080/10962247.2016.1265027>
- 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>
- Jeong, S., Kim, E., Kang, Y.-H., Kim, S. (2023) Top-down Emissions of CO, SO₂, NO_x, PM_{2.5}, and PM₁₀ in China and Korea Based on Ground Observations during 2020-2023, proceeding of the 66th meeting of KOSAE, 134.
- Jeong, S., Kang, Y.-H., Kim, E., Kim, S. (2024) Role of air stagnation in determining daily average PM_{2.5} concentrations in areas with significant impact of long-range transport, *Atmospheric Pollution Research*, 15, 102-147. <https://doi.org/10.1016/j.apr.2024.102147>
- Kang, Y.-H., Kim, S. (2022) Estimating Oxidation Rates of NO_x and SO₂ Released from Domestic Emission Sources in South Korea, *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment*, 38, 716-733. <https://doi.org/10.5572/KOSAE.2022.38.5.716>
- Kim, E., Kim, B.U., Kim, H.C., Liu, Y., Kang, Y.H., Jacob, D.J., Kim, Y.P., Woo, J.H., Kim, J., Wang, S., Yoo, C., Bae, C., Kim, Y., Kim, S. (2024a) North Korean CO emissions reconstruction using DMZ ground observations, TROPOMI space-borne data, and the CMAQ air quality model, *Science of The Total Environment*, 171059. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2024.171059>
- Kim, E., Kim, H.C., Kim, B.-U., Woo, J.-H., Liu, Y., Kim, S. (2024b) Development of surface observation-based two-step emissions adjustment and its application on CO, NO_x, and SO₂ emissions in China and South Korea, *Science of The Total Environment*, 907, 167818. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.167818>

- Korea Ministry of Environment (KMOE) (2020) https://www.me.go.kr/home/web/policy_data/read.do?menuId=10262&seq=7534 (accessed on Sep. 01, 2024).
- Lee, S., Lee, S.-J., Kang, J.-H., Jang, E.-S. (2021) Spatial and Temporal Variations in Atmospheric Ventilation Index Coupled with Particulate Matter Concentration in South Korea, *Sustainability*, 13, 8954. <https://doi.org/10.3390/su13168954>
- National Air Emission Inventory and Research Center (NAIR) (2023) National air pollutants emission in 2021, (in Korean). <https://air.go.kr/article/view.do?boardId=7&articleId=390&boardId=7&menuId=48¤tPageNo=1>
- National Centers for Environmental Prediction (NCEP) (2000) 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.
- National Institute of Environmental Research (NIER) (2023) Annual report of air quality in Korea 2022, (in Korean). https://www.airkorea.or.kr/web/detailViewDown?pMENU_NO=125
- Park, J., Kim, E., Kang, Y.-H., Kim, S. (2024) Assessment of Provincial Air Quality based on Air Quality Index during 2016~2022, *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment*, 40(2), 225-241. <https://doi.org/10.5572/kosae.2024.40.2.225>
- Seinfeld, J.H., Pandis, S.N. (2016) *Atmospheric Chemistry and Physics: From Air Pollution to Climate Change*. John Wiley & Sons.
- Simon, H., Bhawe, 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. (2008) A time-split nonhydrostatic atmospheric model for weather research and forecasting applications, *Journal of Computational Physics*, 227, 3465-3485. <https://doi.org/10.1016/j.jcp.2007.01.037>
- Son, K., Kim, E., Bae, M., You, S., Kang, Y.-H., Kim, H.C., Kim, B.-U., Kim, S. (2020) Evaluations on PM_{2.5} Concentrations and the Population Exposure Levels for Local Authorities in South Korea during 2015-2017, *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment*, 36, 806-819. <https://doi.org/10.5572/KOSAE.2020.36.6.806>
- 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>
- Statistics Korea (KOSTAT) (2021) Korean Statistical Information Service, <http://kosis.kr> (accessed Sep. 01, 2024).

Authors Information

- 박준홍 (아주대학교 환경공학과 석사과정)
(wmsgmd1116@ajou.ac.kr)
- 김은혜 (아주대학교 환경연구소 연구교수,
군산대학교 환경공학과 조교수)
(ekim@kunsan.ac.kr)
- 강윤희 (아주대학교 환경연구소 연구교수)
(ykang@ajou.ac.kr)
- 김순태 (아주대학교 환경안전공학과 교수)
(soontaekim@ajou.ac.kr)

Supplementary Materials

Table S1. Population and population density by province and region in South Korea (unit: thousand persons; person/km²).

Province	Population	Population density	Region	Population	Population density
Seoul	9,508	15,709			
Incheon	2,950	2,766	SMA	26,069	2,196
Gyeonggi-do	13,611	1,335			
Gangwon-do	1,520	90	GWD	1,520	90
Daejeon	1,482	2,747	CC	5,644	338
Sejong	361	777			
Chungcheongbuk-do	1,626	220			
Chungcheongnam-do	2,175	264			
Gwangju	1,476	2,945	HN	5,725	177
Jellabuk-do	1,792	222			
Jellanam-do	1,785	144			
Jeju	672	363			
Busan	3,334	4,328	YN	12,811	562
Daegu	2,396	2,711			
Ulsan	1,125	1,059			
Gyeongsangbuk-do	2,641	139			
Gyeongsangnam-do	3,315	314			
South Korea	51,770	515	South Korea	51,770	515

Sources: KOSTAT (2021)