

논문

2019~2022년 배출 저감에 따른 PM_{2.5} 농도 개선과 지역 간 상호 영향 분석: 표식자-민감도 기법 연계 적용

Assessing PM_{2.5} Improvements and Inter-Regional Interactions under 2019~2022 Emission Controls Using a Tagging-Sensitivity Integrative Approach

정성은, 박준홍, 강윤희¹⁾, 김은혜²⁾, 양혜지³⁾, 박성규³⁾, 김순태^{4),*}

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

³⁾국가미세먼지정보센터 정책지원팀, ⁴⁾아주대학교 환경안전공학과

Seongeun Jeong, Junheung Park, Yoon-Hee Kang¹⁾, Eunhye Kim²⁾, Hye-Ji Yang³⁾,
Sung-Kyu Park³⁾, Soontae Kim^{4),*}

Department of Environmental Engineering, Ajou University, Suwon, Republic of Korea

¹⁾Environmental Research Institute, Ajou University, Suwon, Republic of Korea

²⁾Department of Environmental Engineering, Kunsan National University, Gunsan, Republic of Korea

³⁾Policy Support Team, National Air Emission Inventory and Research Center, Cheongju, Republic of Korea

⁴⁾Department of Environmental and Safety Engineering, Ajou University, Suwon, Republic of Korea

접수일 2026년 3월 30일

수정일 2026년 5월 1일

채택일 2026년 5월 13일

Received 30 March 2026

Revised 1 May 2026

Accepted 13 May 2026

*Corresponding author

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

E-mail : soontae.kim@ajou.ac.kr

Abstract This study quantified the impacts of domestic emission reductions on PM_{2.5} concentrations and population exposure across South Korea during 2019~2022, considering inter-regional interactions and precursor-specific characteristics. Using a hybrid modeling framework combining the Brute Force Method and Particulate Source Apportionment Technology within the CAMx model under consistent meteorological conditions, we estimated changes in concentration and population-weighted concentration (PWC) under policy-driven emission scenarios. Domestic emission reductions decreased the national mean PM_{2.5} concentration by 1.6 µg/m³, accounting for approximately 28% of the observed reduction, and the PWC by 1.9 µg/m³. In most regions, more than half of the concentration decrease was attributable to emission reductions in external regions, highlighting the importance of inter-regional transport. Component analysis showed that secondary inorganic aerosols dominated the PM_{2.5} decrease, with nitrate as the largest contributor despite larger SO₂ reduction rates. This reflects the combined effects of precursor emission magnitude, spatial distribution, and atmospheric transport, rather than emission reduction rates alone. The national PWC also decreased and was consistently larger than the mean concentration reduction across regions, indicating that exposure reduction was amplified by spatial overlap between emission reductions and population distribution. While inter-regional transport dominated the concentration response, local emission reductions were more effective in reducing exposure. Furthermore, the transboundary impacts on both concentration and PWC followed the order of nitrate > sulfate > primary PM_{2.5}, reflecting differences in secondary formation and transport characteristics. These results demonstrate that concentration reduction and exposure mitigation are governed by different spatial processes. Effective air quality management therefore requires an integrated strategy that combines inter-regional cooperative emission control for concentration improvement with locally targeted measures for exposure reduction.

Key words: PM_{2.5}, Emissions reduction, Policy effects, Inter-regional impacts, PSAT, BFM, PWC

1. 서론

국내에서 관측되는 초미세먼지(Particulate matter with an aerodynamic diameter of 2.5 μm or less; PM_{2.5}) 농도는 2016년 이후 전반적인 감소 추세를 보이고 있다(Kim *et al.*, 2025; Kang *et al.*, 2024). 이러한 농도 감소에는 중국을 포함한 국외 지역의 대기질 개선 정책, COVID-19로 인한 사회·경제 활동 변화, 기상 조건의 변동 등 다양한 요인이 복합적으로 작용한 것으로 보고되고 있다(Kang *et al.*, 2024, 2020; Kim *et al.*, 2024; Bae *et al.*, 2021b). 국내 요인 가운데에는 단계적으로 시행된 대기질 개선 대책에 따른 배출 저감은 PM_{2.5} 농도 감소를 설명하는 핵심 요인 중 하나로 여겨지고 있으나(NAIR, 2024a), 이에 대한 정량적 평가는 여전히 제한적인 수준이다.

환경부는 2016년 「제2차 대기환경개선 종합계획(2016~2025)」을 수립하였으며, 2019년에는 「제1차 미세먼지 관리 종합계획(2020~2024)」 및 「권역별 대기환경관리 기본계획(2020~2024)」을 마련하여 부문별 배출 감축 목표를 설정하였다(MOE, 2024, 2019). 특히, 2019년부터 매년 12월~이듬해 3월을 대상으로 한 미세먼지 계절관리제를 도입하여 고농도 발생 기간의 배출 저감을 강화하였다. 이러한 정책과 사회·경제적 요인이 복합적으로 작용한 결과, 국가 대기오염물질 배출목록(Clean Air Policy Support System, CAPSS)에 따르면 NO_x, SO₂, NH₃, Primary PM_{2.5} 배출량은 2019년 이후 감소 추세를 보인다(NAIR, 2024b).

배출 저감 정책이 실제로 PM_{2.5} 농도 개선으로 얼마나 이어졌는지를 정량적으로 추정하는 것은 정책 실효성 평가 및 건강 영향 분석 측면에서 매우 중요하다. 이를 위해 기존 연구에서는 3차원 광화학 대기질 모델이 널리 활용되어 왔으며(Kang *et al.*, 2024, 2020; Kim *et al.*, 2024; Kim *et al.*, 2018), PM_{2.5} 농도 변화의 원인을 기상 변화, 배출 변화, 국내외 영향 등으로 구분하여 분석한 바 있다(Kang *et al.*, 2024, 2020;

Bae *et al.*, 2023, 2022b, 2021b). 그러나 최근 시행된 국내 배출 저감 정책을 대상으로 한 정량적 효과 분석은 여전히 제한적이다.

특히 국내 PM_{2.5} 농도는 자체 배출뿐 아니라 인접 지역의 배출 영향을 동시에 받는 것으로 알려져 있다(Kim *et al.*, 2022, 2021b; Bae *et al.*, 2021a; Kang *et al.*, 2021a, b; Kim *et al.*, 2021a). 이러한 특성은 특정 지역의 배출 저감 효과가 해당 지역에 국한되지 않고, 주변 지역의 PM_{2.5} 농도 변화에도 영향을 미칠 수 있음을 의미한다. 따라서 대기질 개선 정책의 효과를 평가할 때에는 자체 배출 저감 효과와 함께 타 지역 배출 저감에 따른 영향을 구분하여 분석할 필요가 있다. 또한, 2차 생성물질인 PM_{2.5}의 특성상 전구물질 변화에 따른 비선형 반응이 존재하므로, 이를 고려한 분석 방법이 요구된다.

한편, 각 지자체는 PM_{2.5} 농도 감소뿐 아니라, 배출 저감 시 인체 노출 개선에 보다 효과적인 전구물질을 우선적으로 고려할 필요가 있다. 오염원 위치와 인구 분포의 공간적 불일치, 그리고 기상 조건에 대한 PM_{2.5} 주요 성분의 생성·수송·제거 과정의 차별적 민감도는 지역별 인구가중농도(Population-Weighted Concentration, PWC)의 변화 양상을 다르게 유도할 수 있다(Son *et al.*, 2020). 따라서 농도 저감과 인체 노출 저감에 효과적인 전구물질은 지역별로 상이할 수 있으며, 이를 사전에 정량적으로 평가하고 정책 수립에 반영하는 것이 중요하다.

본 연구에서는 2019년부터 2022년까지 시행된 국내 대기질 개선 대책을 대상으로, 정책 시행에 따른 PM_{2.5} 농도 개선 효과를 평가하였다. 아울러, 지역별 배출 저감이 자체 지역 및 주변 지역의 농도와 인구 노출 변화에 미치는 영향을 정량적으로 분석할 수 있는 방법론을 제시하였다. 이러한 분석을 통해 향후 국내 PM_{2.5} 관리 정책에서는 자체 배출 저감과 지역 간 협력을 통합적으로 고려하는 접근이 대기질 개선뿐 아니라 국민 건강 보호 측면에서도 중요함을 확인하였다.

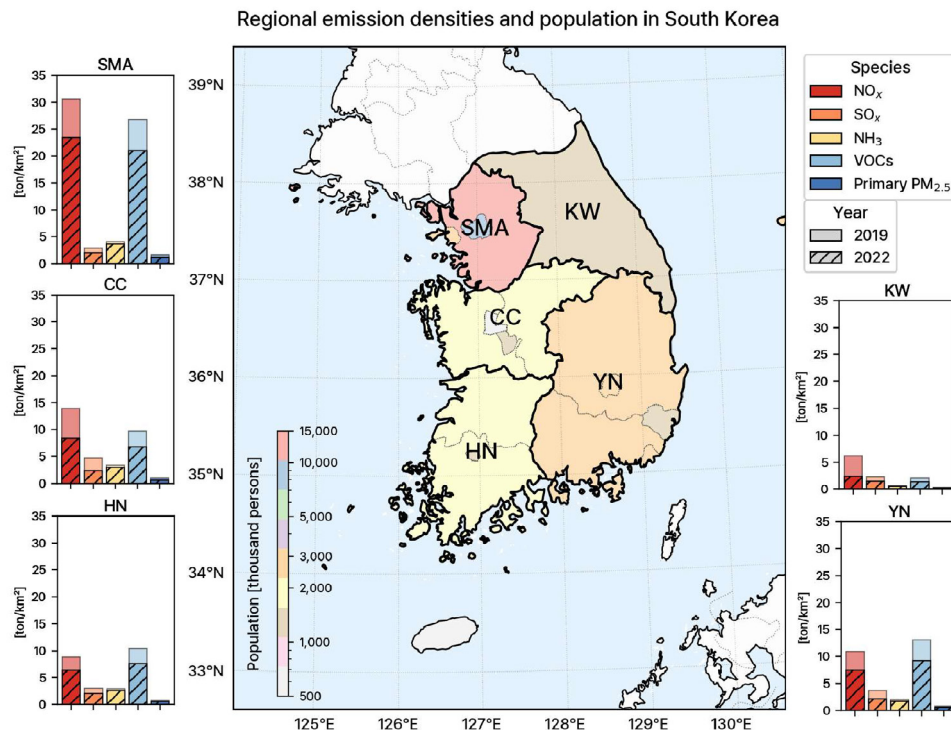


Fig. 1. Model domain with a 9-km horizontal grid resolution over South Korea, showing provincial (si-do)-level population in 2022. The left and right panels present regional emission densities (tons/km²) of NO_x, SO_x, NH₃, VOCs and primary PM_{2.5}, with solid and hatched bars indicating 2019 and 2022, respectively. The numerical values corresponding to the bar graphs are provided in Fig. S1. Each region is defined as both a source and a receptor. Region acronyms are as follows; SMA: Seoul Metropolitan Area, KW: Kangwon, CC: Chungcheong, HN: Honam, YN: Yeongnam.

2. 연구 방법

2.1 대상 기간 및 지역

본 연구는 2019년부터 2022년까지 시행된 국내 대기질 개선 대책의 누적 효과를 정량적으로 평가하는 것을 목적으로 한다. 기준연도인 2019년은 주요 배출 저감 정책이 본격적으로 반영되기 이전 시점이며, 분석 대상 기간은 「제1차 미세먼지 관리 종합계획 (2020~2024)」과 미세먼지 계절관리제 등 주요 정책이 누적적으로 적용된 시기인 2022년에 해당한다.

공간적으로는 국내를 수도권, 강원권, 충청권, 호남권, 영남권의 5개 권역으로 구분하였다(그림 1). 각 권역은 배출 지역(source region)과 수용 지역(receptor region)으로 동시에 정의되며, 이러한 설정을 통해 특정 지역의 배출 저감이 자체 및 타 지역의 PM_{2.5}

농도와 인구 노출에 미치는 영향을 정량적으로 평가할 수 있다.

또한 정책 효과를 인체 노출 관점에서 평가하기 위해 PM_{2.5} 농도 변화뿐 아니라 인구 분포를 고려한 인구가중농도(PWC)의 변화를 함께 분석하였다. 인구 분포 자료는 통계청 자료를 기반으로 구축하였다. 이와 같은 설정을 통해 정책에 따른 배출 변화가 지역 간 농도 및 인구 노출에 미치는 영향을 분리하여 평가하였다.

2.2 배출 시나리오 및 특성

본 연구에서는 정책 시행 이전의 기준 배출 조건(BASE)과 2019~2022년 동안 정책 시행에 따른 누적된 배출 저감량을 반영한 배출 조건(POLICY)의 두 가지 시나리오를 구성하였다. 이를 위해 2019년 기준

배출량과 환경부 국가미세먼지정보센터에서 제공한 정책 반영 배출목록을 활용하였다(NAIR, 2024b). 정책 반영 배출목록은 2019년 기준 배출량을 바탕으로, 2022년까지 물질별·부문별로 누적 배출 저감 효과를 반영하여 작성된 자료이다. 본 연구에서는 해당 자료를 POLICY 시나리오로 활용하였으며, 2019년 기준 배출량을 적용한 BASE 시나리오와의 비교를 통해 정책효과를 정량화하였다. 정책효과를 기상 조건의 영향과 분리하여 평가하기 위해 모든 시나리오에 2022년의 동일한 기상 조건을 적용하였다. 따라서 본 연구에서 제시한 정책효과는 2022년의 고정된 기상 조건 하에서 배출 변화에 의해 유도된 PM_{2.5} 농도 변화를 의미한다. 이를 통해 기상 조건의 차이를 배제한 상태에서 배출 변화에 따른 농도 반응을 독립적으로 해석하였다. 또한 실제 2019~2022년 관측 농도 변화에는 국내 배출 저감뿐 아니라 국외 유입 변화와 기상 변동 등이 함께 반영될 수 있으므로, 본 연구에서는 BASE와 POLICY 시나리오 간 농도 차이(ΔC)를 기준으로 국내 배출 저감에 따른 상대적 정책효과를 해석하였다.

POLICY 시나리오에는 국가미세먼지정보센터에서 공식적으로 산정한 정책 감축량을 반영하였다(NAIR, 2024b). 주요 감축 대상 물질은 NO_x, SO_x, NH₃, VOCs 및 Primary PM_{2.5}이며, 2019~2022년 대기질 개선 대책 시행에 따라 기준 배출량 대비 각각 409,871 ton (29.3%), 143,054 ton (39.4%), 32,114 ton (7.6%), 313,578 ton (12.1%), 28,750 ton (16.7%)이 감축되었다(표 S1). 연도별·물질별·부문별 세부 산정 방법은 NAIR (2024c)에 제시되어 있으며, 본 연구에서 적용한 감축량은 2019년부터 2022년까지 전체 배출 변화량 가운데 정책 시행에 의한 것으로 추정된 배출 변화량만을 의미한다. POLICY 시나리오에서는 연중 시행되는 상시대책과 계절관리제 기간에 시행되는 비상저감조치 등에 따른 정책 저감량을 개별적으로 구분하기 어렵다. 이에 따라 본 연구에서는 정책효과를 연평균 PM_{2.5} 농도를 기준으로 분석하였다.

본 연구에서 적용된 배출 저감량은 2019년 CAPSS

배출목록을 기반으로 산정되며, 물질별·부문별 배출 특성에 따른 지역별 차이가 반영된다. 예를 들어, 산업 및 발전 부문 비중이 높은 지역에서는 SO₂ 배출 저감이 상대적으로 크게 나타나며, 교통 부문 비중이 높은 수도권에서는 NO_x 배출 저감이 상대적으로 크게 반영된다. 다만 Ocean 부문은 모델 입력자료에는 포함하였으나, 본 연구에서 정의한 국내 5개 권역에는 포함되지 않으므로 분석 대상에서는 제외하였다.

또한 발전소 및 대형 산업시설과 같은 주요 점오염원의 경우 굴뚝자동측정기기(Stack Emission Management System, SEMS) 자료를 기반으로 산정된 배출량이 반영되었다(NAIR, 2026). 따라서 2019년 대비 2022년 배출량 변화에는 정책에 따른 설비 개선 및 연료 전환뿐 아니라 실측 기반 배출 변화가 함께 고려되었다. 특히 발전 부문에서는 탈황·탈질 설비 강화와 연료 전환 등의 복합적인 영향으로 SO₂ 및 NO_x 배출 저감이 크게 나타나며, 점오염원 비중이 높은 지역일수록 이러한 저감 효과가 상대적으로 크게 반영된다.

2.3 대기질 모사 설정

본 연구에서는 3차원 광화학 대기질 모델을 이용하여 배출 저감 정책에 따른 PM_{2.5} 농도 변화와 지역 간 상호영향을 분석하였다. 기상장은 National Centers for Environmental Prediction (NCEP)의 Final (FNL) Operational Global Analysis 1° 자료를 초기장으로 활용하여 Weather Research and Forecasting (WRF; version 3.9.1) 모델을 통해 생성하였다(Skamarock *et al.*, 2008). PM_{2.5}에 대한 정책효과를 기상 조건의 차이에 따른 변동성과 분리하여 평가하기 위해, 모든 배출 시나리오에 2022년도의 동일한 기상 입력 자료를 사용하였다.

2.2절에서 제시한 BASE 및 POLICY 시나리오에 해당하는 인위적 배출량은 Sparse Matrix Operator Kernel Emissions (SMOKE; version 4.8)을 통해 대기질 모델 입력자료 형태로 전처리하였다. 자연적 배출량은 Model of Emissions of Gases and Aerosols from

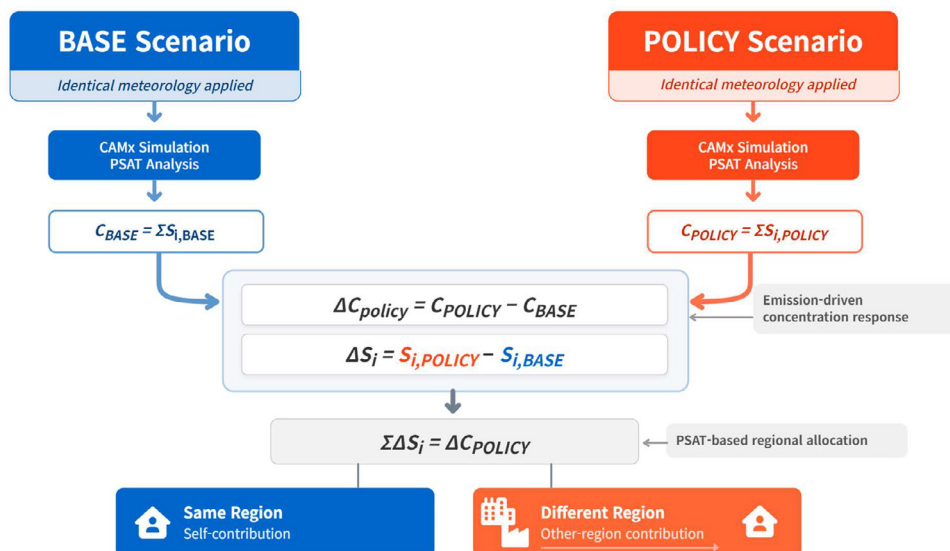


Fig. 2. Conceptual diagram of the approach used in this study to quantify changes in regional contributions associated with policy-driven PM_{2.5} concentration changes.

Nature (MEGAN)을 이용하여 산정하였다. 대기질 모사는 Comprehensive Air Quality Model with eXtensions (CAMx; version 7.1)를 이용하여 수행하였다. 모사 영역은 국내를 중심으로 한 9 km 수평 해상도의 격자로 설정하였으며(그림 1), 경계조건은 중국 지표 관측자료 기반 하향식 배출량을 반영한 상위 도메인 모사 결과에서 추출하여 적용하였다. 상위 도메인에 대한 자세한 모사 정보는(Kim *et al.*, 2025)에 제시되어 있다. 화학 메커니즘은 SAPRC07 (Hutzell *et al.*, 2012), 에어로졸 모듈은 Coarse-Fine (CF) 2-mode scheme을 적용하였다.

2.4 권역별 정책 효과 분석 방법

대기질 모사에서 배출 영향 또는 기여도를 정량화하기 위해 일반적으로 민감도 방법과 표식자 방법이 활용된다(Clappier *et al.*, 2017). 민감도 방법의 대표적인 기법인 Brute Force Method (BFM)는 배출량 변화를 통해 농도 변화를 직접 계산함으로써 정책 효과를 직관적으로 평가할 수 있다는 장점이 있다. 그러나 다수의 배출원 또는 권역을 대상으로 할 경우 추

가 모사가 필요하여 계산 비용이 증가하며, 배출 조건이 달라질 경우 각 배출원의 기여도 합이 총 농도와 일치하지 않을 수 있다는 한계가 있다(You *et al.*, 2020; Nam *et al.*, 2019; Kim, 2011; Koo *et al.*, 2009).

한편, CAMx에서 제공되는 표식자 기반 기법인 Particulate Source Apportionment Technology (PSAT; Yarwood *et al.*, 2007)은 특정 배출 조건에서 형성된 PM_{2.5} 농도를 배출 권역별 기여도로 분해할 수 있다. 이 방법은 한 번의 모사로 여러 권역의 기여도를 동시에 산정할 수 있으며, 권역별 기여도의 합이 총 농도와 일치한다는 장점이 있다. 그러나 배출량 변화에 따른 농도 변화의 비선형성을 직접적으로 반영하는 데에는 한계가 있다(Clappier *et al.*, 2017).

이러한 한계를 보완하기 위해, 본 연구에서는 BFM과 PSAT을 결합한 hybrid 접근을 적용하여 정책에 따른 농도 변화와 권역별 기여도 변화를 동시에 정량화하였다(그림 2). 먼저, 정책 효과에 따른 PM_{2.5} 농도 변화(ΔC_{POLICY})는 BASE 및 POLICY 시나리오 간 농도 차이로 정의하였다(식 1). 여기서 C_{BASE} 와 C_{POLICY} 는 각각 BASE 및 POLICY 시나리오에서 모사된 연평

균 PM_{2.5} 농도이다.

$$\Delta C_{POLICY} = C_{POLICY} - C_{BASE} \quad (1)$$

각 시나리오에서의 농도는 PSAT을 이용하여 산정된 권역별 (i) 기여도 ($S_{BASE,i}$, $S_{POLICY,i}$)의 합으로 나타낼 수 있다(식 2, 3).

$$C_{BASE} = \sum_i S_{BASE,i} \quad (2)$$

$$C_{POLICY} = \sum_i S_{POLICY,i} \quad (3)$$

정책 시행에 따른 권역별 기여도 변화(ΔS_i)는 식 (4)와 같이 정의된다.

$$\Delta S_i = S_{POLICY,i} - S_{BASE,i} \quad (4)$$

이때, 모든 권역에 대한 기여도 변화의 합은 총 농도 변화와 일치한다(식 5).

$$\Delta C_{POLICY} = \sum_i \Delta S_i \quad (5)$$

이는 정책에 따른 PM_{2.5} 농도 변화가 권역별 배출 저감 효과로 일관되게 분배될 수 있음을 의미한다.

본 연구에서는 배출 지역과 수용 지역이 동일한 경우를 자체 기여(Self-contribution), 상이한 경우를 타 지역 기여(Other-region contribution)로 정의하여 지역 간 상호 영향을 분석하였다(그림 2). 이러한 hybrid 접근은 정책에 따른 농도 변화의 절대 규모와 그 변화의 공간적 분담 구조를 동시에 평가할 수 있도록 하며, 권역 간 협력 기반 대기질 관리 전략 수립을 위한 정량적 근거를 제공한다.

2.5 인구 노출 평가

대기오염물질 농도와 인구 분포는 공간적으로 상이할 수 있으므로, PM_{2.5} 농도 감소와 인구 노출 저감 효과 역시 차이를 보일 수 있다(Son *et al.*, 2020). 따라서 PM_{2.5} 농도 변화만으로는 정책 효과를 충분히 평가하기 어려우며, 본 연구에서는 인구가중농도(PWC)를 산정하여 정책 효과를 노출 관점에서 분석하였다.

PWC는 특정 행정구역 내 격자별 PM_{2.5} 농도에 해

당 격자의 인구를 가중하여 다음과 같이 정의된다(식 6).

$$PWC_i = \frac{\sum_{j=1}^N (P_i^j \times C_i^j)}{P_i} \quad (6)$$

여기서 C_i^j 는 권역 i 내 j 번째 격자의 PM_{2.5} 농도($\mu\text{g}/\text{m}^3$), P_i^j 는 해당 격자 인구(명), P_i 는 권역 i 의 총 인구($\sum_{j=1}^N P_i^j$), N 은 권역 i 에 포함된 전체 격자 수를 의미한다.

본 연구에서는 9 km 격자 단위 PM_{2.5} 농도와 행정 구역별 인구자료를 결합하여 시·군·구 단위 PWC를 산정한 후, 이를 권역 단위로 집계하였다. 정책 효과에 따른 PWC 변화(ΔPWC_{POLICY})는 BASE 및 POLICY 시나리오 간 PWC 차이로 정의하였다. 또한 2.4절에서 정의한 권역별 기여도 변화(ΔS_i)를 이용하여 ΔPWC_{POLICY} 를 자체 기여와 타 지역 기여로 구분하였다. 본 연구에서는 농도 기반 정책 효과와 PWC 기반 정책 효과를 함께 제시함으로써 대기질 개선 대책의 실질적 건강 보호 효과를 종합적으로 평가하였다.

3. 결 과

3.1 모사 수행 평가

정책 효과에 따른 PM_{2.5} 농도 변화를 정량적으로 해석하기에 앞서, 본 연구에서는 정책 배출 조건을 반영한 POLICY 시나리오를 기준으로 대기질 모사의 재현성을 평가하였다. 본 연구는 POLICY-BASE 시나리오 간 상대적 농도 변화에 기반한 분석이므로, 정책 조건을 반영한 시나리오의 모사 성능 검증이 중요하다.

관측자료로는 2022년 국내 도시대기측정망 자료와 백령도를 제외한 대기환경연구소 9개 지점 자료를 활용하였다. 도시대기측정망 자료를 이용하여 권역별 PM_{2.5} 중량농도의 모사 성능을 평가하였으며(표 1), 대기환경연구소 자료를 통해 PM_{2.5} 및 주요 구성 성분(nitrate, sulfate, ammonium, EC, OC)의 재현성을 추가로 검증하였다(표 S2).

Table 1. Model performance evaluation of annual mean PM_{2.5} for POLICY scenario simulations at the air quality monitoring stations (AMS) in South Korea in 2022.

Region	Number of sites	OBS	MOD	MB	RMSE	NMB	NME	R
SMA	151	19.2	23.1	3.9	9.6	20.6	34.5	0.84
KW	22	14.5	16.6	2.1	7.4	14.6	43.7	0.75
CC	76	19.2	20.9	1.7	8.3	8.5	30.2	0.82
HN	83	16.2	17.4	1.2	5.8	7.9	26.0	0.87
YN	130	15.6	17.0	1.4	5.6	8.7	25.6	0.89
South Korea	462	17.4	19.7	2.3	6.6	13.0	26.8	0.88

OBS, the mean of the observed values; MOD, the mean of the modeled values; Mean Bias (MB); Root Mean Square Error (RMSE); Normalized Mean Bias (NMB); Normalized Mean Error (NME); Correlation coefficient (R). Unit: OBS, MOD ($\mu\text{g}/\text{m}^3$), NMB (%), NME (%). Emery *et al.* (2017) goals for 24-hr total and speciated PM_{2.5}: NMB < 10%, NME < 35%, R > 0.70. Emery *et al.* (2017) criteria for 24-hr total and speciated PM_{2.5}: NMB < 30%, NME < 50%, R > 0.40. Acronyms for the regions are as follows; SMA: Seoul Metropolitan Area, KW: Kangwon, CC: Chungcheong, HN: Honam, YN: Yeongnam.

POLICY 시나리오의 연평균 PM_{2.5} 모사 결과는 Table 1에 제시한 Emery *et al.* (2017)의 성능 기준을 전반적으로 만족하였다. 연평균 기준으로 모든 권역에서 양의 NMB가 나타났으며, 이는 국내 배출량뿐 아니라 국외 배출량과 기상 입력자료의 불확도 등이 함께 반영된 결과로 해석될 수 있다. 일부 지역에서 양의 편차가 나타났으나, 동일 기상 조건 하에서 수행된 paired simulation 구조를 고려할 때, 시나리오 간 상대적 농도 변화 해석에는 충분한 수준의 재현성을 확보한 것으로 판단된다.

PM_{2.5} 중량농도의 상관계수는 0.88로 나타났으며, 주요 성분은 황산염 (0.68)~PM_{2.5} (0.88) 범위를 보였다. NMB는 -35.8% (OC)~48.9% (질산염)로 일부 성분에서 편차가 나타났으나, 전반적으로 허용 범위 내에 있었다. 특히 황산염과 암모늄은 안정적인 재현성을 보였으며, 질산염은 상대적으로 큰 편차를 보였으나 상대 변화 분석에는 적용 가능한 수준으로 판단된다.

3.2 권역별 PM_{2.5} 정책 효과 및 지역 간 상호 영향

BASE 시나리오에서 국내 평균 PM_{2.5} 농도는 19.3 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 모사되었으며, 2019년 대비 2022년 배출 저감에 따른 연평균 PM_{2.5} 농도 변화(ΔC_{POLICY})는 전국 평균 1.6 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 감소한 것으로 나타났다. 이는 동일 기간 관측된 평균 농도 감소폭 (5.7 $\mu\text{g}/\text{m}^3$)의 약 28%

에 해당하며 (그림 3(a)), 국내 배출 저감만으로는 전체 PM_{2.5} 감소를 충분히 설명하기 어려움을 보여준다. 이러한 결과는 최근 PM_{2.5} 농도 변화가 국외 배출 변화, 기상 조건, 사회·경제적 요인 등 복합적 요인의 영향을 받는다는 선행연구 Kang *et al.* (2024)와 일관된다.

권역별 ΔC_{POLICY} 는 충청권 -2.1 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, 수도권 -1.8 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, 영남권 -1.6 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, 호남권 -1.5 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, 강원권 -1.0 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 나타났으며 (그림 3(b)), 이는 권역별 배출 규모 및 배출 구조의 차이와 일관된 경향을 보였다. 정책 효과를 권역별 기여도로 분해한 결과, 각 권역의 농도 감소는 자체 배출 저감과 타 지역 배출 저감의 합으로 설명되었다.

자체 기여에 의한 농도 감소는 충청권 -1.3 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ (62%), 수도권 -0.8 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ (50%), 영남권 -0.7 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ (44%), 호남권 -0.6 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ (40%), 강원권 -0.3 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ (30%)로 나타났다. 반면, 타 지역 기여율은 38% (충청권)에서 70% (강원권)까지 분포하였으며, 충청권을 제외한 대부분의 권역에서 50% 이상으로 산정되었다. 특히 강원권과 같이 배출 규모가 상대적으로 작은 권역에서는 농도 감소의 상당 부분이 인접 권역의 배출 저감에 의해 설명되었다. 이는 PM_{2.5}가 2차 생성 및 장거리 수송의 영향을 크게 받는 특성과 부합된다 (Kim *et al.*, 2025; Kang *et al.*, 2024, 2020; Bae *et al.*, 2022a, 2020).

종합하면, PM_{2.5} 농도 감소는 권역 간 이동의 영향

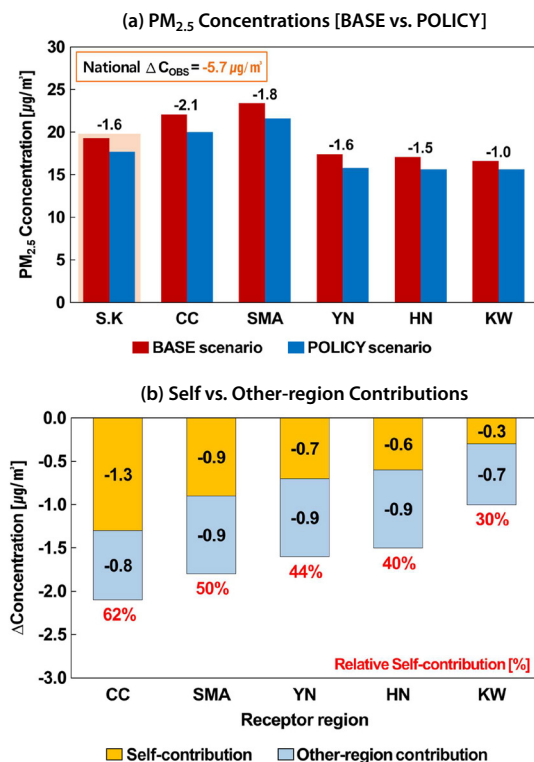


Fig. 3. Bar plots of (a) simulated annual mean PM_{2.5} concentrations for the BASE and POLICY scenarios and (b) policy-driven PM_{2.5} concentration changes (ΔC_{POLICY}) during 2019~2022, decomposed into self- and other-region contributions for each receptor region. Red and blue bars in panel (a) represent BASE and POLICY, respectively. In panel (a), numbers above the bars denote ΔC_{POLICY} . In panel (b), yellow and blue segments indicate self- and other-region contributions, respectively, and percentages denote the relative self-contribution. Acronyms for the regions are as follows; S.K.: South Korea, SMA: Seoul Metropolitan Area, KW: Kangwon, CC: Chungcheong, HN: Honam, YN: Yeongnam.

이 크게 작용하여 타 지역 배출 저감의 기여가 지배적으로 나타났으며, 이는 효과적인 대기질 개선을 위해 권역 간 협력적 배출 관리가 필수적임을 시사한다. 이러한 결과는 이후 인구 노출 변화 분석과 대비하여, 농도와 노출 저감의 공간적 특성이 다르게 나타날 수 있음을 이해하는 기반을 제공한다.

3.3 PM_{2.5} 성분별 변화 및 공간적 영향 특성

앞선 분석에서 확인한 바와 같이, PM_{2.5} 농도 감소

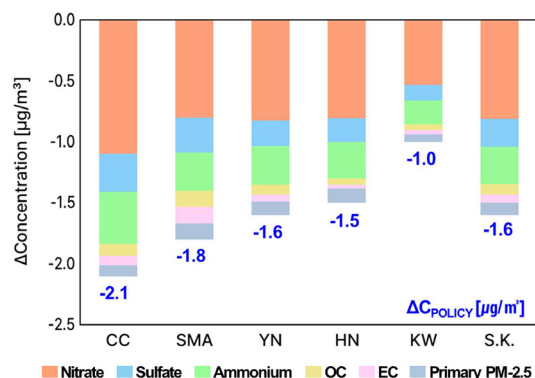


Fig. 4. Stacked bar plots of regional changes in PM_{2.5} components (ΔC_{POLICY}) between the BASE and POLICY scenarios. Components are stacked in the following order (top to bottom): nitrate, sulfate, ammonium, OC, EC, and primary PM_{2.5}. The values above the bars indicate policy-driven concentration changes in each region. Acronyms for the regions are as follows; S.K.: South Korea, SMA: Seoul Metropolitan Area, KW: Kangwon, CC: Chungcheong, HN: Honam, YN: Yeongnam.

와 권역 간 기여 구조는 지역별로 상이하게 나타났으며, 이는 단순한 총 배출량 차이를 넘어 전구물질의 종류와 배출 특성의 차이에 의해 설명될 수 있다. 성분별 분석 결과, 국내 평균 PM_{2.5} 감소량(1.6 μg/m³) 중 sulfate-nitrate-ammonium (SNA)이 약 82% (-1.3 μg/m³)를 차지하여 정책 효과를 주도하는 것으로 나타났다(그림 4). 특히 질산염은 약 50%로 가장 높은 기여를 보이며 모든 권역에서 일관되게 주요 감소 성분으로 확인되었다. 다만 질산염은 관측 대비 모의농도의 양의 편차가 비교적 크게 나타난 성분으로, 그 정량적 기여도에는 불확실성이 존재할 수 있다. 이러한 점을 고려하여 본 연구에서는 PM_{2.5} 모사 농도가운데 질산염이 차지하는 비중보다는, 동일한 모델 체계와 동일한 기상 조건에서 수행된 BASE와 POLICY 시나리오 간 상대적 농도 변화에 기반하여 정책 효과를 산정하였다. 황산염과 암모늄은 각각 13%와 19%를 차지하였으며, 권역별로도 SNA 기여율은 78~86% 범위로 나타났다. 반면 OC, EC 및 Primary PM_{2.5}의 변화는 상대적으로 작아, 전체 PM_{2.5} 개선은 2차 무기 에어로졸 감소가 주도하였다.

주목할 점은 대상 기간 동안 전국 평균 SO₂ 배출

저감률(39.8%)이 NO_x 저감률(32.9%)보다 높았음에도 불구하고, 황산염보다 질산염의 농도 감소가 더 크게 나타났다는 점이다. 이는 배출 저감률뿐 아니라 전구물질의 절대 배출 저감량, 배출 형태 및 공간적 분포, 그리고 대기 중 2차 생성 특성의 차이가 복합적으로 작용한 결과로 해석된다. 실제 절대 배출 저감량은 NO_x (409,871 ton)가 SO_x (143,054 ton)보다 크게 나타났다. 또한 NO_x 는 도로 및 비도로 등 지표 부근 오염원을 중심으로 광범위한 배출을 보이는 반면, SO_x 는 발전 및 산업시설 등 점오염원 중심으로 배출된다(MOE, 2024). 점오염원 배출은 굴뚝을 통해 상층으로 배출되어 지표 농도에 미치는 영향이 상대적으로 작고, 면오염원 대비 2차 생성 전환 특성에서도 차이를 보인다(Kang and Kim, 2022; You *et al.*, 2022; Ju *et al.*, 2019). 특히, 국내에서 NH_3 배출이 주로 농업 및 축산 등 지표 부근에서 배출되는 점을 고려할 수 있다. 따라서 $\text{PM}_{2.5}$ 농도 변화를 설명하기 위해서는 전구물질의 절대 배출 규모, 배출 형태, 공간적 분포, 그리고 대기 중 2차 생성 과정 등을 함께 고려하여 해석할 필요가 있다.

단일 권역의 배출이 복수의 수용 권역에 영향을 미친다는 점을 고려하여, 본 연구에서는 배출 권역(s)이 타 수용 권역(r)에 미치는 기여도 변화($\Delta S_{s \rightarrow r}$)를 수용 지역의 면적(A_r) 가중 평균하여 타 지역 기여($\Delta S_{s \rightarrow \text{other}}^{\text{AWM}}$)를 산정하였다(식 7). 여기서 r은 s를 제외한 수용 권역이며, N은 타 수용 권역의 개수이다. 이를 통해 특정 권역의 배출 저감이 타 지역에 미치는 평균적 영향을 정량적으로 비교하였다.

$$\Delta S_{s \rightarrow \text{other}}^{\text{AWM}} = \frac{\sum_{r=1}^N \Delta S_{s \rightarrow r} \times A_r}{\sum_{r=1}^N A_r} \quad (7)$$

성분별 공간적 영향 범위를 비교한 결과(그림 5), 질산염은 가장 광역적인 영향을 보였다. 예를 들어 수도권에서 NO_x 저감으로 질산염이 $1 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 감소할 경우, 강원권 약 $0.9 \mu\text{g}/\text{m}^3$, 충청권 $0.7 \mu\text{g}/\text{m}^3$, 영남 및 호남권에서도 약 $0.4 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 감소가 나타났다. 반면 황산염은 인접 권역 중심의 영향을 보였으며, Primary

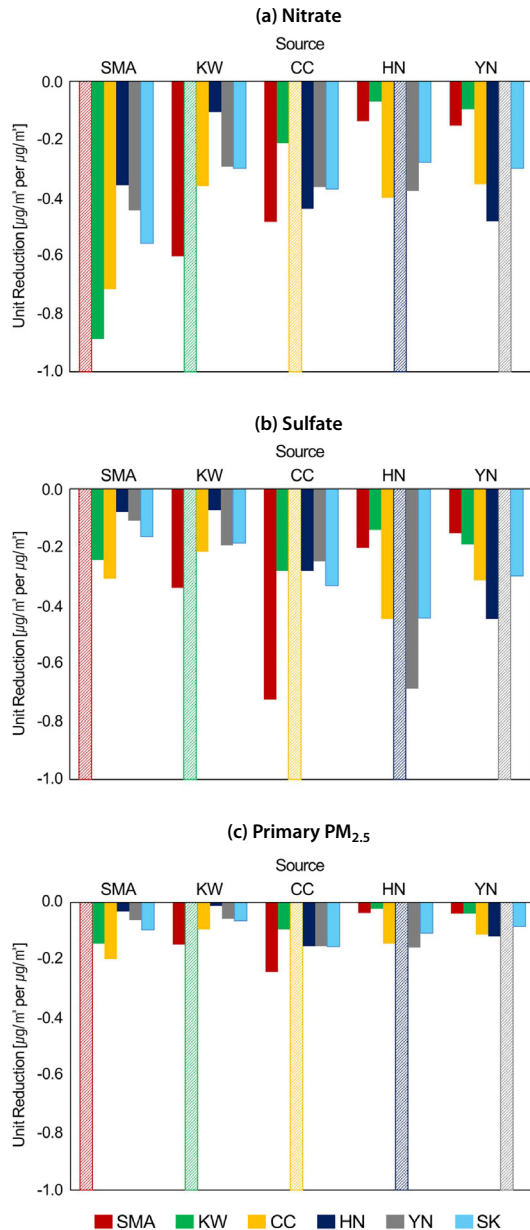


Fig. 5. Bar plots of changes in contributions in receptor regions per unit reduction ($1 \mu\text{g}/\text{m}^3$) in each source region, shown for (a) nitrate, (b) sulfate, and (c) primary $\text{PM}_{2.5}$. For each source region, each bar indicates the contribution change (ΔS) in each receptor region. The light-blue bars represent the area-weighted mean of ΔS across other receptor regions, excluding the source region. Acronyms for the regions are as follows; SMA: Seoul Metropolitan Area, KW: Kangwon, CC: Chungcheong, HN: Honam, YN: Yeongnam, SK: South Korea.

PM_{2.5}는 최대 0.2 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 수준으로 지역 간 영향이 제한적이었다. 면적 가중 평균 기준으로 타 지역 영향 규모는 질산염 (-0.6~-0.3 $\mu\text{g}/\text{m}^3$), 황산염 (-0.4~-0.2 $\mu\text{g}/\text{m}^3$), Primary PM_{2.5} (-0.2~-0.1 $\mu\text{g}/\text{m}^3$) 순으로 나타났다(그림 5 및 그림 S1).

이러한 차이는 가스상 전구물질의 경우 대기 중 수송과 산화 과정을 통해 광역적인 영향을 미치는 반면, 1차 입자상 물질은 배출원 인근에서의 기여가 크고 수송 과정에서 빠르게 감소하는 특성에 기인한다. 이는 동일한 배출 저감이라 하더라도, 대상 전구물질에 따라 정책 효과의 공간적 영향 범위가 달라질 수 있음을 의미한다(Kim *et al.*, 2017).

종합하면, PM_{2.5} 저감 효과는 단순한 배출 감축률이나 감축량만으로 설명되지 않으며, 전구물질의 배출 규모, 공간 분포, 배출 형태, 그리고 2차 생성 특성이 복합적으로 작용한 결과이다. 특히 질산염은 광역적 영향을 통해 전체 농도 변화에 지배적인 역할을 하는 반면, 1차 입자는 국지적 영향이 상대적으로 크다. 이러한 특성은 이후 인구 노출 분석에서 나타나는 농도와 PWC 간 차이를 이해하는 데 중요한 기반을 제공한다.

3.4 정책 효과에 따른 지역별 PM_{2.5} 인구 노출도 평가

권역 간 상호 영향을 인구 노출 관점에서 정량적으로 평가하기 위해, 특정 권역에서 PM_{2.5} 농도 또는 인구가중농도(PWC)가 단위(1 $\mu\text{g}/\text{m}^3$) 감소할 때 타 권역에서 유도되는 ΔC 및 ΔPWC 반응을 분석하였다. 본 분석은 특정 배출 저감 시나리오 자체보다, 한 권역의 농도 변화가 주변 지역의 농도 및 노출에 미치는 전이 효과를 평가하는 데 목적이 있다.

정책 시행에 따른 국내 평균 PWC 감소폭은 1.9 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 로, PM_{2.5} 농도 감소폭(1.6 $\mu\text{g}/\text{m}^3$)보다 약 19% 크게 나타났다. 이는 배출 저감 효과가 인구 밀집 지역과 공간적으로 중첩되면서, 동일한 농도 감소 대비 노출 저감 효과가 확대되었음을 의미한다. 권역별로도 PWC 감소는 1.2~2.3 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 범위로 나타났으며, 대

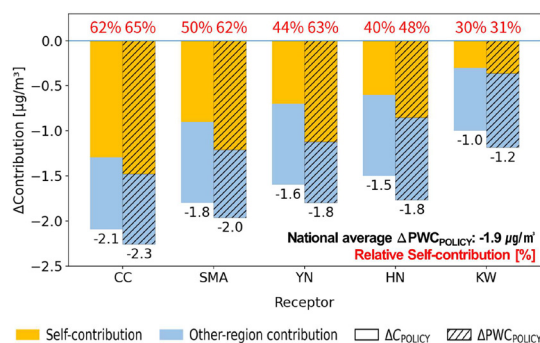


Fig. 6. Stacked bar plots of policy-driven PM_{2.5} concentration changes (ΔC_{POLICY}) and the corresponding changes in population-weighted concentration (ΔPWC_{POLICY}) by receptor region during 2019~2022. For each receptor, the left stacked bar denotes ΔC_{POLICY} and the right hatched stacked bar denotes ΔPWC_{POLICY} . Bars are decomposed into self-contribution (yellow) and other-region contribution (blue). The values below the bars indicate the policy-driven change (self-contribution and other-region contribution), while values above the bars represent the relative self-contribution (%). Acronyms for the regions are as follows: SMA, Seoul Metropolitan Area; KW, Kangwon; CC, Chungcheong; HN, Honam; YN, Yeongnam.

부분의 권역에서 농도 감소 대비 약 10~20% 큰 개선 효과를 보였다(그림 6).

이러한 차이를 정량적으로 살펴보면, 자체 기여에 의한 $\Delta PWC/\Delta C$ 는 모든 권역에서 1 이상(1.1~1.6)으로 나타난 반면, 타 지역 기여의 경우 대부분 1 이하(0.7~1.0 수준)로 나타났다(그림 S2). 이는 동일한 농도 감소라도 그 발생 위치에 따라 노출 저감 효과가 달라짐을 의미한다. 즉, 자체 배출 저감은 인구 밀집 지역과 직접적으로 중첩되면서 노출 저감 효과가 증폭되는 반면, 타 지역에서 유도된 농도 감소는 인구 분포와의 공간적 불일치로 인해 노출 저감으로의 전환 효율이 제한된다.

성분별 공간적 전이 특성을 비교하기 위해, 한 권역에서 특정 성분 농도가 1 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 감소할 때 타 지역에서 나타나는 ΔC 및 ΔPWC 를 면적 가중 평균으로 분석하였다(그림 7). 그 결과, 질산염과 황산염은 각각 0.28~0.56 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, 0.16~0.44 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 수준의 타 지역 농도 감소를 유도하여, Primary PM_{2.5} (0.06~0.15 $\mu\text{g}/\text{m}^3$) 대비 2.6~4.4배 높은 영향을 보였다. PWC 역시

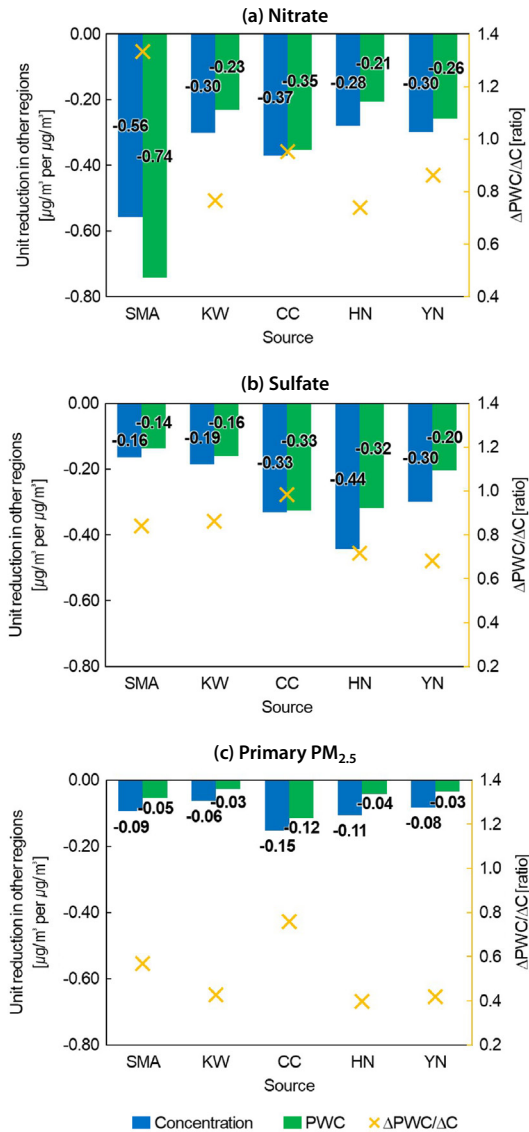


Fig. 7. Bar plots of the area-weighted mean change in non-source (other) receptor regions in response to a unit ($1 \mu\text{g}/\text{m}^3$) reduction in each source region, shown for (a) nitrate, (b) sulfate, and (c) primary $\text{PM}_{2.5}$. Blue and green bars indicate changes in area-weighted mean concentration (ΔC) and population-weighted concentration (ΔPWC), respectively. Yellow markers denote the ratio $\Delta \text{PWC}/\Delta C$ (right axis). Region acronyms are as follows: SMA, Seoul Metropolitan Area; KW, Kangwon; CC, Chungcheong; HN, Honam; YN, Yeongnam.

질산염 ($0.21 \sim 0.74 \mu\text{g}/\text{m}^3$)과 황산염 ($0.14 \sim 0.33 \mu\text{g}/\text{m}^3$)이 Primary $\text{PM}_{2.5}$ ($0.03 \sim 0.05 \mu\text{g}/\text{m}^3$)보다 큰 영향을

나타냈다. 이는 2차 생성 물질이 장거리 수송을 통해 광역적으로 영향을 미치는 반면, 1차 입자는 국지적 영향이 지배적임을 보여준다.

그러나 대부분의 경우 타 지역에 대한 $\Delta \text{PWC}/\Delta C$ 비는 1 이하로 나타났으며, 이는 광역 수송에 의해 유도된 농도 감소가 인구 밀집 지역과 충분히 중첩되지 않을 경우, 노출 저감 효과로의 전환이 제한될 수 있음을 의미한다. 반면, 수도권 질산염의 경우 상대적으로 높은 ΔPWC 가 나타났는데(그림 7(a)), 이는 NO_x -rich 조건에서의 비선형 화학 반응과 인구 분포 특성이 복합적으로 작용한 결과로 해석된다.

또한 권역별로 주요 기여 특성을 살펴보면, 질산염은 수도권 배출 저감이 전국 $\text{PM}_{2.5}$ 농도 및 PWC 개선에 가장 크게 기여한 반면, 황산염은 농도 기준에서는 호남권, PWC 기준에서는 충청권의 영향이 상대적으로 크게 나타났다. 이는 배출량 규모뿐 아니라 인구 밀집 지역과의 공간적 연계성이 정책 효과를 결정하는 중요한 요소임을 보여준다.

종합하면, $\text{PM}_{2.5}$ 농도 감소는 권역 간 수송에 의해 타 지역 배출 저감의 영향이 크게 나타나는 반면, 인구 노출 저감은 자체 배출 저감이 보다 직접적으로 작용하는 것으로 나타났다. 이는 농도 개선과 노출 저감이 서로 다른 공간적 특성과 정책적 우선순위를 가질 수 있음을 의미한다. 따라서 효과적인 대기질 관리 정책은 권역 간 협력을 통한 광역적 배출 저감과 함께, 인구 분포를 고려한 지역 맞춤형 자체 배출 저감 전략을 동시에 고려하는 통합적 접근이 필요하다.

4. 결 론

본 연구에서는 2019~2022년 기간 동안 국내 배출 저감이 $\text{PM}_{2.5}$ 농도 및 인구 노출에 미치는 영향을 권역 간 상호작용과 전구물질 특성을 고려하여 정량적으로 분석하였다. 분석 결과, 국내 배출 저감에 의해 전국 평균 $\text{PM}_{2.5}$ 농도는 약 $1.6 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 감소하였으며, 인구가중농도는 약 $1.9 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 감소한 것으로 나타났다. 전국 평균 $\text{PM}_{2.5}$ 농도 감소는 관측 농도 감소의

약 28%를 설명하는 것으로 분석되었다.

PM_{2.5} 농도 감소는 권역별로 상이하게 나타났으며, 이는 배출원의 공간적 분포와 배출 구조의 차이에 기인한다. 특히 충청권을 제외한 대부분의 권역에서 자체 배출 저감의 기여율은 50% 미만으로 분석되어, 타 지역 배출 저감의 영향이 크게 작용하는 것으로 나타났다. 이는 PM_{2.5} 농도 개선이 단일 지역의 배출 저감 만으로는 제한적이며, 권역 간 협력적 배출 관리 체계가 필수적임을 시사한다.

성분별 분석 결과, SO₂의 배출 저감률이 NO_x보다 높았음에도 불구하고 질산염이 PM_{2.5} 감소에 가장 크게 기여하는 것으로 나타났다. 이는 PM_{2.5} 농도 변화가 단순한 배출 저감률이 아니라, 전구물질의 절대 배출 규모와 공간적 분포, 그리고 대기 중 수송 및 2차 생성 과정이 복합적으로 작용한 결과임을 보여준다. 특히 NO_x는 광범위한 오염원에서 배출되어 광역적 영향을 미치는 반면, SO₂는 점오염원 중심의 배출 특성으로 인해 상대적으로 국지적 영향을 보이기 때문으로 해석된다.

또한 성분별 공간적 전이 및 인구 노출 효과를 비교한 결과, 타 지역 배출 저감에 따른 PM_{2.5} 농도 및 PWC 개선 효과는 질산염 > 황산염 > Primary PM_{2.5} 순으로 나타났다. 이는 질산염과 황산염이 2차 생성 및 장거리 수송을 통해 광역적으로 영향을 미치는 반면, Primary PM_{2.5}는 국지적 영향이 지배적이고 수송 과정에서 빠르게 감소하기 때문이다. 이러한 차이는 동일한 배출 저감이라 하더라도 대상 전구물질에 따라 농도 개선의 공간적 범위와 인구 노출 저감 효과가 크게 달라질 수 있음을 시사한다.

한편, 인구 노출 관점에서 평가한 결과, 권역별 PWC 감소는 평균 농도 감소보다 크게 나타났으며, 이는 배출 저감 효과가 인구 밀집 지역과 공간적으로 중첩되면서 노출 감소에 보다 직접적으로 기여하기 때문이다. 특히 자체 배출 저감은 인구 밀집 지역에서 직접적인 농도 감소를 유도함으로써 노출 저감 효과를 증폭시키는 반면, 타 지역에서 유도된 농도 감소는 인구 분포와의 공간적 불일치로 인해 노출 개선

효과로의 전환이 상대적으로 제한되는 것으로 나타났다.

종합하면, PM_{2.5} 농도 감소는 권역 간 이동의 영향으로 타 지역 배출 저감의 기여가 크게 나타나는 반면, 인구 노출 저감은 자체 배출 저감이 보다 효과적으로 작용하는 것으로 나타났다. 이는 농도 개선과 노출 저감이 서로 다른 공간적 특성과 정책적 우선순위를 가질 수 있음을 의미하며, 효과적인 대기질 관리를 위해서는 광역적 협력과 지역 맞춤형 배출 저감 전략을 동시에 고려하는 통합적 접근이 필요하다.

또한 본 연구에서는 배출 권역과 수용 권역 간 기여도를 정량적으로 분해하고, 이를 성분별·공간적 영향 및 인구 노출과 연계하여 해석하는 분석 체계를 제시하였다. 이러한 접근은 다양한 배출 변화 조건에 대해 농도와 인구 노출 변화를 일관되게 평가할 수 있는 기반을 제공한다. 특히 대기질 관리가 단일 지역의 배출 저감만으로 설명될 수 없음을 고려할 때, 향후 정책 설계에서는 자체 배출뿐 아니라 주변 지역의 배출 변화와 상호 영향을 함께 고려하고, 평균 농도뿐 아니라 인구 노출 저감 효과를 통합적으로 평가하는 접근이 필요하다. 아울러 이러한 분석의 신뢰성을 확보하기 위해서는 대기질 모사의 재현성 향상과 함께, 배출량의 정확도 제고를 위한 관측 기반 자료 확보 및 배출량 고도화가 중요하다. 특히 본 연구에서 주요 감소 성분이자 PM_{2.5} 농도 중 주요 성분으로 나타난 질산염은 상대적으로 큰 모사 편차를 보인 만큼, 향후 질산염 모사 재현성 개선을 위한 다중 관측 자료를 활용한 대기화학모사 고도화가 필요하다.

감사의 글

본 논문은 기후에너지환경부 국가미세먼지정보센터의 재원으로 지원을 받아 수행하였습니다.

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(1), 48. <https://doi.org/10.3390/atmos11010048>
- Bae, M., Kang, Y.-H., Kim, E., Kim, S., Kim, S. (2023) A multifaceted approach to explain short- and long-term PM_{2.5} concentration changes in Northeast Asia in the month of January during 2016~2021, *Science of The Total Environment*, 880, 163309. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.163309>
- Bae, M., Kim, B.-U., Kim, H.-C., Woo, J.-H., Kim, S. (2022a) An observation-based adjustment method of regional contribution estimation from upwind emissions to downwind PM_{2.5} concentrations, *Environment International*, 163, 107214. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2022.107214>
- Bae, M., Kim, S., Kim, S. (2022b) 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(4), 610-623, (in Korean with English abstract). <https://doi.org/10.5572/kosae.2022.38.4.610>
- Bae, M., Kim, E., You, S., Son, K., Kang, Y.-H., Kim, S. (2021a) Local Authority Level Source Apportionments of PM_{2.5} Concentrations based on the CAPSS 2016: (VII) Seoul, *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment*, 37(3), 466-486, (in Korean with English abstract). <https://doi.org/10.5572/kosae.2021.37.3.466>
- Bae, M., Kim, B.-U., Kim, H.-C., Kim, J., Kim, S. (2021b) Role of emissions and meteorology in the recent PM_{2.5} changes in China and South Korea from 2015 to 2018, *Environmental Pollution*, 270, 116233. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2020.116233>
- Clappier, A., Belis, C.-A., Pernigotti, D., Thunis, P. (2017) Source apportionment and sensitivity analysis: two methodologies with two different purposes, *Geoscientific Model Development*, 10(11), 4245-4256. <https://doi.org/10.5194/gmd-10-4245-2017>
- Emery, C., Liu, Z., Russell, A.-G., Odman, M.-T., Yarwood, G., Kumar, N. (2017) Recommendations on statistics and benchmarks to assess photochemical model performance, *Journal of the Air & Waste Management Association*, 67(5), 582-598. <https://doi.org/10.1080/10962247.2016.1265027>
- 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>
- Ju, H., Yoo, C., Kim, B.-U., Kim, H.-C., Kim, S. (2019) Impact of Stack Parameters on Modeled PM_{2.5} Conversion Rates: A Case Study of Chungnam during the KORUS-AQ 2016, *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment*, 35(5), 593-608, (in Korean with English abstract). <https://doi.org/10.5572/kosae.2019.35.5.593>
- Kang, Y.-H., Kim, E., Jung, S., Park, J., Son, C., Kim, S. (2024) Analyzing The Main Drivers of Observed PM_{2.5} Concentrations in South Korea during the 1st to 5th Seasonal Particulate Matter Management Periods, *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment*, 40(4), 407-426, (in Korean with English abstract). <https://doi.org/10.5572/kosae.2024.40.4.407>
- 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(5), 716-733, (in Korean with English abstract). <https://doi.org/10.5572/kosae.2022.38.5.716>
- Kang, Y.-H., You, S., Bae, M., Kim, E., Son, K., Bae, C., Kim, Y., Kim, B.-U., Kim, H.-C., Kim, S. (2020) The impacts of COVID-19, meteorology, and emission control policies on PM_{2.5} drops in Northeast Asia, *Scientific Reports*, 10(1), 22112. <https://doi.org/10.1038/s41598-020-79088-2>
- Kang, Y.-H., You, S., Kim, E., Bae, M., Son, K., Kim, S. (2021a) 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, (in Korean with English abstract). <https://doi.org/10.5572/kosae.2021.37.6.871>
- Kang, Y.-H., You, S., Son, K., Kim, E., Bae, M., Kim, S. (2021b) 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, (in Korean with English abstract). <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, (in Korean with English abstract). <https://doi.org/10.5572/kosae.2018.34.4.588>
- Kim, E., Jeong, S., Kang, Y.-H., Myung, M., Kim, S. (2025) Influence of top-down adjusted upwind emissions on PM_{2.5} concentrations: The case of long-range transport in South Korea, *Environmental Pollution*, 368, 125799. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2025.125799>
- Kim, E., Kim, H.-C., Kim, B.-U., Woo, J.-H., Liu, Y., Kim, S. (2024)

- 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/10.1016/j.scitotenv.2023.167818>
- 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, (in Korean with English abstract). <https://doi.org/10.5572/kosae.2021.37.2.292>
- Kim, S., You, S., Kim, E., Kang, Y.-H., Bae, M., Son, K. (2021b) 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, (in Korean with English abstract). <https://doi.org/10.5572/kosae.2021.37.2.206>
- Kim, S. (2011) Estimating Ozone Sensitivity Coefficients to NO_x and VOC Emissions Using BFM and HDDM for A 2007 June Episode, *Environmental Science International*, 20(11), 1465-1481, (in Korean with English abstract). <https://doi.org/10.5322/JES.2011.20.11.1465>
- Kim, S., Bae, C., Yoo, C., Kim, B.-U., Kim, H.-C., Moon, N. (2017) PM_{2.5} Simulations for the Seoul Metropolitan Area: (II) Estimation of Self-Contributions and Emission-to-PM_{2.5} Conversion Rates for Each Source Category, *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment*, 33(4), 377-392, (in Korean with English abstract). <https://doi.org/10.5572/kosae.2017.33.4.377>
- 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, (in Korean with English abstract). <https://doi.org/10.5572/kosae.2022.38.2.237>
- Koo, B., Wilson, G.-M., Morris, R.-E., Dunker, A.-M., Yarwood, G. (2009) Comparison of Source Apportionment and Sensitivity Analysis in a Particulate Matter Air Quality Model, *Environmental Science & Technology*, 43(17), 6669-6675. <https://doi.org/10.1021/es9008129>
- Nam, K.-P., Lee, H.-S., Lee, J.-J., Park, H.-J., Choi, J.-Y., Lee, D.-G. (2019) A Study on the Method of Calculation of Domestic and Foreign Contribution on PM_{2.5} using Brute-Force Method, *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment*, 35(1), 86-96, (in Korean with English abstract). <https://doi.org/10.5572/kosae.2019.35.1.086>
- Skamarock, W.-C., Klemp, J., Dudhia, J., Gill, D.-O., Barker, D., Wang, W., Powers, J.-G. (2008) A Description of the Advanced Research WRF Version 3, University Corporation for Atmospheric Research, 27, 3-27. <https://doi.org/10.5065/D68S4MVH>
- 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(6), 806-819, (in Korean with English abstract). <https://doi.org/10.5572/kosae.2020.36.6.806>
- Yarwood, G., Morris, R.-E., Wilson, G.-M. (2007) Particulate Matter Source Apportionment Technology (PSAT) in the CAMx Photochemical Grid Model, *Proceeding of the Air Pollution Modeling and Its Application XVII*, Boston, MA. https://doi.org/10.1007/978-0-387-68854-1_52
- You, S., Bae, C., Kim, H., Yoo, C., Kim, S. (2020) Municipality-Level Source Apportionment of PM_{2.5} Concentrations based on the CAPSS 2016: (I) Gyeonggi Province, *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment*, 36(6), 785-805, (in Korean with English abstract). <https://doi.org/10.5572/kosae.2020.36.6.785>
- You, S., Kang, Y.-H., Kim, H., Yoo, C., Kim, S. (2022) The Importance of Plant Emission Type on PM_{2.5} Impact Estimation: A Case Study of Nonpublic Anthracite Burning Facilities, *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment*, 38(6), 802-822, (in Korean with English abstract). <https://doi.org/10.5572/kosae.2022.38.6.802>

Authors Information

- 정성은 (아주대학교 환경공학과 박사과정 학생)
(atmos1214@ajou.ac.kr)
- 박준홍 (아주대학교 환경공학과 석사)
(wnsgmd1116@ajou.ac.kr)
- 강윤희 (아주대학교 환경연구소 박사)
(ykang@ajou.ac.kr)
- 김은혜 (국립군산대학교 환경공학과 조교수)
(ekim@kunsan.ac.kr)
- 양혜지 (국가미세먼지정보센터 정책지원팀 환경연구사)
(hjyang90@korea.kr)
- 박성규 (국가미세먼지정보센터 정책지원팀 전문연구원)
(psk0393@korea.kr)
- 김순태 (아주대학교 환경안전공학과 교수)
(soontaekim@ajou.ac.kr)

Supplementary Materials

Table S1. Regional emissions in South Korea of PM_{2.5} precursors (NO_x, SO_x, NH₃ and VOCs) and primary PM_{2.5} in (a) 2019 under BASE scenario, (b) 2022 under the POLICY scenario, and (c) emissions reductions, with percentage reductions given in parentheses.

Species	NO _x	SO _x	NH ₃	VOCs	Primary PM _{2.5}
(a) 2019					
SMA	362,491	34,694	49,350	318,568	19,214
KW	104,339	38,666	10,696	34,916	5,810
CC	232,856	78,802	56,772	162,839	16,363
HN	185,078	63,245	61,437	217,136	15,877
YN	354,384	117,707	66,250	422,962	26,428
Ocean	32,184	11,894	3	1,118	1,539
(b) 2022					
SMA	277,831	24,419	44,202	249,992	13,503
KW	39,449	23,915	9,466	23,310	3,552
CC	139,407	39,782	48,692	112,254	10,086
HN	133,904	43,786	53,589	159,036	10,567
YN	241,321	68,651	56,442	298,342	17,362
Ocean	29,549	1,401	3	1,027	1,411
(c) Emissions reductions					
SMA	84,660 (23%)	10,275 (30%)	5,148 (10%)	68,576 (22%)	5,711 (30%)
KW	64,890 (62%)	14,751 (38%)	1,230 (11%)	11,606 (33%)	2,258 (39%)
CC	93,449 (40%)	39,020 (50%)	8,080 (14%)	50,585 (31%)	6,277 (38%)
HN	51,174 (28%)	19,459 (31%)	7,848 (13%)	58,100 (27%)	5,310 (33%)
YN	113,063 (32%)	49,056 (42%)	9,808 (15%)	124,620 (29%)	9,066 (34%)
Ocean	2,635 (8%)	10,493 (88%)	0 (0%)	91 (8%)	128 (8%)

Units are tons per year. Region acronyms are as follows: SMA, Seoul Metropolitan Area; KW, Kangwon; CC, Chungcheong; HN, Honam; YN, Yeongnam.

Table S2. Model performance evaluation of annual mean PM_{2.5} and its components for Policy scenario simulations at the Supersites in South Korea excluding Baengnyeong, in 2022.

Species	Number of sites	OBS	MOD	MB	RMSE	NMB	NME	R
PM _{2.5}	9	19.33	18.86	-0.48	5.61	-2.4	21.21	0.88
Sulfate	9	3.01	3.14	0.13	1.47	4.3	34.56	0.68
Nitrate	9	4.55	6.73	2.18	3.85	47.9	59.76	0.84
Ammonium	9	2.56	3.07	0.51	1.37	19.9	39.37	0.82
EC	9	0.64	0.79	0.15	0.25	23.4	31.75	0.85
OC	9	3.23	2.11	-1.12	1.62	-34.7	38.96	0.72

OBS, the mean of the observed values; MOD, the mean of the modeled values; Mean Bias (MB); Root Mean Square Error (RMSE); Normalized Mean Bias (NMB); Normalized Mean Error (NME); Correlation coefficient (R). Unit: OBS, MOD (μg/m³), NMB (%), NME (%). Emery *et al.* (2017) goals for 24-hr total and speciated PM_{2.5}: NMB < 10%, NME < 35%, R > 0.70. Emery *et al.* (2017) criteria for 24-hr total and speciated PM_{2.5}: NMB < 30%, NME < 50%, R > 0.40.

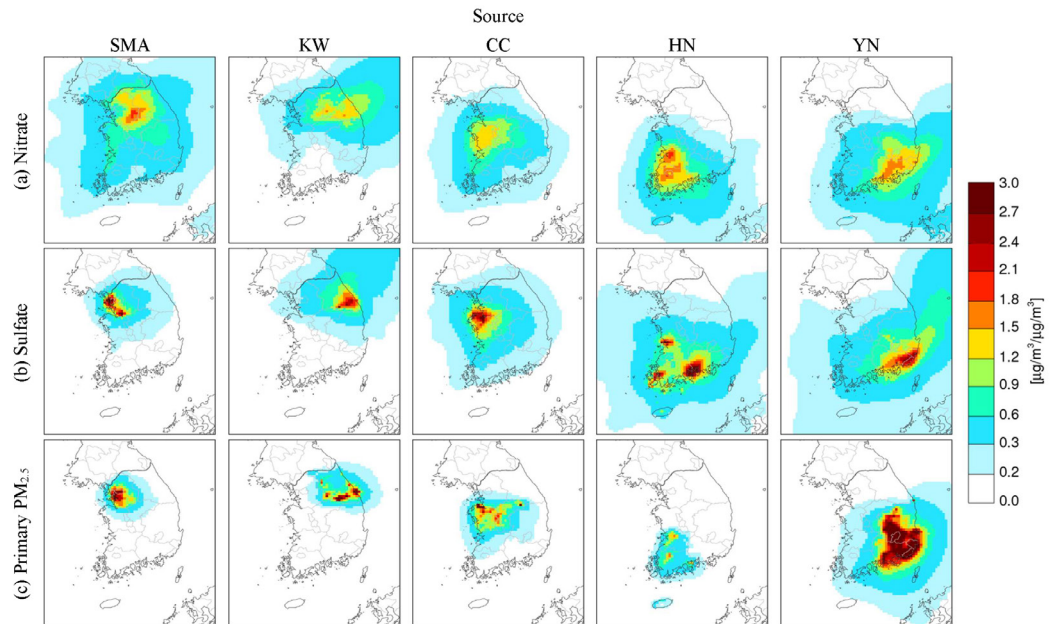


Fig. S1. The spatial distributions of relative changes in contributions to receptor regions induced by unit concentration reductions in source regions for (a) nitrate, (b) sulfate and (c) Primary PM_{2.5}. Acronyms for the regions are as follows; S.K.: South Korea, SMA: Seoul Metropolitan Area, KW: Kangwon, CC: Chungcheong, HN: Honam, YN: Yeongnam.

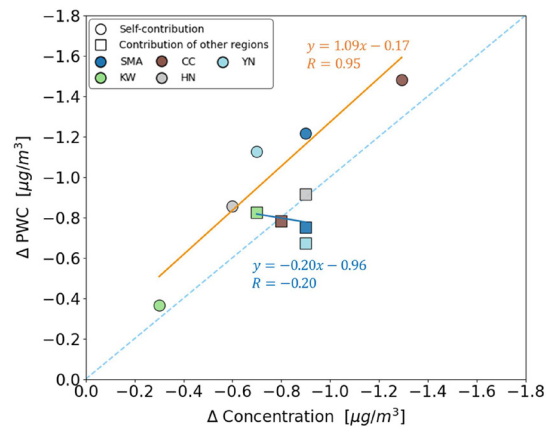


Fig. S2. Scatter plot of the relationship between policy-driven PM_{2.5} concentration changes (ΔC) and ΔPWC for 5 regions in South Korea. The symbols indicate self-contribution (circles) and contributions of other regions (squares).