

논문

국내 석탄-LNG 전환 정책이 지역 초미세먼지 농도에 미치는 영향

Impacts of the Korean Coal-to-LNG Power Plant Transition on Regional PM_{2.5} Concentration

이상현^{1),2),*}, 이수정²⁾, 문난경³⁾, 김맹기^{1),2)}

¹⁾국립공주대학교 대기과학과, ²⁾중부권 미세먼지연구관리센터, ³⁾한국환경연구원

Sang-Hyun Lee^{1),2),*}, Su Jeong Lee²⁾, Nankyong Moon³⁾, Maeng-Ki Kim^{1),2)}

¹⁾Department of Atmospheric Science, Kongju National University, Gongju, Republic of Korea

²⁾Particle Pollution Research and Management Center, Gongju, Republic of Korea

³⁾Korea Environment Institute, Sejong, Republic of Korea

접수일 2025년 11월 3일
수정일 2025년 11월 18일
채택일 2025년 11월 19일

Received 3 November 2025
Revised 18 November 2025
Accepted 19 November 2025

*Corresponding author
Tel : +82-(0)41-850-8526
E-mail : sanghyun@kongju.ac.kr

Abstract As part of its strategy to achieve the 2030 greenhouse gas reduction target and 2050 carbon neutrality goal, the Korean government is pursuing an energy transition by gradually phasing out aging coal-fired power plants and replacing them with liquefied natural gas (LNG) facilities. To assess the potential regional air quality impacts of this transition, we conducted a facility-level analysis of emissions and their effects on fine particulate matter (PM_{2.5}) concentrations. Based on facilities operating in 2022, 12 out of 58 coal-fired units are projected to be decommissioned by 2029, while 3 new units will be added. In addition, LNG facilities with a combined capacity of 13,422 MW are expected to be constructed, resulting in a net capacity increase of 10,442 MW. Using Telemonitoring System (TMS) data and actual 2022 electricity generation records, we estimated emission factors (EFs) for NO_x, SO_x, and total suspended particles (TSP) and applied them to project 2029 emissions. Results indicate that by 2029, NO_x emissions will increase by 4.3% (1,312 tons), whereas SO_x and TSP emissions will decrease by 12.6% (2,600 tons) and 18.1% (279 tons), respectively. A PM_{2.5} source contribution analysis suggests that the closure of coal-fired power plants in Chungnam and Gyeongnam will reduce local and nationwide PM_{2.5} concentrations, while new facilities in Gangwon and Gyeongbuk are expected to have little change in concentrations in neighboring areas. On a national scale, the net effect corresponds to a minor reduction of approximately 0.01 μg/m³ in PM_{2.5} concentrations by 2029, equivalent to approximately 0.2% of the reduction target. These findings highlight that although national PM_{2.5} levels may slightly decrease, the spatial redistribution of air pollution requires careful policy consideration to mitigate adverse impacts on local communities.

Key words: Air quality impact, Coal-fired power plant, Energy conversion policy, LNG conversion, PM_{2.5} source contribution

1. 서론

국제적 기후변화 대응 흐름과 이에 따른 국제사회 요구에 부응하기 위해 대한민국 정부는 2030년까지 온실기체를 2018년 대비 40% 감축하겠다는 ‘2030 국가 온실기체 감축목표’를 제시하고 (Joint Ministries of Republic of Korea, 2021), 2050년에는 온실기체 순 배출량을 0으로 만들어 탄소 중립을 달성하겠다는 ‘2050 탄소중립 목표’를 장기 국가 전략으로 공식 발

표하였다 (Yoon, 2022). 우리나라 온실기체의 상당 부분은 에너지 전환(발전) 부문에서 배출되며, 2018년 기준 전체 배출량의 약 37.1% (269.6백만 톤)가 이 부문에서 배출된 것으로 보고되고 있다. 이에 따라 부문별/연도별 감축 목표를 설정하고, 에너지 전환 부문에서는 44.4% 감축을 목표로 재생에너지 및 LNG 발전을 확대하는 골자의 이행계획을 수립하였다. 특히 11차 전력수급 기본계획에 따라 노후 석탄화력발전소를 단계적으로 폐쇄하고 일부는 LNG 발전으로

전환하는 정책이 진행 중이다(MOTIE, 2025). 이러한 변화는 온실기체뿐 아니라 초미세먼지(PM_{2.5}) 등 대기오염물질 저감 효과에 대한 기대를 높이고 있으며, 정부는 미세먼지 관리 종합 대책을 통해 2029년까지 전국의 연평균 PM_{2.5} 농도를 13 µg/m³ 이하로 낮추는 것을 목표로 설정하고 다양한 세부 전략을 추진하고 있다(Joint Interagency, 2024). 따라서, 국가의 에너지 전환 정책이 PM_{2.5} 농도에 미치는 영향을 체계적으로 분석하는 것은 매우 중요한 과제이다.

선행연구에서는 석탄화력발전소의 배출량과 대기 측정망 농도의 상관관계를 검토하고 다양한 가상 시나리오(폐쇄, 연료 전환, 위치 변경 등)에 기반한 대기질 영향 평가를 수행하였다(KEI, 2017). 연구 결과, 발전소 배출량과 측정 농도 간 상관 계수가 낮게 나타나 석탄 발전이 지역 대기질에 미치는 영향이 제한적인 것으로 분석되었다. 하지만 해당 연구에서도 언급하고 있듯이, 대기질 영향 평가의 타당성을 확보하기 위해서는 석탄 발전뿐만 아니라 다른 부문 배출원에 대한 고려가 수반되어야 하며 기상 조건, 배경 농도, 2차 생성 과정과 같은 대기오염 농도 변화의 핵심 요인들도 함께 반영되어야 한다(Heo *et al.*, 2009; Niu *et al.*, 2024). 이러한 한계점을 고려할 때, 발전소 배출량과 농도의 상관 관계를 단순 분석하기보다는, 배출량-농도 전환 과정에서 기상, 화학적 변환, 지표 침적, 배경 농도 등을 종합적으로 반영하는 보다 정밀한 대기질 모형을 활용한 평가가 요구된다(US EPA, 2018).

이에, 본 연구에서는 국가 에너지 전환 정책, 즉 석탄화력발전소의 단계적 폐쇄와 LNG 전환이 지역의 대기질에 미치는 영향을 종합적으로 평가하고자 한다. 이를 위해 첫째, 2022년 전국 석탄 및 LNG 발전설비와 NO_x, SO_x, TSP에 대한 배출량을 분석하고, 2029년까지의 설비 변화와 배출량 변화를 추정하였다. 둘째, 산정된 배출량 자료를 바탕으로 오염물질별 지역 PM_{2.5} 기여도를 분석하여, 에너지 전환이 지역 대기질 개선에 미치는 영향을 규명하였다. 본 논문은 2장(연구 자료 및 방법)과 3장(연구 결과)을 통해 2022년과 2029년 사이의 전국 발전 설비 및 배출량 변화,

그리고 이에 따른 지역별 PM_{2.5} 농도 변화를 분석하였으며, 4장에서는 연구 결론을 제시한다.

2. 연구 자료 및 분석 방법

2.1 2022년 석탄/LNG 발전 설비와 인위적 배출량 자료

2022년 기준 전국 석탄 및 LNG 발전 부문의 설비 현황과 발전소별 대기오염물질 배출량을 파악하기 위해 정부 및 지자체의 공개 데이터를 활용하였다. 먼저, 설비별 준공 시기, 발전 형식, 연료 종류, 용량, 발전량 등의 정보를 확인하기 위해 전력통계정보시스템(<https://epsis.kpx.or.kr/>)에서 제공하는 자료를 이용하였다. 설비별 대기오염물질(NO_x, SO_x, TSP) 배출량 정보는 한국환경공단의 대기오염물질 통합관리 시스템인 CleanSYS(<https://cleansys.or.kr/introBn.do>)을 통해 제공되는 굴뚝 자동측정기기(TMS) 측정값을 활용하였다. 마지막으로, 본 연구에서 수행한 미세먼지 기여도 분석을 위한 인위적 배출량 입력 자료로는 환경부 국가미세먼지정보센터에서 공개한 최신 국가 대기오염물질 배출량 통계인 CAPSS 2022 자료를 사용하였다.

2.2 2029년 배출량 추정 및 적용 방법

석탄화력발전소 폐지와 LNG 설비로의 대체로 인한 2029년 미래 배출량 변화를 예측하기 위해, 발전량 기반 배출 계수를 산정하여 이를 예측에 활용하였다. 배출 계수는 아래 식과 같이 물질별(NO_x, SO_x, TSP) 배출량(kg)을 연간 발전량(MWh)으로 나누어 산정하였다.

$$\text{배출 계수(kg/MWh)} = \frac{\text{연간 배출량(kg)}}{\text{연간발전량(MWh)}}$$

물질별/설비별 연간 배출량은 CleanSYS TMS 측정 자료를 이용하였고, 연간 발전량은 전력통계정보시스템에서 해당 연도의 발전회사별 데이터를 수집하였다.

2029년 설비별 예상 배출량을 산정하기 위해서는 두 가지 방식의 배출 계수 적용이 필요하다. 대부분의 석탄 및 LNG 발전소의 경우, 2029년까지 일부 설비(굴뚝)가 폐지되더라도 각 발전소의 잔존 설비는 계속 가동될 예정이므로, 이 경우에는 2022년 기준으로 발전소별 배출 계수를 산정한 후 이를 2029년 해당 발전소의 배출량 예측에 적용하였다. 특히, 특정 연도에만 의존했을 때 발생할 수 있는 불확실성(연도별 운영조건, 기상변화, 설비 가동률 변동 등)을 최소화하기 위해 2021~2023년 3개년 평균 배출 계수를 활용하였다. 두 번째 경우는, 2022년 이후 신규로 준공된 석탄화력 및 LNG 발전소들(3.1절의 표 참조)에 해당한다. 이들 설비는 기존 측정 자료가 없기 때문에, LNG 발전소의 경우에는 현재 운용중인 모든 설비의 3년 평균 배출 계수를 적용하였고, 석탄화력발전소의 경우에는 다음과 같은 기준을 적용하였다.

- 2022년과 2023년에 차례로 1, 2호기가 준공되는 강릉 안인 발전소는 2023년 배출 계수를 사용하였다.
- 2024년과 2025년에 차례로 1, 2호기가 준공되는 삼척 블루파워는 전체 설비에 대한 3년 평균 배출 계수를 다시 평균하여 적용하였다. 산정된 배출 계수는 아래 식을 통해 2029년 물질별 예상 배출량 추정에 활용하였다.

$$\begin{aligned} & 2029\text{년 예상배출량(kg)} \\ &= 2029\text{년 예상 연간발전량(MWh)} \\ &\quad \times \text{배출 계수(kg/MWh)} \end{aligned}$$

이때 필요한 예상 연간 발전량은 2029년에 가동될 설비의 총 용량(MW)에 예상 가동 시간(h)을 곱하여 계산하였다. 기본적으로, 예상 가동 시간은 설비별 3년 평균값을 적용하되, 강릉 안인의 경우에는 2023년도의 실제 가동 시간을 사용하였고, 삼척 블루파워는 이용률 50%를 가정하여 연간 가동 시간을 $0.5 \times 365 \times 24$ (h)로 계산하였다. 신규 LNG 설비 역시 전체 LNG 설비의 3년 평균 가동 시간을 기준으로 연간 발전량을 산정하였다.

2.3 인위적 오염물질 배출량의 PM_{2.5} 농도 전환율

인위적 오염물질의 배출량에 의한 대기 중 PM_{2.5} 농도 변화는 대기 중 화학, 수송, 침적 등 복잡한 물리/화학 과정을 거쳐 계산된다. 본 연구에서는 Moon and Seo (2018) 및 Moon *et al.* (2021)의 방법론을 이용해 계산된 전환율을 PM_{2.5} 농도 변화 분석에 사용하였다(<https://eiaresearch.kei.re.kr/analysis/dust>). 해당 연구에서 전환율 산정은 WRF v3.6.1, SMOKE v3.1, CMAQ v4.7.1로 구성된 대기질 모델링 체계를 기반으로 수행되었으며, 한반도 지역의 상세한 정보 산출을 위해 3 km 격자 해상도의 동지화 기법을 적용하였다. 모델링 결과에 대한 평가를 위해 선행연구에서는(Moon *et al.*, 2021) 전국 정주기상관측소 94곳의 2 m 기온과 10 m 풍속, 그리고 전국 대기오염측정소 90곳의 PM_{2.5} 측정값을 모델 결과와 비교하였으며, 주요 통계지표가 Emery *et al.* (2001, 2017)에서 제시한 수용 가능한 모델 성능 기준을 충족하는 것으로 보고되었다. 배출량 변화에 따른 농도 민감도 분석에는 Brute Force Method (BFM)을 사용하였으며, 이는 기본 모사 농도(C_{base})와 민감도 모사 농도(C_{sens})의 차를 배출량 변화율(ΔE)로 나누어 기여농도(Zero-Out Contribution: ZOC)를 산정한다(Kim *et al.*, 2017).

$$\text{ZOC} = \frac{C_{\text{base}} - C_{\text{sens}}}{\Delta E}$$

산정된 기여 농도를 해당 물질의 연간 배출량으로 나누어 오염물질 1톤당 PM_{2.5} 농도 생성량을 의미하는 전환율(Conversion Rate: CR)을 도출하였다.

$$\text{CR} = \frac{\text{ZOC}}{\text{연간 배출량}}$$

이를 바탕으로 전국 17개 지자체를 대상으로 오염원별(점, 선, 면), 오염물질별(NO_x, SO_x, NH₃, VOC, PM_{2.5}) 배출량의 PM_{2.5} 농도 전환율을 산정하였다. 본 연구에서는 2022년도 오염물질별 연간 배출량은 CAPSS 자료를 이용하였으며, 2029년 배출량은 추정 배출량을 적용하였다. 입력자료 생성시 TSP를 PM_{2.5}

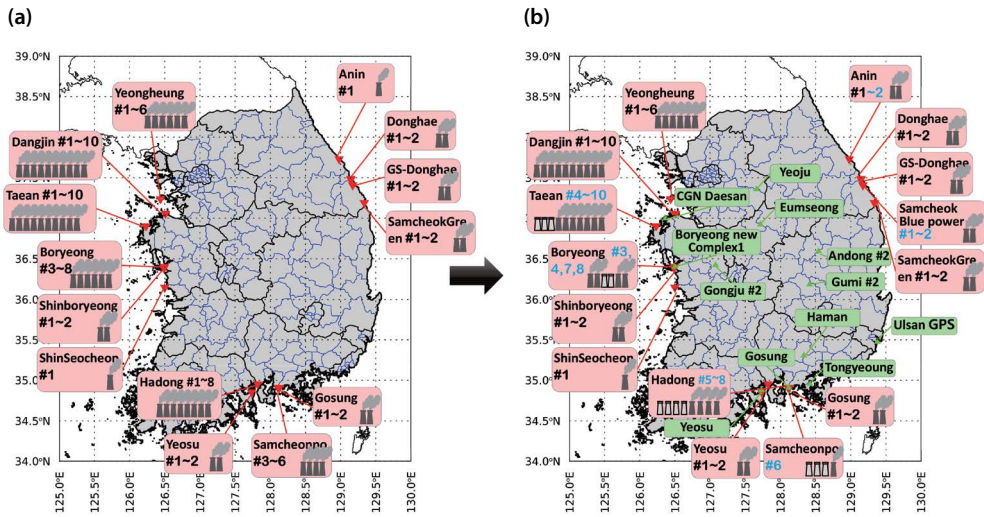


Fig. 1. (a) Distribution of coal-fired power plants operating as of 2022, (b) Distribution of coal-fired power plants scheduled to operate by 2029 (based on the 11th Basic Plan for Electricity Supply and Demand) and newly constructed LNG power facilities since 2022 (Note: Existing LNG facilities operating before 2022 were excluded from the figure to reduce visual complexity).

로 변환하는 부분에 석탄화력발전 설비에 대한 PM_{2.5}/TSP 평균 분율 0.7925 값을 적용하였다(NIER, 2014).

3. 결과 및 고찰

3.1 석탄 및 LNG 발전 설비 변화

석탄에서 LNG로의 전환이 대기오염물질 배출에 미치는 영향을 정량화하기 위해, 먼저 2022년 기준으로 가동 중인 전국의 석탄화력 및 LNG 발전소 현황을 분석하였다. 이후 10차 및 11차 국가 전력수급기본계획에 명시된 설비 변화 전망을 바탕으로 2029년까지 예상되는 설비 변화(폐지 및 신설 포함)를 분석하였다.

2022년 12월 기준, 국내에 총 58기의 석탄화력발전소가 가동 중이며, 이들의 용량 합계는 36,873 MW로 조사되었다. 지역별로는 충남 29기, 인천 6기, 전남 2기, 강원 7기, 경남 14기이다(그림 1a). 2029년까지 이중 총 12기(충남 태안의 3기와 보령의 2기, 경남 삼천포의 3기와 하동의 4기)가 폐지 예정이며, 강원도에 3

기(강릉 안인 1기, 삼척 블루파워 2기)의 신규 석탄화력 설비가 추가될 예정이다. 그 결과, 2029년 전체 석탄화력 설비는 총 49기, 총 용량 합계는 33,893 MW로 2022년 대비 2,980 MW 규모의 용량 감소가 예상된다.

이와 더불어, 폐지되는 석탄 설비를 대체하기 위해 건설되는 LNG 설비(보령 신복합, 공주, 함안 복합, 고성 천연, 구미, 안동 복합, 여수 천연)와 기타 신규로 준공되는 LNG 설비(여주, 울산, 씨지엔 대산, 음성 천연, 통영 천연)로 인해 13,422 MW 용량이 추가되는 것으로 파악되었다(그림 1b).

3.2 인위적 오염물질 배출량 분석

3.1절의 내용을 바탕으로, 석탄 및 LNG 발전 부문에서의 2022년 배출량을 분석하고 2029년 예상 배출량을 추정하였다. 표 1은 2022년 기준 전국의 석탄화력발전소 58기의 설비 현황 및 NO_x, SO_x, TSP의 연간 배출량을 보여준다. 각 발전소의 설비 정보(발전 용량, 연간 발전량, 가동 시간 등)는 전력통계정보시스템에서 제공된 자료를 활용하였고, NO_x, SO_x, TSP의 연간 배출량은 CleanSYS TMS 측정 자료를 기반으로

Table 1. Status of coal-fired power plants and annual emissions (unit: tonne) of NO_x, SO_x, and TSP by facility in 2022.

Region	Facilities	Total capacity (MW)	Annual generation (MWh)	Operating hours (h)	Annual emissions (ton)		
					NO _x	SO _x	TSP
Chungnam	Taeon (#1~10)	6,100	29,220,477	4,790	4,243.4	3,893.9	299.5
Chungnam	Dangjin (#1~10)	6,040	27,944,676	4,627	2,558.4	3,272.5	325.5
Chungnam	ShinSeocheon (#1)	1,018	4,647,748	4,566	213.6	120.2	2.7
Chungnam	Boryeong (#3~8)	3,050	14,614,100	4,792	1,146.2	1,531.7	155.9
Chungnam	Shinboryeong (#1~2)	2,038	12,431,565	6,100	479.4	790.9	39.3
Incheon	Yeongheung (#1~6)	5,080	25,297,951	4,980	1,863.7	2,580.0	128.2
Jeonnam	Yeosu (#1~2)	669	3,300,941	4,934	510.5	55.4	16.9
Gangwon	GS Donghae (#1~2)	1,190	7,495,573	6,299	580.8	331.3	35.1
Gangwon	SamcheokGreen (#1~2)	2,048	11,167,098	5,453	855.5	492.1	110.8
Gangwon	Donghae (#1~2)	400	1,870,760	4,677	482.7	1,263.5	17.8
Gangwon	Anin (#1)	1,040	2,965,856	2,852	324.5	8.6	14.9
Gyeongnam	GosungGreen (#1~2)	2,080	12,015,365	5,777	757.1	1,241.9	26.6
Gyeongnam	Samcheonpo (#3~6)	2,120	11,416,326	5,385	1,730.4	1,432.1	113.8
Gyeongnam	Hadong (#1~8)	4,000	22,359,122	5,590	3,319.5	3,568.6	247.8
Total					19,065.8	20,582.6	1,535.0

제시하였다. LNG 설비에 대해서도 동일한 방식으로 분석을 수행하였으며, 별도의 표는 제시하지 않았으나, 제주 지역을 제외한 전국의 복합화력발전소 중 2022년 기준 운영 중인 26개 설비에 대한 현황을 파악하고 동일한 세 물질에 대한 연간 배출량을 조사하였다.

분석 결과, 2022년 한해 동안 총 58기의 석탄 설비에서 배출된 NO_x, SO_x, TSP의 연간배출량은 각각 약 19,066톤, 20,583톤, 1,535톤으로 나타났으며(표 1), 26개 LNG 설비로부터의 NO_x 연간배출량은 약 11,539톤으로 확인되었다. 이를 환경부의 CAPSS 2022 자료에 수록된 전국 점오염원 배출량(NO_x: 188,448톤, SO_x: 96,638톤, TSP: 11,465톤)과 비교한 결과, 석탄 및 LNG 설비에서 배출된 물질별 연간 배출량이 점 오염원 전체 배출량에서 차지하는 비율은 NO_x 16%, SO_x 21%, TSP 13% 수준으로 분석되었다. 점 오염원이 전체 대기 오염원 중에서 차지하는 비중과 그 중에서도 석탄 및 LNG 발전 부문이 차지하는 비중이 제한적임을 고려할 때, 석탄 설비의 폐지/전환이 전국적인 대기질 변화(즉, PM_{2.5} 농도 변화)에 미치는 영향은 상대적으로 제한적일 수 있으며, 이는

이후 제시할 2029년 배출량 추정 및 PM_{2.5} 기여도 분석 결과 해석에 중요한 참고 자료가 될 것이다.

표 2는 산정된 배출 계수와 예상 연간 발전량을 바탕으로 추정된 2029년의 오염물질별 배출량을 2022년 수치 및 설비 용량과 함께 비교한 것이다. 정부의 에너지 전환 정책에 따라, 석탄 및 LNG 발전 부문의 총 설비 용량은 2029년까지 10,442 MW 증가, 2022년 대비 15%의 증가율을 나타낸다. 석탄화력발전소의 단계적 폐지로 인해 발전 설비는 58기에서 49기로 감소하며 이에 따라 SO_x 및 TSP 배출량은 각각 12.6%, 18.1% 감소하는 것으로 분석되었다. 반면, 약 13,422 MW 규모의 신규 LNG 설비가 추가됨에 따라, 전반적인 NO_x 배출량은 증가할 것으로 예상되며, 전체적으로 4.3%의 순 증가가 발생할 것으로 나타났다. LNG 연소의 경우 SO_x 및 TSP 배출은 매우 낮으나, NO_x는 고온 연소 공정에서 공기 중 질소의 산화를 통해 배출된다.

2022년 전국 석탄 및 LNG 발전 설비에서 배출되는 NO_x, SO_x, TSP 배출량의 지역별 분포를 살펴보면 그림 2와 같다. 3개 오염물질 모두, 석탄화력발전소가 집중 배치되어 있는 충남(29기) 및 경남(14기) 지역

Table 2. Changes in total capacity and annual NO_x, SO_x, TSP emissions (unit: tonne) of coal-fired and LNG facilities between 2022 and 2029.

		Fuel type	2022	2029	Difference (2029~2022)
Total capacity (MW)		Coal	36,873	33,893	-2,980
		LNG	32,552	45,974	+13,422
		Coal + LNG	69,425	79,867	+10,442 (+15%)
Annual emissions (ton)	NO _x	Coal	19,066	15,107	-3,959
		LNG	11,539	16,810	5,271
		Coal + LNG	30,605	31,916	1,312 (+4.3%)
	SO _x	Coal	20,583	17,982	-2,600 (-12.6%)
		TSP	Coal	1,535	1,256

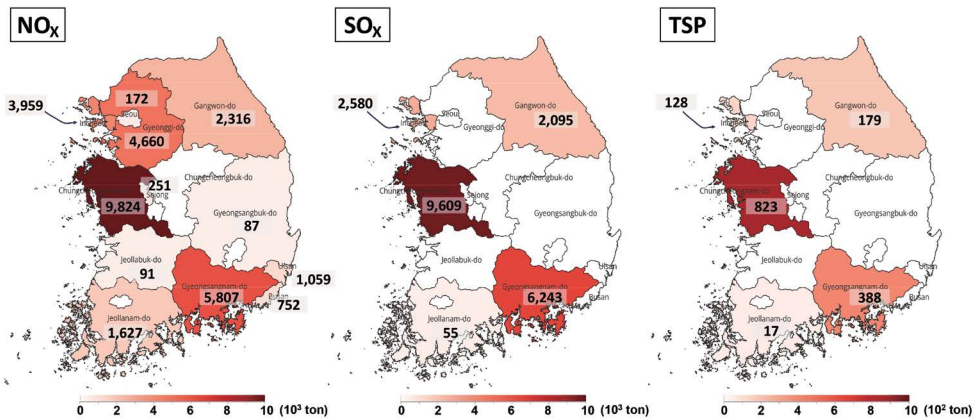


Fig. 2. Regional distribution of annual emissions (unit: tonne) of NO_x, SO_x, and TSP from coal-fired and LNG facilities in 2022.

에서 배출량이 가장 높은 것으로 나타났고 NO_x, SO_x, TSP 합산 배출량이 각각 전체의 38.4%와 23.6%를 차지하는 것으로 분석되었다. 경기 지역에는 석탄화력 발전소가 위치하고 있지 않으나, 전국 LNG 설비의 약 38%가 위치하고 있어 NO_x 배출량 증가에 상당 부분(4,660톤, 전체 NO_x 배출량의 15.2%) 기여하고 있는 것으로 나타났다. 인천의 배출량은 석탄화력발전소(영흥 6호기) 및 LNG(전체 설비의 15% 위치) 양쪽 설비의 기여에 의해 NO_x, SO_x, TSP 합산 배출량이 전국 배출량의 13%를 차지하는 것으로 나타났다.

그림 3은 본 연구에서 추정한 2029년 예상 배출량을 반영한 전국의 NO_x, SO_x, TSP 연간배출량 변화(2029년 배출량 - 2022년 배출량)를 지역별로 나타

낸 것이다. 가장 두드러진 배출량 감소가 나타나는 곳은 충남과 경남 지역으로, 충남의 경우 약 2,500 MW 규모의 석탄설비(총 5기; 태안 #1~3, 보령 #5~6)가 폐지되면서 NO_x, SO_x, TSP 배출량이 2022년 대비 각각 7.7% (753톤), 13.5% (1,299톤), 20% (163톤) 감소할 것으로 보인다. 경남에서는 2029년까지 약 3,700 MW 규모의 석탄 설비(총 7기; 삼천포 #3~5, 하동 #1~4)의 폐지가 예정되어 있어 그로 인한 배출량 감소가 NO_x, SO_x, TSP 각각 37% (2,140톤), 54% (3,369톤), 59.5% (231톤)에 이를 것으로 보인다. 주목할 점은, 충남과 경남 모두 각각 2,650 MW, 2,632 MW 규모의 신규 LNG 설비가 2029년까지 준공될 예정이며, 이에 따른 NO_x 배출량의 증가분이 본 연구의 2029년

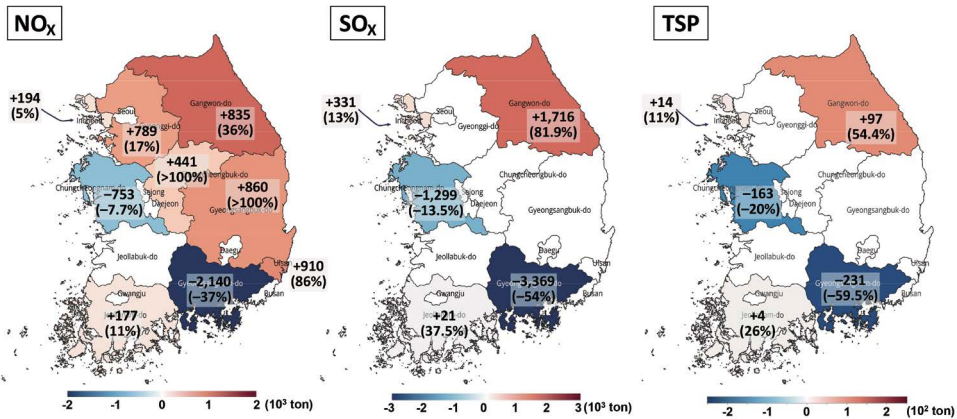


Fig. 3. Regional changes in annual emissions (unit: tonne) of NO_x, SO_x, and TSP from coal-fired and LNG facilities between 2022 and 2029.

배출량 추정에 반영되었다는 점이다. 그럼에도 불구하고, 두 지역 모두 NO_x 배출량이 2022년 대비 감소하는 것으로 나타났는데, 이는 석탄화력발전소의 대규모 폐지로 인한 감축 효과가 LNG 설비 증설에 따른 배출 증가를 상쇄하고도 남는 수준임을 의미한다. 즉, 동일한 발전 용량을 기준으로 할 때, LNG 발전 설비의 NO_x 배출 계수는 석탄화력 발전 설비에 비해 현저히 낮다는 점을 시사한다. 하지만, 본 연구에서 제시한 미래 배출량 전망은 NO_x 저감기술의 도입 수준과 운영 효율이 현재와 동일하다는 가정 하에 산정되었다. 실제로는 저감기술의 추가 도입 및 효율 향상 여부에 따라 배출량이 달라질 수 있으므로, 해당 분석은 기술 발전을 반영하지 않은 추정이라는 점을 언급한다.

반면 2029년까지 배출량이 증가할 것으로 예상되는 지역으로는 강원, 울산, 경남, 경기, 충북, 전남 등이 포함된다. 이 중 강원 지역은 총 3기(강릉 안인 #2, 삼척 블루파워 #1~2), 3,140 MW 규모의 신규 석탄 설비가 추가될 예정으로, NO_x, SO_x, TSP 배출량이 2022년 대비 각각 36% (835톤), 82% (1,716톤), 54% (97톤) 증가할 것으로 추정되었다. 강원을 제외한 나머지 지역의 경우, 신규 석탄 설비는 계획되어 있지 않으나, LNG 설비의 확충으로 인한 NO_x 배출량 증가가 예상된다. 특히 경기, 경북, 울산 지역에는 각각

약 2,000 MW 규모의 LNG 설비가 추가되면서 연간 NO_x 배출량이 800~900톤 수준으로 증가할 것으로 나타났으며, 충북(1,100 MW), 전남(500 MW) 지역도 LNG 설비 입지로 인해 일정 수준의 NO_x 증가가 예상된다.

한편, 전남 지역에서는 SO_x 및 TSP 배출량 또한 각각 21톤, 4톤 증가하는 것으로 분석되었는데, 이는 석탄 설비의 추가에 따른 결과가 아니라, 배출 계수 산정 과정에서 적용된 연도별 차이에 기인한 것으로 해석된다. 즉, SO_x 및 TSP의 배출 계수가 2022년 대비 2023년에 상대적으로 높게 나타나면서 3개년 평균값이 상향 조정되었기 때문이다. 이는 연도별 가동 여건 변화로 인한 배출 계수의 변동성이 반영된 결과로, 현실적인 추정일 수 있으나, 동시에 예측값의 불확실성 요인 중 하나로 간주될 수 있다.

3.3 에너지 전환에 의한 PM_{2.5} 기어 농도 변화 (2022~2029) 분석

정부의 에너지 전환 정책에 따른 전국 석탄화력발전소 폐지 및 LNG 전환으로 인한 대기오염물질 배출량 변화가 대기질 농도 변화에 어느 정도 기여하는지 그 영향을 파악하기 위해, 각 오염물질 배출량의 PM_{2.5} 기여 농도 변화를 분석하였다. 먼저, 2022년 배출량(CAPSS 2022) 기반으로 물질별 및 지역별 PM_{2.5}

기여도를 산정하였다. 이어 본 연구에서 추정한 2029년까지의 석탄 및 LNG 발전 부문의 배출량 변화 값을 2022년 각 지역의 점오염원 배출량 자료에 반영하여 2029년 배출량 자료를 구성하고 추정 배출량 시나리오에 대한 $PM_{2.5}$ 기여 농도를 계산하였다. 분석은 17개 지자체를 배출 지역(source region)과 수용 지역(receptor region) 관점에서 나누어 수행되었으며, 각 지자체의 인위적 배출량이 해당 지역을 포함하여 타 지자체에 미치는 $PM_{2.5}$ 기여 농도와 2029년 에너지 전환 단계에서 지자체별 기여 농도 변화를 고찰하였다.

그림 4는 2022년 기준 충남, 경남, 강원, 경북 4개 배출 지역의 전체 인위적 배출량에 의한 수용 지역의 $PM_{2.5}$ 기여 농도와 2022년과 2029년 사이 배출량 변화에 따른 수용 지역의 $PM_{2.5}$ 농도 변화를 나타내었다. 배출 지역의 인위적 배출은 해당 지역과 주변 지역뿐만 아니라 전국적인 농도에 영향을 주고 있으며(그림 4a, b), 특히 한반도 서쪽에 위치한 충남 지역의 배출은 대전, 세종, 충북, 전북에 주요한 영향을 주고 있으며 다른 지역에 비해 전국적인 영향도 높은 것으로 나타난다(그림 4a). 또한, 석탄 설비가 폐지되는 충남과 경남 지역에서는 해당 지역을 포함한 대부분의 수용 지역에서 $PM_{2.5}$ 농도 감소 경향이 나타났으며(그림 4a, b), 충남 지역에는 약 $0.022 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 의 최대 농도 감소 효과를 보였고 경남 지역에서는 $0.021 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 의 농도 감소 효과가 있는 것으로 나타났다. 최대 배출량 감축이 있는 충남 지역에 인접한 세종, 대전, 전북 지역의 기여 농도 감소는 대략 $0.01 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 수준으로 계산되었다. 한편, 신규 석탄 및 LNG 설비가 추가된 강원 지역은 $0.011 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 의 농도 증가가 나타났으며, 경북 지역에서는 에너지 전환에 의한 수용 지역에서의 $PM_{2.5}$ 농도 변화는 $0.002 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 의 미미한 증가로 확인되었다(그림 4c, d). 특히 강원 지역의 경우 발전 설비의 추가 또는 폐지로 인한 NO_x , SO_x , $PM_{2.5}$ 배출량 변화가 자체 지역($0.0107 \mu\text{g}/\text{m}^3$)보다는 인접 지자체인 충청북도의 $PM_{2.5}$ 농도 증가($0.0125 \mu\text{g}/\text{m}^3$)에 더 큰 영향을 미치는 것으로 나타났다(그

림 4c). 이는 강원도와 충북이 기상학적으로 연계된 권역에 위치해 있어 대기 중 오염물질의 수평 이동이 용이하며, 석탄화력발전소에서 배출되는 $PM_{2.5}$ 가 단거리 내에서 인접 지역의 농도에 빠르게 영향을 미칠 수 있기 때문이다. 이와 유사하게, 경북 지역 또한 자체 지역보다 대구, 울산, 경남 등 인접 광역 지자체에 대한 기여가 더 크게 나타나는 내륙형 고정 오염원의 특성을 보였다. 다만 두 배출 지역 모두에서 석탄화력폐쇄를 통한 에너지 전환 정책의 효과는 연평균 농도 수준에서 $0.01\sim 0.02 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 미만의 미미한 효과가 나타날 것으로 예상되었다. 이러한 결과들은 미세먼지 관리에 있어 개별 지자체 단위의 접근만으로는 한계가 있으며, 배출 지역과 수용 지역 간의 영향 구조를 고려한 공동 관리 권역의 설정이 필요함을 시사한다.

그림 5는 2022년부터 2029년 사이 16개 광역/지자체의 석탄 및 LNG 발전 설비에서 발생하는 NO_x , SO_x , $PM_{2.5}$ 의 연간 배출량 변화와 이로 인한 수용 지역별 $PM_{2.5}$ 농도 변화를 나타낸다. 배출량 감소는 충남과 경남에서만 발생했음에도 불구하고, 이로 인한 $PM_{2.5}$ 농도 변화는 총 10개 수용지역에 걸쳐 광역적으로 나타났다. 예를 들어, 울산 지역의 NO_x 배출량은 약 1,000톤 증가했으나, 인접한 경남 지역의 배출량 감소 영향으로 인해 울산의 $PM_{2.5}$ 농도는 오히려 감소하는 것을 확인하였다. 또한, 배출량 변화가 없었던 부산, 대구, 광주, 대전, 세종 지역에서도 충남 및 경남의 배출량 감축 효과로 인해 $PM_{2.5}$ 농도가 감소하는 경향을 보였다.

이와 같은 지역별 농도 변화를 살펴보면, 2029년까지 정부 정책에 따른 석탄 및 LNG 설비 변화로 인해 충남에서 $0.018 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 가장 높은 저감 효과를 보이며, 경남 지역에서 $0.016 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 수준의 $PM_{2.5}$ 농도 저감 효과가 나타나는 것으로 분석되었다. 이는 해당 지역의 설비 증설로 인한 농도 증가와 타 지역의 설비 폐지에 따른 농도 감소 효과가 상쇄된 결과로서의 순 변화값이며, 전국 지자체 단위에서의 연평균 값에서의 변화를 의미한다. 본 연구는 전체 국내 배출원

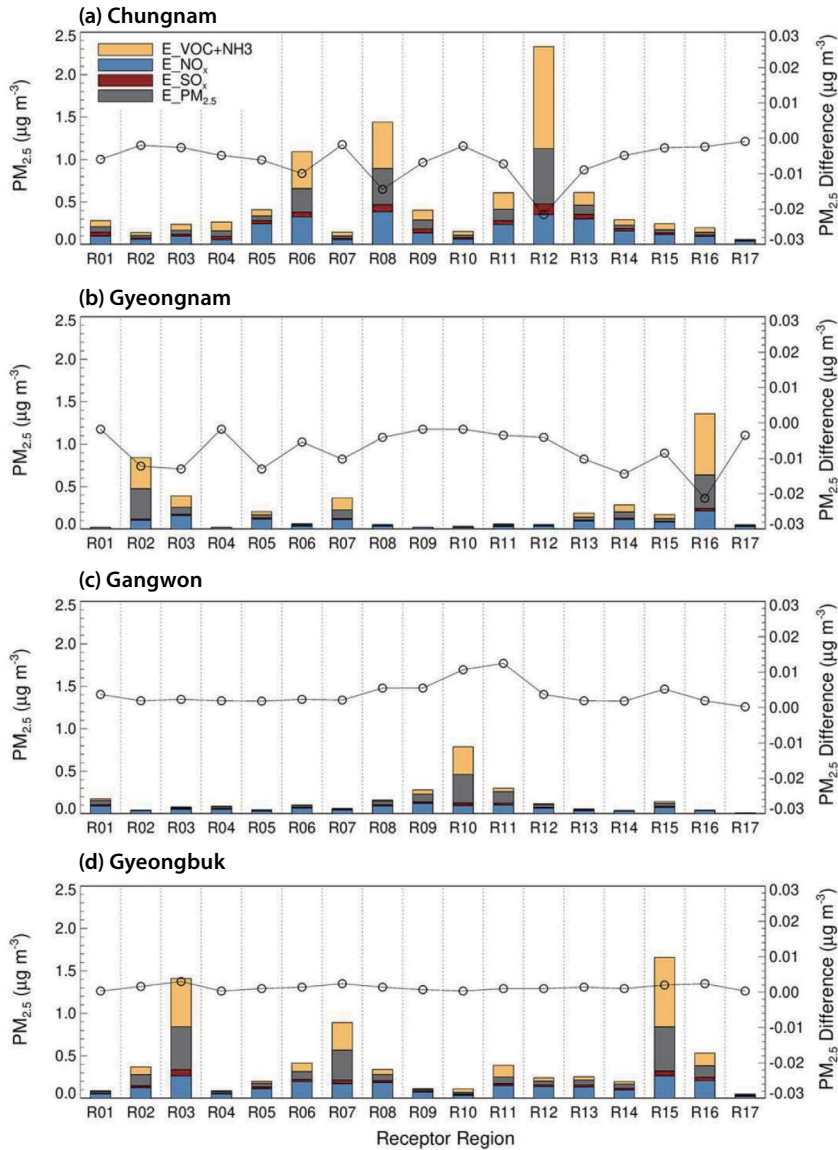


Fig. 4. Modeled contributions of anthropogenic emissions to regional $PM_{2.5}$ concentrations. Each panel shows the contribution from a specific source region: (a) Chungnam, (b) Gyeongnam, (c) Gangwon, and (d) Gyeongbuk. Stacked bars indicate the concentration (left axis) in 17 receptor regions resulting from source-region emissions of NO_x , SO_x , $PM_{2.5}$, and $VOC_s + NH_3$. The overlaid solid line indicates the projected change in $PM_{2.5}$ concentration from 2022 to 2029 (right axis). Receptor regions are defined as: Seoul (R01), Busan (R02), Daegu (R03), Incheon (R04), Gwangju (R05), Daejeon (R06), Ulsan (R07), Sejong (R08), Gyeonggi (R09), Gangwon (R10), Chungbuk (R11), Chungnam (R12), Jeonbuk (R13), Jeonnam (R14), Gyeongbuk (R15), Gyeongnam (R16), Jeju (R17).

(점·선·면) 중 점 오염원에 한정된 분석이며, 이 중에서도 석탄 및 LNG 설비가 차지하는 비중, 더 나아가 일부 설비의 폐지 또는 전환에 따른 배출량 감축 만

을 반영한 결과임을 고려할 때, 전국 평균 $0.01 \mu g/m^3$ 수준의 $PM_{2.5}$ 농도 저감은 정량적으로도 충분히 타당한 수치로 판단된다.

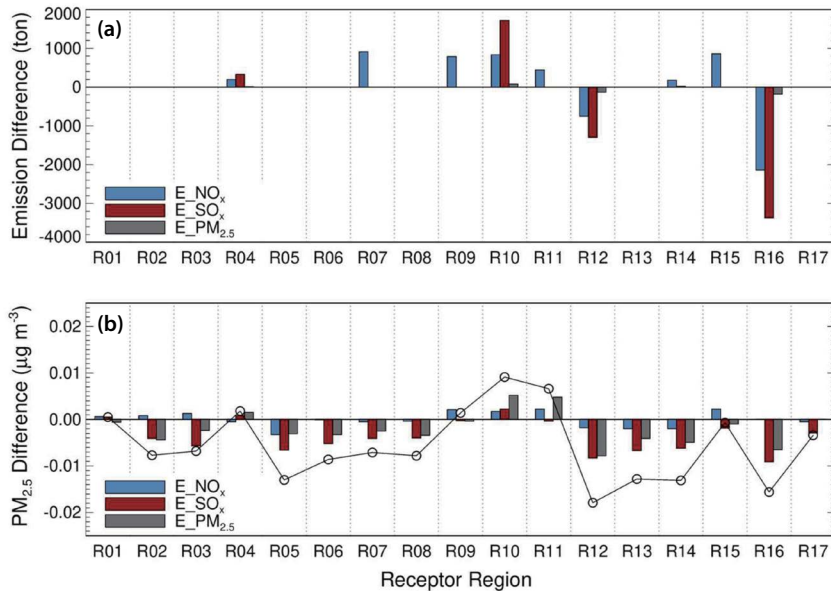


Fig. 5. Projected changes in emissions from coal-fired and LNG facilities and their impacts on regional $PM_{2.5}$ concentrations between 2022 and 2029. (a) The projected difference in annual emissions of NO_x , SO_x , and primary $PM_{2.5}$ (unit: tonne) for each of the 17 regions. (b) The resulting difference in annual mean $PM_{2.5}$ concentration (unit: $\mu g/m^3$), with the stacked bars delineating the contributions from the changes in emissions of each pollutant. The regions (R01-R17) are defined in Fig. 4.

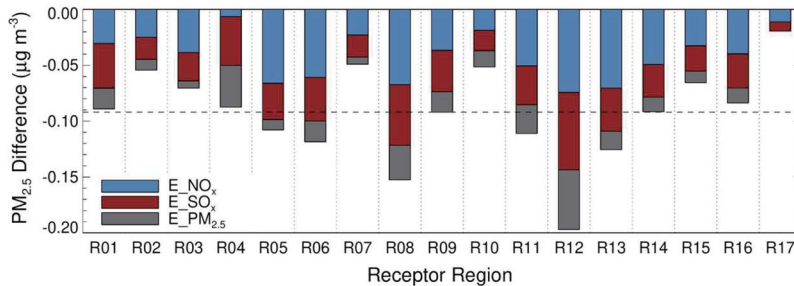


Fig. 6. Projected regional $PM_{2.5}$ concentrations changes in zero-out emissions from coal-fired and LNG facilities in Korea for each of the 17 regions. The regions (R01-R17) are defined in Fig. 4.

2022년 기준, 국내 $PM_{2.5}$ 연평균 농도는 $18.0 \mu g/m^3$ 이며(NIER, 2023), 이 중 약 50%가 국내 배출원에서 기인한다고 가정할 경우, 약 $0.01 \mu g/m^3$ 의 감소는 국내 기여 농도(약 $9 \mu g/m^3$) 기준으로 약 0.1%의 저감 효과에 해당한다. 정부의 미세먼지 관리 종합대책에서 제시한 2029년 $PM_{2.5}$ 농도 목표($13 \mu g/m^3$ 이하)를 달성하기 위해서는, 현재의 에너지 전환 정책(일부 석탄 설비 폐지 및 LNG 전환)만으로는 충분하지 않

을 수 있다. 실제로, 전국의 석탄 및 LNG 발전소에서 배출되는 NO_x , SO_x , TSP를 모두 제거하는 극단적 시나리오를 적용한 결과(그림 6), 전국 평균 $PM_{2.5}$ 농도는 약 $0.1 \mu g/m^3$ 감소하는 것으로 나타났다. 이는 발전 부문 배출이 국내 $PM_{2.5}$ 농도에 기여하는 정도를 정량적으로 파악할 수 있는 지표로 해석될 수 있으며, 향후 효과적인 배출 감축 정책 및 부문 간 통합적 접근의 필요성을 강조하는 결과로 해석된다.

4. 결 론

본 연구는 2030 국가 온실기체 감축 목표와 2050 탄소중립 목표 달성을 위한 대한민국의 에너지 전환 정책이 지역별 대기오염물질 배출량 및 초미세먼지($PM_{2.5}$) 농도에 미치는 영향을 종합적으로 평가하였다. 2022년과 2029년의 기준 연도를 설정하고, 해당 기간 동안의 예상 발전 설비 변화를 분석한 후 대기질 모델링에 기반한 인위적 배출량의 $PM_{2.5}$ 농도 전환율을 활용함으로써 단순 상관관계 분석에 머물렀던 기존 연구의 한계를 보완하였다. 분석 결과, 2022년 발전 설비를 기준으로 2029년까지 석탄화력발전소 12기의 폐지와 3기의 신설, 그리고 13,422 MW 규모의 신규 LNG 발전 설비 증설로 인해 전체 발전 설비 용량은 약 15% 증가하는 것으로 나타났다. 이로 인해 SO_x 와 TSP 배출량은 각각 12.6%와 18.1% 감소하는 긍정적인 효과가 있었으나, LNG 발전의 확대로 인해 NO_x 배출량은 4.3% 순 증가하였다. 이러한 배출량 변화가 대기질에 미치는 영향을 분석한 결과, 석탄 설비가 폐지되는 충남과 경남에서는 $PM_{2.5}$ 농도 감소가 예상된 반면, 신규 발전소가 들어서는 강원과 경북 지역에서는 주변 지역까지 영향을 미치는 농도 증가 양상이 나타났다. 이는 대기오염물질 배출이 국지적인 영향을 넘어 대기 순환에 따라 광범위하게 확산되며, 배출 지역과 수용 지역 간의 영향 구조를 고려한 공동 관리가 필요함을 시사한다. 전국 단위에서 볼 때, 일부 지역의 배출 증가와 다른 지역의 배출 감소가 상쇄되면서 2029년까지 전국 평균 $PM_{2.5}$ 농도는 약 $0.01 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 감소할 것으로 추정되었다. 이는 정부의 2022년 대비 2029년 $PM_{2.5}$ 농도 감축 목표($5.0 \mu\text{g}/\text{m}^3$)의 약 0.2% 수준으로 평가된다. 따라서 본 연구의 결과는 석탄-LNG 에너지 전환 정책만으로는 정부가 제시한 2029년 $PM_{2.5}$ 농도 목표($13 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 이하)를 달성하기에는 부족할 수 있음을 보여준다. 실제로, 전국의 발전 부문에서 발생하는 NO_x , SO_x , TSP 배출량을 모두 제거하는 극단적 시나리오를 적용한 결과, 전국 평균 $PM_{2.5}$ 농도는 약 $0.1 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 감소하는

것으로 확인되었다. 본 연구의 결과는 발전부문의 에너지 전환 정책의 단독 효과에 한정되므로 향후 대기질 목표 달성을 위해서는 발전 부문 외에도 산업, 수송, 난방 등 다양한 부문의 배출량 저감 노력을 종합적으로 고려하여 국가 전체의 대기질 변화를 예측하고, 이를 바탕으로 한 효과적인 미세먼지 관리 정책의 수립이 필요함을 시사한다.

아울러, 본 연구에서 사용된 전환율은 과거 기상장 및 배출량을 이용하여 수행된 대기질 모델링 결과를 기반으로 산정된 값이므로, 현재의 기상 및 배출 조건이나 비선형 물리/화학 반응 등이 충분히 반영되기 어려운 제약을 가진다. 뿐만 아니라 석탄 화력 에너지 전환 정책 효과는 국지성과 계절성이 강하게 나타나는 특징이 기대되므로 고해상도 대기질 모델링을 통한 분석이 요구된다. 보다 정확한 배출량-초미세먼지 농도 전환 관계를 도출하기 위해서는 모형 예측의 정량적 검증과 개선 연구가 선행되어야 하며, 단일 모형에 기반한 평가보다는 다양한 대기질 모형을 종합적으로 활용하는 평가 체계를 마련할 필요가 있을 것으로 판단된다.

감사의 글

이 연구는 환경부의 재원으로 국립환경과학원(NIER-2021-03-03-007) 및 한국환경연구원 일반사업 GP2020-09의 지원으로 수행되었습니다.

References

- Emery, C., Tai, E., Yarwood, G. (2001) Enhanced Meteorological Modeling and Performance Evaluation for Two Texas Ozone Episodes, Report to the Texas Natural Resources Conservation Commission, prepared by ENVIRON International Corp, Novato, CA. <http://www.tceq.state.tx.us/assets/public/implementation/air/am/contracts/reports/mm/EnhancedMetModelingAndPerformanceEvaluation.pdf>

- 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>
- United States Environmental Protection Agency (US EPA) (2018) Modeling Guidance for Demonstrating Air Quality Goals for Ozone, PM_{2.5}, and Regional Haze. EPA 454/R-18-009. U.S. Environmental Protection Agency, https://www.epa.gov/sites/default/files/2020-10/documents/o3-pm-rh-modeling_guidance-2018.pdf (accessed on Sep. 04, 2025).
- Heo, J.-B., Hopke, P.K., Yi, S.-M. (2009) Source apportionment of PM_{2.5} in Seoul, Korea. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 9(14), 4957-4971, <https://doi.org/10.5194/acp-9-4957-2009>
- Joint Interagency (2024) The 2nd Comprehensive Plan for Fine Dust Management (2025-2029)-Abridged version. https://me.go.kr/m/mob/policy_data/read.do?sessionId=Z15uqhcl5VUq8NYQYqghFZOQBwq7Mnti62QGtvC7.mehome2?menuId=92&condition.code=A3&seq=8486 (accessed on Sep. 04, 2025).
- Joint Ministries of Republic of Korea (2021) The 2030 Nationally Determined Contribution (NDC) Enhancement Plan. Ministry of Foreign Affairs, https://www.2050cnc.go.kr/flexer/view/BOARD_ATTACH?storageNo=174 (accessed on Sep. 04, 2025).
- Kim, S., Bae, C., Kim, B.-U., Kim, H.C. (2017) PM_{2.5} Simulations for the Seoul Metropolitan Area: (I) Contributions of Precursor Emissions in the 2013 CAPSS Emissions Inventory, *Journal of the Korean Society for Atmospheric Environment*, 33(2), 139-158, (in Korean with English abstract). <https://doi.org/10.5572/KOSAE.2017.33.2.139>
- Korea Environment Institute (KEI) (2017) Analysis of Environmental and Health Impacts by Fuel Replacement Scenarios for Coal-Fired Power Plants. KEI Project Report 2017-10, Republic of Korea, (in Korean with English abstract).
- Ministry of Trade, Industry and Energy (MOTIE) (2025) 11th Basic Plan for Electricity Supply and Demand, (in Korean).
- Moon, N., Seo, J. (2018) Analysis System for Regional Environmental Status to Support Environmental Assessment: Estimation of PM_{2.5} Contribution and Conversion Rates by Source Category over Local Governments. Korea Environmental Institute (KEI), (in Korean with English abstract). <https://library.kei.re.kr/pyxis-api/1/digital-files/0b2844ca-2d67-4dab-8ee7-0504ca7300a2> (accessed on Sep. 04, 2025).
- Moon, N., Seo, J., Kim, S. (2021) Estimation of Contribution and Emission-to-PM_{2.5} Conversion Rate by Each Local Government for Policy Support, *Journal of the Korean Society for Atmospheric Environment*, 37(6), 891-906, (in Korean with English abstract). <https://doi.org/10.5572/KOSAE.2021.37.6.891>
- National Institute of Environmental Research (NIER) (2014) PM_{2.5} Emission Factors Guidebook: Based on 2011 Air Pollutant Emission Data, (in Korean). NIER-GP2014-040, Republic of Korea. (in Korean) <https://www.air.go.kr/article/view.do?boardId=8&articleId=41&boardId=8&searchLikeColumn=TITLE&menuId=49¤tPageNo=2> (accessed on Sep. 04, 2025).
- National Institute of Environmental Research (NIER) (2023) Air Environment Yearbook 2022. NIER-GP2023-046, Republic of Korea. (in Korean) <https://www.airkorea.or.kr/jfile/readDownloadFile.do?fileId=192e5b0899436&fileSeq=1> (accessed on Sep. 04, 2025).
- Niu, J., Li, H., Liu, X., Lin, H., Zhou, P., Zhu, X. (2024) Driving Force of Meteorology and Emissions on PM_{2.5} Concentration in Major Urban Agglomerations in China, *Atmosphere*, 15(12), 1499. <https://doi.org/10.3390/atmos15121499>
- Yoon, S.-J. (2022) Korea's 2050 carbon neutrality scenario: Contents and challenges, *Energy Focus*, Winter 2021, Korea Energy Economic Institute (KEEI), 18-32. (in Korean), https://www.keei.re.kr/keei/download/focus/ef2112/ef2112_30.pdf

Authors Information

이상현(국립공주대학교 대기과학과 교수)
(sanghyun@kongju.ac.kr)

이수정(충부권 미세먼지연구관리센터 연구교수)
(sj.lee@kongju.ac.kr)

문난경(한국환경연구원 선임연구위원)
(nkmooon@kei.re.kr)

김맹기(국립공주대학교 대기과학과 교수)
(mkkim@kongju.ac.kr)