

기술자료

국내외 주요 대기오염물질의 현황 분석을 통한 충청남도 대기환경측정망 장기 운영 전략 제언

Proposal for a Long-term Operation Strategy for Air Quality Monitoring Station in Chungcheongnam-do Based on Analysis of Domestic and International Air Pollutant Trends

황규철[†], 김중범^{†,*}, 고성훈, 이해연, 김정호¹⁾, 김동호²⁾, 이상덕²⁾, 김나래³⁾

충남연구원 서해안기후환경연구소, ¹⁾열린공간,

²⁾강원대학교 미세먼지통합관리학과, ³⁾금강유역환경청 측정분석과

Kyuchoel Hwang[†], Jong Bum Kim^{†,*}, Seong Hun Go, Hye Yeon Lee, Jeongho Kim¹⁾, Dongho Kim²⁾, Sang-Deok Lee²⁾, Na Rea Kim³⁾

Seohaean Research Institute, ChungNam Institute, Hongseong, Republic of Korea

¹⁾Open space Co., Seoul, Republic of Korea

²⁾Department of Integrated Particulate Matter Management, Kangwon National University, Chuncheon, Republic of Korea

³⁾Geum River Basin Environment Office, Daejeon, Republic of Korea

접수일 2025년 10월 13일

수정일 2025년 11월 8일

채택일 2025년 11월 11일

Received 13 October 2025

Revised 8 November 2025

Accepted 11 November 2025

[†]These two authors contributed equally to this work as co-first authors.

*Corresponding author

Tel : +82-(0)41-630-3924

E-mail : kjb0810@cni.re.kr

Abstract In Korea, while primary pollutants have generally declined, fine particulate matter (PM_{2.5}) and ozone (O₃) remain persistent challenges, underscoring the need for a strategic realignment of monitoring priorities. However, past practice has tended to maintain broad coverage of legacy pollutants such as SO₂ and CO, even where consistently below the national standards and the marginal policy value of continued universal monitoring is limited. This study analyzes Chungcheongnam-do (Chungnam) integrating national and provincial emission inventories with long-term ambient observations and international benchmarks to evaluate network operation options. In Chungnam, annual PM_{2.5} concentrations have consistently exceeded the national standard since monitoring began, and O₃ has shown a pronounced upward trend. By contrast, SO₂ and CO concentrations remain far below their standards, reflecting effective combustion controls and sulfur management. Given the current concentration levels, detection limits of routine instruments, and the costs of procurement and maintenance, we assess the limited marginal utility of continuing SO₂ and CO measurements at all urban air quality monitoring station (AQMS) sites. We therefore suggest reallocating capital and operating budgets from low-utility SO₂ and CO monitoring to enhanced photochemical monitoring. These actions will increase the cost effectiveness and policy relevance of the AQMS network while maintaining representativeness for priority pollutants. Although the analysis centers on Chungnam, the framework and recommendations are transferable to other regions planning medium- to long-term AQMS strategies in the future.

Key words: AQMS, CAI, Air quality policy, Cost-effectiveness

1. 서 론

환경부는 미세먼지 (particulate matter less than 10 μm, PM₁₀)를 비롯하여 총 64개 물질을 대기오염물질로 규정하여 관리하고 있다(MOE, 2021). 대기오염물

질은 인체를 비롯한 환경과 동식물에 다양한 피해를 야기할 수 있으며 (Manisalidis *et al.*, 2020; Kampa and Castanas, 2008; Curtis *et al.*, 2006), 대기 중에 배출된 후 다양한 환경 및 기상조건에 따라 희석·확산되어 주변에 영향을 미치게 된다(Liu *et al.*, 2016). Fang *et al.*

(2013)은 과도한 대기오염물질 배출은 인간의 사망률 증가에 높은 상관성이 있는 것으로 보고하였고, 대기오염물질 배출에 따른 피해 예방과 장기적인 정책 추진의 효과 분석을 위해 대기환경측정망을 설치·운영하고 있다(NIER, 2024). 우리나라에서는 정부와 지방자치단체에서 12 종류의 대기환경측정망을 운영하고 있으며, 2024년 12월 기준 전국 955개의 측정소가 설치되어 있다(NIER, 2024). 지방자치단체에서 운영하는 도시대기측정망(air quality monitoring station, AQMS)은 지역 내 대기질 농도 파악을 목적으로 운영되며, 전체 측정망 중 70.5% (673개소)를 차지한다(MOE, 2024). 2016년부터 PM_{2.5}가 기준물질에 포함되면서 총 6개 기준물질(SO₂, NO₂, CO, PM₁₀, PM_{2.5}, O₃)을 측정 중에 있다. 이후 벤젠과 납이 환경기준물질에 포함되었으나, 이 물질들은 AQMS보다는 유해대기측정망 또는 광화학측정망과 같은 특수목적 측정망에서 측정·분석이 이루어지고 있다(NIER, 2024).

Kim (2017)은 AQMS 데이터를 기반으로 1999년부터 2015년까지 PM₁₀과 PM_{2.5}, NO₂를 대상으로 장기 변화 추이를 분석하였고, Yeo and Kim (2020)은 전국 252개 AQMS 데이터를 활용하여 SO₂ 농도의 연간 및 계절 변화, 대기정책지원시스템(clean air policy support system, CAPSS)의 배출량과의 상관성 분석을 실시하였다. 또한 Yeo *et al.* (2019)은 서울의 AQMS 자료 중 PM₁₀과 PM_{2.5}를 대상으로 장기변화 추이 및 고농도시 공간별 농도변화 특성을 분석하였고, 향후 연구 방향에 대해 제시하였다. Jeong and Kim (2024)은 국내의 대기환경측정망 설치 현황과 온실가스 항목에 대한 추가 방안 등 새로운 환경에 대한 시사점을 제시하였다. 이처럼 다양한 목적으로 설치된 AQMS는 환경부에서 고시한 “대기환경측정망 설치·운영 지침”을 기반으로 운영되고 있다. 이 지침은 5년 단위로 측정망의 설치, 운영, 장비의 유지관리, 자료 선별 및 확정 방법 등을 계획하고, 매년 수정·보완하여 고시하고 있다(Kim and Park, 2020). 하지만 시대가 변화함에 따라 대기오염 관심 물질과 배출 특성은 변화하고 있으며, 과거 문제가 되었던 물질이 최근에는 관리 필

요성이 감소하기도 하고, 반대로 새로운 물질의 관리 필요성이 제기되기도 한다. 최근 환경기준물질 중 O₃과 PM_{2.5}를 제외한 대부분의 물질의 농도가 감소 추세에 있으며(Kim, 2013), 기후변화 등에 대한 영향 증가로 CO₂와 같은 기후변화 유발물질에 대한 관측 필요성이 대두되고 있다(Joo *et al.*, 2025).

충청남도(충남)는 한반도 정서쪽에 위치하고 있어 중국 등 외부로부터 유입되는 장거리 이동오염물질의 직접적인 영향권에 포함되며, 석탄화력발전소, 제철소, 석유화학단지과 같은 대형배출시설들이 다수 위치하고 있어 지역적으로 대기오염에 대한 관심이 높은 지역이다(Hwang *et al.*, 2023). 충남의 경우 2016년까지 15개 시군의 기초지자체 중 천안, 아산, 서산 등 일부 지역에 단 5개의 AQMS가 운영되었다. 하지만 미세먼지에 대한 관심이 증가하기 시작한 2017년 이후 꾸준히 증가하여 2025년 기준 40개소의 측정망이 설치되어 운영되고 있다(MOE, 2023). 과거 대비 양적으로 많은 수의 AQMS가 증설되었지만 지역 현안 문제 해결과 근본적인 원인 분석을 위해서는 기존 측정항목 재검토와 최근 환경 이슈를 반영한 장기적 운영 방안 수립이 필요하다.

이에 본 연구에서는 현재 AQMS에서 측정 중인 물질에 대해 국내외의 주요 도시의 배출과 농도 수준을 파악하였고, 각 항목에 대한 모니터링 필요성을 검토하여 향후 장기적인 관점에서 AQMS 운영 방안을 제시하고자 한다.

2. 연구 방법

2.1 국내외 환경자료 수집

충남을 비롯한 전국 대기오염 현황 분석을 위해 배출량과 농도 자료를 활용하였다. 배출량 자료는 국가미세먼지정보센터에서 연단위로 발간하고 있는 CAPSS를 활용하였다. 정확한 배출량 변화 분석을 위해서는 장기적인 변화 추세 검토가 필요하다. 하지만 CAPSS가 최근 산정방식을 개정하였고, 상이한 산정

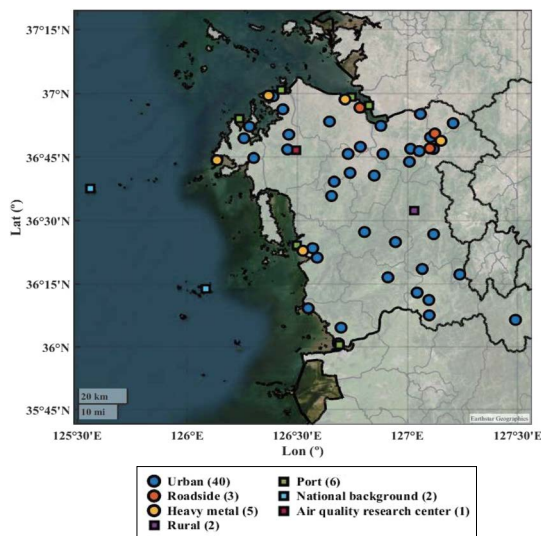


Fig. 1. Spatial distribution of AQMS installed in Chungnam.

방법을 활용한 자료 간 비교는 혼란을 야기할 수 있다. 이에 본 연구에서는 Version 6를 활용하여 산정된 2016년부터 가장 최근 자료인 2022년도를 대상으로 선정하였다. 농도 자료는 에어코리아에서 제공하고 있는 대기환경연보를 활용하였으며, 대상 지역은 전국과 충남으로 한정하였다. 지역에 대한 평균농도는 그 지역에 설치된 전체 측정소의 평균농도로 나타내기 때문에 측정소 위치와 추가 여부에 따라 상이한 결과를 초래할 수 있다. 하지만 현재 지역 대표농도 산출에 지역 내 모든 측정소의 평균농도를 사용하고 있기 때문에 본 연구에서도 지역 측정소의 평균값을 그 지역의 대표농도로 사용하였다. 그림 1은 2025년 기준 현재 충남 지역에 설치·운영되고 있는 대기환경측정망의 위치를 나타낸 것이다. 지자체 차원에서 관리되고 있는 도시대기와 도로변대기, 중금속 측정망은 각각 40개소, 3개소, 5개소가 있으며, 국가에서 관리하고 있는 교외대기와 항만대기, 국가배경, 유해대기측정망은 각각 2개소, 6개소, 4개소(도서 2개소, 선박 2개소), 6개소가 운영되고 있다.

해외 주요도시의 농도 자료는 에어코리아에서 고시된 자료와 IQAir (<https://www.iqair.com/kr>) 및 Air

Pollution in world (<https://aqicn.org/map/world/>)의 자료를 사용하였으며, 배출량 자료는 유럽연합(European Union, EU)과 미국 환경청(United States environmental protection agency, U.S. EPA) 홈페이지의 data sheet를 활용하였다. 배출량 자료는 국내 배출량 자료와의 정합성 유지를 위해 2016년부터 2022년까지로 범위를 설정하였다.

2.2 측정망 운영 정보

대기환경측정망에 대한 자료는 국립환경과학원에서 고시하고 있는 “대기환경측정망 설치·운영 지침(2024)”을 기반으로 하였다(NIER, 2024). 환경기준 물질에 대한 측정장비에 대한 유지관리 비용 정보는 각 측정장비를 수입·보급하는 업체로부터 제공받아 활용하였다.

3. 연구 결과

3.1 국내외 주요 대기오염물질의 관리 현황

표 1은 세계보건기구(World health organization, WHO)와 EU를 비롯하여 U.S. EPA, 일본과 국내 환경부 및 충남의 대기환경기준을 나열한 것이다. PM(PM_{10} , $PM_{2.5}$)과 벤젠, 납(Pb)의 경우 무게 단위(W/V)로 전 세계가 공용으로 표기하고 있으나, 가스상 오염물질의 경우 한국(충남)과 미국, 일본은 부피 단위(V/V)를 사용하는 반면 WHO와 EU는 무게 단위를 사용하고 있다. 이에 각 국가별로 제시하고 있는 기준 농도를 표 1에 표기하였으며, 상호 비교를 위해 WHO와 유럽의 무게 농도는 상온 조건(21°C, 1기압)을 기준으로 변환한 부피 농도를 기준 농도 아래 표기하였다.

$PM_{2.5}$ 의 연평균 기준은 WHO가 $5 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 가장 엄격한 기준을 가지고 있으며, 미국의 경우 1차 기준(Primary standards, P)이 $9 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 그 뒤를 이었다. 그 외 미국의 2차 기준(Secondary standards, S)과 일본, 한국 모두 $15 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 동일한 기준을 보였다. 충남의 경우 $20 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 가장 느슨한 기준을 가지고 있는

Table 1. Air quality standards of major countries worldwide.

Pollutants		WHO	EU	U.S.A	Japan	Korea	Chungnam
Reference		WHO (2021)	EU (2020)	U.S. EPA (2024)	MOE of Japan (1997)	MOE (2023)	Chungnam (2025)
PM _{2.5}	Annual	5 µg/m ³	25 µg/m ³	9 ^P µg/m ³ 15 ^S µg/m ³	15 µg/m ³	15 µg/m ³	20 µg/m ³
	Daily	15 µg/m ³		35 ^{P5} µg/m ³	35 µg/m ³	35 µg/m ³	40 µg/m ³
PM ₁₀	Annual	15 µg/m ³	40 µg/m ³			50 µg/m ³	40 µg/m ³
	Daily	45 µg/m ³	50 µg/m ³	150 ^{P5} µg/m ³	100 µg/m ³	100 µg/m ³	80 µg/m ³
	1 hr				200 µg/m ³		
O ₃	Peak season	60 µg/m ³ (30 ppb)					
	8 hr	100 µg/m ³ (50 ppb)	120 µg/m ³ (60 ppb)	70 ^{P5} ppb		60 ppb	60 ppb
	1 hr				60 ppb	100 ppb	100 ppb
NO ₂	Annual	10 µg/m ³ (5 ppb)	40 µg/m ³ (21 ppb)	53 ^{P5} ppb		30 ppb	20 ppb
	Daily	25 µg/m ³ (13 ppb)			40~60 ppb	60 ppb	40 ppb
	1 hr	200 µg/m ³ (105 ppb)	200 µg/m ³ (105 ppb)	100 ^P ppb		100 ppb	80 ppb
SO ₂	Annual					20 ppb	10 ppb
	Daily	40 µg/m ³ (15 ppb)	125 µg/m ³ (47 ppb)		40 ppb	50 ppb	30 ppb
	1 hr		350 µg/m ³ (132 ppb)	75 ^P ppb	100 ppb	150 ppb	100 ppb
CO	Daily	4 mg/m ³ (3 ppm)			10 ppm		
	8 hr	10 mg/m ³ (9 ppm)	10 mg/m ³ (9 ppm)	9 ^P ppm	20 ppm	9 ppm	5 ppm
	1 hr	35 mg/m ³ (30 ppm)		35 ^P ppm		25 ppm	10 ppm
Pb	Annual	0.5 µg/m ³	0.5 µg/m ³	0.15 ^{P5} µg/m ³		0.5 µg/m ³	0.3 µg/m ³
Benzene	Annual		5 µg/m ³		3 µg/m ³	5 µg/m ³	3 µg/m ³

※ P: Primary standards provide public health protection, including protecting the health of "sensitive" populations such as asthmatics, children, and the elderly.

※ S: Secondary standards provide public welfare protection, including protection against decreased visibility and damage to animals, crops, vegetation, and buildings.

(): The number in parentheses is the value converted from W/V units to V/V units based on standard ambient conditions (21°C, 1 atm)

EU (25 µg/m³)보다는 엄격한 기준을 설정하고 있다. 미국의 경우 1차와 2차로 구분하여 기준을 설정하고

있는데 천식이 있거나 영유아, 노약자 등 환경오염에 민감한 직군에 대해서는 1차 기준을 적용하고, 그 외

에 대해서는 2차 기준을 적용하고 있다. 일평균 기준 역시 WHO가 $15 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 가장 엄격한 기준을 가지고 있으며, 그 외 미국과 일본, 대한민국은 $35 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 동일했다. 충남의 경우 $40 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 위 기준보다 느슨한 기준을 가지고 있다. 환경기준물질에 대한 기준 농도 중 $\text{PM}_{2.5}$ 를 제외한 다른 물질들은 국가 기준 대비 상대적으로 엄격하거나 같은 수준을 보인 반면 $\text{PM}_{2.5}$ 기준 농도는 상대적으로 느슨한 기준을 설정하고 있었다. 이는 국가 기준의 경우 미세먼지에 대한 이슈와 국민적 관심 증대로 2018년 기준이 강화된 것에 반해 충남의 경우 2016년에 설정된 기준이 그대로 유지되면서 나타난 결과이다.

PM_{10} 의 경우 WHO와 EU, 대한민국과 충남에서 연평균 기준이 설정되어 있고, 일본과 미국은 연평균 기준은 없다. 특히 일본의 경우 일평균과 더불어 시간평균농도 기준을 가지고 있었다. 연평균 기준 역시 WHO가 $15 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 가장 강한 기준을 가지고 있으며, EU와 충남 $40 \mu\text{g}/\text{m}^3$, 대한민국 $50 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 이다.

충남의 경우 대부분 대한민국의 기준보다 강력한 관리기준을 설정하고 있다. 대기환경보전법에서는 환경기준물질에 대해 지역별로 자체적인 조례를 지정하여 관리할 수 있도록 제시하고 있는데, 대부분의 지자체에서는 기존 국가 기준보다 강력한 관리기준을 설정하고 있다. 충남 역시 PM_{10} 을 비롯한 다른 환경기준물질에 대해 국가 기준보다 낮은 농도 수준을 제시하고 있어 기준 강화 없이도 기존보다 낮은 농도로 설정된 것처럼 나타났다(ChungNam, 2025).

일평균 기준은 미국이 $150 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 가장 느슨한 기준을 설정하고 있으며, 일본과 대한민국 $100 \mu\text{g}/\text{m}^3$, 충남 $80 \mu\text{g}/\text{m}^3$, EU $50 \mu\text{g}/\text{m}^3$, WHO $45 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 확인되었다. 앞서 언급한 것처럼 일본의 경우 시간 평균기준이 $200 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 설정되어 있는데 최근 동아시아의 PM_{10} 농도변화를 봤을 때 황사 등 장거리 이동오염물질의 영향이 없을 경우 해당 기준을 넘기는 날은 거의 나타나지 않을 것으로 예상된다(Cho et al., 2021; Lee et al., 2020).

O_3 의 경우 WHO에는 첨두시간대에 대한 기준을 설

정하고 있었으며, 그 외 대부분의 나라에서는 8시간 평균 최대농도를 채택하고 있다. 일본은 앞서 PM_{10} 과 마찬가지로 시간 평균기준을 설정하고 있으며, 이는 대한민국과 충남도 동일하다. O_3 에 대한 기준은 WHO가 8시간 평균 최대농도 $100 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (50 ppb)로 가장 엄격한 기준을 설정하고 있으며, EU와 대한민국, 충남이 60 ppb ($120 \mu\text{g}/\text{m}^3$), 미국 70 ppb로 확인되었다.

SO_2 와 NO_2 는 연평균과 일평균, 시간평균 기준이 설정되어 있었다. 장기적인 관점의 관리가 필요한 $\text{PM}_{2.5}$, PM_{10} 의 경우 연평균 및 일평균에 초점이 맞춰져 있는 반면, 실시간 생성과 소멸이 관찰되는 O_3 과 유해성이 높은 CO의 경우 시간 단위(8시간, 1시간) 기준이 설정되어 있다. NO_2 와 SO_2 의 경우 장기적인 관점의 관리와 유해성에 의한 단기적인 관리가 동시에 필요하여 장단기 기준이 모두 설정되어 있다. NO_2 는 일본을 제외한 모든 지역에서 연평균 기준을 설정하고 있다.

CO의 경우 WHO와 일본에서 각각 $4 \text{ mg}/\text{m}^3$ (3 ppm)과 10 ppm으로 일평균 기준이 설정되어 있으며, 그 외 모든 나라에서 8시간 평균 최대농도 기준을 주요 관리기준으로 설정하여 관리하고 있다. WHO와 EU는 8시간 평균 최대농도 기준 $10 \text{ mg}/\text{m}^3$ (9 ppm)로 미국과 대한민국 모두 9 ppm의 동일한 기준을 가지고 있으며, 이는 일본의 20 ppm보다 강력한 기준이다.

그 밖에 납(Pb)과 벤젠(Benzene)이 추가적으로 관리 항목으로 설정되어 있는데 납은 $0.5\sim 0.15 \mu\text{g}/\text{m}^3$, 벤젠은 $3\sim 5 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 유사한 기준을 가지고 있었다. 국내 기준은 우리나라의 여건을 반영하기보다는 설정 초기 국외 사례를 참고하여 설정된 경우가 많다. 따라서 납과 벤젠 역시 국외 사례를 기반으로 기준이 설정되어 외국과 동일한 기준으로 운영되고 있다.

3.2 주요 국가의 대기오염물질 배출 현황

배출원으로부터 배출된 대기오염물질은 대기 중에서 희석, 확산되고, 주변 지형이나 환경조건에 따라 정체 또는 이동하면서 최종적으로 단위 부피당 질량 농도로 각 지역에 영향을 미치게 된다. 이러한 이유로

배출량이 많다고 해도 희석, 확산과 노출 경로에 따라 낮은 영향을 받을 수 있으며, 반대로 배출량이 적더라도 정체, 2차 생성 등을 통해 고농도로 영향을 받을 수 있다(Kim *et al.*, 2024). 과거 산성비 문제가 대두되면서 SO_x, NO_x 등이 주요 대기오염물질로 관리가 시작되었고, 그 뒤 인체 피해나 환경에 대한 영향을 고려하여 관리물질이 추가되었다(Anderson, 2009). 하지만 전 세계적인 대기오염물질 감축 노력에 따라 그 배출량은 점차 감소 추세에 있는 것으로 나타나고 있다(Amann *et al.*, 2013). 이에 본 장에서는 세계 주요 국가를 대상으로 대기오염물질 배출 특성과 경향을 분석하여 배출관점에서의 관리 필요성을 검토하고자 한다.

3.2.1 유럽

그림 2는 EU에 가입되어 있는 27개 나라(프랑스, 이탈리아, 독일 등)에 대한 대기오염물질 배출량 자료이다(EEA, 2024). 유럽은 암모니아(NH₃)와 비메탄 휘발성유기화합물(non-methane volatile organic compounds, NMVOC), NO_x, PM_{2.5}, SO₂를 대상으로 산정하고 있으며, 우리나라와 다르게 CO와 PM₁₀, 블랙카본(BC)은 산정하지 않고 있다. 2016년 유럽 27개국의 대기오염물질 배출량은 46,050 Gg/year였다. 오염물질별 기여율은 NMVOC가 37%로 가장 높았고, 그 뒤를 이어 NO_x 29%, NH₃ 16%, SO₂ 12%, PM_{2.5} 7%로 나타났다. 유럽의 대기오염물질 배출량은 2016년부터

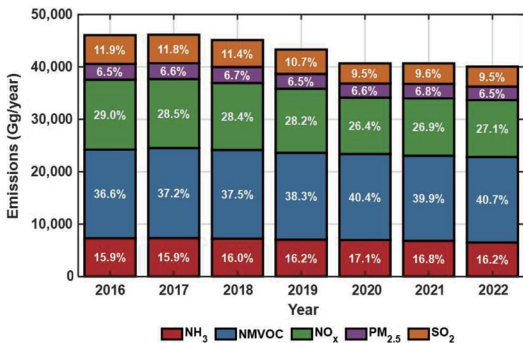


Fig. 2. Emission trends of major air pollutants across 27 European countries.

2022년까지 점차 감소하고 있는 것으로 나타났다. 가장 최근인 2022년의 경우 40,049 Gg/year로 2016년 대비 13.0% 감소하였으며, 부문별로는 SO₂ 30.8%, NO_x 18.7%, PM_{2.5} 13.8%, NH₃ 11.2%, NMVOC 3.4%로 나타났다. 2022년 전체 배출량 대비 오염물질별 기여율은 NMVOC가 41%로 2016년 대비 4% 증가하였고, NO_x는 27%로 2% 감소한 것으로 나타났다. NH₃는 16%로 동일한 기여율을 보였다.

3.2.2 미국

그림 3은 2016년부터 2022년까지 미국의 대기오염물질 배출량을 나타낸 것이다(U.S. EPA, 2025). 우리나라 CAPSS와 비교하면 입자상 오염물질 중 TSP가 제외되었고, SO_x가 SO₂로 한정된 것 외에는 동일한 물질을 산정하고 있다. PM_{2.5}와 PM₁₀에 대해서는 primary라고 명시하여 1차 배출원에 대해서만 산정한다는 사실을 명시하고 있다. 2016년 전체 대기오염물질 배출량은 107,997 Gg/year이고, 가장 최근인 2022년에는 126,454 Gg/year로 7년 사이 17.1% 증가한 것으로 나타났다. 전반적인 배출량 추이는 2016년 이후 3년간 증가 추세에 있다가 2019년 급감 후 다시 증가하는 경향을 보이고 있다. 본 연구에서는 국내 배출량과의 비교·분석을 위해 2022년까지 기간을 선정하였으나 가장 최근인 2024년의 배출량은 92,913 Gg/year로 배출량이 감소하는 것으로 나타나, 대기오염 개선을 위한 노력이 진행 중이라는 것을 확인할 수 있었다. 2016

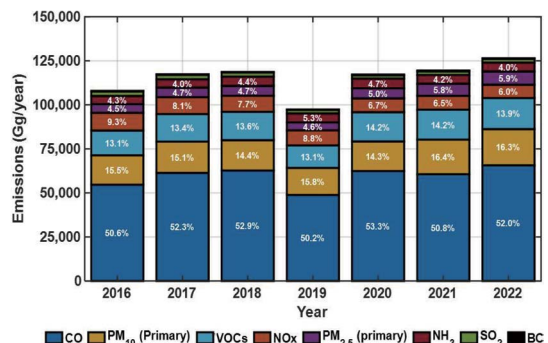


Fig. 3. Emission trends of major air pollutants in the United States

년 기준 대기오염물질 배출기여도는 CO가 51%로 가장 높은 비율을 보였고, PM₁₀ 15%, VOCs 13%, NOx 10%로 나타났다. 이후 2022년 역시 CO가 52%로 가장 높은 비율을 차지하고 있었으며, PM₁₀이 16%, VOCs 14%로 2016년과 비슷한 기여율을 보였다. 8개의 산정 대상 물질 중 대부분에서 배출 증가를 보인 반면, NOx와 SO₂의 배출량은 감소한 것으로 나타나 미국의 배출량 저감 정책이 NOx와 SO₂ 위주로 진행되었다는 것을 간접적으로 알 수 있다.

3.2.3 대한민국

그림 4a는 국내 배출량과 오염물질별 배출 기여도이고 그림 4b는 충남의 배출량과 기여도를 나타낸 것이다(MOE, 2025). 우리나라는 지속적인 대기배출 관리 정책 추진 결과로 배출량이 감소 추세에 있다. 2016년 전국과 충남의 대기오염물질 배출량은 각각 4,138 Gg/year와 411 Gg/year에서 2022년 3,483 Gg/year와 369 Gg/year로 15.8%와 10.2% 감소하였다. 다만 2022년 배출량 산정에 있어 그 동안 누락 배출원이 추가되면서 CO 부분에서 높은 증가량을 보여 정량적인 감축량 산정에는 무리가 있다(MOE, 2025). 이러한 관점에서 2016년과 2021년 배출량을 비교해 보면 전국과 충남은 각각 17.5%와 22.0% 수준의 배출량 저감 결과가 나타난다. 2022년 전체 배출량 대비 오염물질별 기여율은 전국이 VOC 26.9%로 가장 높은 비율을 보였고, 그 뒤를 이어 CO 26.5%, NOx 24.6%, NH₃

7.0%, TSP 6.8%로 상위 3개 물질이 전체 배출량의 78.0%를 차지하는 것으로 나타났다. 충남의 경우 CO가 33.9%로 가장 높은 비율을 보였고, NOx 21.2%, VOC 19.3%, NH₃ 10.7%로 나타났다. 전국 대비 연소 부문 배출기여도가 높은 CO와 NOx가 높게 나타났는데 이는 2022년 추가된 누락 배출원이 제철소 등 대형 배출시설의 연소시설에서 추가되었기 때문이다.

3.3 세계 주요 도시와 국내 대기오염물질 농도변화

그림 5는 세계 주요 도시들의 대기오염물질 농도를 나타낸 것이다. 대상연도는 2011년부터 2023년까지로 하였고, 각 나라마다 기준이 상이하기 때문에 기준은 그림 내 표기하지 않았다. 대한민국의 경우 PM_{2.5}는 2015년부터 측정이 시작되어 이후의 자료를 활용하였다.

그림 5a는 PM₁₀, 그림 5b는 PM_{2.5}의 농도변화를 나타낸 것이다. PM₁₀ 농도를 보면 전반적으로 서울과 도쿄, 파리, 런던에서 꾸준한 감소를 보이고 있으며, 그 외 로스엔젤레스(Los Angeles, LA)와 충남은 증감을 반복하고 있다. 가장 최근인 2023년 기준으로 가장 높은 농도를 보인 곳은 충남으로 연평균 41 µg/m³로 나타났고, 서울 38 µg/m³, LA 33 µg/m³로 3개 지역에서 30 µg/m³ 이상의 농도를 보였다. 도쿄와 런던은 각 13 µg/m³, 파리는 17 µg/m³였다. 유럽에 속해 있는 런던과 파리는 EU 환경기준(40 µg/m³)을 만족하는 것으로 나

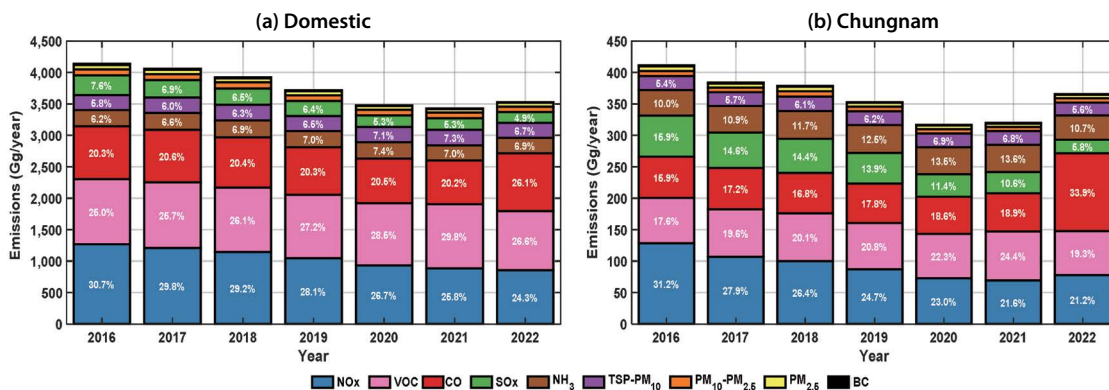


Fig. 4. Emission trends of major air pollutants in Domestic (a) and Chungnam (b)

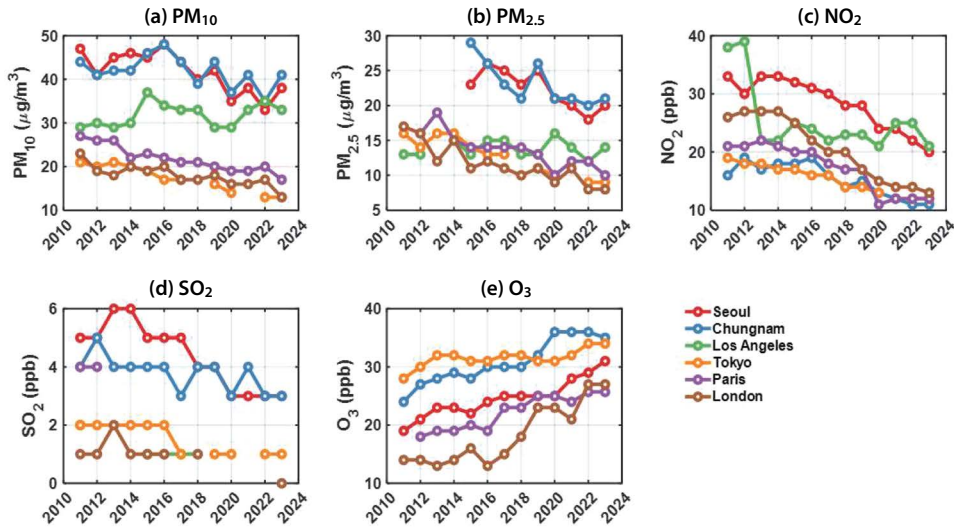


Fig. 5. Trends of air pollutants concentrations in major cities.

타났고, 서울과 충남 역시 국가 기준($50 \mu\text{g}/\text{m}^3$)을 만족하였다. 다만 충남의 경우 충남의 환경기준인 $40 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 보다는 높은 수준으로 향후도 꾸준한 관리가 필요한 것으로 나타났다. 도쿄와 런던은 연평균 기준이 존재하지 않아 기준 달성 여부를 확인할 수 없었다. $\text{PM}_{2.5}$ 역시 서울과 충남에서 가장 높은 농도를 보였다. 2015년에는 $23 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 와 $29 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 에서 2023년에는 $20 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 와 $21 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 서울은 소폭, 충남은 상대적으로 큰 농도변화를 보였다. LA는 2011년 $13 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 에서 2023년 $14 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 정체된 상태로 증감을 반복하고 있고, 도쿄는 2011년 $16 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 에서 2023년 $9 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 꾸준히 감소하고 있다. 파리과 런던은 2012년 기준 $16 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 동일한 농도로 시작하여 2023년에는 $10 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 와 $8 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 절반에 가까운 개선 효과를 보였으며, 꾸준히 개선되고 있는 것으로 나타났다. 유럽의 연평균 기준이 $25 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 인 것을 감안하면 매우 낮은 수치로 유지되고 있으며, 보다 강력한 WHO의 기준에도 근접한 수준이다. LA는 1차 대기환경기준($9 \mu\text{g}/\text{m}^3$)에는 만족하지 못하나 2차 대기환경기준($15 \mu\text{g}/\text{m}^3$)에는 만족하고, 도쿄는 국가 기준에 만족하는 것으로 확인되었다. 서울과 충남은 기준치를 만족하지 못해 지속적인 관리정책 수립과 추진이 필요한 것으로 나타

났다.

NO_2 는 전 세계적으로 농도가 감소하고 있는 것으로 확인되었다. 2011년 기준 가장 높은 곳은 LA로 38 ppb였고, 그 뒤를 이어 서울 33 ppb, 런던 26 ppb, 파리 21 ppb, 도쿄 19 ppb, 충남 16 ppb로 나타났다. 이후 꾸준히 감소하여 2023년에는 파리와 충남이 11 ppb로 가장 낮은 농도를 보였고, 도쿄 12 ppb, 런던 13 ppb, 서울 20 ppb, LA 21 ppb로 나타났다. 개선 비율로 봤을 때 런던이 51.9%로 가장 높은 개선 효과를 나타냈고, 파리 46.2%, LA 44.7%, 서울 38.2%, 도쿄 36.8%, 충남 31.3%로 확인되었다. 충남은 2023년 대상 도시 중 가장 낮은 농도였으나, 기준연도인 2011년 가장 낮은 농도를 보여 상대적으로 낮은 개선율을 보였다. 서울과 충남, LA는 각각 자신의 나라 및 지역 환경기준을 충분히 만족하고 있는 것으로 확인되었다. 파리과 런던 역시 EU의 환경기준($40 \mu\text{g}/\text{m}^3$, 약 32 ppb)에는 만족하나, WHO의 기준($10 \mu\text{g}/\text{m}^3$, 약 8 ppb)에는 만족하지 못하는 것으로 확인되었다.

O_3 은 최근 기후변화와 더불어 전 세계적으로 가장 주목받고 있는 물질이다. PM_{10} 과 SO_2 , CO 등으로 대표되는 1차 오염물질이 지속적인 관심과 정책추진으로 가시적인 개선 효과가 나타나고 있는 가운데 O_3 은

VOC와 NO_x를 전구물질로 2차 생성되는 물질로 기 후변화 등으로 인해 광화학반응이 활발해지면서 전 세계적으로 점차 증가하고 있다(Liu and Ding, 2023). 2012년 기준 O₃의 농도는 도쿄가 30 ppb로 가장 높았고, 충남 27 ppb, 서울 21 ppb, 파리 18 ppb, 런던 14 ppb로 나타났다. 이후 모든 도시에서 지속적인 증가 추세였다. 2023년에는 충남이 35 ppb로 가장 높은 농도를 보였고, 도쿄 34 ppb, 서울 31 ppb, 런던 27 ppb, 파리 26 ppb로 높은 증가율을 보였다. 가장 높은 증가를 보인 곳은 런던으로 92.9% 증가하였고, 서울 63.2%, 충남 45.8%, 도쿄 21.4%로 확인되었다. O₃은 반응성이 커 대부분 단기간인 8시간 또는 1시간 기준으로 관리되고 있으며, 8시간 기준(47~60 ppb)에는 만족하는 것으로 확인되었다. 하지만 전 세계적으로 O₃ 농도가 꾸준히 증가하고 있다는 것이 관찰되고 있는 만큼 이에 대한 원인 분석과 관리 대책 마련이 필요할 것으로 판단된다.

SO₂는 화석연료 연소과정에서 배출되는 주요 대기 오염물질로 최근 황(S) 성분에 대한 개질기술 개발과 후처리설비의 효율 증대로 잘 관리되고 있다. 환경 선진국으로 분류되는 LA와 도쿄, 파리, 런던에서는

2011년 농도가 1~2 ppb 수준이었으며, 대한민국 역시 3 ppb 정도로 낮은 수준이다. WHO와 EU, 미국, 일본에서는 이미 매우 낮은 수준을 유지함에 따라 연평균 관리기준을 설정하지 않고 있으며, 일평균 기준으로 지정되어 있는 30~50 ppb보다도 훨씬 낮은 수준으로 관리되고 있다.

그림 6은 국내 환경기준과 오염물질별 농도변화를 나타낸 것이다. PM₁₀의 경우 연평균 기준인 50 µg/m³에 대해 2012년 만족한 이후 기준 이내로 유지되고 있는 반면, PM_{2.5}는 측정을 시작한 이래로 환경기준에 대해 단 한번도 만족한 적이 없어 향후 목표 달성을 위한 지속적인 정책 발굴과 비용 투자가 필요할 것으로 나타났다. NO₂와 O₃ 역시 환경기준을 만족하고 있지만 O₃의 경우 꾸준히 증가하고 있어 향후 O₃이 대기분야 주요 관심사로 대두될 것으로 예측된다. SO₂의 경우 연평균 기준(20 ppb) 대비 15% 수준(3 ppb)에 머무르고 있으며, CO는 연평균 기준은 없으나 8시간 기준 9 ppm인 점을 감안하면 현재 수준은 0.4~0.5 ppm으로 매우 낮다. 기준물질에 대한 농도 변화 추이를 봤을 때 기준을 초과하고 있는 PM_{2.5}와 O₃에 대해서는 추가적인 관리대책 수립과 추진이 필요하며,

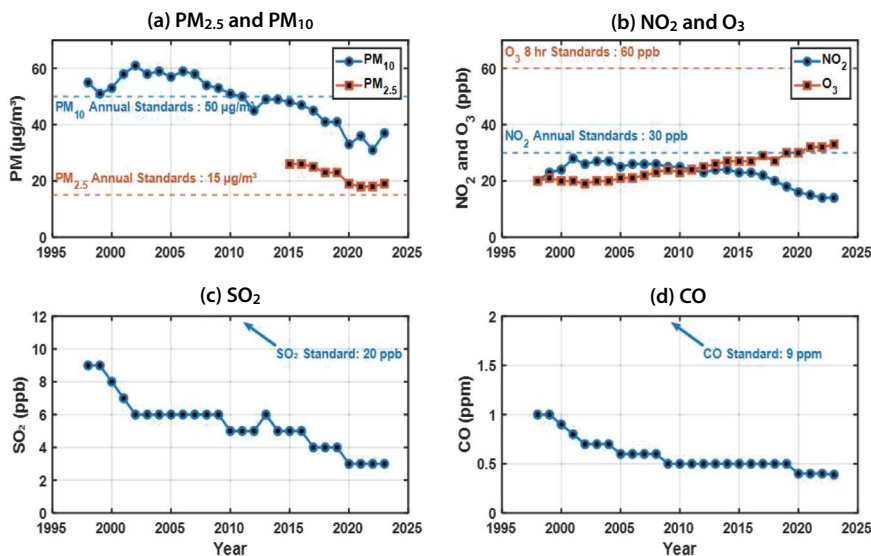


Fig. 6. Trends of major air pollutant concentrations in domestic.

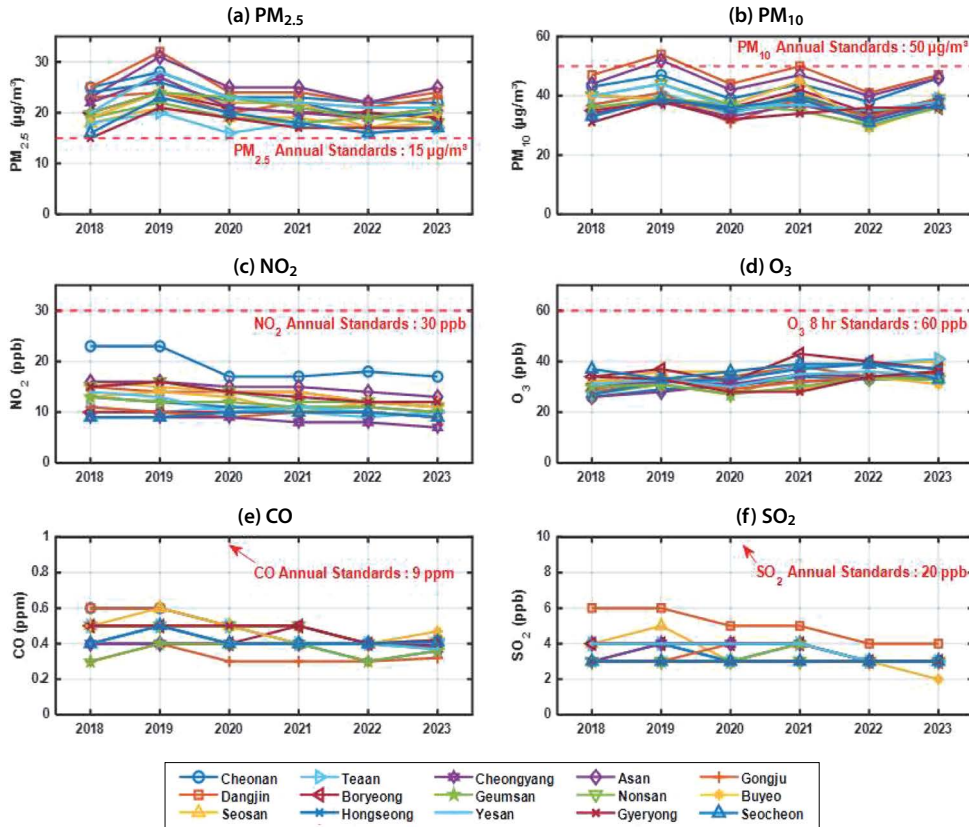


Fig. 7. Trends of major air pollutant concentrations in Chungnam.

NO_2 와 PM_{10} 은 기존 정책으로도 지속적인 감소가 관측되고 있어 현재상태의 정책추진에도 충분히 관리가 가능한 것으로 보인다. 반대로 SO_2 와 CO의 경우 배출량 관점에서는 아직까지도 관리 필요성이 매우 높은 물질임에도 불구하고, 농도의 경우 환경기준 대비 매우 낮은 수준으로 유지되고 있는 것으로 나타났다.

그림 7은 충남 15개 시군을 대상으로 2017년부터 2023년까지의 농도변화를 나타낸 것이다. 앞서 언급한 것처럼 2016년 이전 충남에는 천안, 아산, 서산 3개 시에 단 5개의 AQMS에서 자료를 생산하였으며, 2017년부터 증설하여 2018년부터 15개 모든 시군에서 데이터가 생산되기 시작하였다. 이에 본 연구에서는 대상 구간을 충남 내 15개 시군에서 전체 자료가 확보되기 시작한 2018년을 기준으로 2023년까지 분석하였다.

$\text{PM}_{2.5}$ 는 2019년 최대농도를 보인 후 감소 추세에 있으나 단 1개의 시군도 국가 기준인 $15 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 를 만족하지 못하였다. 2023년 기준 서천, 계룡, 태안이 $17 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 가장 낮은 농도를 보였고, 반대로 아산 $25 \mu\text{g}/\text{m}^3$, 당진 $24 \mu\text{g}/\text{m}^3$, 공주 $23 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 높은 농도를 보였다. 2023년 기준 충남 전체 연평균 농도는 $20 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 국가 환경기준인 $15 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 보다 $5 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 높게 나타났으나 충남의 환경기준에는 겨우 도달한 것으로 확인되었다.

PM_{10} 의 경우 당진이 2019년 $54 \mu\text{g}/\text{m}^3$, 2021년 $50 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 를, 아산이 2019년 $52 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 국가 환경기준을 초과하였으나, 나머지 구간에서는 모두 기준을 만족하는 것으로 나타났다. 가장 최근인 2023년 계룡, 금산, 보령이 $36 \mu\text{g}/\text{m}^3$, 서천, 부여 $37 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 낮은 농도

를 보였고, 당진 $47 \mu\text{g}/\text{m}^3$, 천안, 아산 $46 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 높은 농도를 보였다. 2023년 기준 충남의 PM_{10} 평균농도는 $39 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 국가 기준 대비 $11 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 낮게 나타났으며, 충남 기준과 비교 시에도 $1 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 낮은 농도이다.

NO_2 의 연평균 기준은 국가 30 ppb, 충남 20 ppb이다. 2018년 충남 15개 시군 모두에서 측정이 시작된 이후 국가 기준인 30 ppb를 넘은 경우는 없으며, 충남 기준 역시 2018년과 2019년 각각 23 ppb로 2년 연속 초과한 이후 기준을 초과한 적은 없다. 충남 15개 시군의 전체 평균농도 역시 2018년 14 ppb를 시작으로 2019년 13 ppb, 2020년, 2021년 12 ppb, 2022년과 2023년 11 ppb로 점차 감소하고 있다. 이는 국가 및 충남 기준 대비 50% 이하 수준이다.

O_3 은 연평균 기준은 없다. 8시간과 1시간 평균을 대상으로 국가와 충남 모두 동일한 기준을 가지고 있으며, 8시간은 60 ppb, 1시간은 100 ppb이다. 2023년 전국 AQMS의 O_3 환경기준 달성률은 8시간 평균 0.2%, 1시간 평균 42.3%이고, 특히 8시간 기준 달성률은 최근 7년(2017~2023년)간 채 1% (0.0~0.7%)가 안된다. 이에 환경부에서는 “제3차 대기환경개선 종합계획(2023~2032년)”에 O_3 을 $\text{PM}_{2.5}$ 와 더불어 기준물질로 선정하였고, 2032년까지 전국 O_3 1시간 기준 달성률 50%를 목표로 다양한 정책을 추진하고 있다(MOE, 2022). O_3 에 대한 관리를 위해서는 VOCs와 NO_x 의 존재 형태와 반응 특성 분석이 필요하다. NO_x 는 AQMS에서 시간단위 자료가 생산되고 있으며, 필요에 따라 5분 단위 자료를 활용할 수 있다. 개별 VOC에 대한 자료 확보를 위해서는 단순 농도 측정만 가능한 AQMS 보다는 좀 더 정밀한 측정소 운영이 필요하다. 하지만 충남을 비롯한 중부권에는 단 1개소의 광화학 측정망이 없어 관련 자료 확보가 불가능한 상태이다.

CO는 대표적인 불완전 연소 기인 물질이다. 연소 효율 증대와 시설 발달로 점차 감소 추세에 있으나 반대로 완전연소 증가로 온실가스로 알려져 있는 CO_2 의 배출이 문제가 되고 있다. CO 역시 연평균 관리기준은 없고 8시간과 1시간 기준이 있으며, 국가와 충남은 각각 9와 25 ppm, 5와 10 ppm으로 고시하고 있다.

2018년부터 2023년까지 충남의 연평균 CO 농도는 0.4~0.5 ppm으로 15개 시군 모두 비슷한 수준을 보이고 있다. 이는 8시간 기준과 비교시 충남 기준의 5~10% 수준이다. SO_2 은 연평균 기준으로 국가 20 ppb, 충남 10 ppb가 설정되어 있다. 연도별 충남의 SO_2 평균농도는 3~4 ppb 수준이며, 이는 CO와 마찬가지로 15개 시군 전체가 유사하다. 이는 충남 기준 대비 33%, 국가 기준대비 50% 수준이며, 해당 농도 범위에서 큰 증감 없이 농도가 유지되고 있다. 향후 저감 필요성에 따라 추가적인 감축 노력이 진행되지 않는다면 일정 기간 본 농도를 유지할 것으로 예측된다.

3.4 충청남도의 AQMS 운영과 SO_2 및 CO에 대한 관측 필요성 검토

앞서 언급한 것처럼 충남은 2016년까지 5개의 AQMS를 운영해 왔고, 2024년 12월 기준 40개소로 확대 운영 중에 있다. 지자체 측정망으로는 도시대기와 도로변대기, 대기중금속 측정망이 해당되며, 대기질 정책추진 효과 분석에는 주로 도시대기측정망이 활용된다(MOE, 2024). 도시대기측정망은 환경기준물질 6종과 풍향, 풍속, 온습도를 측정하며, 신규설치시 SO_2 와 CO를 선택적으로 제외할 수 있게 고시하고 있다. 하지만 2017년 이후 신규 설치된 충남의 모든 측정소에는 SO_2 와 CO가 모두 설치되어 있다. 환경기준물질의 경우 연속측정방법을 공정시험방법으로 사용하고 있다. 측정장비 대부분 5분 주기로 자동측정하여 1시간 평균농도로 자료를 생산하고 있으며, 충남 역시 모든 장비를 운영지침에서 고시한 기준에 적합한 장비를 활용하고 있다. 국내 시판 중인 기준장비들은 가스상 오염물질 측정장비는 1대당 1,500~3,000만 원, 입자상 오염물질 측정장비는 2,000~4,000만 원이 필요하다. 제조사가 다양하고, 대부분 수입에 의존하다보니 환율 등에 많은 영향을 받게 된다. 앞서 국내외 주요 도시들을 대상으로 기준물질의 농도 분석 결과 절대적인 농도에 대한 차이는 있지만 전반적으로 유사한 패턴을 보였다. $\text{PM}_{2.5}$ 의 경우 관리기준에 대부분 만족하지 못하고 있으며, PM_{10} 과 NO_2 는 꾸준히 감소

Table 2. Maintenance costs of SO₂ and CO equipment.

(unit: 1,000 won)

Company	SO ₂			CO		
	Price	QA/QC	Accessory	Price	QA/QC	Accessory
A	23,500	668	300	24,000	668	300
B		668		13,500	668	996
C*	24,700	668		21,000	668	
D	19,250	668	1,800		668	
E	13,570	668	570		668	

*: Inclusion of annual consumables costs

추세로 나타나고 있다. O₃은 환경기준을 만족하고는 있지만 급격한 증가를 보이고 있어 대기질 관리 관점에서 주요 물질로 떠오르고 있다. SO₂와 CO는 다양한 개선 정책 추진 결과 환경기준 대비 매우 낮은 수준으로 확인되고 있다. SO₂는 국가 기준 대비 20% 수준이며, CO는 그보다 낮은 5~10% 수준으로 확인되었다. 배출원 관리 측면에서 SO₂와 CO가 주요 물질임에는 틀림 없으나 생활권 환경관리 관점에서 SO₂와 CO는 더 이상 관측 필요성이 높지 않은 것으로 나타나고 있다. 표 2는 현재 국내에서 설치·운영 중인 SO₂와 CO 측정장비에 대한 구매 및 운영비를 나타낸 것이다. 충남에서 운영 중인 AQMS에 SO₂와 CO 장비 구매를 위해 해당 1.4~2.5천만 원, 1개소에 3천만 원(SO₂, CO)으로 산정 시 40개 측정소 모두에 설치에 약 12억 원이 소요되었다. 여기에 검교정과 정도관리, 소모품 교체에 장비당 연간 200~500만 원이 필요하다는 점을 감안했을 때, 연 1.6~4.0억 원이 필요하다. 최근 충남은 날이 커져가는 기후변화에 대한 선도적 대응을 위해 CO₂/CH₄ 측정장비를 추가 설치·운영 중에 있다. CO₂/CH₄ 장비의 경우 기존 가스상 장비 대비 고가(약 1억 원)로 이를 구매·유지관리하기 위해서는 추가적인 비용 산출이 필요하다. 최근 대기환경 중 기후변화와 온실가스에 대한 관심이 증가하면서 기존의 전통적인 대기오염물질에 대한 관심이 감소하고 있다. 이러한 관점에서 비용편익을 고려한 취사선택이 요구되고 있으며, 관측 필요성이 낮아진 SO₂와 CO의 설치·운영에 대한 고민이 필요한 시점이다. 필요성이 증가하고 있는 다른 항목(CO₂, CH₄, NH₃ 등)의 추가

또는 광화학 측정망과 같은 특수목적 측정망으로의 전환을 유도한다면 좀 더 실효성 있는 자료 생산이 가능할 것이다.

3.5 정책 제언

정책 수립과 추진 경과 분석을 위해 대기질 관측은 필요하다. 하지만 대표성 있는 자료 생산을 위해서는 많은 비용과 노력이 필요하다. AQMS 1개소 설치에는 약 2억 원, 연간 유지관리에 약 1~2천만 원 정도가 소요된다. 과거 대기오염에 대한 관리 필요성이 TSP와 SO₂에서 시작된 만큼 전통적인 오염물질에 대한 관측은 매우 중요하였으나 기술발전과 관리 패러다임의 전환으로 기존 관리물질에 대한 필요성이 감소하고 있다. 이와 반대로 기후변화로 대표되는 지구온난화 문제가 거론되면서 신규물질에 대한 관측 필요성이 부각되고 있다. 이에 본 연구에서는 기존 환경기준물질에 대해 국내외 배출과 농도 수준을 검토하였고, 그 결과 아래와 같은 정책 방안을 제언한다.

3.5.1 측정항목에 대한 검토: SO₂와 CO에 대한 관측 필요성 재고

앞서 농도자료 분석 결과 SO₂와 CO는 대기환경기준의 5~20% 수준인 것을 확인할 수 있었다. 배출관리 측면에서 CO와 SO₂는 아직까지 매우 중요한 물질이다. 국내 주 에너지 생산시설이 석탄화력발전소이고, 제철소나 산업단지 같은 대형배출시설이 전국적으로 산재되어 운영되고 있는 가운데 배출구에서 배출되는 오염물질에 대한 관리는 필요하다. 다만 이러한 배출구에 대한 영향은 굴뚝자동관측시스템(tele monitor-

ing system, TMS)을 통해 실시간으로 감시되고 있으며, 이를 기반으로 상시 관리·감독이 가능하다. 하지만 일반 대기 중 농도는 측정장비의 검출한계(limit of detection, LOD)에 근접한 농도를 유지하고 있다. 만약 이럼에도 불구하고 관측이 필요하다면 관리기준을 지금보다 더욱 강화하거나 기존 측정 장비보다 좀 더 고성능의 관측 장비를 도입할 필요가 있다. 하지만 기존 환경기준이 인체 및 환경 유해성을 고려하여 산정 되었으므로, 추가적인 조치는 필요하지 않을 것으로 판단된다. 한 예로 유럽 일부 국가에서는 관측 필요성이 낮아진 SO₂와 CO를 관측 항목에서 제외하여 관측하고 있지 않다. 우리나라도 이러한 관점에서 신규 측정망 구축 시 SO₂와 CO 측정 제외를 검토하도록 권고하고 있으나, 아직까지 신규 설치되는 측정망에 이러한 권고사항이 반영되지 못하고 있다.

3.5.2 통합대기환경지수에 대한 산정 방안

보완 검토

각 국가는 복잡한 대기환경 정보를 국민들에게 보다 쉽게 전달하기 위해 통합대기환경지수를 만들어 활용하고 있다. 미국 U.S. EPA는 PSI (pollutant standards index)를 만들어 활용하고 있고, 우리나라 환경부 역시 CAI (comprehensive air quality index)를 개발하여 활용하고 있다. 하지만 본 지수를 사용하기 위해서는 환경기준물질 6개 항목의 모든 자료가 확보되어야 하며, 그중 1개 물질이라도 누락될 경우 사용할 수 없다. 만약 앞서 언급한 것처럼 SO₂와 CO에 대한 선택적 활용이 가능하다면 본 지수를 산정할 수 없는 지역이 다수 발생할 수 있다. 향후 SO₂와 CO에 대한 선택적 운영이 가능하게끔 본 지수에 대한 검토와 보완이 필요하다.

3.5.3 지역 현안 이슈 관리를 위한 성분 측정 기반의 측정망 확대

SO₂와 CO에 대한 관측 필요성은 감소한 반면, O₃에 대한 관측 필요성은 점차 증가하고 있다. O₃은 NO_x와 VOCs의 광화학반응을 통해 생성되는데 이에 대한 명확한 관리 방안 마련을 위해서는 전구물질에

대한 반응 특성 검토가 필요하다. 하지만 아직까지 중부권(대전, 세종, 충남, 충북, 전북)에는 이러한 자료를 생산할 수 있는 광화학 측정망이 전무한 상태이다. 서울의 경우 국가에서 운영 중인 광화학 측정망 외에도 서울시에서 직접 설치·운영하고 있는 광화학 측정망이 있다. 중부권은 수도권 대비 거주 인구가 적어 고농도 O₃ 발생으로 인한 피해 규모는 작을 수 있지만 반대로 환경 취약계층(노약자)이 다수 거주하고 있어 그 피해는 더 클 수 있다. 대기환경에 대한 관심이 증가하면서 AQMS에 대한 양적 팽창이 어느 정도 이루어진 만큼 향후에는 지역 현안문제 해결에 필요한 성분 분석 기반 측정소의 추가 설치 방안이 검토될 필요가 있다.

4. 결 론

과학기술의 발전과 더불어 대기 관측기술은 점차 발전해 왔다. 충남은 많은 비용과 노력이 들어가는 AQMS를 지속적으로 확대·운영하여 환경 이슈에 발 빠르게 대응해 오고 있다. 하지만 배출량 대비 관리 필요성이 감소하고 있는 일부 물질에 대해서는 비용 편익을 검토하여 향후 장기적인 계획 수립이 필요하며, 반대로 이 비용을 신규 추가·활용이 요구되는 광화학 측정망이나 온실가스 관측 시스템 구축에 활용한다면 좀 더 효과적인 정보 생산과 관리 정책 수립이 가능할 것으로 판단된다. 본 연구는 연구지역을 충남으로 한정하여 자료 분석과 방향성을 제시하였지만 향후에는 관련 이슈를 전국으로 확대·검토하여 장기적인 AQMS 운영 계획에 대해 고민해 볼 필요가 있다.

감사의 글

본 논문은 충청남도의 재원으로 충남연구원 전략과제로 수행된 “시군별 O₃ 농도 분석을 통한 관리방안 제시(25JU0003)”의 일부 연구 결과이며, 이에 감사드립니다.

References

- Amann, M., Klimont, Z., Wagner, F. (2013) Regional and Global Emissions of Air Pollutants: Recent Trends and Future Scenarios, *Annual Review of Environment and Resources*, 38, 31-55. <https://doi.org/10.1146/annurev-environ-052912-173303>
- Anderson, H. (2009) Air pollution and mortality: A history, *Atmospheric Environment*, 43(1), 142-152. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2008.09.026>
- Cho, J.H., Kim, H.S., Chung, Y.S. (2021) Spatio-temporal changes of PM₁₀ trends in South Korea caused by East Asian atmospheric variability, *Air Quality, Atmosphere & Health*, 14, 1001-1016. <https://doi.org/10.1007/s11869-021-00995-y>
- Chungcheongnam-do (Chungnam) (2025) Chungcheongnam-do basic environmental ordinance, Appendix: Air quality standards of Chungcheongnam-do. <https://www.law.go.kr/ordinInfoP.do?ordinSeq=1411154> (accessed on Aug. 3, 2025).
- Curtis, L., Rea, W., Smith-Willis, P., Fenyves, E., Pan, Y. (2006) Adverse health effects of outdoor air pollutants, *Environment International*, 32(6) 815-830. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2006.03.012>
- European Environment Agency (EEA) (2024) European Union emission inventory report 1990-2022. <https://www.eea.europa.eu/en/analysis/publications/european-union-emissions-inventory-report-1990-2022> (accessed on Aug. 3, 2025).
- European Union (EU) (2020) EU air quality standard. https://environment.ec.europa.eu/topics/air/air-quality/eu-air-quality-standards_en (accessed on Aug. 3, 2025).
- Fang, Y., Naik, V., Horowitz, L.W., Mauzerall, L. (2013) Air pollution and associated human mortality: the role of air pollutant emissions, climate change and methane concentration increases from the preindustrial period to present, *Atmospheric Chemistry and Physics*, 13(3), 1377-1394. <https://doi.org/10.5194/acp-13-1377-2013>
- Hwang, K., Park, S., Lee, G., Noh, S., Kim, J., Lee, J.Y., Park, J.-S., Kim, J.B. (2023) Analysis of Chemical Characteristics of PM_{2.5} by Region in Chungnam, *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment*, 39(6), 1007-1021, (in Korean with English abstract). <https://doi.org/10.5572/KOSAE.2023.39.6.1007>
- Jeong, C.H., Kim, Y.P. (2024) Current Status of Air Quality and Greenhouse Gas Monitoring Networks: Case Studies from Various Countries and Implications, *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment*, 40(6), 704-732, (in Korean with English abstract). <https://doi.org/10.5572/KOSAE.2024.40.6.704>
- Joo, S., Lee, S., Lee, S., Oh, Y., Shin, D., Jeong, S., Seo, W., Kenea, S.T., Kim, S. (2025) Achievements and Future Prospects of Greenhouse Gas Research for Climate Change Monitoring in Korea, *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment*, 41(2), 281-320, (in Korean with English abstract). <https://doi.org/10.5572/KOSAE.2025.41.2.281>
- Kampa, M., Castanas, E. (2008) Human health effects of air pollution, *Environmental Pollution*, 151(2), 362-367. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2007.06.012>
- Kim, D.-S., Park, J.-H. (2020) Problems and Improvements in the Quality Control of the Air Monitoring Network, *Journal of Environmental Science International*, 29(8), 847-855, (in Korean with English abstract). <https://doi.org/10.5322/JESI.2020.29.8.847>
- Kim, S.-H., Park, S., Hwang, K., Choi, Y.-N., Lee, S.-S., Park, S., Lee, G., Kim, J., Noh, S., Kim, J.B. (2024) Air Pollution Impact in the Area Around Coal-fired Power Plant in Chungnam, *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment*, 40(1), 149-165, (in Korean with English abstract). <https://doi.org/10.5572/KOSAE.2024.40.1.149>
- Kim, Y.P. (2013) Air Pollution History, Regulatory Change, and Remedial Measures of the Current Regulatory Regimes in Korea, *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment*, 29(4), 353-368, (in Korean with English abstract). <https://doi.org/10.5572/KOSAE.2013.29.4.353>
- Kim, Y.P. (2017) Research and Policy Directions against Ambient Fine Particles, *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment*, 33(3), 191-204, (in Korean with English abstract). <https://doi.org/10.5572/KOSAE.2017.33.3.191>
- Lee, G., Ho, C.-H., Chang, L.S., Kim, J., Kim, M., Kim, S.-J. (2020) Dominance of large-scale atmospheric circulations in long-term variations of winter PM₁₀ concentrations over East Asia, *Atmospheric Research*, 238(1), 104871. <https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2020.104871>
- Liu, J., Ding, W. (2023) Spatial and temporal distribution of PM_{2.5} and O₃ in north China from 2011 to 2020: Patterns and influence mechanisms, *Atmospheric Pollution Research*, 14(11), 101906. <https://doi.org/10.1016/j.apr.2023.101906>
- Liu, J., Mauzerall, D., Chen, Q., Zhu, T. (2016) Air pollutant emissions from Chinese households: A major and underappreciated ambient pollution source, *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 113(28), 7756-7761. <https://doi.org/>

- 10.1073/pnas.1604537113
- Manisalidis, I., Stavropoulou, E., Stavropoulou, A., Bezirtzoglou, E. (2020) Environmental and Health Impacts of Air Pollution: A Review, *Frontiers in Public Health*, 8, 14. <https://doi.org/10.3389/fpubh.2020.00014>
- Ministry of Environment (MOE) (2021) Air quality conservation Policy. <https://www.law.go.kr/lsInfoP.do?lsiSeq=279785&efYd=20251111#0000> (accessed on Nov. 14, 2025).
- Ministry of Environment (MOE) (2022) 3rd Comprehensive Plan for Air Quality Improvement (2023-2032). https://me.go.kr/m/mob/policy_data/read.do?jsessionid=0WNkKj7kgEjScaNm53Mu5Vrg.mehome1?menuId=36&condition.code=A3&seq=8025 (accessed on Nov. 14, 2025).
- Ministry of Environment (MOE) (2023) Annual report of air quality in Korea 2023. https://airkorea.or.kr/web/detailViewDown?pMENU_NO=125 (accessed on Nov. 14, 2025).
- Ministry of Environment (MOE) (2024) Monthly report of air quality, August. https://airkorea.or.kr/web/detailViewDown?pMENU_NO=125 (accessed on Nov. 14, 2025).
- Ministry of Environment (MOE) (2025) 2022 National air pollutant emissions. <https://www.air.go.kr/article/view.do?boardId=10&articleId=441&boardId=10&menuId=32¤tPageNo=1> (accessed on Nov. 14, 2025).
- Ministry of Environment Government of Japan (1997) Environmental quality standards in Japan - Air quality. <https://www.env.go.jp/en/air/aq/aq.html> (accessed on Nov. 14, 2025).
- National Institute of Environmental Research (NIER) (2024) Guidelines for installation and operation of air quality monitoring station (AQMS). https://www.airkorea.or.kr/web/board/3/1051/?pMENU_NO=145&page=1 (accessed on Nov. 14, 2025).
- United States Environmental Protection Agency (U.S. EPA) (2024) NAAQS Table. <https://www.epa.gov/criteria-air-pollutants/naaqs-table> (accessed on Nov. 14, 2025).
- United States Environmental Protection Agency (U.S. EPA) (2025) Air pollutant emissions trends data. <https://www.epa.gov/air-emissions-inventories/air-pollutant-emissions-trends-data> (accessed on Nov. 14, 2025).
- World Health Organization (WHO) (2021) WHO global air quality guidelines. <https://www.who.int/publications/item/9789240034228/> (accessed on Nov. 14, 2025).
- Yeo, M.J., Im, Y.S., Yoo, S.S., Jeon, E.M., Kim, Y.P. (2019) Long-term Trend of PM_{2.5} Concentration in Seoul, *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment*, 35(4), 438-450, (in Korean with English abstract). <https://doi.org/10.5572/KOSAE.2019.35.4.438>
- Yeo, M.J., Kim, Y.P. (2020) Long-term Trend of Sulfur Dioxide Concentration by District in Korea, *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment*, 36(6), 742-756, (in Korean with English abstract). <https://doi.org/10.5572/KOSAE.2020.36.6.742>

Authors Information

- 황규철 (충남연구원 서해안기후환경연구소 연구원)
(kchwang@cni.re.kr)
- 김종범 (충남연구원 서해안기후환경연구소 책임연구원)
(kjb0810@cni.re.kr)
- 고성훈 (충남연구원 서해안기후환경연구소 연구원)
(ksh0521@cni.re.kr)
- 이혜연 (충남연구원 서해안기후환경연구소 연구원)
(yeonii530@cni.re.kr)
- 김정호 (열린공간 소장)
(jeonghoflux@naver.com)
- 김동호 (강원대학교 미세먼지특성화대학원 박사과정)
(kdh7144@naver.com)
- 이상덕 (강원대학교 미세먼지특성화대학원 교수)
(sdlee@kangwon.ac.kr)
- 김나래 (금강유역환경청 측정분석과 환경연구사)
(knarae10@korea.kr)