



총 설

미세먼지: 과거, 현재, 미래

Ambient Fine Particles in Korea: Past, Present, and Future

여민주, 정창훈¹⁾, 김용표^{2),*}

연세대학교 대기과학과, ¹⁾경인여자대학교 보건의료행정학과,
²⁾서울대학교 보건환경연구소

Min Ju Yeo, Chang Hoon Jung¹⁾, Yong Pyo Kim^{2),*}

Department of Atmospheric Sciences, Yonsei University, Seoul, Republic of Korea

¹⁾Department of Health Information and Administration, Kyungin Women's University, Incheon, Republic of Korea

²⁾Institute of Health & Environment, Seoul National University, Seoul, Republic of Korea

접수일 2025년 3월 16일

수정일 2025년 4월 8일

채택일 2025년 4월 8일

Received 16 March 2025

Revised 8 April 2025

Accepted 8 April 2025

*Corresponding author

Tel: +82-(0)2-3277-2832

E-mail: yongmy@snu.ac.kr

Abstract Policy and research activities during last 4 decades for ambient particulate matter (PM) management in Korea are reviewed. Before the 2000s, the relation between the policy action and the level of primary air pollutants was evident. However, the relation has not been clear for PM with an aerodynamic diameter equal to or less than 2.5 μm ($\text{PM}_{2.5}$). It was one of the major reasons for the ineffective government response to the public concern on fine PM. Ineffective government response, ineffective experts response, and media agenda setting on the fine PM caused sharp increase of public concern on fine PM since 2013, though, in general, the levels and the number of high concentration days of fine PM have been decreasing. Since 2016 numerous policies have been announced and executed to reduce the public concern and the levels of fine PM. The concentrations of fine PM have decreased following the policy actions. Still, the efficacy of each policy is not well evaluated. Important factors that should be addressed to develop effective and efficient PM management policy for future are suggested.

Key words: Fine particles, Evolution of policy and research, Evaluation of policy effectiveness, Communication

1. 서 론

초미세먼지 ($\text{PM}_{2.5}$)와 미세먼지 (PM_{10})는 각각 공역학적 지름이 2.5 μm , 10 μm 이하인 먼지를 말한다. 일반적으로 입자 크기가 작을수록 상부 호흡기를 지나 더 깊은 하부 호흡기까지 도달하여 건강에 해로운 영향을 줄 수 있다. 예를 들어, 10 μm 크기의 입자는 입안과 인두 등 상부 호흡기에 주로 침착되며, 2.5 μm 크기의 입자는 기관지까지, 0.1 μm 이하의 입자는 폐포 깊숙이 침착될 수 있다(Morawska and Buonanno, 2021). 세계보건기구(World Health Organization, WHO)는 미세먼지를 1군 발암물질로 지정하였다(IARC, 2013). 2019년 실외 대기오염물질에 의한 초

과사망율(연령표준화)은 한국이 10만명당 19명으로 일본의 12명, 미국의 14명에 비해 높다(WHO, 2022). 미세먼지로 인한 초과사망은 경제에도 악영향을 미치며, 경제협력개발기구(Organisation for Economic Co-operation and Development, OECD)에 의하면 2019년 미세먼지로 인한 초과사망은 우리나라 국내 총생산(Gross Domestic Product)에 4.09%의 손해를 입힌 것으로 평가되었다. 이는 경제협력개발기구 국가 평균인 2.44%나 일본의 3.05%보다 컸다(OECD, 2024a). 이 외에도 초미세먼지는 가시거리를 줄여 시정 악화를 일으키고, 태양빛을 산란하거나 흡수하여 지구환경에도 영향을 미친다.

미세먼지 문제는 국민의 큰 관심사이다. 특히, 2013

년 이후 관심과 우려가 크게 증가하였고 (Yeo and Kim, 2019b), 급증한 미세먼지 검색건수 (Google, 2025)와 언론에서의 미세먼지 관련 보도건수 (KPF, 2025)가 이를 반영한다. 2020년초 코로나 팬데믹으로 미세먼지에 대한 상대적인 관심과 우려는 상대적으로 감소하였지만, 여전히 2010년대 중반 수준의 관심을 유지하고 있다(그림 S1).

그렇다면 국민은 미세먼지 농도가 높아서 관심을 갖는 것일까? 우리나라 PM_{10} 과 $PM_{2.5}$ 농도는 그림 1에서 보듯이 다른 OECD 국가에 비해 높다. 그렇지만 정부의 공식 자료와(그림 2) 국내에서 수행된 여러 연구에서 우리나라 PM_{10} 과 $PM_{2.5}$ 농도는 지난 20여 년 동안 감소하고 있다(예를 들어 Kim and Lee, 2018). 이는 정부의 미세먼지 관리정책이 효과가 있었음을 보여주고 있다. 지난 10여 년 동안 정부에서는 2016년 ‘미세먼지 관리 특별대책’ 2017년 ‘미세먼지 관리 종합대책’ 등의 대책과 2019년 미세먼지 8법 등이 통과되는 등 많은 노력을 기울였다 (SCPM, 2024).

그러나 국가기후환경회의에서 국민정책참여단을 대상으로 하여 미세먼지 문제에 대한 인식을 조사한 결과는 실제와는 다르게 2019년 현재 거주지의 미세먼지 농도가 지난 10년간 증가하였다는 답변이 86%나 되었다(NCCA, 2020). 이는 미세먼지에 대한 과학적인 사실과 국민이 느끼는 현실 사이에 큰 차이가 존재함을 의미한다.

미세먼지에 대한 국민 관심이 증가한 2013년에서 10여 년이 흘렀고, $PM_{2.5}$ 대기환경기준이 2015년 설정된 후 10년이 지났다. 서울의 미세먼지 특성 변화와 저감을 위한 정책 방향을 제시하기는 하였으나 (Kim, 2017, 2006), 전국적인 미세먼지 특성 변화와 정책 방향에 대해서는 아직 연구 결과가 많지 않다. 따라서 이제는 전국적인 미세먼지 농도 추이를 평가하고, 기존 정책의 효과성을 평가하며, 왜 과학적인 사실과 국민의 체감 현실이 차이가 났는지, 그리고 앞으로 어느 정도 더 미세먼지를 줄이기 위한 투자가 필요한지 검토를 하기 적절한 때이다. 또한 미세먼지

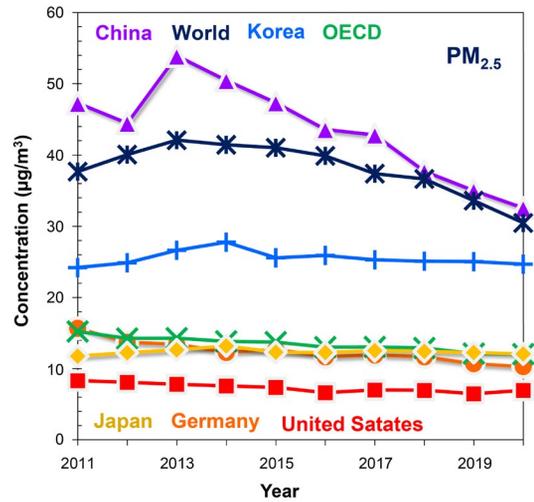


Fig. 1. Trends in population-weighted $PM_{2.5}$ concentrations in Korea and other countries (OECD, 2024b).

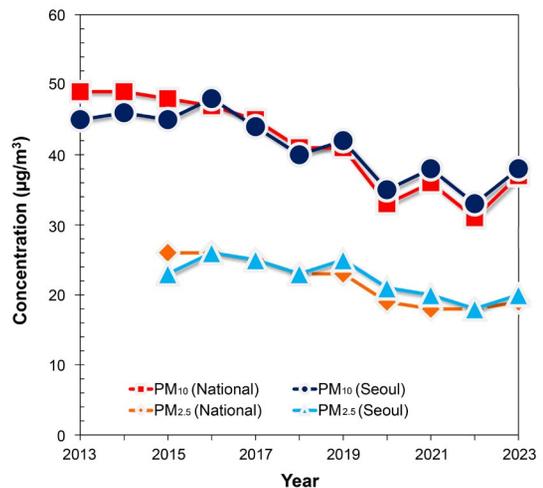


Fig. 2. Trends in $PM_{2.5}$ and PM_{10} concentration in Korea (2013~2023) and Seoul (2015~2023) (NIER, 2024).

와 오존은 대기오염물질이자 단기체류 기후오염물질 (short lived climate pollutants, SLCP)이어서, 앞으로 더 큰 문제가 될 지구환경 문제의 효과적인 관리를 위해 이들 물질 관리가 필요하다.

본 연구에서는 우리나라 미세먼지 관리 정책과 연구에 대해 검토하고, 앞으로의 미세먼지 관리 정책과

연구 방향을 제시하고자 한다. 이를 위해 (1) 1980년대부터 지금까지의 미세먼지 관리와 연구를 정리하여 비판적으로 검토하여, (2) 연구를 통한 미세먼지에 대한 과학적 이해가 미세먼지 관리 방향에 어떻게 기여하였는지를 평가하고, (3) 미세먼지 문제 해결을 위한 앞으로의 관리와 연구 방향을 제안하였다. 본 연구에서 다루는 기간은 지난 10년이 아니라 실제 대기 중 먼지를 포함한 대기오염물질 농도가 높았던 1980년대부터이다. 1980년대부터 우리 대기환경 문제를 바라보아야 현재 우리의 대기관리 정책 방향, 그리고 문제점을 더 잘 파악할 수 있다고 판단하였기 때문이다. 본 논문에서 미세먼지라는 표기는 PM_{10} 과 $PM_{2.5}$ 를 모두 의미하여, 크기에 따라 미세먼지와 초미세먼지를 구분할 경우에는 각각 PM_{10} 과 $PM_{2.5}$ 로 표기하였다. PM_{10} 과 $PM_{2.5}$ 표기 방법도 PM-10, PM-2.5 (정부의 공식 표기 방법)와 PM10, PM2.5로 여러 가지가 있다. 본 연구에서는 PM_{10} 과 $PM_{2.5}$ 를 사용하였다.

2. 초기 단계: 1980, 1990년대

2.1 대기 관리 시작

1960년대와 1970년대에는 대기관리 정책이라고 구체적으로 파악할 수 있는 것이 명확하지 않았다. 시민들의 경제 수준이 어느 정도 향상되자 1980년대부터 대기오염에 대한 관심이 높아지고 대기오염물질 농도를 줄이기 위한 관리 정책을 시행하기 시작하였다. 이 정책은 연료 전환 정책과 배출원 관리 위주로 시작하였다. 1978년 아황산가스(SO_2)에 대한 대기환경기준이 설정된 것을 시작으로 1983년에 일산화탄소(CO), 이산화질소(NO_2), 총먼지(Total Suspended Particle, TSP), 오존(O_3), 탄화수소(Total Hydrocarbon)에 대한 대기환경기준이 설정되었다(NIER, 2024). 표 1은 현재까지의 대기환경기준 변화를 나타낸 것이다. 1990년 환경보전법이 대기환경보전법과 소음·진동규제법으로 분법화되면서 대기환경 관리가 본격적으로 체계화되었다. 1991년에는 먼

지 가운데 납을 환경기준 항목으로 추가하고, 1993년에는 아황산가스 환경기준을 연평균 0.03 ppm으로 강화했으며, PM_{10} 이 새로운 환경기준으로 도입되었다. 또한, 산업단지와 대도시에서 배출규제를 강화하는 한편, 1995년 대기환경보전법 개정을 통해 대기환경규제지역 제도를 도입하여 지역별 맞춤형 관리가 가능하게 되었다.

1980년~1990년대에 이르면서 대기관리 정책은 지역적 오염원과 환경특성에 따라 점차적으로 차별성을 반영하여 적용되기 시작하였다. 수도권은 1980년대부터 심각한 대기오염 문제를 겪었으며, 이에 따라 연료 전환 정책이 적극 추진되었다. 연료 전환 정책은 석유제품에서 황함량을 낮추는 저황유 보급 정책과, 저렴하지만 대기오염물질을 많이 배출하는 석탄이나 중유를 비용은 다소 높더라도 대기오염물질이 적게 나오는 액화석유가스(Liquefied Petroleum Gas, LPG)나 천연가스(도시가스), 등유로 전환하는 것이다. 구체적으로는 1981년 서울과 다른 대도시에 공급되는 중유와 경유의 황함량을 각각 1.6%와 0.4%로 낮추었고, 1993년에는 이를 각각 1.0%와 0.2%로 낮추었다. 1996년에는 이 규정이 적용되는 지역을 확대하였고, 2001년에는 황함량을 중유 0.3%, 경유 0.1%로 낮추었다. 이와 함께 1985년 수도권에 고체연료 사용을 제한하였고, 2003년에는 서울에 고체연료 사용을 금지하였다. 서울의 발전소와 대형 건물에 청정연료인 LPG와 액화천연가스(Liquefied Natural Gas, LNG) 사용을 1988년에 의무화하였고, 1991년에 이를 수도권으로 확대하였다. 1980년대 후반부터 1990년대 초반까지 각 가정에서 연탄 사용을 제한하고 기름보일러를 가스보일러로 바꾸게 된 것이 바로 이 정책이다. 또한 1993년 전국적으로 유연휘발유의 판매를 금지하였다(Kim and Lee, 2018). 1997년에는 서울, 인천, 경기도 15개 시가 대기환경규제지역으로 지정되었으며, 이후 차량 배출가스 규제와 저공해 자동차 도입 등 추가 대책이 시행되었다.

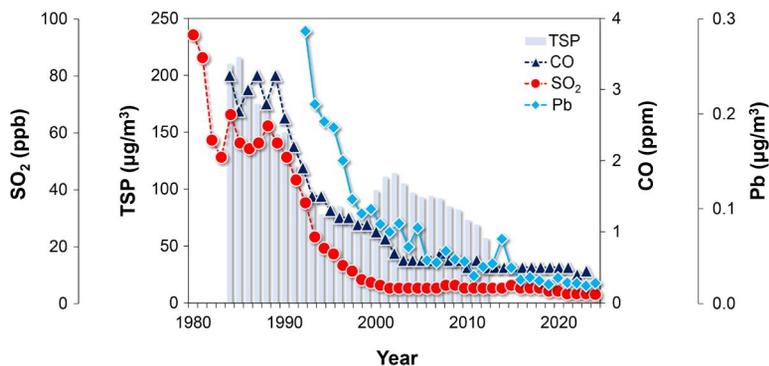
이와같은 정책으로 인해 그림 3에서 보듯이 서울의 1차 대기오염물질 농도는 1980년대 중반부터

Table 1. Evolution of the ambient air quality standard of the criteria air pollutants in Korea (NIER, 2024).

Year	1983	1993	2001	2007	2012	2018
Sulfur Dioxide (SO ₂ , ppm)	0.05/year ¹ 0.15/day ^{1*}	0.03/year 0.14/day 0.25/hour	0.02/year 0.05/day 0.15/hour	S	S	S
Carbon Monoxide (CO, ppm)	8/month 20/8hour	9/8hours 25/hour	S	S	S	S
Nitrogen Dioxide (NO ₂ , ppm)	0.05/year 0.15/hour	0.05/year 0.08/day 0.15/hour	S	0.03/year 0.06/day 0.1/hour	S	S
Particulate Matters (µg/m ³)	TSP	150/year 300/day	S	R	-	-
	PM ₁₀	-	80/year ³ 150/day ³	70/year 150/day	50/year 100/day	S
	PM _{2.5}	-	-	-	-	25/year ⁵ 50/day ⁵
Ozone (O ₃ , ppm)	0.02/year 0.1/hour	0.06/8hours 0.1/hour	S	S	S	S
Lead (Pb, µg/m ³)	1.5/3months ²	S	0.5/year	S	S	S
Benzene (µg/m ³)	-	-	-	5/year ⁴	S	S
Total hydrocarbon (ppm)	3/year 10/hour	R	-	-	-	-

¹From 1978; ²From 1991; ³Implemented at 1995; ⁴Implemented at 2010; ⁵Implemented at 2015. 'S' means the same as the existing value, "R" means removed, and "-" means no standard.

* Standards for hour base values: 99.9 percentile value of one-hour average value should not exceed the standard value and 99 percentile value of 8-hour or 24-hour (day) value would not exceed the standard value.

**Fig. 3.** Long-term trends in primary air pollutant concentrations in Seoul between 1981 and 2023.

2000년대 초까지 획기적으로 줄어들었다. 그러나 1990년대 후반부터 대기오염물질 농도가 크게 변하지 않고 있다. 이는 개별 배출원에서의 대기오염물질

배출량은 배출허용기준 강화로 줄어들었으나, 오염원 수가 증가하였기 때문이다. 예를 들어 서울 자동차 등록대수 1991, 1995, 2000년에 각각 137, 204, 244

만대로 크게 증가하였다.

한편, 울산·온산 지역은 1960년대부터 중화학공업이 집중되면서 대기오염이 심각해졌다. 이에 정부는 1986년 이 지역을 대기보전특별대책지역으로 지정하였으며, 1991년 신규 배출시설에 대한 특별 배출허용기준을 적용하였다. 1996년부터는 황 함량 1.0% 이하의 저황유 사용이 의무화되었고, 1997년에는 휘발성유기화합물(Volatile Organic Compounds, VOCs) 규제가 추가되었다. 오염물질 감축을 위해 굴뚝자동 측정기가 확대 설치되었다. 여수 산업단지는 1990년대 후반부터 VOC 배출 문제가 대두되었으며, 1996년 대기보전특별대책지역으로 지정되었다. 이후 배출시설에 대한 강화된 배출허용기준이 적용되었고, 2004년 VOC 방지시설 설치가 의무화되면서 배출량이 약 30% 감소하는 효과를 보였다. 부산과 대구는 1993년부터 청정연료 사용이 의무화되었으며, 광양만은 철강·석유화학산업의 특성을 고려해 별도의 오염 저감 대책이 적용되었다. 그러나 1990년대 중반에 산업단지 주민의 불만이 속출한 것에서 알 수 있듯이 그렇게 성공적이지 않았다(Hankookilbo, 1996).

이처럼 한국의 대기관리 정책은 지역별 산업 구조와 오염 특성을 반영하여 차별화된 규제를 도입하며 발전해왔다. 그러나 이 정책들은 우리나라의 특성을 이해하여 수립, 시행되었다기보다는 선진국에서 성공한 정책들을 벤치마킹하여 시행한 것이었다. 또한 이들 정책은 어느 정도 성공적이기는 하였으나, 늘어나는 배출원으로 대기오염도가 주민이 만족할 정도로 저감되지는 않았다.

2.2 연구 시작

1980년대부터 1990년대 초까지 대기환경, 특히 미세먼지 관련 연구는 크게 두 분야로 나눌 수 있다. 하나는 개별 연구자에 의한 먼지에 포함된 유해 대기오염물질 농도 및 오염원 파악 연구이고, 다른 하나는 국립환경연구소(현 국립환경과학원)의 황사 관련 연구이다. 대기 먼지 가운데 유해물질 연구는 다환방향족탄화수소(Polycyclic Aromatic Hydrocarbon, PAH) 관련 연구와(Koo and Seo, 1992; Sohn *et al.*, 1987) 중

금속 관련 연구(Heo *et al.*, 1986)가 대표적이다. 황사 관련 연구는 황사입자가 PM_{2.5}보다 큰 입자가 대부분이란 특성으로 입경분포 측정과 이온과 원소 성분 분석을 주로 수행하였다(예를 들어, Lee *et al.*, 1986). 유해물질 연구는 그 당시 국민의 환경에 대한 불안과 관련되며, 황사 연구 분야는 당시 일본에서 관심을 갖던 대기오염물질 장거리이동을 우리나라에서도 연구한 것으로 보인다.

예산과 제도면에서 체계적인 대기환경 연구는 ‘서울 지방의 스모그 현상 연구’(MSIT, 1992)가 ‘G7 프로젝트’ 사업으로 1992년부터 수행되었다. 이 연구는 가시거리와 이와 관련된 PM_{2.5} 물리화학적 특성을 동시에 측정하고, 모델을 적용하여 시정장애에 크게 영향을 주는 주요 화학성분을 정량적으로 평가하였다(예를 들어 Baik *et al.*, 1996; Park *et al.*, 1994). 그러나 이 연구는 미국식 방법론을 도입하여 적용하는데 중점을 두어, 방법론을 제대로 소화하여 우리나라 자체 연구체계 구축과 전체적인 연구 역량을 강화하지는 못하였다.

1990년 중반부터는 국민의 대기환경에 대한 관심이 급증하여 폐기물 소각로에서 배출되는 다이옥신 등에 의한 건강 영향(SMC, 1996), 산업단지에서 유해성 대기오염물질 배출에 대한 건강 영향(Na *et al.*, 2001) 등 연구가 진행되면서 국민의 보다 쾌적한 대기환경에 대한 요구에 맞춘 연구가 증가하였다. 이 연구들은 미국의 체계적인 연구 방법론, 특히 측정과 분석의 정도관리 체계와 관련 측정과 분석 장비를 도입하여 2000년대 대기환경 연구의 기초를 닦은 점에서 의의가 있다. 그러나 현안에 집중하느라 자체적인 연구 역량 강화와 우리나라의 대기환경 문제를 체계적으로 파악하지 못한 것은 아쉬운 점이다.

3. 수도권 집중 관리: 2001~2013년

3.1 수도권 특별법 배경과 주요 내용

수도권에서 여러 정책 시행에도 불구하고 배출원 개수의 증가로 대기오염물질 배출량이 줄지 않고, 따

Table 2. Reduction targets of the air pollutant emissions to meet the goals for NO₂ and PM₁₀ concentrations in 2014 (1st stage Special Plan) (MOE, 2013, 2005).

	SO _x	NO _x	PM ₁₀	VOCs
Emission amount in 2001 (t)	70,188	309,387	14,681	262,479
Reduction (%)	38.7	53.0	38.7	38.7
Estimated Emission amount in 2014 (t)	43,025	145,412	8,999	160,900

Table 3. Investment plan and actual execution amount during the 1st stage Special Plan (Million Won) (MOE, 2013). Percentages in parentheses indicate the proportion of each category relative to the total actual investment.

	Total	Introduction of low emission vehicles	Improvement of in-use vehicles	Management of places of business	Efficient management system	Reduction of road re-suspended dust
Plan	4,002,775	232,480	3,457,602	225,323	77,056	10,314
Actual	3,081,914	589,007	2,300,417	114,017	71,558	6,915
	(100%)	(19.11%)	(74.64%)	(3.70%)	(2.32%)	(0.22%)

라서 대기오염물질 농도도 감소하지 않자, 정부에서는 대기오염물질 배출 총량관리제를 중심으로 한 정책을 기획, 시행하였다.

수도권 대기환경관리 기본계획(기본계획)은 우리나라 인구의 절반 정도가 살고 있는 수도권의 대기오염을 저감하기 위해 수립, 시행된 계획으로 수도권 대기환경개선에 관한 특별법(2003.12 제정) 제8조에 따라 환경부장관이 10년마다 수립, 시행하도록 규정되어 있다. 이에 따라 환경부 장관은 매 10년마다 기본계획을 수립하고 시행하여야 하며, 기본계획에 대한 추진 실적을 매 3년마다 국회에 제출하여야 한다. 정책 대상 지역의 장인 서울특별시, 인천시, 경기도지사는 기본계획을 바탕으로 시행계획을 5년마다 수립하고 시행할 의무가 있으며, 매년 시행계획 추진 실적 보고서를 작성하여 환경부 장관에게 보고하도록 되어 있다.

제1차 기본계획은 2005년부터 2014년까지 10년간 3조원이 넘는 예산을 투입하였다. 1차 기본계획의 저감 목표는 서울시의 PM₁₀과 이산화질소 농도를 2001년 71 µg/m³과 37 ppb에서 2014년 40 µg/m³과 22 ppb로 저감하는 것이고, 이를 위해 3차원 대기화학모형을 활용하여 목표 농도를 달성하기 위한 대기오염물질별 배출량 삭감량을 표 2와 같이 설정하였다(MOE, 2005). 이를 달성하기 위한 분야별 투자계획

과 실제 집행액은 표 3과 같다.

이 대책은 PM₁₀, 질소산화물(NO_x), 황산화물(SO_x), 휘발성유기화합물 등 대기오염 물질 배출을 줄이고, 수도권 대기질을 개선하는 것을 목표로 삼았다. 이를 위해 (1) 운행 경유자동차에 미세먼지 저감장치(DPF) 부착 등의 자동차 저공해화를 포함한 자동차 관리대책, (2) 수도권 사업장에 대한 배출총량제와 이를 이행하는 수단으로 배출권 거래제 도입 등의 사업장 관리대책, (3) 환경친화적인 에너지와 도시 관리, (4) 대기환경관리의 과학화와 시민 참여 활성화를 주요 세부 추진계획수단으로 제시하였다(MOE, 2013).

자동차 관련하여 배출허용기준도 강화하였다. 경유자동차는 2006년에 EURO4, 2009년에 EURO5, 2015년에 EURO6 기준을 도입하였고, 휘발유자동차는 2009년에 ULEV 기준을, 2륜차는 2008년에 EURO3 기준을 도입하였다. 연료도 2009년에 황함량을 휘발유는 50에서 10 ppm, 경유는 30에서 10 ppm, LPG는 100에서 40 ppm으로 낮추었다.

2005년부터 시행된 제1차 기본계획은 국내 최초로 수도권 지역을 대상으로 한 종합적인 대기질 개선 계획이라는 점에서 중요하다. 또한 3차원 모델링으로 시나리오 분석을 통하여 정량적인 계획을 마련한 것, 재원 확보 계획을 구체화한 것도 중요한 발전이다.

다만 대기오염물질 배출량 자료의 불확도가 크고, 모델링 연구에 충분한 시간을 들이지 못해 작성된 시나리오의 불확도가 큰 것이 아쉽다. 이 대책은 이후 2차, 3차 대책으로 이어지는 기반을 마련했으며, 다음 장에 설명할 우리나라 전체 미세먼지 및 대기질 관련 정책 방향과 추진에 주춧돌 역할을 하였다.

3.2 연구 정체

1차 기본계획의 주요 추진 방향의 하나가 ‘대기환경관리의 과학화’ (MOE, 2005)이지만, 그에 상응하는 과제가 지속적으로 수행되지는 않았다. 물론 이 기간에 상당히 큰 규모의 대기환경, 특히 미세먼지 관련 연구과제가 여러 개 수행되었다. 국립환경과학원 용역과제로 ‘대도시 대기질관리방안 조사연구’가 한국 대기환경학회 주관으로 2002~2006년 수행되었다. 서울시에서도 ‘수도권 미세먼지, 오존 등 현황 및 저감방안 연구’ 용역과제가 2007~2010년 동안 현재 서울연구원 주관으로 수행되었다. 이 외에도 환경부 등에서 미세먼지 생성원인 규명을 위한 여러 연구 과제를 발주하였다.

따라서 미세먼지 관련 연구과제가 충분하지는 않았으나, 미흡했던 것은 아니었다. 그러나 대부분의 연구과제가 현안 해결 위주여서, $PM_{2.5}$ 생성 관련한 기초연구는 그다지 활발하지 않았다. 이는 1차 기본계획이 PM_{10} 과 질소산화물을 저감 목표로 한 것과 관련이 크다. 그러나 기본계획 예산 대부분이 $PM_{2.5}$ 저감에 투입되어 목표와 정책 수단의 괴리가 크다는 지적을 받은 것을 고려하면 (BAI, 2008), $PM_{2.5}$ 관련 연구 지원이 적은 것은 아쉬운 점이다. 또한 오존 농도는 이 기간 계속 증가하였음에도 불구하고 (예를 들어, Yeo and Kim, 2021), 이와 관련된 기초연구가 작았던 것도 아쉬운 점이다.

3.3 정책 효과

제1차 수도권 대기환경개선대책은 10년간의 사업 수행을 통해 계획목표를 대체로 달성한 것으로 보고되고 있다 (Han et al., 2017; MOE, 2013).

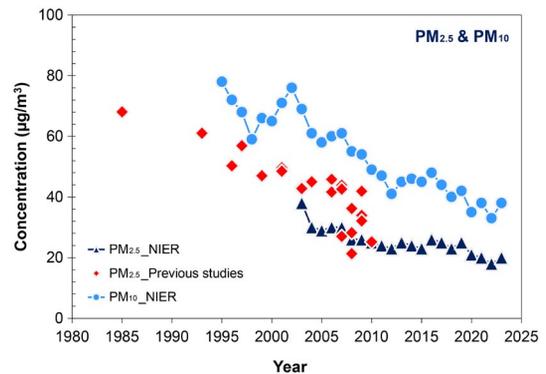


Fig. 4. Long-term trends in PM_{10} and $PM_{2.5}$ in Seoul between 1986 and 2023.

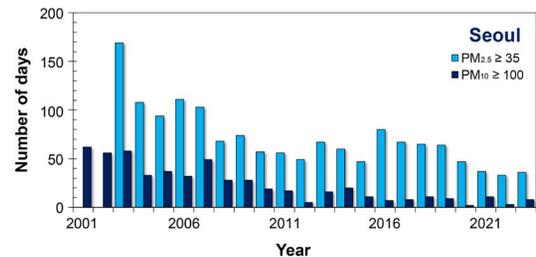


Fig. 5. Long-term trends of the number of days with high PM_{10} ($\geq 100 \mu\text{g}/\text{m}^3$) and $PM_{2.5}$ ($\geq 35 \mu\text{g}/\text{m}^3$) concentration in Seoul between 2001 and 2023.

장기 관측 자료가 존재하는 서울에서 그림 4에서 보듯이 PM_{10} 과 $PM_{2.5}$ 연평균 농도가 1995년부터 2023년까지 감소하는 경향을 보인다. 그림 5에서 보듯이 PM_{10} 과 $PM_{2.5}$ 연간 고농도 발생 횟수도 1995년부터 2023년까지 감소하는 경향을 보인다. Yeo et al. (2019a)와 Yeo and Kim (2019b)도 같은 경향 결과를 얻었다. 이들 농도가 감소함에 따라 연평균 시정은 1981년부터 전반적으로 증가하는 추세이다 (그림 6). 시정은 대기 중 수평 탁도를 의미하는데, 빛 산계수와는 반비례하며, 대기질을 반영하는 대리지표로 오랜 기간 사용되어 왔다. 1990년대에는 시정 저하 문제가 대기오염과 관련하여 시민들의 우려 사항이었다 (Baik et al., 1996; Park et al., 1994). 하지만 시정이 10 km 이하에 해당하는 저시정 빈도는 2000년 이

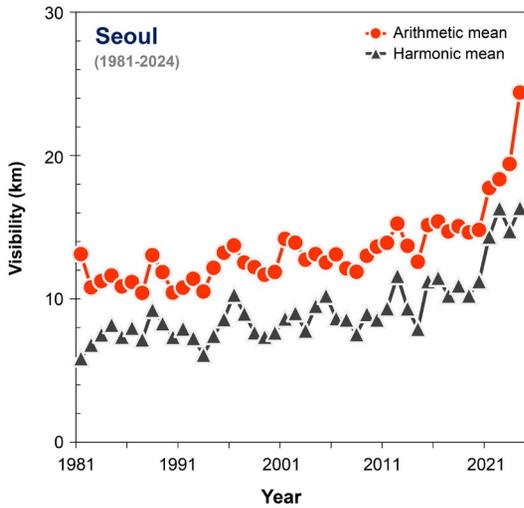


Fig. 6. Long-term trends in visibility in Seoul. The harmonic mean is more sensitive to low visibility, making it better suited for representing atmospheric extinction.

후 우리나라 대부분의 지역에서 증가하는 추세이며 (Yeo *et al.*, 2025), 이는 국민들의 미세먼지 체감농도 증가에 영향을 주었을 수 있다. 한편, 코로나 팬데믹으로 2020년 여러 인위적인 활동에 제약이 생기며 PM₁₀과 PM_{2.5} 농도가 크게 감소하였고, 이후에도 감소 추이를 이어가고 있으며(그림 4) 고농도 일수도 감소하였고(그림 5), 시정 또한 증가 추이를 이어가고 있다(그림 6).

제1차 기본계획의 주요 성과는 수도권 대기질 개선의 초석을 마련했다는 점이다. PM₁₀ 농도가 감소했으며, 질소산화물과 황산화물 배출량도 줄어들었다. 배출 총량제 도입을 통해 산업시설과 발전소의 오염물질 배출을 효과적으로 관리하였으며, 수도권 내 노후 차량 저공해 조치 및 압축천연가스(Compressed Natural Gas, CNG) 버스 확대를 통해 교통 분야의 오염 저감도 이루어졌다고 평가된다. 그러나 1차 수도권 대기환경개선대책의 효과가 어느 정도인지는 아직 확실하지 않고(Han *et al.*, 2017), 목표와 시행 방법의 불일치성과 과학적 이해의 불확실성에 대해 지적을 받았다(BAI, 2015, 2008).

따라서 이러한 성과가 정책효과에 의해서 이루어진 것인가에 대해서는 보다 엄밀한 의미의 정책 효과 분석 내지 성과의 추정이 필요하다. 통상적으로 성과 추정은 정책수단과 결과 간의 인과관계에 근거하고, 정책수단의 순효과를 추정하기 위해 다양한 분석방법이 활용된다. 이때 그 첫 번째 조건은 동일 기간 동안 정책이 시행된 지역이 정책이 시행되지 않은 지역에 비해 배출량이 얼마나 상대적으로 감소되었는지를 확인하는 것이다. 따라서 미세먼지 농도와 배출량의 경우에도 정책효과를 파악하기 위해서는 수도권 지역에서의 1차 기본계획 시행 이전과 이후의 차이와 비수도권 지역에서의 같은 기간 차이를 비교하여야 한다. 이러한 문제를 고려하기 위해 Han *et al.* (2022, 2017)은 연구 방법으로 정책의 효과성을 측정하기 위해 차이의 차이(Difference-in-Differences, DID) 분석을 수행하여 정책 시행 전후 및 정책 시행 지역과 비시행 지역 간 차이를 비교하였다. 연구결과에 따르면 수도권의 미세먼지 농도는 당초 계획했던 수준으로 감소되었으며 미세먼지 배출량 역시 정책 시행 이전보다 감소되었다. 하지만 이러한 감축 정도가 1차 기본계획이 도입한 정책수단에 의한 것인지는 여전히 모호하다. 수도권과 비수도권의 도로이동 오염원으로부터의 배출량 감축의 차이가 명확히 드러나지 않기 때문이다. 물론 배출량과 관련한 다양한 측정의 문제는 이러한 추정 자체를 어렵게 하고 있지만, 바로 이러한 이유로 보다 많은 연구가 필요하다고 지적할 수 있다(Han *et al.*, 2022, 2017; Cheong and Kim, 2021).

이와 같이 대기환경 정책의 효과성 검증은 대기환경이라고 하는 특수성과 미세먼지에 영향을 미치는 수많은 영향 변수의 통제의 어려움으로 정책효과를 정량적으로 명확히 검증하는데 한계를 가질 수 있다. 그럼에도 불구하고, 미세먼지의 집중적인 관리와 다양한 정책의 추진 속에 미세먼지 농도는 개선되는 경향을 보이고있으며, 이를 평가하는 방법 및 결과 역시 꾸준히 연구되고 있다(Bae *et al.*, 2022; Kang, 2022; Lee and Ham, 2020; Kim *et al.*, 2018).

또 하나 검토하여야 할 것은 계획된 정책들이 계획대로 잘 진행되었는가 하는 것이다. 이 계획의 획기적인 점은 광역 대기 관리 기구 신설과 배출 총량제 두 가지일 것이다. 수도권대기환경청 설립은 미국 캘리포니아 남부대기관리국(South Coast Air Quality Management District, SCAQMD)이 여러 카운티의 대기를 통합관리하는 것을 벤치마킹한 것이다. 그러나 수도권대기환경청은 SCAQMD에 비해 법적 강제력이나 재정적 자립이 미흡하고, 연구 인력 또한 매우 미흡하여 실제 광역 대기 관리를 효과적으로 수행하지 못하고 있다. 또한 배출 총량제의 가장 중요한 방법인 배출권 거래제는 Yeon and Kim (2012)나 Park and Kim (2019)에서 밝혔듯이, 이 제도가 벤치마킹한 SCAQMD의 Regional Clean Air Incentives Market (RECLAIM)의 황산화물이나 질소산화물 거래 가격에 비해 수도권 배출권 거래제 가격은 1/600 이하 수준이고, 거래 양도 매우 작았다. 이는 배출할당량을 과다 배정한 것이 가장 큰 이유로 보인다. 그 밖에도 중요한 방향으로 제시한 VOCs 관리도 실제 배출량 저감이 목표량에 미치지 못해, 그다지 성공적이지 않았다(MOE, 2013).

마지막으로 고려할 것은 목표와 정책 수단이 잘 정렬되어 있는가이다. 다시 말하면 정책이 잘 시행되면 목표가 달성되게 정책이 수립되었는가이다. 이 계획의 농도 저감 목표 물질은 PM_{10} 과 질소산화물이었으나, 예산의 90% 이상은 자동차 저공해화에 투입되었다. 자동차에서 배출되는 먼지는 주로 $PM_{2.5}$ 보다도 크기가 작은 먼지로, 자동차 저공해화는 인체 위해성이 높은 자동차 배출 미세먼지를 줄이는 데에는 효과적이었으나, 목표인 PM_{10} 질량농도를 줄이는 데에는 효과가 크지 않았다. 더욱이 수도권에서는 질소산화물 주요 배출원인 자동차 배기가스에서 질소산화물을 줄이는 데 필요한 질소저감장치 부착은 자동차 저공해화 정책에 포함되지 않았다.

요약하면 1차 기본계획을 시행한 수도권의 미세먼지 농도는 감소하였으나, 그 감소 정도는 기본계획 대상지역이 아닌 비수도권 감소 정도와 통계적으로

유의미한 차이를 보여주지 못했다(Han *et al.*, 2022; Cheong and Kim, 2021). 즉 1차 기본계획에 포함된 여러 정책 가운데 어느 정책이 효과적이었는지에 대한 효과분석이 없었다. 이후의 다른 대책들에서 개별 정책의 효과분석이 없다. 또한 1차 기본계획 자체가 목표와 수단의 정합성이 떨어졌고, 계획의 주요 내용도 잘 이행이 되지 않았다.

1차 기본계획은 2015년부터 2차 기본계획으로 이어졌다. 2차 수도권 대기환경계획은 수립당시 4조 5천억원이 넘는 예산을 투입해 PM_{10} , 이산화질소와 함께 $PM_{2.5}$ 와 오존 농도를 줄이는 정책을 펴고자 하였다(MOE, 2013). 이 두 물질은 대기에서 광화학반응에 의해 생성되는 비율이 높은 대기오염물질로 전구물질에서 $PM_{2.5}$ 와 오존으로 변환되는 과정 이해가 중요하며, 이에는 전구물질과 $PM_{2.5}$ 화학조성 파악이 필수적이다. 그러나 그림 7에서 보듯이 $PM_{2.5}$ 성분은 2012년부터야 상시 측정이 시작되었다. 이는 2013년부터 시작된 미세먼지에 대한 국민의 불안에 대처하기에는 과학적인 근거가 미흡했다는 것을 의미한다.

그림 7은 여러 학술지 문헌에서 제시된 1980년대부터의 $PM_{2.5}$ 화학성분 농도와 수도권대기환경연구소에서 측정한 2012~2023년 연평균 $PM_{2.5}$ 화학성분 농도이다. 전체적으로는 감소하는 추세를 보이고 있으나, 그 정도는 화학성분마다 다르다. 황산염, 원소상탄소(Elemental Carbon, EC) 농도는 계속하여 감소하고 있으나, 질산염과 암모늄은 2000년대 중반까지는 증가하다가 감소하는 추세를 보이고 있다. 유기탄소(Organic Carbon, OC)는 2000년대에는 감소, 2010년대는 정체, 2020년대는 약간이지만 증가 추이를 보이고 있다.

한편 질산염/황산염, OC/EC 비는 모두 증가하고 있다(그림 8). 이는 황산염과 EC 농도 감소 추세가 질산염과 OC 감소 추세보다 크기 때문이다. 이는 우리나라와 중국의 황산화물 배출 저감 정책이 효과적이었다는 것과, 우리나라의 자동차 배출저감 대책이 효과적이었는 것을 의미한다. 특히 OC/EC 비의 증가 추이가 질산염/황산염 비의 증가 추이보다 큰 것은

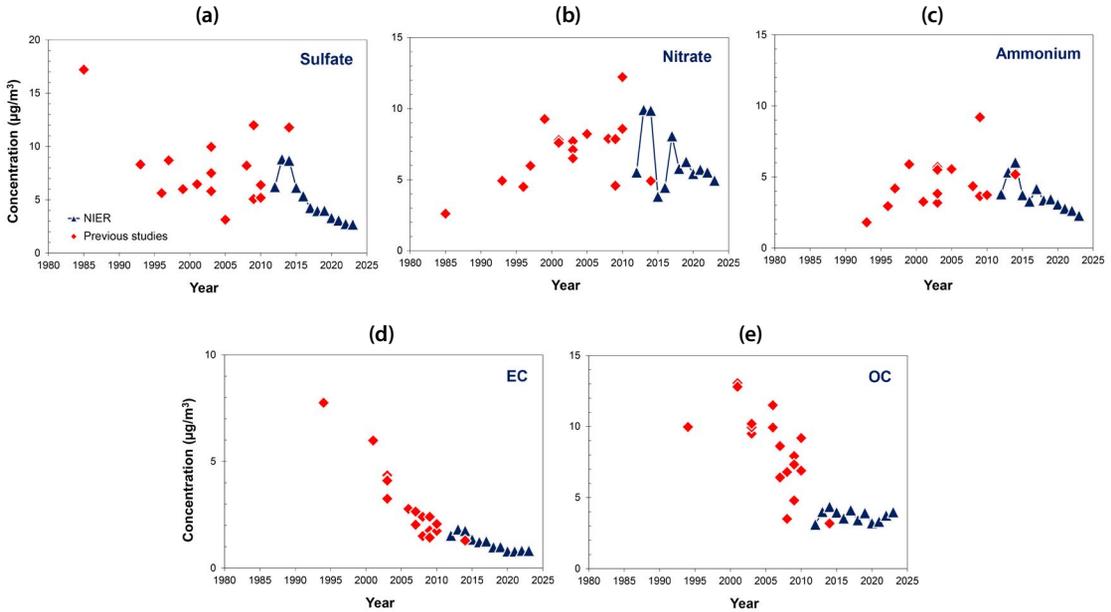


Fig. 7. Long-term trends of PM_{2.5} chemical component concentrations in Seoul. (a) sulfate, (b) nitrate, (c) ammonium, (d) EC, and (e) OC. Previous studies data are from Han and Kim (2015) and NIER data are from NIER (2025a).

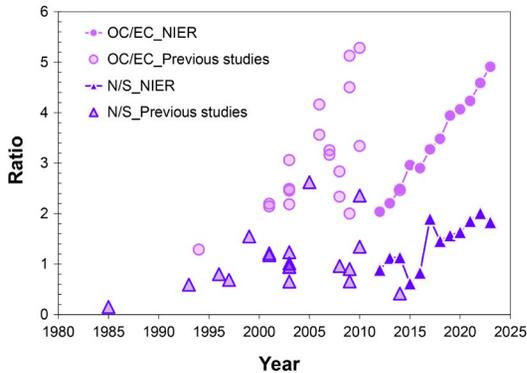


Fig. 8. Trends of the nitrate/sulfate and OC/EC ratio in Seoul. Previous studies data are from Han and Kim (2015) and NIER data are from NIER (2025a).

(1) EC 감소 정책의 효과가 큰 것과 (2) 대기에서 생성되는 2차 유기입자(Secondary Organic Aerosol, SOA) 생성이 상당한 것 두 가지 영향이 같이 작용한 것으로 보인다. SOA 생성 영향 증가는 2020년대 OC 농도 증가와도 관련이 있는 것으로 보인다.

4. 미세먼지 집중 관리: 2013년~현재

4.1 미세먼지의 사회문제화

1장에서 제시하였듯이 우리나라가 다른 OECD 국가에 비해 PM_{2.5} 농도가 높은 것은 사실이나, 미세먼지가 사회문제화된 것은 농도가 높아서만은 아니다. 이는 그림 S1에서 2013년 가을 이전에는 사회적 관심이 그다지 크지 않았다는 것에서 알 수 있다. 왜 2013년 가을부터 미세먼지에 대한 사회적 관심이 커졌는지를 이해하는 것은 미세먼지 문제 해결뿐만 아니라 다른 사회적 환경문제를 이해하는데 도움이 될 것이다.

미세먼지가 사회문제화된 가장 큰 이유는 우리나라 사회환경의 변화일 가능성이 크다. 우리나라 국민은 그동안의 경제 성장과 사회 발전으로 더욱 안전하고 쾌적한 삶에 대한 욕구가 많이 증가하였다. 비록 미세먼지 농도는 과거보다 감소하였지만, 국민은 그보다 더 안전하고 깨끗한 환경을 요구하는 것이다. 다시 말하면 국민은 과거 우리나라의 미세먼지 농도

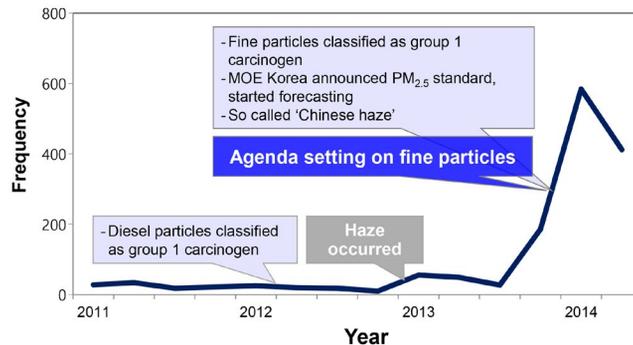


Fig. 9. Trend of the article frequency among 5 major news papers between 2011 and 2014 and major issues during the period. (reconstructed based on Kim *et al.* (2015a)).

와 현재 우리나라를 비교하는 것이 아니라 현재 선진국과 우리나라의 미세먼지 현상을 비교하는 것이다. 여기에 언론이 미세먼지를 의제화하고, 정부와 전문가가 이에 효과적으로 대처하지 못하여 미세먼지가 사회문제화된 것으로 보인다.

먼저 언론의 의제화부터 살펴보자. 2011년부터 2014년 사이 5대 신문사의 미세먼지 관련 기사 건수 추이를 그림 9에 보였다. 2013년 초에 서울과 베이징을 포함한 동북아시아에서 고농도 미세먼지 사례가 발생하였다. 이 때에도 그림 S1과 그림 9에서 보듯 사회적 관심도나 신문 기사 건수가 약간 증가하고는 다시 감소하였다. 사회적 관심도나 신문 기사 건수가 크게 증가한 것은 2013년 가을부터였다. 이 때 나온 미세먼지 관련 주요 내용은 (1) 세계보건기구가 미세먼지를 1군 발암물질로 지정한 것과, (2) 환경부가 PM_{2.5}를 대기환경기준물질로 추가하고, 미세먼지 예보제를 실시하겠다고 한 것, 그리고 소위 ‘중국발 스모그’라는 용어가 언론에 크게 보도된 것이다.

세계보건기구가 미세먼지를 1군 발암물질로 지정한 것이 미세먼지에 대한 사회적 관심을 갖게 한 가장 큰 이유라면, 2012년 세계보건기구가 디젤 입자를 1군 발암물질로 지정하였을 때에도 사회적 관심도나 신문 기사 건수가 증가하였어야 하나 그렇지 않았다. 환경부가 PM_{2.5} 대기환경기준을 신설하고 예보제를 실시한 것은 뒤늦은 감은 있더라도 마땅히 하여야 할

정책이었지만, 이것만으로 사회의 관심을 크게 올리는 않았을 것으로 보인다. 당시 가장 사회의 관심을 받은 것은 미세먼지가 중국에서 온 것이라는 언론 보도인 것으로 보인다(Kim *et al.*, 2015a, 2015b).

우리나라는 아시아 대륙 풍하지역에 있기 때문에 북풍이나 서풍 계열의 바람이 불 때 중국, 몽골, 북한, 러시아에서 우리나라로 대기오염물질이 이동하게 된다. 중국에서 우리나라 미세먼지 농도에 얼마나 영향을 미치는지에 대해서는 많은 연구가 진행되었고, 그 영향 정도는 여러 변수, 특히 기상조건에 따라 크게 변한다. 장기간에 걸친 영향을 검토한 한 중국 모델링 연구에서는 우리나라 PM_{2.5} 농도에 중국이 미치는 영향이 2010년 28.0%에서 2017년 15.7%로 줄어들었다고 보고되었다(Han *et al.*, 2021). 한편 우리나라에서 수행된 한 장기간 모델링 연구에서는 2010~2017년 사이 중국이 우리나라 PM_{2.5} 농도에 미치는 영향이 40~65%라고 보고하였다(Bae *et al.*, 2020). 연구자들에 따라 영향도가 다른 이유는 사용한 배출량과 기상 자료, 모델, 영향도 평가 방법들이 다른 것이다. 한 연구팀에서 다른 조건은 동일하지만 영향도 평가 방법을 다르게 하여 PM_{2.5} 농도의 국내외 영향도를 평가한 결과 2017년 1월 평균 한 방법은 국내 35%, 국외 65%이나, 다른 방법은 국내 18%, 국외 42%, 혼합 40%로 나타났다(KEI, 2018).

풍상 지역으로부터의 공기 이동은 자연적인 것이

며, 여기에 포함된 대기오염물질을 줄이기 위해서는 국제협력을 강화하여야 하지만 현실적으로 우리나라 정부가 외부에서 이동하는 미세먼지를 주도적으로 저감할 수 있는 정책 수단은 없다. 따라서 환경부는 2013년까지는 중국 영향이 있으므로 우리나라 대기 오염물질 배출을 더 줄여야 한다고 발표하였다(MOE, 2014). 그러나 2014년부터는 중국과의 협력을 통한 외부 영향을 강조하고, 이를 줄이기 위한 정책도 주요 정책 수단으로 발표되었다(예를 들어 MAC, 2016).

2013년 가을 전후 5개 신문사의 기사 논조는 2013년 가을 이전에는 미세먼지 발생원을 비산먼지와 자동차·발전 시설의 배출가스, 화석연료의 사용 등 인위적인 원인에 두는 경우가 가장 많았고, 그 결과 국제공조를 통한 대응은 거의 언급되지 않았다. 그러나 2013년 가을 이후에는 미세먼지 발생의 원인을 중국에 두는 경우가 많아졌고, 이에 국제공조를 통한 대응이 언급되기 시작하였다. 그러나 미세먼지 발생의 원인을 중국에 돌리는 비율은 80%가 넘었던 반면, 미세먼지 해결을 위한 대응은 국제공조보다는 개인적 대응에 집중하는 보도 행태를 보였다. 즉, 언론의 미세먼지 문제의 진단과 해결 사이에 괴리가 존재하였다. 언론이 미세먼지 문제로 의제를 구축한(*agenda setting*) 시점과 미세먼지 농도 변화 사이에는 시간차가 존재하였다. 즉, 우리 주변에 상존하지만 인지되지 않던 위험이 과학적 사실과 무관하게 언론에 의해 위험문제로 재구성되어 확산될 수 있음을 언론 기사의 변화량은 보여준다(Kim *et al.*, 2015a).

이러한 언론 기사에 가장 많이 활용된 정보원은 전문가로 608건(39.6%) 이었고, 이어 정부 및 관련 기관이 242건(15.8%), 시민이 195건(12.7%), 기업이 153건(10.0%), 자료인용이 126건(8.2%), 국외 기관이 98건(6.4%) 순으로 나타났다(Kim *et al.*, 2015a). 전문가들은 신문 기사의 정보원, 정부 자문 등의 역할을 하였으나, 미세먼지에 대한 국민의 불안을 줄이는 데에는 실패하였다.

왜 정부와 전문가 집단은 미세먼지가 사회문제화

되고, 국민이 불안해하는 것에 적절히 대응하지 못했을까? 이는 정부가 ‘대기오염물질 배출을 계속 줄이고 있는데 왜 2013년 초에 미세먼지 농도가 증가했느냐’는 질문에 언론과 국민이 이해할 수 있는 과학적인 근거를 제시하지 못했기 때문으로 보인다. 실제로는 그 시기 기상요인이 미세먼지 농도 증가에 크게 기여했기 때문이었으나(Kim *et al.*, 2017), 그동안 시행하고 있던 대기오염물질 배출 저감 정책들 가운데 어떤 것이 미세먼지 농도 저감에 효과적인지, 대기오염물질 배출을 저감해도 미세먼지 농도가 증가하는 것은 어떤 이유 때문인지를 과학적으로 설명할 수 있는 역량이 부족했다. 마지막으로 정부가 국민과의 소통을 효과적으로 시행하지 못하였다. 대표적인 예가 ‘고등어가 미세먼지 주범’ 관련 내용이다(SCPM, 2024). 이러한 국민의 불안 속에서 정부도 국내 배출 저감을 강조하던 데에서 외부 영향을 인용하는 쪽으로 분위기가 바뀌었다(Kang, 2019).

전문가들이 언론의 기사 작성에 중요한 정보원이었음에도 불구하고 과학적인 정보를 효과적으로 제공하지 못한 것은 크게 세 가지 이유가 있는 것 같다. 먼저 전문가는 과제를 수행하거나 논문을 발표하는 형태로 자기 전문 지식을 전달하지, 언론이나 대중에게 전문 지식을 알리는 것을 중시하지 않고 있다. 또한 언론이나 대중처럼 비전문가에게 전문 지식을 전달하는 것이 서툴렀다. 전문가의 용어는 언론이나 대중이 사용하는 용어와 달랐다. 특히 전문가는 단정적으로 말하는 것에 익숙하지 않지만, 언론과 대중은 단정적인 답변을 원했다는 점에서 차이를 보였다. 세 번째는 대기환경 전문가도 더 세분화되어, 각 전문 영역에 대해서는 잘 알고 있지만, 이를 종합적으로 판단할 수 있는 종합적인 전문가가 많지 않았다. 전문가 단체가 전문 지식을 종합적으로 비전문가들에게 전달하는 체계를 만드는 것도 잘 이행되지 않았다. 학회나 협회 같은 전문가 단체는 정부의 용역과제나 다른 형태로 지원을 받는 경우가 많아, 정부가 발표한 것을 제대로 부정하거나 반론을 제시하지 못하였다. 마지막으로, 그 동안의 우리나라 연구 수준이

Table 4. Major Policies Related to Fine Particulate Management (Reorganized and updated based on Shim (2021)).

Period	Major Policies	Remarks
2003	1 st Metropolitan Air Quality Management Master Plan	Metropolitan Area (2005~2014)
2005	1 st Comprehensive National Air Quality Improvement Plan	2006~2015
2011	Revision of the Basic Environmental Policy Act	
2013	Comprehensive Plan for Fine Dust	
2013	2 nd Metropolitan Air Quality Management Master Plan	Metropolitan Area (2015~2024)
2015	2 nd Comprehensive National Air Quality Improvement Plan	2016~2025
2016	Special Measures for Fine Dust Management	
2017	Comprehensive Fine Dust Management Measures	
2017	Metropolitan Fine Dust Seasonal Control Measures	Metropolitan Area
2017	Revision Plan for the 2 nd Metropolitan Air Quality Management Master Plan	The revised plan period is 5 years (2020~2024)
2017	Implementation of Emergency Fine Dust Reduction Measures in the Metropolitan Area	Metropolitan Area
2018	Strengthening Fine Dust Air Quality Standards	
2018	Enactment of the Special Act on Fine Dust	
2019	Enforcement of the Special Act on Fine Dust	
2019	Implementation of Emergency Fine Dust Reduction Measures in High-Pollution Areas	Nationwide
2019	1 st Comprehensive Fine Dust Management Plan	2020~2024
2019	Establishment of Seasonal Fine Dust Management System	Nationwide
2020	Implementation of the Regional Air Quality Management Master Plan	
2022	3 rd Comprehensive National Air Quality Improvement Plan	2023~2032
2024	2 nd Comprehensive Fine Dust Management Plan	2025~2029
2025	Metropolitan Air Quality Management Master Plan	Metropolitan Area (2025~2029)

정부와 언론에 확신을 줄 정도로 미세먼지 고농도 현상을 과학적으로 설명하기에는 충분한 수준이 아니었다.

요약하면 2013년 “국내 대기환경 전문가와 환경부는 2013년 중국의 상황에 대한 객관적 진단을 내리지 못하였고, 그 결과 국민들이 수긍할 수 있는 대책을 제시하지 못하였다” (SCPM, 2024).

4.2 다양한 정책

미세먼지 관련하여서 표 4에서 볼 수 있듯이 다양한 계획과 법들이 제정되고 시행되었다. 제1차 대기환경개선 10개년 종합계획 (2006~2015)은 대기환경보전법에 의한 최초의 대기분야 법정 종합계획으로 10년간 (2006~2015년) 국가 대기질 개선, 기후변화 대책의 정책 방향을 담았다(MOE, 2006). 1차 대기환경개선 종합계획에서 대기질 부문대책은 수도권과 5

대 광역시·광역시 등 오염우심지역을 대상으로 대기질 목표 설정 및 단계별·분야별 대책을 제시하였고 이 중 수도권 대책은 수도권 대기환경관리 기본계획 (2005.11)을 준용하였으며, 5대광역시와 광양만에 대해서는 수도권 대기환경관리 기본계획 수준의 구체적인 대기질 개선 대책을 제시하고자 하였다. 이를 위해 수도권, 5대 광역시, 광양만 등 오염우심지역을 대상으로 대기질 목표를 설정하고, 단계별·분야별 대책, 6대 기본 실천방향, 27가지 세부계획을 포함하였다. 또한, 온실가스 저감을 위한 부문대책으로 전국 단위를 대상으로 4가지 대책, 7대 기본 실천방향, 19가지 세부계획을 수립하였다.

대기오염물질 중 미세먼지에 집중한 대기관리 정책은 미세먼지가 사회적 이슈로 떠오른 2013년 이후부터 본격적으로 발표되기 시작하였다.

2013년 12월 정부는 미세먼지 종합대책을 수립하

였다(KLRI, 2015). 이 대책은 (1) 미세먼지 예보제 확대 및 경보제 실시, (2) 한중일 국제협력 강화, (3) 친환경자동차 보급 확대, 제작차 배출허용기준 단계적 강화, 교통수요 관리 강화, (4) 사업장 배출허용기준 강화, 대기오염물질 총량관리 강화, NO_x 저배출 보일러 등 교체 지원, (5) 오염측정망 확충 등의 내용을 담고 있다. 종합대책은 미세먼지 오염 저감을 위한 다양한 정책방향을 종합적으로 포괄하여 제시하고 있지만, 사업장 관리 외에는 대체로 구체성이 떨어지는 지원 강화, 협력 강화 등을 주요 내용으로 하고 있어 실질적인 미세먼지 오염 저감에 도움이 될 수 있을지 의문이라는 평가를 받았으며, 세부적인 내용이 비슷한 시기에 발표된 2차 수도권 대기환경관리 기본계획과 대동소이한 것으로 보인다(KLRI, 2015).

제1차 수도권 대기환경개선대책에 이어 수립된 제2차 수도권 대기환경개선대책에서는 PM₁₀ 목표치를 기존 40 µg/m³에서 30 µg/m³로 낮추고, PM_{2.5} 목표를 서울시 기준 20 µg/m³로 새롭게 설정하였다. 또한, 제1차 대책과 달리 고농도(Hot-spot) 노출 인구의 건강보호 및 인체 위해성 관리에 중점을 두었으며, 생활오염원 관리도 새롭게 포함되었다(MOE, 2014).

그러나 국민이 체감하는 미세먼지 오염이 악화되면서, 정부는 2016년 6월 관계부처 합동으로 미세먼지 관리 특별대책을 발표하였다(MAC, 2016). 이 대책은 2차 수도권 대기환경관리 기본계획에서 설정한 미세먼지 농도 20 µg/m³ 달성 시기를 2024년에서 2021년으로 앞당기는 것을 목표로 삼았다. 또한, 기존 정책의 한계를 보완하기 위해 2차 생성 먼지의 전구물질 관리 부족, 경유차 실도로 배출량 미고려, 미세먼지 예·경보의 정확성 및 실효성 부족 등의 문제를 반영한 세부 대책을 수립하였다. 이에 따라 특별대책과의 목표 일관성을 유지하고 후속 조치를 체계적으로 이행하기 위해 2차 수도권 대기환경관리 기본계획 변경계획이 심의·확정되었으며, 저감 대책 추진에 따른 배출 삭감량을 반영하여 대기관리권역별 및 지역별 오염물질 목표 배출량이 조정되었다.

제2차 대기환경개선 종합계획(2016~2025)은 2030

년 감축목표 달성 및 기후변화 대응 강화를 목표로 “건강 100세 시대를 여는 맑은 공기, 시원한 지구(Clean Air Cool Earth)”를 비전으로 설정하였다. 이를 바탕으로 대기환경 부문에서는 미세먼지·오존 오염 50% 이상 감축, 기후변화 부문에서는 2030년 BAU 대비 온실가스 37% 감축을 목표로 하였으며, 이를 달성하기 위해 4대 기본 전략과 10대 핵심 분야별 47개 주요 과제를 마련하였다(MOE, 2015).

이후 2017년 5월 문재인 정부가 출범하면서 미세먼지 문제 해결을 최우선 과제로 설정하였고, 같은 해 9월 관계부처 합동으로 미세먼지 관리 종합대책을 발표하였다. 이 대책에서는 2022년까지 미세먼지를 30% 감축하는 목표를 제시하고, 4대 핵심 배출원(발전, 산업, 수송, 생활)에 대한 집중 감축을 위한 중점 추진 과제를 마련하였다. 또한 기상 악화로 고농도 미세먼지 발생이 빈번해지면서, 정부는 2018년 11월 관계부처 합동으로 비상·상시 미세먼지 관리 강화대책을 발표하였다. 이 대책은 고농도 시기 단기 비상저감조치 시행을 위한 구체적인 계획과 함께, 평상시에도 미세먼지 배출을 줄일 수 있도록 강화된 상시 저감 대책을 포함하였다(MOE, 2018).

2019년 3월, 국회는 미세먼지 대응 강화를 위해 미세먼지 8법으로 불리는 8개 법안을 의결하였다. 여기에는 재난 및 안전관리기본법 개정안, 학교보건법 개정안, 액화석유가스의 안전관리 및 사업법 개정안, 항만지역 등 대기질 개선에 관한 특별법안, 실내공기질 관리법 개정안, 대기관리권역 대기환경개선에 관한 특별법 제정안, 대기환경보전법 개정안, 미세먼지 저감 및 관리에 관한 특별법 일부개정법률안이 포함되며, 이를 통해 관련 법령이 정비되고 미세먼지 저감을 위한 재정이 확대되었다. 이어 2019년 11월, 정부는 미세먼지 저감 및 관리에 관한 특별법 제7조에 따라 미세먼지 관리 종합계획(2020~2024)을 발표하며, 미세먼지 저감을 위한 중장기 정책 방향을 제시하였다(Shim, 2021). 2022년 발표된 제3차 대기환경개선 종합계획(2023~2032)은 ‘깨끗한 공기, 건강한 국민’을 정책 비전으로 설정하고, 국민 건강 보호를 최우

선 목표로 삼고 있다(MOE, 2022). 이를 실현하기 위해 효과적인 규제·지원을 통한 국내 감축, 고농도 미세먼지 발생 시 국민 건강 보호 강화, 동아시아 대응 체계 제도화를 통한 국외 유입 저감을 기본 방향으로 설정하였으며, 5대 핵심 전략과 26개 중점 추진 과제를 제시하였다(Shim *et al.*, 2023).

또한 국민 불안 저감을 위해 2019년에 미세먼지 저감 및 관리에 관한 특별법에 의한 미세먼지특별대책위원회, 그리고 국가기후환경회의를 설립하여 운영하였다. 미세먼지특별대책위원회는 미세먼지 관련 주요 정책·계획 및 이행 관련 사항을 심의하는 국무총리 직속 민관합동기구이다. 2018년 8월 제정되고, 2019년 2월 시행된 미세먼지 저감 및 관리에 관한 특별법에도 불구하고 미세먼지에 대한 국민의 불안이 계속되자, 미세먼지를 줄이기 위해 정부가 노력하고 있다는 것을 상징적으로 보여주기 위해 국가기후환경회의를 2018년 4월 설립하였다. 국가기후환경회의는 대통령 직속 민관 합동 자문위원회로 국민 의견을 수렴하여 미세먼지 문제에 관한 범국가적 대책 및 주변 국가와의 협력 증진 방안을 마련하기 위하여 설립되었다. 실체는 두 기구 모두 환경부가 여러 부처의 의견을 취합하여 정리하는 형태로 국민 의견을 수렴하여 정책을 제안하거나, 정책을 심의한 것으로 보인다.

그밖에 2020년에는 기존 2차 수도권 대기환경관리 기본계획 변경계획을 전국으로 확대하기 위해 “권역별(중부권·남부권·동남권) 대기환경관리 기본계획(2020~2024)”이 발표되었다. 이를 통해 미세먼지 관리 권역을 수도권에서 전국으로 확장하고, 지역별 대기오염 수준과 배출량 변화를 고려한 맞춤형 관리를 추진하고자 하였다.

낮은 기온과 적은 강수량, 대기 정체 현상으로 겨울철은 초미세먼지가 발생하기 쉬운 환경이 된다. 특히, 겨울철에는 난방 기구 사용으로 연료 사용량이 늘어날 뿐만 아니라 북서풍을 타고 중국발 미세먼지가 국내로 다량 유입되면서 다른 계절보다 위험성이 큰 고농도 미세먼지가 발생하게 된다. “미세먼지 계

절관리제”는 미세먼지 고농도 시기인 12월부터 이듬해 3월까지 보다 강화된 저감 및 관리 정책을 시행하여, 미세먼지 고농도 현상의 빈도와 강도를 완화하려는 목표를 가지고 시행되었다. 2019년 12월부터 제1차 미세먼지 계절관리제가 시행되었으며, 이에 대한 추진실적 및 성과 등을 검토하고 보완하여(Shim, 2021) 2025년 3월까지 제6차 미세먼지 계절관리제를 시행하고 있다.

미세먼지에 대한 관심이 증가하면서 측정소의 종류 및 개수가 확대되었다. 대기환경측정소 개수는 미세먼지가 사회 현안이 되기 시작한 2013년 말을 기점으로 증가하기 시작하였다. 측정소 개수는 2014년 말 506개에서 2025년 말까지 1002개로 2배 가까이 증가할 예정이며, 측정망 종류도 2014년 말 11개 종류의 측정망(도시대기, 도로변대기, 산성강하물, 국가배경농도, 교외대기, 대기중금속, 유해대기물질, 광화학대기오염물질, 지구대기, PM_{2.5}, 대기오염집중)에서 2025년 현재 국가배경농도측정망이 2개로 분리되고(도서, 선박), 향만측정망이 신설되어 13개 종류의 측정망을 운영하고 있다(NIER, 2025b).

2019년 미세먼지 배출 정보를 체계적으로 관리하기 위한 국가미세먼지정보센터가 운영되기 시작했다.

이와 같이 정부는 미세먼지에 대한 국민들의 우려와 관심이 증가함에 따라 미세먼지 관리와 관련한 다양한 정책을 추진하였다. 이들 대책은 초기의 배출량 저감 위주의 정책에서 시간이 지날수록 지역배출특성과 건강영향을 개선하는 방향으로 진화하고 있으며 미세먼지와 온실가스의 통합관리라는 정책 목표를 향해 나아가는 경향을 보이고 있다. 그러나 이들 정책의 골격과 주요 대책은 수도권 기본계획을 기반으로 하여, 그 장단점을 대부분 계승하고 있다. 특히 개별 정책에 대한 효과성 분석은 아직까지도 잘 이루어지지 않고 있다.

4.3 다양한 연구

미세먼지 문제에 대한 국민 우려와 함께 미세먼지

에 대한 과제 수와 연구비 또한 크게 증가하였다. 2013년의 관심 급증에 대응하여 2014년을 기점으로 과제 수가 급증하였고, 연구비 규모는 2016년 이후 급증하였다. 미세먼지에 대한 관심은 2019년에 최고점에 달했지만(그림 S1), 과제 수와 연구비 규모는 2년 가량 지연되어 2021년에 최고점에 달한 것을 그림 10에서 확인할 수 있다.

이전까지 미세먼지는 환경부가 주로 다루는 환경 문제였으나, 2013년 이후 국민적 관심이 높아지면서 범부처 차원의 과학적 접근이 필요해졌다. 과학기술 부에서 사회문제를 해결하기 위한 연구사업을 기획하여 2014년부터 3년 동안 ‘초미세먼지 통합형 인체 유해성 실시간 진단, 예보모델개선 및 저감 기술 개발’ 과제를 수행하였다. 이 과제는 측정, 모델링, 위해성 평가, 저감 기술 개발, 정책 효과분석 및 소통 체계 개발의 그 이후 대형 미세먼지 연구개발 과제의 연구 범위를 모두 포함하는 과제이었다. 그러나 부처 간 협업이 미흡하여, 대기환경측정망 자료를 제대로 확보하지 못하여 연구 결과 활용이 활발하지는 않았다.

이에 따라 2016년 11월, 관계부처 합동으로 ‘과학기술기반 미세먼지 대응 전략’이 수립되었다(MASC, 2016). 이 전략은 미세먼지의 현상 규명 및 예측, 배출 저감, 국민 생활 보호를 주요 목표로 삼았고, 다부처 사업으로 수행하여 부처 사이의 협력을 강화하려고 하였다. 2017년 8월부터 3년 동안 ‘미세먼지 범부처 프로젝트’가 추진되었으며, 이 프로젝트는 발생·유입, 측정·예보, 집진·저감, 보호·대응 등 미세먼지 전 분야를 아우르는 연구개발을 포함하였고, 과학기술 정통부, 환경부, 보건복지부가 참여했다. 미세먼지 범부처 프로젝트 이후 이를 확대하여 과기정통부에서 ‘동북아-지역 연계 초미세먼지 대응 기술개발 사업’을 2020~2025년 동안 수행하였다.

이 외에도 여러 부처가 참여하여 다양한 R&D 사업을 진행했으며, 과학기술정보통신부, 산업부, 환경부 등에서 새로운 미세먼지 연구개발 사업을 추진했다. 그 가운데 하나가 환경부 산하 국립환경연구원과 미국 항공우주청(National Aeronautics and Space

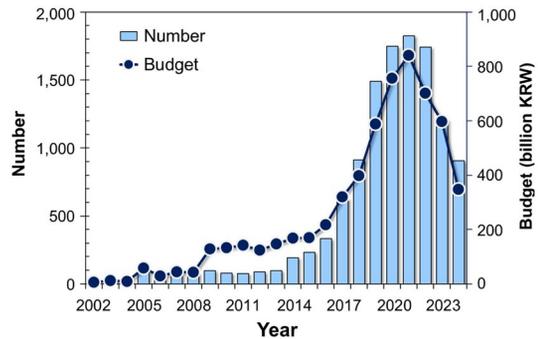


Fig. 10. Trends in the number of projects and research funding related to 'fine particles' in the National Science & Technology Information Service (NTIS) (NTIS, 2025).

Administration, NASA)가 공동으로 2016년 5~6월에 수행한 KORUS-AQ (Korea-United States Air Quality Study)으로, 국민의 미세먼지에 대한 불안을 저감하는데 상당한 역할을 하였다.

이런 대형과제들은 대기환경 연구자들에게는 처음인 대규모 목적 연구이며, 이를 수행하기 위한 연구 체계를 수립하여 연구를 수행하였다. 모델링 연구를 위한 체계 확립, 높은 수준의 측정 연구를 수행하기 위한 장비 구축, 대규모 목적연구 수행 체계 구축을 통해 우수한 연구 결과가 많이 나왔다. 그러나 대부분의 연구자가 개별 연구에 익숙하여 이런 대규모 목적연구에 적응하는데 시간이 걸렸다.

각 부처는 학교, 산업, 교통 등 다양한 분야에서 미세먼지 저감 기술을 개발하였다. 교육부와 과기정통부는 학교 맞춤형 미세먼지 관리 기술을 개발하고, 산업부는 자동차 비배기관 미세먼지 저감 기술 개발을 추진하였다. 환경부는 중소기업장과 군용차량 등 관리 사각지대 해소를 위한 기술 개발을 추진하였고, 질병관리청은 건강 취약 계층을 대상으로 한 질병 예방 및 중재 기술을 개발하고자 하였다. 미세먼지 관리 종합계획(2020~2024)에서는 미세먼지 대응력 제고를 위한 R&D를 강화하였으며, 각 부처별로 특화된 단기 및 특성화 R&D를 추진하였다. 그러나 통합적 R&D 접근은 부족한 측면이 있어 부처별로 단편적인 R&D만 수행되고 있다는 비판이 있다(SCPM, 2024).

Table 5. Trends of PM_{2.5} mass and chemical components' concentration in 6 Atmospheric Environment Research Centers between 2012 and 2023 (NIER, 2025a).

Component	Location*	p-value	Trend	Sen's slope ($\mu\text{g}/\text{m}^3/\text{y}$)
PM _{2.5}	MSA	<2.2e-16	Down (▼)	-1.45
	BN	2.675e-10	Down (▼)	-0.67
	JJ	<2.2e-16	Down (▼)	-1.92
	JB	<2.2e-16	Down (▼)	-1.87
	HN	<2.2e-16	Down (▼)	-1.20
	YN	<2.2e-16	Down (▼)	-1.47
SO ₄ ²⁻	MSA	<2.2e-16	Down (▼)	-0.41
	BN	1.102e-12	Down (▼)	-0.17
	JJ	<2.2e-16	Down (▼)	-0.28
	JB	<2.2e-16	Down (▼)	-0.23
	HN	<2.2e-16	Down (▼)	-0.24
	YN	<2.2e-16	Down (▼)	-0.32
NO ₃ ⁻	MSA	<2.2e-16	Down (▼)	-0.30
	BN	<2.2e-16	Up (▲)	0.14
	JJ	0.04801	Up (▲)	0.01
	JB	0.0004743	Down (▼)	-0.07
	HN	2.02e-06	Down (▼)	-0.06
	YN	<2.2e-16	Down (▼)	-0.17
NH ₄ ⁺	MSA	<2.2e-16	Down (▼)	-0.25
	BN	0.6015	No trend	-
	JJ	0.0001122	Down (▼)	-0.05
	JB	<2.2e-16	Down (▼)	-0.14
	HN	<2.2e-16	Down (▼)	-0.15
	YN	<2.2e-16	Down (▼)	-0.24
EC	MSA	<2.2e-16	Down (▼)	-0.12
	BN	<2.2e-16	Down (▼)	-0.04
	JJ	<2.2e-16	Down (▼)	-0.11
	JB	<2.2e-16	Down (▼)	-0.16
	HN	<2.2e-16	Down (▼)	-0.06
	YN	<2.2e-16	Down (▼)	-0.06
OC	MSA	0.4152	No trend	-
	BN	2.273e-16	Down (▼)	-0.13
	JJ	<2.2e-16	Down (▼)	-0.33
	JB	<2.2e-16	Down (▼)	-0.28
	HN	<2.2e-16	Down (▼)	-0.12
	YN	<2.2e-16	Down (▼)	-0.18

*MSA: Metropolitan Seoul Area (located in Seoul), BN: Baengnyeong, JJ: Jeju, JB: Jungbu (located in Daejeon), HN: Honam (located in Gwangju), YN: Yeongnam (located in Ulsan)

과기정통부에서 2018년 '미세먼지 R&D 패키지 투자 모델 (KiSTi, 2018)'을 만들어 체계적인 연구분야 설정 및 투자에 활용하고자 하였으나, 제대로 활용되지 못했다. 그에 따라 부처별 미세먼지 연구사업은 환경부를 중심으로 추진되고 있는 정부의 미세먼지 관리

정책과 효과적으로 접목되지 못하고 있다 (SCPM, 2024).

미세먼지 문제에 대하여 중장기적으로 대응하고자 '미세먼지 해결 다부처 사업'을 기획하였으나, 예비타당성 평가를 통과하지 못하였다 (SCPM, 2024). 코로

Table 6. Trends of gaseous species concentration in 7 Atmospheric Environment Research Centers between 2012 and 2023 (NIER, 2025a).

Species	Location*	p-value	Trend	Sen's slope ($\mu\text{g}/\text{m}^3/\text{y}$)
SO ₂	MSA	<2.2e-16	Down (▼)	-0.67
	BN	<2.2e-16	Down (▼)	-0.26
	JJ	<2.2e-16	Up (▲)	0.15
	JB	<2.2e-16	Down (▼)	-0.10
	HN	<2.2e-16	Down (▼)	-0.14
	YN	<2.2e-16	Down (▼)	-0.20
NO ₂	MSA	<2.2e-16	Down (▼)	-2.33
	BN	<2.2e-16	Up (▲)	0.18
	JJ	<2.2e-16	Down (▼)	-0.29
	JB	<2.2e-16	Down (▼)	-1.36
	HN	<2.2e-16	Up (▲)	0.34
	YN	<2.2e-16	Down (▼)	-2.40
CO	MSA	<2.2e-16	Down (▼)	-36.8
	BN	<2.2e-16	Up (▲)	16.7
	JJ	<2.2e-16	Down (▼)	-17.2
	JB	<2.2e-16	Down (▼)	-11.7
	HN	<2.2e-16	Down (▼)	-14.6
	YN	<2.2e-16	Down (▼)	-11.1
O ₃	MSA	<2.2e-16	Up (▲)	1.44
	BN	<2.2e-16	Up (▲)	1.31
	JJ	7.075e-09	Down (▼)	-1.28
	JB	<2.2e-16	Up (▲)	1.95
	HN	2.197e-07	Down (▼)	-0.37
	YN	<2.2e-16	Up (▲)	2.62

*MSA: Metropolitan Seoul Area (located in Seoul), BN: Baengnyeong, JJ: Jeju, JB: Jungbu (located in Daejeon), HN: Honam (located in Gwangju), YN: Yeongnam (located in Ulsan)

나19로 인해 2020년부터 대면 활동이 제한되면서 부처별·지자체별 연구성과 공유 활동은 미진했다. 또한, 2020년 정부의 2050 탄소중립 선언과 2022년 2050 탄소중립녹색성장위원회의 발족 등으로 인해 미세먼지 이슈가 탄소중립 이슈로 전환되면서 그림 10에서 보듯이 미세먼지 연구개발 환경이 악화되었다. 특히 2024년 정부의 연구개발 예산 삭감에서 미세먼지 관련 과제들이 특히 많이 예산이 삭감되었으며, 과제에 따라 90%가 삭감된 경우도 있어 실질적인 연구 중단 사태를 맞았다.

4.4 정책 효과

앞의 4.2절에 제시된 미세먼지 저감 정책은 미세먼

Table 7. Variation of the average PM_{2.5} concentrations before and after seasonal PM management in $\mu\text{g}/\text{m}^3$ (NIER, 2025a).

		Difference between two periods ^a	
		Before normalizing meteorology	After normalizing meteorology
SMA	Nov~Mar	-8.1	-11.3
	Apr~Oct	-4.6	-5.9
BN	Nov~Mar	-6.5	-5.6
	Apr~Oct	-1.4	-1.8
JJ	Nov~Mar	-4.3	-4.1
	Apr~Oct	-4.3	-3.8
JB	Nov~Mar	-9.6	-11.1
	Apr~Oct	-6.3	-5.8
HN	Nov~Mar	-5.8	-7.2
	Apr~Oct	-5.6	-5.8
YN	Nov~Mar	-7.0	-8.6
	Apr~Oct	-6.0	-6.7

^a(2021~2023 average) - (2015~2019 average)

*MSA: Metropolitan Seoul Area (located in Seoul), BN: Baengnyeong, JJ: Jeju, JB: Jungbu (located in Daejeon), HN: Honam (located in Gwangju), YN: Yeongnam (located in Ulsan)

지 농도 개선 및 고농도 발생 빈도 감소라는 가시적인 성과를 거두었다.

부문별 주요 정책과 그 효과를 살펴보면, 우선 산업 부문에서는 4개 대기관리권역을 설정하여 권역별 관리체제로 전환하고, 대기관리권역 내 총량관리제를 시행하였다. 또한, 사업장의 배출허용기준을 강화하고, 첨단 장비를 활용한 배출 규제의 실효성 확보를 위해 노력하고 있다. 이를 통해 산업 부문에서의 미세먼지 배출량이 감소하였으며, 특히 오염물질 배출이 많은 제조업과 발전소를 중심으로 감축 효과가 나타났다.

이러한 여러 정책으로 미세먼지를 포함한 대기오염물질 농도는 2012년부터 줄어드는 추세가 확실하다. 그림 4, 7과 표 5, 6에서 보듯이 PM_{2.5} 질량농도와 주성분인 황산염, 질산염, 유기탄소 농도는 대부분 지역에서 줄어들고 있고, 기체상 대기오염물질도 오존을 제외하고는 대부분 지역에서 줄어들고 있다.

또한 2019년부터 시작된 계절관리제도 표 7에서

보듯이 모든 지역에서 효과를 보였다. 특히 기상조건을 평준화하여 기상 영향을 배제한 경우 그 효과가 더 확실하게 나타났다(Lee *et al.*, 2024). 물론 이 효과는 우리나라 정책 효과뿐만 아니라 중국의 정책 효과도 포함된 것이기는 하지만 백령도에서의 효과 정도를 중국에 의한 것이라고 가정한다면, 한반도 대부분 지역에서 계절관리제 효과가 나타나고 있다.

그러나 어느 정책이 효과적이었는지에 대한 정량적 평가는 아직 미흡하다. 제시된 여러 대책들 중 먼저 2016년 발표된 미세먼지 관리 특별대책(MAC, 2016)에 대해 검토하여 보면, 본 대책은 미세먼지 관련하여서는 처음으로 다부처 종합계획으로 발표되었으나 배출저감을 포함한 대부분 대책은 환경부의 주도로 이루어졌고, 이에 따라 수도권을 대상으로 진행하고 있는 수도권 대기환경관리 기본계획의 내용을 약간 확대한 정책이 우선순위가 명확하지 않은 상태로 대책이 시행되었다. 이는 1차 대기오염물질에는 어느 정도 효과적이었지만, 미세먼지 대부분을 구성하는 2차 대기오염물질 저감에 그다지 효과적이지 않다. 이와 같이 1차 대기오염 저감 위주의 대책이 계속될 수밖에 없는 것은 우리나라에서 미세먼지가 생성되는 과정에 대한 이해가 많지 않고, 또 그런 이해를 위해 필요한 자료가 갖추어지지 않았기 때문이고, 또 아직 다부처 관리가 실제로 잘 진행되지 않았기 때문이다.

이에 따라 특별대책은 수도권에서 사용하던 기존 정책의 전국적인 확대와 미세먼지 예보 정확도 향상에 주로 맞추어지게 되었다. 시간만 충분히 주어진다면, 이런 방법도 효과적인데, 대기오염물질 배출을 계속 줄여나가면 언젠가는 미세먼지를 생성하는 반응이 줄어들어 미세먼지 농도는 줄어들 것이기 때문이다. 문제는 대기오염물질 배출을 어느 정도 줄이면 미세먼지 농도가 얼마나 줄어들 것인지에 대한 답을 하기 힘들고, 따라서 언제까지 줄여야 하는지에 대한 계획에 대한 과학적인 근거가 없는 것이다. 이제는 우리 국민의 기대수준과 의식수준이 높아졌고, 따라서 정부가 여러 이해당사자들의 의견에 대하여 합리

적인 답을 하여야만 정책 추진이 가능한 상황이 되었다.

요약하면 2016년 제안된 미세먼지 특별대책은 여러 부처의 이름으로 발표되었지만, 환경부의 수도권 대책을 확대한 것이 대부분이었고 또한 대책의 과학적인 근거가 명확하지 않아 대책 시행의 우선순위가 없고 효과분석을 제대로 할 수 없었다. 그리하여 국민 불안 저감에 그다지 효과적이지 않았다. 예를 들어 기상조건에 따라 같은 대기오염물질 배출이라도 미세먼지 농도가 달라지는 것을 명확하게 설명하지 못해, 국민 불안을 오히려 더하는 경우도 있었다.

그러나 정책의 효율성 면에서 볼 때, 주요 배출원별 배출 저감 효과에 대해서는 연구가 일부 진행되었지만 어느 정책이 얼마나 효과적이었는지에 대한 평가가 되지 않아, 정책 시행 이후에 보완을 추진하는 것이 어려운 측면이 있다. 예를 들어 2014년 기준 우리나라 석탄 발전 배출량을 100% 감축한 모델링 연구 결과, 지역별 연평균 PM_{2.5} 저감 정도는 충남 0.51 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, 세종 0.49 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, 광주 0.35 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 등의 순으로 나타났으며, 제주도에서 최저값(0.06 $\mu\text{g}/\text{m}^3$)을 보였다. 이는 충남 지역 PM_{2.5} 농도의 2.01%를 저감하는 효과이다(KEI, 2018). 이는 막대한 예산 투입에 비해서는 그다지 많은 저감이 아니다. 2017년 발표된 미세먼지 관리 종합대책의 우리나라 대기오염물질 배출량 저감계획(2014년 대비 30% 가량 감축)을 이행하였을 경우, PM_{2.5} 농도 저감은 2015년 기준 25 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 에서 3 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 정도 감소하는 것으로 연구되었다(Kim *et al.*, 2018). 그러나 구체적으로 어느 정책이 얼마나 효과적인지, 또 얼마나 효율적인지(비용대비 효과)에 대한 연구 결과는 거의 없다.

다시 말하면 정책은 ‘저감 대책들의 개선효과를 점검해 예산의 우선순위를 평가한 후에, 효과적인 대책은 확대하고 비효과적인 대책은 폐지하거나 축소하는 과정을 거쳐야 한다’(SCPM, 2024). 그러나 현재 미세먼지 관련 대책들은 이러한 정책효과 분석이 빠진 채로 진행되고 있다.

대표적인 예가 자동차 저공해화이다. 국회 예산정

책처에서 분석한 것에 의하면 미세먼지 대응 예산은 2016년 9,155억원에서 2017년 1조 1,793억원, 2018년 1조 6,467억원, 2019년 2조 480억원으로 매년 20% 이상씩 증가하였으며, 2019년에는 미세먼지 대응 등을 위해 추가경정예산이 편성되었고, 2019년도 추가경정예산 기준 미세먼지 대응 예산은 본예산 대비 66.8% 증가한 3조 4,154억원에 이른다. 이 가운데 친환경차량 보급 지원 사업은 2018년에 5,139억원이 투입되어 전체 미세먼지 예산의 31%를 넘게 차지하였으나 미세먼지 감축량은 102톤이다. 즉, 미세먼지 1톤 감축을 위해 투입된 비용은 50억원으로 나타난다. 같은 방법으로 재생에너지 발전 비중 확대는 5억원/톤, 노선버스 CNG 교체 0.74억원/톤, 이륜차 관리 강화 및 전기이륜차 보급 확대 63억원/톤, 도로재비산 먼지 저감 사업 0.28억원/톤으로 친환경차량 보급 지원 사업과 전기이륜차 보급 확대 사업에서 미세먼지 배출량 감축 비용이 높게 나타난다(NABO, 2019).

즉, 친환경차 보급 확대는 미세먼지 감축 정책 가운데 가장 많은 예산을 집행하였지만, 실제 미세먼지 저감에는 큰 효과가 없었다. 물론 친환경차 보급이 기후변화 주요 정책이고 미세먼지 저감에도 조금이나마 기여하므로 미세먼지 대책 예산에 포함되는 것이 합리적이라고 주장할 수도 있다. 그러나 기후변화 대책 예산이 미세먼지 저감 대책 예산의 대부분을 차지하면, 실제 미세먼지 저감에 효과가 큰 대책은 자원 분배의 왜곡으로 지원을 많이 받지 못해 사용한 예산에 비해 미세먼지 저감 정책이 효과가 없다는 평가를 받을 수 있다. 또한 대책 시행 후 미세먼지 저감 효과가 나타나지 않는 것에 대한 설명을 제대로 할 수 없어 정책에 대한 불신을 초래할 가능성이 있다. 이와 같이 자동차 분야에 미세먼지 대책 예산이 집중된 것은 1차 수도권 기본계획과 같은 문제이다.

5. 앞으로의 미세먼지 문제

5.1 배경

국민의 미세먼지에 대한 관심은 코로나 19 사태 이

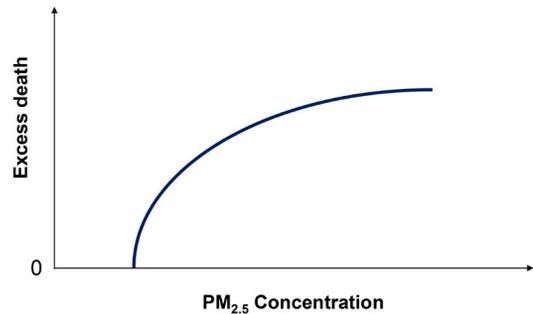


Fig. 11. Relationship between PM_{2.5} concentration and excess mortality (death) (Reconstructed based on the figures WHO (2021)).

후 줄어들었고, 이에 따른 정부의 미세먼지에 대한 정책 집행도 그 이전에 비해 상대적으로 약해졌다. 그럼, 미세먼지 문제는 해결된 것인가? 어떤 의미에서는 사회적 문제로서는 해결되었다고 할 수 있다. 언론이 계속 새로운 사회적 관심사를 의제 구축하는 것은 현대사회의 특징의 하나이므로(Beck, 1997), 사회적 현안이라는 관점에서는 해결된 것과 같다. 그러나 실제 인간과 환경에 미치는 영향은 아직도 크며, 국내외의 사회적 여건 변화, 그리고 지구환경 변화와 함께 앞으로도 큰 영향을 미칠 것으로 보인다.

본 장에서는 앞으로 예상되는 미세먼지 특성을 검토하고, 앞으로 우리나라에서 어떤 미세먼지 관리 대책을 수립하고, 어떤 분야의 연구를 하여야 할지를 논의하였다.

5.2 지속되는 미세먼지 건강 영향

미세먼지는 인체에 여러 가지 나쁜 영향을 미친다. 미세먼지 농도가 어느 정도면 인체에 영향이 없어질지에 대해서는 WHO에서 기존 연구 결과를 종합적으로 검토하였다. 매우 낮은 PM_{2.5} 농도에서도 초과사망이 발생하며, 농도가 높아지면서 그 증가율이 낮아지는 것으로 나타났다(그림 11). 연구 결과를 통계적으로 분석하여, 세계보건기구는 장기 초과사망률을 최소화하기 위해서 PM_{2.5} 대기질 관리기준(guideline level)을 2021년 연평균 5 µg/m³로 24시간 평균

15 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 제시하였고, 2024년 EU, 미국, 타이완에서 PM_{2.5} 대기환경기준을 강화하였다(표 8). PM_{2.5}와 함께 세계보건기구는 측정 자료와 건강 영향 자료가 충분하지 않아 대기질 관리기준을 제시할 수 없지만, 인체 영향 저감을 위해 초미세먼지 개수 농도와 입경 분포(Ultrafine Particles, UFP, 일반적으로 지름이 100 nm 이하의 입자로 간주되나, 물리적 크기, 열 확산률, 전기 이동도 등을 기준으로 정의되며 연구마다 입경 범위가 다양함), 블랙카본/원소상탄소(Black Carbon/Elemental Carbon, BC/EC), 모래먼지(Sand Dust Storms, SDS) 관리가 필요하다고 제시하였다(WHO, 2021).

우리나라는 PM_{2.5} 장기자료가 있는 서울의 경우 20여 년만에 연평균농도가 반 정도로 줄어 20 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 이하로 줄어들었다. 5~20 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 이 영역이 같은 농도의 PM_{2.5}를 줄일 때 초과사망률이 가장 크게 줄어드는 구간이다(WHO, 2021). 이 것이 PM_{2.5} 농도가 우리나라

라의 반 이하인 외국 여러 나라가 PM_{2.5} 대기환경기준을 최근에 계속 강화하고, 미세먼지 저감 정책을 계속 강화하고 있는 이유이다.

5.3 국내외 사회 여건 변화

미래를 예측하는 것은 어렵지만, 우리에게 적어도 앞으로 50년간 확실한 미래 추이는 고령화이다. 노인은 같은 미세먼지 농도이더라도 젊은 연령층에 비해 사망률이 높다(TMA, 2017). 표 9에 보이듯이 일본, 독일은 우리나라보다 미세먼지 농도가 절반 이하지만 이로 인한 사망률은 우리보다 약간 높은데, 이는 대부분 고령화로 인한 노인 인구 비율 증가 때문이다. 우리나라는 이미 고령화사회에 진입하였고, 곧 초고령화사회가 될 것이어서, 미세먼지로 인한 사망률을 줄이려면 지속적인 미세먼지 농도 저감이 필요하다.

또 하나의 사회 여건 변화는 지금도 나타나고 있는 국가 간, 그리고 국내 계층 간 지역 간 갈등이 더 심해지는 것이다. 한국과학기술기획평가원(KISTEP)은 2045년까지 미래사회를 전망해 이슈를 도출했다. 그 결과 (1) 디지털 세상, (2) 사회구조의 변화, (3) 지구 환경변화와 자원 개척, (4) 세계 질서의 변화, (5) 위험의 일상화를 도출했다(KISTEP, 2021). 마찬가지로 미국 국가정보위원회는 2040년 미래 예측에서 기후변화 등의 세계적 도전에 대응하는 어려움으로 공동체, 국가, 국제사회 내의 균열이 증가할 것으로 봤다. 이는 기존 체제와 구조의 역량을 초과해 불균형이 확대되고 공동체, 국가, 국제사회 내의 다툼이 확대될 것으로 예상됐다(NIC, 2021). 국가 간, 지역 간, 계층 간

Table 8. Comparison of the PM_{2.5} and PM₁₀ ambient air quality standards in the world ($\mu\text{g}/\text{m}^3$). The number in the parenthesis is the year the standard was set.

	PM _{2.5}		PM ₁₀	
	Year	Day or 24-hour	Year	Day or 24-hour
Korea	15 (2018)	35 (2018)	50 (2007)	100 (2007)
WHO	5 (2021)	15 (2021)	15 (2021)	45 (2021)
USA	9 (2024)	35 (2024)	-	150 (2012)
Japan	15 (2009)	35 (2009)	-	-
Taiwan	12 (2024)	30 (2024)	50 (2020)	100 (2020)
EU	10 (2024)	25 (2024)	20 (2024)	45 (2024)
UK	20 (2010)	-	40 (2010)	50 (2010)

Table 9. Comparison of the average PM_{2.5} concentrations and mortality rate per 100,000 population in some countries (WHO, 2022).

	South Korea	North Korea	China	Japan	USA	Germany
PM _{2.5} concentration ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	24.04	41.46	38.15	10.84	7.18	10.73
Mortality rate attributed to ambient air pollution	38	103	81	48	29	45
Age-standardized mortality rate attributed to ambient air pollution	19	86	64	12	14	15
Age-standardized mortality rate attributed to household and ambient air pollution	19	213	95	12	14	15

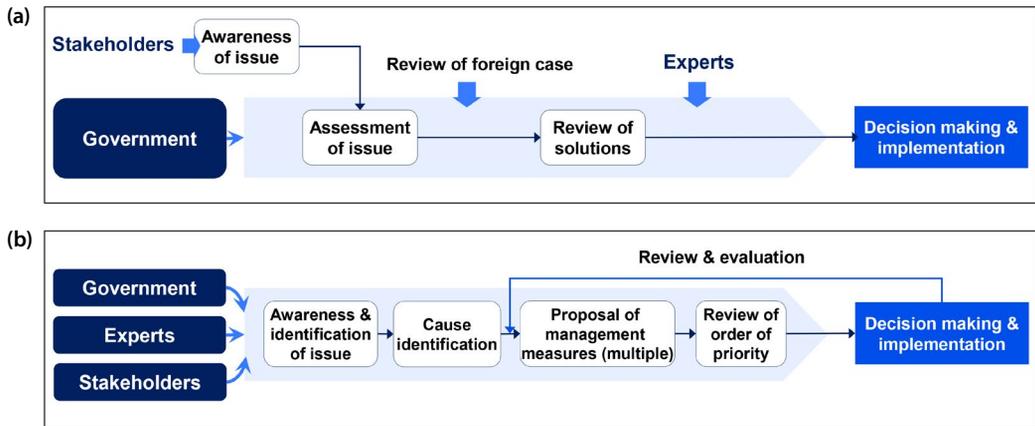


Fig. 12. Proposed air quality management scheme. (a) Current process, (b) Proposes process (NCCA, 2020).

갈등이 심화되면 미세먼지 대응 정책 수립 및 시행 과정이 점점 더 힘들어질 것으로 보인다. 이를 해결하는 방법은 국민에게 정확한 정보를 제공하고, 공론화를 통한 의견 수렴이다.

그림 12(a)는 현재까지의 환경 정책 수립 과정 모식도이다. 정부 주도의 정책을 수립하며, 일반 국민과 전문가는 일부 참여하는 정도이다. 앞으로의 미세먼지 정책이 효과적으로 수립, 시행되기 위해서는 그림 12(b)처럼 문제 파악부터, 정책 방향 설정, 시행 및 평가와 환류까지 전 과정에서 국민과 전문가, 그리고 기업 등의 이해당사자가 참여하는 체계를 밟아야만 효과적이 정책 시행이 가능할 것이다.

5.4 지구환경 변화

지구환경 변화, 특히 기후위기가 미세먼지 농도와 조성에 영향을 미치는 데에는 세 가지 경로가 있다. (1) 지구환경변화에 따른 기후변화로 미세먼지와 오존 같은 2차대기오염물질 생성 과정 변화, 즉, 기온 상승 등으로 2차대기오염물질 생성반응속도가 커질 수 있고, 오염원에서 배출되는 대기오염물질 배출량이 증가하거나, 기상조건에 의해 고농도 사례 같은 극단적 사례가 증가할 수 있다. (2) 기후위기를 완화하는 과정, 예를 들어 탄소중립 과정에서 미세먼지와 전구물질의 배출원 변화에 따른 미세먼지 주요 오염

원과 물리화학 특성 변화가 발생할 수 있다. (3) 기후변화로 인한 인간의 미세먼지 영향 정도 변화, 그리고 기후변화로 인한 새로운 또한 이를 해결하는 방법으로 대기오염물질과 온실가스의 통합관리 및 배출 저감을 통한 공편익에 대한 고려를 여러 나라에서 수행하고 있다.

미국 환경보호청(United States Environmental Protection Agency, US EPA)에 의하면 기후변화는 미국에서는 오존 농도를 증가시킬 것으로 보이며, 다른 대기오염물질에 대해서는 아직 명확하게 추이를 알 수 없다(US EPA, 2022). 중국 베이징 지역에 대한 모델링 연구에서는 기후변화에 따라 고농도 사례(haze)가 증가할 가능성이 높다(Cai *et al.*, 2017). 고농도 사례 증가 가능성과 함께 고려하여야 할 것은 산불이다. 대형 산불은 지금까지의 산불보다 매우 많은 대기오염물질, 특히 유기 성분 대기오염물질을 배출하여 부근의 생태계와 인체 영향을 주고 있다. 최근 발생하고 있는 대형 산불의 원인으로는 여러 가지가 있지만, 공통적인 것은 기후변화로 인한 기상과 생태계 변화이다.

기후변화를 완화하기 위한 수단으로 전 세계는 탄소중립을 달성하기 위해 노력하고 있다(IEA, 2021). 이 과정에서 화석연료 사용 저감으로 황산화물이나 화석연료 연소 과정에서 생성되는 일산화탄소나 먼

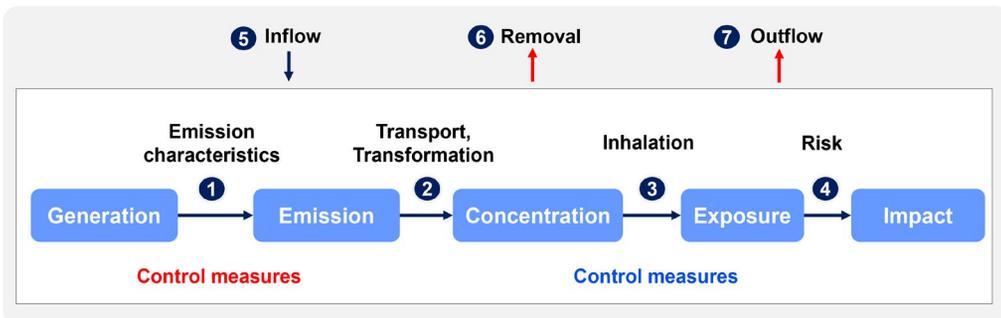


Fig. 13. Proposed schematics of minimizing human exposure from air pollutants.

지는 크게 줄어들 것이다. 그러나 암모니아나 수소 연소 과정에서 질소산화물이 계속 배출될 것으로 예상된다. 또한 암모니아는 화석연료 연소과정보다는 농축산이나 폐기물 분야에서 주로 발생하므로, 온실기체 발생을 줄이기 위해 화석연료 연소를 줄여도 발생이 크게 줄어들지 않을 가능성이 크다. 물론 탄소중립을 달성하기 위해서는 비료 사용이나 가축 사육 방법을 변화시켜야 하지만, 지금까지의 연구로는 암모니아 발생은 탄소중립을 달성하더라도 크게 줄지 않을 가능성이 크다 (The Royal Society, UK, 2021; AQEG, 2020). 한편 VOCs 같은 비연소 배출 물질은 계속해서 배출될 것으로 보이며, 이에 따라 PM_{2.5}나 오존 같은 2차대기오염물질은 계속 생성될 것으로 보인다. 이 외에도 탄소중립 과정에서 새로운 오염원이 발생할 것으로 예상되며, 이를 저감하기 위한 연구가 진행되고 있다(MSIT, 2022). 예를 들어 탄소중립을 추진하는 과정에서 개발된 새로운 방법들이 새로운 대기오염물질 발생원 역할을 하는 경우가 있다. 예를 들어 발생한 이산화탄소를 포집해 저장하거나, 화학반응을 통해 다른 물질로 전환하는 공정인 탄소포집·이용 및 저장(CCUS)이 있다. 현재 상업화 단계까지 개발된 CCUS 공정은 아민계 용매로 이산화탄소를 흡수했다가 다시 분리하는 과정을 반복하는데, 이 과정에서 암모니아, 아민 화합물, 그리고 발암물질인 니트로사민 등이 생성될 수 있다(The Royal Society, UK, 2021; AQEG, 2020).

새로운 오염물질 발생원은 아니지만, 실내 대기환

경도 지금보다 더 문제가 될 가능성이 있다. 탄소중립 시나리오에서는 에너지 효율을 높이기 위해 실내공간의 밀폐도를 높이는 방안이 중요한 수단으로 제시돼 있는데, 이로 인해 환기가 잘 이뤄지지 않아 실내에서 발생하는 대기오염물질이 제거되지 않고 축적될 가능성이 있어 추가적인 제어가 필요할 수 있다.

이는 대부분의 시간을 실내에서 보내는 현대인의 생활 패턴과 결합되어, 인체 위해도를 증가시킬 수 있다. 따라서 그림 13처럼 배출원에서의 저감 기술 적용뿐만 아니라(그림의 ① 부분), 인체 노출을 최소화하기 위한 저감 기술 적용(그림의 ③ 부분, 주로 실내)이 필요하다.

기후변화로 폭염, 가뭄, 홍수, 대형 산불 등의 극한 기상과 그에 따른 자연 재해가 증가하면, 그에 영향을 받는 민감계층에 대한 영향도가 증가할 가능성이 크다. 이는 환경정의 또는 기후정의와 관련되어 시급히 해결하여야 할 문제이다.

SLCP는 대기 중에서 짧은 기간(수일~수십 년) 동안 존재하면서 기후에 직접적인 영향을 미치는 물질을 의미한다. 대표적인 SLCP로는 메탄(CH₄), 블랙카본, 대류권 오존, 에어로졸 등이 있으며, 이들은 복사강제력(radiative forcing)을 변화시켜 지구 기온 상승 혹은 냉각에 기여한다.

SLCP의 기후 영향은 지역적으로 다르게 나타날 수 있다. 예를 들어, 블랙카본은 북극 지역에서 빙하 용해를 가속화하며, 대류권 오존은 기후뿐만 아니라 인

간 건강과 농작물 생산성에도 부정적인 영향을 미친다. 따라서 SLCP 감축은 단순한 기후 대응책이 아니라 다양한 환경 및 사회적 문제와 연계되어 있다 (Szopa *et al.*, 2021). SLCP는 대기 중 지속 기간이 짧기 때문에 배출을 줄일 경우 빠른 시간 내에 기후 영향을 완화할 수 있으며, 이는 장기적인 탄소중립 목표를 달성하는 데 중요한 전략적 역할을 한다 (Rogelj *et al.*, 2014).

SLCP 감축은 기후변화 완화뿐만 아니라 대기질 개선, 인간 건강 보호, 농업 생산성 증가 등의 즉각적인 공편익을 제공한다. 예를 들어, 메탄 배출을 줄이면 단기적인 지구 온난화를 낮출 뿐만 아니라 대류권 오존 농도도 감소하여 인간 건강과 작물 수확량 개선 효과를 기대할 수 있다. 블랙카본 감축은 호흡기 질환을 줄이고, 북극 및 히말라야 빙하의 용해를 늦추는 데 기여할 수 있다. 또한, 에어로졸 감축은 기후 영향뿐만 아니라 강수 패턴 안정화에도 중요한 역할을 한다 (Szopa *et al.*, 2021).

기후변화에 관한 정부 간 협의체 (Intergovernmental Panel on Climate Change, IPCC)는 제6차 평가보고서 (Sixth Assessment Report, AR6)에서 메탄, 블랙카본, 대류권 오존 등 SLCP가 기후변화에 미치는 영향이 크므로, CO₂와 같은 장수명 온실가스 (Long-Lived Greenhouse Gas, LLGHG)와 함께 통합적으로 관리해야 한다고 강조한다 (Szopa *et al.*, 2021). 특히, 각국의 온실가스 배출량 목록 (emissions inventory)에서 SLCP를 포함한 배출량 산정이 필요하며, 국가 감축 목표 (Nationally Determined Contribution, NDCs) 및 국제 기후 협약에서도 SLCP 관리를 보다 체계적으로 반영해야 한다. 궁극적으로, CO₂ 감축이 장기적인 기후 안정화에 필수적이라면, SLCP 감축은 단기적인 기후 영향을 줄이고 즉각적인 환경·건강 혜택을 제공하는 보완적인 전략이다.

정부도 미세먼지 관리 종합계획 (2020~2024)을 통해 미세먼지 배출 분야별 배출감축을 추진했다. 이 같은 미세먼지 감축 추진과제는 에너지 활동도 조정, 에너지 전환 등을 통해 탄소배출 감축과 연계됨으로

써 탄소중립의 한 축으로 역할을 한다 (Kim, 2022). 2024년 수립된 제2차 미세먼지 관리 종합계획 (2025~2029)에서는 핵심 배출원에 대한 미세먼지와 온실가스 동시 감축을 통해 국내 배출량을 효과적으로 감축하겠다는 방침을 세우고, 이를 위해 노후 석탄발전소를 제11차 전력수급기본계획에 따라 폐지·전환을 단계적으로 확대하고, 무탄소 연료 혼소발전 등 연료·원료 전환과정에서 대기 영향을 최소화하기 위한 기술 개발을 함께 추진하고 있다 (MOE, 2024).

이렇게 탄소중립을 위한 이산화탄소 발생 저감 노력은 화석연료 연소 과정에서 직접 발생하는 대기오염물질 (1차 대기오염물질, 질소산화물, 황산화물, 일산화탄소, 휘발성유기화합물, 그리고 어느 정도의 미세먼지가 포함된다)의 발생 자체를 줄일 수 있다.

온실가스와 통합관리를 위하여 외국은 다양한 정책을 추진해 왔다. 호주의 Air Quality and Greenhouse Gas Management Plan에 의하면 대기질 및 온실가스 영향을 관리하기 위해 대기질 관리 및 모니터링 시스템 구축, 온실가스 배출 저감, 법적 요건 준수, 지역 사회 및 이해관계자의 불만 예방등을 추진하는 계획을 수립하였다. 이들 계획은 미세먼지 (PM₁₀, PM_{2.5}, TSP), 질소산화물, 자발적 연소로 인한 가스, 악취 및 온실가스 배출 관리를 포함하며 도로 살수, 차량 속도 제한, 발파 설계 최적화, 석탄 테스트 및 적절한 매립, 디젤 사용량 절감 등이 있으며, 지속적인 모니터링과 연례 검토를 통해 계획을 개선하고자 하고 있다 (Glencore, 2024).

영국은 Institution of Environmental Sciences (IES)와 EPIC (Environmental Policy Implementation Community)가 공동으로 작성한 대기질과 기후변화 통합 관리에 대한 지역정부의 역할에 대한 보고서 (EPIC, 2024)에서, 대기 오염과 기후변화는 상호 연관된 문제로, 같은 오염원이 두 가지 문제를 동시에 유발할 수 있으며, 지방 정부는 대기질 관리와 탄소 배출량 감소를 동시에 수행해야 하며, 이를 위해 내부 조직 간 협력과 정책 간 조율이 필요함을 강조하고 있다. 이어 실행 가능한 조치로 대중교통 개선, 전

기차 도입 확대, 건물의 에너지 효율 향상, 신재생 에너지 사용 확대 등을 제시하고 있으며, 정책 시행 시 지역 경제, 사회적 형평성, 주민 수용성을 고려해야 함을 지적하였다. 또한 정책 효과를 평가하기 위해 교통량, 대기 오염도, 에너지 소비량 등의 데이터를 지속적으로 모니터링해야 함을 주장하였다 (IES, 2024).

세계은행에서 발행한 대기질과 기후변화 완화를 위한 통합관리 보고서 (Sánchez-Triana *et al.*, 2023)는 대기질 관리와 기후변화 완화의 통합적 접근을 논의하고 있다. 보고서는 단기적인 대기오염저감조치와 장기적인 기후변화 대응을 병행하여 환경적, 경제적, 건강상의 이점을 극대화하는 전략을 다룬다. 구체적인 예로, 중국 허베이성 대기 오염 방지 프로젝트, 유럽연합 (EU)의 저공해 교통 정책, 세계은행의 메탄 감축 프로젝트를 다룬다. 예를 들어, 중국 허베이성은 산업 배출 규제, 청정 에너지 전환, 전기 버스 도입 등을 통해 PM_{2.5} 농도를 53% 감소시켰으며, 유럽연합은 저공해 구역 (LEZ) 도입과 전기차 인센티브 확대를 통해 교통 부문 배출을 줄인 예를 설명한다. 그밖에 폐기물 매립지 메탄 포집, 청정 요리 연료 (LPG) 보급, 농업 부문 메탄 저감 기술 도입 등을 통한 온실가스 배출 저감 사례를 통해 이들 사례들이 대기질 개선과 기후변화 대응의 통합적 접근의 중요성을 강조한다 (Sánchez-Triana *et al.*, 2023).

이처럼 해외의 통합관리 정책은 단기적 대기질 개선과 장기적 기후변화 대응을 병행하는 데 초점을 맞추며, 법적·행정적 규제, 기술적 저감 대책, 이해관계자 협력, 지속적인 모니터링과 평가를 핵심 요소로 포함하고 있다. 이는 미세먼지 저감과 온실가스 감축이 개별적으로 접근할 문제가 아니라, 종합적인 전략을 통해 상호 보완적으로 추진될 필요가 있음을 시사한다.

5.5 외부 영향: 북한과 중국

4.1절에서도 밝혔듯이 우리나라는 아시아 대륙 풍하지역에 있기 때문에 여름을 제외한 계절에 북풍이

나 서풍 계열의 바람이 불면 중국, 몽골, 북한, 러시아에서 우리나라로 대기오염물질이 이동하게 된다. 중국에서 우리나라 미세먼지 농도에 얼마나 영향을 미치는지는 연구자에 따라 차이가 있으나 상당한 영향을 미치는 것으로 보고되고 있다.

중국은 2008년 베이징 올림픽 준비를 위해 수도권 (징진지 지역) 대기질 관리를 2000년대 초반부터 시작하였고, 자국민의 미세먼지 문제에 대한 불만이 2013년부터 폭발적으로 증가하자 이에 대처하기 위해 전국적인 대기오염물질 배출원 관리를 시행하였다. 중국 정부는 2013년 9월 대기오염방지 행동계획을, 2018년 7월 람천보위전 (Beat Air Pollution, 푸른 하늘을 위한 전쟁) 행동계획을 발표하여 PM_{2.5} 저감에 총력을 기울이고 있다. 대기오염방지 행동계획이 수도권 (징진지, Beijing-Tianjin-Hebei, BTH), 상하이권 (장강삼각주, Yangtze River Delta, YRD), 광저우권 (주강삼각주, Pearl River Delta, PRD)의 오염우심지역을 중심으로 한 것에 비해, 람천보위전은 전국적인 대기질 개선을 목표로 정책을 수행하여 상당한 효과를 보이고 있다 (Ghim, 2021). 특히 중국 수도권의 대기오염도 저감이 확연히 보인다 (UNEP, 2019). 최근에는 미세먼지 관리에서 오존과 미세먼지 통합관리를 넘어 대기오염물질과 온실기체 통합관리에 노력을 기울이고 있다.

또한 효과적인 미세먼지 관리를 위해, 미세먼지 생성과정 이해를 위한 연구를 대규모로 수행하고 있다 (예를 들어 Hallquist *et al.*, 2016; Guo *et al.*, 2014).

북한은 석탄과 생체연료 위주의 에너지원, 낮은 연소효율과 제어기술의 낙후 등으로 (Yeo and Kim, 2018) 에너지 사용량은 우리나라의 10% 이내지만, 대기오염물질 배출량은 물질에 따라 오히려 우리나라보다 많다 (Kim and Kim, 2019; Kim *et al.*, 2019; Yeo and Kim, 2019a). 2016년 기준 모델링 결과 북한의 대기오염물질이 수도권 미세먼지 연평균농도에 15% 정도 영향을 주는 것으로 나타났다 (Bae *et al.*, 2018). 북한의 경제 발전이 적절한 대기오염물질 배출 저감 정책과 결합한다면 우리나라에 미치는 영향은 감소하

겠지만, 그렇지 않다면 영향이 증가할 가능성이 크다.

북한에서 관측된 시정 자료, 위성 자료와 모델링 결과, 그리고 북한 인근 우리나라나 중국의 지상측정망 자료를 활용하여 북한의 대기오염도와 대기오염물질 배출량을 파악하려는 연구가 계속되고 있다 (Kim *et al.*, 2024; Chong *et al.*, 2023; Seo *et al.*, 2023; Yeon *et al.*, 2019b; Kim *et al.*, 2014).

6. 요약 및 제언

6.1 요약

지난 40여 년 동안 우리나라의 대기환경 개선을 위해 정부와 국민은 노력을 많이 하였다. 1980년대와 1990년대에는 서울과 대도시를 중심으로 연료 전환과 배출허용기준 강화로 1차대기오염물질 저감에 집중하였고, 이는 전국으로 확산되어 황산화물, 일산화탄소, 납, TSP 같은 대기오염물질 농도 저감에 성공하였다. 또 하나의 대기관리 정책은 대규모 산업단지의 심각한 대기오염을 저감하기 위한 여러 정책적 노력이었으며, 이는 1990년대 후반까지 그다지 성공적이지 않았다. 이 기간의 연구는 유해대기오염물질 현황 파악과 황사 연구를 시작으로 미국의 연구 방법론을 도입하여 적용하는 것이 대부분이었다.

대기오염물질 배출 농도는 저감되었으나, 자동차와 주거지 등의 배출원 수가 증가함에 따라 수도권 대기환경은 1990년대 후반부터는 개선되지 않았으며, 이를 해결하기 위해 대기오염물질 배출 총량관리제와 자동차 저공해화를 중심으로 하는 수도권 대기환경관리 기본계획(기본계획)이 수도권 대기환경개선에 관한 특별법에 의거해 2005년부터 시작되었다. 이후 발표된 여러 미세먼지 관련 대책은 이 기본계획과 거의 같은 정책 수단을 포함하고 있어, 우리나라 대기관리의 원형으로 평가할 수 있다. 10년간 3조원이 넘는 정부 예산이 집행된 1차 기본계획은 수도권 대기오염도를 저감하는 데에는 성공하였으나, 목표와 정책 수단의 불일치, 계획했던 주요 전략목표의

미달성 등으로 정책 효과에 대한 명확한 평가를 수행하지 못하였다. 이 기간 연구는 선진국의 연구 방법론을 따라서 우리나라, 특히 서울에 적용하는 것이 대부분이었다.

2013년 가을부터 언론에서 미세먼지 관련 기사 건수가 증가하고, 국민의 관심이 급증하였다. 이에는 2013년 초에 동북아시아 전 지역에서 미세먼지 고농도 사례가 발생한 것과 함께, 전문가와 정부가 효과적으로 대처하지 못한 것이 큰 이유였다. 전문가와 정부가 효과적으로 대처하지 못한 것은 대부분 대기에서 광화학반응으로 생성되는 PM_{2.5} 생성과정에 대한 이해가 부족한 것과 그동안 시행했던 정책 가운데 어느 것이 미세먼지 저감에 효과적이었지를 평가할 정책 효과분석이 미흡했기 때문으로 보인다.

이 때부터 정부는 여러 법과 대책을 수립, 시행하고, 여러 부처에서 경쟁적으로 미세먼지 저감을 위한 연구개발에 투자하였다. 이에 따라 대기오염물질 배출과 농도가 저감되었다. 그러나 정책 효과 분석은 아직도 미흡하다. 정책 효과 분석 결과에 바탕을 둔 수정 보완을 통하여 효율성을 높일 수 없다면 그것은 국가정책으로 추진되는 종합계획이라고 하기 어렵다 (SCPM, 2024). 이 기간 연구개발 투자를 통하여 미세먼지 연구를 종합적으로 수행할 수 있는 체계를 구축할 수 있었고, 미세먼지 생성에 대한 이해가 높아지고, 연구자들 사이의 국제협력이 강화되는 등의 효과가 있었다. 그러나 체계적인 연구분야 설정 및 투자가 이루어지지 않아 부처별 미세먼지 연구사업이 환경부를 중심으로 추진되고 있는 정부의 미세먼지 관리정책과 효과적으로 접목되지 못하고 있다 (SCPM, 2024).

2020년 코로나19 이후 미세먼지에 대한 국민과 언론의 관심이 줄어들면서, 미세먼지는 아직도 심각한 인체 영향과 지구 환경 영향에도 불구하고 더 이상 사회문제가 아닌 것으로 보인다. 이에 따라 정부의 미세먼지 저감 의지도 약해진 것을 연구개발 예산 축소로 파악할 수 있다. 그러나 아직도 우리나라 미세먼지 농도가 인체에 큰 악영향을 미치고 있고, 우리

주위의 사회적 여건 변화, 지구환경 변화와 그에 대처하기 위한 탄소중립 등의 정책으로 미세먼지에 의한 영향이 증가할 가능성이 크다. 따라서 정부와 전문가는 미세먼지 문제를 해결하기 위하여 앞으로 더 노력하여야 할 것이다.

6.2 제언

6.2.1 정책 수립, 시행, 평가 과정 개선

미세먼지에 대한 사회적인 관심이 줄어든 것과는 별개로 미세먼지에 의한 인체와 생태계에 미치는 영향은 계속되고 있다. 이를 저감하기 위해 추진되고 있는 미세먼지 저감 정책에 지속적인 국민의 관심과 지지를 받는 것은 매우 중요하다. 이를 위해서 가장 중요한 것은 국민에게 설명할 수 있는 정책을 수립, 시행, 평가해야 한다는 것이다. 우리 대기오염물질 배출량을 어디에서 어느 성분을 얼마나 줄이면 얼마만에 농도가 얼마나 줄고, 우리에게 미치는 영향이 어느 정도 줄어들 것이라는 과학적인 설명을 효과적으로 국민에게 제시하여야 한다. 서울이나 외국 대도시 경우를 보면 PM_{2.5} 농도를 절반정도로 줄이는데 15~20년 정도 걸렸다. 따라서 장기적으로 일관된 정책 방향을 제시하고 유지하면서 단기간에도 효과가 나타날 수 있는 정책을 잘 발굴하여 단기, 중기, 장기 대책을 구분하여 수립하는 것이 필요하다.

국민에게 설명 가능한 정책을 만들기 위해서는 (1) 과학에 기반한 정책이어야 하고, (2) 정책 수립 과정에 국민이 참여하는 체계가 이루어져야 하고, (3) 만들어진 정책을 효과적으로 국민에게 알리는 소통 체계가 있어야 한다.

이를 위해서는 그림 12에 제시한 것처럼 미세먼지 저감목표가 합의과정을 통해 명확하게 제시되어야 한다. 현재 우리나라 미세먼지 대책은 배출 및 농도 저감 위주이며, 목표 설정에서 이해당사자들의 합의 과정이 미흡하여 공감을 얻지 못하고 있다. 전문가들도 개인 연구에만 몰두할 것이 아니라 정책 수립과 시행, 평가에 필요한 과학적 근거를 제공하는 것을 우선으로 연구하여야 한다.

6.2.2 대기관리 정책 방향을 배출, 농도 저감에서 영향 저감으로 변환

우리나라의 미세먼지 대책은 농도와 배출량 저감 목표가 제시되었을 뿐 영향 저감에 대한 목표는 설정되어 있지 않다. 더구나 제3차 대기환경개선 종합계획 추진 방향이 ‘국민건강 보호를 최우선으로, 건강위해성 기반 관리 확대 추진’이고(MOE, 2022), 제2차 미세먼지 관리 종합계획의 4개 분야의 하나가 ‘국민건강보호를 위한 대응 다각화’이기는 하나(MOE, 2024) 우리나라에서 미세먼지로 인한 건강영향을 평가할 수 있는 체계나 우리 지표가 아직 마련되어 있지 않다. 즉, 영향 저감이 중요한 목표이나, 이를 평가하는 방법론이 없는 상황이다. 따라서 하루 바빠 미세먼지에 의한 건강영향을 평가할 수 있는 체계 구축과 유해성 대기오염물질의 체계적인 관리(Yeo *et al.*, 2016)가 필요하다.

이와 관련한 새로운 연구 수요는 신규 유해물질 파악 및 위해도 평가 체계 구축이다. 최근 분석기술의 발달로 분석기기 검출한도가 낮아지고 화학성분 위해성 평가기술이 발달하면서, 대기 기체와 미세먼지에 포함된 화학성분의 종류가 급증하고 있다(예를 들어 Cheng *et al.*, 2024). 그러나 아직 우리나라는 화학성분 파악을 위한 비표적분석(non-target analysis) 관련 연구가 미흡하며, 화학성분별 위해성 평가도 약하다. 이를 보다 강화하여, 대기오염물질 화학성분별 위해도 평가가 진행된다면, 보다 효율적인 수용원 중심의 대기관리가 가능할 것이다.

영향 저감 관점에서 미세먼지 관리대책을 수립하면 기존 배출 저감 목표(발생원에서 저감기술 적용)보다 다양한 정책 수단이 가능하다. 그림 13에서 보듯이 발생원에서 저감기술을 적용할뿐만 아니라 수용원에서도 저감기술 적용할 수 있어야 보다 유연하고 효율적인 대책 수립이 가능하다. 또 수용원 구분을 다양화하여야 수용원 특성에 맞는 맞춤형 정책 수립이 가능해진다.

수용원 구분이 다양해지면, 환경정의의 고려한 대기관리가 보다 효율적으로 진행될 수 있다. 우리나라

는 2019년 환경정책기본법 제2조(기본이념)에 ‘국가와 지방자치단체는 환경 관련 법령이나 조례·규칙을 제정·개정하거나 정책을 수립·시행할때 모든 사람들에게 실질적인 참여를 보장하고, 환경에 관한 정보에 접근하도록 보장하며, 환경적 혜택과 부담을 공평하게 나누고, 환경오염 또는 환경훼손으로 인한 피해에 대하여 공정한 구제를 보장함으로써 환경정의 실현하도록 노력한다.’라고 제시하였다. 그러나 아직 이 개념을 구체적으로 활용할 수 있는 체계는 없는 상태이다. 이는 미국이 환경정의(Environmental Justice)를 실천하기 위해 1993년 National Environmental Justice Advisory Council (NEJAC)을 설립한 것에 한참 뒤지는 것이다.

6.2.3 효과적인 소통 체계 수립 및 시행

그림 12에 보인 것처럼 미세먼지 문제 해결을 위해서는 정책 수립 과정에서 여러 분야의 이해당사자가 참여(공공참여, public participation)하는 것이 필수적이다. 사회가 발전할수록, 국민과 여러 이해당사자가 참여하여야만 정책, 특히 사회 현안 해결을 위한 정책의 성공 확률이 증가한다. 이에 현상을 이해하는 자연과학적 접근, 배출을 저감하기 위한 공학적 접근뿐만 아니라 효과적인 배출 저감을 위해 이해당사자들 사이의 의견을 조율하고 통합된 의견을 이끌 수 있는 사회과학적 접근이 같이 필요하다(TMA, 2018). 국가기후환경회의에서는 주로 정부와 국민 사이의 소통 문제를 효과적인 미세먼지 정책 수립과 시행의 장애로 주로 지적하였으나, 중앙정부와 지방정부, 중앙정부의 부처 간의 소통과 협업체계의 문제점도 지적하였다(NCCA, 2020). 한 예로 Kim *et al.* (2022)은 충청남도예에 맞춘 미세먼지 소통 전략을 제시하였다. 이와 같은 수용원 맞춤형 소통 전략은 앞으로 권역별 미세먼지 관리와 도심지역 관리를 미세먼지 관리 주요 정책으로 수행하기 위해 필수적이다.

6.2.4 과학적 연구 수행을 위한 체계 수립

2013년 이후 국내 미세먼지 관련 연구가 비약적으

로 발전하기는 하였으나, 최근 미세먼지 연구개발 예산의 대폭 삭감으로 연구 동력이 상당히 상실되었다. 미세먼지 관련 연구, 특히 미세먼지 생성, 이동 기초 연구가 제대로 진행되지 않으면 정책 효과분석, 배출 저감 시나리오 생산 등의 정책 수립, 시행, 평가에 필수적인 과정을 제대로 이행할 수 없다. 이는 앞에서 검토한 정책 수립 과정, 효과적인 소통, 영향 저감으로 정책 목표 전환 등을 효과적으로 수행하지 못한다는 것을 의미한다. 또한 현재 미세먼지 관련 연구가 여러 기관에서 수행되고 있으며, 이 연구 결과를 종합적으로 분석하여 정책에 반영할 수 있는 형태로 제공하고, 필요한 연구를 발굴하여 수행하고, 연구 방향과 내용을 종합적으로 조정할 수 있는 체계가 필요하다(SCPM, 2024).

오존 농도는 현재까지 증가추세이고(Yeo and Kim, 2021; Shin *et al.*, 2012), 앞으로도 당분간 증가할 가능성이 높다. 또한 미세먼지와 오존은 SLCP이다. 따라서 미세먼지와 오존의 통합관리가 필요하며, 이는 VOCs 관리가 중요함을 보여준다.

오존과 미세먼지 생성의 다른 전구물질인 질소산화물에 비해 VOCs는 배출 저감이 상대적으로 잘 되고 있지 않다. 따라서 효과적인 VOCs 배출 저감 정책을 시행하여야 한다. 여기서 문제가 되는 것은 현재 VOCs 배출량은 화학조성을 고려하지 않고 총 배출 질량만이 산출되고 있는데, 이러한 배출량 자료로는 효과적인 정책 수립이 불가능하다. VOCs 성분에 따라 미세먼지와 오존 생성능력이 다르기 때문에(Shin *et al.*, 2013), 성분별 배출량 자료가 필요하다. 성분별 VOCs 배출량 자료가 필요한 또 다른 이유는 상당수의 VOCs 성분이 인체 유해성분이기 때문에 성분별 배출량 자료가 효과적인 인체 영향 저감 정책에 필수적이기 때문이다. 현재 오염물질 배출 및 이동(Pollutant Release and Transfer Register, PRTR) 시스템에서 사업장에서 배출되는 유해성 VOCs 배출량 통계가 산출되지만, 사업장 이외에서 배출되는 VOCs는 성분별 자료가 없다.

6.2.5 지구환경 대응과 연계한 통합관리

여기에는 두 가지 통합관리 체계가 있다. 첫째는 탄소중립과의 통합관리이다. 에너지 수요관리와 교통 정책, 화석연료의 사용 저감은 탄소중립을 이루는 데에도 중요하지만, 미세먼지 저감에도 필수적이다. 이를 통합적으로 전과정을 평가, 관리하는 것이 필요하다(KEI, 2022). 둘째는 기후변화 적응과 연계한 통합관리이다. 기후변화 적응을 위한 여러 대책(예를 들어 폭염 대책)은 미세먼지로 인한 영향을 최소화하는 데에도 도움이 될 수 있다. 이는 앞서서도 논의한 수용원 중심의 영향 저감과도 연계된다.

미세먼지 문제에서 우리가 겪은 경험은 앞으로 다가올 여러 사회현안, 예를 들어 탄소중립이나 기후변화 적응 문제 등에 중요한 사례로 활용될 수 있고, 활용되어야 한다. 과거 사례로부터 교훈을 얻는 것은 우리 사회가 발전할 수 있는 동력이 될 것이다.

감사의 글

이 논문은 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 한국연구재단의 지원(NRF-2023R1A2C1003903)과 정부(환경부)의 재원으로 한국환경산업기술원의 미세먼지관리 특성화대학원 사업의 지원을 받아 수행된 연구입니다.

References

- Air Quality Expert Group (AQEG), UK (2020) Impacts of Net Zero Pathways on Future Air Quality in the UK. Retrieved from https://uk-air.defra.gov.uk/library/reports.php?report_id=1002
- Bae, M., Kim, H.C., Kim, B.U., Kim, S. (2018) PM_{2.5} Simulations for the Seoul Metropolitan Area: (V) Estimation of North Korean Emission Contribution, *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment*, 34(2), 294-305, (in Korean with English abstract). <https://doi.org/10.5572/KOSAE.2018.34.2.294>
- Bae, M., Kim, B.-U., Kim, H.C., Kim, S. (2020) A Multiscale Tiered Approach to Quantify Contributions: A Case Study of PM_{2.5} in South Korea During 2010-2017, *Atmosphere*, 11, 141. <https://doi.org/10.3390/atmos11020141>
- Bae, M., Kim S., Kim, S. (2022) Quantitative Evaluation on the Drivers of PM_{2.5} Concentration Change in South Korea during the 1st-3rd Seasonal PM_{2.5} Management Periods, *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment*, 38, 610-623, (in Korean with English abstract). <https://doi.org/10.5572/KOSAE.2022.38.4.610>
- Board of Audit and Inspection of Korea (BAI) (2008) The Policy Efforts of Diesel Vehicle Emission Control Scheme, Administrative Request for Audit (in Korean).
- Board of Audit and Inspection of Korea (BAI) (2015) The Current Status of the Metropolitan Air Quality Improvement Project Audit (in Korean).
- Baik, N.J., Kim, Y.P., Moon, K.C. (1996) Visibility Study in Seoul, 1993, *Atmospheric Environment*, 30(13), 2319-2328. [https://doi.org/10.1016/1352-2310\(95\)00443-2](https://doi.org/10.1016/1352-2310(95)00443-2)
- Beck, U. (1997) Risk Society: Towards a New Modernity, translated into Korean by Hong, S.T., Saemulgyul, Seoul.
- Cai, W., Li, K., Liao, H., Wang, H., Wu, L. (2017) Weather Conditions Conducive to Beijing Severe Haze More Frequent under Climate Change, *Nature Climate Change*, 7, 257-263. <https://doi.org/10.1038/nclimate3249>
- Cheng, Z., Qiu, X., Li, A., Chai, Q., Shi, X., Ge, Y., Koenig, T.K., Zheng, Y., Chen, S., Hu, M., Ye, C., Cheung, R.K.Y., Modini, R.L., Chen, Q., Shang, J., Zhu, T. (2024) Heterogeneous Reactions Significantly Contribute to the Atmospheric Formation of Nitrated Aromatic Compounds During the Haze Episode in Urban Beijing, *Science of the Total Environment*, 917, 170612. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2024.170612>
- Cheong, S.W., Kim, N.Y. (2021) Effects and Management Risk of Air Quality Management Policies in the Seoul Metropolitan Area: Focusing on Lessening PM₁₀ and NO₂ in the Pollution Reduction Project of In-Use Diesel Vehicles, *Journal of Public Audit and Inspection Review*, 37, 5-36, (in Korean with English abstract). <https://doi.org/10.22651/JAI.2021.37.5>
- Chong, H., Lee, S., Cho, Y., Kim, J., Koo, J.H., Kim, Y.P., Kim, Y., Woo, J.H., Ahn, D.H. (2023) Assessment of Air Quality in North Korea from Satellite Observations, *Environment International*, 171, 107708. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2022.107708>
- Environmental Policy Implementation Community (EPIC) (2024) Integrating Action on Air Quality & Climate Change: A Guide for Local Authorities, Retrieved

- from <https://www.the-ies.org/resources/integrating-action-air-quality>
- Ghim, Y.S. (2021) Comparison of Responses to PM_{2.5} in China and Korea, *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment*, 37, 197-205, (in Korean with English abstract). <https://doi.org/10.5572/KOSAE.2021.37.2.197>
- Glencore (2024) Air Quality and Greenhouse Gas Management Plan, Retrieved from <https://www.glencore.com.au/rest/api/v1/documents/e0998c7ca59196770b9cd-52faf2b8237/Air+Quality+and+Greenhouse+Gas+M+management+Plan.pdf>
- Google (2025) Google Trends: Fine Particles, Retrieved February 13, 2025, from <https://trends.google.com> (in Korean).
- Guo, S., Hu, M., Zamora, M.L., Peng, J., Shang, D., Zheng, J., Du, Z., Wu, Z., Shao, M., Zeng, L., Molina, M.J., Zhang, R. (2014) Elucidating Severe Urban Haze Formation in China, *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 111(49), 17373-17378. <https://doi.org/10.1073/pnas.1419604111>
- Hallquist, M., Munthe, J., Hu, M., Wang, T., Chan, C.K., Gao, J., Boman, J., Guo, S., Hallquist, A.M., Mellqvist, J., Moldanova, J., Pathak, R.K., Pettersson, J.B.C., Pleijel, H., Simpson, D., Thynnell, M. (2016) Photochemical Smog in China: Scientific Challenges and Implications for Air-Quality Policies, *National Science Review*, 3(4), 401-403. <https://doi.org/10.1093/nsr/nww080>
- Han, H., Jung, C.H., Kim, H.S., Kim, Y.P. (2017) The Revisit of the PM₁₀ Reduction Policy in Korea: Focusing on Policy Target, Tools and Effect of First Air Quality Management Plan in Seoul Metropolitan Area, *Journal of Korea Environmental Policy and Administration*, 25(1), 49-79, (in Korean with English abstract). <https://doi.org/10.15301/jepa.2017.25.1.49>
- Han, H., Kum, H., Kim, Y.P., Jung, C.H. (2022) Evaluation of the Effectiveness and Efficiency of Atmospheric Particulates Reduction Policy: The Case of South Korea, *Asian Journal of Atmospheric Environment*, 16, 2021130 <https://doi.org/10.5572/ajae.2021.130>
- Han, S.H., Kim, Y.P. (2015) Long-Term Trends of the Concentrations of Mass and Chemical Composition in PM_{2.5} over Seoul, *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment*, 31(2), 143-156, (in Korean with English abstract). <https://doi.org/10.5572/KOSAE.2015.31.2.143>
- Han, X., Cai, J., Zhang, M., Wang, X. (2021) Numerical Simulation of Interannual Variation in Transboundary Contributions from Chinese Emissions to PM_{2.5} Mass Burden in South Korea, *Atmospheric Environment*, 256, 118440. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2021.118440>
- Hankookilbo (1996) Starting of Pollution Status Study in Yeochon Industrial Complex, news article on 1996.07.13.
- Heo, M.-Y., Kim, H.-C., Sohn, D.-H. (1986) Density Distributions of Metallic Compounds in Particulate Matters, *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment*, 2, 9-18, (in Korean with English abstract).
- Institution of Environmental Sciences (IES) (2024) Integrating Action on Air Quality & Climate Change, Retrieved from https://www.the-ies.org/sites/default/files/reports/epic_air_quality_climate_change_guidance_0.pdf
- International Agency for Research on Cancer (IARC) (2013) Outdoor Air Pollution a Leading Environmental Cause of Cancer Deaths, Retrieved from https://www.iarc.who.int/wp-content/uploads/2018/07/pr221_E.pdf
- International Energy Agency (IEA) (2021) Net Zero by 2050, A Roadmap for the Global Energy sector.
- Kang, H. (2022) Analysis of Regional Effects of the Seasonal Management Policy on Coal-fired Power Plant Using Difference-in-difference Method, *Environmental and Resource Economics Review*, 31(3), 343-365, (in Korean with English abstract). <https://doi.org/10.15266/KEREA.2022.31.3.343>
- Kang, Y.G. (2019) *Dignity of Science*, pp. 191-197, Science Books, Seoul.
- Kim, E., Kim, B.-U., Kim, H.C., Liu, Y., Kang, Y.H., Jacob, D.J., Kim, Y.P., Woo, J.H., Kim, J., Wang, S., Yoo, Y., Bae, C., Kim, Y., Kim, S. (2024) North Korean CO Emissions Reconstruction Using DMZ Ground Observations, TROPOMI Space-Borne Data, and the CMAQ Air Quality Model, *Science of the Total Environment*, 921, 171059. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2024.171059>
- Kim, H.C., Kim, S., Kim, B.-U., Jin, C.-S., Hong, S., Park, P., Son, S.-W., Bae, C., Bae, M., Song, C.-K., Stein, A. (2017) Recent Increase of Surface Particulate Matter Concentrations in the Seoul Metropolitan Area, Korea, *Scientific Reports*, 7, 4710. <https://doi.org/10.1038/s41598-017-05092-8>
- Kim, I.S., Kim, Y.P. (2019) Characteristics of Energy Usage and Emissions of Air Pollutants in North Korea, *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment*, 35(1), 125-137, (in Korean with English abstract). <https://doi.org/10.5572/KOSAE.2019.35.1.125>
- Kim, I.S., Lee, J.Y., Wee, D., Kim, Y.P. (2019) Estimation of the Con-

- tribution of Biomass Fuel Burning Activities in North Korea to the Air Quality in Seoul, South Korea: Application of the 3D-PSCF Method, *Atmospheric Research*, 230, 104628. <https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2019.104628>
- Kim, N.K., Kim, Y.P., Morino, Y., Kurokawa, J.I., Ohara, T. (2014) Verification of NO_x Emission Inventories over North Korea, *Environmental Pollution*, 195, 236-244. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2014.06.034>
- Kim, W. (2022) Integrated Management of Carbon Neutrality and Fine Dust: What Is the Symbiotic Strategy Choice for Cities?, *Monthly Public Policy*, 200, 65-68.
- Kim, Y., Lee, H., Jang, Y., Lee, H. (2015a) How Does the Media Construct the Risk of Particulate Matter?, *Korean Journal of Journalism & Communication Studies*, 59(2), 121-154, (in Korean with English abstract).
- Kim, Y., Lee, H., Lee, H., Jang, Y. (2015b) A Study on the Audience's Perception and Opinion Formation about Particulate Matter Risk, *Korean Journal of Communication & Information*, 72, 52-91, (in Korean with English abstract).
- Kim, Y., Lee, H., Kim, H., Moon, H. (2018) Exploring Message Composition Strategies to Promote Particulate Matter Response Behavior, *Korean Journal of Communication & Information*, 92, 7-44, (in Korean with English abstract).
- Kim, Y., Lee, H., Kim, H., Han, J., Lee, J. (2022) Analyzing Perceptual Differences among Key Publics about Risk Perceptions toward Particulate Matter and Conflict Factors - The Application of the Mental Models to Key Publics in the Chungnam Region - . *Crisisonomy*, 18(1), 1-35, (in Korean with English abstract).
- Kim, Y.P. (2006) Air Pollution in Seoul Caused by Aerosols, *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment*, 22(5), 535-553, (in Korean with English abstract).
- 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>
- Kim, Y.P., Lee, G. (2018) Trend of Air Quality in Seoul: Policy and Science, *Aerosol and Air Quality Research*, 18(9), 2141-2156. <https://doi.org/10.4209/aaqr.2018.03.0081>
- Koo, J.-K., Seo, Y.-H. (1992) Application of Chemical Mass Balance Model for the Source Apportionment of Polynuclear Aromatic Hydrocarbons in Urban Atmosphere, *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment*, 8, 229-239, (in Korean with English abstract).
- Korea Environment Institute (KEI) (2018) Study on Integrated Management Strategies for PM (Particulate Matter), KEI Report 2018-09 (in Korean).
- Korea Environment Institute (KEI) (2022) Study on 2030 Air Quality Outlook and Simultaneous Reduction Policy Direction Following the Implementation of Carbon Neutral Strategy (I), KEI Climate Environment Policy Research 2022-05 (in Korean).
- Korea Institute of Science & Technology Evaluation and Planning (KISTEP) (2021) Science and Technology Outlook to 2045: In-Depth Review of Key Issues, KISTEP Issue Paper 2021-08 (in Korean).
- Korea Institute of Science and Technology Information (KISTI) (2018) R&D Investment Model Development on Fine Particle Matters by Operation of a Coordinative Committee, Final Report (in Korean).
- Korea Legislation Research Institute (KLRI) (2015) A Study on the Improvement of Air Quality Management Legislation System to Reduce the Levels of Fine Particle, Laws to Reduce Particulate Matters, Research Report (in Korean).
- Korea Press Foundation (KPF) (2025) Big Kinds: News Big Data & Analysis, Retrieved February 13, 2025, from <https://www.bigkinds.or.kr> (in Korean).
- Lee, H.-M., Kim, N.K., Ahn, J., Park, S.-M., Lee, J.Y., Kim, Y.P. (2024) When and Why PM_{2.5} Is High in Seoul, South Korea: Interpreting Long-Term (2015-2021) Ground Observations Using Machine Learning and a Chemical Transport Model, *Science of The Total Environment*, 920, 170822. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2024.170822>
- Lee, M.-H., Han, E.-J., Won, Y.-S. (1986) Yellow Sand Phenomena Influence to the Atmosphere in Korea, *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment*, 2, 34-44, (in Korean with English abstract).
- Lee, S., Ham, S. (2020) Development of an Evaluation Model for Regulatory Effectiveness to Reduce PM_{2.5} and Its Application in Seoul, The Seoul Institute, Report #2019-BR-24, (in Korean with English abstract).
- Ministry of Environment (MOE) (2005) Basic Plan Metropolitan Area Air Quality Management (in Korean).
- Ministry of Environment (MOE) (2006) Comprehensive National Air Quality Improvement Plan (1st stage) (in Korean).
- Ministry of Environment (MOE) (2013) Basic Plan on the 2nd Stage Metropolitan Area Air Quality Management (in Korean).
- Ministry of Environment (MOE) (2014) Press release on Basic

- Plan on the 2nd Stage Metropolitan Area Air Quality Management on 2 January 2014 (in Korean).
- Ministry of Environment (MOE) (2015) The 2nd Comprehensive National Air Quality Improvement Plan (in Korean).
- Ministry of Environment (MOE) (2018) Emergency and Regular Fine Dust Management Enhancement Measures (in Korean).
- Ministry of Environment (MOE) (2022) The 3rd Comprehensive National Air Quality Improvement Plan, Sejong (in Korean).
- Ministry of Environment (MOE) (2024) The 2nd Comprehensive Plan for Fine Dust Management (2025-2029) (in Korean).
- Ministry of Science and ICT (MSIT) (1992) A Study on the Seoul Smog Phenomena (1), Seoul (in Korean).
- Ministry of Science and ICT (MSIT) (2022) Fine Particles Reduction in the Net-zero era, Sejong. (in Korean)
- Morawska, L., Buonanno, G. (2021) The Physics of Particle Formation and Deposition During Breathing, *Nature Reviews Physics*, 3(5), 300-301. <https://doi.org/10.1038/s42254-021-00307-4>
- Multi-Agency Committee (MAC) (2016) Special policy on ambient fine particle management (in Korean).
- Multi-Agency Study Committee (MASC) (2016) Control Strategy Against Ambient Fine Particle Based on Science and Technology (in Korean).
- Na, K., Kim, Y.P., Moon, K.-C., Moon, I., Fung, K. (2001) Concentrations of Volatile Organic Compounds in an Industrial Area of Korea, *Atmospheric Environment*, 35, 2747-2756.
- National Assembly Budget Office (NABO) (2019) Analysis of Fine Particles Response Policy, Seoul (in Korean).
- National Council on Climate and Air Quality (NCCA) (2020) Summary of Particulate Matter Status Analysis and Improvement Report, Publication Registration Number 12-1790213-000006-01 (in Korean).
- National Institute of Environmental Research (NIER) (2024) Annual Report on Ambient Air Quality, 2023 (in Korean).
- National Institute of Environmental Research (NIER) (2025a) Final Report: A Study on Comprehensive Analysis of Air Pollution Trends in Region based on Monitoring Data from Air Quality Research Center (III) (in Korean).
- National Institute of Environmental Research (NIER) (2025b) Final Report: A Study on the Development of the Operation Plan of Air Quality Monitoring Sites (2026-2030) (in Korean).
- National Intelligence Council (NIC) (2021) Global Trends 2040: A More Contested World, translated into Korean by Park, D. C., Hanul, Seoul.
- National Science & Technology Information Service (NTIS) (2025) Retrieved February 7, 2025, from <https://www.ntis.go.kr/ThMain.do>
- Organization for Economic Co-operation and Development (OECD) (2024a) OECD Environment Statistics, Retrieved July 9, 2024, from https://www.oecd-ilibrary.org/environment/data/oecd-environment-statistics_env-data-en
- Organization for Economic Co-operation and Development (OECD) (2024b) Exposure to Air Pollution. Retrieved from https://stats.oecd.org/Index.aspx?DataSetCode=EXP_PM2_5
- Park, M.H., Kim, Y.P. (2019) Study of the Cap-and-Trade System Against the Air Pollutants in the Seoul Metropolitan Area and Suggestion for Its Enforcement Throughout South Korea, *Particle and Aerosol Research*, 15, 159-171, (in Korean with English abstract). <https://doi.org/10.11629/jpaar.2019.15.4.159>
- Park, S.-O., Baik, N.-J., Kim, Y.P., Moon, K.-C., Ghim, Y.-S. (1994) The Trend of Visibility Variation of Seoul During 1980-1993, *Journal of Korea Air Pollution Research Association*, 10(3), 203-208, (in Korean with English abstract).
- Rogelj, J., Schaeffer, M., Meinshausen, M., Shindell, D.T., Hare, W., Klimont, Z., Velders, G.J.M., Amann, M., Schellhuber, H.J. (2014) Disentangling the Effects of CO₂ and Short-Lived Climate Forcer Mitigation, *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 111(46), 16325-16330. <https://doi.org/10.1073/pnas.1415631111>
- Sánchez-Triana, E., Shindell, D.T., Mena, M., Enriquez, S. (2023) Integrating Air Quality Management and Climate Change Mitigation : Achieving Ambitious Climate Action by Cleaning the Air We Breathe, *The World Bank*, Washington, D.C. <https://documents.worldbank.org/curated/en/099033123181574723>
- Special Committee on Particulate Matter under the Prime Minister (SCPM) (2024) A 5-Year Journey for Clear Skies: Achievements and Suggestions of the 1st Comprehensive Plan for Particulate Matter Management (2020-2024).
- Seo, J., Kim, Y.P., Kim, J.Y., Yeo, M.J. (2023) A Visibility-Based Estimation of PM_{2.5} Concentrations in Pyongyang, North Korea: Current Status and Long-Term Trends, *Journal of Cleaner Production*, 388, 136007. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2023.136007>
- Seoul Metropolitan City (SMC) (1996) Measurement Estimation

- of Dioxins in Mokdong Resources Recovery Facility, Seoul (in Korean).
- Shim, C.S. (2021) A Study on Integrated Management of Particulate Matter Pollution, KEI report #2021-07-01 (in Korean).
- Shim, C. S., Choi, K.-C., Gong, S., Hahn, J., Lee, S., Chung, Y., Jung, E., Na, G. (2023) The Significance of the 3rd Comprehensive National Air Quality Improvement Plan and Directions for Policy Implementation, Journal of Korean Society for Atmospheric Environment. 39. 710-722, (in Korean with English abstract). <https://doi.org/10.5572/KOSAE.2023.39.5.710>
- Shin, H.J., Cho, K.M., Han, J.S., Kim, J.S., Kim, Y.P. (2012) The Effects of Precursor Emission and Background Concentration Changes on the Surface Ozone Concentration over Korea, Aerosol and Air Quality Research, 12(1), 93-103. <https://doi.org/10.4209/aaqr.2011.09.0141>
- Shin, H.J., Kim, J.C., Lee, S.J., Kim, Y.P. (2013) Evaluation of the Optimum Volatile Organic Compounds Control Strategy Considering the Formation of Ozone and Secondary Organic Aerosol in Seoul, Korea, Environmental Science and Pollution Research, 20, 1468-1481. <https://doi.org/10.1007/s11356-012-1108-5>
- Sohn, D.-H., Heo, M.-Y., and Namkoong, Y. (1987) Studies on Benzo(a)pyrene Concentrations in Atmospheric Particulate Matters, Journal of Korean Society for Atmospheric Environment, 3, 11-17, (in Korean with English abstract).
- Szopa, S., Naik, V., Adhikary, B., Artaxo, P., Bernsten, T., Collins, W.D., Fuzzi, S., Gallardo, L., Kiendler-Scharr, A., Klimont, Z., Liao, H., Unger, N., Zanis, P. (2021) Short-Lived Climate Forcers. In: Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Masson-Delmotte, V., P. Zhai, A. Pirani, S.L. Connors, C. Pean, S. Berger, N. Caud, Y. Chen, L. Goldfarb, M.I. Gomis, M. Huang, K. Leitzell, E. Lonnoy, J.B.R. Matthews, T.K. Maycock, T. Waterfield, O. Yelekci, R. Yu, and B. Zhou (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, pp. 817-922. <https://doi.org/10.1017/9781009157896.008>
- The Royal Society, UK (2021) Effects of Net-Zero Policies and Climate Change on Air Quality. <https://royalsociety.org/topics-policy/projects/air-quality-climate-change>
- Three Major Academies (TMA) (2017) Scholars' Policy Proposal, The Nature and Solutions of the Fine Dust Problem
① What is the Problem with Fine Dust? Retrieved from https://www.naek.or.kr/home_kr/content.asp?page_no=050101&Lang_type=K&VIDX=6022 (in Korean).
- Three Major Academies (TMA) (2018) Scholars' Policy Proposal, The Nature and Solutions of the Fine Dust Problem
② How to Solve the Fine Dust Problem. (in Korean)
- United Nations Environment Programme (UNEP) (2019) A Review of 20 Years' Air Pollution Control in Beijing, ISBN: 978-92-807-3743-1.
- United States Environmental Protection Agency (US EPA) (2022) Air Quality and Climate Change Research, Retrieved October 22, 2022, from <https://www.epa.gov/air-research/air-quality-and-climate-change-research>
- World Health Organization (WHO) (2021) WHO Global Air Quality Guidelines: Particulate Matter (PM_{2.5} and PM₁₀), Ozone, Nitrogen Dioxide, Sulfur Dioxide and Carbon Monoxide, Geneva, Switzerland.
- World Health Organization (WHO) (2022) <https://www.who.int/data/gho/data/indicators/indicator-details/GHO/ambient-air-pollution-attributable-deaths>
- Yeo, M.J., Im, Y.S., Yoo, S.S., Jeon, E.M., Kim, Y.P. (2019a) 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, N.K., Kim, B.M., Jung, C.H., Hong, J.H., Kim, Y.P. (2016) Direction for the Management of Hazardous Air Pollutants in Korea, Particle and Aerosol Research, 12(3), 81-94, (in Korean with English abstract). <https://doi.org/10.11629/jpaar.2016.9.30.081>
- Yeo, M.J., Kim, Y.P. (2012) Flexible Operation of the Cap-and-Trade System for the Air Pollutants in the Seoul Metropolitan Area, Journal of Environmental Management, 105, 138-143. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2012.03.022>
- Yeo, M.J., Kim, Y.P. (2018) Electricity Supply Trend and Operating Statuses of Coal-Fired Power Plants in North Korea, Using the Facility Specific Data Produced by North Korea: Characterization and Recommendation, Air Quality, Atmosphere and Health, 11, 979-992. <https://doi.org/10.1007/s11869-018-0601-5>
- Yeo, M.J., Kim, Y.P. (2019a) The State of the Air Quality and Measures for Improving It in North Korea, Journal of Korean Society for Atmospheric Environment, 35(3), 318-335, (in Korean with English abstract). <https://doi.org/10.5572/KOSAE.2019.35.3.318>
- Yeo, M.J., Kim, Y.P. (2019b) Trends of the PM₁₀ Concentrations and High PM₁₀ Concentration Cases in Korea, Jour-

- nal of Korean Society for Atmospheric Environment, 35(2), 249-264, (in Korean with English abstract). <https://doi.org/10.5572/KOSAE.2019.35.2.249>
- Yeo, M.J., Kim, Y.P. (2021) Long-Term Trends of Surface Ozone in Korea, *Journal of Cleaner Production*, 294, 125352. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.125352>
- Yeo, M.J., Lee, D., Kim, Y.P., Koo, J.-H. (2025) Long-Term Visibility Trend Representing Perceived Air Quality in the Republic of Korea, *Atmospheric Pollution Research*, 16(2025), 102422. <https://doi.org/10.1016/j.apr.2025.102422>
- Yeo, M.J., Seo, J.H., Kim, Y.P. (2019b) Temporal and Spatial Characteristics of Visibility in North Korea, *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment*, 35(6),

726-740, (in Korean with English abstract). <https://doi.org/10.5572/KOSAE.2019.35.6.726>

Authors Information

여민주(연세대학교 대기과학과 연구교수)
(mjyeo@yonsei.ac.kr)

정창훈(경인여자대학교 보건의료행정학과 교수)
(jch@kiwu.ac.kr)

김용표(이화여자대학교 명예교수, 현 서울대학교 보건환경
연구소 연구원) (yongmy@snu.ac.kr)

Supplementary Materials

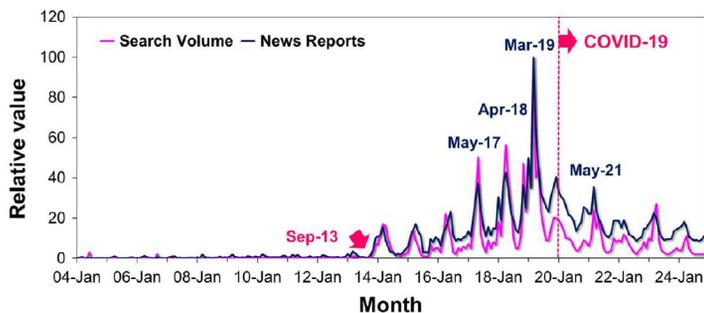


Fig. S1. Trends in google trends for search volume and big kinds for new reports cases search interest for 'fine particles' (2004~2024). Represents relative values with the maximum value set to 100 within the given period (KPF, 2025; Google, 2025).