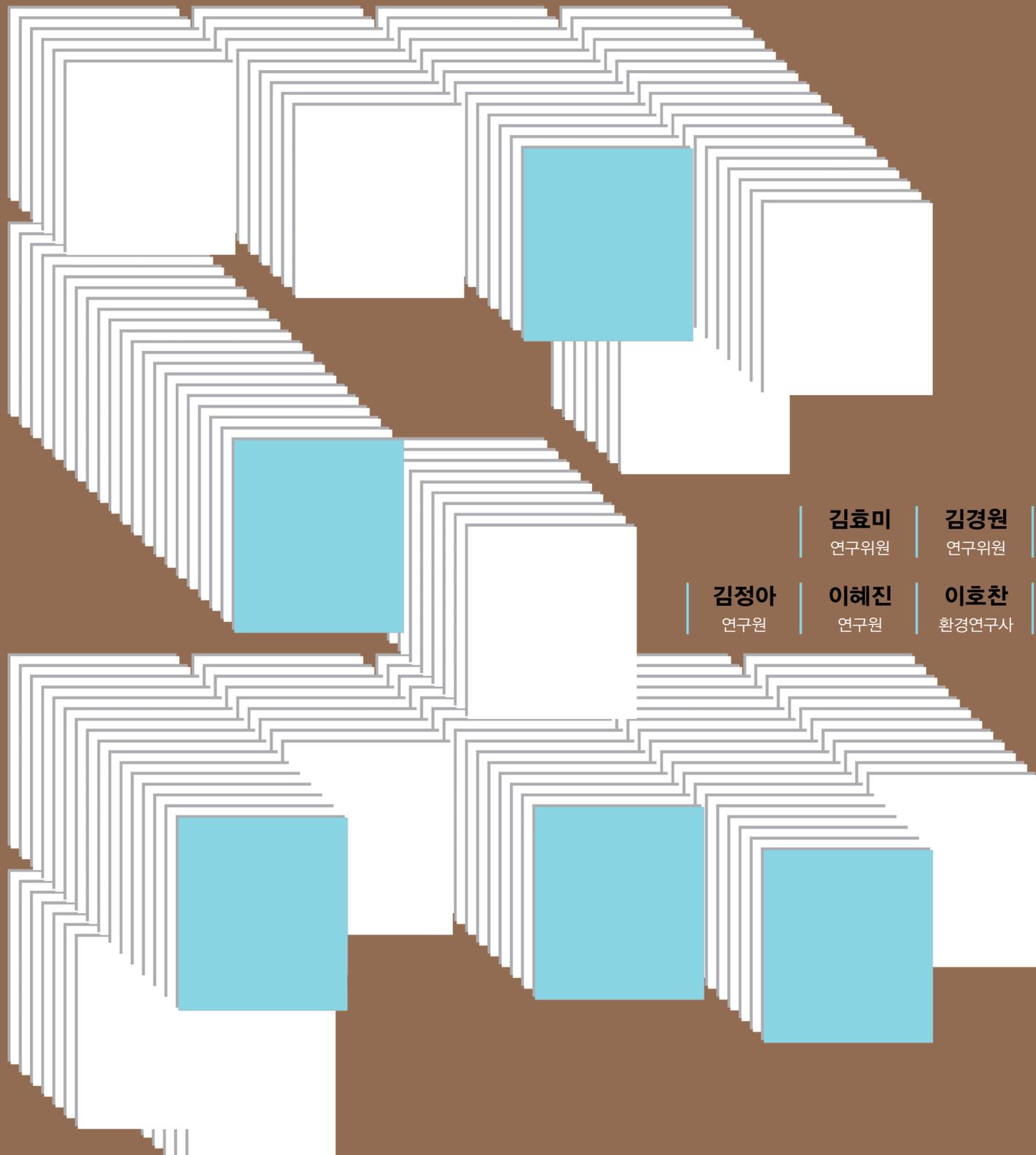


정책리포트

기술 분야

434호
2025. 11. 10.



김호미
연구위원

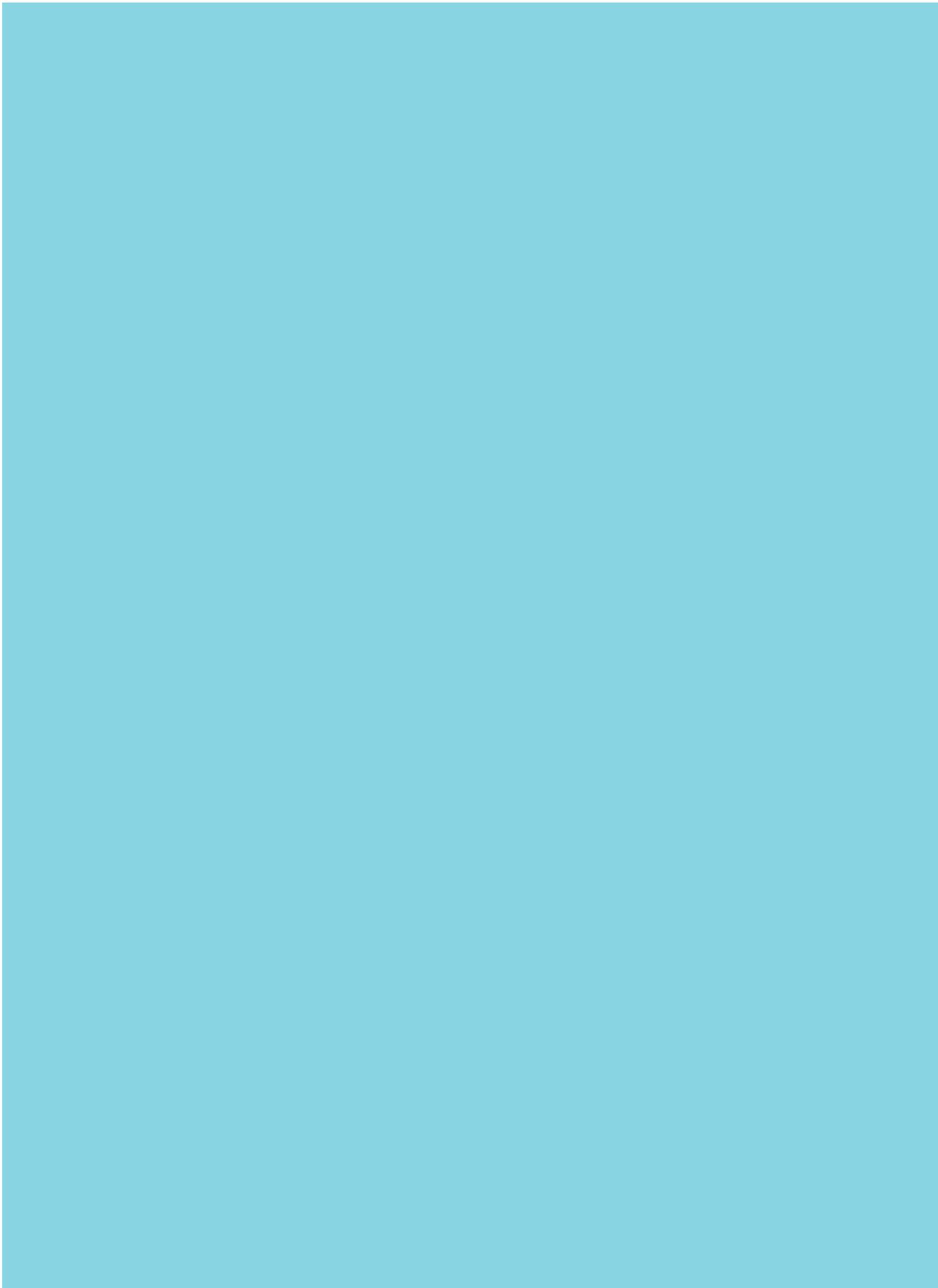
김경원
연구위원

김정아
연구원

이혜진
연구원

이호찬
환경연구사

초미세먼지 성분별 인체 영향과
우선 관리 배출원 도출



2025. 11. 10.
서울연구원 정책리포트(기술 분야)
434호

초미세먼지 성분별 인체 영향과 우선 관리 배출원 도출

김효미 연구위원	김경원 연구위원	김정아 연구원	이혜진 연구원
02-2149-1110	02-2149-1340	02-2149-1181	02-2149-1128
hmkim@si.re.kr	kwkim@si.re.kr	archy76@si.re.kr	leehi@si.re.kr

이호찬 환경연구사
서울시 보건환경연구원
02-570-3356
lhc2542@seoul.go.kr

요약	3
I. 시민 건강 중심 초미세먼지의 질적 관리 필요	4
II. 초미세먼지 일부 성분에서 유의미한 건강위해성	7
III. 초미세먼지 질적 관리를 위한 우선 관리 배출원 검토	12
IV. 시민 건강 중심의 초미세먼지 관리 정책 방향	14

요약

초미세먼지의 구성 성분에 따른 건강 영향 분석 결과 다양한 성분 중 NO_3^- , Na^+ , OC, EC, 레보글루코산, Al의 6개 성분이 순환기계 및 호흡기계 질환과 유의미한 연관성이 있는 것으로 나타났다. 서울시의 초미세먼지 배출량과 농도는 다양한 대책을 통해 지속적으로 저감되고 있다. 하지만, 기준 이하의 낮은 농도에서도 유의미한 건강 영향이 보고되고 있고, 서울시 농도는 대기환경기준을 초과하고 있어 시민의 건강 피해는 여전히 우려되고 있다. 따라서 기존의 대기오염물질 배출량을 저감하는 양적 관리 대책과 함께, 유해성이 높은 성분 배출원을 우선 관리하는 질적 관리가 함께 병행되어야 한다.

서울시, 배출원 관리 대책을 통해 초미세먼지 농도는 지속적으로 개선

서울시는 2000년대 초부터 다양한 배출원 관리 대책을 통해 초미세먼지의 배출량과 농도가 지속적으로 개선되고 있으나, 대기 중 초미세먼지 농도는 여전히 대기환경기준을 상회하고 있으며, 시민 건강 피해가 우려되고 있다. 또한 기준 이하의 낮은 농도에서의 유의미한 건강위해성과 초미세먼지 구성 성분 중 일부 성분이 상대적으로 건강위해성이 크다는 것이 지속적으로 보고됨에 따라 배출 저감을 통한 양적 관리와 함께 유해 성분 배출원의 우선 관리를 통해 초미세먼지의 상대적 유해성을 줄이는 질적 관리의 필요성이 제기되고 있다.

초미세먼지 구성 성분 중 6개 성분, 순환기계 및 호흡기계 질환과 유의미한 양의 연관성

서울시 광진구와 종로구에서 2015년부터 측정된 초미세먼지 성분 모니터링 자료를 건강보험공단의 병원 외래방문 자료와 연계하여 분석한 결과, NO_3^- , Na^+ 성분은 순환기계 질환과 유의미한 양(+)의 연관성이 있었으며, EC, OC, Na^+ , 레보글루코산, Al 노출은 호흡기계 질환과 유의미한 양의 연관성이 확인되었다. 이들 성분의 주요 배출원은 건설장비와 같은 비도로이동오염원, 화물차 및 RV 등 도로이동오염원, 음식점에서 발생하는 생물성연소, 암모니아 배출, 차량 타이어 및 도로 마모 등 비배기 배출로 나타났다.

초미세먼지 배출량을 저감하는 양적 대책과 함께, 유해성을 줄이는 질적 관리 필요

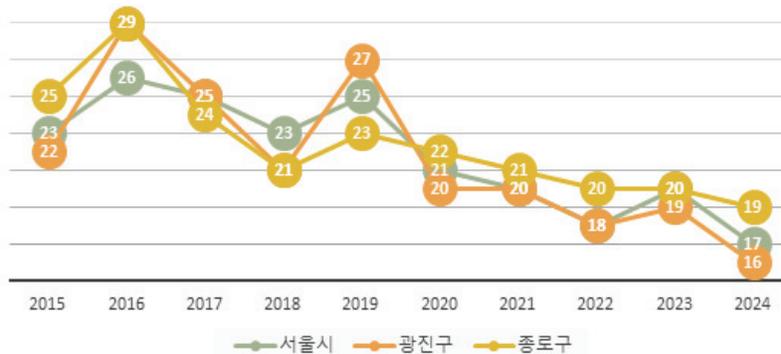
서울시 초미세먼지는 여전히 대기환경기준을 상회하고 있어, 배출량 저감을 통한 정량적 농도 개선이 요구된다. 동시에 시민 건강 보호를 위해 유해성이 큰 성분의 배출원 관리를 강화해야 한다. 아울러 생성기전과 배출원이 불명확한 성분에 대해서는 추가 연구를 통해 과학적 근거를 마련하고, 이를 토대로 정책 기반을 확립할 필요가 있다. 나아가 BC와 같이 기후변화와 건강위해성이 동시에 제기되는 물질은 통합적으로 관리하며, 성분 모니터링 확대와 취약계층 대상 노출 저감 지원을 통해 시민 건강 보호를 강화해야 한다.

I. 시민 건강 중심 초미세먼지의 질적 관리 필요

I 서울시, 배출원 관리를 통해 초미세먼지 농도는 지속적으로 감소

서울시, 다양한 배출원 관리 대책을 통해 초미세먼지 농도는 지속적으로 저감

- 서울시, 미세먼지 농도 저감을 위해 2000년대 초부터 운행차 저공해화, 친환경 보일러 설치 지원, 전기차·수소차 등 친환경차 전환 지원, 건설기계 저공해화, 운행 제한 위반차량 단속 등 다양한 사업 시행
 - 이러한 노력의 결과로 주요 사업 대상인 도로이동오염원의 배출량과 함께 초미세먼지 농도는 지속적으로 저감



[그림 1] 서울시, 광진구, 종로구 연평균 초미세먼지 농도(2015~2024)

저농도 초미세먼지의 건강위해성이 입증됨에 따라 유해 성분을 우선 관리하는 질적 관리 필요

- 초미세먼지 건강 영향 연구 결과, 대기환경기준 이하의 저농도 노출에도 건강에 유의미한 악영향을 미치는 것이 보고됨에 따라 유해 성분을 우선 관리하는 질적 관리 필요성 대두¹⁾
- 또한, 초미세먼지의 성분별 위해성 평가 결과 일부 성분농도의 단위 증가에 따른 건강 위해도가 초미세먼지 질량 농도의 단위 증가에 따른 건강 위해도보다 높은 것으로 보고²⁾³⁾
 - 따라서, 시민 건강 중심의 초미세먼지 관리는 정량적 농도 개선 대책과 함께 구성 성분 중 인체 위해성이 높은 성분의 배출원을 우선 관리하여, 시민 건강 피해를 저감하는 시민 건강 중심의 질적 관점에서의 대기질 관리 대책 마련 필요

1) Shi, Lihua, et al. "Low-concentration PM2.5 and mortality: estimating acute and chronic effects in a population-based study." *Environmental health perspectives* 124.1 (2016): 46-52.

2) Li, Tianyu, et al. "A comprehensive understanding of ambient particulate matter and its components on the adverse health effects based from epidemiological and laboratory evidence." *Particle and fibre toxicology* 19.1 (2022): 67.

3) Paisi, Niki, et al. "Health effects of carbonaceous PM2.5 compounds from residential fuel combustion and road transport in Europe." *Scientific Reports* 14.1 (2024): 1530.

초미세먼지 성분 중 일부 중금속 성분은 다른 성분 대비 높은 건강 위해도

- 초미세먼지에 포함된 중금속 원소들은 신경계와 순환기계에 심각한 영향을 미치는 것으로 보고되고 있으며, 특히 산업지역이나 교통이 많은 도시지역에서 위험도가 높아 이러한 유해 성분에 대한 노출을 최소화하기 위한 정책적 접근이 필요

[표 1] 초미세먼지 독성 성분(PM2.5 Toxic Components)

구분	특성
water-soluble extracts	<ul style="list-style-type: none"> • metals with high solubility/bioavailability • PAHs
organic extracts	<ul style="list-style-type: none"> • PAHs with high oxidative potential
carbon core components	<ul style="list-style-type: none"> • metals with low solubility/bioavailability (Mn, Fe, Na, Ni, Pb, Cr, Ba, Cu, Ti, Al, V)

자료: Li, Tianyu, et al. (2022), Paisi, Niki, et al. (2024)

미국, 유럽 등 성분별 건강위해성을 고려하여 초미세먼지 질적 관리를 위한 대책 도입

- 미국 환경보호청(EPA), 위험군을 포함한 대중의 초미세먼지로부터 건강 보호를 위한 건강 기반의 대기환경기준을 강화
 - 1차(건강 기반) 초미세먼지의 연간 대기질 기준(NAAQS)을 $12\mu\text{g}/\text{m}^3$ 에서 $9\mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 강화, 이를 통해 2032년까지 최대 4,500명의 조기사망을 방지할 수 있을 것으로 기대
- 미국 캘리포니아 대기자원위원회(CARB)는 디젤 엔진에서 배출되는 미세먼지의 발암 가능성을 기반으로 디젤 PM 위험을 줄이기 위한 Diesel Risk Reduction Plan을 수립
- 또한, CARB는 환경정의 관점에서 취약지역의 초미세먼지 노출 및 건강 피해를 증가시키는 주요 배출원을 도출하고, 지역 특성을 고려하여 취약지역에 대한 우선적인 조치가 필요하다고 강조
- 유럽은 초미세먼지 구성성분 중 석탄, 석유 등 화석연료의 불완전 연소로 인해 생성되고 다른 구성성분에 비해 인체에 유해한 영향을 미치며, 대기 배출 시 온실효과를 발생시켜 기후변화에도 영향을 미치는 BC(Black carbon)를 우선 관리할 것을 제안
 - 유럽에서 연간 281,000명(CI: 207,000~317,000명)의 초과 사망자가 PM2.5 노출로 인한 것으로 나타났으며, 이 중 49,000명(CI: 36,000~56,000명)은 탄소성분에 의한 것으로 추정⁴⁾
 - 유럽경제위원회(UNECE)는 BC(black carbon)를 저감하기 위해 지역 내 보일러나 스토브, 농작 폐기물 등에서 발생하는 배출량을 저감하도록 안내하고 있으며, 회원국의 배출 특성을 고려하여 배출원별 관리 대책 가이드를 제시함⁵⁾

4) Paisi, Niki, et al. "Health effects of carbonaceous PM2.5 compounds from residential fuel combustion and road transport in Europe." Scientific Reports 14.1 (2024): 1530.

5) UNECE, 2021, Prioritizing reductions of particulate matter from sources that are also significant sources of black carbon – analysis and guidance

I 초미세먼지 성분별 건강위해성 분석 기반의 유해 성분 우선관리 필요

초미세먼지, 오염원에서 배출된 성분과 2차 생성 성분으로 구성

- 초미세먼지는 오염원에서 직접 배출되는 '1차 초미세먼지'와 오염원으로부터 다양한 오염물질이 대기 중에서 물리·화학적 변환 과정을 거쳐 생성되는 '2차 초미세먼지'로 구분
 - 미세먼지는 여러 오염원에서 배출된 다양한 성분과 2차 생성 성분으로 구성되며, 주요 성분으로 탄소 성분, 이온 성분, 중금속을 포함하는 미량 원소 성분으로 구성⁶⁾

[표 2] 미세먼지 구성성분

구분	주요 화학적 성분
질량	PM Mass
탄소 성분	EC(Elemental carbon), OC(Organic Carbon), BC(Black Carbon), BrC(Brown Carbon)
이온 성분	NO ₃ ⁻ , SO ₄ ²⁻ , NH ₄ ⁺ , Cl ⁻ , Br ⁻ , Na ⁺ , K ⁺
미량 원소 성분	Al, Ba, Be, Ca, Cd, Cr, Cu, Fe, Mg, Mn, N, Ni, Pb, V, Zn, As, Hg, Se

위해성이 높은 초미세먼지 성분을 도출하고 배출원 검토를 통해 우선 관리 배출원 도출 필요

- 서울시는 효과적인 초미세먼지 관리를 위해 2015년부터 광진구와 종로구 2개 측정소에서 초미세먼지 상세모니터링 사업을 시행하여 총 3차에 걸친 초미세먼지 성분농도 측정자료를 구축⁷⁾
 - 측정된 성분농도 자료와 건강자료를 연계하여 성분별 건강위해성을 평가하고, 위해성이 높은 성분의 주요 배출원 검토를 통해 시민 건강 중심의 초미세먼지 질적 관리를 위한 과학적 근거 기반 마련 필요

[표 3] 초미세먼지 성분 측정 항목

항목	상세항목	1차 (2015.8~2016.8)	2차 (2018.2~2019.2)	3차 (2020.1~2021.3)
탄소 성분	PM2.5	OC, EC	OC, EC	OC, EC
이온 성분		Cl ⁻ , NO ₃ ⁻ , SO ₄ ²⁻ , Na ⁺ , NH ₄ ⁺ , K ⁺ , Mg ²⁺ , Ca ²⁺	Cl ⁻ , NO ₃ ⁻ , SO ₄ ²⁻ , Na ⁺ , NH ₄ ⁺ , K ⁺ , Mg ²⁺ , Ca ²⁺	Cl ⁻ , NO ₃ ⁻ , SO ₄ ²⁻ , Na ⁺ , NH ₄ ⁺ , K ⁺ , Mg ²⁺ , Ca ²⁺
중금속		Al, As, Ba, Ca, Cd, Co, Cr, Cu, Fe, Mg, Mn, Mo, Ni, Pb, Sr, Ti, V, Zn, P, S, Sn	Al, As, Ca, Cr, Cu, Fe, Mg, Mn, Ni, Pb, Ti, V, Zn, P, S, Se, Si, Cl, K	Al, As, Ba, Ca, Cr, Cu, Fe, K, Mg, Mn, Ni, Pb, Si, Ti, V, Zn, S
유기물질		Levogluconan	Levogluconan	Levogluconan
안정동위원소		-	C, N, S	-

자료: 서울시(2016), 서울시(2019), 서울시(2021)

6) Yang, Yang, et al. "Particulate matter components and health: a literature review on exposure assessment." Journal of Public Health and Emergency 2.3 (2018).
 7) 서울특별시, 2016, 「초미세먼지(PM2.5) 배출원 인벤토리 구축 및 상세모니터링 연구」; 서울특별시, 2019, 「서울시 초미세먼지 상세모니터링 해석 연구」; 서울특별시, 2021, 「초미세먼지 배출원 확인 및 기여도 해석」

II. 초미세먼지 일부 성분에서 유의미한 건강위해성

I 서울시, 초미세먼지 성분별 농도는 최근으로 올수록 저감

서울시, 초미세먼지 및 주요 성분농도 저감하고 있으나, 2차 생성물질이 농도에 주로 기여

- 서울시 초미세먼지 성분농도 측정 결과 대부분의 성분농도는 감소 추세를 보임
 - OC, EC 농도는 1차 대비 2차 측정 농도는 저감되었으나, 3차에서 약간 증가하였으며, EC 대비 OC 농도의 저조한 저감으로 OC/EC 비율은 증가
 - 이온 성분(NO_3^- , SO_4^{2-} , NH_4^+ , Cl^- , K^+ , Na^+) 역시 3차 측정에서 가장 낮은 농도를 나타내어 감소 추세
 - 중금속은 대부분의 성분이 1차 대비 3차 측정에서 감소되었으나, Ti와 Ni는 약간 증가
 - Ti는 브레이크나 타이어 마모 등 비배기 배출의 주요 성분⁸⁾으로 최근 친환경 전환정책으로 인한 전기차의 증가가 관련 성분농도 증가에 기여한 것으로 추정
- 초미세먼지 농도에 주로 기여하는 성분은 2차 생성물질
 - OC, EC 등이 주기여 성분인 자동차 오염원의 초미세먼지 농도 기여율은 서울시의 지속적인 운행차 저공해화 및 친환경차 전환정책으로 기여율도 감소하는 추세
 - NH_4^+ , NO_3^- , SO_4^{2-} 등이 주로 기여하는 2차 생성 오염물질은 초미세먼지 농도 기여율이 높아 농도 저감을 위해 2차 생성 초미세먼지 관리 필요

[표 4] 수용모델을 이용한 PM2.5 배출원별 기여도 변화

구분	3차 2021년 연구 (2020.04~2021.03)		2차 2019년 연구 (2018.01~2019.01)		1차 2016년 연구 (2015.08~2016.08)		
	기여율(%)	농도($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	기여율(%)	농도($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	기여율(%)	농도($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	
2차생성 (무기염)	소계	43	10.71~11.54	42.0~43.1	9.84~9.94	53~54.1	16.62~16.74
	2차 질산염	26~27	6.27~6.93	26.2~27.4	6.20~6.27	32.1~34.6	10.12~10.63
	2차 황산염	16~17	3.99~4.61	15.6~15.8	3.57~3.74	19.5~21.0	6.00~6.61
비산먼지 및 해염입자	소계	7.3~13	1.80~3.56	9.2~9.3	1.64~2.21	2.2~8.1	0.70~2.48
	토양	4.1~5	1.00~1.40	4.5~6.2	1.02~1.47	1.3~5.8	0.40~1.77
	노후 해염입자	3.2~8	0.80~2.16	3.1~4.7	0.74~1.08	0.9~2.3	0.30~0.72
점·면 오염원 (연료연소 등)	소계	17.5~23	4.32~6.14	15.4~21.0	3.51~4.98	5.4~11.0	1.67~3.46
	소각	6.2~16	1.52~4.24	4.5~5.2	1.06~1.19	-	-
	석탄연소	3~3.2	0.80	2.6~6.4	0.60~1.51	-	-
	산업	3~6.4	0.70~1.58	4.8~8.0	1.09~1.90	2.4~5.9	0.74~1.87
	기름연소	1~1.7	0.40~0.42	2.1~2.7	0.50~0.62	3.0~5.0	0.93~1.58
이동오염원(자동차 등)		9.3~11	2.30~3.01	13.0~18.2	3.08~4.15	19.2~20.0	5.89~6.32
생물성연소		10~17	2.60~4.20	14.2~14.6	3.24~3.47	13.3~13.8	4.08~4.35

자료: 서울시(2016), 서울시(2019), 서울시(2021) 상세모니터링 연구 결과 활용

8) Piscitello, Amelia, et al., 2021, "Non-exhaust traffic emissions: Sources, characterization, and mitigation measures." Science of the Total Environment 766: 144440.

I 초미세먼지 성분별 건강 영향 추정을 위해 성분농도 예측 모델 개발

성분별 건강영향 분석을 위해 Machine Learning 기법을 적용한 성분농도 예측 모델 개발

- 서울시 광진구와 종로구에서 측정된 성분농도는 측정 기간 중 모든 날짜에 측정되지 않아 건강자료와 연계에 한계
 - 국민건강보험의 건강자료 연계를 위해 미측정일에 대한 성분농도 예측 필요

[표 5] 성분농도 측정 차수별, 지점별 측정일수

구분	측정기간	지점	측정일수(유효 측정일수)			
			PM2.5 Mass	이온 성분	탄소 성분	중금속
1차	2015.8-2016.8	광진	137(125)	137(125)	137(125)	127(115)
		종로	136(125)	136(125)	136(125)	126(115)
2차	2018.2-2019.2	광진	127(113)	123(113)	125(113)	127(113)
		종로	126(113)	124(113)	126(113)	126(113)
3차	2020.1-2021.3	광진	203(114)	201(114)	201(114)	114(114)
		종로	121(107)	120(107)	119(107)	110(107)

자료: 서울시(2016), 서울시(2019), 서울시(2021)

- 성분농도 예측을 위해 성분농도 측정데이터, 대기환경 측정망 자료, Copernicus Atmosphere Monitoring Service(CAMS) global reanalysis(EAC4) 자료와 미항공우주국(NASA)의 Modern-Era Retrospective analysis for Research and Applications, Version 2 (MERRA-2)를 이용하여 모델 개발
 - 대기환경 측정망의 결측값은 회귀트리(regression-tree) 기반의 앙상블 모델링 기법인 eXtreme Gradient Boosting(XGBoost) 기법을 적용하여 보완
 - 예측 모형은 회귀트리 앙상블과 베이지안 프레임워크를 기반으로 하는 머신러닝 기법인 Bayesian Additive Regression Trees(BART) 모델을 이용하여 추정
 - 예측값에 대한 신뢰도와 타당도를 여러 시·공간 교차검증법을 종합적으로 사용하여 검증 - 검증 결과 모델이 도시 환경과 측정값이 부족한 기간의 초미세먼지 성분농도를 식별하는데 잘 작동함을 시사

[표 6] 초미세먼지 성분농도 모델링 입력변수 구성

자료원	입력자료	공간 해상도	모델 반영
CAMS	• OC, BC, HNO ₃ , NO ₂ , NO, SO ₄ ²⁻ 에어로졸 혼합비 • Pb, NH ₄ ⁺ , NO ₃ ⁻ 지표면 농도(3시간 추정치)	80km x 80km	시간적 변동추세
MERRA-2	• EC, OC, 먼지, SO ₄ ²⁻ , 해염 지표면 농도(1시간 추정치)	50km x 50km	시간적 변동추세
대기환경 측정망	• SO ₂ , NO ₂ , CO: 1차 오염물질 지표 • O ₃ : 2차 오염물질 지표 • PM10, PM2.5: 1, 2차 오염물질 및 황사 지표	자치구	시공간적 변동추세

I 초미세먼지 중 6개 성분, 질환으로 인한 외래방문과 유의미한 연관성

초미세먼지 6개 성분(NO₃⁻, Na⁺, OC, EC, 레보글루코산, Al) 외래방문과 유의미한 연관성

- 초미세먼지 성분별 모델링 자료를 국민건강보험공단의 병원 방문자료와 연계하여 성분별 단위 농도(1-표준편차: 1-S.D.) 증가에 따른 병원 외래방문 증가 위험도를 추정

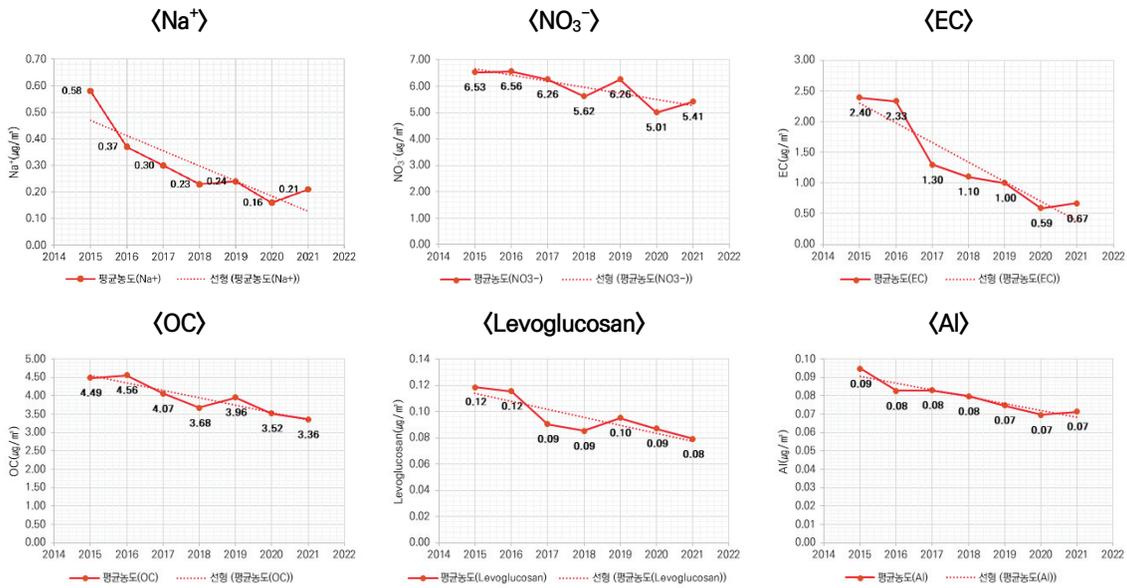
[표 7] 초미세먼지 성분별 건강영향 분석 변수

구분	내용
노출 (Exposure)	분석 대상 성분농도 선정: 33개 모델링 성분 중 교차검증값이 높은 성분을 노출 요인으로 선정 (OC, EC, SO ₄ ²⁻ , NO ₃ ⁻ , NH ₄ ⁺ , Cl ⁻ , K ⁺ , Na ⁺ , 레보글루코산, As, Zn, Cd, S, Co, Cu, Mo, Fe, Mn, Sn, Ba, P, V, Sr, Al, Mg, Cr)
건강결과 (Health outcome)	분석 기간: 2015-2021 분석 대상 지역 (충분한 자료 수 확보를 위해 측정망 설치 인접 자치구를 포함하여 분석) * 측정망 설치 지역(종로구, 광진구) + 측정망 설치 권역 내 인접 자치구(중구, 용산구, 성동구, 동대문구, 중랑구) 분석대상질환 순환기계 질환: 전체(KCD-10:I00-99), 고혈압성질환(I10-15), 허혈성심질환(I20-25), 뇌혈관질환(I60-69), 기타 순환기계 질환 호흡기계 질환: 전체(J00-J99), 급성상기도감염(J00-06), 천식(J45-46), 만성하부호흡기질환(J40-47), 기타 호흡기계 질환
혼란변수 (Confounder)	분석 대상 성분농도를 제외한 그 외 모든 PM2.5 구성성분(성분농도 간 다중공선성, 노출측정오류, 잔여 혼란효과 등 보정), 오존, 기상(기온, 상대습도), 인플루엔자 유행, 공휴일, 요일 효과, 장기 추세

- 초미세먼지 구성성분의 영향 분석 결과, NO₃⁻, Na⁺ 노출은 순환기계 질환으로 인한 병원 외래방문 증가와 유의미한 양(+)의 연관성이, EC, OC, Na⁺, 레보글루코산, Al 노출은 호흡기계 질환으로 인한 병원 외래방문 증가와 유의미한 양(+)의 연관성을 보임
 - NO₃⁻ 농도가 1.91 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ (1-S.D.) 증가하면, 85세 이상 인구집단에서 고혈압으로 인한 병원 외래방문이 2.49% 증가하는 것으로 나타났으며, Na⁺ 농도가 0.19 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ (1-S.D.) 증가하면 20~64세 인구집단에서 전체 순환기계 질환으로 인한 외래방문은 1.4%, 고혈압으로 인한 외래방문은 1.5% 유의미하게 증가
 - EC는 농도가 0.51 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ (1-S.D.) 증가하면, 전체 인구집단의 호흡기계 질환으로 인한 외래방문은 5.48% 증가
 - OC는 농도가 0.40 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ (1-S.D.) 증가하면, 전체 인구집단의 비염으로 인한 외래방문은 1.10%, 20~64세는 2.26% 유의미하게 증가
 - Na⁺는 농도가 0.19 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ (1-S.D.) 증가하면, 전체 호흡기계 질환으로 인한 외래방문은 전체 인구집단에서 2.45%, 60~84세는 3.18% 유의미하게 증가
 - Al은 농도가 12ng/m³(1-S.D.) 증가하면, 전체 인구집단의 호흡기계 질환으로 인한 외래방문은 2.22%, 0~19세는 4.98% 유의미하게 증가
 - 레보글루코산은 농도가 0.02 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ (1-S.D.) 증가하면, 전체 인구집단의 비염으로 인한 외래방문은 1.87%, 20~64세는 2.31% 유의미하게 증가

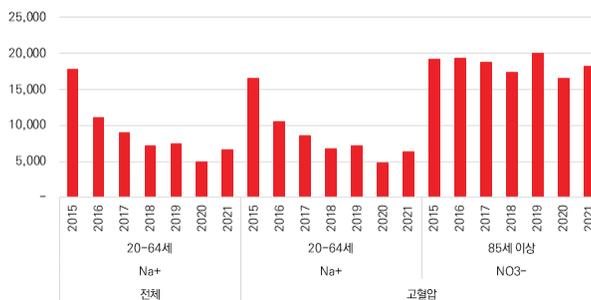
건강과 유의미한 연관성이 있는 성분농도의 감소로 유해 성분의 기여 외래방문 건수 감소 추세

- 질병과 유의미한 연관성이 나타난 성분농도의 연평균 단기 노출수준 분석 결과, 지속적인 대기질 관리 대책으로 인해 초미세먼지 농도와 성분농도는 지속적으로 감소



[그림 2] 건강과 유의미한 연관성이 있는 성분의 연평균 단기노출 수준의 변화

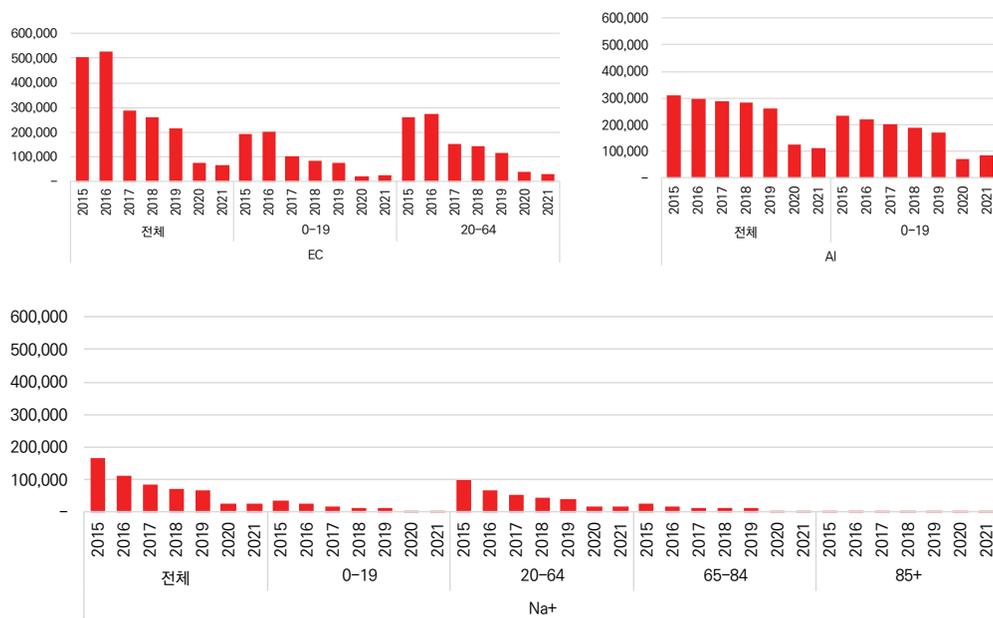
- 순환기계 질환의 경우 Na⁺와 NO₃⁻의 기여 외래방문 건수와 기여율은 전반적으로 감소하고 있지만, 2021년 노출도 증가로 기여 외래방문 건수와 기여율은 다소 증가
 - 20~64세 인구집단의 Na⁺의 평균수준 단기노출로 인한 순환기계 질환 기여 외래방문건수는 2015년 17,839건(기여율 2.9%)에서 2021년 6,613건(기여율 1.1%)으로 저감, 고혈압 기여 외래방문건수는 2015년 16,134건(기여율 3.1%)에서 2021년 6,286건(기여율 1.2%)으로 감소
 - 85세 이상 인구집단에서 NO₃⁻의 평균수준 단기노출로 인한 고혈압 기여 외래방문건수는 2015년 19,204건(기여율 4.6%)에서 2021년 18,262건(기여율 3.8%)으로 감소



[그림 3] Na⁺, NO₃⁻ 평균 수준 단기 노출수준에 따른 순환기계 질환 기여 외래방문건수(건, 2015~2021)

○ 호흡기계 질환의 경우 유해성분의 평균 수준 단기 노출이 감소됨에 따라 성분농도에 의한 기여 외래 방문 건수도 지속적으로 저감

- EC의 평균 수준 단기노출로 인한 전체 호흡기질환 기여 외래방문 건수는 2015년 505,402건(기여율 15%)에서 2019년 215,348건(6.58%), Covid-19가 있던 2021년은 66,615건(4.46%)으로 저감
- EC의 호흡기질환 영향은 20~64세에서 가장 큰 것으로 나타났으며, 해당 인구집단의 기여 병원 외래방문 건수는 2015년 261,902건(14.91%)에서 2019년 116,718건(6.54%), 2021년 32,609건(4.43%)으로 저감
- Na⁺ 평균 수준 단기노출로 인한 전체 호흡기질환 기여 외래방문 건수는 2015년 166,088건(4.9%), 2019년 67,576건(2.1%), 2021년 28,342건(1.86%)으로 저감
- AI 평균 수준 단기노출로 인한 전체 호흡기질환 기여 외래방문 건수는 2015년 311,894건(9.83%), 2019년 258,697건(7.85%), 2021년 114,058건(7.50%)으로 저감



[그림 4] 연도별, 초미세먼지 성분별(EC, AI, Na⁺) 호흡기계 질환 기여 외래방문건수(건)

Ⅲ. 초미세먼지 질적 관리를 위한 우선 관리 배출원 검토

Ⅰ 건강과 유의미한 연관성이 나타난 성분별 주요 배출원 검토

건강과 유의미한 연관성이 있는 성분의 주요 배출원⁹⁾

- OC와 EC는 도로이동오염원, 비도로이동오염원, 생물성연소가 주요 배출원으로, 2021년 배출량 기준, 비도로이동오염원은 건설장비, 화물차, 생물성연소는 고기 및 생선구이, 도로이동오염원은 RV차량 순으로 배출량이 높음
 - 건설장비에 대한 탄소 성분 배출 분석 결과, 중국 China4(Euro4 기준과 유사) 기준의 트럭과 StateII(Tier2 기준과 유사) 기준의 트럭, 크레인, 로우더, 굴삭기 등의 탄소 성분 배출은 OC는 PM2.5의 10.6~36.3%, EC는 20.3~40.8% 차지¹⁰⁾¹¹⁾
- 미국·EU 등 내연기관 자동차 배출가스 기준을 강화(EURO7, LEV4)
 - 유럽에서는 2025년부터 ERO6 보다 NO_x, PM 기준이 대폭 강화되고, 브레이크와 타이어에서 배출되는 미세먼지까지 규제 대상에 포함한 새로운 배출가스 기준 EURO7이 승용차와 소형 상용차에 우선 시행되고, 2027년부터 대형 화물차와 버스에 적용될 예정
 - 미국 LEV4는 LEV3 대비 입자상물질(PM) 65%, 질소산화물(NO_x) 25% 강화되었으며, 2026년부터 적용 예정
- NO₃⁻의 주 오염원은 이차질산염이며, 주요 전구물질인 질소산화물과 암모니아의 서울시 배출량은 점차 감소하고 있으나, 최근 NO₃⁻ 농도는 증가
 - NO_x의 주요 배출원은 도로이동오염원, 비도로이동오염원, 비산업연소로 관련 부문의 추가적인 배출저감 필요
 - 암모니아는 생산공정시설, 농업부문의 가축 및 비료사용, 사람의 분노 등에 의해 주로 발생되며, 가축활동이 거의 없는 서울시는 주로 인구수와 배출계수를 이용하여 산정되므로, 암모니아 저감을 위해 구체적인 배출원과 배출량 파악 필요
 - 서울과 베이징의 극초미세먼지(PM1)의 질산염 연구 결과, NO_x와 VOCs를 낮추는 것이 NO₃⁻의 농도를 낮추는 데 효율적일 것으로 나타남¹²⁾

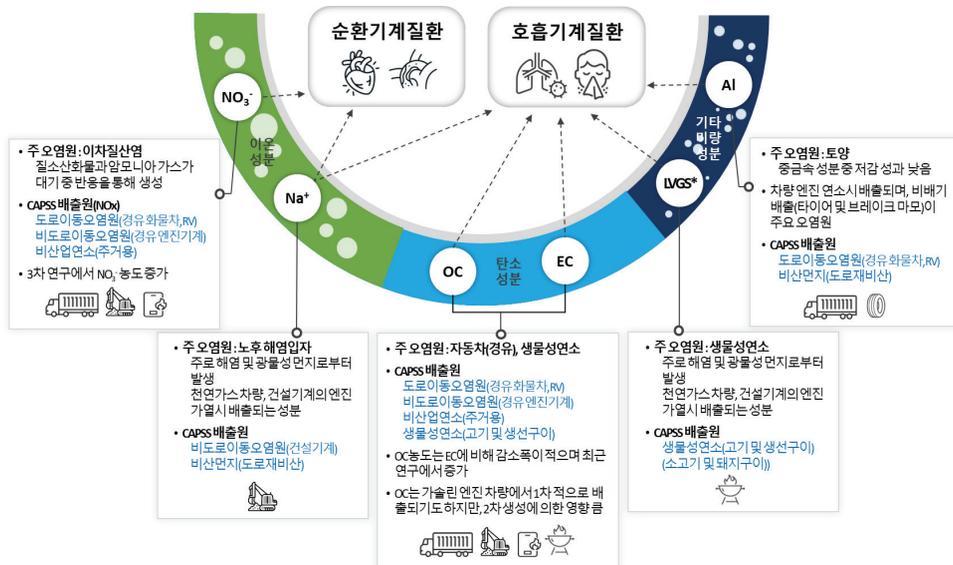
9) 인체 위해성이 나타난 관리대상 초미세먼지 구성성분을 대상으로 배출량 및 농도추세와 함께 가장 최근 수행된 2021년 서울시 초미세먼지 상세모니터링 해석연구(2021 서울시)의 PMF 수용모델을 통해 도출된 주요 오염원과 주 기여성분, 초미세먼지 기여율, 계절적 특성 등을 토대로 배출 및 관리현황과 향후 관리방안을 검토

10) Hao, Yanzhao, et al. "Chemical characterisation of PM2. 5 emitted from motor vehicles powered by diesel, gasoline, natural gas and methanol fuel." *Science of the total Environment* 674 (2019): 128-139.

11) Liu, Yayong, et al. "Chemical compositions of PM2. 5 emitted from diesel trucks and construction equipment." *Aerosol Science and Engineering* 2.2 (2018): 51-60.

12) Qiu, Yanting, et al. "Secondary aerosol formation drives atmospheric particulate matter pollution over megacities (Beijing and Seoul) in East Asia." *Atmospheric Environment* 301 (2023): 119702.

- Na^+ 의 주 오염원은 노후 해염 입자로, 해수, 광물성 먼지, 도로 먼지 등에서 배출되며, 초미세먼지 농도 및 이온 성분 비중은 낮으나, 건강유해성이 나타난 만큼 관리를 위한 관련 배출원 파악 필요
 - 천연가스 차량 및 건설기계에서도 배출되는 성분으로 관련 부문의 배출저감 사업은 Na^+ 농도 저감에 기여
- 레보글루코산은 셀룰로우스가 고온소각 또는 열분해되어 생성되는 물질로 OC, EC, K와 함께 생물성연소 기인 초미세먼지의 주기여 성분
 - 생물성연소의 주요 배출원은 고기 및 생선구이 부문으로 2021년 기준 서울시 전체 생물성연소 배출량의 86.8% 차지
 - 고기 및 생선구이의 배출량은 육종별 연간 소비량과 음식점 및 급식소 비율, 음식점종 종사자 수 자료를 활용하여 산출되므로, 구체적인 배출규제 대책 마련을 위해 관련 업종 대상 주요 대기오염물질 배출물질, 배출량 등을 정확히 파악하는 것이 필요
- Al은 토양기인 오염원의 주기여 성분 중 하나로, 차량 엔진 연소 시 배출되는 미량성분이며, 최근 차량 비배기 배출 주요성분에 관한 연구 결과, 브레이크 및 도로 마모에서 발생하는 주요 성분으로 도출됨¹³⁾
 - 서울시의 전기차 등록 비율은 2024년 7월 기준 경기도 21.7%(134,741대) 다음으로 12.8%(79,548대)로 다른 시도에 비해 높고, 친환경 정책 추진에 따라 점차 증가할 것으로 전망되며, 비배기 배출 역시 증가될 것으로 추정
 - 친환경 정책이 점차 강화 및 확대됨에 따라 인체 위해성이 나타난 Al을 비롯한 비배기 배출 저감을 위한 대책 마련 필요



[그림 5] 질환 연관성이 나타난 6개 초미세먼지 구성성분의 주요 오염원·배출원

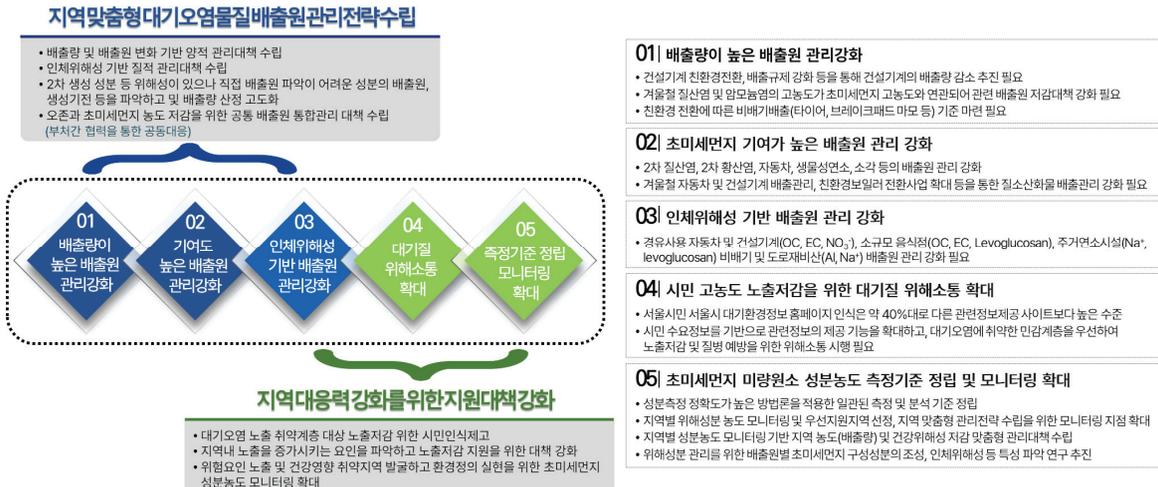
13) Piscitello, Amelia, et al. "Non-exhaust traffic emissions: Sources, characterization, and mitigation measures." Science of the Total Environment 766 (2021): 144440.

IV. 시민 건강 중심의 초미세먼지 관리 정책 방향

I 대기질의 양적·질적 개선과 함께 시민 노출 저감을 위한 대책 강화

지역의 배출 특성과 배출량 변화, 인체 위해성을 기반으로 한 초미세먼지의 양적·질적 관리 필요

- 배출량, 배출원 변화와 인체 위해성을 고려한 양적·질적 지역 맞춤형 관리전략과 함께 장기적으로 기후변화 대응과 연계한 통합 관리전략 필요
 - 서울시 초미세먼지 농도는 대기환경기준(연평균 $15\mu\text{g}/\text{m}^3$)을 상회하고 있어, 기존 배출원 관리 강화(양적 관리), 인체 위해성이 높은 성분 배출원 관리(질적 관리), 단기 체류성 기후변화 유발 물질이면서, 인체 위해성이 보고된 BC의 기후변화 대응 연계 통합 관리 필요
- 초미세먼지 노출과 건강영향 저감을 위해 성분농도 모니터링을 확장하고, 시민 인식 개선 및 노출 저감을 위한 지원 강화
 - 성분농도 모니터링 확대를 통해 건강위해성이 상대적으로 높은 지역 발굴
 - 노출 취약계층 대상, 시민 인식 제고 및 노출 저감 지원 대책 강화



[그림 6] 대기질의 양적·질적 개선 및 노출저감을 위한 정책 방향

주요 추진전략

주요 과제	추진전략
농도, 배출량, 인체 위해성 기반 배출 저감 강화	- 초미세먼지의 농도, 배출량, 인체 위해성을 고려한 배출 저감 전략 수립 - 배출원 관리를 위한 과학적 근거 마련
시민 건강 피해 저감을 위한 초미세먼지 노출 저감	- 초미세먼지 성분 모니터링 확대 - 초미세먼지 성분 모니터링 네트워크 구축 - 대기질 인식 개선 및 노출 저감을 위한 시민 인식 개선

I 농도, 배출량, 인체 위해성 기반 배출 저감 강화

지역별 초미세먼지의 농도, 배출량, 인체 위해성을 고려한 배출 저감 전략 수립

- 초미세먼지 성분별 건강영향 분석을 통해 도출된 6개 성분의 주요 배출원 검토 결과를 반영하여 도로이동오염원, 비도로이동오염원, 생물성연소, 비산업연소, 비산먼지, 비배기 배출 등 배출저감 정책 강화 필요

[표 8] 배출원별 관리 전략

도로이동오염원	<ul style="list-style-type: none"> • 배출량 및 배출 비율이 높은 오염원인 화물차, RV 대상 노후경유차 조기폐차, 친환경차 전환 지원(관련 규제의 재검토 등) • 서울시 전 지역 배출가스 5등급 차량 운행 제한 확대 • 3, 4등급 차량 운행 제한의 시범 사업 운영 등 점차적 도입 및 확대
비도로이동오염원	<ul style="list-style-type: none"> • 서울시 건설현장 친환경 건설장비 사용기준(EURO6, Tier4, 전기사용장비 등) 강화 • 노후 건설기계 조기 폐차 및 친환경 건설장비 전환 지원 • 건설 현장 미세먼지 및 질소산화물 기준 초과 관리 감독 강화
생물성연소	<ul style="list-style-type: none"> • 생물성연소 배출원 중 배출 비율이 높은 소규모 음식점(소고기 및 돼지구이 등) 대상 미세먼지 저감 시설 설치지원 확대 - 미세먼지 저감 시설 설치 확대를 위해 설치 공간의 제약, 건물주와 임차인의 문제 등 해결 방안 검토(기술개발 지원, 규제 등)
비산업연소 비산먼지 및 비배기배출	<ul style="list-style-type: none"> • 주거용 및 산업용 친환경 보일러 전환 확대 • 도로 재비산먼지 저감을 위한 도로 물청소, 미세 분진 흡입 차량 운행 확대 • 공사장 인근 비산먼지 관리 대책 운영 현황 관리 감독 강화 • 차량 비배기 배출 관리 대책의 선제적 도입을 위한 과학적 근거 기반 구축 및 기술개발 지원

배출원 관리를 위한 과학적 근거 기반 마련

- 구성 성분 측정 및 분석 방법 고도화 및 표준화
 - 성분농도의 측정과 분석법 고도화 및 표준화를 통해 분석 결과의 타성성 및 신뢰도 제고를 위한 기반 마련
 - 개발된 표준화된 측정 및 분석법은 측정 및 분석 프로토콜(SOP)을 작성하여 관리
 - 연차별 누적된 자료는 DB화하여 지속적으로 관리
- OC, NO₃⁻ 등 2차 생성 초미세먼지 성분 관리 기반 마련
 - OC는 배출원에서 직접 배출되는 1차 배출원 이외 대기 중 화학반응을 통해 2차 생성되며, NO₃⁻ 역시 질소산화물과 암모니아가 대기 중 반응을 통해 생성되는 2차 질산염의 주요 기여성분
 - 2차 질산염, 2차 황산염 등 2차 생성 물질은 초미세먼지 성분의 50% 이상 차지하며, 고농도 시기 증가하는 특성을 보여 2차 생성 초미세먼지의 생성 기전을 파악하고 관리를 위한 과학적 근거 마련 필요

- 비배기 배출관리를 위한 과학적 근거 마련
 - AI은 브레이크 및 타이어 마모 등 비배기 배출에서 발생하는 주요 성분 중 하나
 - 최근 친환경 정책으로 확대되고 있는 전기차는 내연기관차에 비해 30%가량 무거워 브레이크, 타이어 및 도로 마모로 인한 비배기 배출이 내연기관차에 비해 높음
 - 서울시 전기차 등록률은 2024년 7월 기준 79,548대(국내 전기차 등록 차량의 12.8%)이며, 운행차 관련 정책 강화에 따라 증가할 것으로 전망되어 비배기 배출원의 성분 및 저감 기술 개발 등 과학적 근거 마련 필요
 - 차량 비배기 배출 관리의 선제적 도입을 위한 과학적 근거 기반 구축 및 기술개발 지원

I 시민 건강 피해 저감을 위한 초미세먼지 노출 저감

초미세먼지 성분 모니터링 확대 및 정책 지원 대상 지역 선정

- 지역별 배출원 분포 차이로 인해 지역 간 초미세먼지의 성분 조성비는 달라짐
 - 초미세먼지 중 인체에 유해한 성분의 지역 간 조성비 차이는 지역 주민의 건강에 차별적 영향을 미치는 환경부정의 존재
 - 지역의 인체 위해성이 높은 성분의 배출원 분포와 농도를 분석하여 지역 주민 노출 저감을 위한 지역 맞춤형 관리 대책 마련 필요
- 위해성이 우려되는 지역은 이동식 측정 차량 등을 활용하여 대기질 정밀진단 후 지속적인 성분 모니터링이 필요한 경우 대상 지역을 초미세먼지 성분 모니터링 확대 지점으로 선정
 - 선정된 지점의 모니터링을 통해 초미세먼지의 양적·질적 현황 분석
 - 위해 우려 배출원이 밀집하고, 취약인구 이용시설 및 인구분포가 높은 지역을 관리지원 우선 관리지역으로 선정(미세먼지 집중 관리구역 등)하고, 예산 및 인력 등 정책 지원 확대
 - 정책 지원을 통해 관리가 우수하다고 판단되는 지역은 인센티브 지급 및 사례집을 작성하여 다른 지역에서 활용하도록 배포

수도권 초미세먼지 성분 모니터링 네트워크 구축

- 서울시를 비롯하여, 인천과 경기도는 현재 초미세먼지 성분농도를 측정하고 있어, 수도권 차원의 협력과 공동 대응을 위한 성분 모니터링 네트워크 구축 필요
 - 초미세먼지 성분 측정자료 및 분석 결과를 공유하고, 지역 내 배출원과 건강 연계 분석을 통해 지역 맞춤형 배출 및 노출 저감 전략에 활용
 - 네트워크 구축 시 지역별 자료의 동질성 확보를 위해 측정 및 분석 방법의 표준화된 프로토콜 개발 필요

대기질 인식 개선 및 노출 저감을 위한 시민 인식 개선

- 서울 시민 대기오염 인식 개선을 위한 맞춤형 대기환경-건강위해성 교육을 추진하여 자기 주도적 노출 저감 및 건강 보호를 위한 적극적 행동 변화 유도
 - 생태, 자원순환, 친환경 위주의 환경교육(사회환경교육, 학교환경교육)의 연계 및 범위 확대, 대기환경과 건강위해성, 노출 저감 행동 변화 유도 교육 포함
 - 주민센터, 보건소, 복지시설 등 취약계층 이용 시설 대상 찾아가는 맞춤형 교육 확대
- 서울시민 알권리를 위한 정보 제공 강화
 - 대기환경 관련 시민의 정보 수요(대기질 현황, 건강 영향, 건강 피해를 줄이는 행동 요령)를 파악하여, 시민이 요구하는 정보를 다양한 채널을 통해 전달(미디어, SNS, 소식지, 방문 상담 등)

정책
리포트
기술 분야
제434호

초미세먼지 성분별 인체 영향과 우선 관리 배출원 도출

발행인 오균

편집인 이신해

발행처 서울연구원

06756 서울특별시 서초구 남부순환로 340길 57

02-2149-1234

ISSN 2586-484X

발행일 2025년 11월 10일

디자인 박진범

인쇄·제본 세일포커스

서울연구원 정책리포트는 서울시민의 삶의 질을 향상하고

서울의 도시 경쟁력을 강화하기 위해 도시 전반의 다양한 정책 이슈를 발굴하여 분석함으로써

서울시의 비전 설정과 정책 수립에 기여하고자 작성된 정책보고서입니다.

* 이 정책리포트의 내용은 연구진의 견해로 서울특별시의 정책과 다를 수 있습니다.