

보건복지 ISSUE & FOCUS

미세먼지의 건강 영향 분석과 정책적 시사점

신지영

보건정책연구실 미래질병대응연구센터 부연구위원

- 최근 국내의 미세먼지 농도는 감소하는 추세이나, 코로나19 이후 대기오염 농도에 변화가 있을 수 있기 때문에 미세먼지 대응 정책을 지속적으로 점검할 필요가 있음.
- 서울 지역의 미세먼지 데이터와 사망 데이터를 분석한 결과, 일부 민감계층에서 저농도 미세먼지의 단기간 노출과 사망 위험 간의 연관성이 관찰되었음.
- 미국과 캐나다에서는 질병통제예방센터, 환경보호국, 보건부, 환경기후변화국에서 미세먼지 및 대기오염 대응 사업을 마련하고 있으며, 고농도 미세먼지가 발생했을 때의 행동 지침 및 보건서비스를 다양한 민감·취약계층에게 맞게 세분화하여 제공하고 있음.
- 향후 국내에서는 미세먼지의 최신 위해성 평가를 지속할 필요가 있으며, 미세먼지 모니터링을 강화하고, 민감·취약계층이 미세먼지 노출을 피할 수 있는 보건 서비스를 제공하며, 다중이용시설을 대상으로 한 실내 공기질 검사 수행 체계를 지속적으로 점검할 필요가 있음.

01. 미세먼지 노출이 건강에 미치는 영향 평가와 미세먼지 관련 보건으로 정책 검토의 필요성¹⁾

- ◆ 국내에서는 2019년 「미세먼지 저감 및 관리에 관한 특별법」을 시행하였고, 이후에도 고농도의 미세먼지에 노출되는 것을 줄여 건강에 미치는 영향을 최소화하기 위한 여러 대응책이 제시되었음.
- 정부에서는 미세먼지 관리 종합계획을 수립하여 2020~2024년 미세먼지 저감·관리 정책의 방향과 추진 과제를 제시하고자 하였음(관계부처 합동, 2019). 영유아, 학생 등 취약계층을 대상으로는 ‘고농도 미세먼지 대응 매뉴얼’을 보급하여 건강취약계층의 피해를 최소화하고자 하였음(환경부, 2019).

1) 미세먼지는 대기 중에 떠다니는 입자상 오염물질을 의미함. 이 글에서는 미세먼지 입자의 크기를 기준으로 구분하여 지칭해야 하는 경우 PM₁₀(입자 지름 10 μ m이하)과 PM_{2.5}(입자 지름 2.5 μ m이하)라는 용어를 사용하였음. 또한 PM₁₀과 PM_{2.5}를 모두 아우르는 개념은 ‘미세먼지’로 지칭하였음.

◆ 국내외의 노력에 따라 최근 국내 미세먼지 농도는 몇 년 전에 비하여 감소하는 추세임.

- 2022년 3~5월 서울의 PM_{2.5} 농도는 20 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 관측 이래 최저치를 기록했으며, 2022년 3월에는 비상저감조치가 단 하루도 발령되지 않아, 최근 몇 년 전보다 미세먼지 수준이 개선된 양상을 보였음.
- 그러나 국내 미세먼지 오염 수준이 세계보건기구(World Health Organization, WHO) 가이드라인 기준 이하로 개선되지는 않았고, 코로나19로부터 회복하는 과정에서 국내외의 대기오염 물질 배출량이 다시 증가할 가능성이 있음.
- 최근에 발생한 저농도 미세먼지에 노출되는 것이 건강에 어떤 영향을 미치는지 연관성을 분석하고, 미세먼지 노출을 줄이기 위한 국내외의 대응 정책을 조사 및 비교하여 국내 미세먼지 대응 정책에 대한 시사점을 도출할 필요가 있음.

02. 미세먼지 노출에 따른 건강 영향 분석

◆ 국가 데이터를 활용하여 서울의 PM₁₀, PM_{2.5} 노출과 이로 인한 일별 사망 간의 연관성을 확인해 보고, 성·연령과 같은 인구통계학적 특성에 따라 미세먼지 위험 수준에 차이가 있는지를 확인하고자 하였음.

- 대기오염 자료는 국립환경과학원에서 제공하는 에어코리아 웹페이지에서 도시 대기 측정망 자료를 통해 일자별 PM₁₀, PM_{2.5} 농도를 확인하였음.
- 미세먼지 노출과 사망 간의 연관성을 분석할 때의 모델 보정 변수로 활용하기 위하여 기상청의 종관기상관측(Automated Synoptic Observing System, ASOS) 자료를 확보하였으며, 시·도별 평균 기온, 평균 이슬점 온도, 평균 상대습도의 일자별 값이 기록되어 있는 변수를 확보하였음.
- 통계청 마이크로데이터 통합서비스의 사망 연간 자료를 통해 서울 지역의 일자별 사망자 수를 확인하였으며, 사망자의 성별, 연령, 교육 수준, 발병(사고) 시 직업 변수 등을 확보하였음.

◆ 최종 분석은 2020년 기준 최근 5개년(2016~2020년)을 대상으로 하였으며, 서울 내 일자별 사망자 수를 전체·성별·연령 구간으로 구분하였음.

- 사망 자료의 경우 준-포아송 분포를 가정하였으며, 보정 변수로 날짜, 일자별 평균 기온, 일자별 평균 이슬점 온도, 평균 상대습도와 요일 변수를 이용하였음. 기온 관련 변수와 사망 간의 비선형적인 관련성을 고려하기 위해 일반화 부가 모형(Generalized Additive Model)을 적용하였음.
- 이 글의 분석에서는 당일 노출뿐만 아니라 일정 시간이 지난 후에 미세먼지 노출의 영향이 나타나는 것을 고려하기 위한 지연 효과(Lag effect)를 추정하고자 하였으며, 기존에 미세먼지 노출로 인한 사망이 단기적으로 나타난 것을 고려하여(Zeka, Zanobetti, & Schwartz, 2005) 당일부터(Lag 0) 4일 이전까지의(Lag 4) 미세먼지의 영향을 평가하고자 하였음.

- ◆ 2016년 이후로 서울 지역의 PM₁₀, PM_{2.5} 농도는 지속적으로 감소하는 추세를 보였으며, 2019년에는 2018년 연평균 수치보다 다소 증가하였지만 2020년에는 다시 미세먼지 농도가 최근 5년 중 가장 낮은 수치를 기록하였다(그림 1).
- ◆ 2016~2020년 서울 지역의 사망자 수(22만 1,042명)를 기준으로 미세먼지 노출로 인한 사망의 상대위험도(Relative risk, RR)를 평가한 결과, Lag 0(당일 효과)의 미세먼지 노출 영향이 다른 시기의 영향보다 크게 나타났음. 그러나 유의한 수준은 아니었으며 지연 효과도 모두 유의한 위험을 보이지는 않았음(표 1).
 - 이는 해당 분석이 상대적으로 연구 기간이 짧다는 점과 최근 미세먼지 농도가 감소하는 추세임을 고려할 때, 이전의 미세먼지 노출 수준보다 상대적으로 저농도의 미세먼지 데이터를 분석했기 때문일 수 있음.
 - 연령에 따른 미세먼지 노출과 사망 간의 연관성을 분석하였을 때, 65세 이상 그룹에서는 PM_{2.5}의 당일 노출과 사망 간에 유의한 연관성이 있음을 보였음. 또한 35~64세, 65세 이상 그룹의 미세먼지 노출로 인한 위험이 이보다 연령대가 낮은 그룹에 비해 대체로 높게 나타났음(표 2). 또한 PM_{2.5} 노출로 인한 위험 수준이 PM₁₀의 노출로 인한 위험 수준보다 높게 나타났음.
 - 성별에 따른 미세먼지 노출과 사망 간의 연관성을 분석하였을 때, 여성은 PM_{2.5}의 Lag 0, Lag 1, Lag 2, Lag 3 농도가 사분위수 증가할수록 사망의 상대위험도가 유의하게 증가하였으며, 특히 Lag 0의 미세먼지 노출이 다른 시기보다 연관성이 가장 강하게 나타났음(표 3).

[그림 1] 서울 지역의 연평균 미세먼지 농도(2016~2020년)



자료: 에어코리아 도시 대기 측정망 자료를 활용하여 저자 작성함

〈표 1〉 미세먼지 노출과 사망의 연관성에 대한 포아송 회귀분석 결과¹⁾

Lag	PM ₁₀			PM _{2.5}		
	RR ²⁾	95% CI	P value	RR ²⁾	95% CI	P value
Lag 0	1.004	0.997-1.010	0.253	1.005	0.999-1.011	0.098
Lag 1	1.001	0.995-1.007	0.783	1.002	0.996-1.007	0.606
Lag 2	0.998	0.992-1.004	0.522	0.999	0.993-1.005	0.699
Lag 3	1.000	0.994-1.006	0.967	1.001	0.995-1.006	0.772

주: 1) 독립 변수로 대기오염 물질(PM₁₀ 또는 PM_{2.5})과 날짜, 일자별 평균 기온, 평균 이슬점 온도, 평균 상대습도와 요일을 이용하였음.

2) 미세먼지 노출의 사분위 범위(InterQuartile Range, IQR) 증가에 따른 상대위험도(Relative risk, RR) 값임.

자료: 포아송 회귀분석 결과를 이용하여 저자 작성함.

〈표 2〉 연령에 따른 미세먼지 노출과 사망의 연관성에 대한 포아송 회귀분석 결과¹⁾

연령	Lag	PM ₁₀			PM _{2.5}		
		RR ²⁾	95% CI	P value	RR ²⁾	95% CI	P value
0~19세	Lag 0	0.997	0.937-1.060	0.914	1.006	0.949-1.067	0.833
	Lag 1	0.997	0.936-1.061	0.920	0.987	0.930-1.047	0.663
	Lag 2	1.003	0.942-1.067	0.938	0.998	0.941-1.059	0.950
20~34세	Lag 0	1.007	0.968-1.048	0.740	1.004	0.967-1.042	0.830
	Lag 1	0.990	0.951-1.030	0.613	0.993	0.957-1.031	0.720
	Lag 2	1.012	0.973-1.052	0.565	1.005	0.968-1.042	0.812
35~64세	Lag 0	1.010	0.999-1.022	0.074	1.009	0.998-1.019	0.108
	Lag 1	1.009	0.998-1.021	0.110	1.010	0.999-1.020	0.070
	Lag 2	1.009	0.997-1.020	0.132	1.007	0.997-1.018	0.185
65세 이상	Lag 0	1.006	0.998-1.013	0.129	1.008	1.001-1.015	0.035
	Lag 1	1.002	0.995-1.010	0.537	1.002	0.995-1.009	0.537
	Lag 2	0.997	0.990-1.005	0.467	0.998	0.992-1.005	0.636

주: 1) 독립 변수로 대기오염 물질(PM₁₀ 또는 PM_{2.5})과 날짜, 일자별 평균 기온, 평균 이슬점 온도, 평균 상대습도와 요일을 이용하였음.

2) 미세먼지 노출의 사분위 범위(IQR) 증가에 따른 상대위험도(RR) 값임.

자료: 포아송 회귀분석 결과를 이용하여 저자 작성함.

〈표 3〉 성별에 따른 미세먼지 노출과 사망의 연관성에 대한 포아송 회귀분석 결과¹⁾

성별	Lag	PM ₁₀			PM _{2.5}		
		RR ²⁾	95% CI	P value	RR ²⁾	95% CI	P value
남성	Lag 0	1.004	0.996-1.012	0.299	1.005	0.998-1.012	0.195
	Lag 1	1.003	0.996-1.011	0.436	1.001	0.994-1.008	0.719
	Lag 2	0.999	0.992-1.007	0.814	0.999	0.992-1.006	0.789
	Lag 3	0.999	0.992-1.007	0.863	1.001	0.995-1.008	0.694
	Lag 4	1.005	0.998-1.013	0.169	1.004	0.997-1.010	0.326
여성	Lag 0	1.020	1.012-1.029	<0.001	1.015	1.006-1.024	<0.001
	Lag 1	1.014	1.005-1.023	0.002	1.009	1.001-1.018	0.032
	Lag 2	1.003	0.994-1.012	0.496	1.010	1.002-1.018	0.019
	Lag 3	1.012	1.003-1.020	0.009	1.008	1.000-1.016	0.046
	Lag 4	1.003	0.995-1.012	0.462	1.003	0.995-1.011	0.471

주: 1) 독립 변수로 대기오염 물질(PM₁₀ 또는 PM_{2.5})과 날짜, 일자별 평균 기온, 평균 이슬점 온도, 평균 상대습도와 요일을 이용하였음.

2) 미세먼지 노출의 사분위 범위(IQR) 증가에 따른 상대위험도(RR) 값임.

자료: 포아송 회귀분석 결과를 이용하여 저자 작성함.

03. 국외의 미세먼지 대응 보건의로 정책 동향

◆ 미국은 「대기오염방지법(Clean Air Act)」을 1963년에 처음 제정하고(Heinzerling, 2001) 이를 기반으로 국가대기질기준치(National Ambient Air Quality Standard, NAAQS)와 대기질지표(Air Quality Index, AQI)를 사용하여 대기오염 노출에 대한 대응을 선제적으로 시작했음.

- 미국 질병통제예방센터(Center for Disease Control and Prevention, CDC)의 국립환경건강센터(National Center for Environmental Health)에서 대기오염 및 미세먼지와 관련된 자료를 제공함.
 - CDC의 대기오염·미세먼지 교육 자료는 세 부분으로 이루어져 있음. 1) 미세먼지 개념 및 미세먼지의 주요 배출원, 2) 미세먼지가 건강에 미치는 영향 및 미세먼지의 건강 위해성, 3) 미세먼지 농도가 높은 날 실행할 수 있는 구체적인 행동 지침을 포함함.
- 미국 내 일부 지역자치단위별로도 미세먼지 대응 프로그램을 운영하고 있음.
 - 캘리포니아주에서는 주 내에서 판매되는 모든 실내 공기청정기에 대해 대기자원위원회의 인증을 받도록 하고 있으며, 가이드라인을 통해 위원회가 인증한 제품 모델명을 고시함으로써 소비자들이 미세먼지 노출을 줄이는 데 적합한 기능을 갖춘 공기청정기를 선택할 수 있도록 도움을 주고 있음(California Air Resources Board, 2022).
 - 오리건주 포틀랜드시에서는 2020년 9월 대형 산불로 인하여 대기질이 급격히 악화되었고, 대기질지표 AQI가 미세먼지 수준이 극심한 날을 의미하는 500을 초과하였음.
 - 이로 인한 미세먼지 노출을 예방하기 위해 포틀랜드시에서는 공공 커뮤니티센터를 대기오염 노출을 피하기 위한 임시 보호소로 지정하였고, 노숙인들을 위한 KN95 마스크를 배부하였음. 또한 오리건주 멀티노마카운티의 노숙인 서비스 합동 사무소(Joint Office of Homeless Services)에서도 자원봉사 기관과 연계하여 추가적인 보호소를 마련하였음.

- ◆ 캐나다의 보건부와 환경기후변화국에서는 2008년부터 대기질 건강지수(Air Quality Health Index, AQHI)를 개발하여 국민에게 대기질 정보와 행동 전략에 대한 정보를 제공하고자 함.
 - AQHI는 오존, 초미세먼지, 이산화질소의 세 종류 물질로 인한 대기오염 수준이 초과사망률에 미치는 영향에 대한 시계열 분석 결과를 1에서 10까지로 재조정된 지표임.
 - AQHI 수치에 따라 민감·취약계층(at-risk population)과 일반 대중(general population)의 행동 요령을 구분하여 영유아, 기저질환자 및 고령자 등 대기오염·미세먼지에 취약한 계층이 현재 AQHI가 나타내는 대기 상태에서 노출을 줄이기 위해 취해야 할 행동을 명확하게 제시하고 있음.
 - 캐나다 보건부에서는 실내 미세먼지 배출원 및 노출을 피하기 위한 정보를 제공함으로써 실내 미세먼지에 노출되는 것을 줄이도록 유도하고 있음. 또한 적절한 환기의 중요성을 알리고 환기할 때 AQHI 정보를 활용할 것을 안내하고 있으며, 공기청정기 사용의 장점을 전달하고 있음.
 - 또한 보건부에서는 보건 및 환경 전문가로 구성된 패널들이 대기오염·미세먼지가 건강에 미치는 영향과 건강의 사회·환경적 결정 요인에 대해 논의하는 팟캐스트를 진행하고 있으며, 이를 통해 미세먼지가 건강에 미치는 악영향을 줄이기 위해 국민 스스로가 할 수 있는 행동을 소개하고 있음.
- ◆ 미국과 캐나다를 대표로 한 국외 미세먼지 대응 건강 정책의 주요 내용은 다음과 같음.
 - 미세먼지 및 오존, 이산화질소 등 대기오염 물질에 노출될 때 초래되는 건강상의 악영향을 알리고 민감·취약 계층에게 정보를 제공함.
 - 실내외에서 미세먼지에 노출되는 것을 피하기 위해 오염 물질 배출원 정보를 제공하고 노출 수준과 환경별 행동 방안을 제안함.
 - 국가 차원에서 팟캐스트, 그림책, 스마트폰 애플리케이션 등 미세먼지 정보 제공 매체를 다각화함.
- ◆ 개인 수준에서 하는 행동을 통한 대기오염·미세먼지 노출 감소의 효과는 여러 연구에서 제시된 바 있음(Chen & Zhao, 2011; Cui et al., 2018).
 - 그러나 개인적 차원의 대기오염 노출 중재가 단기적으로는 효율적일 수 있어도, 이러한 노력은 의도치 않은 부작용 및 부담, 건강 보호의 책임을 개인에게 전가하게 된다는 점을 들어 장기적 효용에 대해서는 회의적으로 보는 견해도 있음(Laumbach & Cromar, 2022).
 - 이러한 시각을 반영하여 2018년에 열린 미국 흉부학회에서는 권고안을 통해 오염물질 및 미세먼지 배출 저감이 실외 대기오염으로 인한 건강 부담을 줄이기 위한 가장 중요한 정책이 되어야 하며, 개인 수준에서의 중재는 이차적 방안임을 강조하였음(American Thoracic Society, 2021).

04. 국내 미세먼지 대응 정책의 성과와 한계

- ◆ 2017년 미세먼지 관리 종합대책이 발표된 후 「미세먼지 저감 및 관리에 관한 특별법」, 「대기환경보전법」 등 미세먼지 관련 법이 제정되면서 국내에서 미세먼지 노출에 대응하기 위한 법적 기반이 마련되었음.
 - 또한 「보건의료기본법」에 따라 기후보건영향평가가 시행되었고, 대기질의 건강 위해성에 대한 평가도 국가적으로 시행된 바 있음.
 - 미세먼지 관리 종합계획이나 기후보건영향평가는 법적으로 일정 기간마다 수행해야 한다는 근거가 있으나, 다수의 미세먼지 관리 규정은 강제성이 없고 권고 수준에 그침.
 - 이는 아직까지 어느 정도 수준의 미세먼지 노출이 건강에 영향을 미치는가에 대한 명확한 연구 근거가 부족하다는 점이 원인일 수 있음.
 - 앞으로 미세먼지 노출의 건강 영향에 대한 연구를 지속적으로 장려하되, 국외의 연구 결과도 지속적으로 모니터링함으로써 건강에 영향을 미칠 수 있는 미세먼지 수준을 더욱 명확하게 파악한 후 미세먼지 농도 관리 규제 수준을 정의하는 것이 중요함.
 - 현재 국내의 미세먼지 농도 기준은 국외 및 WHO의 기준만큼 높지 않으므로, 향후 우리나라의 미세먼지 기준을 국제적 수준으로 낮출 필요가 있을지를 연구 결과에 기반하여 검토할 필요가 있음.
- ◆ 최근 국내에서도 '미세먼지 건강보호 수칙'이나 '미세먼지 기저질환자 건강수칙' 등 많은 홍보 자료와 행동 지침을 마련하였고, 카드뉴스, 영상 자료 등 다양한 형태의 가이드라인을 제작하였음.
 - 미세먼지 가이드라인은 전체 국민, 특정 기관, 민감계층 등 여러 집단을 대상으로 하고 있으나, 웹사이트 위주로 게재된 정보는 타깃 집단이 관심을 갖고 사이트를 방문하거나 정보를 찾으려는 노력을 하지 않는다면 해당 정보에 접근하기가 어려워, 활용하는 데 제한이 있을 수 있음.
- ◆ 미세먼지 대응 정책은 대상을 크게 영유아, 노인, 기저질환자 등으로 구분하고 있으나, 기저질환자 중 천식과 만성 폐쇄성 폐질환 등을 앓는 중증 환자(장안수, 2015)와 노숙인, 외국인, 장애인 등과 같은 사회취약계층은 미세먼지 노출에 특히 취약함.
 - 기저질환자를 위해서는 미세먼지 대응 수칙을 국가 및 병원 차원에서 홍보하고 고농도 미세먼지 발생 시 행동 지침을 효과적으로 전달할 수 있는 방안을 마련할 필요가 있음. 사회취약계층의 측면에서도 미세먼지에 대한 정책 방향성을 고려할 필요가 있음.
- ◆ 국외에서도 주와 지역 차원에서 미세먼지 정책을 마련한 사례가 있는 만큼 국내에서도 특정 지역에서 미세먼지가 급증하는 경우를 대비하여 지방자치단체 차원에서 고농도 미세먼지 발생 시의 대처 방안을 마련해 둘 필요가 있음.

05. 정책적 시사점

- ◆ 서울 지역의 미세먼지 데이터와 사망 데이터를 기초로 분석한 결과, 최근 몇 년간 미세먼지 농도가 감소하는 추세임에도 불구하고 일부 인구 집단에서 저농도의 단기 미세먼지 노출과 사망 위험 간의 연관성을 확인하였음.
 - 국내의 미세먼지 수준이 2021년 갱신된 WHO 미세먼지 권고 수준($PM_{2.5}$: 연평균 $5\mu g/m^3$, PM_{10} : 연평균 $15\mu g/m^3$)보다는 여전히 높다는 점을 고려할 때, 향후 추가적인 미세먼지 위해성 평가 연구를 기반으로 미세먼지 농도 기준과 관련 보건의로 정책을 점검할 필요가 있음.
 - 특히 고령층에서 미세먼지 노출 영향이 다른 연령대에 비하여 크게 나타나는 것을 고려할 때, 향후 인구 고령화 비율에 따라 미세먼지 대응 정책의 중요도가 논의될 수 있음.
- ◆ 국내외의 미세먼지 관련 정책을 비교하였을 때, 한국은 세계적으로 미세먼지 수준이 높은 것으로 나타났고(Yu et al., 2023) 이에 따라 미세먼지에 대한 관심이 급증하였기 때문에 미세먼지만을 대상으로 한 법과 홍보 자료가 마련된 것을 확인할 수 있었음.
 - 미국과 캐나다에서는 미세먼지 정책을 대기오염 정책의 일부로 제시하는 반면, 국내에서는 미세먼지만을 중점적으로 언급하는 규정들이 있음.
 - 국외와는 사회·환경적 요인이 다르므로 미세먼지 농도 수준, 민감계층과 사회취약계층의 미세먼지 노출 상황 등을 파악하여 국내 특성을 반영한 미세먼지 관련 정책을 마련해 나갈 필요가 있음.
- ◆ 국내에는 미세먼지 노출에 대한 행동 방침을 담은 가이드라인 및 홍보 자료는 다양하게 개발되어 있으나, 정보 전달 대상자에게 기존 자료를 효과적으로 전달할 수 있는 매체를 선별할 필요가 있음.
 - 미세먼지 및 대기오염 정보에 대한 접근성 향상을 위한 예산을 확보하고, 미세먼지 대응 방법을 TV, SNS, 대중교통 광고 등 다양한 매체를 통해 홍보하는 등 타깃 집단별로 효과를 보이는 매체를 선별할 필요가 있음.
- ◆ 국내에는 미세먼지 관리 종합대책 등 미세먼지 대응을 위한 기초 계획과 법적 기반이 마련되어 있음. 그러나 민감·취약계층을 위한 가이드라인을 보완하고 현 대응 정책을 이행하는 데 문제가 없는지 점검할 필요가 있음.
 - 영유아·노년층과 같은 특정 민감군과 노숙인·장애인과 같은 사회취약계층은 인터넷 활용이 쉽지 않기 때문에 보호자와 기관을 대상으로 하여 대기오염 관련 교육을 진행하되 요양병원 및 노인문화센터 등 다중이용시설을 대상으로는 지속적으로 실내 공기질 검사 결과를 검토하고 검사 수행 체계를 점검할 필요가 있음.
 - 향후 미세먼지 대응 정책은 사회취약계층이 거주하는 지역사회에 대한 미세먼지 교육 및 정보 제공 체계를 확장하는 방향으로 나아갈 필요가 있으며, 대기질 악화 시 취약계층을 위해 보호소를 제공한 국외 사례와 같이 국내에서도 고농도 미세먼지가 발생할 때 취약계층이 이용할 수 있는 보건서비스(마스크 지급, 대피 시설 마련 등)를 제공하는 것을 고려할 필요가 있음.

- ◆ 마지막으로, 국외에서는 최근 미세먼지 외에 오존 및 휘발성 유기화합물 등의 대기오염 물질 관리와 이에 대한 건강 영향 또한 중요하게 대두되고 있으므로, 국내에서도 미세먼지에 대한 가이드라인과 함께 다른 대기오염 물질 노출에 대응할 수 있는 공통적인 행동 지침을 제시할 필요가 있음.

〈참고문헌〉

- 관계부처 합동. (2019). 미세먼지 관리 종합계획(2020~2024). https://policy.nl.go.kr/search/searchDetail.do?rec_key=SH2_PLC20190242990&kwd=에서 인출.
- 장안수. (2015). 미세먼지와 천식. *대한내과학회지*, 88(2), 150-155.
- 환경부. (2019). 영유아·학생·어르신 등 취약계층 보호를 위한 고농도 미세먼지 대응매뉴얼. https://policy.nl.go.kr/search/searchDetail.do?rec_key=SH2_PLC20190233854&kwd=에서 인출.
- American Thoracic Society. (2021). Personal interventions for reducing exposure and risk for outdoor air pollution: An official American Thoracic Society Workshop Report. *Annals of the American Thoracic Society*, 18(9), 1435-1443.
- California Air Resources Board. (2022). List of CARB-Certified Air Cleaning Devices. <https://ww2.arb.ca.gov/list-carb-certified-air-cleaning-devices>에서 2022. 9. 12. 인출.
- Chen, C., & Zhao, B. (2011). Review of relationship between indoor and outdoor particles: I/O ratio, infiltration factor and penetration factor. *Atmospheric Environment*, 45, 275-288.
- Cui, X., Li, F., Xiang, J., Fang, L., & Chung, M. K. (2018). Cardiopulmonary effects of overnight indoor air filtration in healthy non-smoking adults: a double-blind randomized crossover study. *Environment International*, 114, 27-36.
- Health Canada. (2019). What is fine particulate matter (PM_{2.5})? Publications: Healthy Living. <https://www.canada.ca/en/health-canada/services/publications/healthy-living/infographic-fine-particulate-matter.html>
- Heinzerling, L. (2001). The Clean Air Act and the Constitution. *Louis U. Pub. L. Rev.*, 20, 121.
- Laumbach, R., & Cromar, K. (2022). Personal interventions to reduce exposure to outdoor air pollution. *Annals Review of Public Health*, 43, 293-309.
- Yu, W., Ye, T., Zhang, Y., Xu, R., Lei, Y., Chen, Z., ... & Guo, Y. (2023). Global estimates of daily ambient fine particulate matter concentrations and unequal spatiotemporal distribution of population exposure: a machine learning modelling study. *The Lancet Planetary Health*, 7(3), e209-e218.
- Zeka, A., Zanobetti, A., & Schwartz, J. (2005). Short term effects of particulate matter on cause specific mortality: effects of lags and modification by city characteristics. *Occupational and environmental medicine*, 62(10), 718-725.

집필 신지영 (보건정책연구실 부연구위원) 문의: 044-287-8499