

미세먼지 계절관리제 시행 여부에 따른 실내 PM_{2.5} 농도 분포 및 노출에 따른 건강위해성 평가

박신영¹ , 윤단기² , 장혁³ , 윤성원^{1,3} , 이철민^{1,3*} 

¹서경대학교 환경화학공학과, ²서경대학교 나노생명공학과, ³서경대학교 나노화학생명공학과

Indoor PM_{2.5} Concentration Distribution and Health Risk Assessment according to the Implementation of a Seasonal Management System

Shin-Young Park¹, Dann-Ki Yoon², Hyeok Jang³, Sung Won Yoon^{1,3}, and Cheol-Min Lee^{1,3*}

¹Department of Environmental & Chemical Engineering, Seokyeong University, ²Department of Nano & Biological Engineering, Seokyeong University,

³Department of Nano Chemical & Biological Engineering, Seokyeong University

ABSTRACT

Background: Since 2019, the Ministry of Environment has implemented a seasonal fine dust management system from December to March, targeting high PM_{2.5} levels with the aim of reducing PM_{2.5} concentrations and protecting public health. The focus of improving the seasonal management system lies in the atmospheric PM_{2.5} levels. Considering the primary goal of protecting public health, it is necessary to analyze the policy effects from an exposure perspective rather than a concentration-based approach.

Objectives: This study aims to quantitatively assess the improvement of indoor PM_{2.5} levels and the health impacts of the seasonal management system by comparing the periods before and during its implementation in residential environments.

Methods: PM_{2.5} concentrations within residential environments in a metropolitan area were measured using an optical particle counter (IAQ-C7, K-weather, Ltd, Korea) at one-minute intervals during the pre-implementation period (November 21-25, 2022) and during the implementation period (December 19-23, 2022). Based on the measured PM_{2.5} concentrations, a quantitative evaluation of cancer and mortality risks was conducted according to age and gender.

Results: The results of comparing indoor and outdoor PM_{2.5} concentrations before and during the implementation of the seasonal management system showed a decrease of approximately 56.6% and 47.9%, respectively. Health risk assessments revealed that both the safety-limit-based and safety-target-based Hazard Quotients (HQ) exceeded the threshold of 0.1 for children under 19 years of age, both before and after the implementation. The mortality risk decreased by approximately 47.9% after the implementation, with children aged 0-9 showing the highest mortality risk at 0.9%.

Conclusions: The findings of this study confirmed the positive health impacts of the seasonal management system across all age groups, particularly children under 19 who are more vulnerable to fine dust exposure.

Key words: Air pollution, indoor, particulate matter, risk assessment, home environment

Received June 29, 2023

Revised July 10, 2023

Accepted July 14, 2023

Highlights:

- PM_{2.5} concentration have decreased during the ongoing implementation of the seasonal fine dust management.
- It was confirmed that the seasonal management system contributed to reducing PM_{2.5} exposure in children aged 0-9.
- Safety limit-based HQ exceeded only for children, but safety target-based HQ exceeded for all age groups.

*Corresponding author:

Department of Nano Chemical & Biological Engineering, Seokyeong University, 124 Seogyong-ro, Seongbuk-gu, Seoul 02710, Republic of Korea

Tel: +82-2-940-2924

Fax: +82-2-940-7616

E-mail: cheolmin@skuniv.ac.kr

I. 서 론

세계보건기구(World Health Organization, WHO)에서는

2019년 전 세계적으로 대기오염으로 인해 420만 명이 조기사망하였으며, 대기오염과 가정 내 공기 오염의 결합된 영향으로 인해 매년 670만 명의 조기사망이 발생하는 것으로 보고하였

다.¹⁾ 특히 대기오염물질 중 미세먼지는 대기 중에서 부유하고 있는 입자상 물질로 미세먼지에 노출될 경우 호흡기 및 심혈관계 질환의 발생 뿐 아니라 사망률의 증가와도 관련이 있는 것으로 보고된 바 있다.²⁻⁴⁾ 이에 우리나라에서는 미세먼지를 관리하고자 적극적인 미세먼지 정책 개발과 추진, 투자 등에 집중하고 있다.⁵⁾

최근 조사 결과에 따르면 국내 연평균 초미세먼지(PM_{2.5}) 농도는 2022년 기준 17.9 µg/m³로 코로나 19로 인해 대기 중 PM_{2.5} 농도가 감소하였으나, 여전히 연평균 대기환경기준인 15 µg/m³을 초과하였으며, 특히 겨울철에는 PM_{2.5} 농도가 '나쁨'(35 µg/m³ 초과) 등급을 초과하는 날이 빈번하게 나타난다.⁶⁻⁹⁾ 이에 환경부는 2019년 12월부터 미세먼지 계절관리제(이하 '계절관리제'라 함)를 시행하였으며, 현재 4차까지 시행 중에 있다.¹⁰⁾ 계절관리제는 12월부터 3월까지 기존보다 강화된 미세먼지 저감 및 관리 정책을 시행하여 미세먼지 기저농도를 저감하고자 시행된 정책으로 석탄발전 가동 중단과 5등급 차 운행 제한 등 산업과 민간의 다양한 배출 부문에서 배출되는 대기오염물질을 집중적으로 관리한다.¹¹⁾ 실외 대기 중 오염물질 뿐 아니라, 지하역사, 철도, 공항 등 다중이용시설 및 어린이집, 유치원, 학교, 노인요양시설과 같은 민감 취약계층 이용시설 대상으로 점검도 같이 실시하고 있다.¹²⁾

계절관리제 기간 동안의 PM_{2.5} 농도를 조사한 결과 전국적으로 PM_{2.5} 농도 개선 효과가 12월에는 2021년 22 µg/m³에서 2022년 20 µg/m³로 약 9.1% 감소하였으며, 1월에는 2021년 대비 2022년에 약 30.0% 감소한 것으로 확인되어 계절관리제가 시행됨에 따른 미세먼지 저감 효과를 확인할 수 있었다. 특히 충청권과 수도권을 중심으로 21년도 계절관리제 시행 대비


22년도 시행 시 PM_{2.5} '나쁨' 일수가 서울 4일, 인천 5일, 경기 1일, 세종 10일, 충북 6일, 충남 11일이 감소하여 큰 감소 폭을 보인 것으로 나타났다.¹³⁾

이와 같이 계절관리제에 따른 대기질 개선 효과에 대해 연구된 바는 많으나, 보건학적 측면에서 계절관리제 시행에 따른 개선 효과에 관해 연구한 사례는 드물다.¹⁴⁾ 계절관리제의 주된 목적이 미세먼지의 기저농도를 낮춰 미세먼지 노출에 따른 국민 건강을 보호하는 것임을 감안할 때, 단순히 농도 관점에서의 효과 분석보다는 노출량 측면에서의 정책 효과 분석이 필요하다고 판단된다.

또한, 현대인의 경우 하루 중 약 86%의 시간을 실내공간에서 보내며, 코로나 19 이후 실내 여가활동 증가 및 재택근무 등에 따른 실내 생활 시간이 크게 증가하였다.^{15,16)} 특히 선행연구에 따르면 실내 생활 시간 중 주택에서 머무르는 시간은 13.8시간으로 절반의 시간을 주거실내에서 점유하는 것으로 확인되었다.¹⁷⁾ 즉, 현대인은 대다수의 시간을 실내에서 보내기 때문에, 보건학적 효과를 평가함에 있어 실내 노출에 대한 평가가 이루어지는 것이 바람직하다고 할 수 있다.

이에 본 연구에서는 계절관리제 시행 전과 시행 중 실내 PM_{2.5} 농도를 측정하여 계절관리제 시행에 따른 실내 환경에서의 PM_{2.5} 농도 개선 효과를 확인하였다. 또한, 실내 PM_{2.5} 농도 측정 결과를 바탕으로 PM_{2.5} 노출에 따른 건강위해도를 연령 및 성별에 따라 세분화하여 산출함으로써, 노출량 측면에서의 계절관리제의 효과를 정량적으로 확인하고자 하였다.

Table 1. The specification of the measurement device used in this study

Specification	IAQ-C7
Appearance	
	208 (W)×126 (H)×54 (D) MM, 0.75 kg
Metrics	PM _{2.5}
Measurement range	0~1,000 µg/m ³
Fine dust performance grades	1 st grade (90.7%)
Flux	0.1 L/min
Operating range	-5~60°C
Measuring principle	Light scattering laser photometer
Communications	LTE
Data storage	Micro SD

II. 재료 및 방법

1. 측정 방법

본 연구는 수도권에 위치한 주거공간 내 $PM_{2.5}$ 농도를 측정하였다. 대상 가구의 주택 유형은 연립주택인 한 가구를 제외하고 모두 아파트에서 측정되었다. 측정기간은 계절관리제 시행 여부에 따른 실내 $PM_{2.5}$ 농도 차이를 확인하고자 기간을 계절관리제 시행 전(2022.11.21.~2022.11.25.)과 시행 중(2022.12.19.~2022.12.23.)으로 나누었으며, 주중과 주말의 재실자 활동 패턴이 다른 점을 배제하고자 주중 5일 동안 광산란 기반 측정기(IAQ-C7, K-weather, Ltd, Korea)를 통해 1분 간격으로 $PM_{2.5}$ 농도를 측정하였다(Table 1). 측정기는 8가구 모두 거실에 설치했으며, 바닥으로부터 약 1 m 떨어진 선반이나 책상 위에서 측정하였다.

또한 계절관리제 시행에 따른 대기 중 미세먼지 저감 효과의 확인 및 본 연구에서 조사된 실내 미세먼지 농도의 비교를 위해 조사대상 가구와 가장 인접한 지점의 도시대기 측정망 자료를 활용하여 실외 $PM_{2.5}$ 농도를 확인하였다. 실내 및 실외 미세먼지 측정지점은 수도권의 서쪽에 위치한 지역으로 도로망이 밀집되어있어 수도권 내의 교통 중심지로 알려져 있다(Fig. 1). 또

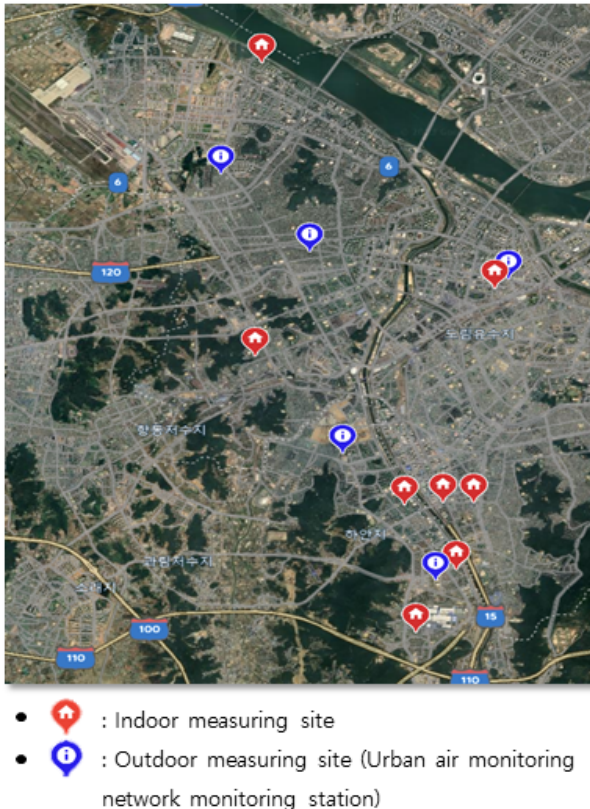


Fig. 1. Measurement points of indoor and outdoor $PM_{2.5}$ concentration

한, 차량 이동량이 많고 교통 체증이 매우 빈번하여 계절관리제 정책 내용 중 교통과 관련된 부분의 전, 후 차이를 뚜렷하게 확인할 수 있을 것으로 판단되는 지역이다.

2. 노출량 및 건강위해성 평가

건강위해성 평가 오염물질의 노출로 인한 가능한 부정적인 영향을 결정하기 위해 사용되는 도구이다.¹⁵⁾ 여기서 사람의 노출량은 일일평균용량(Average daily dose, ADD)으로 평가할 수 있으며, 이는 Eq (1)에 따라 계산되었다.

$$ADD = \frac{C \times IR \times EF \times ED}{BW \times AT} \quad (1)$$

여기서 IR은 호흡률(m^3/day), C는 오염물질 농도($\mu g/m^3$), EF는 노출빈도(hr/day), ED는 노출기간(days), AT는 평균노출시간(days), BW는 체중(kg)이다. 노출계수는 성별 및 연령에 따라 다르게 적용하였으며, 본 연구에서 사용된 노출계수는 Table 2^{18,19)}에 정리하였다.

본 연구에서는 계절관리제 시행에 따른 실내 $PM_{2.5}$ 노출량을 평가하기 위해 오염물질 농도를 시행 전과 시행 중으로 구분하여 노출 시나리오를 설정하였다. 노출시나리오에 따른 노출량은 CTE (central tendency exposure)와 RME (reasonable maximum exposure) 값을 산출함으로써 평균적인 노출량과 합리적인 수준에서의 최대 노출량을 평가하였다.¹⁷⁾ 노출계수는 호흡량, 몸무게, 노출빈도의 경우 평균값인 CTE 값을 노출량 산출시 사용하였고, RME 기준 노출량의 경우 호흡량만을 95% 값을 사용하여 각각 산출하였다. 이렇게 산출된 노출량 평가 결과를 활용하여 다음과 같이 비발암성 위해도 및 사망 위해도를 각각 산출하였다.

2.1. 비발암 위해도 평가

이렇게 산출된 노출량을 통해 비발암성 건강위해도 및 발암성 건강위해도 모두 산출하였으며, 먼저 비발암성 평가의 경우 참고용량(RfD)에 대한 ADD의 비인 HQ를 결정하기 위해 Eq (2)를 통해 계산하였다.

$$HQ = \frac{ADD}{RfD} \quad (2)$$

여기서 HQ는 위해기준(Hazard quotient, HQ)으로 1.0을 기준으로 이를 초과하면 특정 수준의 위해가 있을 수 있음을 의미한다. 본 연구에서는 19세 이상 성인 및 노년층의 HQ를 1.0으로 설정하였으며, 미세먼지의 노출에 취약한 19세 미만 미성년자의 경우 성인보다 엄격하게 평가하고자 HQ를 0.1로 설정하여 미세먼지의 건강위해도를 평가하였다. ADD는 앞서 산출한 노출량이고, RfD는 호흡참고치(Reference Dose)로 Eq (3)을 통해 계산하였다.

Table 2. Exposure factor of this study

Factor	Unit	Age	Scenario	Value		Reference	
				CTE	RME		
IR	m ³ /day	Child	(0~2)	Boys	9.80	10.22	NIER, 2019 ¹⁸⁾
				Girls	9.25	9.45	
			(3~6)	Boys	11.02	11.49	
				Girls	9.79	10.21	
			(7~12)	Boys	12.45	13.11	
				Girls	11.23	11.73	
		Adult & Elder	(13~18)	Boys	16.06	17.95	NIER, 2019 ¹⁵⁾
				Girls	13.28	15.23	
			(19~)	Man	16.21	21.00	
				Woman	13.03	16.93	
BW	kg	Child	(0~2)	Boys	9.68	NIER, 2019 ¹⁸⁾	
				Girls	8.90		
			(3~6)	Boys	19.25		
				Girls	18.45		
			(7~12)	Boys	37.77		
				Girls	35.83		
		Adult	(13~18)	Boys	64.23	NIER, 2019 ¹⁵⁾	
				Girls	54.77		
			(19~64)	Man	72.30		
				Woman	57.92		
Elder	(65~)	Man	63.65	NIER, 2019 ¹⁵⁾			
		Woman	55.50				
EF	hr/hr	Child	(0~18)	-	0.51	Choi, 2013 ¹⁹⁾	
		Adult	(19~64)	Man	0.43		
				Woman	0.61		
	Elder	(65~)	-	0.54			
ED	day	Total			31	This study	
AT	day	Total			31	This study	

$$RfD = \frac{RfC \times IR \times EF \times ED}{BW \times AT} \quad (3)$$

한편, 미세먼지는 단일 물질과 달리 여러 물질로 구성되어 있어 독성값이 부재하다. 이에 본 연구에서는 RfC를 2006년 미국 NAAQS (National Ambient Air Quality Standard)에서 제안하고 있는 호흡참고치의 안전한계값인 35 µg/m³로 설정하였다.²⁰⁾ 또한, 본 연구는 계절관리제의 건강영향을 노출량 기반으로 평가하고 목표를 제시하고자 세계보건기구(World Health Organization, WHO)에서 PM_{2.5} 장기 노출에 따른 심폐질환과 폐암에 의한 사망률 증가가 일어나는 것으로 알려진 최저 농도 10 µg/m³을 안전목표값을 산출하기 위한 RfC로 설정하였다.²¹⁾ 여기서 RfC를 국외 연구 값을 활용하여 RfD 산출 시 선행연구를 참고하여 IR은 20 m³/day, 동일한 노출시간에 대해 비교하

기 위해 EF는 노출량 평가 시 사용된 각 연령 및 성별 빈도(hr/hr), AT는 ED에 365 day/year을 곱해준 값, ED는 30 years, BW는 70 kg을 사용하였다.²²⁾

2.2. 사망 위험도 평가

PM_{2.5} 노출에 따른 사망 위험도 평가는 선행연구결과에서 체계적 문헌고찰을 통해 얻은 CRF (Concentration response function) 값을 참고하여 산출한 SF (Slope factor) 값을 노출량에 곱하여 산출하였다(Eq (4)).

$$Risk = SF \times ADD \quad (4)$$

여기서 Risk는 흡입노출에 대한 단위 위험도로 일반적으로 10⁻⁶을 초과하면 발암 위험이 있을 수 있음을 의미하고, 10⁻⁴을

초과하면 발암 위험이 매우 높음을 의미한다. 한편, PM_{2.5} 농도의 경우 상대위험도(relative risk, RR)값을 흡입단위위해도 대신 사용하였기 때문에, %로만 제시하였다. ADD는 앞서 산출한 노출량이고, SF는 Eq (5)를 통해 계산하였다.

$$SF = \frac{CRE \times IR \times EF \times ED}{BW \times AT} \quad (5)$$

선행연구조사를 통해 획득된 CRF 값은 만성노출의 경우 10 µg/m³ 당 1.08 (95% CI: 1.06~1.09), 급성노출의 경우 1.0065 (95% CI: 1.0044~1.0086)로, 본 연구에서는 선형관계를 가정하기 위해 1 µg/m³의 단위 노출량에 대한 사망률의 변화량을 1 µg/m³ 당 장기노출의 경우 0.108%, 단기노출의 경우 0.10065%로 변환하여 활용하였다.^{23,24)}

Table 3. The distribution of indoor and outdoor PM_{2.5} concentration according to the seasonal management system implementation

Site	Period	N	Concentration (µg/m ³)			p-value	
			Mean±SD	Medium	Max	ANOVA*	t-test [†]
Indoor	Pre-policy	5,125	14.77±10.17	13.00	123.30	p<0.05	p<0.05
	During-policy	5,759	6.41±8.28	4.30	313.40	p<0.05	
Outdoor	Pre-policy	567	35.33±10.41	35.00	64.00	p<0.05	p<0.05
	During-policy	586	18.41±9.69	16.00	61.00	0.24	

*ANOVA results of PM_{2.5} concentrations by indoor and outdoor measurement location.

[†]Paired t-test results of fine dust concentrations according to the policy implementation period.

Table 4. Results of average daily dose according to the seasonal management system implementation

Period	Age	Sex	Concentration (µg/m ³)		ADD (µg/kg/day)	
			CTE	RME	CTE	RME
Pre-policy	0~2	Boy	14.77	38.59	7.63	20.78
		Girl			7.83	20.90
	3~6	Boy			4.31	11.75
		Girl			4.00	10.89
	7~12	Boy			2.48	6.83
		Girl			2.36	6.44
	13~18	Boy			1.88	5.50
		Girl			1.83	5.47
	19~64	Man			1.42	4.82
		Woman			2.03	6.88
	65~	Man			2.03	6.88
		Woman			1.87	6.36
During-policy	0~9	Boy	6.41	21.71	3.31	11.69
		Girl			3.40	11.76
	3~6	Boy			1.87	6.61
		Girl			1.08	6.13
	7~12	Boy			1.02	3.84
		Girl			0.82	3.62
	13~18	Boy			0.79	3.09
		Girl			0.62	3.08
	19~64	Man			0.62	2.71
		Woman			0.88	3.87
	65~	Man			0.88	3.87
		Woman			0.81	3.58

III. 결 과

1. 측정 결과

미세먼지 계절관리제 시행에 따른 실내·외 PM_{2.5} 농도는 Table 3에 나타났다. 실내 PM_{2.5} 농도는 정책 시행 전에는 14.77 ± 10.17 µg/m³, 시행 중에는 6.41 ± 8.28 µg/m³로 약 56.6% 감소하였으며, 시행 전과 시행 중 PM_{2.5} 농도의 차이는 통계적으로 유의한 것으로 확인되었다(p < 0.05). 실외 PM_{2.5} 농도 역시 시행 전 35.33 ± 10.41 µg/m³에서 시행 중 18.41 ± 9.69 µg/m³로 약 47.9% 감소하였다(p < 0.05).

2. 노출평가

계절관리제 시행 전과 시행 중 실내 PM_{2.5} 농도를 통해 PM_{2.5}에 한 달 동안 노출된다고 가정된 노출량을 산출한 결과는

Table 4와 같다. 계절관리제 시행 전 농도가 시행 중 농도 대비 약 2배 높음에 따라, 노출량도 모든 연령에서 약 56.6% 감소하였다. 한편, 연령대 별 노출량을 산출한 결과 0~2세 유아의 ADD가 전 연령 중 가장 높게 나타나 이는 계절관리제 시행이 0~2세 유아의 PM_{2.5} 노출량 저감에 크게 기여할 수 있음을 확인할 수 있는 결과였다.

3. 비발암 위해성평가

노출평가를 통해 산출된 ADD를 바탕으로 안전한계값과 안전목표값 기반 HQ를 산출한 결과는 Table 5와 같다. 성인의 안전한계값 기반 HQ는 성별과 관계없이 정책 시행 전과 시행 중 모두 1을 초과하지 않았으나, 19세 미만 어린이의 경우 시행 전과 시행 중 모두 위해기준으로 설정한 0.1을 초과하였다. 특히 0~2세 영아의 경우 계절관리제 시행 전에는 남자아이는 1.50,

Table 5. Results of hazard quotient according to the seasonal management system implementation

Period	Age	Sex	HQ_safety threshold*		HQ_safety target value [†]	
			CTE	RME	CTE	RME
Pre-policy	0~2	Boy	1.50	4.07	5.23	14.26
		Girl	1.54	4.10	5.37	14.34
	3~6	Boy	0.85	2.30	2.96	8.06
		Girl	0.78	2.14	2.74	7.47
	7~12	Boy	0.49	1.34	1.70	4.69
		Girl	0.46	1.26	1.62	4.42
	13~18	Boy	0.37	1.08	1.29	3.77
		Girl	0.36	1.07	1.25	3.76
	19~64	Man	0.33	1.12	1.16	3.92
		Woman	0.33	1.13	1.16	3.95
	65~	Man	0.38	1.27	1.32	4.46
		Woman	0.35	1.18	1.21	4.12
During-policy	0~2	Boy	0.65	2.29	2.27	8.08
		Girl	0.67	2.31	2.33	8.07
	3~6	Boy	0.37	1.30	1.28	4.54
		Girl	0.34	1.20	1.19	4.20
	7~12	Boy	0.21	0.75	0.74	2.64
		Girl	0.20	0.71	0.70	2.49
	10~18	Boy	0.16	0.61	0.56	2.12
		Girl	0.16	0.60	0.54	2.11
	19~64	Man	0.14	0.63	0.50	2.21
		Woman	0.14	0.63	0.50	2.22
	65~	Man	0.16	0.72	0.57	2.51
		Woman	0.15	0.66	0.53	2.32

*HQ calculated based on the safe limit value (35 µg/m³) of the respiratory reference concentration proposed by the U.S. NAAQS (National Ambient Air Quality Standard).

[†]HQ calculated based on the minimum concentration (10 µg/m³) known to cause increased mortality from cardiovascular and lung cancer diseases due to long-term exposure to fine particulate matter, as suggested by the World Health Organization (WHO).

여자아이는 1.54로 성인의 위해기준인 1을 초과하는 것을 확인할 수 있었다.

한편 안전목표값 기반 HQ의 경우 시행 전에는 모든 연령대에서 위해기준을 초과하였으나, 시행 중 CTE 기준 PM_{2.5} 농도에 노출 시에는 성인과 노년층의 경우 위해기준을 초과하지 않는 것으로 나타났다.

4. 사망 위험도

노출평가를 통해 산출된 ADD를 바탕으로 단기 및 장기 노출에 따른 사망 위험도를 산출한 결과는 Table 6과 같다. 정책 시행 전 대비 정책 시행 중 사망 위험도는 단기 및 장기 노출 모두 약 56.6% 감소한 것으로 확인되었다. 연령별 사망 위험도를 확인한 결과 0~2세 영아가 장기 노출 시 CTE 기준 성별과 관계없이 0.12% 증가하는 것으로 나타나 전 연령대 중 가장 높은 것으로 확인되었으며, 이는 일반 성인 대비 3~6배 높은 수준인 것으로 확인되었다. 그 다음으로 3~6세 유아, 7~12세 초

등학생, 13~18세 중고교생 순으로 위해한 것으로 확인되었다. 한편, 19세 이상 연령대의 사망 위험도를 확인한 결과 성인 여성이 장기노출 및 단기노출 시 0.04%로 높은 수준으로 나타났다.

IV. 고 찰

계절관리제 시행에 따른 실내 및 실외 PM_{2.5} 농도를 확인한 결과, 실내 PM_{2.5} 농도는 정책 기간 동안 6.41±8.28 µg/m³로 이전 대비 약 56.6% 감소하였다(p<0.05). 주거실내의 PM_{2.5} 농도 수준을 조사한 선행연구에 따르면, 주택 실내 PM_{2.5} 농도는 27.0 µg/m³(15.1~44.0 µg/m³)로 본 연구에서 측정된 정책 시행 전 주택 실내 농도인 14.77 µg/m³ 대비 약 2배 낮은 수준이었으나, 정책 시행 중 실내 농도인 6.41 µg/m³ 대비 약 4~5배 낮은 수준인 것으로 확인되었다.²⁵⁾ 실내 측정지점 인근의 실외 PM_{2.5} 농도를 에어코리아 자료를 통해 확인한 결과 정책 기

Table 6. Results of mortality risk according to the seasonal management system implementation

Period	Age	Sex	Risk (%)				
			Long-term		Short-term		
			CTE	RME	CTE	RME	
Pre-policy	0~2	Boy	1.20.E-01	3.27.E-01	1.12.E-01	3.05.E-01	
		Girl	1.23.E-01	3.29.E-01	1.15.E-01	3.06.E-01	
	3~6	Boy	6.79.E-02	1.85.E-01	6.32.E-02	1.72.E-01	
		Girl	6.29.E-02	1.71.E-01	5.86.E-02	1.60.E-01	
	7~12	Boy	3.91.E-02	1.08.E-01	3.64.E-02	1.00.E-01	
		Girl	3.72.E-02	1.01.E-01	3.46.E-02	9.45.E-02	
	13~18	Boy	2.96.E-02	8.66.E-02	2.76.E-02	8.07.E-02	
		Girl	2.87.E-02	8.61.E-02	2.68.E-02	8.03.E-02	
	19~64	Man	1.89.E-02	6.40.E-02	1.76.E-02	5.96.E-02	
		Woman	3.82.E-02	1.30.E-01	3.56.E-02	1.21.E-01	
	65~	Man	3.38.E-02	1.15.E-01	3.15.E-02	1.07.E-01	
		Woman	3.12.E-02	1.06.E-01	2.91.E-02	9.87.E-02	
	During-policy	0~2	Boy	5.21.E-02	1.84.E-01	4.85.E-02	1.71.E-01
			Girl	5.35.E-02	1.85.E-01	4.98.E-02	1.72.E-01
3~6		Boy	2.95.E-02	1.04.E-01	2.74.E-02	9.69.E-02	
		Girl	2.73.E-02	9.64.E-02	2.54.E-02	8.99.E-02	
7~12		Boy	1.70.E-02	6.05.E-02	1.58.E-02	5.64.E-02	
		Girl	1.61.E-02	5.70.E-02	1.50.E-02	5.32.E-02	
13~18		Boy	1.29.E-02	4.87.E-02	1.20.E-02	4.54.E-02	
		Girl	1.25.E-02	4.85.E-02	1.16.E-02	4.52.E-02	
19~64		Man	8.20.E-03	3.60.E-02	7.64.E-03	3.35.E-02	
		Woman	1.66.E-02	7.29.E-02	1.54.E-02	6.79.E-02	
65~		Man	1.47.E-02	6.45.E-02	1.37.E-02	6.01.E-02	
		Woman	1.35.E-02	5.96.E-02	1.26.E-02	5.55.E-02	

간 동안의 PM_{2.5} 농도는 18.41±9.69 µg/m³로 이전 대비 약 47.9% 감소한 것으로 나타났다(p<0.05). 이러한 결과는 수도권 권의 제 3차 계절관리제 당시 농도 25.8 µg/m³ 대비 28.6% 낮은 수준이었다.²⁶⁾

계절관리제 시행 전과 시행 중 시간대별 PM_{2.5} 농도를 확인한 결과, 계절관리제 시행 전에는 8~10시 사이의 농도가 18.96 µg/m³로 높은 농도로 나타났으나, 계절관리제 시행 중 8~10시 사이 농도는 8.6 µg/m³로 시행 전 대비 54.6% 낮아진 것으로 나타났다(Fig. 2). 한편, 계절관리제 시행 중에는 20~21시 사이의 농도가 하루 중 가장 높은 농도로 나타났으나 시행 전 대비 낮은 수준인 것으로 확인되었다. 인근 대기 중 PM_{2.5} 농도를 확인한 결과, 계절관리제 시행 전 실외 PM_{2.5} 농도는 오전시간대에 높게 나타났으며, 퇴근시간인 19시 이후 높아지는 것으로 나타나, 시간대별 실내 PM_{2.5} 농도와 유사한 시간대에 높은 농도로 나타났다. 계절관리제 시행 중 실외 PM_{2.5} 농도도 역시 시행 전과 달리 오전 출근 시간대 농도가 낮게 나타났으며, 시간대별 실내 PM_{2.5} 농도 패턴과 유사하게 나타났다. 이러한 결과는 출퇴근 시간대에 차량 통행량 증가로 대기 중 PM_{2.5} 농도가 높은 농도로 나타나는 것이 실내 PM_{2.5} 농도에도 영향을 끼친 것으로 판단된다.

측정 농도를 바탕으로 계절관리제 시행에 따른 안전한계값 및 안전목표값 기반 HQ를 산출한 결과, 19세 미만 어린이의 경우 시행 전과 시행 중 모두 안전한계값 기반 HQ가 위해 기준인 0.1을 초과하였다. 한편, 0~2세 영아의 경우 정책 시행 전에는 성인의 위해기준인 1을 초과하여 PM_{2.5} 노출에 따른 건강 영향이 우려되었으나, 정책 시행 중에는 1 미만으로 위해 위험이 다소 줄어든 것을 확인할 수 있었다. 한편, HQ는 안전한계값 대비 노출량을 통해 역치를 초과했는지에 대한 유무를 확인한 방법으로 위험 자체가 감소했다고 판단하기에는 어려울 것으로 보인다. 또한 안전목표값 기반 HQ를 확인한 결과, CTE 노

출 수준에서 정책 시행 전에는 모든 연령 대의 HQ가 1을 초과하는 것으로 확인되었으나, 정책 시행 중 성인과 노년층의 HQ는 최대 농도 노출 시에도 HQ가 1을 초과하지 않는 것으로 확인되었다. 즉 이는 계절관리제 시행이 PM_{2.5} 노출에 민감한 어린이를 제외하고 성인 및 노년층에 있어 긍정적인 영향을 야기함을 확인할 수 있는 결과이다. 한편, RME 노출 수준에서 정책 시행 전과 중 모두 안전목표값 기반 HQ가 1을 초과하는 것으로 볼 때, 향후 계절관리제를 통해 PM_{2.5} 농도 저감을 위한 노력이 추가적으로 필요한 것으로 판단되었다.

HQ로는 위해 수준을 초과했는지에 대한 여부만 확인할 수 있기 때문에 본 연구에서는 단위 사망률을 통해 계절관리제 시행에 따른 장기 및 단기 노출 사망 위험도를 확인하였다. 사망 위험도 산출 결과, 노출 기간에 관계 없이 사망 위험도가 정책 시행 중에 56.6% 감소한 것으로 확인되었다. 또한, 0~2세 영아의 사망 위험도가 장기 및 단기 노출 시 0.12%로 전 연령대에서 가장 높은 것으로 나타났으며 계절관리제 시행 중 사망 위험도가 0.05%로 약 전 연령대 중 가장 큰 폭(0.07%p)으로 사망 위험도가 줄어들었다. 이는 계절관리제가 PM_{2.5} 노출에 따른 민감계층의 건강 영향에 긍정적인 영향을 야기하는 것을 확인할 수 있는 결과였으며, 계절관리제를 통해 꾸준히 PM_{2.5} 농도가 관리되었을 때 모든 연령대에서 장·단기 측면에서 정책의 건강 개선 효과를 확인할 수 있는 결과였다.

한편, 본 연구의 측정 대상 지점은 수도권 서부에 위치한 일부 지점에 국한되어 있으며, 측정 기간이 시행 전과 시행 중 각 5일로 짧아 이러한 결과가 수도권 전체의 계절관리제 전과 시행 중 농도 및 노출량을 대표한다고 보기는 어렵다. 또한, 실내 PM_{2.5} 농도는 실내 발생원 및 환기 조건 등을 계절관리제 전·후 동일한 조건이라는 가정하에 이들 조건의 변화를 통한 실내 공기질 변화를 고려하지 않고, 실외 PM_{2.5} 농도가 실내 PM_{2.5} 농도의 주요 영향요인으로 가정하여 건강위해성 평가를 수행하였다는데 제한점을 가질 수 있다. 그러나 본 연구는 현대인의 하루 중 대부분의 시간을 점유하는 주택 실내 PM_{2.5} 농도를 통해 보건학적 측면에 따른 계절관리제의 PM_{2.5} 개선 효과를 확인하였다는데 그 의미를 가질 수 있다 할 수 있다.

V. 결 론

본 연구에서는 계절관리제 시행 전과 시행 중 실내 PM_{2.5} 농도를 통해 계절관리제 시행에 따른 실내 환경에서의 PM_{2.5} 농도 개선 효과를 확인하였으며, 실내 PM_{2.5} 노출에 따른 건강 위험도를 연령 및 성별에 따라 세분화하여 산출함으로써, 노출량 측면에서의 계절관리제의 효과를 정량적으로 확인하고자 하였다.

계절관리제 시행 전과 시행 중 실내·외 PM_{2.5} 농도 분포를 확인한 결과, 실내와 실외 모두 계절관리제의 PM_{2.5} 농도가 줄어

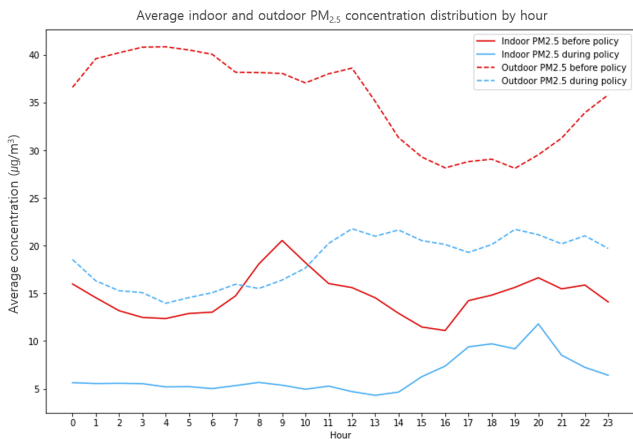


Fig. 2. Indoor PM_{2.5} concentration by time period according to the seasonal management system implementation

든 것으로 확인되었다. 이러한 결과를 바탕으로 연령 및 성별에 따른 건강위해성 평가를 수행한 결과, 19세 미만 어린이의 HQ가 위해기준인 0.1을 초과하여 계절관리제를 통한 PM_{2.5} 기저농도 저감이 지속되어야 할 것으로 확인되었다. PM_{2.5}에 대한 장·단기 노출에 따른 사망 위해도를 산출한 결과, 정책 시행 전 대비 정책 시행 중 사망 위해도가 노출 기간과 관계없이 56.6% 감소한 것으로 확인되었으며, HQ와 마찬가지로 정책 시행 전 PM_{2.5} 농도에 노출 시 0~2세 영아의 사망 위해도가 0.12%로 가장 높게 나타났으며, 이는 일반 성인 대비 최대 6배까지 높은 수준인 것으로 확인되었다. 어린이를 제외하고 주택 실내 점유 시간이 긴 성인 여성의 사망 위해도가 그 다음으로 높게 나타났다.

본 연구에서는 주거환경에서 계절관리제의 실내 PM_{2.5} 농도 저감 및 건강위해도 개선 효과를 정량적으로 확인할 수 있었다. 향후 계절관리제를 통해 대기 중 PM_{2.5} 농도가 지속적으로 관리된다면 정책의 최종 목적인 국민 건강 보호를 달성할 수 있을 것으로 사료된다.

감사의 글

본 결과물은 환경부의 재원으로 한국환경산업기술원의 환경성질환사업의 지원을 받아 연구되었으며(2022003310002), 본 연구는 2023년도 환경부 주관 「화학물질 안전관리 전문 인력 양성 사업」의 화학물질 특성화대학원 지원 사업을 통한 성과물임을 밝힙니다.

Conflict of Interest

No potential conflict of interest relevant to this article was reported.

References

- World Health Organization. Ambient (outdoor) air pollution. Available: [https://www.who.int/news-room/fact-sheets/detail/ambient-\(outdoor\)-air-quality-and-health](https://www.who.int/news-room/fact-sheets/detail/ambient-(outdoor)-air-quality-and-health) [accessed 29 June 2023].
- Dockery DW, Pope CA 3rd. Acute respiratory effects of particulate air pollution. *Annu Rev Public Health*. 1994; 15: 107-132.
- Schwartz J. What are people dying of on high air pollution days? *Environ Res*. 1994; 64(1): 26-35.
- Katsouyanni K, Touloumi G, Spix C, Schwartz J, Balducci F, Medina S, et al. Short-term effects of ambient sulphur dioxide and particulate matter on mortality in 12 European cities: results from time series data from the APHEA project. *Air pollution and health: a European approach*. *BMJ*. 1997; 314(7095): 1658-1663.
- Lee M. Government policy trends on fine dust and the health effects of fine dust, and the R&D trends of the Korean government. *NICE*. 2017; 35(5): 543-548.
- Kim Y, Kim E, Kang YH, You S, Bae M, Son K, et al. Impact of diesel vehicle emissions on PM_{2.5} concentrations in Seoul metropolitan area during the seasonal PM_{2.5} management. *J Korean Soc Atmos Environ*. 2021; 37(1): 169-190.
- Kang YH, You S, Bae M, Kim E, Son K, Bae C, et al. The impacts of COVID-19, meteorology, and emission control policies on PM_{2.5} drops in Northeast Asia. *Sci Rep*. 2020; 10(1): 22112.
- Son K, Bae M, You S, Kim E, Kang YH, Bae C, et al. Meteorological and emission influences on PM_{2.5} concentration in South Korea during the seasonal management: a case of December 2019 to March 2020. *J Korean Soc Atmos Environ*. 2020; 36(4): 442-463.
- Bae M, Kim BU, Kim HC, Kim S. A multiscale tiered approach to quantify contributions: a case study of PM_{2.5} in South Korea during 2010-2017. *Atmosphere*. 2020; 11(2): 141.
- Ministry of Environment. Fourth seasonal fine dust management plan implementation plan. Sejong: Ministry of Environment; 2022.
- National Air Emission Inventory and Research Center. Seasonal management plan. Available: <https://www.air.go.kr/contents/view.do?contentsId=12&menuId=44> [accessed 29 June 2023].
- Special Committee for Fine Dust. Seasonal fine dust management system. Available: <https://www.cleanair.go.kr/dust/dust/dust-season.do> [accessed 10 July 2023].
- Ministry of Environment. The year 2022 had the fewest number of days with high levels of ultrafine dust since observations began. Available: <https://www.me.go.kr/home/web/board/read.do?sessionId=AqeE3NqRZcLkNXvzSXqUSC8r.mehome2?pagerOffset=270&maxPageItems=10&maxIndexPages=10&searchKey=&searchValue=&menuId=&orgCd=&boardId=1574330&boardMasterId=1&boardCategoryId=39&decorator=> [accessed 29 June 2023].
- Jeon J, Choi J, Park S. Analysis of air quality index changes and evaluation of fine dust health effects under the seasonal management plan. Paper presented at: Korean Society of Atmospheric Environment (KOSAE) 65th Annual Conference; 2022 Oct 26-28; Incheon, Korea. Seoul: KOSAE, 2022. p. 90.
- National Institute of Environmental Research (NIER). Korean exposure factor handbook. Incheon: NIER; 2019.
- Park KH, Lee SY, Kim JW. Leisure changes of university students by COVID-19 and the relationship on leisure motivation and health belief. *KSLRP*. 2020; 44(3): 69-86.
- U.S. Environmental Protection Agency (EPA). Guidelines for exposure assessment. Washington, D.C.: EPA; 1992 May. *Federal Register*. 57(104): 22888-22938.
- National Institute of Environmental Research (NIER). Korean exposure factor handbook for children. Incheon: NIER; 2019.
- Choi YJ, Ko KJ. A study on Seoul citizens' perception and management behavior of indoor air quality in homes. *Seoul Stud*. 2013; 14(2): 131-144.
- U.S. Environmental Protection Agency (EPA). 2006 National Ambient Air Quality Standards (NAAQS) for particulate matter (PM_{2.5}). Available: <https://www.epa.gov/pm-pollution/2006-national-ambient-air-quality-standards-naaqs-particulate-matter-pm25> [accessed 29 June 2023].
- World Health Organization (WHO). WHO global air quality

- guidelines: particulate matter (PM_{2.5} and PM₁₀), ozone, nitrogen dioxide, sulfur dioxide and carbon monoxide. Geneva: WHO; 2021.
22. Amnuaylojaroen T, Parasin N. Future health risk assessment of exposure to PM_{2.5} in different age groups of children in Northern Thailand. *Toxics*. 2023; 11(3): 291.
 23. Chen J, Hoek G. Long-term exposure to PM and all-cause and cause-specific mortality: a systematic review and meta-analysis. *Environ Int*. 2020; 143: 105974.
 24. Orellano P, Reynoso J, Quaranta N, Bardach A, Ciapponi A. Short-term exposure to particulate matter (PM₁₀ and PM_{2.5}), nitrogen dioxide (NO₂), and ozone (O₃) and all-cause and cause-specific mortality: systematic review and meta-analysis. *Environ Int*. 2020; 142: 105876.
 25. Park SJ, Park C, Lim D, Lee S, Jang S, Yu S, et al. Impact of indoor pan-frying cooking activity on change of indoor PM_{2.5} concentration level in asthmatics' homes. *J Environ Sci Int*. 2020; 29(1): 109-117.
 26. Bae M, Kim S, Kim S. Quantitative evaluation on the drivers of PM_{2.5} concentration change in South Korea during the 1st - 3rd seasonal PM_{2.5} management periods. *J Korean Soc Atmos Environ*. 2022; 38(4): 610-623.

〈저자정보〉

박신영(박사과정), 윤단기(박사과정), 장혁(학부 연구원),
윤성원(교수), 이철민(교수)