



한국대기환경학회 미세먼지위원회 제2회 대학(원)생 미세먼지 연구논문 공모전 수상작

# 계절관리제 시행에 따른 통합 공기질 지수 변화 분석 및 미세먼지의 건강 영향 평가

## The Change of Comprehensive Air-Quality Index and Health Effects According to the Seasonal PM<sub>2.5</sub> Management

전정인, 최지원, 박신영, 이해원<sup>1)</sup>, 남은정<sup>2)</sup>, 이철민\*

서경대학교 환경화학공학과, <sup>1)</sup>(주)환경보건연구소,  
<sup>2)</sup>국립환경과학원 대기환경연구과

Jeongin Jeon, Jiwon Choi, Shinyoung Park, Hyewon Lee<sup>1)</sup>,  
Eunjung Nam<sup>2)</sup>, Cheolmin Lee\*

Department of Environment & Chemical Engineering, Seokyeong University,  
Seoul, Republic of Korea

<sup>1)</sup>Institute of Environment & Healthy, Seoul, Republic of Korea

<sup>2)</sup>Department of Air Quality Research, National Institute of Environment Research, Incheon, Republic of Korea

접수일 2023년 5월 2일  
수정일 2023년 6월 14일  
채택일 2023년 6월 27일

Received 2 May 2023  
Revised 14 June 2023  
Accepted 27 June 2023

\*Corresponding author

Tel : +82-(0)2-940-2960

E-mail : cheolmin@skuniv.ac.kr

**Abstract** Particulate matter is the cause of various disease such as respiratory disease, and Korea is implementing a seasonal PM<sub>2.5</sub> management intensively in winter to manage particulate matter more efficiently. In this study, we compared the comprehensive air-quality index between the period when the seasonal PM<sub>2.5</sub> management was no implemented (2018) and the period when the seasonal management was implemented (2019, 2020) using data from the air monitoring station in three regions (Seoul, Dangjin and Ulsan). In addition, by conducting a health risk assessment of particulate matter, the effect of reducing particulate matter health risks to the seasonal PM<sub>2.5</sub> management was suggested. As a result of the study, air quality in the three regions improved after the implementation of the seasonal PM<sub>2.5</sub> management compared to before the management was implemented, and there was a reduction effect on health risks. Therefore it is considered that there is a policy effect on the health impact of the implementation of the seasonal PM<sub>2.5</sub> management. This study includes the limitation of the cause of change in substance concentration in the study area was limited to the seasonal PM<sub>2.5</sub> management. However, this study has the significance as the first study to evaluate the effects of the seasonal PM<sub>2.5</sub> management on people's health, and is expected to be used as basic data for domestic air quality management policies.

**Key words:** Seasonal PM<sub>2.5</sub> management, Air-Quality index, PM<sub>10</sub>, PM<sub>2.5</sub>, Health effect assessment

### 1. 서 론

국내의 초미세먼지 (Particulate Matter of which diameter 2.5 μm or less; PM<sub>2.5</sub>)는 통상적으로 겨울철과 이른 봄철에 주로 고농도로 관측되며, 이는 기온이 낮아지면서 난방 개시에 따른 연료 사용 증가와 낮은 혼합도에 따른 희석 효과 감소, 계절풍에 따른 국외 대기오염물질의 국내 유입 증가 등 다양한 변수가 작용

하기 때문이다 (Bae *et al.*, 2020; Kim *et al.*, 2017). PM<sub>2.5</sub>는 가시거리를 감소시킬 뿐만 아니라, 인간 호흡기 및 순환 계통에 악영향을 미칠 수 있는 것으로 알려져 있다 (Kelly *et al.*, 2002; US EPA, 1996; IPCC, 1995; NRC, 1993).

한편 미세먼지 (PM<sub>10</sub>)에 장기간 노출 시 만성폐쇄성폐질환 (Chronic Obstructive Pulmonary Disease; COPD) 발생과 폐기능의 저하와도 관련 있음이 보고

된 바 있고, 미세먼지 농도가 5년간에  $7 \mu\text{g}/\text{m}^3$  증가할 때마다 COPD 발생은 33% 증가하는 것으로 보고되었다 (Schikowski *et al.*, 2005; MacNee and Donaldson, 2000). 천식의 경우 또한 미세먼지가  $10 \mu\text{g}/\text{m}^3$  증가할 때마다 증상 악화를 29% 증가시키고, 이로 인한 응급실 방문 및 입원도 29%를 증가시키는 것으로 보고되었다 (Andersen *et al.*, 2011; Meng *et al.*, 2009). WHO (2021)는 대기오염을 매년 7백만 명 이상의 조기 사망을 일으키는 원인으로 지목하였으며, 특히 경제협력개발기구 (OECD, 2016)에서는  $\text{PM}_{10}$ 과  $\text{PM}_{2.5}$ 로 인해 2060년 한국이 OECD 회원국 중 조기 사망률 및 경제적인 피해가 가장 클 것이라 발표하였다.

이에, 정부에서는 국내 고농도  $\text{PM}_{2.5}$  발생이 빈번한 겨울철을 집중적으로 관리하기 위해 미세먼지 계절관리제 (이하 계절관리제)를 2019년부터 겨울철 (1월~3월, 12월)에 시행하고 있다 (MOE, 2020).  $\text{PM}_{2.5}$ 의 주요 배출원은 연료 연소 사업장, 차량에서 배출되는 매연 등이 있으며, 계절관리제는 전국적으로 공공사업장 가동시간 단축, 등급제 차량 운행, 계획기간 중 석탄 화력발전소 가동 중단 등을 주된 골자로 시행되었다 (Kim and Won, 2021; Son *et al.*, 2020a). 2019년 12월부터 2020년 3월까지 1차 계절관리제를 시행하였으며, 2차 계절관리제는 2020년 12월부터 2021년 3월까지, 3차 계절관리제는 2021년 12월부터 2022년 3월까지 시행되었다.

한편 계절관리제 시행을 통해 미세먼지 농도가 감소한 것은 확인되었으나 (Bae *et al.*, 2022; MOE, 2022; Kim *et al.*, 2021; Son *et al.*, 2020a), 대규모 사업장, 석탄 화력발전소 등 계절관리제 시행 대상 배출원의 경우  $\text{PM}_{10}$ ,  $\text{PM}_{2.5}$ 뿐만 아니라  $\text{SO}_2$ , CO,  $\text{O}_3$ ,  $\text{NO}_2$  등 다른 대기오염물질의 배출과도 연관이 있으므로 전반적인 대기질에도 영향을 끼칠 것으로 판단된다. 또한, 계절관리제를 통한 미세먼지 농도의 감소는 미세먼지 노출에 따른 건강 영향 역시 저감시킬 것으로 예상되나 아직 이것에 대해 정량적으로 분석한 연구는 부재한 실정이다.

기존 미세먼지 노출에 의한 건강 위해성 평가는 미

세먼지의 독성값 부재로 인해 주로 미세먼지에 함유되어 있는 중금속이나 이온성분 등과 같은 성분 중심의 위해성 평가가 이루어져 오고 있을 뿐 미세먼지 자체에 대한 건강 위해성 평가는 이루어지지 못하고 있는 실정이다 (Kim, 2021). 이에 본 연구에서는 미세먼지 독성 정보 부재에 따른 한계를 해결하고자 미세먼지 노출에 의한 역학적 연구를 통해 도출된 질병 발생률을 단위 위해도 (Unit risk, UR)로 활용함으로써 미세먼지 노출에 의한 건강 위해도를 산출하고자 하였다 (Yoon *et al.*, 2019; Bae, 2014).

본 연구에서는 교통 및 인구가 밀집되어 있는 서울과 화력발전소가 위치해 있는 당진, 대규모 산업단지가 위치해 있는 울산을 대상으로 세 지역의 도시대기 측정망 전체 자료를 활용하여 계절관리제가 시행되지 않은 기간과 1차, 2차 계절관리제 시행 기간 동안의 통합대기환경지수 (Comprehensive air-quality index; CAI)를 비교하였으며, 이를 바탕으로 지역별 계절관리제 시행에 따른 개선 효과를 새로운 시각으로 평가하고자 하였다. 나아가 미세먼지 장기 노출 시 발병할 수 있는 대표적 질환인 천식, 만성폐쇄성폐질환 환자의 응급실 경우 입원율 및 미세먼지 노출에 의한 조기 사망률을 이용하여 미세먼지 건강 영향 평가를 수행하여 계절관리제에 따른 미세먼지 건강 위해 저감 효과 (Health benefit)를 제시하고자 수행되었다.

## 2. 연구 방법

### 2.1 측정지점 및 활용자료

본 연구에서는 서울, 당진, 울산을 대상으로 국가 도시대기측정망 자료를 활용하였다. 지역별 측정소는 각각 서울은 25개소, 당진은 2개소, 울산은 19개소가 운영 중으로 해당 지역 전체 측정망 데이터를 활용하였다. 서울은 높은 인구밀도와 많은 교통량으로 인해 대기오염이 심각한 실정이며, 특히 도로변 비산먼지나 자동차 배출원, 주거지역 연료연소 배출원 등의 오염원들이 서울을 포함한 수도권권의 도심지역 미세먼지

농도 증가의 원인으로 알려져 있다(Moon *et al.*, 2011). 충청남도 당진시는 제철소와 화력발전소 등 대기오염을 유발하는 대규모 배출시설이 밀집되어 있다. 환경부 조사 결과(KECO, 2022), 당진시의 대기오염물질 배출량이 전국에서 세 번째로 높았으며, 당진시의 연간 대기오염물질 배출량은 2020년에 16,238톤, 2021년에 13,760톤으로 나타났다. 울산은 울산미포산업단지과 온산산업단지 등 대규모 산업단지가 조성되어 있으며, 석유화학, 기계, 운송장비 등 다양한 업종이 분포하고 있어 대기오염에 대한 분쟁이 빈번히 발생되고 있는 대표 지역이다(Yoo, 2010).

자료 분석 기간은 계절관리제가 시행되지 않았던 2018년 12월~2019년 3월(Before Seasonal PM<sub>2.5</sub> management period; BS)과 1차, 2차 계절관리제 기간인 2019년 12월~2020년 3월, 2020년 12월~2021년 3월(1<sup>st</sup>, 2<sup>nd</sup> Seasonal PM<sub>2.5</sub> management period; S1, S2)로 하였다. 분석 대상 물질로써 통합대기환경지수 계산 시 필요한 PM<sub>10</sub>, PM<sub>2.5</sub>, SO<sub>2</sub>, CO, NO<sub>2</sub>, O<sub>3</sub>의 농도는 에어코리아 웹사이트(<https://www.airkorea.or.kr/web/>)에서 제공하는 도시대기측정망의 1시간 평균 농도를 활용하였다.

## 2.2 통합대기환경지수 (CAI) 산출

계절관리제 시행에 따른 공기질 지수 변화 분석을 위해 국내의 CAI 산출 방법을 활용하였으며, 산출 식은 다음 식과 같다.

$$I_p = \frac{I_{HI} - I_{LO}}{BP_{HI} - BP_{LO}} \times (C_p - BP_{LO}) + I_{LO}$$

이때,  $I_p$ 는 대상오염물질의 대기지수점수,  $C_p$ 는 대상오염물질의 대기 중 농도,  $BP_{HI}$ 는 대상오염물질의 오염도 해당 구간에 대한 최대 오염도,  $BP_{LO}$ 는 대상오염물질의 오염도 해당 구간에 대한 최소 오염도,  $I_{HI}$ 는  $BP_{HI}$ 에 해당하는 지수값(구간 최대 지수값),  $I_{LO}$ 는  $BP_{LO}$ 에 해당하는 지수값(구간 최소 지수값)이다.

연구 대상 기간 중 PM<sub>10</sub>, PM<sub>2.5</sub>, SO<sub>2</sub>, CO, NO<sub>2</sub>, O<sub>3</sub>의 시간 농도를 일평균 농도로 계산하여 각 오염물질

별 공기질 지수를 산출하여 가장 높은 점수를 통합 지수값으로 사용하였으며, 산출된 각각의 오염물질별 지수 점수가 나쁨 이상의 등급이 2개 물질 이상일 경우 가산점을 부여하였다. 나쁨 등급이 1개일 경우 가장 높은 점수를 통합대기환경지수로 사용하였으며, 2개일 경우 가장 높은 점수에 50점을 가산, 3개 이상일 경우 가장 높은 점수에 75점을 가산하였다. CAI는 PM<sub>10</sub>, PM<sub>2.5</sub>, NO<sub>2</sub>, O<sub>3</sub> 값 중 하나라도 부재할 시 제외하여 산출하였다. 통합 지수값은 4개로 구분하였으며, 지수값이 0~50이면 ‘ 좋음’, 51~100이면 ‘ 보통’, 101~250이면 ‘ 나쁨’ 그리고 251~500이면 ‘ 매우 나쁨’으로 구분하였다(<https://www.airkorea.or.kr/web/>).

## 2.3 건강 영향 평가

본 연구에서는 미세먼지 노출로 인한 대표적 질환인 천식, COPD 및 조기 사망을 건강상 악영향 발현 종말점(End point)으로 정의하고, 이에 대한 역학적 조사 연구 결과로부터 각 종말 영향의 단위 위해도를 도출하여 미세먼지 노출에 의한 건강 위해도가 산출될 수 있도록 하였다.

PM<sub>10</sub>과 PM<sub>2.5</sub> 농도 증가(10 µg/m<sup>3</sup>)에 의한 천식 환자의 응급실 경우 입원율과 COPD 환자의 응급실 경우 입원율은 PM<sub>10</sub>의 경우 각각 0.77%, 1.02%, PM<sub>2.5</sub>의 경우 각각 1.55%, 2.08%로 보고되었다(NHIS, 2018). 본 연구에서 질병 조기 사망률은 Bae (2014)의 연구

**Table 1.** Emergency visit rate and unit death rate for particulate matter.

PM	Health effects	Unit risk (%/µg/m <sup>3</sup> )	Reference
PM <sub>10</sub>	HEAP rate*	0.077	NHIS, 2018***
	HECP rate**	0.102	NHIS, 2018***
	Acute unit death rate	0.044	Bae, 2014
PM <sub>2.5</sub>	HEAP rate*	0.155	NHIS, 2018***
	HECP rate**	0.208	NHIS, 2018***
	Acute unit death rate	0.095	Bae, 2014

\*HEAP: Hospitalization via emergency room in asthma patient

\*\*HECP: Hospitalization via emergency room in COPD patient

\*\*\*NHIS: National Health Insurance Service Ilsan Hospital

결과를 근거로 PM<sub>10</sub>과 PM<sub>2.5</sub> 각각 0.44% per 10 µg/m<sup>3</sup>, 0.95% per 10 µg/m<sup>3</sup>을 적용하였다(표 1).

천식 및 COPD 환자의 응급실 경우 입원 위해도의 경우, 응급실 경우 입원율에 PM<sub>10</sub>과 PM<sub>2.5</sub>의 일일 최대 농도를 곱하여 산출하였으며, 질병 조기 사망 위해도의 경우 질병 조기 사망률에 본 연구 대상 기간의 PM<sub>10</sub>과 PM<sub>2.5</sub>의 평균 농도를 곱하여 산출하였다.

Hospitalization via emergency room risk (%)

$$= \text{Concentration}_{\max} (\mu\text{g}/\text{m}^3) \times \text{Visit rate} (\%/10 \mu\text{g}/\text{m}^3)$$

Disease death risk (%)

$$= \text{Concentration} (\mu\text{g}/\text{m}^3) \times \text{Unit death rate} (\%/10 \mu\text{g}/\text{m}^3)$$

## 2.4 오염물질의 평균 농도 차이 검정

계절관리제 시행으로 인한 대상 기간별 오염물질의 평균 농도 차이 검정을 위해 SPSS (Ver. 23) 통계패키지를 이용하여 모수통계 검정인 일원배치 분산분석

(one-way Analysis of Variance, ANOVA)을 수행하였으며, 통계적 유의수준(α)은 0.05로 설정하였다.

## 3. 결과 및 고찰

### 3.1 계절관리제 시행에 따른 오염물질 농도 변화

지역별 대상 기간의 오염물질별 농도 변화를 요약하면 표 2와 같다. 당진의 PM<sub>10</sub>, PM<sub>2.5</sub> 평균 농도가 가장 높은 것으로 조사되었는데, 이는 충남지역에 석탄 화력발전소를 포함하여 현대제철, 대산석유화학단지 등 대형 배출시설이 다수 분포하고 있어 대기오염 문제가 대두되고 있으며, 당진제철소의 생산 공정인 고로, 제강, 소성, 소결 등에서 발생한 낙광탄이 바람에 의하여 비산되어 당진제철소 주변 지역에 영향을 준 것으로 판단된다(Lee and Park, 2019). 또한, 당진의 경우 내륙과 연결되어 좁은 면적에 제철소, 산업단지,

**Table 2.** The concentration of pollutants during the seasonal management.

Pollutants	Area	Mean ± S.D. (N)			p-value
		BS	S1	S2	
PM <sub>10</sub> (µg/m <sup>3</sup> )	Seoul	58 ± 30 (3,025)	43 ± 17 (3,044)	48 ± 33 (3,021)	0.000
	Dangjin	72 ± 38 (235)	54 ± 21 (238)	66 ± 52 (242)	0.007
	Ulsan	44 ± 19 (1,929)	32 ± 13 (1,999)	39 ± 39 (2,178)	0.000
PM <sub>2.5</sub> (µg/m <sup>3</sup> )	Seoul	35 ± 23 (3,025)	28 ± 14 (3,043)	27 ± 17 (3,025)	0.000
	Dangjin	43 ± 28 (235)	33 ± 17 (238)	32 ± 20 (242)	0.000
	Ulsan	25 ± 14 (1,891)	19 ± 9 (1,999)	19 ± 11 (2,146)	0.000
O <sub>3</sub> (ppm)	Seoul	0.017 ± 0.010 (3,011)	0.017 ± 0.009 (3,037)	0.019 ± 0.009 (3,013)	0.000
	Dangjin	0.026 ± 0.011 (242)	0.026 ± 0.011 (244)	0.031 ± 0.011 (242)	0.000
	Ulsan	0.029 ± 0.010 (1,929)	0.027 ± 0.010 (1,995)	0.030 ± 0.010 (2,178)	0.000
NO <sub>2</sub> (ppm)	Seoul	0.036 ± 0.014 (3,021)	0.032 ± 0.012 (3,030)	0.031 ± 0.013 (3,022)	0.000
	Dangjin	0.020 ± 0.008 (242)	0.018 ± 0.007 (244)	0.018 ± 0.007 (242)	0.045
	Ulsan	0.023 ± 0.008 (1,929)	0.021 ± 0.008 (1,994)	0.021 ± 0.009 (2,178)	0.000
CO (ppm)	Seoul	0.7 ± 0.2 (2,999)	0.6 ± 0.2 (3,037)	0.6 ± 0.2 (2,994)	0.000
	Dangjin	0.8 ± 0.3 (242)	0.6 ± 0.2 (244)	0.5 ± 0.2 (242)	0.000
	Ulsan	0.6 ± 0.2 (1,929)	0.5 ± 0.2 (1,999)	0.5 ± 0.1 (2,178)	0.000
SO <sub>2</sub> (ppm)	Seoul	0.005 ± 0.001 (3,022)	0.003 ± 0.001 (3,040)	0.004 ± 0.001 (2,973)	0.000
	Dangjin	0.008 ± 0.005 (242)	0.005 ± 0.004 (244)	0.005 ± 0.003 (242)	0.000
	Ulsan	0.004 ± 0.002 (1,929)	0.004 ± 0.002 (1,999)	0.003 ± 0.002 (2,178)	0.000

발전소 및 도로오염원이 밀집되어 있고 (Kim *et al.*, 2020), 차량산맥이 가로막고 있어 충남지역의 주풍인 서풍이나 북서풍이 유입될 때 오염물질이 풍하지역으로 희석·확산되지 못하고 국지적인 고농도를 발생시키는 것으로 보고되고 있기 때문에 당진에서 미세먼지 고농도 현상이 발생하는 것으로 판단된다 (Son *et al.*, 2020b).

서울의 경우 PM<sub>10</sub> 농도는 BS 기간  $58 \pm 30 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 에서 S1 기간에는  $43 \pm 17 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 으로 27% 감소하였으며, S2 기간에는  $48 \pm 33 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 으로 16% 감소하였다. PM<sub>2.5</sub> 농도의 경우 BS 기간  $35 \pm 23 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 에서 S1 기간에는  $28 \pm 14 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 으로 21% 감소하였으며, S2 기간에는  $27 \pm 17 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 으로 22% 감소하였다. 당진의 경우 PM<sub>10</sub> 농도는 BS 기간  $72 \pm 38 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 에서 S1 기간에는  $54 \pm 21 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 으로 24% 감소하였으며, S2 기간에는  $66 \pm 52 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 으로 BS 기간 대비 7% 감소하였다. PM<sub>2.5</sub> 농도의 경우 BS 기간  $43 \pm 28 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 에서 S1 기간  $33 \pm 17 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 으로 22% 감소하였으며, S2 기간에는  $32 \pm 20 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 으로 24% 감소하였다. 울산의 경우 PM<sub>10</sub> 농도는 BS 기간  $44 \pm 19 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 에서 S1 기간에는  $32 \pm 13 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 으로 26% 감소하였으며, S2 기간에는  $39 \pm 39 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 으로 11% 감소하였다. PM<sub>2.5</sub> 농도의 경우 BS 기간  $25 \pm 14 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 에서 S1 기간에는  $19 \pm 9 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 으로 26% 감소하였으며, S2 기간에는  $19 \pm 11 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 으로 24% 감소하였다.

BS, S1, S2 기간에 대한 오염물질 6종 (PM<sub>10</sub>, PM<sub>2.5</sub>, SO<sub>2</sub>, CO, NO<sub>2</sub>, O<sub>3</sub>)의 농도 차이는 대상 기간 동안 모두 통계적으로 유의한 것으로 평가되었다 ( $p < 0.05$ ). 이는 계절관리제 시행이 대기 중 오염물질 농도 저감에 영향을 끼친 것을 시사한다. Bae *et al.* (2022) 연구에 따르면 국내 PM<sub>2.5</sub> 농도는 1차, 2차, 3차 계절관리제 기간 동안 시행 전인 2018년의 동기간 대비  $8.7 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ,  $9.1 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ,  $10.1 \mu\text{g}/\text{m}^3$  (26~30%) 감소한 것으로 조사되었으며, Son *et al.* (2020a)에 따르면 1차 계절관리제 기간 동안 2016~2018년의 동기간 대비  $6.8 \mu\text{g}/\text{m}^3$  (21.8%) 감소한 것으로 조사되어 본 연구 결과와 일치하였다. 또한, PM<sub>2.5</sub>의 경우 3년 동안 농도가 꾸준

히 감소한 것으로 조사되었다. 주로 PM<sub>2.5</sub> 고농도 현상은 PM<sub>10</sub>과 달리 도시나 공업지대로부터 연료 연소, 자동차 배기가스 등 인위적으로 발생하며 (Han *et al.*, 2022), SO<sub>2</sub>와 NO<sub>2</sub>는 PM<sub>2.5</sub>의 전구체라는 관점에서 이것들의 배출량 감소는 PM<sub>2.5</sub>의 농도 개선과 관련이 있는 것 (Kang and Kim, 2022)으로 비추어 볼 때 연구 대상 지역에서의 PM<sub>2.5</sub> 감소는 계절관리제 시행에 따른 국내 오염물질 배출량 저감으로 인한 결과로 판단된다. 그러나 본 연구는 COVID-19에 의한 사회적 거리두기 효과와 에너지 수요량 감소, 장거리 이동을 통한 국외 유입 영향 등 정책 이외의 요인은 고려하지 않고, 농도 변화를 계절관리제 효과로만 한정하였으므로 평가에 불확실성이 존재한다고 판단된다. 이와 같은 한계성을 극복하고자 계절관리제 시행 이전과 이후의 평가 기간을 COVID-19가 유행하고 있는 기간으로 설정함으로써 COVID-19로 인해 발생하는 여러 혼란적 요소를 통제하고자 노력함으로써 본 연구를 통해 획득된 계절관리제의 시행에 따른 개선 효과의 산출 결과는 의의가 있는 결과라 사료된다. 따라서 향후 오염물질 감소에 대한 계절관리제의 정량적·정성적 효과를 분석하는 연구가 추가적으로 필요하다고 판단된다.

### 3.2 통합대기환경지수 산출 결과

지역별 대상 기간의 CAI 산출 결과는 표 3과 그림 1

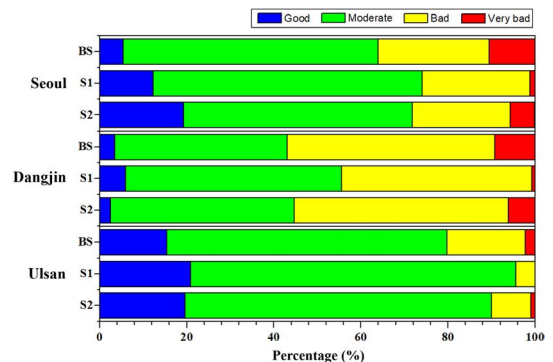


Fig. 1. Percentage of comprehensive air-quality index by region.

**Table 3.** The CAI of pollutants during the seasonal management.

Area	Period	Good		Moderate		Bad		Very bad	
		N	%	N	%	N	%	N	%
Seoul	BS	161	5.4	1,761	58.5	767	25.5	320	10.6
	S1	368	12.2	1,869	61.8	751	24.8	36	1.2
	S2	579	19.2	1,583	52.6	677	22.5	170	5.6
Dangjin	BS	8	3.4	93	39.6	112	47.7	22	9.4
	S1	14	5.9	118	49.6	102	43.7	2	0.8
	S2	6	2.5	102	42.1	119	49.2	15	6.2
Ulsan	BS	292	15.4	1,215	64.3	341	18.0	43	2.3
	S1	416	20.9	1,485	74.6	89	4.5	0	0.0
	S2	420	19.6	1,509	70.3	196	9.1	21	1.0

과 같다. 서울의 경우 ‘ 좋음 ’이 BS 기간에 161일(5.4%)에서 S1 기간에 368일(12.2%)로 약 7%p 증가하였고 S2 기간에 579일(19.2%)로 약 14%p 증가한 것으로 나타났다. ‘ 매우 나쁨 ’의 경우 BS 기간에 320일(10.6%)에서 S1 기간에 36일(3.6%)로 약 9%p 감소하였고, S2 기간에 170일(5.6%)로 약 5%p 감소하였다. 당진의 경우 ‘ 좋음 ’이 8일(3.4%)인 BS 기간 대비 S1 기간에 14일(5.8%)로 2.4%p 증가하였으며, S2 기간에 6일(2.5%)로 0.9%p 감소하였다. ‘ 매우 나쁨 ’의 경우 22일(9.4%)인 BS 기간 대비 S1과 S2 기간에 각 2일(0.8%), 15일(6.2%)로 8.6%p, 3.2%p 감소하였다. 울산의 경우 ‘ 좋음 ’이 BS 기간에 292일(15.4%)에서 S1 기간에 416일(20.9%)로 5.5%p 증가하였고 S2 기간에 420일(19.6%)로 4.1%p 증가하였다. ‘ 매우 나쁨 ’의 경우 BS 기간에 43일(2.3%)이었으며, S1 기간에는 단 하루도 없었고 S2 기간에는 21일(1.0%)로 1.3%p 감소한 것으로 나타났다.

당진의 경우 서울과 울산 대비 ‘ 나쁨 ’ 일 수 비율이 가장 높은 것으로 조사되었는데, 이는 앞서 언급한 바와 같이 당진에는 대기오염물질을 유발하는 대규모 배출시설이 좁은 면적에 밀집되어 있고(Kim *et al.*, 2020), 산맥으로 가로막혀 있어 오염물질이 확산되지 못하고 국지적인 고농도를 발생시키는 것이 영향을 끼쳐 다른 지역과 달리 ‘ 나쁨 ’ 비율이 높게 조사된 것으로 판단된다(Son *et al.*, 2020b). 그러나 당진의 경우

도시대기측정망이 2개소(당진시청사, 송산면)뿐으로 서울과 울산에 비해 측정지점이 매우 적기 때문에 해당 결과가 당진시 전체의 대기질을 반영하기에는 어려움이 있으므로 추가 조사가 필요하다고 판단된다.

본 결과를 통해 전반적으로 1차, 2차 계절관리제 시행으로 인해 국내 오염물질의 농도가 개선된 것을 확인할 수 있었고, 이러한 결과에 따르면 계절관리제는 서울뿐 아니라 당진과 울산 같은 산업단지 및 배출 시설 등이 밀집되어 있는 지역에도 긍정적인 영향을 끼친 것으로 조사되었다. 그러나 세 지역 모두 S1 기간에 비해 S2 기간에서 ‘ 좋음 ’과 ‘ 보통 ’의 비율은 감소하였고, ‘ 나쁨 ’과 ‘ 매우 나쁨 ’의 비율은 증가하는 모습을 보였다. S1 기간에 ‘ 좋음 ’과 ‘ 보통 ’ 비율이 더 높은 이유는 2019년에 시작된 COVID-19의 유행으로 인해 2020년 2~3월 동안 동북아 지역에서의 사회경제 활동의 규모 축소에 따른 배출 감소가 현저한 반면, S2 기간인 2020년 12월은 COVID-19의 재확산으로 사회적 거리두기는 강화되었지만 중국에서는 S1 기간에 비해 엄격한 규제가 시행되지 않아 S1 기간이 S2 기간보다 ‘ 좋음 ’과 ‘ 보통 ’ 비율이 더 높게 나타난 것으로 사료된다.

### 3.3 미세먼지 건강 영향 평가

계절관리제 시행에 따른 PM<sub>10</sub>과 PM<sub>2.5</sub>의 건강 위험도 산출 결과는 다음 표 4와 같다. 서울 PM<sub>10</sub> 천식

**Table 4.** The results of risk assessment.

Area	Period	Risk (%)							
		PM <sub>10</sub>				PM <sub>2.5</sub>			
		HEAP*	HECP**	Disease death		HEAP*	HECP**	Disease death	
				Mean	Max			Mean	Max
Seoul	BS	18.08	36.40	2.55	10.03	23.96	34.74	3.32	14.54
	S1	6.41	12.90	1.87	6.16	5.59	11.40	2.61	8.27
	S2	7.62	15.34	2.13	14.21	5.94	12.11	2.59	9.50
Dangjin	BS	8.96	11.87	3.16	9.46	10.96	14.70	4.05	13.87
	S1	6.82	9.03	2.38	5.46	8.30	11.14	3.14	9.79
	S2	8.22	10.89	2.92	23.23	8.66	11.62	3.07	10.26
Ulsan	BS	5.26	6.97	1.92	5.28	6.39	8.58	2.38	7.32
	S1	4.05	5.37	1.42	3.61	4.94	6.63	1.77	5.42
	S2	5.11	6.77	1.71	21.34	5.20	6.98	1.81	9.12

\*HEAP: Hospitalization via emergency room in asthma patient

\*\*HECP: Hospitalization via emergency room in COPD patient

환자의 응급실 경우 입원 위해도의 경우 BS 기간 18.08%에서 S1 기간에는 6.41%로 11.68%p 감소하였으며, S2 기간에는 7.62%로 10.46%p 감소하였다. 서울 PM<sub>10</sub> COPD 환자의 응급실 경우 입원 위해도의 경우 BS 기간 36.40%에서 S1 기간에는 12.90%로 23.51%p 감소하였으며, S2 기간에는 15.34%로 21.06%p 감소하였다. 당진 PM<sub>10</sub> 천식 환자의 응급실 경우 입원 위해도의 경우 BS 기간 8.96%에서 S1 기간에는 6.82%로 2.15%p 감소하였으며, S2 기간에는 8.22%로 0.74%p 감소하였다. 당진 PM<sub>10</sub> COPD 환자의 응급실 경우 입원 위해도의 경우 BS 기간 11.87%에서 S1 기간에는 9.03%로 2.84%p 감소하였으며, S2 기간에는 10.89%로 0.98%p 감소하였다. 울산 PM<sub>10</sub> 천식 환자의 응급실 경우 입원 위해도의 경우 BS 기간 5.26%에서 S1 기간에는 4.05%로 1.21%p 감소하였으며, S2 기간에는 5.11%로 0.15%p 감소하였다. 울산 PM<sub>10</sub> COPD 환자의 응급실 경우 입원 위해도의 경우 BS 기간 6.97%에서 S1 기간에는 5.37%로 1.60%p 감소하였으며, S2 기간에는 6.77%로 0.20%p 감소하였다.

서울 PM<sub>2.5</sub> 천식 환자의 응급실 경우 입원 위해도의 경우 BS 기간 23.96%에서 S1 기간에는 5.59%로 18.37%p 감소하였으며, S2 기간에는 5.94%로 18.02%p

감소하였다. 서울 PM<sub>2.5</sub> COPD 환자의 응급실 경우 입원 위해도의 경우 BS 기간 34.74%에서 S1 기간에는 11.40%로 23.34%p 감소하였으며, S2 기간에는 12.11%로 22.63%p 감소하였다. 당진 PM<sub>2.5</sub> 천식 환자의 응급실 경우 입원 위해도의 경우 BS 기간 10.96%에서 S1 기간에는 8.30%로 2.65%p 감소하였으며, S2 기간에는 8.66%로 2.30%p 감소하였다. 당진 PM<sub>2.5</sub> COPD 환자의 응급실 경우 입원 위해도의 경우 BS 기간 14.70%에서 S1 기간에는 11.14%로 3.56%p 감소하였으며, S2 기간에는 11.62%로 3.08%p 감소하였다. 울산 PM<sub>2.5</sub> 천식 환자의 응급실 경우 입원 위해도의 경우 6.39%에서 S1 기간에는 4.94%로 1.45%p 감소하였으며, S2 기간에는 5.20%로 1.19%p 감소하였다. 울산 PM<sub>2.5</sub> COPD 환자의 응급실 경우 입원 위해도의 경우 BS 기간 8.58%에서 S1 기간에는 6.63%로 1.95%p 감소하였으며, S2 기간에는 6.98%로 1.60%p 감소하였다.

서울 PM<sub>10</sub>의 급성 질병 조기 사망에 대한 평균~최대 위해도는 BS 기간에 2.55~10.03%, S1 기간에 1.87~6.16%, S2 기간에 2.13~14.21%였으며, PM<sub>2.5</sub>의 경우 BS 기간에 3.32~14.54%, S1 기간에 2.61~8.27%, S2 기간에 2.59~9.50%로 조사되었다. 당진 PM<sub>10</sub>의 급성 질병 조기 사망에 대한 평균~최대 위해도는 BS 기간에

3.16~9.46%, S1 기간에 2.38~5.46%, S2 기간에 2.92~23.23%였으며, PM<sub>2.5</sub>의 경우 BS 기간에 4.05~13.87%, S1 기간에 3.14~9.79%, S2 기간에 3.07~10.26%로 조사되었다. 울산 PM<sub>10</sub>의 급성 질병 조기 사망에 대한 평균~최대 위해도는 BS 기간에 1.92~5.28%, S1 기간에 1.42~3.61%, S2 기간에 1.71~21.34%였으며, PM<sub>2.5</sub>의 경우 BS 기간에 2.38~7.32%, S1 기간에 1.77~5.42%, S2 기간에 1.81~9.12%로 조사되었다.

미세먼지 건강 위해도 산출 결과 계절관리제 시행으로 세 지역 모두 미세먼지 노출에 따른 위해도가 감소한 것으로 조사되었다. 세 지역 중 당진에서 미세먼지 건강 위해도가 가장 높은 것으로 조사되었는데, 이는 당진의 지리적 특성으로 인한 미세먼지의 고농도 현상에 의해 다른 두 지역보다 건강 위해도가 높게 나타난 것으로 판단된다. 본 연구는 계절관리제 시행 전후의 노출량 변화에 따른 건강 위해도(응급실 경우 입원율 등) 전후의 변화를 계절관리제의 효과로 검토하고자 하였으며, 계절관리제 전후 노출 양상의 변화가 없이 노출량(미세먼지 노출)의 저감이 건강 영향에 대한 정량적 영향을 살펴보고자 하였다. 이에 타 노출에 따른 영향을 통제하고 단위 위해도와 노출량의 곱을 통한 건강 위해도 산출 평가 방법을 적용하여 결과를 도출하였으며, 본 연구에 부합한 단위 위해도 선정 시 한 가지 문헌에서 보고된 값을 사용하였기 때문에 건강 위해도 산출에 불확실성이 존재하다고 판단된다. 또한, 본 연구에서의 천식 및 COPD 환자의 응급실 경우 입원 위해도와 급성 질병 조기 사망 위해도 산출 시 위해도 감소의 원인을 기존 선천적 호흡기 질환자 또는 흡연자와 같은 다양한 질병의 원인에 의한 요인을 고려하지 않고 미세먼지 계절관리제 시행으로 인한 효과로 한정하였다는 데에 한계점이 존재한다고 판단된다. 따라서 향후 추가적인 계절관리제 시행 기간에 대한 분석을 통해 미세먼지 노출을 고려한 건강 영향 평가 연구 수행이 필요하다고 판단된다.

그러나 본 연구 결과는 계절관리제 시행을 통한 미세먼지 노출에 따른 건강 영향 저감 효과를 수치화하여 나타내었으며, 이는 계절관리제 시행에 따른 개선

효과를 건강의 측면에서 정량적으로 제시하였다는 데에 의미가 있다고 판단된다. 또한, 향후 비용-편익 분석(Cost-Benefit Analysis; CBA)을 수행한다면 계절관리제 시행을 통한 미세먼지의 건강 영향 감소에 대한 경제적 이익을 평가할 수 있으며, 본 연구는 향후 비용-편익 분석의 기초적 자료로 활용될 수 있을 것으로 기대된다.

#### 4. 결 론

본 연구는 서울, 당진, 울산을 대상으로 세 지역의 도시대기측정망 자료를 활용하여 계절관리제가 시행되지 않은 기간과 1차, 2차 계절관리제 시행 동안의 지역별 계절관리제 시행에 따른 대기질 개선 효과를 정량적으로 평가하고자 통합대기환경지수를 산출하여 비교하였으며, 천식 및 COPD 환자의 응급실 경우 입원율, 질병 조기 사망률을 이용하여 미세먼지 건강 위해성 평가를 수행함으로써 계절관리제에 따른 미세먼지 건강 위해 저감 효과를 제시하였다.

연구 대상 지역의 계절관리제 시행에 따른 통합대기환경지수 산출 결과, 세 지역 모두 계절관리제 시행 이후 ‘ 좋음’과 ‘ 보통’ 일 수는 증가하였으며, ‘ 나쁨’과 ‘ 매우 나쁨’ 일 수는 감소한 것으로 조사되어 계절관리제 시행으로 인해 대기질 개선 효과가 있는 것으로 판단된다.

PM<sub>10</sub>과 PM<sub>2.5</sub>의 건강 위해도 산출 결과, 본 연구에서 조사된 계절관리제 시행으로 인한 천식, COPD 환자의 응급실 경우 입원 위해도와 급성 질병 조기 사망 위해도는 세 지역 모두 감소한 것으로 조사되었다.

계절관리제 시행을 통해 미세먼지의 농도가 저감된 것을 확인할 수 있었으며, 미세먼지 농도가 저감됨에 따라 미세먼지 노출에 따른 건강 위해도 역시 저감된 것을 확인할 수 있었다. 이로 인해 계절관리제 시행에 따른 국민의 건강 영향에 대한 정책적 효과가 있는 것으로 사료된다. 본 연구는 연구 대상 지역들의 물질 농도 변화의 원인을 계절관리제로 한정하였다는 데에



한계가 있으나 계절관리제의 효과에 따른 국민의 건강 영향을 평가한 첫 연구로서의 의미가 있으며, 국내 대기질 관리 정책의 기초자료로 활용될 수 있을 것으로 기대된다.

## 감사의 글

본 논문은 환경부의 재원으로 국립환경과학원의 지원을 받아 수행하였습니다(NIER-2022-03-00-008).

## References

- Andersen, Z.-J., Bønnelykke, K., Hvidberg, M., Jensen, S.-S., Ketzel, M., Loft, S., Sørensen, M., Tjønneland, A., Overvad, K., Raaschou-Nielsen, O. (2011) Long-term exposure to air pollution and asthma hospitalisations in older adults: a cohort study, *Thorax*, 67(1), 6-11. <https://doi.org/10.1136/thoraxjnl-2011-200711>
- Bae, H.-J. (2014) Effects of Short-term Exposure to PM<sub>10</sub> and PM<sub>2.5</sub> on Mortality in Seoul, *Journal of Korean Society Environmental Health*, 40(5), 346-354, (in Korean with English abstract). <https://doi.org/10.5668/JEHS.2014.40.5.346>
- Bae, M.-A., Kim, S.-G., Kim, S.-T. (2022) Quantitative Evaluation on the Drivers of PM<sub>2.5</sub> Concentration Change in South Korea during the 1<sup>st</sup>-3<sup>rd</sup> Seasonal PM<sub>2.5</sub> Management Periods, *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment*, 38(4), 610-623, (in Korean with English abstract). <https://doi.org/10.5572/KOSAE.2022.38.4.610>
- Bae, M.-A., Yoo, C., Kim, S.T. (2020) Estimating the Shutdown Effects of the Old Coal-fired PowerPlants on PM<sub>2.5</sub> and its Composition, *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment*, 36(1), 48-63, (in Korean with English abstract). <https://doi.org/10.5572/KOSAE.2020.36.1.048377>
- Han, S.-B., Song, S.-K., Moon, S.-H. (2022) Concentration Characteristics of PM<sub>2.5</sub> and the Contributions of Physical and Chemical Process to its Production during 2019 PM<sub>2.5</sub> Episodes in Seoul, *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment*, 38(2), 220-336, (in Korean with English abstract). <https://doi.org/10.5572/KOSAE.2022.38.2.220>
- Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) (1995) *Climate Change 1994: The Scientific Radiative Forcing of Climate Change and an Evaluation of the IPCC IS92 Emission Scenarios*, Cambridge University Press, New York, USA.
- Kang, Y.-H., Kim, S.-T. (2022) Seasonal PM Management: (1) What Emissions Should be Reduced?, *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment*, 38(5), 746-763, (in Korean with English abstract). <https://doi.org/10.5572/KOSAE.2022.38.5.746>
- Kelly, V.-R., Lovett, G.-M., Weathers, K.-C., Likens, G.-E. (2002) Trends in atmospheric concentration and deposition compared to regional and local pollutant emissions at a rural site in southeastern New York, USA, *Atmospheric Environment*, 36(10), 1569-1575.
- Kim, B.-K., Won, H.-H. (2021) Analysis of Changes in Power Generation of Each Power Generation Company by the Fine-Dust Seasonal Management System, *Environmental and Resource Economics Review*, 30(4), 627-648.
- Kim, B.-U., Bae, C., Kim, H.-C., Kim, E., Kim, S. (2017) Spatially and chemically resolved source apportionment analysis: Case study of high particulate matter event, *Atmospheric Environment*, 162, 55-70. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2017.05.006>
- Kim, J.-B., Yoon, S.-H., Lee, S.-S., Kim, K.-H., Noh, S.-J., Bae, G.-N. (2020) Spatial and Temporal Distributions of PM<sub>10</sub> and PM<sub>2.5</sub> Concentrations in Chungcheongnam-do, *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment*, 36(4), 464-481, (in Korean with English abstract). <https://doi.org/10.5572/KOSAE.2020.36.4.464>
- Kim, K.-R. (2021) An Establishment of Health Risk for Passengers according to Exposure on Particulate Matters of Subway, (Doctoral dissertation), University of Seoul.
- Kim, Y.-H., Kim, E.-H., Kang, Y.-H., You, S.-H., Bae, M.-A., Son, K.-W., Kim, S.-T. (2021) Impact of Diesel Vehicle Emissions on PM<sub>2.5</sub> Concentrations in Seoul Metropolitan Area during the Seasonal PM<sub>2.5</sub> Management, *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment*, 37(1), 169-190.
- Korea Environment Corporation (KECO) (2022) Clean SYS. <https://cleansys.or.kr/index.do#none>
- Lee, B.-J., Park, S.-S. (2019) Temporal and Spatial Variabilities of Concentrations of Criteria Air Pollutants during Early Summer in 2018 in South Chungcheong Province, *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment*, 35(2), 265-281, (in Korean with English abstract). <https://doi.org/10.5572/KOSAE.2019.35.2.265>
- MacNee, W., Donaldson, K. (2000) Exacerbations of COPD: Envi-

- ronmental Mechanisms, *Chest*, 117(5), 390S-397S. [https://doi-org-ssl.ymlproxy.yonsei.ac.kr/10.1378/chest.117.5\\_suppl\\_2.390S](https://doi-org-ssl.ymlproxy.yonsei.ac.kr/10.1378/chest.117.5_suppl_2.390S)
- Meng, Y.-Y., Rull, R.-P., Wilhelm, M., Lombardi, C., Balmes, J., Ritz, B. (2009) Outdoor air pollution and uncontrolled asthma in the San Joaquin Valley, California, *Journal of Epidemiology & Community Health*, 64(2), 142-147. <https://doi.org/10.1136/jech.2009.083576>
- Ministry of Environment (MOE) (2020) <https://me.go.kr/> (Accessed on July 26, 2022).
- Ministry of Environment (MOE) (2022) <https://me.go.kr/> (Accessed on Jun 2, 2022).
- Moon, K.-J., Park, S.-M., Park, J.-S., Song, I.-H., Jang S.-K., Kim, J.-C., Lee, S.-J. (2011) Chemical Characteristics and Source Apportionment of PM<sub>2.5</sub> in Seoul Metropolitan Area in 2010, *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment*, 27(6), 711-722, (in Korean with English abstract). <https://doi.org/10.5572/KOSAE.2011.27.6.711>
- National Health Insurance Service Ilsan Hospital (NHIS) (2018) Analysis of Medical Use and Mortality Effects in Respiratory Diseases using Fine Dust and Ultrafine Dust Measurement Data and National Health Insurance Claim Data.
- National Research Council (NRC) (1993) Protecting Visibility in National Parks and Wilderness Areas, Committee on Haze in National Parks and Wilderness Areas, National Academy Press, Washington, D.C., USA.
- Organisation for Economic Co-operation and Development (OECD) (2016) The Economic Consequences of Outdoor Air Pollution, OECD Publishing, Paris. <https://doi.org/10.1787/9789264257474-en>
- Schikowski, T., Sugiri, D., Rantf, U., Gegering, U., Heinrich, J., Wichmann, H.-R., Kramer, U. (2005) Long-term air pollution exposure and living close to busy roads are associated with COPD in women, *Respiratory Research*, 6(1), 1-10. <https://doi.org/10.1186/1465-9921-6-152>
- Son, K.-W., Bae, M.-A., You, S.-H., Kim, E.-H., Kang, Y.-H., Bae, C.-H., Kim, Y.-H., Kim, H.-C., Kim, B.-U., Kim, S.-T. (2020a) Meteorological and Emission Influences on PM<sub>2.5</sub> Concentration in South Korea during the Seasonal Management: A Case of December 2019 to March 2020, *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment*, 36(4), 442-463, (in Korean with English abstract). <https://doi.org/10.5572/KOSAE.2020.36.4.442>
- Son, S.-C., Park, S.-S., Bae, M.-A., Kim, S.-T. (2020b) A Study on Characteristics of High PM<sub>2.5</sub> Pollution Observed around Large-scale Stationary Sources in Chungcheongnam-do Province, *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment*, 36(5), 669-687, (in Korean with English abstract). <https://doi.org/10.5572/KOSAE.2020.36.5.669>
- U.S. EPA (1996) Criteria Document on Fine Particles, EPA/600/P-95/001CF, Washington D.C., USA.
- World Health Organization (WHO) (2021). WHO global air quality guidelines: particulate matter (PM<sub>2.5</sub> and PM<sub>10</sub>), ozone, nitrogen dioxide, sulfur dioxide and carbon monoxide. World Health Organization. <https://apps.who.int/iris/handle/10665/345329>. License: CC BY-NC-SA 3.0 IGO
- Yoo, B.-H. (2010) The Influence of Air Pollution Level on Resident's Evaluation and Cognition for Indoor Environment in Ulsan, *Journal of the Korean Housing Association*, 21(3), 87-94, (in Korean with English abstract). <https://doi.org/10.6107/JKHA.2010.21.3.087>
- Yoon, D.-K., Namgoung, S.-J., Kong, H.-K., Hong, H.-J., Lim, H.-B., Park, S.-H., Lee, H.-W., Lee, J.-S., Lee, C.-M. (2019) Assessment of Exposure to and Risk of Formaldehyde and Particulate Matter (PM<sub>10</sub> and PM<sub>2.5</sub>) by Time Activity Applying Real-Time Indoor and Outdoor Monitoring, *Journal of Korean Society Environmental Health*, 45(6), 646-657, (in Korean with English abstract). <https://doi.org/10.5668/JEHS.2019.45.6.646>

## Authors Information

전정인 (서경대학교 환경화학공학과 박사과정)  
(hhzz01@skuniv.ac.kr)

최지원 (서경대학교 환경화학공학과 석사)  
(cjw101304@naver.com)

박신영 (서경대학교 환경화학공학과 박사과정)  
(tldud060900@skuniv.ac.kr)

이혜원 ((주)환경보건연구소 이사)  
(gpdnsis@naver.com)

남은정 (국립환경과학원 대기환경연구과 연구원)  
(eunjunge@korea.kr)

이철민 (서경대학교 환경화학공학과 교수)  
(cheolmin@skuniv.ac.kr)