

## 실내·외 실시간 모니터링을 활용한 폼알데하이드 및 미세먼지(PM<sub>10</sub>, PM<sub>2.5</sub>)의 거주시간별 노출 및 위해도 평가

윤단기\* · 남궁선주\*\*\* · 공혜관\* · 홍형진\* · 임희빈\*\* ·  
박시현\*\*\* · 이혜원\*\*\* · 이정섭\*\*\*\* · 이철민\*\*†

\*서경대학교 나노생명공학과, \*\*서경대학교 화학생명공학과, \*\*\*서경대학교 위해성평가 연구소,  
\*\*\*\*국립환경과학원 환경기반연구부 생활환경연구과

### 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

Danki Yoon\*, Sunju Namgoung\*\*\*, Hyekwan Kong\*, Hyungjin Hong\*, Huibeen Lim\*\*,  
Sihyun Park\*\*\*, Hyewon Lee\*\*\*, Jungsub Lee\*\*\*\*, and Cheolmin Lee\*\*†

\*Department of Nano and Biological Engineering, Seokyeong University

\*\*Department of Chemical and Biological Engineering, Seokyeong University

\*\*\*Institute of Risk Assessment, Seokyeong University

\*\*\*\* Indoor Environment and Noise Research Division, National Institute of Environment Research

#### ABSTRACT

**Objectives:** The purpose of this study was to suggest methods to investigate continuous monitoring of concentration levels and assess the exposure of individuals considering the actual time activity of residents for formaldehyde and particulate matter (PM<sub>10</sub>, PM<sub>2.5</sub>) in the indoor and outdoor air of a house, assess the health risks of children and adults based on the results of the exposure assessment, and provide basic data on studies for assessing exposure and health risks in Korea in the future.

**Methods:** The concentration levels of formaldehyde and particulate matter were measured in a family home in Gyeonggi-do Province from April 25 to July 31, 2019, using electrochemical sensors (formaldehyde) and light scattering sensors (PM<sub>10</sub>, PM<sub>2.5</sub>). Risk assessment by the duration of exposure by time activity was performed by dividing between weekdays and weekends, and indoors and outdoors.

**Results:** The greatest level of carcinogenic risk from inhaling formaldehyde was indoors during the weekdays for both children and adults. For children, the risk was at 7.5 per approximately 10,000 people, and for adults, the risk was at 4.1 per approximately 10,000 people. PM<sub>10</sub> and PM<sub>2.5</sub> also showed the greatest values indoors during the weekdays, with children at 1.7 people and 1.4 per approximately 100 people, respectively, and adults at 8.2 per approximately 1,000 and 1.8 per approximately 100 people, respectively.

**Conclusions:** The risks of formaldehyde, PM<sub>10</sub> and PM<sub>2.5</sub> were shown to be high indoors. Therefore, consideration of exposure assessment for each indoor pollutant and management of indoor air quality is necessary.

**Key words:** Formaldehyde, indoor air, particulate matter (PM<sub>10</sub>, PM<sub>2.5</sub>), risk assessment, time activity

†Corresponding author: Department of Chemical and Biological Engineering, Seokyeong University, 124, Seogyong-ro, Seongbuk-ku, Seoul, Republic of Korea, Tel: +82-02-940-2924, E-mail: cheolmin@skuniv.ac.kr

Received: 5 November 2019, Revised: 29 November 2019, Accepted: 29 November 2019

## I. 서 론

대기질은 우리의 건강과 환경에 다양한 영향을 미치는 것으로 알려져 있으며, 대기오염과 건강 및 삶의 질과의 연관성을 규명하기 위한 수많은 연구들이 수행되어져 오고 있다.<sup>1)</sup> 대기오염은 폐 기능 감소, 호흡기 및 심혈관 질환 악화, 천식 발병률의 증가와 같은 건강문제를 야기하며,<sup>2)</sup> 식생을 손상시키고,<sup>3)</sup> 세계기후상황에 영향을 미치는 등 우리 삶에 영향을 끼치는 것으로 알려져 있다.<sup>4)</sup>

국내 환경정책기본법에서 정하고 있는 대기환경기준물질은 미세먼지, 아황산가스(SO<sub>2</sub>), 일산화탄소(CO), 이산화질소(NO<sub>2</sub>), 오존(O<sub>3</sub>), 납(Pb), Benzene이며, 이중 미세먼지는 PM<sub>10</sub>과 PM<sub>2.5</sub>로 구분하여 나누어 관리하고 있다.<sup>5)</sup> 2013년부터 세계보건기구(World Health Organization, WHO) 산하 국제암연구소(International Agency for Research on Cancer, IARC)에서는 호흡기 및 피부로 침투가 가능해 심장 질환 등 인체에 심각한 피해를 끼칠 수 있는 미세먼지(PM<sub>10</sub>), 초미세먼지(PM<sub>2.5</sub>)를 석면 및 비소 등의 물질과 같은 등급인 1급 발암물질로 지정하였으며,<sup>6,7)</sup> 우리나라에서도 “미세먼지 관리 특별 대책”을 확정 발표하는 등 지속적인 관심과 연구를 진행해 오고 있다.<sup>8,9)</sup>

폼알데하이드는 공기 중의 메탄이나 다른 유기물이 햇빛에 반응하여 산화되어 발생하거나, 미생물에 의해 대사되어 환경 내에 자연적으로도 존재하게 된다.<sup>10,11)</sup> 폼알데하이드는 피혁제조사 사진건판, 폭약, 화장품, 살균제 등 여러 제조 산업에서 많이 쓰이기 때문에,<sup>11,12)</sup> 산업에서 중간물질이나 생성물로 생산된 폼알데하이드의 양은 자연적으로 발생하는 양보다 훨씬 많으며,<sup>13)</sup> 일반 환경에 노출되기 쉽다. 폼알데하이드의 노출은 피부접촉, 흡입, 섭취에 의해 일어날 수 있으며, 인체노출은 주로 활동공간의 흡입을 통해 이뤄지고 있으며,<sup>14,15)</sup> 폼알데하이드 노출 시 안구가려움증, 간지러움, 콧물, 코막힘, 두통 등의 증상이 나타나며 목이 건조해지거나 염증이 유발된다.<sup>16)</sup> 미국 EPA에 따르면 폼알데하이드 흡입 노출 시 B1 발암등급으로 지정되어있다.<sup>7,17)</sup> 이와 같이 폼알데하이드는 일상생활에서 비교적 쉽게 노출되고 주로 눈과 상기도자극과 상피세포 조직병리학적 변화를 일으키므로 폼알데하이드에 대한 노출 특성과 위해성

을 평가할 필요가 있다.<sup>18)</sup>

이와 같은 다양한 공기오염물질의 노출을 평가하기 위한 위해도 관리 측면에서 사람의 시간활동 양상은 핵심적인 부분이며, 특히 노출평가 및 예측모델에서 중요하게 적용될 수 있다.<sup>19,20)</sup> 세계보건기구는 유해 공기오염물질의 인구집단 노출에 대한 건강영향 평가 시 노출량 평가를 위한 모델링(modeling)이 주요 방법 중 하나이며, 시간활동양상은 노출 모델링을 적용할 때 필수적인 요인이라 보고하였다.<sup>6)</sup> 이런 중요성으로 미국의 TEAM (Total Exposure Assessment Methodology), NHEXAS (National Human Exposure Assessment Survey), 유럽 EXPOLIS에서 시간활동 양상에 관한 연구가 지속적으로 수행되고 있으나 국내에서는 일부 연구가 보고되고 있는 실정이다.<sup>21)</sup> 공기오염물질의 개인노출은 고정된 대기측정망에 의해 측정된 것 보다는 오히려 실내 및 실외 환경을 모두 고려한 농도에 의해 결정된다.<sup>22)</sup> 공기오염물질 노출에 의한 개인의 건강영향을 보다 정확히 분석하기 위해 개인의 하루 24시간의 활동양상에 따라 특정 오염물에 노출되는 양을 측정하는 연구가 필요하며,<sup>23)</sup> 실내농도와 시간활동 양상을 통해 개인노출을 예측할 수 있다고 보고되고 있다.<sup>24,25)</sup>

본 연구는 기존 실내·외 단기간 측정 및 개인의 노출 활동 양상이 고려되지 않은 국가 통계 결과를 활용한 건강위해성 평가와는 달리 실제 생활환경에서 지속적으로 농도 조사 및 대상 거주자들의 실제 시간활동 양상이 고려된 개인 노출평가 방법을 제안하였다. 노출평가 결과를 기초로 1군 발암물질로 분류된 PM<sub>10</sub>과 PM<sub>2.5</sub> 및 흡입 노출 시 B1 발암등급으로 분류되어있는 폼알데하이드를 대상으로 건강 위해성 평가를 수행하여 제시함으로써 향후 국내 노출평가 및 건강 위해성평가 연구에 기초적 자료를 제공하고 자 하는 목적으로 수행되었다.

## II. 재료 및 방법

### 1. 조사 방법

본 연구에서 사용된 실내·외 폼알데하이드 및 Particulate Matter (PM<sub>10</sub>, PM<sub>2.5</sub>)의 농도 측정기에 관한 정보는 Table 1에 나타나 있다. 폼알데하이드는 전기화학식 센서(SSGSM-HCHO, SENKO. Co. Ltd., Korea), PM<sub>10</sub> 및 PM<sub>2.5</sub>는 광산란법(dust sensor, sentry

Co. Ltd., Korea)을 이용하여 측정하였으며, 유량 0.5 L/min로 고정하여 분 단위로 24시간 측정하였다. 측정된 데이터는 LTE Cat M1을 통한 데이터 수신 및 측정기 자체의 SD Card에 저장된 데이터를 통해 분석을 실시하였다.

본 장비는 환경산업기술원의 생활공감 과제 “전생애 주기별 실내환경 노출량평가 및 환경 감시 예방 시스템 개발” 과제에서 사용하고 있는 장비로써, 국립환경과학원에서 등가성 평가를 수행하여 1등급을 받은 장비이다. 또한 한국화학융합시험연구원 재현성 검사를 수행하여 90% 이상의 효능을 보인 장비를 이용하여 측정을 진행하였다.

측정 장소는 일반 가정집 실내, 실외 공기 중 폼알데하이드 및 미세먼지 노출에 대한 거주자의 건강 위해성 평가로 경기도 부천시에 위치한 한 가정집을 대상으로 하였으며, 건강위해성 평가의 연구 대상은

거주자를 대상으로 하였다. 측정은 2019년 4월 25일부터 7월 31일까지 약 3달 동안 조사하였다. 측정 데이터는 분 단위로 측정되며, 24시간 측정값을 일 평균으로 환산하여 일일노출농도로 분석하였다. 농도 분석은 주중, 주말 및 실내, 실외로 구분하여 T-test 및 Levene 등분산 검정을 통해 주중 및 주말의 실내·외 농도 비교, 물질별 실내·외 농도를 비교분석 하였다. 측정기가 위치한 경기도 부천시의 가정집은 골목길에 위치하고 있으며, 왕복 4차선 도로변으로부터 약 100 m 떨어진 곳에 위치하고 있으며, 인근에는 산과 주택가가 다수 있었다(Fig. 1).

### 2. 위해성 평가

본 연구에서 발암물질인 폼알데하이드의 위해도 계산을 위하여 흡입 단위 위해도(Inhalation Unit Risk, IUR)를 이용하였다(식 (1)). PM<sub>10</sub>, PM<sub>2.5</sub>의 경

Table 1. Specifications of measuring device

Appearance		
		300(W) * 150(D) * 430(H) MM, 9 kg
Metrics	PM	PM <sub>10</sub> , PM <sub>2.5</sub>
	Gas	CO <sub>2</sub> , CO, NO <sub>2</sub> , HCHO, TVOCs
	Other	Temperature, Humidity
Measuring range	PM	0~100,000 µg/m <sup>3</sup>
	Gas	0~1 ppm
Operating principle	PM	Light scattering
	Gas	2-Electrochemical gas sensor
flux	0.5 L/min, PID FLOW Control	
Measuring interval	1 minute	
Operating range	-30~60°C, 0~99% RH	
Working Power	220 VAC/60 Hz	
Power	144 kW/month	
Communication	LTE Cat M1	
Data storage	SD CARD	

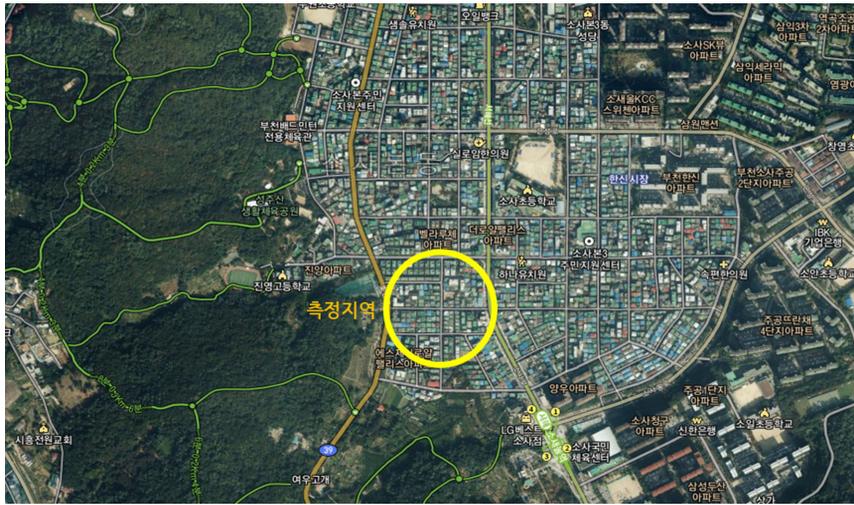


Fig. 1. Map around the measuring point

우에는 일반적인 건강영향 평가 방법으로는 장기간의 추적조사를 통한 먼지의 노출과 건강영향과의 인과관계 규명을 평가하는 역학적 연구, 동물 시험을 통한 독성학적 연구 등이 이루어지고 있으나 이들 연구 방법은 장기간의 연구가 이루어져야 한다는 한계점을 가지고 있다. 또한 폼알데하이드와는 달리 독성 값의 부재로 건강위해성 평가의 수행에 어려움이 따르는 것으로 알려져 있다. 이와 같은 한계점을 고려하여 미세먼지 노출에 의한 건강위해성 평가 방법의 일환으로 미세먼지 노출에 의한 소아 천식 발현으로 인한 응급실 방문율(Emergency Room Visit Rate)을 이용한 응급실 방문 위해도(Emergency Room Visit Risk) 평가 방법과(식 (2)) 미세먼지 노출에 의한 단위 사망률(Unit Death Rate)을 이용한 급성 질병 조기 사망 위해도(Disease Death Risk)를 산출하는 방법(식 (3))을 정립하고 이들 방법을 통한 미세먼지 노출에 따른 거주자의 건강위해도를 산출하였다.

$$\text{Excess cancer risk} = \text{Exposure concentration } (\mu\text{g}/\text{m}^3) \times \text{Inhalation unit risk } (\mu\text{g}/\text{m}^3)^{-1} \quad (1)$$

$$\text{Emergency room visit risk} = \text{Exposure concentration } (\mu\text{g}/\text{m}^3) \times \text{Visit rate } (\%/ \mu\text{g}/\text{m}^3) \quad (2)$$

$$\text{Disease death risk} = \text{Exposure concentration } (\mu\text{g}/\text{m}^3) \times \text{unit death rate } (\%/ \mu\text{g}/\text{m}^3) \quad (3)$$

여기서 발암성 물질인 폼알데하이드의 IUR은 미

국 EPA(United States Environmental Protection Agency)<sup>20</sup>에서 제공하는  $1.3 \times 10^{-5} (\mu\text{g}/\text{m}^3)^{-1}$ 를 적용하였다. PM<sub>10</sub>의 천식으로 인한 응급실 방문을 배현주 등<sup>27</sup>이 국내 주요 4개 도시를 대상으로 조사한 결과인 0.9% ( $10 \mu\text{g}/\text{m}^3$ )를 이용하였으며, PM<sub>2.5</sub>의 응급실 방문을 한국환경정책·평가연구원<sup>28</sup>의 서울시를 대상으로 조사한 결과인 1.05% ( $10 \mu\text{g}/\text{m}^3$ )를 이용하였다. PM<sub>10</sub>과 PM<sub>2.5</sub>의 급성 단위 사망률은 배현주<sup>29</sup>가 서울시를 대상으로 조사한 결과인 0.44% ( $10 \mu\text{g}/\text{m}^3$ )(PM<sub>10</sub>)와 0.95% ( $10 \mu\text{g}/\text{m}^3$ )(PM<sub>2.5</sub>)를 적용하였다.

위 식의 노출 농도의 경우 시간이 가중된 평균 농도가 아니므로, 본 연구의 연구 대상인 실내와 실외로 구분하여, 실내에서 머무르는 시간 및 실외에서 머무르는 시간을 평균농도로 환산 하였다. 환산을 위해 폼알데하이드 흡입에 의한 소아의 발암 위해도와, PM<sub>10</sub> 및 PM<sub>2.5</sub> 노출로 인한 소아의 천식 발현 응급실 방문 위해도는 15세까지 실내 및 실외에서 머무르는 시간으로 가중된 일일 평균 노출 농도( $\mu\text{g}/\text{kg}/\text{day}$ )를 산출하였다. 폼알데하이드의 흡입으로 인한 성인의 발암 위해도와, PM<sub>10</sub>, PM<sub>2.5</sub> 노출로 인한 성인의 급성 질병 조기 사망 위해도는 평생 동안 실내·외에서 머무르는 시간으로 가중된 일일 평균 노출 농도 ( $\mu\text{g}/\text{kg}/\text{day}$ )를 산출하였다. 이를 함수로 나타내면 다음과 같다(식 (4)).

**Table 2.** Fixed assumptions as inputs to risk estimates

Category	Age	Unit	CTE	Reference
Body weight	Children	kg	30.7	MoE (Ministry of Environment), Korean Exposure Factors Handbook for Children, 2016
	Adults		63.3	MoE (Ministry of Environment), Korean Exposure Factors Handbook, 2007
Exposure Duration	Children	yr	15	KOSTAT (Statistics Korea), Life Time Table 2019
	Adults		84.1	
Average Time	Children	yr	15	KOSTAT (Statistics Korea), Life Time Table 2019
	Adults		84.1	
Inhalation rate	Children	m <sup>3</sup> /day	12.7	MoE (Ministry of Environment), Korean Exposure Factors Handbook for Children, 2016
	Adults		14.3	MoE (Ministry of Environment), Korean Exposure Factors Handbook, 2007

Average Daily Dose (ADD,  $\mu\text{g}/\text{kg}/\text{day}$ )

$$= \frac{C \times IR \times EF \times ED}{BW \times AT} \quad (4)$$

여기서 C는 실내 및 실외 폼알데하이드 및 미세먼지 농도( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ), IR은 호흡율( $\text{m}^3/\text{day}$ ), EF는 노출빈도(무명수, 노출시간/24시간), ED는 노출기간으로 1년간 실내 및 실외에서 머무르는 일수, BW는 평균 체중(kg), AT는 평균 노출 일수로 소아천식 응급실 방문 위해도의 경우 15년간의 일수이며, 폼알데하이드와 미세먼지 및 초미세먼지의 급성 단위위해도의 경우 평균수명의 일수를 의미한다.

이와 같이 실내 및 실외의 머무르는 시간이 고려된 일일 평균 노출 농도를 기초로 한 건강 위해도 평가를 수행하기 위해 폼알데하이드의 IUR에 체중을 곱하고 호흡률로 나누어 단위 일일 평균 노출 농도에 따른 폼알데하이드의 IUR로 전환하였다(식 (5)). 미세먼지 단위 일일 평균 노출 농도에 따른 응급실 방문율 급성 단위 사망률 역시 일일 평균 노출 농도를 활용한 건강 위해성 평가 수행을 위해 전환하였다. 이를 정리하여 함수식으로 나타내면 식 (2), 식 (3)은 식 (6), 식 (7)과 같이 표현 할 수 있다.

$$\begin{aligned} \text{Excess cancer risk} &= \frac{C \times IR \times EF \times ED}{BW \times AT} \quad (\mu\text{g}/\text{kg}/\text{day}) \\ &\times \text{Inhalation unit risk } (\mu\text{g}/\text{m}^3)^{-1} \times \frac{BW}{IR} \quad (5) \end{aligned}$$

**Table 3.** Time spent in indoor, outdoor

Weekday/ Weekend	Place	Living time rate (%)	Reference
Weekday	Indoor	87.56	Yang et al., 2009
	Outdoor	5.16	
Weekend	Indoor	87.45	
	Outdoor	5.55	

Emergency room visit risk

$$= \frac{C \times IR \times EF \times ED}{BW \times AT} \quad (\mu\text{g}/\text{kg}/\text{day}) \times \text{Visit rate } (\%/\mu\text{g}/\text{m}^3) \quad (6)$$

$$\begin{aligned} \text{Disease death risk} &= \frac{C \times IR \times EF \times ED}{BW \times AT} \quad (\mu\text{g}/\text{kg}/\text{day}) \\ &\times \text{unit death rate } (\%/\mu\text{g}/\text{m}^3) \quad (7) \end{aligned}$$

식 (5)와 식 (6), 식 (7)을 이용하여 각각의 위해도를 산출하는데 있어 적용된 노출값을 Table 2, 3에 나타내었다. 소아 및 일반인의 체중과 호흡률에 대한 계수는 각각 어린이 노출계수 핸드북<sup>30)</sup> 및 한국 노출계수 핸드북<sup>31)</sup>의 CTE (Central Tendency Exposure) 자료를 활용하였으며, 소아의 경우 어린이 노출계수 핸드북에 제시되어 있는 0세부터 15세까지의 체중과 호흡률 CTE의 평균을 계산하여 사용하였다. 이동 시간을 제외한 1일 실내 및 실외에서의 머무르는 시간은 양원호 등<sup>21)</sup>의 연구를 참고하였으며, 주

**Table 4.** The concentration of air pollutants in weekday and weekend

Air pollutants	Place	Weekday/ weekend	n	Mean	SD	Min	Max	P-value
HCHO ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )	Indoor	Weekday	69	35.8	19.1	6.1	91.1	0.26
		Weekend	28	31.2	15.5	11.5	67.3	
	Outdoor	Weekday	69	48.3	49.7	5.0	232.7	0.79
		Weekend	28	45.3	51.0	5.3	209.4	
PM <sub>10</sub> ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )	Indoor	Weekday	69	21.3	13.8	5.6	68.2	0.37
		Weekend	28	18.8	9.6	6.7	52.9	
	Outdoor	Weekday	69	43.3	20.2	10.0	92.5	0.14
		Weekend	28	36.4	21.6	8.2	97.4	
PM <sub>2.5</sub> ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )	Indoor	Weekday	69	15.3	12.2	2.4	58.3	0.42
		Weekend	28	13.3	9.0	3.9	46.4	
	Outdoor	Weekday	69	30.8	17.1	4.1	83.8	0.32
		Weekend	28	26.9	17.2	4.3	72.7	

중 및 주말로 구분하여 실시하였다. 기대수명의 경우 국내 통계청에서 가장 최근에 발표한 평균 기대수명값(2017년 기준)을 본 연구의 기대수명 노출계수 값으로 선정하였다.<sup>32)</sup>

### III. 연구 결과

#### 1. 연구지역의 특성

2019년 4월 25일부터 7월 31일 까지 폼알데하이드, PM<sub>10</sub>, PM<sub>2.5</sub> 농도분포는 Table 4와 같다. 측정지역 농도의 기술통계 결과 약 3개월간의 폼알데하이드의 농도는 실내에서의 주중과 주말 각각 35.8±19.1, 31.2±15.5  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 으로 주중이 주말보다 더 높게 측정되었으며, 실외는 주중, 주말 각각 48.3±49.7, 45.3±51.0  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 실외 또한 주중이 더 높게 측정되었다. PM<sub>10</sub>은 실내 주중, 주말 각각 21.3±13.8, 18.8±9.6  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 이었으며, 실외는 주중, 주말 각각, 43.3±20.2, 36.4±21.6  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 으로 측정되었다. PM<sub>2.5</sub>는 실내 주중, 주말 각각 15.3±12.2, 13.3±9.0  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  실외는 주중, 주말 각각 30.8±17.1, 26.9±17.2  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 측정되었다. 폼알데하이드와 마찬가지로 PM<sub>10</sub>, PM<sub>2.5</sub> 둘 다 주중이 주말보다 더 높게 측정되었으나 통계적으로 유의한 차이를 보이지 않았다(p>0.05).

실내 실외로 구분하여 나타난 농도는 Table 5에 나타내었다. 폼알데하이드의 실내 농도는 33.8±17.6  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ , 실외 농도는 47.0±49.9  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 으로 나타났다.

**Table 5.** The concentration of air pollutants in indoor and outdoor

Air pollutants	Place	n	Mean	SD	P-value
HCHO ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )	Indoor	125	33.8	17.6	0.00
	Outdoor	125	47.0	49.9	
PM <sub>10</sub> ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )	Indoor	125	20.3	12.1	0.00
	Outdoor	125	40.2	20.9	
PM <sub>2.5</sub> ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )	Indoor	125	14.4	10.8	0.00
	Outdoor	125	29.0	17.1	

PM<sub>10</sub>의 실내 농도는 20.3±12.1  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ , 실외 농도는 40.2±20.9  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 으로 나타났으며, PM<sub>2.5</sub>의 실내 농도는 14.4±10.8  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ , 실외 농도는 29.0±17.1  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 으로 나타났다. 폼알데하이드, PM<sub>10</sub>, PM<sub>2.5</sub> 전부 실외가 실내보다 높게 측정되었으며, 이는 통계적으로 유의한 차이를 나타냈다(p<0.05).

#### 2. 폼알데하이드 노출에 따른 건강 위해성 평가결과

일반 가정집(실내) 가정집 주변(실외)에서의 폼알데하이드의 농도를 분단위로 측정하여 일평균으로 나타낸 결과로 최종 평균농도를 기호로 소아 및 성인에 대한 폼알데하이드 노출에 의한 건강 위해도를 평가한 결과는 Table 6에 나타내었다.

소아의 폼알데하이드 위해도의 경우 주중 실내는 7.5×10<sup>-4</sup>, 실외는 5.9×10<sup>-5</sup>이며, 주말 실내는 6.5×10<sup>-4</sup>, 실외는 6.0×10<sup>-5</sup>로 나타났다. 성인의 위해도는 주중

**Table 6.** Comparison of formaldehyde cancer risk in children and adults

Pollutants	Age	Weekday/Weekend	Place	Risk Value	Total Risk Value
HCHO	Children	Weekday	Indoor	$7.5 \times 10^{-4}$	$1.5 \times 10^{-3}$
			Outdoor	$5.9 \times 10^{-5}$	
		Weekend	Indoor	$6.5 \times 10^{-4}$	
			Outdoor	$6.0 \times 10^{-5}$	
	Adults	Weekday	Indoor	$4.1 \times 10^{-4}$	$8.3 \times 10^{-4}$
			Outdoor	$3.2 \times 10^{-5}$	
Weekend		Indoor	$3.6 \times 10^{-4}$		
		Outdoor	$3.3 \times 10^{-5}$		

**Table 7.** Comparison of emergency room visits risk and acute death risk on PM<sub>10</sub>

Pollutants	Age	Weekday/Weekend	Place	Risk Value	Total Risk Value
PM <sub>10</sub>	Children	Weekday	Indoor	$1.7 \times 10^{-2}$	$3.5 \times 10^{-2}$
			Outdoor	$2.0 \times 10^{-3}$	
		Weekend	Indoor	$1.5 \times 10^{-2}$	
			Outdoor	$1.8 \times 10^{-3}$	
	Adults	Weekday	Indoor	$8.2 \times 10^{-3}$	$1.7 \times 10^{-2}$
			Outdoor	$9.8 \times 10^{-4}$	
Weekend		Indoor	$7.2 \times 10^{-3}$		
		Outdoor	$8.9 \times 10^{-4}$		

실내는  $4.1 \times 10^{-4}$ , 실외는  $3.2 \times 10^{-5}$ 이며, 주말 실내는  $3.6 \times 10^{-4}$ , 실외는  $3.3 \times 10^{-5}$ 로 나타났다. 소아의 경우 주중 실내에서의 위해도가 가장 높게 나타났으며, 성인도 마찬가지로 주중 실내에서의 위해도가 가장 높게 나타났다.

폼알데하이드 총 시간 노출에 의한 소아의 건강 위해도는  $1.5 \times 10^{-3}$ 으로 나타났으며, 성인의 폼알데하이드 총 시간 노출에 의한 건강 위해도는  $8.3 \times 10^{-4}$ 로 나타나 소아의 건강 위해도가 높은 값을 보였다.

### 3. PM<sub>10</sub> 노출에 따른 건강 위해성 평가 결과

PM<sub>10</sub>에 대한 일반 가정집(실내), 가정집 주변(실외)에서의 주중, 주말 노출에 의한 소아 및 성인의 건강 위해성 평가 결과는 Table 7에 나타내었다.

소아의 PM<sub>10</sub> 노출에 의한 천식 발현 응급실 방문 위해도는 주중 실내  $1.7 \times 10^{-2}$ , 실외  $2.0 \times 10^{-3}$ 이며 주말 실내는  $1.5 \times 10^{-2}$ , 실외  $1.8 \times 10^{-3}$ 로 나타났다. 성인의 PM<sub>10</sub> 노출에 의한 급성 질병 조기 사망 위해도는 주중 실내  $8.2 \times 10^{-3}$ , 실외  $9.8 \times 10^{-4}$ 이며, 주말 실내는  $7.2 \times 10^{-3}$ , 실외  $8.9 \times 10^{-4}$ 로 나타났다. PM<sub>10</sub>

노출에 의한 소아의 천식 발현 응급실 방문 위해도는 주중 실내에서 가장 높게 나타났으며, 성인의 PM<sub>10</sub> 노출에 의한 급성 질병 조기 사망 위해도는 소아와 마찬가지로 주중 실내에서 가장 높게 나타났다.

PM<sub>10</sub> 총 시간 노출에 의한 소아의 천식 발현 응급실 방문율은  $3.5 \times 10^{-2}$ 이며, 성인의 급성 질병 조기 사망 위해도는  $1.7 \times 10^{-2}$ 로 나타나 소아의 천식 발현 응급실 방문율이 가장 높은 값을 보였다.

### 4. PM<sub>2.5</sub> 노출에 따른 건강 위해성 평가 결과

PM<sub>2.5</sub>에 대한 일반 가정집(실내), 가정집 주변(실외)에서의 주중, 주말 노출에 의한 소아 및 성인의 건강 위해성 평가 결과는 Table 8에 나타내었다.

소아의 PM<sub>2.5</sub> 노출에 의한 천식 발현 응급실 방문 위해도는 주중 실내  $1.4 \times 10^{-2}$ , 실외  $1.7 \times 10^{-3}$ 로 나타났으며, 주말 실내에서의 위해도는  $1.2 \times 10^{-2}$  실외  $1.6 \times 10^{-3}$ 로 나타났다. 성인의 PM<sub>2.5</sub> 노출에 의한 급성 질병 조기 사망 위해도는 주중 실내  $1.3 \times 10^{-2}$ , 실외  $1.5 \times 10^{-3}$ 로 나타났으며, 주말 실내는  $1.1 \times 10^{-2}$ , 실외는  $1.4 \times 10^{-3}$ 로 나타났다. PM<sub>2.5</sub> 노출에 의한 소아

**Table 8.** Comparison of emergency room visits risk and acute death risk on PM<sub>2.5</sub>

Pollutants	Age	Weekday/Weekend	Place	Risk Value	Total Risk Value
PM <sub>2.5</sub>	Children	Weekday	Indoor	1.4×10 <sup>-2</sup>	3.0×10 <sup>-2</sup>
			Outdoor	1.7×10 <sup>-3</sup>	
		Weekend	Indoor	1.2×10 <sup>-2</sup>	
			Outdoor	1.6×10 <sup>-3</sup>	
	Adults	Weekday	Indoor	1.3×10 <sup>-2</sup>	1.7×10 <sup>-2</sup>
			Outdoor	1.5×10 <sup>-3</sup>	
Weekend		Indoor	1.1×10 <sup>-2</sup>		
		Outdoor	1.4×10 <sup>-3</sup>		

의 천식 발현 응급실 방문 위해도는 주중 실내에서 가장 높은 값을 나타냈으며, 성인의 급성 질병 조기 사망 위해도도 소아의 응급실 방문 위해도와 마찬가지로 주중 실내에서 가장 높은 값을 나타냈다.

PM<sub>2.5</sub> 총시간 노출에 의한 소아의 천식 발현 응급실 방문 위해도는 3.0×10<sup>-2</sup>로 나타났으며, 성인의 급성 질병 조기 사망 위해도는 1.7×10<sup>-2</sup>로 나타나 소아의 응급실 방문 위해도가 가장 높은 값을 보였다.

#### IV. 고 찰

이 연구의 최종목표는 국민들이 대부분의 시간을 보내는 대표적인 실내공간인 주거공간에서, 실내 및 실외로 구분하여 활동하는 시간에 따른 폼알데하이드, PM<sub>10</sub>, PM<sub>2.5</sub>의 건강위해성평가를 수행하여 각 오염물질에 대한 위험성을 제공하는데 있다. 이러한 연구를 수행함에 있어, 본 연구는 크게 두 가지로 구분하여 연구를 수행하였다. 첫째, 국내 주택 실내 및 실외의 폼알데하이드, PM<sub>10</sub>, PM<sub>2.5</sub>를 측정, 분석하여 결과를 제시하였으며, 둘째, 사람들의 실내·외 머무르는 시간을 주중, 주말로 구분하고, 소아와 성인으로 구분하였다. 측정된 각 오염물질의 농도데이터를 가지고 폼알데하이드 흡입으로 인한 초과발암위해도, PM<sub>10</sub> 및 PM<sub>2.5</sub>에 대한 소아의 천식발현 응급실 방문율, PM<sub>10</sub>, PM<sub>2.5</sub>에 대한 성인의 급성 질병 조기 사망 위해도를 산출하여 제시하였다. 그러나 주택의 실내공기 오염에 관한 측정은 단기간에 일부 지역에 국한되어 수행되었기 때문에, 다양한 주거형태 및 주거 지역 거주자에 대한 건강 위해성 평가를 수행하는 데에 한계점이 있다. 그러나 Particulate matter (PM)에 대한 기존의 위해성 평가는 중금속 등 PM

에 포함되어있는 발암성 물질에 대한 위해성 평가를 수행하였지만, 본 연구는 소아의 천식 발현 응급실 방문 위해도를 평가하였으며, 성인의 경우 급성 질병 조기 사망 위해도를 평가하여 제시함으로써 PM 노출에 의한 건강 위해 발현 가능성을 다른 화합물의 영향으로 인한 간접적 평가보다는 PM 자체 노출로 평가하는 새로운 방법을 제안하였다는데 의의가 있다.

폼알데하이드의 농도가 가장 높은 조건은 주중 실외, 주말 실외, 주중 실내, 주말 실내 순으로 나타났다. 실내에서의 주중과 주말의 폼알데하이드 평균 농도는 35.8, 31.2 µg/m<sup>3</sup>으로 통계적으로 유의한 차이는 나타나지 않았으며(p=0.26), 실외에서도 48.3, 45.3 µg/m<sup>3</sup>로 통계적으로 유의한 차이를 보이지 않았다(p=0.79). 실내 및 실외 모두에서 폼알데하이드의 농도가 주중 및 주말 간에 통계적 차이를 나타내지 않은 것은 조사대상 주택의 재실자의 특성상 주중 및 주말 간에 실내 거주 점유율 및 활동에 큰 차이를 나타내지 않아 나타난 결과로 여겨진다. 또한 실외 역시 측정기간 동안 큰 변화가 없어 주중과 주말 농도간에 통계적으로 유의한 차이를 나타내지 않은 것으로 판단된다.

실내·외 폼알데하이드의 농도는 실외 공기 중 농도가 실내 공기 중의 농도보다 통계적으로 유의한 높은 농도를 나타내고 있는 것으로 조사되었다(p=0.00), 이는 폼알데하이드의 경우 건축 내장재 및 접착제 등에서 발생하는 대표적 실내공기 오염물질로 실내 공기 중 농도가 실외 공기 중 농도보다 높다고 보고한 윤충식 등<sup>33)</sup>의 결과와는 상이한 결과로 본 연구의 조사대상 주택이 건설 된지 30년 이상 되었으며, 최근 10년 내에 리모델링 등의 개선 등이 이루어

어지지 않아 폼알데하이드의 발생원이 없음으로 인해 기인된 결과로 여겨진다.

PM<sub>10</sub>과 PM<sub>2.5</sub>의 농도도 폼알데하이드와 마찬가지로 가장 높은 조건은 주중 실외, 주말 실외, 주중 실내, 주말 실내 순으로 나타났다. 이는 재실자의 실내 활동으로 인한 실내 발생 미세먼지의 영향보다 실외 미세먼지 발생원에 의한 영향이 더욱 크다는 것을 확인할 수 있는 결과라 할 수 있다. 실내에서의 PM<sub>10</sub>의 주중과 주말의 평균 농도는 유의한 차이를 보이지 않았으며(p=0.37), 실외에서의 농도 또한 유의한 차이를 보이지 않았다(p=0.14). PM<sub>2.5</sub>의 실내에서의 주중과 주말의 농도는 유의한 차이를 보이지 않았으며(p=0.42), 실외에서의 주중, 주말의 농도 또한 유의한 차이를 보이지 않았다(p=0.32). 이와 같은 결과는 폼알데하이드의 이유와 마찬가지로 주중과 주말의 재실자의 인원 및 행동의 차이가 없는 것으로 판단되며, 실외 또한 큰 변화가 없는 것으로 추정된다. 이에 반해 실내의 PM<sub>10</sub> 및 PM<sub>2.5</sub>의 농도 차이는 유의하게 나타났다(PM<sub>10</sub>, p<0.05)(PM<sub>2.5</sub>, p<0.05). 이와 같은 결과는 실내에서의 재실자의 행동으로 인한 미세먼지 발생의 비중이 낮은 것으로 나타나며, 폼알데하이드의 결과와 같이 미세먼지 역시 실외 발생원에 의한 영향이 실내 발생원에 의한 영향보다 크다고 할 수 있다.

또한, 강동화 등<sup>34)</sup>의 연구 결과 재실자의 행위를 배제한 상태의 실내 미세먼지 농도와 실외 미세먼지 농도를 비교한 결과 실외 미세먼지 농도가 높아 실내 미세먼지 농도 증가의 대표적 발생원은 실내 거주자의 행동인 것으로 보고하였다. 본 연구의 조사 대상 주택의 경우 거주자가 2인이며, 다른 주택 거주자에 비해 거주자의 실내 행동이 적음으로 인해 실외 미세먼지의 농도가 실내 미세먼지의 농도에 비해 높은 농도를 보인 것으로 판단된다.

본 연구에서 사용된 측정기는 광산란 방법으로 입자상 물질을 측정하는 것이기 때문에 수분에 의한 영향을 많이 받는다는 한계점이 있다. 수분이 입자상 물질로 측정되어 과대평가 될 수 있으나, 측정 장비에 Heating coil이 내장되어 있어, 일정 습도 이상이 되면 수분을 가열하여 증발시켜 측정을 하여 수분에 대한 영향을 최소화 하였다.

폼알데하이드의 실내 환경 기준치는 100 µg/m<sup>3</sup> 이하로 실내와 실외 전부 기준치를 초과하지 않았으며,

PM<sub>10</sub>의 24시간 평균 대기환경 기준치 100 µg/m<sup>3</sup> 및 PM<sub>2.5</sub>의 24시간 평균 대기환경 기준치 35 µg/m<sup>3</sup> 를 초과하지 않았다. 또한 실내 공기질 유지 기준 PM<sub>10</sub>, 100 µg/m<sup>3</sup>와 PM<sub>2.5</sub>, 50 µg/m<sup>3</sup> 역시 초과하지 않았다. 전체적인 농도평가 결과 국내 대기 환경 및 실내 환경 기준치를 초과하지 않는 것으로 조사되었다.

폼알데하이드의 위해성 평가 결과 소아와 성인 주중 실내에서 각각 약 만 명당 7.5명, 약 만 명당 4.1명으로 가장 높은 값을 나타냈다. 이것은 주중 실내에서 가장 오랜 시간을 보내므로 폼알데하이드에 가장 오랜 시간 노출되기 때문인 것으로 판단된다. 또한 주중, 주말 및 실외·외를 포함한 전체 폼알데하이드 노출에 의한 발암 위험도는 소아가 약 천명당 1.5명, 성인이 약 만 명당 8.3명으로 높은 값을 나타냈다. 이는 하루종일 24시간 소아의 경우 15세까지, 성인의 경우 84.1세까지 꾸준히 노출된다는 가정 하에 진행하였기 때문에 이처럼 높은 값이 나타난 것으로 사료된다.

양지연 등<sup>35)</sup>에서 다중이용시설에서의 폼알데하이드 노출에 의한 위해성 평가를 진행하였는데, 영화관에서는 근무자의 경우 1.3×10<sup>-4</sup>, 최빈이용자의 경우 1.0×10<sup>-4</sup>, 평균이용자의 경우 4.0×10<sup>-4</sup>로 다소 높은 위험도가 산출되었다. 또한, 대형음식점, 학원, 공연장 및 노래방, 주점 등의 최빈 이용자들의 폼알데하이드의 평생 초과발암위험도는 대부분 1.0×10<sup>-4</sup> 수준으로 산출되었으며, 평균이용자들은 모두 폼알데하이드의 평생 초과발암 위험도가 대부분 1.0×10<sup>-4</sup> 이상으로 산출되어 본 연구와 비슷한 결과가 나타났다. Huang et al.<sup>36)</sup> 연구에 따르면 베이징의 실내 폼알데하이드 노출에 의한 발암 위험도 평가 결과 1.3×10<sup>-3</sup>으로 나타났으며, Sax et al.<sup>37)</sup> 연구에서는 폼알데하이드 흡입 노출에 의한 발암 위험도가 2.1×10<sup>-4</sup>으로 나타나 본 연구와 비슷한 발암 위험도 결과를 보였다.

PM<sub>10</sub>에 대한 위해성 평가 결과, 주중 실내, 주말 실내, 주중 실외, 주말 실외 순으로 나타났다. 그 중 주중 실내의 소아의 PM<sub>10</sub> 노출 시 천식 발현 응급실 방문 위험도가 약 백 명당 1.7명으로 나타났으며, PM<sub>10</sub> 노출에 의한 천식 발현 응급실 방문 총 위험도의 경우 약 백 명당 3.5명으로 나타났다. 성인의 PM<sub>10</sub> 노출에 의한 급성 질병 조기 사망 위험도는 주중 실내에서 약 천 명당 8.2명으로 나타났으며 총

사망 위해도의 경우 약 백 명당 1.7명으로 나타났다.

PM<sub>2.5</sub> 또한 PM<sub>10</sub>과 마찬가지로 위해도가 주중 실내, 주말 실내, 주중 실외, 주말 실외 순으로 높게 나타났으며, 그 중 주중 실내의 소아의 PM<sub>2.5</sub> 노출에 의한 천식 발현 응급실 방문 위해도는 약 백 명당 1.4명으로 나타났다. 소아의 PM<sub>2.5</sub> 노출에 의한 응급실 방문 총 위해도는 약 백 명당 3명으로 상당히 높은 값을 나타냈다. PM<sub>2.5</sub> 노출에 의한 성인의 급성 질병 조기 사망 위해도는 주중 실내에서 약 백 명당 1.3명으로 나타났으며, 총 사망 위해도는 약 백 명당 1.7명으로 나타났다. 이것은 사람의 활동 시간 양상 중 주중 실내에서 가장 많은 시간을 보내기 때문에 주중 실내에서 가장 높은 값을 나타낸 것으로 사료된다. 환경부<sup>38)</sup>에 의하면 다중이용시설 중 어린이집, 의료시설, 노인요양시설의 PM<sub>10</sub> 노출에 의한 질병 사망 위해도는  $6.9 \times 10^{-4}$ ,  $3.0 \times 10^{-5}$ ,  $5.3 \times 10^{-4}$ 로 나타나 본 연구보다 낮은 위해도를 나타냈다.

## V. 결 론

본 연구는 사람들의 실내 및 실외에서 머무르는 시간을 반영하여 위해성 평가를 진행하였으며, 이를 통하여 실내 및 실외에서의 폼알데하이드 흡입, PM<sub>10</sub>, PM<sub>2.5</sub> 노출로 인한 위해성 평가를 진행하였다. 경기도의 한 주택에서 실내 및 실외의 폼알데하이드, PM<sub>10</sub>, PM<sub>2.5</sub>의 농도를 측정된 결과 주중 실외에서 가장 높은 값을 나타내었으며, 실내와 실외의 농도는 통계적으로 유의한 차이를 나타냈다( $p < 0.05$ ). 실내에서의 실내 공기질 기준치를 초과하지 않았으며, 실외 또한 마찬가지로 대기환경 기준치를 초과하지 않았다. 위해성 평가 결과 폼알데하이드의 흡입으로 인한 발암 위해도는 소아와 성인 각각 주중 실내에서 약 만 명당 7.5명, 약 만 명당 4.1명으로 가장 높은 값을 나타내었다. PM<sub>10</sub> 노출로 인한 주중 주말의 소아의 천식 발현 응급실 방문 위해도는 약 백 명당 1.7명 이었으며, 성인의 급성 질병 조기 사망 위해도는 약 천 명당 8.2명으로 가장 높은 값을 나타내었다. PM<sub>2.5</sub> 노출로 인한 주중 주말의 소아의 응급실 방문 위해도는 약 백 명당 1.4명으로 나타났으며, 성인의 조기 사망 위해도는 약 백 명당 1.3명으로 가장 높은 값을 나타내어 폼알데하이드, PM<sub>10</sub>, PM<sub>2.5</sub>에 대한 실내 공기질 관리가 필요할 것으로 사

료된다. 본 연구는 시간활동 양상을 실내와 실외로 구분하여 가정집에서 폼알데하이드, PM<sub>10</sub>, PM<sub>2.5</sub>의 노출 및 위해성 평가를 실시하였다. 이는 추후 사람들의 구체적인 시간활동양상을 반영한 위해성 평가 및 PM에 대한 응급실 방문 위해도, 급성 질병 조기 사망 위해도 평가를 위한 기초자료로 활용할 수 있을 것으로 기대된다.

## 감사의 글

본 연구는 환경부 “생활공감 환경보건기술개발사업(과제명: 전 생애 주기별 실내환경 노출량평가 및 환경 감시 예방 시스템 개발, 과제번호: 2018001350006)”과 환경부의 재원으로 국립환경과학원(과제명: 생활환경 고품광이 평가방법 개발연구(III), NIER번호: NIER-RP2018-161)에 의하여 수행된 연구 지원을 받은 과제입니다.

## References

1. Cho EM, Jeon HJ, Yoon DK, Park SH, Hong HJ, Choi KY, et al. Reliability of Low-Cost, Sensor-Based Fine Dust Measurement Devices for Monitoring Atmospheric Particulate Matter Concentrations. *International journal of environmental research and public health*. 2019; 16(8): 1430.
2. Kampa M, Castanas E. Human health effects of air pollution. *Environmental pollution*. 2008; 151(2): 362-367.
3. Honour SL, Bell JNB, Ashenden TW, Cape JN, Power SA. Responses of herbaceous plants to urban air pollution: effects on growth, phenology and leaf surface characteristics. *Environmental pollution*. 2009; 157(4): 1279-1286.
4. Wang Y, Li J, Jing H, Zhang Q, Jiang J, Biswas P. Laboratory evaluation and calibration of three low-cost particle sensors for particulate matter measurement. *Aerosol Science and Technology*. 2015; 49(11): 1063-1077.
5. MoE (Ministry of Environment). Atmosphere Environmental Standard. 2019.
6. WHO (World Health Organization). Guideline for air quality. 2000.
7. WHO (World Health Organization). Guidelines for Drinking-Water Quality. 2005.
8. Kim, JB. Assessment and estimation of particulate matter formation potential and respiratory effects

- from air emission matters in industrial sectors and cities/regions. *Journal of Korean Society of Environmental Engineers*. 2017; 39(4): 220-228.(in Korean with English abstract).
9. Park JH, Yang SY, Park YK, Ryu HS, Kim EC, Choe YT, et al. Exposure and Risk Assessment of Benzene and PM<sub>10</sub> for Sub-populations using Monte-Carlo Simulations. *Korean Society of Environmental Health*. 2019; 45(3): 247-257.
  10. Graedel TE. Chemical compounds in the Atmosphere, Academic Press Inc, New York, U.S.A. 1978; 161.
  11. Kitchens JF, Casner RE, Edwards GS, Harward WE, III, Macri BJ. Investigation of selected potential environmental contaminants: Formaldehyde. Washington, DC: United States Environmental Protection Agency. 1976.
  12. Verschueren, K. Handbook of environmental data on organic chemicals: Vol. 1 (No. Ed. 4). John Wiley and Sons, Inc. 2001.
  13. Chae HJ, Kim HK, Kim SK, Pyo HS, Hong JK. Analysis and Risk Assessment of Formaldehyde in Water from Water Purification Plant in Korea. *Analytical Science & Technology*. 2009; 22(5): 386-394.
  14. Calvert GJ. Formaldehyde and other Aldehydes. National Research Council, Washington, USA. 1981.
  15. ToxFAQs, A. T. S. D. R. Agency for Toxic Substances and Disease Registry (ATSDR): Formaldehyde. 1999.
  16. Mopper K, Stahovec WL. Sources and sinks of low molecular weight organic carbonyl compounds in seawater. *Marine Chemistry*. 1986; 19(4): 305-321.
  17. US EPA (United State Environmental Protection Agency). Indoor Air Quality (IAQ). 2007.
  18. MoE (Ministry of Environment). Multi-Media and Multi-Pathway Aggregate Risk Assessment (II) -Formaldehyde-. 2012.
  19. Liu W, Zhang J, Korn LR, Zhang L, Weisel CP, Turpin B, et al. Predicting personal exposure to airborne carbonyls using residential measurements and time/activity data. *Atmospheric Environment*. 2007; 41: 5280-5288.
  20. Sexton K, Mongin SJ, Adgate JL, Pratt GC, Ramachandran G, Stock TH, et al. Estimating volatile organic compound concentrations in selected micro-environments using time-activity and personal exposure data. *Journal of Toxicology and Environmental Health, Part A*. 2007; 70: 465-476.
  21. Yang WH, Lee KY, Park KH, Yoon CS, Son BS, Jeon JM, et al. Microenvironmental Time Activity Patterns of Weekday and Weekend on Korean. *Korean Society for Indoor Environment*. 2009; 6(4): 267-274.
  22. Lai HK, Kendall M, Ferrier H, Lindup I, Alm S, Hanninen O, et al. Personal exposures and micro-environment concentrations of PM<sub>2.5</sub>, VOC, NO<sub>2</sub> and CO in Oxford, UK. *Atmospheric Environment*. 2004; 38: 6399-6410.
  23. Schwab M, Colome SD, Spengler JD, Ryan PB, Billick IH. Activity patterns applied to pollutant exposure assessment: data from a personal monitoring study in Los Angeles. *Toxicology and industrial health*. 1990; 6(6): 517.
  24. Noy D, Brunekreef B, Boleij JS, Houthuijs D, De Koning R. The assessment of personal exposure to nitrogen dioxide in epidemiological studies. *Atmospheric Environment. Part A. General Topics*. 1990; 24(12): 2903-2909.
  25. Yoon HJ, Shuai JF, Kim TS, Seo JK, Jung DY, Ryu HS, et al. Microenvironmental Time-Activity Patterns of Weekday and Weekend on Korean Adults. 2017; 16(2): 182-186.
  26. US EPA IRIS (United State Environmental Protection Agency Integrated Risk Information System). Formaldehyde; CASRN 50-00-0. Available: [http://cfpub.epa.gov/ncea/iris/iris\\_documents/documents/subst/0419\\_summary.pdf](http://cfpub.epa.gov/ncea/iris/iris_documents/documents/subst/0419_summary.pdf) [accessed 28 October 2019].
  27. Bae HJ, Kim MH, Lee AK, Park JI, Acute Effects of PM<sub>10</sub> on Asthma Hospitalization Among Children and Benefit Analysis at Four Major Cities in Korea. *Korean Society of Environmental Health*. 2009; 35(1): 1-10.
  28. Korea Environment Institute. A Study on Children's Environmental Disease due to PM<sub>2.5</sub>. 2014.
  29. Bae HJ. Effects of Short-term Exposure to PM<sub>10</sub> and PM<sub>2.5</sub> on Mortality in Seoul. *Korean Society of Environmental Health*. 2014; 40(5): 346-354.
  30. MoE (Ministry of Environment). Korean Exposure Factors Handbook for Children, 2016.
  31. MoE (Ministry of Environment). Korean Exposure Factors Handbook, 2007.
  32. KOSTAT (Statistics Korea). Life Time Table 2019.
  33. Yoon CS, Park DW, Park DY, Jung JY, Lee GY. Variation of Formaldehyde Concentration in Pre-school Facilities by Location and Indoor/Outdoor. *Korean Society of Environmental Health*. 2004; 30(3): 259-263.
  34. Kang DH, Choi DH. A Preliminary Study to Evaluate the Impact of Outdoor Dust on Indoor Air by Measuring Indoor/Outdoor Particle Concentration in

- a Residential Housing Unit. *Journal of Korean Institute of Architectural Sustainable Environment and Building Systems*. 2015; 9(6): 462-469.
35. Yang JY, Kim HH, Shin DC, Kim YS, Sohn JR, Lim JH, et al. Health Risk Assessment of Occupants in the Small-Scale Public Facilities for Aldehydes and VOCs. *Journal of the Environmental Sciences*. 2008; 17(1): 45-56.
36. Huang L, Mo J, Sundell J, Fan Z, Zhang Y. Health risk assessment of inhalation exposure to formaldehyde and benzene in newly remodeled buildings, Beijing. *PLoS One*. 2013; 8(11): e79553.
37. Sax SN, Bennett DH, Chillrud SN, Ross J, Kinney PL, Spengler JD. A cancer risk assessment of inner-city teenagers living in New York City and Los Angeles. *Environmental health perspectives*. 2006; 114(10): 1558-1566.
38. MoE (Ministry of Environment). Survey on the Actual Condition of Indoor Air Quality in Non-Prosecuted Multi-use Facilities. 2015.

<저자정보>

윤단기(대학원생), 남궁선주(연구교수),  
 공혜관(대학원생), 홍형진(대학원생),  
 임희빈(학부생), 박시현(연구원),  
 이해원(연구원), 이정섭(연구관),  
 이철민(교수)