

## 생활시간조사 자료를 활용한 인구집단별 국소환경 초미세먼지(PM<sub>2.5</sub>) 노출 및 기여율 평가

이상훈<sup>1</sup> , 최영태<sup>1</sup> , 김대환<sup>1</sup> , 신지훈<sup>2</sup> , 성경화<sup>3</sup> , 김정<sup>4</sup> , 민기홍<sup>1\*</sup> , 양원호<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup>대구가톨릭대학교 보건안전학과, <sup>2</sup>송원대학교 보건안전관리학과, <sup>3</sup>대구가톨릭대학교 환경보건모니터링센터, <sup>4</sup>(주)이아이랩

### Assessing PM<sub>2.5</sub> Exposure and Contribution Rates by Cluster Microenvironments via a Time-Use Survey

Sanghoon Lee<sup>1</sup>, Youngtae Choe<sup>1</sup>, Daehwan Kim<sup>1</sup>, Jihun Shin<sup>2</sup>, Kyunghwa Sung<sup>3</sup>, Jeong Kim<sup>4</sup>, Gihong Min<sup>1\*</sup>, and Wonho Yang<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup>Department of Health and Safety, Daegu Catholic University, <sup>2</sup>Department of Health and Safety Management, Songwon University, <sup>3</sup>Center of Environmental Health Monitoring, Daegu Catholic University, <sup>4</sup>EILAP Co., Ltd.

#### ABSTRACT

**Background:** People spend 80~90% of their day indoors, with only 10~20% of their time spent outdoors. Evaluating exposure accurately requires assessments based on an individual's time-activity pattern.

**Objectives:** The purpose of this study is to evaluate the exposure and contribution rates of PM<sub>2.5</sub> by microenvironment, identify related exposure factors, and suggest management measures and priorities.

**Methods:** This study analyzed the time-activity patterns of 3,984 weekday respondents in Seoul using data from the 2014 Time-Use Survey by Statistics Korea. The respondents were clustered, and occupational groups were estimated by conducting a frequency analysis of sociodemographic factors. Location data was collected at 10-minute intervals, followed by exposure scenario construction and active simulations. When calculating the exposure and contribution rates of PM<sub>2.5</sub>, the Korean exposure factors handbook was used to account for inhalation rates.

**Results:** Most of the indoor microenvironments where people spend their time are residential. Students spend the most time indoors at 22.7 hours per day, followed by senior citizens at 22.5 hours, office workers at 22.0 hours, and stay-at-home parents at 21.8 hours. Although people spend little time in spaces such as outdoors, in transportation, and other indoor microenvironments, higher PM<sub>2.5</sub> concentrations significantly increase the contribution rates. Among all clusters, even though cluster 10 (office workers) and cluster 2 (night security workers) spend relatively little time in other indoor microenvironments, such as Korean barbecue restaurants and pubs, they were included in the scenarios, resulting in higher exposure concentrations and contribution rates.

**Conclusions:** The analysis of PM<sub>2.5</sub> exposure contribution rates by microenvironment revealed that the highest exposure occurred in the 'other indoor' category, with Korean barbecue restaurants showing the highest concentration levels among them. Based on the PM<sub>2.5</sub> exposure contribution rates in the microenvironments, this study suggests priority locations and population groups for targeted management.

**Key words:** Time-use survey, PM<sub>2.5</sub>, time-activity pattern, exposure assessment, contribution rates

Received August 20, 2024

Revised September 5, 2024

Accepted September 12, 2024

#### Highlights:

- The average person spends 22 hours indoors, which is about 90% of their day.
- The occupancy rate of other indoor environments is relatively low, but Korean barbecue restaurants and pubs are included in the scenario, resulting in high exposure concentrations and contribution rates.
- The Time-Use Survey can provide valuable insights.

#### \*Corresponding author:

Gihong Min: Department of Health and Safety, Daegu Catholic University, 13-13 Hayang-ro, Hayang-eup, Gyeongsan 38430, Republic of Korea

Tel: +82-53-850-3739

Fax: +82-53-850-3736

E-mail: alsrlghd000@naver.com

Wonho Yang: Department of Health and Safety, Daegu Catholic University, 13-13 Hayang-ro, Hayang-eup, Gyeongsan 38430, Republic of Korea

Tel: +82-53-850-3739

Fax: +82-53-850-3736

E-mail: whyang@cu.ac.kr

## I. 서론

공기 중 초미세먼지(Fine Particulate Matter,  $PM_{2.5}$ )는 사람의 건강에 악영향을 미치는 것으로 보고되어 관심이 점차 증대되고 있다.<sup>1)</sup> 또한,  $PM_{2.5}$ 는 입자 직경이  $2.5 \mu m$  이하인 물질로 미세먼지(Particulate Matter,  $PM_{10}$ )보다 입자 직경이 작아 유해성이  $PM_{10}$ 보다 더 크다.<sup>2,3)</sup>  $PM_{2.5}$ 는 석유와 석탄의 연소, 화력발전소와 자동차 등의 배출가스를 통해 배출된 1차 오염물질이 대기 중 다른 물질과 반응하여 생성되는 2차 오염물질이 주요 발생원으로 알려져 있으며, 황산염, 질산염, 유기탄소 등으로 구성되어 있다.<sup>4,5)</sup> 입자의 크기가 작을수록 하부 기관지까지 침착하여 호흡기계에 손상을 일으킬 수 있으며, 농도가 높을수록 심혈관계 및 호흡기계 질환의 증상 악화를 초래하고 유병률 및 사망률을 증가시키는 것으로 알려져 있다.<sup>6)</sup> 또한, 유럽연합(European Union, EU) 12개 국가 7만 여 명의 여성을 대상으로  $PM_{2.5}$  농도가  $5 \mu g/m^3$  증가할 때마다 저체중아 출생 위험이 18%씩 증가한다고 보고하였다.<sup>7)</sup>

일반적으로 선행연구에서는 주로 실외 대기오염물질의 심각성을 인지하고 관심을 기울였다.<sup>8)</sup> 그러나 현대인의 활동 양상이 변화하면서 국소환경(주택실내 68.7%, 사무실 및 공장 5.4%, 기타 실내환경 11%, 차량 실내 5.5%, 실외 7.6%, 술집 및 음식점 1.8%)에<sup>9)</sup> 하루 중 약 80~90%를 실내에서 재실하고 있다.<sup>10,11)</sup> 에너지 효율 측면과 건축법의 특징으로 인해 실내는 밀폐되어 있는 경향이 있으며,<sup>12)</sup> 실내에서 조리, 난방, 청소 등 사람의 활동에 의해  $PM_{2.5}$ 가 발생한다.<sup>13-15)</sup> 따라서  $PM_{2.5}$  노출로 인한 잠재적인 건강위험은 외부 노출로 인한 위험보다 실내에서 더 크다고 보고되고 있다.<sup>16)</sup>

$PM_{2.5}$ 로 인한 개인노출은 재실하고 있는 국소환경의 농도와 시간에 의해 결정되며, 시간에 따른 국소환경에 대한 정보는 개인의 오염물질에 대한 노출을 추정하는 데 있어 필수적인 요소이다. 간접적인 노출평가 방법으로 설문지를 활용하여 개인별 시간활동양상을 조사하여 오염물질의 노출량을 추정할 수 있다.<sup>17)</sup> 일반적으로 사람은 같은 국소환경에 머물지 않고 이동하며, 국소환경에 따라 공기오염물질의 농도가 다르기 때문에 총 인간노출(total human exposure)을 평가할 수 있다.<sup>18)</sup>

노출을 정확히 평가하기 위해서는 국소환경(microenvironment)의 농도와 재실자가 언제, 어디서, 어떤 활동을 통해 오염물질에 노출되었는지 파악할 수 있는 시간활동양상(time-activity pattern)을 고려하는 것이 중요하다.<sup>19,20)</sup> 또한, 사회인구학적 요인(성별, 연령, 직업 등)에 따라 시간활동 및 행동양상의 차이가 존재하며 군집 간 국소환경에서의 시간활동양상 차이가 존재할 수 있다.<sup>21)</sup> 학생은 학교와 가정, 직장인은 직장, 주부는 가정에서 주로 재실하기 때문이다. 시간활동양상은 사회인구학적 요인에 따라 달라지기 때문에 함께 고려되어야 한다.<sup>22)</sup> 국외에

서는 미국 ATUS (American Time-Use Survey), 캐나다(General Social Survey-Time Use), 일본(Survey on Time Use & Leisure Activities) 등에서 생활시간조사(Time-Use Survey)가 진행되고 있다.<sup>23-25)</sup> 국내는 통계청(Statistics Korea)에서 1999년부터 5년 주기로 생활시간조사를 실시하여 국민들이 하루 24시간을 어디서, 어떠한 활동을 하는지 그리고 성별, 나이, 직업 등의 사회인구학적 요인을 함께 평가하고 있다.<sup>26)</sup> 생활시간조사는 개인 노출을 평가하기 위한 핵심적인 요소이며, 군집별 노출시나리오를 가정하여 측정을 통해 노출량을 파악할 수 있다.<sup>27)</sup>

본 연구는 생활시간조사 데이터를 활용하여 군집분석을 실시한 후, 빈도분석을 통해 인구집단을 분류하였다. 주택 실내, 직장(직장 및 학교), 기타 실내, 교통수단(대중교통, 택시, 자가용), 실외(도보)로 구분하여 노출 시나리오에 따른 군집별 실제 모의(active simulation)를 통해 인구집단별 국소환경에 따른  $PM_{2.5}$  노출 및 기여율을 평가하였다. 본 연구의 목적은 직업의 특성에 따라 인구집단을 분류 후 시간활동양상을 파악하여 인구집단별 다양한 국소환경에서의  $PM_{2.5}$  노출량을 평가하고, 노출 기여율 기반 국소환경별 관리 우선순위를 제시하고자 한다.

## II. 재료 및 방법

### 1. 조사방법 및 연구대상

통계청의 마이크로데이터 통합서비스(Microdata Integrated Service, mdis.kostat.go.kr/) 2014년 생활시간조사 데이터를 이용하였다. 조사 데이터는 주택 실내, 직장(직장 및 학교), 기타 실내, 실외(도보), 이동수단(대중교통, 택시, 자가용)으로 총 5가지 국소환경으로 분류하였다. 생활시간조사는 10세 이상의 남녀로 구성되어 있으며, 그 중 대표성이 있는 서울특별시의 주중 3,984명, 주말 2,690명 총 6,674명의 응답자를 1차적으로 선정하였다. 시간활동양상은 주중과 주말에 따라 시간활동양상 및 행동양상이 다르게 나타나고, 주말에는 출근 및 등교를 하지 않는 점을 고려하여 주중 3,984명을 연구대상으로 선정하였다.

### 2. 군집 분석

본 연구에서 사용된 군집분석은 Lee (2017)<sup>28)</sup>의 선행연구에서 수행된 것으로, 생활시간조사 응답자에 대한 군집화 결과를 활용하였다. 응답자의 시간대별 행동 및 장소를 군집화하기 위하여 정보통신기술(Information and Communication Technology, ICT) 기기 사용코드와 함께한 사람 코드를 제외한 주행동코드와 장소/이동수단코드를 활용하여 유사도(similarity) 분석에 의한 군집분석을 실시하였다. 유사도 분석을 바탕으로 응답자들을 군집화함으로써 시간대별 행동 및 장소 패턴의 유사성을 파악하여 각 군집의 특성을 도출하였다.

2.1. 군집 특성화

직업특성을 파악하기 위해서는 사회인구학적인 요인을 파악해야 한다. 군집 특성화를 위한 사회인구학적 요인으로는 성별, 연령, 혼인상태, 교육정도, 교육재학, 경제활동상태, 무직사유, 산업분류, 직업분류 코드를 사용하였다.<sup>29)</sup> 본 연구의 통계분석은 SPSS ver. 19 (IBM Co., USA)를 사용하여 사회인구학적 요인과 시간대별(10분 간격) 행동 및 장소 코드를 기반으로 빈도 분석을 실시하였다.

2.2. 노출 시나리오

노출 시나리오는 Lee (2017)<sup>28)</sup>의 선행연구를 기반으로 작성하였고, 통계청의 2014 생활시간조사 데이터를 사용하여 서울특별시 시민들의 시간활동양상을 분류하였다. 생활시간조사는 10분 간격으로 설계된 시간일지에 국소환경에서의 자신의 행동을 직접 기입하는 방식이다. 서울특별시 응답자 평균 총 3,984명을 대상으로 시간활동양상을 분석하기 위해 시간대별(24시간 10분 간격의 144개) 행동(138개 소분류, 3자리 코드)+장소(9항목, 1자리 코드) 총 4자리의 코드를 결합하여 노출 시나리오를 작성하였다.

생활시간조사 데이터를 바탕으로 국소환경을 실내와 실외로 구분하였다. 실내 환경은 주택 실내, 직장/학교, 기타 실내, 교통수단으로 세분화하였다. 기타 실내 환경은 음식점, 카페, 노인회관, 시장, 마트 등이 포함된다. 세분화를 통해 각 군집 별 다양한 국소환경에서 개인노출을 추정할 수 있도록 하였다 (Table 1).

Table 1. Classification of microenvironments based on exposure scenarios

Microenvironments		
Indoor/outdoor	Category	Subcategory
Indoor	Residential indoor	Office
		School
		Department store cultural center
	Other indoor	Shopping mall
		Security office
		Self-employed store (cafe)
		Lecture room of university
		Cafe
		Study cafe/library
		Pub
		Internet cafe
		Bookstore
		Senior citizens hall
		Supermarket
		Traditional market
		Private educational facility
		General restaurant
	Barbeque restaurant	
	Transportation	Subway
		Bus
		Taxi
		Private car
	Outdoor	Walking

3. 실제 모의

기후적 특성에 따라 실외활동이 감소하여 하루 중 약 90%를 실내에서 보내는 여름철이 생활시간조사의 시간활동양상과 유사하여 2022년 7월 7일부터 2022년 8월 31일까지 실제 모의를 실시하였다.<sup>30,31)</sup> 측정은 실시간 레이저 광도계(SidePak AM520, TSI Inc., USA)를 노출 시나리오에 따라 측정자 호흡기 근처에서 24시간 동안 1분 간격으로 연속 측정하였다(Fig. 1). PM<sub>2.5</sub> 농도는 보정 계수 0.3으로 설정하였으며,<sup>32)</sup> 측정에 사용된 기기의 사양은 Table 2와 같고, 측정 시작 전 Zero filter를 사용하여 기기 교정을 실시 후 펌프의 유량은 1.7 L/min으로 측정하였다.

4. 노출 및 기여율 평가

PM<sub>2.5</sub>에 대한 농도를 각 군집별 국소환경에 적용하여 노출량을 산출하였다(식 (1)).<sup>33)</sup> 각 군집별 국소환경에 따른 노출량은 하루 중 국소환경에서의 재실 시간과 호흡률을 적용하였다. 호흡률은 성인의 경우 한국인의 노출계수 핸드북(2019)을 이용하여 성인 남성 군집 16.21 m<sup>3</sup>/day, 성인 여성 군집 13.03 m<sup>3</sup>/day, 노인 군집은 14.6 m<sup>3</sup>/day로 적용하였으며,<sup>34)</sup> 학생의 경우 한국 어린이의 노출계수 핸드북(2019)을 이용하여 12.73 m<sup>3</sup>/day를 적용하였다.<sup>35)</sup>

Table 2. Specifications for devices to measure PM<sub>2.5</sub> concentration

	SidePak AM520 (TSI Inc., USA) specification	
	Sensor type	90° light scattering, 650 nm laser diode
	Aerosol concentration range	0.001~100 mg/m <sup>3</sup>
	Minimum resolution	0.001 mg/m <sup>3</sup>



Fig. 1. Measuring instruments used in the active-simulations

$$E_{jk} = \sum_k^m C_{jk} TR_{jk} IR_k (\mu g/day) \tag{1}$$

여기서,  $E_{jk}$ 는 흡입 노출량,  $m$ 은 국소환경 총개수,  $k$ 는 군집,  $C_{jk}$ 는 군집  $k$ 의 국소환경  $j$ 에서의 농도,  $TR_{jk}$ 은 군집  $k$ 가 국소환경  $j$ 에서 머문 시간 비,  $IR_k$ 는 군집  $k$ 의 호흡률이다.

### III. 결 과

#### 1. 인구집단별 특성화

본 연구는 2014년 서울특별시 생활시간조사 평일 응답자의 사회인구학적 요인을 추출한 후 유사도를 분석하기 위해 군집 분석 알고리즘을 적용하여 10개의 군집으로 분류하였다. 군집별 사회인구학적 요인을 추출하기 위한 방법으로는 빈도분석을 적용하였다. 인구집단은 쇼핑물 야간 자영업자, 경비실 야간 근로자, 초·중학생, 사무직(1, 2, 3), 자영업자, 노인, 대학생, 주부로 도출되었고, 인구집단별 특성은 Table 3과 같다. 1 군집(쇼핑물 야간 자영업자)은 30~40대로 전문직에 종사하고 있으며, 2 군집(경비실 야간 근로자)은 50~60대로 나타났다. 3군집(초·중학생)은 10대로 구성되었고, 4~6 군집(사무직 1, 2, 3)은 30대~40대로 전문직과 사무직 근로자로 구분되었다. 7 군집(자영업자)은 20~30대 여성으로 구성되었으며, 8 군집(노인)은 60대 이상으로 경제적인 활동이 없었다. 9 군집(대학생)은 학업으로 인해 경제활동이 대부분 없었고, 10 군집(주부)은 30~40대 여성으로 가사와 육아로 인해 경제적 활동을 하지 않는 것으로 나타났다.

#### 2. 노출 시나리오에 따른 군집별 재실시간

본 연구에서 각 군집별 평일 시간활동양상을 주택 실내, 야외, 직장 및 학교, 기타 실내, 교통수단으로 분류하여 분석한 결과 주택 실내에서 보내는 시간이 평균 13.40 hr (55.83%)

로 가장 많았으며, 직장 및 학교 6.23 hr (25.96%), 기타 실내 2.87 hr (11.94%), 교통수단 1.48 hr (6.15%), 실외 활동 시간은 0.65 hr (2.71%)로 나타났다(Table 4). 실내 국소환경 중 주택 실내에서 가장 많은 시간을 보낸 군집은 노인 군집(17.50 hr)이며, 기타 실내는 주부 군집(6.83 hr), 직장 및 학교는 경비실 야간 근로자 군집(9.50 hr), 교통수단은 사무직 근로자 군집(2.00 hr), 실외 국소환경에서는 사무직 근로자 군집(1.00 hr)에서 가장 많은 시간을 보낸 것으로 확인되었다.

#### 3. PM<sub>2.5</sub> 농도 수준

연구원이 실제모의를 통해 각 군집별 국소환경에서의 PM<sub>2.5</sub> 노출 수준을 측정된 결과를 Table 5에 제시하였다. 10개의 군집 중 1 군집(쇼핑물 야간 자영업자)과 5 군집(사무직 2)은 각각 2.3±3.5 μg/m<sup>3</sup>와 2.3±3.3 μg/m<sup>3</sup>로 농도가 낮았으며, 반면 6 군집(사무직 3)과 2 군집(경비실 야간 근로자)은 각각 18.2±84.8 μg/m<sup>3</sup>와 16.6±28.8 μg/m<sup>3</sup>로 높은 농도로 나타났다. PM<sub>2.5</sub> 농도의 최댓값은 576.6 μg/m<sup>3</sup>로 나타났으며, 10개의 군집의 평균 농도는 7.1±15.9 μg/m<sup>3</sup>로 산출되었다.

#### 4. 국소환경 노출 기여율 평가

군집별 인구집단의 국소환경에서의 PM<sub>2.5</sub> 노출량과 기여율을 Table 6에 제시하였다. 군집별 국소환경에 따른 평균 재실률은 주택 실내(55.8%)>직장 및 학교(26.0%)>기타 실내(12.0%)>교통수단(6.2%)>실외(2.7%)로 나타났다. 농도는 기타 실내(43.0 μg/m<sup>3</sup>)>실외(6.7 μg/m<sup>3</sup>)>교통수단(4.7 μg/m<sup>3</sup>)>직장 및 학교(4.2 μg/m<sup>3</sup>)>주택 실내(4.0 μg/m<sup>3</sup>) 순서로 높았다. 국소환경별 노출 기여율은 기타 실내(43.8%)>실외(17.2%)>교통수단(16.7%)>주택 실내(12.5%)>직장 및 학교(10.8%)로 나타났다.

Table 3. Cluster analysis according to the definition and socio-demographic characteristics

Socio-demographic characteristics									
Group	Definition	Gender	Age	Education level	Education	Economic activity status	Reasons for no longer being employed	Industry classification	Occupation classification
1	Shopping mall night workers	Male (68.06%)	30s (26.62%) 40s (29.63%)	University (67.13%)	Graduation (89.58%)	Employed (100.00%)	-	Professional, scientific, and technical services (29.40%) Finance and insurance (20.37%) Administrative and support services (16.90%)	Office workers (42.82%) Professionals and related workers (30.09%) Service workers (8.33%) Manual laborers (7.41%)
2	Security office night workers	Male (58.72%)	50s (35.64%) 60s (25.38%)	High school (47.69%)	Graduation (88.97%)	Employed (99.49%)	-	Wholesale and retail (26.15%) Construction (15.38%) Transportation and storage (12.05%) Accommodation and food services (10.51%)	Manual laborer (35.38%) Technicians and related workers (27.95%)
3	Primary and middle school	Male (50.00%)	10s (100.00%)	Elementary school (52.57%) Middle school (45.59%)	Enrolled (100%)	-	-	-	-
4	Office worker 1	Male (65.73%)	40s (43.22%) 50s (25.32%)	University (55.49%)	Graduation (90.54%)	Employed (98.12%)	-	Wholesale and retail (58.57%) Accommodation and food services (15.60%)	Office workers (32.23%) Sales workers (25.32%)
5	Office worker 2	Female (65.78%)	30s (26.21%) 40s (27.88%)	University (50.58%)	Graduation (79.63%)	Employed (98.33%)	-	Education services (37.69%) Health and social work (22.78%)	Professionals and related workers (47.41%) Office workers (18.03%) Manual laborer (17.2%)
6	Office worker 3	Male (70.18%)	30s (31.58%) 40s (21.05%)	University (62.28%)	Graduation (92.11%)	Employed (98.25%)	-	Manufacturing (96.49%)	Office workers (49.12%) Professionals and related workers (33.33%)

Table 3. Continued

Socio-demographic characteristics									
Group	Definition	Gender	Age	Education level	Education	Economic activity status	Reasons for no longer being employed	Industry classification	Occupation classification
7	Self-employed workers	Female (50.19%)	20s (59.48%) 30s (29.0%)	University (74.72%)	Graduation (73.61%)	Employed (98.51%)	-	Wholesale and retail (35.32%) Accommodation and food services (30.48%) Information and communication (27.14%)	Service workers (28.62%) Sales workers (26.77%) Professionals and related workers (24.91%)
8	Senior citizens	Female (56.15%)	60s (84.59%)	Elementary school (30.64%) High school (26.42%)	Graduation (82.57%)	Unemployed (100.00%)	Retired/aged (70.09%)	-	-
9	University students	Male (54.35%)	10s (45.65%) 20s (40.71%)	University (51.78%)	Enrolled (65.42%)	Unemployed (100.00%)	Studying (75.69%)	-	-
10	Housewives	Female (97.42%)	30s (24.89%) 40s (31.76%)	University (56.65%)	Graduation (94.85%)	Unemployed (100.00%)	Housework (68.45%) Childcare (26.18%)	-	-

**Table 4.** Microenvironments occupancy time (hr) for each cluster per exposure scenario

Group	Definition	Indoor				Outdoor
		Residential indoor	Other indoor	Workplace/school	Transportation	
1	Shopping mall night workers	15.33	2.67	3.67	1.50	0.83
2	Security office night workers	10.33	2.00	9.50	1.75	0.42
3	Primary and middle school students	14.67	2.00	6.00	0.83	0.50
4	Office worker 1	12.67	2.67	5.67	2.00	1.00
5	Office worker 2	10.67	1.50	9.33	2.00	0.50
6	Office worker 3	11.33	1.33	9.33	1.50	0.50
7	Self-employed workers	11.00	1.67	9.00	1.50	0.83
8	Senior citizens	17.50	4.17	0.83	1.00	0.50
9	University students	15.50	3.83	2.75	1.17	0.75
10	Housewives	15.00	6.83	-	1.50	0.67
Time spent average (hr)		13.40	2.87	6.23	1.48	0.65
Time spent average (%)		55.83	11.94	25.96	6.15	2.71

**Table 5.** PM<sub>2.5</sub> exposure concentration (µg/m<sup>3</sup>) for each cluster by exposure scenario

Group	Definition	Mean±SD	Min	Percentile			Max
				25th	50th	75th	
1	Shopping mall night workers	2.3±3.5	0.5	1.0	1.25	2.0	26.4
2	Security office night workers	16.6±28.8	0.7	7.0	8.0	13.6	208.8
3	Primary and middle school students	7.7±3.0	2.5	5.5	7.0	9.0	21.3
4	Office worker 1	5.1±3.7	0.7	3.0	4.4	6.0	29.9
5	Office worker 2	2.3±3.3	1.0	1.0	2.0	2.0	33.8
6	Office worker 3	18.2±84.8	1.0	2.0	2.0	3.0	576.6
7	Self-employed workers	3.4±3.2	1.0	1.0	2.1	4.2	19.7
8	Senior citizens	3.0±1.8	1.0	2.0	2.0	4.0	10.6
9	University students	6.5±23.6	1.1	2.0	2.0	3.0	224.3
10	Housewives	6.0±3.7	1.0	3.0	4.7	7.1	16.2

SD: standard deviation.

### IV. 고찰

본 연구에서 사회인구학적 요인(성별, 연령, 직업 등)에 따라 시간활동 및 행동양상의 차이로 국소환경별 PM<sub>2.5</sub>에 대한 노출 및 기여율이 다르게 나타났다. 선행연구에서 PM<sub>2.5</sub> 노출평가의 경우 대부분 대기측정망에서 측정된 실외 농도로 평가하여 개인노출평가에 대한 한계가 존재하였다.<sup>36,37)</sup> PM<sub>2.5</sub> 농도는 노출시간, 국소환경에서의 행동양상에 따라 달라지기 때문에 본 연구는 생활시간조사 데이터를 활용하여 사회인구학적 요인(성별, 연령, 직업 등)에 따라 유사노출그룹(Similar Exposure Group, SEG)으로 구성하였다. SEG별 24시간 10분 간격 국소

환경별 재실 시간을 노출 시나리오로 구성하여 실제모의를 통해 PM<sub>2.5</sub> 노출 및 기여율을 평가하였다.

현대인의 활동 양상이 변화하면서 하루 중 대부분의 시간을 실내에 재실하는 것으로 나타났다. 실내 재실 시간은 중고등 학생(22.7 hr)>노인(22.5 hr)>대학생(22.1 hr)>사무직 3(22.0 hr)>주부(21.8 hr) 순으로 나타났다. 하루 실내 재실 시간은 평균 22.0 hr로 약 90%를 차지하며, 본 연구의 결과는 선행연구와 유사한 결과로 나타났다.<sup>38)</sup> 학생의 경우 교육 활동(학교, 학원 등)과 실내 놀이(컴퓨터 게임, TV 시청 등)로 실내 재실 시간이 더욱 증가하였다.<sup>39,40)</sup> 노인의 경우 사회적 관계망이 부족하여 외로움을 느끼는 경우가 많아 고립을 방지하기 위해 실내(노

**Table 6.** Exposure contribution rates from each cluster microenvironments

Cluster	Micro environments	Rate of spent time per day (%)	Exposure concentration ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )	Dose* ( $\mu\text{g}/\text{day}$ )	Average of contribution rates (%)
(1) Shopping mall night workers	Residential indoor	63.9	1.3	21.1	7.2
	Office/School	15.3	1.9	30.8	10.6
	Other indoor	11.1	7.3	118.3	40.6
	Transportation	6.3	5.3	85.9	29.4
	Outdoor	3.5	2.2	35.7	12.2
(2) Security office night workers	Residential indoor	43.1	7.6	123.2	6.6
	Office/School	39.6	15.7	254.5	13.6
	Other indoor	8.3	75.4	1222.2	65.5
	Transportation	7.3	9.0	145.9	7.8
	Outdoor	1.7	7.5	121.6	6.5
(3) Primary and middle school students	Residential indoor	61.1	9.0	114.6	26.2
	Office/School	25.0	5.5	70.0	16.0
	Other indoor	8.3	5.5	70.0	16.0
	Transportation	3.5	6.2	78.9	18.0
	Outdoor	2.1	8.2	104.4	23.8
(4) Office worker 1	Residential indoor	52.8	5.6	90.8	20.7
	Office/School	23.6	3.0	48.6	11.1
	Other indoor	11.1	7.8	126.4	28.9
	Transportation	8.3	3.8	61.6	14.1
	Outdoor	4.2	6.8	110.2	25.2
(5) Office worker 2	Residential indoor	44.4	1.4	18.2	8.5
	Office/School	38.9	2.1	27.4	12.8
	Other indoor	6.3	5.8	75.6	35.4
	Transportation	8.3	4.9	63.8	29.9
	Outdoor	2.1	2.2	28.7	13.4
(6) Office worker 3	Residential indoor	47.2	1.8	29.2	0.6
	Office/School	38.9	2.4	38.9	0.8
	Other indoor	5.6	285.0	4619.9	91.9
	Transportation	6.3	3.0	48.6	1.0
	Outdoor	2.1	17.8	288.5	5.7
(7) Self-employed workers	Residential indoor	45.8	1.4	18.2	5.9
	Office/School	37.5	4.3	56.0	18.1
	Other indoor	6.9	10.6	138.1	44.5
	Transportation	6.3	4.3	56.0	18.1
	Outdoor	3.5	3.2	41.7	13.4
(8) Senior citizens	Residential indoor	72.9	3.1	40.4	22.0
	Office/School	3.5	1.2	15.6	8.5
	Other indoor	17.4	2.7	35.2	19.1
	Transportation	4.2	4.0	52.1	28.4
	Outdoor	2.1	3.1	40.4	22.0
(9) University students	Residential indoor	64.6	4.5	72.9	14.6
	Office/School	11.5	1.9	30.8	6.1
	Other indoor	16.0	20.3	329.1	65.7
	Transportation	4.9	2.0	32.4	6.5
	Outdoor	3.1	2.2	35.7	7.1
(10) Housewives	Residential indoor	62.5	4.1	53.4	13.0
	Other indoor	28.5	9.7	126.4	30.8
	Transportation	6.3	4.3	56.0	13.7
	Outdoor	2.8	13.4	174.6	42.5

\*Dose: Respiration rate multiplied by the occupancy time in each microenvironments.

인회관, 문화센터)에서 다양한 활동을 하며 시간을 보내는 경우가 많은 것으로 확인되었다.<sup>41)</sup> 또한, 의료 기술의 발전으로 인해 집에서 건강 관리를 받을 수 있게 되면서 외출이 줄어들어 실내 재실률이 증가한 것으로 판단된다.<sup>42)</sup> 사무직의 경우 다른 군집에 비해 교통수단에서 높은 재실률이 나타났다. 교통수단 재실률이 높은 것은 직장으로 출퇴근을 위해 이동이 많은 것으로 판단된다.<sup>43)</sup> 주부의 경우 가사활동으로 인해 주택 실내의 재실률이 높았으며, 쇼핑이나 교제시간이 많기 때문에 기타 실내의 재실률이 다른군집에 비해 높은 것으로 판단된다.<sup>44)</sup>

각 군집의 PM<sub>2.5</sub> 농도는 1 군집(쇼핑몰 야간 자영업자)과 5 군집(사무직 2)은 각각  $2.3 \pm 3.5 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 와  $2.3 \pm 3.3 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 농도가 낮았으며, 반면 6 군집(사무직 3)과 2 군집(경비실 야간 근로자)은 각각  $18.2 \pm 84.8 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 와  $16.6 \pm 28.8 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 높은 농도로 나타났다. 6 군집(사무직 3)과 2 군집(경비실 야간 근로자)은 노출 시나리오에 기타 실내(고깃집, 호프집)이 포함되어 있어 농도가 높은 것으로 나타났고, 선행연구와 유사한 결과로 나타났다.<sup>45,46)</sup> Lim 등(2012)<sup>47)</sup>의 연구에 따르면 고깃집과 호프집은 다량의 PM<sub>2.5</sub>를 발생시킨다고 보고되고 있다. 고깃집은 조리 과정에서 숯, 연탄, 가스과 같은 점화 연료를 사용하여 육류를 구울 경우 실내 공기 중 상당한 양의 PM<sub>2.5</sub>를 방출하며, 숯과 연탄을 사용하는 경우 연료의 연소 과정에서 추가적으로 PM<sub>2.5</sub>가 발생한다.<sup>48,49)</sup> 숯을 사용하여 조리를 할 경우 전기와 가스를 사용하는 것보다 더 높은 흡입 노출이 관찰되었고, 전체 총 노출량에 대한 PM<sub>2.5</sub>의 기여율은 석탄을 사용할 경우 실외에 비해 약 4~7배 더 높게 나타났다.<sup>50)</sup> Siddiqui (2009)<sup>51)</sup>의 연구에 따르면 숯을 사용한 경우( $2,740 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ) LPG를 사용했을 경우보다 현저히 높은 것으로 나타났다. Brauer (1995)<sup>52)</sup>의 연구에 따르면 석탄과 같은 고체연료의 사용은 높은 실내 오염으로 인해 높은 노출 농도로 나타난 반면, 가스 및 전기와 같은 청정 연료의 사용은 실내 공기 오염을 크게 낮출 수 있다고 보고하였다. 호프집의 경우 가스를 사용하여 음식을 굽거나 식용유를 사용하여 튀기는 조리가 이루어지고, 조리 과정에서 PM<sub>2.5</sub> 농도가 급격하게 상승한다고 보고하였다.<sup>13)</sup> 요리로 발생한 PM<sub>2.5</sub>는 해당 장소의 근로자뿐만 아니라 인접 공간으로 빠르게 확산되어 방문하는 사람의 건강에도 영향을 미칠 수 있다.<sup>53)</sup> 또한, 음식과 기름의 연소로 인해 많은 미세 입자가 발생하여 폐암 발병률을 증가시킬 수 있다.<sup>54)</sup> 본 연구결과를 통해 고깃집 및 호프집은 고농도의 PM<sub>2.5</sub>가 발생되기 때문에 노출 관리가 우선적으로 필요한 국소환경으로 판단하였다.

군집별 국소환경에 따른 평균 노출 기여율은 기타 실내(43.8%), 실외(17.2%), 교통수단(16.7%), 주택 실내(12.5%), 직장 및 학교(10.8%)로 기타 실내에서 가장 높게 나타났다. 기타 실내에서 많은 사람들이 밀집할 경우 PM<sub>2.5</sub> 노출 기여율이 크게 증가한다고 보고되었고, 업무 시간이 비업무 시간보다 노출

기여율이 높다고 보고되고 있다.<sup>55,56)</sup> Brown 등(2011)<sup>57)</sup>의 연구에 따르면 기타 실내의 경우 PM<sub>2.5</sub>의 농도가 단시간 지속되더라도 PM<sub>2.5</sub>의 농도가 높기 때문에 고농도의 노출을 초래할 수 있으며, 노출 기여율 증가에 기여를 한다고 보고하고 있다.

본 연구는 서울특별시 생활시간조사 응답자를 대상으로 군집별 국소환경 실제모의를 통해 PM<sub>2.5</sub> 농도를 측정하여 노출량을 파악하였다. 단편적인 국소환경에서의 측정이 아닌 생활시간조사 데이터를 활용하여 군집별 시간활동양상에 따른 국소환경 농도를 측정하였음에 연구 의의가 있다. 그러나 서울특별시의 시간활동양상으로 진행한 연구이므로 지역별 특성을 반영하지 못하였고, 국소환경 PM<sub>2.5</sub> 농도에 영향을 미칠 수 있는 행동변수에 대해서는 고려하지 않았다. 따라서, 다양한 지역 및 국소환경 PM<sub>2.5</sub> 농도의 영향 변수를 충분히 고려한 추후 연구가 필요하다.

## V. 결 론

본 연구는 10개의 군집을 대상으로 노출 시나리오에 따라 PM<sub>2.5</sub> 농도를 측정하였다. 측정된 농도를 기반으로 각 군집의 국소환경별 재실 시간과 노출농도를 평가하고, 기여율을 평가하였다. 국소환경별 농도 및 재실률은 기존 선행연구들과 유사한 경향을 보였으며, 사람들이 대부분 재실하는 실내 미세 환경은 주택 실내로 나타났다. 시간활동양상에 따른 국소환경별 PM<sub>2.5</sub>에 대한 노출 기여율을 분석했을 때 가장 높은 국소환경은 기타 실내로 나타났으며, 그중 고깃집에서의 노출농도가 가장 높게 측정되었다. 주택 실내의 경우 재실률은 높았으나 농도가 낮아 노출 기여율이 비교적 낮았다. 기타 실내의 경우 재실률은 낮았으나 농도가 높아 노출 기여율이 크게 증가하였다. 군집별 시간활동양상을 고려한 국소환경에서의 PM<sub>2.5</sub> 노출 기여율을 기반으로 관리가 필요한 국소환경 및 인구집단의 우선 순위를 제시할 수 있다.

## 감사의 글

본 연구는 환경부 환경산업기술원의 환경성질환에측평가기 술개발 사업(과제번호: RS-2021-KE001349) 수행 중 작성되었으며 이에 감사드립니다.

## Conflict of Interest

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

## References

- Kim D, Min G, Choe Y, Shin J, Woo J, Kim D, et al. Evaluation of population exposures to PM<sub>2.5</sub> before and after the outbreak of COVID-19. *J Environ Health Sci*. 2021; 47(6): 521-529.
- Atkinson RW, Mills IC, Walton HA, Anderson HR. Fine particle components and health—a systematic review and meta-analysis of epidemiological time series studies of daily mortality and hospital admissions. *J Expo Sci Environ Epidemiol*. 2015; 25(2): 208-214.
- World Health Organization (WHO). Health effects of particulate matter: policy implications for countries in eastern Europe, Caucasus and central Asia. Available: <https://iris.who.int/handle/10665/344854> [accessed 30 July 2024].
- Kim OH. Effects of the particulate matter (PM<sub>10</sub> · PM<sub>2.5</sub>) on domestic tourism demand: evidence from the Korea National Tourism Survey. *Int J Tour Hosp Res*. 2021; 35(5): 131-144.
- Kyung SY, Jeong SH. Adverse health effects of particulate matter. *J Korean Med Assoc*. 2017; 60(5): 391-398.
- Choi HJ. The effect of fine dust risk perception on indoor and outdoor tourists: focusing on planned behavior theory (TPB). *J Korea Entertain Ind Assoc*. 2023; 17(8): 25-37.
- Kim TY. Design of fine dust monitoring system based on the internet of things. *J Korea Inst Inf Electron Commun Technol*. 2022; 15(1): 14-26.
- Ma CJ, Kang GU. A study on the air pollution status and health effects in Tokyo. *J Korean Soc Atmos Environ*. 2023; 39(4): 469-477.
- Yoon YH, Joo JC, Ahn HS, Nam SH. Analyses of the current market trend and research status of indoor air quality control to develop an electrostatic force-based dust control technique. *J Korea Acad Ind Coop Soc*. 2013; 14(12): 6610-6617.
- Yoon H, Shuai JF, Kim T, Seo J, Jung D, Ryu H, et al. Microenvironmental time-activity patterns of weekday and weekend on Korean adults. *J Odor Indoor Environ*. 2017; 16(2): 182-186.
- Sim SH, Kim YS. Characterization and assessment of indoor air quality in newly constructed apartments—volatile organic compounds and formaldehyde-. *J Environ Health Sci*. 2006; 32(4): 275-281.
- Park SE, Kim JY, Shin DC. Health risk of indoor radon in schools. *Korean J Environ Educ*. 1999; 12(2): 81-90.
- He C, Morawska L, Hitchins J, Gilbert D. Contribution from indoor sources to particle number and mass concentrations in residential houses. *Atmos Environ*. 2004; 38(21): 3405-3415.
- Quackenboss JJ, Krzyzanowski M, Lebowitz MD. Exposure assessment approaches to evaluate respiratory health effects of particulate matter and nitrogen dioxide. *J Expo Anal Environ Epidemiol*. 1991; 1(1): 83-107.
- Kim H, Jung KM. Seasonal variations of human exposure to residential fine particles (PM<sub>2.5</sub>) and particle-associated polycyclic aromatic hydrocarbons in Chuncheon. *J Environ Toxicol*. 2006; 21(1): 57-69.
- Choi C, Yang H, Kim H, Kwon H. Evaluation of particulate matter (PM<sub>2.5</sub>) reduction through greenwalls in classrooms. *J Environ Health Sci*. 2023; 49(4): 183-189.
- Lee B, Ban H, Jang Y, Lee K. Measurement of time/location for personal exposure assessment of air pollutants. *J Environ Health Sci*. 2016; 42(5): 314-323.
- Ott WR. Human exposure assessment: the birth of a new science. *J Expo Anal Environ Epidemiol*. 1995; 5(4): 449-472.
- 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. *Toxicol Ind Health*. 1990; 6(6): 517-532.
- Jung SW, Cho YS, Yang WH, Son BS. Comparison of exposure estimation methods on air pollution of residents of industrial complexes. *J Environ Sci Int*. 2013; 22(2): 151-161.
- Guak S, Lee K. Review of exposure assessment methodology for future directions. *J Environ Health Sci*. 2022; 48(3): 131-137.
- Kim EK, Kim ER. The analysis of the structure of time use of aged. *J Korean stud*. 2002; 17: 145-175.
- U.S. Bureau of Labor Statistics. American time use survey. Available: <https://www.bls.gov/tus/> [accessed 30 July 2024].
- Statistics Canada. Time use survey (TUS). Available: <https://www.statcan.gc.ca/en/survey/household/4503> [accessed 30 July 2024].
- Statistics Bureau of Japan. Outline of the 2021 survey on time use and leisure activities. Available: <https://www.stat.go.jp/english/data/shakai/2021/gaiyo.htm> [accessed 30 July 2024].
- Shon AL. Characteristics and development of Time Use Survey. *Korean Assoc Surv Res*. 2000; 1(1): 135-148.
- Noy D, Brunekreef B, Boleij JSM, Houthuijs D, De Koning R. The assessment of personal exposure to nitrogen dioxide in epidemiological studies. *Atmos Environ. Part A. General Topics*. 1990; 24(12): 2903-2909.
- Lee SW. Classification of time activity pattern of urban population by season [master's]. [Seoul]: Graduate School of Seoul National University; 2017.
- Park EO. Job Satisfaction comparison between gender and the influencing factors on job satisfaction. *Korean J Occup Health Nurs*. 2001; 10(2): 131-141.
- Lee S, Lee K. Seasonal differences in determinants of time location patterns in an urban population: a large population-based study in Korea. *Int J Environ Res Public Health*. 2017; 14(7): 672.
- Kim D, Min G, Shin J, Choe Y, Choi K, Sim SH, et al. Measurement of PM<sub>2.5</sub> concentrations and comparison of affecting factors in residential houses in summer and autumn. *J Environ Health Sci*. 2024; 50(1): 16-24.
- Jenkins RA, Ilgner RH, Tomkins BA, Peters DW. Development and application of protocols for the determination of response of real-time particle monitors to common indoor aerosols. *J Air Waste Manag Assoc*. 2004; 54(2): 229-241.
- Lizana J, Almeida SM, Serrano-Jiménez A, Becerra JA, Gil-Báez M, Barrios-Padura A, et al. Contribution of indoor microenvironments to the daily inhaled dose of air pollutants in children. The importance of bedrooms. *Build Environ*. 2020; 183: 107188.
- National Institute of Environment Research (NIER). Korean exposure factors handbook. Incheon: NIER; 2019 Oct. Report No.: NIER-GP2019-037.
- National Institute of Environment Research (NIER). Korean ex-

- posure factors handbook for children. Incheon: NIER; 2019 Nov. Report No.: NIER-GP2019-038.
36. Bae S, Hong YC. Health effects of particulate matter. *J Korean Med Assoc.* 2018; 61(12): 749-755.
  37. Yang WH. Time-activity pattern of students and indoor air quality of school. *J Korean Inst Educ Facil.* 2014; 21(6): 17-22.
  38. Tran VV, Park D, Lee YC. Indoor air pollution, related human diseases, and recent trends in the control and improvement of indoor air quality. *Int J Environ Res Public Health.* 2020; 17(8): 2927.
  39. Han MS, Kim M. Reconsideration on leisure education. *J Sport Leis Stud.* 2013; 54(1): 661-673.
  40. Park SH. A study on participation in leisure activities and social development among high school students. *Korean J Sports Sci.* 2001; 10(2): 85-93.
  41. Kim MS, Bae HO. A longitudinal study on children's time use change and the quality of life. *Korean Soc Child Welf.* 2022; 71(1): 61-92.
  42. Song MJ, Lee HW. A study on the concept and type of integration senior center - focusing on the development of the network of leisure welfare facilities for the elderly. *J Archit Inst Korea Plan Des.* 2019; 35(9): 57-64.
  43. Seok J. A study of factors affecting use intention of untact medical diagnosis and consultation services. *J Korea Contents Assoc.* 2020; 20(12): 180-197.
  44. Son WB, Jang JM. An exploratory research on affecting factors of commute time in the metropolitan area of Korea. *GRI Rev.* 2019; 21(2): 97-116.
  45. Lee HS, Woo BL, Hwang MY, Park CH, Yu SD, Yang WH. Assessment of time activity pattern for workers. *J Korean Soc Occup Environ Hyg.* 2010; 20(2): 102-110.
  46. Lim S, Kim J, Kim T, Lee K, Yang W, Jun S, et al. Personal exposures to PM<sub>2.5</sub> and their relationships with microenvironmental concentrations. *Atmos Environ.* 2012; 47: 407-412.
  47. Lee SC, Li WM, Chan LY. Indoor air quality at restaurants with different styles of cooking in metropolitan Hong Kong. *Sci Total Environ.* 2001; 279(1-3): 181-193.
  48. Jang SJ. Legal policy trends and issues of biomass burning management in air pollution sources of Republic of Korea. *Environ Law Policy.* 2023; 31(2): 1-35.
  49. Min JH, Hur MY, Kim H. Concentration distribution characteristics of PM<sub>2.5</sub> and PM<sub>10</sub>, and health risk assessment for BaP at different types of restaurants. *J Environ.* 2022; 15(1): 33-40.
  50. Li T, Cao S, Fan D, Zhang Y, Wang B, Zhao X, et al. Household concentrations and personal exposure of PM<sub>2.5</sub> among urban residents using different cooking fuels. *Sci Total Environ.* 2016; 548-549: 6-12.
  51. Siddiqui AR, Lee K, Bennett D, Yang X, Brown KH, Bhutta ZA, et al. Indoor carbon monoxide and PM<sub>2.5</sub> concentrations by cooking fuels in Pakistan. *Indoor Air.* 2009; 19(1): 75-82.
  52. Brauer M, Bartlett K, Regalado-Pineda J, Perez-Padilla R. Assessment of particulate concentrations from domestic biomass combustion in rural Mexico. *Environ Sci Technol.* 1996; 30(1): 104-109.
  53. Wan MP, Wu CL, Sze To GN, Chan TC, Chao CYH. Ultrafine particles, and PM<sub>2.5</sub> generated from cooking in homes. *Atmos Environ.* 2011; 45(34): 6141-6148.
  54. Xue Y, Jiang Y, Jin S, Li Y. Association between cooking oil fume exposure and lung cancer among Chinese nonsmoking women: a meta-analysis. *Onco Targets Ther.* 2016; 9: 2987-2992.
  55. Shi Y, Du Z, Zhang J, Han F, Chen F, Wang D, et al. Construction and evaluation of hourly average indoor PM<sub>2.5</sub> concentration prediction models based on multiple types of places. *Front Public Health.* 2023; 11: 1213453.
  56. Hou W, Wang J, Hu R, Chen Y, Shi J, Lin X, et al. Systematically quantifying the dynamic characteristics of PM<sub>2.5</sub> in multiple indoor environments in a plateau city: implication for internal contribution. *Environ Int.* 2024; 186: 108641.
  57. Brown KW, Sarnat JA, Koutrakis P. Concentrations of PM<sub>2.5</sub> mass and components in residential and non-residential indoor microenvironments: the sources and composition of particulate exposures study. *J Expo Sci Environ Epidemiol.* 2012; 22(2): 161-172.

#### 〈저자정보〉

이상훈(연구원), 최영태(연구원), 김대환(연구원),  
신지훈(조교수), 성경화(연구원), 김정(수석연구원),  
민기홍(연구원), 양원호(교수)