



Original Article

국소환경 모델을 이용한 초미세먼지(PM_{2.5}) 노출 기여율 평가

신지훈¹ , 최영태¹ , 김동준¹ , 민기홍¹ , 우재민¹ , 김동준¹ , 신정현¹ , 조만수¹ , 성경화² , 이종대³ , 양원호^{1,2*}

¹대구가톨릭대학교 산업보건학과, ²대구가톨릭대학교 환경보건모니터링센터, ³순천대학교 환경보건학과

Evaluation of PM_{2.5} Exposure Contribution Using a Microenvironmental Model

Jihun Shin¹, Yongtae Choe¹, Dongjun Kim¹, Gihong Min¹, Jaemin Woo¹, Dongjun Kim¹, Junghyun Shin¹, Mansu Cho¹,
 Kyeonghwa Sung², Jongdae Lee³, and Wonho Yang^{1,2*}

¹Department of Occupational Health, Daegu Catholic University, ²Center of Environmental Health Monitoring, Daegu Catholic University, ³Department of Environmental Health Science, Soonchunhyang University

ABSTRACT

Background: Since people move through microenvironments rather than staying in one place, they may be exposed to both indoor and outdoor PM_{2.5} concentrations.

Objectives: The aim of this study was to assess the exposure level of each sub-population group and evaluate the contribution rate of the major microenvironments.

Methods: Exposure scenarios for sub-population groups were constructed on the basis of a 2019 Time-Use survey and the previous literature. A total of five population groups were classified and researchers wearing MicroPEM simulated monitoring PM_{2.5} exposure concentrations in real-time over three days. The exposure contribution for each microenvironment were evaluated by multiplying the inhalation rate and the PM_{2.5} exposure concentration levels.

Results: Mean PM_{2.5} concentrations were 33.0 µg/m³ and 22.5 µg/m³ in Guro-gu and Wonju, respectively. When the exposure was calculated considering each inhalation rate and concentration, the home showed the highest exposure contribution rate for PM_{2.5}. As for preschool children, it was 90.8% in Guro-gu, 94.1% in Wonju. For students it was 65.3% and 67.3%. For housewives it was 98.2% and 95.8%, and 59.5% and 91.7% for office workers. Both regions had higher exposure to PM_{2.5} among the elderly compared to other populations, and their PM_{2.5} exposure contribution rates were 98.3% and 94.1% at home for Guro-gu and Wonju, respectively.

Conclusions: The exposure contribution rate could be dependent on time spent in microenvironments. Notably, the contribution rate of exposure to PM_{2.5} at home was the highest because most people spend the longest time at home. Therefore, microenvironments such as home with a higher contribution rate of exposure to PM_{2.5} could be managed to upgrade public health.

Key words: PM_{2.5}, exposure, microenvironment, time-activity pattern

Received February 13, 2022

Revised March 31, 2022

Accepted April 1, 2022

Highlights:

- More data on PM_{2.5} exposure by region and population is needed.
- PM_{2.5} exposure was calculated using measurements, time-activity, and inhalation rates in Guro, Seoul and Wonju, Gangwon.
- PM_{2.5} exposure is a combination of indoor (90%) and outdoor (5%), and transportation (5%).
- In both places, the elderly were more exposed.

*Corresponding author:

Department of Occupational Health,
 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. 서 론

세계보건기구(WHO)는 가정의 실내공기오염으로 매년 전 세계에서 380만 명이 조기 사망하는 것으로 보고하였다.¹⁾ 도시

화 및 산업화, 화석연료의 사용과 인구밀도의 증가로 대기질이 낮아지고 있으며, 외부에서 오염된 공기가 실내로 유입되면서 실내공기질이 감소할 수 있다.²⁾ 실내에서 발생하는 공기오염원은 난방, 조리작업, 청소, 흡연 등이 있다.³⁾ 이로 인해 실내공



기질이 쾌적하지 못한 경우 호흡기 및 심혈관계 질환, 생물학적 노화 등 인체에 부정적인 영향을 유발하여 실내공기질의 대한 관리가 필요하다.⁴⁾ 일반적으로 초미세먼지(PM_{2.5})의 노출을 평가할 때 정부에서 운영하는 대기측정망의 농도값을 이용하여 해당 지역의 노출을 동일하게 평가하고 실내와 실외에 재실하는 시간과 국소환경(microenvironment)에 대한 노출이 고려되지 않는다.⁵⁾ 하지만 실외보다 실내에서 보내는 시간이 더 많아 실내에서 발생하는 환경오염물질의 대한 노출은 개인의 건강영향에 주요 원인이 된다.⁶⁾ 그리고 사람들은 한 장소에서 머물지 않고 여러 국소환경 및 실외로 이동하며, 집, 학교, 다중이용시설, 직장 등 다양한 실내에서 발생하는 오염물질에 노출된다.⁷⁾ 따라서 PM_{2.5} 농도값을 포함한 공기오염물질의 노출을 정확하게 평가하기 위해서 시간활동양상(time-activity pattern)을 이용한 실내·외 환경 농도는 노출평가 및 예측모델에서 유용하게 이용할 수 있다.⁸⁾

Guak 등(2021)⁹⁾의 연구에 따르면 서울의 인구집단은 하루 중 60% 이상을 집에서 보내며 PM_{2.5}에 대한 실내환경과 실외 농도비(indoor to outdoor concentration ratio, I/O)에 따른 노출은 계절적으로 유의한 차이가 있었다. 성별, 연령, 근무시간 및 건강상태가 PM_{2.5} 노출에 중요한 결정요인으로 작용하였다. 이 연구의 대상 지역 중 서울시 구로구는 고속국도, 지하철 및 기차가 통과하고 유동인구가 많은 교통 중심지이다. 센서기반(sensor-based) 측정기 24개소를 설치하여 PM_{2.5}를 측정 한 결과 평균 42.1 µg/m³로 나타났고, 인구 가중치를 적용하여 노출평가를 한 연구가 선행되었다.¹⁰⁾ 그리고 강원도 원주시는 중소도시로 서울시 구로구에 비해 대중교통의 수가 적으며, 외곽에 산업단지가 형성되어 있다. 대기정책지원시스템(Clean Air Policy Support System)의 국가대기오염물질 배출량 통계에서 강원도는 국내 2015~2017년의 PM_{2.5} 전체 발생량의 4.5±0.5% 및 4.6±0.7%인 것으로 나타났다. 그러나 원주시 도심지에 위치한 반곡동의 경우 2016년 1월 1일부터 2019년 12월 31일까지의 대기오염측정망 PM_{2.5} 농도는 29.1±21.4 µg/m³로 국내 연평균 기준인 15 µg/m³보다 높은 수준으로 나타났다. 원주시에서 배출되는 대기오염물질양에 비해 PM_{2.5}의 농도가 높아 지역사회 배출량 관리보다 개인노출의 대한 관리가 필요한 것으로 나타났다.¹¹⁾

두 지역의 PM_{2.5} 노출 특성을 참고하여 본 연구에서는 서울시 구로구와 강원도 원주시를 대상으로 PM_{2.5}에 대해 실제 모의(active simulation)하여 하위 인구집단에 대한 노출평가를 실시하였다. 이를 통해 지역별 노출농도를 비교하고, 한국인 노출계수를 이용하여 하위인구집단에 대한 노출량과 국소 환경별 노출 기여율을 분석하여 인구집단별 개인노출에 대한 국소환경 관리의 우선순위와 기초 자료를 제공하고자 한다.

II. 연구 방법

1. 시간활동양상 평가

통계청(Statistics Korea) 생활시간조사(Time Use Survey)와 기존 문헌을 고찰하여 각 인구집단의 특성에 따라 국소환경을 분류하였다. 국소환경별 노출시간의 경우 서울시 구로구와 강원도 원주시에 대한 주요 5개 하위 인구집단(sub-populations)에 대해 Park 등(2019)¹²⁾의 연구를 이용하여 미취학 아동은 만 3~6세, 학생은 만 7~18세, 전업주부는 만 19~64세 여성, 사무직 직장인은 만 19~64세 남성, 노년층은 만 65세 이상으로 구분하였다. 미취학 아동의 경우 통계청 자료가 만 10세 이상을 기준으로 조사되었기 때문에 국립환경과학원에서 2019년에 발행한 한국 어린이 노출계수 핸드북을 이용하여 국소환경별 머무른 시간을 적용하였다.¹³⁾ 학생집단의 경우 Ryu 등(2018)⁸⁾의 연구를 참고하였으며, 전업주부 및 직장인, 노인 집단에 대해서는 통계청(mdis.kostat.go.kr)에서 제공한 2019년도 생활시간조사의 연구대상 지역인 서울시와 강원도의 연구기간과 동일한 평일 시간량 자료를 추출하여 10분 단위의 시간활동양상에 대한 행위별 장소를 선정하였다.¹⁴⁾

2. 노출 시나리오 및 PM_{2.5} 농도 측정

시간활동양상 평가 결과를 이용하여 각 인구집단의 특성에 맞춰 방문장소에 대해 노출 시나리오를 구성하였다. 직장 및 학교의 국소환경 중 미취학 아동집단은 초등학교 내 위치한 병설 유치원 또는 어린이집을 선정하였고, 학생은 학교, 직장인은 사무실로 구분하였다. 기타 실내는 미취학 아동 집단의 경우 키즈카페 또는 카페를 방문하였고, 학생 집단은 도서관 또는 학원, 편의점, 식당, 전업주부 집단은 음식점, 카페, 키즈카페, 쇼핑몰을 방문했다. 직장인 집단의 경우 음식점 및 주점을 선정하고, 노인은 의료기관, 체육시설, 노인정을 국소환경으로 구성하였다. 서울시 구로구는 2019년 9월 30일부터 10월 2일까지, 강원도 원주시는 2021년 11월 2일부터 11월 4일까지 각 3일 72시간 동안 각 5개의 인구집단별 1명씩 5명의 연구원이 PM_{2.5} 측정기를 착용하고 시간활동양상에 따라 국소환경에 머무르며 개인노출 농도를 실시간으로 1회 연속 측정하였다.

PM_{2.5} 노출농도 측정은 MicroPEM(RTI International, NC, USA)을 이용했다. MicroPEM은 광산란법을 이용한 직독식 측정기이다. 측정 전후의 여과지를 이용한 중량법으로 보정이 가능하다. 각 인구집단별 5명의 연구원이 개인모니터링을 한 측정기간 동안의 전체 센서 평균농도와 중량농도를 바탕으로 보정을 하였다. 펌프의 유량은 0.5 L/min이며 PM_{2.5} 농도값은 10초 간격으로 수집되었고 측정된 PM_{2.5} 농도는 시간활동양상과 비교를 위해 10분 간격으로 평균값을 산출했다. Du 등(2019)¹⁵⁾ 연구를 참고하여 6~461 µg/m³ 농도값 범위 외의 이상값(outlier)을 제거하였다.

3. 국소환경의 노출 기여율 평가

PM_{2.5}에 대한 노출농도와 시간활동양상 평가 결과를 바탕으로 산출된 호흡률을 각 국소환경별로 적용하였다. 전업주부와 노인 인구집단은 직장 또는 학교의 국소환경에 대한 시간을 집에서 거주한 시간과 합산하였다. 각 지역의 인구집단과 국소환경에 따른 노출량은 하루 중 국소환경에 머무른 시간과 노출시나리오에 따른 호흡률을 적용했다. 호흡률은 한국형 노출계수를 이용하여 어린이 10.4 m³/day, 학생 13.6 m³/day, 전업주부(성인 여자) 13.0 m³/day, 직장인(성인 남자) 16.2 m³/day, 노인(성인 평균) 14.6 m³/day를 적용하였다.^{13,16)} PM_{2.5} 농도의 범위는 평균에 대한 95%의 신뢰구간을 통계프로그램인 SPSS 19.0 software를 사용하여 분석하였다.

$$EC_{jk} = \sum C_{jk}t_{jk} \text{ (}\mu\text{g/m}^3\text{)} \quad (1)$$

$$E_{jk} = \sum_k^m C_{jk}TR_{jk}IR_k \text{ (}\mu\text{g/day)} \quad (2)$$

여기서, 국소환경 모델(microenvironmental model)의 노출농도(EC_{jk})는 식 (1)로 PM_{2.5}의 농도(C_{jk})와 인구집단(k)이 국소환경(j)에서 머무르는 시간(t_{jk})이다.¹⁷⁾ 그리고 흡입 노출(E_{jk})에 대한 식(2)는 인구집단별 노출농도(C_{jk})와 각 국소환경(m)에 머무르는 시간비(TR_{jk})의 호흡률(IR_k)을 산출하여 5개의 하위 인구

집단의 노출 기여율을 추정하였다.¹⁸⁾

III. 결 과

1. 시간활동양상

서울시와 강원도의 문헌고찰 및 통계청 생활시간조사를 이용하여 분석한 하위 인구집단의 시간활동양상에 대한 결과는 Table 1과 같이 나타났다. 재실 시간이 가장 많은 국소환경은 집으로 나타났으며, 노인 집단이 집에서 보낸 시간은 구로구 17.9±4.1 hr, 원주시는 18.4±3.4 hr이었다. 학교에서 보내는 시간은 미취학 아동 집단이 5.9±2.7 hr, 학생 집단은 7.8±2.4 hr로 하루 중 평균 24.6%, 32.6%의 시간을 보냈다. 학생의 경우 이동수단을 이용한 시간이 1.8±1.7 hr로 직장인과 비슷하였다. 서울시와 강원도를 비교한 결과 전업주부의 경우 15.3±4.7 hr, 15.9±4.1 hr로 강원도가 다소 높은 경향이 나타났고, 직장인은 집에서 머무른 시간이 약 5% 정도 강원도가 높았으며 직장인에서 일하는 시간은 서울 6.4±4.3 hr, 강원도 5.8±4.2 hr로 강원도가 약 40분 정도 적었다. 기타 실내 재실률의 경우 서울의 노인 집단이 10.8%로 가장 높고, 직장인(10.0%), 전업주부(8.8%) 순으로 높았으며, 강원도의 직장인이 8.1%로 나타났다. 실외에서 보낸 시간은 노인 집단이 강원 1.8±1.8 hr, 서울 1.6±1.4 hr로 강원도가 약간 높았으며, 전업주부 집단은 두

Table 1. The time spent (hr) in each microenvironment by sub-population groups

Population group	Indoor			Outdoor	Transport	Reference
	Home	Workplace or school	Other places			
	Mean±SD					
Preschool child (N=855)	16.1±2.6	5.9±2.7	0.5±1.1	1.0±1.1	0.6±1.2	Park et al., 2019 ¹²⁾
	67.3%	24.6%	2.2%	4.3%	2.6%	
Student (N=4,663)	12.8±2.4	7.8±2.4	0.8±0.6	1.4±0.7	1.8±1.7	Ryu et al., 2018 ⁸⁾
	53.5%	32.6%	3.3%	5.7%	7.5%	
House wives Seoul (N=1,345)	15.3±4.7	4.4±4.4	2.1±2.8	0.8±1.0	1.2±1.1	Kostat, 2020 ¹⁴⁾
	63.92%	18.50%	8.8%	3.3%	5.0%	
Gangwondo (N=475)	15.9±4.1	4.4±4.3	1.8±2.3	0.8±1.2	1.1±1.1	
	66.1%	18.4%	7.4%	3.5%	4.6%	
Worker Seoul (N=1,168)	12.6±4.1	6.4±4.3	2.4±3.0	0.8±1.2	1.8±1.4	
	52.5%	26.8%	10.0%	3.4%	7.3%	
Gangwondo (N=419)	13.7±3.8	5.8±4.2	2.0±2.5	1.1±1.6	1.5±1.3	
	57.0%	24.0%	8.1%	4.8%	6.2%	
Elderly Seoul (N=599)	17.9±4.1	1.2±3.0	2.6±3.1	1.6±1.4	0.8±1.2	
	74.4%	4.8%	10.8%	6.8%	3.3%	
Gangwondo (N=408)	18.4±3.4	1.4±2.8	1.8±2.0	1.8±1.8	0.6±1.1	
	76.6%	5.8%	7.6%	7.5%	2.4%	

%; rate of time spent in microenvironment.

지역 모두 유사했으며, 직장인 집단의 경우 강원도가 서울보다 다소 높았다.

2. PM_{2.5} 농도 수준

서울시 구로구와 강원도 원주시의 하위 인구집단별 10분 평균의 PM_{2.5} 농도는 Table 2와 같이 나타났다. 구로구의 경우 학생 집단(28.6±19.6 µg/m³)을 제외한 4개의 하위 인구집단의 평균값이 약 30 µg/m³ 이상으로 나타났으며, 노인 집단이 가장 높은 36.2±40.1 µg/m³로 분석되었다. 원주시는 구로구와 동일하게 노인 집단이 28.1±38.0 µg/m³로 가장 높았으며, 전업주부 집단이 21.9±14.2 µg/m³, 학생, 미취학 아동, 직장인 집단 순으로 높았다. 지역별로 비교했을 때 구로구의 미취학 아동 집단이 31.9±30.4 µg/m³으로 원주시 20.5±10.3 µg/m³보다 10 µg/m³정도 차이가 났으며, 학생 집단은 원주시(21.8±9.5 µg/m³)보다 구로구(28.6±19.6 µg/m³)가 높았다. 노인과 전업주부, 직장인 집단 모두 원주시보다 구로구가 높았고, 농도 분포의 백분위를 비교했을 때 모든 부분에서 원주시보다 구로구가 높게 나타났다.

3. 국소환경 노출 기여율 평가

지역별 인구집단의 국소환경에 대한 PM_{2.5} 노출량과 기여율을 분석하였다(Table 3). 미취학 아동 집단의 노출량은 구로구가 146.3~185.8 µg/day, 원주시는 88.3~94.3 µg/day로 약 2배의 차이가 나타났다. 국소환경 중 집의 노출 기여율은 구로구가 90.8%로 84.1%인 원주시보다 높게 분석되었다. 구로구의 학생집단의 노출 기여율은 집 65.3%, 학교 31.2%, 기타 실내 1.71%, 실외 1.46%, 이동수단 0.34%로 원주시와 비슷한 수준이다. 노출량의 경우 원주시보다 구로구가 집에서 약 8~16 µg/day, 학교에서 약 7~9 µg/day 높았다. 전업주부 집단은 집에서 보내는 노출 기여율이 각각 구로구가 98.2%, 원주시가 95.8%

였다. 노출량은 구로구가 원주시(159.9~179.0 µg/day) 보다 약 90 µg/day 높았다. 직장인 집단은 원주시가 집에서 노출되는 양이 90.5~100.4 µg/day로 구로구 78.4~95.4 µg/day보다 다소 높았고, 노출 기여율은 70.7%로 구로구가 59.5%인 것보다 약 11% 높은 수준이었다. 노인 집단은 집에서 보내는 시간이 구로구가 81%, 원주시 79%로 비슷하였으나 노출량은 약 1.5배 높았다.

IV. 고 찰

일정 지역의 전체인구에서 하위 인구집단에 대한 시간활동 양상 중 직장인 집단의 경우 국소환경이 유사한 사무직군을 대상으로 선정하고, 성인 여성의 호흡률을 적용하기 위해 직장인 집단은 성인 남성, 전업주부 집단은 성인 여성으로 구분하였다. 직장인 집단이 집에서 머무른 평균 재실시간이 서울시 12.6 hr와 강원도 13.7 hr로 강원도가 약 1시간 정도 높아 집에서 노출이 PM_{2.5} 전체 노출량에 기여를 하였고, 노인 집단은 원주시가 구로구보다 집에서 재실하는 시간이 높게 나타났다. 2020년 서울시 인구수는 960만명, 인구밀도는 15,865명/km²이고, 강원도는 151만명, 90명/km²으로 인구수는 약 6배 이상 높고, 인구밀도는 서울이 전국에서 제일 높고, 강원도가 제일 낮은 지역으로 확인했다.¹⁹⁾ Cho 등(2021)²⁰⁾의 연구에 의하면 대전지역의 노인복지 서비스 시설과 지하철 등의 대중교통이 가까울수록 이용률이 높고 교외 지역의 노인들은 복지시설을 이용하는데 어려움이 있는 것으로 나타났다. 대중교통이 많은 서울과 상대적으로 적은 강원도의 결과와 유사하였다. 중국 시안의 교통체계 특성분석을 통해 교통 시스템이 발달된 지역의 공공문화시설이 있는 것에 높은 상관관계를 갖는 연구 결과가 있다.²¹⁾ 기반 시설에 대한 접근성과 인구수 및 인구밀도가 낮고 대중교통수단이 상대적으로 적은 것이 강원도의 시간활동양상에서 집에

Table 2. Exposure concentration (µg/m³) of PM_{2.5} by area and sub-populations

Area	Population group (N)	Mean±SD	GM (GSD)	Min	Max	Percentile			
						25 th	50 th	75 th	95 th
Gurogu	Preschool child (428)	31.9±30.4	24.1 (2.0)	6.1	148.1	15.5	21.5	32.2	115.4
	Student (414)	28.6±19.6	23.6 (1.9)	6.1	151.1	15.5	24.0	35.6	70.8
	House wives (395)	34.3±39.9	26.7 (1.9)	6.1	415.0	19.8	25.9	32.6	71.5
	Worker (417)	33.8±43.7	23.9 (2.1)	6.1	393.8	15.9	21.0	34.1	79.6
	Elderly (402)	36.2±40.1	27.6 (2.0)	6.2	402.3	20.4	27.2	34.0	81.6
Wonjusi	Preschool child (432)	20.5±10.3	19.2 (1.4)	11.2	99.9	15.5	17.7	21.9	33.7
	Student (432)	21.8±9.5	20.3 (1.4)	14.3	70.3	14.6	21.2	24.9	40.2
	House wives (432)	21.9±14.2	19.1 (1.6)	6.1	113.9	13.3	16.2	26.0	46.3
	Worker (431)	20.4±7.3	19.1 (1.4)	6.6	51.8	15.8	19.0	23.6	41.2
	Elderly (427)	28.1±38.0	21.0 (1.9)	7.4	448.6	11.9	19.2	31.9	62.1

Table 3. PM_{2.5} contribution rate and exposure assessment of microenvironment by each population group

Population group	Micro-environment	Gurogu					Wonjuji				
		Rate of spent time per day (%)	Breathing rate (m ³ /day)	Exposure concentration* (μg/m ³)	Dose** (μg/day)	Average of contribution rate (%)	Rate of spent time per day (%)	Breathing rate (m ³ /day)	Exposure concentration* (μg/m ³)	Dose** (μg/day)	Average of contribution rate (%)
Preschool child	Home	69	7.15	29.8~37.8	146.3~185.8	90.8	68	7.05	18.5~19.7	88.3~94.3	84.1
	School	24	2.53	24.4~27.6	15.0~17.0	8.7	26	2.70	21.1~27.6	14.7~19.3	15.7
	Other places	2	0.22	10.6~19.1	0.05~0.09	0.04	2	0.22	18.3~28.0	0.08~0.13	0.10
	Outdoor	4	0.43	27.4~60.4	0.49~1.09	0.43	2	0.24	14.5~22.0	0.08~0.12	0.09
	Transportation	1	0.07	58.4~65.2	0.003~0.03	0.01	2	0.19	14.6~23.6	0.05~0.08	0.06
Student	Home	51	6.89	23.0~27.9	80.3~97.4	65.3	52	7.05	19.5~22.2	71.1~81.0	67.3
	School	32	4.31	28.6~33.4	39.1~45.7	31.2	32	4.41	22.5~25.6	32.2~36.6	30.4
	Other places	9	1.29	14.9~23.1	1.8~2.8	1.71	7	1.01	17.8~21.5	1.3~1.6	1.30
	Outdoor	6	0.79	31.9~55.2	1.5~2.5	1.46	5	0.66	19.8~25.3	0.6~0.8	0.64
	Transportation	2	0.31	31.6~96.7	0.2~0.7	0.34	3	0.47	17.1~22.8	0.3~0.4	0.29
House wives	Home	80	10.38	32.7~42.6	270.8~353.1	98.2	82	10.68	18.2~20.4	159.9~179.0	95.8
	Other places	14	1.78	18.6~23.5	4.5~5.7	1.61	12	1.56	30.2~42.6	5.7~8.0	3.87
	Outdoor	3	0.39	20.0~33.3	0.2~0.4	0.10	3	0.36	13.4~28.6	0.1~0.3	0.12
	Transportation	3	0.45	18.7~30.6	0.3~0.5	0.12	3	0.39	20.4~48.4	0.2~0.6	0.23
	Home	47	7.54	22.3~27.2	78.4~95.4	59.5	51	8.21	21.7~24.1	90.5~100.4	70.7
Worker	Workplace	33	5.40	20.2~24.3	36.4~43.7	27.4	35	5.74	17.9~19.1	36.3~38.9	27.8
	Other places	9	1.43	67.0~144.1	8.4~18.1	9.06	4	0.60	13.7~18.7	0.3~0.4	0.27
	Outdoor	3	0.56	34.3~76.2	0.7~1.5	0.74	3	0.45	15.9~18.6	0.2~0.2	0.16
	Transportation	8	1.28	39.8~54.0	4.0~5.4	3.22	7	1.20	15.4~17.8	1.4~1.6	1.09
	Home	81	11.86	34.0~43.5	328.0~419.0	98.3	79	11.6	21.3~25.6	194.6~234.0	94.1
Elderly	Other places	14	1.99	18.3~24.1	5.0~6.6	1.5	12	1.79	28.9~72.9	6.3~16.0	4.91
	Outdoor	3	0.44	24.7~62.1	0.3~0.8	0.15	6	0.84	12.2~68.7	0.6~3.4	0.87
	Transportation	2	0.30	11.3~42.6	0.1~0.3	0.04	3	0.41	17.0~53.3	0.2~0.6	0.17

*Exposure concentration: PM_{2.5} exposure concentration at 95% confidence interval for each microenvironment.

**Dose: breathing rate of the rate of spent time per day and exposure concentration of multiplied microenvironment exposure does.

서 재실시간이 서울시보다 높을 수 있다고 생각한다.

서울시 구로구와 강원도 원주시의 하위 인구집단에 대한 PM_{2.5} 노출농도를 비교했을 때 구로구 학생집단의 실외농도는 31.9~55.2 µg/m³, 국소환경 중 이동 수단에서 31.6~96.7 µg/m³로 나타났다. 원주시 학생집단의 실외와 이동수단의 노출농도는 각 19.8~25.3 µg/m³, 17.1~22.8 µg/m³로 구로구 학생집단에 비해 10 µg/m³ 높게 나타났다. 2018년에 선행된 연구에서 서울의 도로 교통량이 많은 경우 PM_{2.5} 농도가 높다고 보고한 결과와 비교했을 때 구로구 학생집단의 PM_{2.5} 노출에 도로 교통량이 일정 부분 기여하는 것으로 보인다.²²⁾ 다른 하위 인구 집단에서는 원주의 인구집단이 높거나 비슷한 경우도 있는데 이동수단과 실외의 노출에 대해서 추가적인 연구가 필요하다.

PM_{2.5}에 대한 노출 기여율 평가 시 노출은 국소환경에서 노출농도와 노출시간의 함수로 나타낼 수 있는데, 집에 있는 시간이 긴 미취학 아동과 전업주부, 노인 집단의 노출량에 따른 노출 기여율이 학생과 직장인 집단보다 높은 것으로 나타났다. PM_{2.5}의 노출 기여율이 집에서 약 3% 차이인 구로구 전업주부 집단(98.1%)의 노출량은 270.8~353.1 µg/day, 원주시(95.8%)는 159.9~179.0 µg/day로 원주시보다 구로구의 집의 PM_{2.5} 농도값이 높아 노출량이 높은 것으로 판단된다. Lim 등(2012)²³⁾ 연구에서 하루 중 재실시간이 가장 긴 집에서 PM_{2.5}의 개인노출이 가장 크게 기여했다고 보고한 결과와 유사하였다. 직장인 집단은 원주시와 구로구의 노출농도가 큰차이가 나타나지 않았다. 그러나 재실시간이 긴 원주시 직장인 집단의 노출기여율이 70.7%로 구로구(59.5%)보다 높았고 공기오염물질의 노출을 낮추기 위해서는 농도가 높고, 노출시간이 긴 국소환경을 관리해야 한다는 연구 결과와 유사하였다.²⁴⁾

본 연구의 하위 인구집단 노출은 국소환경 중 집에서의 재실시간에 따라 노출량이 크게 증가하고 이에 따른 기여율은 노인, 미취학 아동, 전업주부 인구집단이 실내에서 약 90% 이상으로 나타났다. 미국 필라델피아에서 SHEDS-PM (stochastic human exposure and dose simulation) 모델을 적용했을 때 전체 노출 중 집에서의 노출이 가장 크다고 보고한 결과와 일치하였다.²⁵⁾ 실외의 경우 PM_{2.5}의 노출농도는 머무른 시간이 짧아 노출 기여율의 영향이 크지 않았다. 그러나 실외에서 단시간 노출이 되거나, 실외의 오염된 공기가 실내로 유입되어 장시간 노출되었을 때 문제가 되어 관리를 해야 한다. 실외에서는 실외활동을 자제하거나 개인보호구를 착용하여 개인적인 노출 관리를 하고, 실외의 공기질이 낮은 경우 밀폐하는 실내를 적절히 관리하는 것이 필요하다.²⁶⁾ 유럽 5개의 도시의 2015년 시간활동양상을 기반으로 집, 학교, 교통수단, 실외를 대상으로 PM_{2.5}에 대한 노출평가 연구에서 실외 및 이동수단의 노출은 실내에 비해 2배 이상 높았으나, 재실하는 시간이 긴 집에서 노출량이 높은 기여하였다.²⁷⁾ 본 연구에서 두 지역 노인 집단과 구로구의 미취학 아동 집단의 실외와 대중교통의 PM_{2.5}의 농도는 높으나

재실시간이 짧아 노출 기여율이 적은 것과 일치하였다.

통계청에서 발표한 2020년 남성 기대수명 80.5세, 여성 86.5세를 기준으로 미취학 아동 집단부터 노인 집단의 총 노출량을 산출하면 직장인 집단으로 분류한 남성의 PM_{2.5} 노출량은 구로구 5.0~7.3 kg, 원주는 4.0~5.2 kg 노출되는 것으로 산출되었다.²⁸⁾ 전업주부로 가정한 여성은 구로구 7.4~10.5 kg, 원주시 4.6~5.9 kg로 남성보다 실내 재실시간이 긴 여성이 노출량이 높은 경향으로 분석되었고, 전일제 근로자보다 집에서 대부분의 시간을 보내는 전업주부의 노출이 50% 이상 높았다는 연구와 비슷한 연구결과를 보여준다.²⁹⁾ 노출 기여율이 높은 실내환경을 적절히 관리할 경우 PM_{2.5}에 노출을 감소시킬 것으로 생각한다.

실내환경 오염물질에 대한 노출평가를 실시할 경우 하나의 국소환경이 아닌 시간활동양상에 따른 여러 국소환경 실내와 실외의 개인노출을 평가하는 연구가 지속되어야 하며, 본 연구에서는 5개의 하위 인구집단을 구분하였으나 직장이 있는 노인과 학생에 대해 성별로 구분하고 성인 여성의 경우 직장인 여성을 구분하는 등의 세부적으로 한 추가 연구가 필요하다. 본 연구는 실내오염물질 중 PM_{2.5}에 대해서 실시하였지만 여러 오염물질에 대한 노출평가를 실시해야 한다.

V. 결 론

본 연구에서는 시간활동양상을 분석하여 미취학 아동, 학생, 전업주부, 직장인 노년층에 대한 하위 인구집단을 분류하여 노출시나리오를 구성하였다. PM_{2.5} 실시간 모니터링 측정기를 연구원들이 착용하고 인구집단별로 노출농도를 수집했다. 시간활동양상은 강원도가 서울시보다 집에서 보내는 시간이 더 많았고, PM_{2.5}의 노출농도는 구로구가 약 30 µg/m³, 원주시가 20 µg/m³ 이상으로 구로구가 높게 나타났다. 지역별 시간활동양상에 따른 재실률과 한국인 노출계수의 호흡률을 산출하여 PM_{2.5}에 대한 노출기여율을 분석했을 때 실외와 이동수단의 노출량이 높았다. 그러나 노출기여율은 재실시간이 짧아 낮게 나타났다. 국소환경 중 노출기여율이 가장 높은 곳은 집으로 나타났다. 미취학 아동과 전업주부, 노인 집단이 90% 이상으로 가장 높게 확인되었다.

감사의 글

본 연구는 환경부의 재원으로 한국환경산업기술원의 환경성질환경예측평가기술개발 사업의 지원을 받아 수행되었습니다 (과제번호: 2021003320001).

Conflict of Interest

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

References

- World Health Organization. Household Air Pollution and Health. Geneva: World Health Organization; 2021.
- Chen J, Zhou C, Wang S, Hu J. Identifying the socioeconomic determinants of population exposure to particulate matter (PM_{2.5}) in China using geographically weighted regression modeling. *Environ Pollut*. 2018; 241: 494-503.
- Li C, Bai L, He Z, Liu X, Xu X. The effect of air purifiers on the reduction in indoor PM_{2.5} concentrations and population health improvement. *Sustain Cities Soc*. 2021; 75: 103298.
- Jeong H, Park D. Contribution of time-activity pattern and microenvironment to black carbon (BC) inhalation exposure and potential internal dose among elementary school children. *Atmos Environ*. 2017; 164: 270-279.
- Anderson HR, Favarato G, Atkinson RW. Long-term exposure to air pollution and the incidence of asthma: meta-analysis of cohort studies. *Air Qual Atmos Health*. 2013; 6: 47-56.
- Schweizer C, Edwards RD, Bayer-Oglesby L, Gauderman WJ, Ilacqua V, Jantunen MJ, et al. Indoor time-microenvironment-activity patterns in seven regions of Europe. *J Expo Sci Environ Epidemiol*. 2007; 17(2): 170-181.
- Kim Y, Yang W, Son B. Estimation of total exposure to benzene, toluene and xylene by microenvironmental measurements for iron mill workers. *Korean J Environ Health*. 2007; 33(5): 359-364.
- Ryu H, Yoon H, Eom I, Park J, Kim S, Cho M, et al. Time-activity pattern assessment for Korean students. *J Environ Health Sci*. 2018; 44(2): 143-152.
- Guak S, Lee S, An J, Lee H, Lee K. A model for population exposure to PM_{2.5}: identification of determinants for high population exposure in Seoul. *Environ Pollut*. 2021; 285: 117406.
- Park J, Jo W, Cho M, Lee J, Lee H, Seo S, et al. Spatial and temporal exposure assessment to PM_{2.5} in a community using sensor-based air monitoring instruments and dynamic population distributions. *Atmosphere*. 2020; 11(12): 1284.
- Cha S, Han Y, Bae G. Spatio-temporal distribution of PM₁₀ and PM_{2.5} in Gangwon province of South Korea using air pollution monitoring network data. *J Korean Soc Atmos Environ*. 2020; 36(4): 492-506.
- Park J, Yang S, Park Y, Ryu H, Kim E, Choe Y, et al. Exposure and risk assessment of benzene and PM₁₀ for sub-populations using Monte-Carlo simulations. *J Environ Health Sci*. 2019; 45(3): 247-257.
- National Institute of Environmental Research. Korean Exposure Factor Handbook for Children. Incheon: National Institute of Environmental Research; 2019.
- Statistics Korea. Time Use Survey 2019. Daejeon: Statistics Korea; 2020. Available: https://kostat.go.kr/portal/korea/kor_nw/1/6/4/index.board?bmode=read&aSeq=384161&pageNo=&rowNum=10 &amSeq=&sTarget=&sTxt= [accessed 12 February 2022].
- Du Y, Wang Q, Sun Q, Zhang T, Li T, Yan B. Assessment of PM_{2.5} monitoring using MicroPEM: a validation study in a city with elevated PM_{2.5} levels. *Ecotoxicol Environ Saf*. 2019; 171: 518-522.
- National Institute of Environmental Research. Korean Exposure Factor Handbook. Incheon: National Institute of Environmental Research; 2019.
- Moschandreas DJ, Watson J, D'Abreton P, Scire J, Zhu T, Klein W, et al. Chapter three: methodology of exposure modeling. *Chemosphere*. 2002; 49: 923-946.
- 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.
- Statistics Korea. Life Tables for Korea 2020. Daejeon: Statistics Korea; 2021.
- Cho H, Choi J, No W, Oh M, Kim Y. Accessibility of welfare facilities for elderly people in Daejeon, South Korea considering public transportation accessibility. *Transp Res Interdiscip Perspect*. 2021; 12: 100514.
- Sun W, Wang Y. Coupling analysis of transportation system and public cultural facilities based on POI Data--take Xi'an as an example. *World Sci Res J*. 2021; 7(4): 414-422.
- Jeong J, Lee S. Spatial distribution of particulate matters in comparison with land-use and traffic volume in Seoul, Republic of Korea. *J Cadastre Land InformatiX*. 2018; 48(1): 123-138.
- Lim S, Kim J, Kim T, Lee K, Yang W, Jun S, et al. Personal exposures to PM_{2.5} and their relationships with microenvironmental concentrations. *Atmos Environ*. 2012; 47: 407-412.
- Kornartit C, Sokhi RS, Burton MA, Ravindra K. Activity pattern and personal exposure to nitrogen dioxide in indoor and outdoor microenvironments. *Environ Int*. 2010; 36(1): 36-45.
- Burke JM, Zufall MJ, Ozkaynak H. A population exposure model for particulate matter: case study results for PM(2.5) in Philadelphia, PA. *J Expo Anal Environ Epidemiol*. 2001; 11(6): 470-489.
- Ścibor M, Balcerzak B, Galbarczyk A, Targosz N, Jasienska G. Are we safe inside? Indoor air quality in relation to outdoor concentration of PM₁₀ and PM_{2.5} and to characteristics of homes. *Sustain Cities Soc*. 2019; 48, 101537.
- Korhonen A, Relvas H, Miranda AI, Ferreira J, Lopes D, Rafael S, et al. Analysis of spatial factors, time-activity and infiltration on outdoor generated PM_{2.5} exposures of school children in five European cities. *Sci Total Environ*. 2021; 785: 147111.
- Statistics Korea. Population and Housing Census 2020. Daejeon: Statistics Korea; 2021.
- Buonanno G, Stabile L, Morawska L. Personal exposure to ultrafine particles: the influence of time-activity patterns. *Sci Total Environ*. 2014; 468-469: 903-907.

<저자정보>

신지훈(연구원), 최영태(대학원생), 김동준(연구원),
민기홍(연구원), 우재민(학생), 김동준(학생),
신정현(연구원), 조만수(교수), 성경화(연구원),
이종대(교수), 양원호(교수)