

모사챔버 실험을 통한 실내공간의 재실자 활동에 따른 미세먼지 비산 특성 연구

조성희^{1,2}, 조영민¹, 박덕신¹, 김민정^{1*}

¹한국철도기술연구원 신교통혁신연구소, ²경희대학교 환경응용과학과

Study on Characteristics of Particulate Matter Suspension in Indoor Space through Simulation Chamber Experiments: Influence of Physical Activity

Sunghee Cho^{1,2}, Yeongmin Cho¹, Duckshin Park¹, Minjeong Kim^{1*}

¹New Transportation Innovative Research Center, Korea Railroad Research Institute

²Department of Environmental Science and Engineering, Kyung Hee University

요약 본 연구는 실내공간 중 학교 교실의 특성을 반영한 모사챔버를 활용하여 주요 영향인자를 제어한 조건에서 재실자 활동에 따른 미세먼지 비산을 측정하였다. 이를 위해 67m³ 크기의 모사챔버를 제작하였으며, 실험자가 모사챔버 내부를 걷기(1 m/s), 빠르게 걷기(2 m/s), 뛰기(3 m/s)로 편도 이동 시 비산되는 미세먼지 농도를 측정하였다. 이때 모사챔버의 바닥 미세먼지 침적량은 0.3 g/m², 온도는 20~25 ℃, 습도는 45~50 %를 유지하였다. 또한 바닥에 침적된 미세먼지 질량 대비 공기 중으로 부유하는 미세먼지 질량 비율인 비산계수($\mu\text{g}/\mu\text{g}$)를 각 활동의 이동 속도별로 산출하였다. 모사챔버 내 PM₁₀ 비산농도는 걷기 시 7.3 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, 빠르게 걷기 시 17.6 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, 뛰기 시 26.7 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 이며 PM_{2.5} 비산농도는 걷기 시 3.0 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, 빠르게 걷기 시 4.7 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, 뛰기 시 5.2 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 실험자의 이동속도가 증가함에 따라 선형적으로 증가하였다. 이는 이동속도가 증가함에 따라 실험자 주변 공기의 유동 및 유속이 증가하며, 이에 따라 입자의 비산 속도가 증가하기 때문에 사료된다. 비산계수의 경우 PM₁₀은 걷기에서 0.0097, 빠르게 걷기에서 0.0254, 뛰기에서 0.0454를 보였으며, PM_{2.5}는 걷기에서 0.0040, 빠르게 걷기에서 0.0062, 뛰기에서 0.0095로 이동속도에 대해 선형적인 증가 경향을 보였다. 또한 이동속도와 비산 농도, 비산계수 간의 선형 회귀식을 도출하여 PM₁₀은 99%, PM_{2.5}는 97~99%의 정확도를 확인하였다. 모사챔버 실험을 통해 도출된 재실자 이동속도와 비산 농도, 비산계수 간의 회귀식을 활용하여 재실자의 여러 이동속도 조건에서의 미세먼지 비산 양 추정이 가능할 것으로 사료된다.

Abstract This research investigates the properties of a particulate matter (PM) suspension in accordance with occupants' activity through a simulation chamber experiment that reflects the indoor characteristics. Experimenters move across the simulation chamber at a pace of 1 m/s (walking case), 2 m/s (jogging case), and 3 m/s (running case). Then, the PM₁₀ and PM_{2.5} concentration that increases due to the suspension resulting because of the experimenters' activity is measured. During the experiments, the simulation chamber condition is set at as follows: dust surface mass is 0.3 g/m², temperature is 20~25℃, and humidity is 45~50%. Then, the PM suspension factor, the ratio of airborne PM mass above the suspension site to its surface mass, is analyzed at the respective activity conditions. Both the PM suspension concentration and factor tend to show a linear increase as the moving speed of experimenters' increases. At the respective walking, jogging, and running conditions, the PM₁₀ suspension concentration is 7.3 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, 17.6 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, and 26.7 $\mu\text{g}/\text{m}^3$; the PM_{2.5} suspension concentration is 3.0 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, 4.7 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, and 5.2 $\mu\text{g}/\text{m}^3$. Furthermore, the regression equations between (1) experimenters' moving speed and suspension concentration and (2) experimenters' moving speed and suspension factor are suggested. The accuracy of regression equations is 99% for PM₁₀ and 97~99% for PM_{2.5}.

Keywords : Particulate Matter, Suspension, Suspension Factor, Occupants' Activity, Simulation Chamber

본 연구는 정부(과학기술정보통신부, 교육부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행되었습니다. (No, 2019M3E7A1113078)

*Corresponding Author : Minjeong Kim (Korea Railroad Research Institute)

email: mjkim88@krrri.re.kr

Received September 23, 2021

Revised November 1, 2021

Accepted November 5, 2021

Published November 30, 2021

1. 서론

현대인들은 많은 시간을 가정, 사무실과 같은 실내공간에서 생활함에 따라 실내 미세먼지에 대한 관심이 증가하고 있다. 미세먼지는 호흡기 및 심혈관 질환을 유발하는 등 재실자 건강에 밀접한 영향을 미치므로 실내공기질 관리는 재실자 건강의 중요한 요인으로 대두되고 있다[1,2]. 실내 미세먼지의 발생 원인은 재실자 활동(보행, 청소 등), 요리, 실내 연료연소 등으로 다양하며 바닥으로부터의 비산(suspension)도 주요 발생원으로 알려져 있다[3,4]. 비산 입자는 대개 1-10 μm 직경의 흡입성 입자로 이는 실내공기 중에 오랜 시간 부유하며 호흡을 통해 재실자에게 흡입된다. 또한 가구 및 생활용품 표면에 침적되어 미세먼지에 대한 재실자의 노출 위험성을 증가시킨다[4,5]. 따라서 실내공간 내 재실자의 미세먼지 노출을 파악하기 위해서는 미세먼지의 비산 특성 규명이 필요하다.

미세먼지의 비산에 영향을 미치는 주요 요인은 재실자의 활동 강도, 바닥재 특성(재질, 표면 거칠기 등), 습도로 알려져 있다[6,7]. 특히 재실자 활동 시 발생하는 기류는 미세먼지를 바닥으로부터 분리시키는 주요한 추진원이며, 활동 강도가 증감함에 따라 미세먼지 비산이 증가하는 것으로 알려져 있다[4]. 이에 최근 재실자 활동에 따른 미세먼지 비산에 대한 다수의 연구가 수행되고 있다[8,9]. 그러나 실제로 재실자가 생활하는 공간에서의 미세먼지 실험연구는 실내 온·습도, 바닥 먼지 양, 환기 등 미세먼지 비산에 영향을 미치는 요인 제어에 어려움이 있다. 이로 인해 특정 요인에 의한 미세먼지 비산 특성 규명 및 정량화가 어렵다는 한계를 지닌다[9]. 따라서 본 연구는 실내공간의 특성을 반영한 모사챔버를 활용하여 주요 영향인자를 제어한 조건에서 재실자 활동에 따른 미세먼지 비산 농도를 측정하는 것을 목표로 하였다.

본 연구에서는 학교 교실 특성을 반영한 모사챔버를 활용하였다. 교실은 학생들이 하루 중 두 번째로 많은 시간을 보내는 곳이며, 10대 학생들은 체중 당 호흡량이 많아 다른 연령층에 비해 실내공기질의 영향을 많이 받기 때문이다[10,11]. 이를 위해 67m²[9m(L) X 3m(W) X 2.5m(H)] 크기의 모사챔버를 제작하였으며, 10대 초반의 평균 신체조건을 가진 실험자가 모사챔버 내부에서 걷기, 빠르게 걷기, 뛰기 활동 시 비산되는 미세먼지 농도를 측정하였다. 그 후 활동 조건 별 비산계수를 산정하여 미세먼지 비산에 대한 활동 강도의 영향을 정량적으로 비교하였다.

2. 실험방법

2.1 미세먼지 비산실험 모사챔버

본 연구에서는 「학교시설·설비기준령」의 보통교실 면적인 66m²[7.5m(W) X 9m(L)]의 약 1/3 크기인 27m² [3m(W) X 9m(L)]로 모사챔버를 제작하였다(Fig. 1). 이때 모사챔버의 높이는 2.5m로 하였다. 실제 교실의 출입문을 반영하기 위해 모사챔버의 측면 앞, 뒤쪽에 여닫이 문을 설치하였다. 또한 창문의 크기, 개수, 위치를 실제 교실과 동일하게 구성하였다. 더불어 미세먼지 비산 실험 시 실험자의 출입을 위하여 모사챔버의 전면, 후면에 미닫이 문을 설치하였는데, 미닫이를 사용한 이유는 문을 열고 닫음에 따른 기류 발생 및 미세먼지 농도 변화를 낮추기 위함이다. 실제 교실의 바닥재로는 우드 데코타일, 인조석 테라조 타일, 모노룸 장판이 주로 사용되며 본 모사챔버에는 우드 데코타일을 사용하였다.



Fig. 1. Inside the simulation chamber for particulate matter suspension experiments.

모사챔버 내 미세먼지 농도를 측정하기 위하여 광산란 측정 방식의 aerosol spectrometer 11-D(Grimm Aerosol Technik, 독일)를 사용하였다. 이 장비는 0.25-35 μm 직경의 입자를 31개 채널로 나누어 6초마다 직경 별 개수 농도와 질량 농도를 측정한다. 측정 장비의 설치 높이는 학생들이 의자에 앉았을 때의 호흡기 위치를 고려하여 바닥으로부터 50 cm, 100 cm 높이에 1대씩 설치하였다. 또한 모사챔버 내부의 온도, 습도를 측정하

기 위하여 HygroFlex3 digital transmitter (rotronic, 영국)를 사용하였다.

2.2 미세먼지 비산실험 방법

본 연구의 목적은 모사챔버 내부의 실험자 활동 강도에 따른 미세먼지 비산 농도를 측정하는 것이다. 본 실험은 (1) 모사챔버 내 미세먼지 분사 및 침강, (2) 실험자 활동에 따른 미세먼지 비산 농도 측정, (3) 비산계수 산정의 순서로 진행되었으며 각 과정에 대한 상세 설명은 아래와 같다.

2.2.1 모사챔버 내 미세먼지 분사 및 침강

바닥에 침적된 미세먼지 양(dust mass loading, g/m²)은 비산 농도에 영향을 미치는 요인으로 알려져 있다 [6]. 이에 본 연구에서는 비산 실험에 앞서 시험용 미세먼지(ISO 12103-1 A1 ultrafine test dust)를 모사챔버에 분사 후 침강시켜 챔버 바닥의 미세먼지 양을 일정하게 유지하였다. Table 1은 본 연구에서 사용한 시험용 미세먼지의 입경 분포를 나타낸다. 모사챔버 내부에 미세먼지를 분사하기 위하여 Solid Aerosol Generator 410(Topas GmbH, 독일)을 사용하였다. 챔버 내 미세먼지의 균일 혼합을 위하여 송풍기를 가동하였으며, 분사 완료 후 송풍기를 끄고 24시간 동안 미세먼지를 챔버 바닥으로 침강시켰다.

Table 1. ISO 12103-1 A1 ultrafine test dust size distribution

Size [μm]	Distribution [% less than]
0.97	3-5
1.38	7-10
2.75	23-27
5.50	65-69
11.00	95.5-97.5
22.00	100

실제 학교 교실의 경우 방과후에 매일 청소를 하며 방학마다 주기적으로 물청소를 하므로 바닥의 미세먼지 양이 적을 것으로 사료된다. 이에 본 연구에서는 선행연구 [4,9] 중 오염도가 낮은 실험조건의 평균값인 0.3 g/m²을 챔버 바닥의 미세먼지 침적량으로 도출하였다. 바닥에 침적된 미세먼지 양을 측정하기 위하여 모사챔버 바닥에 필터를 균등 간격으로 배치하여 미세먼지 분사 및 침강 전후의 필터 무게를 측정하였다. 이후 Eq. (1)을 통해 미

세먼지 침적량을 계산함으로써 매 실험마다 챔버 바닥의 미세먼지 조건을 일정하게 유지하였다.

$$dust\ mass\ loading = \frac{m_{after} - m_{before}}{\pi r^2} \quad (1)$$

m_{before} : filter weights before dispersing and settling of the test dust

m_{after} : filter weights after dispersing and settling of the test dust

r : filter radius

2.2.2 활동에 따른 미세먼지 비산 농도 측정

10대 초반 학생들의 활동 특성 분석연구를 기반으로 모사챔버 내부의 실험자 활동 조건을 도출하였다. 선행연구[12-15]에 의하면 10대 초반 학생들은 평균적으로 걷기 활동 1 m/s, 뛰기 활동 4.5 m/s의 이동속도를 보였다(Table 2). 다만 뛰기의 경우에는 직선주로 50m를 전력 질주한 것으로 교실 내부에서의 뛰기 속도는 문헌 자료보다 낮을 것으로 사료된다. 이에 본 연구에서는 실험자의 활동 조건으로 (1) 걷기 1 m/s, (2) 빠르게 걷기 2 m/s, (3) 뛰기 3 m/s를 설정하였다.

Table 2. Physical activity properties of early teenage students

	Walking			Running
	Chae et al. ^[12]	Yoon ^[13]	Lee et al. ^[14]	Korea Sports Promotion Foundation ^[15]
Age	11-12	11-12	10-14	11-12
Moving speed [m/s]	1.35	1.14	0.94	4.5

본 연구에서는 10대 초반의 신체조건(몸무게 46~50 kg)을 가진 실험자가 각 활동의 이동속도에 맞춰 모사챔버 내부를 편도로 이동하였으며 이때 비산되는 미세먼지 농도를 측정하였다. 실험자는 해당 국가연구개발사업의 참여 연구원으로 실험 참여에 대한 사전 동의를 받은 후 실험을 진행하였다. 미세먼지 비산 실험의 상세 과정은 다음과 같다.

- (1) 실험자가 모사챔버에 입장한 후 5분동안 대기함 (목적: 출입문 개폐에 따른 챔버 내 미세먼지 농도 변화의 안정화)
- (2) 실험자가 각 활동 조건별 이동속도로 챔버를 1회

지나감

- (3) 실험자는 뒤쪽 출입문을 통해 챔버에서 나옴
- (4) 챔버 내부의 미세먼지 농도가 안정되면 (1)~(3)을 반복함

「학교보건법 시행규칙」(교육부령)에 따르면 교실의 실내온도는 18~28 ℃, 비교습도는 30~80 %를 유지해야 한다. 이에 본 연구에서는 챔버 내부의 온도를 20~25 ℃, 습도를 45~50 %를 유지하며 실험을 진행하였다.

2.2.3 미세먼지 비산계수 산정

마지막으로 활동별 이동 속도에 따른 미세먼지의 비산 계수를 산정하였다. 비산 계수란 바닥에 침적된 미세먼지 질량 대비 공기 중으로 부유한 미세먼지의 질량 비율로써 Eq. (2)를 통해 계산된다[5].

$$E_{Dp} = \frac{C_{suspense} \times V_{room}}{C_{loading} \times A_{walk}} \quad (2)$$

E_{Dp} : resuspension factor [$\mu\text{g}/\mu\text{g}$]

$C_{suspense}$: resuspension concentration [$\mu\text{g}/\text{m}^3$]

V_{room} : volume of the classroom chamber [m^3]

$C_{loading}$: dust surface concentration [$\mu\text{g}/\text{m}^2$]

A_{walk} : area in the chamber traversed by the occupant [m^2]

이후 실험자의 이동 속도와 비산 계수 사이의 상관관계를 분석함으로써 미세먼지 비산에 대한 재실자 활동의 영향을 정량화 하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1 재실자 활동에 따른 미세먼지 비산 특성

Fig. 2는 실험자 활동에 따른 모사챔버 내부의 PM_{10} 농도 변화를 나타낸다. 각 활동 조건마다 5~7회 반복 실험을 하였으며 그림에서 실선은 농도 변화의 평균값을, 음영은 표준편차를 의미한다. 실험자가 1 m/s 속도로 이동하는 걷기 활동 이후 PM_{10} 농도는 점차 증가하여 3분 뒤 최고 농도에 도달하는 경향을 보였다. 반면 빠르게 걷기, 뛰기의 경우에는 실험자 활동 직후 PM_{10} 농도가 급증하여 약 30초~1분 뒤 최고 농도에 도달하였다. 또한 PM_{10} 비산 농도는 활동 강도가 세짐에 따라 증가하는 경향을 보였다(Table 3). 이는 활동 강도가 증가함에 따라 실험자 주변의 공기 유동 및 유속이 증가하며, 이에 따라 입자의 비산 속도가 증가한다는 기존 연구결과와 일치한

다[16,17]. Rim 등[17]은 신체 활동에 따른 높이 별 공기 유속을 측정하여 움직임이 커질수록 유속이 빨라짐을 확인하였다. 또한 재실자 부근에 발생한 국부적 기류가 입자 이동에 주요한 영향을 미침을 확인하였다. 본 연구에서도 실험자 활동 별 발생 유속을 바닥으로부터 50cm 높이(미세먼지 측정장비 근처)에서 측정하였으며, 선행연구와 유사하게 활동 강도가 증가함에 따라 유속이 증가함을 확인하였다(Table 2). 이로 인해 모사챔버 내 PM_{10} 비산 농도가 활동 강도에 따라 증가한 것으로 사료된다.

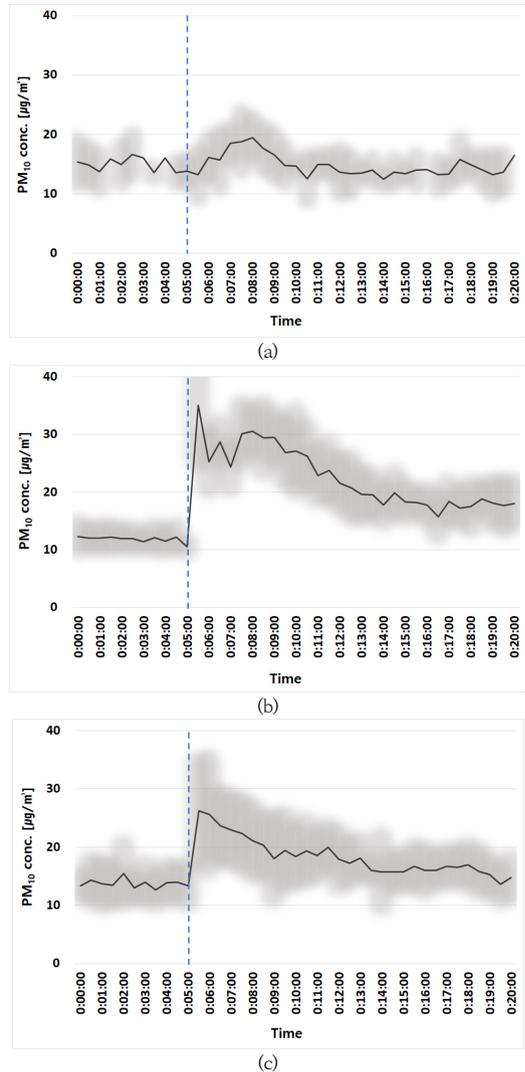


Fig. 2. Changes in PM_{10} concentration in the chamber under each activity condition: (a) walking (b) jogging (c) running

Table 3. Properties of PM suspension depending on occupant activities.

Activity	Walking	Jogging	Running	
Suspension time	3 min.	1 min.	30 sec.	
Air velocity [m/s]	0.06	0.09	0.11	
Suspension conc. [$\mu\text{g}/\text{m}^3$]	PM ₁₀	7.3 (± 0.6)	17.6 (± 6.8)	26.7 (± 6.7)
	PM _{2.5}	3.0 (± 1.1)	4.7 (± 2.6)	5.6 (± 1.2)

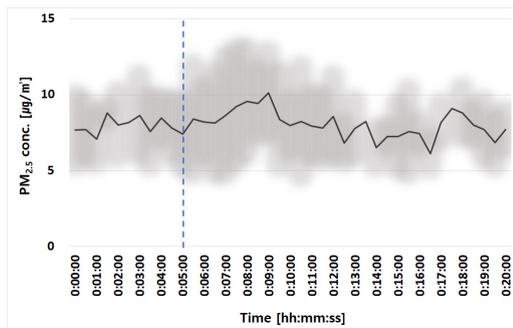
Fig. 3은 실험자 활동에 따른 모사챔버의 PM_{2.5} 농도 변화를 나타낸다. PM₁₀과 유사하게 걷기 활동은 3분 뒤, 빠르게 걷기와 뛰기는 30초~1분 뒤 최고 농도에 도달하는 경향을 보였다. 또한 비산에 따른 PM₁₀, PM_{2.5} 농도 증가율을 Eq. (3)과 같이 산정하였다.

$$R = \frac{C_{suspension}}{C_{before}} \quad (3)$$

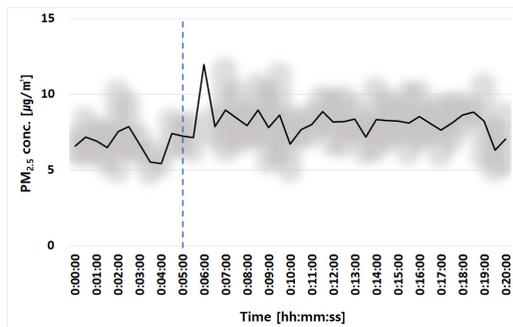
R : PM concentration increase ratio

C_{before} : initial concentration before occupant's activity

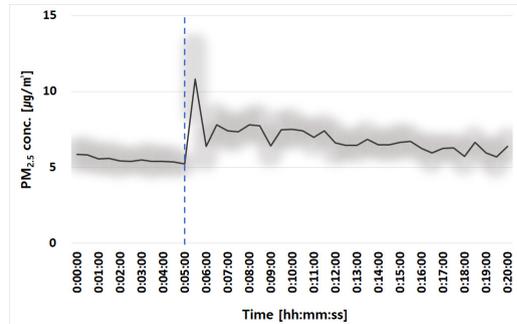
$C_{suspension}$: suspension concentration after occupant's activity



(a)



(b)



(c)

Fig. 3. Changes in PM_{2.5} concentration in the chamber under each activity condition: (a) walking (b) jogging (c) running

빠르게 걷기, 뛰기 활동 시 PM_{2.5}는 초기농도 대비 평균 1.5배 증가하였으며, PM₁₀은 평균 2.3배 증가하였다. 이는 1명의 실험자가 실험 공간을 걸으며 입자 비산농도를 측정 한 선행연구[18]의 1-5 μm 입자는 초기 농도대비 1.2배, 5-10 μm 입자는 2배 증가한다는 결과와 유사한 경향이다.

Fig. 4는 활동별 이동속도에 따른 PM₁₀, PM_{2.5}의 농도 변화를 나타낸다. 실험자의 이동속도가 증가함에 따라 미세먼지 비산 농도는 선형적으로 증가하였으며 이동 속도와 PM₁₀, PM_{2.5} 농도 간 회귀식은 Eq. (4), (5)와 같다. 본 연구에서는 실험자가 활동하지 않는 경우에는 미세먼지 비산이 없다고 가정하여 회귀식의 절편 값은 0으로 하였다.

$$C_{PM10} = 8.7535 \times mv \quad (R^2 = 0.9984) \quad (4)$$

$$C_{PM2.5} = 2.0884 \times mv \quad (R^2 = 0.9741) \quad (5)$$

C_{PM10} : PM₁₀ suspension concentration

$C_{PM2.5}$: PM_{2.5} suspension concentration

mv : moving speed of the respective activity

회귀식에 대한 통계적 유의성 검정지표인 p -value는 PM₁₀의 경우 0.001, PM_{2.5}의 경우 0.01을 나타내었다. 일반적으로 p -value가 0.05보다 작으면 통계적으로 유의하다 판단하므로 이는 실험자의 이동속도와 미세먼지 비산 농도 사이의 회귀모델이 통계적으로 타당함을 의미한다[19]. 또한 회귀식의 적합도를 나타내는 결정계수 (R^2)의 경우 PM₁₀은 0.99, PM_{2.5}는 0.97을 나타내었다. 이는 이동속도와 PM₁₀, PM_{2.5} 비산 농도 사이의 회귀식 정확도가 각각 99%, 97%임을 의미하며, 이를 통해 여러 이동속도 조건에서의 미세먼지 비산 농도 추정이 가능할 것으로 사료된다.

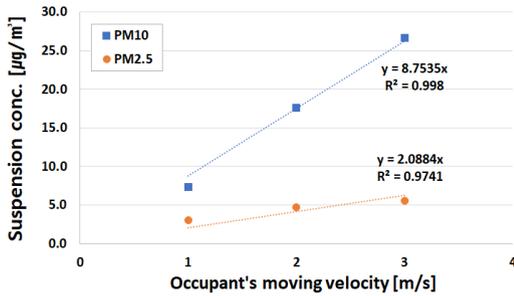


Fig. 4. Comparison of PM suspension concentration under each activity condition

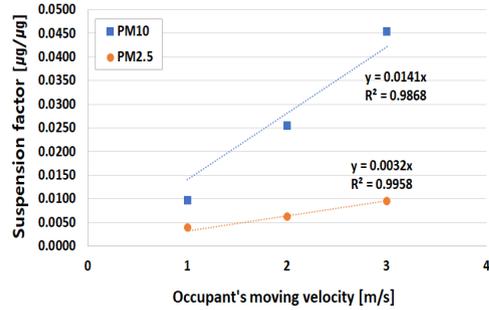


Fig. 5. Comparison of PM suspension factor under each activity condition

3.2 재실자 활동에 따른 미세먼지 비산 계수 비교

미세먼지 비산 농도는 바닥에 침적된 미세먼지 양에 영향을 받는 것으로 알려져 있다[6]. 이에 본 연구에서는 미세먼지의 바닥 침적량 대비 공기 중으로 부유한 질량 비율인 비산 계수를 각 활동의 이동속도 별로 산정하였다(Table 4). Fig. 5와 같이 실험자의 이동속도가 증가함에 따라 미세먼지 비산 계수는 선형적으로 증가하였으며 이들 사이의 회귀식은 Eq. (6), (7)과 같다.

$$E_{PM10} = 0.0141 \times mv \quad (R^2 = 0.9868) \quad (6)$$

$$E_{PM2.5} = 0.0032 \times mv \quad (R^2 = 0.9958) \quad (7)$$

E_{PM10} : PM₁₀ suspension factor

$E_{PM2.5}$: PM_{2.5} suspension factor

mv : moving speed of the respective activity

회귀식 결정계수(R^2)는 PM₁₀, PM_{2.5} 모두 0.99를 나타내었으며, 이는 이동속도와 미세먼지 비산 계수 사이의 회귀식 정확도가 99% 임을 의미한다. 이를 통해 다양한 재실자 이동속도 조건에서의 미세먼지 비산 계수를 추정할 수 있으며, 나아가 해당 실내공간의 바닥 미세먼지 침적량에 따른 미세먼지의 비산 양 추정이 가능할 것으로 생각된다. 추후 미세먼지 비산의 추정 결과를 공기 청정기, 공조시스템 등의 운전·제어와 연계함으로써 실내공간의 공기질 개선에 활용이 가능할 것으로 사료된다.

Table 4. PM suspension factor of the simulation chamber under each activity condition.

[µg/µg]	Walking	Jogging	Running
PM ₁₀	0.0097	0.0254	0.0454
PM _{2.5}	0.0040	0.0062	0.0095

선행연구[5]에 비해 본 연구는 낮은 값의 비산계수를 보였다[선행연구: 0.09~0.1, 본 연구: 0.0097~0.0454 (PM₁₀ 기준)]. 이는 실험자의 활동도 차이 때문으로 판단된다. 본 연구는 실험자의 모사챔버 내부 활동 시 걸음 수가 10~13인 반면, 선행연구는 300 걸음의 활동을 하여 걸음 수 측면에서 본 연구의 활동도가 크게 낮기 때문이다. 이처럼 본 연구와 선행연구는 활동 강도, 바닥 미세먼지 침적량 등의 실험조건이 다르므로 비산 계수의 정량적인 비교는 어렵다. 그러나 외란이 통제된 모사챔버를 이용하여 다양한 환경 조건에서의 미세먼지 비산 실험을 통해 비산계수를 산정, 비교함으로써 실내공간의 환경 특성에 따른 미세먼지 비산 특성 규명 및 정량화에 기여할 수 있을 것으로 사료된다.

4. 결론

본 연구에서는 실내공간의 재실자 활동에 따른 미세먼지 비산 특성을 파악하기 위하여 모사챔버를 이용한 실험적 연구를 수행하였다. 이를 위해 학교 교실을 1/3 크기로 축소된 모사챔버에서 실험자가 걷기, 빠르게 걷기, 뛰기 활동 시 비산되는 미세먼지 농도를 측정하였다. 또한 바닥에 침적된 미세먼지 질량 대비 공기 중으로 부유하는 미세먼지 질량 비율인 비산 계수를 각 활동의 이동속도별로 산출하였다. 미세먼지의 비산 농도와 비산 계수는 실험자의 이동속도가 증가함에 따라 선형적으로 증가하는 경향을 보였다. 또한 이동속도와 비산 농도, 비산 계수 간의 회귀식을 도출하여 PM₁₀은 99%, PM_{2.5}는 97~99%의 정확도를 확인하였으며, 이를 통해 실내공간의 재실자 이동속도에 따른 미세먼지 비산을 추정하는데 도움이 될 것으로 기대된다. 다만 이동속도와 비산특성 간 회귀식의 실제 적용을 위해서는 본 연구의 실험조건

이외의 이동속도에서의 검증 연구가 필요할 것으로 생각된다. 더불어 본 연구는 미세먼지 비산에 대한 다양한 영향인자 중 재실자 활동만을 모사했으므로 향후 습도, 환기 방법, 바닥재 종류 등 실내공간의 여러 환경특성에 따른 미세먼지 비산 연구가 필요할 것으로 사료된다.

References

- [1] M. Kim, H. Liu, J.Y. Kim, C. Yoo, Evaluation of passenger health risk assessment of sustainable indoor air quality monitoring in metro systems based on a non-Gaussian dynamic sensor validation method, *J. Hazard. Mater.*, 278(1), pp. 124-133(2014). DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jhazmat.2014.05.098>
- [2] S.W. Jeong, G.Y. Seo, Estimation of local human health burden due to inhalation of fine particulate matter and identification of major emission sources using a life cycle impact assessment method, *J. Korean Soc. Environ. Eng.*, 41(7), pp. 361-371(2019). DOI: <http://dx.doi.org/10.4491/KSEE.2019.41.7.361>
- [3] R.C. Oberoi, J.I. Choi, J.R. Edwards, J.A. Rosati, J. Thornburg, C.E. Rodes, Human-induced particle re-suspension in a room, *Aerosol Sci. Technol.*, 44(3), pp.216-229(2010) DOI: <http://dx.doi.org/10.1080/02786820903530852>
- [4] J. Qian, J. Peccia, A.R. Ferro, Walking-induced particle resuspension in indoor environments, *Atmos. Environ.*, 89, pp.464-481(2014) DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.atmosenv.2014.02.035>
- [5] J.A. Rosati, J. Thornburg, C. Rodes, Resuspension of particulate matter from carpet due to human activity, *Aerosol Sci. Technol.*, 42(6), pp.472-482(2008) DOI: <http://dx.doi.org/10.1080/02786820802187069>
- [6] J. Qian, A.R. Ferro, Resuspension of dust particles in a chamber and associated environmental factors, *Aerosol Sci. Technol.*, 42(7), pp.566-578(2008) DOI: <http://dx.doi.org/10.1080/02786820802220274>
- [7] A. McDonagh, M.A. Byrne, The influence of human physical activity and contaminated clothing type on particle resuspension, *J. Environ. Radioact.*, 127, pp.119-126(2014) DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jenvrad.2013.10.012>
- [8] A.R. Ferro, R.J. Kopperud, L.M. Hildemann, Source strength for indoor human activities that resuspend particulate matter, *Environ. Sci. Technol.*, 38(6), pp.1759-1764(2004) DOI: <http://dx.doi.org/10.1021/es0263893>
- [9] C. Gomes, J. Freihaut, W. Bahnfleth, Resuspension of allergen-containing particles under mechanical and aerodynamic disturbances from human walking, *Atmos. Environ.*, 41(25), pp.5257-5270(2007) DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.atmosenv.2006.07.061>
- [10] N. Kulkarni, J. Grigg, Effect of air pollution on children, *Paediatr. Child Health*, 18(5), pp.238-243(2008) DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.paed.2008.02.007>
- [11] J. Jeong, H. Lee, Study on the characteristics of air quality in the classroom of elementary school and its control method, *J. Korean Soc. Environ. Eng.*, 32(4), pp.311-322(2010)
- [12] J.B. Chae, S.W. Kong, D.J. Kim, L.J. Kim, T.Y. Kim, S.H. Lee, Research for temporal spatial parameter of the gait according to age, *J. Korean Proprioceptive Neuromuscular Facilitation Association*, 6(2), pp.19-30(2008)
- [13] N.M. Yoon, The comparative study on age-associated gait analysis on normal Korean, Ph.D. thesis, Seonam Univ., Korea(2010)
- [14] S.H. Lee, S.H. Goo, Y.W. Chun, Y.J. Park, The spatial location analysis of disaster evacuation shelter for considering resistance of road slope and difference of walking speed by age case study of Seoul, Korea, *J. Korean Soc. Geospatial Info. Sci.*, 23(2), pp.69-77(2015) DOI: <https://doi.org/10.7319/kogsis.2015.23.2.069>
- [15] Korea Sports Promotion Foundation, 2018 national physique 100 - Development of qualification standard for physical strength of elementary school student(5-6th grade), Korea(2019)
- [16] A. McDonagh, M. A. Byrne, The influence of human physical activity and contaminated clothing type on particle resuspension, *J. Environ. Radioact.*, 127(1), pp.119-126(2014) DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jenvrad.2013.10.012>
- [17] D. Rim, A. Novoselac, Transport of particulate and gaseous pollutants in the vicinity of a human body, *Build. Environ.*, 44(1), pp.1840-1849(2009) DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.buildenv.2008.12.009>
- [18] T. L. Thatcher, D. W. Layton, Deposition, resuspension, and penetration of particles within a residence, *Atmos. Environ.*, 29(13), pp.1487-1497(1995) DOI: [https://doi.org/10.1016/1352-2310\(95\)00016-R](https://doi.org/10.1016/1352-2310(95)00016-R)
- [19] J. G. Lee, R Program Recipes for Multi-Variate Analysis & Data Mining, 1st ed., Bullsbook, Seoul, Korea, pp.95-99(2016)

조 성 희(Sunghee Cho)

[준회원]



- 2020년 2월 : 강원대학교 지구환경시스템공학과 (공학사)
- 2020년 3월 ~ 현재 : 경희대학교 환경응용과학과 석사과정, 한국철도기술연구원 학생연구원

<관심분야>
실내환경, 미세먼지

김 민 정(Minjeong Kim)

[정회원]



- 2010년 2월 : 경희대학교 환경학 및 환경공학과 (공학사)
- 2012년 2월 : 경희대학교 환경응용과학과 (공학석사)
- 2016년 8월 : 경희대학교 환경응용과학과 (공학박사)
- 2017년 2월 ~ 현재 : 한국철도기술연구원 선임연구원

<관심분야>
실내공기질, 미세먼지

조 영 민(Yeongmin Cho)

[정회원]



- 1998년 2월 : 서울대학교 공업화학과 (공학사)
- 2000년 2월 : 포항공과대학교 환경공학부 (공학석사)
- 2003년 8월 : 포항공과대학교 환경공학부 (공학박사)
- 2003년 9월 ~ 현재 : 한국철도기술연구원 책임연구원

<관심분야>
환경공학

박 덕 신(Duckshin Park)

[정회원]



- 1995년 8월 : 경희대학교 환경학과 (환경학석사)
- 2003년 8월 : 경희대학교 환경학과 (환경학박사)
- 1995년 1월 ~ 현재 : 한국철도기술연구원 수석연구원

<관심분야>
대기오염제어, 실내공기질제어