

상대습도에 따른 비산 미세먼지의 크기 분포 및 특성 분석

김민정^{1)*} · 박지원²⁾

¹⁾한국철도기술연구원 신교통혁신연구소

²⁾한국철도기술연구원 철도시험인증센터

(투고 2024년 3월 3일, 수정 2024년 3월 22일, 게재확정 2024년 3월 23일)

Study on size distribution and characteristics of particulate matter suspension in indoor space depending on relative humidity

Minjeong Kim^{1)*}, Jiwon Park²⁾

¹*New Transportation Innovative Research Center, Korea Railroad Research Institute*

²*Railroad Test and Certification Division, Korea Railroad Research Institute*

(Received March 3 2024; Revised March 22 2024; Accepted March 23 2024)

Abstract

Suspension of particulate matter (PM) in indoor spaces, which increases risk of negative impact on occupants' health from exposure to PM, is influenced by humidity level in the indoor environment. The goal of this study is to investigate the property of size-resolved PM suspension in accordance with the relative humidity through simulation chamber experiments which reflect the indoor environmental characteristics. The relative humidity of simulation chamber is adjusted to 35%, 55% and 75% by placing it inside a real-size environmental chamber which allows artificial control of climatic conditions (e.g., temperature, humidity). At the respective humidity conditions, PM suspension concentration caused by occupant walking is analyzed by particle size (0.5-0.8, 0.8-1.0, 1.0-2.5, 2.5-3.5, 3.5-4.5, 4.5-5.5, 5.5-8.0, and 8.0-10 μm). Irrespective of the particle size, the suspension concentration reveals a decreasing tendency as the relative humidity increases. Furthermore, a one-way analysis of variance (one-way ANOVA) test statistically verifies that the suspension concentration has a significant difference depending on the indoor relative humidity level. In addition, as the relative humidity increases, a proportion of the suspended particles with 0.5-2.5 μm diameter decreases, while that with 2.5-3.5 μm diameter increases. The reason is considered that the humidity has an effect on adhesion and coagulation forces of the particles.

Keywords: particulate matter, suspension, size distribution, relative humidity, simulation chamber

* Corresponding author.

Tel : +82-31-460-5818, Fax : +82-31-460-5818

E-mail : mjkim88@krri.re.kr

1. 서론

현대인들은 하루 중 21시간 이상을 가정, 사무실과 같은 실내에서 생활함에 따라 실내 미세먼지 농도 관리의 중요성이 증가하고 있다. 미세먼지는 호흡기 및 심혈관 질환을 유발하는 등 재실자 건강에 밀접한 영향을 미치므로 미세먼지 관리는 재실자 건강의 중요한 요인으로 대두되고 있다(Ji, 2018; Jeong and Seo, 2019). 실내 미세먼지 농도는 침기 및 환기로 인해 유입되는 실외 미세먼지 영향뿐만 아니라 실내 바닥 및 벽체 표면에 쌓여있던 먼지가 재실자 활동으로 확산하는 비산의 영향을 받는 것으로 알려져 있다(Shin et al., 2021). 비산 입자는 1~10 μm 직경의 흡입성 입자로 이는 실내공기 중에 오랜 시간 부유하며 호흡을 통해 재실자에게 흡입되어 노출 위험성을 증가시킨다(Cho et al., 2021). 따라서 실내공간 내 재실자의 미세먼지 노출을 파악하기 위해서는 미세먼지의 비산 특성 규명이 필요하다.

미세먼지 비산의 주요 영향인자는 재실자 활동 강도, 바닥재 특성, 습도 등으로 알려져 있다(Qian and Ferro, 2008; Lv et al., 2019). 특히 높은 습도는 입자 표면의 점착력(adhesion)을 높여 미세먼지 비산을 저해하는 것으로 알려져 있으며, 이에 최근 습도에 따른 미세먼지 비산 영향에 관한 다양한 연구가 보고되고 있다(Kim et al., 2016; Zheng et al., 2020). Kim et al.(2016)은 풍동 내 상대습도를 7~78%로 변화하며 유리, 금 등 다양한 표면에서의 미세먼지 비산 계수를 산정하였으며, 상대습도 50~60% 조건부터 미세먼지 비산이 감소함을 확인하였다. 또한 Zheng et al.(2020)은 상대습도를 50~80%로 변화하며 카펫 바닥으로부터 미세먼지 비산 농도를 측정하였다. 그러나 국내의 경우, 바닥 재질 등 실내공간 특성이 선행연구와 상이하므로 선행연구 결과를 인용할 경우 국내와의 환경적 차이로 인해 실제 미세먼지 비산을 재현함에 한계가 있을 것으로 예상된다(Shin et al., 2021). 더불어 실제로 재실자가 생활하는 공간에서의 미세먼지 실험연구는 온·습도, 먼지 침적 질량, 환기 등 주요 환경인자의 제어가 어려움으로 특정 요인에 따른 미세먼지 비산 특성 규명 및 정량화가 어렵다는 한계를 지닌다

(Cho et al., 2021). 따라서 본 연구는 실내공간의 특성을 반영한 모사챔버를 활용하여 주요 환경인자를 제어한 조건에서 상대습도에 따른 입경별 미세먼지 비산 농도를 측정하는 것을 목표로 하였다.

본 연구에서는 67 m³(3 m (W) × 9 m (L) × 2.5 m (H)) 크기의 실내공간 모사챔버를 활용하였다. 모사챔버 바닥재로는 학교 교실에서 주로 사용되는 우드 데코 타일을 사용하였다. 교실은 평균 재실 인원 21.8명으로 일반 주거 건물 대비 단위 면적당 재실 밀도가 높아 학생들의 활동으로 인한 많은 미세먼지 비산이 예상되며, 10대 학생들은 체중 당 호흡량이 많아 다른 연령층에 비해 미세먼지 흡입 영향이 큰 것으로 알려져 있다(Kim et al., 2019; Heo et al., 2021; Shin et al., 2021). 이에 본 연구에서는 실내공간 모사챔버에 교실 바닥재 특성을 반영하여 교실 환경에서 습도에 따른 미세먼지 비산 특성을 실험적으로 규명하고자 하였다. 이를 위해 모사챔버 내부 상대습도를 35%, 55%, 75%로 조정하며 모사챔버 내부를 빠르게 걷는 상황을 모사하였으며, 이때 입경별 미세먼지 비산 농도를 측정함으로써 비산에 대한 상대습도의 영향을 정량적으로 분석하였다.

2. 실험 방법

2.1. 실내공간 모사챔버

그림 1은 본 연구에서 활용한 실내공간 모사챔버의 구조도 및 제작 모습을 나타낸다. 모사챔버 바닥 면적은 27 m²로 우드 데코타일 바닥재를 사용하였으며, 부피는 67 m³로 제작되었다. 또한 모사챔버 바닥에 미세먼지 침적 환경을 구현하기 위하여 모사챔버 모서리 상단부에 미세먼지 분사구를 설치하였다. 미세먼지 침적 질량(dust mass loading, g/m²)은 비산 농도에 주요한 영향을 미치는 요인이므로 실험에 앞서 미세먼지 침적 조건을 일정하게 유지하는 것이 중요하다(Cho et al., 2021). 이에 본 연구에서는 미세먼지 분사구에 Topas GmbH 社의 Solid Aerosol Generator 410을 연결하여 A1 ultrafine test dust (Power Technology Inc., 미국)를 모사챔버 내부로 분사하였으며, 송풍기를 가동하여 미세먼지를 분산시킨 후 자연 침강시켜 모

사채버 내 미세먼지 침적 질량을 일정하게 유지하였다. 학교 교실의 경우 방과 후 매일 청소하며 방학마다 주기적으로 물청소를 하므로 바닥의 미세먼지 침적량이 적을 것으로 예상됨에 따라, 본 연구에서는 선행연구(Qian et al., 2014) 중 오염도가 낮은 침적 조건의 평균인 0.3 g/m^2 를 모사채버의 미세먼지 침적 질량으로 설정하였다.

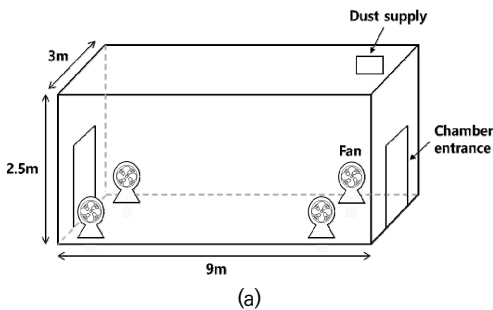


Figure 1 (a) Schematic diagram and (b) production of indoor simulation chamber for particulate matter suspension experiment

2.2. 미세먼지 비산 실험 및 분석 방법

본 연구의 목적은 모사채버 내 상대습도 변화에 따른 미세먼지 입경별 비산 농도를 측정·분석하는 것으로 (1) 모사채버 습도 설정, (2) 재실자 보행에 따른 미세먼지 비산 농도 측정, (3) 입경별 비산 특성 분석의 순서로 연구를 진행하였다.

「학교보건법 시행규칙(교육부령)」에 따르면 교실의 상대습도는 30~80%를 유지해야 한다. 이에 본 연구에서는 상기를 (1) 건조 조건: 35%, (2) 평균 조건: 55%,

(3) 고습 조건: 75%로 구분하여 모사채버 상대습도를 설정하였으며, 습도 조건을 구현하기 위하여 연구 기관에서 보유한 실험용 환경채버를 활용하였다. 이는 국가 기준표준원 산하 한국인정기구(Korea Laboratory Accreditation Scheme, KOLAS)의 인증을 받은 기후 환경 시험장비로서 온도, 습도, 태양광 등 기후 환경을 구현한다. 이러한 실험용 환경채버에 모사채버를 넣은 뒤 스팀 제어 밸브를 조절함으로써 모사채버를 포함한 실험용 환경채버 내부의 상대습도를 조건별로 구현하였으며(그림 2), 모사채버 벽면에 HygroFlex3 digital transmitter(rotronic, 영국)를 부착하여 상대습도를 모니터링 하였다.

이후 재실자 보행에 따른 미세먼지 비산 농도를 측정하였다. 교실과 유사한 상황을 재현하기 위하여 실내화를 착용하였으며, 10대 학생의 보행속도(Chae et al., 2008)를 참조하여 모사채버를 2 m/s의 속도로 이동하였다. 모사채버 내 미세먼지 비산 농도는 Portable Aerosol Spectrometer 11-D(Grimm Aerosol Technik, 독일)를 사용하여 6초 간격으로 입경별($0.25\text{-}35 \mu\text{m}$) 개수농도를 측정하였다. 이때 측정 장비의 설치 높이는 재실자가 의자에 앉았을 때의 호흡기 위치를 고려하여 바닥으로부터 100 cm 높이에 설치하였다. 또한 측정 결과의 오차를 줄이기 위해 습도 조건별로 미세먼지 비산 실험을 5~7회 반복하였다.

마지막으로 습도에 따른 미세먼지 입경별 비산 농도 및 특성 변화를 분석하였다. 미세먼지 입경 분석 관련 선행연구(Tian et al., 2014; Lai et al., 2017)를 참조하여 표 1과 같이 8개의 입경 그룹으로 구분하여 각 그룹의 상대습도별 평균 비산 농도를 산정하였다. 또한 비산 농도에 대한 습도의 영향을 통계적으로 검증하기 위하여 일원 분산분석(one-way analysis of variance, ANOVA)을 수행하였다. One-way ANOVA란 하나의 독립변수가 세 개 이상의 그룹을 포함할 때 그룹의 영향에 의한 종속변수 평균 간 차이를 검증하는 방법으로, 상대습도 35%, 55%, 75% 조건에서 입경별 비산 농도 간 차이가 유의한가를 검증하였다(Lai et al., 2017). 더불어 상대습도 변화에 따른 비산 미세먼지의 입경별 비율 변화를 분석하였다.

Table 1 Diameter classification of the suspended particulate matters [unit: μm]

	Group1	Group2	Group3	Group4
Diameter	0.5-0.8	0.8-1.0	1.0-2.5	2.5-3.5
	Group5	Group6	Group7	Group8
Diameter	3.5-4.5	4.5-5.5	5.5-8.0	8.0-10

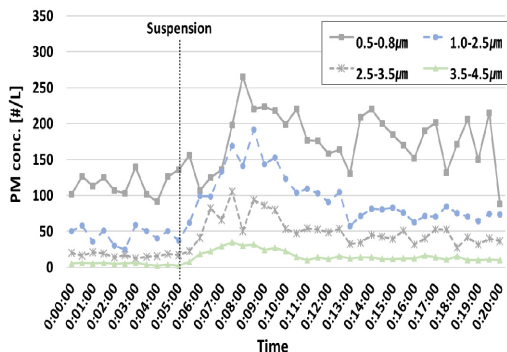


(a)



(b)

Figure 2 (a) Real-scale environmental chamber and (b) indoor simulation chamber inside the real-scale environmental chamber



(a)

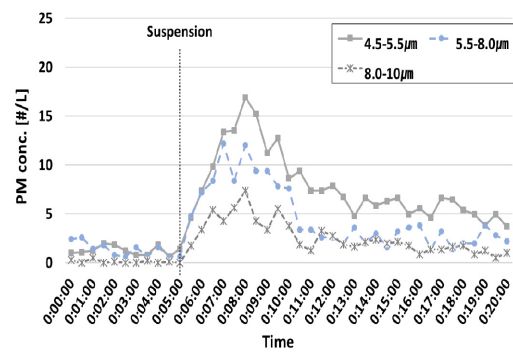
3. 결과 및 고찰

그림 3은 상대습도 55% 조건에서 비산 미세먼지의 입경별 농도 변화를 나타낸다. 입경에 상관없이 모사챔버 내 미세먼지는 재실자 보행 직후 농도가 급증하여 1~2분 뒤 최고 농도에 도달하는 경향을 보였다. 또한 표 2와 같이 입경이 작아질수록 비산 미세먼지의 개수 농도는 증가하는 반면, 질량농도는 감소하는 경향을 보였다. 일반적으로 동일한 질량농도인 경우 작은 입경의 입자가 큰 입경에 비해 개수농도와 비표면적이 크며, 이에 오염물질 흡착 증가 및 기관지 말단까지 침투하는 등 건강 위해성이 높은 것으로 알려져 있다(Kwon et al., 2020). 이에 국내의 미세먼지 관리는 질량농도가 기준이나, 실내공간의 미세먼지 비산 시 작은 입경의 개수농도가 크게 증가하는 본 실험 결과에 따라 개수농도 측면의 미세먼지 관리에 대한 고려가 필요할 것으로 사료된다.

Table 2 PM suspension concentrations under 55% relative humidity condition

	PM1	PM2.5	PM4	PM10
No. conc [particles/L]	202 (± 43)	123 (± 16)	46 (± 12)	12 (± 4)
Mass conc [$\mu\text{g}/\text{m}^3$]	--*	3 (± 1.4)	11 (± 2.5)	20 (± 4)

*Conc. variation is within measurement resolution



(b)

Figure 3 Changes in PM concentrations in the chamber under 55% relative humidity condition with diameter of (a) 0.5-4.5 μm and (b) 4.5-10 μm

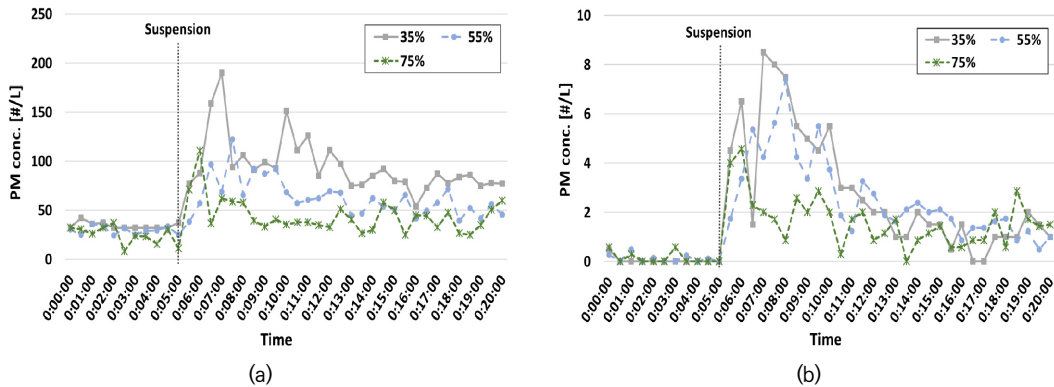


Figure 4 Changes in PM concentrations in the chamber under 35%, 55% and 75% relative humidity conditions with diameter of (a) 2.5–3.5 μm and (b) 8–10 μm

그림 4는 상대습도 35%, 55%, 75% 조건에서 비산 미세먼지(2.5–3.5 μm , 8–10 μm)의 농도 변화를 나타낸다. 입경이 동일한 경우 비산 농도는 습도가 증가함에 따라 감소하는 경향을 보였는데, 이는 입자 접착력(adhesion force)에 대한 습도의 영향 때문으로 생각된다. 습도가 증가함에 따라 입자와 바닥표면 사이에 수증기가 응축되어 물 메니스커스(meniscus, 액체 표면이 만드는 곡선)가 형성되며, 이는 입자와 바닥표면 사이의 접촉 면적을 증가시키는 것으로 알려져 있다. 이에 따라 모세관 힘(capillary force)이 발생하여 입자와 바닥표면 간 접착력이 강해짐에 따라 입자의 비산이 저해되는 것으로 판단된다(Rosati et al., 2008; Qian et al., 2014; Kim et al., 2016).

그림 5는 상대습도에 따른 미세먼지 입경별 평균 비산 농도를 나타낸다. 모든 입경에서 비산 농도는 상대습도가 증가함에 따라 감소하는 경향을 보였다(표 3).

또한 비산 농도에 대한 습도 영향 검증을 위한 One-way ANOVA 결과 통계적 유의성 검정지표인 p -value는 0.05보다 작은 값을 나타내었다(표 4). p -value는 귀무가설(H_0 : 집단 간 평균의 차이가 없다)을 참이라고 가정할 때 그 결과가 관측될 확률로써, 일반적으로 p -value가 0.05보다 작으면 귀무가설을 기각하여 집단 간 평균에는 통계적으로 유의한 차이가 있는 것으로 판단한다(Lai et al., 2017). 이에 본 연구에서는 미세먼지 비산 시 실내공간의 농도는 상대습도에 따라 유의한 차이가 있으며, 상대습도가 실내공간 비산의 주요 환경인자임을 확인하였다. 본 결과는 사무실 내 미세먼지 비산 농도가 건조한 맑은 날에 비해 비가 오는 습한 날에 낮음을 측정했던 선행 연구의 결과와 일치한다(Ji, 2018).

그림 6은 상대습도에 따른 비산 미세먼지의 입경별 수농도 비율 변화를 나타낸다. 상대습도가 증가함에

Table 3 Size-resolved PM suspension concentrations under each relative humidity condition (the values in bracket represent the standard deviation) [unit: particles/L]

R.H. [%]	Particle size [μm]							
	0.5-0.8	0.8-1.0	1.0-2.5	2.5-3.5	3.5-4.5	4.5-5.5	5.5-8.0	8.0-10
35	245 (± 21)	148 (± 17)	243 (± 50)	162 (± 40)	37 (± 13)	20 (± 8)	18 (± 8)	14 (± 3)
55	200 (± 57)	126 (± 16)	202 (± 43)	123 (± 16)	46 (± 12)	22 (± 7)	18 (± 5)	12 (± 4)
75	143 (± 45)	92 (± 15)	143 (± 25)	127 (± 7)	36 (± 4)	12 (± 4)	10 (± 4)	7 (± 2)

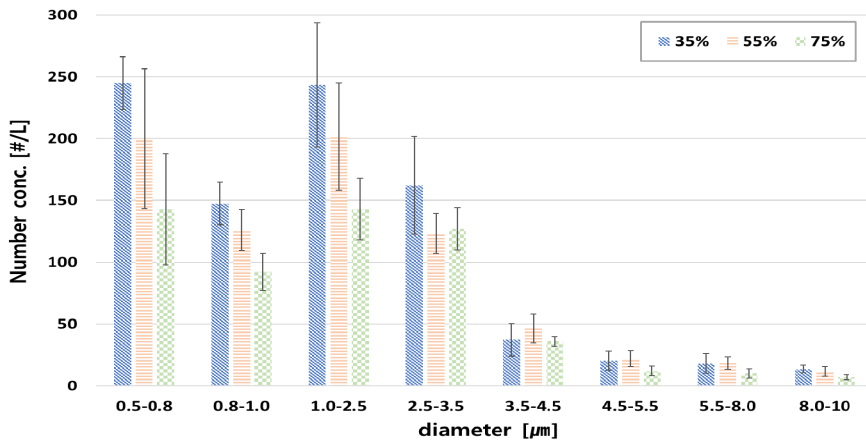


Figure 5 Size-resolved PM suspension concentrations under each relative humidity condition (Error bars represent the standard deviations)

따라 0.5-2.5 μm 입경의 입자 비율은 감소하는 반면, 2.5-3.5 μm 입경의 비율은 증가하는 경향을 보였다. 이는 습도가 입자의 흡습 성장(hygroscopic growth)에 영향을 미치기 때문으로 판단된다(Kim et al., 2019). 습도가 증가함에 따라 입자 표면에 물 분자가 흡착되어 나노미터 두께의 수막을 형성하여 점착성을 증가시키는 것으로 알려져 있다. 이에 따라 입자의 응집(coagulation)이 증가하여 공기 중 비산 입자 간 충돌 시 입경이 증가한 것으로 판단된다(Wang et al., 2017; Zheng et al., 2020).

본 연구는 선행연구(Tian et al., 2014)에 비해 낮

은 비산 농도 결과를 보였다. 이는 두 연구가 동일한 상대습도(30~40%, 70~80%) 조건을 모사하지만 바닥재, 미세먼지 침적량 등 실험 조건의 차이 때문으로 생각된다. 이처럼 본 연구와 선행연구는 실험 조건 차이로 인해 결과에 대한 직접적인 비교는 어렵다. 그러나 실내 환경변화에 따른 미세먼지 비산 영향에 대한 현장 측정·분석 연구가 제약적인 상황에서, 본 연구와 같이 모사챔버를 이용하여 다양한 환경 조건에서 실험적 연구를 수행함으로써 실내 환경 특성에 따른 미세먼지 비산 특성 규명에 기여할 수 있을 것으로 사료된다.

Table 4 One-way ANOVA result about the influence of relative humidity on PM suspension concentration

	0.5-0.8 μm	0.8-1.0 μm	1.0-2.5 μm	2.5-3.5 μm	3.5-4.5 μm	4.5-5.5 μm	5.5-8.0 μm	8.0-10 μm
p-value	0.008	0.012	0.026	0.113	0.004	0.016	0.001	0.051

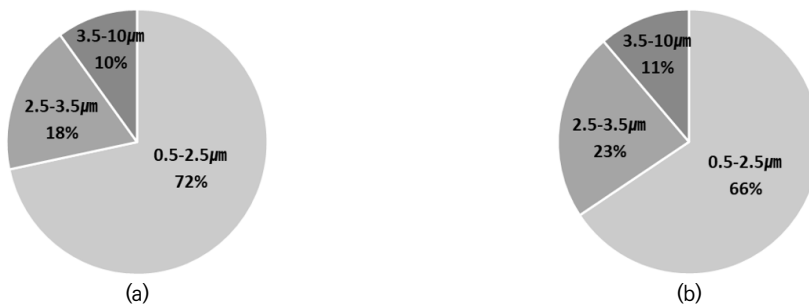


Figure 6 Changes of the suspended particle-size composition depending on relative humidity variation: (a) 35%, (b) 75%

4. 결론

본 연구에서는 실내공간의 상대습도에 따른 미세먼지 입경별 비산 특성을 파악하기 위하여 모사챔버를 이용한 실험적 연구를 수행하였다. 이를 위해 모사챔버 내 상대습도를 35%, 55%, 75%로 설정하고 재실자 보행 시 미세먼지 비산 농도를 8개의 입경 그룹으로 나누어 분석하였다. 모든 입경에서 미세먼지 비산 농도는 상대습도가 증가함에 따라 감소하는 경향을 보였으며, one-way ANOVA 분석을 통해 모사챔버 내 비산 미세먼지 농도는 습도에 따라 유의한 차이가 있음을 통계적으로 확인하였다. 또한 상대습도가 증가함에 따라 0.5-2.5 μm 입경의 입자 비율은 감소하는 반면, 2.5-3.5 μm 입경의 비율은 증가함을 확인하였다. 이와 같은 결과는 입자 접착력 및 응집력에 대한 습도의 영향 때문으로 사료된다. 본 연구와 같이 외란이 통제된 모사챔버를 이용하여 다양한 조건에서의 실험적 연구를 수행함으로써 미세먼지 비산에 대한 실내 환경인자의 영향을 정량적으로 분석하는데 도움이 될 것으로 기대된다. 다만 본 연구는 미세먼지 비산에 대한 다양한 환경인자 중 습도만을 모사했으므로 향후 재실자 활동, 바닥재 타입 등 여러 환경인자의 복합 영향 분석 연구가 필요할 것으로 생각된다. 더불어 비산 미세먼지는 공기 중에 부유하며 호흡을 통해 재실자에게 흡입되므로 재실자 노출 관점에서 비산 미세먼지의 입경별 체류시간에 관한 연구가 필요할 것으로 사료된다.

감사의 글

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

References

- Cho, S., Cho, Y., Park, D., Kim, M. (2021). Study on characteristics of particulate matter suspension in indoor space through simulation chamber experiments: Influence of physical activity, *Journal of the Korea Academia-Industrial cooperation Society*, 22(11), 376-383.
DOI: <https://doi.org/10.5762/KAIS.2021.22.11.376>
- Heo, S., Kim, D. Y., Kwoun, Y., Lee, T. J., Jo, Y. M. (2021). Characterization and source identification of fine dust in Seoul elementary school classrooms, *Journal of Hazardous Materials*, 414, 125531-125541.
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2021.125531>
- Jeong, S.-W., Seo, G.-T. (2019). 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, *Journal of Korean Society of Environmental Engineers*, 41(7), 361-371.
DOI: <https://doi.org/10.4491/KSEE.2019.41.7.361>
- Ji, J.-H. (2018). Size distributions of suspended fine particles during cleaning in an office, *Particle and Aerosol Research*, 14(2), 25-33.
DOI: <http://dx.doi.org/10.11629/jpaar.2018.14.2.025>
- Kim, Y., Wellum, G., Mello, K., Strawhecker, K. E., Thmos, R., Giaya, A., Wyslouzil, B. E. (2016). Effects of relative humidity and particle and surface properties on particle resuspension rates, *Aerosol Science and Technology*, 50(4), 339-352.
DOI: <https://doi.org/10.1080/02786826.2016.1152350>
- Kim J., Park S., Kim, H., Yeo, M. S. (2019). Emission characterization of size-resolved particles in a pre-school classroom in relation to children's activities, *Indoor and Built Environment*, 28(5), 659-676.
DOI: <https://doi.org/10.1177/1420326X17707565>
- Kim J. J., Hann, T., Lee, S. J. (2019). Effect of flow and humidity on indoor deposition of particulate matter, *Environmental Pollution*, 255(2), 113263-113269
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2019.113263>
- Kwon, H.-S., Rue, M. H., Carlsten, C. (2020). Ultrafine particles: unique physicochemical properties relevant to health and disease, *Experimental & Molecular Medicine*, 52(3), 318-328.
DOI: <https://doi.org/10.1038/s12276-020-0405-1>
- Lai, A. C. K., Tian, Y., Tsoi, J. Y. L., Ferro, A. R. (2017). Experimental study of the effect of shoes on particle resuspension from indoor flooring materials, *Building and Environment*, 118, 251-258.
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2017.02.024>
- Lv, Y., Wang, H., Zhou, Y., Yoshino, H., Yonekura, H., Takaki, R., Kurihara, G. (2019). The influence of ventilation mode and personnel walking behavior on distribution characteristics of indoor particles, *Building and Environment*, 149, 582-591.
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2018.12.057>
- Qian, J., Ferro, A. R. (2008). Resuspension of dust particles in a chamber and associated environmental factors, *Aerosol Science and Technology*, 42(7), 566-578.
DOI: <https://doi.org/10.1080/02786820802220274>
- Qian, J., Peccia, J., Ferro, A. R. (2014). Walking-induced particle resuspension in indoor environments, *Atmospheric Environment*, 89, 464-481.
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2014.02.035>
- Rosati, J. A., Thornburg, J., Rodes, C. (2008). Resuspension of particulate matter from

- carpet due to human activity, *Aerosol Science and Technology*, 42(6), 472-482.
DOI: <https://doi.org/10.1080/02786820802187069>
- Shin, H.-W., Na, H.-Y., Son, J.-A., Eom, Y.-S., Kang, D.-H. (2021). Measurement of particle emission rates according to student's activity in elementary school classrooms, *Korean Institute of Architectural Sustainable Environment and Building Systems*, 15(4), 338-349.
DOI: <https://doi.org/10.22696/jkiaeks.20210029>
- Tian, Y., Sul, K., Qian, J., Mondal, S., Ferro, A. R. (2014). A comparative study of walking induced dust resuspension using a consistent test mechanism, *Indoor Air*, 24(6), 592-603.
DOI: <https://doi.org/10.1111/ina.12107>
- Wang, Y., Chen, L., Chen, R., Tian, G., Chen, C., Ge, X. (2017). Effect of relative humidity on the deposition and coagulation of aerosolized SiO₂ nanoparticles, *Atmospheric Research*, 194, 100-108.
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2017.04.030>
- Zheng, S., Du, W., Zhao, L., Li, X. (2020). Effect of relative humidity on resuspended particles caused by human walking, *Journal of Shanghai Jiaotong University*, 25(3), 365-371.
DOI: <https://doi.org/10.1007/s12204-020-2176-1>