

논문

PurpleAir 실내 초미세먼지 측정농도 보정 방법 개발: 건강영향 평가를 목적으로

Calibration Approach of Indoor PM_{2.5} Concentrations with the PurpleAir for Epidemiological Studies

박이현[†], 박영신^{1),†}, 지석민¹⁾, 김영현, 배소연²⁾, 김규민³⁾, 김소리울⁴⁾, 신 철⁵⁾,
김미지⁶⁾, 조승현⁷⁾, 김선영^{1),*}

성균관대학교 통계학과, ¹⁾국립암센터 국제암대학원대학교,
²⁾연세대학교 데이터사이언스학과, ³⁾경기과학기술대학교 보건의료행정학과,
⁴⁾강원대학교 의학과, ⁵⁾고려대학교 의과대학 인간유전체연구소,
⁶⁾경희대학교 의과대학 융합의학과, ⁷⁾RTI International

Eehyun Park[†], Young Shin Park^{1),†}, Seokmin Ji¹⁾, Younghyun Kim,
Soyeon Bae²⁾, Kyumin Kim³⁾, Soriul Kim⁴⁾, Chol Shin⁵⁾, Miji Kim⁶⁾,
SeungHyun Cho⁷⁾, Sunyoung Kim^{1),*}

Department of Statistics, Sungkyunkwan University, Seoul, Republic of Korea

¹⁾National Cancer Center Graduate School of Cancer Science and Policy, Goyang, Republic of Korea

²⁾Department of Data Science, Yonsei University, Seoul, Republic of Korea

³⁾Department of Medical Information, Gyeonggi University of Science and Technology, Siheung, Republic of Korea

⁴⁾College of Medicine, Kangwon National University, Chuncheon, Republic of Korea

⁵⁾Institute of Human Genomic Study, College of Medicine, Korea University, Gyeonggi-do, Republic of Korea

⁶⁾Department of Health Sciences and Technology, College of Medicine, Kyunghee University, Seoul, Republic of Korea

⁷⁾RTI International, Durham, North Carolina, United States of America

접수일 2026년 7월 6일
수정일 2026년 8월 11일
채택일 2026년 9월 8일

Received 6 July 2026
Revised 11 August 2026
Accepted 8 September 2026

[†]These two authors contributed
equally to this work as co-first authors.

*Corresponding author

Tel : +82-(0)31-920-2745
E-mail : sykim@ncc.re.kr

Abstract Given the well-established evidence regarding the adverse health effect of PM_{2.5}, one of the intrinsic limitations of many epidemiological studies is their reliance on ambient exposure. The recent technical developments in low-cost sensors (LCS) have reduced the logistical and financial burdens associated indoor and/or personal PM_{2.5} monitoring. However, LCS PM_{2.5} measurements obtained by optical methods are highly sensitive to meteorological conditions and require appropriate calibration approaches before application. This study aimed to develop a calibration equation for hourly indoor LCS PM_{2.5} measurements using PurpleAir, one of the most widely applied LCS worldwide, in South Korea. Our indoor monitoring campaign collected 2-minute PM_{2.5} concentrations in the homes of 65 older adults living in urban areas of South Korea for five days during each of four seasons in 2023. In addition to PurpleAir, we used MicroPEM, as the reference instrument, that provides gravimetrically corrected PM_{2.5} concentrations. Using 11,999 hourly-averaged PM_{2.5} concentrations, we applied 16 calibration models incorporating different combination of meteorological conditions and compared the evaluation statistics using cross-validation. During the monitoring period, the mean of hourly PM_{2.5} concentration measured by PurpleAir was 23.88 µg/m³ (standard deviation [SD]=10.18). The overestimation by PurpleAir was consistently observed across hours, days, and seasons, although the seasonal and diurnal patterns were similar to those measured by MicroPEM. Among the 16 calibration models, the model including the dew point as a predictor yielded the lowest root mean square error (RMSE) among the single-predictor models and achieved an RMSE nearly identical to that of the most complex model. These findings suggest an optimal calibration

approach for indoor PM_{2.5} measurements obtained using LCS devices and support the application of LCS technology in large-scale indoor and personal exposure assessment studies investigating the health effects of the PM_{2.5}.

Key words: Calibration, Fine particle, Health effect, Indoor air pollution, Low-cost sensor

1. 서 론

입자가 2.5 마이크로미터보다 작은 미세먼지인 초미세먼지(PM_{2.5})는 현대 사회의 중요한 환경보건 문제로, PM_{2.5} 노출이 호흡기질환, 암 등 다양한 건강문제와 연관되어 있음을 일관되게 보고하고 있다(US EPA, 2019). PM_{2.5}의 건강영향을 정확하게 평가하기 위해서는 개인의 실제 노출 수준을 정밀하게 측정하는 것이 필수적이다. 기존의 고정식 대기질 측정망은 광범위한 지역의 평균 농도를 제공하지만, 실내 및 개인의 생활패턴과 미시적 환경 특성을 반영하지 못하는 한계가 있다. 특히 현대인은 하루 중 80% 이상의 시간을 실내에서 보내므로, 실내 환경에서의 PM_{2.5} 노출이 총 개인 노출량에서 차지하는 비중이 매우 크다(Klepeis *et al.*, 2001). 따라서 정밀한 건강영향평가를 위해서는 실외 대기질 측정망 자료만으로는 불충분하며, 실내 및 개인의 실제 생활 환경을 반영한 노출 측정이 필요하다. 그러나 이러한 필요성에도 불구하고, 측정 비용과 실내 및 개인 측정에 대한 부담으로 실제 측정자료 수집은 상당히 제한적이었다.

최근 광산란법 기반의 저비용 PM_{2.5} 센서 기술의 발전은 개개인에 대한 PM_{2.5} 노출평가와 건강영향 평가에 새로운 가능성을 제시하였다(Morawska *et al.*, 2018). 본 연구에서 활용한 저비용센서는 소형·경량 설계로 다양한 실내외 환경에 유연하게 설치할 수 있으며, WiFi 기반 사물인터넷(IoT) 기능을 통해 측정 데이터를 실시간으로 클라우드에 전송함으로써, 기존 측정망으로는 불가능했던 대규모 개인 노출 평가를 가능하게 한다. 하지만 높은 고비용 측정기에 비해 측정 정확도가 낮기 때문에 이에 대한 측정 농도의 정확성을 높이기 위한 보정이 필요하다(Ródenas García *et al.*, 2022; Sá *et al.*, 2022). 광산란 센서의 측

정 오차는 주로 입자의 물리·화학적 특성(크기 분포, 조성, 굴절률) 변화에 따른 광학적 특성 변동(Levy Zamora *et al.*, 2019; Tryner *et al.*, 2019) 및 온도와 상대습도를 포함한 기상 조건의 영향(Jayarathne *et al.*, 2018; Zheng *et al.*, 2018)에 의해 발생한다. 특히 상대습도가 높을 때 흡습성 입자의 크기 증가로 인해 광학적 입자 크기가 과대 추정되어 PM_{2.5} 질량 농도가 과대 평가되는 것으로 보고되고 있다(Ródenas García *et al.*, 2022). 이러한 부정확성을 보완하고자, 중량법으로 측정한 중량농도와 비교하여 성능을 평가하고 보정하고자 하는 연구가 진행되었다(Barkjohn *et al.*, 2021; Bi *et al.*, 2021; Wallace *et al.*, 2021; Ardon-Dryer *et al.*, 2020).

많은 저비용 센서 중에서 PurpleAir는 최근 10여 년 동안 실외 및 실내 PM_{2.5} 노출평가와 건강영향 평가에 가장 광범위하게 사용되었다(Chung and Rohr, 2026). PurpleAir는 다른 저비용 센서에 비해 정확성이 높은 것으로 보고된 Plantower 센서를 이용한다(Barkjohn *et al.*, 2021). 이러한 장점을 바탕으로 개인 노출 평가 연구에서도 PurpleAir 활용이 증가하였다. Bi *et al.* (2020)은 2018년 캘리포니아 전역에서 개개인들이 설치한 2,090개의 PurpleAir를 활용하여 1km 고해상도 PM_{2.5} 노출 지도를 구축하고 산불 발생 시 오염 핫스팟을 실시간으로 탐지하였으며, 2018~2020년 캘리포니아의 실내외 동시 측정 데이터를 이용하여 PM_{2.5} 실내 침투율(infiltration factor)을 추정하였다(Bi *et al.*, 2021). 현재 PurpleAir는 미국, 한국, 그리스, 우간다, 호주 등 5개 대륙에 걸쳐 수천 개가 운영 중이며 지역사회 기반의 대규모 대기오염 모니터링 및 노출 평가 연구에 광범위하게 적용되고 있다(Lu *et al.*, 2022; Morawska *et al.*, 2018). PurpleAir도 측정 정확도 향상을 위한 보정 방법이 개발되었으나, 이전의 연구에서는 주로 실외 PM_{2.5} 농도를 사용하였

Table 1. Comparison of MicroPEM and PurpleAir Devices.

Characteristic	MicroPEM	PurpleAir
Measurement principle	Nephelometer + Gravimetric	Only particle counter
PM size	PM _{2.5} / PM ₁₀	PM ₁ / PM _{2.5} / PM ₁₀
Sampling interval	10 seconds (Real-time)	2 minutes (Real-time)
Weight	Light (~240 g)	Heavy (~450 g)
Portability	Battery powered; portable	Required an electrical outlet; not portable
Cost	High (\$3,500; low-volume production)	Low (\$230~\$260; mass production)
Channel	One channel	Dual channel (A/B)
Accuracy	High (Gravimetric Calibration)	Moderate
Manufacturer	RTI international (USA, NC)	PurpleAir, Inc. (USA)

다. Barkjohn *et al.* (2021)은 미국 16개 주, 39개 정부에서 운영하는 대기질 측정망 측정소에서 수집된 약 12,000개의 24시간 PM_{2.5} 평균 측정값을 활용하여 미국 전역에 활용하기 위한 보정식을 제안하였고, 이 보정식은 최근 실내 PM_{2.5} 측정에도 적절한 방법으로 보고되었다(Koehler *et al.*, 2023). 그러나 저비용 센서를 이용한 정확한 실내 PM_{2.5} 모니터링을 위한 보정 연구는 여전히 제한적이며, 특히 아시아 지역에서의 연구는 거의 전무한 실정이다(Ródenas García *et al.*, 2022; Sá *et al.*, 2022).

본 연구의 목적은 한국에서 저비용 PurpleAir 센서로 환경에서 측정한 실내 PM_{2.5} 농도를 이용하여 보정식을 적용 및 평가하여 한국 실내 대기 환경 모니터링에 적합한 보정식을 개발하는 것이다. 이를 통해, 향후 상대적으로 저비용으로 수집된 대규모의 실내 및 개인 모니터링 PM_{2.5} 농도값의 정확성을 제고하여 실내오염이 건강영향에 미치는 영향을 적절하게 평가할 수 있도록 기여하고자 한다.

2. 연구 방법

2.1 PM_{2.5} 실내측정 모니터링

PM_{2.5} 실내측정 모니터링은 한국인유전체역학조사사업(KoGES, Korean Genome and Epidemiology Study) 및 한국노인노쇠코호트사업(KFACS, Korean Frailty and Aging Cohort Study)의 68명 참여자들에

게 2023년 3월부터 12월까지 수도권과 강원도에서 진행하였다. 조사원이 각 참여자들의 가정을 방문하여 측정하였으며, 사계절에 걸쳐 각 계절별로 5일간의 연속 측정을 진행하였다. 68명의 코호트 참여자는 서울특별시, 경기도 안산시, 강원도 춘천시에 거주하였다.

측정기는 각 가정에서 PurpleAir와 MicroPEM을 나란히 설치하여 동시 측정을 수행하였다(표 1). 두 측정기는 모두 참여자의 실내 주 생활 공간인 거실 내에 직사광선, 난방기구, 조리 공간으로부터 최소 1 m 이상 떨어진 위치에 지면으로부터 1~2 m 높이에 조사원이 직접 설치하였다(그림 1). 본 연구 고령층 참여자들의 가정 내 WiFi 미설치 및 접근의 어려움으로 PurpleAir는 SD카드 기반으로 2분 간격 오프라인 데이터 저장이 가능한 모델을 사용하였다. PurpleAir는 내부에 탑재된 Plantower PMS5003 광학입자 센서를 이용하며, 약 680 ± 10 nm 파장의 레이저와 90° 산란광 검출방식을 사용하여 입자 수를 측정한 후 PM_{2.5} 질량농도를 추정한다.

MicroPEM(RTI International, Research Triangle Park, NC, USA)은 실내 및 개인 노출 평가를 위해 개발된 휴대용 측정기로, 정확도의 강점 때문에 노출평가 및 건강영향 연구에서 활발하게 활용되어 왔다(Guak and Lee, 2018; Zhang *et al.*, 2018). 이 기기는 10초 단위 실시간으로 측정한 광산란법 PM_{2.5} 농도를 동시에 측정한 필터 기반 중량법 농도를 이용해서 보정함으로써, 광산란법 측정농도만 제공하는 다른 저



Fig. 1. MicroPEM (left) and PurpleAir (right) placed in a participant's living room during the indoor $PM_{2.5}$ monitoring campaign conducted across 68 households in 2023.

비용 센서들에 비해 높은 정확도를 보이는 것으로 보고되었다(Du *et al.*, 2019). 중량농도는 각각의 68명의 연구 참가자의 실내 환경 측정시마다 MicroPEM 내부에 장착한 테플론(Teflon) 필터를 이용해서, RTI International의 실험실에서 표준 중량법에 따라 측정된 모니터링 전과 후의 무게 차이로 정량화하였다. Field blank와 shipping blank는 전체 샘플의 3%에 해당되도록 각 계절에 골고루 포집되어 측정된 샘플과 함께 분석하였다. 중량법 분석을 $PM_{2.5}$ 검출 한계는 $1.7 \mu g$ 이며, 회수율은 95.2%였다. 광산란법으로 측정된 실시간 농도에 대해 상대습도로 인한 입자의 흡습 성장 및 산란을 보정한 후, 각 실내 환경 고유의 필터 기반 중량농도를 기준값으로 보정계수를 적용하여 중량농도 기반으로 보정된 실시간 $PM_{2.5}$ 농도를 생성하였다.

가구별 보정계수는 동일한 측정기간에 산출된 필터 기반 중량농도를 MicroPEM 실시간 농도의 평균값으로 나누어 계산하였다. 이후 각 시점의 MicroPEM 실시간 $PM_{2.5}$ 농도에 해당 가구의 보정계수를 곱하여 중량 농도 기준으로 보정된 실시간 $PM_{2.5}$ 농도를 산출하였다.

또한, MicroPEM은 중국 및 한국 등에서 정부에서 운영하는 기준 측정기기들과 측정농도를 비교하여

높은 상관성이 보고되었다(Du *et al.*, 2019; Guak and Lee, 2018). 이러한 정확성을 기반으로 본 연구에서는 MicroPEM에서 측정된 중량법으로 보정된 실내 $PM_{2.5}$ 농도를 기준 농도로 하여, PurpleAir 측정농도의 보정식을 개발하였다.

2.2 PurpleAir 측정자료 가공 및 최종 분석자료 선택

PurpleAir에서 측정된 68명에 대한 4계절 201개 샘플의 시간별 평균 68,827개 $PM_{2.5}$ 농도 자료는 실험실 보정값 선택, 오류값 제거, 시간 매칭 등의 가공과정을 거쳐 최종 65명, 144개 샘플에 대한 시간별 자료를 생성하였다. PurpleAir의 Plantower 센서는 실험실 기반으로 보정된 두 가지 변환값으로, cf_1(correction factor 1)과 cf_atm(atmospheric correction factor)을 제공한다. 본 연구에서는 고농도 상황에 민감하고 과거 미국 전역의 보정식 개발 연구에서 사용된 cf_1 농도를 사용하였다(Barkjohn *et al.*, 2021).

총 68명의 계절별 201개 샘플의 PurpleAir 시간별 $PM_{2.5}$ 농도에 대해 다음과 같은 제외기준을 순차적으로 적용하였다. 먼저, 샘플 수준에서의 제외 기준을 적용하였다. PurpleAir 데이터가 생성되지 않거나 2일 이하로 측정된 경우의 48개 샘플(24%)은 제외

하였다. 이러한 대규모 결측은 주로 측정 종료 시점 지연 (late stop), 센서 내부 오류 등으로 인해 발생하였다. 또한 PurpleAir 측정자료를 획득했지만 MicroPEM의 배터리 방전, 펌프 고장 등의 기술적 문제로 인해 유효한 측정자료를 얻지 못한 9개 샘플도 제외하였다. 다음으로, 시간별 평균 $PM_{2.5}$ 측정자료를 이용해서 두 가지 이상치를 제외하였다. 첫 번째 이상치 기준은 PurpleAir 센서의 품질 관리를 위해 채널 A와 채널 B 간 시간별 평균 농도 차이가 $5 \mu g/m^3$ 를 초과하거나 상대 오차가 61%를 초과하는 측정값이 있을 경우 제외하였다(Barkjohn *et al.*, 2021). 두 번째 기준으로 극단적 이상치가 보정식 추정과정에서 초래할 수 있는 편향된 결과를 방지하기 위해, MicroPEM 센서의 $PM_{2.5}$ 측정값을 기준으로 (평균 $\pm 5 \times$ 표준편차)를 초과하는 PurpleAir 측정값들을 제거하였다. 이러한 이상치 확인 과정을 통해 총 17개의 시간별 농도 일부를 제외하였다.

수집된 자료 중 SD카드에 측정값이 저장된 PurpleAir 원시 데이터에서 두 가지 유형의 시간기록 오류가 확인되었다. 첫 번째 유형은 전체 201개 샘플 중 47개 (23%)에서 나타난 날짜 초기화 오류로, 파일 내 모든 측정값의 날짜가 2000년 1월 1일로 기록되어 있었다. 이는 PurpleAir 센서의 내부 시계 (real-time clock)가 전원 차단 후 재시작 시 기본값으로 초기화 되는 기기 고유의 문제로 알려져 있다(Barkjohn *et al.*,

2021). 이에 대해 PurpleAir와 MicroPEM이 동일한 시점에 측정을 시작하였다는 점을 활용하여, 대응되는 MicroPEM의 측정 시작 시간을 기준으로 PurpleAir 데이터에 2분 간격으로 시간기록을 재할당하였다. 두 번째 유형은 나머지 106개 (53%) 샘플에서 나타난 시간대 불일치 오류로, 측정 연·월·일은 실제 측정일과 일치하였으나 시각이 실제보다 9시간 앞서 기록되어 있었다. 이는 기기 내부 시계가 협정세계시 (UTC) 기준으로 설정되었기 때문이다. 시간일치를 위해 해당 106개 샘플의 시간기록에 9시간을 가산하여 한국 표준시 (KST)로 변환하였다. 이후 2분 간격 PurpleAir 측정농도와 10초 간격 MicroPEM의 시간 차이를 고려하여, 두 기기 각각에서 시간별 평균으로 통합하였다. 위의 자료 정제 과정을 거쳐 최종적으로 65명 참여자의 144개 샘플 (72%)의 총 11,999개 시간별 평균 $PM_{2.5}$ 측정농도를 분석에 사용하였다(그림 2).

2.3 PurpleAir 실내 $PM_{2.5}$ 보정식 개발

본 연구에서는 미국 전역의 실외 $PM_{2.5}$ 연구에서 제시되었으며 실내 환경에서도 검증된 PurpleAir의 $PM_{2.5}$ 측정값의 정확도를 향상시키기 위한 16개 보정식을 적용 및 평가하였다(Koehler *et al.*, 2023; Barkjohn *et al.*, 2021)(표 2).

16개 보정식은 모델 복잡도와 포함된 변수에 따라 크게 네 그룹으로 분류된다. 가장 기본 모형인 첫 번

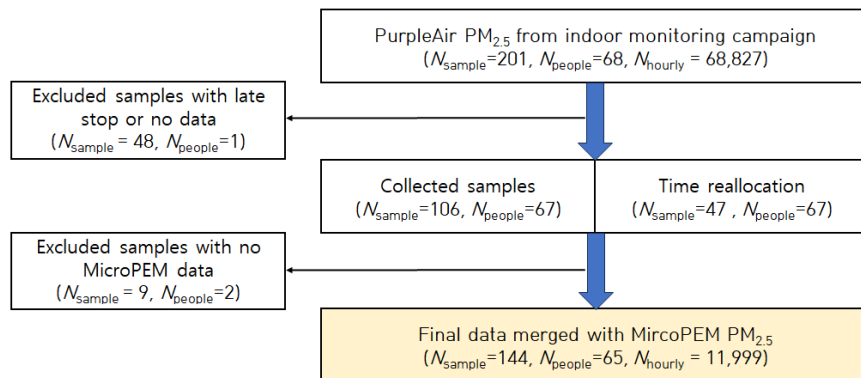


Fig. 2. Data selection procedure to develop a calibration approach for hourly $PM_{2.5}$ concentrations measured by PurpleAir compared to MicroPEM measurements.

Table 2. PurpleAir calibration equation list.

Group model		Equation
1	1	$PM_{2.5,M} = \beta_0 + PM_{2.5,P} \times \beta_1 + \epsilon$
	2	$PM_{2.5,M} = \beta_0 + PM_{2.5,P} \times \beta_1 + RH \times \beta_2 + \epsilon$
2	3	$PM_{2.5,M} = \beta_0 + PM_{2.5,P} \times \beta_1 + T \times \beta_2 + \epsilon$
	4	$PM_{2.5,M} = \beta_0 + PM_{2.5,P} \times \beta_1 + D \times \beta_2 + \epsilon$
3	5	$PM_{2.5,M} = \beta_0 + PM_{2.5,P} \times \beta_1 + RH \times \beta_2 + T \times \beta_3 + (RH \times T) \times \beta_4 + \epsilon$
	6	$PM_{2.5,M} = \beta_0 + PM_{2.5,P} \times \beta_1 + RH \times \beta_2 + D \times \beta_3 + (RH \times D) \times \beta_4 + \epsilon$
	7	$PM_{2.5,M} = \beta_0 + PM_{2.5,P} \times \beta_1 + D \times \beta_2 + T \times \beta_3 + (D \times T) \times \beta_4 + \epsilon$
	8	$PM_{2.5,M} = \beta_0 + PM_{2.5,P} \times \beta_1 + RH \times \beta_2 + T \times \beta_3 + D \times \beta_4 + (RH \times T) \times \beta_5 + (RH \times D) \times \beta_6 + (D \times T) \times \beta_7 + (RH \times D \times T) \times \beta_8 + \epsilon$
	9	$PM_{2.5,M} = \beta_0 + PM_{2.5,P} \times \beta_1 + RH \times \beta_2 + (PM_{2.5,P} \times RH) \times \beta_3 + \epsilon$
	10	$PM_{2.5,M} = \beta_0 + PM_{2.5,P} \times \beta_1 + T \times \beta_2 + (PM_{2.5,P} \times T) \times \beta_3 + \epsilon$
	11	$PM_{2.5,M} = \beta_0 + PM_{2.5,P} \times \beta_1 + D \times \beta_2 + (PM_{2.5,P} \times D) \times \beta_3 + \epsilon$
	12	$PM_{2.5,M} = \beta_0 + PM_{2.5,P} \times \beta_1 + \frac{RH^2}{(1-RH)} \times \beta_2 + \left(PM_{2.5,P} \times \frac{RH^2}{(1-RH)} \right) \times \beta_3 + \epsilon$
4	13	$PM_{2.5,M} = \beta_0 + PM_{2.5,P} \times \beta_1 + RH \times \beta_2 + T \times \beta_3 + (PM_{2.5,P} \times RH) \times \beta_4 + (PM_{2.5,P} \times T) \times \beta_5 + (RH \times T) \times \beta_6 + (PM_{2.5,P} \times RH \times T) \times \beta_7 + \epsilon$
	14	$PM_{2.5,M} = \beta_0 + PM_{2.5,P} \times \beta_1 + RH \times \beta_2 + T \times \beta_3 + (PM_{2.5,P} \times RH) \times \beta_4 + (PM_{2.5,P} \times D) \times \beta_5 + (RH \times D) \times \beta_6 + (PM_{2.5,P} \times RH \times D) \times \beta_7 + \epsilon$
	15	$PM_{2.5,M} = \beta_0 + PM_{2.5,P} \times \beta_1 + T \times \beta_2 + D \times \beta_3 + (PM_{2.5,P} \times T) \times \beta_4 + (PM_{2.5,P} \times D) \times \beta_5 + (T \times D) \times \beta_6 + (PM_{2.5,P} \times T \times D) \times \beta_7 + \epsilon$
	16	$PM_{2.5,M} = \beta_0 + PM_{2.5,P} \times \beta_1 + RH \times \beta_2 + T \times \beta_3 + D \times \beta_4 + (PM_{2.5,P} \times RH) \times \beta_5 + (PM_{2.5,P} \times T) \times \beta_6 + (T \times RH) \times \beta_7 + (PM_{2.5,P} \times D) \times \beta_8 + (D \times RH) \times \beta_9 + (D \times T) \times \beta_{10} + (PM_{2.5,P} \times RH \times T) \times \beta_{11} + (PM_{2.5,P} \times RH \times D) \times \beta_{12} + (PM_{2.5,P} \times D \times T) \times \beta_{13} + (D \times RH \times T) \times \beta_{14} + (PM_{2.5,P} \times RH \times D \times T) \times \beta_{15} + \epsilon$

$PM_{2.5,P}$: Hourly PurpleAir $PM_{2.5}$ concentration (cf_1 , $\mu g/m^3$)

$PM_{2.5,M}$: Hourly MicroPEM $PM_{2.5}$ concentration ($\mu g/m^3$)

RH: Hourly relative humidity (%; PurpleAir sensor)

T: Hourly temperature ($^{\circ}C$, PurpleAir sensor)

D: Hourly dew point ($^{\circ}C$, $D = T - [(100 - RH)/5]$)

$\beta_0, \beta_1, \beta_2, \dots, \beta_{16}$: Regression coefficients

ϵ : Error term

째 그룹의 Model 1은 PurpleAir $PM_{2.5}$ 측정값만을 독립변수로 사용한 단순 선형 회귀로, 두 센서 간의 선형 관계를 나타낸다. 이는 환경 조건의 영향을 고려하지 않은 가장 단순한 형태의 보정식이다. 두 번째 그룹의 보정식들 (Models 2~4)은 $PM_{2.5}$ 측정값에 세 가지 기상 변수(상대습도, 온도, 이슬점) 중 하나를 추가한 형태이다. Model 2는 상대습도(RH)를 포함

하여 입자의 흡습 성장으로 인한 광산란 증가 효과를 보정하며, Model 3은 온도(T)를 포함하여 센서 내부 온도에 따른 측정 편향을 보정한다. Model 4는 이슬점(D)을 포함하는데, 이슬점은 온도와 습도의 복합적 효과를 나타내는 지표로 두 변수만으로 설명되지 않는 측정 오차를 일부 설명할 수 있다(Malings *et al.*, 2020; Mukherjee *et al.*, 2019). 세 번째 그룹 (Models

5~8)은 환경 변수들 간의 상호작용항을 포함한 보정 식이다. Model 5~7은 각 기상변수 조합의 상호작용 항을 포함한 반면, Model 8은 세 변수의 모든 조합의 상호작용항을 추가하였다. 마지막 네 번째 그룹 (Models 9~16)은 $PM_{2.5}$ 측정값과 기상변수 간의 상호 작용 항을 포함하여, 기상변수에 따라 다른 MicroPEM $PM_{2.5}$ 농도를 반영한다. 특히 Model 12는 상대습도의 비선형 효과를 고려하기 위해 $RH/(1-RH)$ 형태의 항을 포함한다. 이는 입자의 흡습 성장이 습도에 따라 비선형적으로 증가하는 현상을 반영하기 위한 것으로, 기존 연구에서 Plantower 광산란 센서의 습도 보정에 사용되었다 (Malings *et al.*, 2020; Tryner *et al.*, 2020; Zheng *et al.*, 2018).

보정식의 성능 평가는 5겹 교차검증 (5-fold cross-validation)을 이용하였다. 5겹 교차검증에서는 전체 데이터를 계절별로 층화 추출하여 5개의 부분집합으로 나눈 후, 각 부분집합을 순차적으로 검증용 데이터로 사용하고 나머지 4개 부분집합의 데이터를 훈련용 데이터로 사용한다. 성능 지표는 5번의 교차검증을 통해 얻은 모든 검증용 데이터의 예측농도를 관측농도와 비교하여, 아래와 같이 평균 제곱근 오차 (RMSE, Root Mean Square Error) 식 (1)과 결정계수 (R^2 , Coefficient of Determination) 식 (2)를 계산하였다.

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (PM_{2.5,M,i} - \widehat{PM_{2.5,P,i}})^2} \quad (1)$$

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (PM_{2.5,M,i} - \widehat{PM_{2.5,P,i}})^2}{\sum_{i=1}^n (PM_{2.5,M,i} - \overline{PM_{2.5,M,i}})^2} \quad (2)$$

여기서 n 은 전체 관측치 수, $PM_{2.5,M,i}$ 는 MicroPEM으로 측정한 $PM_{2.5}$ 농도, $\widehat{PM_{2.5,P,i}}$ 는 보정식을 적용한 PurpleAir의 $PM_{2.5}$ 보정농도이다. RMSE는 보정농도와 측정농도 간의 절대적 오차 크기를 나타내어 보정 정확도를 직접적으로 평가할 수 있으며, R^2 는 상관계수의 제곱(r^2)과 달리, 보정농도와 MicroPEM 측정농도를 1:1 라인(identity line)과 비교하여 두 값 간의 일치도를 평가하는 지표로, 체계적 편향이 존재할 경

우 r^2 에 비해 낮은 값을 가진다 (Kim *et al.*, 2025; Keller *et al.*, 2015). 각 fold는 계절로 층화 추출하여, 계절별 측정값이 각 fold에 균등하게 분포되도록 구성하였다. 5번의 교차검증을 통해 얻은 모든 검증용 데이터(out-of-fold predictions)의 예측값과 실제값을 하나로 통합한 후, 이를 사용하여 단일 RMSE와 R^2 값을 최종 성능 지표로 계산하였다. 또한, 최종 선택된 모델에 대해 참여자, 계절, 지역에 따른 모델 성능 차이를 확인하기 위해 ‘훈련용’ 데이터에서 특정 참여자, 계절, 지역의 측정값을 모두 제외하고 모델을 개발한 후 제외된 참여자, 계절, 지역을 검증용 데이터로 이용하는 교차검증 (leave-one-household-out, leave-one-season-out, leave-one-region-out)을 수행하였다. 교차검증을 통해 최종 보정 모델 선정 후, 전체 데이터를 이용한 재적합(refitting)을 통해 실제 적용을 위한 최종 보정식의 회귀계수를 도출하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1 두 센서 간 $PM_{2.5}$ 측정농도 비교

PurpleAir의 시간별 평균 $PM_{2.5}$ 농도는 $23.88 \mu g/m^3$ (표준편차 = 20.07)로 MicroPEM의 $12.83 \mu g/m^3$ (표준편차 = 10.18)에 비해 거의 2배 높았다 (표 3). 두 기기 간 Pearson 상관계수는 0.73으로 비교적 높은 상관성을 보였다 (그림 3). 시간대별로는 두 센서 모두 유사한 농도 변화를 보였으나, 시간별, 요일별, 계절별로 구분하였을 때 PurpleAir는 MicroPEM보다 일관되게 높은 농도를 보였다 (그림 4). 온도의 경우 PurpleAir가 평균 $29.63^\circ C$ 로 MicroPEM의 $29.02^\circ C$ 와 비슷했던 반면, 상대습도는 PurpleAir가 38.22%로 약 17% 낮게 측정되었다. 두 기기 간 높은 상관성에도 불구하고 일관되게 낮은 PurpleAir의 상대습도는 무작위 오차라기 보다는 전반적인 측정편향을 의미한다. 기존 연구에서도 일관적으로 낮은 상대습도가 보고되었고, 이는 센서 내부에서 발생한 열로 인한 내부 온도 상승 때문으로 지적되었다 (Couzo *et al.*,

Table 3. Summary statistics of hourly PM_{2.5}, temperature, and relative humidity by PurpleAir and MicroPEM in the indoor PM_{2.5} monitoring campaign of 65 older adults in South Korea for 2023.

	People (n)	People* season/ day (n)	Hour (n)	PurpleAir (mean ± SD)			MicroPEM (mean ± SD)		
				PM _{2.5}	Temp	RH	PM _{2.5}	Temp	RH
Overall	65	144	11,999	23.88 ± 20.07	29.63 ± 3.53	38.22 ± 9.68	12.83 ± 10.18	29.02 ± 8.34	55.23 ± 11.73
Season	Spring	57	5,974	24.68 ± 21.25	28.78 ± 2.93	34.12 ± 7.65	14.14 ± 10.91	29.60 ± 10.18	50.90 ± 10.02
	Summer	45	3,791	25.19 ± 17.67	32.84 ± 1.97	46.98 ± 7.05	11.96 ± 8.8	32.03 ± 2.93	65.19 ± 8.32
	Fall	23	1,382	18.47 ± 17.11	27.02 ± 2.37	34.77 ± 5.89	9.58 ± 7.77	24.00 ± 5.46	50.60 ± 8.87
	Winter	19	852	21.22 ± 24.05	25.47 ± 3.17	33.59 ± 11.48	12.80 ± 12.23	26.82 ± 8.92	48.80 ± 12.16
Day	Weekday	65	6,733	24.57 ± 20.72	29.69 ± 3.49	38.21 ± 9.63	13.09 ± 10.21	29.23 ± 8.52	55.13 ± 11.65
	Weekend	65	5,266	23.00 ± 19.18	29.55 ± 3.58	38.24 ± 9.74	12.51 ± 10.13	28.76 ± 8.11	55.35 ± 11.83

SD = standard deviation; Temp = temperature; RH = relative humidity.

2024). 따라서 PurpleAir는 PM_{2.5} 농도의 시간적 패턴을 파악하는 데 유용하나, 특히 한국과 같이 여름철 습도가 높은 환경에서는 보정이 필요하다.

MicroPEM과 PurpleAir의 PM_{2.5} 농도 차이는 두 기기의 측정 원리 차이에서 기인하는 것으로 판단된다. MicroPEM은 필터에 포집된 질량을 직접 측정한 중량농도를 기준으로 광산란 측정농도를 보정하는 반면, PurpleAir는 광산란 센서를 이용하여 입자 농도를 추정한다. PurpleAir의 광산란 센서는 산란광 신호로부터 입자 크기를 추정한 후 고정된 밀도값을 적용해 질량농도로 환산하기 때문에, 동일한 광산란 신호라도 환산과정에서 가정된 밀도값, 입자조성 및 크기 분포 등 광학적 특성에 따라 질량 추정치가 크게 달라질 수 있다(Huang *et al.*, 2021; Kelly *et al.*, 2017). 또한, 기상조건에 따라 농도값이 달라지는데, 특히 광산란 센서는 습도가 높아질 경우 입자의 흡습 성장(hygroscopic growth)에 의해 산란광이 증가하여 실제 질량농도보다 높게 측정되는 것으로 알려져 있다(Wallace *et al.*, 2021; Jayaratne *et al.*, 2018). 본 연구에서 여름철에 두 기기 사이의 차이가 가장 크게 나타났다. 이는 여름철의 높은 온도와 상대습도로 인해 입자 흡습성이 증가하고 광산란 신호가 강화되면서 PurpleAir의 과대추정 정도가 커졌기 때문으로 해석된다. 따라서 한국과 같이 여름철 습도가 높은 환

경에서는 습도를 보완한 PurpleAir 측정농도의 보정이 필요하다. 중량법으로 측정한 농도와 비교해서 PurpleAir의 비교적 높은 PM_{2.5} 농도는 과거 다른 지역 연구에서도 일관적으로 보고되었다. 미국 전역 16개 주의 정부측정소에서 진행한 연구에서는 PurpleAir 일평균 측정농도가 정부표준기기에서 측정한 중량농도에 비해 지역에 따라 12 µg/m³까지 높은 것으로 보고되었다(Barkjohn *et al.*, 2021).

3.2 PurpleAir 보정식 성능 평가

16개 보정식의 5점 교차검증 성능 비교 결과(표 4), 가장 복잡한 model 16에서 가장 낮은 RMSE와 가장 높은 R²를 보였다(RMSE 6.86 µg/m³, R²=0.55). 그러나 가장 높은 RMSE를 보인 가장 간단한 model 1과의 차이는 0.11 µg/m³(R²=0.02)에 불과하였다(RMSE 6.97 µg/m³, R²=0.53). 온도, 습도, 이슬점을 포함한 16개의 보정식을 적용한 결과 RMSE의 차이가 크지 않은 이유로는 분석에 포함된 65명의 실내 PM_{2.5}에 영향을 미칠 수 있는 고령자의 생활습관이나 행동패턴이 단조롭고 유사하기 때문일 수 있다.

다음으로 보정식의 복잡도와 예측 성능을 함께 고려하였을 때, model 16은 가장 우수한 성능을 보였으나, 복잡도가 높았다(그림 5). Model 6~15번까지 PM_{2.5}와 환경 변수 간의 다양한 상호작용항을 포함

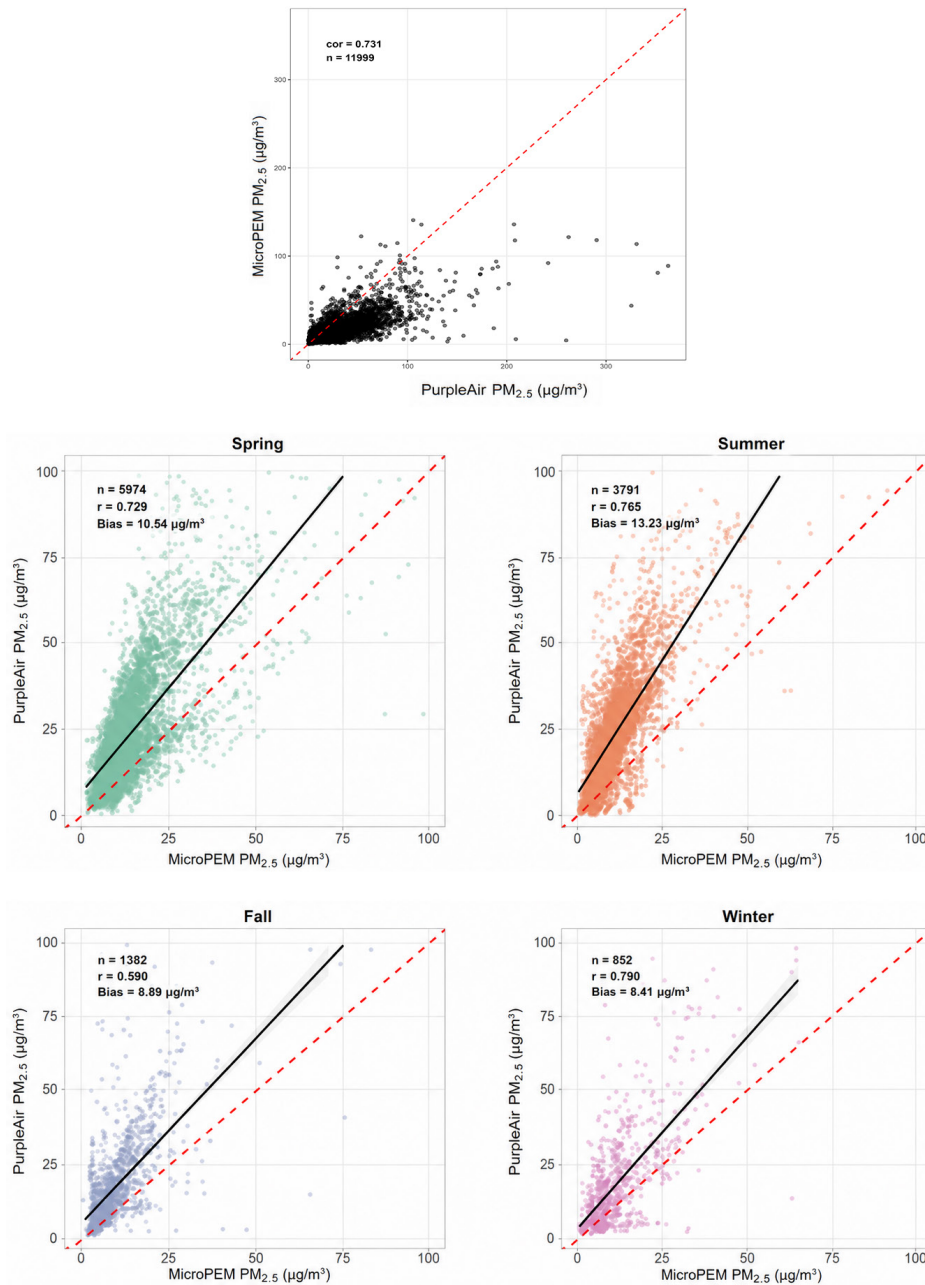


Fig. 3. Scatter plots of hourly indoor $PM_{2.5}$ concentrations between PurpleAir and MicroPEM by all (Top) and four seasons in the indoor $PM_{2.5}$ monitoring campaign of 65 older adults in South Korea for 2023.

하였으나, 4개 이상의 독립변수와 복잡한 상호작용 구조로 인해 보정식의 해석성이 떨어지고 PurpleAir 센서의 광범위한 활용을 제약할 수 있다. 반면 model

1은 단순하지만 선형 회귀로 RMSE가 $6.97 \mu g/m^3$ 를 기록하여 다른 보정식들에 비해 상대적으로 낮은 성능을 보였으며, 실내 환경의 온도도 영향을 전혀 받

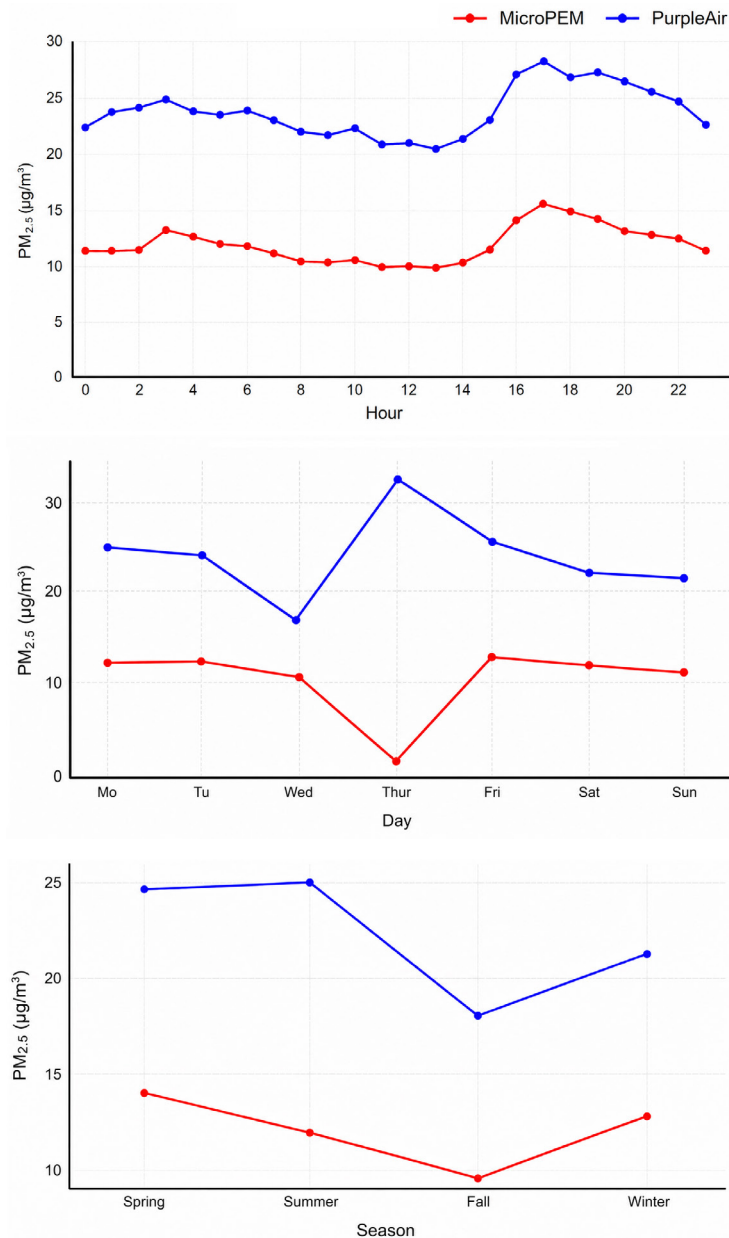


Fig. 4. Mean indoor PM_{2.5} concentrations across hours, days, and seasons between PurpleAir and MicroPEM in the indoor PM_{2.5} monitoring campaign of 65 older adults in South Korea for 2023.

영하지 못하는 한계가 있었다. 사계절이 뚜렷하고 그에 따라 온습도가 변하는 국내의 특성상 온습도의 영향을 고려한 보정식이 필요하였다.

국내 대기 환경과 복잡도를 함께 고려하여 model

2 (PM_{2.5} + RH, 상대습도), model 3 (PM_{2.5} + T, 온도), model 4 (PM_{2.5} + D, 이슬점)을 복잡도와 성능의 균형 측면에서 가장 적합한 후보군으로 도출하였고, 이 세 모델 중 RMSE가 가장 낮은 model 4를 최종 보정식

으로 선정하였다. 환경 변수 간 상호작용항이나 비선형 습도 항을 포함한 복잡한 보정식들은 단순한 보정식 대비 제한적인 성능 개선만을 보인 것은 실내 초미세먼지 데이터에서 복잡한 상호작용이나 비선형 효과가 선형 항으로 충분히 포착될 수 있음을 시사한

Table 4. Evaluation statistics of PurpleAir hourly PM_{2.5} concentrations by 16 calibration models in the indoor PM_{2.5} monitoring campaign of 65 older adults in South Korea for 2023.

Group	Model	RMSE (μg/m ³)	R ²
1	Model 1	6.97	0.53
	Model 2	6.95	0.53
2	Model 3	6.94	0.53
	Model 4	6.90	0.54
3	Model 5	6.90	0.54
	Model 6	6.92	0.54
	Model 7	6.88	0.54
	Model 8	6.87	0.54
4	Model 9	6.96	0.53
	Model 10	6.94	0.54
	Model 11	6.93	0.54
	Model 12	6.96	0.53
	Model 13	6.92	0.54
	Model 14	6.94	0.53
	Model 15	6.88	0.54
	Model 16	6.86	0.55

다. Barkjohn *et al.* (2021) 역시 유사한 이유로 비교적 단순한 형태의 보정식 (PM_{2.5} + RH, 상대습도)을 최종 선택한 바 있다. 연구에서 이슬점을 포함한 보정식을 최적의 보정식으로 선택한 것은 한국의 뚜렷한 사계절 기후 특성과 관련이 있다. 한국은 여름철 고온다습 (평균 상대습도 70~80%)과 겨울철 한랭건조 (평균 상대습도 50~60%)의 극명한 대비를 보이며, 이슬점은 온도와 상대습도를 통합하여 대기 중 수증기 응결 가능성을 직접적으로 나타내는 파생 변수로서 이러한 계절적 온습도 변동을 효과적으로 반영한다. 전체 데이터의 재적합을 통해 도출된 최종 보정식 (3)은 다음과 같다. 보정 전 RMSE는 18.16 μg/m³이었으며, 교차검증 기반 보정 후 RMSE는 6.93 μg/m³으로 크게 감소하였다 (그림 6). 최종 보정식에 대해 추가적인 가구, 계절, 지역별 교차검증 결과 5-fold 교차검증 RMSE와 비교하여 4% 미만의 소규모 차이만 보여 특정 가구, 지역 및 계절에 과적합되었을 가능성은 낮게 나타났다.

$$PM_{2.5,M} = PM_{2.5,P} \times 0.3729 + D \times (-0.1619) + \epsilon \quad (3)$$

3.3 건강영향 평가를 위한 실내노출 평가에서 저비용 센서의 중요성

본 연구에서는 PurpleAir를 사용하여 효율적으로

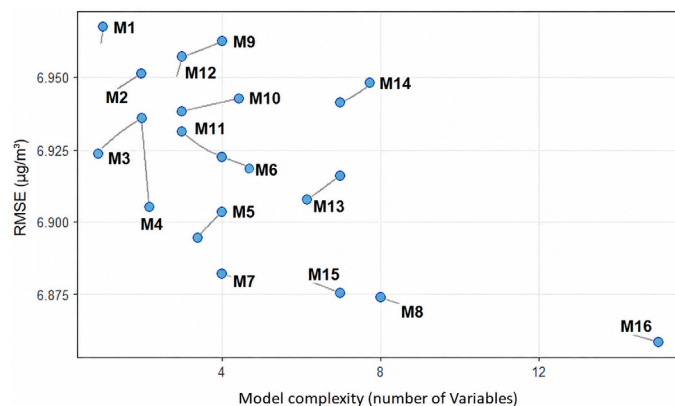


Fig. 5. Relationship between model complexity (number of variables) and model performance (cross-validated RMSE) of PurpleAir hourly PM_{2.5} concentrations across 16 calibration models in the indoor PM_{2.5} monitoring campaign of 65 older adults in South Korea for 2023.

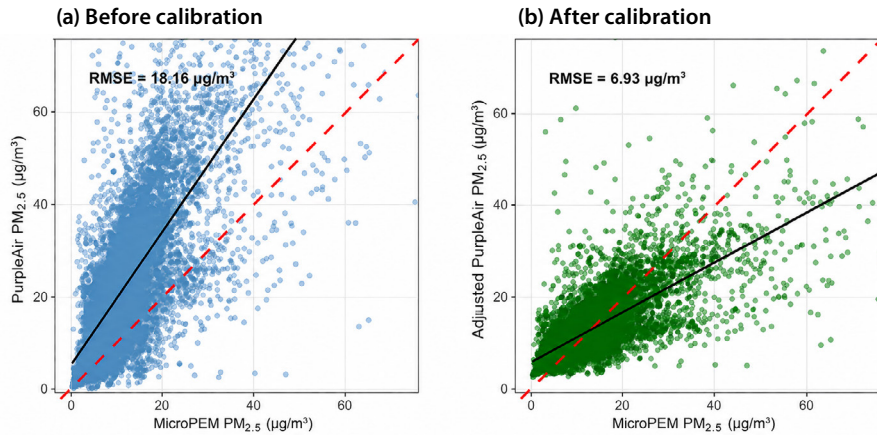


Fig. 6. PurpleAir hourly $PM_{2.5}$ concentrations against MicroPEM $PM_{2.5}$ hourly concentrations before (a) and after (b) calibration in the indoor $PM_{2.5}$ monitoring campaign of 65 older adults in South Korea for 2023. Calibrated $PM_{2.5}$ concentrations are estimated based on 5-fold cross-validation. Best-fit line for black solid line and 1 : 1 line for red dotted line.

실내 $PM_{2.5}$ 농도를 측정할 수 있는 보정식을 도출하였다. 실내 $PM_{2.5}$ 노출은 심혈관질환, 호흡기질환 및 암을 포함한 다양한 건강 악영향과 관련되어 있어 정확한 개인 노출평가의 중요성이 지속적으로 강조되고 있다(Li *et al.*, 2017). 그러나 기존의 중량법 기반 모니터나 연구용 개인노출 측정기기는 높은 정확도를 제공하는 반면 높은 비용과 운영상의 제약으로 인해 대규모 인구집단을 대상으로 한 장기간 노출평가에는 한계가 있었다. 최근 저비용 광산란 센서의 기술 발전과 보정기법의 향상으로 개인의 이동, 활동 및 미세환경 변화에 따른 시공간적 노출 변동성을 실시간으로 측정할 수 있게 되면서 대규모 개인 노출평가와 건강영향 연구에 새로운 가능성이 주목받고 있다(Kim *et al.*, 2023). 본 연구에서 사용한 PurpleAir 저비용 센서 네트워크를 활용한 연구에서는 실외 $PM_{2.5}$ 노출 예측의 정확성이 향상되었으며(Bi *et al.*, 2022), 최근에는 독일 쾰른에서 시민들이 집이나 직장 등 저비용 센서를 직접 설치하고, 모바일 앱으로 호흡기 감염 증상을 주기적으로 보고하여 개인 수준의 대기오염과 호흡기 감염의 연관성을 탐색한 시민 참여의 전향적 타당성 연구도 수행되었다(Soja *et al.*, 2023). 따라서 본 연구에서 도출한 보정식 사용 등 적

절한 보정과 품질관리가 이루어진 저비용 센서는 기존 실내환경 모니터링 체계를 보완하여 실시간 생활 환경 기반의 개인 노출평가를 가능하게 함으로써 대규모 실내 $PM_{2.5}$ 의 건강영향 역학연구의 유용한 도구로 활용될 수 있다.

3.4 강점과 제한점에 따른 향후 연구 방향

본 연구는 건강영향평가를 위한 노출평가 분야에서 국제적으로 널리 활용되고 있는 저비용센서인 PurpleAir를 적용하여, 국내 환경에 맞는 보정 및 활용 가능성을 최초로 검증하였다는 점에서 의의가 있다. 기존 PurpleAir 보정 연구들은 대부분 실외 환경을 대상으로 보정식을 개발하였다. Barkjohn *et al.* (2021)은 미국 전역 실외 환경에서 Federal Reference model/Federal Equivalent Method (FRM/FEM)을 참조 기기로 사용하여 상대습도를 포함한 모델을 개발하였고, Malings *et al.* (2020)은 미국 피츠버그 지역에서 실외 환경에서 상대습도와 온도를 포함한 모델을 제안하였으며, Holder *et al.* (2020), Delp and Singer (2020), Robinson (2020)은 산물·목재 연소 등 특수 조건에서의 보정식을 개발하였다. 이전 연구와 달리 본 연구는 한국 일반 가정의 실내 환경에서

MicroPEM을 참조 기기로 사용하여 보정식을 개발하였다는 점에서 향후 국내 대규모 역학연구 및 개인 노출평가 연구의 기반을 제공하였다. 실내 환경은 제한된 공기 순환, 요리·청소·난방 등 특정 오염원, 국내 아파트 중심의 주거 형태와 바닥 난방 시스템 등 실외와 근본적으로 다른 특성을 가지며, 이러한 환경적 차이가 이전의 연구와는 다른 보정 계수 및 변수를 포함한 것으로 판단된다.

본 연구의 제한점으로는 교차검증 기반 RMSE는 실외 환경을 대상으로 한 기존 연구들에 비해 샘플의 다양성이 낮다는 것이다. 분석에 사용한 참여자의 가정이 국내 3개 지역으로 한정되었고, 실외 환경에 비해 실내 $PM_{2.5}$ 농도의 변동 범위가 좁으며, 교통, 산업 배출 등 외부 오염원의 직접적인 영향이 제한되어 실내 환경에서 상대적으로 $PM_{2.5}$ 농도 변화가 적을 수 있다. 또한 본 연구가 시간 단위 $PM_{2.5}$ 평균값을 사용한 반면 다른 연구에서는 24시간 $PM_{2.5}$ 평균값을 사용하였기 때문에 직접적인 연구 결과 비교 시 주의가 필요하다. 모델과 관련하여 기존 연구와 동일한 16개 모델을 이용하여 성능비교를 목표로 했으나 (Barkjohn *et al.* 2021), 온도, 상대습도 및 이슬점을 동시에 포함한 모델은 변수 간 의존성이 높아 개별 회귀계수의 물리적 의미를 독립적으로 해석하기 어려운 점이 있다. 본 연구에서는 조리시간과 환기 여부 등 활동 자료를 포함하지 않아서, 참여자의 활동에 따른 모델 성능을 평가하지 못한 제한점이 있다. Shen *et al.* (2021)에 따르면 조리는 실내 $PM_{2.5}$ 의 약 64%를 차지하는 핵심 발생원이었고, 최근 연구 (Sá *et al.*, 2022; Demanega *et al.*, 2021; Singer and Delp, 2018)에서는 실내 $PM_{2.5}$ 의 주요 발생원이 조리과 실외 대기의 유입이고 발생원에 따라 센서의 반응이 달라질 수 있음을 보고하였다. 향후 연구에서는 병행 수집한 활동일지와 발생원 정보를 보정식에 적용하여 정확도와 일반화를 향상시키는 것이 필요하다. 마지막으로, 현재 연구에서는 수도권 및 강원 지역의 노인 코호트 참여자를 대상으로 수집된 데이터를 사용하였기에, 다양한 연령대와 지역으로의 일반화에는 추가적인 검증

이 필요하다. 향후 연구에서는 보다 다양한 실내 환경 조건과 인구집단을 포함한 검증을 통해 보정식의 적용 범위를 확장할 필요가 있다.

4. 결 론

본 연구는 국내 고령자 가구의 실내 환경에서 수집한 4계절 $PM_{2.5}$ 자료를 활용하여 PurpleAir 센서의 보정식을 개발하고 검증하였다. 총 65명, 144개 측정 샘플과 11,999개의 시간당 자료를 분석한 결과, PurpleAir $PM_{2.5}$ 와 이슬점을 포함한 보정식이 예측성과 모형 복잡도의 균형 측면에서 가장 적합한 보정모형으로 선정되었다. 현대인은 하루 대부분을 실내에서 생활하므로 정확한 실내 $PM_{2.5}$ 노출평가는 건강영향평가의 핵심이다. 본 연구의 실내 $PM_{2.5}$ 보정식 개발은 기존 실외 중심 연구에서 자주 다루지 못한 연구 주제로, 특히 건강영향평가를 목적으로 하는 코호트 연구에서 중요한 의미를 가진다. 본 보정식은 PurpleAir에서 실시간으로 수집 가능한 변수만을 사용하므로 현장 적용이 용이하며, 대규모 역학연구에서 실내 $PM_{2.5}$ 노출을 경제적으로 평가하는 데 활용될 수 있다. 다만 본 연구는 고령자 가구를 대상으로 수행되었고, 조리 등 세부 실내 발생원의 영향을 충분히 반영하지 못했으므로, 향후 다양한 주거환경과 독립된 자료에서의 추가 검증이 필요하다.

감사의 글

이 연구는 “국립암센터 24H1720-3”의 연구비 지원을 받아 수행되었습니다.

References

- Ardon-Dryer, K., Dryer, Y., Williams, J.N., Moghimi, N. (2020) Measurements of $PM_{2.5}$ with PurpleAir under atmospheric conditions, Atmospheric Measurement Techni-

- ques, 13(10), 5441-5458. <https://doi.org/10.5194/amt-13-5441-2020>
- Barkjohn, K.K., Gantt, B., Clements, A.L. (2021) Development and application of a United States-wide correction for PM_{2.5} data collected with the PurpleAir sensor, *Atmospheric Measurement Techniques*, 14(6), 4617-4637. <https://doi.org/10.5194/amt-14-4617-2021>
- Bi, J., Carmona, N., Blanco, M.N., Gasset, A.J., Seto, E., Szpiro, A.A., Larson, T.V., Sampson, P.D., Kaufman, J.D., Sheppard, L. (2022) Publicly available low-cost sensor measurements for PM_{2.5} exposure modeling: Guidance for monitor deployment and data selection, *Environmental International*, 158, 106897. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2021.106897>
- Bi, J., Wallace, L.A., Samat, J.A., Liu, Y. (2021) Characterizing outdoor infiltration and indoor contribution of PM_{2.5} with citizen-based low-cost monitoring data, *Environmental Pollution*, 276, 116763. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2021.116763>
- Bi, J., Wildani, A., Chang, H.H., Liu, Y. (2020) Incorporating low-cost sensor measurements into high-resolution PM_{2.5} modeling at a large spatial scale, *Environmental Science & Technology*, 54(4), 2152-2162. <https://doi.org/10.1021/acs.est.9b06046>
- Chung, C.S., Rohr, A.C. (2026) PurpleAir Sensor Deployment Trends and Uncertainties, *Sensors*, 26(6), 1789. <https://doi.org/10.3390/s26061789>
- Couzo, E., Valencia, A., Gittis, P. (2024) Evaluation and correction of PurpleAir temperature and relative humidity measurements, *Atmosphere*, 15(4), 415. <https://doi.org/10.3390/atmos15040415>
- Delp, W.W., Singer, B.C. (2020) Wildfire smoke adjustment factors for low-cost and professional PM_{2.5} monitors with optical sensors, *Sensors*, 20(13), 3683. <https://doi.org/10.3390/s20133683>
- Demane, I., Mujan, I., Singer, B.C., Andelković, A.S., Babich, F., Licina, D. (2021) Performance assessment of low-cost environmental monitors and single sensors under variable indoor air quality and thermal conditions, *Building and Environment*, 187, 107415. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2020.107415>
- Du, Y., Wang, Q., Sun, Q., Zhang, T., Li, T., Yan, B. (2019) Assessment of PM_{2.5} monitoring using MicroPEM: a validation study in a city with elevated PM_{2.5} levels, *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 171, 518-522. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2019.01.002>
- Guak, S., Lee, K. (2018) Different relationships between personal exposure and ambient concentration by particle size, *Environmental Science and Pollution Research*, 25(17), 16945-16950. <https://doi.org/10.1007/s11356-018-1889-2>
- Holder, A.L., Mebust, A.K., Maghran, L.A., McGown, M.R., Stewart, K.E., Vallano, D.M., Elleman, R.A., Baker, K.R. (2020) Field evaluation of low-cost particulate matter sensors for measuring wildfire smoke, *Sensors*, 20(17), 4796. <https://doi.org/10.3390/s20174796>
- Huang, C.H., He, J., Austin, E., Seto, E., Novosselov, I. (2021) Assessing the value of complex refractive index and particle density for calibration of low-cost particle matter sensor for size-resolved particle count and PM_{2.5} measurements, *PLoS One*, 16(11), e0259745. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0259745>
- Jayarathne, R., Liu, X., Thai, P., Dunbabin, M., Morawska, L. (2018) The influence of humidity on the performance of a low-cost air particle mass sensor and the effect of atmospheric fog, *Atmospheric Measurement Techniques*, 11(8), 4883-4890. <https://doi.org/10.5194/amt-11-4883-2018>
- Keller, J.P., Olives, C., Kim, S.Y., Sheppard, L., Sampson, P.D., Szpiro, A.A., Oron, A.P., Lindstrom, J., Vedal, S., Kaufman, J.D. (2015) A unified spatiotemporal modeling approach for predicting concentrations of multiple air pollutants in the multi-ethnic study of atherosclerosis and air pollution, *Environmental health perspectives*, 123(4), 301. <https://doi.org/10.1289/ehp.1408145>
- Kelly, K.E., Whitaker, J., Petty, A., Widmer, C., Dybwad, A., Sleeth, D., Martin, R., Butterfield, A. (2017) Ambient and laboratory evaluation of a low-cost particulate matter sensor, *Environmental Pollution*, 221, 491-500. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2016.12.039>
- Kim, S.Y., Gasset, A.J., Blanco, M.N., Sheppard, L. (2025) Ultrafine particle mobile monitoring study designs for epidemiology: Cost and performance comparisons, *Environmental Health Perspectives*, 133(3-4), 047010. <https://doi.org/10.1289/EHP15100>
- Kim, S.Y., Blanco, M.N., Bi, J., Larson, T.V., Sheppard, L. (2023) Exposure assessment for air pollution epidemiology: A scoping review of emerging monitoring platforms and designs, *Environmental Research*, 223, 115451. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2023.115451>
- Klepeis, N.E., Nelson, W.C., Ott, W.R., Robinson, J.P., Tsang, A.M., Switzer, P., Behar, J.V., Hern, S.C., Engelmann, W.H. (2001) The National Human Activity Pattern Survey (NHAPS): a resource for assessing exposure to environmental pollutants, *Journal of Exposure Science & Environmental Epidemiology*, 11(3), 231-252. <https://doi.org/10.1038/sj.jea.7500165>
- Koehler, K., Wilks, M., Green, T., Rule, A.M., Zamora, M.L., Buehler,

- C., Datta, A., Gentner, D.R., Putcha, N., Hansel, N.N., Kirk, G.D., Raju, S., McCormack, M. (2023) Evaluation of calibration approaches for indoor deployments of PurpleAir monitors, *Atmospheric Environment*, 310, 119944. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2023.119944>
- Levy Zamora, M., Xiong, F., Gentner, D., Kerkez, B., Kohrman-Glaser, J., Koehler, K. (2019) Field and laboratory evaluations of the low-cost plantower particulate matter sensor, *Environmental Science & Technology*, 53(2), 838-849. <https://doi.org/10.1021/acs.est.8b05174>
- Li, Z., Wen, Q., Zhang, R. (2017) Sources, health effects and control strategies of indoor fine particulate matter (PM_{2.5}): A review, *Science of the Total Environment*, 586, 610-622. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.02.029>
- Lu, T., Liu, Y., Garcia, A., Wang, M., Li, Y., Bravo-Villasenor, G., Campos, K., Xu, J., Han, B. (2022) Leveraging citizen science and low-cost sensors to characterize air pollution exposure of disadvantaged communities in Southern California, *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 19(14), 8777. <https://doi.org/10.3390/ijerph19148777>
- Malings, C., Tanzer, R., Haurlyuk, A., Saha, P.K., Robinson, A.L., Presto, A.A., Subramanian, R. (2020) Fine particle mass monitoring with low-cost sensors: Corrections and long-term performance evaluation, *Aerosol Science and Technology*, 54(2), 160-174. <https://doi.org/10.1080/02786826.2019.1623863>
- Morawska, L., Thai, P.K., Liu, X., Asumadu-Sakyi, A., Ayoko, G., Bartonova, A., Bedini, A., Chai, F., Christensen, B., Dunbabin, M., Gao, J., Hagler, G.S.W., Jayaratne, R., Kumar, P., Lau, A.K.H., Louie, P.K.K., Mazaheri, M., Ning, Z., Motta, N., Mullins, B., Rahman, M.M., Ristovski, Z., Shafiei, M., Tjondronegoro, D., Westerdahl, D., Williams, R. (2018) Applications of low-cost sensing technologies for air quality monitoring and exposure assessment: How far have they gone?, *Environment International*, 116, 286-299. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2018.04.018>
- Mukherjee, A., Brown, S.G., McCarthy, M.C., Pavlovic, N.R., Stanton, L.G., Snyder, J.L., D'Andrea, S., Hafner, H.R. (2019) Measuring spatial and temporal PM_{2.5} variations in Sacramento, California, communities using a network of low-cost sensors, *Sensors*, 19(21), 4701. <https://doi.org/10.3390/s19214701>
- Robinson, D.L. (2020) Accurate, low cost PM_{2.5} measurements demonstrate the large spatial variation in wood smoke pollution in regional Australia and improve modeling and estimates of health costs, *Atmosphere*, 11(8), 856. <https://doi.org/10.3390/atmos11080856>
- Ródenas García, M., Spinazzé, A., Branco, P.T., Borghi, F., Villena, G., Cattaneo, A., Gilio, A.D., Mihucz, V.G., Gomez Alvarez, E., Ivan Lopes, S., Bergmans, B., Orlowski, C., Karatzas, K., Marques, G., Saffell, J., Sousa, S.I. (2022) Review of low-cost sensors for indoor air quality: Features and applications, *Applied Spectroscopy Reviews*, 57(9-10), 747-779. <https://doi.org/10.1080/05704928.2022.2085734>
- Sá, J.P., Alvim-Ferraz, M.C.M., Martins, F.G., Sousa, S.I. (2022) Application of the low-cost sensing technology for indoor air quality monitoring: A review, *Environmental Technology & Innovation*, 28, 102551. <https://doi.org/10.1016/j.eti.2022.102551>
- Singer, B.C., Delp, W.W. (2018) Response of consumer and research grade indoor air quality monitors to residential sources of fine particles, *Indoor Air*, 28(4), 624-639. <https://doi.org/10.1111/ina.12463>
- Shen, H., Hou, W., Zhu, Y., Zheng, S., Ainiwaer, S., Shen, G., Chen, Y., Cheng, H., Hu, J., Wan, Y., Tao, S. (2021) Temporal and spatial variation of PM_{2.5} in indoor air monitored by low-cost sensors, *Science of the total environment*, 770, 145304. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.145304>
- Soja, S.M., Wegener, R., Kille, N., Castell, S. (2023) Merging citizen science with epidemiology: design of a prospective feasibility study of health events and air pollution in Cologne, Germany, *Pilot and Feasibility Studies*, 9(1), 28. <https://doi.org/10.1186/s40814-023-01250-0>
- Tryner, J., L'Orange, C., Mehaffy, J., Miller-Lionberg, D., Hofstetter, J.C., Wilson, A., Volckens, J. (2020) Laboratory evaluation of low-cost PurpleAir PM monitors and in-field correction using co-located portable filter samplers, *Atmospheric Environment*, 220, 117067. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2019.117067>
- Tryner, J., Quinn, C., Windom, B.C., Volckens, J. (2019) Design and evaluation of a portable PM_{2.5} monitor featuring a low-cost sensor in line with an active filter sampler, *Environmental Science: Processes & Impacts*, 21(8), 1403-1415. <https://doi.org/10.1039/C9EM00234K>
- U.S. Environmental Protection Agency (US EPA) (2019) Integrated Science Assessment (ISA) for Particulate Matter, U.S. Environmental Protection Agency, <https://assessments.epa.gov/isa/document/&deid=347534#downloads> (accessed on Mar. 2026).
- Wallace, L., Bi, J., Ott, W.R., Sarnat, J., Liu, Y. (2021) Calibration of low-cost PurpleAir outdoor monitors using an improved method of calculating PM_{2.5}, *Atmospheric Environment*, 256, 118432. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2021.118432>

atmosenv.2021.118432

- Zhang, T., Chillrud, S.N., Pitiranggon, M., Ross, J., Ji, J., Yan, B. (2018) Development of an approach to correcting MicroPEM baseline drift, *Environmental Research*, 164, 39-44. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2018.01.045>
- Zheng, T., Bergin, M.H., Johnson, K.K., Tripathi, S.N., Shirodkar, S., Landis, M.S., Sutaria, R., Carlson, D.E. (2018) Field evaluation of low-cost particulate matter sensors in high- and low-concentration environments, *Atmospheric Measurement Techniques*, 11(8), 4823-4846. <https://doi.org/10.5194/amt-11-4823-2018>

Authors Information & Contributions

- 박이현 (성균관대학교 통계학과 석사, dlgsdlek1@naver.com)
Writing-original draft; Formal analysis
- 박영신 (국립암센터 국제암대학원대학교 보건AI학과 연구원, park1622@ncc.re.kr) Writing-original draft; Conceptualization

- 지석민 (국립암센터 국제암대학원대학교 보건AI학과 연구원, seoky9403@gmail.com) Resources; Data curation
- 김영현 (성균관대학교 통계학과 석사, suyul0918@gmail.com) Data curation
- 배소연 (연세대학교 응용통계학과 석사, 98920@naver.com) Data curation
- 김규민 (경기과학기술대학교 보건의료행정학과 조교수, perves@gtec.ac.kr) Resources
- 김소리울 (강원대학교 의학과 조교수, soriul.kim@gmail.com) Writing-Review and Editing; Resources
- 신 철 (고려대학교 의과대학 인간유전체연구소 교수, chol-shin@korea.ac.kr) Writing-Review and Editing; Resources
- 김미지 (경희대학교 의과대학 융합의학과 교수, mijiaak@khu.ac.kr) Writing-Review and Editing; Resources
- 조승현 (RTI International Principal Exposure Research Scientist, scho@rti.org) Writing-Review and Editing; Resources
- 김선영 (국립암센터 국제암대학원대학교 보건AI학과 교수, sykim@ncc.re.kr) Writing-Review and Editing; Funding; Supervision; Conceptualization