

ISSN 1738-8716(Print)

ISSN 2287-8130(Online)

Particle and Aerosol Research

Part. Aerosol Res. Vol. 18, No. 4: September 2022 pp. 109-127

<http://dx.doi.org/10.11629/jpaar.2022.18.4.109>

실내 미세먼지 측정을 위한 저가형 PM 센서의 실험실/현장 평가 및 보정 방법

김도현¹⁾ · 신동민¹⁾ · 황정호^{1)*}

¹⁾연세대학교 기계공학부

(2022년 8월 29일 투고, 2022년 10월 19일 수정, 2022년 10월 25일 게재확정)

Laboratory/Field evaluation and calibration method of low-cost PM sensor for indoor PM_{2.5}, PM₁₀ measurement

Doheon Kim¹⁾ · Dongmin Shin¹⁾ · Jungho Hwang^{1)*}

¹⁾*Department of Mechanical Engineering, Yonsei University, Seoul 03722, Korea*

(Received 29 Aug 2022; Revised 19 Oct 2022; Accepted 25 Oct 2022)

Abstract

Recently, low-cost particulate matter (PM) sensors have been widely used in monitoring mass concentration. Maintaining the accuracy of the sensors is important and requires rigorous performance evaluation and calibration. In this study, two commercial low-cost PM sensors(LCS), Plantower PMS3003 and Plantower PMS7003, were evaluated in the laboratory and field with a reference-grade PM monitor (GRIMM 11-D). Laboratory evaluation was conducted with single/mixed particles of PSL (Poly Styrene Latex) in an acrylic chamber at 20°C and relative humidity of 20%. Field evaluation was conducted inside a building of Yonsei University (Shinchon) from February 12 to March 31, 2022. In both evaluations, LCS measured values became different from reference measured values when the relative humidity was high or the outdoor air PM₁₀/PM_{2.5} ratio was high. Based on the field evaluation, the LCS measured values were corrected through four different regression analysis models. As a result, the multivariate polynomial regression analysis model showed highest matching with the reference PM monitor (PM_{2.5} >0.9, PM₁₀ >0.85). In this model, the PM₁₀/PM_{2.5} ratio and relative humidity were chosen as independent variables.

Keywords: fine particles, collection, coating, water-film, cleaning

*Corresponding author.

Email : hwangjh@yonsei.ac.kr

1. 서론

최근 총 입자 광산란 강도를 측정하는 방식의 저가형 미세먼지(Particulate Matter, 이하 PM) 센서를 사용하여 다양한 환경에서 광범위하고 높은 해상도의 시간/공간 측정이 가능해졌다. 광산란 기반 저가형 PM 센서(Low-cost PM Sensor, LCS)는 대기 질 변화에 대해 거의 즉각적인 피드백을 제공할 수 있기 때문에 사용자들은 오염 수준이 높은 장소에 있는지 확인하고 대응할 수 있게 된다. 본 연구에서 사용된 LCS는 Laser(650 nm), PT(Phototransistor) 및 집속 렌즈로 구성된다[그림 1 참고].

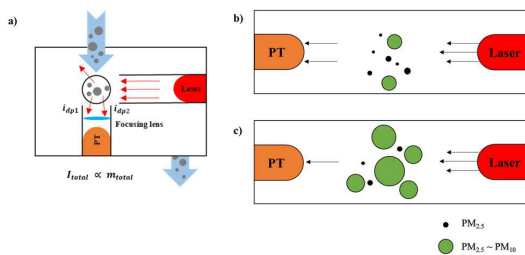


Figure 1. Diagram of the principle of light scattering-based LCS. a) Schematic diagram of light scattering-based LCS (PMS3003, PMS7003); b) Diagram of light scattering when PM₁₀/PM_{2.5} ratio is low; c) Diagram of light scattering when PM₁₀/PM_{2.5} ratio is high.

LCS의 문제는 고가의 기준 참조 PM 모니터링 장비만큼 정확하지 않다는 것이다. 광학 방식의 LCS는 작동 조건(상대습도, 온도, PM 질량 농도), 에어로졸 특성(에어로졸 조성, 크기 분포)의 영향을 받을 수 있기 때문에 보정되지 않은 LCS의 측정값은 실제 미세먼지 양보다 과대/과소평가될 수 있다. 이렇게 편향된 데이터를 효과적으로 줄이기 위해서는 센서의 작동 조건, 입자 구성, 크기 등과 신호 출력 간의 관계를 선정한 참조 장비에 맞도록 보정해야 한다. 본 연구에서는 다중이용시설과 같은 실내공간에서의 용이한 PM 측정에 목적성을 두고 있다. 따라서 실내 PM 측정에 많이 사용되고 휴대성이 가능한 연구등급의 PM 모니터링 장비 중 하나인 GRIMM 11-D를 참조 장비로 선정하였다. GRIMM 11-D는 0.253 ~ 35.15 μm의 입자를 31개의 채널에서 광학적 크기로 나누는 기능을 가지

며 다이오드 레이저(30 mW, 655 nm)로 개별 입자를 계수할 수 있는 기능을 갖춘 고급 광학 입자 측정기이다.

상대습도가 높은 환경에서 LCS 측정값에는 PM 질량 농도에 포함되어서는 안되는 습기가 존재하여 과대평가 될 수 있다. 선행 연구에 따르면 Plantower PMS5003 센서의 경우 상대습도가 65 ~ 70%를 초과할 때 LCS 측정값에 영향을 미치기 시작하는 것으로 나타나고(Magi et al., 2020), 상대습도가 50% 에서도 Sharp GP2Y 및 Shinyei PPD42NS 센서의 경우에는 측정에 상당한 영향을 받는 것으로 보여진다.(Jayaratne et al., 2018). 일반적으로 대기 질 규제는 상대습도가 40 % 이하일 때의 ‘건조’ PM 질량을 규정하므로 이러한 흡습 효과에 대한 보정이 필요하다. 일부 선행 연구에서는 선형 상대습도 보정이 비선형 보정과 같거나 더 나은 성능을 보이기도 하였다 (Badura et al., 2019). 다른 연구에서는 경험적 비선형 상대습도 보정을 적용하면 Plantower PMS3003 고습도 환경에서도 센서의 PM 농도를 건조된 상태 값의 10% 이내로 개선할 수 있다고 제안했다(Zheng et al., 2018). Gao et al.(2015)과 Malings et al.(2020)은 이론적 접근보다 경험적 비선형 보정이 더 낮은 평균 절대 오차와 더 높은 상관 계수를 얻을 수 있다고 하였다. 궁극적으로 상대습도를 교정하기 위해 선형/비선형, 이론적/경험적 방법 중 선택하는 것은 최종 사용자의 신호도와 필요에 따라 결정된다.

반면에 온도가 LCS 측정값에 영향을 미치는 정도는 상대습도에 비해 떨어진다. 대부분의 문헌에서도 -5 ~ 5 °C 사이의 저온에서도 낮은 오차 값 (-5 ~ 5μg/m³) 을 보인다고 한다. 선형 / 2차 보정 공식의 온도 계수에 대한 오류 항은 계수 자체보다 크기 때문에 온도 효과는 극한 환경(사막 등)이 아닌 일반적인 환경에서는 무시될 수 있다(Magi et al., 2020).

본 연구에서는 실내에서의 효과적인 LCS의 평가와 보정 모델 구성을 위해 실험실과 현장 평가를 진행하였다. 광학 방식인 GRIMM 11-D 장비와 LCS를 배치하여 실내 온도, 상대습도와 PM_{1.0},

PM_{2.5}, PM₁₀을 측정하였다. 각 센서 모듈들은 와이파이가 모듈과 함께 아두이노 기반 무선 네트워크형 센서로 제작하여 에어코리아(www.airkorea.or.kr)에서 제공되는 실시간 오픈 API(Application Programming Interface) 외기 PM_{2.5}, PM₁₀ 데이터를 함께 수집하였다. 수집된 데이터 중에서 농도 구간, 외기 PM₁₀/PM_{2.5} 비 (이하 (PM₁₀/PM_{2.5})API) 그리고 상대 습도를 교란요인으로 선정하여 다양한 회귀 분석을 통해 실내환경에서 사용할 LCS의 효과적인 보정 방법 제시를 목적으로 하였다.

2. 실험장치

2.1 센서 모듈 사양

본 연구에서는 DHT22 온/습도 센서와 함께 Plantower PMS3003, Plantower PMS7003 LCS를 평가하였다(이하 PMS3003, PMS7003). DHT22 온/습도 센서는 반도체 세라믹 구성으로 저항 값 변화를 감지하여 온도를 측정하고, 두 개의 전극과 수분 유지판으로 구성되어 저항 값 변화를 통해 공기 중 습도의 변화를 감지한다. LCS의 형상, 내부 모습 및 사양은 그림 2와 표 1에 표기했다. 두 LCS는 포토트랜지스터에서 읽은 광 신호를 광 세기에 따라 정수 형태의 입자 질량 농도($\mu\text{g}/\text{m}^3$)로 산출하여 PM_{1.0}, PM_{2.5} 그리고 PM₁₀ 농도 값을 출력한다(Sayahi et al., 2019, Kelly et al., 2017, Zheng et al., 2018, Badura et al., 2018, Badura et al., 2019).

다양한 크기의 입자들, 예를 들면 1, 2.5, 10 μm 크기의 입자들이 혼합된 상태에서 LCS로 들어가는

경우, 하나의 광원(Laser)과 하나의 디텍터 (PT)로 광 신호를 측정해서 질량 농도로 산출하는 자세한 과정은 LCS 제조사 마다 고유의 Know-How에 해당된다. 따라서 각 LCS에서 산출되는 PM 값 간의 관계가 특정한 값들이 곱해진 것인지, 어느정도 분류를 할 수 있는 것인지 참조 PM 모니터와의 평가를 통해 확인이 필요하다. 예를 들면 PM_{1.0}와 PM_{2.5} 농도를 먼저 구한 뒤에 이 두개의 농도로부터 PM₁₀ 농도 값을 산출을 하는 지, 아니면 하나의 광 측정값으로부터 PM_{1.0}, PM_{2.5}, PM₁₀ 값을 각각 산출하는 지에 대한 연구가 필요하다.

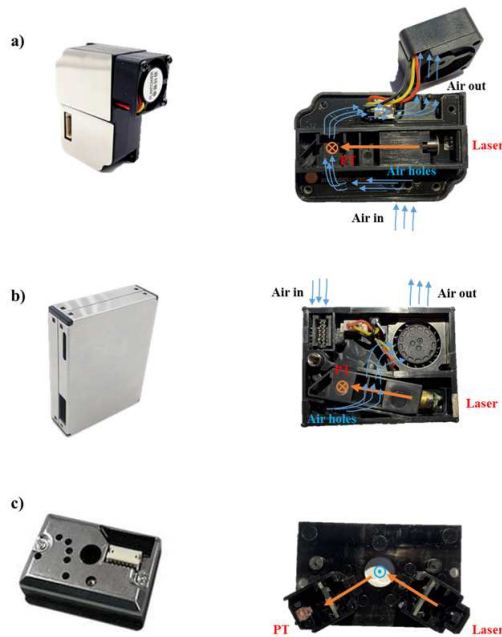


Figure 2. External/Internal shape and internal flow of LCS. a) Plantower PMS3003, b) Plantower PMS7003

Table 1. Specifications of Low-cost PM sensors.

Model	Light wavelength	Scattering Angle	Aspiration	Stated Lower Particle Size Sensitivity	Output	Price
PMS3003	650 nm	90 o	0.1 lpm	0.3 μm	Particle Mass concentrations	~26000 won
PMS7003	650 nm	90 o	0.1 lpm	0.3 μm	Particle Mass concentrations	~25000 won

2.2 무선 네트워크형 PM 센서 구조도

Arduino 기반 무선 네트워크형 PM 센서와 데이터 클라우드 시스템의 전체적인 구조도는 그림 3에 제시하였다. 해당 시스템은 총 3단계를 거치며 측정된 값을 데이터 클라우드에 저장한다. 먼저, 각 센서 모듈로부터 PM, 온/습도의 측정값을 Arduino에서 읽게된다. 그 뒤 nodeMCU 모듈과 I2C(Inter-Integrated Circuit) 통신 방법으로 연결된 Arduino에서 데이터를 byte형식으로 변환하여 각 매개변수 당 4 byte의 크기로 전달한다. 마지막으로 nodeMCU 모듈로 전달된 데이터들은 다시 문자열(string) 형태로 변환된 뒤 매 4.5초마다 데이터 클라우드인 Google datasheet로 무선통신 전송되어 저장된다. 해당 모듈은 3.3 V의 작동 전압, 1.0 mW 이내의 전원 소비를 하고 2.4 GHz의 작동 전파로 실내 전송 범위는 약 40 m, 실외에서는 약 100 m까지 도달할 수 있다.

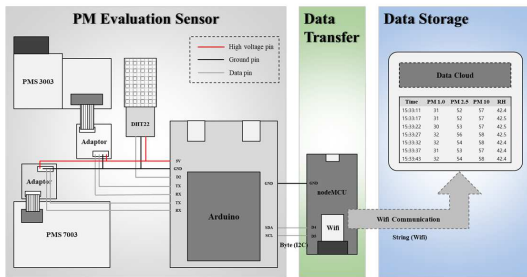


Figure 3. Schematic diagram of Arduino-based wireless network type PM sensor and data cloud system.

2.3 GRIMM 11-D와 LCS의 질량 농도 측정 메커니즘과 보정 계수

광학 방식의 연구 등급 참조 모니터링 장비 GRIMM 11-D는 0.253 ~ 35.15 μm 구간의 입자를 31개 채널의 광학적 크기 분해능으로 다이오드 레이저(30 mW, 655 nm)로 단일 입자에서의 광산란 강도를 측정하여 입자 수 농도를 측정한다. 측정된 수 농도 값은 전체 질량 농도(m_{total})로 나타낼 수 있으며 그 식은 다음과 같다(Friedlander, 2000).

$$m_{total} = \int \rho_p \frac{\pi d_p^3}{6} n(d_p) d(d_p) \quad (1)$$

위 식에서 d_p 는 입자의 입경, ρ_p 는 입자의 밀도(1

g/cm³), $n(d_p)$ 는 입경별 입자수를 뜻한다.

LCS는 다분산 입자에서의 광산란 강도를 측정하여 전체 산란광 강도(I_{total})를 얻어낸다. 이 때 전체 입자에 대한 광산란 강도는 개별 입자가 만들어내는 광산란 강도($i(d_p)$)를 합친 것과 같다고 가정하고(Friedlander, 2000), 그 식은

$$I_{total} = \int i(d_p) n(d_p) d(d_p) \quad (2)$$

이다. PT 센서를 통과하는 입자는 빛을 산란 시키며 PT가 받는 산란 빛의 강도는 입자의 농도와 직접적인 상관관계가 있다[그림 1 참고].

GRIMM 11-D가 측정하는 질량 농도 값($m_{total,Ref}$)과 LCS에서 측정되는 질량 농도 값($m_{total,LCS}$)은 모두 광산란 강도와 선형적인 관계를 가지는 식으로 표현할 수 있다.

$$m_{total,Ref} = \eta_{Ref} \cdot I_{total,Ref} \quad (3a)$$

$$m_{total,LCS} = \eta_{LCS} \cdot I_{total,LCS} \quad (3b)$$

$$m_{total,Ref} = \alpha \cdot m_{total,LCS} \quad (4)$$

위의 식에서 η_{Ref} 과 η_{LCS} 는 각각 GRIMM 11-D와 LCS의 반응 계수를, $I_{total,Ref}$ 와 $I_{total,LCS}$ 는 각각 총 광산란 강도 값을 나타내고, α 는 보정 계수이다.

$$\alpha = \frac{\eta_{Ref} \cdot I_{total,Ref}}{\eta_{LCS} \cdot I_{total,LCS}} \quad (5)$$

광산란 강도 값에 영향을 미치는 요인으로는 온도(T), 상대습도(RH), 입자의 형상(S)가 있다. 본 연구에서 실내 공간에서의 온도 변화는 미미하여 온도에 의한 신호 교란 영향은 무시할 수 있고, 입자 형상에 의한 광산란 강도 변화 또한 무시한다고 가정한다(Badura et al., 2019, Crilley et al., 2020, Magi et al., 2020, Barkjohn et al., 2020). 시간 분해능 구간(Δt_n)에 따른 GRIMM 11-D 장치의 광산란 강도는 식 (6a)가 된다. LCS의 경우 추가적으로 농도 구간($\Delta[PM]$)와 외기 $PM_{10}/PM_{2.5}$ 비($(PM_{10}/PM_{2.5})_{API}$)가 있다고 판단되어 시간 분해능 구간에 따른 LCS의 광산란 강도는 식 (6b)로 표현할 수 있다.

$$I_{total,Ref}(\Delta t_n) = \frac{\int i(d_p, RH) \cdot n(d_p, \Delta t_n) d(d_p)}{\sum n(d_p, \Delta t_n)} \quad (6a)$$

$$I_{total, LCS}(\Delta t_n) = \frac{\int i(d_p, RH, \Delta[PM], (PM_{10}/PM_{2.5})_{API}) \cdot n(d_p, \Delta t_n) \cdot d(d_p)}{\sum n(d_p, \Delta t_n)} \quad (6b)$$

본 연구에서는 보정 계수를 구하기 위해 상대습도를 측정하고, $(PM_{10}/PM_{2.5})_{API}$ 를 수집하여 각 변수들이 GRIMM 11-D와 LCS 측정값 사이의 편향성이 큰 데이터를 효과적으로 보정 해줄 수 있는 적절한 회귀 분석 모델을 찾는다.

2.4 실험실 평가

그림 4는 실험 개략도를 보여준다. 83 × 83 × 158 cm 크기의 아크릴 챔버에서 진행되었다. 챔버의 입자 누출을 방지하기 위해 가장자리는 실리콘 처리를 하였고, 균일한 분포를 만들기 위해 중앙 80 cm 높이의 모서리에 4개의 팬이 장착되었다. 발생된 입자는 챔버 상단 중앙으로 스테인리스 스틸 튜브를 통해 유입되도록 제작되었다. GRIMM 11-D를 챔버 외부 측면의 중단부에 연결하여 1.2 lpm의 유량으로 샘플링 하여 6초마다 측정하였다. LCS의 유입부와 GRIMM 11-D와 연결된 튜브 유입부의 위치 사이 거리는 약 5 cm로 배치하여 동일한 높이에서의 챔버 전체 거리(83 cm) 대비 매우 좁은 간격 비(0.06)로 GRIMM 11-D와 LCS는 동일한 PM을 측정한다고 가정할 수 있다(Li & Biswas, 2017).

평가 실험에 대한 조건은 표 2에 나타냈으며, 단일 입자 실험(대기 에어로졸 크기 분포에서 피크에 해당되는 크기)과 혼합 입자 실험(초미세먼지-PM_{2.5} 크기 분포 구현) 두 방법으로 진행되었다. 두 실험에 대한 입자 분포는 그림 5와 같다. 미립화기(TSI, Jet Atomizer 9302)로 발생시킨 단일/혼합

PSL 입자는 확산건조기(TSI, Diffusion Dryer 3076)를 통과하여 수분이 제거된다. 에어로졸화된 PSL 입자만이 아크릴 챔버로 유입되어 챔버 내 입자 농도를 높인다. 이후 LCS가 PM_{2.5} 질량 농도를 감지할 수 없는 수준으로 감소할 때까지 수행되었다. 온도/습도는 약 20 °C / 20 % 로 유지되도록 하였다. 수집된 데이터는 1분 평균, 단순 회귀 분석 방법으로 성능 평가를 진행하였다.

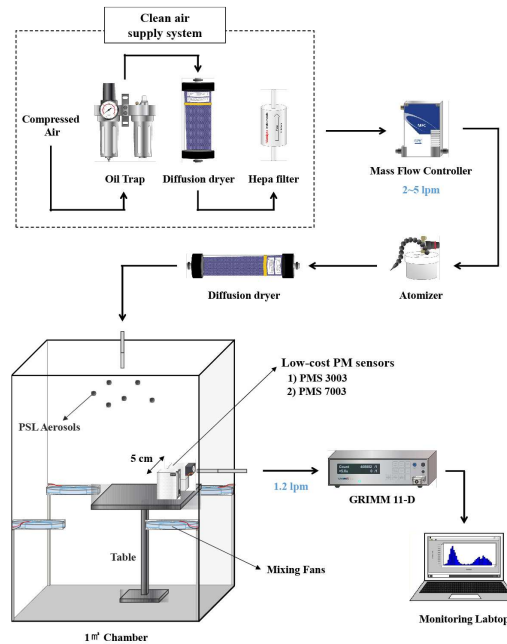


Figure 4. Schematic diagram of LCS evaluation test in laboratory(chamber).

2.5 현장 평가

그림 6a)는 현장 평가에서의 실험 세팅이며, 서울 신촌에 위치한 연세대학교 공학관 실내(37.5618°N, 126.9366 °E)에서 진행되었다. 교정 모

Table 2. Experimental conditions of laboratory evaluation test

Test Number	Particles	Particle generator	LCS	Mass Conc. range [µg/m ³]	Average Temp/Humid
Singled PSL test	PSL 0.56 µm	TSI, Jet Atomizer 9302	PMS3003, PMS7003	1.14 ~ 363.37	23.72 oC 20.81 %
Mixed PSL test	PSL 1.3, 1.5, 1.8, 2.0 µm			0.17 ~ 60.26	20.19 oC 21.67 %

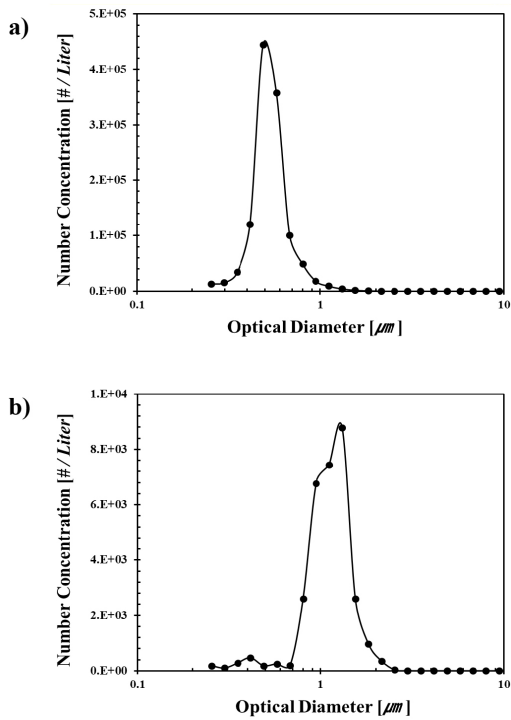


Figure 5. PSL size distribution based on maximum concentration measured by GRIMM 11-D in laboratory evaluation test. a) 0.56 μm single PSL size distribution - mass concentration graph; b) 1.3, 1.5, 1.8, 2.0 μm mixed PSL size distribution - mass concentration graph.

델을 만들 때 intra-unit 내 변동성에 대한 설명하는데 가장 좋은 방법은 GRIMM 11-D와 LCS를 같은 장소에 함께 배치하는 것이다(Giordano et al., 2021). 두 종류의 LCS (PMS3003, PMS7003)와 온도/습도 센서(DHT22)가 같은 공기 영역을 측정할 수 있도록 센서 유입부간의 간격을 2 cm 내로 설치하였다. 각 센서는 아두이노로 작동되며, 와이파이 모듈(nodeMCU)을 통하여 측정된 데이터가 무선 송신된다 [그림 6b) 참고]. GRIMM 11-D와 센서 모듈 박스는 미세먼지 재비산으로 인한 노이즈를 줄이고자 0.76 m 높이에, 같은 공기 영역을 측정할 수 있도록 공기 유입부 간 거리를 20 cm 내로 하여 배치하였다.

GRIMM 11-D 장비의 작동 가능 온도는 0 ~ 40 °C 이며 상대습도가 40% 이상일 때 제습을 해주어

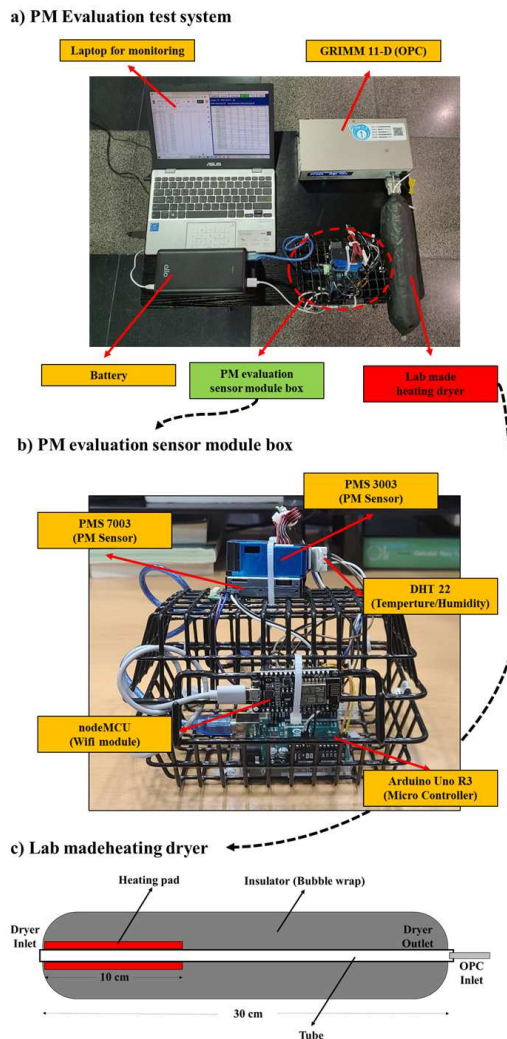


Figure 6. Overall and key elements of the field evaluation test. a) Picture of LCS field evaluation test system; b) LCS module box for field evaluation; c) Cross-section schematic diagram of lab-made heating pad type particle dryer.

야한다. GRIMM 11-D의 측정값에 영향을 미치는 습기를 줄이고자 총 30 cm 길이(전단 10 cm 발열부)의 60 °C까지 발열 가능한 열 기반 드라이어를 제작하였다. 열 기반 드라이어를 GRIMM 11-D 유입부 전단에 연결하여 측정 현장의 상대습도가 40%를 초과하였을 때 작동시켜 상대습도를 낮춘다 [그림 6c) 참고]. 상대습도가 GRIMM 11-D 측정값

에 미치는 영향을 제거하여 식 (6a)에서의 RH항이 소거되며, 아래의 식 (7)로 나타낼 수 있다.

$$I_{total, Ref}(\Delta t_n) = \frac{\int i(d_p) \cdot n(d_p, \Delta t_n) d(d_p)}{\sum n(d_p, \Delta t_n)} \quad (7)$$

현장 평가에서 수집된 데이터는 온도, 상대습도, PM_{1.0}, PM_{2.5}와 PM₁₀ 농도, 현장 평가 지점과 가까운 대기 오픈 API PM_{2.5}, PM₁₀ 데이터이다. 평가는 2022년 2월 12일부터 3월 31일까지 약 두 달간 진행되었다. GRIMM 11-D와 LCS에서 수집된 PM 질량 농도는 1시간 평균값으로 전처리 하였으며 각각 PM^{Ref}(Reference PM Mass Concentration)와 PM^{LCS}로 나타낸다. 오픈 API 데이터는 현장 평가 지점에서 각각 0.75 km, 3.8 km 떨어진 대기질 측정소(신촌역7번출구, 홍제3동 주민센터)에서 측정된 PM_{2.5}, PM₁₀의 1시간 평균 데이터를 수집하여 외기 PM₁₀과 PM_{2.5}의 비인 (PM₁₀/PM_{2.5})_{API}를 사용한다.

2.6 보정 방법

본 연구에서는 네 가지 방법으로 보정 모델을 구성하였다.

1) 단순 회귀 분석

PM^{LCS}와 PM^{Ref}에 대한 단순 회귀 분석 보정 식은

$$PM^{보정된LCS} = CF1_{slope} \cdot PM^{LCS} + CF1_{intercept} = > PM^{Ref} \quad (8)$$

이며, CF는 보정계수(Correction Factor, CF)를 의미하여 CF_{1slope}와 CF_{1intercept}는 기울기와 절편을 의미한다. 또한, 보정계수가 적용된 PM^{LCS}를 PM^{보정된LCS}로 표기한다.

2) (PM₁₀/PM_{2.5})_{API}이 고려된 회귀 분석

보정 계수2(Correction Factor 2, CF2)는 (PM₁₀/PM_{2.5})_{API}를 교란요인으로 적용한 모델이다.

$$PM^{보정된LCS} = CF2 \cdot PM^{LCS} \quad (9)$$

$$CF2 = a (PM_{10}/PM_{2.5})_{API}^2 + b (PM_{10}/PM_{2.5})_{API} + c \quad (10)$$

위 식에서 상수 a, b, c는 회귀 계수를 의미한다. CF2의 목표 보정값을 아래의 식 (11)로 정의된 참

조 보정값(CF^{Ref})으로 한다.

$$CF^{Ref} = \frac{PM^{Ref}}{PM^{LCS}} \quad (11)$$

마지막으로, 식 (11)의 PM^{Ref}와 CF2가 적용된 식 (9)의 PM^{보정된LCS}을 비교한다.

3) 농도 구간별 (PM₁₀/PM_{2.5})_{API}이 고려된 회귀 분석 LCS는 입자의 농도가 낮은 경우에 민감도가 떨어진다 것은 잘 알려진 사실이다. 따라서 본 연구에서는 PM_{1.0}의 경우에 입자 농도가 저농도와 고농도로 나누어서 모델을 세웠다. 따라서 농도 구간을 나누어 적용된 PM^{보정된LCS}은 식 (12)으로 표시된다.

$$PM^{보정된LCS} = \begin{cases} CF3_{Low} \cdot PM^{LCS}, & PM_{1.0}^{LCS} < Threshold \\ CF3_{High} \cdot PM^{LCS}, & PM_{1.0}^{LCS} \geq Threshold \end{cases} \quad (12)$$

이 때,

$$CF3_{Low} = a (PM_{10}/PM_{2.5})_{API}^2 + b (PM_{10}/PM_{2.5})_{API} + c \quad (12a)$$

$$CF3_{High} = a (PM_{10}/PM_{2.5})_{API}^2 + b (PM_{10}/PM_{2.5})_{API} + d \quad (12b)$$

이며, 위 식에서 상수 a, b, c는 회귀 계수를, CF_{3Low}와 CF_{3High}는 각각 저농도와 고농도 구간에서의 CF3를 의미한다. 마지막으로, 식 (12)의 PM^{보정된LCS}와 식 (11)의 PM^{Ref} 값과 비교하여 성능평가를 진행한다.

4) 농도 구간별 상대습도와 (PM₁₀/PM_{2.5})_{API}이 고려된 회귀 분석

보정 계수4(Correction Factor 4, CF4)는 CF3에 상대습도(RH)을 추가적인 교란요인으로 적용한 모델이며, 이를 적용한 PM보정된LCS는 식 (13)으로 표시된다.

$$PM^{보정된LCS} = \begin{cases} CF4_{Low} \cdot PM^{LCS}, & PM_{1.0}^{LCS} < Threshold \\ CF4_{High} \cdot PM^{LCS}, & PM_{1.0}^{LCS} \geq Threshold \end{cases} \quad (13)$$

이 때,

$$CF4_{Low} = a (PM_{10}/PM_{2.5})_{API}^2 + b (PM_{10}/PM_{2.5})_{API} + c \quad (13a)$$

$$CF4_{High} = a (PM_{10}/PM_{2.5})_{API}^2 + b (PM_{10}/PM_{2.5})_{API} + d \quad (13b)$$

이며, 위 식에서 상수 a, b, c, d는 회귀 계수를, CF_{4Low}와 CF_{4High}는 각각 저농도와 고농도 구간에

서의 CF4를 의미한다. 마지막으로, 식 (13)의 $PM^{부정LCS}$ 와 식 (11)의 PM^{Ref} 을 비교하여 성능평가를 진행한다.

2.7 모델 성능평가

본 연구에서는 LCS PM 농도 보정 모델의 성능을 평가하기 위해 통계 지표인 결정계수 (R^2), 평균 제곱근 오차 (RMSE, Root Mean Squared Error), 일치율 (MR, Match Rate)을 사용했다. R^2 , RMSE, MR은 각각 식 (14a), (14b), (14c)로 표시되는데, 여기서 n 은 자료 수, \hat{y}_i, y_i, \bar{y} 는 각각 LCS 보정값, 레퍼런스 장비의 측정값과 평균 측정값이다. MR은 변수 a, b 의 구성에 따라 다른 의미를 가진다. $a = \hat{y}_i, b = \hat{y}_i$ 일 때 레퍼런스에 대한 LCS의 일치율을, $a = \hat{y}_{1i}, b = \hat{y}_{2i}$ 일 때 두 LCS 간 일치율을 의미하며, 아래 첨자의 숫자는 센서 종류를 의미한다. 모델의 성능은 R^2 가 1에 가까울수록, RMSE가 0에 가까울수록, MR이 100에 가까울수록 좋다고

판단한다.

$$R^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (\hat{y}_i - \bar{y})^2}{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2} \tag{14a}$$

$$RMSE = \sqrt{\sum_{i=1}^n \frac{(\hat{y}_i - y_i)^2}{n}} \quad [\mu g/m^3] \tag{14b}$$

$$MR = \left(1 - \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{|a-b|}{a} \right) \times 100 \quad [\%] \tag{14c}$$

3. 실험결과

3.1 실험실 평가 결과 및 분석

LCS들의 성능 평가를 위해 0.56 μm PSL 단분산 단일 입자와 1.3, 1.5, 1.8, 2.0 μm PSL 단분산 혼합

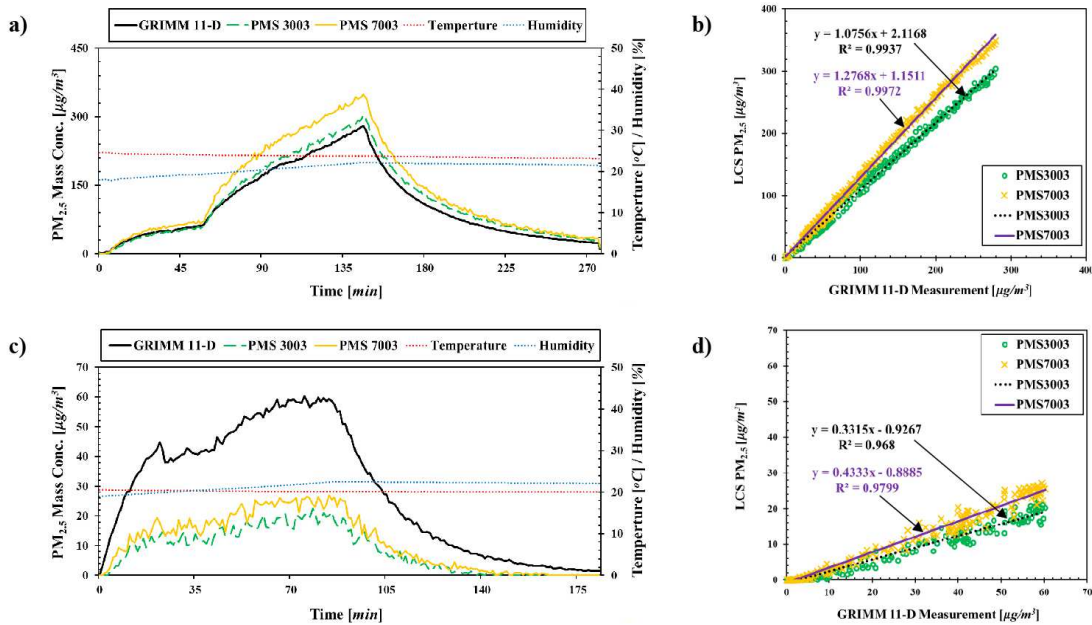


Figure 7. Results of laboratory evaluation test. a) Time series graph of temperature/humidity and PM_{2.5} value of GRIMM 11-D, LCS during 0.56 μm single PSL test. b) Correlation for PM_{2.5} values of GRIMM 11-D and LCS during 0.56 μm single PSL test. c) Time series graph of temperature/humidity and PM_{2.5} value of GRIMM 11-D, LCS during 1.3, 1.5, 1.8, 2.0 μm mixed PSL test. d) Correlation for PM_{2.5} values of GRIMM 11-D and LCS during 1.3, 1.5, 1.8, 2.0 μm mixed PSL test.

입자를 사용한 두 가지 방법으로 진행하였다. 두 가지 방법의 평가 실험에 대하여 그림 7은 LCS와 GRIMM 11-D 장비의 PM_{2.5} 측정값과 온/습도 측정값을 나타낸 결과이다. 먼저 0.56 µm PSL 입자를 사용한 단분산 평가 실험을 위해 약 2시간 30분동안 미립화기를 사용하여 챔버 내부로 입자를 분사시켜 주었고(GRIMM 11-D 장비 기준, PM_{2.5} 농도 279.52 µg/m³에 도달), 미립화기 작동을 멈춰 2시간 10분동안 서서히 떨어지는 PM_{2.5} 농도를 측정하였다 (GRIMM 11-D 장비 기준, PM_{2.5} 농도 10 µg/m³에 도달)[그림 7a) 참고]. PMS3003, PMS7003와 GRIMM 11-D 장비 간의 상관관계(R²)는 0.99 이상(각각 0.9968, 0.9986)이었다. LCS와 GRIMM 11-D의 PM_{2.5} 측정값에 대한 비 (LCS/GRIMM 11-D)의 평균값은 각각 1.0772(± 0.2055), 1.2686(± 0.1572)이었다[그림 7b) 참고]. 0.56 µm PSL 입자 테스트의 경우, 단변수 선형 회귀 분석을 통한 보정 모델만으로도 높은 상관관계와 낮은 편차를 가지게 된다. 반면 PMS3003 센서는 GRIMM 11-D 측정값에 대하여 약 2.5 µg/m³ 이하 농도에서부터 0 µg/m³으로 측정되었으나 PMS7003은 같은 농도 이하에서도 높은 민감도를 보여주었다.

두 번째 평가 실험은 PM_{2.5}에 해당되는 4종류 PSL 입자를 가지고 진행하였다. 약 1시간 30분 동안 미립화기를 사용하여 챔버 내부로 분사시켜 주었고(GRIMM 11-D 장비 기준, PM_{2.5} 농도 60.26 µg/m³에 도달), 미립화기 작동을 멈춰 1시간 40분동안 PM_{2.5} 농도가 감소하는 것을 측정하였다 (GRIMM 11-D 장비 기준, PM_{2.5} 농도 2 µg/m³에 도달)[그림 7c) 참고]. 그 결과 PMS3003, PMS7003 센서는 GRIMM 11-D의 PM_{2.5}과의 상관관계는 높았지만(R²는 각각 0.9815, 0.9876), LCS 측정값이 GRIMM 11-D에서 측정된 질량 농도에 비하여 크게 적었다[그림 7d) 참고]. 예상되는 원인은 두 가지로 LCS의 낮은 유량과 내부 구조상 입자의 공기역학경이 커질 수록 광측정 경로까지 온전히 도달하지 못할 수 있고[그림 2 참고], PM 표면적 증가에 따른 광산란 측정 방해 신호 증가율은 비례하게 되기 때문에 공기역학경이 큰 입자들의 분포

가 많아질수록 과소평가 혹은 노이즈가 크게 나타날 수 있다[그림 1b), c) 참고].

PMS3003, PMS7003 센서 모두 0.56 µm PSL에 대해서는 PM_{2.5} 농도 기준에서 높은 상관관계와 낮은 편향성을 가지고 충분한 민감도를 보이는 것으로 평가되었다. 또한 1.3 ~ 2.0 µm PSL에 대해서도 높은 상관관계는 보였으나 민감도가 떨어지고 GRIMM 11-D에 비하여 적게 측정되는 것으로 나타났다. 이에 현장 평가를 통해 해당 부분을 보완/보정 할 수 있도록 한다.

3.2 현장 평가 테스트 분석 및 보정 결과

그림 8 a), b)는 연세대학교 신촌캠퍼스 공학관에서 2022년 2월 16일 19시부터 3월 31일 20시까지 GRIMM 11-D와 LCS로 측정된 온/습도 및 PM 질량 농도이다. 측정된 온도의 평균은 15.91 °C (± 2.16)으로 계절에 관계없이 실내에서는 편차가 크지 않았다. 반면 습도는 34.83 % (± 11.32)으로 겨울에서 봄으로 바뀌는 계절에 편차가 다소 크게 나타났다. GRIMM 11-D로 측정된 PM_{2.5}와 PM₁₀의 측정 범위는 각각 1.33 ~ 72.92 µg/m³ (평균 20.45 ± 12.55 µg/m³), 1.65 ~ 119.27 µg/m³ (평균 29.07 ± 17.52 µg/m³)이며, PMS3003으로 측정된 미세먼지 농도 범위는 1.00 ~ 137.54 µg/m³ (평균 39.28 ± 28.46 µg/m³), 1.04 ~ 153.03 µg/m³ (평균 42.88 ± 31.02 µg/m³), PMS7003으로 측정된 미세먼지 농도 범위는 1.29 ~ 129.72 µg/m³ (평균 38.40 ± 26.71 µg/m³), 1.65 ~ 172.33 µg/m³ (평균 50.71 ± 34.95 µg/m³)이다. PM_{2.5}의 평균 농도는 PMS3003, PMS7003, GRIMM 11-D 순으로 PM₁₀의 평균 농도는 PMS7003, PMS3003, GRIMM 11-D 순으로 높았으며, LCS의 측정값이 GRIMM 11-D보다 높게 측정되는 경향을 보였다. GRIMM 11-D 대비 PM_{2.5} 측정치가 PMS3003은 평균적으로 약 1.92배, PMS7003은 약 1.47배로 나타나며, GRIMM 11-D 대비 PM₁₀ 측정치가 PMS3003은 평균적으로 약 1.88배, PMS7003은 약 1.74배로 나타났다. 따라서 LCS의 측정값은 대체로 GRIMM 11-D 측정값에 비해 과대평가되는 것으로 나타났다. 반면 일부 구간에서는 LCS의 측정값이 GRIMM

11-D 측정값에 비해 과소평가 되어 다른 경향을 보이기도 하였다[그림 8a), b) 참고]. 따라서 본 연구에서는 위의 현장 평가에서 얻은 데이터를 통해

다양한 변수 및 회귀 분석 모델을 적용하여 보정 모델을 구성하였다. 각 보정 모델에 대한 설명은 표 3에 나타내었으며, 그 과정은 아래에 설명하였다.

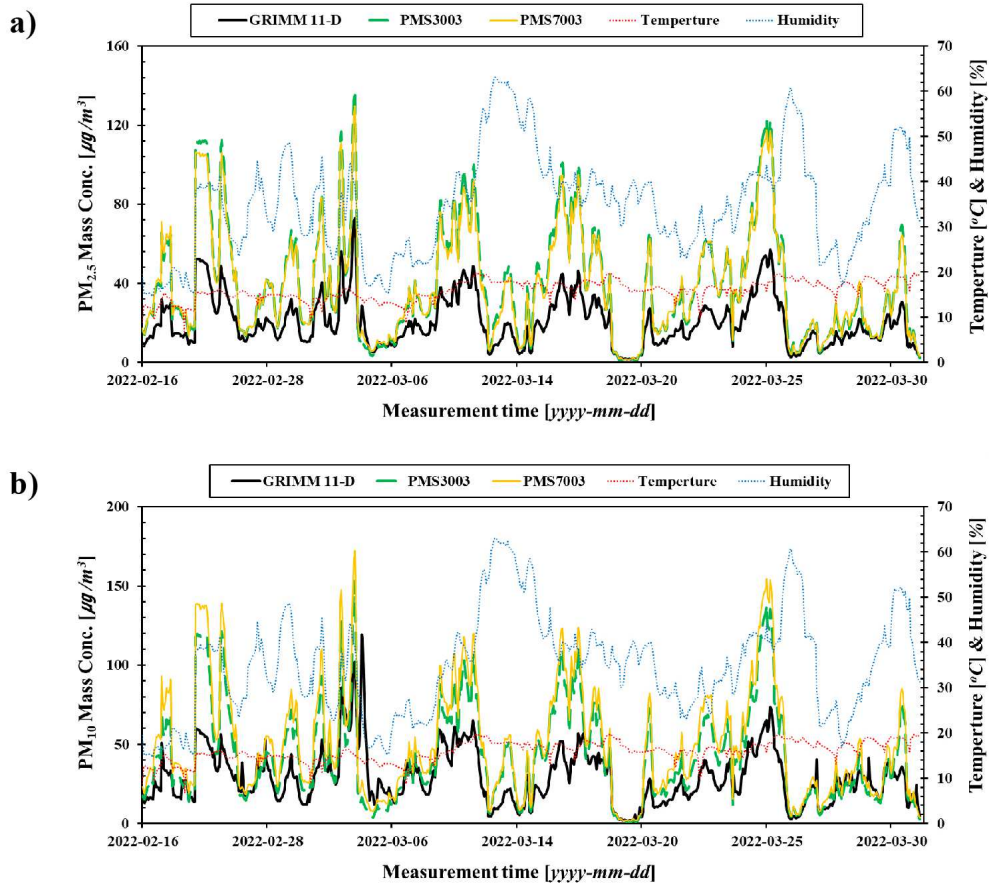


Figure 8. Results of field evaluation test. a) Time series graph of temperature/humidity and mass concentration measurements for PM_{2.5} measured by GRIMM 11-D, PMS3003, PMS7003; b) Time series graph of temperature/humidity and mass concentration measurements for PM₁₀ measured by GRIMM 11-D, PMS3003, PMS7003.

Table 3. Description of CF1~CF4

CF Model	Regression model	Separate Conc. section	Independent variable	Dependent variable
CF1	Simple Linear	X	PM ^{LCS}	PMRef
CF2	Univariate	X	(PM ₁₀ /PM _{2.5})API	CFRef
CF3	Univariate	O	(PM ₁₀ /PM _{2.5})API	CFRef
CF4	Multivariate	O	(PM ₁₀ /PM _{2.5})API, RH	CFRef

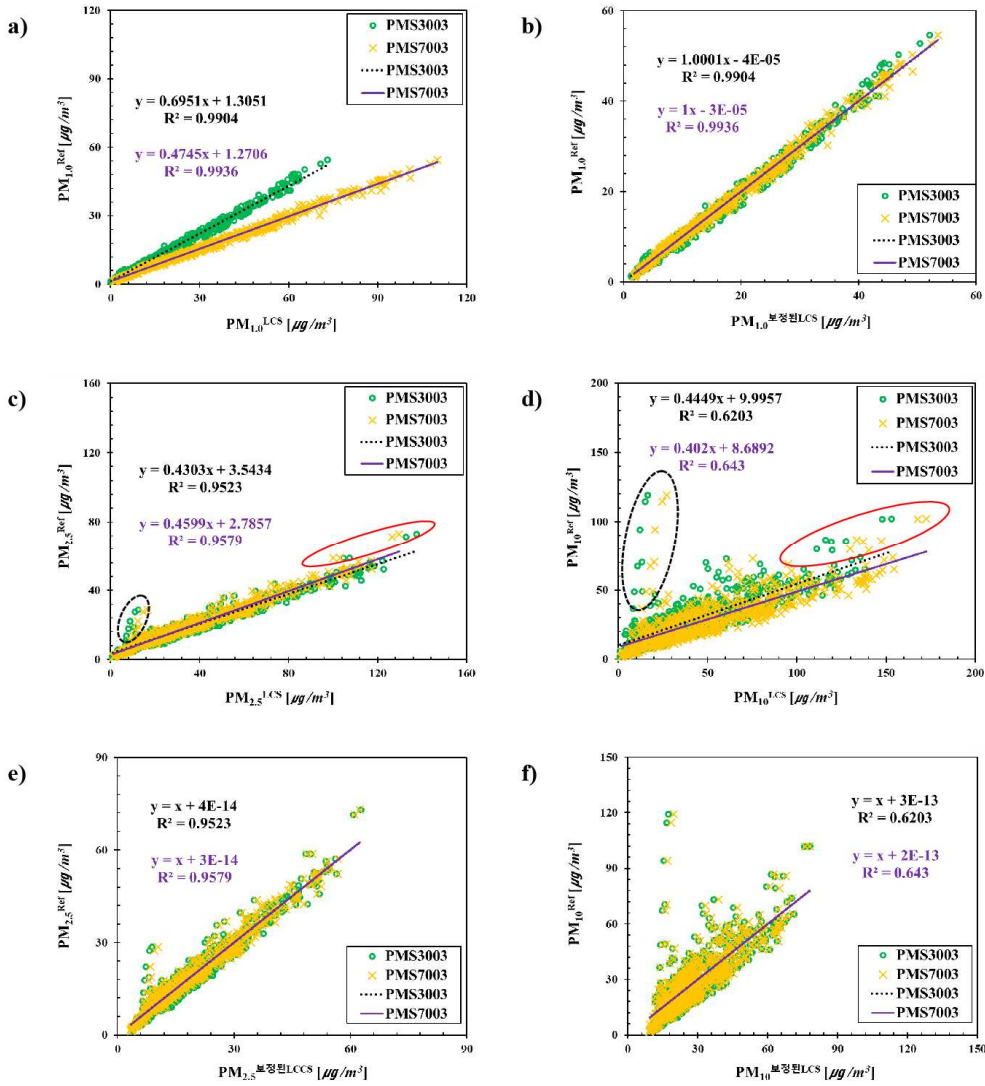


Figure 9. Correlation analysis between PM^{LCS} and PM^{Ref} , and results of CF1 application. a) CF1 for $PM_{1.0}$, b) $PM_{1.0}$ with CF1 applied, c) CF1 for $PM_{2.5}$, d) CF1 for PM_{10} , e) $PM_{2.5}$ with CF1 applied, f) PM_{10} with CF1 applied.

** In the figure, $PM^{보정된LCS} = CF1_{Slope} \cdot PM^{LCS} + CF1_{Intercept}$ **

그림 9는 $PM_{1.0}$, $PM_{2.5}$, PM_{10} 측정값에 대하여 PM^{Ref} 와 PM^{LCS} 의 상관관계를 단순 회귀 분석(CF1)과 R^2 로 나타낸 결과이다. 그림 9a)에서 $PM_{1.0}$ 의 경우 PM^{Ref} 와 PM^{LCS} 간 강한 양의 상관관계를 보여준다. 따라서 LCS의 $PM_{1.0}$ 측정값은 식 (8)을 적용한 단순 회귀 보정만으로도 GRIMM 11-D의 $PM_{1.0}$ 측정값과 높은 일치율을 보였다[그림 9b) 참고]. 반

면에, $PM_{2.5}$ 와 PM_{10} 의 경우, 검정색과 빨간색 타원으로 표시된 점에서 LCS의 측정값이 GRIMM 11-D에 비하여 크게 벗어났다 [그림 9c), d) 참고]. 그림 9c), d)의 X 축을 CF1로 보정한 결과를 (즉 $PM_{2.5}^{보정된LCS}$ 와 $PM_{10}^{보정된LCS}$ 에 대하여) 그림 9e), f)로 보여준다.

RMSE와 MR에 대한 성능 평가 지표에서 PM_{2.5}의 경우 유의미한 결과를 얻었지만, PM₁₀의 경우에 크게 미치지 못하였다. 또한 편향적인 출력값들에 대한 보정은 거의 이루어지지 않았으며, PM^{LCS}와 PM^{Ref} 간의 상관관계(R²) 역시 변하지 않았다[표 4 참고]. 뿐만 아니라 PM_{2.5}^{보정된LCS}와 PM₁₀^{보정된LCS}은 오히려 LOD(Limit of Detection)가 증가하여 LCS의 성능이 떨어지는 결과를 초래하였다 (PM^{보정된PMS3003}에서 PM_{2.5}, PM₁₀의 LOD: 3.98, 10.48 µg/m³; PM^{보정된PMS7003}에서 PM_{2.5}, PM₁₀의 LOD: 3.38, 9.35 µg/m³). 따라서 그림 9c), d)에 나타난 편향적인 측정값들을 보정하기 위해서는 단순 회귀 보정이 아닌, 적합한 요인을 선정하여 다항 회귀 분석 보정 방법을 적용하여야 한다.

PM₁₀^{Ref}와 PM₁₀^{LCS} 간의 상관관계(R²)는 PM_{2.5} 경우의 상관관계보다 낮아, LCS의 PM₁₀ 출력값에 대한 신뢰도 평가가 필요하다. 따라서 PM₁₀^{LCS}이 PM_{2.5}^{LCS}으로부터 선형적으로 산출되는지 (a*PM_{2.5}^{LCS} = PM₁₀^{LCS}, a는 상수), 또는 비선형적으로 산출되는지 (f(PM_{2.5}^{LCS}) = PM₁₀^{LCS}) 확인이 필요하다. 그림

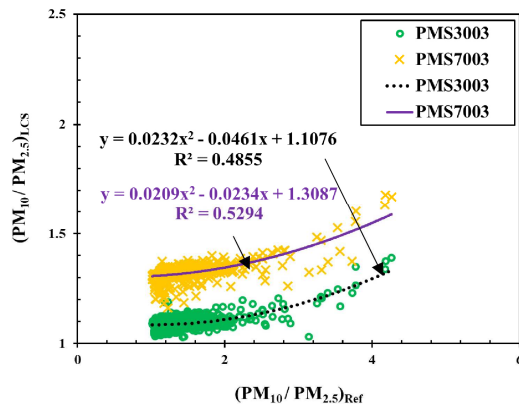


Figure 10. Correlation analysis between (PM₁₀/PM_{2.5})_{Ref} and (PM₁₀/PM_{2.5})_{LCS}.

10은 GRIMM 11-D에서 측정된 PM_{2.5}와 PM₁₀의 비 PM₁₀/PM_{2.5}(이하 (PM₁₀/PM_{2.5})_{Ref})와 LCS에서 측정된 PM_{2.5}와 PM₁₀의 비 PM₁₀/PM_{2.5}(이하 (PM₁₀/PM_{2.5})_{LCS}) 간의 상관관계를 보여준다. 그 결과 (PM₁₀/PM_{2.5})_{Ref}가 커질수록 (PM₁₀/PM_{2.5})_{LCS}가 증가하는 경향을 보였다. 이를 통해 PM₁₀^{LCS}가 PM_{2.5}^{LCS}와 단순 곱의 관계가 아닌, 비선형적인 관계가 있음을 알 수 있다.

Table 4. Performance evaluation results according to the calibration model.

Node	CF Model	R2	RMSE	MR (%)
PMS3003 (PM _{2.5})	Raw	0.9523	25.0024	18.58
	CF1	0.9523	2.7422	84.50
	CF2	0.9682	2.8666	88.01
	CF3	0.9778	2.2359	88.98
	CF4	0.9783	2.1540	89.52
PMS3003 (PM ₁₀)	Raw	0.6203	24.5708	41.86
	CF1	0.6203	10.7962	58.03
	CF2	0.9096	5.8269	83.56
	CF3	0.9155	5.3557	84.01
	CF4	0.9189	5.1735	84.74
PMS7003 (PM _{2.5})	Raw	0.9579	23.1731	21.91
	CF1	0.9579	2.5753	86.63
	CF2	0.9782	2.2619	90.54
	CF3	0.9777	2.0294	91.19
	CF4	0.9784	2.0221	91.42
PMS7003 (PM ₁₀)	Raw	0.6430	31.8523	21.26
	CF1	0.6430	10.4682	61.24
	CF2	0.9241	5.0005	82.77
	CF3	0.9242	4.9018	85.65
	CF4	0.9244	4.8886	86.39

그림 11은 PM_{2.5}, PM₁₀에 대하여 (PM₁₀/PM_{2.5})_{API}와 CF^{Ref} 간의 관계를 분석하여 보정 모델 CF2를 구성한 결과이다. 그림 11a), b)는 각각 PM_{2.5}와 PM₁₀의 경우에서 CF^{Ref}와 (PM₁₀/PM_{2.5})_{API}을 시간축을 기준으로 나타낸 그래프이다. PM_{2.5}와 PM₁₀의 경우 모두 (PM₁₀/PM_{2.5})_{API}가 증가함에 따라 CF^{Ref}가 커지는 경향을 보였다. CF^{Ref}를 (PM₁₀/PM_{2.5})_{API}의

함수로 보이기 위하여 그 결과를 그림 11c), d)에 나타내었다. PM_{2.5}의 경우 양의 1차 선형 관계를 보였고, PM₁₀은 양의 2차 다항 관계가 나타났다. 그림 11e), f)는 그림 9c), d)의 X 축을 CF2로 보정한 결과를, 즉 PM_{2.5}^{보정된LCS}와 PM₁₀^{보정된LCS}에 대하여 보여준다. 그 결과 대부분의 평가 지표에서 CF1과 비교하였을 때 개선됨을 보였다. 먼저, PM_{2.5}^{LCS}에서

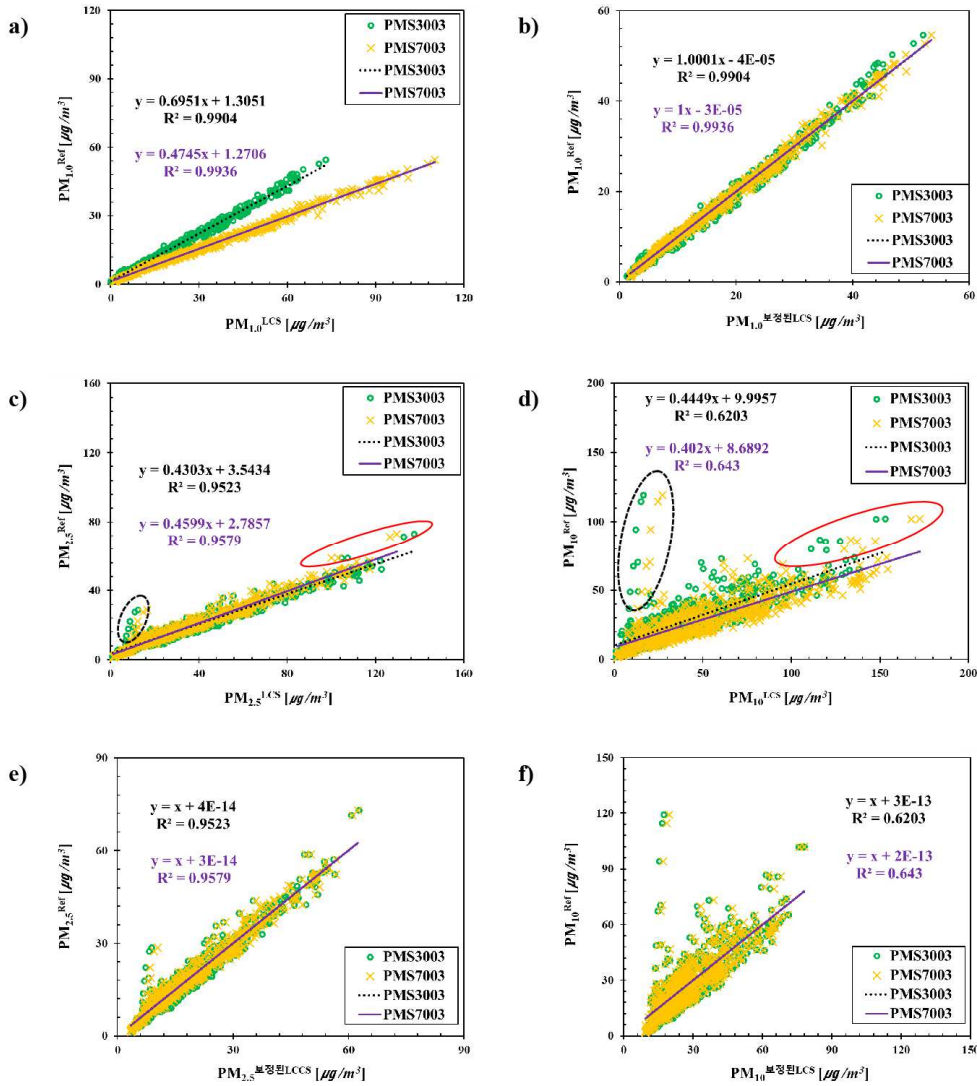


Figure 11. Correlation analysis between Public API based PM₁₀/PM_{2.5} (Shincheon-Hongje station) and PM^{Ref}, and results of CF2 application. a) Time series graph of PM_{2.5} case, b) Time series graph of PM₁₀ case, c) CF2 for PM_{2.5}, d) CF2 for PM₁₀, e) PM_{2.5} with CF2 applied, f) PM₁₀ with CF2 applied.

** In the figure, PM^{보정된LCS} = CF2 · PM^{LCS} **

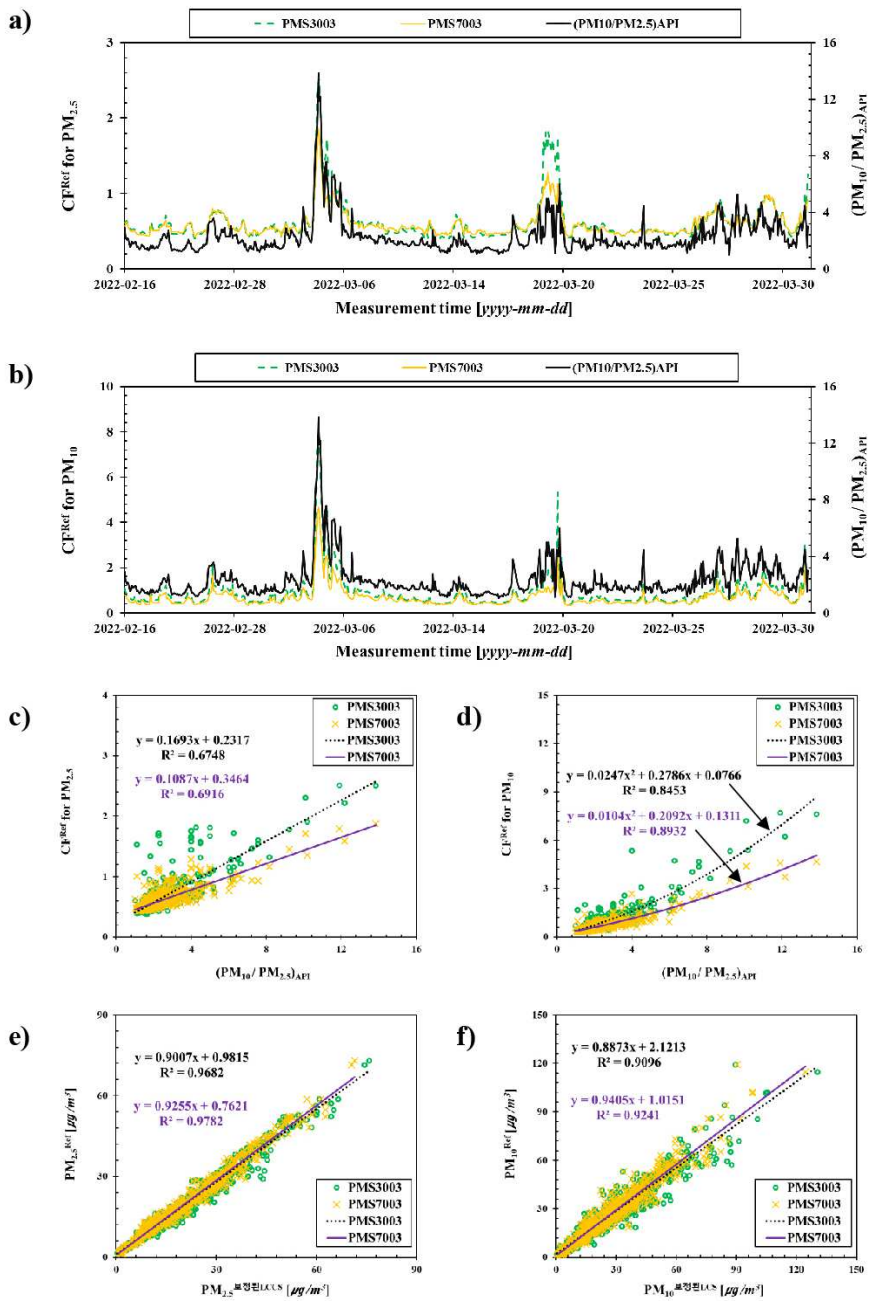


Figure 12. Correlation analysis with CF^{Ref} according to PM mass concentration section, and results of CF3 application. a) Correlation with CF^{Ref} according to $PM_{1.0}^{LCS}$, b) CF3 in $PM_{2.5}$ low conc. section, c) CF3 in $PM_{2.5}$ high conc. section, d) CF3 in PM_{10} low conc. section, e) CF3 in PM_{10} high conc. section, f) $PM_{2.5}$ with CF3 applied, g) PM_{10} with CF3 applied.

** In the figure, $PM_{2.5}^{Ref(LCS)} = CF3 \cdot PM_{2.5}^{LCS}$ **

RMSE는 보정 전과 비교하였을 때 약 $20 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 감소하고 MR은 약 60 % 증가하여 크게 개선되었다. 또한, 저농도 구간의 편향성이 큰 $\text{PM}_{2.5}^{\text{LCS}}$ 에 대하여 CF1에 비해 눈에 띄는 성능 개선이 이루어졌다 (CF1Low RMSE: $4.47 \mu\text{g}/\text{m}^3$, CF2Low RMSE: $1.00 \mu\text{g}/\text{m}^3$). $\text{PM}_{10}^{\text{LCS}}$ 에서는 CF1에 비하여 눈에 띄는 성능 개선을 보였으며, CF1에 비하여 약 $5 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 의 RMSE 감소와 약 20 %의 MR 상승률을 보였다[표 4 참고].

그림 12는 $\text{PM}_{2.5}$ 와 PM_{10} 의 농도 구간을 나누어 보정 모델을 적용한 CF3를 구성한 결과이다. $\text{PM}_{2.5}^{\text{LCS}}$, $\text{PM}_{10}^{\text{LCS}}$ 과 동시에 출력된 $\text{PM}_{1.0}^{\text{LCS}}$ 을 기준으로 하여 농도 구간을 나누고자 $\text{PM}_{1.0}^{\text{LCS}}$ 와 $\text{CFRef}(=\text{PM}^{\text{Ref}}/\text{PM}^{\text{LCS}})$ 간의 상관관계를 통해 농도 구간에 따른 LCS의 민감도 변화를 확인하였다[그림 12a)].

$\text{PM}_{1.0}$ 농도가 증가함에 따라 $\text{PM}_{1.0}$ 에서의 CF^{Ref} 가

빠르게 감소하다가 수렴하는 경향을 보였으며, 각 LCS에 따라 도출된 추세선은

$$y = \begin{cases} 1.3171x^{-0.174}, & \text{PMS3003} \\ 0.8838x^{-0.15}, & \text{PMS7003} \end{cases} \quad (15)$$

이며, y는 $\text{PM}_{1.0}$ 에 대한 CF^{Ref} 를, x는 $\text{PM}_{1.0}^{\text{LCS}}$ 값을 의미한다. 본 연구에서는 ($\text{PM}^{\text{Ref}}/\text{PM}^{\text{LCS}}$) 비의 변화율이 급격하게 감소되어 수렴에 가까워질 때의 $\text{PM}_{1.0}$ 을 구하였고 이를 기준으로 저농도/고농도 구간이라 정의하였다. 즉, 식 (15)의 y"(y의 이계도함수)의 평균값에 대응되는(PMS3003 y" 평균: 0.0036, PMS7003 y" 평균: 0.0026) 각 LCS의 $\text{PM}_{1.0}$ 값은 $7.3355 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 과 $6.8852 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 이다[그림 11b) 참고].

따라서 도출된 각 LCS의 농도 구간 기준으로 저농도/고농도 구간을 나누어 식 (12a)와 (12b)로 도출된 보정 모델 CF3를 구할 수 있다[그림 12b),

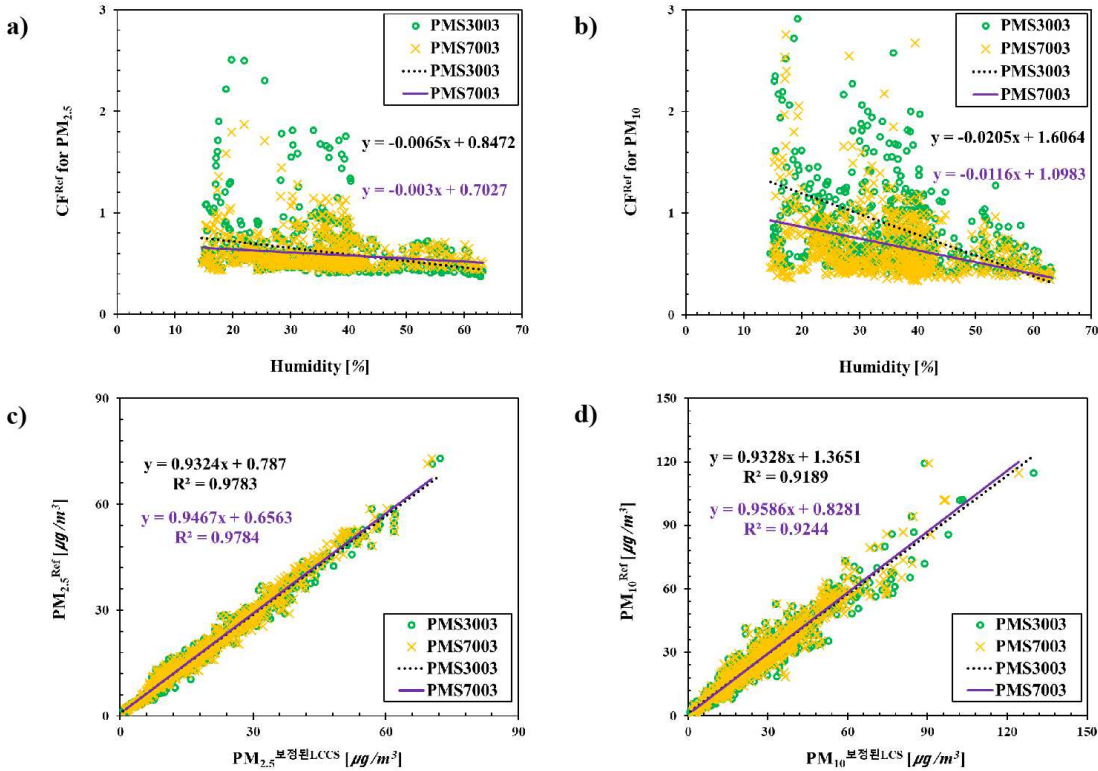


Figure 13. Correlation analysis with CF^{Ref} according to relative humidity, and results of CF4 application. a) $\text{PM}_{2.5}$ case, b) PM_{10} case, c) $\text{PM}_{2.5}$ with CF4 applied, d) PM_{10} with CF4 applied.

** In the figure, $\text{PM}^{\text{보정된LCS}} = \text{CF4} \cdot \text{PM}^{\text{LCS}}$ **

c), d), e)참고]. 그림 12b)는 PM_{2.5} 경우에서 저농도 구간을, 그림 12c)는 PM_{2.5} 경우에서 고농도 구간을 나타내며 식 (12a)와 (12b)에서 계수 a가 0인 1차 선형 관계를 가진다. 그림 12d)는 PM₁₀ 경우에서 저농도 구간, 그림 12e)는 PM₁₀ 경우에서 고농도 구간을 나타 내며 2차 다항 관계를 가진다. 그림 12f), g)는 그림 9c), d)의 X 축을 CF3로 보정한 결과를 (즉 PM_{2.5}^{보정된LCS}와 PM₁₀^{보정된LCS}에 대하여) 보여준다. PM_{2.5}^{LCS}에 대하여 CF3을 적용하였을 때, CF2에 비해 과대평가된 측정값들이 보정되어 성능이 개선됨을 보였다.(CF2 대비 PMS3003 RMSE 감소율: 22.0 %, PMS7003 RMSE 감소율: 10 %)[표 4 참고]. 마찬가지로 PM₁₀^{LCS}에 대하여 CF3을 적용하였을 때, 30 ~ 90 µg/m³ 구간의 과대평가된 값에 대해서도 CF2에 비해 성능이 개선됨을 보였다(CF2 대비 PMS3003 RMSE 감소율: 8.1 %, PMS7003 RMSE 감소율: 2.0%)[표 4 참고]. 그림 13a), b)는 상대습도와 CF^{Ref}에 대한 상관관계를 나타낸다. 상대습도가 증가함에 따라 CF^{Ref}(= PM^{Ref}/PM^{LCS})가 줄어드는 경향을 보였으며, 이는 높은 상대습도로 인한 흡습 효과의 증가로 PM^{LCS}가 과대평가 됨을 알 수 있다. 또한, PM_{2.5}에 비하여 PM₁₀의 경우 상대습도로 인한 신호 교란 정도가 더 큼을 알 수 있으며, PMS7003이 PMS3003에 비하여 상대습도의 영향을 적게 받는 것으로 보인다. 이렇게 상대습도에 따른 교란요인이 추가된 식 (13a)와 (13b)의 CF4는 표 5에 나타내었다. 그림 13c), d)는 그림 9c), d)의 X 축을 CF4로 보정한 결과를 (즉 PM_{2.5}^{보정된LCS}와 PM₁₀^{보정된LCS}에 대하여) 보여준다. PM^{LCS}에 대하여 CF3보다 모든 평가 지표에서 더 높은 보정

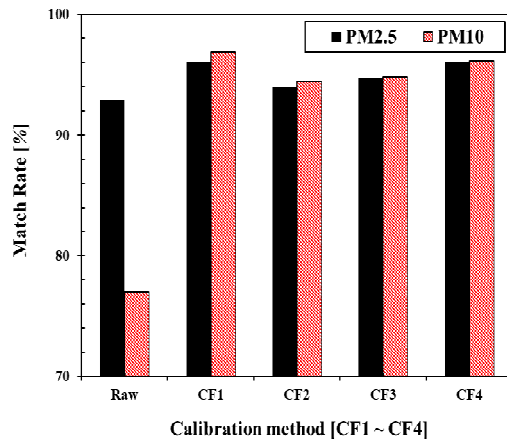


Figure 14. Match rate of PMS3003 and PMS7003 for PM_{2.5} and PM₁₀.

성능을 보였으나, 본 연구에서 측정된 습도로 나타났(CF3 대비 PMS3003 PM_{2.5} RMSE 감소율: 3.7 %, PMS3003 PM₁₀ RMSE감소율: 3.4 %; PMS7003 PM_{2.5} RMSE 감소율: 3.4 %, PMS7003 PM₁₀ RMSE 감소율: 0.2 %)[표 4 참고].

그림 14는 보정 모델에 따른 PMS3003과 PMS7003 간의 MR을 나타낸 그래프이다. PM_{2.5}^{LCS}의 경우, 보정 전 두 센서 간의 MR은 92.9 %로 나타났고 CF4적용 후 두 LCS간 MR은 96.1 %까지 개선됨을 보였다. 또한 PM₁₀^{LCS}의 경우, 보정 전 두 센서 간의 MR은 77.0 % 로 PM_{2.5}^{LCS}에 비하여 낮으나, CF4 적용 후 96.1 %로 매우 크게 개선되었다.

Table 5. Table of expression coefficients for multiple regression model correction factor (CF4)

Node	CF Model	a	b	c	d
PMS3003 (PM _{2.5})	CF4Low	0	0.1373	-0.0023	0.5876
	CF4High	0	0.1093	-0.0014	0.3739
PMS3003 (PM ₁₀)	CF4Low	0.0279	0.1921	-0.0096	0.8304
	CF4High	0.0099	0.2738	-0.0034	0.2488
PMS7003 (PM _{2.5})	CF4Low	0	0.0099	-0.0073	1.0941
	CF4High	0	0.1093	0.0007	0.3095
PMS7003 (PM ₁₀)	CF4Low	0.0396	-0.1719	-0.0164	1.7395
	CF4High	0.0104	0.2105	-0.0004	0.1443

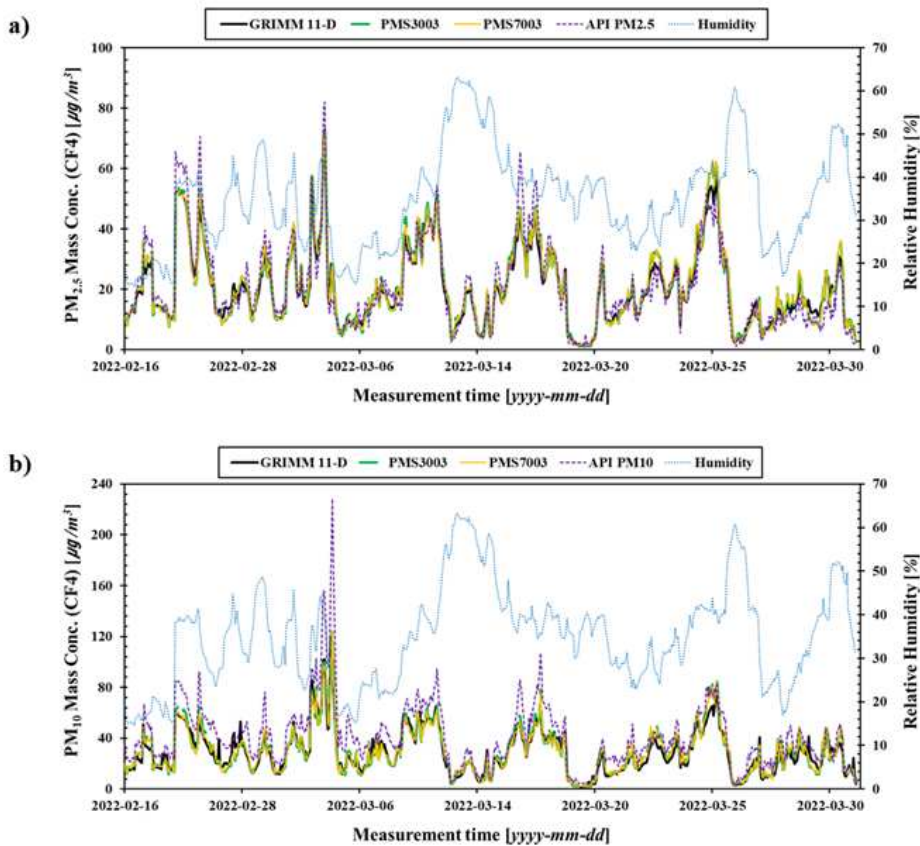


Figure 15. Time series graph of PM values calibrated with CF4 in field evaluation test. a) PM_{2.5} case, b) PM₁₀ case.

PMS3003과 PMS7003의 성능 평가 지표에서 두 LCS를 비교하였을 때, CF4가 적용된 모델에 대하여 모든 지표에서 PMS7003이 우수한 성능을 보였다. 또한, PMS7003은 상대습도로 인한 신호 교란 정도가 적고 보정 모델에 대한 성능 평가 결과에 따라 PMS7003이 PMS3003 보다 고성능의 LCS라 판단된다[표 4 참고].

최종적으로 R2와 MR 평가의 경우 CF1~4 순으로 증가하여 모든 케이스에서 CF4를 적용했을 때가 가장 높았으며[표 4 참고], RMSE는 PMS3003 PM_{2.5}의 CF2 경우를 제외하고는 모든 케이스에서 CF1~CF4 순으로 감소하여 CF4를 적용하였을 때가 가장 낮았다. CF4를 적용한 PM^{LCS}와 PM^{Ref}의 PM_{2.5}, PM₁₀에 대한 시계열 그래프는 그림 15에 나타냈으

며, 보정 전 그림 8과 비교하였을 때 PM^{LCS}가 크게 개선되었음을 보였다.

4. 결론

본 연구에서는 LCS의 효과적인 보정을 위하여 세계적으로 연구에 사용되는 기준 측정기인 광산란 기반의 GRIMM 11-D를 참조 모니터링 장비로 선정하여, PM_{2.5}^{LCS}와 PM₁₀^{LCS}의 정확도를 높이는 보정 모델을 구성하였다. 교란요인 선정부터 다양한 회귀 분석을 통한 보정 방법까지 실험실 평가와 현장 평가를 통하여 진행하였다. 실험실 평가에서 GRIMM 11-D와 LCS 간 단일/혼합 PSL 입자의 질량 농도 측정값에 대하여 높은 상관관계가

나타났으나, 큰 입자들로 조성될 때($PM_{1.0}$ 보다 큰 입자) 센서 내부에서의 입자 손실과 광산란 강도에 대한 간섭으로 LCS 측정값의 과소평가 및 노이즈가 발생하였다. 따라서 공기질 조성에서 큰 입자가 차지하는 비율이 증가할 경우 이러한 경향이 커질 것으로 예상 되었다.

현장 평가에서 LCS 측정값은 GRIMM 11-D에 비하여 주로 높게 측정되는 경향이 나타나고, $PM_{2.5}$ 와 PM_{10} 모두 높은 상관관계를 보였다($PM_{2.5}$: $R^2 > 0.95$, PM_{10} : $R^2 > 0.62$). 하지만, 큰 입자가 차지하는 비율이 높은 경우($(PM_{10}/PM_{2.5})_{API} > 4$) LCS는 GRIMM 11-D에 비하여 낮게 측정되어 경향성이 떨어지는 것으로 나타났다. 또한 저농도 구간($PM_{1.0}^{PMS3003} < 7.3355 \mu\text{g}/\text{m}^3$, $PM_{1.0}^{PMS7003} < 6.8852 \mu\text{g}/\text{m}^3$)에서 LCS의 민감도로 인하여 고농도 구간보다 낮게 측정되는 경향을, 상대습도가 높아질수록 흡습 효과에 의하여 LCS 측정값이 점진적으로 높게 측정되는 경향을 보였다. 이러한 근거들로 LCS 측정값에 대한 교란요인을 $(PM_{10}/PM_{2.5})_{API}$ 와 상대습도로 선정하였으며, 농도 구간을 나누어 회귀 분석을 통한 보정 모델을 구성하고 평가하였다. 그 결과 두 LCS에 대하여 다변수 다항 회귀 분석 모델인 식 (13)의 CF4가 가장 성능이 높은 모델로 평가되었다. 또한 CF4로 보정된 PMS7003이 GRIMM 11-D의 $PM_{2.5}$, PM_{10} 측정값에 대한 가장 높은 MR($PM_{2.5}$: 91.43 %, PM_{10} : 86.39 %)과 가장 낮은 RMSE($PM_{2.5}$: $2.03 \mu\text{g}/\text{m}^3$, PM_{10} : $4.89 \mu\text{g}/\text{m}^3$)를 보였다. 따라서 보정 계수 CF4(농도 구간, $(PM_{10}/PM_{2.5})_{API}$, 상대습도)를 적용하여 참조 PM 모니터와 높은 일치율을 보이는 실내용 고성능 저가형 PM 센서의 보정 모델을 구성하였다. 후속 연구를 통해 본 연구의 보정 모델이 적용된 무선 네트워크형 PM 센서 모듈을 활용한다면, 고밀도의 시공간 네트워크 PM 측정 시스템을 구성하여 효과적인 실내공간 측정이 가능해질 것이라 예상된다.

감사의 글

본 연구는 산업통상자원부(MOTIE)와 한국에너지기술평가원(KETEP)의 지원을 받아 수행한 연구 과제입니다. (No. 20181110200170)

References

- Badura, M., Batog, P., Drzeniecka-Osiadacz, A., & Modzel, P. (2018). Evaluation of low-cost sensors for ambient $PM_{2.5}$ monitoring. *Journal of Sensors*, 2018.
- Badura, M., Batog, P., Drzeniecka-Osiadacz, A., & Modzel, P. (2019). Regression methods in the calibration of low-cost sensors for ambient particulate matter measurements. *SN Applied Sciences*, 1(6), 1-11.
- Barkjohn, K. K., Bergin, M. H., Norris, C., Schauer, J. J., Zhang, Y., Black, M., ... & Zhang, J. (2020). Using low-cost sensors to quantify the effects of air filtration on indoor and personal exposure relevant $PM_{2.5}$ concentrations in Beijing, China. *Aerosol and Air Quality Research*, 20(2), 297-313.
- Crilly, L. R., Singh, A., Kramer, L. J., Shaw, M. D., Alam, M. S., Apte, J. S., ... & Pope, F. D. (2020). Effect of aerosol composition on the performance of low-cost optical particle counter correction factors. *Atmospheric Measurement Techniques*, 13(3), 1181-1193.
- Friedlander, S.K. (2000). *Smoke, Dust and Haze*. Oxford University Press, New York. w York.
- Gao, M., Cao, J., & Seto, E. (2015). A distributed network of low-cost continuous reading sensors to measure spatiotemporal variations of $PM_{2.5}$ in Xi'an, China. *Environmental Pollution*, 199, 56-65.
- Giordano, M. R., Malings, C., Pandis, S. N., Presto, A. A., McNeill, V. F., Westervelt, D. M., ... & Subramanian, R. (2021). From low-cost sensors to high-quality data: A summary of challenges and best practices for effectively calibrating low-cost particulate matter mass sensors. *Journal*

- of Aerosol Science, 158, 105833.
- Jayaratne, 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.
- Kelly, K. E., Whitaker, J., Petty, A., Widmer, C., Dybwad, A., Sleeth, D., ... & Butterfield, A. (2017). Ambient and laboratory evaluation of a low-cost particulate matter sensor. *Environmental Pollution*, 221, 491-500.
- Li, J., & Biswas, P. (2017). Optical characterization studies of a low-cost particle sensor. *Aerosol and Air Quality Research*, 17(7), 1691-1704.
- Magi, B. I., Cupini, C., Francis, J., Green, M., & Hauser, C. (2020). Evaluation of PM_{2.5} measured in an urban setting using a low-cost optical particle counter and a Federal Equivalent Method Beta Attenuation Monitor. *Aerosol Science and Technology*, 54(2), 147-159.
- Malings, C., Tanzer, R., Haurlyiuk, 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.
- Sayahi, T., Butterfield, A., & Kelly, K. E. (2019). Long-term field evaluation of the Plantower PMS low-cost particulate matter sensors. *Environmental Pollution*, 245, 932-940.
- Shao, C., Paynabar, K., Kim, T. H., Jin, J. J., Hu, S. J., Spicer, J. P., ... & Abell, J. A. (2013). Feature selection for manufacturing process monitoring using cross-validation. *Journal of Manufacturing Systems*, 32(4), 550-555.
- Tvedskov, T. F., Meretoja, T. J., Jensen, M. B., Leidenius, M., & Kroman, N. (2014). Cross-validation of three predictive tools for non-sentinel node metastases in breast cancer patients with micro-metastases or isolated tumor cells in the sentinel node. *European Journal of Surgical Oncology (EJSO)*, 40(4), 435-441.
- Zheng, T., Bergin, M. H., Johnson, K. K., Tripathi, S. N., Shirodkar, S., Landis, M. S., ... & 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.