

저가형 미세먼지 측정기의 성능평가

대기측정관리팀

임윤석 · 김승필 · 박창호 · 안미진 · 유승성 · 어수미 · 정 권

Field Evaluation of Low-Cost Particulate Matter Sensors

Atmospheric Measurement and Management Team

**Yun-seok Im, Seung-phil Kim, Chang-ho Park,
Mi-jin Ahn, Seung-sung Yoo, Soo-mi Eo and Kweon Jung**

Abstract

As demand for air quality information increases and the use of low-cost particulate matter(PM) measuring instruments expands, there is growing demand for evaluation of the reliability and performance of these PM sensors. In this study, 4 types of commercialized laser based light scattering PM sensors were evaluated by comparing their output, over 5 days from July 23 to July 28, 2018, with a reference PM analyzer (beta ray absorption method) in the Gangnam urban air quality monitoring station in Seoul, Korea. Possible meteorological effects on low-cost PM sensors were investigated to improve their performance. All low-cost PM sensors overestimated concentrations of both PM_{10} and $PM_{2.5}$, relative to the reference data. A higher error tendency was evident in higher relative humidity conditions. Low-cost PM sensors showed error ranges from 30.24~102.75% for $PM_{2.5}$ and 17.75~59.61% for PM_{10} , showing them to be unsatisfactory for complementary PM monitoring. When low-cost PM sensors were calibrated using relative humidity(RH), their accuracy(error rates) were significantly improved to 8.38~10.23% for $PM_{2.5}$ and 9.42~11.45% for PM_{10} .

However, this study has limitations in that the PM sensors were evaluated and calibrated only over a short period(5 days) during summer. Further testing should be implemented under wider meteorological conditions and for longer periods to better understand the performance of low-cost PM sensors and the RH based calibration method.

Key words : Low-cost PM sensor, light scattering, RH effect

서론

대기 중 미세먼지는 인체의 호흡기 및 심혈관에 끼치는 영향 때문에 많은 연구의 관심대상이 되어 왔다. $5\mu\text{m}$ 이하의 입자의 경우, 코와 인두에서 걸러지지 않고, 기도 하단부까지 도달하며, $1\mu\text{m}$ 이하의 입자는 폐의 폐포까지 침투하여 폐암을 유발시키거나, 알레르기 및 천식을 일으킨다고 보고되고 있다(1, 2). 특히, 한국에서는 2010년대 들어 미세먼지의 심각성에 대한 시민들의 인식이 커짐에 따라 대기질 정보에 대한 시민의 요구가 크게 증가해오고 있다.

현재 전국적으로 약 300여 개의 대기질측정소가 운영되고 있으나, 주로 서울, 부산 수도권 등 대도시 지역에 집중되어 있고, 그 외 지역은 대기측정소의 수가 충분치 못하다. 또한 대도시 지역에서도 주거지역 및 생활공간에 더 밀접한 대기질 정보에 대한 요구가 증대됨에 따라 현재의 국가 대기측정망을 더 늘리고자하는 수요가 크다. 하지만, 대기측정소의 설치에는 자원, 재정, 공간 등 많은 제약이 따르므로 가격이 저렴하고, 휴대가능하면서 실시간으로 미세먼지 농도를 측정할 수 있는 저가형 간이미세먼지센서의 사용이 많은 관심을 받고 있다.

미세먼지 질량농도 측정방법에는 중량농도법, 베타선흡수법, 광산란법의 3가지가 주로 사용되고 있다. 중량농도법은 미세먼지를 여지에 24시간 포집하고, 저울로 포집 전과 후의 여지를 칭량하여 증가한 무게를 포집부피로 나누어 미세먼지의 농도를 계산하는 방식으로, 질량을 직접 측정하기에 정확도가 높고, 포집한 여지를 미세먼지의 성분분석에 사용될 수 있는 장점이 있는 반면, 농도값을 얻는데 48시간 이상이 걸려 실시간으로 자료를 얻는 데는 제한이 있다. 베타선흡수법은 일정시간 미세먼지를 여지에 포집 후 베타선을 조사하여 그 투과율을 측정하는 방식으로 베타선의 투과율과 미세먼지의 농도와의 상관성을 이용하여 미세먼지의 농도를 계산한다. 1분 또는 1시간 단위로 미세먼지 농도를 알 수 있어 실시간자료가 필요한 대기질측정소에서 사용되고 있다. 광산란법은 공기 중에 레이저 등의 빛을 조사하고 부유한 입자상

물질에 의한 산란을 측정하여 입자의 크기 및 농도를 측정하는 방식으로 초 단위의 실시간 자료를 얻을 수 있고, 장비 한 대로 $\text{PM}_{2.5}$, PM_{10} 등을 동시에 측정가능하며, 작고, 가볍게 제작이 가능해 장점이 있지만, 앞선 두 측정방법에 비해 오차가 큰 것으로 알려져 있다. 중량농도법과 베타선흡수법장비는 약 2,000 USD 이상의 고가인 반면, 광산란측정장비는 2,000 USD 수준의 고가장비부터 5 USD 수준의 저가형 장비까지 넓은 가격대에서 제작 판매가 되고 있다. 특히, 100 USD 이하의 저가형 간이미세먼지센서는 전문적인 대기질 측정기관이외의 비전문가인 일반인들에게 접근이 용이하여, 일반인들에게 판매가 늘어나고 있다. 또한 저가형 간이미세먼지센서는 이동통신기술과 사물인터넷기술과 결합하여 광범위한 지역에서 실시간 미세먼지 측정을 경제적으로 가능하게 하며, 이는 기존의 측정망으로는 알지 못했던 미세먼지의 특성 파악하는데 큰 발전을 가져올 수 있다. 예를 들면, 한 건물의 고도별 미세먼지 농도 분포, 도로변으로부터 거리에 따른 미세먼지 농도 분포 등 해상도 높은 미세먼지 측정자료를 통해 국가 대기측정망만으로는 알 수 없었던 미세먼지 특성을 알 수 있다.

하지만 광산란측정법을 사용하는 저가형 간이미세먼지센서는 국가대기오염측정망에서 사용되는 중량농도법, 베타선 흡수법과 달리 환경부 대기오염공정시험기준으로 인증되지 못했으며, 그 정확도에 대해서 많은 문제점들이 발견되고 있다. 특히, 저가형 미세먼지센서에 대해서는 국내에 규제나 평가제도가 없어 시민들을 혼란스럽게 하고 있다.

광산란측정법의 저가형 미세먼지센서에 대해 실내 및 실외조건에서 성능평가에 대한 해외연구들이(3~6) 있어왔지만, 국내 기후조건에서의 일반 대기 중 실외 성능평가는 부족한 실정이다. 특히, 기후조건에 영향을 많이 받는다고 알려진 광산란 미세먼지센서에 대해서 국내 기후조건에 대한 연구가 더욱 필요하다. 이 연구에서는 현재 서울시에서 운영 중인 도시대기측정소의 베타선법 미세먼지측정기와 시중에서 판매중인 저가형 미세먼지 측정기를 실외조건에서 비교평가를 통하여 신뢰도 및 특성을 평가하였다. 또한 기상조건과 저가형 미

Table 1. Characteristics of particulate matter analyzers, low-cost PM sensors and a meteorological sensor used in this study

	Reference		Low-cost PM Sensor			Meteorology
Manufacturer	Kimoto	Honeywell	Plantower	Plantower	DFRobot	Bosch Sensortec
Model	PM711	HPMA115S0	PMS7003	PMSA003	SEN0117	BME280
Measurement	PM _{2.5} PM ₁₀	PM _{2.5} PM ₁₀	PM _{1.0} PM _{2.5} PM ₁₀			Temp, RH, AP
No. of instrument	1		3			1
Cost	~20,000 USD		< 50 USD			< 50 USD

세먼지센서의 오차와의 상관관계를 이용하여 미세먼지센서의 교정가능성에 대해서도 평가를 하였다.

2. 연구방법

1) 측정기간 및 장소

저가형 미세먼지센서의 성능평가를 위해 2018년 7월 23일부터 7월 28일까지 약 5일(117시간)간 서울시 강남구도시대기측정소에서 베타선흡수법의 미세먼지 자동연속측정기와 저가형 미세먼지센서를 비교측정을 하였다. 강남구도시대기측정소는 강남구청(3층 건물) 옥상에 위치하고 있으며, 주변에 도로와 주택, 오피스들로 둘러싸여 도심지역의 전형적인 대기질을 나타낸다.

2) 측정장비

이번 연구에서는 4종의 저가형 미세먼지센서를 평가하였다(표 1). 측정장비간 정밀도를 평가하기 위해 각 저가형 미세먼지센서 모델별로 3대씩 측정하였으며, 기상 영향 평가를 위해 BME280 기상센서로 대기온도, 습도, 기압을 측정하였다. 저가형 미세먼지센서와 기상센서는 자료수집장치에 연결하여 그림 1과 같이 선반 위에 설치하였으며, 베타선흡수법 기준장비인 PM711 장비의 인렛 1미터 지점에 위치시켰다. 저가형 미세먼지센서와 기상센서의 자료는 자료수집장치에 1초 단위로 저장하였다.

저가형 미세먼지센서를 평가하기 위한 기준장비로 베타선흡수법 연속식자동측정기인 Kimoto사의 PM711측정기를 사용하였다. PM_{2.5} 분립장치는

WINS임팩터(Well Impactor Ninety-Six)(7)를 사용하였으며, PM₁₀, PM_{2.5} 측정기 모두 포집관 가열은 45°C로 운영하였다. PM711 측정기의 PM_{2.5}, PM₁₀ 측정값은 자료수집장치에 5분단위로 저장하였다.

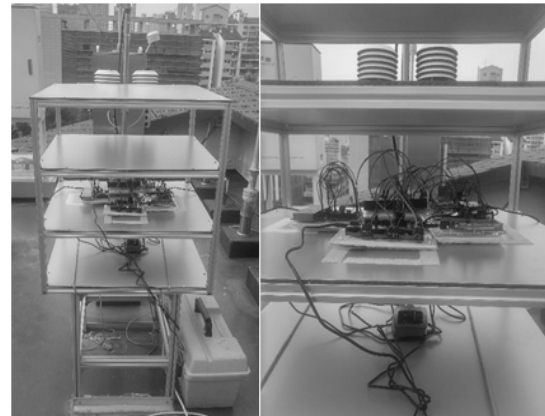


Fig. 1. Installation of 4 low-cost PM sensors and a meteorological sensor in the Gangnam urban air quality monitoring station.

3. 결과 및 고찰

1) 기상 및 미세먼지 농도

2018년 7월 23일부터 7월 28일까지 약 5일(117시간)간 서울시 강남구 도시대기측정소의 평균기온은 33.4°C(28.9~41.4°C), 평균습도는 62%(39~81%), 평균대기압은 752.5 mmHg(750.8~753.8 mmHg)이었고, 최고온도가 41°C에 이를 만큼 일 년 중 가장 덥고 습한 기간이었으며, 측정기

간 내내 저기압 이었다. 그림 2와 같이 기온, 상대 습도, 기압 모두 주야 변동 특성을 보였다.

그림 3에서 보는 바와 같이 측정기간 동안 PM711 기준측정기의 PM_{2.5} 평균농도는 22.63 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ (6~52 $\mu\text{g}/\text{m}^3$), PM₁₀ 평균농도는 32.86 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ (12~66 $\mu\text{g}/\text{m}^3$)으로 대기질등급 중 '보통수준'의 농도를 보였으며, 7월 24일 16시~20시와 7월 27일 13시~18시에 PM_{2.5} 기준 나쁨 수준(> 35 $\mu\text{g}/\text{m}^3$)의 구간이 측정되었다.

2) 저가형 미세먼지센서의 성능평가

저가형 미세먼지센서의 등가성평가에 앞서 상대 정밀도를 평가하기 위해 각 모델별로 3대씩 측정 하였으며, 각 미세먼지센서 3대의 PM_{2.5}, PM₁₀ 측정값에 대해서 상대표준편차를 계산하여 상대정밀도를 평가하였다. 표 3과 같이, PMSA003모델이 PM_{2.5}, PM₁₀ 각각 3.5%, 3.59%로 장비간 편차가 가장 적었고, SEN0177모델의 정밀도는 PM_{2.5}, PM₁₀ 각각 8.48%, 8.49%로 비교적 높았다. 저가

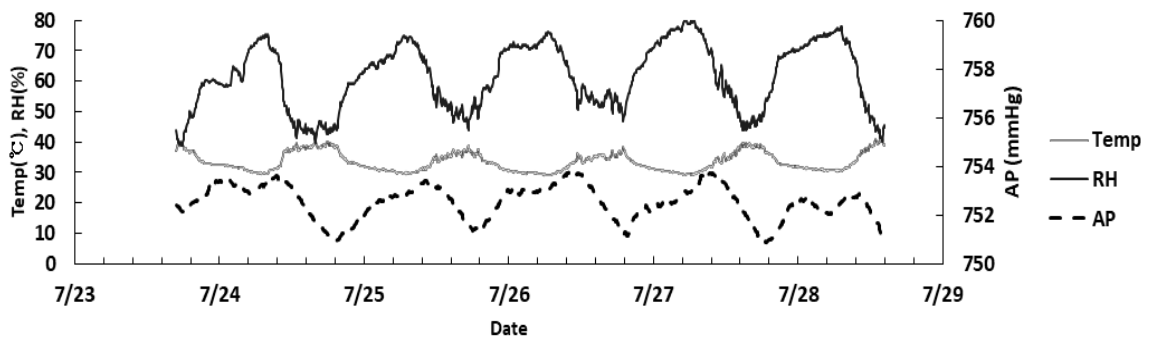


Fig. 2. Time profiles of 5-min averaged temperature(Temp), relative humidity(RH) and atmospheric pressure(AP) from July 23 to July 29.

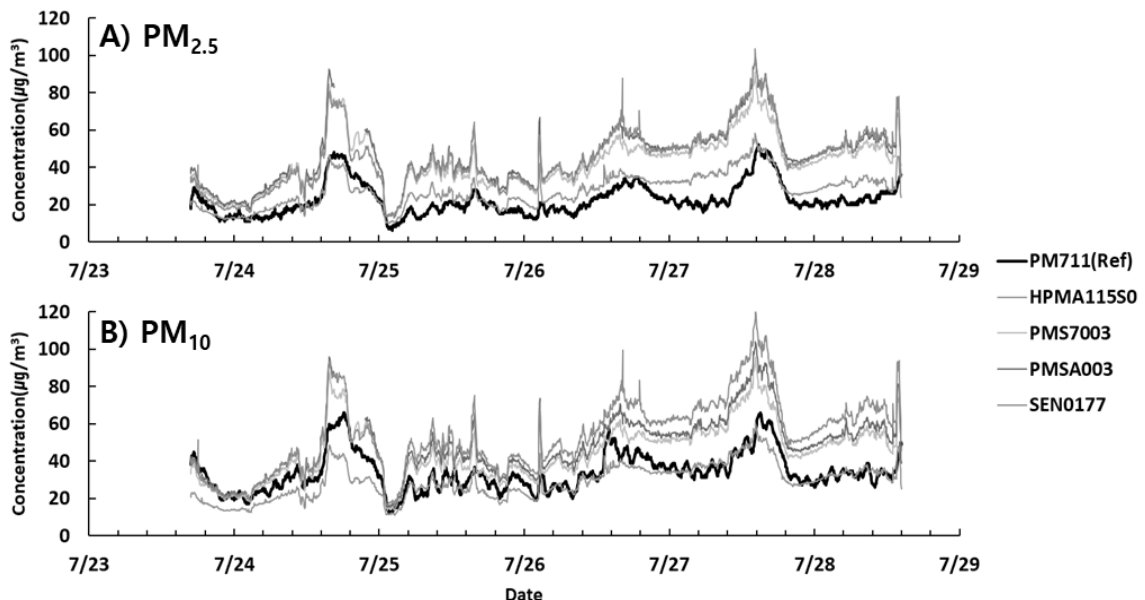


Fig. 3. Comparison of time profiles of 5-min averaged PM_{2.5} and PM₁₀ concentrations of reference method(PM711) and 4 low-cost PM sensors(HPMA115SO, PMS7003, PMSA003, SEN0177) from July 23 to July 29.

형 미세먼지센서에 대한 환경부 형식승인의 기준이 없기 때문에, 베타선 흡수법 미세먼지 측정기의 형식승인 기준(상대표준편차 10%)(8)과 비교할 때 저가형 미세먼지센서의 상대 정밀도는 양호한 수준으로 판단된다.

그림 3를 보면, PM_{2.5}의 경우 저가형 미세먼지 센서들은 기준측정기에 비해 높은 측정값을 보였다. HPMA115S0 모델은 7월 24일~25일까지 2일간은 비교적 근사한 값을 보이다 26일 이후 높은 값을 나타냈으며, 나머지 3개 모델(PMS7003, PMSA003, SEN0177)은 공통적으로 기준측정값에 비해 약 2배 정도의 높은 값을 나타냈으며, 그 경향은 상당히 유사했다. PM₁₀에 대해서는 HPMA115S0모델은 PM_{2.5}의 경향과 반대로 7월 24일까

지 기준측정값에 비해 낮은 값을 보이다가 그 이후에는 비교적 근사한 값을 나타냈으며, 나머지 3개 모델은 7월 23일에서 24일 새벽까지 일부 구간을 제외하고는 전체적으로 높은 값을 나타내었다. PM₁₀에 대해서 Plantower의 PMS7003과 PMSA003은 전체적으로 매우 유사한 측정값을 나타냈으며 SEN0177은 좀 더 높은 측정값을 보였다.

저가형 미세먼지센서들의 PM_{2.5}/PM₁₀값은 0.832~0.944로 기준측정기의 PM_{2.5}/PM₁₀비가 0.699인 점에 비해 매우 높았다(표 4). 특히, HPMA115S0, PMS7003, PMSA003 3개 모델은 PM_{2.5}값이 PM₁₀값의 94% 수준으로 PM_{2.5}와 PM₁₀을 구분하는데 있어 성능의 개선이 필요하다고 보인다. 저가형 미세먼지센서와 기준측정기의 측정값이

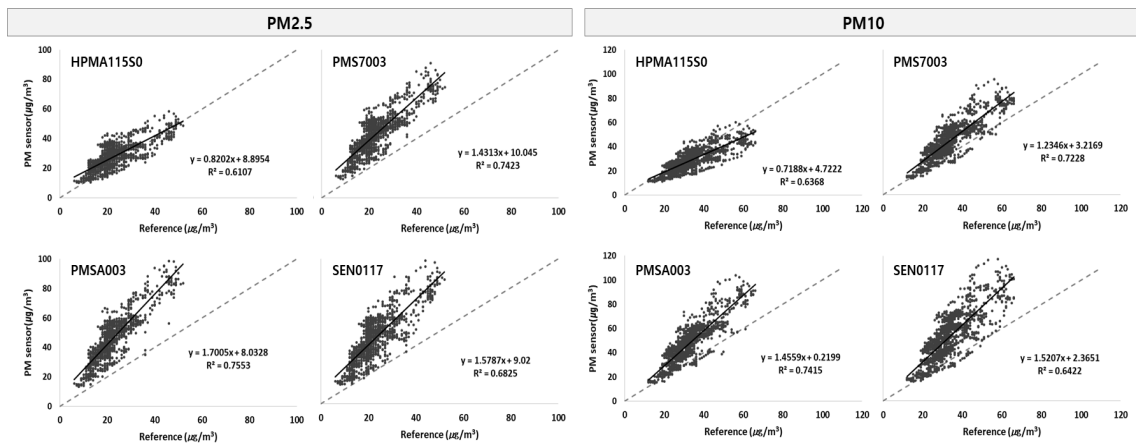


Fig. 4. Linear regressions of PM concentrations between 5min averaged PM_{2.5} and PM₁₀ concentrations of reference method(PM711) and 4 low-cost PM sensors(HPMA115S0, PMS7003, PMSA003, SEN0177).

Table 3. Relative standard deviations(RSD) of 3 sets of 4 low-cost PM sensors

RSD	HPMA115S0	PMS7003	PMSA003	SEN0177
PM _{2.5}	5.65%	4.53%	3.50%	8.48%
PM ₁₀	5.38%	5.93%	3.59%	8.49%

Table 4. PM_{2.5}/PM₁₀ ratios of reference method(PM711) and 4 low-cost PM sensors

	PM711(Ref)	HPMA115S0	PMS7003	PMSA003	SEN0177
PM _{2.5} /PM ₁₀	0.669	0.944	0.944	0.939	0.832

얼마나 일치하는지 평가하기 위해 저가형 미세먼지센서의 5분 평균값과 기준측정기(PM711)의 5분 평균값을 PM_{2.5}, PM₁₀에 대하여 선형회귀분석을 하여 기울기와 절편, 그리고 결정계수(R²)값을 계산하여 등가성평가를 하였다.(그림 4).

저가형 미세먼지센서들을 베타선흡수법 미세먼지측정기의 등가성평가 기준조건(PM_{2.5}:기울기(0.9~1.1), 절편(-2.25~2.25), PM₁₀:기울기(0.9~1.1), 절편(-5.0~5.0))으로 평가했을 때 모든 저가형 미세먼지센서가 그 기준을 만족시키지 못했다. 그림 4를 보면, PM_{2.5}의 경우, 모든 센서 4종의 측정값이 기준측정기(PM711) 보다 높은 측정값 분포를 보였으며(1:1기준선 위로 분포), PM₁₀의 경우는 HPMA115S0만 기준측정기(PM711) 보다 다소 낮은 분포를 보였으며, 나머지 3개 센서는 높은 측정값 분포를 보였다.

표 5는 저가형 미세먼지센서의 오차율을 나타내며, PM_{2.5}에 대해서는 HPMA115S0가 30.24%로 가장 낮았으며, 나머지 3개 모델은 약 100%의 오차율을 보였다. PM₁₀에 대해서는 HPMA115S0의 오차율이 17.75%로 가장 낮았으며, SEN0177이 59.61%로 가장 높은 경향을 보였다. 4개 모든 센서에 대해서 전체적으로 PM_{2.5}의 오차율이 PM₁₀의 오차율 보다 컸다.

이번 연구에서 보인 저가형 미세먼지센서의 과대측정 경향은 이전의 다수의 연구들에서도 공통적으로 관찰되었다(6, 9, 10, 11). Kelly(9) 등의 연구에서 PM_{2.5}에 대해 plantower PMS1003은 기준장비(TEOM)보다 약 40~80%의 높은 값을 나타냈고, Badura(10) 등은 PM_{2.5}에 대해 4종의 센서(SDS011(Nova Fitness), ZH03A(Winsen), PMS7003(Plantower), OPC-N2(Alphasense))가 기준장비(TEOM 1400a)보다 2.5~5배의 높은 값을 나타내는 결과를 보였다. 미세먼지 측정에 영향을 미치는 요소는 온도, 습도, 미세먼지의 성

분 등 다양한데, 이번 연구에서 저가형 미세먼지센서의 과대측정 경향의 큰 오차는 수분의 영향이 가장 큰 것으로 보인다. 기준측정기 PM711의 경우 측정기 유입관에 가열장치가 있어 유입되는 공기의 수분을 제거하는 반면, 저가형 미세먼지센서는 이러한 수분의 영향을 조절하는 장치가 없다. 따라서 습도가 높은 환경에서 저가형 미세먼지센서의 측정 시 미세먼지에 흡착되는 수분이나 미세물입자 등이 PM_{2.5}와 PM₁₀ 측정에 포함되게 되어 과대평가 될 수 있다. 상대습도와 미세먼지의 질량농도와의 상관성에 관한 과거 연구들에서도 상대습도로 인한 미세먼지 질량농도의 증가를 보여 준다. Sinclair 등에 따르면 상대습도가 100%에 이를 때 미세먼지의 질량농도는 약 2배에서 6배까지 증가하였고(12), Waggoner 등은 상대습도 70% 이상에서 미세먼지의 흡수에 의한 질량농도가 증가함을 보고하였다(13).

특히, 이번 연구기간은 최고 기온이 40℃를 넘는 고온다습한 대기 조건이었다는 점을 고려했을 때, 저가형 미세먼지센서의 과대측정값은 습도의 영향으로 판단된다.

3) 저가형 미세먼지센서의 교정

기상조건(온도, 상대습도, 기압)이 저가형 미세먼지센서의 측정에 미치는 영향을 알아보기 위해 기상항목과 저가형 미세먼지센서의 상대오차에 대한 회귀분석을 하였다. 그림 5는 PM_{2.5}에 대한 기상항목과 저가형 미세먼지센서들의 상대오차와의 분포 및 상관성을(R²) 나타낸다.

저가형 미세먼지센서의 상대오차와 기상항목은 그림 5와 같이 곡선형태의 분포를 나타냄에 따라 회귀분석은 2차 다항 회귀분석을 선택하였다. 3개의 기상항목과 저가형 미세먼지센서의 상대오차와의 상관성(R²)은 상대습도, 온도, 기압 순으로 높게 나타났다. PM₁₀에 대해서도 동일한 경향을

Table 5. PM_{2.5} and PM₁₀ error(%) of low-cost PM sensors

Error(%)	HPMA115S0	PMS7003	PMSA003	SEN0177
PM _{2.5}	30.24%	91.91%	102.75%	101.11%
PM ₁₀	17.75%	34.80%	43.58%	59.61%

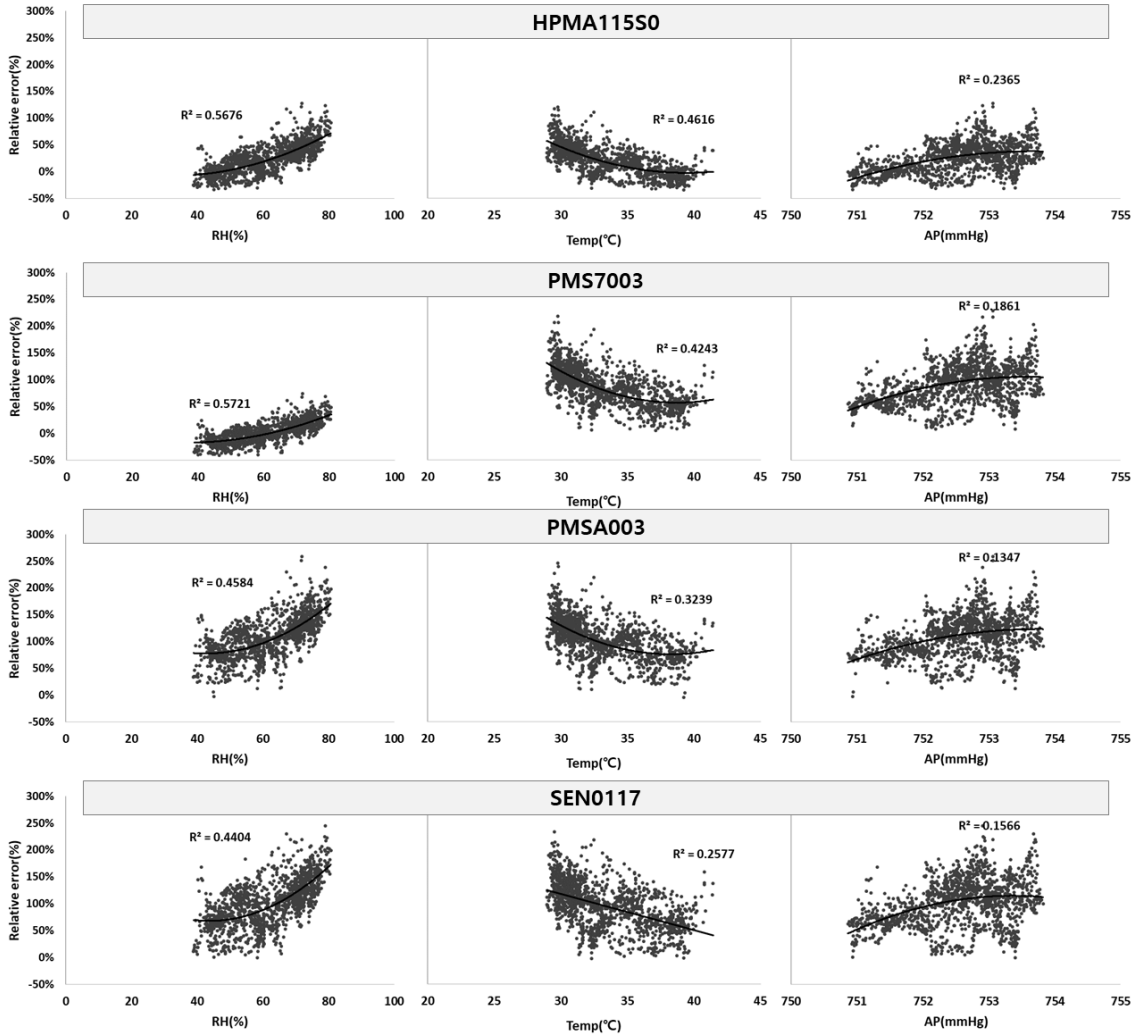


Fig. 5. Regression analysis of meteorological factors(RH, Temp, AP) against $PM_{2.5}$ relative errors of 4 low-cost PM sensors(HPMA115SO, PMS7003, PMSA003, SEN0117).

보여주었다.

저가형 미세먼지센서의 오차를 교정하기 위해 기상항목 중 상관성(R^2)이 가장 높은 상대습도를 이용하여 식 1과 같이 교정식을 만들었다. 상대습도와 저가형 미세먼지센서의 오차율과의 상관성이 2차 다항식의 분포를 보임에 따라 상대습도에 대한 2차 다항식으로 교정식을 만들었다.

$$PM_{cal} = (\beta_0 RH^2 + \beta_1 RH + \beta_2) PM_{raw} + \beta_3 \quad \text{Eq1}$$

where, PM_{cal} : calibrated PM concentration

PM_{raw} : raw PM concentration

RH : relative humidity

β_X : coefficients

상대습도를 이용한 교정식(식 1)의 계수(β_X)는 엑셀의 해찾기 기능을 활용해 최소자승법으로 계산하였으며 표 6에 정리하였다.

식 1과 표 6의 계수들을 이용해 교정한 결과, PM_{10} , $PM_{2.5}$ 대한 4개 센서 모두의 상관계수(R^2)(표 6)가 원자료 보다 향상되었으며, 오차율은 그림 6과 같이 약 10% 대로 크게 감소하였다.

Table 6. Coefficients and R^2 of $PM_{2.5}$ and PM_{10} RH-calibration models for the 4 low-cost PM sensors

	Sensor	β_0	β_1	β_2	β_3	R^2
$PM_{2.5}$	HPMA115S0	2.033	-3.676	2.117	4.041	0.611 → 0.861
	PMS7003	0.368	-1.140	1.009	3.033	0.742 → 0.905
	PMSA003	0.077	-0.624	0.748	3.691	0.755 → 0.893
	SEN0177	0.899	-1.717	1.069	5.496	0.683 → 0.866
PM_{10}	HPMA115S0	1.855	-3.318	2.143	9.123	0.637 → 0.790
	PMS7003	0.343	-1.050	1.076	8.192	0.723 → 0.827
	PMSA003	0.079	-0.487	0.767	8.656	0.742 → 0.806
	SEN0177	0.885	-1.586	1.022	11.988	0.642 → 0.768

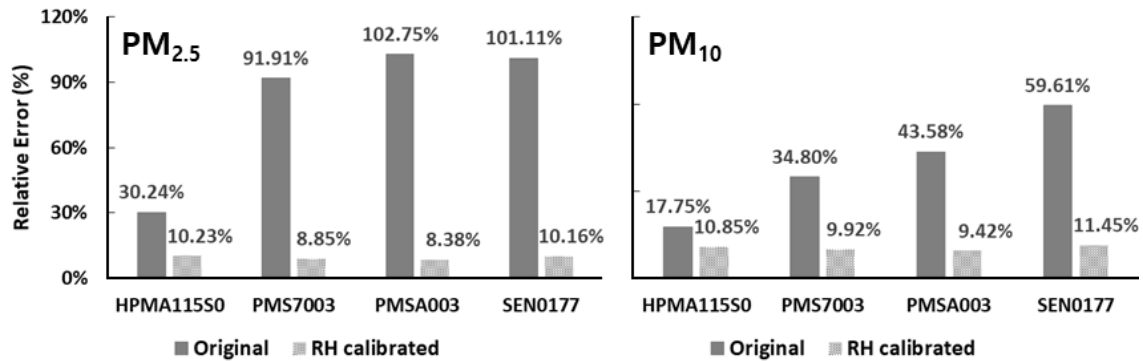


Fig. 6. Relative errors of low-cost PM sensors before and after RH-calibration for $PM_{2.5}$ and PM_{10} .

교정 전 원자료에서는 HPMA115S0센서가 오차율이 가장 적었지만, 교정 후에는 Plantower 센서인 PMSA003과 PMS7003이 오차율이 가장 적었다. 그림 7은 저가형 미세먼지센서의 교정 후 농도를 나타내며, 교정 후 기준측정기와 측정값이 매우 근사해졌음을 알 수 있다.

다만, 24일 오후의 고농도 구간에서 PMSA003과 PMS7003이 기준측정값에 근사한 농도를 보이는데 반해, HPMA115S0와 SEN0177은 다소 낮은 농도를 보이는 점이 발견되었다.

저가형 미세먼지센서를 상대습도를 이용하여 교정을 시도했던 연구들이 있었다. Holstius(3) 등은 $PM_{2.5}$ 에 대해 Shinyei PPD42NS센서를 상대습도에 대한 선형식으로 교정으로 하였으며, R^2 값

이 0.54에서 0.56으로 이번연구보다는 효과가 적었지만, 개선되는 결과를 보였고, Zheng(6) 등은 저가형 미세먼지센서(Plantower PMS3003)를 $PM_{2.5}$ 에 대해서 상대습도의 변형된 2차 다항식 $a + b \frac{RH^2}{1 - RH}$ 형태의 교정식으로 교정하였으며, 1분 데이터의 원자료의 오차율이 27~201%에서 교정 후 10%대로 감소하는 이번 연구결과와 유사한 결과를 나타냈다.

결론

이번 연구에서는 저가형 미세먼지센서를 서울시

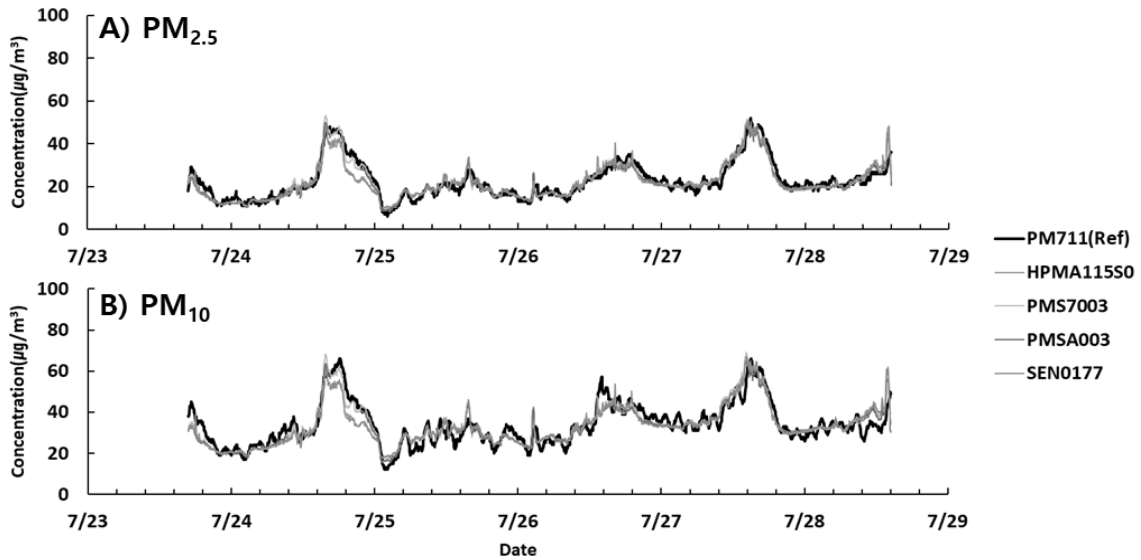


Fig. 7. Comparison of time profiles of RH-calibrated 5min averaged $PM_{2.5}$ and PM_{10} concentrations of reference method(PM_{711}) and 4 low-cost PM sensors($HPMA115S0$, $PMS7003$, $PMSA003$, $SEN0177$) from July 23 to July 29.

도시대기 측정소에서 운영하는 베타선 미세먼지 측정기와 비교하여 성능을 평가하고, 상대습도 측정값을 이용한 교정으로 오차를 줄이는 연구를 하였다. 이번 연구에서는 다음과 같은 결론을 얻었다.

첫째, 4개의 저가형 미세먼지센서는 과다측정 경향을 보였으며, $PM_{2.5}$ 의 오차율이 PM_{10} 의 오차율보다 컸으며, 수분의 영향으로 판단된다. 둘째, 저가형 미세먼지센서 중 $HPMA115S0$ 센서가 $PM_{2.5}$, PM_{10} 모두에서 가장 적은 오차를 보였다. 셋째, 저가형 미세먼지센서의 $PM_{2.5}/PM_{10}$ 비가 기준측정기(PM_{711})의 $PM_{2.5}/PM_{10}$ 비(0.699)에 비해 매우 높았다(0.832~0.944). 넷째, 저가형 미세먼지센서를 상대습도를 이용하여 교정했을 때, 오차율은 약 10%대로 낮아졌으며, 교정 시에는 $PMSA003$ 센서가 가장 적은 오차율을 보였다. 이번 연구결과를 통해 저가형 미세먼지센서는 현재의 기술로는 원자료를 그대로 사용하기에는 제한이 있으며 적절한 교정을 통해서 사용하거나, 정성적으로 상대적 측정값으로 경향 파악에 활용하는 것이 적합하다고 판단된다.

다만, 이번 연구기간이 7월 말로 최고온도 $41.4^{\circ}C$ 까지 올라갈 정도로 고온에 다습한 대기조건인 점

에서, 극한 환경조건에서의 저가형 미세먼지센서의 특성을 평가해 볼 수 있는 좋은 기회이면서 또한 제한점이라고 볼 수 있다. 또한 이번 연구에서 비교평가 기간이 5일로 다양한 기상조건에서의 성능을 평가하기에는 충분치 않았으며, 상대습도값을 이용한 교정식이 다른 기상 조건의 기간에도 효과적으로 적용이 될 수 있는지 추가적인 연구를 통해 확인이 필요하다.

참고문헌

1. Macher, JM : Positive-hole correction of multiple-jet impactors for collecting viable microorganisms. American Industrial Hygiene Association Journal 50:561~568, 1989.
2. Infante, R and Acosta, IL : Size distribution of trace metals in Ponce, Puerto Rico air particulate matter. Atmospheric Environment-Part B Urban Atmosphere 25:121~131, 1991.

3. Holstius, DM, Pillarisetti, A, Smith, KR and Seto, E : Field calibration of a low-cost aerosol sensor at a regulatory monitoring site in California, Atmospheric measurement Techniques, 7:1121~1131,2014.
4. Austin, E, Novosselov, I, Seto, E and Yost, MG : Laboratory evaluation of the Shinyei PPD42NS low-cost particulate matter sensor, PLOS ONE, 10:1~17, 2015.
5. Kelly, KE, Whitaker, J, Petty, A, Widmer, C, Dybward, A, Sleeth, D, Martin, R and Butterfield, A : Ambient and laboratory evaluation of a low-cost particulate matter sensor, Environmental Pollution, 221:491~500, 2017.
6. Zheng, T, Bergin, MH, Johnson, KK, Tripathi, SN, Shirodkar, S, Landis, MS, Sutaria, R and Carlson, DE : Field evaluation of low-cost particulate matter sensors in high- and low-concentration environments, 11:4823~4846, 2018.
7. Peters, TM, Vanderpool RW and Wiener RW : Design and calibration of the EPA PM2.5 well impactor ninety-six(WINS), Aerosol Science and Technology, 34:389~397, 2001.
8. National Institute of Environmental Research : Notification on type approval and inspection of environmental measuring instruments, No.2018-68, 2018.
9. Kelly, KE, Whitaker J, Petty A, Widmer C, Dybwad A, Sleeth D, Martin R and Butterfield A : Ambient and laboratory evaluation of a low-cost particulate matter sensor, Environmental Pollution 221 491~500, 2017.
10. Badura, M, Batog, P, Drzeniecka-Osiadacz, A and Modzel, P : Evaluation of Low-Cost Sensors for Ambient PM2.5 Monitoring, Journal of Sensors, 2018, 5096540, p.16, 2018.
11. Jayaratne, R, Liu, X, Thai, P, Dunbabin, M and Morawska, L : The influence of humidity on the performance of a low-cost air particle mass sensor and the effect of atmospheric fog, Atmospheric Measurement Techniques, 11:4883~4890, 2018.
12. Sinclair, D, Countess, RJ and Hoopes, GS : Effect of relative humidity on the size of atmospheric aerosol particles, Atmospheric Environment, 8:1111~1117, 1974.
13. Waggoner, AP, Weiss, RE, Ahlquist, NC, Covert, DS, Will, S and Charlson, RJ : Optical characteristics of atmospheric aerosols, Atmospheric Environment, 15: 1891~1909, 1981.