

논문

소형 환경제어 챔버 장착형 광산란 센서와 서울 도시대기측정소 미세먼지 농도의 장기 비교 분석

Long-Term Comparison of a Miniature Climate-controlled Light-Scattering Sensor with Urban Particulate Matter Measurements in Seoul

박현민¹⁾, 이미혜^{1),*}, 주태규¹⁾, 김주애^{1),2)}, 백승훈³⁾, 손명희^{3),4)}

¹⁾고려대학교 지구환경과학과, ²⁾고려대학교 기초과학연구원, ³⁾(주)공감센서,

⁴⁾한국전자통신연구원

Hyunmin Park¹⁾, Meehye Lee^{1),*}, Taekyu Joo¹⁾, Joo-Ae Kim^{1),2)}, Sung Hoon Baek³⁾,
Myunghee Son^{3),4)}

¹⁾Department of Earth and Environmental Sciences, Korea University, Republic of Korea

²⁾The Institute of Basic Science, Korea University, Republic of Korea

³⁾Gonggam Sensors Co., Ltd., Republic of Korea

⁴⁾Electronics and Telecommunications Research Institute, Republic of Korea

접수일 2025년 10월 31일

수정일 2026년 1월 8일

채택일 2026년 1월 9일

Received 31 October 2025

Revised 8 January 2026

Accepted 9 January 2026

*Corresponding author

Tel : +82-(0)2-3290-3178

E-mail : meehye@korea.ac.kr

Abstract Low-cost particulate matter (PM) sensors require demonstrated long-term stability and representativeness to be reliably applied in complex urban environments. This study evaluates a climate-controlled light-scattering sensor (Gonggam Sensor GGS727) by analyzing four years (2021~2024) of continuous PM_{2.5} and PM₁ measurements collected at Korea University and comparing them with Beta Attenuation Method (BAM) observations from 25 regulatory monitoring stations across Seoul. The GGS727 achieved high data completeness (>97%) and maintained stable sensitivity throughout the observation period. Hourly-averaged sensor data showed strong spatial correlations with BAM measurements, with an average R² of 0.81 and RMSE of ~6.5 µg m⁻³ across all districts. Performance decreased gradually with distance from the sensor site, indicating that airflow similarity and spatial proximity largely govern coherence between local sensor observations and city-scale PM_{2.5} variability. Long-term regression parameters exhibited minimal interannual drift, demonstrating stable temporal consistency of the sensor. Seasonal comparison with the Jongno monitoring station revealed distinct relative response behaviors. In summer, the sensor tended to report slightly lower concentrations, consistent with organic-rich fine aerosol characterized by lower refractive index, enhanced volatility, and a shift toward smaller particle sizes with reduced scattering efficiency. In winter, nitrate-rich inorganic aerosol enhanced hygroscopic growth and increased optical scattering, leading the sensor to report relatively higher PM_{2.5} than the BAM instrument. These discrepancies reflect inherent differences in measurement principles and aerosol optical/thermodynamic properties rather than a loss of accuracy or stability. The sensor further provided robust PM₁ measurements, with PM₁ accounting for ~69% of PM_{2.5} on average and exhibiting strong seasonal variability (higher in summer, lower in winter). These patterns align with transitions between secondary organic aerosol formation and wintertime accumulation of inorganic salts, underscoring the value of submicron measurements for interpreting aerosol processes. Overall, the results demonstrate that a miniature climate-controlled sensor can reproduce urban PM_{2.5} variability with FEM-comparable fidelity while capturing additional information on ultrafine particles. Such performance highlights the utility of low-cost sensors for dense urban monitoring networks and for enhancing population exposure assessment in environments with strong seasonal and spatial heterogeneity.

Key words: PM_{2.5}, PM₁, Long-term evaluation, Climate-controlled chamber, Urban air quality

1. 서 론

대기 중의 미세먼지는 입자의 공기역학적 직경에 따라 PM₁₀ (지름 10 µm 이하)과 PM_{2.5} (지름 2.5 µm 이하)로 구분되며, 황사, 해염, 산불과 같은 자연적 발생원이나, 산업활동, 난방, 자동차 등의 화석연료 연소과정을 통해 인위적으로 발생한다(Garcia *et al.*, 2023; Nephew *et al.*, 2020). 특히 PM_{2.5}나 PM₁ (지름 1.0 µm 이하)은 크기가 매우 작아 호흡 시 코나 기관지에서 걸러지지 않고 폐까지 직접 침투할 수 있으며, 표면적 대비 부피 비율이 커서 유해물질을 흡수할 가능성 또한 상대적으로 높다(Schraufnagel, 2020). 이러한 특성으로 인해 PM_{2.5}는 호흡기 및 심혈관계 질환, 폐암 등을 유발할 수 있으며, 조기 사망률과도 높은 상관관계를 보이는 것으로 보고된다(Sangkham *et al.*, 2024; Sugiyama *et al.*, 2020; Jansen *et al.*, 2005). 세계보건기구(WHO)에서는 PM_{2.5}를 건강에 치명적인 영향을 미칠 수 있는 1급 발암물질로 지정하였다.

우리나라의 초미세먼지 연평균 농도는 제1차 미세먼지 계절관리제가 시행된 2019년 12월 이후 지속적인 감소 추세를 보여왔으나, 여전히 국내 대기환경기준인 연평균 15 µg m⁻³을 초과하고 있다(Kang *et al.*, 2024). 최근 WHO에서는 미세먼지가 인체에 미치는 영향을 고려하여 연평균 권고 기준을 5 µg m⁻³로 낮추었다(WHO, 2021). 이에 따라 세계 각국에서도 건강 영향을 고려해 규제 강화에 나서고 있으며(Liu *et al.*, 2024), 건강영향 측면에서 초미세먼지를 관리하는 대책 수립이 요구되고 있다.

한편, 국내에서는 「미세먼지 저감 및 관리에 관한 특별법」에 따라 초미세먼지 간이측정기에 대한 성능인증 제도가 운영되고 있으며, 환경부는 간이측정기의 측정 정확도와 정밀도를 평가하여 1등급과 등급외로 성능 등급을 부여하고 있다. 이 제도는 대부분의 인증 시험이 단기간의 실험실 또는 현장 기반 시험을 기반으로 수행되므로 장기간 실제 환경에서의 센서 노후화, 계절별 변동성, 고농도 사례에서의 응답 특성 등을 충분히 반영하기 어렵다는 한계가 있다.

또한, 다수의 광산란 기반 간이측정기들은 습도 변화에 취약하는 점이 선행 연구에서 반복적으로 지적되었으나, 현재의 인증 절차에서는 고습조건(>80%)에서 발생하는 과대평가나 반휘발성 성분 손실 등 농도 구간별 비선형 오차 특성을 종합적으로 고려하기 어렵다.

이러한 제도적 한계로 인해, 실제 도시 대기환경에서 간이 측정기가 참조 장비(FEM/FRM)와 어느 정도의 장기적 일치성을 유지할 수 있는지, 그리고 온·습도 등 외기 변화가 큰 환경에서 측정 안정성을 확보할 수 있는 구조적 개선의 필요성이 지속적으로 제기되고 있다(Nalukurthi *et al.*, 2024). 본 연구는 이러한 필요성을 바탕으로, 기존 저가형 센서와 달리 온·습도 제어 기능을 갖춘 광산란 기반 소형환경제어 챔버를 내장한 센서(GGS727)를 활용하여 4년에 걸친 장기 관측 자료를 도시대기측정소의 PM_{2.5}와 비교함으로써, 단일 센서 관측 값이 서울 전반의 PM_{2.5} 시공간 변동성을 얼마나 대표할 수 있는지, 그리고 국내 간이측정기 성능인증 제도에서 다루기 어려운 장기 안정성 및 계절성 등을 실증적으로 평가하고자 한다.

2. 공감센서(GGS727) 구조 및 특성

본 연구에는 (주)공감센서에서 개발한 Smart AQ Monitor TAM (Tiny Aerosol Conditioner inside Air Monitor)을 사용하였으며, 이하 ‘공감센서’라 한다. 공감센서의 핵심 기술은 입자의 광산란(Light Scattering) 신호를 기반으로 미세먼지 농도를 산출하는 센서와 온도 및 습도 제어 기능을 갖춘 초소형 에어로졸 컨디셔너(TAC)를 결합한 구조로, 외기 온·습도 변화에 취약한 기존 저가형 센서와 달리 환경제어 기반의 안정적인 측정 환경을 제공하는 큰 차별성을 갖고 있다.

광산란법(light scattering method)은 레이저 다이오드와 같은 광원에서 조사된 빛이 부유 입자에 의해 산란되는 강도와 패턴을 측정하여 입자의 크기 분포

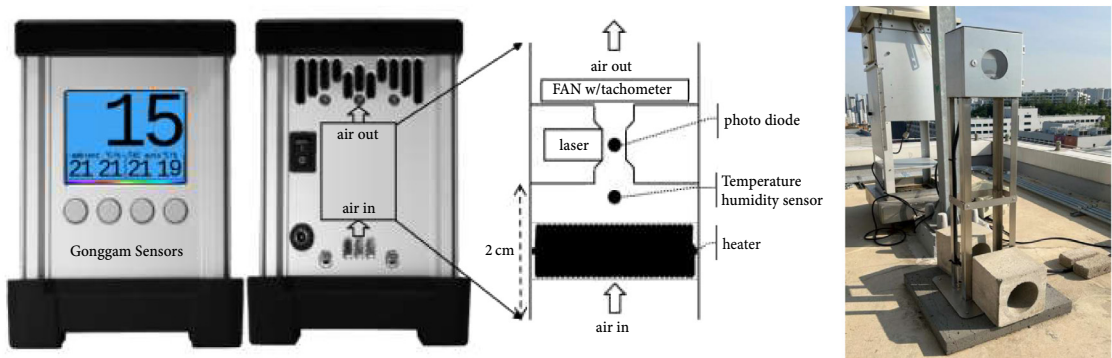


Fig. 1. Front and back views of Gonggam Sensor (GG5727), internal schematic diagram, and installation site located on the roof of the Mediheal EES Hall at Korea University (modified from Baek *et al.*, 2022, *Sensors*, 22(5):1950).

를 추정하고, 이를 기반으로 질량농도를 환산하는 방식이다(Hinds and Zhu, 2022). 공감센서는 레이저와 포토다이오드로 구성된 장치 내부에서 산란 신호의 강도 및 신호 패턴을 측정 한 뒤, 이를 내부 알고리즘을 통해 $PM_1 \cdot PM_{2.5} \cdot PM_4 \cdot PM_{10}$ 질량농도로 환산한다.

TAC 내부에는 온도 및 습도 센서와 직접 가열식 코일 형태 발열체가 장착되어 있어 흡입된 공기에 직접 접촉하여 건조한 뒤 내부의 상대습도(RH)를 약 35~55% 수준으로 정밀하게 제어한다(그림 1). 이러한 인공지능 기반 제어 로직을 통해 센서는 외부 환경 변화에도 안정적인 측정 조건을 유지하며, 흡습 성장(hygroscopic growth), 액상화(deliquescence) 등 외기 습도 변화에 의한 산란 신호의 변동을 최소화하여 장기간 안정적인 신호 품질을 확보할 수 있다(Baek, 2022).

또한, 공감센서는 미세먼지 포집을 위한 사이클론(cyclone)이나 임팩터(impactor)와 같은 기계적 입경 분리기(mechanical cut-off device)를 사용하지 않고, 산란 신호의 분포를 분석하는 알고리즘을 통해 입경 대별 질량농도를 산출한다. 공기는 센서 하단부에서 유입된 뒤 공기의 부력으로 내부 통로를 따라 상향 이동하도록 설계되어 있어 별도의 펌프나 송풍 장치가 필요하지 않으며, 이러한 구조는 인위적인 유동 변화에 따른 외부 오차 요인 또한 최소화한다.

공감센서는 TAC가 장착되어 있음에도 불구하고 공기 흐름 전환을 위한 추가적인 에너지가 필요하지 않아 에너지 소비 측면에서 효율적이다(Baek and Son, 2021). 센서의 전체 크기는 22 cm × 13 cm × 21 cm로 비교적 작아 설치 공간의 제약이 적으며, 작동 온도 범위가 -20°C에서 50°C, 히터의 동작 범위가 -15°C에서 45°C로 넓어 극한 환경을 포함한 다양한 조건에서 안정적으로 활용할 수 있다. 또한 GPS 모듈을 통해 위치 정보를 자동으로 기록할 수 있고, 측정 자료는 Wi-fi를 통해 실시간으로 서버에 전송된다. 전송된 자료는 “에어나우(airnow.kr)” 웹서비스(<https://airnow.kr/>)를 통해 원자료(raw data), 10분 평균, 1시간 평균, 일평균 형태로 제공된다.

공감센서는 미국 캘리포니아 남부 대기질관리청(South Coast Air Quality Management District, SCAQMD) 산하 대기질 센서 성능평가 프로그램인 AQ-SPEC (Air Quality Sensor Performance Evaluation Center)을 통해 독립적인 성능 평가를 받은 바 있다. 2023년 현장(Field) 시험 결과, 공감센서의 PM_1 및 $PM_{2.5}$ 측정치는 기준 장비와 각각 상관계수(R)가 0.97, 0.96을 나타냈다. 또한, 2024년 수행된 실험실(Laboratory) 시험에서는 제한된 조건 하에서 PM_1 및 $PM_{2.5}$ 측정값이 기준 장비와 $R^2 \approx 1.0$ 로 매우 높은 선형성을 보이는 것으로 보고되었다(SCAQMD, 2024).

3. 공감센서를 이용한 서울 도심 PM_{2.5} 장기 측정

2021년 1월 28일부터 2024년 12월 31일까지 약 4년 동안 서울시 성북구 안암동에 위치한 고려대학교 안암캠퍼스 매디힐 지구환경관 옥상에서(지상 약 40 m 높이) 공감센서를 사용하여 10분 간격으로 PM_{2.5}를 연속 관측하였다. 센서는 강우 및 직사광선에 직접적으로 노출되지 않도록 맞춤형 제작된 케이스안에 고정 설치하였다. 전체 기간 동안 원자료의 결측 비율은 약 3%로, 일시적인 작동 오류나 통신 장애 등이 기인하였다. 10분 측정 자료의 회수율(Recovery Rate)은 약 97%로, 도시대기관측망의 1시간 측정자료 평균 회수율이 98.07%인 것에 비하면 매우 높은 수준이다.

도시대기의 10분 평균 자료는 대기 중 순간적인 농도 급변(spike)이나 기기적 요인에 의한 단기 노이즈가 포함될 가능성이 높다. 이러한 비정상값을 제거하기 위해 이동 윈도우 기반 $\pm 2\sigma$ 품질관리 절차를 적용하였다. 전체 기간 동안 제거된 이상치는 전체 자료의 1.18%에 해당하며, 이상치 제거 후 산출된 평균값은 원자료에 비해 약 $0.01 \mu\text{g m}^{-3}$ 감소하였다. 4년간 PM_{2.5}의 평균값은 $17.75 \mu\text{g m}^{-3}$, 중앙값은 $12.20 \mu\text{g m}^{-3}$, 최대값은 $187.50 \mu\text{g m}^{-3}$ 로 산출되었다. 함께 측정된 PM₁ 자료에도 동일한 2σ 필터를 적용한 결과, 4년 평균값은 $12.40 \mu\text{g m}^{-3}$, 중앙값은 $8.40 \mu\text{g m}^{-3}$, 최대값은 $160.50 \mu\text{g m}^{-3}$ 로 나타났다. 평균값과 중간값은 PM₁이 PM_{2.5}의 약 70% 수준으로 과거 제주도 고산에서 측정된 결과와 비교하면 약 10% 정도 낮았다(Han et al., 2023; Shang et al., 2021). 그러나 최대값은 PM₁이 PM_{2.5}의 약 86%로 PM₁의 비율이 매우 높았다.

4. 베타흡수법(Beta Attenuation Method)으로 측정된 PM_{2.5} 농도와 비교

4.1 서울 25개 구별 측정소 PM_{2.5}와의 비교

2021년 1월 28일부터 2024년 12월 31일까지 공감

센서로 측정된 PM_{2.5} 농도를, 같은 기간 서울시 25개 자치구 도시대기측정망의 베타흡수법(Beta Attenuation Method)으로 측정된 PM_{2.5} 농도와 비교하였다. 다지점 참조기기 측정 결과와의 비교 분석을 통해 공감센서의 관측 결과가 서울시의 PM_{2.5} 변동성을 왜곡 없이 표현할 수 있는지를 검토하고자 하였다.

이에 대기환경기준에 따라 공감센서의 10분 평균 자료를 취합하여 1시간으로 평균하여 사용하였다. 서울시의 도시대기측정망 자료는 에어코리아(Air-korea, <https://www.airkorea.or.kr>)에서 제공하는 확정 자료를 종합 참조 기준(ensemble reference)으로 활용하여, 공감센서 관측 값이 도시 규모에서 공통적으로 나타나는 PM_{2.5} 변동성을 얼마나 잘 반영하지를 검토하였다.

그림 2에 나타난 서울시 도시대기측정망 25개소에서 관측된 PM_{2.5}의 4년 평균 농도는 $19.82 \pm 15.1 \mu\text{g m}^{-3}$ 이며, $17.59 \sim 20.26 \mu\text{g m}^{-3}$ 범위에 분포하여 25개 모든 측정소에서 국내 대기환경기준인 연평균 $15 \mu\text{g m}^{-3}$ 를 지속적으로 초과한 것으로 나타났다. 고려대학교에 설치한 공감센서로 측정된 관측된 PM_{2.5}의 4년 평균 농도는 $17.74 \pm 17.53 \mu\text{g m}^{-3}$ 이며, 도시대기 측정소 평균 농도보다 다소 낮지만 이 또한 국내 대기환경 연평균 초과한 수준이다.

25개 구별 관측소의 측정자료와 공감센서 측정자료 간 상관성을 선형회귀 직선의 기울기(slope), 절편(intercept), 평균 제곱근 오차(Root Mean Squared Error, RMSE), 및 결정 계수(R²)를 지표로 활용하여 분석하였다. 결과는 표 1에 각 측정소의 PM_{2.5} 4년 평균농도와 공감센서가 설치된 고려대학교 안암캠퍼스 사이 거리와 함께 제시하였다. 공감센서와 서울시 25개 측정소 간의 선형회귀 결정 계수(R²)는 모두 0.7 이상으로 나타났으며 평균 값은 0.81이었다. 기울기는 0.92~1.21 범위에 분포하였고 평균은 1.06이다. 절편 평균값은 $-2.23 \mu\text{g m}^{-3}$, RMSE 평균값은 $6.46 \mu\text{g m}^{-3}$ 으로 분석되었다.

센서와 구별 측정소 관측 값의 회귀분석 결과로 얻어지는 기울기와 절편은 센서 관측 값이 구별 관측

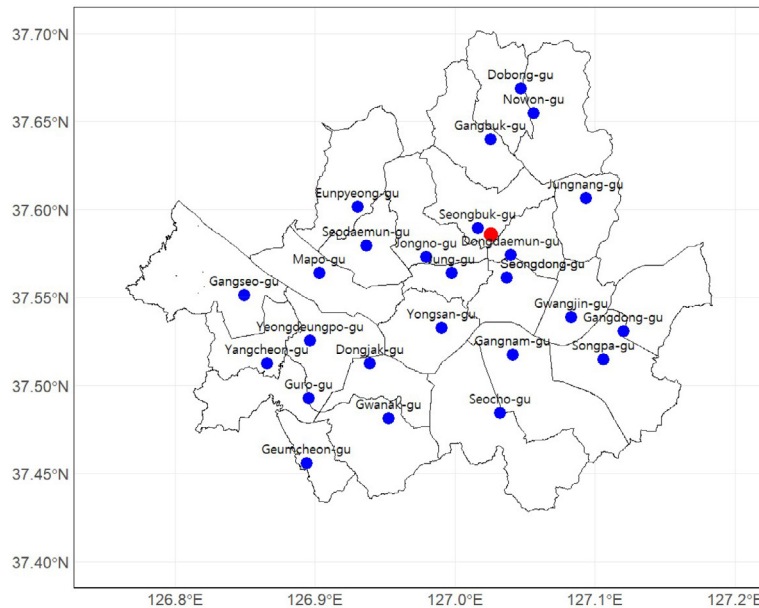


Fig. 2. The map shows the location of 25 air monitoring stations (blue dots) across Seoul and Korea University (red dot) where Gonggam Sensor (GG5727) is used to measure $PM_{2.5}$.

값을 체계적인 편향 없이 재현하는 정도를 나타내며, R^2 는 두 자료 간 변동성의 일치도를, RMSE는 관측 값 간 차이의 크기를 평가하는 지표로 활용된다. 25개 측정소별 회귀분석에서 도출된 기울기는 1보다 크고 절편은 음의 값을 나타내, 측정소별 회귀 기울기와 절편 사이에 강한 음의 상관관계가 확인되었으며, 두 매개변수 간 선형 회귀 결정계수 $R^2=0.70$ 으로 나타났다.

이러한 패턴은 두 가지 측면에서 해석될 수 있다. 첫째, 최소제곱법 (Ordinary Least Squares, OLS) 회귀에서는 자료의 범위와 평균을 기준으로 잔차를 최소화하는 과정에서 기울기와 절편 간에 음의 공분산이 나타나는 경향이 있으며, 이에 따라 기울기가 증가할수록 절편이 감소하고, 반대로 절편이 증가할수록 기울기가 감소하는 trade-off 특성이 나타날 수 있다.

둘째, 이러한 패턴은 광산란식 센서의 물리적 응답 특성 과도 연관될 수 있다. 선행 연구에 따르면 광산란 센서는 입자의 굴절률, 크기 분포 및 밀도 변화에 따라 산란 신호의 기울기와 선형성이 영향을 받을 수

있으며 (Li and Biswas, 2017), 실환경 평가 연구에서 저가형 광산란 센서는 저농도 구간에서 전자 노이즈 (zero-shift) 및 광학 배경신호 (baseline bias)에 의해 산란 신호의 감도가 불안정해지고, 고농도에서는 산란 신호의 비선형성 증가로 인해 민감도가 저하하는 등 농도 의존적 응답 특성이 보고된 바 있다 (Malings et al., 2020). 본 연구에서 관찰된 기울기 >1 및 절편 <0 의 조합 역시 이러한 농도 의존적 응답 특성에 의해 부분적으로 설명될 수 있다.

추가적으로, 구별 측정소와 공감센서의 회귀 성능 지표 (R^2 , RMSE)는 센서 설치 지점으로부터의 거리 증가에 따라 선형적으로 변화하는 경향을 보였다. 각 지표와 거리 간에 기울기는 각각 -0.01 (거리- R^2), 0.19 (거리-RMSE)로 나타나, 거리가 멀어질수록 상관성은 감소하고 오차는 증가하는 경향이 정량적으로 확인되었다. 25개 측정소 중 고려대학교와 인접한 동대문구와 종로구에서 R^2 가 가장 높고, RMSE가 가장 작아 공간적으로 근접한 지점일수록 변동성이 더 유사하게 나타남을 확인할 수 있다 (표 1). 또한 이 선형

Table 1. Linear regression results (R^2 , slope, intercept, RMSE) between the Gonggam Sensor (GG5727) at Korea University and 25 urban air monitoring stations cross Seoul. The distance from Korea University and 4-year $PM_{2.5}$ mean concentration at each station are also provided. Stations are ordered by descending distance.

District	R^2	Slope	Intercept ($\mu g m^{-3}$)	RMSE ($\mu g m^{-3}$)	Distance (Km)	Mean ($\mu g m^{-3}$)
Dongdaemun	0.87	1.13	-3.57	5.35	1.80	19.00
Seongbuk	0.84	1.10	-2.15	5.90	2.37	17.90
Jongno	0.87	1.08	-3.55	5.13	3.58	19.52
Junggu	0.84	1.05	-2.90	6.06	3.66	19.29
Seongdong	0.81	1.21	-3.70	5.67	3.68	17.68
Yongsan	0.80	1.16	-4.58	5.13	4.07	19.16
Seodaemun	0.83	1.02	-0.67	6.42	5.33	17.81
Gangbuk	0.80	1.09	-2.35	6.48	5.63	18.27
Eunpyeong	0.79	1.02	-1.57	7.02	5.71	18.89
Gwangjin	0.82	1.11	-2.61	6.04	5.88	18.16
Jungnang	0.83	1.12	-3.22	5.86	6.32	18.50
Mapo	0.83	1.08	-2.54	6.21	6.36	18.73
Nowon	0.80	1.02	-3.10	6.86	7.52	20.26
Dongjak	0.80	1.01	-2.46	6.97	7.55	19.87
Songpa	0.77	1.14	-3.61	6.51	7.83	18.58
Seocho	0.82	0.92	0.57	7.33	7.86	18.54
Gangnam	0.83	1.13	-3.62	5.88	7.90	18.77
Yeongdeungpo	0.80	1.03	-2.32	6.86	9.72	19.28
Yangcheon	0.79	0.97	-1.98	7.29	10.00	20.04
Gangdong	0.81	1.00	-1.59	6.80	10.16	19.15
Guro	0.79	0.92	1.14	7.92	10.26	18.07
Gwanak	0.77	1.07	-2.56	6.93	10.51	18.89
Dobong	0.84	1.06	-1.03	6.11	10.78	17.59
Gangseo	0.76	1.00	-1.29	7.52	11.29	18.93
Geumcheon	0.78	1.00	-2.01	7.33	12.92	19.55
Average	-	-	-	-	-	18.82
GG5727	-	-	-	-	-	17.74

관계의 결정계수는 각각 0.40 (거리- R^2), 0.56 (거리-RMSE)으로, 거리 변화가 성능지표 변동의 약 40~56%를 설명함을 의미한다.

반면, 회기 기울기와 절편은 거리와는 무관한 분포를 보였다. 기울기는 대부분 1보다 크고 절편은 대체로 음의 값을 나타냈으며(서초구와 구로구는 양의 절편), 이는 저농도 구간에서는 센서 값이 측정소보다 작고 고농도 구간에서는 더 크게 나타나는 일관된 농도 의존적 패턴을 의미한다. 이러한 특성을 거리 차이에 의한 변동성(R^2 , RMSE)과 달리, 체계적 편향은 공간적 거리보다는 센서와 측정소의 국지적 배출 특성과 같은 다른 요인에 기인한다는 점을 시사한다.

서울시 25개 측정소의 4년 평균 $PM_{2.5}$ 농도는

18.82 $\mu g m^{-3}$ 으로 공감센서(17.74 $\mu g m^{-3}$)보다 약 1.08 $\mu g m^{-3}$ 높게 나타났으나, 이는 지역별 배출 특성 및 미세 규모의 위치 조건 차이를 반영한 결과로 볼 수 있다. 본 연구에서는 공간적 근접성, 높은 상관성(R^2), 그리고 1에 가까운 기울기를 종합적으로 고려하여 종로구를 대표 비교 지점으로 선정하였다. 이후 그림 3에서는 계절(여름, 겨울)별 농도 분포를 비교하여, 센서와 참조측정망 간 차이가 어느 조건에서 더욱 두드러지는 분석하였다.

두 곳의 $PM_{2.5}$ 농도는 전형적인 로그정규 분포 형태를 띠며, 여름에 낮고 겨울에 높은 일관된 계절 특성을 보였다. 공감센서는 종로구 측정소에 비해 두 계절 모두 더 큰 변동폭을 보이는데, 이는 두 측정 방

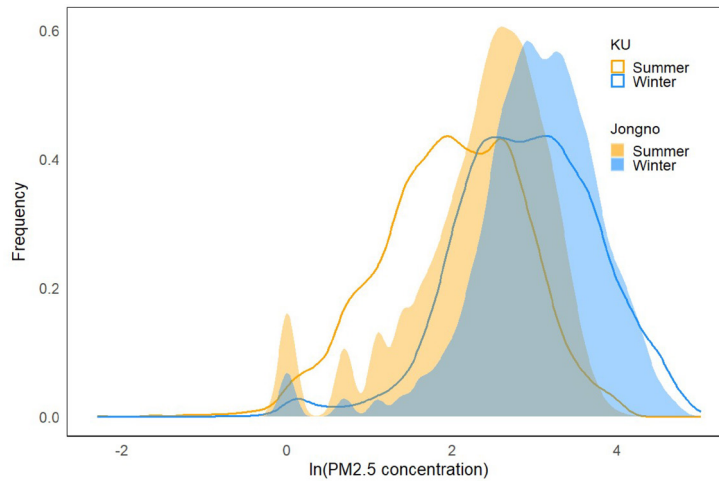


Fig. 3. Log-normal distributions of PM_{2.5} concentrations measured every hour by beta attenuation method at Jongno-gu station and measured every 10 minutes by Gonggam sensor at Korea University (KU). Data were separated into two seasons: summer (June~September) and winter (December~March).

식의 자료 해상도 및 공기 채취 방식의 구조적 차이에 기인한다. 공감센서는 0.01 μg m⁻³ 단위의 연속 값을 보고하므로 미세한 농도 변동이 그대로 반영되어 분포가 상대적으로 넓게 나타난 반면, 베타흡수법 장비는 1 μg m⁻³ 단위의 계단형(step-like) 자료를 생성하고(Shukla and Aggarwal, 2022), 인렛·사이클론·필터를 거치는 과정에서 고주파 변동이 평균화되는 효과가 발생한다(Magi *et al.*, 2020; Chow *et al.*, 2005). 따라서 베타흡수법에 비해 공감센서의 단기 변동 폭이 더 크게 나타난 것은 두 장비의 측정 원리와 자료 처리 특성을 반영한 결과다.

이러한 차이는 두 측정 원리의 구조적 특성을 반영한 결과일 뿐, 센서의 정확도 우위나 전형적 오류 부재를 의미하는 것은 아니다. 한편, 빈도 분포 비교에서는 저농도 구간에서는 측정소 값이 더 크고, 고농도 구간에서는 공감센서 값이 더 크게 나타나는 경향이 확인되었으며, 이에 대한 원인은 다음 장에서 상세히 분석하였다.

4.2 종로구 PM_{2.5}와의 상세 비교 분석

공감센서와의 상세 비교 분석 지점은 인접한 거리에 위치하고, 장기간 변동성을 잘 반영하는 높은 R²

값을 보이며, 선형회귀 기울기가 1에 가까워 편향이 가장 적은 곳을 기준으로 선정하였다. 공감센서가 설치된 고려대학교와 가장 높은 R²(0.87) 및 1에 근접한 회귀 기울기(1.08)를 보인 종로구 측정소는 3.58 km 떨어진 곳에 위치하였고 기류 특성 또한 유사한 지점이다. 종관 기상자료와 고려대학교 AWS 자료 분석 결과, 두 지점 모두에서 서풍(W)-북서풍(NW) 계열 바람의 빈도와 풍속이 우세하게 나타났다. 또한 장기적 안정성 평가를 위해 2021~2024년 동안 연도별 선형관계를 확인한 결과, 기울기(0.09±0.05)와 절편(4.03 μg m⁻³), 결정계수(0.01)의 변화 폭이 매우 작게 나타나 변동성이 거의 없었다. 이러한 결과는 4년에 걸쳐 센서의 감도 변화 또는 baseline drift가 작아 장기적인 시간적 재현성(temporal consistency)이 안정적으로 유지되었음을 보여준다.

본 절에서 계절의 구분은 미세먼지 계절관리제가 시행되는 12~3월을 겨울, 6~9월을 여름으로 하여 비교하였다. 그 결과, 여름철에는 종로구 측정값이 공감센서보다 상대적으로 높은 반면, 겨울철에는 공감센서 측정값이 더 높게 나타났다. 이러한 계절적 차이는 측정기기의 원리와 구조적 특성뿐만 아니라, 대기 중 물리·화학적 특성 변화에 따른 센서 응답 차이

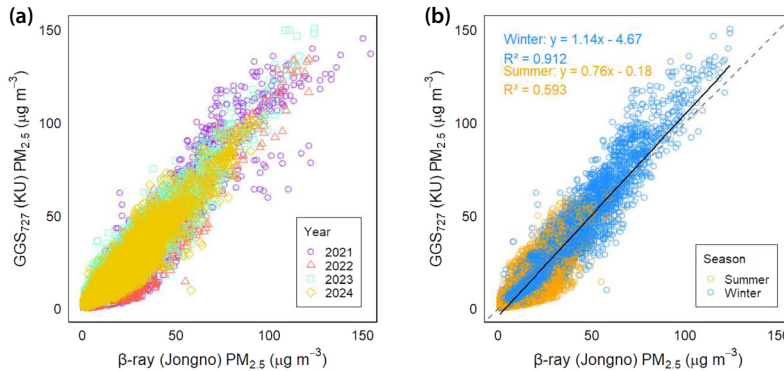


Fig. 4. Comparison of hourly PM_{2.5} concentrations between Korea University (GGS727) and Jongno-gu (β-ray) from 2021 to 2024. (a) Data separated by year and (b) by season, with summer (June~September) in orange and winter (December~March) in blue. The slope, intercept, and R² values of the linear regression fitting are given in the figure. The dashed gray line represents the 1 : 1 line.

로 해석할 수 있다.

서울을 포함한 동아시아 지역의 PM_{2.5}는 여름철에 낮고 겨울철에 높은 계절 특성이 매우 뚜렷하며 고농도 사례 역시 대부분 겨울철에 발생한다. 일반적으로 전구기체의 농도가 여름철에 비해 겨울철에 높으나 여름철에는 전구기체의 산화가 빠르게 진행되므로 PM_{2.5}를 구성하는 조성에서도 큰 계절적 차이를 보인다.

여름철에는 기온 상승과 강한 일사로 인해 VOC 및 반휘발성 유기물(SVOC)의 기체-입자 분배가 기체상으로 이동하므로 (Donahue *et al.*, 2006), SOA 전구물질이 크게 증가한다 (Lim *et al.*, 2010; Saxena and Hildemann, 1996). 대기의 산화력도 크므로 PM_{2.5}의 조성은 2차 유기물(SOA)이 큰 비중을 차지하게 되는데, 이 유기 에어로졸은 상대적으로 낮은 굴절률을 갖는다 (Li *et al.*, 2023). 동일 질량의 입자에 대한 굴절률의 감소는 산란광의 강도를 약화시키므로, PM 농도가 낮고 SOA 비중이 큰 경우 광산란 기반의 센서는 참조측정기에 비해 낮은 값으로 편향될 가능성이 있다. 반면 겨울철에는 질산염과 암모늄염 중심의 이차 무기입자가 증가하는데 (Yu *et al.*, 2018), 이들 무기는 높은 굴절률과 강한 흡습성을 갖는다 (Hu *et al.*, 2010; Tang and Munkelwitz, 1994). 이러한 조성 변화는 여름과는 반대로 산란강도를 증가시킬 수 있다.

조성 변화는 평균 입경에도 영향을 미치게 된다. 일반적으로 SOA에 비해 이차무기입자는 흡습성이 크고 따라서 입자의 크기도 크다. Mie 산란 이론에 따르면 droplet mode 입자의 산란효율이 가장 크고 변화가 크기 때문에 광산란이 조성의 변화에 민감하게 반응할 수 있다 (Matsui *et al.*, 2011). 이는 광산란 기반 센서의 불확도 증가로 이어질 수 있다 (Moore *et al.*, 2021; Jung *et al.*, 2018). 이러한 계절적 입자의 조성 변화 특성으로 인해 공감센서는 참조장비에 비해 여름철 과소평가와 겨울철 과대평가는 충분히 해석 가능한 현상이다. 이러한 불일치는 농도가 가장 낮은 여름철과 고농도 사례가 발생하는 겨울철의 시기적 특성으로 전체 측정 간 상관성에 미치는 영향은 미미하다.

입자의 조성에 따른 입경의 변화는 입경분리 효율에도 영향을 미치게 되므로 임팩터나 사이클론과 같은 size-selective inlet을 사용하지 않는 공감센서의 경우, 특정 조건에서는 이러한 크기 분리 관련 편향을 일부 회피할 가능성이 있다 (Chen *et al.*, 2018). 또한 질산염(NH₄NO₃)은 온도와 RH에 민감한 반휘발성 성분이어서 샘플링 과정에서 휘발에 의한 손실(음의 sampling artifact)이 발생할 수 있다는 점이 잘 알려져 있다 (Chang *et al.*, 2000).

그림 4(a)에 제시된 장기 비교 결과에 따르면, 공감

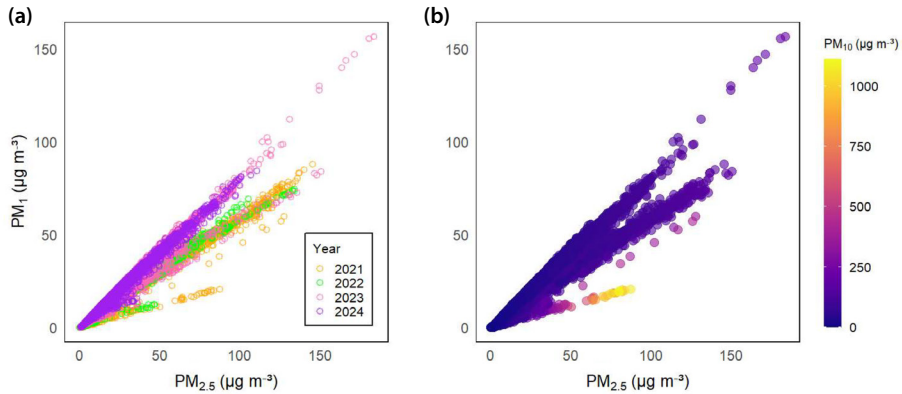


Fig. 5. Hourly relationships between $PM_{2.5}$ and PM_1 concentrations from 2021 to 2024. Panel (b) represents the same relationship with point colors indicating corresponding PM_{10} concentration.

센서는 베타산흡수법 기반의 참조장비와 높은 상관성 및 계절·농도 범위 전반에 걸친 일관된 응답 패턴을 보였다. 이러한 결과는 공감센서가 간이 측정기임에도 불구하고, 서울 도심의 실제 대기환경 조건에서 장기간에 걸쳐 FEM 기반 $PM_{2.5}$ 농도와 유사한 수준의 동적 응답 특성을 안정적으로 유지했음을 시사한다. 비록 센서의 절대 농도 편차는 계절적 에어로졸 조성 변화에 따라 일부 변동될 수 있으나, 시간적 변동성·상대적 변화 추세·고농도 이벤트 대응 능력 측면에서는 규제 장비와 구조적으로 유사한 거동을 지속적으로 재현했다는 점에서 그 신뢰성이 확인되고 할 수 있다.

5. 공감센서로 관측된 서울 PM 특성

공감센서는 $PM_{2.5}$ 와 더불어 PM_1 과 PM_{10} 측정이 가능하므로 다양한 입경의 질량농도 자료를 활용해서 서울시 PM의 특성을 분석하였다. 2021~2024년 동안 PM_1 과 $PM_{2.5}$ 사이의 상관성은 장기간에 걸쳐 매우 안정적으로 유지되었다(기울기는 0.69, 절편 0.05, R^2 는 0.94). PM_1 농도는 $PM_{2.5}$ 가 증가할 때 거의 비례적으로 증가하며, 평균적으로 $PM_{2.5}$ 질량의 약 69%를 차지하였다. 이러한 일관성은 PM_1 자료에 동일하게 적용된 $\pm 2\sigma$ 이동 윈도우 기반 품질관리 절차를 통해

더욱 확보되었으며, 이상치 비율 역시 전체 자료의 약 3% 미만으로 낮게 나타났다.

특히 2024년 기울기와 결정계수(R^2)가 가장 컸으며, 다른 연도에서는 $PM_{2.5}$ 대비 PM_1 의 비율이 낮은 구간이 관찰되었는데, 이러한 시기에는 PM_{10} 의 농도가 함께 높았다. 이는 조대 입자(예: 토양 기원 입자, 재비산 입자 등)의 기여가 증가하며, PM_1 에 비해 $PM_{2.5}$ 가 상대적으로 더 크게 증가했기 때문으로 해석된다. 실제 2024년에는 이러한 고농도 PM_{10} 사례의 빈도가 상대적으로 적어, $PM_1 \sim PM_{2.5}$ 관계의 일관성이 높게 유지된 것으로 보인다.

광산란 센서는 원리상 황사와 같은 조대·비구형 광물성 입자(mineral dust)가 포함될 경우, 밀도가 증가하여 공기역학직경이 달라지며 이에 따라 산란 강도와 실제 질량 간 관계가 비선형적으로 달라져 질량 환산에 구조적 한계가 있는 것으로 알려져 있다(Alfano *et al.*, 2020). 이러한 이유로 행정 목적의 PM_{10} 질량 측정에는 광산란 센서의 사용이 어렵지만, 그림 5와 같이 본 연구에서는 공감센서로 관측된 PM_1 , $PM_{2.5}$ 및 PM_{10} 간 연도별 상관 구조가 일관되게 유지되었다.

$$2021 \sim 2024: PM_1 = 0.69 \times PM_{2.5} - 0.05, R^2 = 0.98$$

$$2021: PM_1 = 0.59 \times PM_{2.5} - 0.26, R^2 = 0.98$$

$$2022: PM_1 = 0.62 \times PM_{2.5} - 0.48, R^2 = 0.99$$

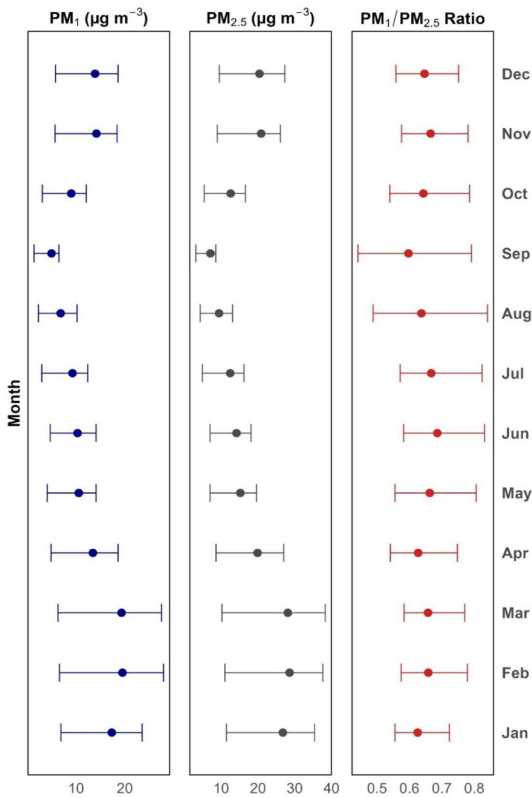


Fig. 6. Monthly variations of PM₁ and PM_{2.5} concentrations, and PM₁/PM_{2.5} ratio.

$$2023: PM_1 = 0.76 \times PM_{2.5} + 0.22, R^2 = 0.96$$

$$2024: PM_1 = 0.81 \times PM_{2.5} - 0.26, R^2 = 0.99$$

이는 공감센서가 일상적인 도시대기 조건에서 존재하는 미세먼지를 안정적으로 포착하고 있음을 의미한다. 따라서, 광물성 조대입자가 우세한 황사 발생 시에는 주의가 필요하지만, 인위적 오염과 2차 생성 입자가 주로 지배하는 도시 대기 환경에서는 신뢰도 높은 자료 생산이 가능함을 보여주며, 복합적인 입자 발생원을 가진 국내 도시대기 모니터링에 센서의 활용 가치를 높게 평가할 수 있음을 시사한다.

PM₁/PM_{2.5} 비율은 계절에 따라 0.59~0.81 범위로 계절에 따라 뚜렷한 차이를 보였으며(그림 6), 여름철에 높고 겨울철에 낮아지는 특징을 나타냈다. 이러한 계절성은 국내 선행연구에서 보고된 결과와 일관

된다. 서울 신촌 지역에서 HR-ToF-AMS를 이용해 측정된 연구(Song *et al.*, 2021)는 PM₁/PM_{2.5} 비율을 0.65 ± 0.10 으로 보고하였다. 이 연구에서는 겨울철에는 무기이온의 기여가 증가하여 상대적으로 큰 입자 범위의 질량이 크게 늘어나 PM₁/PM_{2.5} 비율이 낮아지며, 반대로 여름철에는 2차 유기 에어로졸(SOA)이 주로 초미세입자 영역에서 기여하여 PM₁ 비중이 상승한다고 보고하였다. 즉, 계절별 PM₁/PM_{2.5} 비율 차이는 화학 성분 변화뿐만 아니라, 입자의 크기 분포의 계절적 변동과도 관련됨을 제시하였다.

필터 기반 분석 연구(Han *et al.*, 2023)에서도 유사한 결과가 보고되었다. 도심 대기에서 연평균 PM₁은 PM_{2.5}의 약 60~70%를 차지하였으며, 특히 고농도 사례에서는 질산염이 급격히 증가하여 PM_{2.5} 중 coarse-fine transition 영역($\approx 0.8 \sim 1.5 \mu\text{m}$)의 질량이 크게 늘어나 PM₁/PM_{2.5} 비율이 감소하는 경향이 보고되었다. 이 연구 역시, 계절 및 오염도 수준에 따라 미세입자 내 무기염·유기물 구성과 크기 분포가 달라지고, 그에 따라 PM₁/PM_{2.5} 비율이 체계적으로 변동함을 강조하였다.

본 연구에서도 선행연구에서 보고된 것과 동일한 계절성이 뚜렷하게 나타났다. 여름철에는 PM_{2.5}의 절대 농도가 낮음에도 불구하고 PM₁의 감소 폭이 상대적으로 작아 PM₁/PM_{2.5} 비율이 높게 유지되었다. 여름철에는 서울 도심의 교통배출 등 국지적 오염원(local sources)의 영향이 강화되는 동시에, 반응성이 높은 자연발생 VOCs와 aromatic·alkene 계열 휘발성 유기화합물(VOCs)의 비중이 높아지므로(Kang, 2022), 2차 유기에어로졸의 생성 비중이 증가할 가능성이 있다. Submicron 입경에 주로 분포하는 유기물의 상대적인 증가를 통해 PM₁/PM_{2.5} 비를 증가시키는 방향으로 작용할 수 있다(Kang, 2022; Shrivastava *et al.*, 2017).

이러한 결과는 위에 제시한 국내 도심지역의 기존 연구와 대체로 일치하며, 공감센서가 계절에 따라 지배적인 입자 생성·성장 메커니즘이 변화함에 따른 PM₁ 및 PM_{2.5}의 계절 변동성을 안정적으로 포착하고

있음을 보여준다. 또한 PM_{10} 과 $PM_{2.5}$ 농도 및 비율의 계절적 차이는 대기 중 물리·화학 변환과정, 국지배출의 특성, 그리고 기상조건의 상호작용을 반영하는 대기질 구성의 주요 지표로 기능한다. 특히, 여름철 PM_{10} 비중이 상대적으로 높게 나타난다는 점은, 도시 대기질 관리 측면에서 $PM_{2.5}$ 뿐 아니라 PM_{10} 에 대한 지속적인 모니터링과 위해성 평가의 필요성을 시사한다. 초미세입자 비중이 큰 환경에서는 인체 노출에 따른 건강 영향이 더욱 민감하게 반영될 수 있으므로, PM_{10} 모니터링 자료는 향후 도시 대기질·보건정책 수립에 중요한 기초자료로 활용될 수 있다.

6. 요약 및 결론

본 연구에서는 온·습도 제어 기능을 갖춘 광산란 기반 공감센서(GGS727)를 서울 도심(고려대학교 안암캠퍼스, 약 40 m 고도)에 설치하고, 2021~2024년 약 4년 동안 연속 관측한 $PM_{2.5}$ 자료를 서울시 25개 자치구 베타산흡수법(BAM) 측정망과 비교하여 장기 성능과 공간 대표성을 평가하였다. 센서는 전 기간 동안 약 97% 이상의 높은 자료 회수율과 안정적인 감도를 유지하였으며, 25개 도시대기측정소와의 비교에서 평균 $R^2=0.81$, $RMSE \approx 6.5 \mu g m^{-3}$ 수준으로 도시 대기 $PM_{2.5}$ 변동성을 일관되게 재현하는 것으로 나타났다. 센서 설치 지점과의 거리가 가까운 종로구·동대문구에서 상관성이 가장 높고 오차가 가장 작아, 공간적 근접성과 배후 기류의 유사성이 도시 규모 변동성을 대표하는 데 중요한 역할을 함을 확인하였다.

회귀 분석에서 대부분의 지점에서 기울기 > 1 , 절편 < 0 의 조합이 나타났으며, 이는 최소 제곱 회귀(OLS)의 수학적 특성과 더불어 광산란 센서에서 관찰되는 농도 의존적 응답 특성과 관련된 패턴으로 해석된다. 계절별 비교에서는 여름철에 SOA와 PM_{10} 비중이 증가하면서 낮은 굴절률·작은 입경으로 인해 광산란 기반 센서의 산란 효율이 상대적으로 약화되고, 겨울철에는 질산염 중심 무기염과 accumulation

mode 입자 증가로 산란 효율이 강화되는 경향이 나타났다. 이러한 결과는 센서와 BAM이 동일한 대기 중에서도 에어로졸 조성·광학·입경 특성에 따라 서로 다른 민감도로 응답할 수 있음을 보여주는 것으로, 어느 한 장비의 우위나 오류를 주장하기보다는 측정 원리 차이에 따른 상대적 응답 특성을 정량적으로 제시한 것으로 볼 수 있다.

공감센서는 $PM_{2.5}$ 와 함께 PM_{10} 도 동시에 측정하여, 서울 도심 초미세입자의 구조를 추가적으로 파악할 수 있었다. 4년 동안 PM_{10} 과 $PM_{2.5}$ 는 기울기 0.69, $R^2=0.94$ 로 매우 안정적인 선형 관계를 보였으며, 평균적으로 PM_{10} 은 $PM_{2.5}$ 질량의 약 69%를 차지하였다. $PM_{10}/PM_{2.5}$ 비율은 여름철에 높고 겨울철에 낮아지는 뚜렷한 계절성을 보였고, 이는 여름철 SOA 중심의 초미세입자 기여 증가와 겨울철 무기염(SIA) 증가에 따른 보다 큰 입경대 질량 증가라는 국내의 선행연구의 결과와 일관된다. 이러한 계절별 비율 변화는 서울 대기에서 지배적인 입자 생성·성장 메커니즘이 계절 및 오염도 수준에 따라 달라진다는 점을 뚜렷이 보여준다.

종합하면, 공감센서는 4년 이상의 장기 운용 동안 도시대기 $PM_{2.5}$ 변동성을 BAM 측정망과 유사한 수준으로 안정적으로 추적할 수 있었으며, PM_{10} 과 $PM_{2.5}$ 의 동시 관측을 통해 초미세입자의 상대적 비중과 계절 특성을 평가하는 데 유용한 정보를 제공하였다. 이는 향후 도시 대기질 관리와 건강영향 평가에서 $PM_{2.5}$ 뿐만 아니라 PM_{10} 에 대한 지속적인 모니터링의 필요성을 뒷받침하며, 기상·화학조성 자료를 포함한 추가 연구를 통해 초미세입자 기반의 대기질·보건정책 수립에 중요한 기초 자료로 활용될 수 있을 것이다.

감사의 글

본 연구는 한국연구재단 중견연구(RS-2025-0057-3406)의 지원을 받아 수행되었습니다.

References

- Alfano, B., Barretta, L., Del Giudice, A., De Vito, S., Di Francia, G., Esposito, E., Formisano, F., Massera, E., Miglietta, M. L., Polichetti, T. (2020) A Review of Low-Cost Particulate Matter Sensors from the Developers' Perspectives, *Sensors*, 20(23), 6819. <https://doi.org/10.3390/s20236819>
- Baek, S.H. (2022) Energy-Efficient Monitoring of Fine Particulate Matter with Tiny Aerosol Conditioner, *Sensors*, 22(5), 1950. <https://doi.org/10.3390/s22051950>
- Baek, S.H., Son, M.H. (2021) Implementation and evaluation of a light scattering fine particulate matter sensor system with a tiny aerosol conditioner, *The Journal of Korean Institute of Communications and Information Sciences*, 46(10), 1729-1737, (In Korean with English abstract). <https://doi.org/10.7840/kics.2021.46.10.1729>
- Chang, M.C., Sioutas, C., Kim, S., Gong, H., Linn, W.S. (2000) Reduction of nitrate losses from filter and impactor samplers by means of concentration enrichment, *Atmospheric Environment*, 34(1), 85-98. [https://doi.org/10.1016/S1352-2310\(99\)00308-8](https://doi.org/10.1016/S1352-2310(99)00308-8)
- Chen, Y., Wild, O., Wang, Y., Ran, L., Teich, M., Größ, J., Wang, L., Spindler, G., Herrmann, H., van Pinxteren, D., McFiggans, G., Wiedensohler, A. (2018) The influence of impactor size cut-off shift caused by hygroscopic growth on particulate matter loading and composition measurements, *Atmospheric Environment*, 195, 141-148. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2018.09.049>
- Chow, J.C., Watson, J.G., Lowenthal, D.H., Magliano, K.L. (2005) Loss of PM_{2.5} nitrate from filter samples in central California, *Journal of the Air & Waste Management Association*, 55(8), 1158-1168. <https://doi.org/10.1080/10473289.2005.10464704>
- Donahue, N.M., Robinson, A.L., Stanier, C.O., Pandis, S.N. (2006) Coupled partitioning, dilution, and chemical aging of semivolatile organics. *Environmental Science & Technology*, 40(8), 2635-2643. <https://doi.org/10.1021/es052297c>
- Garcia, A., Santa-Helena, E., De Falco, A., De Paula Ribeiro, J., Gioda, A., Gioda, C.R. (2023) Toxicological Effects of Fine Particulate Matter (PM_{2.5}): Health Risks and Associated Systemic Injuries—Systematic Review, *Water, Air, Soil Pollution*, 234(6). <https://doi.org/10.1007/s11270-023-06278-9>
- Han, J., Lim, S., Lee, M., Lee, Y.J., Lee, G., Shim, C., Chang, L.-S. (2023) Characterization of PM_{2.5} Mass in Relation to PM_{1.0} and PM₁₀ in Megacity Seoul, *Asian Journal of Atmospheric Environment*, 16(1), 2021124. <https://doi.org/10.5572/ajae.2021.124>
- Hinds, W.C., Zhu, Y. (2022) *Aerosol technology: properties, behavior, and measurement of airborne particles*. John Wiley & Sons. (ISBN: 9781119494041)
- Hu, D., Qiao, L., Chen, J.-M., Ye, X., Yang, X., Cheng, T., Fang, W. (2010) Hygroscopicity of Inorganic Aerosols: Size and Relative Humidity Effects on the Growth Factor, *Aerosol and Air Quality Research*, 10, 255-264. <https://doi.org/10.4209/aaqr.2009.12.0076>
- Jansen, K.L., Larson, T.V., Koenig, J.Q., Mar, T.F., Fields, C., Stewart, J., Lippmann, M. (2005) Associations between Health Effects and Particulate Matter and Black Carbon in Subjects with Respiratory Disease, *Environmental Health Perspectives*, 113(12), 1741-1746. <https://doi.org/10.1289/ehp.8153>
- Jung, C.H., Um, J., Bae, S.Y., Yoon, Y.J., Lee, S.S., Lee, J.Y., Kim, Y.P. (2018) Analytic Expression for the Aerosol Mass Efficiencies for Polydispersed Accumulation Mode, *Aerosol and Air Quality Research*, 18(6), 1503-1514. <https://doi.org/10.4209/aaqr.2018.02.0067>
- Kang, S. (2022) An analysis of the temporal variability in volatile organic compounds (VOCs) within megacity Seoul and an identification of their sources, *Atmospheric Pollution Research*, 13(3). <https://doi.org/10.1016/j.apr.2022.101338>
- Kang, Y.-H., Kim, E., Jeong, S., Park, J., Son, C., Kim, S. (2024) Analyzing the main drivers of observed PM_{2.5} concentrations in South Korea during the 1st to 5th seasonal particulate matter management periods, *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment*, 40(4), 407-426, (In Korean with English abstract). <https://doi.org/10.5572/KOSAE.2024.40.4.407>
- Li, J., Biswas, P. (2017) Optical Characterization Studies of a Low-Cost Particle Sensor, *Aerosol and Air Quality Research*, 17(7), 1691-1704. <https://doi.org/10.4209/aaqr.2017.02.0085>
- Li, Y., Bai, B., Dykema, J., Shin, N., Lambe, A., Chen, Q., Kuwata, M., Ng, N., Keutsch, F., Liu, P. (2023) Predicting Real Refractive Index of Organic Aerosols From Elemental Composition, *Geophysical Research Letters*, 50. <https://doi.org/10.1029/2023GL103446>
- Lim, Y.B., Tan, Y., Perri, M.J., Seitzinger, S.P., Turpin, B.J. (2010) Aqueous chemistry and its role in secondary organic aerosol (SOA) formation, *Atmospheric Chemistry and Physics*, 10(21), 10521-10539. <https://doi.org/10.5194/acp-10-10521-2010>

- Liu, J., He, C., Si, Y., Li, B., Wu, Q., Ni, J., Zhao, Y., Hu, Q., Du, S., Lu, Z., Jin, J., Xu, C. (2024) Toward Better and Healthier Air Quality: Global PM_{2.5} and O₃ Pollution Status and Risk Assessment Based on the New WHO Air Quality Guidelines for 2021, *Global Challenges*, 8(4), 23002-58. <https://doi.org/10.1002/gch2.202300258>
- 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. <https://doi.org/10.1080/02786826.2019.1619915>
- Malings, C., Tanzer, R., Hauryliuk, 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>
- Matsui, H., Kondo, Y., Moteki, N., Takegawa, N., Sahu, L.K., Koike, M., Zhao, Y., Fuelberg, H.E., Sessions, W.R., Diskin, G., Anderson, B.E., Blake, D.R., Wisthaler, A., Cubison, M. J., Jimenez, J.L. (2011) Accumulation-mode aerosol number concentrations in the Arctic during the ARC-TAS aircraft campaign: Long-range transport of polluted and clean air from the Asian continent, *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 116(D20). <https://doi.org/10.1029/2011JD016189>
- Moore, R.H., Wiggins, E.B., Ahern, A.T., Zimmerman, S., Montgomery, L., Campuzano Jost, P., Robinson, C.E., Ziemba, L.D., Winstead, E.L., Anderson, B.E., Brock, C.A., Brown, M.D., Chen, G., Crosbie, E.C., Guo, H., Jimenez, J.L., Jordan, C.E., Lyu, M., Nault, B.A., Rothfuss, N.E., Sanchez, K.J., Schueneman, M., Shingler, T.J., Shook, M.A., Thornhill, K.L., Wagner, N.L., Wang, J. (2021) Sizing response of the Ultra-High Sensitivity Aerosol Spectrometer (UHSAS) and Laser Aerosol Spectrometer (LAS) to changes in submicron aerosol composition and refractive index, *Atmospheric Measurement Techniques*, 14(6), 4517-4542. <https://doi.org/10.5194/amt-14-4517-2021>
- Nalukurthi, N., Abimbola, I., Ahmed, T., Anton, I., Riaz, K., Ibrahim, Q., Banerjee, A., Tiwari, A., Gharbia, S. (2024) Challenges and Opportunities in Calibrating Low-Cost Environmental Sensors, *Sensors (Basel)*, 24(11). <https://doi.org/10.3390/s24113650>
- Nephew, B.C., Nemeth, A., Hudda, N., Beamer, G., Mann, P., Petitto, J., Cali, R., Febo, M., Kulkarni, P., Poirier, G., King, J., Durant, J.L., Brugge, D. (2020) Traffic-related particulate matter affects behavior, inflammation, and neural integrity in a developmental rodent model, *Environmental Research*, 183, 109242. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2020.109242>
- Sangkham, S., Phairuang, W., Sherchan, S.P., Pansakun, N., Munkong, N., Sarndhong, K., Islam, M.A., Sakunkoo, P. (2024) An update on adverse health effects from exposure to PM_{2.5}, *Environmental Advances*, 18, 100603. <https://doi.org/10.1016/j.envadv.2024.100603>
- Saxena, P., Hildemann, L.M. (1996) Water-soluble organics in atmospheric particles: A critical review of the literature and application of thermodynamics to identify candidate compounds, *Journal of Atmospheric Chemistry*, 24, 57-109. <https://doi.org/10.1007/BF00053823>
- Schraufnagel, D.E. (2020) The health effects of ultrafine particles, *Experimental & Molecular Medicine*, 52(3), 311-317. <https://doi.org/10.1038/s12276-020-0403-3>
- Shang, X., Lee, M., Lim, S., Gustafsson, Ö., Lee, G., Chang, L. (2021) Dust Criteria Derived from Long-Term Filter and Online Observations at Gosan in South Korea, *Atmosphere*, 12(11), 1419. <https://doi.org/10.3390/atmos12111419>
- Shrivastava, M., Cappa, C.D., Fan, J., Goldstein, A.H., Guenther, A.B., Jimenez, J.L., Kuang, C., Laskin, A., Martin, S.T., Ng, N.L., Petäjä, T., Pierce, J.R., Rasch, P.J., Roldin, P., Seinfeld, J.H., Shilling, J., Smith, J.N., Thornton, J.A., Volkamer, R., Wang, J., Worsnop, D.R., Zaveri, R.A., Zelenyuk, A., Zhang, Q. (2017) Recent advances in understanding secondary organic aerosol: Implications for global climate forcing, *Reviews of Geophysics*, 55(2), 509-559. <https://doi.org/10.1002/2016RG000540>
- Shukla, K., Aggarwal, S.G. (2022) A Technical Overview on Beta-Attenuation Method for the Monitoring of Particulate Matter in Ambient Air, *Aerosol and Air Quality Research*, 22(12), 220195. <https://doi.org/10.4209/aaqr.220195>
- Song, I., Park, J., Park, S.-M., Kim, D., Kim, Y.-W., Shin, H. (2021) Seasonal Characteristics of PM₁ in Seoul, Korea, measured using HR-ToF-Aerosol Mass Spectrometer in 2018, *Atmospheric Environment*, 266, 118717. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2021.118717>
- South Coast Air Quality Management District (SCAQMD) (2024) Field evaluation of Gonggam Sensors Co., Ltd. - Tiny Aerosol Conditioner inside Air Monitor (TAM 1). AQ-SPEC. <https://www.aqmd.gov/aq-spec/evaluations/summary-table>
- Sugiyama, T., Ueda, K., Seposo, X.T., Nakashima, A., Kinoshita,

M., Matsumoto, H., Ikemori, F., Honda, A., Takano, H., Michikawa, T., Nitta, H. (2020) Health effects of PM_{2.5} sources on children's allergic and respiratory symptoms in Fukuoka, Japan, *Science of The Total Environment*, 709, 136023. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.136023>

Tang, I.N., Munkelwitz, H.R. (1994) Water activities, densities, and refractive indices of aqueous sulfates and sodium nitrate droplets of atmospheric importance, *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 99(D9), 18801-18808. <https://doi.org/10.1029/94JD01345>

World Health Organization (WHO) (2021) WHO global air quality guidelines: Particulate matter (PM_{2.5} and PM₁₀), ozone, nitrogen dioxide, sulfur dioxide and carbon monoxide. Retrived from <https://iris.who.int/bitstream/handle/10665/345329/9789240034228-eng.pdf>

Yu, G.-H., Park, S.-S., Park, J., Park, S.-M., Song, I., Oh, J., Shin, H., Lee, M., Lim, H., Kim, H., Choi, J. (2018) Pollution Characteristics of PM_{2.5} Observed during Winter and Summer in Baengryeongdo and Seoul, *Journal of Korean*

Society for Atmospheric Environment, 34, 38-55, (In Korean with English abstract). <https://doi.org/10.5572/KOSAE.2018.34.1.038>

Authors Information

박현민 (고려대학교 지구환경과학과 석사과정)
(hyunmini07@korea.ac.kr)

이미혜 (고려대학교 지구환경과학과 교수)
(meehye@korea.ac.kr)

주태규 (고려대학교 지구환경과학과 교수)
(taekyujoo@korea.ac.kr)

김주애 (고려대학교 지구환경과학과 연구교수)
(alal78@korea.ac.kr)

백승훈 ((주)공감센서 연구소장)
(shun@ggsensors.com)

손명희 ((주)공감센서 대표, 한국전자통신연구원 책임연구원)
(regina@ggsensors.com)