

대기환경에서 광산란 미세먼지 측정기의 PM_{2.5} 보정계수 산정

김 종 범¹⁾ · 김 단 비²⁾ · 노 수 진³⁾ · 윤 관 훈⁴⁾ · 박 덕 신⁵⁾ · 이 정 주³⁾ · 김 정 호^{6),*}

¹⁾충남연구원 서해안기후환경연구소

²⁾국립환경과학원 기후대기연구부

³⁾용인대 산업환경보건학과

⁴⁾(주)에이피엠엔지니어링

⁵⁾한국철도기술연구원 교통환경연구팀

⁶⁾(주)미세먼지연구소

(2020년 4월 27일 투고, 2020년 6월 8일 수정, 2020년 6월 15일 게재확정)

Estimation of PM_{2.5} Correction Factor for Optical Particle Counter in Ambient Air

Jong Bum Kim¹⁾ · Danbi Kim²⁾ · Sujin Noh³⁾ · Kwan Hoon Yoon⁴⁾ · Duckshin Park⁵⁾ · Jeong Joo Lee³⁾ · Jeongho Kim^{6),*}

¹⁾Sehaean Research Institute, ChungNam Institute

²⁾Air Quality Research Department, National Institute of Environmental Research (NIER)

³⁾Department of Occupational and Environmental Health, Yongin University

⁴⁾APM Engineering Co., Ltd.

⁵⁾Transportation Environmental Research Team, Korea Railroad Research Institute (KRRRI)

⁶⁾Fine Particle Lab, Co., Ltd.

(Received April 27 2020; Revised June 8 2020; Accepted June 15 2020)

Abstract

Various devices have been developed to the measurement of particulate matter pollutants, and Optical Particle Counter (OPC) that can be easily and quickly measured is widely used lately. The measured value by OPC is converted to weight concentration using the correction factor (CF). The calculation of CF is very important to improve the reliability and accuracy of OPC. In this study, the CF calculation study of light scattering laser photometer (model 8533, TSI) was carried out to measure in the atmospheric environment using 2 gravimetric devices and 3 light scattering laser photometer devices. Regression analysis and Tukey tests were used to significance the test of measurement devices. Measurements were carried out twice. There was a comparative analysis of measurement data between light scattering laser photometer and gravimetric devices in 1st measurement, and then the Evaluation of PM_{2.5} concentration corrected by CF performed in 2nd measurement. As a result of the significance analysis between light scattering laser photometer and gravimetric devices, the correlation between the same method was high, but the correlation between different methods was low. CF was calculated as 0.4258 based on the measurement results, and it is a similar level to previous studies at home and abroad. It is expected that these results can be used as basic data in the future study for air quality measurement research using light scattering laser photometer. Also, in order to improve the accuracy of the measurement techniques and the development of technology in the atmospheric environment, CF calculation research should be conducted continuously.

Keywords: Optical particle counter, Gravimetric method, Correction factor, Ambient air, PM_{2.5}

*Corresponding Author

Tel : +82-32-227-0033

E-mail : jeonghoflux@naver.com

1. 서론

대기 중 입자상물질은 다양한 형상을 가지며, 그 기원에 따라 밀도 및 화학적 구성성분이 서로 다른 특징을 나타낸다(Colbeck, 2013). 이와 같은 입자상 물질을 정확하게 측정하기 위해 중량법이 사용되어 왔다(Hinds, 1999). 중량법은 기체 펌프를 가동하여 발생하는 압력차를 이용해서 공기 중의 벌크형태의 에어로졸을 목적에 따라 다양한 크기의 입자 분립기에 통과시켜 입자를 분리한 다음에 여과지에 포집하는 방식을 가진다(Kulkarni et al., 2011). 포집 후의 여과지 무게와 포집 전의 여과지 무게를 칭량하여 그 차이를 통해 입자의 무게를 산정하고, 채취한 공기의 부피로 나누어 공기 중의 중량농도로 계산한다. 이 방법은 입자상 물질을 측정하는 가장 기본적인 방법으로 타 방법들에 비해 측정방법이 쉽고, 가장 정확한 값을 얻을 수 있다는 장점이 있다. 그러나 중량법은 실내환경에서 8시간 그리고 대기환경에서 24시간을 연속적으로 채취함에 따라 시간이 오래 소요되며 하나의 대표농도 값만 얻을 수 있고(Kang et al., 2018a), 공기 중에 입자 개수가 적은 경우에는 여과지에 채취되는 무게가 작아짐에 따라 여과지를 칭량하는 과정에서 오차가 발생할 수 있다.

이와 같은 중량법의 단점을 보완하기 위해 실시간 측정 장비의 개발과 보급이 이루어져 왔으며, 입자 계측에 광학(optic)과 미세계측(microscope)기술을 적용함으로써 공기 중의 입자를 크기별로 계수할 수 있게 되었다. 이와 관련된 계측기로 주사이동입자측정기(scanning mobility particle sizer, SMPS), 응축미세입자농도 측정기(condensation particle counter, CPC), 공기역학 입자분석기(aerodynamic particle sizer, APS) 및 광산란 입자계수기(optical particle counter, OPC) 등이 입자를 측정하는데 활용되고 있다(Ji and Bae, 2013). SMPS나 APS는 입자의 지름에 따른 개수 분포를 제공하는데, 중량농도로 환산하기 위해서는 실제 입자의 밀도를 입력해 주어야할 필요가 있으며, 이 과정에서 오차가 발생한다. 광산란 미세먼지 측정기는 광원을 입자에 조사하였을 때 발생하는 산란광을 계측하여 입자를 크기별로 계수한 다음에 중량농도로 환산하며, 사용자가 이 보정계수(correlation factor, CF)를 수정하여 사용할 수 있게

하고 있다(Shaim and Chy, 2013; Li et al., 2015). CF 값을 임의로 조정하는 것은 측정오차를 가져올 수 있으므로, CF 값은 입자의 특성과 조성에 따라 정확한 값이 적용될 필요가 있다(Gorner et al., 2012). 기존의 연구에서도 이러한 문제점이 제기되어 오고 있으나(Kim et al., 2010; Kim et al., 2014; Wallace et al., 2011), 광산란 입자 계수기는 SMPS와 APS에 비해 가격이 저렴하고 측정이 간편한 이유로 일상생활에서도 많이 사용되고 있다(Heim et al., 2008; Walser et al., 2017). 최근 고농도 미세먼지 사례 증가에 따라 국민적 관심과 우려가 증가하고 있는 상황에서 정확도가 낮은 측정 정보는 데이터의 신뢰성 결여와 국민적 혼란을 야기할 수 있다. 정부는 2019년 “미세먼지 저감 및 관리에 관한 특별법”을 시행하여 사전에 형식승인을 받지 아니한 미세먼지 간이측정기에 대해서는 제작이나 수입, 사용을 할 수 없게 하는 등 국가차원의 관리 체계 수립 및 데이터의 정확성 향상을 위한 노력을 기울이고 있다(ME, 2019). 때문에 미세먼지 측정장비에 대해 정확한 CF가 적용되고 있는지에 대한 검증이 매우 중요하며, 장비교정이 이루어진 실험실과 장비를 운영하는 대기환경 조건이 다르기 때문에 CF에 대한 적합성 평가가 지속적으로 이루어져야 한다(Kwon et al., 2015; Kang et al., 2018b). 이에 본 연구에서는 PM_{2.5} 측정에 활용되고 있는 광산란 미세먼지 측정기를 대상으로 도심지역의 대기환경 조건에서 기준 측정방법인 중량법과 비교 분석을 통해 신뢰성 높은 CF를 산정하고자 한다.

2. 연구 방법

2.1 측정장소 및 측정기간

CF 산정 실험을 위해 각각 부천시 도심과 인천시 외곽에 2곳의 장소를 선정하였다. 측정장소의 위치에 대한 정보를 Fig. 1에 나타냈다. 행정구역으로 부천시에 위치한 Site A의 경우 차량 운행이 활발한 도심 상업지역으로 일반적인 도시지역의 대기질을 가정한 장소이다. 행정구역으로 인천시에 위치한 Site B는 주변에 지형지물이 존재하지 않는



Fig. 1. Location of sampling sites, AWS and measurement view

개활지로 도심 배출 기여도가 낮을 것으로 판단되는 지역으로 가정한 위치이다. A와 B 두 지점 사이의 거리는 약 15 km로 두 지점의 중간에는 방재 기상관측소(automatic weather system, AWS)가 위치한다. 본 연구에서는 해당 AWS 자료를 측정기간의 기상정보로 활용하였다. 측정은 먼저 A 지점에서 2014년 2월 4일에서 2월 28일까지 25일간 실시하여 도시지역의 CF를 산정한 후, 이 값을 B 지점에 적용하여 2014년 3월 4일부터 3월 11일까지 7일간 검증평가를 진행하였다.

2.2 PM_{2.5} 측정방법

2.2.1 중량법

중량법으로 PM_{2.5}를 측정하기 위해 초미세먼지 연속채취기(model PMS-103, APM Engineering, Korea)를 사용하였다. PMS-103은 유입구에 PM₁₀ 분립장치와 PM_{2.5} 판성충돌 임펙터를 장착하여 설계 유량 16.7 L/min으로 흡입하도록 설계된 장치이다. PMS-103은 여과지 표면의 먼지부하에 기인한 압력손실 대비 채취유량을 일정하게 유지하기 위해 질량유량 제어기(mass flow controller, MFC)가 내장되어 있다. 시료채취 전 유량교정 및 누설시험을 실시하였

으며, 유량은 공정시험기준에 적합하도록 변이계수(coefficient of variation, CV)를 $\pm 2\%$ 이내로 유지하였다. PM_{2.5} 포집에 사용한 여과지는 온도 25°C, 습도 50% 이하로 유지되는 전자식 데시케이터(desiccator)에 24시간 이상 향량된 47 mm PTFE 멤브레인 필터(Zeflour, pore size 2 μm , Pall)를 사용하였고, 측정 후에는 측정 전과 동일한 조건에서 향량 후 향온향습실에서 10⁻⁶ g까지 측정이 가능한 전자저울을 활용 3회 이상 반복 칭량하여 중량농도를 산정하였다.

2.2.2 광산란법

광산란 미세먼지 측정기는 DustTrak (model 8533, TSI, USA)을 사용하였다. 이 장비는 유량 3.0 L/min으로 흡입시 0.1~15 μm 범위 입자를 최소 1초 단위로 0.001~150 mg/m³ 농도까지 측정할 수 있다. DustTrak 모델은 실내용 측정장비로 알려져 있으나, 본 연구에서는 대기 조건에서 사용하기 위하여 하우징을 제작하여 외기의 기상조건에 충분히 대응할 수 있도록 구성하였다. 유입구에는 PM_{2.5} 분립장치를 장착하였고, 하단에는 스마트히터가 구성되어 상대습도 50% 이하로 조절하였다. 측정 전 유입구 전단에는 1차 표준유량계(Model: Gilibrator-2, SENSIDYNE,

USA)를 연결하여 실제 유량을 확인하여 교정하였다. 유량 교정 후 HEPA filter (PN 801797, TSI, USA)를 입구에 장착하여 바탕값과 산란강도의 영점을 교정하였다. 광산란 미세먼지 측정기는 측정된 값을 농도정보로 환산하기 위한 CF가 설정되어 있는데 본 연구의 경우 초기 설정값인 1.0을 적용하여 연구를 수행하였다.

2.3 실험 및 CF 산정방법

CF 산정을 위한 실험은 PMS-103 2대(PMS#1, PMS#2)와 광산란 미세먼지 측정기 3대(D#1, D#2, D#3)를 24시간 연속측정하여 얻어진 1일 측정결과를 비교·분석하였다. Site A에서 중량법 장비와 광산란 미세먼지 측정기의 측정을 통해 장비간 상관성과 보정계수를 산정 후(pre-test), Site B에서 반복 측정을 통해 산정된 CF에 대한 검증(correlation field test)을 실시하였다. 데이터의 과학적 검증을 위해 평균농도(mean), 표준편차(standard deviation, S.D.), 표준오차(standard error, S.E.), 왜도(skewness, Sk), 첨도(kurtosis, Ku) 등을 활용하여 통계분석을 수행하였고, 유의수준 0.05에서 Tukey Test를 통해 측정장비들 간의 유의성 검사를 실시하였다. 측정값을 각각 종속변수와 독립변수로 단순회귀추정모형의 최소자승법(ordinary least squares)을 적용, 회귀직선을 작성하여 CF를 산정하였다. 측정자료의 통계처리에는 IGOR (Ver. 6.34, Wavemetrics, USA) 상용소프트웨어를 이용하였다.

3. 결과 및 고찰

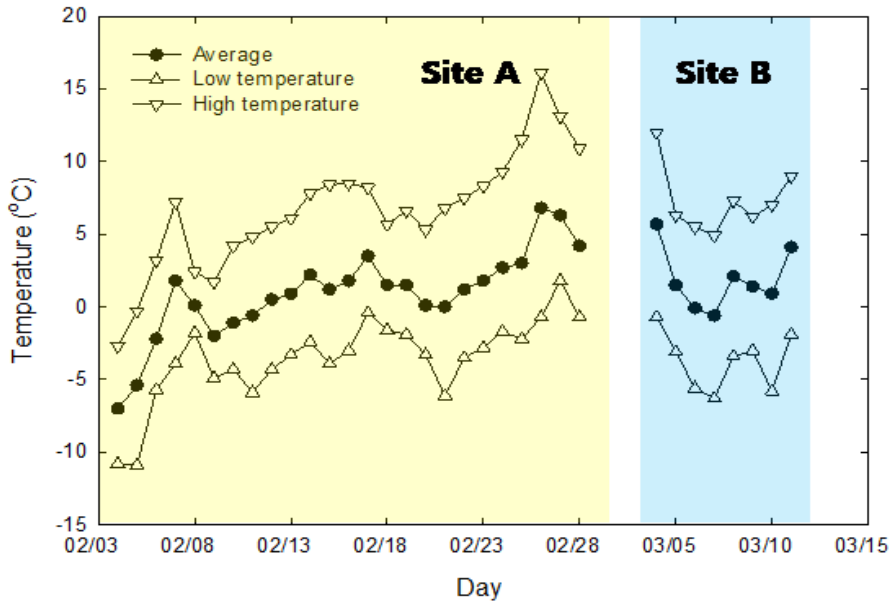
3.1 기상

Fig. 2는 측정기간의 온도변화와 풍향조건을 나타낸 것이다. 온도와 습도 그리고 풍향과 풍속의 기상인자는 $PM_{2.5}$ 측정에 매우 중요한 인자로 작용한다. 풍향과 풍속은 해당 지역에서 입자의 침강 및 확산과 같은 동적변화에 영향을 주며, 온도와 습도는 입자의 생성 및 성장등과 같은 응집, 응축 현상과 밀접한 관련이 있다(Liu, 1976). 측정지점별로 기상인자를 살펴보면 다음과 같다. Site A는 측정기간 평균온도 $0.9^{\circ}C$, 최저온도 $-10.9^{\circ}C$, 최대온

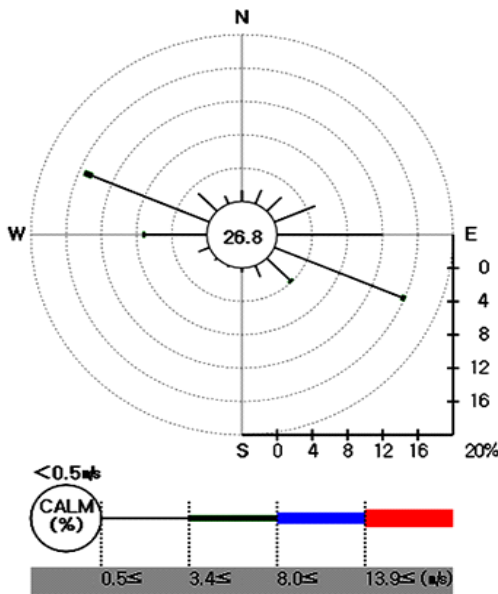
도 $16.1^{\circ}C$ 로 평균 일교차는 $10.2^{\circ}C$ 로 나타났고, 강수는 2월 8일 1 mm를 기록하였을뿐 측정기간동안 맑은날을 유지하였다. 평균 풍속은 $1.9 m/s$ 로 주풍은 동남풍과 북서풍이 비슷한 빈도를 보였다. Site B는 측정기간 평균온도 $1.9^{\circ}C$, 최저온도 $-6.3^{\circ}C$, 최고온도 $12.0^{\circ}C$ 이었고, 평균 일교차는 $11.0^{\circ}C$ 를 기록하였다. B 지점이 A 지점보다 평균온도와 최저온도는 소폭 상승한 것으로 나타났으나, 일교차는 유사한 수준으로 확인되었다. B 지점에서 강수는 측정기간 중 3월 9일 하루 관찰되었고, 강수량은 3 mm를 기록하였다. 평균풍속은 $2.3 m/s$ 이었으며, 주풍은 서북서 방향으로 확인되었다. A 지점과 B 지점의 측정기간이 다르지만 평균온도는 비슷한 수준에서 일교차가 큰 봄철 기온을 나타내었으며, 바람장은 A 지점에서 측정기간동안 동-서의 영향을 받았고, B 지점의 측정기간동안은 북-서의 영향을 받은 것으로 파악된다.

3.2 측정결과 및 통계 분석

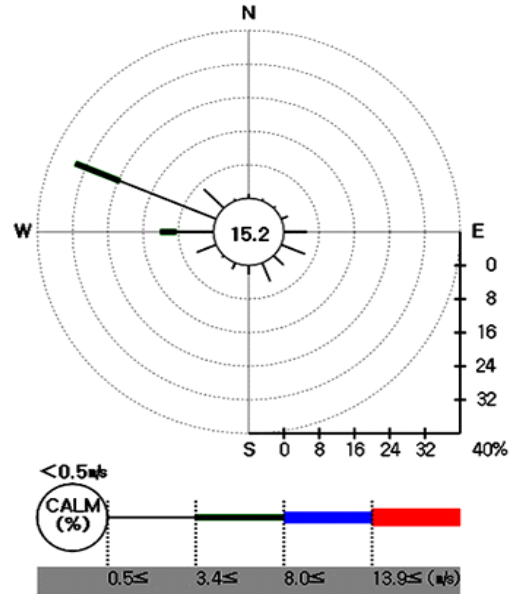
Fig. 3은 Site A에서 측정된 중량법과 광산란 미세먼지 측정기들의 비교분석 결과를 나타낸 것이고, 측정결과에 대한 통계분석 결과를 Table 1에 요약하였다. 각 장비별 $PM_{2.5}$ 측정결과 광산란 미세먼지 측정기는 D#1이 $77.1 \pm 36.6 \mu g/m^3$, D#2 $90.8 \pm 37.9 \mu g/m^3$, D#3 $90.5 \pm 44.3 \mu g/m^3$ 로 나타나 D#2와 D#3의 경우 매우 유사한 농도를 나타냈으나, D#1은 다소 낮은 농도값을 보였다. 중량법은 $36.9 \pm 16.3 \mu g/m^3$ 과 $38.6 \pm 17.6 \mu g/m^3$ 으로 유사한 농도와 경향성을 보였다. 기기별로는 광산란 미세먼지 측정기 $81.6 \mu g/m^3$, 중량법 $37.8 \mu g/m^3$ 으로 광산란 미세먼지 측정기가 중량법에 비해 2.2배정도 높게 나타났다. 표준편차는 광산란 미세먼지 측정기에서 36.6~44.3로 중량법의 16.3~17.6에 비해 농도값들의 편차가 2.3 배 정도 크게 나타났으며, 평균에 대한 표준오차 또한 유사한 수준으로 확인되었다. 측정자료의 왜도를 의미하는 Sk는 모두 양(positive)의 값으로 우측 비대칭인 형태를 가지는 것으로 파악된다. 표준정규분포의 분포의 크기와 폭을 나타내는 첨도인 Ku는 모두 양의 값을 보여 정규분포보다 분포의 폭이 좁은 것으로 나타났다. 특히 광산란 미세먼지 측정기에 비해 중량법의 Ku가 더 큰 값을 가지는 것으로 확인되었으며, 이것은 광산란 미세먼지 측



(a) Temperature



(b) Wind rose (Site A)



(c) Wind rose (Site B)

Fig. 2. Temperature, wind rose measured in both site a and b during measurement period

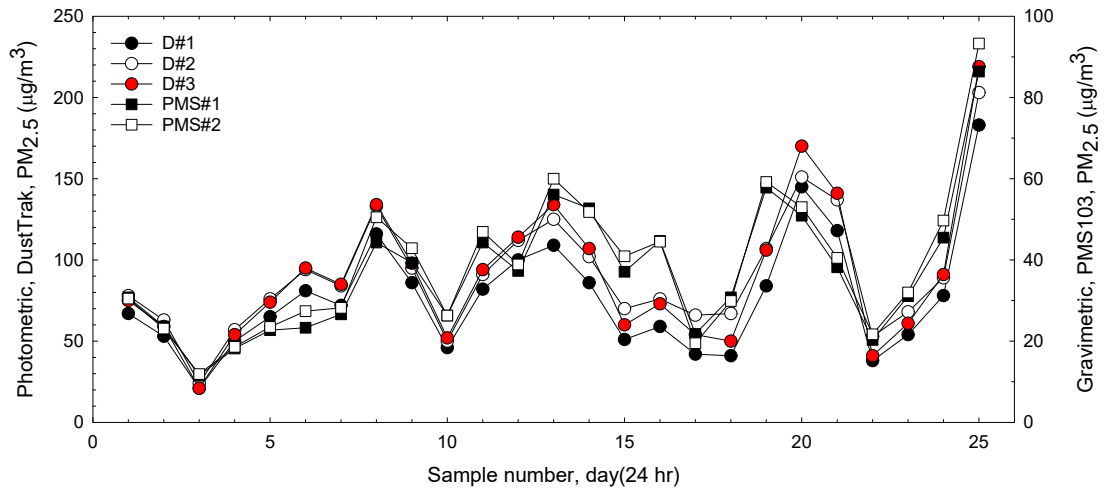


Fig. 3. PM_{2.5} distributions of each instruments measured in Site A

Table 1. Summary of PM_{2.5} measurement results of each instruments

Instrument	n ¹⁾	Mean	S.D.	S.E. ²⁾	Sk ³⁾	Ku ⁴⁾
D#1	25	77.1	36.6	7.3	1.00	0.84
D#2	25	90.8	37.9	7.6	0.97	1.06
D#3	25	90.5	44.3	8.9	1.00	0.83
PMS#1	25	36.9	16.3	3.3	1.00	1.16
PMS#2	25	38.6	17.6	3.5	1.02	1.36

$$^1)n : \text{sample number}, ^2)S.E. = \frac{\sigma}{\sqrt{n}}, ^3)Skewness = \frac{1}{n} \sum_{i=0}^{n-1} \left[\frac{X_i - \bar{X}}{\sigma} \right]^3, ^4)Kurtosis = \frac{1}{n} \sum_{i=0}^{n-1} \left[\frac{X_i - \bar{X}}{\sigma} \right]^4 - 3$$

정기의 측정자료 분포의 분산정도가 크고 반대로 중량법의 측정 자료는 평균에 수렴하는 정도가 높다고 볼 수 있다. 이와 같은 비대칭성과 첨도의 특성은 대기 중의 미세먼지의 분포가 대수정규분포 특성을 가지기 때문인 것으로 판단된다(Wang et al., 2013). 타 선행연구에서 본 연구에 사용된 광산란 미세먼지 측정기와 중량법을 대상으로 실내외에서 비교·분석결과 광산란법이 중량법에 비해 항상 과대 측정되는 것으로 보고하였고(Branis and Hoevorka, 2005), 동일 장비를 대상으로 중량법과 비교분석시에도 Kim et al. (2014)은 1.6배, Wallance et al. (2011)은 2.6배 높게 보고하였다. 측정값에 대한 분석결과 측정 농도간의 표준편차는 광산란 미세먼지 측정기

가 중량법에 비해 2.1~2.7배 크게 나타났으며, 표준 오차 또한 유사한 수준인 2.2~2.7배로 확인되는 등 본 연구 역시 선행연구들과 유사한 결과를 확인할 수 있었다.

3.3 Tukey test를 통한 장비간 유의성 검증

Site A에서 측정된 자료들에 대해 장비간 유의성 검사를 위해 유의수준 0.05에서 Tukey test를 실시하였으며, 결과를 Table 2에 요약하였다. 본 연구에서 얻어진 5대의 측정값을 Tukey test에 입력하여 총 10개의 비교 그룹으로 나열하여 고찰하였다. 두 장비간의 평균값의 차이를 나타내는 DIFF는 G10이 0.4로 가장 낮게 나타났고, G1에서 2.0로 나타

났다. G8과 G9가 각각 13.8과 13.4로 나타났고, 나머지는(G2~7) 38.3~54.1까지 상대적으로 높은 수치를 보였다. Tukey test 결과 전체 그룹에 대한 SE 값이 6.51로 산정되었고, q_c는 3.91로 나타났다. 각 장비들의 DIFF와 SE를 이용하여 q값을 산정한 결과 최종적으로 q_c 이내를 만족하는 G1, G8, G9, G10이 적합한 것으로 채택되었다. 이 결과는 동일 측정장비 즉, 중량법은 중량법과, 광산란 미세먼지 측정기는 광산란 미세먼지 측정기와 적합

도가 높았고, 중량법과 광산란 미세먼지 측정기간의 유의성은 기각되었다. 그러므로 이 결과를 통해 CF를 1로 사용했을 경우에는 중량법과 광산란 미세먼지 측정기간의 표본의 절대적인 차이 즉 평균값의 차이가 너무 크기 때문에 적합하지 않으며, 서로 다른 장비간의 적합한 결과를 얻기 위해서는 CF 계수를 조정하여 사용할 필요가 있다라는 것을 확인할 수 있었다.

Table 2. Results of Tukey test of PM_{2.5} in each instruments during the pre-test periods

No.	Group	Tukey test					
		DIFF ¹⁾	SE ²⁾	q ³⁾	q _c ⁴⁾	Conf ⁵⁾	P ⁶⁾
G1	PMS#1 vs PMS#2	2.0	6.51	0.314	3.91	1	9.99E-01
G2	PMS#1 vs D#1	40.4	6.51	6.206	3.91	0	2.36E-04
G3	PMS#1 vs D#2	54.1	6.51	8.322	3.91	0	3.74E-07
G4	PMS#1 vs D#3	53.8	6.51	8.266	3.91	0	4.48E-07
G5	PMS#2 vs D#1	38.3	6.51	5.892	3.91	0	5.54E-04
G6	PMS#2 vs D#2	52.1	6.51	8.007	3.91	0	1.04E-06
G7	PMS#2 vs D#3	51.7	6.51	7.952	3.91	0	1.24E-06
G8	D#1 vs D#2	13.8	6.51	2.115	3.91	1	5.67E-01
G9	D#1 vs D#3	13.4	6.51	2.060	3.91	1	5.93E-01
G10	D#2 vs D#3	0.4	6.51	0.055	3.91	1	1.00E-00

¹⁾DIFF: the difference between the group means, ²⁾SE: Mean square error, ³⁾q: q statistic for the pair

⁴⁾q_c: critical q value (P=0.05), ⁵⁾Conclusion: accept=1, reject=0, ⁶⁾P: P-value

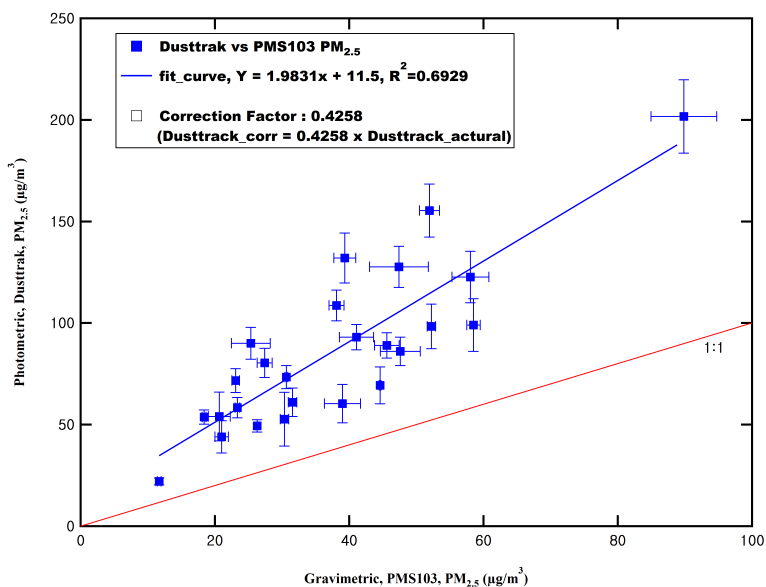


Fig. 4. Correction factor estimated using linear regression analysis (n=25)

3.4 보정계수(CF) 산정

A 지점에서 측정된 결과에 대하여 중량법(x-축)과 광산란 미세먼지 측정기(y-축)의 산포도를 Fig. 4에 나타냈다. 각 자료는 측정값의 편차를 고려하여 좌우 막대로 표준 편차 크기를 나타냈다. 주어진 그림에 1:1 라인을 표시하였으며, 측정 자료는 1:1 라인에서 y-축 방향으로 산포되어 있는 특징을 가진다. 측정된 자료(n=25)를 이용하여 중량법과 광산란 미세먼지 측정기에 대한 1차 회귀분석을 실시하였으며, 결정계수(r^2) 0.69 수준에서 두 장비간의 절대 값의 차이를 고려한 후에 CF를 0.4258로 산정하였다.

3.5 보정계수 검증 평가

CF 산정 후 산정된 값에 대한 검증을 위해 B site에서 2차 측정을 실시하였다. 2차 측정 또한 1차 측정과 마찬가지로 24시간 평균값을 사용하였고, 7일간 수행하였다. Fig. 5의 (a)는 2차 측정에서

측정된 중량법 장비 2대와 광산란 미세먼지 측정기 3대에 대한 일평균농도, 그리고 CF(0.4258)를 사용하여 보정된 농도를 나타낸 것이다. 측정 전체 구간에 대해 평균농도는 중량법이 26.1 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 나타났고, 광산란 미세먼지 측정기는 74.6 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 광산란 미세먼지 측정기 농도가 중량법에 비해 2.9배 높게 나타났으나, 보정계수 적용시 31.6 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 으로 두 농도값의 차이가 줄어들긴 했지만 역시 1.2배 정도 높았다. Fig. 5의 (b)는 보정계수를 반영한 값에 대한 상관성 검증을 위해 회귀분석을 실시하였고, 그 결과 결정계수(r^2)가 0.9557로 매우 높은 수치를 보였다.

1차 측정과 마찬가지로 2차 측정 역시 Tukey test를 통해 장비간 유의성 검사를 실시하였고, 그 결과를 Table 3에 나타냈다. 광산란 미세먼지 측정기와 중량법, 그리고 광산란 미세먼지 측정기와 CF를 사용하여 보정된 농도의 DIFF가 각각 48.43과 42.97로 차이가 크게 나타난 반면, 보정된 광산

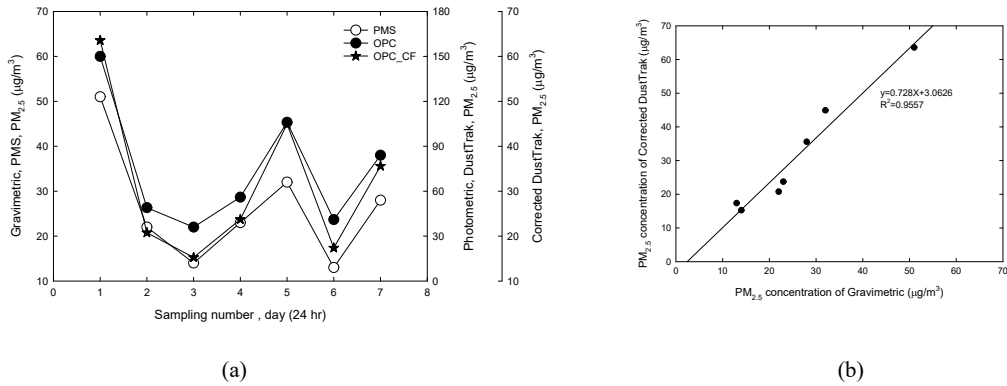


Fig. 5. PM_{2.5} concentration of light scattering laser photometer, gravimetric and corrected light scattering laser photometer and correlation analysis of PMS and corrected light scattering laser photometer

Table 3. Results of Tukey test of PM_{2.5} applied correction factor

Pair	Tukey test					
	DIFF ¹⁾	SE ²⁾	q ³⁾	q _c ⁴⁾	Con ⁵⁾	P ⁶⁾
DustTrak vs PMS103	48.43	10.25	4.7231	3.6093	0	0.00970
DustTrak vs D_corr	42.97	10.25	4.1906	3.6093	0	0.02160
D_corr vs PMS103	5.46	10.25	0.5326	3.6093	1	0.92513

¹⁾DIFF: the difference between the group means, ²⁾SE: Mean square error, ³⁾q: q statistic for the pair

⁴⁾q_c: critical q value (P=0.05), ⁵⁾Conclusion: accept=1, reject=0, ⁶⁾P: P-value

Table 4. Summary of the correction factors obtained by different investigators

Author	year	Correction Factor	Sampling air	Measured item	Compared method
Heal et al.	2000	0.45	Ambient air	PM _{2.5}	Gravimetric
Chung et al.	2001	0.33	Ambient air	PM _{2.5}	Gravimetric
Yanosky et al.	2002	0.45	Ambient air	PM _{2.5}	Gravimetric
Wallace et al.	2006	0.38	Ambient air	PM _{2.5}	Gravimetric
Kingham et al.	2006	0.37	Ambient air	PM _{2.5}	TEOM
Kim et al.	2014	0.57	Ambient air	PM _{2.5}	Gravimetric
This Study	2020	0.42	Ambient Air	PM _{2.5}	Gravimetric

란 미세먼지 측정기와 중량법 농도와의 DIFF는 5.46으로 낮게 나타났다. DIFF와 SE를 바탕으로 산정된 q값 또한 광산란 미세먼지 측정기와 중량법, 그리고 광산란 미세먼지 측정기와 CF를 사용하여 보정된 값 사이에서는 q_c를 만족하지 못하여 기각되었지만 보정된 광산란 미세먼지 측정기와 중량법 간의 q_c 값은 만족하는 것으로 나타났다. 회기분석과 Tukey test 결과를 바탕으로 CF 0.4258로 보정된 광산란 미세먼지 측정기 값은 중량법과 높은 일치율을 보이는 것으로 확인되었다.

Table 4는 그 동안 국내외에서 광산란 미세먼지 측정기 중 본 연구와 동일한 장비인 DustTrak을 대상으로 대기환경에서 PM_{2.5}에 대한 보정계수를 산정한 결과를 나타낸 것이다. 선행연구결과를 보면 Chung et al. (2001)이 0.33으로 가장 낮은 CF를 제시하였고, Kim et al. (2014)이 0.57로 가장 높은 계수를 제시하였지만 본 연구를 제외한 선행연구에서 제시된 CF의 평균은 0.43으로 본 연구에서 제시한 계수(0.42)와 유사한 수치이다. 광산란 미세먼지 측정기 보정에 사용되는 Arizona A1 test dust의 경우 bulk density가 0.5 g/cm³으로 일반 대기 시료와 맞지 않고 Kim et al. (2008)이 서울을 대상으로 PM10에 대한 밀도를 추정 결과 또한 봄(1.64 g/cm³), 가을(1.57 g/cm³), 겨울(1.92 g/cm³)의 밀도가 상이한 것으로 나타난 상황에 광산란 미세먼지 측정기 측정에 일괄적인 CF를 적용하는 것은 측정 신뢰도를 낮추게 된다. CF의 경우 각 업체별로 다년간

다양한 환경에서 축적된 정보를 기반으로 개발되고 있으나 앞서 언급한 주변환경과 특성에 따라 변화폭이 크므로 다양한 조건에서의 CF가 제시되어야 한다.

4. 결론

최근 고농도 미세먼지 사례 등의 증가로 인해 대기환경 및 생활환경에서 미세먼지측정에 대한 관심과 노력이 증가함에 따라 공정시험법인 중량법이나 베타선 흡수법에 비해 쉽고 빠르게 PM₁₀ 및 PM_{2.5}의 정보를 확인할 수 있는 광산란 미세먼지 측정기에 대한 수요가 증가하고 있다. 광산란 미세먼지 측정기는 각 기기별로 측정된 광학적 정보에 보정계수를 반영하여 중량농도로 환산하여 나타내기 때문에 장비의 정확한 사용을 위해서는 이 계수의 산정이 중요하다. 본 연구에서는 광산란 미세먼지 측정기 장비의 한 종류인 DustTrak을 대상으로 기준 장비인 중량법과 비교 분석을 실시하였고, 아래와 같은 결론을 도출하였다.

대기환경을 대상으로 동시 측정결과 중량법은 37.8 µg/m³, 광산란 미세먼지 측정기는 86.1 µg/m³로 약 2.3배 높은 농도 수준을 보였고, 표준편차 역시 중량법 17.0 µg/m³, 광산란 미세먼지 측정기 39.6 µg/m³으로 정확도와 정밀도면에서 큰 차이를 보였

다.

유의수준 0.05 수준에서 Tukey test를 수행하여 장비별 유의성을 검토하였고, 분석결과 중량법 장비와 광산란 미세먼지 측정기 간의 상관성과 유의성은 매우 낮게 나타난 반면, 동일 장비간 유의성은 높게 나타났다. Tukey test와 회귀분석을 통해 결정계수(r^2) 0.69 수준에서 보정계수 0.4258를 산정하였고, 이는 기존 선행연구결과의 평균(0.43)과 유사한 수준이다.

보정계수를 반영하여 2차 검증평가에서 중량법과 광산란 미세먼지 측정기 측정값간 회귀분석 결과 결정계수(r^2)가 0.9557로 매우 높게 나타났고, Tukey test 또한 만족하는 것으로 나타났다.

하지만 보정계수를 반영한 7일간의 2차 측정값 중 농도가 낮은 4일의 데이터는 유사한 농도를 보이나 상대적으로 높은 농도를 나타낸 나머지 3일의 경우 보정계수 적용에도 불구하고 큰 농도 차이를 보였다. 본 연구는 A 지점에서 보정계수를 산정하여 B 지점의 측정자료에 적용함에 따라 제한점으로 작용할 수 있으며, 이러한 오차를 줄이기 위해서는 동일한 지점에서 측정한 중량법으로 광산란 미세먼지 측정기의 값을 보정할 필요가 있다.

앞서 언급한 것과 같이 대기 중 입자상 오염물질은 다양한 요인과 주변환경에 따라 변하기 때문에 장기간 측정된 데이터를 바탕으로 보정계수가 적용되어야 한다. 본 연구에서 단편적이긴 하지만 도심지역 대기환경을 대상으로 CF 값을 제안하였고 본 자료는 향후 광산란 미세먼지 측정기를 활용한 대기질 측정연구시 기초자료로 활용될 수 있을 것으로 기대된다. 또한 앞으로 대기환경분야의 측정기술 정확도 향상과 기술 발전을 위해 CF 관련 산정연구가 지속적으로 이루어져야 할 것이다.

감사의 글

본 연구는 ㈜에이피엠엔지니어링과 ㈜미세먼지연구소의 지원으로 수행된 연구이며, 이에 감사드립니다.

References

- Branis, M., and Hovorka, J. (2005). Performance of a photometer DustTrak in various indoor and outdoor environments, *proc. Evaluations and Assessment*, 535.
- Colbeck, I., and Lazaridis, M. (2013). *Aerosol Science, Technology and Application*, 1st Ed., Wiley Press.
- Gorner, P., Simon, X., Bemer, D., and Liden, G. (2012). Workplace aerosol mass concentration measurement using optical particle counters, *Journal of Environmental Monitoring*, 4, 420-428.
- Heim, M., Mullins, B.J., Umhauer, H., and Kasper, G. (2008). Performance evaluation of three optical counters with an efficient “multimodal” calibration method, *Journal of Aerosol Science*, 39(12), 1019-1031.
- Hinds, W.C. (1999). *Aerosol technology*, 2nd Ed., Wiley & Sons.
- Ji, J.H., and Bae, G.N. (2013). Estimation of mass size distribution of atmospheric aerosols using real-time aerosol measuring instruments, *Particle and Aerosol Research*, 9(2), 39-50.
- Kang, D.S., Oh, J.E., Lee, S.Y., Shin, H.J., Bong, H.K., and Kim, D.S. (2018a). Development and performance evaluation of a real-time PM monitoring basaed on optical scattering method, *Particle and Aerosol Research*, 14(4), 107-119.
- Kang, D.S., Oh, J.E., Lee, S.Y., Shin, H.J., Bong, H.K., Choi, J., and Kim, D.S. (2018b). Development of drying systems for accurate measurement of particulate matter by means of optical particle measuring instruments, *Particle and Aerosol Research*, 14(4), 191-203.
- Kim, S. D., Kim, C.H., and Hwang, U.H. (2008). A study on the particles density estimation in Seoul Metropolitan, *Journal of Environmental Health Science*, 34(2), 131-136.
- Kim, J.H., Oh, J., Choi, J.S., Ahn, J.Y., Yoon, G.H., and

- Park, J.S. (2014). A Study on the correlation factor of optic scattering PM_{2.5} by Gravimetric method, *Journal of the Korean Society of Urban Environment*, 14(1), 41-47.
- Kim, S.J., Kang, H.S., Son, Y.S., Yoon, S.L., Kim, J.C., Kim, G.S., and Kim, I.W. (2010). Compensation of light scattering method for real-time monitoring of particulate matters in subway station, *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment*, 26(5), 533-542.
- Kulkarni, P., Baron, P.A., and Willeke, K. (2011). *Aerosol Measurement, Principle, Techniques, and Applications*, 3rd Ed., Wiley.
- Kwon, S.B., Jeong, W., and Park, D. (2015). Characteristics of PM₁₀ measured by different light-scattering instruments in public transport vehicles, *Particle and Aerosol Research*, 11(1), 1-8.
- Li, Y., Chen, Q., Zhao, H., Lin, W., and Tao, R. (2015). Variations in PM₁₀, PM_{2.5} and PM₁ in an urban area of the Sichuan Basin and their relation to meteorological factors, *Atmosphere*, 6(1), 150-163.
- Liu, B.Y.H. (1976). *Aerosol generation, measurement, sampling, and analysis*, 1st Ed., Academic Press.
- ME (Ministry of Environment) (2019). *Special act on the reduction and management of fine dust*.
- Shaim, M.H., and Chy, D.K. (2013). Real time correlation filter for optical particle counter, *Optical and Quantum Electronics*, 45(2), 1-19.
- Walser, A., Sauer, D., Spanu, A., Gasteiger, J., and Weinzierl, B. (2017). On the parametrization of optical particle counter response including instrument-induced broadening of size spectra and a self-consistent evaluation of calibration measurements, *Atmospheric Measurement Techniques*, 10, 4341-4361.
- Wallace, L.A., Wheeler, A.J., Kearney, J., Ryswyk, K.V., You, H., Kulka, R.H., Rasmussen, P.E., Brook, J.R., and Xu, X. (2011). Validation of continuous particle monitors for personal, indoor, and outdoor exposures, *Journal of Exposure Science and Environmental Epidemiology*, 21(1), 49-64.
- Wang, X., Chen, R.J., Chen, B.H., and Kan, H.D. (2013). Application of statistical distribution of PM₁₀ concentration in air quality management in 5 representative cities of China, *Biomedical and Environmental Science*, 26(8), 638-646.