

PM₁₀ 연속자동측정기(β -ray) 등가성평가 및 비교관측 연구

정원석 · 고희정* · 서원익 · 정지영 · 오상민 · 부경은

국립기상과학원 기후연구부

(투고 2023년 2월 21일, 수정 2023년 3월 21일, 게재확정 2023년 3월 22일)

PM₁₀ β -ray attenuation samplers (β -ray absorption method) equivalence evaluation and comparatively observed study

WonSeok Jung, Hee-Jung Ko*, Wonick Seo, Jiyoung Jeong, Sang Min Oh, Kyung-On Boo
Climate Research Department, National Institute of Meteorological Sciences, Jeju, Republic of Korea

(Received February 21 2023; Revised March 21 2023; Accepted March 22 2023)

Abstract

The Asian dust observation network operates β -ray attenuation samplers to measure PM₁₀ concentrations. In addition, equivalence evaluation and accuracy inspection(Precision Tests) are conducted every year for the reliability of data. β -ray attenuation samplers(16 units) were comparatively observed from May to June 2020 and from July to December 2021. During the observation period, the average daily temperature was the lowest at 6.4°C in December and the highest at 27.3°C in August. The average daily humidity ranged from 60% to 100%, but the average daily humidity was over 75% from July to September. The minimum value of the PM₁₀ Gravimetric method was 5.0 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, the maximum value was 53.4 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, and the average value was 17.8 $\mu\text{g}/\text{m}^3$. The equivalence evaluation results of the PM₁₀ Gravimetric method and β -ray attenuation samplers satisfied the criteria (slope: 1 ± 0.1 , intercept: 0 ± 0.5). A relative error analysis between the PM₁₀ Gravimetric method and β -ray attenuation samplers equipment showed that the relative error increased when the concentration was low and the temperature and humidity were high. In addition, in the β -ray attenuation samplers 5-minute interval observation data in May 2020, a relatively large Standard deviation was shown as an average maximum $\pm 23.4 \mu\text{g}/\text{m}^3$ and a minimum $\pm 15.2 \mu\text{g}/\text{m}^3$. At standard deviations of 10% and 90%, equipment with high variability (deviation) was measured at 6 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ and 61 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, and equipment with low variability was measured at 12 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ and 47 $\mu\text{g}/\text{m}^3$. It was confirmed that concentration differences occurred due to differences in variability for each equipment.

Keywords: PM₁₀, β -ray absorption method, Gravimetric method, Relative error, variability(deviation)

* Corresponding author.

Tel : +82-64-780-6634, Fax : +82-64-738-9072

E-mail : khj0614@korea.kr

1. 서론

황사는 과거부터 계속되어 온 자연현상으로 중국 북동부지역의 급속한 경제성장과 산업화에 다량의 오염물질(오존, 일산화탄소, 이산화황, 질소산화물 등)이 입자에 흡착된다(Song et al., 2004; Song and kim, 2005; Kim, 2008; Yoon et al., 2019). 풍하측에 위치한 우리나라와 일본, 러시아 등 주변국 및 태평양을 지나 미국까지 영향을 미친다(Eguchi et al., 2009; Yu et al., 2019). 황사입자는 주로 직경 10 μm 이하의 모래 먼지이며 작은 크기 때문에 호흡기로 유입되어 천식, 기관지염, 폐렴, 알레르기 비염과 같은 호흡기 질환을 유발할 수 있다. 또한 사회, 경제, 환경적 측면에 부정적인 영향을 미치기 때문에 지속적인 감시와 신속한 정보제공을 통해 피해를 최소화하는 것이 중요하다(Lee et al., 2013; Goudie, 2014).

이에 황사와 같은 입자를 관측하는 자동 측정 방법은 중량법, 광산란법, 광투과법, 베타선 흡수법, 테이퍼소자 진동법 등이 있다. 이 중에 베타선 흡수법은 1분에서 1시간 단위로 실시간 측정이 가능하고, 정밀성, 수분 영향의 보상 및 샘플링(sampling) 타입의 적용이 가능하여 미세먼지(PM_{10} , $\text{PM}_{2.5}$ 등) 측정에 널리 사용되고 있다(Choi et al., 2012).

기상청에서는 황사 관측을 위하여 연속자동측정기(베타선 흡수법)를 전국 29개소를 구축하여 PM_{10} 을 관측하고 있다(Kim et al., 2019). 환경부 및 타기관의 대기오염측정망에서도 베타선 흡수법을 많이 적용하고 있다. 또한 2017년부터 시행된 「환경측정기기의 형식승인·정도검사 등에 관한 고시」 따라서 등가성평가를 시행하였고, 2018년도부터 기상청 및 국립기상과학원에서도 등가성평가를 시행하고 있다. Chang et al. (2001)와 Chang and Tsai. (2003)에 따르면 연속자동측정기는 빛의 감쇄 계수를 질량으로 환산한 간접적인 방법이므로 습도 등 관측환경에 의한 오차 문제를 제시하였고, 관측소가 확대됨에 따라 장비 측정 데이터의 신뢰성 및 정확도가 주요 과제로 언급하였다(NIER, 2015; Park et al., 2017).

본 연구에서는 동일한 조건에서 기준채취기와 연속자동측정기의 등가성평가를 실시하고, 연속자동측정기간의 상대오차 및 표준편차를 이용하여 비교 분석하였다.

2. 연구방법

2.1 장소 및 기간

본 연구는 제주도 서귀포시 국립기상과학원 실험동(33° 15'N, 126° 31'E, 180 m)에서 이루어졌으며, 관측지점은 주변 300 m 이내에 높은 건물이 없고, 외부에 무인자동기상관측장비(Automatic Weather Station; AWS)가 설치되어 온도, 습도와 같은 기상 상태를 확인할 수 있다.

관측에 사용한 기기는 PM_{10} 연속자동측정기(FH62C14, Thermo Fisher Scientific Inc, USA, β -ray 법) 총 16대이며, 질량농도 비교를 위하여 기준채취기(APM. PMS-104, Korea, Class I, PM_{10} sampler)를 활용하였다. 총 관측 기간은 8개월로, 2020년 5월부터 6월까지 5대, 2021년 7월부터 12월까지 11대를 사용하여 비교 관측하였다.

2.2 측정 및 비교 방법

연속자동측정기는 베타선(탄소동위원소-14 : ^{14}C)을 투과시켜 단위 체적 당 PM_{10} 농도($\mu\text{g}/\text{m}^3$)로 표출된다(National Institute of Meteorological Sciences, 2014). 장비 이상 유무를 확인을 위해 온도·기압, 교정 필터 스펀드리프트(Calibration Kit: Zero foil, Span foil), 유량($16.7\text{ L}/\text{min}(\pm 2\%, 0^\circ\text{C}, 1\text{ 기압})$), 공시험법(Zero back ground test) 순으로 사전점검을 진행하였다(환경측정기기의 형식승인 정도검사 등에 관한 고시, 대기오염공정시험기준(ES 01605.1b)).

연속자동측정기와 기준채취기 모두 일 평균은 09 KST(00 UTC)부터 다음날 09 KST(+1 Day UTC)로 관측한 데이터를 사용하였다. 연속자동측정기의 1시간 데이터는 5분 데이터를 가지고 산술평균으로 계산하였고, 일 평균값은 1시간 평균이 24 ± 1 시간(개)를 가지고 산술평균하여 사용한다.

기준채취기는 테프론필터(ADVANTEC, Toyo Kaisha, Ltd., PF050, 47 mm, 5.0 μm , Tokyo, Japan)를 사용하여 PM_{10} 시료를 채취하였다. 채취기의 공기 유속은 MFC가 부착된 자동 시스템을 사용하여 시작부터 종료까지 지속해서 $16.7\text{ L}/\text{min}(\pm 2\%, \text{대기압})$ 을 유지하였다. 표집 시간은 24시간 연속 표집하였으며, 표집 전·후의 필터 무게 차이를 이용하여 중량농도($\mu\text{g}/\text{m}^3$)를 산출하였다.

연속자동측정기와 기준채취기의 일별 관측데이터

를 비교하고자 상대오차(Relative error, RE, %) 방법을 이용하여 분석하였다. 상대오차는 식 (1)을 이용하여 계산하였고, 여기서 B_D 는 각 연속자동측정기에 대한 일 평균값, C_D 는 같은 날에 관측된 기준채취기의 일 평균값이다.

$$RE(\%) = \frac{B_D - C_D}{C_D} \times 100 \quad (1)$$

3. 실험 및 고찰

3.1 기상 및 관측데이터 특성

측정 기간 중 장비별 관측 기간 및 기상 데이터, 관측 농도 평균을 표 1에 나타내었다. 장비별 관측 기간에 따라 계절의 영향인 온·습도 및 관측 농도의 특성이 잘 나타내고 있다. 특히 여름철 2021년 7월부터 9월까지 β -ray 6~9 관측장비의 온·습도가 평균 24.2°C, 90.7%로 가장 높게 나타났으며, 그 외 관측 기간에서는 평균 15.1°C, 73.5%로 나타났다. 연속자동측정 장비별 농도에서 여름철 장비인 β -ray 6~9의 평균 농도는 12.5 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 이며, 장비별 최대 농도는 β -ray 7이 13.0 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, 최저 평균 농도 값은 β -ray 6이 11.8 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 으로 나타났다. 그 외 기간에서 모든 장비 평균은 대략 20 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 이상이며, 장비

별로 최대 농도는 β -ray 10의 27.9 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 최소 농도는 β -ray 16의 18.4 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 이었다.

그림 1은 관측 비교 기간(2020년 5~6월, 2021년 7~11월)에 관측된 기준채취기의 하루평균 PM₁₀ 농도와 관측일의 하루평균 온·습도 분포도를 나타내었다. 데이터는 월별특성 확인을 위하여 연도를 제외하고 나타내었다. 그림1(a)에서와 같이 기준채취기의 PM₁₀ 농도에서는 최솟값 5.0 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 에서부터 최댓값 53.4 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, 평균 17.8 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 나타났다. 관측 기간에 다양한 농도의 범위를 보였으나, 7~9월은 대부분 평균보다 낮은 값을 보였다. Lee et al. (2010)에 의하면, 한반도 계절별 대기오염물질 농도는 겨울철 지표면의 냉각 효과로 혼합고가 낮고 대기 정체로 높은 농도를 보이며, 여름은 강수빈도 증가와 높은 혼합고에 의해 대기확산이 이루어져 낮은 농도를 보인다. 따라서 본 연구 결과에서도 겨울철 PM₁₀ 농도가 높고 여름철에는 낮은 농도를 보였다. 본 연구 결과에서도 겨울철의 PM₁₀의 농도가 높고 여름철에 농도가 낮았다. 관측일에 대한 하루평균 온도(그림 1(b))는 12월이 6.4°C로 가장 낮았고, 8월에 27.3°C로 가장 높았다. 또한 그림 1(c)는 습도인 경우, 60~100% 사이의 습도를 보였으나, 특히 7~9월 전체가 대부분 하루평균 습도가 75% 이상으로 조사되었다.

Table 1. Average data of observation period, temperature and humidity, and observed concentration by Beta-ray equipment.

SET (No.)	Sampling date (season)	Avg. Temp (°C)	Avg. Humidity (%)	Avg. wind speed (m/s)	β -ray Avg. PM ₁₀ ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	G.M. PM ₁₀ ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)
β -ray1	2020.05.06.~05.21.	17.6±1.5	72.1±17.4	2.5±1.5	26.5±13.7	24.0±13.1
β -ray2	2020.05.05.~05.21.	18.0±1.6	76.6±19.1	2.1±1.3	23.6±12.3	22.3±11.8
β -ray3	2020.05.05.~05.21.	17.8±1.5	77.2±17.9	2.2±1.4	24.8±11.9	22.8±11.7
β -ray4	2020.05.05.~05.21.	17.7±1.6	75.4±18.5	2.4±1.4	21.2±10.8	21.8±11.2
β -ray5	2020.05.26.~06.09.	20.1±2.1	81.8±13.1	1.8±1.0	22.5±9.6	21.1±9.3
β -ray6	2021.07.19.~09.26.	24.6±1.5	90.7±5.8	2.6±1.4	11.8±4.9	10.8±4.6
β -ray7	2021.07.29.~09.27.	24.4±1.5	90.6±6.5	2.4±1.2	12.4±5.1	11.6±5.0
β -ray8	2021.08.26.~09.27.	23.8±1.3	90.5±6.1	2.8±1.6	12.7±5.2	11.4±5.2
β -ray9	2021.08.28.~09.26.	23.9±1.3	90.8±5.5	2.6±1.2	13.0±5.6	11.1±5.5
β -ray10	2021.10.15.~11.08.	16.0±2.1	72.3±8.6	1.8±1.3	18.4±7.1	16.4±6.5
β -ray11	2021.10.23.~11.11.	15.2±2.4	71.7±6.4	2.2±1.4	17.8±7.2	17.3±7.0
β -ray12	2021.10.23.~11.10.	15.3±2.3	70.4±6.0	2.1±1.3	18.6±8.1	17.2±7.3
β -ray13	2021.11.17.~12.06.	11.5±2.2	70.9±7.2	1.7±0.8	26.8±14.4	26.0±14.6
β -ray14	2021.11.18.~12.06.	11.3±2.3	70.6±7.4	1.8±0.8	27.9±15.5	24.7±14.4
β -ray15	2021.11.23.~12.12.	10.9±1.9	70.8±8.4	2.0±0.7	20.6±11.6	20.5±12.6
β -ray16	2021.11.27.~12.15.	10.2±2.2	72.4±8.8	2.0±0.8	16.4±7.2	16.4±7.9

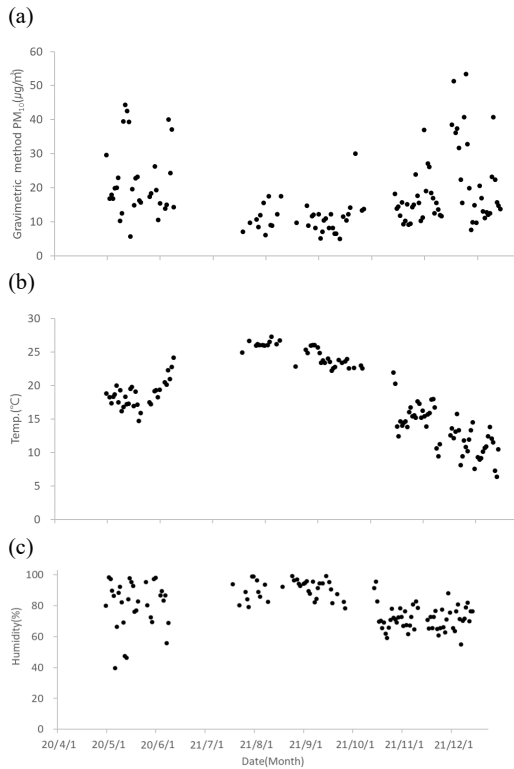


Figure 1. Average daily PM₁₀ Gravimetric method and temperature humidity on the observation day

3.2 장비별 등가성평가 및 비교

기준채취기는 매년 2020년 1월과 2021년 2월에 국가기준측정시스템(NRM, National Reference Method system)에서 국가기준장비와 비교 및 검증하였다. 검증된 기준채취기와 연속자동측정기를 동시에 측정하여 등가성평가를 진행하였으며, 기준채취기와 연속자동측정기의 일별 데이터를 가지고 회귀분석법으로 등가성을 평가하였다(그림2).

모든 연속자동측정기가 등가성평가 기준에 만족하였고, 기울기는 평균 1.04, 절편은 최대 2.5이다. β-ray 16이 기울기가 0.91로 최솟값을 보였고, β-ray 10이 최대 1.08로 나타났다. 절편에서는 β-ray 12가 최소 -0.02, 최대 β-ray 3에서 +2.5로 나타내었다. 16대 연속자동측정기 전체 기울기 평균은 1.00(±0.05)이며, 절편은 평균 1.29(±0.63)이었다. 표준편차 범위(기울기 0.95~1.05, 절편 1.91~0.66)에 분포하는

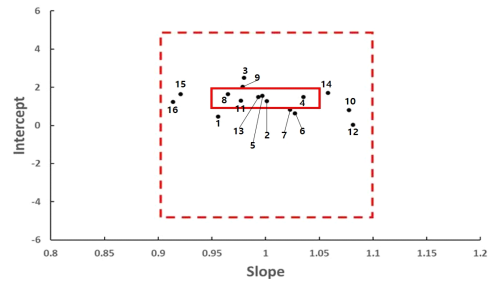


Figure 2. Equivalent evaluation results of PM₁₀ Gravimetric method for β-ray attenuation samplers. The dotted line box denotes the acceptance limits

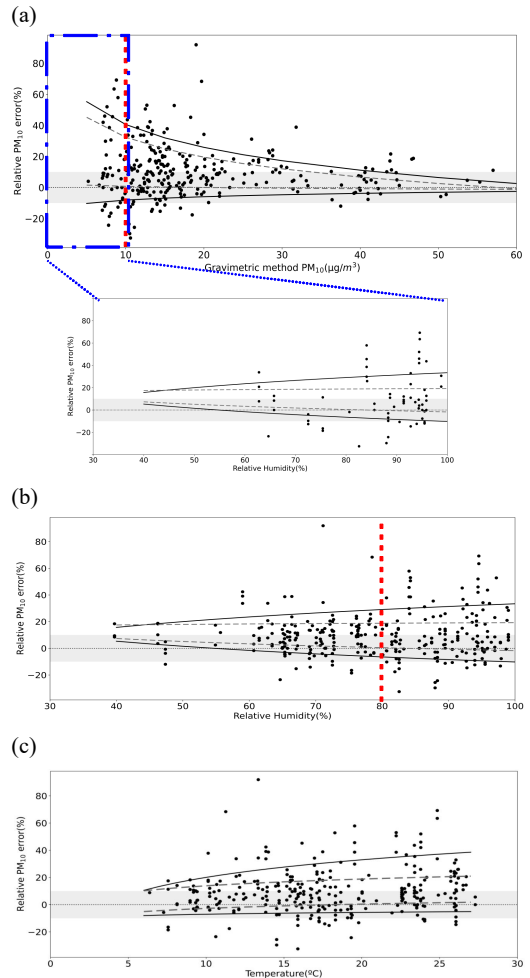


Figure 3. Correlation between errors of PM₁₀ Gravimetric method(a), Relative humidity(b) and Temperature(c)

연속자동측정기는 전체 16개 중 7개로 전체의 43%가 표준편차 내에 있었다. 기울기와 절편 모두 한곳에 군집하여 분포하고 있는 것으로 보아 장비에 대한 재현성이 좋은 것으로 판단된다.

식 (1)을 이용하여 기준채취기 농도와 온도, 습도를 기준으로 상대오차 값을 그림 3에 나타내었다. 상대오차 값의 10%, 90%에 대한 로그 추세선(Logarithmic)을 실선으로 25%, 75%의 로그 추세선을 점선으로 표현하였다.

또한 대기오염공정시험 기준 등가성평가에서 기울기의 오차범위 ± 0.1 , 즉 EPA의 비교 만족 조건인 오차율 $\pm 10\%$ (EPA 40 CFR Appendix K to Part 50, Interpretation of the National Ambient Air Quality Standards for Particulate Matter)를 그림 3에 회색 음

영으로 나타내었다. 그림 3(a)에서 질량농도가 낮을수록 상대오차 값이 크게 나타났으며, 특히 $10 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 이하에서 상대오차값이 더 큰 것을 확인하였다. 또한 질량농도 $10 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 이하의 상대오차값을 습도 기준으로 나열한 결과 습도 80% 이상은 약 78%를 차지하였다. 또한 전체 관측 시료의 약 83%가 기준채취기 농도기준 $25 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 이하에 분포하고 있으며, 상대오차 $\pm 10\%$ 내에서는 전체 중에 57.5%가 $10 \sim 20 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 에 집중되어 있었다.

그림 3(b)에서 습도가 증가함에 따라 추세선이 10%와 90%에서 상대오차가 큰 증가세를 보였다. 특히 추세선 90% 이상 및 습도 80%일 때 상대오차 값이 크게 나타났다. 일반적으로 습도가 높을 때 대기중의 수분함량의 증가로 인해, 흡습성 입자상 물질의 성장시켜 에어

Table 2. Average, 10% and 90% values of β -ray sampler PM₁₀ ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)

Date	G-M PM ₁₀	Type	β -ray 1		β -ray 2		β -ray 3		β -ray 4	
			Average PM ₁₀ concentrat ion \pm StdDev.,	10% and 90% quantile	Average PM ₁₀ concentrat ion \pm StdDev.,	10% and 90% quantile	Average PM ₁₀ concentrat ion \pm StdDev.,	10% and 90% quantile	Average PM ₁₀ concentrat ion \pm StdDev.,	10% and 90% quantile
5/12	44.4	5min (1h)	42.6 \pm 22.4 (42.6 \pm 13.4)	16 to 67 (28 to 63)	45.0 \pm 23.3 (45.0 \pm 11.4)	20 to 77 (35 to 61)	41.0 \pm 21.1 (41.0 \pm 11.4)	16 to 64 (31 to 59)	37.4 \pm 17.4 (37.4 \pm 8.9)	20 to 57 (30 to 45)
5/13	42.6	5min (1h)	41.5 \pm 38.8 (43.4 \pm 23.8)	6 to 99 (16 to 71)	44.7 \pm 35.3 (44.7 \pm 24.3)	15 to 100 (20 to 80)	42.3 \pm 38.1 (42.3 \pm 24.2)	9 to 107 (18 to 72)	37.5 \pm 18.4 (37.5 \pm 21.6)	15 to 94 (19 to 66)
5/14	39.4	5min (1h)	46.8 \pm 24.7 (46.8 \pm 13.8)	25 to 79 (28 to 59)	43.5 \pm 14.0 (44.10 \pm 9.1)	29 to 56 (33 to 56)	46.6 \pm 18.0 (46.6 \pm 10.8)	27 to 74 (31 to 57)	40.8 \pm 12.9 (40.8 \pm 8.3)	29 to 51 (31 to 49)
5/15	5.7	5min (1h)	6.7 \pm 10.9 (8.6 \pm 7.3)	-7 to 20 (-2 to 15)	7.8 \pm 11.3 (9.1 \pm 6.6)	-3 to 20 (2 to 15)	7.1 \pm 15.3 (7.1 \pm 9.0)	-9 to 22 (-4 to 16)	7.6 \pm 9.3 (7.6 \pm 5.7)	-3 to 18 (1 to 15)
5/16	19.6	5min (1h)	21.1 \pm 18.1 (21.8 \pm 10.5)	-1 to 50 (11 to 34)	19.7 \pm 13.0 (17.0 \pm 9)	0 to 35 (9 to 33)	20.3 \pm 14.9 (20.3 \pm 8.9)	-1 to 39 (10 to 32)	17.0 \pm 7.8 (17.0 \pm 4.6)	6 to 26 (11 to 23)
5/19	23.2	5min (1h)	27.3 \pm 30.5 (27.7 \pm 15.6)	0 to 81 (10 to 47)	28.8 \pm 22.9 (28.8 \pm 12.3)	9 to 71 (15 to 48)	28.4 \pm 27.0 (28.4 \pm 13.2)	5 to 77 (13 to 45)	25.2 \pm 18.0 (25.2 \pm 10.6)	10 to 61 (13 to 40)
5/20	16.3	5min (1h)	16.1 \pm 18.8 (17.5 \pm 13.1)	0 to 65 (4 to 39)	17.9 \pm 9.1 (17.9 \pm 5.9)	8 to 28 (13 to 24)	16.7 \pm 15.1 (16.7 \pm 10.7)	4 to 48 (7 to 37)	15.1 \pm 6.0 (15.1 \pm 3.4)	8 to 24 (12 to 19)
avg.	27.3	5min (1h)	28.8 \pm 23.4 (21.7 \pm 13.1)	6 to 61 (14 to 47)	29.6 \pm 18.4 (21.2 \pm 9.1)	11 to 55 (18 to 45)	28.9 \pm 21.3 (21.8 \pm 10.9)	7 to 59 (15 to 45)	25.8 \pm 15.2 (19.1 \pm 6.2)	12 to 47 (16 to 37)
Date	G-M PM ₁₀	Type	β -ray 13		β -ray 14		β -ray 15		β -ray 16	
			Average PM ₁₀ concentrat ion \pm StdDev.,	10% and 90% quantile	Average PM ₁₀ concentrat ion \pm StdDev.,	10% and 90% quantile	Average PM ₁₀ concentrat ion \pm StdDev.,	10% and 90% quantile	Average PM ₁₀ concentrat ion \pm StdDev.,	10% and 90% quantile
11/30	14.9	5min (1h)	11.1 \pm 15.9 (11.1 \pm 15.1)	-7 to 38 (-5 to 32)	13.8 \pm 12.8 (13.8 \pm 11.6)	2 to 32 (4 to 32)	14.5 \pm 10.8 (14.5 \pm 9.6)	4 to 31 (7 to 29)	10.5 \pm 13.0 (10.5 \pm 12.4)	-4 to 32 (-2 to 31)
12/1	9.7	5min (1h)	7.9 \pm 17.1 (7.8 \pm 16.3)	-12 to 36 (-9 to 31)	10.6 \pm 6.4 (10.5 \pm 4.7)	3 to 21 (5 to 17)	11.2 \pm 5.6 (11.1 \pm 4.2)	4 to 19 (5 to 15)	7.6 \pm 11.3 (7.5 \pm 10.8)	-4 to 26 (-3 to 23)
12/3	20.6	5min (1h)	22.7 \pm 21.5 (22.7 \pm 21.4)	1 to 52 (3 to 51)	20.9 \pm 13.9 (20.9 \pm 13.5)	6 to 42 (8 to 41)	20.0 \pm 8.7 (20.0 \pm 7.5)	10 to 33 (12 to 31)	19.7 \pm 16.6 (19.7 \pm 16.4)	2 to 43 (5 to 41)
12/4	17.0	5min (1h)	20.1 \pm 13.0 (22.1 \pm 12.5)	8 to 41 (10 to 40)	18.9 \pm 6.4 (18.9 \pm 4.6)	11 to 28 (14 to 25)	17.3 \pm 10.1 (17.3 \pm 8.9)	5 to 29 (7 to 26)	17.5 \pm 9.4 (17.5 \pm 8.4)	7 to 29 (10 to 24)
12/5	13.1	5min (1h)	14.9 \pm 10.2 (14.9 \pm 9.4)	4 to 30 (6 to 29)	14.3 \pm 7.7 (14.3 \pm 5.7)	7 to 22 (8 to 22)	14.5 \pm 7.9 (14.5 \pm 6.3)	5 to 24 (7 to 23)	12.7 \pm 8.1 (12.7 \pm 6.6)	3 to 21 (5 to 20)
12/6	11.1	5min (1h)	15.3 \pm 15.7 (15.3 \pm 15.1)	0 to 41 (1 to 39)	13.0 \pm 8.8 (13.0 \pm 7.5)	-1 to 24 (4 to 22)	10.9 \pm 11.9 (10.9 \pm 10.8)	-8 to 26 (-3 to 24)	13.1 \pm 12.9 (13.1 \pm 12.2)	-3 to 29 (-1 to 27)
avg.	14.4	5min (1h)	15.3 \pm 15.6 (15.7 \pm 15.0)	-1 to 40 (1 to 37)	15.3 \pm 9.3 (15.2 \pm 7.9)	5 to 28 (7 to 27)	14.7 \pm 9.2 (14.7 \pm 7.9)	3 to 27 (6 to 25)	13.5 \pm 11.9 (13.5 \pm 11.1)	0 to 30 (2 to 28)

로졸 질량농도를 높이는 역할을 한다고 알려져 있다 (Jung et al., 2013). 또한 Shin et al. (2012)에서도 높은 습도에서 중량법에 비해 베타선 흡수법이 높은 질량농도를 보였다. 따라서 본 연구에서도 문헌들과 같은 결과를 보였다. 이는 기준채취기 즉 중량법의 경우, 필터 향량(습도 40%이하) 후 질량농도를 산출하기 때문에 연속자동측정기와의 오차가 발생한 것으로 판단된다.

그림 3(c)는 온도와 상대오차 간의 비교 그래프이며, 대체로 온도가 증가 시 90% 로그 추세선 증가 폭이 크게 보였다. 따라서 결과적으로, $10 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 이하 및 습도 80% 이상의 값에서 장비 간 오차가 크게 나타났다.

3.3 연속자동측정기의 변동성

2020년 5월과 2021년 11~12월 중 온·습도가 낮은 연속자동측정기 각각 4대씩 총 8대를 선정하였다. 표 2는 PM_{10} 5분 및 1시간 데이터의 평균, 표준편차, 분율의 10%, 90% 값을 나타내었다.

5월의 연속자동측정기의 전체 평균 중 5분 데이터의 표준편차는 β -ray 1이 $\pm 23.4 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 높았고, β -ray 4에서는 $\pm 15.2 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 낮은 표준편차를 보였다. 또한 11~12월에서는 5분 데이터의 표준편차는 β -ray 13이 최대 $\pm 15.6 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 에서 β -ray 15이 최소 $\pm 9.2 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 약 $6.4 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 의 값 차이를 보였다. 1시간 데이터에서도 같은 결과를 보였다.

장비별 PM_{10} 농도 분율의 평균 10%와 90% 값을 비교한 결과, 표준편차가 큰 장비일수록 최댓값과 최솟값 차이가 더 크게 나타난 것으로 보인다.

4. 결론

기준채취기와 연속자동측정 장비에 대하여 등가성평가 및 상대오차를 분석하였으며, 연속자동측정 장비간의 5분 및 1시간 관측데이터에 대한 변동성에 대하여 분석하였다. 연속자동측정기의 등가성평가 결과에서 평균 기율기는 1.04이며, 평균 절편은 1.29이었으며, 모든 장비가 등가성평가 기준을 만족하였다. 기준채취기 농도와 온도, 습도를 기준으로 상대오차 값을 분석한 결과, 질량농도에서는 $10 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 이하 및 습도 80% 이상일 때 상대오차가 큰 폭으로 증가하였다. 연속자동측정장비별 5분 데이터에 대한

변동성 분석 결과, 일 평균값은 큰 차이가 없었지만, 5월의 표준편차 크기가 최대 $\pm 23.4 \mu\text{g}/\text{m}^3$, 최소 $\pm 15.2 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 차이가 발생하였고, 11~12월인 경우 표준편차 크기가 최대 $\pm 15.6 \mu\text{g}/\text{m}^3$, 최소 $\pm 9.2 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 나타났다. 기준채취기와 연속자동측정기 일 평균 데이터의 등가성평가와는 다르게 실시간 자료에서 변동성을 보이나, 신속한 정보 제공을 위해 실시간 관측하고, 매년 등가성평가 및 정도검사를 시행하여 데이터의 신뢰도를 높이고 있다.

본 연구를 통해 연속자동측정기의 기상에 따른 등가성평가 및 상대오차, 변동성을 제시함으로써, 관측 환경 및 장비 간 특성에 대한 기초데이터를 제공할 수 있을 것으로 기대한다. 또한 향후 습도에 대한 연속자동측정기 및 중량법의 데이터 오차에 관해 추가적인 연구가 필요할 것으로 생각된다.

감사의 글

본 연구는 기상청 국립기상과학원 「기상업무지원 기술개발」, ‘황사·연무 감시 및 예보 기술 개발 (KMA2018-00521)’의 지원으로 수행되었습니다.

References

- Chang, C.T. and Tsai C.J. (2003). A model for the relative humidity effect on the readings of the PM-10 beta gauge monitor, *Journal of aerosol science*, 34, 1685-1697, [https://doi.org/10.1016/S0021-8502\(03\)00356-2](https://doi.org/10.1016/S0021-8502(03)00356-2).
- Chang, C.T., Tsai, C.J., Lee, C.T., Chang, S.Y., Cheng, M.T. and Chein, H.M. (2001). Differences in PM-10 concentrations measured by beta gauge monitor and high-vol sampler, *Atmospheric Environment*, 35, 5741-5748, [https://doi.org/10.1016/S1352-2310\(01\)00369-7](https://doi.org/10.1016/S1352-2310(01)00369-7).
- Choi, H., Sohn, S.W., Bae, H.D. (2012). Noise Reduction Method for Particle Measurement System using Beta-ray Absorption Method, *The Transactions of the Korean Institute of*

- Electrical Engineers, 61(11), 1706-1712, <https://doi.org/10.5370/KIEE.2012.61.11.1706>.
- Eguchi, K., Uno, I., Yumimoto, K., Takemura, T., Shimizu, A., Sugimoto, N., and Liu, Z., (2009). Trans-pacific dust transport: integrated analysis of NASA/CALIPSO and a global aerosol transport model, *Atmospheric Chemistry and Physics*, 9, 3137-3145, <https://doi.org/10.5194/acp-9-3137-2009>.
- Environmental Protection Agency ; EPA, (2001). Interpretation of the National Ambient Air Quality Standards for Particulate Matter, EPA 40 CFR Appendix K to Part 50.
- Goudie, A. S. (2014). Desert dust and human health disorders, *Environment international*, 63, 101-113, <https://doi.org/10.1016/j.envint.2013.10.011>.
- Jung, C.H., Park, J.H., and Kim Y.P.(2013) Change of the Size-Resolved Aerosol Concentration Due to Relative Humidity, *Particle and Aerosol Research*, 9(2), 69-78, <http://dx.doi.org/10.11629/jpaar.2013.9.2.069>.
- Kim, J., (2008). Transport routes and source regions of Asian dust observed in Korea during the past 40 years (1965~2004), *Atmospheric Environment*, 42, 4778-4789, <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2008.01.040>.
- Kim, M.G., Park, Y.S., Ryoo, S.B. and Cho, J. H. (2019). Improvement and Evaluation of Automatic Quality Check Algorithm for Particulate Matter (PM₁₀) by Analysis of Instrument Status Code, *Atmosphere. Korean Meteorological Society*, 29(4), 501-509, <https://doi.org/10.14191/Atmos.2019.29.4.501>.
- Lee S.D., Kim S.K., Park J.S., Kong B.J., Kim J.C., Kim J.S. and Lee D.W.(2010). The Characteristics of the Air Pollutants Distribution and Concentration at the Baengnyeong Island, *National Institute of Environmental Research*, 16(1), 25-33.
- Lee, H., Kim, H., Honda, Y., Lim, Y.-H., and Yi, S. (2013). Effect of Asian dust storms on daily mortality in seven metropolitan cities of Korea. *Atmospheric environment*, 79, 510-517, <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2013.06.046>.
- National Institute of Environmental Research (NIER). (2015). Quality control of air pollution monitoring system and establishment of data evaluation scheme(I), *Korean Air Pollutants Emission Service* 2015.
- Park, M., Park, J. S., Jo, M., Lee, Y. H., Kin, H. J. and Oh, J. (2017). Comparison of the real-time measurements for PM_{2.5} and quality control method, *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment*, 33(6), 616-623, <https://doi.org/10.5572/KOSAE.2017.33.6.616>.
- Shin, S.E., Jung, C.H and Kim, Y.P. (2012). Estimation of the optimal heated inlet air temperature for the beta-ray absorption method: analysis of the PM₁₀ concentration difference by different methods in coastal areas, *Advances in Environmental Research* 1(1), 69-82, <https://doi.org/10.12989/aer.2012.1.1.069>.
- Shin, S.E., Kim, Y.P. and Kang, C.H. (2010). Comparison of the PM₁₀ Concentration in Different Measurement Methods at Gosan Site in Jeju Island, *Journal of Environmental Impact Assessment*, 19(4), 421-429.
- Song, S.K., and Kim, Y.K., (2005). A Case Study of an Asian Dust (Hwangsa) Event Observed in November 2002 in Korea, *Journal of the Korean Meteorological Society*, 41(5), 707-715.
- Song, S.K., Kim, Y.K., and Moon, Y.S., (2004). Meteorological mechanisms associated with long-range transport of Asian dust observed at the West Coast of North America in April 2001. *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment*, 20(E1), 1-14.
- Yoon, J.E., Lim, J.H., Shim, J.M., Kwon, J.I. and Kim, I.N. (2019). Spring 2018 Asian Dust Events: Sources, Transportation, and Potential Biogeochemical Implications, *Atmosphere*, 10, 276-293, <https://doi.org/10.3390/atmos10050276>.
- Yu, Y., Kalashnikova, O. V., Garay, M. J., and Notaro, M. (2019). Climatology of Asian dust activa-

tion and transport potential based on MISR satellite observations and trajectory analysis. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 19, 363-378, <https://doi.org/10.5194/acp-19-363-2019>.