

PM_{2.5} 국가기준측정장비 선정을 위한 비교 측정 연구

Field Performance Evaluation of Candidate Samplers for National Reference Method for PM_{2.5}

이용환 · 박진수* · 오 준 · 최진수 · 김현재 · 안준영
홍유덕 · 홍지형 · 한진석 · 이강웅¹⁾

국립환경과학원 기후대기연구부 대기환경연구과

¹⁾한국외국어대학교 환경학과 대기화학연구실

(2015년 2월 26일 접수, 2015년 3월 27일 수정, 2015년 4월 13일 채택)

Yong Hwan Lee, Jin Su Park*, Jun Oh, Jin Soo Choi, Hyun Jae Kim,
Joon Young Ahn, You Deog Hong, Ji Hyung Hong, Jin Seok Han
and Gangwoong Lee¹⁾

*Department of Air Quality Research, Climate and Air Quality Research Division,
National Institute of Environmental Research*

¹⁾*Department of Environmental Science, Hankuk University of Foreign Studies*

(Received 26 February 2015, revised 27 March 2015, accepted 13 April 2015)

Abstract

To establish National Reference Method (NRM) for PM_{2.5}, operational performance of 5 different commercial gravimetric-based PM_{2.5} measuring instruments was assessed at Bulkwang monitoring station from January 23, 2014 to February 28, 2014. First, physical properties, design, and functional performance of the instruments were assessed. Evaluation was carried out to determine whether operating method for the instruments and levels of QA/QC activities meet the data quality objectives (DQOs). To verify whether DQOs were satisfied, reproducibility of QA/QC procedures, accuracy, relative sensitivity, limit of detection, margin of error, and coefficient of determination of the instruments were also evaluated. Results of flow rate measurement of 15 candidate instruments indicated that all the instruments met performance criteria with accuracy deviation of 4.0% and reproducibility of 0.6%. Comparison of final PM_{2.5} mass concentrations showed that the coefficient of determination (R^2) values were greater than or equal to 0.9995, and concentration gradient ranged from 0.97 to 1.03. All the instruments satisfied criteria for NRM with the estimated precision of 1.47~2.60%, accuracy of -1.90~3.00%, and absolute accuracy of 1.02~3.12%. This study found that one particular type of measuring instrument was proved to be excellent, with overall evaluation criteria satisfied.

Key words : NRM (National Reference Method), PM (Particulate Matter), WINS (Well Impactor Ninety-Six), NAAQS (National Ambient Air Quality Standards)

*Corresponding author.

Tel : +82-(0)32-560-7272, E-mail : airchemi@korea.kr

1. 서 론

0.001~100 μm 범위 내의 고체 또는 액체 미립자인 에어로졸 중 인체에 많은 영향을 미치는 공기 역학적 직경이 2.5 μm 이하인 초미세먼지($\text{PM}_{2.5}$)는 근래 들어 많은 관심을 받고 있다(North American Research Strategy for Tropospheric Ozone, 2003; Seinfeld and Pandis, 1998). 우리나라 $\text{PM}_{2.5}$ 는 수도권을 기준으로 2012년에서 2014년 사이에 6시간 이상 고농도 지속 사례가 13회에서 23회, 18시간 고농도 지속 사례는 2회에서 18회로 증가하는 등 고농도 발생이 증가세를 보이고 있다(National Institute of Environmental Research, 2014a).

이러한 이유로 환경부에서는 $\text{PM}_{2.5}$ 기준을 24시간 기준 50 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, 1년 기준 25 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 설정하여 WHO(World Health Organization)가 제시하는 타입-II 수준으로 2015년부터 시행하였고, $\text{PM}_{2.5}$ 기준법에 맞춰 측정기 형식승인 제도를 운영하기 위한 국가 기준 장비의 필요성이 대두되었다(National Institute of Environmental Research, 2014b).

미국 EPA(Environmental Protection Agency)는 1997년 $\text{PM}_{2.5}$ 대기 농도 측정에 대한 새로운 NAAQS(National Ambient Air Quality Standards)를 신설하였는데 FRM(Federal Reference Method)은 $\text{PM}_{2.5}$ 측정 기기의 인증을 위해서 챔버 실험을 포함한 엄격한 시험 절차를 제시하고 있다. 또한 측정소에서 후보기기 3대를 최소 10일 이상 현장 실험을 거쳐야 한다. 10일 동안의 24시간 샘플링 시료의 질량농도는 최소 10 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 이어야 하며, 3대의 측정기기의 정밀도는 2 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 이내여야 한다. 데이터는 5분 간격으로 저장할 수 있어야 하고, 24시간 유량을 저장할 수 있어야 한다. 시료 채취는 24시간 간격으로 채취된 시료는 96시간 이내에 샘플러에서 수거되어야 하며, 연속 시료 장치의 경우 4일 간격으로 운영되고 있는 중이다(United States Environmental Protection Agency, 1997). 그 밖의 EU, 캐나다, 일본 등도 $\text{PM}_{2.5}$ 에 대한 국가기준법 신설을 위해 발 빠르게 움직이고 있는 중이다(Dabek-Zlotorzynska *et al.*, 2011; European Union, 2008; Canadian council of ministers of the environment, 2000).

본 연구에서는 $\text{PM}_{2.5}$ 국가기준측정시스템 구축에 필요한 국가기준측정장비 선정을 위해 미국 EPA

FRM의 제작 규격, 운영요소 정확도 및 성능시험 기준, 운영 기능 적합성 등을 만족하는 여부를 검사하고 가장 우수한 장비를 최종 선정 후, $\text{PM}_{2.5}$ 국가기준 측정시스템 구축을 위하여 국외에서 선행된 현황을 조사하여 비교, 검토하였다.

2. 연구 방법

2.1 국가기준시스템 구축

2.1.1 질량 농도 측정 장비

질량농도 측정은 본원에 설치된 항온($20^\circ\text{C} \pm 2^\circ\text{C}$)과 항습($35\% \pm 5\%$)이 유지되는 자동 칭량 챔버 시스템(Automated Filter Weighing System microbalance, METTLER TOREDO UMX-2)을 사용하였다. 무게 측정은 챔버(Chamber)에서 24시간 항량 후 0.0001 mg까지 측정 가능한 저울을 이용하여 여지의 질량농도를 측정하였고, 400 mg 표준 질량 막대 NIST(National Institute of standard and Technology)를 사용하여 챔버의 온도, 습도에 대한 질량농도 보정 값으로 적용하여 포집된 여지의 질량 농도의 무게를 측정하였다. 여지의 무게 측정 전에는 영점 교정을 통해 저울 자체의 오차 허용범위가 기준 범위 내에 있는지 재현성을 테스트하였고, 표준 질량 막대의 무게를 동일 조건으로 측정하여 챔버의 온도, 습도에 대한 보정 값을 적용하였다.

여지의 무게는 총 4회 반복 측정하였고, 여지무게의 측정 후에도 측정 전과 같은 재현성과 표준막대 보정을 실시하였다. 측정된 여지의 무게 중 가장 큰 상대편차를 제거한 3회 평균값을 최종 여지의 무게 값으로 사용하였다. 필터 무게의 장기적인 안정성을 평가하기 위하여 새로 구입된 필터박스에서 사용하지 않은 3개의 필터를 안정화 과정을 거친 후, 주기적으로 질량을 측정하였다. 그 후, 측정된 최종 여지 무게에 샘플링에 적용된 누적표준유량으로 나누어 표준상태의 질량농도로 산출하였다. 채취된 여지는 밀봉하여 여지보관용 항온·습도 데이터에 보관하고, 여지를 수평으로 유지하여 보관함의 덮개가 여지표면에 닿는 일이 없도록 하였으며, 시료를 운반할 때에는 아이스박스를 이용하여 온·습도 변화를 최소화하였다.



Fig. 1. One week accumulation of aerosol larger than 2.5 μm on the WINS Impactor surface.

2. 1. 2 QA (Quality Assurance)/QC (Quality Control)

필터의 교환, 탈착, 캐리어 장착 등 필터가 외부에 노출되어 오염될 가능성을 최소화하기 위하여 클린 벤치에서 모든 작업을 수행하였다. 필터 교환운영 방법에 적합하게 진행하였는지 모두 기록하였고, 안정적인 먼지 포집을 위해 주 1회 누설 검사, 유량 검사 및 WINS (Well impactor Ninety-Six) Impactor 필터의 충돌판 여지와 실리콘 오일을 교체하였다. 그림 1과 같이 WINS Impactor 충돌판 여지 위에 쌓인 2.5 μm 이상의 입자상 물질은 시료의 흐름에 영향을 줄 수 있기 때문에 7일 간격으로 1 mL 실리콘 오일을 충돌판 여지 위에 적서 주어 입자상 물질들이 재 비산되는 현상을 방지하였다.

바탕 실험 검사는 23시간 현장 바탕 실험, 1시간 현장 바탕 실험, 실험실 바탕 실험, 운송 바탕 실험 등 오염이 발생될 수 있는 모든 경로를 추적할 수 있게 실행했다. 필터의 교환 및 탈착 등은 필터가 오염의 노출에 최소화할 수 있는 클린벤치에서 수행하였고, 필터 교환 등의 작업을 수행할 때는 만약에 발생될 수 있는 이상 상황을 모두 기록하였다.

필터 홀더에 장착한 필터는 스테인레스 재질의 캐리어를 이용하여 교체하는 방법을 이용함으로써 일련의 과정에서 발생될 수 있는 필터 오염의 가능성을 최소화하였다. 실험에 사용된 필터는 미국 EPA FRM 운영 점검 양식에 따라 모든 과정을 작성하였고, 운영 점검 양식에는 필터 번호에 따라 NRM 후보 장비, 장착 일, 탈착 일, 운영자, 사용된 카세트 ID,

기상조건, 시료 채취 시작 일시, 종료 일시, 총 채취 시간, 채취 부피, 유량 변동, 칭량 조건 등을 작성하여 적정성을 평가하였다. 장비 QA/QC에 필요한 온도, 압력, 유량, 누출검사를 포함한 일일 점검 형식으로 수행하였다.

누출 검사의 경우 외부유출과 내부유출시험이 분리된 장비와 통합된 장비가 있으나 각각 분리된 점검 양식을 작성하였고, 누출시험의 압력변화 단위가 제작사별로 표시되는 단위를 mmHg로 통일하였다. 교정용 유량계는 한국표준과학원에서 검·교정을 받은 유량계 (Delta-cal, BGI Incorporated Waltham, Mass. U.S.A.)를 이용하여 장비 유량 점검과 교정에 이용하였고, 장비가 산출하는 온도와 압력을 검증하는 데 함께 사용하였다.

2. 2 시료 채취

서울시 은평구 불광동에 위치한 수도권 대기오염 집중측정소(37° 36'N, 126° 55'E, 67 m)에서 2014년 1월 23일부터 2014년 2월 28일까지 37일간 수행하였다. 시료는 오전 11:00시부터 익일 10:00시까지 23시간 샘플링을 하였고, 이 기간 평균 온도, 습도는 각각 1.5°C, 53.2%로 나타났다. 비교 실험에 참여한 장비는 A, B, C, D, E 총 5개 회사, 각각 3대씩 총 15대를 사용하였다. 기기의 배치 위치에 따른 농도 차이의 발생을 최소화하면서 통계적인 오차의 발생 여부를 확인하기 위해 같은 종류의 장비 2대를 연속으로 나란히 배치하고 다른 한 대는 대각선 방향으로 다른 장비 사이에 배치하였으며 수도권 대기오염 집중측정소의 위치와 장비 배치에 대해서 그림 2에 나타냈다.

NRM 장비 선정을 위한 평가 기준은 국내 공정시험법과 3회에 걸친 자문회의와 미국 EPA FRM의 제작 규격, 운영요소 정확도, 및 성능시험 기준, 운영 기능 적합성 등을 만족하는 여부를 검사하고 가장 우수한 장비를 최종 선정하고자 하였다. NRM 장비 기준 평가 요소들을 5종 장비들에 대하여 수행하였으며 항목들을 정리하여 표 1에 나타냈다. Inlet 유입부의 경우 판의 재질은 스테인레스 스틸 또는 산화 처리된 알루미늄 재질을 사용하여 PM₁₀ Impactor와 PM_{2.5} WINS Impactor 타입을 이용하였으며 샘플 입구는 지상으로부터 약 4.0 m의 높이에 위치하도록 설치하였다.

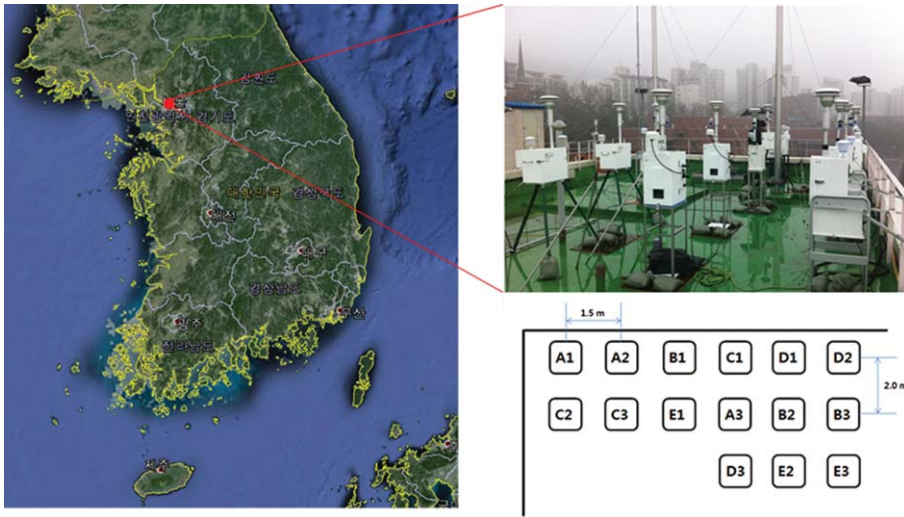


Fig. 2. Location of sampling site and sampler array at bulgwang (37° 36'N, 126° 55'E), South Korea.

Table 1. Performance criteria of NRM sampler.

Parameters	NRM	Equivalent Sampler (Class I)
Sampling period	Minimum 20 day	30 days
Concentration range ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	3 ~ 200	3 ~ 200
Bias	Sampling bias less than 5%	85%
Linear regression Slope	1 ± 0.05	1 ± 0.1
Linear regression minimum intercept	Higher than $-1.0 \mu\text{g}/\text{m}^3$	$25.0 \sim 27.25 \times \text{slope}$ (Higher than -2.25)
Linear regression maximum intercept	Less than $+1.0 \mu\text{g}/\text{m}^3$	$25.0 \sim 22.75 \times \text{slope}$ (Less than $+2.25$)
Filter deposition for 96 hours	-	Less than $50 \mu\text{g}$
Precision	Less than $2 \mu\text{g}/\text{m}^3$ or 10%	Less than 10%
Percent difference	Less than $2 \mu\text{g}/\text{m}^3$ or 10%	Less than 15%
Filter temperature difference tolerance	Less than 5°C with ambient temperature	Less than 5°C with ambient temperature
Correlation coefficient	Higher than 0.97	$R \geq 0.93$ for $\text{CCV} \leq 0.4$ $R \geq 0.85 + 0.2 \times \text{CCV}$ for $0.4 \leq \text{CCV} \leq 0.5$ $R \geq 0.95$ for $\text{CCV} \geq 0.5$

유량의 경우 4.0% 이내의 정확도와 2.0% 이내의 재현성을 유지하는 범위 내에서 유량 제어에 필요한 온도와 압력이 실시간으로 보정될 수 있는 MFC (Mass Flow Controller)를 사용하여 측정하였다. 측정 시 샘플러는 $-20 \sim 40^\circ\text{C}$ 범위에서 정상 작동이 이루어지는 범위에서 이루어졌으며 상대 정밀도, NRM 간 상대정밀도, 절편, 기울기, 상관계수, 가동률에 대한 성능 기준 항목 외에도 장비의 운영 여건과 용이성 등도 반영하였다.

2.3 미국 FRM 측정 시스템 선정 기준

미국 EPA의 경우 여러 업체에서 제작하는 $\text{PM}_{2.5}$ 샘플러가 인증을 받기 위해서는 유입구, 입경분리장치, 상부 필터 고정 장치, 필터 보관함, 필터지지 스크린을 구성하도록 제시하고 있다. $\text{PM}_{2.5}$ 측정 기기의 유량은 $1 \text{ m}^3/\text{hr}$ 를 기준으로 하며, 정밀도와 정확도는 5%와 2% 이내에서 검증되어야 한다. 대기압과 대기 온도 및 필터온도가 기본으로 표시되고 저장되는 조건에서 유량은 30초마다 보정되고 5분마다 측정유량이 저장될 수 있어야 한다. 또 채집된 시료의 일사량

영향을 최소화하기 위하여 필터온도는 대기온도보다 5°C 이상 되지 않도록 주의하여야 한다. PM_{2.5} 측정 기기의 내부 온도를 일정하게 유지하기 위하여 필터가 부착된 공기유입 장치를 구성할 수 있으며, 기기 운영 온도는 -20°C~40°C에서 운영할 수 있다. 그러나 온도가 -30°C 이하일 경우는 자동으로 시료 채집을 중단하는 기능을 포함하여야 한다.

PM_{2.5} 측정 기기의 인증을 위해서 챔버 실험을 포함한 엄격한 시험 절차를 제시하고 있다. 첫 번째는 후보기기 3대를 한 측정소에서 최소 10일 이상 현장 실험을 거쳐야 하고, 10일 동안의 24시간 샘플링 시료의 질량농도는 최소 10 µg/m³이어야 하며, 3대의 측정기기의 정밀도는 2 µg/m³ 이내여야 한다. PM_{2.5} 측정기기는 5분 간격으로 기록이 가능하여야 하고, 24시간 유량을 기록할 수 있어야 한다. 24시간 간격으로 채집된 시료는 96시간 이내에 샘플러에서 수거되어야 하며, 연속 시료 장치의 경우 4일 간격으로 운영되어야 한다. 96시간으로 시료 수거 시간을 제한한 이유는 시료에 채집된 시료의 질량 변화를 최소화하기 위해서다. PM_{2.5}의 운영은 1일, 3일, 6일 간격으로 수행할 수 있다(United States Environmental Protection Agency, 1997).

3. 결과 및 토의

3.1 후보 장비들에 대한 평균 농도 및 재현성, 정확성

본 시험의 바탕 실험은 1월 30일, 2월 6일, 10일, 17일, 24일, 28일 총 5회 걸쳐 약 1주일 간격으로 실시하였다. 1월 30일은 샘플러 안에 23시간 방치한 후 측정한 바탕 실험 농도이며 2월 6일은 1시간 장착 후 측정된 바탕 실험 농도이다. 나머지 시험은 바탕 필터를 실험실 챔버에서만 노출시킨 후 측정된 바탕 실험 농도이다. 23시간 샘플러에서 노출된 바탕 실험 농도와 챔버에서 노출된 필터의 무게차가 통계적으로 차이가 없는 것으로 보아 샘플러의 운영 중에 오염 가능성이 없는 것을 확인하였다. 바탕 실험 농도의 평균농도는 0.28 µg/m³이며 표준편차는 0.28 µg/m³으로 1 µg/m³보다 낮기 때문에 시료의 최종농도에서 차감하지 않았다. 80개의 바탕시료 중 1개에서 6.48 µg/m³의 바탕 실험 농도가 산출되었다. 이

Table 2. Calculated precision, bias, accuracy of candidate samplers.

Type	Mean µg/m ³	Precision %	Bias %	Percent difference %
A	43.9	1.81	3.00	3.12
B	44.4	1.47	-1.86	2.24
C	43.1	1.77	0.77	1.02
D	43.1	1.47	0.11	1.03
E	43.7	2.60	-1.71	1.72

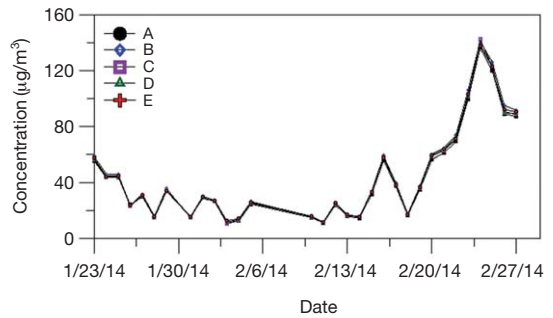


Fig. 3. Temporal variation of PM_{2.5} mass concentrations for five NRM sampler types.

바탕 실험 농도는 챔버 내에서 잠깐 동안 노출된 시료로 같은 시간 노출된 다른 필터의 농도는 매우 낮은 것으로 보아 시료의 운반중이나 칭량 시 오류가 발생한 것으로 생각된다.

표 2에 나타난 정밀도는 5종의 장비가 모두 1.47~2.60% 이내의 수치를 보였고, 정확도 -1.90~3.00%, 절대정확도 1.02~3.17% 사이로 나타나 정밀도, 정확도 모두 NRM 기준을 충분히 만족하는 수준으로 판단된다.

실험 기간 중 5종 후보 장비들의 평균 농도 변화를 나타낸 결과 시험 시작 후 비와 눈 등의 강우 현상으로 PM_{2.5} 농도가 20 µg/m³ 수준으로 떨어졌고, 종료직전 시기에 농도가 100 µg/m³ 이상의 고농도 시기가 그림 3과 같이 나타났다.

측정 자료를 바탕으로 재현성 (Precision, 상대정밀도 %) = CV (Coefficient of Variation) for 3, 정확도 (Bias %), NRM 간 절대정확도를 평가하였다. 재현성은 동일 장비 3대의 CV를 적용하였다. 정확도 Bias는 15대 장비의 평균을 참값으로 간주하고 참값에서 실제 측정값의 차이를 참값으로 나눈 백분율로 구하

Table 3. Overall performance results for NRM candidate samplers.

Parameters	A	B	C	D	E	Criteria
Sampling days	29	32	32	32	32	>20
Flow precision	0.2	0.1	0.1	0.1	0.1	<2%
Flow Bias	2.43	3.20	0.25	-0.09	0.48	<4%
Leak test	Pass	Pass	Pass	Pass	Pass	Pass/Fail
Temperature Bias	0.9	-1.7	1	0	0.2	<1.6°C
Pressure Bias	14~1.4	-3.3	-2.0	1.0	0.3	<10 mmHg
Time bias	60~180s	100~160s	63s~65s	60s	32~35s	<120s/month
Bias	3.00	-1.86	0.77	0.11	-1.71	<5%
Slope	0.974	1.032	1.009	0.991	0.995	0.95~1.05
Intercept	0.080	-0.337	-0.545	0.144	0.569	-1.0~+1.0
precision	1.81	1.47	1.77	1.47	2.60	<10%
R ²	0.9995	0.9997	0.9996	0.9998	0.9997	>0.941
Percent difference	3.12	2.24	1.02	1.03	1.72	<10%
Operation ratio	91	100	100	98	100	>70%

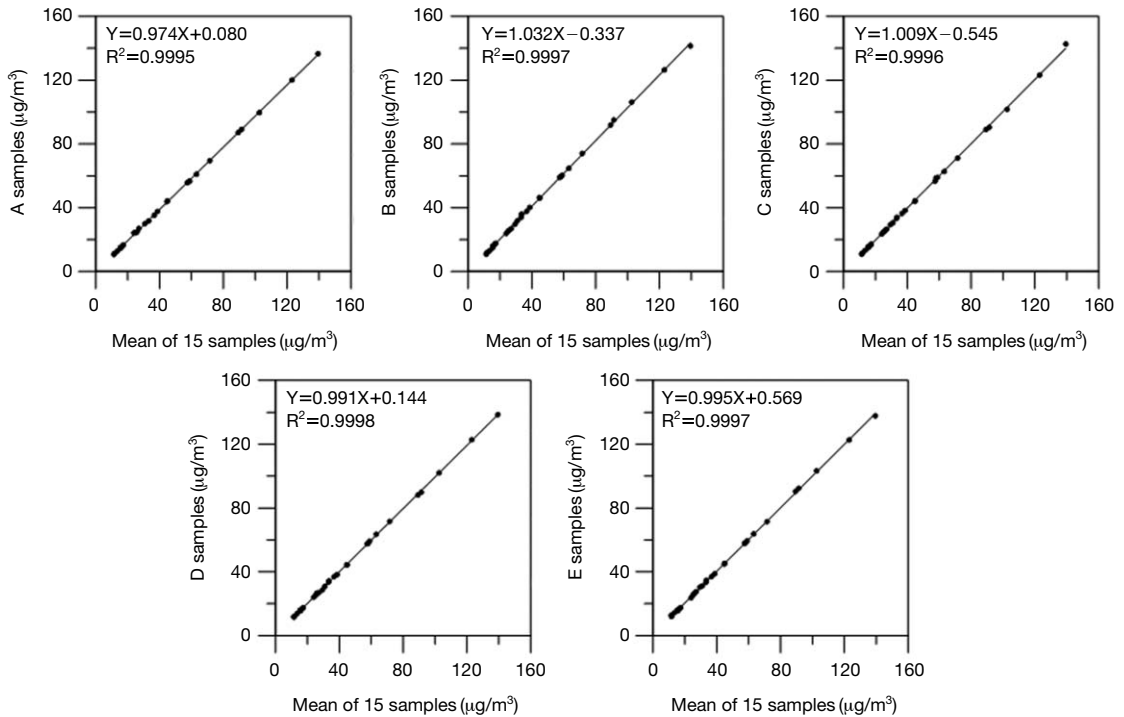


Fig. 4. Inter-comparisons between means of sampler type and means of all samplers.

였다. NRM간 절대정확도는 Bias의 절대 값의 평균을 적용하였다.

3.2 후보 장비들에 대한 실험 결과

5종 장비들에 대한 유량 교정은 모두 교정용 유량

계와의 정확도 차이가 4% 이내로 우수하였고, 재현성 역시 0.6% 이내로 유지되어 안정된 유량 수준을 나타냈다. 장비들은 외기압을 실시간으로 측정하여 표준기압 조건에서 농도 보정 값으로 적용 계산되었고, 실험 초기 한 장비가 15 mmHg 정도 과소평가되

었으나 중반에는 오히려 약간 높은 경향성이 나타났다. 장비운영과 관련된 정확도의 경우 모두 우수한 결과가 나타났고, 가동률 또한 90% 이상의 달성율을 나타냈다. 기압의 정확도와 온도 정확도는 기준 범위를 초과하는 장비들이 있었으나 초과범위가 그리 심각한 수준은 아니었다. 기압과 온도를 측정하는 교정장비의 온도와 기압 정확도를 표준기관에서 검증을 하지 못한 관계로 정확한 평가가 어려운 실정이지만 모든 장비들이 NRM 운영기준을 만족하는 것으로 판단된다. 본 연구에서 각 측정 장비별 평가항목에 대한 결과 값을 요약하여 표 3에 정리하였다.

3종의 장비 중 9대는 고장 없이 운영이 되었고, A 장비는 소프트웨어 업그레이드 도중에 3대 모두 3일간 정지하는 현상이 발생하였다. D 장비의 경우에는 1대에서 컨트롤 기판의 교체가 필요하여 2일간 장비가 정상 작동하지 않았다. 5종의 장비 사이의 상관성을 분석한 결과 최소 0.9995 이상을 나타냈고, 5종 장비들의 평균 기율기 값과 비교한 결과 기율기 값은 그림 4와 같이 0.98~1.03 범위수준을 보였다.

4. 결 론

본 연구를 통하여 국내 처음으로 PM_{2.5}의 질량농도를 채집하고 농도를 산정하는 국가기준시스템 구축에 필요한 국가기준측정장비를 선정하였다. 제안된 기준을 만족하는 후보 장비들은 모두 NRM 장비로 인정하되 국가가 초기에 운영하는 NRM 시스템은 그 중에서 가장 성능이 우수한 장비를 선정하였다.

가동률은 3종의 장비 총 9대는 고장 없이 운영되었고, A 장비의 경우 소프트웨어 업그레이드 도중 3대 모두 3일간 정지하는 고장이 발생하였다. D 장비의 경우 1대에서 컨트롤 기판의 고장으로 인하여 2일간 작동하지 못하였다. 후보 장비들에 대한 유량 교정 결과는 15종 모두 유량계와의 정확도 차이가 4% 이내로 우수하게 나타났고, 재현성 역시 0.6% 이내로 유지되어 모두 안정적으로 나타났다.

장비 사이의 상관성을 분석한 결과 5종 모두 0.9995 이상을 나타내어 우수한 값을 보여주었고, 기율기 범위는 0.98~1.03으로 우수하게 나타났다. 정밀도, 정확도, 절대 정확도는 각각 1.47~2.60%, -1.90~3.00%, 1.02~3.12%로 NRM 기준을 충분히 만족하는 것으로

로 나타났다. 자료 저장 일수는 E 장비가 하루 1회로 가장 짧았고, B 장비의 경우 약 5~7일 정도로 저장이 가능했다. 모든 장비가 RS232나 USB를 이용하여 자료의 저장과 회수가 가능하였다.

장비의 종합적인 평가 결과 조건부충족을 포함하여 모든 장비들이 NRM의 기준에는 만족하는 것으로 평가되었다. A 장비의 경우 임팩터 규격이 허용범위를 벗어나는 항목이 있어 이를 개선하거나 규격에 맞는 임팩터를 사용한다면 NRM으로 사용에 문제가 없는 것으로 나타났다. 비교시험 결과를 토대로 5종의 장비 중 D 장비가 다른 장비에 비하여 정밀도, 정확도, 절대 정확도 등에서 상대적으로 우수한 것으로 나타났다.

References

- Canadian Council of Ministers of the Environment (2000) Canada Wide Standards for Particulate Matter (PM) and Ozone.
- Dabek-Zlotorzynska, E., T.F. Dann, P. Kalyani Martinelango, V. Celso, J.R. Brook, D. Mathieu, L. Ding, and C.C. Austin (2011) Canadian National Air Pollution Surveillance (NAPS) PM_{2.5} speciation program: Methodology and PM_{2.5} chemical composition for the years 2003~2008, Atmos. Environ., 45, 673-686.
- European Union (2008) Directive 2008/EC of the European Parliament and of the Council of 21 May 2008 on ambient air quality and cleaner air for Europe, Official Journal of the European Union L, 152, 1-44.
- National Institute of Environmental Research (2014a) Study on the chemical characteristics of PM_{2.5} in case of high concentration episode (I), 11-1480523-002149-01.
- National Institute of Environmental Research (2014b) Emission Sources and Behavior of PM_{2.5} Organic Materials (V), 11-1480523-002121-01.
- North American Research Strategy for Tropospheric Ozone (2003) Assessment of tropospheric particulate matter in North America, NARSTO, Kennewick, WA.
- Seinfeld and Pandis (1998) Atmospheric Chemistry and Physics. From air pollution to climate change. New Jersey: John Wiley&Sons Inc.
- United States Environmental Protection Agency (1997) In: Register, F. (Ed.), National Ambient Air Quality Standard (NAAQS) for particulate Matter, 62, 38652-38752.