

SHORT COMMUNICATION

미세먼지 여지의 무게 측정을 위한 저비용 계량챔버 개발 및 성능평가

박준현 · 임호진^{1)*}

국립환경과학원 기후대기연구부 대기환경연구과, ¹⁾경북대학교 환경공학과

Development and Evaluation of an Inexpensive Weighing Chamber for Particulate Filters

Jun-Hyun Park, Ho-Jin Lim^{1)*}

Department of Air Quality Research, Climate and Air Quality Research Division, National Institute of Environmental Research (NIER), Incheon 22689, Korea

¹⁾Department of Environmental Engineering Kyungpook National University, Daegu 41566, Korea

Abstract

Filter and microbalance sensitivity in measuring fine particulate matter mass is greatly influenced by particulate properties and environmental factors. Temperature and humidity control inside a measuring chamber with a microbalance, and neutralization of static charges on filters are essential for consistent filter weighing. Commercial weighing chambers are expensive with a unit price of tens of millions won. This study developed an inexpensive weighing chamber for weighing fine particulate matter and evaluated its weighing performance. A microbalance with 1 μg precision was used to measure the weight of a filter. The microbalance was set in a transparent acrylic enclosure (100 x 60 x 65 cm^3) equipped with temperature and humidity control equipments. Weighing performance of the chamber was examined using Teflon filters with or without different particulate sample types. Temperature and humidity were maintained at approximately $23.2 \pm 1.2^\circ\text{C}$ and $36.2 \pm 1.8\%$ for 8 days, respectively.

Key words : Weighing chamber, Particulate filter, Particulate matter, Particle

1. 서 론

미세먼지는 인체 건강, 시정, 기후변화와 매우 밀접한 오염물질로써 각국에서 대기환경기준에 의해 관리되고 있다. 중량농도법은 대기 중 미세먼지 농도를 측정하는 대표적 방법 중 하나이다(US EPA, 2016; MOE, 2022). 미세먼지 포집 필터의 질량을 측정할 때 마이크로 저울의 민감도와 포집된 입자의 물리화학적 성질(예: 흡습성)에 대한 온도 및 습도의 영향 때문에 측정값에 오차가 발생할 수 있다(Carlton and Teitz, 2002). 대

기 중 미세먼지는 시료량에 따라 1 μg 단위로 측정이 필요하며, 이를 위해 1 μg 단위를 측정할 수 있는 마이크로 저울을 주로 사용한다. 정도관리를 위해 마이크로 저울이 설치된 계량챔버는 내부의 온도 및 습도 조절이 되고, 외풍, 빛, 진동, 필터의 오염 및 정전기 발생, 등 외부의 영향이 최소화되어야 한다(US EPA, 2016). US EPA(2016)에 따르면 계량챔버는 측정 시 오염되는 것에 주의해야 한다. 챔버 내부에는 미세먼지가 없어야 하며, 설정된 온도($20 - 23^\circ\text{C}$)와 상대습도($30 - 40\%$)가 유지되어야 하고, 진동이 없는 장소에 설치되어야 한

Received 20 October, 2022; Revised 16 January, 2023;

Accepted 25 January, 2023

*Corresponding author : Ho-Jin Lim, Department of Environmental Engineering, Kyungpook National University, Daegu 41566, Korea
Phone : +82-53-950-7546
E-mail : hylim@knu.ac.kr

© The Korean Environmental Sciences Society. All rights reserved.

© This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

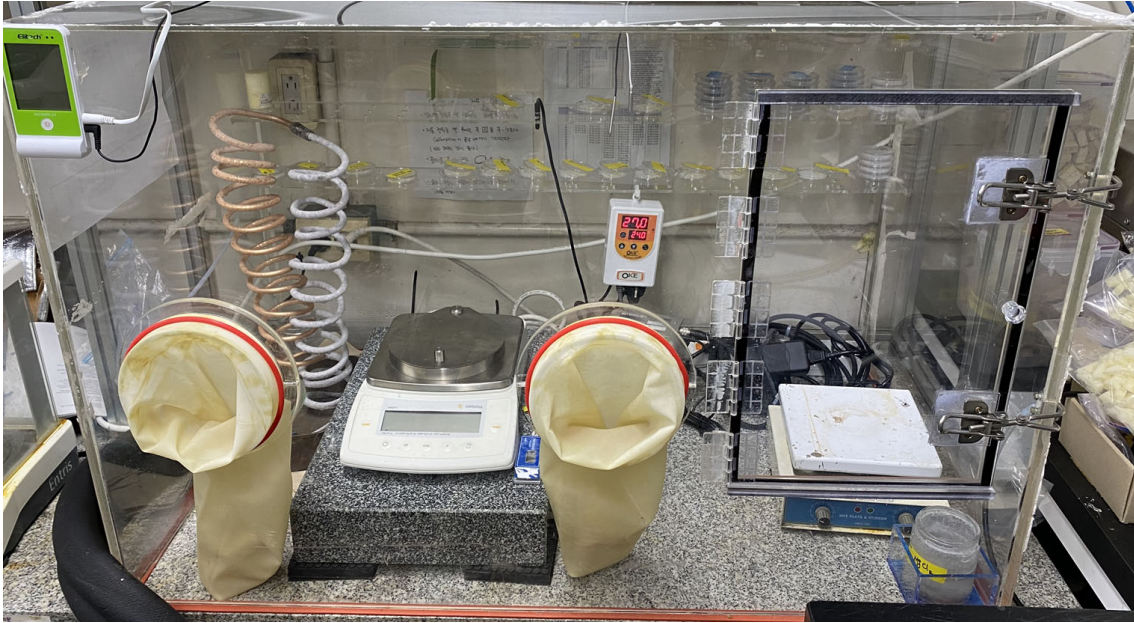


Fig. 1. Newly developed particulate weighing chamber.

다. 24시간 기준으로 온도와 습도는 각각 표준편차 $\pm 2^{\circ}\text{C}$ 와 $\pm 5\%$ 가 허용범위이다. 습도 조절은 필터의 무게 측정에 영향을 미치는 다양한 요인 중 가장 보편적인 요소이다. Brown et al.(2006)에서 유리섬유 필터는 습도 46%에서 81%까지 증가시켰을 때 무게가 $336 \mu\text{g}$ 까지 증가했다. Lawless and Rodes(1999)에서 25 mm 석영 필터는 습도 20 - 80%에서 $170 \mu\text{g}$ 이 증가하였고, 특히 습도 50 - 80%에서 $140 \mu\text{g}$ 이 증가했다. Tierney and Conner(1967)는 유리섬유 필터에 포집된 시료가 상대습도 55% 이하일 때 무게 변화가 1% 이하로 보고하였다. Tsai et al.(2002)에서 유리섬유 필터는 습도 40% 일 때 87.48 mg 에서 65% 일 때 $160 \mu\text{g}$ 증가했다. 실험 환경의 습도가 증가하면 필터의 무게가 같이 증가하며, PVC(polyvinyl chloride) 필터보다 MCE (Mixed Cellulose Esters) 필터가 습도에 더 민감하다고 보고되었다(Charell and Hawley, 1981). 시료가 채취된 필터를 거칠게 다루면 필터에 포집된 시료의 손실을 주기 때문에 조심히 다루어야 한다(US EPA, 2016). 또한 시료를 측정할 때 간격이 길어지면 중량변화로 인해 실험의 오차가 커질 수 있다. 이러한 조건들을 충족시킬 수 있는 상용 계량챔버의 단가는 대략 4 - 5 천만원(약 USD35,000)으로 상당히 고가이다. 본 연

구에서는 마이크로 저울을 이용한 미세먼지 필터의 측정을 위한 계량챔버와 내부 환경을 제어하는 필수 요소들을 자체 제작하여 성능평가를 하였다. 필터 무게를 측정할 때 영향을 주는 온도와 습도의 안정성과 필터 질량변동의 신뢰성을 평가하였다. 상용 장비와 비교할 때 자체 제작한 계량 챔버의 비용절감 효과도 분석하였다.

2. 재료 및 방법

필터의 무게 측정을 위해 정밀도가 $1 \mu\text{g}$ 인 마이크로 저울(Sartorius, CPA2P-F, 독일)을 대리적으로 제작된 저울대 위에 설치하여 사용하였다. 진동을 최소화하기 위한 방진 테이블은 별도로 사용하지 않았다. 계량 챔버의 외형은 투명한 아크릴을 사용하여 직육면체(가로 $100 \times$ 세로 $60 \times$ 높이 65 cm)로 제작되었다. 제작된 챔버의 하단부에 발포 실리콘 패드를 부착하여 외부 공기를 차단하였다. 계량챔버는 외부 진동의 영향이 적은 건물의 1층에 설치하는 것이 좋지만, 본 연구에서는 공간 제약으로 인해 3층에 설치하였다. 계량챔버 내부에서 시료를 취급할 때나 시료를 측정하는 동안 내부 오염을 방지하기 위해 계량챔버 전면부에 인체공학적으로 설계된 지름이 100 mm 인 두 개의 구멍에 정전기를

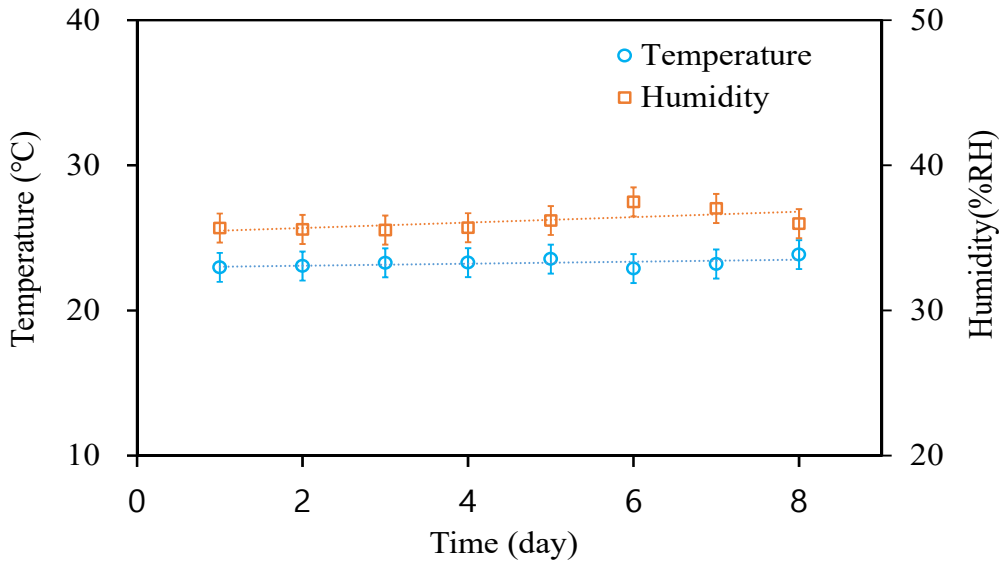


Fig. 2. Temperature and humidity results for consecutive 8 days.

방지하는 PVC 장갑(PIERCAN, G600L, 미국)을 부착하였다. 계량 챔버는 실험실의 환풍구와 에어컨의 영향이 최대한 작은 위치에 설치하였다. 챔버 안쪽 뒤 판 상단에 필터를 보관할 수 있는 판(가로 97.5 × 세로 10 × 두께 0.5 cm)을 3단으로 설치하여 총 51개의 필터를 47 mm 페트리 접시에 담아 보관할 수 있다. Fig. 1은 제작된 계량챔버의 사진이다.

챔버의 하단에는 염화마그네슘(Sigma-Aldrich, 208338, 미국) 포화 수용액이 든 250 mL 유리병 2개를 비치하여 습도를 조절하였다. 이 방법은 밀폐된 환경에서 30 - 40%의 상대습도를 유지하는데 매우 편리한 검증된 방법이다(Marsh et al 1987). 온도는 가열판(Global lab, GLHPS-G, 대한민국)과 저온순환수조(Jeiotech, RW-1025G, 대한민국)에 연결된 구리 튜빙(외경 1/4인치 x 길이 1.2 m)으로 제작한 코일 열교환기를 이용하여 온도조절기로 자동조절 하였다. 저온순환수조의 구리관과 연결되는 타이곤 튜브의 동파 및 결로를 방지하기 위해 고무 발포 보온재를 설치하였다. 저온순환수조의 냉각용매는 차량용 부동액을 물과 혼합하여(혼합비 50:50) 사용하였다. 또한 계량챔버가 설치된 실험실에는 중앙제어되는 천장형 에어컨이 가동되고 있고 하절기에는 창문형 에어컨을 추가로 사용하고 있다. 온습도는 24시간마다 온습도기록계(MAXMIN-24, Elitech, 영국)를 사용하여 10분 간격

으로 자동 저장하였다. 이 기록계의 디스플레이에는 온도와 습도가 실시간으로 표시된다. 또한 매일 0에 24시간 간격으로 최대값과 최소값이 자동으로 초기화되어 표시된다. 이 기록계의 온도와 습도의 정확도는 각각 $\pm 0.5^{\circ}\text{C}$ 와 $\pm 3\%$ 이고, 분해능은 각각 $\pm 0.1^{\circ}\text{C}$ 와 $\pm 0.1\%$ 이며, 측정할 수 있는 범위는 각각 $-40 - 85^{\circ}\text{C}$ 와 $10 - 99\%$ 이다.

성능평가는 PTFE(Whatman, 2 μm , 46.2 mm, 미국)필터를 사용한 블랭크 필터 1개, $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ 수용액을 Collison 분무기로 발생시킨 후 실리카겔 확산 건조기로 건조한 $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ 입자가 포집된 PTFE필터 1개, ISO 19700 튜브전기로에서 연소한 플라스틱 입자를 2 LPM으로 1시간 채취한 PTFE 코팅된 Glass Fiber 필터(Pall, 25 mm, 미국) 2개, 스모그 챔버에서 이차생성된 유기에어로졸(Secundary Organic Aerosol : SOA)을 18 LPM으로 1시간 채취한 PTFE 필터 1개를 준비하였다. 채취된 필터는 페트리디쉬(PALL, Sterile Petri Dishes 50 mm, 미국)에 담아 냉동고에서 -20°C 로 보관하였다. 필터의 무게를 측정하기 전에 필터의 수분평형 유지를 위해 계량챔버에 24시간 정도 보관 후 측정을 수행하였다. 준비된 필터들을 8일 동안 매일 연속으로 측정하여 비교하였다.

필터의 정전기 중화는 Soft-X ray(선재하이테크, SXN-05U, 대한민국)를 사용하여 X-ray 펄스에 필

Table 1. Temperature and humidity variability over 24-hr periods. Min., Max., and SD represent minimum, maximum, and standard deviation.

Day	Temperature				Humidity			
	Min.	Max.	Mean	SD	Min.	Max.	Mean	SD
	℃	℃	℃	℃	%	%	%	%
1	21.3	25.1	23.0	1.2	32.6	38.1	35.7	1.6
2	21.2	25.2	23.1	1.2	32.4	38.5	35.6	1.7
3	21.4	25.4	23.3	1.1	32.4	38.3	35.5	1.6
4	21.5	25.4	23.3	1.1	32.8	38.5	35.7	1.6
5	21.4	25.4	23.5	1.2	33.1	40	36.2	1.8
6	21.2	25.4	22.9	1.3	33.8	40.2	37.5	2.0
7	21.4	25.3	23.2	1.2	34	40.2	37.0	1.9
8	22.1	25.5	23.8	1.0	33.4	39.8	36.0	1.5

터를 30초간 노출하여 필터 측정에 오류를 줄 수 있는 입자의 전하를 중화하였다. 계량챔버 내 필터의 이동 시 필터의 오염을 방지하기 위해 테프론 코팅된 핀셋을 사용하였다. 실험용 필터를 칭량할 때 한국 계량계측 시험 연구소에서 인증하는 F1급(허용오차 ± 0.02 mg) 표준분동으로 매번 칭량 하여 마이크로 저울 상태가 정상적으로 작동 하는지 확인하였다. 각 필터의 무게를 측정하고 저울에서 제거한 후 저울의 무게가 0으로 돌아가는지 확인 후 다음 측정을 시작하였다.

3. 결과 및 고찰

8일 동안 측정된 설정온도, 측정온도, 측정 습도, 평균값, 표준편차를 Table 1에 나타냈다. 계량챔버내의 평균 온도는 $23.2 \pm 1.2^\circ\text{C}$ (표준편차 : σ)이었다. 평균 습도는 36.4% 이고 표준편차는 1.9% 으로 미국 EPA 기준(온도 $20 - 23 \pm 2^\circ\text{C}$, 상대습도 $30 - 40 \pm 5\%$)을 충족하는 수준으로 유지되었다(US EPA, 2016). Fig. 2는 연속 8일 동안 평균 온도와 평균 상대습도의 변화량이다. 온도는 평균 $23.0 - 23.8^\circ\text{C}$, 표준편차 $\pm 1.3^\circ\text{C}$ 에서 유지되었다. 상대습도는 평균 $35.5 - 37.5\%$, 표준편차 $\pm 2.0\%$ 에서 유지되었다. Carlton and Teitz(2002)는 8일 동안 평균온도에서 표준편차 $\pm 0.2^\circ\text{C}$, 평균습도에서 $\pm 0.8\%$ 였다. Allen et al. (2001)의 경우 온도는 24시간 기준으로 $22.2 \pm 1.8^\circ\text{C}$ 이었고, 습도는 $34.8 \pm 2.5\%$ 였다. Kuo et al.(2015)는 60일 동안 평균온도 $18 - 23^\circ\text{C}$, 습도는 $30 - 35\%$ 를 유지하였다.

Carlton and Teitz(2002)가 개발한 계량챔버의 가

열은 500 Watt 전열선을 사용하였고, 냉각은 외부 실린더 CO_2 가스를 챔버 내부에 일정한 방향으로 흘려주면서 Proportional-Integral-Differential (PID) 컨트롤러를 사용하여 온도를 자동으로 조절하였다. 습도 조절은 소형 기습기와 일반 건조제를 온-오프 식으로 조절하였다. 이 방법은 건조제 입자가 챔버 내부에 유입될 수 있고 건조제의 사용기한이 짧다는 단점이 있다. EPA Region 2의 경우 제습에 질소가스를 온-오프 방식으로 흘려주어 조절했다(Carlton and Teitz, 2002). Kuo et al.(2015)의 경우 468 cm 길이의 혼합챔버에 연화마그네슘 수용액에 공기를 흘려주어 습도를 조절하였고, 온도는 칭량실 전체 온도를 $20 - 23^\circ\text{C}$ 로 설정하여 조절하였다. 본 연구에서 개발한 계량 챔버는 이전에 개발된 계량챔버와는 다르게 외부 유입되는 공기나 가스 없이 내부의 습도와 온도를 자동으로 조절하여 유지관리가 간편하고 비용이 저렴하다. 또한 US EPA(2016)에서 제시하는 계량챔버 측정조건에 부합하는 환경을 상용계량챔버 대비 저렴한 비용으로 제작하였다. 계량챔버는 측정에 필요한 환경요소를 지속해 관찰할 필요가 있다.

Table 2는 8일 동안 측정된 필터와 표준 금속의 질량이다. 공 시료는 10회 측정하여 검출한계를 결정하였다. Blank는 공필터, $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ 는 $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ 입자가 포집된 필터, Combustion1과 Combustion2는 플라스틱 연소 미세먼지가 포집된 필터, SOA는 이차유기 에어로졸이 포집된 필터이다.

Standard, Blank, $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$, Combustion1, Combustion2, SOA 필터의 평균질량은 각각 1.008, 140.350, 137.166, 89.451, 89.919, 139.265 mg 이

Table 2. Replicate gravimetric filter analysis for method detection limit determination.

day	Standard	Blank	(NH4)2SO4	Combustion1	Combustion2	SOA
	mg	mg	mg	mg	mg	mg
1	1.008	140.351	137.166	89.451	89.919	139.267
2	1.008	140.351	137.166	89.451	89.919	139.265
3	1.008	140.351	137.166	89.451	89.919	139.264
4	1.008	140.351	137.166	89.450	89.919	139.266
5	1.008	140.350	137.166	89.450	89.920	139.265
6	1.008	140.350	137.166	89.450	89.920	139.265
7	1.008	140.350	137.168	89.451	89.920	139.266
8	1.008	140.350	137.167	89.450	89.920	139.266
Mean	1.008	140.350	137.166	89.451	89.919	139.265
σ	8.51E-08	1.64E-06	3.89E-06	2.09E-06	9.24E-07	4.23E-06

고, 표준편차는 각각 0.0001, 0.0005, 0.0007, 0.0005, 0.0004, 0.0008 mg이다. 본 실험기간 동안 필터 질량의 변화는 방법검출한계인 1.8 μg 이하로 측정되었다. Carlton and Teitz(2002)의 경우 PM_{2.5} 가 포집된 샘플의 표준편차는 0.001 - 0.003 mg, 방법검출한계는 6.3 μg 이었다. Allen et al.(2001)은 미국 9개 연구실이 참여한 round-robin 칭량 테스트의 하나로 20개의 테프론 (Pall, RP2J037, 독일) 공필터를 각 실험실에 전달하여 측정하였다. 기술 및 배송의 어려움 때문에 입자가 포집된 필터는 측정이 실행되지 않았다. 공필터의 잔차(잔차 : 9개 연구실에서 측정한 평균값에서 해당 실험실 측정값을 뺀 값)는 다른 9개의 시설과 유사한 평균 8 μg 이었다. 24시간 기준 공필터의 평균 절대변화는 $1.8 \pm 1.7 \mu\text{g}$ 이었다. Kuo et al.(2015)는 37 mm 크기의 MCE (SKC, 225-1938, 미국), Glass Fiber(GF; SKC, 225-702, 미국), PVC(SK, 225-5-37, 미국), Zefluor (Pall, P5PJ037, 미국), Teflon(Pall, R2PJ037, 미국), Quartz Fiber(QF; SKC, 225-1827, 미국), Aluminum Foil(AF; MSP, 0135-01-0014, 미국)와 5개의 블랭크 필터에 대해 테스트하였다. MCE, GF, PVC, Zefluor, Teflon, QF, AF 필터를 상대습도 35%와 77% 환경에서 10회씩 칭량해 비교하였다. MCE, GF, PVC, Zefluor, Teflon, QF, AF 필터의 질량변화는 각각 0.418 ± 0.0008 , 0.057 ± 0.0003 , 0.006 ± 0.0007 , 0.0009 ± 0.0009 , 0.003 ± 0.0005 , 0.004 ± 0.0005 , 0.001 ± 0.0004 mg이었다. MEC 필터의 질량변화는 0.418 mg으로 흡습성의 영향이 가장 큰 것으로 나타났다. 또한

포집된 에어로졸의 흡습성에 대해서도 평가하였다. Teflon, PVC, GF, MCE 필터에 Polymeric methyl methacrylate(PMMA), Magnesium chloride hexahydrate ($\text{MgCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$), Ammonium nitrate (NH_4NO_3), Sodium chloride(NaCl)를 분무하여 1 μm 크기의 입자를 상대습도 각각 0, 40, 60, 75%로 약 0.5 mg씩 포집하였다. PMMA는 비조해성으로 가습하지 않았다. 계량챔버의 상대습도는 35%에서 칭량하여 질량을 비교하였다. PMMA, MgCl_2 , NH_4NO_3 , NaCl 입자의 흡습성에 따른 질량 차이는 각각 0.02, 0.2, 0.3, 1.2 mg이었다. 이는 필터시료의 습도제어나 컨디션이 되지 않으면 질량의 변화가 있음을 보여준다. 특히 NaCl의 경우 흡습성에 의한 질량 차이가 가장 크게 나타났다.

US EPA(2016)에서 실험실과 현장 공필터의 허용오차 기준은 각각 ± 15 , $\pm 30 \mu\text{g}$ 이내로 되어있다. 본 연구에서 각 샘플 무게의 표준편차는 매우 낮은 수준인 1 μg 으로 그 기준을 충족하였다. Fig. 2에 제시된 데이터를 이용하여 본 연구의 방법검출한계(Method Detection Limit : MDL)를 합동표준편차의 3배로 결정하였다. 합동표준편차는 다음과 같이 구하였다.

$$\text{합동표준편차}(\sigma_{pooled}) =$$

$$\sqrt{\frac{(n_1 - 1)s_1^2 + (n_2 - 1)s_2^2 + \dots + (n_k - 1)s_k^2}{n_1 + n_2 + \dots + n_k - k}}$$

여기서 k는 그룹의 개수, n_k 는 그룹 k의 샘플 사이즈,

s_k 는 그룹 k 의 표준편차이다. 합동표준편차와 방법검출 한계는 각각 $0.6 \mu\text{g}$ 과 $1.8 \mu\text{g}$ 로 나타났다. Table 3은 계량챔버 초기에 설치된 부품의 실제 비용이다. 대리석 테이블, 일회용 페트리디쉬, 핀셋 등은 비용에 포함되지 않았다. 마이크로저울을 포함한 가격은 21,202,000 원(USD14,760)이고, 마이크로저울 가격을 제외하면 6,202,000원(USD4,320)이다. 에어컨, 저온순환수조, 온도조절 가열판 등 전기 사용 비용은 산정하지 않았다. Carlton and Teitz(2002)가 개발한 계량챔버의 비용은 미화 23,230 달러였다. 19년 전 제작된 점을 감안하여 대한민국 2021년 물가상승률(소비자 물가지수, 1.52배)을 적용하면 마이크로 저울을 포함하여 48,522,080원(USD35,310)이고, 저울을 제외한 제작 비용은 29,096,538원(USD20,270)이다. Allen et al.(2001)이 개발한 계량챔버의 비용은 마이크로 저울을 제외하고 미화 약 5,000 달러였다. 20년 전 제작된 비용을 감안해서 대한민국 2021년 기준 물가상승률(소비자 물가지수, 1.56배)을 적용하면 10,443,840원(USD7,268)이다. 마이크로 저울과 전자제품의 비용은 포함되지 않았다.

Table 3. Initial costs for preparation of the weighing facility.

Item	Cost (₩)
Sartorius microbalance	15,000,000
Refrigerated circulation bath	2,500,000
Soft X-ray	2,300,000
Acrylic box	700,000
Elitech temperature and humidity data logger	198,000
PVC glove	160,000
Heating plate	150,000
Magnesium chloride (1 kg)	100,000
Standard weight metal	50,000
On-off temperature controller	30,000
Copper tube 2 m	14,000
Total	21,202,000

4. 결론

본 연구에서 PM 필터의 중량 측정을 위해 외부와 밀폐시켜 자연 기류를 차단한 챔버를 제작하고, 온도와 습도를 적절히 제어할 수 있는 장치를 설치하였다. 제작된

계량챔버의 사용 온도와 습도는 US EPA 요구조건을 충족하였다. US EPA의 $\text{PM}_{2.5}$ 의 필터 무게 측정에 대한 정도관리에서 실험실과 현장 공필터 측정의 표준편차는 15와 $30 \mu\text{g}$ 이내로 되어있다(US EPA, 2016). 본 연구에서 실험실 공필터와 샘플 필터 측정의 표준편차는 $1 \mu\text{g}$ 으로 이 기준을 충족하였다. 본 연구의 계량챔버는 상용 제품의 약 1/5 가격으로 설치되었으나, 상업 제품에 비해 기능이 제한적이다. 본 연구에서 필터 무게 측정의 좋은 결과는 제작된 계량챔버의 엄격한 온도와 습도 조절 때문에 가능하였다. 앞으로도 계량챔버는 필터 무게의 측정에 필요한 환경을 유지해 주기 위해서 지속적인 모니터링과 관리가 필요하다.

REFERENCES

- Allen, R., Box, M., Liu, L. J. S., Larson, T. V., 2001, A Cost-effective weighing chamber for particulate matter filters, *J. Air Waste Manag. Asso.*, 51(12), 1650-1653.
- Brown, A. S., Yardley, R. E., Quincey, P. G., Butterfield, D. M., 2006, Studies of the effect of humidity and other factors on some different filter materials used for gravimetric measurements of ambient particulate matter, *Atmos. Env.*, 40, 4670-4678.
- Carlton, A. G., Teitz, A., 2002, Design of a cost-effective weighing facility for $\text{PM}_{2.5}$ quality assurance, *Journal of the Air & Waste Management Association*, 52(5), 506-510.
- Charell, P. R., Hawley, R. E., 1981, Characteristics of water adsorption on air sampling filters, *American Indus. Hygiene Assoc. J.*, 42, 353-360.
- Kuo, Y. M., Hsu, C. W., Chen, J. Y., Huang, S. H., Lee, L. H., Chen, C. C., 2015, Development of a reliable and cost-effective weighing chamber for aerosol sample analyses, *Aerosol and Air Quality Research*, 15, 749-758.
- Lawless, P. A., Rodes, C. E., 1999, Maximizing data quality in the gravimetric analysis of personal exposure sample filters, *J Air Waste Manag. Assoc.*, 49, 1039-1049.
- Marsh, K. N., 1987, Recommended reference materials for the realization of physiochemical properties, Ch. 2, Ed.; Blackwell Scientific Publications, Oxford UK, 270.
- Ministry of Environment (MOE), 2022, Air pollution process test standards, fine Particulate Matter($\text{PM}_{2.5}$) in ambient air - gravimetric measurement method, National Institute of Environmental Science, ES

- 01606.1.
- Tierney, G.P., Conner, W. D., 1967, Hygroscopic effects on weight derterminations of particulates collected on glass-fiber filters, American Indus. Hygiene Assoc. J.. 28. 363-365.
- Tsai, C. J., Chang, C. T., Shih, B. H., Aggarwal, S. G., Li, S. N., Chein, H. M., Shih, T. S., 2002, The effect of environmental conditions and electrical charge on the weighing accuracy of different filter materials, Sci. Total Environ.. 293, 201-206.
- U.S. Environmental Protection Agency (US EPA), 2016, Quality assurance guidance document 2.12: Monitoring $PM_{2.5}$ in ambient air using designated reference or class I equivalent methods, <http://www.epa.gov>.
-
- Research Fellow. Jun-Hyun Park
Department of Air Quality Research, Climate and Air Quality Research Division, National Institute of Environmental Research (NIER)
pjh4456@korea.kr
 - Professor. Ho-Jin Lim
Department of Environmental Engineering, Kyungpook National University
hjljm@knu.ac.kr