

PM10 질량농도 측정을 위한 시료채취기의 비교 연구

박주면 · 구자건 · 정태영 · 권동명 · 유종익 · 서용칠[†]

연세대학교 환경공학부

(2008년 8월 26일 접수, 2009년 2월 27일 채택)

A Comparison Study of Aerosol Samplers for PM10 Mass Concentration Measurement

Ju-Myon Park · Jakon Koo · Tae-Young Jeong · Dong-Myung Kwon · Jong-Ik Yoo · Yong-Chil Seo[†]

Department of Environmental Engineering, YIEST, Yonsei University

ABSTRACT : A PM10 (aerodynamic diameter $\leq 10 \mu\text{m}$) sampler is used to quantify the potential human exposure to suspended particulate matter (PM) and to comply with the governmental regulation. This study was conducted to compare and evaluate the same PM10 cutpoint and different slopes between United States Environmental Protection Agency (USEPA) PM10 sampling criterion and American Conference of Governmental Industrial Hygienists/Comité Européen de Normalization/International Organization for Standardization thoracic PM10 sampling criterion through theory and experiment. Four PM10 samplers according to the USEPA criterion and one RespiCon sampler in accordance with the thoracic PM10 criterion were used in the present study. In addition, one DustTrak monitor was used to measure real time PM10 mass concentrations. All six aerosol samplers were tested in a PM generation chamber using polydisperse fly ash. Theoretical mass concentrations were calculated by applying the measured particle size distribution characteristics (geometric mean = $6.6 \mu\text{m}$, geometric standard deviation = 1.9) of fly ash to each sampling criterion. The measured mass concentrations through a chamber experiment were consistent with theoretical mass concentrations in that a RespiCon sampler with the thoracic PM10 criterion collected less PM than a PM10 sampler with the USEPA criterion. The overall chamber experiment results indicated, when a PM10 sampler was used as a reference sampler, that (1) a RespiCon sampler had a normalizing factor of 1.6, meaning that this sampler underestimated an average 60% of PM10 mass sampled from a PM10 sampler, and (2) a DustTrak real-time monitor using a PM10 inlet had a calibration factor of 2.1.

Key Words : PM10 Sampler, Thoracic Sampler, Real-time Monitor, Particulate Matter, Sampling Criterion

요약 : PM10(공기역학 직경 $\leq 10 \mu\text{m}$) 시료채취기는 사람이 부유 먼지에 잠재적으로 노출되는 정도를 정량화하고 정부의 규제에 대응하기 위한 목적으로 사용된다. 본 연구는 동일한 PM10 분리한계 직경을 가지지만 다른 기울기를 가지는 미국 환경청의 PM10 시료채취 기준과 미국산업위생전문가협회/유럽표준위원회/국제표준기구의 흉곽성 PM10 시료채취 기준을 이론과 실험을 통해 비교 평가하고자 수행되었다. 이를 위해 미국 환경청의 기준을 따르는 4개의 PM10 시료채취기와 흉곽성 PM10 기준과 일치하는 1개의 RespiCon 시료채취기를 비교 평가 수단으로 사용하였으며, 1개의 DustTrak 측정기를 PM10의 실시간 질량농도를 확인하기 위하여 사용하였다. 6개 시료채취기를 다양한 크기 분포를 가지는 비산재를 이용하여 입자 발생 챔버 안에서 실험하였다. 이론적 질량농도는 측정된 비산재의 입자크기 분포 특성(기하평균 = $6.6 \mu\text{m}$, 기하표준편차 = 1.9)을 각 시료채취 기준에 적용하여 계산하였다. 챔버 실험을 통하여 측정된 질량농도 결과는 흉곽성 PM10 시료채취 기준을 가지는 RespiCon 시료채취기가 미국 환경청의 PM10 기준을 가지는 PM10 시료채취기보다 상대적으로 작은 질량농도를 측정함으로써 이론적 질량농도와 일치하였다. 전체적 챔버 실험 결과는 PM10 시료채취기를 기준 시료채취기로 사용하였을 때, (1) RespiCon 시료채취기는 PM10 시료채취기로 포집된 PM10 먼지 질량농도에 비해 평균 60% 정도 낮게 측정된 것을 의미하는 정규화계수 1.6으로 나타났으며 (2) PM10 유입구를 사용한 DustTrak 실시간 채취기는 2.1의 보정계수를 가지는 것으로 분석되었다.

주제어 : PM10 시료채취기, 흉곽성 시료채취기, 실시간 측정기, 먼지, 시료채취 기준

1. 서론

먼지란 대기 중에 떠다니거나 흩날려 내려오는 입자상물질(PM, particulate matter)로 공기 중에 부유하는 고체상 또는 액체상의 미세한 물질을 말한다.¹⁾ 환경정책기본법²⁾에

서는 미세먼지(PM10) 즉 공기역학 직경(AD, aerodynamic diameter)이 $10 \mu\text{m}$ 이하인 먼지에 대한 환경기준을 설정하여 관리하고 있다. PM의 잠재적 위험성은 입자의 크기, 질량농도, 비중, 용해성, 화학성분 등과 관련성이 높으며 호흡기의 어디에 침착하느냐에 따라 건강 위해성 정도가 결정된다. 미국 환경청(USEPA, United States Environmental Protection Agency)은 연방대기질 관리기준(NAAQS, National Ambient Air Quality Standards)을 제정하여 PM10 (AD

[†] Corresponding author

E-mail: seoyc@yonsei.ac.kr

Tel: 033-760-2438

Fax: 033-763-5224

$\leq 10 \mu\text{m}$)과 $\text{PM}_{2.5}$ ($\text{AD} \leq 2.5 \mu\text{m}$)를 주요 오염물질로 지정하고 있다. 1990년대 초반 미국산업위생전문가협회(ACGIH, American Conference of Governmental Industrial Hygienists),³⁾ 유럽표준위원회(CEN, Comité Européen de Normalisation),⁴⁾ 국제표준기구(ISO, International Organization for Standardization)⁵⁾에서는 PM에 대한 크기별 시료채취기준을 흡입성(inhalable), 흉곽성(thoracic) 및 호흡성(respirable) 먼지로 구분하고 이에 대한 50% 시료채취 중량비율의 공기역학 직경을 각각 $100 \mu\text{m}$, $10 \mu\text{m}$, 및 $4 \mu\text{m}$ 로 협약하였다. PM 노출에 대한 잠재적 위험성을 정량화하기 위하여 PM의 농도를 총부유먼지(때로는 $100 \mu\text{m}$ 보다 큰 입자를 포함), 흡입성 먼지($\text{AD} \leq 100 \mu\text{m}$), PM_{10} (흉곽성 먼지, $\text{AD} \leq 10 \mu\text{m}$), 호흡성 먼지($\text{AD} \leq 4 \mu\text{m}$), $\text{PM}_{2.5}$ ($\text{AD} \leq 2.5 \mu\text{m}$), $\text{PM}_{1.0}$ ($\text{AD} \leq 1 \mu\text{m}$) 등 여러 크기별로 측정할 수 있는 시료채취기를 사용한다. USEPA에서 PM_{10} 기준을 만족하는 이상적인 시료채취기는 $10 \mu\text{m}$ 보다 큰 모든 입자를 걸러내고 $10 \mu\text{m}$ 이하의 입자를 여과지 위에서 채취한다고 규정하고 있다.⁶⁾ 그러나, 여러 연구자들⁷⁻⁹⁾은 현재 사용되는 PM_{10} 시료채취기들이 $10 \mu\text{m}$ 이하의 입자를 여과지 위에 완벽하게 채취하지 못함을 보고하였다. PM_{10} 시료채취기의 특성은 분리한계(CP, cutpoint) 직경과 기울기(slope)를 가지는 누적시료채취효율로 나타낸다.¹⁰⁾ 분리한계 직경은 50%의 누적채취효율을 가지는 공기역학 직경을 말하며 시료채취효율의 기울기는 $\sqrt{\text{AD}_{84.1}/\text{AD}_{15.9}}$ 로 나타낸다. 여기서 $\text{AD}_{84.1}$ 과 $\text{AD}_{15.9}$ 는 각각 누적시료채취효율의 84.1%과 15.9%에 해당하는 공기역학 직경이다.¹⁰⁾

PM_{10} 의 시료채취기준으로는 동일한 $10 \mu\text{m}$ 의 분리한계 직경을 가지는 USEPA의 PM_{10} 시료채취기준¹¹⁾(이하 PM_{10} 기준)과 ACGIH/CEN/ISO³⁻⁵⁾의 흉곽성 PM_{10} 시료채취기준(이하 흉곽성 기준)이 조사되었다. 그러나, 우리나라의 경우 PM_{10} 분리한계 직경에 대한 내용은 환경 관련법을 포함하여 대기오염공정시험법과 한국산업규격 등에서 찾아볼 수 없다. 또한, USEPA PM_{10} 기준¹¹⁾에는 시료채취기가 가져야 하는 기울기 값이 제시되어 있지 않다. 이에 대하여 McFarland와 Ortiz¹²⁾는 USEPA가 승인한 Graseby-Andersen PM_{10} 유입구가 $10.2 \mu\text{m}$ 분리한계 직경과 1.41의 기울기를 가지고 있다고 보고하였다.

본 연구에서는 우리나라에 제시되지 않은 PM_{10} 기준과 흉곽성 PM_{10} 기준을 이론과 실험을 통해 비교 평가하고자 하였다. 이러한 목적을 달성하기 위하여 (1) $10 \mu\text{m}$ 의 동일한 분리한계 직경을 가지는 PM_{10} 기준과 흉곽성 기준을 이론적으로 계산하여 비교하였다. (2) 두 기준과 일치하는 시료채취기를 선택하여 실험을 통하여 측정된 질량농도를 비교 평가하였다. (3) PM_{10} 실시간 질량농도 측정기와 PM_{10} 시료채취기로 측정된 질량농도를 비교 평가하였다.

2. 연구방법

2.1. 공기 시료채취기

PM_{10} 의 질량농도를 측정하기 위하여 USEPA 연방기준 방법(FRM, Federal Reference Method)에 제시되어 있는 4개의 Graseby-Andersen PM_{10} 유입구(Graseby-Andersen model SA246B, Thermo Electron Co., Smyrna, GA, USA)와 ACGIH/CEN/ISO의 시료채취기준인 흡입성, 흉곽성, 호흡성 먼지를 동시에 측정할 수 있는 3단계(stages) 구성의 RespiCon 시료채취기(Models 801132, TSI, Inc., St. Paul, MN, USA) 1개를 사용하였다. 또한, PM_{10} 의 실시간 질량농도를 측정하기 위하여 1개의 DustTrak (Model 8520, TSI Inc., Shoreview, MN, USA)을 사용하였다. 본 연구에 사용된 모든 시료채취기는 채취기 내에서 90° 회전하는 공기 입자의 흐름에서 상대적으로 큰 관성력을 가지는 입자를 걸러내는 충돌 이론(impaction principle)에 근거하여 먼지의 질량농도를 측정한다. PM_{10} 시료채취기는 충돌판(impaction plate)을 사용하여 $\text{AD} \leq 10 \mu\text{m}$ 의 먼지를 여과지 위에 포집하였다. RespiCon 시료채취기는 가상(virtual)의 충돌판을 사용하여 1단계와 2단계에서는 $\text{AD} \leq 10 \mu\text{m}$ 의 먼지를 포집하였고, 3단계에서는 $10 \mu\text{m} < \text{AD} \leq 100 \mu\text{m}$ 의 먼지를 여과지 위에 포집하였다. DustTrak 측정기는 광산란기법(light scattering technology)을 이용하여 실시간 질량농도를 측정하였다. 본 연구에서는 DustTrak의 여러 유입구 중 공기역학 직경 $10 \mu\text{m}$ 의 질량농도를 측정할 수 있는 유입구를 사용하였다.

2.2. 챔버 실험

본 연구에서 사용한 시료채취기를 비교 평가하기 위하여 미국의 농업공기질공학과학센터(Center for Agricultural Air Quality Engineering and Science, Texas, USA)에서 챔버 실험을 수행하였다. 일반 대기환경 중에서 시료채취기로 측정되는 먼지는 그 먼지의 구성 요소가 다양하며 측정되는 장소에서의 공기의 부피와 온도, 압력, 습도 그리고 공기의 방향, 속도, 난류 형성, 채취기의 위치와 높이 등의 영향을 받는다. 이처럼 먼지 측정에 영향을 줄 수 있는 요소들을 최소화하기 위하여 챔버를 제작하여 실험하였다. 이번 연구에 사용한 먼지는 일반 산업시설 먼지를 대표할 수 있도록 입자 크기가 다양한 비산재(fly ash)를 사용하였다. 본 연구에는 사용한 비산재의 입자크기 분포를 확인하기 위해 입자크기 분석기인 Coulter Counter Multisizer (Coulter Counter Multisizer III, Beckman Coulter Inc., Fullerton, CA, USA)를 사용하였다. 연구에 사용된 비산재의 밀도는 Pycnometer (AccuPyc 1330, Micromeritics, Norcross, GA, USA)를 사용하여 측정한 결과 2.7 g/cm^3 이었다. Fig. 1은 전체적인 챔버의 구성을 보여준다. 그림에서 보듯이 공기의 흐름 방향으로 구멍을 가진 칸막이(air straightener), 입자발생장치(feeding system), 덕트 등을 설치하여 챔버 안에서 먼지가 균일하게 분포할 수 있는 구조로 설계하였다. 챔버 안에서 균일한 먼지의 질량농도 측정이 가능한지 확인하기 위하여 본 실험 이전에 여러 차례의 예비실험⁸⁾을 수행하였고 Fig. 1과 같이 입자발생 장치에서의

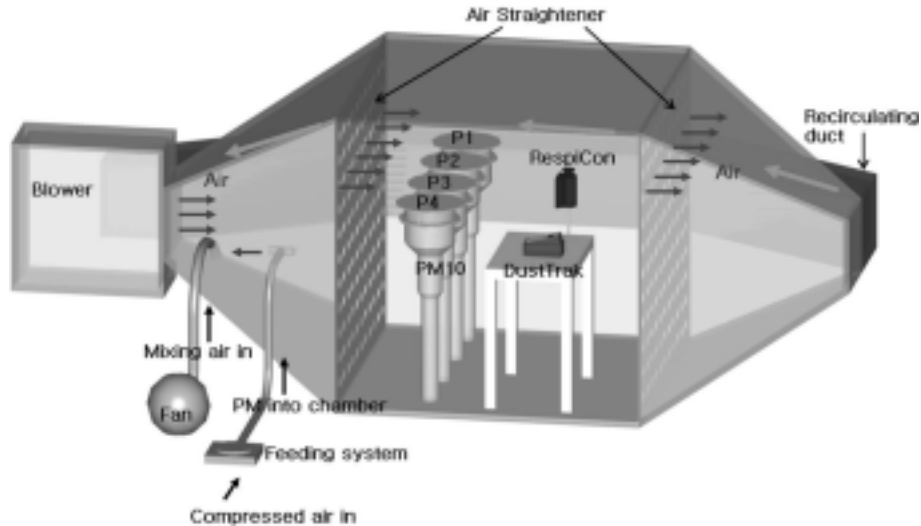


Fig. 1. Experimental setup of PM10, RespiCon, and DustTrak samplers in a PM generation chamber.

입자 투입을 공기 반대 방향으로 변경할 수 있도록 뿔(fan)을 설치하였다. 또한 입자가 최대한 고르게 분포할 수 있도록 혼합 공기(mixing air)를 추가하였다. 본 연구 이전의 챔버 예비실험⁸⁾에서는 Fig. 1의 PM10 시료채취기와 동일한 위치에서 4개의 총부유먼지 시료채취기를 사용하여 먼지의 질량농도를 측정하였으며 실험 결과값 사이에 통계학적으로 유의적 차이가 없었다. 이러한 결과는 시료채취 공간에 균일한 먼지가 분포되어 있음을 의미한다. 본 실험에서는 이전의 실험결과를 바탕으로 챔버 안에서 균일한 먼지가 분포되어 있다는 가정 하에서 실험을 수행하였다.

본 챔버 실험에서는 3회의 실험을 반복하였으며 첫 번째와 두 번째 실험은 각각 1시간, 세 번째 실험은 2시간에 걸친 실험을 수행하였다. 매 실험마다 실험에 사용하였던 비산재가 다음 실험에 섞이지 않도록 청소한 후 새로운 비산재를 실험재료로 사용하였다. 이전의 챔버 예비실험⁸⁾에서 입자의 과대 포집현상을 보였던 PM10 시료채취기에 대하여는 세 번째 실험에서 1시간 실험을 수행하였다. 챔버의 시료채취 공간은 Fig. 1과 같이 가로와 세로의 길이가 각각 2.4 m인 정육면체 모양으로 설계하였다. 챔버 안에서 칸막이의 구멍 뚫린 부분은 전체 칸막이 공간의 18%를 차지하였다. 챔버 안에서 발생한 공기량은 128 m³/min으로 칸막이를 통하여 발생한 유속은 2.1 m/s (128 m³/min / (2.42 m² × 0.18 × 60 s))로 계산되었다. 시료채취기는 챔버 안에서 공기 흐름 방향으로 PM10, RespiCon, DustTrak 순으로 설치되었으며, 시료채취기로 인한 공기 유량의 간섭이 없도록 측정 유입구의 높이를 각각 160 cm, 150 cm, 120 cm로 하였다. 위에 열거된 시료채취기의 공기량은 각각 16.7 L/min, 3.1 L/min, 1.7 L/min을 적용하였다. PM10과 RespiCon에 사용된 여과지는 PTFE Teflon (0.5 μm pore size, Cole-Parmer, Vernon Hills, IL, USA)을 사용하였고 24시간 동안 20°C, 45% 상대습도를 가진 건조기에서 시료채취 전후에 건조하여 측정하였다.^{13,14)} 채취된 입자의 중량을 측정하기 위하여 10 μg 단위까지 측정할 수 있는

전자저울(Model AG245, Mettler Toledo Inc., Hightstown, NJ, USA)을 사용하였으며, 각 실험 전후의 여과지를 수거해 채취된 먼지의 질량을 3회 측정하였다. PM10 시료채취기에는 12초 간격으로 공기량 상태를 측정할 수 있는 압력변환기(PX274, Omega Engineering Inc., Stamford, CT, USA)와 자료저장기(HOBO H8 RH/Temp/2X External, Onset Computer Corp., Pocasset, MA, USA)를 사용하였다. 또한, 공기량을 조절할 수 있도록 diaphragm 펌프(Item 4Z792, Thomas, Sheboygan, WI, USA), needle valve (Model A-68831-00, Cole-Parmer, Vernon Hills, IL, USA), magnehelic pressure gage (Dwyer instruments, Michigan City, IN, USA)를 사용하였다. RespiCon의 공기량 조절을 위해 diaphragm 펌프(Gast DOA-104-AA, Taylor Scientific, St. Louis, MO, USA)를 사용하였으며 공기유량계(Visi-Float, Dwyer instruments, Michigan City, IN, USA)를 사용하여 보정하였다. May,¹⁵⁾ Swanson 등,¹⁶⁾ Mitchell 등¹⁷⁾은 충돌판 위에서 입자반동 현상 연구결과를 보고하였으며 이를 바탕으로 DustTrak의 유입구에 사용된 충돌판 위에는 입자반동 현상을 최소화하기 위하여 그리스(grease) 층을 얇게 입혔다. DustTrak은 입자의 질량농도를 내장된 메모리에 1초 간격으로 매 실험마다 저장하였으며 10 μm의 유입구를 사용하여 PM10 질량농도를 측정하였다.

2.3. PM10의 이론적 특성

PM10과 관련해 공기 중에 부유하는 대부분의 입자크기 분포는 대수정규분포를 가지고 있는 것으로 보고되고 있으며, 대수정규분포는 먼지의 크기 분포를 특성화하는 이론으로 보편적으로 사용되고 있다.¹⁰⁾ 대수정규분포가 가지는 중요성은 입자크기 분포를 기하평균(GM, geometric mean)과 기하표준편차(GSD, geometric standard deviation)의 2가지 용어로 설명할 수 있다는 것이다. 본 연구에서 사용된 비산재의 입자크기 분포를 확인하기 위하여 입자크기 분석기를 사용하였다. 입자크기 분석기로 측정된 256

개 자료의 최적 입자크기 분포를 확인하기 위하여 Weibull⁺⁺ 프로그램(ReliaSoft Corporation, Tucson, AZ, USA, 2007)에 넣었을 때 정규분포, 대수정규분포, 지수분포, 웨이블 등 여러 분포 중에서 대수정규분포를 1순위로 나타내는 것으로 분석되었다. 본 실험에서 사용된 PM10 시료채취기의 측정된 비산재는 입자분석기로 분석할 수 있을 정도의 입자를 확보하지 못하였기 때문에 PM10 시료채취기로 측정된 비산재 입자의 크기 분포를 확인할 수 없었다. 이전의 챔버실험¹⁸⁾에서는 총부유먼지 시료채취기로 측정된 비산재를 입자분석기와 Weibull⁺⁺ 프로그램에 적용하였을 때 11개의 자료 그룹에서 9개의 자료가 대수정규분포를 1순위로 나타냈다. 식 (1)은 공기 중에 부유하는 먼지의 입자크기 분포를 나타내는 대수정규분포의 확률밀도 함수를 보여준다.

입자크기분포 = $f(AD, GM, GSD) = \frac{1}{\sqrt{2\pi AD \ln GSD}} \exp\left[-\frac{(\ln AD - \ln GM)^2}{2(\ln GSD)^2}\right]$ (1)

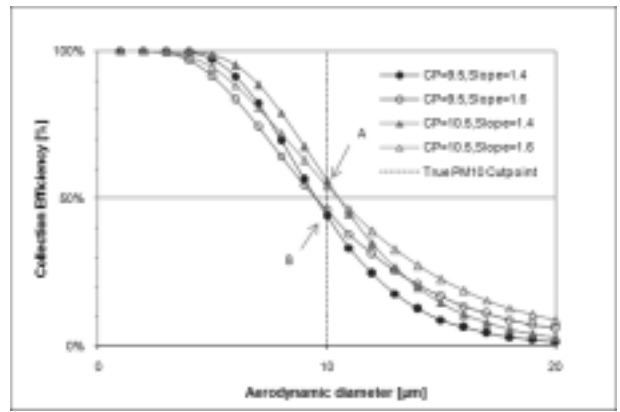
여기서, $f(AD, GM, GSD)$ 는 대수정규확률밀도 함수이다. 입자 크기가 0에서 무한대까지인 누적밀도함수 곡선 아래의 면적은 1이 되며 이상적인 PM10 즉 공기역학 직경 10 μm 까지의 면적의 값은 식 (2)와 같다.

$F(10, GM, GSD) = \int_0^{10} f(AD, GM, GSD) dAD$ (2)

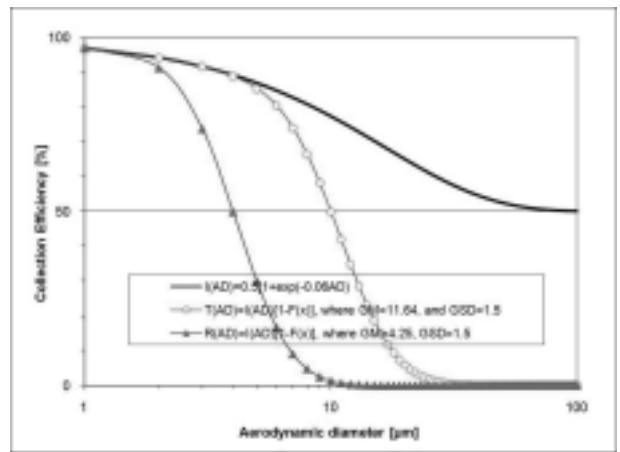
여기서, $F(10, GM, GSD)$ 는 대수정규누적밀도 함수이다. PM10 시료채취 기준을 만족하는 시료채취기의 시료채취 효율(CE, collection efficiency)은 PM10 시료채취기의 분리 한계직경과 기울기(cutpoint와 slope)를 이용하여 공기 중의 입자크기가 $0 \leq AD \leq a$ 의 범위를 가질 때 식 (3)과 같다.

PM10CE = $1 - \int_0^a \frac{1}{\sqrt{2\pi AD \ln \text{slope}}} \exp\left[-\frac{(\ln AD - \ln \text{cutpoint})^2}{2(\ln \text{slope})^2}\right] dAD$ (3)

Fig. 2(a)는 공기역학 직경 10 μm 의 분리한계 직경 기준인 $10 \pm 0.5 \mu\text{m}^{11)}$ 그리고 McFarland와 Ortiz¹²⁾가 실제 측정값을 고려한 기울기 1.5 ± 0.1 을 이용해 시료채취 효율을 살펴본 결과이다. Fig. 2(b)는 PM10 기준과 동일한 분리한계 직경을 가지는 흉곽성 기준의 시료채취 효율을 나타냈다. Fig. 2(a)에서 “A” 위치는 분리한계 직경 10.5 μm 에서 기울기가 1.4와 1.6일 때 시료채취 효율이 각각 55.7%와 54.1%임을 나타내며 “B” 위치는 분리한계 직경 9.5 μm 에서 기울기가 1.4와 1.6일 때 시료채취 효율이 각각 43.9%와 45.7%임을 나타낸다. 이와 같이 PM10 시료채취 기준을 만족하는 시료채취기의 50% 시료채취 중량 비율은



(a)



(b)

Fig. 2. Performance characteristics of (a) a USEPA PM10 sampling criterion and (b) ACGIH/CEN/ISO sampling criteria.

Notes: I(AD), T(AD), and R(AD) are collection efficiencies of inhalable, thoracic, respirable PM as a function of AD in μm . F(x) is a cumulative probability density function of standardized normal variable of x, where $x = \frac{\ln(AD) - \ln(GM)}{\ln(GSD)}$ (ACGIH Appendix D, 1996).

43.9%에서 55.7%까지의 시료채취효율 영역을 나타낸다. 본 연구의 Fig. 2(a)는 PM10 시료채취기로 포집된 입자크기 분포를 Microsoft Excel에서 LOGNORMDIST(AD, LN(cutpoint), LN(slope)) 기능을 사용하여 나타낸 결과이며, 시료채취 효율은 $1 - \text{LOGNORMDIST}(AD, \text{LN}(\text{cutpoint}), \text{LN}(\text{slope}))$ 을 적용하여 계산하였다. PM10 시료채취기로 포집된 먼지의 질량농도는 PM10 시료채취기의 시료채취 효율과 공기 중에 분포하는 입자크기 분포를 가지고 식 (4)와 같이 계산하였다.

PM10 질량농도 = $\int_0^a \text{PM10CE} \cdot \text{입자크기분포} dAD$ (4)

여기서, a는 공기 중에 분포하는 총부유먼지의 최대 크기를 가지는 공기역학 직경이다.

Table 1. Mass concentration (mg/m³) measured from aerosol samplers

Sampler	PM10				RespiCon (PM10)	DustTrak (10 μm inlet used)
	P1	P2	P3	P4		
Test 1	26	34	26	24	17	12
Test 2	17	24	19	18	*	9
Test 3	22	24	21	20	11	11

* No measurement due to a pump problem.

3. 연구결과 및 고찰

3.1. 질량농도 측정값의 비교 및 현미경 분석

Table 1은 이번 연구에 사용된 시료채취기로부터 측정된 PM10 질량농도를 보여주고 있다. 시료채취기의 수행 능력을 비교하기 위하여 유일하게 PM10만 채취하게 설계되어 있는 PM10 시료채취기를 기준 시료채취기로 사용하였다. 본 연구에 사용한 3종류 채취기들로부터 측정된 질량농도 값을 바탕으로 RespiCon과 DustTrak이 정규화계수(normalizing factor) 1.6과 2.1를 가지는 관계식이 성립됨을 확인하였다.

$$\text{PM10 평균질량농도} = 1.6(\text{범위 } 1.0\sim 2.8) \times \text{RespiCon 평균질량농도} \quad (5)$$

$$\text{PM10 평균질량농도} = 2.1(\text{범위 } 1.5\sim 3.0) \times \text{DustTrak 평균질량농도} \quad (6)$$

식 (5)와 (6)에서 정규화계수가 의미하는 것은 RespiCon과 DustTrak을 기준 PM10 시료채취기와 비교하여 각각 평균 60%와 110% 정도의 질량농도를 적게 측정하였거나 기준 PM10 시료채취기가 다른 두 시료채취기와 비교하여 질량농도를 상대적으로 더 많이 측정하였다는 것을 의미한다. 매 실험 후 RespiCon을 분석할 때 각 단계의 구멍과 벽에 많은 먼지들이 부착되어 있는 것을 발견하였다. 이와 같이 RespiCon의 각 단계에서 채취되어야 할 먼지들이 일부 구멍과 벽에 부착되어 정확한 먼지의 포집을 방해하여 실제 측정되어야 할 질량농도보다 상대적으로 낮은 질량농도 값을 보이고 있는 것으로 사료된다.

본 실험에서는 비산재의 물리적 특성을 확인하기 위하여 주사현미경(ESEM E3, Electroscan Inc., Wilmington, MA, USA)을 사용하였다. Fig. 3에서 제시된 그림들은 비산재가 부드러운 표면을 가진 구형의 입자로 수 nm에서 약 20 μm의 크기 분포를 가지고 있음을 보여주고 있다. 또한, 현미경 분석을 통하여 RespiCon이 각 단계에서 호흡성, 흉곽성, 흡입성 시료채취 기준과 일치하는 입자들을 포집하며 PM10 시료채취기도 기준과 일치하는 입자들을 포집한 것을 확인하였다. 그러나 일부 대기환경과 사막 주변,

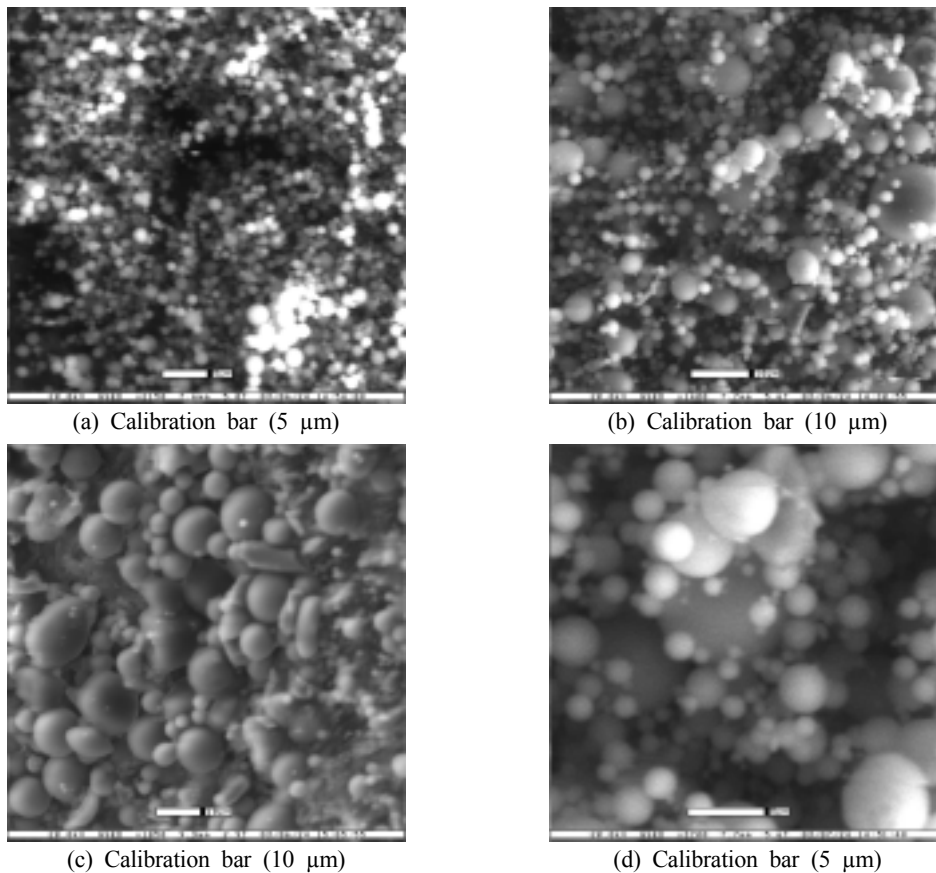


Fig. 3. Particle images showing the cutpoint agreement of (a) a RespiCon Stage 1 for 4 μm, (b) a RespiCon Stage 2 for 10 μm, (c) a RespiCon Stage 3 for 100 μm, (d) a PM10 sampler.

토목공사 현장 등과 같은 작업환경에서는 먼지가 각각 다른 밀도의 비구형 모양을 가지며 공기역학 직경을 가지는 입자와 같은 침강속도를 산정하기 위하여 모양계수(shape factor) 값의 적용이 필요하다. Hind,¹⁰⁾ Wang 등⁸⁾의 연구와 같이 비구형 입자에 대하여 등체적직경(equivalent spherical diameter)으로 분석결과를 제시하는 방식에는 입자의 밀도와 모양계수 값을 적용하여 공기역학 직경으로 계산함으로써 시료채취 기준에 맞는 비교 분석을 할 수 있어야 한다.

3.2. DustTrak의 질량농도 및 보정계수

Fig. 4는 DustTrak 채취기로 측정된 실시간 질량농도로써 챔버 안에서 1초 간격의 평균 질량농도 값을 보여주고 있다. 그림과 같이 DustTrak은 다른 시료채취기에서 측정되는 1개의 질량농도 결과 값이 아닌 시간별 질량농도를 보여주며, 바람의 방향과 속도가 일정하지 않은 대기환경과 작업환경에서 전체적인 질량농도의 흐름을 파악할 수 있는 장점이 있다. 그러나 DustTrak의 질량농도 값은 여러 조사에 의해 ISO 12103-1, A1 시험 먼지(미국 Arizona 사막 먼지)에 대한 보정계수 1값을 가진다. 이번 연구에 사용된 비산재는 보정되지 않은 것이다. 식 (6)에서 PM10 시료채취기를 기준 시료채취기로 사용하여 측정된 질량농도 값으로부터 계산된 2.1(범위 1.5~3.0)은 본 연구에 사용된 비산재의 보정계수이다. 그러나 DustTrak이 이전의 연구에서 다른 형태의 먼지를 위해 보정되었다면 정확한 먼지의 질량농도 측정을 위하여 아래 식에 의해 다시 보정되어야 한다.

$$\text{보정계수} = \frac{\text{기준농도}}{\text{DustTrak 농도}} \times \text{이전에 사용되었던 보정계수} \quad (7)$$

본 연구에 사용된 DustTrak은 10 μm 층돌판 유입구를 사용하여 AD>10 μm인 입자들을 층돌판 위에서 포집하고 AD≤10 μm인 입자로부터 산란된 빛의 양을 질량농도로 계산한다. 매 실험 후 DustTrak을 청소할 때 층돌판 위에 새롭게 형성된 먼지층을 발견하였다. 이는 입자의 반동현상을 최소화하기 위하여 층돌판 위에 입혔던 그리스 위에 포집된 새로운 입자 층으로 입자들 사이의 반동현상을 일으켰을 것으로 사료된다. Tunrner와 Hering¹⁹⁾과 Dunbar 등²⁰⁾도 층돌판 위에서 만들어진 입자층을 발견하였으며 입자층에 의한 반동현상을 보고하였다. 본 연구에서 사용된 DustTrak은 챔버 안에서 분포된 비산재에 대하여 보정계수를 계산하였다. 그러나 입자의 모양, 구성, 비중이 변화하는 외부 대기환경 또는 작업환경에서는 질량농도 측정을 위한 정확한 보정계수 값을 얻을 수 없다. 또한, Park¹⁸⁾은 같은 원리로 질량농도를 측정하는 DustTrak과 SidePak 채취기를 같은 크기의 층돌판 유입구를 가지고 실험하였을 때 두 측정기 사이에 보정계수가 필요하다고 보고하였다. 이와 같이 광산란기법을 사용하는 DustTrak은 상대

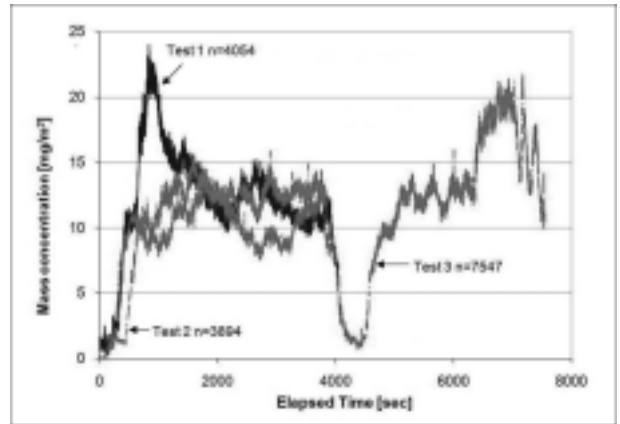


Fig. 4. PM10 mass concentration measurements from a DustTrak real-time monitor.

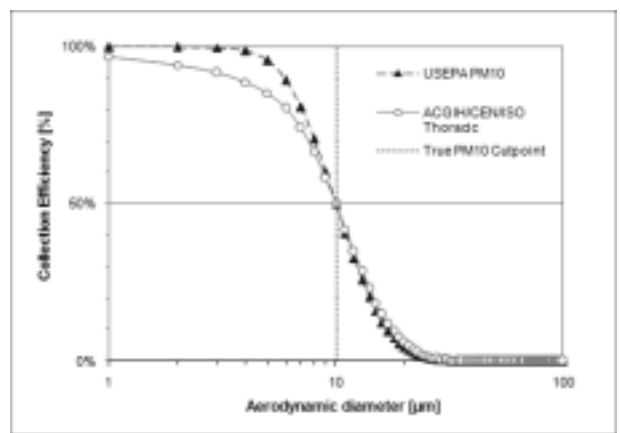


Fig. 5. Comparison of a USEPA PM10 curve with an ACGIH/CEN/ISO thoracic curve.

적 질량농도 측정에는 유용하지만 절대적 질량농도의 측정에는 유용하지 못한 것으로 사료된다.

3.3. USEPA와 ACGIH/CEN/ISO 시료채취기준 비교 및 측정값 비교

Fig. 5에서는 공기역학 직경 10 μm의 동일한 분리한계 직경을 가지는 PM10 기준과 흉곽성 기준을 한 그래프 안에서 비교하였다. 두 기준을 1.5의 동일한 기울기 값을 가지고 비교하였을 때, PM10 기준이 흉곽성 기준보다 더 가파른(참고: 수직의 기울기=1.0) 기울기를 보였다. 이 기울기는 PM10 기준을 가지는 시료채취기가 흉곽성 기준을 가지는 시료채취기보다 작은 입자(AD≤10 μm)를 더 많이 포집하며, 큰 입자(AD>10 μm)를 적게 포집하는 것을 의미한다. 이를 이론적으로 확인하기 위하여 같은 비산재를 사용하여 실험하였던 Park¹⁸⁾의 비산재 입자크기분포 특성(GM = 6.6 μm, GSD = 1.9)과 총부유먼지의 평균 질량농도 29 mg/m³를 이용하여 이상적인 PM10(식 (2)), PM10 기준(식 (3), 여기서 cutpoint = 10 μm와 slope = 1.5), 흉곽성 기준(Fig. 2.(b)의 T(AD))을 식 (4)에 적용하였을 때 위 기준을 가지는 시료채취기들은 각각 21.5 mg/m³, 20.5 mg/m³

m³, 19.1 mg/m³의 질량농도 값을 가진다. 각 식에서는 총부유먼지의 최대 공기역학 직경을 100 μm로 가정하였다. 이와 같이 PM10 기준을 가지는 시료채취기(20.5 mg/m³)는 흉곽성 기준을 가지는 시료채취기(19.1 mg/m³)와 비교하였을 때 상대적으로 큰 질량농도를 가지는 것으로 계산된다. 본 연구를 통하여 4개의 PM10 시료채취기로 3차례 측정된 평균 질량농도 값(22.9 mg/m³ ± 4.6 mg/m³)을 이론적 계산 값(20.5 mg/m³)과 비교하였을 때 이론적 계산 값이 측정값 범위 안에 있었다. 그러나 이전의 총부유먼지 시료채취기를 사용한 Wang 등⁸⁾의 실험에서는 4개의 총부유먼지 시료채취기 사이에 유의적 차이가 없었지만, 본 연구에 사용된 4개의 PM10 시료채취기로부터 측정된 평균 농도 값 등을 이원분산분석(two-way ANOVA, analysis of variance)을 실시하였을 때는 p값이 0.009로 통계학적으로 유의적 차이가 있었다. 이전의 Wang 등⁸⁾의 실험과 비교하여 틀려진 점이 있다면 RepiCon 시료채취기 설치를 위한 삼발이와 DustTrak 설치를 위한 테이블 추가되었다는 것이다. 이러한 추가된 장치들이 시료채취공간에서 불규칙한 공기 기류를 형성하여 균일한 공기의 흐름을 방해하여 먼지를 포집하는데 영향을 주었을 것으로 사료된다. 또한, Fig. 4의 DustTrak 실시간 질량농도 측정값은 시료채취 공간에서 입자의 불규칙한 질량농도 변화를 보여주고 있다. 이러한 결과는 입자발생장치로 투입되는 입자가 공기순환 덕트를 통해 재투입되는 입자와 혼합되어 시료채취 공간에서 균일한 입자 분포를 방해한 이유 때문인 것으로 사료된다.

각 실험 이후 챔버 안을 청소할 때 칸막이 구멍, 천장, 옆벽, 입자발생 장치의 호스, 휠 등에서 많은 입자들이 발견되었다. 이와 같이 챔버 안에서 분포 되지 못했던 입자들이 본 연구에 사용된 시료채취기로 하여금 실제 측정될 질량농도보다 낮은 질량농도를 측정하게 하였을 것으로 사료된다. 향후 연구에서는 순환시스템을 단일시스템으로 구성하고 챔버 안에서 입자의 손실을 최대한 방지할 수 있는 세밀한 입자발생 장치 및 챔버를 제작하여, 시료채취기 사이에 유의적 차이가 없음을 입증하는 실험이 요망된다. 본 연구에서는 먼지 발생 사업장에서 진행되는 후속 연구를 위하여 챔버 안에서 mg/m³ 단위의 고농도의 먼지 환경을 조성하여 실험하였다. 향후에는 일반 대기환경에서 측정되는 μg/m³ 단위의 농도를 고려하여 저농도에서의 챔버 실험 연구와 대기환경에서의 측정 연구가 필요하다. 더 나아가 이론적으로 계산된 PM10 기준과 흉곽성 기준의 질량농도를 심층적으로 분석해 세계적으로 단일화된 PM10 시료채취 기준을 제시할 수 있는 연구가 진행되어야 할 것이다.

4. 결론

본 연구에서는 PM10 질량농도 측정을 위한 USEPA의 PM10 시료채취 기준과 ACGIH/CEN/ISO 흉곽성 PM10 시

료채취 기준을 이론적으로 비교하였으며, PM10 기준을 따르는 4개의 PM10 시료채취기와 흉곽성 기준을 만족하는 1개의 RespiCon 시료채취기를 입자 크기가 다양한 비산재를 발생시키는 챔버 안에 설치하여 질량농도를 측정 비교하였다. 또한, 실시간으로 질량농도를 측정할 수 있는 1개의 DustTrak을 사용하여 그 농도 값을 PM10 시료채취기와 비교 평가하였다. 챔버 안에서 분포된 비산재의 입자 크기 분포 특성을 가지고 PM10 시료채취 기준과 흉곽성 PM10 시료채취 기준을 이론적으로 비교하였을 때, 흉곽성 기준을 가지는 시료채취기가 PM10 기준을 가지는 시료채취기보다 더 적은 먼지를 포집하였다. 챔버에서 측정된 PM10 질량농도는 RespiCon 시료채취기가 PM10 시료채취기보다 상대적으로 작은 양의 먼지를 포집하였다는 점에서 이론적 질량농도와 일치하였다. PM10 질량농도 측정을 위한 챔버 실험 결과는 PM10 시료채취기를 PM10 시료채취기를 기준 시료채취기로 사용하였을 때 RespiCon 시료채취기는 PM10 시료채취기로 포집된 먼지 질량의 평균 60%를 덜 채취한 것을 의미하는 정규화계수 1.6을 가진다. 또한, PM10 충돌판 유입구를 사용한 DustTrak 채취기는 2.1의 보정계수를 가지는 것으로 연구되었다.

참고 문헌

1. 환경부, 대기환경보전법(2007).
2. 환경부, 환경정책기본법 시행령(2006).
3. American Conference of Governmental Industrial Hygienists, Threshold Limit Values for Chemical Substances and Physical Agents and Biological Exposure Indices, ACGIH, USA, pp. 83~86(1996).
4. Comité Européen de Normalisation, Workplace Atmospheres - Size Fraction Definitions for Measurement of Airborne Particles in the Workplace (CEN EN 481), Brussels, CEN, pp. 3~11(1993).
5. International Organization for Standardization, Air Quality Particle Size Fraction Definition for Health-Related Sampling (ISO CD 7708), Geneva, ISO, pp. 3~6(1995).
6. Buser, M., Parnell, C. B. Jr., Lacy, R. E., and Shaw, B. W., Inherent biases of PM10 and PM2.5 samplers based on the interaction of particle size and sampler performance characteristics, in Proceedings of ASAE, St. Joseph, MI, Paper No. 011167(2001).
7. Pargmann, A. R., Parnell, C. B. Jr., and Shaw, B. W., Performance characteristics of PM2.5 samplers in the presence of agricultural dusts, in Proceeding of ASAE, St. Joseph, MI, Paper No. 014008(2001).
8. Wang, L., Wanjura, J. D., Parnell, C. B. Jr., Lacey, R. E., and Shaw, B. W., "Performance characteristics of a low-volume PM10 sampler," *Transactions of the ASABE*, **48**(2), 739~748(2005).
9. US Environmental Protection Agency Method IO-2: Inte-

- grated Sampling of Suspended Particulate Matter (SPM) in Ambient Air, Washington DC, pp. 1(1999).
10. Hinds, W. C., "Ch 4: Particle size statistics," Aerosol technology properties, behavior, and measurement of airborne particles. Wiley Inc., New York, USA, pp. 75~110(1999).
 11. US Environmental Protection Agency (USEPA), 40 CFR Part 53, "Subpart D - Procedures for testing performance characteristics of methods for PM10," Ambient air monitoring references and equivalent methods, Washington DC(2000).
 12. McFarland, A. R., and Ortiz, C. A., Evaluation of prototype PM-10 inlets with cyclonic fractionators, in Proceeding of the 76th Annual Meeting of APCA, Atlanta, GA, Paper No. 33.5(1983).
 13. US Environmental Protection Agency (USEPA), 40 CFR Part 50, "Appendix B - Reference method for the determination of suspended particulate matter in the atmosphere (high-volume method)," National primary and secondary ambient air quality standards, Washington DC(1983).
 14. National Institute for Occupational Safety and Health, Particulates Not Otherwise Regulated, Total (NIOSH 0500), In: Schlecht, P. C. and O'Connor, P. F.(Eds.), NIOSH Manual of Analytical Methods, fourth ed. DHHS (NIOSH) Publication, Cincinnati, OH, pp. 94~13(1994).
 15. May, K. R., "The cascade impactor: An instrument for sampling coarse particles," *J. Scientific Instruments*, **22**, 187~195(1945).
 16. Swanson, P. D., Muzzio, F. J. Annapragada, A., and Adjei, A., "Numerical analysis of motion and deposition of particles in cascade impactors," *International Journal of Pharmaceutics*, **142**, 33~51(1996).
 17. Mitchell, J. P. and Nagel, M. W., "Cascade impactors for the size characterization of aerosols from medical inhalers: their uses and limitations," *J. Aerosol Medicine*, **16**(4), 341~377(2003).
 18. Park, J-M., Rock, J.C., Wang, L., Seo, Y-C., Bhatnagar, A., Kim, S-H., "Performance Evaluation of Six Different Aerosol Samplers in a PM Generation Chamber," *Atmospheric Environment*, **43**, 280~289(2009).
 19. Turner, J. R. and Hering, S. V., "Greased and oiled substrates as bounce-free impaction surfaces," *J. Aerosol Science*, **18**, 215~224(1987).
 20. Dunbar, C., Kataya, A., and Tiangbe, T., "Reducing bounce effects in the Andersen cascade impactor," *International Journal of Pharmaceutics*, **301**, 25~32(2005).