

입자 발생 챔버를 이용한 Andersen과 총분진 시료채취기의 특성 비교

박주면[†]

연세대학교 환경공학부

Characteristic comparison of Andersen and total suspended particulate samplers in a particulate matter generation chamber

Ju-Myon Park[†]

Dept. of Environmental Engineering, Yonsei University

The purpose of this study was to compare the performance characteristics of Andersen and total suspended particulate (TSP) samplers in terms of particle size distribution (PSD) and mass sampling efficiency. In the present study, two Andersen and four TSP samplers were selected and tested to quantitatively estimate human exposure to fly ash representing industrial particulate matter (PM) in a carefully controlled chamber. The PSD characteristics, a mass median aerodynamic diameter and a geometric standard deviation, were found from the sampled PM of airborne samplers in the chamber. An Andersen sampler was compared with a TSP sampler quantified by a Coulter Counter Multisizer, as a reference sampler, to describe the correlation of mass sampling efficiencies between two types of samplers. Overall results indicate that Andersen samplers overestimated small PM due to particle bounce

phenomena between impaction stages. There was reasonably good correlation ($R^2 = 0.89$ and 0.91) between the mass sampling efficiencies of Andersen and TSP samplers during the two tests. However, the lower values of slope (0.71 and 0.72) in two tests showed that the Andersen sampler underestimated PM ($> AD 10.1 \mu m$) with sufficient inertia due to a relatively lower Andersen inlet velocity at 0.8 m/s comparing with the operating air velocity at 2.1 m/s in the sampling zone of a chamber.

Key Words: Andersen sampler; TSP sampler; Particulate matter; Particle size distribution; Sampling efficiency; Air sampling.

I. 서론

분진이란 공기 중에 부유하는 크기와 구성에 있어 다양한 입자상물질의 복합적 혼합물을 말한다(한국산업규격, 2003; ACGIH, 1996; USEPA, 1999). 현재 우리나라에서 공기 중에 부유하는 분진의 용어는 먼지, 총분진, 호흡성분진, 입자상물

질, 입상물질, 미세먼지, 총부유먼지, 에어로졸(aerosol) 등 다양한 명칭으로 사용되고 있으며 그 크기는 약 $0.002 \mu m$ 부터 인간의 머리카락 두께인 $100 \mu m$ 정도이다. 노동부 산업안전보건법, 환경부의 대기환경보전법과 환경정책기본법, 한국산업규격에서는 입자상물질에 대한 여러 용어를 사용하고 있다. 노동부의 화학물질 및 물리적인자의 노출기준에서는

접수일: 2008년 4월 8일, 채택일: 2008년 9월 9일

† 교신저자: 박주면 (강원도 원주시 흥업면 매지리 234 연세대학교 환경공학부,
Tel: 033-760-2449, Fax: 033-760-5010, E-mail: jumpark@yonsei.ac.kr)

분진의 용어를 사용하고 있다. 환경부의 경우, 대기환경보전법에서는 대기오염물질 배출시설에 대해 입자상물질의 용어로 총부유먼지에 대한 배출허용기준을 고시하였으며 환경정책기본법에서는 미세먼지-PM10(공기역학 직경이 10 μ m 이하)으로 대기환경기준을 설정하고 있다. 1990년대 초반에 유럽표준위원회(CEN, Comité Européen de Normalisation), 국제표준기구(ISO, International Organization for Standardization) 및 미국 산업위생전문가협회(ACGIH, American Conference of Governmental Industrial Hygienists)에서는 입자상물질(PM, particulate matter; 이하 분진)의 용어를 사용하였다. 국제적으로 분진에 대한 크기별 시료채취기준을 흡입성(inhalable), 흉곽성(thoracic) 및 호흡성(respirable)분진으로 구분하고 이에 대한 50% 시료채취 중량비율(%)의 공기역학 직경(aerodynamic diameter; 이하 AD)을 각각 100 μ m, 10 μ m 및 4 μ m로 협약하였다(CEN, 1993; ISO, 1995; ACGIH, 1996).

현대사회에서 작업환경과 주변생활환경에서 분진에 대한 근로자와 국민의 건강이 주요 관심사로 대두되고 있다. 노동부에서 발표한 산업재해원인 통계에 따르면 작업환경의 유해인자 중에서 분진과 관련된 진폐에 의한 업무상 질병자가 1,620명으로 유해인자와의 관련성이 뚜렷한 질병(진폐, 난청, 급속 및 중급속 중독, 유기용제 중독, 특정화학물질 중독 등)에 의한 질병자 2,174명의 75%를 차지하고 있으며 진폐로 인한 업무상 질병 사망자는 488/524명으로 93%를 차지하고 있다(노동부, 2006). 분진의 잠재적 위험성은 입자크기, 입자중량농도, 표면화합물, 그리고 호흡기의 어디에 침착하느냐에 의해 결정된다. 인간의 호흡을 통해 작은 입자들은 폐의 가장 깊숙한 부분까지 도달할 수 있다. 인체에 해를 미칠 수 있는 대부분의 분진(> AD 100 μ m)은 코를 통해 1차 걸러지며 AD 4 μ m의 분진은 기관지에 침착하고 AD 4 μ m 보다 작은 분진은 폐포에서 침착되어 혈관 또는 임파관으로 흡수되어 인체에 영향을 주고 있다. 분진에 대한 노출은 여러 연구에 의해 조기사망 및 호흡기와 관련된 많은 질병을 일으키는 심각한 위해 요소로 연구되어 왔으며 도시에서의 가시거리를 방해하는 주원인이 되고 있다(USEPA, 2006). 이러한 분진에 대한 정량적 지식을 얻기 위하여 분진 시료채취기를 사용한다.

현재 수많은 분진 시료채취기가 총부유, 흉곽성, 호흡성, PM_{2.5} 또는 0.1 μ m보다 작은 분진들의 측정에 사용되고 있다. 본 연구의 목적은 이러한 시료채취기 중 분진의 크기별 분석이 가능한 시료채취기를 선택하여 분진 발생 장비를 갖춘 챔버 안에서 그 수행능력을 입자크기분포(PSD, particle size distribution)와 시료채취효율(sampling efficiency)로 비교 평가하는 것이다. 시료채취기의 수행능력은 기준 시료채취기(reference sampler)와의 직접적인 비교실험을 통해서 이루어

진다(CEN, 2002). 그러나, 50% 시료채취 중량비율을 가지고 시료채취효율을 완벽하게 만족하는 이상적인 기준 시료채취기는 존재하지 않는다. 그러므로 본 연구에서는 총부유분진만을 채취하게 설계되어 있으며 정밀도가 높은 입자크기 분석기(CCM, Coulter Counter Multisizer)를 사용하는 총부유분진(TSP, total suspended particulate) 시료채취기(이하 TSP/CCM)를 기준 시료채취기로 사용하였다. 또한, Wanjura et al. (2005)은 본 연구에 사용된 TSP 시료채취기가 미국 환경청(USEPA, United States Environmental Protection Agency)의 TSP 기준을 만족하며 비교 실험을 통하여 상당히 일치하는 결과를 보고하였다(USEPA, 1987; Wanjura et al., 2005).

본 연구의 목적을 정리하면 다음과 같다.

1. Andersen과 TSP/CCM을 사용하여 챔버 안에서 부유하는 Fly ash 발생분진의 입자크기분포와 특성을 살펴본다.
2. Andersen과 TSP/CCM의 시료채취효율을 비교 평가한다.

II. 연구방법

1. 분진 시료채취기

본 연구에서는 공기 중에 부유하는 분진의 입자크기분포와 그 특성을 연구하기 위해 Andersen (Model 20-800, Thermo Electron Co., Smyrna, GA, USA)과 TSP (Wanjura et al., 2005) 시료채취기를 사용하였다. Andersen 시료채취기는 관성충돌이론(inertial impaction theory)을 적용하여 공기 중에 부유하는 분진을 8단계(stage 0 ~ 7: >10.1, 6.5-10.1, 5.3-6.5, 3.7-5.3, 2.4-3.7, 1.2-2.4, 0.7-1.2, 0.5-0.7 μ m)와 Backup 단계(<0.5 μ m)에서 AD 범위로 분진을 채취하여 입자크기분포와 분진중량에 의한 분진특성을 파악하는데 주요하게 사용된다(Hinds, 1999; Park, 2005). TSP 시료채취기는 미국 환경청의 고용량(high-volume: > 1,133 L/min) 시료채취기의 기준을 적용한 저용량(low-volume: 16.7 L/min) 시료채취기를 사용하였다(USEPA, 1987; Wang et al., 2005; Wanjura et al., 2005).

2. 챔버 실험

챔버 실험(chamber experiment)은 미국의 농업공기질공학 과학센터(Center for Agricultural Air Quality Engineering and Science, Texas, USA)에서 수행하였다. 산업현장의 일반 분진을 대신하여 2.7 g/cm³의 밀도를 가지고 있는 입자 크기가 다양한 Fly ash를 사용하였다. 그 밀도는 Pycnometer (AccuPyc 1330, Micromeritics, Norcross, GA, USA)를 사용하여 측정하였다. 챔버 안에서는 분진을 균일하게 분포할 수 있도록 구멍

을 가진 칸막이 (air straightener)를 시료채취 공간 전후에 설치하였으며 발생장치 (feeding system)와 덕트를 이용하여 챔버 안에서 공기가 순환되도록 설계하였다(그림 1). 설치된 칸막이의 구멍 뚫린 부분이 차지하는 공간은 각 칸막이 전체공간의 18%를 차지하며 챔버의 시료채취 공간은 가로 세로 각각 2.4 m의 길이의 정육면체의 모양이다. 챔버 안에서 발생한 공기량은 128 m³/min이며 칸막이를 통하여 발생한 유속은 2.1 m/s로 계산된다.

챔버 안의 공기 흐름방향에서 앞에 위치한 TSP 시료채취기로부터 부분적인 공기 유량의 간섭을 받지 않기 위하여 TSP와 Andersen 시료채취기의 입구의 높이를 각각 160 cm와 140 cm로 가능한 인간의 호흡공간 (breeding zone)에 설치하였으며 시료채취 공기량은 각각 16.7 L/min와 22.7 L/min을 적용하였다. 챔버 안에서 균일한 분진 측정이 가능한지 확인하기 위하여 본 실험 이전에 여러 실험을 수행하였고 입자발생 시스템 개선 등을 통하여 시료채취 공간에 그림 1과 동일하게 설치된 네 개의 TSP 시료채취기로부터 통계학적으로 유의적 차이가 없었다(Wang et al., 2005). 본 실험에서는 이전의 실험결과를 바탕으로 챔버 안에 분진이 균일하게 분포되어 있다는 가정을 가지고 실험을 수행하였다. 두 번의 실험을 각각 1시간씩 수행하였으며 각 실험마다 챔버 안에서 새로운 Fly ash를 사용하였다. Andersen을 사용한 시료채취 실험 이전에 분진을 채취하는 충돌판 (impaction plate)의 입자반동현상 (particle bounce phenomena)을 막기 위하여 진공 실리콘 (vacuume silicone grease)을 살포 후 건조기에서 TSP 여과지와 함께 건조하였다(May, 1945; Swanson et al., 1996; Mitchell et al., 2003). TSP 시료채취기의 여과지는 PTFE Teflon 여과지 (0.5 μm pore size, Cole-Parmer, Vernon Hills, IL, USA)를 사용하였다. 실험에 사용된 여과지와 충돌판은 24시간동안 20 °C, 45% 상

대습도를 가진 건조기에서 시료채취 전후에 건조하였다 (USEPA, 1987; NIOSH, 1994). 채취된 분진의 중량을 측정하기 위하여 10 μg 단위까지 측정할 수 있는 전자저울 (Model AG245, Mettler Toledo Inc., Hightstown, NJ, USA)을 사용하였으며 각 실험 전후 여과지와 충돌판에 채취된 분진의 중량을 세 번씩 측정하였다. Andersen과 TSP 시료채취기에는 12초 간격으로 유량 상태를 측정할 수 있는 압력변환기 (pressure transducer: PX274, Omega Engineering Inc., Stamford, CT, USA)와 자료저장기 (data logger: HOBO H8 RH/Temp/2X External, Onset Computer Corp., Pocasset, MA, USA)를 사용하였다. 유량을 조절할 수 있도록 diaphragm 펌프 (Item 4z792, Thomas, Sheboygan, WI, USA), needle valve (Model A-68831-00, Cole-Parmer, Vernon Hills, IL, USA) 및 magnehelic pressure gage (Dwyer instruments, Michigan City, IN, USA)를 사용하였다.

3. 분진의 입자크기분포 및 특성조사

Andersen 시료채취기를 이용하여 챔버 안에 부유하는 분진을 8단계 한계직경 (stage 0~7: 10.1, 6.5, 5.3, 3.7, 2.4, 1.2, 0.7, 0.5 μm)보다 작은 시료채취 중량효율을 가지고 입자크기분포를 살펴보았다. 각 TSP 시료채취기는 CCM을 사용하여 각 여과지에서 측정된 분진으로부터 등가 구형 직경 (ESD, equivalent spherical diameter) 60 μm까지 256개의 자료를 얻어 분진의 입자크기분포를 살펴보았다. 일반적으로 공기 중에 부유하는 분진은 로그정규분포를 가지고 있으며 로그정규분포를 가지는 분진의 특성은 기하평균 (GM, geometric mean)과 기하표준편차 (GSD, geometric standard deviation)로 표현될 수 있다. 챔버 안에서 분포된 분진의 크기 분포가 로그정규분포를 가지고 있는지 확인하기 위하여 Weibull 프로그램 (ReliaSoft Corporation, Tucson, AZ, USA, 2007)을 사용하여 TSP/CCM에서 얻어진 8개의 자료 그룹 (각 그룹: 256)의 최적 분포를 알아보았다. Weibull 프로그램은 입력된 자료로부터 정규분포, 로그정규분포, 지수분포, 웨이블 등 6개의 분포 중 8개의 그룹 중 7개의 그룹에서 로그정규분포를 1순위로 나타내었고 나머지 1개의 그룹에서는 Weibull 2-변수 분포가 1순위, 로그정규분포가 2순위임을 보였다. 본 연구에서 GM은 50% 누적 시료채취효율을 나타내며 공기역학 중위 입경 (MMAD 또는 d_{50} , mass median aerodynamic diameter)으로 표현되었다. GSD는 누적 시료채취효율의 기울기로 $\sqrt{d_{84.1}/d_{15.9}}$ 에 의해 계산되어졌으며 여기서 $d_{84.1}$ 과 $d_{15.9}$ 는 각각 누적 시료채취효율의 84.1%와 15.9%에 해당하는 공기역학 직경이다(Hinds, 1999).

Andersen 시료채취기로 채취된 분진의 입자크기분포의 특성은 8단계의 한계직경보다 작은 누적중량비율을 가지고 로그프로비트 분석 (log-probit analysis)을 수행하여 다음과 같이

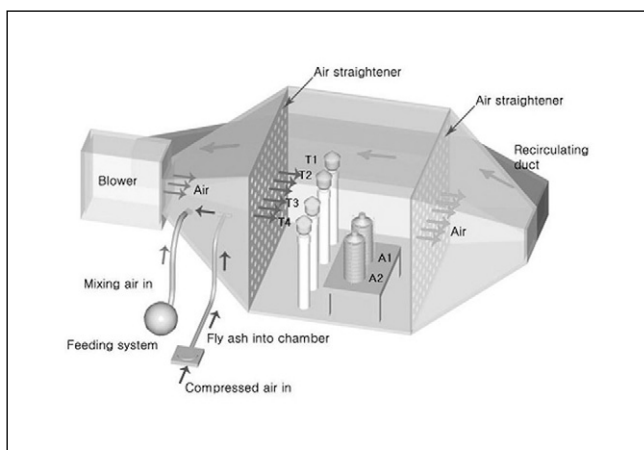


Fig. 1. Experimental setup of Andersen and TSP samplers in a PM generation chamber.
Notes) T1-T4 : TSP samplers; A1 & A2 : Andersen samplers

MMAD와 GSD로 표현하였다(Rock, 1995). 이상적인 로그정규분포는 로그프로빗 분석에서 일직선을 가지게 된다.

$$z = \frac{x - \mu}{\sigma} \approx \frac{\ln(AD) - \ln(MMAD)}{\ln(GSD)} \quad \text{식 1)}$$

$$\ln(AD) \approx \ln(GSD) \times z + \ln(MMAD)$$

여기서, z는 기준 정규확률변수 (standard normal random variable)로 Andersen의 누적중량비율 (%)에서 소수를 가진 누적중량비율로 Microsoft Excel 프로그램에서 NORMINV(누적중량비,0,1) 기능을 가지고 계산될 수 있다. x는 정규확률변수 (normal random variable)로 공기역학 직경을, μ는 모집단평균을, σ는 모표준편차를 각각 나타낸다.

TSP/CCM의 분석결과는 분석물질과 같은 부피를 가지는 ESD에 대하여 부피비율 (%)의 결과 값으로 나타난다. 공기역학 직경에 의해 구해진 Andersen 시료채취기의 특성과 비교하기 위하여 TSP/CCM의 ESD는 다음 식을 이용하여 AD의 무게비율 (%)로 계산하였다(Hinds, 1999).

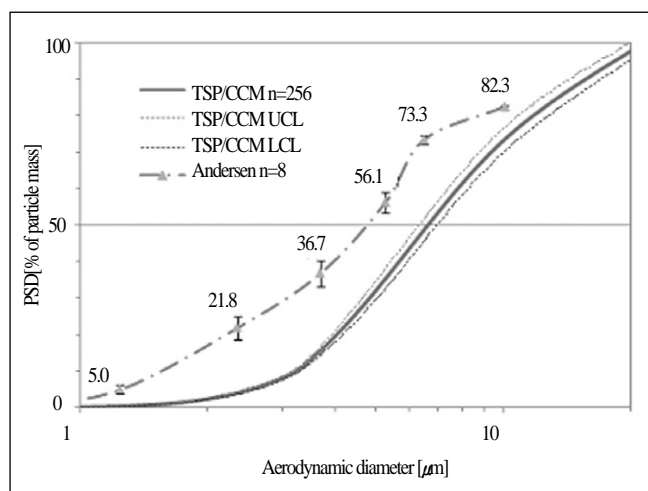
$$AD = ESD \times \sqrt{\frac{\rho_p}{\rho_o \times \chi}} \quad \text{식 2)}$$

여기서, ρ_p는 측정된 분진의 밀도, ρ_o는 단위밀도 (1 g/cm³), χ는 모양계수 (shape factor)를 나타낸다.

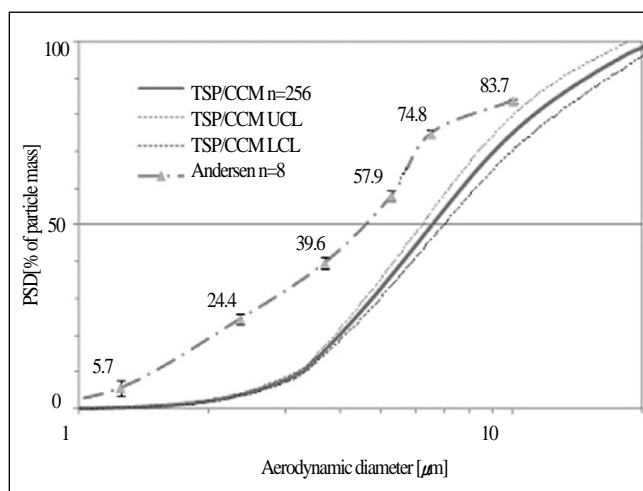
III. 연구결과 및 고찰

1. 분진의 입자크기분포와 특성

챔버 안에서 Andersen과 TSP/CCM으로 측정된 부유분진의 입자크기분포는 95%의 신뢰수준에서 평균 측정값에 신뢰한계 (confidence limit)를 가지고 나타내었다(그림 2). Andersen의 입자크기분포는 2개의 Andersen 시료채취기로 얻어진 각 8단계 한계직경보다 작은 시료채취효율을 연결하여 추정하였으며 TSP/CCM의 입자크기분포는 4개의 TSP 시료채취기로부터 얻어진 각 256개의 시료채취효율의 평균값을 연결하였다. 그림 2는 최적의 그림을 보여주기 위해 1 μm부터 20 μm의 입자크기 영역만을 나타내었으며 Andersen 시료채취기가 TSP/CCM과 비교하여 작은 MMAD를 가지고 작은 중량비율의 분진을 채취한 것을 보이고 있다. 이러한 차이는 매 실험 후 Andersen으로 채취된 분진을 분석할 때 각 단계 (stage)의 수백의 구멍 (orifice)과 각 단계별 벽에서 발견된 많은 분진 (wall losses)들과 일치한다(May, 1945; Cushing et al., 1979; Vaughan, 1989; Horton et al., 1992). 그림 2를 살펴보면 Andersen의 채취된 입자크기분포의 기울기가 상대적으로 x축으로 기울어져 있는 것을 볼 수 있다. 이러한 현상은 Andersen의 8단계 충돌판에서 상대적으로 큰 한계직경을 가지는 윗 단계 충돌판에서 채취되어야 할 일부 큰 입자들이 튕겨져 다음 단계의 작은 한계직경을 가지는 충돌판에 채취되기 때문이다. 본 실험을 통해 스테인레스강 (stainless steel) 충돌판 위에 입힌 실리콘 층이 입자반동현상을 최소화 하지 못하고 있다. 이러한 결과는 실리콘 층 위에 형성된 새로운 입자 층에 의하여 입자와 입자의 충돌에 의한 재반동현상이 발생한 것으로 사료되며 입자의 재반동현상의 결과들은 다른 연구자들에 의해서도 보고되었다(Turner and Hering, 1987; Dunbar et al., 2005). Zimon (1982)은 이상적인 충돌판에서의 실리콘 층 두



(a)



(b)

Fig. 2. Particle size distributions of Andersen and TSP/CCM samplers from (a) Test 1 and (b) Test 2.

계가 충돌판 위에서 채취되는 입자의 반지름과 대략적으로 같아야 함을 제안했다. 그러나, 본 실험에서는 충돌판 위에서 입자에 의해 새로운 층이 형성되어 반동현상을 제어하기 위한 실리콘 층이 효과가 없음을 보이고 있다(Turner and Hering, 1987).

Andersen과 TSP/CCM의 시료채취기로 측정된 챔버 안에서 Fly ash의 입자크기분포 특성 (MMAD, GSD)은 표 1과 같다. 표 1에서 Andersen의 MMAD와 GSD의 평균값 (5.4 μm , 2.1)을 TSP/CCM의 MMAD와 GSD 평균값 (6.6 μm , 1.9)과 비교하였을 때, Andersen의 상대적으로 작은 MMAD와 큰 GSD 값은 단계벽과 구멍에서의 입자손실과 충돌판에서의 입자반동현상을 각각 정량적 수치로 보여주고 있다. 그림 3은 Andersen

의 로그프로빗 분석에서 10.1 μm 의 표준 정규확률변수 (z)값이 일직선상에서 크게 벗어나 있는 것을 볼 수 있다. 이러한 원인은 챔버 안의 2.1 m/s의 실험 풍속에서 상대적으로 큰 관성을 가지고 이동하던 분진들이 Andersen 입구의 채취풍속 (0.75 m/s)에서 단계 0에서 채취 예정된 분진들 ($> AD 10.1 \mu\text{m}$)을 과소 채취하였기 때문으로 사료된다. 또한, Backup 단계에서 채취된 매우 작은 중량의 입자가 10 μg 까지 측정할 수 있는 저율에서 상대표준편차 (표준편차/평균)가 때로는 1을 넘어서는 것을 보이고 있다. 이러한 원인들이 Andersen 시료채취기로 분진의 입자크기분포와 특성을 연구하는 데 영향을 주고 있다.

Table 1. Parameters for the PSDs measured from Andersen and TSP/CCM samplers.

Sampler		Andersen		TSP/CCM			
		A [†] 1	A2	T [§] 1/CCM	T2/CCM	T3/CCM	T4/CCM
MMAD* [μm]	Test 1	5.4	5.6	6.4	7.1	6.6	6.6
	Test 2	5.3	5.4	6.1	6.6	6.3	7.1
	All tests						
	Mean (SD)	5.4 (0.1)		6.6 (0.4)			
GSD [†]	Test 1	2.0	2.1	1.8	1.9	1.8	2.0
	Test 2	2.3	2.1	1.7	1.8	1.8	2.0
	All tests						
	Mean (SD)	2.1 (0.1)		1.9 (0.1)			

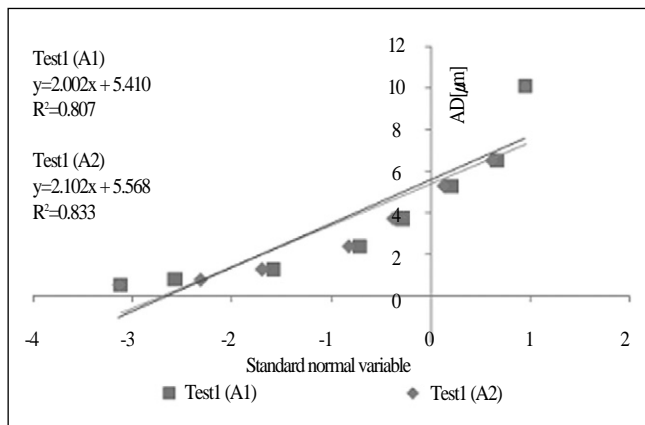
* MMAD : Mass median aerodynamic diameter.

† GSD : Geometric standard deviation.

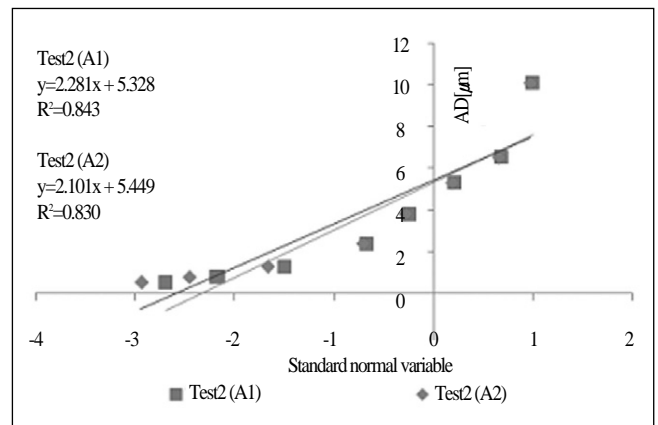
‡ A1 & A2 : Each 1st and 2nd Andersen sampler.

§ T1-T4/CCM : Four TSP samplers analyzed by a Coulter Counter Multisizer.

|| SD : Standard deviation of sample.



(a)



(b)

Fig. 3. MMADs and GSDs of Andersen samplers from (a) Test 1 and (b) Test 2. Notes) A1 : 1st Andersen; A2 : 2nd Andersen.

2. Andersen과 TSP/CCM의 시료채취효율 비교

본 연구에서 사용된 Andersen과 TSP/CCM의 수행능력을 비교하기 위하여 TSP/CCM의 누적시료채취효율을 Andersen의 8단계 한계직경 (AD 10.1, 6.5, 5.3, 3.7, 2.4, 1.2, 0.7, 0.5 μm)으로 분석된 누적채취효율 값과 동일하게 구한 후 절편을 0으로 두어 선형회귀분석을 하였다. 이때의 기울기는 점선의 기울기 1로부터 유의적인 차이 (Test 1 & 2: 기울기 = 0.71 & 0.72, 각각 p<0.0001)가 있었으며 이들의 결정계수, R², 값은 Test 1과 Test 2에서 각각 0.89과 0.91로 회귀직선식에 의미가 있었다(그림 4). Andersen의 1보다 낮은 기울기는 입구의 시료채취풍속에 의하여 AD >10.1 μm 분진의 과소 채취에서 기인한 것으로 설명 할 수 있다. 이에 따라, Andersen의 AD >10.1 μm 분진의 채취효율이 증가한다면 AD <10.1 μm 분진의 누적채취효율을 감소하며 TSP/CCM에 가까운 시료채취효율 (기울기 1)을 얻을 수 있다.

3. 현미경 분석

본 실험에서 사용된 분진 (fly ash)의 물리적 특성을 육안으로 확인하기 위하여 주사현미경 (ESEM E3, Electroscan Inc., Wilmington, MA, USA)을 사용하였다. 그림 5는 TSP의 여과지 위에서 채취된 Fly ash의 물리적 크기가 수 nm에서 20 μm에 이르는 부드러운 표면을 가진 구형임을 보여주고 있다. Fly ash의 현미경분석을 통해 식 2에서의 모양계수는 1로 사용하였다. 그러나, 다양한 입자의 형태를 가지는 작업환경 또는

대기환경에서는 다양한 모양계수 값이 사용(Hind, 1999; Park, 2005)되며 식 2와 같이 공기역학 직경으로의 표준화 작업이 필요하다. 본 연구에서는 CCM의 ESD로 분석된 입자크기분포를 공기역학 직경으로 표준화하여 공기역학 직경의 입자를 포집하는 Andersen 시료채취기와 비교분석하였다. 이와 같은 공기역학 직경을 가지는 입자들의 분석에 의하여 공기역학 직경으로 제시된 작업환경 또는 대기환경의 시료채취 기준들과 비교할 수 있게 된다. 또한, 현미경 분석 시 전자빔으로 형성된 정전력에 의해 여과지 위의 입자무리 (cluster)에서 작은 입자들이 이동하는 것을 관찰했다. 이러한 정전력은 대기 중에서 개별적으로 채취된 입자일지라도 전자빔을 사용한 현미경 분석에서 덩어리 (conglomerates)의 모양을 형성할 수 있음을 보여준다.

IV. 결론

사람이 분진에 노출 되었을 때 그 위해성을 평가하기 위해 시료채취기를 사용하여 입자의 크기별 노출에 대한 정량적 분석이 필요하다. 본 연구에서는 2개의 Andersen과 4개의 TSP 시료채취기를 선택하여 챔버 안에서 입자크기가 다양한 Fly ash를 발생하여 입자크기분포와 시료채취효율을 가지고 각 시료채취기의 특성을 비교 평가하였다. 실험을 통하여 Andersen 시료채취기의 벽과 단계 구멍에서 입자손실을 확인하였으며 Andersen의 입자반동현상을 CCM 입자분석기를 사용한 총분진 시료채취기 (TSP/CCM)의 입자크기분포와 비

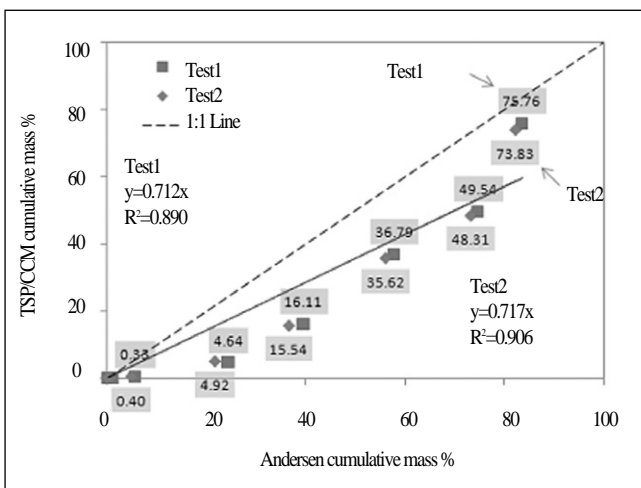


Fig. 4. Plot of Andersen and TSP/CCM cumulative mass percentages.

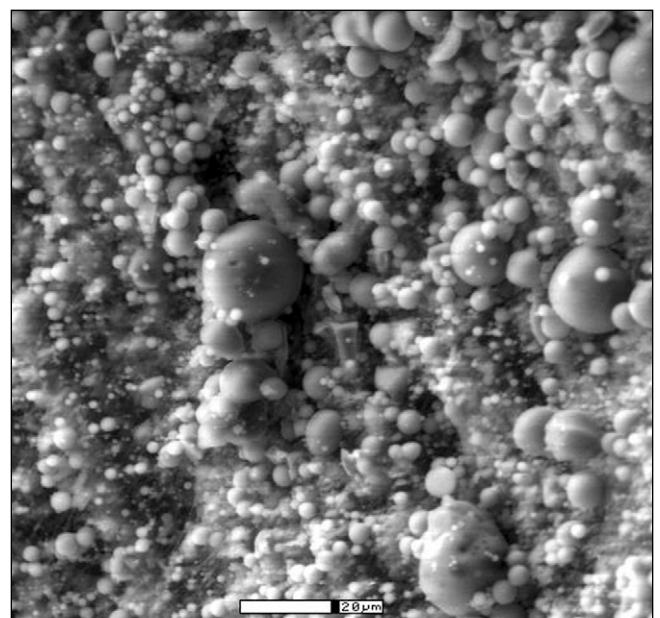


Fig. 5. Fly ash image (Calibration bar : 20 μm).

교하여 확인 할 수 있었다. TSP/CCM과 Weibull 프로그램을 이용하여 챔버 안에서 분포된 Fly ash가 로그정규분포를 가지고 있음을 확인하였고 로그프로빗 분석을 적용하여 챔버 안에서 채취된 Fly ash의 입자크기분포 특성을 MMAD와 GSD 평균값 (Andersen = 5.4 μm 와 2.1, TSP/CCM = 6.6 μm 와 1.9)으로 각각 확인하였다. TSP/CCM보다 큰 Andersen의 GSD 값은 Andersen 시료채취기의 입자반동현상을 정량적 수치로 보여주고 있으며 TSP/CCM보다 작은 Andersen의 MMAD값으로 Andersen 시료채취기의 벽과 단계 구멍에서의 입자손실을 정량적으로 확인하였다. 또한, Andersen과 TSP/CCM의 시료채취효율 비교를 통하여 두 시료채취기 사이에 의미 있는 상관관계 (Test 1과 2, $R^2 = 0.89$ 과 0.91)를 보이고 있으나 Andersen의 낮은 기울기 (Test 1과 2, 기울기 = 0.71와 0.72)는 챔버 안에서의 실험풍속 2.1 m/s에서 Andersen 입구의 시료채취풍속 0.8 m/s에 의하여 상대적으로 큰 관성을 가지고 이동하는 분진 ($> AD 10.1 \mu\text{m}$)을 과소 포집한 것을 보여준다.

REFERENCES

- 노동부. 산업재해분석. 2006. (7-24쪽).
- 한국산업규격 (KS). KS A ISO 0082, 로 볼륨 에어 샘플러법 및 로 볼륨 에어 샘플러에 의한 공기 중 부유 분진 측정 방법 해설. 한국표준협회 2003. (2-11쪽).
- American Conference of Governmental Industrial Hygienists (ACGIH): Threshold Limit Values for Chemical Substances and Physical Agents and Biological Exposure Indices. Cincinnati, OH: ACGIH; 1996. p. 83-86.
- Comite Européen de Normalisation (CEN): Workplace Atmospheres - Size Fraction Definitions for Measurement of Airborne Particles in the Workplace (CEN EN 481). Brussels: CEN; 1993. p. 3-11.
- Comite Européen de Normalisation (CEN): Workplace Atmospheres - Assessment of Performance of Instruments for Measurement of Airborne Particle Concentrations. (CEN EN 13205). Brussels: CEN; 2002. p 23-29.
- Cushing KM, McCain JD, Smith, WB. Experimental determination of sizing parameters and wall losses of five source-test cascade impactors. *Environmental Science & Technology* 1979;13:726-731.
- Dunbar C, Kataya A, Tiangbe T. Reducing bounce effects in the Andersen cascade impactor. *International Journal of Pharmaceutics* 2005;301, 25-32.
- Hinds WC. Aerosol technology properties, behavior, and measurement of airborne particles. New York: Wiley Inc.; 1999. p. 75-110; 128-134; 53-55.
- Horton KD, Ball MHE, Mitchell JP. The calibration of a California measurements PC-2 Quartz Crystal cascade impactor (QCM). *Journal of Aerosol Science* 1992;23(5):505-524.
- International Organization for Standardization (ISO): Air Quality Particle Size Fraction Definition for Health-Related Sampling (ISO CD 7708). Geneva: ISO; 1995. p. 3-6.
- May KR. The cascade impactor: An instrument for sampling coarse particles. *Journal of Scientific Instruments* 1945;22:187-195.
- Mitchell JP, Nagel MW. Cascade impactors for the size characterization of aerosols from medical inhalers: their uses and limitations. *Journal of Aerosol Medicine* 2003;16(4):341-377.
- National Institute for Occupational Safety and Health (NIOSH): Particulates Not Otherwise Regulated, Total (NIOSH 0500). Cincinnati, OH: Department of Health and Human Services/NIOSH, 1994. pp. 1-3.
- Park J-M. Assessment of suspended dust from pipe rattling operations Appendix D Cutoff size calculation (Andersen sampler), Appendix G Shape factor review. PhD Dissertation, Texas A&M University; 2005. p. 136-143 & 157-160.
- Rock JC, Chapter 2 Occupational air sampling strategies, in: Cohen BS et al. (8th Eds.), Air sampling instruments, ACGIH, Cincinnati OH: 1995. p. 19-44.
- Swanson PD, Muzzio FJ, Annapragada A, Adjei A. Numerical analysis of motion and deposition of particles in cascade impactors. *International Journal of Pharmaceutics* 1996;142:33-51.
- Turner JR, Hering SV. Greased and oiled substrates as bounce-free impaction surfaces. *Journal of Aerosol Science* 1987;18:215-224.
- U.S. Environmental Protection Agency (USEPA). 40CFR Part 50: National Primary and Secondary Ambient Air Quality Standards Appendix B. Reference method for the determination of suspended particulate matter in the atmosphere (high-volume method). Washington, DC: USEPA; 1987.
- U.S. Environmental Protection Agency (USEPA). Method IO-2: "Integrated Sampling of Suspended Particulate Matter (SPM) in Ambient Air", Washington, DC: USEPA; 1999. p. 1-4.
- U.S. Environmental Protection Agency (USEPA). Fact Sheet: EPA Strengthens National Ambient Air Quality Standards for Particle Pollution, Washington, DC: USEPA; 2006. Available from: URL:<http://epa.gov/air/particles/pdfs/20060921>

_factsheet.pdf

Vaughan NP. The Andersen impactor: calibration, wall losses and numerical simulation. *Journal of Aerosol Science* 1989;20:67-90.

Wanjura JD, Parnell CB, Shaw BW, Lacey RE. Design and evaluation of a low-volume total suspended particulate sampler. *Transactions of the ASAE* 2005;48(4):1547-1552.

Wang L, Wanjura JD, Parnell CB, Lacey RE, Shaw BW. Performance characteristics of a low-volume PM10 sampler. *Transactions of the ASAE* 2005;48(2):739-748.

Zimon, AD. Adhesion of Dust and Powder. Consultants Bureau, New York: Plenum Publishing Co.; 1982. p. 61-62