Particle and Aerosol Research 제 5 권 제 2 호
PAAR Vol. 5, No. 2 (2009) pp. 63 ~ 70
(사)한국입자에어로졸학회

APS 3321과 Dust Monitor 1.108을 이용한 입자 크기분포 및 수농도 측정결과 비교

임 경 수* · 박 현 설
한국에너지기술연구원 기후변화연구본부

(2009년 5월 21일 접수, 2009년 6월 27일 채택)

Comparison of particle size distribution and particle number concentration measured by APS 3321 and Dust Monitor 1.108

Kyoung-Soo Lim* and Hyun-Seol Park
Climate Change Technology Research Division, Korea Institute of Energy Research

(Received 21 May 2009, accepted 27 June 2009)

Abstract

The size distribution and number concentration of atmospheric aerosol were measured and compared using APS 3321 and Dust Monitor 1.108. The particle size distribution and number concentration measured by two devices were also compared at a particle generation system of standard PSL and fly ash. The number concentration of atmospheric aerosol measured by APS was higher than that by Dust Monitor in particle size range of less than 3.0 μm, but there was good accordance between them in particle size range of over 3.0 μm. In the particle generation system of PSL and fly ash, different measurement results were shown because the particle concentration was higher than that of atmospheric aerosol. The number concentration measured by Dust Monitor was higher than that by APS in most particle size ranges. However, the peak concentration of PSL particles measured by Dust Monitor was lower than that by APS. The difference of the collection efficiency in a scrubber by APS and Dust Monitor measurement was less than 10%, but in the particle size of 1.5 μm, it was over 20%.

Key words : APS, Dust Monitor, Atmospheric aerosol, Number concentration, Collection efficiency

1. 서 론

에어로졸은 핵 형성, 응축, 응집, 파열, 연소 등 다양한 메커니즘에 의해 생성되어 브라운 운동, 대류확산 또는 외력에 의해 이동하거나 표면에 침착하게 된다. 이러한 현상들을 규명하기 위해서는 에어로졸 측정기술이 매우 중요하다. 공기 중에 부유하는 에어로졸을 측정하는 방법은 싸이클론, 임팩터 등의 관성력을 이용한 분리 및 필터에 의한 포집 방법, SEM

*Corresponding author.
Tel : +82-(0)42-860-3459, E-mail : kslim@kier.re.kr

(Scanning Electro Microscope) 등의 전자 현미경을 이용한 방법, DMA (Differential Mobility Analyzer) 등의 전기적 특성을 이용한 방법, OPC (Optical Particle Counter) 등의 광학적 특성을 이용한 방법, APS (Aerodynamic Particle Sizer) 등의 크기 및 밀도에 따른 일정거리의 도달시간(Time of Flight)을 이용한 방법 등이 있다. 주로 대기중에 부유하는 입자의 측정은 대기질 기준의 근거가 되는 24시간 평균 TSP (Total Suspended Particulates), PM10, PM2.5가 주가 되어 왔다. 따라서 싸이클론, 임팩터 등 관성력을 이용하여 입자를 분리한 후 분리된 입자를 필터로 포집하는 방법이 많이 사용되어 왔다. 일부 광학적 방법을 이용한 OPC가 대기중 부유하는 입자의 측정에 사용이 되어 왔으며, 대부분 입자의 크기 분포를 측정하는 목적이 되어 왔다. 반면 전자 현미경을 이용한 방법이나 대부분의 광학적 특성을 이용한 방법 등은 실험실에서 입자 발생, 생성, 응집, 침착, 이동 등의 다양한 메커니즘을 규명하기 위해서 입자를 크기나 농도를 측정하는 방법으로 많이 사용되어 왔다. 하지만 최근에는 대기중 부유하는 입자에 대한 정확한 분석을 위한 상세정보가 필요하게 되어, 질량농도에서 수농도로, 총농도에서 크기별 농도로, 조대입자에서 미소입자로, 농도에서 화학적 조성 및 형성으로 에어로졸 측정 추세가 변화하고 있다. 따라서 기존에 사용되고 있는 관성력에 의한 총질량농도를 측정할 수 있는 싸이클론 및 임팩터뿐만 아니라 크기에 따른 질량농도 및 수농도의 측정할 수 있는 OPC, APS, SMPS (Scanning Mobility Particle Sizer) 등이 대기중 입자 측정에도 많이 사용되고 있다 (Erwin, 2000; Si Shen *et al.*, 2002; Bae *et al.*, 2003, 2004; Park and Kim, 2006; Park *et al.*, 2006; Kim *et al.*, 2007). 하지만 이들의 장치는 크기측정 방식의 차이가 있기 때문에 측정장치들 간의 측정결과에 차이가 있을 수 있으나, 이에 대한 연구가 미비하다. 본 연구에서는 최근에 대기중 입자의 크기분포 및 농도 측정장치로 많이 사용되고 있는 OPC와 APS의 측정결과를 비교하여 차이점을 분석하였다. 대기중에 입자상물질의 크기분포 및 농도뿐만 아니라, 표준입자를 사용하여 이미 알고 있는 입자에 대한 크기분포도 비교하였다. 또한 입자상물질의 농도에 따른 두 장치들 간의 측정결과뿐만 아니라 입자제거장치의 입출구에서 농도를 측정하여 제거효율을 비교하였다.

2. 실험장치 및 방법

2.1 실험장치

2.1.1 입자 측정장치

본 연구에서 사용한 OPC는 GRIMM Dust Monitor (Model 1.108, GRIMM Aerosol Technick)로서, 광산란을 이용한 방법으로 입자의 크기분포 및 농도를 측정한다. 측정공간을 지나가는 입자에 레이저를 조사하면 입자상물질에 의하여 빛이 산란하게 되며, 이 산란된 빛은 집광장치에 의해 모아져 광검출기 (photodetector)로 보내지게 된다. 이 검출기에서는 집광된 양에 비례하여 전기적 신호를 발생시키고, 발생된 전기적 신호는 pulse로 측정된다. 이 pulse의 높이 및 개수를 변환하여 입자의 크기와 개수를 표시할 수 있다. 사용된 Dust Monotor는 0.3 ~ 20 μm 크기를 갖는 입자들을 15개의 채널로 나누어 크기분포를 나타낼 수 있으며, PM10, PM2.5 등으로 나타낼 수도 있다. 또한 47-mm PTFE 필터를 사용하여 중량측정법에 의한 입자의 농도를 동시에 측정할 수 있다. Dust Monitor에 대한 자세한 사양은 표 1에 서술하였다.

Dust Monitor와 함께 입자의 비행시간 (time of flight)을 이용하여 입자의 크기를 측정하는 APS (Model 3321, TSI Inc.)를 측정장치로 사용하였다. APS는 입자 가속노즐과 광산란장치로 구성되어 있으며, 가속노즐에 의해 입자를 크기에 따라 가속시키고 레이저를 통과시켜 입자의 공기역학적 입경을 측정한다. 즉, 가속노즐을 통해 가속화되는 입자는 그 크기에 따라 관성력에 의해서 가속되는 속도가 다르게 되어

Table 1. Specifications of the Dust Monitor 1.108 and APS 3321.

	Dust Monitor 1.108	APS 3321
Size range [μm]	0.3 ~ 20	0.4 ~ 20
Display resolution [channels]	15	52
Concentration range [p/L]	1 ~ 2,000,000	1 ~ 10,000,000
Sampling time	1 sec ~ 6 hr	1 sec ~ 18 hr
Sampling flow rate [L/min]	1.2	1.0 (sheath air: 4.0)
Operating temperature [℃]	4 ~ 45	10 ~ 40

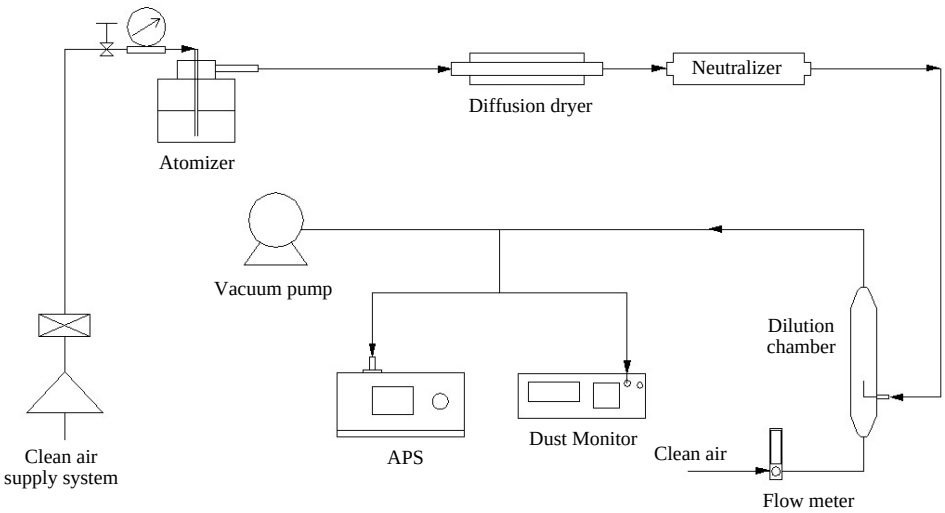


Figure 1. Generation and measurement system for PSL particles.

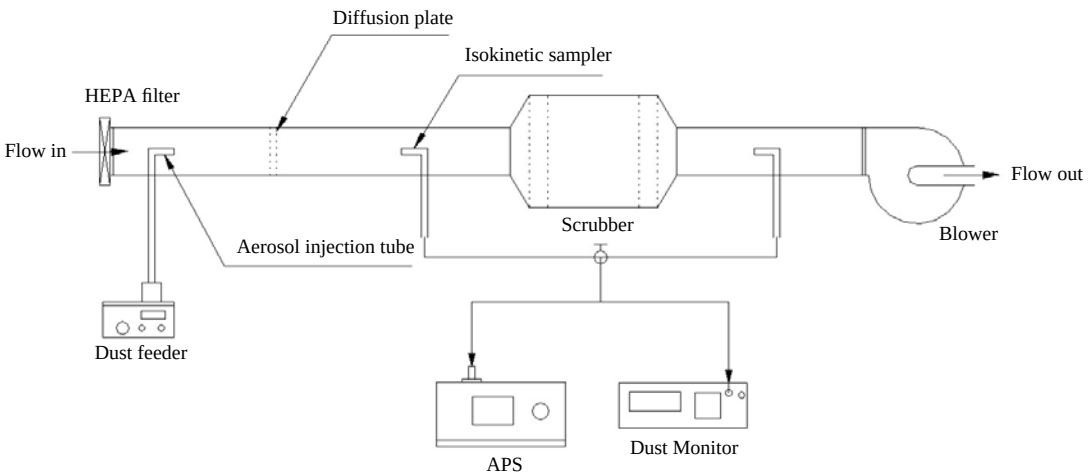


Figure 2. Generation and measurement system for fly ash.

약 100 μm 떨어진 일정한 간격의 2개의 레이저 빔을 통과하는 시간이 입자의 크기에 따라 차이가 난다. 2개의 레이저빔을 통과할 때의 pulse 간격을 측정하여 입자의 입경을 측정하게 된다. 본 연구에 사용된 APS 3321은 0.4～20 μm의 입자크기 범위를 약 52채널로 측정할 수 있으며, 상세한 장치의 사양은 표 1에 서술되어 있다.

2.1.2 입자 발생 및 측정방법

두 측정장치의 비교를 위해서 대기중 에어로졸, 표준입자인 PSL (polystyrene lastex, Duke Scientific Corp.), fly ash를 사용하였다. 대기중 에어로졸의 측정을 위해서는 일정시간 동안 두 측정장치를 같은 장소에서 측정을 할 수 있도록 하였으며, 표준입자인 PSL은 그림 1과 같이 Atomizer (Model 9302, TSI Inc.)를 이용하여 발생시켜 측정하였다. Fly ash의 발생은

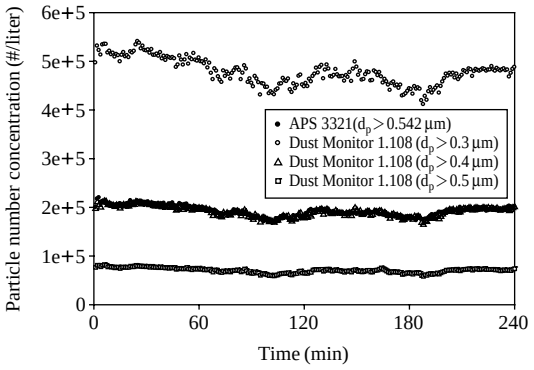


Figure 3. Total number concentration of atmospheric aerosol.

Solid Aerosol Particle Generator (GRIMM Aerosol Technick)를 이용하였으며 그림 2와 같이 발생입자를 측정하였다. 또한, 입자 발생장치 후단에 스크러버를 설치하여 스크러버 통과 전후의 농도를 측정하여 두 측정장치의 입자제거효율 측정치를 비교하였다. 즉, 스크러버 입구측의 fly ash 농도를 Dust Monitor와 APS로 각각 측정하고, 스크러버 출구측의 농도도 각각 측정하여 스크러버의 입자제거효율을 비교하였다.

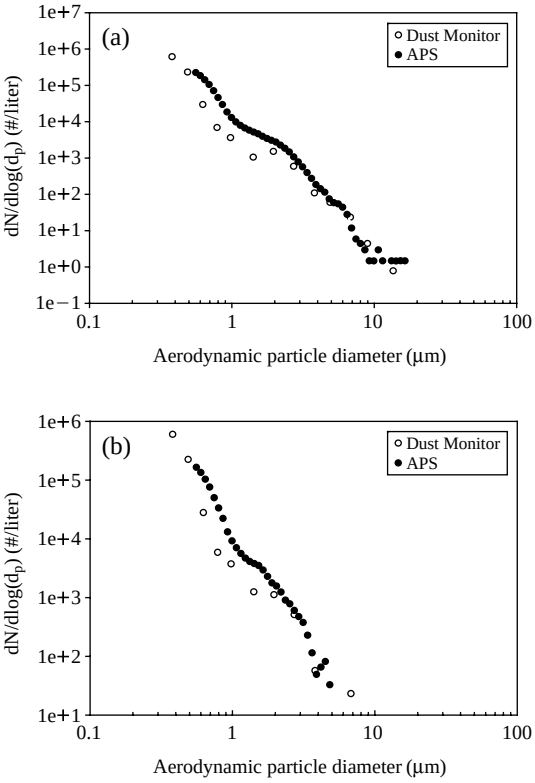


Figure 4. Size distribution and number concentration of atmospheric aerosol.

3. 결과 및 토의

3.1 대기중 에어로졸의 측정비교

입자 측정장치는 각 장치의 입자 측정방법에 따라 측정농도의 차이를 나타낼 뿐만 아니라 측정하고자 하는 입자의 조건에 따라 측정농도의 차이를 보일 수 있다. 본 연구에서는 이미 설명한 바와 같이 서로 다른 측정방법을 가지고 있는 Dust Monitor와 APS를 이용하여 입자의 발생조건 또는 입자의 농도조건에 따라 그 측정값을 비교하였다. 먼저 일반적으로 낮은 농도를 보이고 있는 대기중 입자를 측정하여 그 농도분포 비교하였다.

그림 3은 일정시간 동안의 대기중 입자의 수농도를 비교한 것으로 APS에 의해 측정된 값은 입자의 크기가 0.542 μm 이상의 수농도를 나타내고 Dust Monitor의 값은 입자의 크기가 0.3, 0.4, 0.5 μm 이상의 수농도를 나타내고 있다. 그림에서와 같이 APS에 의해 측정된 0.542 μm 이상의 수농도는 Dust Monitor에 의해 측정된 0.4 μm 이상의 수농도와 비슷한 값을 나타내고 있으며, APS의 측정 입자크기인 0.542 μm와 비슷한 입자 측정크기를 갖는 Dust Monitor의 0.5 μm 이상의 수농도는 APS보다 50% 정도의 작은 값을 보이고 있다. 크기에 따른 입자의 수농도를 비교하기 위해서 그림 4(a), 4(b)와 같이 특정 시간에서의 입자의 크기분포를 나타내었다. 그림 4(a)와 그림 4(b)는 같은 장소에서 서로 다른 시간대에 측정하였지만 비슷한 결과를 보여주고 있다. 대체적으로 Dust Monitor의 측정 수농도 값보다는 APS의 측정 수농도 값이 높게 나타났으며, 입자의 크기가 3.0 μm 이하의 크기에서 이러한 경향이 뚜렷이 나타나고 있다. 하지만, 입자의 크기가 3.0 μm 이상에서는 두 장치의 측정값이 비슷한 경향을 나타내고 있다. 이러한 특성으로 입자의 수농도가 아닌 입자의 질량농도로 전환했을 때 두 장치에 의해 측정된 총 질량농도의 차이가 작을 것으로 예상이 된다. Bae *et*

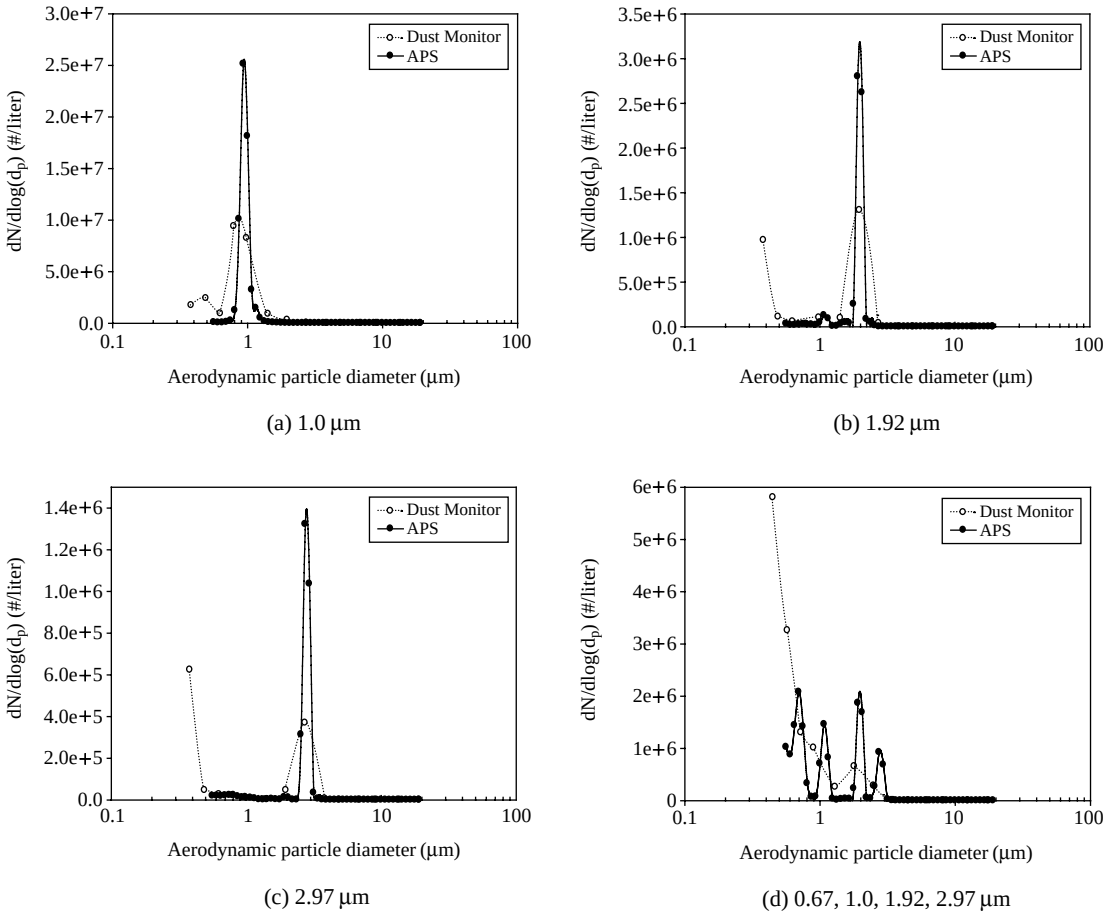


Figure 5. Size distribution and number concentration of PSL particles-1.

al. (2004)의 연구에서는 APS 3320과 Dust Monitor 1.108의 측정결과를 비교하였는데 큰 입자(약 5 μm 이상)의 경우 APS 3320 측정값이 Dust Monitor 1.108 측정값보다 높게 측정이 되었다. 이는 Peter *et al.* (2003)의 연구에서 APS 3320이 본 연구에서 사용한 APS 3321보다 큰 입자 영역에서 입자의 농도를 높게 측정한다고 하였기 때문에 Bae *et al.* (2004)이 이용한 APS 3320의 측정값과 본 연구에서 사용한 APS 3321의 측정값의 차이를 보일 수 있다. Dust Monitor의 반복 측정된 결과를 살펴보면, 입자의 크기가 약 1.5 μm 부근에서 특히, 낮은 값을 나타내고 있는데 이는 다른 Dust Monitor의 측정값과 비교를 하여 차후 연구가 더 필요하다.

3. 2 표준입자 PSL, fly ash 측정비교

그림 5는 표준입자인 PSL을 발생시켜 그 크기분포 및 농도를 비교한 것이다. 그림 5(a), 5(b), 5(c)는 각각 입자의 크기가 1.0, 1.92, 2.97 μm인 PSL을 발생시켜 측정한 것이다. 그림에서와 같이 발생입자는 단분산 크기분포를 가지고 있으며, 각각 1.0, 1.92, 2.97 μm 부분에서 가장 큰 수농도를 보이고 있다. 하지만 Dust Monitor의 경우 APS가 측정할 수 없는 작은 입자크기에서 높은 수농도를 나타내고 있으며, 이러한 경향은 대기 에어로졸의 측정에도 같은 결과를 얻었다. 이러한 높은 수농도는 PSL 입자의 발생시 작은 입자크기범위에서 물입자나 잔류입자 등 PSL 입자 이외의 입자의 측정일 수 있으며, 이 범위

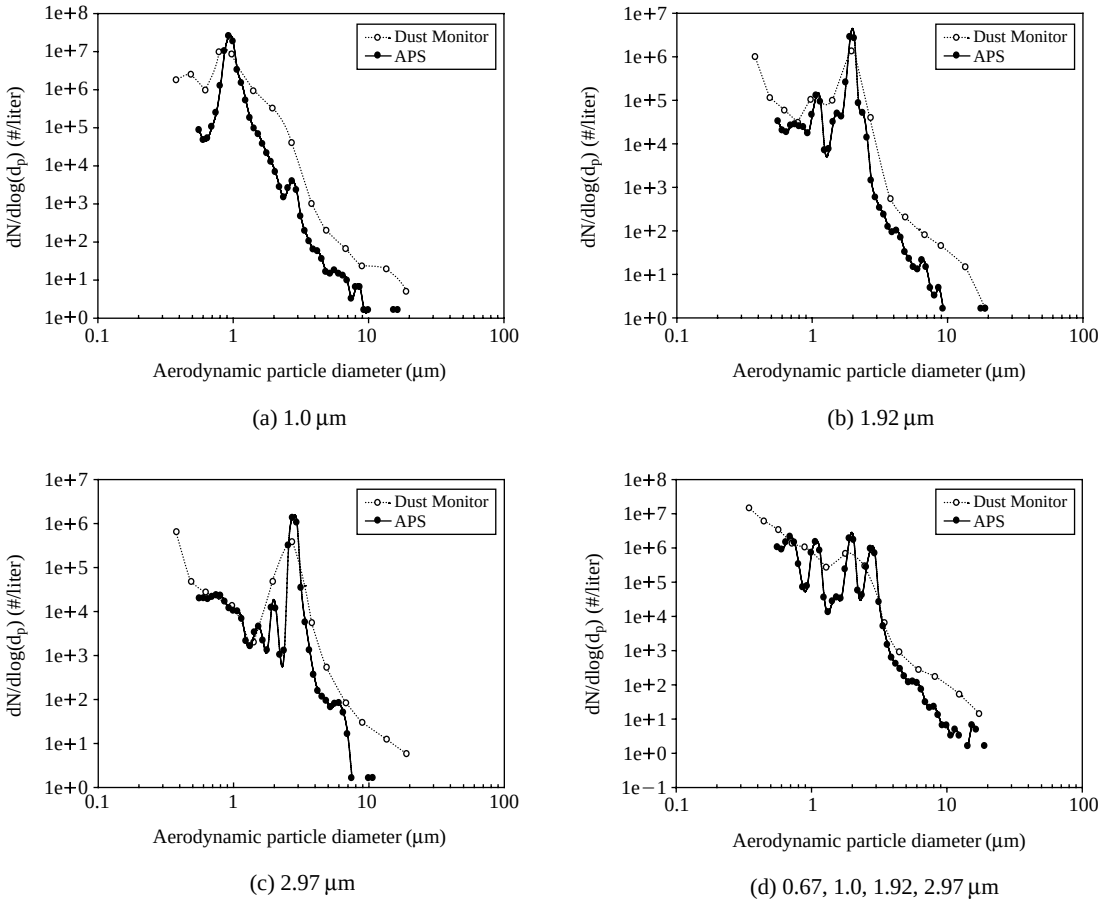
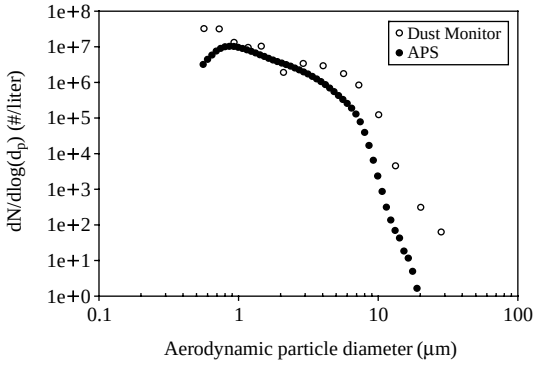
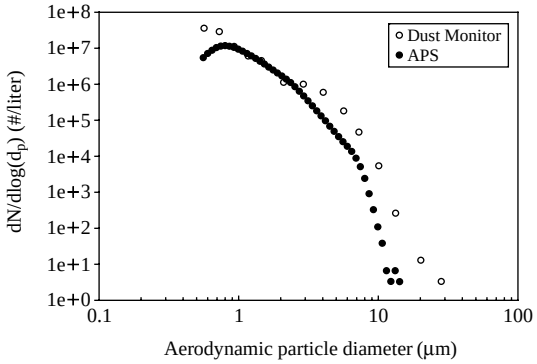


Figure 6. Size distribution and number concentration of PSL particles-2.

에서 다른 측정장치의 비교가 더 필요하다. APS의 경우가 Dust Monitor보다 최고 수농도를 중심으로 폭이 좁은 단분산 크기분포를 나타내고 있으며, 입자의 수농도도 크게 측정이 되었다. APS가 더 단분산 형태의 크기분포를 보이는 이유는 표 1에서와 같이 APS의 입자크기 측정채널이 52개로 Dust Monitor 15개보다 많기 때문에 입자의 크기분포를 나타내는데 있어서 입자크기에 따른 수농도를 좀더 세밀하게 표현할 수 있기 때문이다. 그림 5(d)는 크기가 0.67, 1.0, 1.92, 2.97 μm인 단분산 PSL 표준입자를 섞어서 다분산입자로 발생시켰을 때의 크기분포 및 수농도를 나타내고 있다. 이러한 방법은 이미 Lim *et al.* (2002)에 의해 소개되었으며, 단분산일 때와 다분산일 때의 크기분포를 측정하여 입자 분리장치의 분리효율 특성을 비교하였다. Lim *et al.* (2002)에 의해 단분산 및 다분산 입자의 크기분포는 Aerosizer LD (TSI Inc.)를 이용하여 측정하였으며, 그림 5(d)의 APS 측정결과와 비슷한 경향을 보였다. 즉, 섞은 표준입자의 0.67, 1.0, 1.92, 2.97 μm 크기부분에서 4개의 피크를 가지는 크기분포를 보이고 있다. 그림 6은 그림 5에서 y축의 수농도를 로그눈금으로 나타낸 것으로 각 표준입자의 수농도 피크부분을 제외하고 대부분 Dust Monitor의 값이 크게 나타났다. 대기중 입자의 크기에 따른 수농도분포에서는 앞서 설명했듯이 3.0 μm 이하에서는 APS가 높게 측정이 되어 차이점을 나타내고 있다. 또한, 3.0 μm 이상에서는 대기중 입자의 측정시 두 장치 간 비슷한 수농도 분포를 나타내고 있으나, PSL 입자의 측정시에는 Dust Moni-



(a) Inlet



(b) Outlet

Figure 7. Size distribution and number concentration of fly ash at the scrubber inlet and outlet.

tor의 측정 수농도가 훨씬 높은 수농도를 보이고 있다. 이러한 수농도 분포의 차이는 측정 입자의 농도에 영향을 받은 것으로 대기중 입자의 수농도보다 PSL 입자의 수농도가 10배 이상 고농도를 나타내고 있다. 즉, 대기입자 에어로졸과 같이 낮은 농도(＜6×10^5 #/liter)의 입자의 측정과 고농도(＞6×10^5 #/liter)의 입자의 측정시 두 측정장치 간의 수농도 분포가 서로 다른 경향을 보이고 있다. 이러한 경향은 그림 7에서도 확인할 수 있다. 그림 7은 그림 2에서와 같이 fly ash를 발생시켜 스크러버 전후단의 수농도분포를 측정한 결과이다. 그림 7에서는 대기중 입자의 수농도보다 높게 입자가 발생이 되어 대부분의 입자크기에서 Dust Monitor의 수농도가 높게 측정이 되었다. 하지만 0.8～2.0μm의 입자크기에서는 APS의 측정값과 비슷한 측정값을 보이고 있다. 특히, 입

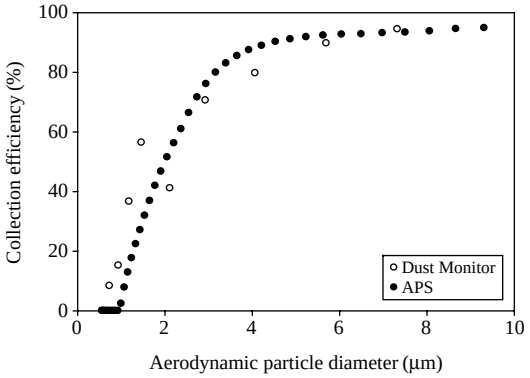


Figure 8. Particle collection efficiency of the scrubber.

자크기가 1.5μm 부분에서는 오히려 Dust Monitor의 수농도 값이 더 적게 측정이 되었으며, 이는 낮은 농도인 대기중 입자의 측정에서도 같은 경향을 보였다.

그림 7의 스크러버 입구측과 출구측의 APS와 Dust Monitor 측정 수농도 분포를 토대로 스크러버의 입자제거효율을 나타내면 그림 8과 같다. 그림에서와 같이 1.5μm 이하에서는 Dust Monitor 측정값으로 구한 제거효율이 APS의 측정값으로 구한 제거효율보다 높게 측정이 되었으며, 그 이상의 입자크기에서는 반대 경향을 나타내고 있다. 입자의 크기가 1.5μm 부분에서는 제거효율차이가 약 20%의 나타내고 있지만 입자의 크기가 1.5μm 부분을 제외하고 제거효율의 차이가 10% 이내를 보이고 있다. 따라서, APS와 Dust Monitor를 이용한 입자의 분리장치나 집진장치의 입자 제거효율 측정시 이러한 차이점을 고려해야 한다. 특히, 앞서 설명했듯이 두 장치에 의해서 측정된 수농도 분포가 입자의 농도에 따라 큰 차이를 보이기 때문에 관성력을 이용한 임팩터 등과 같은 타 장치와의 비교가 차후 더 필요하다.

4. 결 론

본 연구에서는 APS 3321과 Dust Monitor 1.108의 입자 수농도분포를 비교하기 위해서 대기중 입자와 표준입자인 PSL, fly ash를 발생시켜 측정하였다. 대기중 입자의 측정에서는 입자의 크기가 3.0μm 이하에서 APS의 수농도 측정값이 Dust Monitor의 수농

도 측정값보다 높은 값은 나타냈으나, 3.0㎛ 이상에서는 비슷한 경향을 나타내었다. PSL 입자의 측정에서는 두 장치 모두 제시한 표준 크기에서 수농도의 피크를 나타냈으며, 입자 측정 채널수가 더 많은 APS가 더 좁은 피크를 갖는 단분산 분포를 나타내었다. 피크점에서 항상 APS가 높은 수농도 측정값을 나타내었지만, 피크점 주위를 제외한 대부분의 영역에서 대기중 입자의 측정값과는 다르게 Dust Monitor의 측정값이 APS의 측정값보다 높은 값을 나타내었다.

PSL의 측정값과 마찬가지로 fly ash의 측정값 비교에서도 입자의 크기가 0.8～2.0㎛를 제외하고 Dust Monitor 수농도 측정값이 높은 값을 나타냈으며, 특히 입자의 크기가 클 때 그 차이가 현저하게 나타났다. 즉, 대기중 입자와 같이 저농도의 입자 측정과 PSL, fly ash와 같이 고농도의 입자 측정시 두 측정장치 간의 수농도 측정분포의 차이가 서로 반대 경향을 보였다. 입자의 제거효율 측정에 두 장치의 사용시 그 결과를 비교하면, 대부분의 입자크기에서 10% 이내의 차이를 보이고 있으나, Dust Monitor의 경우 입자의 크기가 1.5㎛ 부분의 측정값에서 큰 차이를 보이기 때문에 이에 대한 차후 연구가 더 필요하다.

참 고 문 헌

Bae, G.-N., Kim, M.C., Lim, D.-Y., Moon, K.-C., and Baik, N.J. (2003). Characteristics of urban aerosol number size distribution in Seoul during the winter season of 2001, *Journal of Korean Socienty for Atmospheric Environment*, 19(2), 167-177.

Bae, G.-N., Lee, S.-B., Moon, K.-J., Choi, J.-C., Park, G.-J., and Ahn, J.-U. (2004) Comparison of ambient aerosol size distributions observed by using an APS and two OPCs, Proceeding of the 37th Meeting of Korean Society for Atmospheric Environment, pp. 97-98.

Erwin, K. (2000). The density ambient particles from combine DMA and APS data, *Journal of Aerosol Science*, 31(S1), 759-760.

Kim, C.-H., Jung, K.-S., Hwang, U.-H., and Kim, S.-D. (2007). A study on the aprticle size distribution of particles for Asian dust occurred during April, 2006, *Particle and Aerosol Research*, 3(2), 67-73.

Lim, K.S, Kwon, S.B., Lee, K.W., and Kim, M.C. (2002). Simultaneous use of polystyrene latex particles of different sizes to evaluate performance of a cyclone and impactor, *Aerosol Science and Technology*, 36, 1003-1011.

Park, S.-U., and Kim, J.-W. (2006). Aerosol size distributions observed at the Seoul National University campus in Korea during the Asian dust and non-Asian dust periods, *Atmospheric Environment*, 40, 1722-1730.

Park, Y.J., Kim, S.D., Kim, T.S., and Hwan, U.H. (2006). A study on the size distribution of particle during Asian dust by SMPS-APS system, Proceeding of the 43rd Meeting of Korean Society for Atmospheric Environment, pp. 381-382.

Peters, T.M., and Leith, D. (2003). Concentration measurement and counting efficiency of the aerodynamic particle sizer 3321, *Journal of Aerosol Science*, 34, 627-634.

Shen, S., Jaques, P.A., Zhu, Y., Geller, M.D., and Sioutas, C. (2002). Evaluation of SMPS-APS system as a continuous monitor for measuring PM2.5, PM10 and 69coarse (PM2.5-10) concentrations, *Atmospheric Environment*, 36, 3939-3950.