

노즐 막힘이 미세 오리피스형 다단 임팩터의 입자 채취 성능에 미치는 영향

지준호* · 배귀남* · 황정호**

(2002년 7월 25일 접수, 2002년 12월 14일 심사완료)

Effect of Particle Clogging in Orifices on the Particle Collection Efficiency of a Micro-Orifice Impactor

Jun-Ho Ji, Gwi-Nam Bae and Jungho Hwang

Key Words: Cascade Impactor(다단 임팩터), Collection Efficiency(포집효율), Micro-orifice(미세 오리피스), Nozzle Clogging(노즐 막힘)

Abstract

A cascade impactor is a multistage impaction device used to separate airborne particles into aerodynamic size classes. A micro-orifice impactor uses micro-orifice nozzles to extend the cut sizes of the lower stages to as small as 0.05 μm in diameter without resorting to low pressures or creating excessive pressure drops across the impactor stages. In this work, the phenomenon of particle clogging in micro-orifice nozzles was experimentally investigated for a commercial micro-orifice uniform deposit impactor (MOUDI). It was observed, using an optical microscope, that the micro-orifice nozzles of the final stages were partially clogged due to particle deposition during the aerosol sampling. Therefore the pressure drops across the nozzles were higher than the nominal values given by the manufacturer. To examine the effect of particle clogging in micro-orifice nozzles, the particle collection efficiency of the MOUDI was evaluated using an electrical method for fine particles with diameters in the range of 0.1~0.6 μm . The monodisperse liquid dioctyl sebacate (DOS) particles were used as test aerosols. A faraday cage was employed to measure the low-level current of the charged particles upstream and downstream of each stage. It was found that the collection efficiency curves shifted to correspond to smaller orifice sizes, and the 50-% cutoff sizes were much smaller than those given by the manufacturer for the three stages with nozzles less than 400 μm in diameter.

1. 서론

다단 임팩터(cascade impactor)는 에어로졸의 입경분포를 측정하는데 널리 사용되는 측정장비이다. 대기 에어로졸의 측정뿐만 아니라 환경 후처리 설비의 성능평가와 디젤 자동차의 배출량 측정 등 다양한 분야에 사용되고 있다.

에어로졸 측정장비는 측정원리에 따라 측정할 수 있는 입경의 범위가 제한된다. 현재 입자의 크기를 가장 정확하게 측정하는 장비로 알려져 널리 사용되고 있는 SMPS(Scanning Mobility Particle Sizer)의 경우 입자의 전기적 이동도를 이용하여 3 nm의 입자까지도 측정할 수 있지만, 1 μm 이상인 입자는 측정하지 못한다. 에어로졸의 광산란 현상을 이용하여 입자의 크기를 측정하는 광학적 입자 계수기(optical particle counter, OPC; laser particle counter, LPC)는 보통 0.1 μm 이상인 입자를 측정할 수 있으나, 최대 측정 농도가 상대적으로 낮으므로 입자가 고농도로 존재하는 시스템에는 적용하기 어렵다. 다단 임팩터는 입자

* 연세대학교 대학원 기계공학과

† 책임저자, 회원, 한국과학기술연구원 지구환경연구센터
E-mail : gnbae@kist.re.kr

TEL : 82-2-958-5676

** 회원, 연세대학교 기계공학과

의 관성력을 이용하여 입경을 분류하고, 장비가 기계적인 요소로만 구성되어 있으므로, SMPS, OPC 등에 비해 측정조건이 열악한 경우에도 사용할 수 있다. 예를 들면, 공장이나 발전소의 배출 가스 등과 같이 입자상 물질의 농도가 높거나 연소로 등에서 고온으로 배출되는 입자의 측정에도 적용할 수 있다.

임팩터의 이론, 설계방법, 사용법, 데이터 처리 등에 대해서는 잘 알려져 있으며,^(1,2) 널리 사용되는 임팩터의 성능 특성에 대해서도 많은 연구가 수행되었다.^(3~6) 임팩터는 입자의 관성을 이용하여 입자크기를 분류하므로 주로 크기가 1 μm 이상인 조대 입자(coarse particles)의 분류에 사용되었으나, 최근 1 μm 이하인 미세 입자(fine particles)에 대한 관심이 높아짐에 따라 저압(low-pressure)이나 미세 오리피스(micro-orifice)를 사용하여 미세 입자를 분류할 수 있는 임팩터가 개발되어 널리 사용되고 있다.

국내에서도 다단 임팩터를 사용하여 대기 에어로졸의 입경분포 및 화학적 성분을 측정하는 연구^(7,8) 뿐만 아니라 임팩터의 설계 및 성능평가에 관한 연구^(9,10)도 수행되고 있다. 또한, 다단 임팩터를 이용하여 집진장치의 성능을 평가하기도 한다.⁽¹¹⁾

다단 임팩터를 사용하여 미세 입자를 분류하기 위해서는 임팩터 단의 노즐 구멍을 미세하게 줄여 입자의 관성력을 극대화시킬 필요가 있다. 보통 큰 흡인유량에서도 임팩터 단의 압력강하가 크지 않도록 많은 수의 노즐을 사용한다. 본 연구의 대상인 미세 오리피스형 다단 임팩터(micro-orifice uniform deposit impactor, MOUDI; MSP model 100)의 경우 입자의 50% 분리입경(cut size)이 0.32 μm 인 7단은 직경이 140 μm 인 900개의 노즐로 만들어져 있고, 분리입경이 0.18 μm 인 8단은 직경이 90 μm 인 900개의 노즐로 이루어져 있다.^(4,12) Table 1은 MOUDI에 대하여 노즐 직경이 작은 4단에서 8단까지의 설계인자를 나타낸 것이다. 임팩터의 사용 시간이 길어지면 노즐에 입자가 부착되는 양이 점점 더 증가하므로 노즐이 조금씩 막히게 된다. 임팩터를 사용하여 에어로졸을 측정한 후 노즐에 부착된 입자들을 제거하기 위해 세척하는 작업을 수행하는데, 미세한 노즐의 경우 초음파 세척기를 사용할 수 없으므로,⁽¹²⁾ 노즐에 부착된 입자들이 남아있지 않도록

Table 1 Design and operation parameters of a MOUDI⁽⁴⁾

Stage	Normal cut-point (μm)	Number of nozzles	Nozzle diameter (cm)	p/p_0^*	Nozzle Reynolds number
4	1.8	20	0.137	1.0	1510
5	1.0	40	0.072	0.99	1440
6	0.56	80	0.040	0.97	1340
7	0.32	900	0.0140	0.95	350
8	0.18	900	0.0090	0.89	580

P_0^* means the pressure at the MOUDI inlet

주의해야 한다.

일반적으로 다단 임팩터의 입자채취 성능을 평가하는 경우 분리입경의 크기에 따라 성능평가 방법이 달라진다. 이것은 에어로졸 입자의 크기에 따라 입자발생 및 측정방법이 다르기 때문이다. 실험 대상인 MOUDI의 경우 분리입경이 0.18~10 μm 이므로, 한가지 방법만으로 모든 단의 입자채취 성능을 평가하는 것은 불가능하다. 보통 분리입경이 큰 단은 중량법을 사용하고, 분리입경이 작은 단의 경우 입자계수법을 사용하여 임팩터의 입자채취 특성을 규명하고 있다.^(4,10)

본 연구에서 관심을 갖는 단은 노즐의 직경이 작은 MOUDI의 6~8단으로 제조사가 제시하는 50% 분리입경이 각각 0.56, 0.32, 0.18 μm 이다. 입자가 작아 중량법이나 형광법을 사용하면 실험 시간이 너무 길어 신뢰할 수 있는 데이터를 얻기 곤란하고, 각 단의 압력강하가 크므로 성능평가에 응축핵 계수기(condensation particle counter, CPC)를 사용하기 어렵기 때문에 본 연구에서는 전기적 입자계수법을 사용하였다. Marple 등⁽⁴⁾은 임팩터 단의 상류와 하류에서 전기적 에어로졸 검출기(electrical aerosol detector)를 사용하여 채취 효율을 평가하였다. Hillamo와 Kauppinen⁽¹³⁾은 저압 임팩터의 성능을 평가하기 위해 임팩터 상류에 하전기를 설치하여 코로나 방전을 시킨 후, 기관과 최종 필터에 포집되는 입자의 대전량을 측정하여 임팩터 단의 채취효율을 구하였다. 그러나, 이 방법은 하전기의 성능을 알아야 하고 임팩터 단에 충돌하는 입자가 포화 하전에 가깝게 높게 대전되어 있으므로, 노즐과 기관 사이의 공간 전하와 영상력 등이 임팩터의 성능에 영향을 미칠 수 있다.

본 연구에서는 수년 동안 대기 에어로졸 측정에 사용되고 있는 미세 오리피스형 다단 임팩터(MOUDI)를 대상으로 먼저 노즐의 막힌 정도를 광학 현미경으로 관찰한 후, 전기적 방법을 사용하여 분리입경이 1 μm 이하인 임팩터 단의 입자 채취효율을 평가하여 노즐 막힘에 의한 임팩터의 성능변화를 살펴보았다.

2. 실험

본 연구의 대상인 미세 오리피스형 다단 임팩터(MOUDI)는 수년 동안 대기 에어로졸의 입경분포 측정과 공기청정기기의 성능평가에 사용되었다. 8단으로 구성된 각 단의 분리입경은 0.18, 0.32, 0.56, 1, 1.8, 3.2, 5.6, 10 μm 이고 입구(inlet)의 분리입경은 18 μm 이며, 흡인유량은 30 L/min이다.

먼저 광학 현미경(Olympus model BX80M)을 이용하여 노즐의 막힌 정도를 관찰하였다. 노즐 입구인 상부의 경우 기관의 고정대가 설치되어 있으므로, 노즐 출구인 하부로부터 노즐 밑면 및 깊이에 따라 입자가 부착되어 있는 모습을 살펴 보았다. 이때, 렌즈의 배율을 50, 200, 500배로 맞추어 관찰하였다. 다중 초점 기법을 사용하여 노즐의 깊이별로 여러 장의 이미지를 촬영하여 저장한 후, 전체 이미지를 합성하였다. 즉, 전체 깊이에 따른 입자의 부착 형태를 하나의 사진으로 나타냈다.

본 연구에서는 임팩터 단의 입자채취효율을 평가하기 위하여 Fig. 1과 같이 실험장치를 구성하였다. 단분산 시험 입자를 만들기 위하여 기화-응축 방법으로 액체인 DOS(Dioctyl Sebacate, 밀도 = 0.915 g/cm³) 입자를 발생시켰다. DOS는 액체이므로 임팩터 기관에서 튀김 현상이 생기지 않고, 기화-응축 방법을 사용하기 때문에 표준편차가 작은 크기분포의 입자를 발생시킬 수 있다. DMA(Differential Mobility Analyzer)로 유입되는 단분산 입자의 크기분포의 폭은 균일한 단분산 입자로 분리하는데 매우 중요하다. DMA는 입자를 전기적 이동도에 따라 분리하므로, (+)1가인 입자와 (+)2가인 더 큰 입자가 같은 경로를 따라 이동할 수 있다. 이와 같이 전기적 이동도가 같은 다중 대전입자에 의한 다분산성을 줄이려면

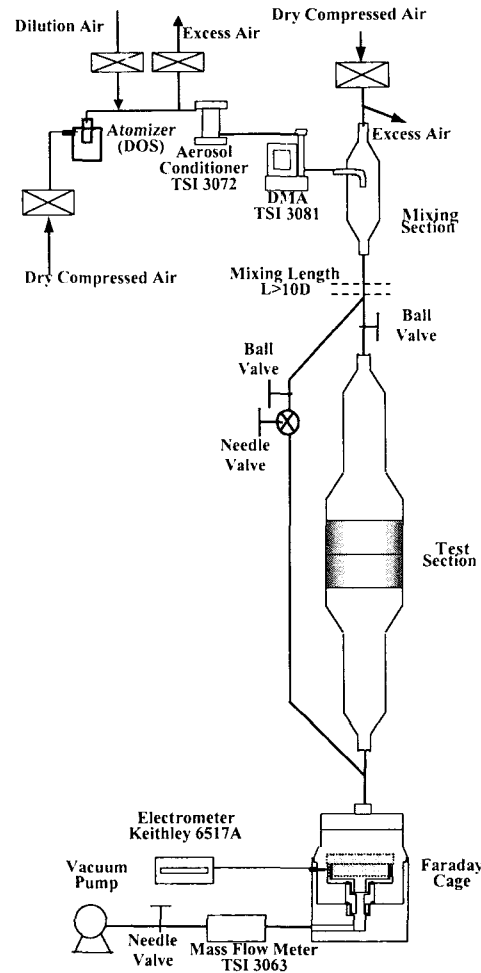


Fig. 1 Schematic diagrams of the experimental setup

발생시키려는 입자보다 크지만 같은 이동도를 갖는 입자의 절대량이 최소화될 수 있도록 크기분포의 폭이 좁은 단분산 입자를 발생시켜야 한다.

용질인 DOS와 용매인 이소프로필 알콜로 만들어진 용액이 기화-응축 방법에 의해 발생된 후, 용액의 DOS 농도에 따라 발생하는 DOS 입자의 기하 평균 입경(geometric mean diameter)이 달라 지므로, 용액의 농도를 변경하여 시험 입자의 크기분포를 변경시켰다. 임팩터의 입자채취 성능 실험을 시작하기 전에 SMPS(TSI model 3936)로 크기분포를 측정 한 후, 기하 평균 입경보다 큰 입자를 발생시켰다.

HEPA(High Efficiency Particulate Air) 필터를 통

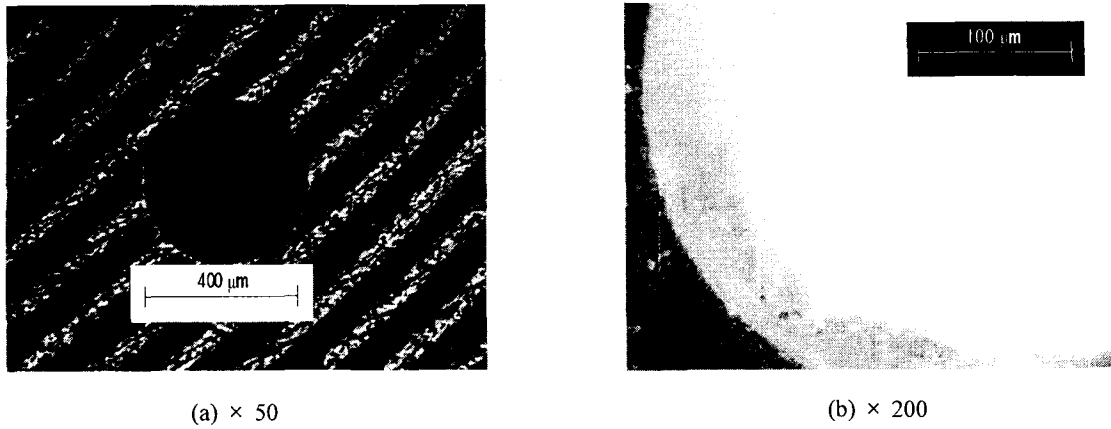


Fig. 2 Cross-sectional view of a nozzle for stage 6

과한 깨끗한 희석 공기의 유량을 40 L/min으로 맞추고, 이 중에서 30 L/min의 유량이 희석관으로 유입되어 임팩터의 시험부를 통과하고, 나머지 10 L/min의 유량은 대기압인 외부로 배출시켜서 혼합부의 압력이 대기압에 가까우면서 일정하게 유지되도록 하였다. 진공펌프 상류의 니들 밸브로 임팩터를 통과하는 유량을 조절하였고, 질량 유량계(mass flow meter, TSI model 3063)로 유량을 측정하였다. DMA를 거쳐 분리된 단분산 입자들은 (+)1가의 단위 전하(1.6×10^{-19} Coulomb)를 갖기 때문에 페러데이 케이지와 극미량 전류계(electrometer, Keithley model 6517A)를 이용하여 임팩터의 상류와 하류의 전류를 측정 후, 임팩터 각 단의 채취효율(η)을 식(1)과 같이 계산하였다. 극미량 전류계의 분해능은 1 fA(0.001 pA)이고, 성능평가 실험에서 0.1~0.6 μm 범위인 DOS 입자가 페러데이 케이지에서 측정될 때 감지된 전류는 0.06~0.5 pA이었다.

$$\eta = 1 - \frac{I_{down}}{I_{up}} \quad (1)$$

여기서, I_{up} 은 임팩터의 단을 통과하지 않고 페러데이 케이지에서 측정되는 상류 시험 입자의 전류이고, I_{down} 은 임팩터의 단을 통과한 후 측정된 전류이다. 시험 입자는 크기가 0.1 μm 이상이고 (+)1가로 단위 대전되어 있으므로, 입자 대전이 임팩터의 채취성능에 영향을 미치지 않는다.⁽¹⁴⁾

다단 임팩터 사용시 시험 단의 상류에 설치되

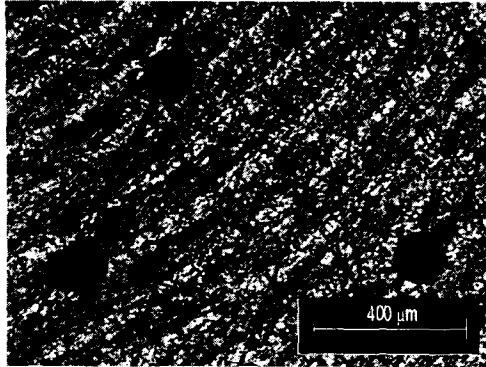
는 단들의 압력강하를 모사하기 위하여 2개의 볼 밸브를 설치하였고, 상류 농도 측정시 시험 단의 압력강하를 모사하기 위하여 니들 밸브를 추가로 설치하였다.

3. 결과 및 고찰

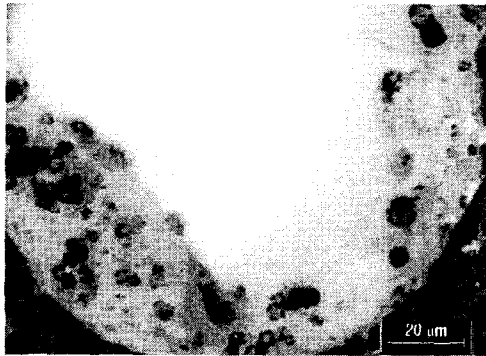
3.1 노즐 벽면에서 입자의 부착 형태

본 연구에서는 대기 에어로졸의 측정에 사용되고 있는 미세 오리피스형 다단 임팩터(MOUDI)를 대상으로 각 단의 노즐 벽면에서 입자의 부착 형태를 살펴보았다. Fig. 2의 (a)와 (b)는 노즐 직경이 400 μm 인 6단의 노즐 밀면과 노즐 내부의 모습을 나타낸 것이다. Fig. 2(a)는 유동의 하류 부분인 노즐 아래쪽에서 촬영한 것인데, 노즐은 매우 둥근 원형이고 직경은 제조사가 제시한 값(400 μm)과 거의 일치한다. 광학 현미경 렌즈의 초점을 깊이 방향으로 바꾸면서 촬영한 후, 이미지를 합성하는 방법을 사용하여 깊이에 따른 노즐 내부의 입자부착 정도를 전체적으로 관찰하였다. Fig. 2(b)는 200배의 배율로 벽면에 부착된 입자들의 형상이 구분되도록 역상으로 이미지를 나타낸 것이다. 대부분의 노즐에서 비슷한 양상을 보였는데, 6단의 경우 노즐 목이 상대적으로 길기 때문에 노즐 입구 부분에서 막힌 정도는 좀 더 심각할 것으로 추정된다.

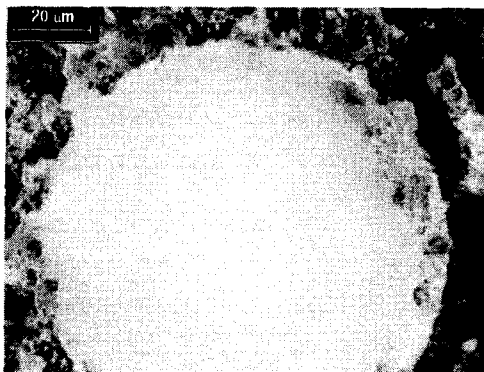
Fig. 3은 7단과 8단의 노즐 밀면과 노즐 내부의 모습을 나타낸 것이다. 이때 광학 현미경의 배율을 50, 500배로 바꾸어 영상을 얻었다. Fig. 3(a)는 7단의 노즐의 배열과 구멍을 보여주는데,



(a) Stage 7 (× 50)



(b) Stage 7 (× 500)



(c) Stage 8 (× 500)

Fig. 3 Cross-sectional view of nozzles for stages 7 and 8

구형의 노즐이 비슷한 간격으로 배열되어 있다. 8단의 경우에도 거의 같은 형태로 노즐이 배열되어 있었는데, 이것은 노즐 개수가 900개로 같기 때문에 비슷한 위치에 노즐을 위치시킨 것으로 생각된다. Fig. 3(b)는 입자에 의해 7단의 노즐이 막힌 형태를 나타낸 것이다. 많은 수의 노즐이 1/3 정도 막혀 있었고, 위치에 따라 약간의 차이가 있었다. 900개의 노즐 중에 그림과 같이 심하게 막혀 있는 노즐이 많았다. 이것은 노즐의 직경이 140 μm로 매우 작고, 노즐을 통과하는 입자의 농도가 높았기 때문인 것으로 생각된다. Fig. 3(c)를 보면, 8단의 경우 상대적으로 벽면의 입자 부착량이 적었다. 이것은 임팩터에 유입되는 대부분의 입자가 7단을 통과하는 동안 제거되어 노즐을 통과하는 입자의 농도가 상대적으로 낮았기 때문이라고 추정된다. 7단의 노즐 직경은 6단의 35%로 크게 줄어들지만, 8단의 노즐 직경은 7단의 64%로 더 적게 줄어든 것도 7단의 노즐 막힘 현상이 심각했던 원인 중의 하나로 생각된다.

Fig. 4는 Fig. 3(b)의 초점 깊이에 따른 영상으로 노즐 깊이에 따른 입자 부착 형태를 나타낸 것이다. Fig. 4(a)~(f)의 영상 초점 거리는 각각 Fig. 4(g)의 1~6번의 위치이다. 렌즈의 초점을 변경하여 촬영한 영상을 차례로 나타낸 것인데, 유동이 빠져나가는 노즐의 밑부분은 입자 부착량이 상대적으로 적었고, 상류 부분으로 올라갈수록 입자 부착량이 증가하였다. Fig. 4(g)는 Fig. 4(a)~(f)의 영상으로부터 추정된 노즐 벽면에 입자가 부착되는 형태를 나타낸 것이다. 그림과 같이 임팩터 노즐의 입구 부분에 상대적으로 입자 부착량이 많고, 입자의 부착량이 증가하면 노즐 막힘 현상은 가속화될 것으로 생각된다.

3.2 압력강하

임팩터의 노즐 내벽에 입자 부착으로 인한 영향은 임팩터의 상류와 하류의 압력 차이를 측정하면 추정할 수 있다. MOUDI의 정격유량인 30 L/min을 흡인할 때 각 단의 압력강하를 측정하였다. Fig. 5는 대기 에어로졸을 측정하는데 사용되어 노즐의 일부가 막혀 있는 경우 4~8단의 압력강하를 측정하여 나타낸 것이다. Marple 등⁽⁴⁾이 깨끗한 노즐을 대상으로 측정한 4~8단의 압력강하를 Fig. 5에 함께 나타냈다. 압력강하는 임팩터 입구에서 각 단의 노즐 출구까지 걸리는 압력으

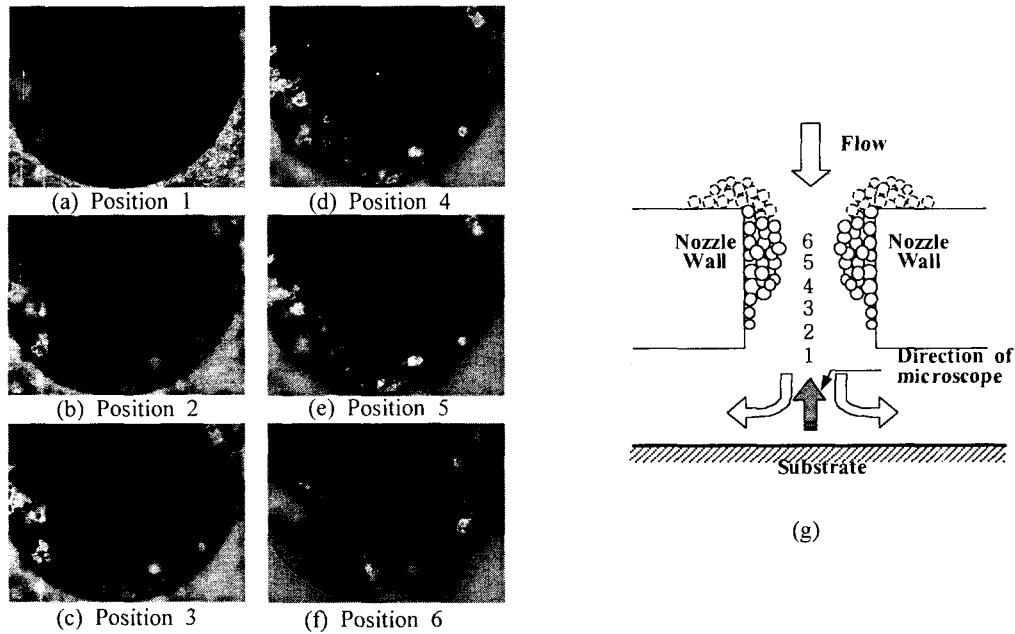


Fig. 4 Pattern of aerosol deposits on the nozzle wall

로, 4단의 압력강하는 입구로 유입된 공기가 1~4단을 통과한 후의 압력강하를 의미한다. 깨끗한 노즐의 경우 압력강하는 4~7단에서 완만하게 증가한 후 8단에서 급격하게 증가한다. 반면에, 노즐의 일부가 막혀 있는 임팩터의 경우 4단과 5단의 압력강하는 깨끗한 노즐의 압력강하와 별로 차이가 나지 않지만, 노즐의 직경이 작은 6~8단에서 압력강하는 급격히 증가한다. 이것은 노즐 벽면에 쌓인 입자가 임팩터 노즐의 단면적을 감소시키기 때문이다. 특히, 깨끗한 노즐에 비해 6단과 7단의 압력강하가 크게 증가했는데, 이것은 6단과 7단의 노즐이 상당 부분 막혀 있음을 암시한다.

3.3 입자채취효율

본 연구에서는 전기적 입자계수법을 이용하여 6~8단의 입자채취효율을 평가하였다. 모든 단이 설치되는 경우와 동일하게 각 단의 상류와 하류의 압력을 조절하였다.

입자의 기하학적, 광학적, 전기적, 운동학적 특성에 따라 입자의 크기는 다르게 표현된다. 실제로 존재하는 입자는 대부분 구형이 아니므로, 비구형 입자를 중력침강속도가 같은 구로 환산하여 나타내는 스톡스 입경(Stokes diameter)이 있고,

입자의 밀도가 1 g/cm^3 인 구로 환산하여 표현하는 공기역학적 입경(aerodynamic diameter)을 많이 사용한다. 임팩터, 싸이클론, 공기역학적 입자 계수기(Aerodynamic Particle Sizer)의 경우 입자의 공기역학적 특성을 이용하므로, 입자의 크기를 공기역학적 입경으로 나타낸다. 스톡스 입경과 공기역학적 입경의 관계는 식 (2)와 같다.

$$d_{ae} = d_p \left(\frac{C_c(d_p)}{C_c(d_{ae})} \right)^{1/2} \rho_p^{1/2} \quad (2)$$

$$C_c = 1 + 1.257 \frac{2\lambda}{d} + 0.40 \frac{2\lambda}{d} \exp(-1.10 \frac{d}{2\lambda}) \quad (3)$$

여기서, d_{ae} 는 공기역학적 입경이고, d_p 는 스톡스 입경, C_c 는 미끄럼 상수, λ 는 평균자유거리, ρ_p 는 입자의 밀도이다. DMA에서 발생된 입자의 크기는 전기적 이동도를 기준으로 한 입경(electrical mobility diameter)이지만, 발생 입자가 액체 입자로 구형인 경우 실제 크기와 비교할 때 2% 이내의 정확성을 가진다. 입자가 구형이면

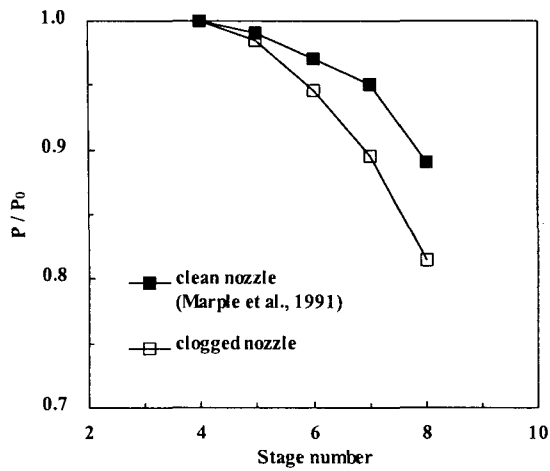
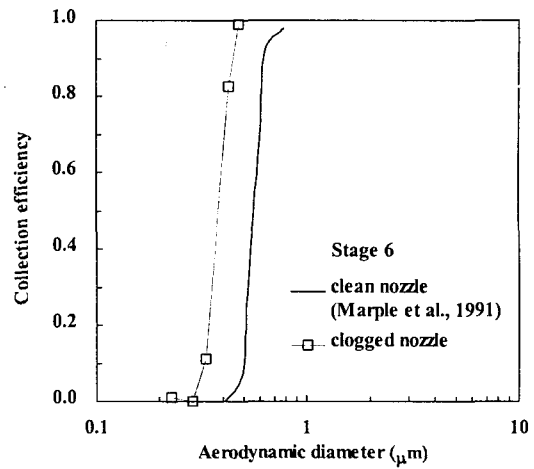


Fig. 5 Ratio of absolute pressure at the exit stage with all upstream stages present in the MOUDI inlet

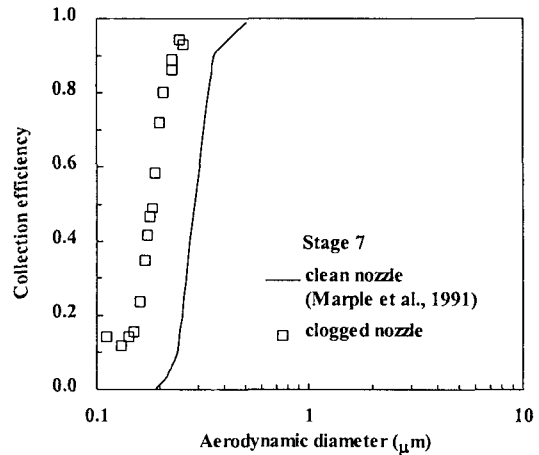
DMA에서 분리한 입경은 스톡스 입경이 되므로, 식 (2)와 (3)을 이용하여 밀도를 보정하면 공기역학적 입경으로 환산할 수 있다.

Fig. 6은 노즐의 일부가 막혀 있는 입액터를 대상으로 전기적 입자계수법을 사용하여 입경별로 구한 6~8단의 입자채취효율을 나타낸 것이다. Marple 등⁽⁴⁾이 깨끗한 노즐을 대상으로 측정된 6~8단의 입자채취효율을 Fig. 6에 함께 나타냈다. 6단의 입자채취효율 곡선을 나타낸 Fig. 6(a)를 보면, 깨끗한 노즐의 50% 분리입경은 0.56 μm 인데 Fig. 2(b)에 나타낸 바와 같이 노즐의 일부가 입자에 의해 막혀 있는 경우 분리입경이 0.38 μm 로 작아진다.

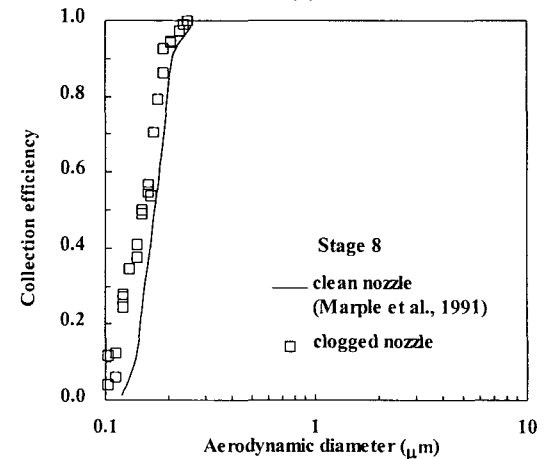
7단의 입자채취효율 곡선을 나타낸 Fig. 6(b)를 보면, 깨끗한 노즐의 50% 분리입경은 0.32 μm 인데 Fig. 3(b)에 나타낸 바와 같이 노즐이 부분적으로 막혀 있는 경우 분리입경이 깨끗한 8단의 분리입경에 가까운 0.185 μm 로 상당히 작아진다. 이것은 Fig. 5에서 보는 바와 같이 7단의 압력강하가 깨끗한 노즐인 8단의 값과 비슷한 것과 일치되는 결과이다. 7단과 8단의 노즐 개수가 900개로 같으므로, 입자의 부착에 의해 노즐 구멍이 막혀 7단의 평균 노즐 직경이 140 μm 에서 약 90 μm 로 감소되었을 것으로 추정된다. 현미경 사진에서도 확인할 수 있었던 것처럼 노즐이 심하게 막혀있던 7단의 경우 분리입경이 감소할 뿐만 아니라 약 0.1 μm 인 작은 입자에서도 약 10%의 채



(a)



(b)



(c)

Fig. 6 Change of collection efficiency by nozzle clogging

취효율을 나타낸다.

8단의 입자채취효율 곡선을 나타낸 Fig. 6(c)를 보면, 깨끗한 노즐의 50% 분리입경은 0.18 μm 인데 Fig. 3(c)에 나타낸 바와 같이 노즐의 일부가 막혀 있는 경우 분리입경이 0.15 μm 로 약간 작아진다. 이것은 8단의 노즐을 통과하는 입자의 농도와 크기가 상대적으로 작기 때문이다. 특히, 동일한 시간을 사용한 경우 7단에 비해 노즐 막힘 현상이 적었고, 노즐 막힘으로 인해 7단의 분리입경이 감소함에 따라 8단의 노즐을 통과하는 입자의 농도와 크기는 상대적으로 더욱 감소하여 7단에 비해 분리입경의 차이가 적다고 생각된다.

4. 결 론

본 연구에서는 수 년 동안 대기 에어로졸의 측정과 공기청정기기의 성능평가에 사용되었던 미세 오리피스형 다단 임팩터(MOUDI)의 노즐의 막힌 정도를 광학 현미경을 이용하여 관찰하였다. 또한, 1 μm 이하인 미세 입자를 발생시켜 전기적 입자계수법을 사용하여 50% 분리입경이 0.56, 0.32, 0.18 μm 이고 노즐 직경이 400, 140, 90 μm 인 6~8단의 입자채취효율을 평가함으로써, 노즐의 막힌 정도가 임팩터의 성능에 미치는 영향도 조사하였다. 현미경 사진과 성능평가 실험결과로부터 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 대기 에어로졸의 측정에 사용되고 있는 미세 오리피스형 다단 임팩터(MOUDI)의 노즐 벽면은 입자가 부착되어 부분적으로 막혀 있었고, 분리입경이 0.32 μm 인 7단의 경우 가장 심하게 막혀 있었다. 이것은 6단에 비해 노즐 직경이 크게 감소하고, 8단에 비해 고농도의 입자가 7단의 노즐을 통과하였기 때문인 것으로 생각된다.

(2) 노즐에 부착된 입자의 영향으로 각 단의 압력강하는 증가하였는데, 깨끗한 노즐과 비교할 때 노즐 벽면에 입자가 많이 부착되어 있던 6단과 7단의 압력강하가 크게 증가하였다.

(3) 깨끗한 상태에서 6~8단의 50% 분리입경은 각각 0.18, 0.32, 0.56 μm 인데, 노즐 벽면에 입자가 부착되어 노즐의 일부가 막혀 있는 경우 각 단의 분리입경은 각각 0.15, 0.185, 0.38 μm 로 작아졌다. 이것은 임팩터의 노즐이 부분적으로 막혀있어 결과적으로 노즐의 직경이 줄어드는 효과

가 발생되어 임팩터의 입자분리 성능이 변한 것을 의미한다. 이러한 각 단의 분리입경의 감소는 압력강하의 증가로부터 추정되는 입자채취 성능의 변화와 거의 일치한다.

미세한 노즐을 사용하는 다단 임팩터의 경우 입자 샘플링 과정에서 노즐 벽에 입자가 부착되어 있으면, 노즐의 직경이 감소하는 효과가 발생하여 임팩터의 입자채취 성능이 달라진다. 따라서, 주기적으로 각 단의 압력강하를 점검하고, 노즐을 세척하여 노즐 막힘으로 인해 임팩터의 성능이 변화되지 않도록 주의하여야 한다.

참고문헌

- (1) Lodge, Jr., J.P. and Chan, T.L., 1986, *Cascade Impactor: Sampling & Data Analysis*, American Industrial Hygiene Association.
- (2) Rader, D.J. and Marple, V.A., 1985, "Effect of Ultra-Stokesian Drag and Particle Interception on Impaction Characteristics," *Aerosol Sci. Technol.*, Vol. 4, pp. 141~156.
- (3) Knuth, R.H., 1984, "Calibration and Field Application of a Sierra Model 235 Cascade Impactor," *Am. Ind. Hyg. Assoc. J.*, Vol. 45, No. 6, pp. 393~398.
- (4) Marple, V.A., Rubow, K.L., and Behm, S.M., 1991, "A Microorifice Uniform Deposit Impactor (MOUDI): Description, Calibration, and Use," *Aerosol Sci. Technol.*, Vol. 14, pp. 434~446.
- (5) Rader, D.J., Mondy, L.A., Brockmann, J.E., Lucero, D.A., and Rubow, K.L., 1991, "Stage Response Calibration of the Mark III and Marple Personal Cascade Impactors," *Aerosol Sci. Technol.*, Vol. 14, pp. 365~379.
- (6) Howell, S., Pszenny, A.A.P., Quinn, P., and Huebert, B., 1998, "A Field Intercomparison of Three Cascade Impactors," *Aerosol Sci. Technol.*, Vol. 29, pp. 475~492.
- (7) Park, J.H. and Choi, K.C., 1997, "Characterization of Chemical Composition and Size Distribution of Atmospheric Aerosols by Low-Pressure Impactor," *Journal of Korea Air Pollution Research Association*, Vol. 13, No. 6,

pp. 475~486.

- (8) Kim, Y.P., Bae, G.N., Ji, J.H., Jin, H.C. and Moon, K.C., 1999, "Aerosol Size Distribution and Composition at Kosan, Cheju Island: Measurements in April 1998," *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment*, Vol. 15, No. 5, pp. 677~685.
- (9) Bae, G.N., Ji, J.H. and Moon, K.C., 1999, "Collection Characteristics of a MOUDI Cascade Impactor for Coarse Particles," *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment*, Vol. 15, No. 6, pp. 799~804.
- (10) Ji, J.H., Bae, G.N., and Hwang, J., 2001, "Design and Performance Evaluation of a Three Stage Impactor," *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment*, Vol. 17, No. 6, pp. 441~450.
- (11) Ji, J.H., Hwang, J., Bae, G.N. and Kim, Y.G., 2001, "Experimental Study on Electrical Agglomeration of Liquid Particles in an Alternating Electric Field," *KSME Journal B*, Vol. 25, No. 3, pp. 442~450.
- (12) MSP Corporation, 1992, *Model 100/Model 110 Micro-Orifice Uniform Deposit Impactor Instruction Manual (MOUDI)*.
- (13) Hillamo, R.E. and Kauppinen, E.I., 1991, "On the Performance of the Berner Low Pressure Impactor," *Aerosol Sci. Technol.* Vol. 14, pp. 33~47.
- (14) Juan, L., Brown, S., Serageldin, K., Davis, N., Rosell, J., Lazcano, J., and Mora, F., 1997, "Electrostatic Effects in Inertial Impactors," *J. Aerosol Sci.*, Vol. 28, No. 6, pp. 1029~1048.