

# 나노 환경입자 측정용 전기적 임팩터의 설계 및 성능평가

지준호\*, 조명훈\*\*, 배귀남†, 황정호\*\*

## Design and Performance Evaluation of Electrical Impactor for Nano Environmental Aerosols

Jun-Ho Ji, Myung-Hoon Cho, Gwi-Nam Bae and Jungho Hwang

**Key Words:** Electrical Impactor(전기적 임팩터), Nano Particle(나노 입자), Cascade Impactor(다단 임팩터), Low Pressure Impactor(저압 임팩터)

### Abstract

An electrical cascade impactor is a multistage impaction device to separate airborne particles into aerodynamic size classes using electrical method. We designed a real-time three-stage electrical low-pressure impactor, which is proper to nanometer sized environmental aerosols. Performance evaluation was carried out for stage 1 and 2. The monodisperse liquid dioctyl sebacate (DOS) particles were generated using condensation-evaporation followed by electrostatic classification using DMA (differential mobility analyzer) for particles with diameters in the range of 0.04~0.8  $\mu$ m. The evaluation of the electrical impactor is based on the use of two electrometers, one connected to the impaction plate of the impactor, and the other to the faraday cage as backup filter. The results showed that the experimental 50% cutoff diameters in the operation pressure were 0.53 and 0.12  $\mu$ m for stage 1 and stage 2. The effect of operation pressure on the cutoff diameter and the steepness of collection efficiency curves is investigated.

### 1. 서론

다단임팩터는 수 십 나노미터에서 수 십 마이크로미터의 대기 에어로졸을 비교적 정확하게 샘플링할 수 있는 장비로 주로 사용되어왔다. 그렇지만 신뢰성 있는 에어로졸의 크기분포 데이터를 얻으려면 샘플링한 무게가 저울의 분해능 이상이어야 하므로 대기의 경우 보통 8시간 이상의 긴 샘플링 시간이 필요하고, 샘플링 전후에 기판을 습도가 일정한 데시케이터 등에서 향량시킨 후

무게를 측정해야 하므로 실제로 크기분포 결과를 얻으려면 수 일의 시간이 필요하다. 게다가 임팩터의 기판을 설치하고 해체하는 과정에서 사소한 실수가 발생해도 측정 결과에 직접 영향을 미칠 수 있다.<sup>(1)</sup>

전기적 임팩터는 이러한 운전의 번거로움과 샘플링 시간의 단점을 극복할 수 있도록 최근에 개발된 계측기이다. 환경 모니터링, 자동차 배출 입자상 물질의 측정, 후처리 장치 측정 시스템 등 응용 범위가 매우 넓고, 시간에 따라 변화하는 시스템에 적용하면 입자의 크기분포의 변화 등을 예측할 수 있다. 특히, 최근에는 Keskinen 등<sup>(2)</sup>의 연구로부터 상용화된 ELPI(electrical low pressure impactor)를 사용하여 대기 에어로졸이나 디젤 입자상 물질을 측정하는 연구가 진행되고 있다.<sup>(3-5)</sup>

임팩터의 성능은 보통 각각의 단위 임팩터를 평가하는 방법을 사용한다. 특히, 임팩터 기판에 입자가 부착하는 양을 전기적으로 측정할 수 있

\* 연세대학교 나노과학기술연구원

\*\* 연세대학교 기계공학과

† 한국과학기술연구원 지구환경연구센터

E-mail : gnbae@kist.re.kr

TEL : 82-2-958-5676

기 때문에, 성능평가 과정에서 1단 임팩터의 기관과 종단필터의 전류량을 측정하면 실시간으로 채취효율을 얻을 수 있다. Hillamo와 Kauppinen<sup>(6)</sup>은 단극성 하전기를 사용하여 에어로졸을 미리 대전시킨 후, 하전 입자의 전류량을 측정하여 Berner 형의 저압 임팩터 각 단의 입자 채취 효율을 측정하였다. Keskinen 등<sup>(7)</sup>은 각 단의 전류량을 다중 채널로 동시에 측정하여 Berner 형의 저압 임팩터의 성능을 평가하였다. Marjamaeki 등<sup>(8)</sup>은 하전기를 통과한 대전 입자가 임팩터 각 단에 충돌하는 순간에 다중 채널을 측정할 수 있는 전류계를 사용하여 다단 임팩터의 성능을 평가하였다. 여러 단의 기관에 충돌한 입자의 대전량을 동시에 측정한 후, 여러 단의 임팩터 채취 효율을 얻었다. 국내에서는 배 등<sup>(9)</sup>의 다단 임팩터의 성능평가에 관한 연구와 지 등<sup>(10)</sup>의 대기 에어로졸 측정용 3단 임팩터의 설계 및 성능평가에 관한 연구가 수행되었다. 국내에서 임팩터의 성능평가에 관한 연구는 보통 1  $\mu\text{m}$  이상의 입자를 대상으로 하였고, 최근에 전기적 방법을 적용하여 절단입경이 1  $\mu\text{m}$  이하인 임팩터의 성능을 평가한 지 등<sup>(11)</sup>의 연구가 있다.

본 연구에서는 미세 입자의 크기분포를 측정할 수 있는 저압 3단 임팩터를 설계하였고, DMA로 분류한 1가로 대전된 단분산 입자의 전하량을 측정하는 전기적 성능평가 방법을 이용하여, 임팩터의 성능을 평가하였다.

## 2. 저압 3단 임팩터의 설계

실시간 임팩터를 제작하기 위해 분리 입경이 0.5, 0.15, 0.05  $\mu\text{m}$ 인 나노 입자를 분리할 수 있는 실시간 저압 3단 임팩터를 설계하였다. 저압 임팩터의 설계에 관한 자세한 내용은 Hillamo와 Kauppinen<sup>(6)</sup>에 자세히 설명되어 있다. 임팩터를 통과하는 공기 유량은 10 L/min으로 설정하였고, 디젤 엔진에서 배출되는 입자상 물질을 측정할 수 있도록 분리 입경을 선택하였다. 분리 입경이 2.5  $\mu\text{m}$ 인 예비 단을 입구에 설치할 수 있도록 하여 첫 번째 단이 0.5~2.5  $\mu\text{m}$ 인 입자를 채취할 수 있도록 하였다.

저압에서 작동하는 임팩터의 경우 상류에 위치한 임팩터 단이 하류 임팩터의 성능에 직접적으

**Table 1** Design parameters of real time three stage impactor

Stage	Cutoff diameter ( $\mu\text{m}$ )	Nozzle diameter (W)	Number of nozzle	Inlet pressure (atm)	Re	Stk <sup>1/2</sup>
Precut	2.5	2.2	3	1	2127	0.49
1	0.5	0.6	9	1	2616	0.465
-	Orifices	0.4	8	0.97	4440	
2	0.15	0.4	10	0.77	3803	0.465
-	Orifices	0.4	10	0.59	3700	
3	0.05	0.4	20	0.34	2331	0.465

로 영향을 미친다. 즉, 세 번째 단의 임팩터의 운전 압력은 첫 번째와 두 번째 단의 압력 강하에 따라 달라지므로, 각 단의 운전 압력에 맞추어 임팩터의 성능평가를 수행하거나 시험 임팩터 입구의 모든 임팩터가 장착된 상태에서 수행되어야 한다. 압력이 떨어지면 공기의 밀도가 감소하므로 입자의 노즐을 통과하는 평균 속도는 증가하고 같은 조건에서 분리 입경은 작아진다. 본 연구에서는 두 번째 단과 세 번째 단에 걸리는 압력을 계산하였다. 미리 계산된 압력을 운전 압력으로 가정하여 성능평가를 수행하였고, 운전 압력을 변경하여 임팩터의 채취효율을 측정하였다.

상압에서 작동하는 분리 입경이 2.5  $\mu\text{m}$ 인 예비 단의 경우 Stk<sup>1/2</sup>를 0.49로 설정하였고, 저압에서 작동하는 1단, 2단 및 3단 임팩터는 0.465로 설계하였다. 임팩터 노즐의 직경은 0.4 mm로 유지하면서 분리 입경을 50 nm까지 감소하려면, 세 번째 단의 상류 압력을 약 0.3 기압까지 감소시켜야 하므로 첫 번째 단과 두 번째 단의 하류에 압력 조절용 오리피스를 설치하였다. Table 1에 설계 인자를 정리하여 나타내었다.

## 3. 임팩터의 성능 평가

저압 임팩터 각 단의 입자채취효율을 평가하기 위하여 Fig. 1과 같이 실험장치를 구성하였다. 전기적 임팩터의 상류에는 하전기를 사용하여 입자를 하전시키지만, 본 연구에서는 DMA에서 (+)1가의 전하수로 발생된 단분산 입자를 성능평가에 이용하였다.

단분산 시험 입자를 만들기 위하여 기화-응축 방법으로 액체인 DOS(Dioctyl Sebacate) 입자를

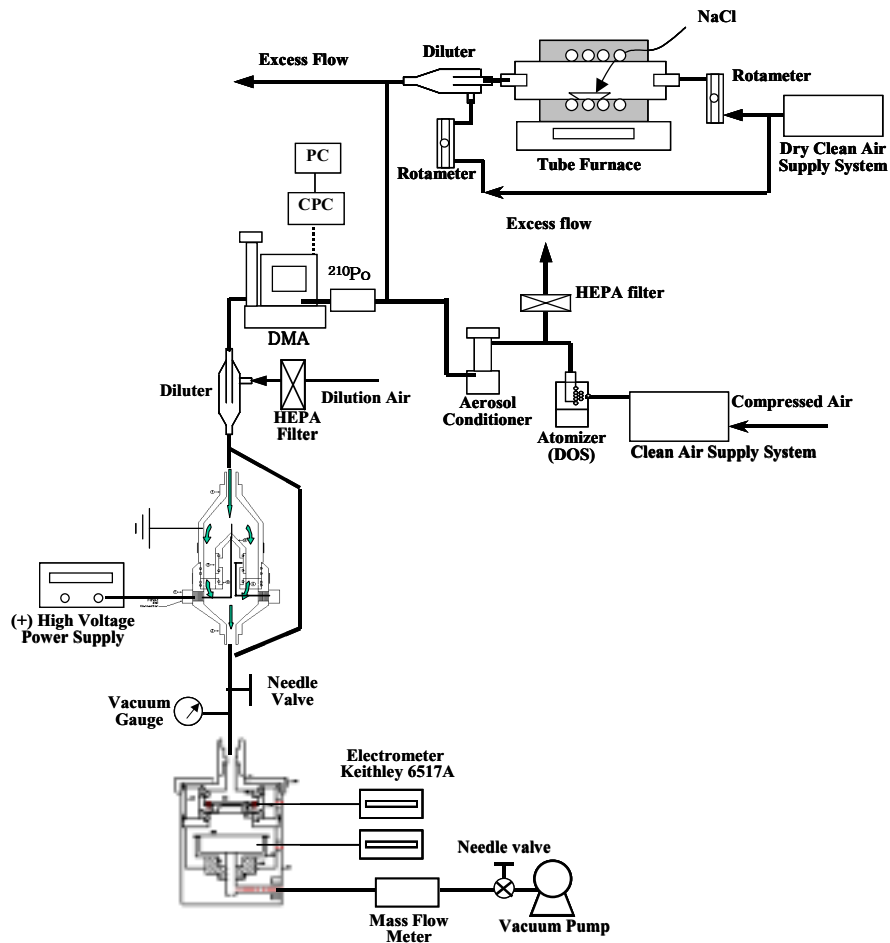


Fig. 1 Experimental setup for performance test of one stage electrical impactor

분무형 입자 발생 장치로 발생시켰고, 고체인 소금 입자를 전기가열 튜브로를 사용하여 발생시켰다. DMA(Differential Mobility Analyzer)로 유입되는 다분산 입자의 크기분포의 표준편차는 정확한 단분산 입자를 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 하전입자에 의한 다분산성을 줄이려면 발생시키려는 입자보다 크지만 같은 이동도를 갖는 입자의 절대량이 최소화될 수 있도록 크기분포의 폭이 좁은 단분산 입자를 발생시켜야 하고, DMA에 유입되는 입자의 피크 농도보다 큰 입자를 선택해야 한다.

용질인 DOS와 용매인 이소프로필 알콜로 만들어진 용액이 기화-응축 방법에 의해 발생된 후, 용액의 DOS 농도에 따라 발생되는 DOS 입자의

기하 평균 입경(geometric mean diameter)이 달라지므로, 용액의 농도를 변경하여 시험 입자의 크기분포를 변경하였다. 임팩터의 입자채취 성능 실험을 시작하기 전에 SMPS(TSI model 3936)로 크기분포를 측정된 후, 기하 평균 입경보다 큰 단분산 입자를 발생시켰다.

HEPA(High Efficiency Particulate Air) 필터를 통과한 깨끗한 희석 공기와 시험 입자를 포함한 공기 유량의 합이 10 L/min이 되도록 했다. 시험 임팩터의 노즐 입구의 압력은 시험 임팩터 상류에 설치한 압력 조절 밸브와 진공 게이지를 사용하여 진공도를 변경하였다. 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 하전량( $1.6 \times 10^{-19}$  Coulomb)을 갖기 때문에 패러데이 캐이지와 전위

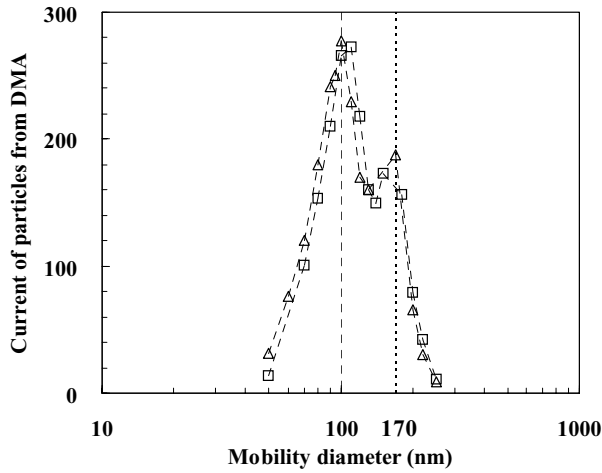


Fig. 2 Current of particles with same mobility classified from DMA

계(electrometer, Keithley model 6517A)를 이용하여 임팩터의 기관과 패러데이 케이지의 전류량을 측정 한 후, 임팩터 각 단의 채취효율( $\eta$ )을 식 (1)과 같이 계산하였다.

$$\eta = \frac{I_{substrate}}{I_{substrate} + I_{filter}} \quad (1)$$

여기서,  $I_{substrate}$ 은 임팩터의 단에서 채취되어 측정되는 시험 입자의 전류량이고,  $I_{filter}$ 는 임팩터 단을 통과한 후에 패러데이 케이지에서 측정된 전류량이다. 다만 임팩터는 모든 단이 장착된 상태에서 운전되도록 설계되었으므로, Table 1에서 계산된 임팩터 입구의 압력조건을 이용하여 성능을 평가하였고, 압력의 변화에 의한 채취효율의 변화를 측정하기 위해, 시험 임팩터의 상류에 압력 조절 밸브(needle valve)와 진공계를 설치하였다.

#### 4. 결과 및 고찰

4.1 다중 하전 입자가 성능평가에 미치는 영향  
전기적으로 성능평가를 수행하는 경우 시험 입자가 정확하지 않으면 실험결과가 크게 달라질 수 있다. 만약 DMA에서 분류되는 입자의 크기가

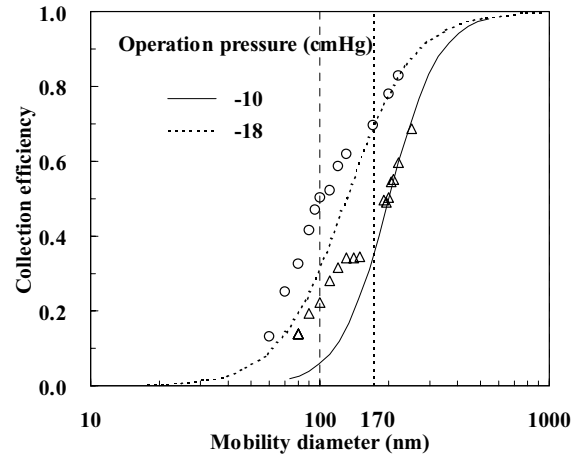


Fig. 3 Artifact of collection efficiency due to the multi-charge effect of particles classified from DMA

정확하게 단분산이 아니면 정밀한 측정이 요구되는 임팩터 실험에서는 오차가 증폭되어 나타난다. 그러므로 기화-응축으로 발생한 입자를 사용하는 경우, 각 용액에 농도에 따라 발생하는 단분산 시험 입자의 크기는 한정된다. 즉, 기하평균 입경보다 큰 입자를 발생시켜야하고, 발생한 입자의 농도는 전기적으로 측정할 수 있을 정도의 농도 이상이어야 한다.

Fig. 2은 일정한 비율로 알콜과 DOS를 섞은 용액을 기화-응축 방법으로 발생한 후, DMA로 분리한 입자의 하전량을 측정한 결과이다. 측정된 입자의 기하평균입경은 약 170 nm로 두 번째 피크에 해당한다. 그렇지만 첫 번째 피크에 해당하는 100 nm 근처의 입경의 하전량이 크게 측정된다. 이것은 DMA에서 분류된 입자가 100 nm 근처에서는 2가 이상의 다중하전 입자의 비율이 높기 때문이다. 실제로 수농도를 측정하게 되면 첫 번째 피크의 농도가 두 번째 피크보다 작게 나타나지만, 수농도가 아니라 전하량을 측정하면 첫 번째 피크의 전하량이 오히려 높게 나타난다. 이것은 2가 이상의 다중 하전된 입자의 전하량이 실제보다 2배 이상으로 측정되기 때문이다.

Fig. 3은 피크가 170 nm인 다분산 입자를 시험 입자로 사용할 때, DMA로 분류한 단분산 입자의 발생이 성능평가 결과에 미치는 영향을 나타낸다. 분리 입경이 0.15  $\mu\text{m}$ 로 설계된 두 번째 단의 운전 압력이 -10과 -18 cmHg인 두 경우에 대해 채취효율을 비교하였다. 피크가 170 nm인 입자를

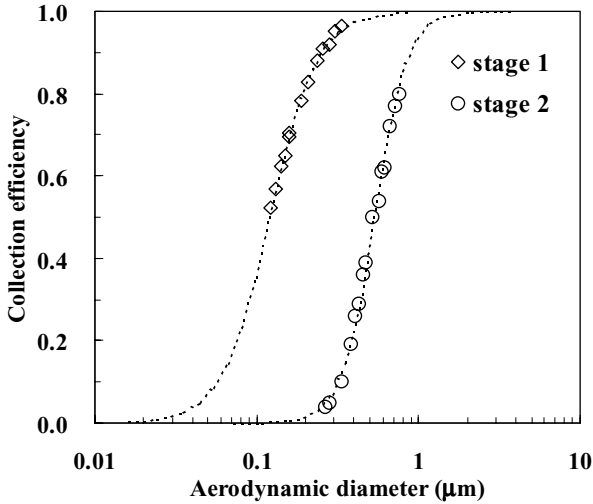


Fig. 4 Collection efficiency of stage 1 (1 atm) and stage 2 (-18 cmHg)

사용한 경우 170 nm 이하 입자를 DMA를 분류하면 이동도는 같지만 크기가 큰 2가 이상의 다중 하전 입자가 섞여 나오기 때문에 큰 입자의 영향으로 임팩터에 기관에 부착되는 입자의 비율이 증가할 뿐 아니라 부착된 입자의 대전량이 2가 이상이므로 채취효율이 과장되어 높게 나타난다. 이와 같이 성능평가를 DMA로 단분산 입자를 발생하여 전기적으로 수행하는 경우, 다중 하전된 입자의 효과를 배제하는 것은 매우 중요하다. Fig. 3과 4의 X축은 입자의 직경을 의미하는 것이 아니고 1가로 대전된 입자의 전기적 이동도에 해당하는 이동도 직경(mobility diameter)을 사용하여 표현하였다.

4.2 저압 임팩터의 입자 채취성능

임팩터는 공기역학을 사용하므로 DMA에서 전기적 이동도로 분류한 입자의 크기를 공기역학경으로 변환하였다.<sup>(11)</sup> 1단의 경우 직경이 0.6 mm 인 9개 노즐을 사용하였고, 2단은 직경이 0.4 mm 인 10개의 노즐을 사용하였다. 초기 설계의 의해 설정한 분리 입경은 각각 0.5, 0.15 μm였고, Stk<sub>50</sub><sup>1/2</sup>는 각각 0.49, 0.465였지만, 다중 노즐을 사용하는 경우 Stk<sub>50</sub><sup>1/2</sup>은 노즐의 개수나 배치 등에 따라 달라질 수 있다. Fig. 4는 1단과 2단의 성능평가 결과를 나타낸다. 성능평가에 의해 얻은 1단과 2단의 분리 입경은 각각 0.53과 0.12 μm였고, 이 때 1단의 경우 대기압에서, 2단의 경우 작동 압력인 -18 cmHg 조건에서 성능을 평가하였

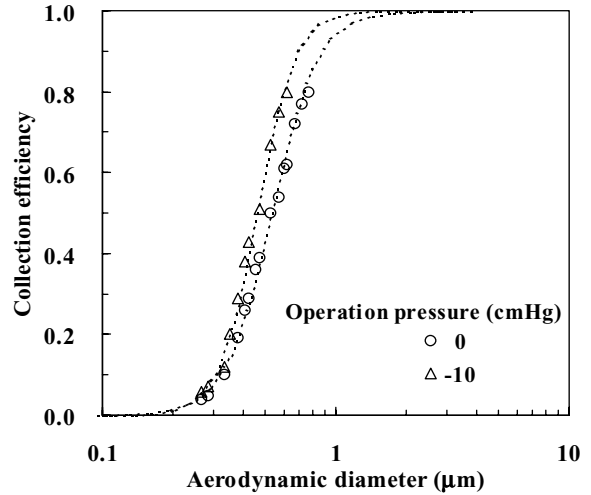


Fig. 5 Collection efficiency of stage 1 varying with operation pressure

다.

식 (2)는 S자 형태의 임팩터의 채취 성능 곡선을 나타낼 수 있는 함수이다.

$$\eta = \frac{1}{1 + \left(\frac{d_{50}}{d}\right)^x} \tag{2}$$

여기서  $d_{50}$ 은 50%의 채취효율을 갖는 분리 입경을 의미하고,  $d$ 는 입경,  $x$ 는 채취 곡선의 기울기 정도를 의미하는 성능계수(steeptness)이다.  $x$ 의 값이 클수록 분리 입경을 기준으로 분리 성능이 좋은 것을 의미한다. 성능 평가 데이터를 이용하여 적절한  $d_{50}$ 과  $x$  값을 찾으면 임팩터의 성능을 나타내는 채취 곡선을 얻을 수 있다.

4.3 운전 압력에 따른 임팩터의 입자 채취성능

임팩터의 운전 압력이 낮아지면 임팩터를 통과하는 공기의 밀도가 감소하므로 에어로졸은 더 빠른 속도로 임팩터 노즐을 통과하고 노즐 직경, 개수, 흡인 유량 등이 일정하더라도 더 작은 입자까지 분리할 수 있다.

Fig. 5는 운전 압력에 따른 임팩터 1단의 입자 채취 곡선을 나타낸다. 1단인 경우 대기압에서 운전되도록 설계되었는데, 운전 압력이 대기압인 경우 성능계수가 4.4인 반면, -10 cmHg에서 운전하는 임팩터의 경우 5.5이다. Fig. 6은 2단의 운전

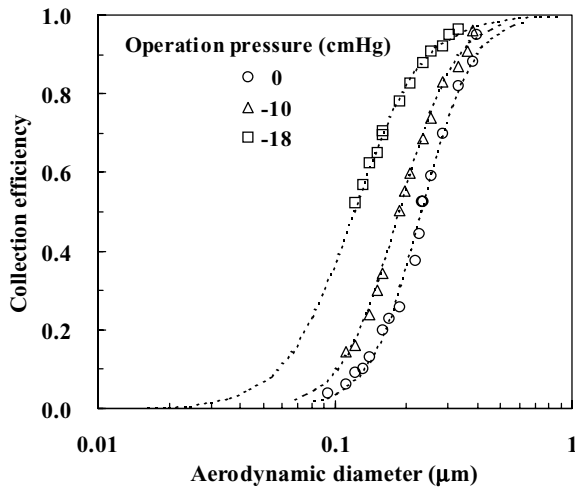


Fig. 6 Collection efficiency of stage 3 varying with operation pressure

압력이 각각 대기압, -10 cmHg, -18 cmHg인 경우로 성능계수는 각각 4, 3.7, 3으로 운전 압력이 낮아질수록 분리성능이 상대적으로 나빠진다. 1단의 경우 운전 압력이 -10 cmHg으로 상대적으로 낮은 조건에서 분리 성능이 좋아진 반면, 2단에서는 운전 압력이 감소하면 임팩터의 분리 성능이 나빠지는데, 이것은 임팩터 노즐에서 빠져 나오는 입자의 유동 조건이 압력에 따라 영향을 받기 때문이라 생각된다.

## 5. 결 론

운전 조건에 따라 발생 입자의 크기분포나 농도가 변화하는 시스템 혹은 전기 응집기나 집진장치 등과 같이 극한 조건에서 입자의 크기 변화를 평가해야 하는 경우에 입자의 크기분포를 실시간으로 측정하는 것은 시스템의 특성을 파악할 수 있는 중요한 기술이다. 본 연구에서는 실시간 전기적 임팩터의 설계하였고, 성능평가를 수행하였다. 전기적 1단 임팩터를 제작하여 전기적 성능평가를 수행하였다.

저압 조건에서 임팩터의 설계 이론을 정리하여, 서브 마이크론 크기의 입자상 물질의 크기분포에 적합한 실시간 저압 3단 임팩터를 설계, 제작하였고, 1단과 2단의 성능을 평가하였다. 전기적 방법을 이용하여 저압 임팩터의 성능을 평가하였고, 성능평가 과정에서 입자 발생의 오류에

의해 나타날 수 있는 평가 왜곡의 문제를 고찰하였다. 특히, 운전 압력에 따른 임팩터의 입자 채취효율 곡선을 구하여, 저압 임팩터의 운전 압력과 임팩터 성능의 관계를 정량적으로 평가하였다.

## 참고문헌

- (1) Lodge, Jr., J.P. and Chan, T.L., 1986, *Cascade Impactor: Sampling & Data Analysis*, American Industrial Hygiene Association.
- (2) Keskinen, J., Pietarinen, K., and Lehtimaeki, M., 1992, "Electrical Low Pressure Impactor," *J. Aerosol Sci.*, Vol. 23, pp. 353~360.
- (3) Maricq, M. M., Podsiadlik, D. H., and Chase, R. E., 2000, "Size Distribution of Motor Vehicle Exhaust PM: A Comparison Between ELPI and SMPS Measurement," *Aerosol Sci. Technol.*, Vol.43, 239~260.
- (4) Ahlvik, P., Ntziachristos, L., Keskinen, J., and Virtanen, A., 1998, "Real Time Measurements of Diesel Particle Size Distribution with an Electrical Low Pressure Impactor," *SAE Technical Paper 980410*.
- (5) van Gulijk, C., Schouten, J. M., Marijnissen, J. C. M., Makkee M., and Moulijn, J. A., 2001, "Restriction for the ELPI in Diesel Particulate Measurements," *J. Aerosol Sci.*, Vol. 32, pp. 1117-1130.
- (6) 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.
- (7) Keskinen, J., Marjamaeki, M., Virtanen, A., Maekelae, T., and Hillamo, R., 1999, "Electrical Calibration Method for Cascade Impactors," *J. Aerosol Sci.*, Vol. 30, pp. 111~116.
- (8) Marjamaeki, M., Keskinen, J., Chen, D. R., and Pui, D. Y. H., 2000, "Performance Evaluation of the Electrical Low-Pressure Impactor (ELPI)," *J. Aerosol Sci.*, Vol. 31, No. 2, pp. 249~261.
- (9) Bae, G.N., Ji, J.H. and Moon, K.C., 1999, "Collection Characteristics of a MOUDI Cascade Impactor for Coarse Particles," *Journal of Korea Air Pollution Research Association*, 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," *Korean Society for Atmospheric Environment*, Vol. 17, No. 6, pp. 441~450.
- (11) Ji, J.H., Bae, G.N., and Hwang, J., 2003, "Effect of Particle Clogging in Orifices on the Particle Collection Efficiency of a Micro-Orifice Impactor," *KSME Journal B*, Vol. 27, No. 2, pp. 197~205.