

## 미세입자 측정용 간이형 3단 전기적 저압 임팩터의 설계 및 성능평가

조명훈\*·지준호\*\*·박동호\*·배귀남\*\*·황정호†

(2004년 2월 5일 접수, 2004년 5월 15일 심사완료)

### Design and Performance Evaluation of a Portable 3-Stage Electrical Low Pressure Impactor(P-ELI) for Measurements of Submicron Aerosol

Myung-Hoon Cho, Jun-Ho Ji, Dong-Ho Park, Gwi-Nam Bae and Jung-Ho Hwang

**Key Words:** Electrical Low Pressure Impactor(전기적 저압 임팩터), Cascade Impactor(다단 임팩터), Cutsizer(분리입경), Stokes Number(스톡스 수)

#### Abstract

Cascade impactors are widely used to collect size classified aerosol. A major disadvantage of this instrument is the required long sampling time. Electrical low pressure impactor has been developed to overcome this disadvantage and to achieve real-time measurements on the particle size distribution. The instrument consists primarily of a corona charger, low pressure cascade impactor and multi channel electrometer. We designed and evaluated the performance of a portable 3-stage low pressure impactor using an electrical method. For the calibration of the impactor, monodispersed particles were generated using evaporation-condensation method followed by electrostatic classification using a DMA(Differential Mobility Analyzer). The collection efficiency curves of the stages can be determined by analysing the fraction of particles collected by each stage.

#### 1. 서 론

대기오염의 주된 원인은 여러 가지가 복합적으로 작용하겠지만 그 중에서도 자동차, 공장, 발전소, 소각로 등의 연소과정 중에 발생하는 입자상 물질들이 대기오염의 주된 오염원이 되고 있다. 이런 입자상물질 중에서도 크기가  $1\mu\text{m}$  이하의 것들은 크기가 매우 작기 때문에 대기 중에 오랫동안 떠다니며 대기를 오염시키며 정확한 측정 또한 매우 어렵다. 이러한 미세 입자상 물질은

인체의 호흡기에 쉽게 침투·축적되어 호흡기 질환의 원인이 되며 시정장애의 주원인이 되고 있기 때문에 최근 들어 미세 입자에 관한 연구가 활발히 진행되고 있고 규제 또한 강화되고 있는 실정이다. 따라서 공기 중에 부유하는 미세입자, 나노 크기의 정확한 측정 및 평가는 매우 중요하다. 이런  $1\mu\text{m}$  이하의 입자상 물질을 측정하는 대표적인 계측기로는 TSI사의 SMPS(Scanning Mobility Particle Sizer) 시스템 등이 있지만 SMPS의 경우, 장비의 가격이 고가이고 시스템 운전이 까다롭기 때문에 연구용으로 많이 사용되고 있으며 시스템의 일부인 CPC(Condensation Particle Counter)라는 입자 개수 측정 장비가 쉽게 운반하기 어렵기 때문에 제한을 받는다.

이에 비해 전기적 다단 임팩터(cascade impactor)는 이러한 운전의 번거로움과 많은 시간이 걸리는 질량측정 과정을 전기적인 방법으로 해결해 샘플링 시간의 단점을 극복할 수 있도록 최근에 개발

\* 연세대학교 기계공학과 대학원

\*\* 회원, 한국과학기술연구원 대기자원연구센터

† 책임저자, 회원, 연세대학교 기계공학과

E-mail : hwangjh@yonsei.ac.kr

TEL : (02)2123-2821 FAX : (02)312-2159

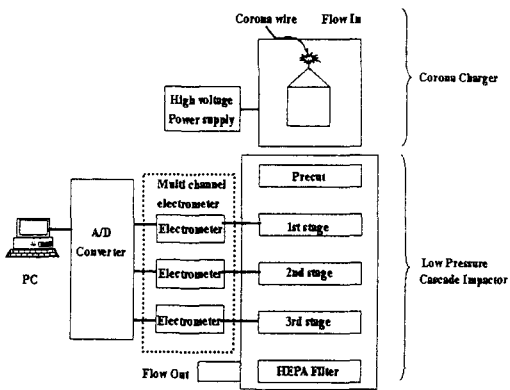


Fig. 1 Schematic diagram of a portable electrical low pressure impactor

된 계측장비이다. 공장, 발전소 등의 배출 에어로졸 측정, 환경모니터링, 디젤 자동차 배출 입자상 물질 측정 등<sup>(1-3)</sup> 응용범위가 매우 넓고 무엇보다도 실시간 측정이 가능한 장점을 가지고 있다. 이미 Dekati사에서 ELPI(Electrical Low Pressure Impactor)라는 제품이 상용화 되어 있고 설계와 성능평가 등에 관해 연구되어 왔다.<sup>(4-5)</sup> ELPI는 시스템 운전이 간단하고 측정범위가 30nm에서 10  $\mu\text{m}$  로 매우 넓다. 특히, 기계적인 장치로만 구성되어 있기 때문에 공장이나 소각로와 같이 고온이며, 고농도의 입자가 나오는 극한환경에서도 측정이 가능하다. 하지만 장비의 가격이 상당히 고가이고 다단 임팩터 부분이 총 13단으로 구성되어 있기 때문에 장비가 커서 고정식으로 사용되고 있다.<sup>(4)</sup> 이러한 문제점을 해결하기 위해 본 연구에서는 1 $\mu\text{m}$  이하의 입자상물질을 실시간으로 크기분포에 대한 농도를 얻기 위해 3단으로 임팩터를 구성하여 포터블하고 저가형인 전기적 임팩터 구성을 목적으로 한다. Fig. 1과 같이 간이형 3단 전기적 임팩터의 구성은 크게 입자 크기에 따라 일정한 하전량을 부가하는 입자하전기, 입자를 크기별로 분리할 수 있는 다단임팩터, 하전된 입자의 전류값을 측정하는 미세전류계, 측정된 전류값을 여러 가지 원하는 값으로 변환시켜주는 소프트웨어 등으로 구성된다. 특히, 1 $\mu\text{m}$  이하에서의 입자상물질을 측정할 수 있는 장비의 수요는 많지만 개발된 제품은 거의 없기 때문에 많은 연구가 필요한 분야이다. 이를 위한 기초연구로 이미 2단 저압 임팩터를 설계하여 인

팩터 각단의 성능을 평가하였고,<sup>(6)</sup> 본 연구에서는 설계, 제작 성능평가를 마친 별도의 하전장치를 이용하여,<sup>(7)</sup> 임팩터 안으로 유입되는 입자가 일정한 하전량을 갖도록 하였다. 이를 위해 먼저 임팩터 안으로 유입되는 입자상 물질들을 코로나 방전을 이용 입자를 입경에 따라 일정한 하전량을 갖도록 하전시키는 에어로졸 하전기를 설계, 제작하여 성능평가를 하였다. 하전기에 대한 자세한 사항은 별도의 논문<sup>(7)</sup>에서 다루기로 한다.

1 $\mu\text{m}$  이하의 입자를 크기별로 분리하기 위해 예비단 제외 3단으로 구성된 저압 임팩터를 설계, 제작하여 전기적인 방법으로 임팩터 개별단의 성능을 평가하였다. 각각의 전류계에서 측정된 전류값은 A/D 컨버터를 이용해 실시간으로 컴퓨터 화면으로 출력, 저장하여 정확한 값을 얻을 수 있도록 하였다. 또한 분리 성능이 좋은 임팩터를 설계하기 위해 각 단마다 압력을 변화시켜 포집효율을 비교해 보았다. 1, 2단의 경우 하전된 단분산 입자를 사용하여 노즐개수와 직경의 변화를 주어 성능평가를 비교하고 분리성능이 우수한 경우를 택해 최종적인 설계값으로 결정하였다. 2단의 경우, 운전압력에 따른 포집효율의 결과를 살펴보고 실험적으로 구한 평균  $\text{Stk}^{1/2}$ (stokes number) 값과 이론적인 값을 비교해 보았다. 마지막 단인 3단의 경우, 액체입자와 고체입자를 같은 크기로 발생시켜 기판의 코팅 유무에 따른 포집효율을 고찰하였다.

## 2. 저압 다단 임팩터

임팩터는 입자의 관성력을 이용하여 입자를 크기별로 분리하는 기기이다. 입자의 관성력을 이용할 경우, 입자의 크기가 작아지면 분리효율이 급격히 떨어지게 된다. 이러한 단점을 보완할 수 있는 것이 운전압력을 저압상태로 유지하는 것이다. 다단 임팩터의 운전압력을 낮추면 공기의 부피가 증가하여 밀도가 감소하므로 입자의 노즐을 통과하는 평균속도가 증가하기 때문에 더 작은 입자까지도 기판에 포집할 수 있는 것이다.

### 2.1 저압 다단 임팩터 설계변수

저압 임팩터의 분리입경(cut diameter)을 계산하려면 유체의 압축성을 고려해야 한다. Flagan,<sup>(8)</sup> Biswas,<sup>(9)</sup> Hering<sup>(10)</sup> 등에서 사용된 방법으로 저압

임팩터를 설계할 수 있다. 이론적인 계산을 하기 위해서 임팩터의 입자 포집효율을 결정하는 설계 변수로 스톡스 수(stokes number)와 노즐내의 유동상태를 나타내는 레이놀즈 수를 계산해야 한다.

무차원 수인 스톡스 수는 노즐 반경에 대한 입자 정지거리(stop distance)의 비로 식 (1)과 같이 표현된다. 스톡스 수는 장애물이 있는 유체 흐름장 변화에 현재의 입자 운동을 계속 유지하려는 입자의 운동 고집성을 나타내는 것으로 스톡스 수가 0이라는 것은 완벽하게 입자가 유선을 따라 움직이는 것을 의미하고 숫자가 점점 커지는 것은 유선을 따라 움직이지 않으려 하는 방향 변화에 대한 저항하는 힘이 커진다는 의미가 된다.

$$Stk = \frac{\tau V}{W/2} = \frac{\rho_p d_p^2 VC_c}{9\mu W} \quad (1)$$

여기서  $d_p$ 는 입자의 직경,  $\tau$ 는 이완시간(relaxation time),  $W$ 는 노즐의 직경,  $V$ 는 노즐을 통과하는 평균유속,  $C_c$ 는 미끄럼 보정계수(slip correction factor),  $\mu$ 는 공기의 점성계수이다. 스톡스 수를 계산하기 위해서는  $C_c$ ,  $V$ ,  $\mu$  등을 알아야 한다.

이상기체이고 유동이 가역 단열 되었다 가정하면 노즐을 통과하는 유동속도는 질량 유량식과 이상기체 방정식을 이용하면 식 (2)와 같다.

$$V = \frac{\dot{m}}{\rho_0} \left( \frac{p_0}{p} \right) \left[ 1 - V^2 \left[ \frac{(k-1)M}{2kR_u T_0} \right] \right] \quad (2)$$

여기서  $\dot{m}$ 은 단위면적당 질량유량,  $T_0$ ,  $p_0$ ,  $\rho_0$ 는 각각 임팩터 입구의 정체점 온도, 정체점 압력, 정체점 공기의 밀도이다.  $k$ 는 비열비로 유체가 공기인 경우 1.4이고,  $M$ 은 28.96 kg/kmol,  $R_u$ 는 일반기체상수로  $8.314 \times 10^3$  J/(K·kmol)이다.

유동 특성을 나타내는 무차원 변수인 레이놀즈 수는 식 (3)과 같다.

$$Re = \frac{\rho V W}{\mu} \quad (3)$$

여기서  $\rho$ 는 노즐 하류의 공기밀도이고, 식 (4)를 사용하여 구할 수 있다.

$$\rho = \rho_0 \cdot (p / p_0)^{1/k} \quad (4)$$

노즐하류 압력인  $p$ 는 식 (5)를 사용하여 계산한다.

$$p = p_0 - \frac{1}{2} \rho V^2 \quad (5)$$

## 2.2 저압 다단 임팩터 설계

임팩터 설계의 핵심은 원하는 크기의 입자를 정확히 분리해 내는 것이다. 이를 위해 이론적인 설계와 경험적인 실험결과를 얻어 임팩터의 성능을 평가한다. 설계를 하기 위해 먼저 50% 분리입경에 해당하는 스톡스 수를 가정한다. 저압 다단 임팩터의 경우 보통 실험적으로 구한 평균값인 0.465를 사용한다.<sup>(5)</sup> 다음으로 원하는 분리입경 값을 정하고 노즐의 지름과 개수, 압력값을 가정한다. 가정된 값과 식 (2)를 이용해 노즐내의 유동 속도를 구한다. 이어 식 (4), (5)를 이용해 노즐하류의 압력을 구한다음 식 (1)을 이용해 분리입경을 구한다. 계산한 분리입경 값이 가정된 값과 일치할 때까지 출구압력과 노즐개수를 변화시켜 위의 과정을 반복하여 원하는 분리입경 값을 얻는다.

Table 1 Design parameter of a portable electrical low pressure impactor

Stage	Cutoff diameter (μm)	Nozzle diameter (mm)	Number of nozzle	Inlet pressure (atm)	Re	Stk <sup>1/2</sup>
Precut	2.5	2.2	3	1	2127	0.49
1A	0.5	0.6	9	1	2604	0.465
1B	0.5	0.5	16	1	1103	0.465
Orifice	-	0.4	8	0.983	5975	-
2A	0.15	0.4	10	0.7	3752	0.465
2B	0.15	0.3	20	0.796	2493	0.465
Orifice	-	0.4	8	0.684	2197	-
3	0.05	0.3	22	0.426	2540	0.465

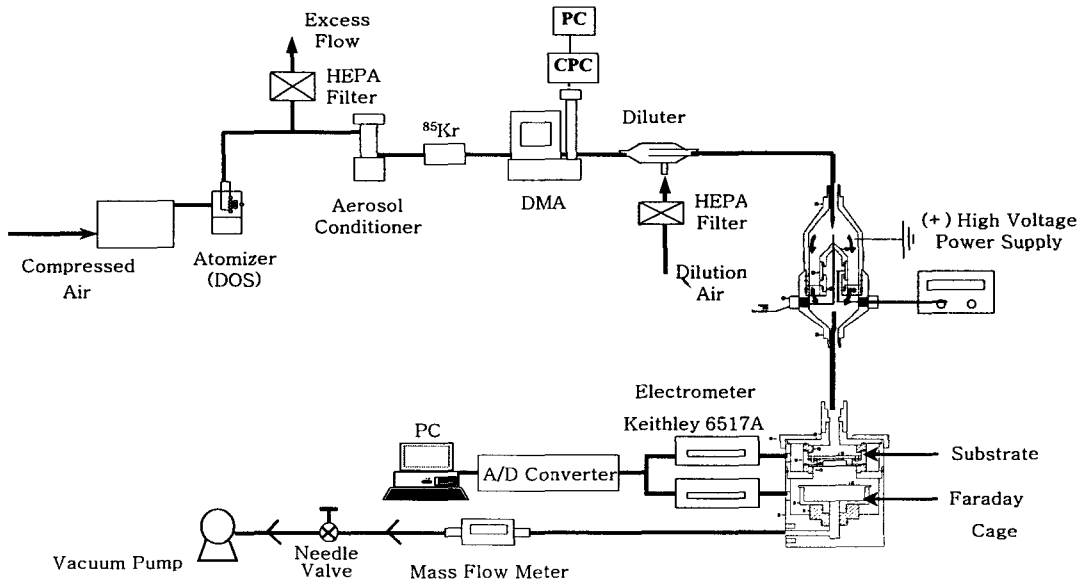


Fig. 2 Schematic diagram of the unit stage electrical impactor

본 연구에서는  $1\mu\text{m}$  이하에서 3단으로 입자를 크기별로 분리할 수 있도록 설계를 하였고 다단 임팩터의 분리입경을 0.05, 0.15,  $0.5\mu\text{m}$ 에서 형성될 수 있도록 하고 예비단을  $2.5\mu\text{m}$ 로 하여 설계를 하였다. 상압에서 작동하는 분리입경이  $2.5\mu\text{m}$ 인 예비단의 경우,  $Stk^{1/2}$ 를 0.49,<sup>(11,12)</sup> 저압에서 작동하는 1, 2, 3단 임팩터는 0.465로 설정하였다.<sup>(5)</sup> 세 번째 단의 경우, 노즐 직경을 0.3mm로 유지하면서 50nm 입자를 분리하려면 상류압력을 0.4기압까지 떨어뜨려야 하므로 첫 번째 단과 두 번째 단 하류에 각각 압력조절용 미세 오리피스를 설치하였다. 1단의 경우 노즐직경은 0.5, 0.6 mm으로 이에 따라 노즐 개수는 9, 16개, 3단의 경우 지름은 0.3mm, 개수는 22개로 설계하였다. 임팩터의 흡입유량은 10L/min으로 선정하였다. Table 1에 최종적인 설계값을 나타내었다.

### 3. 실험방법

각 단의 입자채취효율을 평가하기 위해 Fig. 2와 같이 실험장치를 구성하였다. 입자크기에 따라 일정한 하전량을 부가하기 위해 설계, 성능평가를 마친 하전장치를 사용하였다.

용질인 DOS(dioctyl sebacate)와 용매인 이소프로필 알콜로 만들어진 용액을 Atomizer로 발생시키

켰다. 단분산으로 분류하기 위해 기화응축기(Aerosol Conditioner)를 통과시킨 다음 DMA(Differential Mobility Analyzer, TSI 3081)로 전압을 바꾸어 가면서 분류하였다. 전기적인 방법으로 하전기와 임팩터의 성능을 평가하는 경우, 정확한 시험입자 발생이 중요하다. 특히, DMA로 시험입자를 발생시키는 경우에는 분류특성을 정확히 알고 있어야 한다. 이를 무시할 경우, 성능평가 실험에서 오차가 증폭되어 정확한 결과를 얻을 수 없다.<sup>(4,13-15)</sup> DMA는 입자를 전기적 이동도에 따라 분류해 단분산 입자를 생성하는 장치이다. 이렇게 전기적 이동도에 따라 입자를 분리하면 (+1)가로 하전된 입자와 (+2)가 이상으로 하전된 더 큰 입자가 같은 경로를 따라 이동하게 된다. 따라서 이렇게 다중하전(multi charging)된 입자의 영향으로 실제 크기와 다른 입자들이 발생하는 문제점이 있다. 이를 해결하기 위해서는 발생시키려는 입자보다 크지만, 같은 이동도를 갖는 다중하전된 입자의 절대량이 최소화 될 수 있도록 Fig. 3와 같이 기화 응축방법으로 입경이 폭이 좁은 단분산 형태와 같은 입자를 발생시켜야 하고 피크점 보다 큰 영역의 입경을 선택해 실험을 해야 한다.<sup>(4,13)</sup> Fig. 3에 동일한 DOS 입자를 기화-응축기를 사용한 경우와 사용하지 않은 경우를 비교하여 나타내었다. 이렇게 DMA로 분류된 단분산 입자는 HEPA(High Efficiency Particulate Air)

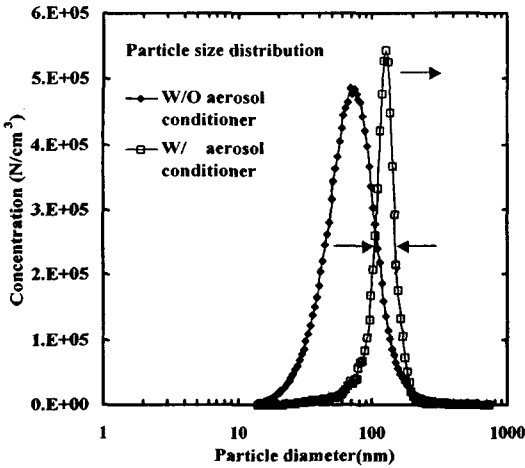


Fig. 3 Size distribution with using aerosol conditioner and non aerosol conditioner

필터를 통과한 청정 회석 공기와 시험 입자를 포함한 공기 유량의 합이 임팩터의 작동유량인 10 L/min이 되도록 하였다. 각 단의 입구 압력은 니들밸브와 압력게이지를 이용 조절하였다. 2대의 미세 전류계(electrometer, keithley 6517A)를 이용, 전류값을 측정하였다. 정확한 포집효율을 구하기 위해 각 입경마다 측정된 모든 전류값을 받아 평균값으로 각 단의 포집효율  $\eta$ 을 구하였다.

$$\eta = \frac{I_{substrate}}{I_{substrate} + I_{filter}} \quad (6)$$

여기서  $I_{substrate}$ 는 임팩터 단에서 측정된 평균 전류값이고  $I_{filter}$ 는 임팩터 단을 통과한 후에 패러데이 케이지에서 측정된 평균 전류값이다.

#### 4. 결과 및 고찰

이론적인 계산에 의해 1, 2단의 분리입경이 각각 0.5, 0.15 $\mu\text{m}$ 에서 형성될 수 있게 설계를 하였고  $Stk^{1/2}$  값은 0.465였지만, 노즐을 여러개 사용하는 경우, 수치해석적으로 정확하게 모델링 할 수 없다. 따라서 실험에 의해 포집효율 곡선을 얻어야 한다.<sup>(4)</sup> Fig. 4는 1, 2단의 입자포집효율곡선을 나타낸 것이다. 1단의 경우, 노즐 개수가 16개인 경우가 9개인 경우에 비해 분리성능이 좋고 분리

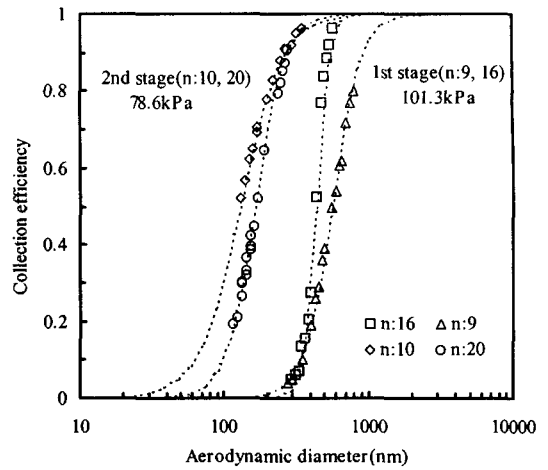


Fig. 4 Collection efficiency of stage 1, 2

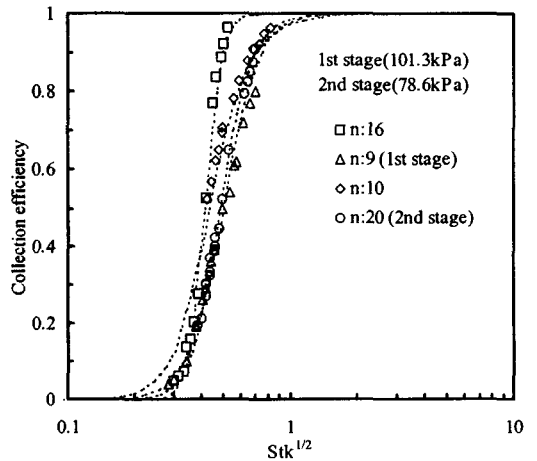


Fig. 5 Collection efficiency of stage 1, 2 with  $Stk^{1/2}$

입경은 각각 0.56, 0.44 $\mu\text{m}$ 로 나타났다. 각각의 레이놀즈 수는 1758, 2610으로 노즐내의 유동패턴이 분리성능에 영향을 주는 것으로 나타났다. 2단의 경우에도 10개보다 20개인 것이 분리성능이 좋고 분리 입경은 각각 0.13, 0.17 $\mu\text{m}$ 로 나타났다. 각각의 레이놀즈 수는 3752, 2493으로 1단의 경우와 비슷한 경향을 보인다. 특히, 2단에서 노즐개수가 10개인 경우, 레이놀즈 수가 3752로 층류의 조건에서 벗어나 곡선의 기울기가 완만해졌다. 그래프 실선은 S자 형태의 임팩터의 포집효율 곡선을 나타내는 추세선으로 식 (7)을 사용했다.

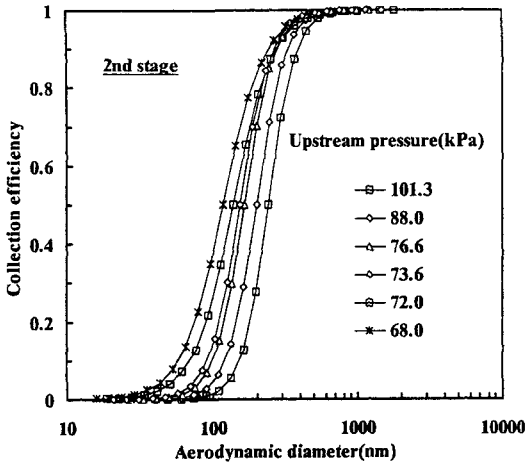


Fig. 6 Effect of upstream pressure on the collection efficiency

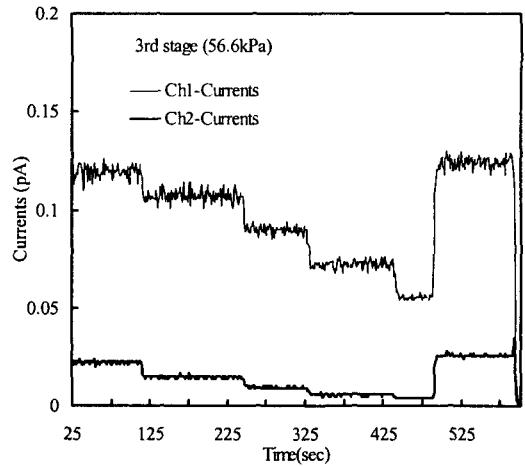


Fig. 8 Measured currents from electrometer using A/D converter

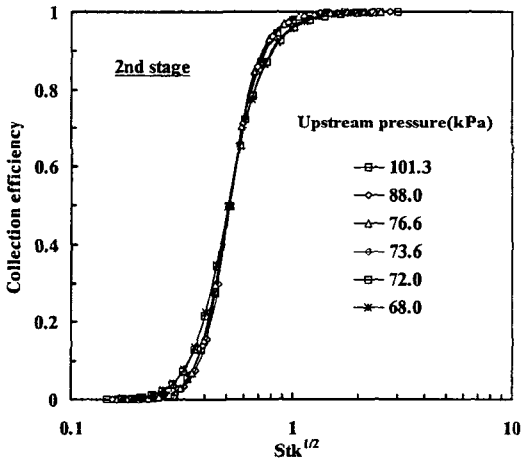


Fig. 7 Effect of upstream pressure on the  $Stk^{1/2}$

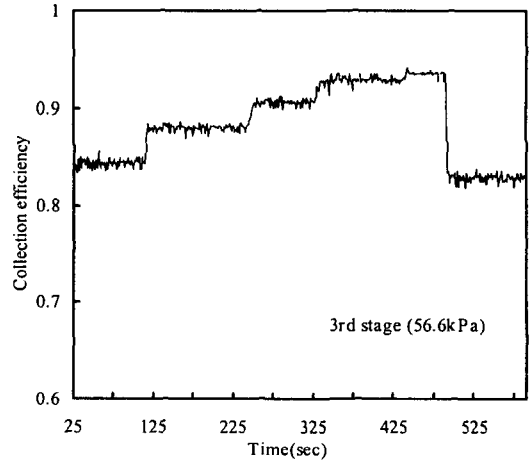


Fig. 9 Collection efficiency using measured currents from electrometer

$$\eta = \frac{1}{1 + \left(\frac{d_{50}}{d_p}\right)^x} \quad (7)$$

여기서  $d_{50}$ 은 50% 분리입경에 해당하는 입자의 입경,  $x$ 는 곡선의 기울기를 나타내는 성능계수이다. 이 값이 클수록 임팩터의 분리성능이 좋은 것을 의미한다. Fig. 5는 공기역학적 입경 대신 무차원 수인  $Stk^{1/2}$  값으로 나타낸 것이다. 1, 2단의 경우, 50% 분리입경에 해당하는 스톡스 수의 제곱근인  $Stk_{50}^{1/2}$  값은 0.43~0.5사이로 일정하게 나타났다.

노즐지름이 0.3mm이고 개수가 20개인 2단의 경우, 운전압력에 따른 포집효율곡선을 비교해 보았다. Fig. 6은 임팩터 상류의 압력을 변화시켜가면서 얻은 효율 곡선이다. 임팩터의 운전압력이 낮아지면 식 (2)에서 알 수 있듯이 노즐을 통과하는 유속이 빨라지고 미끄럼 보정계수가 증가하므로 임팩터의 분리입경은 식 (1)에서 계산할 수 있는 것처럼 작아진다. 2단의 경우, 압력의 영향으로 분리입경이 0.17~0.1 $\mu$ m 까지 작아졌다. 압력이 떨어질수록 속도의 증가로 레이놀즈 수는 증가하게 되는데 이 영향으로 포집효율의 기울기 또한 감소

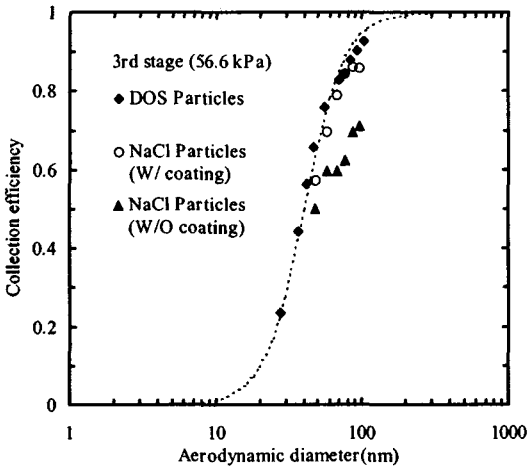


Fig. 10 Collection efficiency of stage 3 using solid particles and liquid particles

하는 경향이 나타나고 있다. Fig. 7은 x축을  $Stk^{1/2}$  값으로 나타낸 것이다. 운전압력이 작아질수록 분리입경이 작아짐과 달리  $Stk_{50}^{1/2}$  값은 0.51~0.52로 일정하게 나타나 포집효율곡선의 특징이 같았으며 설계값과 10%이내 오차를 보였다.

분리입경이 0.5 $\mu$ m인 3단의 성능평가는 액체인 DOS 입자와 고체 입자인 NaCl 입자를 같은 크기의 영역에서 발생시켜 입자의 뱅깅현상(Bouncing effect)으로 인한 포집효율곡선의 변화를 살펴보고 기관을 그리스(grease)로 코팅시켜 뱅깅현상을 최소화 할 수 있도록 하였다. NaCl 입자는 전기가 열류브를 사용해 발생시켰다. Fig. 8은 3단의 경우, 80~100nm 범위의 입자를 입경별로 변화시키며 Ch-1(Substrate의 전류값)과 Ch-2(Faraday cage의 전류값)을 A/D 컨버터를 사용해 실시간으로 컴퓨터 화면으로 출력된 값들을 나타낸 것이다. 한 입경에서 약 100초 동안 측정하였으며, 480초 지점부터는 75nm 입경의 입자에 해당한다. 포집효율이 다르기 때문에 각각의 전류값의 차이가 생기는 것이고, 미세한 전류량을 측정하기 때문에 값들의 흔들림이 있지만 발생 입경에 따라 측정된 전류값은 뚜렷이 구별된다. Fig. 9는 측정된 전류값을 효율로 환산해 나타낸 것이고 Fig. 10은 환산된 효율값의 평균값을 취해 3단의 효율곡선을 나타낸 것이다. 또한 고체입자인 NaCl 입자를 발생시켜 기관의 코팅 유무에 따른 포집효율 곡선을 비교해 나타내었다. 그리스로 코팅을

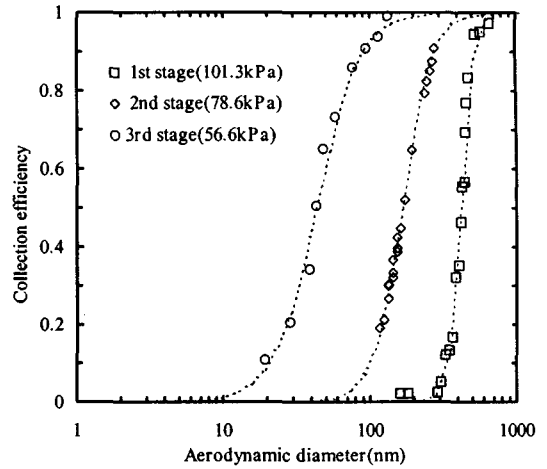


Fig. 11 Collection efficiency of stage 1, 2, 3

하였을 경우, 기존의 액체입자의 효율곡선과 일치하는 반면에 기관에 코팅이 없을 경우, 포집효율이 입자의 뱅깅현상에 의해 낮게 측정되었다. Fig. 11은 각 단의 분리성능이 가장 좋은, 최종적인 간이형 전기적 저압 임팩터의 입자채취효율곡선을 나타낸 것이다. 각 단의 분리 입경은 각각 430, 166, 43nm로 이론적으로 설계한 분리입경의 15% 이내의 값을 얻었다.

### 5. 결 론

본 연구에서는 전기적 임팩터의 구성요소인 하전장치와 저압 3단 임팩터를 설계, 제작하여 성능평가를 수행하였다. 저압 임팩터의 경우, 노즐 지름과 개수의 변화를 주어 성능특성을 비교해보고 운전압력과 기관에 코팅 유무에 따른 입자채취곡선을 실험적으로 얻었다. 또한 설계한 하전장치를 이용하여 임팩터의 분리입경 값을 구해보았다. 본 연구에서 실험을 통해 얻어진 결론은 다음과 같다.

- (1) 각 단의 작동압력이 101.3, 78.6, 56.6kPa에서 50%분리입경이 430, 166, 43nm인 간이형 전기적 저압 임팩터를 개발하였다.
- (2) 설계한 하전장치를 사용하여 입자를 하전시켜 각 단의 입경에 따른 포집효율을 전기적인 방법으로 측정하였다.
- (3) 운전압력을 낮출수록 임팩터의 분리입경이 작아지고 레이놀즈 수의 증가로 분리성능이 나빠

짐을 실험적으로 확인하였다. 그리고  $Stk_{so}^{1/2}$  값은 설계 값과 10% 이내의 오차를 나타내었다.

(4) 시험입자가 고체 입자이고 기판에 그리스로 코팅하였을 경우, 기존의 액체 입자의 효율곡선과 일치하는 반면에 기판에 코팅이 없을 경우 포집효율이 입자의 튕김현상에 의해 낮게 측정되었다.

향후 연구로는  $1\mu\text{m}$ 이하 입자의 크기분포를 실시간으로 측정할 수 있는 전기적 저압 3단 임팩터를 제작하여 신뢰성이 높은 장비와 비교 측정하고 특히, 최근 문제가 되고 있는 디젤 엔진에서 배출되는 입자상 물질을 측정하는 연구를 수행할 예정이다.

## 후 기

본 연구는 학술진흥재단 선도연구지원사업(과제번호: 2003-41-D00358)으로 수행되었으며, 이에 관계자 여러분께 감사드립니다.

## 참고문헌

- (1) 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, pp. 239~260.
- (2) 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*.
- (3) van Gulijk, C., Schouten, J. M., Marijnissen, J. C. M., Makkee M. and Mouljin, J. A., 2001, "Restriction for the ELPI in Diesel Particulate Measurements," *J. Aerosol Sci.*, Vol. 32, pp. 1117~1130.
- (4) 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.
- (5) 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.
- (6) Ji, J. H., Cho, M. H., Bae, G. N. and Hwang, J., 2004, "Design and Performance Evaluation of a Low Pressure Impactor for Sampling Submicron Aerosols," *Trans. KSME B*, Vol 28, No. 3, pp. 349~358.
- (7) Cho, M. H., Ji, J. H., Park, D. H., Bae, G. N. and Hwang, J., 2004, "Design and Performance Evaluation of a Diode Type Corona Charger for Real Time Measurement of The Submicron Aerosol," *Trans. KSME B*, Submitted.
- (8) Flagan, R. C., 1982, "Compressible Flow Inertial Impactors," *J. Coll. Interface Sci.*, Vol. 87, pp. 291~299.
- (9) Biswas, P. and Flagan, R. C., 1984, "High Velocity Inertial Impactors," *Envir. Sci. Technol.*, Vol. 18, pp. 611~616.
- (10) Hering, S. V., Flagan, R. C. and Friedlander, S. K., 1978, "Design and Evaluation of New Low Pressure Impactor. 1.," *Envir. Sci. Technol.*, Vol. 12, pp. 667~673.
- (11) Bae, G. N., Ji, J. H. and Moon, K. C., 1999, "Collection Characteristics of a MOUDI Cascade Impactor for Coarse Particles," *J. Korea Air Pollution Research Association*, Vol. 15, No. 6, pp. 799~804.
- (12) 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.
- (13) Ji, J. H., 2003, "Change of Particle Size Distribution Using Corona Discharge and Classifying Characteristics of Charged Particles," *Ph.D. Thesis*, Yonsei University.
- (14) Ji, J. H., Bae, G. N., and Hwang, J., 2003, "Nano Particle Charging Characteristics of Aerosol Charge Neutralizers," *Trans. KSME B*, Vol. 27, pp. 1489~1497.
- (15) Ji, J. H., Bae, G. N. and Hwang, J., 2003, "Effect of Performance of Aerosol Charge Neutralizers on the Measurement of Highly Charged Particles Using a SMPS," *Trans. KSME B*, Vol. 27, pp. 1498~1507.