

서브마이크론 입자 측정용 저압 임팩터의 설계 및 성능평가

지준호*·조명훈**·배귀남***·황정호†
(2003년 10월 6일 접수, 2004년 1월 19일 심사완료)

Design and Performance Evaluation of a Low Pressure Impactor for Sampling Submicron Aerosols

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

Key Words: Low Pressure Impactor(저압 임팩터), Submicron Particle(서브마이크론 입자), Cascade Impactor(다단 임팩터), Cutoff Diameter(분리입경)

Abstract

A low pressure impactor is an impaction device to separate airborne particles into aerodynamic size classes at low pressure condition. We designed a two-stage low-pressure impactor to classify submicron sized environmental aerosols. Performance evaluation was carried out for stages 1 and 2 by using an electrical method. Monodisperse liquid dioctyl sebacate (DOS) particles were generated using evaporation-condensation process followed by electrostatic classification using a DMA (differential mobility analyzer). The test particles were in the range of 0.08-0.8 μm . For the evaluation of the impactor we used two electrometers; one was connected to the impaction plate of the impactor and the other was to the Faraday cage used as a backup filter. The effect of polydispersity of test aerosols on the performance was investigated. The results showed that the experimental 50-% cutoff diameters at each impactor's operation pressure were 0.53 and 0.187 μm for stages 1 and stage 2, respectively. The effects of operation pressure on the cutoff diameter and the steepness of collection efficiency curves were also investigated.

기호설명

C : 미끄럼 보정계수
 d_p : 입경
 d_{50} : 50% 분리입경
 \dot{m} : 단위면적당 질량 유량
 p_0 : 임팩터 입구의 정체점 압력

p : 노즐 제트 하류의 정압
 Stk : 스톡스 수
 Stk_{50} : 50% 분리입경에 해당하는 스톡스 수
 T_0 : 임팩터 입구의 정체점 온도
 T : 노즐 제트 하류의 온도
 V : 노즐을 통과하는 평균 유동속도
 W : 원형 노즐의 지름
 x : 채취 곡선의 기울기를 나타내는 성능계수

그리스문자

λ : 공기 분자의 평균자유행정
 ρ : 노즐 제트 하류의 공기 밀도
 ρ_0 : 임팩터 입구의 정체점 공기밀도
 ρ_p : 입자의 밀도

* 회원, 연세대학교 나노과학기술연구원
** 연세대학교 대학원 기계공학과
*** 회원, 한국과학기술연구원 대기자원연구소
† 책임저자, 회원, 연세대학교 기계공학과
E-mail : hwangjh@yonsei.ac.kr
TEL : (02)2123-2821 FAX : (02)312-2159

1. 서론

다단 임팩터는 수 십 나노미터에서 수 십 마이크로미터의 대기 에어로졸의 크기분포를 측정하는데 주로 사용되어왔다. 그런데, 신뢰성 있는 에어로졸의 크기분포 데이터를 얻기 위하여 대기의 경우 보통 8시간 이상의 긴 샘플링 시간이 필요하고, 샘플링 전후에 기판을 습도가 일정한 데시케이터 등에서 필터의 습도 조건을 일정하게 유지시킨 후 무게를 측정해야 하므로 실제로 크기분포 결과를 얻으려면 수 일의 시간이 필요하다. 더욱이 임팩터의 기판을 설치하고 해체하는 과정에서 발생할 수 있는 샘플링 필터의 오염이나 조작 실수 등이 측정결과에 직접적으로 영향을 미칠 수 있다.⁽¹⁾

전기적 임팩터는 이러한 운전의 번거로움과 샘플링 시간의 단점을 극복할 수 있도록 최근에 개발된 계측기이다. 환경 모니터링, 자동차 배출 입자상 물질의 측정, 후처리 장치의 성능평가 시스템 등 응용 범위가 매우 넓고, 시간에 따라 변하는 시스템에 적용하면 입자 크기분포의 변화 등을 예측할 수 있다. 특히, 최근에는 Keskinen 등⁽²⁾의 연구결과를 기반으로 상용화된 ELPI(electrical low pressure impactor, Dekati)를 사용하여 대기 에어로졸이나 디젤 입자상 물질을 측정하는 연구가 진행되고 있다.⁽³⁻⁵⁾

다단 임팩터의 설계방법은 노즐의 형상(원형 혹은 슬릿형)과 작동압력(상압 혹은 저압)에 따라 다르다. 단일 원형 노즐을 사용하는 임팩터와 달리 원형 노즐을 여러 개 사용하는 경우, 인접한 노즐에서 생성되는 제트 유동의 간섭에 의해 분리능이 달라질 수 있으므로, 경험치를 사용하여 각 단마다 다른 스톱스(Stokes) 수를 사용하여 임팩터를 설계한다.^(1,6) 특히, 저압 임팩터의 경우 단 수가 증가하면, 작동압력이 달라지므로 분리입경과 작동압력을 가정하여 반복적으로 계산하는 다소 복잡한 과정을 거쳐야 한다. 다중 노즐을 갖는 저압 다단 임팩터의 경우 실험적으로 구한 평균 $Stk^{1/2}$ 은 0.465였다.⁽⁷⁾

다단 임팩터의 성능은 보통 각 단위 임팩터를 대상으로 입경별 입자포집효율을 측정하여 평가한다. 단위 임팩터의 평가방법으로는 중량법, 형광법, 입자계수법, 전기적 방법 등이 있다. 이

중, 전기적 방법을 이용하면 임팩터 기판에 입자가 부착하는 순간 전하량을 측정할 수 있기 때문에, 성능평가 과정에서 임팩터의 기판과 최종필터에서 전하량을 측정하면 실시간으로 채취 효율을 구할 수 있다. Hillamo와 Kauppinen⁽⁷⁾은 DMA (differential mobility analyzer)로 분류한 1가로 대전된 단분산 입자를 사용하여 임팩터 기판과 최종필터로 사용되는 HEPA 필터에 포집되는 하전 입자의 전류를 측정하여 저압 임팩터 각 단의 입자채취효율을 구하였다. Keskinen 등⁽⁸⁾ 역시 DMA로 분류한 1가로 대전된 단분산 입자를 사용하였는데, 다단 임팩터 각 단의 전하량을 동시에 측정할 수 있는 다채널 전류계를 사용하여 저압 다단 임팩터의 성능을 평가하였다. Marjamaeki 등⁽⁹⁾은 임팩터에 유입되는 단분산 시험입자가 미리 하전기를 통과하여 포화하전에 가깝게 하전되도록 한 후, 하전 입자가 임팩터 각 단에 충돌하는 순간 다단 임팩터의 각 단에 연결된 다채널 전류계를 사용하여 다단 임팩터의 성능을 평가하였다. 국내에서는 Bae 등⁽¹⁰⁾의 다단 임팩터의 성능평가에 관한 연구와 Ji 등⁽¹¹⁾의 대기 에어로졸 측정용 3단 임팩터의 설계 및 성능평가에 관한 연구가 수행되었다. 임팩터의 성능평가에 관한 연구는 보통 1 μm 이상의 입자를 대상으로 하였지만, 최근에 전기적 방법을 적용하여 분리입경이 1 μm 이하인 경우 마이크로오피스 임팩터를 대상으로 Ji 등⁽¹²⁾의 연구가 수행되었다.

본 연구의 최종 목적은 실시간 3단 전기적 임팩터⁽¹³⁾를 개발하는 것이다. 이를 위한 기초 연구로 0.17과 0.5 μm 의 분리입경을 갖는 2단 저압 임팩터를 설계하였고 전기적 입자계수법을 이용하여 각 임팩터 단의 성능을 평가하였다. 기화-응축 방법과 전기적 이동도 분류 방법을 사용하여 (+)1가로 대전된 0.06~0.8 μm 인 단분산 시험 입자를 발생시켰다. 시험 임팩터의 기판과 최종필터로 사용한 패러데이 케이지에서 하전 입자의 전하량을 측정하여 단위 임팩터의 성능을 평가하였다. 또한, 시험 입자의 다분산 정도가 전기적 성능평가 결과에 미치는 영향을 고찰하였고, 임팩터의 작동압력에 따른 임팩터의 성능을 분리입경과 성능계수인 입자채취곡선의 경사도(steeptness)로 평가하였다.

2. 설 계

공기가 비압축성 상태인 상압 임팩터의 경우 보통 Rader 와 Marple⁽⁶⁾이 제안한 과정을 따라 설계하는데, 저압에서 작동되는 임팩터의 경우 유체의 압축성을 고려해야 한다. 특히, 다중 노즐을 사용하는 임팩터의 경우 노즐간의 유동간섭으로 인해 단일 노즐과는 다른 성능을 나타내므로, 기하학적 구조나 작동 조건에 따라 임팩터의 성능이 달라진다. 저압 다단 임팩터의 설계에 관한 내용은 Hillamo와 Kauppinen⁽⁷⁾에 상세하게 기술되어 있다.

2.1 설계 이론

본 절에서는 Flagan,⁽¹⁴⁾ Biswas와 Flagan,⁽¹⁵⁾ Hering 등⁽¹⁶⁾에 소개된 이론을 토대로 Hillamo와 Kauppinen⁽⁷⁾에 서술된 내용을 중심으로 임팩터 설계 이론을 정리하였다. 임팩터의 중요한 설계변수로 스톡스 수(Stk)와 레이놀즈 수(Re)를 계산해야 한다. 다음은 저압의 운전조건에서 스톡스 수와 레이놀즈 수를 계산하는 과정을 설명하였다.

스톡스 수는 임팩터의 성능을 나타내는 기본적인 무차원수로 원형 노즐인 경우 반지름에 대한 입자 정지거리(stopping distance)로 정의되고, 식 (1)과 같다.

$$Stk = \frac{\rho_p d_p^2 VC}{9\mu W} \tag{1}$$

여기서, ρ_p 는 입자의 밀도, d_p 는 입경, V 는 노즐 목을 통과하는 평균유속, C 는 미끄럼 보정 계수, μ 는 공기의 점성계수, W 는 원형 노즐의 직경이다. 스톡스 수를 계산하려면, 식 (1)에서 V , C , μ 등을 알아야 한다.

임팩터 노즐의 상류에 대한 하류의 압력비 (p/p_0)가 0.97보다 작으면 공기의 압축성을 고려해야 한다.⁽⁷⁾ 이와 같이 압력강하가 높은 임팩터의 경우 유동이 단열되었다고 가정하면 노즐을 통과하는 평균 유속은 온도와 압력에 따라 식 (2)와 같이 표현된다.

$$V = \frac{\bar{m}''}{\rho_0} \left(\frac{p_0}{p} \right) \left(\frac{T}{T_0} \right) \tag{2}$$

여기서, \bar{m}'' 은 단위면적당 질량 유량, T_0 , p_0 , ρ_0 는 각각 임팩터 입구의 정체점 온도, 정체점 압력, 정체점 공기 밀도이다. T 와 p 는 노즐 제트 하류의 온도와 정압이다. Fig. 1은 임팩터의 주요 설계변수를 나타낸 것이다.

이상적 단열조건에서 노즐 하류의 온도는 노즐 상류의 정체점 온도를 사용하여 식 (3)과 같이 나타낼 수 있다.

$$T = T_0 - \frac{V^2}{2} \times \frac{(k-1)}{k} \frac{M}{R} \tag{3}$$

식 (2)와 (3)으로부터 노즐을 통과하는 평균 유속은 식 (4)로 나타낼 수 있다.

$$V = \beta \left[1 - V^2 \left(\frac{(k-1)M}{2kRT_0} \right) \right] \tag{4}$$

여기서, k 는 비열비로 1.4이고, M 은 28.96 $kg/kmol$ 이다. R 은 $8.314 \times 10^3 J/(K \cdot kmol)$ 이다. β 는 식 (5)와 같다.

$$\beta = \frac{\bar{m}''}{\rho_0} \left(\frac{p_0}{p} \right) \tag{5}$$

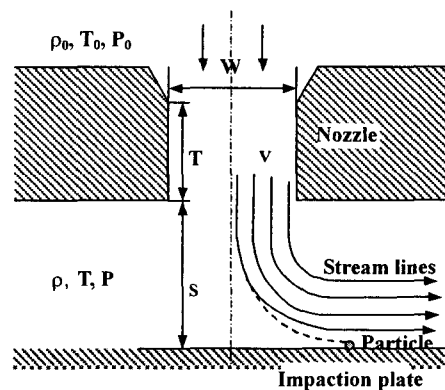


Fig. 1 Geometrical design parameters of an impactor

공기의 동점성 계수(μ)는 온도에 따라 영향을 받는데, Sutherland가 제안한 식 (6)을 이용하여 계산할 수 있다.⁽¹⁶⁾

$$\mu = \mu_a \left(\frac{T}{T_a} \right)^{1.5} \left(\frac{T_a + S}{T + S} \right) \quad (6)$$

여기서, μ_a 는 $1.832 \times 10^{-5} \text{ kg/(m} \cdot \text{s)}$ 이고, S는 Sutherland 상수로 110.4K이다. 하첨자 a는 1 atm, 296K 조건을 나타낸다, 즉, T_a 는 296K이다.

각 단(stage)에서 미끄럼 보정계수 C는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$C = 1 + 1.257 \frac{2\lambda}{d_p} + 0.4 \frac{2\lambda}{d_p} \exp\left(-1.10 \frac{d_p}{2\lambda}\right) \quad (7)$$

공기 분자의 평균자유행정(mean free path)인 λ 는 식 (8)로 표현된다.

$$\lambda = \lambda_a \frac{T}{T_a} \frac{p_a}{p} \frac{1 + S/T_a}{1 + S/T} \quad (8)$$

여기서, λ_a 는 $0.673 \times 10^{-7} \text{ m}$ 이다.

유동 제트의 특성을 나타내는 무차원 변수인 제트 레이놀즈 수는 식 (9)와 같다.

$$Re = \frac{\rho VW}{\mu} \quad (9)$$

노즐 하류의 공기 밀도(ρ)은 식 (10)과 (11)을 사용하여 구할 수 있다.

$$\rho = \rho_0 \cdot (p/p_0)^{1/k} \quad (10)$$

$$p = p_0 - \frac{1}{2} \rho V^2 \quad (11)$$

2.2 저압 다단 임팩터의 설계 변수

저압 다단 임팩터를 설계하는 목적은 원하는 분리입경을 갖는 임팩터를 얻는 것이다. 단일 노즐과는 달리 다중 노즐인 경우 유동간의 간섭이 임팩터의 입자채취효율에 영향을 미치므로 경험

적인 실험 결과가 중요하다. 먼저 50% 분리입경 (d_{50})에 해당하는 스톡스 수 (Stk_{50})를 가정하여 기하학적 변수인 노즐 직경과 노즐 개수를 결정해야 한다. Fig. 2에 설계과정을 나타내었다. 이와 같이 설계한 임팩터의 성능을 평가하면, 각 단의 성능 특성을 나타낼 수 있고, 각각 임팩터 단의 기하학적 구조에 대한 스톡스 수를 찾을 수 있다. 노즐 제트의 평균 속도(V)를 계산하기 위해 (식 (4) 참조) 노즐 출구의 압력(p)과 노즐 수(n)를 가정하였다. 식 (10)을 이용하여 노즐 출구의 밀도(ρ)를 계산하였고, 식 (11)에 의해 다시 노즐 출구의 압력을 얻었다. 이 때 가정한 노즐 출구의 압력과 계산한 노즐 출구의 압력이 같아지도록 계산을 반복하였다. 이번에는 가정한 노즐 수와 출구 압력을 식 (1)에 적용하여 임팩터의 분리입경을 계산하였다. 계산한 분리입경이 가정한 분리입경과 일치할 때까지 노즐 수를 변화시켜 반복하면 설계한 임팩터의 분리입경에 근접한 성능을 얻을 수 있는 노즐 수를 결정할 수 있다.

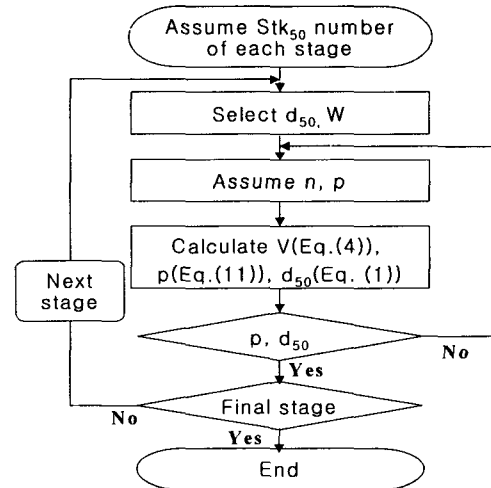


Fig. 2 Flow chart for design procedure of a cascade low pressure impactor

Table 1 Design parameters of two stage low pressure impactor

Stage	Cutoff diameter (μm)	Nozzle diameter (mm)	Number of nozzle	Inlet pressure (kPa)	Re	Stk ^{1/2}
Precut	2.5	2.2	3	101.3	2127	0.49
1	0.5	0.6	9	101.3	2616	0.465
-	Orifices	0.3	15	98.0	-	-
2	0.17	0.4	10	80.6	3752	0.465

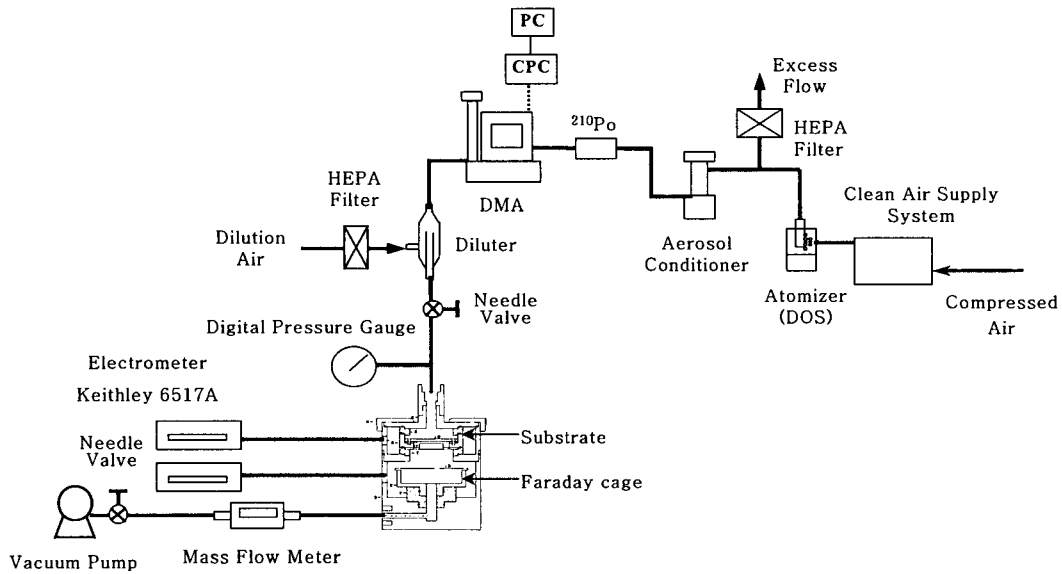


Fig. 3 Experimental setup for performance test of unit stage electrical impactor

저압에서 작동하는 임팩터의 경우 상류에 위치한 단이 하류 단의 성능에 직접적으로 영향을 미친다. 따라서 각 단의 작동압력에 맞추어 임팩터의 성능을 평가하거나 시험 단 상류의 모든 단이 장착된 상태에서 수행되어야 한다. 본 연구에서는 첫 번째 단과 두 번째 단 사이에 압력강하용 오리피스를 설치하여 두 번째 단의 작동압력을 변화시킬 수 있도록 설계하였다. Table 1에 나타낸 것처럼 직경 0.3 mm인 오리피스를 15개 설치하는 경우 98 kPa에서 80.6 kPa로 압력을 낮출수 있다.

예비 단의 경우 상압에서 작동하는 분리입경이 2.5 μm 인 $\text{Stk}^{1/2}$ 를 0.49로 설정하였고,^(10,11) 이전 연구의 결과⁽¹¹⁾를 사용하였다. 본 연구에서 성능평가를 수행했던 임팩터의 1단과 2단은 $\text{Stk}^{1/2}$ 를 0.465로 설계하였다.⁽⁷⁾ 첫 번째 단과 두 번째단의 50% 분리입경 (d_{50})을 각각 0.5, 0.17 μm 로 선택하였다. 1단의 경우 직경이 0.6 mm인 노즐을 9개 사용하였고, 2단은 직경이 0.4 mm인 노즐을 10개 사용하였다. 임팩터의 흡인유량은 10 sL/min로 선정했다. 여기서 sL/min의 s는 표준상태를 의미하는 것으로 25°C, 1기압 상태를 나타낸다.

3. 성능평가 실험

본 연구에서는 단위 전기적 임팩터를 제작하여

성능을 평가하였다. 이 때, 각 단은 다중 노즐의 간격을 일정하게 배열하였다. 저압 임팩터 각 단의 입자채취효율을 평가하기 위하여 Fig. 3과 같이 실험장치를 구성하였다. 상용화된 전기적 임팩터의 경우 상류에 하전기를 설치하여 입자를 하전시키지만, 본 연구에서는 DMA에서 (+)1가로 하전된 단분산 입자를 성능평가에 이용하였다.

분무형 입자발생기에서 생성된 DOS(dioctyl sebacate) 액체 입자를 단분산으로 분류하기 위하여 기화응축기(Aerosol conditioner, TSI 3702)와 DMA(TSI 3081)에 통과시켰다. 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 영향을 줄이려면 크기분포의 폭이 좁은 입자가 DMA로 공급되어야 하고, 피크농도보다 큰 입자를 DMA로 분류하여 발생시켜야 한다.⁽¹²⁾

용질인 DOS와 용매인 이소프로필 알콜로 만들어진 용액의 DOS 농도에 따라, 발생하는 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 3936)로 크기분포를 측정하였고, 기하 평균 입경보다 큰

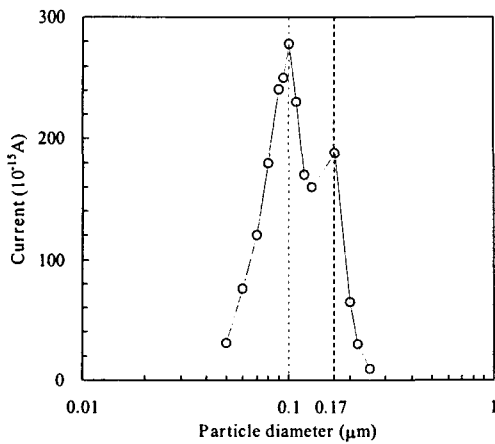


Fig. 4 Current of particles with same mobility classified from a DMA

단분산 입자를 DMA 전압을 바꾸며 분류하였다.

HEPA(High Efficiency Particulate Air) 필터를 통과한 청정 회석 공기와 시험 입자를 포함한 공기 유량(0.3 sL/min)의 합이 임팩터의 작동유량인 10 sL/min이 되도록 했다. 시험 임팩터의 노즐 입구의 압력은 시험 임팩터 상류에 설치한 니들 밸브와 진공 게이지를 사용하여 조절하였다. 진공펌프 상류의 니들 밸브로 임팩터를 통과하는 유량을 조절하였고, 질량 유량계(TSI 3063)로 유량을 측정하였다. DMA를 거쳐 분리된 단분산 입자들은 패러데이 케이지와 전위계(electrometer, Keithley 6517A)를 이용하여 임팩터의 기관과 패러데이 케이지의 전류를 측정 후, 임팩터 각단의 채취효율(η)을 식 (12)와 같이 계산하였다.

$$\eta = \frac{I_{substrate}}{I_{substrate} + I_{filter}} \quad (12)$$

여기서, $I_{substrate}$ 은 임팩터의 단에 포집된 입자로부터 측정되는 전류, I_{filter} 는 임팩터 단을 통과한 후에 패러데이 케이지에서 측정된 전류이다. Table 1에서 계산된 임팩터 입구의 압력조건에서 성능을 평가하였다.

4. 결과 및 고찰

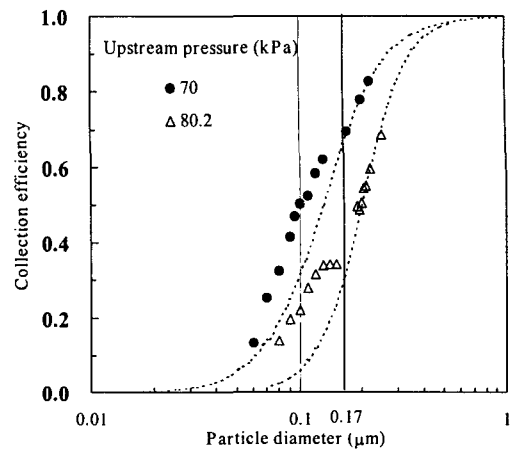


Fig. 5 Artifact of collection efficiency due to the multi-charge effect of particles classified from a DMA

4.1 다중하전 입자가 성능평가에 미치는 영향

전기적으로 임팩터의 성능을 평가하는 경우 시험 입자가 정확하게 발생되지 않으면 실험결과가 크게 달라질 수 있다. 만약 DMA에서 분류되는 입자의 크기가 정확하게 단분산이 아니면 전기적 입자계수법을 사용하는 임팩터 성능평가 실험에서는 오차가 증폭되어 나타날 수 있다. 먼저 발생 입자의 다분산성이 성능평가 결과에 미치는 영향을 알아보았다.

DOS를 용매인 이소프로필 알콜에 섞어 기화-응축 방법으로 발생한 후, DMA로 유입되기 이전에 입자의 크기분포를 측정 한 결과 기하평균입경이 약 0.17 μm 이고 기하표준편차가 1.3 정도인 대수정규분포에 가까운 분포를 얻었다. 이 크기 분포에 대해 Fig. 4는 DMA의 인가전압을 변경하면서 분리한 단분산 입자의 하전량을 측정한 결과이다. 그 결과 두 개의 피크를 갖는 분포를 보여주고 있다. 이와 같은 입자의 하전량 분포는 DMA 입구의 예비하전기로 사용되는 에어로졸 중화기(^{210}Po)의 특성에 따른다.^(17,18) 첫 번째 피크는 (+)1가로 하전된 0.1 μm 입자와 (+)2로 하전된 약 0.15 μm 의 입자를 모두 포함한 반면, 두 번째 피크에 해당하는 0.17 μm 의 입자는 대부분이 (+)1이다. 이것은 입경과 전하량이 달라도 전기적 이동도가 같다면 DMA 내에서 같은 경로를 이동하기 때문이다. 따라서 DMA로 유입되기 전에는 첫 번째 피크의 크기에 해당하는 입자의 수

농도가 두 번째 피크의 입자의 수농도보다 낮지만,^(17,18) DMA에서 분류된 입자의 하전량을 측정하면 첫 번째 피크의 하전량이 오히려 높게 나타난다. 이것은 (+2)가 이상의 다중 하전된 입자의 전하량이 실제보다 2배 이상으로 측정되기 때문이다. 보다 정량적인 해석을 하면 다음과 같다. 예를 들어 (+1)가를 뿜 100 nm 입자들에 의한 전류값을 구해보자. Fig. 4에 의하면 100 nm에서 측정된 총 전류값은 약 280×10^{-15} A 임을 알 수 있다. 이 값은 (+2)가를 뿜 150 nm 입자들에 의한 전류값을 포함한다. 150 nm 인 경우, (+1)가로 하전된 경우에 비해 (+2)가로 하전되는 비율이 약 25% 정도임은 잘 알려진 사실이므로⁽¹⁹⁾ (+2)가로 하전된 150 nm 입자들에 의한 전류값은 (+1)가로 하전된 150 nm 입자들에 의한 전류값에 2×0.25 배가된다. Fig. 4에 의하면 (+1)가를 뿜 150 nm 입자들에 의한 전류값은 약 160×10^{-15} A 이므로 (+1)가로만 하전된 100 nm 입자들에 의한 전류값은 200×10^{-15} A 정도가 된다. 반면 150 nm로 크기 분류할 경우 같은 전기적 이동도를 갖는 2가로 하전된 입자의 크기는 약 230 nm 이다. Fig. 4에서 230 nm 크기의 입자의 전하량은 거의 없으므로 150 nm에서 측정된 (+1)가로만 하전된 입자들에 기인한다고 할 수 있다.

Fig. 5는 위에서 설명한 바와 같이 피크가 0.17 μm 인 다분산 입자를 시험 입자로 사용할 때 DMA로 분류한 단분산 입자의 발생이 임팩터의 전기적 성능평가에 미치는 영향을 나타낸 것이다. 두 번째 단의 작동압력이 80.2, 70.0 kPa인 경우 채취효율을 비교하였다. 앞에서 설명한 것처럼 피크가 0.17 μm 인 다분산 입자를 DMA로 분류하여 단분산 시험 입자로 사용하는 경우 0.17 μm 이하 입자를 사용하면, 전기적 이동도는 같지만 크기가 큰 2가 이상의 다중 하전 입자가 섞여 나오기 때문에 임팩터의 채취효율이 과장되어 높게 나타난다. Fig. 4와 5의 X축은 1가로 대전된 입자의 전기적 이동도에 해당하는 입자 직경을 사용하여 표현하였다.

그래프의 실선과 점선은 각 압력조건에서 임팩터의 S자형 성능 곡선으로, 본 연구의 2단의 작동압력이 80.2, 70.0 kPa인 경우 성능평가 실험의 결과를 식 (13)을 이용하여 피팅한 추세선이다. 성능평가의 결과는 다음 4.2절에서 설명하였다.

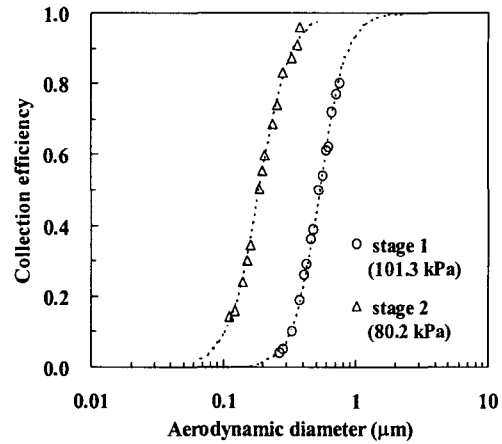


Fig. 6 Collection efficiency curves of stages 1 and stage 2

$$\eta = \frac{1}{1 + \left(\frac{d_{50}}{d_p}\right)^x} \quad (13)$$

여기서 x 는 채취 곡선의 기울기를 나타내는 성능계수(steeptness)이다. x 가 클수록 임팩터의 분리 성능이 좋은 것을 의미한다. 성능평가 데이터를 이용하여 적절한 d_{50} 과 x 값을 찾으면 임팩터의 성능을 나타내는 채취 곡선을 얻을 수 있다.

4.2 저압 임팩터의 입자 채취성능

초기 설계의 의해 설정한 분리입경은 각각 0.5, 0.17 μm 였고, $Stk_{50}^{1/2}$ 는 0.465였지만, 다중 노즐을 사용하는 경우 $Stk_{50}^{1/2}$ 는 노즐 수나 배열 등에 따라 달라질 수 있다. Fig. 6는 1단과 2단의 성능평가 결과를 나타낸 것이다. 앞절에서와 같이 다중 하전 효과가 실험결과에 미치는 영향을 방지하기 위해 기하평균 입경보다 큰 입자를 인가전압을 바꾸며 DMA로 분류하였다. 임팩터는 공기역학적 입경을 사용하므로 DMA에서 전기적 이동도로 분류한 입자의 크기에 $\sqrt{\rho_p}$ 를 곱해(ρ_p ; particle density) 공기역학적 입경으로 변환하였다.⁽¹¹⁾ 이때 작동압력인 1단의 101.3 kPa, 2단의 80.2 kPa의 경우 설계과정에서 50% 분리입경이 각각 0.5과 0.17 μm 였지만, 성능평가에 의해 얻은

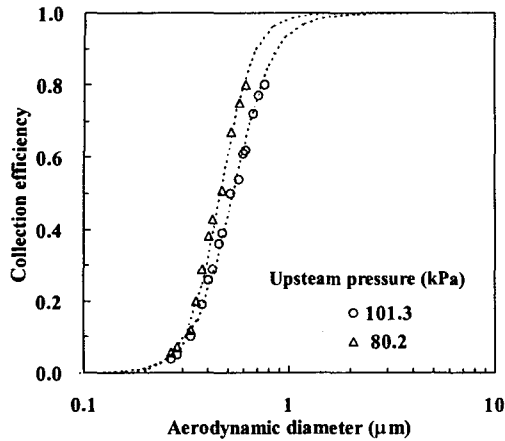


Fig. 7 Effect of upstream pressure on the collection efficiency of stage 1

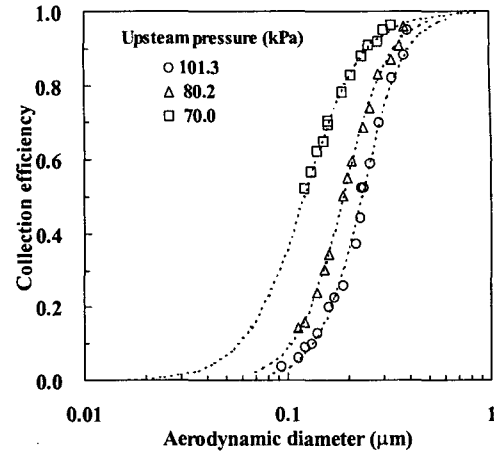


Fig. 8 Effect of upstream pressure on the collection efficiency of stage 2

분리입경은 1단과 2단이 각각 0.53과 0.187 μm 였다. 그래프 실선은 S자 형태의 임팩터의 채취 성능 곡선을 나타내는 추세선으로 식 (13)을 이용하여 구하였다.

임팩터의 작동압력이 낮아지면 식 (2)와 (7)에서 알 수 있는 것처럼 노즐을 통과하는 공기유속이 빨라지고 미끄럼 보정계수가 증가하므로, 임팩터의 50% 분리입경은 식 (1)에서 계산할 수 있는 것처럼 작아진다. 즉, 노즐 직경, 개수, 흡인 유량 등이 일정하더라도 더 작은 입자까지 분리할 수 있다. Fig. 7은 작동압력에 따른 임팩터 1단의 입자 채취 곡선을 나타낸 것이다. 1단인 경우 대기압에서 작동되도록 설계되었는데, 작동압력이 101.3 kPa인 경우 분리입경이 0.53 μm 인 반면, 80.2 kPa에서 0.46 μm 로 더 작은 입자를 분리할 수 있다. Fig. 8은 2단의 작동압력이 각각 대기압(101.3 kPa), 80.2 kPa, 70.0 kPa인 경우 입자 채취곡선을 나타낸 것이다. 50% 분리입경은 대기압인 경우 0.23 μm 에서 압력이 낮아질수록 0.187, 0.12 μm 로 작아졌다.

Table 2에는 임팩터의 성능을 정리하여 나타냈다. 50% 분리입경과 성능계수로 각 단의 임팩터의 성능을 나타냈다. 1단의 경우 성능계수 x 는 101.3 kPa인 경우 4.4인 반면, 80.2 kPa에서 5.5로 분리성능이 좋아졌다. 2단의 경우 성능계수는 작동압력이 낮아질수록 각각 4, 3.7, 3으로 상대적

으로 나빠지는데, 임팩터 노즐에서 빠져나오는 유동의 레이놀즈 수가 1단의 경우는 3000 이하의 층류 조건에서 작동했지만, 2단의 경우 3512, 3851, 3896으로 압력이 낮아질수록 층류 조건에서 벗어나기 때문인 것이라 생각된다. Rader와 Marple⁽⁶⁾에 의하면 원형 노즐의 경우 레이놀즈 수가 층류인 500~3000 범위인 경우 분리성능이 우수한 임팩터를 얻을 수 있는 반면, 3000을 넘어가면 성능이 점점 나빠진다.

Table 2는 또한 식 (1)을 사용하여 공기역학적 입경을 $Stk^{1/2}$ 으로 바꾸어 50% 채취효율에 해당하는 $Stk_{50}^{1/2}$ 과 성능계수를 계산한 결과를 보여준다. 이 때, $Stk^{1/2}$ 를 X축으로 사용한 경우 성능계수는 x_s 로 나타냈다. Figs. 9과 10은 공기역학적 입경을 무차원수인 $Stk^{1/2}$ 으로 변환하여 나타낸 것이다. Fig. 9는 1단의 작동압력이 101.3, 80.2 kPa인 경우 50% 분리입경에 해당하는 $Stk_{50}^{1/2}$ 가 0.51, 0.515로 비슷하게 나타났다. 성능계수는 압력이 낮은 80.2 kPa에서 6.5로 대기압의 5.2보다 높았다. Fig. 10은 2단의 경우로 $Stk^{1/2}$ 은 임팩터의 작동압력이 101.3, 80.2, 70.0 kPa일 때, 각각 0.47, 0.52, 0.50로 비슷했다. 반면 성능계수는 작동압력이 101.3, 80.2 kPa에서 5.5, 5.7로 비슷했지만 70.0 kPa인 경우 4.8로 임팩터의 분리성능이 나빠졌다.

Table 2 Experimental results of performance of the low pressure impactor

Stage	Upstream pressure (kPa)	Re	Cutoff diameter (μm)	χ	$\text{Stk}_{50}^{1/2}$	χ_s
1	101.3	2202	0.53	4.4	0.51	5.2
1	80.2	2821	0.46	5.5	0.515	6.5
2	101.3	3243	0.23	4.0	0.47	5.5
2	80.2	4022	0.187	3.7	0.52	5.7
2	70.0	4650	0.12	3.0	0.50	4.8

5. 결론

본 연구에서는 전기적 임팩터의 본체로 사용될 수 있고 서브 마이크론 입자상 물질의 크기분포의 측정에 적합한 저압에서 작동하는 2단 임팩터를 설계, 제작하였다. 각각 단위 임팩터의 성능을 전기적 방법으로 평가하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 각 단의 작동압력이 101.3과 80.2 kPa에서 50% 분리입경이 0.53과 0.187 μm 인 2단 임팩터를 개발하였다.
- (2) DMA를 사용하여 입자를 분류할 때 정확한 단분산 입자가 발생되지 않으면, 임팩터의 성능을 전기적으로 평가하는 경우 측정 오차가 증폭되어 크게 나타났다.
- (3) 2단 저압 임팩터의 작동압력이 70.0~101.3 kPa에서 각 단의 $\text{Stk}^{1/2}$ 는 0.47~0.52로 비슷하게 나타났다.

작동 조건에 따라 발생한 입자의 크기분포나 농도가 변화하는 시스템 혹은 전기 응집기나 집진 장치 등과 같이 극한 조건에서 입자의 크기 변화를 평가해야 하는 경우 입자의 크기분포를 실시간으로 측정하는 것은 시스템의 특성을 파악하는데 중요한 기술이다. 향후 연구로는 약 0.05 μm 의 분리입경의 3단을 추가하여, 1 μm 이하 입자의 크기분포를 실시간으로 측정할 수 있는 3단 전기적 저압 임팩터를 제작하여 평가하려고 한다. 특히, 임팩터 노즐의 직경을 최소화하여 입자 채취 곡선의 기울기가 급한 분리 성능이 좋은 임팩터를 개발하고, 저압에서의 작동변수의 영향을 정량화하는 연구를 수행할 예정이다.

후 기

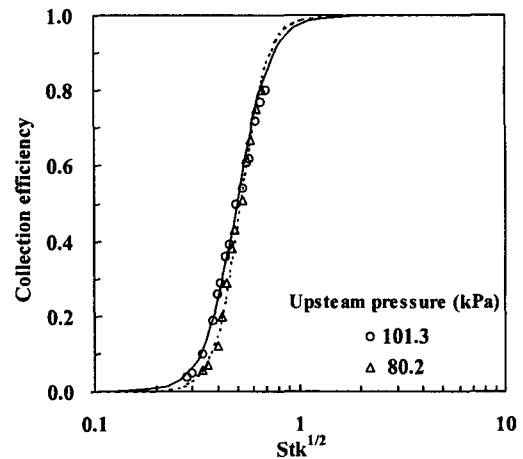


Fig. 9 Collection efficiency of stage 1 with $\text{Stk}^{1/2}$

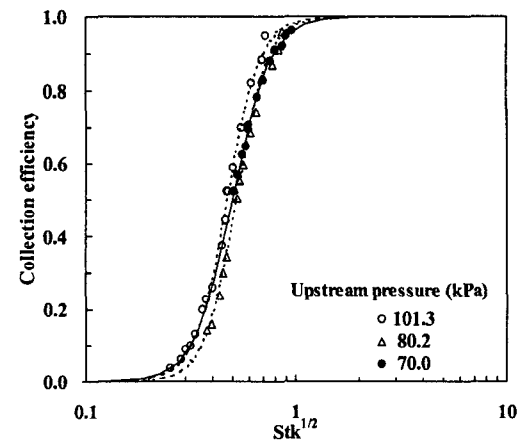


Fig. 10 Collection efficiency of stage 2 with $\text{Stk}^{1/2}$

본 연구는 학술진흥재단 선도연구지원사업(과제번호: 2003-041-D00358)과 과학기술부 국가지정연구실사업(관리번호: M1-0204-00-0049)의 지원으로 수행되었으며, 이에 관계자 여러분께 감사드립니다.

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) 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.
- (7) 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.
- (8) 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.
- (9) 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.
- (10) 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.
- (11) 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.
- (12) 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.
- (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) Flagan, R. C., 1982, "Compressible Flow Inertial Impactors," *J. Coll. Interface Sci.*, Vol. 87, pp. 291~299.
- (15) Biswas, P. and Flagan, R. C., 1984, "High Velocity Inertial Impactors," *Envir. Sci. Technol.*, Vol. 18, pp. 611~616.
- (16) 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.
- (17) Ji, J. H., Bae, G. N., and Hwang, J., 2003, "Nano Particle Charging Characteristics of Aerosol Charge Neutralizers," *KSME Journal B*, Vol. 27, pp. 1489~1497.
- (18) 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," *KSME Journal B*, Vol. 27, pp. 1498~1507.
- (19) TSI Corporation, 1999, *Model 3936 SMPS(Scanning Mobility Particle Sizer) Instruction Manual*.