

## 대기 에어로졸 측정용 3단 임팩터의 설계 및 성능평가 Design and Performance Evaluation of a Three Stage Impactor

지 준 호 · 배 귀 남<sup>1),\*</sup> · 황 정 호  
연세대학교 기계공학과, <sup>1)</sup>한국과학기술연구원 지구환경연구센터  
(2001년 8월 22일 접수, 2001년 10월 29일 채택)

Jun-Ho Ji, Gwi-Nam Bae<sup>1),\*</sup> and Jung-Ho Hwang  
Department of Mechanical Engineering, Yonsei University,  
<sup>1)</sup>Global Environmental Research Center, Korea Institute of Science and Technology  
(Received 22 August 2001; accepted 29 October 2001)

### Abstract

A three stage impactor with the cutoff diameters of 1, 2.5, and 10  $\mu\text{m}$  in aerodynamic diameter was developed and tested. The gravimetric method and the particle counting method were utilized to evaluate the collection performance of each stage. A vibrating orifice aerosol generator was employed to generate monodisperse test aerosols larger than 2  $\mu\text{m}$  in diameter. Polystyrene latex (PSL) particles smaller than 2  $\mu\text{m}$  in diameter were generated by an atomizer and the particle number concentration was measured by an Aerodynamic Particle Sizer Spectrometer. The experimental cutoff diameters obtained from the particle collection efficiency curves are in good agreement with the designed values. The square roots of Stokes number at 50% collection efficiency for stage 1, 2, and 3 are 0.42, 0.48, and 0.45, respectively. Effects of the particle bounce and the impaction plate on the collection efficiency were investigated. The collection efficiency curves including effect of the particle bounce were also compared with those of the MOUDI cascade impactor.

**Key words** : aerosol, cascade impactor, collection efficiency, particle bounce,  $\text{PM}_{10}$ ,  $\text{PM}_{2.5}$ ,  $\text{PM}_1$

### 1. 서 론

미세 입자는 대표적인 대기오염물질로 알려져 있고, 대기 환경 뿐만 아니라 호흡기 장애나 암을 유발시키는 등 인체에도 나쁜 영향을 미친다. 지금까지 에어로졸은 주로 대기오염 규제에 따라 총부유입자(total suspended particulates; TSP)와 공기역학적

입경(aerodynamic diameter)이 10  $\mu\text{m}$  또는 2.5  $\mu\text{m}$  이하인 부유입자(particulate matter;  $\text{PM}_{10}$ ,  $\text{PM}_{2.5}$ )를 측정하여 대기오염도를 평가하여 왔다. 싸이클론이나 임팩터는 입자의 원심력 또는 관성력을 이용하여 특정 크기 이상의 입자를 분리할 수 있으므로, 필터의 전단에 싸이클론 또는 임팩터를 설치하여  $\text{PM}_{10}$ 이나  $\text{PM}_{2.5}$ 를 측정하고 있다.

임팩터는 입자의 곡선 운동을 이용하여 에어로졸을 분리하는 기기로 초기에는 작업장에서 분진을 제거하는 방법으로 사용되었다. 1960년대 이후에는

\* Corresponding author  
Tel: +82-(0)2-958-5676. E-mail: gnbae@kist.re.kr

단위 임팩터를 연속적으로 배열하여 입자를 크기별로 분리하는 다단 임팩터가 사용되었다. 모든 임팩터의 단은 같은 원리에 의해 작동되는데, 노즐을 통과한 에어로졸 입자가 공기와 함께 평평한 임팩터 기판으로 향하고, 유선이 90°로 급격히 변하는 과정에서 관성이 큰 입자는 기류를 따라가지 못하고 임팩터 기판에 충돌하게 된다. 이때 충돌된 모든 입자가 기판에 부착된다고 가정하면, 충돌하지 않은 입자들은 기류를 따라 다음 단으로 빠져나가고, 이와 같은 방식으로 다음 크기 영역의 입자들이 분리된다. 임팩터는 충돌 기판의 재질 및 표면상태, 입자의 재질 및 흡인유량 등에 따라 입자채취 특성이 달라질 수 있다. 임팩터의 이론, 설계방법, 사용법, 데이터 처리 등에 대해서는 잘 알려져 있으며 (Lodge, Jr. and Chan, 1986), 널리 사용되는 임팩터의 성능 특성에 대해서도 많은 연구가 수행되었다 (Sioutas et al., 1999; Howell et al., 1998; Marple et al., 1991; Rader et al., 1991; Knuth, 1984; Rao and Whitby, 1977). 임팩터는 입자의 관성을 이용하여 입자크기를 분류하므로 주로 크기가 1µm 이상인 조대 입자 (coarse particles)의 분류에 사용되었으나, 최근 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.

대기 규제가 점점 작은 입자의 영향을 고려하는 추세이므로, 외국의 경우 PM<sub>10</sub>과 PM<sub>2.5</sub>를 동시에 측정할 수 있는 2단 임팩터 (MST Indoor Air Sampler)나 PM<sub>1</sub>까지 측정할 수 있는 3단 임팩터 (Dekati 3 Stage Impactor)가 상용화되어 있다. 최근에는 국내에서도 다단 임팩터에 대한 연구가 수행되고 있다. 즉, 다단 임팩터를 이용한 대기 에어로졸의 입경분포 측정 (김용표 등, 1999; 박정호와 최금찬, 1997) 뿐만 아니라 임팩터의 성능평가에 대한 연구도 수행되고 있다 (권순박 등, 2000; 배귀남 등, 1999).

본 연구에서는 대기환경의 규제 입경인 10, 2.5 µm와 앞으로 규제 가능성이 있는 1µm를 기준으로 입자를 분리할 수 있는 3단 임팩터를 설계, 제작하여 성능을 평가하였다. 임팩터의 성능을 파악하기 위하여 단분산 입자를 발생시킨 후 중량법과 계수법을 사용하여 각 단의 입자채취효율을 측정하였다. 임팩터 기판의 재질에 따른 채취효율 곡선의 변

화와 기판에서 고체 입자의 튀김 현상에 의한 영향을 조사하였다. 또한, 본 연구결과를 상용 다단 임팩터 (microorifice uniform deposit impactor, MOUDI, model 100, MSP Corp., USA)의 성능과 비교하였다 (배귀남 등, 1999; Marple et al., 1991).

## 2. 3단 임팩터의 설계

### 2.1 임팩터의 이론

원하는 크기에서 입자를 정확히 분리할 수 있도록 그림 1에 나타낸 바와 같은 임팩터의 기하학적 형상 및 운전 변수들을 결정하여야 한다. 임팩터의 입자채취효율을 결정하는 중요한 설계 변수로 스톡스 수 (Stokes number)가 있다. 스톡스 수는 노즐 반경에 대한 입자 정지거리의 비로 식(1)과 같이 표현된다. 노즐 반경은 노즐을 통과하는 공기 제트의 반경을 의미하고, 입자 정지거리는 노즐에서 평균 출구속도를 사용하여 구한다.

$$Stk = \frac{\tau U}{W/2} = \frac{\rho_p d_p^2 U C_c}{9\eta W} \quad (1)$$

여기서,  $\tau$ 는 이완시간 (relaxation time),  $U$ 는 노즐에서 평균 출구속도,  $W$ 는 노즐 직경,  $\rho_p$ 는 입자 밀도,  $d_p$ 는 입경,  $C_c$ 는 미끄럼 보정계수,  $\eta$ 는 공기의 점성계수이다.

일반적으로 이상적인 임팩터의 채취효율 곡선은 각 단의 분리입경에서 계단 함수 (step function)의 형태이어야 한다. 원형 노즐의 경우 스톡스 수와 분

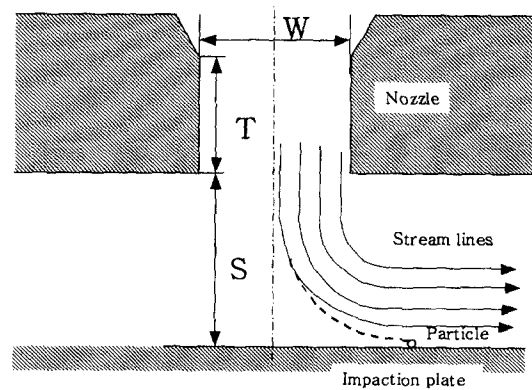


Fig. 1. Geometrical design parameters of an impactor.

리입경의 관계는 식 (2)와 같다.

$$d_{50} = \sqrt{\frac{9\eta W S t k_{50}}{C_c \rho_p U}} = \sqrt{\frac{9\pi n \eta W^3 S t k_{50}}{4 C_c \rho_p Q}} \quad (2)$$

여기서,  $d_{50}$ 은 채취효율이 50%일 때 입경,  $Stk_{50}$ 은 분리입경일 때 스톱스 수,  $n$ 은 노즐 수,  $Q$ 는 흡인유량이다.

입자는 형상이 있는 3차원 물체로서 크기를 정확히 말하는 것은 불가능하므로, 입자의 기하학적, 광학적, 전기적, 운동학적 특성을 이용하여 입자의 크기를 다양하게 정의하여 사용하고 있다. 대기환경에서는 입자의 운동학적 특성의 하나인 중력침강속도를 이용하여 입자의 크기를 정의하는 방법이 많이 사용되고 있다. 실제로 존재하는 입자는 대부분 구형이 아니므로, 비구형 입자를 중력침강속도가 동일한 구로 환산하여 입자 크기를 정의한다. 실제 입자의 밀도와 같은 밀도를 갖는 구의 직경을 스톱스 입경 (Stokes diameter)이라고 부르고, 실제 입자의 밀도와 다르게 밀도가  $1\text{g/cm}^3$ 인 구의 직경을 공기역학적 입경 (aerodynamic diameter)이라고 부른다. 입액터, 싸이클론, 공기역학적 입경 측정기 (Aerodynamic Particle Sizer Spectrometer)의 경우 입자의 공기역학적 특성을 이용하므로, 입자의 크기를 공기역학적 입경으로 나타낸다. 스톱스 입경 ( $d_p$ )과 공기역학적 입경 ( $d_{ac}$ )의 관계는 식 (3)과 같다.

$$d_{ac} = d_p \left( \frac{C_c(d_p)}{C_c(d_{ac})} \right)^{1/2} \left( \frac{\rho_p}{\rho_{ac}} \right)^{1/2} \quad (3)$$

일반적으로 분리입경이 커서 입액터의 노즐에서 압력강하가 크지 않은 상압 입액터의 경우  $C_c$ 는 1로 일정하기 때문에 입액터 설계시  $C_c$ 를 고려할 필요가 없지만, 분리입경이 작아 노즐의 압력강하가 커서  $C_c$ 에 영향을 미치는 저압 입액터의 경우  $C_c$ 를 고려하여 각 단을 설계하여야 한다.

### 2.2 입액터의 설계

본 연구에서는 대기환경에서 관심의 대상이 되고 있는 입경 (10, 2.5, 1  $\mu\text{m}$ )을 기준으로 에어로졸의 크기를 분류하여 질량 농도와 화학적 조성을 파악하는데 사용될 수 있는 3단 입액터를 설계하고자 하였다. 정격 흡인유량은 30 L/min로, 각 단의 기관과 최종필터 (after filter)의 직경은 37 mm로 설정하였다.

입액터의 설계 인자로는 입액터의 형상과 흡인유량 등의 운전조건이 있다. 입액터의 형상은 공기 제트의 평균 속도와 직접 관계되는데, 노즐 직경 ( $W$ )과 노즐과 기관간의 거리 ( $S$ ), 노즐 목의 길이 ( $T$ ) 등이 입액터의 성능에 영향을 미치는 것으로 알려져 있다 (그림 1 참조). Rader and Marple (1985)은 입액터의 성능에 대한 수치해석 결과를 근거로 입액터 설계에 대한 지침을 제시하였다. 즉, 분리성능이 우수한 입액터를 설계하기 위해서는 원형 노즐의 경우 직경에 대한 노즐과 기관 사이의 비 ( $S/W$ )가 1 이상이고, 레이놀즈 수는 500 ~ 3,000이어야 한다. 본 연구에서도 이들이 제시한 설계 조건을 만족시킬 수 있도록 설계 인자의 값을 결정하였다.

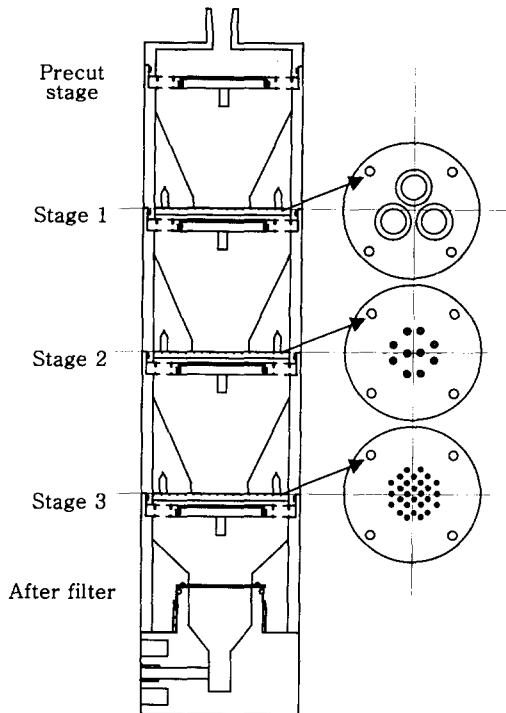
입액터의 입자 분리성능은 스톱스 수의 함수로 표현되므로, 보통 원형 노즐을 1개만 사용하는 입액터의 경우 수치모사에 의해 예측된 원형 노즐의 채취효율 곡선으로부터 구한  $\sqrt{Stk_{50}}=0.49$ 를 사용하여 입액터의 각 단을 설계한다 (Lodge and Chan, 1986; Rader and Marple, 1985). 그런데, 원형 노즐을 여러 개 사용하는 경우 제트 유동간의 상호작용에 의해 입액터의 분리성능이 달라질 수 있으므로, 설계자의 경험에 의해 각 단마다 약간 다른 스톱스 수를 사용하여 입액터를 설계한다. 본 연구에서는 먼저  $\sqrt{Stk_{50}}=0.49$ 를 사용하여 입액터 각 단의 노즐 수와 직경을 설정하여 3단 입액터의 1차 시제품 (model A)을 제작한 후, 실험적으로 얻은 1차 시제품에 대한 입자채취효율 곡선으로부터 분리입경에 해당하는 스톱스 수를 구하였다. 이렇게 구한 각 단의 스톱스 수를 기준으로 노즐 직경을 변경하여 입액터의 2차 시제품 (model B)을 제작하여 성능을 평가하였다.

가공하기 쉽고 레이놀즈 수의 범위를 만족하도록 각 단의 노즐 수와 직경을 선정하였고, 직경 37 mm인 기관에 에어로졸이 모두 채취될 수 있도록 직경 25 mm인 원의 내부에 노즐을 배치하였다. 1차 시제품의 설계치와 1차 실험결과를 근거로 결정한 2차 시제품의 설계치를 표 1에 나타냈다.

3단 입액터의 구조는 필요에 따라 입구에서 약 15  $\mu\text{m}$  이상인 입자를 제거할 수 있는 예비 분리 (precut) 기관을 설치할 수 있도록 하였고, 샘플링 조건에 따라 필요한 단만을 선택하여 사용할 수 있도록 각 단의 형상을 표준화시켰다. 마지막에는 최

**Table 1. Design parameters of the prototype three stage impactors.**

Stage and model	Nominal cutoff diameter (μm)	Number of nozzle	$\sqrt{Stk_{50}}$	Nozzle diameter (mm)	S/W	Re	Experimental cutoff diameter (μm)
1A	10	3	0.49	8.0	0.50	1757	8.4
1B			0.42	8.9	0.45	1579	9.9
2A	2.5	10	0.49	2.1	0.95	2008	2.3
2B			0.48	2.2	0.90	1916	2.5
3A	1.0	28	0.49	0.8	1.11	1892	0.83
3B			0.45	0.9	1.00	1675	0.98



**Fig. 2. Sectional view of the prototype three stage impactor.**

중필터를 설치하여 1 μm 이하인 입자를 채취할 수 있도록 설계하였다. 본 연구에서 제작한 임팩터 시제품의 구조를 그림 2에 나타냈다.

### 3. 임팩터의 성능평가 실험

임팩터의 성능은 입자채취효율 곡선으로 나타낼

수 있는데, 이상적인 임팩터의 경우 분리입경 이상의 입자들은 모두 기관에 채취되고, 이보다 작은 입자는 모두 공기와 함께 통과한다. 그러나, 실제 임팩터의 경우 노즐을 통과하는 기류의 속도분포가 균일하지 않으므로, 분리입경 이상인 입자의 일부는 기관에 부착되지 않고 통과할 수 있고, 분리입경 이하인 입자라도 기관에 채취될 수 있다. 따라서, 실제 임팩터의 채취효율 곡선은 S자 형태이고, 채취효율 곡선의 경사(stiffness)가 급할수록 분리성능이 좋은 임팩터가 된다. 본 연구에서는 3단 임팩터의 입자채취 특성을 살펴보기 위하여 분리입경이 각각 10, 2.5 μm인 1단과 2단은 중량법, 분리입경이 1 μm인 3단은 계수법으로 입자채취효율을 평가하였다.

#### 3.1 중량법에 의한 임팩터의 성능평가

중량법으로 임팩터의 성능을 평가하기 위하여 그림 3에 나타낸 바와 같이 진동 오리피스 입자발생장치(vibrating orifice aerosol generator, VOAG, model 3450, TSI Inc., USA)를 사용하여 단분산 입자를 발생시키고, 흡인유량을 조절할 수 있는 성능평가장치를 제작하여 실험을 수행하였다. 습식 가스미터(wet gas meter, model W-NK-10A, Sinagawa Corp., Japan)로 압력(진공도)에 따라 교정된 유량계(rotameter)를 사용하여 임팩터로 흡인되는 유량을 설정 값(30 L/min)으로 일정하게 유지하였다. 시험 입자로는 올레인산(oleic acid, 밀도=0.895 g/cm<sup>3</sup>)으로 만든 액체 입자와 소금(NaCl, 밀도=2.2 g/cm<sup>3</sup>)으로 만든 고체 입자를 사용하였다. 기관으로는 직경이 37 mm인 테플론 필터(Teflon filter, F2996-25, zefluor, pore size 2 μm, Gelman Scientific)와 알루미늄 호일(Al foil)을 사용하였다. 최종필터로는 직경이 37 mm인 테플론 필터를 사용하였다. 기관의 표면은 코팅 등의 처리를 하지 않고 그대로 사용하였다. 임팩터의 기관과 최종필터는 측정 전과 측정 후 24시간 동안 데시케이터에 보관하여 항습시킨 후 분해능이 1 μg인 전자저울(model MT5, Mettler-Toledo)로 무게를 측정하였다. 각 단의 입경별 채취효율은 임팩터의 기관과 최종필터에 채취된 입자의 무게로부터 구하였다.

#### 3.2 계수법에 의한 임팩터의 성능평가

분리입경이 1 μm인 3단의 채취효율을 평가하기

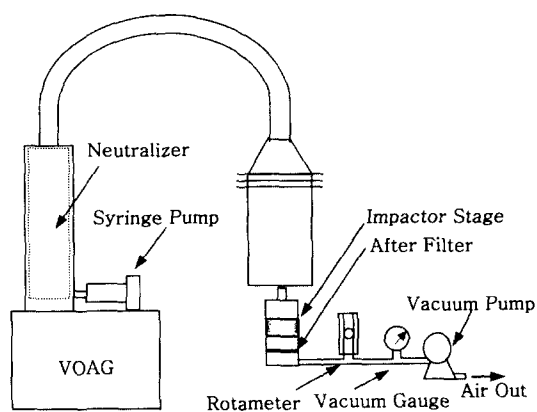


Fig. 3. Schematics of the experimental system for gravimetric method.

위해 계수법을 사용하였다. 그림 4와 같이 샘플링 프로브가 설치된 연결부를 3단의 상류와 하류에 장착하여 입자채취효율을 평가하였다. 분무기(atomizer, model 9302, TSI Inc., USA)로 단분산 PSL (polystyrene latex) 입자를 발생시키고, 공기역학적 입경 측정기(aerodynamic particle sizer spectrometer, APSS, model 3320, TSI Inc., USA)를 사용하여 임팩터의 상류와 하류의 입자 수 농도와 평균 입경을 측정하였다. 공기역학적 입경 측정기의 대표값으로는 기하 평균 입경을 사용하였고, 최대 농도의 10% 이상을 나타내는 채널들을 선택하여 데이터를 처리하였다. 즉, 채취효율을 계산하는데 평균적으로 5개 채널을 사용하였고, 3단의 상류와 하류의 농도는 선택한 채널들의 농도를 더하여 구하였다. 1대의 공기역학적 입경 측정기를 사용하였으므로, 2개의 볼 밸브와 Y관을 이용하여 상류와 하류의 농도를 교대로 측정하였다. 이때 공기역학적 입경 측정기의 흡인유량(5.0 L/min)을 고려하여 임팩터의 3단을 통과하는 유량이 30 L/min가 되도록 니들 밸브와 질량유량계(mass flowmeter, model 3036, TSI Inc., USA)로 조절하였다.

3단의 경우 고체 입자인 PSL 입자를 사용하여 채취효율을 평가하므로, 기관에서 입자의 튀김 현상이 생겨 입자채취효율을 왜곡시킬 수 있다. 입자의 튀김을 최소화시키기 위하여 알루미늄 호일을 실리콘 스프레이로 코팅하여 기관으로 사용하였다. 특정 크기의 PSL 입자만 시판되고 있으므로, 임팩터의 분

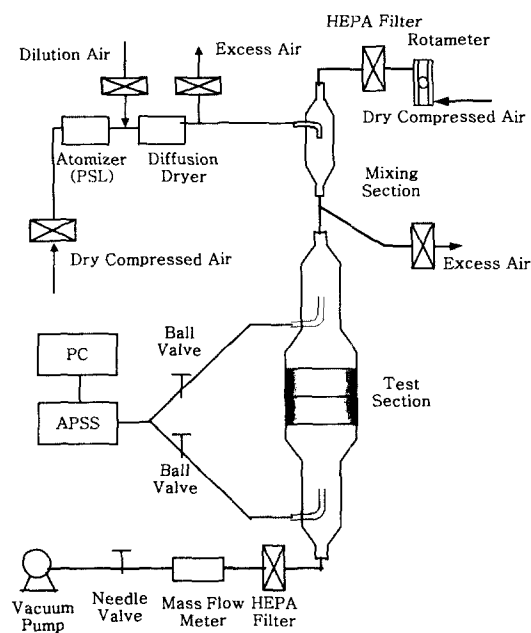


Fig. 4. Schematics of the experimental system for particle counting method.

리입경에 해당하는 스톡스 수를 구하기 위하여 식 (1)에서 알 수 있는 것처럼 입경 뿐만 아니라 노즐을 통과하는 평균 속도, 즉 임팩터의 흡인유량을 3가지(25, 30, 35 L/min)로 변경하여 스톡스 수의 함수로 임팩터의 채취효율을 나타냈고, 이것으로부터 50% 분리입경을 구하였다.

#### 4. 임팩터의 성능 특성

##### 4.1 임팩터의 채취효율 곡선

그림 5는 임팩터 시제품(model B)의 각 단별 입자채취효율 곡선을 나타낸 것이다. 1단과 2단은 중량법, 3단은 입자 계수법을 사용하여 입자채취효율을 구하였다. 채취효율 곡선으로부터 구한 1, 2, 3단의 50% 분리입경은 각각 9.9, 2.5, 0.98  $\mu\text{m}$ 이다(표 1 참조). 그림에서 점선은 각 단의 이상적인 채취효율 곡선을 나타낸 것이다.

1단과 2단의 경우 노즐 직경이 다른 A 모델과 B 모델에 대하여 액체 입자인 올레인산을 단분산으로 발생시켜 입경별 채취효율을 구하여 그림 6에 나타

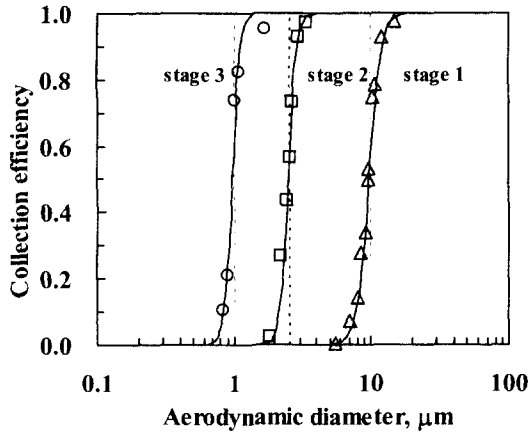


Fig. 5. Particle collection efficiency curves of the prototype impactor (model B).

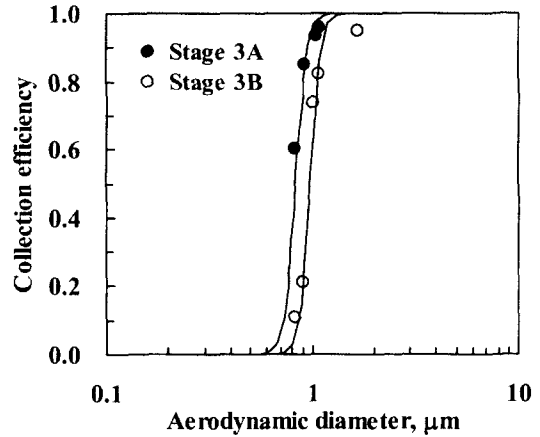


Fig. 7. Effect of nozzle diameter on the collection efficiency for stage 3.

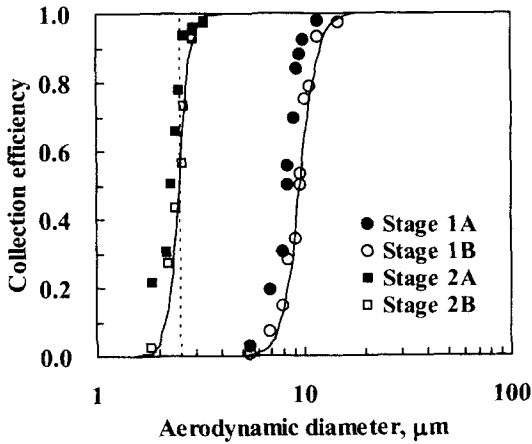


Fig. 6. Effect of nozzle diameter on the collection efficiency for stages 1 and 2.

났다. 그림을 보면, 노즐 직경이 큰 경우 (model B) 노즐을 통과하는 평균 기류 속도가 작아지므로 분리입경이 증가한다. 1단과 2단의 A 모델의 경우 ( $W = 8.0 \text{ mm}$ 와  $W = 2.1 \text{ mm}$ ) 50% 분리입경이 설계치보다 작았으므로, A 모델에 대한 실험결과로부터 스톡스 수를 계산하여 B 모델을 설계, 제작하여 성능을 다시 평가하였다. B 모델의 경우 ( $W = 8.9 \text{ mm}$ 와  $W = 2.2 \text{ mm}$ ) 1, 2단의 50% 분리입경이 각각  $9.9, 2.5 \mu\text{m}$ 로 설계치와 거의 일치하였다.

3단의 경우 PSL 입자를 사용하여 입자 계수법을

로 채취효율을 구하여 그림 7에 나타냈다. 초기 설계 과정에서는 미끄럼 보정계수 ( $C_s$ )를 고려하지 않았기 때문에 A 모델 ( $W = 0.8 \text{ mm}$ )의 50% 분리입경은 약  $0.83 \mu\text{m}$ 로 설계치보다 작게 나타났다. 3단 A 모델의 실험결과로부터 스톡스 수를 계산하여 설계, 제작한 B 모델 ( $W = 0.9 \text{ mm}$ )의 경우 50% 분리입경 ( $0.98 \mu\text{m}$ )이 설계치 ( $1 \mu\text{m}$ )와 매우 유사하다.

#### 4.2 스톡스 수에 의한 비교

스톡스 수는 임팩터의 분리성능을 나타내는 무차원 수이다. 즉, 임팩터의 스톡스 수의 특성을 알고 있으면 운전 조건의 변동에 의한 성능 변화를 미리 예측할 수 있다. 그림 8은 분리입경이  $10 \mu\text{m}$ 인 1단 (model B)의 입자채취효율을 분리입경이 동일한 상용 다단 임팩터 (MOUDI)의 1단 성능 (배귀남 등, 1999)과 비교하여 스톡스 수의 함수로 나타낸 것이다.

MOUDI의 1단도 노즐 수가 세 개이므로  $\sqrt{Stk_{50}}$ 은 약 0.42로 일치하지만, MOUDI의 경우 분리입경보다 큰 입자의 채취효율이 상대적으로 낮음을 알 수 있다. 이것은 노즐 상류의 형상이 서로 달라 노즐로 유입되는 유속분포의 차이에 기인된 것으로 추정된다. 즉, MOUDI의 경우 상부 기관과 노즐 사이의 간격이 좁아 노즐 상류에서 기류가 급격히 변하는 형상이고, 본 시제품의 경우 그림 2에 나타낸 바와 같이 상대적으로 기류가 완만하게 변하는 형상이다.

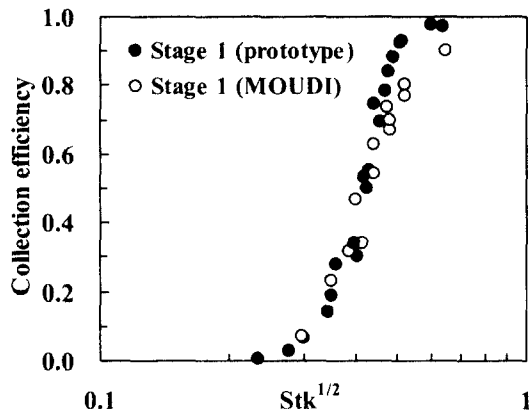


Fig. 8. Comparison of collection efficiencies for stage 1.

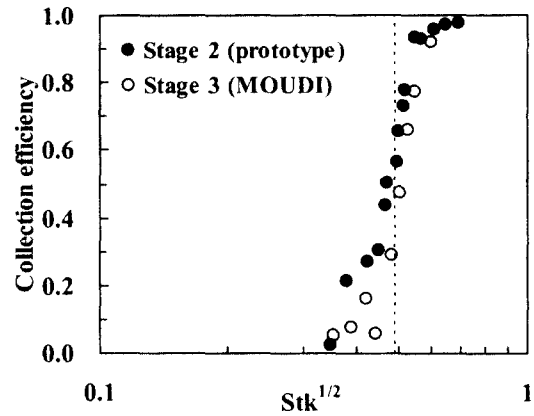


Fig. 9. Comparison of collection efficiencies for stage 2.

그림 9는 분리입경이 2.5  $\mu\text{m}$ 인 2단(model B)의 채취효율 특성을 분리입경이 3.2  $\mu\text{m}$ 인 MOUDI 3단의 성능과 비교하여 나타낸 것이다. 스톡스 수의 차이로 채취효율 곡선이 MOUDI의 곡선에 비해 왼쪽으로 이동하였지만, 1단과는 달리 채취효율 곡선의 경사가 모든 영역에서 비슷하게 나타남을 알 수 있다. 1단의 경우 MOUDI의 1단과 노즐 개수가 같기 때문에 분리입경에 해당하는 스톡스 수가 거의 일치하지만, 분리입경과 노즐 개수가 다른 2단의 경우 스톡스 수와 입자채취효율의 관계가 다르게 나타난다. 이것은 다중 노즐을 사용하는 경우 입자채취효율이 노즐 개수와 배열에 의한 유동간의 간섭에 의해 영향을 받을 수 있다는 것을 의미한다. 또한, 개발 임팩터가 작은 입경에서 상대적으로 높은 효율을 나타내는 경우가 있는데, 이것은 VOAG로 입자를 발생시키는 경우 2 $\mu\text{m}$  이하인 입자의 발생이 불안정하여 생긴 오차에 기인된 것으로 생각된다.

그림 10은 분리입경이 1  $\mu\text{m}$ 인 3단의 입자채취효율을 계수법으로 구하여 나타낸 것이다. PSL 입자를 사용하여 다양한 입경에 대한 채취효율을 구하는데 제약이 있으므로, 흡인유량을 변경하여 스톡스 수의 범위를 넓혔다. 즉, 3가지 흡인유량에 대한 채취효율을 구하여 스톡스 수의 함수로 나타냈다. 노즐 직경이 0.8 mm인 A 모델의 경우 데이터가 많지 않으므로, 노즐 직경이 0.9 mm인 B 모델의 성능평가 결과를 이용하여 분리입경을 계산하여 표 1에 나타냈다. 3단의 경우 미끄럼 보정계수(C<sub>s</sub>)를 고려

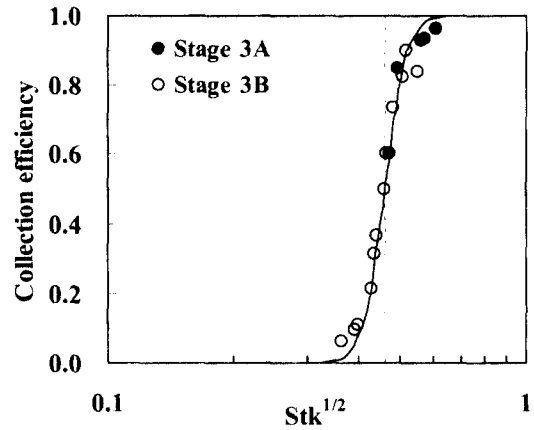


Fig. 10.  $Stk^{1/2}$  vs. collection efficiency for stage 3.

하여 그림 10으로부터 분리입경에서의 스톡스 수를 구하였고, B 모델의  $\sqrt{Stk_{50}}$ 은 약 0.45이다.

### 4.3 기판 재질과 입자 재질의 영향

임팩터 기판의 재질이 채취효율에 미치는 영향을 파악하기 위하여 2가지 기판(Al foil, Teflon filter)을 사용하여 1단과 2단의 채취효율을 구하여 그림 11에 나타냈다. 기판이 테플론 필터인 경우 분리입경보다 작은 입자의 채취효율이 알루미늄 호일일 때의 채취효율보다 높다. 이것은 상용 다단 임팩터(MOUDI)에 대한 배귀남 등(1999)의 실험결과와 일치한다. 테플론 필터가 알루미늄 호일에 비해 두

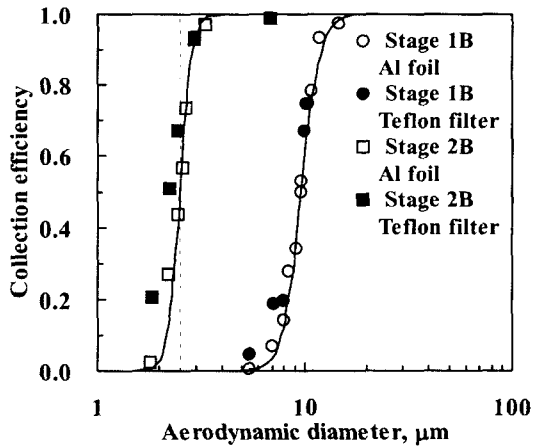


Fig. 11. Effect of substrate material on the particle collection efficiency for stages 1 and 2.

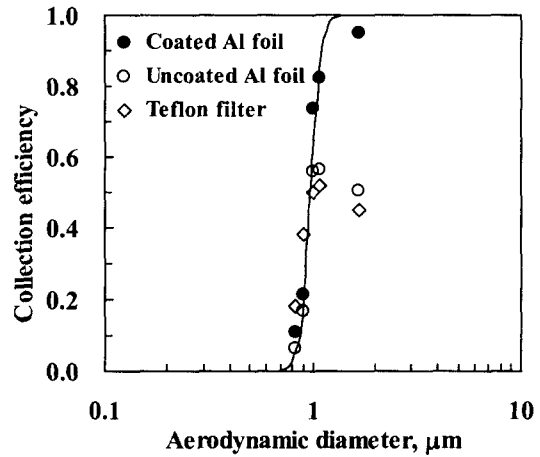


Fig. 13. Effect of particle material and substrate material on the particle collection efficiency for stage 3.

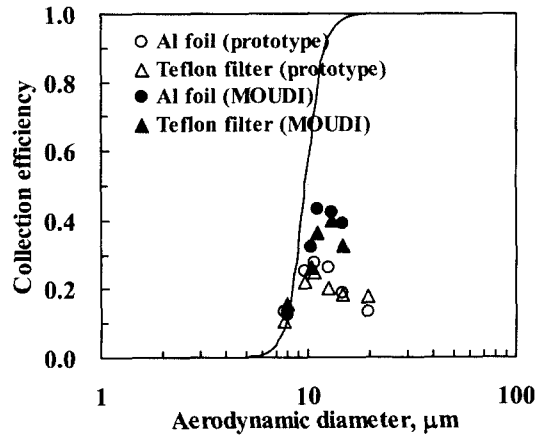


Fig. 12. Effect of particle material on the particle collection efficiency for stage 1.

접고, 표면이 더 거칠어서 노즐과 기관 사이의 거리가 가까워지고 표면에서의 기류 교란으로 인해 채취효율이 증가된 것으로 생각된다.

올레인산 입자의 경우 액체이므로 기관에 충돌하면 바로 부착되지만, 소금 입자는 고체이므로 기관에 충돌하는 순간 운동 에너지를 모두 잃지 않고, 반발력으로 다시 튀어나올 수 있다. 입자 재질에 따른 1단의 채취효율 변화를 MOUDI 1단의 실험결과(배귀남 등, 1999)와 비교하여 그림 12에 나타냈다.

충돌 분무기로 발생시킨 소금 입자를 시험 입자로 사용했는데, 기관이 테플론 필터인 경우 튀김 효과가 좀 더 크게 나타나고 입경이 증가함에 따라 채취효율은 증가하다가 입경이 분리입경보다 크면 채취효율이 더 이상 증가하지 않고 오히려 감소하는 경향을 나타낸다. 개발 임팩터의 경우 최대 채취효율이 30% 이하로 MOUDI 1단의 채취효율에 비해 낮다. 이것으로부터 본 연구에서 제작한 1단에서의 튀김 현상이 상대적으로 더 크다는 것을 알 수 있다. MOUDI의 경우 직경이 47mm인 기관을 사용하고, 노즐에서 상대적으로 큰 관성을 갖는 입자들이 노즐로 유입되기 이전에 기류가 급격히 변하는 부분에서 손실되어 감소하기 때문이라고 생각된다. 본 실험결과에 의하면 기관에서 입자가 튀어나오는 현상으로 인해 분리입경보다 큰 입자의 채취효율이 크게 달라지는데, 기관을 코팅하여 사용하면 입자의 튀김에 의한 측정결과의 왜곡을 최소화시킬 수 있다.

3단의 경우 기관의 재질에 따른 채취효율의 변화를 살펴보기 위하여 코팅하지 않은 알루미늄 호일과 테플론 필터를 기관으로 선정하여 PSL 입자에 대한 채취효율을 구하여 그림 13에 나타냈다. 코팅하지 않은 알루미늄 호일의 채취효율은 입경이 분리입경보다 작으면 코팅한 알루미늄 호일 기관을 사용한 경우와 비슷하지만, 분리입경보다 크면 채취효



율이 더 이상 증가하지 않고 감소하는 경향을 나타낸다. 테플론 필터의 채취효율은 분리입경 이하에서 코팅한 알루미늄 호일에 비해 높지만, 입경이 분리입경보다 크면 코팅하지 않은 알루미늄 호일의 채취효율보다 약간 낮다. 코팅하지 않은 알루미늄 호일과 테플론 필터의 고체 입자에 대한 최대 채취효율은 60% 이하로 1단의 경우에 비해 높다. 이것은 3단의 분리입경이 1단의 분리입경에 비해 작기 때문에 입자의 관성력이 적어 기관에서 튀어나오는 현상이 감소하였기 때문이다.

4. 결 론

본 연구에서는 대기환경의 규제 대상인 PM<sub>10</sub>, PM<sub>2.5</sub>와 향후 규제 가능성이 있는 PM<sub>1</sub>을 구분하여 채취할 수 있는 3단 임팩터를 설계, 제작하여 성능을 평가하였다. 중량법과 계수법을 사용하여 임팩터의 단별 입자채취효율을 구하였고, 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 본 연구에서 제작한 임팩터 시제품의 각 단별 50% 분리입경은 9.9, 2.5, 0.98 μm로 설계치와 거의 일치한다. 이때 50% 분리입경에 해당하는 스톡스 수( $\sqrt{Stk_{50}}$ )는 각각 0.42, 0.48, 0.45이다.
- (2) 임팩터의 흡인유량과 노즐의 개수, 노즐과 기관간 거리가 결정되어 있는 경우 노즐의 직경이 작아지면 단의 분리입경이 작아지고 채취효율 곡선은 입경이 작은 쪽으로 이동한다. 그러나, 스톡스 수로 나타낸 입자채취효율 곡선은 동일하다.
- (3) 표면이 매끄럽지 않은 테플론 필터를 기관으로 사용한 경우 분리입경보다 작은 입경에서 채취효율이 알루미늄 호일을 기관으로 사용한 경우보다 약간 높게 나타나지만, 분리입경은 변하지 않는다.
- (4) 고체 입자의 경우 기관에서 입자의 튀어나오는 현상으로 인해 최대 채취효율이 1단의 경우 30% 이하, 3단의 경우 60% 이하로 낮다.
- (5) 분리입경이 10 μm인 시제품 1단의 입자채취효율 특성을 MOUDI 1단의 성능과 비교하면, 분리입경보다 큰 입경에서 시제품의 액체 입자에 대한 채취효율은 더 높지만, 고체 입자가 기관으로부터 튀어나오는 영향을 더 크게 받아 시제품의 고체 입자에 대한 채취효율은 더 낮다.

국내의 대기 에어로졸 연구는 대부분 수입한 기기를 사용하여 PM<sub>10</sub>과 PM<sub>2.5</sub>를 분리하여 측정하고 있는 실정이다. 대기환경의 규제대상 입자를 동시에 측정할 수 있는 3단 임팩터를 개발하여 대기 에어로졸 측정에 사용하면 기기의 위치나 흡인유량의 변화 등이 PM<sub>10</sub>과 PM<sub>2.5</sub> 농도의 차이에 미치는 영향을 고려하지 않아도 될 것이다. 본 연구에서는 한번의 시행착오를 거쳐 설계치에 근접한 분리입경을 갖는 임팩터 시제품을 개발하였다. 향후 임팩터 내부 벽면에서의 입자 손실을 정량화시키고, 실제 현장에서 유사 기기와의 비교 실험을 거치면, 3단 임팩터 시제품을 대기 에어로졸 연구에 사용할 수 있을 것으로 예상된다.

참 고 문 헌

권순박, 임경수, 이규원, 지준호, 배귀남 (2000) 상압 다단 임팩터의 설계 및 성능평가. 한국대기환경학회 2000 춘계학술대회논문집, 219-220.

김용표, 배귀남, 지준호, 진현철, 문길주 (1999) 제주도 고산에서의 에어로졸 입경분포별 조성: 1998년 4월 측정 연구. 한국대기환경학회지, 15(5), 677-685.

박정호, 최금찬 (1997) 저압 임팩터를 이용한 대기 에어로졸 입자의 입경분포 측정과 화학조성 자료의 해석. 한국대기보전학회지, 13(6), 475-486.

배귀남, 지준호, 문길주 (1999) 다단 임팩터(MOUDI)의 조대 입자 채취 특성. 한국대기환경학회지, 15(6), 799-804.

Howell, S., A.A.P. Pszenny, P. Quinn, and B. Huebert (1998) A field intercomparison of three cascade impactors. *Aerosol Sci. Technol.*, 29, 475-492.

Knuth, R.H. (1984) Calibration and field application of a Sierra model 235 cascade impactor. *Am. Ind. Hyg. Assoc. J.*, 45(6), 393-398.

Lodge, Jr., J.P. and T.L. Chan (1986) Cascade Impactor: Sampling & Data Analysis. *American Industrial Hygiene Association*.

Marple, V.A., K.L. Rubow, and S.M. Behm (1991) A micro-orifice uniform deposit impactor (MOUDI): description, calibration, and use. *Aerosol Sci. Technol.*, 14, 434-446.

Rader, D.J. and V.A. Marple (1985) Effect of ultra-Stokesian drag and particle interception on impaction characteristics. *Aerosol Sci. Technol.*, 4, 141-156.

Rader, D.J., L.A. Mondy, J.E. Brockmann, D.A. Lucero, and

- K.L. Rubow (1991) Stage response calibration of the Mark III and Marple personal cascade impactors. *Aerosol Sci. Technol.*, 14, 365-379.
- Rao, A.K. and K.T. Whitby (1977) Nonideal collection characteristics of single stage and cascade impactors. *Am. Ind. Hyg. Assoc. J.*, 38, 174-179.
- Sioutas, C., M.C. Chang, S. Kim, P. Koutrakis, and S.T. Ferguson (1999) Design and experimental characterization of a  $PM_{10}$  and  $PM_{2.5}$  personal sampler. *J. Aerosol Sci.*, 30(6), 693-707.