

〈論 文〉

## 특정크기 입자농축을 위한 대유량 슬릿형 2단 가상충돌기의 성능분석

박성호\* · 김상수\*\* · 오명도\*\*\*

(1990년 8월 9일 접수)

### Analysis of High Volume Slit Type Two-Stage Virtual Impactor for Particle Size Classification

Sung Ho Park, Sang Soo Kim and Myung Do Oh

**Key Words :** Virtual Impactor(가상충돌기), 50% Cut-off Stokes Number(50% 커트오프 Stokes 수), UV-Visible Absorption Spectrometry(비색정량법), Separation Efficiency(분리 효율), Concentration Efficiency(농축효율)

#### Abstract

A two-stage slit type virtual impactor based on the concept of the single stage virtual impactor has been designed, fabricated, and evaluated for the purpose of concentrating the suspended particles in the air with the size range of 1.8-4.5  $\mu\text{m}$  and handling large flow volume. Monodisperse methylene blue particles have been generated with vibrating orifice aerosol generator (VOAG). The separation efficiency and concentration efficiency have been measured by the UV-visible absorption spectrometry. Previous study for a single stage virtual impactor were used to determine the design parameters such as 50% cut-off sizes and dimensions of the two stage virtual impactor. The separation efficiency curve and 50% cut-off Stokes number(cut-off sizes) are not sensitive to the nozzle Reynolds number, but sensitive to the ratio between the minor flow rate and the total flow rate, The measured concentration efficiency was compared with the maximum concentration efficiency determined by the separation efficiencies of the first and the second stages. The differences between the measured and the maximum concentration efficiencies result from the wall loss due to the deposited particles on the internal walls inside the impactor.

#### 기 호 설 명

$A$ : 흡수(absorbance)	$I$ : 용액용기를 통과한 광의 세기(intensity)
$b$ : 용액용기(cell)의 길이	$I_0$ : 용액용기를 통과하기전의 광의 세기
$c$ : 용액의 농도	$L$ : 노즐길이
$C(D_p)$ : Cunningham 수정계수(correction factor)	$M_{im}$ : 2단 가상충돌기 입구에 들어오는 입자의 총질량
$D_p$ : 입자직경	$M_{ma,j}$ : $j$ 단 주유동의 필터에 포집된 입장의 질량
	$M_{mb,j}$ : $j$ 단 부유동의 필터에 포집된 입자의 질량
	$Q_{m,2}$ : 2단 부유동의 유량
	$Q_i$ : 2단 가상충돌기 입구에 들어오는 총유량

\* 한국과학기술원 기계공학과  
 \*\* 정회원, 한국과학기술원 기계공학과  
 \*\*\* 정회원, 생산기술연구원 연구개발본부

- S : 가속노즐 출구에서 수집노즐 입구까지의 거리
- Stk : Stokes수
- T : 가속노즐 목의 길이
- V : 가속노즐 목에서의 평균속도
- $W_j$  : j단 가속노즐의 폭
- $W_{rj}$  : j단 수집노즐의 폭
- $\epsilon$  : 흡수율( absorptivity)
- $\eta_c$  : 측정 농축효율
- $\eta_j$  : j의 분리효율
- $\eta_{mc}$  : 최대 농축효율
- $\mu$  : 공기의 점성
- $\rho$  : 공기의 밀도
- $\rho_p$  : 입자의 물질밀도( particle material density)

1. 서 론

공기중 또는 특정공간에 부유된 입자를 원하는 크기의 범위로 분리해서 농축하는 입자 수집장치는 대기오염 및 정화등의 환경산업에 필수적으로 요구되고 있다. 한편으로, 입자의 운동 메카니즘(mechanism)을 연구할 때 사용되는 분말 형태의 입자 또는 분무식 입자 발생기에서 발생하는 입자들은 매우 다양한 크기분포(polydisperse)를 가진다. 발생된 입자들을 원하는 특정크기의 비교적 균일한(monodisperse) 입자분포를 만들어 편리하고 신뢰성있는 실험자료를 얻기 위해서는 입자농축기에 대한 연구가 필수적이라 하겠다.

대부분의 입자농축기는 입자의 관성을 이용하여 크기를 선별한다. 이를 위하여 2단 이상의 관성충돌기(inertial impactor) 또는 가상충돌기(virtual impactor)로 구성된다. 그러나 관성충돌기를 이용한 경우 충돌판(impaction plate)에서 입자의 반동(bounce)현상의 포집성능에 영향을 주게되고, 충돌판에 채집할 수 있는 입장의 양이 한정되는 단점이 있다. 따라서 이러한 단점을 보완하고 효율적인 입자수집을 위해서는 가상충돌기가 많이 이용되고 있다. 가상충돌기(virtual impactor)는 Fig.1에서 보는 바와 같이 충돌판 대신에 상대적인 정체공기에 에어로졸(aerosol)을 충돌시키고, 많은 유량을 가진 주유동(major flow)의 유선을 직각방향으로 급격히 굴곡시켜 작은 관성력을 가진 작은 입자들은 유선을 따라 주유동으로 가고, 큰 관성력을 가

진 큰 입자들은 유선에서 벗어나 유량이 적은 부유동(minor flow)으로 가게하여 서로 다른 크기의 입자들을 분리하는 장치이다.

가상충돌기의 성능은 Forney<sup>(1)</sup>등에 의하여 많은 연구가 이루어졌다. Forney는 가속노즐 폭과 수집노즐 폭의 비 및 레이놀즈수에 따라 슬릿형(slit type)가상 충돌기에 대하여 실험적으로 연구한 바 있다. Masuda<sup>(2)</sup>는 청청 공기를 노즐 입구관의 중심부와 벽면에 분포시켜 원형(circular type)가상충돌기의 효율개선을 제시하였고, Marple과 Chien<sup>(3)</sup> 및 Kim과 Her<sup>(4)</sup>는 원형 가상충돌기에 대하여 레이놀즈수, 유량비, 수집노즐(receiving nozzle)의 형상 등에 대하여 수치적 계산을 하였으며, Chen<sup>(5)</sup>등은 이 변수들에 대하여 실험을 한 바 있다. 2단 가상충돌기에 대한 연구는 Chen<sup>(6)</sup>는 분말식 입자발생기에서 발생하는 입자들을 비교적 균일한 크기가 되도록 하기 위하여 원형 가상충돌기를 직렬로 연결하여 분리효율과 농축효율을 구한 바 있으며, Kauppinen<sup>(7)</sup>등은 대기중에 알레르기(allergy)를 유발하는 화분을 농축하는 연구를 위하여 2.4~7.2 $\mu$ m 범위내에 있는 입자들을 분리 농축하는 원형 2단 가상충돌기에 대하여 연구한 바 있다.

원형 가상충돌기에서는 많은 양의 에어로졸을 다루기 위해 노즐직경을 크게하면 관성변수(Stokes 수)가 작아지고 분리효율이 50%가 되는 입자의 50% 커트오프 직경(50% cut-off particle diameter)이 커지므로 대유량을 취급하기 어렵다. 그러나 슬릿형 가상충돌기는 대유량에서도 취급이 용이하고 주어진 유량과 입자의 커트오프 직경에 대해

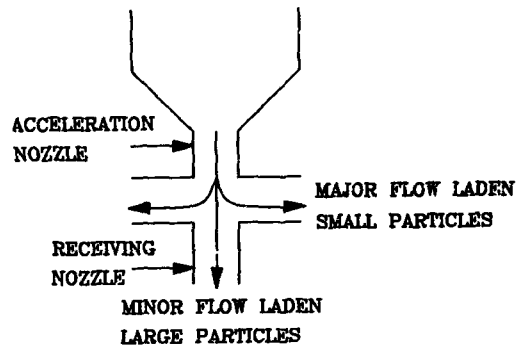


Fig. 1 Conceptual picture of particle separation in virtual impactor

여 레이놀즈수와 압력손실을 작게 하면서 충돌면적을 넓게하는 잇점이 있다.

따라서 본 논문에서는 800 lpm인 대유량을 처리하고 공기중 1.8~4.5 $\mu$ m 입자를 효율적으로 선별하여 농축시키는 슬릿형 2단 가상충돌기를 설계 제작하고 그 성능이 평가되었다. 즉, 첫째단과 둘째단에서 4.5 $\mu$ m과 1.8 $\mu$ m이 각각 50%의 효율로 분리되도록 설계되었다. 즉, 첫째단과 둘째단에서 4.5 $\mu$ m과 1.8 $\mu$ m이 각각 50%의 효율로 분리되도록 설계한다. 설계인자(design parameter)들을 결정하기 위하여 먼저 슬릿형 노즐의 1단 가상충돌기의 분리효율(separation efficiency)에 대한 실험을 통하여 50% 커트오프 Stokes수를 구하고, 이를 기초로 하여 2단 가상 충돌기의 주요치수와 작동조건을 결정하였다.

## 2. 실험

가상충돌기는 입자의 관성분리의 원리를 이용한 것으로서 큰 입자들은 전방에 있는 부유동으로 흘러가는 반면, 작은 입자들은 수집노즐 근처에서 굴곡된 주유동으로 대부분 흘러간다. 2단 가상충돌기는 이 과정을 한번 더 반복하게 된다(Fig.2). 가상충돌기의 주된 무차원수는 Stokes수로서 다음과 같이 정의 된다.

$$Stk = \frac{\rho_p C (D_p) V D_p^2}{18 \mu W_j} \quad (1)$$

Stokes수는 입자의 정지거리를 유동의 특성길이에 나눈것이며 이의 물리적 의미는 입자의 관성력과 항력의 비를 나타낸다. Stokes수는 무차원수이므로  $(Stk)^{1/2}$ 는 주어진 유동조건에서의 무차원 입자 직경을 의미한다.

### 2.1 실험장치

본 실험에서 사용된 실험장치의 계통도는 Fig.3과 같다. 장치들은 크게 균일한 크기의 입자를 발생시키기 위한 입자 발생장치, 입자를 분리 및 농축하는 2단 가상충돌기, 분리 및 농축효율을 입자의 크기에 따라 측정하기 위한 필터, 2단 가상충돌기로 부터 나오는 유량을 제어하고 측정하기 위한 장치, 그리고 필터에 부착된 입자의 질량을 측정하기 위한 Spectrophotometer와 입자의 수밀도(number density)와 직경을 점검하기 위한 광학

입자계수기(optical particle counter)로 구성된다.

본 실험에 사용된 입자는 메틸렌블루(methylene blue, 1.27g/cm<sup>3</sup>)를 메틸알콜과 증류수가 1:1로 혼합된 용매에 용해시켜 여러가지 농도의 용액을 이용하여 VOAG(Vibrating Orifice Aerosol Generator; TSI Model 3450)에 의하여 발생시킨다. 입자의 건조와 전기적인 중성을 보장하기 위하여 희박공기와 함께 Kr-85를 사용한 중화장치(neutralizer)를 통하여 입자를 2단 입자농축기로 보낸다.

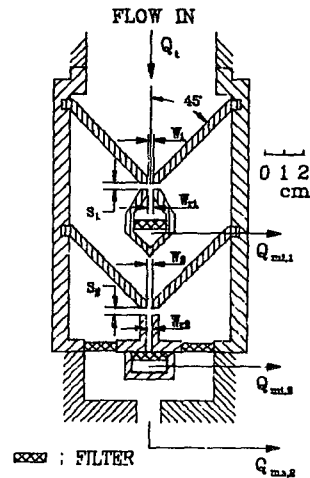


Fig. 2 Prototype of high volume two-stage virtual impactor

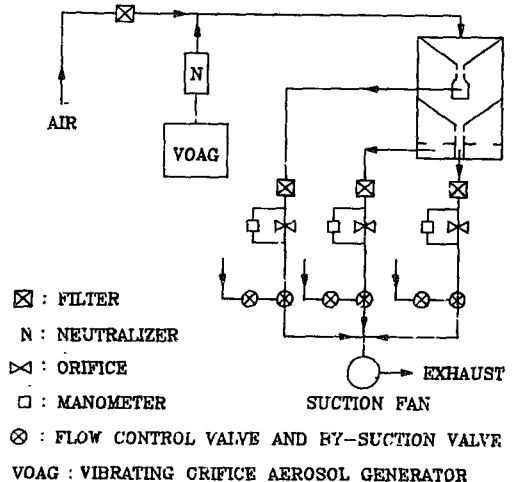


Fig. 3 Schematic diagram of the experimental apparatus

발생된 입자의 크기는 VOAG의 오리피스 직경, 압전소자(piezoelectric ceramic)의 진동 주파수, 메틸렌블루 용액의 농도 등에 의하여 결정되며 VOAG 매뉴얼에 준하여 조절하였다. 입자크기의 보정은 관성충돌기의 원리를 이용하여 발생된 입자를 표적에 부착시켜 광학현미경에 의한 사진과 광학 입자계수기(DAN model 82-3200)에 의하여 입자의 크기 및 수밀도를 측정하여 실시하였다. 본 실험에서 농축하려고 하는 입자의 크기분포가 1.8~4.5  $\mu\text{m}$  범위이므로, 본 실험을 위하여 발생한 균일한 크기의 메틸렌블루 입자는 1.4/2.5, 4.0/6.7, 10.0  $\mu\text{m}$ 의 세 부류, 5가지의 크기이다.

2단 가상충돌기 주요부분의 크기 및 작동조건은 1단 가상충돌기의 결과인<sup>(8)</sup>  $(Stk)_{50}^2 = 0.7$  ( $W_r/W = 1.3$ ,  $\alpha = 0.1$ ,  $S/W = T/W = 1.0$ )를 이용하여 설계 및 제작하였다. 각단에서의 가속노즐 입구 경사각은 Marple과 Chien<sup>(9)</sup>에 의하면 45°인 경우가 30°인 경우보다 수집노즐에서 입자의 벽면손실이 작으므로 45°로 하였다. 첫째단과 둘째단의 가속노즐 및 수집노즐의 길이는 800 lpm을 처리할 수 있도록 110mm로 하였다. 종래의 원형 2단 가상충돌기에서 Chen<sup>(6)</sup> 등은 16.44 lpm, Kauppinen<sup>(7)</sup> 등은 18.5 lpm의 유량을 처리하는 것에 비하면 본 슬릿형 2단 가상충돌기는 매우 많은 유량을 처리할 수 있다. 본 2단 가상충돌기의 첫째단과 둘째단에서 입자의 컷오프 직경이 각각 4.5  $\mu\text{m}$ 와 1.8  $\mu\text{m}$ 가 될 수 있도록 첫째단과 둘째단 가속노즐의 폭은 6.0mm와 2.0mm로 하였다. 유로의 연결은 Fig.3에서 보는 바와 같이 첫째단에서 분리된 4.5  $\mu\text{m}$ 보다 작은 입자를 포함하고 있는 주유동을 둘째단의 가속노즐로 연결되고, 둘째단의 부유동에서 1.8  $\mu\text{m}$ 과 4.5  $\mu\text{m}$  범위 내에 있는 입자들을 포집하도록 하였다.

2단 가상충돌기의 효율을 측정하기 위하여 Fig.2에서 보는바와 같이 세곳에 HEPA필터(hollongworth and vose, HB-5055)를 설치하였다. HEPA필터에 채집된 메틸렌블루 입자들의 무게는 비색정량법(UV-visible absorption spectrometry)에 의하여 측정하였다.

## 2.2 측정방법

각 필터에 채집된 입자는 균일한 크기이므로 입자의 질량을 측정하면 채집된 입자의 갯수를 알 수 있다. 질량의 측정을 위하여 전자저울을 사용하면 많은 실험시간이 소요되고 작은 입자의 경우는 측

정오차도 크므로, 본 측정에서는 비색 정량법의 원리를 이용하였는데 이는 다음과 같다. 평행 단색광(parallel monochromatic beam)이 두께  $b$ , 농도  $c$ 인 용액을 지날때, 광자(dphoton)와 흡수매질의 상호 작용에 의하여 광의 세기는  $I_0$ 에서  $I$ 로 감소되며, 흡수(absorbance)는 Beer & Lambert 법칙에 의하면 광이 지나가는 용액의 농도와 용기의 길이에 비례한다<sup>(6)</sup>.

$$A \equiv \log_{10}(I_0/I) = \epsilon bc \quad (2)$$

본 실험에 사용된 메틸렌블루 용액의 흡수( $A$ )는

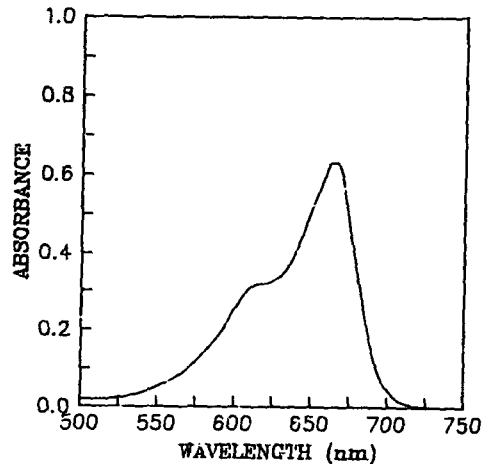


Fig. 4 Spectra of methylene blue obtained with a spectrophotometer

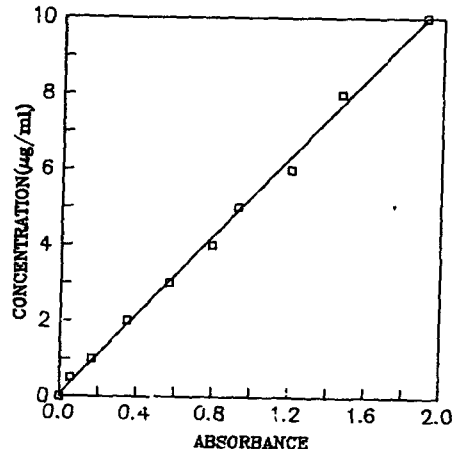


Fig. 5 Relationship between absorbance and concentration of the solution

spectrophotometer (varian, CARY-17)를 이용하여 파장에 따라 측정해 본 결과 Fig. 4에서와 같이 파장이 665nm에서 최고값을 보였으므로 농도 측정시 파장은 위의 값으로 고정하였고, 용액을 담은 용기의 길이는 1cm를 이용하였다. 식 (2)에서 흡수율을 모르므로 우선 알고있는 용액 여러가지의 흡수를 측정하여 흡수와 용액의 농도와의 관계를 최소자승법에 의하여 Fig. 5와 같이 구하였다. 각 실험에서 필터에 채집된 메틸렌블루 입자들을 증류수에 용해시켜 용액을 만든후 흡수를 측정하므로써 Fig. 5를 이용하여 용액의 농도 ( $\mu\text{g/ml}$ ), 즉 필터에 채집된 입자의 질량을 구하여 입자의 분리효율과 농축효율을 정의식에 따라 계산하였다.

성능실험을 시작하기 전에 충돌기의 입구에 필터를 설치하여, 10분의 실험시간 동안 각 입자의 크기에 따라 2단 가상충돌기 입구에 들어오는 입자의 질량을 측정한다. 각 입자크기에 따라 입자조건을 측정한후 충돌기 입구에 설치된 필터 지지대를 제거하고 성능실험을 수행하였다.

### 3. 실험결과

2단 가상충돌기 각단의 분리효율과 측정 농축효율(measured concentration efficiency)은 다음과 같다.

$$\eta_1 = \frac{M_{m1,j}}{M_{m1,j} + M_{mi,j}} \quad (3)$$

$$\eta_c = \frac{M_{mi,2} / Q_{mi,2}}{M_{in} / Q_t} \quad (4)$$

분리효율은 각 단에서 입자들이 부유동으로 분리되는 성능을 의미하며, 측정 농축효율은 둘째단 부유동에서의 단위 체적당 입자양(갯수)과 2단 가상충돌기 입구에서의 단위 체적당 입자양과의 비를 의미한다. 최대 농축효율은 첫째단과 둘째단의 분리효율로부터 계산된 농축효율로서 다음과 같이 정의한다.

$$\eta_{mc} = (1 - \eta_1) \eta_2 \frac{Q_t}{Q_{mi,2}} \quad (5)$$

측정 농축효율은 최대 농축효율보다 클 수 없으며 2단 가상충돌기의 내부벽면에 입자가 부착되는 벽손실이 없다면 측정 농축효율과 최대 농축효율은 같아질 것이다.

유량비가 일정할때 ( $\alpha_1 = 0.1$ ), Stokes수에 따른 첫

째단의 분리효율은 Fig. 6에서 보는 바와 같이 유량비가 같으면 레이놀즈수에 따라 분리효율은 거의 같은 곡선에 있음을 알 수 있다. 본 실험에서는 1.8~4.5 $\mu\text{m}$  범위내에 있는 입자들을 농축하기위하여 레이놀즈수를 크게 변화 시키지 못하였으나 Chen<sup>(6)</sup>등에 의하면 레이놀즈수가 970에서 8180까지 변할때 ( $Stk$ )<sup>1/2</sup>에 따른 분리효율은 같은 곡선상에 있다는 결과와 일치한다. 그러나 레이놀즈수가 변할때 ( $Stk$ )<sup>1/2</sup>에 따라 효율 곡선은 거의 같지만 입자직경에 따른 효율은 레이놀즈수에 따라 변하게 된다. 즉, 50% 분리효율을 갖는 입자의 커트오프 직경은 다음과 같이  $Re^{1/2}$ 에 반비례한다.

$$Stk = \frac{\rho_p C (D_p) V D_p^2}{18 \mu W_1} = \frac{Re}{18} \frac{\rho_p}{\rho} \frac{D_p^2}{W_1^2} \quad (6)$$

$$Re = \frac{\rho V W_1}{\mu}$$

같은 레이놀즈수 6672에 대하여 노즐폭 비가 1.3과 1.08에 따른 영향이 거의 없음을 볼수 있는데, 이는 Masuda와 Nakasita<sup>(10)</sup>에 의하면 노즐폭 비가 커질수록 ( $Stk$ )<sup>1/2</sup>은 감소하나 1.0에서 1.7사이에서는 감소하는 경향이 매우 미소하게 나타나고 1.7보다 커지면 ( $Stk$ )<sup>1/2</sup>이 다시 커진다는 결과와 비교할때 이해될 수 있다. 첫째단에서 유량비가 0.05, 0.1, 0.15로 변할때 ( $Stk$ )<sup>1/2</sup>에 따른 분리효율의 변화는 Fig. 7에 나타나 있다. 유량비가 커질수록 ( $Stk$ )<sup>1/2</sup>은 작아지는데 이는 Chen<sup>(6)</sup>등의 결과와 일치한다.

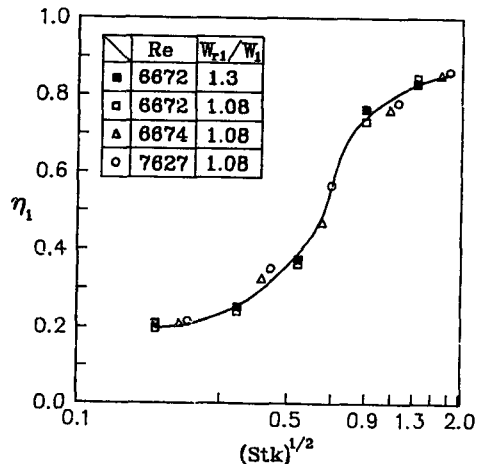


Fig. 6 First stage separation efficiency as a function of ( $Stk$ )<sup>1/2</sup> ( $\alpha_1 = 0.1$ )

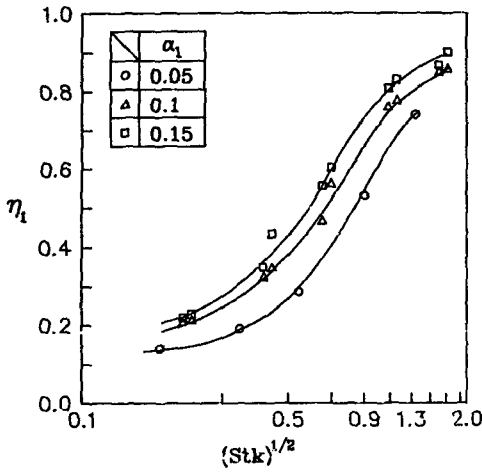


Fig. 7 First stage separation efficiency showing the effect of the flow rate ratio ( $\alpha_1 = Q_{m,1}/Q_t$ )

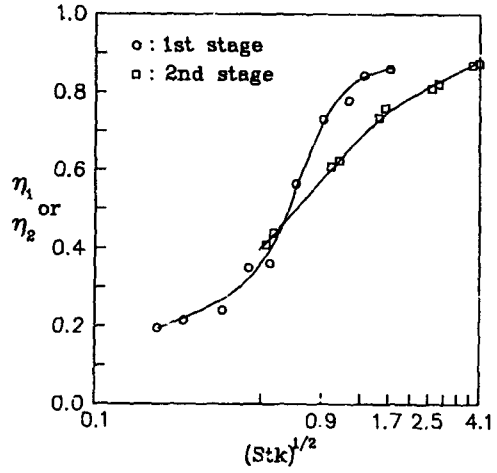


Fig. 8 Separation efficiency of the first and the second stage ( $\alpha_1 = \alpha_2 = 0.1$ )

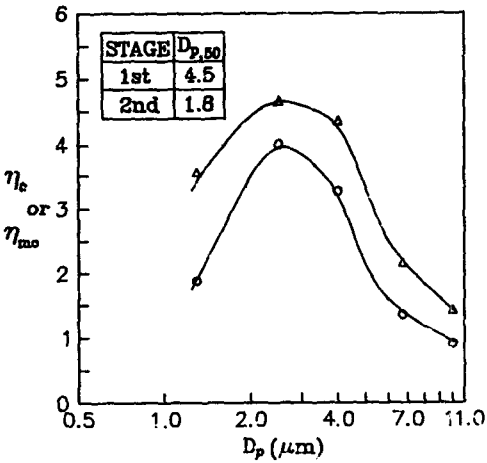


Fig. 9 Comparison between measured concentration efficiency(○) and maximum concentration efficiency(△)

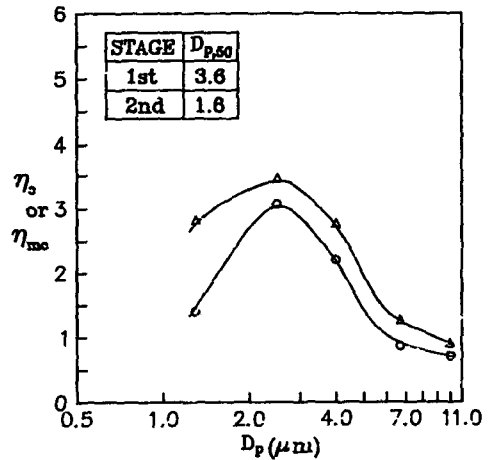


Fig. 10 Comparison between measured concentration efficiency(○) and maximum concentration efficiency(△)

Fig. 8은 첫째단과 둘째단에서의 분리효율을 무차원 입자직경으로 표현한 것이다. 각 단은 각각 하나의 곡선으로 나타남을 알 수 있다.

50%의 분리효율을 갖는 입자의 커트오프 직경을 첫째단과 둘째단에서 각각  $4.5\mu\text{m}$ 와  $1.8\mu\text{m}$ 로 하였을 때 측정 농축효율과 최대 농축효율은 Fig. 9에 나타나 있다. 농축효율이 2라는 뜻은 2단 가상충돌기의 입구에서 입자의 수밀도 보다 둘째단 부유동에서 입자의 수밀도가 두배라는 의미이다.  $1.8\mu\text{m}$ 과  $4.5\mu\text{m}$ 사이의 입자들은 측정 농축효율이 3배 이

상임을 볼 수 있는데, 이는 단위 체적당 3배 이상으로 입자들이 농축되었다고 볼 수 있다. 최대 농축효율은 식 (5)에서와 같이 첫째단과 둘째단의 분리효율로써 계산된 농축효율이다. 측정 농축효율과 최대 농축효율의 차이는 Fig. 9가 Fig. 10보다 크게 나타난다. 이는 첫째단의 커트오프 직경이 큰 Fig. 9가 Fig. 10보다 첫째단에서 둘째단으로 큰 입자들이 유동하기 때문이다.

50% 분리효율을 갖는 입자의 커트오프 직경을 첫째단과 둘째단에서 각각  $3.6\mu\text{m}$ ,  $1.6\mu\text{m}$ 로 하였을

때의 측정 농축효율과 최대 농축효율은 Fig. 10에 나타나 있다. Fig. 10은 Fig. 9보다 입자의 커트오프 직경의 범위가 좁으므로 비교적 농축효율 분포가 낮음을 알 수 있다.

#### 4. 결 론

공기중 부유하는 입자를 신속히 분리 및 농축해야 할 경우 단위 시간당 처리해야 할 유량이 많아야 하는데, 이러한 대유량을 처리하는 능력을 가진 슬릿형 2단 가상충돌기는 1.8~4.5 $\mu\text{m}$  범위 내에 있는 입자들을 농축하기 위하여 장치의 설계, 제작 및 성능실험이 최초로 수행되었다. 본 슬릿형 2단 가상충돌기는 종래의 원형 2단 가상충돌기 보다 43~48배의 유량을 처리할 수 있다. 측정방법으로서 비색정량법을 입자측정 기법에 최초로 도입하였다. 본 연구에서 관찰된 주된 결론은 다음과 같다.

- (1) 50% 커트오프 Stokes수는 유량비가 일정할 경우에 노즐 레이놀즈수에 무관하다.
- (2) 50% 커트오프 Stokes수는 유량비가 증가함에 따라 감소한다.
- (3) 본 실험에서 1.8 $\mu\text{m}$ 와 4.5 $\mu\text{m}$  범위에 있는 입자들을 농축한 결과 적어도 3배 이상의 농축효율을 얻을 수 있다.

#### 참 고 문 헌

- (1) Forney, L.J., 1976, "Aerosol Fractionator for Large-Scaling Sampling", Rev. Sci. Instrum. Vol. 20, No.5, pp. 1264~1270.
- (2) Masuda, H., Hochrainer, D., and Stober, W., 1979, "An Improved Virtual Impactor for Particle Clas-

sification and Generation of Test Aerosol with Narrow Size Distributions", J. Aerosol Sci., Vol. 10, pp. 275~287.

- (3) Marple, V.A. and Chien, C.M., 1980, "Virtual Impactors: A Theoretical Study", Environmental Science and Technology, Vol. 14, No.8, pp. 976~985.
- (4) Kim, S.S. and Her, J.Y., 1988, "Numerical Study on Virtual Impactor", 3rd International Symposium on Transport Phenomena in Thermal Control, August 14~18, Taipei, Taiwan, ROC, pp. 377~388.
- (5) Chen, B.T., Yeh, H.C., and Cheng, Y.S., 1985, "A Novel Virtual Impactors: Calibration and Use", J. of Aerosol Sci., Vol. 16, No.4, pp. 343~354.
- (6) Chen, B.T., Yeh, H.C. and Rivero, M.A., 1988, "Use of Two Virtual Impactors in Series as an Aerosol Generator", J. of Aerosol Sci., Vol. 19, No. 1, pp.137~146.
- (7) Kauppinen, E.I., Jappinen, A.V.K., Hillamo, R.E., Rantioentimarki, A.H., and Koivikko, A.S., 1989, "A Static Particle Size Selective Bioaerosol Sampler for the Ambient Atmosphere", J. of Aerosol Sci., Vol. 20, No.7, pp.829~838.
- (8) Park, S.H., 1989, "An Experimental Study on the Performance of the High Volume Rectangular Jet Virtual Impactor", M.S. Thesis, KAIST.
- (9) Skoog, D.A., 1985, "Principles of Instrumental Analysis", CBS College Publishing, New York, pp. 160~178.
- (10) Masuda, H. and Nakasita, S., 1988, "Classification Performance of a Rectangular Jet Virtual Impactor-Effect of Nozzle Width Ratio of Collection Nozzle to Acceleration Jet", J. of Aerosol Sci., Vol. 19, No.2, pp.243~252.
- (11) Chen, B.T. and Yeh, H.C., 1987, "An Improved Virtual Impactor: Design and Performance", J. of Aerosol Sci., Vol.18, No.2, pp. 203~214.