

전기장이 형성된 관성 충돌기에서 대전 입자의 거동과 부착 특성에 대한 연구

박형호* · 김상수**

(1998년 3월 12일 접수)

Pre-Charged Particle Deposition in an Impactor subjected to an Electric Field

Hyung-Ho Park and Sang-Soo Kim

Key Words : Electrostatic Precipitator(전기 집진기), Two-Stage Electrostatic Precipitator(2 단식 전기 집진기), Impactor(관성 충돌기), Corona Discharge(코로나 방전), Stagnation Flow(정체 유동), Light Scattering Method(광 산란법)

Abstract

Effect of electrostatic and inertial forces on the pre-charged particle deposition was theoretically and experimentally studied by introducing the inertia impactor subjected to an electric field. To derive the analytic solution, we assumed that a flow was an ideal stagnation flow, a particle had saturation charges, and the electric field within the test section was uniform. On the other hand, Al_2O_3 particle groups were used as the test particles, which mean sizes were $1\mu m$, $3\mu m$, and $5\mu m$. To measure the deposition efficiency, the light scattering method was used. The results showed that the deposition efficiency was minimized at a certain nozzle velocity as increasing the nozzle velocity, only if the electric force was applied. As the electric field strength increased, $Stk_{50}^{1/2}$ was decreased, and its decreasing rate was reduced with increasing the flow velocity. Moreover the existence of electric field was against the cut-off performance of the inertia impactor.

기호설명

B : 입자이동도
 C : 슬립 보정계수
 D_h : 수두 직경
 D_p : 입자 직경
 D_{50} : 집진입경
 e : 전자 전하량
 E : 집진부 전기장
 E_{ch} : 대전부 전기장
 m_p : 입자 질량
 N : 노즐 수
 q : 입자 전하량
 Q : 총 체적 유량
 q_{in} : 포화 전하량

Re : 제트 레이놀즈 수, $2\rho W U_0/\mu$
 S : 제트-평판 거리
 Stk : 스토크 수, $\rho_p U_0 C D_p^2 / 9\mu W$
 Stk_{50} : 50% 부착효율을 갖는 스토크 수
 t : 시간
 T : 노즐 목 길이
 u : 유동 속도
 u_p : 입자 속도
 U_0 : 평균유속
 V : 집진부 전압
 V_{ch} : 대전부 전압
 W : 노즐 폭
 ϵ_p : 유전율
 η : 입자부착효율
 μ : 동점성계수
 ρ : 공기 밀도
 ρ_p : 입자 밀도
 τ : 임팩터 특성시간

* 한국과학기술원 대학원 기계공학과

** 회원, 한국과학기술원 기계공학과

1. 서론

대기오염물질을 효과적으로 제거하기 위해 오염물질을 특성별로 분류하는 것이 중요하다. 특히 입자상 물질인 경우, 인체에 미치는 영향이나 분진 제거 장치의 가동조건은 오염물질의 크기에 밀접한 관계를 갖기 때문에 입자를 크기별로 분류할 필요가 있다.

관성 충돌기는 공기류에 부유된 입자를 크기별로 분류·수집하는 장치로서 대기오염물질의 특성을 연구하는데 중요한 실험장치로 사용된다. 관성 충돌기의 장점은, 장치의 크기가 작아 이동성이 좋고 구성이 간단하며, 싸이클론 분류기 등에 비해 동력을 작게 소모하며 입자의 질량분포를 비교적 정확하고 손쉽게 측정할 수 있다는 것이다. 반면, 관성 충돌기는 입자의 순수 관성힘에 의존하여 작동하기 때문에 포집된 입자의 양이 적어 신뢰성 있는 계측을 하기위해서 장시간 수집이 필요하다. 하지만 이러한 경우 관성 충돌판에 부착된 입자의 일부가 부착면으로부터 떨어져 나가는 재유입현상 등으로 인하여 어려움이 있다.

관성 충돌기에 대한 연구는 비교적 부착기구가 간단하여 많은 연구자에 의해 연구되어 왔다. Fuchs⁽¹⁾는 관성 충돌기의 유동조건을 이상화하여 이론적인 해석을 수행했는데, 그는 관성 충돌기의 효율은 스토크 수에 의해 지배된다고 하였다. 따라서 관성 충돌기의 효율은 이론상 일정한 크기이상의 입자에 대해서는 100% 효율을 갖고 그보다 작은 입자에 대해서는 0%가 된다. 그러나 Rader와 Marple⁽²⁾에서 언급된 바와 같이 여러 연구자의 실험결과를 보면, 관성 충돌기의 효율은 스토크 수에 대하여 S자 모양의 효율곡선을 갖는 것으로 보고되었다. 이와 같은 차이는 Fuchs의 해석이 유동을 이상화함으로써, 실제 관성 충돌기의 효율에 영향을 미치는 유동조건과 관성 충돌기의 기하학적 형상 등을 무시하였기 때문에 나타난 것이다. 스토크 수로 대변되는 입자특성과, 유동조건, 그리고 기하학적 조건을 고려한 관성 충돌기의 효율에 대한 연구가 Marple⁽³⁾에 의해 행해져 왔다. Marple은 유동장과 입자체적을 수치모사함으로써, 관성 충돌기의 효율이 유동조건과 설계변수의 변화에 영향을 받음을 보였고, 각 조건에 대하여 스토크 수가 변함에 따라 효율곡선이 S자의 상반부의 형태를 보인다고 하였다. 이러한 결과는 실험결과와 차이를 보이는데, 이것은 관성 충돌기의 입자부착기구가 관성력만으로 이루어진다고 가정하였기 때문이다. 또한 Jaenicke와 Blifford⁽⁴⁾

의 실험은 입자가 균일할수록 부착효율의 S자 곡선이 좀더 날카롭게 됨을 보였다. Marple과 Willeke⁽⁵⁾는 관성 충돌기의 설계를 위한 수치해석을 수행하여 절단입경은 노즐의 크기와 수, 그리고 관성 충돌기를 지나는 유체의 총유량에 관계가 있다고 하였다.

최근의 연구경향을 보면, 전기력을 이용한 입자제거 연구가 활발하게 이루어지고 있다. Zhao 등⁽⁶⁾의 실험은 유선에 수직으로 평판을 설치하고 평판과 전극에 코로나 방전을 일으키면 입자가 평판에 부착되는 효율이 증가함을 보여주고 있다. 이를 관성형 정전 집진기라고 한다. 또한 서용재와 김상수⁽⁷⁾의 수치연구 결과, 이단식 정전 집진기의 집진부에 터울 설치하면 전기력에 관성력이 부가되어 입자부착효율이 평행판과 차이를 가진다고 하였다. 특히 전기력이 일정하면 유속의 변화에 대하여 최소 집진효율이 나타나는 때가 있음을 보였다.

이러한 연구는 관성 충돌기의 효율과 성능향상의 가능성을 보여준다. 따라서 우리는 전기장이 형성된 관성 충돌기에 미리 대전된 입자를 공급하여, 관성 충돌기의 분리성능과 입자부착효율에 미치는 전기력의 효과를 평가하고자 한다. 이를 위하여 정전 관성 충돌기를 이상적인 조건에서 해석하여, 여러 가지 물리량(유속, 전기장, 입자크기 등)의 변화에 따른 입자의 거동과 부착효율을 평가하고, 실험을 통해 이론해석의 정당성을 확인할 것이다.

2. 이론적 배경

2.1 관성 충돌기

Fig.1은 관성 충돌기의 전형적인 그림이다.

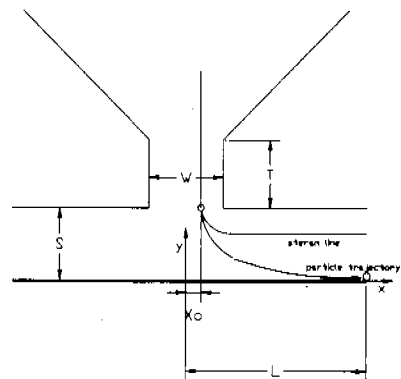


Fig. 1 Schematic Diagram of Impactor.

관성 충돌기는 노즐과 충돌판으로 구성되어 있다. 관성 충돌기의 효율에 영향을 미치는 변수는 유체특성 변수, 입자특성 변수, 관성 충돌기 설계변수가 있다. 따라서 관성 충돌기의 효율은 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$\eta = f(U_0, \rho, \mu, D_p, \rho_p, W, T, S) \quad (1)$$

식(1)을 무차원 해석을 하면 다음과 같은 무차원 수로 효율이 결정된다.

$$\eta = f(Re, Stk, S/W, T/W) \quad (2)$$

식(2)에서 Re 은 레이놀즈 수로서 제트의 수두직경 D_n 에 근거를 두었으며 원형 노즐인 경우 D_n 는 W와 같고, 사각 노즐인 경우 D_n 는 2W와 같다. 또한 Stk는 스토크 수로서, 입자의 무차원 크기는 스토크 수의 제곱근으로 정의된다.

$$\sqrt{Stk} = \sqrt{\frac{\rho_p C U_0 D_p^2}{18 \mu W/2}} \quad (3)$$

노즐의 폭은 Stk_{50} 에 대응하는 운동학적 절단입경 D_{50} 에 대하여 결정되며, 사각 노즐인 경우 다음과 같이 표현된다.

$$W = \left(\frac{\rho_p Q C D_{50}^2}{9 \mu Stk_{50}} \right)^{1/2} \quad (4)$$

식(4)에서 Q는 유량을 나타낸다. $Stk_{50}^{1/2}$ 은 기하학적 형상이나 유속에 민감하게 반응하지 않는 것으로 알려져 있으며, 그 값은 0.71이다.⁽⁸⁾

2.2 코로나 방전과 입자의 대전

코로나 방전에 의한 입자의 대전은 전기장 대전과 확산대전이 있으며, 크기가 $1\mu m$ 이상인 입자는 주로 전기장 대전에 의해 대전된다. 이때 입자가 전기장 내에 거주하는 시간이 대전특성시간 보다 충분히 크면 입자는 완전 대전되며, 완전 대전량은 다음과 같다.⁽⁹⁾

$$q_{sat} = \left(\frac{3\epsilon_p}{\epsilon_p + 2} \right) \left(\frac{E_{ch} D_p^2}{4e} \right) \quad (5)$$

3. 이론해석

3.1기체 유동장

본 연구의 해석 영역은 Fig. 1과 같다. 기체 유동장은 다음과 같은 가정과 초기조건을 이용하여 해석한다.⁽⁸⁾

- (1) 관성 충돌판의 길이는 무한히 크다.
- (2) 유동은 Potential Flow 이다.

초기조건: $x(t=0) = x_0, y(t=0) = S$

따라서 유선을 시간의 함수로 나타내면 다음과 같다.

$$x = \exp\left(\frac{U_0}{S}t + \ln x_0\right) \quad (6)$$

$$y = \exp\left(-\frac{U_0}{S}t + \ln S\right) \quad (7)$$

3.2 입자운동 해석

입자운동을 해석하기 위해 다음과 같은 가정을 설정하였다.

- (1) 입자간의 상호작용이 무시 가능한 희박 농도분포 이다.
- (2) 입자의 형상은 구형이고, 입구에서 입자의 속도는 유동의 속도와 같다.
- (3) 입자에 작용하는 체력(body force)은 쿨롱(Coulomb) 힘만 고려한다.
- (4) 대전된 입자의 전하에 의한 전기장 변화는 무시한다.
- (5) 고전압부와 접지부사이의 전기장은 균일한 분포를 갖는다.
- (6) 집진판은 입자에 대하여 무한 sink로 가정한다.

단일 입자의 운동을 기술하기 위해서 다음과 같이 단일입자에 작용하는 힘을 고려하여야 한다.

$$m_p \frac{du_p}{dt} = \sum_i F_i \quad (8)$$

입자에 작용하는 힘은 유체의 점성력, 전기력, 자기력, 중력 등이 있으나, 정전 관성 충돌은 점성력과 전기력에 의해 지배되기 때문에 다음과 같이 표현된다.

$$m_p \frac{du_p}{dt} = \frac{3\pi\mu D_p}{C} (\mu - u_p) + qE \quad (9)$$

점성력은 좌변의 첫째 항과 같이 유체와 입자간의 상대속도에 비례한다. 식(9)에서 $3\pi\mu D_p$ 는 Stokesian drag로서 입자의 크기가 기체분자의 평균 자유이동 거리보다 매우 클 때 위 식의 C 값이 1이 된다. 따라서 유동 기체가 공기라고 하면, $1\mu\text{m}$ 보다 큰 입자에 대하여 C의 값은 거의 1과 같다.⁽⁶⁾

3.3 입자운동 방정식

다음은 본 연구에서 주어진 계산영역에 대한 입자운동의 이론해석이다. 여기에서 전기력은 y축 방향으로만 작용한다고 설정하였다.

x-축 방향

$$\tau \frac{d^2x}{dt^2} + \frac{dx}{dt} - \frac{U_0}{S}x = 0 \tag{10}$$

y-축 방향

$$\tau \frac{d^2y}{dt^2} + \frac{dy}{dt} + \frac{U_0}{S}y = EqB \tag{11}$$

여기에서

$$\tau = \frac{1}{18} \frac{D_p^2}{\mu} \rho_p, \quad B = \frac{C}{3\pi\mu D_p} = \frac{\tau}{m}$$

식(10)과 식(11)에서 τ 는 유동에 대한 입자운동을 나타내는 특성시간으로서, 정지거리는 입자의 초기속도와 τ 의 곱으로 표현된다. 그리고 E와 q는 좌표 값과 무관하므로 좌표에 대하여 상수로 취급할 수 있다. 또한 q는 입자의 전하량은 입자의 거주시간이 입자대전 특성시간보다 매우 크면 완전대전 되었다고 할 수 있다⁽⁶⁾. 따라서 q를 q_{sat} 로 놓을 수 있다. 또한 B의 값은 입자이동도(Particle Mobility)를 나타내며, 일정한 단위 유도력에 의해 입자에 주어지는 속도가 된다. 초기조건은 다음과 같다.

$$x = x_0, \quad y = S, \quad \frac{dx}{dt} = 0, \quad \frac{dy}{dt} = -U_0 \tag{12}$$

식(12)의 초기조건으로 식(10)과 식(11)을 풀면 입자의 궤적을 시간의 함수로 나타낼 수 있다.

3.4 입자부착효율

입자가 집진판에 부착되는 조건은 입자중심 의 y 좌표값이 입자의 반경이 될 때로 하였다. 입자의 부착효율은 다음의 과정을 통해 구해진다.

- (1) 입자가 노즐입구에서 균일한 분포로 투입된다.
- (2) 입자중심의 위치가 $(L, D_p/2)$ 이 되는 입자가 입구에서 출발할 때 갖는 x축 좌표 x_0 값을 구한다.
- (3) 효율은 x_0 에 대한 노즐 폭 절반의 비로 나타난다.

$$\eta = \frac{x_0}{W/2} \tag{13}$$

실제 계산에서는 입자중심의 y 좌표가 최초로 $D_p/2$ 이 될 때의 시간을 구하고 이 시간을 x축 운동식에 대입하여 x의 값이 집진판의 절반이 되게 하는 입구의 출발위치 x_0 를 구하게 된다. Table 1은 이론해석에 사용된 물리량들이다.

Table 1 Physical Properties.

Gas	Air	Particle	Al ₂ O ₃
μ	$1.82 \times 10^{-4} \text{Nsm}^{-2}$	ρ	1.2kgm^{-3}
Re	550 ~ 4000	V_{ch}	10 kV
ϵ_p	8.8	V	0.0 ~ 9.0kV
D_p	1.0 μm ~ 5.0 μm	ρ_p	3.965g/cm ³
W	5mm	S	5mm
T	5mm	L	20mm

4. 실험

4.1 실험조건

기존 연구⁽²⁾에서 저속과 고속에서 입자 부착효율이 차이를 보이기 때문에, 유속에 의한 영향을 평가하기 위해 노즐 레이놀즈 수를 500 ~ 3000 사이의 값을 선택했다.

$Stk_{50}^{1/2}$ 의 값이 사각 노즐인 경우, 대략 0.71의 값을 가짐으로 이 범위를 중심으로 효율곡선을 얻기 위해, 스토크 수의 값을 0.1 ~ 1.3 사이의 값을 설정하였다

입자 부착부에 유입되는 입자를 완전대전 시키기 위해 10kV의 전압을 대전부에 공급하여 입자를 대전 시켰고, 입자 부착부에 0kV ~ 9kV까지의 전압을 부가하여 전기력에 의한 효과를 평가 하였다.

4.2 실험장치

Fig.2는 실험장치도를 나타낸다. 입자발생장치에서 공급되는 입자는 외부 공기와 함께 실험장치로 유입된다. 공기에 부유된 입자는 대전부를 통과하면서 대전 되고, 입자 부착

부에서 전기력과 판성력을 받아 집진판에 부착된다. 또한 입자 부착부에 부착되지 못한 입자는 하류로 흘러가 확산관 장치에 의해 부착 효율이 측정된다. 또한 수축관(Contraction Part) 입구에서 출구까지의 길이는 250mm로 입구 폭 120mm에 대하여 2.1 배로 길이를 충분히 길게 하여 수축관 출구에서 유동이 균일한 분포를 갖도록 하였다. 또한 수축관 출구의 폭을 5mm로 하여 입구 폭과 출구 폭의 축소비가 24 : 1이 되도록 하여 실험에 필요한 충분한 유속을 얻었다.

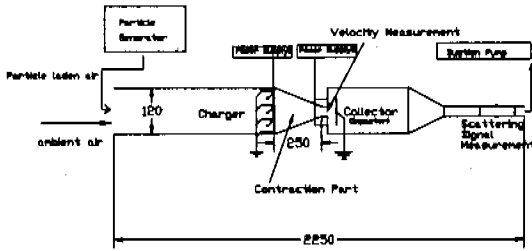


Fig. 2 Experimental Arrangement.

Fig.3은 입자발생장치이다. 입자발생장치는 균일한 양의 입자를 공급하는 모터-벨트부와 공급된 입자를 실험부로 불러주는 Blowing-air Chamber로 구성되어 있다. 입자공급량은 모터 회전속도와 벨트 위에 깔린 입자량의 두께에 의해 결정된다.

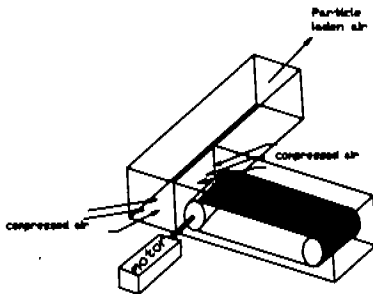
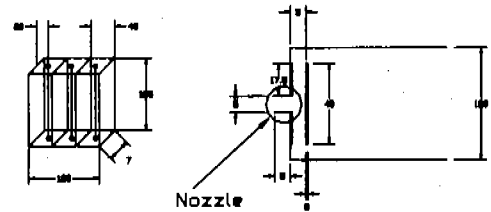


Fig. 3 Particle Generator.

본 실험에서 입자를 대전 시키기 위해 양 코로나 방전을 이용하였다. 또한 유입되는 입자가 완전 대전 되고, 접지부에 대전입자가 부착되는 것을 최소화 하기위해 Fig.4(a)와 같이 접지판은 소폭으로 다중 설치하였다. 이때, 코로나방전은 약 6.5kV에서 일어나며, 충분한 입자 대전량을 얻기 위해 실험 부가 전압은 10kV로 설정하였다. 대전부(Charger)의 대전특성시간은 평균전기장에 대하여 5×10^{-5} sec 이고, 대전부 거주시간은 4×10^{-2} sec로서 입자가 완전대전 되었다고 볼 수 있다.

Fig.4(b)는 입자 부착부(Collector)의 구조를 나타낸다. 입자 부착부는 판성충돌기와 전극으로 구성되어 있다. 전극사이 간격은 5mm로 하였고 고전압부는 17.5mm x 180mm 구리판 두개로 구성되어 있다. 노즐속도 6m/sec에 대하여 D_{50} 가 4.5 μ m가 되도록 하기위해 노즐 폭 W를 5mm로 하였고, 노즐 폭과 깊이의 축소비는 1 : 32로 하여 2차원 유동이 되도록 하였다. 이 노즐 폭을 기준으로 노즐 목 길이, 그리고 노즐출구-충돌판 간 거리의 비는 각각 1이 되도록 하였다. 또한 충돌판의 폭은 40mm로 하였다.



(a) Charger

(b) Collector

Fig. 4 Charger and Collector.

Fig.5는 광 산란법을 이용한 입자부착 효율 측정 장치이다. 입자의 크기가 일정하다면 광 산란량은 입자의 수밀도에 비례한다. 실험에 사용한 광원으로 632.8nm의 파장을 갖는 He-Ne Laser를 이용하였고, 산란신호는 광전자 증배관을 이용하여 수집하였다. 그리고 노이즈를 제거하고 신호를 증폭하기 위해 LOCK-IN AMP를 사용하였다. 또한 앞에서 주어진 레이놀즈 수를 얻기 위해, 실험 유량은 108 ~ 756 lpm 하였다. 유속은 열선 유속계를 이용하여 측정하였고, 평균유속을 구하여 직경 8mm 오리피스 유량계를 보정하였다.

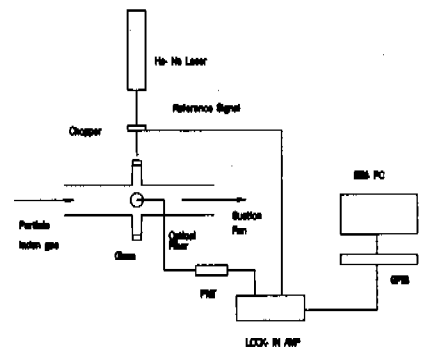


Fig. 5 Optical Arrangement for Particle Number Density Measurement.

Fig.6은 입자 부착부 입구에서 속도분포

이다. 이 그래프에서 벽면을 제외하면 전체적으로 균일한 속도분포를 갖는 것을 알 수 있다.

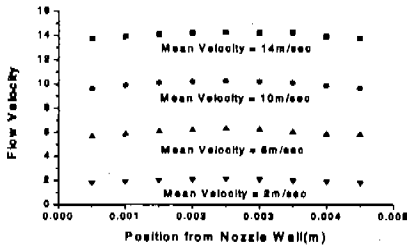


Fig. 6 Nozzle Velocity Distribution.

4.3 실험내용 및 방법

산화 알루미늄(Al_2O_3) 입자를 사용하였고, 입자크기를 보정하기 위해 입자의 균을 SEM 사진으로 촬영하였다. 입자의 모양은 균일하지 않았으며 이것을 같은 면적의 지름을 갖는 원형 입자로 환산하였다. 평균크기가 0.98, 3.05, 4.95 μm 인 입자 군은 평균에 대한 표준편차가 각각 2.8%, 4.4%, 4.9%였다. 따라서 비교적 단분산 입자에 가깝다고 볼 수 있다. 그런데 광 산란량은, 입자의 크기가 1 μm 이상이면, 입자의 단면적에 비례하기 때문에 입자의 크기에 대한 면적 분율의 분포를 고려하여야 한다. Fig.7은 3 μm 에 해당하는 입자군에 대한 입자의 크기분포이다. 그래프는 평균에 해당하는 입자의 수밀도와 면적밀도에 대한 비율로 환산되었다. 두 그래프의 분포는 거의 일치하는 것으로 나타났다. 즉 면적분포는 평균에 대하여 대칭적인 분포를 가지며 수밀도 분포와 마찬가지로 면적분포의 편차도 아주 작다. 따라서 광 산란량을 이용하여 입자의 수밀도를 측정하는 것이 유효하다고 할 수 있다. 또한 입자가 집진부를 지나가면 입자의 평균크기가 작아져 입자의 크기분포가 편차를 갖는 경우 광 산란량을 이용하여 부착효율을 구하는 것은 오차를 수반할 수 있으나, 평균에 해당하는 입자의 수

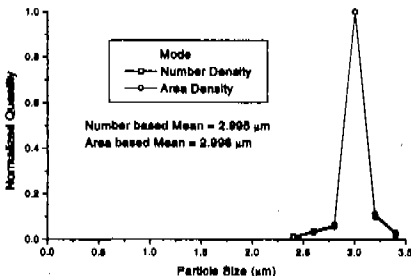


Fig. 7 Particle Size Distribution for 3 μm .

밀도나 면적밀도가 압도적으로 크기 때문에 그 영향도 무시될 수 있다.

Fig.8은 방전부와 입자 부착부에서 측정된 총 전류량이다. 부파전압에 따른 총전류량의 변화를 조사하기 위하여 집진판과 집지극 사이에 마이크로 전류계를 설치하여 총 전류량을 측정하였고, 집진판과 집지극 사이에 1000:1 probe를 병렬로 연결하여 부파되는 전압을 측정하였다. 방전부의 총 전류량을 살펴보면, 약 6.5kV에서 코로나 방전이 시작되고, 총 전류량은 거의 인가 전압의 제곱에 비례하여 증가한다. 또한 유속을 변화시켜도 총 전류량에는 차이가 없어보이는데, 이는 코로나 방전 시 이온이 집지극으로 이동하는 속도가 매우 커서 유동에 의한 영향을 거의 받지 않기 때문이다. 한편 입자 부착부의 인가전압을 16kV까지 상승시키는 동안, 집진판 모서리의 영향으로 전류가 발생했으나 값이 아주 작아 무시할 수 있다. 따라서 입자 부착부는 코로나 방전을 유발시키지 않고 대전입자에 전기력을 가한다고 볼 수 있다.

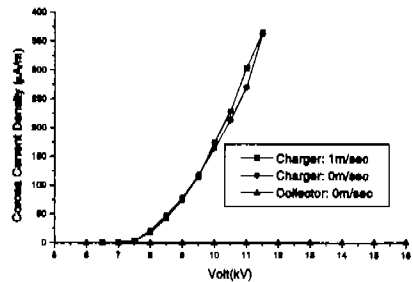


Fig. 8 Current-Voltage Characteristics.

Fig.9은 광 산란 신호를 받아서 20초 간격으로 평균하여 그린 그래프이다. 400초 동안 광 산란 신호는 평균에 대하여 약 9% 편차를 갖는다.

부착효율은 광 산란량의 변화를 측정하여 구하게 되는데, 입자의 크기가 일정하면 산란광의 양은 입자의 수밀도에 비례한다. 입자의 부착효율을 측정하기 위해, 입자 부착부의 집진판이 제거되었을 때의 입자의 광 산란량을 기본신호로 하였다. 이후 집진판을 설치하였을 때의 신호를 측정하여 판성력과 전기력에 의한 입자제거 효율을 구하였다. 전체 실험조건에 대하여 각각 3회씩 측정하였고, 효율평균에 대한 편차량은 최소 6%에서 최대 11%였다.

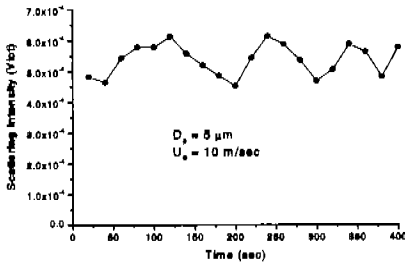


Fig. 9 Characteristics of Particle Generator.

5. 결과 및 고찰

5.1 입자궤적

Fig.10(a)은 노즐출구 유속이 10m/sec 일때, 유선의 모습이다. 그림을 보면, 노즐에서 충돌판까지 거리에 비해 반쪽 충돌판의 길이가 4 배가 됨으로, 충돌판을 벗어날 때, 유선은 충돌판에 매우 가까이 접근해 있으며 충돌판에 대하여 평행하게 보인다. 따라서 충돌판의 끝으로 갈수록 관성력에 의한 입자부착효과는 급격히 떨어지게 된다. Fig.10(b)는 위와 동일한 속도에서 3μm 입자의 궤적을 나타낸 것이다. Fig.10(c)과 Fig.10(d)는 동일한 조건에서 전압을 1kV 와 9kV 를 가해주었을 때 입자궤적을 나타낸 것이다. Fig.10(b), Fig.10(c), Fig.10(d)를 보면 입자부착효과는 0.2, 0.8, 1.0으로 증가한다. 이것은 입자에 관성력만이 작용하면 충돌판 끝으로 갈수록 유선이 충돌판에 평행하여지기 때문에 유선과 입자궤적의 방향이 같아져, 관성력을 거의 받지 않지만, 전기력이 함께 작용하면 관성력이 작아지는 충돌판 하류의 입자가 충돌판 방향으로 전기력을 받게 되어 부착 효율이 증가하기 때문이다.

5.2 입자크기와 부착효율의 관계

본 연구에서 수행한 이론해석은 Rader 와 Marple 의 계산과 비교하여 잘 일치함을 알 수 있다. Fig.11(a)은 순수 관성 충돌기에 대한 효율 곡선 이다. 여기에서 solid symbol 은 이론해석의 결과물 나타내고, hollow symbol 은 실험결과를 나타낸다. 스토크 수가 큰 경우 Rader 와 Marple 이 계산한 결과와 차이가 나타나는데, 이것은 주로 관성충돌기 입구의 제트유동의 차이에서 기인한다.

본 연구의 이론해석은 제트유동을 uniform flow 로 가정하였기 때문에 벽면부근에서 유

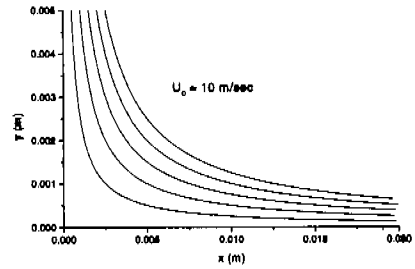


Fig. 10 (a) Stream line

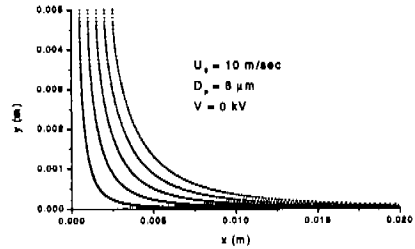


Fig. 10 (b) Particle Trajectory

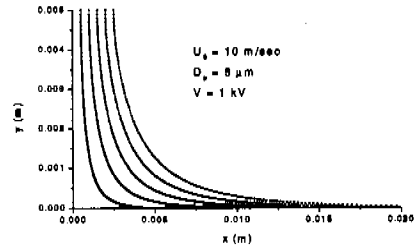


Fig. 10 (c) Particle Trajectory

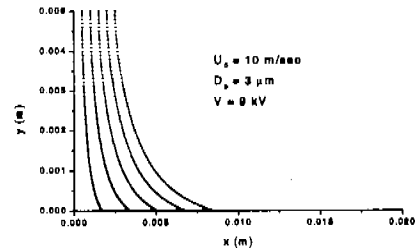


Fig. 10 (d) Particle Trajectory

속이 작아져서 생기는 관성력 감소효과가 무시되었다. 그리고 관성력은 입자크기의 세제곱에 비례하며 평균유속이 일정한 경우 스토크 수의 제곱근은 무차원 입자크기를 나타내기 때문에, 벽면에서 관성력 감소효과는 스토크 수가 증가함에 따라 좀더 크게 나타난다. 그런데 이러한 차이에도 불구하고 관성충돌기의 특성을 나타내는 $Stk_{50}^{1/2}$ 의 값은 잘

일치하기 때문에 본 연구의 이론해석은 충분히 유효하다고 할 수 있다.

순수 관성 충돌기의 효율은 스톡 수와 레이놀즈 수의 함수로 표현되지만, 노즐의 레이놀즈 수가 500 ~ 4000 까지 변하는 구간에서는 스톡 수의 영향이 지배적임을 알 수 있다. Fig.11(b), Fig.11(c), Fig.11(d)를 보면, 효율곡선이 이론 값과 실험 값 모두 스톡 수가 일정할 때, 레이놀즈 수가 증가하면 같은 스톡 수에 대하여 효율이 감소하는 것을 알 수 있다. 이것은 같은 스톡 수라 하더라도, 유속이 커지면 입자의 크기가 줄어들어 같은 전압에서 전기력을 적게 받기 때문이며, 또한 입자에 전기력을 미칠 수 있는 시간도 짧아지기 때문이다. 여기에서 실험과 이론 값의 차이는 다음과 같은 원인에서 기인하는 것으로 보인다. 첫째, 입자크기가 평균값에 대하여 약간의 편차를 갖고있어서 함께 섞여있는 작은 입자가 충분히 제거되지 못했기 때문이며, 둘째, 충돌판 표면에 유입된 입자가 충돌 후 튕겨 나가거나 일단 부착된 입자가 유동에 의해 다시 뿔살려 나가는 효과에 의한 것으로 생각된다. 이것은 Marple 과 Willeke⁽⁵⁾의 연구에서 언급되었듯이, 표면처리 방법에 따라 집진효율이 영향을 받기 때문이다. 셋째, 입자 부착부 입구의 유속이 변하면 부근에서 낮기 때문에 입자가 충분한 관성력을 갖지 못하여 부착효율이 감소된 것으로 보인다. 마지막으로 실험에서 노즐출구 단면은 전기력을 부가하지 못하였기 때문에 이론 값보다 더 작은 효율을 나타낸 것으로 보인다.

전기력이 부가될 때, 저속으로 갈수록 $Stk^{1/2}$ 의 증가에 대하여 부착효율이 선형적으로 증가하는 경향을 보인다. 이것은 저속으로 갈수록 입자가 전기장내에 거주하는 시간이 길어지는 반면, 관성력은 작아지기 때문에, 전체 효율에서 전기력에 의한 영향이 지배적이기 때문이다. 따라서 전기력은 입자의 크기에 비례하기 때문에 부착효율은 스톡 수의 제곱근에 선형적으로 비례한다.

유속이 일정할 때, 전체효율에 대해 전기력과 관성력의 영향은 입자크기가 증가하면 관성력이 지배적이고, 입자크기가 감소하면 전기력이 지배적인 것으로 나타났다. 이것은 전기력은 입자크기의 제곱에 비례하고, 관성력은 입자크기의 세제곱에 비례하여 나타나기 때문인 것으로 생각된다.

5.3수집전압과 부착효율의 관계

Fig. 12(a), Fig. 12(b), Fig. 12(c)을 보면, 여러 가지 유속에 대하여 $1\mu m$ 인 입자의 경우 전압증가에

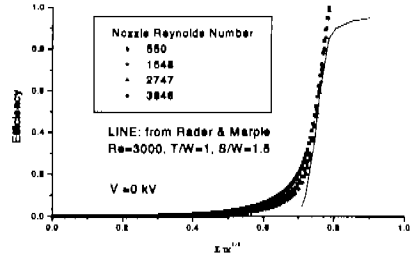


Fig. 11(a) Comparison Analytic Solution with Rader & Marple's Data

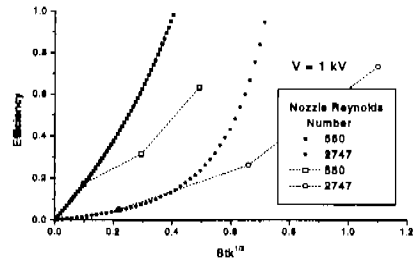


Fig. 11(b) Efficiency for various $Stk^{1/2}$

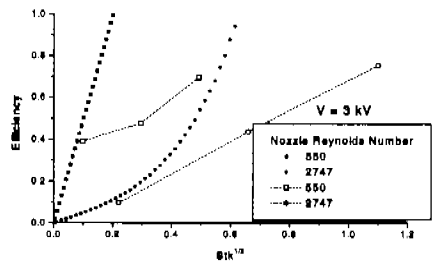


Fig. 11(c) Efficiency for various $Stk^{1/2}$

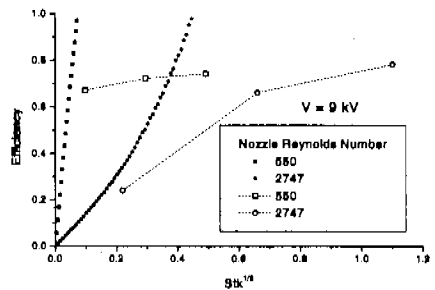


Fig. 11(d) Efficiency for various $Stk^{1/2}$

대한 효율의 증가가 선형적으로 나타나지만, 이보다 큰 입자의 경우 비선형적인 것을 알 수 있다. 이것은 작은 입자의 경우 부착효율이 실험유속의 범위에서 관성력을 거의 받지 못하고 대부분 전기력에 의해 지배되는데,

전기력은 입자의 크기가 고정되어 있을 때, 전압에 비례하기 때문이다. 반면, 큰 입자의 경우 관성력에 의한 영향이 전기력과 비교할 수 있는 정도로 크기 때문에 전기력이 증가하여도 효율이 선형적으로 증가하지는 않는다.

저속이고 전압이 높을 때, 높은 집진효율을 보이는 것을 알 수 있는데, 이것은 유속이 저속일 경우 입자가 전기장을 통과하는 시간이 길어져 전기력에 의한 영향을 많이 받기 때문이다. 실험결과를 보면 세가지 입자 모두 전압이 높아짐에 따라 효율의 증가율이 떨어지는 것으로 보이는데, 이것은 위에서 설명한 것과 같이, 충돌판 표면의 특성과 입자크기의 비균일성 때문으로 생각된다.

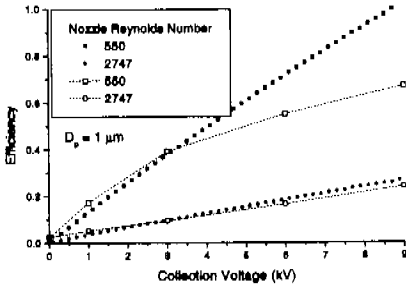


Fig. 12 (a) Efficiency for various Voltage

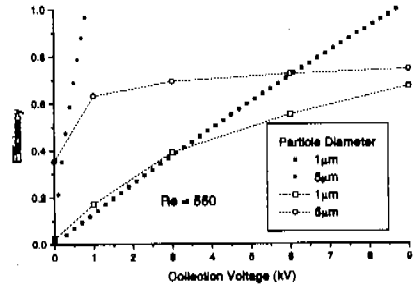


Fig. 12 (d) Efficiency for various Voltage

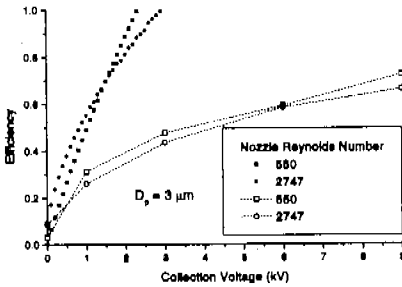


Fig. 12 (b) Efficiency for various Voltage

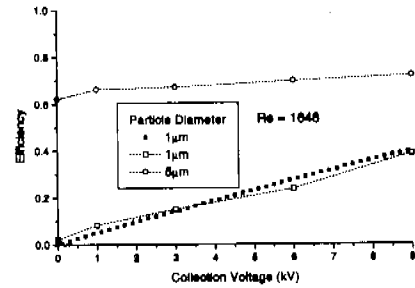


Fig. 12 (e) Efficiency for various Voltage

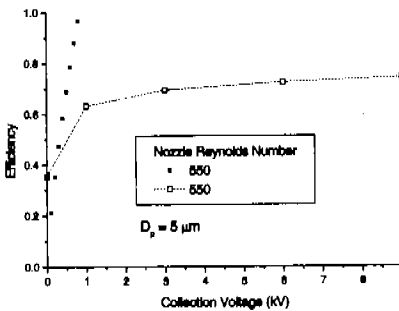


Fig. 12 (c) Efficiency for various Voltage

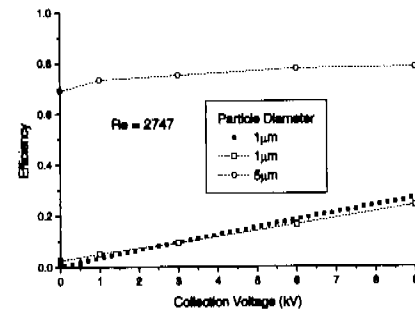


Fig. 12 (f) Efficiency for various Voltage

전압에 대한 효율의 증가는 0kV에서 1kV로 전압이 증가할 때, 최대가 된다. 이것은 Fig.10(b), Fig.10(c), Fig.10(d)에서 본 입자궤적처럼, 일단 전기력이 작용하면 낮은 전압에서도 충돌판에 부착될 만큼의 충분한 전기력을 받기 때문이다.

Fig.12(d), Fig.12(e), Fig.12(f)을 보면 유속이

본 실험에서는 입자의 부착효율이 0.8을 넘지 못하는 것으로 나타났다.

전압이 높을 때, 입자의 크기나 속도는 효율에 거의 영향을 주지 못하고, 전압이 낮아지면, 반대로 유속과 입자크기에 효율이 민감하게 반응한다. 이것은 전압이 낮아지면

관성력의 영향이 지배적이고 전압이 높으면 전기력이 지배적이기 때문이다.

5.4 유속과 부착효율의 관계

Fig.13(a)은 전기장이 없을 때 노즐 레이놀즈 수에 대한 입자부착효율을 나타낸 것이다. 이 그림을 보면, 효율곡선은 입자의 크기가 커질수록 레이놀즈 수에 대한 효율의 증가율이 큰 것을 알 수 있다. 이것은 입자가 클수록 50% 부착효율을 갖는 임계유속을 전후로 하여 유속이 미세하게 변해도 관성력은 큰 차이를 보이기 때문인 것으로 생각된다. 이때, 50% 효율을 갖는 유속은 입자의 크기가 증가함에 따라 급격히 작아짐을 알 수 있다.

Fig.13(b)에서 Fig.13(e)를 보면, 전기장이 있을 때, 효율이 최소가 되는 유속이 존재함을 볼 수 있다. 이러한 결과는 서용재와 김상수(7)의 연구와 같은 경향을 갖는다. 이는 입자의 부착효율이 전기력과 관성력에 의해 결정될 때, 전기력과 관성력이 유체의 속도에 대하여 상이한 경향을 갖기 때문이다. 즉,

타난다. 그러나 유속이 6m/sec 부근에서는 3 μ m 이상의 입자에 대하여 유속이 6m/sec 부근에서 최소의 집진효율을 보이는데, 6m/sec의 유속에서는 전기력이 급속히 줄어든 반면, 관성력이 충분히 증가하지 못하기 때문이라고 생각된다.

최소효율을 갖는 레이놀즈 수는 이론 계산 결과와 실험결과가 대체로 일치하는 것을 알 수 있다. 예외적으로, 1 μ m 입자의 효율은

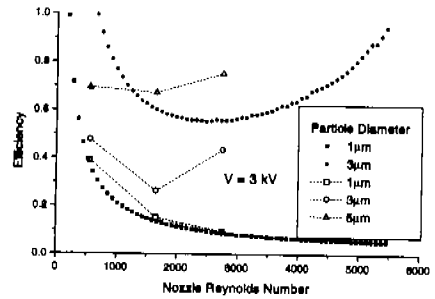


Fig. 13 (c) Efficiency for various Nozzle Re

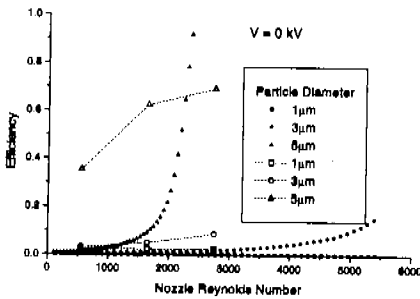


Fig. 13 (a) Efficiency for various Nozzle Re

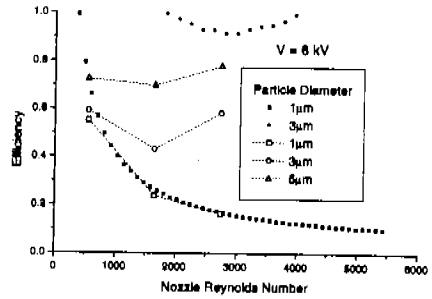


Fig. 13 (d) Efficiency for various Nozzle Re

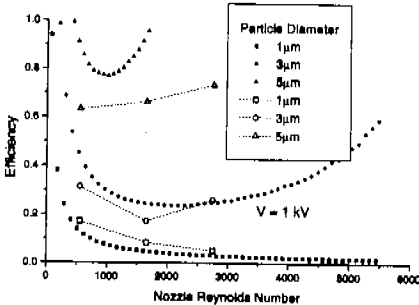


Fig. 13 (b) Efficiency for various Nozzle Re

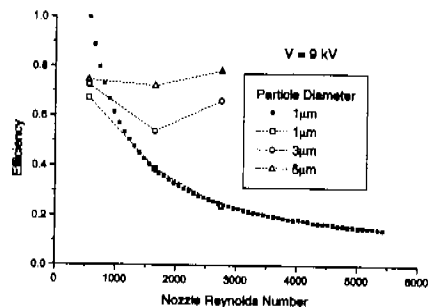


Fig. 13 (e) Efficiency for various Nozzle Re

전기력은 유속이 높아질수록 입자의 거주시간이 줄어들어 유속에 반비례하게 되며, 반면 관성력은 유속이 높아질수록 커지게 된다. 따라서 전체효율은 유속의 증가에 대하여 저속에서는 전기력의 영향에 의하여 높게 나타나고 고속에서는 관성력의 영향으로 높게 나

속도가 증가함에 따라 감소하는 것으로 나타났다. 따라서 본 연구에서 관측한 유속범위에서는 최소효율이 되는 유속은 없으며, 유속에 대하여 효율이 지수적으로 감소하는 것처럼 보인다. 그러나 순수 관성 충돌기 이론

으로부터 $1\mu\text{m}$ 의 입자부착 효율이 50%가 되는 유속을 구하면 약 145m/sec 가 된다. 따라서 전기력이 부가된 경우, 효율은 50%이상일 것임으로 $1\mu\text{m}$ 인 입자인 경우에도 전기력이 부가되면 효율이 최소가 되는 유속이 존재함을 알 수 있다. 또한 $1\mu\text{m}$ 입자인 경우 실험과 이론 값이 잘 일치하는 것을 알 수 있는데, 이는 타입자에 비해 입자가 구형에 가깝고 입자의 크기가 상대적으로 균일하다는 점과, 실험유속구간에서 전체적으로 낮은 효율을 갖기 때문에 입자의 재유입 등에 의한 효과가 작기 때문인 것으로 생각된다.

같은 크기의 입자에 대하여 전압이 증가하면, 효율이 최소가 되는 유속이 증가하는데, 이는 유속이 상대적으로 높아 거주시간이 작다고 하더라도 전압이 높은 경우는 입자가 부착될 수 있는 충분한 전기력을 받을 수 있기 때문이다. 따라서 전압이 강해지면 전기력이 지배적인 영역이 넓어진다.

같은 크기의 전압에 대하여 입자의 크기가 증가하면, 최소효율을 갖는 유속이 감소한다. 이것은 입자의 크기가 증가할 때, 판성력의 영향은 비교적 낮은 영역에서도 상당한 정도로 나타나기 때문에, 전기력과 판성력이 동시에 취약한 유속은 감소하는 결과를 보이는 것이다.

5.5 전압과 유속의 변화에 따른 $Stk_{50}^{1/2}$

Fig14은 전압과 유속이 변할 때, 50% 부착효율을 갖는 입자크기 D_{50} 에 대응하는 $Stk_{50}^{1/2}$ 을 나타낸 그래프이다. $Stk_{50}^{1/2}$ 은 전기력과 유속의 함수로서 전기력이 증가함에 따라 지수적으로 감소하며, 유속이 증가함에 따라 그 감소율은 줄어든다. 이러한 효과는 유속이 높아지면 입자의 거주시간이 짧아져, 전기력에 의한 영향을 크게 받지 않기 때문에 나타난다.

따라서 판성형 정전 집진기 등에서 입자의 부착효율을 높이기 위해서, 부착효율이 최소가 되는 특성 유속을 피해야 하고, $1\mu\text{m}$ 정도의 작은 입자가 유입될 때, 유속을 최대한 낮추어서 작동시켜야 한다. 또한 고속에서 작동시킬 때에는 전기력의 이득이 저속에 비해 크지 않음을 알 수 있다.

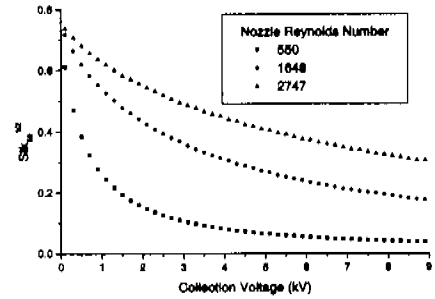


Fig. 14 $Stk_{50}^{1/2}$ for various Collection Voltage.

6. 결론

전기장에 형성된 판성 충돌기를 지나서 대전입자의 거동과 부착특성에 대한 이론해석과 실험을 통해 다음과 같은 결론을 내렸다.

- (1) 전기력이 작용하면, 전기력에 의한 영향이 절단입경 D_{50} 보다 작은 입자에 광범위하게 미치게 되어 순수 판성 충돌기에 비하여 입자의 분리성능이 떨어진다.
- (2) 전기력이 부가될 때, 유속의 변화에 따른 부착효율에 대한 연구에서 최소부착효율을 가지는 유속이 있다는 것을 알았고, 본 실험의 조건에서 최소효율을 갖는 유속은 6m/sec 였다.
- (3) 50% 효율을 갖는 $Stk_{50}^{1/2}$ 은 전기력이 커질수록 감소하고, 유속이 커질수록 감소율은 줄어든다.

참고문헌

- (1) Fuchs, N.A., 1978, Fundamentals of Aerosol Science, D.T. Shaw(ed.), Wiley, New York
- (2) Rader, D.J. and Marple, V.A., 1985, Effect of Ultra-Stokesian Drag and Particle Interception on Impaction Characteristics, Aerosol Sci. Tech., vol. 4, pp. 141~156
- (3) Marple, V.A., 1970, A fundamental study of inertia impactors, Ph.D. Thesis, Univ. of Minnesota
- (4) Janiecke, R. and Blifford, L.H., 1974, The influence of aerosol characteristics on the calibration of impactors, J. Aerosol Sci., vol. 5, pp. 457~464
- (5) Marple, V.A. and Willecke, K., 1976, "Inertial Impactors Theory, Design and Use." in Fine Particles: Aerosol Generation, Measurement, Sampling, and Analysis, B.Y.H. Liu(ed.), Academic Press, New York, pp. 411~446
- (6) Zhao, Z., Zhang, X., and Zhang, G., 1993, Model and experiments for the efficiency of a multi-stage impacting electrostatic precipitator, J. Aerosol Sci., vol.

24, pp. 515~523

(7) 서용재, 김상수, 1995, 장애물이 설치된 정전 유동장내에서 대전입자의 부착 특성. 1995년도 대한기계학회 추계학술대회 논문집, 제 2 권, P. 367~372

(8) Reist, P.C., 1993, Aerosol Science and Technology, McGraw-Hill, Inc., New York

(9) Friedlander, S.K., 1977, Smoke, Dust and Haze, John Wiley & Sons, New York