

1단 전기 집진기에서 2차 유동이 집진 효율에 미치는 영향

이재복* · 배귀남** · 황정호***

(1999년 7월 20일 접수)

Effect of Secondary Flows on the Particle Collection Efficiency in Single Stage Electrostatic Precipitator

Jae-Bok Lee, Gwi-Nam Bae and Jung-Ho Hwang

Key Words: Electrostatic Precipitator(전기 집진기; ESP), Secondary Flow(2차 유동), Particle Collection Efficiency(집진 효율), Corona Discharge(코로나 방전), Electric Field Intensity(전기장 강도)

Abstract

The ionic wind formed in a nonuniform electric field has been recognized to have a significant effect on particle collection in an electrostatic precipitator(ESP). Under normal operating conditions the effect of ionic wind is not pronounced. However, as the flow velocity becomes smaller, the ionic wind becomes pronounced and induces secondary flow, which has a significant influence on the flow field and the particle collecting efficiency. In this paper, experiments for investigating the effect of secondary flow on collection efficiencies were carried out by changing the flow velocities in 0.2-0.7m/s and the applied voltages in 9-11kV/cm. The particle size distributions and concentrations are measured by DMA and CNC. To analyze the experimental results, numerical analysis of electric filed in ESP was carried out. It shows that particle collection is influenced by two independent dimensionless numbers, Re_{ehd} and Re_{flow} not by N_{ehd} alone. When Re_{flow} decreases for constant Re_{ehd} , the secondary flow prohibits the particle collection. But when Re_{ehd} increases for constant Re_{flow} , it enhances the particle collection by driving the particles into the collection region.

기호설명

<p>b : 전기적 이동도[m²/V · sec]</p> <p>C_o : 전압 인가 전 입자 농도[개/cm³]</p> <p>C_{elec,o} : 전압 인가 시 입자 농도[개/cm³]</p> <p>D : 집진부 폭[cm]</p> <p>De : 도이치(Deutsch) 수(= $\frac{2Lw}{DU}$)</p> <p>d_p : 입자 크기[μm]</p>	<p>E_o : 평균 전기장 강도[kV/cm]</p> <p>F_{ehd} : 전기력[N]</p> <p>L : 집진부 길이[cm]</p> <p>N_{ehd} : Re_{ehd}/Re_{flow}</p> <p>P : 압력</p> <p>Re_{ehd} : 전기적 레이놀즈 수</p> <p>Re_{flow} : 유동 레이놀즈 수</p> <p>Stk : 스톱스(Stokes) 수</p> <p>U : 평균 유동 속도[m/s]</p> <p>U_e : 전기적 특성 속도[m/s]</p> <p>u : x방향 유속</p> <p>V : 전압[kV]</p> <p>v : y방향 유속</p>
--	--

* 연세대학교 대학원 기계공학과

** 회원, 한국과학기술연구원 지구환경연구센터

*** 회원, 연세대학교 기계공학과

E-mail : hwangjh@bubble.yonsei.ac.kr

TEL : (02)361-2821 FAX : (02)312-2159

w : 입자의 이동 속도[m/s] ($= \frac{qE_o C}{3\pi d_p \mu}$)

그리스문자

Ω : 와도

ϵ_o : 공기의 유전 상수

η_c : 집진 효율

μ : 공기의 점성 계수[kg/m · sec]

ρ : 공기의 밀도[kg/m³]

ρ_s : 공간 전하 밀도[C/m³]

ρ_{sw} : 와이어 주변의 공간 전하 밀도[C/m³]

ν : 공기의 동점성 계수[kg/m²]

1. 서론

최근 들어 대기오염의 주원인으로 주목되고 있는 입자상 물질인 매연(smoke), 분진(dust)뿐 아니라 NO_x나 SO_x 등의 기체상 물질을 대상으로 저온 플라즈마 혹은 코로나 방전을 이용한 오염물질 저감 장치에 대한 연구가 활발해지면서 입자와 유해 가스를 함께 제거하는데 관심이 많아지고 있다. 일반적으로 NO_x나 SO_x 등의 제거에는 주로 펄스(pulse) 전원이, 입자상 물질의 제거는 주로 직류(DC) 전원이 사용되는데 이들의 동시 제거를 위해서는 펄스와 직류 전원이 중첩된 장치를 이용하기도 한다.⁽¹⁾

직류 및 펄스를 이용한 입자상 물질을 저감하기 위해 현재 실험실에서 시도되는 입자/가스 동시 저감 장치의 일부는 1단 전기집진기의 형상을 기초로 이루어지고 있다. 1단 전기집진기 효율을 나타내는 식 중에서 Deutsch 식은 널리 사용되는 이른 식으로 균일 유동과 균일 전기장 조건에서 입자의 농도 분포가 균일할 때 적용된다.

Fig. 1에 나타난 바와 같이 길이 L, 폭 D, 평균 전기장 강도가 E_o의 평판 집진기에 크기 d_p, 전하 q를 띤 입자가 공기 유속 U로 들어온다고 가정하면 Deutsch 식은 다음과 같이 표현된다.

$$\eta_c = 1 - \exp(-De) \quad (1)$$

이때 De는 $\frac{2Lw}{DU}$ 이다. w는 입자의 이동 속도

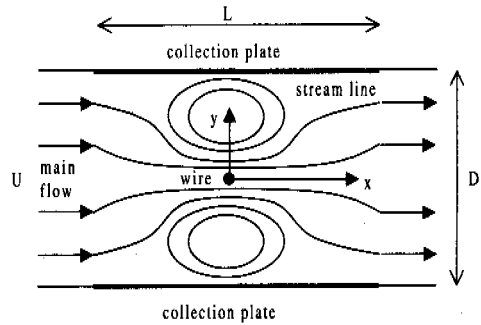


Fig. 1 Streamlines of main and secondary flow in an electrostatic precipitator

(migration velocity)로 $\frac{qE_o C}{3\pi d_p \mu}$ 이고, C와 μ 는 각각 미끄럼 상수, 공기의 점성 계수이다. 식 (1)에서 보는 바와 같이 집진 효율은 De가 증가할수록 높아지므로, L/D와 U가 일정할 경우 De는 입자의 이동 속도에 따라 달라지며, 결국 평균 전기장 강도에 비례하여 집진 효율이 증가하게 된다. 식 (1)을 이용하여 입경 별 집진 효율을 계산하면, 주어진 전기장 강도와 입자 대전이 포화 대전이라는 가정 하에 약 0.3 μ m에서 효율이 최소가 됨을 알 수 있다.

그러나 실제의 경우는 전기장 세기가 균일하지 않으며, 특히 유속이 낮은 경우는 비균일 전기장에 의한 이온 유동으로 인해 Fig. 1에서 보듯이 2차 유동이 형성되어 집진 효율은 2차 유동이 없는 경우에 비해 감소한다고 알려져 있다.⁽⁴⁾ Fig. 1은 와이어와 2개의 평판으로 이루어진 1단 전기집진기의 기본 형상과 주유동 및 강한 2차 유동으로 인해 회전셀을 형성한 경우의 유선을 보여준다. 두 평판 사이에 위치한 와이어에 일정 크기 이상의 전압을 가하면 코로나 방전이 생기며, 이때 극성을 갖는 이온이 발생하여 와이어로부터 접지판(혹은 집진판)으로 이동한다. 이러한 현상을 이온 유동, 혹은 코로나 풍이라고 하는데, 주유동 방향에 대해 수직 방향으로 생기며, 주유동과의 간섭에 의해 2차 유동을 형성한다. 2차 유동의 강약에 따라 집진기 내에서 회전셀을 형성하여 주유동과 더불어 입자의 거동에 영향을 준다.

2차 유동에 관한 연구로는 Robinson⁽²⁾이 처음으로 헬륨 추적 기체로 유동을 가시화하여 2차 유

동의 존재를 확인한 이후 Yabe 등⁽³⁾은 주유동이 없는 경우에도 코로나 풍이 발생하는 것을 실험적으로 보여줌으로서 코로나 풍은 일종의 체적력으로 유동에 영향을 미친다는 것을 밝혀냈다. Yamamoto와 Velkoff,⁽⁴⁾ Leonard 등⁽⁵⁾은 코로나 풍과 주유동의 상호 간섭에 의해 2차 유동이 형성되는 것으로 생각하고, 이에 대한 무차원 수를 정의한 후, 유동 가시화 실험을 통하여 무차원 수의 크기에 따라 2차 유동의 강도가 변함을 밝혀냈다. Kallio와 Stock⁽⁶⁾은 LDA를 이용해 약 0.7m/s 보다 큰 유속에서는 2차 유동이 무시될 수 있음을 밝혀냈다. Goo와 Lee⁽⁷⁾는 입자의 난류 거동 해석을 통해 De가 3 이상일 경우 2차 유동이 집진 효율을 향상시킬 수 있고, 3 이하에서는 오히려 감소시킨다고 보고하였다. 정상현과 김상수⁽⁸⁾는 수치 해석을 통해 2차 유동이 있을 경우 집진 효율이 난류 확산에 비례하여 증가함을 보여주었다. 이상과 같이 대부분의 연구들은 유동 가시화 실험을 통해 2차 유동을 관찰하거나 수치 해석을 통해 입자의 집진 효율을 계산하였으나 실험적으로 2차 유동이 집진 효율에 미치는 영향을 규명한 연구는 거의 수행되지 않았다.

이와 같은 2차 유동과는 별도로 많은 연구자들에 의해 입자계측기를 이용하여 집진 효율과 입자 크기의 관계를 실험적으로 규명한 연구가 수행되었다. Choudhary와 Gentry⁽⁹⁾나 McCain 등⁽¹⁰⁾은 각각 임팩터와 광학입자계수기를 사용하여 서브마이크론 입자까지 집진 효율을 측정하여 집진 효율이 0.2~0.4 μ m에서 최소가 됨을 보였다. Ylatalo 등⁽¹¹⁾은 DMPS(Differential Mobility Particle Sizer)로 입경 분포를 측정하여 서브마이크론 범위에서 집진 효율이 최소가 됨을 확인했으며 Yoo 등⁽¹²⁾도 역시 DMPS를 사용해 0.03 μ m 이하의 입경 범위에서 집진 효율이 현저히 낮아지는 이유가 부분 하전의 영향임을 확인했다.

본 연구에서는 2차 유동이 집진 효율에 미치는 영향을 실험적으로 고찰하였다. 이를 위해 연소로 등에서 배출되는 미세 분진과 비저항이 유사한 서브마이크론 크기의 소금(NaCl) 입자를 사용하여, 와이어-판으로 구성된 1단 전기집진기의 전압 및 유속을 변화시키면서 DMPS로 입경 별 집진 효율을 측정하였다. 또한 전기장 해석을 수행하여 2차 유동의 영향을 이론적으로 규명하였다.

2. 이 론

전기 집진기 내에서 전기력은 체적력으로 작용하고, 정상 상태 및 비압축성 유동으로 가정하면 Navier-Stokes 방정식은 2차원 평판 좌표계에서 다음과 같이 표현된다.⁽¹³⁾

$$\begin{aligned} \text{x-방향 : } & u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} = \\ & - \frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial x} + \nu \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \right) - \frac{\rho_s}{\rho} \frac{\partial V}{\partial x} \end{aligned} \quad (2)$$

$$\begin{aligned} \text{y-방향 : } & u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} = \\ & - \frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial y} + \nu \left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} \right) - \frac{\rho_s}{\rho} \frac{\partial V}{\partial y} \end{aligned} \quad (3)$$

여기서 V는 전압이고 ρ_s 는 공간 전하 밀도이며, 다음의 두 식으로부터 구해진다.⁽¹⁴⁾

$$\frac{\partial^2 V}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 V}{\partial y^2} = - \frac{\rho_s}{\epsilon_0} \quad (4)$$

$$\frac{\partial V}{\partial x} \frac{\partial \rho_s}{\partial x} + \frac{\partial V}{\partial y} \frac{\partial \rho_s}{\partial y} = \frac{\rho_s^2}{\epsilon_0} \quad (5)$$

식 (2)를 y에 대해 미분하고 식 (3)을 x에 대해 미분한 뒤 그 차이를 계산한다. 이때 연속 방정식 $\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} = 0$ 을 이용하고 $\frac{\partial v}{\partial x} - \frac{\partial u}{\partial y}$ 를 와도 Ω 로 치환하면 식 (6)이 유도된다.

$$\begin{aligned} u \frac{\partial \Omega}{\partial x} + v \frac{\partial \Omega}{\partial y} = & \nu \left(\frac{\partial^2 \Omega}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \Omega}{\partial y^2} \right) \\ & + \frac{1}{\rho} \left(\frac{\partial \rho_s}{\partial y} \frac{\partial V}{\partial x} - \frac{\partial \rho_s}{\partial x} \frac{\partial V}{\partial y} \right) \end{aligned} \quad (6)$$

식 (6)을 무차원 시키기 위해 $\bar{V} = V/V_0$, $\bar{u} = u/U$, $\bar{v} = v/U$, $\bar{x} = 2x/D$, $\bar{y} = 2y/D$, $\bar{\rho}_s = \rho_s/\rho_{sw}$, $\bar{\Omega} = D\Omega/2U_e$ 등의 무차원 수를 도입한다. 이때 U_e 는 이온 유동 속도이며 $U_e = (\rho_{sw} V_0/\rho)^{1/2}$ 로 정의되는데, ρ_{sw} 는 와이어 표면의 전하 밀도, V_0 는 와이어에 인가된 전압이다. 식 (6)에 $Re_{flow} (= UD/\nu)$, $Re_{chd} (= U_e D/2\nu)$ 을 적용하면 식 (7)이 얻어진다.⁽⁴⁾

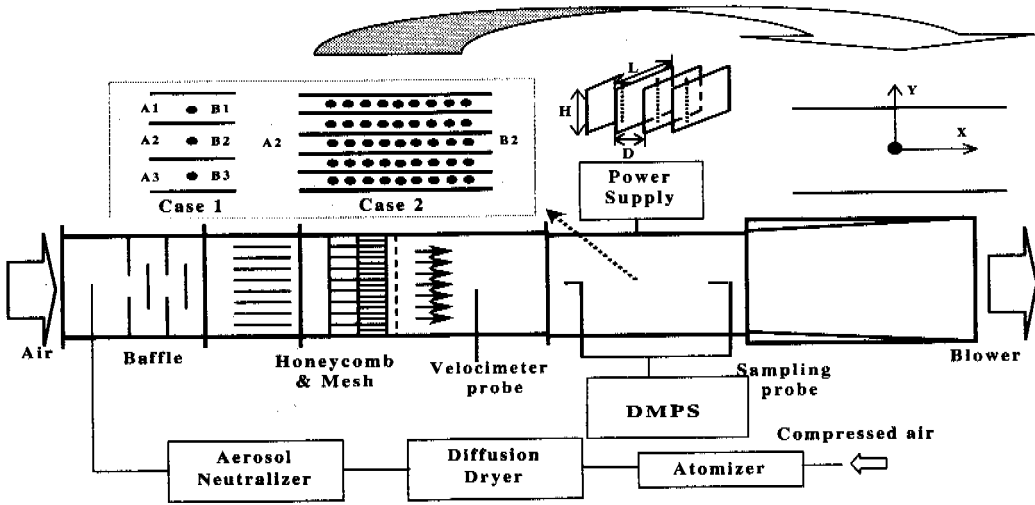


Fig. 2 Experimental set up

$$\left(\bar{u} \frac{\partial \bar{\Omega}}{\partial x} + \bar{v} \frac{\partial \bar{\Omega}}{\partial y} \right) = \frac{1}{Re_{flow}} \left(\frac{\partial^2 \bar{\Omega}}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \bar{\Omega}}{\partial y^2} \right) \quad (7)$$

$$+ \frac{Re_{ehd}}{2Re_{flow}} \left(\frac{\partial \bar{\rho}_s}{\partial y} \frac{\partial \bar{V}}{\partial x} - \frac{\partial \bar{\rho}_s}{\partial x} \frac{\partial \bar{V}}{\partial y} \right)$$

이때 Re_{ehd} 는 전기수력학적(electrohydrodynamic) 레이놀즈 수로 이온 유동의 강도를 나타내는 무차원 수이고, Re_{flow} 는 주유동 강도를 나타내는 무차원 수이다. 이들의 비를 N_{ehd} 라 하고 다음과 같이 표현한다.

$$N_{ehd} = \frac{Re_{ehd}}{Re_{flow}} \sim \frac{U_e}{U} \quad (8)$$

$Re_{flow} \gg 1$ 이면 식 (7)은 다음과 같이 근사될 수 있다.

$$\bar{u} \frac{\partial \bar{\Omega}}{\partial x} + \bar{v} \frac{\partial \bar{\Omega}}{\partial y} \sim N_{ehd} \left(\frac{\partial \bar{\rho}_s}{\partial y} \frac{\partial \bar{V}}{\partial x} - \frac{\partial \bar{\rho}_s}{\partial x} \frac{\partial \bar{V}}{\partial y} \right) \quad (9)$$

공간 전하에 작용하는 전기력과 전기장 강도의 관계인 $\bar{F}_{ehd} = \bar{\rho}_s \bar{E}$ 를 적용하면, 식 (9)는 식 (10)으로 간략화 된다.

$$(\bar{U} \cdot \nabla) \bar{\Omega} \sim N_{ehd} (-\nabla \times \bar{F}_{ehd}) \quad (10)$$

식 (10)의 좌변은 와도 전달(vorticity transport)항으로 2차 유동의 강도를 의미하고, 우변은 N_{ehd} 와 전기력 와도의 곱으로 전기력에 의한 이온의 회전 유동 크기를 의미한다. 식 (10)으로부터 유속이 일정하고, 전기력이 증가하는 경우와 전기력이 일정하고, 유속이 감소하는 경우 모두 N_{ehd} 에 따라 2차 유동의 강도(와도)가 증가함을 알 수 있다. Yamamoto 등⁽⁴⁾에 의하면 N_{ehd} 가 0.6보다 큰 경우 2차 유동의 존재를 무시할 수 없으며, 1.2보다 크면 Fig. 1의 회전셀을 형성할 정도로 영향이 크다.

3. 실험

본 실험을 위한 전체 시스템은 Fig. 2와 같이 크게 입자 발생부, 입자 부유부, 균일 유동부, 집진부로 나뉘어진다. 입자 발생부에서는 10%의 NaCl 수용액을 사용해 분무기(atomizer)로부터 분무된 액적을 확산 건조기(diffusion dryer) 및 입자 중화기(aerosol neutralizer)를 통과시켜 NaCl 입자를 발생시켰다. 입자 부유부는 생성된 NaCl 입자와 풍동으로 유입된 공기를 여러 단의 차폐판(baffle)을 통과시켜 혼합시킨다. 균일 유동부는 하니콤(honey comb)과 망(mesh)을 통해 유동과 입자 농도 분포를 균일하게 만든다. 집진부에서 단위 셀의 폭(D)과 길이(L)는 각각 50mm, 100mm ($L/D=2$, Fig. 2의 case 1)와 30mm, 200mm

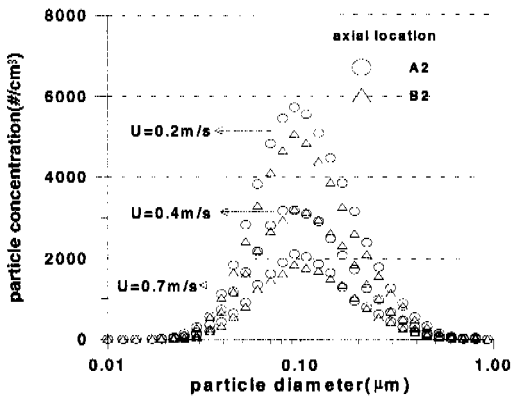


Fig. 3 Particle size distributions

($L/D=6.7$, Fig. 2의 case 2)이고, 단위 셀 당 와이어 개수는 각각 1개, 9개이다. 와이어의 직경은 0.25mm이다. 방전극인 와이어에 고전압(9, 10, 11kV)을 인가했으며 집진판을 접지시켰다. 공기의 유속은 송풍기(blower)의 토출구에 다공판을 설치하여 조절하였다. 평균 유속은 2차 유동의 영향을 고려해야 하는 0.2, 0.4, 0.7m/s를 선정했고, 시험 단면의 3가지 높이(1/4H, 1/2H, 3/4H)에서 각각 폭 방향의 1cm 간격으로 유속을 측정하여 위치 별로 평균 유속의 $\pm 10\%$ 이내로 균일함을 확인하였다. 이러한 유동 및 전기적 조건은 각각 $Re_{flow} \gg 1$, $N_{ehd} \sim 1$ 을 만족하며, 이에 관해서는 뒤에 자세히 설명하였다.

Okazaki와 Willeke⁽¹⁵⁾의 모델을 기초로 제작한 프로브로 입자를 샘플링 하였으며, 대상 입자가 서브마이크론의 입경 범위이므로(Stk 수는 약 10^{-6}) 입자의 관성력에 의한 샘플링 프로브 입구에서의 손실은 무시할 만하다. DMPS는 DMA (differential mobility analyser; TSI 3071)와 CNC (condensation nucleus counter; TSI 3025)로 구성되는데, 입자의 전기적 이동도를 이용해 입경 별 농도를 측정하는 장치이다. 실험 시 풍동으로 유입되는 NaCl 입자의 농도는 일정하지만 주유동의 유속(0.2, 0.4, 0.7m/s)에 따라 시험 단면의 입자 농도는 약 5×10^4 , 4×10^4 , 2×10^4 개/cm³이었다. 입자 분포는 대수 정규 분포이며 평균 입경(NMD; number median diameter)은 0.1 μ m이고 기하학적 표준 편차는 유속과 관계없이 약 1.7이었다. 실험 시 배경 농도는 1개/cm³ 이하로 실험 농도에 비해 무시할 만하였다. 집진부를 통과하면서 생길 수 있는 입자의 손실 정도를 확인하기

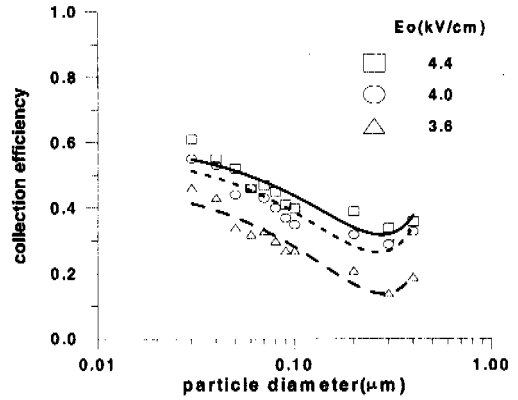


Fig. 4 Effect of electric intensity on the particle collection efficiency.($L/D=2$, $U=0.2$ m/s)

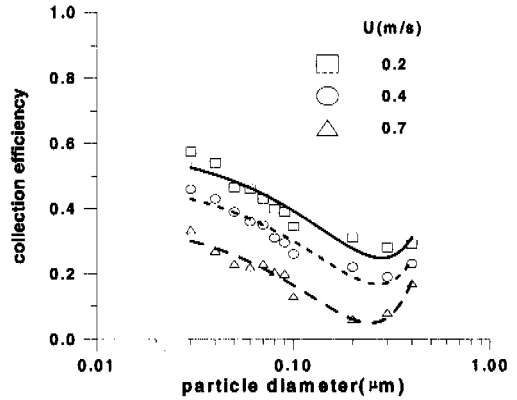


Fig. 5 Effect of flow velocity on the particle collection efficiency.($L/D=2$, $E_o=4.0$ kV/cm)

위해 전압을 인가하지 않은 상태에서 집진부 전/후단(Fig. 2의 A2, B2 지점)에서 농도를 측정하였다. Fig. 3에 나타난 바와 같이 집진부 전/후단 간 입자 농도는 벽면으로의 확산 부착등에 의해 10% 이내의 손실이 생김을 알 수 있다. 한편 Fig. 2에 표시된 B1, B2, B3에서의 농도 차이를 비교한 결과 평균값과의 편차가 5% 이하로 매우 적으므로, 본 연구에서는 유동이 집진부를 통과할 때의 전기적인 집진 효율을 B2에서의 측정값을 이용하여 다음과 같이 계산하였다.

$$\eta_c = 1 - \frac{C_{elec,o}}{C_o} \quad (11)$$

이때 C_o , $C_{elec,o}$ 는 각각 전압을 인가하지 않았을 경우와 전압을 인가했을 경우 B2에서 입자의 농도이다.

4. 결과 및 고찰

4.1 전기장/유속이 집진 효율에 미치는 영향

Fig. 4와 5는 인가 전압과 유속을 변화시키면서 입경 별 입자 농도를 측정 한 후, 식 (11)을 사용하여 집진 효율을 구한 결과를 보여준다. 이때 실험 조건은 Case 1(L/D=2)이었고, 평균 전기장 강도 E_0 는 $2V_0/D$ 로 계산하였다. Fig. 4에서 보듯이 유속이 0.2m/s로 일정할 때 전기장 강도가 클수록 집진 효율이 증가한다. Fig. 5는 평균 전기장 강도가 4.0kV/cm로 일정할 때, 유속이 입경 별 집진 효율에 미치는 영향을 나타낸 것으로 유속이 작을수록 집진 효율은 증가함을 알 수 있다. 집진 효율은 전기장 강도나 유속에 관계없이 입경이 약 $0.3\mu m$ 일 때 최소가 되는데, 이는 기존의 실험 결과와 일치한다.⁽⁹⁻¹¹⁾

Fig. 4의 결과는 집진셀 내의 전기장 해석으로 설명할 수 있다. 즉 Fig. 6에 나타난 바와 같이 평균 전기장 강도가 증가할수록 국부 전기장 강도($E_y = \partial V / \partial y$)도 집진판 주변에서 증가하므로 집진 효율이 높아진다.

한편, Fig. 7을 보면 평균 전기장 강도에 따라 집진판 주변의 전기장 강도가 비례해서 증가하며 와이어에서 멀어져도 같은 경향을 보인다. 그 이유는 다음과 같다. 와이어에 인가된 전압이 커질수록, 즉 평균 전기장 강도가 커질수록, 증가된 코로나 현상은 많은 공간 전하를 발생시킨다.⁽¹⁶⁾ 이와 같이 증가된 공간 전하량은 특히 Fig. 6에 보듯이 와이어 주변의 전기장 강도의 상승을 억제하게 된다. 이로 인해 와이어 주변에서는 평균 전기장 강도의 증가에 따른 전기장 강도 차이가 미미한 반면, 와이어로부터 멀어질수록 평균 전기장 강도에 따라 전기장 강도가 증가한다.

4.2 2차 유동이 집진 효율에 미치는 영향

2차 유동의 영향을 알아보기 위하여 식 (4), (5)를 이용하여 전위 및 이온 농도를 계산하여 Table 1에 나타내었고, 무차원 수 Re_{flow} , Re_{end} , N_{end} 를 비교하였다. Re_{flow} 는 유속에 따라 각각 811~2838 이고, Re_{end} 는 평균 전기장 강도에 따라 1178~2091이었다. 두 무차원 수의 비인 N_{end} 는 0.41~2.57이고, 대부분의 경우 N_{end} 는 0.6보다 크

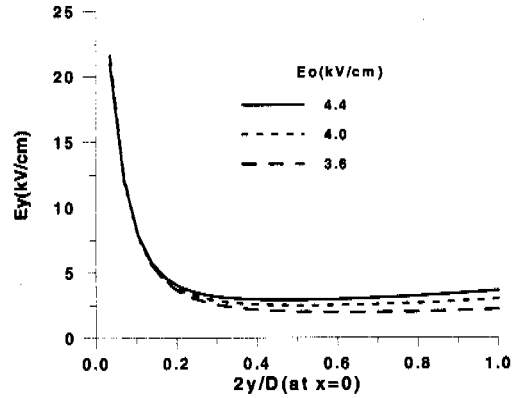


Fig. 6 Comparison of electric field intensity distributions between the wire and the collection plate

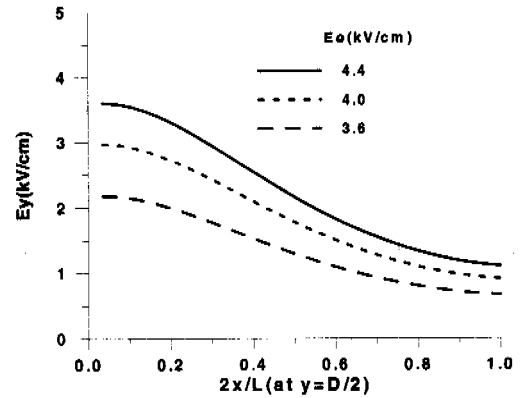


Fig. 7 Comparison of electric field intensities distributions near the collection plate

므로 2차 유동의 영향이 나타날 것으로 예상된다.

Fig. 8과 9는 2차 유동이 집진 효율에 미치는 영향을 보여준다. 집진 효율에 영향을 주는 인자로는 E_0 , U , d_p 가 있으나 이들의 개별적인 영향을 알아보는 대신 포화 하전으로 가정하고, 하나의 변수 De 를 독립변수로 선정하였다. Fig. 8은 전기 특성이 일정한 상태에서 주유동이 변할 때의 집진 효율을 보여주며 Fig. 9는 주유동이 일정할 때 전기 특성이 변화하는 경우이다. 두 경우 모두 De 가 증가함에 따라 집진 효율이 증가함을 알 수 있다.

Table 1 Non-dimensional numbers for various experimental conditions

E_0 (kV/cm)	3.6	4.0	4.4
ρ_{sw} (C/cm ³)	8.6×10^{-4}	1.8×10^{-3}	2.8×10^{-3}
U_e (m/s)	0.85	1.2	1.5
Re_{chd}	1178	1682	2091
U (m/s)	Re_{flow}	N_{ehd}	
0.2	811	1.45	2.07
0.4	1622	0.72	1.03
0.7	2838	0.41	0.73

먼저 Fig. 8은 Re_{chd} 가 일정하고 Re_{flow} 가 감소하는 경우, 즉 N_{ehd} 가 증가할 때(그림에서 화살표 방향)주어진 De 에서 집진 효율은 감소한다. 평균 전기장 강도가 일정하므로 식 (10)의 F_{ehd} 가 일정하며 N_{ehd} 의 증가에 따라 좌변의 2차 유동의 강도가 증가하는 경우로 Yamamoto와 Velkoff⁽⁴⁾의 유동 가시화 실험 및 수치 계산을 통해 얻은 유동 특성 의 경향과 잘 일치한다. 즉, 전기장 강도가 일정할 때 2차 유동이 강할수록 집진판 주위에서는 입자의 부착을 방해하는 방향으로 유동이 형성되어 입자의 이동 방향을 교란 시켜 집진 효율이 낮아짐을 알 수 있다.

반면에 Fig. 9와 같이 Re_{flow} 가 일정하고 Re_{chd} 가 증가하는 경우, N_{ehd} 가 증가함에 따라 주어진 De 에서 집진 효율도 증가한다. 이는 2차 유동 및 전기장 강도 측면에서 다음과 같이 설명된다. 평균 전기장 강도의 증가에 따라 식 (10)의 F_{ehd} 가 증가하며, 수치 계산 결과 $|\nabla \times F_{ehd}|$ 가 증가한다. 따라서, N_{ehd} 가 증가함에 따라 2차 유동의 강도가 증가하며, 와도에 의해 추가로 입자들이 집진판으로 이송된다. 이런 입자들은 집진판 주변에서도 입자 부착을 방해하는 방향으로 형성된 2차 유동의 영향을 받기도 하지만, Fig. 6과 7에서 보는 바와 같이 전기장 강도의 크기에 비례해 증가하는 집진판 주변의 전기 경계층의 영향으로 집진 효율이 증가된다.

결국 본 실험에서와 같이 하전량과 이동 속도

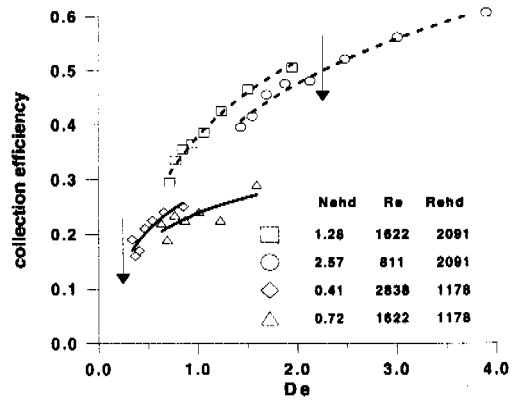


Fig. 8 Variation of particle collection efficiency with Re_{flow} for constant Re_{chd}

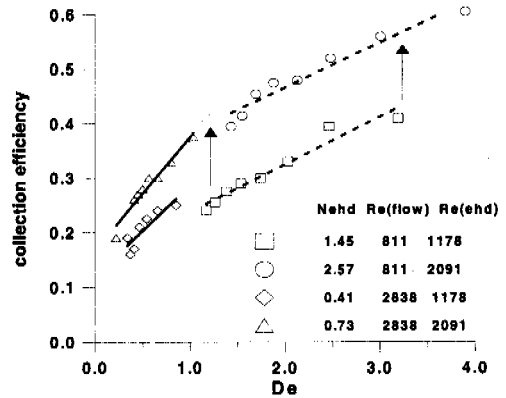


Fig. 9 Variation of particle collection efficiency with Re_{chd} for constant Re_{flow}

가 작은 서브마이크론 입자의 집진 효율은 Yamamoto와 Velkoff⁽⁴⁾가 언급한 2차 유동 강도와 집진판 주변의 전기장 강도에 의해 결정된다.

4.3 전기장 강도가 2차 유동에 미치는 영향

4.2절의 결과는 평균 전기장 강도 4.4kV/cm이하 그리고 De 가 5이하의 비교적 작은 전기장 강도 및 De 범위에 대한 것이다. 평균 전기장 강도에 의한 2차 유동의 영향을 고찰하기 위하여 L/D 는 6.7(Fig. 2의 Case 2), De 는 0~30의 범위에서 유속 0.2m/s인 경우 평균 전기장 강도를 증가시키면서 집진 효율을 측정하여 Fig. 10에 나타냈다. Fig. 10을 보면, 전기장 강도가 클수록 집진 효율이 높고, De 가 큰 범위에서도 동일한 경향을 나타낸다. 전기장 강도의 증가에 의한 2차 유동은

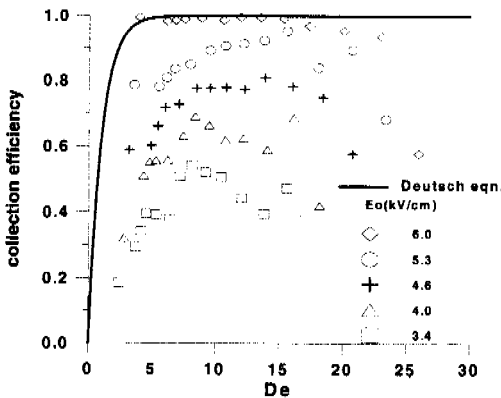


Fig. 10 Variation of particle collection efficiency with mean electric field intensity. ($L/D=6.7, U=0.2\text{m/s}$)

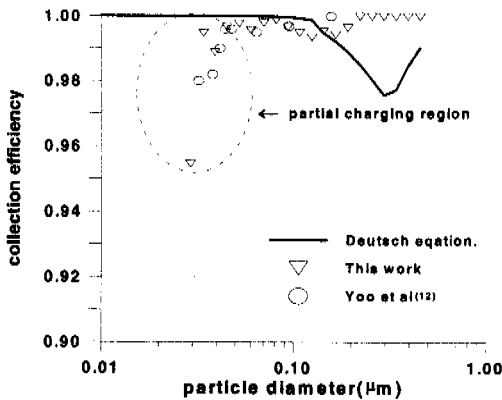


Fig. 11 Comparison of theoretical and experimental particle collection efficiency. ($L/D=6.7, U=0.2\text{m/s}, E_0=6.0\text{kV/cm}$)

집진 효율을 높인다는 것을 모든 전기장 강도 및 De 범위에서 확인했다. 따라서 넓은 범위의 전기장 강도($0\sim 6\text{kV/cm}$) 및 $De(0\sim 25)$ 에서 전기장 강도의 증가에 의한 2차 유동이 집진 효율을 향상 시킬을 알 수 있다. 한편 Fig. 10에서 각 평균 전기장 강도 별로 De 가 큰 영역에서 집진 효율이 감소되는 것은 부분 하전에 의한 것으로 서브마이크론 입자의 대전 과정 중 주로 발생한다. 부분 하전이 발생하면 이론적으로 대전된 단위 전하 개수가 1이 안되어, 일부 입자가 전혀 대전되지 않고 통과하여 집진 효율이 급격히 감소한다. 이를 다시 설명한 Fig. 11은 본 실험과 유사한 전기장 강도 및 유속에서 수행된 2단 전기집진기

실험 결과⁽¹²⁾ 및 Deutsch 식을 비교하여 나타낸 것으로 입경이 $0.05\mu\text{m}$ 이상인 영역에서는 두 실험결과는 유사한 집진 효율을 보인다. 반면에 입경이 $0.05\mu\text{m}$ 이하에서는 부분 하전으로 집진 효율이 Deutsch 식에 비해 급격히 감소하며, 입경이 작을수록 그 정도는 더욱 심해진다.

5. 결론

본 연구에서는 1단 전기집진기에서 2차 유동이 서브마이크론 입자의 집진 효율에 미치는 영향을 고찰하여 다음과 같은 결과를 얻었다. 첫째, 집진 효율은 전기장 강도가 클수록 유속이 작을수록 증가하며 2차 유동에 의해 영향을 받는다. 둘째, N_{ehd} 의 증가에 따라 와도가 증가하고, 이로 인해 2차 유동의 강도가 증가한다. 셋째, N_{ehd} 와 입자(특히 입자 이송속도가 작은 서브마이크론 크기의 입자)의 집진 효율과의 관계는 N_{ehd} 뿐만 아니라, Re_{ehd} 및 Re_{flow} 에 의해 독립적으로 결정된다. 넷째, 입경이 $0.05\mu\text{m}$ 이하인 영역에서는 부분 하전에 의해 집진 효율이 급격히 감소한다.

후 기

본 연구는 과학재단 특정 기초 연구 과제(97-02-00-03-01-3) 지원의 일부로 진행되었으며, 이에 관계자 여러분께 감사드립니다.

참고문헌

- (1) Clements, J. S., A. Mizuno, A., Finney, W. C., and Davis, R. H., 1989, "Combined Removal of SO_2 , NO_x , and Fly Ash from Simulated Flue Gas Using Pulsed Streamer Corona," *IEEE Trans. Ind. Applications*, Vol. 25, pp. 62~69.
- (2) Robinson, M., 1976, *ERDA, Health & Safety Lab. Rep. HASL-301*.
- (3) Yabe, A., Mori, Y. and Hijikata, K., 1978, "EHD Study of The Corona Wind between Wire and Plate Electrodes," *AIAA J.*, Vol. 16, pp. 340~345.
- (4) Yamamoto, T. and Velkoff, H. R., 1981, "Electrohydrodynamics in an Electrostatic Preci-

- pitator," *J. Fluid Mech.*, Vol. 108, pp. 1~18.
- (5) Leonard, G. L., Michner, M. and Self, S. A., 1980, "Experimental Study of the Effect of Turbulent Diffusion on Precipitation Efficiency," *J. Aerosol Sci.*, Vol. 13, pp. 271~284.
- (6) Kallio, G. A. and Stock, D. E., 1992, "Interaction of Electrostatic and Fluid Dynamic Fields in Wire-Plate Electrostatic Precipitator," *J. Fluid Mech.*, Vol. 240, pp. 133~166.
- (7) Goo, J. H. and Lee, J. W., 1997, "Stochastic Simulation of Particle Charging and Collection Characteristics for a Wire-Plate Electrostatic Precipitator of Short Length," *J. Aerosol Sci.*, Vol. 28, pp. 875~893.
- (8) 정상현, 김상수, 1994, "1단 전기집진기에서 난류확산과 2차 유동이 입자의 농도분포에 미치는 영향," 94년 열 및 유체공학 부문 학술대회 논문집, pp. 8~15.
- (9) Choudhary, K. R. and Gentry, J. W., 1974, "Particle Collection Efficiency of a Bench Scale Electrostatic Precipitator in the Field Charging Region as a Function of Particle Size," *J. Colloid and Interface Sci.* Vol. 48, pp. 263~280.
- (10) McCain, J. D., Gooch, J. P. and Smith, W. B., 1975, "Results of Field Measurements of Industrial Particulate Sources and Electrostatic Precipitator Performance," *J. Air Pollution Control Assoc.*, Vol. 25, pp. 117~121.
- (11) Ylatalo, S. I., Kauppinen, E. I., Hautanen, J., Joutsensaari, J., Ahonen, P., Lind, T. M., Jokiniemi, J. K. and Kipelainen, M., 1992, "On the Determination of Electrostatic Precipitator Efficiency by Differential Mobility Analyzer," *J. Aerosol Sci.*, Vol. 23, pp. s795~s798.
- (12) Yoo, K. H., Lee, J. S. and Oh, M. D., 1997, "Charging and Collection of Submicron Particles in Two Stage Parallel Plate Electrostatic Precipitator," *J. Aerosol Sci.*, Vol. 27, pp. 308~323.
- (13) Liang, W. J. and Lin, T. H., 1994, "The Characteristics of Ionic Wind and Its Effect on Electrostatic Precipitators," *Aerosol Sci. Technol.*, Vol. 20, pp. 330~344.
- (14) MacDonald, J. R., Smith, W. B. and Spencer, H. W., 1977, "A Mathematical Model for Calculating Electrical Conditions in Wire Duct Electrostatic Precipitation Device," *J. Appl. Phys.*, Vol. 48, pp. 2231~2243.
- (15) Okazaki, K. and Willeke, K., 1987, "Transmission and Deposition Behavior of Aerosols in Sampling Inlets," *Aerosol Sci. Technol.*, Vol. 7, pp. 275~283.
- (16) Oglesby, S. and Nichols, G. B., 1978, *Electrostatic Precipitation*, pp. 44~45, Marcel Dekker.