

## 2단 평행판 전기집진기의 서브마이크론입자 집진성능 개선 연구

### Study on improvement of submicron particle collection performance in 2-stage parallel-plate electrostatic precipitators

유 경 훈\*, 오 명 도\*\*, 이 준 식\*\*\*  
K. H. Yoo, M. D. Oh, J. S. Lee

**Key words :** 2-stage parallel-plate ESP(2단 평행판 전기집진기), Partial charging(부분하전), Improvement of collection efficiency(집진효율 개선)

#### Abstract

It was reported by some researchers that two-stage parallel-plate ESPs, commonly called electronic air cleaners, show decreasing behavior of collection efficiency as particle size decreases below about  $0.03\mu\text{m}$ . This phenomenon is attributed to partial particle charging characteristics, where some of incoming particles are not charged in the charging cell of 2-stage parallel-plate ESP. One way to improve the decreasing collection efficiency in that particle size range is to enforce particle charging quantity in the charging cell. In the present study, in order to do this a 2-wire series-type charging cell modified from a 1-wire normal-type one was suggested and investigated theoretically and experimentally concerning improvement of the collection efficiency. It was confirmed from the experimental and theoretical works that the collection efficiency was apparently improved.

#### 기 호 설 명

<p><math>a_{ij}</math> : 적합곡선의 계수</p> <p><math>B</math> : 입자의 기계적 유동율(<math>=\frac{C_s}{3\pi\mu d_p}</math>)</p> <p><math>C_{inlet}</math> : 집진기 입구에서 측정된 입자농도</p> <p><math>C_s</math> : 미끄럼 보정인수</p> <p><math>d_p</math> : 입자지름</p>	<p><math>D_B</math> : 브라운 확산계수(<math>=\frac{kTC_s}{3\pi\mu d_p}</math>)</p> <p><math>De</math> : Deutsch 수(<math>=\frac{V_1 L_2}{UW_2}</math>)</p> <p><math>D_f</math> : 입자확산계수(<math>=D_B + D_i</math>)</p> <p><math>D_i</math> : 난류확산계수</p> <p><math>E</math> : 국소 전기장강도</p> <p><math>E_x, E_y</math> : 하전셀의 x방향, y방향 전기장성분</p> <p><math>E_2</math> : 집진셀의 전기장강도(<math>=\frac{V_2}{W_2}</math>)</p> <p><math>f</math> : 마찰 인수</p> <p><math>h</math> : 하전셀 집진판간격의 절반</p> <p><math>j_p</math> : 하전셀 집진판에서의 전류밀도</p>
--	---

\* 정회원, 한국생산기술연구원 자본재설비기술개발 센터 냉동공조연구팀  
 \*\* 정회원, 서울시립대학교 정밀기계공학과  
 \*\*\* 정회원, 서울대학교 기계공학과

- $k$  : 볼츠만상수 ( $= 1.38 \times 10^{-23} \text{J/K}$ )
- $K$  : 양의 공기이온의 전기적 유동율
- $Kn$  : 공기이온에 대한 Knudsen 수 ( $= \frac{2\lambda_i}{d_p}$ )
- $L_2$  : 집진셀의 길이
- $N_i$  : 하전셀에서의 국소 이온수농도
- $N_{oil}, N_{on}$  : 전기효과 비작동시, 작동시의 집진기 출구면에서 측정된 총입자수농도
- $Pe$  : 전기적 Peclet 수 ( $= \frac{V_i W_2}{D_p}$ )
- $P(z)$  : 가우스 확률분포함수
- $q_c$  : 전자전하 ( $= 1.6 \times 10^{-19} \text{C}$ )
- $q_p$  : 입자전하
- $R$  : 재비산인수
- $\overline{q_p}$  : 하전셀 출구면을 빠져나가는 입자들의 앙상블평균 입자하전량
- $\overline{q_{pn}}$  : 하전셀 벽면에 부착되는 궤적을 가진 입자들의 앙상블평균 입자하전량
- $s$  : 하전셀 길이의 절반
- $t$  : 시간
- $T$  : 절대온도
- $U$  : 공기의 평균속도
- $U_x, V_y$  : 하전셀내의  $x$  및  $y$ 방향 입자속도
- $U_T$  : 마찰속도
- $V_i$  : 집진셀내의 입자횡단속도 ( $= \frac{\overline{q_p} E_2 C_s}{3\pi\mu d_p}$ )
- $V_1$  : 코로나와이어 인가전압
- $V_2$  : 집진셀의 인가전압
- $W_2$  : 집진셀의 판간간격
- $y_c$  : 입자의 종결위치가 하전셀 출구면상의 ( $s, h$ )인 임계궤적의 입구출발  $y$ 값
- $y_0$  : 하전셀 입구에서의 입자의  $y$ 좌표
- $\alpha, \beta$  : 하전셀의 부분하전효과인수
- $\epsilon_0$  : 자유공간의 유전율 ( $= 8.85 \times 10^{-12} \text{F/m}$ )
- $\lambda_i$  : 공기이온의 평균자유행로 ( $= 0.0145 \mu\text{m}$ )
- $\mu$  : 공기의 분자점성계수
- $\nu$  : 무차원 입자전하 ( $= \frac{q_p q_c}{2\pi\epsilon_0 d_p k T}$ )
- $\Phi$  : 전기포텐셜
- $\rho_p$  : 입자의 밀도

- $\tau_p$  : 입자이완시간 ( $= \frac{\rho_p d_p^2 C_s}{18\mu}$ )
- $\omega$  : 무차원 전기장강도 ( $= \frac{q_c d_p E}{2kT}$ )
- $\eta_1$  : 하전셀의 집진분율(fraction)
- $\eta_2$  : 집진셀의 집진분율(fraction)
- $\eta_{db}$  : 집진셀의 집진효율모델 예측값
- $\eta_{ex}$  : 실험에 의한 총체적 집진효율
- $\eta_{th}$  : 이론에 의한 총체적 집진효율

### 1. 서 론

전기식 공기청정기(electronic air cleaner)<sup>(1)</sup>라고 불리는 2단 평행판 전기집진기는 1935년에 미국의 Penney 박사가 1912년에 Schmidt가 착상하여 특허낸 2단 정전식 집진원리를 이용하여 처음으로 개발하였다.<sup>(2)</sup> 이후 용접작업장 및 가공공장에서의 용접흄, 오일미스트 등의 처리와 가정 및 사무실 등의 실내공기질 개선에 널리 사용되어 왔다. 그러나 성공적인 작동과 사용에도 불구하고 정격처리대상인 서브마이크론 입경영역에서 잘 정의된 집진성능실험에 의하여 확인된 집진효율결과들이 보고되지 않았으나 최근에 Hanley et al.<sup>(3)</sup>, 오명도와 유경훈<sup>(4)</sup>, Yoo et al.<sup>(5)</sup>이 신뢰성 있는 연구결과를 발표하였다. 한편, Hanley et al.<sup>(3)</sup>은 처음으로 약 0.03 $\mu\text{m}$ 이하 입경영역에서 입경이 감소함에 따라 집진효율이 감소됨을 보고하였고 후에 Yoo et al.<sup>(5)</sup>에 의하여 하전셀을 통과하는 일부의 입자들이 전혀 전기적으로 하전되지 않는 부분하전(partial charging)현상이 0.03 $\mu\text{m}$  이하 입경영역에서 발생하며 이 부분하전 효과로 인해 2단 평행판 전기집진기의 집진효율이 크게 감소하게 됨이 이론적, 실험적으로 규명되었다.

부분하전효과를 감소시켜 이러한 미세입경영역에서의 감소하는 집진효율을 개선시키는 한가지 방법은 하전셀내에서의 입자하전량을 강화시키는 것이다. 본 연구에서는 이를 위하여 기존의 정격 2단 평행판 전기집진기의 1-와이어 하전셀과 모든 조건이 동일한 2-와이어 하전셀을 제안하고 미세입경영역에서의 집진성능 향상에 관하여 이론적, 실험

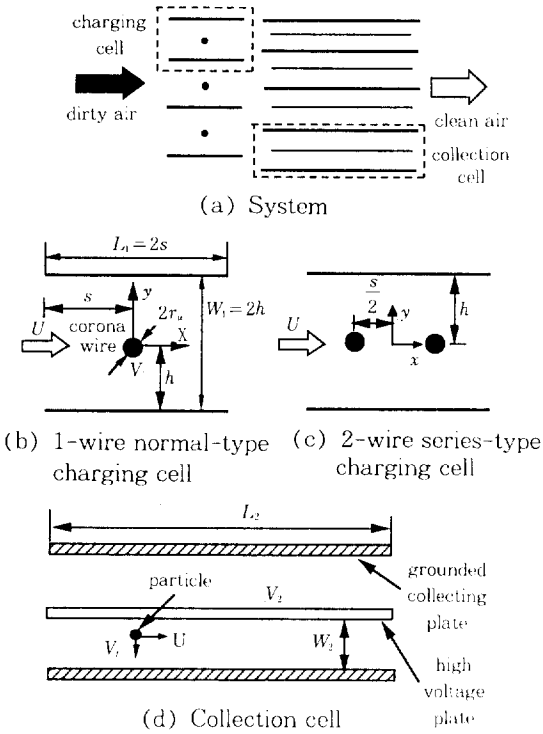


Fig.1 Modeling of a 2-stage parallel-plate ESP

Table 1 Operation conditions of the present 2-stage parallel-plate ESP

Radius of wire $r_c$ (mm)	0.1
Width of charging cell $W_1$ (mm)	45
Length of charging cell $L_1$ (mm)	60
Width of collecting cell $W_2$ (mm)	6
Length of collecting cell $L_2$ (mm)	190
Applied voltage of corona wire $V_c$ (kV, positive)	11.5
Applied voltage of high voltage plate $V_2$ (kV, positive)	6
Velocity of gas $U$ (m/s)	2.5
Temperature of air $T$ (K)	293
Pressure of air $P$ (atm)	1
Viscosity of air $\mu$ (kg/m-s)	$1.8 \times 10^{-4}$
Air mean free path( $\mu$ m)	0.066
Ion mobility $K$ ( $m^2/V-s$ )	$1.4 \times 10^{-4}$
Ionic mean free path $\lambda_i$ ( $\mu$ m)	0.0145
Wire roughness factor	1.0

험적으로 연구하였다. 참고로 본 연구의 모든 수식과 관련된 전기적, 기계적 물리량, 상수들은 모두 SI 시스템의 MKS 단위로 계산되고 표시되었고 미언급 기호들은 기호설명부분에 나타내었다.

## 2. 이론해석

### 2.1 모델링

본 연구에서 고려될 2단 평행판 전기집진기의 개략도가 Fig.1(a)에 도시되어 있다. Fig.1(b)는 1-와이어 정규 하전셀, Fig.1(c)는 본연구에서 제안하는 2-와이어 직렬형 하전셀, Fig.1(d)는 공통으로 사용되는 집진셀을 나타낸다. 이론 및 실험에 사용되는 작동조건 및 제원, 물성치는 Table 1에 수록되어 있다.

### 2.2 입자하전율 모델

하전셀내의 서브마이크론 입자들은 코로나방전에 의해 생성된 양의 공기이온(positive air ion)들에게 노출되어 단극성 확산하전(unipolar diffusion charging)과 단극성 전기장하전(unipolar field charging)이 동시에 발생하는 단극성 복합하전(unipolar combined charging)의 지배를 받게 된다. 본 연구의 고려 입경영역  $0.01\mu\text{m} \sim 1.0\mu\text{m}$ 는 양의 공기이온에 대한 Knudsen 수  $\text{Kn} = 2\lambda/d_p$ 가  $0.029 < \text{Kn} < 2.9$ 이므로 천이하전 특성 영역( $0.1 \sim 0.3 < \text{Kn} < 10$ )과 연속체하전 특성영역( $\text{Kn} < 0.1 \sim 0.3$ )에 속한다.<sup>(6)</sup> 천이하전영역에서의 복합하전 이론은 아직 규명되지 않은 상태이고<sup>(5,6)</sup> 본 연구의 처리입경이 거의 천이영역과 연속체영역의 경계에 해당해서 천이영역에 있는 부분도 어느정도 연속체영역의 기동을 따른다고 간주할 수 있다. 본 연구에서는 고려 입경영역 전체에 걸쳐 연속체 복합하전이론을 적용하였다. 따라서 다음식으로 기술되는 Fjeld and McFarland<sup>(7)</sup>가 제안한 입자하전율 모델을 고려하였다.

$$\frac{dq_p}{dt} = \left( \frac{dq_p}{dt} \right)_{\text{unif}} \quad \text{for } 0 \leq \omega \leq 0.1 \quad (1a)$$

$$\frac{dq_p}{dt} = \left( \frac{dq_p}{dt} \right)_{\text{cont}} \quad \text{for } \omega \geq 10 \quad (1b)$$

$$\frac{dq_p}{dt} = 2\pi d_p k T K N \exp\left(\sum_{ij} a_{ij} \nu (\ln \omega)^i\right)$$

for  $0.1 \leq \omega \leq 10$  and  $0 \leq \nu \leq 20$  (1c)

$$\frac{dq_p}{dt} = \left(\frac{dq_p}{dt}\right)_{\text{Fuchs}} + \left(\frac{dq_p}{dt}\right)_{p-M}$$

for  $0.1 \leq \omega \leq 10$  and  $\nu \geq 20$  (1d)

여기서  $\omega = q_p d_p E / 2kT$ 는 무차원 전기장강도,  $\nu = q_p q_i / 2\pi \epsilon_0 d_p kT$ 는 무차원 입자전하,  $t$ 는 시간,  $d_p$ 는 입자지름,  $k$ 는 볼츠만상수,  $T$ 는 절대온도,  $K$ 는 양의 공기이온의 전기적 유동율,  $N_i$ 는 국소 이온수농도,  $q_i$ 는 전자전하,  $E$ 는 국소 전기장 강도,  $\epsilon_0$ 는 자유공간의 유전율이다. 식 (1a)의 Fuchs<sup>(8)</sup>의 단극성 확산하전율, 식(1b)의 Pauthenier and Moreau-Hanot<sup>(9)</sup>의 단극성 전기장하전율, 식(1c)의 적합곡선의 계수  $a_{ij}$ 는 Fjeld and McFarland<sup>(7)</sup>의 연구에 수록되어 있다.

### 2.3 전기장강도 및 이온수농도

식 (1)의 계산에 있어 요구되는 하전셀내의 국소 전기장강도  $E$ 와 이온수농도  $N_i$ 를 구하기 위하여 공기이온들은 모두 1가 이온(singly charged ion)들로 이루어져 있다고 가정하면 다음의 정전장 지배방정식을 고려할 수 있다.

$$\frac{\partial^2 \Phi}{\partial x^2} = -\frac{q_p N_i}{\epsilon_0}$$

(2a)

$$\frac{\partial}{\partial x} \left( q_p N_i K \frac{\partial \Phi}{\partial x} \right) = 0$$

(2b)

여기서  $\Phi$ 는 전기포텐셜이다. 포아송방정식 식 (2a)에 적용된 유한체적법(finite volume method)<sup>(10)</sup>을 제외하면 본 연구에 도입된 경계조건 및 수치해석방법은 근본적으로 McDonald et al.<sup>(11)</sup>의 연구와 동일하다. 계산영역은 Fig.1(b)의 1-wire 정규형하전셀의 경우 대칭성으로 인하여 하전셀의 제1사분면을 선택하였고 채택된 격자계는  $27(x) \times 21(y)$ 이다. Fig.1(c)의 2-wire 직렬형 하전셀의 경우는 2개의 1-wire 정규형 하전셀이 직렬로 결합된 것으로 간주할 수 있으므로 1개에 대해 계산한 것을 대칭적으로 반복사용하면 된다.

임의의 주어진 하전셀 접지판에서의 전류밀도 (current density)  $j_p$ 에 대해 코로나와이어의 인가 전압  $V_i$ 를 추적해가는 half-interval shooting 방법<sup>(12)</sup>을 도입하였으며 수렴조건은 다음과 같이 채택하였다.

$$\left| \frac{(j_p)_{\text{given}} - (j_p)_{\text{cal}}}{(j_p)_{\text{given}}} \right| \leq 10^{-4}$$

and  $\text{MAX} \left| \frac{\Phi_n - \Phi_0}{\Phi_0} \right| \leq 10^{-6}$

여기서,  $(j_p)_{\text{given}}$ 과  $(j_p)_{\text{cal}}$ 은 각각 하전셀 접지판에서의 주어진 전류밀도(A/m<sup>2</sup>)와 계산된 전류밀도이고  $\Phi_0$ 와  $\Phi_n$ 는 하전셀내의 국소 전압들의 이전 계산값과 신규계산값을 각각 나타낸다. 보다더 자세한 내용은 유경훈<sup>(6)</sup>의 연구에 수록되어 있다.

### 2.4 입자운동방정식

하전셀에서의 최종 입자하전량을 얻기 위해서는 입자의 궤적을 추적해야만 한다. 하전셀내의 입자 궤적은 코로나풍 효과(corona wind effect)를 받는 것으로 알려져 있다. Yoo et al.<sup>(5)</sup>, 유경훈<sup>(6)</sup>의 고찰에 근거해서 2단 평행판 전기집진기의 하전셀내의 양의 코로나풍에 의한 난류 및 2차 유동의 영향을 무시하였다. 따라서 아래와 같은 초기조건을 가진 입자운동방정식을 고려하였다.

$$\frac{dx_p}{dt} = U_p, \quad \frac{dy_p}{dt} = V_p$$

(3a)

$$\frac{dU_p}{dt} = \frac{1}{\tau_p} (U - U_p) + \frac{Bq_p E_x}{\tau_p}$$

(3b)

$$\frac{dV_p}{dt} = \frac{1}{\tau_p} (0 - V_p) + \frac{Bq_p E_y}{\tau_p}$$

(3c)

$$x(0) = -s, \quad y(0) = y_0, \quad U_p(0) = U,$$

$$V_p(0) = 0, \quad q_p(0) = 0$$

(3d)

여기서  $x_p$ 와  $y_p$ 는  $x$ 와  $y$  방향의 입자위치,  $U_p$ 와  $V_p$ 는 입자속도,  $\tau_p$ 는 입자이완시간,  $B$ 는 입자의 기계적 유동율,  $E_x$ 와  $E_y$ 는  $x$ 와  $y$ 방향의 전기장성분,  $s$ 는 하전셀 폭의 절반,  $y_0$ 는 하전셀 입구에서의 입자의  $y$ 좌표이다. 입자하전율공식 (1)과 입자운동

방정식 (3)을 연립하여 Fourth order adaptive-stepsize Runge-Kutta scheme<sup>(13)</sup>을 적용하였다. 자세한 내용은 유경훈<sup>(6)</sup>의 연구에서 참조할 수 있다.

### 2.5 집진셀 집진성능공식

Fig.1(d)에 도시된 집진셀에서의 집진분율(fraction)을 구하기 위하여 아래와 같이 층류유동 집진 성능모델, Deutsch<sup>(14)</sup>, Cooperman<sup>(15)</sup>, Leonard et al.<sup>(16)</sup>, Zhibin and Guoquan<sup>(17)</sup>의 집진성능모델들을 고려하였다.

$$\eta_{dp, Lam} = De \text{ for } De \leq 1$$

$$= 1 \text{ for } De \geq 1 \quad (4a)$$

$$\eta_{dp, Dev} = 1 - \exp(-De) \quad (4b)$$

$$\eta_{dp, Coe} = 1 - \exp\left[\frac{UL_2}{2D_p}\right]$$

$$- \sqrt{\left(\frac{UL_2}{2D_p}\right)^2 + (1-R)Pe\left(\frac{L_2}{W_2}\right)^2} \quad (4c)$$

$$\eta_{dp, Leo} = 1 - \int_0^1 P\left(\frac{\zeta - De}{\sqrt{2De/Pe}}\right) d\zeta \quad (4d)$$

$$\eta_{dp, Zhi} = 1 - \sqrt{\frac{Pe}{4\pi De}} \int_0^1 \exp\left[-\frac{Pe}{4De}(\zeta - De)^2\right] d\zeta \quad (4e)$$

여기서  $De = V_i L_2 / UW_2$ 는 Deutsch 수,  $Pe = V_i W_2 / D_p$ 는 전기적 Peclet 수,  $V_i = \bar{q}_v E_2 C / 3\pi \mu d_p$ 는 집진셀내의 입자횡단속도,  $E_2 = V_2 / W_2$ 는 집진셀의 전기장강도,  $\bar{q}_v$ 는 하전셀 출구면을 빠져나가는 입자들의 앙상블평균 입자하전량,  $L_2$ 는 집진셀의 길이,  $W_2$ 는 집진셀의 고전압판과 접지판간 거리,  $C$ 는 미끄럼 보정인수,  $D_p$ 는 입자확산계수,  $P(z)$ 는 가우스 확률분포함수이다. Cooperman 집진성능모델식(4c)의 재비산(re-entrainment) 인수  $R$ 은  $1/Pe$ 로 평가하였다. 식(4)의  $De$ 와  $Pe$ 의 계산에 필요한 집진셀 채널유동내의 입자확산계수  $D_p$ 는 완전발달 난류 채널유동 가정을 도입하여 다음과 같이 평가하였다.

$$\frac{1}{f^{1/2}} = -1.8 \log_{10}\left(\frac{6.9}{Re}\right), \quad U_\tau = \sqrt{\frac{fU^2}{8}},$$

$$D_i = 0.12 U_\tau W_2, \quad D_p = D_i + D_{ii} \quad (5)$$

여기서  $f$ 는 마찰 인수<sup>(18)</sup>,  $U_\tau$ 는 마찰속도,  $D_i$ 는 난류확산계수,  $D_{ii}$ 는 브라운 확산계수이다.

### 2.6 총체적 집진효율

단분산 에어로졸에 대한 2단 평행판 전기집진기의 총체적 집진효율은 하전셀의 입자캐적과 부분하전효과를 고려하여 다음과 같이 유도하였다.

$$\eta_{ts} = \eta_1 + \eta_2 = \left(1 - \frac{y_r}{h}\right)\beta + \left(\frac{y_r}{h}\right)\eta_{d1}\gamma \quad (6a)$$

$$\beta = \text{MIN}\left[1, \frac{\bar{q}_{bc}}{q_i}\right], \quad \gamma = \text{MIN}\left[1, \frac{\bar{q}_v}{q_i}\right] \quad (6b)$$

여기서,  $\eta_1$ 과  $\eta_2$ 는 각각 하전셀과 집진셀의 집진분율(fraction),  $\eta_{d1}$ 는 식(4)의 각각의 집진셀 집진성능이다. 식(6)에서  $y_r$ 은 하전셀에서의 입자의 종결위치가 하전셀 출구면상의 ( $s, h$ )가 되는 임계 캐적의 입구출발  $y$ 값이고  $\alpha$ 와  $\beta$ 는 하전셀에서의

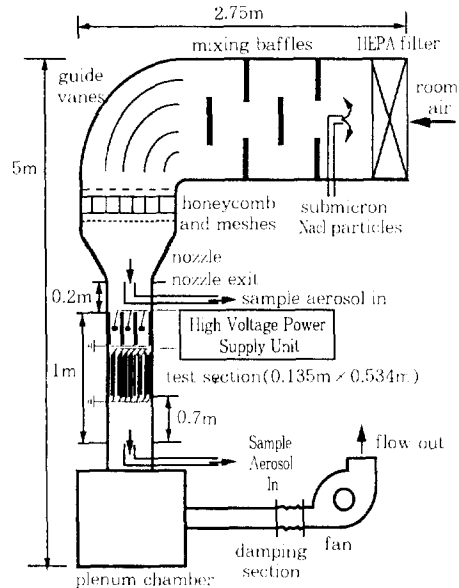


Fig.2 Schematic diagram of the clean wind tunnel for the ESD particle size efficiency experiment

부분하전 효과인수이다.  $\overline{q_m}$ 는 하전셀 벽면에 부착되는 레적을 가진 입자들의 앙상블 평균 입자하전량이다.

3. 실험 장치 및 방법

Fig.2에 도시된 실험장치는 청정풍동, 서브마이크론 입자발생부, 에어로졸 샘플링 및 전달부, 서브마이크론 입자수 농도측정부, 2단 평행판 전기집진기로 구성되었다. 청정풍동은 흡입형이며 입구 종횡비 7.5, 면적 축소비 7.6의 2차원 노즐을 가지고 있다. Fig.2에 도시된 바와 같이 전기집진기가 설치된 청정풍동의 시험부는 13.5cm(W)×53.4cm(H)의 단면적을 가지고, 정격속도 3m/s에서 노즐로부터 난류강도 0.5%, 평균속도의 균일도 0.97%의 청정기류를 공급받는다. 서브마이크론입자 발생부는 Constant Output Atomizer(Model 3076, TSI, Inc., St. Paul, MN, USA)와 기타의 에어로졸 조화장치로 이루어져 있고 사용된 수용액의 농도에 따라 기하평균지름(Geometric Mean Diameter, GMD) 0.03~0.2 $\mu$ m, 기하표준편차(Geometric Standard Deviation, GSD) 약 1.67의 대수정규분포를 이루는 서브마이크론 NaCl 입자 에어로졸들을 발생시킨다.<sup>(4,6)</sup> 에어로졸 샘플링 및 전달부는 샘플링 프로우브와 튜브로 구성되어 있고 샘플링 프로우브는 Okazaki and Willeke<sup>(19)</sup>의 설계에

근거하였다. 서브마이크론 입자수농도 측정부는 Electrical mobility detection technique을 이용하는 DMA가 내장된 DMPS(Model 3932, TSI, Inc., St. Paul, MN, USA)이다. 전기집진기가 설치된 시험부로 유입되는 청정풍동의 노즐출구면에서 측정된 에어로졸들의 입자수농도분포는 Fig.3에 도시되어 있으며 모두 대수정규분포(log-normal distribution)를 이루고 있음을 알 수 있다. 입자발생특성, 입자수농도의 측정 및 보정방법 등의 자세한 사항은 유경훈<sup>(6)</sup>의 연구를 참고할 수 있다.

응집과 같은 기계적 효과를 배제하기 위하여 시험부 출구면상에서 전기집진기 작동 및 비작동시의 수평중심선 균등분할 3등분점들에서 각각 1회씩 측정하여 다음과 같이 집진효율 실험값  $\eta_{ci}$ 를 산출하였다.

$$\eta_{ci} = \frac{N_{off} - N_{on}}{N_{off}} \tag{7}$$

여기서  $N_{on}$ 는 전기효과 비작동시의 시험부 출구면에서의 총입자수농도,  $N_{off}$ 은 전기효과 작동시의 시험부 출구면에서의 총입자수농도이다.

4. 결과 및 검토

0.01 $\mu$ m 입경에 대해서 하전셀 모델에 따른 하전셀내의 입자궤적의 변화가 Fig.4에 도시되어있

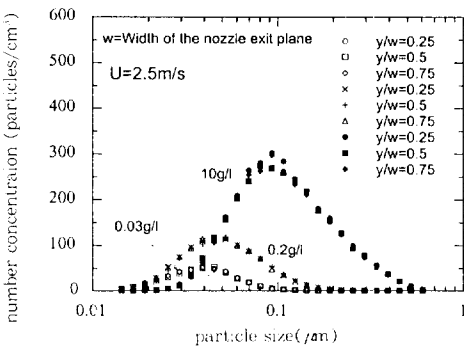


Fig.3 Number concentration distributions at the outlet of the nozzle with NaCl concentrations of 0.03g/l, 0.2g/l and 10g/l

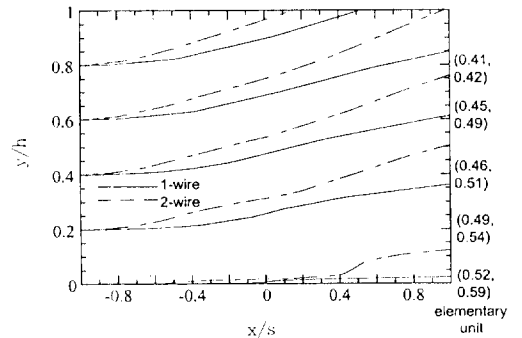


Fig.4 Variation of particle trajectories with respect to charging cell type for  $d_p=0.01 \mu$ m ( $U=2.5$ m/s,  $V_1=11.5$ kV)

다. 그림으로부터 2-와이어 직렬형 하전셀의 입자 궤적들이 1-와이어 정규하전셀의 경우보다  $y$ 방향으로의 굴절도가 상당히 증가하였음을 알 수 있다. 또한 그래프의 우측에는 각각의 입구출발위치에 대한 궤적들의 종결위치에서의 입자 전하량들이 기본 전하의 단위로 표시되어 있는데 각각의 괄호내에서 상부의 것은 1-와이어 정규 하전셀의 경우이고 하부의 것은 2-와이어 직렬형 하전셀의 경우이다. 각각의 비교로부터 2-와이어 하전셀의 경우에서 입자전하량의 증가가 이루어졌음을 알 수 있다. 한가지 중요하고도 흥미로운 사실은  $0.01\mu\text{m}$  입경에 대한 종결위치에서 입자전하량들이 모두 물리적으로는 불가능한 기본전하 1보다 낮은 값들이 얻어지고 있다는 것이다. 입자전하가 기본전하 1보다 작다는 것은 유입된 입자들중에서 일부는 전혀 전기적으로 하전되지 않았음을 의미하고 부분하전현상이 발생한 것이다.<sup>(10)</sup>

Fig.5에는  $0.01\mu\text{m}$ 입경에 대해서 하전셀 모델에 따른 입자궤적상의 국소 입자전하량의 변화가 도시되어 있다. 그림에서 가로축은 입자의 궤적을  $x$ 축에 투영한 것이다. 각각의 입구 출발위치에 대해서 2-와이어 하전셀의 경우가 1-와이어 하전셀의 경우보다 국소 입자전하량이 증가하였음을 알 수 있다. 또한, 2-와이어 하전셀의 국소 입자전하량이 1-와이어 하전셀의 경우보다 입구근처에서 더욱 급격하게 증가하였음이 관찰되고 이는 와이어의 밀집

도가 높기 때문에 국소 전기장강도와 이 운수농도가 1-와이어 하전셀보다 더 높기 때문이다. 각각의 국소 입자전하량 변화곡선에는 심볼들이 표시되어 있는데 이는 계산수행중에 입자의 위치를 일정 횟수마다 간헐적으로 표시한 것이다. 심볼들의 위치를 살펴보면  $y_0/h=0.0$ 의 경우에서 관찰되는 코로나 와이어 근방과 세로축의 스케일상 도시 못한 입구 바로근방에서 집중적으로 표시되고 있어 이 영역들에서의 입자하전율의 변화가 가장 급격하여 입자전하량의 증가가 크게 발생함을 알 수 있다. 따라서 2-와이어 하전셀에서는 높은 와이어 밀집도와 그로 인한 입구면 근처의 높은 전기장강도와 이 운수농도로 인하여 1-와이어 하전셀에서보다 더 높은 입자하전량의 증가가 유도된 것임을 알 수 있다. 한편, 전체적으로 볼때 대부분의 입자전하량이 입구 근처에서 거의 순간적으로 정상 상태값에 도달하는 특성을 보여주고 있는데 이는 외부인가 전기장의 존재에 상관없는 일반적인 단극성 하전과정(unipolar charging process)의 본질적인 특성중의 하나이며<sup>(20)</sup> 이러한 결과로 미루어 볼때 Deutsch<sup>(11)</sup> 모델의 기본 가정인 “입자들은 집진기로 들어오자마자 즉시 완전하게 하전된다.”는 가정은 어느정도 타당함을 확인할 수 있다.

Fig.6에는 1-와이어 하전셀에 대한 집진효율 계산값과 실험값이 모두 도시되어 있다. 약  $0.03\mu\text{m}$  이하 입경영역에서 모든 단분산 집진효율 곡선  $\eta_{th}$

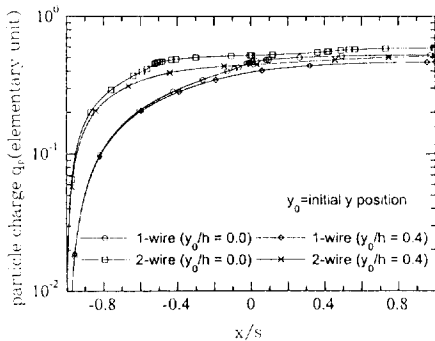


Fig.5 Variation of particle charges along trajectory with respect of charging cell type for  $d_p=0.01\mu\text{m}$  ( $U=2.5\text{m/s}$ ,  $V_1=11.5\text{kV}$ )

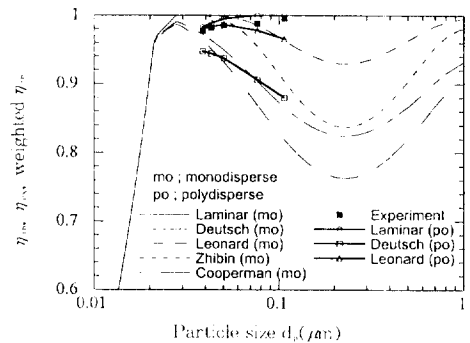


Fig.6 Comparison of the theoretical and experimental overall collection efficiencies for the normal-type charging cell ESP ( $U=2.5\text{m/s}$ ,  $V_1=11.5\text{kV}$ ,  $V_2=6\text{kV}$ )

가 입경이 감소함에 따라 급격하게 감소하고 있음을 알 수 있다. 이 감소현상은 전술한 바와 같은 부분하전효과에 기인한 것이다. 또한 그림에는 집진효율 실험값  $\eta_{ex}$ 가 도시되어 있는데 입경이 감소함에 따라 대략 97%와 100% 사이에서 감소하는 경향을 보여주고 있다. 실험값들의 가로축 좌표는 기하평균지름을 의미하며 차례로  $GMD=0.038\mu m$  ( $GSD=1.53$ ),  $0.043\mu m$ (1.58),  $0.050\mu m$ (1.62),  $0.076\mu m$ (1.73),  $0.11\mu m$ (1.79)이다. 이론과 실험의 비교를 위하여 Fig.6에는 Fig.3에 도시된 집진기로 유입되는 입구에서의 수농도분포를 다음과 같이 가중하여 얻은 다분산 집진효율  $weighted \eta_{th}$ 가 도시되어 있다.

$$weighted \eta_{th} = \frac{\sum_i (\eta_{th})_i (C_{inlet})_i}{\sum_i (C_{inlet})_i}$$

여기서,  $i$ 는 DMPS상의 측정입자크기채널,  $\eta_{th}$ 는 이론모델로부터 구한 단분산효율(식(6)),  $C_{inlet}$ 은 집진기 입구에서 측정된 입자수농도이며  $\eta_{th}$ 의 계산에 있어서는  $i$ 번째 측정채널의 대표입경이 사용되었다. 비교로부터 다분산 층류 집진효율곡선이 실험 값들과 가장 잘 일치하고 두 곡선의 변화 경향이 거의 동일함을 알 수 있다. 이는 집진셀 채널 유동내의 Reynolds 수  $Re = \frac{UW_2}{\nu}$ 가  $1935 (< 2300)$ 이기 때문이다. 한편, 다분산 층류곡선이 실험결과

들을 약간 과대에측함을 관찰할 수 있는데 이는 몇 가지 원인에 기인한 것으로 판단된다. 첫째, Fjeld and McFarland<sup>(21)</sup>가 관찰한 것처럼 연속체 복합하전이론이 전이하전특성영역에서의 입자하전량을 과대에측했기 때문이다. 둘째, 부분하전이 발생한 경우 하전된 입자들의 개수를 최대로 지정했기 때문이다. 다시 말하면 평균전하량이 기본전하 0.7로 하전된 입경의 경우 하전된 입자들은 기본전하 1 또는 기본전하 2 이상의 전하량을 가질 수 있지만 본 연구에서는 모두 기본전하 1로 하전된 것으로 간주하여 하전 입자수를 전체 유입입자들의 70%로 가정하였기 때문이다.

하전셀 모델이 집진효율에 미치는 효과가 Fig.7에 도시되어 있다. 그림에서의 다분산 집진효율  $weighted \eta_{th}$ 는 모두 층류모델에 의한 것이다. 2-와이어 하전셀의 경우에서도 역시 실험치와 이론치의 일치를 관찰할 수 있다. 그림으로부터 2-와이어 하전셀을 사용함으로써 집진효율의 뚜렷한 향상이 있음을 이론적, 실험적으로 확인할 수 있다. 한가지 주목할 것은 2-와이어 하전셀의 경우 실험치와 이론치의 차이가 1-와이어 하전셀의 경우보다 상당히 감소했다는 점이다. 이는 명백히 하전셀에서의 입자전하량을 강화시켜 주었을 뿐 아니라 하전되지 않은 입자들의 개수를 확실하게 감소시켜 부분하전효과를 감소시켰음을 의미하는 것이다. 따라서 다중와이어 하전셀은 1-와이어 정규 하전셀보다 부분하전 효과를 감소시키는 데 있어 더욱 효율적이라고 결론지을 수 있다.

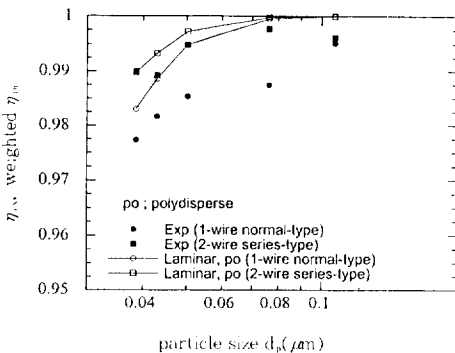


Fig.7 Effect of the charging cell type on overall collection efficiency ( $U=2.5m/s$ ,  $V_1=11.5kV$ ,  $V_2=6kV$ )

## 5. 결 론

서브마이크론 입경영역에서 2단 평행판 전기집진기의 집진성능 평가와 개선에 관한 이론적, 실험적 연구를 수행하고 다음과 같은 사항들을 관찰하였다.

1) 2-와이어 직렬형 하전셀은 동일한 재원 및 작동조건을 갖는 1-와이어 정규 하전셀보다 서브마이크론 입경영역에서 부분하전효과를 줄여서 효율을 향상시키는 데 있어 더 이롭다.

2) 본 연구의 집진효율모델은 2-와이어 하전셀을 가진 2단 평행판 전기집진기의 집진효율 실험



결과들을 잘 예측해 주었다.

3) Table 1의 2-와이어 하전셀을 가진 2단 평행판 전기집진기는 GMD  $0.03\mu\text{m}\sim 0.2\mu\text{m}$ , GSD 약 1.65의 다분산 NaCl입자 에어로졸에 대해 98%에서 100%사이의 높은 집진효율 실험값들을 보여주었다.

### 참 고 문 헌

- ASHRAE, 1992, "Air Cleaners for Particulate Contaminants", ASHRAE Handbook-Heating, Ventilating and Air-Conditioning Systems and Equipment, Atlanta, Georgia, ASHRAE, Inc., Chapter 25.
- White, H. J., 1963, Industrial Electrostatic Precipitation, Addison-Wesley, Reading, Massachusetts.
- Hanley, J. T., Smith, D. D., Lawless, P. A., Ensor, D. S. and Sparks, L. E., 1990, "A Fundamental Evaluation of an Electronic Air Cleaner", Proc. of the 5th International Conference on Indoor Air Quality and Climate, July 29-August 3, Toronto, Vol.3, pp. 145~150.
- 오명도, 유경훈, 1994, "2단 평행판 전기집진기의 서브마이크론 입자 포집특성실험", 공기조화 냉동공학 논문집, Vol. 6, No. 3, pp. 237~246.
- Yoo, K. H., Lee, J. S. and Oh, M. D., 1997, "Charging and Collection of Submicron Particles in Two-Stage Parallel-Plate Electrostatic Precipitators", Aerosol Science and Technology, In press.
- 유경훈, 1996, 2단 평행판 정전식 집진기의 입자 하전 및 포집에 관한 연구, 공학박사 학위논문, 서울대학교.
- Fjeld, R. A. and McFarland, A. R., 1989, "Evaluation of Select Approximations for Calculating Particle Charging Rates in the Continuum Regime", Aerosol Science and Technology, Vol.10, pp. 535~549.
- Fuchs, N. A., 1947, "The Charges on the Particles of Aerocolloids", Izv. Akad. Nauk. SSSR, Ser. Geogr. Geofiz., Vol. 11, pp. 341~348.
- Pauthenier, M. M. and Moreau-Hanot, 1932, "Charging of Spherical Particles in an Ionizing Field", J. de Physique et Le Radium, Vol. 3, pp. 590~613.
- Patankar, S. V., 1980, Numerical Heat Transfer and Fluid Flow, McGraw-Hill, New York.
- McDonald, J. R., Smith, W. B., Spencer III, H. W. and Sparks, L. E., 1977, "A Mathematical Model for Calculating Electrical Conditions in Wire-Duct Electrostatic Precipitation Device", J. Applied Physics, Vol. 48, pp. 2231~2243.
- Carnahan, B., Luther, H. A. and Wilkes, J. O., 1969, Applied Numerical Methods, John Wiley & Sons, New York.
- Press, W. H., Flannery, B. P., Teukolsky, S. A. and Vetterling, W. T., 1986, Numerical Recipes, Cambridge University Press, Cambridge.
- Deutsch, W., 1922, "Bewegung und Ladung der Elektrizitatstrager im Zylinderkondensator", Annalen der Physik, Vol. 68, pp. 335~344.
- Cooperman, P., 1971, "A New Theory of Precipitator Efficiency", Atmospheric Environment, Vol. 5, pp. 541~551.
- Leonard, G. L., Mitchner, M. and Self, S. A., 1982, "Experimental Study of the Effect of Turbulent Diffusion on Precipitator Efficiency", J. Aerosol Science, Vol. 13, No. 4, pp. 271~284.
- Zhibin, Z. and Guoquan, Z., 1994, "Investigations of the Collection Efficiency of an Electrostatic Precipitator with Turbulent Effects", Aerosol Science and Technology, vol. 20, pp. 169~176.

18. White, F. M., 1986, Fluid Mechanics, McGraw Hill, New York.
19. Okazaki, K. and Willeke, K., 1987, "Transmission and Deposition Behavior of Aerosols in Sampling Inlets". *Aerosol Science and Technology*, Vol.7, pp. 275~283.
20. Liu, B. Y. H. and Kapadia, A., 1978, "Combined Field and Diffusion Charging of Aerosol Particles in the Continuum Regime", *J. Aerosol Science*, Vol. 9, pp. 227~242.
21. Fjeld, R. A. and McFarland, A. R., 1986, "Bipolar Charging in the Transition Regime", *J. Aerosol Science*, Vol. 17, pp. 653~667.