

광폭 전기집진기의 집진 특성에 관한 수치적 연구

김 용 진[†], 홍 원 석, 정 상 현, 하 병 길, 하 대 흥*, 유 주 식**

한국기계연구원 열유체환경연구부, *한서대학교 항공기계학과, **안동대학교 기계교육과

A Numerical Study on the Collection Characteristics of a Wide Plate-Spacing Electrostatic Precipitator

Yong J. Kim[†], Won S. Hong, Sang H. Jeong, Byung K. Ha, Dae H. Ha*, J.-S. Yoo**

Korea Institute of Machinery & Metals, Yuseong, P.O. Box 101, Daejeon 305-343, Korea

*Department of Aeronautical and Mechanical Engineering, Hanseo University, Seosan 356-706, Korea

**Department of Mechanical Engineering Education, Andong National University, Andong 760-749, Korea

(Received June 8, 2001; revision revised October 16, 2001)

ABSTRACT: The electrical characteristics and particle collection efficiency of a wide-plate spacing electrostatic precipitator are numerically investigated, and the results are compared with those obtained experimentally. The electric potential and field strength near the collection plate increase with increasing the plate spacing. The electric field strength of a discharge electrode of a twisted pin type is larger than that of a rectangular type. As the roughness factor of the discharge electrode wire becomes small, or the plate spacing becomes narrow, the corona current of the precipitator increases. The numerical results agree well with those obtained from experimental method.

Key words: Wide-plate spacing electrostatic precipitator(광폭 전기집진기), Numerical analysis (수치해석), Electrical characteristics(전기적 특성), Particle collection efficiency(집진효율)

기 호 설 명

A : 집진 면적 [m^2]

a : 입자 반경 [μm]

a_x : x -방향의 격자점 간격 [m]

a_y : y -방향의 격자점 간격 [m]

b : 이온 이동도 [$m^2/V\text{-sec}$]

b_e : 이온과 입자의 유효 이동도 [$m^2/V\text{-sec}$]

b' : 유효 이동도 [$m^2/V\text{-sec}$]

b_s : 방전극 이온화 영역경계에서의 이온 이동도 [$m^2/V\text{-sec}$]

d_p : 입자의 지름 [μm]

E : 전계강도 [V/m]

E_{avg} : 극간의 평균 전계강도 [V/m]

E_c : 분진의 대전역에서의 전계강도 [$volt/m$]

E_p : 집진판 근방의 전계강도 [$volt/m$]

e : 전자전하량 [$coul$]

f : 방전극 거칠기계수

G : 전기집진기의 성능계수

I : 코로나 전류 [A]

J : 전류밀도 [A/m^2]

J_p : 집진판에서의 평균 전류밀도 [A/m^2]

[†] Corresponding author

Tel.: +82-42-868-7475; fax: +82-42-868-7284

E-mail address: yjkim@kimm.re.kr

j_t	: 집진판에서의 총 전류밀도 [A/m^2]
j_p	: 집진판에서의 입자의 전류밀도 [A/m^2]
K	: 입자의 유전상수
k	: 볼츠만 상수 [$J/^\circ K$]
N	: 입자의 수
N_0	: 자유 이온밀도 [m^{-3}]
Q	: 가스유량 [m^3/sec]
q	: 하전량 [coul]
q_i	: t_i 에서의 하전량 [coul]
q_D	: 확산대전 이론에 따른 하전량 [coul]
q_F	: 장대전 이론에 따른 하전량 [coul]
q_s	: 장대전에 의한 포화대전량 [coul]
r_0	: 전체 전장의 반경요소가 0이 되는 θ 방향의 반경거리 [m]
r_w	: 방전극 직경 [cm]
S_x	: 방전극과 집진판 사이의 간격 [m]
S_y	: 방전극 간격의 절반 [m]
SCA	: 비집진면적 [$m^2/(m^3/sec)$]
T	: 절대온도 [$^\circ K$]
T_g	: 가스의 온도 [$^\circ C$]
t	: 시간 [sec]
t_i	: 고정된 조건에서의 초기 하전시간 [sec]
t_f	: 고정된 조건에서의 최종 하전시간 [sec]
U_g	: 가스의 속도 [m/s]
V	: 전기 포텐셜 [volt]
V_w	: 방전극의 인가전압 [V]
\tilde{v}	: 이온의 평균 열적 속도 [m/s]
W	: 광폭전기 집진기의 집진판 간격
x	: 방전극에서 집진판으로의 좌표계
y	: 집진판과 평행한 좌표계

그리스 문자

δ	: 가스의 상대밀도
ϵ_0	: 진공에서의 유전율 [coul/N \cdot m 2]
η	: 집진효율
θ	: 입자 중심을 원점으로 하는 구 좌표계의 방위각 [radian]

θ_0	: 입자로 유입되는 전력선의 최대 방위각 [radian]
μ	: 가스의 점성계수 [kg/m \cdot sec]
ρ	: 공간 전하밀도 [coul/m 3]
ρ_s	: 방전극 이온화 영역경계에서의 공간 전하밀도 [coul/m 3]
ω	: 입자의 이동속도 [m/s]

하첨자

x	: x -방향의 양을 나타냄
y	: y -방향의 양을 나타냄

1. 서 론

전기집진기는 대량의 배기가스를 처리할 수 있고 구조적으로 매우 단순하므로 대기로 방출되는 입자상 오염물질들을 제거하는 대표적인 장치로 널리 사용되고 있다.⁽¹⁻³⁾ 특히 수백 MW의 전력을 생산하는 석탄 화력발전소에서 플라이 애쉬(fly ash)를 제거하는 가장 경제적인 수단으로 사용되고 있다. 최근의 환경규제의 강화에 따라 전기집진기에서도 새로운 연구개발이 진행되고 있는데, 그 가운데 가장 큰 문제점의 하나로, 황 함유율이 낮은 석탄으로부터 생성되는 플라이 애쉬의 전기저항은 집진기에서의 역전리(back ionization)를 생성시킬 정도로 매우 높다.

역전리는 집진된 분진층에 형성된 불평등 전계가 파괴되는 현상으로 집진판에 부착된 분진의 재비산을 동반한다. 이로 인하여 유동가스 속으로 분진이 재유입되어 집진효율이 낮아지게 된다. 이와 같이 전기저항이 높은 분진의 역전리 문제를 해결하기 위한 기술적인 방안으로, 펄스(pulse) 하전 등의 여러 가지 방법이 있으나, 설치비가 및 유지보수비용의 절감차원에서 집진판 간격을 확대시키는 광폭 전기집진기(wide plate-spacing electrostatic precipitator, WPEP)에 관한 연구가 활발하게 적용되고 있다.

일반적으로 전기집진기의 성능은 비집진면적(specific collection area, SCA)의 크기에 의존한다. 따라서 초기에는 높은 집진효율을 얻기 위하여 동일한 집진거리에 대하여 비집진면적을 증가시키기 위해 노력해 왔다. 즉 집진판 사이의 거

리를 감소시켜, 집진판 간격을 주로 250~300 mm로 설계하였다. 그러나 집진판 간격을 넓은 광폭 전기집진기의 가장 큰 특성은 집진판 간격의 증가로 인한 비집진면적의 감소에도 불구하고 집진 효율이 높게 나타난다는 것이다. 이에 따라 근래에는 많은 연구자들이 설치비를 절감하고 집진 성능을 개선하기 위하여 집진기의 케이스를 확장하지 않고 집진판 간격을 넓히기 위한 연구를 수행하고 있다.⁽⁴⁻⁷⁾

최근 김용진 등⁽⁶⁻⁸⁾은 실험실 규모의 광폭 전기 집진기를 제작하여 방전극 형상과 집진판 간격 등의 여러 가지 설계요소들이 집진 특성에 미치는 영향을 조사하였다. 그리고 최근에는 2단 및 1단 전기집진기에 대하여 전기집진의 전기 및 유동장에 대한 수치해석에 관한 기본적인 연구를 수행하였다.^(9,10)

본 연구에서는 평판형의 광폭 전기집진기에 대하여 간단하고 응용 가능성이 높은 수치해석적인 방법을 적용하여, 광폭 전기집진기의 전기 및 집진 특성을 해석하고 여기에서 구한 결과들을 실험결과와 비교한다.

2. 해 석

2.1 전기장

전기 포텐셜과 공간 전하밀도에 대한 정상 상태의 지배방정식은 다음과 같다.

$$\frac{\partial^2 V}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 V}{\partial y^2} = -\frac{\rho}{\epsilon_0} \quad (1)$$

$$\rho^2 = \epsilon_0 \left(\frac{\partial V}{\partial x} \frac{\partial \rho}{\partial x} + \frac{\partial V}{\partial y} \frac{\partial \rho}{\partial y} \right) + \frac{\epsilon_0 \rho}{b_e} \left(\frac{\partial V}{\partial x} \frac{\partial b_e}{\partial x} + \frac{\partial V}{\partial y} \frac{\partial b_e}{\partial y} \right) \quad (2)$$

식(1)과 식(2)를 풀기 위한 집진기 내의 기초적인 계산영역을 Fig. 1에 도시하였다. 그리고 Fig. 2에는 수치해석에 사용되는 구조와 기호를 나타내었다. 수치적인 기법을 사용하기 위해서 Fig. 2에 나타낸 것처럼 계산영역을 작은 사각계산 격자로 나눈다. Fig. 2의 격자점에서 중앙차분법을 적용하면 다음과 같이 된다.

$$\frac{\Delta V_0}{\Delta x} = \frac{1}{2a_x} (V_4 - V_2) \quad (3)$$

$$\frac{\Delta V_0}{\Delta y} = \frac{1}{2a_y} (V_1 - V_3) \quad (4)$$

식(3)과 식(4)를 식(1)에 적용하여 V_0 를 구하면 다음과 같다.

$$V_0 \approx \frac{1}{2(a_x^2 + a_y^2)} \times \left[a_y^2 (V_2 + V_4) + a_x^2 (V_1 + V_3) + \frac{a_x^2 a_y^2 \rho_0}{\epsilon_0} \right] \quad (5)$$

ρ 와 b 에 대한 일차 미분은 다음과 같이 쓸 수 있다.

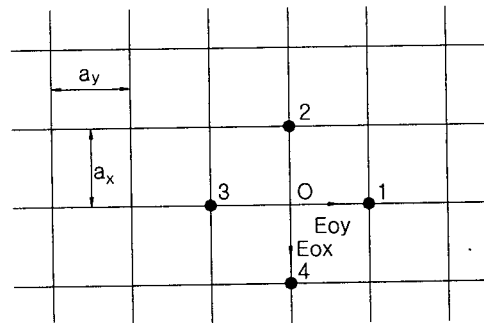
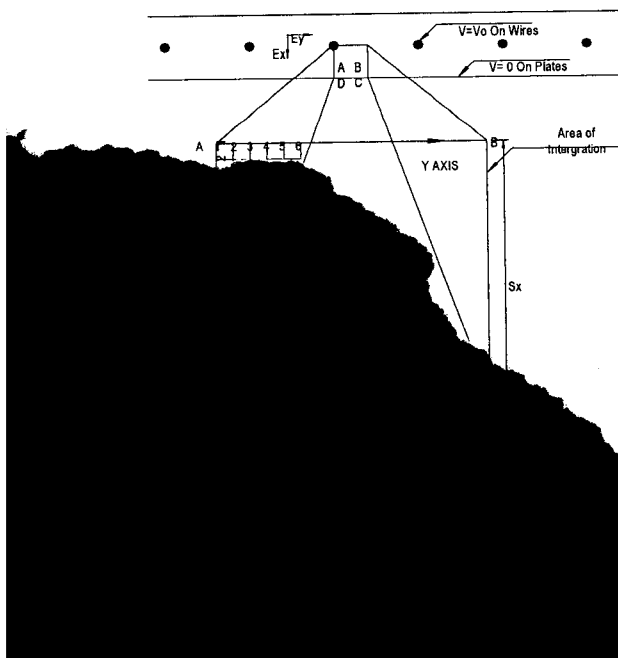


Fig. 2 Partial grid generation and nomenclature.

리를 감소시켜, 집진판 간격을 주로 250~300 mm로 설계하였다. 그러나 집진판 간격을 넓힌 광폭 전기집진기의 가장 큰 특성은 집진판 간격의 증가로 인한 비집진면적의 감소에도 불구하고 집진 효율이 높게 나타난다는 것이다. 이에 따라 근래에는 많은 연구자들이 설치비를 절감하고 집진 성능을 개선하기 위하여 집진기의 케이스를 확장하지 않고 집진판 간격을 넓히기 위한 연구를 수행하고 있다.⁽⁴⁻⁷⁾

최근 김용진 등⁽⁶⁻⁸⁾은 실험실 규모의 광폭 전기 집진기를 제작하여 방전극 형상과 집진판 간격 등의 여러 가지 설계요소들이 집진 특성에 미치는 영향을 조사하였다. 그리고 최근에는 2단 및 1단 전기집진기에 대하여 전기집진의 전기 및 유동장에 대한 수치해석에 관한 기본적인 연구를 수행하였다.^(9,10)

본 연구에서는 평판형의 광폭 전기집진기에 대하여 간단하고 응용 가능성이 높은 수치해석적인 방법을 적용하여, 광폭 전기집진기의 전기 및 집진 특성을 해석하고 여기에서 구한 결과들을 실험결과와 비교한다.

2. 해 석

2.1 전기장

전기 포텐셜과 공간 전하밀도에 대한 정상 상태의 지배방정식은 다음과 같다.

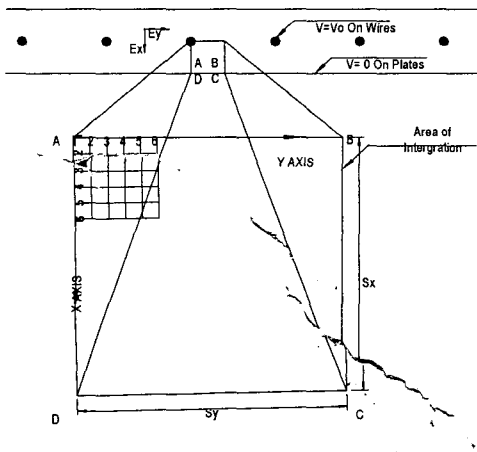


Fig. 1 Nomenclature used in the numerical analysis.

$$\frac{\partial^2 V}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 V}{\partial y^2} = -\frac{\rho}{\epsilon_0} \quad (1)$$

$$\rho^2 = \epsilon_0 \left(\frac{\partial V}{\partial x} \frac{\partial \rho}{\partial x} + \frac{\partial V}{\partial y} \frac{\partial \rho}{\partial y} \right) + \frac{\epsilon_0 \rho}{b_e} \left(\frac{\partial V}{\partial x} \frac{\partial b_e}{\partial x} + \frac{\partial V}{\partial y} \frac{\partial b_e}{\partial y} \right) \quad (2)$$

식(1)과 식(2)를 풀기 위한 집진기 내의 기초적인 계산영역을 Fig. 1에 도시하였다. 그리고 Fig. 2에는 수치해석에 사용되는 구조와 기호를 나타내었다. 수치적인 기법을 사용하기 위해서 Fig. 2에 나타낸 것처럼 계산영역을 작은 사각계산 격자로 나눈다. Fig. 2의 격자점에서 중앙차분법을 적용하면 다음과 같이 된다.

$$\frac{\Delta V_0}{\Delta x} = \frac{1}{2a_x} (V_4 - V_2) \quad (3)$$

$$\frac{\Delta V_0}{\Delta y} = \frac{1}{2a_y} (V_1 - V_3) \quad (4)$$

식(3)과 식(4)를 식(1)에 적용하여 V_0 를 구하면 다음과 같다.

$$V_0 \approx \frac{1}{2(a_x^2 + a_y^2)} \times \left[a_y^2 (V_2 + V_4) + a_x^2 (V_1 + V_3) + \frac{a_x^2 a_y^2 \rho_0}{\epsilon_0} \right] \quad (5)$$

ρ 와 b_e 에 대한 일차 미분은 다음과 같이 쓸 수 있다.

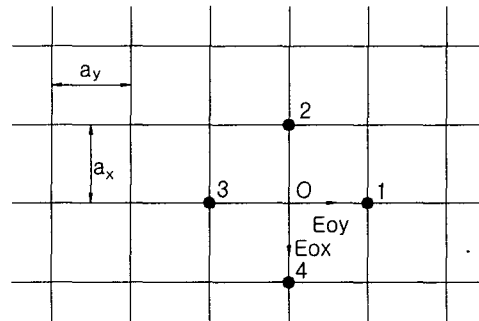


Fig. 2 Partial grid generation and nomenclature.

$$\frac{\Delta \rho_0}{\Delta x} = \frac{\rho_0 - \rho_2}{a_x} \quad (6)$$

$$\frac{\Delta \rho_0}{\Delta y} = \frac{\rho_0 - \rho_3}{a_y} \quad (7)$$

$$\frac{\Delta b_0}{\Delta x} = \frac{b_0 - b_2}{a_x} \quad (8)$$

$$\frac{\Delta b_0}{\Delta y} = \frac{b_0 - b_3}{a_y} \quad (9)$$

그리고 식(2)에서 ρ_0 를 구하면 다음과 같다.

$$\rho_0 = -\alpha \pm \sqrt{\alpha^2 + \beta} \quad (10)$$

$$\begin{aligned} \text{여기에서 } \alpha &= \frac{\varepsilon_0(2A_1 - A_2)}{2a_x a_y b_0} \\ A_1 &= a_y b_0 E_{0x} + a_x b_0 E_{0y} \\ A_2 &= a_y b_2 E_{0x} + a_x b_3 E_{0y} \\ \beta &= \frac{\varepsilon_0(a_y E_{0x} \rho_2 + a_x E_{0y} \rho_3)}{a_x a_y} \end{aligned}$$

식(5)와 식(10)에 대한 경계조건은 다음과 같다.

- (a) $V = V_w$ 방전극에서의 인가전압
- (b) J_p 집진판에서의 전류밀도
- (c) $V = 0$: 선 CD
- (d) $\frac{\partial V}{\partial x} = 0, \frac{\partial V}{\partial y} = 0$: 점 A와 B
- (e) $\frac{\partial V}{\partial x} = 0$: 선 AB
- (f) $\frac{\partial V}{\partial y} = 0$: 선 BC, CD 및 AD

선 AB, BC 및 CD에 대한 경계조건은 식(10)을 매우 간단하게 하고, 식(5)와 식(10)의 해를 구할 수 있게 한다. 선 AB, BC 및 CD에서 α 와 β 는 다음과 같이 표현된다.

$$\alpha_{AB} = \frac{\varepsilon_0(2a_x b_0 E_{0y} - 2a_x b_3 E_{0y})}{2a_x a_y b_0} \quad (11)$$

$$\begin{aligned} \alpha_{BC} &= \alpha_{AD} = \alpha_{CD} = \alpha_{AB} \\ &= \frac{\varepsilon_0(2a_y b_0 E_{0x} - 2a_y b_2 E_{0x})}{2a_x a_y b_0} \end{aligned} \quad (12)$$

$$\beta_{AB} = \frac{\varepsilon_0 E_{0y} \rho_2}{a_x} \quad (13)$$

그리고

$$\beta_{BC} = \beta_{AD} = \beta_{CD} = \frac{\varepsilon_0 E_{0x} \rho_2}{a_x} \quad (14)$$

식(5)와 (10)의 해를 구하는 수치해석을 시작하기 위해서는 모든 계산 격자에서 전압 포텐셜의 초기값과 코로나 영역의 공간 전하밀도를 결정하는 것이 필요하다. 전압 포텐셜의 초기값은 공간 전하를 고려하지 않을 때 다음과 같이 결정된다.⁽¹³⁾

$$\begin{aligned} \frac{V(x, y)}{V_w} &= \\ &= \frac{\sum_{m=0}^{\infty} \ln \left[\frac{\cosh \pi(y - 2mS_y)}{2S_x} - \cos(\pi x/2S_x) \right]}{\sum_{m=0}^{\infty} \ln \left[\frac{\cosh \pi(y - 2mS_y)}{2S_x} + \cos(\pi x/2S_x) \right]} \\ &= \frac{\sum_{m=0}^{\infty} \ln \left[\frac{\cosh(\pi m S_y/S_x) - \cos(\pi r_w/2S_x)}{\cosh(\pi m S_y/S_x) + \cos(\pi r_w/2S_x)} \right]}{\sum_{m=0}^{\infty} \ln \left[\frac{\cosh(\pi m S_y/S_x) - \cos(\pi r_w/2S_x)}{\cosh(\pi m S_y/S_x) + \cos(\pi r_w/2S_x)} \right]} \end{aligned} \quad (15)$$

그리고 방전극 가까이의 초기 공간 전하밀도는 코로나 영역이 실린더형이고 전류는 연속적이라는 가정 하에서 결정된다. 이 초기값은 다음과 같다.

$$\rho_s = \frac{2 \times 10^{-3} S_y J_p}{\pi b_s r_w f(30\delta + 9\sqrt{\delta/r_w})} \quad (16)$$

포텐셜 계산은 모든 격자점에서의 포텐셜 변화량이 0.001% 이하가 될 때까지 수행된다. 계산된 전류밀도 $J = -\rho \left(\frac{\Delta V}{\Delta x} \right) b$ 는 측정된 전류밀도와 비교된다. 그리고 계산된 전류밀도와 측정된 전류밀도의 차가 1% 이상이면 코로나 영역을 나타내는 공간 전하를 보정하고, 이 두 값의 차가 1% 이하로 일치할 때까지 반복하여 계산한다.

2.2 입자 하전량

단극 이온하전(unipolar ionic charging)에서 입자 하전은 입자 직경, 노출시간 및 전기적 조건의 함수로 이루어진다.⁽¹²⁾ 입자의 하전에 대한 식은 동력학적 이론을 기본으로 하며 입자와 이

온간의 충돌 가능성에서 하전률을 결정한다. 이 이론은 장대전(field charging)과 확산대전(diffusion charging)을 동시에 계산하고 확산하전에 전장이 미치는 영향을 계산한다. 이 이론에 따르면 하전률은 다음과 같이 계산된다.⁽¹³⁾

$$\begin{aligned} \frac{dq}{dt} &= \frac{N_0 e b q_s}{4\epsilon_0} \left(1 - \frac{q}{q_s}\right)^2 \\ &+ \frac{\pi a^2 \tilde{v} N_0 e}{2} \int_{\theta_0}^{\pi/2} \exp[F(\theta)] \sin \theta d\theta \\ &+ \frac{\pi a^2 \tilde{v} N_0 e}{2} \exp(-qe/4\pi\epsilon_0 akT) \quad (17) \\ F(\theta) &= \frac{qe(r_0 - a)}{4\pi\epsilon_0 kT a r_0} \\ &+ eE_{avg} \cos \theta \frac{[3ar_0^2 - r_0^3(K+2) + a^3(K-1)]}{kT r_0^2 (K+2)} \end{aligned}$$

위 식은 입자가 크고 전계강도가 높은 경우에는 전통적인 장대전 하전식과 같게 되고, 전계강도가 낮은 경우에는 전통적인 확산 하전식과 같이 된다.

전통적인 하전이론에서 장대전과 확산대전의 합에 의한 하전량을 나타내는 식은 다음과 같다.⁽¹⁰⁾

$$\begin{aligned} q &= q_D + q_F = \left(\frac{4\pi\epsilon_0 akT}{e}\right) \\ &\ln \left[\frac{e^2 a \tilde{v} N_0}{4\epsilon_0 kT} (t_f - t_i) + \exp\left(\frac{q_i e}{4\pi\epsilon_0 akT}\right) \right] \\ &+ q_s \left[\frac{\frac{N_0 b e}{4\epsilon_0} (t_f - t_i) + \frac{1}{\left(1 - \frac{q_i}{q_s}\right)} - 1}{\frac{N_0 b e}{4\epsilon_0} (t_f - t_i) + \frac{1}{\left(1 - \frac{q_i}{q_s}\right)}} \right] \quad (18) \end{aligned}$$

입자 하전량은 식(17)과 (18)로써 계산된다.⁽¹²⁾ 확산대전량과 장대전량의 합으로 구해지는 식(18)은 입경 0.09 μm에서 1.4 μm 범위의 입자에 대해 적절한 하전량을 산출한다.

전기장의 계산에 있어서는 모든 전하 운반체의 운동은 유효 이동도(effective mobility) 하나로 표현된다고 가정한다. 공기 중에서 입자의 존재는 유효 이동도를 감소시킨다. 이온으로부터 전

하를 획득하고 이온보다는 움직임이 덜한 입자가 전체 전류의 일부를 운반하기 때문이다. 측정된 인가전압과 코로나 전류를 사용하여 전기적인 조건을 계산하면 유효 이동도는 다음과 같이 결정된다.⁽¹⁴⁾

$$b_e = b' \left(\frac{j_t}{200j_p + j_t} \right) \quad (19)$$

2.3 입자의 이동속도 및 집진효율

전기장 내의 입자운동은 전기장의 강도와 입자 전하라는 두 가지의 전기적 요소에 의하여 결정된다. 그런데 일반적인 전기집진기에서 취급되는 입자의 직경이 10 μm 이하의 미세입경이므로 입자의 레이놀즈수가 1보다 작아서, Stokes 항력법칙을 따르며 중력을 무시할 수 있다. 그리고, 전기집진기 내에서의 유속이 1.5 m/s 이하로 낮으므로, 관성력 또한 무시할 수 있고 가정한다. 이때, 집진판 부근의 일정 전장 속에서 이동하는 입자의 이동속도는 다음과 같이 계산된다.^(1,2)

$$\omega = \frac{E_c E_p d_p}{2\pi\mu} \quad (20)$$

전기집진기의 효율에 대한 수학적 모델은 다음과 같은 지수함수적인 집진효율식을 근간으로 한다.^(14,15)

$$\eta = 1 - \exp(-SCA \cdot \omega)^k \quad (21)$$

여기에서 일반적으로 석탄보일러의 경우에는 k=0.5로 하면 실험치와 잘 일치하는 것으로 알려져 있다. 이 식은 수학적 모델 구성하기 위하여 몇 가지의 가정을 하고 있다. 따라서 실제의 전기집진기에서는 완전히 만족되지는 않는다. 그러나 그 결과는 실제의 집진기에 근접할 수 있으며 집진기 성능계수를 도입하면 실험값에 더욱 접근할 수 있다는 장점이 있다.

주어진 입경에 대한 각각의 단위계산영역에 집진되는 입자의 수는 집진기 전체에 대하여 그 입경의 집진효율을 구하기 위하여 누적된다. 집진기의 j번째 단위계산 길이에서 i번째 입경의 집진분율은 다음과 같은 수식으로 표현된다.

$$\eta_{i,j} = 1 - \exp(-w_{i,j}A_j/Q)^G \quad (22)$$

여기에서 $w_{i,j}$ (m/sec)는 j 번째 단위계산 길이에 i 번째 입경의 이동속도이고 A_j (m²)는 j 번째 단위계산 구간의 집진면적이며 G 는 전기집진기 성능계수이다. 전체 전기집진기에 대하여 주어진 입경의 집진분율 η_i 는 아래의 수식으로 표현된다.

$$\eta_i = \frac{\sum_j \eta_{i,j} N_{i,j}}{N_{i,j}} \quad (23)$$

여기에서 $N_{i,j}$ 는 j 번째 단위계산 구간에 유입되는 i 번째 입자의 1 m³당 입자개수이다. $N_{i,j}$ 는 아래와 같이 쓸 수 있다.

$$N_{i,j} = N_{i,j-1} \exp\left(\frac{-w_{i,j-1}A_{j-1}}{Q}\right) \quad (24)$$

여기에서 $N_{i,1} = N_{i,0}$ 는 유입가스의 입경분포에서 i 번째 입경입자의 1 m³당 입자개수이다. 입경범위 전체에 대한 총괄 집진효율 η 는 다음과 같다.

$$\eta = \sum_i \eta_i P_i \quad (25)$$

Table 1 Applied voltage (V [kV]) and corona current (I [mA]) with a discharge electrode of rectangular type for several plate spacings (W)

W (mm)	300		400		450		500	
	V	I	V	I	V	I	V	I
340	50.6	5.17	68	5.41	77	7.71	85	7.68
280	41.7	2.14	56	2.32	63	2.65	70	2.89
200	29.9	0.41	40	0.53	45	0.48	50	0.54

Table 2 Specification of a pilot electrostatic precipitator with one passage

Gas velocity	1.1 m/s	Wire thickness	2 mm
Plate height	1.9 m	Wire length	2.78 m
Plate length	2.88 m	D.E. plate height	1.42 m
Plate area	10.93 m ²	Wire height	1.6 m
Wire number	11	Total wire length	17.6 m

여기에서 P_i 는 유입가스의 입경분포에서 i 번째 입경입자의 질량분율(%)이다.

3. 결과 및 논의

실험으로부터 구한 실험조건에 대하여 수치계산을 하였다. 집진판 간격에 따른 집진효율 특성을 알아보기 위하여 집진판 간격을 300 mm, 400 mm, 450 mm 및 500 mm로 바꾸면서 계산하였다. 방전극과 집진극 사이의 평균 인가 전장은 200 kV/m, 280 kV/m 혹은 340 kV/m이다.

Table 1에 RT형(Rectangular type) 방전극을 사용하는 경우의 집진판 간격별 인가된 평균 전장에 대하여 인가전압과 그때의 코로나 전류를 나타내었다. 그리고 Table 2에는 전기집진기의 사양을 나타내었으며, Table 3에는 집진판 간격별 유량과 비집진면적(SCA)을 나타내었다.⁽¹⁵⁾

먼저 인가 평균 전계강도를 340 kV/m로 하여 여러 가지의 집진판 간격에 대해 전압 포텐셜과 전계강도를 구하여 Fig. 3과 Fig. 4에 도시하였다. 그림에서 $y=0$ 인 경우는 Fig. 1의 AD 선, 즉

Table 3 Gas flow rate and SCA for several plate spacings

Plate spacing (mm)	300	400	450	500
Gas flow rate (m ³ /sec)	0.63	0.84	8.49	9.44
SCA (m ² /m ³ /sec)	17.42	13.07	11.62	10.45

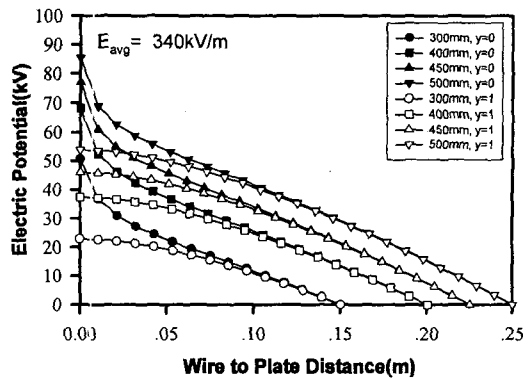


Fig. 3 Distribution of electric potential for several plate spacings with a discharge electrode of rectangular type and $E_{avg} = 340$ kV/m.

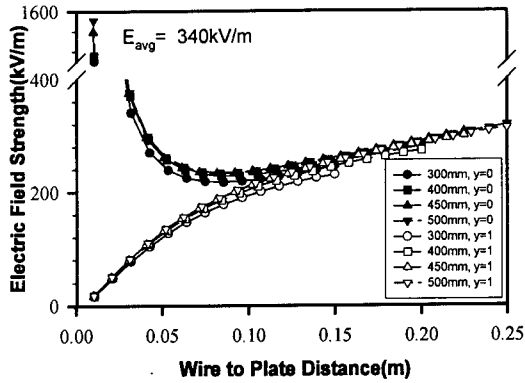


Fig. 4 Distribution of electric field strength for several plate spacings with a discharge electrode of rectangular type and $E_{avg}=340$ kV/m.

방전선으로부터 집진판까지의 포텐셜 분포를 나타내고, $y=1$ 인 경우는 방전선과 방전선의 중간에서의 포텐셜 분포를 나타낸다. Fig. 3과 Fig. 4는 인가 평균 전계강도가 같을 경우 집진판 간격이 증가할수록 집진판 가까이의 전기 포텐셜과 전계강도가 증가하는 것을 보여주고 있다.

Fig. 5에는 RT형(Rectangular type)과 TP형(Twisted pin type)의 방전극에 대한 전계강도를 도시하였다. Fig. 5는 방전극 종류가 전계강도에 미치는 영향을 나타내는 것으로써 TP형의 방전극이 RT형보다 더 높은 전계강도를 나타내고 있다. 이에 따라 TP형에서 RT형보다 더 높은 집진

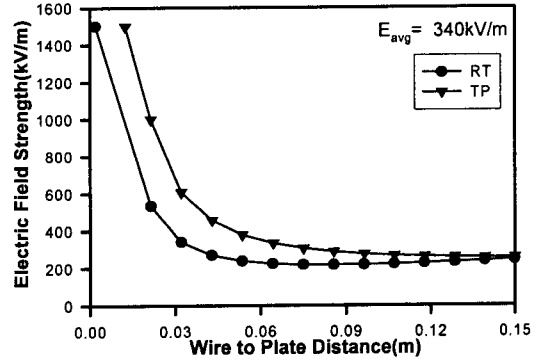


Fig. 5 Effect of the type of discharge electrode on the distribution of electric field intensity along wire to plate with $W=450$ mm and $E_{avg}=340$ kV/m.

효율을 나타낸다.⁽⁶⁾

Fig. 6과 Fig. 7에는 RT형 방전극을 사용하고 있는 파일럿 광폭 전기집진기에 대한 전압-전류 특성의 수치적 결과와 실험적 결과를 도시하였다. 전기집진기에서 가장 널리 사용되고 있는 방전극은 RT형이다. 먼저 집진판 간격을 450 mm로 하여 방전극의 거칠기 계수(f)가 집진기의 전압-전류 특성에 미치는 영향을 Fig. 6에 나타내었다. Fig. 6은 방전극의 거칠기 계수가 감소할수록 코로나 전류가 증가함을 보여주고 있다. 그리고 실험에 사용된 사각 방전극의 f 는 0.9인데 이때의 수치적 결과는 실험적 결과와 잘 일치한다.

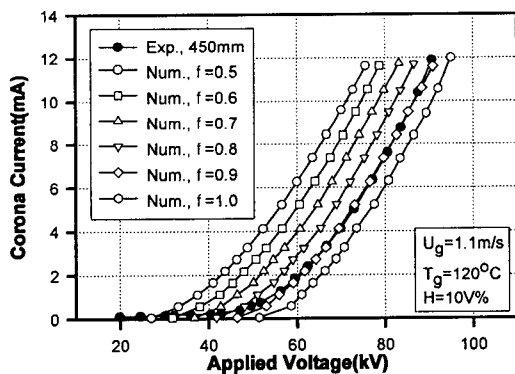


Fig. 6 Effect of roughness factor on the V-I characteristics.

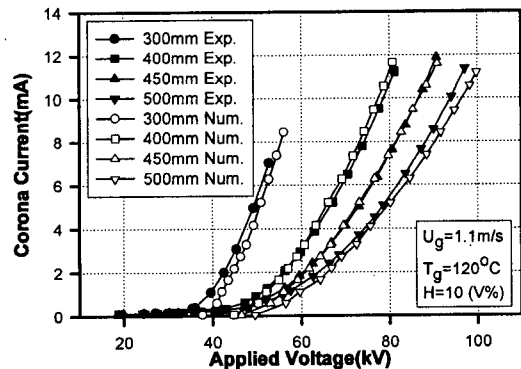


Fig. 7 Corona current as a function of applied voltage obtained with experimental and numerical methods for several plate spacings.

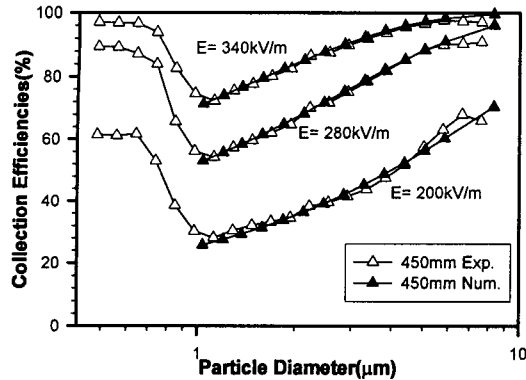


Fig. 8 Collection efficiency as a function of particle diameter obtained with experimental and numerical methods for E_{avg} = 200 kV/m, 280 kV/m and 340 kV/m with a discharge electrode of rectangular type.

RT형 방전극의 수치 해석에서 사용하는 f 의 기본적인 값은 0.9인데 본 파일럿 전기집진기에서도 잘 일치하는 것을 알 수 있다.

Fig. 7에는 여러 가지의 집진판 간격에 대해 RT형 방전극의 V-I 특성을 도시하였다. Fig. 7은 집진판 간격이 좁아질수록 코로나 전류가 증가함을 보여주고 있다. 그리고 수치적인 방법으로 구한 집진판 간격에 따른 전압-전류 특성은 실험적 결과와 잘 일치한다.

다음에는 여러 가지의 평균 전계강도(200 kV/m, 280 kV/m, 340 kV/m)에 대해 입자의 지름(d_p)에 따른 집진효율을 구하여 Fig. 8에 나타내었다. 그리고 최종적으로 Fig. 9에는 총괄 집진효율을 구하여 실험결과와 비교하였다. 입자의 지름이 $1 \mu\text{m}$ 이하인 영역($d_p < 1 \mu\text{m}$)에서는, 입자가 커지면 집진효율이 낮아진다. 그러나 $d_p > 1 \mu\text{m}$ 에서는, 입자가 커질수록 집진효율이 증가한다(Fig. 8). 입자에 대한 집진효율과 집진기의 총괄 집진효율은 모두 인가전압의 증가와 함께 증가한다. 그리고 효율에 대한 Fig. 8과 Fig. 9의 두 결과는 모두 수치적 결과와 실험적 결과가 잘 일치함을 보여 주고 있다.

4. 결 론

유한차분법을 사용하여 광폭 전기집진기의 집

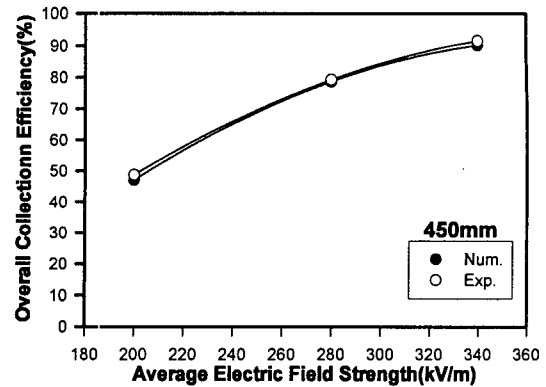


Fig. 9 Comparison of overall collection efficiency obtained with numerical method with that of experimental results, with $W=450$ mm and a discharge electrode of rectangular type.

진 특성을 조사하여 실험결과와 비교하였다. 인가된 전계강도가 같을 경우 집진판 간격이 넓어지면 집진판 부근의 전기 포텐셜과 전계강도가 증가한다. 그리고 TP형의 방전극은 RT형보다 더 높은 전계강도를 나타낸다. 방전극의 거칠기 계수가 작아지면 코로나 전류가 증가한다. 실험결과와 잘 일치하는 RT형 방전극의 거칠기 계수는 0.9이다. 입자의 지름이 $1 \mu\text{m}$ 이상인 영역에서는, 입자가 커질수록 집진효율이 증가한다. 그리고 총괄 집진효율은 인가전압의 증가와 함께 증가한다. 이상의 수치해석을 통하여 구한 본 연구의 결과는 모두 실험결과와 잘 일치한다.

후 기

본 연구는 환경부 G7 연구의 일환으로 수행되었으며, 환경부 및 두산중공업(주)의 지원에 감사드립니다.

참고문헌

- Oglesby, S. and Nichols, G. B., 1978, Electrostatic Precipitation Technology, Marcel Dekker Inc. New York.
- White, H. J., 1963, Industrial Electrostatic Precipitation, Palo Alto: Addison-Wesley Publishing Company, Inc., pp. 155-159.

3. Lioyd, D. A., 1988, *Electrostatic Precipitator Handbook*, Adam Hilger, Bristol and Philadelphia.
4. Rea, M. and Bogani, V., 1993, Influence of the Electrode Geometry and of the Operating Characteristics on the Efficiency of Electrostatic Precipitators, Proc. Tenth Particulate Control Symposium and Fifth International Conference on Electrostatic Precipitation, Washington, DC, USA, Vol. 1, pp. 221-228.
5. Pajak, J. R., 1996, Rigid Discharge Electrode and Wide Spacing Electrostatic Precipitators in Poland, Proc. 6th International Conference on Electrostatic Precipitation, Budapest, Hungary, pp. 100-105.
6. Kim, Y. J., Jeong, S. H., Hong, W. S., Ha, B. K., Cho, S. S. and Ham, B. H., 1998, Effect of the plate spacing and discharge electrode shape on the efficiency of wide plate spacing electrostatic precipitator, Proceeding of 7th International Conf. of ESP, pp. 590-595.
7. Kim, Y.-J., Ha, B.-K., Jeong, S.-H., Hong, W.-S., Yoa, S.-J. and Yoo, J.-S., 2001, A Study on the Collection Characteristics of a Wide Plate-Spacing Electrostatic Precipitator-I. Effect of Plate Spacing and Type of Discharge Electrode, J. of Air-Conditioning and Refrigeration, Vol. 13, No. 10, pp. 939-946.
8. Kim, Y.-J., Ha, B.-K., Jeong, S.-H., Hong, W.-S., Ha, D.-H. and Yoo, J.-S., 2001, A Study on the Collection Characteristics of a Wide Plate-Spacing Electrostatic Precipitator-II. Effect of wave form of pulse energization, J. of Air-Conditioning and Refrigeration, Vol. 13, No. 11, pp. 1059-1064.
9. 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, Vol. 23, No. 7, pp. 308-323.
10. Kim, Y. J., Hong, W. S., Choi, H. O., Ham, B. H., Min, C. S., and Yu, K. S., 1994, Experimental and Finite Difference Method Analysis on Collection Characteristics of Electrostatic Precipitator, J. of Korean Air Pollution Res. Association, Vol. 10, No. 1, pp. 49-56.
11. White, H. J., 1951, Particle Charging in Electrostatic Precipitator, Trans. Amer. Inst. Elec. Part 1, Vol. 70, pp. 1186-1191.
12. Smith, W. B. and McDonald, J. R., 1976, Development of a Theory for the Charging of Particles by Unipolar Ions. J. Aerosol Sci., Vol. 7, pp. 151-166.
13. Oglesby, S. and Nichols, G. B., 1970, A Manual of Electrostatic Precipitator Technology: Part I, Fundamentals. NTIS PB 196380, APTD 0610, National Air Pollution Control Administration, Cincinnati, Ohio, pp. 57-66.
14. Matts, S. and öhnfeldt, 1963-1964, Efficient fast Cleaning with SF Electrostatic Precipitators. SF Rev., Vol. 6,7, pp. 105-122.
15. Ha, B. K., 1999, Improvement of collection efficiency for high resistivity coal fired fly ash with Pilot-scale electrostatic precipitator, Ph.D. thesis, Pukyong National University.