

<論 文>

1단 전기집진기에서 난류확산과 2차유동이 입자의 농도분포에 미치는 영향

정상현* · 김상수** · 김용진*

(1994년 10월 27일 접수)

Effects of Turbulence Diffusion and Secondary Flows on the Particle Concentration Distribution in Single Stage ESP

Sang Hyun Jeong, Sang Soo Kim and Yong Jin Kim

Key Words : Electrostatic Precipitator(전기집진기), Electric Potential(전기포텐셜), Charge Density(전하밀도), Cross Flow(주유동), Ion Flow(이온유동) Secondary Flow(2차유동), Electrode(전극), Concentration Distribution(농도분포)

Abstract

Numerical simulations for the effects of secondary flow and turbulence diffusion on the particle concentration distributions have been carried out for the single stage electrostatic precipitator. The electrohydrodynamic secondary flow, particle concentration distribution and collection efficiency have been evaluated as a function of dimensionless parameters such as Re , N_{ehd} , P_e , x . The results of simulations show that for increasing secondary flow intensity the concentration distribution is drastically deformed and collection efficiency is decreased which is more than due to turbulent diffusion.

기 호 설 명

- b : 이온의 이동률 ($m/V-S$)
- C : 입자의 미끄럼계수(Cunningham slip)
- d : 방전극과 집진판 사이의 거리
- d_b : 입자직경
- D : 난류확산계수
- \vec{E} : 전기장벡터
- \vec{J} : 전류밀도벡터
- k : 난류운동에너지
- L : 집진판 길이
- N : 무차원 입자농도 (n/n_o)
- $N_{ehd} : R_{ehd}/R_e$

- P_e : 전기 Peclet수 (dw_o/D)
- R_{ehd} : 전기 Reynolds수 ($u_e d/\nu$)
- R_e : Reynolds수 ($2u_o d/\nu$)
- w : 전기력에 의한 입자의 이동속도
- w_o : 평균전기장에 의한 입자의 이동속도
- u_e : 전기특성속도
- u_o : 주유동입구속도
- ϕ : 전기포텐셜
- ϕ_o : 공급전압
- ρ_c : 공간전하밀도
- κ : 입자의 전기이동속도와 주유동입구속도와의 비 (w_o/u_o)
- \emptyset : 무차원 전기포텐셜 (ϕ/ϕ_o)
- η : 집진효율
- ν : 동점성계수

*정회원, 한국기계연구원

**정회원, 한국과학기술원 기계공학과

1. 서 론

정전유동장에서 입자의 전달현상을 이용한 대표적인 장치가 전기집진기이다. 전기집진기의 연구에서 하전된 입자들의 전달기구 해석은 매우 중요한 문제이나 집진효율에 영향을 미치는 인자들에 대한 연구는 기초과정의 이해수준으로 머물러왔다. 그러나 최근의 국제적인 환경규제치의 강화로 인하여 전기집진기의 성능개선 및 특성분석 등에 대한 연구가 매우 활발히 진행되는 경향이다.

전기집진기 성능을 예측하는 방법으로는 전통적으로 광범위하게 사용되는 Deutsch식이 있으나 이것은 균일유동과 균일전기장의 조건에서 다음과 같은 가정, 즉 유동의 흐름방향의 임의의 단면에서 입자의 농도분포가 균일분포를 이룬다는 무한 난류확산의 가정을 전제로 하였다. Deutsch 이론에 의하면 입자의 농도는 집진판의 길이에 따라 $\text{Exp}(-x/L_D)$ 으로 감소하며, 여기서, $L_D = u_0 d / w_0$ 로 표현되는 길이이고 d 는 덕트의 폭, w_0 는 균일한 크기의 가스속도에 대한 입자의 수직방향의 이동속도를 나타낸다. 그러나 실제 전기집진기의 집진과정은 가스유동장의 분포 및 비균일 전기장분포로 인하여 입자의 이동속도는 불균일하게 되고 따라서 Deutsch의 이론과는 많은 차이점을 나타내게 된다.

만일 균일전기장 E 가 작용하는 평판-평판형의 전기집진기에서 유동이 완전층류인 균일유동이고 입자의 브라운운동을 무시한다면 입자는 유동속도 u 에 의해 흐름방향으로 이동하며 전기적인 쿨롱힘에 의해 집진판 방향으로 이동할 것이다. 이 때 입자의 집진판 방향으로의 이동속도는 $w = qCE / 3\pi\mu d_p$ 로 표시되며, 여기서, q 는 입자의 대전량, C 는 입자의 미끄럼 보정계수(Cunningham slip correction factor), μ 는 가스의 점성계수, d_p 는 입자의 직경을 나타낸다. 결국 이 경우 입자의 궤적은 직선이 되고 모든 유입입자는 $(u/w_0)d$ 의 위치안에서 집진되게 될 것이며, 이것이 집진효율을 예측하는 모델중의 하나인 층류모델이다.

난류유동인 경우 입자의 거동은 난류확산의 크기에 영향을 받을 것이며 이때 입자의 농도 및 궤적은 층류유동인 경우에 비하여 큰 차이를 보일 것이다. 즉, 난류확산이 없는 경우는 층류모델이 되고,

난류확산이 무한인 경우에는 Deutsch 모델이 되며, 난류확산을 조절하게 되면 층류모델과, Deutsch 모델의 불합리성을 개선할 수 있다. 이와 같이 유한 난류확산의 개념을 도입한 집진효율 예측모델을 난류확산모델, 또는 유한 난류확산모델이라 하고, 층류모델이나 Deutsch 모델에 비하여 좀더 실제적인 방법이다. 이와 같은 유한 난류모델의 연구에서 유동의 분포 및 전기장의 분포, 그리고 입자의 난류확산도의 분포는 입자의 농도분포 및 집진효율에 매우 크게 영향을 미치는 중요한 인자이다. 1단식 전기집진기에서의 유동은 주유동 및 전기적 힘에 의해 생성되는 이온유동이 복합적으로 작용하여 매우 복잡한 유동형태를 나타내며, 집진기의 기하학적인 형상, 전극의 극성, 전류밀도 그리고 주유동의 평균속도 등에 민감하게 의존한다. Leonard et al⁽¹⁾은 난류와 확산 개념의 도입에 의하여 집진기 효율의 예측을 하였으며, 이때 나타나는 효율은 Deutsch 모델의 경우보다 높게 나타남을 보였고, D 를 입자의 난류확산계수라 할때, 전기 Peclet수 $Pe = We d / D$ 를 정의하여 Pe 의 값이 높을수록 쿨롱힘에 의한 입자의 이동이 지배적이며 집진효율이 증가함을 밝혔다. Khim⁽²⁾은 와이어-플레이트형의 전기집진기에서 균일유동장인 경우에 대하여 입자의 농도분포를 계산하였으며 와이어 방전극 직전에서 농도가 급격히 감소하며, 와이어를 지난후 난류확산에 의해 농도가 증가하는 분포를 가짐을 보였다. 그러나 위의 연구들은 공간전하밀도에 의한 이온유동의 생성으로 주유동과 이온유동의 상호작용에 의해 생기는 2차유동으로 인한 복합적인 유동장의 영향은 고려치 않고 있다. 즉, 정지유체속의 공간전하밀도는 유체에 쿨롱힘을 작용시켜 순수한 전기적인 힘만으로 유체의 운동을 발생시키며 이때 생성되는 유동을 이온유동이라 하고, 전기가 작용하지 않을때의 유동을 주유동이라 하며, 이온유동과 주유동과의 상호작용에 의한 복합적인 유동을 2차유동이라 한다. 2차유동은 주유동과의 상호작용에 의해 매우 복잡한 양상을 띄게 되며⁽³⁾ 따라서 집진기 내부의 입자의 농도분포에 매우 큰 영향을 미치게 된다. Larsen과 Sorensen⁽⁴⁾은 2차유동과 난류확산이 입자의 농도분포에 미치는 영향에 대하여 연구하였으며, 난류확산과 2차유동의 강도는 모두 집진효율을 감소시킴을 보였고, 특히 2차유동의 강도가 커질때 약한 난류확산에서 효율은 Deutsch 효율보다 작아짐을 보였다. 또한 난류확산이 없는

경우 입자의 집진효율은 2차유동의 강도에 반비례함을 나타내었다. 그러나 Larsen과 Sorensen의 연구결과는 균일 주유동과 균일 전기장분포의 가정에 의한 결과이며, 따라서 입자의 이동속도가 균일한 경우에 대한 예측결과이다. Yamamoto⁽⁵⁾는 2차유동과 비균일 전기장에서 집진효율과 농도분포를 구하였다. Yamamoto의 연구결과에서는 입자의 난류확산계수가 특정값 이상에서 집진효율은 급격히 감소하게 되는 임계 확산계수가 존재함을 보였으며, 임계 난류확산계수 이하의 난류강도를 가질때 입자의 집진효율은 입자의 이동속도에 의존하고 난류나 정전유동장에 의해서는 크게 영향을 받지 않음을 보였다.

본 연구에서는, 1개의 와이어전극이 존재하는 와이어-플레이트형의 1단식 전기집진기에 대하여, 2차유동의 세기, 난류확산 그리고 공간전하밀도 등이 동시에 고려된 경우, 농도분포 및 집진효율에 미치는 영향을 분석하고, 순수 난류확산에 의한 입자의 농도분포, 2차유동에 의한 입자의 농도분포 및 난류확산과 2차유동의 상대적 영향의 비교, 분석 등을 수치해석적으로 고찰하고자 한다.

2. 지배방정식 및 수치해석

전기집진기 내부에서의 2차유동, 난류확산, 공간전하밀도, 비균일전기장 등이 입자의 농도분포에 미치는 영향을 분석하기 위하여 1개의 와이어와 평행평판의 구조를 가지는 Fig. 1과 같은 계산모델을 수치해석 모델로 한다.

2.1 전기장의 지배방정식 및 수치해석

자기장의 영향 및 입자의 공간전하밀도의 영향을 무시하고 2차원 정상상태의 전류의 흐름으로 가정하면 전기장과 전류 연속방정식은 다음과 같이 쓸 수 있다.

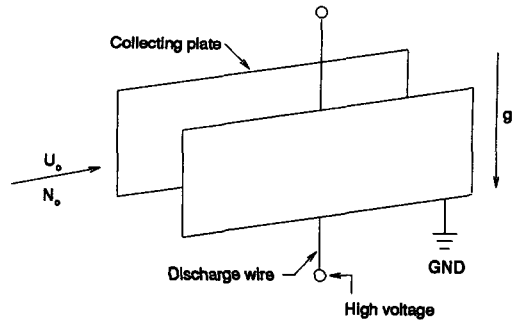
$$\nabla \cdot \vec{E} = \frac{\rho_c}{\epsilon_0} \quad (1)$$

$$\nabla \cdot \vec{J} = 0 \quad (2)$$

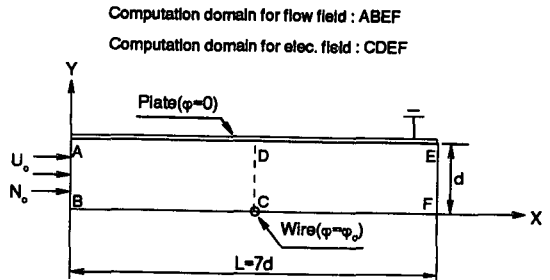
$$\vec{J} = \rho_c (b\vec{E} + \vec{u}) \quad (3)$$

$$\vec{E} = -\nabla\phi \quad (4)$$

여기서, ∇ 는 벡터의 미분연산자이고, b 는 이온의 이동률(mobility)이며, ρ_c 는 공간전하밀도를 나타낸다. 또한 ϵ_0 는 가스의 유전율이며, \vec{J} 는 전류



(a) Schematic of single wire-plate type ESP



(b) Computation model and coordinate system

Fig. 1 Schematic of single stage ESP and computation model

밀도벡터, \vec{u} 는 유동의 속도벡터, \vec{E} 는 전기장강도의 벡터, ϕ 는 전기포텐셜을 나타낸다.

이온의 속도 $b\vec{E}$ 는 유체속도 \vec{u} 에 비하여 매우 크며, 따라서 유체의 속도는 전류의 흐름에 영향을 미치지 않는다고 가정하면 전하밀도 방정식은 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$\rho_c^2 = \epsilon_0 \nabla \rho_c \cdot \nabla \phi \quad (5)$$

전기포텐셜 및 전기장강도의 경계조건은 다음과 같다.

$$\phi(0, 0) = \phi_0, \phi(x, d) = 0, \quad (6a)$$

$$E_x(0, y) = 0, E_x(L/2, y) = 0, E_y(x, 0) = 0 \quad (6b)$$

$$I_{exp} = \int_0^{L/2} \rho_c(x, d) E_y(x, d) b W_p dx = I_{cat} \quad (6c)$$

여기서, I_{exp} 는 실험에 의해 측정된 집진판에서의 총전류이고 I_{cat} 은 계산에서 구하여진 집진판에서의 총전류이며, W_p 는 집진판의 폭을 나타낸다. 전기장의 수치해석을 하기 위한 영역은 Fig. 1에서

대칭성에 의해 플레이트의 중심선을 따른 영역 CDEF에 대하여 전기장 수치해석을 한다. 전기장 방정식을 수치해석 하기 위해 전기포텐셜 및 공간 전하밀도의 경계조건이 필요하며, 식(6a) 및 식(6b)에 의해 전기포텐셜의 경계조건은 만족된다. 그러나 공간전하밀도의 경계조건인 와이어 방전극에서의 공간전하밀도는 코로나영역내의 전하밀도에 대한 모델링이 되어있지 않기 때문에 식(6c)의 방법에 의하여 와이어 공간전하밀도를 구하여 공간전하밀도의 경계조건으로 사용한다. 즉 실험에 의해 집진판에서의 전류를 측정하여 와이어에서 방전되는 전체 방전전류를 구하고, 와이어에서의 전하밀도를 가정하여 계산을 한 후 계산에 의한 집진판에서의 전체전류값이 실험에 의해 측정되어진 전체전류값과 일치할 때까지 와이어에서의 전하밀도를 변화시켜 가면서 반복계산하여, 공간전하밀도에 대한 경계조건을 만족시킨다. 따라서 식(6c)의 의미는 와이어 공급전압에 대한 전하밀도의 값이 일의적으로 결정되며 이 조건에서 집진판의 전체전류의 값은 와이어에서 방전된 전체전류의 값과 일치하게 된다는 것이다. 전기장방정식의 수치해석은 중앙차분법과 후진차분법을 이용하여 차분화시켰으며 SOR 방법에 의해 계산하였다. 전기장의 수렴조건은 실험에 의한 전류값과 계산에 의한 전류값 사이의 오차가 1×10^{-5} 이하가 되면 수렴한 것으로 간주하였다.

2.2 유동장의 지배방정식 및 수치해석

모든 실제적인 전기집진기에서 유동은 난류이며 입자의 전달은 변동유동의 구조에 의해 지배된다. 1단 전기집진기 유동은 입구 유입유동과 이온유동의 복합적인 유동이 형성되며 따라서 정확한 집진 효율을 예측하기 위해서는 유체의 운동량이 입자의 농도분포에 미치는 영향을 명확히 예측하여야 하며, 이렇게 하기 위해서는 먼저 유동장의 속도분포를 구하여야 한다. 그러나 기존의 대부분의 연구에서 유체의 유동은 균일속도분포를 갖는다고 가정하여 계산하였으며, 이와 같은 경우에는 주유동의 속도에 의한 운동량이 전기력에 대하여 충분히 클 때는 타당성이 있으나, 전기력의 영향이 크게 나타나는 낮은 유동속도에서의 입자의 농도분포 예측에는 실제적인 문제와 많은 차이점을 나타낸다. 따라서 집진효율 예측을 하기 위한 2차원 속도분포를 갖는 난류유동장의 지배방정식은 다음과 같다.

연속방정식

$$\frac{\partial u_i}{\partial x_i} = 0 \tag{7}$$

운동량방정식

$$\frac{\partial \rho u_i u_j}{\partial x_j} = -\frac{\partial P}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} [\mu_{eff} (\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i})] + \rho_c E_i \tag{8}$$

식(8)에서 μ_{eff} 는 $\mu_{eff} = \mu + \mu_t$ 로 표시되는 난류 유동에서의 등가 점성계수이다.

또한 $\rho_c E_i$ 는 전기장으로 인해 유체에 작용하는 체력(body force)이다. 난류변동성분에 대한 모델링은 표준 k-ε모델을 사용하였으며, 난류운동에너지와 난류소산율 방정식은 다음과 같다.

난류운동에너지 방정식

$$\frac{\partial \rho u_j k}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\frac{\mu_{eff}}{\sigma_k} \frac{\partial k}{\partial x_j} \right) + G - \rho \epsilon \tag{9}$$

난류소산율 방정식

$$\frac{\partial \rho u_j \epsilon}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\frac{\mu_{eff}}{\sigma_\epsilon} \frac{\partial \epsilon}{\partial x_j} \right) + C_1 \frac{\epsilon}{k} G - C_2 \rho \frac{\epsilon^2}{k} \tag{10}$$

여기서,

$$G = \mu_{eff} \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \tag{11}$$

$$\mu_t = \rho C_\mu \frac{k^2}{\epsilon} \tag{12}$$

$i=1,2, j=1,2, C_1=1.44, C_2=1.92, C_\mu=0.09, \sigma_k=1.0, \sigma_\epsilon=1.3$ 이다.

유동장의 계산을 위해 먼저 균일유동의 입구조건과 출구에서의 물리량은 선형적이라는 가정을 하였으며, 입구에서의 난류운동에너지와 소멸률은 아래와 같이 가정하였고, 벽면(집진판)에서의 난류운동에너지 및 소멸률은 0으로 두었다.

따라서 유동장의 경계조건은 다음과 같다.

$$\begin{aligned} u(0, y) &= u_o \\ u(x, d) = v(x, d) &= k(x, d) = \epsilon(x, d) = 0 \\ \frac{\partial u}{\partial y} |_{(x,0)} = \frac{\partial k}{\partial y} |_{(x,0)} = \frac{\partial \epsilon}{\partial y} |_{(x,0)} &= v(x, 0) = 0 \\ k(0, y) &= 0.01 u_o^2 \\ \epsilon(0, y) &= C_\mu k^{3/2} / 0.01 d \\ \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} |_{(L,y)} = \frac{\partial^2 v}{\partial x^2} |_{(L,y)} = \frac{\partial^2 k}{\partial x^2} |_{(L,y)} = \frac{\partial^2 \epsilon}{\partial x^2} |_{(L,y)} &= 0 \end{aligned} \tag{13}$$

한편 난류운동량 방정식의 경계조건 및 난류에너지 전달방정식의 원천항(source term)으로써 벽마찰 응력을 구하기 위해 대수벽함수(wall function)를 사용하였다.

$$y^+ = \frac{\rho C_\mu^{1/4} k_p^{1/2} y_p}{\mu} \quad (14)$$

$$\tau_w = \frac{\rho C_\mu^{1/4} k_p^{1/2} x_t}{\ln(E_t y^+)} \quad (y^+ \geq 11.63) \quad (15)$$

$$\tau_w = \mu \frac{u_p}{y_p} \quad (y^+ < 11.63) \quad (16)$$

벽면 가까이에서의 난류소멸률은 길이척도(length scale)가 벽으로부터의 거리에 비례한다고 가정하여 다음과 같이 계산하였다.

$$\epsilon_p = \frac{C_\mu^{3/4} k_p^{3/2}}{x_t y_p} \quad (17)$$

여기서, x_t 는 Kamman상수, E_t 는 적분상수이며 각각 0.41과 0.09를 사용하였다.

여기서, 하첨자 p 는 벽면에서 가장 가까운 격자점을 나타낸다. 집진기 내부의 유체는 비압축성 정상상태의 뉴토니언(Newtonian)유체로 가정하였으며, 와이어의 직경은 집진부의 평균간극에 비하여 매우 작으므로 와이어직경이 유동장에 미치는 영향은 무시하였다. 유동장의 해석은 유한체적법에 의해 방정식을 차분화시켰으며 SIMPLER 알고리즘을 사용하여 유동장을 해석하였다. 유동장의 수렴조건은 각각의 격자점에서 연속방정식의 만족도의 오차가 1×10^{-6} 이하로 되면 수렴하였다고 간주하였다.

2.3 농도장의 지배방정식 및 수치해석

먼저 입자의 농도장을 계산하기 위하여 입자의 크기는 약 $0.3 \mu\text{m}$ 이상이며 입자에 작용하는 전기력은 쿨롱힘만 작용한다고 가정하고, 입자의 가속도 및 중력의 영향, 부착된 입자의 재유입과 래핑(rapping) 등의 영향은 무시한다. 또한 스톱스 영역내에서 균일크기의 구형입자 운동을 회박입자군의 연속체로 가정하면, 2차원 정상상태의 입자의 연속방정식은 다음과 같이 된다.

$$\nabla \cdot n(\vec{u} + \vec{w}) = 0 \quad (18)$$

여기서, n 은 입자의 수밀도를 나타내며 \vec{u} 는 가스의 속도, \vec{w} 는 전기력에 의한 입자의 이동속도 $\vec{w} = \mu_e \vec{E}$ 로 표시된다. 전기에 의한 입자의 유동률 μ_e 는 공간과 시간의 함수이며 $\mu_e(r, t) = q(r, t)$

$C/3 \pi \mu d_p$ 와 같이 표시되나, 입자직경이 $0.3 \mu\text{m}$ 이상인 경우 확산대전을 무시할 수 있으므로 입자는 전기장 대전에 의해 완전대전(fully charging)되었다고 가정하면 공간만의 함수가 된다.

순간 난류변동성분을 시간평균량과 변동성분으로 표시하면 $\vec{u} = \overline{\vec{u}} + \vec{u}'$, $n = \overline{n} + n'$, $\mu = \overline{\mu} + \mu'$, $\vec{w} = \overline{\vec{w}} + \vec{w}'$ 으로 되고, 충분히 대전된 입자가 입구부로 유입된다고 가정하고, 난류확산계수는 일정하다고 가정한다. 또한 브라운확산(Brownian diffusion)은 난류확산에 비하여 매우 작으므로 무시하고 난류플럭스를 입자의 확산으로 식(19)와 같이 모델링한 후 무차원식으로 표시하면 식(20)과 같이 된다.

$$\overline{n'(\vec{u}' + \vec{w}')} = -D \nabla \overline{n} \quad (19)$$

$$\left(\frac{\vec{U}}{\kappa} + \vec{E} n \right) \cdot \nabla \overline{N} = \nabla \cdot \left(\frac{1}{P_e} \nabla \overline{N} \right) - \overline{N} \cdot \nabla \vec{E} n \quad (20)$$

여기서, $U = u/u_o$, $En = E/E_o$, $N = \overline{n}/n_o$, $\kappa = w_o/u_o$, $w_o = \mu_e E_o$ 이고 $X = x/d$, $Y = y/d$, $P_e = dw_o/D$ 를 나타내며, E_o 는 평균전기장 세기이고 n_o 는 입구유입 입자농도이다. 전기 Peclet수 P_e 는 난류확산에 대한 전기에 의한 입자이동의 크기를 나타내며, P_e 가 ∞ 이면 층류모델인 경우이고, P_e 가 0이면 무한 난류확산의 경우가 된다. κ 는 입구에서의 가스의 유입속도와 평균전장에 의한 입자의 이동속도(migration velocity)와의 비를 나타내는 무차원수로 전기장의 크기가 일정한 경우 입자의 크기에 의존하는 매개변수이다.

위의 식(20)에서 결국 입자의 속도는 $\vec{V}_p = \vec{U}/\kappa + \vec{E} n$ 로 나타나며, 본 연구에서 고려하는 입자의 크기 범위내($0.3 \mu\text{m}$)에서 κ 가 작으면 즉 입자의 크기가 작으면 입자의 속도는 주유동속도의 영향을 크게 받고 입자크기가 커지면 입자의 속도는 전기력에 의한 영향이 커지게 된다.

입자장의 계산을 위해 먼저 균일분포의 입구조건과 출구에서의 입자농도는 선형적이라는 가정을 하였으며, 다음과 같은 경계조건을 가진다.

$$N(0, Y) = 1, \left(V_p N - D \frac{\partial N}{\partial Y} \right) \Big|_{r=0} = 0$$

$$\frac{\partial N}{\partial Y} \Big|_{r=1} = 0, \frac{\partial^2 N}{\partial X^2} \Big|_{x=L} = 0 \quad (21)$$

입자의 집진효율은 입구로부터 집진판의 길이방향에 따라 집진된 입자의 플럭스의 합, 또는 입구 유입입자의 플럭스와 임의의 X 위치에서 집진되지

않고 통과된 입자의 플럭스와의 차이와 같으며 다음과 같이 표시된다.

$$\begin{aligned} \eta(X) &= 1 - \int_0^1 U_p N(X, Y) dy \\ &= \int_0^X V_p N(X, 1) dX \end{aligned} \quad (22)$$

입자장의 수렴조건은 반복계산시의 각각의 격자점에서 다음의 조건을 만족시키면 수렴하였다고 간주하였다.

$$\frac{N^i - N^{i-1}}{N^i} < 1 \times 10^{-6} \quad (23)$$

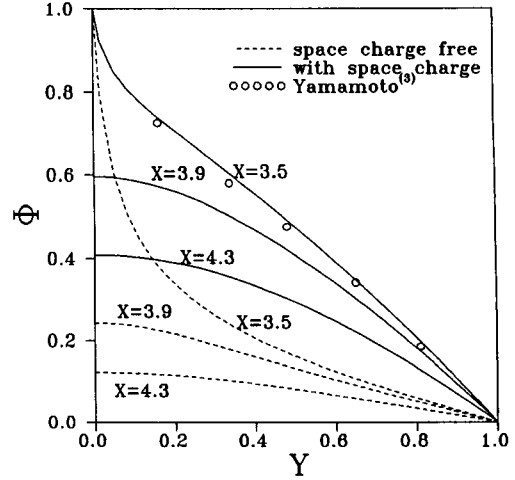
여기서, i 는 반복회수를 나타낸다.

3. 수치해석 결과 및 고찰

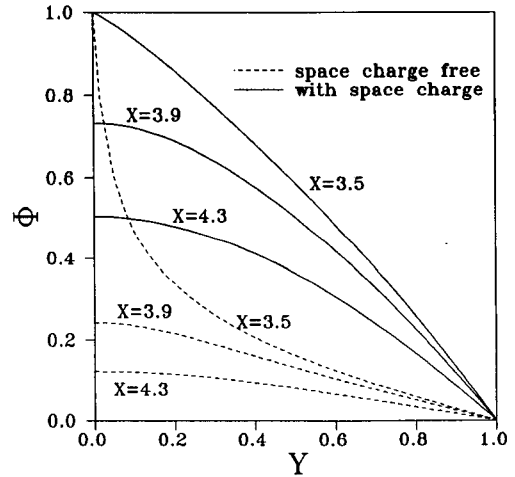
1단 전기집진기에서 입자의 이동현상을 고찰하기 위하여 입구 주유동속도의 크기, 입자의 난류확산, 2차유동의 강도, 공간전하밀도, 입자의 크기 등의 각각의 변수변화에 대한 입자의 농도분포를 수치해석하였다. 전기장과 유동장에 사용한 계산조건은 와이어 공급전압 40 kV, 전기장 계산영역내의 집진판에서의 총전류는 Yamamoto⁽³⁾의 집진판전류 실험값을 외삽(extrapolation)하여 구한 데이터인 4.461×10^{-4} mA를 사용하였으며, 이온의 이동율(mobility)은 $0.00014 \text{ m}^2/\text{V-S}$ 을 이용하였다. 주유동속도 0.5, 1, 1.5 m/s, 집진판 길이는 방전극과 집진판 사이의 간격의 7배를 사용하였고, 입자의 농도장은 무차원식에 의해 매개변수 (P_e, κ)의 변화에 대해 나타내었다.

Fig. 2에 와이어 공급전압 15 kV와 40 kV일 때, 공간전하밀도를 고려하지 않은 경우와 고려한 경우에 대해 $X=3.5, 3.9, 4.3$ 의 위치에서의 Y 방향에 따른 전기포텐셜의 분포를 나타내었으며, 공간전하밀도의 영향은 전기포텐셜을 증가시킴을 알 수 있고, 15 kV일때의 Yamamoto⁽³⁾의 실험결과와 일치함을 보이고 있다.

Fig. 3에 평판-평판형 전기집진기에서, $P_e=20$ 과 $P_e=100$ 인 경우에 대해 $Y=0.0, 0.1, 0.3, 0.5, 0.9$ 의 위치에서 입자의 농도분포를 나타내었다. 이 경우 $Y=0.0$ 의 위치는 고전압판(high voltage plate)을 나타내며 $Y=1.0$ 은 집진판을 나타낸다. 그림에서 나타나듯이 난류확산으로 인하여 $P_e=20$ 인 경우가 $P_e=100$ 인 경우에 비하여 고전압판 부



(a) $\Phi_0 = 15 \text{ kV}$



(b) $\Phi_0 = 40 \text{ kV}$

Fig. 2 Nondimensional electric potential distribution

근에서의 입자농도가 높게 나타나며, Yamamoto⁽⁵⁾의 결과와 경향이 일치함을 보인다.

Fig. 4는 와이어-플레이트형 전기집진기에서 주유동과 이온유동의 상호작용에 의한 2차유동의 생성과정을 나타낸다.

(a)는 전기장이 존재하지않은 경우($\phi=0$)의 주유동을 나타내며, (b)는 입구유동이 없는 경우, 즉 정지유체속에 전기력을 작용시킨 경우이며 이때의 유동을 이온유동이라 한다. (c), (d), (e)는 주유동과 이온유동의 상호작용으로 인한 2차유동을 나타낸다. 2차유동의 크기는 전기특성속도를 기준으로 정의되는 전기레이놀즈수(Re_{nd})와 주유동의

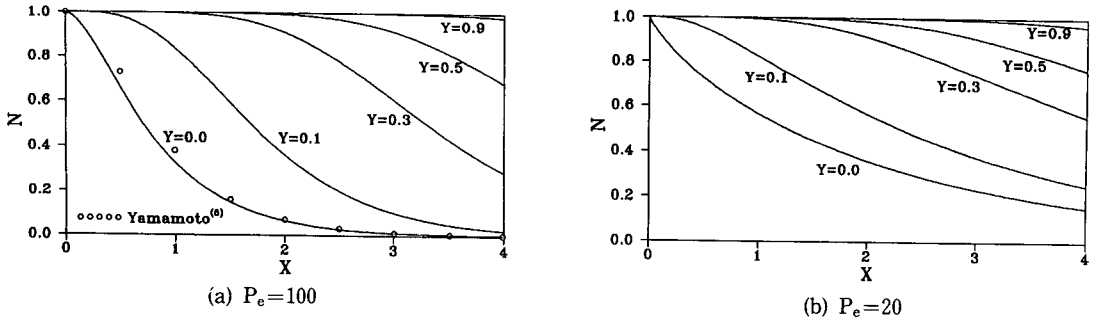
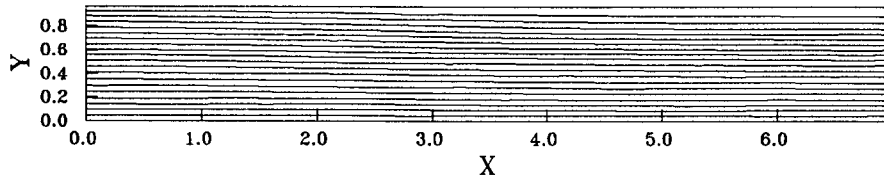
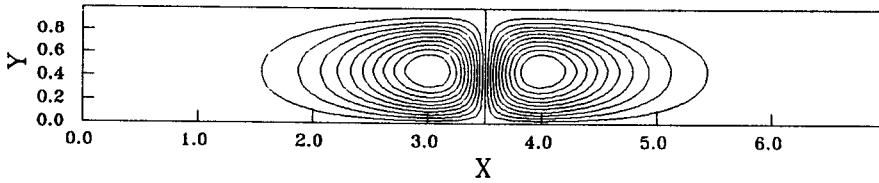


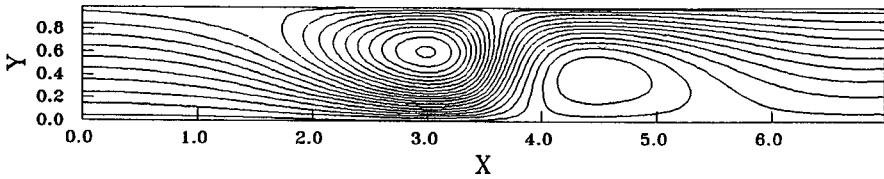
Fig. 3 Nondimensional concentration distribution for the plate-plate ESP($u_0=1.0$ m/s, $b=0.1$)



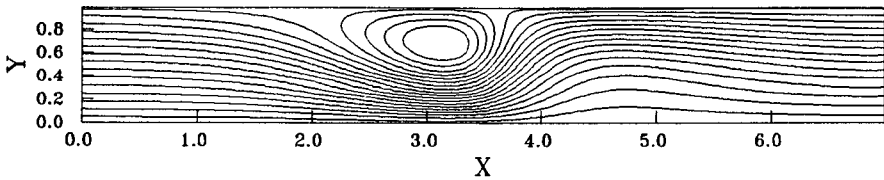
(a) $N_{ehd}=0.0$, $u_0=1.0$ m/s



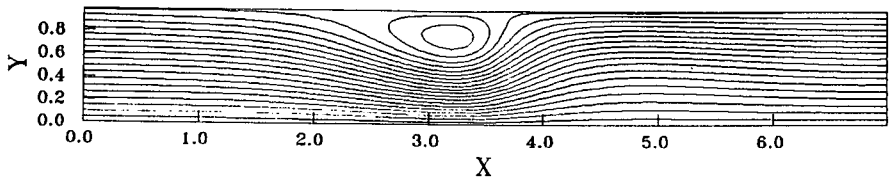
(b) $N_{ehd}=0.0$, $u_0=0.0$ m/s



(c) $N_{ehd}=27.2$ ($Re=1976$, $u_0=0.5$ m/s)



(d) $N_{ehd}=136$ ($Re=3952$, $u_0=1.0$ m/s)



(e) $N_{ehd}=9.16$ ($Re=5926$, $u_0=1.5$ m/s)

Fig. 4 Flow interaction between cross flow and secondary flow(wire position=3.5, $0.0: \phi_0=40$ kV)

속도를 기준으로 한 레이놀즈수(Re)의 비(N_{ehd})로
 서 나타낸다. 즉 $N_{ehd} = R_{ehd} / Re$, $R_{ehd} = U_e d / \nu$,
 $Re = 2U_0 d / \nu$, $U_e = \sqrt{\rho_{co} \phi_0 / \rho}$ 로 나타내며, 여기서,
 U_e 는 전기특성속도, ρ_{co} 는 와이어에서의 전하밀
 도, 그리고 ϕ_0 는 와이어공급 포텐셜을 나타낸다.
 주유동속도의 크기가 작을수록, 다시 말하면 N_{ehd}
 수가 클수록 2차유동의 크기는 증가하고, 와이어
 방전극의 상류부분과 하류부분에 큰 순환류가 나타
 나며, 이때 생성된 순환유동은 집진기의 유로 단면
 적을 감소시키는 역할을 하게 됨을 예측할 수 있
 다. N_{ehd} 수가 감소할수록 유동의 상호간섭의 크기
 도 감소하여 순환류는 점점 사라지며, 따라서 주유
 동속도의 크기가 일정속도 이상이 되면 집진기 내

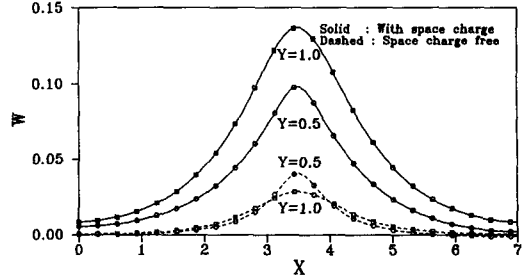


Fig. 5 Effect of space charge density on the particle drift velocity($Re=10$, $u_0=1.0$ m/s, $\phi_0=40$ kV)

부의 가스의 유동은 전기장의 영향을 거의 받지않
 게 된다. 결국 집진과 하전(charging)이 동시에

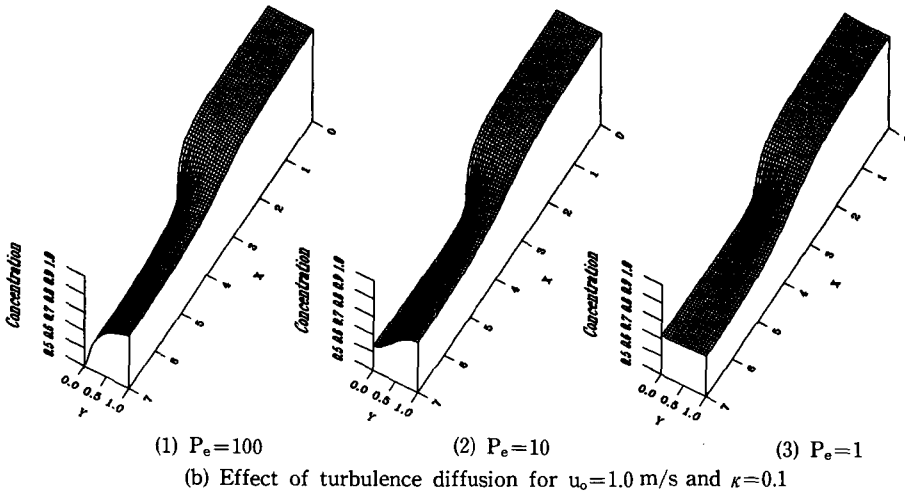
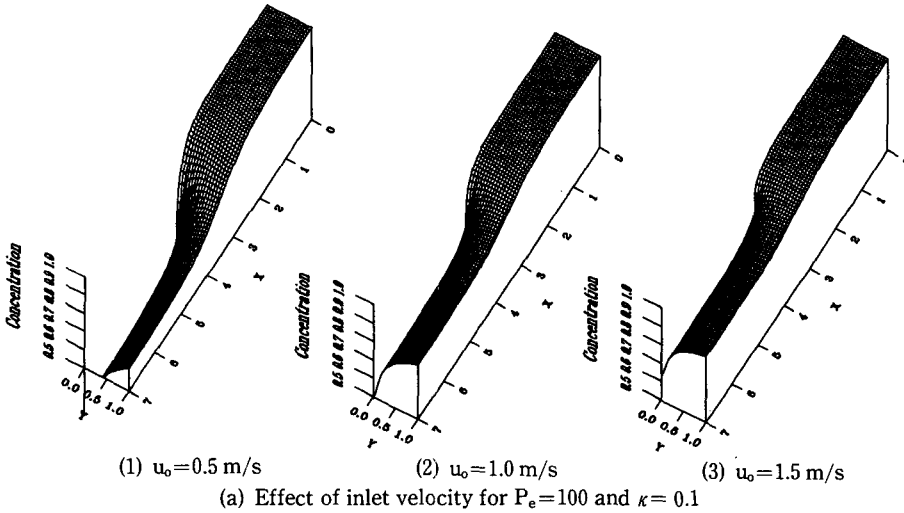


Fig. 6 Effects of inlet velocity and turbulence diffusion on the concentration distribution case of (uniform flow)

수행되는 1단 전기집진기 유동과 같은 복잡한 유동장의 분포는, 1차원 균일유동의 가정을 한 Deutsch 모델은 더이상 적용할 수 없음을 나타내며, 순환류의 존재는 입자의 농도분포에 매우 큰 영향을 미치게 됨을 Fig. 4로부터 예측할 수 있다.

Fig. 5는 공간전하밀도가 입자의 이동속도에 미치는 영향을 나타내며, 그림에서 나타나듯이 공간전하밀도는 입자의 이동속도를 급격하게 증가시키는 요인으로 작용한다. 이것은 공간전하밀도가 전기포텐셜의 분포를 변화시켜 전기장을 크게 증가시킨데 기인한 것이며, 따라서 하전과 집진을 동시에 수행하는 1단 전기집진기의 해석에서는 공간전하밀도를 반드시 고려하여야 함을 보이고 있다.

Fig. 6의 (a)에 균일유동장일 때, $P_e=100$, $x=0.1$ 인 경우에 대한 입자의 농도분포를 입구유동의 크기에 따라 나타내었다. 와이어방전극을 기준으로 집진기의 중심선부근 상류에서 방전극에 가까이 갈수록 입자의 농도는 급격하게 감소하며 이것은 방전극에서 강한 역방향의 전기력이 작용하기 때문이다. 방전극을 지난후 집진기 길이방향에 따른 입자의 농도는 주유동속도가 증가할수록 점점 증가하는 경향을 가진다. 한편 집진판 부근에서는 약한 전기력의 작용으로 인하여 방전극 상류에서는 급격한 농도감소가 나타나지 않으며, 유동방향에 따라 서서히 감소함을 보이고 이 결과는 Khim⁽²⁾의 연구결과와 일치함을 보인다. Yamamoto⁽¹⁰⁾ 또한 출구농

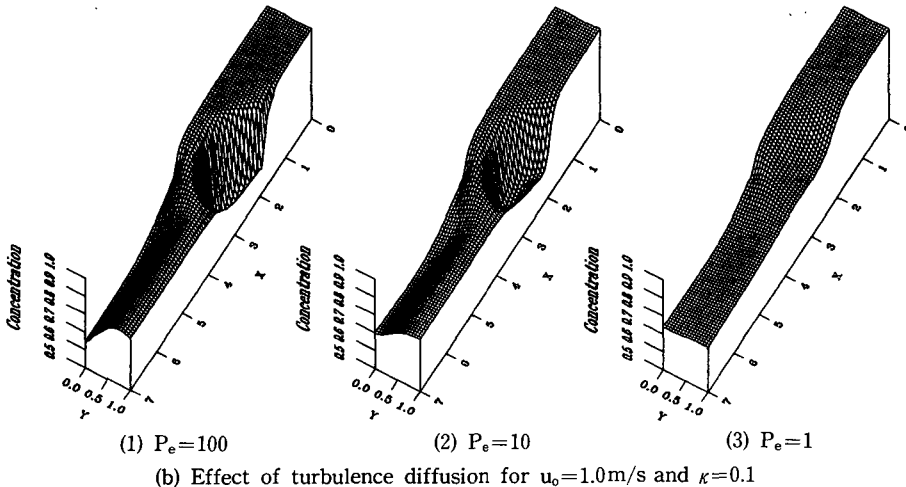
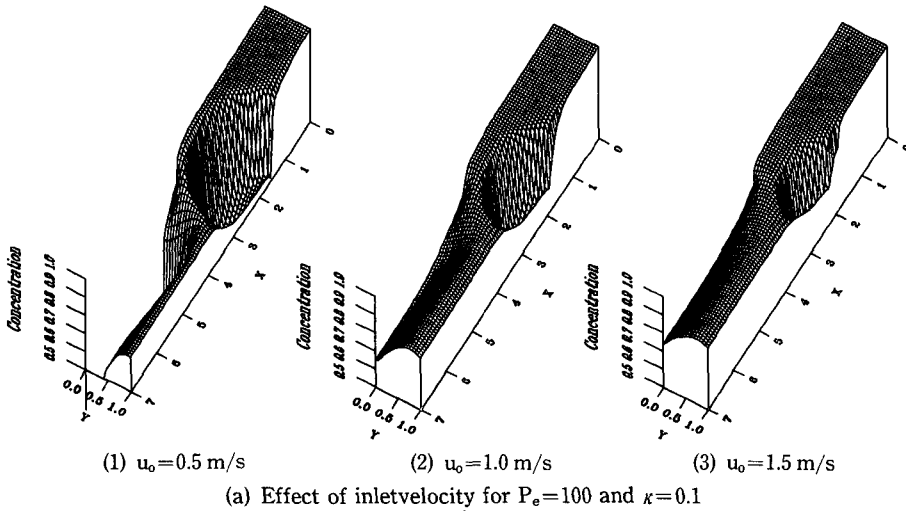


Fig. 7 Effects of inlet velocity and turbulence diffusion on the concentration distribution case of (secondary flow)

도의 증가는 입자의 통과량을 증가시키고 집진효율을 감소시킴을 의미하므로 결국 주유동속도의 최적치를 구하는일은 집진기 설계에서 대단히 중요한 문제임을 나타낸다. (b)는 $U=1\text{ m/s}$, $\kappa=0.1$ 인 경우 P_e 의 변화에 대한 입자의 농도를 나타내었다. P_e 가 감소할수록 즉 난류강도가 증가할수록 집진기 출구에서의 입자의 농도는 증가하며, $P_e=1$ 의 경우와 같이 난류강도가 매우 커지면 유동의 수직방향으로의 입자의 농도분포는 균일분포를 나타내며, $P_e=0$ 으로 접근할수록 Deutsch 모델에 근접함을 알 수 있다.

Fig. 7의 (a)는 2차유동인 경우, $P_e=100$, $\kappa=0.1$ 일 때 입구유동의 크기에 대한 입자의 농도분포

를 나타낸다.

주유동 속도가 작은 경우($U_o=0.5\text{ m/s}$, $N_{hd}=27.2$), 즉 2차유동의 강도가 큰 경우 농도분포의 격심한 변화가 일어나고 순환류 영역에서 농도의 감소도 크게 나타나며, 주유동 속도가 증가함에 따라 농도분포의 변화는 점점 감소하고 있음을 보인다. 즉 입자 농도분포는 유동장의 변화에 매우 민감한 반응을 보이며, 또한 집진기 출구에서의 입자의 농도 역시 균일유동인 경우에 비하여 증가하고, 이것은 집진효율이 균일유동장에 비하여 감소하고 있음을 나타낸다. 따라서 전기집진기의 설계시 2차유동의 영향을 최소화시키는 것은 난류강도의 감소와 함께 매우 중요한 문제임을 알 수 있다. (b)는 U_o

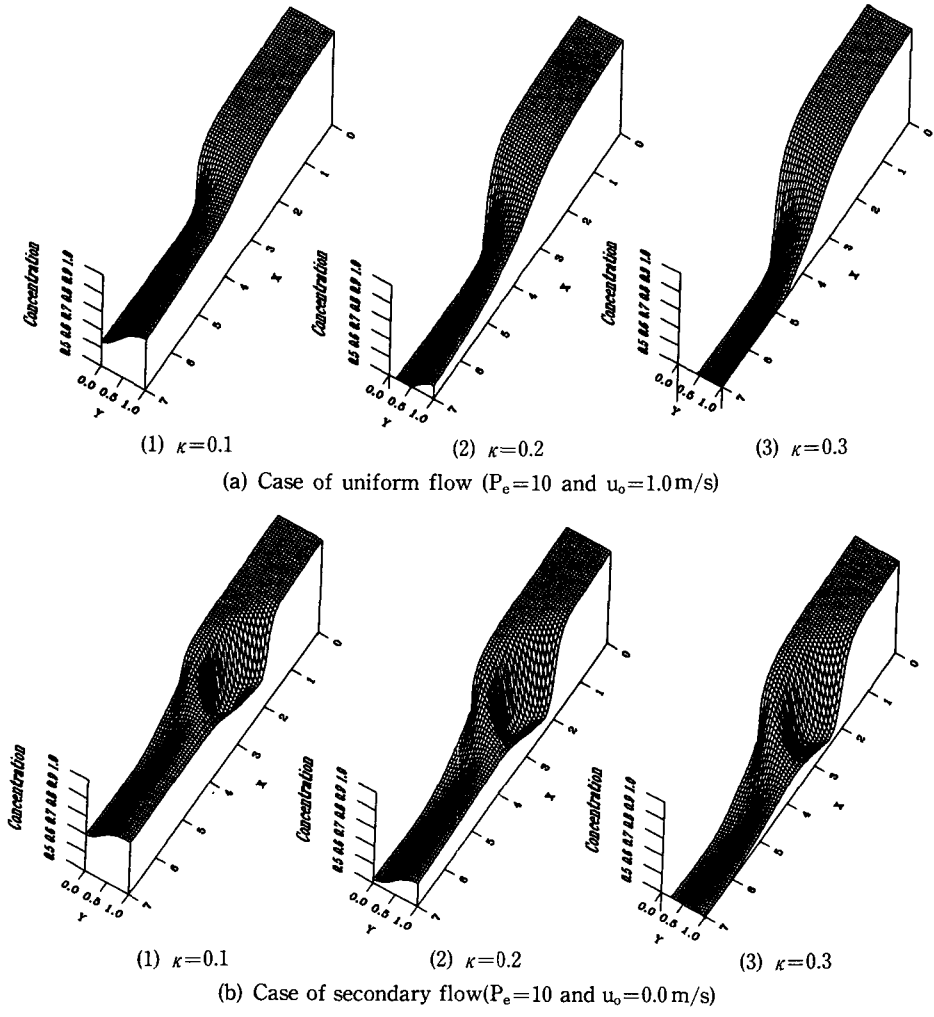


Fig. 8 Effects of particle size on the concentration distribution

=1 m/s, $\kappa=0.1$ 일 때 P_e 의 변화에 대한 입자의 농도분포를 나타낸다. P_e 가 감소할수록, 즉 난류확산이 증가할수록 2차유동의 영향은 감소함이 나타나며, 이것은 2차유동의 영향으로 순환류 영역에서의 낮은 농도와 주위의 높은 농도와의 사이에서 역방향으로의 난류확산이 일어난 결과이다. 결국 난류확산이 증가할수록 유동의 수직방향 농도분포의 변화는 감소하고 $P_e=0$ 으로 접근할수록 이 경우 역시 Deutsch 모델에 근접함을 예측할 수 있다.

Fig. 8의 (a)는 $U_0=1$ m/s, $P_e=10$ 일 때 균일유동의 경우에 입자의 크기에 대한 농도분포를 나타내었다. 입자의 하전량은 입자의 직경과 전기장의 크기에 의존하며, 전기장 대전이 지배적인 경우 ($d_p > 0.3 \mu\text{m}$) $q=q(E, d_p^2)$ 의 관계로 나타난다. 따라서 일정한 크기의 전기장에서는 입자의 하전량은 입자직경의 제곱의 함수로 되며 결국 $\kappa=\kappa(d_p^2)$ 으로 나타낼 수 있다. 따라서 κ 의 증가에 따라 입자의 하전량이 증가하고 결국 집진효율은 증가함을 보이고 있다. (b)는 2차유동의 효과를 고려한 경우의 농도를 입자의 크기에 대하여 나타내었다. 그림에서 나타나듯이 고려된 범위내에서의 입자 크기의 증가에 대하여 순환류 영역에서의 농도분포의 형태는 큰 변화를 보이지 않고 있으며 단지 입자의 크기가 증가함에 대하여 출구농도만 감소함을 볼 수 있다. 따라서 입자직경의 증가는 입자농도 분포의 전체형태에는 큰 영향을 미치지 않으나 집진효율은 크게 증가시킬 수 없다.

Fig. 9는 $U_0=1$ m/s, $\kappa=0.1$ 인 경우 P_e 의 변화에 대한 집진효율을 균일유동과 2차유동에 대하여 나타내었다. 먼저 균일유동인 경우 예측한 바와같이 P_e 가 감소할수록, 즉 난류확산이 증가할수록 입자의 집진효율은 감소하나, 이에 비해 2차유동인 경우에는 P_e 가 감소함에 따라 집진효율은 증가함을 보이고 있으며 이 현상은 균일유동의 경우에 비하여 반대의 현상을 나타내고 있고 이것은 Larsen과 Sorensen⁽⁴⁾의 연구결과와 같은 경향을 보인다. 즉 2차유동의 강도가 높을때 난류확산이 증가하면 입자의 집진효율은 증가하는 경향을 보이며 이것은 Fig. 7에서 나타났듯이 순환류 영역의 낮은 농도에 의한 입자의 역확산현상에 기인한 것이다.

Fig. 10은 $\kappa=0.1$, $P_e=100$ 인 경우, 균일유동인 경우와 2차유동인 경우에 대하여 주유동속도의 크기에 따른 입자의 집진효율을 나타내었다. 앞의 농도분포에서 나타났던 것처럼 2차유동의 영향은 균

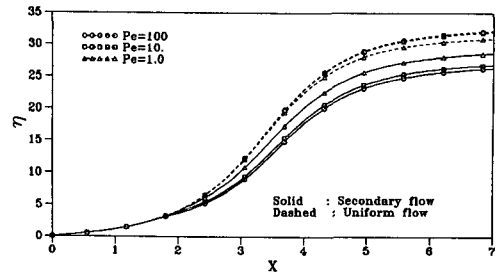


Fig. 9 Effects of turbulence diffusion and secondary flow on the collection efficiency for $u_0=1.0$ m/s and $b=0.1$

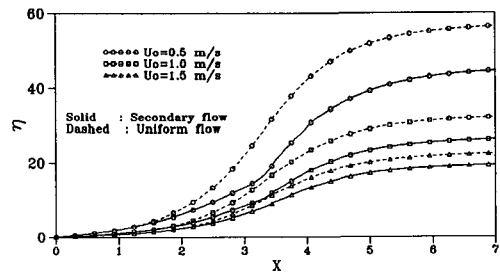


Fig. 10 Effects of inlet velocity on the collection efficiency for $P_e=100$ and $b=0.1$

일유동인 경우에 비하여 입자의 집진효율을 감소시키게 된다. 위의 Fig. 9와 Fig. 10에서 보듯이 집진기 유동이 균일유동인 경우에는 입자의 난류확산은 입자의 집진효율을 감소시키며, 유동장이 2차유동인 경우에는 2차유동 자체는 입자의 집진효율을 감소시키나 난류확산은 입자의 집진효율을 증가시키는 복합적인 형태로 나타나게 된다. 그러나 집진효율의 감소량 측면에서의 고찰을 하여보면, 2차유동인 경우 난류확산에 의해 집진효율이 증가하더라도 2차유동 자체에 의한 집진효율의 감소량때문에 결국 전체 집진효율의 감소량은 균일유동인 경우의 난류확산에 의한 집진효율의 감소량에 비하여 더 크게 나타나며, 결국 입자의 집진효율은 난류확산의 영향에 비하여 2차유동의 영향이 더 크게 작용함을 나타낸다.

4. 결 론

와이어-플레이트형의 1단 전기집진기의 단순화 모델에 대하여 정전유동장과 난류확산이 입자의 농도분포와 집진효율에 미치는 영향을 고찰하기 위한

수치해석을 행하였으며, 수치해석의 결과는 입자의 난류확산(전기 Peclet수), 2차유동의 강도(N_{ehd} 수) 그리고 입자의 직경(κ)과 입자의 농도분포와의 관계로 나타내었다.

2차유동의 영향이 없는 경우 즉 균일유동장의 경우, 난류확산의 증가는 집진기의 출구농도를 증가시키고, 입자의 집진효율을 감소시킨다.

일정한 난류확산일때, 2차유동의 강도를 증가시키면 2차유동의 순환류 영역에서 입자의 농도분포는 격심하게 변하고, 집진효율은 감소하게 된다.

2차유동의 경우 난류확산이 증가하면 순환류 부근의 역확산에 의해 입자의 농도분포는 균일분포화되고 집진효율은 난류확산의 증가에 따라 증가한다. 그러나 집진효율의 감소량 측면에서 고찰하여 보면 난류확산에 의한 집진효율의 감소에 비하여 2차유동에 의한 집진효율의 감소가 크게 나타남을 알 수 있으며 이것은 난류확산의 영향에 비하여 2차유동의 영향이 더 크게 작용함을 나타낸다.

따라서 2차유동을 감소시키는 방법은 전극의 공급전압을 감소시키거나, 주유동 속도를 증가시키면 가능하나, 공급전압을 감소시키면 전기장의 강도가 약해지고, 또한 방전극에서의 코로나 발생이 원활하지 않아 입자의 하전량 및 입자의 이동속도를 감소시키게 되며, 주유동의 속도를 증가시키면 입자의 통과량이 증가하고 난류확산이 커지게 된다. 따라서 1단 전기집진기의 설계시에 공급전압의 크기와 주유동속도의 크기에 대한 상호관계를 최적화하는것은 대단히 중요한 문제이다.

참고문헌

- (1) Leonard, G. L., Mitchner M. and Self, S. A., 1980, "Particle Transport in Electrostatic Precipitators," *Atmospheric Environment*, 16, pp. 1568~1571.
- (2) Khim, K. D., Mitchner M. and Self, S. A., 1987, "Comparison of Wire-Plate and Plate-Plate Electrostatic Precipitators in Turbulence Flow," *J. of Electrostatics*, 19, pp. 21~32.
- (3) Yamamoto, T. and Velkoff, H. R., 1981, "Electrohydrodynamics in an Electrostatic Precipitator," *J.F.M.*, Vol. 108, pp. 1~18.
- (4) Larsen, P. S. and Sorensen, S. K., 1984, "Effect of Secondary Flows and Turbulence on Electrostatic Precipitator Efficiency," *Atmospheric Environment*, Vol. 8, No. 16, pp. 1963~1967.
- (5) Yamamoto, T., 1989, "Effects of Turbulence and Electrohydrodynamics on the Performance of Electrostatic Precipitators," *J. of Electrostatics*, 22, pp. 11~22.
- (6) Leonard, G. L., Mitchner, M. and Self, S. A., 1982, "An Experimental Study of the Electrohydrodynamic Flow in Electrostatic Precipitator," *J.F.M.*, Vol. 27, No. 4, pp. 123~140.
- (7) Leonard, G. L., Mitchner, M. and Self, S. A., 1982, "Experimental Study of the Effect of Turbulent Diffusion on Precipitator Efficiency," *J. of Aerosol Science*, Vol. 13, No. 4, pp. 272~284.
- (8) Shaughness, E. J., Davision, J. H. and Hay, J. C., 1985, "The Fluid Mechanics of Electrostatic Precipitators," *Aerosolscience and Technology*, 4, 471~476.
- (9) Self, S. A., Khim K. D. and Mitchner, M., 1987, "Precipitator Performance Improvement Through Turbulence Control," *3ed International Conference on Electrostatic Precipitator*, 443~480

(1) Leonard, G. L., Mitchner M. and Self, S. A., 1980, "Particle Transport in Electrostatic