

원통형 전기집진기의 전기유체역학적 해석에 관한 연구

Study on Electrohydrodynamic Analysis of Cylinder Type ESP

조 용 수 · 여 석 준

부산수산대학교 환경공학과

(1996년 2월 5일 접수, 1996년 7월 23일 채택)

Yong-Soo Cho, Seok-Jun Yoo

Department of Environmental Engineering, National Fisheries University of Pusan

(Received 5 February 1996; accepted 23 July 1996)

Abstract

The main purpose of this study is to investigate the collection efficiency characteristics of a cylindrical ESP. To do that, it is necessary to analyze the electric field, gas flow field, and mechanism of particle movement by numerical simulation based on EHD model. For a gas flow field, Navier-Stokes equation involving the electric source term was solved by SIMPLE algorithm. In case of the electric field, the current continuity and electric field equations were solved by S.O.R. method. The analysis of particle movement was performed on the basis of PSI-CELL model from the Lagrangian viewpoint. The results showed that the influence on the gas flow field by the electric field is almost negligible in a cylindrical ESP. The particle drift velocity v_p toward the collection surface is increased continuously by the electrostatic force due to the rise of particle charge as the particle is moving to the flow direction and the particle size becomes larger. The collection efficiency is to be quite higher with the increase of applied voltage for the same particle size, while becomes smaller as the inlet velocity is increased.

Key words : ESP, electrohydrodynamic analysis, EHD model, PSI-CELL model, collection efficiency

1. 서 론

대기오염물질 배출 허용기준이 강화됨에 따라 고효율 집진 장치에 대한 개발이 절실히 요구되며, 더욱이 전기 집진기는 높은 효율과 유지 보수가 간편하여 이에 대한 연구가 활발히 진행되고 있는 실정이다. 전기집진기는 기하학적 형상에 따라 평판형 (plate type)과 원통형 (cylinder type)으로 분류할 수 있으며, 처리 유량이 많은 경우 전자가 사용되나 후자는 중·소형으로 산 미스트 또는 미세 분진까지 제거할 수 있는 특히 높은 효율이 요구되는 경우 주로 사용된다. 본 연구에서 다루고

자 하는 전기집진기 형태는 중·소형인 원통형 전기집진기로서, 집진극의 지름이 50~200 mm의 범위를 가지며, 길이는 대개 2~5 m 사이에서 변동한다. 기체 유속은 전통적인 설비에 있어서 약 1~2 m/s이다.

전기집진기의 집진 효율 모델에 대한 연구는 Deutsch (1922)에 의해 이론적으로 유도된 집진 효율식과 Cooperman (1969)에 의한 입자들의 역확산 효과를 고려한 연구가 있으나, 이들 식은 유도하는 과정에서의 많은 단순화된 가정들로 인해 정밀한 예측을 할 수 없어 실제와는 많은 차이를 나타내게 된다. 실제로 전기집진기 내의 기체 유동 및 입자 운동은 코로나 전기장과 복잡하게 커플링되어 있으며, 전기집진장치의 집진 효율 특성을 수

치적으로 정확히 예측하기 위해서는 이러한 전기장 및 유동장 시스템에 대한 해석이 선행되어야 한다. 그러므로 전기집진기의 집진 효율 모델을 만들기 위해서는 집진기의 기하학적 형상, 인가 전압 및 유입 기체 유속 등의 중요 설계 변수에 따른 전기집진기 내의 전기장과 기체 유동 방정식을 수치적으로 해석하고 입자 궤적 모델에 의한 입자 운동을 추적할 필요가 있다.

최근에는 이러한 전기유체역학(EHD: electrohydrodynamics)적 방법을 이용하여 전기장과 결합된 전기집진기 내부 유동, 입자 운동 및 농도 분포에 대한 예측이 시도되고 있다. 평판형 전기집진기의 경우 McDonald *et al.*(1977)에 의해 집진기 내부의 비균일 전기장 분포가 계산되었으며, 최근 Yamamoto *et al.* (1989)에 의해 비균일 전기장에서 입자 농도 분포 및 집진 효율 특성이 계산된 바 있다. 그러나, 원통형 전기집진기의 경우 Elmoursi *et al.*(1986)에 의해 공간전하 효과를 고려한 전기장 분포가 계산된 것과 Cristina *et al.*(1991)에 의한 유사한 연구가 있으나, 그 외 원통형 전기집진기에서 유동장 및 입자 거동에 관한 실험 또는 수치적 연구는 미미한 상태이다. 따라서, 본 연구에서는 앞에서 언급한 바와 같이 이러한 전기유체역학적 방법을 적용한 수치적 접근 방법에 의해 원통형 전기집진기 설계의 중요 인자인 방전극과 집진극 직경, 인가 전압 및 유입 유속에 따른 집진기 내부의 전기장 분포 및 유동장 분포를 구하고 이들이 입자 거동에 미치는 물리적 효과를 해석하여, 원통형 전기집진기의 집진 효율 특성을 정성적, 정량적으로 파악할 수 있는 수치적 모델의 확립과 최적의 원통형 전기집진기 설계를 위한 기초적 자료를 제공하고자 한다.

2. 수치적 모델의 해석

본 연구의 해석은 기체 유동장 방정식, 전기장 방정

식, 입자의 대전 메카니즘 및 대전된 입자의 거동 등으로 구분할 수 있다. 본 연구에서는 실린더 중심에 방전극이 있는 그림 1과 같은 구조를 계산 모델로 한다. 기체 유동장 해석은 Navier-Stokes 방정식을 SLMPLE algorithm에 의해 계산을 한다 (Patankar, 1980). 전기장을 지배하는 방정식은 전기장 방정식과 전류 연속 방정식으로 구분되며, 전기장 방정식은 중앙 차분 (central difference)에 의해, 전류 연속 방정식은 후진 차분 (backward difference)을 이용해 S.O.R.(successive over relaxation) method로 계산한다. 본진 입자 거동에 대한 해석은 Lagrangian 관점의 궤적 모델 (trajectory model)을 이용하여 입자의 부착율 및 집진 효율을 계산한다.

2.1 기체 유동장 방정식

집진기 내부의 기체 유동장 해석을 위해 2차원 축 대칭, 정상 유동으로 가정하여 부유 기체 내의 입자 적재율이 높지 않은 즉, 입자 거동이 기체 유동에 영향을 미치지 않는 dilute한 기체-입자 유동으로 모델화 한다.

질량보존식

$$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r}(\rho r v) + \frac{\partial}{\partial x}(\rho u) = 0 \tag{1}$$

u-운동량 방정식

$$\begin{aligned} & \frac{1}{r} \left[-\frac{\partial}{\partial x}(\rho u r u) + \frac{\partial}{\partial r}(\rho v r u) - \frac{\partial}{\partial x} \left(r \mu \frac{\partial u}{\partial x} \right) - \frac{\partial}{\partial r} \left(r \mu \frac{\partial u}{\partial r} \right) \right] \\ & = -\frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\mu \frac{\partial u}{\partial x} \right) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \mu \frac{\partial v}{\partial x} \right) + \rho_e E_r \end{aligned} \tag{2}$$

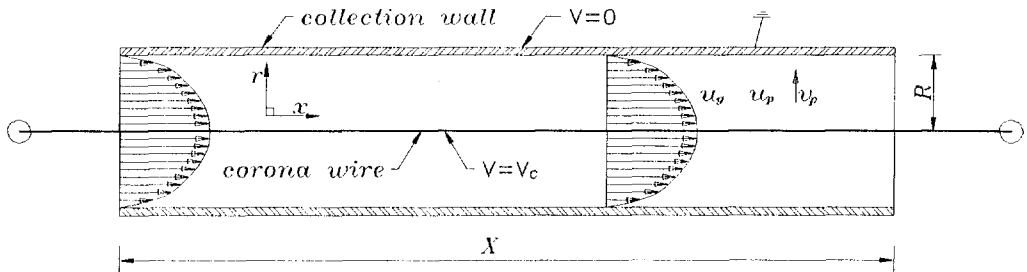


Fig. 1. Computational model and coordinate system.

v-운동량 방정식

$$\frac{1}{r} \left[\frac{\partial}{\partial x} (\rho u r v) + \frac{\partial}{\partial r} (\rho v r v) - \frac{\partial}{\partial x} \left(r \mu \frac{\partial v}{\partial x} \right) - \frac{\partial}{\partial r} \left(r \mu \frac{\partial v}{\partial r} \right) \right] = -\frac{\partial p}{\partial r} - \frac{2\mu v}{r^2} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\mu \frac{\partial u}{\partial r} \right) + \frac{1}{r} \left(r \mu \frac{\partial v}{\partial r} \right) + \rho_c E_r \quad (3)$$

여기서, 방정식 중의 $\rho_c E_x, \rho_c E_r$ 는 전기장으로 인해 유체에 작용하는 생성항이다. 위 방정식을 계산하기 위한 경계 조건은 다음과 같다. 단, 방전극의 직경이 유동장에 미치는 영향은 무시하였다.

입구에서, fully developed flow
 출구에서, $\frac{\partial u}{\partial x} = \frac{\partial v}{\partial x} = 0$
 대칭축에서, $\frac{\partial u}{\partial r} = v = 0$
 벽면에서, $u = v = 0$ (4)

2.2 전기장의 방정식

아크 방전이 일어나지 않는다고 가정하고 자기장의 영향 및 입자의 공간전하밀도의 영향을 무시하고 정상 상태 (steady state) 전류의 흐름으로 가정하면 전기장과 전류에 대한 지배 방정식은 다음과 같다 (Ogtesy et al., 1978).

전기장 방정식

$$\nabla^2 V = -\frac{\rho_c}{\epsilon_0} \quad (5)$$

전류연속 방정식

$$\nabla \cdot j = \nabla \cdot (\rho_c b E) = 0 \quad (6)$$

전기장 방정식을 수치해석하기 위해서는 전기포텐셜 및 공간전하밀도의 경계조건이 필요하며, 이 중 방전극에 인가되는 전압값과 집진판에 인가되는 전압값 $V_{wire} = V_c, V_{wall} = 0$ 에 의해 전기포텐셜의 경계조건은 만족된다. 그러나 공간전하밀도의 경계조건인 방전극에서의 공간전하밀도는 코로나 영역내의 공간전하밀도에 대한 모델링이 되어 있지 않기 때문에 본 연구에서는 Kaptzov의 가정 (McDonald et al., 1977)으로부터 방전극 주위의 공간전하밀도를 구하여 공간전하밀도의 경계조건으로 사용한다. 즉, 방전극에 흐르는 전류를 가정하여 아래

식의 방법에 의해 방전극 주위의 공간전하밀도를 계산한 후, 계산에 의한 집진면에서의 전류값이 가정에 의한 전류값과 일치하게 될 때까지, 즉 경계조건과 일치하게 될 때까지 전류값을 변화시켜 가면서 반복 계산하여 공간전하밀도에 대한 경계조건을 만족시킨다. 이와 같은 방법으로 지배방정식과 경계조건을 만족하는 전기장과 공간전하밀도를 구하게 된다.

$$\rho_{ci} = \frac{j_i}{2\pi b a (30\delta + 9\sqrt{\delta/a})} \times 10^{-3} \quad (7)$$

2.3 입자의 대전

전기집진기 내의 입자가 대전되는 원리는 전기장 대전과 확산 대전의 두 가지 대전 메카니즘으로 구분된다. 일반적으로 입자 직경이 0.5 μm 이상인 경우에는 전기장 대전이 추가 되고, 0.2 μm 이하인 경우에는 확산 대전이 주된 대전 메카니즘이 된다. 그리고 0.2~0.5 μm 인 경우에는 위 두 대전 메카니즘이 동시에 고려된다. 확산 대전은

$$q(t) = akT\theta/e \ln(1 + \tau^*) \quad (8)$$

로 표현되는데, 여기서 $q(t)$ 는 시간에 따른 입자전하량, a 는 입자의 반경, k 는 Boltzmann 상수, T 는 온도, e 는 전자의 전하량, θ 는 실제시간, τ^* 는 $\pi a v N e^2 / kT$ 로 표현되는 무차원 시간이며, 여기서 v 는 이온의 평균속도, N 은 이온의 개수농도 (number concentration) 이다.

그리고, 장대전의 경우는

$$q(t) = q_s \theta / (\theta + \tau') \quad (9)$$

로 되며, 여기서 q_s 는 $12 \frac{\epsilon_p}{\epsilon_p + 2} \pi \epsilon_0 a^2 E$ 로 표현되는 한계 대전량이며, ϵ_p 는 입자의 유전율, θ 는 실제시간, 그리고 τ' 는 $4\epsilon_0 / Neb$ 로 표현되는 특성 시간이다.

2.4 입자운동방정식

본진 입자에 대한 운동방정식은 각 입자에 대하여 뉴우톤의 운동방정식을 적용하여 해석하는 Lagrangian 궤적 모델을 적용하였다. 지배방정식을 유도하기에 앞서, 입자의 운동을 기술하기 위해 사용된 가정은 다음과 같다.

- 입자간의 상호작용이 무시 가능한 희박 농도 분포이다.
- 입자의 형상은 구형이다.

-입자에 대전된 전하에 의한 전기장변화는 무시한다.

입자의 운동을 기술하기 위해서는 입자에 작용하는 점성력, 자기력, 중력, 전기력 등 여러 힘을 고려해야 하는데, 이 중 전기집진기 내에서 입자에 작용하는 주된 힘인 공기저항력과 정전기력 만을 고려하면, 단일 입자에 대한 운동방정식은 다음과 같이 표현될 수 있다.

$$m_p \frac{dv}{dt} = C_D \rho (u-v) |u-v| \frac{A_p}{2} + qE \quad (10)$$

여기서,

- C_D : 공기저항계수
- v : 입자 속도(m/s)
- u : 기체 속도(m/s)
- m_p : 입자 질량(kg)
- A_p : 입자 단면적(m²)
- q : 입자 대전량(coulomb)
- E : 전기장 강도(V/m)

이며, 적분시간 Δt 동안 기체속도 u 는 일정하다고 가정하고 위 입자운동 방정식을 시간에 대하여 적분하면

$$v = u - (u - v_0) \exp\left(-\frac{\Delta t}{\tau}\right) + \tau q E \left[1 - \exp\left(-\frac{\Delta t}{\tau}\right)\right] \quad (11)$$

이 되며, 여기서 v_0 는 입자의 초기 속도이고, τ 는 다음과 같이 정의되는 특성시간이다.

$$\tau = \frac{\rho_p d_p^2}{18\mu} \quad (12)$$

어느 시점 Δt 에서 입자의 속도가 결정되면, 시간 Δt 에서 입자의 위치는 아래 식과 같이 적분된다.

$$x_p = x_{p,0} + (v' + v) \frac{\Delta t}{2} \quad (13)$$

따라서 위 식으로부터 개개의 입자의 운동궤적을 추적하여 집진기내의 입자 거동을 해석할 수 있다. 여기서 $x_{p,0}$ 및 v' 는 Δt 이전의 입자의 위치 및 속도를 의미한다.

2.5 입자농도

본 연구에서는 집진기 내부 각 위치에서의 입자 농도 분포를 구하기 위해 Crowe *et al.* (1977)에 의해 개발

된 PSI-CELL (Particle Source In-Cell) 모델을 적용하였다. PSI-CELL 모델은 유동장을 연속되어 있는 cell로 분할 한 다음, 각 cell을 통과하는 입자들의 개수, 속도 등으로부터, 각 cell에서의 평균 입자 농도를 구한다. 그림 2는 PSI-CELL 모델에 사용되는 cell구조를 나타낸다.

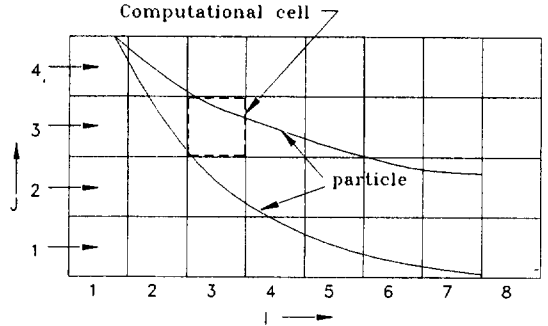


Fig. 2. Illustrative cell structure used in PSI-CELL model.

2.6 집진 효율식

입자 속도와 PSI-CELL 모델로부터 구해진 입자 농도 분포로부터 집진면에서의 입자 부착율 및 집진 효율을 구할 수 있다.

이 때, 집진면으로의 입자 부착율은

$$J_p = \rho_p \cdot v_p |u_{wall}| \quad (14)$$

여기서, ρ_p : 입자 농도

v_p : 입자 이동 속도

누적 집진 효율은

$$\eta_c = \frac{\int_0^x J_p(s) 2\pi r ds}{\rho_{p,in} U \pi R} \quad (15)$$

와 같이 표현된다.

3. 결과 및 고찰

본 연구에서 사용한 원통형 전기집진기의 구조는 반경 0.1 m, 길이 1.5 m의 원통형 집진극과 길이 1.5 m, 반경 1 mm인 중심축의 방전극으로 구성되어 있다. 집진 효율 예측을 위해 도입된 물리적 변수들의 수치적 data는 표 1에 주어지며, 이에 대한 전기장 분포, 기체

유속 분포, 입자 유속 분포, 입자 궤적, 입자 농도 분포 및 집진 효율 등을 수치적 방법에 의해 정량적으로 해석하였다. 전기장 해석을 위한 수치적 simulation의 검증을 위해 그림 3에서 인가전압 45 kV인 경우의 전기장 강도를 Elmoursi *et al.* (1986)의 결과와 비교해 볼 때 거의 일치하고 있음을 알 수 있다.

그림 4-a, b, c는 인가 전압 35, 45, 55 kV에서 공간전하밀도, 전기 포텐셜, 전기장 강도 분포를 도시한 것이다. 방전극에 주어진 인가 전압에서의 공간전하밀도의 경계 조건은 앞서 설명한 시행착오법으로 구하며 이 방법에 의해 45 kV인 경우 공간전하밀도는 그림 (a)에 보여지며 35, 55 kV인 경우는 좌표 scale 차이에 의해 그림에 표현하지 않았다. 전기 포텐셜 및 전기장 강도는 방전극 부근에서 급격히 하강하다가 집진극으로 가면서 변화율은 점진적으로 완만하게 변화한다. 전기장 강도는 $r/R=0.1$ 에 도달하면서 거의 일정한 구배의 접근값에 접근하며, 전기 포텐셜 및 전기장 강도의 인가 전압에

Table 1. List of computational conditions for collection efficiency.

Variables	Values
Applied voltages	0, 35, 45, 55 kV
Average inlet gas velocity	0.5, 1.0 m/s
Particle diameter	0.5, 1.0, 2.0, 3.0, 5.0, 7.5, 10.0 μm
Particle density	1300 kg/m^3
Particle permittivity	high(∞)

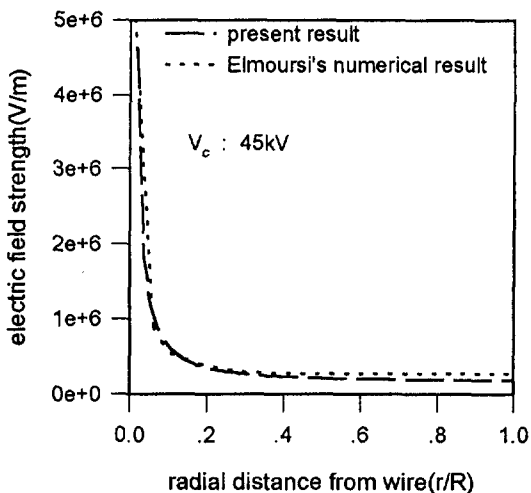
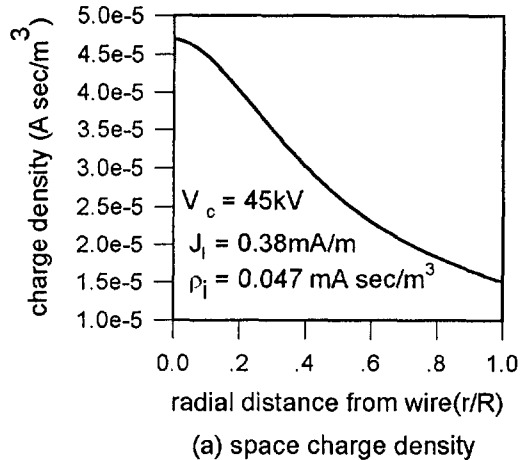
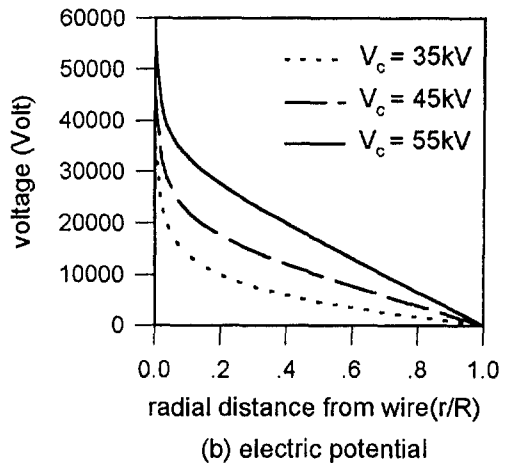


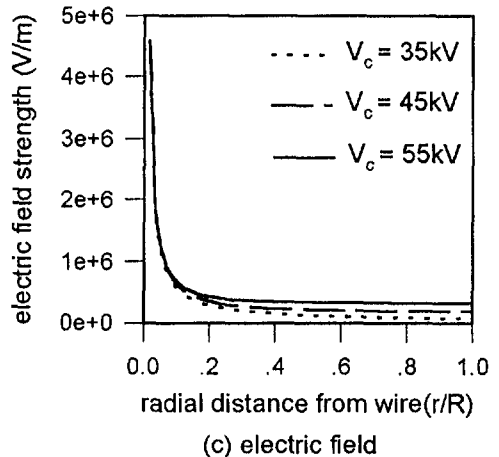
Fig. 3. Electric field strength along radial distance ($V_c=45$ kV).



(a) space charge density



(b) electric potential



(c) electric field

Fig. 4-a, b, c. Electric field distribution ($V_c=35, 45, 55$ kV).

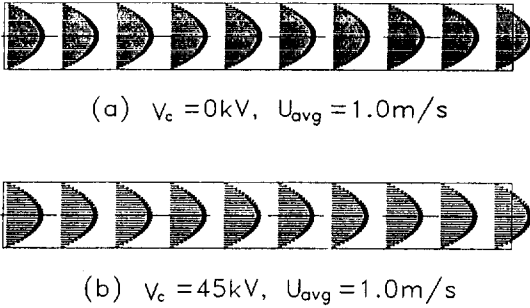


Fig. 5-a, b. Gas flow field distribtion ($U_{avg}=1.0$ m/s, $V_c=45$ kV).

다른 변화는 그림에서 보는 바와 같이 예측될 수 있다.

그림 5-a,b는 인가 전압 0, 45 kV, 유입 유속 1.0 m/s일 때의 집진부 내부의 기체 유속 분포를 나타낸 것이다. 그림에서 보는 바와 같이 인가 전압 0 kV일 때와 45 kV인 경우에서 유속 분포의 차이는 거의 없는 것으로 나타났는데, 이는 방전극이 튜브의 축 방향으로 분포되어 있어 그 방향 (u 속도 방향)으로의 전기 포텐셜 변화는 거의 없기 때문이다. 즉 기체 유동장 방정식의 생성항인 전기장은 반경 방향으로만 형성되어 u -운동량 방정식의 유동 분포를 전기장 효과에 의해 변화시키지 못하며, v -운동량 방정식에서는 생성항 ($\rho_e E_r$)의 효과에 의해 v 속도를 변화시키지만 반경 방향 속도의 order가 u 속도에 비해 매우 작으므로 전기장 효과에 의한 유동 분포의 변화는 매우 미미한 것으로 평가된다.

그림 6-a,b는 인가 전압 45 kV, 유입 유속 0.5, 1.0 m/s일 때 1.0, 5.0, 10.0 μ m인 입경 범위에서 입자의 궤적을 도시한 것이다. 동일 전압 및 입경에서 유입 유속이 0.5, 1.0 m/s일 때를 비교하여 보면 유입 유속 증가에 따라 유동 방향으로의 입자 관성력 증대로 반경 방향으로의 전기장 효과를 완화시켜 v_r 의 감소를 초래하므로 입자가 집진면에 도달하기 위한 축 방향으로의 이동 거리는 증가함을 알 수 있다. 입구에서 방전극 가까운 지점에서 유입된 입자는 방전극 부근의 강한 전기장으로 인해 $r/R=0.5$ 부근에서 유입된 다른 입자들보다 궤적이 처음부터 집진극 쪽으로 치우치는 것을 볼 수 있다. 이는 강한 전기장의 효과가 튜브 중심 부근의 높은 u 속도에 의한 입자 관성력의 효과를 감소시키는 것과 $r/R=0.5$ 부근에 접근하면서 그림 4-c 및 그림 5에서 보듯이 낮은 u 속도에 의한 축방향 관성력의 감소에도 불구하고 전기장 강도의 급격한 감소에 의해 입자 반경방향 이동속도가 작아지기 때문이다. 더욱이 집진면 ($r/R=1.0$) 부근에서 낮은 u 속도에 의한 입자의 체류

시간 증가에 의해 대전량이 거의 포화 상태에 이르는 데 이는 표 2에 잘 나타나 있으며, 입자 운동 방식의 정전기력 항인 qE 에서 낮은 전기장에도 불구하고 q 의 증대 및 관성력의 급격한 감소로 인해 입자의 궤적은 거의 수직 방향으로 움직이는 것을 알 수 있다. 이러한 현상은 입자의 크기가 증가할수록 대전량이 증대되어 더욱 현저하게 나타난다.

그림 7은 유입 유속 1.0 m/s, $d_p=1.0 \mu$ m 및 35, 45, 55 kV의 인가 전압 변화에 따른 입자 궤적을 나타낸다. 이는 그림 6에서 설명한 바와 같이 유사한 경향을 나타내며, 그림 4-c의 인가전압 증가에 따른 전기장 강도의 증대로부터 인가전압 35, 45, 55 kV에서 입자가 집진면에 도달하기 위한 최소거리는 $x/R=7.2, 5.4, 4.4$ 로 감소됨을 알 수 있다.

그림 8-a,b는 인가 전압 45 kV, 입경 1.0 μ m, 유입 유속 0.5, 1.0 m/s에서의 PSI-CELL 모델로부터 구해진 각 cell에서의 입자의 집진면으로의 이동 속도 v_b 를 나타낸 것으로 주어진 cell내에 존재 하는 입자들의 평균 이동 속도를 의미한다. 방전극에 가까운 위치에 있는 입자는 방전극 주위에 형성되어 있는 강한 전기장 (E)과 이로 인한 입자 대전량 (q)의 증가로 인해서 입자 운동 방정식 중의 정전기력에 관한 항, 즉, qE 의 증가를 가져오므로 집진면으로의 이동 속도 v_b 는 방전극에 가까이 있는 입자가 외측에 있는 입자보다 큰 것으로 나타났다. 그리고 x/R 이 길어짐에 따라 입자의 체류 시간이 길어지게 되어 전체적으로 입자의 이동 속도 v_b 또한 증가하는데 이는 입자의 이동 속도에 영향을 미치는 인자 중의 하나인 입자의 대전량 q 가 시간의 함수로 시간에 따라 증가하기 때문이다. 그리고 유입 유속 0.5 m/s와 1.0 m/s를 비교하여 보면, 같은 거리 (x/R)에 도달하기까지 입자의 체류 시간은 유입 유속 0.5 m/s 일 때가 유입 유속 1.0 m/s일 때에 비해 크므로 입자의 대전량 또한 많아져서 같은 위치에서 입자의 이동 속도는 유입 유속 0.5 m/s 일 때가 1.0 m/s 일 때 보다 큰 것으로 나타났다. 그리고 기체 속도 1.0 m/s에서 $x/R=4.0$ 인 위치에서 방전극 가까운 위치의 입자 이동 속도가 0으로 나타나는 부분이 있는데 그림 5에서 알 수 있듯이 이것은 입구에서 방전극 주위에 있던 입자가 점차 집진극 쪽으로 이동하여 방전극 부근의 cell에 입자가 존재하지 않기 때문인 것으로 추정된다. 유입 유속 0.5 m/s에서도 $x/R=4.0$ 인 지점에 이르러서 위와 유사한 현상이 나타나며 1.0 m/s에 비해 상대적으로 입구로부터 가까운 위치에서 발생할 것으로 생각된다. 그리고 $r/R=0.5$ 이상의 영역에서는 반경 방향을 따라 v_b 는 계속 증

Table 2. Particle charge with axial distance and residence time for various particle diameter ($r/R=0.8$, average inlet gas velocity=1.0 m/s, unit of particle charge=coulomb).

Time(sec) x/R	0.1	0.5	1.0	1.5	2.0
	$d_p (\mu m)$	0.8	3.4	6.8	10.2
1.0	0.782e-17	0.133e-16	0.145e-16	0.150e-16	0.152e-16
5.0	0.190e-15	0.332e-15	0.363e-15	0.375e-15	0.381e-15
10.0	0.783e-15	0.133e-14	0.154e-14	0.150e-14	0.153e-14

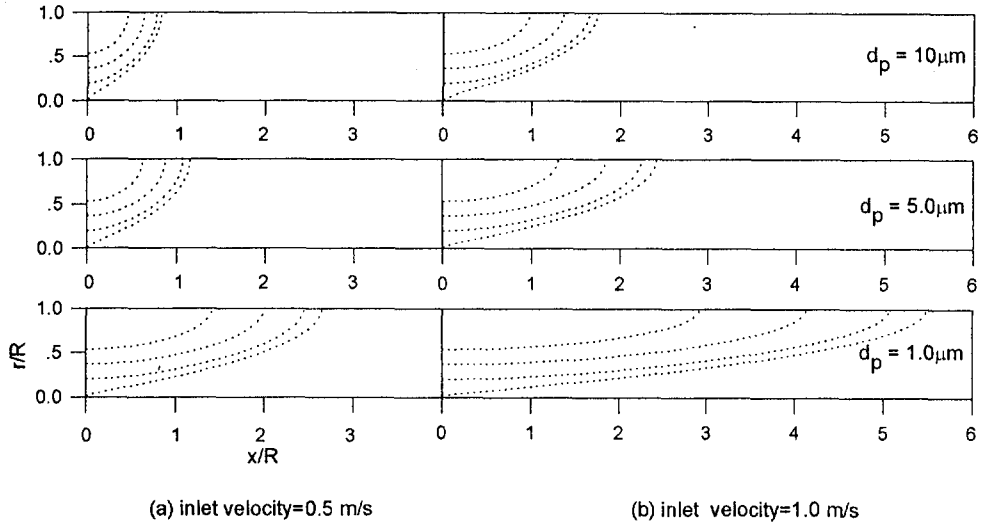


Fig. 6-a, b. Particle trajectory with inlet velocities ($U_{avg}=0.5, 1.0$ m/s, $V_c=45$ kV).

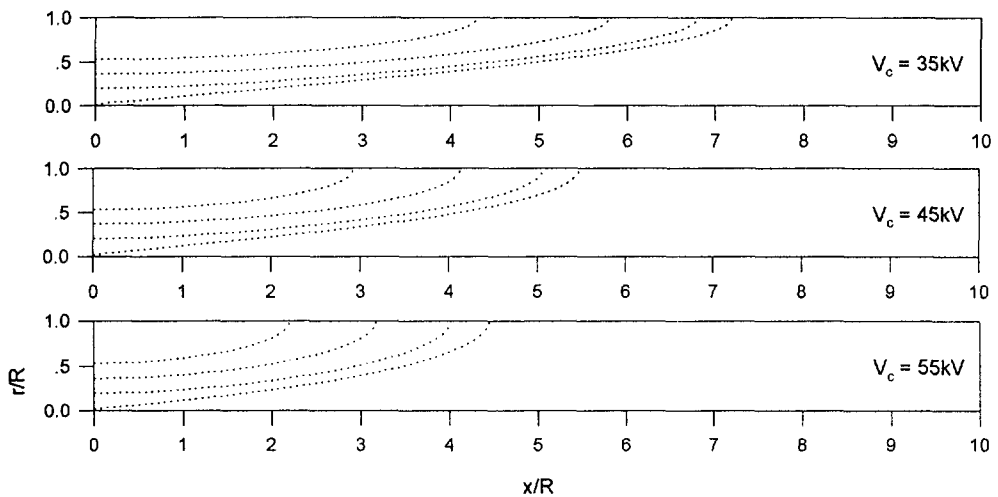
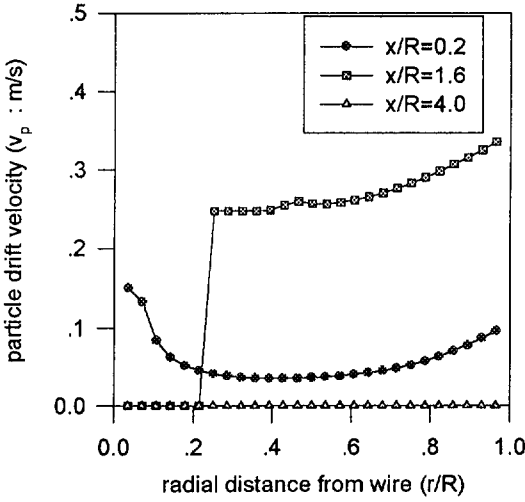
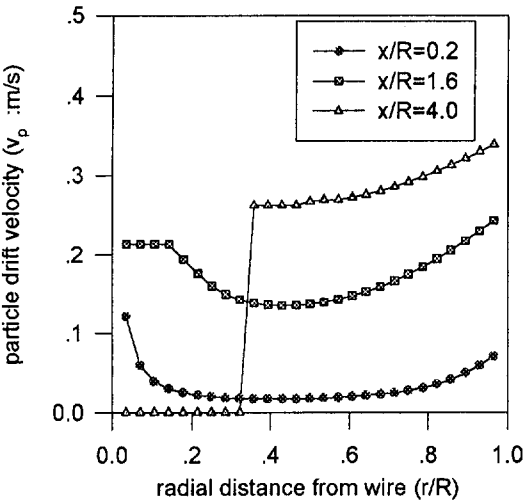


Fig. 7. Particle trajectory with various applied voltages ($U_{avg}=1.0$ m/s, $d_p=1.0 \mu m$, $V_c=35, 45, 55$ kV).



(a) inlet velocity = 0.5 m/s



(b) inlet velocity = 1.0 m/s

Fig. 8-a, b. Particle drift velocity distribution with inlet velocities ($U_{avg}=0.5, 1.0$ m/s, $d_p=1.0 \mu\text{m}$ $V_c=45$ kV).

가하는 경향을 보이는데, 이는 기체 유속 분포를 볼 때 벽면 쪽으로 갈수록 기체 유속이 작아지므로 동일한 x/R 에서 입자는 집진극 쪽으로 갈수록 체류 시간이 길어지게 된다. 그러므로 시간의 함수인 입자의 대전량 증가에 의해 입자 이동 속도 v_p 의 증가를 초래하게 되며, 이것은 x/R 이 커질 수록 더욱 뚜렷하게 나타난다.

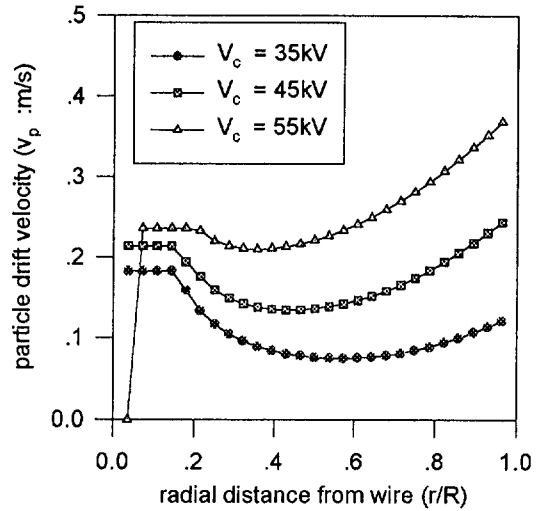
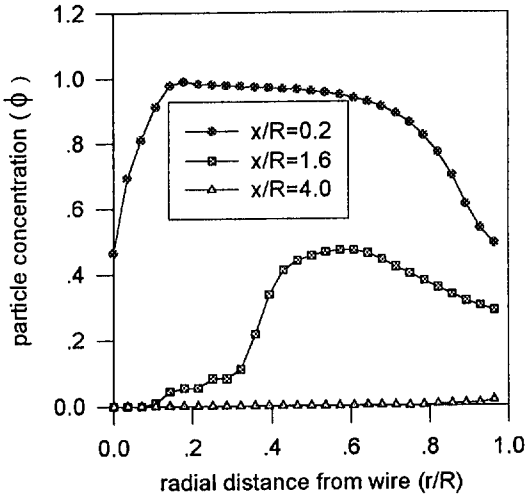


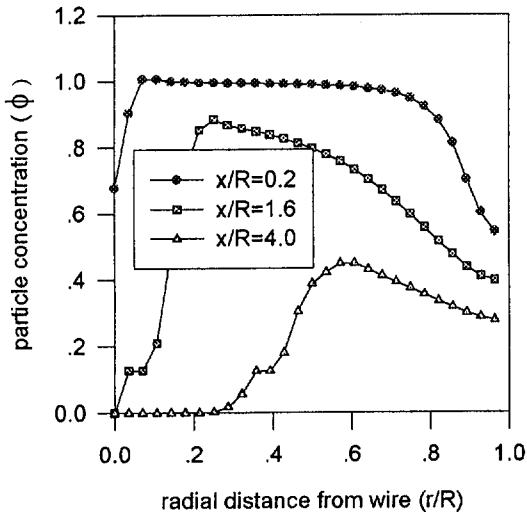
Fig. 9. Particle drift velocity with various applied voltages ($U_{avg}=1.0$ m/s, $d_p=1.0 \mu\text{m}$, $V_c=35, 45, 55$ kV, $x/R=1.6$).

그림 9는 유입 유속 1.0 m/s, $d_p=1.0 \mu\text{m}$, $x/R=1.6$ 에서 인가 전압 변화에 따른 v_p 를 나타낸다. 그림 4에서 보듯이 인가 전압 증가에 따라 전기장 강도의 증가로 v_p 는 커지며, 속도 증가치는 방전극 부근에서보다 집진극에 접근하면서 더욱 커진다. 즉, 방전극 부근에서 35, 45, 55 kV인 경우 v_p 는 0.18, 0.21, 0.24 m/s이며, 집진극 부근에서는 0.12, 0.24, 0.36 m/s로 표현된다. 이는 그림 4-c 및 그림 5에서 보듯이 인가전압 45, 55 kV인 경우 방전극 부근에 비해 집진면 부근에서 v_p 가 증가하는 것은 낮은 전기장 강도에도 불구하고 기체 유속의 감소로 $x/R=1.6$ 지점에 도달하는 입자의 체류시간의 증가에 의하며, 반면 35 kV인 경우 v_p 가 감소하는 것은 입자의 체류시간의 증가에도 불구하고 전기장 강도가 45, 55 kV일 때 보다 상대적으로 더 감소하기 때문인 것으로 사료된다.

그림 10-a,b는 인가 전압 45 kV, 유입 유속 0.5, 1.0 m/s 및 입경 $1.0 \mu\text{m}$ 인 경우에 $x/R=0.2, 1.6, 4.0$ 에서 PSI-CELL모델로부터 구한 각 단면의 입자 농도 분포를 나타낸 것이다. 집진기 입구로 유입되는 입자 농도분포는 균일한 무차원 농도 $\phi=1.0$ ($\phi = \rho_p/\rho_{p,in}$ 으로 정의되며, ρ_p 및 $\rho_{p,in}$ 은 임의의 지점 및 유입부의 입자 농도이다.)으로 유입된다. 그림 10-a의 $x/R=0.2$ 인 경우 입자 농도 분포는 $r/R=0$ (방전극) 부근에서는 집진면으로 향하는 큰 v_p 로 인해 $\phi=0.45$ 의 낮은 농도를 보이며, $r/R=0.1\sim 0.7$ 의 영역에서는 방전극 부근



(a) inlet velocity = 0.5 m/s



(b) inlet velocity = 1.0 m/s

Fig. 10-a, b. Particle concentration distribution with inlet velocities ($U_{avg}=0.5, 1.0$ m/s, $d_p=1.0 \mu\text{m}$, $V_c=45$ kV).

에서 이동해 온 입자들에 의해 1.0에 가까운 농도 분포를 보이며, $r/R=0.7 \sim 1.0$ 에서는 집진극에 접근할수록 낮은 농도 분포를 나타내는데, 이는 집진면에 근접할수록 v_p 는 증가하기 때문이다. $x/R=1.6$ 인 지점에서는 이미 집진극 방향으로 이동한 입자들로 인해 $x/R=0.2$ 에서 보다 전체적으로 낮은 농도 분포를 보이며, $r/R=$

$0 \sim 0.1$ 까지는 농도가 0이며, 그 후 점차 증가하여 $r/R=0.6$ 부근에서 최고 농도 0.5를 보이며, 그 외 영역에서는 점차적으로 낮아지는 분포를 보인다. $x/R=4.0$ 인 지점에서는 $r/R=0 \sim 0.9$ 범위는 이미 집진극 방향으로 입자들이 이동한 후이기 때문에 입자 농도는 0으로 나타난다.

그림 10-b는 그림 10-a와 동일한 조건에서 유입 유속이 0.5 m/s에서 1.0 m/s로 증가한 경우로 농도 분포의 전체적인 경향은 (a)의 경우와 유사하지만 동일한 x/R 에서 (b)의 경우가 (a)의 경우에 비해 보다 더 높은 농도 분포를 보인다. 이것은 동일한 위치에서 (b)가 (a)의 경우 보다 입자의 이동 속도가 2배 정도 크기 때문에 반경 방향의 정전기력 효과를 감소시키기 때문이다. $x/R=0.2$ 에서 입자 농도는 중심축 부근에서 0.8 정도이며, $r/R=0.08 \sim 0.8$ 영역에서는 입구에서의 농도와 같은 1.0에 가까운 농도를 유지하며, $r/R=0.8$ 이상부터는 집진 벽면으로의 입자 이동으로 인해 점차 낮아지는 분포를 보이며, 벽면 부근에서 0.5 정도의 농도를 나타낸다. $x/R=1.6$ 은 $r/R=0 \sim 0.05$ 의 중심축 부근의 영역에서는 입자가 이미 집진면 방향으로 이동하였으므로 입자의 농도는 0에 가까우며, $r/R=0.05 \sim 0.14$ 영역에서는 입자 농도가 점차 증가하여 $r/R=0.14$ 부근에서 최대 농도 0.9를 보이며, $r/R=0.14$ 이상부터는 반경 방향으로 갈수록 입자 농도는 점차 감소한다. $x/R=4.0$ 인 경우 $r/R=0.0 \sim 0.2, 0.6, 1.0$ 에서 농

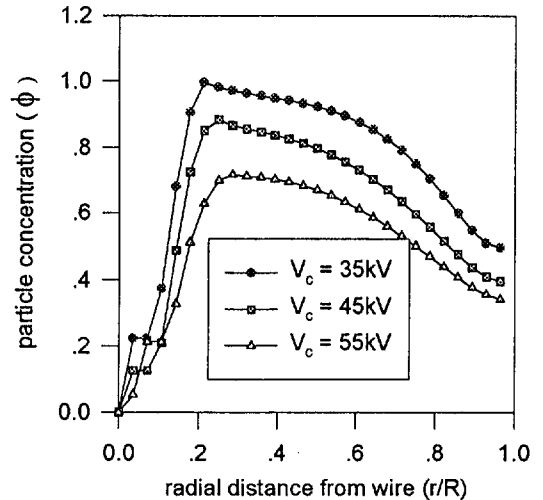


Fig. 11. Particle concentration distribution with various applied voltages ($U_{avg}=1.0$ m/s, $d_p=1.0 \mu\text{m}$, $V_c=35, 45, 55$ kV, $x/R=1.6$).

도는 0, 최대 농도 0.6 및 0.3 정도를 나타내며, (a)에 비해서 유속 증가에 의해 현저히 높은 농도를 나타낸다.

그림 11은 유입 유속 1.0 m/s, $d_p=1.0 \mu\text{m}$, $x/R=1.6$ 에서 인가 전압 변화에 따른 입자 농도 분포를 도시한 것이다. 이것은 그림 10에서와 유사한 개념으로 해석될 수 있으며, 그림 9의 인가 전압 변화에 따른 입자 이동 속도 분포로부터 예측될 수 있다. 즉, 방전극으로부터 $r/R=0.2$ 에 이르면서 농도는 급격히 증가되어 최대치에 도달하며, 이후 집진면에 가까워지면서 감소하는 경향을 보인다.

그림 12는 인가 전압 45 kV, 유입 유속 1.0 m/s에서 각 입경별 입자의 누적 집진 효율 η_c 를 나타낸다. 누적 집진 효율은 식 (15)로 표현되며 집진면의 인접 영역에서의 농도 분포 및 반경 방향 입자 이동 속도에 직접적으로 의존된다. 그림 6에서 예측한 대로 입경의 크기 증가에 따라 집진 효율은 증대되며 집진 완료를 위한 x/R 의 길이는 감소한다. 즉 $d_p=0.5, 2.0, 10 \mu\text{m}$ 에서 $x/R=8, 4, 2$ 일 때 집진이 완료됨을 알 수 있으며, 더욱이 유동 방향에 따른 누적 집진 효율 η_c 의 증가 구배는 입경이 커지면서 더욱 높아진다.

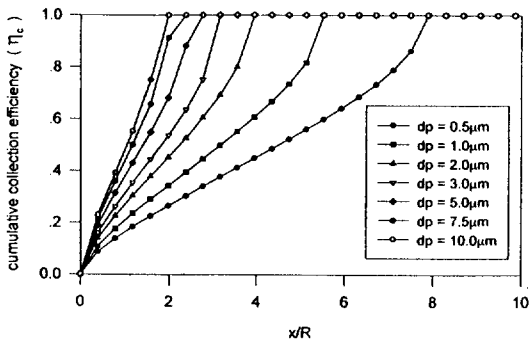


Fig. 12. Collection efficiency with various particle sizes ($U_{avg}=1.0 \text{ m/s}$, $V_c=45 \text{ kV}$).

그림 13은 인가 전압 35, 45, 55 kV, 입경 1.0, 5.0 μm 및 유입 유속 1.0 m/s에서 인가 전압 및 입경 변화에 따른 누적 집진 효율을 나타낸다. 동일 입자 크기에서 인가 전압의 증가에 따라 집진 효율은 매우 크게 증가하며, 효율 증가치는 입경이 커지면서 더욱 증대함을 알 수 있다. 즉, $d_p=1.0 \mu\text{m}$, $x/R=2.0$ 인 경우 인가 전압 35, 45, 55 kV에서 집진 효율 η_c 는 0.2, 0.35, 0.48로 나타나는 반면, $d_p=5.0 \mu\text{m}$, $x/R=$

2.0인 경우 35, 45, 55 kV에서 η_c 는 0.42, 0.68, 1.0 (집진 완료)을 나타낸다. 이는 입자 운동 방정식에서 입경 증가에 따른 drag의 증가 보다 정전기력 (qE)의 효과가 더욱 크게 작용하는 것으로 추정된다. 동일 전압에서 입경 변화가 η_c 에 미치는 효과는 그림 12에서 언급된 바 있다.

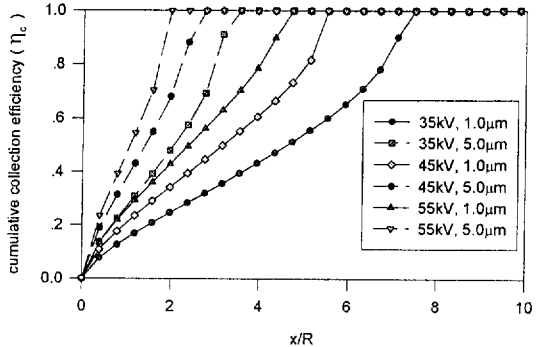


Fig. 13. Collection efficiency with various particle sizes and applied voltages ($U_{avg}=1.0 \text{ m/s}$, $d_p=1.0, 5.0 \mu\text{m}$, $V_c=35, 45, 55 \text{ kV}$).

그림 14-a, b는 유입 유속 0.5, 1.0 m/s, $d_p=0.5 \mu\text{m}$ 및 인가 전압 35, 45, 55 kV에서 유입 유속, 인가 전압 변화에 따른 η_c 를 나타낸다. 유입 유속 증가에 따른 축 방향의 관성력의 증가는 정전기력의 효과를 상대적으로 완화시켜 집진 효율의 감소를 초래하며, 입경 0.5 μm , 인가 전압 35 kV인 경우 유입 유속 0.5, 1.0 m/s에서 집진 완료를 위한 x/R 은 5, 10 이상이 요구된다. 인가 전압이 55 kV로 증가하는 경우 0.5, 1.0 m/s에서 $\eta_c=1.0$ 을 위해 $x/R=3, 6.5$ 를 나타낸다 (0.5 μm 이하의 입에서는 더 높은 수치의 인가 전압 또는 x/R 이 요구된다). 이는 예측한 바와 같이 동일 원통형 집진기에서 많은 유량을 취급하기 위해 실린더의 축 길이를 증대시켜야 하며, 적당한 축 길이를 유지하기 위해서는 인가 전압을 증가시켜야 함을 알 수 있다.

4. 결 론

전기유체역학 모델을 이용하여 원통형 전기집진기의 집진 효율을 예측하기 위해 다양한 인가 전압, 유입 유속 및 입자 크기 등의 물리적 변수들에 대하여 연구를 수행한 결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있다.

1) 원통형 전기집진기에서 전기장의 효과가 기체 유

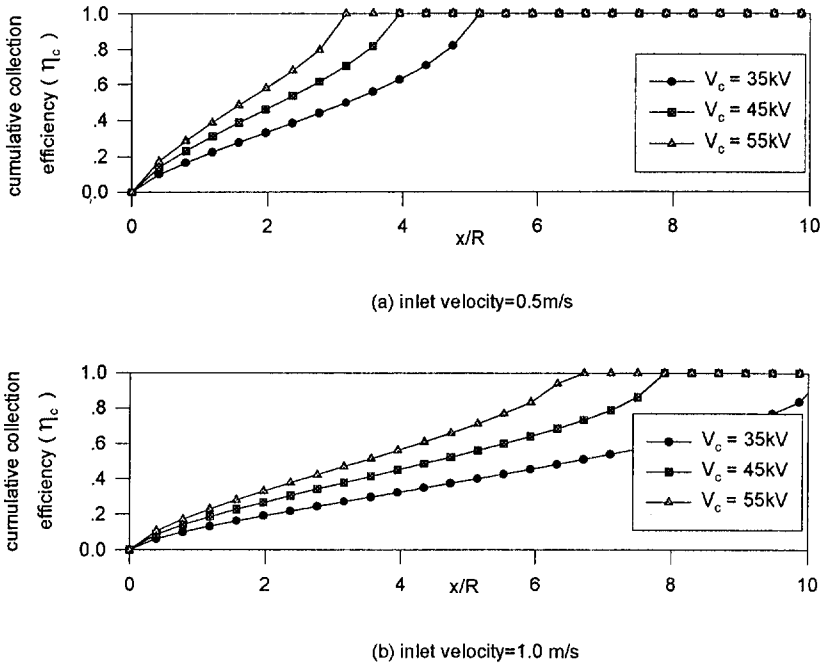


Fig. 14-a, b. Collection efficiency with various applied voltages ($U_{avg}=0.5, 1.0$ m/s, $d_p=0.5 \mu\text{m}$, $V_c=35, 45, 55$ kV).

속 분포에 미치는 영향은 미약하다.

- 2) 입자의 집진극으로의 이동속도 v_p 는 유동 방향으로 진행하면서 하전량의 증가로 한계대전량에 도달할 때까지 계속 증가한다. 즉, 유입 유속 1 m/s, 인가 전압 45 kV 및 입경 $1.0 \mu\text{m}$ 인 경우 $r/R=1.0$ 에서 x/R 이 0.2, 1.6, 4.0으로 증가함에 따라 v_p 는 0.08, 0.24, 0.34로 증가하였다.
- 3) 입자의 대전량은 입경의 제곱에 비례해서 증가되므로, 유입 유속 1.0 m/s, 인가 전압 45 kV에서 입경 $0.5 \mu\text{m}$ 인 경우, $x/R=8.0$ 에서 입경 $10.0 \mu\text{m}$ 인 경우 $x/R=2.0$ 에서 집진이 완료되었다 ($\eta_p=100\%$).
- 4) 유입 유속 1.0 m/s, 입경 $1.0 \mu\text{m}$ 및 $x/R=4.7$ 에서 인가 전압 35, 45 kV에서 집진 효율은 50, 70%이며 55 kV인 경우 최대효율 100%로 나타났다.
- 5) 유입 유속 증가에 따른 축 방향의 관성력의 증가는 정전기력의 효과를 완화시켜 집진 효율의 감소를 초래하며, 입경 $0.5 \mu\text{m}$, 인가 전압 35 kV인 경우 유입 유속 0.5, 1.0 m/s에서 집진 완료를 위한 x/R 은 5, 10이 요구된다.

감사의 글

이 논문은 1994년도 한국학술진흥재단의 자유공모과제 연구비에 의하여 연구되었으며, 이에 감사드립니다.

기호설명

로마자

- a : 방전극의 지름 (cm)
- b : 이온의 이동도 (mobility; $\text{m}^2/\text{Volt}\cdot\text{sec}$)
- b_i : 방전극 주위의 이온의 이동도 ($\text{m}^2/\text{Volt}\cdot\text{sec}$)
- d_p : 입경 (μm)
- E : 전기장 강도 (electric field strength; Volt/m)
- j_i : 방전극 단위 길이 당 전류 (A/m)
- R : 원통 반경 (m)
- T : 온도 (K)
- U : 평균 기체 유입 유속 (m/s)
- v_p : 반경 방향으로의 입자 이동 속도 (m/sec)
- V : 전압 (electrostatic potential ; Volt)
- V_c : 방전극에의 인가 전압 (Volt)

그리이스 문자

δ : 공기의 상대밀도

ϵ_0 : 공기의 유전율 (permittivity; 8.85×10^{-12} F/m)

ρ_c : 공간전하밀도 (space charge density;
A-sec/m³)

ρ_{ci} : 방전극 주위의 공간전하밀도 (A-sec/m³)

$\rho_{p, m}$: 집진기 입구의 입자 농도 (kg/m³)

ρ_{pm} : 입자 밀도 (kg/m³)

τ' : $4\epsilon_0/Ne_b$, 특성 시간 (sec)

μ : 기체 점성 (kg/m-sec)

참 고 문 헌

- Borgwardt V.(1989) The effect of particle size on the efficiency of separation by an electrostatic precipitator, Int. Chem. Eng., 29(2).
- Cooperman P.(1969) Paper, No. 69-4, APCA Meeting, New York City.
- Crowe C.T.(1982) Review numerical models for dilute gas-particle flow, Trans. ASME, J. Fluids Eng., 104.
- Crowe C.T., M.P. Sharma and D.E. Stock (1977) The particle-source-in cell (PSI-CELL) model for gas-droplet flows, Journal of Fluids Engineering, 325-332.
- Deutsch W.(1922), Ann. Phys., 68(335).
- Elmoursi A.A. and P. Castle(1986) The analysis of corona quenching in cylindrical precipitators using charge simulation, IEEE Transactions on Industry Applications, IA-22(1).
- Hinds W.C.(1982) *Aerosol technology*, Wiley-Interscience, New York.
- Leonard G.L.(1983) An experimental study of the electrohydrodynamic flow in electrostatic precipitators, J. of Fluid Mech., 127, 123.
- Matthew N.O. and Sadiku (1993) Monte carlo solution of axisymmetric potential problems, IEEE Transactions on Industry Applications, 29(6).
- McDonald J.R., W.B. Smith and H.W. Spencer III and L.E. Sparks (1977) A mathematical model for calculating electrical conditions in wire-duct electrostatic precipitation devices, Journal of Applied Physics, 48(6).
- Ogtesy S. and G.B. Nichols (1978) *Electrostatic precipitation*, Marcel, Dekker, New York.
- Patankar S.V.(1980) *Numerical heat transfer and fluid flow*, McGraw-Hill.
- Robinson M.(1971) Electrostatic precipitation, in *Air Pollution Control*, edited by W.S. Trasssed., Wiley-Interscience, New York.
- Saverio C. and F. Mauro.(1991) Numerical computation of corona space charge and V-I characteristic in DC electrostatic precipitators, IEEE Transactions on Industry Applications, 27(1).
- Shapiro M., A. Oron and C. Guthinger (1989) Electrostatic precipitation of charged from a tubulent flow between coaxial cylinders, Jornal of Colloid and Interface Science, 127(2).
- Shaughnessy E.J., J.H. Davidson and J.C. Hay (1985) The fluid mechanics of electrostatic precipitators, Aerosol Science and Technology, 4, 471-476.
- Wu Z., I. Colbeck and G. Zhang (1993) Deposition of particles on a Single cylinder by a coulombic force and direct interception, Aerosol Sci. & Tech., 19, 40.
- Yamamoto T.(1981) EHD in an electrostatic precipitator, J. of Fluid Mech., 108(1).
- Yamamoto T. and H.R. Velkoff (1981) Electrohydrodynamics in an electrostatic precipitator, J. Fluid Mech., 108, 1-18.