

# 오일러리안 수치해석법을 이용한 전기집진기의 집진효율 예측에 관한 연구

박정호\* · 전중환\*\*

## A Study on Prediction of Collection Efficiency of Electrostatic Precipitator Using Eulerian Numerical Analysis

Jeong-Ho Park, Chung-Hwan Chun

**Key Words:** Electrostatic Precipitator(전기 집진기), Collection Efficiency(집진 효율), Eulerian Numerical Analysis(오일러리안 수치 해석), Turbulent Diffusivity(난류 확산 계수)

### Abstract

The transport of charged particles in electrostatic precipitator is investigated by Eulerian numerical analysis. Collection efficiencies are calculated using various combinations of the assumptions about flow field, turbulent diffusivity and boundary condition at collecting electrode. The characteristics of calculated collection efficiencies are compared with the trends of published experimental results. It is found that the collection efficiency for the case using nonuniform turbulent flow field, nonuniform turbulent diffusivity and zero concentration boundary condition at collecting electrode is the most suitable for the prediction of collection efficiency of electrostatic precipitator.

#### 기호설명

- $C$  : 입자 농도
- $D$  : 난류 확산 계수
- $H$  : 방전극과 집진판 사이 간격
- $L$  : 집진 구역 길이
- $U$  : 주유동 속도
- $W$  : 입자의 정전 이동 속도
- $x, y$  : 직교 좌표

#### 1. 서론

전기 집진기 내의 입자의 난류 확산을 모사하여 집진 효율을 예측하는 데 사용되는 수치해석 방법은 크게 오일러리안 방법과 라그랑지안 방법

으로 나뉘어 진다. 라그랑지안 방법은 개개 입자의 궤적을 추적하는 방식으로 각 입자에 대한 정보를 획득할 수 있는 반면에 충분한 수의 입자에 대한 계산을 수행하기 위해서는 많은 전산 용량과 계산 시간을 필요로 한다. 실용적인 집진 효율 예측에는 입자의 난류 확산을 Fick의 법칙으로 모델링하여 대류/확산 방정식을 푸는 오일러리안 방법이 보다 적합하다고 볼 수 있다. 오일러리안 방법을 이용하여 전기 집진기의 집진 효율 특성을 예측한 기존의 대표적인 연구들<sup>(1-4)</sup>은 균일 유동장과 균일 난류 확산 계수의 조건과 집진판에서의 입자 농도 구배가 0이라는 경계 조건들을 사용하여 왔다. 그 결과 난류 확산 계수의 증가가 집진 효율의 감소로 이어지는 결과들이 발표되어 왔다. 그러나 최근의 실험적 연구들<sup>(5-6)</sup>과 라그랑지안 방법을 이용한 수치해석 결과들<sup>(7-8)</sup>은 기존의 오일러리안 해석 결과와 다른 경향들을 보여주고 있다. 본 연구에서는 오일러리안 해석 방법에 사용되는 유동장과 난류 확산 계수 분포와 집진판에서의 경계 조건들을 바꾸어 가면

\* 포항공대 기계공학과 대학원

\*\* 포항공대 기계공학과

서 집진 효율을 계산해 각 조건들이 집진 효율 예측에 미치는 영향에 대해 연구하였다.

## 2. 수치 해석 방법

### 2.1 지배 방정식

브라운이안 운동에 의한 입자 확산 효과와 주유동 방향의 난류 확산 효과를 무시할 수 있다고 가정하면, Fig. 1과 같은 전기 집진기 내에서의 2차원 정상 상태의 입자 농도 방정식은 아래와 같다.

$$U \frac{\partial C}{\partial x} - W \frac{\partial C}{\partial y} = D \frac{\partial^2 C}{\partial y^2} + \frac{\partial D}{\partial y} \frac{\partial C}{\partial y} \quad (1)$$

평균 주유동 속도를  $U_0$ 라고 하면, 식 (1)은 아래와 같은 비정상 상태의 1차원 입자 농도 방정식으로 변환될 수 있다.

$$\frac{\partial C}{\partial t} - \left( W + \frac{\partial D}{\partial y} \right) \frac{U_0}{U} \frac{\partial C}{\partial y} = D \frac{U_0}{U} \frac{\partial^2 C}{\partial y^2} \quad (2)$$

위 식에서  $t$ 는 시간으로  $x/U_0$ 와 동일하다. 식 (2)를 FTCS(Forward Time, Centered Spaced scheme)를 이용한 유한차분법으로 이산화하고, 주어진 경계조건을 사용하여 수치해석적으로 입자 농도 분포를 구하였다.

### 2.2 초기 조건 및 경계 조건

초기 조건으로는  $t=0$ 에서  $C=C_0$ , 경계 조건들로는 아래와 같은  $y=H$ 의 대칭선에서는 입자의 플럭스(flux)가 0이 되도록 정하고,  $y=0$ 의 집진판에

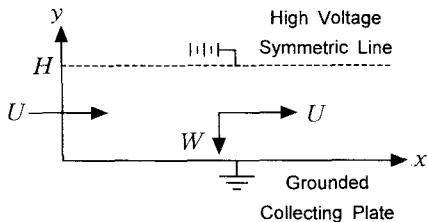


Fig. 1. Schematic diagram of an electrostatic precipitator

서는 입자의 농도 구배가 0라는 조건과 입자 농도가 0이라는 2가지 조건을 고려하였다.

$$-D \frac{\partial C}{\partial y} - WC = 0 \quad \text{at } y = H \quad (3)$$

$$C = 0 \quad \text{at } y = 0 \quad (4)$$

$$\frac{\partial C}{\partial y} = 0 \quad \text{at } y = 0 \quad (5)$$

### 2.3 난류 유동장

전기 집진기 내의 난류 유동장의 속도 분포에 대해서는 평균 유속  $U_0$ 로 균일한 분포를 가지는 경우(plug flow)와 두 평판 사이에서 완전 발달된 난류 유동장(fully developed turbulent flow)의 유속 분포  $U(y)$ 를 가지는 두 경우를 고려하였다. 완전 발달된 난류 유동장의 경우는 Kallio와 Reeks<sup>(9)</sup>의 연구에 언급되어 있는 유속 계산식을 사용하여 속도 분포를 구하였다.

### 2.4 난류 확산 계수

난류 확산 계수는 기존의 연구들과 같이 집진 구역 전체의 난류 확산 계수가 난류 중심 영역(turbulent core region)의 난류 확산 계수  $D_0$ 와 동일한 균일 분포를 가지는 경우와 아래 식과 같이 집진판으로부터 특정 위치  $h$ 까지는 0에서  $D_0$ 까지 선형적으로 증가하고 난류 중심 영역에서는  $D_0$ 로 균일한 분포를 가지는 2가지 경우를 고려하였다.

$$D(y) = D_0 \frac{y}{h} \quad 0 \leq y < h \quad (6)$$

$$D(y) = D_0 \quad h \leq y \leq H \quad (7)$$

본 연구에서  $h$ 는 Oron 등<sup>(10)</sup>의 연구에서 가정된 바와 같이  $0.1H$ 로 가정하였다.

### 2.5 Plug flow 모델과 Deutsch 모델

유동장 분포가 평균 주유동 속도  $U_0$ 로 균일한 경우, 난류 확산이 존재하지 않는 경우의 집진 효율( $\eta$ )은 식 (8)과 같은 Plug flow 모델로 구하여진다.

$$\eta = \frac{WL}{U_0 H} = \frac{Wt}{H} = De \quad (8)$$

위 식에서 De는 무차원 Deutsch number이다.

반면 Deutsch 모델<sup>(1)</sup>은 주유동의 수직 방향으로 무한 난류 확산의 가정을 도입한 것으로 집진 효율 계산식은 식 (9)와 같다.

$$\eta = \exp(-De) \quad (9)$$

### 3. 결과 및 고찰

본 연구에서는 앞에서 언급된 집진판에서의 경계 조건, 유동장 분포, 난류 확산 계수 분포의 각 경우들을 조합해서 Table 1과 같이 총 8가지 경우에 대해 입자 농도 분포를 계산하고, 집진 효율을 구하였다. 또한 난류 확산이 집진 효율에 미치는 영향을 알아보기 위해서 아래와 같이 입자의 정전 이동 속도와 난류 확산의 상대적 비를 나타내는 무차원수 Peclet number를 변화시키면서 집진 효율의 변화를 살펴 보았다.

$$Pe = \frac{WH}{D_0} \quad (10)$$

Table 1 Test conditions to model the particle transport in electrostatic precipitator

	$U_0$	$U(y)$	$D_0$	$D(y)$	$C _{y=0}=0$	$\frac{\partial C}{\partial y} _{y=0}=0$
case 1	○		○		○	
case 2	○		○			○
case 3		○		○	○	
case 4		○		○		○
case 5		○	○		○	
case 6		○	○			○
case 7	○			○	○	
case 8	○			○		○

Fig. 2는 case 2와 case 6의 집진 효율을 비교해 균일 유동장의 경우와 완전 발달된 난류 유동장의 경우의 집진 효율들을 서로 비교해 나타낸 그림이다. 그림에서 알 수 있듯이 완전 발달된 난류 유동장에서 계산된 집진 효율이 균일 유동장에서의 집진 효율에 비해 조금 낮게 나타나고 있다. 이러한 경향은 다른 case들의 계산 결과 비교에서도 유사하게 나타났다.

유동장과 난류 확산 계수가 모두 균일하고, 집진판에서의 경계 조건이 입자 농도가 0인 경우(case 1)와 입자 농도 구배가 0인 경우(case 2)의 집진 효율 계산 결과를 Fig. 3과 4에 나타내었다. case 1인 경우 Fig. 3에서 알 수 있듯이 Pe가 감소할수록, 즉 난류 확산의 영향이 증가할수록 집진 효율이 증가하는 경향이 나타나고 있다. 이것은 집진 구역 내의 난류 확산 계수가 균일하고 집진판 표면의 입자 농도가 0으로 주어짐에 따라 난류 확산으로 인한 입자의 집진이 주요 집진 기구로 크게 작용하기 때문이다. 기존의 연구<sup>(1)</sup>에 언급되어 있듯이 이 경우의 집진 효율은 난류 확산으로 인한 집진이 비현실적으로 크게 작용해 지나치게 큰 집진 효율을 가지게 됨을 확인할 수 있다. case 2의 경우는 기존의 연구들<sup>(1-4)</sup>에서 사용된 조건들로 Fig. 4에 나타난 바와 같이 집진 효율들은 Deutsch 모델과 Plug flow 모델에 의해 예측된 집진 효율들 사이에서 Pe가 감소할수록 감소하는 경향을 보여주고 있다. 이는 집진판에서의 입자 농도 구배를 0으로 준 경계 조건으로 인해 난류 확산에 의한 집진은 완전히 배제된 상태에서 난류 확산의 역할이 집진판으로 향하는 입자들을 집진 구역 중앙으로 재분산시키는 데 한하기 때문이다.

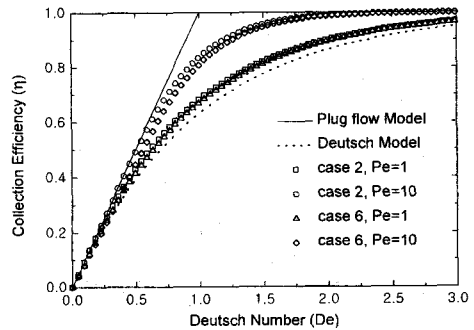


Fig. 2 Comparison of collection efficiencies for case 2 and 6 for various values of Pe

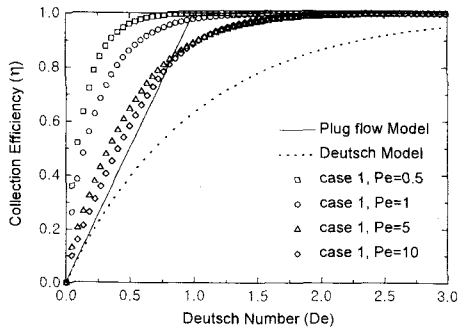


Fig. 3 Collection efficiencies for case 1 for various values of Pe

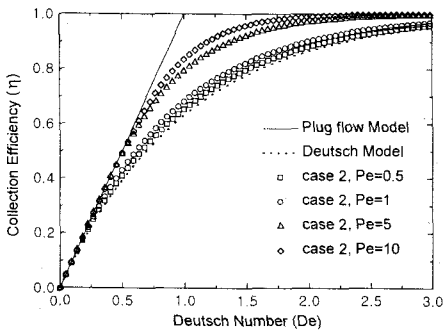


Fig. 4 Collection efficiencies for case 2 for various values of Pe

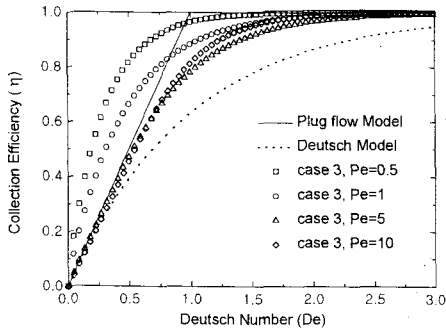


Fig. 5 Collection efficiencies for case 3 for various values of Pe

유동장과 난류 확산 계수가 모두 불균일하게 주어지고, 집진판에서의 입자 농도가 0인 경우 (case 3)의 집진 효율을 Fig. 5에 나타내었다. 그림을 살펴보면 Pe가 클 때 (Pe=5,10)는 Pe의 증가가 집진 효율의 증가를 불러오는 반면, Pe가 작

을 때 (Pe=0.5,1)는 반대로 Pe의 감소가 집진 효율의 증가로 이어짐을 알 수 있다. 이러한 경향이 나타나는 원인은 다음과 같이 설명할 수 있다. Pe가 클 때는 입자의 정전 이동 속도가 난류 확산에 의한 영향보다 지배적이므로 입자의 집진은 주로 입자의 정전 이동에 의해 이루어지게 된다. 이러한 상황에서 난류 확산은 case 2의 경우와 같이 입자를 재분산시킴으로써 집진 효율을 감소시키는 역할을 주로 하게 된다. 이러한 현상은 Pe가 5와 10일 때 case 2와 case 3의 집진 효율을 비교해 그린 Fig. 6에서 두 case들의 집진 효율이 거의 유사한 값과 경향을 지니고 있는데서 확인할 수 있다. 반면에 Pe가 작을 때는 난류 확산의 영향이 입자의 정전 이동보다 지배적으로 되면서 주요 집진 기구로서의 역할을 하게 된다. Pe가 0.5와 1일 때 case 2와 case 3의 집진 효율을 비교한 Fig. 7을 살펴보면 두 case들의 집진 효율 경향이 확실히 다른 것을 발견할 수 있다. case 2의 경우는 Pe가 감소할수록 집진 효율이 감소하면서 Deutsch 모델에 의해 예측된 집진 효율에 가까워지는 반면에 case 3의 경우는 Pe가 감소할수록 집진 효율이 증가하면서 De가 1보다 작은 영역에서는 plug flow 모델에 의해 예측된 집진 효율보다 더 큰 집진 효율을 보여주고 있다.

case 3의 집진 효율 계산 결과에서 나타난 경향들은 라그랑지안 방법을 이용한 기존의 연구 결과들<sup>(7-8)</sup>의 경향과 매우 유사하다. 뿐만 아니라 case 2의 조건들을 사용했던 기존의 연구들이 설명하기가 불가능했던 실험 결과들<sup>(5-6)</sup>에 대한 해석을 가능케 한다. Riehle과 Löffler<sup>(5)</sup>는 모델 전기 집진기와 음극 코로나 방전(negative corona discharge)을 이용한 다분산 입자의 집진 효율 측정 실험에서 직경 2 μm 이하의 미세 입자들의 집진 효율이 plug flow 모델에 의해 예측된 집진 효율보다 높다는 실험 결과를 발표하였다. 또한 Schmid와 Umhauer<sup>(6)</sup>는 직경 1 μm의 단분산 입자의 집진 효율이 양극 코로나 방전을 이용했을 때보다 음극 코로나 방전을 이용했을 때 더 높다는 실험 결과를 발표하였다. Fig. 4에서 알 수 있듯이 case 2의 조건을 사용한 집진 효율 예측에서는 plug flow 모델에 의해 예측된 집진 효율이 이론적으로 가능한 최대의 집진 효율이다. 그러므로, Riehle과 Löffler<sup>(5)</sup>의 실험 결과를 설명하기 어렵다. 또한 기존의 많은 실험적 연구들<sup>(12-14)</sup>에서

알려진 바와 같이 음극 코로나 방전은 양극 코로나 방전에 비해서 전기 집진기 내의 난류 유동장의 난류 강도를 뚜렷이 증가시킨다. 유동장의 난류 강도가 난류 확산 계수와 밀접한 관계가 있다는 사실을 고려해 보면, 난류 확산 계수가 더 큰 음극 코로나 방전의 집진 효율이 양극 코로나 방전의 집진 효율보다 더 크다는 실험 결과 역시 case 2의 조건을 사용해 구한. 집진 효율 경향으로는 설명이 불가능하다.

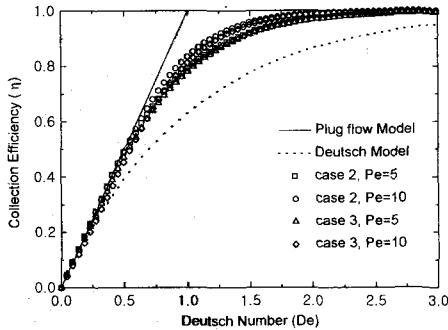


Fig. 6 Comparison of collection efficiencies for case 2 and 3 for large values of Pe

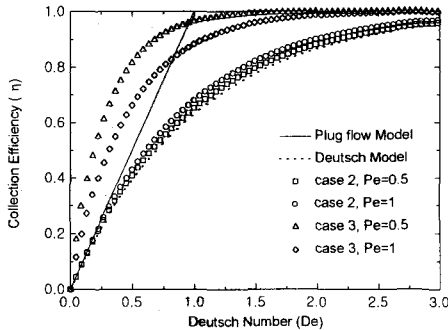


Fig. 7 Comparison of collection efficiencies for case 2 and 3 for small values of Pe

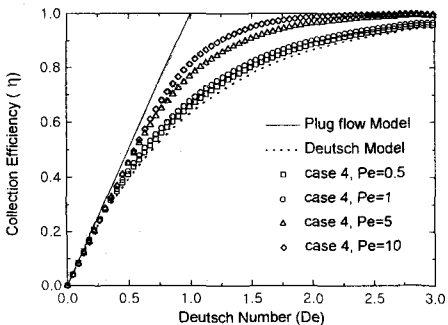


Fig. 8 Collection efficiencies for case 4 for various values of Pe

그러나,  $2 \mu\text{m}$  이하의 미세 입자들의 정전 이동 속도가 매우 작다는 점과 음극 코로나 방전으로 인해 난류 확산 계수가 크게 증가되었다고 가정했을 때, 두 실험 결과들은 case 3의 집진 효율 예측 결과들로 설명이 가능해진다. 즉 작은 Pe의 경우 집진 효율이 plug flow 모델에 의해 예측된 집진 효율보다 높은 점과 Pe가 감소할수록 집진 효율이 증가한다는 case 3의 집진 효율 계산 결과들은 이러한 실험 결과들의 경향과 잘 일치하기 때문이다.

Fig. 8은 case 4의 조건을 사용한 집진 효율 계산 결과를 보여주고 있다. 유동장과 난류 확산 계수가 모두 불균일하게 주어졌음에도 불구하고 집진판에서의 경계 조건이 입자 농도 구배가 0으로 주어졌기 때문에 Fig. 4에 나타난 case 2의 집진 효율 경향과 매우 유사함을 알 수 있다.

case 5에서 8까지는 case 1에서 4의 경우와 유동장의 조건만이 각각 다른 경우들이다. 그러므로 앞에서 언급한 바와 같이 다른 조건들이 동일할 경우, 균일 유동장을 사용해 계산한 집진 효율이 완전 발달된 난류 유동장을 사용해 계산된 집진 효율보다 약간 더 크다는 차이만이 있으므로, 집진 효율 계산 결과의 제시는 생략하도록 한다.

#### 4. 결론

본 연구에서는 오일러리안 수치 해석 방법을 사용해 전기 집진기의 집진 효율을 예측하는 데 있어 고려해야 할, 전기 집진기 내의 유동장과 난류 확산 계수 그리고 집진판에서의 입자 농도의 경계 조건들이 집진 효율 예측에 미치는 영향에 대해 연구하였다. 그 결과 난류 확산 계수 분포와 집진판에서의 경계 조건이 집진 효율 예측에 중대한 영향을 미치는 요소들이 파악되었다.

기존의 연구들에서 주로 이용되었던 균일 난류 확산 계수 분포와 집진판에서 입자 농도 구배를 0으로 정한 경계 조건을 사용한 경우, 난류 확산에 의한 입자의 집진을 근본적으로 배제함으로써 난류 확산의 증가가 단순히 집진 효율의 감소로 이어짐을 알 수 있었다.

이에 반해 불균일 난류 확산 계수 분포와 집진판에서의 입자 농도를 0으로 정한 경계 조건을

사용한 경우는 입자의 정전 이동 속도와 난류 확산 영향의 상대적인 비에 따라 난류 확산이 입자의 집진에 미치는 영향이 달라지는 결과가 나타났다. 즉, 입자의 정전 이동 속도가 난류 확산의 영향에 비해 큰 경우에는 난류 확산의 증가가 집진 효율의 감소를 가져오지만, 난류 확산의 영향이 정전 이동 속도에 비해 큰 경우에는 난류 확산으로 인한 집진이 주요 집진 기구로 작용함으로써 난류 확산의 증가가 집진 효율의 증가로 연결되었다. 이러한 경향은 기존의 라그랑지안 수치 해석 결과들에서 밝혀진 경향과 상당히 유사하다. 또한 기존의 연구들로 설명되지 못하였던 음극 코로나 방전의 조건에서 미세 입자의 집진 효율을 측정할 실험 결과들에 대한 설명도 가능케 하였다.

## 후기

본 연구는 BK21 사업의 지원을 받았습니다. 이에 감사드립니다.

## 참고문헌

- (1) Leonard, G. L., Mitchner, M. and Self, S. A., 1980, "Particle transport in electrostatic precipitator," *Atmos. Envir.*, Vol. 14, pp. 1289-1299.
- (2) Llewelyn, R. P., 1982, "Two analytical solutions to the linear transport diffusion equation for a parallel plate precipitator," *Atmos. Envir.*, Vol. 16, No. 12, pp. 2989-2997.
- (3) Kihm, K. D., Mitchner, M. and Self, S. A., 1987, "Comparison of wire-plate and plate-plate electrostatic precipitators in turbulent flow," *J. Electrostatics*, Vol. 19, pp. 21-32.
- (4) Riehle, C. and Löffler, F., 1995, "Grade efficiency and eddy diffusivity models," *J. Electrostatics*, Vol. 34, pp. 401-413.
- (5) Riehle, C. and Löffler, F., 1993, "Reflections on similarity laws concerning particle transport in electrical precipitators," *Powder Technol.*, Vol. 77, pp. 201-208.
- (6) Schmid, H.-J. and Umhauer, H., 1998, "In-situ measurement of local particle fluxes in a laboratory-scaled esp," *Proc. 7th ICESP*, Kyongju, pp. 121-131.
- (7) Goo, J. H. and Lee, J. W., 1996, "Monte-carlo simulation of turbulent deposition of charged particles in a plate-plate electrostatic precipitator," *Aerosol Sci. Technol.*, Vol. 25, pp. 31-45.
- (8) 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.
- (9) Kallio, G. A. and Reeks, M. W., 1989, "A numerical simulation of particle deposition in turbulent boundary layers," *Int. J. Multiphase Flow*, Vol. 15, pp. 433-446.
- (10) Oron, A., Gutfinger, C. and Hassid, S., 1988, "Turbulent deposition of charged particles under the influence of an external electric field," *J. Colloid Interface Sci.*, Vol. 121, No. 2, pp. 531-542.
- (11) Deutsch, W., 1922, "Bewegung und Ladung der Elektrizitätsträger in Zylinder Kondensator," *Ann. Phys.*, Vol. 68, pp. 335-344.
- (12) Davidson, J. H. and Shaughnessy, E. J., 1986, "Turbulence generation by electric body forces," *Exp. Fluids*, Vol. 4, pp. 17-26.
- (13) Davidson, J. H. and McKinney, P. J., 1990, "Electrohydrodynamic precipitator flow with a barbed plate discharge electrode," *Aerosol Sci. Technol.*, Vol. 12, pp. 319-334.
- (14) 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.