

## 전기집지기 집진특성 실험 및 유한차분해석에 관한 연구

### Experimental and Finite Difference Method(FDM) Analysis on Collection Characteristics of Electrostatic Precipitator

김용진 · 홍원석 · 최현오 · 함병훈\* · 민춘식\* · 유기선\*

한국기계연구원, \*한국중공업(주)

( 원고접수 : 1994. 1. 27 )

Y.J. Kim, W.S. Hong, H.O. Choi, B.H. Ham\*, C.S. Min\*, K.S. Yu\*

( Received 27 January 1994 )

#### Abstract

Electrostatic Precipitators(EP) are widely used in industry for controlling the emission of particulate pollutant. Recently, a number of researches have been conducted to solve performance and reliability problems of EP, As a result of researches in the laboratory and of pilot scale, a technology of wide-pitch-spacing has been successfully applied to full scale units. It has been known that the wide-pitch-spacing can reduce the capital cost of newly installed precipitators, and the cost of rebuilding existing units.

In this paper, a systematic study was performed to develop a wide-pitch electrostatic precipitator. The study includes experimental and numerical work on the following : particle collection characteristics for a bench-scale unit; gas flow characteristics(temperature and velocity distributions); other EP operating variables such as electric power supply/control.

The results are applied directly to design of wide-pitch-spacing EP and the developed numerical model was found to be a good agreement with the experimental results. The EHD simulation program is necessary to design the high efficiency EP.

#### 1. 서 론

최근의 전세계적으로 첨예화된 환경오염 가운데서도 대기오염 문제는 매우 심각하며, 국가적으로 환경오염 규제치의 강화 등으로 인하여 사회의 각 분야에서 집진장치에 대한 수요가 급증하고 있다. 특히 전기집진기(Electrostatic Precipitator, EP)는 높은 집진효율과 운전 및 보수가 용이하므로(Oglesby S. and Nichols G.B., 1978; Robinson M., 1971) 그 수요가 비약적인 성장을 보이고 있다. 그런데 우리나라에서는 이러한 전기집진기의 설계, 제작과 관련하여 국한된 방식에서 적용하고 있으나, 설계변형 및 고효율화 기술의 대부분을 외국에 의

존하고 있는 실정이다. 특히, 전기집진기에서 역코로나(Back ionization) 현상에 의한 집진효율의 급격한 감소와 Deutsch-Anderson/Matts식에 의한 설계시 평균 migration 속도 계산에서의 gas 속도분포, 전기장 영역의 분할, Aspect ratio 효과 등에 관한 근사적 설계, 그리고 부착 Ash의 재비산방지와 집진효율 증대 및 E.P. 수명의 측면에서 내부 유동 해석 기술 미비로 인한 장시간 동안 많은 비용을 소모하는 모델실험 등의 문제는 고효율 전기집진기 설계에서 매우 중요하며 시급하게 해결되어야 할 과제들이다(White H.J., 1977).

최근의 전기집진기 내부의 집진 프로세스의 해석에 관한 연구가 매우 활발하게 진행되고 있으며, 전

기집진기의 성능과 신뢰성 향상 및 시공과 유지비의 절감 측면에서, 집진판의 폭을 넓히는 광폭전기집진기에 관한 연구, 그리고 역 코로나 현상을 줄이고 에너지 절감 효과를 얻는 간헐전압공급 방식 및 유동가스의 상태를 조절하는 등의 여러가지 방안에 관한 연구가 집중되고 있다. 특히, 전기집진기에서 방전부와 집진부는 집진기 전체 체적의 90% 이상을 차지하기 때문에 이에 대한 최적설계는 궁극적으로 소요동력의 최소화, EP 전체 크기의 최소화 등에 의한 시공원가 절감을 가져오기 때문에 EP 연구에서 가장 중요하다고 할 수 있다.

최근의 EP가 가장 많이 사용되어지고 있는 화력발전 분야에서는 석탄연료등의 저급연료의 사용이 증가하고 있고, 이때에 발생하는 다량의 Ash 등 배출물을 처리하여야하며, 유황성분이 작은 수입탄에는 전기저항이 매우 높은 Ash를 포집해야 하므로 이때에 역 코로나 현상이 문제가 되어 이에 대한 많은 기술이 요구되어 진다. 따라서 주어진 전기저항값을 가진 분진이 부착되어감에 따라 전계분포 및 전위차 등을 정확히 예측되어야만 집진효율저하를 가져오는 역 코로나 현상을 방지할 수 있다. 따라서 전기집진기 내부의 집진 프로세서의 해석에 관한 연구가 매우 활발하게 진행되고 있으며 (Yamamoto T.Y. and Velkoff H.R., 1981; Oron A. et al., 1989), 이러한 연구들은 고전기저항분진의 집진효율의 향상과 이에 관한 예측기법이 집중되고 있다. 미국의 SRI(Southern Reserch Institute) 연구소 등에서는 집진기 모델을 미소하게 분할하여 여러가지 분진입자에 대하여 전기장과 하전밀도를 수치적으로 계산하여 집진효율을 예측하고 있다. 현재 대부분의 EP 본체 설계시에 Deutsch-Anderson식,

$$\eta = 1 - e^{-\frac{A}{v}\omega} \quad (1)$$

을 사용하고 있는데, 여기서, A=The collection surface area of the EP, v=The gas flow rate through the EP이며,  $\omega$ =Particle migration velocity이다. 여기서 migration velocity는 EP 설계에서 가장 중요한 값으로, Electric field properties, Dust properties, Fluid flow properties, Geometric properties 등에 의하여 매우 민감하게 작용되는 함수로 되며 이들에 대한 전반적인 복잡해가 필요하다. Deutsch-Anderson 식의 가정중의 하나가 집진판 사이의 유동이 균일하다고 가정하는데, 실제 현상과 매우 큰 차이를 보여 주었다. 따라서 이러한 컴퓨터 모델은 집진효율을 예측할 때, 가정을 배제하고 유체의 누수(Sneakage), 추타 및 재비산 등의 효과에

관한 실험적인 관계식을 이용하여 실제 상황에 가까운 전기집진의 특성을 예측하는데 널리 이용하고 있다.

산업용 EP인 경우 일반적으로 내부유속이 1-3m/s, 전류밀도가 0.1-0.3mA/m<sup>2</sup> 정도에서 운전되고 있는데, 온도장에 의한 부력과 코로나 방전시의 이온류(Ion flow) 등을 고려한 정확한 컴퓨터 시뮬레이션을 통하여 주어진 전류밀도에서의 최대유속을 결정하고 이에따라 EP 크기의 최소화 및 컴팩터화를 달성할 수 있다.

본 연구에서는 전기집진 장치의 유동 및 집진특성을 해석, 예측하기 위한 컴퓨터프로그램을 개발하고, 실험을 통하여 검증함으로써, 전기집진기의 최적설계에 응용할 수 있도록 한다. 그리하여 기존의 EP 설계시 장시간에 걸쳐 많은 비용이 소모되는 모델실험을 간소화 하고, 주어진 집진효율과 처리유량에 대하여 최적의 EP를 설계함으로써 EP 시공원가절감 및 국제적인 가격경쟁력의 강화에 크게 기여할 것으로 사료된다.

## 2. 실험

본 연구에서 실험은 두가지로 나누어 실행하였다. 첫째로, 대형 전기집진기 본 실험에 앞서, 전계분포 및 전기유체역학(EHD) 유동의 예비 기초실험이 수행되었다. 이때의 실험모델은 610mm×610mm 크기, 높이 540mm로 고정하였다. 그리고 방전극에 코로나 전압을 인가하기 위하여 30kV/5mA 용량의 고전압공급장치(High Voltage Power Supply)를 사용하였으며, 방전극과 집진판 사이의 전계분포를 측정하기 위하여 3차원 이송대(3D traverse) 및 랑뮤어 프루브(Langmuir probe)를 제작하여 (Yamamoto T.Y. and Velkoff H.R., 1981) 방전부 인가전압에 따른 전계분포를 측정하였다. 둘째로, 화력발전소에 실제로 설치된 전기집진기에서 주어진 분진에 대하여 집진판 간의 간격과 대응하는 인가전압의 변화에 따른 집진효율의 변화 특성을 종합적으로 조사하기 위하여 본 연구에서는 모델 실험장치를 설계, 제작하였다. 표 1에 모델 전기집진기의 주요 사양이 나타나 있다.

모델 전기집진기는 집진판, 방전선, 고전압 공급장치, 애쉬, 절연애자 및 케이싱 등으로 구성된다. 본 연구에서 사용되는 광폭전기집진기 모델 실험장치의 계략도는 그림 1에서 보는 바와 같이 크게, 버너 및 기체혼합 로(Furnace)로 구성되는 고온기체 공급시스템, 플라이 애쉬(Fly ash) 및 고체상의 분진을 공급하는 분진 발생/공급 장치, 유속 및 집

진, 전기장 효과를 실험하기 위한 전기집진기 실험 모델 본체, 그리고 실험 유동을 공급하고 제어하는 흡입팬 및 기타 유량조절 밸브, 밸브 시스템 등으로 구성된다.

Table 1. Description of the model Electrostatic Precipitator.

Plate Height	: 1,490mm
Plate Spacing	: 300-500mm
Number of Gas Passages	: 1
Plate Length	: 2,630mm
Nominal Flow Rate	: 68.85CMM
Nominal Velocity	: 1.00m/s
Discharge electrode Voltage	: -100kV
Discharge electrode current	: -8mA

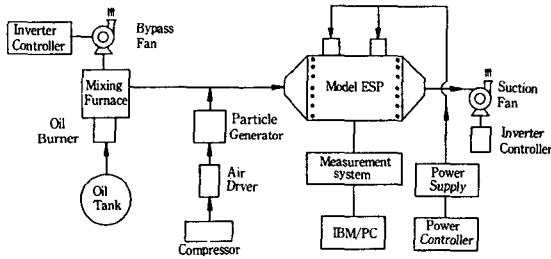


Fig. 1. Schematic diagram of experimental arrangement.

먼저, 고온기체 공급 시스템은 집진기 유입 유동 가스의 온도를 100°C~250°C 범위로 상승시킬 수 있도록 설계, 제작하였다. 이는 연소 버너를 이용한 직접 가열방식을 채택하였으며, 가열기체의 균일한 혼합은 혼합로내에서 일어나도록 설계하였다.

그리고 분말상의 입자를 고온의 기류중으로 분산, 공급할 수 있는 장치가 설계, 제작되었다. 분진발생 장치는 원통형의 벽면에 4개의 노즐을 설치하여 노즐을 통하여 젯트 기류를 형성시켜 선회유동을 만들고 이때 발생하는 압력의 역구배로 인하여 분말상의 분진을 띄워서 에어로졸상의 분진을 발생, 공급시킨다. 이때의 발생 분진의 양은 노즐을 통과하는 유량에 의하여 조절될 수 있으며, 이는 바이패스 밸브(Bypass valve)에 의하여 제어된다.

그리고 집진기에 유입되는 분진 입자의 크기분포, 유속 및 온도분포를 측정하기 위해서 입도계수기 (Particle Counter; ROYCO 5000), 피토우 유속계 및 열전대를 각각 사용하였다. 그림 2는 본 실험에 사용된 SiO<sub>2</sub> 분진입자의 입경분포를 보여주고 있으

며, 그림 3은 전기집진기 실험모델내로의 유입부 단면에서의 유속분포 및 온도분포의 결과를 보여준다.

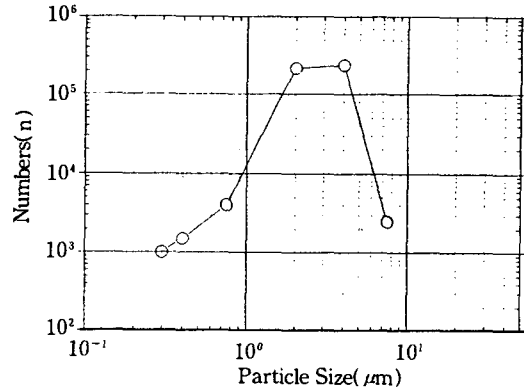
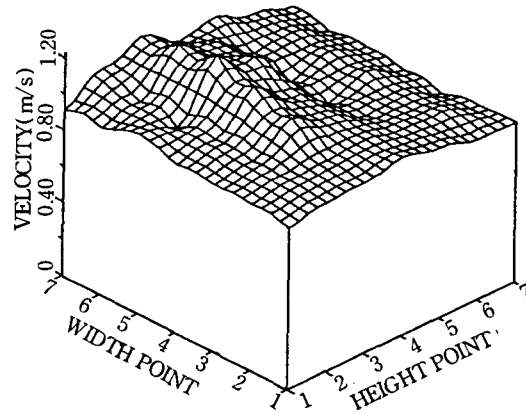
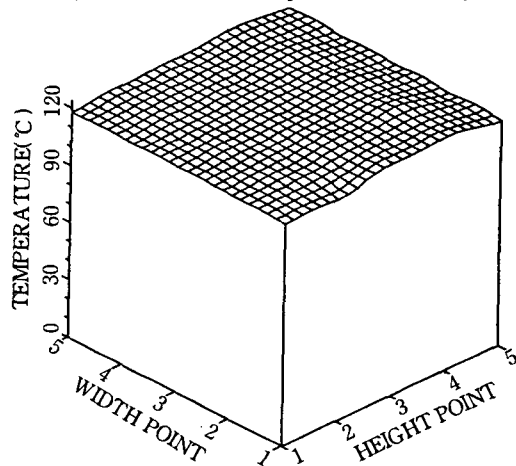


Fig. 2. Size distribution of the test SiO<sub>2</sub> particles



(a) Three dimensional plot of the velocity.



(b) Three dimensional plot of the temperature.

Fig. 3. Distribution of gas temperature and velocity in inlet duct of EP.

### 3. 수치해석

전기집진기 집진/방전부의 유체 및 입자운동은 코로나(Corona)전기장과 복잡하게 조합되어 있으며, 전기집진장치의 집진효율을 수치적으로 정확히 예측하기 위하여는 이러한 조합시스템을 해석하지 않으면 안된다(Oron, A. Et al., 1989; Mclean, K.J., 1976). 일반적으로 도이취(Deutsch) 방정식에 의하여 전기집진기의 성능을 예측하고 있는데, 이것은 균일 입자농도 분포와 모든 집진기 내부 위치에서의 균일 혼합(Mixing) 등의 무리한 가정을 가지고 있기 때문에 정밀하고 정확한 예측이 불가능하다. 최근에는 전기유체역학(EHD; Electrohydrodynamic)과 조합하여 전기집진기 내부유동을 정확히 예측하고 입자운동 및 농도 분포에 의한 전기집진기 성능 예측이 시도되고 있다. 따라서 본 연구에서도 방전부 및 집진부에서 입자운동을 예측하기 위하여 일반적인 EHD모델을 적용한다. 본 연구에서는 집진/방전부를 2개의 방전극선에 의하여 모델화하여 수치계산을 수행하였으며, 이때에 사용된 계산격자(Grid) 생성이 그림 4에 나타나 있다.

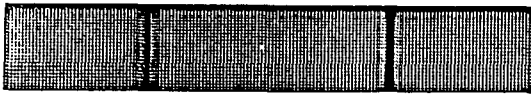


Fig. 4. Numerical grid generation.

전기집진기에서 코로나 전기장이 존재할 때 유체 유동 및 입자운동은 유체역학, 전기장 및 입자운동이 서로 커플(Couple)되어 나타난다. 즉, 1) 급격하게 운동하는 전기이온(Ion)에 의한 유체역학/정전기장의 커플, 2) 입자의 마찰력 등에 의한 유체역학/입자 운동의 커플, 그리고 3) 쿨롱(Coulomb)력 등을 통한 입자운동/정전기력의 커플이다. 그리고 본 연구에서는 입자의 질량부하(Mass loading)가 매우 낮다는 가정을 하였다. 따라서 이때의 유체유동에 대한 연속방정식, 운동량 방정식 및 에너지 방정식은,

(연속방정식)

$$\frac{\partial}{\partial X_i}(\rho_k U_i) = 0 \quad (2)$$

(운동량방정식)

$$\frac{\partial}{\partial X_i}(\rho_k U_i U_j) = \frac{\partial P}{\partial X_i} + \frac{\partial}{\partial X_i} \left[ \mu_k \left( \frac{\partial U_i}{\partial X_j} + \frac{\partial U_j}{\partial X_i} \right) - \rho_k \overline{U_i U_j} \right] - \rho_k g \beta (T - T_{ref}) \delta_{iz} + \rho_k E_i \quad (3)$$

(에너지 방정식)

$$-\frac{\partial}{\partial X_i}(\rho_k U_i T) = -\frac{\partial}{\partial X_i} \left[ \left( \frac{k}{C_p} + \frac{\mu_k}{\sigma_T} \right) \frac{\partial T}{\partial X_i} \right] \quad (4)$$

이 되며, 사용되는 난류모델은,

$$-\rho_k \overline{U_i U_j} = \mu_k \left[ \frac{\partial U_i}{\partial X_j} + \frac{\partial U_j}{\partial X_i} \right] - \frac{2}{3} \rho_k k \delta_{ij} \quad (5)$$

여기서, Prandtl-Kolmogorov 관계식

$$\mu_k = C_\mu \rho_k \frac{k^2}{\epsilon}$$

(k-전달식)

$$\frac{\partial}{\partial X_i}(\rho_k U_i k) = -\frac{\partial}{\partial X_i} \left[ \left( \mu_k + \frac{\mu_k}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial X_i} \right] + \rho_k (P + G - \epsilon) - 2\mu_k \left( \frac{\partial U_i}{\partial X_i} \right)^2 \quad (6)$$

(ε-전달식)

$$\frac{\partial}{\partial X_i}(\rho_k U_i \epsilon) = -\frac{\partial}{\partial X_i} \left[ \left( \mu_k + \frac{\mu_k}{\sigma_\epsilon} \right) \frac{\partial \epsilon}{\partial X_i} \right] + \rho_k \frac{\epsilon}{k} [C_1(P + G) - C_2 \epsilon] + \frac{2\mu_k \mu_k}{\rho_k} \left( \frac{\partial^2 U_i}{\partial X_i \partial X_i} \right)^2 \quad (7)$$

여기서,  $P = \frac{\mu_k}{\rho_k} \left( \frac{\partial U_i}{\partial X_j} + \frac{\partial U_j}{\partial X_i} \right) \frac{\partial U_i}{\partial X_j}$

$$G = g \beta \overline{U} \beta \delta_{iz}, \quad -\overline{U} \beta = \frac{\mu}{\rho_k \sigma_t} \frac{\partial T}{\partial X_i}$$

$$G = -\frac{g \beta \mu_k}{\rho_k} \frac{\partial T}{\partial X_i} \delta_{iz}$$

$$\rho_k \sigma_T \frac{\partial T}{\partial X_i}$$

이며, 상수들,

$$C_\mu = 0.09 \exp \left[ \frac{-3.4}{(1 + R_i/50)^2} \right]$$

$$C_1 = 1.44$$

$$C_2 = 1.92 [1 - 0.3 \exp(-R_i^2)], \quad R_i = \frac{\rho_k k^2}{\mu_k \epsilon}$$

로 된다. 위의 방정식 (3)에서 U, P는 유체의 평균 속도, 압력이며,  $\rho_k$ 는 공간하전밀도(space charge density; C/m<sup>2</sup>), 그리고 E는 전장(electric field)벡터이다. 방정식 (3)에서  $\rho_k E_i$  항이 전기장에서 이온의 운동(ion wind)이 유체유동에 기인하는 항이다.

위의 유체유동에서 하전밀도와 전장을 구해야 하는데, 정상상태(steady state)와 자장(magnetic field)의 효과가 무시된다는 가정하에서 코로나 현

상에서 전기장과 전류에 대한 지배방정식은,  
(Poisson의 전기장 방정식)

$$\frac{\partial^2 \phi}{\partial X^2} = -\frac{\rho_s}{\epsilon_0} \quad (8)$$

여기서,  $\rho_s = \rho_a + \rho_b$   
(전류의 연속방정식)

$$\frac{\partial}{\partial X_i} [(\rho_a b_a + \rho_b b_b) E_i] = 0 \quad (9)$$

이 된다. 여기서  $\epsilon_0$ 는 공기의 유전율(permittivity;  $8.85 \times 10^{-12} \text{F/m}$ ),  $b$ 는 이온의 운동가능성(mobility),  $E$ 는 전기장, 그리고  $\phi$ 는 전압(electro-static potential)이다. 여기서 방정식 (8)과 (9)은 하나의 3차 비선형 방정식,

$$\nabla \cdot (\nabla^2 \phi \nabla \phi) = 0 \quad (10)$$

로 되며, 이것을 풀기 위해서는 3개의 경계조건을 필요로 한다.

그런데 경계조건 가운데서 2개는 통상적으로 Dirichlet형으로 결정되는 이오나이저와이어와 집진 집진판에 인가되는 전압값,  $\phi_i = V$ 과  $\phi_c = 0$ 들이다. 윗식에서  $\phi_a$ 와  $\phi_c$ 는 각각 방전극과 집진판에 인가되는 포텐셜이며,  $V$ 는 방전극에 인가되는 직류전압이다. 그리고 또하나의 경계조건이 필요하게 되는데, 그것은 방전극 주위의 이온화 영역에서 결정되어진다. 본 연구에서는 Kaptsov의 가정으로부터 유도되는 방전극 표면 주위의 전장의 가정으로부터 경계조건을 택하였다. 그리고 본 연구에서 이용된 가정들은, 먼저 이오나이저 표면에서 전기장의 코로나 개시(onset)값은 Peek's 공식,

$$E_0 = \pm 3 \times 10^6 \left[ \frac{T_0 P}{T P_0} + 0.03 \left( \frac{T_0 P}{T P_0 r_0} \right)^{1/2} \right] \quad (11)$$

여기서,  $r_0 = r_w + 0.03 \sqrt{r_w}$ 에 의해서 주어지며, 양전극면간에서의 이온전하는 단일 극성이며 정상상태에 있고, 이온의 운동가능성은 일정하며, 이온의 확산 현상과 이오나이저 주위의 이온화 영역의 두께는 무시할 수 있다는 것이다.

입자의 하전은 이온들이 입자들의 표면에 충돌함으로써 생성된다. 일반적으로 2개의 하전 미캐니즘들이 있는데 하나는 확산대전(Diffusion charging)이며, 다른 하나는 장대전(Field charging)이다. 확산대전은 이온과 입자들의 불규칙한 브라운 운동으로부터 기인되며, 장대전은 방전부내의 강한 전장에 의해서 기인된다. 먼저 확산대전량은

$$q(t) = akT/e \ln(1+r) \quad (12)$$

로 표현되는데, 여기서,  $q(t)$ 는 시간에 따른 입자하전량(쿨롱),  $a$ 는 입자의 반경,  $k$ 는 Boltzmann상수,  $T$ 는 온도,  $e$ 는 전자의 하전량, 그리고  $r = \pi a v N e^2 \theta / kT$ 로 되는 무차원 시간이며 여기서  $v$ 는 이온의 평균속도,  $N$ 은 이온의 수밀도(Number concentration),  $\theta$ 는 실제시간이다. 그리고 장대전의 경우는,

$$q(t) = q_0 \theta / (\theta + t') \quad (13)$$

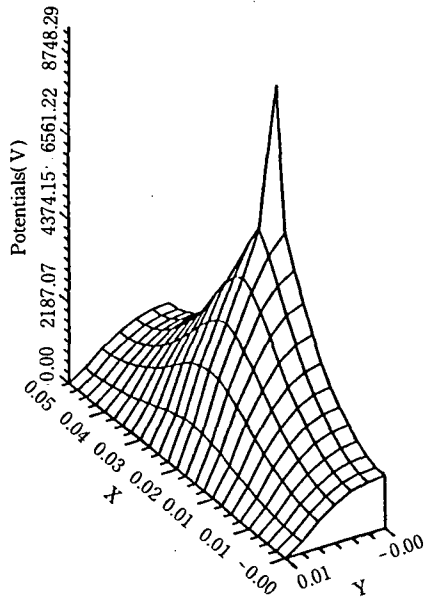
로 되며, 여기서  $q_0 = 12 \pi \epsilon_0 a^2 E$ 로 표현되는데 한계대전량이며,  $\theta$ 는 실제시간, 그리고  $t' = 4 \epsilon_0 / N e b$ 로 표현되는 무차원시간이다. 따라서 입자가 방전부를 통과할 때 대전되는 전체전하량은 방정식 (12)와 (13)의 합으로 나타나게 된다.

그리고, 본 연구에서 분진입자에 대한 운동방정식은 입자 개개에 대하여 뉴턴의 운동방정식을 적용하여 해석하는 라그랑지(Lagrangian) 궤적모형을 이용하였다. 따라서 단일 입자에 대한 운동방정식은 다음과 같다.

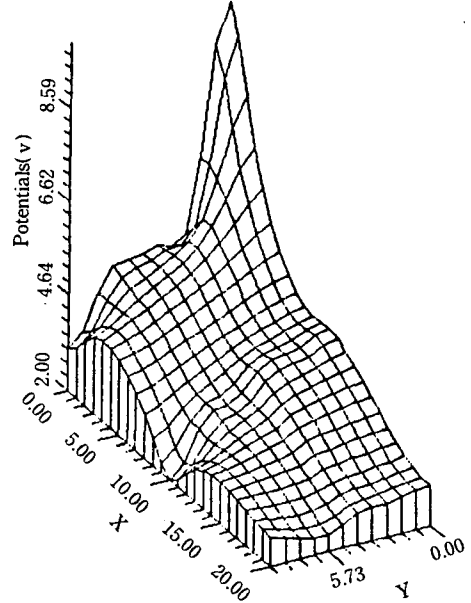
$$\frac{dV_{p,i}}{dt} = (U_i - V_{p,i}) / \tau_d + \frac{qE_i}{m_p} \quad (14)$$

여기서,  $\tau_d = \rho_p d_p^2 / 18 \mu_0$ 이며,  $f = 1 + 0.15 \text{Re}_d^{2/3}$  ( $\text{Re}_d < 1,000$ )이다. 식(14)를 시간에 대하여 적분하여 입자의 국부(Local) 속도와 변위를 구할 수 있으며, 따라서 개개의 입자의 궤적을 추적하여 집진판 벽면에서 입자의 부착정도를 판단할 수 있다.

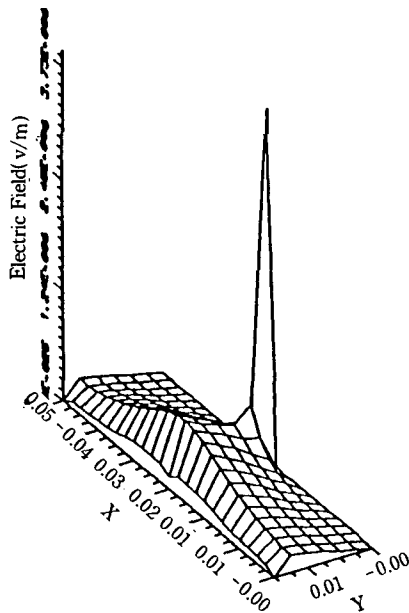
그리고 난류운동에서 입자의 운동을 계산 할 때, 난류는 등방성(Isotropic)이며, 요동(Fluctuation) 속도분포는 가우스(Gaussian) 분포를 가진다는 가정을 이용한다. 이때의 요동속도 분포의 표준편차는,  $\sigma_u = (3k/2)^{1/2}$ 을 가지며, 이에따라 유체속도는 랜덤(Random)하게 선택된다. 또한 적분 시간간격(Interval)도, 입자와 유체(한개의 난류 에디(Eddy))간의 상관(Interaction) 시간으로 설정되는데, 이것은 입자가 에디를 통과하는 시간( $t$ )과 에디의 수명(Life time)중에서 작은 값,  $t_{\text{in}} = \text{Min}(t, t_e)$ 이 사용되어진다. 여기서  $t_e = \zeta_0 / |u'|$ 이며, 에디의 특성크기인 난류길이  $\zeta_0$ 은 일반적으로  $\zeta_0 = 0.3 k^2 / \epsilon_0$ 로 표현되며, 요동속도의 국부(Local) 속도크기는 난류운동 에너지와 관계가 있으며 이는  $|u'| = (2k/3)^{1/2}$ 과 같이 표현된다. 그리고 입자의 에디를 통한 관통 시간,  $t_r$ 은,  $t_r = \zeta_e / |u-v|$ 로부터 구할 수 있다.



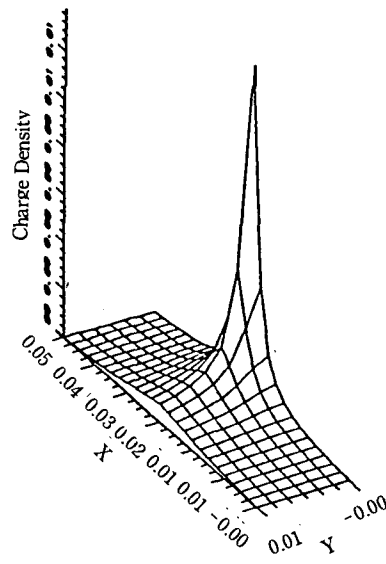
(a) Electric Potentials (calculation)



(b) Electric Potentials (measurement)



(c) Electric Field Intensity



(d) Space Charge Density

Fig. 5. Distribution of electric potentials, electric field intensity, and space charge density between corona wire and electrode plate.-X(Wire-Plate distances)=12mm, Y(Length)=45mm, dw=0.3mm, V=10kV.

4. 결과 및 고찰

전기집진기 내부의 전기적, 유체역학적 특성에 관하여 앞에서 제시된 수치해석 모델과 유한차분법을 이용하여 전기장과 유동장을 계산하였다. 전기장은 SOR(Successive over relaxation)법을 이용하여 계산하였으며 유동장은 SIMPLE(Semi-implicit method for pressure-linked equation) 알고리즘을 이용하여 계산하였다.

단일 방전선을 가지는 형상에 대하여 방전부 내부의 전기장, 전장의 세기 및 공간전하밀도 분포가 그림 5의 (a), (b), (c), (d)에 나타나 있다. 공간전계분포의 계산결과는 그림 5의 (a), 측정결과는 그림 5의 b)에 나타냈다. 그림의 X축은 이온이저 와이어와 방전판 사이의 폭이 12mm를 나타내며, Y축은 이온이저 와이어를 중심으로 방전판 길이의 반인 20mm에 대한 전계분포를 나타내었다. 그리고 하단 그림의 X축은 이온이저 와이어와 방전판 사이의 거리를 나타내었고, Y축은 방전판의 길이, Z축은 이온이저 와이어와 방전판 사이의 거리를 나타내었고, Y축은 방전판의 길이, Z축은 전계분포, 전계의 세기, 공간하전분포를 3차원으로 표시하였다. 그림 (a), (b)에서 보는바와 같이, 이 두 결과들은 전반적으로 매우 잘 일치하고 있다. 그림 (b)에서 유로방향과 방전판 벽면에서 나타난 원 형태의 전계는 Langmuir probe의 직경이 0.1mm, 노

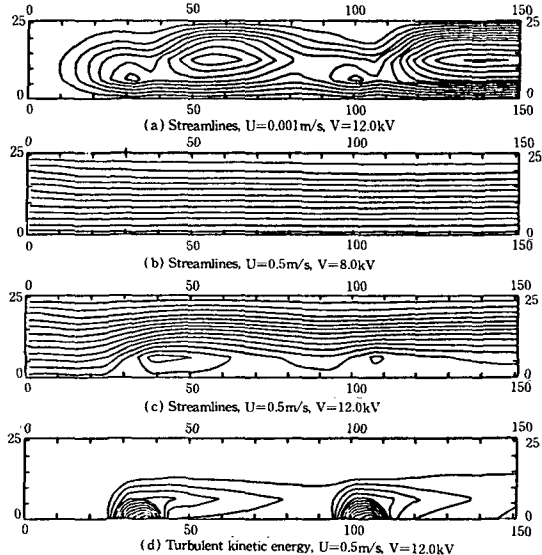


Fig. 6. Predicted EHD Streamlines and turbulent kinetic energy.

-X=Length( mm)  
-Y=Corona wire-plate distances( mm)

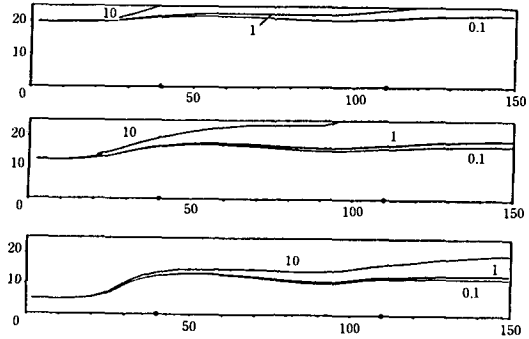


Fig. 7. Computed particle trajectories.

-X=Lengt(mm)  
-Y=Ccorona wire-plate distances(mm)  
-u=0.5m/s, V=8.0kV

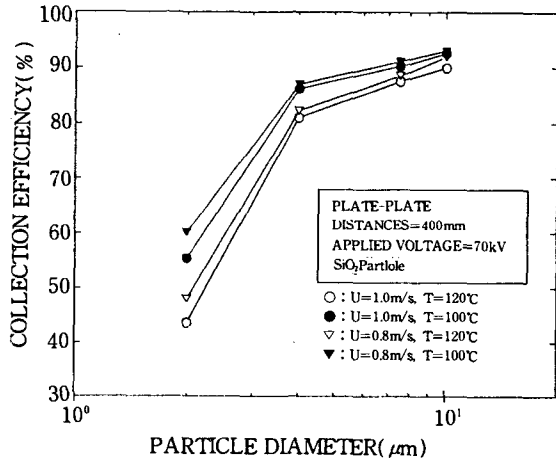


Fig. 8. Particle collection efficiencies for various conditions.

출된 와이어의 길이가 15mm이므로 측정시 probe의 떨림과 probe에 가해지는 미세한 전류에 의한 실험적인 오차로 생각된다.

그리고 전기집진기 내의 EHD 유동의 계산결과 2-와이어 전기집진기 모델에서 각조건에 대한 유선과 난류특성의 분포가 그림 6에 나타나 있다. 그리고 그림 7은 2-와이어 유동 조건에서 각 입구 위치에서의 SiO<sub>2</sub>입자의 크기에 따른 궤적을 수치적으로 구한 결과를 나타내어 주고 있다. 먼저, 그림 6의 유선비교에서, 인가전압이 높아짐에 따라 코로나 유동 영향이 증가하여, 유동의 혼란이 발생함을 볼 수 있다. 그런데 실험에서 보면 계산유동의 결과에 비하여 혼란의 정도가 더욱 증가함을 볼 수 있었으며, 이는 그림 7의 결과에서 보는바와 같이 입자궤적과 유체유선의 궤적의 차이 때문으로 사료된다. 따라서 가시화 촬영을 통한 EHD유선의 비교에서 공급되는

분진의 크기 및 종류에 따라 유선의 결과가 상당히 달리 관측될 수 있다는 것을 알 수 있다.

그림 8는 11개의 방전선을 가지는 전기집진기 모델(표 1) 실험장치에 대하여 입자계수기를 이용한 SiO<sub>2</sub> 입자의 집진효율의 실험결과를 집진판 간격이 400mm, 인가전압이 70kV일때 유속의 변화와 온도의 변화에 대하여 보여주고 있으며, 그림 9는 모델 실험 조건에 대한 수치계산과 실험 결과와의 비교를 보여준다. 그림에서 보는바와 같이 수치계산의 결과는 복잡한 전기집진기 유동에서의 집진효율이 실험과 비교적 잘 일치함을 보여주고 있다.

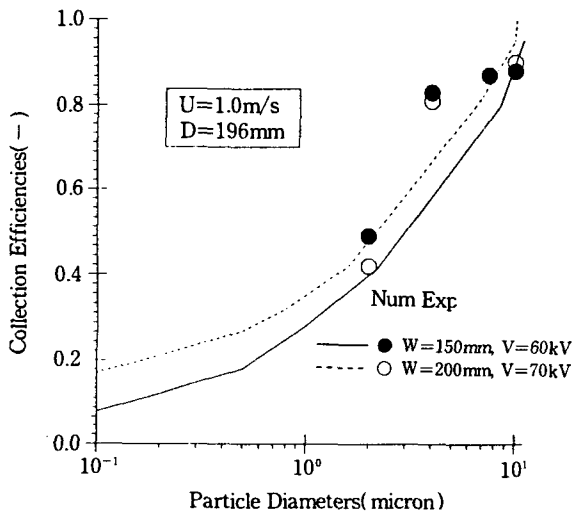


Fig. 9. Comparisons of particle collection efficiencies between numerical and experimental results.

## 5. 결 론

전기 집진기의 연구 결과 유한차분법을 이용한 전기집진기 내부의 전기장, 유동장 및 입자운동을 예측하기 위한 수치해석 프로그램을 개발하였으며, 수치해석 모델의 타당성이 평판채널 유동에서의 실험결과와 비교되었다. 비교결과 본 수치계산의 모델들은 전기집진기 내부 전기, 유동 및 분진유동, 그리고 집진효율 등의 예측을 비교적 정확하게 할 수 있으며, 이는 향후 고효율의 전기집진기의 정밀한

최적설계에 응용될 수 있을 것으로 사료된다.

그리고, 이상에서 제시된 해석 모델과 기초 실험 및 수치계산 결과들은, 본 연구에서 설계, 모델 전기집진기 실험장치를 통하여, 집진/방전 특성과 분진특성, 그리고 전압공급 및 추타, 절연특성 등의 종합적이고 다양한 실험 데이터에 의해서 추후 계속적으로 수정, 보완될 것이다.

## 참 고 문 헌

- Cooperman, G.(1981) A new current-voltage relation for duct precipitators valid for low and high current densities, IEEE Trans., IA-17, 236-239
- Leonard, G.L., Mitchner, M., and Self, S.A.(1980) Particle transport in electrostatic precipitators, Atmospheric Environment, 14, 1289-1299
- McLean, K.J.(1976) Factors affecting the resistivity layer in electrostatic precipitators, J.Air Pollution Cont. Ass., 28, 866-870
- Oglesby, S.and, Nichols, G.B.(1978) Electrostatic Precipitation, Marcel, Dekker, New York
- Oron, A., Gutfinger, C. and Hassid, S.(1989) Turbulent Deposition of Charged Particles under the Influence of an External Electric Field, J.of Colloid and Interface Science, Vol. 127-2, 401-416
- Sekar, S., and Stomberg, H.(1981) On the prediction of current-voltage characteristics for wireplate precipitators, J. Electrostatics, 10, 35-43
- Robinson, M.(1971) Electrostatic Precipitation, in W. Strauss ed., Air Pollution Control, part1, Wiley-Interscience, New York
- White H.J.(1977) Electrostatic precipitation of fly ash, J.Air Pollution Con. Association, 27, 15-21, 114-120, 206-217, 308-318
- Yamamoto, T.Y. and Velkoff, H.R.(1981) Electrohydrodynamics in an electrostatic precipitator, J. Fluid Mech, vol. 108, 1-18