

< 논문 >

## 핀이 부착된 와이어형 방전극의 형상에 따른 코로나 방전특성에 대한 연구

안영철\* · 정성일\* · 이재근\* · 정동규\*\*  
(2005년 1월 31일 접수, 2006년 1월 11일 심사완료)

### Experimental Study on the Corona Discharge Characteristics of the Pin-plate Electrode Geometries

Youngchull Ahn, Seongir Cheong, Jaekeun Lee and Dongkyu Chung

**Key Words:** Electrostatic Precipitator(전기집진기), Electrode(방전극), Geometry(형상), Corona Discharge (코로나 방전), Electric Field Intensity(전기장 강도)

#### Abstract

Electrostatic precipitators(EPs) have low pressure drop and high dust collection efficiency and are widely used for industrial dust collectors. The current-voltage characteristics, which are important to maintain high dust collection efficiency, depend on several factor: discharge electrode shape, gas flow property, dust loading etc. In this study, experiments are performed to investigate the current-voltage characteristics of the corona discharge of various electrode geometries and an empirical model is proposed to predict current-voltage characteristics of the corona discharge. The corona onset voltage correction coefficient( $\alpha$ ) and the geometry correction coefficient( $k_g$ ) are used to the conventional equation for wire-plate type discharge electrode. The corona onset voltages are -6.3 kV and almost constant when the numbers of discharge pins are varied from 3 to 9. The length of discharge pins has very sensitive effects on the corona onset voltage. They are increased from -6.3 to -7.8 kV when the discharge pin length are 8.5 and 4.5 mm, respectively. The empirical model shows good agreement with experimental results and can predict the effects of discharge pin length and number.

#### 기호설명

D : 집진판의 간격[m]  
 $E_0$  : 코로나개시 전기장 세기[kV/m]  
 H : 방전와이어의 길이[m]  
 K : 이온의 이동도[m<sup>2</sup>/Vsec]  
 $K_0$  : 0°C 1기압 표준 공기상태에서의 이온의 이동도[m<sup>2</sup>/Vsec]  
 $K_d$  : 분진 투입에 의한 보정계수

$k_g$  : 방전극 형상계수  
 L : 방전핀의 길이[m]  
 P : 공기압력[atm]  
 $P_0$  : 표준상태의 공기압력[atm]  
 $R_{L/W}$  : 핀길이(L)/핀간격(W)  
 $R_{L/R}$  : 핀길이(L)/핀지름( $2r_0$ )  
 $r_0$  : 방전핀 반경[m]  
 $r_{eff}$  : 등가 실린더 반경[m]  
 T : 공기온도[°C]  
 $T_0$  : 표준상태의 공기온도[°C]  
 V : 인가전압[kV]  
 $V_0$  : 코로나 개시전압[kV]  
 W : 방전핀의 간격[m]

† 책임저자, 회원, 부산대학교 기계기술연구소  
 E-mail : ycahn@pusan.ac.kr  
 TEL : (051)510-2492 FAX : (051)512-9835

\* 회원, 부산대학교 기계공학과

\*\* 회원, (주)씨에프텍

그리스 문자

$\alpha$  : 코로나 개시전압 보정계수

$\epsilon_0$  : 진공에서의 공기 유전율[F/m]

$$V_0 = r_0 E_0 \ln\left(\frac{r_{eff}}{r_0}\right) \quad (2)$$

## 1. 서론

최근 들어 환경오염에 대한 관심이 증가하면서 효과적인 집진설비에 대한 여러 가지 연구들이 많이 수행되고 있다. 특히 전기집진기는 낮은 압력손실과 높은 집진효율 때문에 가용용 공기청정기 혹은 산업용 집진설비로 널리 이용되고 있는데 높은 집진효율을 지속적으로 유지하기 위해서는 높은 이온 밀도와 전계강도가 필수적이다. 그러므로 전기집진기의 성능은 코로나 방전에 의한 전류-전압 특성으로 나타낼 수 있으며 이에 대한 특성파악은 효율적인 전기집진기를 설계하는데 반드시 필요한 부분이기도 하다. 전류-전압 특성에 영향을 미치는 주된 요소로는 방전극에 대서는 형상, 크기, 표면 거칠기 등이 있으며 그 외 내부를 흐르는 가스의 유동특성, 분진 입자의 특성, 인가전압의 극성 등이 있다.<sup>(1-3)</sup>

특히 방전극에 대한 다양한 연구가 수행되어졌으나, 와이어형 방전극을 제외하고는 전압-전류 특성에 대한 정확한 예측이 불가능하며, 방전 특성을 향상시키기 위해 사용되는 핀이 부착된 와이어형 방전극에 대한 전압-전류 특성의 예측이 불가능하다. 따라서 본 연구에서는 핀이 부착된 와이어형 방전극에 대하여 방전특성을 분석하고 코로나 개시전압 보정계수( $\alpha$ )와 형상계수( $k_g$ )를 도입하여 핀이 부착된 와이어형 방전극에 대한 경험식을 도출하여 향후 핀이 부착된 와이어형 방전극의 설계시 유용한 참고 자료로 활용되도록 하고자 하였다.

## 2. 이론

평판형 전기집진기 내부에 입자가 존재하지 않는 경우 인가 전압에 따라 발생하는 코로나 전류는 다음의 식과 같이 계산에 의해 구할 수 있다.<sup>(4)</sup>

$$I = \frac{4\pi\epsilon_0}{\left(\frac{W}{2}\right)^2 \ln\left(\frac{r_{eff}}{r_0}\right)} KV(V - V_0) \quad (1)$$

여기서  $V_0$ 는 다음과 같이 나타난다.

그러나 이 식은 기본적으로 원형의 방전극을 대상으로 하여 제안된 식이므로 방전효율을 높이기 위해 도입되는 다양한 형상의 방전극에 대한 방전특성을 제대로 예측하기는 불가능 하다. 그래서 여러 연구자들<sup>(4,5)</sup>에 의해 다양한 형상의 방전극에 대한 방전특성이 연구되어 왔으며 그 중 Brocilo 등<sup>(6)</sup>은 다음과 같은 방전 특성식을 제안하였다.

$$I = k_g \frac{4\pi\epsilon_0}{\left(\frac{W}{2}\right)^2 \ln\left(\frac{r_{eff}}{r_0}\right)} K_d KV(V - V_0) \quad (3)$$

이 식에서는 방전극의 형상에 따라 변화하는 방전특성을 보정하기 위해  $k_g$ 를 그리고 분진 투입에 의한 영향을 보정하기 위해  $K_d$ 를 고려하였으며 원형, 사각형, 나사산형(threaded), 그리고 스파이크형(spiked) 방전극에 대한 실험 및 연구를 수행하였다. 그러나 Brocilo 등<sup>(6)</sup>은 코로나 개시전압을 나타내는 식 (2)를 수정 없이 그대로 사용하였고 방전극 형상에 따라 다르게 나타나는 특성을  $k_g$ 로 보정하는 방식으로 접근하였기 때문에 본 연구에서 살펴보고자 하는 핀(pin)이 부착된 방전극형(barbed)에 대해서는 상당히 큰 오차를 수반하였다. 그래서 본 연구에서는 식 (2)와 (3)을 수정 보완하여 핀형 방전극에서의 방전특성을 잘 조사할 수 있는 경험식을 제안하고자 하였다.

## 3. 실험장치 및 방법

### 3.1 실험장치

Fig. 1에는 코로나 방전특성을 분석하기 위해 제작된 1단식 전기집진장치의 개략도와 방전극과 방전핀의 설치상태를 나타내었으며 Table 1에는 실험장치의 사양을 나타내었다. 직경 2mm인 스텐레스 재질의 원형 방전극 2개를 기본으로 설치하였으며 방전의 효율성을 높이기 위해 방전핀을 설치하였다. 방전핀의 길이는 4.5, 6.5, 8.5mm로 변화시켰으며 방전핀의 간격은 93mm(3개 설치시) ~ 31mm(9개 설치시)로 변화시켜 방전특성을

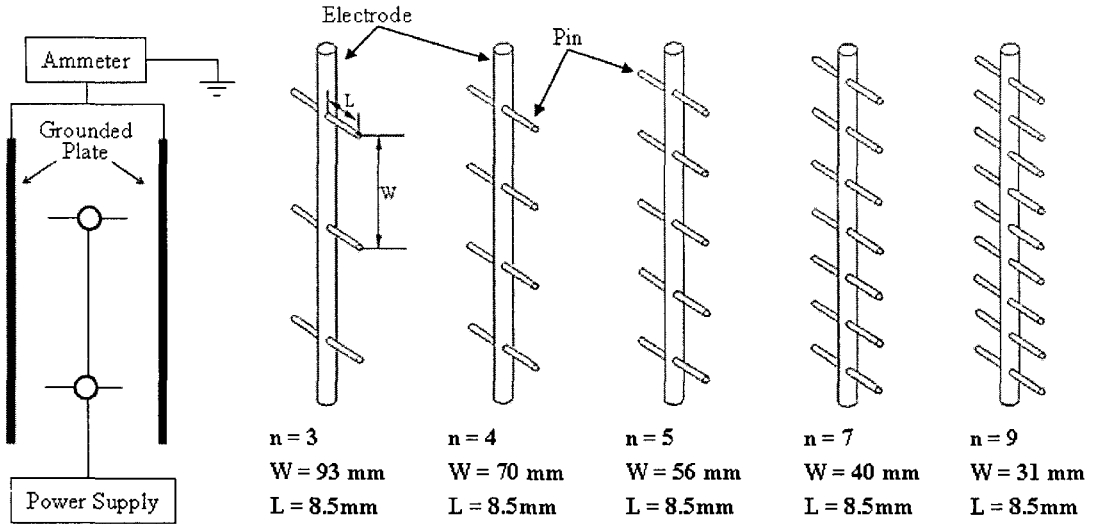


Fig. 1 Schematic diagram of the experimental apparatus and the electrodes

Table 1 Specifications of the experimental apparatus

Parameters	Specifications
Electrode	φ2×280 mm, 2EA
Distance of grounded plates	83 mm
Grounded plate	280 × 300 mm
Applied voltage	0 ~ -35 kV
Pin	Diameter: φ1 Length: 4.5, 6.5, 8.5 mm
Pin distance	31, 40, 56, 70, 93 mm (9, 7, 5, 4, 3 EA)
Temperature	25 °C
Relative Humidity	43 %

분석하였다. 고전압 발생은 (-) 극성을 가지는 고전압 발생장치(한국스위칭, -50kV)를 이용하였으며 0 ~ -35kV의 범위에서 실험을 수행하였다. 집진판을 통해 흐르는 전류는 디지털 전류계를 이용하여 측정하였다.

### 3.2 실험 방법

실험의 정확성 및 반복성을 위해 모든 실험은 온도 25°C, 상대습도 43%인 항온항습챔버[H&C 시스템(주)]에서 수행되었으며 모든 실험 결과는

3회 측정된 결과를 평균하여 나타내었다. 고전압 발생장치를 이용하여 서서히 인가전압을 증가시키다가 전류 값이 증가하기 시작하는 점을 코로나 개시전압으로 간주하였으며 스파크방전이 발생하기 전의 안정전적인 코로나 방전이 발생하는 영역까지 실험을 수행하였다.

## 4. 실험결과 및 고찰

### 4.1 코로나 개시전압

일반적으로 코로나 개시전압은 방전극 형상에 따라 달라지는 것으로 알려져 있다. 방전극의 표면이 매끈한 경우보다 침상 혹은 돌기물이 형성되어 있을 때 더 낮은 전압에서 코로나가 발생하게 되는데 이는 방전극의 경계면에서 전계의 구배 또는 전기장의 세기가 강해져서 코로나 발생이 용이해지기 때문이다. 그러나 식 (2)에서는 그러한 현상을 반영할 수 없으므로 식 (2)를 보완하여 다음과 같은 수정계수  $\alpha$ 를 도입하였다.

$$V_0 = \alpha r_0 E_0 \ln \left( \frac{r_{eff}}{r_0} \right) \quad (4)$$

코로나 개시전압은 방전핀의 길이에 지배적인 영향을 받으며 또한 방전핀의 직경에 민감하게 변화하므로 본 연구에서는 방전핀의 직경에 대한

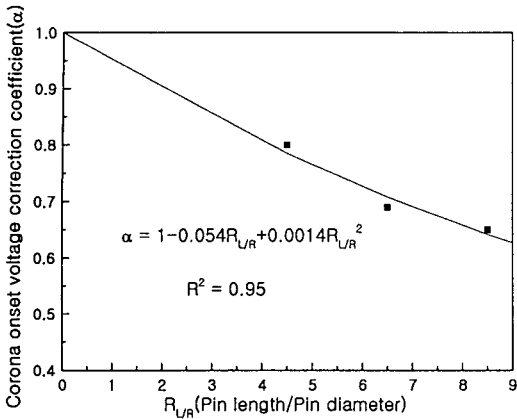


Fig. 2 Variations of the corona onset voltage correction coefficient as a function of the ratio of pin length to pin diameter

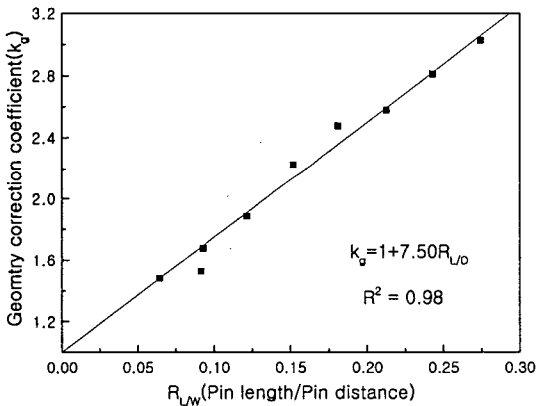


Fig. 3 Variations of the geometry correction coefficient as a function of the ratio of pin length to pin distance

길이의 비( $R_{LW}$ )로써 코로나 개시전압의 보정계수 ( $\alpha$ )를 나타내었으며 Fig. 2에 도식화하여 나타내었다.

Fig. 2에 나타낸 바와 같이 코로나 개시전압 보정계수( $\alpha$ )는  $4.5 \leq R_{L/R} \leq 8.5$ 의 범위에서 다음과 같은 식으로 표현이 가능하다.

$$\alpha = 1 - 0.054R_{L/R} + 0.00141R_{L/R}^2 \quad (5)$$

4.2 방전극 형상계수

방전극의 형상은 코로나 개시전압 뿐만 아니라

코로나 전류의 양에도 영향을 미치게 되는데 본 연구에서는 방전극의 길이와 방전극의 설치 간격에 따른 영향을 중심으로 형상계수의 변화 경향을 분석하였다.

Fig. 3에는 방전극의 길이와 설치간격의 비에 따라 변화하는 형상계수를 나타내었는데 거의 선형적으로 증가하는 경향을 나타냄을 알 수 있다. 즉, 방전극의 길이가 길어질수록 원형의 방전극에 대해 더욱 큰 보정을 필요로 한다는 것을 나타내고 있으며 또한 방전극이 촘촘하게 설치될수록 큰 보정계수가 필요하게 된다. 이와 같이 방전극의 길이와 설치간격의 비에 따라 변화하는 보정계수는  $0.064 \leq R_{L/D} \leq 0.27$  범위에서 아래의 식 (6)과 같이 표현이 가능하다.

$$k_g = 1 + 7.50R_{L/D} \quad (6)$$

그러므로 식 (5)를 이용하여 식 (4)를 보완하면 다음의 식 (7)과 같이 나타낼 수 있다.

$$V_0 = (1 - 0.054R_{L/R} + 0.0041R_{L/R}^2) \times r_0 E_0 \ln\left(\frac{r_{eff}}{r_0}\right) \quad (7)$$

그러므로 식 (3)과 (6), (7)을 이용하면 코로나 방전에 의한 전류-전압 특성곡선을 얻을 수 있다. 본 연구에서는 식 (3)의 분진투입에 의한 보정계수  $K_d$ 는 무시하였으며 이온의 이동도  $K$ 는  $0^\circ\text{C}$  1기압인 표준 공기상태에서의 이동도인  $K_0 = 2.10 \times 10^{-4} \text{ m}^2/\text{Vsec}$ 를 이용하여 다음의 식 (8)에 의해 보정하여 사용하였다.

$$K = K_0 \frac{TP_0}{T_0P} \quad (8)$$

4.3 방전극의 길이에 따른 방전특성

Fig. 4에는 방전극의 길이에 따른 코로나 방전 특성을 실험적 결과와 모델링 결과를 비교하여 나타내었다. 방전극이 부착되지 않은 상태에서는 약 -20 kV에서 코로나 방전이 시작되어 전류가 증가하는 것으로 측정되었으며 방전극의 길이가 4.5, 6.5, 8.5mm 인 경우에는 각각 -7.8, -6.7, -6.3 kV에서 코로나 방전이 시작되었다. 방전극이 부착된 경우가 부착되지 않은 경우에 비하여 약 12 ~ 14kV 정도 빨리 코로나가 개시되는 것으로

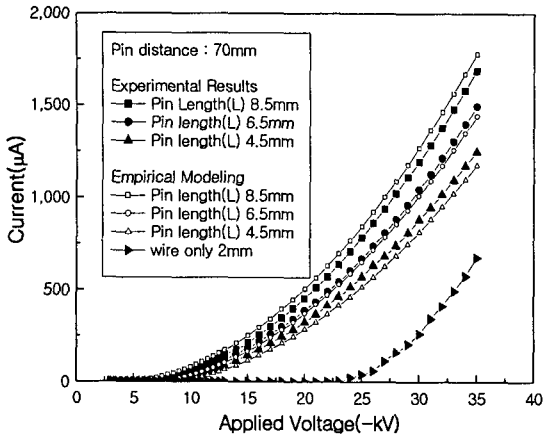


Fig. 4 Comparison of the experimental data with the modeling data for the corona current as a function of pin length

측정되었으며 방전핀이 길수록 더욱 낮은 전압에서 빨리 방전되는 것을 확인할 수 있었다. 그리고 수정된 모델링식을 이용한 모델링 결과는 실험결과를 매우 정확하게 나타내고 있음을 알 수 있다.

#### 4.4 방전핀의 간격(개수)에 따른 방전특성

Fig. 5는 방전핀의 간격에 따른 코로나 방전특성을 실험적 결과와 모델링 결과를 비교하여 나타낸 것이다. 방전핀의 길이는 모두 8.5 mm로 동일한 상태에서 실험이 수행되었으며 코로나 개시전압은 -6.3 kV 정도로 거의 비슷한 경향을 나타내었다. 단지 방전핀의 설치 개수가 많아 설치 간격이 좁아졌을 경우 방전 전류의 증가가 매우 크게 나타남을 확인할 수 있는데 -30 kV의 경우 핀의 설치 간격이 93 mm인 경우와 31 mm인 경우는 각각 952  $\mu\text{A}$ 와 1,927  $\mu\text{A}$ 로 두 배정도의 차이가 있음을 알 수 있다. 그리고 모델링 결과와 실험결과는 매우 근사하게 모사되고 있음을 확인할 수 있다.

Fig. 6에는 한 개의 방전극에 설치되어 있는 방전핀의 개수에 따른 전류의 변화를 나타낸 그래프이다. Fig. 5에서는 방전핀의 개수가 증가할수록 전체 코로나 전류는 증가하는 경향을 보이고 있지만 하나의 방전핀에서 발생하는 전류의 양은 급격히 감소하고 있음을 나타내고 있다. 이는 방전핀이 많이 설치됨으로써 해서 전기장이 균일화되어 방전핀 표면에서의 전기장도를 약화시키기 때문이다.

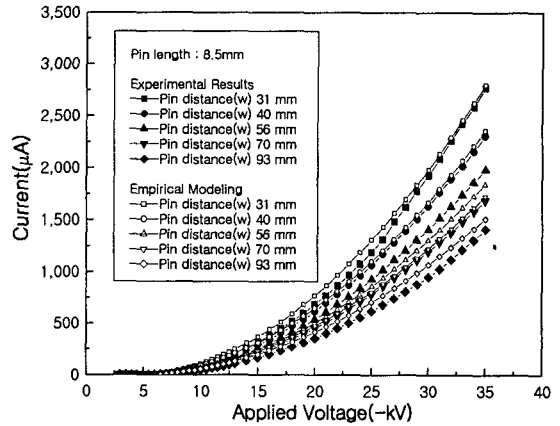


Fig. 5 Comparison of the experimental data with the modeling data for the corona current as a function of pin distance

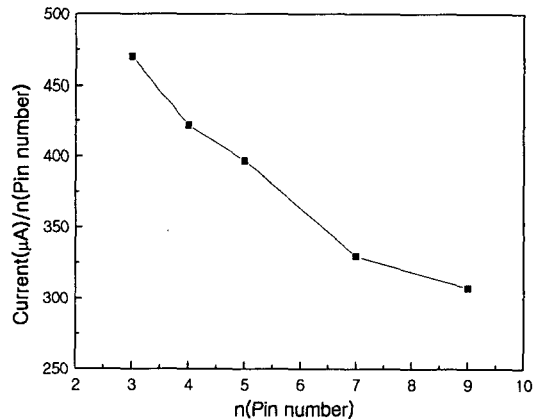


Fig. 6 Average current of a single pin as a function of pin number per discharge electrode

## 5. 결론

본 연구는 전기집진기의 높은 집진효율을 지속적으로 유지하기 위하여 핀이 부착된 방전극에서 다양한 방전극 형상에 대한 코로나 방전특성을 분석하였으며 아래와 같은 결론을 도출하였다.

(1) 코로나 개시전압은 방전핀의 간격(개수)에는 큰 영향을 받지 않고 일정한 특성을 나타내었으며 방전핀의 길이가 길어질수록 낮은 전압에서 방전이 발생하였다.

(2) 코로나 방전 전류는 방전핀의 간격이 줄어들 때(개수가 증가할 때) 증가하는 특성을 보이지만 단위 방전핀당 발생하는 전류는 급격히 감소

하는 경향을 나타낸다.

(3) 편이 부착된 방전극의 방전 전류-전압 특성을 예측할 수 있는 경험적 모델링을 수행하였으며 실험결과와 매우 잘 일치함을 확인하였다.

### 후 기

본 연구는 에너지관리공단의 에너지·자원기술개발사업의 지원으로 수행되었으며 이에 관계자 여러분께 감사드립니다.

### 참고문헌

- (1) Moor, A. D., 1973, *Electrostatics and its Applications*, John Wiley & Sons, New York, p. 194.
- (2) Lee, J. B., Bae, G. N. and Hwang, J., 2000, "Effect of Secondary Flows on the Particle Collection Efficiency in Single Stage Electrostatic Precipitator," *Transactions of the KSME B*, Vol. 24, No. 2, pp. 251~259.
- (3) Noh, K. C., Lee, Y. H. and Oh, M. D., 2003, "Generation Characteristics of Ozone and NO<sub>x</sub> and Particle Removal in the Electrostatic Precipitators," *Transactions of the KSME B*, Vol. 27, No. 10, pp. 1442~1449.
- (4) Jedrusik, M., Gajewski, J. B. and Swierczok, A. J., 2001, "Effect of the Particle Diameter and Corona Electrode Geometry on the Particle Migration Velocity in Electrostatic Precipitators," *Journal of Electrostatics*, Vol. 51~52, pp. 245~251.
- (5) Miller, J., Hoferer, B. and Schwab, A. J., 1998, "The Impact of Corona Electrode Configuration on Electrostatic Precipitator Performance," *Journal of Electrostatics*, Vol. 44, pp. 67~75.
- (6) Brocilo, D., Chang, J. S., Findlay, R. D., Kawada, Y. and Ito, T., 2001, "Modelling of the Effect of Electrode Geometries on the Corona Discharge Current-Voltage Characteristic for Wire-Plate Electrostatic Precipitators," *Annual Report Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena*, pp. 681~684.