

선-판식전극계에서 전기마당 및 포텐셜의 분포와 부유립자의 대전특성

최향미, 임현철

경애하는 김정은동지께서는 다음과 같이 말씀하시였다.

《과학연구부문에서는 나라의 경제발전과 인민생활향상에서 전망적으로 풀어야 할 문제들과 현실에서 제기되는 과학기술적문제들을 풀고 첨단을 돌파하여 지식경제건설의 지름길을 열어놓아야 합니다.》

최근 생산공정의 무진, 무균화를 실현하는데서 선-판식코로나방전기술[2]을 많이 리용하고있다. 그러나 대기압비평형플라즈마를 리용하는 정전기제진기술의 기초리론은 아직 완성되지 않았다.[4]

우리는 선-판식전극계에서 전기마당 및 포텐셜의 분포와 부유립자의 대전특성을 연구하였다.

1. 선-판식전극계에서 전기마당 및 포텐셜분포특성

정전기제진장치의 기초로 되는 선-판식전극계는 그림 1과 같다.

그림 1에서 보는바와 같이 코로나선전극길이방향을 z 축으로, 선전극과 판전극사이의 수직방향을 x 축으로 하고 선전극의 중심에 원점을 두고 판전극에 평행인 방향을 y 축으로 하였다. 또한 선전극과 판전극사이거리를 b , 판전극의 너비를 $2d$ 로 하였다.

무한선전극이 그것으로부터 같은 거리에 있는 공간의 모든 점에 만드는 전기마당세기는 같기때문에 선-판식전극계에서는 xy 평면만을 주목하면 된다.[1]

거울영상법에 의한 공간전기마당합성방법은 그림 2와 같다.

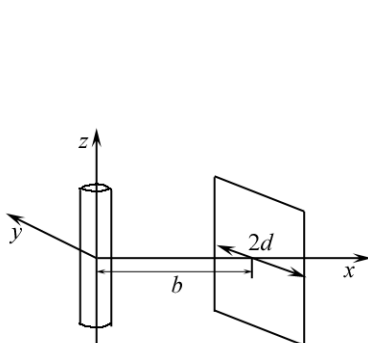


그림 1. 선-판식전극계

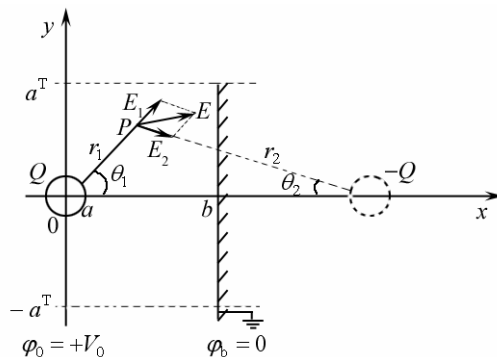


그림 2. 거울영상법에 의한 공간전기마당합성방법

그림 2에서 보는바와 같이 xy 평면에서 전기량 Q 를 가지는 원전극과 $\varphi=0$ 인 접지면 사이 공간전기마당세기분포는 거울영상법에 의하여 판의 뒤쪽에 대칭되게 $-Q$ 의 전기량을 가지는 영상전극이 있다고 보고 계산할수 있다. 즉

$$\mathbf{E} = \mathbf{E}_1 + \mathbf{E}_2 = \frac{Q}{2\pi\epsilon_0 r_1} \mathbf{e}_{r_1} + \frac{-Q}{2\pi\epsilon_0 r_2} \mathbf{e}_{r_2}. \quad (1)$$

여기서 \mathbf{E} 는 선-판전극사이 점 P 에 생기는 전기마당세기, $\mathbf{E}_1, \mathbf{E}_2$ 는 실전극 Q 와 영상전극 $-Q$ 가 점 P 에 만드는 전기마당세기, ϵ_0 은 진공속에서의 유전률($8.85 \cdot 10^{-12} \text{F/m}$), r_1, r_2 는 실전극과 영상전극으로부터 점 P 까지의 거리, $\mathbf{e}_{r_1}, \mathbf{e}_{r_2}$ 는 실전극과 영상전극으로부터 점 P 까지의 거리벡토르이다.

식 (1)을 x, y 성분으로 표시하면 다음과 같다.

$$\mathbf{E} = \frac{Q}{2\pi\epsilon_0} \left[\left(\frac{x}{x^2 + y^2} + \frac{2b-x}{(2b-x)^2 + y^2} \right) \mathbf{e}_x + \left(\frac{y}{x^2 + y^2} - \frac{y}{(2b-x)^2 + y^2} \right) \mathbf{e}_y \right] \quad (2)$$

경계조건(식 (3))을 리용하면 선-판식전극에서의 전기마당세기는 식 (4)로 표시된다.

$$\begin{cases} E(0, a) = E(a, 0) = E_0 \\ E(b, y) = c \end{cases} \quad (3)$$

여기서 a 는 선전극의 반경($a \ll b$)이고 E_0 은 선전극표면의 전기마당세기이다.

$$\mathbf{E}(x, y) = E_0 a \left[\left(\frac{x}{x^2 + y^2} + \frac{2b-x}{(2b-x)^2 + y^2} \right) \mathbf{e}_x + \left(\frac{y}{x^2 + y^2} - \frac{y}{(2b-x)^2 + y^2} \right) \mathbf{e}_y \right] \quad (4)$$

전기마당세기와 포텐셜사이의 관계식 $E = -\text{grad}\varphi$ 로부터 경계조건(식 (5))을 리용하여 포텐셜분포를 구하면 식 (6)과 같다.

$$\begin{cases} \varphi(0, a) = \varphi(a, 0) = V_0 \\ \varphi(b, y) = 0 \end{cases} \quad (5)$$

$$\varphi(x, y) = \frac{V_0}{2\ln(a/2b)} \ln \frac{x^2 + y^2}{(2b-x)^2 + y^2} \quad (6)$$

선-판식전극에서 $V_0 = 12\text{kV}$, $a = 0.1\text{mm}$, $b = 5\text{mm}$, $2d = 10\text{mm}$ 즉 $x = (0, 5)$, $y = (-5, 5)$ 일 때 전기마당의 세기분포와 포텐셜분포는 그림 3, 4와 같다.

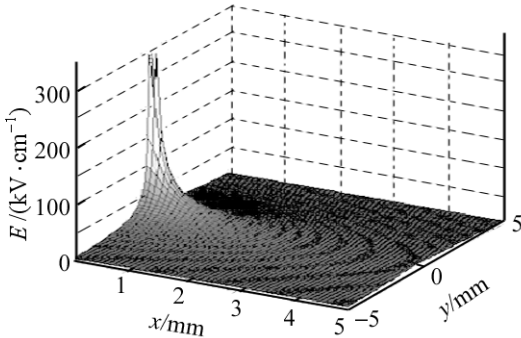


그림 3. 선-판식전극에서 전기마당의 세기분포

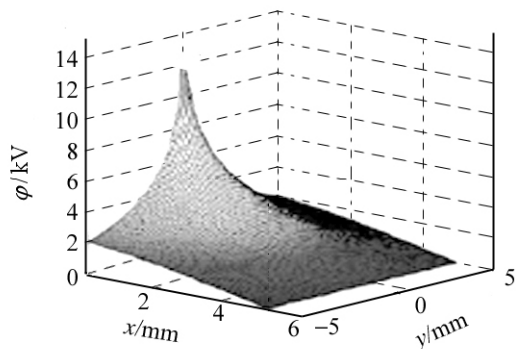


그림 4. 선-판식전극에서 포텐셜분포

그림 3, 4에서 보는바와 같이 전기마당세기와 포텐셜은 선전극주위에서 제일 높고 판전극쪽으로 가면서 감소하며 두 전극사이공간에서의 마당분포가 공기의 절연과피에 해당하는 전기마당세기(30kV/cm)이상의 값분포를 가진다는것을 알수 있다. 이것은 두 전극사이 에 들어온 부유립자를 충분히 이온화시키고 일정한 값이상의 전하량으로 대전시킬수 있게 한다.

2. 전기마당세기 및 크기에 따르는 부유립자의 포화대전특성

전기마당속에서 부유립자는 이온충돌 및 이온확산의 두가지 방법으로 대전된다.

이온충돌대전에 의한 부유립자의 포화대전량은 립자를 구모양이라고 볼 때 다음과 같이 표시된다.

$$q_{\text{충돌}} = 4\pi D \varepsilon_0 a_{\text{부}}^2 E \quad (7)$$

여기서 D 는 부유립자의 대전결수로서 $D = \frac{3\varepsilon_r}{\varepsilon_r + 2}$ (ε_r 는 부유립자의 상대유전률)로 표시되며(D 값은 대략 2.5) $a_{\text{부}}$ 는 부유립자의 반경, E 는 외부전기마당세기이다.

이온확산대전에 의한 부유립자의 포화대전량은 다음과 같이 표시된다.

$$q_{\text{확산}} = \frac{20\pi\varepsilon_0 k_0 T}{e} a_{\text{부}} \quad (8)$$

여기서 k_0 은 볼츠만상수($1.380 \cdot 10^{-23} \text{ J/K}$), T 는 전극공간온도($\approx 300\text{K}$), e 는 전기소량($1.6 \cdot 10^{-19} \text{ C}$)이다.

식 (7), (8)로부터 이온충돌대전이나 이온확산대전에 의한 포화대전량은 다같이 부유립자의 크기 $a_{\text{부}}$ 에 관계되지만 외부전기마당세기는 이온충돌대전에만 영향을 준다는것을 알 수 있다.

두가지 대전중에서 어느 대전이 더 우세한가를 나타내는 파라미터 β 는

$$\beta = \frac{q_{\text{확산}}}{q_{\text{충돌}}} = \frac{5k_0 T}{e D a_{\text{부}} E} \approx 5.18 \times 10^{-2} \times \frac{1}{a_{\text{부}} E} \quad (9)$$

로 주어진다.

선-판식전극에서 전기마당세기가 30~300kV/cm일 때 부유립자크기에 따르는 β 의 변화는 그림 5와 같다.

그림 5에서 보는바와 같이 β 는 부유립자크기가 커짐에 따라 감소하며 부유립자크기가 같을 때에는 전기마당세기가 셀수록 크다는것을 알수 있다. 크기가 $0.3 \sim 1 \mu\text{m}$ 인 부유립자들에서는 이온충돌대전이 우세하며 이온확산대전은 무시할수 있다. 즉 부유립자의 대전특성은 이온충돌대전만 평가해도 된다는것을 보여준다.

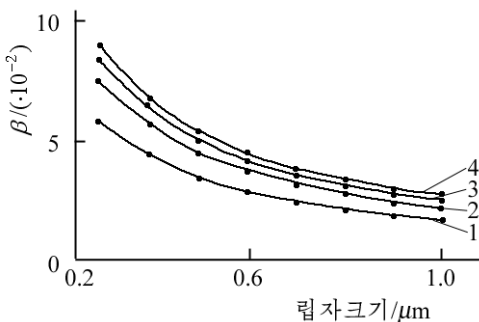


그림 5. 부유립자크기에 따르는 β 의 변화
1-4는 전기마당의 세기가 각각 30, 100, 200, 300kV/cm인 경우

부유립자크기에 따르는 이온충돌대전에 의한 포화대전량변화는 그림 6과 같다.

그림 6에서 보는바와 같이 부유립자크기가 클수록, 전기마당세기가 셀수록 포화대전량도 크다는것을 알수 있다.

부유립자가 전하 q 로 대전되는데 걸리는 시간은 다음과 같다.

$$t = t_0 \cdot \frac{q/q_{\max}}{1 - q/q_{\max}} \quad (10)$$

여기서 t_0 은 포화전하량의 50%만큼 충전되는데 걸리는 시간으로서 $t_0 = \frac{4\epsilon_0}{Ne\mu_i}$ (N 은 부유립자주위공간의 단위체적당 이온수, μ_i 는 이온의 이동도)으로 표시되며 q 는 부유립자의 전하량, q_{\max} 는 부유립자의 포화대전량이다.

식 (10)으로부터 부유립자가 포화대전량의 90%만큼 충전되는데 걸리는 시간을 계산하면 보통 1ns정도이다. 즉 코로나방전마당속에서 부유립자는 매우 빠른 시간안에 포화값으로 대전된다는것을 알수 있다.

실험결과는 선행연구결과[3]와 일치하였다.

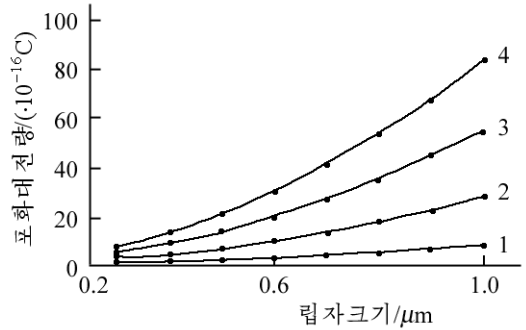


그림 6. 부유립자크기에 따르는 포화대전량변화
1-4는 전기마당의 세기가 각각 30, 100, 200, 300kV/cm인 경우

맺 는 말

1) 선-판식전극계에서 전기마당 및 포텐셜분포를 거울영상법으로 평가하고 분포특성을 계산한 결과 두 전극사이공간에서의 마당분포가 공기의 절연파괴에 해당하는 전기마당세기(30kV/cm)이상의 값분포를 가지며 이것은 두 전극사이구역에 들어온 부유립자를 충분히 이온화시키고 일정한 값이상의 전하량으로 대전시킬수 있게 한다.

2) 선-판식코로나방전계에서 크기가 0.3~1.0μm인 부유립자들을 높은 효율로 수집전극에 수집할수 있다.

참 고 문 헌

- [1] 류정애 등; 전자기학, 김일성종합대학출판사, 24, 주제97(2008).
- [2] S. O. H. Al-Shujairi; International Journal of Scientific and Engineering Research, 4, 1, 2013.
- [3] Knoxville; Industrial Plasma Engineering 1, University of Tennessee, 251~274, 1995.
- [4] 唐国山 等; 水泥厂电除尘器应用技术, 化学工业出版社, 23, 2005.

주제104(2015)년 11월 5일 원고접수

Distribution of Electric Field and Potential and Characteristics of Aerial Dust Charge in Wire-Plane Electrode System

Choe Hyang Mi, Im Hyon Chol

We estimated the distribution of electric field and potential with the method of mirror images and calculated the characteristics of these distributions in wire-plane electrode system.

As the result, we confirmed that the field distribution between both electrode was over electric field strength(30kV/cm) for the electric breakdown of air, so the aerial particles between both electrode can be ionized and charged with the quantity of charge over the certain value.

We can collect the aerial particles of $0.3 \sim 1.0 \mu\text{m}$ to the collection electrode with high efficiency.

Key words: wire-plane electrode system, electric field distribution, potential distribution, saturation charge