

질소가스에 대한 2차원 코로나 방전특성 해석

최종대, 심재학, 고광철, 강형부
한양대학교 전기공학과

Two-dimensional simulation of corona discharge characteristics in nitrogen

Jong-Dae Choi, Jae-Hak Shim, Kwang-Cheo Ko, Hyung-Boo Kang
Dept. Electrical Eng., Hanyang Univ.

Abstract - In this study, we simulated the developing process of two-dimensional corona discharge using the fluid method in 760 torr. It was assumed that the transport coefficients of nitrogen gas were only the function of local electric field. Discharge mechanisms considered were a Townsend first ionization and a secondary electron emission. We obtained spatio-temporal distribution of electron and ion by calculating continuity equation using FCT algorithm and calculated an electric field distribution considering a space charge.

1. 서 론

코로나 방전은 전계의 불평등이 심한 곳에서 일어나는 방전현상으로 침 부분이나 가는 선 근처에서 빛과 소리를 동반하는 기체방전이다. 이러한 코로나를 이용한 응용분야로는 전기집진기, 프린터, electrophotography, 오존발생장치 등이 있으며, 최근에는 환경오염대책의 일환으로 전기집진장치에 대한 관심이 고조되고 있다[1]. 전기집진장치는 Lodge 가 최초로 발견하였으며, 극성효과에 따라 응용분야가 다르다. 정코로나는 실내의 공기청정기에 사용되고, 부코로나는 방출된 입자를 모으는 공업적 집진기에 사용된다. 코로나 방전은 전극사이에 있는 하전입자들의 운동에 의해서 발생되므로 전자와 이온의 거동을 시간의 진전에 따라 해석하면 그특성을 알 수 있다. 본 연구에서는 유체법을 사용하여 코로나 방전의 특성을 해석하였다. 질소가스에 대한 수송계수는 국부전계의 함수로 나타내었으며, 연속식을 유한 차분법의 개정된 형태인 FCT(Flux-Corrected Transport)법으로 계산하여 전자와 이온밀도 분포의 시·공간적 변화를 구하였고, 공간전하를 고려한 전계분포를 구하였다.

2. 본 론

2.1 코로나 방전에 대한 지배방정식

2차원 코로나 방전의 해석에 필요한 기본적인 물

리를 포함한 방정식들은 전자와 이온에 대한 연속 방정식과 전계에 대한 Poisson 방정식으로 다음과 같이 나타낼 수 있다. N_2 가스에서는 재결합 및 부착을 무시할 수 있으므로 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\frac{\partial n_+}{\partial t} + \nabla \cdot (v_+ n_+) - D_+ \nabla^2 n_+ = \alpha n_e |v_e| + S \quad (1)$$

$$\frac{\partial n_e}{\partial t} + \nabla \cdot (v_e n_e) - D_e \nabla^2 n_e = \alpha n_e |v_e| + S \quad (2)$$

$$\nabla^2 \Phi = -q_e (n_+ - n_e) / \epsilon_0 \quad (3)$$

여기서, n_e : 전자밀도, n_+ : 정이온 밀도, v_e : 전자의 이동속도, v_+ : 정이온의 이동속도, D_e : 전자의 확산계수, α : Townsend 전리계수, S : source항으로서 광에 의한 전리와 정이온 및 광자가 음극면과 충돌하여 음극면에서 2차전자가 방출되는 γ_i , γ_p 등이 포함된다. 식(1), (2)를 풀면 전극사이에 위치한 전자와 이온의 거동과 증감에 의한 방전현상을 해석할 수 있다.

2.2 Numerical Method

연속 방정식의 수치해법은 FCT법[2][3][4]을 사용하여 구하였다. 방정식(1), (2)에서 밀도 도함수에 대한 대류항은 다음과 같다.

$$\left. \frac{\partial N}{\partial t} \right|_{conv} = -\nabla \cdot (N \hat{v}) \quad (4)$$

여기서, N 은 밀도이고, V 는 드리프트 속도이다. 종속변수 (rN)을 간단히 취급하기 위해서 축대칭 구조를 사용하였다.

$$\left. \frac{\partial (rN)}{\partial t} \right|_{conv} = -\frac{\partial f}{\partial r} - \frac{\partial g}{\partial z} \quad (5)$$

$$f = rNv_r, \quad g = rNv_z, \quad \hat{v} = v_r \hat{e}_r + v_z \hat{e}_z$$

대류항의 first-order 계산은 간단한 Euler time integration을 가진 donor cell 알고리즘으로 구하였다[5].

2.2.1 확산항과 충돌전리항

식(1)에서 확산항과 충돌전리항은 각 time step에서 계산하였다. 첨자의 i, j 는 grid point를, t 는 time step을 나타낸다. 이온은 전자에 비해 질량이 크기 때문에 이온에 의한 확산항은 무시하였으며, 여기서, 사용한 확산계수 D_L (logitudinal diffusion coefficient), D_T (transverse diffusion coefficient)의 값은 각각 $1800 \text{ cm}^2/\text{s}$, $2190 \text{ cm}^2/\text{s}$ 이다.

확산항은 다음과 같이 주어진다.

$$\left. \frac{\partial N}{\partial t} \right|_{diff} = D_L(N'_{i,j+1} + N'_{i,j-1} - 2N'_{i,j}) / \Delta z^2 + \pi D_T \left(\frac{r_{i+1} + r_i}{r_{i+1} - r_i} (N'_{i+1,j} - N'_{i,j}) - \frac{r_i + r_{i-1}}{r_i - r_{i-1}} (N'_{i,j} - N'_{i-1,j}) \right) \frac{\Delta z}{V_{i,j}} \quad (6)$$

충돌 전리항은 빨리 변화하므로 second order scheme을 사용하여 계산하였다.

$$\Delta N_{i,j}^{\Delta T/2} = \frac{\Delta T}{2} \alpha |v_e| N_{i,j}^t \quad (7.a)$$

$$N_{i,j}^{t+\Delta T/2} = \frac{N_{i,j}^t + N_{i,j}^{t+\Delta T}}{2} + \Delta N_{i,j}^{\Delta T/2} \quad (7.b)$$

$$\left. \frac{\partial N}{\partial t} \right|_{ionize} = \alpha |v_e| N_{i,j}^{t+\Delta T/2} \quad (7.c)$$

2.2.3. 전류밀도 계산

전류밀도는 전극사이를 흐르는 전자·이온밀도, 드리프트 속도를 이용해서 계산한 Sato 방정식으로 구하였다(6).

$$J = \frac{e}{V} \int_0^d (N_+ W_+ - N_e W_e) E_L dz \quad (8)$$

단, e : 단위 전하량, V : 인가전압, d : 갭간거리
 W_+ : 이온의 이동속도, W_e : 전자의 이동속도,
 E_L : 라플라스 전계

2.2.4 해석모델 및 수송계수

해석모델로는 그림1과 같은 2차원 축대칭 전극구조를 사용하였다. 질소를 배경기체로 사용하였고, 인가전압은 -4500 (V) 로 하였으며, 질소 기체에 대한 수송계수는 극부 전계의 함수로 선형화하여 간단히 다음식과 같이 나타냈다.

$$a/p = \begin{cases} 5.7 \exp(-260/(E/p)) E/p < 100 [\text{V/cmTorr}] \\ 12. \exp(-335/(E/p)) E/p > 100 [\text{V/cmTorr}] \end{cases}$$

$$W_e = 2.9 \times 10^5 E/p [\text{cm/s}]$$

$$W_i = \begin{cases} 2 \times 10^3 (1 - 4 \times 10^{-3} E/p) E/p [\text{cm/s}] & E/p < 80 \\ 1.25 \times 10^4 \sqrt{E/p} - 2.4 (E/p) [\text{cm/s}] & E/p > 80 \end{cases}$$

Source항은 이온이 음극면과 충돌하여 이차전자를 발생시키는 γ_i 작용만을 고려하였다. 이온이 음극면과 충돌하면 모두 전극에 흡수되는 것으로 가정하였고, 2차전리계수는 0.01 로 하였다(7).

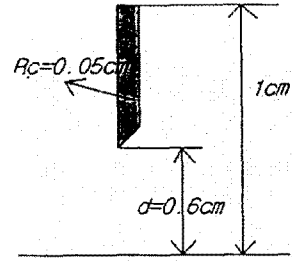


그림1. 침대 평판전극구조

2.2.5 simulation 결과

그림2는 -4500 (V) 를 전극에 인가했을 때 전극사이를 흐르는 전류밀도를 시간의 변화에 따라 나타낸 것이다. 양 전극에 전압을 인가한 직후부터 약 30 (ns) 까지는 전류밀도가 거의 0에 가깝다.

a) 코로나 개시전 단계

그림3은 전압을 인가한 직후부터 30 (ns) 까지 전극사이의 전계변화 및 전자·이온밀도 변화를 나타낸 것이다. 이 영역에서는 공간전하에 의한 전계의 왜곡이 미미하여 초기전계와 30 (ns) 때의 전계가 거의 같다. 그러나 침 부분에서는 전계가 강하여 전리가 활발히 일어나긴 하지만, 방전을 개시하기에 충분한 전자밀도를 가지지 못한다.

b) 펄스 형성단계

그림4(c)에서 볼 수 있듯이 공간전하에 의한 전계의 왜곡이 나타나기 시작한다. 공간전하에 의해서 전계가 감소하지만, 전자·이온쌍이 계속 발생하여 약해지는 전계를 보상하기 때문에 전류밀도는 계속증가하는 양상을 보인다.

c) 방전의 안정단계

70 (ns) 이후부터는 전류밀도가 일정한값으로 안정화된다. 전자와 이온이 양 전극에 흡수되어 공간전하에 의한 전계감소가 약해지므로 전계가 다시 강화되어, 이런 과정을 계속 반복해서 전류밀도가 일정한 값으로 안정화 된다.

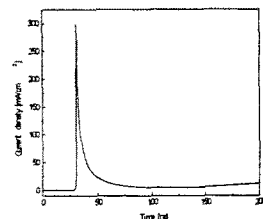


그림2. 전극간에 흐르는 전류밀도(mA/cm^2)

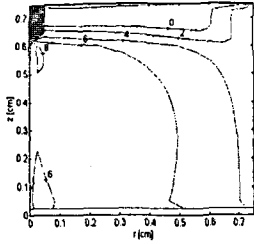


그림3(a). $t=20(\text{ns})$ 에서 전자밀도 분포(cm^{-3})

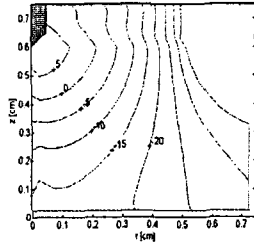


그림3(b). $t=20(\text{ns})$ 에서 이온밀도 분포(cm^{-3})

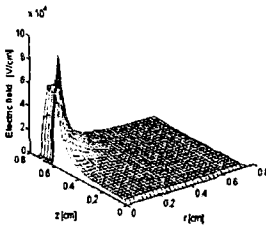


그림3(c). $t=20(\text{ns})$ 에서 전기분포(V/cm)

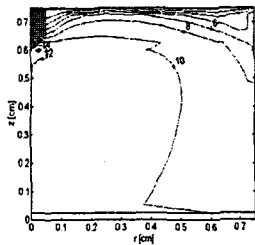


그림4(a). $t=50(\text{ns})$ 에서 전자밀도 분포(cm^{-3})

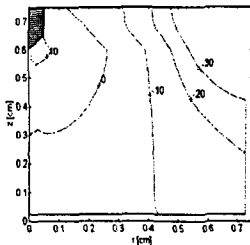


그림4(b). $t=50(\text{ns})$ 에서 이온밀도 분포(cm^{-3})

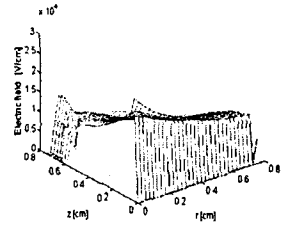


그림4(c). $t=50(\text{ns})$ 에서 전기분포(V/cm)

3. 결 론

질소가스에 대해서 전자의 1차충돌전리, 이온의 2차충돌전리 등을 고려하여 코로나 방전을 2차원으로 해석하였다. 코로나 방전은 일차적으로 전자의 충돌전리에 의해 발생된 전자와 이온이 증배되어 공간전하로서 방전에 기여하고, 이러한 공간전하 효과가 나타나기 시작하면서 부터는 전계가 감소되어 충돌전리가 줄어들게 되며, 전자는 양극쪽으로 빠르게 이동하여 흡수된다. 이 때부터는 이온이 주된 공간전하로서 작용하여 이온에 의한 2차전리가 주 source로 영향을 끼치게 된다. 본 연구에서 공간전하로 영향을 미치기 시작하는 전자·이온밀도의 크기는 약 10^{10}cm^{-3} 인 것으로 나타났다.

[참 고 문 헌]

- [1] J. S. Chang, "Corona discharge process", IEEE Trans. Plasma Sci., vol. 19, 1152, 1991
- [2] S. K. Dhali, "Two dimensional studies of streamers in gases", J. Appl. Phys., vol. 62, 4696-4707, 1987
- [3] D. L. Book & J. P. Boris, "Flux-Corrected Transport II: Generalizations of the method", J. Comput. Phys., vol. 18, 248-283, 1975
- [4] J. P. Boris & D. L. Book, "Flux-Corrected Transport III: Minimal-Error FCT Algorithms", J. Comput. Phys., vol. 20, 397-431, 1976
- [5] S. T. Zalesak, "Fully Multidimensional Flux-Corrected Transport Algorithms for Fluids", J. Comput. Phys., vol. 31, 335-362, 1979.
- [6] N. Sato, " Discharge current induced by the motion of charged particles", J. Phys. D, vol. 13, 13-16, 1980
- [7] R. Morrow, "Theory of stepped pulses in negative corona discharges", Phys. Rev. A, vol. 32, 3821-3824, 1985