

유한요소법을 이용한 침대 평판 전극에서의 SF₆가스 방전 특성 해석

A study on the discharge characteristics of SF₆ gas by Finite Element Methods in needle to plane electrode

현정수, 박필용, 최승길, 심재학, 강형부*
한양대학교 전기공학과, *한양대학교 전자전기공학부

Jung-soo Hyun, Pil-yong Park, Seung-kil Choi, Jae-hak Shim, Hyung-boo Kang
Hanyang University

Abstract

This paper describes the process of corona discharge in SF₆ gas. The discharge characteristics such as electric field distribution, electron density, ion density and current density distribution are considered as time go by, The result show that difference between electronegative gas and nonelectronegative gas.

Key words : needle to plane electrode(침대 평판 전극), finite element method(FEM, 유한요소법), SF₆(6불화황)

1. 서론

고전압 전력용 기기에서는 전극 구조 및 형상의 불균일성에 따른 전계의 집중에 의해 코로나 방전이 발생할 가능성이 높다. 이러한 코로나 방전 현상은 전극간의 전자나 이온과 같은 하전입자의 거동에 의해 좌우되므로 코로나 방전 현상을 정량적, 체계적으로 규명하기 위해서는 전리, 재결합, 부착 등 방전 현상을 좌우하는 요인들의 시간적 변화에 대한 고려가 필요하다. 따라서 본 연구에서는 대표적인 불평등 전계인 침대 평판전극을 모델로 하여, 형상을 정확히 구현할 수 있는 유한요소법을 사용하여 코로나 방전 현상을 수치 해석하였다. 유한요소법은 다양한 형상에 대해 유동적으로 대처할 수 있고, 요소의 크기를 다양하게 만들 수 있어, 요소의 개수를 적게하여 계산시간을 단축시키고, 효과적인 해석을 할 수 있게 한다. 매질은 부성기체로서 많은 전력계통기기에 주로 쓰이고 있는 SF₆ 가스를 사용하였다. SF₆ 가스 방전 특성은 부착에 의해 크게 제한되므로 본 연구에서는 기본적인 충돌전리 및 2차 전리뿐만 아니라 부착현상을 고려하여 시간의 변화에 따라 전자밀도, 이온밀도, 전류밀도 분포를 계

산하였다.

2. 지배 방정식

코로나 방전 해석을 위한 지배 방정식은 식(1)~(4)와 같이 전자, 양이온, 음이온의 밀도에 대한 연속방정식과 Poisson방정식으로 이루어진다. 연속방정식과 Poisson방정식은 시간차분법을 통하여 순차적으로 반복 계산된다.

$$\frac{d\rho_e}{dt} = -\nabla \cdot (\rho_e W_e) + \rho_e \alpha |W_e| + S + \nabla^2(D\rho_e) - \rho_e \eta |W_e| - \rho_e \rho_+ \beta \quad (1)$$

$$\frac{d\rho_+}{dt} = -\nabla \cdot (\rho_+ W_+) + \rho_e \alpha |W_e| + S - \rho_e \rho_+ \beta - \rho_- \rho_+ \beta \quad (2)$$

$$\frac{d\rho_-}{dt} = -\nabla \cdot (\rho_- W_-) + \rho_e \eta |W_e| - \rho_- \rho_+ \beta \quad (3)$$

$$\nabla^2 \Phi = -\frac{e}{\epsilon} (\rho_+ - \rho_e - \rho_-) \quad (4)$$

$$E = -\nabla \Phi \quad (5)$$

여기서 W_e, W_+, W_- 와 ρ_e, ρ_+, ρ_- 는 각각 전자, 양이온, 음이온의 드리프트속도와 밀도이며, α, η, β 는

전자의 충돌전리계수, 부착계수, 재결합계수이다. 또, D 는 전자의 확산계수, S 는 광전리에 의한 소스항, ϵ 은 유전율, Φ 는 전위, e 는 전자전하량을 나타낸다.

3. 유한요소해석

3.1. 해석 과정

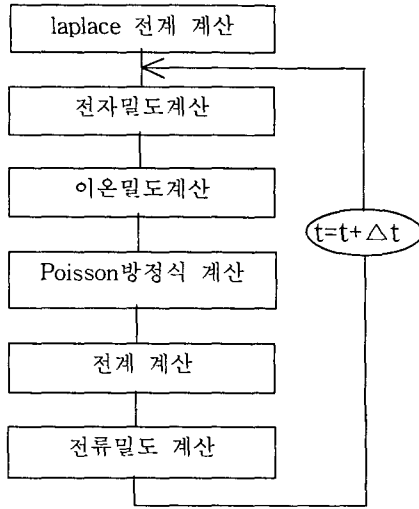


그림 1 수치 계산 순서도
Fig. 1 Flow Chart

3.2 유한요소 정식화

3.2.1 연속방정식의 수치해법

식(1)에 후퇴차분법을 사용하면 식(6)이 얻어진다.

$$\frac{\rho_e^{t+\Delta t} - \rho_e^t}{\Delta t} = -\nabla \cdot (\rho_e^{t+\Delta t} W_e) + \rho_e^{t+\Delta t} \alpha |W_e| + S + \nabla^2 (D \rho_e^{t+\Delta t}) - \rho_e^{t+\Delta t} \eta |W_e| - \rho_e^{t+\Delta t} \rho_+^t \beta \quad (6)$$

전자밀도 ρ_e 를 보간함수를 사용하여 근사화하면 식(7)과 같다.

$$\rho_e = \sum_{ie=1}^3 N_{ie} \rho_{ie} \quad (7)$$

원통 좌표계에서 θ 방향에 대한 ρ_e 의 변화는 없으므로,

$$\frac{d\rho_e}{d\theta} = 0, \quad \int d\theta = 2\pi$$

이며, r 을 식(8)과 같이 요소절점의 좌표로 표현할 수 있다[1].

$$r = \sum_{ke=1}^3 N_{ke} r_{ke} \quad (8)$$

식(6)을 Galerkin Method에 의해 정식화하면,

$$I_j = \sum_{e=1}^{element} I_{je} = 2\pi \int_s \left\{ \rho_e^{t+\Delta t} + \Delta t \nabla \cdot (\rho_e^{t+\Delta t} W_e) - \Delta t \rho_e^{t+\Delta t} \alpha |W_e| - \Delta t S - \Delta t \nabla^2 (D \rho_e^{t+\Delta t}) + \Delta t \rho_e^{t+\Delta t} \eta |W_e| + \Delta t \rho_e^{t+\Delta t} \rho_+ \beta - \rho_e^t \right\} N_j r dr dz = 0 \quad (9)$$

$$I_{je} = [2\pi(1 - \Delta t \alpha |W_e| + \Delta t \eta |W_e|) \sum_{i=1}^3 \sum_{k=1}^3 r_{ke} \int_s N_{ie} N_{je} N_{ke} dr dz + 2\pi \Delta t W_{er} \int_s N_{je} N_{ke} dr dz + 2\pi \Delta t \sum_{i=1}^3 \left\{ W_{er} \frac{dN_{ie}}{dr} + W_{ez} \frac{dN_{ie}}{dz} \right\} \sum_{k=1}^3 r_{ke} \int_s N_{je} N_{ke} dr dz - 2\pi \Delta t D \sum_{i=1}^3 \left(\frac{dN_{ie}}{dr} \frac{dN_{je}}{dr} + \frac{dN_{ie}}{dz} \frac{dN_{je}}{dz} \right) \sum_{k=1}^3 r_{ke} \int_s N_{ke} dr dz] \rho_{ie}^{t+\Delta t} - \left[2\pi \sum_{i=1}^3 \sum_{k=1}^3 r_{ke} \int_s N_{ie} N_{je} N_{ke} dr dz \right] \rho_{ie}^t - 2\pi \Delta t S \sum_{k=1}^3 r_{ke} \int_s N_{je} N_{ke} dr dz \quad (10)$$

3.2.2 포아송방정식의 수치해법

식(4)의 포아송 방정식도 3.2.1절과 같은 과정을 거쳐서 아래와 같이 표현한다.

$$\Phi_{ie} = \left[2\pi \Delta t \sum_{i=1}^3 \left(\frac{dN_{ie}}{dr} \frac{dN_{je}}{dr} + \frac{dN_{ie}}{dz} \frac{dN_{je}}{dz} \right) \times \sum_{k=1}^3 r_{ke} \int_s N_{ke} dr dz \right] \Phi_{ie} + 2\pi \Delta t \frac{e}{\epsilon} (\rho_+ - \rho_e - \rho_-) \times \sum_{k=1}^3 r_{ke} \int_s N_{je} N_{ke} dr dz \quad (11)$$

3.2.3 전류밀도 계산

전류밀도는 전극사이를 흐르는 전자, 이온밀도, 드리프트속도를 이용해서 계산한 Sato 방정식으로 구하였다.[15]

$$I = \frac{e}{V} \int_0^d [(N_+ W_{+r} - N_e W_{er} - N_- W_{-r}) E_L + (N_+ W_{+z} - N_e W_{ez} - N_- W_{-z}) E_T] dr dz \quad (12)$$

여기서 e 는 단위전하량, V 는 인가전압, d 는 갭간 거리이다.

4. 해석모델 및 결과

4.1. 해석모델

해석 모델로는 그림2와 같이 침을 음극으로 한

침대 평판 전극을 가정하였다. 침의 직경은 0.05cm 이고, 간극은 0.5cm이다. 해석영역은 전계가 밀집되는 침부근의 밀도 변화를 정확히 해석하기 위해 z 축을 따라서 요소를 밀하게 자르고 평판부근은 소 하게 하여 총절점수 3935개, 요소수 7465개로 분할 하였다.

음극에는 -3kV를 인가하였고, SF₆ gas의 밀도는 2.12x10¹⁸ /cm³ 를 가정하였다[4].

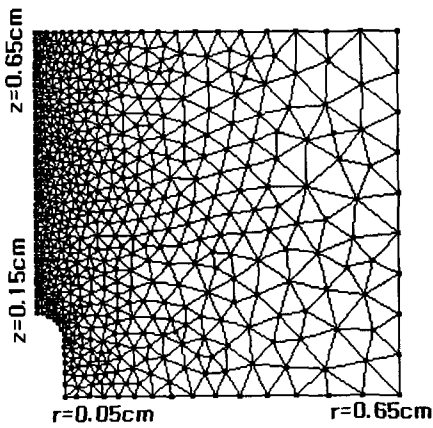


그림 2 침대 평판 모델의 요소 분할도
Fig. 2 Discretized model of rod to plane electrode

4.2 결 과

다음 그림은 1[ns]와 2[ns]에서 SF₆ gas의 전자 밀도와 정이온 밀도를 구한 것이다.

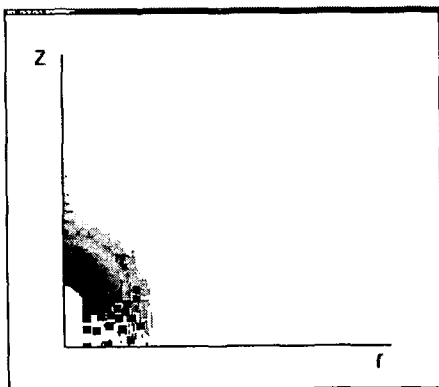


그림 3 1[ns]에서 전자밀도분포
Fig. 3 electron density distribution

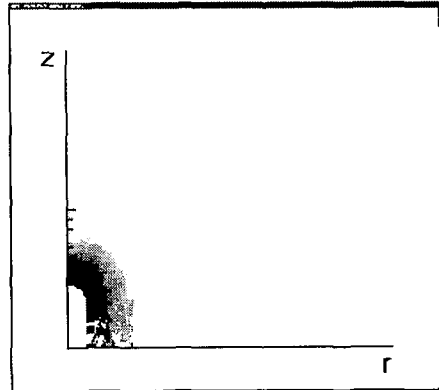


그림 4 1[ns]에서 정이온밀도분포
Fig. 4 positive ion density distribution

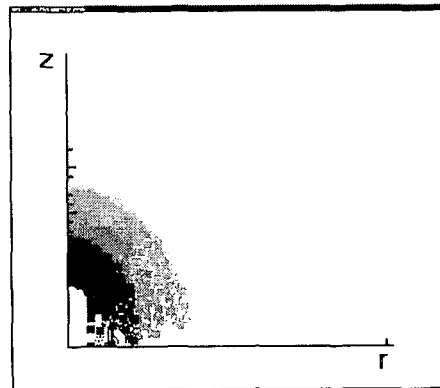


그림 5 2[ns]에서 전자밀도분포
Fig. 5 electron density distribution

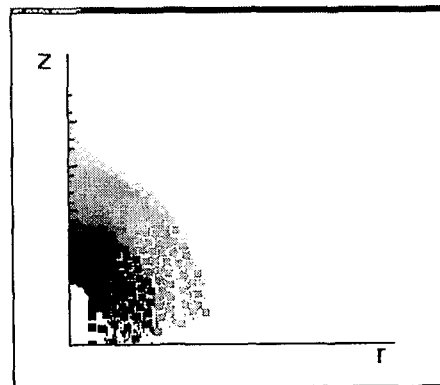


그림 6 2[ns]에서 정이온밀도분포
Fig. 6 positive ion density distribution

초기전자는 전 영역에 대해 고르게 분포시켰다. 또한, 1차 전리, 2차 전리, 부착 및 재결합은 전계에 따른 함수로 고려하였고[3], 광전리는 낮은 밀도의 플라즈마를 고르게 분포시키는 방법을 이용하였다[2].

연구 결과, 초기(1[ns])에는 전자밀도와 정이온밀도가 비슷한 분포를 보였으나, 평판 부근에서의 전계가 매우 작으므로 1차전리계수보다 부착계수가 커지게 되어 전자밀도가 많이 감소하게 된다. 본 연구와 같은 실험조건에서 1차전리계수와 부착계수가 같아지는 환산전계는 $E/N=2.88 \times 10^{-19}$ 이다(그림 7(c)). 이 보다 작은 값에서는 부착계수가 1차전리계수보다 커지게 되어 전자 소호능력이 강해진다. 또한 부착 계수가 매우 큰 가스임에도 불구하고 전자와 정이온 밀도의 증가에 비하여 부이온의 밀도는 증가량이 미비함을 알 수 있다(그림 7(a)).

전류밀도는 급격히 증가하다가 전류밀도가 약 $3[\text{mA}/\text{m}^2]$ 에 이르렀을 때 증가가 둔화되기 시작한다(그림 7(b)).

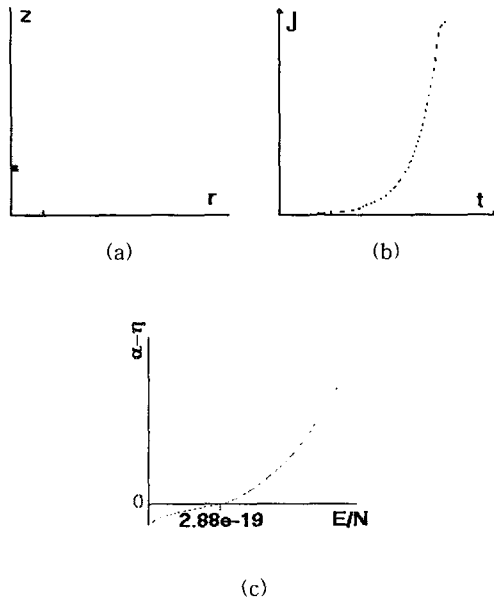


그림 7 (a) 1[ns]에서 부이온밀도분포
 (b) 전극간에 흐르는 전류밀도
 (c) 전계에 따른 $\alpha - \eta$
 Fig. 7 (a) negative ion density distribution
 (b) current density between electrodes
 (c) $\alpha - \eta$ via electric field graph

5. 결론 및 토의

SF₆ gas에서는 많은 수의 전자들이 양극에 흡수되기 전에 간극에서 소멸되었고, 공간전하가 전계를 약화시키는 작용에 의해 전류의 증가가 크게 억제되었다.

정확한 방전 해석을 위해서는 넓은 전계의 범위에 대한 수송계수를 고찰해야 할 필요가 있으며, 차후 침 반경에 따른 방전 특성 및 정극성 코로나에 대하여 해석하고자 한다.

[참고문헌]

- [1] 林達鎬. 電氣系の有限要素法, 東明社, 1986.
- [2] S. K. Dhali, "Two dimensional studies of streamers in gases," J. Appl. Phys., Vol. 62, pp. 4696-4707, 1987.
- [3] R. Morrow, "A survey of the Electron and Ion Transport Properties of SF₆," *IEEE Trans. on Plasma Sci.*, Vol. 14, No.3, pp. 234-239, 1986.
- [4] Janifen Liu, G. R. Govinda Raju, "Simulation of Corona Discharge Negative Corona in SF₆," *IEEE Trans. Dielectrics and Electrical Insulation*, Vol. 1, No.3, 1994.
- [5] Zienkiewicz, *The Finite Element Method*, William Clowes & Sons, 3rd Edition, 1977
- [6] P. Silvester, *Finite element for electrical engineers*, Cambridge Univ., 1983
- [7] B. Wendroff, *Theoretical Numerical Analysis*, Academic Press, 1966
- [8] 小實 天, 根本佐久良雄, *有限要素法入門*, オーム社, 1983.
- [9] Jianming Jin, *The Finite Element Method in Electromagnetics*, A Wiley-Interscience Publication, 1993
- [10] 田春生, *放電高電壓工學*, 東明社
- [11] M. Khalifa, *High-Voltage Engineering-Theory and Practice*, Marcel Dekker, Inc, 1990.
- [12] Matthew, N. O Sadiku, *Numerical Technique in Electromagnetics*, CRC Press, 1992.
- [13] Melvin J. Marson, Robert J. Lopez, *Numerical Analysis-A Practical Approach*, Thomson Information, 3rd Edition, 1990.
- [14] Hou-Cheng Huang and Asif S. Usmani, *Finite Element Analysis for Heat Transfer - Theory and Software*, Springer-Verlag, 1993.