

평행 평판 전극에서의 경계 조건의 변화에 따른 기체 방전의 유한 요소 해석

김남경*, 김동훈*
경북대학교*

Analysis of Gas Discharge with Variation of Boundary Condition at Parallel Plate using Finite Element Methode

Nam-Kyung Kim*, Dong-Hun Kim*
Kyungpook National University*

Abstract - 본 논문에서는 스트리머 방전에 대한 연구의 일환으로 전자사태의 발생과정 및 절연과괴현상을 2차원 유한요소법을 이용하여 해석하였다. 평행 평판 전극을 모델로 도입하고 전자밀도에 대한 경계조건을 변화시켜 각각 시뮬레이션을 통하여 신뢰성 있는 결과를 도출하였다.

1. 서 론

기체 방전은 한 쌍의 전극에 전압을 인가하였을 때 형성되는 전계 내에서 전자가 중성 기체 분자 및 전극과의 작용에 의해 도전되는 현상을 나타낸다[1]. 기체 방전은 전극 간의 길이와 압력에 따라 여러 종류로 나뉘게 되며 그 중 스트리머 방전은 높은 압력과 긴 전극 간격사이에서 발생하는 기체방전이다[2].

전자사태에서 스트리머 방전으로 전환되기 위해서는 양극 부근에서의 절연과괴가 가능할 만큼의 충분한 공간전하밀도가 분포해야 되고 광전자 방출, 이차전자 방출, 광전리와 같은 이차전자를 발생시키는 매커니즘이 필요하다. 그러나 이 모든 현상을 고려하면 많은 계산량과 메모리가 필요하므로 일반적으로 무시하거나 근사해왔다. 현재에는 이런 부분을 보완하기 위해 수학적 기법들을 고려하는 추세가 강해지고 있다. 본 논문에서는 기체방전의 기본 매커니즘인 전자사태의 발생과정 및 절연과괴현상에 대해 수학적 기법을 고려하지 않고 유한요소법만을 이용하여 해석하였고 신뢰성을 가진 결과를 도출하였다.

본 논문에서는 수치해석 시간을 고려하여 짧은 간격의 2차원 축대칭 모델을 도입하고 전자밀도에 대한 경계조건을 고려한 경우와 고려하지 않은 경우로 나누어 각각에 대한 기체 방전 현상을 유한요소법을 이용하여 해석하였다.

2. 본 론

2.1 지배방정식

스트리머의 형성과 전파 특성을 해석하기 위하여 지배방정식은 전자, 양이온, 음이온을 고려한 3개의 연속 방정식과 전계 특성을 해석하기 위한 포아송 방정식으로 다음과 같이 구성된다.

$$\frac{\partial N_e}{\partial t} = S + N_e \alpha |W_e| - N_e \eta |W_e| - N_e N_p \beta - \nabla \cdot (N_e W_e) + \nabla \cdot (D \nabla N_e) \quad (1)$$

$$\frac{\partial N_p}{\partial t} = S + N_e \alpha |W_e| - N_e N_p \beta - N_n N_p \beta - \nabla \cdot (N_p W_p) \quad (2)$$

$$\frac{\partial N_n}{\partial t} = N_e \eta |W_e| - N_n N_p \beta - \nabla \cdot (N_n W_n) \quad (3)$$

$$\nabla \cdot (\epsilon_r \nabla V) + \frac{e}{\epsilon_0} (N_p - N_e - N_n) = 0 \quad (4)$$

여기서 N_e, N_p, N_n 은 각각 전자, 양이온, 음이온 밀도이고 W_e, W_p, W_n 은 각각의 드리프트 속도이다. α, β, η, D 는 이온화, 재결합, 부착, 전자의 확산 계수를 의미한다. 그리고 S 는 광전리에 의한 소스항을 나타낸다. 본 논문에서는 광전리 효과를 고려하지 않았으므로 소스항은 무시하였다.

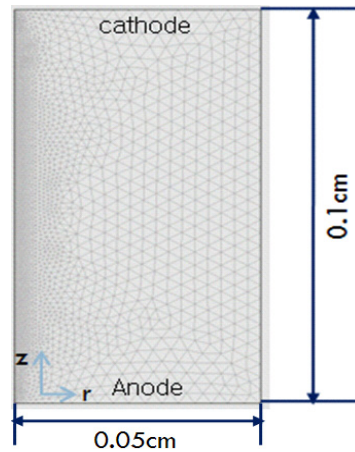
식 (5)는 스트리머 방전의 초기조건으로 가우시안 분포를 갖는 전자-양이온 한 쌍을 음극 표면에 위치시켰다[3].

$$N_e|_{t=0} = N_p|_{t=0} = N_0 e^{-\left[-\left(\frac{r}{0.006}\right)^2 - \left(\frac{z-0.1}{0.006}\right)^2 \right]} \quad (5)$$

여기서 N_0 는 $1 [cm^{-3}]$ 로 두었다.

2.2 기체 방전 모델

기체 방전 시뮬레이션에 사용된 전극구조는 평행 평판 전극구조로 전극간 거리는 0.1 cm, 전극의 길이는 0.05 cm인 원판형으로 설정하였다. 공기의 조건으로 대기압은 760 Torr, 온도는 300 K, 질소 가스 밀도는 $2.45 \times 10^9 [cm^{-3}]$ 이며 인가한 전압은 5 kV이다. 그림 1은 평행 평판 전극의 요소분할도이며 축대칭구조로 해석하였다. 분할된 절점 수는 4,948 개이며 총 요소 수는 40,684개이다.



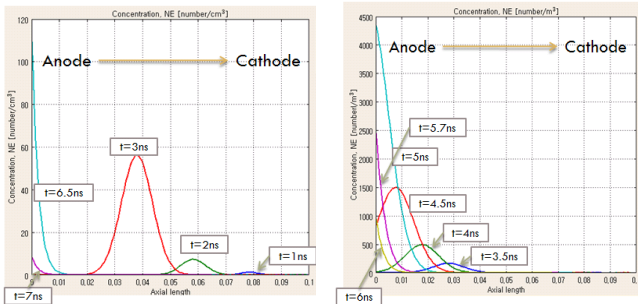
<그림 1> 평행 평판전극의 요소분할도

해석에 사용된 모델에서는 광전자방출 효과를 고려하기 전단계로 이를 대체할 수 있는 전자 밀도에 대한 음극 경계 조건을 고려한 경우와 고려하지 않은 경우에 대하여 발생하는 전자사태의 발생과정 및 절연과괴현상을 다중물리해석도구인 COMSOL(Ver. 3.5a)을 이용하여 해석하였다[4].

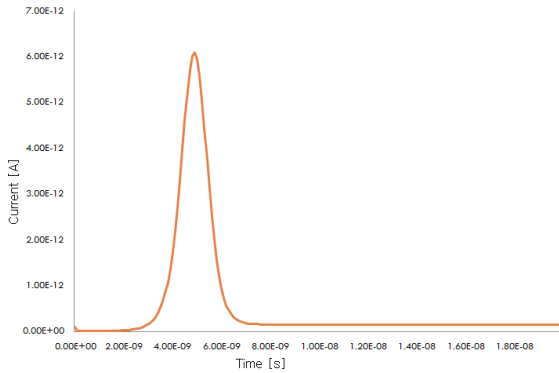
2.3 기체 방전 해석

2.3.1 전자밀도에 대한 음극의 경계조건이 0인 경우

2차원 유한요소 해석을 통해 전자밀도에 대한 음극의 경계조건을 0으로 주고 초기 중성플라즈마를 음극에 위치시킨 후 해석한 결과 Z축 상에서의 시간에 따른 전자밀도 분포와 전류분포를 그림 2와 3에 나타내었다. 3 ns이전까지 전자밀도는 이온화 과정으로부터 양극으로 서서히 증가하며 그 이후 전자사태에 의해 전자밀도가 4.4×10^9 까지 급격히 증가한다. 그러나 5ns이후부터 급격히 감소하다가 모두 양극에서 빠져나가게 된다. 이는 초기에 인가해 준 중성 플라즈마 이외에 전자사태를 일으키는 요소가 존재 하지 않기 때문이다. 그러므로 본 논문에서 제시한 유한요소법에 기초한 기체 방전 해석 방법은 오류가 없음을 검증하였다.



(a) $t=1\text{ns}, 2\text{ns}, 3\text{ns}, 6.5\text{ns}, 7\text{ns}$ (b) $t=3.5\text{ns}, 4\text{ns}, 4.5\text{ns}, 5\text{ns}, 5.7\text{ns}$
 <그림 2> Z축 상에서의 시간에 따른 전자밀도 분포
 -음극의 경계조건을 0으로 둔 경우

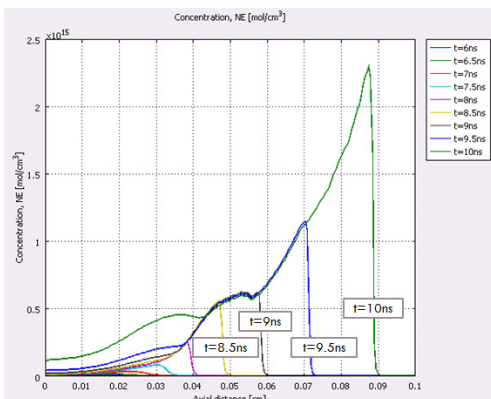


<그림 3> 음극의 경계조건을 0으로 둔 경우의 전류 분포

2.3.2 전자밀도에 대한 음극의 경계조건이 $10^9 [\text{cm}^{-3}]$ 인 경우

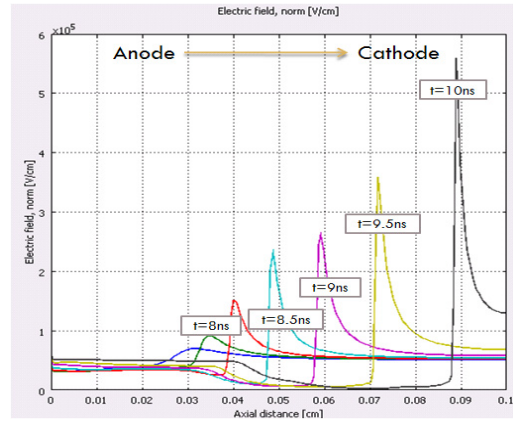
제시한 해석 방법으로 광전자방출 효과를 고려하기에 앞서 광전자방출 효과를 대체할 만큼의 충분히 많은 전자를 음극 축 상의 미소 영역에 경계조건으로 주었다. 이 때 인가해 준 전자밀도의 양은 기존의 광전자방출 효과를 고려한 논문의 자료를 토대로 한 것이다[5,6]. 그림 4~6은 음극판의 미소영역의 경계조건으로 전자밀도를 $10^9 [\text{cm}^{-3}]$ 으로 인가하고 해석한 결과 Z축 상에서의 시간에 따른 전자 밀도, 전계 세기와 전류 분포이다.

전자밀도에 대한 음극 경계조건을 0으로 둔 경우와는 달리 전자사태에 의해 생성되는 전자가 양극에 도달했을 때의 전자밀도는 $8.5 \times 10^{12} [\text{cm}^{-3}]$ 정도까지 증가하였다. 이는 양극으로 빠져나가는 전자보다 음극판에서 지속적으로 공급되는 전자에 의해 생성되는 전자가 많기 때문이다. 생성된 높은 밀도의 공간 전하들이 양극 주변에 분포함으로써 강한 전계가 발생되고 이로 인해 절연 파괴현상이 발생하여 음극 방향으로의 전자 생성량이 증가하고 있음을 그림 4를 통해 알 수 있다.

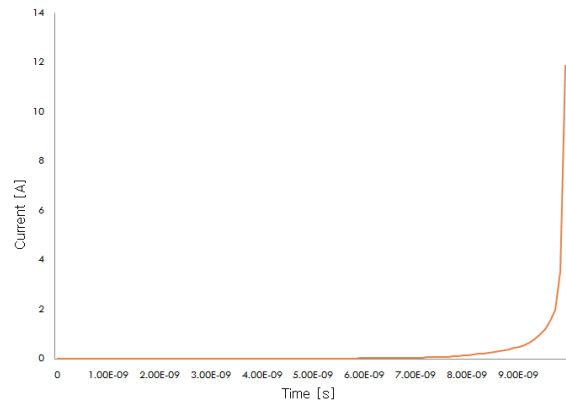


<그림 4> Z축 상에서의 시간에 따른 전자밀도 분포
 - 음극 표면에 $10^9 [\text{cm}^{-3}]$ 을 인가한 경우

전계 분포는 6ns 이전까지는 전자밀도에 대한 음극경계조건을 인가하지 않았을 경우와 비슷한 진행을 보이나 그 이후에는 전자사태에 의해 생성되는 공간전하들에 의한 전계가 강해지면서 전 방향으로의 전계가 발생하게 되며 점차 음극 쪽의 전계세기가 증가함을 그림 5에 나타내었다. 그림 6으로부터 시간에 따른 공간전하 밀도가 급격히 증가함에 따라 전류 또한 증가함을 알 수 있다.



<그림 5> Z축 상에서의 시간에 따른 전계세기 분포
 - 음극 표면에 $10^9 [\text{cm}^{-3}]$ 을 인가한 경우



<그림 6> 음극 표면에 $10^9 [\text{cm}^{-3}]$ 을 인가한 경우의 전류 분포

3. 결 론

본 논문은 연속방정식과 포아손방정식을 결합하여 2차원 평행 평판 전극에 대하여 기체방전현상을 유한요소법을 이용하여 해석하였다. 스트리머 방전에 대한 연구의 일환으로 전자밀도에 대한 음극 경계조건을 0으로 둔 경우와 $10^9 [\text{cm}^{-3}]$ 을 인가한 경우로 나눠 시뮬레이션을 시행하였다. 각각의 경우에 대해 초기에는 전자밀도 및 전계 분포가 비슷한 양상을 보인다. $10^9 [\text{cm}^{-3}]$ 을 인가한 경우 6ns 이후에 절연 파괴 현상이 발생하여 전 방향으로의 전계가 발생하게 되며 전자가 점점 음극방향으로 생성됨을 시뮬레이션을 통하여 신뢰성 있는 결과를 도출하였다. 이와 같은 결과로부터 제시한 해석 방법이 이차전자생성 매커니즘을 고려한다면 실제 대기압상태에서의 기체방전현상을 정확히 규명할 수 있을 것으로 기대된다.

[참 고 문 헌]

- [1] 백용현 외, "기체방전의 파괴전압에 미치는 음극 표면 상태의 영향", 대한전기학회 1986년도 하계학술대회 논문집, pp.445-448, 1986
- [2] 김종일, 이명익, "고전압 방전 플라즈마:이론 및 응용", 인터비전, 2004
- [3] A A Kullikovsky, "Positive streamer between parallel plate electrodes in atmospheric pressure air", J. Phys. D: Appl. Phys. on volume 30, pp.441-450, 1997
- [4] COMSOL Multiphysics' Manual, COMSOL, Inc. 2009
- [5] G E Georghiou, R Morrow, A C Metaxas, "Two-dimensional simulation of streamers using the FE-FCT algorithm", J. Phys. D: Appl. Phys. on volume 33, pp.L27-L32, 2000
- [6] G E Georghiou, R Morrow, A C Metaxas, "The effect of photoemission on the streamer development and propagation in short uniform gaps", J. Phys. D: Appl. Phys. on volume 34, pp.200-208, 2001