

유체법을 이용한 유사스파크 방전의 기동 특성 해석

Ignition Characteristics Analysis of Pseudospark Discharge using Fluid Method

심재학 한양대학교 공대 전기공학과
주흥진 한양대학교 공대 전기공학과
고광철 한양대학교 공대 전기공학과
강형부 한양대학교 공대 전기공학과

Jae-Hak Shim Dept. of Electrical Eng. Hanyang University
Heung-Jin Ju Dept. of Electrical Eng. Hanyang University
Kwang-Chul Ko Dept. of Electrical Eng. Hanyang University
Hyung-Boo Kang Dept. of Electrical Eng. Hanyang University

Abstract

Theoretical predictions are given of the time dependence of charged particle densities and electric field in a pseudospark discharge. Our model is based on a numerical solution of the continuity equation for electrons and positive ions and coupled with Poisson's equation for the electric field. From numerical results, we can identify physical mechanisms that lead to the rapid rise in current in the onset of a pseudospark discharge.

1. 서론

최근 많은 기술분야에서 시간적·공간적으로 에너지를 집중시키는 요구가 점차 증대되어 이 분야에서 펄스 대전류가 사용되고 있다. 이들 대전류를 상용 전력계통에서 직접 얻는 것은 곤란하며, 일반적으로 작은 전력으로 에너지 축적 시스템에 저장하여 이를 짧은 시간에 방출함으로써 펄스 대전류를 얻을 수 있다. 이를 위해 고전압·대전류를 제어할 수 있는 고속의 대전류 스위치가 중요한 역할을 하며, 펄스파워 기술의 개발은 전적으로 스위치 기술에 의존한다고 해도 과언이 아니다. 이러한 대전류 스위치로 현재 많이 이용되는 것에는 고압 방전 갭(high pressure discharge gap), 이그니트론(ignitron), 사이러트론(thyratron) 등이 있으나, 전극의 손상이 심해 반복율이 좋지 않거나, 전류밀도에 제약을 받는 등 효율적이지 않다.

Christiansen 등은 1979년 중성화된 플라즈마 상태에서 공간 전하에 의한 입자 가속 여부를 조사하던 중, 중공음극(hollow cathode)에서 플라즈마 트리거에 의한 방전 전류밀도를 제어하는 방법을 연구하면서 유사스파크 방전을 발견 [1]했는데, 유사스파크 방전은 아크에 도달하기 전에 확산되어 전극의 손상이 적으므로 펄스파워의 대전류 스위치 개발에 적당하다. 일반적인 스위치와 비교해서 유사스파크 스위치는 전압을 인가한 후 전류상승이 매우 빠르고, 대전력에서 높은 반복율을 가지며, 전극의 손상이 거의 없으므로 수명이 길고, 또한 대전류 단계의 지속이 microsecond 또는 그 이상 길게 나타나는 등 새로운 종류의 대전력 스위치로 관심을 끌고 있다 [2]. 또한 대전류 방전으로의 전이에서 강한 전

자빔을 발생시킬 수 있으며, 이온 빔과 x-ray를 발생시킬 수 있어서 재료의 미세 가공과 하전 입자빔원으로 흥미를 끈다.

본 연구에서는 2차원, 원통형의 중공음극 구조를 모델링하여, 유사스파크 방전을 발생시키는 mechanism을 정성적으로 모의실험하였다.

2. 본론

1) 유사스파크 방전의 특성

유사스파크 스위치는 외부적으로 음극을 가열시키지 않고, 저압력(0.1~1 torr) 글로(glow) 모드에서 동작하는 기체 방전 장치로, Paschen 곡선의 최소값 좌측 영역에서 동작한다. 유사스파크 방전을 일으키는 가장 간단한 구조는 평행 평판 전극의 중심에 구멍을 뚫, 중공(hollow) 음극의 형태를 취한다.

유사스파크 방전은 저기압 중공음극(hollow cathode) 방전으로서 다음과 같은 세가지 측면에서 다른 방전과 구별된다 [2].

(1) 전압을 인가한 후 짧은 시간동안 방전 전류가 급격히 상승한다. 보통 단일 갭 구조에서 10[kA]의 전류와 20[kV]의 전압을 인가시, 전류 상승률은 5×10^{11} [A/sec]이고, 100[kHz]의 높은 반복률을 나타낸다 [3].

(2) 대전류 방전으로 전이할 때 강한 전자빔의 발생을 수반한다. 전류가 상승하는 수십 ns 동안 전자빔은 전 방전전류의 10~20%까지 도달한다.

(3) 대전류밀도에서 아크와 같은 필라멘트가 보이는 것과는 대조적으로 유사스파크 방전은 입자의 확산으로 나타나며, 아크에 의한 전극 표면의 손상이 거의 없다.

2) 물리적 모델과 수치적 방법

본 연구에서는 2차원 원통좌표계의 시간에 의존하는 유사스파크 모델을 고려하였다. 이상적인 저기압 방전 모델은 전계에 대한 Poisson 방정식, 이와 결합된 전자·이온의 Boltzmann 방정식으로 이루어져 있으나, 이를 모델링하기는 쉽지 않다[11]. 본 연구의 모델은 전자 및 이온 수송에 대한 유체적 기술과 이에 결합된 전계에 대한 Poisson 방정식에 기초를 두며[10], 하전입자 kinetics와 전계 사이에는 국부적으로 평형이라고 가정하였다. 유체 방정식은 하전입자 밀도의 시간·공간적인 의존성을 결정하고, 평형이라는 가정을 통해 Boltzmann 방정식 대신 연속방정식 및 운동량 수송 방정식으로 전자·이온에 대한 kinetics를 설명할 수 있다.

유사스파크 방전을 기술하는 기본적인 방정식은 다음과 같이 표현된다[4][5].

전자밀도를 n_e , 양이온 밀도를 n_p , 전위를 V 로 하였을 때 전자·이온에 대한 연속 방정식은 (1)식으로 나타나고,

$$\frac{\partial n_{\alpha(p)}}{\partial t} + \nabla \cdot n_{\alpha(p)} v_{\alpha(p)} = S_i \quad (1)$$

Poisson 방정식은 (2)식으로 표현된다.

$$\nabla^2 V = - \frac{|e|}{\epsilon_0} (n_p - n_e) \quad (2)$$

여기서 $v_{\alpha(p)}$ 는 전자(양이온)의 평균속도, e 는 전자의 전하량, ϵ_0 는 자유공간의 유전율이다. 또, S_i 는 연속방정식의 전리항으로 단위체적당, 단위시간당 생성된 전자와 정이온의 수를 나타낸다. 여기서는 단지 전자에 의한 충돌 전리만을 고려하여 S_i 를 다음으로 정의하였다.

$$S_i = n_e \nu_i \quad (3)$$

여기서 $\nu_i \approx \alpha |W_e|$ 는 전리 주파수이고, α 는 전리계수이다.

전리계수 α 는 다음과 같이 주어지며[6],

$$\alpha = A \exp[-B(t/E)^\gamma] \quad (4)$$

He에서 A 는 4.4, B 는 14.0, γ 는 1/2로 주어진다.

연속방정식에 나타난 하전입자의 평균속도는 Boltzmann 방정식으로부터 얻어진다. 전자와 이온의 관성(열에너지에 관련된 드리프트 에너지)을 무시하면, 이 방정식은 간단한 형태로 되어 드리프트항과 확산항의 합인 하전입자 flux를 나타내게 된다.

$$\begin{aligned} \phi_{\alpha(p)} &= n_{\alpha(p)} v_{\alpha(p)} \\ &= n_{\alpha(p)} \mu_{\alpha(p)} E - \nabla (n_{\alpha(p)} D_{\alpha(p)}) \end{aligned} \quad (5)$$

여기서 $\mu_{\alpha(p)}$ 는 전자(이온)의 이동도, $D_{\alpha(p)}$ 는 전자(이온)의 자유확산계수이다.

위의 모든 변수들은 국소 좌표 (r, z) 에서 하전입자 kinetics는 국소전계에 평형이라고 하였으므로 수송계수들(전리 계수, 드리프트 속도, 확산계수)은 국소전계 $E(r, z)$ 에만 의존한다.

본 연구에서는 implicit 적분 기술을 사용하여 전계에 대한 Poisson 방정식과 전자·이온에 대한 연속방정식을 풀었다.

수송 방정식과 Poisson 방정식이 유한 차분법으로 표현되었는데, 전자·이온의 연속방정식은 exponentially fitted discretization 방법[7][8][9]에 기초를 둔 implicit법으로 계산하였고, Poisson 방정식은 successive overrelaxation법(SOR)을 이용하여 각 시간간격마다 계산하였다. Exponentially fitted discretization 방법은 Scharfetter-Gummel에 의해 제시되었는데, 2차원 반도체 장치에서 전자와 홀 수송에 대한 지배방정식을 모델링할 때 사용되었다. 본 연구에서는 이 방법을 도입했는데, 이는 시스(sheath)와 플라즈마 영역에서의 계산에 매우 효율적이라고 생각된다.

3. Simulation 결과 및 고찰

본 연구에서 사용한 유사스파크 방전의 모델은 음극과 양극의 지름은 1[cm], 음극 홀 반경은 0.3[cm], 음극과 양극사이의 gap길이는 1[cm], 음극판의 두께는 0.3[cm], 중공음극의 길이는 0.5[cm]로 하였고, 양극에 인가한 전압은 4000[V], 음극 전위는 0[V]로 하였다. 이 형상을 그림 1에 나타낸다. 방전 개시 단계에만 관심이 있으므로 외부회로의 영향은 고려하지 않았고, 1[torr]의 압력에서 He 기체를 사용했다. 음극에서 2차 전자 방출은 이온 충돌만을 고려하여 모든 음극면에서 0.3으로 계산하였으며, trigger효과를 simulation하기 위해 중공음극 내부에만 10^9cm^{-3} 의 균일한 초기 전자·이온 밀도를 주었다.

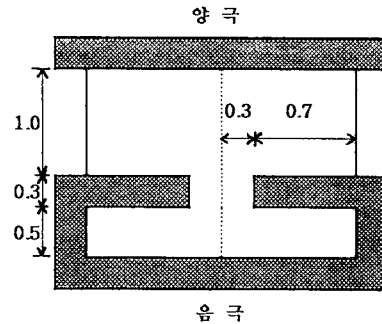


그림 1 유사스파크 스위치의 구조

Fig. 1 Pseudospark switch geometry
계산시 필요한 데이터로는 전자·이온의 이동도, 확산계수와 전리항이 있으며, He에 대해 E/P의 함수로 취하였다[6]. 본 연구에서는 전자가 중성 기체와의 충돌에서 전리가 발생할 때

전자와 이온이 하나씩 발생한다고 가정하였다.

그림 2는 중공음극 내부에 초기 전자·이온을 부여하기 직전에서의 등전위면을 나타낸 것으로, 유사스파크 방전 장치의 형상에 의한 것이다.

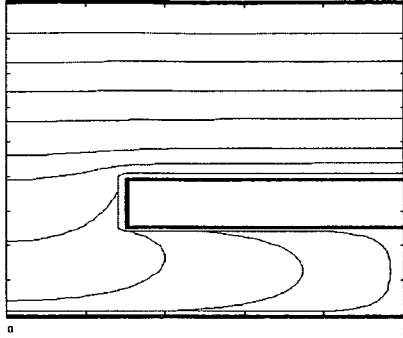


그림 2 진공의 등전위분포

Fig. 2 Equipotential distribution in vacuum

그림 3과 그림 4는 시간이 경과함에 따른 초기 하전입자의 동향 및 그 시각에서의 등전위 분포를 나타낸 것이다. 초기 전자는 음극 hole을 통해 양극으로 유입되는데, 이 시간에서는 중공 음극 내부에서의 전계가 아주 약하기 때문에 drift flux 보다는 diffusion flux에 의해 전자가 양극으로 이동한다. 반면 이온은 전자에 비해 무거우므로 이동이 거의 없다. 또한 전자와 He 사이의 충돌도 거의 발생하지 않는다. 또한 전자는 음극 hole을 지나면서 전계에 의해 가속을 받게 되므로 이 때 등전위면은 hole을 통해 중공음극으로 침투하지 못하고, 음의 공간전하(negative space charge)에 의해 오히려 양극쪽으로 밀려난다. 이 때 이온은 거의 이동하지 못하고 전자에 의한 1차 전리에 의해 계속 축적된다. 계속 시간이 경과하면 전자의 1차 전리에 의해 생성된 이온이 계속 축적되어 점차 전위가 증가하게 되고, 다시 등전위면이 중공음극으로 침투하기 시작한다. 그러나 아직까지 양의 공간전하(positive space charge)가 형성되지 못하여 등전위면은 거의 진공상태에서의 전위와 일치한다.

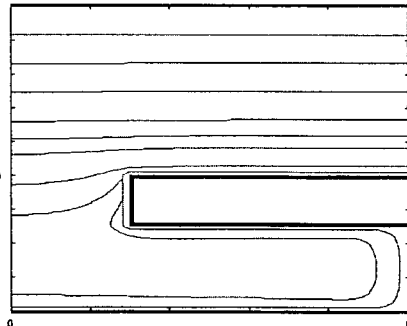


그림 3(a) t=5[ns]에서의 등전위분포

Fig. 3(a) Equipotential distribution at t=5[ns]

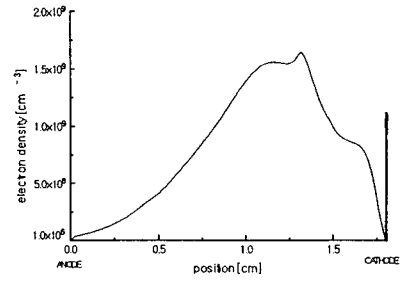


그림 3(b) t=5[ns]에서 대칭축상의 전자밀도
Fig. 3(b) Electron density on symmetric axis at t=5[ns]

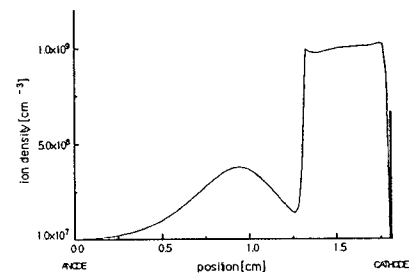


그림 3(c) t=5[ns]에서 대칭축상의 이온밀도
Fig. 3(c) Ion density on symmetric axis at t=5[ns]

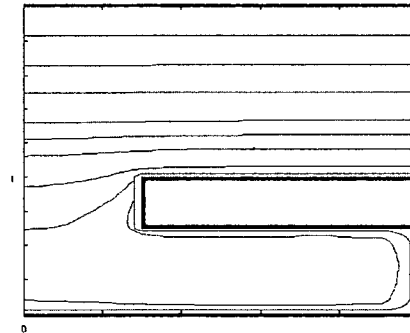


그림 4(a) t=100[ns]에서의 등전위분포
Fig. 4(a) Equipotential distribution at t=100[ns]

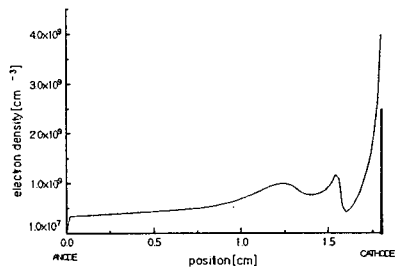


그림 4(b) t=100[ns]에서 대칭축상의 전자밀도
Fig. 4(b) Electron density on symmetric axis at t=100[ns]

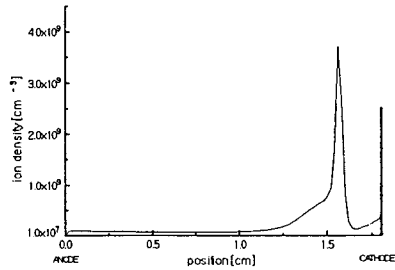


그림 4(c) $t=100[\text{ns}]$ 에서 대칭축상의 이온밀도
 Fig. 4(c) Ion density on symmetric axis at
 $t=100[\text{ns}]$

4. 결론

수치해석적 방법을 통하여 유사스파크 방전의 mechanism을 밝히고자 하는 본 연구에서는 수송계수(드리프트 속도, 확산계수)를 국부 전계의 함수로 나타내어 전자의 충돌에 의한 전리만을 고려한 해석을 행하였다. 전자-중성기체의 충돌 전리만을 고려하여도 상당한 전자증배가 이루어지고 있으나, 전자증배는 광에 의한 전리, 광전자방출, 열이온 방출 등의 mechanism에 의해 훨씬 큰 값을 갖게 될 것이므로 이들을 계산에 포함시킬 필요가 있다.

또한 이온에 대한 연속방정식 및 운동량 수송 방정식은 국부적 평형이라는 가정에 잘 부합하지 않지만, 이와는 대조적으로 고에너지 영역(중공음극에서의 이온시스 영역)의 전자가 전계에 의해 얻는 에너지는 충돌에 의해 잃는 에너지와 국부적으로 균형을 이루지 못한다. 따라서 유체법에 의한 방전 거동을 해석으로는 이러한 부분을 해석하는 것이 불가능하다고 생각되므로, 차후에 Monte Carlo 기술을 사용한 복합 유체-입자 모델(hybrid fluid-particle model)을 통해 이러한 문제점을 해결할 필요가 있을 것이다.

참고문헌

- [1] J. Christiansen and Ch. Schultheiss, *Z. Physik A* 290, pp35-41, 1979
- [2] J. P. Boeuf and L. C. Pitchford, *IEEE Trans. Plasma Sci.*, Vol. 19(2), pp. 286, 1991
- [3] G. Mechttersheimer, R. Kohler, T. Lasser and R. Meyer, *J. Phys. E:Sci. Instrum.*, Vol. 19, pp. 466, 1986
- [4] J. P. Boeuf, *Phys. Rev., A* 36(6), pp. 2782, 1987
- [5] J. P. Boeuf, *J. Appl. Phys.*, Vol. 63, No. 5, pp. 1342, 1988
- [6] A.L. Ward, *J. Appl. Phys.*, Vol. 33(9), pp. 2789, 1962
- [7] B. S. Polsky and J. S. Rimshans, *Solid -State Electronics*, Vol. 24(12), pp. 1081, 1981
- [8] D. L. Scharfetter and H. K. Gummel, *IEEE Trans. Electron Devices*, ED-16, pp. 64, 1969
- [9] A. A. Kulikovskiy, *J. Comput. Phys.*, Vol. 119, pp. 149, 1995
- [10] J.P. Boeuf, in *The Physics and Applications of Pseudosparks*, New York: Plenum, 1990
- [11] J. H. Ingold, *Phys. Rev. A* 40, pp. 3855, 1989