

Pseudo-Spark 방전 특성의 해석(1)

°심재학*, 장용부*, 고광철**, 강형부*

*한양대학교 공과대학 전기공학과

**경원대학교 공과대학 전기공학과

An Analysis of the Characteristics of Pseudo-Spark Discharge

°Jae-Hak Shim*, Yong-Moo Chang*, Kwang-Cheol Ko**, Hyung-Boo Kang*

*Department of Electrical Engineering, Han-Yang University

**Department of Electrical Engineering, Kyung-Won University

Abstract

The Monte-Carlo simulation was used to define the physical mechanisms of the initiation phase of pseudo-spark discharge. The pseudo-spark discharge employing the hollow cathode geometry is accompanied by very fast current rising and intense charged particle beams. In this model, time-dependent continuity equation for the electrons and ions were solved consistently with Poisson's equation for the electric field in a two-dimensional, symmetrically cylindrical geometry. From the simulation, a sequence of physical mechanisms that cause the rapid current rise associated with the onset of pseudo-spark discharge mode were identified.

1. 서론

통상 10~100[kV] 정도의 전압에서 동작하는 pseudo-spark 방전은 전류 상승이 매우 빠르고(10¹¹ A/s order), 하전 입자의 확산으로 인하여 방전이 발생하기 때문에 전극의 손상이 극히 적으며 또한, 고반복율(repetition rate:100[kHz])[1]을 얻을 수 있고, 대전류 단계의 지속이 microsecond 또는 그 이상으로 길게 나타나기 때문에 새로운 스위치로 관심을 끌고 있다[2].

또한 pseudo-spark 방전에서는 대전류 방전으로의 전이에 수반하여 강한 전자 빔의 발생을 유발할 수 있으며 또한 이온 빔과 x-ray를 발생시킬 수도 있다.

본 연구에서는 pseudo-spark 방전을 일으키는 물리적 mechanism을 규명하기 위하여 원통형 hollow 음극 구조를 갖는 pseudo-spark 스위치의 2차원적 모델을 생각하여 방전의 기동 단계를 simulation한다. 이 모델은 이온과 전자의 연속성과 운동량 전달

에 대한 2차원 방정식, 그리고 전계에 관한 Poisson 방정식을 포함하는 것이다.

이온과 전자에 대한 연속방정식의 source 항은 음극 방출 전자에 대한 Monte-Carlo simulation을 통하여 얻어진다. 고에너지 전자 각각이 전계를 따라 가속되면서 전리를 일으키게 되며, 대전류 단계로의 원인이 되는 hollow 음극의 진자효과(pendulum effect)[3]를 확인할 수 있다.

아래의 본문에서는 simulation 모델링에 관련된 사항을 기술하였으며, 다음에 계산 결과 및 결론을 기술하였다.

2. 본론

본 연구에서 생각한 pseudo-spark 모델은 원통좌표계의 2차원 시간 의존 모델이다. 전자밀도를 n_e , 양이온 밀도를 n_p , 전위를 V 로 하였을 때 다음 방정식이 성립한다. 전자 및 이온에 대한 연속 방정식은 (1)식으로 나타나고

$$-\frac{\partial n_{e(p)}}{\partial t} + \nabla \cdot n_{e(p)} v_{e(p)} = S \quad (1)$$

Poisson 방정식은 (2)식으로 쓸 수 있다.

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

여기서 $v_{e(p)}$ 는 전자(양이온)의 평균 속도, S는 전리항, e 는 전자의 전하량, ϵ_0 는 자유 공간의 유전율이다. 공간 전하와 Poisson 방정식으로부터 전계를 계산할 수 있으며, 이 전계에 의하여 전자 flux에 의한 전류가 흐르게 된다. 음극으로부터의 전자 전류와 방전 gap에서의 전계 분포를 계산하고, Monte-Carlo 법을 적용하여 전리항 즉, 유체 방정식의 입력을 결정한다.

유체적 측면에서 본 bulk 전자는 공간전하전계와 방전 전도도에 큰 영향을 미치기 때문에 중요하게 다루어야 할 한 측면이고, 입자적 측면에서 본 고에

너지 전자는 기체 분자나 원자를 전리시켜 전자와 이온의 source를 제공하는 것이다.

Bulk를 형성하는 저에너지 전자는 일반적으로 그 평균 특성(밀도, 평균 속도, 평균 에너지)에 의해 그 특성을 규정할 수 있다. Boltzmann 방정식을 이용하여 그 속도 분포를 가정하면 전리항은 밀도와 평균에너지에 의존하게 된다. 또한 방전에서 주어진 위치와 시간(r,t)에서의 전리 주파수와 이송 효율은 단지 국부전계 E(r,t)/p값에만 의존한다는 국부 전계 근사를 가정한다.

인속 방정식에 나타난 하전 입자 평균 속도는 Boltzmann 방정식으로부터 얻어진다. 전자와 이온의 관성을 무시하면 이 방정식은 간단한 형태로 되어 drift항과 확산항의 합인 하전 입자 flux를 나타내게 된다.

$$\Phi_{e(p)} = n_{e(p)} v_{e(p)} = n_{e(p)} \mu_{e(p)} E - \nabla \cdot (n_{e(p)} D_{e(p)}) \quad (3)$$

여기서 $\mu_{e(p)}$ 는 전자(이온)의 이동도, $D_{e(p)}$ 는 전자(이온)의 자유확산 효율이다.

운동량 전달 방정식과 Poisson 방정식은 유한 요소법으로 해를 구하였으며 운동량 전달 방정식에서 나타나는 flux는 세 기본변수(전자밀도, 이온밀도, 전위)에 대하여 선형화하였다. 적분 시간 간격은 단지 flux가 선형이라는 가정이 타당하게 되는 정도로 제한하여 계산 시간을 줄였다.

고에너지 전자는 그 각각에 대하여 불평등 전달 특성을 고려하였다. 전리항은 전자 에너지 분포에서 고에너지 부분에 대단히 민감한 함수이기 때문에, 또 이 전리항에 대해 전자와 이온 밀도는 지수적으로 증가하기 때문에 이 분포의 고에너지부를 정확히 기술하는 것은 대단히 중요하다[4].

본 모델에서 전리항은 음극으로부터 방출된 전자 중 주어진 지점 (r,t)에서 운동 에너지와 위치 에너지의 합이 전리 threshold보다 큰 고에너지를 갖는 전자가 전리를 일으키며 양극에 흡수되기 까지 그 전자의 궤적과 그 자전자(progeny)를 따라 Monte-Carlo simulation을 행하여 얻어진다. 여기서 계산 시간을 가능한 최소로 하기 위하여 전자 에너지 분포의 고에너지 부분만을 simulation하였고 그보다 낮은 부분의 에너지를 갖는 전자에 대해서는 유체적 계산에 포함하였다.

Simulate될 전자는 음극으로부터 방출된 전자와 그 자전자로 이 전자들은 유체 모델에서 flux의 공간분포에 따라 무작위로 선택된 위치에서 음극으로부터 방출되었다고 가정한다.

3. 계산 결과

(1)-(2)식에 관련된 system의 해에 사용한 경계조건은 음극의 전위를 영으로, 양극의 전위를 5000 [V]로 하였다. 주로 방전의 초기화에 관심이 있기 때문에 외부 회로의 영향은 고려하지 않았고 전위는 음극에서 양극까지 벽을 따라 선형적으로 증가한다고 가정한다. 하전 입자 밀도는 전극과 벽에서 영으로 놓는다. 음극을 떠나는 전자속은 음극으로의 이온 flux에 비례한다. 2차 전자 방출 효율은 일정하고 음극으로의 이온 충돌에 의한다고 가정하였으며 양극에 면한 음극 측에서 영으로 놓았다.

이 모델의 계산에 필요한 data는 운동량 방정식 (3)에서의 전자와 이온의 이동도와 자유확산율[1], (1)식에서의 전리항이다. 헬륨에 대한 이동도는 E/p의 함수로 다른 문헌[5]에서 주어지며, 전자-헬륨 사이의 충돌 단면적[6]을 이용하여 전리항을 결정하였다.

다음의 그림 1.은 음극과 양극의 지름을 2cm, 음극 hole의 지름은 0.6cm, hollow 음극 길이는 0.65cm, 주 음극-양극 gap 길이를 0.7cm, 전극 판의 두께를 0.15cm로 한 전극 구조와 초기 전압을 인가하였을 때 즉, Poisson 방정식의 하전입자 항을 영으로 하였을 때의 등전위면을 나타낸 그림으로 각 line의 간격은 250[V]이다.

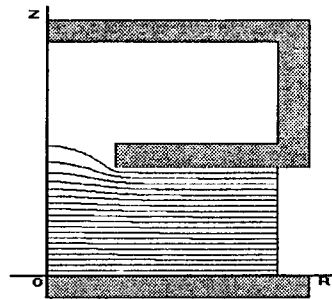


그림 1. 전극 구조와 등전위면

다음의 그림 2.는 중심축 부근에서의 반경 방향과 축방향의 전계의 세기를 나타낸 것이다.

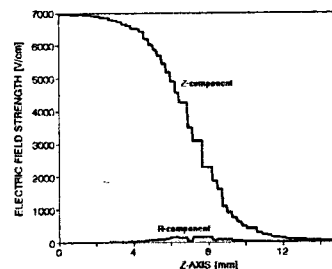


그림 2. 중심축 부근의 전계의 세기

위의 그림로부터 hollow 영역에서는 전계가 거의 없고 대부분의 전계는 음극과 양극의 gap 사이에만 존재하고 있으며 또한 반경 방향의 전계는 거의 없고 축 방향의 전계가 주로 작용하므로 전자는 음극의 hollow 영역에서 발생하여 양극으로 진행할 때 거의 축방향으로만 힘을 받게 됨을 알 수 있다.

이러한 초기 전계에 따라 압력 0.1 Torr인 헬륨 기체 내에서 양극 전압을 5000[V], hollow 음극의 초기 전자 및 이온의 밀도를 10^{19}cm^{-3} 로 하였을 때 Monte-Carlo simulation을 행한 결과 pseudo-spark 방전 진전은 4 단계(Townsend 방전 단계, 플라즈마 형성 단계, hollow 음극 효과 단계, 플라즈마 팽창 단계)로 나누어 생각할 수 있었으며 그 각각에 대해서는 발표시 언급하기로 한다.

4. 결론 및 토론

Computer simulation을 통한 pseudo-spark 방전의 mechanism을 밝히려는 본 연구에서 bulk 전자와 이온의 관성에 의한 효과, 2중 충돌, 전극 및 벽에서의 하전입자의 반사, 음극의 광전자 방출, 열이온 방출 등의 물리적 mechanism을 무시하여 계산을 행하긴 하였으나, 전자의 음극 방출 mechanism이 가장 정량적으로 전류의 시간 의존성을 변화시킬 것으로 생각한다. Pseudo-spark로의 방전 진행에서 hollow 음극 내에는 전계 형성이 거의 없고 또한 전자 증배는 항상 방전 유지에 필요한 값 이상을 유지하며 일단 전자 증배가 최대치에 도달하면 hollow 음극으로의 플라즈마 형성 및 팽창이 최대가 된다. 따라서 hollow 음극 내의 sheath가 계속 수축하여 결국 음극으로부터의 전자 방출은 전계 방출이 지배할 것으로 예측할 수 있다.

본 연구에서는 인가 전압을 5000[V]로 한 경우를 고려하였지만, pseudo-spark 방전은 보통 수십 [kV]이상에서 관찰되므로 계속되는 연구는 이러한 조건까지 모델의 타당성을 확장시켜야 할 것이다. 또한 본 연구에서 제외시킨 다른 물리적 현상을 고려하여 계산을 확장시켜 볼 필요가 있을 것으로 사료된다.

REFERENCE

- [1] G. Mechttersheimer, R. Kohler, T. Lasser & R. Meyer, "High repetition rate, fast current rise pseudospark switch," J. Phys. E, v19, pp.466, 1986
- [2] M.A. Gundersen & G. Schaefer, Eds., *The Physics and Applications of Pseudosparks*, New York:Plenum, 1990
- [3] J.P. Boef, *The Physics and Applications of Pseudosparks*, New York:Plenum, 1990
- [4] J.P. Boef & L. Pitchford, "Pseudospark discharge via computer simulation," IEEE Trans. on Plasma Sci., v.19, pp.286, 1991
- [5] A.L. Ward, "Calculation of cathode-fall characteristics," J. Appl. Phys., v.33, pp.2789, 1962
- [6] J.P. Boef & E. Marode, "A Monte Carlo analysis of an electron swarm in a non-uniform field: The cathode region of a glow discharge in helium," J. Phys. D, v.15, pp.2169, 1982