

전자빔 인출을 위한 2차전자방출 특성 연구

우성훈*, 이홍식**, 이광식***
 아시아대학교*, 한국전기연구원**, 영남대학교***

Characteristics of Secondary Electron Emission for Electron Beam Extraction

Sung-Hun Woo*, Hong-Sik Lee**, Kwang-Sik Lee***
 Asia Univ.*, KERI**, Yeungnam Univ.***

Abstract - Electron beam generator of cold cathode type has been developed for industrial application, for example, waste water cleaning, flue gas cleaning, and pasteurization etc. The operational principle is based on the emission of secondary electrons from cold cathode when ions in the plasma hit the cathode, which are accelerated toward exit window by the gradient of an electric potential. The characteristics of secondary electron emission are studied by comparing total cathode current with ion current.

1. 서 론

냉음극형 대면적 전자빔 발생장치는 수처리, 배가스 처리 및 살균 등 산업용으로 개발되어져 왔으며, 동작원리는 보조방전인 글로우 상태하, 즉 플라즈마 상태에 있는 양이온이 주 전극인 냉음극과 충돌하여 방출되는 2차 전자에 기본을 두고 있다.

양이온들이 고체 표면에 충돌할 때 비하전 입자 및 하전 입자들이 방출된다. 비하전 입자는 대부분의 경우 냉음극 표면에 접촉하고 있는 기체 분자이다. 이것은 양이온이 냉음극 표면으로부터 인출되는 전자에 의해 중성화된 것이거나 냉음극 표면으로부터 비교적 낮은 속도로 확산된 단독 또는 집단의 원자이다. 때때로 이러한 중성 입자들은 준안정상태인 경우로도 존재하는데 이것은 양이온이 중성화되었던 후 냉음극 표면으로부터 반사된 경우이다. 하전입자는 일반적으로 금속표면으로부터 방출되는 2차전자가 대부분으로 음이온 및 양이온의 경우도 있다. 그러나, 본 연구 대면적 전자빔 발생장치에서는 2차전자가 중성입자 및 하전입자와의 충돌에 의해서 소실되는 경우는 충분히 무시할 수 있다.

2차전자는 양이온의 운동에너지 (K_i)와 포텐셜 에너지 (eV_i)의 합이 음극 일함수 (ϕ)의 2배를 초과할 때, 즉 ($K_i + eV_i \geq 2e\phi$)일 때 방출되며, 입사 양이온당 방출되는 2차전자들의 수는 이온의 에너지와 음극의 특성 그리고, 특히 음극 표면의 상태에 의존한다.[1] 즉, 2차방출계수는 기체의 전리전압이 높을수록 음극의 일함수가 낮을수록 크게 나타나며, 표면의 정전도와 흡착기체의 양에 의해 현저하게 변화하는데 기체를 흡착하지 않는 표면에서의 2차전자방출계수는 낮다. 또한, 입사이온이 여기된 상태라면 2차전자방출계수는 크게 된다.

본 연구에서 2차전자방출 특성을 파악하는 것은 매우 중요하다. 왜냐하면, 원리적으로 글로우 방전에서 인출된 이온이 고전압 냉음극과 충돌하여, 그 때 발생하는 2차 전자를 가속하여 직접적으로 빔을 인출하기 때문이다.

대면적 전자빔 발생장치에서의 2차전자방출계수 (γ)는 이온들의 에너지에 따라 증가하며, 100(W) 부근에서 최대로 도달하는 것으로 알려져 있다.[2][3] 그 이유는 빠른 속도로 입사하는 이온들이 단지 2차전자의 일부분이 누출되는 깊이까지 음극을 통과하기 때문이다. 즉, 이

온의 운동에너지가 100(keV) 이상이 되면 입사이온이 급속내부로 침투하여 2차전자의 일부분만이 탈출가능하기 때문이다.

본 연구에서는 대면적 전자빔 발생장치의 효율적인 전자빔 인출을 위한 2차전자방출 특성을 연구하였다. 2차전자방출계수는 전자빔의 세기에 크게 의존하기 때문에 빔 인출 연구에 앞서 중요한 부분에 해당된다. 따라서, 본 연구에서는 빔 인출에 있어서 보조 방전이 되는 글로우 방전하에서 전자빔 전류와 관련이 있는, 즉 2차전자방출과 직접적인 관련이 있는 글로우 방전전류 및 주 전극인 냉음극으로 유입되는 이온전류, 負의 고전압이 인가된 냉음극의 부하전류와의 관계를 조사하였다

2. 양이온에 의한 2차전자방출 특성

냉음극에 흐르는 전류 (I_c)는 플라즈마로부터 냉음극에 유입되는 이온전류 (I_i)와 냉음극에서 발생하는 2차 전자에 의한 전류 (I_e)의 합으로 나타난다. 2차전자방출은 이온의 종류와 에너지, 냉음극 매질의 종류뿐만 아니라 그 표면의 처리상태에 의존한다. 2차전자방출계수, γ 는 음극에 유입되는 이온 1개에 대하여 몇 개의 전자가 생성되는 가를 나타낸다.

전자전류 $I_e = \gamma \cdot I_i$ 임을 고려하면, 냉음극에 흐르는 총전류는 다음식으로 표현될 수 있다.

$$I_c = (1 + \gamma)I_i \quad (1)$$

식 (1)로부터 2차전자방출계수를 알 수 있다.

식 (2)와 같이 플라즈마 경계부에서 냉음극으로 유입되는 이온전류밀도는 플라즈마 쉬스의 이론에 따라 냉음극에 인가하는 전압에는 무관하다.[2][3][4]

$$j_i \approx \frac{1}{2} n_i e \left(\frac{K \cdot T_e}{M} \right)^{1/2} \quad (2)$$

따라서, 이온전류는 그림 1에 보이는 것과 같이 글로우 방전 동안 메쉬 형태의 내부 그리드 전극을 통하여 그라운드 된 냉음극 쪽으로 흐르는 전류로서 측정하였다. 플라즈마 쉬스를 가로질러 흐르는 이온속(ion flux)은 식 (3)과 같이 전자온도에 의해 결정되므로 모든 방향에 대하여 이온속은 일정하다고 할 수 있다.[5]

$$\Gamma_i = n_s \cdot u_B = n_s \cdot \left(\frac{e \cdot T_e}{M} \right)^{1/2} \quad (3)$$

따라서, 전체 플라즈마 표면적에 대하여 이온이 메쉬 그리드를 통과할 수 있는 면적의 비율을 계산하면 방전

전류에 대한 이온전류의 비율을 알 수가 있다.

우선 글로우 방전전류와 이온전류의 비를 전체 플라즈마에서 벽쪽으로 흐르는 이온들의 면적과 내부 그리드를 통과하는 이온들의 면적에 대한 식 (4)의 계산을 바탕으로 구했다.

$$\left(\frac{\pi r^2}{(\pi DR) + \{(2\pi R^2) - \pi r^2\}} \right) \times 100(\%) \quad (4)$$

식 (4)로부터 계산한 결과들은 약 5.6(%) 정도로 그림 2와 같이 측정 실험 결과들과 잘 일치하였다.

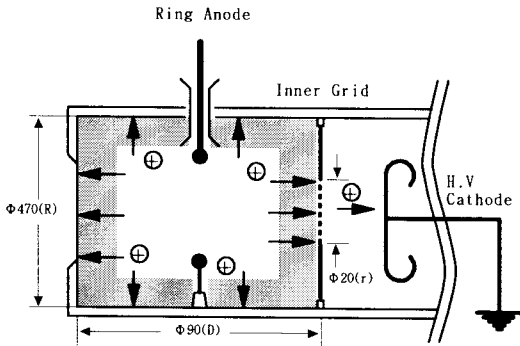


그림 1. 이온전류 측정을 위한 개략적 메카니즘

그림 2는 압력 5(mtorr)에서 0.2 ~ 1[A]까지 변화하는 글로우 방전에 대해서 이온전류와 글로우 방전전류에 대한 이온전류의 비율을 보인다. 이온전류는 방전전류와 함께 선형적으로 증가한다. 그 결과, 글로우 방전전류가 0.5, 0.6, 0.7, 0.8, 0.9 및 1[A]일 때 이온전류는 29.1, 33.7, 38.9, 44.6, 49.0 및 54.3(mA)로 나타났다.

또한, 방전전류에 대한 이온전류의 비는 방전전류 증가에 따라 조금씩 감소하며, 0.5[A]를 넘어선 방전전류에 대해서 그 값은 5.4 ~ 5.8(%) 정도로 일정함을 알 수 있다.

이러한 사실들은 내부 그리드를 통과하는 대부분의 이온들은 냉음극에 도달할 수 있다는 것을 의미한다.

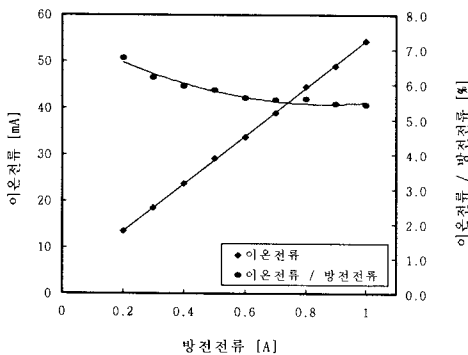


그림 2. 글로우 방전전류에 대한 이온전류 및 글로우 방전전류와 이온전류의 비율

그림 3은 압력 5(mtorr)에서 인가전압이 20(kV)일 때, 글로우 방전전류 변화에 따라서 냉음극으로 흐르는 부하전류, 즉 냉음극 전류를 측정했던 것으로서 펄스변압기를 거치지 않고 진공관 스위치를 통해서 스위칭된 저전압을 음극에 인가하여 기생 캐패시턴스 등의 영향을 무시할 수 있는 조건에서 변류기(CT)로써 음극 부하전류를 측정 한 것이다.

식 (2) 및 그림 2와 그림 3으로부터 알 수 있는 것은 전자빔 전류와 직접적인 관련이 있는 음극으로 유입되는 이온전류와 냉음극 전류는 글로우 방전전류의 함수가 됨을 알 수가 있다. 또한, 이와 같은 관계는 글로우 방전전류와 전자빔 전류와의 관계 실험을 통해서도 확인할 수 있었다.(6)(7)

가스압력 5(mtorr), 글로우 방전전류 1[A]에서 2차전자방출계수를 구하기 위하여 인가된 펄스 고전압의 변화에 따라 변류기(CT)를 사용하여 냉음극에 흐르는 총 전류를 측정하였다.

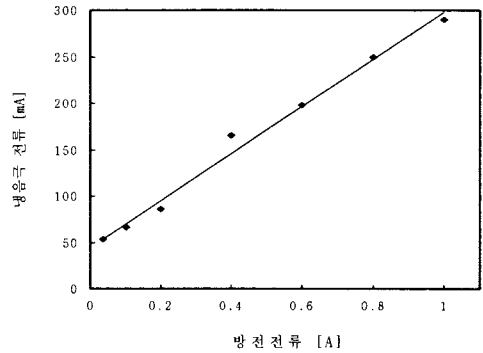


그림 3. 글로우 방전전류와 냉음극에 흐르는 부하전류와의 관계 (압력 5(mtorr), 가속전압 20(kV))

그림 4는 압력 5(mtorr), 방전전류 1[A]의 조건에서 30(kV)까지 가속전압을 증가함에 따라 냉음극에 흐르는 부하전류를 나타내고 있으며,

그림 5는 그에 따른 펄스전압 파형 및 냉음극에 흐르는 부하전류 파형을 나타내고 있다. 펄스 상승시간이 us 이하로 매우 짧고 펄스 모양이 거의 구형파에 가까움을 알 수 있다. 펄스 초기에 전류가 굉장히 큰 것은 고전압이 가해지기 시작할 때 생기는 전자의 이동 때문이다.

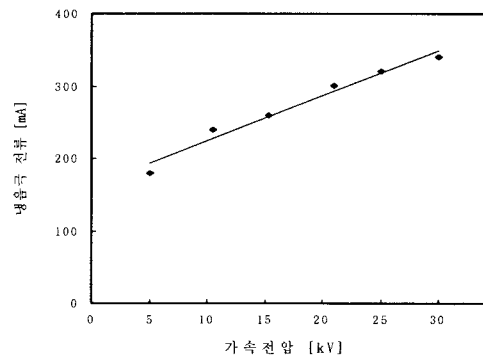


그림 4. 가속전압과 음극에 흐르는 부하전류와의 관계 (압력 5(mtorr), 방전전류 1[A])

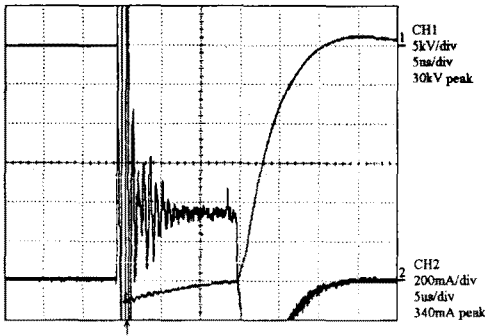


그림 5. 가속전압(30[W]) 및 음극에 흐르는 부하전류

그림 6은 그림 2 ~ 그림 4로부터 얻어진 가속전압에 따른 2차전자방출계수를 나타내고 있다. γ 의 값은 가속전압의 증가에 따라 증가한다는 것을 알 수 있다. 헬륨이온과 스테인레스 스틸 음극에 대한 γ 값은 가속전압 5, 10, 15, 20, 25 및 30[W]에서 각각 2.3, 3.4, 3.8, 4.5, 4.9 및 5.3 정도이다. 더 높은 가속전압에서 γ 의 특성들을 연구하기 위하여 펄스변압기를 사용하여 음극전류 측정을 시도하였다. 그러나 음극전류가 인가한 가속전압의 펄스를 제대로 따라가지 않는 등 잡신호로 인하여 결과를 분석하기가 어려웠다. 왜냐하면 음극 부하전류는 펄스변압기 등을 사용하는 경우에는 직류전압을 사용하는 경우와는 달리 정확하게 측정하기 곤란하기 때문인데, 이는 주변의 기생 커패시턴스 또는 인덕턴스 등에 의해 영향을 크게 받기 때문인 것으로 분석된다.

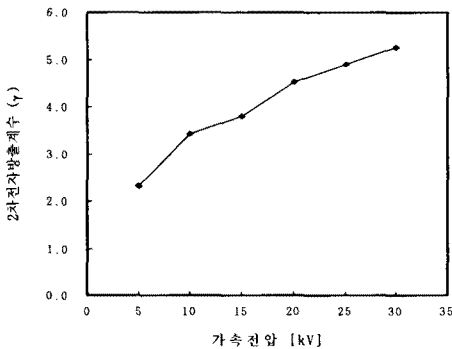


그림 6. 가속전압에 따른 2차전자방출계수

2차전자방출계수는 입사되는 이온의 속도, 즉 가속전압의 제곱근에 의존한다고 알려져 있으며, 그림 6의 결과를 이용하면 가속전압이 100[W] 정도 일 때 2차전자방출계수는 약 10 ~ 11 정도일 것으로 추정된다.(2)(3)(8)(9)

3. 결 론

헬륨가스 5[mtorr], 방전전류 1[A]의 글로우 방전조건에서 5, 10, 15, 20, 25 및 30[W]의 가속전압을 스테인레스 스틸 음극에 인가하였을 때 발생하는 2차전자방출계수를 조사하였으며, 각각 2.3, 3.4, 3.8, 4.5, 4.9 및 5.3 정도로 나타났다.

그러나 더 높은 가속전압에서는 펄스변압기 특성상 정확한 음극전류를 측정하기가 곤란했으며, 더 정확한 결과들을 위해서, 전원장치의 개선과 새로운 측정 시스템이 개발되어야 할 것이다.

- [1] B. Szapiro, J. J. Pocca, " Electron emission from glow discharge cathode materials due to neon and argon ion bombardment ", J. Appl. Phys. Vol. 65, pp.3713, 1989.
- [2] 山本賢三 " 電離氣體 ", コロナ社, 1966, Translation of Ionized Gases(2nd edition 1965).
- [3] A. von Engel, " Ionized Gases ", American Institute of Physics Press, 1993.
- [4] Fransis F. Chen " Introduction to Plasma Physics and Controlled Fusion " Plenum Press, 1984.
- [5] Michael A. Lieberman, Allan J. Lichtenberg, " Principles of Plasma Discharges and Materials Processing ", A wiley Interscience Publication, 1994.
- [6] 김광훈, 조주현, 우성훈, 이홍식, " 냉음극형 대면적 전자빔 발생장치에서 2차전자방출특성 ", 대한전기학회 방전·고전압연구회, pp.350-353, 1999, 5.
- [7] 우성훈, 이광식, 조주현, 이홍식, " 냉음극형 대면적 전자빔의 공간적 분포 특성 ", 대한전기학회 하계학술대회, pp.2170-2172, 1999, 7.
- [8] P. Hall, E. Foll. - Radiat. Phys. Chem., Vol. 35, No. 4-6, pp.653-657, 1990.
- [9] C. A. Ordonez and R. E. Peterkin, Jr, " Secondary Electron Emission at Anode, Cathode, and Floating Plasma-Facing Surfaces ", J. Appl. Phys., Vol. 79, No. 5, pp 2270-2274, 1 March 1996.
- [10] Chu-Hyun Cho, Hong-Sik Lee, Geun-Hie Rim, Sung-Hun Woo, Kwang-Sik Lee, M. Abroyan, " Development of a Low Energy Large Area Electron Beam Generator " GA of APFA & APPTC '99, Seoul, Korea, July 4-7, pp.20, 1999.
- [11] Sung-Hun.Woo, Kwang-Sik Lee, Dong-In Lee, Chu-Hyun Cho, Hong-Sik Lee, M. Abroyan. " A Study on the Generation of Low Energy Large Aperture Electron Beam ", The 9th Asian Conference on Electrical Discharge(ACED '98), B1-1, November 9-11, Bangung, Indonesia, 1998.
- [12] M. Abroyan, Sung-Hun Woo, Chu-Hyun Cho, Hong-Sik Lee, Kwang-Sik Lee, " Low Energy Large Area Electron Accelerator with Continuous and Pulse Mode Operation ", 대한전기학회 방전·고전압연구회, pp.87-89, 1999, 5.