

**냉음극형 대면적 전자빔의 공간적 분포 특성**

우성훈\*, M. Abroyan\*, 조주현\*, 김광호\*, 이홍식\*, 임근희\*, 이광식\*\*  
 \* 한국전기연구소 전기물리연구팀, \*\* 영남대학교 전기전자공학부

**Characteristics of spatial distribution of cold cathode type large aperture electron beam**

S.H. Woo, M. Abroyan, C.H. Cho, G.H. Kim, H.S. Lee, G.H. Rim, K.S. Lee  
 \* Applied Electrophysics Team, KERI, \*\* Yeungnam University

**Abstract** - A low energy large aperture(LELA) pulsed electron beam generator of a cold cathode type has been developed for environmental applications, 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. We have fabricated the LELA electron beam generator with the peak energy of 200keV and beam diameter of 200mm and obtained the large aperture electron beam in air. The electron beam current density has been investigated as a function of glow discharge current, accelerating voltage and radial distribution in front of the exit window foil. The plasma density and electron temperature have been measured in order to confirm the relation with the electron beam current density. We are going to upgrade the LELA electron beam generator in the electron energy, electron beam current and stability of operation for various applications.

**1. 서 론**

전자빔 발생기술은 날로 발전되어 이용되고 있으며, 응용분야에 따라 전자빔 에너지와 전자빔 전류가 결정되고 있다. 최근에는 미국 캘리포니아의 RPC사 및 러시아의 NIEFA 연구소에서 산업용으로 개발하여 상용화한 상태이다.[1]~[3]

본 연구에서는 200keV의 냉음극형 저에너지 대면적 펄스 전자빔 발생장치를 개발하였는데, 앞으로 폐수처리, 배가스 처리, 살균 등의 분야에 이용이 크게 기대된다. 이 전자빔 발생장치의 가장 중요한 특징중의 하나는 빔 단면적이 200cm<sup>2</sup> 라는 것이다. 왜냐하면, 이러한 응용분야에 있어서 전자빔의 인출 단면적은 대상물의 처리효율과 밀접한 관계를 가지기 때문이다. 다른 중요한 특징으로서는 종래의 전자빔 가속기와 비교해 비교적 낮은 압력 조건과 간단한 구조를 가져 쉬운 유지 및 관리가 가능하다. 또한, 종래의 전자빔 가속기는 열전자 방출의 작은 단면적으로 인해 대상물에 대하여 스캐닝이 요구되었지만, LELA 전자빔 발생장치는 전혀 대상물에 스캐닝 필요가 없다. 본 연구에서 사용한 대면적 전자빔의 발생원은 글로우 방전에 의해 발생된 플라즈마 내의 이온이 부의 고전압이 인가된 냉음극에 충돌할 때의 2차전자이다.

본 연구에서는 냉음극형 대면적 전자빔 발생장치의 인출창으로부터 인출되는 전자빔을 글로우 방전전류와 가속전압에 따른 반경방향분포의 함수로서 측정하였다. 또한 Langmuir probe를 이용하여 반경방향분포에 따른 플라즈마 밀도 및 전자온도를 측정하였으며, 특히 반경방향분포에 있어서 전자빔 전류밀도와 플라즈마 밀도와 의 관계를 확인하였다.

**2. LELA 구성**

전자빔 발생장치 전체 시스템의 구성도를 그림 1에 나타내었다. 실험장치의 설계기준 파라메타는 다음과 같다.

- 전자빔 최대 에너지 : 200keV
- 인출전자빔 피크전류 : 1A
- 주파수 : 최대 200Hz
- 펄스폭 : 40μs
- 빔 인출 유효 단면적 : 200cm<sup>2</sup>
- 인출창 : 50μm Al foil

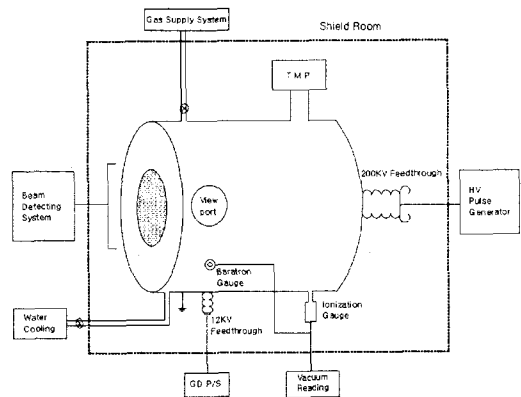


그림 1. LELA 구성도

LELA는 크게 이온 소스용 DC 보조전원장치와 전자빔 발생 및 가속을 위한 주전원장치, 진공장치, 가스 공급장치, 냉각 시스템 및 X-ray 차폐장치로 구성되어 있다. 진공 챔버는 직경 50cm, 길이 40cm의 원통형 스테인레스로 제작되었고 글로우 방전은 직경 50cm, 길이 10cm 정도의 영역에서 발생한다. 챔버 내에는 플라즈마를 발생을 위한 ring 형태의 양극과 국부적인 플라즈마를 유지하기 위한 mesh 형태의 내부 그리드와 전자를

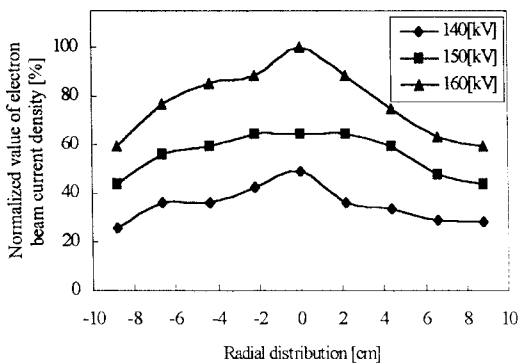
발생 가속을 위한 냉음극을 포함하고 있다.

냉음극은 일함수가 낮은 금속일수록 2차전자방출에 유리하지만 열에 의한 음극 수명을 고려하여 스테인레스를 사용하였다. 열에 의한 foil의 손상 및 수명단축을 방지하기 위하여 foil 주변에 수냉방식을 하였다.

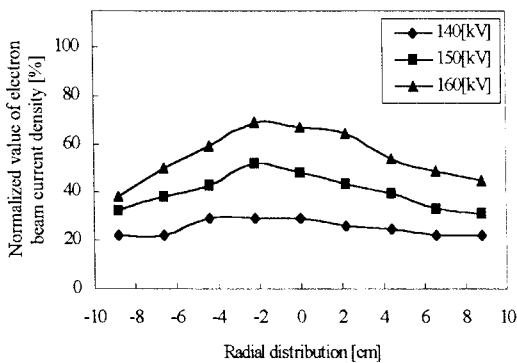
전자빔 발생 source인 글로우 방전 개시 및 플라즈마 여기를 위해 챔버 내부의 ring 형태의 양극과 ground된 챔버 벽 사이에 수백 볼트의 전압을 인가하였다. 진공은 니이들 밸브를 통하여 헬륨가스를 일정한 비율로 흐르게한 후 600 l/sec 용량의 터보분자펌프를 사용하여 충분히 배기후 수 mtorr로 유지하였으며, 압력은 Baratron gauge를 사용하여 측정하였다. 전자빔을 발생 및 가속을 위한 주 전원은 35kV의 Vacuum tube를 이용하여 펄스를 만들고 1:6의 펄스 변압기로 승압하여 200kV를 얻었으며 펄스 고전압은 RC 분압기를 제작하여 측정하였다. 글로우 방전 전류는 인출 전자빔의 세기와 직접관계가 있으므로 보조전원장치 내의 Digital panel meter 에서 환산한 값으로 모니터링 하였다.

### 3. 전자빔 전류밀도

그림 2는 대기중에서 인출장의 반경방향분포에 따른 규격화된 전자빔 전류밀도를 보인다.



(a) 글로우 방전 전류 : 1[A]



(b) 글로우 방전 전류 : 0.5[A]

그림 2. 대기중에서 인출장의 반경방향분포에 따른 규격화된 전자빔 전류 밀도

헬륨 기체 압력이 5mtorr 일 때, 방전전류 및 가속 전압의 변화에 따른 빔 전류밀도의 반경방향 분포를 쉽게 이해하기 위하여 방전전류 1A, 가속전압 160kV 일 때의 빔 전류밀도를 기준으로 규격화 하였다. 분포에 따라 대기중으로 인출되는 전자빔 전류는 인출장에 대해 약 20mm 정도의 간격으로 9 포인트를 설정한 후 직경 15mm의 구리 전극을 각 포인트에 근접하게 설치하여 무유도 저항(100Ω)에 걸리는 전압을 측정함으로써 얻어졌다.

동일 위치의 일정 가속전압에 대해서 전자빔 전류는 방전전류가 증가함에 따라 증가하였는데 이는 방전전류가 증가하면 플라즈마 밀도가 증가하여 냉음극으로 유입되는 이온의 양이 증가하기 때문이다. 또한 동일 위치의 일정 방전전류에 대해서 전자빔 전류는 가속전압이 증가함에 따라 증가하였다. 이러한 사실들은 앞선 실험을 통해서 이미 확인한 사실이다.[4]

반경방향 분포에 따른 전자빔 전류밀도는 중심부가 높고 외벽으로 갈수록 낮으며 중심부를 기준으로 거의 대칭적인 구조를 보이고 있다. 중심부와 외벽에서의 밀도분포는 방전전류 1A, 가속전압 160kV 일 때 최대 40% 정도의 큰 분포 차이를 보이고 있으며, 방전전류 0.5A, 가속전압 140kV 일 때는 최대 8% 정도의 밀도분포 차이를 보이고 있다. 이것은 이온과 전자가 챔버 벽면 쪽으로 확산되거나 챔버 벽면에서 재결합 되는 소실 기구로 인해 결국, 전자빔 발생 source인 이온의 밀도 분포가 낮아지기 때문인 것으로 생각된다.

### 4. 플라즈마 밀도 및 전자온도

플라즈마 파라메타는 별도의 바이어스 전원을 제작하여 Langmuir probe로 측정하였다. Probe의 I-V 특성 곡선은 scanning 전압(V)을 probe에 인가한 후 이에 따른 probe 전류를 측정하여 얻어졌다.

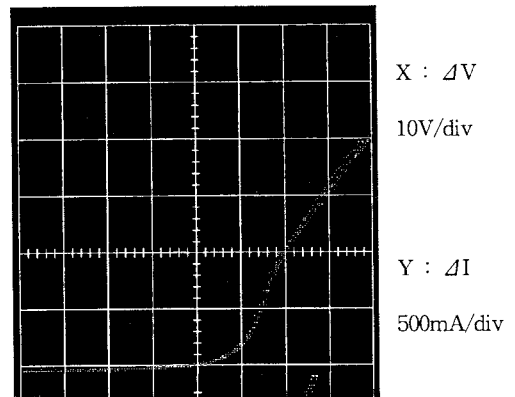


그림 3. Single Langmuir probe의 I-V 곡선

본 연구의 플라즈마는 probe 주변 포텐셜이 positive 이므로, 즉 floating 포텐셜이 높기 때문에 원하는 파형을 얻기 위하여 바이어스 전압으로서 우선 DC positive 전압을 floating 포텐셜 만큼 가한 후, scanning 전압인 삼각파를 DC 성분에 실어서 probe에 인가하였다. 이때 V는 챔버 벽면 그 자체에 대해 reference 한 값이다.

그림 3은 본 연구에서 측정된 I-V 곡선의 일 예이

다. 전자온도( $T_e$ )는 probe 전압에 대한 probe 전류의 로그값의 기울기로부터 구해졌다.[5]

$$T_e[eV] = \frac{\Delta V_p}{\Delta \ln I_p} \quad \text{----- (1)}$$

플라즈마 밀도( $n_e$ )는 포화이온전류를 V-I 곡선에서 구한 후 (2)식에 의해 얻어졌다.

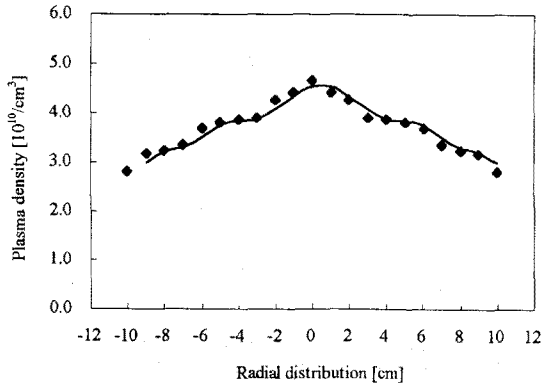
$$n_e[\text{cm}^{-3}] = 2.4 \cdot 10^{11} \cdot \frac{M^{1/2}[AMU] \cdot I_{si}[\text{mA}]}{r_s[\text{mm}] \cdot l_p[\text{mm}] \cdot \sqrt{\bar{E}_e[eV]}} \quad \text{----- (2)}$$

{  $M$ : 이온의 질량,  $r_s$ : sheath 반경 }

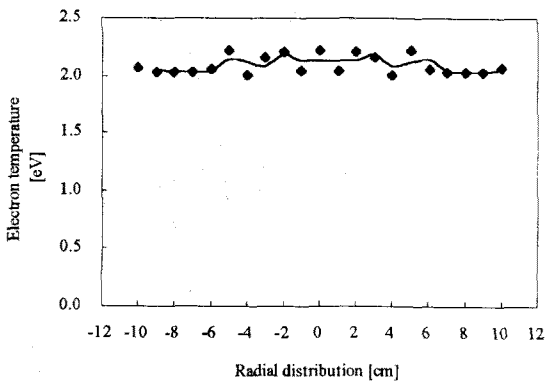
{  $l_p$ : probe tip 길이,  $\bar{E}_e$ : 평균 전자에너지( $1.5 \cdot T_e$ ) }

그림 4는 반경방향분포에 따른 플라즈마 밀도 및 전자온도를 나타내고 있다.

플라즈마 밀도는 중심부에서  $4.68 \times 10^{10} / \text{cm}^3$  정도로 높



(a) 플라즈마 밀도



(b) 전자 온도

그림 4. 반경방향분포에 따른 플라즈마 밀도 및 전자온도

고 외벽으로 갈수록 낮아져  $2.81 \times 10^{10} / \text{cm}^3$  정도에 이르고 있으며 대칭적인 구조를 보이고 있다. 중심부와 외벽의 밀도 분포는 최대 40% 정도의 차이를 보이고 있다. 이것은 이온과 전자가 재결합하여 소실되는 경우로서 벽면의 경우가 공간에 비해 충돌의 기회도 많으며 중화를 일으킬 확률이 크기 때문인데 즉, 공간에서 재결합이 행해지는 경우는 적고 오히려 벽면에서 확산이 일어나서 표면 재결합으로 인한 이온과 전자의 소실 확률이 크기 때문이다.

전자온도는 반경방향 분포에 따라 거의 2eV로 일정한 것으로 나타났다. 이것은 음극으로 유입되는 이온전류밀도와 밀접한 관계가 있는데, 실제 음극으로 유입되는 이온전류밀도는 외벽 보다 중심부에서 높기 때문에 반경방향분포에 따른 이온전류 밀도는 플라즈마 밀도 분포와 같은 경향을 보이고 있다. 따라서 식 (3)의 관계[6]로 부터 전자온도는 거의 일정함을 확인할 수 있다.

$$j_i \approx \frac{1}{2} n_i e \left( \frac{KT_e}{M} \right)^{1/2} \quad \text{----- (3)}$$

## 5. 결 론

본 연구에서는 냉음극형 대면적 전자빔 발생장치의 인출장으로부터 인출되는 전자빔을 방전전류와 가속전압에 따른 반경방향분포의 함수로서 측정하였으며, 또한 Langmuir probe를 이용하여 반경방향분포에 따른 플라즈마 밀도 및 전자온도도 측정하였다. 전자빔 전류밀도와 플라즈마 밀도는 중심부에서 높고 외벽으로 갈수록 낮은 대칭형의 유사한 분포를 가졌으며, 전자빔 전류밀도는 플라즈마 밀도와 밀접한 관계가 있음을 확인할 수 있었다. 플라즈마 밀도는 중심에서 최대  $4.68 \times 10^{10} / \text{cm}^3$  이며, 전자온도는 반경방향에 대해 2eV로 거의 일정한 값을 유지하였다.

## (참 고 문 헌)

- [1] Waldemar Scharf, Wioletta Wieszczycka, "Electron Accelerators for Industrial Processing -A REVIEW", Warsaw University of Technology, Sept 1998.
- [2] W. J. Ramler, "Performance Characteristics of a WIP Electron Beam System", 7th International Meeting on Radiation Processing, 1989.
- [3] Warren J. Ramler, "Performance Characteristics of a WIP Electron Beam System", RPC Industries, Hayward, California.
- [3] "SMOL- Accelerator for Researchs in the field of Radiation Processing", Technical Note of NIIIEFA, Russia, 1997.
- [4] 김광훈, 조주현, 우성훈, 이홍식, "냉음극형 대면적 전자빔 발생장치에서 2차 전자 방출 특성", 대한전기학회 방전 및 고전압연구회 춘계 학술발표회 논문집, pp 350~353, 1999.
- [5] A. von Engel, "Ionized Gases" American Institute of Physics Press, 1993.
- [6] Francis F. Chen "Introduction to Plasma Physics and Controlled Fusion" Plenum Press, 1984.