

저에너지 대면적 전자빔 발생장치 개발에 관한 연구

論 文
48C-12-6

A Study on the Low-energy Large-aperture Electron Beam Generator

曹柱鉉* · 崔永旭* · 李弘植** · 林根熙** · 寓盛薰*** · 李廣植§
(Chu-Hyun Cho · Young-Wook Choi · Hong-Sik Lee · Geun-Hie Rim ·
Sung-Hun Woo · Kwang-Sik Lee)

Abstract - This research has been carried out to develop a low-energy large-aperture pulsed electron beam generator (LELA), 200keV 1A, for industrial applications. One of the most important feature of this electron beam generator is large electron beam cross section of 190cm². Low energy electron beam generators have been used for water cleaning, flue gas cleaning, and pasteurization, etc. In these applications the cross section of the e-beam is related to reaction efficiency. Another important feature of this LELA EB generator is easy maintenance because of its simple structure and relatively low vacuum operation compared to the conventional EB generators. The conventional EB generators need to be scanned because the small cross section thermal electron emitters are used in the conventional EB generators which have small EB cross section. In this research, we use the secondary electrons generated by ion bombardment on the HV cathode surface as a electron source. Therefore we can make any shape of EB cross section without scanning.

Key Words : 저에너지대면적전자빔, 글로우방전플라즈마, 쉬스, 고전압펄스, 진공관스위치

1. 서 론

전자빔 가속장치는 고압이 인가된 전자원에서 방출되는 전자를 가속·제어하여 대상물에 조사하는 장치로서 물리적 기본원리와 초고압 전원발생장치를 핵심기술로 하는 복합기술로 기존의 열처리, 화학처리 및 측정기기 등 매우 다양한 응용분야에 적용되는 기술이다.

일본·미국·독일 및 러시아 등 선진국에서는 상용화된 기술로서, 환경기기, 살균처리, 용접, 폐가스처리, 수처리, 신소재 개발 및 금속처리 등에 폭넓게 사용되고 있다[1-8]. 국내에서는 산업발전에 따른 신소재 개발 등의 요구에 의해 연구기관 등을 중심으로 수입되어 가동 중에 있다.

본 연구의 목표는 펄스 200keV, 1A급 대면적 전자빔 발생장치 개발이다. 본 연구의 가장 큰 특징은 전자빔의 단면적이 190cm²에 이르는 대면적이라는 점이다. 이는 저에너지 전자빔 가속기가 주로 폐수처리, 배연처리, 식품살균, 폴리머 가공 등의 산업용 분야에 그 목적을 두고 있으므로 반응면적을 넓게 하여 효율을 높이고, 장치를 간단하게 하여 수명을 연장시키고, 운전 및 유지보수를 쉽게 할 수 있는 장점

이 있다.

현재까지 개발된 전자빔 가속기들은 대부분 전자원으로서 LaB₆ 등의 특수한 재료로부터 방출되는 열전자를 이용한다. 이 경우 전자빔의 단면적이 수 cm²로서 산업용을 위해서는 별도의 스캐닝이 필요하다. 본 연구에서 개발한 전자빔 발생장치는 그러한 별도의 스캐닝이 필요 없는 대면적 전자빔으로서, 그 원리는 글로우 방전 플라즈마로부터 이온을 인출 가속하여 HV음극과 충돌시키고, 그 때 발생하는 2차전자를 가속하여 인출하는 냉음극형 전자빔 발생장치로서 원리적으로 전자빔의 단면적을 원하는 형태로 만들 수 있다[4, 9-11].

2. 대면적 전자빔 발생 및 가속원리

그림 1은 본 연구에서 개발하고자 하는 전자빔 발생장치의 개념도이다. 글로우 방전은 압력 수 mTorr의 헬륨가스로 채워진 용기 내부에서 링 양극(ring anode)과 용기 외벽사이에 전압을 인가함으로써 발생하며, 이때 방전개시 및 플라즈마 여기를 위해 공급되는 전압은 진공 용기에 대해 정극성을 가진다. 이와 같이 글로우 방전에 의해서 생성된 플라즈마를 유지하면서 음극에 전자를 발생 및 가속하기 위한 음극성 고전압 펄스를 인가한다. 펄스가 인가되면 플라즈마 내에 쉬스(sheath)가 형성되며 쉬스 영역 내부에 존재하는 이온은 음극으로 가속되어 충돌하고, 이때 음극 표면에서 다수의 2차전자 방출이 일어난다. 이렇게 발생한 전자들은 음극 전압에 의해서 가속되어 플라즈마 영역과 인출창을 통과하여 대기중으로 인출된다. 이때 가스압력이 어느 정도 낮

* 正 會 員 : 韓國電氣研究所 電氣物理그룹 先任研究員

** 正 會 員 : 韓國電氣研究所 電氣物理그룹 責任研究員

*** 正 會 員 : 韓國電氣研究所 電氣物理그룹 委囑研究員

§ 正 會 員 : 嶺南大學校 電氣電子工學部 教授·工博

接受日字 : 1999年 4月 6日

最終完了 : 1999年 11月 15日

아 전자의 평균자유행정이 전극사이의 거리보다 크게되면 전자는 가속되어지는 동안 다른 중성 및 하전입자와 충돌 없이 대부분 가속영역 및 플라즈마 영역을 통과하여 전자빔 인출 창(알루미늄 또는 티타늄 호일)을 통과하기 위한 충분한 에너지를 가지게 된다[15].

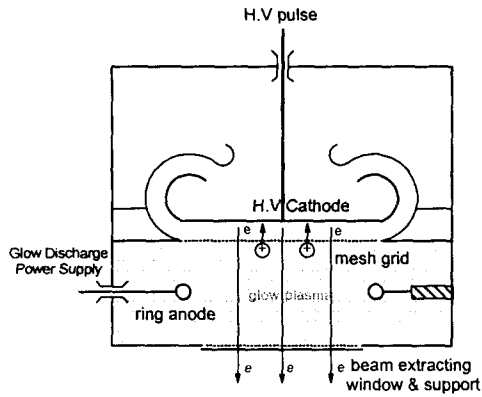


그림 1 대면적 전자빔 발생장치의 개념도
Fig. 1 Schematic of the Large Area Electron Beam Generator

3. 저에너지 대면적 전자빔 발생장치 구성

글로우 보조방전을 이용한 냉음극형 저에너지 대면적 펄스 전자빔은 글로우 보조방전과 전자빔 가속전압의 형태에 따라서 pulse-pulse, pulse-DC, DC-pulse로 나눌 수 있다. 본 연구에서는 DC 글로우 방전과 펄스 가속전압을 이용한 DC-pulse형을 이용하였다. 그림 2에 실험장치의 구성을 나타내었다. 실험장치의 설계기준 사양들은 다음과 같다.

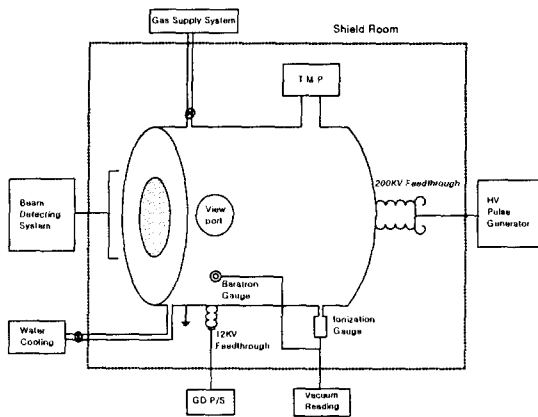


그림 2 저에너지 대면적 전자빔 발생장치 구성도
Fig. 2 The elements of the LELA electron beam generator

- 전자빔 인출 단면적 : 190 cm²
- 전자빔 최대에너지 : 200keV
- 인출 전자빔 피크전류 : 1A
- 펄스폭 : 40μs
- 반복 주파수 : 1000pps

고전압 펄스 전원은 35kV 진공관을 이용하여 펄스를 만들고 펄스 변압기로 승압하여 최대 200kV를 얻었다. 보조 방전으로서는 헬륨 가스를 사용하여 수 mTorr에서 그림 1의 링 양극과 진공 용기와의 사이에 DC 3A의 안정된 글로우 방전을 얻을 수 있었다. 이온에 의해서 2차전자가 발생하는 음극은 스텐레스 금속을 사용하였고, 플라즈마 가스로는 He를 이용하였다. 200keV의 에너지에서 He 원자에 의한 스텐레스 금속으로부터의 2차전자 방출계수는 정확히 알려진 바는 없지만 다른 금속과 비교하여 볼 때 대략적으로 $\gamma \approx 3 \sim 6$ 정도로 추정된다[12, 16].

4. 펄스 발생장치

그림 3에 펄스 발생장치의 개략도를 나타내었다. 기본적인 설계 파라미터는 출력 펄스 피크 전압 200kV, 피크 부하 전류 3A, 펄스 폭 40μs, 최대 반복율 1000pps 이다. 그림에서 C₁은 정류된 전압의 리플을 줄이는 역할을 하며 C₂에 저장된 에너지가 진공관이 on 되는 순간에 전류 제한 저항과 펄스 변압기 1차측을 통하여 방전되면서 2차측에 6배의 부극성 전압을 유도한다. 펄스에 있어서 상승시간과 하강 시간은 응용 분야에 따라서 매우 중요한 요소이다.

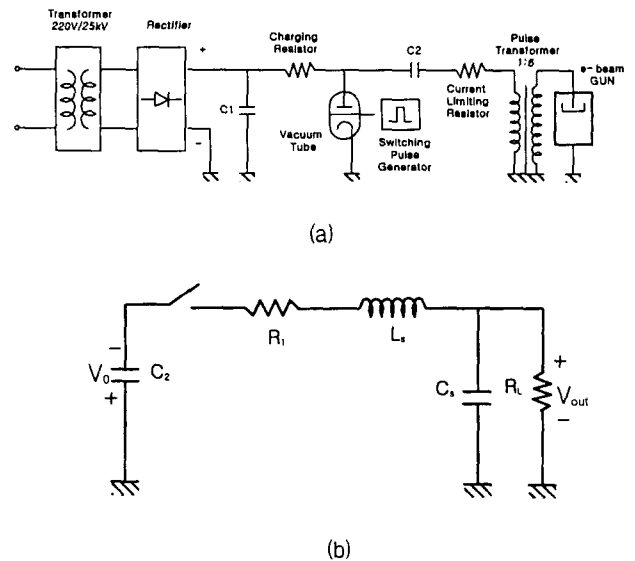


그림 3 펄스 발생 시스템 (a) 개략도 (b) 등가회로
Fig. 3 The pulse generating system
(a) Schematic diagram
(b) Equivalent circuit

본 전자빔 발생장치에 있어서 상승시간과 하강시간은 손실과 직결되므로 가능하면 짧은 것이 요구된다. 그러나 펄스 변압기의 승압비가 높을수록 누설 인덕턴스와 기생 커패시턴스에 의해서 펄스의 상승, 하강시간이 길어지는 문제점이 있다.

이러한 문제를 해결하는 방법중의 하나는 글로우 방전을 펄스로 하고 그 펄스 폭을 전압 펄스보다 작게 하여 손실을 줄이는 것이다.

4.1 진공관 스위치 특성

본 연구에서 사용한 진공관 스위치는 러시아에서 제작한 GMI-14B 모델로서 그 특성은 부하에 따라 다르지만 최대 정격은 다음과 같다.

- 최대 스위칭 전압 : 33kV
- 최대 통전 전류 : 40A
- 전류 상승 및 하강시간 : 0.1μs 미만

4.2 펄스 변압기 특성

그림 3의 (b)는 시스템의 특성을 파악하기 위한 등가회로로서 펄스 변압기 1차측에서 바라본 등가회로이다. 펄스 특성에 무관한 DC 충전부는 등가회로에서 제외되었다. 펄스 변압기는 1차측 116 turn, 2차측 700 turn으로, 누설 인덕턴스와 기생 커패시턴스를 줄이기 위한 구조로 제작되었다. L_s 와 C_s 는 권선 수의 비가 클수록 커지지만 진공관 스위치의 스위칭 전압이 낮기 때문에 200kV를 얻기 위해서 1: 6 정도로 하였다. 그림에서 C_2 는 0.28μF, R_1 은 전류제한 저항 0.5kΩ 및 진공관 스위치의 등가저항 50Ω의 합, L_s 는 펄스 변압기의 누설 인덕턴스로서 740μH, C_s 는 펄스 변압기 및 펄스 변압기 2차측으로부터 부하인 GUN에 연결되는 케이블의 기생 커패시턴스 및 GUN 자체의 커패시턴스 등을 고려한 값으로 1차측으로 환산한 값은 약 8nF 이다. GUN 부하는 200kV, 1A인 경우에 200kΩ의 등가저항을 1차측으로 환산하면 5.5kΩ 이다.

그림 3의 (b) 등가회로는 LC 공진을 통해서 부하 측에 V_0 이상의 전압이 걸리게 된다. 이상적인 경우에는 2배의 전압이 인가되지만 RL의 저항과 펄스 변압기의 손실에 의해서 그 효과는 매우 감소한다. 그림 3의 (b) 회로가 진동하기 위한 조건은 다음과 같다.

$$R_1 < 2\sqrt{\frac{L_s}{C_{eq}}} = 2\rho \quad (1)$$

여기서 $C_{eq} = C_1 C_s / (C_1 + C_s)$ 를 나타낸다. 여기서 $R_1=550\Omega$, $2\rho=608\Omega$ 이므로 거의 임계진동에 가까운 진동이 발생한다는 것을 알 수 있다.

이 때 진동주파수는 다음과 같다.

$$\omega = \sqrt{\frac{1}{L_s C_{eq}} - b^2} \quad (2)$$

여기서 $b = \frac{R_1}{2L_s}$ 이다. 펄스 변압기의 1차측 권선에 걸리는 전압은 식(3)으로 표현되고 이때의 전압 상승시간은 식(4)로 나타낼 수 있다.

$$V_{out} = -\frac{C_2}{C_2 + C_s} V_0 + \frac{C_2}{C_2 + C_s} V_0 e^{-bt} (\cos \omega t + \frac{b}{\omega} \sin \omega t) \quad (3)$$

$$\frac{T}{2} = \frac{\pi}{\omega} = \pi / \sqrt{\frac{1}{L_s C_{eq}} - b^2} \approx 18\mu s \quad (4)$$

펄스 변압기의 2차측 출력의 상승시간도 1차측의 상승시간과 같다고 할 수 있으므로 전체적으로 펄스 변압기의 상승 시간은 약 18μs로서 그림 8에 나타난 전압 파형과 비교해서 거의 일치하고 있음을 알 수 있고, 여기서 나타난 오차는 누설 인덕턴스 및 기생 커패시턴스의 계산치가 실제와 약간의 차이가 있음을 나타내고 있다. 펄스의 하강시간은 그림 3의 (b)에서 스위치가 off 된 후에 펄스 변압기의 기생 커패시턴스에 저장된 전하를 부하저항을 통해서 방전하게되므로 그 시정수는 44μs에 이른다. 그림 8에서 전압의 하강시간이 상승시간보다 2배정도 느림을 확인할 수 있다.

4.3 전압 및 전류 측정

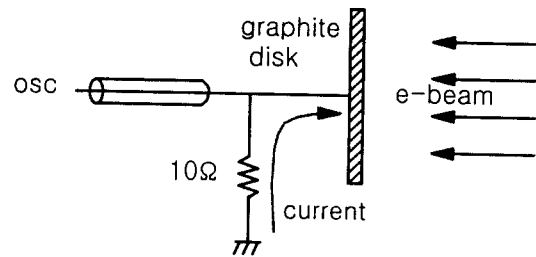


그림 4 전자빔 전류 측정

Fig. 4 Measurement of electron beam current

전자빔 전류는 그림 4와 같은 간략화 된 Faraday Cup을 이용하여 측정하였다. 정밀한 측정을 위해서는 진공 분위기에서 2차 전자방출을 억제하여 측정하여야 하지만 본 연구에서는 disk를 인출 창에 최대한으로 가까이 붙여서 대기중으로 인출된 빔을 측정하였다. 이 경우 발생이 가능한 오차의 요인은 2차전자 발생에 의한 측정전류의 감소, 전자빔이 공기와의 충돌전리에 의해 발생하는 플라즈마에 측정전류의 증가, disk의 표면에 음 전하 축적에 의한 측정전류의 감소 등이 있다. 2차 전자 방출은 disk를 흑연으로 하여 최대한 억제하였으며 플라즈마 형성에 의한 오차는 그 다지 크지 않아 본 연구에서는 무시하였고, 전하축적에 의한 오차는 그림 4의 저항 값을 변화시키며 그 영향이 나타나지 않는 낮은 저항 값을 선택하였다.

5. 전자빔 발생 및 인출

인출되는 전자빔 전류는 음극에 유입되는 이온 전류와 음극에서 발생하는 2차전자에 의한 전류 등으로 주어진다. 한편 2차전자 방출계수는 이온의 에너지에 의존하는 계수이다. 따라서 이와 같은 관계를 고려하면 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$I_c = I_i + \gamma(E)I_i \quad (5)$$

한편 인출 전자빔은 음극전류에서 이온 유입에 의한 전류

(I_i)와 손실(I_l)을 뺀 전류인데 손실은 인출용 호일 및 호일 지지구조, 플라즈마영역과 가속영역을 분리하는 그리드에서 발생하는 손실과 전자빔이 진공용기 내의 중성원자와 하전입자와 충돌하여 발생하는 손실 등이 있다.

$$I_b = I_c - I_i - I_l = \gamma(E)I_i - I_l \quad (6)$$

플라즈마의 경계부분에서 음극으로 유입되는 이온 전류는 플라즈마 쉬스의 이론에 따르면 음극에 인가하는 전압에는 무관하게 식 (7)과 같이 나타난다[14]. 그러나 2차 전자방출 계수 $\gamma(E)$ 는 인가전압의 함수이고 대체로 100keV 이상의 이온 에너지에서는 포화되는 경향을 보인다[16].

$$j_i \approx \frac{1}{2} n_i e \left(\frac{KT_e}{M} \right)^{1/2} \quad (7)$$

한편 손실은 대부분 Gun의 구조에 의해서 결정된다. 따라서 같은 에너지에서 전자빔의 전류를 증가시키기 위해서는 음극으로 유입되는 이온 전류를 증가시켜야하고 이온 전류는 플라즈마의 밀도에 의존한다. 플라즈마의 밀도는 글로우 방전전류에 선형적으로 비례하므로 결국 전자빔의 전류는 글로우 방전전류의 함수가 된다. 이와 같은 관계는 그림 5와 그림 6에 나타난 바와 같이 실험을 통하여 확인할 수 있었다.

그림 5는 인가전압이 25kV 일 때 방전전류에 따라서 음극으로 흐르는 부하전류를 나타낸 것이고, 그림 6은 가속 전압이 180kV 일 때 인출되는 전자빔의 전류이다. 음극 부하전류는 펄스 변압기 등을 사용하는 경우에는 직류 전압을 사용하는 경우와는 달리 정밀하게 측정하기 곤란하다. 주변의 기생 커패시턴스 또는 인덕턴스 등에 의해서 영향을 크게 받기 때문이다. 그림 5의 경우는 펄스 변압기를 거치지 않고 그림 3의 진공관 스위치를 통해서 스위칭 된 저전압을 음극에 인가하여 기생 커패시턴스 등의 영향을 무시할 수 있는 조건에서 음극 부하전류를 측정한 것이다. 그림에서 알 수 있듯이 보조 글로우 방전전류가 3A 정도면 음극 부

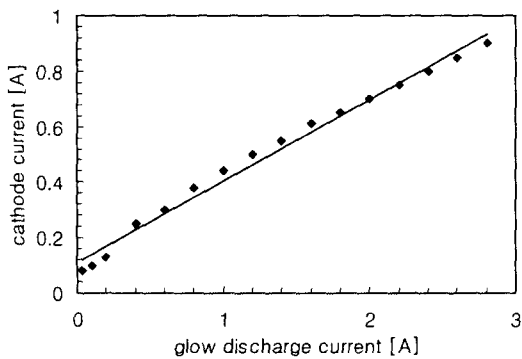


그림 5 음극에 흐르는 부하 전류와 글로우 방전전류와의 관계(가속전압 25kV)

Fig. 5 The relation between load current through the cathode and glow discharge current (accelerating voltage 25kV)

하전류는 25kV의 비교적 저전압에서도 1A에 도달한다. 그림 6은 180kV로 가속된 전자빔을 50 μ m의 알루미늄 인출창을 통하여 대기 중으로 인출하였을 때 Faraday cup을 이용하여 측정된 전류를 나타낸 것이다. 전자빔 전류는 글로우 방전 전류에 선형적으로 비례함을 잘 나타내고 있다.

그림 7은 알루미늄 인출창에 의한 손실을 추정하기 위해서 일정 방전전류(0.5A)에서 가속 전압에 따른 인출 전자빔의 전류밀도를 나타낸 것이다. 전자빔의 에너지가 200keV 일 때 50 μ m의 알루미늄 인출 창에 의한 손실은 약 18%에 이른다[17]. 그림 7은 글로우 방전전류 0.5A에서 인가 전압과 인출 전류를 나타낸 것이다. 그림 7에서 알 수 있듯이 가속 전압이 낮을수록 인출 전류는 급격히 감소하고 대부분의 전자빔은 인출 창에서 열로 소멸된다. 인출 전자빔 전류는 펄스의 피크의 일부분에서만 측정된다는 것을 알 수 있다. 그러므로 그림 8에 나타난 전압 펄스의 상승시간이 짧을수록 인출 창에 의한 손실을 줄일 수 있다.

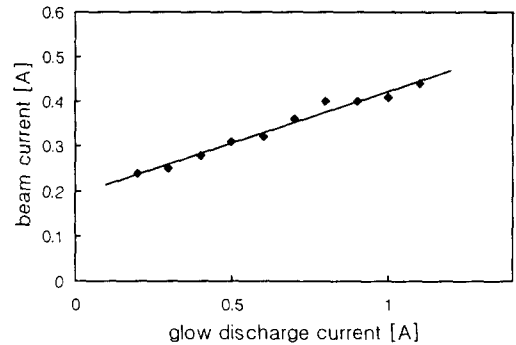


그림 6 글로우 방전 전류와 전자빔 인출 전류의 관계(가속 전압 180kV)

Fig. 6 The relation between electron beam current and glow discharge current (accelerating voltage : 180kV)

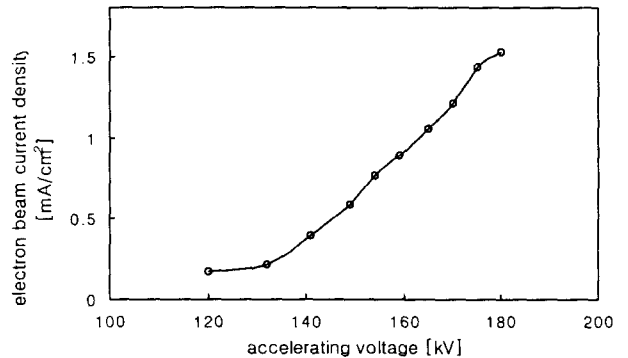


그림 7 가속 전압과 인출 전자빔 전류밀도와의 관계 (방전전류 0.5A)

Fig. 7 The relation between accelerating voltage and electron beam current density (glow discharge current 0.5A)

6. 그리드의 형상과 전자빔의 공간적 분포

고전압이 인가되는 가속영역과 플라즈마의 영역을 나누는 그리드의 기하학적인 형태는 고전압 펄스에 의한 절연파괴와 인출 전자빔 전류의 크기 및 분포에 직접적으로 관계가 있다. 고전압이 인가되면 전계는 그리드의 구멍(hole)을 통해서 플라즈마 영역으로 침투하게 되고 플라즈마로부터 이온입자를 인출하여 음극으로 가속시킨다.

본 연구에서는 hole형 그리드와 mesh형 그리드의 두 가지에 대하여 빔 인출을 시도하였다. hole형 그리드의 경우 hole의 크기는 인출 창의 호일 지지물의 hole 사이즈와 같이 직경 20mm로 하였다. 이와 같은 hole 그리드의 경우 플라즈마 영역으로 침투하는 등전위 면의 형상이 원형에 가깝게 되어 음극에 유입되는 이온빔이 작은 영역으로 집중되어 결과적으로 그림 9의 내부의 그림과 같이 인출 전자빔이 주로 중심 부분에 집중되어 공간적으로 불균일하게 되었다. mesh형 그리드의 경우 와이어의 직경은 0.4mm, 메쉬 그리드의 격자 크기는 가로세로 4.5mm로 하였다. 이와같은 메쉬 그리드의 경우는 그림 1의 원리도에 개략적으로 나타낸 바와 같이 침투 등전위면이 평판에 가까운 형상을 갖는다. 따라서 인출된 전자빔이 그림 9의 원형 흔적이 나타낸 바와 같이 공간적으로 균일한 분포를 갖게 된다. 그림에서 검은 부분은 전자빔에 의해서 흑백 인화지에 감광된 부분이다.

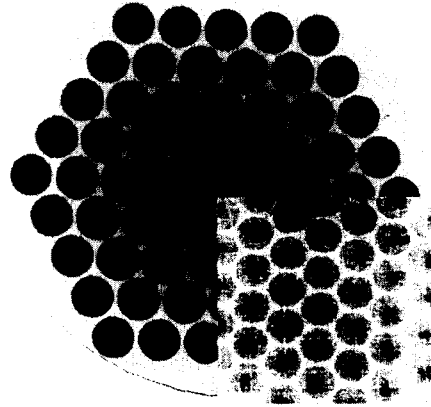


그림 9 인출된 전자빔의 흔적 (내부 : hole 형 그리드의 경우)

Fig. 9 The marks of the extracted electron beam (inside : hole grid)

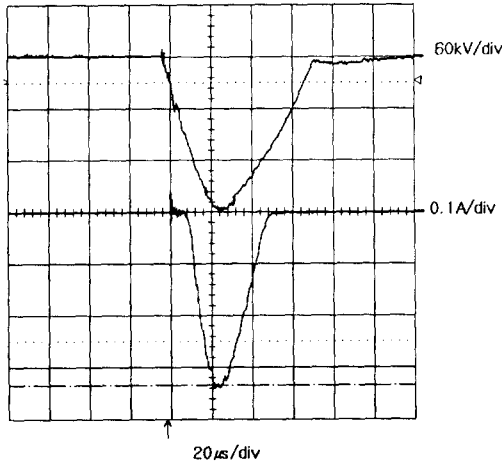


그림 8 가속 전압 파형과 인출 전자빔 전류파형
Fig. 8 The waveforms of accelerating voltage and extracted current

인출된 전자빔 전류에 있어서도 mesh형 그리드의 경우가 hole 형 그리드에 비해서 더 크게 나타났다. 이는 mesh형의 경우가 hole 형에 비해서 유효 면적이 더 크기 때문이다. 그림 10은 본 연구에서 설계 제작한 전자빔 발생장치이다.

7. 결 론

본 연구에서는 DC 글로우 방전, 펄스 가속 전압형 대면적 전자빔 발생장치와 펄스 전원장치를 설계 제작하여 전자빔 발생 및 인출을 성공적으로 수행하였으며 실험 및 고찰을 통하여 다음의 사실을 확인 할 수 있었다.

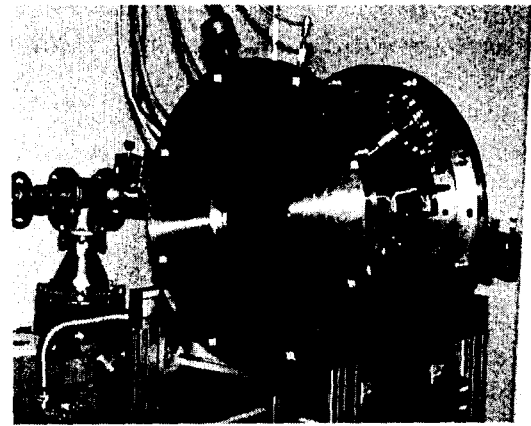


그림 10 제작된 저에너지 대면적 전자빔 발생장치
Fig. 10 LELA electron beam generator

- 1) He 가스 수 mTorr에서 200keV의 펄스 전자빔 발생을 안정적으로 할 수 있었다.
 - 2) 인출 전자빔 전류는 보조 글로우 방전전류와 선형적으로 비례한다.
 - 3) 전자빔 인출에 있어서 손실은 가속전압이 높을수록 현저히 줄어든다.
 - 4) 인출 전자빔의 분포는 비교적 균일하며 mesh grid의 경우가 hole형 그리드 보다 균일하였다.
- 본 장치의 경우 보다 효율을 높이기 위해서 펄스 글로우 방전과 DC 가속 전압 형태를 채용하는 것이 바람직하며, 이 경우 펄스 글로우 방전전류를 더욱 증가시킬 수 있으며, 따라서 평균 출력 수 kW의 전자빔을 얻을 수 있을 것으로 생각된다. 향후 펄스 글로우 방전 - DC 가속전압 타입을 이용하여 평균 출력 5kW 급의 대면적 전자빔 발생장치를 개발하고 배가스 처리 및 다양한 매질의 표면처리 분야에 응용할 계획이다.

참 고 문 헌

[1] P. HOLL and E. FÖLL, "New Applications of Low Voltage Electron Beam Accelerators", Radiat. Phys. Chem., Vol. 35, Nos. 4~6, 1990, pp 653~657.

[2] Denise A. Cleghorn and Dam V. Nablo, "Electron Sterilization Validation Techniques Using the Controlled Depth of Sterilization Process", Radiat. Phys. Chem., Vol. 35, Nos. 1~3, pp 382~389, 1990.

[3] J. W. LEONHARDT, "Industrial Application Electron Accelerators in GDR", Radiat. Phys. Chem., Vol. 35, Nos. 4~6, pp 649~652, 1990

[4] "SMOL- Accelerator for Researchs in the field of Radiation Processing", Technical Note of NIEFA, Russia, 1997.

[5] Y. A. Kotov, S. Y. Sokovnin and A. L. Filatov, "Using a High-Current Electron Beam to Generate Ozone", 10th IEEE Pulsed Power Conf., 1995 V. 2, pp 1239~1242.

[6] I. N. MESHKOV, "Radiation Technologies in Metallurgy and Machinery", Radiat. Phys. Chem., Vol. 35, Nos. 4~6, pp 483~487, 1990.

[7] Tadashi Ohgo, Tamio Hara, Manabu Hamagaki and Kazushige Ishii, "A DC High Current Low Energy Electron Beam Gun", J. Appl. Phys., Vol. 70, No. 8, pp 4050~4052, 15 October 1991.

[8] Javier Ignacio Etcheverry, Nérida Mingolo, Jorge J. Rocca, "A Simple Model of a Glow Discharge Electron Beam for Materials Processing", IEEE Transactions on Plasma Science, Vol. 25, No. 3, June 1997.

[9] W. J. Ramler, "Performance Characteristics of a WIP Electron Beam System", 7th International Meeting on Radiation Processing, 1989.

[10] G. G. Isaacs, "High Power Pulsed Electron Beam from a Glow Discharge", Nov 1967, New Technology, pp 542~543.

[11] R. Mehnert and P. Klenert, "The Low-Energy Electron Accelerator Lea for Pilot Scale Operations", Radiat. Phys. Chem., Vol. 35, Nos. 4~6, pp 645~648, 1990.

[12] 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.

[13] Katsumi Masugata, Tetsuo Yamada, Etsuji Chishiro, Akira Matsuyama, and Kiyoshi Yatsui, "Evaluation of the Energy Loss of Intense Pulsed Ion Beam in Thin Foil Targets", IEEE Transactions on Plasma Science, Vol. 25, No. 3, June 1997.

[14] Fransis F. Chen "Introduction to Plasma Physics and Controlled Fusion " Plenum Press, 1984.

[15] John T. L. Thong "Electron Beam Testing

Technology" Plenum Press, 1993.

[16] A. von Engel " Ionized Gases" Oxford 1965.

[17] 우성훈, 이광식, 이동인, 조주현, 이홍식 외, "저에너지 대면적 전자빔 발생장치 개발(I)", 대한전기학회 방전 및 고전압연구회 춘계 학술발표회 논문집, pp 135~137, 1998.

저 자 소개



조 주 현 (曹 柱 鉉)

1966년 1월 29일 생. 1989년 한양대 공대 전기공학과 졸업. 1993년 동 대학 대학원 졸업(석사), 현재 한국전기연구소 선임연구원. 주관심분야 : 펄스파워 응용, 전자빔 발생 및 응용

Tel : (0551) 280-1493, Fax : (0551) 280-1406

E-mail : chcho428@keri.re.kr

최 영 욱 (崔 永 旭)

전기학회논문지 제48C권 4호 참조

이 홍 식 (李 弘 植)

전기학회논문지 제48C권 4호 참조

임 근 희 (林 根 熙)

전기학회논문지 제48C권 4호 참조



우 성 훈 (禹 盛 薰)

1970년 9월 16일 생. 1993년 영남대 공대 전기공학과 졸업. 1997년 동 대학원 졸업(석사). 1999년 동 대학원 박사 수료. 1997년 8월~현재 한국전기연구소 전기물리 연구그룹 위촉연구원. 주관심분야 : 오존발생장치 개발, 전자빔 발생 및 응용

등 방전 · 고전압 및 플라즈마 관련분야.

Tel : (0551) 280-1496, Fax : (0551) 280-1406

E-mail : shwoo@keri.re.kr

이 광 식 (李 廣 植)

전기학회논문지 제48C권 7호 참조

Tel : (053) 810-2486, Fax : (053) 813-8230

E-mail : kslee@ynucc.yeungnam.ac.kr