

저에너지 대면적 전자빔 발생장치 개발(II)

우 성훈, 이 광식, 이 동인, 조 주현, 최 영욱, 이 홍식, M. Abroyan
 영남대학교 전기전자공학부, 한국전기연구소 전기물리연구팀

A Development of the Low Energy Large Aperture Electron Beam Generator

Sung-Hun Woo, Kwang-Sik Lee, Dong-In Lee, Chu-Hyun Cho, Young-Wook Choi, Hong-Sik Lee
 School of Electrical and Electronic Engineering of Yeungnam University, Applied Electrophysic

Abstract - We have established a pulsed electron beam generation system with an energy of 200[keV], pulse repetition rate of 200[Hz], and several tens of [μ s] pulse width. The system is characterized by a cold cathode that is simpler than the hot cathode. Target object does not need to be scanned because of large aperture electron beam of 300[cm²]. Electron source is secondary electrons that are generated when the ions from the glow discharge collide on the cathode surface. In this paper, the discharge current characteristics are investigated experimentally as a function of He gas pressure in order to obtain stable glow discharge. And computer simulations are carried out as a preliminary study for the development of low energy large aperture electron beam generator. The variation of electron beam current is investigated as a function of rising time of high voltage when 20[kV] potential is applied in 20[mTorr] pressure.

때 전자가 헬륨가스(He) 20[mTorr]의 분위기 속에서 가속되어 foil을 통과하는 상황을 모의하여 음극에 인가되는 고전압 펄스의 rising time의 변화에 따른 전자빔 전류의 변화를 조사하였다.

2. 본 론

2.1 관련이론

2.1.1 전자빔 발생 및 가속원리

1. 서 론

최근, 산업기술 분야에서는 전자빔 발생을 위한 기술이 상품화 되고 있으며 빔의 에너지와 전류의 크기에 따라서 기체레이저 여기, 금속 표면처리, 금속 기계가공 등의 산업분야 뿐 만 아니라 살균, 방사선 치료, 휘발성 유기물 처리(VOCs), 탈황·탈질, 오존 발생 등 의료 및 환경분야에 이르기까지 다양하게 응용되고 있다.^{[1][2][3][4]} 그 중에서 저에너지 대면적 전자빔(Low Energy Large Aperture Electron Beam) 발생 기술은 주로 상압 또는 고압력에서 균일한 글로우 방전을 얻기 위한 보조수단으로 기체레이저 장치에서 이미 그 가치를 인정받아 왔으며 최근에는 미국 RPC사에서 산업용으로 상용화 하였고^[5] 러시아의 NIEFA 연구소에서 100[kW]급 대출력 CO₂레이저 및 오존발생용으로 개발함으로써 산업응용 분야에서도 많은 관심을 가지게 되었다.^{[6][7][8]} 이처럼 전자빔 가속 및 발생기술은 국내 산업기술 개발을 주도할 기술로서 선진국에서는 이미 상용화된 기술이지만 국내에서는 연구기관을 중심으로 수입되어 가동중에 있는 실정이다.

우리가 개발하고자 하는 전자빔 발생장치는 에너지 200[kV], 전류 1[A], 펄스폭 수십[μ s], 펄스 반복율 200[Hz]의 펄스형 전자빔 발생장치로서 특징은 '냉음극'으로서 종래의 '열음극' 가속기에 비해, 기계·전기적으로 복잡하지 않고 투자비용 및 유지비용이 적으며 전자빔의 면적이 300[cm²] 정도의 '대면적' 이므로 3차원 처리가 가능하여 피처리 대상물에서의 스케닝이 필요없다는 것이다.

본 연구에서는 글로우 방전 개시 및 플라즈마 여기를 위해 DC 520[V]의 정극성 전압을 인가하여 압력변화에 따른 방전전류 특성을 조사하였으며, 또한 저에너지 대면적 전자빔 발생장치 개발을 위한 기초연구로서 컴퓨터 시뮬레이션 하였다. 음극에 -20[kV]의 전압을 인가하였을

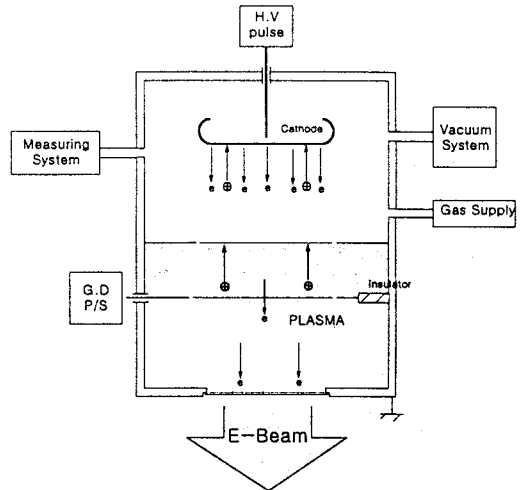


그림 1. 전자빔 발생장치 개념도

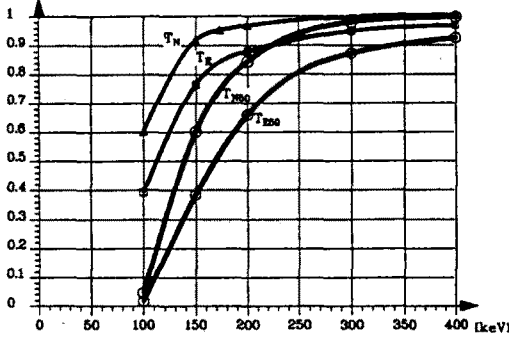
그림 1은 본 연구에서 개발하고자 하는 전자빔 발생장치의 개념도이다.

글로우 방전은 압력 수~수십[mTorr]의 헬륨가스로 채워진 챔버 내부에서 mesh 양극과 챔버 외벽사이에 전압을 인가함으로써 발생하며, 이때 방전개시 및 플라즈마 여기를 위해 공급되는 전압은 챔버에 대해 정극성을 가진다. 이와같이 글로우 방전에 의해서 생성된 플라즈마를 유지하면서 cathode에 전자를 발생 및 가속하기 위한負의 고전압 펄스를 인가한다. 펄스가 인가되면 플라즈마 내에 sheath가 형성되며 sheath 영역 내부에 존재하는 이온은 음극으로 가속되어 충돌하고, 이때 음극 표면에서 다수의 2차전자 방출이 일어난다. 이렇게 발생한 전자들은 음극 전압에 의해서 가속되어 플라즈마 영역과 foil을 통과하여 대기중으로 인출된다. 이때 가스압력이 어느정도 낮아 전자의 평균자유행정이 전극사이의 거리보다 크게되면 전자는 가속되어지는 동안 다른 중성 및 하전입자와 충돌 없이 대부분 가속영역 및 플라즈마 영역을 통과하여 전자빔 인출용 foil을 통과하기 위한 충분한 에너지를 가지게 된다.

2.1.2 전자빔 인출용 Al foil

진공과 대기압을 분리하면서 전자빔을 대기중으로 인출하기 위해서 foil은 전자빔의 에너지에 따라서 두께를 신중하게 선택해야 하므로, 1기압의 압력을 견디는 기계적 강도와 전자빔의 손실이 가능한 한 적은 두께를 고려하여 본 연구에서는 40[μm], 50[μm]의 Al foil을 사용하였다.

그림 2는 두께 25[μm], 50[μm]의 Al foil을 통하여 전자빔을 인출할 때의 전자빔 에너지에 따른 총전자 개수의 효율과 전자 에너지 효율을 나타내고 있다.



T_N, T_E : 총전자 개수, 전자에너지 효율(두께 : 25[μm])
 T_{N50}, T_{E50} : 총전자 개수, 전자에너지 효율(두께 : 50[μm])

그림 2. 전자빔 에너지에 따른 foil 투과 효율

2.1.3 X-ray 차폐

X-ray는 진공속에서 고속으로 가속된 전자들이 금속 표면에 충돌함으로써 발생하는 방사선으로 특징은 광파와 radio 파와 같은 성질의 전자기 방사선이지만 10^{-10} [m]이하의 매우 짧은 파장을 가지며 광 및 radio 파보다 수백만배 이상의 훨씬 더 큰 에너지를 가진다. 따라서 여러종류의 금속은 물론 인체의 조직까지 침투하므로 전자빔 발생 및 응용시 반드시 그에 수반하는 위험성을 생각하여 방사선 차폐를 한다.

그림 3은 전자빔 에너지에 따른 납, 철, 콘크리트의 상대적 방사선 차폐비용을 나타내고 있으며 콘크리트가 가장 저비용이지만 부피가 커지며 납과 철에 비해 각각 20배, 3배 이상의 차폐두께가 요구되기 때문에 빔 에너지 및 안전성을 고려하여 적절히 선택한다.

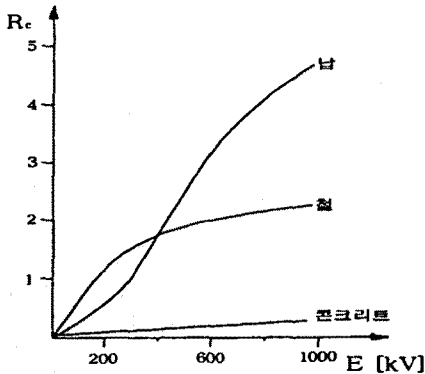


그림 3. 전자빔 에너지에 따른 상대적 방사선 차폐비용

2.2 실험장치 및 방법

2.2.1 실험장치

전자빔 발생장치는 크게 Ion source용 DC 보조전원장

치와 전자빔 발생 및 가속을 위한 주전원 장치, 그 밖에 진공장치, 가스공급장치 및 냉각 시스템으로 구성되어 있다. 플라즈마 가속챔버 내에는 플라즈마를 발생시키고 유지하기 위한 mesh 양극이 설치되어 있으며, 국부적인 플라즈마를 유지하기 위한 내부 grid(또는 mesh)와 함께 전자방출을 위한 cathode 전극을 포함한다.⁽⁹⁾

2.2.2 실험방법

글로우 방전 개시 및 플라즈마 여기를 위해 DC 520[V]의 정극성 전압을 mesh에 인가한 후 헬륨가스의 압력을 수~수십[mTorr]로 변화시켜 방전전류 특성을 조사하였다.

또한, 저에너지 대면적 전자빔 발생장치 개발을 위한 기초연구를 목적으로 20[kV]의 고전압 펄스를 음극에 인가하여 20[mTorr]의 진공속으로 전자가 가속되는 상황을 모의하여 인가전압의 rising time의 변화에 따른 전자빔 전류의 변화를 조사하였다.

3. 실험결과 및 검토

3.1 DC 글로우 방전 특성

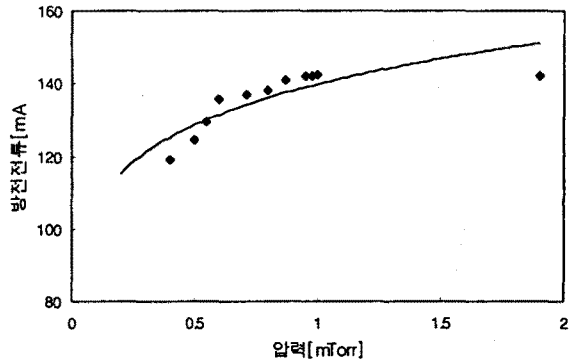


그림 4. 글로우 방전전류 특성(압력 수[mTorr] 이하)

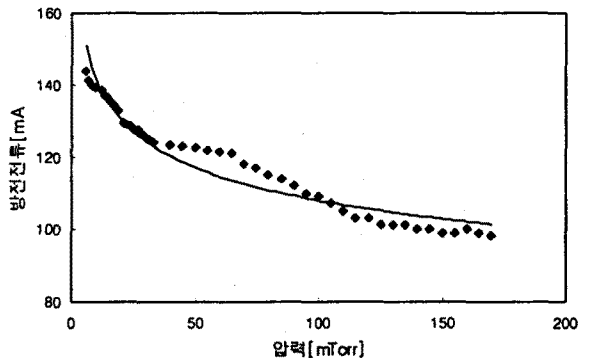


그림 5. 글로우 방전전류 특성(압력 수~수십[mTorr])

그림 4와 그림 5는 본 연구에서 제작한 전자빔 발생장치의 압력에 따른 글로우 방전전류의 특성을 나타낸다.

그림 4의 경우는 압력이 수[mTorr] 이하인 경우로서 압력이 높아짐에 따라서 방전 전류도 증가하는 경향을 나타내었고, 그림 5의 경우는 압력의 증가에 대해서 방전전류가 조금씩 감소하는 경향을 보였다.

이러한 결과는 낮은 압력에서는 압력의 증가가 전자와 중성기체간의 충돌 전리를 증가시키고, 높은 압력에서는 전자가 충돌전리에 충분한 에너지를 얻지 못할 만큼 평균

자유 행정이 짧아지기 때문으로 분석된다.

따라서 플라즈마의 밀도와 방전전류가 비례한다고 가정하였을 때 가장 적절한 가스의 압력이 있다고 생각할 수 있다.

3.2 시뮬레이션

본 장치의 Pulse shape와 인출 전자빔과의 관계를 조사하기 위해서 헬륨가스 20[mTorr]의 조건하에서 20[kV]의 펄스를 인가할 경우에 대해서 시뮬레이션을 하였다. 사용한 시뮬레이션 코드는 버클리 코드로서 XPDP1 코드를 사용하였다.¹¹⁾

그림 6에 나타난 바와같이 펄스의 상승시간이 빠를수록 전자빔 전류는 크게 나타났다. 이러한 이유는 펄스의 상승시간이 짧을수록 Ion matrix의 영역이 넓어지고 음극에서의 2차전자 방출이 많아지기 때문이다. 즉 글로우 방전에 의해서 생성된 플라즈마 내에 negative 펄스가 가해지면 전자가 음극으로부터 밀려나면서 상대적으로 무거운 Ion만 남게되는 Ion matrix의 영역이 펄스의 상승이 빠를수록 넓어지고, 따라서 음극으로 입사하는 Ion flux도 많아진다는 것이다.

한편, 펄스의 상승이 끝나면 sheath가 형성되고 전자빔의 전류는 포화하게 된다. 이 영역에 관해서는 추가로 시뮬레이션을 수행할 예정이다.

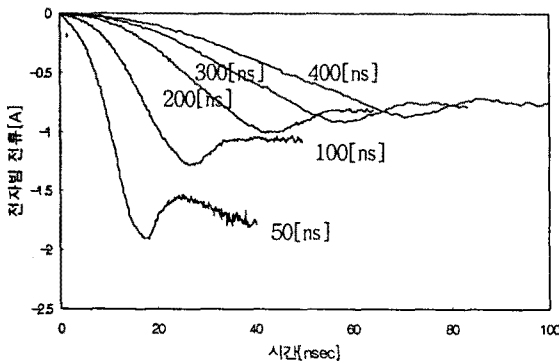


그림 6. 인가전압의 rising time 변화에 따른 인출 전자빔 전류

4. 결 론

본 연구에서는 저에너지 대면적 전자빔 발생장치 개발에 필요한 개념 및 원리와 전자빔 발생원인 글로우 방전에 대한 기초실험을 행하였고, 인가전압이 20[kV]인 경우에 대하여 펄스 상승속도에 대한 전자빔 전류의 관계를 시뮬레이션을 통하여 조사하였다.

실험결과, 글로우 방전 전류는 압력이 수[mTorr] 이하의 영역에서는 압력이 증가할수록 방전전류도 증가하였고, 그 이상의 영역에서는 압력의 증가에 대해서 약간씩 감소하는 경향을 나타내었다.

한편, 시뮬레이션 결과 전자빔 전류는 펄스의 상승시간이 짧을수록 크게 나타났다. 이는 글로우 방전에 의해서 생성된 플라즈마의 sheath와 밀접한 관련이 있는 것으로 여겨지며 추후 보다 자세한 시뮬레이션을 통하여 그 관계를 조사할 예정이다.

(참 고 문 헌)

- [1] 箱田 照幸 外 三人, "電子ビームによる揮發性有機物の處理", EP-97-59, pp 13~18, 平成 9年.
- [2] 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.
- [3] 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.
- [4] J. W. LEONHARDT, "Industrial Application Electron Accelerators in GDR", Radiat. Phys. Chem., Vol. 35, Nos. 4~6, pp 649~652, 1990
- [5] W. J. Ramler, "Performance Characteristics of a WIP Electron Beam System", 7th International Meeting on Radiation Processing, 1989.
- [6] "SMOL~ Accelerator for Researchs in the field of Radiation Processing", Technical Note of NIEFA, Russia, 1997.
- [7] 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.
- [8] G. G. Isaacs, "High Power Pulsed Electron Beam from a Glow Discharge", Nov 1967, New Technology, pp 542~543.
- [9] 우성훈, 이광식, 이동인, 조주현, 이홍식 외, "저에너지 대면적 전자빔 발생장치 개발(I)", 대한전기학회 방전 및 고전압연구회 춘계 학술발표회 논문집, pp 135~137, 1998.
- [10] C. K. Birdsall, V. P. Gopinath, and J. P. Verboncoeur "Plasma Computer Experiments Laboratory", Plasma Theory and Simulation Group EECS Department, University of California, Berkeley, CA 94720, 20 December 1996.
- [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] I. N. MESHKOV, "Radiation Technologies in Metallurgy and Machinery", Radiat. Phys. Chem., Vol. 35, Nos. 4~6, pp 483~487, 1990.
- [13] 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.
- [14] Takao Fusayama, "High Pressure Operation of an Electron Beam Gun", Journal of Applied Physics. Vol. 25, No. 5, pp L406~L408, May 1986.
- [15] 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.
- [16] M Bălăceanu, L Dinu and C Popovici, "The Space Distribution of the Electron Beam in a Glow Discharge Electron Gun and its Correlation with the Cathode Geometry", J. Phys., V. 18, pp 835~841, 1985.
- [17] Yanglai Cho, "Development of Accelerators and Society", J. Accel. Plasma Res., Vol. 1, No. 3, September 23, 1996.
- [18] Javier Ignacio Etcheverry, Nélida 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.
- [19] 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.