

## 3극 전계방출 전자총의 정전기 렌즈에 의한 전자빔 거동

김충수\*, 김동환<sup>+</sup>, 박만진<sup>++</sup>, 장동영<sup>+</sup>, 한동철<sup>++</sup>

(논문접수일 2007. 6. 20, 심사완료일 2007. 8. 23)

### Electron Beam Behaviors by the Electrostatic Lens in Triode Field Emission Gun

Chung-Soo Kim\*, Dong Hwan Kim<sup>+</sup>, Man-Jin Park<sup>++</sup>, Dong-Young Jang<sup>+</sup>, Dong-Chul Han<sup>++</sup>

#### Abstract

A field emission electron gun including 3 electrodes including one cathode and two anodes is very important for high resolution electron microscope. To have functions to control the initially-emitted electron beam, two anodes act as an electrostatic lens according to equipotential lines by adjusting the spot size, intensity, and working distance. To verify the action of the electron beam by the electrostatic lens by changing several parameters such as electrode shape, displacement and applied voltage to the electrodes, the two lenses were design and simulated and then their performances were analyzed with angular beam intensity(distribution), electrical optic axis variation and their stability.

**Key Words** : field emission(전계방출), electron gun(전자총), electrostatic lens(정전기렌즈), equipotential line(등전위선), angular beam intensity(각집속도), electrical optic axis(전기적광축)

### 1. 서론

전계방출(field emission)은 전자현미경(SEM: scanning electron microscope) 및 전자빔 모사장치(EBL: electron beam lithography) 등의 전자빔 장치에서 낮은 에너지분포(energy distribution)와 높은 전류밀도(current density)를 제공함으로써 아주 중요하다. 이 양자역학적 터널링(quantum mechanical) 현상 이용하여 전자를 방출하기 위해서는 음극

(cathode)와 2개의 양극(anode)으로 이루어진 최소 3개의 전극이 필요하다<sup>(1-3)</sup>.

특히, 2개의 양극에 전압을 인가함으로써 두 양극은 전기장 렌즈(electrostatic lens)의 역할을 하게 되고 음극으로부터 방출된 전자빔을 집속(focus)할 수 있다. 이 전기장 렌즈를 구성하는 2개의 전극의 형상, 전극거리 및 전극에 인가된 전압에 의하여 초기에 방출된 전자빔의 스팟사이즈(spot size)와 작업거리(working distance)를 조절할 수 있고 이는

\* 서울대학교 기계항공공학부 (reaves91@snu.ac.kr)

주소: 139-743 서울시 노원구 공릉2동 172

+ 서울산업대 기계설계자동화공학부

++ 서울대학교 기계항공공학부

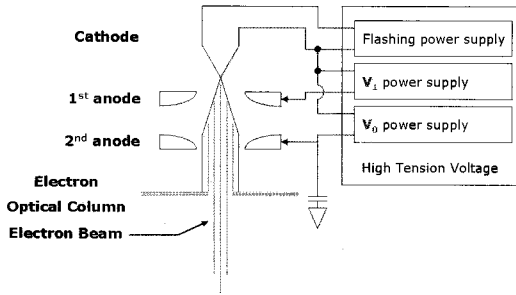


Fig. 1 The schematics of field emission electron gun

곧 전자빔의 질(quality)을 결정할 수 있다<sup>(2)</sup>.

본 논문에서는 전기장 렌즈의 구조가 전자빔의 집속에 미치는 영향을 알아보기 위하여 전극형상, 전극거리 및 인가전압을 고려하여 렌즈를 설계하고 제작하였다. 렌즈의 성능을 분석하기 위하여 전기화학적으로 제작된 음극과 렌즈를 배치하여 고진공 시스템에서 전계방출을 유도하고 라인컬렉터(line collector)를 이용하여 방사된 전자의 전류를 선택적으로 얻음으로써 각집속도(angular beam intensity) 및 방출 전자의 특성을 평가하였다.

## 2. 정전기 렌즈 설계

전자의 방출, 가속, 집속을 위하여 전자총의 구성은 하나의 음극과 2개의 양극으로 Fig. 1에 보인 것과 같이 최소 3개의 전극이 요구된다. 전기화학적으로 제작된 음극과 제 1양극에는 0 ~ -15kV의 음전압(negative voltage)이 인가되는데 제 1양극에는 음극보다 상대적으로 양전압(positive voltage)을 인가함으로써 전류 방출을 유도하게 되고 2번 양극은 접지되었다. 음극과 제 1양극의 전위차 ( $V_1$ )는 방출되는 총 방출전류의 양을 결정하고 음극과 제 2양극의 전위차 ( $V_0$ )는 시료에 떨어지는 전자의 에너지를 결정한다.  $V_0$ ,  $V_1$ 은 각각 인출전압(extraction voltage), 가속전압(acceleration voltage)이라고 부른다<sup>(1)</sup>. 방출된 전자는 1번 양극과 2번 양극에 인가된 전압에 따라서 Fig. 2와 같이 두 개의 전극사이에 등전위선(equipotential line)이 형성되고 이 선에 수직인 방향으로 방출된 전자빔이 이동하게 된다<sup>(5)</sup>. 이를 전기장 렌즈라고 부른다. 이 전기장 렌즈에 인가하는 전압에 따른 두 양극의 전위차(potential difference)와 양극의 형상에 의하여 변하는 등전위선의 분포에 따라 유도된 전자빔의 궤적이 변함으로써 스팟사이즈, 작업거리가 조절된다.

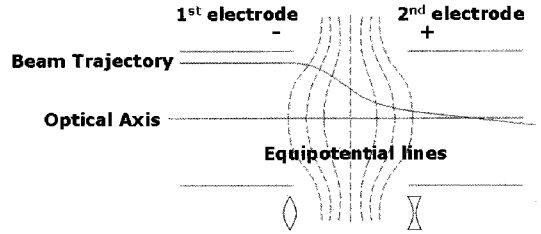


Fig. 2 Electrostatic lens Action(5)

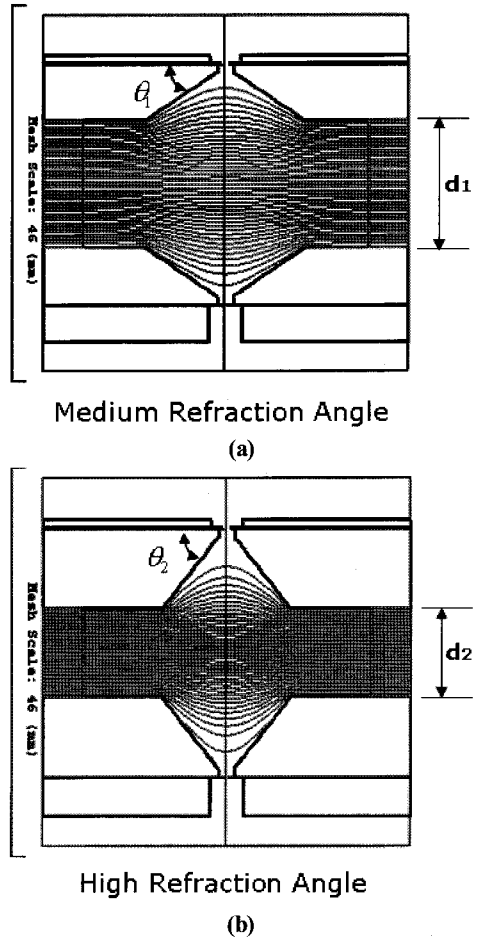


Fig. 3 Equipotential lines of two designed electrostatic lens (a) medium refraction angle(35°) (b) high refraction angle(50°)

전계방출 전자총에서 전기장 렌즈의 형상과 전극 간의 거리 및 인가전압에 따른 전자빔의 집속현상을 관찰하기 위하

여 먼로(Munro)(4) 렌즈를 변형하여 OPTICS(상용 소프트웨어)를 이용하여 굴절각(refraction angle)을 조절하기 위하여 렌즈 형상을 조절하였다. 이에 따라 2가지 렌즈를 설계하였고 설계된 렌즈는 굴절각( $\theta_1 = 35^\circ, \theta_2 = 50^\circ$ )과 두 전극간의 거리( $d_1 = 15.5\text{mm}, d_2 = 10.5\text{mm}$ )를 조절하면서 전기장의 분포를 변화시켰다. 전극형상과 전극거리에 따른 양극사이의 등전위선 분포는 Fig. 3과 같다.

### 3. 실험 장치

설계된 전기장 렌즈의 성능을 측정하기 위하여 진공 챔버(chamber)에 전자총이 장착되었다. Fig. 5는 설계된 렌즈가 탑재된 전자총과 챔버 및 모니터링(minitoring) 시스템이다. 이 고진공 챔버는 측정 장치가 위치한 부분에서의 진공도는  $\sim 10^{-9}$  torr의 진공도에 도달 할 수 있지만 내부 Fig. 6과 같은 측정 시스템의 전기적인 연결로 인한 내부 오염물질(contamination) 발생으로 인하여 전계방출이 유도되는 음극 부분에서의 진공도는 약  $\sim 10^{-7}$  torr였다.

방출된 전자빔의 각집속도 및 방출 전류의 특성을 측정하기 위하여 Fig. 6과 같은 라인 콜렉터를 이용한 측정 시스템이 고안되었다. 제작된 라인콜렉터는 PCB 기판 위에 0.6mm의 라인두께(line width)와 0.4mm의 간격(line spacing)으로 총 21개의 라인이 전류를 측정용 위해 위치한다. 제작된 라인콜렉터와 스위칭 장치는 Fig. 7과 같다.

각집속도 측정 전 음극과 1번 양극의 전위차에 의하여 유도된 전계방출 전자의 안정도를 측정하기 위하여 Fig. 6에서 보인 전원공급기에 연결된 플로팅 전류계(floating current meter)를 사용하였고 안정도는 약  $6.5\mu\text{A}$  영역에서 약 14%였으며 Fig. 8에 나와 있다.

전기장 렌즈의 효과에 의하여 집속된 전자빔의 전류 분포 실험 조건은 Fig. 9와 같이 주어졌고 라인 콜렉팅 스위치를 이용하여 라인콜렉터에서 측정되었다. Fig. 9(a)는 굴절각이  $35^\circ$ 이고 전극거리는 15.5mm인 렌즈이고 각집속도는 음극에 -5kV, -10kV, -15kV의 고전압을 인가하고 음극과 1번 양극에 인출전압을 1.9kV를 유지하면서 측정되었다. Fig. 9(b)는 입사각이  $50^\circ$ 이고 전극거리는 10.5mm인 렌즈의 각집속도는 음극에 -5kV, -10kV, -15kV의 고전압을 인가하고 1번 양극에 인출전압( $V_1$ )을 1.7kV를 유지하면서 측정되었다. 그리고 실제 시스템에서는 두 양극의 빔이 지나가는 곳에 빔의 사이즈와 수차(aberration)를 감소하기 위한 각각  $100\mu\text{m}$ 와  $50\mu\text{m}$ 의(aperture)가 위치한다. 조리개가 위치할 때 빔의 집속 범위는 약 3mm 내외로 측정범위가 제한적이었다. 따라서 본

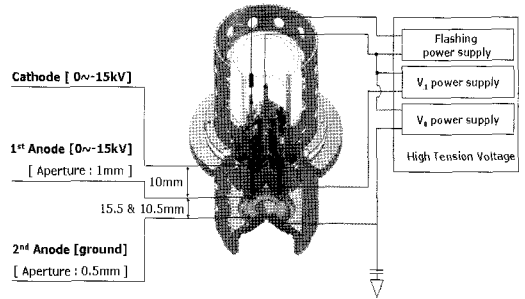


Fig. 4 Electron gun for field emission

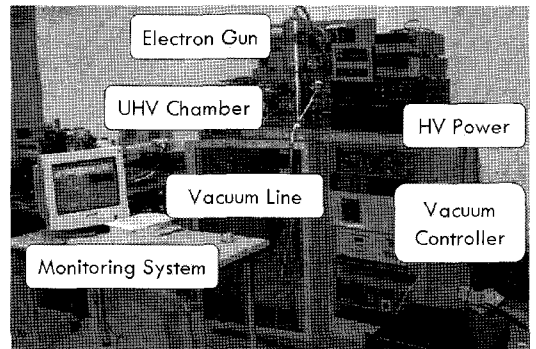


Fig. 5 Ultra high vacuum chamber and experimental setup

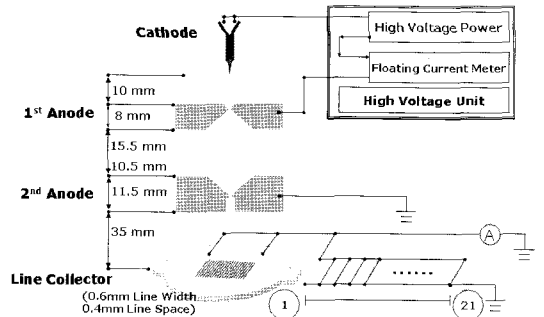


Fig. 6 Angular beam intensity measurement

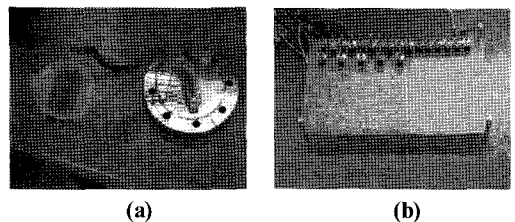


Fig. 7 Experimental setup for angular beam intensity (a) line collector (b) Collecting switch

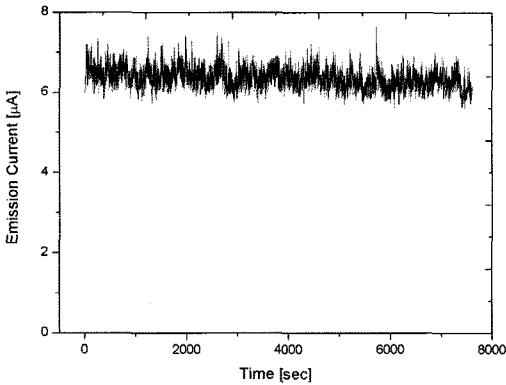


Fig. 8 Stability of field emission current

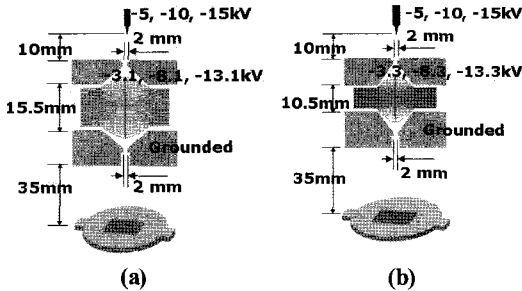
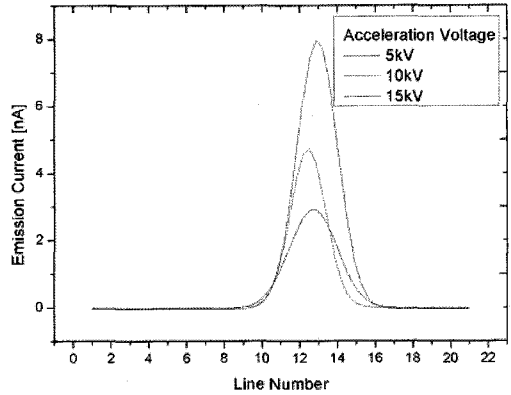


Fig. 9 Angular intensity measurement

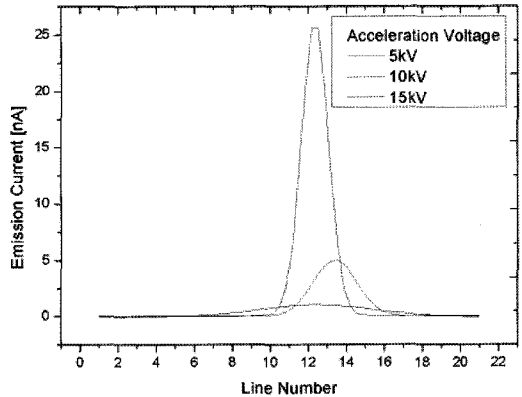
실험에서는 빔의 분산 영역을 쉽게 관찰하기 위하여 조리개를 제외한 2mm의 빔패스 홀(beam path hole)를 사용하여 측정하였다.

#### 4. 실험 결과

두 가지 전기장 렌즈에서의 라인콜렉터에서 측정된 각집속도 실험결과 Fig. 10과 같은 가우시안 분포(Gaussian distribution)의 전류 분포를 얻을 수 있었다. Fig. 10(a)에서 가속전압을 -5kV, -10kV, -15kV로 변화함에 따라 최대 방출 전류를 내는 라인번호는 13번, 12번, 13번이었다. 이 지점은 방출된 전자빔이 최대의 밝기(brightness)를 내는 곳으로 전기적 광축(electrical optic axis)을 나타낸다. 즉, 가속전압이 변화함에 따라 전기적 광축이 변화함을 알 수 있다. 또한, 이 라인에서 방출 전류의 양이 2.72nA, 4.68nA, 7.74nA로 선형적으로 증가하였고 전자빔의 집속 범위는 약 5 mm 정도로 거의 일정했다. Fig. 10(b)의 경우는 12번, 14번, 12번으



(a)

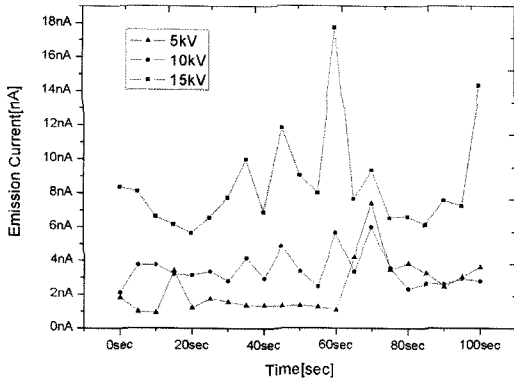


(b)

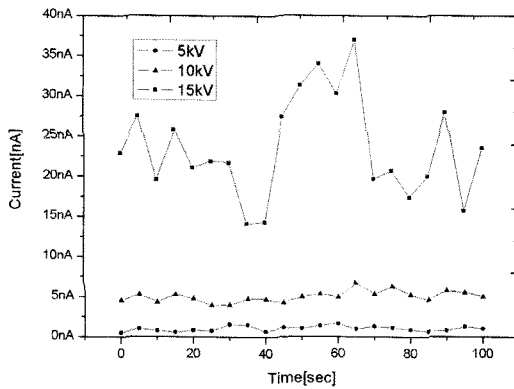
Fig. 10 Angular beam intensities with (a) medium(35°) (b) high(50°) refraction angle and their experimental conditions varying applied voltages to electrodes

로 전기적인 광축이 이동하였고 이 라인에서는 1.01nA, 5.02 nA, 27.5nA의 전류가 측정되었다. 가속 전압의 증가에 따라 방출 전류 측정값이 증가하였지만 Fig. 10(a)와 비교하여 -5 kV에서는 1nA의 저전류(low current)가 -15 kV에서는 27.5 nA의 고전류(high current)가 나타났다. 방출 전류의 분포는 가속전압의 증가함에 따라 약 5~12mm 정도로 가속전압의 변화에 따라서 전자빔의 집속 범위가 불안정하게 분포함을 알 수 있다.

각 렌즈에서 최고 전류치를 나타낸 라인에서의 측정 전류는 Fig. 11과 같다. 각 렌즈에 따른 라인콜렉터에서의 방출 전류의 특성을 비교하여 보면 Fig. 11(a)의 경우 방출 전류는 불안정했다. Fig. 11(b)의 경우는 -5kV, -10kV의 가속전압을 인가하였을 시 방출전류는 각각 약 1nA, 4.5nA 영역에



(a)



(b)

Fig. 11 Stability at the highest current in line collector

서 안정적이었지만 -15kV에서 방출 전류가 평균 23nA 정도로 급속하게 증가하였고 불안정했다.

### 5. 결론

전계방출을 유도하고 전기장렌즈에 따른 성능 및 특성을 평가하였다. 등전위선 분포에 따른 렌즈의 설계와 제작이 이루어졌으며, 이를 통하여 방출 전자의 특성을 실험적으로 관찰하였다. 전극형상, 위치 및 가속전압에 따른 전계방출 전자의 궤적을 관측함으로써 각 전기장 렌즈의 집속 현상과 방출 전자의 고유한 성질을 나타냄을 알 수 있었으며 이는 곧 전자빔의 안정도와 전기적 광축의 변화에 영향을 미침을 실험적으로 관측할 수 있었다. 특히, 전기적 광축의 변화의 관찰은 실제 전자빔 시스템의 자동축맞춤(auto alignment)에 응용될 수 있다.

### 후기

본 연구는 산업자원부 차세대기술개발 사업 및 서울시 산학연 협력사업의 지원으로 수행되었음(과제번호 10853).

### 참고 문헌

- (1) Crewe, A. V., Eggenberger, D. N., Wall, J. and Welter, L. M., 1968, "Electron gun using field emission source" *Rev. of Sci. Instrum.*, Vol. 39, No. 4, pp. 576~583.
- (2) Harker, K. J., 1960, "Determination of electrode shapes for axially symmetric electron guns, *J. Applied Physics*, Vol. 31, No. 12, pp. 2165~2170.
- (3) Gomer, R., 1961, *Field emission and field ionization*, Harvard University Press, Cambridge, pp. 47~52.
- (4) Orloff, J., 1977, *Hand book of charged particle optics*, CRC press, New York, pp. 3~5.
- (5) EL, A. B. and EL, J. C. J., 1970, *Electron beams, lenses and optics vol. 1*, Academic press, New York and London, pp. 60~65.