

# 멀티채널 방식에 의한 초미세 바늘 전극의 제작 및 빔 특성

임연찬\*, 현정우, 김성수, 박철우†, 이종항‡, 강승언

## Manufacture of an Ultra-Sharp Tungsten Electrode for Field-Emission Electron Beam and Its Beam Characteristics

Y. C. Yim, J. W. Hyun, S. S. Kim, C. W. Park<sup>†</sup>, J. H. Lee<sup>++</sup> and S. O. Kang

### Abstract

An ultra-sharp tungsten electrode for field emission was manufactured by using an electrochemical etching method, and its beam characteristics were investigated. KOH and NaOH were the electrolytes used in this research, and the taper length of the tip varied from 150  $\mu\text{m}$  to 250  $\mu\text{m}$  according to the applied voltage and the concentration of the electrolyte. The electron-beam stability was measured to be within 5% for a total emission current of 5  $\mu\text{A}$  during 4 hours of operation, and the ignition voltages were found to be  $\sim 300$  V. The tip radius was experimentally found to be 250  $\text{\AA}$  from a linear fitting of Fowler-Nordheim plots, which was in remarkably good agreement with that of the image size from scanning ion-microscopy.

**Key Words :** ultra-sharp tungsten electrode, electrochemical etching

## I. 서론

초미세(Ultra sharpness) 텅스텐 바늘 전극은 찬 음극 전기장 방출 전자빔(Cold cathode field electron beam)을 위한 전극으로 사용되며, 또한 주사 터널 현미경(Scanning tunneling microscopy : STM) [1]과 전계 이온 현미경(Field Ion Microscopy : FIM) [2], 고배율의 주사 전자현미경(Scanning Electron Microscopy : SEM) [3], 전자빔 홀로그래피 [4] 등의 전자원으로 사용된다. 특히 STM의 경우  $\sim 1000$   $\text{\AA}$  이하의 곡률 반경이 요구되고 있으며, 고해상도의 STM에서는 200~300  $\text{\AA}$ 의 곡률 반경을 필요로 한다.

초미세 바늘 전극의 제작은 다양한 방법들이 알려져 있다. 그 방법들을 살펴보면 다음과 같다. 전기화학적 식각과

폴리싱(Electro-chemical etching and polishing) [5], 음극 때려내기(Cathode sputtering), 이온 가공(Ion milling), 화학적 식각과 폴리싱(Chemical etching and polishing), 기계적인 가공, 그리고 기타 다양한 방법들이 있으며, 위의 방법들을 조합한 방법들이 있다. 여러 가지 방법중에서 전기장 방출 전자빔을 위하여 가장 효율적이고 널리 사용되는 방법이 전기 화학적 식각 또는 폴리싱방법이다. 식각과 폴리싱은 거의 유사하여 특별히 구분하지 않으나, 구분하는 방법은 식각 EH는 폴리싱 과정에서 현상적으로 나타나는 전류밀도를 이용하는 것이다. 식각은 가해진 전압에 대하여 낮은 전류밀도를, 폴리싱은 상대적으로 높은 전류밀도를 갖는 것으로 구분한다. 전기 화학적 식각 방법에서도 시료의 재질에 따라서 전해 용액의 종류와 농도, 전압의 형태(직류, 교류, 펄스)와 크기 용액의 온도, 마주보는 전극의(counter electrode) 형태 및 재질 등 매우 다양한 결정 요소들이 있다. 특히 용액의 종류와 농도 그리고 전압의 형태와 크기 등이 중요한 결정 요

\* 임연찬, 광운대학교 전자물리학과(yimvchan@hotmail.com)

서울시 노원구 월계동 447-1

† 한국산업기술대학교 기계공학과

‡ 한국산업기술대학교 기계공학과

소로 작용한다. 용액의 종류는 시료의 재질에 따라서 달라지며, 대표적으로 Pt-It의 경우 KCN, CaCl<sub>2</sub>, HCl, NaCl, KCl 용액이 사용되며, 텅스텐(W)의 경우에는 NaOH와 KOH 용액이 주로 사용된다. 또한 시료의 재질에 따라서 가해주는 전압의 형태도 직류, 교류, 또는 필요한 경우 펄스 전압을 사용하기도 한다. 직류전압의 경우 기체 방출이 국소적으로 이루어지며 제어가 용이한 장점이 있고, 교류 전압은 식각 효율이 높다. 이렇게 다양한 결정 요소들 때문에 텅스텐 바늘 전극의 용도에 따라서 여러 가지 방법으로 전기화학적 식각이 이루어진다. 최근에는 좀 더 작은 곡률 반경의 초미세 텅스텐 바늘 전극을 제작하기 위하여 산소 흡착 방법을 이용한 방법이 소개되고 있다. 산소 흡착[6] 방법은 전기화학적 식각 방법을 통하여 1차적으로 바늘 전극은 대략적인 형태로 제작한 다음, 10<sup>-5</sup> torr의 산소에서 시료의 온도를 1500-2000 K로 유지하여 산화와 환원 과정을 반복하면 산화된 텅스텐 표면이 제거되어 초미세 바늘 전극을 제작할 수 있다. 그러나 여러 단계의 공정을 거쳐야 되는 단점이 있다. 초미세 바늘 전극의 형태는 구형 대칭과 매끄러운 표면 그리고 적당한 테이퍼 길이가 요구된다. 또한 전기장 방출 전자빔을 위한 초미세 바늘 전극의 제작에 있어서 궁극적인 목표는 낮은 임계 방출 전압(low extraction voltage), 긴 수명(long life time), 안정된 방출 전류(stable emission current), 작은 퍼짐각(small emission angle) 등이며, 이러한 요소들은 텅스텐 바늘 전극의 형태와 곡률 반경 등과 매우 밀접한 관계를 가지고 있다.

본 실험에서는 전기화학적 식각 방법으로는 바늘 전극을 제작하여, 전극의 형태 및 곡률 반경을 측정하였으며, 전기장 방출을 통하여 전자빔의 안정도와 전류-전압 특성을 분석하였다. 또한 Fowler-Nordheim 공식을 사용하여 실험적으로 곡률 반경을 구했으며, 이 결과를 이온 현미경 사진과 직접 비교하였다.

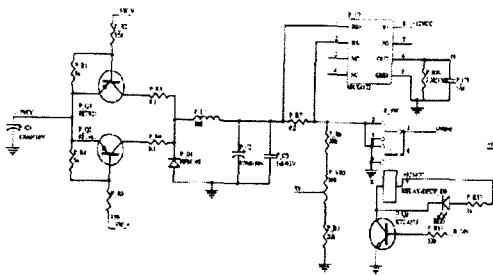


Fig.1 전기화학적 식각장치의 개략도

## II. 실험장치 및 방법

### 1. 바늘 전극의 제작

이 실험에서는 전기화학적 식각 방법을 이용하여 전기장 방출 전자빔을 위한 초미세 바늘 전극을 제작하였다. 서론에서 기술하였듯이 전기 화학적 식각 방법에도 시료의 재질과 용도에 따라서 다양한 조건들이 있다. 특히 이 실험은 낮은 임계 전압과 안정된 전자빔을 얻기 위하여 초미세 바늘의 곡률 반경이 수십 나노급 이하인 바늘 전극의 제작과 높은 재현성을 목표로 하고 있다. 높은 재현성을 얻기 위하여 단한번의 공정으로 초미세 바늘 전극을 제작할 수 있는 물방울 떨어뜨림(Drop-off[5,7])방식을 택하였다. 그림1은 전기화학 식각 장치의 개략도이다.

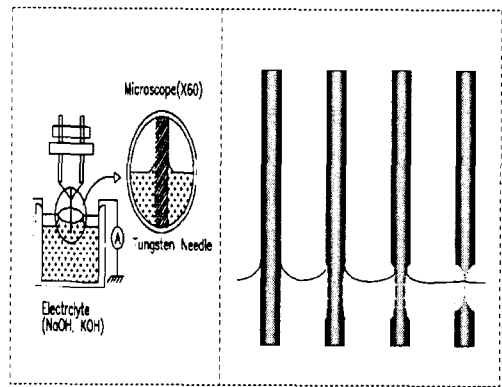


Fig. 2 a) 바늘 식각장치. b) 물방울 떨어뜨림(Drop-off) 방식의 식각과정

그림 2의 a)에서 직경이 0.15mm인 식각되어질 텅스텐 바늘은 양극에, 음극은 1mm 직경의 구리전선을 원형으로 제작하여 사용하였다. 텅스텐바늘의 전해질 용액내로의 침몰 깊이를 3mm정도 하였으며 이렇게 설치된 후 전원을 가하여 식각을 시작하였다.

이때 식각되는 전 과정을 현미경을 이용하여 상태를 관찰한다. 물방울 떨어뜨림(Drop-off) 방식은 전해용액과 수직으로 잠긴 텅스텐 바늘과의 표면장력으로 인해 그림 2의 a)와 같은 모양을 형성하며, 용액표면의 원형 전극(음극)으로 인해 용액의 수면에서부터 식각이 시작된다. 그림 2의 b)에서 보여 지는 것처럼 식각이 진행되면서 텅스텐 바늘은 전극이 연결되어 있는 부분과 용액에 잠겨 있는 두개의 부분으로 분리되며, 이때 분리되는 순간의 전류가 크게 변하므로 이 순간의 전류 변화를 검출하여 전극에 가하는 전압을 차단함으로써 초미세의 바늘 전극을 제작할 수 있다. 이때 텅스

텐 바늘이 두개의 부분으로 분리된 이후에도 조금씩 식각이 이루어지기 때문에 전압 차단은 매우 중요한 요소이다. 따라서 분리된 이후 더 이상의 식각이 일어나지 않도록 매우 빠른 시간(1ms 이하)에 전압을 차단하여야 한다. 이 실험에서 사용한 전해용액은 NaOH와 KOH용액으로 1~3 N까지 농도를 변화시켜 실험하였으며, 가해진 전압은 2~10 V의 직류전압을 사용하였다.

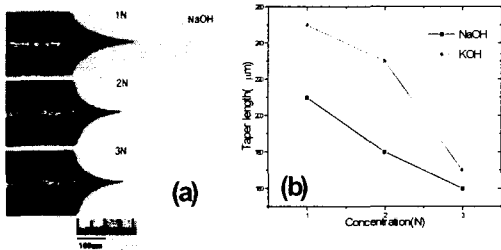


Fig.3 (a)용액의 농도에 따른 테이퍼 길이 비교 표, (b)용액의 농도에 따른 테이퍼 길이 비교 사진.

그림 3은 용액의 농도를 1~3 N로 변화시키면서 식각한 결과로 바늘 전극의 테이퍼 길이를 비교한 표(a)와 현미경 사진(b)이다. 그림 3(a)에서는 NaOH의 용액과 KOH용액을 사용하였을 때 용액의 농도에 따른 각각의 테이퍼 길이가 250μm로 3N의 농도에서는 170μm보다 약 80μm정도 길게 식각되는 결과를 얻었다. 또한 용액 농도가 1N에서 KOH용액의 경우 테이퍼 길이는 210μm로 NaOH 용액에서의 테이퍼 길이보다 약 40μm정도 더 짧게 식각되는 결과를 얻었다.

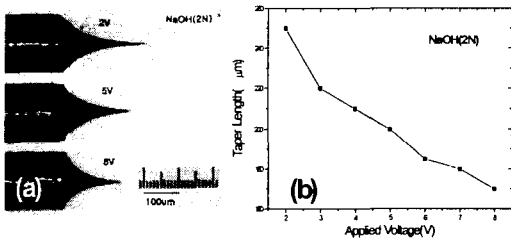


Fig. 4 (a) 전압의 크기에 따른 테이퍼 길이 비교 표, (b) 전압의 크기에 따른 테이퍼 길이 비교사진.

그림 4는 NaOH(2N)의 전해용액에서 가해진 전압크기를 변화시켜 실험한 결과이다. 전압이 2V에서는 테이퍼 길이가 250μm로, 8V에서의 170μm보다 약 80μm더 길게 식각

되는 결과를 얻었다. 식각률이 클 경우 표면근처에서의 식각이 표면에서 멀리 떨어진 곳의 식각보다 상대적으로 크게 일어나며 따라서 테이퍼 길이가 작아진다. 용액의 농도가 높을수록 그리고 식각전압이 클수록 식각률이 크며, 또한 NaOH 용액보다 KOH 용액이 식각효율이 크다.

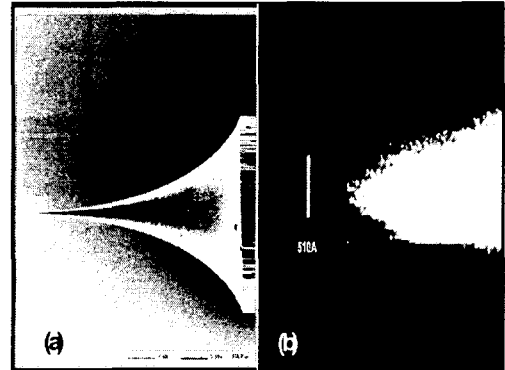


Fig. 5 (a) 초미세 바늘 전극의 이온 현미경 사진(600배), (b) 초미세 바늘 전극의 이온 현미경 사진(400,000배).

그림5(a)는 초미세 바늘 전극의 이온 현미경 사진이다. 대청성이 매우 뛰어나며, 표면의 상태가 매끄럽게 식각되었다. 이때의 배율은 600배이다. 그림 5(b)는 그림 5(a)에서 바늘 초미세 부분만을 확대한 이온현미경 사진(400,000배)이며, 이때 곡률반경이 대략 200~300 Å 정도임을 알 수 있다. 이때의 조건은 2N의 NaOH 용액의 4V의 전압을 사용했다. 전압의 크기와 용액의 농도에 따라서 곡률반경의 크기는 거의 변하지 않으며, 반복되는 실험에서 높은 재현성을 얻을 수 있었다.

## 2. 전기장 방출 전자빔의 전류-전압 특성

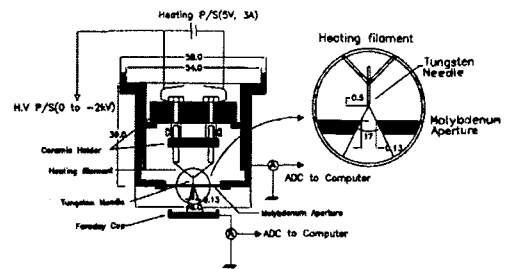


Fig. 6 전기장 방출 전자빔 발생 장치 개략도.

그림 6은 전자빔 발생장치의 개략도이다. 텅스텐 도선의 중앙에 점 용접으로 초미세 바늘 전극을 장착시킨 후 전기 절연을 위하여 세라믹 지지대를 이용 장착시킨다. 텅스텐 도선의 양단에 텅스텐 바늘 전극을 열세척 하기 위한 장치로서 5V, 3A의 전력을 가할 수 있는 전원 공급 장치를 연결하였다. 열세척 장치는 전극 표면의 산화막 또는 불순물을 제거하기 위하여 사용되며, 바늘 전극을 장착한 직후 2.5A, 3V의 전력으로 10초 동안에 열세척을 한다. 전자빔을 추출하기 위한 0 kV~2 kV까지 출력을 가진 전원 공급 장치를 바늘 전극에 연결하였다. 양극(anode)은 텅스텐 바늘의 끝에 서부터 0.5mm의 거리를 두었으며, 130 $\mu$ m 직경의 바늘구멍을 사용하였다. 바늘구멍을 통과하는 전자빔의 전류는 양극에서 10mm간격을 두고 페리데이 컵을 장착하여 측정하였다. 또한 동시에 추출극에서의 전류도 측정할 수 있도록 전류계를 장착하였으며, 페리데이 컵과 양극에서의 전류는 ADC를 통하여 0.1초 단위로 개인용 컴퓨터와 연결하여 측정하였다. 그림 7의 결과는 방출전류의 안정도를 보여주고 있다. 이때 측정한 시간은 12,000초이며, 0.1초 단위로 전류를 측정하였다. 그림 8은 총 방출전류량이며, 빔의 안정성은 총 방출전류량에 대하여 5%( $\Delta I/I$ )이내이다. 전류-전압 특성 곡선은 그림 8에서 보여주듯이 약 300V의 임계전압을 갖는다. 임계 전압에서의 방출전류는 ~10nA이었으며, 공급전압이 증가할수록 방출전류 역시 증가하였으며, 공급전압이 -1.4kV에서 약 -9nA로 측정되었다.

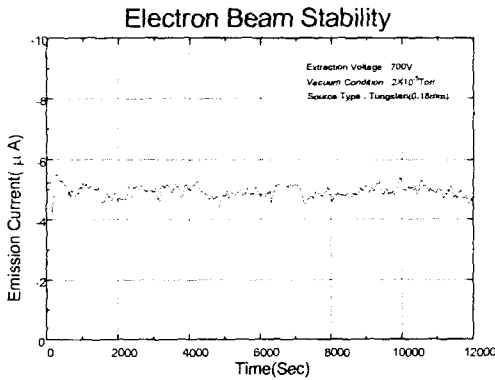


Fig.7 전기장 방출 전자빔의 안정도 특성.

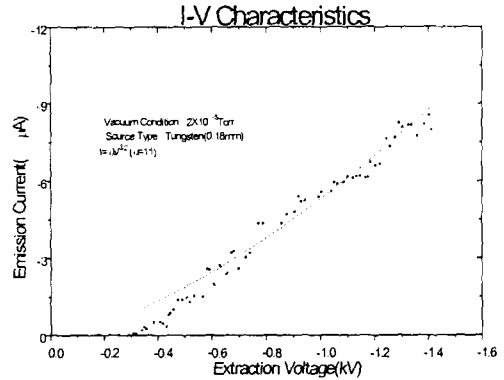


Fig.8 전기장 방출 전자빔의 전류-전압 특성 곡선.

### 3. Fowler-Nordheim 공식을 이용한 초미세 바늘 전극의 곡률반경 결정

Fowler-Nordheim [8] 공식은 전기장 방출에서 빔이 방출되기 시작하는 영역 부근에서 전류(I)-전압(V)곡선으로 다음과 같이 주어진다.

$$\frac{I}{V^2} = a \cdot \exp\left(-\frac{b\phi^{2/3}}{V}\right) \quad (1)$$

$$\ln\left(\frac{I}{V^2}\right) = -\frac{b\phi^{2/3}}{V} + \ln(a)$$

여기에서

$$a = 6.2 \times 10^6 A \left(\frac{\mu}{\phi}\right)^{1/2} (\mu + \phi)^{-1} + (\alpha \kappa r_{eff})^2$$

$$b = 6.8 \times 10^7 \alpha \kappa r_{eff}$$

이다.  $\alpha$ 는 Nordheim 영상 보정으로 1의 값을,  $\phi$ 는 일함수로 텅스텐의 일반적인 일함수인 4.5 eV,  $\kappa$ 는 기하학적 계수(geometrical coefficient [6])로 텅스텐 팁의 곡률 반경에 비해 양극까지의 거리가 매우 크므로  $\kappa \approx 5$ [6]이고,  $\mu$ 는 Fermi level이다. x축을  $1/V$ , 그리고 y축을  $\ln(I/V^2)$ 로 하여 위의 식(1)을 이용하여 구한 실험 결과인 Fowler-Nordheim 곡선을 그림 9에 나타내었다. 방출 전류가 작은 임계전압 근처에서 측정해야 하기 때문에 빔 방출시 떨림이 있으며 따라서 실험오차를 축소시키기 위하여 500개 이상의 실험결과를 사용하며 Fowler-Nordheim 곡선을 얻었다. 물론 그림 9에서 보여주는 직선은 선형 맞춤을 통하여

얻어진 결과이다. 위의 Fowler-Nordheim 그림을 이용하여 초미세 바늘 전극의 곡률반경을 결정하는 과정은 다음과 같다. 먼저 Fowler-Nordheim 그림을 실험으로 구한 다음, 이 그림의 기울기를 구한다. 이 그림의 기울기는 위의 식 (1)에서  $-b\phi^{2/3}$  이다. 따라서 텅스텐의 일함수 4.5 eV와 Nordheim 영상 보정(image correction)  $\alpha = 1$ , 그리고 기하학적 계수  $\kappa=5$ 를 대입하면 초미세 바늘 전극의 곡률반경을 결정할 수 있다. 위의 수치를 대입한 결과, 초미세 바늘 전극의 곡률반경은  $\sim 250 \text{ \AA}$ 로 결정된다. 또한 전기장 방출시 전기장의 세기와 일반적인 전압의 근사식 [11]을 사용하여 다음과 같은 방법으로도 곡률반경을 결정할 수 있다.

$$F \simeq \frac{V}{\kappa r} \quad (2)$$

전기장 방출시 전기장의 세기( $F$ )는  $\sim 0.5V/\text{\AA}$ 이고, 기하학적인 계수  $\kappa=5$ , 그리고 임계방출전압을 실험에서 측정할 결과  $\sim 300 \text{ V}$ 이다. 따라서 위의 식 (2)를 사용하여 초미세 바늘 전극의 곡률반경( $r$ )은 약  $\sim 230 \text{ \AA}$ 로 계산할 수 있다. Fowler-Nordheim 공식을 이용하여 실험에서 결정한 결과와, 전기장의 세기를 이용하여 실험에서 결정한 결과가 잘 일치함을 확인하였다. 또한 바늘 전극의 이온현미경 사진(그림 5(b))을 통한 곡률반경 측정결과  $200\sim 300 \text{ \AA}$ 으로 잘 일치함을 알 수 있다.

#### IV. 결 론

전기화학적 식각방법을 이용하여 바늘 전극의 곡률 반경이  $200\sim 300 \text{ \AA}$ 인 초미세 바늘 전극의 제작하였으며, 제작된 초미세 바늘 전극을 사용하여 전기장 방출 전자빔의 전류-전압 특성과 전자빔 방출시의 안정도 등을 측정하였다. Fowler-Nordheim 공식을 이용하여 실험적으로 결정한 곡률 반경( $\sim 250 \text{ \AA}$ )과 전기장의 세기를 이용한 계산한 곡률반경( $\sim 230 \text{ \AA}$ ), 그리고 이온현미경 사진(그림 5(b))에서 구한 곡률반경( $200\sim 300 \text{ \AA}$ )의 크기는 모두 잘 일치하였다. 전기장 방출 전자빔의 안정도는 12,000초 동안 전자빔의 감소 또는 증가하는 현상은 나타나지 않았으며, 전자빔의 순간적인 떨림 역시 5% 이하의 안정도를 보였다.

초미세 바늘 전극을 제작하기 위하여 여러 가지 다양한 방법으로 시도되고 있으나, 비교적 간단하고 재현성이 높

있는 초미세 바늘 전극을 제작할 수 있었다. 특히 본 연구에서 제작된 초미세 바늘 전극은 매우 낮은 전압( $\sim 300 \text{ V}$ )에서 전기장 방출 전자빔의 얻을 수 있었으며, 따라서 낮은 전압과 소형의 전자원으로서 매우 큰 응용가능성을 가지고 있다.

#### 후 기

본 연구는 2003년도 광운대학교 교내학술연구비와 산업자원에서 지원하는 차세대신기술개발과제인 "이온빔 이용 나노가공용 장비 개발" 사업으로부터 지원을 받아 연구되었으며, 이에 감사드립니다.

#### 참 고 문 헌

- [1] G. Binning, H. Rohrer, Ch. Gerber and E. Weibel, 1982, "Surface Studies by Scanning Tunneling Microscopy," *Phys. Rev. Lett.* 49, pp. 57~61
- [2] E. W. Muller and K. Maha역, *Phys. Rev.* 102, 624(1956).
- [3] Y. Akame, E. Nishimura, A.Sakai and H. Murakami, 1990, "New scanning tunneling microscopy tip for measuring surface topography," *J. Vac. Sci. Technol. A8*, pp.429~433.
- [4] Akira Tonomura, 1987, "Applications of electron holography," *Rev. Modern Phys.* 59, pp.639~669
- [5] Allan. J. Melmed, 1991, "The art and science and other aspects of making sharp tips," *J. Vac. Sci. Technol. B9*, pp.601~608
- [6] H. S. Kim, M. L. Yu, U. Staufer, L. P. Muray, D. P. Kern and T. H. P. Chang, 1993, "Oxygen processed field emission tips for microcolumn applications," *J. Vac. Sci. Technol. B11*, pp.2327~2331.
- [7] R. J. Morgan, *J. Sci. Instrum.* 44, 808 (1967).
- [8] R. Gommer, 1961, *Field Emission and Field Ionization*, Harvard University Press, Cambridge.