

## 탄소나노튜브를 이용한 고휘도 X-선원용 전자빔원 개발

김선규<sup>†</sup> · 허성환 · 조성오

한국과학기술원 원자력 및 양자공학과  
(논문접수일 : 2005년 8월 22일)

### Development of an electron source using carbon nanotube field emitters for a high-brightness X-ray tube

Seonkyu Kim<sup>†</sup>, Sunghwan Heo, Sung Oh Cho

Department of Nuclear and Quantum engineering, KAIST  
(Received August 22, 2005)

#### 요 약

고휘도 마이크로빔 X-선원에 사용할 고휘도 전자빔원을 탄소나노튜브를 이용하여 설계, 제작하였다. 전자빔원은 탄소나노튜브 팁을 이용한 음극, 전자빔 인출용 그리드, 전자빔 가속용 양극으로 이루어진 삼극관 형태의 구조를 가진다. 설계된 휘도 값을 얻기 위하여 X-선 발생부에서의 전자빔 직경이 5  $\mu\text{m}$  이하, 빔전류가 약 30  $\mu\text{A}$  이상이 요구된다. 이러한 요구조건을 만족시키기 위하여, EGUN Code를 이용하여 전자빔의 궤적 및 공간분포 등을 계산함으로써, 탄소나노튜브 팁 및 전자빔원의 구조 등을 최적화 하였다. 제작된 탄소나노튜브 팁은 직경 200  $\mu\text{m}$  의 텅스텐 와이어를 전기화학적으로 에칭하여 그 끝을 뾰족하게 만든 뒤 텅스텐의 끝 부분에 탄소나노튜브를 화학기상법으로 증착하여 제작하였다. 제작된 탄소나노튜브를 이용하여 전자빔 인출실험을 수행하였다. 개발 중인 탄소나노튜브 팁을 이용한 고휘도 전자빔원의 설계 특성 및 기초 실험결과를 보고한다.

주제어 : 탄소나노튜브, X-선원, 고휘도, 마이크로빔

#### Abstract

A high-brightness electron beam source for a microfocus X-ray tube has been fabricated using a carbon-nanotube (CNT) field emitter. The electron source consists of cathode that includes a CNT field emitter, a beam-extracting grid, and an anode that accelerates that electron beam. The microfocus X-ray tube requires an electron beam with the diameter of less than 5  $\mu\text{m}$  and beam current of higher than 30  $\mu\text{A}$  at the position of the X-ray target. To satisfy the requirements, the geometries of the field emitter tips and the electrodes of the gun was optimized by calculating the electron trajectories and beam spatial profile with EGUN code. The CNT tips were fabricated with successive steps: a tungsten wire with the diameter of 200  $\mu\text{m}$  was chemically etched and was subsequently coated with CNTs by chemical vapor deposition. The experiments of electron emission at the fabricated CNT tips were performed. The design characteristics and basic experimental results of the electron source are reported.

Key Words : CNT, X-ray tube, high brightness, microfocus

## 1. 서 론

1992년에 탄소나노튜브 (carbon nanotube)가 발견된 이후 전자빔원으로서의 가능성이 1995년에 밝혀진 후로 최근 탄소나노튜브를 이용한 전자빔원이 전계방출 디스플레이, X-선 튜브, 기타 고휘도 전자총 등의 용도로 전 세계적으로 활발히 연구개발 되고 있다 [1]. 탄소나노튜브를 이용한 전계방출 전자빔원의 경우 기존 열전자빔원이나 냉전계방출형 전자빔원보다 전자빔의 휘도를 훨씬 더 증가시킬 수 있을 뿐 아니라 전자빔 인출원의 크기를 줄일 수 있는 이점이 있다 [2]. 이러한 장점으로 인해 탄소나노튜브를 이용한 전자빔원은 X-선 튜브에 널리 이용되고 있다. 이미 일본 나고야 대학에서는 탄소나노튜브를 이용한 초소형 X-선 튜브를 개발하였고 [3,4], 미국 노스캐롤로이나 대학에서도 탄소나노튜브를 이용하여 X-선원을 개발하였다 [2,5]. 한편, X-선원의 크기가 작아질수록 공간분해능이 높은 X-선 영상을 얻을 수 있게 되는데, 최근 의료 및 산업용 X-선 영상장치를 위해 X-선의 크기가 수  $\mu\text{m}$  이하인 마이크로빔 (micro-focus) X-선 튜브가 널리 개발되어지고 있다[2]. 그러나 기존의 마이크로빔 X-선 튜브는 대개 열전자빔원을 사용하고 있어 X-선의 휘도가 대개  $10^9 \text{ phs/mm}^2\cdot\text{mrad}^2\text{s}$  이하이고 따라서 이를 이용하여

X-선 영상을 얻을 경우 시간이 많이 걸리는 단점이 있다 [1]. X-선 튜브에서 발생하는 X-선의 휘도가 이렇게 제한되는 이유는 X-선 타겟을 때리는 전자빔의 휘도가 제한되어 있기 때문이며, 이러한 점에서 탄소나노튜브는 X-선의 휘도를 높일 수 있는 좋은 대안이 될 수 있다.

본 연구팀은 현재 탄소나노튜브를 이용한 전계방출원을 이용하여 고휘도 마이크로빔 X-선 튜브를 개발 중이다. 설계된 마이크로빔 X-선 튜브의 개념설계도 및 제원은 각각 그림 1, 표 1과 같다. 설계된 X-선 튜브의 휘도는  $10^{11} \text{ phs/mm}^2\cdot\text{mrad}^2\text{s}$ , 발생하는 X-선의 에너지는 10 - 24 keV, 타겟에서 발생하는 X-선의 직경은 5  $\mu\text{m}$  이하이다. 이러한 X-선을 발생하기 위해 전자빔원은 탄소나노튜브를 이용한 전계방출원을 사용하였고 X-선 발생부는 몰리브덴 포일을 이용한 투과형으로 설계하였다. 설계된 X-선 휘도를 얻기 위하여 필요한 전자빔의 전류는 최소 25  $\mu\text{A}$ 이었다. X-선 타겟을 때리는 전자빔의 크기가 설계된 X-선의 직경인 5  $\mu\text{m}$ 보다 작아야 한다. 이를 위해 전자빔 광학계는 전자현미경에서 널리 이용되는 이중 집속렌즈를 사용하였고 전자빔원은 탄소나노튜브 팁을 가진 음극, 전자빔 인출용 그리드, 전자빔 가속용 양극으로 구성된 삼극관형을 채택하였다. 음극과 양극만으로 이루어진 이극관형은 구조가 간단

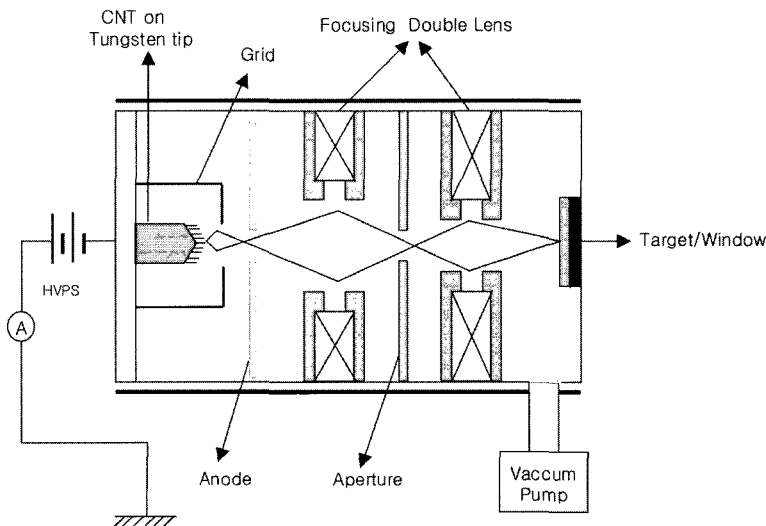


그림 1. 개발 중인 X-선 마이크로빔원의 개념 설계도

표 1. 개념 설계된 X-선 마이크로빔원 주요 제원

X-선원의 구조	탄소나노튜브를 이용한 3극관형 (Transmission type x-ray tube)
X-선 에너지	10 - 24 keV
X-선 휘도	1011 phs/mm <sup>2</sup> ·mrad <sup>2</sup> ·s
전자빔 에너지	0 - 100 keV
Target에서의 전자빔 전류	> 25 $\mu$ A
Grid 전압	0 - 2 kV
전자빔 광학계 구조	Double lens type
Target 재질	텅스텐
Target 두께 및 크기	4 $\mu$ m, 1 × 1 cm <sup>2</sup>
Cone angle	60도
Electron emitter	multi CNTs on W wire (0.2 mm)

하나, 이극관의 경우 전자빔의 에너지가 고정되면 인출전류도 고정될 뿐 아니라 X-선 타겟을 때리는 전자빔의 직경을 작게 만드는 데 한계를 가진다. 따라서 본 연구에서는 삼극관형 전자빔원을 사용하였다. 양극을 통과한 전자빔은 집속렌즈와 aperture에 의해 X-선 타겟에서 빔의 크기가 5  $\mu$ m 이하로 조절되어진다.

## 2. 탄소나노튜브 팁 및 전자빔원 광학계 설계

탄소나노튜브를 이용한 전자빔원의 주요 제원 도출 및 개념 설계를 위해 탄소나노튜브에서 발생하는 전자빔의 특성 변수 및 x선 타겟까지의 전자빔 광학 등을 EGUN code로 계산하였다. 탄소나노튜브에서 인출되는 전자빔의 궤적을 계산한 결과는 그림 2와 같다. 그림 1에서 볼 수 있듯이 탄

소나노튜브에서 전계 방출로 전자빔을 인출하기 위해 탄소나노튜브와 양극 사이에 그리드 전극을 설치하여 탄소나노튜브 팁에서 강한 전기장이 발생하도록 하였다. 계산결과에 의하면 양극을 통과하는 빔은 발산하고 있으므로 양극을 통과한 뒤의 전자빔의 통과하는 직경은 점점 커지게 된다. X-선 타겟에서 요구하는 전자빔의 직경 (5  $\mu$ m) 에 대한 요구조건을 만족시키기 위하여 솔레노이드를 이용한 두 개의 전자빔 집속렌즈를 양극 후단에 설치하였을 때 전자빔 광학의 변화는 그림 2와 같다. 그림에서 보여지듯이 양극을 통과한 뒤에도 전자빔의 크기가 증가하지 않고, 양극위치보다 빔의 크기가 줄어들고 있음을 알 수 있다. 집속렌즈의 정확한 위치, 필요한 자기장 값 등은 탄소나노튜브 팁의 모양, 그리드 전극의 모양 및 그리드 인가전압, X-선 튜브의 타겟 위치 등 여러 가지 변수에 의해 좌우된다. 한편 음극에 대한 그리드 전극의 위치 및 그리드 전압의 변화에 따른 인출되는 전자빔 전류량을 계산한 결과는 표 1과 같다. EGUN code에 의한 계산결과로부터 그리드에 인가하는 전압의 범위가 수 kV 정도임을 알 수 있다.

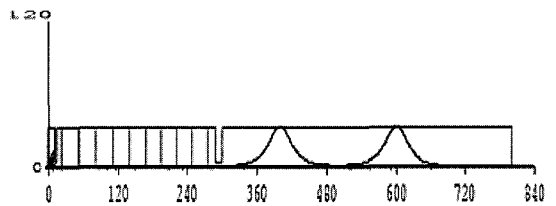


그림 3. 이중집속렌즈를 이용한 전자빔광학계에서의 전자빔 궤적

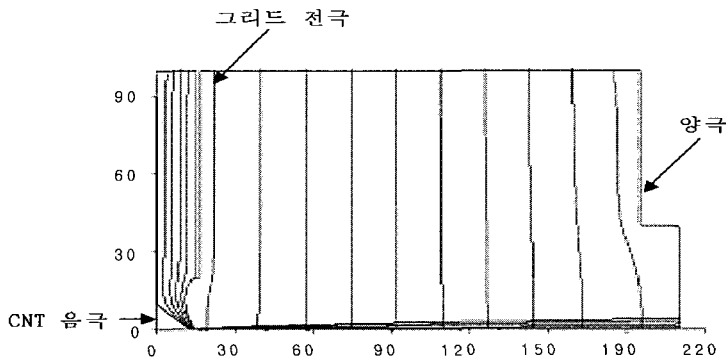


그림 2. 탄소나노튜브 팁에서 인출되는 전자빔의 궤적

표 2. 그리드의 위치에 따른 전류변화 (좌측, 그리드전압 1 kV)와 그리드 전압에 따른 인출전류 변화 (우측, 그리드위치 3 mm)

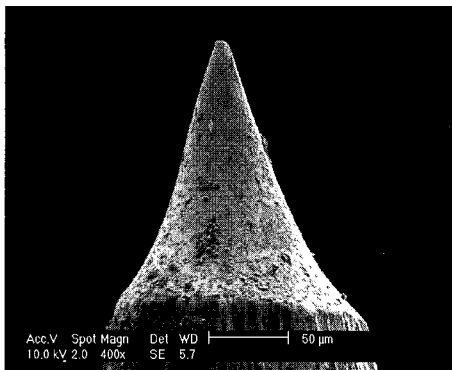
그리드 위치 (mm)	방출전류( $\mu A$ )	그리드 전압 (kV)	방출 전류( $\mu A$ )
1	740	0.5	6.7
2	76	1	17
3	17	1.5	32
4	5.3	2	48
5	1.8	2.5	67

### 3. 탄소나노튜브 팁 제작

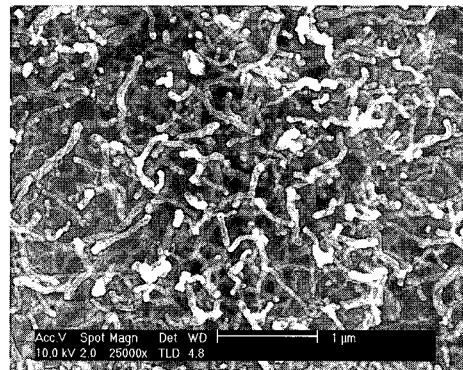
표 1에서 보여지듯이 설계된 X-선의 휘도를 얻기 위해서는 X-선 타겟을 때리는 전자빔 전류가 25  $\mu A$  이상이어야 한다. 따라서 탄소나노튜브 팁에서는 이보다 훨씬 더 높은 전자빔 전류가 발생하여야 하는데, 단일의 탄소나노튜브에서는 이 정도의 전류를 인출시킬 수 없다. 일반적으로 금속이나 실리콘 등의 평판 기판에 탄소나노튜브를 성장 또는 코팅시키면 좁은 면적에 여러 개의 탄소나노튜브가 존재하는 음극을 만들 수 있다. X-선 타겟을 때리는 전자빔의 직경이 5  $\mu m$  이하로 만들어져야 하기 때문에, 전자빔을 발생하는 면적이 가능한 작아야 한다. 이는 빔을 발생시키는 면적이 높을수록 빔의 에미턴스가 커져 빔의 직경을 줄이는데 한계가 발생하기 때문이다. 본 연구에서는 직경이 200  $\mu m$ 인 텅스텐 와이어 끝에 탄소나노튜브를 코팅하는 방식을 채택하였다. 이 때 인출되는 전자빔의 전류를 높이기 위해 텅스텐 와이어의 끝 부분을

뾰족하게 만들어 국부적인 전기장의 세기를 높이고 음극을 설계하였다. 이렇게 설계된 음극에서 발생하는 전자빔의 전류 및 빔광학은 표 2에서 보여지는 것과 같이 설계값을 만족시킬 수 있음을 확인하였다. 제작된 탄소나노튜브 팁의 주사전자현미경 (SEM) 사진은 그림 4와 같고 팁 제조 과정은 다음과 같다.

먼저 직경 200 $\mu m$ 인 텅스텐 와이어를 그림 5와 같이 전기화학적인 방법을 이용하여 에칭하였다 [6,7]그림에서 보여지듯이 KOH 용액에 백금전극과 텅스텐 팁을 설치한 뒤, 텅스텐 팁이 양극이 되게 직류 전압을 서서히 인가한다. 그 결과 그림 5에 보여진 화학반응에 의해 텅스텐 팁에서 산화반응이 일어나면서 텅스텐 팁이 서서히 녹게 된다. 이 때 텅스텐 팁과 KOH 용액과의 표면장력에 의해 텅스텐 팁의 끝 부분이 그림4(a)와 같이 뾰족하게 된다 [6,7]. 에칭이 완료된 텅스텐 팁은 불산과 증류수로 세척하고 이후 화학기상증착법 (CVD)으로 다중벽 탄소나노튜브를 증착하였다 [8,9]. 그림



(a)



(b)

그림 4. (a) 제작된 탄소나노튜브 팁의 SEM 사진, (b) 증착된 탄소나노튜브의 SEM 사진

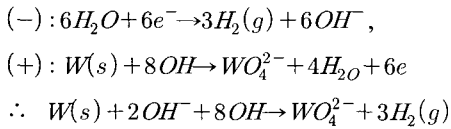
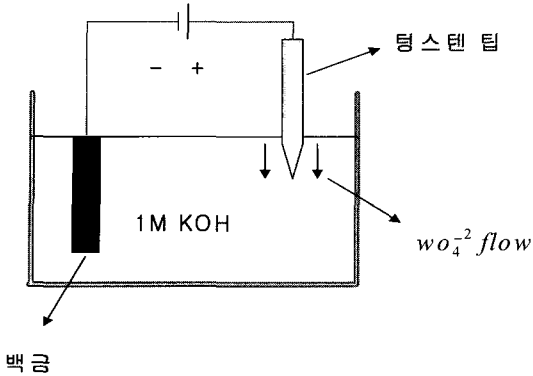


그림 5. 전기화학적 과정에 의한 텅스텐 팁의 에칭 과정

4(b)에서 보여지듯이 길이가 수  $\mu m$ 인 탄소나노튜브 다발이 텅스텐 팁 표면에 코팅되어 있음을 알 수 있다.

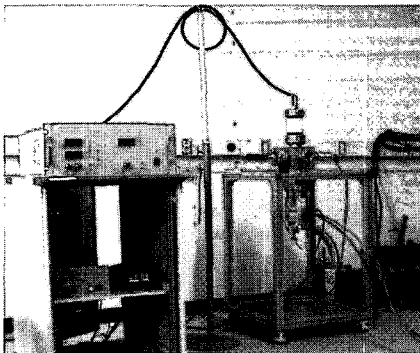
#### 4. 전자빔 인출실험

제작된 탄소나노튜브 팁의 전자빔 인출 특성을 측정하기 위한 실험장치를 그림 6과 같이 구성하였다. 탄소나노튜브 팁은 황동으로 만든 지지대에 고정시키고 반대편에 알루미늄이 코팅된 ZnS 형광판을 설치한 뒤, 형광판에 고전압을 인가하도록 하였다. 실험에서의 진공도는  $10^{-5} \sim 10^{-6}$  torr이었고,

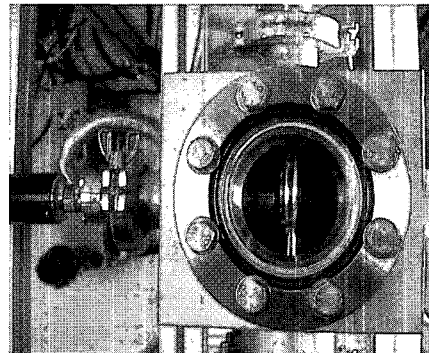
형광판에 걸어준 전압은 1~3 kV였다. 탄소나노튜브 팁과 형광판의 거리는  $300 \mu m$ , 빔 인출은 연속적으로 이루어졌다. 제작된 탄소나노튜브 팁에서 인출된 전자빔 전류와 인가전압과의 관계는 그림 7(a)와 같고, 인출된 전자빔의 영상은 그림 7(b)와 같다. 그림에서 보여지듯이 인출전류는 Fowler-Nordheim 공식을 잘 따름을 알 수 있었고 [10,11], 인출되는 전자빔의 형태도 둥근모양인 것을 알 수 있었다. 실험에서 얻은 인출전류의 최대값은  $300 \mu A$ 이상이므로, 이는 마이크로빔 X-선 튜브에서 필요로 하는  $25 \mu A$ 보다는 훨씬 더 큰 값이다.

#### 5. 요약 및 논의

탄소나노튜브 팁을 이용하여 고휘도 마이크로빔 X-선 튜브를 위한 전자빔원을 설계, 제작하였다. 탄소나노튜브 팁과 전자빔원의 구조는 EGUN code를 이용하여 설계하였다. 탄소나노튜브 팁은  $200 \mu m$  직경을 갖는 텅스텐 와이어를 화학적으로 에칭하여 끝을 뾰족하게 만든 뒤, 에칭된 텅스텐 끝 부분에 다중벽 탄소나노튜브를 CVD 공정으로 코팅하였다. 제작된 탄소나노튜브 팁을 이용하여 전자빔 인출실험을 수행한 결과, 설계된 X-선 튜브에서 요구되는  $25 \mu A$ 보다 훨씬 더 큰 약  $300 \mu A$  이상의 전류를 인출하였고 또한 인출되는 전자빔이 둥근 모양을 함을 알 수 있었다. 향후 이중집속렌즈 등을 이용한 전자빔 광학계를 설치하여 직경  $5 \mu m$ 인 마이크로 전자빔을 인출하는 실험을 수행할 예정이다.



(a)



(b)

그림 6. (a) 전자빔 인출 실험장치 사진, (b) 탄소나노튜브 팁과 양극(Anode)의 모습

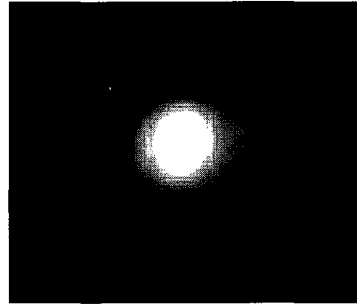
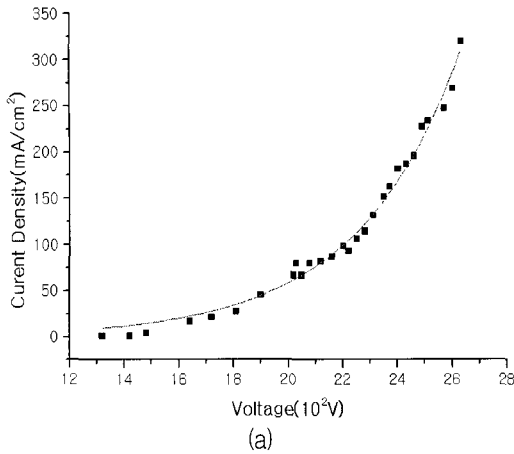


그림 7. 탄소나노튜브 팁에서의 전자빔 인출특성. (a) 인가전압과 인출전류와의 관계, (b) 전자빔 인출영상

### 감사의 글

본 연구는 과학기술부에서 시행하는 원자력 연구개발 중장기계획사업의 지원에 의해 이루어진 연구입니다.

### 참고 문헌

- [1] N. de Jonge and J. M. Bonard, *Phil. Trans. R. Soc. Lond. A* **362**, 2239 (2004)
- [2] Y. Cheng, J. Zhang, Y. Z. lee, B. Gao, S. Dike, W. Lin, J. P. Lu, and O. Zhou, *Rev. sci. Instru.* **.75**, 3264 (2004).
- [3] S. Senda, Y. Saki, Y. Mizuta, S. Kita, and F. Okuyama, *Appl. Phys. Lett.* **85**, 5679 (2004).
- [4] A. Haga, S. Senda, Y. Sakai, Y. Mizuta, S. Kita, and F. Okuyama. *Appl. Phys. Lett* **84**, 2208 (2004).
- [5] J. Zhang and G. Yang, Y. Cheng, B. Gao, and Q. Qiu, Y. Z. Lee, J. P. Lu, and O. Zhou, *App. Phys. Lett.* **86**, 184104 (2005).
- [6] J. P lbe, P. P. Bey, Jr, S. L. Brandow, and R. A. Brizzolara, N. A, *J. Vac. Sci. Technol. A* **8**, (1990).
- [7] Inger Ekvall and Erik Waktstrom, *Meas. Sci. Technol.* **10**, 11 (1999).
- [8] Young Chul Choi, Dae Woon Kim, Tae Jae Lee, Cheol Jin Lee, and Young Hee Lee, *Synthetic Metals* **117**, 81 (2001).
- [9] Cheol Jin Lee, Dae Woon Kim, Tae Jae Lee, and Young Hee Lee, *Chem. Phy. Lett*, **312**, 461 (1999).
- [10] J. M. Bonard, K. A. Dean, F. C. Coll, and C. Klinke, *Phys. Rev. Lett.* **89**, 197602 (2002).
- [11] R. H. Fowler and L. Nordeim, *Proc. R. Soc. London, Ser. A* **119**, 173 (1928).