

띠 모양의 에미터를 가지는 탄소나노튜브 삼전극 전계방출 디스플레이 소자의 시뮬레이션

Simulation of the Strip Type CNT Field Emitter Triode Structure

류성룡*, 이태동*, 김영길*, 변창우*, 박종원**, 고성우**, 천현태**, 고남제**

(Seong-Ryong Ryu*, Tae-Dong Lee*, Young-Gil Kim*, Chang-Woo Byun*, J. W. Park**, S. W. Ko**, H. T. Chun**, and N. J. Ko**)

Abstract

The field emission characteristics are studied by simulation for carbon nanotube triode structures with a strip-shaped emitter and a gate hole aligned with it. Two structures, one with double-edge and the other with single edge are analyzed. They show good emission characteristics. Emissions of electrons are concentrated on the edges of emitter and the emitted current increases as the distance between emitter and gate decreases. For single-edged emitter, the emitted electrons form a narrow strip-shaped beam which has a good directionality. These triode structures have advantages in that they can be easily fabricated and aligned for assembly.

Key Words : Triode structure, Field emitter, Carbon nanotube, Field emission display

1. 서론

1991년에 발견된 탄소나노튜브(carbon nanotube, CNT)[1]는 화학적 안정성이 높고, 역학적으로도 매우 강한 특성 외에 끝 부분이 곡률 반경 수 nm 정도로 극히 뾰족하므로 전계방출 에미터로서 대단히 큰 잠재적 가능성을 지니고 있다[2]. 최근에는 CNT를 전계방출 에미터로 사용하는 디스플레이 장치를 구현하고자 하는 연구가 활발히 이루어지고 있다[3]. 이 경우 CNT는 삼극 구조의 음극 위에 성장 또는 도포되어 에미터의 역할을 하게 되는데, 연구된 삼극구조의 대부분은 원형의 에미터와, 그에 정렬된 원형 구멍의 게이트를 가지는 구조로 되어있다.

이 논문에서는 원형 대신 띠 모양의 에미터와 그에 나란하게 정렬된 띠 모양의 게이트 구멍을 가지는 삼극구조의 가능성을 시뮬레이션을 통해 연구하였다. 띠 모양 에미터의 양쪽 가장자리를 모두 이용하는 경우와 한쪽 가장자리만을 이용하는 경우에 대하여 전계와 방출 전자의 공간적 분포, 전자의 궤적, 그리고 전류-전압 특성 등을 계산하고 그 결과를 비교하였다. 계산 결과 한쪽 가장자리를 이용한 삼극구조의 경우는 매우 우수한 전자방출의 방향성을 가지는 것으로 나타났다. 에미터의 형상이 우리의 에미터와 비슷하면서 게이트가 에미터의 아래에 위치하는 유사한 구조[4]와 비교하여 전자방출의 강도와 전자빔의 방향성 및 조절 가능성 모두 우수하였다.

* : 금오공과대학교 자연과학부 물리학전공

(경북 구미시 신평동 188,

FAX : 054-467-4480

Corresponding Author : tdlee@kumoh.ac.kr

** : LG.Philips Displays

2003년 2월 11일 접수, 2003년 4월 22일 1차 심사완료,

2003년 6월 30일 2차 심사완료, 2003년 8월 11일 최종심사완료

2. 시뮬레이션

시뮬레이션에는 Vector Fields 사의 전계분석 프로그램인 OPERA-3d를 사용하였다. 이 프로그램은 유한요소법을 이용하여 주어진 구조 내에서의

전위 및 전계분포를 계산하고 전계방출에 대해서는 Fowler-Nordheim[5] 이론을 적용한다. Fowler-Nordheim 이론에 따르면, 전계방출되는 전류는 전자가 방출되는 지점의 국소적 전계에 따라 매우 예민하게 변화하며, 그 의존성은 다음의 Fowler-Nordheim 방정식으로 표현한다.

$$I \propto (F^2/\phi)\exp(B\phi^{3/2}/F) \quad (1)$$

이 식에서 ϕ 는 에미터 물질의 일함수(work function), F 는 국소적 전계, B 는 상수로서 $6.83 \times 10^9 \text{ V} \cdot \text{eV}^{-3/2} \cdot \text{m}^{-1}$ 이다. 에미터 물질이 결정된 경우, 가장 중요한 양은 국소적 전계 F 인데 이 전계는 CNT와 같이 끝이 뾰족한 물체의 근처에서는 전극 간의 거리(d)와 전위차(V)에 의해 결정되는 거시적 전계 $E = V/d$ 보다 훨씬 커지게 된다. 거시적 전계에 대해 국소적 전계가 강화되는 이 비율을 전계강화인자(field enhancement factor)라 하고 β 로 표시하는데, 다음과 같은 관계가 성립한다.

$$F = \beta E \quad (2)$$

시뮬레이션에서 CNT의 일함수는 5.0 eV로 가정하였다. CNT의 전계강화인자 β 는 종류와 제작 방법, 분포 밀도 등 여러가지 요인에 따라 달라지는데[6], 나중벽 나노튜브(MWNT)의 경우 800~3,000 그리고 단일벽 나노튜브(SWNT)는 2000~10,000으로 알려져 있으며[7] 이 논문에서는 전계강화인자를 1,000으로 가정하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1 양쪽 가장자리 띠에미터 (Double-Edged Strip Emitter)

양쪽 가장자리를 가지는 띠에미터의 구조가 그림 1에 그려져 있다. 에미터는 먼저 두께 10 μm 의 금속 음극(cathode)을 띠 모양으로 형성시키고 그 위에 약 2 μm 정도의 CNT를 도포하여 제작한다. 띠의 너비는 100 μm , 게이트 구멍의 폭은 150 μm 로 하였다. 음극의 편평한 바닥면과 게이트(gate)의 간격은 30 μm , 게이트의 두께는 2 μm 로 하였다. 길이는 220 μm 로 하였다. 양극(anode)은 음극에서 500 μm 떨어져 있는 것으로 가정하였고 양극 전압(V_a)은 500 V로 유지하였다.

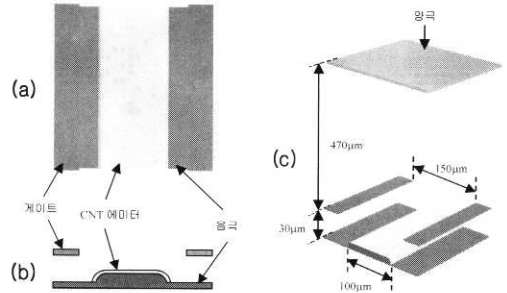


그림 1. 양쪽 가장자리 띠에미터의 구조 (a) 정면도, (b) 측면도, (c) 계산에 이용된 수치들.

Fig. 1. Structure of double-edged strip emitter. (a) Front view, (b) Side view, (c) Dimensions used in simulation.

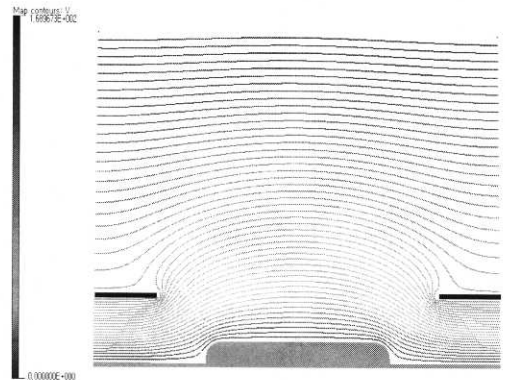


그림 2. $V_g = 82 \text{ V}$ 인 경우 양쪽 가장자리 띠에미터의 전위 분포.

Fig. 2. Potential distribution in double-edged strip emitter structure for $V_g = 82 \text{ V}$.

그림 2는 게이트 전압(V_g)이 82V일 때 전위의 시뮬레이션 결과이다. 게이트에 의한 전계($E_g = V_g/H$)가 $82\text{V}/20 \mu\text{m} = 4.1\text{V}/\mu\text{m}$ 로서 양극에 의한 전계($E_a = V_a/L$) $500\text{V}/500\mu\text{m} = 1\text{V}/\mu\text{m}$ 보다 4배 이상 크므로 등전위면은 게이트 구멍에서 위쪽으로 부풀게 된다. 전계의 방향은 등전위면과 수직이므로 방출전자의 궤적은 게이트 쪽으로 편향될 것으로 예측된다.

전계의 세기는 등전위면의 간격이 좁은 CNT

에미터의 가장자리 부분에서 가장 강하게 되므로 주로 이곳에서 전자가 방출된다. 그림 3은 에미터 바로 위에서의 전류밀도 분포를 보여준다. 에미터는 띠 모양이지만 실제로는 띠의 양쪽 가장자리에 서만 전자가 방출된다는 것을 알 수 있다.

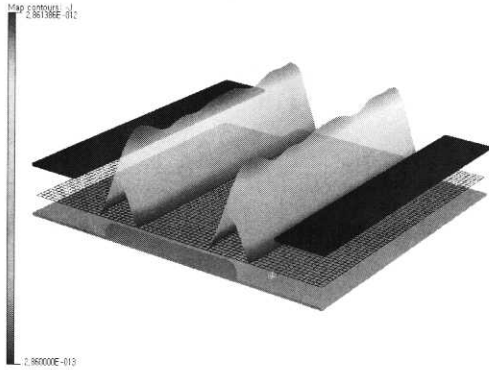


그림 3. $V_g = 82V$ 일 때, 에미터 바로 위에서 전류 밀도 분포의 히스토그램.

Fig. 3. Current density distribution just above the emitter surface for $V_g = 82V$ represented as a histogram.

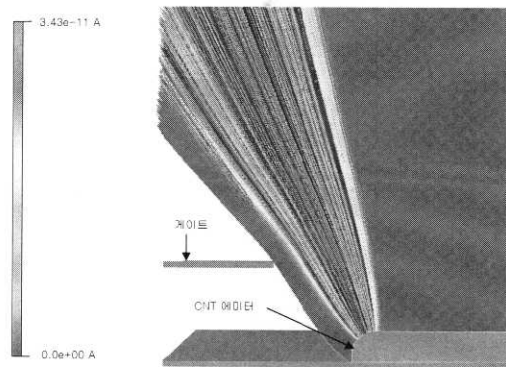


그림 4. $V_g = 82 V$ 일 때 양쪽 가장자리 에미터에서 방출된 전자궤적. 좌우 대칭이므로 절반만 보였음.

Fig. 4. Trajectories of electrons emitted from double-edged emitter for $V_g = 82V$. Just the half of the structure is shown because of the symmetry.

그림 4는 에미터에서 방출된 전자의 궤적을 보여준다. 방출 전류밀도는 가장자리 부분에서 가장 높고($10^{-9} - 10^{-11} A/cm^2$) 같은 명암으로 처리된 나머지 부분의 전류밀도는 약 $10^{-20} A/cm^2$ 정도로서 완전히 무시할 수 있다. 또한 그림에서 알 수 있듯 방출된 전자는 처음 방출된 각도를 거의 유지하며 진행한다.

그림 5의 그래프는 양쪽 가장자리 에미터 구조의 전류-전압곡선이다. 단일 에미터에서의 기준 전류가 약 $2 \mu A$ 정도라고 하면, 에미터의 폭과 게이트 구멍의 폭이 각각 $100 \mu m, 150 \mu m$ 인 경우(▼로 표시된 그래프), 동작 전압은 약 $80 V$ 정도가 되며 이 값은 직경 $100 \mu m$ 의 원형 CNT 에미터와 직경 $150 \mu m$ 의 원형 게이트 구멍을 가지는 삼극 구조에 대하여 우리가 계산한 결과 (●로 표시된 그래프)인 $65 V$ 와 비교하면 다소 큰 값이다.

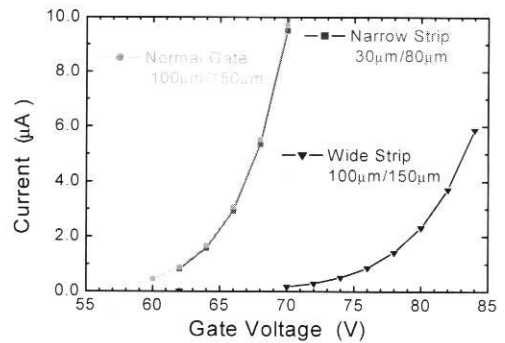


그림 5. 양쪽 가장자리 에미터의 전류-전압 곡선. 전류는 에미터에서 방출되는 총 전류를 나타낸 것이다. (▼) : 에미터 폭/게이트 폭 = $100 \mu m/150 \mu m$, (■) : 에미터 폭/게이트 폭 = $30 \mu m/80 \mu m$. (●)는 비교를 위하여 계산한 직경 $100 \mu m$ 의 원형 CNT 에미터와 직경 $150 \mu m$ 의 원형 게이트 구멍을 가지는 삼극 구조의 전류-전압 특성이다.

Fig. 5. Current-Voltage curve for double-edged strip emitter. Current is the total current emitted from the emitter. For (▼), emitter width/gate hole width is $100 \mu m/150 \mu m$. For (■), it is $30 \mu m/80 \mu m$. (●) is shown for comparison and it represents the characteristic of a triode with a circular emitter and gate hole with diameter $100 \mu m$ and $150 \mu m$, respectively.

에미터의 폭과 게이트 구멍의 폭을 각각 $30\ \mu\text{m}$, $80\ \mu\text{m}$ 로 줄인 경우(■로 표시된 그래프), 작동 전압은 약 $65\ \text{V}$ 정도로 훨씬 향상되어 그림에 보인 원형 에미터-게이트 구조와 거의 일치하는 모습을 보여 준다. 시뮬레이션 결과 에미터의 크기가 작아지고 게이트 구멍의 크기가 작아질수록 방출전류가 급격하게 증가하는 것으로 나타났는데, 이는 게이트 구멍이 좁아짐으로써 반대편 게이트까지의 거리가 더 가까워지게 되어, 에미터 가장자리의 전계가 강화되기 때문이다. $100\ \mu\text{m}$ 정도의 너비를 가진 넓은 에미터는 방출 전류가 적은 대신 음극과 CNT를 모두 스크린 프린팅 등의 방법으로 경제적으로 제작할 수 있는 장점이 있으며 폭이 $30\ \mu\text{m}$ 또는 그 이하인 좁은 에미터는 낮은 전압에서 작동시킬 수 있으므로 소비전력을 낮출 수 있는 장점이 있지만 음극을 광식각(photolithography) 등의 방법으로 제작해야 하므로 제작비용이 높아지는 단점을 가진다.

3.2 한쪽 가장자리 띠에미터 (Single-Edge Strip Emitter)

그림 6은 한쪽 가장자리 띠에미터의 구조를 보여준다. 이 구조는 그림 6에서와 같이 띠 모양의 금속음극의 한쪽 가장자리에만 CNT를 도포하고 게이트의 구멍을 그 가장자리 쪽으로 좁힌 구조이다.

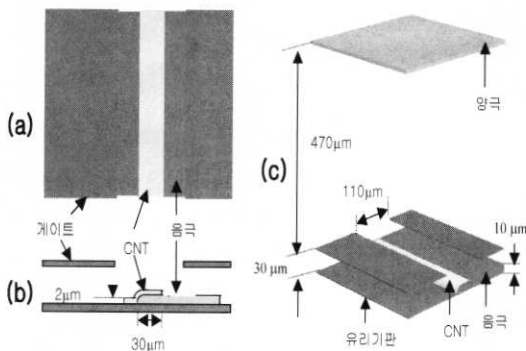


그림 6. 한쪽 가장자리 띠에미터의 구조 (a) 정면도 (b) 측면도 (c) 계산에 이용된 수치들.

Fig. 6. Structure of single-edged strip emitter. (a) Front view (b) Side view (c) Dimensions used in simulation.

그림 7은 에미터 가장자리와 게이트의 간격을 $40\ \mu\text{m}$ 그리고 게이트 구멍의 너비를 $110\ \mu\text{m}$ 로 하여 시뮬레이션을 수행한 경우(▼)와, 이 값들을 각각 $25\ \mu\text{m}/80\ \mu\text{m}$ 로 한 경우(■)의 전류-전압 곡선이다. 게이트 구멍의 너비가 $110\ \mu\text{m}$ 일 경우의 작동 전압은 약 $96\ \text{V}$ 로서 양쪽 가장자리를 모두 사용하는 에미터의 경우(그림 5의 wide strip (▼) 그래프)보다 $10\ \text{V}$ 정도 높다. 방출전류를 결정하는 중요한 인자인 에미터와 게이트 사이의 간격이 3.1절의 양쪽 가장자리 에미터의 경우인 $25\ \mu\text{m}$ 보다 훨씬 넓은 $40\ \mu\text{m}$ 이기 때문이다. 그 간격을 $25\ \mu\text{m}$ 로 좁히면, 그림 7의 (■) 그래프에서 볼 수 있듯 작동전압이 약 $70\ \text{V}$ 정도로 오히려 더 낮아지게 된다. 이것은 게이트 구멍의 폭이 좁아져서 가장자리 반대편 게이트의 영향이 더 커지기 때문이라 여겨진다.

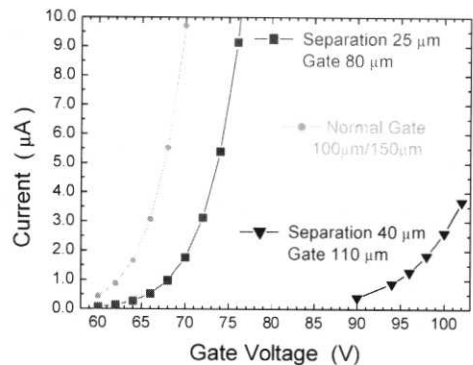


그림 7. 한쪽 가장자리 띠에미터의 전류-전압곡선. 전류는 에미터에서 방출되는 총전류를 나타낸 것이다. (▼) : 에미터-게이트 간격/게이트 구멍 폭 = $40\ \mu\text{m}/110\ \mu\text{m}$, (■) : 에미터-게이트 간격/게이트 구멍폭 = $25\ \mu\text{m}/80\ \mu\text{m}$, (●)는 비교를 위하여 계산한 직경 $100\ \mu\text{m}$ 의 원형 CNT 에미터와 직경 $150\ \mu\text{m}$ 의 원형 게이트 구멍을 가지는 삼극 구조의 전류-전압 특성이다.

Fig. 7. Current-Voltage curve for a single-edged strip emitter. Current is the total current emitted from emitter. Emitter width/gate hole width is $100\ \mu\text{m}/150\ \mu\text{m}$ for (▼), and $30\ \mu\text{m}/80\ \mu\text{m}$ for (■). (●) curve is shown for comparison and it represents the characteristic of a triode with a circular emitter and gate hole with diameter $100\ \mu\text{m}$ and $150\ \mu\text{m}$, respectively.

그림 8은 한쪽 가장자리 에미터에서 방출된 전자의 궤적이다. 그림 4에 보인 양쪽 가장자리 에미터의 전자궤적과 비교해 보면, 한쪽 방향으로만 퍼짐이 발생하므로 지향성 측면에서 더 우수함을 알 수 있다.

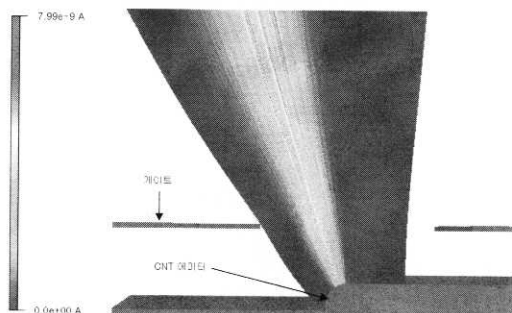


그림 8. $V_g = 72$ V일 때, 한쪽 가장자리 띠에미터의 방출 전자 궤적.

Fig. 8. Trajectories of electrons emitted from single-edged emitter for $V_g = 82$ V.

양쪽 가장자리 에미터와 한쪽 가장자리 에미터의 전계방출 특성은 각기 고유한 장점을 가진다. 단순히 동작전압이 낮은 것이 좋다는 관점에서 본다면 양쪽 가장자리를 이용하는 좁은 폭 에미터 구조가 65 V로서 가장 우수하다고 볼 수 있다. 그러나 이 구조는 금속 음극의 폭이 30 μm 정도로 좁기 때문에 스크린 프린팅 등 저렴한 기술로 구현하기가 어렵고 광식각 등 값비싼 박막공정을 필요로 하므로 생산 비용이 높아질 가능성이 높다. 다음으로 낮은 동작 전압을 가지는 구조는 한쪽 가장자리 에미터에서 게이트 구멍 폭이 좁은 구조로서, 동작전압은 좁은 폭 양쪽 가장자리 에미터보다 5 V 정도 높은 약 70 V이다. 그러나 이 구조는 금속 음극이나 CNT 도포 폭이 상대적으로 넓기 때문에 스크린 프린팅 등 저가의 방식으로 제작할 수 있다는 장점이 있다. 그와 함께 한쪽 가장자리만을 이용하므로 지향성이 양쪽 가장자리 에미터보다 우수하다는 장점도 아울러 가진다. 그러므로 5 V 정도 높은 동작전압이 크게 문제가 되지 않는다면, 제작비용과 지향성 면에서 유리한 이 구조가 더 낫다고 할 수 있다.

띠에미터와 원형 에미터를 비교해보면 비슷한

크기의 구조에서 전계방출 특성은, 동작전압이 낮은 점에서 원형 에미터가 우수한 특성을 보인다. 그러나 삼극 구조의 전계방출 특성은 에미터와 게이트 구멍 가장자리와의 간격에 민감하기 때문에, 원형 에미터의 경우, 에미터와 게이트 구멍이 동심을 이루어 모든 방향에서 간격을 동일하게 유지하여야 고른 전계방출을 기대할 수 있다. 즉, 에미터와 게이트의 정렬이 x-y 방향 모두에서 이루어져야 한다. 이에 비하여 띠에미터는 비슷한 크기를 가지는 원형 에미터에 비하여 동작 전압이 높지만, 에미터의 폭을 조절함으로써 비슷한 동작전압을 얻을 수 있다. 정렬 측면에서는 띠 형상의 길이에 수직한 방향만 정렬하면 되므로 정렬이 용이하고 그 결과 제작 시 각각의 소자마다 비교적 균일한 동작특성을 얻을 수 있는 장점이 있다. 또한 선형의 발광이 필요한 경우에도 매우 유용하다.

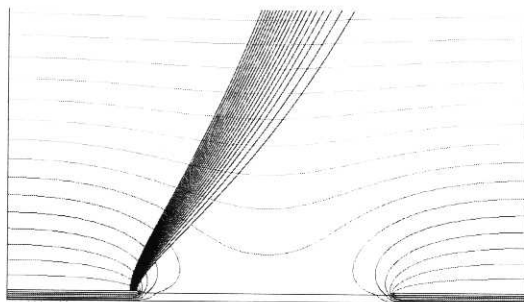


그림 9. 언더게이트의 한쪽 가장자리에서의 방출 전자 궤적.

Fig. 9. Trajectories of electrons emitted from an emitter edge of under-gate structure.

비슷한(즉, 에미터가 1차원적인) 에미터 형태가, 게이트가 에미터보다 아래에 위치하는 이른바 언더게이트(under-gate) 구조로 연구된 바 있다[4]. 그림 9는 언더게이트 구조에 대하여 Tricom 소프트웨어로 시뮬레이션한 전자궤적을 보여주고 있다. 띠에미터 구조에 비하여 전자궤적이 옆으로 훨씬 더 기울어지는 모습을 보인다. 이것은 게이트가 에미터의 아래에 위치하기 때문에 필연적으로 발생하는 현상이며 같은 이유로 게이트 전압에 의한 전류의 제어도 우리의 구조에 비하여 더 어렵게 된다. 그러므로 게이트가 에미터 위에 있는 우리의 삼극구조가 방출전류의 세기, 전자빔의 방향성, 그리고 전류 조절의 용이성 측면에서 장점을 가진다.

4. 결론

띠 모양의 에미터와 게이트 구멍을 가지는 CNT 삼전극 소자의 전계방출 특성을 시뮬레이션을 통해 분석하였다. 분석결과를 토대로 도출한 결론은 다음과 같다.

- (1) 동작전압은 양쪽 가장자리 좁은 에미터가 65 V로서 가장 우수하였으나, 지향성과 저가 제작 가능성까지 감안한 특성은 게이트 구멍의 폭이 좁은 한쪽 가장자리 에미터 구조가 더 우수하다고 판단된다.
- (2) 띠 에미터 구조는 에미터와 게이트 구멍이 모두 원형인 구조와 비교할 때 동작전압은 비슷하거나 높은 반면, 제작과 정렬이 용이하다는 장점을 가진다.
- (3) 언더게이트 구조와 비교하면 방향성과 전류 밀도, 제어가능성 측면에서 더 우수하다.

감사의 글

본 연구는 한국과학재단 지정 금오공과대학교 전자부품산업고품질화 및 공정자동화연구센터의 지원에 의한 것입니다.

참고 문헌

- [1] S. Iijima, "Helical microtubules of graphitic carbon", *Nature*, Vol. 354, p. 56, 1991.
- [2] W. A. de Heer, A. Chatelain, and D. Ugarte, "A Carbon nanotube field-emission electron source", *Science*, Vol. 270, p. 1179, 1995.
- [3] J. M. Kim, N. S. Lee, D. S. Chung, S. H. park, Y. W. Jin, J. H. Kang, Y. S. Choi, H. Y. Kim, M. J. Park, I. T. Han, J. W. Kim, J. E. Jung, J. H. You, C. G. Lee, S. H. Jo, K. S. Choi, E. J. Chi, S. J. Lee, and H. G. Park, "New emitter techniques for field emission displays", *SID01 Digest*, p. 304, 2001 ; Several other papers in the same volume.
- [4] Y. S. Choi, J. H. Kang, H. Y. Kim, Y. J. Lee, J. W. Kim, J. E. Jung, J. M. Kim, Y. W. Jin, N. S. Lee, S. H. Jo, K. S. Choi, C. G. Lee, and J. H. You, "A Simple structure and fabrication of carbon-nanotube field emission display", *SID 01 Digest*, p. 718, 2001.
- [5] J. W. Gadzuk and E. W. Plummer, "Field emission energy distributions (FEED)", *Rev. Mod. Phys.* Vol. 45, p. 487, 1973.
- [6] J.-M. Bonard, N. Weiss, H. Kind, T. Stockli, L. Forro, K. Kern, and A. Chatelain, "Tuning the field emission properties of patterned carbon nanotube films", *Adv. Mater.*, Vol. 13, p. 184, 2001.
- [7] J.-M. Bonard, J.-P. Salvetat, T. Stockli, and Chatelain, "Field emission from single-wall carbon nanotube films", *Appl. Phys. Lett.*, Vol. 73, No 7, p. 918, 1998.