

# 띠 모양의 에미터를 가지는 탄소나노튜브 삼전극 전계방출 디스플레이 소자의 시뮬레이션

류성룡, 이태동, 김영길, 변창우, 박종원\*, 고성우\*, 천현태\*, 고남제\*  
금오공과대학교, LG.Philips Displays\*

## Simulation of the Stripe type CNT Field Emitter Triod Structure

Seong-Ryong Ryu, TaeDong Lee, YongGil Kim, ChangWoo Byun, J.W. Park\*, S.W. Ko\*, H.T. Chun\*, N.J. Ko\*  
Kumoh National Institute of Technology, LG. Philips Displays\*

### Abstract

띠모양의 에미터와 에미터와 정렬된 띠모양의 게이트 구멍을 가진 탄소나노튜브(CNT) 삼극 구조에 대하여 전계방출 시뮬레이션을 수행하였다. 전자방출은 주로 가장자리에서 발생하였으며 에미터와 게이트사이의 간격이 가까워지면 급격히 증가하였다. 전자방출 특성도 상당히 우수하였다. 한쪽 가장자리만을 사용한 삼극구조의 경우에는 방출된 전자의 궤적이 좁은 띠모양으로 형성되어 방향성이 매우 우수하게 나타났다. 띠모양의 에미터 및 게이트로 이루어진 삼극구조는 제작이 용이하고 조립할 때 정렬이 쉬운 장점이 있다.

**Key Words** : 삼극구조(triod structure), 전계방출소자(field emitter), 탄소나노튜브(carbon nanotube), field emission display

### 1. 서 론

탄소나노튜브(CNT)는 전자방출 특성이 우수하고 화학적으로 안정되어 전계방출소자에 적합한 물질로 많은 연구 대상이 되어왔다[1]. 주로 연구된 CNT를 사용한 삼극 구조는 대부분 원형의 에미터와 에미터와 정렬된 게이트의 구조로 되어있다. 이 논문에서는 원형 대신 띠모양의 에미터와 에미터와 정렬된 띠모양의 게이트 구멍을 가지는 삼극구조의 가능성을 연구하였다. 한쪽 가장자리만을 이용한 삼극구조의 경우는 매우 우수한 전자방출의 방향성을 가지는 것으로 나타났다. 언더게이트를 가지는 비슷한 구조[2]과 비교하여 전자방출의 강도와 전자빔의 방향성 및 조절 가능성 모두 우수하였다.

### 2. 시뮬레이션

시뮬레이션에서 CNT의 일함수는 5.0eV으로 가정하였다. CNT의 전계강화인자 (field enhancement factor)는 다중벽나노튜브 (MWNT)의 경우 800~3000 그리고 단일벽나노튜브 (SWNT)는 2000~10000으로 알려져 있으며[3] 이 논문에서는 전계강화인자를 1000으로 가정하였다. 시뮬레이션에는 Vector Fields 사의 OPERA3D를 사용하여 수행하였다.

### 3. 결과 및 고찰

#### 3.1 양쪽 가장자리 띠에미터 (Double-Edge-Stripe Emitter)

양쪽 가장리리를 가지는 띠모양 에미터의 구조

가 그림 1에 그려져 있다. 에미터는 먼저 두께 10 $\mu$ m의 금속음극(cathode)을 띠모양으로 형성하고 그 위에 약 2 $\mu$ m 정도의 CNT를 도포한다. 띠의 너비는 100 $\mu$ m, 게이트 구멍의 직경은 150 $\mu$ m로 하였다. 캐소드의 편평한 바닥면과 게이트(gate)의 간격은 30 $\mu$ m, 게이트의 두께는 2 $\mu$ m로 하였다. 길이는 220 $\mu$ m로 하였다. 양극(anode)은 음극에서 500 $\mu$ m 떨어져 있는 것으로 가정하였고 양극 전압( $V_a$ )은 500V로 유지하였다.

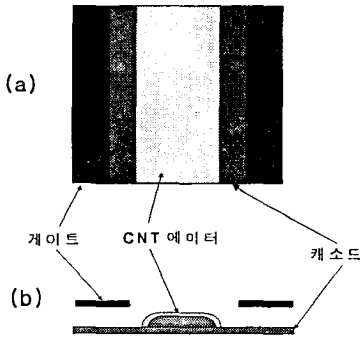


그림 1. 띠모양 에미터의 구조  
(a)정면도 (b)측면도

그림 2는 게이트전압( $V_g$ )이 82V일 때 전위의 시뮬레이션 결과이다. 게이트에 의한 전계 ( $E_g = V_g/H$ )가 양극에 의한 전계( $E_a = V_a/L$ )보다 훨씬 크므로 ( $E_g = 5.0 \times E_a$ ) 등전위면은 게이트 구멍에서 위쪽으로 부풀게 된다. 전계의 방향은 등전위면과 수직이므로 방출전자의 궤적은 게이트쪽으로 편향될 것으로 예측된다.

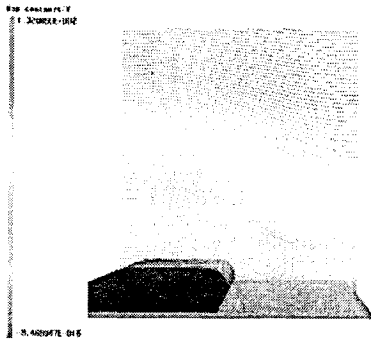


그림 2.  $V_a=82V$ 인 경우 띠 에미터의 전위 분포. 좌우 대칭이므로 절반만 보였음.

전계의 세기는 등전위면의 간격이 좁은 CNT 에미터의 가장자리 부분이 가장 강하게 되므로 주로 이곳에서 전자가 방출된다. 그림 3은 에미터 바로 위의 전류 밀도 분포를 보여준다. 에미터는 띠모양이지만 실제로는 띠의 양쪽 가장자리에서만 전자가 방출된다는 것을 알 수 있다.

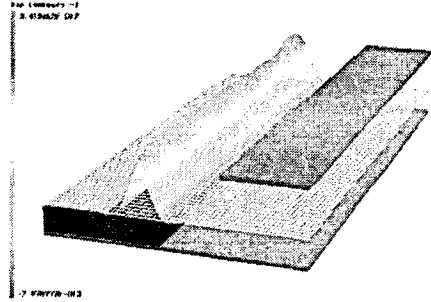


그림 3. 에미터 바로 위의 전류 밀도 분포의 히스토그램. 좌우 대칭이므로 절반만 보였음.

그림 4의 그래프는 띠 에미터 구조의 전류-전압 곡선이다. 단일 에미터에서의 기준 전류가 약 2 $\mu$ A 정도라고 하면 작동 전압은 약 80V 정도가 되며 이는 직경 100 $\mu$ m의 원형의 CNT 에미터와 직경 150 $\mu$ m의 원형의 게이트 구멍을 가지는 삼극 구조에 대하여 우리가 계산한 결과 (약 65V)와 비교하면 다소 큰 값이다.

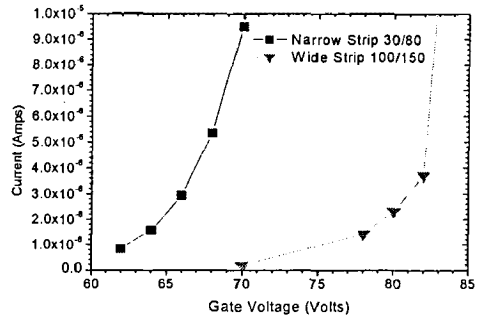


그림 4. 띠 에미터의 전류-전압 곡선.

에미터에서 방출된 전자의 궤적은 그림 5에 그려져 있다. 방출 전류밀도는 가장자리 부분에서 가장 높고( $10^{-9} - 10^{-11}$  A/cm<sup>2</sup>) 같은 명암으로 처리된 나머지 부분의 전류밀도는 약  $10^{-20}$  A/cm<sup>2</sup> 정도로서

완전히 무시할 수 있다. 또한 그림에서 알 수 있듯 방출된 전자는 게이트에 부딪혀 손실되지 않고 처음 방출된 각도를 거의 유지하며 진행한다.

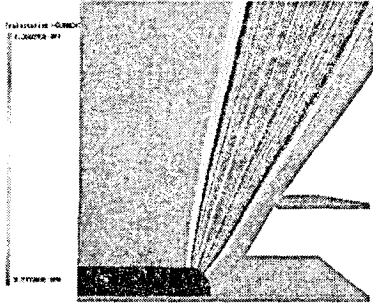


그림 5.  $V_a=82V$ 일 때 양쪽 가장자리 에미터에서 방출된 전자궤적. 좌우 대칭이므로 절반만 보였음.

에미터의 너비와 게이트 구멍의 직경을  $30\mu m/80\mu m$ 로 줄인 경우의 작동전압은 그림 4에서 알 수 있듯이 약  $64V$  정도로 나타나서 훨씬 향상된 모습을 보여 준다. 시뮬레이션 결과 에미터의 크기가 작아지고 게이트 구멍의 크기가 작아질 수록 방출 전류가 급격하게 증가하는 것으로 나타났다.  $100\mu m$  정도의 너비를 가진 넓은 에미터는 방출 전류가 적은 대신 음극과 CNT를 모두 스크린 프린팅 등의 방법으로 경제적으로 제작할 수 있는 장점이 있으며 폭이  $30\mu m$  또는 그 이하인 좁은 에미터는 음극을 광식각(photolithography) 등의 방법으로 제작해야 하므로 제작비용은 올라가지만 훨씬 낮은 전압에서 작동시킬 수 있으므로 소자의 소비전력을 낮출 수 있는 장점이 있다.

### 3.2 한쪽 가장자리 띠에미터 (Single-Edge Stripe Emitter)

한쪽 가장자리 띠에미터의 구조가 그림 6에 나타나 있다. 이 구조는 그림 1에서와 같은 띠 모양의 금속음극의 한쪽 가장자리에만 CNT를 도포하고 게이트의 구멍을 한쪽 가장자리 근처로 좁힌 구조이다.

그림 7은 에미터 가장자리와 게이트의 간격을  $40\mu m$  그리고 게이트 구멍의 너비를  $110\mu m$ 로 하고 시뮬레이션을 수행한 경우(■)와 각각  $25\mu m/80\mu m$ 인 경우(▼)의 전류-전압 곡선이다.

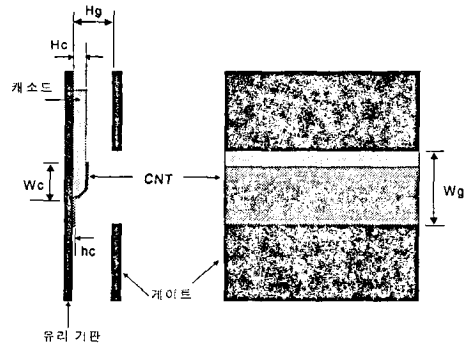


그림 6. 한쪽 가장자리 띠 에미터의 구조

게이트 구멍의 너비가  $100\mu m$ 일 경우의 작동 전압은 약  $96V$ 로서 양쪽 가장자리를 모두 사용하는 띠에미터의 경우(그림 4)보다  $10V$  정도 높다. 방출전류를 결정하는 중요한 인자인 에미터와 게이트 사이의 간격이 3.1절의 양쪽 가장자리 에미터의 경우인  $25\mu m$ 보다 훨씬 넓은  $40\mu m$ 이기 때문이다. 그 간격을  $25\mu m$ 로 좁히면 작동전압이 약  $70V$  정도로 오히려 더 낮아지게 된다. 이것은 게이트 구멍의 크기가 작아져서 가장자리 반대편의 게이트도 영향을 미치기 때문이라고 여겨진다.

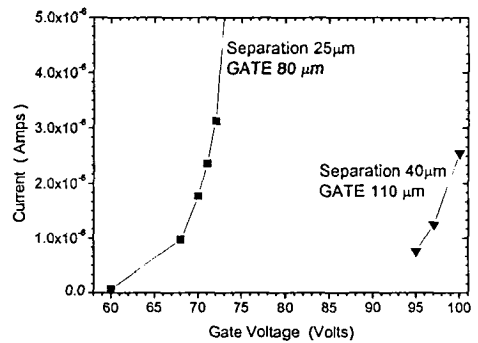


그림 7. 한쪽 가장자리 띠에미터의 전류-전압 곡선.

그림 8은 한쪽 가장자리 띠에미터에서 방출된 전자의 궤적이다. 그림 5에 보인 양쪽 가장자리 띠에미터의 전자궤적과 비교해 보면, 한쪽 방향으로만 퍼짐이 발생하므로 지향성이 우수함을 알 수 있다.

전계 방출 에미터의 특성은 전자가 방출되는 에미터의 가장자리와 게이트 구멍 가장자리와의 간격에 매우 민감하다. 에미터와 게이트 구멍이 모두

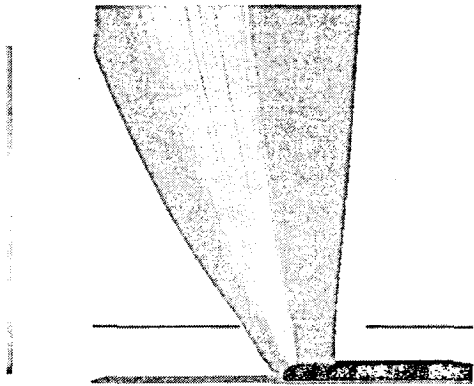


그림 8. 한쪽 가장자리 띠에미터의 방출 전자 궤적.

원형인 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. 이와는 대조적으로 띠에미터의 경우는 띠의 길이에 수직인 방향만 정렬하면 되므로 정렬이 용이하고 제작시 각각의 소자마다 비교적 균일한 동작특성을 얻을 수 있는 장점이 있다. 또한 선형의 발광이 필요한 경우에도 매우 유용하다. 앞에서 다룬 두 종류의 띠 에미터 구조들 중 한쪽 가장자리 띠에미터는 상당히 좋은 방향성을 가지고 있으며 게이트 구멍의 너비보다 훨씬 넓은 띠모양의 음극에서 한쪽 가장자리만 에미터로 사용하므로 제작이 용이하면서도 방출전류는 양쪽 가장자리 띠에미터의 경우와 비슷하거나 더 크다는 장점이 있다.

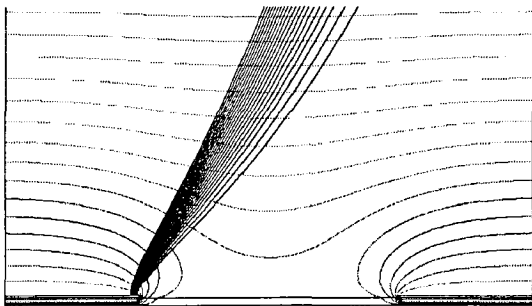


그림 9. 언더게이트의 한쪽 가장자리에서의 방출 전자 궤적.

비슷한 에미터 형태가, 게이트가 에미터보다 아래에 위치하는 언더게이트 형태로 연구된 바 있다 [3]. 그림 9는 언더게이트에 대하여 우리가 Tricomp 소프트웨어로 시뮬레이션한 전자궤적을 보여주고 있다. 현재 우리의 띠에미터에 비하여 전자궤적이 옆으로 훨씬 더 기울어지는 모습을 보인다. 이것은 게이트가 에미터의 아래에 위치하기 때문에 필연적으로 발생하는 현상이며 같은 이유로 게이트에 의한 전류제어도 우리의 구조에 비하여 더 어렵게 된다. 띠 모양의 게이트가 에미터 위에 있는 우리의 삼극구조는 게이트가 에미터 위에 있어서 더 강한 전자방출과 좋은 전자빔의 방향성, 그리고 전자방출을 더 쉽게 조절할 수 있는 장점이 있다.

#### 4. 결론

띠 모양의 에미터와 게이트 구멍을 가지는 CNT 삼전극 소자의 전계방출 특성을 시뮬레이션을 통해 분석하였다. 이 구조는 에미터와 게이트 구멍이 모두 원형인 구조와 비교할 때 동작전압은 비슷하거나 낮으면서 제작과 정렬이 용이하다는 장점을 가진다. 언더게이트 구조와 비교하면 방향성과 전류밀도, 제어가능성 측면에서 더 우수하다. 특히 한쪽 가장자리 띠에미터가 우수한 동작 특성을 가진다.

#### 감사의 글

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

#### 참고 문헌

- [1] W. A. de Heer *et al.*, Science Vol. 270, p. 1179, 2001.
- [2] Y.S. Choi *et al.*, SID01 Digest, p. 718, 2001.
- [3] J.-M. Bonard, J.-P. Salvetat, T. Stockli, Chatelain, "Field emission from single-wall carbon nanotube films", Appl. Phys. Lett., Vol. 73, No 7, p. 918, 1998.