

탄소나노튜브 기반 백 라이트 유닛 기술 동향

Technical Trend of Carbon Nanotube Based Back Light Unit

융합기술시대의 ICT 부품 연구동향 특집

송윤호 (Y.H. Song) 테라전자연구팀 책임연구원
정진우 (J.W. Jeong) 테라전자연구팀 선임연구원

목 차

-
- I . 개요
 - II . LCD BLU
 - III . CNT FEL
 - IV . CNT BLU
 - V . 결론

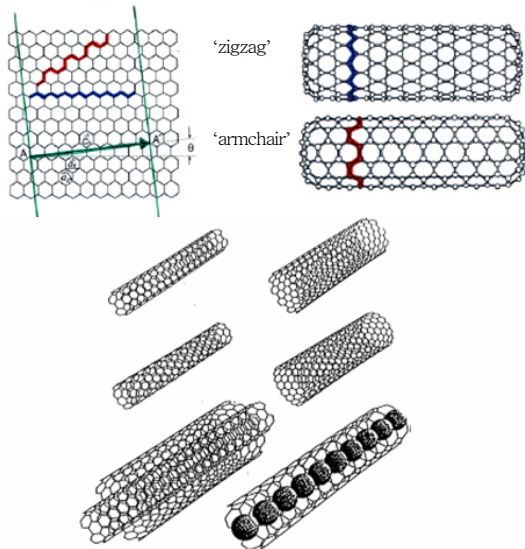
탄소나노튜브(CNT)는 나노 기술의 대표적인 물질로, 나노 크기의 튜브 반경과 100:1 이상의 높은 종횡비, 그리고 물리·화학적 안정성 등으로 인해 이상적인 전자 방출원 재료로 여겨져 많은 연구기관들이 CNT를 이용한 응용 소자를 개발하고 있다. 나노 기술을 바탕으로 한 CNT 백 라이트 유닛(BLU)은 CNT에 인가된 전기장에 의해 전자가 방출되고 방출된 전자가 고전압으로 가속되어 형광체를 때려서 발광하는 원리로 작동되며, 면광원으로서 고정세의 로컬 디밍, 고속 순간 발광에 의한 잔상 제거 등의 장점으로 고품질의 LCD TV에 적용될 수 있으며, 냉음극형광램프와 발광다이오드를 대체할 만한 차세대 BLU로서 뛰어난 특성을 가지고 있다.

I. 개요

고체로서의 탄소는 오직 한 종류의 원소로만 구성되어 있음에도 불구하고 다른 원소와는 달리 다양한 성질과 형태로 바뀔 수 있는 물질이다. 역사적으로 유사 이전부터 목탄으로서 주요 에너지원이었던 탄소는 코크스 또는 활성탄, 탄소 섬유 등으로 형태를 달리하면서 인류 문명 발전에 공헌하여 왔으며, 최근에는 풀러렌(fullerene)[1]이나 탄소나노튜브(CNT)[2]의 독특한 형태로 새로운 물리, 화학, 전기/전자, 기계 소재로 각광받고 있다.

CNT는 1991년에 NEC의 Thukuba 연구소의 S. Iijima가 고분해능 투과전자현미경(TEM)을 이용하여 두 개의 탄소 전극 간의 아크에 의해 발생한 탄소 부산물을 관찰하는 과정에서 발견되었다. 이후 1992년에 NEC의 T. Ebbesen과 P. Ajayan이 CNT를 대량으로 제조할 수 있는 방법을 개발하였으며, 현재는 일반적으로 아크-방전(arc-discharge)[2] 및 화학기상증착(CVD)[3] 방법으로 제조되어 널리 사용되고 있다.

CNT의 구조는 (그림 1)과 같이 탄소 원자들이 육각형으로 배열된 판을 둥글게 말아서 형성된 것으로 생각해 볼 수 있다. 이때, 말린 방향에 따라 끝부



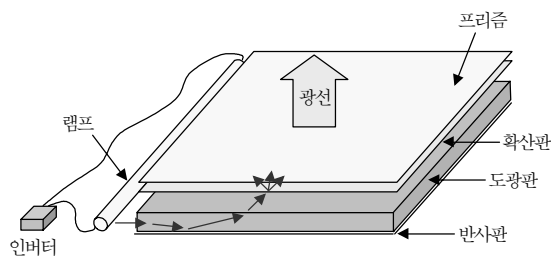
(그림 1) CNT의 구조

분이 지그재그 형태와 팔걸이 의자(armchair) 형태를 띌 수 있다. 이렇게 말려서 형성된 탄소 관이 하나의 벽을 가지면 SWNT, 다수 개의 벽을 가지면 MWNT가 되며, MWNT가 다발로 구성된 형태로도 존재한다. 기술이 발전함에 따라 이러한 구조를 임의로 조절할 수 있게 되었으며 모양 및 구조에 따라 기계, 전기, 화학적인 특성이 달라 다양한 분야에서 활용이 가능하다.

CNT는 그 직경이 수 nm이면서 길이는 수~수십 μm 로 일반적인 반도체 공정으로는 구현하기 어려운 구조적 특징을 가진다. 이로 인해 전기장이 인가될 경우, CNT의 끝에서 전자의 양자역학적인 터널링이 매우 쉽게 일어날 수 있어 고성능 전자 소스(electron source)로 활용될 수 있으며, 대표적인 응용으로는 전계방출 디스플레이(FED)[4], 전계방출 램프(FEL)[5]-[9], X-선 소스[10] 등이며 현재 상용화를 위한 연구가 활발히 진행되고 있다. 본 고에서는 최근 액정 디스플레이(LCD)의 차세대 백라이트 유닛(BLU)으로 개발되고 있는 CNT FEL에 대한 기술 동향을 논의한다.

II. LCD BLU

LCD는 자체 발광력이 없으므로 액정 패널의 하부에 위치하여 균일한 평면 광을 방출하는 장치가 반드시 필요한데, 이를 BLU라 한다. BLU에서 방출된 빛은 상부 액정 패널의 RGB 픽셀 단위의 스위칭 작용에 의해 화소를 표현하고, 그에 대응되는 이미지 혹은 동영상 표현할 수 있게 된다. BLU는 (그림 2)에서 보는 바와 같이 냉음극형광램프(CCFL)



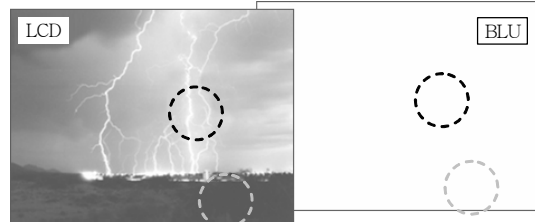
(그림 2) BLU의 구조

나 발광다이오드(LED)로 구성되는 램프와 선광원이나 점광원을 면광원으로 전환시키는 도광판(light guide) 및 광을 확산, 반사 및 휘도 상승 그리고 균일도를 상승시키기 위한 각종 광학 시트(sheet)로 구성된다[11]. BLU는 일반적으로 고휘도, 고균일도, 저전력, 경량화 및 고박형의 특성을 만족시켜야 한다.

BLU는 그 용도에 따라 노트북, 컴퓨터 모니터, TV, PDA, 휴대폰, 내비게이터용 등으로 나눌 수 있다. BLU의 휘도는 개인의 용도로 사용하는 컴퓨터 모니터의 경우 약 $1,500\sim 6,000\text{cd/m}^2$ 정도로도 충분하나 다수가 시청하는 TV는 $7,000\sim 10,000\text{cd/m}^2$ 정도의 상대적으로 높은 휘도를 요구한다.

최근에는 CCFL에 비해 높은 소비전력에도 불구하고 화질, 색재현, 두께 및 친환경성 등의 장점 때문에 LED를 채용한 BLU가 시장에 많이 소개되고 있다. 하지만 LED가 BLU로서 확실한 입지를 굳히기 위해서는 넘어야 할 과제들이 많은 것도 사실이다. 그럼에도 최근 LED는 기술의 발전으로 효율 향상과 제조 원가 하락이 급속도로 진행되고 있어 조만간 CCFL 수준에 접근할 것으로 기대된다.

CCFL이 높은 효율과 낮은 가격에도 불구하고 극복할 수 없는 단점을 가지고 있는데, 이는 LCD의 화질이다. LCD는 자발광 디스플레이가 아니므로 BLU가 반드시 필요하며 CCFL은 항상 켜져 있어야 한다는 단점이 태생적으로 존재한다. 따라서, 검은 화면을 만들기 위해서는 CCFL BLU가 켜져 있는 상태에서 액정 패널이 빛을 차단해야 하므로 전력이 낭비되고 빛을 완벽히 차단하지 못하는 액정의 특성상 콘트라스트(contrast) 특성이 나빠진다는 단점이 존재한다. 최근에는 CCFL의 경우에도 부분적으로 BLU를 끌 수 있는 기술이 개발되고 있으나, 선광원이라는 한계 때문에 완벽한 특성을 얻기가 어렵다. 반면 LED의 경우는 점광원이므로 불필요한 부분을 끌 수 있는 로컬 디밍 BLU 제작이 가능하다. (그림 3)에 일반적인 BLU와 로컬 디밍 BLU를 나타내었다. (그림 3a)와 같이 전체 화면에 BLU가 발광하는 일반적인 구조의 경우 콘트라스트 특성이 떨어지는



(a) Conventional BLU



(b) Local Dimming BLU

(그림 3) 일반적인 BLU(a)와 로컬 디밍 BLU(b)의 비교

반면, (그림 3b)와 같이 BLU의 밝기가 밝은 부분은 더 밝게, 어두운 부분은 어둡게 조절될 경우 액정 화면의 화질도 크게 개선되면서 불필요한 부분은 발광되지 않으므로 소비전력 감소의 효과도 얻을 수 있다. 최근 LED를 이용한 로컬 디밍 BLU를 채용한 TV가 시장에 출시되고 있으나 높은 가격대로 인해 고급 제품에만 채용되고 있는 실정이며, 밝기를 조절할 수 있는 기본 단위인 로컬 디밍 블록의 크기 제한으로 그 효과가 미비한 실정이다.

LCD는 액정 스위칭 시간이 느린 관계로 잔상 등의 문제로 브라운관(CRT)에 비해 동영상 특성이 일반적으로 나쁘다. CCFL이나 LED를 BLU로 채택한 LCD의 경우 프레임 전환 주파수를 120Hz, 240Hz 등으로 높이면서 화질 개선의 방법을 모색하고 있다. 그러나, 이러한 기술은 부차적인 효과로 인해 완벽한 대안이 될 수 없어 동영상 화질 개선을 위해서는 앞으로 많은 개선이 필요한 실정이다.

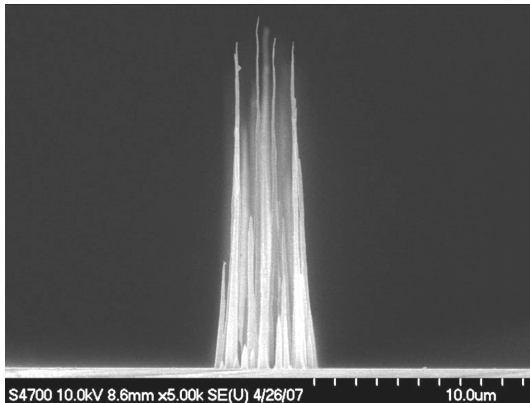
III. CNT FEL

CNT를 전자 소스 또는 전계 에미터로 사용하기 위해서는 캐소드 전극에 CNT를 부착시키는 공정이

반드시 필요하다. 이러한 공정은 (그림 4)와 같이 캐소드 전극에 CNT를 직접 성장시키는 방법[3]과 (그림 5)와 같이 CNT 파우더를 페이스트(paste)화 하여 전극에 프린팅[6],[7] 등의 방법으로 에미터를 형성하는 방법으로 크게 나눌 수 있다. 직접 성장법의 경우 일반적으로 CVD가 많이 쓰이고 있으나 대면적 공정에 제약이 따르며 공정 비용이 비싸다는 단점이 있다. 반면 페이스트 형태로 제작할 경우 저가, 대면적 공정이 용이하다는 장점을 가진다.

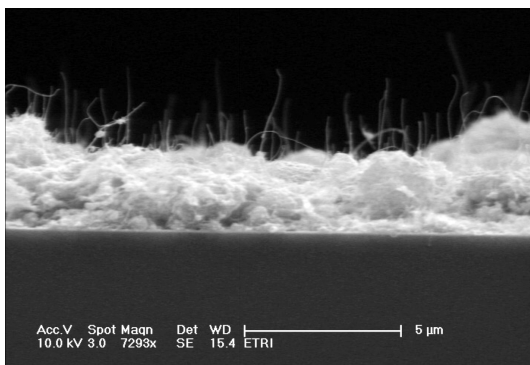
페이스트 방법에 의한 CNT 에미터는 CNT 파우더를 유기 바인더(binder), 필러(filler), 용매 등을 섞어 페이스트로 만드는 단계와, CNT 페이스트를 스크린 인쇄(screen printing) 방법으로 캐소드 기판에 형성하는 단계와, 소성 공정을 거쳐 불필요한

유기 물질들을 태우고 난 후 CNT를 표면에 수직으로 노출시키는 표면처리 단계로 이루어지며, 최종 형성된 CNT는 (그림 5)와 같이 표면에 노출된다. 특성이 좋은 CNT 에미터를 제작하기 위해서는 페이스트의 제조뿐만 아니라 프린팅 및 후처리 공정이 적절하게 최적화되어야 한다. CNT 에미터는 낮은 문턱전압과 균일한 전계방출 및 열화가 없는 안정된 방출 특성을 얻는 것이 관건이다. 한국전자통신연구원(ETRI)에서 개발한 CNT 에미터의 경우, (그림 6)과 같이 $1V/\mu m$ 이하의 낮은 전계에서 전계방출이 일어나며 전계방출 안정성/신뢰성 측면에서도 (그림 7)의 그래프와 같이 좋은 특성을 보여주고 있다[7]. (그림 7) 그래프의 경우, 매우 높은 연속적인 전계방출 전류 밀도($\sim 12mA/cm^2$) 하에서 장시간 동안에



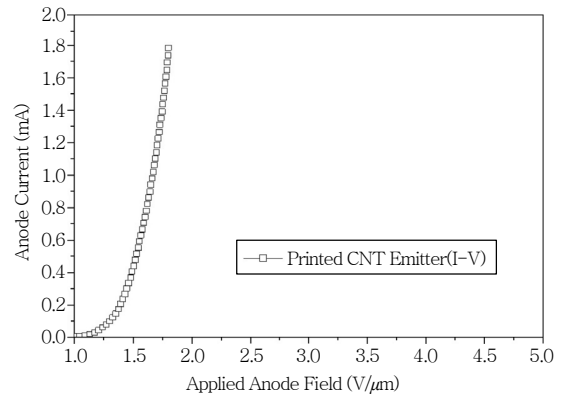
<자료>: K.C. Park 외, IMID2007, p.782.

(그림 4) 기판에 성장된 CNT 에미터



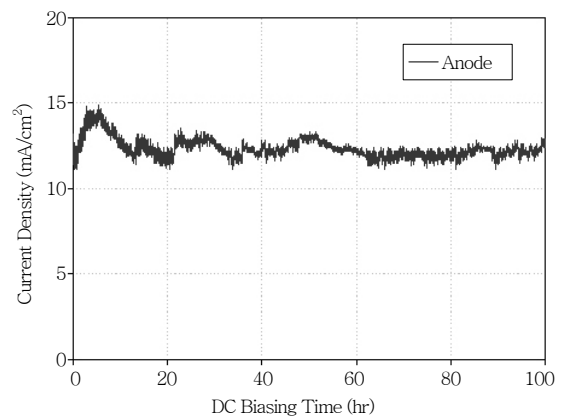
<자료>: ETRI, 2007.

(그림 5) 페이스트 방법으로 형성된 CNT



<자료>: ETRI, 2007.

(그림 6) CNT 에미터의 전계방출 특성



<자료>: ETRI, 2007.

(그림 7) CNT 에미터의 전계방출 신뢰성

도 열화 없는 안정된 특성을 보여주고 있다. 참고로 FEL에서 요구되는 전류 밀도는 약 수~수십 $\mu\text{A}/\text{cm}^2$ 에 불과하다. 따라서, 개발된 CNT 에미터를 BLU의 전자 소스로 사용할 경우에도 충분한 수명이 보장될 수 있다.

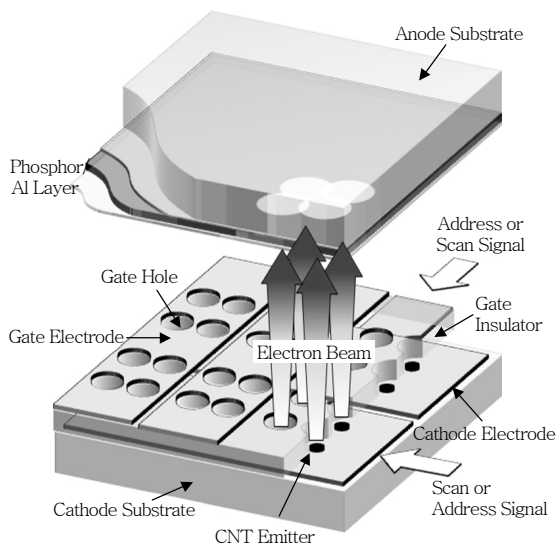
FED와 FEL은 캐소드의 전계 에미터로부터 방출된 전자를 아노드 전압으로 가속시켜 형광막에 충돌시켜 발광시킨다는 개념에서 모두 동일하다. 하지만 안정성이나 효율 측면에서 다양한 FEL 구조가 존재할 수 있다. 에미터를 가지는 캐소드와 형광막을 가지는 아노드만 존재하는 2극 구조의 경우, 구조적으로 간단하여 제조가 용이하고 가격이 저렴하다는 장점이 있는 반면 전계 에미터가 아노드 전극에 노출되어 있는 특징으로 인해 아노드 전압을 높여 전자를 가속시키는 데 한계가 있다. 일반적으로 안정적인 구동 특성을 보이는 (그림 8)과 같은 3극형 구조는 공정상 제작이 어려운 단점이 있으나 안정적인 구동이 가능하고 고전압 아노드 인가가 용이하여 발광효율을 높일 수 있다. 현재까지 저가속전압에서 효율이 높은 형광체가 존재하지 않으므로 FEL 응용에서는 아노드 전압을 최대한 높이는 것이 효율적인 측면에서 유리하며, 통상 15kV 정도의 가속전압이 필요하다. 특히, 게이트 전극과 캐소드 에미터 간의

거리가 짧은(수 μm) 마이크로 게이트 구조의 경우 에미터와 게이트 간에 단락이 일어나거나 고전압 아노드 전계의 영향을 받아 구동 특성이 불안정해지는 경우가 존재한다. ETRI에서 개발중인 FEL은 게이트 전극과 캐소드 에미터 간 거리가 수십~수백 μm 인 매크로 게이트(macro gate) 구조를 취하여 고전압 아노드 조건 하에서도 매우 안정적인 동작이 가능하다.

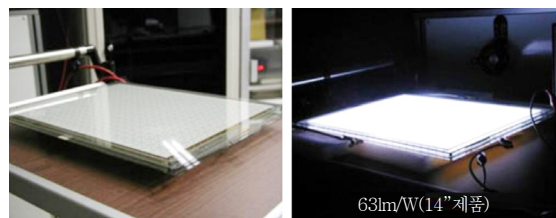
일반적으로 FEL은 구동 안정성 및 수명 보장을 위해 전계방출의 온/오프(on/off)가 반복적으로 이루어지는 펄스 구동을 택한다. 게이트 전극이 에미터로부터 멀리 위치한 매크로 게이트 구조의 램프를 구동하는 경우, 전계 에미터에 충분한 전계를 인가해 주기 위해서는 게이트 구동 전압을 매우 높게 인가하여야 하는 단점이 있을 수 있다. 하지만 ETRI에서는 게이트 전극에 일정한 DC 전압으로 인가한 상태에서 캐소드 전류를 제어하는 전류 구동 방식을 택함으로써 이러한 문제를 해결하고 있다. 이러한 전류 구동 방식을 택할 경우 기존 전압 구동방식의 경우보다 매우 낮은(5V 이하) 전압만으로 FEL의 제어가 가능하다.

IV. CNT BLU

CNT FEL은 현재 면 조명용과 기존 BLU의 단점을 극복할 수 있는 차세대 BLU용으로 크게 대별되어 개발되고 있다. 국내의 나노퍼시픽은 (그림 9)에서 보는 바와 같이 제작이 비교적 용이한 레터럴 게이트(lateral gate)형의 면 조명용 FEL를 개발하고 있으며, 삼성 SDI와 ETRI는 톱 게이트(top gate) 구



(그림 8) 3극형 FEL의 구조

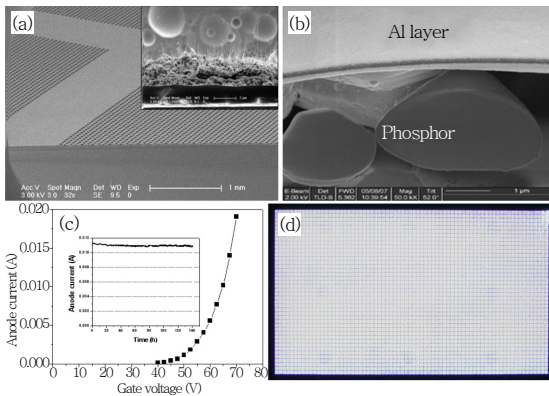


<자료>: 나노퍼시픽

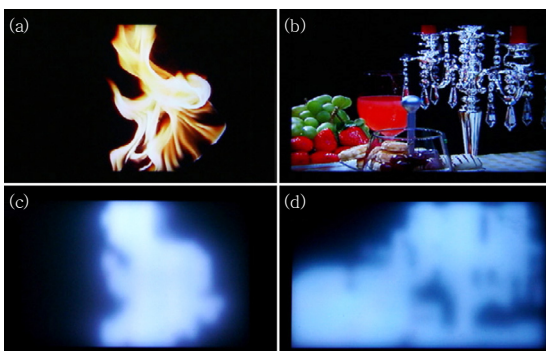
(그림 9) 레터럴 게이트 구조의 FEL

조의 로컬 디밍 CNT BLU를 개발하고 있다.

(그림 10)은 삼성 SDI에서 개발된 32인치 로컬 디밍 CNT BLU의 모습을 보여준다[8]. 톱 게이트 방식의 CNT BLU의 게이트 절연막은 20 μm 두께로, 유리 페이스트를 프린팅하여 제작되고 Mo가 게이트 전극으로 코팅되었다. 게이트 홀은 약 20 μm 이며, 게이트 홀 중앙에 CNT 에미터가 페이스트 형태로 프린팅된 후, 후면 노광 방법으로 형성되었다. 제작된 CNT BLU는 아노드 가속 전압이 15kV, 게이트 전압이 70V일 때 휘도가 약 6,000cd/m²였다고 보고되었다. 삼성 SDI의 로컬 디밍 블록 사이즈는 가로, 세로 각각 1cm로 매우 작아 세밀한 로컬 디밍 패턴 형성이 가능하다.



<자료>: H.S. Kim 외, Nanotechnology, Vol.19, 2008, p.235306.
(그림 10) CNT 전계 에미터의 SEM 사진(a), 형광막 단면 SEM 사진(b), CNT 에미터의 전계방출 특성(c), 32인치 CNT BLU 발광 패턴(d)

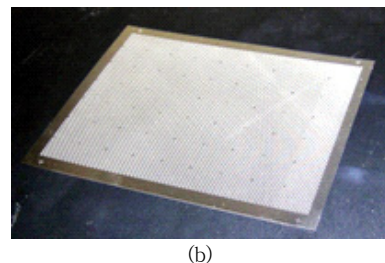
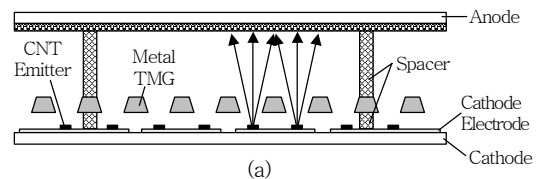


<자료>: H.S. Kim 외, Nanotechnology, Vol.19, 2008, p.235306.
(그림 11) 삼성 SDI의 32인치 CNT BLU를 채용한 LCD TV 시연

(그림 11)은 CNT BLU를 채용한 LCD TV의 시연 영상이다. 화면 휘도 패턴에 따라 CNT BLU 휘도가 조절되며 이로 인해 높은 콘트라스트의 화면을 얻을 수 있다. 이때 명암비는 300,000:1이라고 한다.

ETRI에서는 삼성 SDI와 동일한 톱 게이트형 구조이나 (그림 12a)와 같이 게이트 절연막의 높이가 상대적으로 높은(~100 μm) 매크로 게이트 구조를 채택한 CNT BLU를 개발하고 있다[9]. (그림 12b)는 게이트 전극으로 사용되는 메시 게이트를 보여준다.

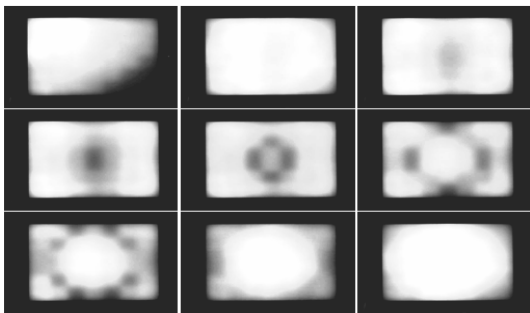
게이트 전극으로 사용되는 메시 게이트의 게이트 홀은 CNT 에미터 패턴과 대응되도록 설계되며, 일반적으로 에칭 방식으로 가공·제작된다. 제작된 메시 게이트는 CNT 에미터가 형성된 캐소드 기판에 우선적으로 정렬 접합된다. 메시 게이트 구조의 램프는 게이트가 CNT 에미터로부터 멀리 떨어져 있으므로 게이트 구동 전압이 높아지는 문제점을 가지나, ETRI에서는 게이트 전압을 일정하게 유지한 상태에서 캐소드 전류를 제어함으로써 CNT BLU의 펄스 구동 및 블록별 휘도 조절이 가능하도록 하였다. 캐소드 전류를 제어하는 구동방식을 택할 경우 5V 이하의 낮은 전압으로 CNT BLU를 제어할 수 있어 구동회로를 간단하면서 저가격으로 제작할 수 있는 이점이 있다. 또한, 로컬 디밍 구동의 경우 각 블록별로 임의 접근(random access addressing)이 가능하므로 통상적인 순차 구동방식을 택하는 전



(그림 12) ETRI의 CNT BLU 구조(a) 및 금속 매크로 게이트(b)



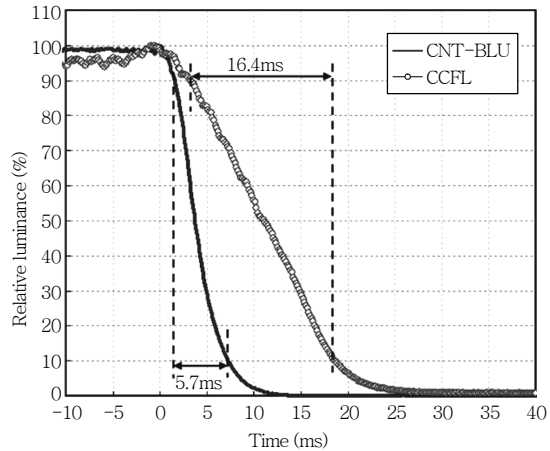
(그림 13) ETRI의 15", 42블록 CNT BLU



(그림 14) ETRI의 15", 42블록 CNT BLU 구동 영상

압 제어의 경우보다 각 블록별로 듀티(duty)를 높일 수 있는 장점이 있다.

(그림 13)은 ETRI에서 개발한 15인치, 42블록 CNT BLU 사진으로, 각 로컬 디밍 블록은 가로, 세로 각각 약 4cm 크기이다. 캐소드 전극은 Ag 페이스트를, CNT 에미터는 CNT 페이스트를 인쇄하여 형성하였다. 개발된 CNT BLU는 매크로 게이트의 구조적 강점으로 인해 아크에 의한 과전압, 과전류로부터 크게 보호될 수 있다. 15kV의 아노드 가속 전압에서 매우 안정적인 구동 특성을 보이며, 피크 휘도는 $10,000\text{cd/m}^2$ 이상을 얻을 수 있었다. 15kV 이상의 아노드 전압이 인가될 경우에는 엑스-선(X-ray)이 방출되기 때문에 현재 일반 유리를 아노드 기판으로 사용하는 CNT BLU에는 더 높은 가속 전압을 인가하기가 불가능하다. (그림 14)는 15인치, 42블록 CNT BLU로부터 얻은 다양한 구동 영상이다. 캐소드에 인가되는 전류를 제어함으로써 42블록의 휘도가 각각 조절되는 모습을 볼 수 있다.



<자료>: H.S. Kim 외, Nanotechnology, Vol.19, 2008, p.235306.

(그림 15) LCD TV의 응답속도 비교

CNT BLU는 다른 BLU와 차별되는 특징이 있는데, 그것은 높은 응답속도이다. 앞서 언급한 바와 같이 LCD는 액정의 낮은 응답속도로 인한 잔상 등의 문제로 동영상 특성이 CRT에 비해 현저히 저하된다. 주파수 증가(120, 240Hz) 등의 기술로 잔상 문제를 해결하고 있으나 근본적인 해결 방법과는 거리가 있다. 하지만 CNT BLU의 경우, 순간적인 고휘도 특성과 더불어 높은 응답속도를 가지는 전계방출의 특성상 이러한 동영상 문제를 근본적으로 해결할 수 있다.

(그림 15)는 CCFL과 CNT BLU를 채용한 LCD TV의 응답속도를 나타낸 그래프이다. 응답속도는 밝기가 90%에서 10%로 감소하는 시간으로 정의된다. 그래프에 나타난 바와 같이, CNT BLU를 채용한 경우 CCFL에 비해 거의 3배나 응답속도가 빠른 것을 알 수 있다. 이러한 CNT BLU의 특성을 이용하여 순간적인(impulsive) 강력한 백 라이트 발광을 일으킬 경우 잔상에 의한 화질 저하 문제가 해결될 수 있다. 이는 현재 CNT BLU만 가능한 기술이다.

V. 결론

지금까지 CNT 전계 에미터를 이용한 BLU에 관하여 살펴보았다. 현재 LCD BLU의 주류를 이루고

있는 CCFL은 낮은 가격과 높은 효율에도 불구하고 환경 문제, 화질 저하, 색재현율 등의 문제로 새로운 BLU의 개발이 요구되고 있는 실정이다. LED BLU가 최근 급속히 발전하면서 CCFL을 대체하고 있으나 가격 등의 문제로 시장 진입이 더디게 진행되고 있는 실정이다. 나노 기술을 바탕으로 한 CNT BLU는 CCFL과 LED를 대체할 만한 뛰어난 특성을 가지고 있으며, 최근 몇몇 기관들에 의해 우수한 특성의 BLU가 개발되고 있는 실정이다. 태생적으로 면광원인 CNT BLU는 로컬 디밍 기술, 잔상 제거 기술 등의 적용으로 고품질의 LCD TV 시장에 적용될 수 있는 차세대 BLU 기술이다.

● 용어해설 ●

CNT FEL: 캐소드 기판에 형성된 CNT 전계 에미터에 전기장을 인가하여 방출된 전자를 고전압으로 가속하여 아노드 기판의 형광체에 충돌시켜 발광하는 음극선발광형의 면광원

CNT BLU: CNT FEL를 LCD의 BLU 모듈에 채택한 것으로, 고정세의 로컬 디밍, 고속 순간 발광에 의한 잔상 제거 등의 장점으로 CRT 품질의 LCD TV를 구현할 수 있음

약어 정리

BLU	Back Light Unit
CCFL	Cold Cathode Fluorescent Lamp
CNT	Carbon Nanotube
FED	Field Emission Display
FEL	Field Emission Lamp
MWNT	Multi Wall CNT
LCD	Liquid Crystal Display
LED	Light Emitting Diode
SWNT	Single Wall CNT

참고 문헌

[1] H.W. Kroto, J.R. Heath, S.C. O'Brien, R.F. Curl, and R.E. Smalley, "C60: Buckminsterfullerene," *Nature*, Vol.318, No.14, 1985,

pp.162-163.

[2] S. Iijima, "Helical Microtubules of Graphitic Carbon," *Nature*, Vol.354, 1991, pp.56-58.

[3] J.I. Sohn, S. Lee, Y.-H. Song, S.-Y. Choi, K.-I. Cho, and K.-S. Nam, "Patterned Selective Growth of Carbon Nanotubes and Large Field Emission from Vertically Well-aligned Carbon Nanotube Field Emitter Arrays," *Appl. Phys. Lett.*, Vol.78, 2001, pp.901-903.

[4] W.B. Choi, D.S. Chung, J.H. Kang, H.Y. Kim, Y.W. Jin, I.T. Han, Y.H. Lee, J.E. Jung, N.S. Lee, G.S. Park, and J.M. Kim, "Fully Sealed High-brightness Carbon-nanotube Field Emission Display," *Appl. Phys. Lett.*, Vol.75, 1999, pp.3129-3132.

[5] B.-N. Lin, M.-C. Hsiao, Y.-Y. Chang, W.-Y. Lin, L.-Y. Jiang, M.-H. Lin, L.-H. Chan, Y.-C. Jiang, T.-H. Tsou, and C.-C. Lee, "Novel Structure of Carbon Nanotubes Backlight Unit," *SID Symp. Digest*, Vol.37, 2006, pp.71-73.

[6] H.S. Kim, J.W. Lee, S.K. Lee, C.S. Lee, K.W. Jung, J.H. Lim, J.W. Moon, M.I. Hwang, I.H. Kim, Y.H. Kim, B.G. Lee, Y.C. Choi, H.R. Seon, S.J. Lee, and J.H. Park, "Field Emission-back Light Unit Fabricated Using Carbon Nanotube Emitter," *Int'l Meeting on Information Display(IMID) Digest 2007*, 2007, pp.277-280.

[7] J.-W. Jeong, D.-J. Kim, J.-T. Kang, J.-S. Kim, and Y.-H. Song, "Development of Highly Bright Field Emission Lamp for Dynamic Back Light Unit in LCD," *Proc. of the 14th Int'l Display Workshops(IDW) 2007*, 2007, pp.2189-2190.

[8] Y.C. Choi, J.W. Lee, S.K. Lee, M.S. Kang, C.S. Lee, K.W. Jung, J.H. Lim, J.W. Moon, M.I. Hwang, I.H. Kim, Y.H. Kim, B.G. Lee, H.R. Seon, S.J. Lee, J.H. Park, Y.C. Kim, and H.S. Kim, "The High Contrast Ratio and Fast Response Time of a Liquid Crystal Display Lit by a Carbon Nanotube Field Emission Backlight Unit," *Nanotechnology*, Vol.19, 2008, pp.235306-235310.

[9] J.-W. Jeong, D.-I. Kim, J.-T. Kang, J.-S. Kim,

- and Y.-H. Song, "15-in. Dynamic Field Emission BLU for LCD," *Proc. of the 15th Int'l Display Workshops(IDW) 2008*, 2008, pp.2019-2020.
- [10] J. Zhang, Y. Cheng, Y.Z. Lee, B. Gao, Q. Qiu, W.L. Lin, D. Lalush, J.P. Lu, and O. Zhou, "A Nanotube-based Field Emission X-ray Source for Microcomputed Tomography," *Review of Scientific Instruments*, Vol.76, 2005, p.094301.
- [11] T. Shiga and S. Mikoshiba, "Reduction of LCTV Backlight Power and Enhancement of Gray Scale Capability by Using Adaptive Dimming Technique," *SID Symp. Digest*, Vol.34, 2003, pp.1364-1367.