

## 기술 특 집

# Carbon Nanotube를 이용한 Field Emission Display 개발

강성기, 이천규, 김종민(삼성 에스디아이(주) 중앙연구소)

## I. 개 요

### 1. 평판 TV 시장 개요

작년 월드컵대회를 계기로 크게 늘기 시작한 PDP-TV와 LCD-TV의 시장은 PDP의 경우 2002년 세계시장 규모는 80만대에 달했고 2005년에는 800만대에 이를 전망이며, LCD는 중대형 TV 시장을 새로운 목표로 2002년 150만대에서 2005년에는 1000만대로 확대될 전망이다.

최근에 들어 더욱 뜨거워진 PDP와 LCD간 경쟁의 답은 가격인하와 화질 개선이다. 주요 LCD 업체들은 현재 30-50인치대 대형 LCD 패널을 생산하기 위한 6,7세대 생산라인에 대한 투자를 진행중이거나 계획중에 있다. 대형 라인에서의 다면취를 무기로 LCD-TV와 PDP-TV간의 대당 가격 차이는 42인치의 경우 2002년 3500달러에서 2007년에는 700달러선으로 축소될 것으로 예상하고 있다. 반면 PDP 생산업체들의 경우에도 2005년까지 PDP-TV의 생산비용을 현재의 1/3로 줄이는 것을 목표로 다면취등, 신공정 개발을 하고 있다.

한편 화질의 경우 해상도와 색재현성에서는 LCD-TV가, 동영상구현과 휘도에서는 PDP-TV가 앞서고 있지만 두 제품 모두 서로에게 필적할 정도의 화질 개선을 위한 개발을 진행중이다. 하여튼 양 제품간의 경쟁등에 힘입어 30인치 이상의 대형 평판 TV 시장은 연간 10% 이상의 성장이 예상되는 있고 이에 새로운 도전장을 내는 Display가 있으니 LCD대비 70%의 재료비, 1/4의 투자비라는 가격 경쟁력과 PDP 대비 1/2의 소비전력과 CRT 수준의 자발광 화질, Size Free, 해상도 Free라는 장점으로 CNT-FED가 개발에 박차를 가하고 있다.

### 2. FED 개요

FED는 마이크로 팁 주위에 강한 전기장이 형성될 때 일어나는 양자 역학적인 전자의 방출 현상을 이용하는 것으로 1980년대 후반에 프랑스의 LETI가 디스플레이에의 응용

가능성을 제시하고 개발하기 시작함으로써 상업화의 가능성을 보였다. FED의 구조는 다수의 에미터 팁으로 구성된 전체 에미터 어레이(Field Emitter Array : FEA)가 초소형 전자총으로 동작하며, 게이트와 팁 간에 일정 전압(수십 V)이 인가되면, 전자들이 팁으로부터 양자역학적으로 터널링되어 방출된다. 방출된 전자들은 더욱 큰 아노드(anode) 전압(수백 V~수 kV)에 의해 형광체가 도포되어 있는 아노드 쪽으로 가속되며, 전자들이 형광체에 충돌하게 되면 이 에너지에 의해 형광체 내의 특정 원소 내에 있는 전자들이 여기되었다가 떨어지면서 빛을 발생한다. 이러한 FED의 구조 및 동작 원리로부터 알 수 있듯이, 평판형으로 구성된 것을 제외하면, 마이크로 전자총을 사용하므로 CRT와 동작원리가 흡사하다. 따라서, FED의 장점은 CRT와 마찬가지로 음극선발광(Catholuminescence) 원리로 동작한다는 점(자발광, 높은 효율, 높은 휘도와 넓은 색재현 영역, 넓은 시야각 등이 가능함), 동작 속도가 매우 빠르다는 점(응답 속도 : 수  $\mu$ msec), 동작 온도 영역이 넓다는 점( $-45^{\circ}\text{C} \sim +85^{\circ}\text{C}$ )을 들 수 있다.

그러나 이렇게 많은 장점과 지난 10여년간 Spindt-type FED을 필두로한 많은 기술적, 상업적 성공을 위한 노력과 기술적 성공에도 불구하고 아직 FED의 양산 라인 설립을 통한 상업화를 달성한 업체는 없었는데 이는 TFT-LCD와 같은 높은 투자 비용과 생산 원가에 기인하는것이다. 이와 같이 코스트 문제와 대형화의 한계라는 상업화의 장애물이 최근 CNT-FED라는 새로운 형태의 FED 출현으로 극복될 수 있을것이라는 검증 작업이 상당한 진보를 보이고 있다. 지금까지 CNTs의 FEDs에 대한 응용은 두가지 방법으로 연구되어 왔는데 그중 하나가 캐소드 판 위에 직접 CNT 에미터를 합성하는 것이고 또다른 방법은 미리 준비된 CNT 에미터를 코팅하는 것으로, 예로서 screen printing, spraying, spin coating 등이 있을 수 있다. 현재 대면적의 유리기판에 저온에서의 CVD 기술로 CNTs를 균일하게 합성하는 것은 아직 충분히 개발되지는 못하였고 본 보고서에서는 캐소드 판에 CNT 에미터를 형성하는 FED 기술에 집중하여 검토하도록 한다.

## II. CNT-FED 제조

차세대 평판 디스플레이 소자인 CNT-FED의 상용화를 위해 중점적으로 개발을 추진해야 할 분야는 크게 5가지로 요약된다. 분산성 및 신뢰성이 우수한 CNT Paste의 개발, 균일성과 효율성이 우수한 전자 방출원의 구조 및 제조 공정 개발, 상대적으로 낮은 가속 에너지에 의해서도 높은 효율을 발생시킬 수 있는 컬러 형광체의 개발, 중전압 구동회로의 개발, 캐소드 전극판과 형광체 스크린 판을 얇은 유리판 내에 고진공으로 실장시킬 수 있는 기술의 개발들로 분류된다. 최근의 탄소나노튜브(CNT)를 전자 방출원으로 이용한 연구에서는 CNT emitter를 간단한 인쇄 공정으로 형성, 전자원으로 적용함으로써 대형 시제품 제작으로 대형화의 용이, 투자 비용의 절감에 따른 원가 경쟁력의 회복 등을 입증하였으나 이의 상업적 성공을 위해서는 CNT 원 재료에 대한 양산 기술 확보와 원리 이해 및 Cathode 구조 설계를 통해 전자방출 효율을 향상시킴으로서 소자설계에 보다 넓은 여유를 가지면서 제조 공정의 난이도를 낮출수 있어야 할 것이다. 또한, 고진공 실장 기술에서는 고진공 유지를 위해 진공 인-라인 실장기술 개발이나 게터 물질의 제조 및 장착기술이 중요한데, 무엇보다도 공정의 실용성이 생산성 및 저비용성 측면에 있을 수 있기 때문에 최적의 고진공 실장방법을 개발하는 것도 중요한 과제로 언급되고 있다.

### 1. CNT Paste의 제조

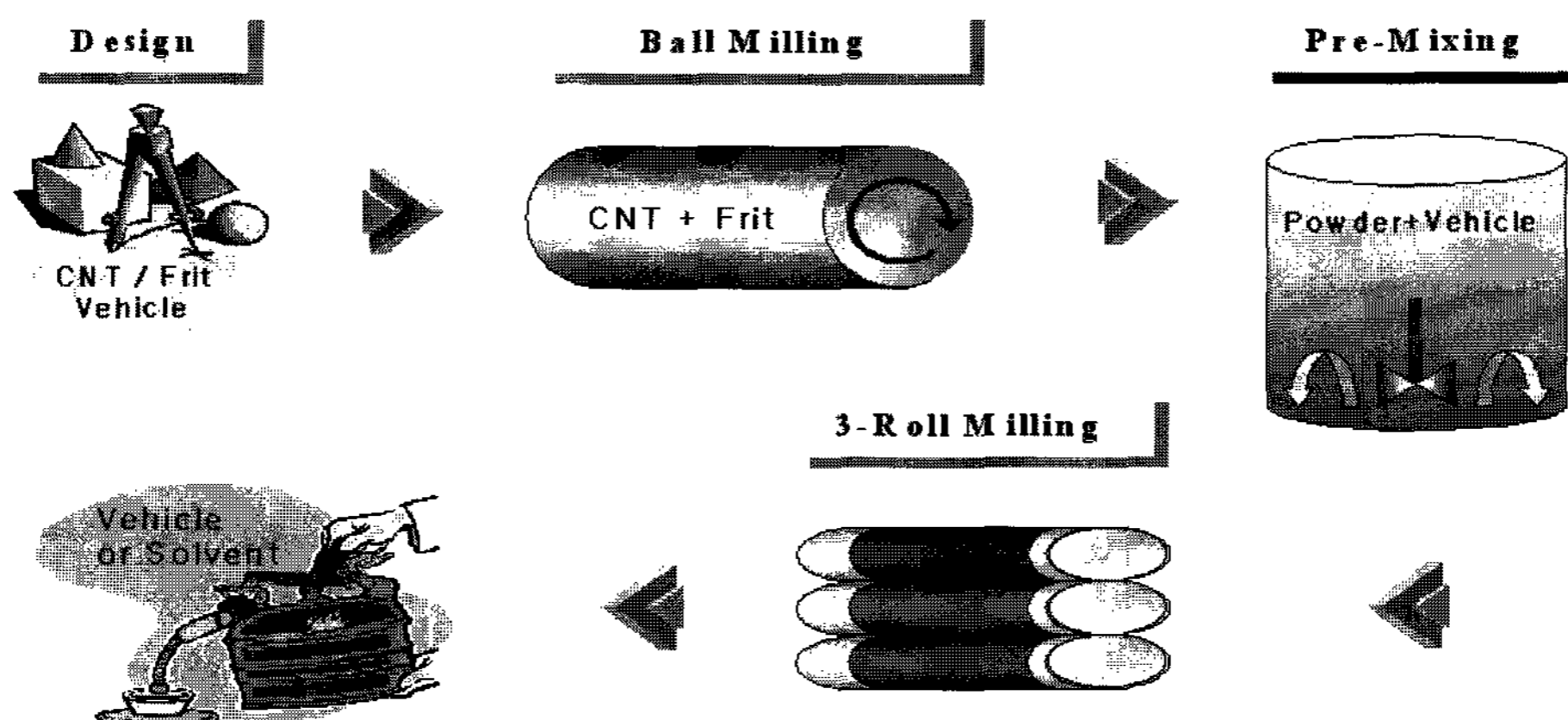
성공적인 CNT cathodes의 제조에 있어 가장 중요한 것은 좋은 CNT paste를 준비하여 스크린 인쇄가 되도록 하는 것이다. Paste 제조에는 일반적으로 arc-discharge에 의해 성장된 SWNTs를 사용하는데 TEM(transmission electron microscopy)으로 살펴보면 1.4-2nm의 diameter인 개별 nanotube들이 bundles로 뭉쳐져 있는 것을 알 수 있다. CNT의 Single-wall 특성은 Raman spectroscopy에 의해서도 알 수 있다. CNT powder는 기계적 grinding후 frit와 혼합되어 다른 inorganic과 organic vehicles에 의해 인쇄가 용이한 paste가 된다.

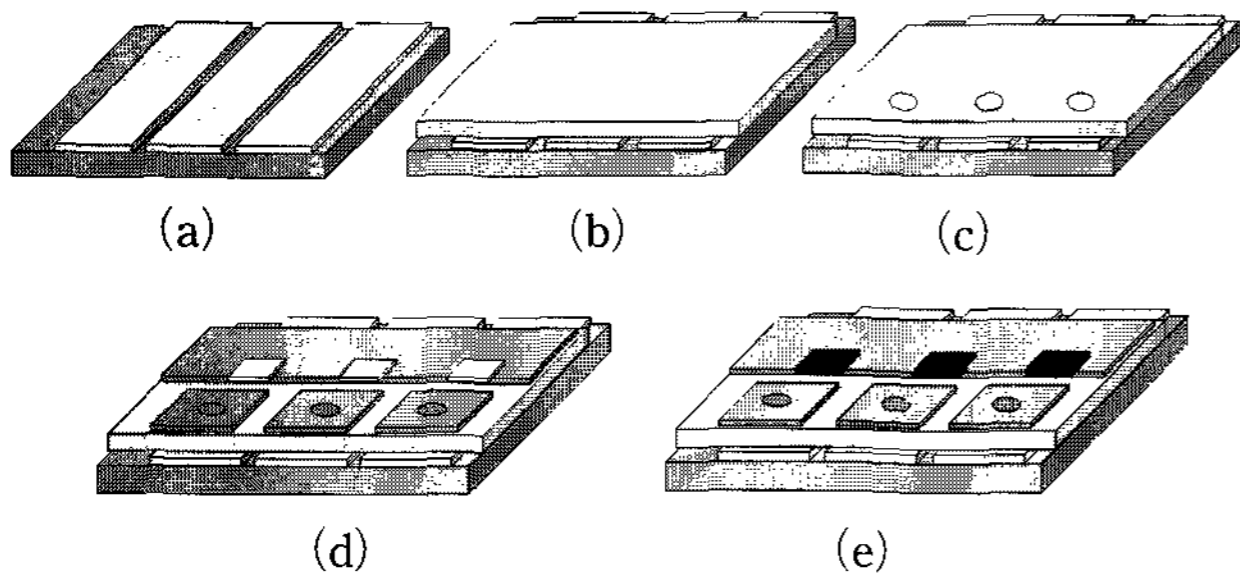
ball mill이나 3-roll mill에 의해 잘 혼합된 것을 적절한 vehicles이나 solvents를 첨가하여 viscosity를 조정하게 되는데 이는 screen printing 공정에 있어 매우 중요한 역할을 하게 된다. 이렇게 마련된 CNT paste는 충분한 emission 효율을 나타내어야 하며 또한 cathode 제조 공정을 거치면서도 충분히 견디어 주어야 하는 강도를 지녀야 하는 것으로, CNT-FED device의 중요 특성인 캐소드의 emission capability에 큰 영향을 미치게 된다. CNT pastes는 가끔 추가적인 표면 처리가 요구되기도 하는데 이는 emission site densities를 증가시켜 좀더 높은 휘도와 안정성 그리고 균일한 emission을 가능케 한다. CNT-FED의 양산 체제에서는 물론 최소한의 공정을 통해 전체 display 제조 공정을 거친후에도 충분한 emission density를 가지도록 하는 것이 중요하다.

### 2. Panel 제작 공정

카본나노튜브를 이용하여 게이트 전극을 갖춘 캐소드 구조를 제작하기 위해 노말 게이트 구조(normal-gate structure) 및 언더 게이트 구조(under-gate structure)가 연구되어 왔다. 기초 실험 결과 노말 게이트 구조는 게이트 홀의 크기를 30um 정도로 형성하더라도 동작 전압이 50V 미만으로서 유리한 반면에, 균일한 방출을 얻기가 공정상 상대적으로 어려운 것을 확인하였고, 언더 게이트 구조는 대면적상에서도 균일한 전자 방출을 얻는 면에서 유리하지만, 상대적으로 동작전압이 다소 높은 단점이 일차 확인되었다. 따라서 대형 HD TV용 Display 개발에서는 언더 게이트 캐소드 구조를 이용하여 연구를 수행하고 있다.

[그림 1]은 상기의 캐소드 기판 제조 공정을 보여주고 있다. 라인 형상의 투명 전극이 기판상에 형성된다(a). 그 위에 후막 절연층이 스크린 프린팅 방법으로 2회 인쇄 및 소성되고(b), 사진 식각 방법으로 via hole pattern이 형성된 후 습식 식각된다(c). 박막 전극이 스퍼터링 방법으로 형성되고, 통상의 사진식각 공정을 이용하여 캐소드 전극 및 대향 전극을 형성한다(d). 마지막으로 카본 나노튜브 페이스트를 스크린 프린팅 방법으로 인쇄한 후 UV 노광 및 현상을 통하여 화소마다 하나씩 직사각형 전자방출층이 형성된

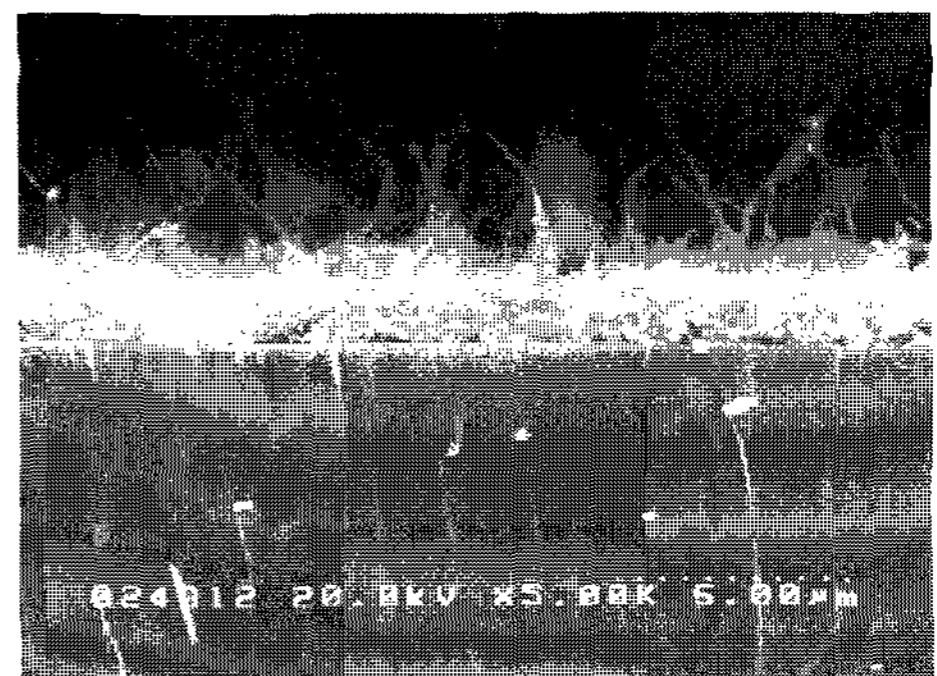
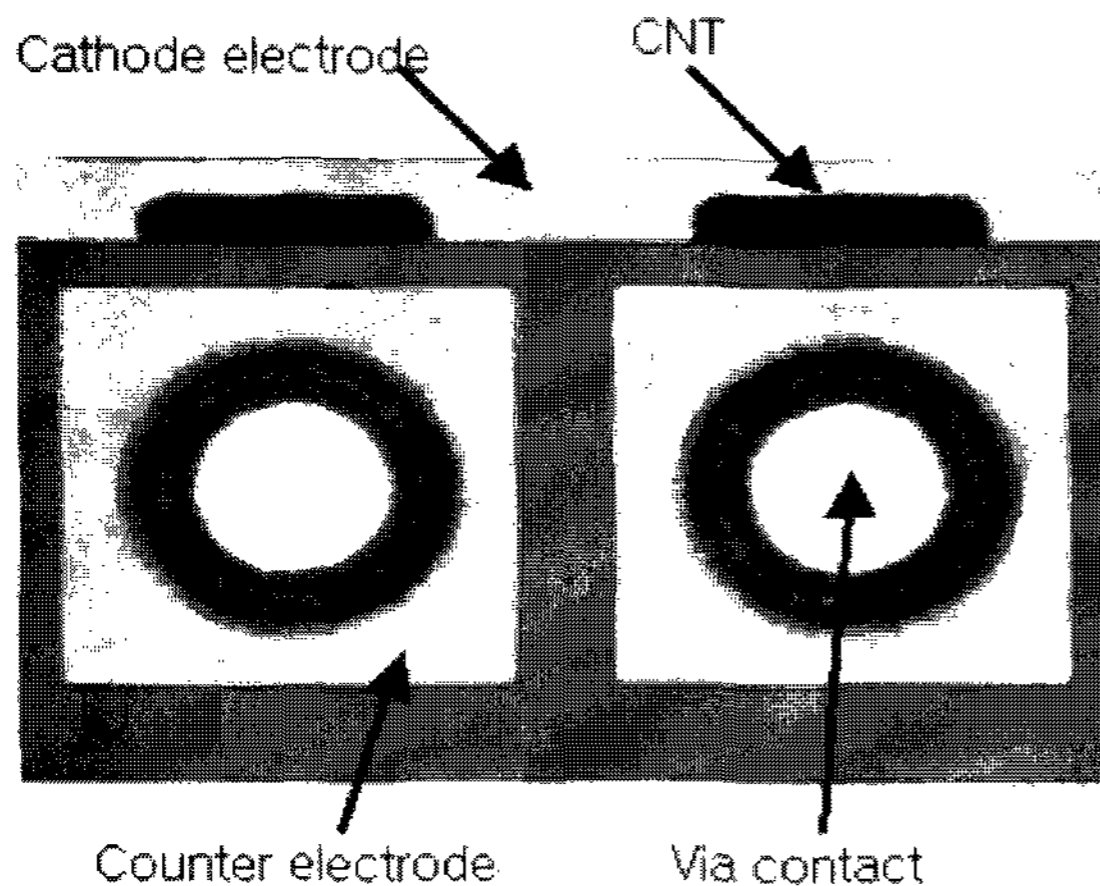




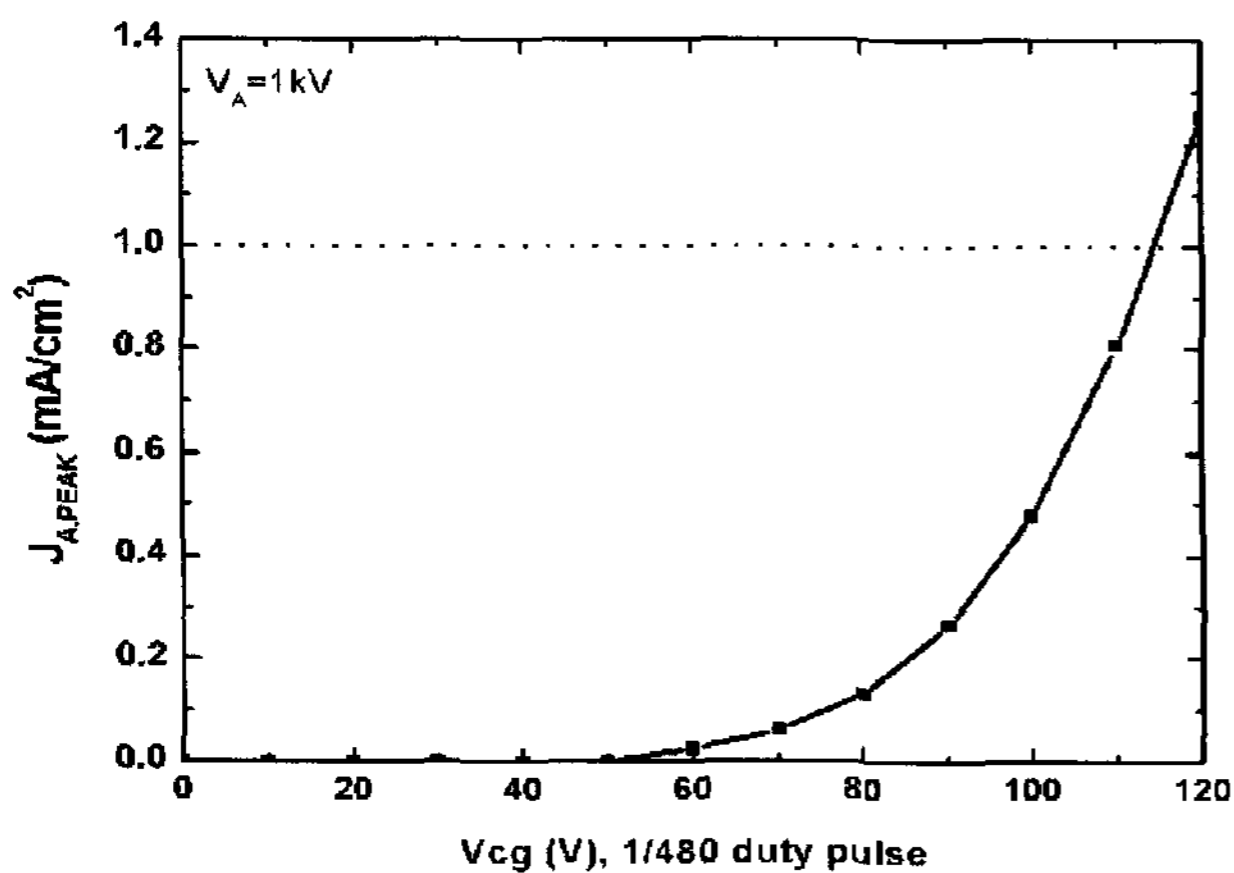
[그림 1] 캐소드 기판 제조 공정  
 (a) 언더 게이트 형성, (b) 절연층 형성,  
 (c) Via hole 형성, (d) 캐소드 전극 및 대향 전극  
 형성, (e) CNT 전자방출층 형성

다(e).

[그림 2(a)]는 제작된 캐소드의 평면도를 보여주고 있다. 화소수는 480\*720\*RGB이다. CNT edge와 대향전극 사이의 거리는 30um이고, 캐소드 전극의 폭은 60um이다. [그림 2(b)]는 CNT층의 SEM(Scanning Electron Microscope) 사진이다. 튀어나온 CNT의 길이는 약 1um 정도이고, 개별 CNT bundle들이 위쪽을 향해 있다. [그림 3]은 언더 게이트 캐소드의 J-V 특성 곡선을 보여주고 있



[그림 2] 캐소드 평면 사진(a), CNT층의 SEM 사진(b)

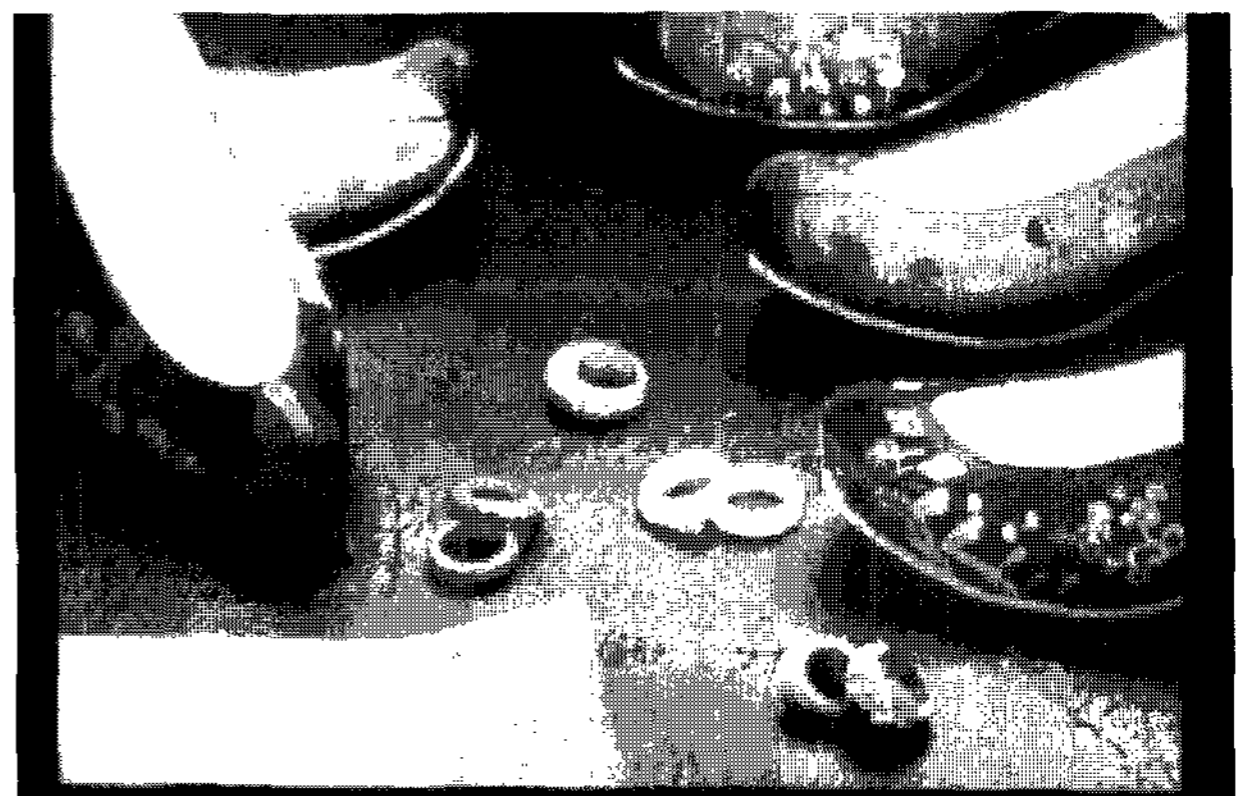


[그림 3] 언더 게이트 카본 나노튜브 캐소드의 전류밀도-전압 특성 곡선

다. 1/480 duty의 캐소드-게이트간 펄스 전압에 대한 최대 아노드 전류를 나타낸다. 약 115 V에서 수 mA/cm<sup>2</sup>의 아노드 전류가 얻어졌다. 만들어진 캐소드 기판은 형광스크린 기판과 결합되어 vacuum sealing 공정을 통하여 패널로 만들어진다. R, G, B 형광체로서 Y<sub>2</sub>O<sub>2</sub>S:Eu, ZnS:Cu, Al, ZnS:AgCl 등이 사용되었다. Glass tube를 사용하는 통상의 봉착 및 배기 공정이 사용되고, 패널 진공도 향상을 위해 non-evaporable getter가 사용되었다. [그림 4]는 제작된 패널의 Image 모습을 보여 주고 있다. emission uniformity는 비교적 양호하고, full-white image에서의 휘도가 200Cd/m<sup>2</sup> 정도 측정되었다. 이외에 특성도 평가가 진행중이며, 특성 개선을 위한 설계 및 공정 변경이 진행중이다.

### 3. 기타 CNT FED 개발 동향

CNT paste를 이용한 전자방출층 대신 CNT growth 방법으로 형성할 수 있다면 CNT 잔사 불량 문제가 없고 CNT vertical alignment가 용이하며, 재료 원가적 측면에서 유리한 것으로 생각되고 있다. 하지만 현재 기술로는 CNT growth시 기판 온도가 500℃ 이상으로 높아서 금속 박막을 산화시키는 등의 문제점을 야기하고, 또한 multi-



[그림 4] 5.2", 240\*320\*RGB pixel size : 110um\*30um



wall nanotube가 형성되기 때문에 캐소드 동작 전압이 상승하는 불리한 점을 안고 있다. 따라서 growth 온도를 최소한 450°C 이하로 낮출 수 있고, 동작 전압 면에서 동등 수준이 달성된다면 CNT paste를 이용한 방법보다 유리하다고 판단되고 있다. 이러한 취지로 기존의 캐소드 구조에 CNT growth에 방법을 사용한 전자방출층 형성과 저전압 구동이 가능한 캐소드 신 전극 구조에 대한 연구를 국내 대학에서 진행중이며, 차세대 기술로서 high throughput, high vacuum을 위한 in-line vacuum sealing 기술 개발도 병행하고 있다.

진공 인-라인 실장 기술은 FED의 마지막 제조 단계로서 패널의 수명과 제조수율, 생산성에 크게 영향을 미치는 기술이다. 현재까지는 진공도가 우수한 배기 튜브(evacuation tube)방식을 선호하나, 공정 시간이 긴 단점을 가지고 있다. 따라서, 진공도가 우수한 배기튜브 방식의 장점을 진공 인-라인 실장 기술에 적용하기 위한 게터 실장 연구가 이루어져야 하며, CNT의 파괴를 억제하기 위하여 진공 실장 온도가 최대한 저온에서 이루어져야 한다.

또한 CRT에 Hot Wire cathode를 채용하여 CRT의 전장을 줄여 보려는 개발에서 기존 cathode 대신 CNT에 의한 전계 방출과 2차전자의 되튐(Hopping) 현상을 이용한 Ultra Slim Type의 FED 개발이 진행되고 있으며 이는 Spacer가 필요없는 장점이 있으나 다수의 전극 Sheet 채용으로 구조가 복잡해 두께가 두껍고 무게도 무거운 단점이 있다.

### Ⅲ. 맺음말

2001년, 세계 최초로 10억분의 1미터 크기의 Carbon 분체를 Display Emitter로 채용한 삼성의 CNT-FED시현 이후 일본, 대만을 비롯한 세계 우수 Display 업체가 CNT FED 개발에 참여하였고 그동안의 연구 노력의 결과 여전히 한국은 기술적으로 세계의 선도적인 위치에 있으나 아직도 CNT FED가 소비자의 안방을 차지하기 위한 PDP와LCD와의 충분한 품위와 가격경쟁력 확보를 위해서는 새로운 숨고르기가 필요한 시기이다. 즉 그 가능성은 충분히 검증되었으나 사업화 착수를 위한 선결 조건으로 CNT 및 Paste 재료 기술과 DFSS 개념에서의 강건 설계 및 공정 단순화와 전용 설비 개발 병행을 통한 양산 대비, 제품 신뢰성의 사전 검증이 되어야 한다.

이에 재료 및 설비 업체등과의 협력체제 구축을 통해 사업 Infra를 구축하고 CNT Paste의 레올로지 연구와 같은 기초실험 및 연구개발은 대학 및 출연연구소와 협업을 계속 진행되어야 하며 Display 기업체 내에서도 기존 FED 기술 인력 중심에서의 제품 개발을 벗어나 CRT, LCD, PDP와의 이중 Display 기술융합을 통해 LCD, PDP에서의 성공 신화를 이어나가야 할 것이다.