

기술 특 집

탄소나노튜브에서 전계방출

유 세 기 (한국외국어대학교 전자물리학과)

I. 서 론

1999 Iijima에 의해 발견된 탄소나노튜브(carbon nanotube, CNT)는^[1,2] 나노과학/기술의 주요한 물질의 하나로 현재 많은 연구가 진행되고 있다^[3-7]. CNT는 흑연의 한 층이(graphene sheet라고 한다) 원통형으로 말려있으면 단일벽 나노튜브(single-walled nanotube, SWNT)라고 하고, 여러 층이 말려 있으면 다중벽 나노튜브(multiwalled nanotube, MWNT)라고 부른다. 또한 이 graphene sheet가 어떠한 방향(chirality)으로 말려서 CNT가 되었느냐에 따라, SWNT는 반도체 또는 금속의 성질을 띤다. 탄소나노튜브는 지름 대 길이의 비(aspect ratio)가 보통 10^3 이상으로 매우 높은 기하학적인 형태를 갖고 있어, 동일한 전압에 비해 다른 구조물보다 강한 전기장을 얻을 수 있는 전자방출이 매우 용이한 이상적인 구조이다. 또한 전계방출의 경우는 일반적으로 나노튜브의 전기적 성질에 상관없이 전자의 방출이 원활하게 이루어지고 있어 많은 연구가 활발히 이루어지고 있다. 그 중 탄소나노튜브를 이용한 전계방출 디스플레이(field emission display, FED)는 CNT의 대표적인 응용으로써 평판디스플레이로 그 역할을 할 것으로 기대되며, 이는 LCD용 backlight로도 그 응용이 가능하다. 여기에서는 탄소나노튜브의 전계방출현상에 대한 연구결과 및 개발 동향을 소개하고, 최근 들어 많이 만들어지고 있는 다양한 나노구조물에서의 전계방출 현상에 대하여도 간략히 언급하고자 한다.

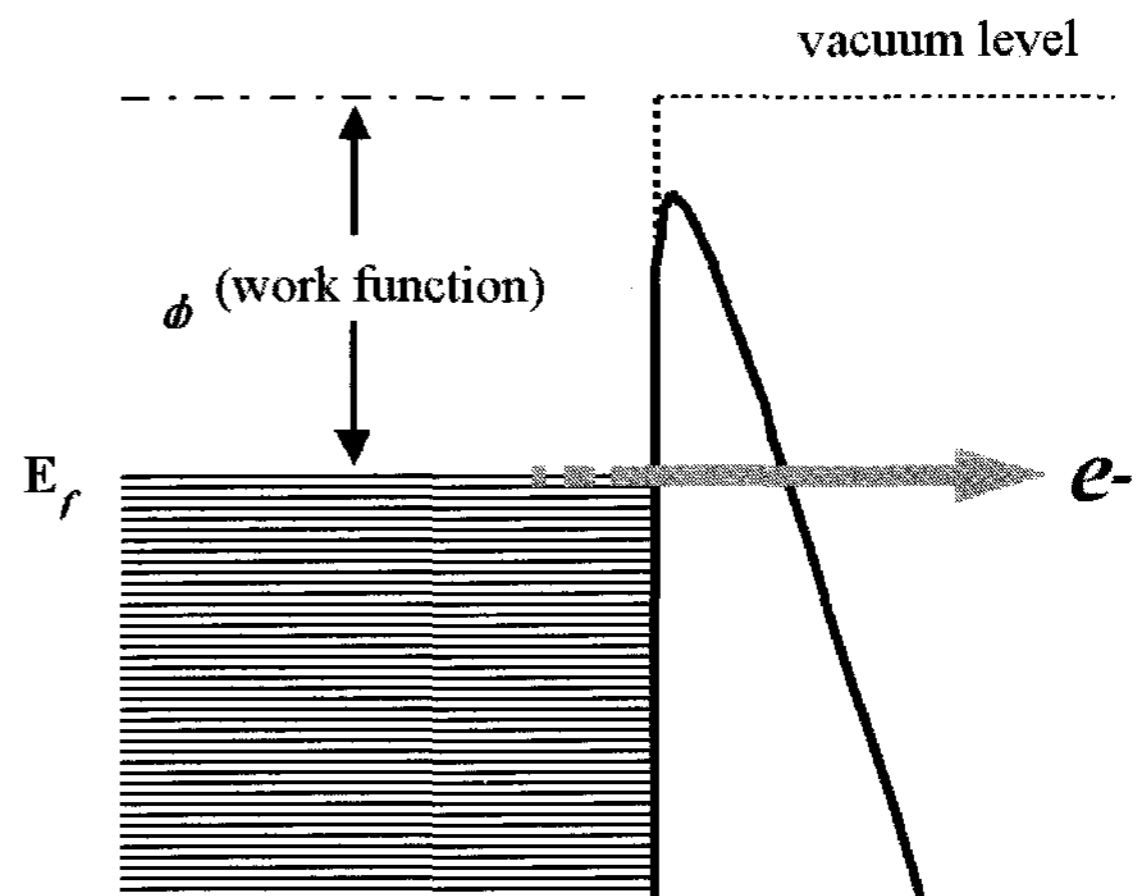
II. 전계방출

전계 방출(field emission)은^[8] 일반적으로 강한 전기장($0.3\sim 0.6\text{V}/\text{\AA}$)하에서 금속 표면에서 전자가 진공 또는 다른 물질 속으로 방출되는 현상이다^[9,10]. 이는 전자가 외부 에너지 원(열, 빛, 고에너지 입자)의 도움으로 금속과 진공과의 에너지 장벽인 일함수(workfunction)를 뛰어넘는 열전자, 광전자 또는 이차 전자 방출과 같은 현상과 근본적으

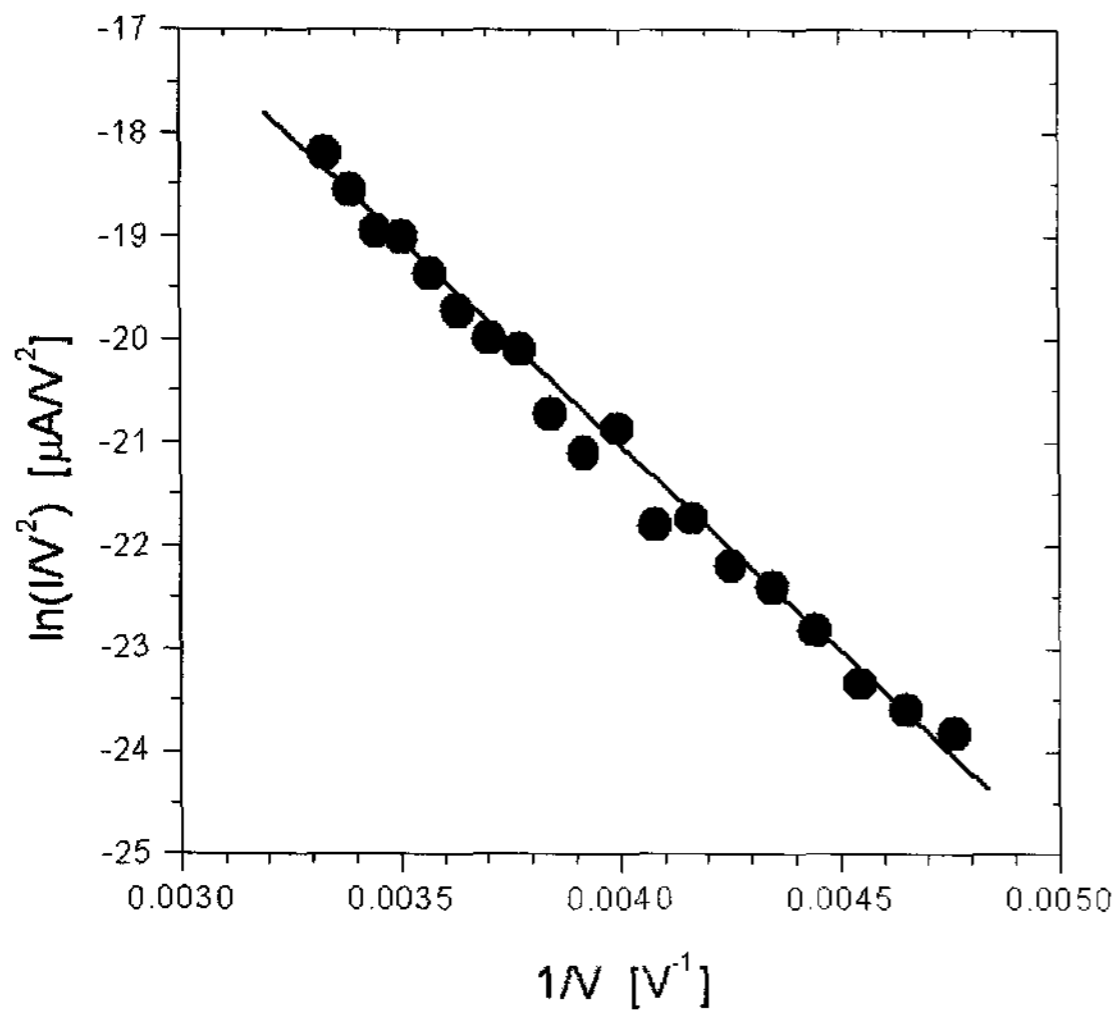
로 다른 것으로서, 외부에서 가해진 전기장이 에너지 장벽을 [그림 1]에서와 같이 꺾이고 전자는 순수한 양자 학적인 터널링(tunneling)으로 에너지 장벽을 통과해서 진공 중으로 방출되는 것이다. MOS 트랜지스터에서는 전자가 산화물 장벽을 넘어서 게이트 전극으로 빠지는 원하지 않는 누설전류는 진공이 아닌 고체로 통과되는 대표적인 예이다^[11]. 이 현상에 대해서는 1928년에 Fowler와 Nordheim에 의해 그 당시 탄생한 양자역학 이론을 적용하여 이론적으로 정립되었다^[10]. 전압 V 를 가했을 때, 전계 방출된 전류(I)는

$$I \propto V^2 \exp(-\phi^{3/2}/\beta V),$$

로 표시된다. 여기서 ϕ 금속의 일함수이며 β 는 field enhancement factor($E = V * \beta$)로 불리우는 상수로 주어진 전계 방출원의 기하학적인 특성을 반영한다. 즉 β 값이 크면 전계 방출이 쉽게 일어나며, 그 형태는 뾰족하게 변한다^[12]. 일반적으로 전계방출은 가능한 한 낮은 전압에서도 전자가 나올 수 있게 금속을 매우 뾰족하게 만든 후 전계 방출을 유도한다. Fowler-Nordheim 공식은 절대온도 0K에서 금속



[그림 1] 전계 방출 메커니즘 개략도. 전기장이 걸리기 전의 점선으로 표시된 진공 준위(vacuum level)가 전기장이 걸리면 실선과 같이 변한다. 전자는 금속의 페르미 준위에서부터 진공 중으로 방출된다.



[그림 2] 전형적인 Fowler-Nordheim 커브. 텅스텐 팁에 다중벽 CNT를 붙여서 측정한 값.

평면에서 전자 방출에 관한 이론이기는 하지만, 1000K 이상의 고온에서 작동시키지 않는 한 Fowler-Nordheim 공식은 실험결과를 매우 잘 설명한다. 이는 대부분의 금속이 높은 일함수(4~6eV) 값을 가지고 성질에서 연유하기도 한다. 높은 온도에서 전계 방출은 thermal field emission이라고 하며, 저온에 강한 전기장의 근사식을 취하면 Fowler-Nordheim 공식으로 되며, 고온에 약한 전기장의 근사식을 취하면 열전자 방출에 관한 Richardson 또는 Schottkey 공식이 된다¹⁹⁾. 일반적으로, 실험 결과를 [그림 2]에서와 같이 $\log(I/V^2)$, $1/V$ 의 함수로 그려서 직선의 형태를 띠고 있으면, 전계방출에 의해 전자가 방출된 직접적인 증거로 간주한다.

전계 방출의 역사를 살펴보면, 초기에는 고체 내에서 페르미 에너지 근처의 전자의 특성 파악하려는 의도로 많이 연구되었으며, 전계 방출로 금속의 일함수도 유추하기도 하였다. 전계방출 실험에서 실제로 그 금속에 걸리는 전기장 값을 정확히 알기 어렵기 때문에, 현재 일함수 값을 구하는 데는 보통 광전자 방출(photoemission)을 이용하고 있다. 그 후 field emission microscopy, field ionization microscopy와 같이 직접 금속의 전자 또는 격자 구조를 원자 수준으로 확대해서 볼 수 있는 현미경으로서 많은 연구가 이루어졌으며, scanning tunneling microscopy 보다 수십 년 앞서서 원자의 배열을 직접 관찰하였다¹³⁾. 그 후 Spindt에 의해 3극관 구조의 게이트(gate)를 가지는 금속 팁을 쉽게 만들수 있는 방법이 보고된 후¹⁴⁾, 전자 방출원으로 이용 가능성에 관한 연구가 활성화되었다. 진공으로 전자 방출이 매우 수월할 것이라는 기대감을 가지고 음의 전자 친화도(negative electron affinity)를 갖는 반도체 물질(다이아몬드, 질화물 반도체 등)에 관한 연구도 많이 이루어졌으나¹⁵⁾, 반도체라는 성질로 인해 물질 내에서 전자 이동이 자유롭지 못한 점으로 인해 전계방출이 원활하지 않아, 그 후 금속 팁의 코팅물질로 그 영역이 다소 축소되었다.

여러 가지의 전자 방출 현상 중에서 보통의 경우 열전자

방출과 전계 방출 현상을 이용한 소자가 많이 사용되고 있으며, 진공관과 브라운관의 전자총이 대표적인 열전자를 이용하는 것이다. 전계 방출은 예열 또는 가열 과정이 필요하지 않아 냉전자 방출(cold emission)이라고 불리우기도 한다. 또한 전계 방출된 전자가 가지는 에너지의 분포의 선폭이 열전자보다 적기 때문에 전자 렌즈에서 수차(aberration)이 적어서, 전자 현미경의 경우 전계 방출형 전자현미경이 일반적인 열전자 전자 현미경보다 더 뛰어난 분해능을 가지게 있다.

III. 탄소나노튜브에서 전계 방출

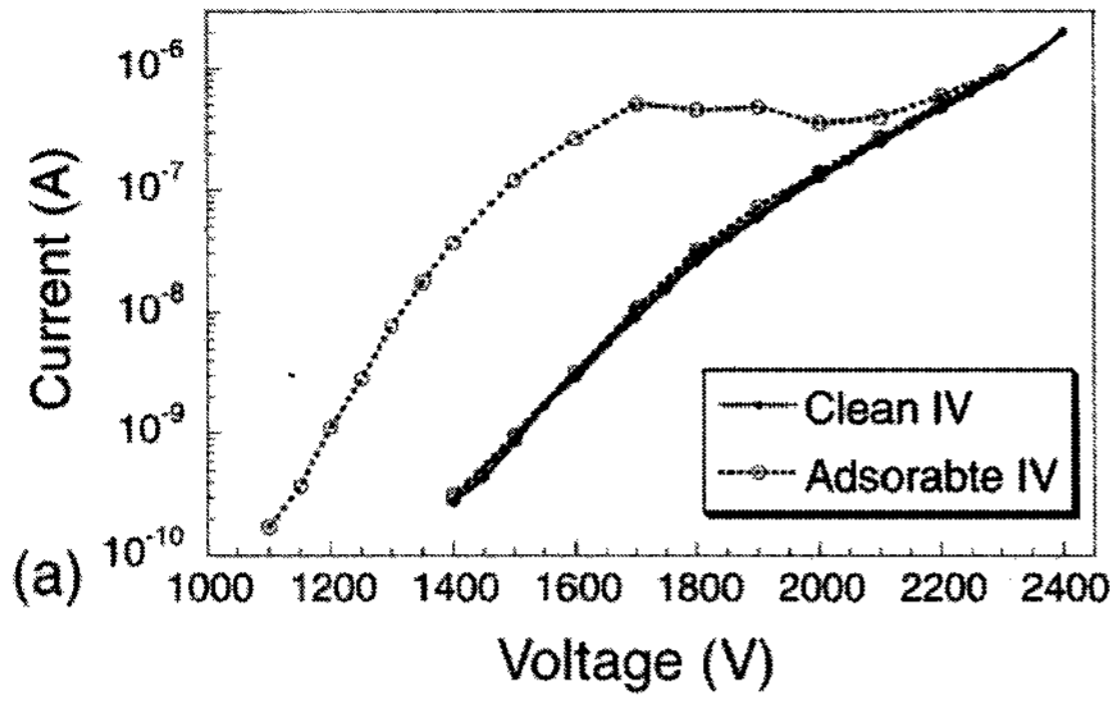
1. Adsorbate에 의한 전계방출

앞에서 언급한 바와 같이 CNT는 전계방출에 유리한 형태를 가졌고, 금속보다 수천 배나 높은 단위 면적 당 전류 밀도($\sim 10^9 \text{A/cm}^2$)—일부에서는 CNT에서 전자의 흐름이 산란되지 않는 ballistic이라는 실험 결과도 있다¹⁶⁾—등으로 인해 이상적인 전계 방출원으로 생각된다^{17,18)}. 따라서 기존의 금속 또는 반도체 등으로 이루어져 왔던 전계 방출원을 대신하여 CNT를 전계방출원으로 이용하고자 하는 것은 자연스러운 연구 개발 방향이라 할 수 있다. 그동안 연구되어 온 여러 물질에 대한 전계방출 특성이 [표 1]에 나타나 있으며¹⁸⁾, CNT는 매우 우수한 전계 방출 물질임을 알 수 있다. 대략적으로 볼 때, 단일벽 CNT가 다중벽 CNT보다 기하학적인 형태가 더욱 뾰족한데서 기인하여 전계방출 특성이 좋으나, 수명과 같은 안정성은 떨어진다고 알려져 있다.

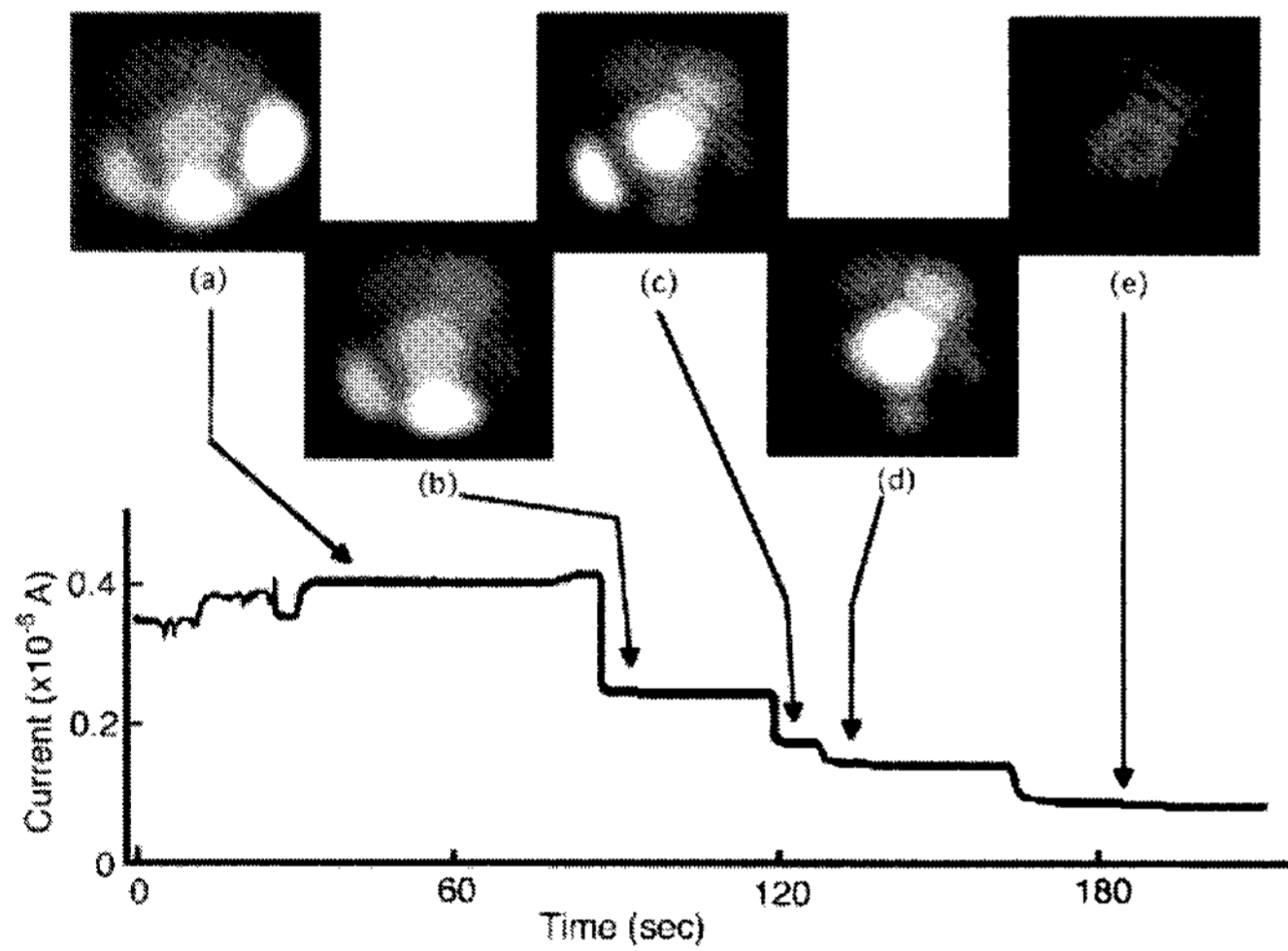
탄소나노튜브에서 측정한 초기의 전계방출 실험 결과는 Fowler-Nordheim 직선을 잘 따르지 않는 것으로 관찰되었다. 즉 [그림 3]의 윗 커브와 같은 형태를 띠며, [그림 2]와 같이 Fowler-Nordheim 방식으로 그리면 꺾인 두 개의 직선으로 표시되는 것이다¹⁹⁾. 이에 대한 논란이 많이 있어 왔으나, 최근에는 이는 탄소나노튜브 표면에 존재하는 adsorbate에 의한 영향으로 밝혀졌다¹⁹⁻²¹⁾. 즉, adsorbate

[표 1] 여러 종류의 전계방출원의 문턱 전기장. 여기서 문턱 전기장은 10mA/cm^2 의 전류가 흐를 때의 전기장으로 정의된다.¹⁸⁾

물 질	임계전기장 (V/ μm)
Mo tips	50~100
Si tips	50~100
p-type semiconducting diamond	160
Undoped, defective CVD diamond	30~120
Amorphous diamond	20~40
Cesium coated diamond	20~30
Graphite powders(<1 μm size)	17
Carbon nanotubes	1.6~6.5

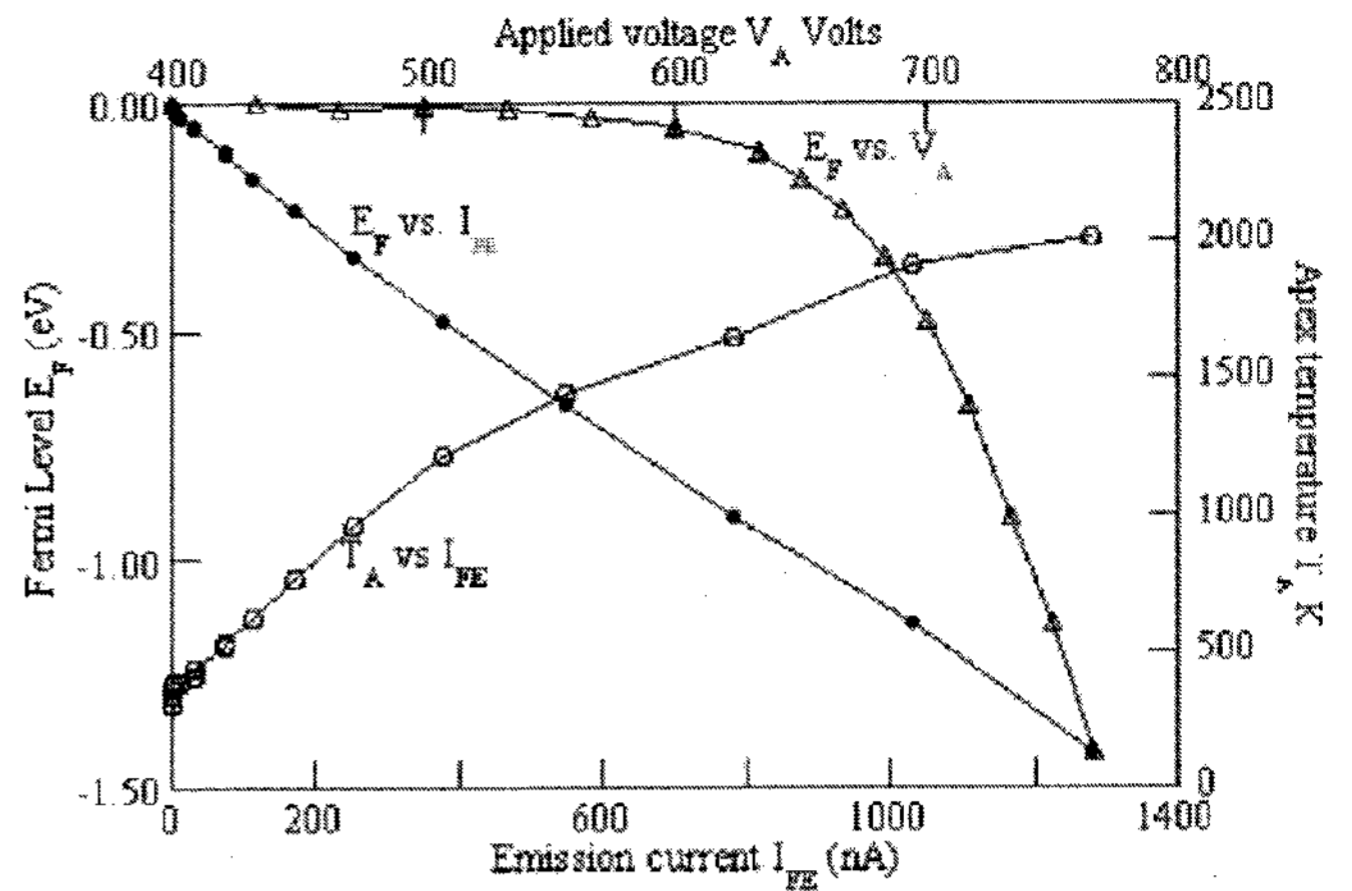


[그림 3] 단일벽CNT의 전계방출 특성. 위 커브는 adsorbate가 CNT 끝에 붙어있는 경우, 아래 커브는 adsorbate가 없는 경우이다.



[그림 4] 다중벽 CNT에서 가스분자가 떨어지면서 전류의 변화와 그에 상응하는 FEM 패턴의 변화를 시간에 따라 표시하였다. 약 1330K로 가열하여 시간이 흐름에 따라 밝은 부분이 사라지면서, 전류가 계단형으로 감소함을 알 수 있다. 맨 나중에는 모든 adsorbate가 다 떨어졌고, FEM에서 밝은 부분이 하나도 없다.

가 사라진 깨끗한 CNT의 경우 [그림 3]의 아래 커브와 같이 Fowler-Nordheim 공식을 잘 만족시킴을 알 수 있다. 전계 실험 도중에 깨끗한 CNT를 얻는 방법 중 하나로 다량의 전계 방출 전류로 인한 Joule 가열로 adsorbate를 증발시키는 방법이 자주 사용되며, [그림 3]의 아래 커브와 같은 방법을 통해 얻은 것이다. 이 adsorbate에 의한 영향을 field emission microscopy(FEM)로도 관찰하였는데, 이러한 adsorbate가 CNT 끝부분에 붙었다가 떨어지는 것을 FEM의 오각형 육각형의 형태의 밝기 변화하는 것으로 실시간으로 관측하였다^[19, 20]. 즉, [그림 4]에서 보듯이, 다중벽 CNT에서 약 1330K로 가열하여 시간이 흐름에 따라 밝은 부분이 사라지면서, 전류가 그에 상응해서 계단형으로 감소함을 알 수 있다. 맨 나중에는 모든 adsorbate가 다 떨어졌고, FEM에서 밝은 부분이 하나도 없게 된다. 아주 정밀한 실험의 경우를 제외하고는 대부분의 CNT에서의 전계 방출 실험은 10^{-6} 또는 10^{-7} Torr 정도의 고진공(high vacuum) 하에서 이루어짐을 감안하면, adsorbate를 통한



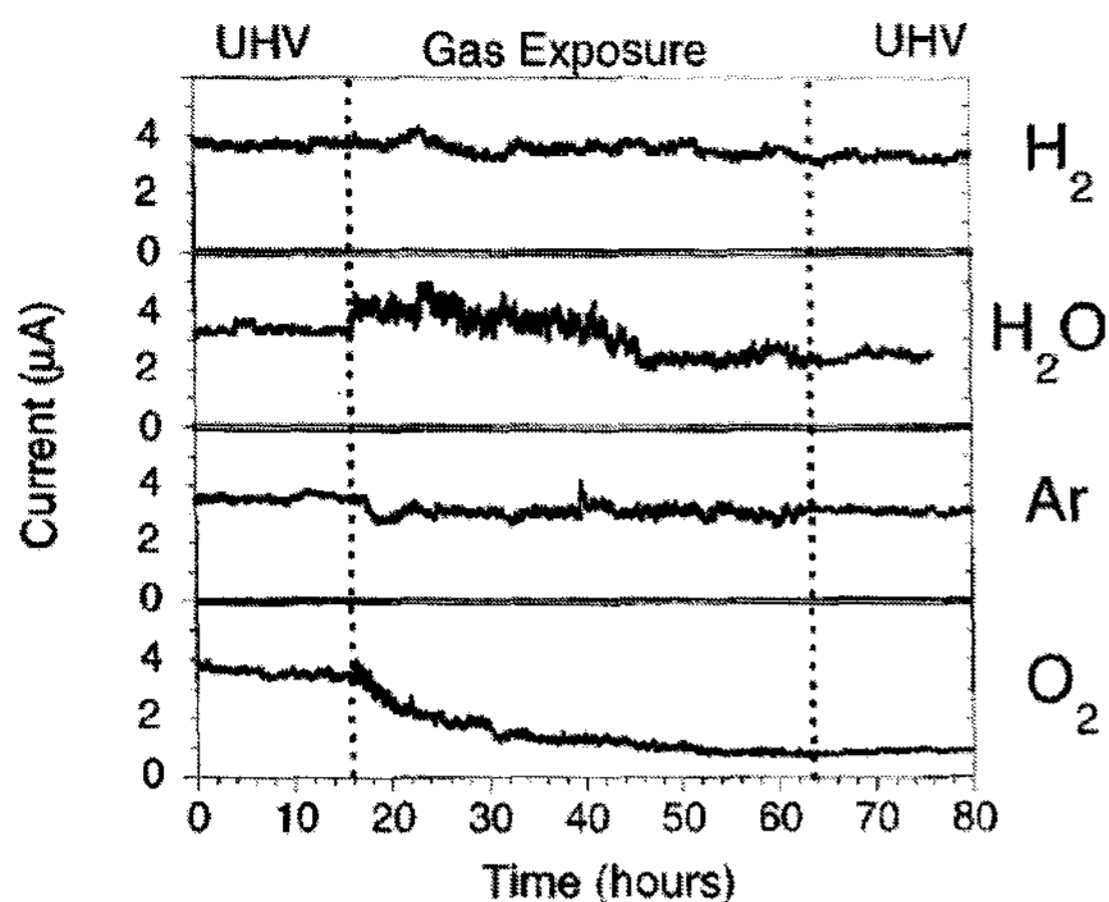
[그림 5] 전류밀도에 따른 페르미 에너지와 그 때 측정된 온도의 변화.

전계 방출의 메커니즘을 이해하는 것은 중요한 일이다.

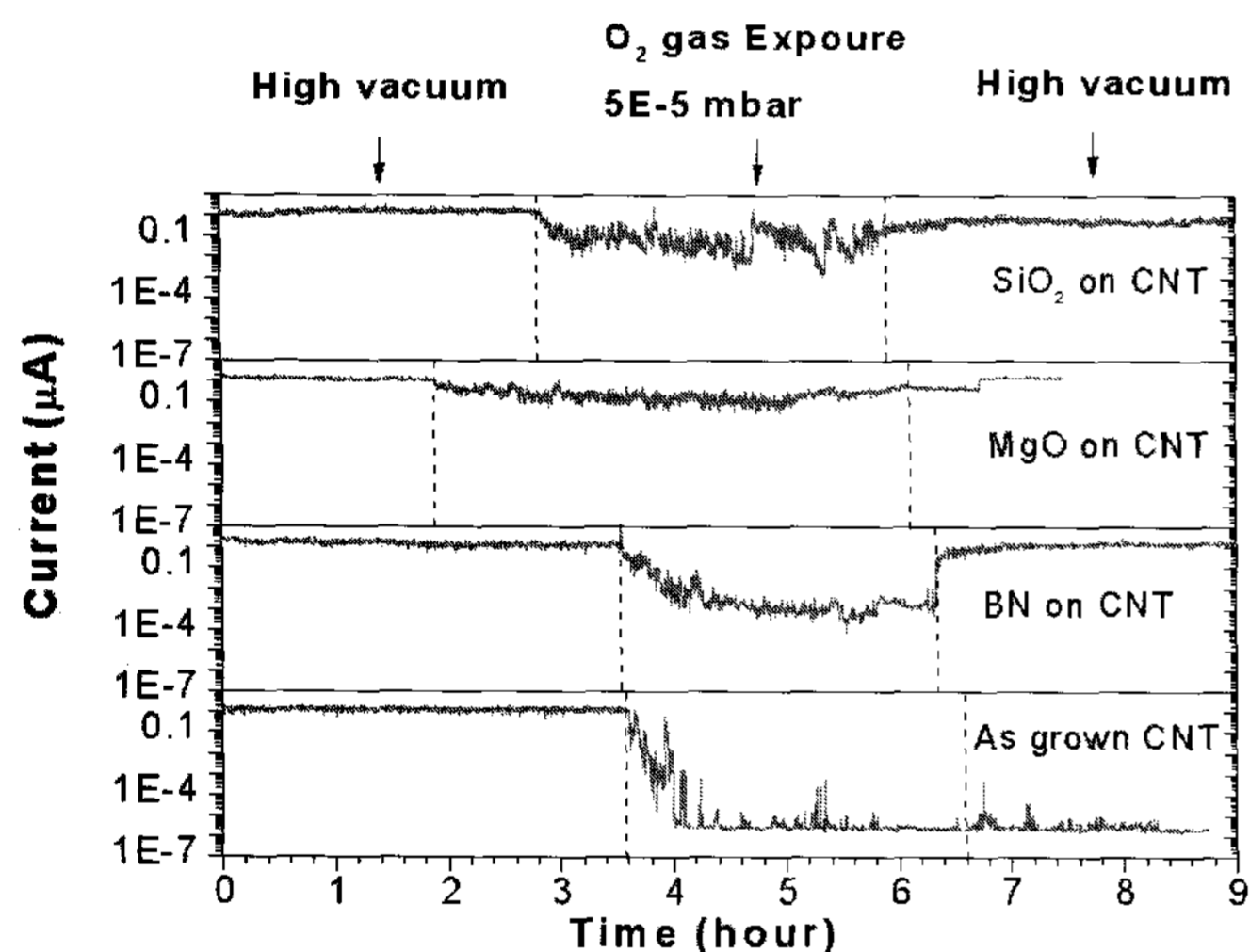
CNT에서 전계방출 도중에 빛이 나오는 현상이 CNT내의 에너지 준위 간의 전자 전이에 의한 것으로 초기에 추측되었으나, 이후에 보다 더 정밀한 실험을 통해서 Joule 가열 현상으로 인해 CNT에서 흑체 복사를 따르는 빛으로 밝혀졌다^[21]. 또한 이 논문은 온도 상승에 따른 전계 방출의 변화를 다루었으며, $1.4\mu\text{A}$ 정도의 다량의 전류가 흐를 때 CNT가 약 2000K까지도 올라갈 수 있음을 보여주었다. [그림 5]에서 볼 수 있듯이, CNT가 adsorbate 분자가 붙어있는 경우, 전계방출되는 전류의 크기도 작고 그 안정성이 떨어지고, Fowler-Nordheim 곡선을 따르지 않으며, 방출된 전자의 에너지 분포 곡선이 가해진 전기장의 세기가 커짐에 따라 낮은 쪽으로 이동하는 등, 전형적인 전계 방출이라고 보기 힘든 현상을 나타낸다. 그러나, Joule 가열에 의해 CNT가 깨끗해졌을 경우에는, 방출된 전류량도 매우 크며 Fowler-Nordheim 곡선을 잘 따르며, 방출된 전자의 에너지 분포 곡선도 전기장에 따라 이동이 없으며 그 분포 형태도 전형적인 전계방출 곡선을 잘 만족시키고 있다. 따라서, CNT에서 전계방출을 측정할 때 adsorbate에 의한 효과를 감안해서 실험을 해야 할 것이다.

2. 분위기 가스 변화에 따른 전계 방출

Dean등은 단일벽 CNT의 전계 방출 실험 도중에 다른 종류의 가스를 주입하여, 전류의 변화를 관찰하였다^[22]. [그림 6]에서 볼 수 있듯이, 수증기의 경우 초기에 전류가 증가하였다 감소하였고, 수소와 아르곤 가스의 경우 큰 변화가 없으나, 산소의 경우 75%의 전류 감소가 일어남을 알 수 있다. 실험한 시간이 수십 시간이나 되는 것을 감안하면 산소 분위기 외에는 CNT가 전자 방출원으로서 비교적 성능이 뛰어난 것을 알 수 있다. 산소 가스의 경우 산소 이온에 의한 스퍼터링 효과 때문에 CNT가 영구적으로 손상을 입어서, 산소 가스를 제거한 후에도 원상태로 돌아오지 못한 것으로 생각된다.



[그림 6] 여러 종류의 가스 분위기에서 단일벽 CNT의 전계방출 안정성. 수소와 아르곤 가스의 경우 큰 변화가 없고, 수증기의 경우 초기에 전류가 올라가다가 다시 떨어지고, 산소에서는 매우 급격하게 줄어드는 것을 알 수 있다.



[그림 7] 산소 분위기 하에서 전계 방출 안정성 실험. 코팅이 된 CNT의 경우 전계방출 특성이 덜 나빠지고, 산소를 제거하게 되면 처음의 전류값으로 돌아간다. 그러나 코팅이 없는 CNT는 산소 분위기에서 전류가 거의 방출되지 않고, 산소를 제거하더라도 초기값을 회복하지 못한다.

CNT 전계방출 성능을 더 향상하기 위한 방법으로 SiO_2 , MgO, 또는 BN과 같은 부도체로 약 100\AA 내외의 두께로 다중벽 CNT 주위를 얇게 코팅하여, [그림 7]에서와 같이 산소 분위기와 같은 전계 방출원에 대해 가혹한 조건에서 전계 방출의 안정성을 꺾을 수 있다. 또한 이 코팅 층의 두께가 적절한 경우(약 $100\sim 200\text{\AA}$ 경우)는 임계 전기장 값을 낮추고, 동일한 전기장에서 더 많은 전류를 방출할 수 있게 한다. 따라서 부도체 코팅은 CNT의 전계방출 특성을 향상시키는 유용한 방법이라 할 수 있다^[23].

3. 플라즈마로 처리한 CNT에서 전계 방출

CNT에 플라즈마 처리를 하여 전계방출의 특성이 변하는

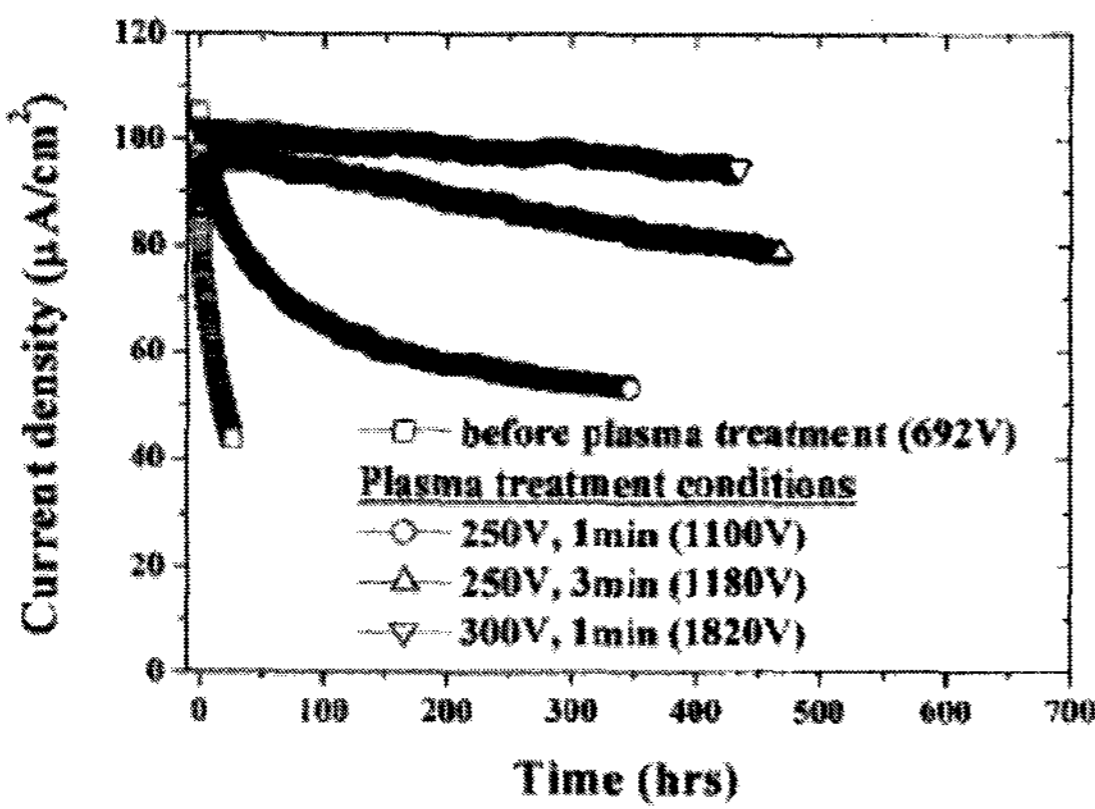
실험이 많이 행해지고 있다. 플라즈마 후처리 공정을 통해 전계방출의 전류 밀도를 높이려거나, 안정성을 높이려는 목적에서 시작된다^[24, 25]. [그림 5]에서 볼 수 있듯이, Xe/Ne 가스로 처리한 경우, 시간에 따른 안정성이 높아진다. 플라즈마로 처리한 단일벽 CNT 전계방출원의 전류밀도가 반으로 줄어드는 시간이 30 시간에서 약 5000 시간 이상으로 획기적으로 늘어난다. 양이온의 스퍼터링(sputtering) 효과에 의해 큰 field enhancement factor 값을 가지는 CNT가 에칭이 되어서, 보다 많은 CNT들이 전계방출에 참가하여서 전반적으로 전계방출의 안정성이 향상된 것으로 추측된다^[24]. 또한 다중벽 CNT를 사용하여 Ar 플라즈마로 처리한 CNT는 전류밀도가 처리 전에 비해 약 수백 배에서 수천 배 정도 커졌다. 이는 뭉쳐져 있던 CNT 덩이가 플라즈마에 의해 풀어져서 전계방출에 참가하는 CNT의 개수가 많아지고 field enhancement factor가 증가해서, 이에 따라 전류 밀도가 커진 것으로 여겨진다^[25]. 그 외에도 산소, 수소, 암모니아 가스를 이용한 플라즈마 처리를 한 CNT에서 전계 방출이 좋아짐을 보고하였다^[26-28].

4. CNT 외의 다른 나노구조물에서 전계 방출

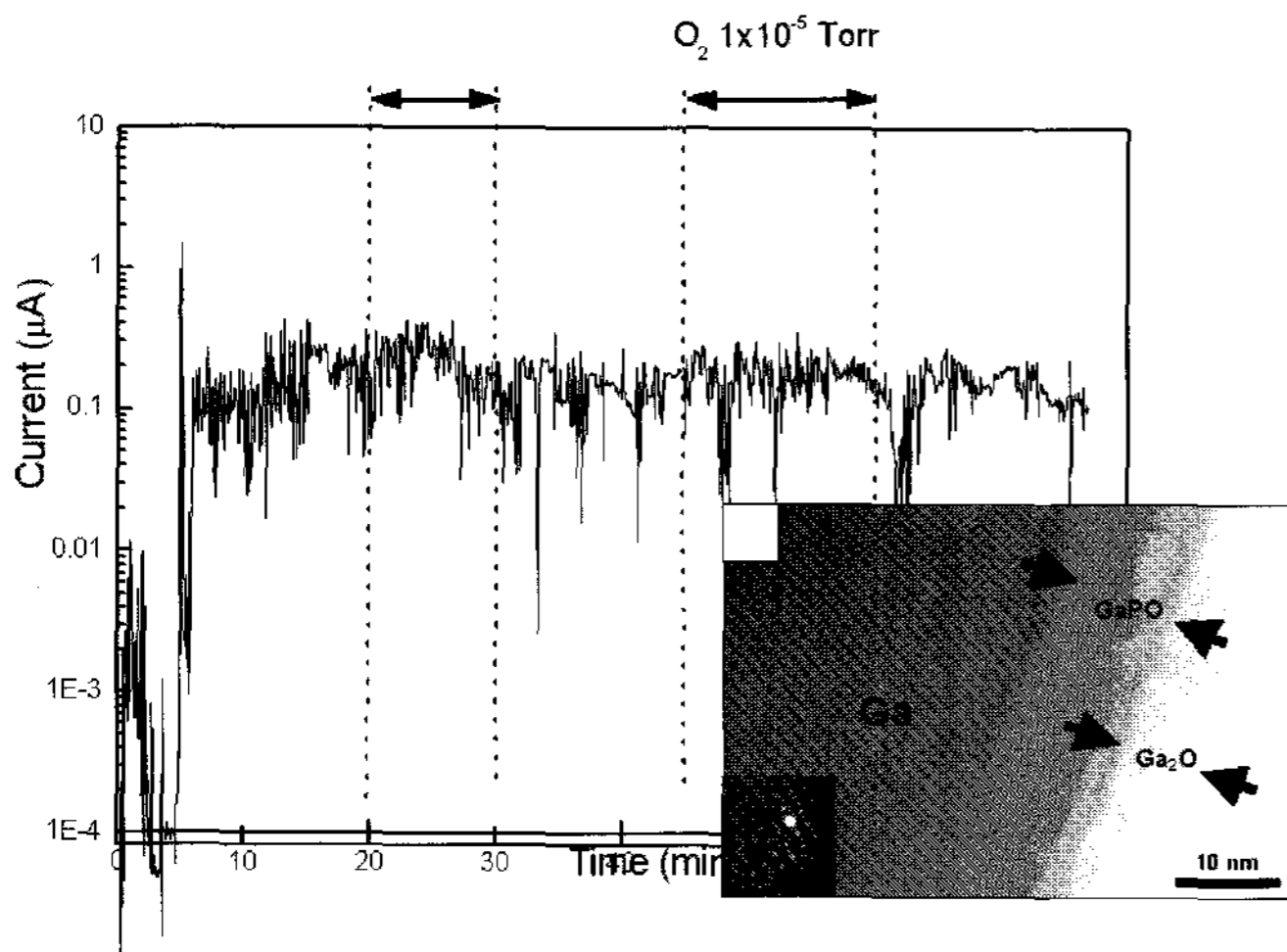
CNT 이외에는 carbon nano 양과, 다른 나노튜브, 무기물/유기물 nanowire 등이 합성되었으며, 그 중 SiO_2 , GaN, GaP, ZnO 등 다수의 나노와이어에 대하여 전계방출 특성이 측정되었다. GaN, GaP, 비정질 Si 나노와이어는 화학기상법, ZnO 나노와이어 경우 화학기상법과 sonochemical 방법으로, PEDOT, PPV 전도성 폴리머 나노와이어는 anodic alumina template를 이용하여 수용액법으로 성장시켰다^[29-33]. [표 2]를 보면 측정된 나노와이어 모두 CNT보다는 큰 전기장 값을 나타내고 있다. CNT 결정성의 질에 따라 다르겠지만, 보통 단일벽 CNT의 경우 보통 $1\sim 2\text{V}/\mu\text{m}$ 를 가지며, 좋은 CNT의 경우 $1\text{V}/\mu\text{m}$ 보다 작은 값을 나타내며, 다중벽 CNT의 경우 SWNT보다 약간 큰 값을 나타낸다. 이와 같이 나노와이어는 전계 방출 특성(임계 전기장, 방출 전류밀도)은 CNT 보다 떨어지는 특성을 보이고 있는데, 이는 대부분 나노 와이어가 반도체/부도체의 성질을 띄고 있으며, 지름이 CNT보다 크고—대부분의 나노와이어의 경우 양자 속박의 나타날 만큼 지름이 작은 경우를 잘 만들지 못하고 있다—지름 대 길이의 비인 aspect ratio가 작은 데서 기인한 것으로 추정된다. 또한 나노 와이어들은 초음파 세정 시 부서지기도 하는 등 기계적인 안정성은 CNT 보다 떨어진다. 또한 전도성 폴리머 나노와이어의 경우 전계 방출 안정성이 떨어지는데, 이는 유기물이 전계 방출 전류로 인한 Joule 가열에 의해 유기물이 불안정해지는 현상으로 추측된다. 그러나, GaP 나노와이어의 경우는 나노와이어 합성 시 자연적으로 생긴 표면의 산화막으로 인해 산소 분위기에서 전계 방출 특성이 나빠지지 않는 좋은 특성을 나타냈다([그림 9] 참조). 이는 앞에서 언급한 바와 같이 부도체가 코팅된 CNT의 전계 방출 특성이 향상되는 것과 같은 맥락이다.

[표 2] 여러 종류의 나노 와이어 전계방출원의 임계 전기장. 여기서 임계 전기장은 1 μ A/cm²의 전류가 흐를 때의 전기장으로 정의된다. GaN와 GaP 나노 와이어는 화학기상법으로, ZnO는 화학기상법과 sonochemical 방법으로, 비정질 Si는 화학기상법, 2종류의 폴리머는 anodic alumina template를 사용하여 수용액법으로 성장시켰다.

물 질	임계 전기장(V/ μ m)
GaN 나노와이어	10
GaP 나노와이어	8.5
ZnO 나노와이어	3.5~9
비정질 Si 나노와이어	3.5
PEDOT 나노와이어	3.5
PPV 나노와이어	9
CNT	0.1~2



[그림 8] 플라즈마 처리를 한 CNT에서 전계방출 안정성. 1/1000 duty ratio의 펄스 전압을 가했다. 플라즈마 처리를 하지 않은 CNT의 경우 매우 빨리 전류밀도가 떨어지는데 반하여, 처리를 한 경우 안정성이 매우 높아졌음을 알 수 있다.

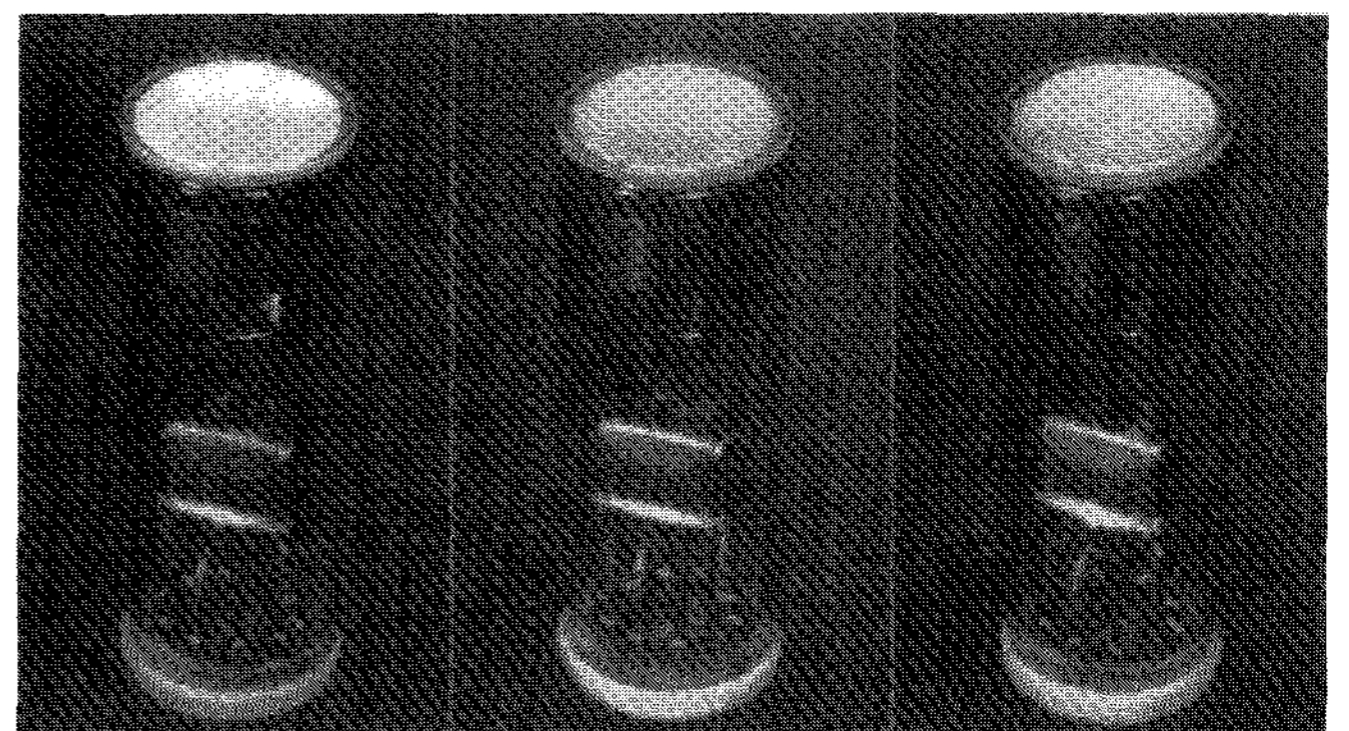
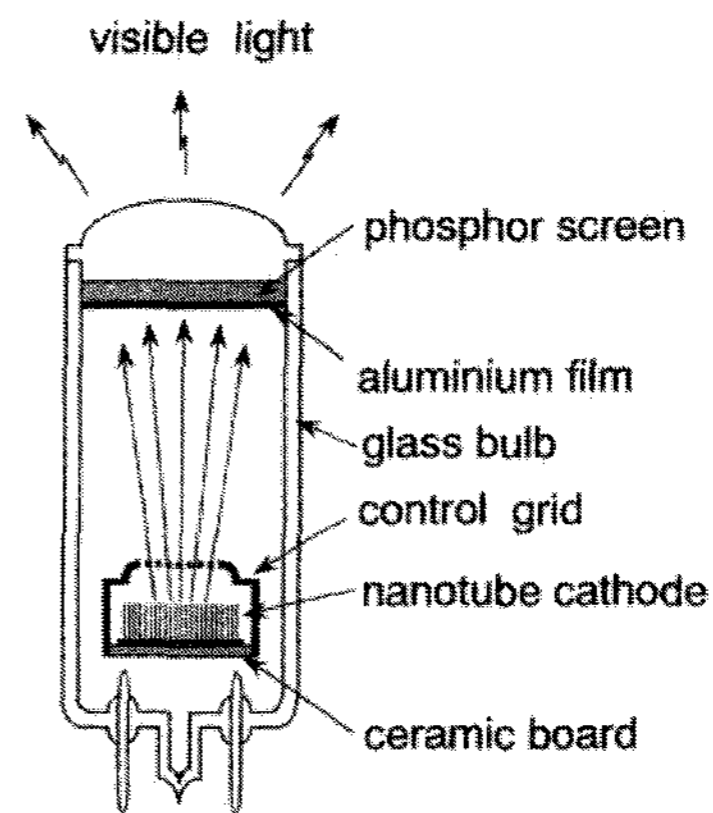


[그림 9] 산소 분위기하에서 GaP 나노와이어에서 시간에 따른 전계방출 안정성 실험. GaN 나노와이어와 달리 전류 밀도가 산소를 주입하여도 큰 변화가 없다. 이는 GaP 나노와이어의 외곽에 존재하는 산화물 박막 때문인 것으로 추측된다.

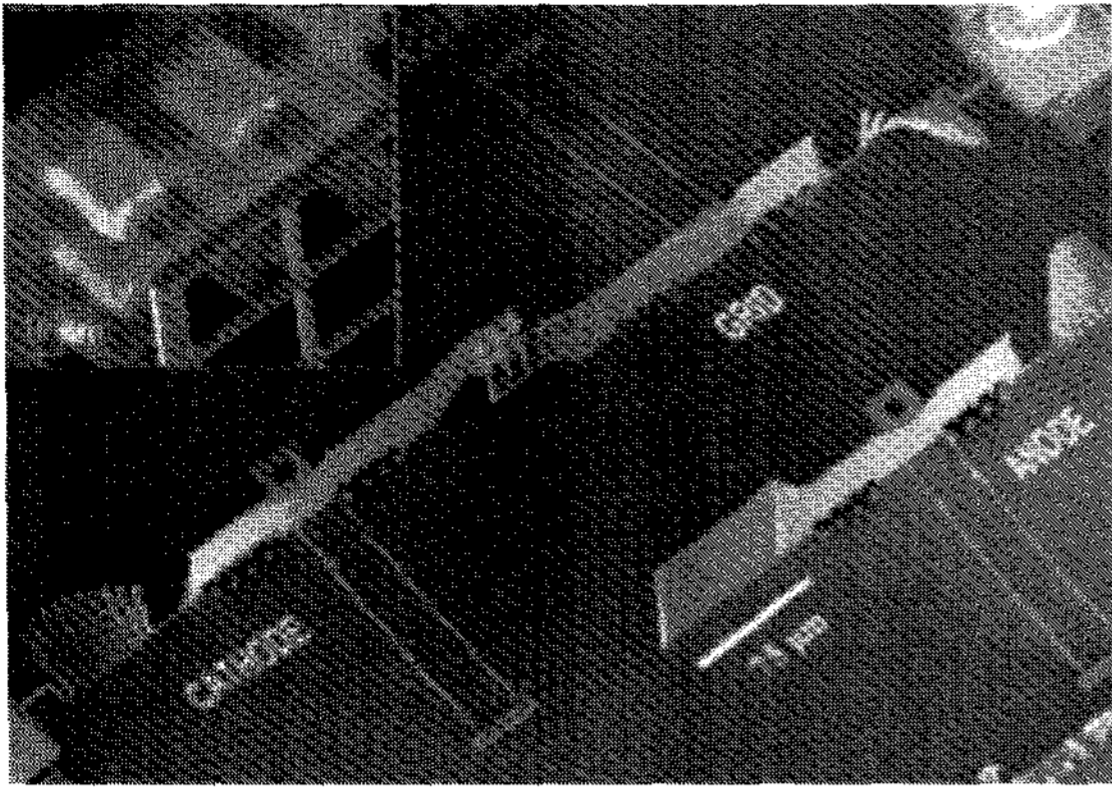
아직까지는 CNT가 전반적으로 전계 방출 특성이 다른 나노 구조물에 비해 우수한 것으로 여겨진다. 나노와이어는 chirality 조절이 어려운 CNT의 적용이 힘든 메모리와 같은 전자 디바이스 등에서 좋은 특성을 나타내고 있어서, CNT와 나노와이어는 특성, 응용 면에 있어서 상호 보완적인 특성을 지닌다고 할 수 있다.

IV. 응용

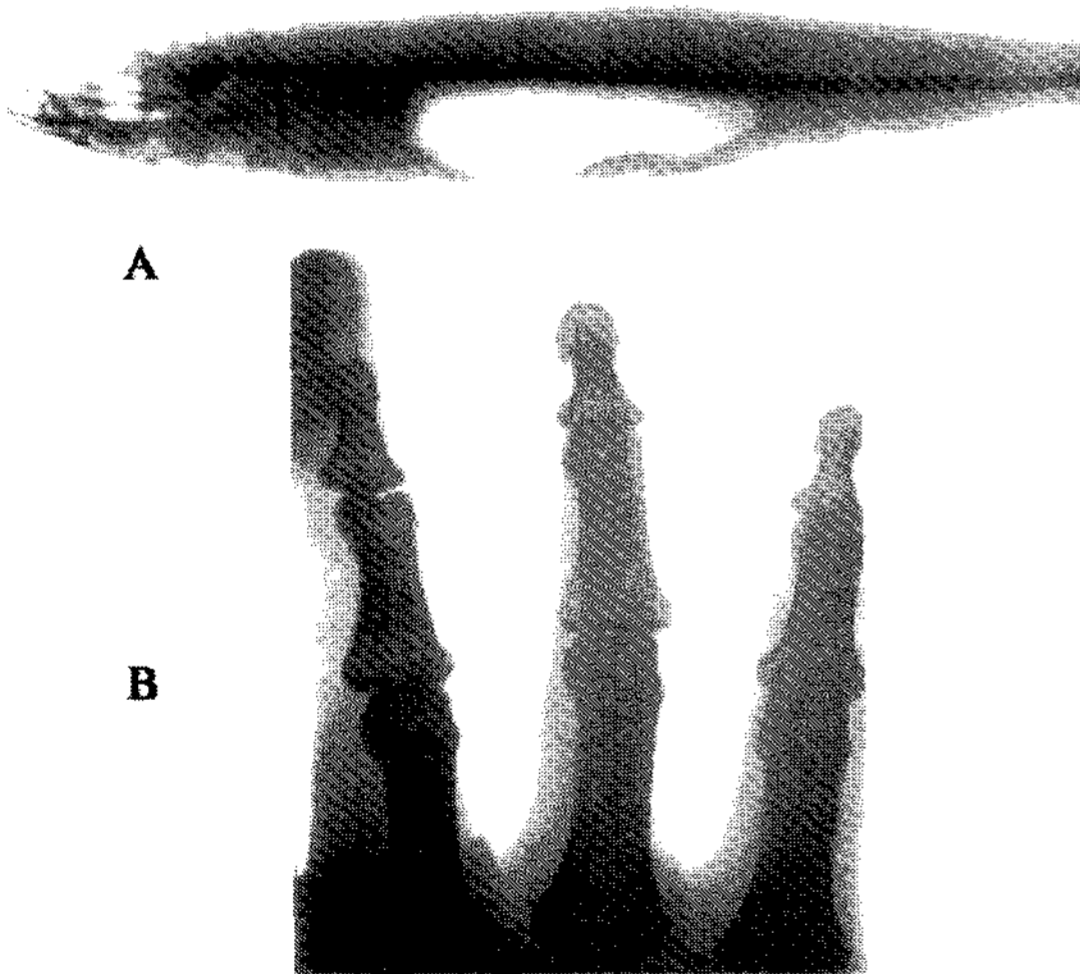
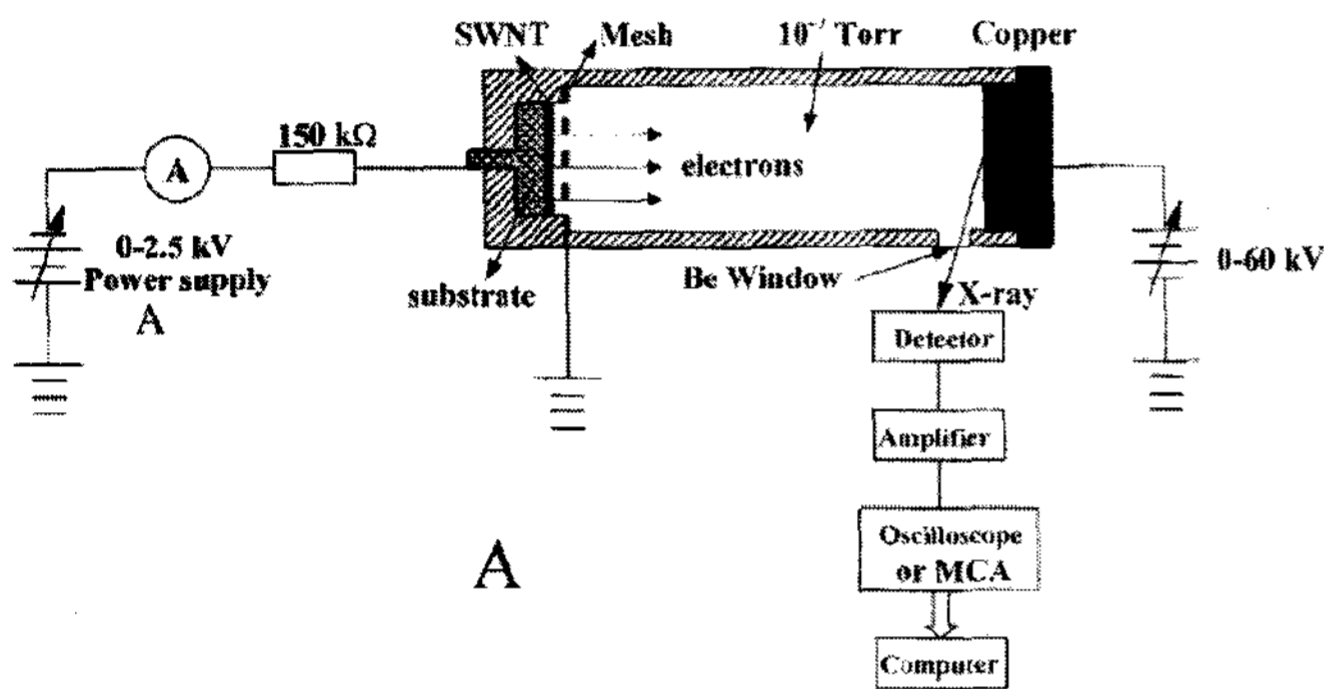
CNT의 응용 중에서 전계 방출을 이용한 소자와 복합 재료가 유망한 분야로 추측되고 있다. 그 중 복합재료로는 자동차 도장용 페인트^[34], 테니스 채, 골프채, 자전거 프레임, 우주 엘리베이터^[35] 등과 같은 분야가 있다. 그러나 아직은 CNT를 사용한 이러한 제품개발이 활성화가 미약한데, 이는 CNT의 가격 경쟁력이 다른 대체 복합소재에 비해 떨어지기 때문이기도 하다. 그 외로는 전계 방출 분야가 CNT를 이용한 여러 종류의 응용 예 중 실질적으로 상품화에 가장 근접해 있어서, 사회 경제적인 효과가 다른 분야에 비해 큰 것으로 여겨진다. 이는 CNT를 전계 방출원으로 사용한 전계방출 디스플레이(field emission display, FED)의 연구 개발에 상당부분 기인하고 있다^[3]. CNT를 사용하기 전에는 몰리브덴과 같은 금속을 전자 방출원으로 사용한 FED가 연구 개발되었으나^[36], 현재는 CNT의 우수한 전계 방출 성능



[그림 10] CNT를 이용한 전구. 위는 전구의 개략도, 밑 그림은 실제 빨강, 녹색, 파랑 색 전구의 제품 사진.



[그림 11] MEMS 기술을 이용해 만든 CNT 전계방출원을 채택한 초소형 microwave 증폭기.



[그림 12] CNT를 사용한 X-선 발생기의 개략도와 이를 이용하여 찍은 생선과 사람 손의 X-선 사진.

과 저가의 공정 개발 등으로 인해 CNT를 이용한 전계 방출원이 주류를 형성하고 있다. 또한 FED와 유사한 구조로 LCD용 backlight를 개발 중에 있다. CNT의 전계방출을 이용하여 조명기구로 쓰려고 하는 시도가 행해지고 있으며 ([그림 10]), 옥외 특수 조명에서부터 시작하여 일반 조명 시장으로 진입을 염두에 두고 개발 중에 있다^[37].

CNT는 단위면적 당 임계 전류밀도가 매우 크므로, 전계 방출을 기반으로 한 microwave 증폭기의 개발의 가능성이

매우 높다. [그림 11]은 CNT와 MEMS 기술을 결합한 초소형 microwave 증폭기의 시제품이다^[38]. 또한 [그림 12]와 같이 CNT에서 나오는 전자를 높은 에너지로 가속시켜서 금속판에 충돌시켜 X선을 발생시키는 장치도 연구되었다. CNT는 작은 크기에서도 높은 전류가 나올 수 있으므로, 휴대용 X선 장치로 의로기기 등으로의 응용 가능성이 모색되어지고 있다^[39,40].

V. 맺음말

나노 구조물의 대표적인 물질인 CNT는 매우 넓은 응용 가능성을 가지고 있다. CNT는 매우 높은 지름대 길이의 비를 가지있어서 낮은 전압에서도 쉽게 전자의 방출이 가능하고, 유연성이 뛰어나 외부적인 충격에도 강하고, 전기 전도도 또한 좋아서 매우 이상적인 전계 방출원이다. 또한 전계 방출 분야는 CNT의 취약점인 chirality에 대한 의존성이 적어서, 메모리 소자와 같은 전자 디바이스와 달리 쉽게 응용될 수 있는 이점을 가지고 있다. 따라서, 현재 CNT를 전자 방출원으로 사용한 FED와 LCD용 backlight를 위시한 많은 분야에 관한 연구가 진행 중에 있어서, 가까운 시일 안에 이를 이를 이용한 응용제품을 생활 주위에서 쉽게 접할 수 있을 것으로 예상된다.

참고 문헌

- [1] S. Iijima, Nature 354, 56 (1991).
- [2] 누가 처음으로 CNT를 발견하였는가에는 여러 이견이 존재하는 듯 하다. 그러나, CNT가 가지는 중요한 의미를 알지 못하고 그냥 넘어가고 그 후 CNT 연구에 기여를 하지 않은 과거의 논문을 근거로는 Iijima가 CNT를 처음 발견했다는 사실을 뒤엎기에는 무리가 따른다고 저자는 생각한다.
- [3] J. M. Kim, W. B. Choi, N. S. Lee, and J. E. Jung, Diamond Rel. Materials 9, 1184 (2000).
- [4] S.-H. Jeong, J.-H. Ko, J.-B. Park, and W. Park, J. Am. Chem. Soc., 126, 15982 (2004).
- [5] Z. F. Ren, Z. P. Huang, J. W. Xu, J. H. Wang, P. Bush, M. P. Siegal, and P. N. Provencio, Science 282, 1105 (1998).
- [6] W. A. de Heer, A. Chatelain, and D. Ugarte, Science 270, 1179 (1995).
- [7] S. Yu, W. Yi, J. Lee, T. Jeong, S. Jin, J. Heo, J. H. Kang, Y. S. Choi, C. S. Lee, J.-B. Yoo, and J. M. Kim, Appl. Phys. Lett. 80, 4036 (2002).
- [8] 여기서 field는 electric field를 말하는 것이며, 보통 전계, 전기장, 또는 전기 마당 등으로 번역된다. 그 중에 전계라는 용어는 물리학계에서는 더 이상 사용되지 않고 있다. 그러나, field emission이라고 쓸 경우에는

- 전계 방출이라는 용어가 관행적으로 광범위하게 사용되고 있다. 따라서, 이 논문에서는 field emission을 전계 방출로 표기하도록 하고, electric field는 전기장으로 표기하도록 하겠다.
- [9] A. Modinos, "Field, Thermionic, and Secondary Electron Emission Spectroscopy" (Plenum Press, New York, 1984).
- [10] R. H. Fowler and L. Nordheim, Proc. Roy. Soc. A 119, 173 (1928).
- [11] J. G. Fossum, A. Ortiz-Conde, H. Shichijo, and S. K. Banerjee, IEEE Trans. Electron Devices 32, 1878 (1985).
- [12] D. Alpert, D. A. Lee, E. M. Lyman, and H. E. Tomaschke, J. Vac. Sci. Technol. B 1, 35 (1964).
- [13] R. H. Good and E. W. Muller, Handbuch der Physik, 21, 176 (1956).
- [14] C. A. Spindt, J. Appl. Phys. 39, 3504 (1968).
- [15] O.-H. Nam, M. D. Bremser, T. S. Zheleva, and R. F. Davis, Appl. Phys. Lett. 71, 2638 (1997).
- [16] S. Frank, P. Poncharal, Z. L. Wang, and W. A. de Heer, Science 280, 1744 (1998).
- [17] M. S. Dresselhaus, G. Dresselhaus, and Ph. Avouris, "Carbon nanotubes, synthesis, structure, properties, and applications", Springer, Berlin, 2001.
- [18] Whikun Yi, SeGi Yu, J. E. Jung, N. S. Lee, Ji-Beom Yoo, C. G. Lee, S. K. Kang, and J. M. Kim, *Carbon nanotube-based field emission display*, in "Handbook of luminescence, display materials and devices", edited by H. S. Nalwa and L. S. Rohwer (Am. Sci. Publishers, Stevenson Ranch, 2003).
- [19] K. A. Dean and B. R. Chalamala, Appl. Phys. Lett. 76, 375 (2000).
- [20] K. Hata, A. Takakura, and Y. Saito, Surf. Sci. 490, 296 (2001).
- [21] S. T. Purcell, P. Vincent, C. Journet, and V. T. Binh, Phys. Rev. Lett. 88, 105502 (2002).
- [22] K. A. Dean and B. R. Chalamala, Appl. Phys. Lett. 75, 3017 (1999).
- [23] W. Yi, T. Jeong, S. Yu, J. Heo, C. Lee, J. Lee, W. Kim, J.-B. Yoo, and J. Kim, Adv. Mat. 14, 1464 (2002).
- [24] W. S. Kim, J. Lee, T. W. Jeong, J. N. Heo, B. Y. Kong, Y. W. Jin, J. M. Kim, S. H. Cho, J. H. Park, and D. H. Choe, Appl. Phys. Lett. 87, 163112 (2005).
- [25] Y. Kanazawa, T. Oyama, K. Murakami, and M. Takai, J. Vac. Sci. Technol. B 22, 1342 (2004).
- [26] S.-C. Kung, K. C. Hwang, and I. N. Lin, Appl. Phys. Lett. 80, 4819 (2002).
- [27] J. Zhang, T. Feng, W. Yu, X. Liu, X. Wang, and Q. Li, Diamond Rel. Mat. 13, 54 (2004).
- [28] J. Zhang, X. Wang, W. Yu, T. Feng, F. Zhang, Z. Zheng, Q. Li, and X. Liu, Sol. St. Comm. 127, 289 (2003).
- [29] C. J. Lee, T. J. Lee, S. C. Lyu, Y. Zhang, H. Ruh, and H. J. Lee, Appl. Phys. Lett. 81, 3648 (2002).
- [30] K. H. Park, W. J. Seo, S. Lee, and K. H. Koh, Appl. Phys. Lett. 81, 358 (2002).
- [31] C.-C. Chen, C.-C. Yeh, C.-H. Chen, M.-Y. Yu, H.-L. Liu, J.-J. Wu, K.-H. Chen, L.-C. Chen, J.-Y. Peng, and Y.-F. Chen, J. Am. Chem. Soc. 123, 2791 (2001).
- [32] B. H. Kim, D. H. Park, J. Joo, S. G. Yu, and S. H. Lee, Synthetic Metals 150, 279 (2005).
- [33] S. W. Jeong and et al., submitted to Appl. Phys. Lett.
- [34] O. Breuer and U Sundararaj, Polymer Composites 25, 630 (2004).
- [35] C. B. Edwards and E. A. Westling, "The Space Elevator" (Spaseo, 2003).
- [36] J. M. Kim, J. P. Hong, J. H. Choi, Y. S. Ryu, and S. S. Hong, J. Vac. Sci. Technol. B 16, 736 (1998).
- [37] Y. Saito, S. Uemura, and K. Hamaguchi, Jpn. J. Appl. Phys. 37, L346 (1998).
- [38] C. Bower, W. Zhu, d. Shalom, D. Lopez, L. H. Chen, P. L. Gammel, and S. Jin, Appl. Phys. Lett. 80, 3820 (2002).
- [39] G. Z. Yue, Q. Qiu, B. Gao, Y. Chen, J. Zhang, H. Shimoda, S. Chang, J. P. Lu, and O. Zhou, Appl. Phys. Lett. 81, 355 (2002).
- [40] H. Y. Choi, W. S. Chang, H. S. Kim, Y. H. Park, and J. U. Kim, Phys. Lett. A 357, 36 (2006).

저 자 소개



유 세 기

North Carolina State University 박사 (물리학), 1997-1998 NCSU 전자공학과 post-doc., 1998~2002 : 삼성종합기술원 전자방출원 연구단, 2003~현재 : 한국외국어대학교 전자물리학과 교수