

미세 팁 기판 위에 전기영동법으로 성장시킨 탄소 나노튜브의 전계방출 특성

장한빛 · 노영록 · 김종필 · 박진석[†]

[†]한양대학교 전자전기제어계측공학과

Field emission properties of carbon nanotubes grown on micro-tip substrates using an electrophoretic deposition method

Han-Beet Chang, Young-Rok Noh, Jong-Pil Kim and Jin-Seok Park[†]

[†]Dept. of Electronic, Electrical, Control and Instrumentation Engineering, Hanyang University

ABSTRACT

Field-emission characteristics of carbon nanotubes(CNTs), which were grown on conical-type tungsten micro-tips by using an electrophoretic deposition(EPD) method, were examined. The EPD method proved to be convenient to manipulate and arrange CNTs from well dispersed suspensions onto such tip-type substrates. The growth rate of CNTs was proportional to the applied d.c. bias voltage and the process time. It was observed from the Raman study that the EPD-produced CNTs showed better crystal qualities with the Raman intensity ratio(I_D/I_G) of 0.41-0.42 than the CVD-produced CNTs and their crystal qualities could be further improved by thermal annealing. The electron emitters based on the EPD-CNTs showed excellent field emission properties, such as the threshold voltage for electron emission of about 620 V and the maximum emission current of about 345 μ A. In addition, the EPD-CNTs exhibited the stable long-term(up to 40 h) emission capability and the emission stability was enhanced by thermal annealing.

Key Words : Carbon nanotubes, Electrophoretic deposition, Thermal annealing, Field emission, Long-term stability.

1. 서 론

탄소 나노튜브(carbon nanotube, CNT)는 화학적 안정성 및 열적 전도성이 높고, 기계적 강도가 우수하며, 높은 종횡비(aspect ratio)에 의한 전계방출 특성이 뛰어나 최근 광범위한 나노 소자 응용 분야의 신소재로 각광받고 있다[1]. 특히, 최근에는 우수한 전계방출 특성을 이용하여 방사선 진단 및 의료용 분야에서 활용되는 고분해능(high resolution), 초소형 엑스선(x-ray) 장치의 냉음극(cold cathode) 재료로서 많은 연구들이 진행되고 있다[2,3]. 이 경우 공간 분해능이 높은 엑스선 영상을 얻기 위해서는 엑스선 발생용 타겟(target)에 충돌하는 전자빔(electron beam)의 면적을 최소화시켜야 하는데, 이를 위하여 최근에 화학기상증착(chemical vapor deposition, CVD) 방법을 이용하여 미세($< 1 \mu$ m)

팁(tip) 구조의 기판 위에 CNT를 직접 성장시키는 연구가 시도된 바 있다[4,5]. CNT의 물성은 그 성장방법에 따라 달라질 수 있는데, CVD와 같은 직접성장(direct growth)[6] 방식과 간접성장(indirect growth)[7] 방식을 이용하여 CNT의 성장이 가능하다. 여기서, 대표적인 직접성장 방법으로 사용되고 있는 CVD 방법은 CNT 성장시 성장변수들의 조절이 용이하여 CNT의 물성을 미세하게 조절할 수 있으며, 촉매금속이 형성된 부분에서만 CNT가 성장하므로 특정 부분에 선택적인 성장이 가능하지만, 대량 생산이 어렵고, 촉매금속이 불순물로 작용할 수 있으며, 간접성장 방식에 비하여 일반적으로 높은 공정온도를 요구한다. 본 연구에서 CNT 성장을 위해 사용한 전기영동법(electrophoretic deposition, EPD)은 간접성장 방식 중 하나로서, 장치의 구조가 간결하며, 저비용의 공정을 할 수 있고, 공정 시 온도의 제한이 없는 장점이 있기 때문에 효율적인 CNT 성장방법으로 인식되고 있다[8]. 그러나, 현재

[†]E-mail : jinsp@hanyang.ac.kr

까지 초소형 엑스선 발생용 전자빔 응용과 관련하여 미세 팁 기관 위에 전기영동법을 이용하여 CNT를 성장시키고 그 전계방출 특성을 분석한 연구 결과는 보고된 바 없다.

본 연구에서는 전기영동법을 사용하여 원추형 미세 금속 팁 기관 위에 CNT를 성장시키고 이렇게 성장된 CNT가 초소형 엑스선 장치의 효과적인 냉음극 전자원으로 응용이 가능한 지를 검토하였다. 이를 위하여 성장된 CNT의 구조적 물성 뿐 아니라 전계방출 특성 및 방출전류의 장시간 안정성을 체계적으로 분석하였다. 또한, 성장된 CNT에 대한 열처리 후공정을 수행하고, CNT의 결정성 및 전계방출 특성의 변화를 비교, 분석하였다.

2. 실험방법

CNT 성장을 위한 기관으로 사용하기 위하여 250 μm 의 지름을 갖는 텅스텐(W) 와이어를 2 mol/L의 KOH 수용액 안에서 백금(Pt) 전극과 3 V의 직류전압을 인가하여 전기화학식각(electrochemical etching) 방법을 통해 팁 끝의 직경이 약 500 nm인 원추형(conical) 텅스텐 팁을 제작하였다.

Fig. 1은 이러한 미세 팁 기관 위에 CNT를 성장시키기 위하여 본 연구에서 사용한 전기영동법 장치의 구조를 나타낸 것이다. 우선, CNT의 성장 이전에, IPA(isopropyl alcohol) 용액 50 ml에 CNT 파우더(powder) 10 mg을 넣은 현탁액(suspension)을 만들고, 질산마그네슘($\text{Mg}(\text{NO}_3)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$) 15 mg의 계면활성제(surfactant)를 넣고 초음파 진동기에서 10분간 분산(dispersion) 공정을 수행하였다. IPA 용액에 의해 전해질로 작용하는 질산마그네슘이 이온화되고 현탁액 속에서 CNT가 마그네슘 이온(Mg^{2+})을 흡수하여 양전하(positive charge)를 형성하게 된다. 이러한 CNT 현탁액 안에 전극을 넣고 전계를 걸어주면 전해질에 의해 전류가 흐르게 되어 양전하로 대전된 CNT가 음극(cathode)으로 이동하여 텅스텐 미세 팁 위에 성장하게 된다. Fig. 2는 텅스텐 미세 팁 위에 CNT 성장시 마그네슘 이온이 CNT 내에 흡수되었음을 확인시켜 주는 EDX(energy-dispersive x-ray spectroscopy, EX-250, Horiba) 분석 결과이다. 여기서, 양극(anode)과 음극 사이의 거리는 10 mm로 고정시켰고, 상온에서 직류전압의 크기 및 전압인가 시간을 다양하게 변화시키면서 CNT를 성장시켰다. 또한, 전기영동법에 의해 성장된 CNT 시료에 ICP-CVD(inductively coupled plasma chemical vapor deposition) 장치를 사용하여 10 mTorr의 아

르곤(Ar) 분위기에서 기관 온도를 700 °C로 유지하고, 10분간 열처리(thermal annealing) 후공정을 수행하였다.

전기영동법에 의해 성장된 CNT의 구조 및 CNT 성장 및 열처리에 따른 원추형 미세 팁 기관의 형상 변화를 관찰하기 위하여 FE-SEM(field emission-scanning electron microscopy, JSM-6330F, JEOL)을 사용하였다. 열처리 이전(as-grown) 및 이후(annealed)의 CNT 시료들에 대한 결정성(crystallinity)의 변화를 분석하기 위하여 라만 분광분석(Raman spectroscopy, T64000, Jobin Yvon)을 수행하였다.

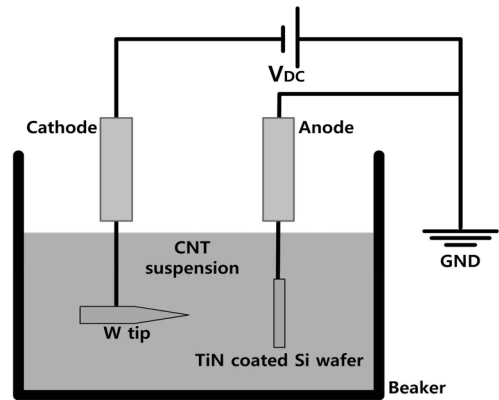


Fig. 1. A schematic diagram of the EPD system used for CNT growth.

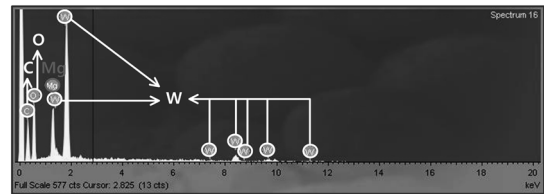


Fig. 2. The EDX spectrum of a CNT grown by EPD.

또한, CNT로부터의 전자방출 특성을 분석하기 위하여 고전압 공급기(Keithley 248, 최대공급전압 5kV)와 미세전류 측정기(Keithley 6517A, 최소감지전류 1pA)를 이용하여 전계방출 전류-전압(I-V) 특성을 측정하였으며, 이로부터 전계방출을 위한 개시전압(V_{th}) 및 1 kV 구동전압에서의 최대 방출전류(I_{max})를 산출하였다. 전계방출 측정시 장치 내의 진공을 약 2.0×10^{-7} Torr 이하로 유지하였으며, CNT 이미터(emitter)가 부착된 구리(Cu) 음극과 양극(ITO-coated glass) 간의 거리를 250 μm 로 고정시켰다.

3. 결과 및 고찰

Fig. 3은 CNT를 성장시키기 이전의 원추형 텅스텐 미세 팁 기관 및 전기영동법을 이용하여 다양한 인가 직류전압의 크기 및 인가 시간에 따라 성장시킨 CNT 시료들과 열처리를 수행한 CNT 시료에 대한 FE-SEM 사진을 나타낸 것이다. 우선, Fig. 3의 (a)는 CNT 성장에 사용된 원추형 텅스텐 기관을 나타낸 것이고, Fig. 3의 (b)는 이러한 기관 위에 전기영동법에 의해 성장시킨 CNT 시료의 표면 사진으로서 미세 팁 위에 CNT가 성공적으로 성장되었음을 확인할 수 있었다. CVD와 같은 직접성장 방법을 이용하여 성장시킨 CNT는 일반적으로 수직 배열을 가지는 반면에, 본 연구에서 전기영동법을 이용하여 성장시킨 경우에는 CNT들이 서로 응집(aggregation)되어 3차원 망상 구조를 이루고 있는 것을 확인할 수 있었다.

또한, Fig. 3의 (c)-(e)에 나타낸 사진들을 비교해 보면, 전기영동법에 의한 CNT 성장시 인가해 준 직류전압의 크기 및 시간에 비례하여 CNT의 성장이 단조적으로 증가하였음을 알 수 있다. 이는 직류전압이 증가

할수록 전기영동 장치의 두 전극 사이에 흐르는 전류가 증가하고 그로 인해 보다 많은 양전하를 가진 CNT가 텅스텐 팁 위에 성장될 수 있으며, 인가시간이 길수록 양의 전하를 가진 CNT가 텅스텐 팁 위에 머무르는 시간이 증가하여 성장률이 증가하였기 때문이라 사료된다. 또한, Fig. 3-(f)에 나타낸 바와 같이, CNT-C와 동일한 조건에서 성장된 시료에 대하여 열처리를 수행한 결과, 열처리가 CNT의 구조적 형상 변화에 미치는 영향은 크지 않았음을 알 수 있었다.

Fig. 3에 나타낸 CNT 시료들의 결정성을 분석하기 위하여 라만 스펙트럼을 측정하였고 그 결과를 Fig. 4에 정리하였다. 일반적으로 CNT의 주요 라만 피크(peak)로는 결정화된 흑연 피크를 반영하는 G-피크($\sim 1580\text{ cm}^{-1}$)와 주로 탄소질 불순물 성분을 반영하는 D-피크($\sim 1360\text{ cm}^{-1}$)가 존재하는 것으로 알려져 있다. 따라서, 이 두 피크의 강도비(intensity ratio, 즉 I_D/I_G)를 이용하여 CNT의 결정성을 평가할 수 있으며, D-피크의 강도가 상대적으로 커서 I_D/I_G 비가 높게 되면 결정화되지 않은 탄소가 증가하여 CNT의 결정성이 저하됨을 의미한다[10]. 본 연구에서 전기영동법에 의해 성장시킨 CNT들의 I_D/I_G 값은 직류 인가전압의 크기 및 인가시간에 거의 관계없이 약 0.41~0.42 정도로 나타났다. 이는 기존에 ICP-CVD와 같은 직접성장 방법을 이용하여 동일한 텅스텐 미세 팁 기관 위에 성장시킨 CNT 시료들의 I_D/I_G 값(약 0.8~1.2)에 비하여[11] 더 낮은 값으로서 결정성이 상당히 우수하다고 판단된다. 또한, 전기영동법에 의해 성장된 시료(CNT-C)에 대하여 열처리를 수행한 결과 I_D/I_G 값이 약 0.34로 감소하는 것으로 나타나 열처리에 의해 CNT의 결정성이 더욱

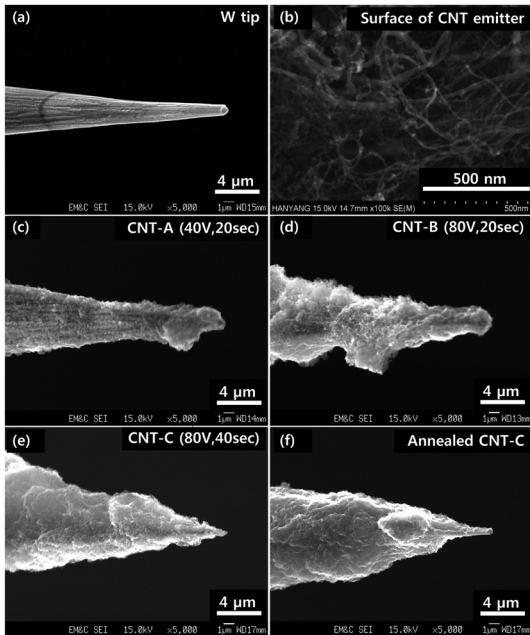


Fig. 3. FE-SEM images: (a) W-tip prior to CNT growth, (b) the surface of CNT grown on the W-tip, (c)-(e) as-grown CNTs under the various conditions ((c) CNT-A: 40V/20s, (d) CNT-B: 80V/20s, and (e) CNT-C: 80V/40s), and (f) the annealed sample for the CNT-C.

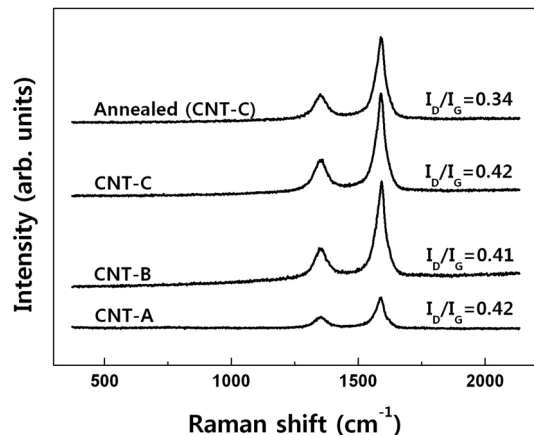


Fig. 4. Raman spectra for various as-grown and annealed EPD-CNTs.

향상되었음을 알 수 있었다.

Fig. 5는 전기영동법으로 성장시킨 CNT들의 전계방출 전류-전압 특성을 나타낸 것이며, 이 결과들로부터 Fowler-Nordheim 그래프를 도시하여 Fig. 5안에 함께 제시하였다. 여기서, 전계방출 개시전압 V_{th} 는 방출전류가 $1.0 \mu A$ 에 도달하게 하는 인가전압의 크기로, 또한 최대 방출전류 I_{max} 는 인가전압이 $1.0 kV$ 일 때 CNT로부터 측정된 방출전류의 크기로 각각 정의하였다. 각 CNT 시료로부터 산출한 V_{th} 및 I_{max} 의 결과를 Table 1에 정리하였다.

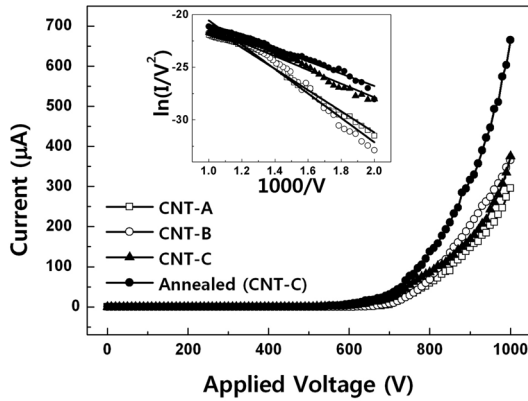


Fig. 5. Field-emission I-V characteristics of as-grown EPD-CNTs and the annealed CNT. The inset represents their corresponding Fowler-Nordheim plots.

Table 1. Comparison of V_{th} and I_{max} values estimated from the various CNTs as shown in Fig. 5.

CNT-emitters	V_{th} (V)	I_{max} (μA)
CNT-A	650	295
CNT-B	630	366
CNT-C	580	375
Annealed (CNT-C)	530	665

그 결과, 본 연구에서 전기영동법에 의해 성장시킨 as-grown CNT 시료들의 경우, V_{th} 가 약 580-650 V, I_{max} 가 약 295-375 μA 범위로 나타난 바, 기존에 동일한 텅스텐 팁 기관 위에 직접성장 방법에 의해 성장시킨 CNT의 전계방출 특성과 비교하여[11] 더 우수한 전계방출 특성을 얻을 수 있었다. 또한, 열처리를 수행한 이후에는 V_{th} 가 약 530 V로 더욱 감소하였고, I_{max} 는 약 665 μA 로 현저히 증가하였음을 확인하였다. 이는 Fig. 4의 라만 스펙트럼 결과에서 분석한 바와 같이 전

기영동법에 의해 성장시킨 CNT들이 비교적 높은 결정성을 가지고 있으며, 또한 열처리에 의해 CNT의 결정성이 더욱 향상된 것에 기인한다고 사료된다.

Fig. 6은 본 연구에서 전기영동법을 이용하여 성장시킨 CNT에 대하여 장시간 전계 전자방출을 수행하면서 방출전류의 변화 즉, 전계방출의 안정성을 분석한 결과이다. 우선, Fig. 6의 (a)는 as-grown 및 annealed CNT-C 시료에 대하여 100 μA 의 방출전류를 얻기 위해 인가해 준 구동전압을 각각 800 V 및 740 V로 고정시키고 40시간 동안 지속적으로 전계방출을 유도하면서 매 10분마다 방출전류의 변화를 측정해 본 결과로서 이를 초기 방출전류에 대한 각 측정 시간별 방출전류의 비율로 나타낸 것이다. 또한, 상기와 같이 40시간 동안 안정성 평가를 수행한 이후 as-grown 및 annealed CNT-C 시료들에 대하여 팁 형상의 변화를 FE-SEM으로 측정하여 Fig. 6의 (b)와 (c)에 각각 나타내었다.

Fig. 6(a)의 방출전류 변화 결과에서 나타난 바와 같이, 약 40시간 동안의 전자방출 이후에 초기 방출전류에 대한 최종 방출전류의 크기 비율(즉, I/I_0)이 as-grown CNT-C의 경우에는 약 29% 정도로 감소하였으나, annealed CNT-C 시료의 경우에는 약 53% 정도의 감소가 나타난 바, 열처리에 의해 장시간 전계방출에 따른 방출전류의 안정성이 향상되었음을 알 수 있었다. 뿐만 아니라, Fig. 6의 (b)와 (c)에 보여진 팁에 대한 FE-SEM 사진들을 비교할 때, 40시간의 전계방출 이후에 as-grown CNT-C 시료의 경우에는 팁의 넓은 영역에 걸쳐 CNT가 손상되어 제거된 반면에, annealed CNT-C 시료에서는 팁 끝 부분의 일부만이 손상되었음을 알 수 있는 바, 이는 열처리에 의해 CNT의 구조적 안정성이 더 향상되었음을 의미한다. 이러한 결과는 기존에 동일한 텅스텐 팁 기관 위에 직접성장법에 의해 성장된 CNT 이미터들로부터 얻어진 전계방출 안정성 결과와 비교할 때[11], 장시간 구동에 따른 방출전류의 열화 및 미세 팁 자체의 손상이 상대적으로 현저히 줄어든 결과라 판단된다.

기존에 직접성장 방법에 의해 성장된 CNT 이미터의 경우 장시간의 전계방출 구동에 따라 방출전류의 저하 및 팁 형상의 변화가 나타나는 것은 CNT와 기관과의 응착력 약화, 팁 끝 부분의 고열 발생 및 이온화된 기체 충돌에 따른 CNT의 손상이 초래되고, CNT의 산화 및 CNT 성장 시 주변 불순물의 흡착 등의 영향에 의해 발생하는 것으로 보고된 바 있다[12]. 그러나, 본 연구에서 전기영동법으로 성장시킨 CNT의 경우 상대적으로 방출전류의 장시간 안정성이 향상된 이유는, CNT 성장 시 미세 팁 기관 위에서 CNT들이 서로 응

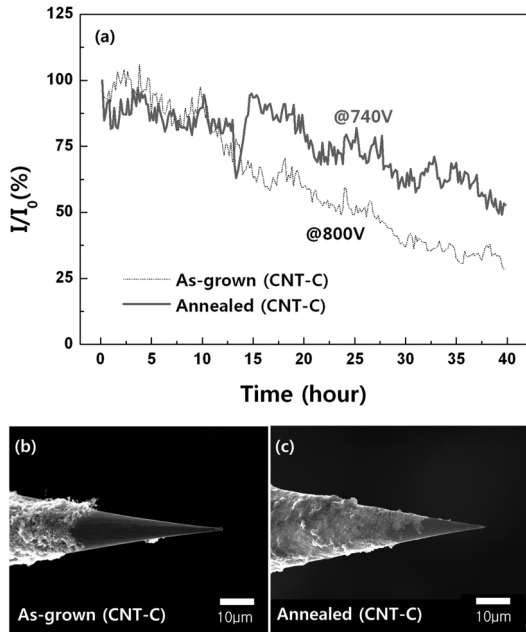


Fig. 6. Results of long-term (40h) stability test for as-grown and annealed CNTs: (a) the change of emission currents, (b) and (c) the FE-SEM images of as-grown CNT and annealed-CNT after 40h-operation, respectively.

집되어 3차원 망상 구조를 형성함에 따라 기판과의 응착력이 향상되었으며, ICP-CVD와 같은 직접성장법에서는 일반적으로 700°C 이상의 고온에서 CNT의 성장이 이루어지는 것에 비하여[13] 전기영동법을 사용하는 경우에는 상온에서도 CNT의 성장이 이루어질 수 있기 때문에 반응기 내 주변으로부터 불순물이 흡착(adsorption)될 가능성이 적었기 때문이라 사료된다. 또한, 열처리에 의해 CNT의 구조적 결함이 감소하여 결정성이 더욱 향상되었기 때문에, 이온 충돌에 의한 CNT의 손상이 감소하였고, 고온에서 활성화되는 산화에 대한 저항성도 증가한 것 등에 기인한 결과라 판단된다.

4. 결 론

본 연구를 통하여 전기영동법에 의해 500 nm 이하의 직경을 갖는 원추형 미세 튜브 텅스텐 기판 위에 CNT를 성공적으로 성장시킬 수 있음을 확인하였다. 라만 분석 결과, 성장된 CNT가 as-grown 상태에서도 우수한 결정성을 가지고 있으며, 열처리를 수행한 결과 I_p/I_G 값이 약 0.34 정도로 결정성이 더욱 향상됨을 확인하였

다. 또한, 열처리 이전의 CNT 시료들에 대한 전계방출 특성 측정 결과, 전계방출 개시전압이 평균 약 620 V, 최대 방출전류는 약 345 µA 정도로 매우 우수한 특성을 보였으며, 열처리를 수행한 이후에는 개시전압이 약 530 V로 더욱 감소하였고, 최대 방출전류는 약 665 µA로 거의 두 배 정도로 크게 증가하였음을 확인하였다. 특히, CNT의 엑스선 냉음극 활용 시 방출전류의 크기와 함께 중요한 요소인 장시간 전계방출 구동에 따른 방출전류의 안정성 평가 결과, 40시간 구동 이후 방출전류의 수준이 초기 방출전류의 약 29 % 정도를 유지하였으며, 특히 열처리된 CNT 시료의 경우에는 40시간 이후에도 약 53 % 수준을 유지하는 향상된 안정성을 얻을 수 있었다.

상기와 같이, 본 연구에서 전기영동법을 이용하여 제작한 CNT 이미터가 우수한 전계방출 특성 및 높은 안정성을 나타낸 것은, CNT들이 3차원 망상 구조를 형성함에 따라 기판과의 응착력이 비교적 크고, 상온에서 CNT를 성장시키에 따라 주변으로부터의 불순물 흡착 가능성이 적었기 때문이며, 특히 열처리에 의해 CNT의 구조적 결함이 감소한 것 등에 기인한 것으로 사료된다. 결론적으로 본 연구를 통하여 전기영동법은 장비 구조가 간단하고, 상온에서도 우수한 전계방출 특성을 가지는 CNT를 성장시킬 수 있는 장점이 있기 때문에, 향후 초소형, 고해상도 엑스선 발생용 전자원 응용 분야에서 효과적인 CNT 제작방법으로 활용될 수 있을 것이라 기대된다.

감사의 글

이 논문은 2009년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 기초연구사업(No. 2009-0075800)의 지원을 받아 수행된 것임.

참고문헌

1. H. Y. Jung, S. M. Jung, and J. S. Suh, Carbon, "Horizontally aligned single-walled carbon nanotube field emitters fabricated on vertically aligned multi-walled carbon nanotube electrode arrays," Vol. 46, pp. 1345, 2008.
2. H. Sugie, M. Tanemura, V. Filip, K. Iwata, K. Takahashi, and F. Okuyama, "Carbon nanotubes as electron source in an x-ray tube," Appl. Phys. Lett., Vol. 78, pp. 2578, 2001.
3. K. Kawakita, K. Hata, a and H. Sato, "Development of microfocused x-ray source by using carbon nano-

- tube field emitter,” *J. Vac. Sci. Technol. B*, Vol. 24, pp. 950, 2006.
4. J. P. Kim, Y. K. Kim, C. K. Park, H. Y. Choi, J. U. Kim, and J. S. Park, “Direct growth of carbon nanotubes on a micro-sized cobalt tip and characterization of electron-emission properties,” *Thin Solid Films*, Vol. 517, pp. 1136, 2008.
 5. D. Ferrer, T. Tanii, I. Matsuya, G. Zhong, S. Okamoto, and H. Kawarada, “Enhancement of field emission characteristics of tungsten emitters by single-walled carbon nanotube modification,” *Appl. Phys. Lett.*, Vol. 88, pp. 033116, 2006.
 6. Y. Li, W. Kim, Y. Zhang, M. Rolandi, D. Wang, and H. Dai, “Growth of single-walled carbon nanotubes from discrete catalyst nanoparticles of various sizes,” *J. Phys. Chem. B*, Vol. 105, pp. 11424, 2001.
 7. W. Y. Sung, S. M. Lee, W. J. Kim, J. G. Ok, H. Y. Lee, and Y. H. Kim, “New approach to enhance adhesions between carbon nanotube emitters and substrate by the combination of electrophoresis and successive electroplating,” *Diamond Relat. Mater.*, Vol. 17, pp. 1003, 2008.
 8. H. Zhao, H. Song, Z. Li, G. Yuan, Y. Jin, “Electrophoretic deposition and field emission properties of patterned carbon nanotubes,” *Appl. Surf. Sci.*, Vol. 251, pp. 242, 2005.
 9. S. I. Jung, S. H. Jo, H. S. Moon, J. M. Kim, D. S. Zang, C. J. Lee, “Improved crystallinity of double-walled carbon nanotubes after a high-temperature thermal annealing and their enhanced field emission properties,” *J. Phys. Chem. C*, Vol. 111, pp. 4175, 2007.
 10. M. Sveningsson, R. E. Morjan, O. A. Nerushev, Y. Sato, J. Backstrom, E. E. B. Campbell, and F. Rohmund, “Raman spectroscopy and field-emission properties of CVD-grown carbon-nanotube films,” *Appl. Phys. A: Materials Science and Processing*, Vol. 73/4, pp. 409, 2001.
 11. C. K. Park, J. P. Kim, S. J. Yun, Y. K. Kim, W. Kim, J. W. Kim, J. S. Park, “Field-emission properties of carbon nanotubes grown on a submicron-sized tungsten tip in terms of various buffer layers,” *Diamond Relat. Mater.*, Vol. 17, pp. 1826, 2008.
 12. J. A. Sanchez, M. P. Mengüç, R. R. Vallance, and K. F. Hii, “Heat transfer within carbon nanotubes during electron field emission,” *J. Thermophys. Heat. Tr.*, Vol. 22, pp. 281, 2008.
 13. Y. K. Kim, J. P. Kim, C. K. Park, S. J. Yun, W. Kim, S. Heu, J. S. Park, “Electron-emission properties of titanium carbide-coated carbon nanotubes grown on a nano-sized tungsten tip,” *Thin Solid Films*, Vol. 517, pp. 1156, 2008.
-
- 접수일: 2010년 10월 25일, 심사일: 2010년 11월 11일
 게재확정일: 2010년 11월 30일