

## 페이스트를 이용한 탄소나노튜브의 수직배양법 연구

이재걸 · 문주호<sup>†</sup> · 이동구\*

연세대학교 세라믹공학과

\*금오공과대학교 신소재시스템공학부

(2002년 3월 6일 접수; 2002년 4월 1일 승인)

### Process Development of Aligning Carbon Nanotube from the Paste

Jaekul Lee, Jooho Moon<sup>†</sup> and Dong-Gu Lee\*

Department of Ceramic Engineering, Yonsei University, Seoul 120-749, Korea

\*School of Material and System Engineering, Kumoh National University of Technology, Gumi 730-701, Korea

(Received March 6, 2002; Accepted April 1, 2002)

#### 초 록

다이아몬드 연마 필름(diamond lapping film)으로 긴 탄소나노튜브를 절단하고 이를 Scanning Electron Microscope(SEM)으로 관찰했다. 절단된 탄소나노튜브를  $\alpha$ -terpineol을 용매로 ethyl cellulose를 바인더로 사용하여 제조한 페이스트를 스크린 프린팅과 주사 사출법으로 유리 기판에 도포하였다. 스크린 프린팅으로 인쇄된 선에 존재하는 절단된 탄소나노튜브를 기판에 대해 수직 배향을 시키기 위하여 사포, 다이아몬드 연마 필름을 사용하여 마찰시키거나 접착성이 있는 테이프를 이용하여 접촉시켰다가 분리 하는 방법을 시도하였다. SEM으로 탄소나노튜브의 배향 특성을 관찰한 결과 주사 사출법과 스크린 프린팅 후 다이아몬드 연마 필름을 사용하여 후처리하는 간편한 방법으로 탄소나노튜브의 우수한 수직배양이 이루어짐을 알 수 있었다.

#### ABSTRACT

Long Carbon Nanotubes(CNTs) were cut by diamond lapping film followed by observation using SEM. The paste was prepared by mixing shortened CNT powder,  $\alpha$ -terpineol used as a solvent, and ethylcellulose as a binder. This paste was deposited on glass substrate by screen printing and extruded by syringe. After screen printing, several post-treatments were performed to control the alignment of CNTs perpendicular to the substrate. The deposited CNTs were scratched by sand paper or diamond lapping film. It was also treated by attachment followed by an immediate detachment using the adhesive tape. SEM observation indicates that excellent vertical alignment of CNTs could be achieved by simple post-treatments from the screen printed-CNTs paste. Similar alignment of CNTs is also observed in the as-extruded CNTs paste.

**Key words :** Carbon nanotubes, Alignment, Screen printing, Syringe extrusion

#### 1. 서 론

1991년 탄소나노튜브(CNT)가 Iijima에 의해서 발견된 이후로, 그 구조와 특성에 대해서 많은 연구가 수행되어 왔다.<sup>1)</sup> 탄소나노튜브는 우수한 전기적, 기계적 특성으로 인하여 센서, 다이오드, 방탄복 등 다양한 분야에 많은 응용성을 갖고 있다.<sup>2,3)</sup> 탄소나노튜브는 다층나노튜브(MWNTs)와 단층나노튜브(SWNTs)로 나누어 구분할 수 있는데 다층나노튜브는 이질촉매에 사용되고 있고 단층나노튜브는 Atomic Force Microscope(AFM)의 nanoprobe로 사용되고 있을 뿐만 아니라 수소저장을 위한 소재로 이용될 가능성

이 있으며 태양열을 흡수하여 기존의 태양열전지의 성능을 배가 시킬 것으로 예상된다.<sup>4,6)</sup> 이에 따라 다양한 응용 분야에 적용될 것으로 전망되는 탄소나노튜브를 보다 더 저렴한 방법으로 대량 생산하고자 아크 방전법, laser ablation, 화학 기상증착법 등 다양한 합성공정이 연구되고 있다.<sup>2)</sup>

특히 최근엔 탄소나노튜브를 차세대 디스플레이 방식인 Field Emission Display(FED)의 전계 방출용 팁(emitter)으로 적용하고자 하는 연구가 시도되고 있다. FED는 기존의 브라운관 방식의 고화질특성과 박막액정 디스플레이 방식의 저 전력 슬림형 디스플레이의 장점을 모두 갖추고 있어 차세대 디스플레이의 표준이 될 것으로 보인다. FED에 사용되는 전계방출 팁으로 현재는 몰리브데늄(Mo)을 사용하고 있으나 이의 경우 메탈게이트와 절연체의 복잡한 미세패턴 공정이 수반되어 제조비용이 높아지

<sup>†</sup>Corresponding author : jmoon@yonsei.ac.kr  
Tel : 82-2-2123-2855 Fax : 82-2-365-5882

는 결과를 가져와 FED의 상용화에 걸림돌이 되고 있다. 이에 비해 탄소나노튜브는 좁은 영역에서 전계 방출이 가능하므로 간단한 회로구조를 가진 FED 제작이 가능하여 비용 절감을 시킬 수 있을 뿐만 아니라 폴리브테니움에 비해 일함수가 낮아서 저 비용 저 전력소비로 전계방출을 시킬 수 있는 장점을 갖추고 있다.<sup>7)</sup> 탄소나노튜브를 전계방출 팁으로 효율적으로 사용하기 위해서는 탄소나노튜브가 배면 기판에 수직으로 배열되어야 하고 이를 위해 다양한 방법이 시도되고 있다. 탄소나노튜브를 폴리머와 혼합한 후 물리적 힘으로 펴는 방법은 유리 기판을 사용하는 FED 제조공정에 적합하지 않으며,<sup>8)</sup> CVD로 기판 위에서 직접 성장시키는 방법은 고가의 장비가 필요하며 탄소나노튜브 배향성이 공정변수에 민감하게 의존한다.<sup>8)</sup> 따라서 탄소나노튜브 FED의 실용화를 위해서는 보다 저비용의 새로운 공정법 개발이 요구되고 있다.

본 연구에서는 미세패턴 전극 도포에 주로 사용되고 있는 페이스트를 이용한 탄소나노튜브의 수직 배양법에 대해 연구하였다. 합성된 탄소나노튜브는 대부분 전계방출 팁으로 사용되기는 부적합한 길이를 갖고 있어 FED의 방전공간 높이인 200  $\mu\text{m}$  이내로 줄여야 하며 또한 서로 얽히지 않고 수직 배향을 수월히 유도시키기 위해 탄소나노튜브를 절단하게 된다. 주로 화학적 절단법이 사용되고 있으나 본 실험에서는 마찰을 통한 기계적 방법으로 절단하였다. 그 후  $\alpha$ -terpineol을 용매로 ethyl cellulose를 바인더로 사용하여 탄소나노튜브 페이스트를 제조한 후 기판위에 스크린 프린팅<sup>10)</sup>으로 인쇄된 선을 후처리 시킨 것과 페이스트로부터 직접 주사사출법으로 기판에 도포된 탄소나노튜브의 수직 배향성을 SEM으로 관찰하였고 각각의 공정에 사용된 페이스트의 점도 특성을 비교하였다.

## 2. 실험방법

### 2.1. 탄소나노튜브의 절단 방법

재료는 일진 나노테크에서 화학기상증착법(CVD)으로 제조한 다층탄소튜브를 사용하였다. 이 탄소나노튜브의 평균 지름은 50 nm이며 길이는 60  $\mu\text{m}$  이상이었다. 먼저 탄소나노튜브를 에탄올과 함께 투명한 유리병에 넣은 다음 상온에서 초음파를 조사하여 균일하게 분산된 서스펜션을 제조한다. 탄소나노튜브를 절단하기 위하여 polishing grinder(Phoenix beta, Buehler)에 다이아몬드 연마용 필름(평균입자크기 0.1  $\mu\text{m}$ , Buehler)을 위, 아래 틀에 각각 고정시킨 다음 탄소나노튜브 서스펜션을 연마용 필름 사이에 넣고 각각 100, 200, 300 rpm의 속도로 회전하면서 3분간 분쇄하였다.<sup>11)</sup>

이러한 방법으로 절단한 탄소나노튜브를 관찰하기 위해서는 탄소나노튜브가 서로 응집되어 있지 않고 수용액 상태에서 균질하게 분산되어야 한다. 분산을 위하여 Gum

Arabic 고분자와 deionized water를 2 wt% : 98 wt% 비율로 섞은 다음 90°C에서 가열하여 Gum Arabic을 완전히 녹인 후<sup>12)</sup> 각각의 다른 방법으로 분쇄한 탄소나노튜브를 분산용 용액에 넣고 혼합한 다음 초음파 분산기(Sonosnasher, Ulsso Atitech)로 3분간 고르게 분산시켰다. 이 분산 용액으로부터 절단된 탄소나노튜브의 SEM 관찰용 시료를 제조하였으며 탄소나노튜브 입자 크기 분포를 입도 분석기(UPA150, Microtrac)로 측정하였다.

### 2.2. 스크린 프린팅을 이용한 탄소나노튜브의 수직 배양

스크린 인쇄에서 요구되는 기본적인 페이스트의 조건은 비 휘발성 용매(terpineol, butyl carbitol)계열을 사용하고 인쇄된 선의 선명도가 높아야 하며 thixotropic 거동이 나타나야 한다. 기초 실험 결과 스크린 인쇄용 최적 페이스트 조성은 무게 비율로 절단 속도 200 rpm으로 절단한 탄소나노튜브 4%, ethyl cellulose(Aldrich Chemical) 12%,  $\alpha$ -terpineol(Aldrich Chemical) 83%의 비율이었다. Ethyl cellulose를  $\alpha$ -terpineol에 혼합한 다음 90°C에서 20분간 가열하여 완전히 용해시킨 후 절단된 탄소나노튜브와 용매를 마노 유발에 넣은 후 약 3시간 동안 고르게 혼합하였다. 탄소나노튜브 페이스트의 스크린 프린팅에는 400 mesh 스크린을 사용하였고 인쇄기판과 스크린 간격(snap of distance)은 1 mm의 조건에서 인쇄하였다. 스크린 인쇄된 선은 5시간 동안 250°C에서 건조 한 후 탄소나노튜브의 수직배향을 이루기 위한 후처리 방법으로 사포(1200 CW)와 다이아몬드 연마용 필름으로 스크린 인쇄된 CNT의 표면층을 기판에 수평한 방향으로 마찰시키는 방법과 접착성이 있는 POST It<sup>TM</sup>(3 M)을 사용하여 접촉시킨 다음 분리하는 방법을 시도하였다. 각각의 방법으로 후 처리된 시료들을 SEM(S-4200, Hitachi)으로 관찰하였다.

### 2.3. 주사 사출법을 이용한 탄소나노튜브 수직배양

주사 사출법으로 탄소나노튜브의 수직배양을 이루기 위해서는 주사 사출에 적합하도록 탄소나노튜브의 유동특성(rheological properties) 최적화를 위해 페이스트 조성을 확립하여야 한다.<sup>13)</sup> 최적의 페이스트는 thixotropic 특성을 나타내어 주사 사출시 페이스트의 유동이 시작되면 적은 사출압력으로도 부드럽게 노즐을 통과하면서 페이스트내의 탄소나노튜브의 배향을 유도해야 한다. 기초 실험결과 탄소나노튜브가 기판에 수직으로 배양할 수 있는 최적의 페이스트 조성은 무게비율로 탄소나노튜브 5.4%, ethyl cellulose 5.4%,  $\alpha$ -terpineol 84.7%, glass frits 4.5%이었다. 페이스트 구성 성분을 마노 유발에서 3시간 동안 혼합한 후 노즐의 내경이 200  $\mu\text{m}$ 인 luer lock 형식의 바늘을 사용한 주사기를 통하여 기판에 수직방향으로 사출 시킨 후 형성된 탄소나노튜브 응집체의 미세구조를 SEM으로 관찰하였다.

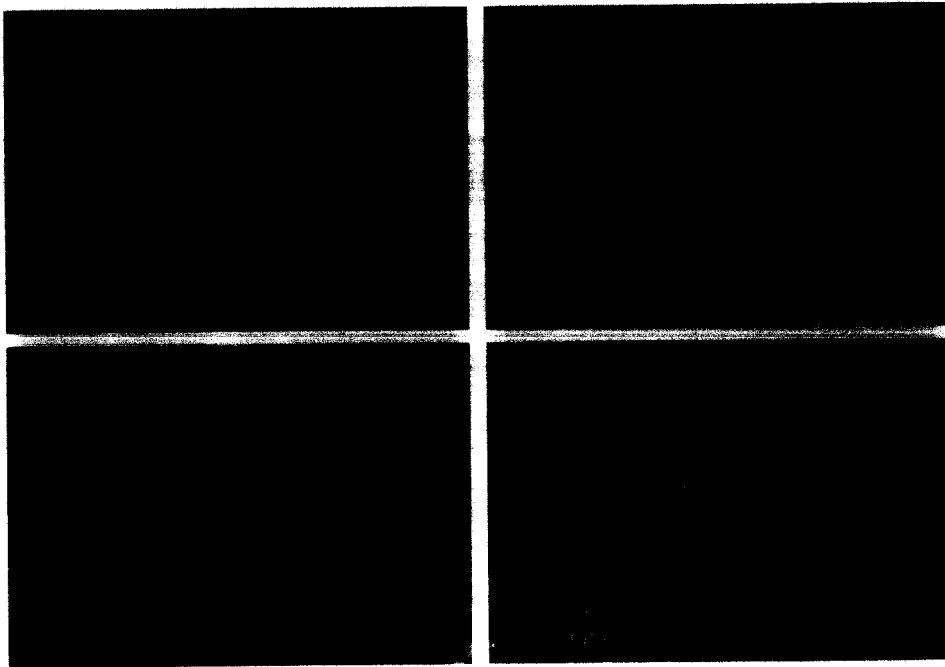


Fig. 1. SEM images of multi-wall carbon nanotubes shortened by various conditions: (a) no treatment CNT (b) ground at 100 rpm, (c) ground at 200 rpm and (d) ground at 300 rpm.

### 3. 결과 및 고찰

연마용 필름을 사용하여 각각 다른 속도로 회전시키면서 연마기로 분쇄한 탄소나노튜브를 전자현미경으로 관찰한 것을 Fig. 1에 나타내었다. 사용한 모든 방법으로 다층 탄소나노튜브를 효과적으로 절단할 수 있음을 알 수 있었다. 절단 전 탄소나노튜브의 길이는 60 μm 이상임에 비해서 절단 후 회전속도와 절단 방법에 따라 현격한 차이는 나타나지 않았으며 대부분의 길이가 3 μm 이하로 관찰되었다. 절단하기 전 탄소나노튜브의 길이는 수십 마이크로미터를 나타내고 있으나(Fig. 1(a)), 회전속도 100 rpm 조건에서는 1~3 μm의 길이를 나타내고 있고(Fig. 1(b)), 회전속도 200 rpm 경우는 탄소나노튜브 길이가 0.4~2 μm를 나타내고 있다(Fig. 1(c)). 회전속도 100, 200 rpm 모두 비교적 고르게 절단되어 절단된 탄소나노튜브 간의 길이 차이가 크지 않음을 나타내고 있다. 그러나 회전속도 300 rpm 조건에서는 길이가 0.4~3 μm의 분포를 나타내는 것을 관찰할 수 있으며 절단된 탄소나노튜브들의 길이 장단의 편차가 큰 것을 알 수 있었다(Fig. 1(d)).

Fig. 2는 입도분석기로 각각의 방법으로 절단된 탄소나노튜브의 평균 길이와 입도 분포를 측정된 결과를 나타내었다. Light scattering 방식으로 측정된 나노튜브의 입자크기는 Fig. 1의 SEM으로 직접 관찰된 것과 유사하게 0.2~4 μm의 분포를 하고 있었다. Fig. 2(a)에 나타낸 것과 같이 분쇄하지 않았을 경우 입자 크기가 3~6 μm에 집중 분포되어 있음을 알 수 있다. 기계의 측정 최대치가 7 μm

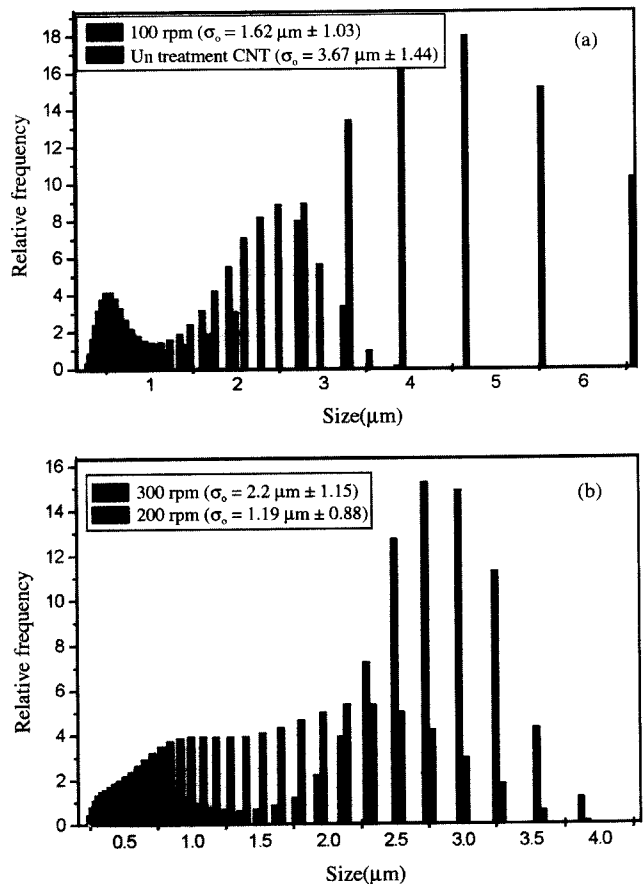


Fig. 2. Particle size distribution of CNT: (a) no treatment CNT and ground at 100 rpm (b) ground at 200 rpm and 300 rpm.

이어서 이 이상의 입자 크기는 나타내지 못하였다. 회전 속도 100 rpm의 경우 입자크기가 큰 영역인 2~3 μm에 약 37%가 분포되어 있는 것으로 판단할 때 회전 속도가 느려 분쇄가 불충분하게 이루어졌음을 알 수 있었고, Fig. 2(b)에서 200 rpm의 경우는 어느 특정 입자크기에 분포가 편중되어 있지 않고 정규 분포에 가까운 모습을 보였고 평균크기가 1.19 μm(±0.88)로 다른 회전속도 조건에 비하여 최단 길이를 나타내고 있어 다이아몬드 연마필름을 사용하는 분쇄의 최적속도임을 알 수 있었다. 반면 회전 속도 300 rpm 조건에서 분쇄한 경우는 입자크기가 보다 큰 영역인 2~3 μm에 약 53%가 분포되어 있는 것으로 판단할 때 회전 속도가 지나치게 높아 연마 필름과 필름 사이가 균질하게 맞물려 돌아가지 못하여 균일한 분쇄를 이루지 못한 것으로 판단된다. 위와 같은 결과로 판단할 때 탄소나노튜브의 절단법으로 다이아몬드 연마 필름의 사용이 효과적임을 알 수 있었으며 회전속도가 절단효율성을 좌우하는 중요한 변수이었다.

Fig. 3은 스크린 프린팅과 주사 사출에 사용된 페이스트의 전단율에 따른 점도 변화를 나타내고 있다. 페이스트에 가해지는 전단율이 높아짐에 따라서 점도가 낮아지는 shear thinning 거동을 나타내고 있음을 알 수 있다. 전체적으로 스크린 프린팅에 사용되는 페이스트의 점도가 더 높게 나타나고 있어, 전단율 22 s<sup>-1</sup>에서 스크린 프린팅용과 주사 사출용 페이스트의 점도는 각각 56000 mPa·s와 15810 mPa·s를 나타내고 있다. 스크린 프린팅에서는 스퀴즈가 페이스트에 작용하는 전단 응력과 속도의 차이

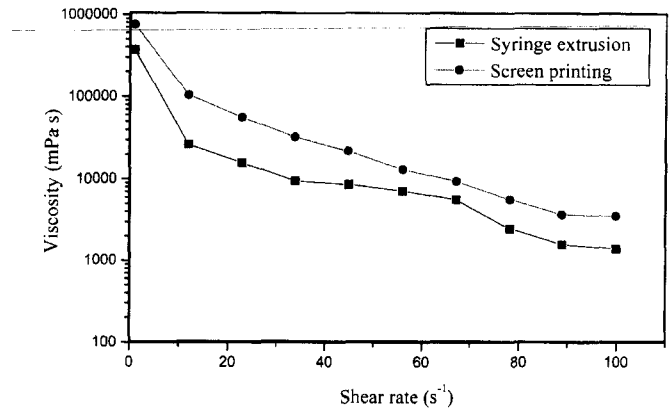


Fig. 3. Rheological behavior of carbon nanotube pastes used for syringe extrusion and screen printing.

에 따라서 인쇄된 선에 선명도와 정밀도에 영향을 미치며, 인쇄 시에는 스크린 mesh를 통과하며 유동되는 페이스트내의 봉상입자 형상의 탄소나노튜브의 입자배열을 좌우하며, 또한 인쇄 후에도 페이스트 점도에 따라 건조 속도가 변화되어 탄소나노튜브의 최종적인 수직배열성에 영향을 미치게 된다. 또한 주사사출법에 의하여 탄소나노튜브를 배향시키는데 있어서도 사용되는 페이스트의 유동학적 특성이 주요 공정 변수로, 주사바늘로부터 페이스트의 사출에 필요한 전단 응력, 페이스트 내의 입자배열, 사출된 페이스트 응집체의 형상 및 크기 등에 영향을 미치게 된다.

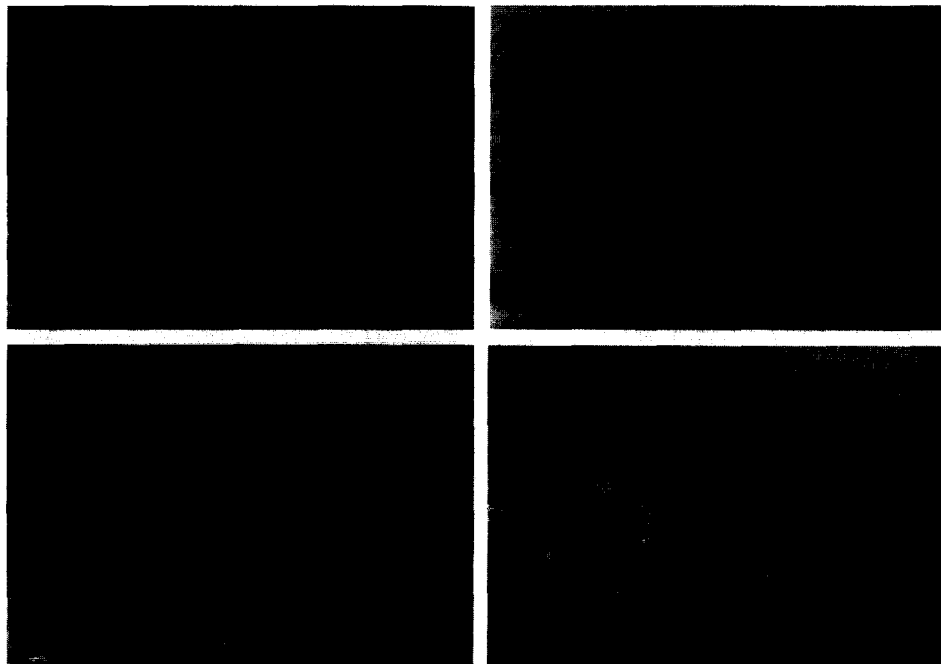


Fig. 4. SEM images of screen printed carbon nanotubes aligned by various post-treatments: (a) attaching/detaching, (b) scrubbed by sandpaper and (c)/(d) scrubbed by diamond lapping film.

본 실험에서는 탄소나노튜브의 페이스트의 유동학 특성과 스크린의 mesh 크기 조절을 통하여 스크린 인쇄된 경우에 있어서는 탄소나노튜브의 수직배향 정도가 전계 방출용으로 사용하기에는 배향성과 배향된 입자의 수가 부족하였다. 따라서 스크린 프린팅으로 인쇄된 탄소나노튜브의 배향성을 유도시키기 위해 사포(1200 CW)와 다이아몬드 연마 필름으로 마찰시키거나 접착성 테이프로 붙였다가 분리하는 후처리 공정을 시도한 것을 SEM으로 관찰하여 Fig. 4에 나타내었다. Fig. 4(a)는 일부의 탄소나노튜브가 접착성 테이프로 분리 시 접착력에 의해 일부 수직 배향되어 있는 모습을 나타내고 있다. 그러나 접착력에 의한 수직배향은 인쇄된 선과 접착성 테이프 간의 균일한 접착이 이루어지기 어려우며 또한 일정한 접착력 이상이 되면 스크린 인쇄된 선의 손실이 나타남에 따라 수직 배향에 영향을 미치는 이들 변수들을 제어하는 어려움이 있다. Fig. 4(b)의 경우는 사포로 인쇄된 선을 마찰시켜 탄소나노튜브가 일부 수직 배향된 모습을 보이나 탄소나노튜브가 서로 얽혀 있을 뿐만 아니라 균일하게 수직 배향이 이루어지지 않고 있다. 이는 사포의 입자가 균일하지 않을 뿐만 아니라 거칠어서 불규칙적으로 수직 배향이 이루어지고 인쇄된 선에 손상을 가져왔기 때문이라고 판단된다. 이에 비하여 Fig. 4(c)와 4(d)는 다이아몬드 연마 필름으로 마찰시킨 것으로서 이는 사포의 표면구조와 다르게 입자크기가 0.1  $\mu\text{m}$ 인 미세하고 균질한 다이아몬드입자로 이루어진 매끄러운 표면구조로 이루어져 있어 크기가 0.05  $\mu\text{m}$ 인 탄소나노튜브에 좀더 균일하게 힘이 작용하여 사포에 비해 우수한 수직 배향이 이루어질 수 있음을 알 수 있었다.

페이스트를 주사 사출법으로 유리기관에 도포한 페이스트 응집체를 SEM으로 관찰하여 Fig. 5에 나타내었다. Fig. 5(a)에서 보듯이 기관에 수직방향으로 사출된 페이스트 응집체는 원뿔형의 모습을 나타내고 있다. 페이스트의 점도가 너무 낮을 경우는 주사바늘 출구로부터 사출된 페이스트는 기관 위에서 응집체 형상을 이루지 못하고 퍼지게 되며, 점도가 너무 높은 경우에는 페이스트 유동을 위한 과도한 응력이 요구되거나 쉽게 바늘 입구가 막히는 현상이 발생하고 페이스트 유동 시 탄소나노튜브 입자 재배열이 충분히 일어나지 못하여 사출된 응집체 내에서도 수직 배향이 거의 관찰되지 못하였다. 반면 적절히 조절된 페이스트를 사용하여 주사 사출된 경우에는 페이스트의 점도특성에 기인하여 주사바늘과 분리 시에 원뿔형의 페이스트 응집체를 이루게 된다. 또한 미세구조 측면에서도, 탄소나노튜브 페이스트가 직경 200  $\mu\text{m}$  주사바늘을 통과하여 유동되는 동안 페이스트 내에 무질서하게 혼합되어 있는 각각의 입자들이 저항을 적게 받는 형태로 입자 재배열이 일어나 사출되는 수평방향으로 탄소나노튜브들이 배열되어 유리기관 위에 수직방향으로 도

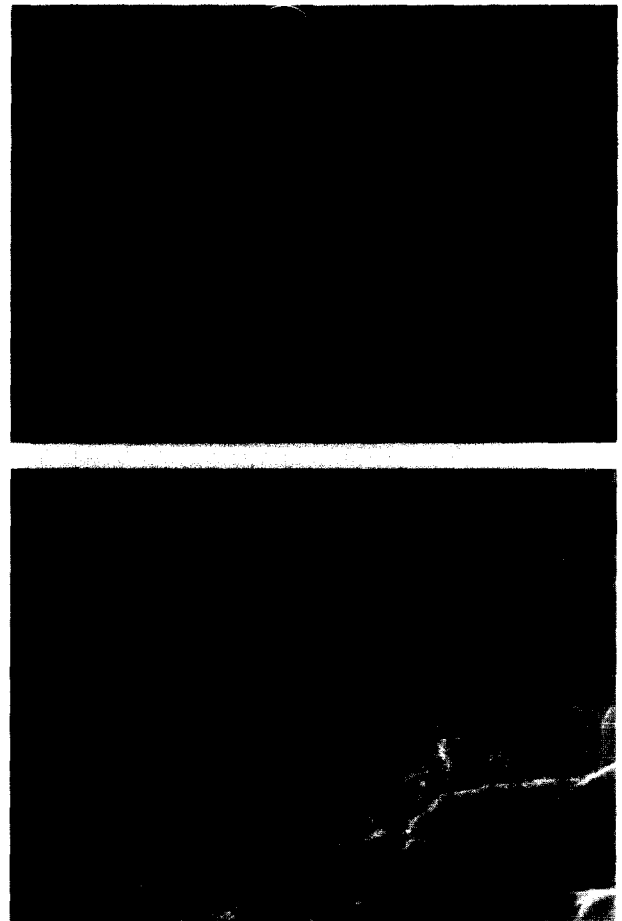


Fig. 5. SEM images of the as-processed carbon nanotubes aligned by syringe extrusion: (a) extruded carbon nanotubes paste and (b) high magnification image of the marked area on (a).

포된 페이스트의 응집체 내에서도 기관과 수직하게 우수한 배향이 이루어진 것을 관찰할 수 있었다(Fig. 5(b)). 이러한 탄소나노튜브의 원활한 재배열과 주사사출의 용이한 공정을 위해서는 Fig. 3에 나타낸 것과 같이 스크린 인쇄의 경우보다 낮은 점도의 제어된 페이스트가 필요하였다.

페이스트를 이용한 탄소나노튜브의 수직배향에 있어서 스크린 프린팅과 주사사출공정 모두 우수한 수직배향 특성을 이룰 수 있었다. 그러나 실제 FED 제조공정 적용 측면에서 볼 때 주사사출법은 대면적 미세패턴 공정이 용이하지 못하고 사출된 탄소나노튜브 응집체의 높이를 일정하게 제어하기 어려운 요소를 갖고 있다. 반면 스크린 프린팅의 경우는 탄소나노튜브 페이스트로부터 20  $\mu\text{m}$  정도의 해상도로 대면적 미세패턴 공정이 용이한 장점이 있다. 스크린 인쇄만으로는 탄소나노튜브의 수직배향성이 FED의 전자방출용 팁으로 부적합하지만 다이아몬드 연마 필름을 사용하여 간단한 마찰과정을 통하여 수직 배향성을 향상시킬 수 있었다. 대면적 FED 제조공정 측면

에서도 다이아몬드 필름의 마찰과정 중 탄소나노튜브 미세패턴 후막표면에 전달되는 힘의 균질성만 확보될 수 있다면 스크린 프린팅-후처리 공정으로 탄소나노튜브의 배향성 제어공정을 효율적으로 이룰 수 있다고 판단된다.

#### 4. 결 론

기계적 절단 방식으로 다이아몬드 연마 필름을 사용한 회전 분쇄가 화학적 증착법으로 합성된 다층 탄소나노튜브의 효과적 절단방법임을 알 수 있었다. 회전속도 200 rpm이 최적 분쇄조건으로 길이 60  $\mu\text{m}$  이상의 탄소나노튜브가 평균 입자크기 1.19  $\mu\text{m}$ ( $\pm 0.88$ )로 변화되어 FED 전계방출용 팁으로 사용되기에 적합한 길이로 절단할 수 있었다. 절단된 탄소나노튜브를 이용하여서 스크린 프린팅과 주사 사출법에 적합한 페이스트를 제조하였고 이로부터 수직 배양을 시도 해본 결과, 스크린 프린팅으로 인쇄한 경우엔 탄소나노튜브의 수직배향성은 거의 관찰할 수 없었지만 주사 사출공정을 통하여 도포된 페이스트 응집체 내에서는 기판에 수직인 방향으로 탄소나노튜브의 우수한 배향특성을 나타내었다. 스크린프린팅의 경우에서는 배향특성을 유도시키기 위하여 인쇄된 탄소나노튜브의 표면을 다이아몬드 연마 필름을 사용하여 기계적 마찰을 시키는 후처리 공정으로 배향성이 향상됨을 확인하였다.

#### REFERENCES

1. S. Iijima, "Helical Microtubules of Graphitic Carbon," *Nature*, **354** 56-7 (1991).
2. P. M. Ajayan and R. Vajtai, "Properties and Applications of Carbon Nanotubes," pp. 315-16 in Carbon Filaments and Nanotubes: Common Origins, Differing Applications?, Nato Science Series Vol. 372, Ed. by L. P. Biro, C. A. Bernardo, G. G. Tibbetts and Ph. Lambin, Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, 2001.
3. M. S. Kim, W. J. Woo, H. J. Woo, H. S. Song, Y. S. Lee and J. C. Lee, "Characterization of Nanostructure and Electronic Properties of Catalytically Grown Carbon Nanofiber(in Kor.)," *J. Kor. Ceram. Soc.*, **61** [7] 1153-58 (2000).
4. H. K. Yu, W-K. Choi, H. Ryu and B. Lee, "Preparation of Carbon Nanomaterials by Thermal CVD and their Hydrogen Storage Properties(in Kor.)," *J. Kor. Ceram. Soc.*, **38** [10] 867-70 (2001).
5. A. C. Dillon, K. M. Jones, T. A. Bekkedahl, C. H. Kiang, D. S. Bethune and M. J. Heben, "Storage of Hydrogen in Single-walled Carbon Nanotubes," *Nature*, **386** 377-79 (1997).
6. A. Cao, X. Zhang, C. Xu, B. Wei and D. Wu, "Tandem Structure of Aligned Carbon Nanotubes on Au and its Solar Thermal Absorption," *Solar Energy Mater. & Solar Cells*, **70** 481-86 (2002).
7. A. A. Talin, K. A. Dean and J. E. Jaskie, "Field Emission Displays: A Critical Review," *Solid-State Electronics*, **45** 963-76 (2001).
8. L. Jin, C. Bower and O. Zhou, "Alignment of Carbon Nanotubes in a Polymer Matrix by Mechanical Stretching," *App. Phys. Lett.*, **70** 1197-99 (1998).
9. C. J. Lee, J. H. Park, S. W. Han and J. S. Ihm, "Growth and Field Emission of Carbon Nanotubes on Sodalime Glass at 550°C using Thermal Chemical Vapor Deposition," *Chem. Phys. Lett.*, **337** 398-402 (2001).
10. A. Kalledaer, M. Memmig and H. Schmidt, "Nanometer Sized Particles for Viscosity Controlled Binder for Silk Screen Printing," *J. Non-Crystalline Solids*, **218** 399-402 (1997).
11. I. Stepnek, G. Maurin, P. Bernier, J. Gavillet, A. Loiseau, R. Edwards and O. Jaschinski, "Nano-mechanical Cutting and Opening of Single Wall Carbon Nanotubes," *Chem. Phys. Lett.*, **331** 125-31 (2000).
12. R. Bandyopadhyaya, E. Nativ-Roth, O. Regev and R. Yerushalmi-Rozen, "Stabilization of Individual Carbon Nanotubes in Aqueous Solutions," *Nano Lett.*, **2** [1] 25-8 (2002).
13. D. J. Horrobin and R. M. Nedderman, "Die Entry Pressure Drops in Paste Extrusion," *Chem. Eng. Sci.*, **189** [53] 3215-25 (1998).