

# 플라즈마 기상 화학 증착법을 이용한 탄소나노튜브의 선택적 수직성장 기술

방윤영\*, 장원석#

## Selective Growth of Freestanding Carbon Nanotubes Using Plasma-Enhanced Chemical Vapor Deposition

Yun Young Bang\* and Won Seok Chang#

### ABSTRACT

Chemical vapor deposition (CVD) is one of the various synthesis methods that have been employed for carbon nanotube (CNT) growth. In particular, Ren et al reported that large areas of vertically aligned multi-wall carbon nanotubes could be grown using plasma-enhanced chemical vapor deposition (PECVD). In this study, we synthesized aligned CNT arrays using a direct current (dc) PECVD system. The synthesis of CNT requires a metal catalyst layer, etchant gas, and a carbon source. In this work, the substrates consisted of Si wafers with Ni-deposited film. Ammonia (NH<sub>3</sub>) and acetylene (C<sub>2</sub>H<sub>2</sub>) were used as the etchant gases and carbon source, respectively. Pretreated conditions had an influence on vertical growth and density of CNTs. And patterned growth of CNTs could be achieved by lithographical defining the Ni catalyst prior to growth. The length of single CNT was increased as nickel dot size increased, but the growth rate was reduced when nickel dot size was more than 200 nm due to the synthesis of several CNTs on single Ni dot. The morphology of the carbon nanotubes by TEM showed that vertical CNTs were multi-wall and tip-type growth mode structure in which a Ni cap was at the end of the CNT.

**Key Words** : Carbon nanotube (탄소나노튜브), Plasma-enhanced chemical vapor deposition (플라즈마 화학 기상 증착), Ni catalyst (니켈촉매), Vertical growth (수직성장)

### 1. 서론

탄소나노튜브(Carbon Nanotube, CNT)는 다양한 물리적·화학적 성질<sup>1, 2</sup>을 가지고 있어 21세기 첨단 전자정보산업을 비롯한 많은 첨단산업분야에 폭넓

게 이용될 수 있으며, 나노과학기술 분야의 핵심소재로 세계적으로 관심이 집중되고 있다. 1991년에 처음으로 관찰된<sup>3</sup> 탄소나노튜브는 평판디스플레이 (Flat panel displays), 화학센서(Cheical sensors), 수소저장(Hydrogen storage) 등의 많은 분야에 잠재성

접수일: 2006년 11월 1일; 게재승인일: 2007년 4월 10일

\* 한국기계연구원 나노공정장비연구센터

# 교신저자: 한국기계연구원 나노공정장비연구센터

E-mail: paul@kimm.re.kr Tel. (042) 868-7134

을 가지고 있으며<sup>2,4</sup>, 합성방법에는 아크방전법(Arc discharge), 레이저 증착법(Laser vaporization), 열분해법(Pyrolysis), 열(Thermal) 화학 기상 증착법 그리고 플라즈마(Plasma-enhanced) 화학 기상 증착법 등이 있다. 광범위한 첨단 분야에 탄소나노튜브의 응용이 가능함에도 불구하고 그 활용이 널리 확산되지 못하는 이유는 이들의 성장 제어가 어렵고, 불규칙하다는 점 때문이다. 이를 위하여 본 연구는 수직 배양합성이 가능하고 저온합성, 고순도 합성, 대면적 기판 합성이 가능하며, 구조제어가 용이한 플라즈마 화학 기상 증착법을 통해 탄소나노튜브를 합성하였다.

일반적으로 탄소나노튜브를 합성함에 있어 플라즈마 화학 기상 증착법에서는 열 증착법, 스퍼터링법, 전자빔 증착법으로 Ni, Fe, Co 등의 탄소 반응 촉매 금속<sup>5</sup>을 증착한 Si, SiO<sub>2</sub> 또는 유리 기판을 이용한다. 기판에 증착된 촉매 금속은 암모니아(NH<sub>3</sub>)와 수소(H<sub>2</sub>) 가스 등을 통해 수~수십 나노 크기의 미세한 촉매 금속 입자가 형성되고, 탄소 공급 반응가스를 챔버 내로 주입하면서 전압을 인가하여 글로우 방전된 반응 가스 플라즈마를 통해 미세한 촉매 금속 입자로부터 탄소나노튜브를 합성한다. 이때 반응가스로는 C<sub>2</sub>H<sub>2</sub>, C<sub>2</sub>H<sub>4</sub>, CH<sub>4</sub>, C<sub>2</sub>H<sub>6</sub>, CO가 주로 사용된다.

플라즈마 화학 기상 증착법으로 탄소나노튜브 합성 시 변수로 작용하는 조건은 성장 온도, 촉매 금속의 에칭에 따른 탄소나노튜브의 합성 경향, 전처리 과정 중 전류량, 성장 시간 등이 존재한다. 본 연구에서는 탄소나노튜브의 성장 길이와 위치 제어를 위하여 Ni 촉매를 Si 기판위에 다양하게 패터닝하여 여러 실험 변수들을 통해 원하는 위치에서만 수직 성장 할 수 있는 조건을 찾고, 필요한 곳에 선택적으로 합성하여 전계방출 전자 현미경(Field Emission Scanning Electron Microscope, FE-SEM)과 투과 전자 현미경(Transmission Electron Microscope, TEM)으로 형상을 관찰하였다.

## 2. 플라즈마 화학 기상 증착 장치

Figure 1은 본 실험에서 사용한 플라즈마 화학 기상 증착 장치의 개략도이다. 탄소나노튜브를 합성하기 위한 기판은 접지된 하부전극 위에 놓이게 하였다. 균일한 탄소나노튜브의 성장을 위하여 상부전극 주위의 샤워링으로부터 원료기체를 주입하

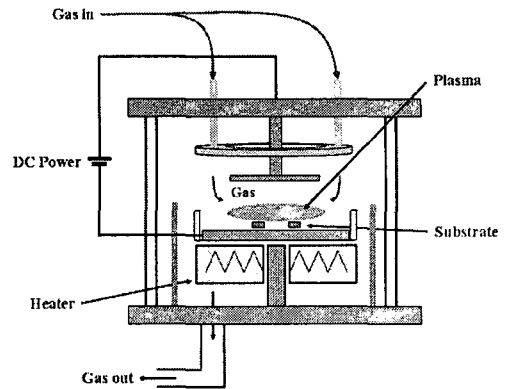


Fig. 1 Schematic of the direct current plasma enhanced chemical vapor deposition system

였다. DC 전원으로 전류를 일정하게 흐를 수 있게 하였고, 상부전극으로부터 양전하를 인가하여 하부전극 중심으로 플라즈마를 발생시켜 탄소나노튜브의 수직성장에 도움을 주었다.

하부전극 아래부분에는 750°C까지 상승 가능한 열저항 히터를 설치하였고, 플라즈마를 모으기 위해 석영유리를 둘렀다. 내부 압력은 로터리펌프, 터보펌프 그리고 배출 가스량을 변화시킬 수 있는 스톱 밸브를 통해 조절하였다.

## 3. 탄소나노튜브 성장 메커니즘

탄소나노튜브의 성장 메커니즘은 촉매 금속이 그 해답을 가지고 있다. 촉매 금속층은 Figure 2에서와 같이 NH<sub>3</sub> 플라즈마에 의해 에칭 되어지는데, 이때 만들어지는 단구(terrace)형태의 촉매 금속은 반응가스인 C<sub>2</sub>H<sub>2</sub>의 탄소원자와 반응한다.

C<sub>2</sub>H<sub>2</sub> 가스는 여러 탄화가스들 중에서 열에 의한 분해에 가장 낮은 활성화 에너지를 가지고 있어 쉽게 탄소를 촉매로 공급할 수 있어 효율적인 성장을 이룰 수 있다. 또 촉매 금속으로 많이 사용되는 Ni, Fe, Co 천이 금속들은 탄소에 대한 고용도가 크고, 4d 전자 궤도가 비어 있기 때문에 아세틸렌과의 흡착반응이 쉬워<sup>6</sup> 탄소나노튜브 합성에 주로 사용되고 있다.

반응가스에서 분리된 탄소원자의 촉매 금속과의 반응은 금속 입자의 가장자리에서 우선적으로 일어나 흡착이 용이하게 된다. 흡착된 탄소원자는

촉매 금속으로 용해, 확산 과정을 거쳐 가장자리에 탄소층을 형성하게 되고, 이 탄소층이 쌓이면서 탄소나노튜브의 벽이 형성되어진다.<sup>7, 8</sup>

탄소나노튜브의 성장 형태는 두 가지로 분류되는데 촉매 금속 입자가 탄소나노튜브의 아래에 남아있을 경우를 base-type, 탄소나노튜브 끝으로 이동하였을 경우를 tip-type이라고 한다. Baker<sup>8</sup> 등에 의하면 기판과 촉매 금속사이의 상호인력에 그 원인을 두어 설명하였다. 이러한 상호인력은 촉매 금속이 에칭 되었을 때 기판과의 접촉각에 의해 설명되어진다. 예를 들어 700℃의 Si기판위에서의 Ni 촉매 금속 입자는 그 접촉각이 커 탄소나노튜브 성장 시 기판과 분리되어 Ni 입자가 대부분 탄소나노튜브 끝에서 관찰되고, Fe나 Co는 접촉각이 작아 base 형태로 탄소나노튜브 아래에서 많이 발견된다. 하지만, 이와 같은 촉매 금속의 선택이 성장 방식을 완벽하게 제어하지는 못한다.

#### 4. 실험 방법

플라즈마 화학 기상 증착법을 통한 탄소나노튜브 합성에서는 촉매 금속이 필요하다. 본 실험에서는 Ni 촉매금속의 면적을 대면적, 8×8 μm 크기의 격자 모양 그리고 dot으로 다양하게 증착하여 촉매 금속의 면적과 두께 변화에 따른 탄소나노튜브의

성장 추이를 관찰하였다. 촉매 금속은 Si 기판 위에 스퍼터링법과 전자빔 증착법을 이용하여 증착하였다. 대면적 기판은 Si 기판위에 Ni 촉매 금속을 10, 30, 50 nm 두께로 스퍼터링법을 이용하여 증착하였고, 8×8 μm 크기의 격자 모양 Ni 촉매 금속은 마스크와 PR을 이용하여 패턴을 만들고 전자빔 증착법으로 20 nm를 올렸다. 마지막 단계인 Ni dot 증착에서의 탄소나노튜브 성장 실험은 기판위에 스핀코터를 이용하여 Si 기판위에 PMMA를 100 nm 코팅하고, E-beam lithography 장비를 이용하여 다양한 도즈량으로 전자빔을 조사한 뒤 50, 100, 150, 200 nm 지름의 dot 크기로 develop하였다. 각 dot 패턴의 간격은 탄소나노튜브 성장에 서로 영향을 미치지 않게 ~1 μm의 거리를 두었다. Ni dot은 develop한 시편 위에 전자빔 증착법을 이용해 10, 20 nm 두께로 증착하였다. 증착된 기판은 lift off 공정으로 아세톤에 1분 정도 담궈두어 PR을 완전히 제거하였다. 이렇게 만들어진 Ni dot은 FE-SEM과 원자현미경(Atomic Force Microscopy, AFM)으로 관찰하였다.

촉매 금속이 증착된 기판은  $\sim 5.2 \times 10^{-5}$  Torr 이하

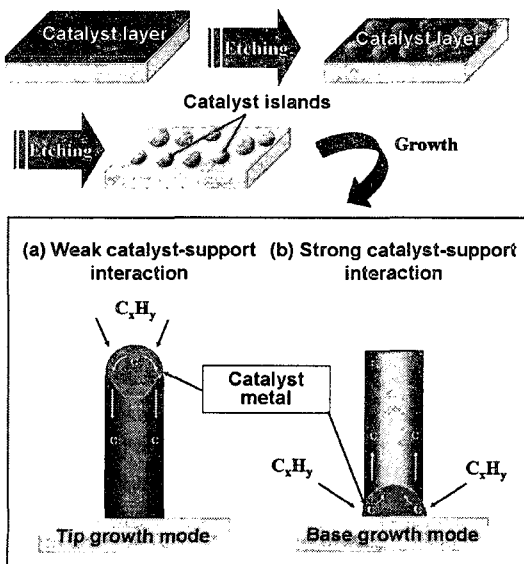


Fig. 2 Mechanism of carbon nanotube growth<sup>8</sup>

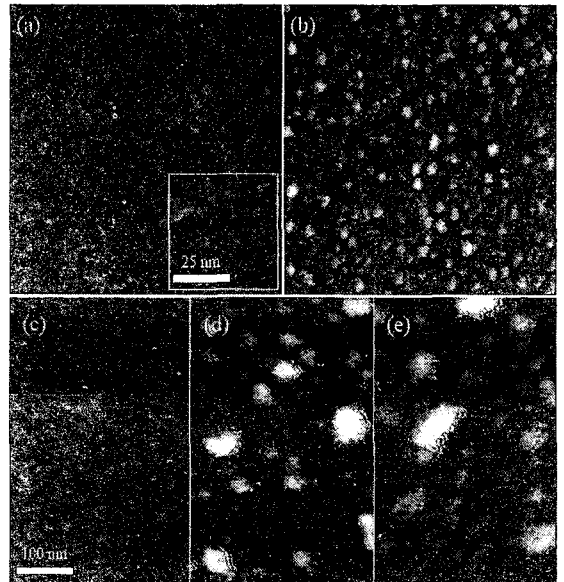


Fig. 3 AFM images showing the surface morphologies of Ni film dots prepared at the dc power currents of (a) 20 mA, (b) 60 mA, and (c)-(e) 100 mA: Ni layer of (a)-(c) 10 nm, (d) 30 nm, and (e) 50 nm

고진공 분위기하에서 620°C로 가열하였다. 탄소나노튜브의 핵인 촉매 금속 미립자를 만들기 위해 챔버에 NH<sub>3</sub>를 180 sccm으로 흘려주어 3 Torr의 압력에서 두 전극 사이에 DC 전원을 인가하여 NH<sub>3</sub> 플라즈마를 유도하였다. 본 실험에서는 인가된 DC 전류의 세기와 전처리 시간에 따른 결과를 확인하기 위하여 전처리 시간을 1, 5, 10 min으로 변화하였고 20, 60, 100 mA의 전류 변화로 촉매 금속을 예칭하여 탄소나노튜브 성장 경향성을 관찰하였다.

탄소나노튜브를 합성하기 위한 반응 기체로는 C<sub>2</sub>H<sub>2</sub> 가스를 사용하였으며, 전처리 조건에서 NH<sub>3</sub> 량 30 %의 C<sub>2</sub>H<sub>2</sub> 가스를 챔버 내로 공급하면서 DC 전원을 인가, 글로우 방전 플라즈마를 통해 탄소나노튜브를 성장시켰다. 성장시간에 따른 탄소나노튜브의 성장추이와 전류세기에 따른 변화를 관찰하기 위해 본 실험에서는 5, 10 min의 시간 변화와 20, 40, 80 mA 전류세기의 변화를 주었다. 이렇게 합성한 탄소나노튜브의 형상은 FE-SEM과 TEM으로 관찰하였다.

### 5. 결과 및 고찰

Figure 3은 탄소나노튜브를 성장시키기 위해 Ni 촉매 금속을 NH<sub>3</sub> 플라즈마로 10 min 동안 예칭한 후 관찰한 기판 표면의 AFM 사진이다. 각각 (a)-(c)10, (d)30, (e)50 nm로 증착된 Ni 층은 전처리 공정을 거치면서 표면이 거칠어지고 입자가 서로 떨어진 단구 형태로 나타나게 되는데, 이 때의 크기와 분포가 탄소나노튜브 성장의 크기와 성장모드를 결정하게 된다. Figure 4 (a), (b)는 10 nm Ni 금속층을 20, 60 mA의 전류세기로 예칭한 것으로 Ni 입자가 ~20 nm 크기로 미세하고 균일하게 분리되어있는 것을 볼 수 있다. 반면, 전류세기가 100 mA인 (c) 기판은 얇은 촉매 금속의 표면이 허물어져 예칭이 과도하게 되어진 것으로 사료되어 같은 전류세기로 더 두꺼운 Ni 촉매 금속층을 증착한 결과, Figure 3 (d), (e)와 같이 100 nm이상의 Ni 입자가 나타나는 등 크고, 불균일한 입자를 얻었다. 이에 따라 균일한 탄소나노튜브를 얻기 위해 본 실험에서는 Ni 촉매층이 10, 20 nm인 기판을 선택하여 탄소나노튜브를 합성하였다.

Figure 4는 전처리 시간에 따른 탄소나노튜브 성장 추이를 관찰하기 위해 예칭 시간을 달리한 사진이다. 5 min간 전처리한 기판위에서 성장한 탄소

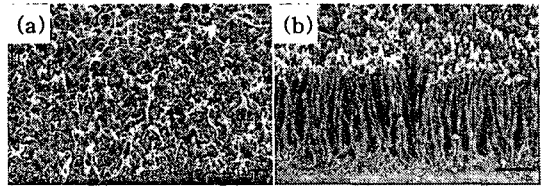


Fig. 4 SEM images of grown CNTs for 5 min after pretreatment for (a) 5 min and (b) 10 min with gas of NH<sub>3</sub> (180 sccm) at 620°C

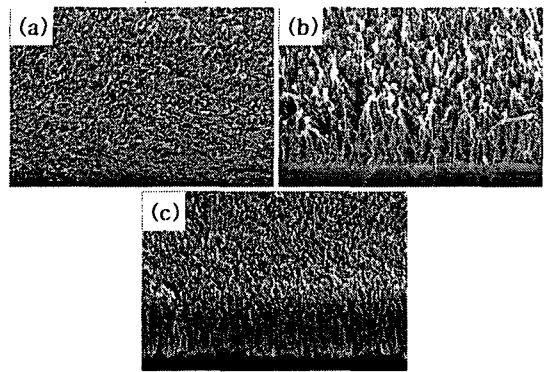


Fig. 5 SEM images of grown CNTs for (a) 1 min, (b) 5 min and (c) 10 min with mixture gas of C<sub>2</sub>H<sub>2</sub> (60 sccm) and NH<sub>3</sub> (180 sccm) at 620°C by dc bias-assisted PECVD

나노튜브는 수직 성장이 제대로 이루어지지 못하고 일정치 않은 형상을 가지는 반면 10 min간 전처리한 기판위의 탄소나노튜브는 높은 밀도를 가지고 ~2.2 μm의 길이로 수직 성장한 것을 관찰하였다. 이는 촉매 금속인 Ni층의 예칭이 충분히 이루어지지 못하여 입자화가 제대로 일어나지 않았을 경우 탄소나노튜브의 수직 성장을 방해함을 알 수 있다.

Figure 5는 탄소나노튜브 성장과정에서의 시간 의존성을 조사하기 위한 것이다. 시간이 흐를수록

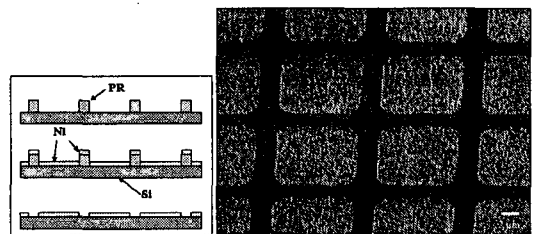


Fig. 6 The growth of carbon nanotubes which take on the area of the nickel microgrids

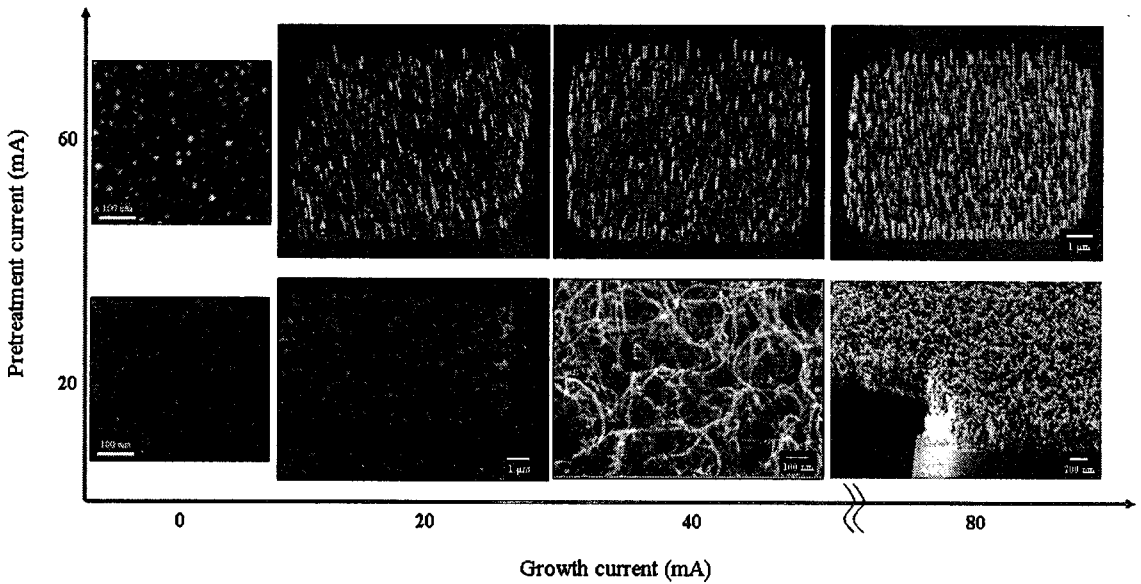


Fig. 7 Morphologies of CNT according to pretreatment and growth current

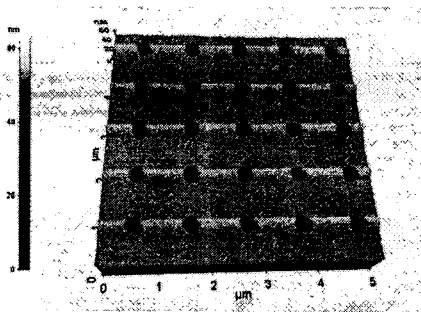


Fig. 8 AFM image of the PR surface after develop

그 길이가 증가한 것을 알 수 있으며, 5 min 성장 시  $\sim 1.2 \mu\text{m}$ , 10 min 성장 시 길이가  $\sim 2.7 \mu\text{m}$ , 지름이  $\sim 60\text{-}80 \text{ nm}$ 인 탄소나노튜브를 얻었다. 하지만 더 이상의 성장은 진행되지 않았는데, 이는 수식 성장의 도움과 비정질 탄소층의 제거에 도움을 주던  $\text{NH}_3$  플라즈마의 에칭의 효과가 성장 억제에 영향을 주는 것으로 사료된다.

탄소나노튜브를 원하는 곳에 선택적으로 성장시키기 위한 실험으로 본 실험에서는 먼저  $8 \times 8 \mu\text{m}$  크기의 격자무늬 위에 탄소나노튜브를 합성하였다. Figure 6은 Si 기판위에 패터닝된 Ni 촉매 금속 위에만 탄소나노튜브가 성장하는 것을 보여준다.

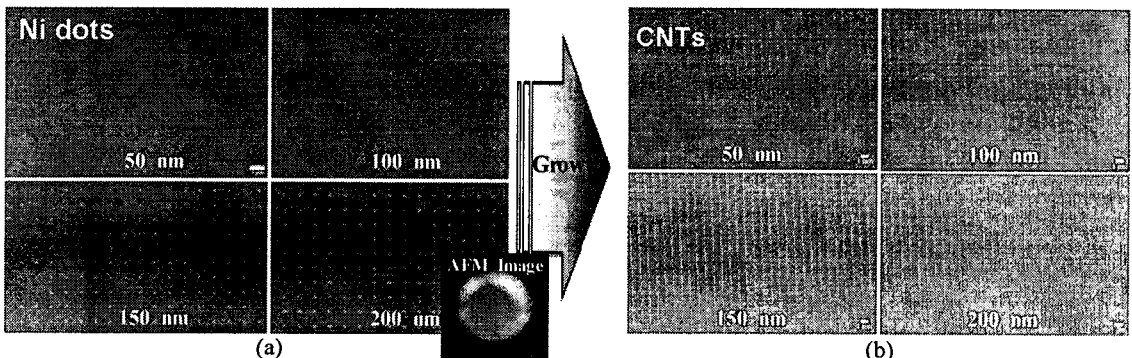


Fig. 9 SEM images showing (a) the Ni dot by E-beam lithography and (b) the CNTs from Ni dots from 50 to 200 nm in width

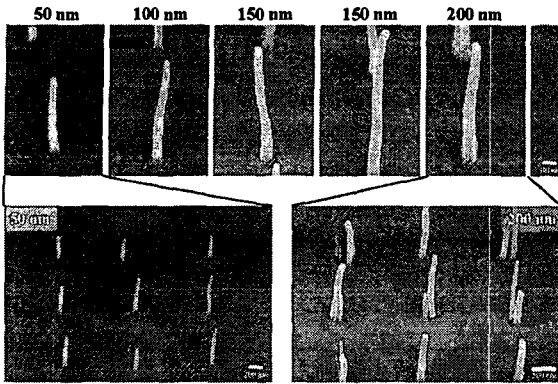


Fig. 10 SEM images of the CNTs grown from Ni dots from 50 to 200 nm of diameter. The scale bar is 100 nm long and the sample tilt was 30°



Fig. 11 SEM images of the multi CNTs grown from Ni dots 300 and 400 nm of diameter

이는 추후 촉매금속의 크기에 따라 한 가닥의 CNT만을 성장시킬 수 있음을 말해준다.

Figure 7은 전처리와 전체 공정에서의 전류세기가 탄소나노튜브 성장에 어떻게 영향을 주는지에 대해 보여주는 그림이다. 전처리 전류의 세기는 전술한 촉매 금속의 입도분포에 영향을 주었고, 그 입자의 상태는 탄소나노튜브의 수직 성장에 영향을 주었다. 또 성장 공정 시의 전류세기는 탄소나노튜브의 밀도에 영향을 주었다. 본 실험에서는 20 nm의 두께를 가진 Ni 촉매 금속 기판을 60 mA로 전처리한 후, 80 mA의 전류세기로 성장하였을 때 가장 밀도가 높고 수직 성장에 적합하였다. 하지만, 격자무늬 중앙에서의 탄소나노튜브의 일정한 크기와 모양에 반해 격자 가장자리에서는 에칭 시 핵의 크기가 다양하게 분포됨으로 인해 탄소나노튜브의 길이 또한 다양한 분포를 가졌다.

이와 같은 크기 분포를 최소화하고 원하는 곳에 선택적으로 한 가닥씩 성장시킬 수 있게 하기 위해 Ni dot을 만들었다. Figure 8은 Ni dot을 만드는 공

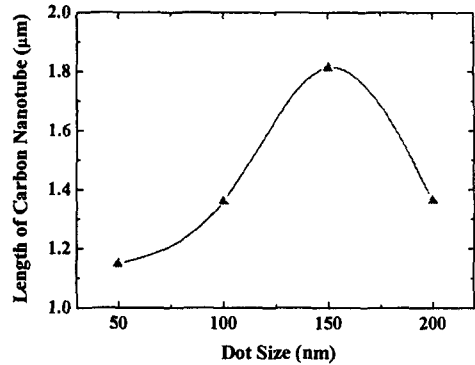


Fig. 12 Plot of the CNTs length as varying Ni dot size

정 가운데 E-beam lithography 장비를 이용하여 PMMA를 Ni dot 크기에 맞게 develop한 시편 표면의 AFM 사진이다. 여기에 Ni을 증착하고 lift off 후 PR을 제거하여 Ni dot을 얻었고, 그 위에 탄소나노튜브를 성장한 것이 Figure 9이다. Ni dot 위의 탄소나노튜브는 전술한 실험 조건에서 각 Ni dot 크기에 따라 일정하고 균일한 크기 분포를 가지고 성장하였다.

Figure 10은 성장한 Ni dot 크기에 따른 탄소나노튜브의 성장 변화를 FE-SEM으로 관찰한 사진이다. Ni dot 크기가 커질수록 탄소나노튜브의 지름과 길이가 증가한다. 하지만 200 nm 이상에서의 Ni dot에서는 탄소나노튜브의 길이 증가가 더 이상 이루어지지 않고 오히려 그 길이가 감소하여 두 개 이상의 탄소나노튜브가 성장함을 관찰하였다. 이는 200 nm 이상의 Ni dot에서는 에칭 시 두 개 이상의 탄소나노튜브 핵이 발생하여 최대 성장을 방해하는 것으로 사료된다. 이는 300, 400 nm Ni dot을 만들

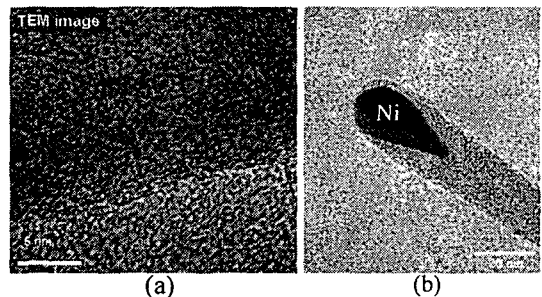


Fig. 13 TEM images showing (a) multi-walled CNT and (b) tip-type growth

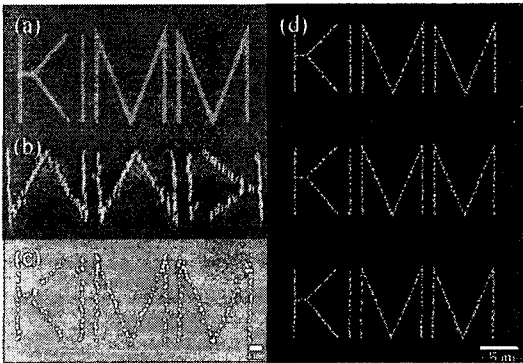


Fig. 14 SEM images of (a) the character pattern by E-beam lithography, (b), (c), and (d) the CNTs from Ni pattern (The sample (b) tilt is 30°)

어 실험한 결과 Figure 11과 같이 그 지름이 커짐에 따라 탄소나노튜브의 개수가 기하급수적으로 증가하는 반면 그 길이는 감소하는 것으로 미루어 알 수 있다. Ni dot에서 성장한 탄소나노튜브의 평균 길이는 Figure 12에서와 같이 Ni dot의 지름이 50 nm일 때, 평균 1.15  $\mu\text{m}$ 이고, 지름이 150 nm일 때 평균 1.81  $\mu\text{m}$ 였다. 하지만, 지름이 200 nm에서는 전술한 바와 같이 그 길이가 감소하여 지름이 100 nm와 비슷한 평균 1.37  $\mu\text{m}$ 로 측정되었다.

성장한 탄소나노튜브는 TEM으로 관찰한 결과 Figure 13과 같이 다중벽이고 tip-type의 탄소나노튜브임을 확인하였다.

Figure 14는 촉매금속 위에서만 선택적으로 성장하는 탄소나노튜브의 특성을 이용하여 E-beam lithography로 제작한 Ni 문자위에 탄소나노튜브를 성장시킨 FE-SEM 사진이다. 이러한 결과로부터 금속성을 갖는 다중벽 탄소나노튜브를 원하는 곳에 선택적으로 일정한 길이를 갖도록 성장시킬 수 있는 기술을 개발함으로써 나노구조를 이용한 연구에 다양하게 응용할 수 있을 것으로 사료된다.

## 6. 결론

플라즈마 기상 화학 증착법에 의해 탄소나노튜브를 합성함에 있어서 Ni 촉매 금속 층의 두께에 따른 전처리 후의 입자화 정도와 전처리 시간이 탄소나노튜브의 성장에 미치는 영향 그리고 전류세기의 영향에 대해 관찰하였다. 전처리 시간이 부족할

때 탄소나노튜브의 성장은 정상적으로 이루어지지 못한다. 본 연구에서는 전처리 시간이 10 min일 때가 최적 시간이었다. 탄소나노튜브는 시간에 비례하여  $\sim 2.7 \mu\text{m}$ 까지 성장하였지만, 어느 시점 이상에서는 더 이상 성장하지 않았다. 전처리 전류세기와 시간에 따라 촉매 금속의 입자화는 탄소나노튜브의 수직성장에도 영향을 주었고, 성장 전류세기는 그 밀도에 관여하였다. 본 실험에서는 전처리 시 60 mA, 성장 시 80 mA 전류세기가 최적조건이었다.

또 Ni 촉매금속이 존재하는 곳에만 탄소나노튜브가 선택적으로 성장함을 관찰하였고, 촉매금속의 dot 크기에 따라 비례하여 성장하다가  $\sim 200 \text{ nm}$  이상의 크기에서는 여러 가닥의 탄소나노튜브가 성장하여 길이 성장에는 악영향을 끼쳤다.

본 실험을 통해 얻어지는 탄소나노튜브는 Ni 촉매금속을 나노튜브 끝에 포함하는 tip-type이었으며, 다중벽 탄소나노튜브로 성장하였다.

플라즈마 기상 화학 증착법을 이용한 탄소나노튜브의 합성은 저온 성장, 선택적 성장, 그리고 길이 제어라는 장점을 가지고 있어 탄소나노튜브 및 나노 구조체를 이용한 IT 및 바이오의 넓은 분야에서 다양하게 사용되어 질 수 있을 것이다.

## 후 기

본 연구는 21세기 프론티어연구개발사업인 나노메카트로닉스 기술개발사업단의 연구비 지원(M102KN010001-02K1401-00710)에 의해 수행되었습니다.

## 참고문헌

- Xie, S., Pan, W. Li, Z., Chang, B. and Sun, L., "Mechanical and Physical Properties on Carbon Nanotube," J. Phys. Chem. Solids, Vol. 61, No. 7, pp. 1153 - 1158, 2000.
- Kim, M. S., Woo, W. J., Song, H. S., Lee, Y. S. and Lee, J. C., "Characterization of Nanostructure and Electronic Properties of Catalytically Grown Carbon Nanofiber," J. Kor. Ceram. Soc., Vol. 37, No. 4, pp. 345 - 353, 2000.
- Iijima, S., "Helical Microtubules of Graphitic Carbon," Nature, Vol. 354, pp. 56-57, 1991.

4. Yu, H. K., Choi, W. K., Ryu, H. and Lee, B., "Preparation of Carbon Nanomaterials by Thermal CVD and their Hydrogen Storage Properties," J. Kor. Ceram. Soc., Vol. 38, No. 10, pp. 867 - 870, 2001.
5. Kibria, A. K. M. F., Mo, Y. H., Yun, M. H., Kim, M. J. and Nahm, K. S., "Effects of Bimetallic Catalyst Composition and Growth Parameters on the Growth Density and Diameter of Carbon Nanotubes," Kor. J. Chem. Eng., Vol. 18, No. 2, pp. 208 - 214, 2001.
6. Bae, S. G., Lee, S. J., Cho, S. J. and Lee, D. Y., "Growth of Carbon Nanotubes on Different Catalytic Substrates," J. Kor. Ceram. Soc., Vol. 41, No. 3, pp. 247 - 252, 2004.
7. Melechko, A. V., Merkulov, V. I., Mcknight, T. E., Guillorn, M. A., Klein, K. L., Lowndes, D. H. and Simpson, M. L., "Vertically aligned carbon nanofibers and related structures: Controlled synthesis and directed assembly," J. Appl. Phys., Vol. 97, No. 041301, pp. 1 - 39, 2005.
8. Baker, R. T. K., "Catalytic Growth of Carbon Filaments," Carbon, Vol 27, No. 3, pp. 315 - 323, 1989.