

# 열화학기상증착법에 의한 고순도 탄소나노튜브의 성장

## Growth of Highly Purified Carbon Nanotubes by Thermal Chemical Vapor Deposition

柳在銀\* · 朴正訓\*\* · 金大運\*\*\* · 李鐵眞<sup>§</sup> · 孫權熙<sup>§§</sup> · 申東赫<sup>§§§</sup> · 文仁琪<sup>#</sup>  
 (Jae-Eun Yoo · Jung-Hoon Park · Dae-Won Kim · Cheol-Jin Lee · Hee-Kwon Son ·  
 Dong-Hyuk Sin · In-Gi Moon)

**Abstract** - We have grown carbon nanotubes by thermal chemical vapor deposition of C<sub>2</sub>H<sub>2</sub> on catalytic metal deposited on silicon oxide substrates. Highly purified carbon nanotubes are uniformly grown on a large area of the silicon oxide substrates. It is observed that surface modification of catalytic metals deposited on substrates by either etching with dipping in a HF solution and/or NH<sub>3</sub> pretreatment is a crucial step for the nanotube growth prior to the reaction of C<sub>2</sub>H<sub>2</sub> gas. The diameters of carbon nanotubes could be controlled by applying the different catalytic metals.

**Key Words** : 탄소나노튜브, 열화학기상증착법, 촉매금속, 표면처리.

### 1. 서 론

탄소나노튜브는 일본 NEC의 Iijima 박사에 의해 최초로 전기방전법을 이용한 합성의 성공이 보고된 이후로[1], 탄소나노튜브는 전기방전법[2]을 비롯하여 열분해법[3], 플라즈마 화학기상증착법[4], 레이저증착법[5], 열화학기상증착법[6-9] 등의 다양한 방법으로 합성이 연구되어 왔다. 탄소나노튜브에서 하나의 탄소원자는 3개의 다른 탄소원자와 결합되어 있고 육각형 벌집 무늬를 이룬다. 만약 편평한 종이위에 이러한 벌집 무늬를 그린 후 종이를 말면 나노튜브 구조가 된다. 즉 나노튜브 하나는 속이 빈 튜브 혹은 실린더와 같은 모양을 갖고 있다. 이것을 나노튜브라고 부르는 이유는 튜브의 직경이 보통 수 나노미터에서 수백 나노미터 정도로 극히 작기 때문이다. 탄소나노튜브는 그래파이트 면이 말리는 각도에 따라서 금속과 같은 전기적 도체(Armchair 구조)가 되기도 하고 반도체(ZigZag 구조)가 되기도 한다. 또한 그래파이트 면의 개수와 형태에 따라서 단중벽 나노튜브(Singlewalled Nanotube), 다중벽 나노튜브(Multiwalled Nanotube), 다발형 나노튜브(Rope Nanotube)로 구분하기도 한다. 한편 탄소나노튜브가 반도체특성을 나타낸다는 연구 결과 이외에도 탄소나노튜브를 여러 다발로 포개놓으면

도핑된 반도체와 같은 특성을 가진다는 사실이 밝혀졌다 [10].

2000년대 첨단 전자·정보화 시대에는 CRT의 뒤를 이어서 고효율, 고효율, 저소비전력을 장점으로 하는 FED(Field Emission Display)가 차세대 정보디스플레이소자로 크게 주목을 받고 있다. FED의 핵심기술은 FED tip 가공기술과 재료의 안정성에 있는데, 아직까지는 실리콘 팁(Si tip)이나 모리브덴 팁(Mo tip)을 주로 사용해 오고 있지만 안정성에 큰 문제가 있어서 앞으로는 가공하기 쉬우면서도 안정성이 높은 새로운 재료를 개발할 필요가 있다. 최근 탄소나노튜브를 FED tip을 사용하려는 연구가 국내외적으로 활발하게 진행되고 있다. 탄소나노튜브를 2차전지전극 및 연료전지에 응용할 경우에도 많은 기대효과를 얻을 수 있다. 2차전지에서 가장 중요한 문제는 전지의 무게를 줄이는 것과 충전 효율을 높이는 것이다. 현재 사용되고 있는 수소흡장합금 대신 탄소나노튜브를 적용하면 위 두 가지 조건을 모두 만족시킬 수 있어 자동차 배터리, 충전용 건전지, 노트북 컴퓨터 등의 소형 이동형 전자제품에 응용이 기대되므로 산업계에 커다란 파급효과를 가져올 수 있다. 연료전지는 가능한 한 수소저장용량을 증가시켜야 하는데 탄소나노튜브는 무게가 가벼울 뿐만 아니라 튜브 내에 수소를 저장할 수 있는 공간이 많아서 단위 질량당 전하 저장능력이 뛰어나다. 따라서 탄소나노튜브의 빈 공간에 수소를 저장하여 차세대 연료전지로 사용할 경우, 그 응용범위는 자동차를 비롯한 각종 시스템의 에너지분야에 다양하게 적용할 수 있다.[11] 또한 탄소나노튜브의 우수한 전기전도도와 기계적강도를 이용하면 STM이나 AFM의 Tip으로 사용이 가능하고 아울러 나노튜브의 미세크기를 초미세시스템의 미세 연결선, 초미세 파이프, 액체 주입장치 등에 적용이 가능하다. 나아가서는 탄소나노튜브의 가스흡착기능을 이용하는 가스센서의 제작과 탄소와 생체조직과의 친화성을 이용한 각종 의료용 장치의 부

\* 非 會 員 : 漢陽大 金屬材料工學科 · 工博  
 \*\* 準 會 員 : 群山大 電氣工學科 · 碩士  
 \*\*\* 準 會 員 : 群山大 電氣工學  
 § 正 會 員 : 群山大 電氣工學科 副教授 · 工博  
 §§ 準 會 員 : 群山大 電氣工學科 碩士課程  
 §§§ 非 會 員 : 漢陽大 金屬材料工學科 教授 · 工博  
 # 非 會 員 : 韓國科學技術院 責任研究員  
 接受日字 : 2000年 4月 21日  
 最終完了 : 2000年 12月 3日

품으로서의 응용도 기대된다.[12] 그러나 이러한 응용을 위해서는 고순도의 탄소나노튜브를 대량으로 만들 수 있어야 하고, 탄소나노튜브의 길이와 반경을 조절하며, 탄소나노튜브를 자유롭게 조작할 수 있는 기술을 개발해야 한다. 그러나 고순도의 탄소나노튜브를 합성하는 것과 탄소나노튜브의 구조제어는 아직은 연구단계이고 또한 탄소나노튜브의 대량 생산 가능성이 전기방전법[13]과 레이저증착법[5]에 의해서 어느정도 실현되었다고는 하지만 탄소나노튜브의 직경과 길이 그리고 성장 방향의 조절이 아직은 매우 어려운 상태이다. 수직방향으로 정렬된 탄소나노튜브는 다공질 실리카[6]와 다공질 실리콘 기판위에 Fe 금속을 패터닝한 기판[14]을 열화학기상증착법으로 합성에 성공한 연구 결과가 보고되었다. 그러나 이러한 경우 응용을 위한 방법으로는 시료의 처리조건이 너무 복잡하고 더욱이 다공질 물질에서는 구멍의 직경이 일정하지 않아 편평한 실리콘 기판위에서의 합성에 비해 성장된 탄소나노튜브의 직경조절에는 불리하다. 본 연구에서는 대기압 상태에서의 열화학기상증착법을 이용하여 비교적 대면적의 편평한 실리콘 기판위에서 균일한 직경과 높은 밀도를 가지며 탄소파티클이 적은 탄소나노튜브 합성에 대하여 고찰하고자 한다.

### 2. 실험

비저항이 10~20Ω cm인 P-type[100]의 실리콘 기판위에 두께가 300nm의 열산화막을 성장시켰다. 그리고 진공증착기를 사용하여 실리콘 산화막위에 상온에서 코발트 또는 니켈을 진공도 10<sup>-6</sup> torr 이하에서 두께 약 100~300 nm로 금속막을 증착시켰다. 그리고 나서 촉매금속막이 증착된 시료들은 산화막과 금속막간의 접속력을 증대시키기 위해 확산로에서 약 400℃의 온도에서 20분 동안 아르곤 분위기에서 열처리를 실시하였다. 열처리 된 시료들은 희석된 HF용액에서 100~400 sec 동안 촉매금속막을 식각시킨 후 석영보트에 장착을 하고나서 석영보트를 CVD의 반응로 내부로 집어 넣었다. 그리고 나서 CVD의 반응로는 850~900℃의 온도까지 가열된다. 상온에서 설정온도까지 도달하는 동안 반응로 내부에서 촉매금속막의 산화를 막기 위해서 아르곤 가스를 흘려주었고 반응온도에 도달한 후에 아르곤 가스는 잠그고 아세틸렌 가스를 반응로 내부로 흘려주어 탄소나노튜브를 성장시킨 후, 반응로의 온도가 상온에 도달 할 때까지 다시 아르곤 가스를 흘려주었다.

### 3. 결과 및 고찰

그림 1(a)는 실리콘 산화막위에 코발트 금속막이 증착된 시료를 HF용액에 300sec 동안 표면을 식각한 후 탄소나노튜브를 성장한 시료의 전자현미경 사진이다. 이 시료는 900℃에서 아세틸렌 가스를 20분 동안 15sccm을 흘려주면서 탄소나노튜브를 성장시켰다. 성장된 탄소나노튜브는 기판전면에 걸쳐 균일하게 성장되었고 매우 높은 밀도를 보이고 있다. 또한 기판 전면에 어떠한 탄소파티클도 관찰되지 않았고 성장된 나노튜브들은 서로 뒤섞여 표면에 누워있으며 나노튜브의 끝부분은 막혀있다. 그림 1(b)는 HF 용액에 250sec 동안 식각한 후 탄소나노튜브를 성장시킨 나노튜브

의 사진이다. 300sec 동안 HF dipping을 한 경우와 비슷한 밀도의 탄소나노튜브가 성장되었다. HF용액에서 200sec 동안 금속표면을 식각한 후 나노튜브를 성장시킨 시료의 경우에는 그림 1(c)에 보이는 것처럼 코발트막 위에는 나노튜브가 전혀 성장되지 않았고 탄소파티클들이 기판전면에 걸쳐 분포되어있는 상태이다. 촉매금속막을 HF용액에서 250~300sec 동안 표면처리를 할 경우 나노튜브가 기판전면에 걸쳐 고밀도로 균일하게 성장되었지만 400sec 동안 표면처리를 할 경우 촉매금속막이 모두 식각되어서 나노튜브가 성장되지 않았다. HF용액 속에서 촉매금속막을 표면처리하는 시간이 촉매금속막의 두께와 밀접한 관계가 있음을 알 수 있다. 그러나 200sec 동안 HF dipping 후, 암모니아 가스를 850℃에서 10분 동안 300sccm을 흘려주면서 표면처리를 한 경우 그림 1(d)에서 보듯이 밀도가 현저히 감소한 상태지만 탄소나노튜브가 성장되었다.

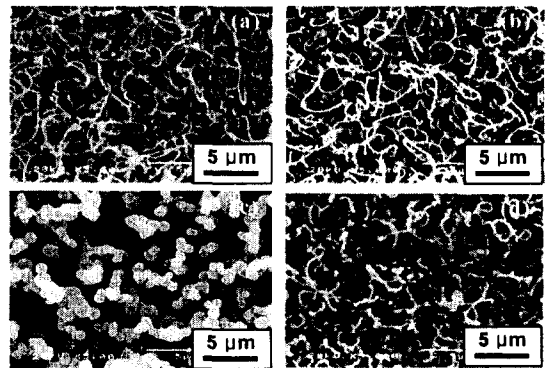


그림.1 표면처리조건에 따른 Co가 증착된 실리콘산화막 기판위에서 성장된 탄소나노튜브의 SEM 사진.

(a) HF 용액에 300초 동안 식각처리함. (b) HF 용액에 250초 동안 식각처리함. (c) HF 용액에 200초 동안 식각처리함. HF 처리시간이 짧을수록 탄소나노튜브가 성장되지 않고 대신에 탄소파티클들이 생성되었다. (d) HF 용액에 200초 동안 처리 후 이어서 암모니아 가스에서 식각처리함.

Fig.1 SEM images of carbon nanotubes on Co-coated silicon oxide substrates with the surface treated for : (a) 300sec HF dipping and (b) 250sec HF dipping and (c) 200sec HF dipping. No carbon nanotubes were grown for the shorter dipping time but instead carbonaceous particles were deposited. (d) 200sec HF dipping and NH<sub>3</sub> pretreatment at 850℃ for 10 min

그림 2는 탄소나노튜브의 성장에 대한 촉매금속의 역할을 평가하기 위하여 실리콘 산화막 기판위에 코발트를 증착시킨 후, Co/SiO<sub>2</sub> 기판 위에 니켈을 증착시켰다. 이 경우 코발

트막은 실리콘산화막과 니켈막의 접착력을 증가시키기 위한 접착층으로 사용되었다. HF 용액에서 200sec 동안 식각처리를 한 후, 850°C에서 10분 동안 300sccm의 암모니아가스를 흘려 표면처리를 실시하였다. 이어서 탄소나노튜브 성장을 위해서 850°C를 유지하면서 나노튜브성장을 위해 아세틸렌 가스를 10분동안 40sccm 흘려주었다. 그림에서 보이는 것처럼 탄소나노튜브의 밀도는 많이 감소했지만 역시 기판전면에 걸쳐 탄소나노튜브가 성장했음을 알 수 있다. 직경은 약 100nm로 촉매금속이 코발트일때의 200nm에 비해 절반수준으로 작아졌음을 알 수 있다. 또한 부분적으로 탄소파티클이 존재하는 것을 관찰할 수 있었다.

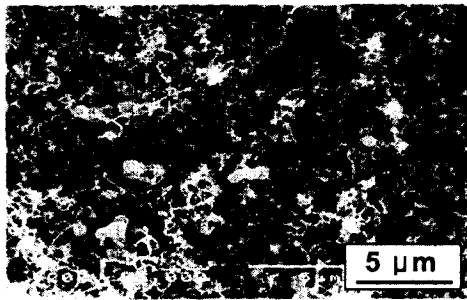


그림 2 Ni이 증착된 Co/SiO<sub>2</sub> 기판에서 성장된 탄소나노튜브의 SEM 사진.

Fig.2 SEM image of nanotubes grown on a Ni/Co-coated silicon oxide substrate.

그림 3은 실리콘산화막 기판위에 증착시킨 코발트막을 HF로 식각처리한 후의 표면상태(surface morphology)를 전자현미경으로 관찰한 사진이다. 그림 3(a)는 HF용액에서 200sec동안 코발트 표면을 식각한 시료인데, 식각이 진행되어 촉매금속막이 미세한 입자형태로 변화된 것을 나타내고 있다. 표면의 거칠기가 증가했음을 알 수 있다. 그림 3(b)는 HF용액에 300sec 동안 식각한 시료의 표면사진이다. 이 시료는 200sec에 비해 식각이 더 많이 되면서 촉매금속 입자의 크기가 감소한 것을 알 수 있고 마치 표면에 microcrack이 형성된 것을 보여주고 있다. 그러나 HF dipping 시간이 400sec 일 경우는 전이금속이 완전히 식각되었다. 그림 3(c)는 HF 용액에 200sec 동안 식각처리 후 850°C에서 암모니아 가스로 식각처리를 실시한 시료의 표면사진이다. HF 용액에서 200초 동안 식각처리를 실시한 조건에 비해서 촉매금속 입자의 크기가 감소하고 밀도도 줄어든 것을 알 수 있다. 이러한 결과를 토대로 하여 탄소나노튜브의 성장이 촉매금속막의 표면상태에 따라 결정적인 영향을 받음을 알 수 있다.

그림 4는 성장된 탄소나노튜브의 투과전자현미경의 사진이다. 그림 4(a)는 직경이 다른 여러 가지의 탄소나노튜브를 보여주고 있으며 성장된 탄소나노튜브의 내부는 비어있는 것을 보여주고 있다. 또한 성장된 탄소나노튜브의 직경이 서로 다름을 보여주고 있다. 그림 4(b)는 탄소나노튜브의 확대시킨 TEM 사진으로써, 성장된 탄소나노튜브의 내부가 마치 대나무 마디처럼 구분된 형태의 대나무 구조(bamboo structure)이고 각각의 마디 간극과 형태가 유사한 경향을 보이고 있다. 그림 4(c)는 고배율 TEM 사진인데, 탄소나노튜브가 그래파이트 면이 여러겹으로 말려있는 다중벽 구조임을 알 수 있고, 각각의 그래파이트 면의 간극은 약 0.34nm이며 내부의 홀 직경이 약 40nm인 것을 알 수 있다. 역시 그림 4(c)에서도 대나무구조의 형성을 자세히 보여주고 있다. 탄소나노튜브를 구성하는 그래파이트 면의 결정구조는 양호한 것으로 나타나지만 탄소나노튜브의 외벽에는 약간 결정성이 나쁜 그래파이트 면이 존재하는 것을 알 수 있다.

structure)이고 각각의 마디 간극과 형태가 유사한 경향을 보이고 있다. 그림 4(c)는 고배율 TEM 사진인데, 탄소나노튜브가 그래파이트 면이 여러겹으로 말려있는 다중벽 구조임을 알 수 있고, 각각의 그래파이트 면의 간극은 약 0.34nm이며 내부의 홀 직경이 약 40nm인 것을 알 수 있다. 역시 그림 4(c)에서도 대나무구조의 형성을 자세히 보여주고 있다. 탄소나노튜브를 구성하는 그래파이트 면의 결정구조는 양호한 것으로 나타나지만 탄소나노튜브의 외벽에는 약간 결정성이 나쁜 그래파이트 면이 존재하는 것을 알 수 있다.

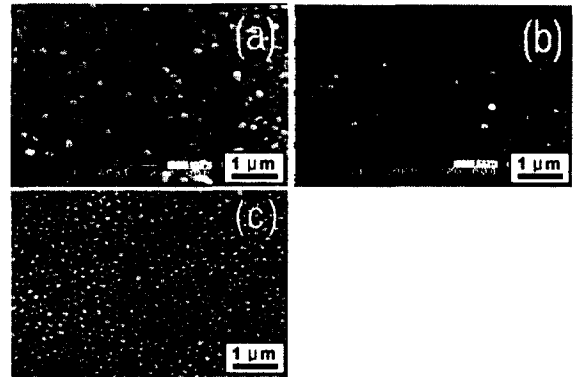


그림 3 실리콘산화막 기판에 증착된 코발트막의 표면형상 사진.

(a) 200초 HF dipping, (b) 300초 HF dipping, (c) 200초 HF dipping 과 850°C에서 NH<sub>3</sub> 식각처리

Fig.3 The surface morphologies of Co metal layers coated on silicon oxide substrate, treated for (a) 200 sec HF dipping and (b) 300 sec HF dipping and (c) treated 200sec HF dipping and NH<sub>3</sub> pretreatment at 850°C for 10min

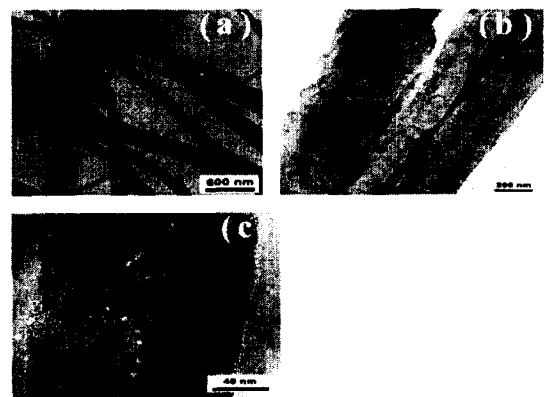


그림 4 실리콘산화막 기판위의 Co에서 합성된 탄소나노튜브의 TEM 사진.

Fig.4 TEM images of carbon nanotubes grown on Co-coated silicon oxide substrates.

그림 5는 여러 가지 방법으로 성장된 탄소나노튜브의 라만 스펙트럼을 보여주고 있다.

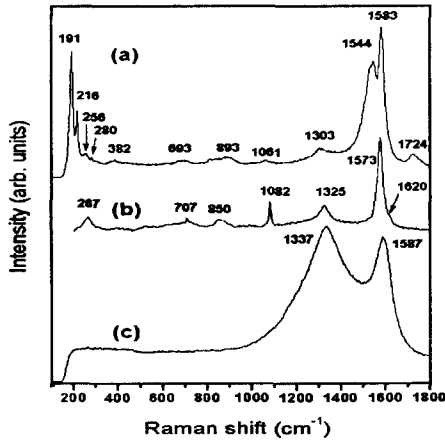


그림 5 탄소나노튜브의 라만 스펙트럼.

- (a) 전기방전법으로 Ni-Fe 촉매금속을 사용하여 합성시킨 단중벽 탄소나노튜브.
- (b) 전기방전법으로 합성시킨 다중벽 탄소나노튜브.
- (c) 열화학기상증착법으로 성장시킨 다중벽 탄소나노튜브.

Fig.5 Raman spectra of carbon nanotubes.

- (a) Singlewall nanotubes catalytically synthesized with a Ni-Fe mixture by arc discharge.
- (b) Multiwalled nanotubes synthesized by arc discharge.
- (c) Carbon nanotubes grown by thermal CVD.

본 연구에서는 632.8 nm 파장을 갖는 He-Ne 레이저를 장착한 Micro-Raman spectroscopy를 사용하였다. 라만분석에 사용한 단중벽 탄소나노튜브는 전기방전법으로 합성하였으며, 고분해능 전자현미경의 분석에 의하면 단중벽 탄소나노튜브의 직경은 10 nm이었다. 그림 5(a)는 전기방전법으로 합성한 단중벽 탄소나노튜브에 대한 라만 스펙트럼을 보여주고 있다. 그림 5(a)에 의하면 1583 cm<sup>-1</sup>에 있는 graphitic sheet의 특성을 나타내는 G-line이 분명하게 보여지고 있다.[15] G-line 이외에도 1544 cm<sup>-1</sup>에 있는 피크는 서로 다른 직경을 갖는 단중벽 탄소나노튜브의 존재를 알려주고 있고 191 cm<sup>-1</sup>와 216 cm<sup>-1</sup>에 뚜렷하게 나타나는 저 에너지 피크는 radial 방향을 따라서 진동하고 있는 탄소나노튜브의 breathing mode를 나타내고 있다.[16] 1724 cm<sup>-1</sup>에 있는 피크는 breathing mode(190.5 cm<sup>-1</sup>)와 G-line의 피크의 상호작용에 의한 2차 Raman scattering에 기인한다. 이러한 2차 피크의 존재는 성장된 탄소나노튜브가 단중구조임을 나타낸다. 1303 cm<sup>-1</sup>에 있는 D-line 피크는 주로 그래파이트구조의 결함이나 탄소파티클에 의해 나타나는 것으로 고려된다.[17] 그림 5(b)는 전기방전법에 의해 합성한 다중벽 탄소나노튜브의 라만 스펙트럼을 보여주고 있다. 이 경우 탄소나노튜브의 직경은 약 100 nm 이었다. 1620 cm<sup>-1</sup>에 있는 작은 피크를 포함하는 1544 cm<sup>-1</sup>에 있는 또렷한 G-line은 분석에 사용한 시료가 다중벽 탄소나노튜브인 것을 나타낸다.

한편, 이 경우에는 breathing mode를 나타내는 200cm<sup>-1</sup>근처의 피크가 나타나지 않고 또한1720 cm<sup>-1</sup>근처에 있는 어떠한 2차 피크도 관찰되지 않는데, 이것은 다중벽 탄소나노튜브의 존재를 잘 확인시켜준다. 그림 5(c)는 열화학기상증착법으로 성장된 탄소나노튜브의 Raman spectrum을 나타내고 있다. 그림 5(c)에서는 1587 cm<sup>-1</sup>에서 G-line 피크가 분명하게 나타나지만 1720 cm<sup>-1</sup>근처에는 어떠한 2차 피크도 관찰되지 않는다. 1337 cm<sup>-1</sup>근처에 있는 D-line 피크가 broad하게 나타나는 이유는 상대적으로 열화학기상증착법에 의해 성장되는 탄소나노튜브가 탄소파티클이 없이 깨끗하고 직경과 길이도 균일하게 성장되지만 낮은 성장온도에 기인하여 탄소나노튜브의 외벽에 결함이 있는 그래파이트구조가 존재하는 것을 의미한다. 이러한 특성은 고배율 TEM 분석에서 나타난 결과와 잘 일치한다. 낮은 에너지영역에서는 어떠한 피크도 관찰되지 않는데, 이러한 결과는 열화학기상증착법에 의해 성장된 탄소나노튜브가 다중벽 구조인 것을 의미한다.

### 3. 결 론

대면적인 실리콘산화막 기판위에 열화학기상증착법을 이용하여 탄소나노튜브를 기판전면에 걸쳐 균일하게 성장시켰다. 성장된 탄소나노튜브는 탄소파티클이 없는 깨끗한 상태였으며 TEM 과 Raman spectrum분석을 통하여 탄소나노튜브의 구조가 다중벽이고 Bamboo 구조인 것을 알 수 있었다. 탄소나노튜브의 직경은 촉매금속의 종류에 의해서 변화시킬 수 있고, 고품질의 탄소나노튜브 성장을 위해서는 HF dipping과 암모니아 전처리 과정을 통한 촉매금속막의 표면 상태 조절이 매우 중요한 과정임을 알 수 있었다. 이러한 열화학기상증착법을 사용하면 탄소나노튜브의 성장온도 및 고품질의 성장이 가능하므로, 앞으로 여러 종류의 평판 디스플레이, 2차전지, 연료전지, 생체재료, 복합체 등의 응용분야에서 유리할 것으로 생각되어진다.

### 참 고 문 헌

- [1] S. Iijima, Nature 354, 56 (1991).
- [2] D. S. Bethune, C. H. Kiang, M. S. deVries, G. Gorman, R. Savoy, J. Vazquez, and R. Beyers, Nature (London) 363, 605 (1993).
- [3] M. Terrines, N. Grobert, J. Olivares, J. P. Zhang, H. Terrones, K. Kordatos, W. K. Hsu, J. P. Hare, P. D. Townsend, K. Prassides, A. K. Cheetham, H. W. Kroto, and D. R. M. Walton, Nature 388, 52 (1997).
- [4] Z. F. Ren, Z. P. Huang, J. W. Xu, J. H. Wang, P. Bush, M. P. Siegal, P. N. Provencio, Science 282, 1105 (1998).
- [5] A. Thess, R. Lee, P. Nikolaev, H. Dai, P. Petit, J. Robert, C. Xu, Y. H. Lee, S. G. Kim, D. T. Colbert, G. Scuseria, D. Tomanek, J. E. Fisher, and R. E. Smalley, Science, 273, 483 (1996).
- [6] W. Z. Li, S. S. Xie, L. X. Qain, B. H. Chang, B. S. Zou, W. Y. Zhou, R. A. Zhao, and G. Wang, Science 274, 1701 (1999).

- [7] C. J. Lee, D. W. Kim, T. J. Lee, Y. C. Choi, Y. S. Park, W. S. Kim, W. B. Choi, N. S. Lee, J. M. Kim, Y. G. Choi, S. C. Yu, and Y. H. Lee, Appl. Phys. Lett., 75, 1721 (1999)
- [8] C. J. Lee, J. Park, S. Y. Kang, and J. H. Lee, Chem. Phys. Lett., 323, 554 (2000)
- [9] C. J. Lee, J. H. Park, and J. Park, Chem. Phys. Lett., 323, 560 (2000)
- [10] Jisoon. Ihm Hyoung Joon Chol, Nature 391, 466(1998)
- [11] M. M. J. Treacy, T. W. Ebbensen, and J. M. Gibson, Nature 381, 678 (1996).
- [12] W. A. de Heer, A. Chatelain, and D. Ugarte, Science 270, 1179 (1995).
- [13] C. Journet, W. K. Maser, P. Bernier, A. Loiseau, M. Lamy de la Chapelle, S. Lefrant, P. Deniard, R. Lee, and J. E. Fischer, Nature (London) 388, 756 (1997).
- [14] S. Fan, M. G. Chapline, N. R. Franklin, T. W. Tombler, A. M. Casell, and H. Dai, Science 283, 512-514 (1999). Science 283, 512 (1999).
- [15] P. C. Eklund, J. M. Holden, and R. A. Jishi, Carbon 33, 959 (1995).
- [16] A. M. Rao, E. Richter, Shunji Bandow, Bruce Chase, P. C. Eklund, K. A. Williams, S. Fang, K. R. subbaswamy, M. Menon, A. Thess, R. E. Smalley, G. Dresselhaus, and M. S. Dresselhaus, Science 275, 187 (1997).
- [17] Y. Kawashima and G. Katagiri, Phys. Rev. B59, 62 (1999).

저 자 소 개



유재은 (柳在銀)

1963년 6월 4일생. 1987년 한양대 금속재료공학과 졸업. 1990년 한양대 금속재료공학과 졸업(석사) KIST 금속부 근무 (1990-1992) 일진그룹 신규사업팀 근무 (1992-2000) 1999년 한양대 금속재료공학과 졸업(공학) 현재 일진그룹 나노기술연구소 소장



박정훈 (朴正訓)

1973년 9월 11일생. 1998년 군산대학교 전기공학과 졸업. 1999년 동 대학원 전기공학과 (석사). 현 일진 나노텍(주) 연구원



이철진 (李鐵眞)

1982년 2월 고려대학교 공과대학 전기공학과 졸업. 1984년 2월 고려대학교 대학원 전기공학과 전자재료 및 반도체 전공 (석사) 1993년 2월 고려대학교 대학원 전기공학과 전자재료 및 반도체 전공 (박사)

1983년 12월~1991년 9월 삼성전자(주) 반도체연구소 선임연구원 (Thin Film Division Leader for 64K-DRAM, 256K-DRAM, 1M-DRAM, 4M-DRAM, 16M-DRAM Development project) 1996년 8월~1997년 7월 일본 동북대학 개원연구원 (SiGe Epitaxial Growth) 1993년 9월~현재 군산대학교 공과대학 전자정보공학부 부교수



김대운 (金大運)

1974년 5월 20일 생. 1993군산대학교 전기공학과 입학. 1999년 군산대학교 전기공학과 졸업. 현 일진 나노텍(주) 근무



손권희 (孫權熙)

1973년 12월 28일생. 1999년 군산대 공과대학 전기공학과 졸업. 현재 동 대학원 석사과정.



신동혁 (申東赫)

1954년생 1976년 서울대학교 공학사. 1979년 한국과학기술원 (석사). 1982년 한국과학기술원 (공학). 현재 한양대학교 금속재료공학과 교수

문인기 (文仁琪)

1938년생. 1961년 2월 서울대학교 금속공학과 졸업. 1982년 2월 연세대학교 대학원 금속공학과 졸업(공학) 현 한국과학기술연구원 책임연구원