

Thema

# | 탄소나노튜브의 합성기술 동향 및 전망

곽정춘 박사과정  
(세종대 나노신소재공학부)

이내성 교수  
(세종대 나노신소재공학부)

## 1. 서론

탄소에는 일반적으로 두 개의 결정형, 즉 다이아몬드(Diamond)와 흑연(Graphite)이 존재하는 것으로 널리 알려져 있다[1]. 다이아몬드는 탄소 간의  $sp^3$  혼성에 의한 공유결합(C-C, 0.154 nm)으로 사면체의 구조를 가지며 다이아몬드 입방정(Diamond Cubic)의 단위격자를 형성한다. 흑연은 탄소 원자들이  $sp^2$  혼성결합(C=C, 0.142 nm)으로 평면상 육각형의 벌집구조(Hexagonal Honeycomb)를 구성하는 그래핀(Graphene) 층들이 적층된 구조를 가지고 있으며, 그래핀 층의 탄소는 강한 공유결합(C=C, 0.142 nm)을 하고 있는 반면 층과 층은 약한 반데르발스(van der Waals) 결합에 의해 일정한 간격(0.335 nm)을 유지하고 있다 (그림 1).

1985년 Kroto[2] 등은 풀러렌(Fullerene)이라 불리는 탄소의 세 번째 동소체인 결정형의 새로운 탄소 물질을 발견하였다. 풀러렌은 축구공과 같이 탄소원자들이 구형으로 둘러싸여 배열된 새장구조를 갖는다. 기존의 두 결정형 탄소들과는 달리 유한한 개수의 탄소 분자들로 이루어진 집합체이며, 대표적인 예인  $C_{60}$ 와 같이 대개 분자식으로 표현된다.  $C_{60}$ 의 탄소들은  $sp^2$  혼성으로 원자간 결합을 하고 있으며, 60개의 탄소원자로 구성되고, 20개의 육각형과 12개의 인접하지 않는 오각형으로 이루어졌으며, 완전한 대칭성을 가진다. 풀러렌은 육각형에 둘러싸인 오각형이 존재함으로써 닫힌 새장구조의 구형을 형성할 수 있게 된다. 소량씩 합성되던 풀러렌은 1990년 Kratschmer 등이 흑연 전극의 아크방전(Arc Discharge)을 이용하여 다른 구조의 풀러렌을 포함하고 있는  $C_{60}$ 를 다량으로 합성하면서 본격적인 연구가 시작되었다[3].

탄소나노튜브(Carbon Nanotube, CNT)는 1991년 Iijima[4]가 아크방전으로 풀러렌 수트(Soot)를 합성하던 중, 흑연 전극 표면에 생성된 물질을 관찰하

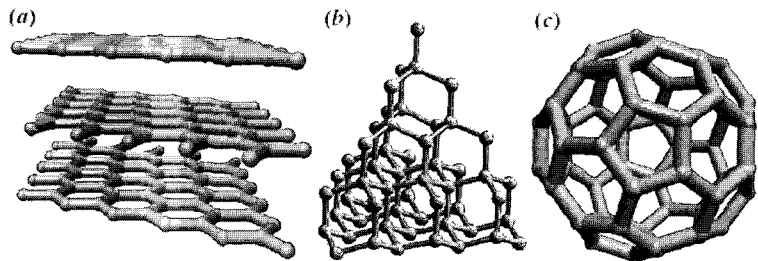


그림 1. Crystal structures of (a) graphite, (b) diamond, and (c)  $C_{60}$  buckminsterfullerene(1).

면서 발견되었다(그림 2). CNT는  $sp^2$  결합을 하는 그래핀 층이 원통형으로 말린 구조를 가지고 있으며, 끝부분은 플러렌의 반구 형태로 닫혀있는 모양을 하고 있다. CNT는 대개 1 nm에서 수십 nm의 직경을 갖고 있으며, 중심 축을 기준하여 벽이 하나이면 단일벽(Single-walled, SWCNT), 대략 0.34 nm의 층간 간격을 유지하고 있는 벽이 두 개이면 이중벽(Double-walled, DWCNT), 벽이 세 개 이상은 다중벽(Multi-walled, MWCNT)으로 분류된다.

SWCNT는 평면 육각형 벌집구조의 그래핀 층에서 원점에 있는 탄소원자와 임의의 위치에 있는 탄소원자를 같은 점에 오도록 원통형으로 말아 연결하여 만들어질 수 있다. 이 때 그래핀 층에서 원점의 탄소원자와 연결된 탄소원자의 위치는 원점에 대해 단순 단위포의 기본벡터  $a_1, a_2$ 의 정수배인  $na_1, ma_2$ 로 표현될 수 있으며, 이를 간단하게  $(n,m)$ 으로 나타낸다. 이 두 개의 지표인  $n$ 과  $m$ 으로 키랄성(Chirality)과 비 키랄성을 갖는 SWCNT를 정의할 수 있다(그림 3). 여기서 두 가지의

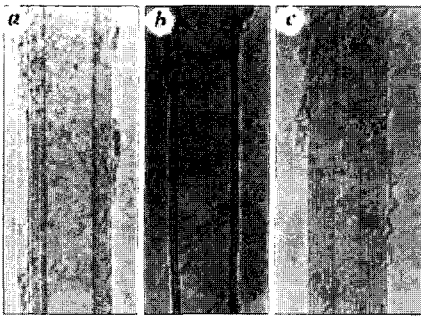


그림 2. TEM images of CNTs with (a) five graphitic walls, (b) two graphitic walls, and (c) seven graphitic walls(4).

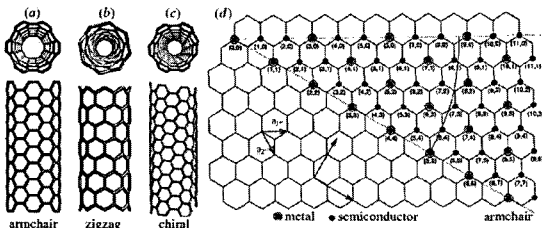


그림 3. Conformation of SWCNTs exhibiting different chiralities : (a) armchair, (b) zigzag, and (c) chiral nanotubes, (d) Indexed graphene sheet(1).

비 키랄성 SWCNT가 존재하는데  $n=m$ , 즉  $(n,n)$ 이면 암체어(Armchair)형이고  $m=0$ , 즉  $(n,0)$ 이면 지그재그(Zigzag)형으로 분류된다. 그리고  $n$ 과  $m$ 이 다르면 키랄성이 된다. 모든 암체어 튜브는 전기적으로 금속성(Metallic)이고,  $n-m$ 이 3의 정수배가 아니면 반도체성(Semiconducting), 3의 정수배일 경우 금속성을 띤다. 이와 같이 SWCNT의 전기적 특성은 직경과 키랄성에 따라 달라지게 된다.

CNT는 nm의 직경과 긴 길이에 의한 큰 종횡비(High Aspect Ratio)와 비표면적을 가지며, 독특한 구조에서 비롯된 대칭성과 비 대칭성으로 금속성과 반도체성을 가진다. 이외에도 화학적 또는 열적으로 안정하며, 우수한 기계적 성질을 가지고 있다. 이와 같이 CNT가 가지고 있는 여러 가지 특성을 이용하여 다양한 분야에 CNT를 응용하려는 연구가 진행 중이다. Heer 등[5] CNT의 큰 종횡비와 nm의 직경을 이용하여 전기장(Electric Field) 하에서 전자를 방출할 수 있는 소자를 처음으로 제안하였으며, 현재 국내외의 산업체에서 CNT를 이용한 Field Emission Display나 TFT-LCD용 백라이트(Backlight)가 활발히 개발이 되고 있다. 또한 CNT는 우수한 기계적인 물성으로 고분자 복합재[6-8]의 강화 재료에 사용될 수 있으며, 소량의 첨가로 고분자의 강도를 향상시키고, 정전기 차폐, 그리고 전기 전도성을 부여할 수 있다. 세라믹과 금속에 CNT를 첨가하여 기존의 재료들이 가지는 단점을 극복하는 연구도 진행되고 있다. 높은 전기 전도도와 화학적인 안정성을 가지고 있어 전기화학 반응을 일으키는 전극 또는 그에 해당하는 분야, 즉 이차전지의 음극과 연료전지의 촉매 지지 멤브레인 재료, 커패시터, 화학센서, 내부가 비어

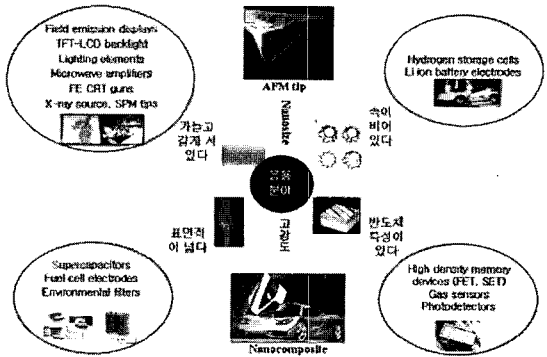


그림 4. Various applications of CNTs.

있어 수소저장재료 등 광범위한 분야에 응용될 것으로 기대된다[9-11](그림 4).

위에 언급한 여러 분야에서 CNT를 실용화시키기 위한 첫 번째 과정으로 고 순도를 갖는 CNT를 대량으로 합성해야 하는 것이 필수적이다. CNT를 발견한 후 여러 가지 합성법들이 개발되었으며, 대표적인 예로 전기 방전법(Electric Arc Discharge), 레이저 증발법(Laser Evaporation), 화학기상 증착법 등을 들 수 있다. 본 논문에서는 지금까지 개발된 CNT의 여러 합성 방법들에 대한 원리와 특징들을 소개하고자 한다.

## 2. CNT 대량합성 기술

### 2.1 전기 방전법

1992년 Ebbesen과 Ajayan은 Kratschmer가 풀러렌을 합성하기 위해 사용하는 전기 방전법으로 CNT를 대량으로 합성하였다[12, 13](그림 5). 전기 방전법에서는 불활성 기체인 아르곤이나 헬륨 분위기 하에서 두 개의 흑연 전극 사이에 아크를 발생시켜서 Soot형태의 CNT를 합성한다. 흑연 전극 사이에 전류를 흘려주면 고온(~3000 °C)의 플라즈마가 발생하며 탄소 원자들이 증발되고, 그 후 고온의 탄소원자 증기가 냉각에 의해 낮은 온도로 유지되고 있는 음극이나 챔버 벽 등에 증착하게 된다[14, 15]. 합성된 CNT의 수율은 전극 사이의 플라즈마 안정성, 전류밀도, 기체압력, 전극과 챔버의 냉각 속도 등에 따라 결정된다. 수백 torr의 압력으로 유지되고 있는 아르곤이나 헬륨 분위기에서 두 흑연 전극 사이의 거리는 1 mm일 때, 전압이 20~40 V, 전류가 50~100 A 정도의 조건에서 전기방전이 잘 일어난다.

전기 방전법은 간단하고 고 품질의 CNT를 합성할

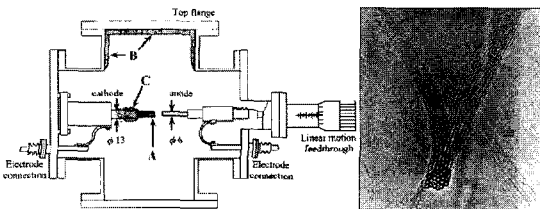


그림 5. Schematic of an electric arc discharge apparatus and TEM image of bundled SWCNTs synthesized by the electric arc discharge. Scale bar, 4nm(13, 25).

수 있는 방법이지만, 공정이 연속적이지 않고 불안정하며 대량의 CNT를 합성하기가 어렵다. 이는 생성된 Soot가 음극 부분에 누적되고 전극의 간격을 일정하게 유지하기 어려워 전류의 흐름이 고르지 못하여 전계가 불균일하게 되기 때문이다[16]. 결과적으로 증발된 탄소의 밀도와 온도의 분포가 달라져서 불순물 탄소 입자들이 CNT와 함께 합성된다. Lee 등은 이러한 문제를 개선하기 위하여 PREP(Plasma Rotating Electrode Process) 방식을 제안하였다[17](그림 6). 이 방식에서 흑연 음극이 고속으로 회전하여 마이크로 영역에서 균일한 방전을 일으킴으로써 플라즈마를 안정화시키게 된다. 플라즈마로 증발된 고밀도의 탄소 증기는 회전하는 전극의 원심력에 의해 고속으로 플라즈마 영역을 벗어나 음극에 수직한 컬렉터에 모이게 된다. 또한 이 방법은 연속 공정이 가능하여 CNT를 대량생산하는데 적합하다 하겠다.

Ishigami 등은 간단하고 연속적인 공정으로 DWCNT를 합성하는 방법을 제안하였다[18](그림 7). 이 방법은 일반적인 전기 방전법에서 필요한 수냉식 챔

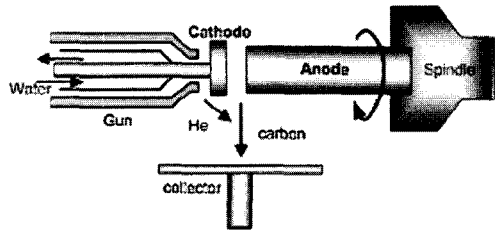


그림 6. Schematic of a plasma rotating electrode process system for electric arc discharge(17).

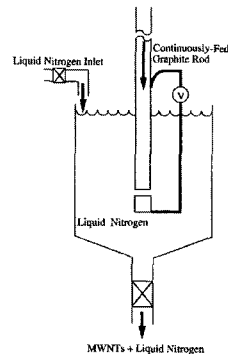


그림 7. Schematic of a liquid nitrogen reaction chamber for the continuous production of CNTs by the electric arc discharge(18).

버, 진공 장치, 가스 주입 장치 등 복잡하고 비용이 많이 드는 장치가 없이 오직 DC 전원장치, 흑연전극, 액체질소 용기만을 이용하였다. 특히 액체질소 안에 담겨 있는 흑연 전극 사이에서 발생한 플라즈마는 매우 안정하고 산소가 없는 분위기를 제공하며 플라즈마에 의해 발생하는 온도의 변화를 줄이는 장점을 가지고 있다.

SWCNT의 합성은 Iijima와 Ichihashi에 의해 처음으로 보고되었다[19]. 이들은 메탄과 아르곤 분위기에서 촉매로 철을 포함한 흑연 전극을 방전시켜 SWCNT를 합성하였으며, 이 때 흑연 양극 부분에 구멍을 내어 흑연과 촉매금속이 혼합된 재료를 채워 주고 음극은 고순도의 흑연을 사용하였다. CNT의 수율을 높이는 방법으로 합성에 사용되는 촉매를 Fe, Ni, Co 같은 전이금속 [19, 20] 외에 Y, Gd과 같은 희토류 금속류[21, 22], 또는 Fe/Ni, Co/Ni과 같이 공촉매[23] 들을 이용하거나 촉진제를 첨가한다. Park 등은 직류 전기 방전법으로 저압(100 torr)의 헬륨 분위기에서 소량의 Ni, Fe와 흑연을 사용하고, 촉진제로 황을 첨가하여 고 수율의 SWCNT를 합성하였다[24]. Journet 등은 Ni과 Y 촉매를 사용하여 고 수율의 CNT를 얻었고, 이 방법은 현재 가장 널리 적용되는 방법 중에 하나가 되었다[25].

한편 고 수율로 CNT를 얻는 것과 동시에, 생산량을 증가시키기 위한 연구도 진행되었다. Liu 등은 수소와 아르곤 분위기에서 준 연속식 전기 방전법으로 큰 다발을 형성하며 배열되는 SWCNT를 합성하였다[26](그림 8). 이 방법으로 합성된 SWCNT 로프는 100 mm 길이를 가지며 약 5 분 동안 방전하여 대략 30 mg의 생성물을 얻을 수 있으며 30 % 정도가 SWCNT이었다. Ando 등은 직류 APJ(Arc Jet Plasma) 방식을 개발했는데[27], 이 방식에서 증발된 탄소가 양극 부분에 축적되는 양을

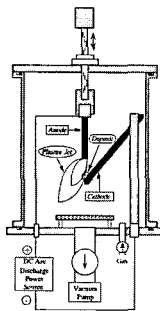


그림 8. Schematic of a DC arc plasma jet (APJ) apparatus(26).

20 % 이하로 줄일 수 있었고, 분당 1.24 g의 CNT 다발을 고 수율로 얻을 수 있었으며, 그 순도는 대략 50 % 이상에 해당된다고 보고하였다.

전기 방전법은 고 품질의 CNT를 생산할 수 있지만 고순도의 흑연 전극, 금속분말, 고순도의 He, Ar 기체를 사용하여 생산 비용이 비교적 높으며, CNT 이외에 비정질 탄소, 촉매금속 입자, 흑연 입자 등의 불순물을 함께 생성시킨다. 전기 방전법으로 합성한 CNT의 응용에 따라 이러한 불순물들을 화학적, 물리적 방법으로 제거하는 정제과정을 거치기도 한다.

## 2.2 레이저 증발법

레이저 증발법은 고온 및 불활성 가스 분위기에서 고순도의 흑연 타깃에 Nd:YAG 레이저를 조사하고 증발시켜서 CNT를 합성하는 방법으로 전기 방전법과 기본적으로 유사한 개념을 가지고 있다[28](그림 9). Guo 등은 처음으로 레이저 증발법에 의한 MWCNT의 합성을 보고하였다[29]. 1200 ℃에서 높은 수율을 갖는 고품질의 MWCNT를 얻을 수 있었으나, 온도가 감소하면 CNT에 결함(Defect)이 발생하여 품질이 저하되었다. 이 때 흑연 타깃에 소량의 전이금속을 첨가하면 SWCNT가 합성된다[30]. 흑연 타깃에서 증발된 탄소 증기의 50 % 정도가 SWCNT로 전환되며 사용된 촉매 금속에 따라서 수율이 달라진다. 단일 촉매일 때는 Ni, Co, Pt, Cu, Nb 순으로, 공촉매 일 때는 Co/Ni, Co/Pt, Ni/Pt, Co/Cu의 순으로 수율이 떨어졌다.

1996년 DPLV법(Dual Pulsed Laser Vaporization)이 개발되어 레이저 증발법을 최적화하면서 SWCNT의 수율을 70 %까지 끌어 올렸다[31]. 합성 조건은 기존의 것과 유사하였으나, 진공 하의 1000 ℃에서 열처리하여 플러렌과 같은 불순물을 제거하였다. 본 방법에서는 두 개의 연속적인 레이저 펄스(532 nm, 1064 nm)를 이용하였는데, 첫 번째 펄스는 흑연 타깃을 증발시키고 두

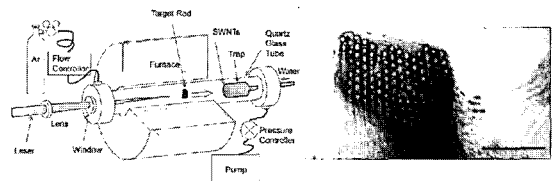


그림 9. Schematic of a laser vaporization apparatus and TEM image of bundled SWCNTs synthesized by laser vaporization. Scale bar, 10 nm(31, 64).

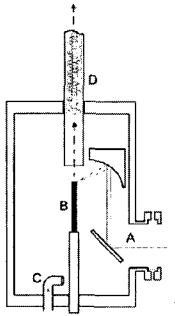


그림 10. Schematic of a laser vaporization chamber. A : laser beam, B : graphite target rod, C : nozzle introducing an inert gas, D : Cu-wire collector[32].

번째 펄스는 증발된 입자 중 큰 입자를 쪼개는 역할을 하였다. 합성된 SWCNT는 직경이 균일하고, 100~500 개 정도의 CNT가 뭉쳐서 다발을 이루었다.

Maser 등은 CW(Continuous Wave) CO<sub>2</sub> 레이저 증발법에 의해 공촉매가 혼합된 흑연에서 SWCNT를 합성하였다[32](그림 10). 본 장치에서는 챔버 위의 수직 부분에 Cu로 된 코일형 콜렉터가 있으며 흑연 타겟 주변에 가열로가 없어 쉽게 SWCNT를 합성할 수 있지만, 분위기 기체나 흑연 타겟의 구성에 따라 SWCNT의 수율이 많이 달라진다. 아르곤이나 질소에서는 다발의 SWCNT을 합성할 수 있으나 He 분위기에서는 소량의 SWCNT만이 얻어진다[33].

레이저 증발법은 고순도의 흑연 타겟을 사용하고, 높은 레이저 강도를 필요로 한다. 따라서 전기 방전법에 비해 순도가 높은 CNT는 얻을 수 있으나, 1회 생산량이 적기 때문에 전기 방전법보다 경제성이 다소 떨어진다 하겠다.

### 2.3 화학기상증착법

CVD는 가장 널리 알려져 있는 CNT 합성법으로 앞에서 언급한 전기 방전법과 레이저 증발법과는 다른 특징을 가지고 있다. 앞의 두 방법이 3000 K 이상의 고온과  $\mu\text{s}$ 이나 ms의 반응시간을 요하나, CVD 법은 700~1473 K의 비교적 낮은 온도와 분이나 시간단위의 긴 반응시간을 요구하는 기술이다. CVD 기술의 발전으로 1998년 이후부터 CNT의 생산 기술이 급속히 진전되어 고품질의 SWCNT나 MWCNT를 파우더 형태나 기판 위에 제조하였으며, 촉매금속을 제거할 필요가 없다면 정제하지 않아도 될 정도로 순도가 높아 합성물 자체를 그대로 사용하기도 한다.

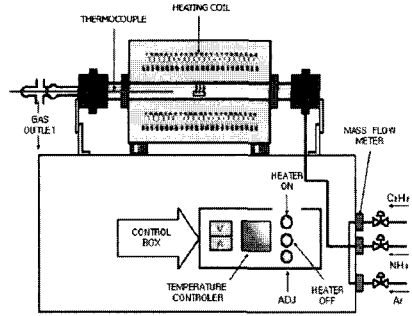


그림 11. Schematic of a thermal CVD system.

몇 가지 CVD법들이 보고 되었는데, 대표적인 예로 열 CVD(Thermal CVD)와 열분해법(Catalytic Pyrolysis of Hydrocarbon)을 들 수 있다.

#### 2.3.1 열화학기상법

열 CVD 장치는 가열로 안에 석영관이 장착되는 간단한 구조를 가지고 있어 비용이 많이 들지 않아 CNT 합성에 많이 사용되고 있다(그림 11). 이 방법에서는 금속 촉매, 촉매 지지체, 탄화수소 원료 가스의 종류, 가스 주입량, 반응온도, 반응시간 등 다양한 인자들에 의해 CNT의 길이, 직경, 모양, 결합, 결정성 등이 결정된다. 대부분의 열 CVD법은 촉매로 Fe, Co, Ni를 사용하고 원료로 아세틸렌(C<sub>2</sub>H<sub>2</sub>)과 에틸렌(C<sub>2</sub>H<sub>4</sub>)을 이용하여 MWCNT를 합성한다. 대개 500~900 °C 정도의 성장온도에서 탄소 원자들이 금속입자에 용해되고 포화된 후 석출되면서 CNT를 형성하게 된다. 위의 합성조건들은 적절히 조절하면 다양한 형태의 CNT를 고 수율로 얻을 수 있다.

Fonseca 등은 다공성 Silica나 Zeolite에 Co, Fe를 함침시킨 금속촉매를 700 °C로 유지되고 있는 석영관 안에 장입하고 아세틸렌을 흘려주어 MWCNT를 합성하였다. 하지만 지지체를 Clay로 바꿀 경우 촉매의 활성이 떨어져 낮은 수율을 나타내었다[34, 35]. 단일 촉매를 사용한 것보다 공촉매, 즉 Co/Mo, Co/V, Co/Fe를 Zeolite나 Alumina에 함침하여 제조한 경우 MWCNT의 수율이 증가하였다[36]. 두 지지체에서 V와 Fe가 각각 Co에 공촉매로 작용할 때 수율이 증가하였으나 공촉매의 구성에 따라 수율이 달라졌다.

원료인 탄화수소 가스도 CNT 합성에 영향을 준다. 불포화 탄화수소 원료를 사용하면 포화 탄화수소를 사용할 때 보다 분해속도가 빨라져 수율이 높아지는 반면에 포화 탄화수소를 사용하면 CNT의 벽의 개수가 줄

어들과 결정성이 좋아진다. 따라서  $C_2H_2$ ,  $C_2H_4$ ,  $C_6H_6$  와 같이 탄소 함량이 많은 불포화 탄화수소는 MWCNT를 합성할 때 이용되고,  $CH_4$ 나  $CO$  등은 SWCNT 합성에 주로 사용된다. Dai 등은 처음으로 CVD 기술을 이용하여  $1200\text{ }^\circ\text{C}$ 에서  $CO$  가스로  $Al_2O_3$  에 함침된 Mo 촉매 상에 소량의 SWCNT를 합성하였다[37]. Colomer 등은  $1000\text{ }^\circ\text{C}$  온도에서  $H_2/CH_4$  가스로 MgO 지지체에 포함된 금속입자(Co, Ni, Fe) 상에서 70~80 %의 수율을 갖는 SWCNT를 대량으로 합성하였다. MgO 지지체는 묽은 산처리 만으로도 쉽게 제거될 수 있어 정제 측면에서 용이하다[38].

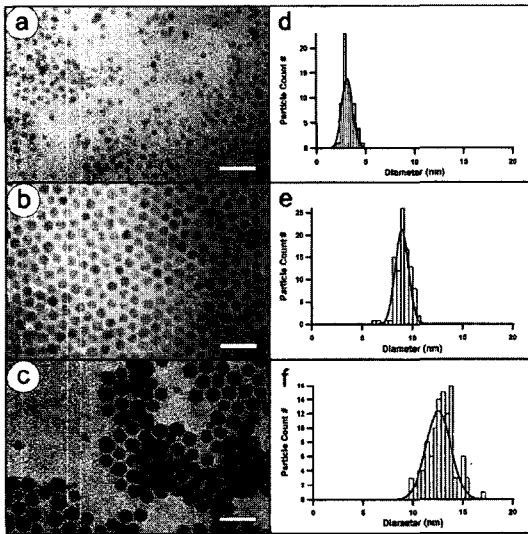


그림 12. (a), (b), (c) TEM images of iron nanoclusters and (d), (e), (f) their size distributions. Scale bars in (a)~(c), 30 nm(41).

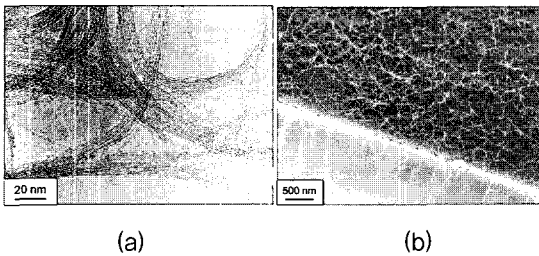


그림 13. (a) TEM and (b) SEM images of SWCNTs directly synthesized on a quartz substrate by alcohol catalytic CVD(42).

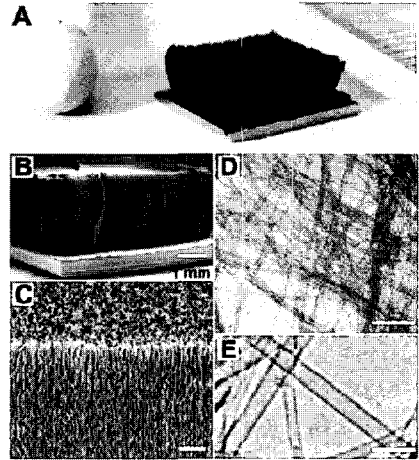


그림 14. SWCNTs grown with water-assisted CVD. (A) 2.5-mm-tall SWCNTs on Si water, (B) SEM image of the same SWCNTs, (C) SEM image of the SWCNT, scale bar, 1 (m), (D) TEM image of the SWCNTs, scale bar, 100 nm, and (E) TEM image of the SWCNTs, scale bar, 5 nm(43).

촉매 입자의 크기는 SWCNT 생성에 미치는 가장 중요한 인자 중의 하나이다. Li 등은 3~14 nm의 크기를 가지며 Mo가 소량 포함된 Fe 나노입자를 제조하였으며, 성장조건에서 SWCNT를 생성시키는 촉매 크기의 최대값이 4~8 nm 사이에 존재한다고 보고하였다[39]. 또한 Apoferritin 내에 Fe 원자를 도입하여 서로 다른 크기의 단분산된 촉매입자를 만들어 실험한 결과, 대략 1.8 nm 이하의 크기를 갖는 금속입자는 활성이 높아 SWCNT를 성장시켰으나 평균 7 nm 크기의 금속 입자에서는 SWCNT가 성장되지 않았다[40]. Cheung 등은 3, 9, 13 nm 크기를 갖는 단분산된 금속 입자를 제조하였는데, 3, 9 nm의 금속입자에서는 SWCNT와 DWCNT이 성장된 반면, 13 nm에서는 MWCNT가 합성되었다[41](그림 12). 이 상과 같이 SWCNT은 약 5 nm 이하의 촉매 크기에서 잘 생성되며, 촉매가 커짐에 따라 MWCNT이 성장된다.

최근에 Maruyama 등은 탄화수소 원료로 알코올을 사용하여  $550\text{ }^\circ\text{C}$ 의 비교적 낮은 온도에서 고 품질의 SWCNT를 합성하였다[42]. 이 방법은 SWCNT를 대량 생산할 수 있을 뿐만 아니라, 석영이나 실리콘 기판 위에서도 직접 성장시킬 수 있는 기술이다. 이 방법에서는 약 5 wt%의 촉매금속을 담지한 USY-zeolite를 120분

동안 반응시켜 촉매 무게 대비 40 wt% 이상의 수율로 SWCNT를 합성할 수 있었다. 제조된 CNT에는 금속촉매나 비정질 탄소가 거의 존재하지 않았으며 MWCNT 또한 관찰되지 않는다고 보고하였다(그림 13).

또 하나의 기대되는 SWCNT 합성법이 Hata에 의해 보고되었다[43]. 본 방법에서는 에틸렌 가스와 더불어 소량의 물을 적절한 비율로 주입하면 합성할 때 생성되는 비정질 탄소를 선택적으로 제거하여 촉매의 활성을 계속 유지시켜 줄 수 있게 된다. 그 결과 활성을 갖는 촉매에서 고순도의 SWCNT (>99.98%)를 기관 위에서 2.5 mm의 높이까지 성장시켰다. 또한 이 방법은 재생 가능하고 다른 생산기술과 접목했을 경우 대량으로 고순도의 SWCNT를 합성할 수 있는 가능성을 제시하였다(그림 14).

### 2.3.2 열분해법

열분해법은 CNT를 대량으로 생산할 때 흔히 사용되는 방법으로서 열 CVD와 달리 지지체로부터 CNT를 회수할 필요가 없고 전처리를 하지 않은 기관 위에 저비용으로 합성할 수 있는 장점을 가지고 있다. 합성의 일반적인 과정은 다음과 같다. 금속 촉매는 콜로이드 현탁액이나 유기금속의 전구체 형태로 CVD 챔버 내부에 직접 주입된다. 메탈로센(Iron Pentacarbonyl과 Iron(II) Phtalocyanine)의 유기금속 화합물이 촉매 전

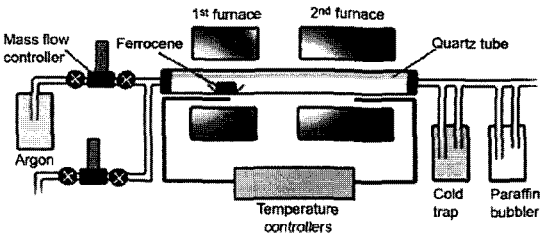


그림 15. Schematic of a catalytic pyrolysis system with two-stage furnaces(45).

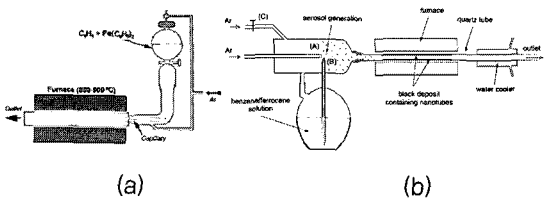


그림 16. Schematics of (a) a spray pyrolysis setup and (b) an aerosol pyrolysis setup(46, 48).

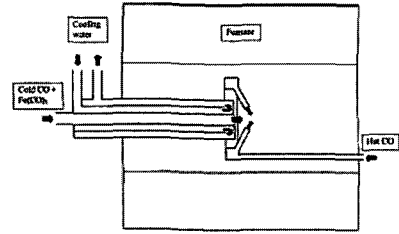


그림 17. Layout of a CO flow tube reactor used for the HiPCO process(53).

구물질로 주로 이용되며, 탄화수소 공급원료인 벤젠, 자이렌, 톨루엔, 핵산 등의 용매에 용해되어 사용된다. 이러한 유기금속 전구체는 가열에 의해 승화되고 운반 기체에 의해 챔버에 주입된 후 열에 의해 분해되거나 수소에 의해 환원되어 촉매입자들을 형성한다. 일반적으로 유기금속을 기화시키고 CNT를 합성하는 온도가 다르기 때문에 두 단계의 가열로가 필요하다[44, 45](그림 15). 이것의 발전된 형태로 실린지 펌프와 분사기를 사용하면 연속적으로 메탈로센 촉매가 용해된 용액을 가열로에 직접 공급할 수 있다[46-48]. 거의 모든 경우에 CNT는 석영으로 된 기관 위나 반응기 벽면에서 자란다(그림 16).

촉매인 메탈로센을 기화시키는 방식으로는 CNT의 길이나 직경 등 물리적인 형태를 조절하기 어려우나 기상에서의 탄소원료에 대한 비를 조절하여 이를 변화시킬 수 있다[44, 49]. 주입되는 탄소원료인 아세틸렌의 농도를 감소시키거나[45] 메탈로센의 농도를 묽게 하거나[50] thiophene (C<sub>4</sub>H<sub>4</sub>S)를 첨가하여 SWCNT를 합성할 수 있다[51, 52].

한편 최근에 탄소 공급 원료로 CO(Carbon Monoxide)와 유기금속 전구체로 Iron Pentacarbonyl (Fe(CO)<sub>5</sub>)을 사용하고 1~10 기압과 800~1200 °C의 온도에서 연속적으로 SWCNT를 합성하는 새로운 기술이 개발되었다. Nikolaev에 의해 개발된 이 방식은 HiPCO(High Pressure CO Disproportionation)라 불리며, 공정이 효율적이어서 SWCNT를 대량으로 생산할 수 있다[53](그림 17). 생산된 SWCNT의 평균 직경은 1.1 nm이며 일일 생산량은 약 10 g 정도이다. 공정조건으로는 CO의 압력이 30 기압, 반응온도는 1050 °C인 것으로 알려져 있다.

### 3. CNT 기관성장을 위한 플라즈마 화학 기상증착법

대면적의 기관 위에서 CNT를 정렬된 형태로 성장시키는 것은 주로 반도체, 센서, 전자방출원 등 나노 스케일의 전자소자 분야에 응용하기 위해 연구되고 있는 합성 기술이다. 앞에서 언급한 CVD 법으로도 정렬된 CNT를 얻을 수 있으나 여기서는 정렬된 CNT를 합성하는 새로운 방식의 기술로서 플라즈마 화학기상증착법(Plasma Enhanced Chemical Vapor Deposition, PECVD)을 소개하고자 한다. PECVD는 CNT를 수직 성장시키는 기술로서 향후의 성장 가능성이 높은 분야이다. 플라즈마 공정으로 CNT를 성장시킬 때의 가장 큰 이점은 주입되는 가스 혼합물에 전기 에너지를 가하여 라디칼과 이온으로 쉽게 분해할 수 있고, 이들이 기관과의 증착과 에칭의 상호작용을 거쳐 CNT를 성장시킬 수 있기 때문에 열 CVD 보다 성장온도를 상당히 낮출 수 있다는 것이다.

DC 플라즈마 반응기에서는 접지된 전극과 전원장치에 연결된 파워 전극이 챔버 내에서 한 쌍의 전극을 구성한다. 대개 양극을 접지하고 음극에 걸어준 음의 직류 바이어를 인가하여 플라즈마를 형성함으로써 공급원료인 탄화수소를 분해시킨다(그림 18). 촉매층을 코팅한 기관을 음극에 위치시켜 CNT를 성장시킨다. CNT의 성장온도를 유지하기 위해 기관을 가열하

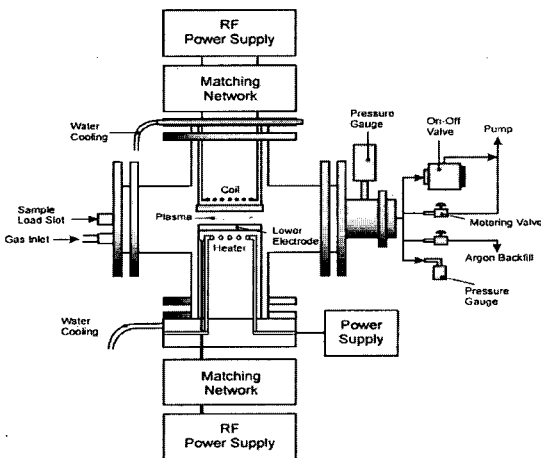


그림 18. Schematic of an inductively coupled PECVD reactor with independent RF power(63).

는 개별적인 히터 장치가 필요하다. 기관이 놓인 전극의 하단부에서 저항가열이나 램프 히터를 장착하여 가열하기도 하며, Hot Filament PECVD에서는 텅스텐 와이어를 플라즈마 안에 위치시켜 이를 저항 가열시키기도 한다. 하지만 이 두 시스템에서 걸어준 직류 전압이 다소 높기 때문에 (>300 V) 플라즈마 시스(Sheath) 내의 높은 전기장으로 이온들의 에너지가 높아지고 기관에 대한 이온 충돌을 발생시켜 성장하는 CNT 및 코팅된 촉매층, 기관 등에 손상을 가하여 효율성이 떨어질 수 있다. 따라서 이온들의 충돌 및 비등방성 에칭을 줄일 수 있는 리모트(Remote) 플라즈마 방식의 Microwave PECVD, Inductively Coupled PECVD, rf PECVD가 시도되고 있다.

PECVD에서 CNT를 성장시키는데 사용하는 탄화수소 원료로는 메탄, 에틸렌, 아세틸렌 가스가 사용되고 있다. 플라즈마는 탄화수소 가스를 분해시켜 많은 양의 반응성 라디칼을 만들기 때문에 비정질 탄소를 생성할 가능성이 높다. 그러므로 아르곤, 수소, 암모니아 가스를 함께 넣어주어 원료가스를 희석을 시키거나 불순물을 에칭시켜 비정질 탄소의 생성을 억제시킬 수 있다. 보통 탄화수소 가스의 농도를 20%까지 유지하고 압력은 1~20 torr로 조절한다. 이 보다 낮은 압력에서는 CNT의 성장 속도가 느려지게 된다.

정렬된 CNT는 Li 등에 의해 Fe 입자가 포함된 메조

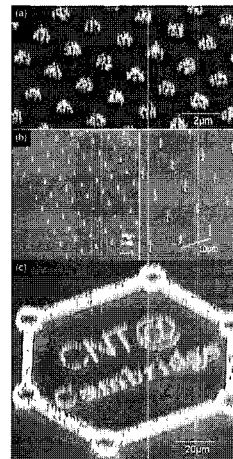


그림 19. (a) Bunches of MWCNTs with the diameter of 100 nm grown on 1 μm nickel dots, (b) individual MWCNTs grown on 100 nm nickel dots, and (c) high-yield, uniform, and selective growth of MWCNTs(58).



포러스 실리카 위에서 아세틸렌의 열분해법으로 700 °C에서 합성되었다. 하지만 고온의 합성온도는 디스플레이에서 사용되는 유리의 변형온도인 660 °C에서는 적합하지 않다. Ren 등은 660 °C 이하의 온도에서 니켈이 코팅된 유리기판 위에 아세틸렌과 암모니아 가스를 흘려주어 Hot Filament PECVD로 정렬된 MWCNT를 합성하였다[54]. Huang 등은 같은 방식으로 Ti 위에 Co, Fe, Ni을 촉매로 사용하여 CNT를 성장시켰다[55]. Ni 촉매는 CNT의 높은 결정성 및 빠른 성장속도, 적은 양의 비정질 탄소 생성, 적은 결함 등의 우수한 합성 특징을 보인 반면, Co는 가장 나쁜 결과를 보였다. 하지만 CNT의 직경은 Ni을 사용했을 때 가장 컸는데, 이는 Ti 층과의 친화력이 좋지 않아 큰 촉매 클러스터를 형성하

였기 때문이었다. 또한 최근에 자기조립 폴리스티렌 나노입자 리소그래피 기술을 이용하여 Ni 입자를 주기적으로 배열한 후 Hot Filament PECVD를 이용하여 주기적으로 배열된 CNT를 성장시켰다[56].

Chhowalla 등은 dc-PECVD로 Ni 촉매 두께, 인가전압, 온도, 아세틸렌 대 암모니아의 비율, 압력 등의 변수를 조절하여 CNT의 성장특성을 연구하였다[57]. 여기서 CNT의 직경, 성장속도, 밀도는 촉매의 두께와 열처리 조건에 따라 변화되고, 수직성장은 가해진 전기장에 의해 결정되었다. Teo 등은 패터닝된 균일한 배열의 CNT를 성장시켰는데[58, 59](그림 19) 이 때 비정질 탄소의 생성을 억제하기 위해서는 C<sub>2</sub>H<sub>2</sub>와 NH<sub>3</sub>의 비율이 중요한 것으로 언급하였다. 합성하는 동안 C<sub>2</sub>H<sub>2</sub>는 플라즈마에 의해 계속 분해되어 기판에 비정질 탄소를 증착시킨다. 따라서 NH<sub>3</sub>를 흘려주면 비정질 탄소가 C-N이나 C-H 형태로 분해되어 기판 표면에서의 비정질 탄소 생성을 막아준다. 이러한 비정질 탄소의 증착은 촉매의 활성화를 떨어뜨려 CNT의 합성을 저해하는 요인이 되기 때문에, 비정질 탄소는 가능한 한 제거되어야 한다. 효과적인 방법 중 하나로 수소종이나 질소종을 이용하여 합성 중에 비정질 탄소를 선택적으로 에칭하는 것이다. 근래에 들어서는 챔버 내의 클리닝을 위해 사용되던 산소를 합성 중에 극소량 첨가함으로써 비정질 탄소를 효과적으로 제거하여 고속으로 CNT를 성장시킨 결과가 보고되기도 하였다[60](그림 20).

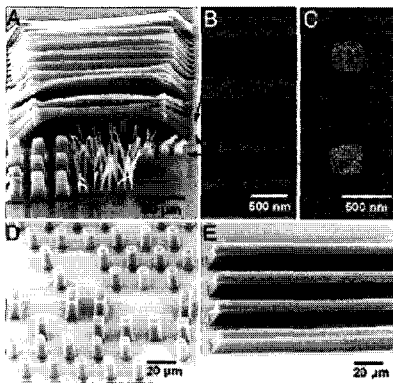


그림 20. O<sub>2</sub>-assisted growth of vertically aligned SWCNT towers and sheets(60).

Microwave PECVD로 실리콘 기판에 증착된 Co 촉매에서 CNT를 합성하였는데[61], 기판이 평평하거나 굴곡을 가지더라도 기판 위에 형성되는 플라즈마 시스템의 전기장으로 인해 CNT가 표면에 수직인 방향으로 성장하였다(그림 21). Microwave PECVD에서 CNT가 수직으로 자라는 이유는 음극과 수직하지 않는 CNT는 비등방성 에칭에 의해 제거되기 때문이라는 보고도 있다[62]. Dielzeit 등은 Inductively Coupled PECVD로 Si/Al/Fe 상에서 CH<sub>4</sub>, H<sub>2</sub>, Ar 가스를 이용하여 CNT의 성장특성을 연구하였다[63].

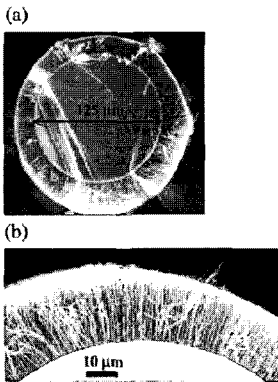


그림 21. SEM images of radially grown MWCNTs on the surface of optical fiber(61).

#### 4. 국내외 기술개발 동향

국내의 경우 현재 CNT 소재의 합성 및 구조제어에 대한 기반기술은 세계적인 수준이나 CNT 소재의 대량 합성 공정기술이 아직 확보되지 않아 CNT의 양산화가

이루어지지 못하고 있는 실정이다. 시장 및 기술이 아직은 미성숙한 상태인 현 시점에서 미국 및 일본 업체들이 CNT 세계시장의 대부분을 차지하고 있으나, 향후에는 어느 업체가 먼저 경쟁력을 갖춘 제품을 대량으로 생산하여 시장을 선도하느냐에 따라 미래의 판도가 크게 좌우될 것으로 예상된다. 국내 CNT 소재 분야의 경우 일진나노텍, 나노텍, 넥센나노텍, CNT社, 나노카본 등에서 CNT 소재를 합성하여 판매하고 있으나 아직은 주문생산과 준 파일럿 생산단계이다. 국내의 CNT 소재 생산기술은 선진국에 비해 다소 떨어지는 편이지만 여러 기업들이 대량생산 기술을 활발히 개발하고 있어 머지않아 선진국과 대등한 수준의 기술을 확보할 것으로 기대된다.

세계적으로 CNT를 생산하는 주요 업체는 미국, 일본 및 유럽을 중심으로 10여 개 정도가 있다. 미국업체로는 Hyperion Catalysis International, CNI, 일본 업체로는 Mitsui, Showa Denko, 벨기에의 Nanocyl, 독일의 Bayer 등이 있다. 점차 여러 가지 응용제품의 사업화가 가시화되면서 일본의 Mitsui가 세계 최초로 연간 120톤 규모의 대량생산 설비를 갖출 것으로 알려져 있다.

Showa Denko는 CNT의 대량합성 기술을 개발하면서 1998년 전반기까지의 연구에서는 탄화수소와 촉매를 1000℃ 이상의 기상에서 반응시켜 고효율의 MWCNT를 합성하였고 1999년 3월부터는 연속식 대형 반응장치의 설계와 제작을 착수하여 1999년 말에는 이 시험설비를 가동하여 평균직경 30nm의 MWCNT를 시간당 200g 정도씩 생산하였다. 그리고 2000년 5월 후처리 공정을 완성하여 CNT 합성장치 전 설비가 완공됨으로써 본격적인 양산 가능성을 검증하게 되었다. Mitsui 물산의 자회사인 CNRI는 120톤의 파일럿 플랜트를 건설하여 시험운전을 시작하였다. 이들 2개 업체 외에도 GSI 크레오스(구 군제산업)는 컵 적층형의 독특한 구조를 갖는 CNT를 미국에서 양산하고 일본에서는 응용개발을 진행 중에 있다. Honjo Chemical은 전기 방전법으로 MWCNT를 합성하고 있으며, Ulvac은 전자소자응용을 목적으로 한 기관 상의 MWCNT 합성장치를 판매 중에 있다.

미국에서는 Hyperion Catalysis International이 연 생산 200톤(추정)의 MWCNT를 생산하고 있다. MWCNT의 양산에서는 일본의 4개社, 그 외 국가의 2개사가 실용화 경쟁 중이다. 최근에는 한국, 중국, 대만의 업체들도 CNT의 양산기술 개발을 활발히 진행하고

있다.

최근 유럽에서도 대량합성 장치 및 공정기술에 관한 개발을 적극적으로 추진하고 있다. 독일의 Bayer에서는 유동층 반응기를 이용한 MWCNT 합성장비를 개발하고 있으며, 자사 제품을 활용하여 CNT 고분자 복합재의 시제품을 출시하였다. 영국의 Tomas Swan 사는 수직형 반응기를 이용하여 합성한 SWCNT와 MWCNT를 판매하고 있으며, 고분자 Masterbatch 제품도 제조하고 있다. Tomas Swan社는 최근 일본에 사무소를 설치하여 아시아 지역을 대상으로 본격적으로 영업을 착수하기도 하였다.

2005년 기준으로 MWCNT 생산능력은 연간 294톤 이상이나 실제 생산규모는 약 10% 수준이다. Cientifica에서 2005년 발간한 "Nanotube 시장자료"에 따르면 2007년경에는 적어도 연간 1,640톤 규모 이상으로 성장할 것으로 추정되며, 2010년에는 5,560톤 규모로 성장할 것으로 예상된다. 2005년 기준으로 SWCNT 생산능력은 연간 9톤 정도이나, 현재 SWCNT 사용규모는 230kg 정도이다. 2007년경에는 적어도 연간 43톤 규모 이상으로 성장할 것으로 추정되며 2010년경에는 195톤을 상회할 것으로 예상된다.

현재 MWCNT의 가격은 kg당 200유로 수준이며, 다른 경쟁재인 CNF, 탄소섬유 및 카본블랙 등과의 비교에 있어서 가격 대비 성능 수준을 감안하면 MWCNT의 가격이 kg당 50유로 이하로 떨어지려면 다른 경쟁재를 대체할 수 있는 수준에 도달함으로써 고분자 복합재 등 다양한 응용분야에서 광범위하게 사용될 수 있을 것이다. 전 세계적으로 대량합성 공정 및 설비 구축을 위해 많은 투자와 노력을 경주하고 있어 2010년경이면 50유로/kg 수준을 충분히 달성할 것으로 전망된다. 향후 CNT가 범용으로 사용될 수 있는 가격경쟁력을 확보하기 위해서는 CNT의 대량합성을 위한 장치설계 및 제작기술, 합성 및 대량생산 기술 등의 핵심 요소기술을 국내에서 자체 개발해야 하며, 이를 위해서는 지속적인 연구개발 투자가 중요하다 하겠다.

## 5. 결론

CNT는 여러 구조와 뛰어난 물성으로 재료가 가질 수 있는 다양한 장점들을 두루 갖추고 있어 나노기술 분야에서 각광받는 재료로서 전기전자, 환경, 에너지

및 생명공학 분야 등 폭넓은 분야에서 응용이 기대되는 꿈의 소재로 불리고 있다. CNT의 대량 합성은 응용을 위한 첫 번째의 주요 관문이라고 할 수 있다. CNT가 발견된 이후 지난 15년간 CNT의 합성기술은 급속히 성장해 왔다. SWCNT, DWCNT와 MWCNT는 앞에서 언급한 전기 방전법과 레이저 증발법, CVD 등 다양한 방법으로 합성이 가능하다. 모든 기술들이 대량 생산에 필요한 요소들, 즉 경제성과 실용성 등에 적합하도록 발전하고 있지만 각 합성 기술들은 그 나름의 장점과 단점을 동시에 가지고 있어 대량생산 및 응용에서 요구하는 CNT의 특성 측면에서 서로 경쟁을 하고 있다고 하겠다. 이 중에서도 CVD 법은 연속공정으로 대량생산이 가능하여 다른 기술들에 비해 각광을 받고 있다. 한편 지난 몇 년간 나노전자소자 분야에 대한 응용을 목적으로 CNT의 수직 및 수평정렬 성장에 대한 연구가 진행되었는데, 이를 위해 주로 CVD와 PECVD 기술이 적용되었다. 이러한 연구들로 인해 nm 크기의 CNT를 특정 위치에서 특정방향으로 성장시킬 수 있을 정도로 합성기술이 발전하였다. 나노기술은 광범위한 영역에서 소자 및 부품, 재료의 미세화 및 정밀화를 중심으로 더욱 진보되고 있어 이러한 고 정밀도로 제어 가능한 CNT의 성장기술은 장래의 새로운 기술을 창출하는데 활용될 것으로 기대된다.

### 참고 문헌

- [1] M. Terrones, H. Terrones, *Phil. Trans. R. Soc. Lond. A* 361, 2789 (2003).
- [2] H. W. Kroto, J. R. Heath, S. C. O'Brien, R. F. Curl, [R. E. Smalley, *Nature* 318, 162 (1985).
- [3] W. Kratschmer, L. D. Lamb, K. Fostiropoulos, D. R. Huffman, *Nature* 347, 354 (1990).
- [4] S. Iijima, *Nature* 354, 56 (1991).
- [5] W. A. d. Heer, A. Chatelain, D. Ugarte, *Science* 270, 1179 (1995).
- [6] R. H. Baughman, A. A. Zakhidov, W. A. de Heer, *Science* 297, 787 (2002).
- [7] A. B. Dalton et al., *Nature* 423, 703 (2003).
- [8] J. Sandler et al., *Polymer* 40, 5967-5971 (1999).
- [9] J. Kong et al., *Science* 287, 622 (2000).
- [10] A. Srivastava, O. N. Srivastava, S. Talapatra, R. Vajtai, P. M. Ajayan, *Nat. Mater.* 3, 610 (2004).
- [11] G. Che, B. B. Lakshmi, E. R. Fisher, C. R. Martin, *Nature* 393, 346 (1998).
- [12] T. W. Ebbesen, P. M. Ajayan, *Nature* 358, 220 (1992).
- [13] Y. Saito, K. Nishikubo, K. Kawabata, T. Matsumoto, *J. Appl. Phys.* 80, 3062 (1996).
- [14] T. W. Ebbesen et al., *Chem. Phys. Lett.* 209, 83 (1993).
- [15] S. Seraphin, D. Zhou, J. Jiao, *Carbon* 31, 685 (1993).
- [16] X. K. Wang, X. W. Lin, V. P. Dravid, J. B. Ketterson, R. P. H. Chang, *Appl. Phys. Lett.* 66, 427 (1995).
- [17] S. J. Lee, H. K. Baik, J.-e. Yoo, J. H. Han, *Diam. Relat. Mat.* 11, 914 (2002).
- [18] M. Ishigami, J. Cumings, A. Zettl, S. Chen, *Chem. Phys. Lett.* 319, 457 (2000).
- [19] S. Iijima, T. Ichihashi, *Nature* 363, 603 (1993).
- [20] D. S. Bethune et al., *Nature* 363, 605 (1993).
- [21] D. Zhou, S. Seraphin, S. Wang, *Appl. Phys. Lett.* 65, 1593 (1994).
- [22] Y. Saito, K. Kawabata, M. Okuda, *J. Phys. Chem.* 99, 16076 (1995).
- [23] S. Seraphin, D. Zhou, *Appl. Phys. Lett.* 64, 2087 (1994).
- [24] Y. S. Park et al., *Synth. Met.* 126, 245 (2002).
- [25] C. Journet et al., *Nature* 388, 756 (1997).
- [26] C. Liu et al., *Adv. Mater.* 12, 1190 (2000).
- [27] Y. Ando et al., *Chem. Phys. Lett.* 323, 580 (2000).
- [28] Y. Ando, X. Zhao, T. Sugai, M. Kumar, *Mater. Today* 7, 22 (2004).
- [29] T. Guo et al., *J. Phys. Chem.* 99, 10694 (1995).
- [30] T. Guo, P. Nikolaev, A. Thess, D. T. Colbert, R. E. Smalley, *Chem. Phys. Lett.* 243, 49 (1995).
- [31] A. Thess et al., *Science* 273, 483 (1996).
- [32] W. K. Maser et al., *Chem. Phys. Lett.* 292, 587 (1998).
- [33] E. Munoz et al., *Carbon* 38, 1445 (2000).
- [34] A. Fonseca, K. Hernadi, J. B. Nagy, D. Bernaerts, A. A. Lucas, *J. Mol. Catal. A* 107, 159 (1996).
- [35] A. Fonseca et al., *Appl. Phys. A* 67, 11 (1998).
- [36] I. Willems et al., *Chem. Phys. Lett.* 317, 71 (2000).
- [37] H. Dai et al., *Chem. Phys. Lett.* 260, 471 (1996).
- [38] J.-F. Colomer et al., *Chem. Phys. Lett.* 317, 83 (2000).
- [39] Y. Li, J. Liu, Y. Wang, Z. L. Wang, *Chem. Mater.* 13, 1008 (2001).
- [40] Y. Li et al., *J. Phys. Chem. B* 105, 11424 (2001).

[41] C. L. Cheung, A. Kurtz, H. Park, C. M. Lieber, J. Phys. Chem. B 106, 2429 (2002).

[42] S. Maruyama, Y. Murakami, Y. Shibuta, Y. Miyauchi, S. Chiashi, J. Nanosci. Nanotech. 4, 360 (2004).

[43] K. Hata et al., Science 306, 1362 (2004).

[44] R. Sen, A. Govindaraj, C. N. R. Rao, Chem. Mater. 9, 2078 (1997).

[45] B. C. Satishkumar, A. Govindaraj, R. Sen, C. N. R. Rao, Chem. Phys. Lett. 293, 47 (1998).

[46] R. Kamalakaran, M. Terrones, T. Seeger, P. Kohler-Redlich, M. Ruhle, Appl. Phys. Lett. 77, 3385 (2000).

[47] A. Cao et al., Carbon 39, 137 (2001).

[48] M. Mayne et al., Chem. Phys. Lett. 338, 101 (2001).

[49] C. Singh, M. S. P. Shaffer, A. H. Windle, Carbon 41, 359 (2003).

[50] A. R. Harutyunyan, G. Chen, P. C. Eklund, Appl. Phys. Lett. 82, 4794 (2003).

[51] H. W. Zhu et al., Science 296, 884 (2002).

[52] H. M. Cheng et al., Appl. Phys. Lett. 72, 3282 (1998).

[53] P. Nikolaev et al., Chem. Phys. Lett. 313, 91 (1999).

[54] Z. F. Ren et al., Science 282, 1105 (1998).

[55] Z. P. Huang et al., Appl. Phys. A 74, 387 (2002).

[56] Z. P. Huang et al., Appl. Phys. Lett. 82, 460 (2003).

[57] M. Chhowalla et al., J. Appl. Phys. 90, 5308 (2001).

[58] K. B. K. Teo et al., Appl. Phys. Lett. 79, 1534 (2001).

[59] K. B. K. Teo et al., Nanotechnology 14, 204 (2003).

[60] G. Zhang et al., PNAS 102, 16141 (2005).

[61] W. Zhu, C. Bower, S. Jin, O. Zhou, Appl. Phys. Lett. 77, 830 (2000).

[62] S. H. Tsai, C. W. Chao, C. L. Lee, H. C. Shin, Appl. Phys. Lett. 74, 3462 (1999).

[63] L. Delzeit et al., J. Appl. Phys. 91, 6027 (2002).

[64] Y. Ando, X. Zhao, T. Sugai, M. Kumar, Mater. Today 7, 22 (2004).

저자약력



성명 : 광정춘

- ◆ 학력
- 1997년 전남대 고분자공학과 공학사
- 1999년 전남대 대학원 고분자공학과 공학석사
- 현재 세종대 대학원 나노공학과 박사과정

- ◆ 경력
- 1999년 - 2000년 한국화학연구원 화학소재1팀 연구원
- 2001년 - 2002년 대주정밀화학 부설연구소 주임연구원
- 2003년 - 2007년 세종대 나노공학과 연구원



성명 : 이내성

- ◆ 학력
- 1984년 서울대 금속공학과 공학사
- 1986년 한국과학기술원 재료공학과 공학석사
- 1996년 Pennsylvania State Univ. 재료공학과 공학박사

- ◆ 경력
- 1986년 - 1989년 한국기계연구원 재료공학부 연구원
- 1990년 - 1991년 한국가스공사 기술연구원 연구원
- 1997년 - 2001년 삼성종합기술원 수석연구원
- 2001년 - 현재 세종대 나노신소재공학부 부교수