

# 탄소나노튜브 기술동향 및 시장전망

홍재민 · 이창환

## 머 리 말

21세기는 지식과 정보가 그 국가의 경쟁력을 좌우하는 지식 기반 산업사회로 나아가고 있으며, 최고가 아니면 살아남을 수 없는 무한경쟁시대가 되어가고 있습니다. 이러한 변화 속에서 각 국가에서는 미래 유망기술(Emerging Technology)을 선정하여 국가 역량을 집중함으로써 차세대 국가경쟁력을 확보하려는 여러 가지 노력을 기울이고 있습니다.

최근 우리나라에서도 미래 유망기술에 대한 관심이 어느 때보다도 증대되고 있는 가운데, 한국과학기술정보연구원에서는 과학계량학적인 방법으로 미래 국가 유망기술을 예측하기 위한 일련의 연구를 수행하고 있습니다.

본 보고서는 과학기술정보데이터베이스(SCIE)에서 최근 6년간 분야별 피인용도가 높은 핵심논문들을 가지고 정보계량학적인 분석을 행하여 선정된 핵심 유망 연구영역에 대해 관련 국내전문가들의 자문을 토대로 작성된 R&D 동향보고서입니다. 본 보고서가 관련 과학기술정보를 국내에 확산시키고, 미래 국가유망기술의 전략적 육성을 위한 연구개발 활동에 작으나마 도움이 되었으면 합니다.

마지막으로 본 보고서를 집필한 저자들의 노고에 감사드리며, 본고의 내용은 한국과학기술정보연구원의 공식의견이 아님을 밝혀둡니다.

2005년 12월

한국과학기술정보연구원

원 장 **조 영 희**

## 목 차

제1장 서론 .....	1
1. 연구의 배경 .....	1
2. 연구의 방법 .....	2
제2장 기술의 개요 .....	3
1. 탄소나노튜브의 정의 .....	3
2. 탄소나노튜브의 역사 .....	4
3. 탄소나노튜브의 구조 .....	7
4. 탄소나노튜브의 합성방법 .....	9
5. 미래 신소재로서의 탄소나노튜브 .....	18
제3장 국내외 기술개발동향 .....	21
1. 국내외 기술 수준 .....	21
2. 국내외 특허 정보 분석 .....	24
3. 시장 동향 분석 및 사업성 .....	27
제4장 결론 .....	35
참고문헌 .....	37

## 표 목차

〈표 3-1〉 주요국의 기술력 순위 .....	23
〈표 3-2〉 각국별 탄소나노튜브의 수요량 .....	30
〈표 3-3〉 SWNT와 MWNT의 2005년 가격 비교 .....	32

## 그림 목차

〈그림 2-1〉 탄소 동소체의 종류의 구조 .....	4
〈그림 2-2〉 탄소나노튜브의 다양한 구조 .....	7
〈그림 2-3〉 탄소나노튜브 구조의 표기 방법 .....	8
〈그림 2-4〉 촉매 화학 기상증착법의 분류 .....	11
〈그림 2-5〉 기상합성 장치 .....	12
〈그림 2-6〉 기상합성법으로 합성한 탄소나노튜브의 SEM 사진 .....	13
〈그림 2-7〉 기상합성법에 의해서 합성시킨 탄소나노튜브의 TEM 사진 · 14	
〈그림 2-8〉 열 CVD장치 .....	15
〈그림 2-9〉 950 °C에서 열 CVD법으로 성장시킨 탄소나노튜브의 SEM 사진 .....	16
〈그림 2-10〉 550 °C에서 열 CVD법으로 성장시킨 탄소나노튜브의 SEM 사진 .....	17
〈그림 2-11〉 550 °C에서 열 CVD법으로 Ti막이 증착된 글라스 위에 성장 시킨 탄소나노튜브의 SEM 사진 .....	17
〈그림 3-1〉 특허 건수와 피인용점유율 비교 : 전체(좌), 한국(우) .....	22
〈그림 3-2〉 상위 10개국의 기술 분야별 기술력 비교 .....	23

〈그림 3-3〉 국가별 시장 확보율 비교표 .....	24
〈그림 3-4〉 연도별 출원건수 및 누적건수 추이 .....	25
〈그림 3-5〉 미국특허의 연도별 출원건수 및 누적건수 추이 .....	25
〈그림 3-6〉 일본특허의 연도별 출원건수 및 누적건수 추이 .....	26
〈그림 3-7〉 한국특허의 연도별 출원건수 및 누적건수 추이 .....	27
〈그림 3-8〉 CNT 시장의 규모와 수입 소득예측 .....	29
〈그림 3-9〉 2010년 일본의 각 분야별 시장 규모 .....	31
〈그림 3-10〉 연도별 CNT 가격 예상 비교표 (CIENTIFICA) .....	34



## 제 1 장

# 서 론

### 1. 연구의 배경

- 21세기 지식기반사회에서 과학기술경쟁력은 국가경쟁력의 원천이며, 이에 세계 각국들은 미래의 경쟁에 살아남기 위해 핵심기술과제를 선정하여 연구개발에 박차를 가하고 있음.
- 우리나라 과학기술부도 2005년 6월 ‘미래국가유망기술위원회’를 구성하여 ‘과학기술예측조사(2005-2030)’ 결과(2005년 5월, 국가과학기술위원회 보고)에서 도출된 기술후보군을 바탕으로 『미래 국가유망기술 21』을 선정하여 발표한 바 있음.
- 또한 한국과학기술정보연구원(KISTI)에서는 2005년 SCIE 논문데이터베이스를 이용한 정보계량학적 분석을 통해 『미래 유망연구영역 선정연구』를 시도하였으며, 본 보고서는 그 결과에 기초하여 최근 2~3년간 논문의 인용도가 급속히 높아지고 있는 유망 연구영역을 중심으로 기술논평 형식으로 풀이한 심층적 Expert Review임.

## 2. 연구의 방법

- 한국과학기술정보연구원에서는 SCIE 데이터베이스에 등록된 논문(1999~2005년 상반기까지 발표된 논문) 중에서, 각 연도 및 각 분야별(저널분류 22분야)로 피인용수가 상위 1%인 고인용 논문(HCP: Highly cited papers)을 추출하고 공인용분석(Co-citation analysis) 및 동시단어분석(Co-word analysis) 등의 과학계량학적 방법들과 전문가 평가(Expert evaluation)를 통해 ‘미래 유망연구영역’을 도출하였음.
- 상기 도출된 미래 유망연구영역 중에서 통계학적 방법으로 최근 논문의 인용도가 급격히 상승하는 연구영역을 과학기술 분야별로 추출하여 본 테크이슈 보고서의 주제로 삼았음.
- 본 보고서는 탄소나노튜브 분야에 있어서 최근 많이 발표되고 있는 논문들을 종합하여 관련 분야 연구에 대한 기초 지식과 함께 세계적인 연구동향을 개괄적으로 살펴보고, 미래 핵심기술로 자리잡기 위한 연구개발 전략을 제시하였음.

## 제2장

# 기술의 개요

### 1. 탄소나노튜브의 정의

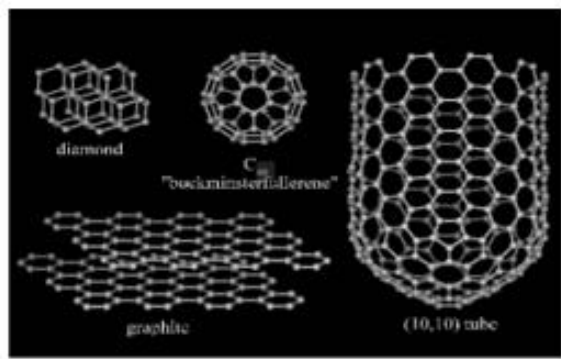
- 최근에 나노미터 크기의 극 미세 영역에서 새로운 물리 현상과 향상된 물질 특성을 나타내는 연구결과가 보고되면서 나노 과학 기술이라는 새로운 영역이 태동하게 되었고, 이러한 나노 과학 기술은 앞으로 21세기를 선도해 나갈 수 있는 과학기술로써 전자정보통신, 의약, 소재, 제조공정, 환경 및 에너지 등 의 분야에서 필수적인 기술로 부각되었음<sup>[1]</sup>.
- 1996년 Rice 대학의 Smalley 교수가 풀러렌(fullerene)의 발견으로 노벨상을 수상한 이래, 나노 크기를 가진 구조 중에서 탄소 소재는 가장 주목받는 물질로 부각되고 있으며, 20세기의 핵심 물질이 실리콘이었다면, 21세기의 핵심물질은 탄소가 될 것으로 예측되고 있음.
- 이중 탄소 나노튜브는 뛰어난 물성과 구조로 인하여 전자정보통신, 환경, 에너지 및 의약 분야로 산업적 응용성의 기대가 큰 소재이며, 향후 나노 과학을 이끌고 갈 중요한 기반 요소로 많은 기대를 모으고 있음.



## 2. 탄소나노튜브의 역사

- 1985년에 Kroto와 Smalley가 탄소의 동소체(allotrope)의 하나인 풀러렌(fullerene : 탄소 원자 60개가 모인 것, C<sub>60</sub>)을 처음으로 발견한 이후, 1991년 새로운 물질을 연구하던 일본 전기회사(NEC) 부설 연구소의 Iijima 박사가 전기 방전법을 사용하여 흑연 음극상에 형성시킨 탄소덩어리를 TEM으로 분석하는 과정에서 가늘고 긴 대롱 모양의 탄소 나노튜브를 발견하여 Nature지에 처음으로 발표하였음.<sup>[2]</sup>
- 이때 성장된 탄소나노튜브의 길이는 수십 nm - 수  $\mu\text{m}$ 이었고, 외경은 2.5-30 nm 였음. 탄소나노튜브에서 하나의 탄소원자는 3개의 다른 탄소원자와 sp<sup>2</sup> 결합의 육각형 벌집무늬를 이루며, 이 튜브의 직경이 대략 수 nm 정도로 극히 작기 때문에 나노튜브라고 부르게 되었음.

<그림 2-1> 탄소 동소체의 종류의 구조



- <그림 2-1>은 탄소나노튜브의 발견으로 현재까지 알려진 탄소소재의 동소체들로서, 1992년 Ebbesen, Ajayan 등은 전기방전법을 사용하여 탄소나노튜브를 합성할 때, 챔버 내의 헬륨압력을 높일 경우 흑연 음극 상에서 탄소나노튜브의 합성수율이 크게 증가한다는 사실을 발표하였음.<sup>[3]</sup>
- 1993년에는 IBM의 Bethune 등과 NEC의 Iijima 등이 전기방전법을 사용하여 직경이 1 nm 수준인 단중벽 나노튜브(single walled nanotube: SWNT) 합성을 각각 발표하였음.<sup>[4,5]</sup>
- 1996년 Smalley 등은 레이저 증착법(laser vaporization)으로 직경이 균일한 SWNT를 고수율로 성장시키는 방법을 발표하였고, 이 경우 성장된 SWNT는 bundle 형태로 존재하여 이 형태를 다발형 나노튜브(rope nanotube)로 명명하였음.<sup>[6]</sup>
- 1998년에 Ren 등이 플라즈마 화학 기상증착법을 사용하여 유리기판위에 수직배향 된 고순도의 탄소나노튜브를 합성시킴으로써, 탄소나노튜브의 합성과 응용기술면에서 획기적인 진전을 가져오게 되었음.<sup>[7]</sup>
- 그 후, 탄소나노튜브 합성 및 응용에 관한 연구가 국내외적으로 많은 연구자에 의해 활발히 수행되고 있음.
- 1991년 Iijima에 의해 탄소나노튜브가 처음 발견된 이후 탄소나노튜브 분야에 많은 진전이 있었음. 현재의 기술로서 대량합성방법, 정제방법, MWNT 및 SWNT 합성방법, 수직배향 합성기술, end-cap을 제거하고 이물질을 삽입하는 방법 등에 괄목할만한 성과를 보여주고 있음.

## 6 탄소나노튜브 기술동향 및 시장전망

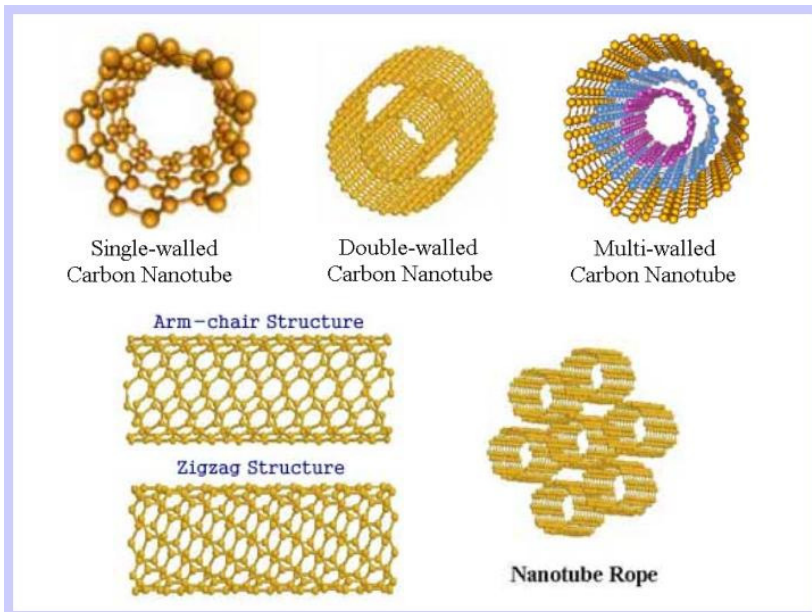
그러나 현재까지도 나노시스템이 갖는 복잡성, 다양성, 미세성 등과 같은 특성으로 인하여 탄소나노튜브의 합성과 응용에 관한 연구가 많이 요구되고 있는 상황임.

- 탄소나노튜브의 합성기술은 1998년을 기점으로 기존의 전기 방전법, 레이저 증착법으로부터 CVD법으로 급격히 전환된 이후로, 위에서 기술된 현재의 기술뿐만 아니라 탄소나노튜브의 구조 및 형태제어, 대면적 합성기술, 저온합성 기술 등에 아직 해결해야 될 과제들이 많이 남아있는 실정임. 탄소나노튜브의 물성은 많은 학자들에 의해 뛰어난 전기적, 기계적 성질을 가진다고 이론적으로 증명되었으며, 이는 실험적으로 확인이 되었음.
- 이러한 탄소나노튜브의 우수한 물성으로 인하여 emitter 및 디스플레이 응용, 2차 전지 및 연료전지, 나노부품 및 시스템, 고기능 복합체 등에 관한 탄소나노튜브 응용연구가 더욱 활발히 진행될 예정임. 특히 탄소나노튜브의 합성과 응용연구가 활성화되면 첨단 전자정보산업 분야의 적용이 빠른 속도로 발전하고 있어서, 차세대 평판 디스플레이 산업분야에서 국내의 기술경쟁력 확보에 크게 기여할 수 있을 것으로 기대됨.
- 탄소나노튜브 관련분야의 논문이 하루 1편 이상 게재될 만큼 연구가 국·내외적으로 적극적으로 추진되고 있으나, 아직까지도 미개척 연구개발 분야가 많은 상태임. 탄소나노튜브의 합성과 응용에 대한 연구는 외국의 선진연구 그룹에서도 아직 초기 단계이므로 우리나라에서도 탄소나노튜브 분야의 연구에 집중적으로 노력을 기울이면 머지않아 국제 경쟁력을 확보할 수 있을 것으로 예상됨.

### 3. 탄소나노튜브의 구조

- 탄소나노튜브는 흑연면(graphite sheet)이 나노 크기의 직경으로 둥글게 말린 상태이며, 이 흑연 면이 말리는 각도 및 구조에 따라서 금속 또는 반도체의 특성을 보임. 또한 벽을 이루고 있는 결합수에 따라서 단일벽 탄소나노튜브 (Single-walled Carbon Nanotube), 이중벽 탄소나노튜브 (Double-walled Carbon Nanotube), 다중벽 탄소나노튜브 (Multi-walled Carbon Nanotube), 다발형 탄소나노튜브 (Rope Carbon Nanotube)로 구분함. 이에 관한 그림을 <그림 2-2>에 나타내었음.

<그림 2-2> 탄소나노튜브의 다양한 구조



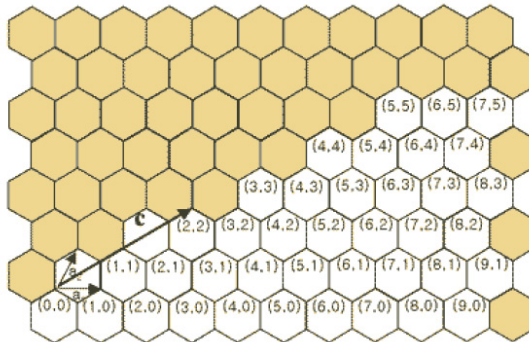
## 8 탄소나노튜브 기술동향 및 시장전망

- 탄소나노튜브는 <그림 2-2>에서 볼 수 있듯이 zigzag와 armchair 라고 알려진 두 개의 대칭구조가 가능함. 실제로 대부분의 탄소나노튜브는 이러한 대칭구조를 갖는 대신에 벌집 모양의 육각형이 튜브 축을 따라서 나선형으로 배열된 chiral 구조를 가짐. 각각의 튜브 구조를 분류하는 간단한 방법은 graphene 격자위의 두 점을 연결하는 벡터 Ch로 표시함. 실린더는 이 벡터의 두 끝점이 만나도록 평면을 말아 올린 것임. <그림 2-3>은 Dresselhaus의 표기 방법에 따른 graphene 면을 보여주고 있는데, 이 그림에서 정수 짝(n, m)은 나노튜브가 만들어지는 가능한 구조를 나타냄. 그러므로 n과 m으로 벡터 Ch를 다음과 같이 표시할 수 있음.

$$Ch = na_1 + ma_2$$

여기서  $a_1$ 과  $a_2$ 는 graphene 면의 단위세포 기본벡터이며,  $n \geq m$  임. zigzag 튜브는  $m=0$  이며, armchair 튜브는  $n=m$  의 값을 가짐. 위의 조건과 다른 튜브들은 chiral 임.

<그림 2-3> 탄소나노튜브 구조의 표기 방법



- 탄소나노튜브의 전기적 성질은 직경과 chirality의 함수로서 금속 혹은 반도체적 성질을 주기적으로 가지며, 이론적 연구에 의하면 SWNT의 1/3이 금속성, 나머지는 band gap이 나노튜브 직경에 반비례하는 반도체 성질을 나타낸다.
- 일반적으로  $n-m = 3q$  (단,  $q$ 는 정수)일 때,  $(n,m)$  나노튜브는 금속성을 가짐. 모든 armchair 구조의 나노튜브와 zigzag구조의 약 1/3의 정도의 나노튜브가 금속성을 가짐. 일반적인 금속이 평탄한 DOS(density of state)를 가지는 반면, 나노튜브의 DOS는 각 피크가 single quantum subband에 일치하는 많은 특이성(singularity)이 존재. 이들 특이성은 STS(Scanning Tunnelling Spectroscopy)나 공명 라만분광(Resonant Raman Spectra)등의 실험적 결과를 해석하는데 중요함.

#### 4. 탄소나노튜브의 합성방법

- 탄소나노튜브 합성은 처음에는 전기방전법(arc-discharge)이 주류를 이루었으나, 이후 레이저증착법 (laser vaporization), 열분해법(pyrolysis) 등이 제시되었음. 이들 방법은 탄소나노튜브를 합성한 후, 고순도를 얻기 위해서는 복잡한 정제 과정을 거쳐야 하며, 또한 구조제어 및 수직배향 합성이 어려운 단점을 갖고 있음.
- 최근에는 탄소나노튜브를 수직배향으로 합성할 수 있는 CVD법(화학기상증착법, chemical vapor deposition)이 크게 부각되고 있으며, CVD법은 열 CVD법, DC 플라즈

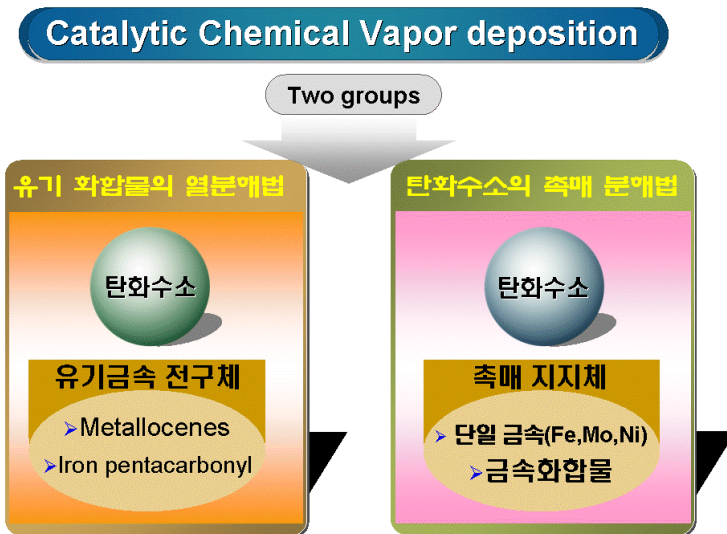
## 10 탄소나노튜브 기술동향 및 시장전망

마 CVD법, RF 플라즈마 CVD법, 마이크로파 플라즈마 CVD법으로 구분할 수 있음. 이러한 CVD 방법은 기존의 전기방전법이나 레이저 증착법에서는 불가능한 탄소나노튜브의 수직배향 합성이 가능할 뿐만 아니라 저온합성, 고순도 합성, 대면적 기판합성이 가능하며 나아가서는 탄소나노튜브의 구조제어가 용이한 장점을 가지고 있음.

- 탄소나노튜브를 다양한 분야에 응용하기 위해서는 저온 합성기술, 수직배향기술, 대면적 기판합성기술, 고품질 합성기술, 성장 및 구조제어기술이 중요한 요소로 부각 됨.
- 한편 최근에 탄소나노튜브를 대량 합성할 수 있는 방법으로 기상 성장법(vapor phase growth)법이 제시되고 있는데, 이 방법은 기판을 사용하지 않고 반응로 내부로 촉매금속 소스와 탄화가스를 동시에 공급하여 반응로 내벽과 반응로 내부 공간에서 기상반응으로 탄소나노튜브를 합성하는 방법으로써 대량합성에 유리한 장점을 가지고 있음.
- 여러 가지 합성법이 있지만 본문에서는 최근 대두되고 있는 많이 쓰이는 촉매화학 기상 증착법과 열화학 기상 증착법에 대해서 소개하고자 함.
- 촉매화학 기상 증착법 (Catalytic Chemical Vapor Deposition)
  - 고품질 SWNTs를 생산하는 방법으로 전기방전법 (Arc-discharge), 레이저증발법(Laser-ablation)이 있지만 이들 방법은 나노튜브를 대량으로 생산하는데

- 있어서 적합한 합성방법이 아님.
- 반면에 촉매 화학 기상증착법 (Catalytic chemical vapor deposition)은 산업 스케일에서 값싼 가격으로 SWNT, DWNT, MWNT합성을 하는데 매우 유용. 또한 CNT의 직경, 길이, 밀도, 구조, 결정성 등을 제어하기가 쉽고, 고순도의 CNT를 대량생산 할 수 있어 유망한 합성방법이라 할 수 있음. 촉매화학 기상증착법에는 두 부류의 방법으로 나뉨.

<그림 2-4> 촉매 화학 기상증착법의 분류<sup>[8]</sup>



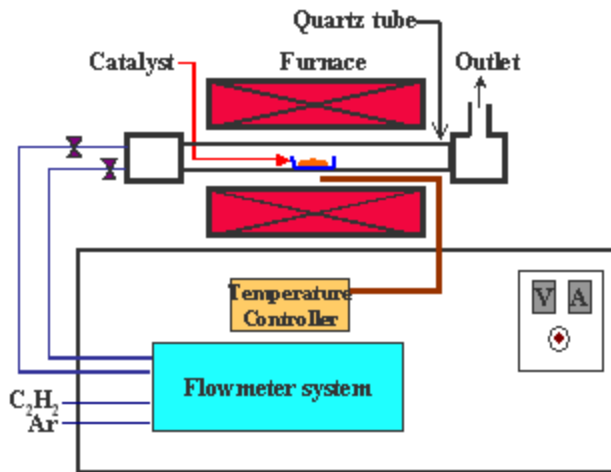
- 기존의 CVD법은 기판위에 촉매금속을 증착시킨 후, 이러한 촉매금속위에 C<sub>2</sub>H<sub>2</sub>, C<sub>2</sub>H<sub>4</sub>, CH<sub>4</sub>, C<sub>2</sub>H<sub>6</sub>등의 반응 가스를 이용해서 탄소나노튜브를 합성하는 방법임. 그러



## 12 탄소나노튜브 기술동향 및 시장전망

나 기상합성법은 기판을 사용하지 않고 반응로 안에 반응가스와 유기 금속촉매를 직접 공급하여 기상에서 탄소나노튜브를 직접 합성하는 방법으로써, 탄소나노튜브를 대량으로 합성하기에 유리한 방법으로 제안되고 있음. <그림 2-5>는 탄소나노튜브의 기상합성법에 사용되는 장치의 개략도임.

<그림 2-5> 기상합성 장치<sup>[8]</sup>

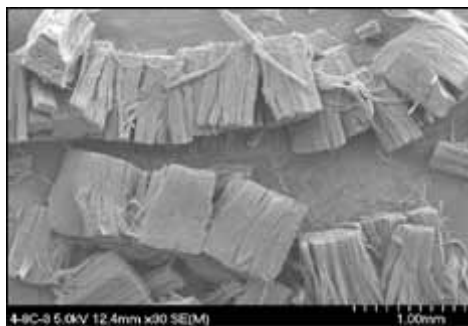


- 장치의 한편에 반응가스를 공급하기 위한 장치가 설치되어 있고 반응로 내에 촉매금속 분말이 들어있는 보트가 설치되어 있음. 반응로는 2단계 온도영역으로 설계되어 있는데, 촉매금속 분말이 들어 있는 보트가 위치한 제 1온도 영역은 비교적 저온으로 유지되고 탄소나노튜브의 합성이 이루어지는 제 2온도 영역은 고온으로 유지됨.
- 제 1온도 영역은 탄화가스를 분해할 수 없지만 촉매금

속을 기화시키기에 충분한 비교적 저온으로 유지됨. 일단 제 1온도 영역에서 촉매금속 분말로부터 기화되는 촉매금속은 원자 상태이지만 반응로 안에서 원자들 간의 충돌과 결합과정을 통하여 수-수십 nm 크기의 미세한 파티클로 형성됨.

- 저온영역에서 촉매금속 분말로부터 기화된 미세한 촉매금속 파티클이 제 2온도 영역에 도달되면 반응로 내부로 공급된 후 제 2온도 영역에서 고온에 의해서 분해된 탄화가스가 촉매금속 파티클에 흡착되고 확산하여 촉매금속 파티클에서 탄소나노튜브의 합성이 진행됨.
- <그림 2-6>은 기상합성법에 의해서 합성된 탄소나노튜브의 SEM 사진임. 이 그림에서 알 수 있듯이 약 1000  $\mu\text{m}$  정도의 길이를 갖는 고순도의 탄소나노튜브들이 촉매금속이 증착된 기판 없이도 반응로 내에서 기상반응에 의해서 고밀도로 균일하게 합성된 것을 알 수 있음.

<그림 2-6> 기상합성법으로 합성한 탄소나노튜브의 SEM 사진<sup>[8]</sup>



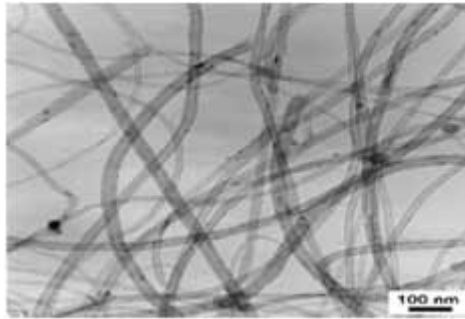
- <그림 2-7>은 기상합성법에 의해서 합성시킨 탄소나노튜브의 TEM 사진임. 이 TEM 사진에서 탄소나노튜브

#### 14 탄소나노튜브 기술동향 및 시장전망

는 직경이 30 nm 이하이고 다중벽구조를 가지며, 나노튜브의 가운데가 비어 있는 것을 확인할 수 있음. 그러나 CVD법으로 성장시킨 나노튜브와 다르게 나노튜브에서 대나무구조를 나타내는 마디는 거의 나타나지 않음.

- 한편 탄소나노튜브의 내부가 부분적으로 검게 보이는 부분은 합성시 촉매금속 덩어리가 나노튜브의 내부로 흡인된 것을 보이고 있지만 대부분의 나노튜브는 비교적 순도가 높고 나노튜브 표면에 탄소 파티클이 없는 것을 나타내고 있음.

<그림 2-7> 기상합성법에 의해서 합성시킨 탄소나노튜브의 TEM 사진<sup>[8]</sup>

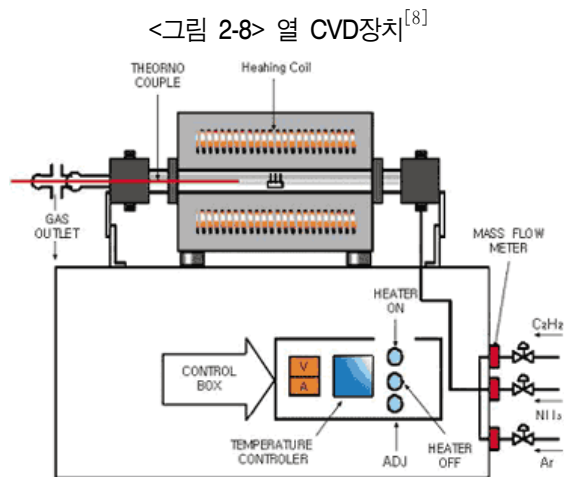


#### ○ 열화학 기상 증착법 (Thermal Chemical Vapor Deposition)

- 대면적 기판 위의 탄소나노튜브 합성은 앞으로의 FED를 비롯한 각종 전계방출 디스플레이에 적용할 수 있다는 점에서 기술적으로 아주 중요함. 최근에 들어서 대면적 기판위에서 열 CVD 방법으로 탄소나노튜브를 합성하는 연구가 상당히 진척되었음. CVD 합성방법은 생성물이나 원료가 다양하고, 고순도 물질을

합성하기에 적합하며, 미세구조를 제어할 수 있다는 장점을 가지고 있음.

- <그림 2-8>은 탄소나노튜브 합성에 사용한 열 CVD 합성장치임. 석영 반응로의 외벽에 저항코일을 감아서 안정된 반응온도를 유지할 수 있고 반응로 내부에 온도를 감지할 수 있는 열전대가 설치되어 있음.



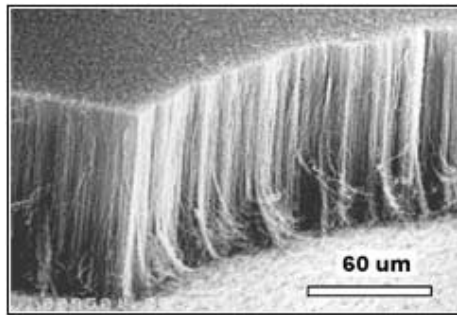
- 열 CVD법에 의한 탄소나노튜브의 합성방법은 먼저 실리콘 또는 실리콘 산화막 또는 알루미늄 기판위에 촉매금속으로서 Fe, Co, Ni등을 수십 nm 정도의 두께로 증착하고, 이어서 촉매금속막이 증착된 기판을 반응로 안에 넣어서 700~950 °C의 온도 범위에서 NH<sub>3</sub> 분위기로 열처리를 실시하여 촉매금속을 미세한 크기의 나노파티클로 형성시킨 후, C<sub>2</sub>H<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>, C<sub>2</sub>H<sub>4</sub>, CO 등의 탄화가스를 반응로 내부로 공급하여 탄소나노튜브를

## 16 탄소나노튜브 기술동향 및 시장전망

성장시킴.

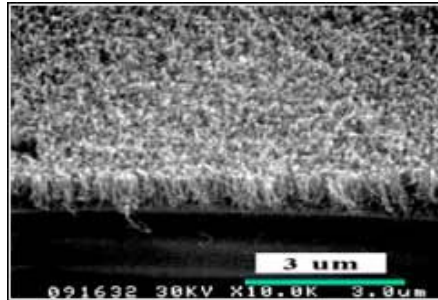
- <그림 2-9>는 950 °C에서 열 CVD법으로 성장시킨 탄소나노튜브의 SEM 사진을 보여주고 있음. 표면에 탄소파티클이 없는 고순도의 탄소나노튜브가 수직 방향으로 정렬되어 균일하게 성장된 것을 나타내고 있음. 탄소나노튜브의 길이는 대략 100  $\mu\text{m}$ 이고 직경은 120 nm인 것을 보여주고 있음.

<그림 2-9> 950 °C에서 열 CVD법으로 성장시킨 탄소나노튜브의 SEM 사진<sup>[8]</sup>



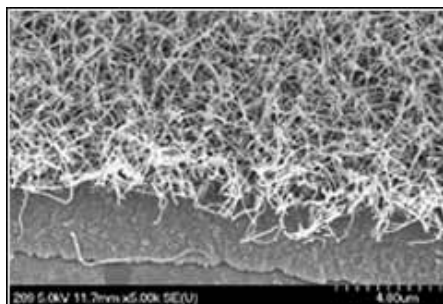
- <그림 2-10>은 550 °C에서 성장시킨 탄소나노튜브의 SEM 사진임. 950 °C에서 성장시킨 탄소나노튜브와 마찬가지로 역시 표면에 탄소파티클이 없는 고순도의 탄소나노튜브가 수직 방향으로 정렬되어 균일하게 성장된 것을 나타내고 있으나, 탄소나노튜브의 길이는 대략 1  $\mu\text{m}$ 이고 직경은 약 20 nm인 것을 보여주고 있음. 열 CVD법에 의한 탄소나노튜브 성장에서는 온도가 감소할수록 탄소나노튜브의 성장속도가 감소하고 직경도 감소하는 특성을 나타냈음.

<그림 2-10> 550 °C에서 열 CVD법으로 성장시킨 탄소나노튜브의 SEM 사진<sup>[8]</sup>



- <그림 2-11>은 550 °C에서 Ti막이 증착된 소다라임 글라스 위에 성장시킨 탄소나노튜브의 SEM 사진임. 소다라임 글라스는 녹는점이 550 °C로 낮은 편이지만 진공실장에 유리하고 가격이 저렴하여 각종 디스플레이에 대부분 사용되고 있는 기판재료임. Ti막은 탄소나노튜브의 전계전자방출 특성을 평가하기 위하여 캐소드로 사용함. 550 °C에서 실리콘 산화막 기판 위에 성장시킨 탄소나노튜브와 다르게 탄소나노튜브의 수직배향성이 그다지 좋지 않지만 표면에 탄소파티클이 없는 고순도의 탄소나노튜브가 합성된 것을 보여주고 있음.

<그림 2-11> 550 °C에서 열 CVD법으로 Ti막이 증착된 글라스 위에 성장시킨 탄소나노튜브의 SEM 사진<sup>[8]</sup>



## 5. 미래 신소재로서의 탄소나노튜브<sup>[9]</sup>

### ○ 탄소 나노튜브의 장점

- 이 반도체는 이미 도핑이 된 효과를 지니고 있어 그 응용을 위해 따로 도핑할 필요가 없음. 반도체 소자 제작공정에서 하나의 중요한 과정이 줄어들어 유리하며, 이것은 실제 대량생산을 염두에 둘 때 대단히 큰 장점이 됨.
- 선 폭이 대략 나노미터 정도로 작기 때문에 만약 수 나노미터 정도 크기의 기억소자나 회로를 만든다면 현재 최첨단의 집적회로 선폭의 백분의 일 정도가 됨. 넓이로 따져 만분의 일이므로 현재보다 만 배 정도 집적도가 높은 칩을 만들 수 있으며, 기억소자로 이야기하면 그 집적도가 테라(10<sup>12</sup> 즉 1조) DRAM에 이르게 됨. 즉, 엄지 손톱만한 면적에 Encyclopedia Britannica 전질의 100배 가까운 정보를 기억시킬 수 있음.
- 탄소 원자 사이의 결합은 현재 반도체의 주종을 이루고 있는 실리콘보다 훨씬 더 강함. 따라서 실내온도의 공기 중에서 화학적으로 극히 안정되고 강하며, 전자회로 외에도 초강력 섬유나 열, 마찰에 잘 견디는 표면재료로도 쓸 수 있음. 기존의 흑연섬유가 대략 강철만큼 강하지만 새로운 나노튜브 섬유는 그보다 10배 이상 강하며, 열전도도가 실리콘보다 훨씬 높아 열을 잘 방출하므로 반도체 소자가 작동하면서 뜨거워지는 문제가 쉽게 해결됨.

- 탄소는 화학적으로 성질이 이미 많이 연구되어 있으므로 폴리머를 만드는 기술이 이미 고도로 발전된 노하우를 이용하여 새로운 방면에 응용이 가능함. 실리콘에서는 어려웠던 생물체와의 직접적인 정보교환(일종의 interface)등 용이해질 것으로 기대됨.

○ 탄소나노튜브의 단점

- 우선 그 생산이 고도의 기술을 요하므로 대량생산이 아직 요원하고 또한 원하는 트랜지스터를 만들기 위해 회로를 어떻게 깔 것인가도 해결해야 할 문제임. 기존의 실리콘에서는 기본적으로 실리콘 위에 화학적으로 즉 etching으로 회로를 그리는 기술이 필요했지만 여기서는 이미 존재하는 가는 선을 원하는 대로 배열시키는 기술이 필요하므로 기존의 반도체를 개량하는 것보다 전혀 새로운 응용 가능성을 탐구하는 것이 바람직함.



## 제3장

# 국내외 기술개발동향

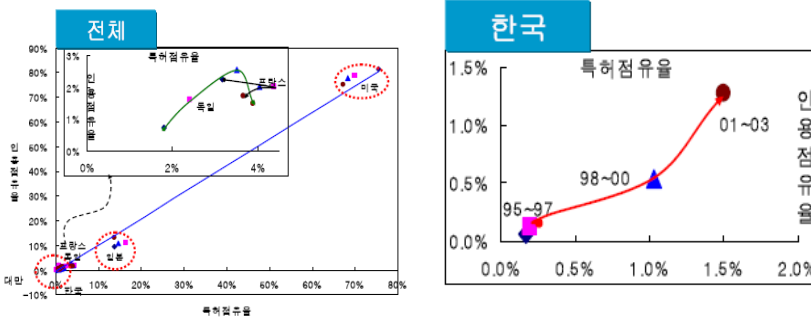
## 1. 국내외 기술 수준

### ○ 특허 건수 vs 피인용점유율 비교

- 나노기술에 대한 중요도와 관심이 집중되면서 나노소자를 구현하고 이에 대한 특허를 출원하는 국가가 증가하고 있으며 이에 대한 연구의 진행이 급속도로 진행되고 있음.
- <그림 3-1>은 나노기술과 관련된 전체 국가의 특허 출원 점유율을 보여주고 있음. 왼쪽 그림에서 볼 수 있듯이 미국에서 나노기술에 대한 점유율은 약 70% 정도로 나노기술의 선진국다운 면모를 보여주고 있음. 또한 일본의 점유율도 약 15%로 높은 점유율을 보이고 있음.
- 한국의 나노기술에 대한 연구는 선진국에 비해 뒤늦은 출발로 인하여 아직 5%에도 도달 못하는 상황이지만 현재 많은 연구가 진행 중임.

22 탄소나노튜브 기술동향 및 시장전망

<그림 3-1> 특허 건수와 피인용점유율 비교 : 전체(좌), 한국(우)

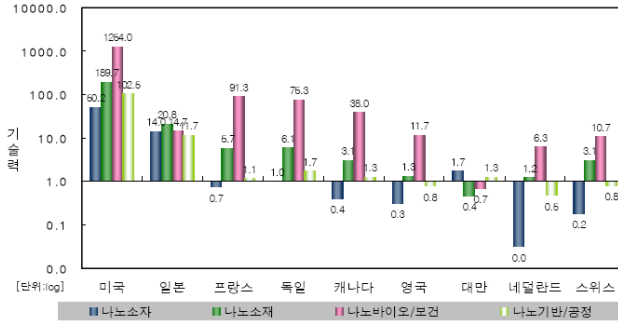


자료: 한국 특허 정보원

○ 기술 분야별 기술력 비교

- 미국 특허건수 상위 10개국의 기술 분야별 기술력 비교 (한국 = 1)
- 한국의 기술 분야별 기술력  
나노소자 분야는 프랑스, 독일과 대등하며, 캐나다, 영국에 비해서는 우위를 보임. 나노바이오/보건 분야의 기술력은 미국의 약 1/1254 수준에 미침
- <그림 3-2>에서는 상위 10개국의 기술 분야별 기술력 비교를 보여주고 있음.
- <표 3-1>은 나노 기술 주요국들의 기술력 순위를 보여 줌. 기술력 순위는 미국, 일본, 프랑스 순이며 한국은 10위를 차지하였음. 한편 영향력은 네덜란드가 가장 높음. 대한민국은 양적 특허 건수에 비해 세계적 영향력이 상대적으로 약함. 양적 증가보다는 기초적 투자를 더욱 늘려야 할 필요성이 있음.

&lt;그림 3-2&gt; 상위 10개국의 기술 분야별 기술력 비교



자료: 한국 특허 정보원

&lt;표 3-1&gt; 주요국의 기술력 순위

구분	기술력	건수	영향력	시장력	과학력
	TS	PN	PII	PFS	SS
미국	1	1	2	4	1
일본	2	2	4	10	2
프랑스	3	3	9	6	5
독일	4	4	11	9	4
네덜란드	5	9	1	2	7
캐나다	6	5	7	1	3
영국	7	6	3	3	6
대만	8	8	5	12	10
스위스	9	10	6	7	11
대한민국	10	7	12	11	8
이스라엘	11	12	8	5	9
이탈리아	12	11	10	8	12

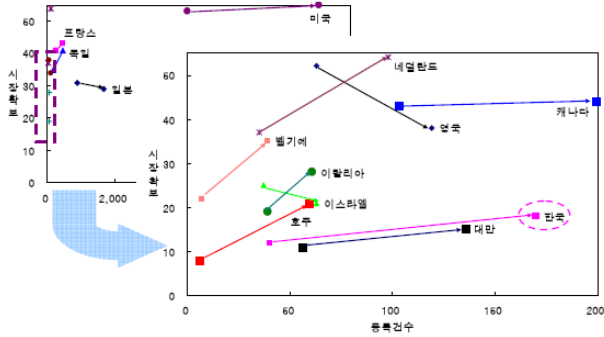
자료: 한국 특허 정보원

## ○ 시장 확보력

- 시장 확보 수가 높은 국가는 미국, 프랑스, 독일 등의 순서임.
- 한국은 시장 확보 수에서 미국의 약 1/3 수준으로 시장 확보 다변화 노력은 미흡한 것으로 판단됨.

## 24 탄소나노튜브 기술동향 및 시장전망

<그림 3-3> 국가별 시장 확보율 비교표

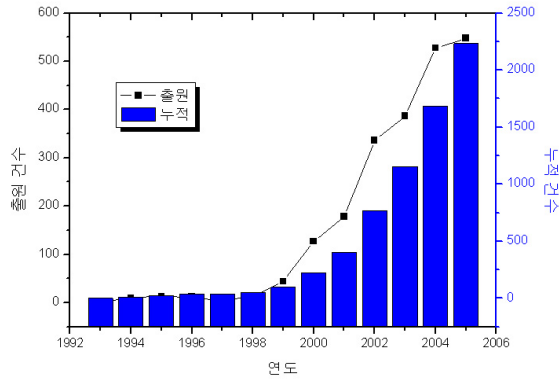


자료: 한국 특허 정보원

## 2. 국내외 특허 정보 분석

- 대상 DB에 검색된 국내외의 특허의 출원건수는 1991년에 일본 NEC의 Iijima 박사가 탄소나노튜브를 처음 발견한 이후로 지금까지 꾸준한 증가세를 유지하고 있음.
- 2001년부터 2005년까지 출원건수가 선형적으로 증가하는 추세를 보이고 있으며 미국과 일본 그리고 국내에서도 많은 특허가 출원되었음.
- <그림 3-4>에서 선모양은 연도별 출원건수를, 막대모양은 누적 출원건수를 나타낸 것으로 1985년 이후 조사대상인 미국, 일본 한국에 약 400여건의 탄소나노튜브 관련 특허가 출원되었음을 알 수 있음.
- 2000년까지는 주춤한 증가세를 보이다가 2005년까지는 약 2000건의 누적건수를 보이는 등 특허출원의 급격한 증가세를 보여주고 있음.

<그림 3-4> 연도별 출원건수 및 누적건수 추이

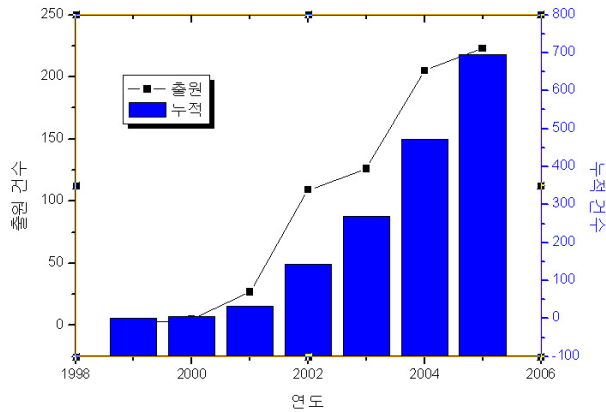


(<http://www2.wips.co.kr/>)

○ 미국

- 2001년 27건을 비롯하여 2003년에는 126건, 2004년에는 205건, 그리고 2005년에는 약 223건으로 2002년 이후 특히 건수가 선형적으로 증가하는 것을 알 수 있음.

<그림 3-5> 미국특허의 연도별 출원건수 및 누적건수 추이



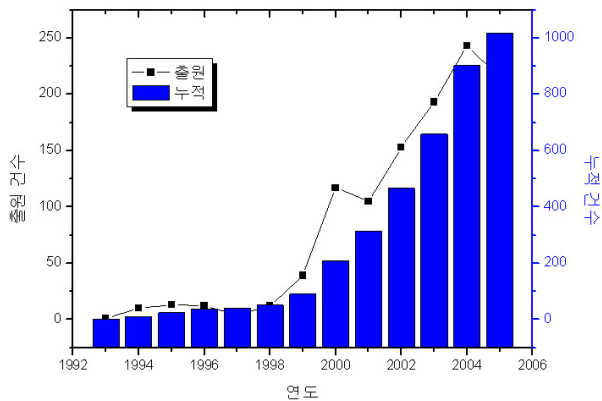
(<http://www2.wips.co.kr/>)

## 26 탄소나노튜브 기술동향 및 시장전망

### ○ 일본

- 일본에서는 탄소나노튜브에 대한 특허가 1991년부터 출원되기 시작했으며 이후 완만한 성장을 보이다가 1998년 이후에는 급격한 팽창을 보였음.
- 미국과는 대조적으로 1999~2000년도에도 100건이 넘는 많은 특허가 출원되었으며 2000년 이후 선형적으로 꾸준히 증가하는 추세를 보이고 있음.
- 2005년 현재 누적건수가 1000건이 넘는 특허 출원이 되었으며 탄소나노튜브에 대한 꾸준한 연구가 진행되고 있음.

<그림 3-6> 일본특허의 연도별 출원건수 및 누적건수 추이



(<http://www2.wips.co.kr/>)

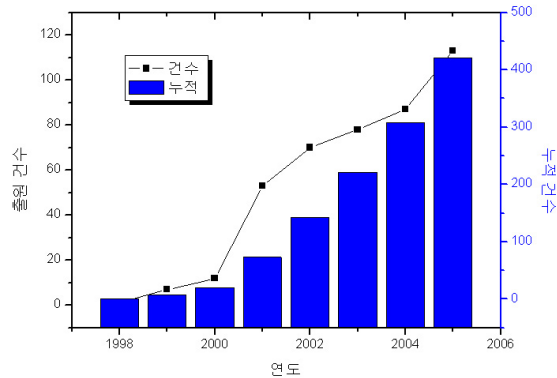
### ○ 한국

- 한국에서는 선진국에 비해 다소 늦은 1997년부터 특허 출원이 이루어진 것으로 보이며 2000년까지는 아직 국

내 연구자들의 연구 성과가 뚜렷이 나타나지는 않았음.

- 2000년 이후 본격적으로 개발이 추진되어 특허출원이 증가하는 가시적인 성과가 있었으며 2001년부터 2005년까지 선형적으로 특허가 증가하는 것을 알 수 있었음.
- 2001년에는 약 50건, 2003년에는 약 70건의 특허가 출원되었으며 2005년에는 약 100건 이상이 출원되는 것으로 볼 때 국내에서 탄소나노튜브에 대한 연구가 꾸준히 진행되고 있음.

<그림 3-7> 한국특허의 연도별 출원건수 및 누적건수 추이



(<http://www2.wips.co.kr/>)

### 3. 시장 동향 분석 및 사업성

#### ○ 탄소나노튜브 산업의 특성

- 탄소나노튜브는 발생 (seeds) 단계에서 응용단계로 넘어

가고 있는 성장기술임. 주변기술의 지원으로 seeds인 코어기술이 개발되고, 응용분야의 기반적 기술 지원으로 응용기술이 개발되어 기술의 한계를 극복하게 됨.

- 경제 적용화(commercialization) 기술의 지원으로 고부가가치화, 고생산수율 등을 획득함으로써 경제적인 한계를 극복하고, 마지막으로 환경문제 등과 같은 사회적인 한계를 극복하고 나서야 비로소 실제적인 기술로써 제품생산에 적용되게 됨. 현재, 탄소나노튜브는 코어기술에서 다양한 응용기술이 개발되는 단계로 넘어가고 있고, 기술과 경제의 벽을 동시에 넘어서고 있는 상황.
- 탄소나노튜브는 용도분야가 다양하고 기술적 파급도가 큰 기술임. 탄소나노튜브는 전자분야와 의약학 분야, 복합소재분야 등에 사용될 정도로 용도가 매우 다양함. 최근 경향을 볼 때 단기적으로 슬림형 텔레비전의 전자총으로 사용이 거의 확실시되고 있으며, 복합재료로서의 용도도 점진적으로 구체화되고 있음. 또한 수소저장용 및 반도체 메모리로서의 사용가능성도 예측되고 있어 해당분야의 응용기술 개발이 가속화될 것으로 보임.

○ 세계 시장규모 추이

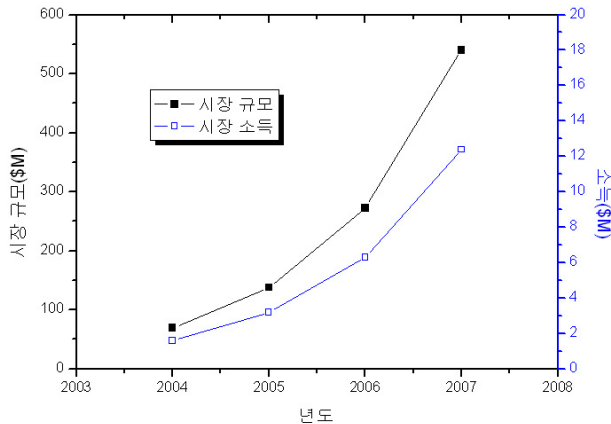
- 탄소나노튜브의 경우, 아직 시장규모가 극히 미미함. 앞에서 언급했듯이 연구용 수요가 대부분이고 전자파 차폐용 특수도료 등 특수용도로의 이용이 일부 이루어



지고 있는 실정.

- 연구용으로 사용되는 재료의 경우 수년간 사용할 것을 미리 발주하기도 하기 때문에 연간 수요량을 예측하기가 어려우며, 특수용도의 수요발생도 일정하지 않아 정확하게 시장을 예측하기는 매우 힘든 상황임.
- 세계시장은 2000년에 270만달러, 2001년에 502만달러, 2002년에는 1억2000만 달러 정도이며, 2007년 까지 성장률 98%로 5억 4000만 달러의 시장 규모가 예상됨. 우리나라의 경우 일본 143.2만달러, 독일 136.6만달러에 이어서 120만달러 정도의 탄소나노튜브를 사용할 것으로 예측되고 있음. <그림 3-8>에는 CNT 시장의 규모와 수입 소득예측을 나타내고 있음.

<그림 3-8> CNT 시장의 규모와 수입 소득예측<sup>[10]</sup>



- 수요량 측면에서 본다면 시장은 더욱 커질 것으로 보임. 이는 탄소나노튜브의 생산수율이 더욱 향상되어,

### 30 탄소나노튜브 기술동향 및 시장전망

점차 가격이 낮아지고 있기 때문이다.

- 따라서 시장규모가 100% 넘는 수준으로 향상되고 있다 하더라도 수량 측면에서 보면 훨씬 더 높은 수준으로 증가할 것임을 의미함.
- <표 3-2>에 2002년 기준 탄소나노튜브의 수요량을 국가별로 나타내었음. 일본이 가장 많은 318.6 kg의 탄소나노튜브를 사용할 것으로 예측되었고, 다음이 독일의 304 kg, 우리나라가 267.4 kg을 사용할 것으로 분석되었음.

<표 3-2> 각국별 탄소나노튜브의 수요량

(2002년, kg)

미국	일본	독일	프랑스	한국	러시아	중국	기타	계
229.2	318.6	304.0	255.0	267.4	211.0	154.8	80	1820

- 전체적으로 보면, 전 세계 국가들은 유사한 규모의 탄소나노튜브 수요추이를 보임을 알 수 있음. 이는 연구의 전체규모가 크다 하더라도 탄소나노튜브가 나노 단위의 분말이어서 기술개발에 사용되는 탄소나노튜브의 양이 매우 제한적이고 아직도 응용기술개발이 제대로 이루어지지 않아 사용되는 탄소나노튜브의 양이 미미하기 때문.

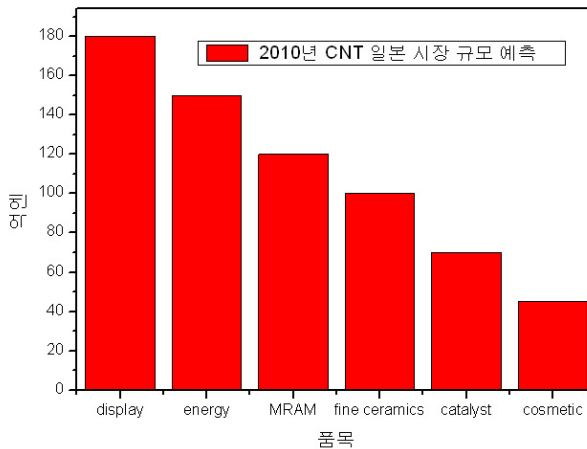
#### ○ 일본 시장규모 추이

- 일본의 2000년도 탄소나노튜브 시장규모는 약 3.6억엔

수준이었으나 2002년에는 7.4억엔으로 커지고, 2010년에는 20~30조엔으로 커질 것으로 예측됨.<sup>[11]</sup>

- 주로 기초연구 및 응용연구에 사용되는 것으로 알려지고 있으며, 연구용 샘플을 제공해주는 기업은 일본에서 200~300개에 달함. 2000년경까지는 연구 수준의 소량을 제공하는 시설이 위주였다면 2001년 후반부터는 양산을 전제로 한 공급체제 정비가 이루어지고 있음.
- 일본에서는 2010년 실용화를 목표로 연구개발에 박차를 가하고 있음. 일본에서 가장 실용화에 근접한 제품은 FED로 알려지고 있으며, 연료전지 음극재료로도 같이 실용화될 수 있으리라 보고 있음.
- <그림 3-9>에는 2010년 일본의 각 분야별 시장 규모를 예측하였음.

<그림 3-9> 2010년 일본의 각 분야별 시장 규모<sup>[11]</sup>



### 32 탄소나노튜브 기술동향 및 시장전망

#### ○ 국내 시장규모 추이

- 우리나라의 2000년도 탄소나노튜브 시장규모는 약 4억원(40 kg), 2001년 7억원(100 kg) 정도였으나, 업계에서 추정하고 있는 2002년 시장규모는 약 12억원(268 kg) 정도이고, 2007년에는 792억원에 이를 것으로 전망됨.

#### ○ 가격동향 분석

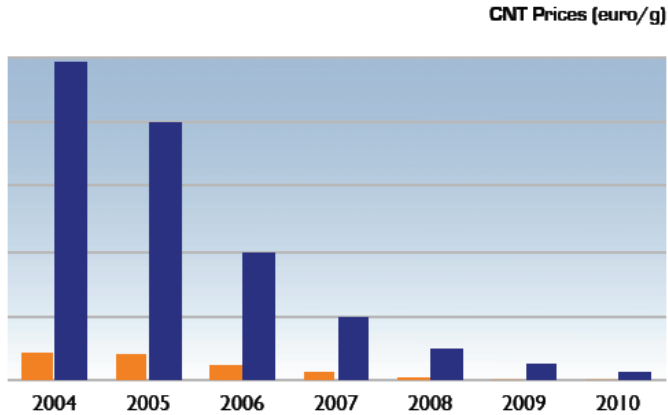
- 미국 컨설팅 업체인 W사가 제시하고 있는 탄소나노튜브 평균가격을 산정해보면 2000년에 kg당 1만 달러 수준이었고, 2002년 들어서 3-5천 달러로 거의 절반 수준으로 떨어졌음
- 단중벽 나노튜브(SWNT : Single Walled NanoTube)의 경우에는 제조가 간단하지 않아 2000년에는 kg당 38만 달러 수준이었으나, 2002년경에는 10만 달러로 떨어졌음. 2005년 미국 한 업체의 SWNT와 MWNT의 가격을 <표 3-3>에 나타내었음.

<표 3-3> SWNT와 MWNT의 2005년 가격 비교<sup>[10]</sup>.

grams	SWNT >90wt%	MWNT >95wt%(20~30nm)
1	\$ 175	\$ 20
10	\$ 1500	\$ 140
25	\$ 3300	\$ 230
100	\$ 10750	\$ 600

- 이러한 가격들은 여러 업체들의 수년간 가격을 평균한 추정치로, 실제로 구매에 들어갈 경우에는 구매하는 양이나 품질에 따라 가격이 많이 달라지는 양상을 보이고 있음. 즉, 구매의 양이 많아지면 상대적으로 가격이 떨어지고, 제품의 품질이 높아지거나 탄소나노튜브의 함량이 높아질수록 가격이 올라가고 있음.
- 탄소나노튜브는 2002년 시장규모가 1억2000만 달러 정도이고 2007년의 시장규모가 약 5억4000만 달러로 예상되고 있으며, 2002년 이후 연평균 98% 정도 성장할 것으로 예상되고 있어 시장적 측면에서 매력을 갖춘 사업아이템이라 할 수 있음.
- 탄소나노튜브 제조기술의 경우, 가장 효율적이라고 할 수 있는 기술이 공지되어 있음. 하지만 아직도 탄소나노튜브의 값이 더 내려가야 하기 때문에 효율적인 기술에 대한 기대는 큼. 그래서 혁신적 기술이 나타나 세계시장에서 업계를 재구축할 가능성이 상존하고 있음.
- 용도 측면에서 보면 응용 분야가 다양하여 장기적으로 적절한 위험회피 전략 수립이 가능할 것으로 보여짐.
- 경쟁상황을 살펴보면, 일본이나 미국 등에 세계적 업체들이 있으며, 국내에도 일진나노텍이라는 중견 업체가 시장에 진출하고 있음.

<그림 3-10> 연도별 CNT 가격 예상 비교표 (CIENTIFICA)



- <그림 3-10>에서는 앞으로 2010년까지 CNT 가격 예상표를 보여주고 있음.
- 탄소나노튜브는 이미 기존의 배터리 기술과 대적할만한 수준에 올랐음. 현재 약 50%의 리튬 배터리가 탄소나노튜브를 사용하여 2배의 에너지 효율을 얻고 있음. Cientifica의 분석에 따르면 이는 2010년에는 약 85%까지 상승할 것으로 보임.
- 다층면의 나노튜브는 연료전지에 있어 효율을 10배 증가시킬 수 있으며 50%의 비용 감소를 가져 올 수 있다. 향후 5년 내 가격은 하락할 것이며, 약 70%의 연료전지가 탄소나노튜브를 사용할 것으로 보임.
- 탄소나노튜브의 가격은 향후 5년 내 10~100개 요소에 의해 하락할 것으로 전망이며, 나노섬유와 MWNT의 가격은 2008~2009년 사이 에너지 시장에서 책정될 것으로 보임.

## 제4장

### 결 론

- 20세기의 실리콘과 같이, 21세기에는 탄소재료가 핵심 역할을 할 것으로 기대되고 있는 가운데, 특히 탄소나노튜브는 전자정보통신, 환경 및 에너지, 의약 등의 분야에서 응용 가능성이 확실히 되고 있음.
- 탄소나노튜브 관련 특허 출원건수가 증가하여 2004년, 2005년에는 그 전의 거의 2배의 건수가 나타나고 있어 연구 및 상용화가 활발히 이루어지고 있음을 알 수 있음.
- 탄소나노튜브는 기술측면에서 보면 도입기에서 성장기로 넘어가고 있고, 제품 측면에서는 도입기 마지막 단계에 와 있다고 할 수 있음. 용도가 다양하여 기술 파급도가 매우 크고, 많은 연구개발이 이루어지고 있어 단기간 내에 성장 가능성이 매우 높은 기술이라고 할 수 있음.
- 세계시장규모를 보면, 2002년에 1억2000만달러로 추정되고 있으며, 2007년에는 5억 4000만달러에 이를 것으로 전망되고 있음. 국내시장도 2002년도 12억원 정도에서, 2007년에는 792억원에 달할 것으로 예측되고 있음.
- 전체적으로 탄소나노튜브 산업은 고성장을, 도입기단계 산업이므로 기술력 있는 기업이 장기적 관점에서 관련

### 36 탄소나노튜브 기술동향 및 시장전망

산업분야 등과 산학연 공동연구체제를 구축하여 시장에 진입한다면 세계적인 경쟁력을 확보할 수 있을 것으로 보임.



## 참고문헌

1. 박종구, 이경제/나노기술개발의 최근동향/재료마당/13, 38, 2000
2. S. Iijima, "Helical microtubules of graphitic carbon", Nature, 354, pp.56-58, 1991
3. T.W. Ebbesen and P.M. Ajayan, "Large-scale synthesis of carbon nanotubes", Nature, 358, pp.220-222, 1992
4. S. Iijima and T. Ichihashi, "Single-shell carbon nanotubes of 1-nm diameter", Nature, 363, pp.603-605, 1993
5. D.S. Bethune, C.H. Kiang, M.S. de Vries, G. Gorman, R. Savoy, J. Vasquez and R. Beyers, "Cobalt-catalysed growth of carbon nanotubes with single-atomic-layer walls", Nature, 363, pp.605-607, 1993
6. A. Thess, R. Lee, P. Nikolaev, H. Dai, P. Petit, J. Robert, C. Xu, Y.H. Lee, S.G. Kim, A.G. Rinzler, D.T. Colbert, G.E. Scuseria, D. Tomanek, J.E. Fischer and R.E. Smalley, "Crystalline Ropes of Metallic Carbon Nanotubes", Science, 273, pp.483-487, 1996
7. Z. F. Ren, Z. P. Huang, J. W. Xu, J. H. Wang, P. Bush, M. P. Siegal, P. N. Provencio, "Synthesis of Large Arrays of Well-Aligned Carbon Nanotubes on Glass", Science 282, pp.1105-1107, 1998
8. 고려 대학교 공과대학 전자공학과 나노튜브 및 나노소자 연구실
9. <http://www.natural21c.com/silver/cnt/>
10. Wright State Univ. (Carbon Nanotechnology Incorporated)
11. AIST Today international edition No. 10, p22.

## 저자소개

홍재민

- 공학박사
- 현, 한국과학기술연구원 책임연구원

이창환

- 공학박사 수료
- 현, 한국과학기술정보연구원 선임연구원
- 저서: 산업용 로봇, 자동차 연료장치 등

## 자문위원

김일두

- 공학박사
- 현, 한국과학기술연구원 선임연구원

BB102

홍재민 · 이창환

---

## 탄소나노튜브 기술동향 및 시장전망

---

2005년 12월 19일 인쇄

2005년 12월 23일 발행

발행처



서울특별시 동대문구 청량리동 206-9

☎ 130-742

전화 : 3299-6114

등록: 1991년 2월 12일 제5-258호

발행인

조영화

인쇄처

영신기획

---

---