

핵심정보분석을 통한 국가전략산업 고도화 지원체제 구축사업

< 과제명 : 탄소나노튜브 >

2002. 12

김기일 (선임연구원), 강현무 (선임연구원)
김강희 (선임연구원), 손종구 (선임연구원)
배상진 (선임연구원)

연구기관 : 한국과학기술정보연구원

<저자소개>

김기일

- 공학박사
- 산업기술정보연구원 책임연구원
- 현, 한국과학기술정보연구원 선임연구원

강현무

- 산업기술정보연구원 책임연구원
- 현, 한국과학기술정보연구원 선임연구원

김강희

- 산업기술정보연구원 책임연구원
- 현, 한국과학기술정보연구원 선임연구원

손종구

- 경영학박사
- 산업기술정보연구원 책임연구원
- 현, 한국과학기술정보연구원 선임연구원

배상진

- 산업기술정보연구원 책임연구원
- 현, 한국과학기술정보연구원 선임연구원

머 리 말

21세기는 정보통신기술이 주도하는 정보화 사회, 노인인구가 전체 구성인구의 상당비율을 차지하는 고령화 사회, 환경문제가 경제활동의 주요 제약으로 등장하는 친환경 중심의 사회입니다. 이러한 환경변화에 대응하기 위해 사회 변화의 트렌드에 걸맞는 국가적 차원의 새로운 적응전략이 필요한 시점에 와 있습니다.

현재, 우리나라 산업은 생산공정 분야에서의 국제경쟁력은 확보하였으나, 기초연구·제품개발·마케팅 분야의 경쟁력은 상대적으로 취약한 실정입니다. 이는 90년대의 자본투입 주도형(investment-driven) 발전전략에 기인하고 있습니다. 그 결과, 1990년~2001년 간의 경제성장은 생산성 향상보다 자본투입에 지나치게 의존하는 비효율적인 경제구조를 갖게 되었습니다.

우리나라는 외환위기를 통해 투입주도형 성장전략은 한계에 이르렀음을 이미 경험한 바 있습니다. 따라서, 21세기 지식정보화시대에서는 투입주도형이 아닌 혁신주도형 전략을 통한 경제성장이 절실히 요구됩니다. 국내외 전문연구기관들은 이러한 문제들을 해소할 수 있을 것으로 기대하는 미래전략산업으로 IT·BT·NT·ET 등을 제시하고 있습니다. 그러나, 이들 산업분야의 기술들은 기반기술의 특성을 갖고 있으며, 기술연구의 영역이 광범위하고 선진국의 기술선점 분야도 다수 존재합니다. 따라서, 우리나라도 비교우위가 있고, 산업화 기회가 있는 분야를 선정하여 선택과 집중의 원칙에 의한 개발을 유도할 필요가 있습니다. 한국과학기술정보연구원(KISTI)는 「핵심정보분석을 통한 국가 전략 산업 고도화 지원체제 구축사업」을 통해, 21세기 우리나라의 국가전략산업으로 육성해야 할 IT·BT·NT·ET 등의 산업분야를 중심으로 20개 기술을 선정하였습니다. 이들은 IT분야의 「텔레매틱스」, 「무선인터넷」, 「PDP」, 「디지털TV」, BT분야의 「Bio Chip」, 「유전자치료」, 「Biosensor」, 「바이오 농약」, NT분야의 「나일론계 나노컴퍼지트」, 「고온초전도재료」, 「MEMS」, 「광촉매」, 「탄소나노튜브」, 그리고 기타분야의 「영상의료기기」, 「레이저 가공기」, 「로봇」 등 입니다. 이 기술들은 향후 외형적인 시장규모뿐만 아니라 타 산업분야에의 파급력면에서도 매우 중요한 분야로 예상되고 있습니다. 본 보고서는 향

후 전략산업으로 등장할 유망기술들의 기술분석과 산업분석 및 사업성 평가로 구성되어 있으며, 기술개발동향, 특허동향, 주요 국가들의 기술수준분석, 기술예측 및 로드맵, 산업분석, 시장분석 및 예측, 사업 매력도 평가 등을 주요 연구내용으로 하였습니다. 이를 통해 연구개발 단계에서 부터 사업화를 염두에 두고 있는 이해관계자들의 요구를 폭넓게 수렴하고자 하였습니다.

끝으로 본 보고서를 집필한 연구원들의 노고에 감사하며, 수록된 내용은 연구자 개인의 의견으로서, 한국과학기술정보연구원의 공식의견이 아님을 밝혀두고자 합니다.

2002년 12월

한국과학기술정보연구원
원장 조영화

<목 차>

제 1 장 서 론	1
제 2 장 기술동향 및 전망	3
제 1 절 기술 개요	3
1. 정의 및 역사	3
2. 구조	5
3. 분류와 특징	9
4. 물성	11
가. 전기적 성질	11
나. 열적 성질	11
다. 기계적 성질	12
5. 합성법	13
가. 전기방전법(arc-discharge)	13
나. 레이저 증착법(laser vaporization)	15
다. 플라즈마 화학기상증착법(Plasma Enhanced CVD)	15
라. 열화학기상증착법(Thermal Chemical Vapor Deposition)	17
마. 기상합성법(Vapor Phase Growth)	18
바. 전기분해법	19
사. Flame 합성법	19
제 2 절 기술의 응용분야	20
1. 응용분야 트렌드	20
2. 주요 응용분야	23
가. 에미터(Emitter) 및 FED 응용	23
나. 수소저장 및 연료전지 응용	25
다. 전기이중층 축전기 (Electric Double Layer Capacitor)	29
라. 전기화학적 이온분리 전극	31
마. 극미세 전자 스위칭소자 응용	33

마. 매카트로닉스(Mechatronics) 및 고기능 복합체 응용	34
제 3 절 기술 개발동향	36
1. 탄소나노튜브 합성 및 응용기술	36
2. 연구개발 전략	38
제 4 절 특허동향	40
1. 정보분석 대상 DB	40
2. 특허정보 분석	40
제 5 절 기술수준 분석	48
1. 국가별 투자 비교	48
2. 주요 기술 수준 측정	51
제 6 절 기술예측 및 로드맵	55
제 3 장 시장분석 및 사업성평가	59
제 1 절 산업 개요	59
제 2 절 산업 분석	60
1. 산업의 특성	60
2. 시장 기회 요인 및 위협 요인 분석	64
가. 시장 기회 요인	64
나. 시장 위협 요인	65
3. 생산자 분석	66
가. 일본	70
나. 미국	72
다. 기타 국가	73
라. 우리나라	73
4. 시장 동향 분석	74
가. 세계 시장규모 추이	74
나. 일본 시장규모 추이	76
다. 국내 시장규모 추이	77
라. 가격동향 분석	77

다. 국내 시장점유율	78
5. 수요예측	79
제 3 절 사업 매력도 평가	81
1. 사업매력도 평가기준	81
2. 사업매력도 평가	82
제 4 장 결 론	87
< 참고 문헌 >	88

<표 차례>

<표 2-1> 디스플레이 기기별 성능 비교	25
<표 2-2> 탄소나노 소재의 수소저장 능력	27
<표 2-3> 탄소 소재의 기공구조, 비축전 용량 및 물리적 성질	32
<표 2-4> 역삼투법과 전기화학적 이온분리법의 비교	33
<표 2-5> 특허정보 분석 대상 DB	40
<표 2-6> 미국의 주요기관별 분야별 지원규모	49
<표 2-7> 일본의 주요기관별 분야별 지원규모	49
<표 2-8> 국내 탄소나노튜브 기술수준 평가	54
<표 2-9> 응용분야별 필요기술	56
<표 3-1> 탄소나노튜브의 용도	62
<표 3-2> 나노분야 주요기술별 혁신성 및 개발진척도	63
<표 3-3> 반도체 메모리 노광기술의 한계	65
<표 3-4> 분야별 탄소나노튜브 이용에 필요한 응용기술	66
<표 3-5> 탄소나노튜브 합성 및 응용기술 개발동향	67
<표 3-6> 각국별 탄소나노튜브의 수요량	76
<표 3-7> BMO평가 차트기준	82

<그림 차례>

<그림 2-1> 탄소 동소체의 종류와 구조	4
<그림 2-2> 흑연의 결정구조	6
<그림 2-3> 탄소나노튜브 구조의 표기방법	6
<그림 2-4> (5,5) arm-chair 구조 및 (9,0) zig-zag 구조의 탄소나노튜브 단위셀	8
<그림 2-5> (6,3) 나노튜브의 단위셀 표현방법	9
<그림 2-6> 탄소나노튜브의 구조와 종류	10

<그림 2-7> 전기방전법에 의한 탄소나노튜브 합성장치	14
<그림 2-8> 레이저 증착법에 의해 탄소나노튜브 합성장치	15
<그림 2-9> 플라즈마 CVD법에 의한 탄소나노튜브 합성장치	16
<그림 2-10> Thermal CVD법에 의한 탄소나노튜브 합성장치	18
<그림 2-11> 기상합성법에 의한 탄소나노튜브 합성장치의	19
<그림 2-12> 탄소나노튜브를 이용한 각종 응용기술 개발	21
<그림 2-13> 탄소나노튜브를 이용한 FED	24
<그림 2-14> Field Emmision Display 제품사진	25
<그림 2-15> 탄소나노튜브의 수소저장능력 측정장치	29
<그림 2-16> 전기이중층 축전기의 단위셀	31
<그림 2-17> 개개의 SWNT를 이용한 FET 이미지	34
<그림 2-18> 탄소나노튜브를 이용한 FED 및 영상구현 이미지	37
<그림 2-19> NEC에서 개발한 휴대용 연료전지 프로토타입	38
<그림 2-20> 연도별 출원건수 및 누적건수 추이	41
<그림 2-21> 미국특허의 연도별 출원건수 및 누적건수 추이	41
<그림 2-22> 일본특허의 연도별 출원건수 및 누적건수 추이	42
<그림 2-23> 한국특허의 연도별 출원건수 및 누적건수 추이	43
<그림 2-24> 최다 출원인 랭킹 분석	44
<그림 2-25> 출원인 국적	44
<그림 2-26> 합성법에 의한 특허건수(특허 전체)	45
<그림 2-27> 합성법에 의한 특허건수(DB별)	45
<그림 2-28> 합성법에 의한 연도별 특허건수	46
<그림 2-29> 용도별 특허건수(특허 전체)	46
<그림 2-30> 용도별 특허건수(DB별)	47
<그림 2-31> 용도에 대한 연도별 특허건수	48
<그림 2-32> 나노기술분야 국가간 경쟁력	51
<그림 2-33> 나노전문가 경쟁력 점수	52
<그림 2-34> 탄소나노튜브응용분야 국가간 경쟁력	53
<그림 2-35> 탄소나노튜브 기술 로드맵	57
<그림 2-36> 연도별 탄소나노튜브 연구개발동향	58

<그림 2-37> 탄소나노튜브 응용분야 개발단계	58
<그림 3-1> 코어기술의 제품적용	61
<그림 3-2> 탄소나노튜브의 이용방법에 따른 용도	64
<그림 3-3> 업체별 탄소나노튜브 생산량	70
<그림 3-4> 국가별 탄소나노튜브의 예상시장점유율	75
<그림 3-5> 일본 탄소나노튜브 시장규모추이	77
<그림 3-6> 연도별 탄소나노튜브의 가격동향	78
<그림 3-7> 국내 탄소나노튜브 예상시장점유율	79
<그림 3-8> 샘플 출하된 탄소나노튜브의 용도	80
<그림 3-9> 탄소나노튜브 세계시장 전망	81
<그림 3-10> 탄소나노튜브 BMO사업매력도평가	85

제 1 장 서 론

최근 정부는 21세기를 헤쳐나갈 미래기술로, 나노기술(NT), 정보기술(IT), 바이오기술(BT), 환경기술(ET), 우주항공기술(ST), 문화기술(CT) 등 소위 6T 기술을 육성하고자 많은 노력을 기울이고 있다. 이러한 기술 가운데 나노기술(NT)은 나노미터 크기의 극미세 기술영역을 말하는 것으로, 새로운 물리현상과 향상된 물질특성으로 특징 지워지고 있다.

20세기의 핵심 물질이 실리콘이었다면, 21세기의 핵심물질은 탄소가 될 것으로 예측되고 있으며, 그 중에서도 나노크기 탄소 소재가 가장 주목받고 있다. 나노기술(NT)에 포함되는 탄소나노튜브는 1991년 새로운 물질을 연구하던 일본전기회사(NEC)의 Iijima 박사가 전기방전법을 사용하여 흑연 음극상에 형성시킨 탄소덩어리를 TEM으로 분석하다가 처음 발견하였다.

탄소나노튜브는 튜브의 직경과 대칭성·층구조·다발구조·결합의 변형·불순물의 존재 등에 따라 전자 구조가 변화하고 전도 특성도 달라져 수많은 응용 가능성이 점쳐지고 있는 대표적인 나노단위 탄소재료이다. 탄소나노튜브가 발견된 지 10년이 지난 현재, 세계적으로 일부 업체들이 양산체제를 구축하여 생산에 박차를 가하고 있는 상황이다.

최근 탄소나노튜브가 실용화에 가장 접근되고 있는 분야로는 수지복합재료, FED전자총, 주사형터널현미경 탐침 등이 있으며, 반도체와 트랜지스터로의 응용도 점차 가시화 되고 있다. 대부분의 컨설팅 기관들 또한 탄소나노튜브 시장이 조만간 급격하게 증가할 것으로 예측하고 있습니다.

뛰어난 물성과 구조 때문에, 전자정보통신, 환경, 에너지 및 의약 분야에의 응용이 기대되고 있으며 특히, 차세대 전자정보 산업분야 등에서 폭 넓게 응용될 것으로 기대됨에 따라 선진 각국에서는 첨단 전자정보 산업 분야와 고기능성 나노소재의 경쟁력 확보 차원에서 국가적인 지원아래 탄소나노튜브의 합성 응용에 대한 연구를 광범위하게 수행하고 있다.

제 2 장 기술동향 및 전망

본 장에서는 최근 나노기술에서 가장 먼저 가시화될 것으로 여겨지고 있는 탄소나노튜브의 개요에서부터 응용, 개발동향, 특허동향을 살펴보고 기술수준분석 및 기술예측을 행하였다.

제 1 절 기술 개요

1. 정의 및 역사

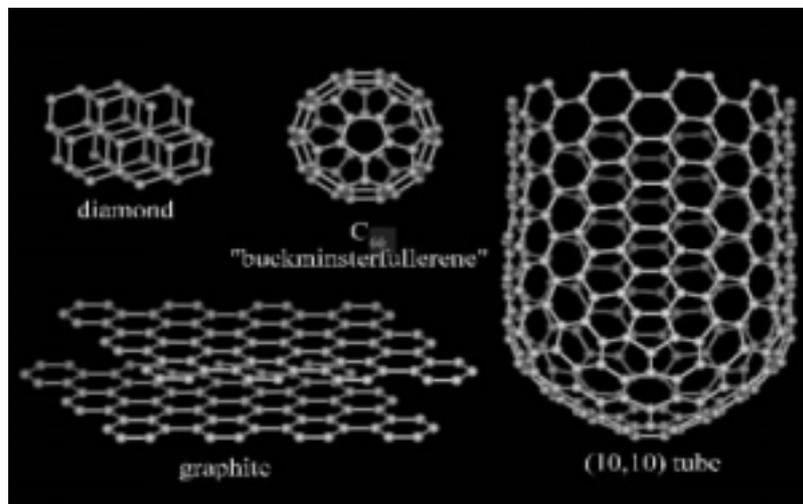
최근에 나노미터 크기의 극미세 영역에서 새로운 물리현상과 향상된 물질 특성을 나타내는 연구결과가 보고되면서 나노과학기술이라는 새로운 영역이 태동하게 되었고, 이러한 나노과학기술은 앞으로 21세기를 선도해 나갈 수 있는 과학기술로써 전자정보통신, 의약, 소재, 제조공정, 환경 및 에너지 등의 분야에서 필수적인 기술로 부각되었다[1]. 1996년 Rice 대학의 Smalley 교수가 풀러렌(fullerene)의 발견으로 노벨상을 수상한 이래, 나노크기를 가진 구조 중에서 탄소 소재는 가장 주목받는 물질로 부각되고 있다. 20세기의 핵심 물질이 실리콘이었다면, 21세기의 핵심물질은 탄소가 될 것으로 예측되고 있다. 이중 탄소나노튜브는 뛰어난 물성과 구조로 인하여 전자정보통신, 환경, 에너지 및 의약 분야로 산업적 응용성의 기대가 큰 소재이며, 향후 나노과학을 이끌고 갈 중요한 기반 요소로 많은 기대를 모으고 있다.

1985년에 Kroto와 Smalley가 탄소의 동소체(allotrope)의 하나인 풀러렌(fullerene : 탄소 원자 60개가 모인 것, C₆₀)을 처음으로 발견한 이후, 1991년 새로운 물질을 연구하던 일본전기회사(NEC) 부설 연구소의 Iijima 박사가 전기방전법을 사용하여 흑연 음극상에 형성시킨 탄소덩어리를 TEM으로 분석하는 과정에서 가늘고 긴 대롱 모양의 탄소나노튜브를 발견하여 Nature지에 처음으로 발표하였다[2]. 이때 성장된 탄소나노튜브의 길이는 수십 nm- 수 μm 이었고, 외경은 2.5-30 nm 이었다. 탄소나노튜브에서 하나의 탄소원자는 3개의 다른 탄소원자와 sp² 결합의 육각형 벌집무늬를 이루며, 이 튜브의 직경이 대략 수

nm 정도로 극히 작기 때문에 나노튜브라고 부르게 되었다. <그림 2-1>은 탄소 나노튜브의 발견으로 현재까지 알려진 탄소소재의 동소체들이다.

1992년 Ebbesen, Ajayan 등은 전기방전법을 사용하여 탄소나노튜브를 합성할 때, 챔버내의 헬륨압력을 높일 경우 흑연 음극상에서 탄소나노튜브의 합성수율이 크게 증가한다는 사실을 발표하였다[3]. 1993년에는 IBM의 Bethune 등과 NEC의 Iijima 등이 전기방전법을 사용하여 직경이 1 nm 수준인 단중벽 나노튜브(single walled nanotube; SWNT) 합성을 각각 발표하였다[4,5]. 이어서 1996년 Smalley 등은 레이저증착법(laser vaporization)으로 직경이 균일한 SWNT를 고수율로 성장시키는 방법을 발표하였고, 이 경우 성장된 SWNT는 bundle 형태로 존재하여 이 형태를 다발형 나노튜브(rope nanotube)로 명명하였다[6]. 1998년에 Ren 등이 플라즈마 화학기상증착법을 사용하여 유리기판위에 수직배향 된 고순도의 탄소나노튜브를 합성시킴으로써, 탄소나노튜브의 합성과 응용기술면에서 획기적인 진전을 가져오게 되었다[7]. 그 이후로 탄소나노튜브 합성 및 응용에 관한 연구가 국내외적으로 많은 연구자에 의해 활발히 수행되고 있다.

<그림 2-1> 탄소 동소체의 종류와 구조



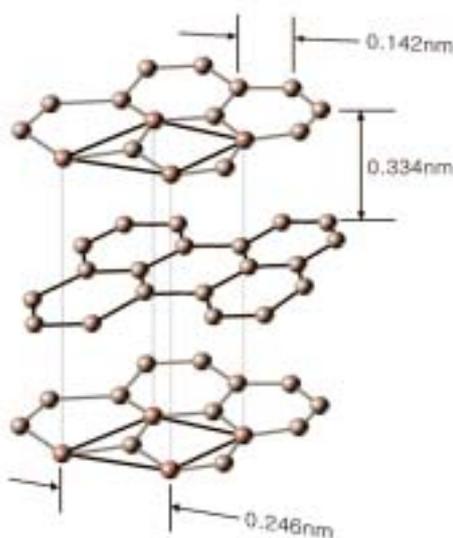
2. 구조

탄소 원자는 $1s^2 2s^2 2p^2$ 의 전자배열을 갖는다. 공유 결합을 이루기 위해

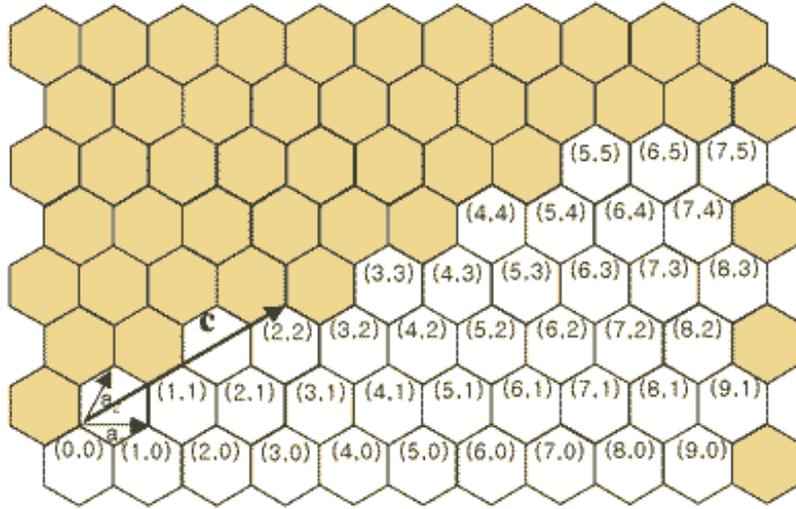
서 2s 궤도 함수의 전자 하나가 2p 궤도 함수로 전이한다. 흑연 결정 구조에서 한 개의 탄소 원자는 세 개의 인접 탄소 원자와 평면상에서 sp^2 으로 표현되는 강한 σ 결합을 이룬다. 나머지 p 궤도함수를 갖는 전자는 이 평면과 수직으로 약한 π 결합을 이룬다. 이 약한 결합에 의해서 흑연은 semi-metal 특성을 보이게 된다. 그리고 평면상에서 인접 원자들간의 π 궤도함수의 중첩으로 인하여 상대적으로 큰 전기전도도를 나타낸다. 흑연은 0.334 nm 의 면간격을 갖고 일반적으로 ABAB...의 순서로 쌓여진다. 이러한 구조는 1924년에 Bernal이 처음으로 제안한 Bernal 흑연이다.

<그림 2-2>는 이 Bernal 흑연을 보여주는 그림이다. 이 구조에서 unit cell 내에는 4 개의 원자들이 포함되어 있다. 완벽한 흑연이 아닌 경우에는 면사이의 간격은 단결정 흑연의 면간격 보다 크다는 것이 알려졌다. Tetrahedral 구조를 갖는 다이아몬드 구조에서는 각각의 탄소 원자는 4 개의 인접 원자와 결합되어 있으며 결합 구조는 sp^3 결합구조를 이루고 있다. 그런데 다이아몬드는 흑연보다 덜 안정하기 때문에 상압에서 1700 °C 의 온도에서 흑연으로 변한다. 탄소나노튜브는 'zig-zag' 와 'armchair'라고 알려진 두 개의 대칭 구조가 가능하다(<그림 2-6>참조). 실제적으로는 대부분의 탄소나노튜브는 이러한 대칭 구조를 갖는 대신에 벌집 모양의 육각형이 튜브축을 따라 나선형으로 배열된 'chiral' 구조를 갖는다.

<그림 2-2> 흑연의 결정구조



<그림 2-3> 탄소나노튜브 구조의 표기방법



각각의 튜브 구조를 분류하는 간단한 방법은 graphene 격자위의 두 점을 연결하는 벡터 \mathbf{C} 로 표시하는 것이다. 실린더는 이 벡터의 두 끝점이 만나도록 평면을 말아 올린 것이다. <그림 2-3>은 Dresselhaus의 표기 방법에 따른 graphene 면을 나타낸다[8,9]. 이 그림에서 정수 짝 (n, m) 은 튜브가 만들어지는 가능한 구조를 나타낸다. 그러므로 n 과 m 으로 벡터 \mathbf{C} 를 다음과 같이 표시할 수 있다.

$$\mathbf{C} = n\mathbf{a}_1 + m\mathbf{a}_2$$

여기서 \mathbf{a}_1 과 \mathbf{a}_2 는 그래핀 면의 단위 세포 base 벡터이며, $n \geq m$ 이다. Zig-zag 튜브는 $m=0$ 이며, armchair 튜브는 $n=m$ 의 값을 갖는다. 위의 조건과 다른 튜브들은 'chiral' 이다. C_{60} 분자의 반으로 튜브의 끝이 덮어씌워지는 Zig-zag 튜브는 정수 $(9,0)$ 로 표현되며, armchair 튜브는 $(5,5)$ 로 표시된다. <그림 2-3>에서 보듯이 \mathbf{a}_1 과 \mathbf{a}_2 의 크기는 0.246 nm 이므로 벡터 \mathbf{C} 의 크기는 $0.246(n^2+nm+m^2)^{1/2} \text{ (nm)}$ 이며, 튜브의 직경 d_t 는 다음과 같이 주어진다.

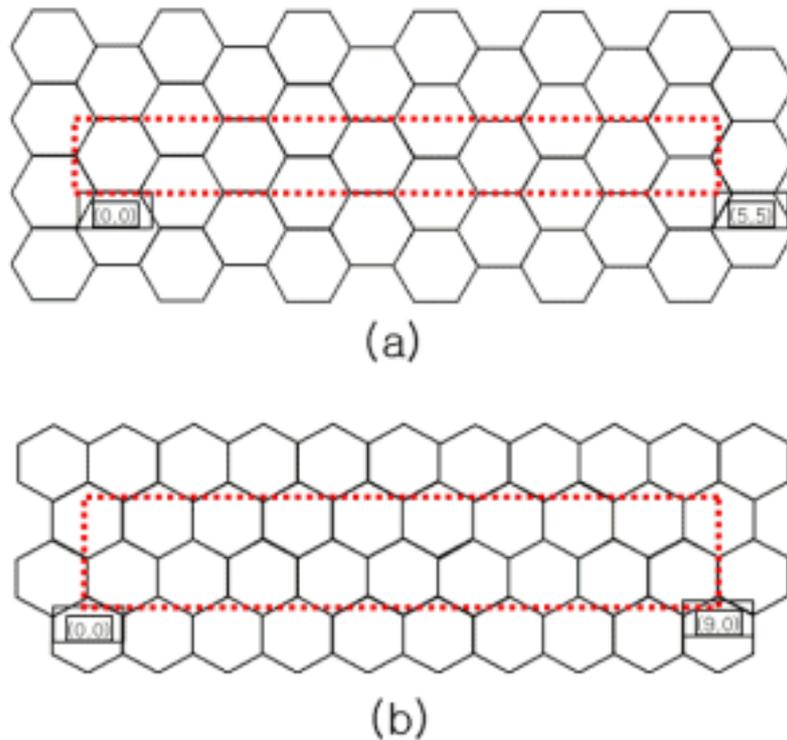
$$d_t = 0.246(n^2+nm+m^2)^{1/2} / \pi \text{ (nm)}$$

그리고 chiral angle θ 는 다음과 같다.

$$\theta = \sin^{-1}\{3^{1/2}m/2(n^2+nm+m^2)^{1/2}\}$$

나노튜브를 '1차원적인 결정'이라고 생각한다면, 튜브의 축을 따라서 단위 세포를 정의할 수 있다. <그림 2-4>는 armchair 나노튜브와 zigzag 나노튜브에 대한 단위세포를 보여주는 그림이다. 그러면 armchair 튜브의 폭은 a 의 크기와 같고, zig-zag 튜브의 폭은 $3^{1/2}a$ 와 같다. 이보다 더 긴 직경을 갖는 armchair와 zig-zag 나노튜브는 이보다 더 긴 단위 세포를 갖는다. 'chiral' 나노튜브는 비대칭적인 성질 때문에 긴 단위 세포를 갖는다.

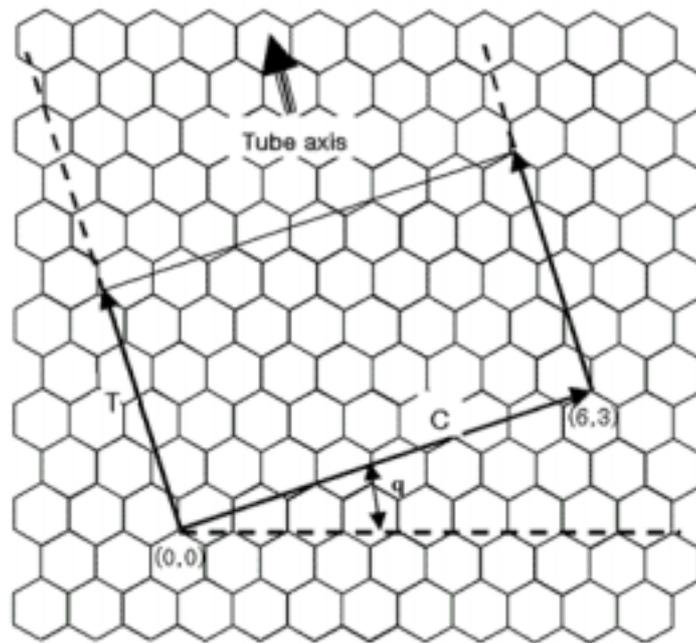
<그림 2-4> (5,5) arm-chair 구조 및 (9,0) zig-zag 구조의 탄소나노튜브 단위셀



이런 세포를 만드는 방법은 다음 <그림 2-5>와 같다[8-11]. 먼저 원점 O에서 벡터 C에 수직되게 선을 그어서 원점과 같은 격자점에 닿을 때까지 선을 연장한다. 이 그림은 (6,3)나노튜브에 관한 그림이다. 축방향의 단위 세포의 길이는 그림에서 벡터 T의 크기이다. 일반적으로는 실험적으로 2-30 nm 정

도의 직경을 갖는 나노튜브들이 관찰되는데, 이 나노튜브의 단위세포의 길이는 매우 길 수가 있다. 예를 들어서 (80,67)로 표현된 나노튜브는 직경이 거의 10 nm 이고, 단위세포의 길이는 54.3 nm 이고 그 안에는 64,996 개의 원자들이 포함되어 있다.

<그림 2-5> (6,3) 나노튜브의 단위셀 표현방법

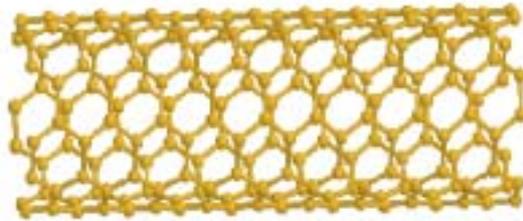


3. 분류와 특징

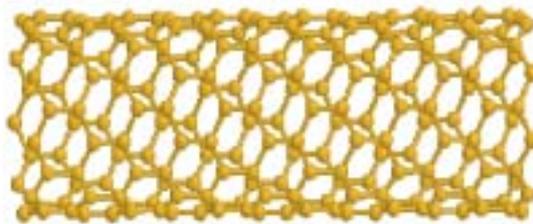
탄소나노튜브는 흑연면(graphite sheet)이 나노 크기의 직경으로 실린더 형태를 가지며, sp^2 결합 구조를 갖는다. 이 흑연면이 말리는 각도 및 구조에 따라서 도체 또는 반도체의 특성을 보인다. 또한 벽을 이루고 있는 결합 수에 따라서 단중벽나노튜브(SWNT; single wall nanotube), 다중벽 나노튜브(MWNT; multi-walled nanotube), 다발형 나노튜브(rope nanotube)로 분류될 수 있다. <그림 2-6>는 탄소나노튜브의 구조 및 종류를 보여주고 있다. SWNT의 경우, 대표적으로 금속 성질을 가지는 arm-chair 구조 및 반도체 성질을 가지는 zigzag 구조가 있으며, MWNT의 경우 벽이 개수가 2개 이상이며, 직경이 100 nm 미만인 나노튜브를 통칭한다. SWNT의 경우 개개의 나

노튜브들이 서로 반데바알스 힘에 의해 서로 엉켜 있어서 나노튜브 rope로 분류되기도 한다.

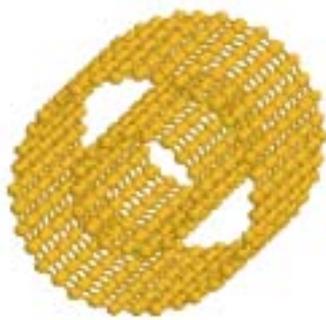
<그림 2-6> 탄소나노튜브의 구조와 종류



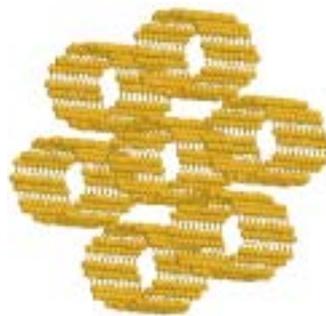
Armchair 구조 탄소나노튜브(도체)



Zigzag 구조 탄소나노튜브(반도체)



Multi-walled nanotube



Rope nanotube

이들 각 물질들은 서로 다른 특성의 물리적 성질을 가지고 있으므로, 우선 현재까지 연구된 나노튜브의 물성을 정리하고, 이들의 응용처를 기술하고자 한다.

4. 물성

탄소나노튜브는 위에서 언급한 바와 같이 나노크기의 흑연면이 실린더 구조로 둥글게 말린 형태를 가지고 있으며, 크기나 형태에 따라 독특한 물리적 성질을 가지는 거대분자(macromolecule)이다. 이들 구조에 따른 물리적 특성 평가에 대한 연구가 최근 많이 진행되고 있으나, 아직까지 해결해야 될 내용이 많이 남아있는 실정이다. 그 이유는 탄소나노튜브가 직경, 길이, chirality에 따라 다양한 물리적 성질을 가지고 있기 때문이다. 현재까지 알려진 탄소나노튜브의 전기적, 열적, 기계적 성질들을 간략히 요약하여 아래에 서술하였다.

가. 전기적 성질

1998년 Frank는 SPM(Scanning probing microscopy)을 이용하여 탄소나노섬유를 수은 액체상에 담지하여 전도성을 측정하였다[25]. 그 결과 탄소나노튜브가 양자거동을 보이면서 획기적인 전도성 (ballistic conductance)을 가진다고 보고하였다. MWNT의 전도성은 각 나노튜브가 수은 액체상에 첨가될 때마다 1 G_0 만큼 증가하였다. 이때 G_0 의 값은 $1/12.9 \text{ k}\Omega^{-1}$ 이다. 1999년 Sanvito등은 scattering 기법을 이용하여 MWNT의 전도성을 측정하였으며 Frank의 결과를 재확인하였다[26]. 또한 이들은 MWNT내의 양자전도성 채널이 interwall 반응에 의해 감소됨을 관찰하였고, 이 반응에 의해 각 탄소나노튜브의 전자흐름이 재배치됨을 관찰하였다. Thess등은 rope형태의 금속성 SWNT의 저항을 four-point 기법을 이용하여, 300 K에서 약 $10^4 \text{ }\Omega\text{-cm}$ 임을 관찰하였으며, 이 값은 현재 알려진 고전도성 탄소나노섬유보다 더 높은 값을 가진 것으로 나타났다[27]. Frank등과 Avouris등은 각각 10^7 A/cm^2 이상, 10^{13} A/cm^2 이상의 안정된 전류밀도가 나타남을 관찰하였다[25].

나. 열적 성질

탄소나노튜브의 열전도도는 온도와 phonon의 평균자유경로에 의존한다. Hone등은 1999년 탄소나노튜브의 열전도도가 온도에 일차적인 관계식을 가짐을 발표하였으며, 7-25 K의 온도범위에서는 직선관계, 25-40 K의 범위에서는 직선의 기울기가 증가하고, 상온이상에서는 온도가 증가함에 따라 단조증가함을 보였다[28]. 이들은 저온에서의 열전도도에 대한 모델식을 다음과 같이 제안하였다.

$$k_z = \sum C v_z \tau$$

여기서 k_z 는 열전도도, C 는 비열, v 는 음속, τ 는 relaxation time이다. Hone 등은 상온에서 singlewalled nanotube rope에 대한 열전도도가 1,800 - 6,000 W/mK의 범위에 존재하는 것을 제시하였다. 1999년 Goddard 등은 (10,10) 나노튜브의 열전도도가 인가전류(applied current)가 증가함에 따라 2,980 W/mK에 접근함을 수치적으로 계산하였다[29]. 2000년 Tomanek 등은 탄소나노튜브의 열전도도와 온도의 상관관계를 연구하였으며, 특히 Hone 등이 제안했던 상온에서의 열전도도가 6,600 W/mK인 아주 높은 값을 재확인하였고, 이 값이 phonon의 평균자유경로가 아주 큰 것에 기인하는 것을 이론적으로 입증하였다[30]. 그러나 Barber등은 열전도도의 온도에 대한 상관관계가 선형적이기보다는 다른 특성을 갖는다고 주장하였는데, 즉 100K의 온도까지는 37,000 W/mK인 최대치까지 증가하다가 400 K에서부터는 3,000 W/mK로 급격히 감소한다고 보고하였다.

다. 기계적 성질

SWNT의 탄성(elastic behavior)은 최근 나노튜브 분야에서 활발하게 연구가 진행되고 있는 분야이다. 전반적으로 SWNT는 강철보다 10-100배 견고(stiff)하고 물리적인 충격에 강하다. 나노튜브의 tip에 힘을 가하면 손상 없이 구부러지며, 힘을 제거하면 원래상태로 돌아간다[31]. 그러나 이런 현상을 정량화하는 것은 아주 어려운 문제로 알려져 있다. 1996년 미국 Princeton 대학과 Illinois 대학의 연구팀은 평균 Young's modulus가 1.8 TPa임을 측정하

였다[32]. 이들은 튜브를 자유롭게 세운 후, tip의 미세사진을 촬영하여 다양한 온도에서 blur의 양으로부터 Modulus를 계산하였다. 1997년 Goddard는 (10,10) armchair 나노튜브의 modulus가 640.30 GPa이고, (17,0) zigzag 나노튜브가 648.43 GPa이며, (12,6) chiral 나노튜브가 673.93 GPa임을 제시하였다. 이 값들은 potential의 2차 미분계수로부터 계산되어졌으며, 위에서 측정된 1.8 TPa 값과는 상당한 차이를 보여주었다. 1998년 Treaty 등은 elastic modulus가 1.25 TPa임을 보고하였다[33]. 이 값은 1997년 Wong 등에 의해 관찰된 MWNT의 1.28 TPa와 비교될 수 있다. 이들은 AFM을 이용하여 지지체에 고착되지 않는 나노튜브의 한 끝을 평형상태에서 벗어나게 하고, 이때 tip에 작용하는 힘을 기록함으로써 modulus를 측정하였다. 1999년 Rubio 등은 tight-binding 계산을 통하여 SWNT의 Young's modulus가 직경 및 chirality에 크게 의존함을 보였으며, (10,0)과 (6,6) 나노튜브에 대해 1.22 TPa, (20,0) 나노튜브에 대해 1.26 TPa인 것을 보고하였다. 위의 결과들을 보면 SWNT의 경우 elastic modulus가 직경 및 구조에 크게 의존함을 알 수 있다. 그러나 1999년 Forro등은 AFM을 이용하여 MWNT의 경우에 modulus가 지름에 크게 의존하지 않고, 나노튜브내의 결함등의 구조적인 면에 크게 의존한다고 보고하였다. 또한 이들은 15-20 nm의 직경을 가지는 SWNT의 bundle에 대해 100 GPa의 modulus를 보고하였다[34]. Modulus에 대한 값들에 대한 논쟁은 계속되고 있으며, 이것은 나노튜브의 wall 두께에 대한 연구자들이 자의적인 해석에 의해 크게 기인하는 것으로 보고되고 있다. 일반적으로 탄소분자가 완전히 고체상의 실린더형태를 가진다면 modulus는 앞서 논의된 값보다 작은 값을 보일 것이며, 튜브형태이면서 wall 두께가 작을수록 modulus는 증가할 것으로 예상된다.

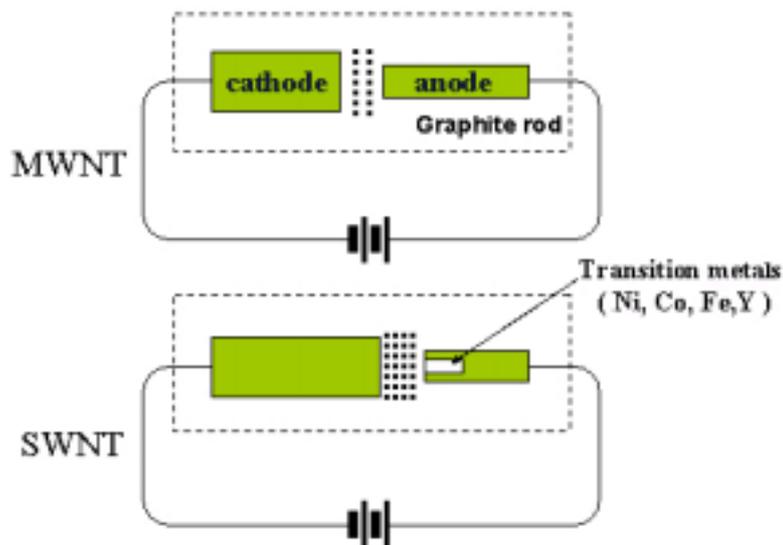
5. 합성법

가. 전기방전법(arc-discharge)

이 방법은 초기에 탄소나노튜브를 합성할 때 사용한 방법이다[12]. 두 개의 전극으로는 흑연 막대를 사용하였다. 두 전극 사이에서 방전이 일어나면 양

극으로 사용된 흑연 막대에서 떨어져 나온 탄소 cluster들이 낮은 온도로 유지되고 있는 음극 흑연 막대에 응축된다. 이렇게 음극에서 응축된 흑연은 탄소나노튜브와 탄소 나노입자들을 포함하고 있다. 초기에 이 방법으로 합성된 탄소나노튜브의 양이 매우 적었으나 나중에 Ebbesen과 Ajayan이 공정을 개선시켜서 합성되는 탄소나노튜브의 양을 증가시켰다[13]. <그림 2-7>에는 대표적인 전기방전 장치가 나타나 있다. 이 장치에서 chamber는 진공펌프와 헬륨공급 장치에 연결되어 있다. 전극으로 사용되는 흑연 막대는 보통 고순도의 재질을 사용한다. 양극 흑연 막대는 직경이 6 mm인 긴 막대이며, 음극 흑연 막대는 직경이 9 mm이며 길이는 양극 흑연 막대보다 짧다. 양질의 탄소나노튜브를 합성하기 위해서는 음극을 냉각시키는 것이 필수적으로 요구된다. 양극의 위치는 가변적이어서 전기방전이 일어나는 동안에 두 극 사이의 거리를 일정하게 유지시켜야 한다. 두 극 사이에는 일반적으로 직류 전원이 사용되는데, 20~40 V의 전압 범위에서 전류는 50~100 A 정도일 때 전기방전이 잘 일어난다. 안정적인 방전이 일어나는 두 흑연 막대 사이의 거리는 1 mm 이하이다[14, 15]. 그리고 순수한 양극 흑연 막대에 Co, Ni, Fe, Y 등을 혼합해서 전기방전을 하면 single wall 탄소나노튜브를 얻을 수 있다.

<그림 2-7> 전기방전법에 의한 탄소나노튜브 합성장치



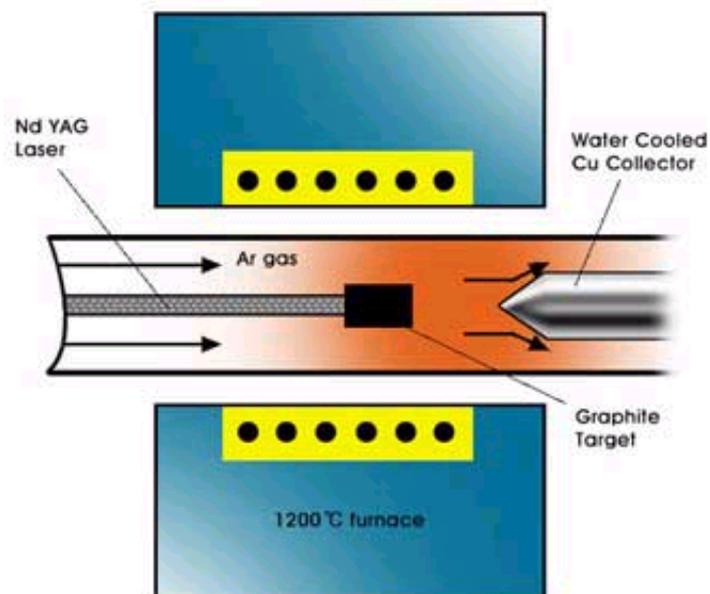
전기방전법에서 고품질의 탄소나노튜브를 얻기 위한 가장 중요한 요소는 chamber 내의 기체의 압력과 인가전류이다[13,16,17]. 압력이 증가하면 탄소

나노튜브의 생산량이 증가하지만 너무 높은 압력은 탄소나노튜브의 수율을 떨어뜨린다. 또한 전류는 안정된 플라즈마를 유지할 수 있는 범위 내에서 가능한 한 낮은 값을 갖는 것이 좋다.

나. 레이저 증착법(laser vaporization)

1995년에 미국 Rice 대학의 Smalley 그룹은 레이저 증착법에 의해서 탄소나노튜브를 합성하였다. <그림 2-8>는 Smalley 그룹에서 사용한 레이저 증착장치이다. 1200 °C의 오븐 안에 있는 흑연 target 에 레이저를 쬐여서 흑연을 기화시킨다. 이때 운반 가스로는 헬륨이나 아르곤 가스가 사용되고 오븐의 압력은 500 Torr 정도로 유지한다. Target 에서 기화된 흑연은 차가운 collector에서 흡착된다. 이와 같이 얻어진 응축 물질에는 multi-walled 탄소나노튜브와 탄소나노입자가 섞여 있다. 그런데 순수한 흑연 target 대신에 Co, Ni, Fe등이 혼합된 흑연을 target으로 사용하면 균일한 single wall 탄소나노튜브를 얻을 수 있다. 이렇게 합성된 튜브들은 rope의 형태로 나타난다.

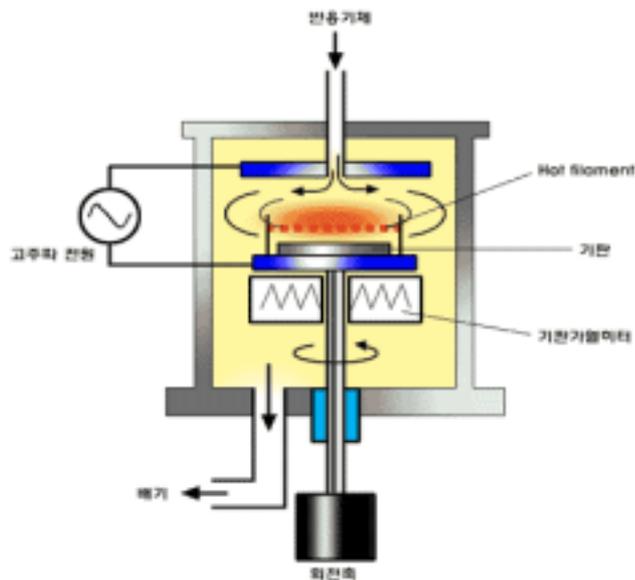
<그림 2-8> 레이저 증착법에 의해 탄소나노튜브 합성장치



다. 플라즈마 화학기상증착법(Plasma Enhanced CVD)

플라즈마 CVD의 장점은 열 CVD보다 저온에서 탄소나노튜브를 합성할 수 있다는 점이 무엇보다도 큰 장점이다[18]. 일반적으로 플라즈마 CVD에서 방전을 일으키는 전원은 직류(DC) 또는 고주파의 두 가지로 구분된다. 여기서 쓰이는 고주파는 RF(13.56 MHz)와 Microwave(2.47 GHz)를 대표적으로 사용하고 있다. 플라즈마 방식은 방전 공간을 전극 사이에 끼우고 전극에 인가되는 고주파 전계에 의하여 글로우 방전을 발생시키는 방법이다. <그림 2-9>는 플라즈마 CVD 장치에 대한 개략도이다. 이와 같은 평행 평판형이 가장 일반적인 전극 구조이며 큰 면적의 것도 비교적 제작하기 쉬우므로 양산장치에 많이 이용된다. 보통 막을 증착시킬 기판은 접지된 전극 측에 놓이며, 막을 균일하게 성장시키기 위하여 마주 보는 전극으로부터 원료기체를 내려오게 하는 경우가 많다. 직류방전 방식은 고주파 방식과 동일하지만 방전용 전원만 다를 뿐이다. 일반적으로 반응기체로서 C_2H_2 , CH_4 , C_2H_4 , C_2H_6 , CO 가스를 사용해서 탄소나노튜브를 합성한다. 보통은 Si, SiO_2 혹은 glass 기판 위에 Fe, Ni, Co 등의 금속을 증착하고 이 금속을 선처리하여 작은 그래인들을 만든 후에, 위의 반응 기체들을 RF로 글로우 방전을 일으켜서 기판위에 탄소나노튜브를 합성한다.

<그림 2-9> 플라즈마 CVD법에 의한 탄소나노튜브 합성장치

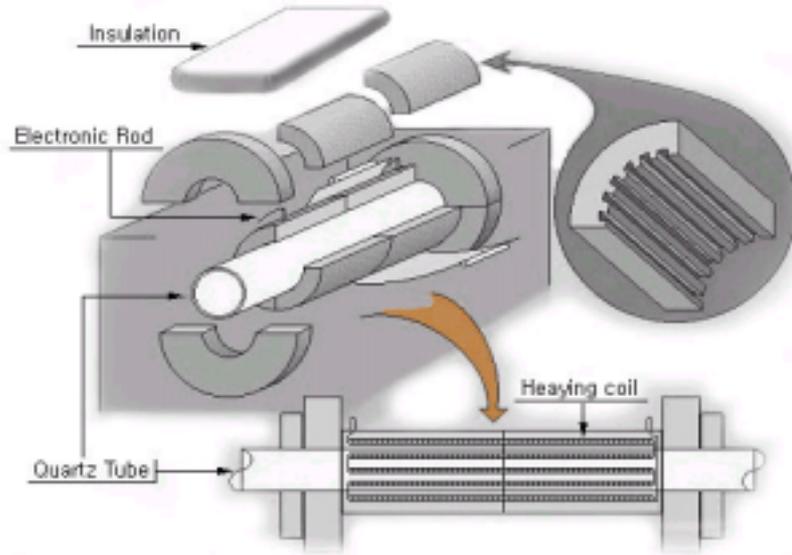


라. 열화학기상증착법(Thermal Chemical Vapor Deposition)

대면적 기판위에서의 탄소나노튜브 합성은 앞으로의 FED를 비롯한 각종 전계방출 디스플레이에 적용할 수 있다는 점에서 기술적으로 아주 중요하다. 최근에 들어서 대면적 기판위에서 열 CVD 방법으로 탄소나노튜브를 합성하는 연구가 상당히 진척되었다[20,21]. CVD 합성 방법은 생성물이나 원료가 다양하고, 고순도 물질을 합성하기에 적합하며, 미세구조를 제어할 수 있다는 장점을 가지고 있다. 그러나 대기압 하에서의 열화학기상증착법은 반응의 전과정이 상압에서 이루어지기 때문에 반응로내 기상에서의 활성종의 전달이 용이하지 않고 기판위에서의 반응가스의 유속이 변하게 되면 가스의 전달이 일정하지 않아 기판전면의 균일도가 좋지 못하고 기판의 온도변화와 기판의 위치등에 따라 크게 영향을 받는 등의 단점이 있다. 그러나 앞서 열거한 탄소나노튜브 성장법들의 단점은 대부분은 보완할 수 있으며, 특히 시료의 처리과정이 간략하고 대량생산이 가능하고 고순도의 탄소나노튜브의 성장이 가능하여 정제의 필요성이 크게 줄어든다는 장점이 있다.

열화학기상증착법을 이용한 탄소나노튜브를 합성하는 방법은 다음과 같다. 여러 가지 기판위에 먼저 촉매금속으로서 Fe, Ni, Co, Co-Ni 등의 금속을 증착하고 이 금속을 입힌 기판을 HF로 선처리를 한 다음, 이 시료를 CVD 장치에 장입하고 850 °C의 온도에서 다시 NH₃로 이 시료의 금속면을 에칭하여 작은 금속 그레인들을 형성시킨다. 탄소나노튜브는 이 작은 금속 그레인 위에서만 합성되기 때문에 이 작은 금속 그레인을 먼저 형성하는 것이 무엇보다도 중요한 과정이다. <그림 2-10>은 일반적인 열 CVD 탄소나노튜브 합성장치의 개략도이다.

<그림 2-10> Thermal CVD법에 의한 탄소나노튜브 합성장치



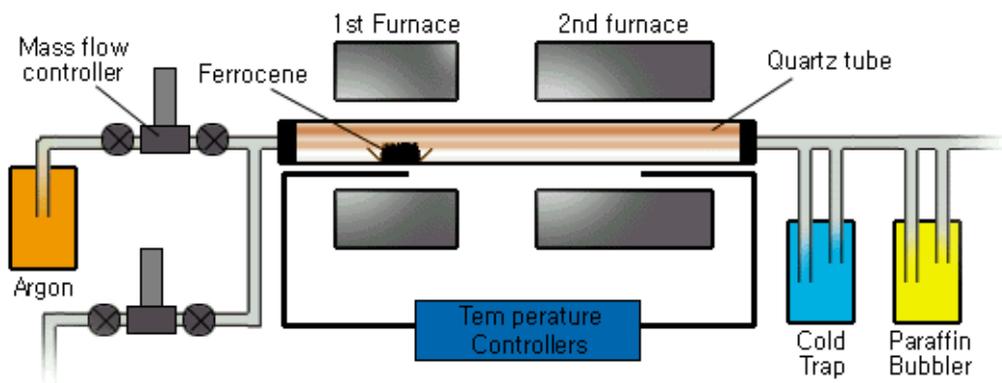
마. 기상합성법(Vapor Phase Growth)

기상합성법에 의한 탄소나노섬유 합성은 종래의 VGCF 제조공정의 변형된 방법이다[22]. 촉매입자와 반응기체가 반응기 안으로 연속적으로 주입되면서 탄소나노섬유가 합성된다. C₂H₄, CO, CH₄, C₂H₂, benzene 및 xylene 등의 탄화수소물질과 전이금속 촉매를 함유한 유기금속화합물로서 Fe(CO)₅ 혹은 Ferrocene 등을 반응료에 동시에 흘려줌으로써 탄소나노섬유합성이 시작된다. 가열로 안에서 분해된 Fe 원자는 기상에서 cluster를 형성하면서 탄소나노섬유 성장을 위한 핵을 형성한다. Fe(CO)₅의 기화온도는 105°C이고 250°C에서 분해되기 시작한다. Ferrocene은 185 °C에서 승화되며, 400°C 이상에서 분해되기 시작한다. 탄소나노섬유의 성장과정은 탄화수소기체가 금속입자의 표면에서 화학흡착 및 분해된 탄소원자들이 금속입자의 표면에서 금속 carbide를 형성한다. 금속의 표면에서 carbide로 포화되면, 금속입자내부로 확산되고, 그 입자들의 뒷면에 응결되어 탄소나노섬유로 성장된다. 탄소나노섬유를 구성하는 흑연면(graphite sheet)은 촉매입자의 결정면에 의해 크게 좌우되며, 탄소나노섬유의 직경은 분해된 촉매입자의 크기에 의해 크게 영향을 받는다. 20-30nm 크기의 촉매입자가 분포되어 있을 때 촉매의 활성이 아주 크다고 알려져 있으며, 따라서 수율도 크다. 나노크기의 탄소섬유를 성장시키기 위해서는 섬유 core 외부인 반지름 방향으로 등방성의 탄소흡착을 최대한 억제

하는 것이 중요하다. <그림 2-11>은 탄소나노튜브의 기상합성에 사용된 장치의 개략도이다.

탄소나노튜브의 중간 부분에 촉매 금속이 있었는데, 이 촉매 금속을 중심으로 탄소나노튜브가 양방향으로 성장되는 것을 알 수 있다. 이것은 기판 위의 촉매 금속위에서 탄소나노튜브가 합성되는 방법과 아주 유사하다. 즉, 촉매 금속만 있으면 탄소나노튜브는 기판위에서나 또는 기판이 없든지 간에 촉매 금속을 매개체로 성장된다.

<그림 2-11> 기상합성법에 의한 탄소나노튜브 합성장치



바. 전기분해법

흑연막대(음극)를 용융상태의 LiCl 전해질이 함유된 흑연 crucible(양극)에 담그고 전기회로를 구성하여 MWNT를 합성하는 방법이다[23]. 흑연 crucible의 온도는 보통 약 600℃이며 Ar분위기이다. DC전류를 3-20A, 20V 미만에서 인가하면 직경이 2-10nm, 길이가 0.5μm 이상의 MWNT가 합성된다. 비정질 탄소 및 encapsulate CNTs가 부산물로 생성된다.

사. Flame 합성법

CH₄등의 탄화수소화합물이 미량의 산소분위기에서 연소되면서 발생하는 연소열이 열원이 된다. 탄소나노튜브 합성을 위한 C₂H₂등의 반응가스와 촉매 전구체를 Diffusion Flame 분위기에 흘려줌으로써 합성조건에 따라 MWNT 및 SWNT가 합성된다[24]. Flame 분위기의 온도가 600-1300℃의 범위로 균일

하지 않아 비정질탄소가 다량 포함되며, 결정성이 다소 떨어지는 편이다. 저비용으로 대량합성에 용이하며 전극재료에 유망하다.

제 2 절 기술의 응용분야

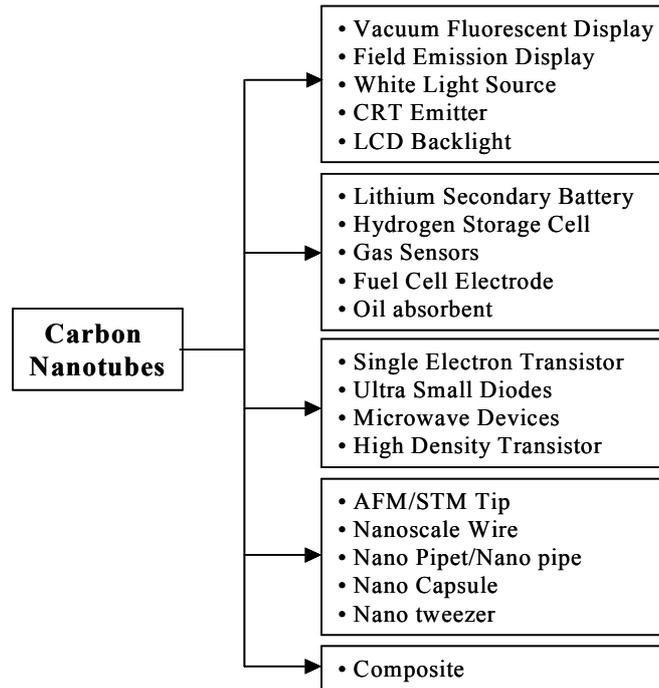
1. 응용분야 트렌드

1991년 일본의 Iijima에 의해 발견된 이후 탄소나노튜브는 인류역사상 가장 빠른 속도로 발전한 소재라 해도 과언이 아닐 만큼 많은 관심을 받고 있고, 미시 및 거시적인 측면에서 다양한 응용이 기대되는 획기적인 소재이다. 탄소나노튜브의 대량합성에 관한 연구는 미국, 일본, 프랑스 등을 중심으로 국제적으로 이미 기초연구 단계를 넘어서 본격적으로 대량합성공정기술의 개발이 활발히 진행 중에 있다. 향후 5년 이내에 탄소나노튜브는 지금까지 범용적으로 사용되어 왔던 활성탄, 탄소섬유, 활성탄소섬유 등의 소재와 비슷한 가격으로 시장경쟁력을 확보할 수 있을 것으로 예상되므로 <그림 2-12>에 언급된 응용연구 분야가 산업체 중심으로 획기적으로 발전하리라 전망된다. 탄소나노튜브는 독특한 물리적 성질 때문에 각종 장치의 emitter, VFD(vacuum fluorescent display), 백색광원, FED(field emission display), 리튬이온 2차전지 전극, 수소저장 연료전지, 나노 와이어, AFM/STM tip, 단전자 소자, 가스센서, 의공학용 미세 부품, 고기능 복합체 등에서 무한한 응용 가능성을 갖고 있다.

향후 첨단 전자정보화 시대에는 지금까지 표시소자로 이용되어온 CRT(cathode ray tube)의 뒤를 이어서 LCD(liquid crystal display), LED(Light emitting diode), PDP(plasma display panel), FED 등의 평판 디스플레이가 주역으로 등장할 것으로 예상된다. 그 중에서도 고화질, 고효율 및 저소비 전력을 장점으로 갖는 FED는 차세대 정보 디스플레이 소자로 크게 주목을 받고 있다. 실리콘 팁이나 몰리브덴 팁은 수명과 안정성에 큰 문제가 있으며, 전자방출 효율이 좋지 못하기 때문에 탄소나노튜브를 emitter tip으로 사용하려는 연구가 현재 가장 크게 주목을 받고 있다[12]. FED의 핵심기술은 emitter tip의 가공기술과 안정성에 바탕을 두고 있으며, 삼성종합

기술원에서 세계적으로 가장 앞서나가고 있으며 현재 산업화 단계에 있다. 이와 같은 FED 기술이 완성이 되면 마이크로 amplifier, 전광판, 백라이트, 옥외광고판등 이에 파생되는 emitter 기본소재 기술이 동반 상승하여 상품화가 가능할 것으로 전망된다.

<그림 2-12> 탄소나노튜브를 이용한 각종 응용기술 개발



탄소나노튜브를 연료 전지 및 전기이중층 축전기에 응용할 경우에도 많은 기대효과를 얻을 수 있다. 탄소나노튜브를 연료전지 전극으로 사용할 경우에는 자동차 배터리, 충전용 건전지, 노트북 컴퓨터, 휴대폰 등의 소형 이동용 전자제품에 응용할 수 있는 가능성이 크다. 특히, 일본의 NEC에서 탄소나노소재를 이용하여 휴대용 연료전지의 prototype을 완성함으로써 2005년 이내에 상업화를 목전에 두고 있다. 그밖에, 연료전지는 수소저장 능력을 높여야 하는데, 탄소나노튜브의 빈 공간을 이용하여 수소를 저장하면 저장용량이 증가된다. 탄소나노튜브는 무게가 가벼울 뿐만 아니라 튜브 내에 수소를 저장할 수 있는 공간이 많아서 단위 질량당 전하저장 능력이 뛰어나다. 탄소나노튜브를 이용한 수소저장시스템이 개발이 되면 그 자체가 대체에너지원이 될 것이며, 연료전지에 바로 응용이 가능하므로 전기자동차등에 파급효과

가 대단히 클 것으로 예상된다. 또한 탄소나노튜브는 직경 및 감긴 형태에 따라서 전기적 성질을 조절할 수 있고, 직경이 수십 nm인 튜브를 성장시킬 수 있으므로, 현재의 실리콘 소자를 대체하여 Tera급 메모리 소자를 만들 수 있을 것으로 예상되고 있다. 그리고 탄소나노튜브의 우수한 전기전도도와 기계적 강도를 이용하면 STM과 AFM의 팁으로 사용할 수 있고, 미세 크기의 탄소나노튜브를 초미세 시스템의 초미세 연결선, 초미세 파이프, 초미세 액체주입 장치, 탄소나노튜브의 가스 흡착성을 이용하는 가스센서와 탄소와 생체 조직과의 친화성을 이용한 의료용 장치의 부품으로서의 응용도 기대된다. 한편 탄소나노튜브의 물성을 이용한 고기능 복합소재의 응용도 산업 전반에 크게 영향을 미칠 것으로 기대된다. 특히 전자파차폐, 정전기분산, 마이크로 프로세서의 열적 분산등을 위한 multifunctional 복합체등에서 조만간에 산업화가 이루어 질 것으로 전망된다. 탄소나노튜브 응용이 본격적으로 진행될 경우 그 시장은 가히 천문학적이며, 이에 따라 탄소나노튜브의 합성과 응용 연구가 자발적으로 활발히 진행될 것으로 예상된다.

현재의 기술로서 대량합성방법, 정제방법, MWNT 및 SWNT 합성방법, 수직배향 합성기술, end-cap을 제거하고 이물질을 삽입하는 방법, BT(Bio Technology) 기술과의 접목 등에서 괄목할만한 성과를 보여주고 있다. 그러나 현재까지도 나노시스템이 갖는 복잡성, 다양성, 미세성 등과 같은 특성으로 인하여 탄소나노튜브의 합성과 응용에 관한 연구가 많이 요구되고 있는 상황이다. 탄소나노튜브의 합성기술은 1998년을 기점으로 기존의 전기방전법, 레이저 증착법으로부터 CVD법으로 급격히 전환된 이후로, 위에서 기술된 현재의 기술뿐만 아니라 탄소나노튜브의 구조 및 형태제어, 단결정을 가진 탄소나노튜브 생산, 대면적 합성기술, 바이오 물질과의 친화성 등 아직 해결해야 될 과제들이 많이 남아있는 실정이다. 탄소나노튜브의 물성은 많은 학자들에 의해 뛰어난 전기적, 기계적 성질을 가진다고 이론적으로 증명되었고, 이는 이미 실험적으로 확인되었다.

2. 주요 응용분야

가. 에미터(Emitter) 및 FED 응용

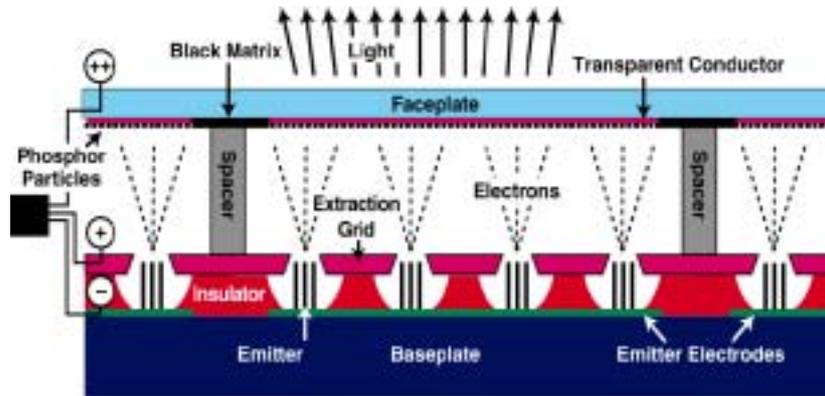
탄소나노튜브를 이용한 전자방출원(emitter) 및 FED(field emission display) 응용에 관한 연구는 최근에 전 세계적으로 가장 활발히 연구되고 있는 대표적인 분야중의 하나이다. 다음 세대의 첨단 전자정보화 시대에는 지금까지 표시 소자로 이용되어 온 CRT(cathode ray tube)의 뒤를 이어서 LCD(liquid crystal display), LED(Light emitting diode), PDP(plasma display panel), FED(field emission display)등의 평판 디스플레이가 주역으로 등장할 것으로 예상된다. 그 중에서도 고품질, 고효율 및 저소비 전력을 장점으로 갖는 FED는 차세대 정보 디스플레이 소자로 크게 주목을 받고 있다. FED의 핵심기술은 emitter tip의 가공기술과 안정성에 바탕을 두고 있다.

전계방출은 전자가 도체 표면에서 진공으로 터널링 하는 현상으로, 외부에 서의 전기장을 인가해 주어야 가능하다. 전계방출을 위해 금속 emitter에 인가 되어야 할 전기장은 $3\sim 7\times 10^7\text{V/cm}$ 정도로 매우 높다. 인가되어야 할 전기장을 낮추기 위해서 많은 연구가 이루어졌지만 대체적으로 그 방향은 두 가지이다. 첫째는 emitter의 tip의 반경을 줄이는 방법이고, 다른 하나는 emitter의 일함수를 낮추는 방법이다, 첫번째 방법은 emitter의 field enhancement factor를 증가시킴으로 emitter 끝에서 전기장의 세기를 더욱 증가시키는 방법이다. 초기에는 실리콘이나 몰리브덴을 전기화학적으로 식각 하여 emitter로 사용하였다[35,36]. 그러나 emitter와 양극과의 거리가 있어서 높은 전압을 인가하여야만 하기 때문에, 수명과 안정성에 큰 문제가 있는 것으로 알려져 있다. 높은 전도성과 예리한 tip를 가진 탄소나노튜브를 emitter tip으로 사용하면 Emitter 및 gate hole의 직경을 줄일 수 있으므로 전계방출에 필요한 인가전압을 줄이는데 가장 효과적인 방법이다[37]. 탄소나노튜브는 직경이 수 nm 정도로 aspect ratio가 매우 크기 때문에 field emitter로서 큰 장점을 가지고 있다고 할 수 있다. 탄소나노튜브에 따라서 다소 차이는 있지만 탄소나노튜브의 field enhancement factor는 약 2500~10000 정도이다[38]. 그리고 탄소나노튜브는 기계적으로 안정하며, 전기 전도성 또한 우수하다. 단층 탄소나노튜브는 emitter 한개당 최고 $2\times 10^6\text{A}$ 까지 견딜 수 있는 것으로 알려져 있다.

탄소나노튜브 emitter의 개발은 Smalley 등에 의해 SWNT의 FED 전자방출 능력이 확인된 이후[39], De Heer 등에 의해 FED 설계가 시도되었다[40].

Chang 등은 탄소나노튜브-전도성 에폭시 복합체를 이용한 스크린 프린팅법으로 다이오드 타입 FED을 제작하였고, pixel마다 pulse signal을 걸어줌으로써 on-off 조절하는 방식으로 화면에 글자를 표현하는데 성공하였으며 10^{-6} torr의 낮은 진공에서 안정된 전자방출이 가능함을 보여주었다[41]. Saito 등은 MWNT를 이용한 FED의 가능성을 보여주었고[42], 최근에 삼성종합기술원에서는 탄소나노튜브를 이용한 FED 제작연구를 착수하여 스크린 프린팅법으로 12 inch FED의 동영상 구현에 성공하는 개가를 올렸으며, 저전압에서 기존의 Spindt-type의 FED보다 높은 휘도(1800 cd/cm^2 at $3.7 \text{ V}/\mu\text{m}$)를 보여주었다[43]. <그림 2-13>는 탄소나노튜브를 이용한 FED의 전형적인 개략도이다. Emitter의 tip으로서 나노튜브가 사용되며, 양극과 음극사이에 spacer가 있으며 위에 형광체가 존재한다.

<그림 2-13> 탄소나노튜브를 이용한 FED



<그림 2-14>에는 Field Emission Display를 이용한 제품의 사진이 나타내었다.

<그림 2-14> Field Emission Display 제품사진



또한 <표 2-1>에는 디스플레이 기기별 성능을 비교하여 나타냈다. FED의 경우 대부분의 항목에서 우수성을 나타냈다.

<표 2-1> 디스플레이 기기별 성능 비교

항목	FED	LCD	CRT	EL
Low Cost	●		●	
Wide Viewing Angle	●		●	●
Rugged	●			●
Sharpness	●		●	
Low Power	●	●		
High Resolution	●	●	●	
Thin	●	●		●
Lightweight	●	●		●

자료 : www.displaybank.com

나. 수소저장 및 연료전지 응용

탄소나노튜브를 연료전지 및 이차전지 전극으로 사용할 경우에는 자동차 배터리, 충전용 건전지, 노트북 컴퓨터 등의 소형 이동용 전자제품에 응용할 수 있는 가능성이 크다. 특히 휴대용 연료전지는 수소저장 능력을 높여야 하는데, 기존의 수소저장합금(metal hydride)은 금속이기 때문에 수소저장량이 무게비로 1wt% 정도 밖에 되지 않고 수소의 반복적인 흡·탈착에 의해 금속이 미분화되는 등의 문제점이 있어 세계적으로 저장용량이 크면서 가볍고 안전성을 갖는 새로운 수소저장체 개발에 대한 연구들이 계속 진행되어 왔다. 그러나, 탄소나노튜브의 빈 공간을 이용하여 수소를 저장하면 저장용량이 크게 증가할 가능성이 크다. 탄소나노튜브를 이용한 연료전지가 개발되면 대체에너지원으로 크게 각광을 받을 것으로 기대된다.

탄소나노튜브의 수소저장은 1997년 미국 IBM Bethune등에 의해 처음 시도되었고[53], 최근 전기자동차의 상용화 문제로 미국 에너지성(DOE)에 의해 전략적인 연구 계획이 수립된 분야이다. DOE의 전략적인 수소저장 계획에

의하면, 자동차 주행거리 500km 기준으로 6.5wt%(63kgH₂/m³)의 수소저장능력을 가지면 충분히 상업적 가치가 있는 것으로 평가되어, 수소 저장량 6.5wt%은 DOE의 수소저장 계획의 목표치가 되었다[54]. 탄소나노튜브에 수소를 저장할 수 있다는 사실이 알려지면서 최근 전 세계적으로 수소저장에 관한 많은 실험들이 비공개적으로 진행되고 있고, 동시에 이론적 계산 및 컴퓨터 모사실험 또한 많은 연구결과들이 보고되고 있다. <표 2-2>는 현재까지 발표된 탄소나노소재의 수소저장능력을 정리하였다.

현재 탄소나노튜브의 수소저장은 두 가지 논쟁이 있는데 첫 번째는 graphite nanofibers(GNFs)에 67.5wt%의 수소를 저장할 수 있다는 Rodriguez 등의[55] 보고와 알칼리 금속을 탄소나노튜브에 도핑하면 14~20wt%의 수소를 저장할 수 있다는 Chen 등의[56] 연구결과처럼 DOE의 목표치 6.5wt%를 훨씬 넘어서는 연구결과들이 다수 보고되고 있다. 그러나 chen의 연구에서 알칼리 금속에 의해 수분이 다량 포함되어 실제로 수소저장능력은 수 wt.% 미만이라는 것이 밝혀지면서, 이러한 연구결과들은 많은 연구자들에 의해 재현성이 의심받고 있으며, 전 세계적으로 논란의 대상이 되고 있다. 두 번째는 수소가 탄소나노튜브의 안쪽 빈 공간에 저장되느냐 아니면 다발로 이루어진 나노튜브 사이의 공간에 저장되느냐 하는 논쟁이다. 이 논쟁에 관해서 많은 실험적 결과와 이론적 계산 및 컴퓨터 모사실험 등이 행해졌으나, 현재까지 뚜렷한 결론이 나지 않은 상태이다. Dillon 등은[54] 단층 탄소나노튜브에 상온에서 ~4wt%, ~133K에서 5~10wt%의 수소가 흡착되며 대부분의 수소는 튜브 안에 저장된다고 결론지었다. Liu 등도[57] 이와 비슷한 결론을 내렸는데, 그들은 아크방전법으로 단층 탄소나노튜브 합성시 전이금속과 황화합물을 반응촉진제로 첨가하여 나노튜브의 직경을 증가시킨 후, 산처리와 열처리를 통하여 나노튜브의 끝을 개방시켜 실험한 결과, 온도 300K, 수소압력 10.1Mpa에서 4.2wt%의 수소가 저장됨을 보고하였고 나노튜브의 직경이 수소저장에 큰 영향을 미친다고 결론지어 수소가 튜브안에 저장됨을 시사하였다. 그러나 Ye 등은[58] 단층 나노튜브 다발을 유기용매 속에서 초음파 처리하여 다발을 어느 정도 풀어헤치면 수소저장량이 증가하고 그것은 다발이 풀어지면서 수소가 흡착될 수 있는 표면적이 커졌기 때문이라고 설명하여, 수소가 튜브의 안에 저장되는 것이 아니라 나노튜브 표면에 물리흡착됨을 시사하였다.

<표 2-2> 탄소나노 소재의 수소저장 능력[63]

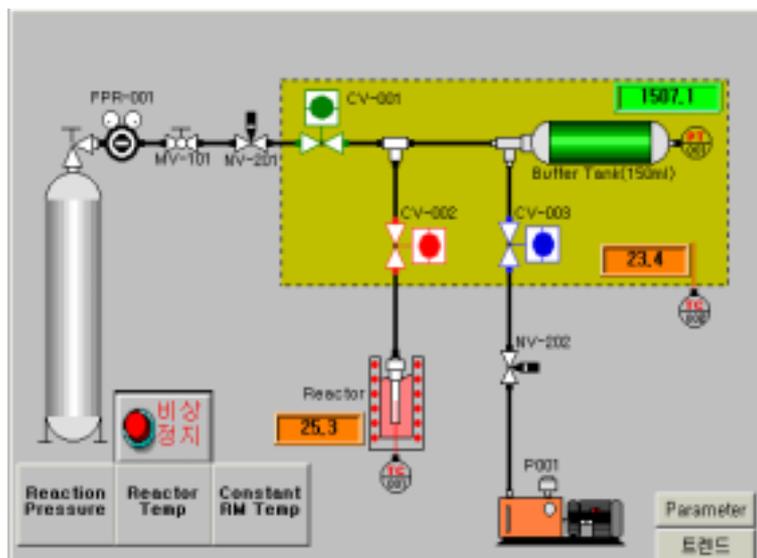
Material	max. wt % H ₂	T(K)	P(MPa)
SWNTs (low purity)	5-10	133	0.040
SWNTs (high purity)	-4	300	0.040
GNFs (tubular)	11.26	298	11.35
GNFs (herringbone)	67.55	298	11.35
GNFs (platelet)	53.68	298	11.35
graphite	4.52	298	11.35
GNFs	0.4	298-773	0.101
Li-GNFs	20.0	473-673	0.101
Li-graphite	14.0	473-673	0.101
K-GNFs	14.0	313	0.101
K-graphite	5.0	313	0.101
SWNTs (high purity)	8.25	80	7.18
SWNTs (-50 % pure)	4.2	300	10.1
SWNTs (50 % pure)	2	293	0.101

성균관대 이영희 교수팀에서 밀도함수법을 이용하여 탄소나노튜브에 수소가 저장될 때 수소의 흡착위치와 최대 저장용량, 저장과정을 이론적으로 연구한 결과에 의하면[59-62], 수소는 나노튜브의 벽 바깥에 arm-chair형이나 zig-zag형으로 화학흡착되거나 나노튜브의 안에 수소분자의 형태로 저장될 수 있으며, 저장할 수 있는 최대 수소저장량은 수소 사이의 척력과 수소분자와 나노튜브 벽 사이의 척력에 의해 결정되는 것으로 밝혀졌다. 단층나노튜브는 수소저장에 있어 다층 나노튜브보다 더 효율적이다. 단층 탄소나노튜브의 경우, 최대 수소 저장량은 반경에 비례하였고, 실험적으로 주로 관측되는 (10, 10) 나노튜브를 기준으로 할 때 질량비로 14%까지 저장이 가능했다. 수소는 찢혀들어감 메커니즘(flip-in mechanism)이나 걷어참 메커니즘(kick-in mechanism)에 의해 튜브 안쪽 분자 형태로 저장되고, 분자의 해리과정과 찢혀나옴 메커니즘(flip-out mechanism)의 두 단계를 거쳐 나노튜브 밖으로 빠져 나올 수 있었다. 탄소나노튜브 안에 수소를 저장 및 빼내는 과정은 모두

에너지 장벽의 크기가 2eV 이내로 비슷하고, 그 동안 나노튜브 구조가 깨지 않는 가역적인 과정이다. 이는 탄소나노튜브가 전지나 연료저장용기로서 안정하게 이용될 수 있음을 제시한다. 또한 수소가 화학흡착되므로써, 원래는 도체의 성질을 띠는 (5, 5) 탄소나노튜브가 일정한 밴드갭을 가지는 반도체가 된다는 사실도 알아냈다.

탄소나노튜브의 수소저장 능력을 측정하는 방법에는 대표적인 4가지 방법이 있다. Temperature-programmed deposition (TPD) 와 thermogravimetry pressure concentration temperature(PCT) 장치, Thermobalance를 이용하는 방법 및 전기화학적 방법으로 수소저장량을 측정하는 방법 등이 있다. <그림 2-15>은 보편적으로 가장 많이 사용되는 PCT 장치이며, 고압의 수소를 이용한 수소저장량 측정장치의 개략도(성균관대)이다. 고압의 수소기체를 buffer tank에 넣고 압력을 측정하고, 안정된 뒤 tank 안의 수소기체를 나노튜브가 들어있는 cell 에 넣고 tank의 압력이 안정될 때까지 기다린다. 이때 처음 tank의 압력과 최종적인 압력과의 차이를 가지고 기체상태 방정식을 이용하여 수소저장량을 측정하는 방법이다.

<그림 2-15> 탄소나노튜브의 수소저장능력 측정장치의 개략도



다. 전기이중층 축전기 (Electric Double Layer Capacitor)

에너지 저장장치 중 전기이중층 축전기(EDLC)는 고출력 펄스 파워 능력과 고전압 에너지 저장능력으로 인하여 전지와 더불어 소형경량의 전기화학적 에너지 저장장치, 대출력 펄스 파워 및 피크파워의 부하 평준화용으로의 응용이 기대되고 있으며 환경 친화적인 재료의 사용, 긴 수명 및 높은 충방전 효율 등으로 인하여 환경·경제적인 측면에서 그 기술의 중요성이 크게 부각되고 있다. 군사용, 우주항공용 및 의료용 등의 고부가 장비의 대출력 펄스파워 전원으로 사용될 것이 예상되며 선진국에서도 전기자동차, 전력저장 시스템 및 효율적인 에너지 사용을 위해 국가 차원의 중추산업 분야로 지원하고 있다.

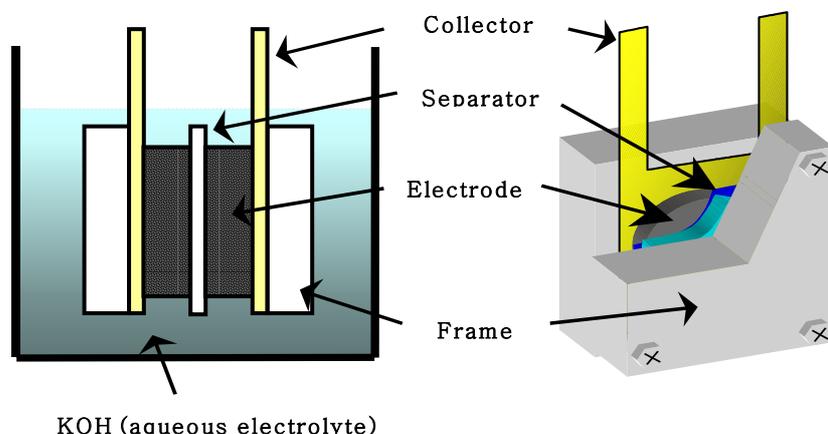
EDLC에 적합한 전극물질은 넓은 표면적, 높은 전자전도도, 용이한 성형 및 가공성 등의 특성이 요구된다. 이러한 특성을 만족시킬 수 있는 것이 물론 탄소재료이다. 탄소재료는 전자전도도가 흑연의 경우 1.25×10^3 S/cm, pyrolytic carbon은 50-100 S/cm로 전자전도도가 큰 구리(5.88×10^5 S/cm)와 반도체인 germanium(1.25×10^2 S/cm) 이상의 값을 가지며, 특히 활성화 및 화학적 처리과정을 통해 큰 비표면적을 가진 탄소전극과 일부 화학흡착이 동반된 pseudo-capacitance를 가진 탄소전극을 제조할 수 있다. 현재까지 초고용량 축전기용으로 제안된 탄소재료로는 활성탄소, 활성탄소섬유, 비정질 탄소, 탄소에어로젤, 탄소복합재료 등이 있다. 가장 많이 이용되고 있는 활성탄소는 비표면적이 1000-3000 m^2/g 의 높은 값을 가지지만, 전극역할에 기여하지 않은 20 Å 미만의 미세 기공이 많이 분포되어 있어서, 실제로 이용되고 있는 유효 비표면적은 전체의 20-30 % 수준이다. 또한 현재 상용화된 활성탄소는 전극성형 중 바인더가 첨가되어야 하는데 바인더 첨가로 인해서 전극의 저항이 증가할 뿐만 아니라 집전체와의 접촉저항도 커지게 된다. 전극물질로서의 탄소나노튜브는 전자전도도가 최대 1.0×10^4 S/cm이며, 비표면적의 유효이용율이 거의 100%이며, 현재까지 알려진 최대 비표면적은 약 500 m^2/g 에 이른다.

최근에 Niu 등은[64] CVD법으로 합성한 다층 탄소나노튜브를 초고용량 캐패시터 전극으로 사용하고, 38wt%의 H_2SO_4 용액을 전해질로 하여 비축전 용량 113F/g, 8Kw/kg의 출력밀도와 0.56Wh/kg의 에너지 밀도를 얻었다.

Ma 등도[65] Niu등과 같은 방법으로 합성한 다층 탄소나노튜브와 38wt%의 H₂SO₄ 용액을 이용하여 실험하였으나, Niu 등과는 다르게 페놀수지를 바인더 물질로 사용하여 전극을 성형 후 열처리하여 사용하였으나, 25F/g의 비교적 낮은 비축전 용량을 나타내었다.

이영희 교수팀은 아크방전으로 합성한 단층 탄소나노튜브를 전극 활물질로 이용하고 7.5N-KOH 수용액을 전해액으로 하여 비축전 용량이 최고 180F/g의 초고용량 캐패시터를 제작하였다[66]. 전극제작은 정제하지 않은 단층 탄소나노튜브에 바인더를 10~40wt%를 혼합 후 1000psi의 압력으로 성형 후, 600~1000℃에서 열처리하여 전극으로 사용하였다. 충방전 특성 평가 및 순환 전압전류 측정과 교류 임피던스 측정을 위해 <그림 2-16>에 나타난 것처럼 단위전지를 구성하여 실험하였다. 전극성형 후 BET(N₂) 비표면적 측정 결과, 열처리 전의 단층 나노튜브의 비표면적은 220m²/g 이었으나 바인더 혼합 후 성형하여 열처리하는 과정에서 열처리 온도가 증가함에 따라 비표면적도 증가하여 1000℃에서 360m²/g 정도의 비표면적을 나타내었다. 열처리 전의 단층 나노튜브의 세공은 평균직경이 68Å이었으나 열처리 온도가 증가함에 따라 감소하여 1000Å에서 약 32Å을 나타내었다. 세공분포는 열처리 전에는 150Å 부근과 20Å 부근에 세공이 밀집되어 있었으나, 열처리 후에는 150Å 부근의 중세공이 사라지고 30~40Å 부근에 세공들이 밀집되어 있음을 알 수 있었다.

<그림 2-16> 전기이중층 축전기의 단위셀



라. 전기화학적 이온분리 전극

현재까지 전기화학적 이온분리법을 위한 전극용으로 제안된 탄소재료는 활성탄소, 활성탄소섬유, 비정질 탄소, 탄소에어로젤이 있다. 이중 전기화학적 이온분리법에 주로 적용되고 있는 것이 활성탄소섬유 및 탄소에어로젤이다. 활성탄소섬유는 기공이 균일한 미세공(10-20Å)으로 이루어져 있지만 최근에는 프리커서에 기공을 쉽게 발달시키는 휘발성 고분자물질 및 소량의 금속 이온들을 혼합하여 방사한후 활성화하여 미세공의 크기분포를 30-40Å 범위로 넓히면서 금속을 침착하는 등의 기술이 개발되는 등 탄소표면 특성을 다양화하는 노력이 진행되고 있다. 탄소에어로젤은 resorcinol - formaldehyde 와 같은 유기화합물을 탄화시켜 초임계 건조를 거쳐서 제조된다. 1995년 미국의 LLNL(Lawrence Livermore National Laboratory)에 있는 J. C. Farmer는 monolith 형태의 탄소에어로젤을 합성하여 전기화학적 이온분리시스템에 적용하여 CDI 기술을 발표하였으며 현재까지 개발 중에 있다.

탄소나노튜브를 전기화학적 담수공정에 응용할 경우 기존의 전극 물질인 Graphite, AC, ACF, Carbon aerogel 등에 비해서 Capacitance linearity, 충전밀도, 비표면적, 기공부피, 전기저항 측면에서 우수한 특성을 가지고 있어서 적어도 3배 이상의 정제 능력(40000ppm TDS)을 나타낼 것으로 기대되며 광대한 범위의 오염된 물의 정제에 사용될 수 있다.

<표 2-3> 탄소 소재의 기공구조, 비축전 용량 및 물리적 성질

종 류	비표면적 (m ² /g)	축전용량 (F/g)	겉보기밀도 (g/cm ³)	전기저항 (mΩ/cm)	기공부피 (cm ³ /g)
활성탄	300-600	150	0.5-0.9	200-300	0.52-1.47
활성탄소섬유	500-1200	100-250	0.8	4800	1.87
탄소에어로젤	400-1200	20-150	0.2-1.0	40	3.74 (50nm. pore)
탄소나노튜브	100-700	80-300	> 1.0		

특히, 탄소나노튜브 전극등을 사용하여 전기화학적 이온분리기술로 물을 정제 할 경우, 현재 많은 기술개발이 진행되고 있는 역삼투법(reverse osmosis)과 비교하여 볼 때 10배 이상 경제적이면서 약 70%의 전력을 절약 할 수 있을 것이라 기대된다. 전기화학적 이온분리기술은 역삼투법 혹은 이온교환(ion exchange)법에서의 전처리 과정이 필요없고, 재생과정에서 어떠한 화학처리를 하지 않아 2차 오염문제를 방지할 수 있다. 최근에 Sabrex of Texas Inc.의 Robert Atlas는 탄소나노 튜브의 전기화학적 물정제의 가능성을 보고하였으며, 미국의 FarWest Group에서 탄소나노튜브의 Capacitive Deionization Technology(CDT)에의 응용가능성을 보고하였다.

<표 2-4> 역삼투법과 전기화학적 이온분리법의 비교

방 법	전극형태	TDS Limit	Disinfection	분리시간	전력
역삼투법		35,000			10X
전기화학적 이온분리법	탄소에어로젤	15,000		12X	10X
	활성탄소섬유	7,500	94% 제거	1X	2X
	탄소나노튜브	35,000	94% 제거	24X	1X

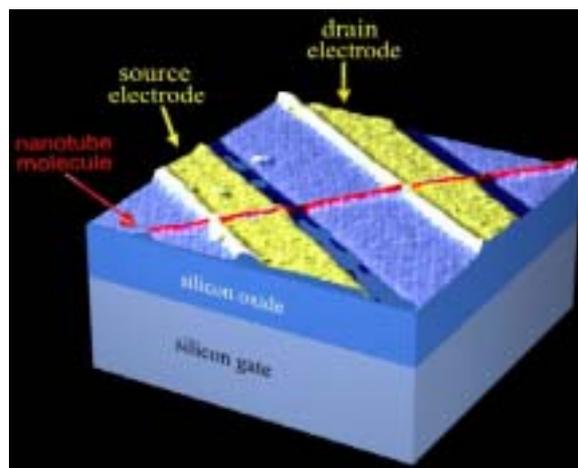
탄소나노튜브를 전기 이중층 축전기, 연료전지, 수소저장, 이차전지 등의 전기 화학적 시스템과 더불어 전기 화학적 이온분리기술에 의한 해수담수화 공정기술은 21세기의 최대 과제인 수자원 개발에 편승하여 세계적으로 활발히 개발이 진행될 것으로 예상된다. 해수담수화 기술은 세계적 업체인 Sabrex of Texas Inc.와 FarWest Group 등에서 탄소나노튜브의 응용에 대한 상업화 가능성을 크게 보고하면서 앞으로 세계적인 관심분야가 될 것임에 틀림없다. 탄소나노튜브를 전기 화학적 시스템에 응용하려는 기술은 현재로서는 실험적인 수준에서 기초 연구가 보고되었다. 탄소나노튜브 전극의 실용화에 있어서 가장 큰 문제점은 가격문제에 기인하여, 이로 인해 제품개발의 수준까지는 이르지 못하였기 때문에 탄소나노튜브의 대량합성을 통한 저가의 탄소나노튜브공급이 이루어진다면 경제적인 탄소나노튜브전극 제작을 통해 수자원개발의 선두기술이 될 것이 확실시된다. 이럴 경우 전기 화학적 이온분리시스템에 응용하는 기술은 21세기 수자원 개발에 필수적인 기술로

평가받아 전세계 연구자들의 폭발적인 연구 대상이 되어 이 분야에서 특히 획득을 위한 치열한 기술개발이 진행될 것으로 예상된다.

마. 극미세 전자 스위칭소자 응용

탄소나노튜브는 직경 및 감긴 형태에 따라서 금속 또는 반도체의 전기적 성질을 조절할 수 있고, 직경 수십 nm인 튜브를 성장시킬 수 있으므로, 현재의 실리콘 소자를 대체하여 Tera급의 메모리 소자를 만들 수 있을 것으로 예상되고 있다[39]. 네덜란드의 Delft 대학의 Dekker등은 SWNT를 이용하여 상온에서 단분자 규모의 나노소자를 <그림 2-17>와 같이 제조하였다[67]. 이 소자에서 직경이 1 nm 정도의 반도체 특성을 가지는 탄소나노튜브가 SiO₂로 증착된 Si 기판위에 400 nm 간격을 두고 분리되어 있는 두 개의 금속 전극을 연결하고 있음을 볼 수 있다. Dekker등은 전류-전압($I-V_{bias}$) 특성이 gate 전압에 따라 다른 거동을 보이는 서로 다른 두 종류의 탄소나노튜브가 있음을 확인하였다. Gate 전압에 무관하고 $I-V_{bias}$ 특성이 선형관계를 보이는 금속성의 탄소나노튜브와, Gate 전압에 크게 영향을 받으며 $I-V_{bias}$ 특성이 비선형관계를 보이는 반도체 특성의 탄소나노튜브로 분류하였다.

<그림 2-17> 개개의 SWNT를 이용한 FET 이미지



최근 서울대 임지순 교수팀은 미국 Berkely 대학과 공동연구를 통하여 triod type의 10nm 크기 탄소나노튜브 transistor를 개발했다고 보고한 바 있

다[68]. 나노튜브를 십자형으로 배열해 놓으면 금속성 나노튜브와 반도체성 나노튜브의 접합이 쇼트키 장벽효과를 보이고 다른 조합의 나노튜브 접합은 장벽효과가 없다. 그 결과 트랜지스터 기능을 완벽하게 수행하게 하면서 동시에 탄소나노튜브끼리 겹쳐진 부분의 넓이가 10 nm^2 로, 이러한 기술은 현재의 현재 실용화된 256 MDRAM 반도체 소자를 1만분의 1로 줄일 수 있는 것으로 평가되고 있고, 앞으로 Terabit DRAM의 등장을 기대해 볼 수도 있다.

바. 메카트로닉스(Mechatronics) 및 고기능 복합체 응용

탄소나노튜브의 우수한 전기전도도와 기계적 강도를 이용하면 SPM, STM 및 AFM의 팁으로 사용할 수 있다. 현재 AFM tip으로 이용되고 있는 Si 이나 SiN 재질의 tip 경우 시편의 미세결합을 부분적으로 관찰하지 못하는 단점이 있다. 탄소나노튜브 tip을 사용할 경우 이런 단점을 크게 해결하는 것으로 나타났다. 미세 크기의 탄소나노튜브를 초미세 시스템의 초미세 연결선, 초미세 파이프, 초미세 액체주입 장치, 탄소나노튜브의 가스 흡착성을 이용하는 가스센서와 탄소와 생체 조직과의 친화성을 이용한 의료용 장치의 부품으로서의 응용도 기대된다. 특히 Lieber 등은 나노튜브 tip에 작용기를 부착시킴으로써 표면상의 특정 작용기를 감지하는 센서의 가능성을 제시하였다[69,70]. 이들은 탄소나노튜브의 tip을 산화시켜 제거하고, carboxyl 기능을 tip에 부착시킴으로써 표면상의 다양한 분자로 화학적 패터닝된 표면을 영상화하였고, 또한 생화학적 측면에서 ligand-receptor의 상호작용을 관찰하기 위하여 탄소나노튜브를 적용하였다.

탄소나노튜브의 물성을 이용한 고기능 복합소재의 응용도 산업전반에 크게 영향을 미칠 것으로 기대된다. 기존의 카본블랙이나 탄소섬유가 고분자지지체에 전도성 매체로 사용되어지고 있는 것처럼, 탄소나노튜브의 높은 전기전도성을 이용하여 optoelectronics 적용 복합체 연구가 최근 진행되고 있다 [71]. 뿐만 아니라, 단순히 기계적 성질을 향상시키기 위한 범용 복합체가 아닌, 기계적 성질, 열적 성질, 전기적 성질이 우수한 multifunctional nanocomposite의 출현도 기대할 수 있다. 특히, 전자파 차폐나 정전기 분산을 위한 복합체가 빠른 시일내에 산업화가 예상된다. 21세기는 정보통신의 시대로

서 이동통신 단말기뿐만 아니라 모든 전자기기에서는 전자파가 발생하고 그것을 차폐하는 것은 필수적이다. 이 시점에서 가격 및 성능면에서 국제적인 경쟁력을 갖는 전자파 차폐재의 개발은 대부분의 전자/통신기기에 적용된다는 점에서 산업적 파급효과가 매우 클 것으로 예상된다. 회로부품 및 금속박막 대신 탄소나노튜브를 이용한 복합재를 case 재료로 사용하면 생산공정과 물류시스템을 통일시킬 수 있으며 제품의 내구성을 향상시킬 수 있다. 복합재뿐만 아니라 박막재도 연구할 것이므로 그 응용의 폭도 매우 것으로 기대된다. 특히, 탄소나노튜브가 갖는 나노재료의 특성상 기존의 여타 전도성 충전재보다 소량(5 wt% 이하)을 첨가하여 소정의 전도성 및 전자파차폐능 확보 가능하다[72]. 현재까지 탄소나노튜브 제조비용이 매우 크기 때문에 복합체 연구에 큰 장애가 되는 것으로 여겨지고 있으나, 비용이 저렴한 탄소나노튜브 합성법이 최근 발표되고 있어 복합체 연구가 크게 주목을 받을 것으로 생각되며, 향후 탄소나노튜브의 산업화 진입에 가장 빠른 분야가 될 것으로 판단된다.

제 3 절 기술 개발동향

1. 탄소나노튜브 합성 및 응용기술

탄소나노소재의 합성은 90년대 초 일본 및 미국을 중심으로 활발히 진행되어, 현재는 미국의 Hyperion Catalysis International 사에서는 평균 10 nm의 직경을 가지는 탄소나노섬유를 대량 합성하고 있다고 보고하고 있다. 또한 미국 Boston 대학의 Ren교수팀이 다중벽 탄소나노튜브를 열화학기상증착법을 이용하여 대량 생산할 수 있는 기술을 보유하고 있으며, 단중벽 탄소나노튜브는 Rice 대학의 Smalley팀이 CNI 회사를 설립하고, 기상합성법의 일종인 HiPCO 공정을 사용하여 99% 이상의 순도로 약 20g/일의 규모로 현재 합성하고 있다. 향후 수백 ton까지 생산량을 늘릴 계획이다. 탄소나노섬유의 합성은 현재 일본, 미국, 중국등에서 최근 활발히 연구를 진행하고 있으며, 미국의 Applied Science, 일본의 Showa-Denco사에서 전극 첨가제 및 복합체

응용을 위한 sub-micron 직경의 탄소섬유가 현재 상업적으로 생산되고 있다. 탄소나노튜브의 합성은 거의 기업 중심으로 진행되고 있다.

국내에서는 성균관대의 이영희 교수팀에서 탄소나노튜브의 구조 및 기능제어, 응용에 관한 기초연구를 활발히 수행하고 있으며, 한양대의 이철진 교수팀에서는 열화학기상증착법에 의해 대면적 기판에서의 탄소나노튜브 합성 및 저온합성의 기초연구를 수행하고 있다. 포항공대 이건홍 교수팀에서는 알루미늄 템플레이트를 이용한 emitter의 기초연구 및 캐패시터, 수처리 적용을 위한 탄소전극개발의 연구를 수행중이다. 그밖에 서울대, 연세대, 한국과학기술원, 표준연구원 등의 연구기관에서 기초연구 및 응용분야에서 최근 괄목할 만한 연구를 진행하고 있다. 그러나 탄소나노소재의 합성은 소규모 실험실 수준에서 이루어지고 있을 뿐, 대학단위의 연구실이나 기업체 부설연구소에서 응용을 위한 탄소나노튜브는 전량 외국에서 수입하고 있는 실정이다. 국내에서는 탄소나노소재의 대량합성은 일진나노텍이 유일하게 개발해 오고 있으며 pilot 규모에서 시험하여 최근 대량합성기술을 확보한 상태이다.

탄소나노튜브를 이용한 응용기술 중에서 산업적으로 가장 앞서 있는 분야가 나노튜브를 이용한 field emission display 분야이다. 이 분야는 삼성종합기술원의 김종민 박사팀의 주도하게 개발이 진행되어 왔으며, 세계적으로 단연 선두를 달리고 있는 분야이다. <그림 2-18>은 탄소나노튜브를 이용하여 개발한 FED의 사진이다.

<그림 2-18> 탄소나노튜브를 이용한 FED 및 영상구현 이미지



서울대 물리학부 국양 교수팀에서 속이 비어있는 탄소나노튜브에 플러렌을 인위적으로 삽입하여 탄소나노튜브의 반도체 성질을 임의대로 조작하는데 성공하였으며, 이 기술은 향후 분자양자 소자에 성공적으로 적용될 경우 현재 반도체 크기를 1만분의 1로 줄일 수 있는 기술이다[73]. 연료전지로의 응용은 일본의 NEC에서 탄소나노혼(nanohorn)을 제조하여 백금촉매를 담지하여 원료기체인 수소 분해 효율이 급격히 향상됨을 최근 확인하였으며, SONY에서 플러렌을 전극 멤브레인으로 사용하여 검증 실험단계에 있다[74]. 특히, NEC의 경우 탄소나노소재를 전극으로 사용하여 휴대용 연료전지를 2005년 이내에 상업화할 계획이며, 성공할 경우 노트북 컴퓨터의 전원을 몇 일 동안 교체함이 없이 사용할 수 있고, 휴대전화의 경우 무려 1 개월 이상 사용하게 할 수 있다. <그림 2-19>은 NEC에서 개발한 휴대용 연료전지의 모형도이다. 명암크기에 해당할 정도로 소형화가 가능한 것으로 보여진다. 국내의 경우 한국과학기술원의 유용교수팀에 의해 나노기공 탄소 template를 제조하여 백금촉매를 담지하고 촉매의 활성이 10배 이상 증가한 것으로 보고하였다[75].

<그림 2-19> NEC에서 개발한 휴대용 연료전지 프로토타입



그밖에 SPM 팁등의 나노부품 및 소자, 전자기기 하우징을 위한 전자파차폐, 반도체 포장용기를 위한 정전기 분산목적의 고기능 복합체등에 관한 응용연구가 전세계적으로 활발히 진행되고 있다.

2. 연구개발 전략

탄소나노튜브의 특이한 구조 및 물성이 보여주는 다기능성, 고기능성은 정보통신기기의 필수 3요소인 평면표시소자, 메모리소자, 전지에 응용력이 뛰어나며 기존의 소자가 가지고 있는 물성의 한계를 극복할 수 있어서, 전세계적으로 경쟁력 우위를 확보하기 위한 전략들이 다각적으로 추진 중에 있다. 탄소나노튜브를 광범위한 분야에서 산업적으로 응용하기 위해서는 탄소나노튜브를 대량으로 합성하고, 직경, 길이 및 결정성 등의 미세구조를 제어하는 기술이 필수적으로 선행되어야 한다. 그러나, 나노소자의 연결선으로 이용될 수 있는 고순도를 지니면서 특정 chirality를 가진 구조가 완벽히 제어된 탄소나노튜브를 대량으로 합성하는 기술은 현재 극히 초기단계이다. 전기방전법, 열분해법, 레이저 증착법, 플라즈마 화학기상증착법, 열화학기상증착법 등 여러 가지 방법이 탄소나노튜브를 합성하는데 사용되어 왔으나, 기존의 방법을 이용하여 탄소나노튜브를 합성하였을 때, 다양한 chirality를 가진 탄소나노튜브가 합성되었다. 따라서, 고순도의 단결정성을 가지는 탄소나노튜브를 합성하는 것은 현재 매우 어려운 일로 평가되고 있다. 탄소나노튜브의 합성 측면에서는 이와 같은 높은 순도 및 특정한 chirality를 가진, 즉 단결정성을 가지는 탄소나노튜브를 합성하는 것이 중요한 연구전략 및 주제가 될 것으로 판단된다.

탄소나노튜브의 광범위한 응용처를 구현하기 위해서는 각 기능에 부합하는 다양한 구조의 탄소나노튜브가 필요하다. 평판 디스플레이인 FED를 구현하기 위해서는 대면적의 유리기판 위에 직경이 작은 다층 탄소나노튜브를 수직으로 성장시킬 수 있어야 하고, 유리기판의 용융점보다 낮은 온도에서 탄소나노튜브를 성장시킬 필요가 있다. 메모리 소자에 응용하기 위해서는 개개의 탄소나노튜브 조작성이 가능해야 할뿐만 아니라 각각의 양자특성 이해가 선행되어야 한다. 또 고품질 탄소나노튜브, 길이제어, 직경제어, 금속-탄소나노튜브 접합제어등의 구조제어가 선행되어야 하고, terabit급 메모리를 구현하기 위해서는 궁극적으로 array 기술이 확립되어야 한다. 탄소나노튜브를 2차전지나 연료전지, 수소저장 등에 응용하기 위해서는 최적직경의 나노튜브를 합성해야 하고, 금속의 성질을 가져야 하며, 길이가 짧을수록 수소저장

용량이 증가하고 저장에 유리하다. 또 저장능력을 높이기 위해서 알칼리 금속등의 도핑이 필요하며 정제된 탄소나노튜브가 요구된다. 따라서 탄소나노튜브를 다양한 응용처에 사용하기 위해서는 선행기술로 각 응용처에 적합한 탄소나노튜브의 구조 및 설계기술이 요구되며, 이후 각 소자들의 내부에서의 탄소나노튜브 기능을 제어하는 기술을 확립해야 할 것이다. BT기술과 관련하여 바이오 물질과 화학적으로 양립할 수 있는 기술을 확립하는 것이 고부가가치 산업창출에 중요한 전략이 될 수 있다.

마지막으로 탄소나노튜브를 이용한 차세대 전자정보 산업제품의 국가경쟁력 확보를 위해서는, 해당기업을 중심으로 학계 및 연구소등과 연계하여 원천기술 및 특허를 개발하여 대외 기술 경쟁력을 확보하는 것이 매우 중요한 전략이라고 할 수 있다. 이때, 해당기업의 과감한 투자가 선행되어야 하며, 이럴 경우 나노소재 관련산업 제품의 고유상품화로 수출 경쟁력의 증대 및 신규산업 창출에 큰 도움이 될 것이다.

제 4 절 특허동향

1. 정보분석 대상 DB

특허자료의 정보분석을 위한 DB로는 한국과학기술정보연구원(KISTI)에서 제공하고 있는 USPA, JEP A 및 KUPA를 선택하였다. 외국의 자료로는 USPA와 JEP A를 택하였는데, USPA는 미국 특허청의 특허정보 자료를 재가공한 DB이고, JEP A는 일본 특허청의 공개특허 자료를 재가공한 DB이다. 국내 특허자료는 한국공개특허 DB인 KUPA를 선택하여 자료를 검색하였다.

<표 2-5> 특허정보 분석 대상 DB

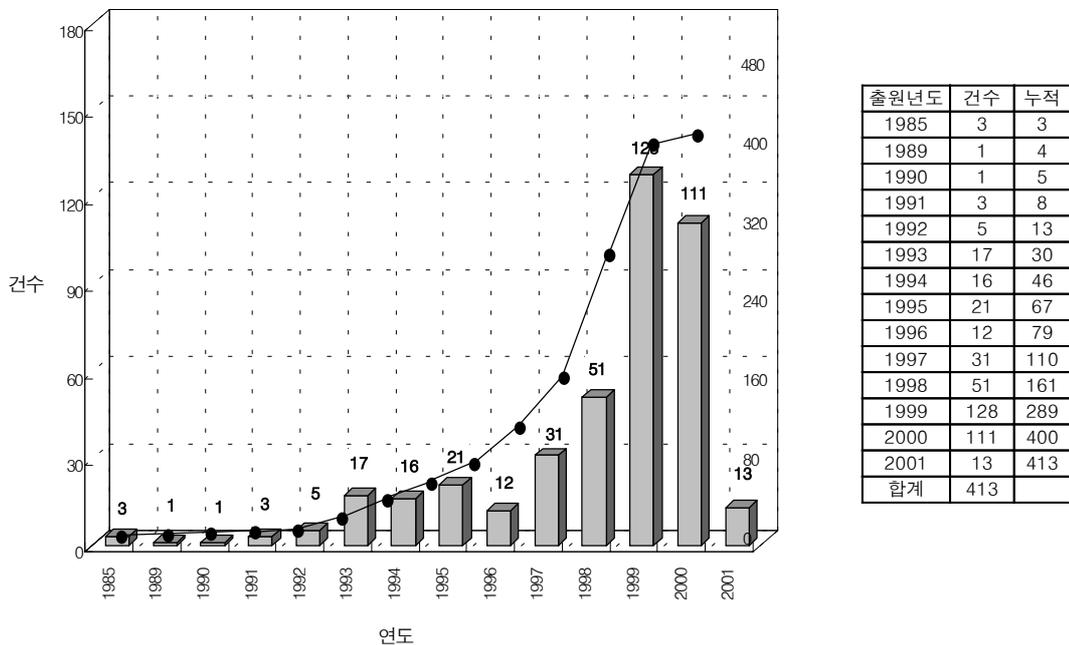
DB명	수록내용	검색건수
USPA	1976년부터 공고된 미국특허 DB	95
JEP A	1976년부터 공개된 일본특허 DB	216
KUPA	1983년부터 공개된 한국특허 DB	102

2. 특허정보 분석

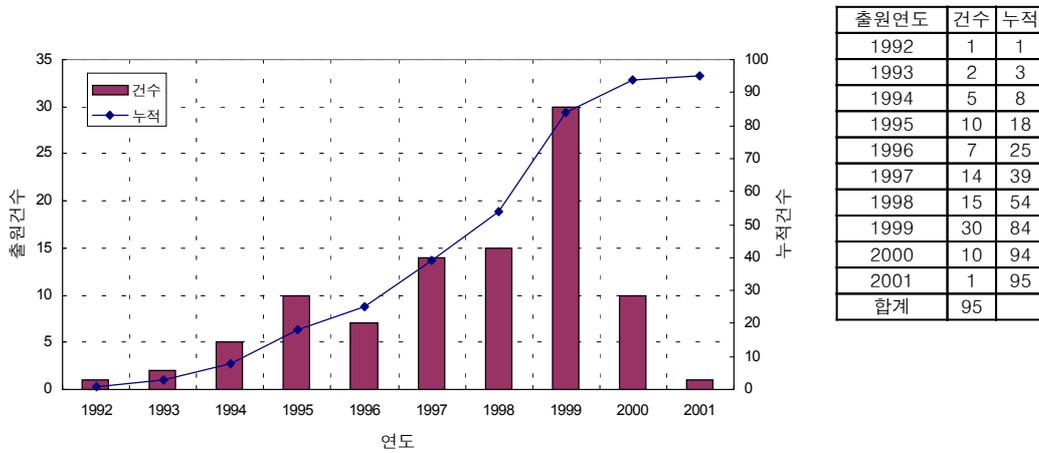
대상 DB에 검색된 국내외의 특허의 출원건수는 1991년에 일본 NEC의 Iijima 박사가 탄소나노튜브를 처음 발견한 이후로 지금까지 꾸준한 증가세를 유지하여 왔으나 2000년 이후 최근 들어 그 출원건수 증가가 주춤하고 있다.

<그림 2-20>에서 막대형은 연도별 출원건수를, 선모양은 누적 출원건수를 나타낸 것으로 1985년 이후 조사대상인 미국, 일본 한국에 약 400여건의 탄소나노튜브 관련 특허가 출원되었음을 알 수 있다. 1993년을 기점으로 21건 1998년에 51건, 1999년 128건, 2000년 111건 등 특허출원의 급격한 증가세를 보여주고 있다.

<그림 2-20> 연도별 출원건수 및 누적건수 추이(전체)

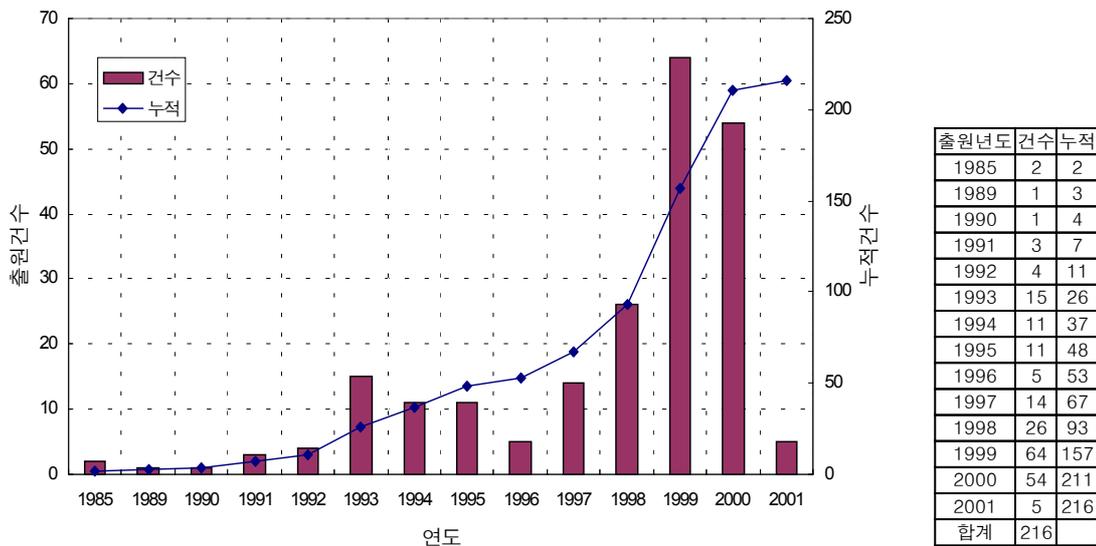


<그림 2-21> 미국특허의 연도별 출원건수 및 누적건수 추이(USPA)



미국의 탄소나노튜브 관련 특허는 1992년부터 시작된 것으로 나타나고 있다. 1994년 5건을 기점으로 1997년 14건, 1999년 30건 비교적 선형의 증가를 보이고 있으나 2000년 이후 최근 특허 건수의 감소는 미국내 IT 산업의 거품 제거 현상이 탄소나노튜브 관련 분야에도 영향을 미치고 있는 것으로 판단된다.

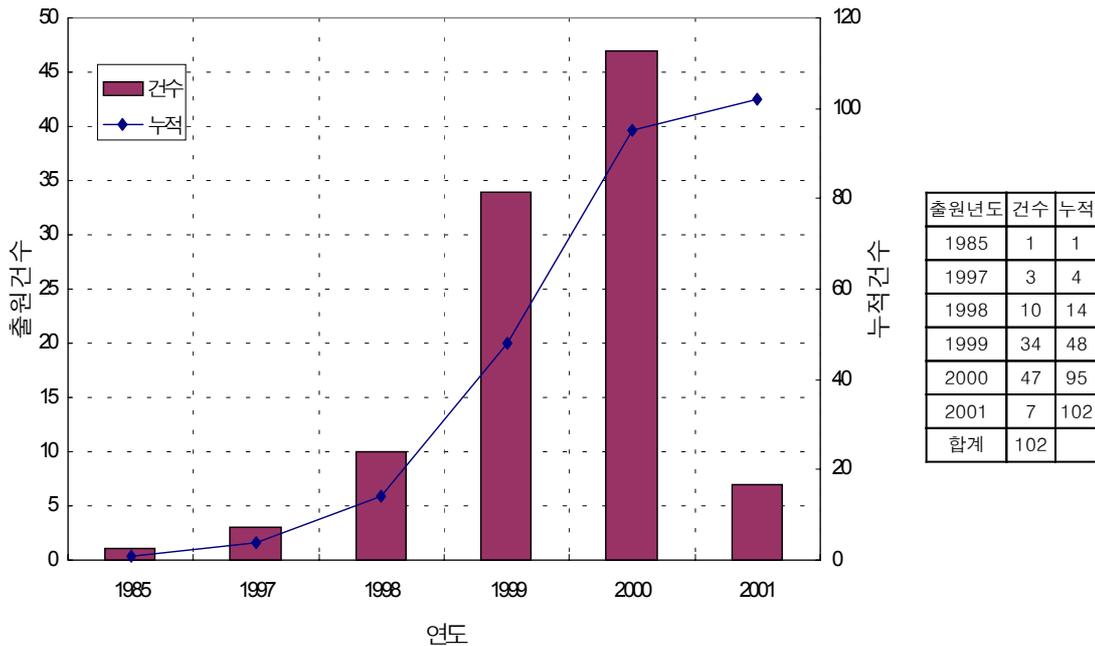
<그림 2-22> 일본특허의 연도별 출원건수 및 누적건수 추이(JEPA)



일본에서는 탄소나노튜브 1991년부터 출원되기 시작했으며 이후 완만한 성장을 보이다가 1998년 이후에는 급격한 팽창을 보이는데 이는 최근 일본에

서 정부와 민간이 합동으로 경제난국을 타개하고 기술경쟁력 확보를 위한 방안으로 나노기술 연구개발이 활발히 이루어지고 있는 현상을 반영한 것으로 보여진다.

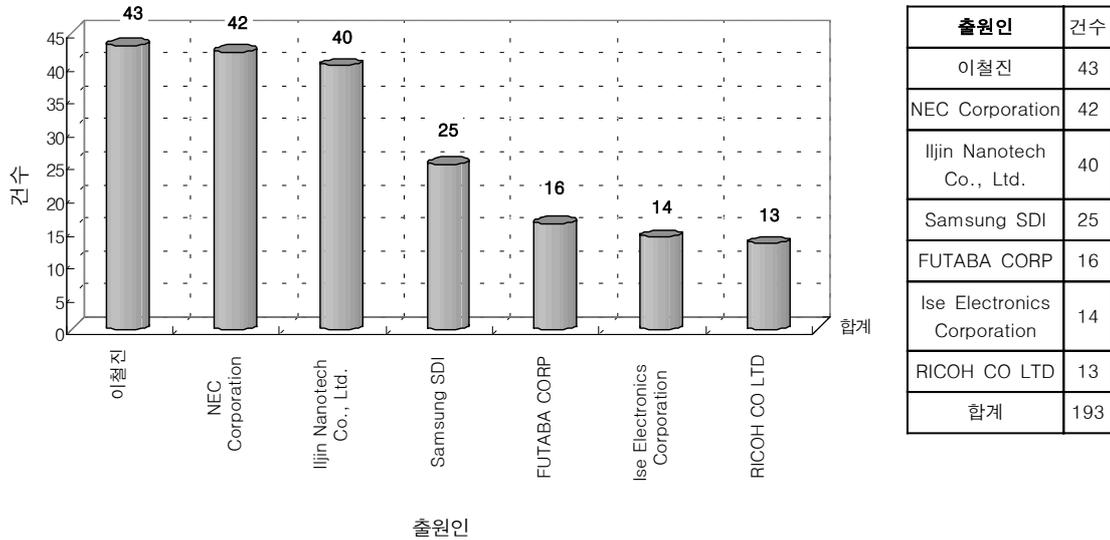
<그림 2-23> 한국특허의 연도별 출원건수 및 누적건수 추이(KUPA)



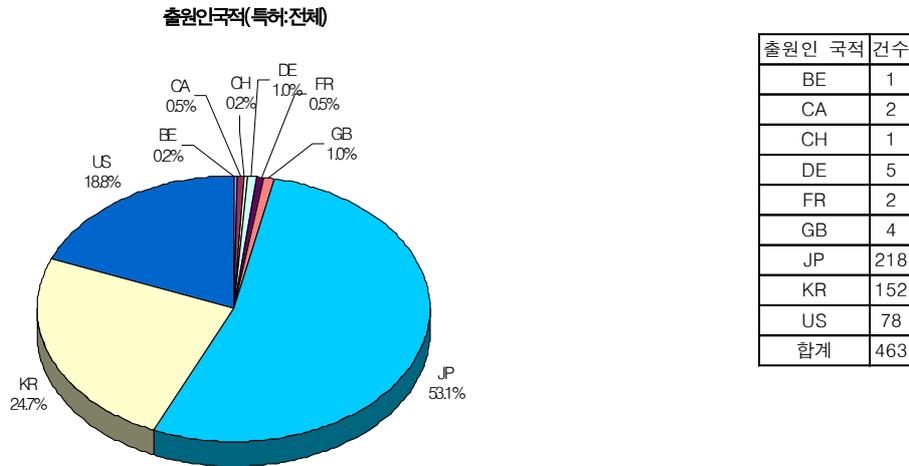
한국에서는 선진국에 비해 다소 늦은 1997년부터 특허출원이 이루어진 것으로 보이며 1985년도의 1건은 검색상의 오류로 판단된다. 1997년 이후 최근에는 급격한 양적 증가를 나타내고 있으며 이는 국내 연구자들의 연구성과가 상당한 수준에 와 있는 것으로 판단되며 나노기술개발이 본격적으로 추진된 2000년 이후에는 보다 많은 가시적 성과가 있을 것으로 추정되나 아직 자료의 미공개 또는 DB에 추가되지 않은 부분이 있을 것으로 추측된다.

미국, 일본, 한국 전체에서 특허를 많이 출원한 출원인을 보면 한국의 이철진이 43건으로 최다이며 일본의 NEC가 42건, 일진 나노텍이 40건 등으로 한국 출원인이 상위 그룹을 형성하고 있다. 이철진은 개인출원과 일진 나노텍과의 공동출원을 통해 많은 출원건수를 나타내고 있으며, 특히 일본에 특허출원을 많이 하고 있는 것으로 나타났다. 하지만 이는 한국특허를 포함한 결과로서 그대로 받아들이기에는 무리가 있다.

<그림 2-24> 최다 출원인 랭킹 분석(특허 전체)

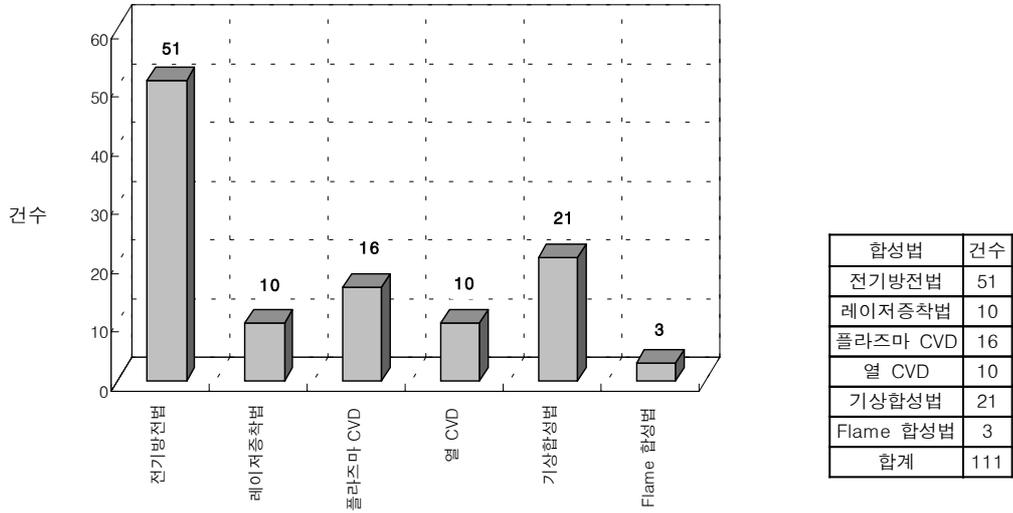


<그림 2-25> 출원인 국적(USPA+JEPA+KUPA)

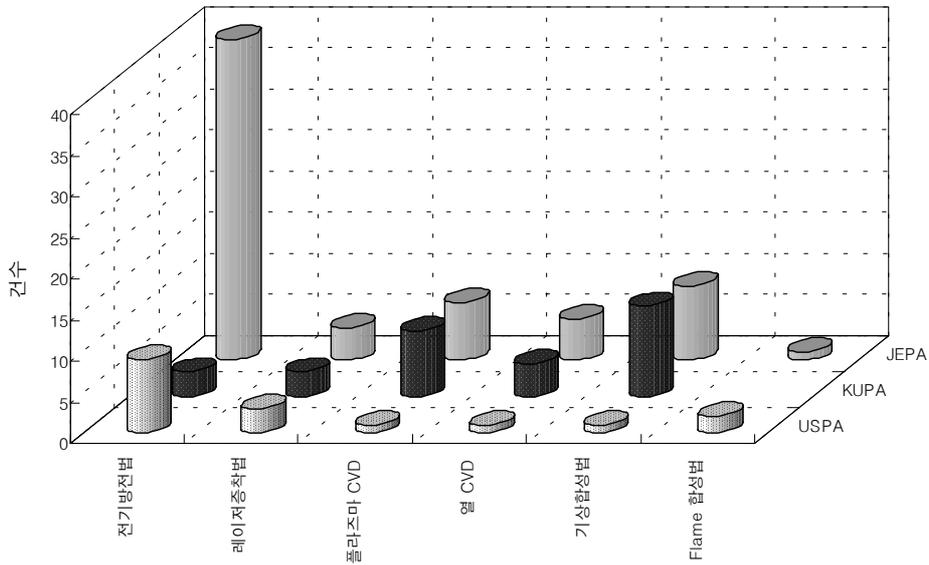


<그림 2-26>는 탄소나노튜브의 제조(합성) 방법에 의한 건수를 나타내고 있다. 기술 초기부터 사용되어진 전기방전법이 51건, 레이저 증착법이 10건 등으로 나타나고 있고, 최근 탄소나노튜브 합성방법으로 주목받고 있는 CVD 방법 등은 전기방전법에 비해 비교적 적은 수치로 나타나고 있다. 현재 기술 및 제품 모두 개발이 활발히 진행되고 있는 단계이므로 앞으로도 다양한 합성방법 등이 나타날 것으로 예상된다.

<그림 2-26> 합성법에 의한 특허건수(특허 전체)

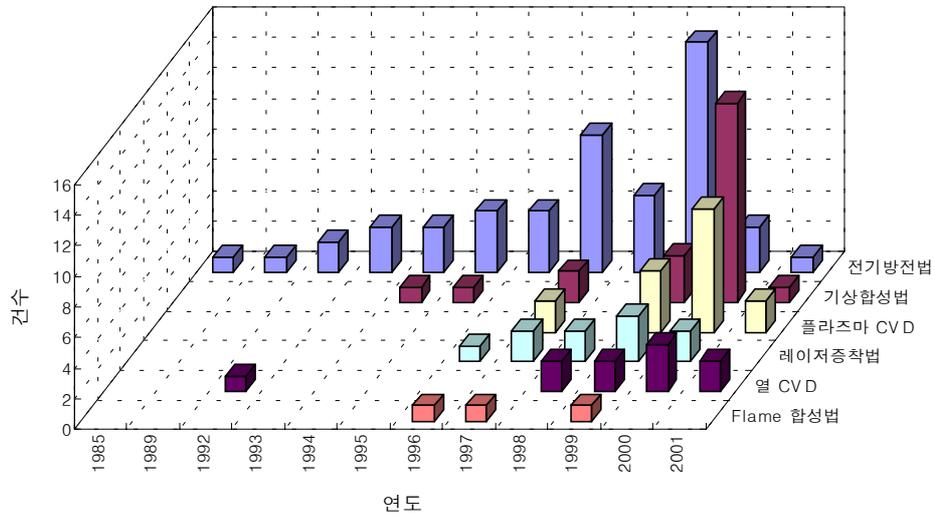


<그림 2-27> 합성법에 의한 특허건수(DB별)



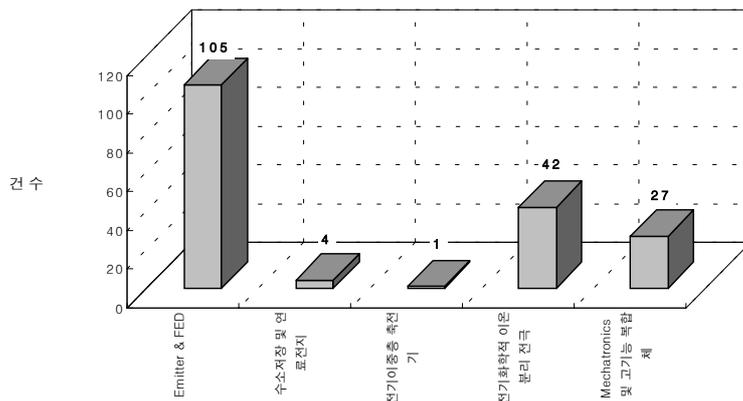
<그림 2-27>은 합성법에 의한 건수를 국가별(DB별)로 비교하였다. 일본과 미국은 전기방전법에 의한 합성법이 주를 이루고 있는 반면 한국은 기상합성법과 CVD법이 다수를 차지하고 있다.

<그림 2-28> 합성법에 의한 연도별 특허건수(특허 전체)



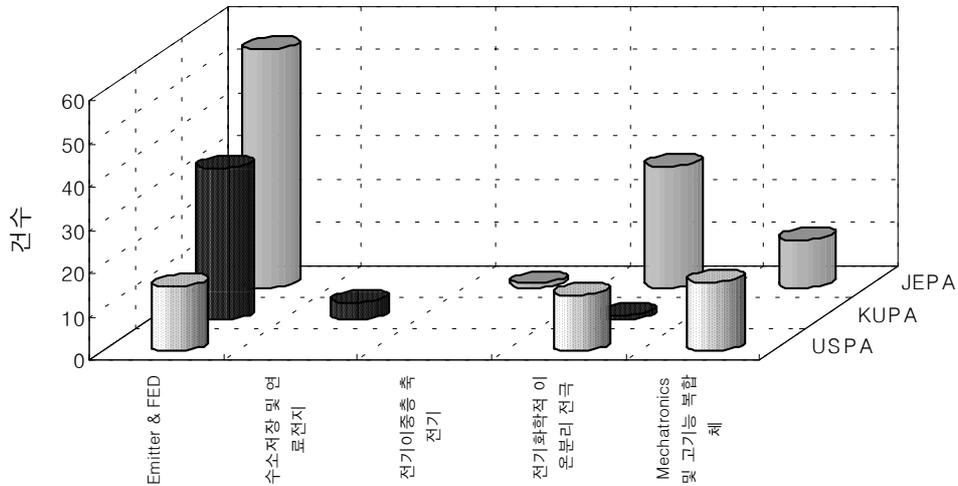
<그림 2-28>에서 보여지듯이 초기에는 정전기방전법이 주류를 이루다가 시간이 지남에 따라 기상합성법, 플라즈마 CVD법 과 열 CVD법으로 합성방법이 변하고 있는 것으로 나타났다.

<그림 2-29> 용도별 특허건수(특허 전체)



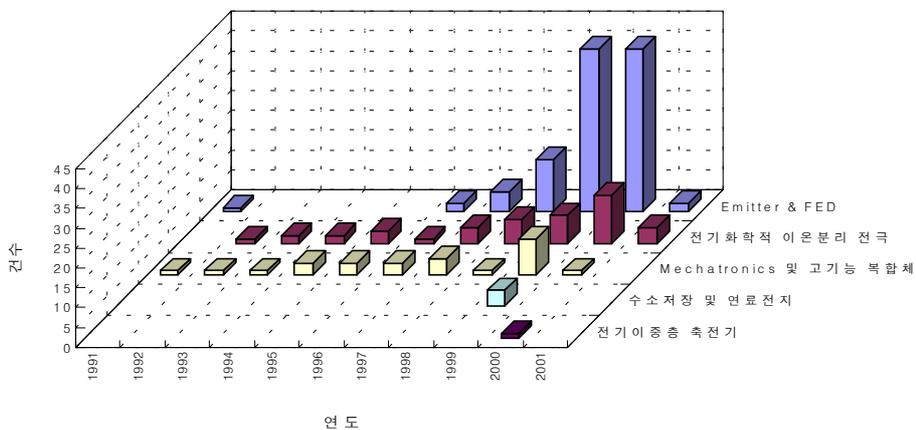
<그림 2-29>는 탄소나노튜브의 용도(응용)에 의한 건수를 나타내고 있다. Emitter 또는 FED 응용관련이 105건으로 월등하게 나타났고, 전극 응용이 42건, 복합체 응용이 27건으로 각각 나타나고 있다.

<그림 2-30> 용도별 특허건수(DB별)



<그림 2-30>은 용도에 의한 건수를 국가별(DB별)로 비교하였다. 탄소나노튜브가 IT산업에 응용되는 Emitter & FED에 가장 많이 활용되고 있다. 미국에서는 Mechatronics 및 고기능 복합체 분야에 일본에서는 전기화학적 이온분리전극 분야에 많은 응용이 이루어지고 있는 반면 한국에서는 수소저장 및 연료전지 분야의 개발이 상당히 이루어지고 있다. <그림 2-31>에서 볼 수 있듯이 디스플레이 등 전자부품 소재로 사용되는 Emitter & FED 분야가 1999년 이후 활발한 증가를 이루며 연료전지와 이온분리 전극 분야도 최근에 많은 연구가 진행되고 있다.

<그림 2-31> 용도에 대한 연도별 특허건수



제 5 절 기술수준 분석

1. 국가별 투자 비교

탄소나노튜브의 기술개발을 촉진하는 외부환경 중에서 가장 특이할 만한 사항은 나노분야에 대한 세계적인 투자라고 할 수 있다. 탄소나노튜브가 속해 있는 기초연구분야와 나노소재분야의 경우, <표 2-6>과 <표 2-7>에 나타난 바와 같이 선도국가인 미국과 일본에서 각 기관별로 특히 많은 예산을 배정하여 연구를 진행하고 있음을 알 수 있다.

<표 2-6> 미국의 주요기관별 분야별 지원규모

(단위 : 백만달러)

구분	기초 연구		응용 연구		센터 및 네트워크		인프라 구축		사회 교육관련		합계		
	2000	2001	2000	2001	2000	2001	2000	2001	2000	2001	2000	2001	2003
NSF	57	122	3	12	16	37	12	25	9	21	93	217	174
DOC/NIST			5	10			2	6	1	2	8	18	-
DOE	17	34	13	29	15	15	13	16			58	94	97
DOD	6	10	31	54	16	24	14	19	3	3	70	110	133
NASA	1	4	3	11			1	5			5	20	46
NIH	6	7	16	17		1	8	9	2	2	32	36	45
합계	87	177	71	133	47	77	50	80	15	28	270	495	495

자료 : 산업자원부, 일본일간공업신문

<표 2-7> 일본의 주요기관별 분야별 지원규모

(단위 : 백만달러)

구분	나노전자 공학	나노소재	바이오 나노기술	양자연산	2000년 예산
경제산업성	○	○	○		145
문부과학성	○	○	○	○	174
농림수산성			○		3
우정사업청				○	1
기타	○	○	○	○	5
합계					328

자료 : 산업자원부

탄소나노튜브의 합성과 응용에 대한 연구는 외국의 선진연구 그룹에서도 아직 초기 단계이므로 우리나라에서도 탄소나노튜브 분야의 연구에 집중적으로 노력을 기울이면 머지않아 국제 경쟁력을 확보할 수 있을 것이다. 과학기술부는 전 세계적으로 NT기술이 아직 초기단계에 불과하다고 보고 선택과 집중을 통한 투자를 확대하고 기술개발에 전력투구하면 세계 최고의 기술력 확보도 가능할 것으로 판단하고 있다. 이를 뒷받침하기 위하여 최근 정부가 나노기술 분야의 전략적 육성을 위해 올해 1,850억원에서 2006년까지 8,300억원으로 정부지원을 늘릴 방침이라고 밝힌 바 있다. 아울러 현재 부족한 나노산업의 인력양성을 위해 인력양성 프로그램을 마련할 계획이며, 나노팹 시설을 구축 본격적으로 연구 지원서비스를 제공할 계획이다. 물론 탄소나노튜브는 나노기술 중에서 나노소재의 소 영역에 불과하나, 모든 나노기반 기술의 기본소재에 해당하므로 향후 모든 나노영역의 사업에서 큰 영향을 줄 것으로 기대된다. 민간 조합으로 나노산업기술연구조합(<http://nanorahihome.com>)이 금년 초에 공식출범 했으며, LG전자기술원, 삼성전자를 비롯한 대기업 6개사와 전자부품연구원(KETI), 나노공정센터 등 연구소-대학 6곳, 일진나노텍(주)와 S&S시스템을 비롯한 15개 중소기업으로 구성되었다. 이 연구조합은 정부의 나노기술정책을 구체화하고 축적기술을 이른 시일 내 산업화하기 위한 것이 특징이다.

탄소나노튜브는 나노기술(NT) 뿐만 아니라, 소위 BT, IT, ST, ET의 5T기술의 기본소재가 될 수 있으며, 대량으로 생산되어 현재의 가격이 다양한 업종

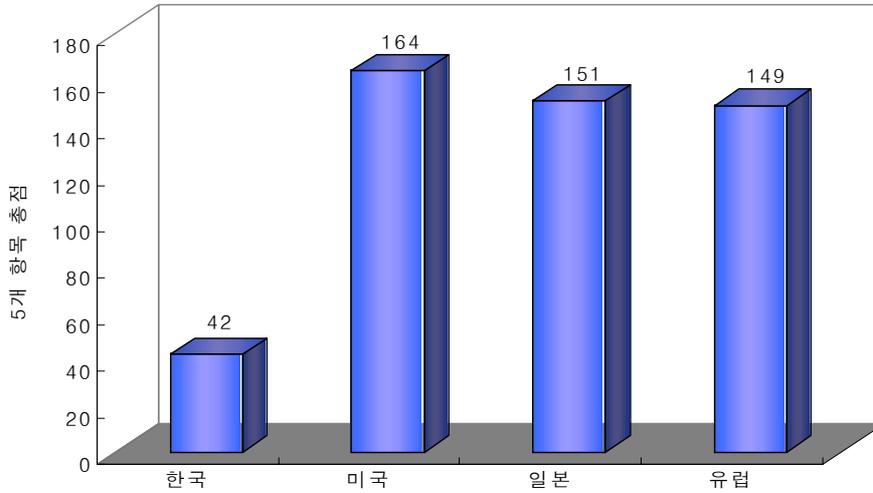
의 산업체에서 요구하는 가격으로 맞추어지면, emitter 및 디스플레이 응용, 2차전지 및 연료전지, 나노부품 및 시스템, 고기능 복합체 등에 관한 탄소나노튜브 응용연구가 더욱 활발히 진행될 것으로 예상되며, 2005년을 기점으로 점차 탄소나노튜브를 이용한 제품이 사회전반에 출시될 것으로 예상된다. 특히 첨단 전자정보산업 분야의 경우, 탄소나노튜브의 적용이 빠른 속도로 발전하고 있어 조기에 차세대 FED 산업분야에서 상품화를 기대할 수 있다. 따라서, LCD, PDP, 유기 EL과 같은 디스플레이와 함께 국내의 기술경쟁력 확보에 크게 기여할 수 있을 것으로 기대된다. 마지막으로, 나노기술은 그 특성상 정부와 학계뿐만 아니라 민간 산업계에서 나름대로 제 역할을 수행해야 비로소 빛을 볼 수 있다. 삼성전자, LG전자, 하이닉스반도체 등 나노기술에 미래의 운명이 좌우되는 해당 업체들의 과감한 기술개발 투자와 산·학연계가 필수적이라는 게 전문가들의 공통된 지적이다.

2. 주요 기술 수준 측정

세계기술평가센터(WTEC, 미국 로올대 소재)의 분류 종합평가 기준에 따르면 우리나라 나노기술은 미국을 100으로 볼때 우리는 25 밖에 되지 않는다. 우리나라 나노기술 수준의 경우, <그림 2-32>와 같이 5개 항목에서 총 42점을 얻어 미국 (164점), 일본(151점), 유럽(149점)과 비교해 낮은 점수를 얻었다.

이를 분야별로 보면 우리나라는 나노구조체합성, 소자, 소재에서 각각 10점, 바이오나노 등에서 각각 6점으로 받아 미국에 비해 3분의 1과 4분 1수준에 각각 머물고 있는 것으로 나타났다.

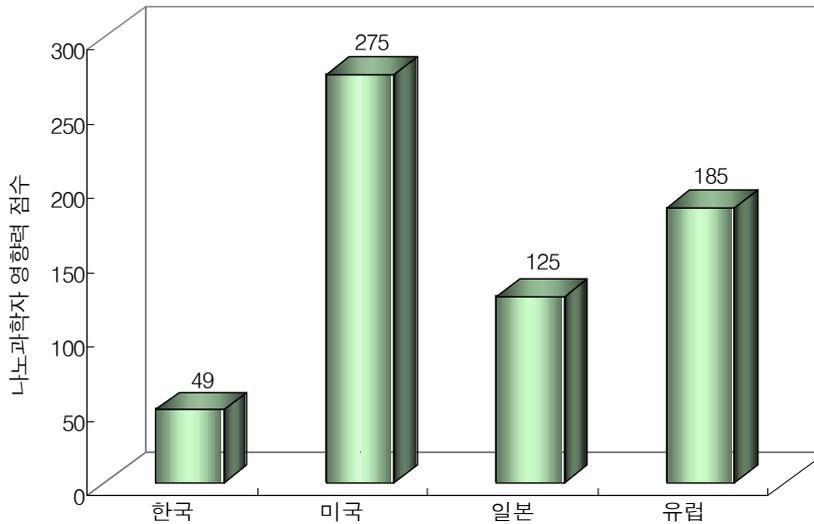
<그림 2-32> 나노기술분야 국가간 경쟁력



자료 : 세계기술평가센터(WTEC)

<그림 2-33>에는 각국의 나노전문가들의 영향력 점수를 나타내었다. 각국의 상위 5명의 영향력이 있는 나노과학자의 개인영향력을 알아보는 조사에서 우리나라는 49점으로 미국(275점)에 비해 5분의 1수준에 머물고 있다. 이 부분에서 유럽은 185점, 일본은 125점으로 우리보다 월등히 앞서있는 것으로 나타났다.

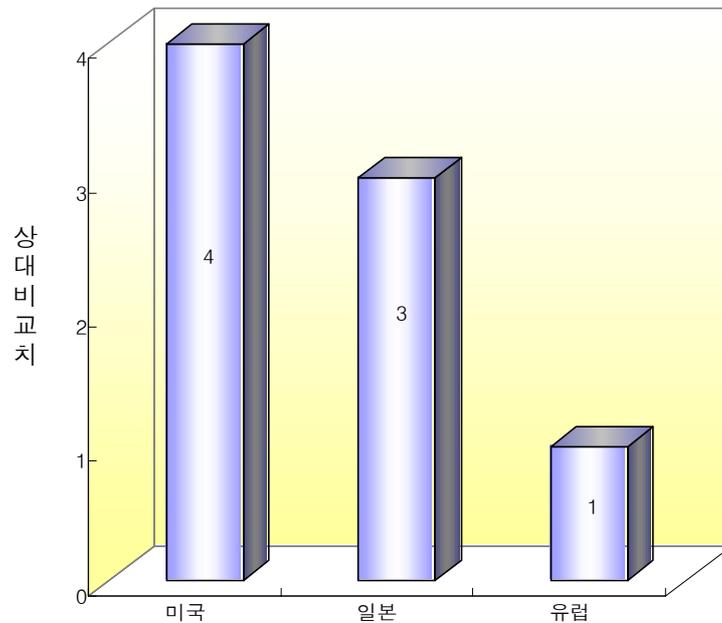
<그림 2-33> 나노전문가 경쟁력 점수



자료 : 국가 나노기술개발계획 보고서(2001년)

그리고 탄소나노튜브 응용기술분야에서의 국가간 경쟁력을 <그림 2-34>에 나타내었다. 미국이 가장 우수하고, 다음으로 일본, 유럽의 순으로 알려지고 있다.

<그림 2-34> 탄소나노튜브응용분야 국가간 경쟁력



자료 : 이운홍, 산업경쟁력 심포지엄-현상과 과제, 2001.5

<표 2-8>에는 displaybank에서 평가한 탄소나노튜브 국내기술수준에 대한 평가가 나타내었다. 국내의 에미터(emitter) 응용기술 개발은 지금까지 주로 FED 응용에 관심이 집중되어 있었다. 최근에 보고된 9인치 크기의 스크린 프린팅법에 의한 초기수준의 FED 개발은 외국에 비해 손색이 없는 수준이지만 전반적인 에미터(emitter) 응용을 비롯한 각종 응용연구 수준은 아직도 선진국에 비해 크게 뒤진 상태이다. 특히 FED 제작에 실제로 사용된 탄소나노튜브는 외국에서 합성한 것을 구입하여 사용한 것이어서 국내에서 경쟁력 있는 제품생산이 필수적으로 요구되고 있다. 국내의 탄소나노튜브의 대량합성과 응용기술을 선진국과 비교한 표에서 보면, 우위에 있다고 판단되는 기술은 열CVD법에 의한 고순도 탄소나노튜브 대면적 합성과 FED응용기술뿐이고 대부분이 열세에 있다고 여겨진다. 그러나 대량생산방법에서는 기상합성법과 CVD법이 우선되고 있는 실정이므로 이 분야에 대한 원천기술을 조

기에 확보하고 신속한 사업추진을 한다면 시장에서 경쟁력이 생길 수 있다고 여겨진다.

<표 2-8> 국내 탄소나노튜브 기술수준 평가

핵심 기술 내용	국외수준 (100%기준)	국내수준 (외국대비%)	비고
탄소나노튜브 기초물성연구	전기적특성 및 각종 물성의 이론적규명(100)	전기적특성 및 각종 물성의 이론적규명(80)	열세
Single-Walled 탄소나노튜브합성	전기방전법(100) 레이저증착법(100)	전기방전법(70) 레이저증착법(40)	열세
탄소나노튜브 저온 수직배향	플라즈마CVD법(100)	플라즈마CVD(80)	열세
고순도 탄소나노튜브 대면적 합성	열CVD법(100)	열CVD법(105)	우위
탄소나노튜브 고온 수직배향 합성	열CVD법(100)	열CVD법(100)	동등
탄소나노튜브 대량합성기술	전기방전법(100) 레이저증착법(100) CVD법(100) 기상합성법(100)	전기방전법(50) 레이저증착법(40) CVD법(100) 기상합성법(70)	열세
탄소나노튜브의 구조제어 및 팁 형태조절 기술	구조제어(100) 팁 형태조절(100)	구조제어(90) 팁 형태조절(90)	열세
탄소나노튜브 전계전자 방출 특성	수mA/cm ² (100)	수mA/cm ² (100)	동등
탄소나노튜브 에미터 응용기술	백색광원, 휴대용Lamp, LCD Backlight, CRT에미터(100)	백색광원, CRT에미터(50)	열세
탄소나노튜브 FED응용기술	ScreenPrinting(100)	ScreenPrinting(105)	우위

자료 : www.displaybank.com

제 6 절 기술예측 및 로드맵

탄소나노튜브의 경우 아직 연구개발 단계이므로 탄소나노튜브 자체 및 응용 분야에 대한 연구과제는 산적되어 있다. 그 가운데 탄소나노튜브 가장 중심이 되는 과제는 탄소나노튜브 양산기술로, 구체적으로는 다음과 같다.

- ◆ 탄소나노튜브의 구조, 사이즈 제어 기술
- ◆ 고품질의 탄소나노튜브 생산기술(컨테미네이션 방지기술, 정제기술 등)
- ◆ 탄소나노튜브의 수익률, 원료에 대한 제품의 비율 향상 등

탄소나노튜브는 단층, 다층이나 탄소원자가 구성하는 육각형, 튜브의 굵기 등 구조나 사이즈에 따라 특성이 크게 변화하기 때문에, 각 용도에 적합한 탄소나노튜브를 공급하기 위해서는 탄소나노튜브의 구조, 사이즈를 제어하는 기술이 불가피하다. 특히, 반도체 소자 등 전자공학 분야에서 실용화하기 위해서는 고도 제어기술이 필요하게 될 것으로 보여진다.

현재, 양산기술로는 CVD법이 유력하지만, 이 방법은 촉매로서 금속분말을 다량으로 필요로 하기 때문에, 혼입에 따른 품질저하가 지적되고 있다. 이 점도, 첨단 분야 실용화를 위해서는 꼭 해결되어야 할 점이다. 또한 탄소나노튜브의 수익률, 원료에 대한 제품의 비율 향상을 통하여 고효율의 양산기술을 확립하면, 생산 코스트가 절감되어 수요자가 입수가 가능한 가격대의 탄소나노튜브 공급이 가능해지게 된다. 이에 따라, 연구개발이 촉진되어 각 분야에서 실용화 시기가 앞당겨지면, 탄소나노튜브 보급이 가속화되며, 또한, 용도분야 확대도 기대할 수 있다. 탄소나노튜브의 양산기술로는 현재 CVD법이 유력하지만, 다른 기술도 발표되고 있으며, 기존 기술의 개량·개선 외에 새로운 생산기술의 연구개발도 활발하게 이루어지게 될 것으로 보여진다.

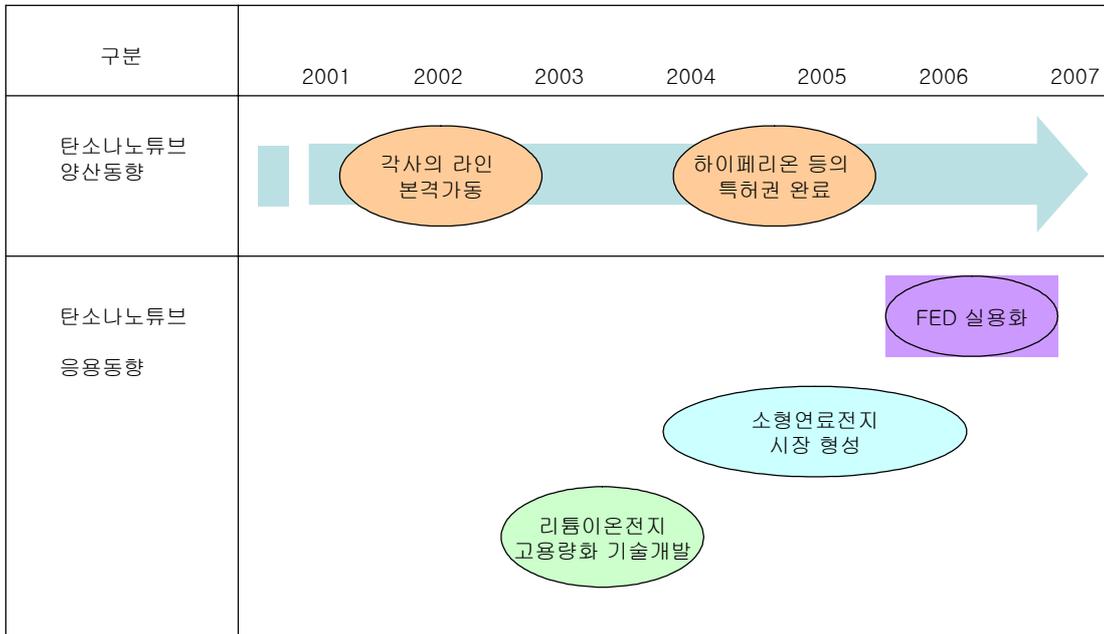
또한 탄소나노튜브가 실제로 제품에 응용되려면 더 많은 세부기술들이 필요해진다. <표 2-9>에는 현재 연구개발되고 있는 응용분야별로 필요한 세부 기술들을 나타내었다.

<표 2-9> 응용분야별 필요기술

분야	필요기술
대량합성기술	전기방전법, 고압열분해법, 레이저증발법, 열분해법 등에 의한 단층나노튜브 및 다층나노튜브 분말 생성법, 고수율·고순도 정제법
디스플레이기술	스크린프린트법, IN SITU CVD 선택저온수직성방법, 전자방출제어기술, 나노튜브분산기술
메모리소자기술	수직나노튜브를 이용한 고직접메모리설계기술, 수평나노튜브를 이용한 트랜지스터, 어레이설계기술, 나노튜브-금속 접합제어기술, 반도체나노튜브 선별기술, 금속-반도체성질 제어기술
에너지저장기술	수소저장기술, 이차전지기술, 슈퍼커패시터기술, 정밀용량측정기술
전자소자기술	나노집계기술, STM tip 설계기술, 나노저울기술, 나노액츄에이터 기술, 센서기술, 전자기차폐기술

<그림 2-35>에 Fuji Chimera사의 탄소나노튜브 로드맵을 나타내었다. 탄소나노튜브를 이용하여 리튬이온전지를 고용량화하는 것은 2003년에 실현될 것으로 여겨지고, 소형연료전지 시장형성은 2005년경에, FED는 2006년경에 실용화 될 것으로 보고 있다. 플로렌과 탄소나노튜브의 라인은 2001년과 2002년에 본격가동하고 있고 하이페리온 등이 출원한 탄소나노튜브관련 특허는 2004년경에 특허권이 종료하는 것으로 나타났다.

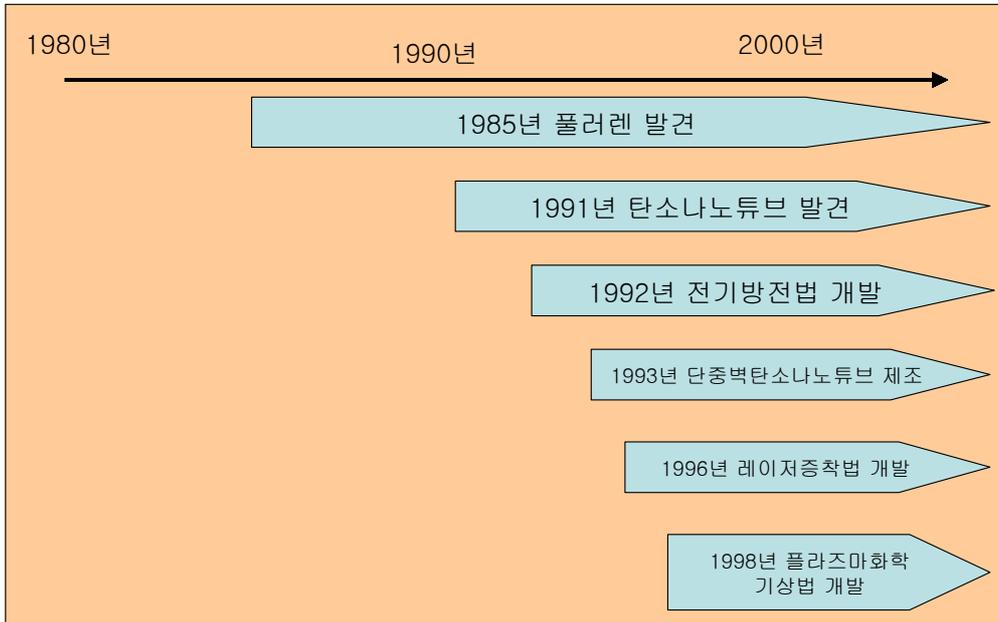
<그림 2-35> 탄소나노튜브 기술 로드맵



<그림 2-36>에는 탄소나노튜브의 발견과 제조방법의 개발을 연도별로 나열하였다. 전기방전법이 먼저 개발되고 기상법이 나중에 개발되었다. 현재, 기상법의 경우에는 품질은 우수하지는 않지만, 가격면에서는 유리한 편이어서 제품이 kg당 10-30만에 팔리고 있다. 목표치는 kg당 만엔 이하이다. 전기방전법의 경우에는 품질은 우수하지만 가격면에서 불리한 편이어서 kg당 180만엔에 팔리고 있다. 목표치는 약 60만엔이다.

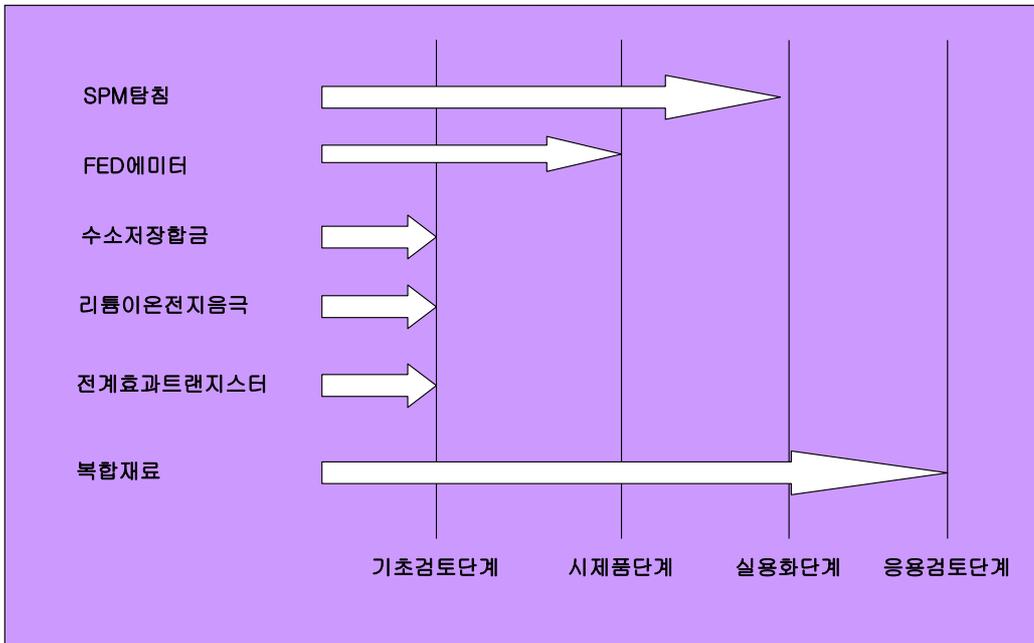
<그림 2-37>에는 2002년 현재 시점에서 응용분야의 개발단계를 나타내었다. 복합재료로 사용되는 탄소나노튜브는 응용검토단계에 접어들었고, SPM 탐침의 경우에도 실용화단계이며, FED emitter도 시제품이 제작되었다. 나머지 분야는 아직 기초검토단계이다.

<그림 2-36> 연도별 탄소나노튜브 연구개발동향



자료 : KISTI 작성

<그림 2-37> 탄소나노튜브 응용분야 개발단계(2002년 현재)



자료 : Fuji Chimera자료 참조 KISTI작성

제 3 장 시장분석 및 사업성평가

제 1 절 산업 개요

탄소나노튜브가 속해 있는 나노기술(NT)은 1980년대 일본이 민간차원에서 연구하던 분야였으나, 2000년 초에 미국의 클린턴 대통령이 미래를 주도할 기술로 지목하고 집중적인 투자계획을 발표하면서부터 전세계적인 관심의 대상이 되었으며, 이 시기부터 각국이 정부차원의 개발체제를 구축하면서 치열한 경쟁체제에 돌입해 있다.

미국의 경우에는 국가나노기술과제(NNI)를 기초연구, 응용연구, 센터 및 네트워크, 인프라구축, 사회교육관련 5개 부문으로 나누고 있으며, NSF(국립과학재단), DOD(국방부), DOE(에너지부), NASA(우주항공국), DOC(상무부), NIH(국립위생연구소) 등 6개 기관을 주축으로 한 12개 정부기관이 참여하고 있다.

일본의 경우에는 2001년 3월에 경제산업성과 문부과학성이 공동으로 나노기술지원전략을 수립하였으며, 나노전자공학, 나노소재, 바이오나노, 양자연산 등 4개 분야로 나누어 지원하고 있다.

일본 經團連의 조사에 따르면, 일본의 나노기술 시장규모는 2005년에 약 28조원, 2010년에는 320조원에 달할 것으로 추정되고 있다.

나노관련기술들이 대부분 원천기술로서, 대상제품에 적용되는 형태가 명확하지 못한 특성을 갖고 있는데 반해, 탄소나노튜브는 형태, 재료, 용도에 있어 다른 나노기술들과 뚜렷하게 구분된다.

현재 탄소나노튜브를 생산하고 있는 업체들로는 국내의 경우 일진나노텍과 나노텍, 외국의 경우 미국의 Hyperion Catalysis Instrument, Carbon Nanotechnologies Incorporated, 일본의 Mitsui, Mitsubishi 등의 업체들이 있다. 수요업체로는 탄소나노튜브를 이용하여 소자를 생산하는 업체인 미국의 Nano-lab 등과 탄소나노튜브를 벌크 단위로 사용하여 전자파 차폐 기능을 갖게 하는 특수도료업체들이 있다. 그리고 자체적으로 생산하여 연구용으로 소비하고 있는 탄소나노튜브관련 연구소들이 다수 있는 것으로 알려지고 있다.

용도측면에서 보면 분야가 확대되어질 가능성은 많지만, 아직까지 용도개발이 충분히 이루어지지 않은 상태이며, 일부 Atomic Force Microscopy (AFM)의 Microscope probe tips와 전자파차폐 도료용으로만 사용되고 있다. 따라서 탄소나노튜브의 용도개발이 계속적으로 이루어지고 상용화가 진행된다면 탄소나노튜브의 사용량도 급격히 증가되고, 영향을 미치는 분야 또한 확대될 것으로 기대된다.

제 2 절 산업 분석

1. 산업의 특성

탄소나노튜브 산업의 특징을 살펴보면 다음과 같다.

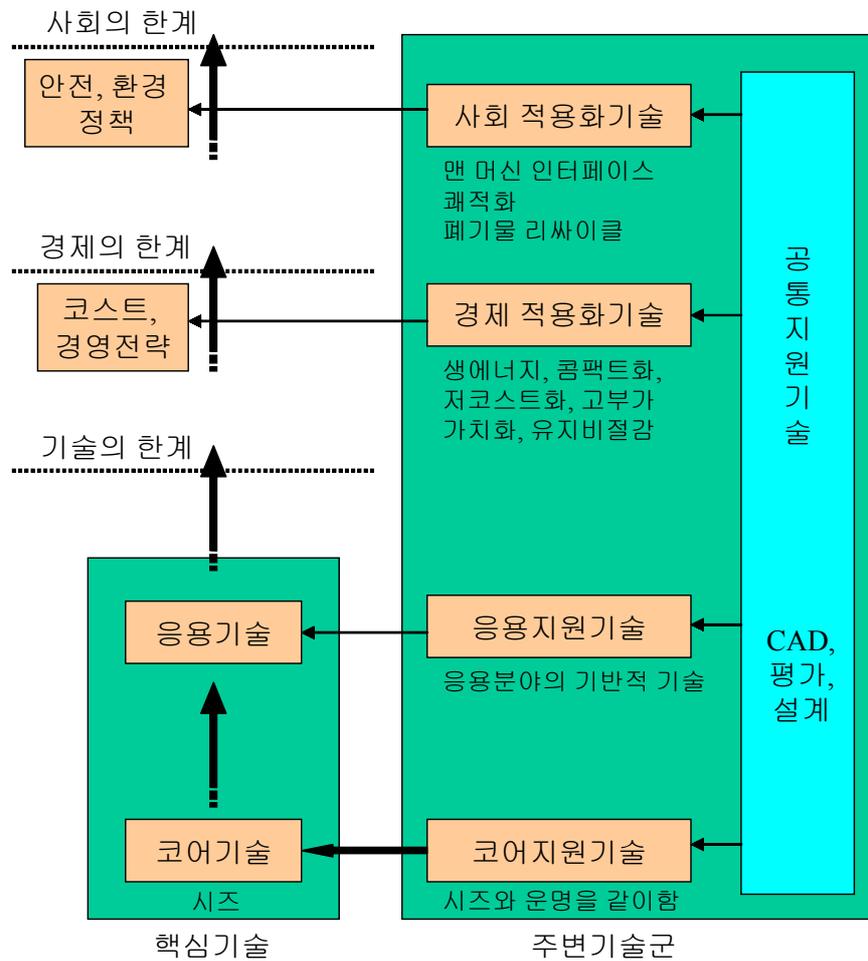
첫째, 탄소나노튜브는 발생(시즈)단계에서 응용단계로 넘어가고 있는 성장 기술이다. 노무라종합연구소가 정리한 기술이 발생하여 제품에 적용되는 과정을 <그림 3-1>에 나타내었다. 주변기술의 지원으로 시즈인 코어기술이 개발되고, 응용분야의 기반적 기술 지원으로 응용기술이 개발되어 기술의 한계를 극복하게 된다. 이어서 경제 적용화(상용화) 기술의 지원으로 고부가 가치화, 고생산수율 등을 획득함으로써 경제적인 한계를 극복하고, 마지막으로 환경문제 등과 같은 사회적인 한계를 극복하고 나서야 비로소 실제적인 기술로써 제품생산에 적용되게 된다.

현재, 탄소나노튜브는 코어기술에서 다양한 응용기술이 개발되는 단계로 넘어가고 있고, 기술과 경제의 벽을 동시에 넘어서고 있는 상황이다.

둘째, 탄소나노튜브는 용도분야가 다양하고 기술적 파급도가 큰 기술이다.

탄소나노튜브는 전자분야와 의약학분야, 복합소재분야 등에 사용될 정도로 용도가 매우 다양하다. Fuji Chimera 연구소가 보고한 구체적 응용분야를 <그림 3-1>에 나타내었다. 최근 경향을 볼 때, 단기적으로 박형 텔레비전의 전자총으로 사용이 거의 확실시되고 있으며, 복합재료로서의 용도도 점진적으로 구체화되고 있다. 또한 수소저장용 및 반도체 메모리로서의 사용가능성도 예측되고 있어 해당분야의 응용기술 개발이 가속화될 것으로 보인다.

<그림 3-1> 코어기술의 제품적용



자료 : 노무라 종합연구소(1991)

셋째, 탄소나노튜브는 단시간내 성장 가능성이 큰 기술이다. <표 3-2>에 일 본 특허청에서 발표한 나노구조재료기술들의 기술혁신성과 개발진척도를 나타내었다. 여기서, 탄소나노튜브는 가장 혁신성이 있는 5개 기술 중 하나이며, 최근 가장 연구가 활발한 7개 기술에 속해 있다. 즉, 동 기술은 나노기술 분야 중에서도 매우 유망한 기술로서, 계속적으로 연구가 활발히 진행될 것으로 보여진다.

<표 3-1> 탄소나노튜브의 용도

분야	용도	비고
전지/콘덴서	연료전지용 수소저장소재 리튬이온전지의 전극재료 전기이중층 콘덴서재료 고성능 축전지	고성능축전지의 장수명 화
전자장치	차세대 트랜지스터 (양자효과 이용)	
측정기	나노온도계	50-1000℃를 0.25℃ 단위로 측정
표시소자	FED(Field Emission Display) 형광표시관의 전자총 전계방출형 전자원	전자방출소자를 10% 낮은 전압에서 가동
탐침/나노테크 부재	AFM, APM, ATM현미경의 탐침 나노휘스커, 나노로드,	재료의 요철부분의 위를 씩워 원자단위로 관찰
회로소재	반도체회로 등의 초미세가공 소재에 사용	
바이오/의약	바이오센서, 주사침, 캡슐(약 의 생체 수송과 방출)	
복합재료	수지·세라믹·금속의 강화 전도성복합재, 반도체성 플라스틱, CC복합재료	복합재료의 정전방지, 경량화, 고강도화, 수지의 성능향상

자료 : 일본 産總研(2001)

<표 3-2> 나노분야 주요기술별 혁신성 및 개발진척도

분 야		년 대		1980	1985	1990	1995	2000	2001
		1984	1989	1994	1999		이후		
제 조 기 반 기 술		SPM기술과 응용기술 (분자·원자 조작·가공기술)	→	→	⇒	⇒	☆	⇒	
		SPM용 탐침제작기술		→	→	⇒	☆	⇒	
		SPM이용 리소그래피와 고밀도 기록		→	→	→	☆	⇒	
		기상반응증착법	→	→	→	→	△	→	
		Self-assembly법			→	→	◎	→	
		고분자화학법	→	→	→	→	△	→	
		광리소그래피	→	→	→	→	○	→	
		범노광장치	→	→	→	→	○	→	
		전자현미경	→	→	→	→	○	→	
		싱크트론방사광기술			→	→	○	→	
		초미립자제조기술	→	→	→	→	△	→	
구 조 체 · 디 바 이 스 기 술	무기나노	양자디바이스			→	→	☆	⇒	
		반도체레이저		→	→	→	△	→	
		초미세회로				→	△	⇒	
		고밀도기록미디어		→	→	→	○	→	
	탄소·유기나노	탄소나노튜브			→	⇒	☆	⇒	
		다이아몬드박막			→	→	◎	→	
		유기EL			→	→	○	→	
	고분자·무기나노	나노구조제어고분자폴리머	→	→	→	→	○	→	
		세라믹나노복합재료			→	→	◎	→	
		슈퍼메탈합금			→	→	◎	→	
	다공·고표면적 나노	분리막	→	→	→	→	○	→	
		광촉매	→	→	→	⇒	○	⇒	
	바이오 관련나노	DDS			→	→	◎	→	
		단백 및 DNA의 나노재료화			→	→	◎	→	
		생체모방소자				→	◎	→	

* 주 : ☆◎○△는 개별기술의 혁신성을 나타내는 것으로, ☆,◎는 혁신적인 기술을 나타내며, ☆이 가장 혁신적인 것, ◎이 혁신적인 것임. ○는 단순한 나노단위기술, △은 단순한 나노단위 기술인 동시에 혁신성이 혼재되어 있는 기술임.
 →은 5년간을 나타내며 →표기년대는 그 기술에 대한 연구개발이 표면화된 시기를 나타내며 ⇒은 연구개발이 →보다 활발함을 나타냄.

자료 : 일본특허청, 나노구조재료기술에 관한 기술동향조사, 2001.

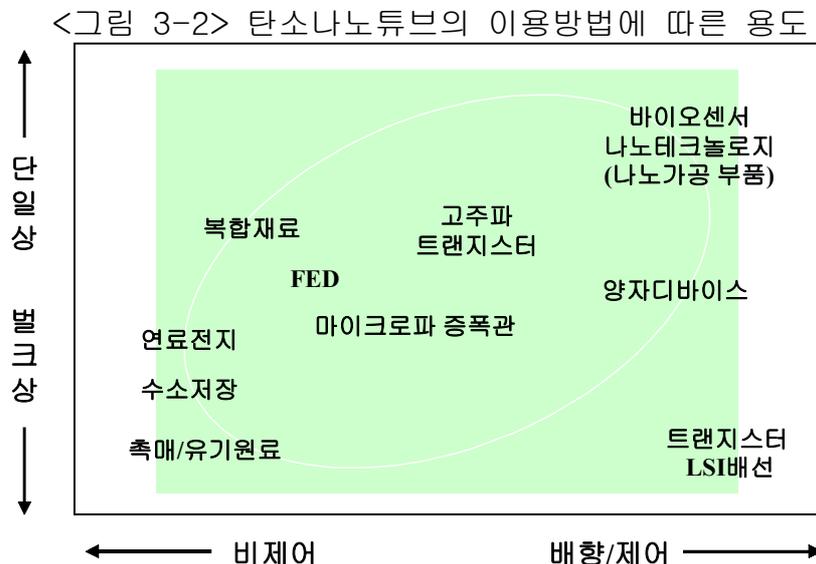
2. 시장 기회 요인 및 위협 요인 분석

가. 시장 기회 요인

시장의 기회 요인 중 첫 번째 손꼽을 수 있는 것은 용도 분야의 확대로 볼 수 있다.

탄소나노튜브는 전자분야에 가장 많이 응용되고, 소재 및 의약분야에도 사용되고 있으며, 그 양은 미미한 수준이나 복합재료 및 FED에 대한 적용도 가시화되고 있다. 이외에도 시제품이 개발되고 있는 기타 용도도 기술적, 경제적 한계를 넘는다면 응용분야가 확대될 것으로 보인다. 또한 LSI 및 연료전지에 대한 응용이 가시화 된다면, 그 시장규모도 크게 확대 될 것으로 보인다.

탄소나노튜브의 이용방법에 따른 용도를 <그림 3-2>에 나타냈다. 바이오센서의 경우에는 단일상의 탄소나노튜브를 배향시키고, 수소저장이나 촉매로 사용하는 경우에는 벌크상의 탄소나노튜브를 비제어 상태로 사용하며, LSI 배선의 경우에는 벌크상의 탄소나노튜브를 배향시켜 사용함을 알 수 있다.



자료 : 기술경영연구원, “나노 시장·기술분석”

탄소나노튜브의 또 다른 시장 기회 요인으로는 기술한계를 들 수 있다.

예를 들면, 기존 노광기술의 한계점을 극복하기 위한 탄소나노튜브의 반도체 메모리 응용 연구들이 여기에 해당된다. 광원별 선폭을 나타낸 <표 3-3>에서

알 수 있는 바와 같이, 기존의 노광기술로는 100nm를 넘어서지 못하고 있다.

<표 3-3> 반도체 메모리 노광기술의 한계

1990년	2000년	2005년	2010년
UV영역 g선 → I선 (463nm) (365nm)	Deep UV영역 → KrF → (248nm)	→ ArF → (193nm)	→ F2 → (157nm)

반도체 메모리를 나노단위로 설계하여, 1nm의 크기로 반도체의 종래 기능을 실현한다면, 현재 반도체 소자는 길이에서 100배, 면적에서 10,000배, 체적에서 100만배의 집적도를 올릴 수 있을 것으로 보인다.

나. 시장 위협 요인

탄소나노튜브의 시장에 있어서 가장 큰 위협 요인은 응용기술개발의 한계라고 볼 수 있다. 현재 탄소나노튜브의 용도는 다양하지만 응용기술이 쉽게 개발되지 못하고 있는 실정이다. 즉 대량으로 사용되고 있는 분야가 아직까지 극히 미미한 상황으로, 상품화를 위해서는 양산화를 위한 기술혁신이 요구되고 있다.

<표 3-4> 분야별 탄소나노튜브 이용에 필요한 응용기술

분야	기술
FED(Field Emission Display)	- 저온 MWNT 수직성장기술
메모리소자	- 나노튜브제어 (길이, 직경, 금속과의 접합, 배향)
2차전지, 연료전지	- 최적직경 및 길이의 나노튜브 합성 - 알칼리 금속 도핑 및 정제

또한 제품 호환의 어려움도 위협요인으로 작용하고 있다. 즉 한 업체의 탄소나노튜브를 특정 제품에 적용시킨 후 다른 업체에서 생산된 탄소나노튜브를 동 제품에 도입하기가 어렵다. 왜냐하면 업체별로 생산하는 탄소나노튜브의 특성

이 다르기 때문에 동일 제품에 적용시킬 경우 문제를 야기시키기 때문이다. 이러한 점이 탄소나노튜브 시장의 성장을 위협하는 걸림돌로 작용하고 있다.

3. 생산자 분석

탄소나노튜브 사업을 수행하고 있는 일본, 미국, 기타 국가 및 국내의 동향을 파악함으로써 경쟁현황을 살펴보았다. 또한, <표 3-5>는 세계적으로 알려진 회사의 탄소나노튜브의 합성과 대상 응용처의 동향을 정리하였다.

<표 3-5> 탄소나노튜브 합성 및 응용기술 개발동향

회 사	개발항목 (공정)	생산량 (년간)	응 용	비 고
Hyperion Catalysis International (USA)	MWNT (CVD)	2000-1.5t 2001-5t	Static dissipation Conductive Plastic Fuel System	GE사(미국) 합작
Carbon Nanotechnologies Inc. (USA)	SWNT (HiPCO)	2001-12kg 2005-100t (예상)	Nanocomposites	미국 Kellogg Brown & Root사(미국)와 장비관련 협력 R.E.Smalley 교수가 창업 Dupont사와 display 공동 개발 Sumitomo Co.(일본)와 아시아지역 사업협력관계체결
CARBOLEX (USA)	SWNT (Arc)	2000-1.8kg 2001-12kg	FED(field emission display)	University of Kentucky 세계최대의 시약 판매회사 Sigma Aldrich에 납품 Advanced Science and Technology Commercialization Center(ASTeCC)의 회원
BUCKY USA (USA)	Fullerene Fullerene derivatives MWNT SWNT	2000-5t 2001-10t	Super-conductivity Non-linear optics Pharmaceuticals etc.	R&D oriented company - mainly target on Production / separation, modification of fullerenes
Misui (Japan)	MWNT (CVD)	2001-1t 2002-120t	Auto's body Fuel cell Painting	CNRI 회사 설립 20억엔 규모의 공장설립
Misubishi (Japan)	Fullerene (ARC)	2007-1500t	의료용	미쯔비시화학과의 협력- '프런티어카본' 회사 설립 2007년까지 220억엔 투자

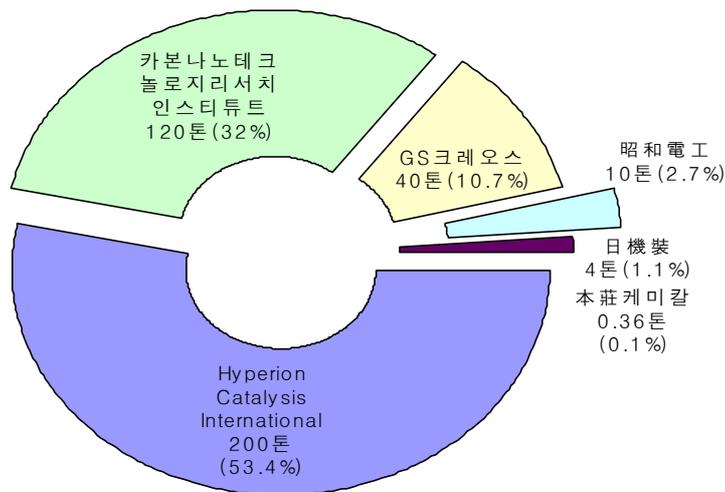
<계 속>

회 사	개발항목 (공정)	생산량 (년간)	응 용	비 고
Nikkiso (Japan)	MWNT (CVD)	-		pilot scale
Showa- Denko (Japan)	VGCF MWNT	VGCF- 수백 ton MWNT- 수백 kg	C o n d u c t i n g Additive(battery) Composite	VGCF - 상업화 MWNT - pilot scale
Osaka Gas Company (Japan)	CNT	수백 kg	Field Emission 전극재료 수소저장	엔지니어링 회사와 협력하여 미니 plant 건설
Honjo Chemical (Japan)	Fullerene SWNT	대량합성	Super-conductivity etc.	자본금 20억원, 매출 2000억원 2000년 5월 Mitsubishi, FIC, MER사와의 협의하에 플러렌과 나노튜브의 대량합성장치를 Neyagawa 공장에 설치
Tsinghua Uni. (China)	MWNT	30t 120t 가능		Shaanxi Nanfeng Chemical Industry group과 협력 Tsinghua-Nanfeng Nano Industry Eng. Center 설립
S u n Nanotech (China)	MWNT		Super-conductivity Nanocobalt Nanosilver H ₂ storage Nanocomposite	미쯔비시화학과의 협력- '프런티어카본' 회사 설립 2007년까지 220억엔 투자
Nanoces (USA)	MWNT (CVD) SWNT (ARC)		H y d r o c a r b o n polymer Field emitter	Boston College Controlled diameter & length

<계 속>

회 사	개발항목 (공정)	생산량 (년간)	응 용	비 고
Carbon Solution (USA)	SWNT (ARC)	-	SWNT solution	U. Kentucky 와의 공동연구로 특허 획득
Materials and Electrochemical Research Corporation (USA)	SWNT MWNT Fullerene (ARC)	-	Battery & Fuel Cell H ₂ storage Composite Coating	R&D oriented company
Nanoledge (France)	SWNT MWNT (ARC)	-	Composite with Polymer	GDPC Lab. (프랑스, 몽펠리에 대학에서 착수)
Rossester Hold Ltd. (Cyprus)		360 kg		
I L J I N Nanotech (Korea)	SWNT (ARC) MWNT (CVD)	500 kg	Electrode Composite	현재 Pilot scale 대량합성 설비 착수

<그림 3-3> 업체별 탄소나노튜브 생산량(2001년)



자료 : Fuji Chimera Research Institute, "2002 微粉体市場の現状と将来展望"

<그림 3-3>에는 미국의 Hyperion Catalysis International에서 가장 많은 200톤(53.4%)을 생산하였으며, 일본의 카본테크놀러지 리써치인스티튜브에서도 120톤(32%)을 생산하고 있다. 그외 많은 업체들이 실제로 탄소나노튜브를 생산하고 있다.

여기서는 국가별로 연구개발 및 생산현황을 구체적으로 살펴보고자 한다.

가. 일본

업체와 대학이 탄소나노튜브 개발경쟁을 지속하고 있는 일본의 경우, 1997년부터 탄소원자 튜브가 다층구조로 된 탄소나노튜브의 양산연구에 주력하고 있고, 나노튜브의 샘플출하를 시작한 기업이 이미 30개사를 넘고 있는 것으로 미루어 보아 거의 실용화에 근접하고 있다고 볼 수 있다.

주요 생산업체는 日機裝, 昭和電工, GSI크레오스 등이며, NEC, 日立製作所, 니콘, 富士제록스, 伊勢電子工業, 大阪가스, 三菱化學, 도요타자동차, 本田技研工業 등이 탄소나노튜브 관련 특허를 출원하고 있다.

신소재에 관심이 많은 업체로 일본에서 가장 큰 펌프제조회사인 日機裝은 CVD로 MWNT를 제조하여 g당 1달러 수준에 판매하고 있다.

昭和電工은 연간 수백 Kg의 MWNT를 제조할 수 있는 수직형 MWNT 파일롯 장비를 갖추고 있다.

大阪가스는 미니플랜트를 건설하여 연간 수백 Kg의 생산능력을 갖추고, 전자총 및 전극재료 용도 등으로 제공하고 있다.

本莊케미칼의 경우 폴리렌과 탄소나노튜브 대량합성장치를 2000년에 네아가와에 설치하였다.

住友商事는 미국 CNI사와 제휴하여 현재 30~40Kg/day SWNT 생산체제를 구축하고 있으며, 2002년 상반기까지 400kg을 생산할 수 있는 시스템으로 확대할 예정이다.

三井物産이 전액 출자한 자회사인 CNRI社(Carbon Nanotech Research Institute)는 연간 120톤을 생산할 수 있는 능력을 2002년 9월까지 갖출 계획이며, 시설이 완비되면 g당 0.1달러 수준으로 가격을 떨어뜨릴 수 있을 것으로 전망하고 있다.

三菱化學은 “프론티어 카본”을 설립, 2007년까지 220억엔을 투입하여 연간

150톤의 생산시설을 갖출 예정이다.

세이코인스트루먼트社は SPM에 MWNT를 적용시키는 연구를 진행중이며, 디스플레이, 연료전지와 이차전지에 대한 응용에도 주력하고 있다.

NEC는 신탄소계 물질의 이론을 예측하는 연구를 하고 있다.

島津製作所에서도 SPM에 탄소나노튜브를 적용시키는 연구를 진행중이며, 東陽테크니크에서는 조작시스템으로 사용되는 탄소나노튜브를 연구중에 있다.

한편, 참여 연구소 및 대학의 현황을 보면 다음과 같다. 科學技術振興事業團이 탄소나노튜브를 연료전지에 적용하기 위한 연구를 하고 있고, 신에너지·산업기술종합개발기구(NEDO)도 참여하고 있으며, (재)일본세라믹스센터(JFCC)는 유동기상법 및 플라즈마 CVD법으로 탄소나노튜브를 합성하는 방법과 SiC표면열분해에 의한 합성법도 연구하고 있다. 理化學研究所는 탄소나노튜브 전자소자를 실현하기 위하여 전기전도성관련 연구를 하고 있다.

탄소나노튜브를 발견한 이지마 교수가 재직하고 있는 名城大學도 계속적으로 탄소나노튜브를 연구하고 있으며, 東北大學은 나노복합재료의 물리, 화학 및 폴리렌의 고체물리, 탄소나노튜브의 물성과 관련하여 연구하고 있다. 信州大學은 탄소나노튜브 및 나노섬유를 산업에 응용하기 위하여 연구를 하고 있으며, 연료전지에 대한 응용방안도 강구중이다. 東京大學은 탄소신물질 전자물성, 반도체 초격자 등 인공 저차원계에 관한 연구를 하고 있으며, 大阪府立大學은 SPM용 탄소나노튜브 탐침과 핀셋을 개발하고 있다. 三重大學은 탄소나노튜브를 디스플레이 용도로 이용하기 위하여 전자방출 특성을 연구하고 있으며, 電氣通信大學에서는 탄소나노튜브와 폴리렌 관련 이론을 연구하고 있다.

나. 미국

IBM은 2년내에 탄소나노튜브를 실리콘을 대신하는 차세대 LSI 재료로서 개발하기 위하여 노력하고 있으며, 탄소나노튜브에 전류를 흘려, 열분해함으로써 반도체 나노튜브를 제조하는 기술을 개발하고 있다

CVD법에 의하여 MWNT를 제조하고 있는 Hyperion Catalysis

International은 연간 수톤을 제조할 수 있는 능력을 갖추고 있으며, General Electric社에 5톤을 납품한 실적도 가지고 있다. 또한 연료전지와 전도성플라스틱 분야도 연구하고 있다.

HiPCO법과 레이저 오븐법으로 SWNT를 제조하고 있는 Carbon Nanotechnologies Incorporated社는 연간 수십 Kg의 생산능력을 가지고 있고, Smalley교수가 있는 라이스대학과 생산시설을 건설중이며, 듀폰社와도 레이저 오븐 기술계약을 체결한 상태이다. 일본의 住友와도 아시아지역 공략을 위한 협력관계를 체결하였다.

Carbolex社는 가장 흔하다고 할 수 있는 아크방전법에 의하여 SWNT를 생산하고 있고, 세계최대 시약업체인 Sigma Aldrich에 납품하고 있으며, 연간 수십 Kg을 생산할 수 있는 능력을 가지고 있다. 현재, FED(Field Emission Display) 분야를 연구하고 있다.

BUCKY USA社는 SWNT와 MWNT 모두를 생산하고 있으며 연간 수톤을 생산할 수 있는 능력을 가지고 있다.

Nanocs社의 경우 보스턴대학과 연계하여 탄소나노튜브의 길이와 입경을 조절하는 기술을 개발하였으며, CVD법에 의하여 MWNT를, 아크방전법에 의하여 SWNT를 생산하고 있다.

Carbon Solution社는 켄터키대학과 공동으로 특허를 출원하였으며 아크방전법에 의하여 SWNT를 제조하고 있다.

또한 Material and Electrochemical Research Corporation社는 수소저장용으로 탄소나노튜브를 연구하고 있으며, 아크방전법으로 SWNT와 MWNT를 제조하고 있다.

다. 기타 국가

프랑스의 Nanoledge社는 아크방전법으로 SWNT와 MWNT를 생산하고 있으며 나노섬유와 나노복합재료 분야를 연구하고 있다.

1998년에 설립된 사이프러스의 Rosseter Hold社는 연간 수백kg의 생산능력을 가지고 있다.

중국에도 청화대학과 Sun Nanotech社 2개 업체가 MWNT를 생산하고 있

다. 청화대학의 경우 생산량이 연간 수십톤에 달하며, Sun Nanotech社도 대량합성장치를 설치하여 테스트중인 것으로 알려지고 있다.

라. 우리나라

가양테크노타운에 위치한 일진나노텍(www.iljinnanotech.co.kr)은 17가지의 탄소나노튜브를 제조하고 있고, 새로운 탄소나노튜브 생산라인을 개발하여 생산성을 획기적으로 향상시키고 있다. 연간 수 톤의 생산능력을 가지고 있는 것으로 알려지고 있는 同社는 연차적으로 수요증가에 발맞추어 생산시설을 확충할 계획으로 있다.

또한 천안대학교내의 벤처기업인 나노텍이 양산화를 추진하고 있다.

이외에도 소규모 벤처들이 있으나 실제 생산량은 미미한 실정이다.

한편 탄소나노튜브의 응용제품 개발 현황을 보면 다음과 같다. 삼성종합기술원(김종민 박사)은 탄소나노튜브를 이용한 TV 브라운관보다 선명한 화질, TFT LCD보다 적은 생산비용으로 차세대 영상화면으로 평가받는 Field Emission Display(FED)의 2-3년내 상용화가 가능할 것으로 발표하고 있다.

탄소나노튜브와 관련한 대학의 연구현황을 보면 다음과 같다. 서울대 임지순교수는 탄소로 구성된 분자인 나노튜브를 다발로 배열하면 도핑을 하지 않고도 튜브가 저절로 반도체의 성질을 띠게 된다는 이론을 입증하여 Nature지에 기고했다. 서울대 국양교수는 속이 비어있는 탄소나노튜브에 풀러렌을 인위적으로 삽입하여 탄소나노튜브의 반도체성을 조작하는 데 성공했고, 한국과학기술원의 유용교수는 나노탄소 템플레이트(template)를 제조하여 백금촉매를 담지함으로써 촉매의 활성을 10배 이상 증가시키는데 성공하였다. 이외에도 탄소나노튜브의 구조와 기능을 연구하고 있는 성균관대의 이영희교수, 열화학기상증착법에 의해서 탄소나노튜브를 저온합성하는 기초연구를 하고 있는 한양대 이철진교수, 탄소전극을 개발하고 있는 포항공대의 이건홍교수가 있으며, 서울대, 연세대, 한국과학기술원, 표준연구원 등에서도 계속적으로 기초연구를 하고 있다.

4. 시장 동향 분석

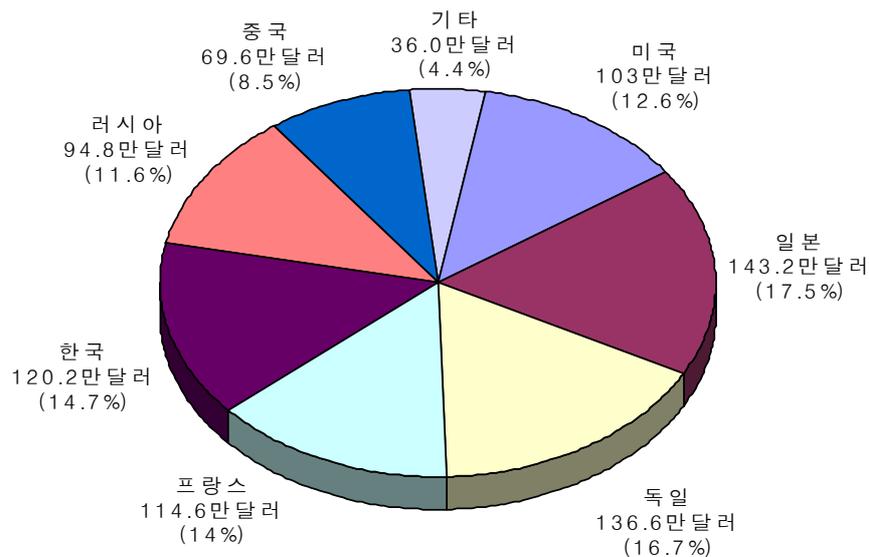
가. 세계 시장규모 추이

탄소나노튜브의 경우, 아직 시장규모가 극히 미미하다. 앞에서 언급했듯이 연구용 수요가 대부분이고 전자파차폐용 특수도료 등 특수용도로의 이용이 일부 이루어지고 있는 실정이다. 연구용으로 사용되는 재료의 경우 수년간 사용할 것을 미리 발주하기도 하기 때문에 연간 수요량을 예측하기가 어려우며, 특수용도의 수요발생도 일정하지 않아 정확하게 시장을 예측하기는 매우 힘든 상황이다. 따라서 해당분야 전문가 인터뷰와 외국 컨설팅업체들의 예측자료를 바탕으로 탄소나노튜브의 시장을 추정하였다.

세계시장은 2000년에 270만달러, 2001년에 502만달러, 올해에는 818만달러가 될 것으로 보인다. 성장률은 150%이상이므로 단기간 내에 급격히 성장할 것으로 여겨진다.

2002년 국가별 탄소나노튜브의 예상시장점유율(금액기준)은 <그림 3-4>와 같다. 우리나라의 경우 일본 143.2만달러, 독일 136.6만달러에 이어서 120만달러 정도의 탄소나노튜브를 사용할 것으로 예측되고 있다.

<그림 3-4> 국가별 탄소나노튜브의 예상시장점유율(2002년)



자료 : W사 자료를 토대로 KISTI 재구성

한편, 수요량 측면에서 본다면 시장은 더욱 커질 것으로 보인다. 왜냐하면 탄소나노튜브의 생산수율이 더욱 향상되어, 점차 가격이 낮아지고 있기 때문이다. 따라서 시장규모가 100% 넘는 수준으로 향상되고 있다 하더라도 수량 측면에서 보면 훨씬 더 높은 수준으로 증가할 것임을 의미한다.

연구용으로 사용된 수요량을 보면, 2000년 전세계적으로 266Kg이었던 것이 2001년에는 684Kg이 사용되었을 것으로 추정되며, 올해에는 1,820Kg이 사용될 것으로 전망되고 있다.

탄소나노튜브의 수요량을 국가별로 살펴보면 <표 3-6>과 같다. 일본이 가장 많은 318.6Kg의 탄소나노튜브를 사용할 것으로 예측되었고, 다음이 독일의 304Kg, 우리나라가 267.4Kg을 사용할 것으로 분석되었다.

<표 3-6> 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

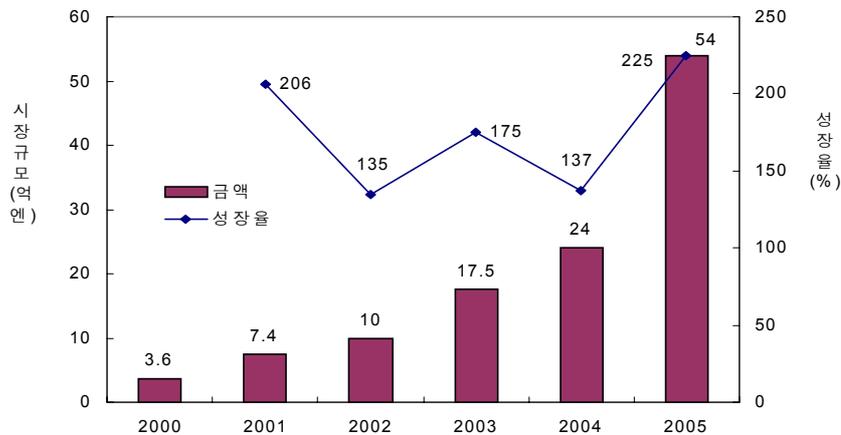
전체적으로 보면, 전세계 국가들은 유사한 규모의 탄소나노튜브 수요추이를 보이고 있음을 알 수 있다. 이는 연구의 전체규모가 크다 하더라도, 탄소나노튜브가 나노단위의 분말이어서, 기술개발에 사용되는 탄소나노튜브의 양이 매우 제한적이고, 아직도 응용기술개발이 제대로 이루어지지 않아 사용되는 탄소나노튜브의 양이 미미하기 때문이다.

나. 일본 시장규모 추이

<그림 3-5>에는 Fuji Chimera에서 예측하고 있는 일본 시장규모추이를 나타내었다. 일본의 2000년도 탄소나노튜브 시장규모는 약 3.6억엔 수준이었으나 2002년에는 7.4억엔으로 커지고, 2005년 54억엔으로 커지는 것으로 나타났다. 주로 기초연구 및 응용연구에 사용되는 것으로 알려지고 있으며, 연구용 샘플을 제공해주는 기업은 일본에서 200~300개에 달한다. 2000년경에는 연구 수준의 소량을 제공하는 시설이 위주였다면 2001년 후반부터는 양산용

전체로 한 공급체제 준비가 이루어지고 있다. 일본에서는 2005년 실용화를 목표로 연구개발에 박차를 가하고 있다. 일본에서 가장 실용화에 근접한 제품은 FED로 알려지고 있으며, 연료전지 음극재료로도 같이 실용화될 수 있으리라 보고 있다.

<그림 3-5> 일본 탄소나노튜브 시장규모추이(2002년)



자료 : Fuji Chimera Research Institute, "2002 微粉体市場の現状と将来展望"

다. 국내 시장규모 추이

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

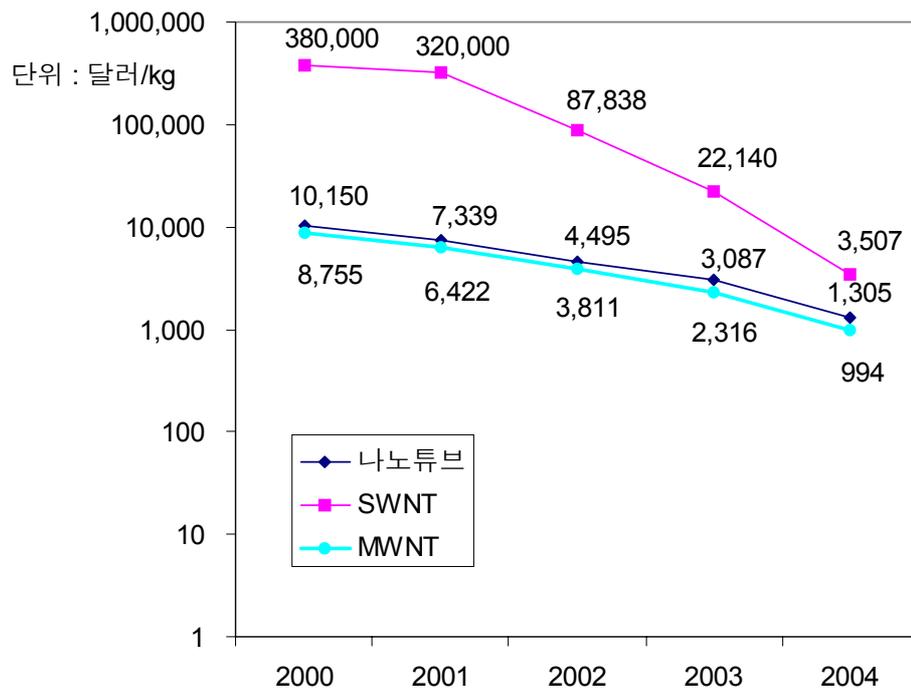
라. 가격동향 분석

미국 컨설팅 업체인 W사가 제시하고 있는 탄소나노튜브 평균가격을 산정해보면 2000년에 Kg당 1만달러 수준이었고, 2002년 들어서 3-5천달러로 거의 절반 수준으로 떨어졌으며, 2004년경에는 1천달러 수준이 될 것으로 전망된다. 단중벽 나노튜브(SWNT : Single Walled NanoTube)의 경우에는 제조가 간단하지 않아 2000년에는 Kg당 38만달러 수준이었으나, 2002년경에는 10만

달러로 떨어졌으며, 향후 생산기술의 발달로 그 가격은 기하급수적으로 떨어질 것으로 예상된다. 상대적으로 다중벽 나노튜브(MWNT : Multi-Walled NanoTube)의 경우는 초기에 9천달러 수준였던 것이 2002년에는 약 4천달러 수준이 되고 있다.

이러한 가격들은 여러 업체들의 수년간 가격을 평균한 추정치로, 실제로 구매에 들어갈 경우에는 구매하는 양이나 품질에 따라 가격이 많이 달라지는 양상을 보이고 있다. 즉, 구매의 양이 많아지면 상대적으로 가격이 떨어지고, 제품의 품질이 높아지거나 탄소나노튜브의 함량이 높아질수록 가격이 올라가고 있다.

<그림 3-6> 연도별 탄소나노튜브의 가격동향



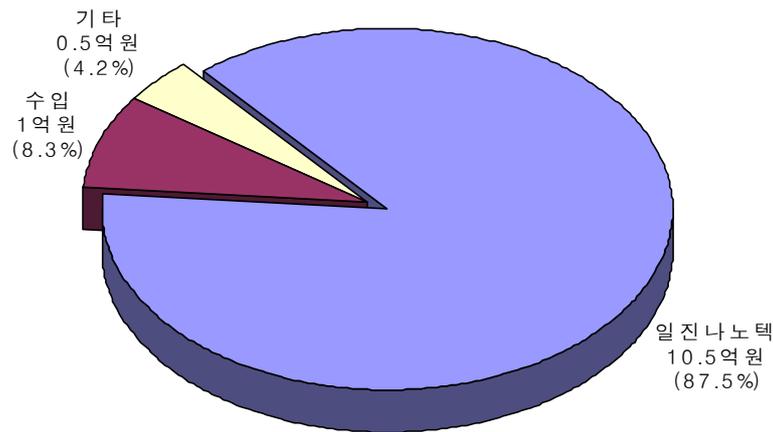
자료 : 미국의 컨설팅업체 W사

마. 국내 시장점유율

탄소나노튜브는 일진나노텍이 거의 대부분을 생산공급하고 있고, 일부가 수입되고 있으며, 극히 일부분이 자체 생산되고 있다. 그러나 일진나노텍의

생산이 작년 10월부터 정상적으로 가동되기 시작하였으므로 2001년도의 정확한 시장을 추정하기는 어렵다. 따라서, 관계자들의 인터뷰를 통해 2002년도의 국내 탄소나노튜브의 시장점유율을 예상해보면 <그림 3-7>과 같다.

<그림 3-7> 국내 탄소나노튜브 예상시장점유율(2002년)

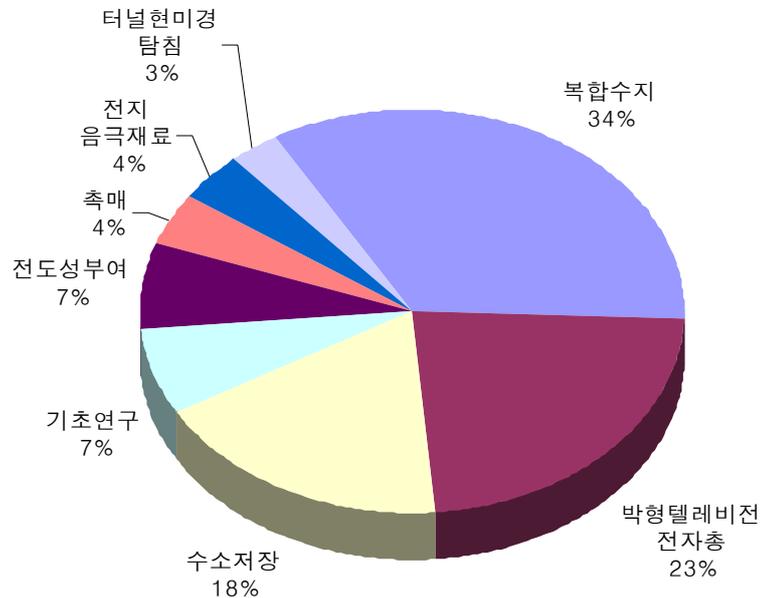


자료 : 관계자들의 인터뷰를 통해 KISTI 작성

5. 수요예측

샘플 출하된 탄소나노튜브가 사용되고 있는 분야를 보면 <그림 3-8>과 같다. 가장 많이 사용되고 있는 분야는 복합수지분야로서 전체의 1/3정도를 차지하고 있다. 플라스틱에 탄소나노튜브를 3~4% 혼합하여 전자기기의 외부에 도포할 경우 전자파에 의한 전자기기의 오작동을 막을 수 있는 것으로 알려져 있으며, 현재 미국에서 일부 실용화되고 있고, 일본에서도 유망할 것으로 전망되고 있다. 다음으로 박형 텔레비전의 전자총 분야가 23%를 차지하고 있고, 이어서 수소저장 분야가 18%를 차지하고 있다. 나머지는 기초연구, 전도성부여, 촉매, 전지의 음극재료, 터널현미경 탐침 용도로 10%이내가 사용되고 있다.

<그림 3-8> 샘플 출하된 탄소나노튜브의 용도



자료 : 일본 産總研

한편, 탄소나노튜브는 향후 차세대 표시장치인 FED용 전자총, 연료전지의 전극재료 등에 폭넓은 응용이 예상되고 있다.

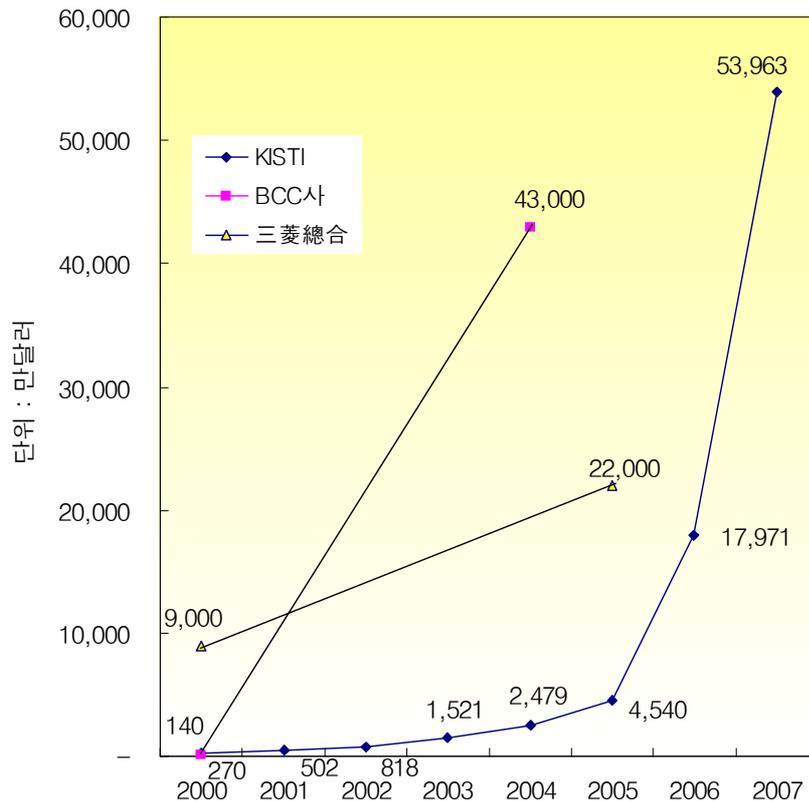
탄소나노튜브의 수요 예측자료가 가끔씩 해외 컨설팅 업체에서 발표되고 있으나 2000년 이후 시장전망치가 조사업체들간에 차이도 크고, 대체적으로 과장되어 있음을 알 수 있다. 예를 들어 BCC는 탄소나노튜브의 시장규모가 2000년에 140만달러 수준에서 2004년 4억3000만달러로 증가할 것으로 보고 있다. 그러나 KISTI가 기존의 BCC社와 三菱總合社의 예측치를 국내 해당분야 전문가들에게 제시하고, 자문을 구한 내용을 토대로 예측한 향후 5년간의 세계탄소나노튜브의 수요와는 <그림 3-9>에 나타낸 바와 같이 상당한 차이가 있음을 알 수 있다.

KISTI의 예측으로는 2002년 세계시장은 818만달러, 2005년에는 4,540만달러에 달할 것으로 전망되고 있다.

이와 같이 시장의 성장률은 2000년도에 전망한 것보다는 대체적으로 지연되고 있는데, 그 이유는 최근 들어 시장의 성장이 둔화되고 있고, 시장규모의 확대에 시간이 걸릴 것으로 예상되기 때문이다. 따라서 전문가들은 BCC

社나 三菱總合社가 예상했던, 현재 거의 실용화 단계에 이르고 있는 Emmiter로의 응용으로 인한 급성장은 향후 3-5년 이후에나 나타날 것으로 전망하고 있다.

<그림 3-9> 탄소나노튜브 세계시장 전망



자료 : 전문가 인터뷰를 통하여 KISTI 작성

제 3 절 사업 매력도 평가

1. 사업매력도 평가기준

간단하면서도 실용적인 수량적 평가기법으로, 객관화 도모에 유효하기 때문에 미국 및 일본의 상무성, 대기업, 비즈니스 스쿨 등에서 널리 활용되고 있는 BMO(Bruce Merrifield-Ohe)분석에 의해, 신청기술의 사업매력도를 평가

하였다.

사업매력도는 6개의 항목으로 구성되어 있으며, 각 항목마다 10점씩 총 60점 만점이다. 여기서 35점 이상을 획득하면, 그 아이템은 사업진입의 매력이 있는 것으로 판단할 수 있다.

<표 3-7> BMO평가 차트기준

ITEM의 매력도(60점) (사업진입의 매력이 있는가?)	
1. 매출·이익 가능성	(10)
- 사업개시 5년후의 추정시장규모	(5)
- 이익 가능성(해당 세분류 산업의 매출액영업이익률)	(5)
2. 성장 가능성	(10)
- 시장 진입후 5년간의 추정 시장성장률	
3. 경쟁상황	(10)
- 선발기업과 예상진입기업의 대응력 강도	(4)
- 상품/서비스의 수명	(3)
- 특허 및 상표에 의한 방어 가능성	(3)
4. 위험분산도	(10)
- 세분시장 또는 응용분야의 다양성	
5. 업계 재구축가능성	(10)
- 혁신적 기술 또는 판매형태로 업계 재구축할 가능성	
6. 특별한 사회적 상황	(10)
- 정치적, 공정거래상, 사회환경적 우대 및 수출입 마찰, 환경오염 등 사회적 마찰	

2. 사업매력도 평가

◆ 매출, 이익 가능성(8점)

탄소나노튜브의 세계시장 규모는 2002년도에 818만달러 규모이고, 국내시장 규모는 12억원 정도로 추산되고 있으며, 사업 개시후 5년후인 2007년의

세계시장규모는 53,963만달러, 국내는 792억원(세계시장 성장률 적용)으로 추정되고 있어, 추정 시장규모로 본다면 중소기업이 기술을 전문화하여 사업화할 만한 시장규모로 보여진다. 시장에서는 5점 만점에 4점을 부여하였다.

한편, 탄소나노튜브의 용도는 다양하지만, 적용이 가장 우선시되는 부분이 반도체 및 기타전자부품 업종으로 여겨져 해당수치를 참조하였다. 반도체 및 기타전자부품 업종 부문의 최근 3년간 매출액영업이익율은 10.88%로서 국내 제조업 평균 매출액영업이익율 6.51%보다 높아서, 신청기술로 장기적으로 상당한 이익을 낼 수 있을 것으로 판단된다. 여기서는 5점 만점에 4점을 부여하였다. 따라서, 동사의 매출 및 이익 가능성은 10점 만점기준으로 8점이다.

◆ 성장 가능성(10점)

탄소나노튜브의 경우 광통신 산업의 성장속도에 따라 시장이 달라지겠지만, 국내시장에 대한 2002년부터 2007년까지의 연평균 성장률은 131%로 기대되고 있어, 고성장이 예상되고 있다. 따라서, 10점 만점기준으로 **10점**의 점수를 부여하였다.

◆ 경쟁상황(5점)

탄소나노튜브 시장에서 Hyperion Catalysis International(미), 카본나노테크놀러지리써치인스티튜트(일), GSI크레오스 등이 있고 우리나라의 경우에는 일진나노텍, 나노텍이 생산하고 있다. 국내에서 일진나노텍이 차지하는 비중이 크다고 여겨져 4점 만점에 1점을 부여하였다.

탄소나노튜브의 경우 제품형성 초기로 여겨져 라이프 사이클은 5년 이상으로 보여져 3점 만점에 3점을 부여하였다.

한편, 제품생산에 있어서 획기적인 특허권이 존재하고 있어 해당분야를 포괄적으로 방어하고 있다고 여겨져 3점 만점에 1점을 부여하였다.

따라서, 선발기업과 예상 진입기업의 대응력 강도, 상품 및 서비스의 수명, 특허 및 상표에 의한 방어 가능성 등을 고려하여, 경쟁상황은 10점 만점 기준으로 5점을 부여하였다.

◆ 위험분산도(6점)

탄소나노튜브의 용도는 전자파차폐재, 복합수지, FED 등 여러 가지 용도로 사용된다. 현재 실제로 사용되고 있는 분야는 전자파차폐재와 복합수지이지만 용도는 확산되고 있어 응용분야는 많다고 할 수 있다. 하지만 대부분의 경우 시장이 형성되는 초기인 점이 감안되어야 한다.

따라서, 세분화 시장에 의한 리스크 분산도는 10점 만점기준으로 6점을 부여했다.

◆ 업계 재구축 가능성(5점)

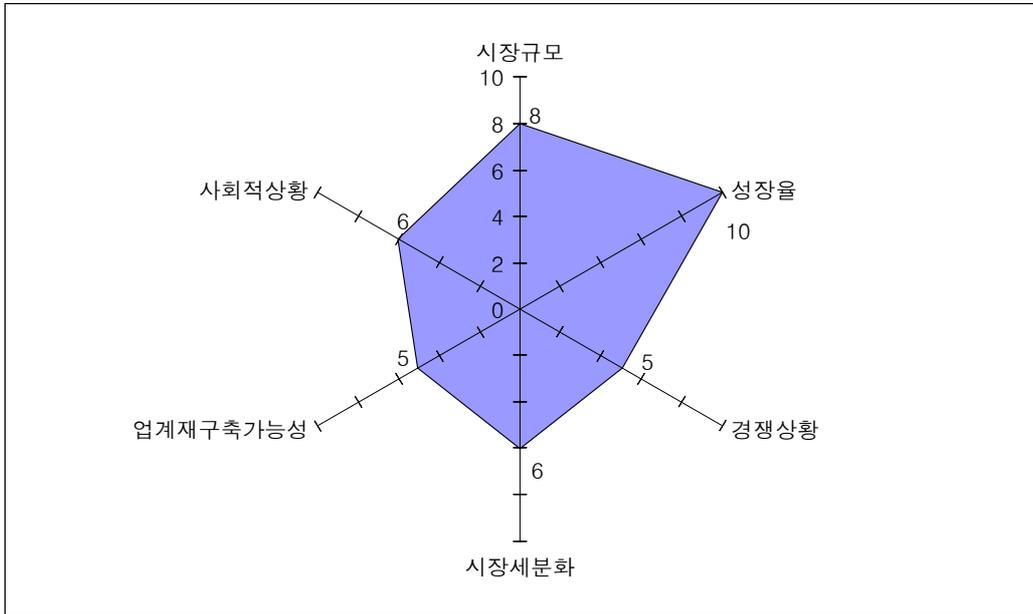
국내의 탄소나노튜브 기술은 생산기술 부문에서는 앞섰다고 하기 어렵지만, 디스플레이 부문 등의 분야에서는 세계를 선도하고 있다. 현재 가장 효율적이라고 여겨지는 탄소나노튜브 대량생산기술이 개발되어 특허화되어 있어, 업계재구축 가능성에서는 조금 점수를 낮추어, 10점 만점 기준으로 5점을 부여하였다.

◆ 특별한 사회적 상황(6점)

탄소나노튜브는 정치적, 공정거래상으로 특별한 우대사항이 없고, 수출입마찰, 환율변동, 환경오염, 인력수급문제 등의 사회적 마찰도 없으나, 수입대체라는 측면이 있어서, 10점 만점기준으로 6점을 부여하였다.

이상의 BMO 분석 결과를 종합하면 총점이 40점으로, 탄소나노튜브는 사업진입의 매력이 있는 것으로 평가되었다.

<그림 3-10> 탄소나노튜브 BMO사업매력도평가



자료: KISTI

탄소나노튜브는 2002년 시장규모가 12억원 정도이고 2007년의 시장규모가 약 792억원으로 예상되고 있으며, 2002년 이후 연평균 131% 정도 성장할 것으로 예상되고 있어 시장적 측면에서 매력을 갖춘 사업아이템이라 할 수 있다. 탄소나노튜브 제조기술의 경우, 가장 효율적이라고 할 수 있는 기술이 공지되어 있다. 하지만 아직도 탄소나노튜브의 값이 더 내려가야 하기 때문에 효율적인 기술에 대한 기대는 크다. 그래서 혁신적 기술이 나타나 세계시장에서 업체를 재구축할 가능성이 상존하고 있다. 용도 측면에서 보면 응용분야가 다양하여 장기적으로 적절한 위험회피 전략 수립이 가능할 것으로 보인다. 경쟁상황을 살펴보면, 일본이나 미국 등에 세계적 업체들이 있으며, 국내에도 일진나노텍이라는 중견 업체가 시장에 진출하고 있다.

제 4 장 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 있다.

탄소나노튜브관련 특허 출원건수가 증가하여 1999년, 2000년에는 그 전의 거의 2배의 건수가 나타나고 있어 연구 및 상용화가 활발히 이루어지고 있음을 알 수 있다.

탄소나노튜브는 기술측면에서 보면 도입기에서 성장기로 넘어가고 있고, 제품 측면에서는 도입기 마지막 단계에 와 있다고 할 수 있다. 용도가 다양하여 기술 파급도가 매우 크고, 많은 연구개발이 이루어지고 있어 단기간 내에 성장 가능성이 매우 높은 기술이라고 할 수 있다.

세계시장규모를 보면, 2002년에 818만달러로 추정되고 있으며, 2007년에는 53,963만달러에 이를 것으로 전망되고 있다. 국내시장도 2002년도 12억원정도에서, 2007년에는 792억원에 달할 것으로 예측되고 있다.

전체적으로 탄소나노튜브산업은 고성장을, 도입기단계 산업이므로 기술력 있는 기업이 장기적 관점에서 관련산업분야 등과 산학연 공동연구체제를 구축하여 시장에 진입한다면 세계적인 경쟁력을 확보할 수 있을 것으로 보인다.

< 참고 문헌 >

1. 박종구, 이경제, 나노기술개발의 최근동향, *재료마당*, **13**, 38, 2000
2. S. Iijima, *Nature*, **354**, 56, 1991
3. T.W. Ebbesen and P.M. Ajayan, *Nature*, **358**, 220, 1992
4. S. Iijima and T. Ichihashi, *Nature*, **363**, 603, 1993
5. D.S. Bethune, C.H. Kiang, M.S. de Vries, G. Gorman, R. Savoy, J. Vasquez and R. Beyers, *Nature*, **363**, 605, 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, *Science*, **273**, 483, 1996
7. Z. F. Ren, Z. P. Huang, J. W. Xu, J. H. Wang, P. Bush, M. P. Siegal, P. N. Provencio, *Science* **282**, 1105, 1998
8. M. S. Dresselhaus, G. Dresselhaus and R. Saito, *Carbon*, **33**, 883 (1995)
9. M. S. Dresselhaus, G. Dresselhaus and P. C. Eklund, "*Science of Fullerenes and Carbon Nanotubes*", 1996
10. R. A. Jishi, M. S. Dresselhaus, G. Dresselhaus, *Phys. Rev., B* **47**, 16671, 1993
11. R. A. Jishi, D. Inomata, K. Nakao, M. S. Dresselhaus, G. Dresselhaus, *J. Phys. Soc. Japan*, **63**, 2252, 1994
12. Y. Ando, X. Zhao, K. Hirahara, K. Suenaga, S. Bandow and S. Iijima, *Chem. Phys. Lett.*, **323**, 580, 2000
13. T. W. Ebbesen and P. M. Ajayan, *Nature*, **358**, 220, 1992
14. T. W. Ebbesen, *Ann. Rev. Mater. Sci.*, **24**, 235, 1994
15. T. W. Ebbesen in *Carbon nanotubes: preparation and properties*, CRC Press, Boca Raton, p. 139, 1997
16. T. W. Ebbesen, H. Hiura, J. Fujita, Y. Ochiai, S. Matsui and K. Tanigaki, *Chem. Phys. Lett.*, **209**, 83, 1993
17. G. H. Yaylor, J. D. Fitzgerald, L. Pang and M. A. Wilson, *J. Cryst. Growth*, **135**, 157, 1994

18. L.C. Qin, D. Zhou, Krauss and D.M. Gruen, *Appl. Phys. Lett.*, **72**, 3437, 1998
19. Z. F. Ren, Z. P. Huang, J. W. Xu, J. H. Wang, P. Bush, M. P. Siegal, P. N. Provencio, *Science*, **282**, 1105, 1998
20. C. J. Lee, D. W. Kim, T. J. Lee, Y. C. Choi, Y. S. Park, Y. H. Lee, W. B. Choi, N. S. Lee, G. S. Park and J. M. Kim, *Chem. Phys. Lett.*, **312**, 461, 1999
21. C. J. Lee, J. H. Park, S. Y. Kang and J. H. Lee, submitted in *Chem. Phys. Lett.*
22. Fan, Y-Y., Cheng, H-M., Wei, Y-L., Su, G. and Shen, Z-H.: *CARBON*, **38**, 789, 2000
23. K. Tanaka, T. Yamabe and K. Fukui, "*The Science and Technology of Carbon Nanotubes*", CRC Press, p.149. 1997.
24. R.L.V. Wal, T.M. Tichich and V.E. Curtis, *Chem. Phys. Lett.*, **323**, 217, 2000.
25. S. Frank, *Science*, **280**, 1744, 1998
26. S. Sanvito, Y. K. Kwon, D. Tomnek, and C. J. Lambert, *Phys. Rev. Lett.*, **84**, 1974, 2000
27. H. Dai, P. Petit, J. Robert, C. Xu, Y. H. Lee, S. G. Kim, A.G. Rinzler, D. T. Colbert, G. Scuseria, D. Tomnek, J. E. Fischer, R. E. Smalley, *Science*, **273**, 483, 1996
28. J. Hone, M. Whitney, A. Zettle, *Synthetic Metals*, **103**, 2498 (1999).
29. J. Che, T. Cagin, and W. A. Goddard III, Thermal Conductivity of Carbon Nanotubes, Locations :
<http://www.foresight.org/Conferences/MNT7/Papers/Che/index.html>
30. S. Berber, Y.-K. Kwon, and D. Tomnek, *Phys. Rev. Lett.* **84**, 2000
31. C. Dekker, Carbon Nanotubes as Molecular Quantum Wires, *Physics Today*, p.22, May, 1999
32. P. F. Schewe and B. Stein, *The American Institute of Physics Bulletin of Physics News*, **279**, 1996

33. E. Dujardin, T. W. Ebbesen, A. Krishnan, P. N. Yianilos, M. M. J. Treacy, *Physical Review B* **58**(20), 14013, 1998
34. D. Tomanek, "Science and Application of Nanotubes", p.297, 1999
35. E. Muller and T.T. Song, "Field Ion Microscopy", Elsevier, NY, 1969
36. K.M. Bowkett and D.A. Smith, "Field Ion Microscopy", Elsevier, NY, 1970
37. E.G. Zaidman, *IEEE Trans. Electron Devices*, **40**, 1009, 1993
38. J.M. Bonard, J.P. Salvetat, T. Stockli, W.A. De Heer, L. Forro and A. Chatelain, *Appl. Phys. Lett.*, **73**, 918, 1998
39. A.G. Rinzler, J.H. Hafner, P. Nikolaev, L. Lou, S.G. Kim, D. Tomanek, P. Nordlander, D.T. Colbert and R.E. Smalley, *Science*, **269**, 1550, 1995
40. W.A. de Heer, A. Chatelain and D. Ugarte, *Science*, **270**, 1179, 1995
41. Q.H. Wang, A.A. Setlur, J.M. Lauerhaas, J.Y. Dai, E.W. Seelig and R.P.H. Chang, *Appl. Phys. Lett.*, **72**, 2912, 1998
42. Y. Saito, K. Hamaguchi, k. Hata, K. Uchida, Y. Tasaka, F. Ikazaki, M.Yumura, A. Kasuya and Y. Nishina, *Nature*, **389**, 554, 1997
43. W.B. Choi, D.S. Chung, J.H. Kang, H.Y. Kim, Y.W. Jin, I.T. Han, Y.H. Lee, J.E. Jung, N.S. Lee, G.S. Park and J.M. Kim, *Appl. Phys. Lett.*, **75**, 3129, 1999
44. H. Murakami, M. Hirakawa, C. Tanaka and H.Yamakawa, *Appl. Phys. Lett.*, **76**, 1776, 2000
45. X. Xu and G.R. Brandes, *Appl. Phys. Lett.*, **74**, 2549, 1999
46. P.G. Collins, A. Zettle, H. Bando, A. Thess and R. Smalley, *Science*, **278**, 100, 1997
47. P.R. Schwoebel and I.J. Brodie, *Vac. Sci. Technol. B.* **13**, 1391, 1995
48. Y.C. Choi, D.J. Bae, B.S. Lee, Y.H. Lee, G.S. Park, W.B. Choi, N.S. Lee, J.M. Kim, *J. Vac. Sci. Technol. A.*, **18**, 1864, 2000
49. K.A. Dean and B.R. Chalamala, *Appl. Phys. Lett.*, **76**, 375, 2000
50. Y.C. Choi, Y.M. Shin, D.J. Bae, S.C. Lim and B.S. Lee, *Diamond and*

- Related Materials*, 10, 1457, 2001
51. H.D. Beckey, "*Field Ionization Mass Spectroscopy*", Pergamon, NY (1971).
 52. H. Y. Hwang, "*Template Synthesis of Carbon Nanotubes and Their Application to a Field Emitter Array*", MS Thesis, POSTECH, 2001
 53. A.C. Dillon, K.B. Jones, T.A. Bekkedahl, C.H. Kiang, D.S. Bethune, and M.J. Heben, *Nature*, **386**, 377, 1997
 54. M.S. Dresslhaus, K.A. Williams and P.C. Eklund, *MRS Bulletin*, **24**, 45, 1999
 55. A. Chamber, C. Park, R.T.K. Baker and N.M. Rodriguez, *J. Phys. Chem. B*, **102**, 4253, 1998
 56. P. Chen, X. Wu, J. Lin and K.L. Tan, *Science*, **285**, 91, 1999
 57. C. Liu, Y.Y. Fan, M. Liu, H.T. Cong, H.M. Cheng and M.S. Dresselhaus, *Science*, **285**, 91, 1999
 58. Y. Ye, C.C. Ahn, C. Witham, B. Fultz, B. Liu, A.G. Rinzler, D. Colbert, K.A. Smith and R.E. Smalley, *Appl. Phys. Lett.*, **74**, 2307, 1999
 59. S.M. Lee, K.S. Park, Y.C. Choi, Y.S. Park, Y.S. Park, J.M. Bok, D.J. Bae, K.S. Nahm, Y.G. Choi, S.C. Yu, N.G. Kim, T.J. Frauenheim and Y.H. Lee, *Synthetic Metals*, **113**, 209, 2000
 60. S.M. Lee and Y.H. Lee, *Appl. Phys. Lett.*, **76**, 2877, 2000
 61. S.M. Lee, K.H. An, W.S. Kim, Y.H. Lee, G. Seifert and T.J. Frauenheim, *Synthetic Metals.*, **121**, 1189, 2001
 62. S.M. Lee, K.H. An, W.S. Kim, Y.H. Lee, G. Seifert and T.J. Frauenheim, *J. Ame. Chem. Soc.*, **123**, 5059, 2001
 63. A. Hale, "*Advances in Cutting Edges Applications and Scalable Production of Carbon Nanotubes*", The Knowledge Foundation Inc. 2000
 64. C. Niu, E.K. Sichel, R. Hoch, D. Moy and H. Tennent, *Appl. Phys. Lett.* **70**, 1480, 1997
 65. R.Z. Ma, J. Liang, B.Q. Wei, B. Zhang, C.L. Xu and D.H. Wu, *Power Sources*, **84**, 126, 1999

66. K.H. An, W.S. Kim, Y.S. Park, I.S. Lim, D.J. Bae, S.M. Lee, Y.C. Choi and Y.H. Lee, *Advanced Materials*, **13**, 497, 2001
67. S.J. Tans, A.R.M. Verschueren and C. Dekker, *Nature*, **393**, 49, 1998
68. P. Nikolaev, M.J. Brinikowski, T.K. Bradley, F. Rohmund, D.T. Colbert, K.A. Smith and R.E. Smalley, *Chem. Phys. Lett.* **313**, 91, 1999
69. S.S. Wong, E. Joselevich, A.T. Woolley, C.L. Cheung and C.M. Lieber, *Nature*, **394**, 52, 1998
70. S.S. Wong, A.T. Woolley, E. Joselevich, C.L. Cheung and C.M. Lieber, *J. Amer. Chem. Soc.*, **120**, 8557, 1998
71. S.A. Curran, P.M. Ajayan, W.J. Blau, D.L. Carroll, J.N. Coleman, A.B. Dalton, A.P. Davey, A. Drury, B. McCarthy, S. Maier and A.A. Strevens, *Advanced Materials*, **10**, 1091, 1998
72. www.fibrils.com, "Conductive Plastics", 2001.10.5
73. www.chosun.com, "반도체 성능 1만배 꿈의 물질 개발", 2002.2.28
74. www.ch2bc.org/index2.htm, "Fuel Cells", 2001.8.31.
75. www.mk.co.kr, "탄소나노물질 개발", 2001.7.12.
76. H.W. Kroto, J.R. Heath, S.C. O'Brien, R.F. Curl, R.E. Smalley, *Nature* **318**, 6042 1985