

# 탄소나노튜브의 산업적 응용

소대섭 · 김경호 · 최봉기 · 김기일 · 함헌 · 강인필

2008. 12



# 머 리 말

나노기술은 21세기 국가 과학기술경쟁력의 확보와 국가 경제 및 사회의 지속적인 발전을 위한 핵심기술입니다. 또한, 전통 제조 산업과 타분야의 첨단기술과 융합하여 국가의 미래 기술경쟁력을 한층 고도화시킬 수 있는 기반기술로서 차세대 성장 동력으로 인식되고 있습니다.

2000년 1월 미국의 “국가나노기술전략(NNI; National Nanotechnology Initiative)” 발표를 계기로 세계의 나노기술경쟁이 본격적으로 시작되었습니다. 우리나라는 2001년 7월 ‘나노기술종합발전계획’을 수립하였고, 2002년 12월에는 ‘나노기술개발촉진법’을 제정하여 체계적이고 적극적인 지원을 하고 있습니다. 특히, 2005년 12월에는 ‘제2기 나노기술종합발전계획’을 수립하여 2015년에 ‘나노기술 분야에서 세계 3대국의 기술경쟁력 확보’라는 비전을 제시하고, 이를 위해 최고수준의 ‘30대 실용화 기술’ 개발을 적극 추진하고 있습니다.

이러한 정부정책의 추진 방향과 시대적 변화에 부응하기 위해 한국과학기술정보연구원(KISTI)은 매년 나노분야의 핵심 전략기술에 대해 연구개발 동향 및 산업시장 전망 등에 관한 심층 분석연구를 수행하여, 이를 나노기술분석보고서로 발간하고 있습니다.

특히, 꿈의 신소재로 주목받고 있는 탄소나노튜브의 산업적 적용에 관한 최신 동향을 분석하여 「탄소나노튜브의 산업적 응용」 분석보고서를 발간하게 되었습니다. 본 보고서가 해당 분야의 기술과 산업 발전에 조금이나마 보탬이 되기를 기대합니다.

본 연구는 교육과학기술부의 지원으로 수행되었으며, 본 연구원의 소대섭, 김경호 책임연구원, 김기일, 최봉기 선임연구원 및 외부전문가로 합헌 박사 와 강인필 교수께서 공동 집필한 것으로 그 노고에 깊이 감사드립니다. 본 보고서에 수록된 내용은 집필자들의 사견이며 한국과학기술정보연구원의 공식의견이 아님을 밝혀둡니다.

2008. 12.

한국과학기술정보연구원

원장 박 영 서



# 목차

제1장 서론 .....	1
제2장 기술개발 동향 및 전망 .....	3
1. 기술 개요 .....	3
가. 탄소나노튜브의 개념 .....	3
나. 탄소나노튜브의 물성 .....	5
다. 탄소나노튜브의 합성 방법 .....	6
(1) 전기방전법(Arc-discharge) .....	6
(2) 화학기상증착법(Chemical Vapor Deposition, CVD) .....	7
(3) 레이저 증착법(Laser Vaporization) .....	8
(4) 기상합성법(Vapor Phase Growth) .....	9
(5) 기타 .....	9
라. 환경, 건강, 안전성 문제 .....	9
2. 국내외 개발 동향 .....	10
가. 국내의 연구개발 현황 .....	10
나. 응용 분야 .....	15
(1) 전계방출 디스플레이 .....	15
(2) 고분자 복합재료 .....	15
(3) 수소저장 및 연료전지 .....	16
(4) 단전자 트랜지스터 및 메모리소자 .....	16
(5) Mechatronics 및 이미징 .....	17
(6) 센서 .....	17
(7) 전도성 투명전극 .....	18

<b>제3장 탄소나노튜브의 응용</b> .....	19
1. 개요 .....	19
2. 탄소나노튜브 나노전자소자 .....	22
가. 기술 개요 .....	22
나. 나노 전자소자로서 탄소나노튜브의 재료적 특성 .....	23
다. 탄소나노튜브 트랜지스터 .....	25
라. 향후 전망 .....	28
3. 탄소나노튜브 전계방출 디스플레이 .....	29
가. 기술 개요 .....	29
나. FED 소자로서 탄소나노튜브의 재료적 특성 .....	31
다. 탄소나노튜브 FED .....	32
라. 향후 전망 .....	35
(1) FED 적용을 위한 탄소나노튜브 대량 생산 기술 .....	36
(2) 고품질 전계 방출원 생산을 위한 탄소나노튜브 분산 공정 .....	36
(3) 내구성 높은 FED 제작을 위한 탄소나노튜브 신뢰성 향상 .....	36
4. 탄소나노튜브 고분자 복합재료 .....	38
가. 기술 개요 .....	38
나. 개발 동향 .....	42
(1) 기계 및 구조용 복합재료 .....	42
(2) 전도성 재료 .....	44
(3) 고열전도성 재료 .....	46
다. 향후 전망 .....	47
5. 에너지소자 기술 .....	49
가. 기술 개요 .....	49
나. 개발 동향 .....	50
(1) 복합나노구조형 플라스틱 태양전지 .....	50
(2) 초고용량 캐패시터 .....	51
(3) 탄소나노튜브 전극 .....	52
(4) 수소저장 .....	53
다. 향후 전망 .....	54
6. 탄소나노튜브를 이용한 나노센서 .....	55
가. 탄소나노튜브 가스센서 .....	55

(1) 기술 개요 .....	55
(2) 가스센서로서의 탄소나노튜브의 재료적 특성 .....	55
(3) GaP 나노와이어 트랜지스터를 이용한 가스센서 소자제작 .....	56
(4) 효소로 합성한 폴리아닐린 나노파이버 가스센서 소자제작 .....	57
(5) 미니 가스센서 개발 .....	58
(6) 향후 전망 .....	59
나. 탄소나노튜브 바이오센서 .....	59
(1) 기술 개요 .....	59
(2) 바이오센서로서의 탄소나노튜브의 특성 .....	61
(3) 탄소나노튜브를 이용한 바이오센서 기술 .....	62
(4) 나노-바이오센서의 기술 동향 .....	65
(5) 향후 전망 .....	67

## 제4장 산업화 동향 .....

1. 개요 .....	69
2. 국내의 생산 동향 .....	73
가. 국외 생산 동향 .....	73
나. 국내 생산 동향 .....	77
3. 탄소나노튜브의 종류별 생산 현황 .....	79
가. 다중벽 탄소나노튜브 .....	79
나. 단일벽 탄소나노튜브 .....	80
다. 주요국별 생산 현황 .....	81
4. 탄소나노튜브 응용기술 개발 동향 .....	84
가. CNT 국내외 응용기술 개발 현황 .....	85
나. 탄소나노튜브의 응용기술 연구 동향 .....	86
(1) Nano-Electronics .....	86
(2) 나노 복합재료 .....	91
(3) 에너지 분야 .....	95
(4) 측정과 이미징 .....	97
다. 탄소나노튜브 응용기술의 산업화 추진 현황 .....	99
(1) 세계 현황 .....	99

(2) 국내 현황 .....	105
5. 산업화 전망 .....	106
가. 탄소나노튜브 .....	106
(1) 탄소나노튜브 생산 산업화 전망 .....	106
(2) 탄소나노튜브 수요동향 및 수요예측 .....	110
(3) 탄소나노튜브 응용 기술의 산업화 전망 .....	110
나. 탄소나노튜브 복합소재 .....	122
(1) 전자파 흡수체 .....	123
(2) 자동차용 수지 .....	125
(3) 에너지 분야 .....	128
(4) 의료·계측 .....	132
<b>제5장 결 론</b> .....	134
<b>참고문헌</b> .....	136

# 표 차례

<표 2-1> 탄소나노튜브 관련 주요 연구 논문 .....	10
<표 2-2> 탄소나노튜브 관련 핵심 특허 .....	12
<표 2-3> 탄소나노튜브 관련 핵심 연구자 .....	13
<표 2-4> 탄소나노튜브의 응용분야 .....	14
<표 2-5> 탄소나노튜브의 용도 .....	14
<표 3-1> 충전제 특성 비교 .....	40
<표 3-2> 탄소나노튜브 투명전극의 응용분야 .....	46
<표 3-3> 나노-바이오 융합기술 분류 .....	66
<표 4-1> 탄소나노튜브의 적용 분야 (원재료, 중간품, 최종품) .....	69
<표 4-2> 탄소나노튜브, 카본블랙, 탄소섬유 가격 비교 .....	71
<표 4-3> PAN계 탄소섬유 분야별 수요규모 추이와 예측 .....	72
<표 4-4> 탄소나노튜브 해외 주요 생산 기업 .....	75
<표 4-5> 탄소나노튜브 국내 주요 생산 기업 .....	77
<표 4-6> 탄소나노튜브의 용도별 개발 분야 및 적용 제품 .....	85
<표 4-7> 국외 CNT 투명박막 기술 현황 .....	94
<표 4-8> 탄소나노튜브 국내 주요 연구 기업 .....	106
<표 4-9> 다중벽 탄소나노튜브 (MWNTs : Multi Wall Carbon Nanotubes) 가격 .....	109
<표 4-10> 단일벽 탄소나노튜브 (SWNT : Single Wall Carbon Nanotubes) 가격 .....	109
<표 4-11> 각종 평면 디스플레이 성능비교 .....	112
<표 4-12> FED 참여업체 및 그 동향(矢野經濟研究所) .....	113
<표 4-13> 탄소나노튜브 FED 대수와 CNT 수요량의 시장규모 예측 .....	113
<표 4-14> 미국 Intel사 공정기술 로드맵 .....	114
<표 4-14> 용도별 플렉시블 투명전극 기술의 시장규모 예측 .....	121
<표 4-15> 노트북·휴대전화용 EMC 대책에서의 MWCNT 잠재수요량 .....	125
<표 4-15> 보통·소형자동차에서의 주요부품별 수지사용량 .....	126
<표 4-16> 자동차 수지부품의 MWCNT 잠재수요량 .....	127

<표 4-17> 복합재료 분야 용도별 시장규모 예측 .....	128
<표 4-18> 리튬이온 2차전지용 MWCNT 시장규모 예측 .....	129
<표 4-19> 에너지분야에서 CNT 총시장규모 추이(2003년~2010년) .....	131
<표 4-20> SPM 탐침 시장규모예측(일본시장, 수량·금액기준) .....	133

# 그림 차례

<그림 2-1> 탄소나노튜브의 발견(이지마) .....	3
<그림 2-2> 탄소나노튜브의 종류 .....	4
<그림 2-3> 전기방전법 구조도 .....	7
<그림 2-4> 플라즈마 화학기상증착법 .....	7
<그림 2-5> 열화학기상증착법 .....	8
<그림 2-6> 레이저증착법의 구조도 .....	8
<그림 2-7> 기상합성법 장치도 .....	9
<그림 2-8> 전계방출디스플레이 구조도 .....	15
<그림 2-9> 고분자 복합재료 응용 .....	15
<그림 2-10> 연료전지 구조와 응용 .....	16
<그림 2-11> 탄소나노튜브 소자 .....	17
<그림 2-12> Eikos사에서 제작한 전도성 투명전극 .....	18
<그림 3-1> 단일벽 탄소나노튜브의 구조 .....	24
<그림 3-2> Si/SiO <sub>2</sub> 기판위에 형성된 백금전극 위에 얹혀진 SWNT로 구성된 단전자 트랜지스터의 AFM 이미지 사진과 그 구조 .....	26
<그림 3-3> Schematic cross section of IBM's CNFET(carbon nanotube field effect transistor) .....	27
<그림 3-4> 600 nm 길이와 1.8 nm 직경을 가지는 탄소나노튜브 FET의 후면 게이트 구조 및 전기적 특성 .....	27
<그림 3-5> 고전압계(high electric field)에서 예리한 선단 형상을 지닌 음극선(cathode) 전자방출원을 이용한 전계전자방출 현상 개략도 .....	30
<그림 3-6> CRT와 탄소나노튜브-FED 구조 원리 .....	31
<그림 3-7> 탄소나노튜브 electron filed emission cathodes의 균일한 전계 방출 특성 .....	33
<그림 3-8> 탄소나노튜브 전계방출디스플레이 구조도 .....	34
<그림 3-9> 삼성전자에서 개발한 32인치 탄소나노튜브-FED 시제품과 38인치 탄소나노튜브-FED TV 개발 .....	35
<그림 3-10> 고분자 복합재료의 충전제 .....	38
<그림 3-11> Macro-composite(SEM)와 Nano-composite(TEM)의 비교 .....	39

<그림 3-12> 탄소나노튜브 Nano-composite의 응력-변형률 곡선 .....	41
<그림 3-13> 나노복합재료의 전기전도도 비교 .....	42
<그림 3-14> 플라스틱 태양전지의 구조와 동작원리 .....	51
<그림 3-15> (a) Gap 나노와이어소자의 SEM 이미지, (b) Gap 나노와이어에서 관측되는 n형 게이트 효과 .....	57
<그림 3-16> (a) 효소로 합성된 PANI 나노파이버의 전자현미경 사진, (b) 암모니아 가스에 대한 PANI 나노파이버의 전기적 특성 변화곡선 .....	57
<그림 3-17> 나노튜브 가스센서 .....	58
<그림 3-18> 나노바이오센서의 응용 .....	60
<그림 3-19> 바이오센서의 메커니즘 .....	61
<그림 3-20> 나노-화이버 끝단이 열린 카복실리기 형성 모습 .....	62
<그림 3-21> Functionalized CNF and strategy to immobilize GOx on the open-end of CNF .....	63
<그림 3-22> 대장균 나노-바이오센서 작동원리 .....	64
<그림 3-23> 나노-바이오센서의 연구용 시제품 .....	65
<그림 4-1> 소재의 사업화 단계 .....	70
<그림 4-2> 탄소나노튜브 기업체 지역별 분포 .....	82
<그림 4-3> 탄소나노튜브를 연결소자로 사용 .....	91
<그림 4-4> 연도별 탄소나노튜브의 가격동향 .....	109
<그림 4-5> 샘플 출하된 탄소나노튜브의 용도 .....	110
<그림 4-6> LCD/PDP TV 시장규모 예측(세계, 수량기준, 단위:천대) .....	111
<그림 4-7> 투명 전도성 박막의 전기광학적 특성에 따른 응용분야 .....	115
<그림 4-8> 스마트 윈도우의 전원 on/off 상태 .....	117
<그림 4-9> 플렉시블 디스플레이 시장 규모 I-Supply (2006) .....	118
<그림 4-10> 투명전도성 필름 시장 예측 현황 I-Supply (2006) .....	119
<그림 4-11> 용도에 따른 MWNT 출하량 변화 .....	120
<그림 4-12> 전자과 흡수체의 수요분야별 시장규모 예측(수량기준) .....	124
<그림 4-13> 전자기기용 전자과 흡수체 용도별 구성비(수량, 금액기준) .....	124
<그림 4-14> 노트북·휴대전화용 EMC 대책에서의 MWCNT 잠재수요량 .....	125
<그림 4-15> 자동차 수지부품의 MWCNT 잠재수요량 .....	127
<그림 4-16> 복합재료 분야 용도별 시장규모 예측 .....	128
<그림 4-17> 리튬이온 2차전지 부극재용 MWCNT 시장규모예측 .....	130
<그림 4-18> SPM 탐침 시장규모추이 .....	133

## 서 론

우리나라는 2001년도부터 국가적 핵심전략기술로 나노기술개발을 정부가 직접 투자해 왔으며, 2008년까지 약 1조9,000억원을 투자하는 등 국가적 전략기술 산업으로 인식하고 적극적인 지원을 하고 있다. 민간분야의 투자도 크게 증대되고 있어 삼성과 LG 등 대기업은 물론 한화나노텍(구 일진나노텍), 탑나노시스, (주)CNT 등 중소 벤처기업들의 개발 열기가 매우 고조되고 있다. 이를 바탕으로 고강도 신소재, IT 분야의 소자 부품, 섬유 의류 등 일상 용품, 디스플레이와 휴대폰, 가전제품 등 폭넓은 분야에서 상품화가 빠른 속도로 진척되고 있다.

탄소나노튜브는 21세기 들어 국가적 신전략 기술로 부각된 나노기술(Nanotechnology) 분야에서 핵심 원천소재로 인식되고 있으며, 선진국의 시장 예측 기관에서는 향후 한국이 탄소나노튜브 시장에서 세계 선두권을 차지할 것으로 전망하고 있다.

탄소나노튜브는 1991년 NEC의 이지마에 의해 발견되었으며, 6각형으로 배열된 탄소원자들의 직경이 수~수십 nm의 튜브 구조의 탄소동소체 중의 하나로서, 단일벽 나노튜브, 이중벽 나노튜브, 다중벽 나노튜브로 구분할 수 있다. 강철에 비해 100배나 되는 인장강도, 뛰어난 유연성(Pliability), 구조에 따라 금속성과 반도체성을 나타내는 전기적 특성 등 독특한 특성 때문에 21세기 꿈의 신소재로 불리고 있다.

합성방법으로는 전기방전법, 화학기상증착법, 레이저 증착법, 기상합성법, 전기분해법 등이 있으며, 전계방출 디스플레이, 고분자 복합재료, 수소저장 및 연료전지 분야, 2차전지, 단전자 트랜지스터, 메모리 소자, 원자힘 현미경 탐침 팁, 센서, 전도성 투명전극 등 광범위한 분야에서

상품화와 응용연구가 진행되고 있다.

본 보고서는 탄소나노튜브의 최신 연구개발 및 산업시장 동향과 산업화 전망에 대해서 분석한 것이며, 2장에서는 탄소나노튜브의 개념 및 합성 방법을 포함하여 기술 개발 동향과 전망을, 3장에서는 탄소나노튜브의 응용에 관해 기술하였으며, 4장에서는 이의 산업화 동향과 전망을 구체적으로 기술하였다.

## 기술개발 동향 및 전망

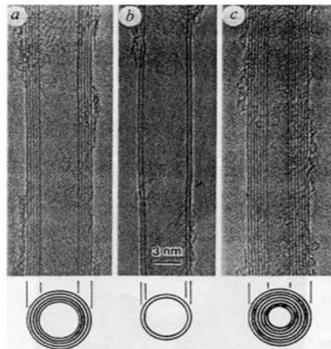
### 1. 기술의 개요

#### 가. 탄소나노튜브의 개념

탄소나노튜브(Carbon Nanotube, CNT)는 6각형으로 배열된 탄소원자들이 튜브 상 모양을 하고 있는 탄소동소체 중의 하나로서, 탄소원자 철망(chicken wire)의 시트가 실린더 형으로 말려 있는 형상을 하고 있다.

탄소나노튜브는 일반적으로 1991년 일본 NEC 기초연구소(동경)의 수미오 이지마(Sumio Iijima)에 의해 발견된 것으로 알려져 있다. 그러나 Hyperion Catalysis는 1983년에 다중벽 탄소나노튜브를 이미 생산했다고 밝히고 있으며, 당시에 Hyperion Catalysis는 carbon fibril (탄소 원

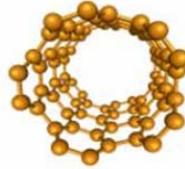
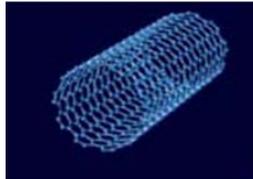
Sumio Iijima., Nature 354, 56 (1991)



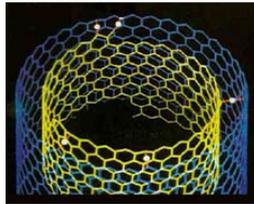
〈그림 2-1〉 탄소나노튜브의 발견(이지마)

섬유)이라는 이름으로 MWNT를 생산했고 1987년에 관련 특허를 획득했다. 이지마는 이 물질의 독특한 화학구조를 과학적으로 해석하고 1993년에 SWNT를 제조한 공로가 크게 인정받고 있다.

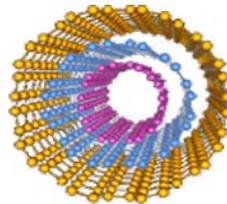
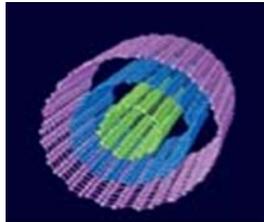
탄소나노튜브는 튜브를 구성하는 층의 수에 따라 분류되기도 하는데, 단일벽 탄소나노튜브(Single-Walled Carbon Nanotube, SWNT)는 하나의 실린더로 구성되어 있으며, 약 1 나노미터 내외의 직경을 나타내며, 다중벽 탄소나노튜브(Multi-Walled Carbon Nanotube, MWNT)는 실린더들이 각 실린더 내에 여러 겹으로 내포되어 있으며, 전체 직경이 5~100 nm 정도를 나타낸다.



단일벽 탄소나노튜브 (SWNT)



이중벽 탄소나노튜브 (DWNT)



다중벽 탄소나노튜브 (MWNT)

<그림 2-2> 탄소나노튜브의 종류

단일벽, 다중벽 등 층구조에 의한 분류 외에도 길이가 긴 것과 짧은 것, 끝이 개방된 것과 폐쇄된 것 등으로 나눌 수도 있다. 그리고 6각형 열들(rows)이 직접 실린더 둘레를 연결하고 있느냐 또는 위로 가면서 직경이 좁아져서 튜브 길이 방향으로 나선형으로 올라가고 있느냐에 따라 서로 다른 유형의 나선성(螺線性, chirality)을 가지고 있다. 이러한 구조적 특성이 CNT의 물성에 영향을 미침으로써 절연체가 되기도 하고, 전도체 또는 반도체적 성질을 나타내기도 한다. CNT의 장점 중의 하나가 강도가 매우 우수한 점인데 이는 각 나노튜브가 전적으로 탄소원자간의 강력한 공유결합(covalent bond)에 의해 연결되어 있기 때문이다. 이러한 물성에 대한 정보는 구조가 상대적으로 덜 복잡한 SWNT가 MWNT에 비해 많이 알려져 있다.

CNT는 고휘 탄소섬유(carbon fiber, 일부는 나노미터 직경을 갖고 있음)와는 뚜렷이 구별되는 특성을 나타내고 있다. 탄소섬유는 여러 가지 형태의 탄소 혼합물로 구성되어 있는데, 흑연(graphite)이나 특정한 분자 구조가 없는 무정형 탄소 층들을 함유하고 있고 실린더형 철망 구조를 갖고 있지 않다. 그래서 CNT 수준의 기계적 강도를 나타내지 못한다.

## 나. 탄소나노튜브의 물성

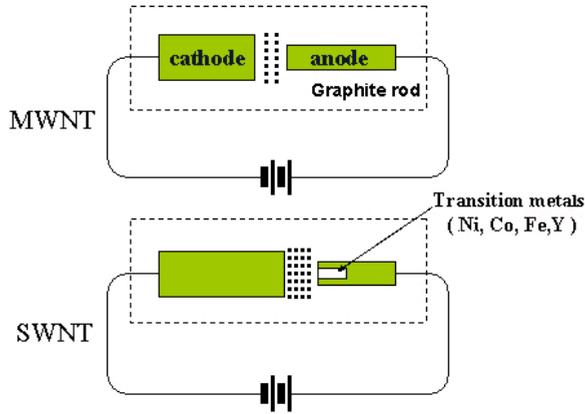
- 강도(Strength) : CNT는 인장강도(tensile strength : 끊어지지 않고 잡아늘이는 힘에 견디는 능력)가 1/6의 무게로 강철의 100배를 나타낸다.
- 유연성(Pliability) : 매우 큰 인장강도에도 불구하고 SWNT는 유연하며, 평편하게 또는 꼬거나 구부리는 것이 가능하다. 이러한 특성으로 인해 SWNT는 강하고 유연한 코드나 케이블의 제조에 응용될 가능성이 높다. 나노튜브는 또한 탄성이 있어 변형 후에 원래의 형상으로 쉽게 되돌아간다.

- 금속성 또는 반도체성(Metallic or semiconducting) : 나선성(chirality)이 나 꼬임의 정도에 따라 CNT는 전기를 통할 수 있으며, 구리와 같은 금속성이나 실리콘과 같은 반도체성 거동을 나타내기도 한다. 밴드 갭(band gap: 나노튜브의 전도를 돕기 위해 필요한 에너지 양)은 튜브의 직경과 chirality를 제어함으로써 조절이 가능하다. MWNT는 서로 상이한 직경의 튜브를 가지고 있기 때문에, 다중 전류 신호를 한 번에 운반하는 것도 가능하다.
  
- 탄도 전자 터널링(Ballistic electron tunneling) : 기존 전도체에서 전자는 결함점(defect sites)에서 흩어지거나 튀어나오는데, 이는 전선이 저항을 갖도록 함으로써, 그 길이 구간에서 전력손실을 야기하기 때문이다. 반면 CNT는 전자들이 총선에서 나오는 총알처럼 탄도를 그리며 이동할 수 있어, 아무런 방해도 받지 않고 튜브의 길이를 따라 이동이 가능하다. 이러한 물성으로 인해 CNT는 전계 방출 디스플레이(field emission display, FED)나 고효율 장거리 전력 케이블 또는 신규 전자 소자 분야에 응용 가능성이 매우 높다.

## 다. 탄소나노튜브의 합성 방법

### (1) 전기방전법(Arc-discharge)

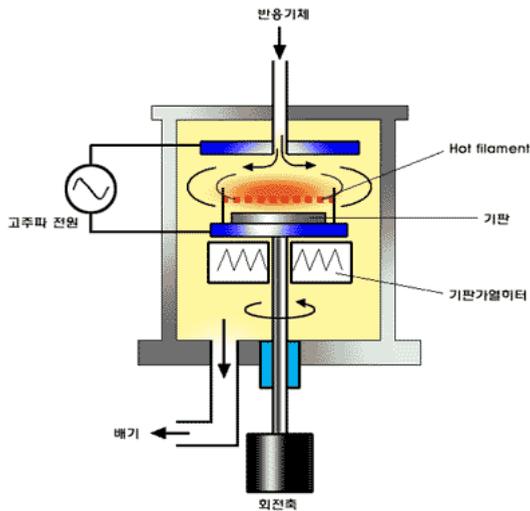
2개의 흑연 막대를 수 mm 간격으로 두고 전원에 연결하면, 두 막대 사이에서 아크 방전이 일어나며, 이 방전으로 인해 탄소가 가열되어 고온 플라즈마로 증발되고, 이어서 나노튜브로 응축된다. 전형적인 수율은 최대 30wt%이며, CNT 합성의 원천적인 방법인 아크 방전은 거의 구조적 결함 없이 SWNT 및 MWNT 모두를 제조할 수 있지만, 생성된 튜브는 짧고, 랜덤한 크기와 방향으로 퇴적되는 경향이 있다.



〈그림 2-3〉 전기방전법 구조도

## (2) 화학기상증착법(Cheical Vapor Deposition, CVD)

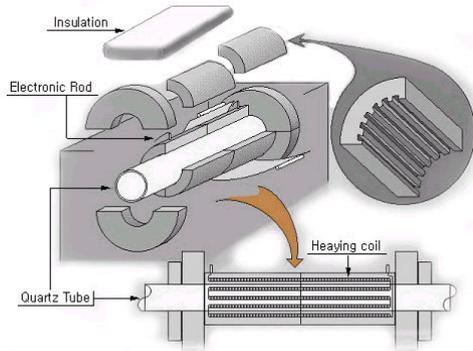
표면에 적당한 촉매가 있는 기판을 가열로 내에 두고, 메탄과 같은 탄소함유 가스를 서서히 공급하면, 가스가 분해하면서 탄소 원자들이 방출되어 촉매 상에서 나노튜브가 형성된다. 수율은 10~100%로서 상



〈그림 2-4〉 플라즈마 화학기상증착법

업화하기에 적당한 방법으로서 가장 긴 나노튜브도 만들 수 있다. 결합이 많은 MWNT를 생성하는데 사용한다.

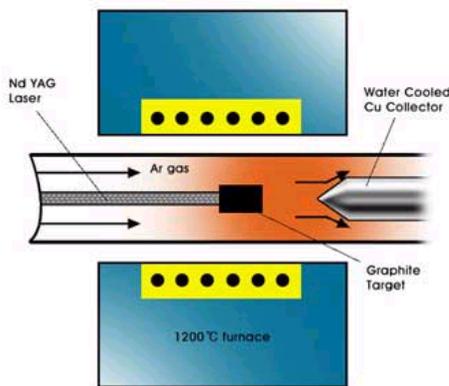
플라즈마 화학기상증착법(Plasma Enhanced CVD)과 열화학기상증착법(Thermal CVD)이 있다.



〈그림 2-5〉 열화학기상증착법

### (3) 레이저 증착법(Laser Vaporization)

흑연 막대가 레이저 펄스로 증발되어 고온의 탄소 가스를 발생하며, 이어서 나노튜브로 응축된다. 수율은 최대 70%로 상당히 높은 편이며,

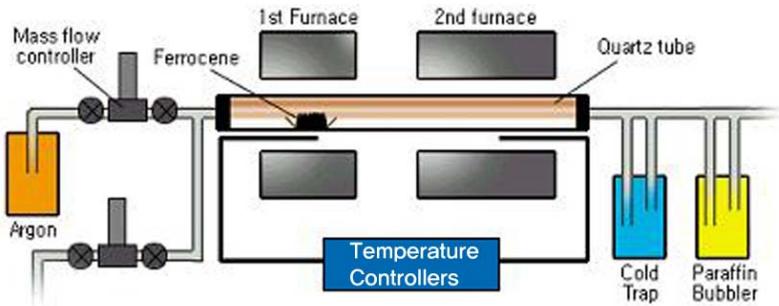


〈그림 2-6〉 레이저증착법의 구조도

주로 SWNT 합성에 활용되어 튜브의 직경을 제어할 수 있지만, 비용이 상대적으로 고가이다.

#### (4) 기상합성법(Vapor Phase Growth)

촉매입자와 반응기체가 반응기 안으로 연속적으로 주입되면서 탄소 나노튜브가 합성된다.  $C_2H_4$ , CO,  $CH_4$ ,  $C_2H_2$ , benzene 및 xylene 등의 탄화수소물질과 전이금속 촉매를 함유한 유기금속화합물인  $Fe(CO)_5$  혹은 Ferrocene 등을 반응로에 동시에 흘려줌으로써 CNT를 합성한다.



〈그림 2-7〉 기상합성법 장치도

#### (5) 기타

HiPCO 프로세스(high-pressure carbon monoxide)는 일산화탄소(CO) 가스가 고압에서 금속 촉매 전구체와 혼합되며, 이 촉매 전구체가 분해되어 활성촉매를 형성하고, 이로부터 나노튜브가 성장한다. 평균 직경 1.1 나노미터인 SWNT를 생성하며, 수율은 약 70%이다. 그 밖에도 전기분해법 및 Flame 합성법 등이 있다.

### 라. 환경, 건강, 안전성 문제

CNT의 구성 원소인 벌크 재료의 탄소는 무독성이지만 CNT 자체는

탄소의 다른 형태들과는 뚜렷이 구별되는 화학구조를 갖고 있어, 반드시 안전하다고는 말할 수가 없다. CNT가 인체에 유독한 증거로, NASA의 연구는 CNT를 쥐의 폐에 주입한 바 CNT가 카본블랙보다 더 유해하며, 장기적 흡입시 심각한 작업장 건강 위험물질로 간주되고 있는 석영 분진보다 더 유해할 수 있음을 시사한 바 있다. 또한, CNT는 화학적으로 튼튼하고 안정해 체내에서 파괴되거나 환경 중에서 박테리아에 의해 분해되기 어려운 구조를 갖고 있다. 이러한 위험성을 완화하기 위해 CNT 외부 표면에 다른 화학 그룹을 첨가하는 등 구조적 개질을 시도하는 연구가 진행되고 있다. 하지만, 아직까지는 CNT의 인체 유해성이나 환경 노출에 대한 문제가 꾸준히 제기되고 있는 상황이다.

## 2. 국내외 개발 동향

### 가. 국내외 연구개발 현황

1991년 처음 발견된 이후 지금까지 20,000편 이상의 논문이 발표되고, 전세계적으로 많은 연구가 진행되고 있다. <표 2-1>은 CNT에 관련된 주요 논문을 요약하였다.

<표 2-1> 탄소나노튜브 관련 주요 연구 논문

연도	논문제목	저자	저널	연구분야
1991	Helical microtubules of graphitic carbon	S. Iijima	Nature 354, 56 (1991)	Discovery of multi-wall carbon nanotubes
1992	Are fullerene tubules metallic?	J. W. Mintire, B. I. Dunlap and C. T. White	Phys. Rev. Lett. 68, 631 (1992)	Conductivity of carbon nanotubes
"	New one-dimensional conductors - graphitic microtubules	N. Hamada, S. Sawada and A. Oshiyama	Phys. Rev. Lett. 68, 1579 (1992)	"
"	Electronic structure of graphene tubules based on C60	R. Saito, M. Fujita, G. Dresselhaus and M. S. Dresselhaus	Phys. Rev. B 46, 1804 (1992)	"
1993	Structural Rigidity and Low Frequency Vibrational Modes of Long Carbon Tubules	G. Overney, W. Zhong, and D. Tománek, Z.	Z. Phys. D 27, 93 (1993)	Structural rigidity of carbon nanotubes

"	Single-shell carbon nanotubes of 1-nm diameter	S Iijima and T Ichihashi	Nature, 363, 603 (1993)	Synthesis of single-wall nanotubes
"	Cobalt-catalysed growth of carbon nanotubes with single-atomic-layer walls	D S Bethune, C H Kiang, M S DeVries, G Gorman, R Savoy and R Beyers	Nature, 363, 605 (1993)	"
1995	Unraveling Nanotubes: Field Emission from an Atomic Wire	A.G. Rinzler, J.H. Hafner, P. Nikolaev, L. Lou, S.G. Kim, D. Tománek, P. Nordlander, D.T. Colbert, and R.E. Smalley	Science 269, 1550 (1995)	Nanotubes as field Emitters
1996	Crystalline ropes of metallic carbon nanotubes	Andreas Thess, Roland Lee, Pavel Nikolaev, Hongjie Dai, Pierre Petit, Jerome Robert, Chunhui Xu, Young Hee Lee, Seong Gon Kim, Daniel T. Colbert, Gustavo Scuseria, David Tománek, John E. Fischer, and Richard E. Smalley	Science 273, 483 (1996)	Ropes of single-wall nanotubes
1997	Individual single-wall carbon nanotubes as quantum wires	SJ Tans, M H Devoret, H Dai, A Thess, R E Smalley, L J Geerligs and C Dekker	Nature, 386, 474 (1997)	Quantum conductance of carbon nanotubes
"	Storage of hydrogen in single-walled carbon nanotubes	A C Dillon, K M Jones, T A Bekkendale, C H Kiang, D S Bethune and M J Heben	Nature, 386, 377 (1997)	Hydrogen storage in nanotubes
1998	Synthesis of large arrays of well-aligned carbon nanotubes on glass	Z F Ren et al.	Science, 282, 1105 (1998)	Chemical Vapor Deposition synthesis of aligned nanotube films
"	Encapsulated C60 in carbon nanotubes	B.W. Smith, M. Monthieux, and D.E. Luzzi	Nature 396, 323 (1998)	Synthesis of nanotube peapods
2000	Unusually High Thermal Conductivity of Carbon Nanotubes	Savas Berber, Young-Kyun Kwon, and David Tománek	Phys. Rev. Lett. 84, 4613 (2000)	Thermal conductivity of nanotubes
"	Macroscopic Fibers and Ribbons of Oriented Carbon Nanotubes	Brigitte Vigolo, Alain Pénicaud, Claude Coulon, Cédric Sauder, René Pailler, Catherine Journet, Patrick Bernier, and Philippe Poulin	Science 290, 1331 (2000)	Macroscopically aligned nanotubes
2001	Engineering Carbon Nanotubes and Nanotube Circuits Using Electrical Breakdown	P.C. Collins, M.S. Arnold, and P. Avouris	Science 292, 706 (2001)	Integration of carbon nanotubes for logic circuits
"	Superconductivity in Ropes of Single-Walled Carbon Nanotubes	M. Kociak, A. Yu. Kasumov, S. Guéron, B. Reulet, I. I. Khodos, Yu. B. Gorbatov, V. T. Volkov, L. Vaccarini, and H. Bouchiat	Phys. Rev. Lett. 86, 2416 (2001)	Intrinsic superconductivity of carbon nanotubes

2000년까지는 단지 소수의 특허만이 등록되었으나, 그 후 이 분야의 특허출원이 폭발적으로 증가하였다. 현재까지 약 350건의 주요 특허가 등록되었으며 매년 수백건의 특허가 출원 중이다. 아직까지 전자 및 재료 분야가 많이 출원되고 있다. Hyperion의 재료관련 특허들의 특허권이 대부분 만료되어가는 시점이어서, MWNT에 의해 향상된 구조재료를 제조하려는 기업들에게 기회가 되고 있다.

〈표 2-2〉 탄소나노튜브 관련 핵심 특허

제목	특허번호	출원일자	특허권자	만료일	주요내용
Carbon fibrils, method for producing same and compositions containing same	US 4,663,230	1987, 5, 5	Hyperion Catalysis International Inc.	2004, 12, 6	MWNT를 구조 재료에 사용하는 최초 특허
Carbon fibers and method for their production	US 5,424,054	1995, 6, 13	International Business Machines Corporation	2013, 5, 21	아크방전법 나노튜브 합성에 관한 초기특허
Nanometer-scale microscopy probes	US 6,159,742	2000, 12, 12	President and Fellows of Harvard College	2019, 6, 4	나노튜브 팁이 장착된 현미경 탐침
Process for producing single wall nanotubes using unsupported metal catalysts	US 6,221,330	2001, 4, 24	Hyperion Catalysis International Inc.	2017, 8, 4	화학증착법 나노튜브 합성
Carbon nanotube structures made using catalyst islands	US 6,346,189	2002, 2, 12	The Board of Trustees of the Leland Stanford Junior University	2018, 8, 14	반도체 기판상에서 나노튜브의 성장 및 전자소자 이용 관련 특허
Gas-phase nucleation and growth of single-wall carbon nanotubes from high pressure CO	US 6,761,870	2004, 7, 13	William Marsh Rice University	2022, 7, 1	CNT의 HiPCO 합성에 관한 리처드 스몰리의 특허, CNI에 라이선스됨

주요 출원인을 살펴보면 탄소나노튜브의 원천특허를 갖고 있는 Hyperion Catalysis사, 탄소나노튜브 소자 기술을 중점적으로 연구개발하고 있는 IBM, 스몰리의 SWNT 제조기술을 중심으로 한 Carbon Nanotechnologies Inc. 등 미국의 주요 기업의 연구자들과 Stanford 대학의 H. Dai와 삼성종합기술원 출신의 최원봉 Florida International University 교수 등이 핵심 인물로 꼽히고 있다.

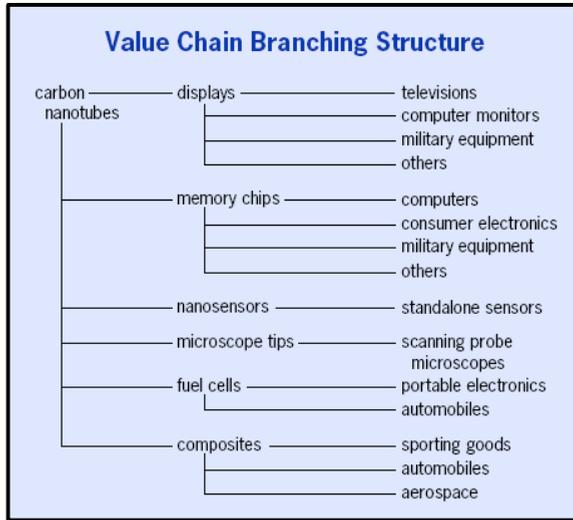
(표 2-3) 탄소나노튜브 관련 핵심 연구자<sup>1)</sup>

이름	소속 및 직위	특징
Michael Laine	Hyperion Catalysis의 개발 책임자	MWNT 응용개발 주도
Hongjie Dai	스탠포드대학 교수	주로 화학증착법을 통하여 표면에서의 정렬된 탄소나노 튜브 아키텍처 신합성법 연구
Stephane Robert	Raymor Industries의 CEO	CNT 제조를 모색하는 캐나다 재료기업의 대표
Art Swift	Unidym의 대표	CNT 관련 특허권에 가장 큰 영향력을 미침
Shuji Tsuruoka	Mitsui의 수석관리자	Mitsui에서 MWNT의 대량생산을 이끌고 있음. NIOSH와 CNT의 건강, 안전에 관한 작업을 진행
Phaedon Avouris	Manager, Nanoscale science and technology group at the IBM T.J. Watson research Center	나노튜브 트랜지스터 개발 연구 주도
Won-Bong Choi	Director of Center for Nanomaterials and Devices and Professor of Mechanical and Materials Engineering, Florida International University	한국 삼성종합기술원(SAIT)에서 최초로 천연색 FED 개발

탄소나노튜브는 기계적, 전기적, 열적 특성에 의해 매우 다양한 분야에 응용될 수 있는 꿈의 신소재로 인식되고 있다. 초기에는 전기적 특성을 이용한 전자소자, 디스플레이, 메모리 칩 등에 관한 응용 연구가 주를 이루었다. 최근에는 바이오 분야와 융합된 센서 분야 및 에너지 문제 해결을 위한 연료전지와 태양전지 분야, 일상 용품에 쉽게 적용할 수 있는 복합재료 분야 등 적용 분야가 매우 광범위하게 확대되고 있다.

1) the Nanotech Report 5th edition, Lux Research Inc., 2007

〈표 2-4〉 탄소나노튜브의 응용분야<sup>2)</sup>



〈표 2-5〉 탄소나노튜브의 용도<sup>3)</sup>

분야	용도	비고
전자/콘덴서	연료전지용 수소저장소재 리튬이온전지의 전극재료 전기이중층 콘덴서재료 고성능 축전지	고성능 축전지의 장수명화
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 나노휩스커, 나노로드,	재료의 요철부분 위를 씌워 원자단위로 관찰
회로소재	반도체회로 등의 초미세가공소재에 사용	
바이오/의약	바이오센서, 주사침, 캡슐 (약의 생체 수송과 방출)	
복합재료	수지-세라믹-금속의 강화 전도성복합재, 반도체 플라스틱, CC복합재료	복합재료의 정전방지, 경량화, 고강도화, 수지의 성능향상

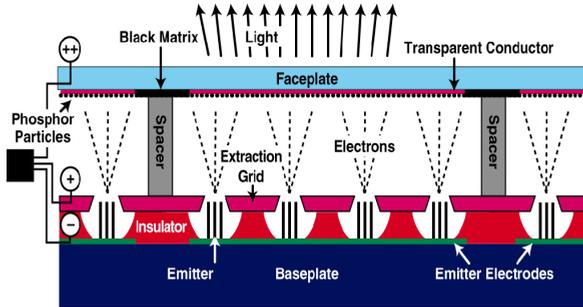
2) the Nanotech Report 5th edition, Lux Research Inc., 2007

3) 일본 산업기술총합연구소 (2001)

## 나. 응용분야

### (1) 전계방출 디스플레이

전계방출표시소자(FED)는 차세대 정보디스플레이 소자로 크게 주목되고 있으며, 특히 이중벽 나노튜브(DWNT)가 가장 유망한 디스플레이 재료로 기대되고 있다.



〈그림 2-8〉 전계방출디스플레이 구조도

### (2) 고분자 복합재료

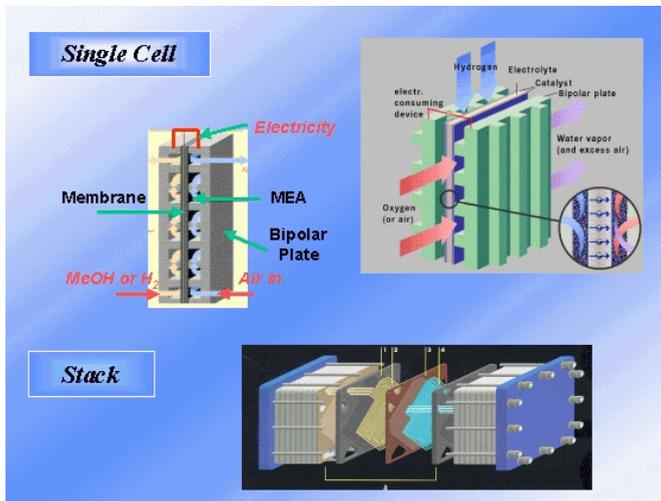
탄소나노튜브는 재료에 손상을 주지 않고 강도와 전도성을 증가시킬 수 있다. Hyperion catalysis의 MWNT 초기 용도는 GM 자동차의 플라스틱 부품에 첨가해 정전기의 축적을 방지하고, 부품을 전도성으로 만들어 정전도장이 가능하도록 하는 것이었다.



〈그림 2-9〉 고분자 복합재료 응용

### (3) 수소저장 및 연료전지

탄소나노튜브 구조가 갖는 무수한 빈 공간을 통해 수소 저장기능을 크게 향상하고 이를 연료전지 등에 이용하는 것이 가능하다. 1997년 미국 IBM의 Bethune 등에 의해 처음 시도되었고, 미국 에너지부(DOE)에 의해 전략적인 연구가 추진되고 있다.

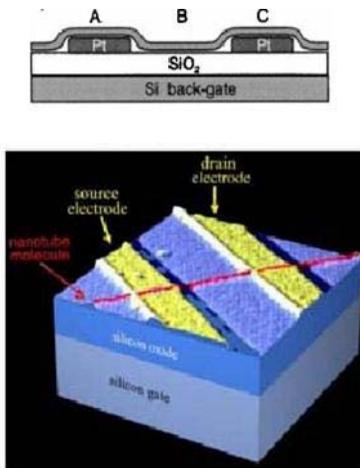


〈그림 2-10〉 연료전지 구조와 응용

### (4) 단전자 트랜지스터 및 메모리소자

탄소나노튜브의 직경 및 감긴 형태에 따라서 전기 특성의 제어가 가능한 단일전자 트랜지스터(Single electron transistor) 제조가 가능하다.

또한 직경이 수십 nm인 튜브를 성장하거나 콩깍지 형 나노튜브(Peapod)를 통해 현재의 실리콘 소자를 대체할 수 있는 Tera급( $10^{12}$ )의 메모리 소자를 제조할 수 있다. 매사추세츠의 신생기업인 Nantero는 나노튜브 기반의 비휘발성 RAM(nonvolatile random access memory)을 제조하고 있으며, IBM은 개별 나노튜브로부터 첨단 회로를 조립하는 응용 연구를 수행하고 있다.



〈그림 2-11〉 탄소나노튜브 소자

### (5) Mechatronics 및 이미징

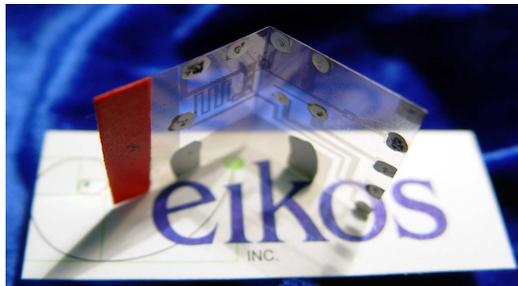
나노 수준의 측정 및 분석에도 탄소나노튜브가 활용되고 있는데, 일례로 원자힘 현미경(atomic force microscope, AFM) 탐침 팁에 나노튜브를 사용하면 보다 예리한 팁을 제공할 수 있어 해상도를 향상시킬 수 있다. 라이스 대학의 리차드 스몰리(Richard Smalley)와 하버드 대학의 찰스 리버(Charles Lieber)는 AFM 및 STM(scanning tunneling microscopy)에 나노튜브 팁 탐침을 이용한 선구자들이다.

## (6) 센서

전자들은 CNT의 표면을 따라 이동하기 때문에 분자들이 표면에 부착되면 전도도가 변하는데, 이는 나노튜브를 저전력을 사용하는 극히 민감한 센서를 제작하는 데 사용할 수 있음을 의미한다. 스탠포드 대학의 Hongjie Dai는 가스 및 생체분자용 나노튜브 기반 센서를 연구하고 있으며, 캘리포니아 Bay area의 Nanomix는 이러한 기술의 상업화를 시도하고 있다. 또한, 가스 흡착성 가스센서 혹은 탄소와 생체 조직과의 친화성을 이용한 의료용 장치의 부품에도 적용이 가능하다.

## (7) 전도성 투명전극

액정디스플레이(LCD), 터치스크린 등에 기존의 인듐주석(ITO) 전극을 대체하여 구부릴 수 있는 투명한 전극으로 활용될 수 있다.



〈그림 2-12〉 Eikos사에서 제작한 전도성 투명전극

## 탄소나노튜브의 응용

### 1. 개요

탄소나노튜브(Carbon Nanotube, CNT)는 그 재료적 우수성으로 인하여 나노기술 분야에서 가장 많이 언급되는 재료이다. 그 강도가 강철의 인장 강도보다 수백 배 강하고, 열전도도가 다이아몬드 보다 뛰어나며 전기 전도도가 구리와 같으며, 전류가 구리보다 더 많이 통과될 수 있으며, 그 이름에 나와 있듯이 나노 크기의 소재이므로 현재 나노 기술 분야의 핵심 재료로 이용되고 있다. 이러한 우수성을 가지고 있는 나노 기술의 핵심 재료를 어떤 회사는 매년 수백 톤의 양을 양산할 계획이라고 발표하는 반면에 다른 회사는 정리된 몇 그램의 소량 생산에도 극히 어려움을 겪고 있는 것이 탄소나노튜브와 관련된 복합적인 현실이다. 실제로 탄소나노튜브는 이들 벽의 형태, 재료적 특성 및 길이 등에 의하여 다양한 종류가 존재하고 있으며, 이들의 생산량, 가격 및 특성의 변화들이 이들의 응용을 다양화 시키고 있다. 이러한 점들을 고려하여 보면, 탄소나노튜브의 영향은 이미 현실에 나타나고 있으며, 이 재료의 잠재성이 실현될 경우에는 수천만 달러의 시장이 형성될 전망이다.

나노소자 기술은 앞으로 세계 시장을 지배하게 될 전자 관련 산업의 기술 중심에 위치해 있다. 멀지 않은 미래의 디지털 컨버전스 시대에는 나노소자를 이용한 PC, 가전, 이동통신, 바이오 칩, 항공우주, 국방에 이르기까지 전 산업분야의 두뇌와 핵심 저장장치들은 나노소자로 구성되며 이와 관련된 공정 기술이 그 생산기술을 주도할 것이다. 따라서

세계적인 기업들은 “나노반도체 기술 개발과 상용화를 가장 먼저 장악하는 회사가 향후 미래 전자 산업을 지배할 것이다.” 라는 모토를 내걸고 기업의 사활을 건 경쟁을 벌이고 있다. 이러한 헤게모니 선점을 위한 기술 개발의 현장 중심에는 탄소나노튜브가 위치하고 있다. 탄소나노튜브를 이용한 전자소자는 그 재료의 우수한 장점과 나노크기의 재료라는 특성으로 초고속, 저전력 소비, 저발열량 및 고밀도와 같은 장점이 있다고 보고되고 있다. 따라서 세계적인 전자소자 관련 업체들이 그 개발에 박차를 가하고 있다.

탄소나노튜브의 응용 기술 분야 중 디스플레이는 그 기술의 상용화 분야에서 가장 주목 받고 있는 분야라고 할 수 있다. 탄소나노튜브를 사용한 전계 방출 디스플레이(Field Emission Display, FED) 기술을 이용한 대화면 고정밀 벽걸이형 텔레비전은 CRT에 비하여 저소비전력, 고화질, 고휘도 및 광시야각 이라는 장점이 있다. 따라서 탄소나노튜브-FED는 30~40인치 급의 저가격, 고화질의 중대형 디스플레이 미래에 크게 각광을 받을 수 있을 것으로 기대 된다. 현재 탄소나노튜브-FED의 기술개발을 위해서는 탄소나노튜브 분리□정제기술과 같은 재료에 대한 문제점과 화소 내부 및 화소들 사이에 방출되는 전류의 균일성을 개선하고 구동전압을 저감하기 위한 공정기술 개발이 요구된다. 이러한 화상 이미지의 안정성과 내면균일성을 개선시키기 위한 전계 방출원(Field Emitter)의 기술개발 등과 같은 요소기술들과 제조를 위한 공정기술 등이 해결 된다면 소비자들은 탄소나노튜브-FED라는 전자제품을 통해서 또 다른 나노기술의 혜택을 누릴 수 있게 될 것이다.

탄소나노튜브는 이상적인 일차원 구조의 형상으로서, 원자들이 구조체를 따라 이동하기가 수월하므로, 구리보다 뛰어난 전기 전도도를 지니고 있다. 또한 이음매가 없는 구조는 기계적으로 뛰어난 특성을 지니고 있고 뛰어난 열전도도, 탄성을 및 기계적인 강도를 지니고 있다. 이러한 탄소나노튜브의 장점을 전기적, 물리적, 화학적 특성을 이용하려는 많은 연구가 여러 분야에서 다양하게 응용이 시도되고 있으나 탄소

나노튜브 단독으로는 원하는 물성을 얻을 수 없다. 이에 따라 탄소나노튜브의 장점과 금속, 세라믹 같은 물질의 장점을 이용한 탄소나노튜브 복합소재로의 응용 방법이 연구되고 있다. 탄소나노튜브 복합소재는 내열성 및 내화학성과 같은 고분자 고유의 성질을 유지하면서 탄소나노튜브 자체의 우수한 물성을 활용하여 낮은 표면저항을 가지면서 열전도성, 투명성, 고강도, 난연성, 광택성, 내화학성 특성 등을 복합적으로 구현할 수 있는 제품을 만들 수 있다. 따라서 탄소나노튜브는 나노복합재료 분야에서의 이상적인 충전제(filler)로 많은 기대를 모으고 있으며, 현재 이를 활용한 분야의 사업이 탄소나노튜브의 응용 분야 중에서 가장 활발하게 진행되고 있다.

에너지 저장 소재와 관련해서는 전 세계적으로 나노기술에 대한 연구개발이 집중되고 있어서, 복합나노구조형 플라스틱 전지와 관련된 핵심기술들이 빠르게 개발될 것이라 판단된다. 탄소나노튜브의 에너지 분야 응용기술로는 연료전지용 수소저장 기술이 산업화에 파급효과가 가장 클 것으로 보인다. 수년 내에 실용화 보급될 전기자동차에 배터리와 함께 부하조절 기능의 초고용량 캐패시터가 사용될 것이며, 특히 하이브리드 자동차에는 배터리를 대신하여 초고용량 캐패시터만 장착될 것으로 예상된다. 그리고 21세기 초에는 배터리 수준의 에너지 밀도를 가지는 초고용량 캐패시터가 전기자동차 이외의 여러 분야에서도 실용화 보급될 것으로 기대된다. 현재는 기술 정립의 단계이므로 향후 많은 연구가 필요해, 실용화까지는 상당한 시간이 걸릴 것으로 보인다. 하지만 대체 에너지의 중요성을 고려하면 에너지 소자에 대한 연구는 국가 전략적으로 활성화될 가능성이 높다.

탄소나노튜브의 넓은 표면적, 화학적 안정성, 높은 가스 흡착성, 나노 크기 직경 등의 장점 때문에, 이러한 특성을 활용한 가스센서와 나노바이오 센서의 연구가 활발하게 진행되고 있다. 특히 탄소나노튜브를 가스센서로 적용하여  $O_2$ ,  $NO_2$ ,  $NH_3$  신경가스 등을 성공적으로 검출한 연구들이 보고되었다. 신기술의 발전과 융합기술의 중요성이 강조되면

서 새로운 나노기술을 이용한 탄소나노튜브 나노 바이오센서는 기존의 바이오센서가 갖는 특성과 나노 구조체의 독특한 성질을 결합하여 센서의 감도 특성을 극대화함으로써 작동에 요구되는 샘플의 양을 극소화 할 수 있게 되어 비침습적(non-invasive) 혹은 최소 침습적(minimally invasive)인 방법으로의 사용을 가능하게 해준은 물론이고, 선택된 위치에서 매우 극소적인 분석 물질의 농도 변화에 대한 실시간 감시를 가능하게 해줄 것으로 기대된다.

## 2. 탄소나노튜브 나노전자소자

### 가. 기술 개요

탄소나노튜브 반도체는 상온에서 실리콘보다 70배 이상 우수하고 빠른 특징이 보고되고 있다. 삼성종합기술원은 지난 2001년 수직형 탄소나노튜브 FET(Field Effect Transistor)를 개발하여 세계적으로 큰 주목을 받았다. IBM은 2002년 실리콘 반도체보다 특성이 우수한 탄소나노튜브 반도체를 개발하였고 이를 토대로 2005년까지 시험생산을 거쳐 10년 이내에 상용화할 계획을 발표하였다.

삼성SDI는 탄소나노튜브를 이용한 전계방출디스플레이(Field Emission Display, FED)에서 일본을 앞지르고 있으며 하이닉스는 MRAM용 MR 소자, 소재 및 단위공정을 개발했고, 단전자 소자를 이용한 회로 기술연구를 진행하고 있다. 또 LG전자도 FED 및 Nano Data 저장시스템(NDSS)을 개발하여 나노 전자 소자시대에 대응하고 있다.

국내 산업이 반도체 및 전자산업 분야에서 계속적인 우위를 유지하기 위하여 우수한 미래 전자소자기술의 확보는 필수적이며, 탄소나노튜브 전자소자 기술은 그 중의 핵심 기술이라고 할 수 있다. 그러나 본 기술이 성숙되고 상용화되기 위한 재료의 합성, 공정처리 및 응용과 관련되어 여러 장애물들이 산적해 있다.

탄소나노튜브를 이용한 나노전자소자 개발은 탄소나노튜브가 도체와 반도체의 성질을 지닌 나노 크기의 재료로서 전자의 이송이나 발열에 있어서 기존의 물질에 비해 월등히 우수하므로 나노기술이 봄을 이룬 초기에 그 이용의 산업 응용과 관련하여 많은 기대를 모은 분야이다. 그러나 현재 전자소자의 소재로서 탄소나노튜브는 초기의 기대와는 다르게, 금속성과 반도체 성질의 나노튜브들의 분리 합성 및 분류기술과 더불어 그들의 직경을 제어하는 기술의 부족으로, 이론과는 달리 현실적 공정상의 nano manipulation 기술, 정렬 기술, 분산 기술 등 여러 험난한 문제들에 직면해 있다. 인내심을 기반으로 현재의 장애 요소들을 극복한다면 나노튜브전자소자 기술은 다양한 소자의 실용화 기술을 앞당기는 핵심기술이 될 것으로 전망된다.

## 나. 나노 전자소자로서 탄소나노튜브의 재료적 특성

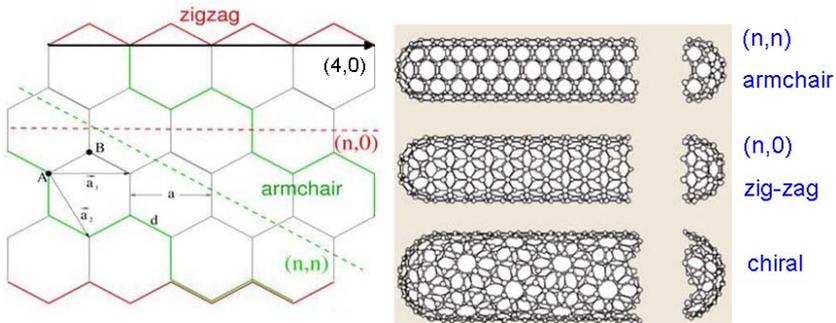
탄소는 자연 상태에서 평면 구조를 나타내는 흑연(graphite)의 형태나 3차원 망상 구조인 다이아몬드와 같은 입체 형태로 존재하고 있다. 그러나 화학적 합성기술의 발달로 Smalley와 그의 연구 그룹들은 풀러렌(Fullerene)이라고 불리는 축구공 형태의 탄소 동소체를 합성하고 그 공을 인정받아 1996년 노벨화학상을 수상하였다. 그 후 일본 NEC의 Iijima는 1991년 흑연판이 둥글게 감긴 형태의 속이 비어 있으며 긴 세장비(aspect ratio)인 튜브형 풀러렌을 합성하여 나노 기술의 핵심 소재인 탄소나노튜브의 시대를 열었다.

탄소 나노튜브에서 하나의 탄소원자는 3개의 다른 탄소원자와 결합되어 그 흑연 판이 나노 크기의 직경으로 속이 빈 튜브 형태로 둥글게 감긴 상태로 그 표면은 육각형의 벌집무늬를 지니고 있다. 이러한 외형의 탄소나노튜브는 흑연 판이 감기는 각도와 감긴 직경에 따라 금속과 같은 전기적 도체가 되기도 하고 또 전기가 잘 안 통하는 반도체가 되기도 하는 소재이다. 그리고 이들이 말려진 벽의 겹 수에 따라 단일벽

나노튜브(Single-wall nanotube, SWNT), 다중벽 나노튜브(Multi-wall Nanotube, MWNT)로 구분한다.

탄소나노튜브는 나노크기를 지니며 직경이나 감긴 형태에 따라 전기적 성질이 달라지며, 실리콘처럼 반도체성을 띤다는 사실은 새로운 나노 소자의 훌륭한 후보감으로, 현재의 실리콘 소자를 대체하여 테라급의 초고집적 메모리 소자를 만들 수 있을 것으로 예상되고 있다.

탄소나노튜브는 수 나노미터의 직경을 지닌 반면에 그 길이는 수 마이크로미터 이상으로, 세장비(aspect ratio)가 그 직경에 비하여 300~1000 이상으로 매우 크며, 그 구성 탄소들이 이음매가 없이 연속적으로 연결되어 있어 이상적인 1차원 구조의 탄소 재료라고 할 수 있다. 따라서 적은 에너지 전달 손실을 지닌 나노 크기의 작은 소자로 빠른 동작 특성을 지닌 소자로서의 가능성을 지니고 있는 재료이다.



〈그림 3-1〉 단일벽 탄소나노튜브의 구조

탄소나노튜브의 전기적 물성은 탄소 구조의 모습과 튜브의 직경에 따라 결정이 된다. <그림 3-1>과 같이 평면위서 둥글게 말린 육각형 벌집 모양이 튜브 길이의 축 방향으로 armchair 형의 형태로 말려 있을 경우에는 금속성의 나노튜브가 되며, 이 방향으로 지그재그(zig-zag)형으로 말려 있으면 반도체성의 나노튜브가 된다. 그리고 이러한 반도체성 나노튜브의 경우 에너지 갭은 그 직경에 반비례하여 나타난다.

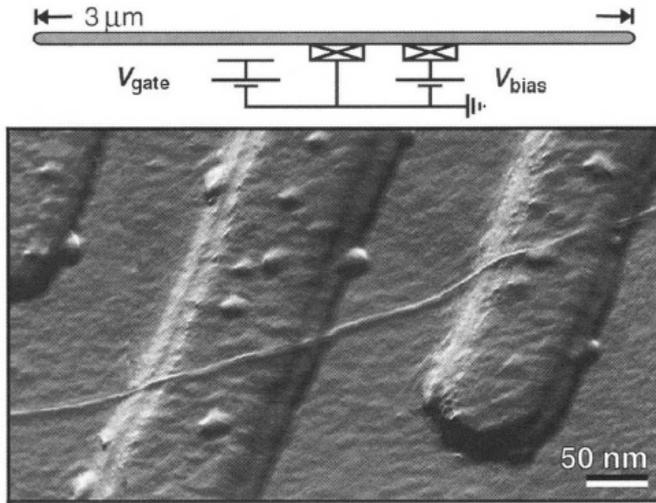
탄소나노튜브들은 그들의 직경에 따라서 특이한 가전대와 전도대 세트가 있기 때문에 직경에 따라 에너지 갭이 매우 다양하게 나타난다. 예를 들어, 가장 작은 직경을 갖는 나노튜브는 에너지적으로 멀리 떨어진 매우 적은 수의 상태들을 갖는 반면, 나노튜브의 직경이 증가할수록 좀더 많은 상태들이 허용되고 상태간 간격도 줄어들게 된다. 이와 같이 직경이 다른 나노튜브들은 금속처럼 영에 근접하는 정도의 밴드 갭부터 실리콘 정도의 갭을 갖는 것도 있고 혹은 이들 사이의 값도 가질 수 있다. 따라서 탄소나노튜브는 직경에 따라 다양한 에너지 밴드 갭을 지닐 수 있으므로 이러한 특성과 더불어 나노 크기를 가져 나노소자의 building block이 될 수 있다는 점과 그 크기가 양자역학의 지배를 받는 영역이라는 점은 탄소나노튜브를 활용한 여러 미세 전자소자들의 탄생이 가능하게 하는 특성이라고 할 수 있다.

## 다. 탄소나노튜브 트랜지스터

탄소나노튜브를 이용한 최초의 트랜지스터는 금속성 SWNT를 이용하여 1997년 Tans은 단전자 트랜지스터 (single electron transistor, SET)를 개발하여 Nature 지에 소개하였다.<sup>4)</sup> 이들은 저온에서 electrical quantum wire 사용한 SWNT의 물성을 측정한 결과, 드레인-소오스 바이어스 ( $V_{bias}$ )가 영이 되는 근처에서 전류가 영이 되는 일종의 전압 ‘갭(gap)’이 나타나고 전압이 증가함에 따라 전류가 계단식으로 증가하는 현상을 실험적으로 관측을 하였다.

---

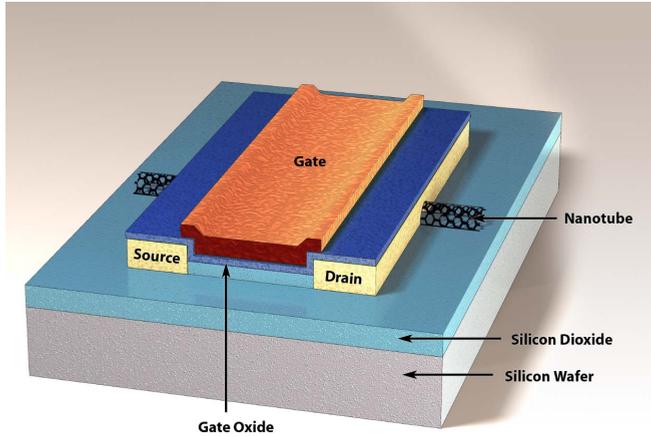
4) S. J. Tans, M. H. Devoret, H. Dai, A. Thess and R. E. Smalley, "Individual single wall carbon nanotubes as quantum wires", Nature 386, 474, 1997



<그림 3-2> Si/SiO<sub>2</sub> 기판위에 형성된 백금전극 위에 얹혀진 SWNT로 구성된 단전자 트랜지스터의 AFM 이미지 사진과 그 구조

그 후 상온에서 동작하는 최초의 탄소나노튜브 p-FET(Field Effect Transistor)가 1998년 Dekker 그룹에 의하여 Nature 지에 보고가 되어 실리콘기반 트랜지스터 기술의 대안으로 주목받게 되었다.<sup>5)</sup> 탄소나노튜브 FET는 <그림 3-3>에서와 같이 기판에 형성된 탄소나노튜브를 트랜지스터의 채널(Channel)로 하여 탄소나노튜브의 양 끝단에 금속 전극을 부착하여 전자(Electron)나 전공(Hole)의 소스(Source)와 드레인(Drain)을 게이트(Gate) 절연막과 게이트를 순차적으로 형성한다. 이렇게 구성된 통상의 반도체성 SWNT는 대기 중에서 정공이 주요 전하 운반자가 되며, 전류 밀도는 게이트 전극에 가하는 게이트 전압의 크기에 따라 변조되고, 특히 음의 게이트 전압 크기가 증가할수록 전류가 증가하는 전형적인 p-형 반도체의 특성을 보인다.

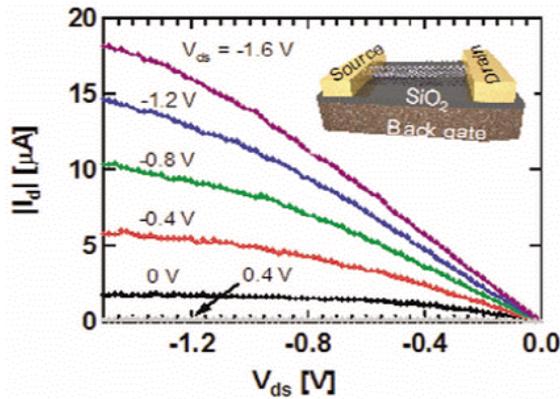
5) S.J. Tans, M.H. Devoret, H. Dai, A. Thess, R.E. Smalley, L.J. Geerligs, C. Dekker, "Electronic structure of atomically resolved carbon nanotubes," Nature 386, 474, 1997



〈그림 3-3〉 Schematic cross section of IBM's CNFET (carbon nanotube field effect transistor)

자료 : IBM

탄소나노튜브를 이용한 n-형 FET는 스탠포드 Dai 그룹에 의하여 1999년 발표되었다. 이 그룹은 실험에서는 SWNT 채널의 일부에 n-형 FET 특성이 가능하도록 K-원소를 도핑시켜 n-p접합을 만들었다. 이들은 우연히 불균질하게 도핑된 K-원소들이 전하 운반자의 연속적인 흐



〈그림 3-4〉 600 nm 길이와 1.8 nm 직경을 가지는 탄소나노튜브 FET의 후면 게이트 구조 및 전기적 특성

를 방해하는 장벽을 형성하게 되고, 결국 도핑 길이에 해당하는 부분이 고립된 양자 점처럼 거동하여 SET 특성과 공명 터널 트랜지스터를 보인다고 보고하였다.

트랜지스터의 채널(Channel)이 작아지게 되면 캐리어(Carrier : 전자나 정공을 통합하여 지칭함)가 지날 수 있는 경로도 작아지게 되어 캐리어의 이동도(Mobility)가 큰 물질의 선택이 필수적이다. 이동도가 증가되기 위해서는 개별 캐리어가 이동하는 매질이나 캐리어 상호간에 산란이 억제되어야 하고, 이를 물리학에서는 발리스틱 전자수송(Ballistic Transport)이라고 표현한다. 트랜지스터 응용에서 크기의 미세화 관점 외에 탄소나노튜브의 장점은 원자구조의 결함을 제거하는 정도에 따라 원리적으로 발리스틱 전자수송이 가능하다는데 있다. 실제로 탄소나노튜브 트랜지스터에서 측정된 캐리어 이동도는 실리콘에 비해 10배 이상 크고, 효과적으로 결함을 제거하는 기술의 발전으로 더 큰 이동도를 기대할 수 있다.

## 라. 향후 전망

탄소나노튜브는 나노 크기의 소재이므로 그 크기적인 특징으로 인하여 나노 소자의 building block이 될 수 있을 뿐만 아니라 재료적인 특성으로도 1차원 도체 또는 반도체의 특성을 지니고, 접촉저항 및 나노튜브의 길이에 따라 다양한 물성을 보이므로 응용 측면에서 볼 때, 작은 크기와 빠른 동작, 적은 에너지 손실의 나노소자로서 주목을 받아왔다.

나노튜브로 동작하는 메모리칩은 저 전력 소비와 낮은 비휘발성과 높은 저장밀도를 제공하며 현재보다 1,000배 이상 빠른 속도의 프로세서를 제공할 수 있을 것으로 기대된다.

현재 나노 전자소자 제작용 소재로서 탄소나노튜브는 달리 금속성과 반도체 성질의 나노튜브 분리 합성 및 분류기술과 더불어 그들의 직경을 제어하는 기술 부족과 더불어 나노튜브를 원하는 위치에 놓이도록

위치를 제어하는 nano manipulation 기술, 정렬 기술, 분산 기술 등 공정 상으로도 여러 험난한 문제들에 직면하여 있다.

탄소나노튜브는 소재의 훌륭함에도 불구하고 만들어진 소재자체를 Top down 방식으로 패터닝하거나 조립하는 일은 거의 불가능하다. 그러나 모든 연구자가 직경이 1nm인 탄소나노튜브를 실리콘웨이퍼 상의 미세 선을 대체할 수 있으면 기존의 리소그래피 기술로서는 도달할 수 없다고 판단되는 테라비트(TeraBit) 급의 메모리를 구현 할 수 있을 것으로 기대한다. 특히 탄소나노튜브가 가지고 있는 물리적, 전기적, 기계적 성질은 기존 리소그래피 기술로 가공하여 만들 수 있는 어떤 소재에 비해서도 뛰어난 성능을 가지고 있으므로 이를 이용한 나노소자를 제작하는 것은 꿈의 기술로 여겨지고 있다.

탄소나노튜브가 지니고 있는 우수성과 그 높은 잠재력을 나노소자에서 구현시키기 위해서는 그 활용 연구의 역사와 노력이 아직은 미흡하다는 점을 충분히 인식하여, 지속적인 인내심과 노력으로 여러 당면한 기술적인 난제들을 극복하여야만 할 것이다.

탄소나노튜브를 활용한 나노소자 개발 기술이 성숙되기 위해서는 적어도 10년 이상의 시간이 더 걸릴 것으로 전망된다. 하지만 나노튜브전자소자, 특히 집적화를 포함하는 트랜지스터, 배선기술은 탄소나노튜브 소자 전 분야에 활용이 되는 공통 기반 기술로서, 본 기술의 발전이 다양한 소자의 실용화 기술을 앞당기는 핵심기술이 될 것으로 전망된다.

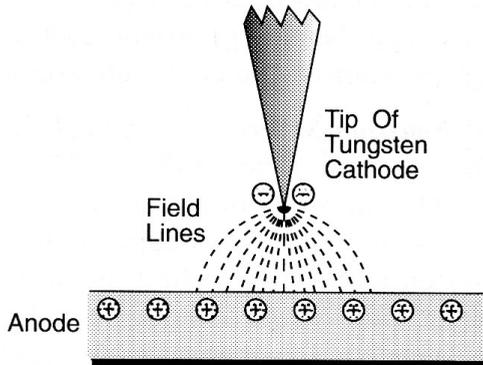
### 3. 탄소나노튜브 전계방출 디스플레이

#### 가. 기술 개요

전계방출 디스플레이(Field Emission Display, FED)는 음극선관(Cathode Ray Tubes, CRT)의 화상품격과 PDP의 평판특성을 동시에 가지는 영상소자로서 디스플레이 디바이스 면으로 형성된 전자방출원인

캐소드(Cathode)에서 방출된 전자가 형광체에 부딪혀 발광하는 CRT 원리와 동일한 구도로서, 이론적으로는 PDP, TFT-LCD 대비 20~30% 원가경쟁력을 보유한 디스플레이 장치이다.

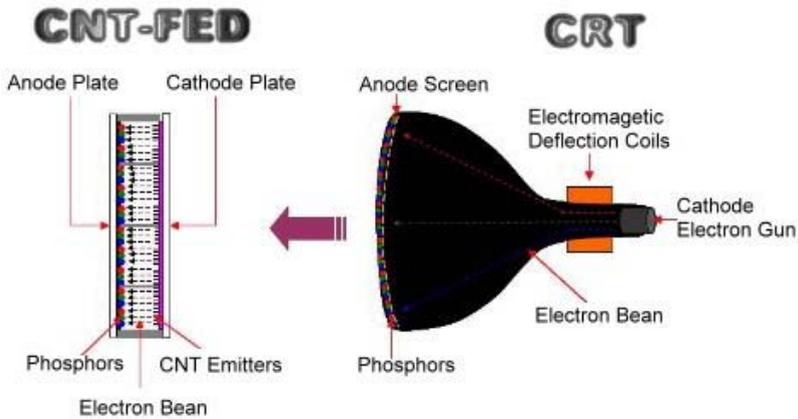
FED의 기본 구조는 음극기판 상에 화소마다 배열된 전계전자 방출원에서 방출된 전자가 그 화소마다 배열된 양극기판 상에 R, G, B 3색의 형광체를 여기발광시켜 화상을 형성하는 것이다. 이들의 구현 원리는 전계방출(Field Emission)이라는 현상이며, 전계전자 방출이란 고체 표면에 약  $10^9$  V/m 정도의 강한 전계를 인가하면 전자를 고체 안에 고착시키고 있는 표면 포텐셜 장벽이 얇아지면서 터널효과에 의해 상온에서도 전자가 진공 속으로 방출되는 현상이다. 이와 같은 고(高)전계를 실현하기 위해 전계방출형 전자원은 선단이 예리하게 뾰족한 형상의 음극이 사용된다(<그림 3-5>).



(그림 3-5) 고전압계(high electric field)에서 예리한 선단 형상을 지닌 음극선(cathode) 전자방출원을 이용한 전계전자방출 현상 개략도

FED는 CRT 기술과 유사하나 디스플레이 장치의 두께를 수 mm 정도로 줄일 수가 있으며, 단일 전자총(electron gun)을 이용하는 화상을 형성하는 CRT와는 달리 각각의 형광 점 뒤에 정교한 금속성 팁의 array

를 전계전자 방출원을 위치시켜 충분한 전계방출원을 확보할 수 있다 (<그림 3-6>). 그러므로 FED는 전계방출원인 에미터(Emitter) 들이 손상되어 고장난 화소가 존재할 지라도 LCD에 비하여 우수한 화질을 제공할 수 있는 장점 뿐만 아니라 전력의 소비적 측면에 있어서도 40인치 형 FED는 LCD나 PDP에 비하여 약 3배가량 적을 것으로 예측되고 있다.



<그림 3-6> CRT와 탄소나노튜브-FED 구조 원리

차세대 FED는 고화질, 고휘도의 넓은 시야각, 제조 공정의 단순화, 선명한 동영상의 재생 능력, 강한 내구성 및 저소비전력 등을 요구하고 있으며 이러한 특성은 전계방출원의 특성에 크게 의존하고 있다. 최근 활발히 연구되고 있는 탄소나노튜브는 나노 기술의 핵심 재료일 뿐만 아니라 그 재료의 형상과 전기적인 특성으로 인하여 기존의 에미터보다 매우 우수한 차세대 FED의 전계방출원 재료로서 크게 각광을 받고 있을 뿐만 아니라 산업계와 학계에서 이러한 복잡한 차세대 디스플레이의 특성을 만족시킬 뛰어난 후보로서 손꼽히고 있어 이와 관련된 활발한 연구와 상용화 기술들이 진행되고 있다.

## 나. FED 소자로서 탄소나노튜브의 재료적 특성

탄소나노튜브는 수십 nm인 직경에 비하여 수십  $\mu\text{m}$  길이를 이루고 있어 300~1000 이상의 높은 세장비(aspect ratio)를 지니므로 기존의 금속 전자방출원이 약 10~100 정도의 세장비에 비하여 그 구조적으로 뾰족한 형상이므로, 고(高)전계를 실현하기 위해 뛰어난 전계방출형 전자원의 형상을 지니고 있다.

FED의 개발에 필요한 핵심기술은 전자를 많이 잘 방출하는 에미터 팁(Tip)의 가공기술과 성능 안정성 유지이다. 전자를 쉽게 방출하려면 팁의 끝이 뾰족하여야 하므로, 일반적인 금속이나 실리콘 혹은 고강도의 금속류로 세밀한 공정을 거쳐 팁을 만들어 사용할 수 있으나 이미 수명과 안정성에 문제가 있는 것이 확인된 반면, 탄소나노튜브는 별도로 뾰족하게 만드는 공정이라든지 뾰족한 정도가 균일하도록 하는 공정 등이 거의 불필요하다는 장점이 있다.

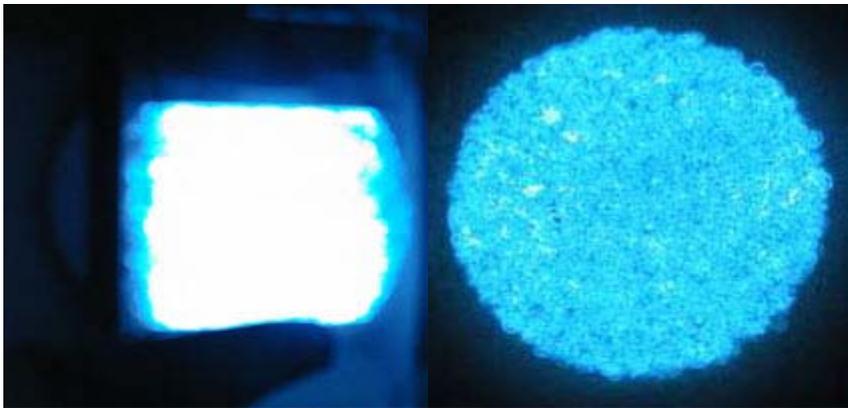
탄소나노튜브는 화학적으로 안정적이며 기계적으로도 강인하고 전기적 전도도가 우수하므로 다량의 전류를 흘려보낼 수 있다. 탄소나노튜브는 고전압계에서  $10\text{mA}/\text{cm}^2$  전류밀도와  $0.8\text{V}/\mu\text{m}$ 의 낮은 작동전압 특성들이 보고되고 있는 등 전기적 전도도가 우수하므로 다량의 전류를 흘려보낼 수 있어, 전계전자 방출 재료로서 유리한 물리 화학적 성질을 갖추었다. 따라서 탄소나노튜브는 다른 재료들보다도 낮은 전압에서 전자를 방출시킬 수 있으며 손상 없이 오랜 기간 동안 사용할 수 있는 각광받는 FED 재료로서 주목을 받고 있다.

## 다. 탄소나노튜브 FED

탄소나노튜브를 스피트형 캐소드를 대신하는 새로운 FED용 캐소드 재료로서 특성을 보고한 최초의 연구는 스위스 EPFL의 de Heer와 그의 동료들에 의해서 평판형 디스플레이에 응용가능성을 보인 1995년 사이언스에 발표된 연구이다.<sup>6)</sup> 이 연구에서 그들은 정렬된 탄소나노튜브

필름을 이용하여 안정적이고 간단한 전자총을 만들어 평판형 디스플레이의 응용가능성을 보고하였다.

탄소나노튜브 전계 방출원은 현재 일부 상용화되어 시판되고 있는 경우도 있으나, 대부분 개발 또는 시험 단계에 있다. 각 업체마다 다양한 방법으로 전자 방출원을 개발하고 있으며, 기존의 Si나 Mo를 top down 방식의 원추상으로 가공하는 FED 방출원은 균일한 가공 및 안정된 전계 방출이 어렵고 염소에 매우 약한 단점이 있다. 반면에 탄소나노튜브는 화학적으로 안정적이며 본래 재료의 끝단 형상이 뾰족한 형태이므로, 최근 몇 년 사이에 일부 업체들로부터 많이 채용되고 있다. 또한, 마이크로-팁 형 소자로서 탄소나노튜브를 적용하는 것 이외에 플레인-팁(Plain-tip) 소자로서 탄소나노튜브를 적용할 경우, 대화면 및 저가격화의 장점으로 인해서 한국의 삼성SDI, 영국의 PFE (Printable Field Emitter) 등의 업체와 세계 여러 연구 그룹에서 연구 개발 중에 있다.

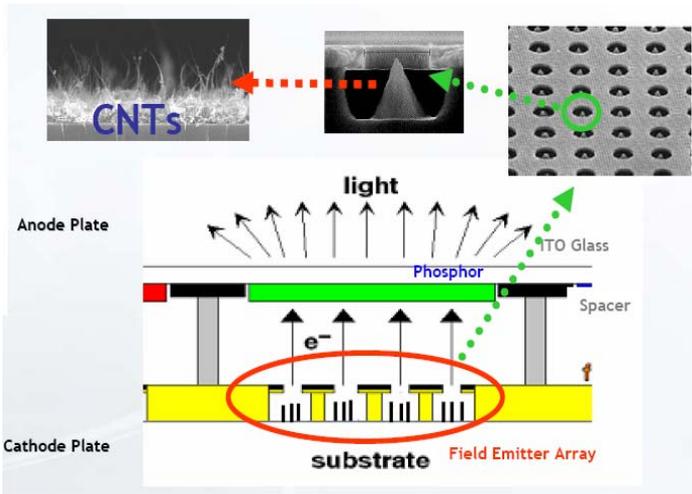


〈그림 3-7〉 탄소나노튜브 electron filed emission cathodes의 균일한 전계 방출 특성

자료 : Xintek Inc.

6) Walt A. de Heer, A. Chatelain, D. Ugarte, "A Carbon Nanotube Field-Emission Electron Source", Science November 1995, Vol. 270, No. 5239, pp. 1179-1180. 1995.11.

탄소나노튜브를 이용한 전계방출 디스플레이는 기본적으로 <그림 3-8>과 같은 구조로서 탄소나노튜브가 기존의 금속 팁의 에미터를 대신한다. 탄소나노튜브가 갖는 소재와 공정 특수성으로 인하여 음극 부분에서 소재 및 제조공정, 그리고 구조상의 변형은 있을지라도 음극 및 게이트 전극의 역할, 양극구조, 스페이서(Spacer)를 비롯한 진공 패키징 구조, 그리고 구동방식 등은 전반적으로 3극관형 전계방출 디스플레이의 기본 원리와 구조를 따른다. 음극기판 상에 화소(Pixel)마다 배열된 전계전자 방출원에서 방출된 전자가 진상의 화소마다 배열된 양극기판 상에 R, G, B 3색의 형광체를 여기발광시킴으로써 화상을 형성한다. 음극판 상에는 화소 선택을 행한 음극전극과 휘도 변조를 행한 게이트전극이 직교하여 설치되며, 이 교점에 1 화소 분의 전자원이 형성된다.



<그림 3-8> 탄소나노튜브 전계방출 디스플레이 구조도

전계방출 전자원의 방출전류는 일함수와 전계집중계수에 크게 의존한다. 또한 표면에서의 실질적인 일함수는 가스흡착에 의해서 변화하는데, 실제 패널에서의 진공도에서는 시간 경과에 따라 크게 변동된다.

또한 통상 화소마다 이미터 배열을 만들어 내는데, 각각 이미터형상의 편차에 의해서 화소 내 및 화소 사이의 방출전류에 편차가 발생되게 된다.

탄소나노튜브 FED 제작을 위해서는 균일 크기와 방향을 갖는 탄소나노튜브 대량 제조기술과 더불어 이러한 탄소나노튜브를 대형 유리기관 위에 형성 및 배열하는 공정도 확보되어야 한다. 이와 더불어 탄소나노튜브가 너무 밀집되어 있을 경우, 높은 종횡비에 의한 전계 증배 효과가 크게 감소되므로 이들을 수직 방향으로 형성함과 동시에 주기적으로 일정 간격을 갖도록 배열시키는 공정기술이 필요하다.

그리고 탄소나노튜브 소재 및 프린팅 공정이 주가 되는 특징으로 인하여 게이트를 집적화 시키는 것이 용이하지 않으며, 이로 인해 게이트의 가공과 설치 방법, 위치 등에 관한 기술적인 정립이 요구된다. 이 외에도 소재 및 제조공정, 그리고 전계방출 소자 및 디스플레이 시스템 차원에서 많은 과제를 안고 있음에도 불구하고 기업들을 중심으로 탄소나노튜브를 적용한 전계방출 디스플레이 패널 시제품이 발표되고 있으며, 일부 회사는 제품 생산에 착수할 계획으로 있다.



〈그림 3-9〉 삼성전자에서 개발한 32인치 탄소나노튜브-FED 시제품과 38인치 탄소나노튜브-FED TV 개발

자료 : 삼성전자

## 라. 향후 전망

### (1) FED 적용을 위한 탄소나노튜브 대량 생산 기술

FED는 넓은 탄소나노튜브 어레이를 사용하는 경우 에미터의 효율이 높아 LCD보다 높은 해상도와 선명도를 구현할 수 있다. 탄소나노튜브를 면발광 전계 방출원으로 사용하기 위해서는 이들을 기판 표면에 균일하게 수직방향으로 분포시킨 어레이 형태로 만들어야만 한다. 그러나 탄소 나노튜브의 정렬된 어레이를 대량생산할 수 있는 나노제조 기술은 FED 제조의 상용화에 가장 큰 장벽으로 여겨지고 있다.

### (2) 고품질 전계 방출원 생산을 위한 탄소나노튜브 분산 공정

탄소나노튜브-FED 개발에 대해 우수한 전계방출원의 에미터를 생산하기 위한 대표적인 어려운 공정 기술은 탄소나노튜브의 분산을 제어하여 균일하고 적절한 밀도를 조절하는 것이다. 탄소나노튜브의 밀도가 너무 높을 경우, 튜브들 사이의 전기장을 차폐시켜 더 높은 동작 전압을 요구하게 되며, 반대로 낮은 밀도는 균일한 발광 형태와 많은 전계 방출 전류를 얻을 수 없는 등 성능 저하를 가져온다. 하지만 튜브의 길이 및 튜브사이의 간격을 조절하는 일은 매우 어려운 일이다. 따라서 이러한 문제의 해결책은 탄소나노튜브를 기판 상에서 직접 수직으로 성장시키는 방법과 탄소나노튜브를 전기영동법으로 페이스트로 분산하는 방법, 스크린 인쇄법 등을 이용한 대면적 분포 방법 등이 있다. 전자의 경우에는 대면적의 전계 방출원을 대량 생산하기에는 적합하지 않은 단점이 있다. 후자의 경우에는 대량생산에는 적합하나 탄소나노튜브의 밀도와 배열 방향들의 조절이 어렵다. 그러나 이 방법은 대량생산에 적합하므로 삼성 SDI와 일본 Noridake에 의하여 채용되어 연구 개발 중이다.

### (3) 고내구성 FED 제작을 위한 탄소나노튜브 신뢰성 향상

전자방출원은 FED의 핵심 요소로서 고밀도의 전류를 수만 시간 이상 안정적으로 방출하여야 한다. 그러나 탄소나노튜브를 이용한 전자방출원은 열화 또는 산화로 인하여 성능저하가 발생하고 있어 신뢰성 향상을 위한 노력이 요구되고 있다. 방출전류의 불균일성은 FED의 휘도 불균일과 깜빡임(flicker)의 원인이 된다. 탄소나노튜브를 공기 중에서 전계 방출원으로 장시간 사용을 할 경우에는 공기 중의 산소나 수소 등의 성분이 탄소나노튜브를 손상시켜 전자방출 성능을 저하시킬 수 있으므로 탄소나노튜브 팁을 열처리하거나 보호막을 입혀 보호하고 이를 불활성 가스를 넣은 고진공 환경에서 사용을 하여야 한다. 따라서 현재 생산공정에서는 발광의 균일성을 확보하기 위하여 탄소나노튜브의 성능저하 개선을 위한 기술로서 vacuum bulb technology를 개발함과 더불어 시간의 흐름에 따른 탄소나노튜브 전자방출량의 변동을 평균화하는 방법 등이 개발되고 있다.

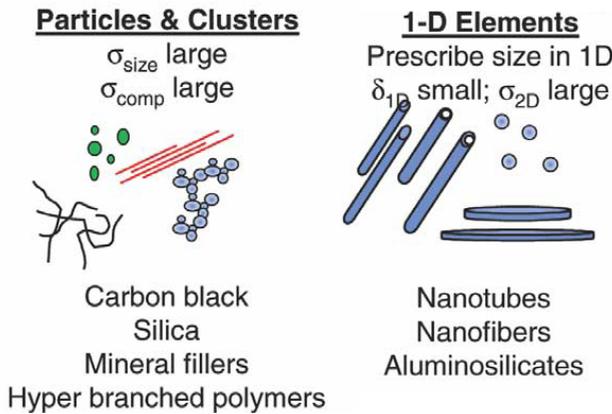
탄소나노튜브-FED의 상용화 연구는 10여년이 넘었으나 향후 탄소나노튜브-FED가 상용화되어, 가정의 거실에서 지금의 PDP나 LCD 디스플레이어 보다 저렴하고 뛰어난 화질을 지닌 대형 탄소나노튜브-FED를 만나기 위해서는 앞으로도 수많은 과제와 공정기술을 해결하여야 한다. 하지만 탄소나노튜브-FED는 현재 상용화 된 평판 디스플레이에 비하여 부품의 수가 적어 비용을 더 낮게 할 수 있는 가능성이 있으며, 낮은 소비전력으로 고화질을 실현할 수 있는 등 시장과 산업체에서 큰 매력이 있으므로 가까운 장래에 상용화가 이루어질 것으로 전망되고 있다.

## 4. 탄소나노튜브 고분자 복합재료

### 가. 기술 개요

고분자 복합재료(polymer composite materials)는 고분자계 매트릭스와 충전제(filler)의 혼합으로 구성된 복합재이다.<sup>7)</sup> 일반적으로 고분자의 특성을 유지하면서 충전제의 특성을 갖는 기능성 재료가 된다.

충전제로는 탄소섬유, 카본블랙(Carbon Black), 탄소나노튜브 등이 사용된다. 카본블랙은 정전기 분산 플라스틱에 자주 이용되며, 탄소섬유는 항공기나 스포츠 용품에 널리 이용되고 있다. 고분자 복합재료의 충전제의 종류는 <그림 3-10>에 나타내었다.<sup>8)</sup>



<그림 3-10> 고분자 복합재료의 충전제

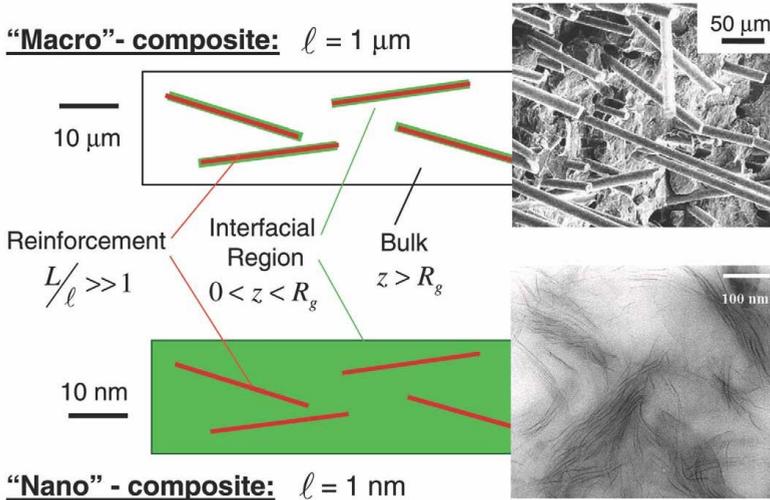
탄소섬유의 경우 기계적인 강도는 매우 높고 강하지만 구조적 취약성으로 이론적인 한계치에는 미치지 못하고 있다. 하지만 탄소나노튜브는 기존의 충전제와는 다른 뛰어난 기계적, 전기적, 열적 특성으로 관심

7) 이영희, "탄소나노튜브의 물성과 응용," Sae Mulli, Vol. 51, No.2, 84, 2005.6

8) Richard A. Vaia · H. Daniel Wagner, "Framework for Nanocomposites", Materials Today, November, 2004 pp.32-37 2004.11

을 끌고 있다. 탄소나노튜브는 그 이름에 나타나 있듯이, 탄소로 구성이 되어 있으나 이와 유사한 다이아몬드, 그래파이트(graphite), 플러렌(fullerene) 보다는 낮은 밀도를 가지며, 길이방향으로 원통형으로 말려 육각형 벌집 모양의 탄소들이 이음매가 없는 연속형 구조를 지닌 긴 세장비 (aspect ratio)의 튜브 형상을 하고 있다. 탄소나노튜브의 이러한 특수한 형상은 이상적인 일차원 구조의 형상으로서, 원자들이 구조체를 따라 이동하기가 수월하므로, 구리보다 뛰어난 전기 전도도를 지니고 있다.

탄소나노튜브의 이음매가 없는 구조는 뛰어난 열전도도, 탄성을 및 기계적인 강도를 지니고 있어, 나노복합재료 분야에서의 이상적인 충전제(filler)로 많은 기대를 모으고 있으며, 현재 이를 활용한 연구와 사업이 탄소나노튜브의 응용 분야 중에서 가장 활발하게 진행되고 있다.



(그림 3-11) Macro-composite(SEM)와 Nano-composite(TEM)의 비교

그 중 탄소나노튜브-고분자 복합체는 나노복합재료의 대표적인 첨가 소재인 탄소나노튜브를 이용한 것으로서 내열성 및 내화학성과 같은

고분자 고유의 성질을 유지하면서 탄소나노튜브 자체의 우수한 물성을 활용하여 낮은 표면저항을 가지면서 열전도성, 투명성, 고강도, 난연성, 광택성, 내화학성 특성 등을 복합적으로 구현할 수 있는 제품으로 만들어 볼 수 있다.

고분자 복합재료에 사용되는 충전제 간의 상호 특성비교는 <표 3-1>에 잘 나타나 있으며, 탄소나노튜브는 카본블랙과 탄소섬유에 비교해서 가격적인 면을 제외하고는 대부분의 항목에서 뛰어난 것을 알 수 있다.

<표 3-1> 충전제 특성 비교<sup>9)</sup>

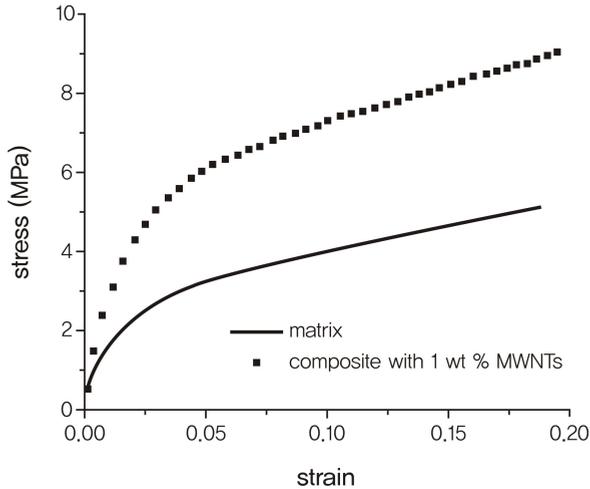
특성	Carbon black	Chopped carbonfiber	탄소나노튜브
필요 충전량	25~35%	15~20%	2~5%
전도도 조절	양호	좋음	문제의 소지 있음
분산의 용이	좋음	좋음	문제의 소지 있음
부품 성능	보통	양호	폴리머 변화에 의존
표면 처리	양호	양호	좋음
충전재 가격	\$1-\$2/lb	\$4-\$5/lb	\$20/lb

탄소나노튜브는 카본블랙과 탄소섬유에 비해 매우 적은 양으로도 전기적 성능이 좋지만, 단위 중량당 가격이 비싸다는 것과 폴리머 내 분산의 어려우며 전도도의 조절이 어렵다는 것이 단점으로 알려져 있다. 또 다른 문제점으로 분산시 탄소나노튜브의 비표면적이 매우 크기 때문에 단일 움직임이 거의 불가능하고 다발형태로 움직이게 되며 복합재료의 제조 시 충분한 분산이 이루어지지 않고 충전제의 뭉침현상을 유발하게 되어 충전제가 갖추어야 할 세장비를 낮추는 효과를 일으켜 물리적 물성치의 저하를 초래하는 점이 있다.

부품의 성능은 충전제 함유량에 영향을 받게 된다. 그 이유는 충전제의 양이 증가 할수록 공정 시에 높은 온도와 압력이 필요하게 되기 때

9) 한창수, "탄소나노튜브 응용제품의 동향", 전자부품, 2009년 3월호, p22, 2009.3

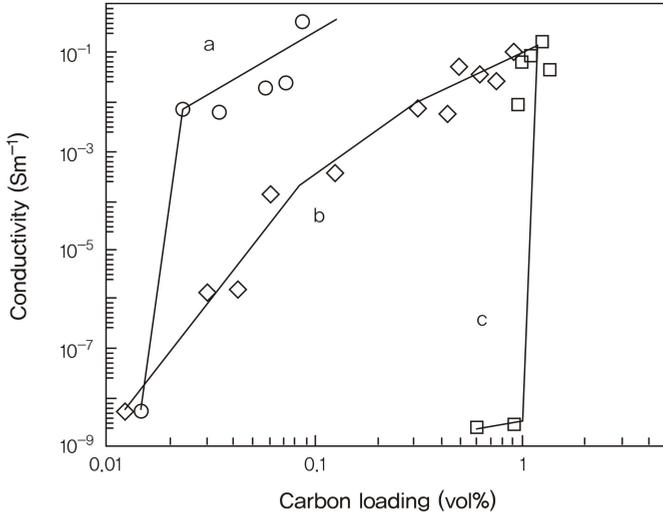
문인데, 폴리머는 이러한 공정시의 온도와 압력에 따라 휨(warping)과 크랙(crack)이 발생하므로 상품성과 각종 물리적 특성이 저하되게 된다. 특히 표면처리의 경우는 자동차 외장을 매끄럽게 표면처리 하는 것이 힘들기 때문에 중요한 요소이다. 탄소섬유의 크기를 고려하면 이것이 표면에 노출되면 거칠어 보이게 된다. 카본블랙의 경우도 이 문제에서 자유롭지 못하며 카본블랙 입자가 탈락하면서 pit을 형성하게 되어 역시 표면을 거칠게 한다. 탄소나노튜브-고분자 복합체의 경우 매트릭스 폴리머에 약간의 탄소나노튜브의 첨가를 통해 폴리머 매트릭스의 기계적 물성이 크게 증가하는 것을 알 수 있다(<그림 3-12>).



(그림 3-12) 탄소나노튜브 Nano-composite의 응력-변형률 곡선<sup>10)</sup>

탄소나노튜브-고분자 복합체는 전기전도도 측면에서 기존의 충전제와는 다르게, 탄소나노튜브는 세장비가 매우 커서 폴리머 매트릭스 내에 균일한 분산이 이루어졌을 경우 적은 충전만으로 전기전도도가 급격히 증가하게 된다(<그림 3-13>).

10) 이영희, "탄소나노튜브의 물성과 응용," Sae Mulli, Vol. 51, No.2, 84, 2005.6



〈그림 3-13〉 나노복합재료의 전기전도도 비교<sup>11)</sup>

- a: 탄소나노튜브
- b: Carbon Black with copper-chloride
- c: Carbon Black Only

## 나. 개발 동향

### (1) 기계 및 구조용 복합재료

구조재료 분야는 고분자 종류별로 탄소나노튜브를 함유한 복합재료 기술이 주를 이루며 기술의 실용화가 매우 근접한 분야이다. 간단한 예를 들면 일본의 TORAY사는 열가소성 수지 중 Polyamide 고분자 복합재료에 대한 기술을 발표하였고, Geogia Tech Research Corp에서 아크릴로니트릴 복합재료, 그리고 타이어 회사를 중심으로 Rubber를 기재로 한 복합재료 등 점차 기술의 적용범위가 확대되고 있다.

고분자 나노복합재료의 다른 개발 방향의 하나는 탄소나노튜브의 특징을 활용하여 특정제품의 부품별로 초점을 맞추어 개발하는 것으로,

11) 이영희, "탄소나노튜브의 물성과 응용," Sae Mulli , Vol. 51, No.2, 84, 2005.6

예를 들어 탄소나노튜브의 전기 전도성 및 표면 윤택특성을 이용하여 습동 부품의 원료로 적용하는 기술(Hyperion Catalisys International) 등이 전개되고 있다.

고분자 이외의 재료를 적용한 경우로는 기존의 탄소섬유를 강화재로 적용하던 분야에 탄소섬유 대신 탄소나노튜브를 적용하는 기술로 탄소/탄소복합재료 및 세라믹의 강화재로 탄소나노튜브를 적용하는 기술이 개발되고 있다.

탄소나노튜브와는 다른 종래의 섬유보강재료들은 대체로 수십  $\mu\text{m}$ 의 직경과 수 mm의 길이를 가지는 중간규모(mesoscale)의 크기이다. 탄소섬유의 경우, 강성(stiffness)은 230~725 GPa, 강도(strength)는 1.5~4.8 GPa 범위의 기계적 물성을 나타내며, 최근에 기상합성법으로 제조된 탄소나노섬유의 경우는 100 nm의 직경에 20~100  $\mu\text{m}$ 의 길이를 나타낸다. 이와 같이 보다 작은 크기의 섬유는 단위 중량당 보다 넓은 표면적을 가짐에 따라 복합체의 기저 재료와 보다 큰 접착력을 제공하며, 이와 같은 맥락에서 고강도와 경량화가 요구되는 구조 재료 분야에서 탄소나노튜브는 이상적인 기계적 보강재료라 할 수 있다.<sup>12)</sup>

구조재료로 탄소나노튜브 복합체가 응용될 수 있는 분야는 스포츠용품, 자동차, 군수장비, 항공기 등 매우 광범위하다. 일례로 세계적인 프랑스 도로일주 사이클 대회인 Tour de France에서 2006년도에 우승을 차지한 자전거의 프레임에는 Zyvex사의 개질된 탄소나노튜브가 적용되었다. 탄소섬유 시트를 탄소나노튜브가 함유된 수지로 코팅시켜 제조시킨 프레임을 통해 종전의 프레임보다 약 20% 가량의 무게를 감소시킬 수 있었다.

항공 재료 분야는 향후 탄소나노튜브 복합체의 활용도가 높아질 것으로 기대되는 분야이다. 현재 항공 재료는 연비절감, 이착륙 시할주 거리 단축 등의 목적으로 경량화가 요구되고 있다. 이에 따라 항공재

12) 윤창훈, 이한상, "탄소나노튜브(CNT) 복합소재", Polymer Science and Technology Vol. 18, No 1, February, 2007 pp.4-7, 2007.2

료는 기존의 티타늄이나 알루미늄 소재에서 탄소섬유의 사용비중이 날로 증가되고 있는 추세이다. 탄소나노튜브 강화 플라스틱은 현재의 탄소섬유 강화 플라스틱보다 강도는 약 6배 강하면서 무게는 약 50%인 특성을 가지고 있다. 이에 따라 미국의 국가 연구기관인 MITRE에 따르면 항공기 동체를 기존의 알루미늄에서 탄소나노튜브 강화 플라스틱으로 대체 하였을 경우 약 10%의 연료절감 효과를 가져올 것으로 예측되고 있다.

## (2) 전도성 재료

### ① 정전기 차폐용(electro static discharge, ESD) 소재

미국의 Hyperion Catalysis사는 플라스틱/나노튜브 복합재를 생산하여 자동차 산업과 전자제품 분야에 응용 제품을 상업화 하고 있다.<sup>13)</sup> 이 회사는 polycarbonate, nylon, polybutyl terephthalate(PBT) 등의 고분자 수지에 직경 10~15 nm의 MWNT를 첨가하여 정확한 도전성을 지니며 입자의 박리가 적은 뛰어난 복합소재를 생산하여 전기 전자부품의 하우징, 트레이 및 반송 용기 등과 같은 ESD 복합소재를 생산 판매하고 있다. 이 회사의 제품은 GM자동차의 연료시스템의 연료 배관, 커넥터, O-링, 필터하우징, 펌프 모듈 등과 같은 연료와 접촉하는 플라스틱과 고무로 만들어진 요소부품 등에 적용되어 정전기를 분산하여 정전기를 예방하고 있다. 또한 최근에 이 회사는 정전기 차폐용 복합소재를 IC용 테스트 드라이브의 소켓에 적용하여 검사 시 정전기로 인한 검사 대상 IC의 손상을 예방할 수 있는 검사용 소켓을 개발하였다.

13) 한중훈, "탄소나노튜브 합성 및 전도성 고분자 개발 동향", Polymer Science and Technology Vol. 16, No 2, April, 2005 pp.162-175. 2005.4

## ② 박막형 탄소나노튜브 고분자 복합소재

최근 컴퓨터와 각종 가전기기, 통신기기가 디지털화 되고 고성능화됨에 따라 대화면 및 휴대 가능한 플렉서블 소자 구현이 절실히 요구되고 있는 상황이며 현재까지 사용되고 있는 ITO 투명전극은 진공증착, 에칭 등 고가의 장비 및 부식성 화학약품을 사용하고 있고 원료물질인 인듐이 자원고갈에 의한 생산량이 한정되어 있기 때문에 탄소나노튜브 복합소재의 박막형인 차세대 탄소나노튜브 투명전극 제조기술이 관련 시장에서 강력히 요구되고 있다.

현재 소규모시장의 일부 제품에서 상용화가 시도되고 있지만 아직 본격적인 시장은 형성되어 있지 않다. 미국의 기업체인 에이코스는 SWNT를 이용하여 투명전도성 박막을 개발해 'Invisicon'이라는 상품명으로 투명전도성 박막 제품을 출시한 바 있다.

박막형 탄소나노튜브 고분자 복합소재는 투명전도성 필름의 용도로 크게 활용될 것으로 전망되며, 투명전도성 필름은 현재 약 90% 가까운 범위에서 터치패널로 사용되고 있다. 모바일 기기 등 터치패널 탑재 기기의 수요 확대에 따라 매년 그 사용량이 증가하고 있으며, 탄소나노튜브 고분자 투명박막 필름은 우선적으로 터치패널과 같은 기존 시장분야에서 개발진척 정도에 따라 급격한 대체가 이루어질 것으로 예상된다. 탄소나노튜브 투명전극은 디스플레이 분야, 태양전지용 전극, 스마트 윈도우, RFID용 배선 등의 다양한 플렉서블 일렉트로닉스 분야에 파급효과가 클 것으로 예상되기도 한다. 태양전지 산업은 향후 5~10년간 연평균 두 자리 수 이상의 고도 성장을 기록할 것으로 기대되고 있는 신성장 산업으로 그 응용분야 또한 우주개발, 통신시설, 항공보안, 주택가전, 자동차 등 다양하다(<표 3-2>).

〈표 3-2〉 탄소나노튜브 투명전극의 응용분야<sup>14)</sup>

응용분야	구체적 용도	요구특성	필름화 특성
전자부품 회로재료	콘덴서 저항체, 박막복합회로	Rs:10Ω /sq Rs:10 <sup>2</sup> ~10 <sup>5</sup> Ω /sq	박막화 소형화, 가소성
투명전극 신호입력	LCD, PDP, OLED Flexible display 터치패널, EL백라이트	투명도 > 80% Rs:10 <sup>2</sup> ~10 <sup>4</sup> Ω /sq	투명성, 대면적화 경량, 박막형화 가공성, 내충격성
전자파차폐(EMI) 대전방지(ESD)	각종전자기기, 휴대폰 크린룸 설비	투명도 > 80% Rs:10 <sup>2</sup> ~10 <sup>9</sup> Ω /sq	투명성, 대면적화 가공성, 내충격성
면발열체	LCD히터 자동차용 유리	투명도 > 60% Rs:10 <sup>2</sup> ~10 <sup>3</sup> Ω /sq	투명성, 대면적화 내충격성
열선반사	선택투과 열선반사 스마트 윈도우	투명도 > 60% Rs:10 <sup>2</sup> ~10 <sup>3</sup> Ω /sq	대면적화 내충격성
광전전환 소자	태양전지 광증폭기	투명도 > 60% Rs:10 <sup>3</sup> Ω /sq	대면적화 가공성

### (3) 고열전도성 재료

고열전도성 탄소나노튜브 고분자 복합소재는 탄소나노튜브의 뛰어난 열전도 특성(max, 6000W/mK)을 이용한 소재로서 고분자와 함께 마이크로 크기에서의 열전도성, 열방사성, 전기전도성을 극대화 한 것으로 그 가공기술에 따라 다양한 형태의 소재, 부품으로 형성할 수 있다.

고열전도성 소재는 점액형(viscous)으로 고체와 액체의 중간형태의 페이스트형 재료이다. 이것은 기존의 히트싱크를 대체하여 방열소재로 탄소나노튜브 복합소재가 이용될 수 있다. 대표적인 제품 사용분야 중 하나인 LED 조명시장의 경우 고휘도 LED 발열문제를 해결하여, 패키징의 간소화에 따라 제품의 신뢰성 확보, 제품수명의 확보 및 가격 경

14) 한창수, “탄소나노튜브 응용제품의 동향”, 전자부품, 2009년 3월호, pp.22, 2009.3

쟁력 확보 등으로 이를 적용할 수 있는 열전도성 소재의 채용이 본격화 될 것으로 전망된다.

현재 LED 조명제품은 주로 3W급을 여러개 사용하여 필요한 휘도의 조명제품을 개발하고 있으나, 3W급의 제품에 채용된 각종 방열부품의 크기는 고급제품 및 본격적인 조명제품에 적용하기에는 아직 대형이며, 패키징의 크기를 줄이기 위해서는 5W급의 고회도 LED가 채택될 수 있는 방열부품 개발이 필수적이다.

전체 열관리 소재는 다우 케미컬, 존슨 매티, 베이클라이트, 알코아, 로드, 스미토모, 신에츠, 선하야토 등 미국과 일본 기업이 독점적으로 공급하고 있으며, 2000년 시장 규모는 3250억 달러, 시장 성장률은 연 13%이다.

2000년도 시장의 구성비는 컴퓨터관련 39%, 통신장비 26%, 산업 및 가전 22%, 국방 및 자동차가 13%로 대부분 시장이 확대되고 있는 첨단 관련 산업이다. 열관리 소재를 사용한 IC 패키지의 66%는 일본과 한국을 비롯한 극동지역에서 조립생산되고 있으나, 일본을 제외하고 한국, 대만 등은 열관리 소재의 80%이상을 수입에 의존하고 있다.

세계 최고 수준의 정보□전자기기 제조공정 기술에 비해 국내 IT 관련 소재산업은 극히 취약하며 체계적인 연구개발체제가 확립되지 못했고, 여타 첨단소재산업과 마찬가지로 선진국의 기술 장벽이 매우 높은 실정이다. 최근, 고성능 전자부품에 대응할 열관리소재의 개발차원에서 탄소나노튜브와 같은 고열전도성 소재가 주목을 받고 있다.

## 다. 향후전망

탄소나노튜브-고분자 복합체는 현재 개념 정립 단계에 있는 기술로서 선진국에서조차 기술이 확립되지 않았다. 그리고 아직 탄소나노튜브의 가격은 기존 컴파운드 기기를 이용한 연구가 가능할 정도로 저렴하지 않기 때문에, 현재 표준적 복합화 공정을 통한 연구는 불가능하다.

현재 공급되고 있는 탄소나노튜브의 순도 및 치수에 대해 정확한 정보나 규격은 시스템화 되지 않아 표준화 작업이 절실히 요구되고 있으며 최근 국내외적으로 탄소나노튜브 관련 표준화의 논의가 매년 개최되고 있어서 향후 표준화와 함께 탄소나노튜브 고분자 복합소재 기반의 융합부품 및 제품 개발의 가속화가 예상된다.

탄소나노튜브 고분자 복합재료는 앞서 말했던 바와 같이 탄소나노튜브 고유의 특성에 기인한 실용화를 향한 몇몇 난관들이 존재한다. 이 난관 중에 가장 잘 알려져 있는 것이 탄소나노튜브의 분산 기술이며, 아직까지 뚜렷한 해결책은 존재하지 않으며 여러 가지 방법들이 보고되고 있는 중이다.

탄소나노튜브는 흑연판 사이의 상호작용과 유사한 탄소나노튜브간의 강한 반데르발스(van der Waals) 상호작용으로 인해 단일체로 존재하지 않고 다발이나 응집체로 존재하게 된다. 이러한 현상으로 각종 특성을 향상시키는 복합재료를 제조할 때 튜브의 고른 분산이 제대로 일어나지 않는다.<sup>15)</sup>

고분자 매트릭스 내에 가능한 개개의 탄소나노튜브가 제대로 분산되지 않으면 충전제로서의 장점을 발휘할 수 없게 되므로, 탄소나노튜브의 폴리머 매트릭스 내로의 분산기술은 매우 중요한 문제의 하나로 지목되고 있다.

탄소나노튜브 분산기술은 각 연구자 별로 다른 고유한 방법을 보유하고 있어 아직 뚜렷한 해결책은 없는 상황이며 NASA Langley가 물리·화학적 원리에 근거한 체계적인 방법에서 선두에 서있다.

초미립자 직접 분산법으로 분류되는 탄소나노튜브-고분자 복합체 제조 공정은 용융 혼합 및 in-situ 중합을 통하여 이루어지는데 나노 크기의 초미립자가 고분자 쇄와 거의 동일한 크기 영역에 대한 기존의 컴파운딩 개념과는 다른 새로운 복합화 시도 및 물리, 화학, 재료공학 등의

---

15) 이종일, 정희태, "탄소나노튜브 복합체의 기술동향", Korean Chem. Eng. Res., Vol. 46, No. 1, February, 2008, pp. 7-14, 2008.2

공학적 지식의 결합이 요구된다.

탄소나노튜브에 대한 다양한 화학적 및 기계물리적 전처리/기능화를 통한 고분자 매트릭스와의 계면특성에 대한 제어와 탄소나노튜브의 특정 방향으로의 배향제어를 통한 물성 극대화 노력도 초고강도 고분자 복합재료 제조에 필수적이다.

탄소나노튜브 배향기술은 Smalley의 자기장을 이용한 배향법이 여타 연구자의 기계적 스트레칭에 의한 방법에 비해 비교 우위에 있다. 탄소나노튜브 고분자 계면제어 기술은 이스라엘 Weizmann 연구소의 Wagner와 Rice대의 Barrera등이 최고기술을 보유하고 있다.

탄소나노튜브-polymer nanocomposites의 실용화는 탄소나노튜브의 양산여부에 크게 의존하며 MWNT의 경우에는 미국의 하이페리온, 일본의 미쓰이, 쇼와-덴코에서 연간 수백 톤의 생산능력을 갖추고 있지만, SWNT의 경우에는 아직 양산과는 거리가 먼 상황이다. 이런 이유로 탄소나노튜브의 가격은 기존의 컴파운드 기기로 생산하기에는 가격이 저렴하지 않다.

탄소나노튜브-고분자 복합체는 탄소나노튜브 가격 문제가 남아있지만 5~10년 이내에는 탄소나노튜브의 저렴한 합성법 및 대량합성기술의 개발되어 저가공급이 가능할 것으로 여겨진다.

## 5. 에너지소자 기술

### 가. 기술 개요

에너지 분야 응용기술로는 연료전지용 수소저장 기술이 산업화에 파급효과가 가장 클 것으로 보인다. 탄소나노튜브는 무게가 가벼울 뿐만 아니라 튜브 내에 수소를 저장할 수 있는 공간이 많아서 단위 질량 당 전하저장 능력을 높일 수 있다. 현재는 기술 정립의 단계이므로 향후

많은 연구가 필요해, 실용화까지는 꽤 많은 시간이 걸릴 것으로 보인다. 하지만 대체 에너지의 중요성을 고려하면 에너지 소자에 대한 연구는 전략적으로 활성화될 가능성이 높다.

탄소나노튜브를 이용한 기술로는 담체/전극기술이 있으며 탄소나노튜브의 구조적 특성을 이용하여 촉매의 밀도를 증가시켜 다량의 수소를 발생시키는 것으로, 연료전지와 2차전지에 적용될 수 있다.

탄소나노튜브의 뛰어난 특성을 이용한 순간 발생 과부하 조절/공급하는 시스템을 위한 초고용량 캐패시터도 에너지 소자 중 하나이다. 탄소나노튜브의 수소에 대한 물리적 및 화학적 흡착을 이용한 수소저장 소재로의 연구도 진행 중이다. 이 분야의 기술 수준은 기초 연구단계의 아이디어나 가능성이 제한된 기술영역에서 제안된 단계이며, 2000년도부터 관련특허들이 나타나기 시작하고 있다.

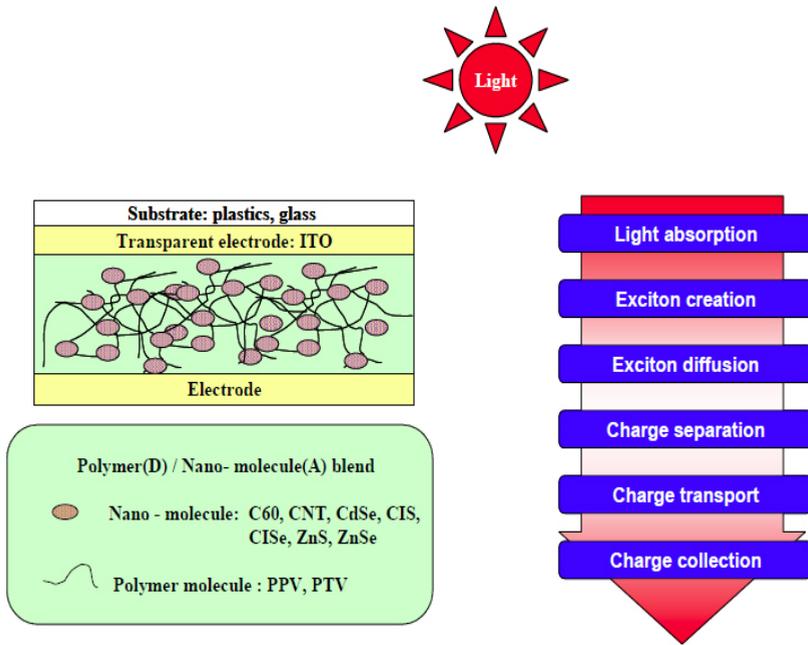
## 나. 개발동향

### (1) 복합나노구조형 플라스틱 태양전지

플라스틱 태양전지는 기존의 실리콘 계통의 무기 태양전지에 비해서 많은 장점을 가지고 있다. <그림 3-14>는 복합 나노구조형 플라스틱 태양전지의 구조와 동작원리를 나타낸 것이다.

<그림 3-14>에서 보듯이 구조적으로 간단하여 제조 공정이 단순하고, 상온에서 폴리머와 탄소나노튜브 등 nano-molecule spin cast 등의 방법을 사용하여 active layer를 형성하므로 고온이나 진공 작업 등 고가의 공정이 필요하지 않다. 제조공정이 대형화에 유리할 뿐만 아니라 플라스틱 기판을 사용하는 경우에 제품을 경량화 할 수 있으며 플렉시블한 제품제작이 가능하다.

플라스틱 태양전지의 핵심기술은 폴리머와 나노입자의 규칙적이며 고밀도의 배열과 분산이 필요하며 비저항이 작은 전극형성기술과 반사손실을 줄이기 위한 반사방지막 형성기술이 있다.



〈그림 3-14〉 플라스틱 태양전지의 구조와 동작원리

## (2) 초고용량 캐패시터

휴대용 전자기기를 비롯해 전기자동차 등과 같은 독립된 전원공급장치가 요구되는 시스템이나 순간적으로 발생하는 과부하를 조절/공급하는 에너지 저장 장치는 아직 실용을 위한 목표치에는 도달하지 못했다. 전기에너지를 저장 및 활용하는 과정에서의 효율은 배터리보다 캐패시터가 성능이 좋다. 그 이유는 캐패시터의 에너지 저장 메커니즘이 산화/환원의 화학적 메커니즘의 배터리와는 달리 가역적인 이온의 운동학적 메커니즘이기 때문이며 충전속도가 빠르고 배터리보다 충전 사이클이 매우 길다.

기술 선진국들은 1990년대 초부터 비약적으로 발전한 신소재 기술에

힘입어 이러한 캐패시터의 장점을 유지하며 에너지 저장 능력을 향상시키기 위한 연구 개발을 꾸준히 수행하여 왔으며 이에 종래의 캐패시터보다 고용량의 축전능력을 가진 초고용량 캐패시터를 개발하였고 소형의 전자부품과 반도체칩의 메모리 백업용 UPS(Uninterruptible Power Source)를 이미 상품화하였다.

초고용량 캐패시터의 에너지 밀도는 최신형 2차 전지의 약 1/10수준, 동력밀도는 거의 100배의 수준으로 향상되었다. 이는 종래의 캐패시터와는 달리 비표면적이 큰 탄소나노튜브 등의 소재를 사용하였기에 가능하였다.<sup>16)</sup>

### (3) 탄소나노튜브 전극

탄소나노튜브는 가벼우면서도 높은 전기전도도와 화학적 안정성 및 큰 비표면적 등의 전기화학적 에너지 저장 장치의 전극 활물질로 매우 우수한 물성을 가지고 있기 때문에, 초고용량 캐패시터나 리튬이온 전지 등에 전기화학적 수소저장의 전극 활물질로 이용하려는 연구들이 진행되고 있다.

나노구조 전극의 특징은 리튬 이온의 출입 시 부피변화에 따른 변형을 흡수할 수 있고, 전극- 전해질 간 접촉면적이 넓어 충방전 속도가 빠르며 전자 혹은 리튬이온의 수송거리가 짧다는 것이다. 리튬이온전지나 전기화학적 수소저장용 탄소나노튜브의 연구는 꽤 많은 보고가 이루어지고 있으나 초고용량 캐패시터용 탄소나노튜브에 대한 연구들은 상대적으로 적은 편이다.

탄소나노튜브와 기존의 초고용량 캐패시터의 전극재료로 사용되고 있는 전도성 고분자 또는 산화금속과의 나노복합체를 이용하여 기존의 전극재료들의 성능을 향상시키기 위한 연구들도 진행되고 있다. Jurewicz 등은 MWNT(Multi-walled Carbon Nanotube)의 표면에 Ppy (polypyrrole)

16) 산업자원부, "탄소나노튜브 슈퍼배터리의 제작 및 특성연구", 2005

를 전기화학적으로 코팅하여 163F/g의 축전용량을 갖는 전극을 합성하였으며 Frackowiak 등은 화학적 종합방법을 이용하여 MWNT와 Ppy의 나노복합체를 합성하여 172F/g의 용량을 얻었다.<sup>17)</sup>

#### (4) 수소저장

환경친화적인 수소연료전지를 에너지원으로 사용하는 수소자동차는 수소의 안전한 저장에 대한 문제가 항상 제기되었으며, 수소저장장치는 적절한 양을 저장할 수 있고, 안전성이 확보되는 수소 저장 장치가 절실히 요구된다.

수소저장합금은 이러한 위험성을 줄일 수 있지만, 높은 온도에서 쉽게 녹는다는 단점이 있어 상온에서 저장해야 하는데, 아직 2 wt%를 넘기지 못하고 있다. 최근 미국의 에너지부(DOE)에서 전기 자동차의 상용화를 위해 제시한 목표치는 6.5 wt%이다. 이는 1m<sup>3</sup>당 62.5kg의 수소량을 의미하며, 대략 500 km를 주행할 수 있다.

탄소재료(탄소나노튜브, 활성탄소 등)는 수소저장합금의 문제를 해결하기에 알맞다고 알려져 있다. 상온에서 고체상태이면서 가장 가볍고 표면적이 넓은 탄소구조체를 다양하게 만들어 낼 수 있기 때문이다. SWNT는 수소 분자를 저장할 수 있는 긴 나노 채널과 넓은 비표면적의 좋은 수소 저장체로 기대되고 있다. SWNT는 직경이 0.7~3 nm 정도이고, 길이가 수십  $\mu\text{m}$  정도로 긴 파이프 구조이다.

수소분자는 탄소나노튜브의 외부보다 내부에서 더욱 안정된 상태를 가지는 것으로 나타났으며, 한 가닥의 탄소나노튜브는 수소를 저장하는 통과 같은 역할을 할 수 있는 것으로 알려졌다. 이러한 장점에도 불구하고 탄소 재료는 수소 저장에 효율적이 못한 것으로 알려졌다. 그 이유는 수소기체는 상온에서 적당한 압력아래 있을 때, 탄소재료 표면의 일부와 반응한다는 가설이 제기되었다.

17) 이영희, "탄소나노튜브의 물성과 응용," Sae Mulli, Vol. 51, No.2, 84, 2005.6

## 다. 향후 전망

우수한 특성을 갖는 플라스틱 태양전지는 변환효율이 극히 낮아서 상용제품에 응용되지 못하고 있다. 이것의 핵심기술인 전도성 고분자 개발과 탄소나노튜브의 분산기술개발이 필수적이다. 전 세계적으로 나노기술에 대한 연구개발이 집중되고 있어서, 복합나노구조형 플라스틱 태양전지의 핵심기술들이 빠르게 개발될 것이라 판단된다.

저가격 고효율의 복합나노구조형 플라스틱 태양전지 제조 공정들이 개발되고 나아가 양산적용이 가능해진다면, 기존 실리콘 계통의 태양전지가 많이 보급되지 못한 큰 이유였던 가격경쟁력을 확보할 수 있을 것으로 기대된다. 수 년내에 실용화 보급될 전기자동차에 배터리와 함께 부하조절 기능의 초고용량 캐패시터가 사용될 것이며, 특히 하이브리드 자동차에는 배터리를 대신하여 초고용량 캐패시터만 장착될 것으로 예상된다. 지속적인 신소재 개발에 의해 21세기 초에는 초고용량 캐패시터가 배터리 수준의 에너지 밀도를 가지는 제품이 전기자동차 이외의 여러 분야에서도 실용화 보급될 것이다.

탄소나노튜브 전극의 경우, 모든 표면적이 밖에 노출되어 있어 100% 용량발현에 기여함을 알 수 있어 탄소나노튜브가 초고용량 캐패시터의 전극 활물질로 응용에 충분한 가능성이 있음을 시사해주고 있다. 수소가스의 제조에 나노소재를 활용하려는 연구가 일부 있지만 아직까지 경제적인 의미를 부여할 수준에 이르지 못하고 있다.

## 6. 탄소나노튜브를 이용한 나노센서

### 가. 탄소나노튜브 가스센서

#### (1) 기술 개요

탄소나노튜브를 이용하여 가스센서가 제작되고 있으며, 넓은 표면적, 화학적 안정성, 높은 가스 흡착성, 나노크기 직경 등의 장점 때문에 가스센서로서의 가능성이 커지고 있다. 특히 가스센서로 적용하여  $O_2$ ,  $NO_2$ ,  $NH_3$  신경가스 등을 검출하는 연구들이 보고되었고, 부분 방전에 의해 발생하는 산화성 분해생성물을 검출하는 뛰어난 특성 때문에, 금속 챔버 내부에 설치되는 SWNT를 이용한 부분방전 검출용 가스센서의 개발이 활발하게 이루어지고 있다. 에코(환경)산업의 비중이 커지는 상황에서 친환경적인 가스센서의 개발은 우수한 미래 소자 확보를 위한 중요한 기술이다.

#### (2) 가스센서로서 탄소나노튜브의 재료적 특성

가스센서는 감지막 표면에 가스 분자들의 전기 화학적 흡착으로 부터 막의 전기 및 광학적 특성 변화를 이용하는 화학 센서의 일종이다. 가스센서는 보통  $SnO_2$ ,  $ZnO$  및  $TiO_2$ 의 금속-산화물계 물질을 감지막으로 사용하고 있으며, 빠른 응답 특성과 저가격 및 휴대용을 제작이 가능한 장점이 있는 반면에, 비선형적인 응답특성과 감도를 향상시키기 위해 200~500°C의 가열이 요구되어 예열시간 및 추가적인 전력 소모의 문제점들을 가지고 있다.

최근에는 이를 보완하기 위해 상온에서도 동작할 수 있는 다양한 센서들이 소개되고 있다. 흡착 표면적을 넓힌 다공질 실리콘이나 탄소나노튜브와 같은 나노 소재를 이용한 센서들이 그 예로서, 소형화 및 저전력 소모의 장점을 살린 상용화로서 진행 중에 있다. 표면에 가스 흡

작 방식의 센서들은 흡착에너지가 낮은 헬륨이나 네온과 같은 불활성 기체들을 검지하기에는 어렵고, 이 가스들은 전자와 충돌에 의해 이온화 시키는 물리적인 방식으로 측정되어야 한다. 이온화를 통한 검지 방식은 고전압이 인가되기 때문에 전극은 전기적 특성뿐만 아니라 내열성 및 내화학성이 강해야 하며, 최근에는 나노공학에 대한 관심의 확대로 탄소나노튜브의 합성과 응용에 대한 연구가 다양하게 이루어져 왔으며 탄소나노튜브의 우수한 물리적 화학적 특성으로 전자소자 등에 전극이나 기능성 재료로 활용하는 연구가 진척되고 있다.

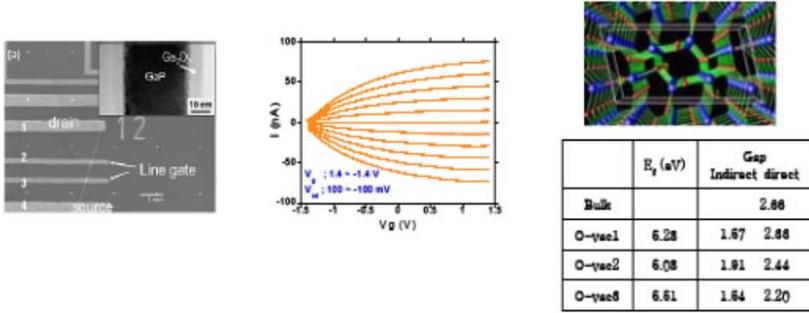
한편 지금까지 탄소나노튜브를 이용한 다양한 화학센서들이 연구되어 왔으며 이들은 화학적인 방식과 물리적인 방식으로 구분된다. 일찍이 화학적인 방식의 센서가 개발되었고 단일벽 또는 다중벽 탄소나노튜브의 표면에 가스 흡착에 따른 전기전도도 및 감지 막의 유전율 변화를 감지하는 방법으로 센서의 구조는 전계효과 트랜지스터 다이오드 및 정전 용량형으로 제작되었다.

측정은 주로 산화질소, 암모니아, 산소 및 이산화탄소 등의 가스 흡착성을 보이는 가스에 대해 이루어졌다. 탄소나노튜브를 이용한 물리적인 방식의 가스센서는 그 후에 발표되었으며, 불활성 기체인 아르곤, 헬륨 및 공기 등의 농도를 측정하기 위해 소개되었다. 물리적인 방식을 탄소나노튜브가 에미터(Emitter) 전극으로 우수한 성질을 갖추고 있으므로 전자의 전계 방출을 통해 중성가스 분자들과 충돌 및 이온화 과정에서 나타나는 방전 전류의 크기를 측정함으로써 가스농도를 검지하게 된다.

### (3) GaP 나노와이어 트랜지스터를 이용한 가스센서 소자제작

GaP 나노와이어에 전극을 붙여 n형 트랜지스터 제작하고 UV에 대한 전기전도도의 변화로 GaP 나노와이어의 포토센서 응용 가능성을 확인했다. GaP 나노와이어 표면의 산화막 형성과 전자구조 변화에 대한 계산으로 포토센서 작용이 GaP에 의한 것이 아니라 표면의 GaO 층에 의

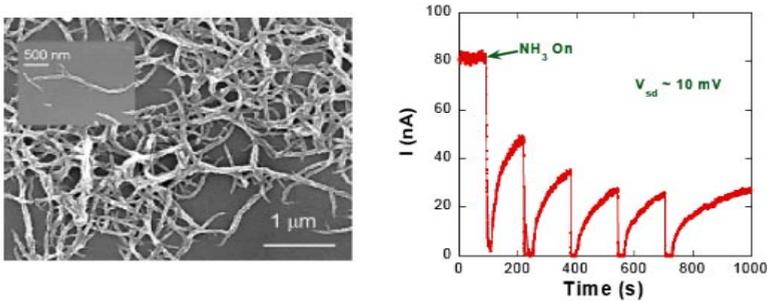
한 것임이 규명되었다. NO<sub>2</sub> 나 암모니아에 대한 반응은 크게 나타나지 않았으나 아민그룹을 포함한 유기분자로 도핑 가능성을 확인되었다.



〈그림 3-15〉 (a) Gap 나노와이어소자의 SEM 이미지, (b) Gap 나노와이어에서 관측되는 n형 게이트 효과<sup>18)</sup>

#### (4) 효소로 합성한 폴리아닐린 나노파이버 가스센서 소자제작

유전자 조작법으로 생산된 효소 peroxidase를 이용하여 organic/aqueous biphasic system에서 폴리아닐린(PANI) 나노파이버를 합성하며 PANI 나노파이버 FET 소자 제작 및 반도체 특성 측정하고 PANI 나노파이버의 산화, 환원가스에 대한 Sensing 특성을 확인했다.



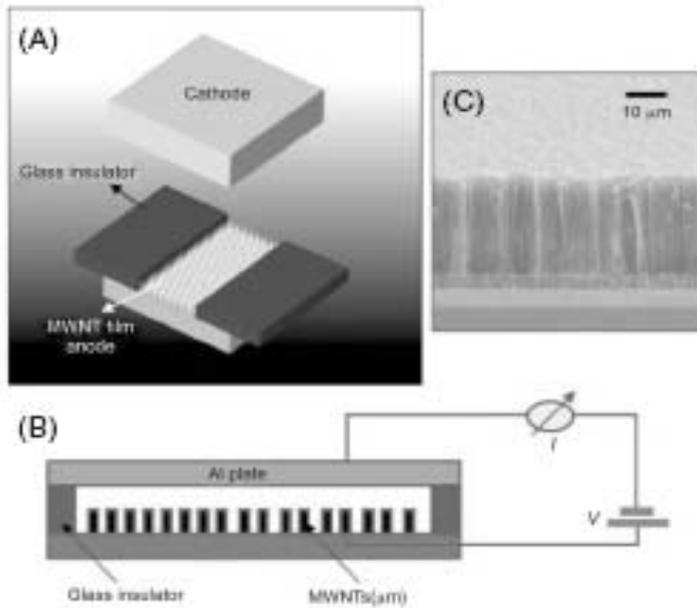
〈그림 3-16〉 (a) 효소로 합성된 PANI 나노파이버의 전자현미경 사진, (b) 암모니아 가스에 대한 PANI 나노파이버의 전기적 특성 변화곡선<sup>19)</sup>

18) 한국화학연구원, “나노센서 기본사업 연구보고서”, 2004

19) 한국화학연구원, “나노센서 기본사업 연구보고서”, 2004

### (5) 미니 가스센서 개발

현재 많은 관심을 받고 있는 나노튜브의 중요한 응용 중 하나가 미니 가스센서 개발 분야이다. 대표적인 가스이온화를 이용한 센서는 통상적으로 부피가 크고 고전압의 전력소모가 많은 장치이다. 탄소나노튜브를 사용하는 경우, 낮은 전압에서도 나노팁에서 매우 높은 전기장이 형성되어 breakdown voltage(파괴전압)를 낮출 수 있고 이러한 특성을 이용하여 저전력, 소형 가스센서의 개발이 가능하며 이러한 미니센서는 환경모니터링, 화학공정진단, 기타 가스검출 등 응용성이 크다.



〈그림 3-17〉 나노튜브 가스센서

- (A) 나노튜브양극-유리절연체-알루미늄 음극구조
- (B) 테스트장치
- (C) 탄소나노튜브 SEM<sup>20)</sup>

20) NICE, “미니가스센서개발” NICE, Vol.21, No.5, pp.564, 2003

<그림 3-17>은 센서의 기본적 구조를 나타낸다. 탄소나노튜브는 화학증착(CVD)을 이용하여 성장하였으며 25~30nm 직경, ~30 $\mu$ m 길이를 가지며 그림(B)의 장치에서 전극사이를 기체로 채우며, 인가된 전압에 따른 방출 전류를 측정된다.

## (6) 향후 전망

나노 소재에 대한 연구는 기존 소재에서는 실현할 수 없었던 새로운 물성이나 기능을 얻는 데 목적이 있고, 이를 위해서는 크게 기존 소재를 나노 크기로 미세화 하는 방법과 나노 크기의 새로운 물질 구조를 원자 단계로부터 조합하는 두 가지 방법이 이용될 수 있다.

현재와 같은 초기단계에서는 미세화를 통한 나노 소재 개발이 대부분을 차지하고 있으며, 기존 소재를 가지고 지름이나 두께를 나노미터화 함으로써 새로운 물질 구조를 가진 나노 소재를 개발하는 것이 일반적인 방법이다.

나노 소재는 나노 기술의 기초 연구 분야인 나노 공정, 나노 기기, 나노 측정 등의 분야에서 나온 성과와 접목됨으로써 큰 발전을 이루게 될 전망이고, 특히 나노 소재 분야가 정보/전자 분야의 나노 기술과 융합되면 나노 기술과 관련한 큰 시장이 형성될 것으로 기대된다.

## 나. 탄소나노튜브 바이오센서

### (1) 기술 개요

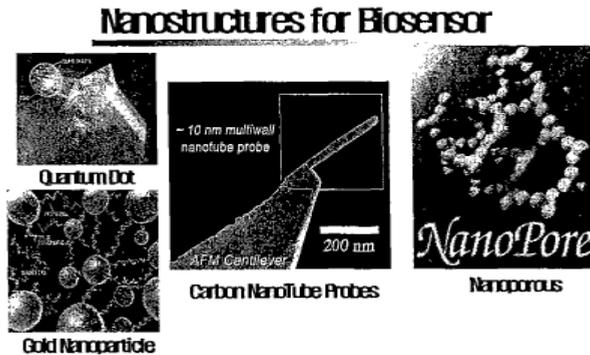
나노기술은 최근 전자공학/컴퓨터 및 환경 분야와 더불어 특히 의료 및 건강 분야에 있어 획기적인 기술적 진보를 이루어, 그 의학적 응용 분야의 범위 및 종류가 기하급수적으로 증가할 것으로 보인다. 그 중 나노바이오센서는 미래사회에 각광을 받을 가장 큰 소재로서, 나노기술을 적용시켜 기존의 바이오센서와는 차별화되는 기능을 가진 바이오

센서를 의미한다.

세계적으로 나노 바이오센서의 개발 및 상용화를 위한 연구가 활발하게 진행되고 있고, 나노 바이오센서의 시장이 형성되고 크게 증가할 것이라는 예상에는 이견이 없다. 따라서 이에 대비하여 나노 바이오센서의 개발 동향을 파악할 필요가 있다.

나노 바이오센서의 소재의 가장 큰 부분은 탄소나노튜브가 차지할 것으로 예상되며 탄소나노튜브는 합성 방법, 크기, 강도, 유연성, 전도성 등 많은 성질들이 기존의 소재들과는 다른 고유한 특성을 가지고 있다. 신기술의 발전과 융합기술의 중요성이 강조되면서, 새로운 나노기술을 이용한 나노 바이오센서 개발에 관한 연구가 활발하게 진행되고 있고 기존의 바이오센서가 갖는 특성과 나노 구조체의 독특한 성질을 결합하여 그 동안 이루지 못하였던 성능상의 획기적인 발전이 기대되고 있다.

나노 구조체의 특성을 활용한 나노 바이오센서는 센서의 감도 특성을 극대화함으로써 작동에 요구되는 샘플의 양을 극소화 할 수 있게 되어, 비침습적(non-invasive) 혹은 최소 침습적(minimally invasive)인 방법으로서의 사용을 가능하게 해주는 물론이고 분석 물질의 농도 변화를 극소의 선택된 위치에서 실시간 감시하게 해줄 것으로 기대된다.



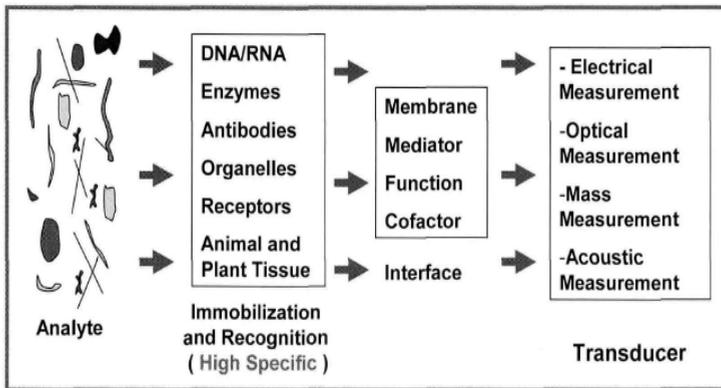
〈그림 3-18〉 나노바이오센서의 응용<sup>21)</sup>

21) 식품의약품안전청, “나노바이오센서의 품질관리 평가방법 및 기준개발”, 2004

## (2) 바이오센서로서 탄소나노튜브의 특성

생체감지물질(bioreceptor)과 신호변환기(signal transducer)로 구성되어 분석하고자 하는 물질을 선택적으로 감지할 수 있도록 한 장치인 바이오센서의 생체감지 물질에는 특정 물질과 선택적으로 반응 및 결합할 수 있는 효소, 항체, 항원, 렉틴 등이 있다.

바이오센서는 여러 바이오 물질들이 가지고 있는 고유한 특징, 즉 특정한 물질과만 반응하는 성질을 이용하여 측정하고자 하는 분석 물질이 포함된 용액에서 관심 있는 분자들을 정량적으로 측정한다. 측정하는 센서 끝단에 바이오 부분이 있음을 의미하며 측정 방법으로는 전기화학적 계측법, 광학적 계측법, 질량적 계측법 등이 있으며 여기서 얻어진 신호들은 신호 조정기를 통하여 최종은 전기적 신호로 다시 변환되어 보여지게 된다.



〈그림 3-19〉 바이오센서의 메커니즘<sup>22)</sup>

나노바이오센서는 선택성(selectivity)와 감도(sensitivity)의 특징이 있고 그 외 고려할 사항이 있는데, 선택성은 바이오센서의 정의에서 알

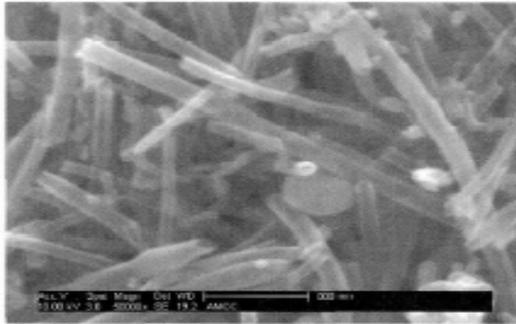
22) 윤여홍, 허신, 이성철, "나노-바이오 센서 기술과 특성", 한국정밀공학학회지, Vol.25, No.11, pp.7-14, 2008.11

수 있는 바와 같이 센서 끝단의 DNA, RNA, 항체 등의 리셉터가 얼마나 용액 안에 관심 있는 분자들을 선택적으로 검출하여 전기적 신호로 보여주는가를 의미하고, 감도는 측정하고자 하는 대상이 포함된 용액에서 관심 있는 분자들의 농도 변화에 따라 센서가 반응하는 민감성을 의미 한다. 즉 얼마나 낮은 농도(Limit of Detection, LOD)에서 시작하여 어떤 민감도로 어느 범위까지 측정할 수 있는가를 말한다. 그 외 고려해야 하는 것은 바이오센서 끝단에는 선택인자 즉 바이오 분자를 포함하고 있다. 따라서 이로 인하여 센서를 오랫동안 보관하는 데는 한계가 있고 보관도 적절한 조건이 필요하게 된다.

### (3) 탄소나노튜브를 이용한 바이오센서 기술

#### ① 전기화학 방식에 의한 탄소나노튜브 효소 센서

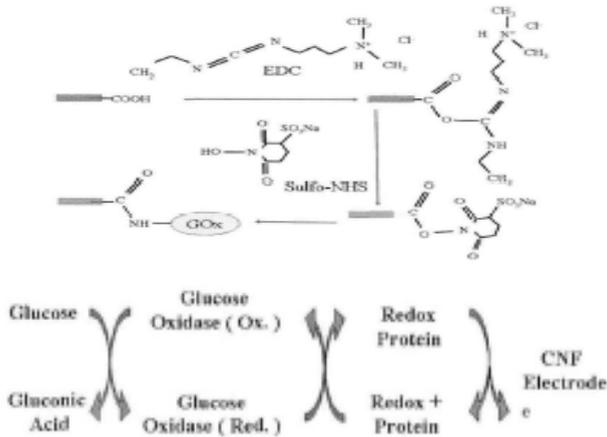
전기화학 방식에 의한 나노-바이오센서는 측정하고자 하는 분자가 센서 끝단에 있는 효소와 반응을 하게 되며, 이 반응을 통하여 새로운 생성물이 발생된다. 이러한 생성물은 전기화학적 방법 중의 하나인 Amperometric 방법을 이용하여 검출한다.



〈그림 3-20〉 나노-화이버 끝단이 열린 카복실리키 형성 모습<sup>23)</sup>

23) 윤여홍, Mark J. Schulz, Vesselin Shanov, “전기화학적 방식에 의한 탄소나노튜브 바이오센서 기술”, 한국정밀공학회지, Vol.25, No.11, pp.15-21. 2008.11

이러한 바이오센서를 만들기 위해서는 황산, 질산, 염산 등의 강산 등을 이용하여 나노튜브를 처리하게 된다. 그리하여 위의 <그림 3-20>에서 보는 것과 같이 카복실기를 형성하게 된다. 이러한 나노 튜브의 카복실기는 밑의 <그림 3-21>에서 보는 것과 같이 Carbodiimide Hydrochloride 같은 화학물질을 이용하여 활성화 시킬 수 있으며, 이는 포도당 산화효소(Glucose Oxidase, GOx) 같은 효소 또는 항체, DNA/RNA/PNA 등을 나노튜브에 공유 결합시킬 수 있다.



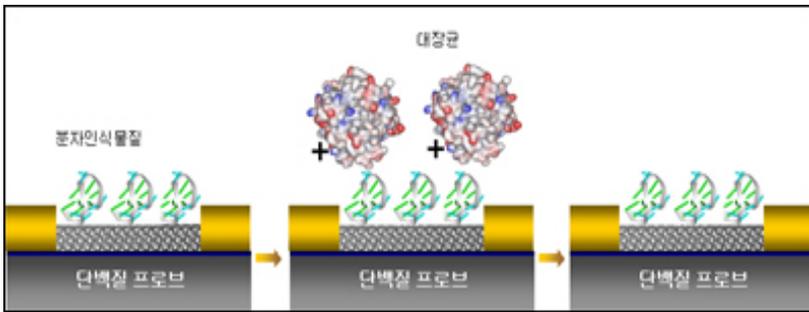
<그림 3-21> Functionalized CNF and strategy to immobilize GOx on the open-end of CNF

### ② 대장균 나노-바이오센서

나노-바이오센서란 나노기술을 이용한 바이오센서를 말하며, 기존의 바이오센서 보다 감도가 우수하다. 현재 상용화된 바이오센서는 특정 단백질이나 미생물에 반응하는 형광물질을 이용, 변화되는 색깔을 감지해내는 방식이다. 따라서 대장균을 감지하는 바이오센서의 경우 대장균의 유무를 파악하는 것은 가능하지만, 그 양을 알아내는 것은 어렵다. 나노기술을 이용한 나노-바이오센서는 나노 소재를 이용함으로써 반응하는 표면적을 확대해 감지되는 감도를 높일 수 있다. 현재 나노-

바이오센서에 사용되는 나노 소재로는 탄소나노 튜브와 실리콘을 이용한 나노 와이어 등이 대표적이며, 나노 와이어를 이용하는 경우 각 소자별로 균일한 성능을 확보할 수 있지만 탄소나노 튜브를 이용하는 경우보다 감지감도가 낮다.

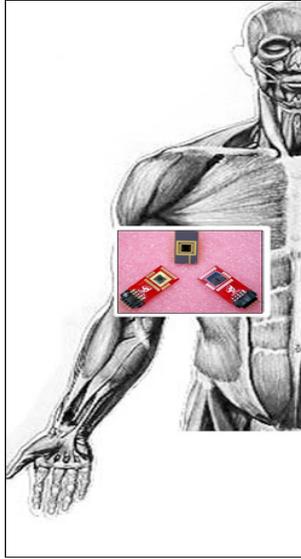
탄소나노튜브를 이용한 나노-바이오센서는 전기적 변화의 입출력을 위한 회로기판 위에 바이오센서 칩을 부착시킨다. 칩 표면은 탄소나노 튜브로 구성되며 튜브위에 분자인식물질(분자인식물질)을 부착해 특정 미생물 등을 감지해 낸다. 분자인식물질과 특정 미생물이 결합하면 탄소나노튜브의 전기적 특성이 달라지고 달라진 수치를 개인휴대단말기(PDA)나 컴퓨터로 읽어냄으로써 어느 정도의 미생물이 분포하는지 알 수 있다. 대장균 등이 분자인식물질에 결합하면 아래쪽 탄소나노튜브(회색부분)의 전기적 특성이 변화돼 이를 감지하게 된다.



(그림 3-22) 대장균 나노-바이오센서 작동원리<sup>24)</sup>

현재 상용화를 추진하고 있는 대장균 나노-바이오센서는 센서의 칩 부분에 12개 안팎의 소자가 집적돼 있으며 소자별 감지가 가능해 미생물의 양 측정도 가능하다.

24) 서울경제, “나노-바이오센서 인체 내 삽입, 질병도 진단한다” . 2008.11.19



〈그림 3-23〉 나노-바이오센서의 연구용 시제품

먹는 물이나 대형 급식시설의 식품 속에 있는 대장균의 양이 안전한 수준인지 알아내려면, 물이나 식품의 시료를 채취, 실험실로 가져와 확인한다. 정확한 확인을 하려면 균을 배양해야 하기 때문에 약 24시간이 지난 뒤에야 결과를 알 수 있다. 그러나 대장균을 감지하는 나노-바이오센서를 이용하면 현장에서 20분 안에 대장균 양에 따른 적합 여부를 확인하는 것이 가능하다. 이러한 나노-바이오센서의 크기를 줄이고 생체 적합성을 확보하면 생체 안에 삽입, 혈당을 재거나 암 진단 등에 활용할 수 있고 몸속에 센서를 넣고 생활하다가 특정 질병이 발생하거나 질환에 감염되면 외부 진단 장치에 이 사실이 무선통신으로 전달되도록 하는 것도 가능하다.

#### (4) 나노-바이오센서의 기술 동향

##### ① 효소센서 분야

올메디쿠사의 글루코닥터는 짧은 측정시간(11초)과 극소 혈액 필요

량(4 $\mu$ l)으로 정확한 측정이 가능하다. (주)바이오웍에서 개발한 비침습성 혈당센서는 1개의 센서로 12시간 사용이 가능하며 20분마다 자동으로 혈당을 측정해 주는 장점이 있다.

② 면역분석센서 분야

신진메딕스, 녹십자, 동아제약, 제니스라이프사이언스, (주)다이아 칩 등에서 에이즈, 매독, 결핵, 유행성출혈열, 감염 등의 진단시약들을 개발하고 있다.

(표 3-52) 나노-바이오 융합기술 분류<sup>25)</sup>

주요 기술분류	세부기술
검지 및 정제	- 나노 감지체 기술, 바이오 물질 검지 - 나노 추출·분리·변응, 바이오물질 나노 정제
치료 및 임플란트	- 막물전달용 나노 구조체, 표적지향 나노 막물전달기술, 생체 친화적 나노 구조체, 나노 구조체를 이용한 치료기술, 생체친화적인 표면처리기술, 생체적합 임플란트 나노 구조체
정보	- 바이오분자 전자회로 제작기술 - 바이오분자를 이용한 정보처리 및 저장기술
에너지	- 바이오매스 에너지 변환기술 - 바이오에너지 나노 활용기술
극한 제어 및 분석	- 극한분석기술, 극한제어기술 - 생체 친화적 무기물 표면 처리기술
생필품	- 식품, 화장품 및 기타 생필품 처리 기술
농림	- 동식물용 나노 바이오센서 및 칩 - 농작물 및 가축병 조기 진단기술
수산	- 호르몬 및 항생제의 나노 전달체 - 환경친화적인 수산 호르몬 및 항생제, 식품 특성 감지 나노 바이오센서, 수산식품 안전성 평가 기술
종합 나노바이오 기술-암정복용	- 초고강도 나노 센서 및 진단 칩 기술 - 나노 구조를 이용한 초고강도 바이오 이미징 기술, 암 발병 조기 진단 및 예측 기술, 표적 지향적 암치료 기술
안전성, 영향평가 및 표준화	- 나노 구조의 인체영향평가 기술, 나노 구조의 환경영향평가 기술, 나노 재료 규격 표준화, 나노기술 안전성평가 기술, 나노제품 안전성 및 환경영향평가 기술, 나노 바이오 기기 규격 표준화, 나노 소자 성능 및 규격 표준화

25) 나노정보분석팀, “나노-바이오 융합기술의 연구개발 동향”, 한국과학기술정보연구원, nano weekly 269호, 2008.4.11

### ③ DNA 센서 분야

경북대에서 한국인 모발에서 찾아낸 유전자 3천개를 올려놓은 DNA 칩을 개발하였고 KAIST 의학과과학기술연구센터에서 DNA 칩과 판독기를, 바이오메드랩은 자궁경부암 진단용 DNA 칩을 개발하고 있다.

### ④ 단백질 센서 분야

서울대 유전공학연구소가 국내 처음으로 항원-항체를 이용한 단백질 칩으로 자동진단시스템을 개발하여 진단시간을 단축시키고 샘플처리 능력을 40배 이상 향상시켰다.

## (5) 향후 전망

대개의 경우 센서는 이미 기존에 연구되어 알려진 것들을 소형화하여 새로 개발된 칩에 장착하는 방식을 택한다. 그러나 많은 경우 화학 센서 또는 분석 화학시스템에 대한 기본적 개념의 부족으로 새로운 과학적 원리나 개념에 바탕을 둔 시스템은 찾기 어려우며 실용성 또한 의심스러운 경우가 많다. 따라서 세계적인 센서 연구진들은 전자공학-기계공학-화학-임상의학 등의 팀을 구성하여 현실적 필요를 고려한 종합적 연구를 시도하고 있다.

반면 아직 한국의 실정은 각 분야별 인력도 많이 부족하기 때문에 이러한 종합적 연구체계가 갖추어 지기에는 상당한 시간이 걸릴 것으로 예측된다. 학계의 연구방향과 산업체의 연구방향이 추구하는 목표가 시차가 있는 경우 일반적으로 학술지에 발표되는 내용들이 실제 상품으로 경쟁력을 가지는 시간은 10~15년 사이로 본다. 따라서 늦어도 2010년 이후에는 lab-on-a-chip과 같은 분석화학 시스템이 집적화된 바이오센서, 지노믹스에 바탕을 둔 실용적 DNA 센서, 프로테오믹스에 바탕을 둔 단백질센서가 시장의 한 구석을 차지하기 시작하여, 2015년 이후에는 시장의 상당한 부분을 장악하게 되지 않을까 예측된다.

나노-바이오센서의 제작에 대한 기능기 생성이나 단백질 부착 등의 각 단계에서 특성을 정량적으로 해석하는 것은 매우 중요하다. 따라서 특성을 정량적으로 해석하는 방법을 개발하는 것이 필요한 과제이며, 또한 실험을 진행하기 위해 이용되는 각종 측정 장비의 활용도 역시 효율적 발전 및 개발에서 중요한 과제일 것이다.

그 밖에도 최근 나노 재료의 크기에 의한 시스템적인 독성이 문제되고 있고, 예를 들어 혈관 속에서 측정을 한다고 하면, 혈관 속을 움직이다가 혈관 밖으로 나가 혈액 뇌관문을 통과 하는 문제가 발생되어 안전에 문제가 발생할 수 있다. 이런 문제들을 해결하기 위한 메커니즘적 구조의 과제도 해결해야 할 문제라 할 수 있다.

나노-바이오센서의 경우 서로 다른 두 기술을 접목시켜 만든 것이기 때문에 두 분야의 전문지식이 요구 되는 분야이다. 특히 생물, 화학, 의학을 비롯하여 물리, 기계, 전자, 재료, 컴퓨터 기술 등이 융합된 총체적인 시스템이므로, 이러한 분야의 바탕으로 하나의 새로운 과제를 만들었기 때문에 두 분야의 전문적인 인력을 양성하는 것이 가장 시급한 문제라고 생각된다. 그래서 정부에서는 향후 이 분야의 석□박사급 연구원을 연간 200명씩 육성한다는 계획아래 현재 여러 연구 분야에 학제간 지원을 하고 있다.

## 산업화 동향

### 1. 개요

탄소나노튜브는 뛰어난 전기적 특성과 물성으로 인하여 나노기술에서 중요한 산업 소재로 연구 개발되고 있다. 특히 탄소나노튜브는 여러 산업 분야에 적용될 수 있는 무한한 시장 잠재성을 갖고 있어 미국, 일본, 중국 등의 국가에서 탄소나노튜브를 이용한 전기 및 전자 산업, 복합소재 등의 여러 분야에서 국가적 지원 아래 탄소나노튜브의 생산 및 응용에 대한 연구를 진행하고 있다. 탄소나노튜브는 <표 4-1>에서 나타난 바와 같이 탄소나노튜브가 여러 다양한 분야와 제품에 적용이 될 수 있어, 탄소나노튜브는 단기간에 산업 전반에 사용할 수 있을 것으로 기대된다.<sup>26)</sup>

일반적으로 소재의 산업화 단계는 <그림 4-1>에서 보는 바와 같이 1) 응용 기술의 개발, 2) 사업성 평가, 3) 인체 및 환경 안정성 평가 등의

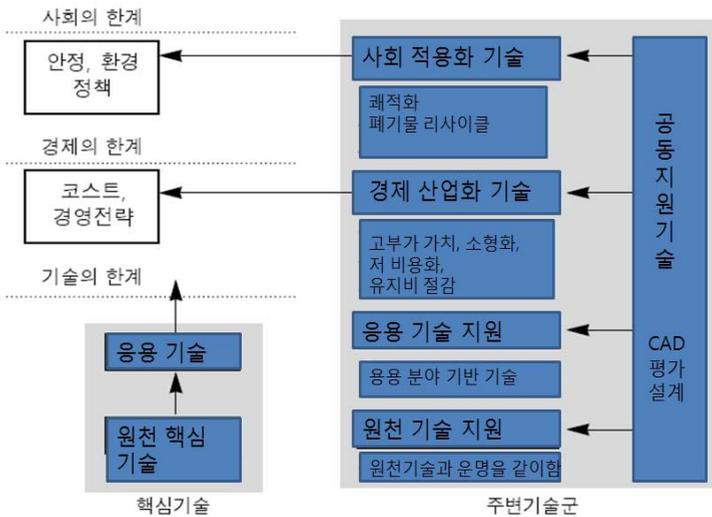
<표 4-1> 탄소나노튜브의 적용 분야 (원재료, 중간품, 최종품)

Display	Television, Computer Monitors, Military Equipment, Others
Memory Chips	Computers, Consumer Electronics, Military Equipment, Others
Composite Materials	Motor Vehicles, Aircraft, Sports Equipment, Others
Nanosensors	Standalone Sensors
Microscope Tips	Scanning Probe, Microscopes
Fuel Cells	Portable Electronics, Automobiles

26) The Nanotech Report 4th edition, Lux Research Inc., 2006

과정을 거친다. 탄소나노튜브 또한 1) 응용 기술의 개발, 2) 탄소나노튜브가 적용된 제품의 경제성, 3) 탄소나노튜브가 적용된 제품의 안전성 등 많은 부분에서 탄소나노튜브의 사업화에 관계된 평가가 이루어지고 있지만, 탄소나노튜브는 이러한 소재의 산업화의 어려움을 극복하고 실제 산업 제품으로 적용되는 과정에 있다.

현재 탄소나노튜브 산업화의 진행 과정을 살펴보면 초기의 합성 및 응용기술 개발 연구 단계에서 실제 산업의 응용 제품에 쓰이는 단계로의 산업화로 진행되고 있는 중이다. 탄소나노튜브의 산업화를 위하여, 탄소나노튜브의 대량생산과 응용 제품 연구 분야로 나누어 진행되어 오고 있다. 현재, 탄소나노튜브가 산업제품 전반에 사용되기 위하여 가장 중요한 것은 탄소나노튜브의 가격이다. <표 4-2>에서와 같이 탄소나노튜브의 가격은 산업제품 전반에 사용되고 있는 카본 블랙과 카본파이버와 비교하여 가격이 월등하게 높다. 따라서 탄소나노튜브가 카본 블랙과 카본파이버와 경쟁하여 탄소나노튜브의 시장을 형성 위하여 가



<그림 4-1> 소재의 사업화 단계

자료 : 노무라 종합연구소 (1991)

장 시급히 해결되어야 요건은 시장이 요구하는 가격으로 탄소나노튜브를 공급할 수 있어야 한다.<sup>27)</sup>

〈표 4-2〉 탄소나노튜브, 카본블랙, 탄소섬유 가격 비교

종류	1 g 가격
카본블랙	10 ~20 원
탄소섬유	100 원
탄소나노튜브	MWNT : 200 원 SWNT : 10,000 원

현재 카본블랙 시장은 일본의 경우 고무용 카본블랙은 67만톤~70만톤의 생산 규모를 보이고 있고, 보통 카본블랙 가격은 kg당 500엔 ~ 2000엔 정도이다. 최근에는 도전성 카본 ‘커티블랙’이 개발되어 2002년에 약 3,000톤이 판매된 것으로 추정된다. 이 전도성 카본 ‘커티블랙’은 IC포재, 전기부품, 케이블의 반도체 등의 플라스틱으로부터 고무, 토너, 도색원료, 착색제, 건전지, 배터리 전극재료 등 폭넓은 분야에서 이용되고 있다. 이 ‘커티블랙’은 종래의 도전성 카본블랙에 비해 1/2~1/3의 첨가량만으로 같은 도전성을 부여할 수 있기 때문에 베이스 수지나 도료 물성에 미치는 영향을 억제할 수 있고 또한 혼련에 의한 도전성 저하도 적다.

탄소섬유는 크게 나누어 PAN계와 피치계의 두 종류가 있는데, 탄소섬유 시장의 대부분은 PAN계이며, 피치계는 전체의 1/10을 차지한다. <표 4-3>에서와 같이 세계 PAN계 탄소섬유 수요량은 2003년에 1,300톤에 달한 것으로 추정되고, PAN계 탄소섬유는 일본 생산회사가 세계 시장의 80%를 생산하고 있다. 현재 탄소섬유 수요는 항공, 스포츠레저, 토목·산업용 세 부분으로 크게 쓰인다. 항공 분야에서는 항공기용도 수요로 항공기의 2차 구조재에 쓰이고 있고, 기종에 따라 다르지만 항공기 한대 당 탄소섬유가 6~7톤 쓰이고 있다. 스포츠레저 분야에서는 골

27) 한국과학기술정보연구원, 탄소나노튜브(심층정보분석), 2002

프사프트, 낚시대, 라켓(테니스, 배드민턴, 스쿼시) 세 가지에 주로 많이 사용한다. 토목 산업분야에서는 건축의 보강용으로 쓰인다. 또한 자동차분야에서의 탄소섬유는 커넥터나 엔진관련 내열재 등 작은 부품에 쓰이고 있다. 또한 탄소섬유는 경량, 고강도화, 고강성화도 가능하여 자동차용 소재로서 주목받고 있으며 가격이나 리사이클 등의 문제가 해결되면 시장이 크게 확대될 가능성이 있다.<sup>28)</sup>

〈표 4-3〉 PAN계 탄소섬유 분야별 수요규모 추이와 예측

(단위:톤)

	2001년	2002년	2003년	2004년	2005년	2006년
토목·건축	6030	6580	7190	7860	8600	9400
스포츠레저	4020	4020	4050	4080	4120	4160
항공·우주	2850	2850	2780	2919	3070	3230
합 계	12900	13450	14020	14859	15790	16790
전년대비		104%	104%	106%	106%	106%

탄소나노튜브의 시장을 형성하기 위해서는 기존의 카본블랙 및 탄소섬유가 쓰이는 분야를 탄소나노튜브로의 대체하는 방법과 탄소나노튜브 고유의 특성을 이용한 제품을 개발하는 방법이 있다. 현재 탄소나노튜브가 카본블랙, 탄소섬유와 비교하여 뛰어난 물성과 전기적 특성을 가지고 있지만 시장을 형성하는데 어려움을 겪는 부분은 가격이다. 현재 탄소나노튜브의 가격은 카본블랙, 탄소섬유와 비교하여 비싸기 때문에, 시장에서 가격 경쟁을 하여 카본나노튜브의 시장을 형성하는 것은 매우 어려운 실정이다. 실제 탄소나노튜브가 카본블랙, 탄소섬유와 경쟁을 하기 위하여서는 MWNT의 경우 100원/g까지 가격하락이 이루어지지 않으면 산업에 쓰이는 부분은 극히 일부 용도의 시장에 한정될 가능성이 있다. 단 탄소나노튜브의 경우, 첨가에 따라 도전성 부여 등 본래 목적만이 아니라 기계적 강도나 열팽창 억제 등 2차적으로 파생되

28) カーボンナノチューブの可能性と将来予測, 일본 矢野経済研究所, 2004

는 성능을 기대할 수 있으므로 가격하락이 잘 이루어지면 광범위한 용도로 산업전반에 사용될 가능성은 있다. 따라서 탄소나노튜브를 기존의 카본 블랙과 탄소섬유와 경쟁할 수 있는 가격으로 공급하기 위한 대량생산 기술 및 방식의 연구가 많은 나라에서 경쟁적으로 진행되고 있다. 현재, 탄소나노튜브의 대량합성에 대한 연구는 초기의 실험실 수준인 아크방전, 레이저 증착법, 화학증착법 등의 합성법에서 발전하여, HiPCO 방식, Gas Stream 방식, Fluidizing Bed Reaction 방식, Plasma Arc Discharge 방식 등 탄소나노튜브의 대량생산기술이 활발하게 개발되고 있다.

<표 4-4>는 대량합성 방식을 개발한 회사에서 각각의 성장기술 방식을 이용하여 탄소나노튜브를 제조 및 판매를 하고 있어, 가격적 측면에서 카본블랙, 탄소섬유와 가격 경쟁력을 확보할 수 있을 것으로 예상되어, 탄소나노튜브의 산업화가 빠르게 앞당겨 질 것으로 예상되고 있다.<sup>29)30)31)32)</sup>

## 2. 국내외 생산 동향

### 가. 국외 생산 동향

탄소나노튜브의 초기의 합성은 연구용 정도의 소량합성이 대부분이었다. 이후 탄소나노튜브의 뛰어난 전기적, 물리적 특성과 탄소나노튜브를 이용한 다양한 산업적 응용연구의 진행으로, 탄소나노튜브를 대량 생산하여 산업화 시키려는 연구가 진행 중에 있다. 1990년대 초의 연구용 소량 생산은 다양한 생산방식을 사용하여 연구 개발되었다. 초

29) J. Vacuum Science & Technology A, Vol.19, No.4, Bronikowski MJ, Willis PA, Colbert DT, Smith KA, Smalley RE, 1800-1805, 2001

30) Clean Techn Environ Policy, DOI 10.1007/s10098-006-0083-2, Springer-Verlag, 2007

31) Plasma Sources Sci. Technol. 12 M Meyyappan, Lance Delzeit, Alan Cassell1 and David Hash, 205-216, (2003)

32) T.W. Ebbesen and P.M. Ajayan, Nature, 358, 220, 1992

기의 대학이나 연구소에서 연구용 탄소나노튜브의 소량생산에서 현재는 많은 회사에서 다양한 방식의 대량 생산방식을 사용하여 탄소나노튜브를 생산하고 있다. 세계의 탄소나노튜브의 생산 동향은 미국의 Hyperion Catalysis International 사에서 평균 10nm의 직경을 가지는 탄소나노섬유를 대량 합성하고 있다. 미국의 CNI 회사는 HiPCO 공정을 SWNT를 대량 생산하고 있다. 일본의 Misui는 다중벽탄소나노튜브를 2002년 120톤 규모로 생산할 수 있는 공장 설립을 발표하였다. 일본의 Showa Denko는 VGCF를 연간 수백톤, 다중벽탄소나노튜브는 연산 수백 kg을 생산하고 있다. 특히 주목을 끄는 것은 중국 Tsinghua 대학에서 다중벽 나노튜브를 연간 120톤 규모의 생산을 발표하고 있다.<sup>33)</sup>

탄소나노튜브의 대량생산은 미국, 일본 등의 업체를 중심으로 약 10개 정도이며, 미국업체로는 Hyperion은 연간 MWNT를 200T 이상의 생산이 가능한 설비를 가동중에 있다. CNI는 HipCO 방식을 사용하여 SWNT를 연산 5톤 규모로 생산하고 있다. 일본 업체로는 쇼와덴코는 MWNT를 연간 50톤을 생산할 수 있는 시설을 가지고 있다. 특히 일본의 CNRI는 MWNT를 Fluidizing bed reaction 공정을 사용하여 연간 120톤, SWNT를 연간 1톤 규모로 생산할 수 있다. 중국의 Shenzhen Nanotech Port Co는 MWNT, SWNT를 연간 수톤 규모로 생산 할 수 있는 설비를 가동 중에 있다. 비록 이들 업체에서는 탄소나노튜브를 대량 생산공급 할 수 있는 능력이 있다고 판단되나, 실제 탄소나노튜브를 이용한 응용제품의 출시가 아직 이루어지지 않아 대부분 소량만 생산하고 있다. 대부분의 수요처는 연구용 수요가 대부분을 차지하고, 전도성 복합소재에 사용되는 특수 도료에 일부 사용되고 있다. 현재 탄소나노튜브 가격은 탄소나노튜브의 생산방식 및 생산량의 증가에 의하여 탄소나노튜브의 가격의 하락이 예상된다. 따라서 조만간 시장에서 요구하는 MWNT 기준 100원/g 의 가격이 형성되면 대량의 탄소나노튜브가 쓰일 것으로 예상되고 있다.

33) 탄소나노튜브[심층정보분석], 한국과학기술정보연구원, p62~64, (2002)

〈표 4-4〉 탄소나노튜브 해외 주요 생산 기업

기업명	국가	특징	생산능력
Carbon Nanotechnologies Inc.	미국	-Rice대학으로부터 HiPCO 공정에 대한 라이선스를 획득. -Smalley 공동설립, Kellogg에 합병됨 -단일벽, 이중벽, 삼중벽 탄소나노튜브 공급에 집중 -SWNT 대량합성 (HipCo method) -응용분야 : 전계방출, 에너지소재, 기능성복합재	SWNT 연간 5 T (03)
Hyperion Catalysis International	미국	-원천 다중벽나노튜브 제조업체로서, 복합물 응용을 위한 고분자와 선혼합된 다중벽 나노튜브를 개발 -82년설립(상표명, FIBRIL), GE에 합병됨 -MWNT 대량합성 (Gas stream reaction) -응용분야 : 자동차, 전자, 고분자 수지	MWNT 연간 200 T 이상 (03)
Carbolex	미국	-Sigma-Aldrich를 통해 SWNT를 그램 단위로 판매 -98년설립(Kentucky 대학) Eklund 설립 -전기방전법 SWNT, MWNT 판매 -응용분야 : 전계방출분야	SWNT, MWNT 연간 수 T (03)
Showa Denko	일본	-2001년 1월부터 양산(300kg/day) -응용시장 주력(VGCNF) -2001년 CNF와 MWNT 양산 (Gas stream reaction) -응용분야 : 2차전지, 섬유, 복합재	MWNT 직경 150 nm : 연간 40 T (03), MWNT 직경 80 nm : 연간 10 T (03)
CNRI	일본	-Mitsui 자회사 -MWNT 대량합성기술 개발, SWNT 기술개발중(Fluidizing bed reaction) -응용분야 : 연료전지, 반도체, 의료용	MWNT : 연간 120 T (03), SWNT : 연간 1 T (03)
Mitsubishi 중공업	일본	-Frontier Carbon 자회사 설립 -SWNT 대량합성 (Fluidizing bed reaction) -응용분야 : 전계방출, 연료전지, 기능성복합재	SWNT, MWNT 연간 수 T (03)
Nikkiso	일본	-SWNT, MWNT 대량합성 (Arc discharge) -SWNT 대량합성 (Fluidizing bed reaction) -응용분야 : 연료전지	SWNT, MWNT 연간 4 T (03)
JFE-CNT	일본	-MWNT 대량합성 (대기압 Arc discharge) -응용분야 : 전계방출, 기능성복합재	

Toray	일본	-SWNT, MWNT 대량합성, C60 소스, Zeolite, Fe/Co catalyst (나고야대 시노하라교수 기술) -응용분야 : 전계방출, 에너지소재, 기능성복합재	
JFCC (Frontier Carbon)	일본	-SWNT 대량합성 (Fluidizing bed reaction) -Selective growth MWNT 합성 -응용분야 : 연료전지, 전계방출, 반도체소자	
Microphase	일본	-SWNT, DWNT 대량합성 (Gas stream reaction) -응용분야 : 연료전지, 전계방출	
GSI 크레오스	일본	-Cup-shaped MWNT 대량합성 (Gas stream reaction), Carbere (Endo교수 기술제휴) -응용분야 : 연료전지, 전계방출	MWNT 연간 40 ~ 50 T ('03)
Fujitsu	일본	-Selective growth MWNT 합성 -응용분야 : 반도체소자	
Hitachi	일본	-SWNT 대량합성준비중 -응용분야 : 연료전지	
NEC	일본	-Carbon Nanohorn (Laser vaporization) -응용분야 : 연료전지	
Honjo Chemical	일본	-SWNT, DWNT, MWNT 대량합성 (Arc discharge) -응용분야 : 전계방출, 기능성복합재	SWNT, MWNT 연간 360 kg ('03)
Nanocyl	벨기에	-유럽의 대표적 기업 -SWNT, DWNT, MWNT 대량합성 (Gas stream reaction) -응용분야 : 연료전지, 전계방출 응용, 기능성복합재	
Shenzhen Nanotech Port Co.	중국	-아시아에서 가장 큰 탄소나노튜브 제조업체 -중국과학원설립회사 -SWNT, DWNT, MWNT 대량합성 (Plasma Arc discharge, Gas stream), -응용분야 : 연료전지, 전계방출 응용, 기능성복합재	SWNT, MWNT 연간 수 T ('03)

## 나. 국내 생산 동향

해당분야의 전문가에 따른 국내의 탄소나노튜브 시장 규모는 2007년 50억원 정도로 추정되고 있다. 아직까지는 탄소나노튜브는 복합소재와 연구개발이 시장의 대부분을 차지하고 있으나, 수년 내에 전계발광 디스플레이 또는 연료전지 등의 산업소재 분야에서의 시장 규모가 급격하게 확대될 것으로 전망되고 있다. 탄소나노튜브의 국내시장 규모는 2000년 약 4억원(40kg), 2001년 7억원(100kg), 2002년 약 12억원(268kg), 2007년에는 50억원이다. 2002년 기준, 전체 12억원의 시장 중에서 약 10.5억원을 일진나노텍이 공급하여 87.5%의 시장을 점유하고 있고, 수입 규모가 1억원으로 8.3%, 기타업체가 0.5억원인 4.2%의 시장을 점유하고 있는 것으로 보고되고 있다.<sup>34)</sup>

일진나노텍은 2004년 기준으로 연간 약 5톤 정도를 생산하고 있고, 많은 벤처기업들이 시장선점을 위한 치열한 경쟁을 벌이고 있다. <표 4-5>에서 보인바와 같이 최근 CNT, 제이오, 카본나노텍 등의 벤처기업들이 기상합성법(CVD법)을 바탕으로 고분자 복합체에 활용 가능한 MWNT를 대량생산하고 있다.<sup>35)</sup>

〈표 4-5〉 탄소나노튜브 국내 주요 생산 기업

업 체	소재지	특징 및 주생산품	응용분야
일진나노텍	서울	- CVD 방식에 의한 SWCNT, MWCNT 합성 및 판매 - ARC 방식에 의한 SWCNT, MWCNT 합성 및 판매 - CNT BLU 개발 중 (일진다이아몬드 공동)	-전계방출소자용 -기능성 복합재용 -연료전지 (DMFC)
CNT	인천	- CVD 방식에 의한 MWCNT 합성 (~20ton/yr)	-고분자 복합체용

34) 탄소나노튜브의 저온 성장, 전자부품연구원, 한국기술거래소(www.kttc.or.kr)

35) 탄소나노튜브[심층정보분석], 한국과학기술정보연구원, p62~64, (2002)

제이오	인천	- CVD 방식에 의한 MWCNT 합성 (~20ton/yr)	-고분자 복합체용
카본나노텍	포항	- CVD 방식에 의한 MWCNT 합성 및 판매 (~45ton/yr), \$100/kg 수준까지 판매 가능 - CNT-고분자 복합재, CNT-금속 복합재 응용분야 개발 중 - 연료전지 촉매	-전도성컴파운드 -Polymer+CNT Masterbatch
K-H Chemical	강릉	- 기상합성방식에 의한 SWCNT 합성 및 판매 (~3kg/yr) - >95%의 순도 (반도체성 SWCNT)	-4ton/yr 급 장치설계 중
나노카본	수원	- 기상합성방식에 의한 MWCNT 합성 및 판매 (300kg/yr) - 내경이 크고, 표면특성이 뛰어난 MWCNT - 고분산 탄소 나노튜브 (HollowCNT 50/75/100) - 친수성 탄소 나노튜브, 고분산 나노튜브	-연료전지 등에 적용 관심 -CNT 파우더, CNT -Composite (Film, Plate)
한화기술연구소 레피더스	대전	- 전자파차폐용 / 정전기방지용 CNT 복합소재 개발	-MWNT
세메스	기흥	- 고정층 및 유동층 방식에 의한 MWCNT 합성장비 개발 및 판매 (~20kg/day) - 기관 성장 CNT 합성 장비 개발 (플라즈마 방식)	-전계방출소자 응용 -기능성 복합재 응용 -장비업체
나노미래	대구	- 탄소나노소재 및 응용제품 개발 - 분산성 향상 Functional CNT 개발	-정전기 방지용 섬유 -전도성 코팅제 개발
Cluster Instruments Co.,	대구	- CNT 부산 용액 - 기능화 CNT	-ESD 복합체
나노텍	천안	- SWNT, DWNT CVD합성 공정개발	-고전도성 나노복합재 -전자파 차폐 및 대전 방지재

### 3. 탄소나노튜브의 종류별 생산 현황<sup>36)</sup>

#### 가. 다중벽 탄소나노튜브

다중벽 탄소나노튜브(MWNT)는 공급업자들로부터 가장 많은 주목을 받는 탄소 나노구조체이며, 세계적으로 53개 공급업체 중 40개사가 MWNT를 생산하고 있다. MWNT 제조기업의 39%가 미국에 집중되어 있으며, 그 다음이 중국(18%), 일본(15%), 한국(13%), 유럽(10%) 순으로 되어있다. 세계 전체 생산 능력은 2005년 기준 연간 294톤 이상이며, 2007년 1,640톤, 2010년 5,560톤에 이를 것으로 전망된다. 그러나 2005년 기준 생산량은 29톤/년 정도(약 전체 생산능력의 약 10% 수준)이며, 주된 용도는 전도성 복합재의 첨가제이다.

탄소나노튜브의 상업적 최초생산은 Hyperion Catalysis가 20여년 전부터 생산해오고 있는 MWNT 생산이다. 중국기업인 Shenzhen Nanotech Port는 2001년부터 MWNT를 대량생산해오고 있다고 주장하며, 향후(2005년 기준) 2년내에 생산능력을 5~10배 증대시킬 계획이며, 가격도 5년내에 현재(2005년 기준)의 4000유로/kg에서 80유로/kg으로 대폭 내릴 예정인 것으로 알려져있다. 신규 참여기업 중 가장 주목되는 것이 Mitsui Corp.인데, Mitsui는 자회사 Bussan Nanotech Research Institute (이전의 CNRI)를 통해 2002년 일본에서 1520만 달러를 들여 연간 120톤의 MWNT를 생산할 수 있는 생산설비를 구축하였다(현재 생산량은 이것의 일부임). BNRI는 0.23 유로/그램의 저가격으로 MWNT를 판매할 수 있다고 보고한 적이 있으나, 이러한 목표를 달성했는지는 분명치 않다.

MWNT의 대량생산에 뛰어 들고 있는 다른 업체들 중에는 Rosseter (Cyprus), Carbon Nano-Material Technology Co.(한국), Chengdu Organic Chemistry(중국), Sun Nanotech(중국), Shenyang Gina New

36) Nanotube for the Composite Market, Cientifica, 2005. 7

Materials Co.(중국), Tsinghua-Nafine Nano-Powder(중국), Helix Material Solutions(미국), Nanolab(미국), Nanocraft(미국), Ahwahnee(미국), Nanostructured & Amorphous Materials(미국), Arkema(유럽), n-TEC(유럽), Nanocyl(유럽)이 있다. 현재 미국이 MWNT의 전 세계 생산의 65%를 차지하고 있으나, 향후 2년내에 중국이 최대 생산국가가 될 것으로 전망된다.<sup>37)</sup>

## 나. 단일벽 탄소나노튜브

단일벽 탄소나노튜브(SWNT)의 양상은 매우 다르다. BCC(Business Communications Company)는 2000년 세계 생산량을 1~5kg으로 추산하고 있는데, 이는 금액으로 약 150만 달러에 상당하며, 그램당 가격이 300~1,500달러 범위이다. Cientifica는 2005년의 전세계 생산량을 약 230kg/년, 생산능력 9톤/년으로 추정하고 있다. 전세계 생산의 절반 이상이 미국에서 이루어지고 있으며(약 5톤/년), 나머지 절반은 중국에서 생산된다. 2년내 중국이 최대 생산국가가 될 것으로 전망된다. 세계적으로 SWNT 제조기업의 약 절반이 미국(46%)에 위치하며, 그 다음이 유럽(13%), 중국(13%), 일본(13%), 한국(9%) 순이다.

세계적으로 SWNT 제조 가동율은 생산능력의 10%이하이며, 가장 많이 사용하는 곳은 중국으로 생산능력의 7%가 SWNT의 제조에 사용되고 있다. 특히 SWNT의 상업화에는 많은 장벽이 가로 놓여 있으며, 판매량도 겨우 연구개발 시험용 정도 수준이다. 산업이 미성숙 단계에 있지만, 제조업자들은 향후 5~10년 사이에 투명 전도성 전극 등 연구개발에 의한 수요 창출로 SWNT의 시장이 성장할 것으로 기대하고 있고, 공급업자들은 생산능력을 2007년 43톤 이상, 2010년 195톤으로 증대시킬 계획이다.

Carbon Nanotechnologies Inc.는 유망한 HiPCO 프로세스에 기반한

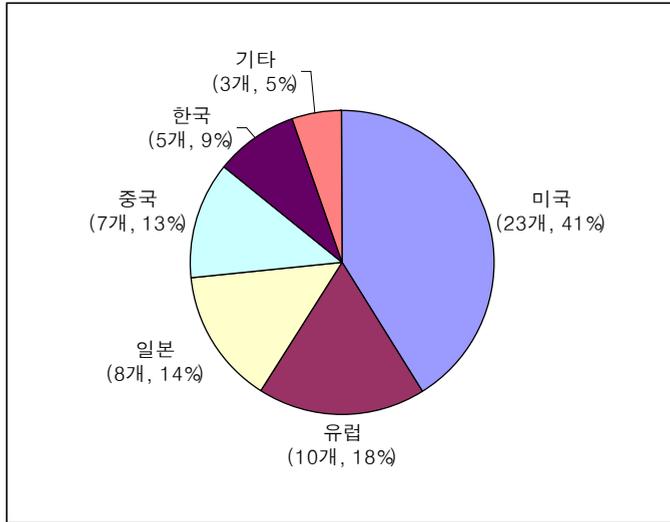
37) 탄소나노튜브[심층정보분석], 한국과학기술정보연구원, p114, (2002)

파일럿 플랜트를 건설하고, 현재 10kg/일 이상을 생산할 수 있는 최대 생산능력을 갖고 있다고 주장하고 있다. CNI는 곧 45kg/일의 생산능력을 갖추게 될 것이라고 했다. CNI는 Sumitomo와 판매 및 유통 계약을 맺고 있으며, Sumitomo는 CNI 탄소나노튜브의 절반을 취급하게 되며, 이중의 70~80%는 일본에서 소비된다. 중국기업 Shenzhen Nanotech Port, Chengdu Organic Chemistry와 미국의 Nanostructured & Amorphous Materials은 현재 최대 생산 능력을 갖고 있는 공급업체들로서 모두 촉매 CVD 공정을 채용하고 있다. 일본에서는 Honjo Chemicals가 파트너 기업 Mitsubishi Corp.를 통하여 상업화한 SWNT를 이미 생산하고 있다. 다른 기업들 즉, Mitsui의 BNRI, Tokai Carbon, Toray Industries 등은 현재 상태가 불분명하고 대부분의 기업들은 실제 생산과 생산능력에 대한 정확한 정보의 제공을 꺼려하나 대량생산 기술개발에 박차를 가하고 있다.

대부분의 기업은 SWNT를 벌크로 제조하고 있으며, “제조된 그대로”(As produced)의 SWNT는 상당량의 불순물을 함유하고 있으며(순도가 10~95%로 평균 50%임), 가격은 그램당 12~400유로 범위이다. 정제된 SWNT(70~95wt%)는 그램당 20~600유로이다. 일부 기업들이 2010년까지 가격을 0.5유로/그램 이하로 내릴 계획을 표명하고 있지만, 평균 가격은 향후 (2005년 기준) 5년간은 높은 상태로 머물 전망이다. 만약 이 목표가 달성되면 현재 고가격으로 인해 배제되고 있던 SWNT의 상업적 응용에 주요한 장벽해소가 될 것으로 예상된다.

## 다. 주요국별 생산 현황

세계적으로 나노튜브 제조기업의 수는 <그림 4-2>에서 보는 바와 같이 미국(23개, 40%), 유럽(10개, 17%), 일본(8개, 15%), 중국(7개, 13%), 한국(5개, 9%), 기타(3개, 6%) 순임. 기업규모로는 중소/신생기업(61%), 대기업(25%), 자회사/합작기업(6%), 대학/연구소(8%)로 파악되고 있다.



〈그림 4-2〉 탄소나노튜브 기업체 지역별 분포

탄소나노튜브를 제조하는 대기업 및 소기업 모두 소량의 나노파이버를 생산하고 있으며, 대기업들은 주로 일본에 위치하고 있는 것으로 보인다. 특히 일부 대기업은 합작기업이나 자회사를 설립하고 나노튜브를 생산하고 있으며, 특정 용도에 맞는 탄소나노튜브 제조기술을 개발하고 있다.

미국의 경우 탄소나노튜브의 상업적 제조업체들은 주로 미국에 위치하고 있으며, 대부분이 스피아웃(spinouts)/신생/중소기업(85%), 대기업(5%), 자회사/합작기업(10%)들로 구성되어 있다. CNI와 같은 선구적인 창업사는 자신들의 SWNT를 여러 시장 부문에 소개하기 위하여 전략적 제휴를 추구하고 있으며, 여러 합작기업을 설립하여 공급자들에게 최종 유통 수익의 지분을 나누어 주고 있다. CNI는 나노튜브 샘플을 원가로 또는 무료로 250여개의 거래처에 공급하고 있으며, 나아가 고객들이 자사의 지식과 지적재산권을 이용하도록 협력관계를 개발하고 있고, 일본에서 CNI는 Sumitomo Corp.와 판매 및 유통 협약을 맺음으로써

아시아에서의 전진 기지를 구축하고 있다.

유럽의 경우 소기업(spin-outs, spin-ups, SME)이 주류(67%)를 이루고 있으며(대기업 33%), 이들은 보통 대학과 연결되어 있고, 대학 연구실에서 얻어진 성과를 바탕으로 창업되었다. 일반적으로 화학 및 첨단소재 분야의 소수의 대기업들은 자신들의 복합재료를 위한 새롭고 흥미로운 충전제(filler)를 탐색하는 R&D 프로젝트의 결과로서 탄소나노튜브나 나노파이버를 생산하기 시작했다.

중국의 경우 CNT 제조업체들이 자주 R&D 센터나 대학과 긴밀히 연계되어 있으며, 북경(기초연구 집중)과 상하이(응용 및 상업화 집중)의 2개의 핵심 R&D 나노기술 중심지역이 있다. 중국 나노기술 연구의 90% 이상이 중국과학원(Chinese Academy of Sciences)과 대학들에서 수행되고 있고, 기업형태는 대학/연구소(42%), 스핀아웃(spinouts)/신생/중소기업(29%), 대기업(29%) 순이다. 중국은 일반적으로, 산업 R&D는 덜 개발되어 있고 전문 인력의 부족을 심각하게 겪고 있는데, 중국도 산업을 한층 발전시키기 위해서는 많은 나노기술 과학자가 필요한 실정이다. 그러나 이 때문에 2000년 이래 나노기술 관련 창업이나 기업들의 나노기술 투자에 장애는 되고 있지 않고 있다.

일본의 경우 자사의 응용개발 또는 생산 수요를 위해 탄소나노튜브를 생산하는 기업의 수가 다른 어느 지역보다 많다. 이것은 일본의 전통적인 네트워크화된 기업문화와도 완전히 일치하고 있고, 기업형태는 스핀아웃(spinouts)/신생/중소기업(74%), 대기업(13%), 자회사/합작기업(13%)이다. 일본의 신에너지산업기술총합개발기구(NEDO)와 경제산업성(METI)은 신 탄소재료에 대한 다양한 산업부문에 공통된 기초기술 개발을 목표로 'Frontier Carbon Technology Project'를 지원하고 있고, 이 프로젝트는 일본 파인세라믹스센터(Japan Fine Ceramics Center)에 의해 운영되고 있으며, 15개 민간기업, 2개 연구기관, 5개 국립연구소, 6개 대학, 3개 국외 연구그룹이 참여하고 있다.

한국의 생산현황은 최근 4~5년 사이에 탄소나노튜브와 나노파이버

를 공급하는 신생기업들이 나타나고 있으며, 이들 기업은 대량생산 공정의 최적화와 제품 수요 증대를 위한 가격 저하에 집중하고 있다. 기업형태는 스피아웃(spinouts)/신생/중소기업(80%), 대기업(20%)이다

#### 4. 탄소나노튜브 응용기술 개발 동향

탄소나노튜브의 뛰어난 전기적 기계적 물성은 탄소나노튜브를 이용한 각종 장치로의 응용 제품개발 가능성을 보여주고 있어서, 많은 연구개발이 활발하게 진행되고 있다. 탄소나노튜브를 이용한 연구 분야는 <표 4-6>에서 보여준 바와 같이 전광판, 백라이트, 전등 등 같은 광전자 소자 분야, 자동차 배터리, 노트북 컴퓨터 및 휴대폰 배터리 등과 같은 에너지 분야, 레진이나 에폭시 같은 고분자 물질에 탄소나노튜브를 섞어 고분자 재질을 강화시키거나, 전도성을 증진시킨 고분자 복합소재 분야, 탄소나노튜브의 수소 저장 능력을 이용한 연료 전지 연구 등의 많은 연구가 세계적으로 활발하게 진행되고 있다. 비록 탄소나노튜브는 많은 산업제품에 사용될 수 있는 가능성은 많은 연구 결과로 보이고 있으나, 실제 탄소나노튜브는 응용기술 개발의 문제와 탄소나노튜브의 가격이 카본블랙, 탄소섬유보다 비싸 실제 제품의 적용에는 많은 어려움을 보이고 있다.

향후 탄소나노튜브의 대량생산에 의하여 탄소나노튜브가 가격 경쟁력을 가지게 되면, 탄소나노튜브의 사용은 급격하게 늘어날 것으로 충분히 예상 할 수 있다. 현재, 미국, 일본, 중국, 유럽 등의 나라에서는 탄소나노튜브를 이용한 제품의 원천기술 및 특허 개발을 하여 대외 기술 경쟁력의 확보를 위한 연구를 활발하게 진행하고 있다.

〈표 4-6〉 탄소나노튜브의 용도별 개발 분야 및 적용 제품

분야	용도	비고
전자/콘덴서	연료전지용 수소저장소재 리튬이온전지의 전극재료 전기이중층 콘덴서재료 고성능 축전지	고성능축전지의 장수명화
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/나노소재	AFM, APM, ATM현미경의 탐침 나노휩스커, 나노로드,	재료의 요철부분의 위를 씌워 원자단위로 관찰
회로소재	반도체회로 등의 초미세가공 소재에 사용	
바이오/의약	바이오센서, 주사침, 캡슐(약의 생체 수송과 방출)	
복합재료	수지세라믹금속의 강화 전도성복합재, 반도성 플라스틱, CC복합재료	복합재료의 정전방지, 경량화, 고강도화, 수지의성능향상

자료 : 일본 産總研(2001)

## 가. CNT 국내외 응용기술 개발 현황

탄소나노튜브는 초기의 합성 및 물성 연구에서 1993년 일본의 NEC가 CNT를 이용한 나노튜브 트랜지스터를 구현한 연구 이후, 탄소나노튜브의 물리적, 전기적, 기계적 특성을 이용한 센서, Interconnector 등을 연구하는 나노전자 분야의 연구뿐만 아니라, 산업의 전반에서 탄소나노튜브를 이용한 많은 연구가 진행 중에 있다. 1997년 미국 IBM에 의해 탄소나노튜브를 이용한 수소 저장 연구가 발표된 이후 탄소나노

튜브를 사용한 연료전지 및 이차전지의 전극으로의 사용 등 에너지 부분으로의 연구가 진행 중에 있다. 탄소나노튜브의 나노미터 직경과 강한 탄성을 이용하여 시도된 탄소나노튜브 탐침에 대한 연구는 많은 응용 가능성을 보여주고 있다. 탄소나노튜브 탐침은 SEM/ AFM 등에 부착되어 고해상도를 주고 있고, 저장용 장치, 나노 리소그래피 등의 많은 부분으로 연구가 진행 중에 있다. 고분자에 탄소나노튜브를 섞어 고분자의 기계적, 전기적 특성을 증진시키는 연구 또한 많이 진행 중에 있다.<sup>38)</sup>

대표적 연구그룹으로는 네덜란드 Delft 대학의 Dekker 그룹을 비롯해, 미국의 Rice 대학의 Smalley 그룹, Harvard 대학의 Lieber 그룹, Stanford 대학의 Dai 그룹, North Carolina 대학의 Otto Zhou 그룹, UCLA 대학의 Gruner 그룹, Illinois 대학의 Strano 그룹, 동경대학의 마루야마 그룹 등이 있다. 독일의 막스플랑크연구소나 미국의 NASA, Naval Research 등 국책 연구소와 IBM 및 한국의 삼성(삼성중기원, 삼성SDI, 삼성전자 포함) 등 많은 대학과 기업에서 탄소나노튜브를 실제 제품에 사용하기 위한 많은 연구가 진행되고 있다.

## 나. 탄소나노튜브의 응용기술 연구 동향

### (1) Nano-Electronics

#### ① 전계방출(Emitter) 및 FED

탄소나노튜브가 가지는 전자 방출 특성은 평면 디스플레이 산업에 중요한 소자로서 크게 주목받고 있다. 1995년 미국의 Smally group은 단일벽 탄소나노튜브가 Emitter로 응용 가능성이 연구된 이후, 많은 국내의 연구진에 의하여 탄소나노튜브 Emitter의 연구가 진행되어 오고 있다. 1995년 De Heer group에서 탄소나노튜브를 이용한 FED 연구를

38) 탄소나노튜브[심층정보분석], 한국과학기술정보연구원, p114, (2002)

발표하였고, 이후 Chang 등은 스크린 프린팅법으로 다이오드 타입의 FED를 제작하였다. 이후 1997년 일본의 Saito 등은 다중벽 탄소나노튜브를 이용한 FED 연구를 하였다. 2001년 미국의 Stanford 대학은 세라믹, 알루미늄과 같은 기판 위에서 다발로 성장된 탄소나노튜브의 전자 방출 특성을 연구하였다.

일본은 기업의 탄소나노튜브를 이용한 Emitter/FED 연구가 활발하여, 1996년 일본의 Sharp에서 원통형의 전자원을 함유한 페이스트를 스크린 프린팅이나 스핀코팅법으로 전자 방출 영역을 형성하는 전자 방출 특성 연구를 발표하였고, 2000년 일본의 Toshiba 사가 탄소나노튜브를 기존 FED의 금속 Emitter 소자를 탄소나노튜브로 대체하는 연구를 발표하였다. 2002년 Matsushita사에서는 탄소나노튜브를 스크린 프린팅으로 인쇄하는 경우 스크린 마스크를 사용하여 인쇄시 메시의 위치와 전자방출의 위치를 배열하는 기술을 발표하였다. 미국 Motorola사가 500℃에서 탄소나노튜브 Emitter 성장에 성공했다.<sup>39)40)</sup>

국내에서는 1999년 일진 나노텍에서 양측에 스페이서를 두고 표면에 탄소나노튜브를 형성한 기본적인 Diode 형태의 전계방출 소자에 관한 연구를 발표하였고, 이후 중간에 메시 형태의 금속막을 형성하여 게이트 전극으로 사용하는 연구를 진행하였다. 나노퍼시픽에서는 평면형 조명장치로 탄소나노튜브층, 도전층, 형광층을 형성하는 연구를 발표하였고, 이후 탄소나노튜브 사이에 금속나노입자를 채움으로서 방출 효과를 향상시키는 연구를 발표하였다. 2003년 삼성에서는 탄소나노튜브의 전계방출 특성을 향상시키기 위하여 1차 수직성장된 탄소나노튜브의 측면에 2차로 다수의 탄소나노튜브를 성장 시킨 연구를 발표하는 등 탄소나노튜브의 전계방출 특성에 대한 많은 연구를 진행하였고, 또한 탄소나노튜브를 사용한 스크린프린팅 방법을 사용하여 FED 동영상 구현하였다.<sup>41)</sup>

---

39) 미국특허 US6097138

40) 일본특허 JP2004-031045

## ② Lamp, X-Ray

탄소나노튜브를 이용한 전계방출의 특성은 평면 디스플레이 산업에의 적용뿐만 아니라, Lamp, X-ray 등의 연구가 활발하게 진행되고 있다. 탄소나노튜브를 Lamp로 상용화하기 위한 연구로 2001년 일본의 NEC사는 원통형의 내부에 삽입된 원통관이 내벽, 외벽으로 나누어져 있고 탄소나노튜브를 형성한 구조를 발표하였다. 2002년 대만의 Delta Optoelectronics사는 방전관에 전자방출재료를 탄소나노튜브로 하는 연구를 하였고, 이후 일본의 Noritake는 내부에 전계방사 냉음극, 게이트전극, 전자방출원으로 탄소나노튜브를 형성하는 연구를 하였고, Toshiba는 전자방출 소재는 표면에 미세 도전성 돌기군과 2차 전자 방출 효율이 높은 탄소나노튜브 같은 Carbon 막 재료를 사용하는 연구를 진행하였다.<sup>42)43)</sup>

탄소나노튜브를 이용한 X-ray의 연구는 2001년 일본의 Rigaku사에서 열음극과 전자방출 전극이 대향하여 배치되어 있으며, 전자방출극은 탄소나노튜브로 이루어진 연구를 발표하였고, 2003년 미국의 Oxford Instrument사는 진공 X-ray 튜브에 탄소나노튜브 필름으로 전자방출이 구성되고 전계를 인가하여 타겟 수단으로 연결 구성을 한 연구를 발표하였다. 2005년 미국의 North Caroline 대학에서는 복수개의 캐소드 구조체 및 타겟이 구성되고, 각각의 전계방출 물질이 구성되는 연구를 발표하였다.<sup>44)45)</sup>

## ③ FET (Field Effect Transistor)

최근 Single Electronic 방식의 초미세 메모리 소자를 위한 대안으로서 탄소나노튜브를 이용하고 있다. NEC사가 1995년 탄소나노튜브를 Field Effect Transistor(FET)로의 가능성을 연구를 시작으로 각국의 반

41) 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

42) 미국특허 US20020121856

43) 일본특허 JP2004-119175

44) 일본특허 JP2001-266780

45) 미국특허 US6876724

도체 관련 회사에서 많은 연구 개발을 진행해 오고 있다.

1995년 일본의 NEC는 게이트 전극으로 된 탄소나노튜브의 양단에 절연체를 이용해 각각 소스 및 드레인 전극을 설치 한 후 탄소나노튜브에 인가된 게이트 전압에 의해 드레인에 전달되는 전자의 양을 제어하는 연구를 최초로 발표를 한 후, 2003년 전계효과 트랜지스터의 채널이 여러 다발 탄소나노튜브로 구성된 연구를 발표하였다.

미국의 IBM은 유전층 하부에 탄소나노튜브가 형성되어 소스, 드레인 사이를 연결하는 구성의 Top gate 구조를 연구하였고, Intel은 전극 사이에 유전층 및 탄소나노튜브를 사용한 Top, Bottom gate 구조의 FET 소자를 발표하였다. Infineon은 한 개의 탄소나노튜브와 나노와이어를 이용하여 터널링 전류를 통하여 FET 구조를 형성하는 연구를 발표하였다.

삼성전자는 전이 금속층 상에 전자들이 터널링될 수 있는 간격으로 형성된 탄소나노튜브 구조인 수직형 FET를 연구 발표하였다. LG전자는 촉매층 형성, 촉매위 금속 소스, 드레인 전극 형성, CVD로 촉매층을 수평으로 성장하여 채널을 형성하는 연구를 발표하였다. Hynix사는 탄소나노튜브 한 다발로 형성되는 베이스 전극이 양측에 각각 연결되어 탄소나노튜브로 형성되는 Emitter 및 콜렉터를 구성 하는 연구를 발표하였다. 많은 회사가 연구 개발을 시도하고 있으나 모두 기초적인 단계이므로 실용화는 2010년 이후에나 개발 될 것으로 기대하고 있다.

매사추세츠의 신생기업인 Nantero는 나노튜브 기반의 비휘발성 RAM (nonvolatile random access memory)을 제조하고 있으며, IBM은 개별 나노튜브로부터 첨단 회로를 조립하는 다소 비현실적인 응용 연구를 수행하고 있다.<sup>46)47)48)49)50)</sup>

---

46) 일본특허 JP1995-122198

47) 일본특허 JP2002-076324

48) 미국특허 US6798000

49) 미국특허 US6891227

50) 미국특허 US6890780

#### ④ Sensors/Wire/Interconnector

전자들은 탄소나노튜브의 표면을 따라 이동하기 때문에 분자들이 표면에 부착하면 전도도가 변하는데, 이는 탄소나노튜브를 저전력의 극히 민감한 센서를 제작하는 데 사용할 수 있음을 의미한다.

스탠포드 대학의 Hongjie Dai는 가스 및 생체분자용 나노튜브 기반의 센서를 연구하고 있으며, 캘리포니아 Bay area의 신생기업인 Nanomix는 유사한 기술을 가스 흡착성 가스센서 혹은 탄소와 생체 조직과의 친화성을 이용한 의료용 장치의 부품에 응용연구하고 있다.

미국의 South Florida 대학에서 공진기로 전기 전자 소자의 소스 및 드레인 전극간의 변화를 감지하여 그 사이에 있는 입자, 분자 등을 감지하는 연구를 발표하였고, California 대학도 전극간의 커패시터를 측정하기 위한 수단으로 탄소나노튜브를 수직으로 성장시킨 연구를 진행하였다.

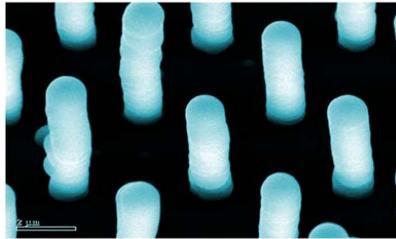
일본의 Matsushita사는 실리콘 산화물 등이 베이스 필름에 배치되고, 탄소나노튜브를 전극으로 사용하여, 신호처리 회로에 의해 압력, 습도 및 빛이 검출되는 양을 나타내는 출력 신호로 공급되는 센서를 연구하였다. Honeywell사는 반도체 전극 구성과 탄소나노튜브를 서로 구성하여 가스와 액체의 성분을 감지하는 센서를 발표하였다. KotoSeoko사는 빛, 자기, 압력, 온도 등에 따른 전기적 변화에 따라 전기신호를 감지하는 센서를 연구하였다.

한국의 삼성전자는 기판위에 탄소나노튜브를 형성하고 타겟 바이오분자와 결합하는 리셉터의 순전하와 반대되는 극성을 탄소나노튜브에 인가하여 선택적으로 리셉터 위치에 부착되는 결합력의 차이를 검출하는 센서를 연구 발표하였다. KIST는 탄소나노튜브 패턴의 금속 결정에 타겟 바이오 물질과 결합하는 리셉터가 형성되어 다양한 타겟 바이오 물질을 다량으로 검출하는 센서를 연구하였다. 한국원자력연구소는 탄소나노튜브를 이용하여 중성자를 검출하는 센서를 발표하였다. 한국화학연구원은 탄소나노튜브에 팔라듐을 코팅하여 수소 원자와 반응으로 탄소나노튜브의 정공의 농도변화를 감지하여 수소가스 검출을 측정하

는 센서 연구를 하고 있다.

탄소나노튜브를 이용한 Wire/Interconnector 기술은 FET와 유사한 기술로 나노스케일의 구조를 전극의 연결 수단이나, 반도체 소자의 채널로 사용되는 기술이다.

<그림 4-3>에서 보는 바와 같이 2003년 일본의 NTT사는 2개 이상의 여러 미세한 소자 사이를 기판에 접촉하지 않는 상태에서 탄소나노튜브를 이용하여 전기적으로 결합한 소자간 배선을 연결하는 연구를 발표하였다. 2004년 Intel사는 직접회로의 트렌치 부분을 탄소나노튜브를 사용하여 전기적 연결을 구성하는 연구발표를 하였다. 2004년 삼성전자는 절연층 상에 컨택홀을 형성하고 탄소가스를 주입 후 탄소나노튜브 성장시켜 배선을 형성하는 연구를 발표하였다. 2004년 하이닉스는 금속배선과 접촉될 도전층 부분에 패턴을 형성과 금속막을 형성 시킨 후 탄소나노튜브를 성장시키는 연구를 발표하였다.<sup>51)52)53)54)55)56)</sup>



〈그림 4-3〉 탄소나노튜브를 연결소자로 사용

## (2) 나노 복합재료

탄소나노튜브의 전기적, 물리적, 화학적 특성을 이용하려는 많은 연

51) 미국특허 US20030218224

52) 미국특허 US6949931

53) 한국특허 KR2003-0014997

54) 미국특허 US20040041154

55) S.S.Wong, E. Joselevich, A.T.Woolley, C.L.Cheung and C.M.Liever, Nature, 394, 52, 1998

56) S.S.Wong, A.T.Woolley, E. Joselevich, C.L.Cheung and C.M.Liever, J. Amer. Chem. Soc., 120, 8557, 1998

구가 여러 분야에서 다양하게 응용이 시도되고 있으나 탄소나노튜브 단독으로 원하는 물성이 얻어지지 않고 있다. 탄소나노튜브와 고분자, 금속 나노입자를 결합시키는 방법은 탄소나노튜브 복합체의 혼합 비율에 따라서 크게 두가지 종류로 나누어 볼 수 있다.

고분자나 세라믹, 금속이 기저(matrix)로 사용되고 탄소나노튜브는 첨가제 수준으로 소량 들어가 탄소나노튜브의 높은 직경 대 길이 비율에 의해 상호 연결되어 있는 구조를 만드는 방법과, 탄소나노튜브의 특성을 보완하기 위하여 탄소나노튜브의 표면에 고분자를 코팅하거나 세라믹 혹은 금속 나노입자를 붙여서 기능을 부여하는 방식이다. 이렇게 탄소나노튜브가 복합 물질에 따라서 탄소나노튜브/고분자 복합체와 탄소나노튜브/세라믹 혹은 탄소나노튜브/금속 나노입자 복합체로의 연구는 많은 산업부분에서 응용 가능성을 가지고 연구되고 있다.

#### ① 복합소재

탄소나노튜브는 재료에 손상을 주지 않고 강도와 전도성을 증가시킬 수 있는 소재로서 탄소나노튜브를 이용한 복합소재는 산업 전반에서 많이 연구 되고 있다. 현재 탄소나노튜브를 이용한 복합재료 기술의 연구는 a) 탄소섬유 및 카본 블랙을 탄소나노튜브로 대체하기 위한 연구와 b) 탄소나노튜브의 특성을 최대한 활용하여 적합한 재료를 개발하는 형태로 진행된다.

탄소나노튜브를 다른 카본 물질로 대체하기 위한 복합재료의 연구는 기존의 제품에 사용되는 카본 블랙, 카본섬유를 대신하여 탄소나노튜브를 사용하여 기존의 제품의 물성 및 특성을 향상시키는 연구에 초점을 두고 있다. 특히 여러 종류의 고분자 수지는 산업전반의 다양한 분야에 많이 사용 되고 있어 여러 회사 및 연구 기관에서 고분자 종류별로 탄소나노튜브 함유에 대한 특성 연구를 활발하게 진행하고 있다.

Hyperion catalysis는 MWNT를 사용하여 GM 자동차의 플라스틱 부품에 첨가해 정전기의 축적을 방지하고, 부품을 전도성으로 만들어 정

전도장이 가능하도록 하는 연구를 진행하였고, 2003년 Toray사는 탄소 나노튜브와 열가소성 수지 중의 Polyamide를 사용한 고분자 복합재료를 연구 발표하였고, 고려대학교에서는 UHMWPE, Geogia Tech 연구소에서는 아크릴로니트릴을 주성분으로 한 복합재료, 그리고 타이어 회사에서는 고무에 탄소나노튜브를 이용한 복합재료를 연구하고 있다. 고분자 이외 탄소나노튜브를 이용한 복합재료는 탄소/탄소 복합재료 및 Ceramic의 강화재로 탄소나노튜브를 적용하고 있다. Honetwell은 탄소 매트릭스의 나노 복합재료를 사용하여 Actuator, Super Capacitor, 전자기기의 부품의 적용 가능성을 연구하였고, 한국과학 기술원에서는 탄소나노튜브와 금속이 균일하게 혼합 및 분산될 수 있는 제조 방법을 연구하였다.<sup>57)58)59)60)61)</sup>

## ② 전도성 복합소재

탄소나노튜브는 우수한 전기전도도, 열전도, 및 뛰어난 기계적 강도 등을 가지고 있어 탄소나노튜브를 이용한 많은 소재가 연구되고 있다. 탄소나노튜브의 전기전도도를 이용한 Opto-electronics 적용 복합체 연구가 최근 많이 진행되고 있다.

특히 <표 4-7>에서와 보는 바와 같이 탄소나노튜브의 뛰어난 전기 전도성을 이용하여 기존의 ITO(Indium Tin Oxide)가 사용되는 투명전극을 대체하기 위하여 국내외 연구기관에서 많은 연구개발을 진행하여 오고 있다. 미국의 벤처회사 Nanomix는 단일벽 CNT (SWCNT) 박막을 이용한 최초의 flexible CNT network 박막 트랜지스터(TFT)를 개발하였다. 이 회사가 개발한 CNT-TFT 구조의 전기적인 특성은 pentacene TFT에 비하여 약 10배, poly-Si TFT에 비해서는 약 1/5의 mobility를 갖

57) 일본특허 JP2003-286350

58) 일본특허 JP2003-246927

59) 미국특허 US685410

60) 한국특허 KR2005-0027415

61) 일본특허 JP2004-123770

고 있고, 또한 구부릴 수 있으며, 투명한 전극으로 활용으로 가능하여 기존의 ITO 전극을 대체할 수 있는 가능성을 보이고 있다. 또한, 한국 전기연구원은 탄소나노튜브, 용매, 바인더, 안정제, 균일제 등의 5개 이상의 성분으로 탄소나노튜브 투명전극 코팅액을 개발하고 있다. Hyperion, Siemens, General Electric 등에서는 탄소나노튜브의 전기전도성을 이용하여 EMI Shield 재료, 안테나, 의료용 기기부품의 재조 등을 위한 기술을 연구하였다.

탄소나노튜브의 함유 복합재료는 이외에도 탄소나노튜브가 분자구조에 따라 도체 반도체 특성을 나타낼 수 있는 선택적인 전기 전도도, 우수한 열전도도 등의 전도 특성과 넓은 비표면적을 이용한 화학적 촉매 특성을 가짐으로서 전자소재, 방열소재, 디스플레이 소재, 전극소재 등으로의 용도가 확대될 것으로 전망된다. 또한 탄소나노튜브의 기계적 특성 이외의 특성을 활용한 전도성 박막, EMI 차폐 재료 등의 기능성 재료의 개발이 시도되고 있다.<sup>62)63)64)65)66)67)</sup>

〈표 4-7〉 국외 CNT 투명박막 기술 현황

국가	해당 기관	기술 개발 현황
일본	큐슈 대학	DNA wrapping 한 CNT를 1층씩 적층하는 방법으로 투명 전도성 박막 제조
	야마가타 대학	아민기와 CNT표면 결합을 이용하여 CNT-아민의 결합으로 형성된 박막 제조
	AIST	SWNT와 아민기를 LB(Langmuir-Blodgett) 법을 이용하여 박막 제조
독일	막스-플랑크 연구소	음 이온성 계면활성제인 SDS를 적용하여 LB 법으로 SWNT 박막제조
	슈트트가르트 대학	CNT 분산액을 스프레이 코팅으로 박막제조
미국	펜실바니아 대학	산화 환원기를 포함하는 계면 활성제로 CNT를 가용화

62) Nano Lett. 5, 345 (2005)  
 63) Science. 305, 1273 (2004)  
 64) Nano Lett. 4, 1643 (2004)  
 65) Nano Lett. 3, 1353 (2003)  
 66) Appl. Phys. Lett. 86, 033105 (2005)  
 67) Nano Lett. 5, 757 (2005)

		하여 전기화학적으로 전극 상에 CNT 박막 제조
	텍사스 대학 (나노테크 연구소)	기판 위에 수직 성장시킨 직경 약 10nm 길이 70~400nm의 MWNT를 이용하여 폭 3.4cm 길이 1m의 박막 sheet를 제조
	Rice 대학	SWNT를 이용한 다양한 종류의 필터를 이용하여 투명 전극 박막을 제조
	USC 대학	SWCNT를 PE 박막위에 두께를 달리 코팅하여 투명전도성 박막 제조
	다트머스 대학	SWCNT를 금 입자가 분산되어 있는 톨루엔 용액속에 분산시킨 후 LG 기술로 실리콘 기판위에 증착시켜 박막 제조
	캘리포니아 주립대학	CNT를 이용한 박막의 네트워크 구조 및 CNT 박막의 특성에 대한 연구 수행
	플로리다 대학	SWCNT 분산액으로 박막 형성 한 후 기판 위에 전이시켜 초박막 제조
중국	chongging 대학	필터위에서 CNT 박막 제조 후 산처리 영향 분석

### (3) 에너지 분야

에너지 분야에서의 탄소나노튜브의 연구는, 탄소나노튜브의 높은 전기전도성과 높은 비표면적을 이용하여, 기존에 활성탄소나 흑연과 같은 탄소 물질이 사용되던 분야에서 기존 탄소재료의 한계를 극복하거나 성능을 향상시킬 수 있는 재료로서 연구되고 있다. 특히 연료전지나 기타 수소에너지를 응용하는 분야에서 탄소나노튜브를 수소저장 매체로 사용하려는 시도가 있어왔고, 리튬이온전지, 전기이중층 커패시터에서 전극 재료로 하기 위한 많은 시도가 있어 왔다. 특히 탄소나노튜브는 무게가 가벼울 뿐만 아니라, 탄소나노튜브의 빈 공간의 안팎으로 수소를 저장할 수 있는 공간이 많아서, 단위 질량당 전하의 저장 능력이 뛰어난 능력이 있어 대체 에너지원으로 많은 연구가 이루어지고 있다. 탄소나노튜브를 이용한 연료전지, 2차 전지 같은 에너지 저장 소재로 응용 연구는 향후 탄소나노튜브가 2차 전지 전극 및 연료 전지의 전지 무게 감소와 충전효율의 증가 시키는 연구는, 향후 탄소나노튜브를 자동차 배터리, 충전용 건전지, 노트북 컴퓨터 등의 소형 이동용 전자제품 등에 이용할 수 있을 것으로 기대되고 있다.

### ① 리튬 2차 전지

소형 이동용 전자제품인 휴대전화, 노트북 등에 사용되는 리튬 2차 전지는 체적당 에너지 밀도가 400Wh/L로 알려져 있다. 현재 이동용 전자제품은 해마다 고성능화의 진행되고 있어 Li-2차 전지의 용량 또한 증가되어야 하는 시장 상황에 있다. 따라서 향후 탄소나노튜브를 사용하여 리튬 2차 전지의 용량을 증가시키는 연구를 진행 중에 있다. 탄소계 재료를 전극으로 이용하는 리튬 이온 2차 전지의 경우의 연구는 2005년 삼성 SDI에서 양극 물질에 탄소나노튜브를 이용한 연구를 하였고, 2003년 일진나노텍은 음극을 만들 때 탄소나노튜브, 중합체, 도전체를 혼합시켜 전극을 제작하는 연구 및 박막의 고체 전해질에 탄소나노튜브를 사용한 연구를 하였다. 2003년 일본의 Matsushita사도 전극의 재료를 탄소나노튜브를 이용하는 연구를 발표하였다.<sup>68)69)70)</sup>

### ② 연료전지

탄소나노튜브의 빈 공간을 이용하여 수소를 저장, 연료전지 등에 이용하는 기술로 1997년 미국 IBM의 Bethune 등에 의해 처음 시도된 이후, 많은 연구진에 의하여 미래 에너지원으로 NEC, Sony, Motorola, 한국 삼성전자 등이 연구를 진행하고 있다. 탄소나노튜브에 수소원자가 10% 가까이 증착이 된다면 탄소나노튜브는 연료전지에서 수소의 새로운 저장 수준이 될 것이다. 수소의 증착은 SWCNT, MWCNT 벽면이나 내부, 틈새에 물리현상을 이용하여 흡착시키는 방법과, 화학흡착 방법이 시도되고 있다, 화학흡착은 분자끼리의 결합으로 흡착되므로, 물리흡착보다 유리할 것으로 기대된다. CNT의 수소흡장에 관해서는 CNT 충전 방법, CNT 흡착 방법 등의 다양한 문제가 걸려 있으나, 연구자들은 화학흡착을 이용하여 CNT에 수소를 흡착하는 연구를 진행 중이다.

68) 일본특허 JP2003-273433

69) 일본특허 JP2005-004974

70) 한국특허 KR2000-0056422

일본 Sony사의 연구를 보면 연료전지에 수소 저장을 플러렌, 탄소나노튜브, 탄소나노파이버로 이용하는 연구, 연료전극 및 산소전극에 탄소나노튜브를 이용하는 연구 등을 발표하였고, 삼성 SDI에서는 탄소나노튜브 내외 벽에 루테튬, 백금 같은 촉매가 균일하게 분산되는 연구를 수행하였다. 미국의 California 대학에서는 폴리머 전해질과 촉매가 있는 탄소나노튜브를 함께 전극을 조립한 구조를 제시하였다.<sup>71)72)73)</sup>

#### (4) 측정과 이미징

탄소나노튜브의 우수한 기계적 강도, 전기전도도를 이용한 STM 및 AFM의 팁으로 사용하는 연구는 기존의 Si, SiN을 사용한 팁 재질이 관찰하지 못하는 부분을 관찰할 수 있어 많은 관심을 받고 있다. 탄소나노튜브 탐침은 Micro Manipulation에 의하여 캔틸레버의 끝에 고정된 것으로 일반적으로 사용되는 다중벽 탄소나노튜브가 사용된다. 탄소나노튜브를 이용한 나노탐침은 물체의 측정뿐만 아니라, 리소그래피, 대용량 저장장치의 응용 기술 연구 등의 나노스케일의 가공에 이용할 수 있는 가능성을 가지고 있다.

##### ① 탄소나노튜브 탐침

원자 현미경(atomic force microscope, AFM)은 물체 표면의 해상도를 위하여 Si를 이용하나, 현재 고해상도를 위하여 Si 탐침 대신 AFM에 탄소나노튜브 탐침을 사용하면 측정하는 물체 표면의 해상도를 향상시킬 수 있다. 라이스 대학의 리차드 스몰리(Richard Smalley)와 하버드 대학의 찰스 리버(Charles Lieber)가 AFM 및 STM(scanning tunneling microscopy)에 나노튜브 팁 탐침을 이용하여 고해상도를 얻는 연구를 진행한 이후, 많은 연구자들에 의하여 진행되고 있다. 초기 측정용 탐

71) www.mk.co.kr, “탄소나노물질개발”, 2001. 7. 12

72) 미국특허 US6805985

73) 한국특허 KR2004-0011181

침에 대한 연구는 탄소나노튜브에 은도금 또는 무전해 니켈 도금을 미크론 수준으로 하여, 도금된 탄소나노튜브를 STM/ATM 같은 장치의 탐침 기체에 용착한 후에, 선단부분만 에칭하여 도금부를 제거하는 방법이 제시된 이후 Osaka Gas에서 직선성이 높은 나노스케일의 침상물질 제조 방법을 연구 발표하였고, 한국과학기술원에서는 시료의 자성 특성을 조사하기 위하여 자성탐침의 탐침으로서 탄소나노튜브를 이용하는 연구를 하였다. 탄소나노튜브를 이용한 탐침은 이미 산업화가 진행된 산업으로 현재 SPM 탐침을 제조하고 있는 업체는 Si계 탐침 경우 올림퍼스와 나노센사브(독일) 2개사가 압도적인 점유율을 보이고 있고, 미국의 피에조막스가 CNT 탐침을 제조하고 있다.<sup>74)75)76)</sup>

## ② 저장용 장치

저장용 장치는 기존의 저장장치의 한계를 넘는 새로운 방법으로 탄소나노튜브를 이용한 연구를 수행하고 있으며, 이에 대한 연구로 일본의 Ricoh사는 전하를 지지하는 방법에 의해 데이터를 기록하는 기록 장치에서 전하의 수수와 전하의 유무를 판단한 전극탐침을 탄소나노탐침으로 적용하고, 이 탄소나노튜브에 의해 미소영역의 대전 혹은 용량 검지가 가능하여 고밀도 기록을 실현하는 기록 장치에 대한 연구를 발표하였다. Daiken Chemical Co.에서는 탄소나노튜브 팁과 이를 감싸는 나노코일로 형성되는 Nano-magnetic Head 및 이를 이용한 저장장치에 대한 연구를 발표하였다.<sup>77)78)</sup>

## ③ Nano Imprinting

반도체 산업 같은 전자 산업의 발달로 인하여 나노 구조물을 저가로

74) 일본특허 JP2000-230932

75) 일본특허 JP2001-341014

76) 한국특허 KR2004-0080184

77) 일본특허 JP2003-059133

78) 미국특허 US6735046

대량 생산할 수 있는 기술의 개발이 요구되고 있다. 1995년 프린스턴 대학 Chou 교수에 의해 제안된 나노 임프린팅 공정기술은 100 nm급 이하의 나노 구조물을 저가로 대량 생산할 수 있는 기술로, 현재 반도체 공정 및 마이크로급 소자제작에 널리 사용되고 있는 포토 리소그래피 기술을 대신한 차세대 리소그래피 기술로 주목받고 있다. 특히 나노 임프린팅 공정의 응용 분야는, 반도체 분야, 광통신 부품, 디스플레이 부품, 초고속 고밀도 저장매체 등의 전자소재에 응용이 가능할 것으로 전망된다. 나노리소그래피의 연구로 LG 전자는 기판상에 대면적의 나노튜브를 수직합성 시킨 다음, 탄소나노튜브를 패턴화된 모양으로 제거시켜 제조되는 대면적 전자빔 소스기판과 진공유지의 기능을 하면서 차폐기능을 하는 챔버로 구성되는 전자빔 노광장치를 연구하였다. 삼성전자는 2차원 나노리소그래피 장비에 대한 기술을 발표하였다.<sup>79)</sup>

## 다. 탄소나노튜브 응용기술의 산업화 추진 현황

### (1) 세계 현황

초기에는 주로 재료의 합성, 물성 및 화학적 특성에 대한 연구를 진행하였으나, 1998년 나노튜브 트랜지스터의 구현 이후에는 소자응용에 대해 많은 연구가 되고 있다. 특히, 탄소나노튜브는 이미 복합재료용으로 사용되고 있으며, 디스플레이, 전자회로, 이미징 장비에 응용가능성이 있고, 초소형, 초고속 칩과 초박막, 초고해상도 디스플레이에 대한 수요가 증가함에 따라 고 합성비용 문제를 극복하기 위해 노력 중에 있다. 이에 따라, 많은 탄소나노튜브 생산업체들은 탄소나노튜브의 생산뿐만 아니라 탄소나노튜브를 이용한 응용개발에 많은 노력을 기울이고 있다. 세계 주요 업체의 산업화 추진 현황은 다음과 같다.

---

79) 미국특허 20040036398

- Zyvex : 탄소나노튜브를 폴리우레탄, 에폭시, 레진 등에 섞어서 복합체를 만들어 판매하며, 또한 원자수준의 측정을 할 수 있는 측정 장치를 만들어 파는 업체이다.
- Southwest NanoTechnologies : 2001년에 오클라호마 대학의 실험실에서 설립한 회사로 Fluidized bed 방식, MoCoCAT 방식으로 SWNT를 생산하고 있다. 2008년 상업용 SWNT을 하루에 수 Kg 생산하고, 고순도의 SWNT는 월 수 Kg을 생산하고 있다.
- Nantero : 카본나노튜브를 이용한 소자의 개발에 힘쓰고 있다. 카본나노튜브를 용액상태로 분산하여 실리콘 웨이퍼에 스핀코팅한 후, 에칭 공정을 거쳐 CNT를 패턴화 하는 기술을 보유하고 있다. 2007년 이후 비교적 경쟁이 덜 심한 센서, 전자제품에 사용되는 프린터 기술의 개발에 주력하고 있고, 또한 자사의 라이선스를 사용하는 회사에 라이선스 비용을 청구하는 형태의 사업을 시도하고 있다.
- NanoTechLabs : 탄소나노튜브와 금속 나노입자를 생산 판매와 함께, 정부나 다른 기관의 연구를 수행하는 전문적으로 수행하는 회사이다. 탄소나노튜브는 CVD 방식으로 생산함과 동시에 수요자의 요구에 맞게 공급도 하고 있다. 탄소나노튜브를 항공산업에 적용하기 위하여 탄소나노튜브를 이용한 경량의 복합소재 기술 개발에 주력하고 있다.
- NanoIntegris : 탄소나노튜브의 정제 기술을 통하여 SWNT를 비슷한 직경, 같은 전기적 특성을 가진 SWNT를 분리해 낸다. 금속 특성을 가진 SWNT를 이용하여 투명전극, 반도체 특성을 가진 SWNT는 센서 등의 개발에 주력하고 있다.

- Nanocomp Technologies : CVD 방식을 사용하여 MWNT 및 SWNT를 생산하고 있다. 생산된 CNT를 항공 산업의 가벼운 소재, 전지, 전극 등의 소재로 사용되길 기대하고 있다. 특히 CNT를 방탄의 소재로 사용되기를 기대하고 있다
- Nano-C : 화염방사법에 의하여 SWNT 및 플러렌을 생산하고 있다. SWNT를 사용하여 투명전극을 개발을 시도하고 있다.
- Hyperion Catalysis International : 세계 최초로 MWNT를 생산 공급한 업체로 탄소나노튜브를 폴리머, 레진에 분산시켜 사용자가 편하게 쓸 수 있도록 CNT를 복합소재에 혼합하여 알갱이 형태로 자동차 회사, 전자 회사에 공급하고 있다. 특히 마스터배치 형태로 공급된 CNT 복합소재는 자동차의 연료 계통의 정전분산에 사용되고 있다.
- Eikos : 탄소나노튜브를 사용하여 반도체-CNT 잉크를 제조하고 있다. 특히, CNT 잉크를 ITO, ZnO 의 투명전극과 같이 사용하여 ITO, ZnO의 투명전극의 전도성을 높이는 결과를 얻었다. CNT를 사용한 투명전극이 기존의 ITO 투명전극의 대안으로 사용하기 위한 연구를 진행 중이며, 특히 CNT를 사용한 투명전극이 태양전지, LED 같은 전자 산업에 쓰이기를 기대하고 있다.
- Columbian Chemicals : CVD 방식을 사용하여 MWNT, 카본파이버, 카본 나노 파티클을 생산하는 업체이다. 특히 연료전지의 촉매로 백금을 탄소나노튜브에 분산시킨 제품을 생산하고 있다.
- Cheap Tubes, Inc. : 전 세계의 약 15개의 탄소나노튜브를 생산하는 업체로 부터 1년에 MWNT 12톤, SWNT 1톤의 탄소나노튜브를 공급 받아 미국, 유럽, 아시아 등에 시장에 전문적으로 탄소나노튜브를 공급하는 업체이다.

- CarboLex : 1998년에 설립된 회사로 하루 수십 kg의 SWNT를 아크 방식으로 생산하는 업체이다. 이 회사는 생산된 상태에서 SWNT의 순도를 50% 에서 70%로 증가시키기 위한 연구 개발을 계속하고 있다. 생산된 SWNT의 공급도 초기 몇 g 단위의 양으로 공급하던 수요자에서 현재 kg 단위의 소비자를 계속 늘려가고 있다. 탄소나노튜브를 전자산업의 전도성 필름에 적용시키기 위한 목표를 가지고 연구개발에 힘쓰고 있다.
- Shenzhen Nanotech Port Company(중국) : CVD 방식으로 MWNT, DWNT, SWNT를 연간 약 10톤 정도 생산하고 있다. 파우더 형태의 탄소나노튜브 뿐만 아니라, 물과 유기 용매에 분산된 탄소나노튜브를 판매하고 있다. 대부분의 MWNT는 복합소재에 사용되고 있다.
- Raymor Industries(캐나다) : 2004년에 카본나노튜브를 생산 공급한 회사로 플라즈마 연속 방식을 이용한 SWNT를 생산하고 있는 회사로, 항공 산업에 적용하기 위한 탄소나노튜브의 생산에 주력하고 있고, 최근에는 전자 및 화학제품에 사용될 수 있는 탄소나노튜브를 선보이고 있다.
- Thomas Swan and Company(영국) : 중간 규모의 화학회사로 CVD 방식을 사용하여 MWNT 및 SWNT 생산 판매하는 회사로 파우더 형태뿐만 아니라, 분산하여 판매한다. 탄소나노튜브의 순도는 약 70~90% 로 소비자의 요구에 따라 순도를 조절하여 판매한다.
- Nanocyl(벨기에) : MWNT를 생산하는 업체로, 특히 10 nm 보다 적은 직경의 CNT를 생산하고 있는 업체이다. CNT 파우더 뿐만 아니라, CNT와 폴리머나, 에폭시를 혼합하여 만든 CNT 복합소재를 판매하고 있다. 90% 정도를 MWNT 파우더의 형태로 판매하고 있으나, 향후 MWNT를 사용한 복합소재의 비중을 50%까지 늘릴 계획으로 있다.

- 아루바쿠(일본) : 성막원리는 플라즈마 CVD법으로 직접 기판 상에 CNT 성장시키는 기술로, 이 기술을 이용하여 증착된 CNT 성막장치를 판매중이다. 이 성막장치를 판매한 초기에는 대학□연구기관 출하가 80% 이상이었으나 지금은 민간기업 출하가 40%를 넘게 되었다. 이 성막장치는 유리기판위 특정 금속부분에만 CNT를 선택적으로 성장시킬 수 있어, FED 패널제조 등의 이용이 기대된다. 이미 이 장치를 노리타케 Ltd.가 디스플레이패널 응용에 쓰고 있다. 또한 CNT 성막장치 외에 열CVD법에 의한 GNF 성막장치도 판매하고 있다.
- NEC(일본) : NEC는 모바일기기용 연료전지, 차세대트랜지스터에서의 CNT 응용□연구를 하고 있다. 모바일기기용 연료전지에서는 메탄올을 연료로 하는 DMFC를 개발하고 있다. 이 회사가 레이저법으로 개발한 탄소나노혼(CNH)를 백금촉매담지에 채용하고 있다. CNH을 촉매담지재료로 씌으로써 종래의 카본블랙을 쓸 때보다 백금을 초미립자할 수 있어 표면적이 커진다. 이로써 DMFC 반응효율이 오르고 백금 비용저감에도 이어진다. 전자디바이스 분야에서는 소스전극과 드레인전극에 MWCNT, SWCNT를 배치한 CNT 트랜지스터 개발에 매달리고 있다.
- 오사카가스(일본) : CNT 응용연구로 수소흡장 분야에 집중하고 있다. CNT 합성방법은 탄소원 원료로 카르빈류를 사용하는 독자적인 방법이다. 구조를 독자적으로 변화시킨 SWCNT, MWCNT를 제조중이다. 생산된 CNT는 상온에서 3wt% 수소흡장이 가능하며, 향후 구조개량으로 상온 5wt% 이상 가능하다고 한다.
- 소화전공(일본) : VGCF를 리튬이온 2차 전지 부극첨가재로서 출하중으로 연간 생산량은 40톤이다. 리튬이온 2차 전지 부극에 VGCF를 첨가함으로써 종래보다 수명이 1~2년 늘어난다고 한다.

- GSI크레오스(일본) : 컵스택형 CNT ‘카르벨’ 일본 판매창구이다. GSI크레오스는 분말상태의 카르벨과, 수지에 카르벨을 혼합한 펠렛상 컴파운드 ‘코무후론’을 일본에서 판매하고 있다. 코무후론은 합성 직후 얽힌 카르벨을 풀어 이 회사가 설계한 2축 혼련압출장치를 사용하여 수지내부에 균일하게 CNT를 성공적으로 분산하였다. 이미 이 카르벨을 이용한 제품이 시장에 투입되었으며 향후 시장 확대가 기대된다.
- 세이코인스트루먼트(일본) : 大研化学工業이 제조한 SPM(주사형탐침현미경) 탐침을 판매하고 있다. SPM 제조□판매 업체로서 종래의 실리콘탐침보다 분해능이 높은 CNT탐침을 판매하고 있다. 초기에는 대학□연구기관이 판매 대상의 대부분이었으나, 점차 민간기업의 비중이 증가하고 늘고 있다. CNT에 도전성을 부여, 대상물 전위나 전류를 측정할 수 있는 CNT탐침도 개발하고 있다.
- 노리타케(일본) : CNT를 이용한 FED 연구를 진행하고 있다. 제품은 옥외대형표시용 화소로서 고전압형 형광표시관을 기본으로 그 필라멘트상 열음극 대신 CNT 냉음극을 배치한 것으로, 음극, 그리드, 양극으로 이루어진 삼극진공관의 일종이다. CNT 음극형성에는 스크린인쇄법을 사용하며, MWCNT를 사용하고 있다. 음극전류밀도는  $0.1\sim 1A/cm^2$ 을 얻을 수 있으며 수명에서도 15,000시간 이상이 가능하다. 쓰이는 CNT 양은 극히 적으며 일본 내 형광관 열원 전부를 CNT로 대체하여도 사용될 CNT양은 1톤 정도이다.
- 히다치조선(일본) : 도전성 수지에 CNT를 수직배열한 도전성 나노시트 샘플출하를 2002년 12월부터 판매하고 있다. 도전성 시트 응용제품으로서 FED 전자원, 전기이중층 캐패시터, 환경정화필터 등을 상정하고 있다.

## (2) 국내 현황

아직까지는 탄소나노튜브 복합소재와 연구개발용으로 활용되는 시장이 대부분을 차지하고 있으나, 일진나노텍은 탄소나노튜브를 이용한 평면형 광원을 개발하고 있다. 또한 17인치 CNT 평면 광원의 프로토타입을 제작한 나노퍼시픽 등 많은 벤처기업들이 이 분야에서 시장선점을 위한 치열한 경쟁을 벌이고 있다. 삼성 SDI와 LG전자 등 대기업체는 CNT를 활용하여 디스플레이 등에 적용하여 상품의 경쟁력을 극대화하고 첨단제품의 시장을 선점하기 위한 시장개척에 역점을 두고 있다.

- 삼성SDI : 탄소나노튜브를 이용한 스크린 프린팅 방법을 사용하여 38인치 CNT FED를 개발하였다. 또한 차세대 에너지인 이차전지, 연료전지 등의 분야에 탄소나노튜브를 적용하기 위한 연구 노력을 진행하고 있다.
- 삼성전자 : 탄소나노튜브를 이용한 Terabit 급 메모리 소자의 개발을 진행 중이다.
- LG전자 : 탄소나노튜브를 이용하여 20인치 탄소나노튜브 FED를 개발 중이다.
- LG화학 : 탄소나노튜브를 이용한 2차전지, 연료전지를 개발 중에 있다. 특히 리튬이온전지, 리튬 폴리머 전지의 개발을 진행 중에 있다.
- 나노퍼시픽 : 전계방출 탄소나노튜브 평면 광원을 개발 중에 있다. 또한 탄소나노튜브의 전계방출 특성을 일반조명의 광원에 사용하기 위한 연구를 진행 중에 있다.

〈표 4-8〉 탄소나노튜브 국내 주요 연구 기업

업체	소재지	특징 및 주생산품	응용분야
삼성SDI	기흥	- CNT FED 분야의 세계기술 선도 (최근 38인치 CNT FED 개발)	- 차세대 디스플레이(FED, Flexible Display, 3D Display) - 차세대 에너지(이차전지, 연료전지, 태양전지)
삼성전자	수원	- Terabit급 탄소나노튜브 메모리 소자개발 - CNT FED 개발중	- 메모리 소자
LG전자, LG Philips	서울	- CNT FED 개발중 최근 20인치급 CNT FED 개발	- 전계방출분야 응용
LG 화학	서울	- CNT소재 이용한 연료전지, 2차전지 개발 중	- 리튬이온전지, 리튬폴리머전지, OLED 신물질
나노퍼시픽	의왕	- 전계방출형 CNT 평면광원 개발중	- LCD-TV용 BLU 및 일반조명용 광원 - TFT-LCD의 backlight 응용
아텍시스템	인천	- 나노튜브제조장비 - 전기방전 설계 및 제어기술 확보	- 전기방전장치 생산

## 5. 산업화 전망

### 가. 탄소나노튜브

#### (1) 탄소나노튜브 생산 산업화 전망

CNT가 시장을 형성하는데 있어 가장 중요한 것은 가격이다. 어느 정도 구조가 균일하고 순도가 높은 것은 1g당 수 백원~수 십만원 수준에 있다. 탄소나노튜브를 복합재로 사용할 경우, 경합재료의 가격인 100원/g 이하인 점을 생각하면, 소량 첨가하는 이점을 고려해도 다중벽 탄소나노튜브는 100원/g까지 가격하락이 이루어지지 않으면, 시장이 일부

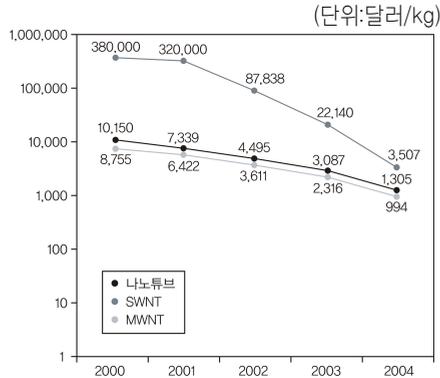
용도에만 한정될 가능성이 높다. 탄소나노튜브-복합체에 탄소나노튜브를 첨가할 경우, 첨가에 따라 복합재의 도전성 증가, 기계적 강도 강화, 열팽창 억제 등의 성능을 기대할 수 있어 가격하락이 잘 이루어지면 광범위한 용도에서 채용될 가능성은 있다. 특히 휴대전화나 노트북PC는 의 케이스에 탄소나노튜브를 소량 첨가하여 가격 부담을 적게 만들 수 있을 뿐만 아니라, 모바일기기의 EMC 대책도 함께 할 수 있어 많은 연구가 진행되고 있다. 반대로 자동차 분야는 중량당 비용은 전자기기와 비교해 낮고 대량의 첨가량이 필요하므로 CNT 가격 하락이 어느 정도 이루어지지 않으면 채용은 어렵다. 탄소나노튜브가 복합재로 사용할 경우, 충분히 CNT가 분산되지 않으면 기대한 성능이 나올 수 없으므로, 사용자의 편의를 생각하여 분산기술을 사용한 펠렛이나 마스터배치 형태의 복합재를 출하하는 비율이 증가할 것으로 생각된다. 에너지 부문에는 리튬이온 2차전지에서 채용되고 있다. 향후 모바일기기용 연료전지에 탄소나노튜브의 사용이다. 전자기기 경우 FED를 이용한 디스플레이용 소재 이외에는 광학필터나 센서디바이스에서 CNT 응용연구가 시작되고 있는데 기초연구단계이며 실용화는 2010년 이후로 예측된다.

탄소나노튜브의 생산 판매 시장은 세계적으로 산업화의 초기 단계로 생산량은 다중벽 탄소나노튜브의 경우 수백톤에 불과하다. 이는 탄소나노튜브를 사용하는 제품이 아직 시장에 나오지 않고 있지 때문이다. 특히 단일벽 탄소나노튜브의 상업화에는 많은 장벽이 가로 놓여 있으며, 판매량도 겨우 연구개발 시험용 정도 수준이다. 산업이 미성숙 단계에 있지만, 제조업자들은 향후 5-10년 사이에 수요가 투명 전도성 전극 등의 연구개발에 의한 수요 창출로 SWNT의 시장이 성장할 것으로 기대하고 있고, 공급업자들은 생산능력을 2007년 43톤 이상, 2010년 195톤으로 증대할 계획이다. 그러나 탄소나노튜브는 향후 탄소나노튜브를 사용하는 제품이 시장에 나오기 시작하면, 탄소나노튜브의 생산 시장은 기하급수적으로 늘어날 것으로 기대되고 있다. 따라서 생산업체별 매출액은 대략 수 억원에서 수 십억원 정도 규모로 추정되고 있다.

탄소나노튜브의 산업화의 생산 기술과 가격적 측면에서 보면 연구실 규모의 소규모 생산기술의 연구개발에서 산업화를 위한 많은 대량생산 기술 개발이 진행 중에 있다. 따라서 탄소나노튜브의 대량 생산을 위한 세계기업의 경쟁과 대량생산에 의한 가격의 하락은 이미 진행되고 있는 중이다. 특히 다중벽 탄소나노튜브의 세계 생산 능력은 2005년 기준 연간 294톤 이상이며, 2007년 1,640톤, 2010년 5,560톤에 이를 것으로 전망된다. 그러나 2005년 기준 생산량은 29톤/년 정도(약 전체 생산능력의 약 10% 수준)이다. 단일벽 탄소나노튜브의 생산과 가격은 BCC (Business Communications Company)는 2000년 세계 생산량을 1~5kg으로 추산하고 있는데, 이는 금액으로 약 150만 달러에 상당하며, 그램당 가격이 300~1,500달러 범위이다.

특히 탄소나노튜브의 대량 생산 기술과 가격 하락에 따른 탄소나노튜브 소요량 측면에서의 수요 시장을 본다면 탄소나노튜브의 생산량과 생산수율이 향상되어, 급격하게 낮은 가격을 형성하여 탄소나노튜브가 가격적 측면에서 탄소섬유와 경쟁이 가능하여 질 것으로 예상하고 있다. 세계시장 규모를 보면, 2000년에 270만 달러, 2001년은 500만 달러, 2005년에는 800 만 달러로 추정되고 있다. 국내시장도 2001년은 7억원 정도였고, 2005년에는 50억원 정도로 추정되고 있다. 미국의 Global Industry Analysts, Inc. 분석을 보면 2010년 세계 탄소나노튜브의 시장은 약 19억 달러에 이를 것이라는 전망을 내놓고 있다. 탄소나노튜브 평균가격을 산정해보면 2000년에 kg당 1만달러 수준이었고, 2002년 들어서 4,000 ~ 5,000 달러로 거의 절반 수준으로 떨어졌으며, 2004년에는 1,000 달러 수준이었다. 이후 급격하게 다중벽 탄소나노튜브의 가격이 하락되어 2008년 기준 kg 당 450달러 정도에 거래가 되고 있다. 단일벽 탄소나노튜브의 경우에는 제조가 간단하지 않아 2000년에는 kg당 38만 달러 수준이었으나, 2002년에는 10만 달러로 떨어졌으며, 2008년 기준 kg 당 5만달러 정도에 거래되고 있다. 세계 탄소나노튜브의 가격에 대하여 KISTI는 <그림 4-4>와 같은 전망을 내놓고 있다. KISTI의 전망과 같

이, 탄소나노튜브의 가격은 2008년 기준(<표 4-9>, <표 4-10>)과 같이 급격하게 떨어지고 있다. 탄소나노튜브의 가격이 급격하게 떨어지고 있는 이유는 대량생산 설비의 증산과 가격 경쟁이 치열하게 시장에서 경쟁을 하고 있고, 탄소나노튜브를 사용한 제품이 아직 출시가 되지 않아 대규모의 탄소나노튜브 사용처를 아직 찾고 있지 못하고 있기 때문이다.



〈그림 4-4〉 연도별 탄소나노튜브의 가격동향

자료 : KISTI

〈표 4-9〉 다중벽 탄소나노튜브 (MWNTs : Multi Wall Carbon Nanotubes) 가격

2008년 기준 (단위 :달러)

순도 90wt% MWNTs	1 kg	500 kg	TON
MWNTs 90wt% 10-30nm	\$450	\$75,000	\$125,000
MWNTs 90wt% 20-40nm	\$400	\$65,000	\$95,000
MWNTs 90wt% >50nm	\$400	\$65,000	\$95,000

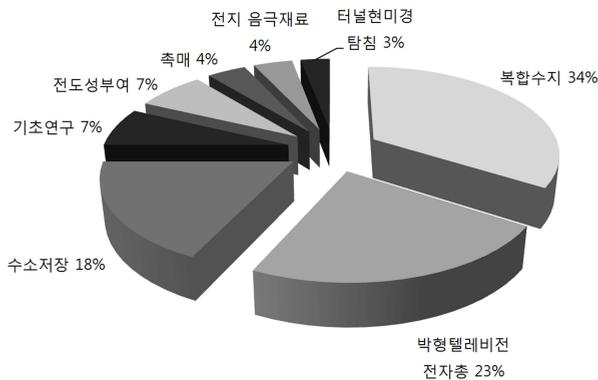
〈표 4-10〉 단일벽 탄소나노튜브(SWNT : Single Wall Carbon Nanotubes) 가격

2008년 기준 (단위 :달러)

SWNTs	1g	500g	1kg
SWNTs 90wt%	\$95	\$32,500	\$50,000
Short SWNTs 90wt%	\$160	\$47,500	\$90,000
SWNTs 60wt%	\$45	\$13,000	\$25,000
Short SWNTs 60wt%	\$75	\$20,000	\$37,500

## (2) 탄소나노튜브 수요동향 및 수요예측

샘플 출하된 탄소나노튜브가 사용되고 있는 분야를 보면 <그림 4-5>와 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. 한편, 탄소나노튜브는 향후 차세대 표시장치인 FED용 전자총, 연료전지의 전극재료 등에 폭넓은 응용이 예상되고 있다.



<그림 4-5> 샘플 출하된 탄소나노튜브의 용도

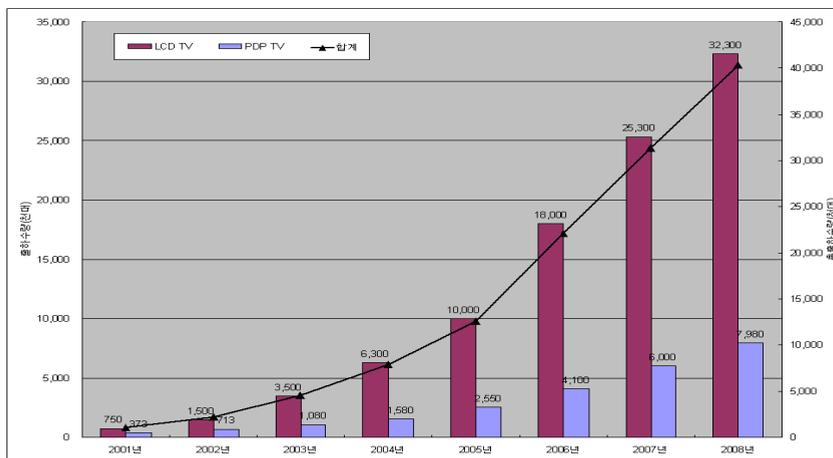
자료 : 일본 産總研

## (3) 탄소나노튜브 응용 기술의 산업화 전망

### ① 전계방출(Emitter) 및 FED

평면 디스플레이 시장은 LCD TV, PDP TV가 꾸준히 가격을 낮추면

서 기존의 CRT TV가 가지고 있던 시장을 많이 차지하고 있다. 현재 LCD 생산업체는 화면의 대형화를 추진 중에 있고 2003년에 LCD 업체가 발표한 LCD 패널을 들어 보면 대만업체가 46~47인치, 한국의 삼성이 46, 54, 57인치, LG Philips사가 55인치를 발표하였다. 일본 샤프도 2004년에 양산하기 위한 시제품 45인치를 발표하였다. 많은 LCD TV 생산업체는 30인치 이상의 대형 평면 디스플레이 시장에서 가격경쟁 단계에 돌입해 있다. 평면 디스플레이인 LCD TV가 대형화로 갈 경우 LCD 경우에는 저전력 소비구조에서 발광효율을 올리는 구조 연구나 드라이버IC에 의한 저소비전력화가 연구되고 있다. 휘도에 관해서 LCD 경우 백라이트에 의존하기 때문에 휘도에는 한계가 있지만 LCD TV용 백라이트 연구개발이 활발해지고 있으므로 향후 저비용 저소비전력을 실현한 백라이트가 사용될 것으로 보인다. 수명에 있어도 LCD는 6만 시간을 달성했다.



〈그림 4-6〉 LCD/PDP TV 시장규모 예측(세계, 수량기준, 단위:천대)

자료 : 矢野經濟研究所 추정

〈표 4-11〉 각종 평면 디스플레이 성능비교

	LCD		PDP			OEL(시작품)	FED(시작품)
	인치	인치	인치	인치	인치	인치	인치
인치	37	40	37	42	50	24.2	11.3
업체	샤프	삼성	日立 製作所	日立 製作所	日立 製作所	소니	双葉 電子工業
화소수	1366×768	1280×768	1024×1024	1024×1024	1280×768	1024×768	640×480
휘도	450	450	900	1100	900	200	350
명암비	800:1	600:1	1000:1	1000:1	1000:1	-	-
응답속도	16ms	23ms	1~10ms			<1ms	10~30 $\mu$ s
소비전력	195	200	294	300	328	-	11
수명	60,000	60,000	30,000	30,000	30,000	-	-

FED 시장의 경우 지금까지 실리콘을 에미터로 채용한 스피트형이 연구 개발되어 왔다. 스피트형은 미국 모토롤라에서 군사용으로 제조하고 있는 방송기기용 디스플레이 등 일부 상용화 되고 있다. 실리콘 에미터의 상용화의 어려움은 에미터를 실리콘으로 제조하는 공정이 복잡하기 때문에 고비용이 필요하고 제조 시간이 많이 걸리기 때문이다.

탄소나노튜브를 이용한 저비용 고효율의 FED 개발이 많은 회사에서 진행 중이다. 특히 CNT를 에미터로 사용할 경우의 특징으로는 CNT의 높은 전계방출성능에 의한 고휘도, 스크린인쇄법이 가지는 제조공정의 단순함, 대화면화 지향 등을 들 수 있다. 현재 CNT형 FED에 참여하고 있는 업체는 삼성SDI, 미국 모토롤라, 일본의 미쯔비시전기, 노리타케(伊勢電子工業), 히다치디스플레이즈, 아시히글라스(旭硝子)이다. 탄소나노튜브 FED 실용화에 있어 수명은 6만시간 수준에 접근하여야 하지만 지금까지 보고된 CNT FED 수명은 1만5,000시간 정도이다. 또한 휘도불균일성을 줄이는 것으로 CRT 경우 휘도 편차가 1.6%~2% 이내인 것에 비해 FED는 10%에 달한다. 이 편차를 없애기 위해 CNT 막의 표면처리, 막의 평탄화, 에미션사이트 증가 등이 연구되고 있다. 또한 시장투입 경우, 가장 중요한 것이 가격이다. CNT FED가 제품화에 도달했다 하여도 가격이 기존에 LCD에 사용되는 제품과 비교하여 비싸면 시장에서 경쟁하기 어려울 것으로 생각된다.

〈표 4-12〉 FED 참여업체 및 그 동향

기업명	에미터재료	에미터타입	동향	동향
東芝/캐논	산화팔러듐	SED	1999년에 SCE를 연구하던 캐논이 東芝와 제휴. 현재 600인치체제로 연구개발	연구개발단계
日立製作所	금속/절연체 /금속	MIM	제조공정에서 TFT LCD 제조장치를 쓸 수 있는 것이 큰 특징	연구개발단계
松下電工	폴리실리콘	BSD	2.6인치, 화소수 84(RGB)×63의 디스플레이 패널 시작품을 발표	연구개발단계
소니	몰리브덴	스핀트	Candescent와 협력체제를 갖춰 FED 연구개발	실용화단계
双葉電子工業	몰리브덴	스핀트	Pixtech으로부터 기술제공을 받지만 현재 기술수준은 꽤 높음. 18.2cm, 단색 제품 전시	실용화단계
伊勢電子工業	CNT	열CVD	CNT를 사용한 FED를 三重大学와 공동으로 개발.	연구개발단계
모토롤라(미)	CNT	열CVD	스핀트형으로부터 CNT형으로 연구를 이행.	연구개발단계
삼성SDI(한)	CNT	스크린인쇄	CNT를 사용한 FED를 연구. 2004년에 상품화 목표	연구개발단계

자료 : 矢野經濟研究所

〈표 4-13〉 탄소나노튜브 FED 대수와 CNT 수요량의 시장규모 예측

단위 (수량:대, 수요량:g)

	2003년	2004년	2005년	2006년	2007년	2008년	2009년	2010년
LCD	3500,000	6,300,000	10,000,000	18,000,000	25,300,000	32,300,000	55,233,000	84,448,430
PDP	1,080,000	1,580,000	2,550,000	4,100,000	6,000,000	7,980,000	12,289,200	28,265,160
FED	0	0	15,000	48,000	150,000	460,000	690,000	820,000
SWCNT								
DWCNT	0	0	30,000	96,000	300,000	920,000	1,380,000	1,640,000
수요량								
kg 환산	0	0	30	96	300	920	1380	1640

자료 : 矢野經濟研究所 추정

## ② 전자디바이스

전자기기의 고밀도화에 따라 LSI 배선 핏치는 미세화 방향으로 진행되고 있으며 탄소나노튜브는 종래의 톱다운 방식의 반도체 가공기술을

극복할 수 있는 유력한 배선재료의 하나로 주목을 받고 있다. 트랜지스터에는 IBM, NEC, 배선에서는 인피니온, NTT, 후지쯔연구소가 CNT 응용연구를 진행하고 있다.

NEC는 CVD법으로 합성한 CNT, 저저항 접촉전극, 튜게이트 전극을 채용한 CNT FET를 시험 제작하였다. 이 회사에서 CNT FET 특성을 조사한 바에 따르면, Si MOSFET보다도 높은 상호컨덕턴스( $13000\mu\text{S}/\mu\text{m}$ )를 가진 것으로 발표되었다. 또한 상호컨덕턴스는 CNT 직경에 의존하며 향후 CNT 구조와 디바이스 설계 최적화에 의해 성능향상이 기대된다고 한다.

LSI 배선에 CNT를 응용하는 것도 각 업체에서 연구되고 있다. 인피니온은 열CVD법에 의한 MWCNT를 6인치 Si 기판위에 선택적 수직배향성장시키는데 성공하였고, 일본의 후지쯔연구소는 PCVD법을 이용하여 비어홀 내에서의 선택적 CNT 수직배향 성장에 성공하였다. 현재 CNT의 LSI 응용은 기초적인 단계이므로 실용화까지는 아직 많은 문제를 해결하여야 한다.

CNT를 에미터로 사용할 경우의 특징으로는 CNT의 높은 전계방출 성능에 의한 고휘도, 스크린인쇄법이 가지는 제조공정의 단순함, 대화면화 지향 등을 들 수 있다.

〈표 4-14〉 미국 Intel사 공정기술 로드맵

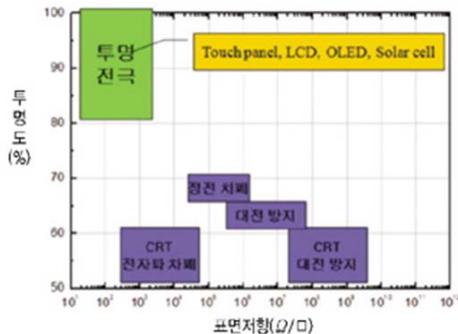
도입시기	1997년	1999년	2001년	2003년	2005년	2007년	2009년	2011년
공정기술노드 (nm)	250	180	130	90	65	45	32	22
웨이퍼직경 (mm)	200	200	200	300	300	300	300	300
금속배선재료	Al	Al	Cu	Cu	Cu	Cu	Cu	?
채널구조	Si	Si	Si	변형Si	변형Si	변형Si	변형Si	변형Si
게이트절연막	SiO <sub>2</sub>	SiO <sub>3</sub>	SiO <sub>4</sub>	SiO <sub>5</sub>	SiO <sub>6</sub>	high-k	high-k	high-k
게이트전극	다결정Si	다결정Si	다결정Si	다결정Si	다결정Si	금속	금속	금속

자료 : Intel

### ③ 투명전극

탄소나노튜브를 이용한 유기전극 혹은 유기 복합체 전극이 기존의 금속 및 금속산화물 전극을 대체하여 디스플레이 소자에 적용할 수 있을 뿐만 아니라 새로운 응용분야를 창출해 내기 위해서는 전극 재료의 투명도 대비 전도특성 향상과 고해상도가 가능한 박막가공 및 패터닝 기술이 향상되어야만 한다. 이를 구현하기 위해서는 고분자의 경우 필러로 사용되는 전도성 입자 및 탄소나노튜브 자체의 전기적 특성의 향상 및 박막 매트릭스 내에서의 분산 기술, 프린팅 기술이 확보되어야 한다.

투명전극의 용용은 막의 전기 전도도와 투명도에 따라 결정된다. <그림 4-7>에서 보는 바와 같이 디스플레이용으로 사용되기 위해서는 면저항 1,000  $\Omega/\text{sq}$  이하, 가시광선 영역에서의 80% 이상의 투명도를 가져야 하며, 대전방지제 전자사진 기록 등에 사용되려면 ~70%의 투명도와 107  $\Omega/\text{sq}$  이하의 면저항을 가져야 한다. 현재 투명전극에 사용되는 재료는 대부분 ITO 박막으로 대부분 평판 디스플레이 시장에 집중적으로 사용되고 있다. 탄소나노튜브를 이용한 플렉시블 투명전극이 개발될 경우 기존의 사용되던 ITO의 대체와 ITO로는 적용이 제한적이거나 불가능했던 영역에서 새로운 산업이 창출될 수 있을 것이다. 또한 디스플레이시장 외에 태양전지나 RFID, 전자차폐재, 대전방지재, Optical Modulator, Printed Electronics 등의 다양한 IT 산업 분야에서 사용될 수 있다.

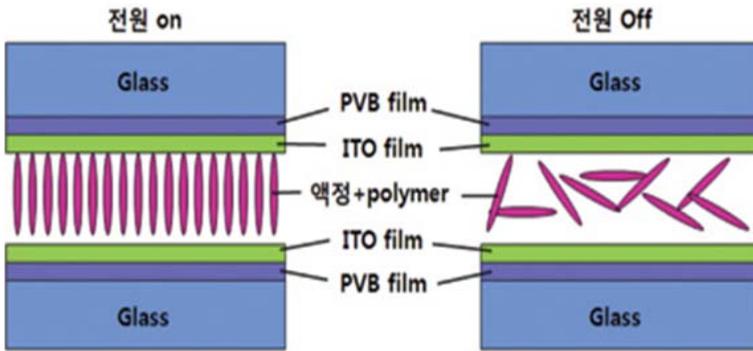


<그림 4-7> 투명 전도성 박막의 전기광학적 특성에 따른 응용분야

현재 디스플레이에 사용되는 투명전극은 대부분 ITO로 공정상 안정한 점 등의 유리한 점이 있어 현재까지 유리기판위에 ITO박막의 형태로 사용되어 왔으며, 플렉시블 디스플레이를 위하여 폴리머 필름위에 ITO 박막을 형성시킨 것이 사용되고 있다. 그러나 ITO 박막은 플렉시블 특성이 좋지 못하여 보다 차세대의 플렉시블 디스플레이에 응용이 점차 어려워지고 있다. 게다가 ITO 사용 총량의 95% 이상을 수입에 의존하고 있어 ITO 자체의 국산화가 미비한 실정이며, 고가의 인듐을 사용하기 때문에 ITO 박막의 가격은 5,000 원/m<sup>2</sup> 수준 이하로 떨어지지 않아 새로운 투명전극을 개발하는 것이 경제적으로도 필요한 실정이다. 탄소나노튜브를 사용한 플렉시블한 투명전극은 플렉시블 디스플레이 뿐만 아니라 기존의 평판 디스플레이, 노트북, 모니터, TV 등 모든 분야 디스플레이 전극의 대부분을 대체하는 것도 가능하다. 투명전극에 프린팅 기술을 사용할 경우 현재 기술수준에서는 유기 투명전극의 소재의 경우 프린터 해상도, 내구성, 전기적 특성 등 물성이 ITO에 미치지 못하고 있다. 이에 디바이스 적용에 어려움이 있는 것이 사실이나 아직 기술개발 초기단계이며, 미세하게 인쇄할 수 있도록 공정개발이 이루어진다면 기존 ITO를 사용할 때와는 비교할 수 없을 정도로 저가에 생산할 수 있게 될 것이다. 또 종이의 가격에 근접한 저가의 디스플레이를 생산하는 것이 가능해져 종이나 신문처럼 쉽게 사고 폐기할 수 있는 디스플레이의 구현이 가능해질 것이다.

투명전극은 전자파 차폐제로서도 사용이 가능하다. 전자파가 전자기기의 내부가 아닌 표면에 사용되었을 때 높은 전기전도성으로 인하여 전자기기의 표면에서 발생하는 전자파를 차폐하는 기능을 수행할 수 있으며, 디스플레이 기기의 경우 전자파를 차폐하기 위해서도 사용이 가능하다. 따라서 전자파 차폐 전극으로 사용되기 위하여서는 전자기기의 표면에 코팅되는 것이 가장 유리하며 이에 투명전극이 개발될 경우 아주 유용하게 사용이 가능해질 것이다. 또한 탄소나노튜브를 투명전극으로서 대전방지제로 사용할 수 있는데 이는 전도성 고분자를 이

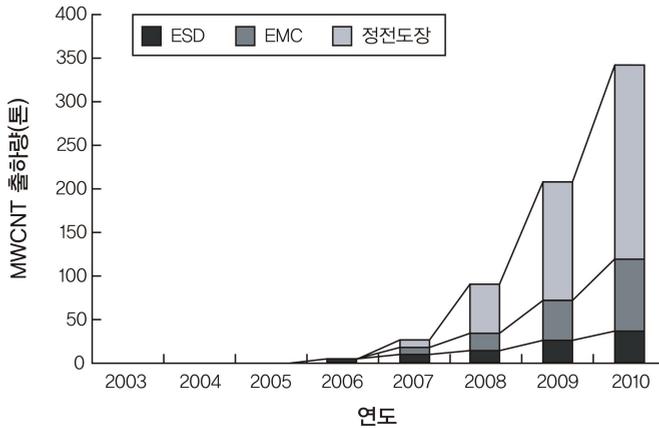
용하여 기재의 표면전기저항을 감소시킴으로써 정전기 발생의 원인이 되는 대전(전하의 축적)을 방지하여 정전기 발생을 방지하는 역할에 사용될 수 있다. 태양전지에서 사용되는 전극은 투명성과 고도의 낮은 저항성분을 필요로 한다. 하지만 기존의 투명전극은 저항이 너무 높아 이에 사용되기 어려우며, 저항이 작은 플렉시블한 투명전극이 개발되면 태양전지의 전극으로 이용할 수 있을 것이다. 투명전극의 스마트 윈도우로의 사용이다. 투과도 가변유리, 조광유리라고도 불리는 스마트 윈도우는 <그림 4-8>에 보인 바와 같이 전기가 흐를 때만 광투과가 허용되어 투명상태로 변하는 특성을 이용한 것으로 건물의 냉난방 부하와 조명사용에 대한 에너지 낭비를 30% 정도 줄여주는 기술이지만 사용되는 ITO 필름이 고가이기에 일부 고급 건축자재로 사용되고 있을 뿐이다. 하지만 대량생산이 가능한 저가의 투명전극이 개발될 경우 그 적용분야가 급속히 늘어날 것으로 예상할 수 있다.



<그림 4-8> 스마트 윈도우의 전원 on/off 상태

투명전극의 산업전망은 플렉시블 디스플레이용 투명전극에는 거의 CNT-polymer가 사용되고 있으며, 다른 재료를 사용하여 플렉시블한 투명전극을 만든다 해도, 기본적으로 투명성과 전기전도도를 갖는 플렉시블한 전극이 요구되는 분야는 거의 같다고 볼 수 있다.

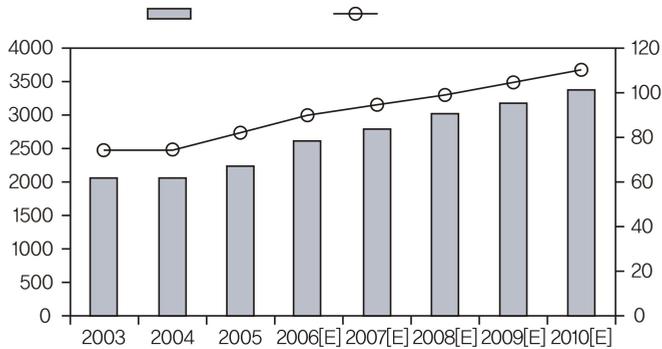
디스플레이 산업에 전도성 고분자나 CNT 같은 재료를 이용한 유기 투명전극이 상용화 되어 본격적으로 디스플레이에 적용이 될 경우 ITO 투명전극의 시장을 급속히 대체 할 수 있을 것으로 보이며, 플렉시블한 특성을 이용한 새로운 응용분야를 창출하고, 기존의 평판 디스플레이 시장까지 영역을 확대할 수 있을 것으로 기대된다. 현재 유기 투명전극은 상용화된 전극은 있으나 아직 본격적으로 디바이스에 적용되지는 않은 시장진입 초기 상태이다. 플렉시블 디스플레이 시장은 전자종이를 시작으로 그 시장이 형성될 것으로 보인다. <그림 4-9>는 2006년에 I-Supply와 DisplaySearch 에서 플렉시블 디스플레이 시장규모를 예측한 것이다.



<그림 4-9> 플렉시블 디스플레이 시장 규모 I-Supply (2006)

자료 : I-Supply (2006)

현재 평판 디스플레이 유리기관의 전극으로 사용되는 ITO 박막은 평판 디스플레이의 수요 증가와 더불어 연평균 14%에 이르는 높은 시장 성장률을 보이고 있다. 모바일 기기에 사용되는 ITO 투명전도성 유리기관의 CNT-Polymer 필름으로 대체될 가능성이 있다. 현재 ITO 투명전도성 필름의 주요 용도는 터치 패널으로 세계시장은 연평균 6.2%씩 꾸준히 증가하고 있고, <그림 4-10>의 I-Supply의 예측에서 보이는 바와 같



〈그림 4-10〉 투명전도성 필름 시장 예측 현황 I-Supply (2006)  
 자료 : I-Supply (2006)

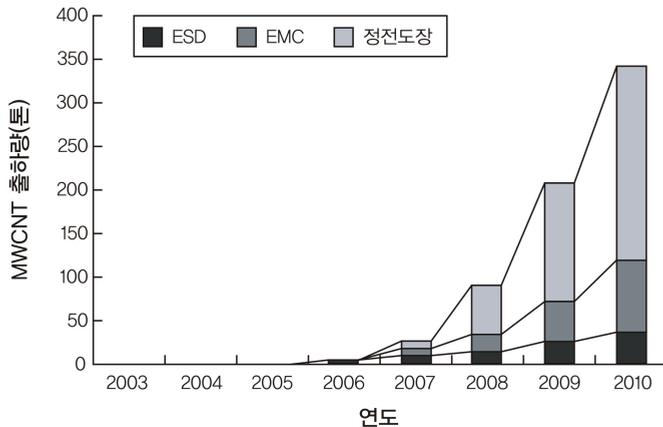
이 투명전도성 필름 시장의 규모는 계속 증가 할 것으로 예측된다. ITO 투명전도성 필름시장은 일본의 Nitto Denko가 세계 시장의 25%를 차지하고 있으며, Oike Kogyo, Toyobo 및 Torayrk가 뒤를 따르고 있다. 하지만 ITO는 현재 매우 고가이며, 터치패널이나 플렉시블 디스플레이 같이 기계적 충격을 지속적으로 받는 경우 금속산화물의 깨지기 쉬운 특성으로 인해 내구성이 취약하다. 그리고 플라스틱 기판과의 접착력, 열팽창계수의 차이로 인한 공정상의 문제점으로 인해 유기 투명전극으로 서서히 대체될 가능성이 많다.

투명전극을 사용한 전자패 차폐의 시장은 이동통신과 무선인터넷 등의 발달로 점차 사용이 증가함에 따라 전자파 대책 산업은 급격한 신장세를 보이고 있다. 전자파 차폐 산업은 현재 주로 문제시 되는 휴대폰, 노트북, PC, PDA, 모니터 등뿐 아니라 일상가전용품에까지 수요가 증가할 것으로 예상된다. 기본적으로 전자파 차폐는 유효 회로 외의 곳으로 접지시켜 여분의 전기, 자기가 흐르게 하는 것으로, 1 Ω/sq 이하의 낮은 저항이 필요하다. 현재 각각의 기업에서 필요한 기술을 독자적으로 개발 보유, 개선하고 있는 것으로 판단되며, 유기투명전극을 전자파 차폐제로 사용하는 것은 아직 완성했다고 볼 수는 없다.

대전 방지제로 사용한 투명전극은 거의 대부분의 전자분야에서 사용

되며, 그 시장 규모가 무한하여 정확한 국내의 시장을 예측하기 어렵다. 단지 주 생산업체들의 관련 보고자료로 부터 예측할 뿐이고, 2005년 Cientifica에서 예측한 자료인 <그림 4-11>에 보는 바와 같이, 대전 방지제 및 정전도장 등에 플렉시블한 유기 투명전극의 재료로 CNT가 사용되어 대전방지제품을 출시하기 시작했으며, 2004년에 0.24톤에서 2010년에 345.6톤으로 급증할 것으로 예측된다. 특히 탄소나노튜브가 전도성 고분자와 사용되는 전도성 플라스틱, 정전방지 시트, ICP 등의 시장 규모는 2003년에서 2005년까지 전도성 플라스틱은 연평균 8%, 전도성 고분자는 30%에 가까운 높은 성장률을 보이고 있으며, 수요는 더욱 늘어날 전망이다. 현재 전도성 고분자는 전도성 플라스틱이 주류를 이루고 있으며, 유기 투명전극이 개발될 경우 전도성 플라스틱 시장의 상당수를 점유할 수 있을 것으로 생각된다.

탄소나노튜브를 유기 태양전지용 전극으로 플렉시블한 투명전극이 이용될 수 있는데, 현재 투명전도성 필름(ITO 필름)의 주 용도는 터치 패널로 어느 정도의 높은 저항값을 허용하지만 태양전지에서는 저저항의 필름이 요구된다. 각국의 태양에너지 개발과 함께 유기 태양전지용 전극시장은 꾸준한 성장이 계속될 것으로 보이며, 2006년 I-Supply 자



<그림 4-11> 용도에 따른 MWNT 출하량 변화

료의 예측에 의하면 유기 태양전지용 전극시장은 2010년에는 전체 플렉시블 전극시장의 14%, 2015년에는 전체의 22%를 차지하게 될 것으로 전망하고 있다.

탄소나노튜브가 스마트 윈도우의 투명전극으로 사용될 수 있다. 현재의 스마트 윈도우 시장은 이제 막 형성되기 시작한 것으로 그 용도는 인테리어용 등으로 한정되어 있지만, 그 파급효과는 상당히 클 것으로 예상되고 있다. 2006년 I-Supply가 예측한 자료인 <표 4-14>에서 보는 바와 같이 스마트 윈도우 시장을 전체 신소재 유리 시장을 통해 스마트 윈도우가 포함된 전기전자 시장을 유추한다면, 일본의 신소재 유리시장은 세계시장의 약 50%를 차지하며, 그중 스마트 윈도우가 속한 전기전자 시장은 <표 4-14>에서와 같이 전체의 11~14% 정도로 유리시장의 성장과 함께 성장해 갈 것으로 추정할 수 있다.

<표 4-14> 용도별 플렉시블 투명전극 기술의 시장규모 예측

분야	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015
플렉시블 디스플레이	16	66	215	536	766	1010	1314	1606	1929
플렉시블 디스플레이 TFT 재료	1.6	6.6	21.5	53.6	76.6	101.1	131.3	160.6	192.9
유기, 태양전지용 반도체 재료	31.2	46.8	70.2	105.3	158.0	237.0	355.5	533.3	800
유기 FED 반도체 재료	-	5.9	15.7	31.5	69.9	130.3	223.0	395.7	658.4
합계	48.8	125.3	322.4	726.4	1070.5	1478.4	2023.8	2695.8	3580.3

플렉시블 투명전극은 플렉시블 디스플레이를 실현시킬 수 있는 중요한 부품이다. 유기 투명전극 시장은 상용화가 일부 진행되고 있으나 상황이고, 기존의 투명전극 필름인 ITO 필름시장은 아직 성숙되지 않은 상태이다. 현재 디스플레이 시장이 저가격, 박형, 대화면화 추세로 가고 있어, 향후 유기투명 전극을 이용한 다양한 종류의 디스플레이가 실생활에 응용될 것으로 예상된다.

## 나. 탄소나노튜브 복합소재

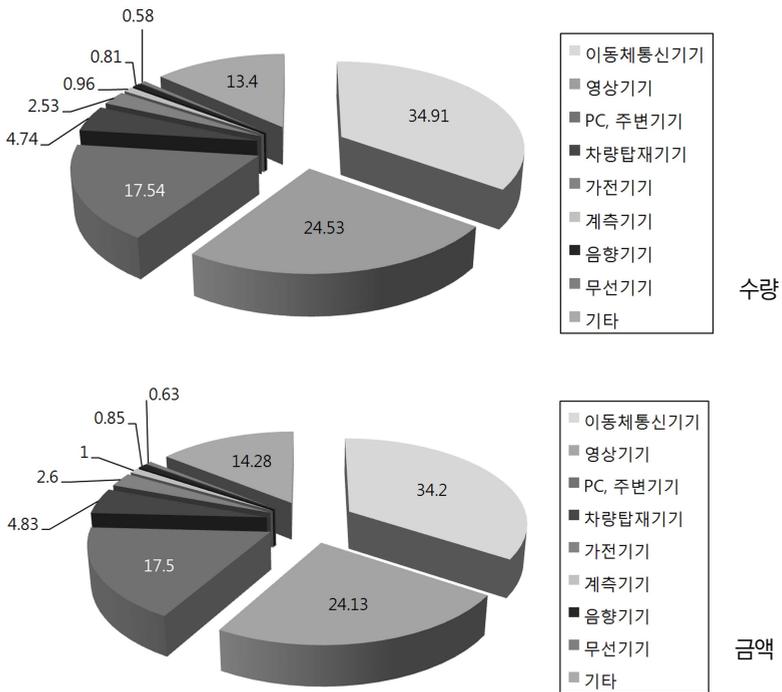
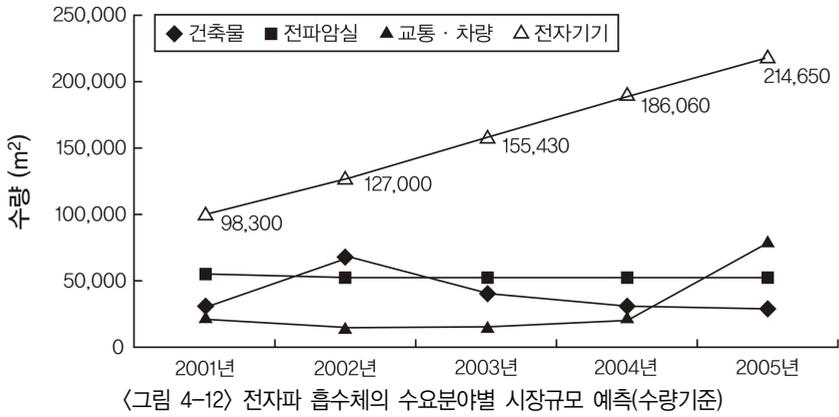
탄소나노튜브의 독특하고 우수한 전기적, 물리적, 화학적 특성 때문에 여러 산업분야에서 탄소나노튜브의 역할이 크게 기대되었으나 탄소나노튜브 단독으로는 여러 가지 요구 조건을 충족시키는데 한계가 있음이 밝혀지고 있다. 따라서 탄소나노튜브와 고분자 복합체 또는 탄소나노튜브와 금속/반도체 복합체와 함께 사용하여 응용을 시도되고 있으며 여러 연구결과에서 희망적인 가능성을 확인하고 있다. 탄소나노튜브와 사용되는 복합체는 용도에 따라 크게 두가지 종류로 나눌 수 있다. 고분자나 세라믹 같은 Base 물질이 기저(Matrix)로 사용되고 탄소나노튜브가 첨가물로의 사용이다. 사용된 기저(Matric) 물질에 따라 복합소재가 전도성의 증진이나, 강화용 복합소재로의 응용이 가능하다. 또 다른 사용도로 탄소나노튜브에 고분자나 금속 나노입자를 붙여 탄소나노튜브에 기능성을 부여하는 산업제품의 응용이다. 특히 전도성 고분자는 부도체인 범용 플라스틱 매트릭스에 금속, 카본 등의 전도성 충전제를 혼입하여 도전화한 복합재료와, 고분자 매트릭스 그 자체가 원천적으로 전도성을 갖는 고유 전도성 고분자(Intrinsically Conductive Polymer) 등 두 종류로 크게 분류될 수 있다. 전도성 고분자의 종류로 폴리아세틸렌(Polyacetylene), 폴리피롤(Polypyrrole), 폴리티오펜(Polythiophene), 폴리아닐린(Polyaniline) 등이 있다. 폴리아세틸렌은 도핑에 의해 높은 전도성과 함께, 도판트의 종류에 따라 p형, n형 반도체적 성질을 나타내고 있고, 폴리아세틸렌의 경량성, 구조적으로 넓은 면적을 가질 수 있어, 외부전압 인가에 의한 전기화학적 도핑이 가능하여 2차전지에 대한 연구가 추진되고 있다. 폴리피롤(Polypyrrole)계 전도성 고분자는, 일반적으로 폴리아닐린이나 폴리티오펜에 비교하여 우수한 전도성능(1,000 S/cm 이상)을 가지고 있어, 전도성 고분자로서는 가장 많이 보급된 재료로, 주로 칩 콘덴서에 사용되고 있으며 OLED용 소재로도 개발이 추진되고 있다. 또한 폴리아닐린계 전도성 고분자는 원료인 아닐린이 저가

라는 점과 전도성을 크게 조절할 수 있는 독특한 특성 등의 장점을 가지고 있기 때문에 대전방지 포장재 등 앞으로 응용으로 연구되고 있다.

### (1) 전자파 흡수체

전자파 흡수체는 자성 전자파 흡수체, 유전성 전자파 흡수체, 복합계 전자파 흡수체 세 종류로 나뉜다. 자성 전자파 흡수체는 고무 등의 수지에 페라이트나 연자성 금속재료를 조합한 것으로 대부분이 휴대전화나 노트북에 쓰이는 전자기기용이다. 유전성 전자파 흡수체는 발포폴리에틸렌에 탄소입자를 혼합한 것으로 전파암실이나 교통/차량용으로 사용된다. 복합계 전자파 흡수체는 페라이트 등의 자성재와 유전재료를 조합한 것으로, 전파암실용이 대부분을 차지한다.

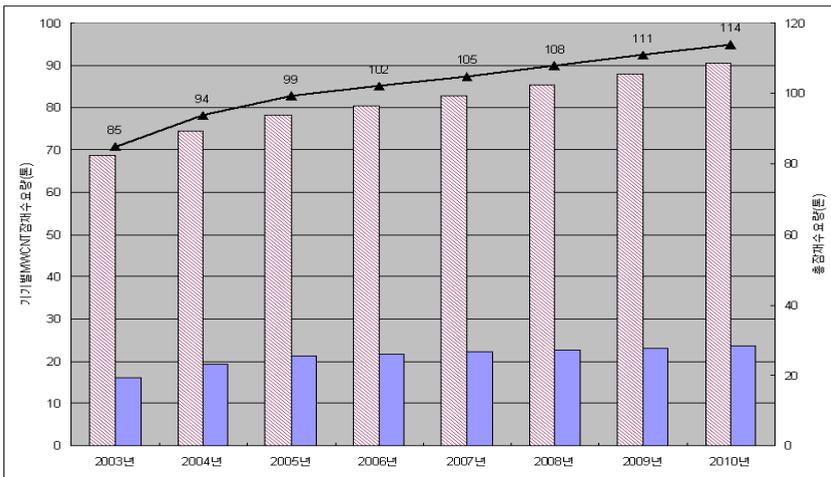
전자기기의 전파 흡수체는 휴대전화나 노트북, 디지털카메라 같은 기기의 소형화, 다기능화와 더불어 기존의 EMC 대책 부품으로는 어려워지고 있기 때문에 전파 흡수체의 사용이 늘고 있다. 전자기기의 전파흡수체 적용사례에는 IC 및 기판방사 방지, 케이블복사 방지 등이다. IC 및 기판방사에 대해서는 IC 상부, 기판 사이에 붙인다. 케이블 복사에 대해서는 케이블에 감아 붙인 플랫폼케이블에 눌러 붙이고, 용기 복사에 대해서는 용기 내 벽면, 개구부 주변에 붙인다. 휴대용 전자기기에서의 복합체 분야에서의 탄소나노튜브 이용 가능성으로 휴대전화나 노트북의 고성능화에 따른 EMC 대책으로서 일부 전자기기에 탑재되고 있는 것이 자성전자파 흡수체이다. 자성전자파 흡수체에는 페라이트나 연자성금속재료가 첨가되어 있는데 이를 대체하여 CNT가 사용될 가능성이 있다. 탄소나노튜브가 휴대전화에 EMC 대책용 CNT를 첨가한 케이스를 사용한 경우에는 단일벽 탄소나노튜브가 1000원/1g 정도 되어야 사용 가능하다. 그러므로 CNT 비용이 1g당 1000원 수준에 달하면 휴대전화나 노트북, 휴대용 DVD 플레이어에 EMC용으로 케이스의 복합재료로서 쓰일 가능성이 있다. 정전방지용도에 있어서는 이미 IC 반송용 트레이에 일부 채용되고 있다. 대부분이 고분자형 대전방지제나 카본블랙을 쓰고 있으나 대단히 밀도가 높은 IC에서는 CNT가 쓰이는 경우도 있다.



〈그림 4-13〉 전자기기용 전자파 흡수체 용도별 구성비(수량, 금액기준)

〈표 4-15〉 노트북·휴대전화용 EMC 대책에서의 MWCNT 잠재수요량

	2004년	2005년	2006년	2007년	2008년	2009년	2010년
노트북(대)	6,560,000	6,888,000	7,094,640	7,307,479	7,526,704	7,752,505	7,985,080
사용수지량(kg)	4,959,360	5,207,328	5,363,548	5,524,454	5,690,188	5,860,894	6,036,720
MWCNT 잠재수요량(kg)	74,390	78,110	80,453	82,867	85,353	87,913	90,551
휴대전화(대)	64,540,000	70,994,000	72,413,880	73,862,158	75,339,401	76,846,189	78,383,113
사용수지량(kg)	1,290,800	1,419,880	1,448,278	1,477,243	1,506,788	1,536,924	1,567,662
MWCNT 잠재수요량(kg)	19,362	21,298	21,724	22,159	22,602	23,054	23,515
CNT 총잠재수요량	93,752	99,408	102,177	105,025	107,955	110,967	114,066



〈그림 4-14〉 노트북·휴대전화용 EMC 대책에서의 MWCNT 잠재수요량

## (2) 자동차용 수지

자동차의 수지의 사용은 자동차의 경량화 및 사용 용도의 다양성으로 인하여, 자동차 1대당 수지의 비율이 1973년 2.9%에서 2001년에는 8.2%까지 상승하였다. 2001년 자동차 1대당 수지 사용량은 134kg으로

1997년보다 27kg 증가하였다. 증가량의 대부분은 1997년과 2001년을 비교하여 25.6kg 사용량이 증가한 폴리프로필렌이다. 폴리프로필렌은 성형성, 기계특성, 내약품성, 리사이클성에 대해 물성 밸런스가 좋아 인스트루먼트 패넬을 비롯하여 수지통합 흐름이나 철 대체로 프론트엔드 캐리어에 채용되는 등 모듈화 진전에 의해 수요가 늘고 있는 것으로 보인다. 2001년의 경우 폴리프로필렌이 자동차 채용 수지에서 점하고 있는 비율은 50%가 된다. 향후 자동차 부품중 수지로 대체 가능성이 있는 부품으로서는 엔진룸이 중심이며, 기능부품에 대해서는 내열성, 기계적 강도 등 엄격한 조건이 적용되므로 폴리아미드를 중심으로 한 고기능수지가 확대되어 갈 것으로 생각된다.

자동차 수지 부품 분야에서 탄소나노튜브의 채용 가능성은 크게 나누어 외장, 내장, 기능부품의 세 가지로 구분되며 CNT를 첨가하는 목적도 다르다. 외장부품 경우 펜더, 범퍼 등에 정전도장 용도로 CNT가 쓰일 가능성이 높다. 내장부품 경우, 인스트루먼트패넬, 콘솔박스 등이다. 내장에 사용되므로 먼지 등이 부착되는 것을 막는 정전방지용도가 기

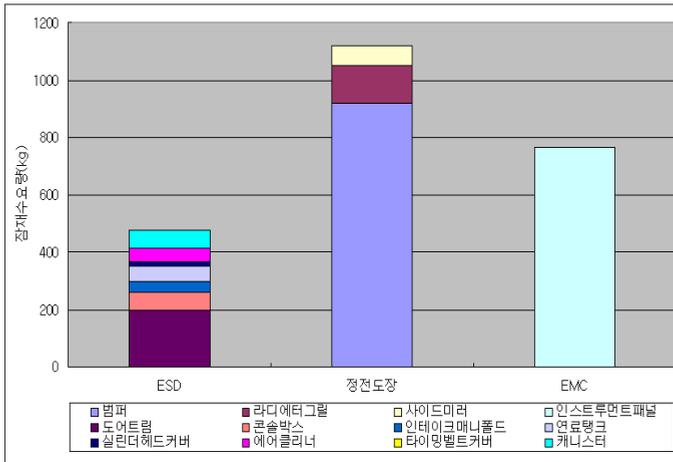
〈표 4-15〉 보통·소형자동차에서의 주요부품별 수지사용량

사용부분	주요채용수지
범퍼	폴리프로필렌
라디에터 그릴	폴리프로필렌, ABS
사이드미러	폴리아미드, ABS, 폴리프틸렌테레프탈레이트, 폴리아세타르
램프	폴리카보네이트, 폴리메틸메타크릴레이트
인스트루먼트패넬	폴리프로필렌, ABS, 폴리페닐렌에테르
도어트림	폴리프로필렌, 페놀
시트	폴리우레탄
콘솔박스	폴리프로필렌, ABS, 폴리우레탄
필리(pillar)	폴리프로필렌, ABS
인테이크매니폴드	폴리아미드
연료탱크	폴리에틸렌, 폴리아미드
실리더헤드커버	폴리아미드
에어클리너	폴리프로필렌
타이밍벨트커버	폴리프로필렌, 폴리아미드
캐니스터	폴리아미드

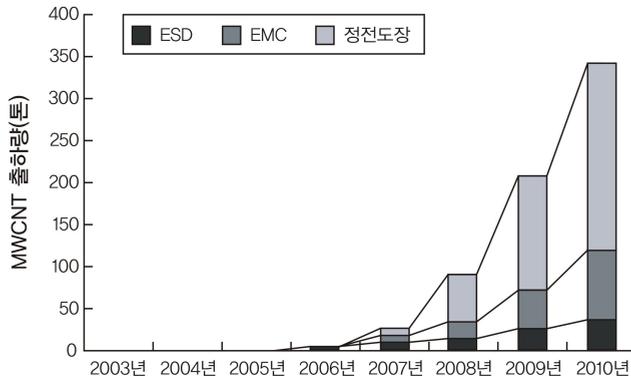
〈표 4-16〉 자동차 수지부품의 MWCNT 잠재수요량

	종류	채용수지량(톤)	ESD	정전도장	EMC	CNT수요량(톤)
외장부품	범퍼	92,000		920		920
	라디에터그릴	13,000		130		130
	사이드미러	7,000		70		70
내장부품	인스트루먼트패널	51,000			765	765
	도어트림	40,000	200			200
	콘솔박스	12,000	60			60
	인테이크매니폴드	8,000	40			40
기능부품	연료탱크	10,000	50			50
	실린더헤드커버	3,200	16			16
	에어클리너	10,000	50			50
	타이밍벨트커버	2,500	12.5			12.5
	캐니스터	12,000	60			60
총합		260,700	489	1,120	765	2,374

대된다. 특히 내비게이션이나 ETC, 각종 안전시스템에 의해 자동차의 전자화가 이루어지고 있어 향후 EMC 대책을 위하여 CNT가 쓰일 것으로 생각된다. 기능부품 경우, 연료탱크, 각종 커버류가 있다. 엔진부품에 쓰이는 수지제품에서는 대전된 정전기가 불꽃을 일으켜 연료가 인화될 위험성이 있어 정전방지 용도로 채용이 이루어질 것으로 생각된다.



〈그림 4-15〉 자동차 수지부품의 MWCNT 잠재수요량



(그림 4-16) 복합재료 분야 용도별 시장규모 예측

(표 4-17) 복합재료 분야 용도별 시장규모 예측

	2003년	2004년	2005년	2006년	2007년	2008년	2009년	2010년
ESD	0	0.24	1	5.9	11	14.7	27	38
EMC	0.0	0.0	0.0	3.1	5.2	20.1	46.7	83.6
정전도장	0	0	0	0	10.08	56	134	224
총합	0	0.24	1.00	9.04	26.29	90.89	207.70	345.60

### (3) 에너지 분야

화석 연료의 고갈로 대체에너지 개발과 함께 에너지의 저장 및 이동에 대한 연구가 점점 증가하고 있다. 현재 자동차를 배터리, 연료전지, 슈퍼커패시터 등을 이용하여 구동시키려는 노력이 국가와 산업계에서 활발히 진행 중이다. 따라서 기존의 화석 에너지 대신 태양에너지나 화학에너지를 전기에너지로 변환하는 에너지 변환장치나 발생된 전기에너지를 저장, 이동시킬 수 있는 에너지 저장장치의 연구, 개발이 절실히 요구되고 있다. 최근 탄소나노튜브가 에너지 저장 및 변환 장치에의 응용 가능성이 보고되면서 탄소나노튜브를 이용한 에너지 관련된 연구가 활발히 수행되고 있으나 그 자체만으로는 여러가지 문제점이나 한계점 때문에 적용에 한계를 보이고 있다. 따라서 탄소나노튜브의 특성

을 활용한 탄소나노튜브 복합체가 여러 분야에서 응용이 모색되고 있으며 에너지 저장 및 변환 장치에서도 예외가 아니다.

에너지 분야에서의 탄소나노튜브 응용은 탄소나노튜브의 전기전도성과 높은 비표면적을 이용하는 경우로, 기존에 활성탄소나 흑연과 같은 탄소재료의 한계를 극복하거나 성능을 향상시킬 목적으로 탄소나노튜브를 연구하는 것이다. 특히 수조저장 능력을 이용한 연료전지, 전도성을 이용한 리튬이온전지의 전극재료, 전기이중층 커패시터에서 전극으로의 사용이 연구되고 있다.

① 리튬이온 2차전지 부극재용 MWCNT의 가능성

리튬이온 2차전지 부극재에는 흑연 열화속도를 늦추기 위해 MWCNT의 일종인 VGCF(직경 150nm)가 첨가되고 있고 주로 고수명이 요구되는 휴대전화나 노트북 PC에서 쓰이고 있다. 현재 세계시장에서 쓰이는 리튬이온 2차전지 부극재 시장규모는 2003년 추정치로 3,310톤으로 추정되고 이중 고성능용도에서 사용되는 부극재 시장규모는 2,648톤이 된다. 성능향상을 위해 VGCF는 10wt% 첨가되므로 2,648톤을 기준으로 VGCF의 잠재수요를 시산하면 264.8톤이 된다. 향후 휴대전화, 노트북PC의 고성능화가 이루어질 것은 확실하기 때문에 향후 시장규모가 증가할 것으로 예상된다.

〈표 4-18〉 리튬이온 2차전지용 MWCNT 시장규모 예측

(단위:톤)

	2003년	2004년	2005년	2006년	2007년	2008년	2009년	2010년
리튬이온 부극재 시장규모	3,310	3,730	4,250	4,920	4,821	4,676	4,536	4,200
고성능용 잠재수요	2,648	2,984	3,400	3,936	3,857	3,741	3,629	3,360
MWCNT 잠재수요	264.8	298.4	340.0	393.6	385.7	374.1	362.9	336.0
MWCNT 시장규모(톤)	40	74	95	120	116	112	109	105
잠재수요에 대한 구성비(%)	15	25	28	30	30	30	30	31



(그림 4-17) 리튬이온 2차전지 부극재용 MWCNT 시장규모예측

## ② 전기이중층 캐패시터

전기이중층 캐패시터는 대부분 AV/정보기기용으로 출하되고 있지만 리튬이온 2차전지 가격하락에 따라 향후 기대수요분야는 자동차분야로 기대된다. 자동차분야에서의 용도는 현재 채용되고 있는 ECB(전자제어 브레이크), ISG(지능형 스타터 제너레이터), HEV용 전원 등이 거론된다. 캐패시터 중량 가운데 70%가 활성탄이기 때문에 일본의 관서열화학(關西熱化学)은 첨단탄소인 플러렌으로 활성탄을 대체하여 사용하는 연구를 진행 중에 있다. 또한 CNT는 활성탄보다 10~25배의 정전용량을 확보할 수 있기 때문에 활성탄을 대체하여 채용할 가능성을 보여준다. 비용측면에서 보면 자동차용 활성탄이 50,000원/kg이지만 다중벽 탄소나노튜브가 활성탄보다 10~25배의 정전용량을 확보할 수 있기 때문에 100,000원/kg~250,000원/kg이 캐패시터에 CNT가 채용될 가능성이 있다.

〈표 4-19〉 에너지분야에서 CNT 총시장규모 추이(2003년~2010년)

(단위: kg)

	2003년	2004년	2005년	2006년	2007년	2008년	2009년	2010년
DMFC	0.0	0.6	12.4	315.6	549.8	1,058.0	1,504.0	2,033.6
리튬이온전지부극	40,000	74,000	95,000	120,000	116,000	112,000	109,000	105,000
전기이중층캐패시터	0	0	0	0	0	18,600	50,700	100,350
수소흡장	0	0	0	0	0	0	0	0
합계	40,000	74,001	95,012	120,316	116,316	131,658	161,204	207,384
합계(톤)	40	74	95	120	117	132	161	207

### ③ 연료전지

연료전지에서 탄소나노튜브는 백금(Pt) 촉매의 지지체로 사용되어진다. 탄소나노튜브 위에 촉매로 사용되는 Pt 등의 금속을 가능한 넓은 비표면적을 가지도록 분산시켜 복합체를 만들지만, 연료전지의 촉매로서 고가의 Pt의 사용은 연료전지 상업화에 가장 큰 걸림돌로 작용하고 있다. 따라서 적은 양의 촉매를 사용하면서도 넓은 표면을 가지게 하여 촉매의 사용량을 줄이기 위하여 Pt나 Pt 합금을 초음파 화학이나 극초단파 조사 등의 방법을 쓰고 있다. 또한 연료전지의 연료로 사용되는 수소의 저장을 위해 탄소나노튜브와 금속 복합체가 연구되고 있다. 수소원자를 SWCNT, MWCNT 벽면이나 내부, 틈새에 물리현상을 이용하여 흡착시키는 방법이 시도되었으나, 최근에는 화학흡착 방법이 시도되고 있다. 화학흡착은 분자끼리의 결합으로 흡착되므로 일부러 첨가물을 CNT에 섞는 방법이며, 물리흡착보다 기대되고 있다. CNT의 수소흡장에 관해서는 CNT 충전 방법, CNT 흡착 방법 등의 다양한 문제가 걸려 있으나, 연구자들이 CNT 수소흡장을 연구하는 것은 화학흡착 등의 면에서 가능성이 있기 때문이다. 연료전지의 수소흡장방법 선별은 향후 CNT의 수소저장능력이 10 wt% 가까이 되면 새로운 저장수단으로서 고압분배로 바뀔 가능성이 있으나 아직까지 연료전지 사용을 위한 수소저장용 탄소나노튜브 연구분야는 해결해야 할 과제가 많이 남아 있다.

#### (4) 의료·계측

##### ① SPM 탐침

기준에 Si 탐침을 사용하여 물체의 표면 측정하던 문제점을 개선하기 위하여 탄소나노튜브를 사용한 탐침이 활발 개발되어 현재 상용화되고 있다. CNT가 측정 장비의 탐침은 태핑 반복이나 취급하는 사람의 숙련도에 따라 화상변화가 없기 때문에 실험데이터에 신뢰성이 있는 것으로 평가받고 있어 측정 장비로의 채용이 늘고 있다. SPM 탐침은 탄소나노튜브의 용성, 고분해능, 장수명 등에 의해 장치업체를 가리지 않기 때문에 품질이 좋은 것이 보급되는 양상을 보인다. 이 때문에 CNT 직경을 균일하게 제어하여 사용한 기재탐침의 측정 효율을 증가시키고 있다. 일본의 오사카대학에서는 CNT 탐침 직경을 작고 균일하게 하기 위하여, 산소 분위기의 다중벽 탄소나노튜브의 표면에 전류를 흘려 탄소나노튜브 표면을 가열하여, 다중벽 탄소나노튜브의 선단을 0.4nm로 만들고 있다.

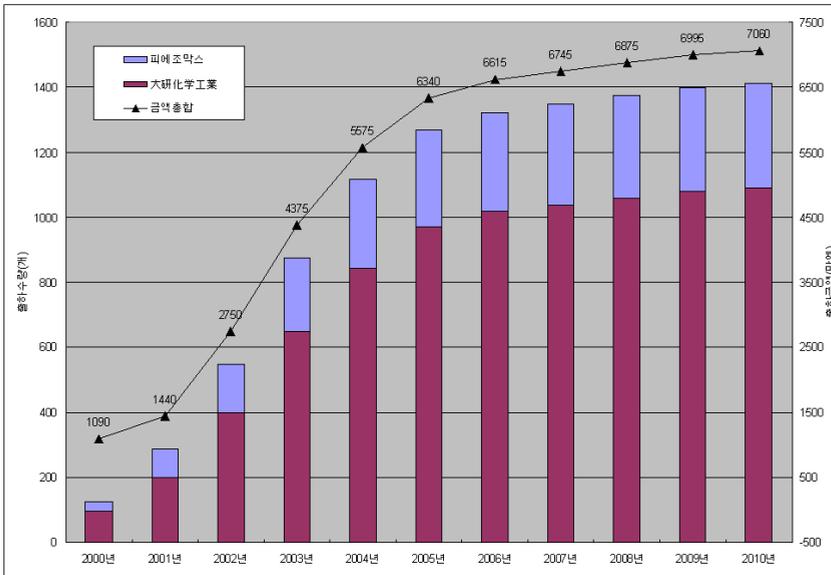
현재 SPM 탐침을 제조하고 있는 업체는 Si계 탐침 경우 올림퍼스와 나노센사브(독) 2개사가 압도적인 점유율을 보이고 있으며 이외에 미국이나 러시아의 중소규모 업체가 있다. CNT 탐침의 경우 일본의 다이킨 화학(大研化学工業), 미국의 피에조막스가 CNT 탐침을 제조하고 있다. 특히 大研化学工業은 SPM 장치 제조판매를 하고 있는 세이코인스트루먼트를 판매창구로 하여 업체나 대학연구기관에 출하 중이다. Si계 탐침의 가격은 3만원~20만원, CNT 탐침 가격은 초기인 2000년에 개당 100만원에서 지금은 개당 50만원 정도이다.

SPM(주사형 탐침현미경)은 측정조건 차이에 따라, 초고진공형, 대기형 두 종류로 대별할 수 있다. CNT 탐침이 출하되기 시작한 2001년 이후 순조롭게 시장이 확대되어 2003년도에는 수량기준 875개, 금액기준 4375만엔 규모로 추정된다. Si계 탐침 경우에는 일본 내에서 연간 8,000~10,000개의 수요가 발생하였다.

〈표 4-20〉 SPM 탐침 시장규모예측(일본시장, 수량금액기준)

	00년	01년	02년	03년	04년	05년	06년	07년	08년	09년	10년
大研化学工業	95	200	400	650	845	971	1019	1039	1059	1080	1090
피에조막스	28	88	150	225	270	297	304	310	316	319	322
수량총합	123	288	550	875	1115	1268	1328	1349	1375	1399	1412
금액총합	1090	1440	2750	4375	5575	6340	6615	6745	6875	6995	7060

자료 : 矢野經濟研究所 추정



〈그림 4-18〉 SPM 탐침 시장규모추이

자료 : 矢野經濟研究所 추정

## 결 론

탄소나노튜브는 전자산업, 정보산업, 복합소재분야, 대체에너지분야 등의 많은 산업 부분에서 많은 주목을 받고 있다. 최근에 탄소나노튜브는 ITO를 대체하여 투명전극으로 이용할 수 있는 가능성이 발견되어 플렉시블 디스플레이 전극, 태양전지 전극, 무선식별(RFID) 전극 등으로의 연구가 활발하게 진행 중에 있다. 그리고 한국, 미국, 일본, 중국은 CNT 소재의 대량합성 기술과 설비를 확보하여 탄소나노튜브 소재의 가격이 급격하게 하락하고 있는 추세이다. 현재 CNT 가격은 단순히 수요-공급의 원칙에서 가격이 결정되고 있는 상황이지만, CNT를 적용한 제품의 출시와 함께 생산업체들이 생산 규모는 기하급수적으로 늘어갈 것으로 전망된다. 또한 대량생산에 의한 CNT 가격도 카본 블랙, 탄소 섬유로 대표되는 다른 탄소소재와 대등하게 경쟁할 수 있는 가격으로 급락할 것으로 전망된다. 따라서 산업전반에 탄소나노튜브를 사용하는 제품의 수도 많이 늘어날 것으로 전망된다.

탄소나노튜브의 독특하고 우수한 전기적, 물리적, 화학적 특성 때문에 전자기기, 복합소재, 에너지 저장 및 변환 장치에서 탄소나노튜브의 역할이 크게 기대되어, 정부와 민간 기업에서는 CNT의 연구 개발에 신중하게 검토하여 투자해 왔다. 많은 연구결과, 탄소나노튜브 소재 자체의 특성은 우수하나, 탄소나노튜브 단독으로는 산업제품으로 사용되기 위한 여러 가지 요구조건을 충족시키는 데 한계가 있음이 밝혀지고 있다. 이에 따라 탄소나노튜브와 고분자 복합체 또는 탄소나노튜브와 금속/반도체 복합체와 같이, 탄소나노튜브를 다른 물질과 함께 사용하여 제품의 특성을 향상시키는 응용연구가 시도되고 있으며 여러 연구결과

에서 희망적인 가능성을 확인하고 있다. 하지만 대부분의 응용 분야에  
서 아직은 기존의 재료에 비해서 월등한 특성을 나타내고 있지는 않은  
실정이다. 특히 에너지 저장 및 변환 장치 분야에서의 탄소나노튜브 복  
합체 응용은 다른 복합체 응용분야인 전기 전도성 복합재료, 구조 재료  
용 복합재료 등과는 달리 아직 실용화의 길이 멀고 험하게 보이지만,  
많은 연구 개발을 통하여 기존의 문제가 개선될 것으로 기대된다.

## 참고 문헌

1. 전자신문, “[나노강국을 건설하자]-나노반도체 선점경쟁”, 2004.1.4
2. 이윤희, 김동호, “탄소나노튜브의 집적(integrated)디지털 논리 회로 기술”, 물리학과 첨단기술 March 2003, pp 15-23. 2003.3
3. 신진국, 한영수, 정민재, 이재은, 윤상수, 김성태, “탄소나노튜브 트랜지스터”, Bulletin of the Korean institute of electrical and electronic material engineers, Vol 14, No 9, 25. 2001
4. 신진국, 이재은, 한영수, 윤상수, 정민재, 김성태, “탄소나노튜브의 전자소자 응용”, The journal of Korea Institute of Electronics Engineers, Vol 28, No 1, 35, 2001
5. 이영희, “탄소나노튜브의 물성과 응용”, Sae Mulli, Vol 51, No 2, 84. 2005.6
6. S. J. Tans, M. H. Devoret, H. Dai, A. Thess and R. E. Smalley, “Individual single wall carbon nanotubes as quantum wires”, Nature 386, 474. 1997
7. S. J. Tans, M.H. Devoret, H. Dai, A. Thess, R.E. Smalley, L.J. Geerligs, C. Dekker, “Electronic structure of atomically resolved carbon nanotubes”, Nature, 386, 474, 1997
8. 한국과학기술정보연구원, “탄소나노튜브-연구개발과 산업시장 동향 및 사업화 전망”, 2007.4
9. 박정원, “나노소자를 이용한 전자소자”, 한국과학기술정보연구원, 2007.1
10. 한국과학기술정보연구원, “탄소나노튜브 소자 기술”, 2006.12
11. Walt A. de Heer, A. Chatelain, D. Ugarte, “A Carbon Nanotube Field-Emission Electron Source”, Science November 1995, Vol. 270, No. 5239, pp 1179-1180, 1995.11.17
12. Yahachi Saito and Sashiro Uemura, “Field emission from carbon nanotubes and its application to electron sources”, Carbon, Vol 38, Issue 2, 2000, pp 169-182. 2000.2

13. 한국과학기술정보연구원, “전계방출디스플레이 기술 보고서”. 2004.11
14. 산업자원부, “탄소나노튜브 응용 광 및 전자소자 개발 보고서”. 2007.7
15. 유호천, “카본나노튜브를 사용한 FED의 최신 기술동향”, 한국과학기술정보연구원, 2006.9
16. 사이토 야하치, “카본 나노튜브에 의한 FED”, Monthly ‘DISPLAY’ TechnoTimes of Japan, 2007.7
17. 한국과학기술정보연구원, “FED에 적용 가능한 대량 생산 나노기술”, 글로벌동향브리핑(GTB), 2007.9
18. 삼성SDI, [http://www.samsungsdi.co.kr/contents/kr/tech/disClass\\_06\\_01.html](http://www.samsungsdi.co.kr/contents/kr/tech/disClass_06_01.html)
19. NEDO, [http://www.nedo.go.jp/english/activities/1\\_sangyo/3/p03016e.html](http://www.nedo.go.jp/english/activities/1_sangyo/3/p03016e.html)
20. 이종일, 정희태, “탄소나노튜브 복합체의 기술동향”, Korean Chem. Eng. Res., Vol 46, No 1, February, 2008, pp 7-14, 2008.2
21. 윤창훈, 이현상, “탄소나노튜브(CNT) 복합소재”, Polymer Science and Technology Vol 18, No 1, February, 2007 pp 4-7. 2007.2
22. Richard A. Vaia·H. Daniel Wagner, “Framework for Nanocomposites”, Materials Today, November, 2004 pp 32-37. 2004.11
23. 한중훈, “탄소나노튜브 합성 및 전도성 고분자 개발 동향”, Polymer Science and Technology, Vol 16, No 2, pp 162-175, 2005.4
24. 산업자원부, “탄소나노튜브 슈퍼배터리의 제작 및 특성연구”, 2005
25. 김성진, “탄소나노튜브 전극으로부터 전계방출을 이용한 가스센서의 응용”, Journal of the Korea Institute of Electrical and Electronic Material Engineers, Vol 19, No 5, pp 405, 2006
26. 정우석, “탄소나노튜브 소자의 응용기술과 전망”, 한국과학기술정보연구원, 2007.1
27. 장현주, “전산모사를 이용한 나노소재 개발”, 한국화학연구원, 2004
28. NICE, “미니가스센서개발“ NICE, Vol 21, No 5, pp 564, 2003
29. 한창수, “탄소나노튜브 응용제품의 동향”, 전자부품, 2009년 3월호, 22, 2009.3
30. 윤여홍, Mark J. Schulz, Vesselin Shanov, “전기화학적 방식에 의한 탄

- 소나노튜브 바이오센서 기술”, 한국정밀공학학회지, Vol 25, No 11, pp 15-21, 2008.11
31. 윤여홍, 허신, 이성철, “나노-바이오 센서 기술과 특성”, 한국정밀공학학회지, Vol 25, No 11, pp 7-14, 2008.11
  32. 허신, 윤여홍, 이성철, “미세 캔틸레버 방식에 의한 나노-바이오 센서 기술”, 한국정밀공학학회지, Vol 25, No 11, pp 22-29, 2008.11
  33. 한국과학기술정보연구원, “나노-바이오 융합기술의 연구개발 동향”, nano weekly 269호, 2008.4.11
  34. 서울경제, “나노-바이오센서 인체 내 삽입, 질병도 진단한다”, 2008.11.19
  35. 식품의약품안전청, “나노 바이오센서의 성능 평가방법 및 기준개발”, 2004
  36. 식품의약품안전청, “바이오센서의 안정성 평가방법 및 기준 개발”, 2004
  37. 식품의약품안전청, “나노바이오센서의 품질관리 평가방법 및 기준개발”, 2004
  38. 이노넷, “바이오센서”, 2004.3.25
  39. 시스템 반도체 포럼, “IT중심나노/바이오융합기술”, 2006.9.3
  40. 한국화학연구원, “나노센서 기본사업 연구보고서”, 2004
  41. 한국과학기술정보연구원, “나노태양전지”, 2003.12
  42. 나노기술개발촉진법 [제정 2002.12.26 법률 6812호]
  43. 한국과학기술정보원, “탄소나노튜브(심층정보분석)”, 2002
  44. Lux Research Inc., The Nanotech Report 4th edition, 2006
  45. Bronikowski MJ, Willis PA, Colbert DT, Smith KA, Smalley RE, J. Vacuum Science &Technology A, Vol 19, No 4, pp 1800-1805, 2001
  46. Clean Techn Environ Policy, DOI 10.1007/s10098-006-0083-2, Springer-Verlag, 2007
  47. Lance Delzeit, Alan Cassell and David Hash, Plasma Sources Sci. Technol. 12 M Meyyappan, pp 205-216, 2003

48. T. W. Ebbesen and P.M. Ajayan, *Nature*, 1992
49. 일본특허 JP1997-188509
50. 일본특허 JP2004-018328
51. 한국특허 KR2001-0113306
52. 미국특허 US5591312
53. 일본특허 JP1995-061803
54. 미국특허 US20040131532
55. 미국특허 US20030190277
56. 일본특허 JP2005-023408
57. 미국특허 US6162411
58. 미국특허 US20040223901, US6761870
59. 미국특허 US6761870
60. 일본특허 JP1999-043316
61. 한국특허 KR2004-0085982
62. Cientifica, “Nanotube for the Composite Market”, 2005. 7
63. J. M. Bonard, J.P. Salvetat, T. Stockli, W.A. De Heer, L. Forro and A. Chatelain, *Appl. Phys. Lett.*, 73, 918, 1998
64. 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*, 1995
65. W. A. de Heer, A. Chatelain and D. Ugarte, *Science*, 1995
66. Q. H. Wang, A. A. Setlur, J. M. Lauerhaas, J. Y. Dai, E. W. Seelig and R. P. H. Chang, *Appl. Phys. Lett.*, 1998
67. Y. Saito, K. Hamaguchi, K. Hata, K. Uchida, Y. Tasaka, F. Ikazaki, M. Yumura, A. Kasuya and Y. Nishina, *Nature*, 1997
68. 미국특허 US6097138
69. 일본특허 JP2004-031045
70. 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., 1999

71. 미국특허 US20020121856
72. 일본특허 JP2004-119175
73. 일본특허 JP2001-266780
74. 미국특허 US6876724
75. 일본특허 JP1995-122198
76. 일본특허 JP2002-076324
77. 미국특허 US6798000
78. 미국특허 US6891227
79. 미국특허 US6890780
80. 미국특허 US20030218224
81. 미국특허 US6949931
82. 한국특허 KR2003-0014997
83. 미국특허 US20040041154
84. S. S Wong, E. Joselevich, A. T. Woolley, C. L. Cheung and C. M. Liever, Nature, 1998
85. S. S Wong, A. T. Woolley, E. Joselevich, C. L. Cheung and C. M. Liever, J. Amer. Chem. Soc., 1998
86. 일본특허 JP2003-286350
87. 일본특허 JP2003-246927
88. 미국특허 US685410
89. 한국특허 KR2005-0027415
90. 일본특허 JP2004-123770
91. Nano Lett., 5, 345, 2005
92. Science. 305, 1273, 2004
93. Nano Lett., 4, 1643, 2004
94. Nano Lett., 3, 1353, 2003
95. Appl. Phys. Lett., 86, 033105, 2005
96. Nano Lett., 5, 757, 2005

97. 일본특허 JP2003-273433
98. 일본특허 JP2005-004974
99. 한국특허 KR2000-0056422
100. www.mk.co.kr, “탄소나노물질개발”, 2001
101. 미국특허 US6805985
102. 한국특허 KR2004-0011181
103. 일본특허 JP2000-230932
104. 일본특허 JP2001-341014
105. 한국특허 KR2004-0080184
106. 일본특허 JP2003-059133
107. 미국특허 US6735046
108. 미국특허 20040036398

본 나노기술분석보고서는 교육과학기술부 특정연구개발사업 『나노기술종합정보지원 체제 구축사업』의 6차년도(2008.5-2009.4) 사업으로 발간되었습니다.

나노기술분석보고서 2008

## 탄소나노튜브의 산업적 응용

인 쇄 2008년 12월 26일

발 행 2008년 12월 29일

발행처  한국과학기술정보연구원  
www.kisti.re.kr Korea Institute of Science and Technology Information

발행인 박영서

주 소 서울특별시 동대문구 회기로 66 ☎ 130-742  
전화 : (02) 3299-6114

등 록 1991, 2, 12, 제5-258호

ISBN 978-89-6211-307-5

인쇄처 승림디앤씨

■ 보고서 내용의 무단 복제를 금함