

# 탄소나노튜브

탄소나노튜브 소재의 응용기술과 전망

| 정우석. 동향정보분석팀



미래선도기술 이슈분석보고서는 혁신형 중소기업 정보분석 지원사업의 일환으로 작성된 보고서로서, 유망 기술에 대한 이슈분석을 통해 국내 기업들이 자사에 적합한 사업아이템 발굴 기회를 극대화 하는데 목적이 있다. 이슈 분석 대상은 글로벌 동향 브리핑(GTB) 사업에서 축적한 약 10년간의 글로벌 모니터링 정보를 키워드 빈도분석 후 수요 조사를 통해 정하였다. 또한 국내외 연구개발동향, 산업동향 및 기술/실용화/과급효과 등의 측면에서의 이슈제기 및 분석을 해당분야 전문가와 공동으로 수행함으로써 수요자 중심의 보고서가 되도록 노력하였다.

## 2006 미래선도기술 이슈분석보고서

• 나노셀룰로오즈 보강 복합재료	• 광촉매 박막제조기술
• 차세대 하드디스크 HAMR	• 산업용 무선 필드버스
• 멀티페로익스(Multiferroics)	• P2P 네트워크
• 탄소나노튜브	• 센서네트워크 기술
• 휴대용 연료전지	• 온라인 게임
• 칩내장형 임베디드 기술	• 임베디드 기술
• 유전자 치료	• 십진 부동산소수점 연산기
• 열화학적 복합전환 공정	• 게임산업
• 자기 냉장고	• 나노소재를 이용한 전자소자
• 유기 반도체 태양전지	• 유기반도체(Organic Semiconductors)
• 충전기기용 나노절연재료	• 공기오염센서
• 무선 통신망간의 간섭	• 위성항법시스템 시험장(GATE)
• 이동통신-무선랜 통합망의 보안	• 위성항법시스템 소프트웨어 수신기
• 해외선진국 반도체장비 기술동향	• 광촉매의 성능 및 응용 기술 현황
• 동유럽의 VoIP 사업현황	• 해외 선진국의 DMB/DAB 기술동향
• 지능형 자동차에 사용되는 텔레매틱스 기술동향	• 신약개발을 위한 RNAi 제품 현황
• 주요 선진국의 냉동·공조 기술 현황	• 해외 선진국의 위성항법 시스템 기술 동향
• 영상진단기기 및 초음파영상진단기기 제품 현황	• 최근의 게임시장 동향
• 해외 주요국의 디지털 전자제품 동향	• 해외 주요국의 디지털 전자제품 동향

# Contents

1	<b>서론</b>	
	기술/산업 개요	05
	기술/산업의 종류 및 특성	06
	이슈 분석의 목적과 필요성	08

2	<b>기술동향 및 분석</b>	
	국내외 연구개발 동향	10
	주요 특허분석	13
	국내외 산업동향	15

3	<b>이슈 제기 및 분석</b>	
	이슈 제기	18
	소재 생산의 경쟁력 확보를 위한 과제	19
	소자의 실용화 및 산업화를 위한 기술적 과제	22

	<b>참고 문헌</b>	26
--	--------------	----

# 서론

## 1

- | 기술/산업 개요
- | 기술/산업의 종류 및 특성
- | 이슈 분석의 목적과 필요성

# 1 서론

## | 기술/산업 개요

- 탄소나노튜브(carbon nanotube, CNT)는 1991년 일본의 이지마 박사에 의해 처음으로 발견되어, 본격적으로 나노 기술(Nano Technology, NT) 시대의 화려한 서막을 열게 한 소재임. 탄소나노튜브는 원자적으로 각 탄소원자가 끊긴 결합 없이 삼중결합을 유지하고 있는 일차원적 단순 구조체임에도 불구하고, 금속성질 또는 반도체 특성과 같은 다양한 전자적 특성과 뛰어난 강도 등을 보여주고 있음[1].(표 1 참조)
- 나노기술은 기존 기술분야(물리, 화학, 재료, 전자, 생물 등)의 경계를 잇는 융복합기술이며, 나노구조물의 분석, 제어, 합성 등 전과정을 100nm 이하에서 제어하는 높은 기술집약도를 가진 기술이고, 재료, 전자, 광학, 에너지 등 거의 모든 산업의 경제적 파급성 및 에너지 효율 극대화과 오염방지를 위한 환경 친화성 기술임. 특히, CNT는 미래를 바꿀 10대 신기술로, 소재분야의 만병통치약으로 탁월한 전자특성, 기계적 특성, 온도 안정성, 전계방출 특성 등을 가지며, 2001년부터 CNT 양산방법이 일부 개발됨에 따라 응용 가능성이 높아지고 있음.
- 산업적 응용으로 CNT 복합소재 제조 뿐만아니라, 나노소자의 금속선, 메모리 및 전위효과 소자, SPM 탐침, 이차전지 전극재, 연료전지의 촉매담지체, 전기역학적 센서 및 표시소자 등의 다양한 분야에서 연구 개발되고 있어, 파급효과가 클 것으로 기대를 모으고 있음[2].

[표 1] 탄소나노튜브의 물리적 성질 비교

물리적 성질	탄소나노튜브(SWCNT)	비교
크기	0.6 ~ 1.8nm(직경)	50nm 미세공정(e-beam노광)
밀도	1.33 ~ 1.4 g/cm <sup>3</sup>	2.7 g/cm <sup>3</sup> (알루미늄)
인장강도	4.5x10 <sup>10</sup> Pascal	2x10 <sup>9</sup> Pascal(고강도스틸)
허용전류밀도	1x10 <sup>9</sup> A/m <sup>2</sup>	1x10 <sup>6</sup> A/m <sup>2</sup> (구리선)
열전도율	6000 W/mK	3320 W/mK(다이아몬드)
내열성	2800℃	600~1000℃(금속선)

자료 : 물리학과 첨단기술 [1]

# 1 서론

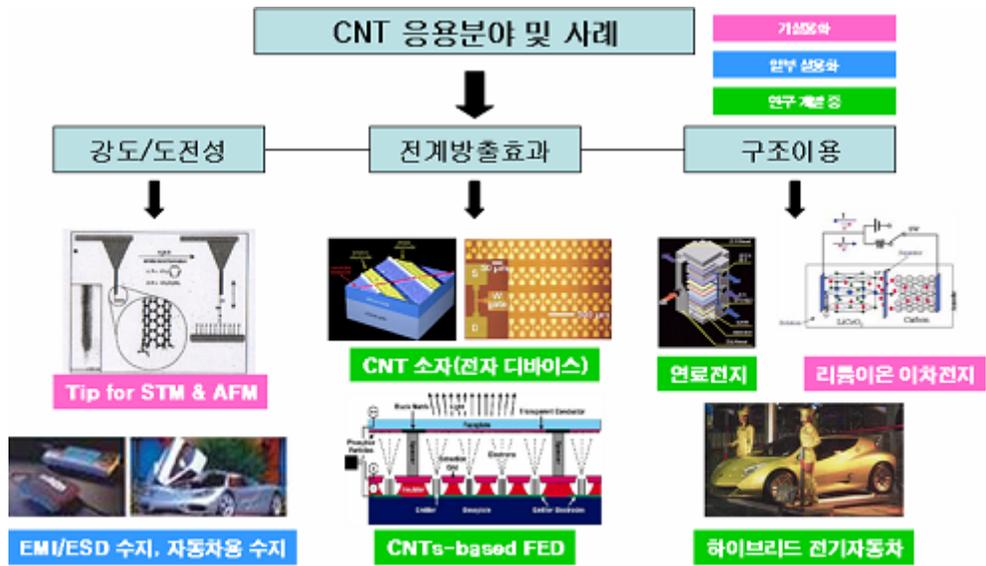
## | 기술/산업의 종류 및 특성

### 가. 탄소나노튜브 소재 관련 제품별 분류

- (1) 단일벽 탄소나노튜브(single-walled carbon nanotube, SWCNT)  
: CVD법에 의한 대표적인 방법은, 미국의 CNI사의 HIPCO법(1000도 이상의 높은 고온, 압력이 요구되고, 반응기내의 Fe 화합물(촉매)를 사용하기 위한 특별한 장치 및 공정이 필요하지만, 순도, 수율, 재현성은 양호)과 일본의 CNRI사의 ACCVD법(알콜을 원재료로 하여 고체 촉매상에 SWCNT를 생성)임. 대표적인 응용분야는 수소저장, FED, 전자디바이스 [3].
- (2) 다중벽 탄소나노튜브(multi-walled carbon nanotube, MWCNT)  
: MWCNT는 도전성이나 기계적 강도를 이용한 복합재료 제조에 주로 사용됨. 복합재의 예로, 자동차 수지 분야에서는 CNT를 첨가한 수지가 상용화됨.
- (3) 이중벽 탄소나노튜브(dual-walled carbon nanotube, DWCNT)  
: MWCNT의 일종인 DWCNT가 최근 FED 에미터 최적 재료로서 주목받고 있음. 높은 전계방출 효율의 SWCNT는 내구성 면에서 불리하나, 여러 층이 겹쳐 있는 MWCNT는 오히려, 직경이 굵어 전계방출이 낮아지기 때문임.
- (4) 기타 CNT 소재  
: 1998년에 NEC가 발견한 CNH(Carbon Nanohorn)는 SWCNT 선단이 원추상으로 닫힌 것의 집합체를 총칭하며, 탄산가스레이저 증착법에 의해 제조. 컵스택 (cupstack)형 CNT는 사다리꼴 모양의 컵을 여러장 겹친 구조를 하고 있으며 표면이 평활한 통상적인 SWCNT, MWCNT에 비해 분산이 쉽다는 특징을 가지고 있어, 향후 복합재료 용도로 사용 가능[4].

### 나. 탄소나노튜브의 산업적 응용분야별 분류

- 탄소나노튜브의 산업적 응용은 2000년부터 본격화되었다. 현재 활발히 연구되고 있는 이용분야는 강도 및 도전성 이용, 전계방출(Field Emission), 구조이용 세가지로 나누어짐. <그림 1-1>은 실용화 단계를 보여줌.
- (1) 강도, 도전성 분야  
: 주사탐침 전자현미경(Scanning Probe Electron Microscope, SPM) 탐침은 CNT의 고강성을 이용한 대표적인 활용이고, 도전성을 활용한 전자디바이스는 현재 개발중에 있고, EMI/ESD수지, 자동차용 수지와 같은 복합재료는 실용화 단계에 있음.



[그림 1] CNT 응용분야 및 사례

(2) 전계방출 이용 분야

: FED(Field Emission Display)는 CNT의 가장 강력한 활용 대상이기 때문에, 전자업체들이 CNT에미터(emitter)를 FED에 이용하는 것에 관련하여 원천특허를 왕성하게 확보해 가고 있음. 한편, 의료기기의 전자원으로 전계방출 특성을 응용하는 연구 개발도 활발함.

(3) 구조이용 분야

: CNT 나노 구조를 활용한 경우는 연료전지의 촉매담지체, 수소저장 특성을 활용한 전기자동차응용 등 파급효과가 큰 분야들임.

# 1 서론

## 이슈 분석의 목적과 필요성

- ① 나노기술(nano technology, NT)은 IT, BT, ET와 함께 21세기 산업혁명을 주도할 핵심 기술로 미국, 일본, 유럽 등 62개국이 나노기술 종합계획을 수립하여 추진 중에 있으며, 탄소나노튜브(carbon nanotubes, CNT) 관련 기술은 그 중심에 있다.
- ② 국가과학기술위원회는 나노기술개발촉진법 제4조에 의거하여, 2015년 선진 3대국 기술 경쟁력 확보와 2014년 2조6천억불 규모의 세계 나노관련 시장의 20%수준을 점유하기 위한 나노기술종합발전계획(2005.12)을 세웠고, '세계최고수준 실용화 30대 기술' 개발에 CNT 소자, CNT 복합재료, 고효율 전계방출 나노소재 및 CNT 합성기술 등 CNT 관련기술 4건을 포함시켰다[5].
- ③ 엄청난 사회 문화적 및 경제적 파급성을 가진 CNT 기술이지만, 그림 1에서와 같이 실용화 수준은 아직 초기 단계이다. 그래서, 세계 각국은 소재 생산, 가공 및 응용시장에서의 주도권을 확보하기 위해 치열한 기술 경쟁을 벌이고 있다.
- ④ 반도체기술로드맵(ITRS 2004)에 따르면 트랜지스터 개발 로드맵에서 실리콘 소자 기술은 15nm 이상에서는 물리적 및 기술적 한계에 도달하게 되어, 2012년경에 새로운 기술 플랫폼이 필요하다고 지적하고 있다. 이를 극복할 수 있는 후보중에 단연 CNT 가 두각을 나타내고 있는데, 그것은 CNT의 금속/반도체성 특성과 작은 직경(0.6~20nm), 높은 전류전도성(109A/cm<sup>2</sup>), 뛰어난 열전도성(6000W/mK) 특성 때문이다.
- ⑤ 수조 달러가 넘는 미래 전자소자 시장의 주도권을 확보하기 위해, IBM 등 세계 각국의 그룹들은 CNT 트랜지스터뿐만아니라, Logic 및 메모리소자에 관한 연구를 활발히 진행하고 있다. 그러나, 아직까지 CNT 구조제어기술, 자기정렬기술, 선택적 CNT 버닝기술, 직접성장기술, 양산시스템 및 In-situ 공정기술 등 근본적으로 해결해야 할 문제들이 많이 남아 있는 상태다.
- ⑥ NT와 IT가 결합된 정보통신미래신기술로서 CNT 수직전자소자는 확실한 차세대 반도체의 기술적 대안이며, IT 부가가치를 창출시킬 수 있는 미래 ITEM일 것이다. 그러나, 우리나라는 미국, 일본 등에 비해 CNT의 소자 응용기술 및 CNT 형성기술이 다소 열세에 있는 상황이다. 더 늦어지기 전에 원천기술을 개발하여, CNT 소자 산업의 미래 주도권을 확보해야 할 것이다.
- ⑦ 위와 같은 중요성으로 탄소나노튜브에 대한 다양한 연구와 이슈 분석 보고서는 지속적으로 출현하고 있는 상황이다. 그러나, 좀 더 포괄적이면서, 향후 기술개발의 맥을 잡을 수 있는 보고서가 필요하다는 생각에 이슈보고서를 준비하게 되었다. 본 보고서는 최근의 국내 탄소나노튜브에 관한 기술적인 정보를 바탕으로 탄소나노튜브 생산과 1차 가공소재, 그리고, 좀더 복잡한 소자 응용기술에 이르기까지 최근의 기술을 체계적으로 분류하고자 하였다. 향후 개발 방향을 예측하거나, 중점 기술을 파악하는 데, 본 이슈 분석이 도움이 되었으면 한다.

## 기술동향 및 분석

- 2 | 국내외 연구개발 동향
- | 주요 특허분석
- | 국내외 산업동향

## 2 기술 동향 분석

### | 국내외 연구 개발 동향

가. 국내외 연구개발 동향 및 전망  
(표 2. 국내외 CNT 연구개발 동향 참조)

- (1) 국내 연구개발 동향  
: CNT 소재 생산 분야에서는 일본이나 미국에 비해 열세인 상태에 있으나, 최근 카본나노텍, 세메스 등이 소재 양산장비를 개발하는 등 자체적인 양산시스템을 확보해가고 있음. 미래산업 활용분야 발굴 및 산업화 촉진을 위해 2002년 나노기술개발 촉진법이 발표되어 2000억원 이상의 연구비가 투입되고 있고, 산학연의 관심이 폭발적으로 증가하여, 관련 특허의 출원이 크게 늘고 있음[6].
- (2) 일본의 연구개발 동향  
: 소재 생산 및 활용에 있어 매우 활발한 연구가 진행되고 있음. 미쓰비시사는 2007년 연간 1500톤의 CNT를 양산할 계획을 가지고 있으며, NEC는 초고속 나노소자에 CNT를 적용하는 연구를 진행 중에 있음.
- (3) 미국의 연구개발 동향  
: CNT 소재 생산 및 개발에 대한 원천특허를 가장 많이 보유하고 있으며, 최근 4년간 37억 달러의 연구자금이 투입되고 있음. 한편, 모토로라는 나노방출탄소, 나노 튜브 디스플레이(NED)를 개발하고 있음[7].
- (4) 전망
  - 향후 탄소나노튜브는 광기능소자 부품, 디스플레이, 복합재료 등에서 무한한 활용이 예상되고, 2010년경에는 관련시장이 약 15조원 이상으로 커질 것으로 전문가들은 보고 있음.
  - 탄소나노튜브 소재의 구조, 길이 및 순도와 수율 등 고품질 CNT 제조과 대량생산을 동시에 확보할 수 있는 것이 중요하므로, 이러한 생산기술을 확보하기 위한 국가들간의 기술경쟁이 더욱 뜨겁게 진행될 것임.

[표 2] 국내외 CNT 연구개발 동향

국가	국내외 동향	비고
대한민국	<ul style="list-style-type: none"> <li>▶ 소재 원천특허 확보는 뒤지나, 공정기술은 대등한 수준까지 근접함</li> <li>▶ 디스플레이 제작 등 응용기술에서는 가장 앞서있음 : 삼성전자/LG전자 등.</li> <li>▶ 전문 소재 생산업체는 미미함 (최근 대량 합성법을 독자 개발함)</li> <li>▶ 2002년 나노기술 개발 촉진법 발표</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▶ 최근 특허 출원 급증</li> <li>▶ 삼성 SDI 36인치 FED 개발</li> <li>▶ 알진나노텍, 카본나노텍, PSIA</li> <li>▶ 2000억원 이상의 연구비 투입</li> </ul>
일본	<ul style="list-style-type: none"> <li>▶ 1991 NEC의 이치마 박사가 세계 최초로 관찰함</li> <li>▶ 소재 전문기업이 있으며, 제품에 대한 시장이 세계에서 가장 큼</li> <li>▶ 미쓰비시 : Frontier Carbon 자회사, 전계방출, 에너지 소재, 복합재료</li> <li>▶ NEC : 기존 실리콘 소자보다 속도가 10이상 빠른 트랜지스터 개발</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▶ 전기방전법</li> <li>▶ 시와덴코사, 나노파이버</li> <li>▶ 2007년 1500톤/년 예정</li> <li>▶ Nature 소재</li> </ul>
미국	<ul style="list-style-type: none"> <li>▶ CNT 소재 개발에 대한 원천특허를 가장 많이 보유함</li> <li>▶ 모토로라 : 나노방출 탄소나노튜브 디스플레이 (NED) 개발 (2006)</li> <li>▶ 하이페리온 : CNT양산과 관련해 GE와 독점 계약을 맺음</li> <li>▶ Kellog : CNH를 흡수, Smalley 공동 설립</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▶ 4년간 37억달러 연구 투자</li> <li>▶ LCD와 결합</li> <li>▶ 자동차, 전자, 고분자 수치</li> <li>▶ 전계방출, 기능성 복합재 응용</li> </ul>

## 나. 국내외 기술비교

### ○ 탄소나노튜브 응용산업별 기술 비교 및 관련 업체들

#### (1) FED

: 관련 업체로는 국내에 삼성과 LG, 일본에서는 캐논, 마쓰시타, 소니, 도시바, 미국은 Si diamond Technology, Motorola, 유럽의 PFE 등 10여 업체가 있음. 삼성 SDI의 경우 2002년에 32인치급 3극형 CNT-FED를 개발했으며, 2010년까지 50인치 FED 개발을 목표로 하고 있고, 스크린프린팅 법에 의한 CNT 후막 형성을 진행하고 있음. 모토로라는 전자방출원으로 질소가 도핑된 비정질 탄소막을 사용하고 있으며, Si Diamond Technology 는 탄소박막 전자방출원 소자와 음극선관 디스플레이의 전자광학을 결합시키는 방향으로 개발하고 있음. 한편, LG전자와 소니를 비롯한 여러 회사들은 탄소나노튜브나 탄소계열 전자방출원을 적용하는 FED를 개발 중에 있음.

#### (2) 반도체소자

: NEC는 CNT의 전도성을 활용하기 위해 고주파 트랜지스터에 CNT 배선을 이용하는 기술을, IBM은 선택적 파괴에 의한 도체/반도체 CNT를 선별하는 기술을 발표하였고[8], 임피니온 은 LSI 중방향배선에 MWCNT를 응용하는 등 꾸준히 개발가능성이 제기하고 있음.

#### (3) SPM 탐침

: CNT를 SPM 탐침에 응용하면, 선끝지름이 작아(최소직경 ~1nm) 가로방향 분해능이 높아 지는 것, 직선성이 좋아 깊은 요철에서도 정확한 이미지가 재현될 수 있는 장점이 있음. 또한 CNT는 화학적으로 안정하고 마모도 적어, 수명 면에서도 실리콘과 비교하여 우수함. CNT 탐침 제조회사로는, 미국의 피에조맥스와 일본의 大研化學工業이 있음.

(4) 복합재료

: 카본블랙이나 탄소섬유와 비교해, CNT를 복합재료에 활용할 경우 소량만 첨가해도 충분한 도전성이 얻을 수 있는 장점이 있음. 예를 들어, CNT 첨가량은 충분히 수지에 분산시킬 경우, 카본블랙의 1/4~1/5, 탄소섬유의 1/3~1/4으로 같은 수준의 도전성을 나타낼 수 있음. 복합재료에 MWCNT를 쓰는 것은, CVD법에 의한 대량합성이 가능하고, 가격이 싸며, 수지 등에 분산하기 쉬운 점 때문임. 미국 GE가 일부 차종에 정전도장용 PA/PPE에 CNT를 혼합한 제품을 갖추고 있으며, 일본의 日立造船은MWCNT를 이용한 도전시트를 개발한 사례가 있음.

(5) 연료전지

: NEC에서는 탄소나노튜브의 일종인 탄소나노혼(carbon nanohorn, CNH)를 전극에 적용하여, 평균소비전력 12W의 노트북 PC를 5시간 구동할 수있는 DMFC를 개발함(출력밀도는50mW/cm<sup>2</sup>, 평균출력 14W, 최대출력 34W, 출력전압 12V). Sony사는 플러렌을 전해질 재료로 사용함으로써 DMFC에서 메탄올의 크로스오버를 차단해 고효율 전지를 구현함[9].

(6) 수소저장

: 지금까지 자동차용 연료전지 개발은 수소저장기술이 key issue였으며 수소저장합금이나 수소분배 등이 연구 개발되었으나 중량, 설치공간, 위험성 등의 문제에 대해 구체적인 해결책은 없었음. 현재는, CNT 자체로는 수소저장이 어렵다는 견해가 강하며, 수소저장에 최적인 구조 개발이나 불순물을 포함한 상태에서의 수소저장 가능성을 찾는 움직임이 있음.

## 2 기술 동향 분석

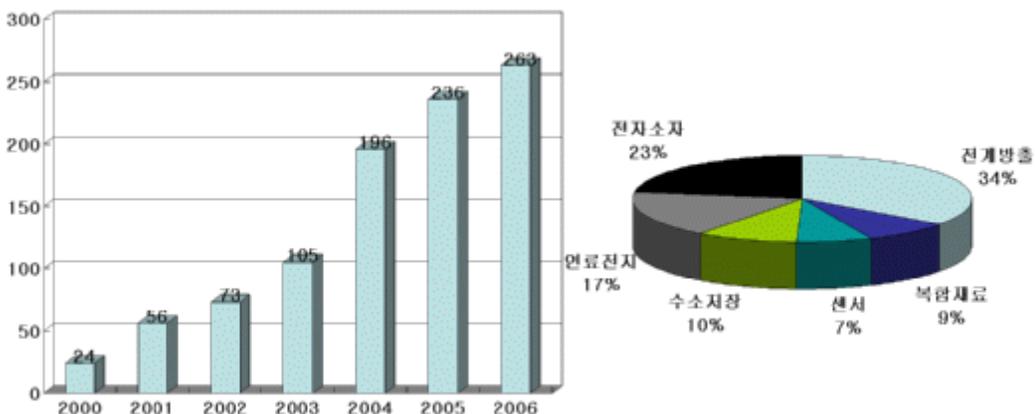
### | 주요 특허 분석

#### 가. 해외 주요 특허 분석

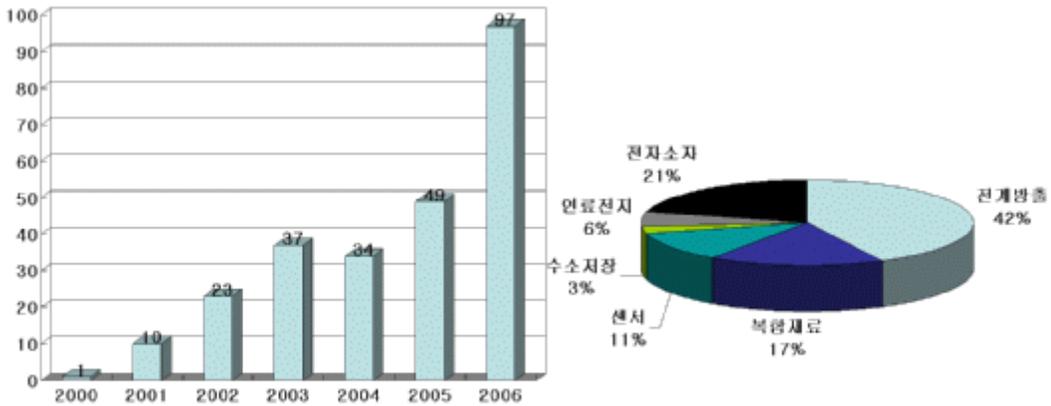
- WIPS 특허 분석 시스템에 의해서, 대표적으로 미국 특허분석을 실시한 결과를 그림 2에 나타냄. CNT의 대량생산 시스템이 개발되기 시작한 2000년 이후에 CNT에 관한 특허등록건수가 폭발적으로 증가해감을 알 수 있음.
- CNT의 대표적인 응용분야별 특허취득건수가 654건이었으며, 취득 비율을 비교해보면, 전계방출, 전자소자, 연료전지, 수소저장, 복합재료, 센서 순으로 나왔고, CNT제조법에 대한 특허도 105건 정도로 나왔는데, 기상합성법-레이저법-CVD법-전기방전법 등이 비슷한 특허 취득 비율을 보이고 있음.

#### 나. 국내 주요 특허 분석

- 그림 3에 우리나라의 CNT에 대한 특허 분석 결과를 나타냄. 미국특허에 비하면 전체적인 등록건수가 훨씬 작지만, 최근에는 등록건수가 미국의 1/3 ~ 1/2 수준까지 따라오고 있음. 2000년 이후 CNT응용분야에 대한 특허 등록 건수는 총 144건이었고, 전계방출, 전자소자, 복합재료, 센서, 연료전지, 수소저장 순으로 많이 차지하고 있음. 한편, CNT 제조법에 대한 특허 등록은 총8건으로 상당히 저조함.
- 미국 특허와 비교하면, 응용분야별 특허 비율로 매우 유사한데, 특히, 전계방출 분야의 왕성한 특허 취득은 DISPLAY분야에서의 우리나라의 개발 경쟁력의 단면을 보여주고 있음.



[그림 2] 미국내 연도별 등록수와 응용분야별 특허등록비율 (2000 ~ 2006년)



[그림 3] 국내 연도별 등록수와 응용분야별 특허등록비율 (2000 ~ 2006년)

## 2 기술 동향 분석

### | 국내외 산업 동향

#### 가. 산업적 응용분야 및 파급효과

##### (1) 전계방출 특성 활용

: 전계방출표시소자는 패터닝된 금속기관 위에 CNT 팁을 수직으로 형성시켜 만드는데, CNT 밀도는 보통  $5 \times 10^6 \sim 10^7 \text{cm}^{-2}$  정도임. CNT를 사용한 저온 x-ray 튜브는 작고, 이동이 가능하며, 낮은 전력 소모와 긴 수명 등의 부가적인 장점까지 가지고, 최근에는 기존  $50 \sim 500 \text{Acm}^{-2}$  범위보다 큰  $1 \text{Acm}^{-2}$  이상의 전류밀도로 넓은 지역을 조사할 수 있는 x-ray 튜브와 삼차원 이미징 처리가 가능한 더블빔 나노튜브 x-ray 튜브가 개발됨.

##### (2) 고강도 및 도전성 활용

: 주사전자현미경 탐침은 2000년부터 이미 실용화되었고, 도전성 분야의 CNT 활용에서 가장 많은 사용량이 기대되는 CNT 분야는 복합재료로, 최근에는 폴리머의 전기적 또는 기계적인 특성을 향상시키기 위해 나노튜브를 활용하는 연구도 있음. 예를 들어, 무게비로 약 10%의 탄소나노튜브를 첨가시켜도 폴리머의 전기전도도는 108이상 증가됨[10].

##### (3) 구조적 특성 활용

: NEC는 탄소나노혼(CNH)을 재료로 휴대형 연료전지(DMFC 형태)의 촉매담지체 응용. 지금까지 DMFC 촉매담지체는 카본블랙이 쓰였으나, 촉매입자지름을 작게 하는 데에 한계가 있었는데, CNH를 적용할 경우, 이런 응집이 일어나지 않고, 2~3nm의 백금을 균일하게 분산시킬 수 있어, 카본블랙 경우보다도 백금의 전기화학반응을 10배 높일 수 있음[11].

##### (4) 수소저장 능력 활용

: 자동차용 연료전지의 최대 관건은 안전하게 대용량의 수소를 저장할 수 있는 수소저장기술임. 이론적으로 밝혀진 CNT의 수소흡착 과정은 물리흡착이므로, CNT는 기존의 금속화합물이나, 다른 재료에 비해 많은 장점을 보유.

##### (5) 반도체 특성 활용

: 탄소나노튜브의 반도체 성질, 높은 종횡비(aspect ratio)와 튼튼한 구조는 나노 크기의 전자소자의 응용에서 우수한 장점들로, 실제 정류기에서 전계효과 트랜지스터에 이르기까지 수많은 CNT 응용이 시도되고 있음. 최근, 반도체성 CNT만을 추출해내는 기술이나, 금속성 CNT를 반도체성 CNT로 전환시키는 기술 등 CNT 조작기술이 개발.

##### (6) 나노 물질 흡착 특성 활용

: CNT는 나노센서로서 소재로, 질소 제2산화물 및 암모니아를 검출하거나, 레독스-엔자임-글루코스-옥시데이즈의 검출용 화학센서로 사용하여 수직 배열된 탄소나노튜브로 구성된 거대 나노전극들로 만든 DNA 센서로 활용 가능함[12].

## 나. 국내외 산업동향 및 전망

- CNT의 대량합성 방법으로 대부분 업체가 CVD법을 채택하고 있지만, CVD법은, 전기방전법, 레이저법과 비교하여, 결정성이 좋지 않으므로 품질이 문제되는 분야보다는 복합재료 같은 분야에 적용하고 있음. 일본의 토레는 나고야대학에서 개발한 촉매화학기상합성법으로 촉매로 이용하여 DWCNT 대량합성을 개발하고 있으며, CNRI는 SWCNT 양산을 시작하여, ACCVD법을 이용하여 고품질 SWCNT를 대량 합성하고 있음.
- 국내에서는 2006년에 세메스가 CNT 대량 합성 연속장치를 개발하여, 세계 최고 수준의 CNT 합성기술을 보유하게 된 것은 물론 대량 생산 체제를 갖추게 되었고, 카본나노텍 또한 독자기술로 탄소나노튜브와 흑연나노섬유의 합성기술, 촉매제조기술, 형상제어기술, 관련 제조장비를 개발하고, 설비 증설을 통해 연간 45톤을 생산할 수 있는 양산체재를 갖추 계획임.
- 탄소나노튜브의 가공 및 응용수준은 아직까지 선진국들에 비해 낮은 수준(60~70% 수준)에 있음. 그러나, FED에서는 경쟁력을 갖춰가고 있고, 전자디바이스 분야에서도 반도체 CNT를 이용하여 트랜지스터를 만드는 연구가 활발히 진행되고 있음.

## 이슈 제기 및 분석

- 3 | 이슈 제기
- | 소재 생산의 경쟁력 확보를 위한 과제
  - | 소자의 실용화 및 산업화를 위한 기술적 과제

## 3 이슈 제기 및 분석

### 이슈 제기

- 탄소나노튜브는 산업적 경쟁력 확보 측면에서 고려해야 할 문제가 있는데, 특히 응용기술, 특히, 생산단가 측면에서 살펴봐야 할 것임. 특히의 경우 우리나라는 최근 응용기술에서 출원수가 급속도로 증가하여, 선진국들과 거의 대등한 원천특허를 확보해 가고 있고, 생산단가의 경우는 몇몇 업체가 대량생산체제를 갖추므로써 소재의 가격 경쟁력을 갖춰가고 있음.
- 가장 큰 문제는 산업적 파급효과가 큰 응용기술로, 이와 관련된 탄소나노튜브 이슈들은 향후 21세기 국가 과학기술 및 산업경쟁력에 커다란 영향을 미칠 수 있으며, 이를 철저히 분석하고 원천특허를 확보해 나가는 것이 무엇보다 중요하여, 본 보고서에서는 탄소나노튜브에 관련된 소재와 소자 부분에서의 응용기술에 관련된 이슈들을 다루었음.

#### 가. 소재 생산의 경쟁력 확보를 위한 과제

- 소재 생산의 경쟁력 확보는 단지 탄소나노튜브의 대량 생산만을 의미하지 않고, 고효율, 고순도의 탄소나노튜브의 양산과 더불어, 탄소나노튜브를 기반으로 한 소재의 가공 분야도 해당됨. 불과 몇 년 전만 하더라도, 높은 생산단가는 산업적 응용에 있어서 가장 큰 장벽으로 여겨졌는데, 2001년에 그램당 500달러를 호가하던 CNT 가격이, 일본, 중국, 러시아 업체 등이 양산에 성공하여 CNT를 저가격에 공급하기 시작하여 최근 그램당 10달러 내외(MWCNT의 경우)까지 낮아졌음.
- CNT 양산전에 CNT 구조 및 특성에 따른 분류와 표준화가 선행되어야 할 것이고, CNT를 첨가한 복합재료 소재 응용기술, 연료전지 촉매담지체 등 박막공정에서부터 벌크공정까지 소재 재생산에 대한 경쟁력을 높여야 함.

#### 나. 소자의 실용화 및 산업화를 위한 기술적 과제

- CNT의 강도 및 도전성 응용에 있어서는 STM 팁 제조기술, 나노 액츄에이터, 센서기술, CNT정렬 기술, CNT 분산기술 등이, 메모리 소자 응용에서는 CNT를 활용한 고집적 메모리 소자기술 및 수평CNT 트랜지스터, CNT-금속 접합기술, 반도체 나노튜브 형성 및 변형 기술 등 CNT 물성 개질 관련 기술이 포함됨. 전계방출소자 응용에서는 스크린프린트법 등 CNT 분산기술, CNT 선택적 성장기술, CNT 분산기술, 전자방출 제어기술 등이 거론되고, 에너지 관련 응용 기술에서는 수소저장기술, 커패시터 관련 기술, 연료전지의 전극 활용 기술 등이 해당함.

#### 다. 경제적 파급효과

- CNT 세계시장 규모는 아직 미미한 수준이다. 그나마 연구용 수요가 대부분이고, SPM 탐침과 전자파 차폐소재 및 복합소재 등에서 현재 산업적 응용이 시작되어 구체적인 수요가 발생하고 있다. CNT 수요는 2000년에 약 270만달러, 2001년에는 500만달러, 2002년에는 1억2000만달러였고, 2007년까지 성장률이 98%에 이를 전망이다. 그렇지만, FED, IT-BT 융합분야, 의료분야, 및 수소저장과 전지에 관련된 에너지 환경 분야에서 CNT 응용이 가시화된다면, CNT 관련 산업의 경제적 파급효과는 엄청날 것임 (2015년 이후 나노소자 시장만 수조 달러의 시장 형성).

## 3 이슈 제기 및 분석

### 소재 생산의 경쟁력 확보를 위한 과제

#### 가. 생산성 확보 및 제품 표준화

- CNT관련 산업이 시장에 정착하는데 있어 가장 중요한 것은 CNT 가격을 낮출 수 있는 대량생산 기술을 확보하는 것이고, 2000년 이후, CVD법을 활용한 CNT 대량생산 시스템이 개발됨에 따라 CNT 수요를 증가시키고 있음.
- 단일벽 탄소나노튜브(SWCNT)는 결정성을 좋게 하기 위해, 아크방전법, 레이저증발법을 써서 합성하는 경우가 많고, 수율이 낮으며, 장치 가격이 비싼 점 등의 이유로 인해 다중벽 탄소나노튜브(MWCNT)보다 가격이 월등히 높음. 한편, 수요분야에 따라 MWCNT 순도와 가격은 크게 좌우될 수 있는데, 복합재료나 FED에 쓰이는 MWCNT는 불순물이 섞여 있어도 기능적으로는 문제가 없으므로 정제처리를 단순화 할 수 있어 가격하락이 가능하지만, SPM용 탐침의 경우는 고순도이며 결정성이 높은 것이 요구되므로 고가임.
- CNT가격은 CNT 제조법(CVD법, 아크방전법, 레이저법 등), CNT구조(SWCNT, MWCNT, CNH 및 기타) 및 순도(25~95%)에 따라 크게 달라진다. 대량생산된 CNT는 구조제어가 쉽지 않아, 고품질(크기 균일도, 특성 균일도), 및 고순도를 갖추는 데에 어려움이 있음.
- CNT는 어떤 재료보다도 많은 응용분야가 존재하고, 같은 응용분야라 하더라도 요구되는 CNT 특성이 조금씩 다르기 때문에 각 CNT 생산업체에서는 각 요구 스펙에 맞게 양산기준을 잡기가 쉽지 않은데, 초기 CNT업체들은 주문업체가 요구하는 특성에 맞는 CNT를 개발하여 양산하는 형태가 주를 이루었으나, 이후 양산전문 CNT 업체들이 다수 생겨나고, 공통적인 CNT 활용 스펙이 형성되자, 응용분야별로 표준 스펙을 결정하는 것이 가능하게 됨. 이에 따라, CNT 제조 업체들은 표준 특성을 확보한 CNT를 제조한 후에 가격 경쟁력으로 경쟁하게 됨.
- 한편, In situ CNT 응용 제조 분야는 제품의 신뢰도가 CNT뿐만 아니라, 온도 및 성장 방향 조절 등 공정장치의 최적화는 매우 중요함.

#### 나. 개발 방향과 고려사항

##### (1) CNT의 분리, 배열 및 정제 기술

- 탄소나노튜브는 스스로 엉키는 성질을 가지고 있기 때문에 나노튜브를 엉키지 않도록 하는 것이 복합 물질이나, 소자의 응용 가능성을 높이는 것임. 자기배열 기술은 용융 고분자와 같은 끈적한 유체 안에 나노튜브를 분산시키는 방법으로, 짧은 나노튜브는 혼합물의 벽면에 흐르고 혼합물의 중간에는 더 큰 나노튜브들이 남게 되는 현상으로 일정한 크기의 나노튜브 획득은 물론 고품질 고분자 나노복합체 생산에 있어 주요 기술의 하나임.

- 반도체성과 금속성 나노튜브는 극성에서 매우 큰 차이를 가지고 있어 양전기 영동법에 의해 분리될 수 있는데, 이 방법은 단지 마이크론 크기의 전극 시스템을 사용하여 행해져 왔기 때문에 소량의 금속성 나노튜브를 생산함. 이를 개선시키는 방법으로 대용량 셀에 사용되는 것보다 더 강한 장 변화(field gradient)가 구형의 이중극 물체를 분리하는데 이용하는 것이 가능함.
- 나노튜브를 대량으로 만들어낼 때 이용하는 공정(플라즈마 CVD 방법 등)에서는 흔히 불순물(탄소 찌꺼기와 촉매 잔유물)이 만들어지기 때문에 나노튜브의 질이 떨어지므로, 약한 산처리와 함께 습한 공기에서 그것들을 가열하고 자기장을 이용해 불순물과 분리하여 나노튜브를 정제하는 방법을 개발됨.
- SWNT를 일정한 배열을 갖도록 거대규모의 제품을 제작하는 이유는 이방성(anisotropic) 배열을 가진 거대규모 제품이 SWNT의 기계, 화학, 전기적 성질을 정확하게 나타내지 못하기 때문으로, SWNT의 길이가 길수록 자기장과 평행하게 정렬되는 특성이 있기 때문에, 장축이 길수록 유리하지만, SWNT가 자기장의 영향을 받아 회전하고자 할 때는 열역학적 에너지가 필요하기 때문에, 자기장의 세기를 적절하게 열역학적 에너지보다 크게 적용하게 하여, 단일벽 탄소나노튜브(SWNT)를 배열하고 조립해 거대 규모의 탄소나노 튜브 제품을 만드는 기술이 개발됨[13].

(2) CNT-복합재료

- 단일벽 탄소나노튜브의 각층은 LBL(layer-by-layer) 조합공정에서 퇴적되기 때문에 이 공정을 반복하면 복합재료 기질 전체에 단일벽 탄소나노튜브가 매우 균일하게 분포되게 할 수 있음. LBL 기술은 배향된 단일벽 탄소나노튜브를 많이 포함하고 있는 다층 층을 조합하여 원하는 두께를 가지는 필름을 만드는데도 사용할 수 있으며, 단일벽 탄소나노튜브의 재배향 정도는 상호교차(criss-crossed)된 단일벽 탄소나노튜브 구조로 된 다층 필름을 제조하는데 충분함. 이렇게 해서 만들어진 복합재료는 조직공학, 인공근육, 태양전지, 센서 및 다른 전자장비에 응용될 수 있음.
- 최근 탄소 나노튜브 충전제는 복합재료에서 진동을 감쇄하는 재료로서 주목을 받고 있으며, 이것은 고온에서 고분자 주사슬이 보다 유연해지기 때문에 고분자와 탄소 나노튜브 사이의 기계적 결합이 보다 약해져서 일어나는 것이고, 고온에서 진동을 상쇄할 수 있는 재료들은 항공우주, 기계재료, 소비재 등 다양한 분야에 활용 가능함.
- 계면활성제를 사용하여 단일벽 탄소 나노튜브를 분산하면 계면활성제에 의해 탄소 나노튜브와 고분자와 상호반응이 잘 일어나지 않기 때문에 우수한 강도를 가진 복합재료의 제조를 기대할 수 없는데, 이의 해결을 위해 이미다졸 양이온(imidazolium)을 포함하는 이온 액체 내에서 단일벽 탄소 나노튜브를 가루로 만들어 단일벽 탄소 나노튜브가 부유시켜 만들면, 탄소 나노튜브가 7%의 낮은 농도로 포함된 메타아크릴레이트 버키 플라스틱은 인장강도에서 120% 향상을 보였으며 전도도는 1Scm<sup>-1</sup>를 나타내는 복합재의 제조가 가능하였음.

### (3) CNT-전지재료

- 탄소 나노튜브는 중심 튜브와 이웃 튜브 사이의 간격과 넓은 표면적을 이용하여 슈퍼커패시터(super capacitor)에 사용되는 전극 물질로 매우 촉망받고 있는데, MWCNT를 이용하여 수산화 칼륨(KOH)으로 활성화하여 슈퍼 커패시터의 대량 생산의 가능성을 제기됨. 슈퍼커패시터를 이용할 경우에 작은 전류 밀도에서도 충전 및 방전이 가능한 소자의 제작이 가능함. 여기서, 전하를 빨리 공급할 수 있는 능력인 전력 밀도(power density)를 결정하는 중요한 요소는 슈퍼커패시터의 모든 요소의 저항의 합과 비례함. 즉, 전극의 다공성 층의 전해질의 확산 저항(diffusion resistance), 전극과 전류 콜렉터(current collector) 사이의 접촉 저항(contact resistance)과 전극 물질 자체의 저항을 모두 포함하고, 에너지 밀도는 전극 물질의 다공체의 크기와 전해질 이온 모양 및 기능성 그룹을 포함한 이온 크기에 의존함.
- 탄소나노튜브와 금속을 결합시키면 수소저장체의 특성을 향상시킬 수 있는데, 단일 수소 분자가 SWCNT에 접근하면 에너지 장벽을 경험하지 않고 Ti 원자가 포함된 (8,0) 나노튜브에 흡착되면, 0의 에너지 장벽은 4개의 수소 분자가 늘어서 H-H 결합으로 표면에 분자적으로 흡착될 때까지 지속됨. 이러한 상호 작용은 물리적 흡착(physisorption)보다는 훨씬 강하고 화학적 흡착(chemisorption)보다는 약함.
- SWCNT가 수소 저장을 위한 후보물질로 주목받고 있는데, 포텐셜 조절을 통해 SWNT 측벽에 금속이 전착된 후 금, 백금, 팔라듐 나노입자를 전기적으로 연결시키는 도선의 역할을 수행하는 것임.

### (4) CNT 탐침 제작

- 전기영동법에 의한 고분해능 원자력간 현미경 탐침과 전자빔 소스(전자 에미터)용 CNT 칩의 제작 기술은 기존 방법에 비해 두 가지 특징을 가지고 있는데, 첫 번째는 특수한 제조 환경이 불필요하다는 점으로, 장치가 간단하며 공정이 단순하여 저비용으로 CNT 탐침을 제작할 수 있고, 우발적인 방식에 비해 나노튜브를 제조하는 것이 아니라 자동 제어 가능한 방식이라고 것임. 두 번째 특징은 순도가 높고 배향성이 뛰어난 CNT 탐침의 길이 제어가 가능하다는 점임.

## 3 이슈 제기 및 분석

### 소자의 실용화 및 산업화를 위한 기술적 과제

#### 가. 소자 응용을 위한 기술적 문제점

- 생명과학분야(BT)와 나노기술분야(NT)의 융합에 있어 CNT의 역할 중에 주로 논의되고 있는 것은 생체시스템의 연결통로(파이프), 초미세 약물주입장치, 나노튜브의 기체 흡수성을 이용한 나노가스센서, 나노튜브에 기능기를 부착한 초미세 센서, 탄소와 생체 조직과의 친화성을 이용한 의료용 초미세 부품으로의 소자 응용 가능성임. 그러나, 아직 연구개발 초기인 만큼 실용화 직전 성격의 문제점보다는 기존의 문제점을 CNT가 해결할 수 있는 가능성과 향후 이슈에 대해 살펴볼 필요가 있음.
- 미래의 테라급 나노소자 개발에 CNT를 응용을 위해 필요한 집적화 공정은 패턴 위에서의 CNT의 직접 성장기술, 자기정렬기술, 선택적인 CNT 버닝, CNT 구조제어 성장기술 등의 문제들임.
- 탄소나노튜브의 FED 응용에서 고려해야 할 점은 CNT 소재가 크기와 방향이 균일한 대량 제조기술이 개발되어야 하며, 전계방출 특성이 우수한 CNT 구조로 최적화되어야 하고, CNT를 대형 유리 기판 위에 배열시키는 공정이 확보되어야 할 것임. 한편, FED에 비해 상대적으로 간단한 구조인 CNT 광원의 응용을 위해서는 높은 밀도의 전자를 방출하기 위한 CNT 소재기술, CNT 성장과 프린팅 기술, 고휘도와 장수명을 위한 형광체 소재 및 도포기술, 유리판을 진공 패키징하는 기술, 구동회로 및 주변지원기술 등이 과제들임.

#### 나. 기술적 문제점의 극복 방향

##### (1) BT-NT 융합 분야

- 암 생물학자들이 건강한 세포에서 악성 세포로 변화되는 복잡한 세포간 신호 체계를 밝혀냄에 따라 비정상적인 세포 성장(증식)을 멈출 수 있는 새로운 치료법의 개발이 가속화되기 시작했지만, 치료 시약은 단백질이기 때문에 기능을 유지한 채 세포 막과 세포질 내로 주입하기가 어려웠는데, 탄소나노튜브를 활용하여, 작은 단백질을 세포로 유입시킬 수 있는 장치(생체파이프)가 개발된 것은 대표적인 사례임.
- 탄소 나노튜브 트랜지스터에 부착된 단일 줄기 DNA를 사용하여 공기 중에 있는 미량의 화합물을 탐지할 수 있는 나노 수준의 센서가 개발되고 있는데, DNA와 결합된 소자는 화합물의 혼합물에서 미량의 냄새를 추적할 수 있는 후각센서(가스 및 화학센서)는 실용화가 가능하며, 이 사실을 응용하여 소변 시료를 사용해 암을 조기에 탐지할 수 있는 새로운 방법이 개발될 가능성이 있음[14].
- DNA로 코팅된 단일벽 탄소 나노튜브를 살아 있는 세포에 적용하여, 미량의 해로운 오염 물질을 탐지하여, 특정 DNA 서열을 알 수 있는 방법이 개발되었는데, DNA 센서의 잠재적 응용은 암 관련 유전자의 신속한 탐지, 감염된 유기체를 확인하는 살아 있는 세포에서 센서로 작동될 수 있다는 보여준 사례임.

- 대부분의 탄소 나노튜브 화학센서의 작동기구는 나노튜브의 전기저항의 변화로, 정전용량 신호는 노이즈가 거의 없고 검출 속도가 빠르며 감도가 높은 센서의 제조를 가능함. 예를 들어, 기질의 단분자층으로 둘러싸여진 여러층의 나노튜브로 구성된 센서는 특정 생물분자나 화학물질과 선택적으로 결합하여, 타겟 화학물질이 들어와서 나노튜브를 둘러싼 단분자층과 접촉하면, 화학물질이 흡착되거나 표면과 결합하는데, 나노튜브에 전기를 걸어주면 튜브의 표면에 강력한 전기장이 생성되고, 흡착된 분자들은 전기적으로 극성을 띠거나 재배열 되기 때문에 나노튜브의 정전용량이 증가하게 되는 현상임[15].

## (2) CNT 전자소자 분야

- 최근 탄소나노튜브와 나노선 소자를 대량 생산하는 기술이 개발되었는데, 탄소나노튜브가 친수성 분자와 친화력이 강하다는 특성을 활용하여, 기관의 특정 위치에 비 흡착성 분자막을 도포한 뒤에 나노선이 포함된 용액을 뿌려, 탄소나노튜브와 나노선이 깨끗한 표면에만 자동적으로 결합되는 원리를 이용한 것임. 이 기술로 향후 고성능 트랜지스터 집적회로와 초고감도 바이오 센서의 대량제작이 가능[16].
- 탄소 나노튜브는 구리와 비교하여 단위 면적 당 약 1000배의 전류밀도를 가지고 있으며, 속도는 10배나 빠르고, 또한 열을 훨씬 빠르게 분산시키기 때문에 구리선이 가지지 못한 많은 장점들을 보유. 2010년 경 반도체는 약 45나노미터의 공정을 가질 것으로 보이며, 2013년경에는 32나노미터가 될 것으로 예상된다. 공정부분의 최적화가 이루어지면, 향후 DRAM의 배선 등에 활용될 가능성이 높음.
- 무기질 나노튜브를 금속-산화물-용매 전계 효과 트랜지스터(FET)에 집적하는 방법이 개발되어, 이온의 전도도를 이용하여 빠른 전계 효과 변조가 가능하게 되었음. 반도체에 무기질 나노튜브를 도핑하여 표면 처리를 하면 나노 유체 트랜지스터의 p-형에서 양극형과 n-형 전계 효과 트랜지스터의 스위치를 만들 수 있음.
- 탄소나노튜브를 사용한 진동기는 나노튜브 채널로 구성된 세 개의 전극을 가진 트랜지스터 형태로, 소스 드레인을 연결하고 있는 나노튜브는 AC 전압이 게이트에 가해지면, 역학적으로 진동함. 나노크기의 진동기는 휴대폰이나 원자 수 단위로 물질의 질량 측정이 가능한 센서에 응용 가능함. 탄소나노튜브의 전기역학적 특성은 메모리로서의 응용도 가능함. 나노튜브 메모리는 비휘발성이고, 빠르며, 매우 오랜 시간 정보를 저장할 수 있고, 접속수도 DRAM/SRAM과 필적할 만한 수준이라는 장점 등을 보유함[17].

(3) 전계방출 응용소자 분야

- 에미터로서 쓰이는 경우, 기관 표면에 CNT를 균일하게 성장하는 방법으로 크게 스프레이법, 스크린인쇄법, 전기영동법이 있음. 스프레이법은 에어브러시로 용매에 분산된 CNT를 금속기관 위에 붙여 붙이는 것으로, 스프레이전에, Fe, Ti 등의 금속을 미리 퇴적시킨 후 버퍼층 위에 스프레이를 행하고 열처리하는 방법. 스크린인쇄법은 CNT, 도전페이스트, 유기바인더로 된 페이스트를 기관위에 메시를 통하여 도포하는 것으로, 건조, 및 소성 후에 적당한 표면처리를 함으로써, CNT를 표면에 노출시키는 방법. 상온에서 기관 표면에 도포가 가능하므로, 다양한 패널사이즈에 적용할 수 있음. 전기영동법은 전해질 현탁액 중에서 CNT에 전하를 띠게 하여 전기력에 의해 금속표면에 CNT를 퇴적시키는 방법. 그 외에, 직접 기관상에 CNT를 성장시키는 방법으로 CVD법이 있는데, 메탄, 아세틸렌 등을 원료가스로 하여 CVD법으로 Fe/Co/Ni 같은 촉매금속이 패터닝 후에 사용됨. 그러나, CRT경우 휘도 편차가 1.6%~2% 이내인 것에 비해 FED는 10%에 달해, 이 편차를 없애기 위해 CNT 막의 표면처리, 막의 평탄화, 에미션사이트 증가 등이 연구되고 있음.
- 기존 X-레이 튜브는 전자 방출을 위해 사용하는 필라멘트 열음극 튜브(thermionic tube)에서 2000도 이상의 높은 열이 발생해 X-레이 필라멘트 광원의 수명이 길지 않았지만, 전자 방출원으로 CNT를 이용하여 분해능력이 우수한 영상을 획득할 수 있었고, 만약 고장 시에는 CNT만 교체해 반영구적인 사용이 가능하다는 장점이 있음.
- 탄소나노튜브의 발광 성질은 반도체로서의 특성을 보다 충실히 유지하고 있는 것이기 때문에 본 박막은 광-전자 기능에만 머물지 않고 FET 등을 포함한 다양한 반도체소자에 전개가 가능할 것임. 이는 반도체 SWNT의 밴드갭 광학 천이에 유래하는 것으로, 튜브가 응집한 박막에서는 튜브간 상호작용 때문에 발광 기능이 없어지지만 새롭게 개발된 방법에 따르면 젤라틴의 분산 작용에 의해 튜브끼리의 고립 상태가 유지되기 때문에 발광 SWNT 박막을 실현할 수 있는 기술임. 계면활성제를 이용해 SWNT를 수중 분산하면 밴드갭의 광학 천이에 의한 발광을 검출 가능함.

## 다. 산업화 촉진을 위한 고려사항

- 탄소나노튜브 소재 및 응용 분야에 대한 원천기술 확보 및 산업 활성화를 위해 다음과 같은 사항을 일관되게 추진해야 할 것임.
  - 산학연 클러스터로 연구개발 체계를 구성하여 핵심원천기술 발굴과 산업화를 일괄적으로 동시 추진함
  - 대규모 수요업체를 대상으로 탄소나노튜브의 제품 표준화 조기에 확립시킴
  - 소재 수요 규모가 큰 Killer Application의 집중 발굴과 소재 개발 역량을 집중시킴
  - 탄소나노튜브 연구 개발에 위한 정기학회 개최로 기술 교류를 활성화시킴
  - 탄소나노튜브의 새로운 응용기술에 대한 원천 특허 확보
  - 소재 생산업체와 수요업체간의 상호 공동 연구개발 확대
  - IT-NT 및 BT-NT 등 융합기술 개발
  - 탄소나노튜브 개발을 위한 대규모 펀드 조성
  - 국가간의 연구개발 협력 및 연계 연구 시스템 확보
  - CNT 소재 및 응용에 대한 전문가 양성

## 참고문헌

1. 한창수, 서희원, '탄소나노튜브 조립기술', 물리학과 첨단기술, 2004
2. R. H. Baughman, A. A. Zakhidov, and W. A. Heer, Science 297(2002) 787
3. 한상무, 최승욱, '일본의 탄소나노튜브 시장개황과 실용화 동향', RIST, 2004
4. M. Endo et al., Nano Lett, 3(6) (2003) 723
5. 나노기술종합발전계획, 국가과학기술위원회, 2005-12
6. <http://www.semes.co.kr/>
7. <http://www.motorola.com/>
8. P. G. Collins, et al., Science 292 (2001) 706
9. 矢野?濟研究所(Yano Research Institute Ltd.), 'カ"[ボンナノチュ]"[ブの可能性と将来予測 2004'
10. M. P. Anantram and F. Leonard, Rep. on Progress in Phys. 69 (2006) 507.
11. <http://www.nec.com/>
12. J. Li, 'Chemical and Physical Sensors in Carbon Nanotubes, 2004, CRC press
13. X. L. Xie, Y. W. Mai and X. P. Zhou, Mater. Sci. and Eng. R49 (2005) 89
14. M. Strano et al., Science 311 (2006) 508
15. A. Johnson et al., Nano Lett. 5(9) (2005) 1774
16. <http://hnd.snu.ac.kr/Default.htm>
17. T. Rueckes et al., Science 289 (2000) 94

## 저자소개

➤ 정 우 석

- 공학 박사
- 현, 한국전자통신연구원 선임연구원
- 하이닉스 반도체 선임연구원(1998~2001)

➤ 한국과학기술정보연구원 동향정보분석팀