

# 고열전도성 카본나노튜브-고분자 소재의 응용 기술

김종원, 송병갑, 김미경, 염정현<sup>1</sup>, 김해식<sup>2</sup>

한국염색기술연구소, <sup>1</sup>경북대학교 기능물질공학과, <sup>2</sup>울산과학기술대학교 친환경에너지공학부

## 1. 서 론

고열전도성 카본나노튜브(Carbon Nanotube, CNT)-고분자 복합재는 기본적으로 낮은 표면저항을 가지면서 열전도성, 투명성, 친환경, 고강도, 난연성, 광택성, 내화학성 특성 등이 복합적으로 구현될 수 있는 제품을 창출할 수 있으며 향후 최소 수조 이상의 엄청난 신규시장을 창출할 수 있는 전형적인 나노기반의 전략 산업분야이다.

일본에서는 2001년 총리부에서 종합과학기술회의를 주최하여 연간 예산 360억엔 규모의 나노테크놀로지에 관한 프로젝트를 수립하여 NEDO(신에너지산업기술종합개발기구) 및 AIST(산업기술종합연구소)를 주관으로 나노 복합재료의 연구 개발을 활발히 진행하고 있다. NEDO는 2010년까지 나노 기술의 실용화(제품화, 부품화)를 정책목표로 두고 나노 수준에서 미세구조 제어를 통하여 나노복합재료의 물리적 특성 제어 및 향상을 위한 연구 개발을 수행하고 있다. 미국에서의 나노복합재료 연구는 2000년 발표된 나노테크놀로지 국가전략(National Nanotechnology Initiative: NNI)의 'Nanostructured material by design' 세부 프로그램에서 이루어지고 있다. 미항공우주국은 우주왕복선의 연료 절감 및 내열성 향상을 위하여 기존의 탄소섬유 및 유리섬유로 제작하였던 기체의 일부분을 대체하기 위하여 탄소나노재료를 이용한 초경량 고내열성 탄소 나노복합재료에 대한 연구를 수행하고 있으며, 이를 통하여 향후 전개될 신개념 항공우주산업분야에서 세계시장을 선점하고자 노력하고 있다.

CNT는 차세대 NT, BT, IT 분야의 핵심소재로서, 선진 각국에서 경쟁적으로 기술 개발을 추진하고 있으며, CNT 기반의 고열전도성 복합재 구현은 관련 산업에 미치는 영향이 크기 때문에 선진국에서의 기술이전 자체가 원천 봉쇄되어 미국, 일본 등 선진국으로부터 각종 원천기술 및 응용기술에 대한 기술로 지급 요구가 거세질 것으로 예상된다.

CNT-고분자는 CNT의 뛰어난 열전도 특성을 이용한 소재로서 고분자를 이용하여 마이크로 크기에서의 열전도성, 열방사성, 전기전도성을 극대화한 소재로서 그 가공기술에 따라 다양한 형태의 소재, 부품으로 형상화 될 수 있는 점액형(viscous) 소재로서, 고체와 액체의 중간형태의 페이스트형 재료이다.

마이크로 열전도성 점액형 소재는 마이크로 길이의 열전도성이 20W/mK 이상인 소재이다. 마이크로 열전도성 점액형 소재를 이용한 고열전도성 소재는 소재가공 기술의 형태에 따라 Sheet, 접착제, 필름형태의 다양한 중간재 형태의 제품을 개발할 수 있으며, 동시에 제품화 경쟁력 강화를 위한 복합기능성 소재로서 정전분산성능(ESD)가 구현되면서 마이크로 열전도성이 20W/mK 이상인 소재로 구현가능하다. 고열방사용 점액형 소재를 이용한 응용제품의 개발 분야 중 친환경 고단열 소재는 마이크로 크기의 단열 셀 벽면에서 CNT의 뛰어난 열방사 특성을 이용하여 열방사 에너지를 효과적



Fig. 1. 각 재료의 열적성질 비교.

으로 흡수하여, 밀도가 120kg/m<sup>3</sup> 수준에서 열전도도가 0.021W/mK 이하가 되면서 환경규제물질이 제거된 친환경적인 제품이다(Fig. 1).

고열전도성 CNT-고분자 복합재는 상용 고분자 소재에 전기/열전도성을 부여하기 위하여 CNT 전도성 첨가제가 고분자 매트릭스 혹은 고분자 필름 상에 고르게 분산되어, 내열성 및 내화학성과 같은 고분자 고유의 성질을 유지하면서도 도전성을 가진 나노소재 기반 복합재이다. 복합재의 유형별로 벌크형, 박막형, 섬유형 형태가 있다(Fig. 2).

박막형 CNT-고분자 복합재는 유연성, 투명성, 대면적, 휴대성, 경량성, 저가의 모든 특성을 확보할 수 있는 신규개념의 전극으로서 energy, display, electronics 응용의 flexible 소재 분야에서 원천기술에 의한 엄청난 신규시장을 창출할 수 있으며, 최근 차세대 모바일 기기의 차세대 투명전극으로서 전 세계적으로 큰 주목을 받고 있는 분야이다. 벌크형 CNT-고분자 복합재는 on-line painting을 위한 fender, door handles, mirror housing 등의 차량용 플라스틱 외장재, fuel line/tank, quik connects, O-ring, pump modules 등의 차량용 연료시스템 등의 자동차 산업에 현재 시험 적용 혹은 일부 제품화 되고 있으며, 컴퓨터 및 반도체 산업에 CNT-고분자 복합재가 적용된 부품 및 제품들이 향후 시장에서 크게 활성화 될 전망이다. 또한 반도체, IC 패키징, 가전, 전자부품 등에서의 방열문제를 효율적으로 해결할 수 있는 고열전도성의 CNT-고분자 점액형 중간재 형태의 제품이 앞으로 시장에서 크게 주목을 받을 것으로 예상된다. 섬유형 CNT-고분자 복합재는 최근에 들어서 관심을 갖는 특성들인 방수, 방염, 방화, 방열, 방전 제품 뿐 아니라 전류를 통하거나, 초고강도, 초고탄성, 초고흡수 및 극한의 열과 불에 견딜 수 있는 섬유나 빛 투과성이 있는 섬유, 역삼투 섬유, 이온 또는 가스 교환 섬유, 자가 점착 섬유(self adherence) 등에 활용될 수 있는 분야이다. 고열전도성 CNT-고분자 복합재의 각 유형별 구조는 Table 1과 같다.



Fig. 2. CNT-고분자 복합재의 유형별 응용분야.

Table 1. CNT-고분자 복합재의 유형별 개념도

유형	형태	구조
벌크형	고분자 매트릭스에 CNT가 3차원 분산 형태	
박막형	고분자 필름상에 CNT가 2차원적으로 분산된 형태	
섬유형	건/습식 spinning 공정에 의해 제조되는 섬유상 형태	

특히, 열 관련 소재의 경우 선진국의 대부분 제조업체들이 실리콘 기반, 금속기반의 제품으로 각종 제품들을 생산하고 있으며, 한국의 경우 거의 대부분의 열 관련 소재에 대해서 수입에 의존하고 있어, 기존의 기술적인 장벽과 지적재산권 문제를 회피하고 새로운 소재 채택과 경쟁력 강화를 위해서 CNT를 이용한 복합소재를 사용하여 고열전도성, 고방열 특성의 소재연구를 본격적으로 진행하여 시장 우월적 지위를 확보해야 한다. 기존에 한국이 참여하고 있지 못했던 약 127억 달러에 달하는 새로운 거대시장에 참여함으로써 새로운 제품의 확보와 동시에 기존의 전략전통사업인 자동차, 전자, 전기, 섬유, LED, 에너지 등의 산업분야에 경쟁력을 강화해야 할 것이다.

## 2. 본 론

### 2.1 시장환경

#### 2.1.1 세계 시장 동향

##### 2.1.1.1 고열전도성 소재

각종 전자부품의 고집적화, 고속화 및 제품의 경박 단소화 경향에 따라 방출열량이 급증하고 있으며 향후 전자공업의 발전 열방출에 대한 효과적인 해결 방안이 크게 의존하는 바, 이에 대한 가장 유력한 대응기술로서 각종 열관리소재에 대한 산업계의 수요가 크게 제기되고 있다.

##### - 고휘도 LED 조명시장

대표적인 제품 적용처 중 하나인 LED 조명시장의 경우 고휘도 LED 발열문제를 해결하여 패키징의 간소화함으로써 제품의 신뢰성, 제품수명 및 가격 경쟁력 확보를 통해 급격한 상용화가 예상된다. 현재 LED 조명제품은 주로 3W급을 여러 개 사용하여 필요한 휘도의 조명제품을 개발하고 있으나, 3W급의 제품에 채용된 각종 방열부품의 크기는 고급제품 및 본격적인 조명 제품에 적용하기에는 아직 대형이며, 패키징의 크기를 줄이기 위해서는 5W급의 고휘도 LED가 채택될 수 있는 방열부품의 개발이 필수적이다 (Fig. 3).

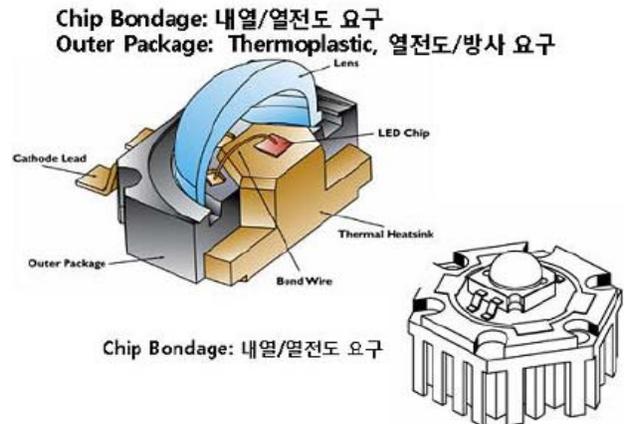


Fig. 3. LED Packaging시 고열전도성 소재.

온실가스 감축, EU의 수은, 할로겐 규제 등 정책적인 변수로 인하여 2013년 이후 CAGR에 대한 추정이 어려워나, 2008년 기준으로 외국 선진국의 백열전구 사용금지 법령의 제정이 급속도로 추진됨에 따라 정부의 정책목표에 따라 CAGR이 더욱 급격하게 증가할 것으로 추정된다. 삼성경제연구소(2006.5) '세계 LED 시장의 기술동향과 국내 기업현황 및 시장분석'에 의하면 2010년 이후 CAGR은 약 35%로 추정되며, 자동차용 고휘도 LED 조명제품의 시장형성은 2010년 이후 본격적으로 형성될 것으로 추정된다.

##### - IC 및 통신부품 열관리 소재

열관리소재는 현 시장규모가 127억 달러에 달하며 향후 10년간 25~40%의 연성장률이 예상되는 고성장-고부가 가치형 소재이나, 현재는 일본 및 미국이 전세계 시장을 주도하고 있다(Fig. 4).

전체 열관리소재는 Dow Chemical, Johnson Matthey, Bakelite, Alcoa, Lard, Sumitomo, Shin-Etsu, Sunhayato 등 미국과 일본 기업이 독점적으로 공급하고 있으며, 2000년 시장 규모는 \$325Bn, 시장 성장률은 연 13%이다. 2000년도 시장의 구성비는 컴퓨터관련 39%, 통신장비 26%, 산업 및 가전 22%, 국방 및 자동차가 13%로 대부분 시장이 확대되는 첨단산업 관련이다. 열관리 소재를 사용한 IC 패키지의 66%를 일본과 한국을 비롯한 극동지역에서 조립생산하고 있으나, 일본을 제외하고 한국, 대만 등은 열관리 소재의 80% 이상을 수입에 의존하고 있다.

2.1.1.2 고방열 CNT-고분자 소재

- 고방열 CNT-고분자 소재를 이용한 미세발포체

경질 폴리우레탄 폼은 뛰어난 단열성과 기계적 물성, 넓은 사용온도 범위 (-235~150℃)와 경제성 등의 장점으로 인해 단독으로 혹은 타 재료와 복합화하여 단열재, 경량구조체, 완충재 등 여러 용도에 널리 사용되고 있다. 경질 폴리우레탄 폼은 실용화 되어 있는 단열재 중 열전도율이 가장 낮은 단열재로서 80~90%가 사용되고 있으며 150℃의 고온영역에서부터 인공위성의 발사로켓(-235℃)과 같은 극저온 영역까지 광범위하게 사용할 수 있는 유일한 단열재이다.

ICI, BASF, Bayer, Dupont 등 거대 기업에서 경질 폴리우레탄 단열재에서 CFC와 물을 혼합 사용하거나 CFC와 이산화탄소를 혼합 사용하는 기술이 연구되고 있다. 경질 폴리우레탄 폼은 다양한 방법으로 제조할 수 있기 때문에 목적 및 용도에 맞춰 다양한 용도로 사용될 수 있다. 대표적인 용도로는 건축용 단열재와 냉장고용 단열재, 스프레이폼, 냉동선박 및 LNG 선박용 단열재, 인공위성 발사로켓의 연료탱크 단열재, 지역난방 등에 사용되는 이중보온관과 초저온용 배관의 단열재 등에 사용되고 있다. LNG 선박 저장탱크용 단열재는 -165℃의 초저온에서 사용되는 물질로서 저온에서의 기계적 강도, 충격흡수, 단열성 등이 매우 중요하여 일반적인 단열재로는 사용이 불가능하다. 국내시장규모를 이용하여 세계시장규모를 역산출하면 일반적으로 국내시장규모가 세계시장규모의 10% 정도로 가정할 수 있으므로 2005년 기준으로 93,500억원이며, 시장 성장률을 고려하여 2012년 시장규모는 111,903억원으로 증가할 것으로 예측된다.

- 평판디스플레이 방열부품

평판디스플레이(FPD) 제품의 경우 PDP 뿐만 아니라, LCD의 경우에도 방열문제로 인한 제품의 신뢰성 저하가 문제 되고 있다. 대표적인 LCD, PDP의 경우 기존 TV제품에서는 Full HD 방식의 제품고급화 및 디지털정보디스플레이(DID) 시장의 본격적인 형성으로 고휘도 제품이 요구되고 있으며 이로 인하여 방열대책이 더욱 요구되고 있으나, 제품에 적용할 수 있는 방열대책이 현재 적용 가능한 가격수준에서 Heatsink 또는 Heatsink의 Anodizing 처리 등 제한되어 있어 고휘도 고급 제품 개발에 문제가 되고 있다. 용도별 평판디스플레이(FPD) 시장 실적 및 전망분석에서 가장 규모가 크며, 성장률이 급격하게 증가하는 것은 TV 제품이며, 이 제품들은 32인치 이상 대형화면과 향후 디지털 방송의 송출에 대비한 Full HD 방식이 주류를 이룰 것으로 보여 대형 TV제품에 대한 방열소재가 더욱 적극적으로 필요할 것으로 판단된다. 국가별 평판디스플레이 품목별 시장점유율 분석을 보면 TFT-LCD의 경우 한국, 일본, 대만 등 인접 3개국에서 거의 대부분을 생산하고 있으며, PDP의 경우에도 전 세계 시장의 절반에 해당하는 물량이 생산되고 있다(Table 2).

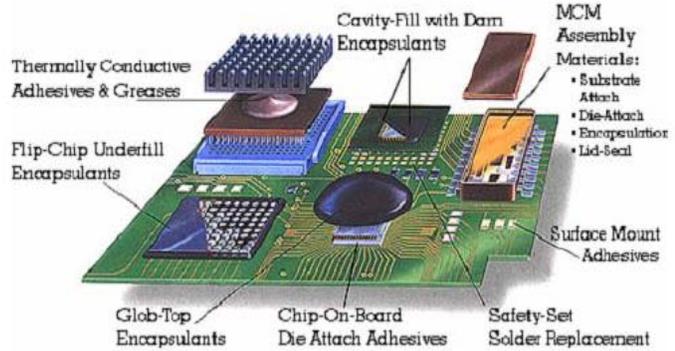


Fig. 4. 고방열 접착제의 열관리소재 사례.

Table 2. 국가 및 평판 디스플레이 품목별 시장 점유율

(단위:억불)

구분	TFT-LCD			PDP		
	2003	2004	2005	2003	2004	2005
한국	110.9	176.5	222.3	9.4	17.9	34.8
일본	120.4	144.5	152.9	16.3	23.7	25.8
대만	87.6	140.5	186.6	0.4	1.0	0.3
기타	0	0	8.8	26.1	42.6	60.9
계	318.9	461.4	570.6	52.2	85.2	121.8

(출처 : DisplayBank, 2006)

**- 태양전지 방열부품**

고집광 태양전지에 있어서 방열은 태양전지의 광변환 효율과 수명이 직결됨으로 방열부품은 태양전지 모듈에 있어 필수부품이다. 시스템 가격 중 모듈, 인버터 및 기타부품 등의 하드웨어가 차지하는 비중이 약 61%임을 감안하고, 태양전지용 방열부품의 가격비중이 하드웨어 소재가격의 약 5%정도로 가정하면, 시장은 2005년 기준으로 약 3억 불로 추정할 수 있다. 현재 태양광 발전 비중이 전체 발전량의 0.03%에 불과하며, 화석 연료의 의존을 줄이려는 각국의 노력이 강화되고 있고, 현재는 가정용 발전이 주가 되고 있으나, 향후 공공시설 수요 증가가 예상이 되고, 태양전지 가격 및 태양광 발전 단가의 장기적인 하락이 예상되고, 소비자들의 환경에 대한 관심 증가로 태양전지 수요가 높은 성장세를 보일 것으로 전망된다(Fig. 5).

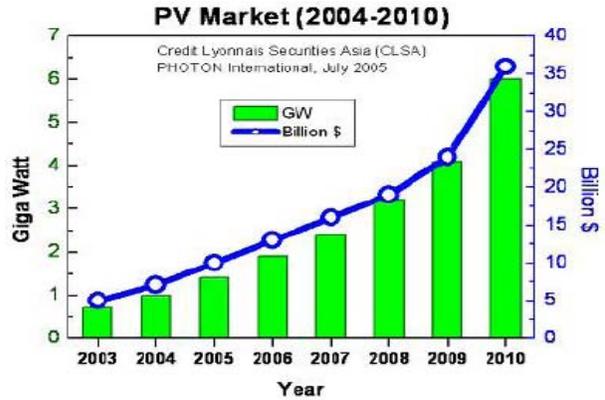


Fig. 5. 태양전지 세계시장 전망(출처 : I-SUPPLY, 2006).

**2.1.2 국내 시장 동향**

**2.1.2.1 고열전도성 소재**

세계 최고 수준의 정보·전자기기 제조공정 기술에 비해 국내 IT 관련 소재산업은 극히 취약하며 체계적인 연구개발체제가 확립되지 못하였고, 여타 첨단소재산업과 마찬가지로 선진국의 기술 장벽이 매우 높다. 또한, 고성능 전자부품에 대응할 열관리소재에 대한 대책이 전무하여 전자산업 발전에 커다란 걸림돌이 될 것으로 우려되고 있다. 국내 방열관련 소재를 제조하는 회사는 거의 없으며, 클라스타 인스트루먼트에서 CNT-복합재를 이용한 방열도료를 개발하여 가전제품에 적용중이며, 일창프리스전, 휘텍스피디이 공동으로 알루미늄 페이스트를 이용하여 태양열전지 방열부품, 메모리 방열부품 등을 개발 및 사업화를 추진하고 있다.

**- 고휘도 LED 조명시장**

고휘도 LED 조명은 서울반도체, 금호전기, 현대자동차 등이 대표적인 기업으로 현재 제품을 개발 중이거나 또는 상용화하였으나, 전반적으로 3W급의 LED를 이용하여 조명 장치를 출시하였으며, 이 또한 대부분의 Heatsink의 대형화로 컴팩트한 제품을 개발하는데 문제점이 있다. 지식경제부 에너지자원정책본부 에너지관리과의 동향분석 자료에 따르면 기존 조명의 대체가 가능한 수준의 LED 조명이 출시될 예정인 2011년부터 2015년까지 기존 조명의 약 30%(15조 4,064억원)를 고휘도 LED 조명으로 대체 계획하고 있다.

**- IC 및 통신부품 열관리 소재**

세계 최고 수준의 정보·전자기기 제조공정 기술에 비해 국내 IT 관련 소재산업은 극히 취약하며 체계적인 연구개발체제가 확립되지 못하였고, 여타 첨단소재산업과 마찬가지로 선진국의 기술 장벽이 매우 높다. 2000년대 국가적인 중요사업인 전자산업은 컴퓨터 및 이동통신 분야가 60% 이상인데, 이를 제품군으로 분류하면, 시스템산업, 컴포넌트산업, 소재산업으로 분류되고, 각각 \$993Bn, \$330Bn, \$60Bn이다. 소재산업은 80% 이상을 수입에 있으므로 열관리 소재에 대한 기술개발이 이루어지지 않으면 컴퓨터 및 통신기기 등 전자산업의 성장에 비례하여 소재의 해외 의존도가 증가할 것이다.

**2.1.2.2 고방열 CNT-고분자 소재**

**- 고방열 CNT-고분자 소재를 이용한 미세발포체**

국내시장규모는 2005년 기준으로 9,350억원/년이나, 국내 조선산업의 세계시장점유율 1위의 호황과 성장률 감안(한국조선공업협회 자료근거 : 2000~2005 약 10%/년) 및 가전시장의 성장률(한국가전산업협회 자료근거 : 약 3%/년)만 고려하면, 약 2.6%/년의 성장률로 추정할 수 있다(Table 3.).

Table 3. 단열재로 사용되는 경질폴리우레탄 폼의 국내시장규모(2005년)

(단위 : 억원)

구분	샌드위치판넬	스프레이폼	LNG선박 및 초저온 배관	냉장고	기타
시장규모	3,200	1,850	2,300	500	1,500

(출처 : 정밀화학공업진흥협회(2007), 한국가스공사 LNG선박 및 탱크수요 예측 자료집)

LNG 선박용 폴리우레탄 폼을 생산하는데 필요한 발포제는 HCFC계 발포제와 탄화수소계, HFC계, CO<sub>2</sub> 등이 있으며 HCFC계 단열재는 오존층 파괴물질로 선진국에서는 생산이 금지되어 있는 물질이다. 그러나 현재 사용되고 있는 LNG 선박용 단열재는 선진국에서는 생산 및 사용이 금지되어 있는 HCFC-141b를 이용하고 있다.

#### - 평판디스플레이 방열부품

국내 PDP 제조업은 삼성SDI, LG전자가 있으며 두 회사의 생산규모는 Fig. 6과 같다. PDP 모듈당 평균 소요 Heatsink는 18개로, 이를 적용한 PDP 방열부품의 시장규모는 2005년 기준으로 약 7천만불/년 정도로 추정된다. LCD 모듈의 경우 BLU의 방열대책이 필요하며, 특히 대형 TV제품과 산업용 모니터 분야에 적극적으로 요구가 되고 있다. TV용 산업용 모니터의 비율이 전체생산량과의 비율이 전 세계평균과 동일하다 가정하면 약 29%정도로 추정할 수 있으며, 2005년 기준으로 약 6.7천만불/년 정도로 추정된다.

#### - 태양전지 방열부품

고집광 태양전지에 있어서 방열은 태양전지의 광변화 효율과 수명이 직결됨으로 방열부품은 태양전지 모듈에 있어 필수부품이다. 국내 태양전지 수요는 전 세계 수요량의 0.1~0.2%에 불과(2005년 기준, 2~3MW)하지만, 향후 국내 태양전지 수요는 급속도로 증가할 전망이다. 정부는 2012년까지 총 10만 가구에 태양광 발전시설을 보급하는 것을 목표로 2001년부터 태양광주택 보급 사업을 추진하고 있다. 상업용 발전시설의 경우 현재로서는 전기 공급이 어려운 도시 지역을 중심으로 설치되어 있으나, 정부의 제도적 지원에 힘입어 대규모 상업용 발전소 설립이 본격 추진되고 있다. 고유가 행진이 지속되고 온실가스 감축이 지상과제로 떠오름에 따라 LG전자, 현대중공업, 삼성SDI 등 국내 대기업은 물론 한국철강, 주성엔지니어링 등 중견기업들도 태양전지 사업에 경쟁적으로 뛰어들고 있는 실정이다(Table 4).

Table 4. 국내 태양전지 관련기업 현황

제조품목	업체명	현황
셀	포퓰반도체	- 6MW/년 설비를 갖추고 있으나 생산량은 4~5MW/년 수준
	네스코솔라	- 생산설비는 갖추고 있으나 규모가 매우 작음
모듈	심포니에너지	- 20MW/년 설비를 갖추고 있으나 생산량은 10MW/년 수준
	경동솔라	- 10MW/년 설비를 갖추고 있으나 생산량은 5MW/년 수준
	현대중공업	- 10MW/년 설비를 갖추고 있으나, 2005년 중반기 이후에 양산에 돌입 2005년 생산량은 0.4MW수준
		- 2006년 900억 신규투자

(출처 : 전자부품연구원, 2006)

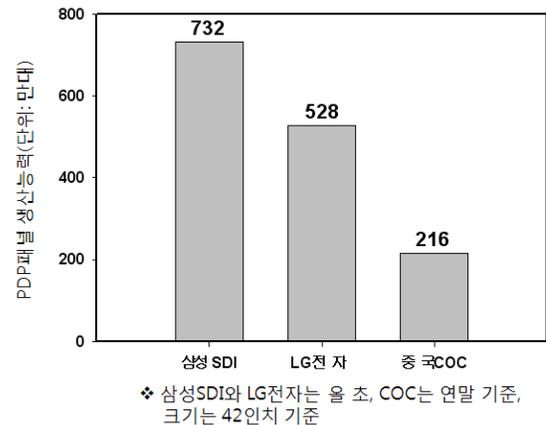


Fig. 6. 한국과 중국의 PDP 패널 생산능력.  
(출처 : 매일신문 2008.03.12)

## 2.2 기술동향

### 2.2.1 세계 기술 동향

#### - 고열전도성/고방열 소재

IT 관련 패키지소재 전문연구센터를 통한 산학연 협동연구체제(Georgia Institute of Technology, Packaging Research Center)구축 및 이를 통한 신속한 제품개발 대응 체계가 활용되고 있다. 특정 정보·전자용 부품 및 기기의 방열체계를 구축하기 위해서는 금속, 세라믹, 고분자 계열의 다양한 소재가 활용되며 각 소재의 상호적합성이 신뢰성 및 방열효율의 극대화에 필수적이므로 다양한 소재 전문가들로 구성된 국가주도의 연구 프로그램을 통한 관련 기반기술 및 소재기술의 개발이 시급하다. 열관리소재는 Dow Chemical, Johnson Matthey, Bakelite, Alcoa, Lord, Sumitomo, Shin-Etsu, Sunhayato 등 미국과 일본 기업이 독점적으로 공급하고 있으며, 다양한 제품공급을 공급하면서 후발국의 진출을 저지하고 있다. 산학연 합동연구체제가 확립되어 열관리 소재 road map에 대응하는 신속한 제품개발을 하고 있다. 금속분말을 활용한 고전도성 접착제 등을 통해 일부 회사에서 20W/m·K 수준의 제품을 선보이고 있으며, 일반적으로 고열전도성 고분자는 2W/m·K정도이다. 현재 고방열 제품은 주로 변성 실리콘 기반, 또는 실리콘 카바이드를 활용하여 복사특성을 최대한 발현할 수 있는 제품군으로 개발되고 있으며 고방열 제품군은 주로 접착제, 도료 등에 한정되어 있다.

#### - 발포소재를 이용한 단열재

폴리우레탄 폼을 생산하는데 필요한 발포제는 HCFC계 발포제와 탄화수소계, HFC계, CO<sub>2</sub> 등이 있으며 HCFC계 단열재는 오존층 파괴물질로 선진국에서는 생산이 금지되어 있는 물질이다. 그러나 현재 사용되고 있는 LNG 선박용 단열재는 선진국에서는 생산 및 사용이 금지되어 있는 HCFC-141b를 이용하고 있는데 이는 HCFC-141b이외의 발포제를 사용할 경우 단열성능이 저하되어 LNG 선박의 설계기준에 미치지 못하기 때문이다. ICI, BASF, Bayer, Dupont 등 거대 기업에서 경질 폴리우레탄 단열재에서 CFC와 물을 혼합 사용하거나 CFC와 이산화탄소를 혼합 사용하는 기술이 연구되고 있다. 경질 폴리우레탄 단열재에 있어서도 연질 폴리우레탄 제조에 이용되는 수발포 공정이나 cyclopentane, HFC 등의 새로운 발포제를 이용한 단열재 제조 공정에 관한 연구가 수행되고 있다. 새로운 계면활성제를 이용하여 제조된 우수한 단열성능의 미세 기포 단열재가 상업화되어 있다. 단열재에 carbon black을 filler로 사용하여 단열재 cell 내부에서 복사에 의한 열전달을 차단하는 연구 등이 진행 중에 있다. 일본의 경우, 환경 친화성 단열재에 대해서 판넬 양쪽에 진공을 걸어줌으로써 우수한 단열성능을 얻을 수 있는 진공판넬의 제조에 성공하였으나 제조 원가가 매우 많이 들기 때문에 기술 도입에 문제가 있다. CNT를 이용한 폴리우레탄에 대해서는 아직 만족할만한 성과를 나타낸 실험 결과는 보고되지 않고 있다.

#### - CNT의 기능화/분산 기술

CNT의 전기적 성질을 이용하는 방법의 일환으로 소재의 표면에 코팅하는 방법을 택할 경우 CNT와 수지가 잘 섞여서 CNT가 고루 분산되게 하여야 한다. 문제는 대개의 CNT가 거의 모든 binder와 상용성이 없어 CNT 끼리의 응집 현상이 뚜렷하게 나타난다는 것이다. 이를 극복하기 위해 CNT의 표면을 개질하여 matrix와의 상용성을 강화하고자 많은 기계적, 화학적 방법이 동원되었다. 이들 중에는 기계적으로 CNT 덩어리를 분쇄하여 좀 더 크기가 작은 tube로 개질하면 end point가 많이 matrix에 노출 될 것이고 따라서 상용성이 좋아질 것이라고 생각해서 매우 심한 마찰을 가하는 방법도 있고, 강산에 CNT를 넣어 교반하면 CNT 표면에 화학적으로 active site가 생기고 이 site에 기능기들이 붙어 matrix와의 가교역할을 할 것이라고 생각하고 오랜 시간동안 산(酸)에 넣어 교반하는 방법도 있었다. 하지만, 아직까지 이런 방법들 중에서 대규모로 적용 가능한 성공적인 방법은 도출되지 않았다.

시제품으로 출하된 CNT의 용도분석을 통해서 보면 대부분이 복합수지에 적용을 위해 연구 중임을 알 수 있다(Fig. 7). 점액형 고분자 나노복합체의 상용화에 대한 분석 자료는 다음과 같다(Table 5).

대만의 칭화대학에서는 전자파 차폐제를 구현하기 위하여 폴리우레탄에 CNT를 in-situ poly-

merization하는 연구를 수행하고 있다. 일본의 오사카 대학에서는 CNT 분산의 핵심공정인 cutting 공정을 산처리를 통하여 연구하고 있다. 일본의 Toray사에서는 SWCNT에 conjugated polymer를 코팅하여 분산성을 향상시키려는 시도를 하고 있다. Thin Wall CNT는 그래파이트 수가 10개 이내인 MWCNT로서, 직경이 약 10nm이하 Thin wall 수준으로 저밀도를 나타내면서 매우 강한 강성을 보유한 재료이다. 일본의 Aerospace Exploration Agency에서는 MWCNT와 고분자의 복합소재에서 고분자의 말단기 조절을 통한 분산성 향상을 시도하고 있다. Ethanol과 같은 용매에 CNT를 함침시킨 현탁액을 초음파 처리하여 분산하는 시도가 있다. HNO<sub>3</sub>, H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> 또는 이들의 혼합 용액에 CNT를 함침시켜 표면을 산화시킴으로서 분산시키는 방법이 산업적으로 또는 실험실에서 일반적인 방법으로 시도되고 있다. Hyperion catalysis사의 복합재의 경우 산처리 방법을 이용하여 고분자-CNT 복합 소재를 제조하여 판매하고 있다.

CNT의  $\pi$ -bond를 open 시킨 두 monomer의 고분자 반응에 CNT가 참여할 수 있도록 하는 중합충전법으로 소규모의 중합이 가능한 고분자에서 이용하고 있다. 현재 미국의 CNI가 Thin wall CNT 합성에 가장 앞서 있다. 미국의 Clemson 대학에서는 MWCNT를 기능화 한 후에 고분자 매트릭스에 분산을 시도하고 있다. 일본의 데이진에서는 Aromatic 축중합 고분자를 이용한 CNT 코팅기술을 개발하여 CNT 복합소재의 분산성을 향상시키고자 하는 연구를 수행하고 있다. 미국의 Cleveland 대학에서는 CNT에 금속을 코팅하여 고분자와의 복합소재 형성에 대한 연구를 수행하고 있다. 중국에서는 MWCNT를 폴리올레핀에 분산하려는 시도를 하고 있다(Table 6).

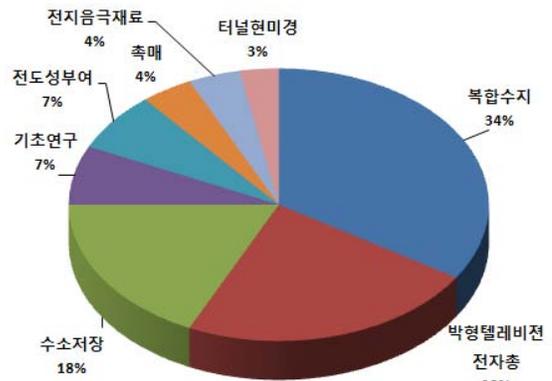


Fig. 7. 시제품으로 출하된 CNT의 용도. (출처 : AIST, 2002)

Table 5. 점액형 고분자 나노 복합체의 상업화 현황

회사	구조	제조방법	상업화연도	용도전개
Arakawa Chemical, 미국	Epoxy, PU 등 / silica hybrids	Sol-Gel	2000	Adhesive, painting, 전자재료
Nippon Paint, 일본	Nano paste (Au, Ag, Pt)	직접분산	2000	-
Hanse Chemie, 독일	Epoxy/silica	Sol-Gel	2001	-

Table 6. 선진국의 대표적 CNT의 기능화 기술

연구그룹	기능화 방법	용도	응용분야
IBM(Bethune), Liu	산처리와 열처리	연료전지용 수소저장소재	수소저장, 연료전지
Smalley, Saito, Chang, Zhou	산처리공정(카르복실화) MWCNT 이용, 전도성에폭시복합체	FED/lamp	표시소자
Lieber	산처리를 통한 카르복실화	AFM/STM 탐침	탐침
Hongjie Dai	산처리를 통한 카르복실화	단백질 고정화	바이오/의약
Zhou	비닐모노머를 CNT 표면에 이식	CNT 복합체	복합재료
Riggs	폴리머가 이식된 CNT를 합성	복합 박막	광학재료
Viswanathan	스틸렌 중합반응	CNT-polymer 복합재료	복합재료

### 2.2.2 국내 기술 동향

#### - 고열전도성/고방열 소재

국내의 경우 소수의 제품화(외산 대체) 연구가 산발적으로 이루어지고 있을 뿐, ShinEtsu, National Starch 등 연매출 10억 달러 이상의 선진사와 같이 다양한 제품 스펙트럼을 제공하지는 못하고 있는데 이는 소재 중심의 연구개발 프로그램 및 중점연구그룹의 부재에 기인한다. 또한 대학 및 벤처 기업에 의한 원소재 합성 등 기초 연구개발 능력이 크게 향상되었음에도 불구하고 생산-판매-유저들 간의 네트워크화 부재 내지는 value chain 형성 실패로 대부분 경쟁력 있는 제품개발로는 이어지지 못하고 있다. 체계적인 열관련 기반 인프라 구축이 미흡하여 개발된 소재를 활용하여 부품화할 수 있는 체계가 없으며, 이는 새롭게 개발된 소재에 대해서도 적용가능성을 어렵게 하는 요인이 된다. 일창프리시전과 휘닉스퍼디아가 알루미늄 페이스트를 이용한 고열전도성 냉각솔루션에 대해서 메모리 방열판과 태양열전지 방열부품으로 개발하기 위해 공동연구를 진행하고 있다. 클라스타 인스트루먼트에서 CNT를 이용한 알루미늄 heat sink용 방열도료를 개발하여 일부 상용화하였으며, 추가적인 제품에 대한 개발을 진행하고 있으며, 접착제 등 2차원 형태 및 준 3차원에서 고방열, 고열전도성을 구현할 수 있는 CNT 복합체를 연구하고 있다(Fig. 8).

#### - 발포소재를 이용한 단열재

국내에서는 일부 대기업과 국가연구기관을 중심으로 대체 발포제와 나노클레이를 이용한 단열성능 향상 연구가 수행되고 있다. 주로 냉장고용 단열재에 있어서 물 혹은 cyclopentane을 이용함으로써 CFC 및 HCFC를 대체하는 발포기술이 연구되고 있다. 또한 발포용 CFC 대체물질 사용 실태 조사 평가와 용도개발의 연구가 최근 수행된 바 있다. 나노 기술은 현재 polyethylene, polypropylene, nylon 등과 같은 범용성 고분자와 clay의 nano-composite에 대해서는 많은 연구가 이루어지고 있으나 폴리우레탄에 대해서는 순수 clay, 혹은 유기화 처리를 한 clay를 polyol에 도입하여 단순히 오랜 시간 동안 혼합해 준 뒤 isocyanate와 반응시켜 폴리우레탄을 제조한 경우만 있을 뿐 그 연구가 미미한 실정이다. 뿐만 아니라 clay를 polyol에 도입하여 폴리우레탄을 제조한 연구에서도 폴리우레탄의 물성을 살펴보면 나노화가 거의 이루어지지 못하여 단순한 무기물을 첨가시킨 복합재료에 불과한 경우가 대부분이다. 또한 CNT를 이용한 단열재 개발연구는 외국에서와 마찬가지로 전혀 연구되고 있지 않다.

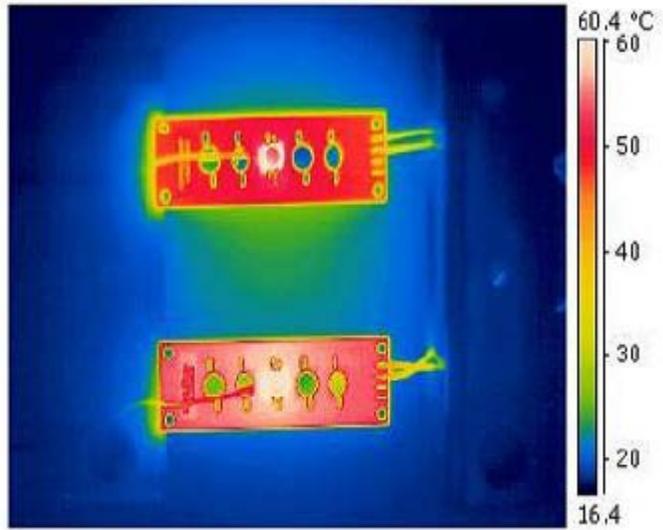


Fig. 8. 클라스타 인스트루먼트에서 개발한 CNT를 이용한 방열도료 적용한 Power LED MPCB 방열특성.

## 3. 결 론

고열전도성 CNT-고분자 복합재 기술은 향후 NT-IT-ET 융합 분야에서 신기술, 신상품이 출현할 가능성이 매우 높기 때문에 CNT-고분자 복합재 관련 상용화 기술을 선진국에 비해 조속히 확보할 경우 NT-IT 융합기술 분야의 선두국가로 부상하는데 큰 기여를 할 것으로 판단되며, 특히, CNT-고분자 복합재는 NT-IT 융합기술 분야만이 아니라 NT-ET, NT-BT 융합기술 분야에서도 핵심 소재로 응용될 것으로 예상된다. 특히 국가 차원에서는 CNT 분야가 전 세계적으로도 선두권에 있는 기술이므로 향후 산업 주도권을 확보할 수 있고 국가의 지속적인 성장도 가능하다는 관점에서 보자면, 세계 산업의 흐름에 맞춰 산업적 파급효과가 크며 이미 일부 제품이 상용화가 진행되고 있을 만큼 산업의 도입기에 와 있는 CNT 소재를 바탕으로 한 CNT-고분자 복합재료의 개발을 현시점에서 적

극적으로 활성화하여 선진국과 대등한 기술력을 확보해야 할 것이다.

CNT-고분자 복합재는 나노기술의 고도화에 따라 향후 신규 제품에서 요구하는 물성을 부합시킬 수 있는 유일한 신소재로서 다양한 신규 제품구현이 CNT-고분자 복합재 제조기술 기반 위에서 실현될 수 있으며 향후 5~10년 이내에 기술적 파급효과 크고 산업기술 경쟁력을 획기적으로 강화할 수 있는 핵심 원천기술을 확보할 수 있을 것이며, 융합분야의 범위가 상당히 포괄적이어서 고품위 플라스틱 복합소재, 차세대 flexible 디스플레이, 각종 백라이트용 투명전극, 터치패널, LED, 유기 태양전지, wearable PC 및 넓은 의미의 섬유용 디지털 페이퍼, 고품위 전자파차폐/흡수제, 면상발열체, 군수 및 우주 항공산업, 초고강도/초경량의 전도성 섬유, 대전방지, 차세대 intelligent 스마트 섬유 등의 신규 제품에서 요구하는 물성을 부합시킬 수 있는 유일한 신소재로서 응용시장이 확대될 것이다.

## 참고문헌

1. S. Ijima, Helical Microtubules of Graphitic Carbon, *Nature*, **354**, 56-58(1991).
2. H. D. Wagner, Nanotube-Polymer Adhesion: A Mechanism Approach, *Chem. Phys. Lett.*, **361**, PAGE, 2002.
3. D. Heywood, "Textile Finishing", Society of Dyers and Colourists, UK, 2003.
4. Y. M. Chang and J. H. Chung, A Study on the Electrostatic Characteristics of the Materials Treated by Antistatic Additives, *J. KIIS*, **10**(1), PAGE, 1995.
5. D. J. Kim, L. J. Zhu, C. S. han, J. H. Kim, and S. H. Baik, Raman Characterization of Thermal Conduction in Transparent Carbon Nanotube Films, *Langmuir*, **27**, 14532-14538(2011).
6. Y. Li, X. Shi, and J. Hao, Electrochemical Behavior of Glassy Carbon Electrodes Modified by Multi-walled Carbon Nanotube/Surfactant Films in a Buffer Solution and an Ionic Liquid, *Carbon*, **44**, 2664-2670(2006).
7. J. P. Lu, Elastic Properties of Single and Multilayered Nanotubes, *J. Phys. Chem. Solids*, **58**, 1649-1652(1997).
8. K. Lau, The Revolutionary Creation of New Advanced Materials: Carbon Nanotubes Composites, *Composites, Part B* **33**, 263-277(2002).
9. 지식경제부, "플렉서블 투명전도성 CNT-polymer 박막 기술개발", 연구기획보고서, 2007.
10. 지식경제부, "고전도성 CNT-고분자 복합재 개발", 연구기획보고서, 2008.
11. KISTI, "탄소나노튜브 분산기술", 2005.
12. 박종규, 강상규, "고분자 나노복합재 기술개발 동향", KISTI, 2003.
13. <http://endomoribu.shinshu-u.ac.jp/research/cnt/composit.html>.

**김 종 원** (현) 한국염색기술연구소 연구개발본부 첨단소재연구팀 선임연구원



- 주요 경력 -

- 2003 영남대학교 섬유공학과(학사)
- 2005 영남대학교 섬유공학과(석사)
- 2010 영남대학교 섬유공학과(박사수료)
- 2003~2005 영남대학교 지역협력연구센터 연구원
- 현재 한국염색기술연구소 첨단소재연구팀 선임연구원

Tel. : 053-350-3912 / Fax. : 053-350-3736 / E-mail : kjwfiber@dyetec.or.kr

**송 병 갑** (현) 한국염색기술연구소 연구개발본부 수석연구원



- 주요 경력 -

- 1980 성균관대학교 섬유공학과(학사)
- 1983 성균관대학교 섬유공학과(석사)
- 1985~1994 독일 아헨공과대학 화학과(Dipl. Chem.)
- 1994~1997 독일 아헨공과대학 화학과(Dr. rer. nat)
- 1984~1984 한국섬유기술연구소 연구원
- 1986~1988, 1993~1997 German Wool Research Institute 연구원
- 1998~1998 한국생산기술연구원 선임연구원
- 현재 한국염색기술연구소 연구개발본부 수석연구원

Tel. : 053-350-3870 / Fax. : 053-350-3736 / E-mail : song@dyetec.or.kr

**김 미 경** (현) 한국염색기술연구소 첨단소재연구팀 팀장



- 주요 경력 -

- 2002 경북대학교 일반대학원 염색공학과 석사
- 2008 경북대학교 일반대학원 섬유시스템공학과 박사수료
- 현재 한국염색기술연구소 첨단소재연구팀 팀장

Tel. : 053-350-3910 / Fax. : 053-350-3736 / E-mail : kmk@dyetec.or.kr

**염 정 현** (현) 경북대학교 기능물질공학과 부교수



- 주요 경력 -

- 1997 경북대학교 염색공학과(학사)
- 2000 경북대학교 염색공학과(석사)
- 2004 경북대학교 염색공학과(박사)
- 2004~2005 Georgia Institute of Technology(Post-doc.)
- 현재 경북대학교 기능물질공학과 부교수

Tel. : 053-950-5739 / Fax. : 053-950-6744 / E-mail : jhyeum@knu.ac.kr

**김 해 식** (현) 울산과학기술대학교 친환경에너지공학부 연구원



- 주요 경력 -

- 1998 경북대학교 화학과(학사)
- 2002 경북대학교 화학과(석박사통합수료)
- 2004~2011 ㈜클라스타인스트루먼트 팀장
- 현재 울산과학기술대학교 친환경에너지공학부 연구원

Tel. : 052-217-2906 / Fax. : 052-217-2311 / E-mail : hskim@unist.ac.kr