

# 탄소나노튜브/바인더 일액형 용액을 이용한 투명전도성 필름 제조 기술

한중탁 선임연구원, 정희진 선임연구원, 이건웅 그룹장 (한국전기연구원 나노카본소재연구그룹)

## 1. 서론

탄소나노튜브 (Carbon Nanotubes, CNTs)는 1991년 일본 이지마 박사에 의해 발견된 이후 나노기술의 빌딩블럭으로 주목받으며 물리적, 화학적 특성 규명 및 다양한 응용 분야에 관한 연구가 수행되고 있다. CNT는 완벽한 구조와 기계적, 물리적, 전기적 및 열적 특성을 갖고 있으며, 전기전자, 정보통신, 에너지, 바이오, 우주항공, 스포츠, 국방 등 폭넓은 분야에서 응용가능성이 제시되고 있다. CNT는 튜브 형상을 이루는 벽의 수에 따라 단일벽 (Single-walled, SWNT), 이중벽 (Double-walled, DWNT), 다중벽 (Multi-walled, MWNT)으로 구분할 수 있으며 튜브 축에 대해 감긴 형태 (Chirality)에 따라 금속성과 반도체성으로 구분할 수 있다. CNT는 아크방전법, 레이저증발법, 화학기상증착법 등 여러 방법에 의해 합성되어지는데, 합성 기술의 향상과 다양한 CNT 응용 제품의 상업화의 도입으로 가격이 급속도로 낮아지고 있다. CNT 종류 및 직경에 따른 2006년 기준 단가를 표 1에 정리하였다.

SWNT의 경우 직경이 1 nm 수준에 불과한 반면 길이는 수  $\mu\text{m}$ 에서 수 mm에 이르는 구조이고 SWNT 사이의 큰 Van Der Waals 인력 ( $\sim 10^3 \sim 10^6$  eV)에 의한 응집현상이 발생하여 합성 시 단독으로 존재하지 못하고 수십-수백 nm의 번들 형상으로 존재한다. MWNT의 경우 상대적으로 큰 직경으로 인해 직진성이 증가하여 응집현상보다는 고분자 사슬

표 1. 탄소나노튜브의 전형적인 직경 및 2006년 기준 Selling Price.

CNTs	Diameter (nm)	Cost (\$/gram) <sup>a</sup>
SWNTs	2	100~1000
MWNTs	5~100	1~20
DWNTs	2~5	200~500
VGCNFs	50~200	0.2

<sup>a</sup> price depends on purity of CNTs

의 엉킴 현상과 유사한 특성을 보여준다. DWNT의 경우 직경이 작은 일부는 SWNT와 유사한 특성을, 직경이 큰 일부는 MWNT와 유사한 특성을 보여준다. 이러한 탄소나노튜브를 전도성 구현 소재로 응용하기 위해서는 번들형상 또는 엉킴 현상 등의 응집특성을 반드시 해결해야 한다. 나노튜브의 응집현상은 물리, 화학적으로 다루기에 매우 어려운 상황이며 나노튜브 응용에 있어 큰 걸림돌이 되고 있다. 따라서 나노튜브 응용에 있어 분산기술 [1-17]은 반드시 극복해야 할 요소기술이라 할 수 있다.

탄소나노튜브의 주요 응용분야는 전도성 구현소재로서 전자파 차폐, 정전기 분산, 평판 및 플렉시블 디스플레이, 태양전지 등을 대표적으로 들 수 있으며 각각의 응용분야마다 요구되는 엄격한 수준의 전기전도도를 구현해야 한다. 특히 터치패널, OLED, OTFT 등의 디스플레이에서는 투과도와 전도도를 동시에 구현해야하므로 CNT 분산기술이 필수항목이라 할 수 있다. 아울러, 기질과의 접착력과 전도성

코팅막의 물리화학적 특성을 향상하기 위해서는 CNT의 분산성을 저해하지 않으면서 바인더 물질이 포함된 일액형 코팅액을 제조하는 기술과 적절한 바인더의 선정이 매우 중요하다. 기존 디스플레이에 표준물질로 사용되고 있는 ITO (Indium Tin Oxide)는 외부 Stress에 의해 쉽게 파괴되며, 증착방식에 따른 고비용, 인듐의 매장량 제한 등의 단점이 있어 향후 대체소재의 출현이 요구되고 있다. CNT의 분산 기술과 일액형 코팅액 제조 기술 그리고 나노코팅 및 패터닝 기술이 개발된다면 ITO를 능가하는 투명 전극소재가 될 것으로 예측하고 있다. 이상과 같이 최근 투명전도성필름 또는 투명전극 소재로서 각광 받고 있는 탄소나노튜브의 분산기술과 이를 이용한 투명필름 제조 기술의 동향을 살펴보고자 한다.

## 2. 국내의 기술개발 동향

일반적으로 투명전도성 필름은 플라즈마 디스플레이 패널 (PDP), 액정 디스플레이(LCD) 소자, 발광 다이오드소자 (LED), 유기전자발광소자 (OLED), 터치패널 또는 태양전지 등에 사용된다. 이러한 투명 전도성 필름은 높은 전도성 (예를 들면,  $1 \times 10^3 \Omega / \text{sq}$  이하의 면저항)과 가시광선 영역에서 높은 투과율 (80 % 이상)을 가지기 때문에 태양전지, LCD, PDP, 그 이외의 각종 수광소자와 발광소자의 전극으로 이용되는 것 이외에 자동차 창유리나 건축물의 창유리 등에 쓰이는 대전 방지막, 전자파 차폐막 등의 투명전자파 차폐체 및 열선 반사막, 냉동 쇼케이스 등의 투명 발열체로 사용되고 있다.

투명전도성 필름으로는 주석이 도핑된 산화 인듐 막 (Indium Tin Oxide, ITO)이 낮은 저항의 막을 쉽게 얻을 수 있기 때문에 많이 이용되고 있다. ITO의 경우 제반 물성이 우수하고 현재까지 공정 투입의 경험이 많은 장점을 가지고 있지만, 산화인듐 ( $\text{In}_2\text{O}_3$ )은 아연 (Zn) 광산 등에서 부산물로 생산되기 때문에 공급이 불안정한 문제점이 있다. 또한, ITO 막은 유연성이 없기 때문에 폴리머기질 등의 플렉시블한 재질에는 사용하지 못하는 단점이 있으며, 고온, 고압 환경 하에서 제조가 가능하므로 생산단가

가 높아지는 문제점이 있다.

향후 디스플레이의 발전방향에 따라 대면적 코팅, 유연기판 도입, 낮은 공정단가, 단순한 프린팅 공정 등이 요구되고 있어 기존 ITO 소재를 부분적 또는 전체적으로 대체하기 위한 다양한 시도가 이루어지고 있다. 이를 위해 기존 TCO (Transparent Conductive Oxide) 재료의 용액공정 방식, 나노메탈 분산 방식, 전도성 고분자 그리고 CNT 분산 등의 기술이 경쟁하고 있다. 이들 중 CNT는 전기저항이  $10^4 \Omega \text{cm}$ 로 금속에 버금가는 전기전도도를 가지고 있으며, 표면적이 벌크 재료에 비해 1000배 이상 높고, 외경에 비해 길이가 수천 배 정도로 길기 때문에 전도성 구현에 있어 이상적인 재료이며, 표면기능화를 통해 기질에의 결합력을 향상시킬 수 있는 장점이 있다. 또한 이론적 퍼콜레이션 농도가 0.04%에 불과하여 광학적 성질을 유지시키면서 전도도를 구현할 수 있는 이상적인 재료로 평가되고 있으며, 플렉시블한 기질에의 사용이 가능하여 그 용도가 무한할 것으로 기대되고 있다. 다만, 전술한 바와 같이 CNT 소재를 이용하여 투명 전도성 필름을 구현하기 위해서는 SWNT, DWNT 그리고 직경이 작은 MWNT로 사용이 제한되며 이때 수반되는 분산의 어려움을 극복해야 한다.

투명전극의 가장 이상적인 소재인 SWNT의 전기적 특성은 합성 단계에서 결정되는 구조로부터 영향을 받고 있는데, Chirality에 따라 금속성과 반도체성 튜브로 구분되어 전도성의 차이가 변화한다. 따라서 투명전극을 형성하기 위해 가장 바람직한 CNT 전극의 형태는 산화에 의한 결합 없이 불순물이 제거된 고순도, 구조적 완결성을 갖는 SWNT에서 금속성 튜브만을 선택적으로 분리하여 이를 매트릭스에 나노스케일로 고르게 분산하는 것이다. 앞서 기술한 바와 같이 고성능의 CNT 투명전극을 개발하기 위해서는 정제, 분리, 분산 등 탄소나노튜브 제어 기술을 개발하는 것이 매우 중요하다.

CNT 기반 투명전도성 필름 또는 투명전극 제조 기술은 분산기법과 Loading방법 또는 코팅방법 등에 따라 다음 그림 1과 같이 분류할 수 있으며 다음 절에서 대표적인 제조 기법을 분류하여 기술하고자 한다.

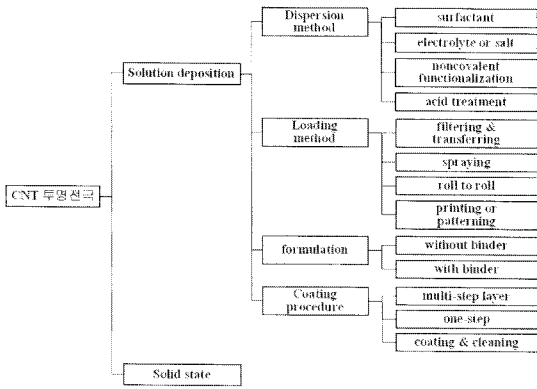


그림 1. CNT 기반 투명전극 제조 기술의 분류.

### 2.1 계면활성제를 이용한 SWNT 분산액의 필터링/전이 방식

Z. Wu [18] 등은 정제된 SWNT를 계면활성제를 이용하여 수용액에 분산하고 진공 필터장치를 이용하여 필터막 위에 탄소나노튜브 필름을 형성한 후 이를 기판 위에 전이시키는 방식으로 IR 영역에서 투명 (90% 이상)하며 고전도성 (6700 S/cm)인 얇은 SWNT 필름을 제조할 수 있는 방법을 발표하였다 (그림 2). 상기 필터링 및 기판으로의 전이 방법은 작

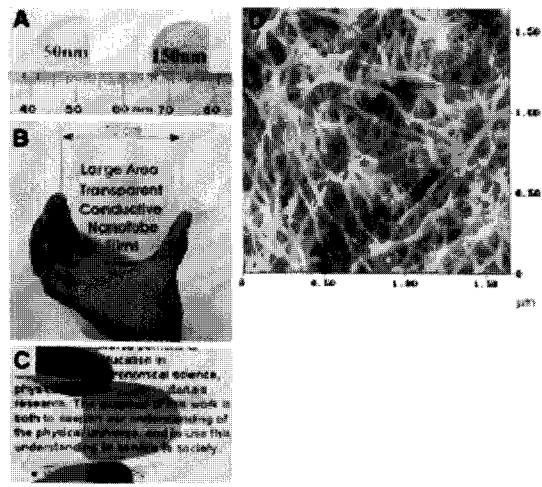


그림 2. 필터링 방식에 의해 제조된 투명 SWNT 필름.

은 면적의 투명전극 제조방법으로 유용하게 쓰일 수 있는 반면 대면적에 적용하기에는 어려운 점, 전이 단계에서 필름의 균일도를 유지하기 어려운 점, 또한 최종적으로 전이된 CNT 필름의 계면활성제를 제거해야 하는 단점을 가지고 있다.

G. Grüner [19] 그룹은 Z. Wu의 방법을 보완하여 필터막 위에 형성된 탄소나노튜브 필름을 PDMS몰드를 이용하여 유리 또는 고분자 기질에 전이하는 Stamping 방식을 고안하여 투명전도성 탄소나노튜브 패턴형성에 대해 발표하였다 (그림 3).

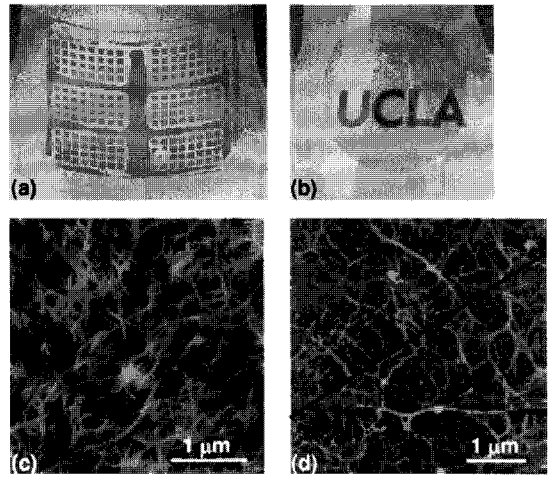


그림 3. PET 필름 위에 패턴된 CNT 필름의 사진.

Zhou [20] 그룹에서는 G. Grüner 그룹에서 고안한 PDMS Stamping 방식에 의해 SWNT 필름을 고분자 기질에 형성시키고 이를 Hole-injection Electrode로 사용하여 OLED를 구동시켰다. 이 연구에서 Zhou는 Arc-discharge Nanotube가 HiPco Nanotube 보다 더 균일하고 전도성이 좋은 나노튜브 네트워크를 형성하여 Lifetime이 더 긴 OLED를 구동할 수 있다고 주장하고 있다 (그림 4, 5).

B. B. Parekh [21] 등은 Z. Wu의 방법을 이용하여 필터링된 탄소나노튜브 필름을 기질에 전이시킨 후 질산과 Thionyl Chloride의 후처리 공정을 통해 투과율 80%에 면저항 150 Ω/sq인 투명전극을 개발하였다 (그림 6).

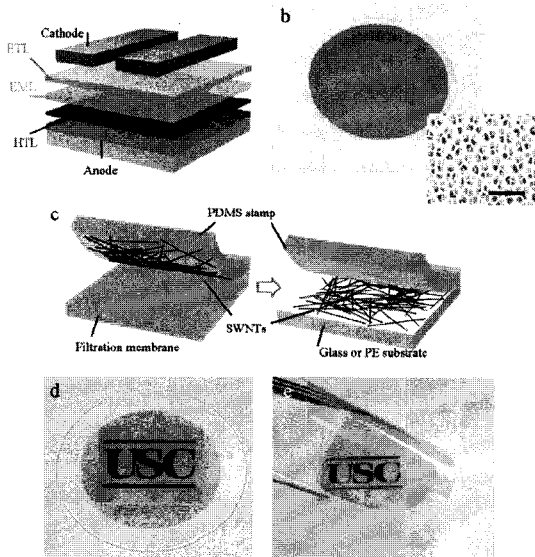


그림 4. (a) OLED의 구조, (b) 사용된 alumina filter, (c) PDMS를 이용한 SWNT의 전이방법, (d) 유리 기판에 형성된 40nm 두께의 SWNT 필름, (d) 고분자기판에 형성된 SWNT 필름.

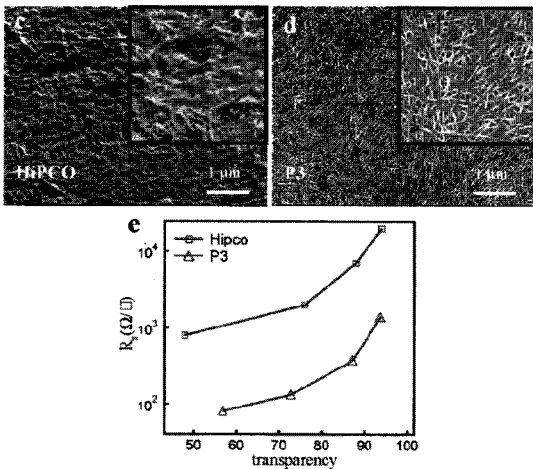


그림 5. HiPCO와 P3 (Arc-discharge) SWNT의 표면 모폴로지와 광-전기적 특성 비교.

## 2.2 계면활성제를 이용한 탄소나노튜브 분산액의 스프레이 코팅 방식

필터링 방식에 의해 전도성 필름을 제조하는 방법은 필름 두께를 제어하기는 용이하지만 필터 크기

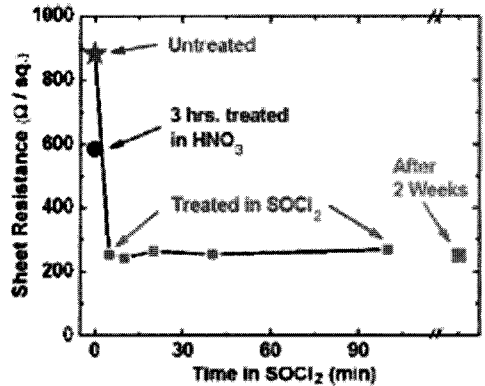


그림 6. 질산과 SOCl<sub>2</sub>의 처리시간에 따른 CNT 필름의 면저항 감소.

의 제한에 의해 향후 대면적에 적용하기에는 부적절하며 재연성 측면에서 약점을 보이고 있다. 보다 일반적인 대면적 균일코팅 방법으로 스프레이 코팅이나 프린팅 방식 등이 고려되고 있다.

미국의 Eikos社는 Nanoshield™ 방식을 이용하여 SWNT 0.04 wt%를 매트릭스에 도입하고 이를 용액 방식으로 코팅하여 투과율 90%에 면저항 200 Ω/sq인 Inviscon™이라는 투명 전극 필름을 개발하였으며 현재 상업적으로 가장 앞선 기술로 평가 받고 있다. Eikos社의 방식은 접착층으로써 고분자막을 우선적으로 기질표면에 코팅 후 탄소나노튜브 용액을 코팅하는 방식을 도입하여 다중구조를 형성시키는 방식을 채택하였으나 다중코팅방식은 낮은 면저항 구현 측면에서 유리한 반면 SWNT와 기판 사이의 계면결합력은 검증이 필요한 것으로 판단된다 [22, 23]. 그림 7은 2006년에 발표된 Eikos社의 용도별 광-전기적 특성을 보여주고 있다.

또한, S. Roth [25] 등은 계면활성제 SDS (Sodium Dodecyl Sulfate)에 분산된 탄소나노튜브를 기판 위에 분사하여 스프레이 코팅방식에 의해 탄소나노튜브 네트워크를 형성하고 SDS를 제거한 후 전기화학적으로 폴리아닐린, 폴리 피롤 등의 전도성 고분자를 기판 상에서 중합함으로써 투과율 80%에 면저항 700 Ω/sq인 투명전극을 개발하였다.

스프레이 방식은 대면적에 균일한 필름을 형성시

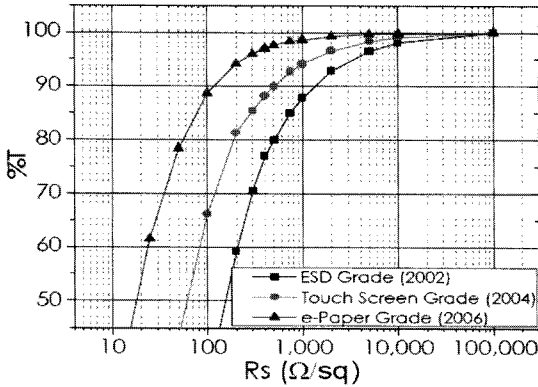


그림 7. Inviscon™ 투명전극 필름의 광-전기적 특성 (From ref 24).

킬 수 있지만 필름 내 CNT의 밀도를 감소시켜 면저항을 증가시키는 단점을 지니고 있다. 이러한 밀도 증가 문제를 해결하기 위해 최근 성균관대 이영희 교수팀 [26]은 단일벽 탄소나노튜브를 계면활성제에 의해 분산시킨 수용액을 PET 기질에 스프레이 코팅한 후 산용액에 침지하여 계면활성제의 제거 및 CNT 필름의 밀도를 증가시키는 방법으로 투명전극을 개발하였다(그림 8).

상기와 같이 계면활성제를 이용하여 분산용액을 제조하고 이를 스프레이 등의 방법으로 코팅하는 방식은 첫째, 기판 위에 올려진 CNT의 Densification, 둘째, 잔류 계면활성제의 제거, 셋째, 기판과 CNT의 접착력 부여 측면에서 검토가 필요한 상황이다.

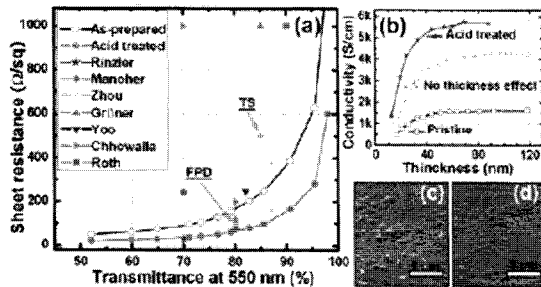


그림 8. 질산 처리 전후 SWNT 코팅막의 (a) 투과도 대비 면저항 값, (b) 두께에 따른 전도도, (c), (d) 표면 모폴로지.

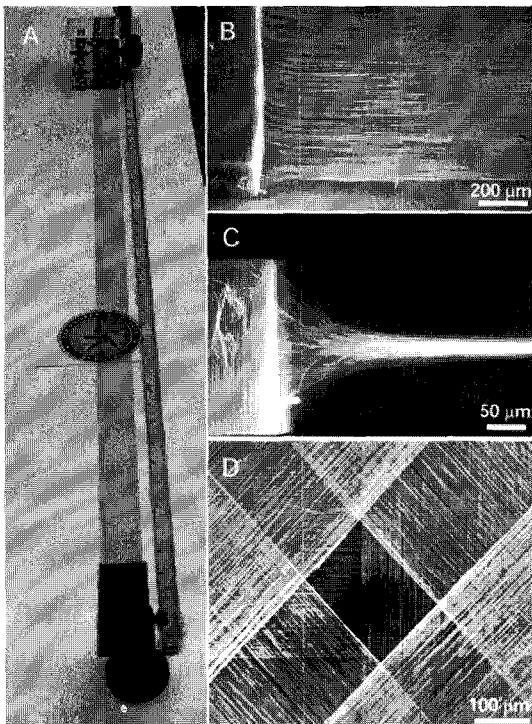
### 2.3 Solid State 방식에 의한 투명시트 제조

University of Texan at Dallas의 R.H. Baughman 그룹 [27]에서는 실리콘기판 위에 성장시킨 고체상태의 MWNT Forest로부터 나노튜브 안 (Yarn)을 형성하는 연구를 수행해 왔으며 최근 이를 Sheet형으로 제조하여 투명전도성 필름으로 활용할 수 있음을 발표하였다. 방향성을 갖는 일방향 시트를 서로 다른 방향으로 겹치는 방법으로 전도성의 방향성을 제거하였으며, 응용분야로써 Hole-injection Electrode로 사용하여 그림 9에서 보여지는 바와 같이 유기발광소자의 특성을 구현하였다.

### 2.4 기능화된 탄소나노튜브와 바인더의 혼합액을 이용한 일액형 코팅

지금까지의 투명전도성 필름 코팅방식은 여러 공정 즉, CNT의 분산액을 필터링하여 기질에 전이하거나 스프레이 코팅 후 계면활성제를 제거하고 후처리를 하는 등의 다양한 공정을 거치게 된다. 상업적인 활용도를 높이기 위해서는 필터링 방식보다는 대형면적에 코팅이 가능한 스프레이 또는 Roll to Roll 코팅방식이 바람직하며 여러 단계의 코팅공정을 거치는 방식을 지양해야 할 것이다. 스프레이 코팅을 이용하는 방식에 있어서도 코팅막의 내구성을 위해서는 바인더 개념이 도입되어야 하는데 기존에는 바인더를 함유하지 않거나, 접착층을 미리 기질 위에 코팅하고 그 위에 CNT용액을 코팅하는 방식을 사용하고 있다.

이에 대한 대안으로써 한국전기연구원의 나노카본소재 연구그룹에서는 CNT 투명전극의 물리화학적 안정성과 계면접착력 확보를 위해 바인더 물질을 CNT 분산액과 혼합한 일액형 CNT/바인더 혼합 코팅액을 제조하여 유리나 고분자 필름 등에 코팅하는 기술을 개발하였다. 그림 10에서 보여지는 바와 같이 바인더가 혼합될 경우 임계바인더 함량 ( $X_c$ )이 존재하게 되며  $X_c$  이상의 바인더를 첨가할 경우 CNT가 바인더 내부에 묻혀 면저항이 급격히 증가하게 된다. 따라서 적정량의 바인더를 함유할 수 있도록 바인더의 함량을 조절하여 혼합 코팅액을 제조하고 기질에 코팅하여 우수한 광-전기적 특성과 내구성을 지니는 투명전극 필름을 제조할 수 있게 된다 [28].



(a) MWNT Forest로부터 시트의 형성과 이의 조합, (b) 제조된 MWNT 시트를 hole-Injection Electrode로 사용하여 구동하는 유기발광소자의 사진.

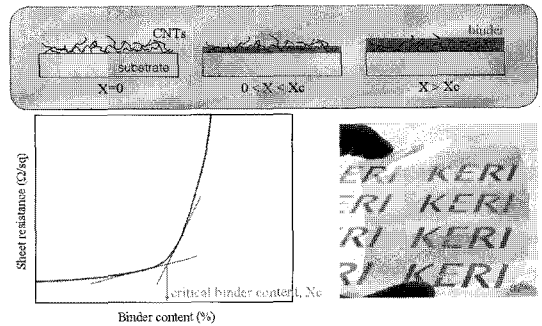


그림 10. CNT와 바인더 혼합액의 코팅 시 바인더 함량에 따른 광-전기적 특성에 대한 개념도.

이러한 코팅기술은 기업에 이전하여 터치패널에 사용되는 ITO전극을 대체하기 위한 상용화를 준비 중에 있다.

이외에도 국내에서 발표된 연구결과를 보면 PS-b-P4VP같은 블록공중합체를 분산제로 사용하고 P4VP를 금속이온으로 도핑하여 면저항을 저하시키는 연구도 진행되었다. 그러나 제조된 필름의 면저항은 터치패널 등에 적용될 만큼의 수준에 미치지 못하고 있다 [29].

그리고 최근에 한국전기연구원에서는 탄소나노튜브/바인더 일액형 코팅액을 이용해 투명하면서 전도도를 지니고 초발수 특성을 지니는 코팅기술을 개발하였다 [30]. 이러한 투명 초발수 전도성 코팅 기술은 기존의 대전방지, 전자파 차폐 등의 기능성에 고투과도와 자가세정 능력을 부여한 것으로 각종 광소자 및 기능성 유리 등의 코팅소재로 활용할 수 있으며, 고투과도와 자가세정 능력 그리고 발열히터 특성이 동시에 요구되는 자동차의 열선(熱線) 유리, 스마트 윈도우, 대전방지 코팅, 전자파 차폐 코팅 등에도 다각적으로 활용이 가능하다.

### 3. CNT 기반 투명전도성 필름의 향후 전망

CNT 기반 투명전극 기술은 장기적으로 플렉시블



디스플레이 기술동향과 밀접한 관련이 있다. E-paper 기술을 시작으로 2010년경부터 본격적으로 시장을 주도하게 될 플렉시블 디스플레이기술의 요소기술로써 CNT 투명전극이 사용될 것으로 판단된다. 최근 발표된 플렉시블 디스플레이 기술 및 시장 전망 자료에 따르면 유럽의 Polymer Vision이나 Plastic Logic과 같은 파이오니어의 성격을 가진 회사들이 E-book의 상용화 단계를 추진 중에 있고, 대규모 양산과 시장창출 능력이 있는 한국의 삼성전자와 LG Philips LCD를 비롯하여 일본의 많은 디스플레이 회사들이 다양한 기술기반의 방식을 가지고 이 시장영역에 뛰어들 준비를 하고 있다. 또한, 2011년부터는 3인치급 이하의 LCD와 OLED기반의 플렉시블 디스플레이를 채용한 High-end의 모바일 폰이 등장하고, 2013년에는 4인치에서 9인치 급의 OLED기반의 모바일폰 이외의 다양한 어플리케이션에도 플렉시블 디스플레이가 채용될 것으로 전망한다. 기본적으로 기존의 TFT-LCD와 동등한 수준의 품질을 구현한 플렉시블 디스플레이가 출현한다면, 전체 어플리케이션을 대체하는 속도는 매우 빠르게 진전 될 것으로 확신한다. 2016년부터는 LCD, OLED기반의 10인치 이상급의 대형 디스플레이 시장, 즉 기존의 노트북, TV, 모니터 등도 기존과는 전혀 다른 디자인과 컨셉을 담은 신제품들이 개발되고 상품화될 것으로 전망된다. 기존 어플리케이션의 대체시장분야에서는 단기시장 (5년 이내)에서는 모바일 폰이 그 대체이고, 장기시장 (9년 이후)에서는 10인치 이상의 대형 디스플레이 시장에서 TV, 노트북, 모니터 등이 대체되는 플렉시블 디스플레이가 적용될 것으로 본다 (그림 11).

플렉시블 디스플레이 시장은 2010년 약 2.8억 불에서, 2015년 약 59억 불, 2017년 약 122억 불의 시장을 형성할 것으로 전망된다. 플렉시블 시장은 장기적인 관점에서는 기존의 다양한 디스플레이가 궁극적으로 가장 효율적인 1,2개의 디스플레이 기반 기술로 단순화 되고 통합되는 과정을 거칠 것으로 예상된다. 또한 지금까지의 개념과는 완전히 차별화되고 다른 개념의 노트북, 모니터, TV 혹은 이러한 기능들을 통합한 새로운 개념의 디자인과 기능을 가진 디스플레이 어플리케이션이 등장할 것으로 보인다.

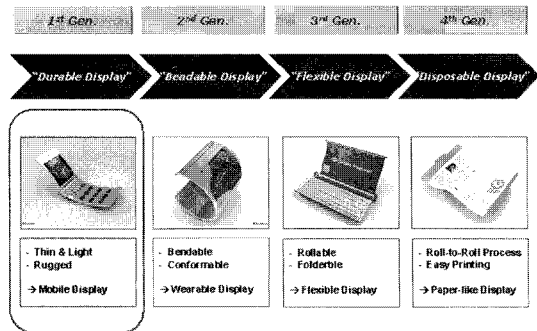


그림 11. 플렉시블 디스플레이의 Road Map (From ref. 31).

상기와 같은 차세대 디스플레이 외에 단기적으로 CNT 투명전극의 유망한 응용 분야로 저항막식 터치패널을 들 수 있다. 터치패널에는 저항막식, 정전용량식, 광학식, 초음파식 등의 종류가 있으며, 각각 장·단점을 가지고 있다. 저항막식은 PDA, OA, FA 기기 분야에서 가장 일반적인 방식이며, 구조는 ITO막을 부여한 플라스틱 필름의 상부전극과 하부전극 사이에 스페이서를 개입시켜 샌드위치장이 되어 있다. 현재 베이스 필름은 PET 수지가 중심이며 그 외에 PES, PC, PAR 등이 사용되고 있다. 그림 12는 EMI, FPD, 터치 패널의 투과도-면저항 요구치와

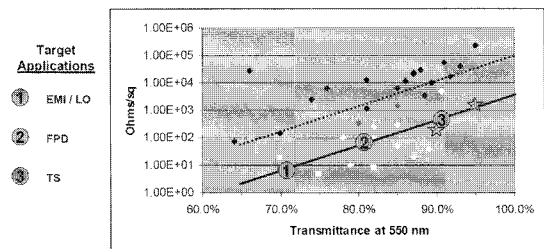


그림 12. 응용 분야별 투과도-면저항 요구치 및 기술개발 동향 (상단 마름모 및 별 : Eikos社, 하단 마름모 : ITO).

Eikos社의 수준을 보여주고 있다. 현재 국내에서는 한국전기연구원의 나노카본소재연구그룹에서 개발한 CNT투명전도성 코팅기술이 기업에 이전되어 터치패널용 ITO필름을 대체하는 상용화를 눈앞에 두고 있다. 향후 다양한 분산기법의 활용을 통해 CNT투명전극의 투과도-면저항 특성이 보다 획기적으로 개선할 경우 디스플레이 전극소재로의 응용 등 그 파급효과는 매우 크다 할 수 있다.

또한 CNT투명전극은 투명 TFT에 응용가능한데, 현재까지 보고된 주요 결과를 살펴보면, SWNT를 Transfer Printing법을 이용하여 Quartz기판에 증착하고 Epoxy절연체, Ti/Au를 gate 전극으로 사용하여 Mobility가 대략  $1000 \text{ cm}^2/\text{V} \cdot \text{S}$ 이고 On/off 비가  $10^5$ 인 투명 TFT를 개발하였고 [32] 미국의 Brewer Science Inc.에서는 2008년 4월에 Polymer Film위에 고순도 SWNT를 증착하여 Mobility가 현재까지 알려진 값 중에서 최고인  $48000 \text{ cm}^2/\text{V} \cdot \text{S}$ 를 갖는 플렉시블 투명 TFT를 발표하였다. 미국과 더불어 일본의 Toray 및 NEC에서도 CNT를 이용한 투명 TFT 연구에 박차를 가하고 있다.

## 참고 문헌

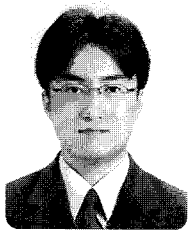
- [1] J. L. Bahr, E. T. Michelson, M. J. Bronikowski, R. E. Smally, J. M. Tour, *Chem. Comm.*, 193(2001).
- [2] Y. J. Marcus, *Solution Chem.*, 20, 929(1991).
- [3] M. J. Kamlet, R. W. Taft, *J. Am. Chem. Soc.*, 98, 377(1976).
- [4] K. D. Ausman, R. Piner, O. Lourie, R. S. Ruoff, *J. Phys. Chem. B*, 104, 8911(2000).
- [5] G.-W. Lee, Y.-B. Park, and S. Kumar, *Structure and properties of carbon nanotube-based films and fibers*, in *Functional Nanomaterials*, ed. by K. E. Geckeler, E. Rosenberg, American Scientific Publishers, New York, 2005.
- [6] K. Yurekli, C. A. Mitchell, R. Krishnamoorti, *J. Am. Chem. Soc.*, 126, 9902(2004).
- [7] L. Jiang, L. Gao, J. Sun, *J. of Colloid and Interface Science*, 260, 89(2003).
- [8] R. S. Cohen, E. N. Roth, E. Baskaran, Y. L. Kalisman, L. Szleifer, R. Y. Rozen, *J. Am. Chem. Soc.*, 126, 14850(2004).
- [9] G.-W. Lee, S. Kumar, *J. Phys. Chem. B*, 109, 17128(2005).
- [10] S. Niyogi, M. A. Hamon, H. Hu, B. Zhao, P. Bhowmik, R. Sen, M. E. Itkis, R. C. Haddon, *Acc. Chem. Res.*, 35, 1105(2002).
- [11] T. Fukushima, A. Kosaka, Y. Ishimura, T. Yamamoto, T. Takigawa, N. Ishii, T. Aida, *Science*, 300, 2072(2003).
- [12] A. Pénicaud, P. Poulin, A. Derré, E. Anglaret, P. Petit, *J. Am. Chem. Soc.*, 127, 8(2005).
- [13] X. Zhang, T. Liu, T. V. Sreekumar, S. Kumar, X. Hu, K. Smith, *Polymer*, 45, 8801(2004).
- [14] R. J. Chen, Y. Zhang, D. Wang, H. Dai, *J. Am. Chem. Soc.*, 123, 3838(2001).
- [15] D.-Q. Yang, B. Hennequin, E. Sacher, *Chem. Mater.*, 18, 5033(2006).
- [16] J. Chen, H. Liu, W. A. Weimer, M. D. Halls, D. H. Waldeck, G. C. Walker, *J. Am. Chem. Soc.*, 124, 9034(2002).
- [17] [www.lot-oriel.com/pdf/all/zyvcnt\\_driedfilm.pdf](http://www.lot-oriel.com/pdf/all/zyvcnt_driedfilm.pdf), Zyvex Dried Film Soluble Functionalized Carbon Nanotubes, (2004).
- [18] Z. Wu, Z. Chen, X. Du, J. M. Logan, J. Sippel, M. Nikolou, K. Kamaras, J. R. Reynolds, D. B. Tanner, A. F. Hebard, A. G. Rinzler, *Science*, 305, 1273(2004).
- [19] Y. Zhou, L. Hu, G. Grüner, *Appl. Phys. Lett.*, 88, 123109(2006).
- [20] D. Zhang, K. Ryu, X. Liu, E. Polikarpov, J. Ly, M. E. Tompson, C. Zhou, *Nano Lett.*, 6, 1880(2006).
- [21] B. B. Parekh, G. Fanchini, G. Eda, M. Chhowalla, *Appl. Phys. Lett.*, 90, 12913(2007).
- [22] 대한민국 특허 10-2003-7012636(2003).
- [23] 대한민국 특허 10-2005-7014111(2005).
- [24] C. Weeks, *touch screen Veritas et Visus*, 1, 34(2006).
- [25] N. Ferrer-Anglada, M. Kaempgen, V. Skakalova, U. D. Weglikowska, S. Roth, *Diamond and Related Materials*, 13, 256(2004).
- [26] H. Z. Geng, K. K. Kim, K. P. So, Y. S. Lee, Y. Chang, Y. H. Lee, *J. Am. Chem. Soc.*, 129, 7758(2007).
- [27] M. Zhang, S. Fang, A. A. Zakhidov, S. B. Lee, A. E. Aliev, C. D. Williams, K. R. Atkinson, R. H. Baughman, *Science*, 309, 1215(2005).
- [28] 대한민국 특허 10-2007-0048708(2007).
- [29] J. Sung, P. S. Jo, H. Shin, J. Huh, B. G. Min, D. H.





- Kim, C. Park, Adv. Mater. 20, 1505 (2008)
- [30] J. T. Han, S. Y. Kim, J. S. Woo, G. W. Lee, Adv. Mater. 20, 3724 (2008)
- [31] 플렉시블 디스플레이 기술 및 시장전망 (2007-2017), Displaybank Report, 2007.
- [32] S. J. Kang, C. Kocabas, T. Ozel, M. Shim, N. Pimparkar, M. A. Alam, S. V. Rotkin, J. A. Rogers, Nat. Nanotech. 2, 230(2007).

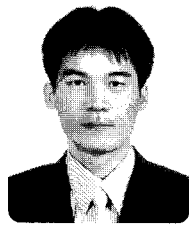
저|자|약|력



성 명 : 한중탁

- ◆ 학 력
  - 2000년 단국대 고분자공학과 공학사
  - 2002년 포스텍 대학원 화학공학과 공학석사
  - 2005년 포스텍 대학원 화학공학과 공학박사

- ◆ 경 력
  - 2005년 - 2006년 Post-Doc, National Institute of Standard and Technology (NIST)
  - 2006년 - 현재 한국전기연구원 나노카본소재연구 그룹 선임연구원



성 명 : 정희진

- ◆ 학 력
  - 2001년 전북대 물리학과 이학사
  - 2003년 성균관대 대학원 물성물리학과 이학석사
  - 2006년 성균관대 대학원 물성물리학과 이학박사

- ◆ 경 력
  - 2006년 - 2008년 프랑스 에콜폴리테크닉 박사 후 연구원
  - 2008년 - 현재 한국전기연구원 나노카본소재연구 그룹 선임연구원



성 명 : 이건웅

- ◆ 학 력
  - 1992년 전남대 고분자공학과 공학사
  - 1994년 서울대 대학원 화학공학과 공학석사
  - 1999년 서울대 대학원 화학공학과 공학박사

- ◆ 경 력
  - 2000년 - 2003년 한국과학기술연구원 연구원
  - 2003년 - 2005년 Research Scientist, Georgia Institute of Technology
  - 2005년 - 현재 한국전기연구원 나노카본소재연구 그룹 그룹장

