

차세대 플렉시블 투명 전극 동향

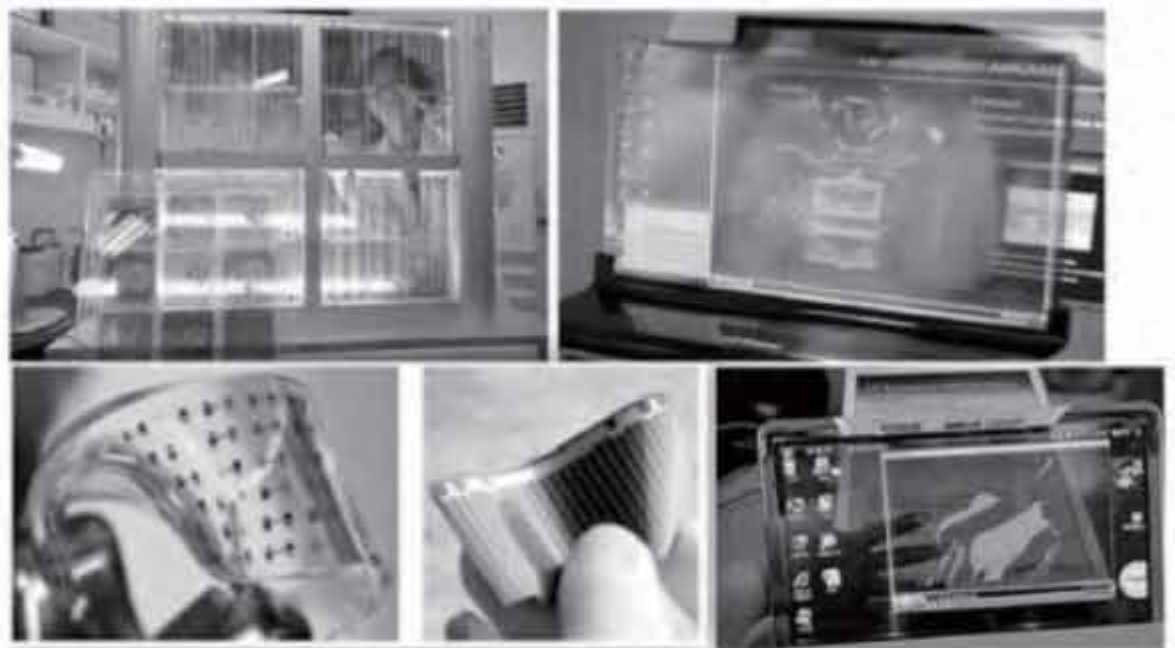
고려대학교 전기전자전파공학부
최현주, 박태현, 정신우, 함대진, 주병권 교수

21세기 유비쿼터스 사회에 들어서면서 급속도로 발전해 가는 정보 기술 및 디스플레이 기술로 인하여 언제 어디서나 정보를 접할 수 있는 휴대가 간편하고 이동성을 가진 모바일 정보전자 기기의 필요성이 증대되고 있다. 꿈의 디스플레이라 할 수 있는 플렉시블 디스플레이 시대를 실현하기 위해서는 유연하고 가벼우며 휴대가 간편한 플렉시블 정보전자 기기가 필수적이다(그림 1 참조).

1. 플렉시블 투명 전극의 개요

플렉시블 디스플레이, 트랜지스터, 터치패널, 태양전지로 대표되는 플렉시블 정보전자 기기가 만들어지기 위해서는 기판 재료의 개발뿐만 아니라 광투과도 및 전기전도성이 우수하고 유연한 전극 재료의 개발이 이루어져야 한다.

일반적으로 투명 전극은 비저항이 $1 \times 10^{-3} \Omega/\text{cm}$ 이하, 면저항이 $10 \Omega/\text{square}$ 이하로 전기전도성이 우수하고 가시광선 영역에서의 투과율이 80% 이상이라는 두 가지 성질을 만족시키는 박막을 의미한다.



(출처 : <http://www.kosen21.org/index.jsp>)

〈그림 1〉 플렉시블 정보전자 기기



〈그림 2〉 플렉시블 정보전자 기기 실현을 위한 투명 전극의 조건

현재 LCD, PDP 등 유리 기판을 사용하는 평판디스플레이에는 Indium Tin Oxide (ITO) 투명 전극이 사용되고 있다. 이러한 ITO 투명 전극을 만들기 위해서는 진공 증착, 에칭 등 고가의 장비 및 부식성 화학약품을 사용하여야 하므로 경제성이 낮을 뿐만 아니라 indium의 고갈, 환경오염 등 부수적인 문제점이 따른다. 또한 플라스틱 기판 위에 ITO 투명 전극을 사용할 경우, 기판과의 열팽창계수의 차이에 의한 변형으로 면저항이 증가되며, 외부 충격에 의해 쉽게 끊어지는 문제점이 발생한다.

이를 해결하기 위해 낮은 면저항과 높은 투과율, 우수한 전도도를 가진 전도성 고분자나 탄소나노튜브, 그래핀 등의 차세대 디스플레이용 투명 전극 소재의 개발이 활발히 이루어지고 있다. 특히 초경량, 저전력, 저가격, 휴대성의 조건을 충족시키는 플렉시블 투명 전극 기술을 통해 차세대 디스플레이의 저가격화 및 대면적화를 실현할 수 있다면, 이는 미래를 이끄는 전자 정보 산업의 핵심 원동력이 될 것이다(〈그림 2〉 참조).

2. 플렉시블 투명 전극의 특성 비교

ITO 전극을 대체하기 위해 전도성 고분자, 탄소나노튜브, 그래핀 등 다양한 플렉시블 투명 전극 재료에 대한 개발 및 연구가 디스플레이 관련 핵심 기술을 선점하고 있는

국가의 연구소나 대기업을 중심으로 활발히 진행되고 있다. 하지만 아직까지 상용 디스플레이 제품에 적용된 예는 전 세계적으로 존재하지 않는다. 여러 가지 고려사항을 만족시켜야만 플라스틱 기판 상에 투명 전극을 구성하여 공통전극으로 상용화할 수 있기 때문에 앞으로 해결해야 할 문제가 많이 남아있는 실정이다.

먼저, 소자를 휘거나 접었을 때에도 기계적으로 안정해야 하며, 플라스틱 기판과의 열팽창계수 매칭을 통해 변형이 잘 일어나지 않아야 한다. 또한 기판과의 우수한 접착력 및 계면 특성, 후속 공정상의 안정성을 위한 내화학성, 신뢰도를 위한 내구성 등의 조건을 갖추어야만 실질적으로 상용화에 성공할 수 있다. 유연성, 접착성, 열팽창 특성, 인쇄 가능성 등을 고려하였을 때, 플렉시블 디스플레이용 전극 재료로는 플라스틱 기판과 물성의 조화를 가장 잘 이루는 유기물 재료를 이용하는 것이 바람직하며, 현재 가장 많이 연구되고 있는 것은 전도성 고분자 및 탄소나노튜브, 그래핀이다.

각각의 특성을 비교해 보면(〈표 1〉 참조), 첫번째로 전도성 고분자의 경우, 투명 전도 산화물에 비해 매우 우수한 유연성, 접착력, 열팽창계수를 가지며, 용액 공정이 가능하다는 장점을 가지고 있다. 현재 ITO를 대체할 투명 도전막으로 PEDOT:PSS가 대표적인 물질로 인정받고 있다. 하지만 대부분의 전도성 고분자는 용해도가 낮고 에너지 밴드갭이 3eV 이하로 반도체적 성질을 나타내고 있어 400 nm 이상 가시광선 파장대의 빛을 흡수하기 때문에 근본적으로 색을 띠고 있는 경우가 있고, 광투과도를 높이기 위해 박막의 두께를 얇게 하면 면저항이 높아진다는 단점을 가진다.

그러나 최근에 전도성이 높은 나노 물질들을 입자화하여

〈표 1〉 플렉시블 투명 전극의 재료 및 특성 비교

	전도성고분자	CNT 필름	그래핀	투명 전도 산화물
				
투명성	○	○	○	○
유연성	○	○	○	X
전도성	△	△	○	○
인쇄가능성	○	○	○	X
가격	○	△	X	△
환경친화성	△	○	○	○

○: 매우우수, ○: 우수, △: 보통, X: 미흡

(출처 : <http://www.chempolicy.or.kr>)

용매 내에 분산시킴으로써 광투과도의 손실 없이 면저항의 특성을 향상시키는 기술이 개발되어 관심을 끌고 있다.

또 다른 투명 전극인 탄소나노튜브(CNT) 필름은 불순물이 많이 포함되어 있는 단일벽 탄소나노튜브를 정제하고 전기적 결함을 제거하여 매트릭스 내에 나노스케일로 분산시킴으로써 제조할 수 있는 높은 전도도의 투명 전극이다. 전도도를 더욱 향상시키면 유기박막 트랜지스터의 소스, 드레인 전극으로 이용할 수 있으며, 잉크젯 등 프린팅 방식으로 패터닝이 가능하게 되면 배선 재료로도 활용할 수 있을 것이다.

탄소나노튜브 투명 전극의 경우 아직은 투과도 대비 전도도가 그다지 높지 않고 패터닝 방식도 잉크젯 등의 프린팅 방식보다는 에칭 방식이 주로 연구되고 있는 상황이다. 탄소나노튜브 혹은 복합재 전극의 전도 특성을 향상시키기 위해서는 무엇보다도 탄소나노튜브 자체의 전도 특성을 높이는 것이 중요한데, 이를 위해서 탄소나노튜브를 도핑하여 전자 구조에 변화를 주거나 전체 탄소나노튜브의 약 33%를 차지하고 있는 금속성 탄소나노튜브만을 분리해내

는 방법이 연구되고 있다.

이러한 금속성 탄소나노튜브의 효과적인 분리와 나노스케일에서의 분산 기술을 확립함으로써 고투명성, 고전도성 투명 전극의 개발을 실현할 수 있을 것이다. 다만, 탄소나노튜브 필름을 이용한 플렉시블 투명 전극의 면저항을 낮추기 위해서는 두껍게 쌓아야 하고, 투과도를 높이기 위해서는 얇게 쌓아야 하기 때문에 최적의 두께 조절이 필요하다.

현재 양산되는 탄소나노튜브 필름 전극은 약 200~500 Ω/square 수준의 면저항과 80%정도의 투과도를 나타내고 있다. 탄소나노튜브 투명 전극은 높은 면저항을 나타내고 있지만 인쇄 공정이나 분산 공정을 통해 대면적의 필름 제조가 가능하고 나노튜브 특성상 유연성이 매우 우수하기 때문에 플렉시블 투명 전극의 재료로 가능성이 매우 높다. 현재 많은 연구 그룹에서 Touch screen, FPD에 적용 가능한 CNT-polymer화합 투명 전도막의 제작에 성공했다고 보고하고 있다.

그래핀은 탄소나노튜브와 탄소 동소체 중의 하나로서 탄소 원자들이 2차원적인 평면으로 배열된 구조이며, 높은 투과도 및 전도성, 유연성과 기계적인 내구성 등을 토대로 최근 새롭게 각광을 받고 있는 나노 소재이다. 그래핀은 2004년에 영국 Geim 연구진이 테이프를 이용하여 흑연에서 그래핀을 분리하는데 성공하면서 많은 연구가 진행되기 시작했다. 현재 사용 중인 대표적 투명 전극 ITO는 늘리거나 구부리면 깨지거나 쉽게 전기전도성을 잃어버린다는 단점을 갖고 있다.

반면, 그래핀 투명 전극은 ITO에 비해 유연성이 매우 우수하며, 열 전도도는 500배 정도 크고, 파괴되기 전까지의 변형률은 20배 이상, 전자 이동도는 200배 이상에 이르기 때문에 차세대 투명 전극 재료로서 잠재력이 매우 높다. 그래핀은 변형이 된 상태에서도 전도도의 변화가 굉장히 적고, 광 투과도도 우수하며, 플라스틱 기판 위에 형성될 수

있어 유연하고 투명한 전자 소자의 전극 재료로서 적합한 특징을 지니고 있다. 또한 그래핀은 유사한 특성을 지닌 탄소나노튜브의 기술적 한계를 넘어선 것으로도 주목 받는다. 탄소나노튜브는 금속성과 반도체성이 섞여 있고 이를 분리하기가 어려우며 반도체에 사용될 경우 금속성 때문에 소자 성능이 떨어지는 부작용도 발생한다. 하지만 실리콘

웨이퍼와 같이 2차원 필름 형태로 된 그래핀은 후공정을 통해 금속성과 반도체성을 분리할 수 있다.

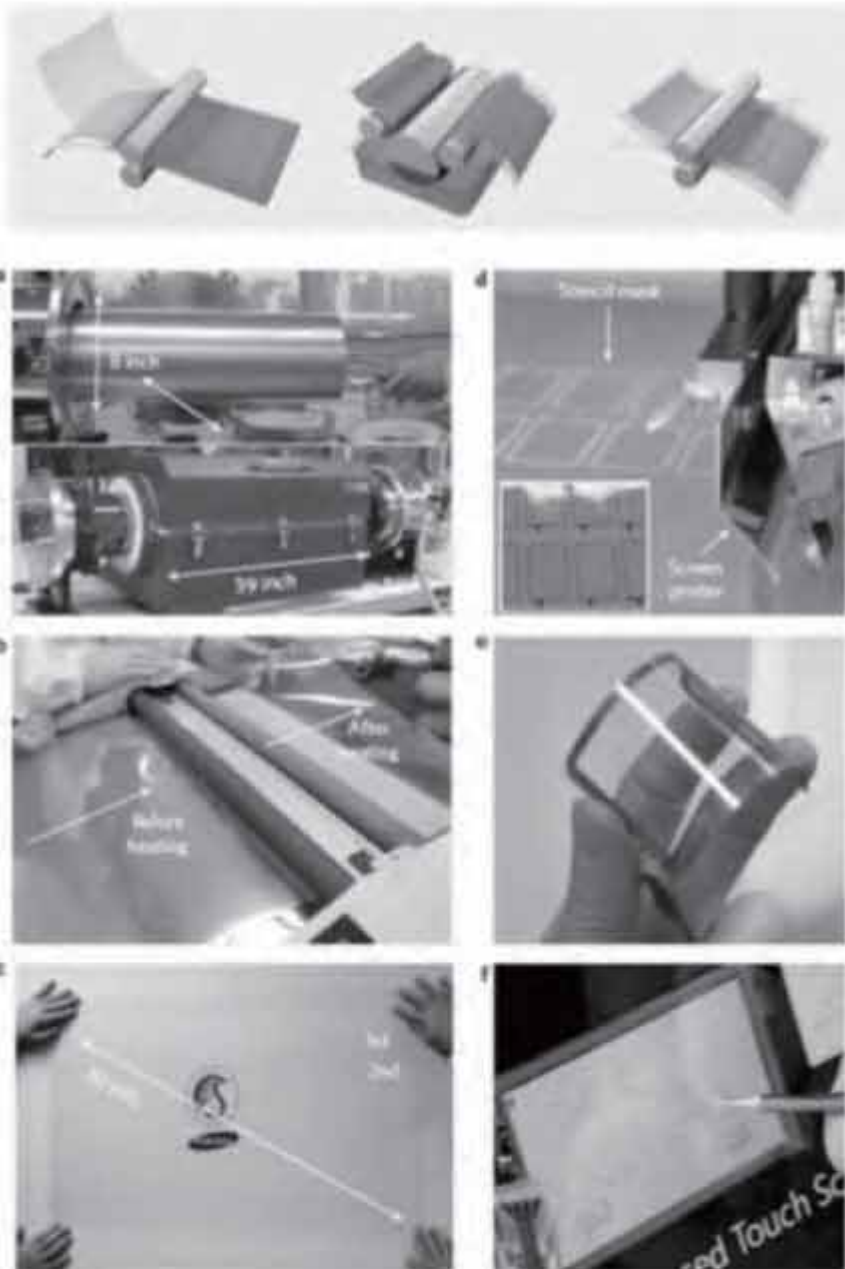
반도체 소자에 응용하기 위해 그래핀 연구를 활발히 수행하고 있다. 한편, 투명전극으로의 그래핀 응용연구분야에서는 독일Max Plank 연구소가 최근 염료 감응형, 유기 태양전지의 투명전극에 적용한 연구결과를 보고한바 있다. 영국의 Geim 연구진이 소개한 접착 테이프 법은 구조적으로 우수하고 큰 결정을 제공한다는 장점으로 널리 사용되고 있으나 최종 수율이 극히 낮아 상용화에 어렵다는 평가를 받고 있다. 이러한 문제를 해결하기 위해 성균관대학교에서는 Roll-to-Roll 공정을 이용한 대면적 그래핀 제조 기술을 보고하였다(그림 3) 참조).

이렇게 우수한 특성을 바탕으로 미국 IBM연구소, 콜롬비아 대학, 영국 맨체스터 대학에서는

그래핀이 요즘 주목받고 있는 것은 전 세계 학계와 기업들이 상용화에 박차를 가하고 있기 때문이다. 대면적 합성 기술을 제시한 연구소나 기업들이 최근에는 그래핀을 활용한 나노전력발전소자도 개발하였다. 나노전력발전소자는 외부의 전력 공급 없이도 휘거나 누르거나 진동을 주면 스스로 전력을 발생시키는 소자를 말한다. 휘거나 구부러도 그 특성에 변함이 없는 그래핀이 적용된 나노전력발전소자는 휘어지는 터치 센서, 입을 수 있는 인공 피부, 두루마리 디스플레이를 장착한 모바일 기기, 착용 가능한 휴대폰 등을 위한 전력장치 등에 적용될 것으로 기대된다.

3. 투명 전극의 응용 분야 및 플렉시블 디스플레이 시장 동향

투명 전극은 투과도 대비 전도도 특성에 따라 그 응용 분야가 달라지게 되는데, 투명 용도로 쓰이기 위해서는 투과율이 80% 이상이어야 한다. 면저항이 $104 \Omega/\text{square}$ 이상인 경우에는 반도체 및 디스플레이 생산 시 사용되는 각종



(출처 : Nature Nanotechnology, 2010년)

〈그림 3〉 Roll-to-Roll 공정을 이용한 대면적 그래핀의 제조 공정과 모양(상), 은(Ag) paste의 스크린 프린팅과 스크린 패넬에의 응용(하)

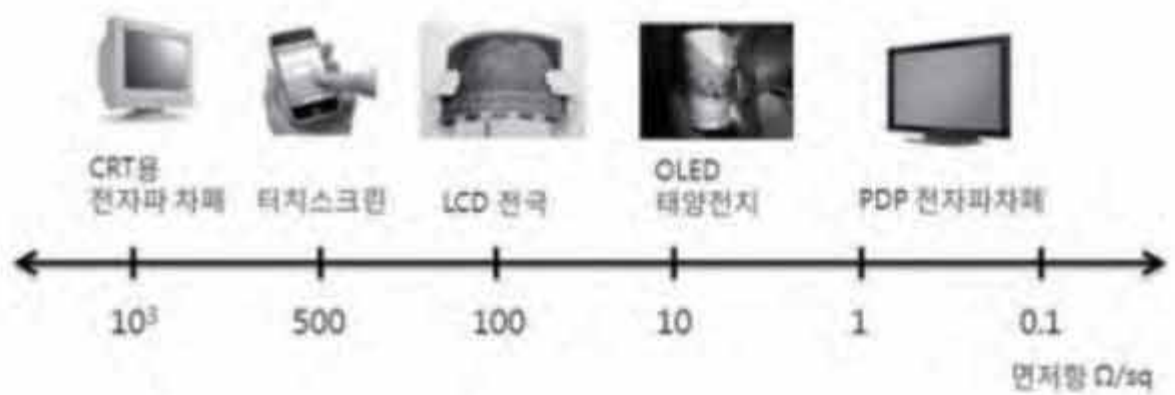
정전기 발생 억제 제품에 적용될 수 있으며, 103 Ω /square인 경우에는 CRT용 전자파 차폐, 500 Ω /square인 경우에는 터치스크린에 사용 가능하다. 투명하고 면저항이 102 Ω /square이하이면 액정이나 토너를 이용한 플렉시블 디스플레이뿐만 아니라 기존의 평판 디스플레이인 LCD에도 적용할 수 있기 때문에 저가의 디스플레이를 생산하는 것이 가능해진다.

투명 전극이 10 Ω /square이하의 면저항을 갖는다면 차세대 꿈의 디스플레이로 주목 받고 있는 OLED의 ITO 투명 전극을 대신하여 사용될 수 있으며, 태양전지에도 응용 가능하다. 또한 면저항이 1 Ω /square이하이면, PDP 전자파 차폐 필름으로서 각 부품 간의 전자파 간섭으로 인한 기기오작동을 방지하고 사람에게 미치는 전자파를 차단하는 역할을 할 수 있다. 휴대폰, PDP, LCD TV, 네비게이션 등의 전기·전자 제품에 적용되는 것을 비롯하여, 최근에는 전자파에 의한 정밀 기기의 오작동 피해가 우려되는 의료 산업, 군사 시설 및 일반 건축물에서도 사용된다(그림 4 참조).

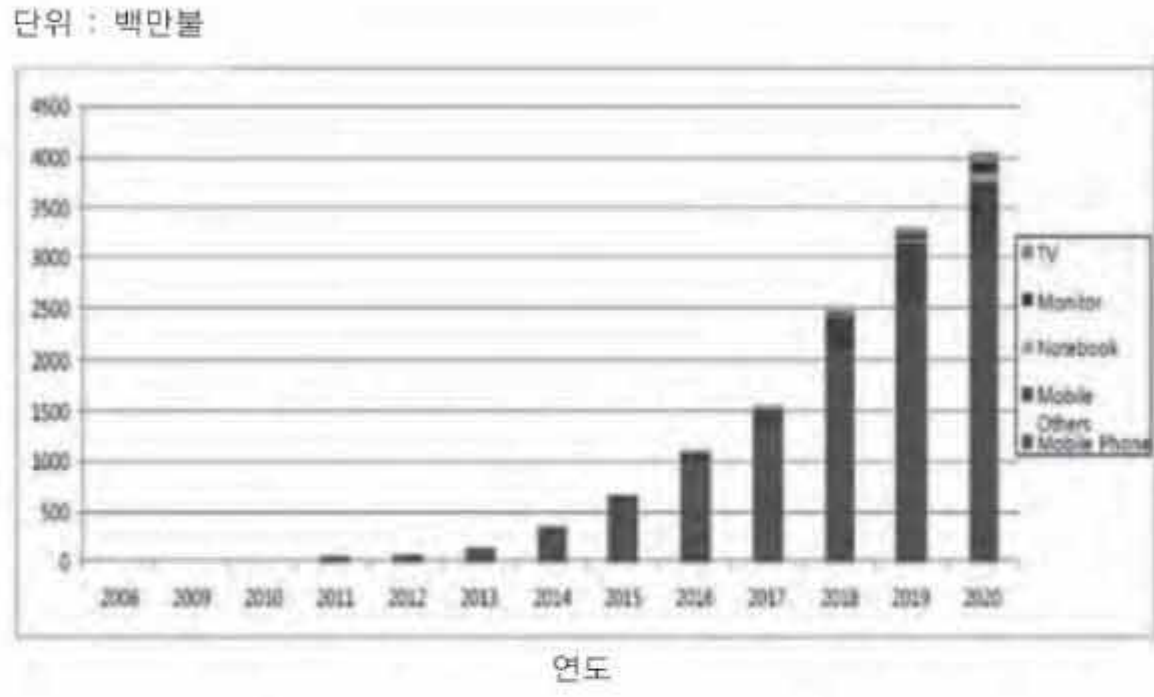
위에서 나타낸 투명 전극의 응용 분야 전망을 알아보기 위해서는 최근 플렉시블 디스플레이의 동향을 살펴볼 필요가 있다. 현재 플렉시블 디스플레이의 시장에 뛰어든 기업들은 매우 다양한 기관 기술, 구동소자 기술, 디스플레이 모드 기술을 개발하

여 그 결과물을 발표하고 있다. 플렉시블 디스플레이 전자종이 기술의 상용화는 미국의 E-Ink사가 선도적으로 수행하고 있으며, LG Display는 비정질 실리콘 TFT기술을 기반으로 한 Metal Foil 기판을 이용하여 플렉시블 e-Book 디스플레이 연구결과를 집중적으로 개발, 2008년 하반기부터 12인치 크기의 흑백 전자종이를 양산하였다.

플렉시블 디스플레이 전체 시장은 매년 급성장하여 2020



(출처 : 디피아솔루션, 차세대디스플레이사업단 보고서)
 〈그림 4〉 투명 전극의 응용 분야



(출처 : 디스플레이뱅크, 2008)
 〈그림 5〉 플렉시블 디스플레이의 시장 동향

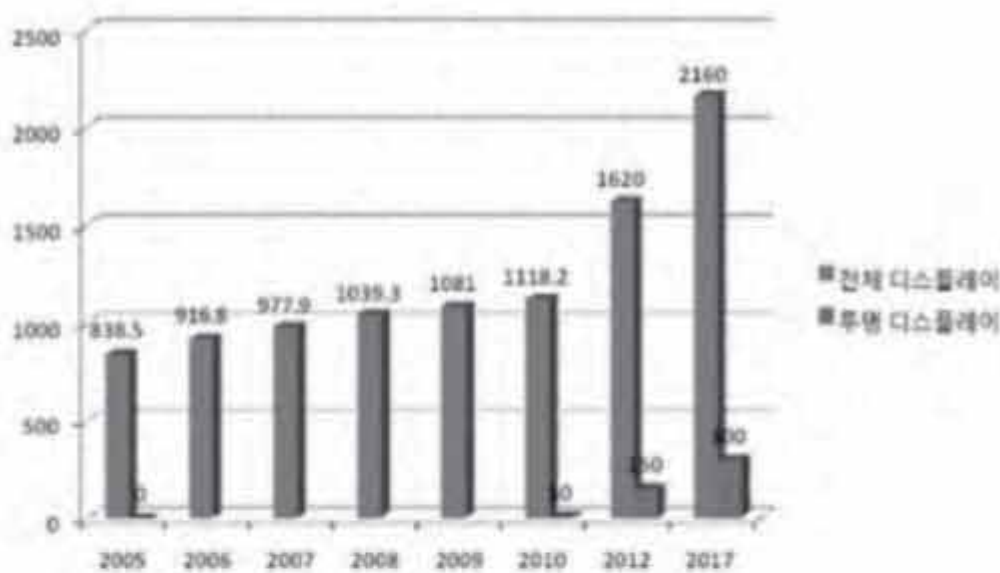
년에 약 400억불로 획기적인 시장 성장을 할 것으로 예상된다(그림 5) 참조). 플렉시블 디스플레이의 주요 애플리케이션은 2011년까지는 신규 애플리케이션인 e-paper 기술 기반의 e-Book 및 광고판 등이 될 것이며, 그 이후로는 모바일폰을 중심으로 한 중소형 대체 애플리케이션이 시장을 주도할 것으로 전망된다. 플렉시블 시장은 장기적인 관점에서 볼 때, 기존의 다양한 디스플레이에서 가장 효율적인 한 두 개의 디스플레이 기반 기술로 단순화되고 통합되는 과정을 거칠 것으로 예상된다.

또한 지금까지의 개념과는 완전히 차별화되고 다른 개념의 노트북, 모니터, TV 혹은 이러한 기능들을 통합한 새로운 개념의 디자인과 기능을 가진 디스플레이 애플리케이션이 등장할 것으로 보인다.

플렉시블 디스플레이 중에서도 투명 전극의 효용성을 직접적으로 살펴볼 수 있는 투명 디스플레이는 자동차 앞 유리, 창문, 안경 렌즈 등 평소엔 투명한 상태로 유지되다가 그 용도에 따라 특화하여 사용될 수 있는 분야에 적용이 가능해 미래의 디스플레이 중 하나로 주목 받고 있다. 또한 기존의 디스플레이 산업을 대체할 수 있을 뿐 아니라 기능과 디자인 면에서 무한한 가능성이 있어 새로운 산업 창출이 가능하고 잠재적 가치가 매우 큰 기술로 인식되고 있다.

투명 디스플레이의 시장 전망은 다음과 같다(그림 6) 참조). 투명전자소자를 이용한 스마트 창, 투명 내비게이션 등 투명 IT 전자기기는 2010년부터 시장을 형성하여 2012년에는 전체 디스플레이 시장의 약 9%를 차지하고, 이어서 2017년에는 약 300억 달러의 규모로 급성장할 것으로 전

망되고 있다. 투명전자소자는 디스플레이의 형태로 1차 시장 진입 후, 투명한 특성이 요구되는 전자제품 전반으로 시장을 확충할 것으로 기대된다. 이 중 현재 시장이 형성되어 있는 분야는 투명 전극 분야로서 디스플레이, 태양전지, 터치패널 등의 응용 분야에 자리잡고 있는 시장은 매년 약 50% 이상씩 성장을 하고 있다. 디스플레이 산업의 특성상 주로 대기업들이 시장을 주도할 것으로 전망되고 있으며, 일반 디스플레이 산업과 전자 산업 등을 전방 산업으로 하는 대기업들의 디스플레이 분야에 대한 활발한 연



(단위 : 억달러)

품목	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2012	2017
전체 디스플레이	838.5	916.8	977.9	1039.3	1081	111.8	1620	2160
투명 디스플레이						10	150	300

(출처 : ETRI, 투명전자소자의 기술 동향, 2007년 10월)

〈그림 6〉 투명 디스플레이 시장의 성장 전망

구가 있을 것으로 예측된다.

국내에는 세계적인 디스플레이 제조업체들이 포진해 있으므로 활발한 연구 개발을 통해 시장을 선점한다면 기존에 구축되어 있는 제조 설비 등을 통해 큰 규모의 경제 효과를 낼 수 있어 선시장 진입을 통해 해외 기업들에 대한 시장진입 장벽을 형성할 수 있을 것으로 전망된다.

4. 최근 연구동향

앞에서 살펴본 바와 같이 플렉시블 투명 전극은 뛰어난 전기적 특성을 가지고 있으며, 시장 전망 또한 매우 밝다. 이러한 투명 전극 기술의 우수성을 가지고 디스플레이 소자에 적용하기 위해서는 패터닝 및 대면적화에 대한 연구와 개발이 반드시 필요하다.

첫번째 소개할 논문은 그래핀의 패터닝 기술 및 대면적화의 가능성을 보여준 좋은 연구이다(그림 7) 참조). National University of Singapore의 Kian Ping Loh 그룹에서는 솔루션 공정이 가능한 그래핀을 이용하여 Nano letters지에 발표하였다. 일반적으로 그래핀 옥사이드가 분산된 용액으로부터 그래핀을 생산하는 벌크공정은 결함의 밀도가 높기 때문에 전기전도도 및 정공이동도가 낮아서 전자소자

의 적용이 제한적이라고 보고되고 있다.

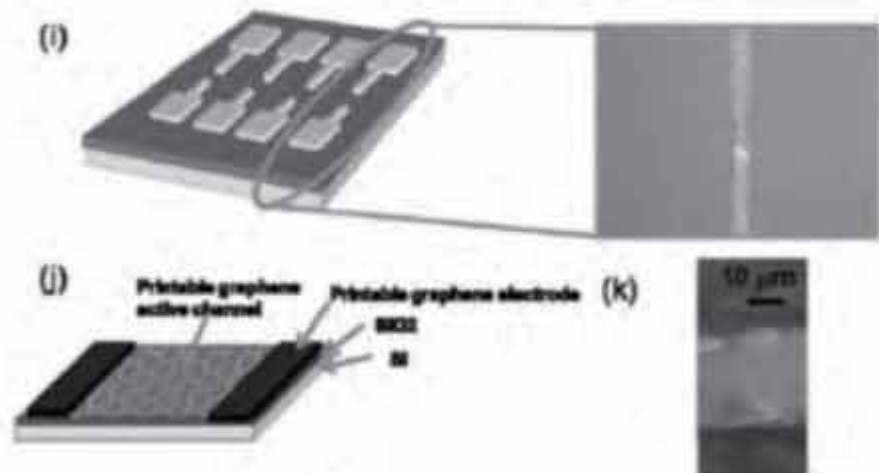
하지만 본 그룹은 25 μm 이상의 큰 조각 산화그래핀 시트로부터 그래핀을 생산하여 결함의 밀도를 최소화함으로써 기존방식의 그래핀 이동도보다 3오더 향상된 5000 cm^2/Vs 의 캐리어 이동도를 보고하였다. 또한 그래핀 전극의 솔루션 공정을 이용한 패터닝을 통해 CMOS 소자에 적용하였으며, 이는 대면적 적용이 가능한 그래핀 전극의 전자소자 적용 가능성을 보여준다.

다음으로, UCLA의 G. Gruner 그룹에서는 parylene-C 네트워크를 이용한 높은 투명도와 전도도를 갖는 탄소나노튜브 전극을 발표하였다(그림 8) 참조). 이것은 기존의 탄소나노튜브의 단점인 전극의 핀홀 결함과 투명도 문제를 극복한 결과라고 할 수 있다. 본 연구로 85% 투명도에서의



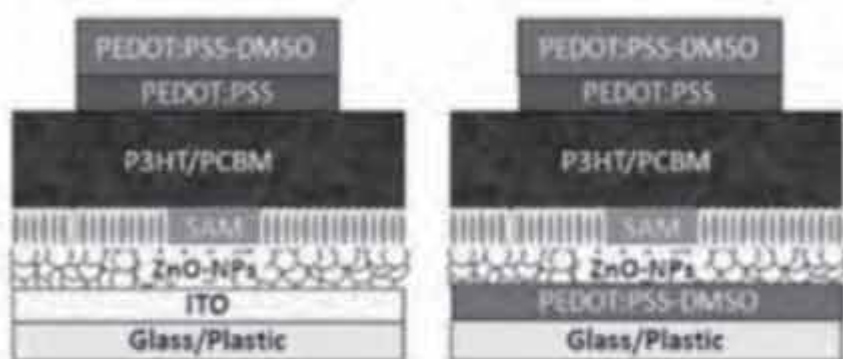
(출처 : Nanotechnology, 2009년)

〈그림 8〉 parylene-C 네트워크를 이용한 탄소나노튜브



(출처 : Nano Letters, 2010년)

〈그림 7〉 그래핀을 이용한 Field emission transistor (FET) device



(출처 : Organic Electronics, 2009년)

〈그림 9〉 PEDOT : PSS를 전극으로 사용한 inverted solar cell 구조

150 Ω /square, 90% 투명도에서의 300 Ω /square를 갖는 탄소나노튜브 전극 공정법을 소개하였다.

마지막으로, University of Washington의 Alex K. Jen 그룹에서는 태양전지의 ITO를 대체하고자 PEDOT:PSS를 전극으로 사용하였고, polymer solar cell을 제작하여 Organic Electronics지에 발표하였다(그림 9) 참조). 패터닝이 자유로운 전도성고분자 전극을 인버티드 구조의 솔라셀 상부 전극으로 사용하였다. 전도성 고분자 전극은 유연성이 뛰어나기 때문에 구부림 측정 이후에도 효율 보존력이 92%로 기존 ITO(< 50%)보다 우수한 성능을 보여준다.

5. 결론

플렉시블 정보전자 기기에 적용 가능한 플렉시블 투명 전극 기술은 전도성 고분자, 탄소나노튜브 필름, 그래핀 등의 테마로 많은 연구진들에 의해 개발되어 왔다. 특히 이러한 투명전자소자 기술은 미래 유비쿼터스 사회를 구현하기 위한 핵심 기술로 급부상하고 있다. ITO와 비교했을 때, 유연성이 더욱 강조된 전도성 고분자, 높은 전도도를 가지는 탄소나노튜브, 높은 투과도 및 유연성과 기계적인 내구성 등을 토대로 가장 각광을 받고 있는 나노 신소재 그래핀 등의 투명 전극은 실용적 및 학술적인 면에서 기대치가 높은 기술로 고려되고 있다.

이들은 각각 전도도 특성에 따라 다양한 응용 분야에 적합하게 적용될 수 있기 때문에, 향후 20년 뒤의 투명 디스플레이 시장 전망까지 밝게 비추주고 있으며, 최근 영화 '아바타'의 투명 터치 디스플레이 기술이 머지않았음을 잘 알려주고 있다. 투명 전극 기술을 정보 디스플레이 산업에 적절하게 활용하기 위해서는 패터닝 및 대면적화, 전도도와 투과도의 향상에 대한 집중적인 연구와 투자가 선행되어야 하며, 이러한 핵심 원천 기술 보유를 통해 앞으로 치

열하게 전개될 플렉시블 정보 전자 산업의 기술 선점을 이루어 나가야 할 것이다. **op**

■ 감사의 글

본 연구는 2009년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업(No.2009-0083126) 및 세계수준의 연구중심대학 사업 (R32-2008-000-10082-0)의 지원 하에 의해 수행되었습니다.

〈참고문헌〉

1. <http://www.kosen21.org/index.jsp>
2. <http://www.chempolicy.or.kr>
3. J. H. Ahn et al., "Roll-to-roll production of 30-inch graphene films for transparent electrodes", Nature Nanotechnology (2010)
4. 디피아이솔루션스, 차세대 디스플레이 사업단 보고서, 산업자원부, 2005
5. 디스플레이뱅크, 플렉시블 디스플레이 기술 분석 보고서, 2008
6. ETRI, 투명전자소자의 기술 동향 분석 보고서, 2007년 10월
7. S. K. Hau et al., "Indium tin oxide-free semi-transparent inverted polymer solar cells using conducting polymer as both bottom and top electrodes", Organic Electronics, vol. 10, pp. 1401~1407 (2009)
8. S. Wang et al., "High mobility, printable, and solution-processed graphene electronics", Nano Letters, vol. 10, pp. 92~98 (2010)
9. L. Hu et al., "A method of fabricating highly transparent and conductive interpenetrated carbon nanotube/polyene networks", Nanotechnology, vol. 20, pp. 465304-1~5 (2009)
10. www.tda.com