

플렉서블 투명 전극 기술 동향

□ 이재현 / 한밭대학교

요약

플렉서블 디스플레이는 차세대 정보표시 소자의 가장 핵심적인 산업분야로 많은 연구와 기술개발결과들을 바탕으로 현재 핸드폰 등의 소형 디스플레이에 적용되고 있다. 이러한 성공적인 시장 진입은 새로운 디스플레이 제조 공정과 신개발 재료들을 기반으로 달성할 수 있었다. 저자는 이러한 플렉서블 디스플레이의 원리 및 개발 역사 그리고 플렉서블 디스플레이의 핵심 기술인 플렉서블 투명전극 형성 기술에 대하여 설명하고자 한다.

I. 서론

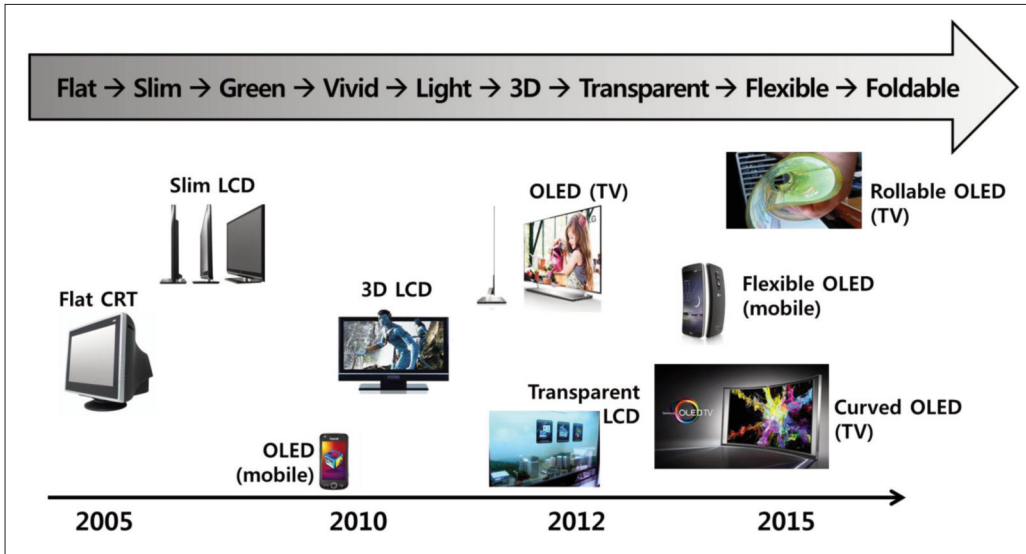
디스플레이란 정보를 인간에게 시각을 통하여 전달시켜 주기 위한 전자기기를 의미한다. 디스플레이는 전자빔 주사를 기본 원리로 작동하는 CRT (Cathode-Ray Tube) 디스플레이, LCD (Liquid Crystal Display), OLED (Organic Light Emitting Diodes) 등으로 점진적으로 개발되어 왔다. 이러한

기존의 고해상도, 대면적화, 저전력구동 등의 기술을 바탕으로 발전한 현재의 디스플레이는 “smart”, “human-friendly”, “curved or unbreakable”, “transparent”, “rollable or foldable” 등의 키워드를 가지고 개발되고 있다.

특별히 플렉서블 디스플레이는 가볍고, 얇은 물리적인 특징을 가지고 있어 제품의 자유로운 디자인이 가능하여 디스플레이의 활용 범위를 혁신적으로 확장시킬 것으로 기대된다. 이 글에서는 플렉서블 디스플레이를 구현하기 위한 핵심 기술인 플렉서블 투명 전극 기술에 대한 개발 동향을 기술하고자 한다.

II. 플렉서블 디스플레이의 기술 개발 동향

플렉서블 디스플레이 현실화에 가장 근접해 있는

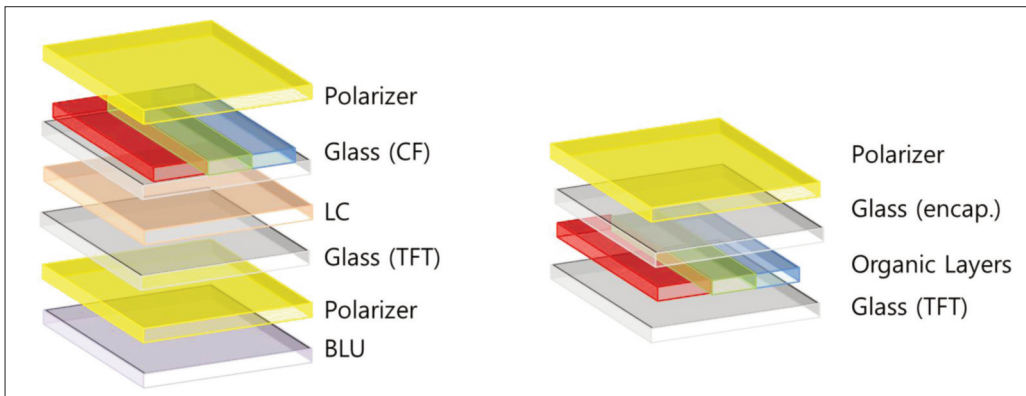


〈그림 1〉 디스플레이의 변화

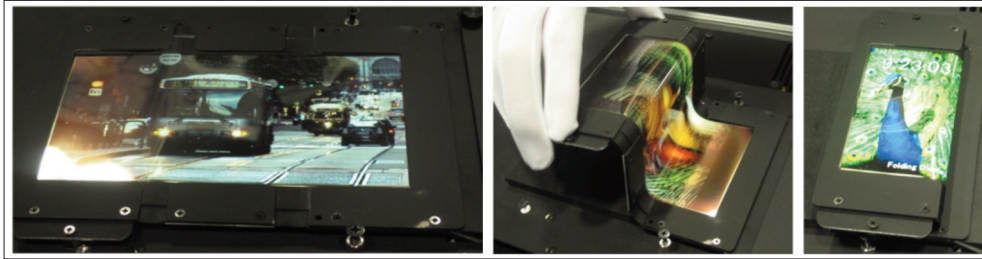
OLED에 대하여 알아보자. 저해상도의 플렉서블 디스플레이는 전자종이가 구현할 수 있다면 고해상도 디스플레이는 OLED가 적합하다. OLED는 아래의 그림과 같이 기존의 LCD와는 다르게 자체 발광형 디스플레이 소자이기 때문에 LCD의 백라이트 유닛(BLU)이 필요 없어 0.5 mm이하의 얇은 두께로도 소자를 제작할 수 있다. 또한 액정(LC)의 물리

적 거동 없이 전류의 제어를 통하여 빛을 켜고 끌 수 있기 때문에 플렉서블 구동에 따른 시야각 문제나 소자의 안정적인 구동에 제한이 없다.

Eastman Kodak 사에 의해 최초로 발표된 OLED 소자는 소니, 삼성, LG 등의 기업들을 중심으로 비약적인 발전을 거듭하였다. 현재 양산되는 플렉서블 OLED는 큰 곡률을 가지지만 시제품으로



〈그림 2〉 LCD와 OLED의 구조 비교



〈그림 3〉 Nokia에서 발표한 foldable OLEDs (SID 2014) [1]

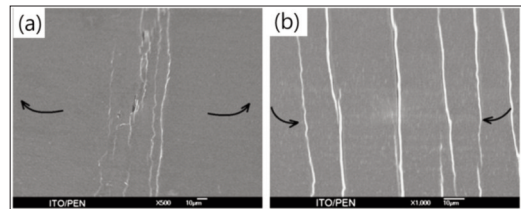
발표되는 소자들의 경우는 매우 유연한 특성을 보여주고 있다.

2013년도에는 LG전자에서 처음으로 플렉서블 디스플레이를 적용한 “G플렉스”를 출시하였고 이어서 삼성전자에서는 핸드폰 화면의 옆이 구부러진 “갤럭시 엡시”를 출시하는데 성공하였다. 노키아는 SID 2014에서[1] 2 mm의 곡률반경으로 3겹으로 접을 수 있는 5.9 inch 크기의 foldable 디스플레이를 발표하기도 하였다. 이러한 플렉서블 디스플레이를 구현하기 위한 가장 핵심 기술인 플렉서블 투명전극 기술들을 살펴보자.

III. 플렉서블 투명 전극 기술

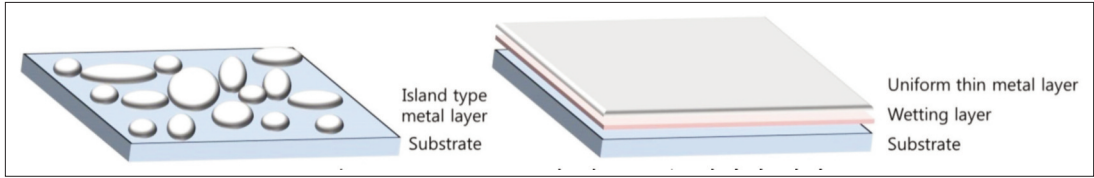
디스플레이의 투명 전극은 픽셀의 구동을 위해 전력을 공급하면서도 외부로 빛이 나올 수 있도록 투명한 특성을 가져야 한다. 일반적으로 투명 전극은 100 Ohm/sq 이하의 면저항 및 가시광선 영역에서 85% 이상의 광투과도, 고내열성, 표면 평활성 등의 특성을 가져야 한다. 기존의 디스플레이에서 폭넓게 사용되는 투명 전도성 산화물, TCO (Transparent Conducting Oxide)는 가시광선 영역에서 높은 광투과 특성을 가지면서도 높은 전기

전도도 특성을 가지는데 그 중에서도 ITO (Indium Tin Oxide)는 가장 널리 쓰이는 투명 전극이다. 하지만 스퍼터 공정으로 성막되는 ITO전극은 낮은 변형률을 가지고 있기 때문에 아래의 그림과 같이 외부 stress에 의하여 쉽게 부서져 버려 저항이 급격하게 증가하기 때문에 기존의 성막 조건으로는 플렉서블 디스플레이에 적용하기 어렵다.



〈그림 4〉 PEN 기판이 구부러짐에 따라 파손되는 ITO 전극의 SEM 이미지 (a) tensile stress, (b) compressive stress [2]

이와 같이 플렉서블 디스플레이에서 사용 가능한 투명 전극은 소자가 접히거나 휘는 경우에도 기계적인 안정성이 확보되어야 하고 유연 기판과의 접착력이 우수하며 반도체 공정상의 내화학성을 가져야 한다. 이러한 여러 가지 요구조건을 만족하기 위한 유연 투명 전극은 금속 산화물, 금속, 탄소 구조체, 전도성 고분자를 활용하는 투명 전극으로 나누어 볼 수 있다.



(그림 5) Wetting layer에 따른 금속 박막의 성형

1. 무기물 플렉서블 투명 전극

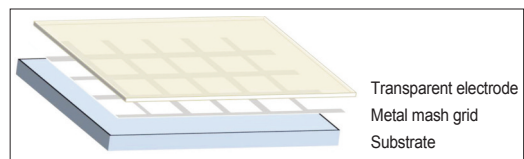
IZO(Indium Zinc Oxide)나[3] GZO(Ga doped Zinc Oxide)[4] 등의 금속산화물 전극은 기존의 ITO 전극과 유사한 전도도와 투과도에서도 더 큰 유연성을 가진다. ITO/metal/ITO 적층 구조의 경우는[5] 박막의 Ag를 interlayer로 사용한 경우 89%의 높은 투과율을 유지하면서도 4.28 Ohm/sq 의 면저항을 달성할 수 있었다.

금속을 10 nm 근방의 초박막 형태로 성막 하게 되면 광투과성을 가지게 되어 투명전극으로 사용할 수 있다. 금속과 기판 사이의 표면에너지 차이에 의한 금속의 island 형태의 성장이 성막 초기에 진행 될 때에는 surface plasmon 현상에 의해 가시광선 영역에서의 흡수가 존재할 수 있으나 표면에너지를 제어하는 wetting layer 등의 도입으로 인해 균일한 초박막을 얻을 경우 안정적인 플렉서블 투명전극으로 사용이 가능하다. 독일의 IAPP 연구소의 경우 [6] MoO₃ (3 nm)/Au (1 nm)/Ag (7 nm)의 구조로 면저항 19 Ohm/sq 와 광투과도 83%를 가지는 투명전극을 발표하였다 [그림 6].

은 나노 와이어 등은 100 nm 이하의 직경을 가지면서도 수 μm의 길이를 가질 수 있어 불규칙적으로 연결된 나노 와이어 박막의 경우는 낮은 면저항과 일정한 투과도를 가지는 전극으로 사용될 수 있다. 금속 나노 와이어는 용액 공정을 통하여 성막이 가

능하므로 플렉서블 기판에 roll-to-roll 공정 등의 인쇄 공정으로 성막이 가능하다는 장점을 가지고 있다. 하지만 높은 투과도를 가지기 위하여 나노 와이어의 농도를 낮추게 되면 나노 와이어 간의 연결이 끊어지게 되어 저항이 증가할 수 있는 단점과 기판과의 접착력 향상과 면저항 특성 향상을 위한 고온 후처리 공정은 플라스틱 기판의 적용에 제한적이라는 단점을 가지고 있다.

수십 μm 넓이의 금속 박막 격자 패턴을 인쇄 공정이나 임프린팅 공정 등을 사용하여 대면적에 구현하면 투명전극의 역할을 할 수 있다. 다른 투명전극과는 달리 격자 패턴을 가지고 있기 때문에 평면상에 균일한 전극을 이루고 있지 못하여 전하의 주입이 면에 고르게 주입되기 위해서는 추가적인 투명전극의 성막이 필요할 수 있다. 플렉서블 디스플레이 제작을 위하여 플라스틱 기판을 사용하는 경우는 저온 공정 등의 제한된 공정을 할 수 밖에 없어 투명전극의 저항을 디스플레이에서 원하는 만큼 최소화 할 수 없게 된다. 이러한 경우에 금속 격자를 이용하여 보조 투명전극으로[7] 사용하면 투명



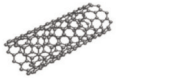
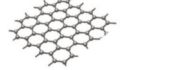
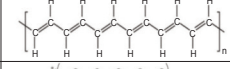
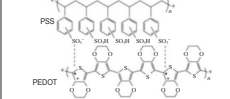
(그림 6) 금속 격자 패턴을 사용한 유연 투명 전극

전극의 높은 저항을 보상할 수 있게 해준다.

2. 유기물 플렉서블 투명 유연 전극

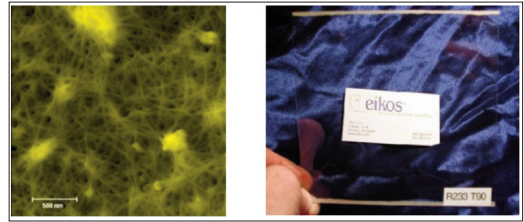
유기물 투명 전극은 graphene, CNT (Carbon NanoTube), π -공액 고분자 기반의 투명전극 등을 들 수 있다. 아래의 <표 1>은 다양한 유기물 투명 유연 전극의 분자구조들을 보여주고 있다.

<표 1> 유기물 투명 유연 전극의 분자구조

Organic electrode	Name	Molecular structure
Carbon allotropes	Carbon Nanotube	
	Graphene	
Polymer	Polyacetylene	
	PETDOT:PSS	

탄소구조체는 매우 우수한 기계적 물성과 함께 높은 전하이동도를 가지고 있어 투명전극으로써의 우수한 재료적인 특성을 가지고 있지만 대량 생산 적용 및 공정 안정성 측면에서는 투명 전극으로의 적용이 제한적이었다. 하지만 지속적인 연구 개발을 통하여[8] 그래핀의 경우 급속열처리 기술을 이용한 CVD (Chemical vapor deposition) 방식을 사용하여 34 inch 크기의 그래핀을 17분만에 제조하는 장비[9] 등이 개발되어 투명전극으로써 대면적의 그래핀을 활용할 수 있게 되었다. 미국의 eikos 사는[10] <그림 7>에서와 같이 탄소나노튜브를 용

액 공정을 통해 성막하여 투과율 90%이상에서 면저항이 233 Ohm/sq에 달한 Invisicon®을 발표하기도 하였다. 탄소나노튜브는 용액 공정을 통한 성막이 가능하므로 잉크젯 프린팅 등의 기술을 사용하여 손쉬운 패터닝이 가능하다는 장점을 가지고 있다.



<그림 7> Invisicon® CNT의 AFM 이미지 및 CNT가 코팅된 PET 기판

전도성 고분자는 다른 투명전극 재료에 비하여 매우 우수한 유연성을 가지고 공정성이 우수하여 유기물 투명 전극으로 집중적으로 연구되어 왔다. 전도성 고분자는 탄소의 이중결합과 단일결합이 교차하여 반복되는 구조를 통해 π -공액 고분자를 기본 구조로 한다. 그 중에서도 널리 사용된 thiophene 계열의 poly(3,4-ethylenedioxythiophene) (PEDOT) : polystyrene sulfonate (PSS) 의 경우는 dimethylformamide (DMF), N-methylpyrrolidone (NMP), dimethyl sulfoxide (DMSO) 등의 도핑을 통하여 500~1000 S/cm까지 전기전도도를 향상시킬 수 있다. Heraeus사의 Cleviso™ PH 1000와 같은 경우는[11] 100 Ohm/sq 수준의 면저항을 보이는 등 우수한 전기적 특성을 달성할 수 있었다. 하지만 대부분의 전도성 고분자들은 가시광선 영역에서 빛을 흡수하기 때문에 막의 두께를 두껍게 할 수 없어 면저항이 다른 투명 전극에 비하여 높다는 단점과 수용성 특징에 따른 수분산액을 사용시 박

막의 내습성이 떨어지는 단점들을 가지고 있었다. 최근에는 다양한 유기 용매의 적용 및 후처리 공정 등의 도입으로 최대 46.1 Ohm/sq의 전도도에 90%의 투과도를 가지는 전도성 고분자의 연구 결과가 [12] 보고되기도 하였다.

IV. 결론

현재까지의 디스플레이 산업의 비약적인 발전이 막대한 양의 정보를 인간에게 전달할 수 있게 했다 면 미래의 디스플레이는 정보를 인간에게 어떻게

전달해 줄 것이고, 인간이 어떻게 활용할 수 있게 해 줄 것인지에 대한 길을 보여줄 것이다. 현재 제품화 되어 보여지고 있는 플렉서블 디스플레이들은 이러한 미래의 소자들이 현실화 되기 위한 초기 단계의 결과물들이다. 새로운 유연 기판 및 소재들에 적합한 신개념의 공정들이 확립되고 완성되기까지는 아직도 재료, 공정, 장비, 소자 등의 많은 분야에서 추가적인 연구들이 필요하다. 국내의 많은 연구소, 기업, 학교에서의 우수한 연구 결과들을 바탕으로 현재 디스플레이 강국으로써의 한국이 앞으로의 차세대 플렉서블 디스플레이 시장에서도 독보적인 기술력을 선점 할 수 있을 것으로 기대해 본다.

참고 문헌

- [1] http://techon.nikkeibp.co.jp/english/NEWS_EN/20140606/356848/
- [2] G. A. Potoczny, et al., Thin Solid Films, Vol. 528, pp. 205-212, 2013
- [3] Y.-S. Park, et al., Thin Solid Films Vol. 518, pp. 3071-3074, 2010
- [4] J.-L. Wu, et al., IEEE TRANSACTIONS ON ELECTRON DEVICES, VOL. 60, NO. 7, pp. 2324, 2013
- [5] Y.-S. Park, et al., J. Phys. D: Appl. Phys. Vol. 42 pp. 235109, 2009
- [6] S. Schubert, et al., Adv. Energy Mater. Vol.3, pp. 438-443, 2013
- [7] S. Hong, et al., ACS Nano, Vol. 7, No. 6, pp. 5024-5031, 2013
- [8] S. Bae, et al., Nature nanotechnology, Vol. 5, pp. 574-578, 2010
- [9] <http://www.etnews.com/20150407000168>
- [10] <http://www.eikos.com/invisicon.html>
- [11] <http://www.heraeus-clevios.com/en/applications/highlyconductiveclevios/highly-conductive-clevios.asp>
- [12] N. Kim, et al., Adv. Mater. Vol. 26, pp. 2268-2272, 2014

필자 소개



이재현

- 2002년 : 고려대학교 재료금속공학과 학사
- 2011년 : 서울대학교 재료공학과 박사
- 2012년 : 드레스덴 공과대학 (독일) 박사후 연구원
- 2012년 ~ : 한밭대학교 창의융합학과 조교수
- 주관심분야 : Flexible OLED, Thin Film Encapsulation