



플렉서블 디스플레이 기술 동향

+ 곽민기 수석연구원, 김종웅 선임연구원 전자부품연구원 디스플레이 부품소재연구센터

1. 서론

1. 개요

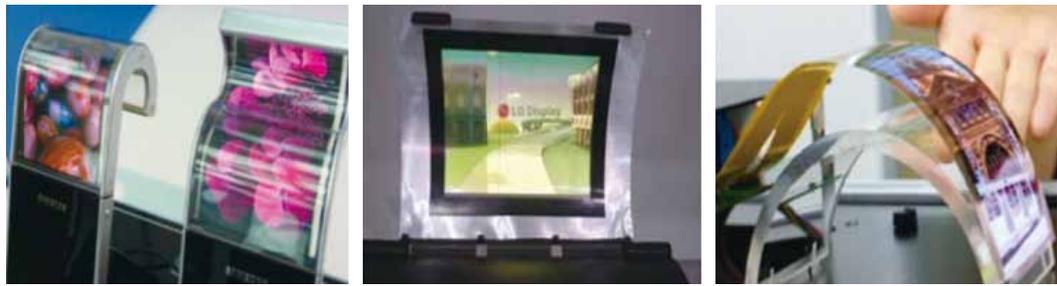
플렉서블 디스플레이(Flexible Display)는 종이처럼 얇고 유연한 기판을 통해 디스플레이에 손상 없이 휘거나 구부릴 수 있고 궁극적으로는 늘릴 수도 있는 화상 구현 시스템을 통칭하며, 이때 디스플레이의 화질 수준은 현재의 Rigid LCD 및 AMOLED 수준 또는 그 이상이 되는 것을 전제로 한다. 즉, 기존 LCD 및 AMOLED에서 사용하는 유리 기판을 플라스틱 필름으로 대체하고 디바이스 보호를 위한 봉지(Encapsulation)를 박막으로 형성하여 유연성을 부여한 것이다. 이 경우 디스플레이는 얇고 가벼우며 충격에 강하므로 다양한 형상으로 제작이 가능하며, 경우에 따라 형태 변환 특성을 부여할 수 있다. 이러한 기술은 일차적으로 깨지지 않는 모바일 기기나 웨어러블 컴퓨터 개발에 필수적으로 요구되는 것이기도 하지만, 디스플레이 업계에서는 이를 정제된 시장 분위기를 반전시키기 위한 핵심 아이템으로 인식하고 다양한 제품 개발에 나서고 있는 상황이다(그림 1 참조).



그림 1. 대표적인 플렉서블
디스플레이 제품
(삼성의 Gear Fit 및 LG의 G-Flex)

국내의 대표적 기업인 삼성 및 LG 등은 첫 타겟으로 5인치대 플렉서블 스마트폰을 잡고 제품 개발을 진행 중이다. 아직은 제품 자체가 형태 변환 특성을 갖는, 이른바 Bendable 제품 개발에는 도달하지 못했지만, 수십에서 수백 밀리미터의 곡률반경으로 휘어진 제품 개발에는 성공한 상황이다. 이는 디스플레이보다는 배터리 및 케이스 등의 플렉서블화가 지연되고 있기 때문이며, 사실 수십 밀리미터의 곡률반경을 가지는 플렉서블 디스플레이 개발은 거의 완성단계에 있다고 볼 수 있다. 일본 소니나 샤프 등도 비슷한 전략으로 제품을 개발 중이며, 주로 3~4인치 크기의 소형 패널 개발에 적극적으로 나서고 있는 상황이다(그림 2 참조). 반면 도시바는 10.2인치의 플렉서블 패널 개발에 성공했다고 발표한 바 있으며, 이를 기반으로 최초로 플렉서블 스마트 패드 개발에 나설지 주목되고 있다. 국가적으로 보면

한국은 삼성 및 LG 등 대기업을 중심으로 소형 패널부터 개발해나가고 있는 상황이며, 중국과 대만은 국책 과제를 통해 플렉서블 OLED 기술 개발에 박차를 가하고 있는 상황이다. 일본은 한국과 마찬가지로 기업을 중심으로 제품 개발을 진행 중이며, 특별히 LCD TV 이후 빼앗긴 주도권을 되찾기 위해 절치부심 중이다.



Samsung Mobile Display

LG Display and UDC

sharp 2012

그림 2. 플렉서블 AMOLED 프로토타입 제품(출처: 디스플레이서치)



그림 3. 플렉서블 디스플레이의 발전단계(출처: 한국디스플레이산업협회)

한편 플렉서블 디스플레이의 발전단계는 여러 개로 나뉘어 정의되고 있는데, [그림 3]에 잘 나타나 있다. 1단계는 깨지지 않는 단계로, 유리 기판을 플라스틱 필름으로 변경하여 강한 압력 또는 충격이 인가되어도 견딜 수 있는 제품이 이에 해당한다. 최근 삼성 및 LG 등에서 출시된 휘어진 제품들도 이 단계에 해당한다고 할 수 있다. 2단계 및 3단계는 실제 제품이 플렉서블한 것으로, Bending 및 Rolling이 가능한 제품이 여기에 해당한다고 할 수 있다. 이 경우 대부분 디바이스에 인

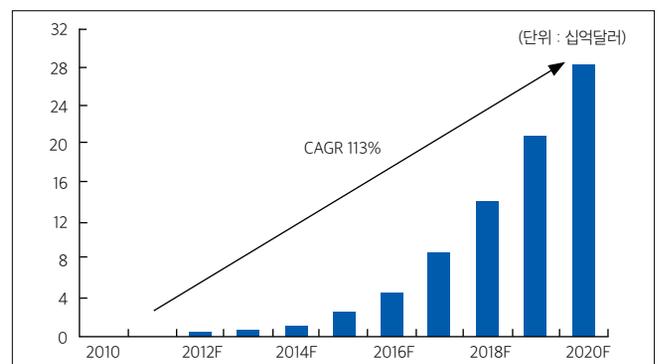


그림 4. 플렉서블 디스플레이 시장규모 예측치(출처: 아이서플라이)

가되는 Strain은 약 1~5% 수준으로, 그 정도의 Strain 인가 시의 Stress(일반적으로 tensile stress)를 견딜 수 있으면 디바이스 제작이 가능하다. 반면 4단계는 완전히 접을 수 있는 수준의 제품을 의미하는 것으로 10% 이상의 고변형률 인가 시에도 견딜 수 있어야 한다. 이 단계의 제품은 일종의 신축성 디바이스라고 해도 무방하다고 할 수 있다.

플렉서블 디스플레이의 시장규모 예측치는 전망 기관에 따라 다소 차이가 있지만, 대개 [그림 4]에 나타난 것처럼 2015년 이후 크게 성장할 것으로 예상되고 있다. 본격적인 플렉서블 디스플레이라고 할 수 있는 2단계 이후의 제품 또한 2015년 이후 출시될 것으로 예상되고 있다.

II. 본론

1. 플렉서블 디스플레이 기술 이슈

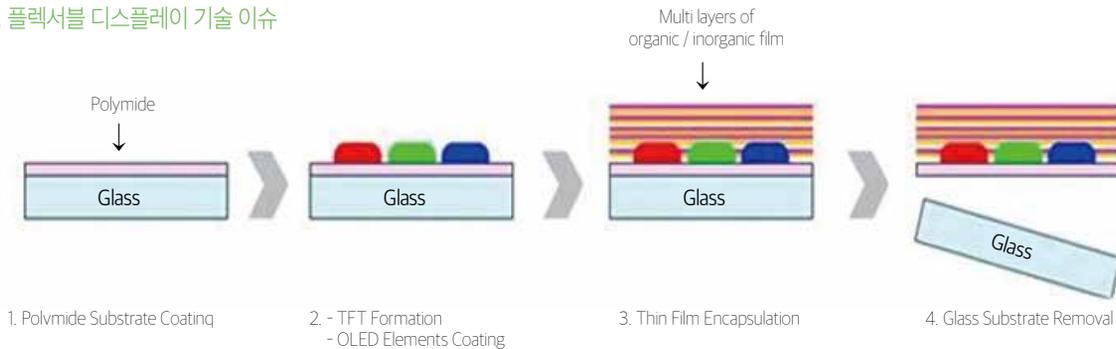


그림 5. AMOLED 기반 플렉서블 디스플레이 제조 공정

플렉서블 디스플레이 제작을 위해서는 기존 Rigid 디스플레이와는 전혀 다른 공정 개발이 필요하다. 현재 매우 다양한 공정이 개발 중에 있지만, 이 중 가장 일반적인 예를 [그림 5]에 나타내었다. 그림에서 기존의 AMOLED 공정과 가장 크게 차이가 나는 부분은 기판 및 Encapsulation 부분이라고 할 수 있다. 기판 제조 파트는 각종 전극 및 TFT 공정을 포함하며 최종 공정 후 Rigid support로부터 떼어내는 공정도 여기에 포함된다. 기존 제조 공정과 또 다른 부분은 Encapsulation 공정인데, 기존에는 금속 Can 또는 유리 Cap/plate를 디바이스 상부에 부착하여 수분과 공기로부터 소자를 보호한 반면, 유연성 확보를 위해서는 그러한 소재를 사용하기 어려우므로 주로 수십 나노미터 두께의 박막을 증착하여 형성하게 된다.

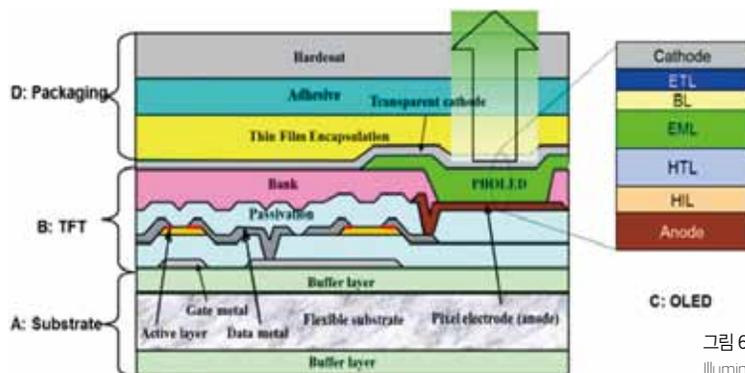


그림 6. AMOLED 기반 플렉서블 디스플레이의 모식도(Pang et al., Illumination & Displays, 2012)

플렉서블 디스플레이의 일반적인 단면 모식도를 다시 [그림 6]에 나타내었다. 그림에 나타난 바와 같이 플렉서블 디스플레이는 크게 보 면 기판, TFT, OLED 및 Packaging (Encapsulation)의 4가지 파트로 구성되어 있는데, 이 중 현재 가장 이슈가 되고 있는 부분은 기판, TFT 및 Packaging이라고 할 수 있다. 이 글에서는 해당 파트의 기술 이슈를 간략하게 살펴보고자 한다.

2. 기판 소재 및 공정

플렉서블 디스플레이 제조를 위한 기판은 사실상 플렉서블한 소재는 모두 사용할 수 있다. 현재 매우 다양한 종류의 소재가 제품 개발에 적용되고 있는데, 이를 간략하게 정리하면 [그림 7]과 같이 나타낼 수 있다. 크게 보면 금속 Foil과 플라스틱 필름으로 나눌 수 있으며, 기 타 초박형 유리나 종이 등은 향후 사용 가능 어플리케이션이 매우 제한적임으로 논외로 한다. 금속 Foil은 그 자체로 전도성을 가지는 특 이성과 함께 우수한 유연성 등이 장점으로 부각되나 근본적으로 투명하지 않기 때문에 EPD(Electrophoretic display) 등의 반사형 디스 플레이에만 적용될 수 있다는 문제가 있다. 플라스틱 필름의 경우가 가장 일반적인 기판 소재로 검토되고 있는데, 이 경우 제품에서 요 구하는 성능 수준에 따라 매우 다양한 소재가 활용될 수 있다. 현재까지 플렉서블 기재로 가장 널리 사용되어 온 PET는 수분 및 산소 투 과율이 높고 유기 용매에의 용해도가 매우 낮아 상온 Casting이 어렵다는 문제가 있으므로 현재는 투명 폴리이미드 등 차세대 소재가 검 토되고 있다. 특별히 투명 폴리이미드는 [표 1]에 나타난 것과 같이 CTE가 20ppm/K 정도로 매우 낮고 Tg가 높아 열적 안정성까지 뛰고 있으므로 삼성 및 LG 등에서는 내부적으로 플렉서블 디바이스 제조를 위한 표준 기판 소재로 결정한 상황이다.



그림 7. 플렉서블 디스플레이용 기판 종류

	Ultimate Tensile Strength (Mpa)	Young's Modulus (GPa)	Tg (°C)	CTE (ppm / K)	Dielectric Constant	Resistivity (Wcm)	Ref.	Chemical Resistance	
								Acetone	Acid
PET	55	2.5 ~ 3.0	76.5	79.2	3	2×10^{15}	Transparent	×	○
PC	52 ~ 72	2.1 ~ 2.4	150	70.2	3	7.3×10^{16}	Transparent	×	○
PI	221	2.8	385	20	3.5	1.5×10^{15}	Colored	×	○
PES	83 ~ 100	2.4 ~ 8.6	228	49.1	3.8	2.9×10^{16}	Transparent	×	○
PAR	100	2.9	330	50	2.6	1.0×10^{16}	Transparent	×	○
Glass		73	620	3	5.7		Transparent	○	○

* For stretchable electronic : PDMS, Poly-urethane, Poly-urethane acrylate, Thin PET, etc.

표 1. 플렉서블 디스플레이 제조를 위한 기판 소재 현황

현재 일반적으로 논의되고 있는 플렉서블 디스플레이보다 한 단계 더 나아간 신축성 디스플레이 제작을 위해서는 기판 소재 또한 신축 성을 띄어야 하므로 폴리이미드 등의 소재는 적합하지 않다. 신축성 디바이스 제조를 위해서는 PDMS와 같이 투명하면서 신축성을 띄는 소재 개발이 절실한 상황이며, 현재 전자부품연구원, 화학연구원 등에서 폴리우레탄 또는 실리콘을 기반으로 한 다양한 소재 개발이 진 행 중이다. 기판 소재와 함께 플렉서블 디스플레이 제작을 위해 꼭 개발되어야 하는 것이 투명 전극 소재이다. 현재까지 주로 사용되어 온 ITO(Indium tin oxide)는 우수한 전도도와 투과율로 인해 거의 대부분의 소자 제작에 사용되어 왔으나 Bending radius가 10mm 이내

인 경우 ITO layer의 Cracking 및 이로 인한 저항 증가로 플렉서블 소자 제작에는 적합하지 않다는 문제가 있다. 이를 대체하기 위해 다양한 소재가 연구되고 있는데 이를 간략히 요약하면 [표 2]와 같다. 탄소 기반의 Graphene과 CNT가 최근 주목받은 사례가 있으나 대체로 금속 기반의 Mesh 및 나노와이어가 ITO 대체 플렉서블 전극 소재로 적합한 것으로 알려지고 있다. 이는 금속 특유의 고전도도와 박막일 경우의 우수한 연성 등에 기인하는 것으로 향후 플렉서블 전극 소재로 널리 활용될 것으로 기대된다.

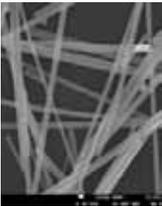
ITO Nanoparticle	CNT film	Graphene	Conductive Polymer	Metal mesh grid	Metal Nanowire
					
<ul style="list-style-type: none"> - 결정질 또는 비결정질 나노입자 활용 - 페이스트 또는 잉크 타입 슬러리 - 고온 성막 시 전도도 우수(플렉서블 기판 사용 불가) - 저온 성막 시 낮은 전도도 	<ul style="list-style-type: none"> - 유연성이 우수하고 대면적 코팅 가능 - 면저항이 높고 SWNT의 가격이 아직 높음 - 패터닝이 어렵고 표면 morphology가 거침 	<ul style="list-style-type: none"> - 우수한 전자 이동도와 높은 광 투과도 - 유연성이 우수함 - 건식 공정 시 특성 우수하나 대면적 코팅 어려움 - 습식 공정 시 저조한 특성 	<ul style="list-style-type: none"> - 대표물질 : PEDOT : PSS - 유연성이 우수하고 인쇄공정 적용 가능 - 전기 광학적 특성 저조함 - 고습도 환경에서의 낮은 신뢰성 - 물질 개발 필요 	<ul style="list-style-type: none"> - 금속 Mesh를 형성하여 전도성 구현 - 인쇄공정에 적용되기 쉽고 특성이 우수함 - 고투과도 및 전도도 구현을 위해 미세선 폭 구현 가능한 인쇄 공정 개발 필요 	<ul style="list-style-type: none"> - 금속을 1차원적으로 성장시켜 형성한 나노급 와이어 용액 - 낮은 고형분으로 제가력 공정 가능 - 높은 전기/광학적 특성 및 우수한 유연성 - 패터닝 공정 개발 필요

표 2. 다양한 ITO 대체 소재 연구 동향

3. 플렉서블 디스플레이용 구동소자 이슈

플렉서블 디스플레이의 구동소자는 LCD, OLED 및 전자종이 등 플렉서블 디스플레이 소자의 구동을 위한 것이며, TFT 소자 및 전극 소자를 포함하는 것이다. 플렉서블 픽셀 구동 소자로는 산화물, 비정질 실리콘 및 폴리 실리콘 TFT 등이 일반적이며, 이들을 [표 3]에 비교하여 나타내었다. 이 중 산화물 TFT는 최근 적용 가능 기판 사이즈와 전자 이동도 등에서 폴리 실리콘 TFT를 추월하는 특성을 나타내어 차세대 플렉서블 디스플레이용 구동소자 소재로 각광받고 있다. 이와 더불어 유기물을 활용한 소자인 OTFT 또한 전자 이동도가 높고 Bending 등의 기계적 응력 하에서도 안정적인 성능을 나타내어 차세대 소재로 주목받고 있으나 아직 수명과 신뢰성에서 저조한 특성을 나타내어 연구개발이 진행 중이다. 플렉서블 디스플레이 구동 소자 개발의 주요 이슈는 플라스틱 기판 위에 공정을 안정적으로 진행하기 위한 저온 공정 개발 및 안정적이고 균일한 이동도 및 문턱전압 특성 확보이다. 이를 위해 최근 상온에서의 소결 특성 등과 관련한 연구결과가 저명한 저널에 종종 실리고 있는 상황이다.

	Oxide	a-Si	LTPS
Mother Glass Size	8G	8G	5.5 ~ 6G
Semiconductor	Amorphous IGZO	Amorphous Si	Poly Si
TFT Uniformity	Good	Good	Poor
Mobility (cm ² / Vs)	> 10	0.5 ~ 1	~100
Number of Masks	4-5	4-5	5-11
Cost	Low	Low	High
Reliability (10 ⁵ hr)	$\Delta V_{th} < 1V$	$\Delta V_{th} < 5V$	$\Delta V_{th} < 0.5V$

표 3. 플렉서블 디스플레이용 TFT 특성 비교

4. 플렉서블 디스플레이용 봉지 공정 이슈

플렉서블 디스플레이 개발과 관련하여 기판소재만큼이나 중요도가 높은 것이 봉지 기술, 즉 Encapsulation이라고 할 수 있다. 현재까지 대부분의 Encapsulation이 유리 또는 금속 Cap으로 이루어져왔음을 감안할 때, 유연한 박막으로 이들과 유사한 특성을 구현해야 한다는 점은 매우 쉽지 않은 숙제로 남아온 것이 사실이다. [그림 8]에 AMOLED 용의 다양한 Encapsulation 기술을 비교하였다. 그림에 나타났듯이 기존의 Rigid 소자 제작을 위해서는 금속 또는 유리를 Cap 모양으로 가공하여 기판에 붙이거나 유리 또는 Polymer plate를 유무기 Sealant를 통해 붙여 사용했는데, 이 경우 유연성이 매우 떨어지므로 현재는 다층의 박막을 증착하거나 얇은 Cover glass와의 혼용을 통해 봉지 공정을 수행하고 있다. 이와 같이 박막으로 Encapsulation할 경우 기술 이슈는 원자 격자 간 간격이 매우 조밀하게 형성되어 산소 등 Gas가 투과될 수 없도록 증착되어야 한다는 점이다. 이를 위해 ALD(Atomic Layer Deposition) 공정이 주로 사용되나, 이 공정은 증착 효율이 매우 낮고 공정비용이 높다는 단점 때문에 아직 양산용으로는 적합하지 않다는 문제를 안고 있다. 이 때문에 현재는 얇은 폴리머 또는 유리와의 혼용을 통해 이를 극복하고 있으며, 향후 공정 기술이 보완될 경우 실질적인 플렉서블 디스플레이용 Encapsulation 공정으로 박막 증착 공정이 활용될 수 있을 것으로 보인다.

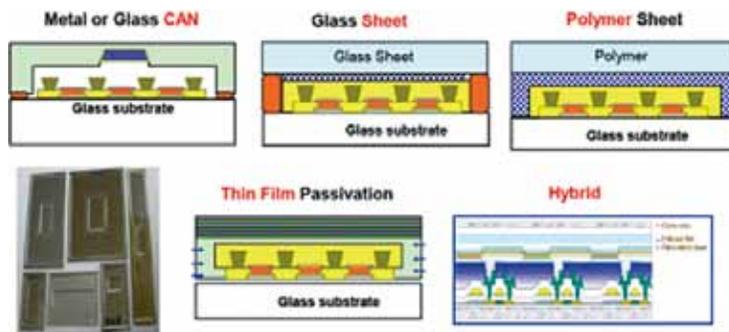


그림 8. AMOLED용 Encapsulation 기술 비교
(출처: LG디스플레이, HMC 투자증권)

III 결론

LCD 산업의 성숙화와 주요 경쟁국의 본격적인 추격에 따라 고해상도 패널을 기반으로 하는 차세대 플렉서블 디스플레이는 기업의 미래 먹거리 창출을 위한 핵심 아이템으로 떠오르고 있다. 2012년 한국의 디스플레이 패널 생산액은 약 46조 원으로 총 GDP의 3.7%를 차지하였으며, 수출은 349억 달러로 전체 수출의 6.4%를 차지할 정도로 엄청난 규모로 성장했다. 이들이 단시간 내에 모두 플렉서블 디스플레이로 대체되지는 않겠지만 2016년에 약 40억 달러에 이를 것으로 보이는 플렉서블 디스플레이 시장은 우리가 절대로 주도권을 놓쳐서는 안 되는 핵심 미래 먹거리라고 할 수 있겠다. 현재까지는 주로 전자종이 등 EPD를 중심으로 플렉서블 디스플레이 개발이 이루어져 왔으나, 플라스틱 기판 소재, 투명전극, 구동 소자 및 박막 Encapsulation 기술이 총체적으로 개발되어 2015년부터는 OLED 기반의 플렉서블 디스플레이 제품이 주류가 될 것으로 예상된다. 1차적으로는 휘어진 또는 큰 곡률반경으로만 굽힐 수 있는 디스플레이 제품이 선보이겠지만 2016년 이후부터는 본격적인 플렉서블 디스플레이, 즉 Bendable 또는 Rollable 제품이 시장에 선을 보일 수 있을 것으로 기대된다. 이를 위해서는 다양한 요소 기술이 동시에 개발되어 제품 개발이 활용될 수 있어야 할 것이며, 기업, 학계 및 정부 차원의 강력한 그리고 지속적인 연구 및 지원이 필요하다고 하겠다. 

* [참고 문헌]

① Displaysearch, "Market assessment, OLED displays and lighting" 2012

③ Pang et al., Illumination & Displays, 2012

② 한국디스플레이산업협회, "AMOLED 제조장비 시장전망과 분석 보고서" 2012

④ Kim et al., "플렉서블 기판 적용을 위한 TFT 기술 동향 및 전망" 2013