

플렉시블 디스플레이

Flexible Display

IT 핵심부품기술 특집

이진호 (J.H. Lee)	플렉시블소자팀 팀장
추혜용 (H.Y. Chu)	OLED팀 팀장
서경수 (K.S. Suh)	유기전자소자팀 팀장
강광용 (K.Y. Kang)	단말부품연구부 부장

목 차

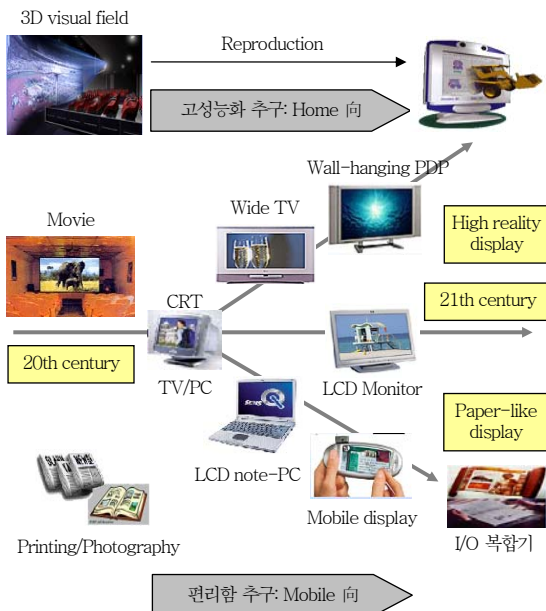
-
- I. 서론
 - II. 표시 방식에 따른 플렉시블 디스플레이
 - III. 플렉시블 디스플레이를 위한 스위칭소자 및 기판 기술
 - IV. 플렉시블 디스플레이 개발동향 및 전망
 - V. 결론

Flexible display는 플라스틱 등 휘 수 있는 기판에 만들어진 평판 디스플레이로, 우수한 표시특성을 그대로 가지면서 접거나 구부리거나 두루마리 형태로 변형이 가능하기 때문에 현재의 평판 디스플레이 시장의 차세대 기술로 평가되어 전세계적으로 급격한 연구가 이루어지고 있다. Flexible display는 원리적으로 종이와 같은 수 센티미터 이내로 휘거나, 구부리거나, 말 수 있는 얇고 유연한 기판을 사용하게 되며, 기존의 딱딱한 유리기판을 사용하는 디스플레이와는 달리 가볍고, 얇고, 내충격성이 강하며, 구부림이 자유롭다. 본 고에서는 flexible display의 핵심 기술, 주요기판의 최근 flexible display 연구 개발동향 및 발전전망 등에 대하여 살펴보기로 한다.

I. 서론

영화 “마이너리티 리포트”에서는 손에 쥐고 있던 신문이 갑자기 컴퓨터 모니터처럼 되면서, 주인공의 얼굴이 클로즈업되어 나타나는 장면이 나온다. 이러한 상황은 향후 10년 후 flexible display 기술의 개발로 현실화가 될 가능성이 점차 높아지고 있다. 또한, 백화점의 대형 벽면과 터널의 곡면 천정에 설치된 대형화면에서 실재 없이 동영상 광고가 나오며, 옷에 여러 가지 디스플레이를 부착시킨 채 거리를 활보하는 젊은이들로 거리는 가득찬 상황이 아주 먼 미래는 결코 되지 않을 것이다.

정보 디스플레이의 발전 추세는 (그림 1)에서와 같이 현재의 사물을 현실감 있게 나타내 주는 고성능화와 정보단말기의 이동성에 맞추어 mobile 및 편리성을 지향하게 된다. 정보 단말기기의 소형, 경량화에 따른 소형화로의 추세로 가지만 인간이 인식하는 디스플레이는 고정화 및 대형화가 요구되고 있어, 디스플레이가 접을 수 있으면 이러한 요구를 만



<자료>: Trigger 2001. 4., OFTA 2000. 2., SRI E.P. Report 2001.

(그림 1) 디스플레이 발전방향

족시키는 것이 되어, 종이와 같은 display 및 flexible display의 수요가 증가하게 된다[1],[2].

플렉시블 디스플레이란 기존의 디스플레이 특성의 손실없이 종이와 같이 수 센티미터 이내로 휘거나, 구부리거나, 말 수 있는 얇고 유연한 기판을 사용하여 제조된 디스플레이이며, 기존의 딱딱한 디스플레이와는 달리 가볍고, 얇고, 내충격성이 강하며, 구부림을 자유롭게 할 수 있는 디스플레이로 정의된다. 플렉시블 디스플레이는 용도 및 기능으로 깨지지 않는(rugged) 디스플레이, 굽혀지는(bending) 디스플레이, 두루마리가 가능한(rollable) 디스플레이로 구별할 수 있다. 단기적으로는 가볍고, 견고하며, 구부림이 가능한 디스플레이는 DMB, WiBro, PDA 등 휴대화되고 있는 고품위 모바일용으로 적용될 수 있으며, 장기적으로는 두루마리형 디스플레이는 필요한 기술개발을 거쳐 상용화 될 전망이다. 실제 PDA 크기의 LCD를 유리기판에서 플라스틱 기판으로 변경하여 제작하였을 시 무게는 1/3 이하로 줄어들었다[1],[2].

플렉시블 디스플레이를 구현하기 위한 핵심기술로는 플렉시블 기판과 플렉시블 디스플레이용 표시방식, 플렉시블 능동구동소자의 기술을 각각 분류할 수 있다(표 1) 참조). 플렉시블 기판으로는 기존의 유리기판 대신 고분자 필름을 위주로 하는 플라스틱 기판, 금속 foil, 약간의 구부림이 가능한 유리 등을 들 수 있다. 플렉시블 디스플레이용 표시방식으로는 LCD, OLED, 전자종이 방식이 연구되고 있다(표 2) 참조).

<표 1> 표시방식별 플렉시블 디스플레이의 성능비교

	Cholesteric LCD	OLED	전자종이
Reflectivity	40%	NA	40%
Full Color	○	○	△
Response Time	30~100ms	<1ms	100ms
Contrast	20~30:1	20~30:1	10~30:1
Driving	Passive	Active	Active
Developer	Kent Display	Kodak	E-ink

〈표 2〉 플렉시블 디스플레이를 위한 기술 매트릭스

플렉시블 기관	플렉시블 디스플레이 표시방식	플렉시블 능동구동 스위칭 소자
유리(Bendable)	LCD	OTFT
플라스틱	OLED	a-Si TFT
금속판	전자종이	Poly-Si TFT 비 능동구동

〈표 3〉 플렉시블 디스플레이의 응용분야

응용분야	기관	형태	크기(inch)
Appliances/Other consumer electronics	plastic	curved	< 1 to 3
Automotive	glass, metal, plastic	curved	Up to ~7
Mobile phone	plastic	curved, flexible	< (1 to 2)
Dynamic signage	metal, plastic	flexible, rollable	~7 to >20
Electronic book	plastic	flexible	5~8
Electronic paper	plastic	rollable	12~15
PDA/Handheld computer	plastic	curved	2~4
Smart card	plastic	flexible	<1

기존의 디스플레이가 가지는 표시특성의 수준이나 그 이상의 특성을 구현하기 위해서 플렉시블 기관상의 고성능 스위칭소자의 개발이 필수적이다. 플렉시블 기관 상에 능동구동 스위칭소자 기술은 전세계적으로 초기 개발단계로 디스플레이의 고화질, 고성능화를 위한 핵심기술이다. 플렉시블 능동구동 스위칭소자 기술 및 OLED 기술은 디스플레이의 대형화, 저가격화, 고실감화 등의 핵심기술로 중소형 디스플레이의 많은 부분을 대체할 수 있을 뿐 아니라, 새로운 응용을 기대할 수 있다.

향후, 플렉시블 디스플레이의 응용 분야는 <표 3>에 나타난 것과 같이 e-Book, e-Newspaper, 전자칠판, 스마트 카드, CAD/CAM, 광고용 전광판, 매장가격표, PDA와 같은 모바일 기기용 디스플레이, cell phone 보조 디스플레이, 각종 패션 등 응용분야가 다양하다[3].

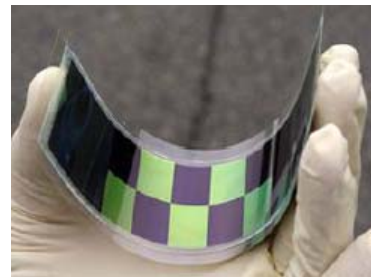
II. 표시 방식에 따른 플렉시블 디스플레이

1. LCD 기술

액정 디스플레이 모드의 경우 오랜 기간의 상업화를 통한 신뢰성, 안정성, 넓은 온도 범위, 생산능력, 시장확보 등을 고려할 때 공급자의 측면에서 가장 큰 장점을 가진다.

기존 LCD는 유리기관을 사용하여 액정의 액체적 특성에 의해 패널이 영향을 받지 않았지만 플라스틱과 같은 플렉시블한 기관을 사용하여 구부리는 경우, 액정의 흐름(flow) 현상으로 화질이 크게 좌우되어 안정성있는 모드의 개발이 요구된다. 모드의 안정성 향상을 위해 액정을 어떠한 방법으로 인캡슐레이션 할 것인가가 가장 중요한 관건이 된다. 기존의 ball spacer의 산포방법을 이용하거나 rigid spacer의 형성을 통하여 여러 기관에서 개발된 바 있다. 그러나 이러한 방법을 통하여서는 고정세화 대면적 LCD를 구현하기는 어려운 단점이 있다.

고분자와 액정의 복합체를 이용한 안정화 구조가 널리 연구되고 있다. PDLC는 수~수십 마이크로 크기의 액정방울들이 고분자에 분산된 필름형태로 미국의 Kent 대학에서 제안한 이후로 많은 연구가 이루어지고 있다(그림 2) 참조). 이때 고분자 매트릭스는 단단한 지지대 역할을 하고 있어 내충격성, 대면적, 플렉시블 디스플레이에의 응용이 가능하다. 또한, PDLC는 액정과 고분자의 굴절률차를 이용한 산란형 디스플레이로 polarizer 없이 광투과를 조절



(그림 2) Kent Display사의 Flexible LCD

할 수 있다. 그러나, 높은 구동전압, 느린 응답속도 및 낮은 대조비 등의 단점이 있다.

Bi-stable 특성을 이용한 메모리 모드는 콜레스테릭 액정을 이용한 고분자 안정화 콜레스테릭 액정 (PSCT) 모드가 많이 연구되고 있다[4]. PSCT는 planar texture에서의 선택반사를 bright 상태로, focal conic texture의 산란을 dark 상태로 사용하는 것으로 광학특성 및 양산성이 우수하여 e-book으로 유리하다. 이러한 방식은 이미지의 메모리가 가능하므로 전력소모가 매우 적고 컬러 필터 없이도 색구현이 가능한 장점을 가진다. 그러나, 고해상도와 full-color 구현이 어렵고, 구동전압이 높은 단점이 있다. 또한, 구동회로가 복잡하여 현재는 간단한 디스플레이에만 적용되고 있다.

AM LCD 즉, TFT-LCD 형태의 플렉시블 LCD 역시 많이 연구되고 있는데, 이는 PM에 비하여 고화질, 저소비전력, 대형화에 유리하다. 플렉시블 LCD를 구현하기 위하여 TFT 기술이 중요한 기술이 되는데, 기존의 유리기판상의 제조온도가 약 350°C 부근인데 비하여 플라스틱 기판을 사용하는 경우 150°C 이하로 공정온도를 낮추어야 한다. TFT 기술로 비정질 실리콘 TFT, OTFT, 저온 폴리 실리콘 TFT 등이 시도되고 있다. 비정질 실리콘 TFT의 경우, 기존의 제조라인을 그대로 이용할 수 있는 장점이 있지만, 플라스틱 기판의 열팽창으로 인해 양산적인 측면에서 고정세화, 대형화가 어려운 실정에 있다. OTFT의 경우 유연성에 있어서 플렉시블 LCD를 구현하기에 많은 장점이 있으나, 양산화 관점에서 개발의 여지가 많다.

2. OLED 기술

OLED는 자발광형의 표시소자로 시야각과 대조비가 우수하고 저소비전력과 빠른 응답속도, 저렴한 제조비용과 사용환경이 넓은 장점을 가지고 있으며, 단일기판상에 제조 가능하기 때문에 유연성이 있는 소자로 쉽게 만들 수 있는 장점이 있다. 1987년 이스만 코닥사의 Tang이 적층구조의 유기물질에서 고휘도로 빛을 내는 데 성공한 것을 시작으로 OLED

는 2005년 현재까지 많은 기술적인 진보가 이루어졌다. 휴대형 소형 정보단말기에 OLED가 채택되어 상용화가 급진전을 이루고 있다.

OLED를 제조하는 방법으로 크게 유기 저분자를 진공에서 가열하여 증착하는 방법과 고분자 용액을 잉크젯 프린팅이나 스크린 프린팅하는 방법으로 나눌 수 있다. OLED 특성은 저분자를 진공증착하는 방법이 가장 우수하는데, Pioneer, UDC, 삼성 SDI, LG 전자 등 대부분의 회사가 이 방법을 사용하고 있다. Dupont, Philips 등은 고분자용액을 이용한 잉크젯 방식을 사용하고 있다[5].

플렉시블 OLED의 상용화를 위한 핵심 기술로는 고기능 플라스틱 기판 기술, 저온 전공정 기술, 능동 구동(AM)을 위한 박막 트랜지스터 기술, 박막 passivation 기술을 들 수 있다.

OLED 디스플레이는 유기 소재를 사용하므로 산소나 수분에 노출될 경우 수명이 급격하게 감소하는 문제점이 있다. 특히, 일반적인 플라스틱 기판의 투습도가 10~1,000g/m²/day으로 OLED의 장수명화를 위하여 필요한 1×10⁻⁵g/m²/day 이하의 투습 특성을 위해서는 기판에 수분 차단막을 형성하는 것이 불가피하다. 차단막은 유기막과 무기막을 적층하게 되는데 무기막으로는 SiO_x, SiN_x, SiON, AlO, AlON 등이 사용되어 수분과 산소를 차단하며, 유기막은 무기막의 증착시 발생하는 pinhole과 스트레스를 완충하는 역할을 한다. 따라서 유기막과 무기막을 교대로 적층하는 다층구조를 사용하게 된다. 차단막은 용액공정과 진공증착법으로 형성할 수 있으며, 저투습, 저투산소 특성뿐만 아니라 고광투과 특성과 유연성을 확보해야 한다. 또한 OLED 상부에 형성하는 passivation은 차단막의 특성을 확보하며 OLED의 특성에 영향을 주지 않도록 주의를 요한다. (그림 3)에는 ETRI가 2003년 개발한 플렉시블한 PM OLED를 나타내고 있다.

AM OLED 형태의 플렉시블 OLED를 구현하기 위하여서는 역시 TFT 기술이 중요한 기술이 되는데, 기존의 유리기판상에서의 TFT 기술이 이슈가 되고 있는 실정이다. 전류구동 능력 등이 고려되어



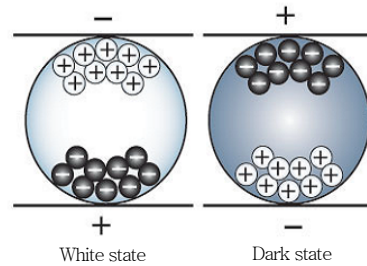
(그림 3) ETRI의 Flexible PM OLED(2003년)

다른 TFT 방식보다 저온 폴리 실리콘 TFT가 가장 현실적인 대안으로 채택되고 있다. 그러나, 플라스틱 기판상에서의 TFT 방식은 공정의 난이도, 양산성, 소자성능 등이 종합적으로 고려되어야 하므로 다양한 TFT 제조기술이 현재 개발되고 있다.

3. 전자종이 기술

전자종이를 구현하기 위한 기술로 캡슐형 전기영동 디스플레이(microencapsulated electro-phoretic display), Twisted Ball, REED, MEMS 기반 전자종이 기술 등으로 구분할 수 있다[6].

캡슐형 전기영동법은 1996년 MIT Media Lab.에서 개발한 방법으로 (그림 4a)와 같이 특정한 전하를 가진 특정색의 잉크 미립자와 반대전하를 띤 다른 색의 잉크 미립자와 투명 유전유체를 지름 100~200 μm 의 크기의 마이크로캡슐로 감싸는 구조를 만들고 이 마이크로캡슐을 바인더와 혼합하여 전극 사이에 위치시켜 마이크로캡슐 내부의 잉크 미립자를 동작시킨다. 양으로 전압을 인가시킬 경우, 음의 미립자가 표면으로 다가와 미립자의 색으로 표시할 수 있으며, 반대전압을 인가하는 경우, 반대미립자 색깔을 나타낼 수 있다. Media Lab에서 spin-off하여 설립된 E-ink사는 백색 반사율이 우수한 TiO_2 미립자에 흑색으로 카본계열의 재료를 사용하고 있다. 이러한 기술과 Philips사의 OTFT 기술과 결합하여 능동구동 전자종이를 구현하여 (그림 4b) 상업화의 가능성을 높였으며, 능동구동 전자종이의



(a) 전기영동 동작원리



(b) 전자종이

(그림 4) E-ink사의 전기영동 동작원리 및 전자종이

상업화를 목적으로 Polymer Vision사라는 회사를 만들었다. 이러한 전자종이 기술은 종이질감에 가까운 특성과 시인성이 우수하며, 메모리 기능이 있어 소비전력이 극히 작다는 장점을 지닌다. 그러나, 응답속도가 약 100ms로 동영상 구현에는 많은 개선이 필요하며, 컬러 필터를 이용하여 컬러표시가 가능한 소자는 현재 연구중이다. AM 방식의 전자종이를 구현하기 위하여서는 초기에는 비정질 실리콘 TFT를 많이 사용해오다가 근래에는 Philips 등이 OTFT를 이용한 능동구동 기술이 구현되면서 많은 개발자들이 이 방식을 따르고 있으며, OTFT의 양산 적용 가능성이 높아지고 있다.

Xerox의 자회사인 Gyricon Media사는 우선 투명한 두 장의 고분자 기판 사이에 수백만 개에 이르는 30~100 μm 크기의 볼이 오일로 채워진 실리콘 합성고무(silicone elastomer) cavity에 분산된 형태를 가지고 있다. 여기서 분산되어진 볼의 양쪽이 강하게 대조되는 반구 형태로 한쪽에는 빛을 흡수할 수 있도록 흑색으로 되어 있으며 다른 쪽의 반구에는 빛을 반사할 수 있도록 백색으로 되어 있다. 볼의

흑색과 백색의 영역은 서로 반대의 전하를 가지고 있어 외부에서 인가해 주는 전기장의 방향에 따라서 볼은 회전하게 되는데, 이와 같은 특성을 이용하여 검게 표시할 부분에는 흑색으로 되어 있는 부분이 상부에 있도록 전기장을 형성해 주며, 반대로 하얗게 표시될 부분에는 백색으로 되어 있는 부분이 상부에 있도록 전기장을 반대로 형성하게 된다. 볼의 크기에 따라서 구현되는 디스플레이의 해상도나 다른 전기광학 특성은 변하게 되는데, 볼의 크기가 $30\mu\text{m}$ 인 경우 약 300dpi 정도의 해상도 구현이 가능하며 볼의 크기가 $100\mu\text{m}$ 로 커질 경우 해상도는 약 100dpi 정도로 떨어지게 된다. Gyricon display는 6~10:1 정도의 대조비를 나타낼 수 있다. 구동 전압 및 볼이 회전하는 스위칭 시간은 각각 50~150V, 80~100ms 정도로 구동 전압이 다른 디스플레이에 비해 상대적으로 높고 흑/백으로의 스위칭되는 시간이 길어 동영상 구현이 어려운 단점이 있다.

일본의 Bridgestone사가 2004년에 개발한 QR-LPD를 이용한 전자종이 기술은 대전된 입자를 이용하는 것은 기존기술과 유사하지만 잉크입자가 액체처럼 동작하는 고체 입자이므로 색깔이 전환되는 스위칭 시간이 0.2ms로 매우 빨라 동영상 구현이 가능한 기술이어서 많은 주목을 받고 있다. 그러나 QR-LPD 기술이 상용화되기 위해서는 200V 이상의 구동전압을 10V대로 현저히 낮추어야 하는 장애물을 통과하여야 한다(그림 5) 참조).



(그림 5) Bridgestone사의 QR-LPD 전자종이

Ⅲ. 플렉시블 디스플레이를 위한 스위칭소자 및 기판 기술

1. 유기물 트랜지스터 기술(OTFT)

표시소자를 능동구동(active-matrix addressing)하기 위해서는 각 화소마다 박막 트랜지스터(TFT)와 같은 스위칭 소자를 부착시켜야 하는데, 기존의 유리기판상이 아닌 플라스틱이나 금속 foil 상에 TFT를 형성시켜야 한다. 플렉시블 기판상에 무기물계 필름보다 유기물을 이용한 소자를 형성시킬 경우 기판을 구부리기가 쉽고, 대면적 공정으로의 확장이 가능하다. 또한, 고분자재료의 진전이 이루어 진다면, 잉크젯 공정과 같은 저가의 인쇄법을 사용하여 TFT를 제작할 수가 있으며, 대규모의 투자가 불필요한 roll-to-roll 공정이 가능한 장점이 있다.

OTFT는 1964년 CuPc를 이용하여 처음 제작하였으나 성능이 나쁘고 연구에 큰 진전이 없다가 1983년 polyacetylene으로 이동도 $7 \times 10^{-5} \text{cm}^2/\text{Vsec}$ 를 보고함으로써 관심을 끌기 시작하였고, 1992년 펜타센으로 이동도를 $2 \times 10^{-3} \text{cm}^2/\text{Vsec}$ 으로 개선하였으며, 그 후로 2003년 3M에서 펜타센으로 이동도를 $5 \text{cm}^2/\text{Vsec}$ 으로 획기적으로 개선하였다. 현재 OTFT는 단위소자의 수준을 넘어서 디스플레이를 구동하기 위한 백플레인(backplane)용의 어레이 수준으로 개발되고 있다[7].

일반적으로 OTFT는 TFT의 반도체를 유기재료로 대체한 소자를 의미하지만 궁극적으로는 게이트 절연막 및 도전체 모두가 유기재료가 사용될 것이다. 현재 유기반도체 재료로는 Pentacene, 6T, CuPC, ADT, F-CuPC, Perylene, PTCDA 등이 개발되어 사용되고 있으며, 유기물 절연체로는 BCB, Polyimide, Acryl, Parylene C, PMMA, CYPE, 유기물 전도체로는 PEPOT, PEPOT:PSS 등이 사용되고 있다. 또한, 플렉시블 디스플레이의 투명전극용으로 탄소나노튜브 복합체를 이용한 전극이 활발히 개발되고 있다.

OTFT는 현재 AM 방식의 전자종이 및 LCD를 구현하기 위한 백플레인이 성공적으로 개발되고 있다. 또한 OTFT는 이러한 디스플레이 분야의 응용뿐만 아니라 향후 전자태그, 유기전자 회로, disposable 전자회로, 유기물 센서, 유기물 메모리소자 등의 핵심소자로 사용될 것으로 예상된다.

2. 무기물 트랜지스터 기술(a-Si TFT, Poly-Si TFT)

디스플레이의 능동구동을 위한 TFT 기술로 무기물 재료의 트랜지스터로 크게 비정질 실리콘 TFT와 저온 폴리 실리콘 TFT를 고려할 수 있다. 비정질 실리콘 TFT는 현재의 대부분의 TFT-LCD의 스위칭소자로 사용되고 있으며, 공정온도가 350°C 이상이다. 비정질 실리콘 TFT를 사용하는 경우, 현재의 제조시설을 그대로 사용할 수 있는 장점이 있다. 플라스틱 기판에서 비정질 실리콘 TFT를 제작하는 경우, 공정온도가 150°C 이하의 공정에서 이루어져야 한다. 비정질 실리콘 TFT를 제조하기 위해서는 CVD를 포함한 모든 공정이 저온에서 이루어져야 하며, 대면적에서 균일도를 확보하는 문제와 플라스틱 기판상에 박막을 적층할 때 기판의 열변형에 의한 패터닝 alignment를 효과적으로 확보할 수 있는 기술이 확보되어야 한다. 또한, 비정질실리콘 TFT가 플라스틱 기판상에 제조되었을 때, 기판 구부림에 의하여 TFT의 이동도, 문턱전압 등의 약간의 소자성능 변화가 보고되고 있으며, 이를 극복하는 여러 가지 기술도 개발되고 있다[8].

삼성전자에서는 2005년 200 μ m 두께의 PES 플라스틱 기판위에서 100ppi급 5인치 비정질 실리콘 TFT 어레이를 제작하고, TFT-LCD를 집적화하는 기술을 개발하였다. 플라스틱 기판 양면에 barrier coating을 한 것이 특징이며, 모든 공정은 150°C 이하에서 수행되었다.

저온 폴리실리콘 TFT의 경우 구동회로의 집적화 시킬 수 있고, 디스플레이를 고해상도로 제조할 수 있는 장점이 있으며, OLED 구동용으로 비교적

적합한 소자이다. 저온 폴리실리콘 TFT를 플라스틱 기판상에 구현하는 경우, 역시 150°C 이하에서 이루어져야 하며, 비정질실리콘 TFT 제조 시 요구되는 기술을 포함하여, 저온에서 저수소함량의 실리콘막을 증착하는 기술, 저온 게이트 절연막 증착기술, 저온 결정화 기술, 저온에서의 ion doping 및 활성화 기술이 추가적으로 개발되어야 한다. 미국의 FlexiC사가 2000년 플라스틱 기판상에서 박막증착과 패터닝을 통하여 저온 폴리실리콘 TFT를 제조한 바 있다. 그 외에 Sony사 등 여러 기관에서 시도하였으나, 제조공정의 난이도로 인하여 어려워 최근에는 유리기판에 저온 폴리실리콘 TFT를 먼저 제작한 후, 이것을 플라스틱 기판으로 전이하는 방식의 기술을 개발하여 AM-LCD, AM OLED 등에 적용하려고 하고 있다.

3. 플렉시블 디스플레이를 위한 기판 재료

기존의 평판디스플레이 기판으로 사용되는 유리 기판은 0.7mm 내외의 두께를 사용한다. 유리기판의 특성상 깨지기 쉬워서 추가의 아크릴과 같은 보호층이 요구된다. 또한 유리기판은 무거운 단점이 있다. 이러한 기판을 플라스틱으로 대체할 경우, 가볍고, 깨어지지 않은 장점을 가진다.

디스플레이용 기판으로 사용되기 위해서는 디스플레이 제조 시 요구되는 특성을 만족해야 한다. 기본적인 특성 중에서 투과형 디스플레이인 경우 광학적 투명도와 균일도가 요구된다.

디스플레이 기판으로 요구되는 중요한 다른 특성은 디스플레이 공정에 대한 적합성이다. 기존 디스플레이 제조공정의 큰 수정 없이 기판을 대체하여 공정할 수 있는 것이 중요한 점이라 할 수 있다. 사용 chemical에 대한 내화학성, 고온에서 안정성, 열팽창계수 등이 중요한 요인이 된다. 플렉시블 LCD의 경우, LCD의 장점을 살리기 위해 열팽창이 크더라도 복굴절이 작고, 유연하며, 비교적 저렴한 기판이 좋다.

또한, 제조 후 소자의 안정성이 중요한 요인이 된

〈표 4〉 플렉시블 기판 특성 비교

	Tensile Strength(Mpa)	Young's Modulus(Gpa)	Tg(°C)	CTE (ppm/K)	Dielectric Const.	Resistivity(Ωcm)	Color	Chemical Resistance	
								Acetone	Acid
PET	55	2.5~3.0	76.5	79.2	3	2×10^{15}	Transparent	bad	good
PC	52~72	2.1~2.4	150	70.2	2	7.3×10^{16}	Transparent	bad	good
PES	83~100	2.4~8.6	228	49.1	3.8	2.9×10^{16}	Transparent	bad	good
PEN	275	6.1	200	23	-	2×10^{17}	Transparent	bad	good
PI	221	2.8	385	20	3.5	1.5×10^{17}	Colored	bad	good
Poly arylate	100	2.9	330	50	2.6	1.0×10^{16}	Transparent	bad	good
Glass(1737)	-	73	620	5	5.7	-	Transparent	good	good

다. 유리기판은 기체를 통과시키지 않는 장점이 있는 반면 대부분의 고분자필름은 산소나 수분을 통과시킨다. 이러한 산소나 수분은 OLED의 경우 소자 열화에 치명적인 영향을 미치게 된다. 이러한 고분자 기판을 사용할 때 보호막을 기판상에 코팅하여 산소나 수분의 통과를 저지시켜 소자의 안정성을 향상시키는 공정을 하게 된다. 일반적으로 액정의 경우 10^{-2} , 전자종이의 경우 10^{-1} , OLED의 경우 10^{-6} ($\text{g}/\text{m}^2/\text{day}$) 수준의 투습률을 허용하고 있다.

또한, 최근에는 플렉시블 디스플레이의 기판으로 stainless steel과 같은 금속 foil을 고려하고 있는데, 플라스틱의 취약한 내열성의 단점이 보완되며, 열팽창 계수가 작아 고성능의 박막 트랜지스터의 제작이 가능한 장점이 있다. 반면 불투명하고, 표면의 균일도와 부식의 문제점을 가지고 있으나, 표면 균일도를 연마공정이나 평탄화 공정의 도입, 불투명한 기판의 경우 반사형 디스플레이 개발 등으로 금속기판의 단점을 해결하려는 시도가 이루어지고 있다(〈표 4〉 참조).

IV. 플렉시블 디스플레이 개발동향 및 전망

1. 국내외 개발동향

현재 플렉시블 디스플레이는 세계적으로 관심을 일으키며, 최근 수 년 동안 많은 기술적인 진전이 이루어졌다. 플렉시블 디스플레이의 생산을 목표로 하

여 제품 개발에 주력하고 있는 회사들은 세계적으로 10여 개에 이르며, 나름대로 독창성 있는 구조들을 제시하고 있다. 미국, 영국과 일본에서 활발한 개발 동향을 보이고 있으며, 유럽에서는 재료 개발에 치중하고 있다. 미국의 Arizona 대학에는 2004년부터 플렉시블 디스플레이 연구센터가 국가(국방성) 지원 프로그램으로 활발히 가동되고 있으며, 대만에서도 2004년부터 ITRI/ERSO를 중심으로 하여 플렉시블 디스플레이 연구 컨소시엄을 구성하여 활발하게 연구가 진행중이다.

가. 플렉시블 LCD

플렉시블 LCD로 PM 방식과 AM 방식으로 모두 개발되고 있는데, PM 방식은 저가의 저소비 전력용을 목표로 cholesteric 액정과 같은 bistable 액정을 사용하는 경우가 대부분이다. 플렉시블 LCD의 경우, 디스플레이를 구부렸을 때 액정의 플로를 어떻게 막아주는가가 중요한 기술이 된다. AM 방식의 경우, 백플레인으로 비정질실리콘 TFT와 OTFT가 개발되어 많이 적용되고 있다.

Philips사에서는 2004년 폴리카보네이트 기판상에 painting과 UV curing 과정으로 매우 얇은 4인치급 플렉시블 수동 LCD(컬러 STN)를 구현하였다. 플라스틱 기판에 무기 EL을 이용한 flexible back-light를 도입하였다. Eastman Kodak사에서는 2004년 photographic 기술과 재료를 바탕으로 bistable flexible electronic display를 개발하였다. 수용성



(그림 6) Kodak사의 Flexible LCD

cholesteric 액정을 분산을 채용하였다(그림 6) 참조).

Sharp사에서는 2004년 폴리이미드 기판상에서 4인치급 반사형 플렉시블 능동 LCD(컬러 STN)를 구현하였다.

국내에서는 현재 학계를 중심으로 LCD 기반형 플렉시블 디스플레이 기술개발에 관한 핵심연구를 개발하고 있으며, 삼성전자에서는 5인치급 플라스틱 LCD 개발을 완료하였으며, 모바일 디스플레이용 2.2인치 풀컬러 투과형 플라스틱 TFT-LCD를 개발중이다.

나. 플렉시블 OLED

미국의 UDC와 일본의 Pioneer사는 플라스틱 저분자 OLED 패널을 구현하였고 2003년에 Pioneer사는 PM OLED를 개발하여 입을 옷에 부착 가능하도록 하였다(그림 7) 참조). 영국 CDT사와 일본의 Sanyo 전기회사가 1999년에 고분자 전기 발광 소자와 저온 poly-Si TFT를 사용하여 1.8인치, 200,000 단색 픽셀 흑백 디스플레이를 구현하였다.

플라스틱 OLED의 박막 passivation 기술로 Vitex systems에서 유기/무기 다층 박막을, Dow Chemical사나 Agfa사에서는 기체 투과 방지막에 대한 연구를 활발히 진행하고 있다.

ETRI에서는 정보통신부의 지원을 받아 플렉시블 OLED의 핵심 기반 기술을 확보하고 있다. 2000년 국내 처음으로 플라스틱 기판을 기반으로 하는 1.8인치급 플렉시블 PM OLED를 단분자 유기소재와 고분자 유기소재를 이용하여 시연하였으며, 공정 기술과 OLED 장수명화 기술의 개발을 통하여



(그림 7) Pioneer사의 PM OLED(2003년)

2003년에는 128×64 flexible PM OLED를 시연하였다. 현재, 능동구동 플렉시블 OLED의 풀컬러화를 위한 고효율, 고색순도 백색 OLED 기술과 고개구율 확보를 위한 상부방출형 OLED 기술, 초박막 passivation 기술을 개발중에 있다.

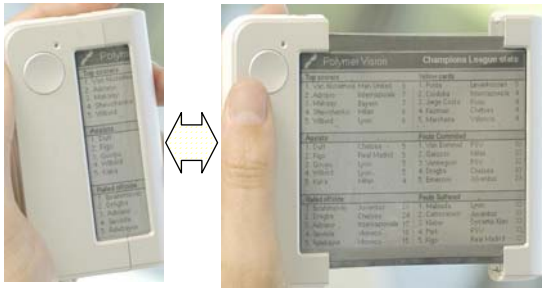
다. 플렉시블 전자종이

전자종이 기술은 미국의 E-ink사가 선도적으로 수행하고 있다[11]. 단색 전자종이는 현재, 상용화 수준에 와 있으나, 컬러 전자종이 수준은 아직 개발의 여지가 많이 있다.

미국의 SiPix사는 2004년 우수한 electro-optical 특성을 나타내는 플렉시블 microcup 전자종이를 독자적으로 개발하였다.

Philips의 spin-off 회사인 Polymer Vision사에서는 2005년에 25μm 플라스틱 기판을 lamination 한 후 4-mask 공정의 솔루션 기반의 OTFT 백플레인 상에 E-ink사의 전자종이 패널과 결합시켜 5인치, 80ppi급 두루마리 가능한 능동구동형 전자종이 디스플레이를 제작하였다(그림 8) 참조). 디스플레이의 두께는 100μm 정도이며, 7.5mm의 반경으로 수백 회의 구부림에도 소자가 잘 동작하였다. 두루마리형 5인치 디스플레이를 2006년 말까지 양산에 나선다는 목표로 잡고 있다[12],[13].

Xerox는 Gyricon Display의 상용화를 위해 2000년 12월 Gyricon Media란 회사를 창립하였고 최근에는 3M과 상호협력 속에 양산용 제품 생산에 주력하고 있다.



(그림 8) Polymer Vision사의 e-reader(mono 전자 종이 기술, 2005년)

후지쯔는 지난 7월 컬러 디스플레이를 선보였다. 세이코엡손은 E-ink사의 전자종이 패널을 표시부로 하여 구부러지는 전자종이 디스플레이를 이용한 첫 제품으로 시계를 개발, 2006년 일본 시장에 선보일 계획이다. LG 필립스 LCD는 미국 E잉크와 공동으로 2005년 일본 'FPD2005' 행사에서 흑백 10인치 및 컬러 필터를 이용하여 6인치 컬러 전자종이 프로토타입 개발을 발표했다.

ETRI에서는 정보통신부의 지원을 받아 전자종이 핵심기술을 확보하고, 2002년 유리기판상에 전자종이를 시연한 바 있으며, 2005년 차세대 PC 전시회에서 다색 전자종이 패널을 이용한 다색의 mono 전자종이를 시연하였다. 이를 바탕으로 현재 컬러잉크를 이용하여 컬러필터를 사용하지 않는 다색 전자종이를 개발중에 있다.

라. 플렉시블 OTFT

미국 Princeton 대학에서는 1997년 stainless-steel foil 위에 a-Si TFT를 구현하고 저분자 유기 EL과 결합하여 능동구동 소자를 구현하였다. 또한, Penn. State Univ.에서 OTFT를 이용하여 LCD를 위한 AM 백플레인을 제작한 바 있다.

Philips사에서는 2002년 OTFT를 이용하여 PDLC를 구동(64×94pixels)하였으며, 2004년에는 E-ink사의 전자종이와 결합하여 4.7인치 QVGA 전자종이를 개발하였다. Cambridge에서 OTFT를 이용하여 전자종이를 구동하였다.

영국의 Plastic Logics사에서는 2005년 고분자 폴리머 TFT 백플레인을 제작하고, E-ink사의 전자종이와 결합시켜 능동구동형 전자종이 디스플레이를 제작하였다. 175 μ m PET 플라스틱 기판을 사용, polyfluorene 기반의 폴리머 반도체와 폴리머 절연막을 이용하였으며, 전극으로 PEDOT/PSS 폴리머 재료를 이용하여 잉크젯 방식을 사용하여 제작하였다. 제작된 TFT의 특성으로는 이동도가 0.01cm²/Vs, 문턱전압이 -5V, on-off ratio가 10⁴이다. 5mm bending의 조건에서 소자가 잘 동작되었다.

삼성전자에서는 유리기판상에서는 2005년 15인치 XGA급 OTFT-LCD 모듈 개발하였으며, (이동도: 3cm²/Vs, on-off ratio: 10⁶), BLU는 기존의 기술을 사용하였다(그림 9) 참조).

국내에서는 프린티어 과제인 차세대디스플레이 개발사업에서 2003년부터 10년간 AOD 사업을 포함하는 디스플레이 전 분야에 대한 연구개발사업(약 100억/Y)이 진행중이다. 여기에 포함된 OTFT 기술, OLED 기술, 플렉시블 디스플레이용 소재기술 등이 학계, 산업계, 연구계가 공동으로 관련기술을 개발하고 있다.

경희대에서는 2005년 PES 기판상에서 a-Si:H TFT와 같은 수준의 OTFT를 제작하였는데, Organic CVD 방법에 의하여 펜타신(pentacene)의 반도체층을 액티브층으로 증착하였으며, 게이트 절연막으로 cross-linked PVP를 사용하였다. 제작된 소자의 이동도는 1.8cm²/Vs.을 얻었으며, 어레이 수준에서 좋은 결과를 얻었다.



(그림 9) 삼성전자의 15인치 OTFT-LCD

마. 플렉시블 TFT(a-Si TFT, Poly-Si TFT)

비정질실리콘이나 폴리실리콘을 플렉시블 디스플레이의 스위칭 소자로 사용할 경우, 소자의 성능 면에서 유리하고 기존의 제조라인을 그대로 사용할 수 있는 장점을 가진다. 삼성전자에서 2005년 비정질실리콘 TFT를 이용한 5인치급 100ppi급의 TFT-LCD를 개발하였다. 200 μ m 두께의 PES 플라스틱 기판을 이용하여 기존의 a-Si:H TFT 라인에서 공정 가능한 백플레인 기술을 개발하였다. 모든 공정은 150°C 이하의 공정으로 진행되었다. Barrier coating을 양면에 다하였으며, back light unit은 아직 플렉시블한 것을 사용하지 못하였으며, 기존의 BLU를 사용하였다. 양산 측면에서는 수율 개선, 대면적 제조 등에서 아직 개발할 여지가 많다. 또한, Sharp사에서는 3.3인치 QVGA급 TFT-LCD를 개발하였다.

미국의 Flex IC사가 2000년 플라스틱 기판에서 저온 폴리실리콘 TFT를 120°C 이하에서 공정을 수행하여 어레이로 제작하였다. 저온 폴리실리콘 TFT를 플라스틱 기판에서 제조하기 위하여 비정질실리콘 증착, 플라스틱 기판에 damage 없는 공정기술, 저온 게이트 절연막 증착기술, 저온 결정화 기술, 저온에서의 ion doping 및 활성화 기술이 개발되었다.

Seiko-Epson사에서는 2003년 기판전이 공정을 이용한 플렉시블 폴리실리콘 TFT-OLED를 최초로 개발 발표하였으며[9], 2005년에는 이 기술을 E-ink사의 전자종이와 결합시켜 2인치, QVGA급 200 ppi 능동구동형 전자종이를 제작하였다.

삼성 SDI에서는 2005년 150 μ m 두께의 304 SUS foil 기판을 이용하여 표면평탄화를 한 후 플렉시블 LTPS-TFT를 제작하여 4.1인치 65ppi급 (100×246) AMOLED 패널을 집적화하였다. 제작된 TFT의 특성으로는 이동도가 75.1cm²/Vs, 문턱 전압이 3.9V, Sub. Swing 0.9V.dec.의 값을 얻었다 [10].

ETRI에서는 정보통신부의 지원을 받아 플라스틱 기판상에 저온 폴리실리콘 TFT를 직접 제작하는 핵심기술을 확보하고, 최근에는 이동도(n-type)

가 180cm²/Vsec로 유리기판상에서 보다 양호한 특성을 플라스틱 기판상에서 구현하였으며, 이를 이용한 플렉시블 AM OLED가 개발중에 있다.

2. 향후 기술발전 전망

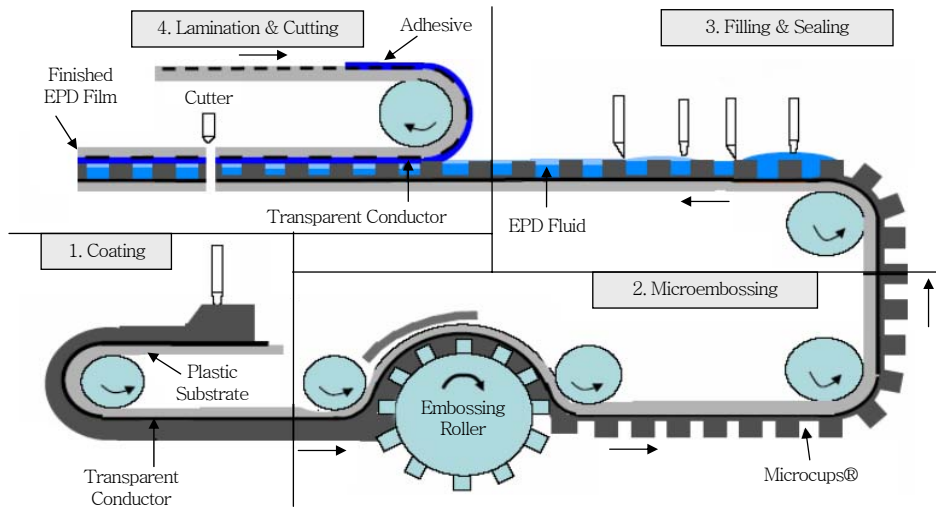
플렉시블 디스플레이의 경우 전세계적으로 연구 개발 초기단계에 있어 향후 기술 개발의 방향에 대한 유용성이 높다고 할 수 있다. 플렉시블 디스플레이의 구현 기술 및 양산화에 있어서 LCD와 같은 기존 소자기술의 변형 및 연장선의 측면과 OTFT나 전자종이와 같은 새로운 방식의 접근의 경쟁이라는 측면에서도 볼 수 있다.

재료개발과 새로운 공정개발의 성과가 플렉시블 디스플레이의 상용화를 더욱 가속화 시킬 것이다. OTFT 고성능의 유기 고분자 물질이 개발된다면, 인쇄법을 이용하여 TFT 소자를 roll-to-roll 공정을 채택할 수 있으며, 이러한 방법을 이용하여 대면적 공정을 저가격으로 할 수가 있게 된다. 또한, (그림 10)과 같이 roll-to-roll 공정과 대면적 저가격의 프린팅 공정은 향후 디스플레이 제조공정의 큰 화두가 되고 있다.

미국 Xerox사에서는 2005년 플라스틱 기판인 PEN에 저가의 잉크젯 공정을 사용하여 a-Si:H과 OTFT를 백플레인으로 하고, E-ink사의 전자종이와 결합시켜 75dpi, 128×128pixel급의 능동구동형 전자종이의 가능성을 보여 주었는데, 저가격 인쇄공정의 디스플레이에의 응용성을 높이는 결과로 주목을 받고 있다.

완전한 플렉시블 디스플레이를 구현하기 위해서는 반도체층이나 절연체층뿐만 아니라 배선재료도 유기재료 혹은 유연성이 확보되는 재료가 사용되어야 하며, 이러한 시도로 탄소나노튜브를 페이스와 혼합하여 유성성이 확보된 투명전극용으로 개발되고 있으며, 은나노입자와 같은 나노크기의 금속입자를 프린팅 방법으로 선택적으로 증착하는 방법 등이 개발되고 있다.

플렉시블 디스플레이를 구현하기 위한 전자종이



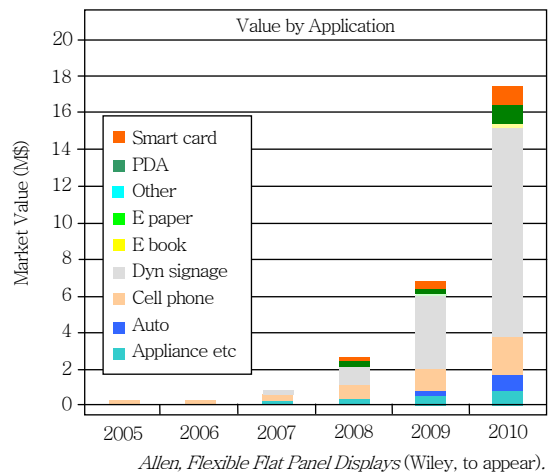
(그림 10) Roll-to-Roll 공정의 예

기술이 먼저 상용화가 이루어지며, LCD 기술은 back light 문제로 반사형으로 먼저 개발될 것이다. 플라스틱 기판 위에 능동구동 OLED 기술은 스위칭 소자기술, 기판필름, 투명전극, OLED 패키징 등의 핵심 부품 소재 기술의 뒷받침이 있어야만 실용화가 가능하지만, 이러한 요구를 충족시킬 수 있는 기술 개발이 충분하게 되어 있지 않은 상태이다. 특히, 플라스틱 OLED 디스플레이의 장수명화를 위한 passivation 기술은 소재(기판) 및 소자 측면에서 함께 고려되어야 하며, 플렉시블 디스플레이를 위한 핵심 기술이 되고 있다.

3. 향후 시장전망

플렉시블 디스플레이의 본격적인 시장은 아직 형성되지 않았지만, 일본 노무라 연구소의 예측에 따르면 2010년경 전체 평판디스플레이 시장의 10~20%에 이를 것으로 전망하고 있다.

플렉시블 디스플레이의 상용화 시기는 그 성능과 용도에 따라 크게 달라질 것으로 예상된다. 플렉시블 디스플레이 중에서 우선, 단색의 전자종이가 먼저 시장 진입을 할 것으로 예상된다. LCD의 경우 현재보다 가볍고, 견고하다는 장점으로도 시장에서의 호응이 높을 것이며, rigid한 형태로 기존의 유리기



(그림 11) Flexible Display 시장전망

판을 단지 플라스틱으로 교체하는 수준이 먼저 등장될 것이며, 점차 그 범위가 확대될 것으로 예상된다. 플렉시블 OLED도 점차 상용화가 될 것이며, 플렉시블 AM OLED의 경우, 금속 foil을 이용한 디스플레이가 먼저 시장에 출시될 수가 있으며, 플라스틱 기판을 이용한 디스플레이가 본격적인 시판될 때까지는 향후 7~8년 이상이 걸릴 것으로 전망된다.

플렉시블 디스플레이 중에서 가장 먼저 시장에 진입한 전자종이의 경우 2005년 430만 달러에서

2006년 740만 달러, 2007년 940만 달러의 시장이 형성될 것으로 전망된다(DisplaySearch, 2003년 2/4분기 자료).

(그림 11)에는 응용분야별 플렉시블 디스플레이의 시장을 나타내었는데, 초기에는 cell phone용의 시장이 대부분이었다가 2008년 이후부터는 dynamic signage 분야의 시장이 급격하게 증가됨을 알 수 있다. 이는 향후, 플렉시블 디스플레이가 패션, 보조 디스플레이 장치, 각종 표시기 등 다양한 응용분야에 사용될 것으로 생각된다.

V. 결론

전자책으로 Sony사가 E-ink사 및 Philips사가 공동으로 e-Book을 2004년 4월에 판매를 시작하였다. 그러나 기존의 전자수첩이나 PDA 등과의 차별화를 시키지 못하였으며, 또한 유리기판에 제작되어 플렉시블한 형태가 아니어서 본격적인 시장형성이 이루어지지 않았다. 조만간 플렉시블한 기판상의 전자종이가 시장에 나올 전망이며, LCD, OLED 기술도 상용화의 진전이 이루어 질 것이며, 이러한 플렉시블 디스플레이의 용도는 다양하게 펼쳐져 우리 생활에 편리함을 더해줄 것으로 전망된다.

플렉시블 디스플레이로 기존의 유리기판에서 점차 유리나 플라스틱 등을 같이 사용하고, 향후 플렉시블 기판이 사용될 전망이다. 컬러 반사형 LCD는 고휘도화를, OLED는 고효율화를 추구하여 점차 필름 디스플레이 형태를 취하게 될 것이다. 또한 저가의 대면적용으로는 OTFT 구동 디스플레이가 구현되어 OTFT 구동 전자종이 상용화가 확대될 것이며, 구동회로용 스위칭소자로 고해상도용으로는 저온 폴리실리콘이 사용될 것이며, 비정질 실리콘 TFT도 플렉시블 디스플레이에 적용될 것이다.

플라스틱 디스플레이의 경우 전세계적으로 연구 개발 초기단계에 있어 기술 개발을 통한 차세대 핵심 기술 확보 및 시장 선점이라는 관점에서 연구의 중요성이 있어, 국가별로 집중적인 투자를 하고 있는 실정이다. 차세대 디스플레이라고 각광을 받고

있는 플렉시블 디스플레이 분야는 기관, 소자, 소재 등 아직 안전하게 개발된 것이 없기 때문에 국내에서 많은 연구를 하여 원천기술을 확보해나갈 수 있는 분야이다. 플렉시블 디스플레이 기술개발과 관련된 기술에 대한 지적재산권 확보에 집중하여야 할 것이며, 관련 소재 부품 장비 등도 산학연 공동으로 적극적으로 기술개발이 필요하다.

약어 정리

AM	Active-Matrix
AOD	All Organic Display
BLU	Back Light Unit
CAD	Computer Aided Design
CAM	Computer Aided Manufacturing
DMB	Digital Multimedia Broadcasting
LCD	Liquid Crystal Display
MEMS	Micro Electro Mechanical System
OLED	Organic Light Emitting Diode
PDLC	Polymer Dispersed Liquid Crystal
PM	Passive-Matrix
PSCT	Polymer Stabilized Cholesteric Texture
QR-LPD	Quick-Response Liquid Powder Display
REED	Reverse Emulsion Electro-phoretic Display
TFT	Thin Film Transistor
UDC	Universal Display Corporation
WiBro	Wireless-Broadband

참고 문헌

- [1] "Coverstory-Flexible Display," Display Asia, 2003.
- [2] Overviews, *12th FPD Manufacturing Technology Expo & Conference*, 2002.
- [3] Antoine Kahn, Norbert Koch, and Weiyang Gao, "Electronic Structure and Electrical Properties of Interface between Metals and π -Conjugated Molecular Films," *Polymer Science, Polymer Physics* 41, 2003, p.2529.
- [4] T. Schneider et al., "Flexible Encapsulated Cholesteric LCDs by Polymerization Induced Phase Separation," *SIDO5 Digest*, 2005, pp.1568-1571.

- [5] M. Kadowaki, "Flexible OLED: Share the Future, Design Your Business," Dai Nippon Printing Co. Ltd., *Flexible Display & Electronics Conf.*, 2004.
- [6] K. Shinozaki, "Electrodeposition Device for Paper-Like Displays," *SID02 Digest*, 2002, pp.39-41.
- [7] H.E.A. Huitema et al., "Plastic Transistors in Active-Matrix Displays," *Nature*, 2001, pp.599-600.
- [8] A. Asano and T. Kinoshita, "Low-Temperature Polycrystalline-Silicon TFT Color LCD Panel Made of Plastic Substrates," *SID02 Digest*, 2002, pp. 1196-1199.
- [9] S. Utsunomiya et al., *Journal of the SID 10/1*, Vol. 69, 2002.
- [10] J.H. Cheon and J. Jang et al., "A 4.1 inch Top-emission AMOLED on Flexible Metal Foil," *SID*, 2005.
- [11] www.e-ink.com
- [12] www.philips.com
- [13] www.polymervision.com