

디스플레이용 플라스틱 기판의 현황

Plastic Substrates for Flexible Display

김기현 (G.H. Kim)

유기전자소자팀 선임연구원

서경수 (K.S. Suh)

유기전자소자팀 팀장

목 차

-
- I. 서론
 - II. 플라스틱 기판의 필요성
 - III. 플라스틱 기판의 종류
 - IV. 플라스틱 기판 구조
 - V. 플라스틱 기판의 요구특성
 - VI. 결론

정보화의 심화 및 대중화에 따라서 다양한 정보를 시각화하여 인간에게 전달하는 디스플레이로서 장소, 시간에 구애됨이 없으면서 초경량, 저전력의 얇고, 종이처럼 가볍고 유연한 플렉시블 디스플레이가 최근 학문적, 산업적으로 많은 주목을 받고 있다. 플렉시블 디스플레이를 구현하기 위해서는 플렉시블 기판(박형 유리, 메탈호일, 플라스틱), 저온 공정용 유기, 무기 소재, 플렉시블 일렉트로닉스, 봉지 그리고 패키징 기술 등이 복합적으로 필요하다. 이 중에서 플렉시블 기판은 플렉시블 디스플레이의 성능, 신뢰성, 가격을 결정하는 가장 중요한 부품으로 인식되고 있다. 플렉시블 기판 중에서는 플라스틱 기판이 가공의 용이성, 저 중량(유리의 1/2), 연속 공정의 적합성 등으로 인해서 광범위하게 적용이 검토되고 있다. 본 고에서는 디스플레이용 플라스틱 기판의 최근 산업적, 기술적 동향에 관해서 설명한다.

I. 서론

현대 산업사회가 고도의 정보화 시대로 발전함에 따라서 각종의 장치로부터 다양한 정보를 시각화하여 인간에게 전달하는 전자 디스플레이 산업의 중요성이 증대하고 있으며, 이러한 추세는 앞으로 상당기간 지속되리라 예측되고 있다. 디스플레이의 종류에는 CRT와 FPD로 나눌 수 있는데, 최근 기존의 유리 기반형 FPD 산업의 시장 확대와 더불어 메탈 호일(metal foil), 박형 유리(very thin glass) 혹은 플라스틱 기반형 플렉시블(flexible) 디스플레이에 관해 학계 및 산업계에서 기술개발 및 제품개발을 활발히 진행하고 있다[1]. 플렉시블 디스플레이는 기존의 유리 기반형 디스플레이에 비해서 박형(thinner) 및 경량(lighter)으로 충격에 강하며 휴대가 간편하다는 장점 이외에 공간상, 형태상의 제약에서 상대적으로 자유로워 다양한 응용성을 확보할 수 있어서 우리가 가진 기술로는 실현이 불가능해 보이는 우리의 머릿속에서만 존재하던 많은 아이디어가 이를 통해 현실화 될 수 있다.

플렉시블 디스플레이의 정의는 명확하지 않으나, 대체적으로 플렉시블 기판 위에 형성된 디스플레이를 통칭해 플렉시블 디스플레이로 부르고 있다. 플렉시블 디스플레이의 발전 과정을 보면, 초기 단계에서는 모바일 혹은 포터블 디스플레이를 중심으로 유리가 가지는 취약한 내충격성을 보완하기 위하여 유리대신 플렉시블 기판을 이용한 rugged 디스플레이가 주로 연구되어 왔으며, 최근에는 플렉시블 기판의 장점을 이용한 bendable 디스플레이가 일부 기업을 중심으로 상업적 결과물이 보도되고 있다. 그러나 궁극적으로는 플렉시블 디스플레이가 지양하는 목표는 형태적으로는 종이와 같이 휴대가 용이하고, 가볍고, 장소의 제약이 없는 종이같은(paper-like) 디스플레이이며, 산업적으로는 저가격화를 실현하기 위해 연속공정(roll-to-roll process)을 통한 양산성 확보를 지향하고 있다. 이와 같은 플렉시블 디스플레이를 구현하기 위해서는 플렉시블 기판, 저온 공정용 유기·무기 소재, 플렉시블 일렉트로닉

스, 봉지(sealing), 그리고 패키징 기술 등이 복합적으로 필요하다.

이 중에서 플렉시블 기판은 플렉시블 디스플레이의 성능(performance), 신뢰성(reliability), 가격(cost)을 결정하는 가장 중요한 부품으로서 인식되고 있다. 본 자료에서는 이에 관한 특히 플라스틱 기판에 대해서 최근의 기술적·산업적 동향을 설명하기로 한다.

II. 플라스틱 기판의 필요성

3가지 종류(메탈호일, 박형 유리, 플라스틱 기판)의 기판이 플렉시블 디스플레이의 구현을 위해 검토되고 있으며, 각각의 장단점으로 인해 응용성에서 많은 차이를 보이고 있다.

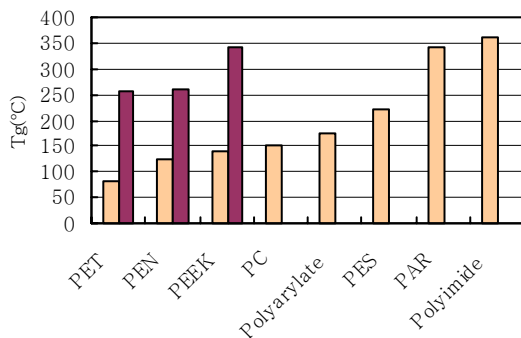
먼저 박형 유리는 기존에 사용되던 유리(보통 두께, 700 μ m)를 박형(50~200 μ m)화한 소재로서 3종류의 기판 중에서 가장 저렴하고 투명하며, 표면 평탄도가 양호하고, 수분 및 산소가 투과하기 어렵다는 장점 이외에 원가 절감 및 공정성 확보가 용이하다는 특징을 가지고 있으나 충격에 약하고 다른 기판 소재와 달리 연속공정으로의 적용이 힘든 단점이 있다. 메탈 호일은 투명한 디스플레이가 요구되지 않는 경우에 내충격성을 확보하면서 유리에 가까운 물성을 요구할 경우 적용이 검토될 수 있다. 보통 부식 문제 때문에 스테인리스 스틸(stainless steel)이 사용되며, 전기적 절연성을 확보하기 위해 절연체를 코팅하는 과정이 부수적으로 필요하다는 단점이 있다.

플렉시블 디스플레이 구현을 위한 가장 적합한 소재로 플라스틱 기판이 오래 전부터 주목을 받아오고 있다. 플라스틱 기판은 앞서 언급한 두 종류의 기판 소재에 비해 무게가 가볍고, 가공이 용이해 형태의 제약이 거의 없다는 점과 산업적으로 저가격화 실현을 위한 연속공정 특히 최근 활발히 연구가 진행되고 있는 잉크젯(inkjet) 프린팅에 가장 적합한 소재라는 특징을 가지고 있다[2],[3].

1. 플라스틱 기판의 분류

플라스틱 기판은 열적 거동 특성, Tg(연화점, glass transition temperature)별로 정리하면 (그림 1)과 같이 크게 3가지의 형태로 나누어 볼 수 있으며 각각의 열적 거동의 차이로 인해서 플라스틱 기판의 제조 방법은 조금씩 차이를 보인다. 플라스틱의 Tg는 국부적인 분자사슬의 거동(segmental motion)이 시작되는 온도로서 Tg 부근에서 플라스틱의 물리적, 기계적 물성이 급격히 일어나게 된다. 따라서 플라스틱의 Tg는 플라스틱 기판의 사용 온도를 결정하는 중요한 의미를 포함하고 있다.

PET, PEN, PEEK 등의 열가소성 세미결정성 플라스틱은 (thermoplastic semicrystalline polymer) ~140°C 정도의 Tg, ~340°C 정도의 Tm(녹는점, melting temperature)을 가지고 있으며, Tm 이상의 온도로 플라스틱을 가열하면 플라스틱은 용융된다. PET, PEN 기판은 용융 후 2축 연신하여 기판을 형성하는데, 이들 기판의 제조 방법은 다음에 자세히 설명한다. 세미결정성 플라스틱보다 Tg가 높고, Tm을 보이지 않는 150°C Tg의 PC, 220°C Tg의 PES 등의 열가소성 무정형(amorphous) 플라스틱은 상기의 연신 방법 이외에 용매 캐스터(solvent cast) 방법으로도 광학용 기판의 형성이 가능하다. 마지막으로 상대적으로 높은 내열성을 가진 PI, polyarylate, PAR 등은 용융 후 연신을 통한 기판 제조가 어려워 용매 캐스터 방법을 이용해서 기판을 제조한다.



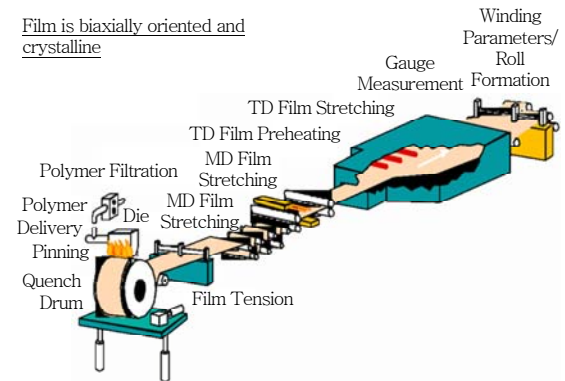
(그림 1) 광학용 기판 소재의 열적 특성

2. 플라스틱 기판의 성형 방법

가. 용융-압출(extrusion) 방식

용융 후 2축 연신하여 기판을 제조하는 공정을 살펴보면 (그림 2)와 같다.

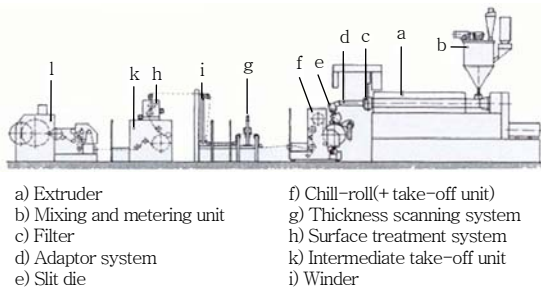
먼저 기판의 원료가 되는 pellet 혹은 칩 형태의 PET, PEN 등과 사용 목적에 맞게 첨가한 첨가제(대전방지제, UV 안정제, 가소제 등)를 혼합한 후 이를 함께 PET, PEN 등의 Tm 이상의 온도로 가열해 혼합 용융시킨다. 용융된 플라스틱 수지는 다이(die)를 통과하면서 시트(sheet) 형태로 가공되고 이를 먼저 MD 방향으로 연신한다. 이어서 기판의 방향성을 상세히 하기 위해 이어서 MD와 수직 방향인 TD으로 기판을 가열·연신해 광학용 기판을 제조한다. 이 같은 방법은 저 공정 비용으로 플라스틱 기판의 성형이 가능하다는 장점은 있으나, PET, PEN, PEEK와 같은 세미결정성 플라스틱의 경우 MD, TD 방향으로 기판을 연신할 때 기판을 구성하는 고분자의 배향 상태가 상이하여 연신 방향인 MD, TD 방향으로 기판의 광학적(굴절률, 투과도 등), 기계적 특성이 서로 차이를 보이게 된다. 따라서 이렇게 제조된 기판은 LCD와 같이 편광필름을 사용하는 디스플레이의 경우 적용이 어렵다는 단점이 있다.



(그림 2) 용융-압출 방식을 이용한 기판 형성 방법

나. 용매 캐스터 방법

열적 거동 온도가 세미결정성 플라스틱보다 10~200°C 정도 높은 무정형 플라스틱은 용융 후 연신



(그림 3) 용매 캐스터 방식을 이용한 기판 형성 방법

을 해 기판을 성형하는 것은 공정적·장비적으로 어려움이 있다. 따라서 높은 열적 거동 특성을 보이는 무정형 플라스틱은 적정 용매에 첨가제 및 플라스틱을 혼합·용해시켜 유동성을 확보한 후 이를 두께가 고정된 슬릿 다이(slit die)를 통과시키면서 용매를 휘발시켜 플라스틱 기판을 성형하는 용매 캐스터 방법을 이용한다(그림 3) 참조).

이 같은 방법은 방향성이 없는 기판을 얻을 수 있다는 장점은 있으나 용융-압출 방식에 비하여 양산성이 떨어지고, 사용된 용매의 회수, 정제, 재사용을 위한 별도의 설비가 필요하다는 단점이 있다.

Ⅲ. 플라스틱 기판의 종류

현재 적용이 검토되고 있는 플라스틱 기판의 종류 및 각 기판의 제조업체를 정리하면 <표 1>과 같

<표 1> 플라스틱 기판의 종류 및 제조업체

Materials	Color	Maker
PC	Clear	Teijin Film(Japan)
		GE(USA)
		Mitsubishi Engineering(Japan)
PET	Clear	General Atomics(USA)
		Mitsubishi Chemical(Japan)
PES	Clear	i-Components(Korea)
		Sumitomo Bakelite(Japan)
PI	Orange	DuPont(USA)
	Clear	Mitsubishi Gas(Japan)
Polynorbonene	Clear	JSR(Japan)
PEN	Clear	Dupont Teijin Film(Japan)
AryLite	Clear	Ferrania Image System(Italia)

다. 플라스틱 기판 소재는 선진 화학 업체를 중심으로 상업화 연구가 진행중에 있으며, 특히 소재의 열적, 광학적, 기계적 특성을 향상시키기 위한 연구가 주류를 이루고 있다. 플라스틱의 물리적, 화학적 물성은 사용목적과 응용 범위에 따라 각각 다른 관점이 있을 수 있으며, 본 자료에서는 플렉시블 디스플레이 구현을 위한 기판 관점에서 살펴본다.

1. PC 기판

PC는 우수한 광학적, 기계적 특성을 가진 플라스틱이지만 내화학성(특히 ketone계)이 취약하다고 알려져 있으며, 따라서 사용 용매(PR developer, PR remover, metal etchant, 세정(cleaning) 용매)에 많은 제약이 따르게 된다. 이 같은 문제점을 해결하기 위해 PC 기판의 경우 기판의 양면에 내화학성을 확보하기 위해 내화학층(chemical resistance layer) 혹은 HC층을 별도로 형성할 필요성이 있다. 일반적인 플라스틱 기판 소재의 공통적인 문제점일 수 있으나 열팽창계수(CTE)가 무기물에 비해 10배 정도 크다는 점과 기존의 유리에 비해 저온 공정(최대 사용 온도 범위, 150~180°C)으로 진행해야 한다는 단점이 있다.

2. PET 기판

세미 결정성 고분자인 PET는 Tm이 낮아 비교적 낮은 온도에서 용융성을 확보할 수 있고, 저렴한 공정·제조 비용으로 플라스틱 기판 성형이 용이하여 오랜 전부터 기판 적용이 검토되었다. PET와 같은 세미결정성 플라스틱은 내화학성 측면에서는 무정형 고분자보다 우수하며, 흡습성이 낮아 공정 시간 단축에 유리한 점은 있으나, 낮은 Tg, Tm에 기인한 취약한 열적 안정성으로 인해 실제 적용에는 어려움이 있다. 또한 PET 기판은 광학적으로 TD, MD 방향으로 이방성을 보이므로 LCD와 같은 편광판을 사용하는 디스플레이의 기판으로서는 적용이 불가능하다. 더욱이 150도 이상의 열처리에 의해 PET 분자 사슬의 재결정화가 일어나 국소적으로 기판이

뿌옇게 되는 백탁(whitening) 현상이 일어나 기판의 광학 투과도가 저온 열처리에 의해서도 저하되는 문제점을 안고 있다.

3. PES 기판

플라스틱 기판으로서 일본의 Sumitomo Bakelite사에 의해서 최초로 상업화된 PES는 다른 플라스틱 기판과 달리 두드러진 단점을 보이지 않는 기판으로 가장 활발히 적용이 검토되고 있다. 그러나 Ketone계 용매에 대해서 내화학성이 취약하고 앞서 소개된 두 기판과 같이 유리에 비해 CTE가 높고, 최대 공정 온도(180°C)가 낮다는 단점 이외에 흡습성이 비교적 큰 플라스틱으로서 물과 접촉하거나 공기 중에 장시간 방치했을 경우에는 탈수(dehydration) 공정이 추가로 필요하다는 어려움이 있다. 또한 PES 기판 제조에 필요한 PES pellet을 제조하는 업체가 전 세계적으로 3곳(BASF, Sumitomo Bakelite, 솔베이)에 불과해서 기판 원료의 공급에 어려움이 있고, 이에 따라 PES 기판의 판매 가격이 현재 유리 가격에 비해서 월등히 높다는 문제도 안고 있다.

4. PI 기판

PI는 DuPont사에서 1960년대 후반 상업화된 이후 우수한 내화학성, 내열성으로 인해 전기, 전자 부품 등에 폭넓게 응용이 되고 있는 플라스틱으로서 최근 이들의 물성에 주목해 이들을 플렉시블 기판으로 적용하고자 하는 노력이 있다. PI는 앞서 언급한 PES보다도 더 큰 흡습성(약 3배)을 보이는 소재로서 공정 중에 적절한 탈수 과정의 도입이 요구된다. PI의 분자사슬 내의 이미드(imide) 그룹은 내열성을 부여하는 그룹일 뿐 아니라 소재의 광학 특성을 떨어뜨리는 원인이 되며, 이 이미드 그룹의 존재로 인해 일반적인 PI 기판은 짙은 노란색을 띠게 된다. 따라서 PI의 광투과도는 550nm의 가시광선에 대해 ~30% 전후에 불과하며 이 같은 수치는 앞서 언급한 PES 및 PC의 ~90%와 큰 차이를 보이게 되는데

이런 광학적 특성은 디스플레이용 기판 소재로서 PI의 응용성에 큰 제약이 되고 있다. 이에 최근 PI의 분자사슬 변화를 이용해 광학적으로 투명하면서, 높은 Tg(>300°C)를 가진 PI 기판이 Mitsubishi Gas(주)에 의해서 개발되어 Neopulim[®]L이라는 상품명으로 선보이고 있다.

5. PEN 기판

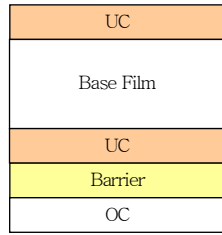
PEN은 앞서 언급한 PET와 유사한 거동을 보이는 광학적 이방성을 가진 플라스틱으로서, 열적 안정성 측면에서는 많은 문제점을 안고 있지만, 최근 많은 발전이 있어 Phillips의 경우 PEN을 이용한 연구 결과를 발표하였다. 가격이 저렴하고, CTE가 무기물에 비해서 높기는 하지만 다른 플라스틱 소재에 비해서 가장 낮은 수치를 보이므로 PEN을 플렉시블 디스플레이 구현을 위한 가장 적합한 소재로 보는 견해도 있다.

6. AryLite 기판

AryLite 기판은 이탈리아의 Ferrania Image System사가 개발한 광학 기판으로 국내의 관련 기판, 업체로부터 긍정적인 평가를 받고 있다. 다른 플라스틱 기판 소재와 비교해 우수한 열적, 광학적, 화학적 특성을 보이고 있으며, 특히 CTE의 경우 앞서 언급한 PES 및 PC는 130~150°C 부근에서부터 급격히 증가하는 경향을 보이지만 AryLite 기판은 온도의 증가에 따라 증가는 하지만 200°C까지 선형적인 증가하는 우수한 열적 특성 곡선을 보여준다.

IV. 플라스틱 기판 구조

플라스틱 기판의 구조는 제조 방법, 제조 회사별로 차별화, 특허화되어 있다. 일반적인 구조는 앞서 언급한 PET, PES, AryLite 등의 50~200 μ m 두께의 베이스 필름(base film)에 ketone류 등에 취약한 베이스 필름의 화학적 안정성을 확보하기 하기 위해



(그림 4) 플라스틱 기판의 단면

서 가교 아크릴레이트(crosslinked acrylate) 등으로 수 μm 두께의 고분자층(HC(hardcoat) 혹은 UC(undercoat) layer)을 베이스 필름의 양면에 적층된다. 유리 기판과는 달리 플라스틱 기판에서는 외부의 수분, 산소의 침입으로부터 디스플레이의 이미지 특성의 열화를 방지하기 위해서 한층 혹은 다층의 무기물(두께, 수십 nm)층이 베리어(barrier)층으로서 HC 혹은 UC 층 위에 단면 혹은 양면으로 적층되며, 무기물인 베리어층을 보호하기 위해서 투명 고분자층(OC(overcoat) layer)이 베리어층 위에 서로 유기적으로 복합된 적층 구조로 플라스틱 기판은 구성되어 있다.

이때 적층된 플라스틱 기판의 각 층의 종류 및 두께는 기판의 광학적, 열적 특성의 최적화를 통해 선정된다(그림 4) 참조).

V. 플라스틱 기판의 요구특성

기준에 사용되던 유리를 대신해 플라스틱 기판이 사용되기 위해서는 디스플레이 구현에 필요한 열적, 광학적, 그리고 기계적 물성이 요구된다. 열처리에 따른 플라스틱 기판의 팽창 및 수축에 따른 기판의 치수 및 형태의 변화는 디스플레이 이미지 특성에 큰 영향을 미치게 된다. 따라서 낮은 CTE, 높은 공정 온도 등이 요구된다. 기판 표면의 평탄성 및 청결도는 후속 공정에서 형성되는 박막(유기물 혹은 무기물)의 신뢰성 및 안정성에 영향을 미치는 인자로서, 기판 형성시 소재 조성물 및 형성 공정의 최적화로 관련 특성을 확보하여야 한다. 또한 공정성을 확보하기 위해서는 공정상에 사용되는 용매에 대해 내

화학적 및 일정 범위 이상의 강직성(rigidity)이 요구된다. 이외에 디스플레이의 성능에 직접적인 영향을 미치는 기판의 투과도(transmittance)는 기판을 시각 창으로 활용하는 LCD, OLED(bottom-emission), D-paper의 경우 특히 중요시 되며 400~800nm의 파장 대에서 85% 이상의 투과도가 요구된다.

1. 치수 안정성

기판의 치수 안정성(dimensional stability)은 일반적으로 최대 공정온도 및 시간 하에서 플라스틱 기판을 열처리한 후 이를 상온으로 냉각시켜 열처리 전·후의 기판의 변화율(단위 ppm 혹은 %)로 정의한다. 이때 평가하는 기판의 단위 길이는 제조 메이커별로 차이를 보이며 TMA-7 thermomechanical analyzer(Perkin Elmer)를 이용해 주로 평가한다.

플라스틱 기판은 고온에 노출되었을 경우 팽창 및 수축하는 현상을 보이게 되는데 이 같은 현상은 플렉시블 디스플레이 구현 시 가장 큰 공정적 걸림돌이 되고 있다. 기판의 열적 안정성을 확보하기 위한 방안으로 기판 소재, 세트 업체별로 크게 두 가지 방법으로 접근을 하고 있는데, 먼저 소재 업체에서

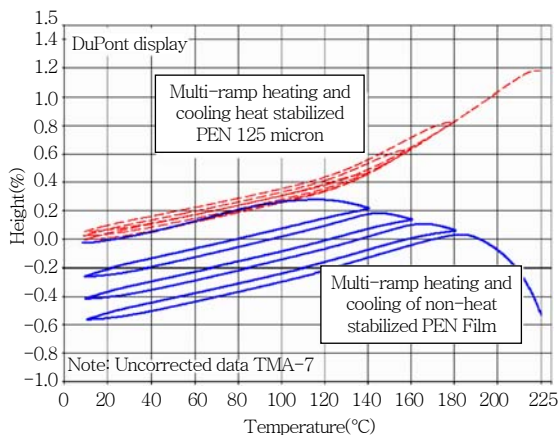
● 용어해설 ●

LCD: 박막 트랜지스터(thin film transistor)에 의하여 제어되는 액정(liquid crystal)과 두 장의 직교 편광필름이 광학 셔터(optical shutter)로 작용하여 각각의 화소(pixel)마다 투과 광량을 조절함으로써 이미지를 구현하는 디스플레이이다. LCD의 시장 규모는 2004년 510억 달러(미화)로 전체 평판 디스플레이 시장의 88%를 차지하고 있으며, 2007년에는 640억 달러로 확대될 것으로 예측되고 있다.

OLED: 1987년 이스만 코닥사의 Tang이 적층구조의 유기물질에서 고휘도로 빛을 내는 데 성공한 것을 시작으로 현재까지 많은 기술적인 진보가 이루어졌다. 휴대형 소형 정보 단말기에 OLED가 채택되어 상용화가 급진전을 이루고 있으며, LCD와는 달리 자발광형의 표시소자로 시야각과 대조비가 우수하고 저소비전력과 빠른 응답 속도, 저렴한 제조비용과 사용 환경이 넓은 장점을 가지고 있다.

는 플라스틱 기판 자체의 열적 안정성을 위해서, 내열성이 우수한 소재를 베이스 기판 소재로 이용하거나 기판 제조 시 기판의 열 이력을 최소화하기 위한 공정을 채용해 기판의 열 이력과 인접층(HC 혹은 OC layer)과의 열적 거동의 차이(mismatch)를 최소화하는 방향으로 접근을 하고 있다. 두번째로 세트 업체에서는 플라스틱 기판을 이용해 관련 공정을 진행함에 있어 공정을 항온, 항습 분위기 하에서 진행해 공정의 신뢰성을 확보함과 동시에 플라스틱 기판의 열 이력을 최소화하기 위해 공정 온도를 최대한 낮추려는 노력을 기울이고 있다. 또한 높은 공정 온도에 의해 열적 변형이 일어난 플라스틱 기판은 충분히 상온까지 냉각한 후 공정을 진행해 각 공정이 동일한 기판 상태에서 진행되도록 하고 있다.

열처리에 따른 기판의 변화율은 열처리 온도에도 의존성을 보이지만 시간에 따라서도 의존성을 보인다. 이 같은 특징으로 인해 기판의 제조 단계에서 적절한 열안정화(heat-stabilized) 공정을 추가해 진행하면 이 공정을 진행하지 않은 기판에 비해 훨씬 향상된 치수 안정성을 보이는 플라스틱 기판을 얻을 수 있다. (그림 5)는 열안정화 공정을 진행한 PEN과 그렇지 않은 PEN의 thermomechanical 분석을 8°C에서 출발해 140°C, 160°C, 180°C 그리고 220°C까지 가열과 냉각을 반복하면서 평가한 결과이다. 열안정화를 하지 않은 기판의 경우 가열 후 냉각에 의



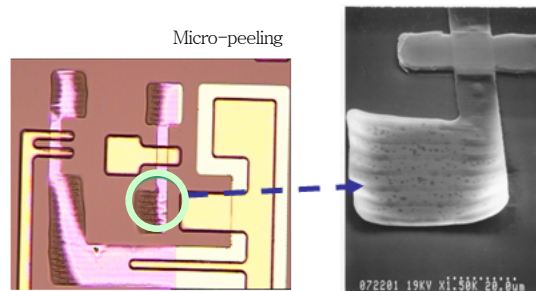
(그림 5) 열안정화 공정 도입의 유무에 따른 PEN 기판의 치수 안정성 변화

해 치수 변화율이 줄어들고 있으나 기판의 치수에 영구 변형이 일어났음을 볼 수 있다. 이에 비해 열안정화 공정을 진행한 기판의 경우 기판의 영구 변형이 일어나지 않았다.

열적 요인 이외에 기판의 치수 안정성은 디스플레이 형성 공정 중 사용된 용매(주로 물에 의한)에 의한 팽윤(swelling) 현상에 의해서도 문제가 될 수 있으나 이 문제는 각 공정 단계 사이에 적절한 탈용매 과정을 도입해 해결하고 있다.

2. 낮은 CTE

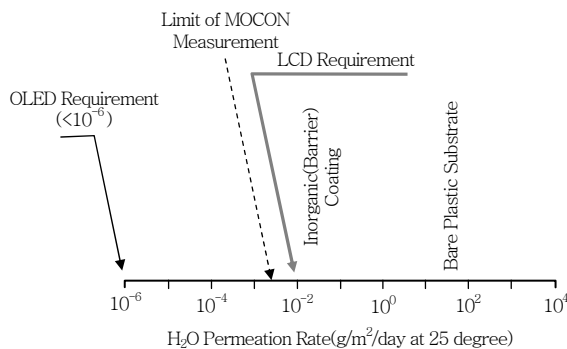
기판의 열적 거동을 평가하는 방법으로는 앞서 언급한 것처럼 기판을 가열 후 초기 온도까지 냉각시켜 기판의 치수 변화율(이때 보통은 수축 현상이 일어남)을 평가하는 방법과 일정 가열 온도에서의 기판의 늘어나는 정도를 평가하는 방법이 있는데, 후자의 평가 결과를 CTE로 정의한다. 플렉시블 디스플레이를 구현하기 위해서는 플라스틱 기판 위에 여러 층의 무기물(특히 구동부)을 적층하게 되는데 이때 기판과 적층된 층이 고온 공정에서 CTE 차이가 많이 날 경우 (그림 6)에서 보는 것과 같이 증착 층이 crack이 생긴다든지 박리가 일어날 수 있다. 따라서 플라스틱 기판의 CTE는 20pm/°C 이하의 값이 선호되나 현재 이 값을 만족하는 기판은 없는 실정이다. 또한 CTE는 플라스틱의 Tg 부근에서 급격히 (3배 정도) 증가하는 경향을 보이기 때문에 Tg가 높으면서 CTE가 낮은 소재가 플렉시블 디스플레이 구현에 적합한 소재로 판단된다.



(그림 6) CTE 차이에서 생긴 박막의 박리 현상

3. 높은 베리어성

기존의 유리를 대신해 플라스틱 기판이 적용되기 위해서는 유리 정도의 베리어 특성이 요구된다. 무정형 고분자(PES, PC 등)보다는 열가소성 세미결정성 플라스틱(PET, PEN 등)이 조금 낮은 경향을 보이지만 플라스틱 베이스 기판만으로는 대체적으로 1~100g/m²[day] 정도의 높은 투습도를 보인다. 그러나 디스플레이의 이미지 특성의 열화(액정의 오염, 구동 소자의 열화, OLED cathode 메탈층의 산화 등)를 막기 위해서는 외부로부터 디스플레이 내부로 들어오는 오염 인자(산소, 수분, 먼지 등)를 차단할 수 있는 베리어 박막이 플라스틱 기판에 필요하다. 이때 요구되는 베리어 박막의 품질은 오염 인자에 대한 민감도에 따라 조금씩 다를 수 있지만 LCD의 경우 ~10⁻²g/m²[day] 정도, OLED의 경우 < 10⁻⁶g/m²[day] 정도의 베리어 박막이 요구된다((그림 7) 참조). 플라스틱의 베리어 박막에 관한 연구는 1950년대부터 식품 포장재 개발을 위해 시작되었지만, 플라스틱 기판용 베리어의 경우 기판의 광투과도를 손상시키지 않으면서 기존의 식품 포장재의 베리어보다 투습도가 1/1000 이하인 베리어 박막이 요구된다. 베리어 박막의 품질은 증착면의 청결도, 베리어 박막의 치밀도, 인접층과의 계면 특성이 복합적으로 결부된 특성으로서 최근에는 유기/무기 복합박막이 서로 적층된 구조의 베리어 막이 많이 연구, 검토되어 지고 있다. 베리어 박막의 특성을 평가하는 방법으로는 MOCON사의 투습도 및 투산



(그림 7) 디스플레이별 요구 투습도

소도 평가 장비가 가장 일반적으로 사용되고 있으나 장비의 측정 한계(투습도의 경우, < 5×10⁻³g/m²[day]의 경우에는 측정 불능)때문에 지극히 산소 및 수분에 대한 투과도가 낮은 기판의 특성은 다른 형태의 평가 수단이 요구된다. 다양한 평가 수단이 있으나 MOCON 장비로 평가할 수 없는 베리어 특성은 칼슘 테스트 방식으로 많이 평가가 진행되고 있다.

4. 강직성

플라스틱 기판의 경직성(rigidity)은 기판의 공정 적합성을 평가하는 중요한 의미가 있는데, 이는 young's modulus(*E*), 두께(*t*), poisson's ratio(*ν*)의 함수로 정의된다.

$$Rigidity = \frac{E \times t^3}{12(1 - \nu)} \quad (1)$$

Young's modulus의 경우 열가소성 세미결정성 플라스틱이 무정형 고분자보다 3배 정도 큰 값을 보이므로 동일한 두께의 기판의 경우 열가소성 세미결정성 플라스틱이 무정형 플라스틱보다 공정을 진행하는 입장에서는 3배 정도 딱딱하게 느끼게 된다. Poisson's ratio는 외부의 힘에 대한 가로, 세로의 변형비로서 일반적인 플라스틱의 경우 0.3~0.4 정도의 값을 보여준다.

5. 투과도

플라스틱 기판의 투과도(transmittance)는 디스플레이의 이미지 특성과 소비 전력에 큰 영향을 미치는 중요한 소재특성으로서 디스플레이용으로 적용하기 위해서는 고투과도 및 공정상의 변화(열 및 용매처리 공정)에 따른 소재의 결정화도 및 표면 변화에 따른 산란, 반사도의 변화가 일어나지 않아야 한다. 투과도를 평가하는 방법으로는 전 가시 광선 영역(400~700nm)의 혼합 광에 대한 광특성(투과, 반사) 혹은 특정 파장(550nm)에서의 광특성을 평가한다. 현재 적용이 검토되는 대부분의 광학 기판은 550nm에서 고투과도 (> 85%)를 보이며, 베이스 필

름과 베리어 박막까지 적층된 필름의 광특성을 비교해 보아도 큰 유지차를 보이지 않는 것이 일반적이다.

6. 내구성(Durability)

종이같은 혹은 bendable 디스플레이를 실현하기 위해서는 기판을 구성하는 구성층의 기계적 특성을 이해할 필요가 있다[4]. 플라스틱 기판은 베이스 기판, 베리어, HC, OC, 투명 전극 등의 유기물과 무기물이 적층된 다층(multilayer) 구조로서 이루어져 벤딩(bending) 혹은 사용중에 구성 박막의 균열 및 층간의 박리 현상이 생길 수 있다. 이와 같은 플라스틱 기판의 구조적 문제는 유기물과 young's modulus 값이 약 100배 정도 차이가 나는 무기물(베리어, 투명 전극)층에 기인한 것이지만 무기물을 대체할 유기물 소재가 개발되지 않는 한 피할 수 없는 문제이다. 따라서 기판의 기계적 특성을 확보하면서 구부릴 수 있는 신뢰성이 확보된 디스플레이를 구현하기 위해서는 적절한 유기 소재의 개발뿐 아니라 각 층(특히 무기물층)의 기계적 특성을 바탕으로 적절한 기판 설계가 절실히 필요하다.

여러 층(무기물 및 유기물)이 적층된 플라스틱 기판을 기계적 파단이 일어날 때까지 벤딩하면 (그림 8)에서 보는 바와 같이 내부의 기판 쪽에서는 internal stress가 발생하고, 기판 위에 증착된 박막에서는 증착 박막과 플라스틱 기판과의 adhesion failure가 발생을 하거나 증착 박막층 내부의 cohesive failure가 수반되게 된다.

벤딩에 의해 플라스틱 기판에 가해진 internal stress(σ_i)는 박막 코팅 전후의 curvature radius

(R_1, R_2)와 박막 코팅 전후의 young's modulus, poisson's ratio, 두께 등을 대입해 식 (2)로부터 계산될 수 있다.

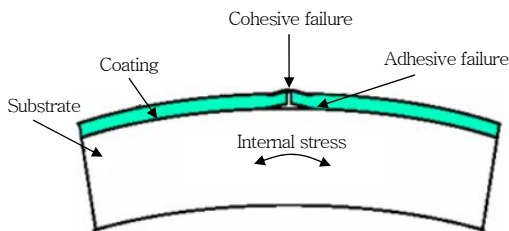
$$\sigma_i = -\frac{E_s \times h_s^2}{6(1-\nu_s)h_c} \left(1 + \frac{h_c}{h_s} \left(4\frac{E_c}{E_s} - 1\right)\right) \times \left(\frac{1}{R_2} - \frac{1}{R_1}\right) \quad (2)$$

이때 E_s 와 E_c 는 기판과 코팅 박막의 young's modulus, ν_s 는 기판의 poisson's ratio, h_s 와 h_c 는 각각 기판과 코팅 박막의 두께이다.

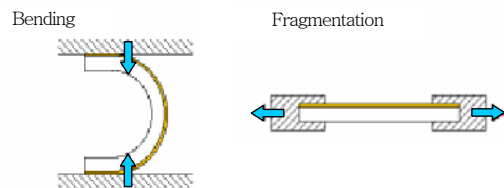
증착 박막의 cohesive failure를 평가하는 수단 으로서는 크게 벤딩을 이용하는 방법과 파쇄(fragmentation) 방법이 있다. 벤딩 방법은 (그림 9)에서 보는 바와 같이 상하로 물려진 플라스틱 기판을 양쪽에서 stress를 가하면서 플라스틱 기판의 증착 박막의 cohesive failure를 관찰하는 방법으로서 실험이 용이하여 많이 이용되고 있다. 파쇄 방법은 기판을 양쪽으로 연신하면서 증착 박막의 cohesive failure를 CCD 카메라를 이용해 관찰하는 방법을 이용한다.

증착 박막(투명 전극(ITO, IZO), 베리어(SiN, SiO, SiC))의 cohesive failure를 현상학적으로 살펴보면, 기판에 strain을 가하지 않은 상태에서 기판 표면을 살펴보면(그림 10a), 박막을 증착하는 과정 중에 혼입된 이물(particles) 혹은 증착 박막의 아래 플라스틱 기판 표면에 존재하는 pin-hole 혹은 이물 등의 microdefect를 관찰할 수 있다.

기판에 strain을 가함에 따라서 기판 혹은 증착면에 존재하던 microdefect를 중심으로 crack이 시작됨을 볼 수 있으며(그림 10b), 더욱 strain이 증가하면 증착 박막 두께의 100~500배 정도의 길이를 가진 crack이 나타나기 시작한다. 이때가 되면 crack의 성장은 더욱 급격해지고, 이에 따라 (그림 10c)에



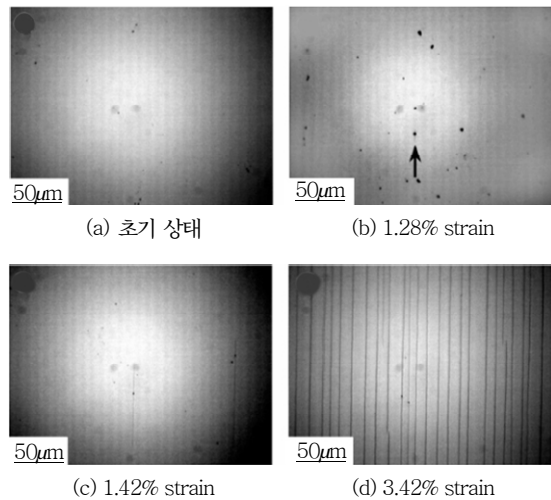
(그림 8) 벤딩에 따른 플라스틱 기판의 변형



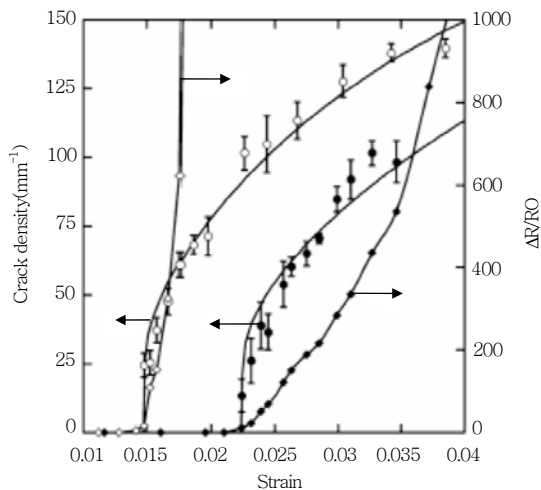
(그림 9) 플라스틱 기판의 기계적 시험 방법

서 보여진 것처럼 변형이 나타나게 된다. Crack이 성장 과정을 지나 더욱 큰 strain이 증착 박막에 가해진 경우에는 (그림 10d)에서 보여지는 것처럼 tensile failure가 전체 증착 면에서 관찰되게 된다.

(그림 11)은 벤딩 방법을 이용해 플라스틱 기판 위에 ITO가 각각 50, 100nm 증착된 기판의 cohesive failure를 관찰한 결과이다. (ITO의 두께가 두



(그림 10) 100nm의 ITO가 코팅된 플라스틱 기판에서의 Crack의 진행 과정



<자료>: Thin Solid Films, Vol.460, 2004, p.156.

(그림 11) ITO가 코팅된 플라스틱 기판의 외부 변형에 대한 Tensile Crack 밀도와 저항 변화. 50nm: filled symbols, 100nm: open symbols

꺼워질수록 면저항은 감소하며 특히 OLED의 경우 저저항의 투명 전극이 요구된다.) (그림 11)을 보면 100nm ITO 박막의 경우 50nm ITO 박막에 비해 상대적으로 낮은 strain에서부터 저항치가 급격히 증가하는, 즉 crack이 증가하는 모습을 보여준다. 이 같은 결과는 ITO 박막의 두께를 증가시키는 것은 면저항을 낮출 수 있는 방법이지만 상대적으로 응용성(특히 벤딩)에서 많은 문제점을 야기할 수 있음을 함께 보여준다. 이 결과는 베리어 무기 박막에서도 비슷하게 관찰된다. 따라서 현재 사용되는 무기 투명 전극, 베리어 막을 그대로 플라스틱 기판에 적용할 경우 bendable 디스플레이는 모르겠으나 종이같은 디스플레이를 구현하는 것은 거의 불가능하다.

7. 용도별 요구특성

플라스틱 기판은 사용 목적에 따라 조금씩 요구 특성이 달라질 수 있는데 OLED의 경우 앞서 언급한 것처럼 지극히 낮은 투습도 및 투산소도가 요구되며 이것은 OLED 패널의 안정성 측면에서 가장 중요한 관리 항목이다. OLED를 하부 발광(bottom-emission) 형태로 사용하는 경우 플라스틱 기판을 통과한 광을 시각적 이미지로 인식하기 때문에 고투과도가 요구된다. 또한 OLED는 구조상 발광층이 증착되는 증착면의 표면 평탄도, 두께 균일도, 내환경성이 이미지 특성에 중요한 영향을 미친다(<표 2> 참조).

반도체 공정에 플라스틱 기판을 적용하기 위해서는 다수의 별도 관리 항목이 요구되는데, 두께 균일도, 플라스틱 기판 위에 형성된 무기 박막과 플라스틱 기판과의 높은 접착력, 충분한 기계적 특성이 요구된다. 가장 중요한 것은 공정성·신뢰성에 가장 큰 영향을 미치는 기판의 내열 특성이다. 기존의 반도체 공정은 높은 공정 온도를 이용한 무기 박막 증착이 많은 부분을 차지하는데, 플라스틱 기판에 적용하기 위해 공정 온도를 무리하게 낮추는 것은 증착 무기 박막의 품질을 떨어뜨려 소자의 성능 저하

〈표 2〉 OLED 구현시 요구되는 기판의 특성치

Barrier properties	< 1 μ g H ₂ O/m ² [day] @38°C, 90% RH < 10 ⁻⁶ cc O ₂ /m ² [day]
Transmittance	> 85%
Sheet resistance	50 Ω /sq(preferably 10 Ω /sq)
Roughness(nm)	< 20Å
Thickness uniformity	0.01mm and 5%
Environmental stability	100h@50°C, 90% RH; 250h@100°C and -25°C; 15 Cycles from -20 to 100°C in 5°C/min; without any change in physical and optical properties

<자료>: 42nd Annual technical conference proceeding, 1999.

를 초래하게 된다. 따라서 플라스틱 기판의 내열 특성은 증착 박막의 품질 및 소자 특성에 직접적인 영향을 미치는 인자로 인식되고 있으며, 원활한 반도체 공정 진행을 위해서는 20ppm/°C 이하의 CTE 및 180°C 공정에서 열적 안정성(치수 안정성)을 확보할 수 있어야 한다.

또한 최대 공정온도와 상온 사이의 thermal cycle에서 기판의 수축률이 0.003% 이내여야 한다. 어떤 디스플레이의 구동부로 사용될지에 따라 조금씩 차이가 있을 수 있으나 앞서의 OLED에서 요구되던 정도의 광투과도, 투습도, 투산소도 등이 필요하다. 앞서의 내열성 이외에 중요한 항목은 내화학성으로 공정에서 사용되는 모든 용매에 대해서 내성을 가지고 있어야 한다.

VI. 결론

지금까지의 유리 기반형 디스플레이는 원판 유리의 크기에 의존한 시설 투자시기 및 규모가 디스플레이 업체의 성공 요인이었으나, 차세대 디스플레이는 제품의 용도 다양화 및 다양한 제품 대응 여부가 향후 시장 지배력을 좌우할 것으로 보인다. 이런 시장에서는 지금까지 보다 부품, 소재의 중요성이 더욱 증대하게 될 것이다.

많은 플라스틱 기판이 소재 업체를 중심으로 적용 검토되고 있으나 기존의 유리를 대체할 만큼의

특성이 확보된 기판은 현재 없으며, 이 같은 이유로 몇 가지 시제품들은 발표되었으나 이미지 특성 및 신뢰성이 확보된 플렉시블 디스플레이는 아직 보고되지 않고 있다. 디스플레이의 발전 추이를 볼 때 향후 플렉시블 디스플레이가 하나의 시장 흐름을 형성할 것으로 보이나 현재의 기술적 수준을 고려하면 획기적인 소재 개발 및 공정개발이 진행되지 않고서는 기존의 유리 기반형 디스플레이 정도의 품질 특성을 확보하기는 어려워 보인다.

플렉시블 디스플레이의 핵심 소재인 플라스틱 기판의 품질은 디스플레이의 이미지 특성 및 공정 수율에 가장 큰 영향을 미치는 소재 분야이나 국내의 연구 기반은 취약한 실정으로, 국내의 소재 업체는 최근에 들어서 플라스틱 기판의 사업화를 위한 R&D 연구에 착수하였으며, 세트 업체에서는 외국 선진 업체와 기술 협정을 맺고 전량 필요 물량을 수입해 관련 연구를 수행하고 있다.

향후에도 디스플레이 시장에서 지금과 같은 시장 지배력을 확보하기 위해서는 관련 소재 분야에 대해 지속적인 기술 개발과 함께 마케팅 측면에서도 장기적 비전을 가지고 관련 문제를 해결하고자 하는 노력이 절실히 요구되고 있다.

약어 정리

CRT	Cathode-Ray Tube
CTE	Coefficient of Thermal Expansion
FPD	Flat Panel Display
ITO	Indium Tin Oxide
IZO	Indium Zinc Oxide
LCD	Liquid Crystal Display
MD	Machine Direction
OLED	Organic Light-Emitting Device
PAR	Fluorene-containing Polyarylate
PC	Polycarbonate
PEEK	Polyetheretherketone
PEN	Polyethylene Naphthalate
PES	Polyethersulfone
PET	Polyethylene Terephthalate
PI	Polyimide
TD	Transverse Direction

참 고 문 헌

- [1] Jin Jang, "Displays Develop a New Flexibility," *Materialstoday*, Vol.9, 2006, pp.46-52.
- [2] Williams A. MacDonald, "Engineered Films for Display Technologies," *J. Mater. Chem.*, Vol.14, 2004, pp.4-10.
- [3] Jay Lewis, "Materials Challenge for Flexible Organic Devices," *Materialstoday*, Vol.9, 2006, pp.38-45.
- [4] Y. Leterrier, L. Medico, E. Demarco, J. -A. E. Manson, U. Betz, M.F. Escola, M. Kharrazi Olsson, and F. Atammy, "Mechanical Integrity of Transparent Conductive Oxide Films for Flexible Polymer-based Displays," *Thin Solid Films*, Vol.460, 2004, pp.156-166.