

디스플레이용 플라스틱 기판의 전망

Plastic Substrates for Flexible Display

김기현 (G.H. Kim) 유·무기나노복합소재팀 선임연구원
 송윤호 (Y.H. Song) 유·무기나노복합소재팀 팀장

목 차

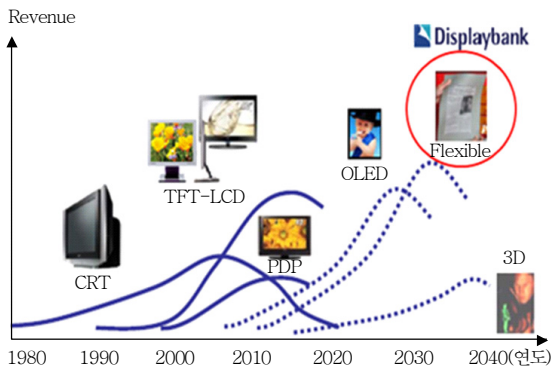
-
- I . 서론
 - II . 플라스틱 기판의 특성
 - III . 열적 안정성 확보 방안
 - IV . 응용별 기판의 요구 특성
 - V . 결론

플렉시블 기판은 플렉시블 디스플레이의 공정성, 성능, 신뢰성, 가격을 결정하는 가장 중요한 부품으로서 산업적인 주목을 받고 있다. 플렉시블 기판 중에서는 플라스틱이 가공의 용이성, 저중량, 연속공정의 적합성으로 인해 적용이 광범위하게 검토되고 있지만, 광학용 기판으로서는 많은 소재적/공정적 문제점을 안고 있다. 이를 해결하기 위해 플라스틱 기판의 특성(주로 열적 안정성)을 향상시키거나, 플라스틱 기판에 적합한 저온 형성용 유/무기 소재 및 공정을 개발하는 연구가 많이 진행되고 있으나, 수요 업체의 요구수준에는 미치지 못하고 있다. 본 자료에서는 디스플레이용 기판으로서 플라스틱의 문제점을 살펴보고 이를 개선하기 위한 최근의 소재 및 수요 업체의 동향을 알아본다.

I. 서론

현대 사회가 고도의 정보화 시대로 발전함에 따라 전자 디스플레이 산업의 중요성이 증대하고 있다. FPD의 발전 방향을 살펴보면 현재까지는 기술/제품 개발의 방향이 고품격 이미지 구현 및 대면적화를 중심으로 진행되어 왔으나, 향후는 저가격화 및 플렉시블화가 디스플레이의 산업적 발전 방향이 될 것으로 예측되고 있다.

신 공정 개발(inkjet/roll-to-roll 공정, nano-imprinting, non mask 공정), 차세대 유기소재 개발(차세대 잉크, TFT/CF 소재 등), 부품 소재의 통합화/단순화를 통한 저가격화 및 얇고, 깨지지 않고 저중량의 새로운 특성을 부여한 플렉시블화가 새로운 산업 흐름이라고 한다면 이에 부합하는 가장 적합한 FPD는 플라스틱 기판을 이용한 플렉시블(flexible) 디스플레이가 될 것으로 보여진다(그림 1) 참조.



(그림 1) 디스플레이의 발전 추이[1]

플렉시블 디스플레이는 2017년경이 되면 물량 기준으로 전체 FPD 시장의 34% 정도를 차지할 것으로 예측되고 있다[1].

플렉시블 디스플레이는 휴대폰, PDA, MP3 player 등의 소형 모바일 디스플레이에 우선 채용될 것으로 보이며 플렉시블 디스플레이의 대면적 기술이 확보되면 기존 디스플레이가 채용되던 노트북, 모니터, TV 등의 중/대형 분야에서 유리기반 디스플레이를 대체할 것으로 기대된다. 또한 기존의 디스플레이로는 적용이 제한적이거나 불가능했던 새로운 분야에 응용이 될 것으로 보여진다. 대체시장 및 신규시장의 시기별 규모는 <표 1>, <표 2>와 같다[1].

플렉시블 디스플레이는 2009년 low-end 소형 모바일 폰을 시작으로, 2011년경에는 high-end 모바일 폰 시장에서 기존의 디스플레이를 대체할 것으로 예측되며, 2017년이 되면 대체시장 규모는 56억 달러까지 성장할 것으로 기대된다[1].

신규 애플리케이션 시장규모는 2010년 2.7억 달러, 2017년 66억 달러로 급성장이 예측된다[1].

플렉시블 기판은 디스플레이의 성능(performance), 신뢰성(reliability), 가격(cost)을 결정하는 가장 중요한 부품으로 인식되고 있다. 현재 유리 판가의 500% 이상인 플라스틱 기판의 판가는 본격적인 시장 형성에 따라 하락해 2012년 이후가 되면 유리 가격의 200% 내외, 패널 가격의 10% 정도를 차지하게 될 것으로 예측된다[2]. 플라스틱 기판의 향후 시장 전망은 <표 3>으로 예측된다.

<표 1> 대체시장 규모 - 금액기준[1]

(단위: 백만 달러)

Size	Main Application	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017
S&M	Mobile Phone (Low-end), Others	-	-	6.6	17.4	71.5	121.1	222.7	573.8	948.5	1,413.9	1,751.0
	Mobile Phone (High-end), Others	-	-	-	-	20.9	52.0	238.8	369.2	646.0	1,692.1	2,775.5
	Mobile Others	-	-	-	-	-	-	18.9	45.7	194.9	294.0	491.7
Large	Notebook	-	-	-	-	-	-	-	-	-	270.1	461.5
	Monitor	-	-	-	-	-	-	-	-	-	16.5	38.9
	TV	-	-	-	-	-	-	-	-	-	48.6	121.7
Total		-	-	6.6	17.4	92.4	173.1	480.4	988.7	1,789.4	3,735.2	5,640.4

〈표 2〉 신규시장 규모 - 금액기준[1]

(단위: 백만 달러)

Technology	Size	Application	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	
E-Paper	~7°	e-Book		10.5	48.5	152.0	406.5	722.2	1382.1	1428.7	2617.8	2881.3	2551.7	
		Smart Card		1.1	2.7	5.0	21.6	31.6	42.3	48.6	47.3	44.5	35.0	
		Wearable		0.3	1.5	2.8	4.6	14.7	5.7	0.0	0.0	0.0	0.0	
		Medical				0.6	1.1	1.8	2.5	3.5	4.5	5.0	13.8	
		Military				4.5	16.8	27.3	37.0	52.5	99.0	121.5	225.0	
		Others		3.5	6.4	12.0	19.3	22.0	31.5	59.5	78.1	125.6	162.8	
	8°~15°	e-Book			27.0	46.2	35.1	105.0	124.0	312.0	404.7	840.0	1283.5	
		Others				16.8	7.8	17.5	46.5	91.0	230.0	382.2	855.1	
	16°~30°	Sign Display				10.4	24.5	45.0	73.8	90.0	132.0	201.5	210.6	
		Others				15.6	14.7	22.5	41.0	54.0	72.6	93.0	108.0	
	31°~49°	Sign Display						8.0	21.0	60.5	90.0	103.5	140.0	
		Others						8.4	24.0	38.0	71.0	110.5	150.0	
	50°~	Sign Display							18.0	40.5	72.0	180.0	275.0	
		Others							9.0	24.3	36.0	54.0	66.0	
	Sub Total			0.0	15.4	86.1	265.8	552.0	1026.1	1858.3	2303.1	3955.0	5142.5	6076.6
	OLED,LCD	~9°	Automotive							7.5	21.0	110.5	147.5	302.5
Military									7.0	19.5	42.0	66.0	90.0	
Others									3.5	6.0	7.5	10.5	13.3	
10°~		Sign Display										25.0	66.0	
		Others										25.0	44.0	
Sub Total			0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	18.0	46.5	160.0	274.0	
Total			0.0	15.4	86.1	265.8	552.0	1026.1	1876.3	2349.6	4115.0	5416.5	6592.4	

〈표 3〉 플라스틱 기판의 세계시장 전망[2]

연도	2016	2017	2018	2019	2020
물량 (천 sq)	5,600	6,592	9,229	12,921	18,089
금액 (억 원)	5,600	6,592	9,229	12,921	18,089

II. 플라스틱 기판의 특성

플라스틱 기판은 메탈 호일, 유리에 비해 무게가 가볍고(1/2~1/7), 충격에 강하고, 가공이 용이해 형태/두께의 제약이 거의 없다는 점과 산업적으로 플렉시블 디스플레이의 저가격화 실현을 위한 연속공정(roll-to-roll 공정)에 가장 적합한 소재로서 플렉

시블 디스플레이의 개발 초기부터 산업적 주목을 받았다[3].

플라스틱 기판은 유리에 비해 소재적 장점도 있으나 기존의 유리 기판에서는 문제가 되지 않던 내화학성, 내열성, 흡습성, 투과도 등에서 많은 문제점을 안고 있다.

유리는 Tg가 690°C이지만, 열가소성 세미 결정성 고분자(PET, PEN)는 Tg가 80~120°C, 고내열성 무정형 고분자(PC, PES, PAR)는 150~325°C에 불과해 유리와 비교해 플라스틱 기판은 낮은 공정온도를 요구한다[3]. PES 기판은 ~150°C, PC는 ~120°C, PET 및 PEN은 100~120°C 정도가 최대 허용 공정 온도로 알려져 있다.

〈표 4〉 소재별 CTE

분류	소재	CTE(ppm/°C)
무기물	유리	4
	PET	30
	PEN	20
고분자	PC	70
	PES	60~70
	AryLite	70

따라서 플라스틱 기판을 적용해 디스플레이를 구현하기 위해서는 저온(120~150°C 이하) 형성용 소재 개발을 통해 공정(TFT 혹은 CF 형성온도) 온도를 낮춰 플라스틱 기판의 열 이력 변화를 최소화하거나, 사용되는 플라스틱 기판의 내열성을 향상시키는 방안이 고려되어야 한다. 플라스틱 기판을 일정한 고온에까지 승온한 후 상온으로 냉각하는 공정을 진행하는 경우 고온에서는 기판이 팽창하고, 상온으로 온도를 냉각할 때에는 수축 현상을 보이게 되는데 이같은 현상은 플라스틱 기판의 공정 적용에 큰 걸림돌이 되고 있다.

열적 특성을 평가하는 또 다른 항목인 열팽창계수(CTE)를 비교해 보면(〈표 4〉 참조), 유리가 4 ppm/°C 정도이나 플라스틱은 이보다 5~20배 정도의 큰 값을 보인다. CTE는 일정 가열 온도에서의 기판의 늘어나는 정도를 나타낸다(식 1) 참조).

$$CTE = \frac{dt/t}{dT} \quad (1)$$

플라스틱 소재는 유리와는 달리 성긴 분자 구조에 분자간력도 약해 외부 환경(열, 용매) 변화에 대해 취약할 뿐 아니라, 친 수성기를 대부분 포함하고 있어 공기 중에 노출되거나 디스플레이 형성 공정 시 리소그래피(photolithography) 공정과 같이 현상시 물을 세정액으로 사용하는 경우 기판의 종류에 따라 다소간 차이를 보이나 수분이 플라스틱 기판 내부에 함유되어 공정성 및 신뢰성에 부정적인 영향을 미칠 수 있다.

또한 플라스틱 소재는 유리와는 달리 외부의 오염 인자(수분, 산소)에 대해 투과성을 보이므로 외부

〈표 5〉 응용별 플라스틱 기판의 베리어 요구 수준

	Water Vapor Permeation Rate (WVPR, g/m ² /day@38°C; 90%RH)
OLED	10 ⁻⁶
Solar Cell	10 ⁻⁴
LCD	
RFID Tag	10 ⁻²
EL Display	

인자에 의한 소자의 열화를 방지하기 위해서는 적절한 패키징(베리어) 방법이 요구된다(〈표 5〉 참조).

디스플레이용 기판으로서 플라스틱은 소재/공정적으로 문제점을 안고 있어 이 같은 문제점을 보완하기 위해 플라스틱은 다층 구조를 가지고 있다. 먼저 플라스틱 필름(base film)의 상, 하 양면에 고투과성을 가진 아크릴레이트(acrylate) 혹은 아크릴레이트-에폭시(epoxy) 수지를 1~2μm 코팅 후 경화하여 필름의 내화학성을 보강한다. 이때 적용되는 층을 HC(hardcoat) 혹은 UC(undercoat) 층으로 부른다[3]. 그리고 HC 혹은 UC 층 위에 외부의 수분, 산소의 차단을 위한 베리어 층이 도입된다. 이때 형성되는 베리어 층은 일반적으로 공정 특성상 한 쪽 면에만 형성하는 것이 일반적이며, 베리어 층은 업체마다 소재, 공정이 차별화되어 있으며, 한 층의 무기물로만 구성하거나 유기/무기, 무기/무기의 다층 구조로 구성된다. 무기물인 베리어 박막을 외부적 손상으로부터 보호하기 위해서 가교된 아크릴레이트 혹은 아크릴레이트-에폭시를 이용해 베리어 층위에 OC(overcoat) 고분자 층을 적층해 보통 4~5층의 다층막(OC/Barrier/UC/Base film/UC 혹은 OC/Barrier/Base film/UC)으로 플라스틱 기판을 구성한다[3],[4].

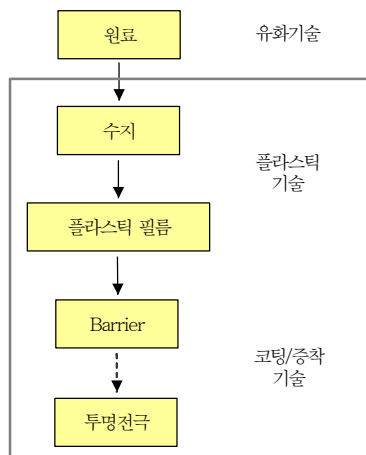
플라스틱 기판의 구조는 공정성 및 응용성을 고려해 다양한 형태가 적용, 검토되고 있다. 예를 들면 기판의 흡습성을 보완하고 열 수축률을 낮춰 공정성을 개선하고, 내환경성을 확보하기 위해 베리어 박막을 플라스틱 필름의 양쪽에 형성한 OC/Barrier/UC/Base film/UC/Barrier/OC 구조, 터치 스크린과 같이 기판상에 투명 전극이 함께 요구될 때에는

ITO 혹은 IZO/OC/Barrier/UC/Base film/UC, ITO 혹은 IZO/Barrier/UC/Base film/UC, ITO 혹은 IZO/UC/Base film/UC/Barrier/OC 등이 있다.

1. 플라스틱 기판의 제조 공정

플라스틱 기판을 제조하는 생산 단계는 (그림 2)에서 보인 것처럼 플라스틱 기판의 원료를 합성하고 이를 반응시켜 고분자 수지(polymer resin)를 제조하는 단계, 합성된 고분자의 열적 거동을 고려해 용융-압출 혹은 용매-캐스트 방법으로 50~200 μ m 두께의 필름을 제조하는 단계, 필름상에 베리어 박막을 적절한 적층 방법(건식, 습식)을 이용해 코팅하는 단계, 그리고 응용성에 따라 터치 스크린, 태양 전지, OLED의 전극 물질로 투명 전극(transparent conducting layer)을 추가로 형성하는 단계로 크게 나누어 볼 수 있다.

플라스틱 기판 소재로서 적용이 검토되고 있는 PES, Colorless PI, PC, PEN, COC는 일본이 전세계 사용량의 대부분을 생산/공급하고 있다. PEN은 DuPont Teijin Film이, PC는 Teijin, Colorless PI는 Mitsubishi Gas가 공급을 하고 있으며, PES는 Sumitomo Bakelite사가 수지의 원료 생산에서부터 투명전극 코팅까지 일괄 생산 체계를 구축하고 있다. 일본은 플라스틱 기판의 주용도가 플렉시블 AMLCD, 전자종이, 터치 스크린 개발에 맞추어져



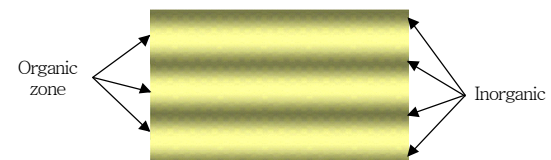
(그림 2) 플라스틱 기판의 제조 공정

있기 때문에 대부분 양산되는(스퍼트(sputter) 장비를 많이 이용) 기판의 베리어 품질은 OLED의 요구치에는 미치지 못하고 있다. 최근 일부 장비 업체를 중심으로 OLED용 베리어 박막에 관한 연구는 진행되고 있으나, 기존 연구와 차별화되어 있는 것 같지는 않다.

Sumitomo Bakelite사는 PES 위에 ITO를, Teijin사는 PC 위에 IZO를 각각 형성한 제품을 시판하고 있으며, PEN, COC, Colorless PI 기판을 생산하는 DuPont Teijin Film, JSR, Mitsubishi Gas사는 투명전극을 형성하지 않은 기판을 시생산하고 있다. 일본은 기판 원료의 합성을 위한 유화 기술에서부터 수지화 기술, 플라스틱 기판화 공정 기술, 베리어 박막 코팅 기술에 이르기까지 관련 소재, 공정, 장비 전 분야에서 세계 최고의 경쟁력을 보유하고 있다.

미국의 경우, PC, PET 등의 범용 투명 수지를 생산하던 GE Plastic, DuPont 등의 화학업체에서도 플라스틱 기판용 수지에 관심을 가지고 최근 연구를 수행하고 있으나 고내열성 및 고투광성을 가진 수지 분야에서는 일본에 기술적으로 뒤져 있다. 1999년 설립된 Vitex사는 유기막과 무기막을 다층막을 반복적으로 형성하는 방법으로 OLED에서 요구하는 $\sim 10^{-6}$ g/m²/day의 고품위의 베리어 박막을 세계 최초로 보고하였다[3]. GE Global Research는 PECVD를 이용해 하나의 챔버(chamber) 안에서 조성비를 연속적으로 바꿔가면서 SiO_xC_y와 SO_xN_y를 교차 형성하는 방식((그림 3), graded 베리어 박막)으로 PC 기판 상에 베리어 박막을 얻었다. 얻어진 박막의 특성은 다음과 같다[5].

(투습도, low 10⁻⁵~mid 10⁻⁶g/m²/day; 내화학성, pass; 투과도, 82%; adhesion, 4B; 치수안정성, 4ppm/hr; 평균 표면평탄도, 0.6nm)



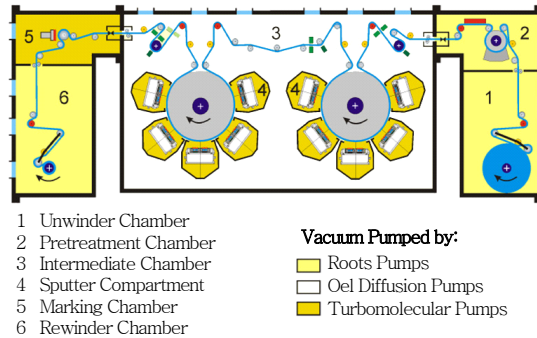
(그림 3) GE Global Research사의 Grated 베리어의 개략도

〈표 6〉 플라스틱 기판의 종류 및 장, 단점[3],[4]

	장점	단점
PET	- Resistance to UV - Chemical resistance - Low water absorption - Low cost - Environmental stability	- Birefringence - Whitening (after thermal treatment)
PEN	- Chemical resistance - Low CTE - Low water absorption - Resistance to UV - Low cost	- Birefringence - Optical transmittance
PC	- Optical transmittance - Process-ability	- Chemical resistance - High CTE - Resistance to UV - Out-gassing
PES	- Resistance to UV - Optical transmittance	- Chemical resistance - High cost - High water absorption - High CTE
PI	- Thermal resistance - Chemical resistance	- High cost - High water absorption - High CTE
AryLite	- Thermal resistance - Chemical resistance	- High cost - High CTE - Resistance to UV
COC	- Optical transmittance	- Low thermal resistance - Chemical resistance - High CTE

현재 양산 혹은 시험 생산되고 있는 플라스틱 기판의 종류 및 장, 단점은 <표 6>과 같다.

유럽에서는 생산되는 기판용 고내열성 수지는 이탈리아의 FIS사가 독자 개발한 AryLite, 기판 사업을 직접 하지는 않지만 BASF가 생산하는 PES, BAYEL사의 고내열 PC 등이 있다. FIS사는 용매-캐스팅 방식으로 고내열성 AryLite 기판을 상업 제조하여 공급하고 있지만, 베리어 박막을 형성할 기술력이 없을 뿐 아니라 베리어 관련 협력 체계를 구축하지 못한 채 사업화하여 AryLite 기판의 화학적, 열적 안정성에도 불구하고 시장 확대에는 한계가 있었다. 그러나 최근 AryLite 기판의 물성에 주목하고 AryLite 베이스 필름에 베리어를 형성해 이를 사업



(그림 4) Von ARDENNE사의 Roll-to-Roll 장비

화 하려는 움직임도 있다. 플렉시블 디스플레이용 기판을 직접 생산하는 유럽 업체는 FIS사가 유일한 것으로 보이며, 플라스틱 필름제조 및 베리어 코팅 장비는 유럽, 특히 독일 장비가 기술적 우위를 점하고 있다[6]. (그림 4)는 독일 Von ARDENNE사의 roll-to-roll 장비를 보여준다.

Phillips사는 미국의 Vitex System 혹은 GE Global Research와는 차별화된 방법으로 무기박막(SiN 및 SiO)을 반복 층으로 사용해 베리어 박막을 형성하였는데, 이때의 다층 박막은 OLED에서 요구하는 우수한 베리어($<1 \times 10^{-6} \text{g/m}^2/\text{day}$) 품질을 보였다[7].

2. 국내의 플라스틱 기판 산업 동향

가. 수지화 공정

플라스틱을 디스플레이용 기판 소재로 적용하기 위해서는 범용 수지와는 달리 엄격한 고투광성(투과율, 반사율, haze, birefringence), 고내열성(Tg, CTE, 치수안정성), 화학적 신뢰성(분자량, 분자량 분포, 반응률, 휘발성 잔류물의 농도)이 확보되어야 하기 때문에 적용 가능한 소재에 한계가 있을 뿐 아니라, 범용 수지와는 화학 구조적으로 차별화되어 있다. 최근까지 거의 관련 연구가 진행되지 못하던 국내 소재 업체에서도 플렉시블 디스플레이에 대한 수요 업체의 요구와 관련 소재의 높은 부가가치 때문에 기판용 수지를 개발하기 위해 코오롱, LG화학, 제일모직 등 기존 대기업을 중심으로 사업성 검토를

하고 있거나 실험실 수준의 R&D 연구를 진행하고 있다.

이들 회사들은 일본 업체를 중심으로 양산 혹은 시생산되고 있는 기판용 수지와는 차별화된 새로운 고내열성, 고투광성을 가진 고분자를 설계, 합성해 기판을 공급하기보다는 각 회사별로 관련 기술이 축적된 엔지니어링 플라스틱을 기판 소재로 그대로 적용하거나 기존 구조에 화학구조를 일부 변경해 시장 요구에 대응하려는 전략을 가지고 있는 것으로 보인다.

기판용 고분자 수지를 얻기 위해서는 기존의 범용 고분자의 반응 및 정제, 보관 시보다 훨씬 높은 품질관리를 요구한다. 이때 수지화를 위한 반응 조건(온도, 시간, 습도, 반응기의 크기 및 모양, 반응기 내의 교반 속도, TSC, 용매 및 개시제의 종류 등)의 변화에 따라 분자량, 분자량 분포, 반응도, 미반응 잔류물의 농도 등이 영향을 받을 뿐 아니라 정제, 보관 방법에 따라서 같은 회사의 같은 종류의 기판이라도 제품별로 미세한 특성 차이를 보인다.

기판용 수지 합성 반응은 연속공정으로 진행하지 못하고 배치(batch) 타입으로 통상 진행을 하는데 각 배치별로 진행된 고분자의 물성을 수요 업체에서 요구하는 정도로 일정하게 제어하는 것이 소재 업체 입장에서는 용이하지 않다. 이런 이유로 현재 상업화된 PES, PC 등을 보더라도 제품별로 물성 차이가 있고 위치에 따라서는 열팽창/수축 거동이 일정하지 않아 수요 업체로서는 공정 적용에 큰 어려움을 겪고 있다. 따라서 기판의 균일성 확보는 향후 플렉시블 디스플레이의 경쟁력 확보에 필수적인 요소이다.

또한 반응도에 따른 미반응 잔류물 혹은 올리고머(oligomer) 및 보관시 흡착된 오염인자(주로 수분)는 증착/열처리 공정시 가스(out-gassing) 형태로 배출되어 막질을 저하시키거나 막간의 계면 접착력에 부정적 영향을 미쳐 국부적인 2, 3차 특성 변화의 원인을 제공할 수 있으므로, 기판 내의 흡착 오염인자를 공정 중 적절한 단계를 통해 제거하지 못할 경우 제품의 안정성에 부정적인 영향을 미칠 수 있다.

나. 필름화 공정

FPD에는 편광 필름, 위상차 필름, BLU의 확산 필름, 프리즘 필름 등 많은 기능성 플라스틱 필름이 사용되고 있어서 국내에서도 고투광성 수지를 성형, 가공해 필름화하는 기술은 확보를 하고 있다. 그러나 플라스틱 기판은 앞서의 기능성 필름과는 다르게 수지의 내열 특성상 훨씬 높은 가공온도 혹은 용매를 이용한 캐스트-건조 공정을 거쳐 성형을 하기 때문에 장비적, 공정적으로 차별화되어 있다. 국내에서 양산 개념으로 플라스틱 기판을 성형하는 곳은 (주)아이컴포넌트가 BASF로부터 PES를 구입한 후 이를 용융-압출 방식으로 기판을 제조해 제품화한 것이 유일하다.

다. 베리어 코팅

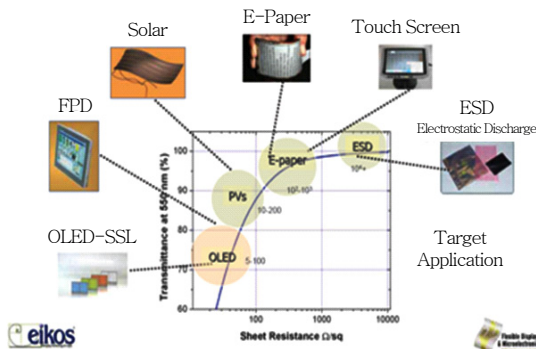
산업계에서는 (주)삼성 코닝이 폴리에스터 필름에 베리어 및 투명전극을 형성하는 장비를 구축하고 터치스크린용 플렉시블 기판을 시생산하다가 사업을 철수한 후 (주)아이컴포넌트가 PES에 베리어를 증착해 공급하고 있는 것이 국내에서는 유일하다.

연속 공정용 베리어 증착 장비를 생산하는 국내 업체는 전무하며, 기존의 FPD 혹은 반도체 박막 증착 장비를 제조하던 일부 업체를 중심으로 사업 다각화의 일환으로 플라스틱 기판의 베리어 층 형성에 관심을 가지고 배치 타입의 테스트를 진행하고 있다.

라. 투명 전극

플라스틱 기판은 유리에 비해서 내열성이 취약하기 때문에 투명 전극을 통상 150°C 이하의 저온 공정으로 형성을 한다. 저온에서 투명전극(ITO, IZO)을 형성할 경우 대부분이 비정질 상태이거나 국부적인 마이크로 결정립을 함유한 상태를 보인다.

일본의 플라스틱 기판 업체에서는 자신들의 기판에 가장 적합한 형태의 투명 전극을 외주를 통하여 기판에 형성하거나(Toray 등), 투명전극을 형성하는 일괄 생산체계를 갖추고 이를 통해 투명전극/플



(그림 5) 응용별 투명 전극의 전기적 특성요구치[8]

플라스틱 기판을 제조하고(Tejjin, Sumitomo Bakelite) 있으나, 국내에서는 이런 체계를 갖춘 회사는 없다. 투명 전극을 증착 사용할 경우 전극과 하부 막과의 계면 접착력이 문제가 되는데 일본에서는 플라스틱 기판 표면의 플라즈마 세정을 통하여 투명전극의 접착력을 향상시키는 방안 등을 연구하고 있다. 응용별 투명전극의 전기적 요구 특성은 (그림 5)와 같다.

3. 용도별 기판의 요구 특성

플라스틱 기판의 용도별 요구 특성은 <표 7>과 같다.

<표 7> 응용별 기판의 요구 특성[4]

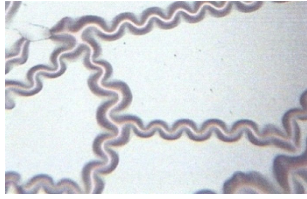
특성	요구 사항		
	AMLCD	AMOLED	Si Process
Tg(°C)		> 200	
CTE(ppm/°C)	< 20	< 20	< 30
Transmittance(%)	> 88%@550nm	> 85%@550nm	> 85%(400~700)
Thickness(μm)	from 50 to 400μm(preferably 50~150μm)		
Max. process temperature(°C)	~ 150	~ 150	10h@275°C(minimum 180°C)
Thermal shrinkage	less than 0.003% at maximum process temperature for 1h		
Thickness uniformity	Variation less than 5%		
Young's modulus	> 2.5GPa	-	1~4GPa
Roughness(nm)	< 5.0	< 2.0	-
Retardation(nm)	< 10	-	-
WVTR(g H ₂ O/m ² /day@38°C, 90%RH)	~10 ⁻²	10 ⁻⁵ ~10 ⁻⁶	

4. 광학용 기판으로서 문제점

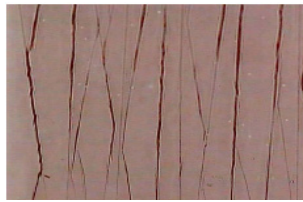
가. 낮은 열적 안정성

열처리에 따른 기판의 수축/팽창에 따른 치수 및 형태의 변화는 공정성, 디스플레이의 이미지 특성 및 양품 수율에 직접적인 영향을 미친다. 플라스틱 기판을 디스플레이 공정에 적용할 경우 최대 사용 공정 온도는 플라스틱의 내열성, 유기 혹은 무기 소재의 형성 온도 등을 고려해 볼 때 120~150°C 정도에 불과하다. 이 같은 공정 온도는 기존 유리 기반 FPD의 TFT 혹은 CF 형성 온도보다도 현저히 낮아 이 온도에서 기존의 FPD 소재/공정을 이용할 경우 동일한 품질 특성의 TFT 혹은 CF을 얻기는 거의 불가능하다.

따라서 저온 공정 적용이 가능한 차세대 소재(주로 유기물) 혹은 신공정을 개발하거나, 플라스틱 기판의 내열성을 향상시켜 최대 허용 공정 온도를 높이고자 하는 노력을 하고 있으나 아직은 수요 업체의 요구 수준에는 미치지 못하고 있다. 플라스틱의 취약한 치수안정성은 오차(misalign)를 고려한 설계를 요구하기 때문에 유리 수준의 개구율(aperture ratio)을 확보하기가 어려울 뿐 아니라 line defect 이 발생할 가능성도 상대적으로 크다.



(a) Compressive stress에 의한 무기 박막 층의 delamination 현상



(b) Tensile stress에 의한 무기 박막 층의 crack 현상
(그림 6) 열처리 공정에 따른 무기 층의 손상

플라스틱 기판은 치수 안정성이 떨어지는 소재일 뿐 아니라 무기물과 CTE 값이 10배 이상 차이를 보이기 때문에 무기물이 적층된 기판의 경우 열 공정 시 compressive stress 혹은 tensile stress가 무기 층에 가해져 (그림 6)에 나타난 것처럼 무기 층에서 박리(delamination) 혹은 크랙(crack)이 발생할 수 있기 때문에 열 공정시 적절한 스트레스 해소 방안을 소재적/공정적으로 수립할 필요성이 있다.

나. 흡습성

유리 기판과는 달리 흡습성은 플라스틱에서는 피할 수 없는 현상으로 PES, PI는 중량의 1% 이상, 나머지 기판도 종류에 따라 약간의 차이는 있지만, 공정성 및 신뢰성에 영향을 미칠 정도의 흡습성을 가지고 있다.

현재는 다른 공정적 이슈(내열성, 내화학적, 재현성 등) 때문에 심각성에 대한 인식이 부족하나 향후 플라스틱 기반 디스플레이의 제품 신뢰성, 안정성 확보를 위해서는 소재/공정적인 해결 방안이 반드시 고려되어야 한다.

다. 약한 부착력

플라스틱 기판과 무기물(금속 배선 등)은 서로 계

면 부착력이 낮은 소재이므로 물리적(cleaning)/화학적(표면 처리) 수단을 이용해 두 계면간의 접촉력을 확보할 필요성이 있다.

라. 플라스틱 특성

플라스틱은 특성상 승온한 후 상온으로 생각하는 열 공정을 진행하는 경우 고온에서는 기판이 팽창하고, 이때의 변화는 온도 및 시간(thermal aging 효과)에 모두 비례한다. 고온에서 상온으로 온도를 냉각하는 경우에는 반대로 기판이 수축 과정을 거치게 되는데, 이때에는 일정 시간까지는 선형적인 수축 현상을 보이다 초기 상태에 근접했을 때는 수축 현상이 플라스틱의 낮은 열전도도와 약한 분자간력으로 인해 지극히 느리게 안정화되는데, 이때를 지연 시간이라 부른다. 150°C 열처리 공정에도 플라스틱 기판의 지연 시간은 수 시간을 요하는 것으로 알려져 있다.

Ⅲ. 열적 안정성 확보 방안

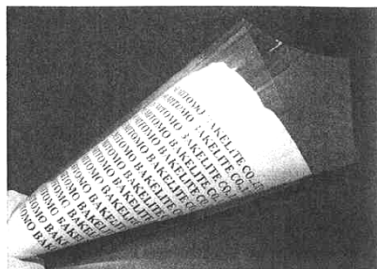
앞서 플라스틱 기판의 공정/적용 측면에서 부정적인 문제점을 알아보았다. 본 장에서 기판의 열적 안정성 확보를 위한 소재적, 공정적 접근 방법을 살펴 본다.

1. 소재적 관점

플라스틱 기판의 열적 안정성을 확보하기 위한 방안으로 소재, 수요 업체 측면에서 접근을 하고 있다. 먼저 소재 및 기판 제조업체에서는 플라스틱 기판 자체, 특히 베이스 필름의 열적 안정성을 확보하기 위해 내열성이 우수한 소재를 합성, 이를 기판 소재로 이용하거나 기판 제조시 기판의 기능성 박막(베리어, OC, UC 층)의 열 이력을 최소화하기 위해 전처리 열 공정을 채용하고 인접 층과의 열적 거동의 mismatch를 최소화하는 방향으로 접근을 하고 있다.

이중에서 무기 섬유(주로 glass fiber)와 고분자를 함께 용융-압출하거나 무기 나노 입자(inorganic nano-particles)를 고분자와 혼합해 용매-캐스트 방법으로 플라스틱 필름을 복합화하는 방식이 CTE 낮추는 방법으로 많이 연구되고 있다[3],[4]. 필름을 복합화할 경우 두 소재간의 굴절률 차이에 따른 광 산란에 의해 광 특성(haze) 저하가 발생하므로 복합소재를 플라스틱 기판으로 연구하는 기관에서는 두 가지의 상이한 소재의 굴절률 조합이 주된 연구 분야가 되고 있다. Sumitomo Bakelite사는 2003년 IDW에서 고분자 수지와 무기 섬유상을 용융-압출방식으로 FRP 복합 기판을 최초로 보고하였다((그림 7) 참조)[9]. 이때 발표된 복합 필름은 투과도 89%, CTE는 30~120도에 걸쳐서 14ppm/°C의 값을 보였다.

수요 업체에서는 현재 TV용 유리 판가 수준인 \$50~60/m² 이하의 가격으로 플라스틱 기판을 구매하기를 원하고 있으나 PES, AryLite, PC 기판은 \$250/m² 이상으로 대단히 고가의 부품으로서, 여기에 복합화를 위해 소재 및 공정 비용이 추가적으로 들어갈 경우 응용성 확보에 어려움이 될 수 있어, 복합화가 플라스틱 기판 소재의 내열성을 확보하는 유용한 수단임에도 경제성 측면에서 소재 업체로서는 고민에 빠져 있다. Sumitomo Bakelite사가 개발한 상기의 복합소재 기판의 경우에도 기술개발 수준의 연구는 진행되어 관련 결과는 보고되었으나 제조비용을 고려할 때 사업화는 힘든 것으로 알려져 있다. 이외에 기판의 제조 단계에서 적절한 열 안정화 공정을 추가해 진행하면 Tg 이상의 온도에서도 치수 안정성을 보이게 된다.



(그림 7) 고분자-무기 섬유상 복합 필름[9]

복합 소재를 이용하는 방법 이외에 수요 업체를 중심으로 플라스틱 기판의 양면에 CTE가 낮은 무기 박막을 별도로 추가 형성해 기판 전체의 CTE를 낮추는 방법도 연구되고 있다. 그러나 CTE를 낮추기 위해 별도의 무기 박막 층을 형성하는 것도 현재도 고가인 플라스틱 기판의 제조 공정 비용의 상승을 초래하여 플렉시블 디스플레이 전체의 경쟁력 약화를 초래할 수 있다.

2. 공정적 관점

플라스틱 기판의 열적, 기계적 특성을 고려하면 저온 경화형 유기 소재가 적합하나 재현성, 신뢰성 확보가 어려울 뿐 아니라 기존 무기 소재와 비교해서도 특성치가 열악해 유기 소재를 채용하지 못하고, 저온에서 여러 무기(구동부, 배선 등) 층을 플라스틱 기판상에 적층하는 방식을 많이 채용하고 있다.

그러나 플라스틱 기판의 열적 거동(CTE, thermal expansion/shrinkage)이 무기물과는 차이가 커 플라스틱 기판과 그 상부에 적층된 무기 층과의 계면 특성을 어떻게 확보해 가느냐 하는 문제는 생산성에 직접적으로 영향을 미치게 된다.

다층이 적층된 기판의 특성은 Griffith Theory를 이용해 설명한다(식 2) 참조[10].

$$\frac{\sigma_f^2 h_f}{2E_f} \leq 2\gamma \quad (2)$$

열처리 공정 후 기판이 냉각되면서 무기 층에 compressive stress가 가해져 무기 필름(h_f)과 플라스틱 기판이 박리되는 현상을 막기 위해서는 플라스틱 기판상에 적층되는 무기 필름의 두께(h_f)는 가능한 얇게 형성한다. 공정에 따른 무기 박막의 stress(σ_f)을 줄이기 위해 공정 온도는 가능한 낮게 설정을 하여야 하며, 무기 박막의 intrinsic film stress는 공정 조건을 최적화해 최소화하여야 한다. 또한 계면의 접착력(adhesion energy) (γ)을 높이기 위해 무기 박막 형성 전에 화학적(표면 세정) 혹은 물리적(plasma 처리) 처리가 필요하다.

이외에 계면 접착력을 확보하기 위해서는 패턴화 하는 무기 박막의 면적은 최소화하고, 공정 중 계면에 영향을 줄 수 있는 인자를 최소화하기 위해 디스플레이 공정은 항온, 항습 시설 하에서 수행한다.

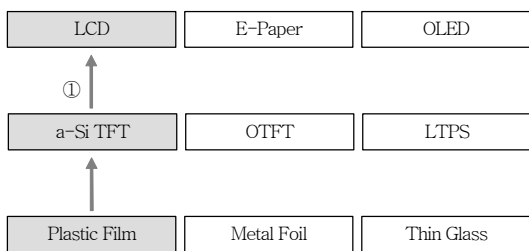
IV. 응용별 기판의 요구 특성

플렉시블 디스플레이의 최근 R&D 방향을 응용별로 나누어 살펴보고, 각 제품별 적용성을 확보하기 위해 기판 측면에서는 어떤 특성이 확보되어야 하는지 설명한다[1],[4].

1. 단기적 개발 방향

가. 플렉시블 AMLCD

삼성전자, SHARP와 같은 유리 기반 AMLCD을 양산하고 있는 업체를 중심으로 기존 LCD의 TFT, CF 소재 및 공정을 플라스틱 기판상에 그대로 적용해 LCD의 박막화, 저중량, 저가격, 내충격성을 보완/개선하고자 하고 있다(그림 8 참조)[1],[4]. 플라스틱 기판상에 기존의 AMLCD 구현이 가능할 경우 대체 시장 혹은 향후 신규 시장의 창출도 가능해 산업적 파급효과가 클 것으로 예측되지만, 플라스틱의 특성상 기존의 유리 기반 AMLCD에 비해서는 공정성, 이미지 특성, 가격 측면에서 어려움이 있다. 따라서 기존의 유리 기반 AMLCD 수준의 상품성을 갖춘 플라스틱 AMLCD을 구현하기 위해서는 유리 기판 수준의 판가, 공정성이 플라스틱 기판에서 확보되어야 하지만, 앞서 언급한 여러 이유로 현실적인 어려움이 있다.

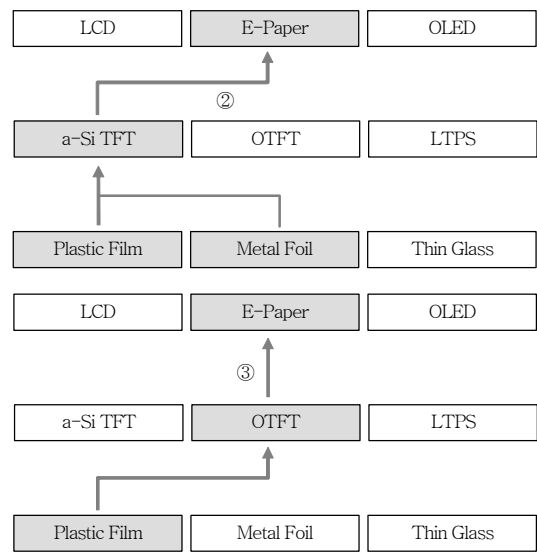


(그림 8) 플렉시블 AMLCD 개발 동향[1]

나. 플렉시블 전자종이(E-Paper)

컬러 동영상을 구현하기는 어려우나, 종이 같은 해상도, 넓은 시야각을 가진 디스플레이로서 사용 기판에 제약이 없고, 전원을 차단한 후에도 화상을 유지할 수 있고 BLU를 사용하지 않아 저가형 이동 통신기에 적합한 플렉시블 전자종이는 삼성전자, LG Phillips LCD, 유럽의 폴리머 비전(Polymer Vision)과 플라스틱 로직(Plastic Logic)사를 중심으로 상용화 연구가 진행되고 있다.

전자종이는 반사형 디스플레이로서 구동 소자가 탑재되는 하판 기판의 광특성이 중요치 않아서 (그림 9)에서 나타난 것처럼 플라스틱 이외에 공정성 확보가 용이한 메탈 호일이 기판으로서 검토되고 있다. 그러나 상부의 전기영동 입자의 지지체 역할을 담당하는 기판의 광학 특성은 플렉시블 전자종이의 이미지(반사도) 특성을 좌우한다. 현재는 PEN 기판이 낮은 판가 및 비교적 용이한 공정성으로 채용되고 있으나, PEN 기판이 광학용 기판 중에서 가장 낮은 광 투과도(86~87%@550nm)를 보이기 때문에 응용성에 제약이 있다. 전자종이는 낮은 반사도로 인해 CF를 이용한 컬러화가 용이하지 않아서 B/W (black/white) 타입의 저가격의 중소형 디스플레이

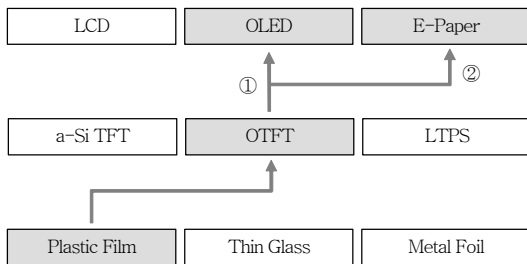


(그림 9) 플렉시블 AM 전자종이 개발 동향[1]

가 주요 수요처가 될 것으로 보인다. 이 경우 기관의 평가 및 투과도가 중요시 된다[1],[4].

2. 장기적 개발 방향

플렉시블 디스플레이는 저가격화를 실현하기 위해 연속공정을 통한 양산성 확보를 지향하고 있다. 이 같은 관점에서 보면 (그림 10)에서 보인 것처럼 한 장 혹은 두 장의 플라스틱 기관을 이용해 연속 공정을 통해 AMOLED 혹은 AM-전자종이가 궁극적인 개발목표가 될 것으로 보인다. 이때에는 공정성, 투과도, 평가 이외에 현재와 같은 배치 타입의 공정에서는 문제시 되지 않던 기관의 기계적 특성 (rigidity 등)이 중요 관리 항목이 될 것으로 판단된다[1],[4]. 이외에 OLED를 고려하면 기관의 베리어 품질이 제품의 신뢰성에 영향을 주게 된다.



(그림 10) 연속 공정을 이용한 플렉시블 디스플레이의 개발 동향[1]

V. 결론

산업 경쟁력을 갖춘 플렉시블 기관을 제조하기 위해서는 원료를 생산하는 유화업체, 원료를 반응시켜 고분자 수지화하는 화학업체, 생산된 수지를 가 공해 기관을 제조하는 장비를 개발하는 업체 및 기관 성형업체, 기관상에 기능성을 부여하기 위해 형성하는 HC, OC 층의 원료 물질 및 관련 공정을 제공할 화학업체, 기관상에 베리어 및 투명전극 박막을 형성할 장비 제조 및 운용업체 등이 함께 필요하다.

어떤 업체/연구기관도 상기의 관련 기술을 모두 가지고 있지 않으므로 플렉시블 기관 기술개발을 위

해서는 관련 기업과 기술 간에 협력 체계의 구축과 산학연의 목표의식 공유를 전제로 하는 기술융합 전략이 절실히 필요하다. 기술간 융합이나 기업 간의 협력은 국내의 산업 구조상 기업에서는 수용하기 어려운 점이 있으나, 기업 간 혹은 산학연간의 유기적 협력 체계를 구축하지 않고는 외국 특히 일본업체가 주도하고 있는 기관 산업에서 경쟁력을 확보하기는 어려울 것이다.

수 년 간에 진행된 일련의 산업 동향을 살펴보면 플라스틱 기관이 현재의 유리 기관 수준의 물성을 단시간에 달성하기는 어려울 것이며, 불가능할 것이라는 전망도 있다. 현재의 플렉시블 기관/디스플레이 산업은 취약한 플라스틱 기관의 특성을 고려해 볼 때 수요 업체는 어느 선까지 기존의 유리 기관에 비해 열악한 기관의 공정성, 신뢰성을 허용할 것인지, 기관 제조업체는 플라스틱 기관의 특성을 어느 정도까지 유리에 근접하게 만들 수 있느냐 하는 서로의 눈높이를 맞추어 가는 단계로 볼 수 있으며 서로 다른 산업 사이에 어느 선 정도에서 산업적 합의가 이루어지느냐가 향후 플렉시블 디스플레이의 미래를 결정하게 될 것으로 보인다.

● 용어해설 ●

LCD: 박막트랜지스터(thin-film transistor)에 의해 제어되는 액정(liquid crystal)과 두 장의 직교편광필름이 광학 셔터(optical shutter)로 작용하여 각각의 화소(pixel)마다 투과광량을 조절함으로써 이미지를 구현하는 디스플레이이다.

OLED: 전기를 연결하면 빛을 내는 발광다이오드(LED) 가운데 빛을 내는 부분이 유기화합물로 이뤄진 것을 말한다. BLU 없이 스스로 빛을 내기 때문에 LCD보다 얇게 만들 수 있으며, 반응속도가 빠르고 전력소비도 적다. 특히 화질이 뛰어난 능동형(AM) OLED는 LCD와 PDP를 대체할 가장 유력한 차세대 디스플레이로 떠오르고 있다.

약어정리

AMLCD Active Matrix Liquid Crystal Display
BLU Backlight Unit

CF	Color Filter
COC	Cyclic Olefin Copolymer
CTE	Coefficient of Thermal Expansion
FIS	Ferrania Image System
FPD	Flat Panel Display
FRP	Fiber Reinforced Plastic
IDW	International Display Workshop
ITO	Indium Tin Oxide
IZO	Indium Zinc Oxide
OLED	Organic Light-Emitting Device
PAR	Fluorene-containing Polyarylate
PC	Polycarbonate
PECVD	Plasma Enhanced Chemical Vapor Deposition
PEN	Polyethylene Naphthalate
PES	Polyethersulfone
PET	Polyethylene Terephthalate
PI	Polyimide
TFT	Thin-Film Transistor
TSC	Total Solid Content

참 고 문 헌

[1] Displaybank, “플렉시블 디스플레이 기술 및 시장(2007~2017),” Mar. 2007.

[2] 지식경제부, “전략기술개발사업 화학공정분야 경제성분 석보고서,” 2008.

[3] 김기현, 서경수, “디스플레이용 플라스틱 기판의 현황,” 전자통신동향분석, 제21권 제5호, 2006. 10., pp.129-140.

[4] 김기현, “Flexible 디스플레이 기판재료,” 평판 디스플레이 이용 부품 및 재료 기술(항공대) 세미나, 2008.

[5] Min Yan et al., “Lexan[®] Resin for Display Technology,” *4th Annual Flexible Display & Microelectronics Conference*, 2005.

[6] J. Struempfel et al., “Technology and Equipment for Optical Multi-Layer Coatings on Flexible Substrates,” *4th Annual Flexible Display & Microelectronics Conference*, 2004.

[7] Displaysearch, “Flexible Display Report,” 2006, pp. 178-188.

[8] Chris Weeks, “Carbon Nanotube Based Flexible Transparent Electrodes,” *6th Annual Flexible Display & Microelectronics Conference*, 2007.

[9] T. Nakao, S. Shibahara, and W. Oka, “High Performance Plastic Substrate for Flat Panel Display,” *IDW'03 Proc.*, pp.621-624.

[10] 서종현, “Amorphous-Si TFT 기반의 AMLCD 기술개발,” 차세대 flexible display 기판의 현황 및 개발 전략 워크숍, 2007.