

기술 특 집

플렉시블 디스플레이용 기판 개발 동향 (Trend in flexible substrate development for flexible displays)

김인선 ((주)아이컴포넌트)

I. 서 론

액정 디스플레이(LCD, liquid crystal display)를 포함한 평판 디스플레이는 우리나라의 산업 중에서 세계적으로 우위를 점유하는 몇 안되는 산업 제품 중 하나이다. 평판 디스플레이의 현재 화두는 저가격화를 통한 대형 TV 제품의 보다 빠른 보급과 시장 점유율의 확대이지만, 신규 디스플레이 모드의 개발과 생산은 차세대를 대비하는 디스플레이 업계의 또 다른 화두이기도 하다. 또한 디스플레이 산업의 선두 유지를 위한 업계와 정부의 노력은 플렉시블 디스플레이의 개발과 이에 필요한 다양한 전후방 산업의 편성에 그 관심이 집중되고 있다. 현재 디스플레이의 주종인 LCD 산업의 경우 주요 소재 부품의 해외 의존도가 일정 수준 이하로 저하되지 않고 있으므로 산업의 규모가 확대되었으나 소재

부품의 해외 의존도가 여전히 높은 것으로 나타나고 있다. 따라서 차세대 디스플레이 개발에 있어 소재 부품의 개발을 동시에 수행하여 차세대 디스플레이 도래 시점에서 국내 개발 소재가 사용되도록 하는 산업적 필요가 크게 주목받고 있다. 차세대를 겨냥한 디스플레이 업체들과 연구개발 담당자들은 유기 EL(electroluminescence), 유기 TFT(thin film transistor) 등의 신규 소재의 지속적인 개발과 플렉시블한 디스플레이 개발이라는 연구 주제에 대해 개발의 속도를 보다 가속하고 있다.¹⁻⁴⁾ 플렉시블 디스플레이는 상기의 유기 EL 혹은 유기 TFT를 접목시킨 차세대 디스플레이를 포함하여 기존의 TFT-LCD, PM-LCD, 그리고 전자 종이 등 다양한 디스플레이 모드를 플렉시블한 기판에 구현하는 것을 말한다. 또한 플렉시블한 기판은 일반적인 플라스틱 필름을 기반으로 한 기판을 포함하여 플렉시블한 유리 및 금속판을 기반으로 한 기판 등 다양한 종류들이 있을 수 있다. 본 원고에서는 현재 국내외에서 개발 시도되고 있는 플렉시블 기판의 개발에 대한 최근의 경향에 대해 논하고자 한다.

플렉시블 디스플레이는 차세대 디스플레이로 관심의 대상이며 아직까지는 양산되는 모델이 없으나 최근 Philips에서 분사한 Polymer Vision사에서 Readius라 명명한 휴대형 e-book형태의 플렉시블 디스플레이를 출시할 예정이다.

이를 시작으로 다양한 형태의 e-ink 디스플레이가 관심을 끌고 있으며 이를 플렉시블하게 구현하고 상품화하는 연구



[그림 1] 국내에서 시도되고 있는 다양한 플렉시블 디스플레이의 예시

[그림 2] Polymer Vision의 Readius

가 많이 진행되고 있다. 국내에서는 삼성전자와 LG디스플레이사에서 e-ink 모드를 비롯하여 다양한 LCD모드를 플렉시블하게 구현하고자 하는 노력이 진행 중이며 국내의 디스플레이 업체의 플렉시블 디스플레이 개발은 보다 양산을 염두에 둔 개발이 진행 중이다. 이에 따라서 플렉시블한 기판의 적용도 보다 양산성을 염두에 둔 것으로 판단되어진다. 이는 유리 기판에 익숙한 디스플레이 업체가 플렉시블 기판을 적용하는데 있어 유리 기판 수준의 양산성을 고려하여 개발을 진행하고 있고 이에 따라 보다 진보된 플렉시블 기판이 필요한 것으로 예측된다. 2006년 2월에 개최된 Flexible Microelectronics and Display Conference에서 삼성전자는 플렉시블한 기판을 이용한 디스플레이의 발전을 삼단계로 정의하고 먼저 깨지지 않는(rugged) 디스플레이, 이후 굽혀지는(bendable) 디스플레이 마지막으로 플렉시블(flexible) 디스플레이의 구현을 예고했다.^[6] 이 경우 구현되어지는 디스플레이에 따른 응용 제품은 먼저 휴대용 기기(mobile & portable display) 이후 착용가능 혹은 유행 제품(wearable & fashionable display) 그리고 종이형태 디스플레이(paper-like display) 등이 예상된다. 플렉시블 기판 역시 이에 상응할 수 있는 개발이 예상되고 현재의 유리 기반 디스플레이에서 벗어나서 깨지지 않는 기판을 시작으로 종이형태의 디스플레이를 구현할 수 있는 기판까지 개발이 진행되고 있다.^[6, 7, 8] 이에 기판의 개발에 있어 최근 진행되는 개발의 방향에 대해서 언급하고자 한다.

II. 플렉시블 기판의 종류

플렉시블 기판은 디스플레이 모드에 따라 상이한 소재가 사용 가능하다. 즉 투과형과 반사형의 차이에 따라 투명한 기판소재 혹은 불투명(반투명) 기판 소재가 각각 사용 가능하다. 자체 발광형 디스플레이인 OLED와 반사형 모드 디스플레이인 e-ink 형태의 디스플레이는 불투명(반투명) 기판과 투명 기판이 모두 사용될 수 있다. 이에 반해 투과형 LCD의 경우에는 투명 기판만이 사용가능하고 특히 LCD의 경우 액정의 광학 특성을 사용하여 구현되므로 기판의 광학 등방성이 요구된다. 불투명(반투명) 기판의 경우 금속 박막이 사용되기도 하며, 고분자 재료 가운데 반투명한 폴리이미드 필름이 사용 가능하다. 최근에는 폴리이미드 필름 가운데 투명하도록 개질을 시도한 투명 폴리이미드 필름이 디스플레이 기판 용도로 개발되었다.

유리의 경우 일반적인 관념은 적절한 두께에서 판형으로 인지되어 왔으나 보다 박막의 유리는 그 휨성이 개선되어 플렉시블 디스플레이 기판으로 그 사용 가능성을 시험해 왔다. 현재 사용되는 평판 디스플레이용 유리 기판은 0.7mm 내외의 두께이다. 하지만 그 두께를 0.1mm 수준으로 낮추는 경우 기판의 휨성이 늘어나므로 유리 기판을 플렉시블하게 사용할 수 있게 된다. 박막 유리 기판을 이용한 디스플레이의 구현은 두 가지 방향에서 가능하다. 먼저 기존의 유리 기판 상에 디스플레이 모듈이나 TFT를 구현한 후 유리 기

판을 식각을 통해 박형화시키는 경우 기존의 디스플레이 공정을 그대로 사용하면서 휨성이 부여되는 디스플레이가 구현될 수 있다. 일본 도시바에서 노트북용 LCD를 이러한 방식으로 박형화하는 개발을 진행한 것으로 소개되고 있다. 이에 반해 박형 유리를 개발하여 유리 기판에 휨성을 부여하고 이러한 기판 상에 디스플레이를 구현하는 노력도 시도되었다. 독일의 Schott사는 박막 유리에 고분자 코팅을 통해 유리의 특성을 유지하는 박형 유리 기판의 개발을 시도하였다.^[9]

앞서 언급된 박막 금속 기판의 경우 최근 국내 업체에서 플렉시블 디스플레이 개발에 적용하여 보다 큰 관심을 끌고 있다. 이는 플라스틱 기판이 가지는 부족한 특성을 극복하면서 플렉시블 디스플레이의 개발을 급속하게 진전시키기 위한 노력의 일환이지만 실제 디스플레이에 광범위하게 적용하게 될 지는 의문시되기도 한다. 하지만 박막 금속 기판의 적용을 통하여 개발되는 플렉시블 디스플레이의 상용화 정도에 따라 금속 기판의 적용이 보다 빠르게 진행될 수도 있겠다. 이 경우 금속 박막의 표면 처리에 보다 많은 개발이 필요할 것으로 예상된다.^[10]

플렉시블 디스플레이 기판으로 보다 일반적으로 예상되는 소재는 투명 플라스틱 필름이다. 투명 플라스틱 필름은 다양한 소재가 개발되어 있거나 개발이 진행되고 있다. 하지만 투명 플라스틱 필름만으로는 디스플레이 기판으로서 취약한 특성을 보이므로 이를 극복하기 위한 열처리 및 코팅이 요구된다. 최근 e-ink 모드에 적용이 시도되어서 주목을 받고 있는 PEN(polyethylene naphthalate) 소재를 비롯해서 PC(polycarbonate), PES(polyethersulfone) 그리고 PAR(polyarylate)와 COC(cyclic olefin copolymer) 등 다양한 소재의 고분자 필름들이 플렉시블 디스플레이 기판으로 사용 가능한 후보로서 지속적인 기판 개발과 플렉시블 디스플레이 개발에 응용되고 있다.

디스플레이 기판으로 사용되기 위해서는 기존의 디스플레이에서 요구되는 특성을 만족시켜야 한다.[표 1] 기본적인 특성 중에는 투과형 디스플레이의 경우(LCD 등) 광학적 투

[표 1] 디스플레이용 유리 기판의 요구 특성

Specification	LCD 종류		
	Black/White	Color STN	TFT
Heat Resistance (°C)	>200	>200	>200
Transmittance (%@550nm)	>85	>85	>85
Surface Resistance (Ω/\square)	40	40	40
Oxygen Transmission Rate (cc/m ² /day)	<0.5	<0.5	<0.5
Water Vapor Transmission Rate (g/m ² /day)	<0.1	<0.1	<0.01
Dimensional Stability (%)	<0.05	<0.05	<0.05
Chemical Resistance	aq. KOH	O	O
	aq. HCl	O	O
	Ethanol	O	O
	NMP	O	O

명도와 균일도 등이 요구된다. 액정 디스플레이는 편광 현상을 이용하므로 사용되는 기관의 광학 등방성이 중요한 특성으로 요구된다. 기타 요구되는 광학 특성은 haze, yellow index 등이 있다. 디스플레이 기관으로 요구되는 또 하나의 특성은 디스플레이 공정에 대한 적합성이라 할 수 있다. 기존 디스플레이 공정은 유리 기관을 이용하여 고온 공정 및 다양한 세정 공정을 포함한다. 이러한 디스플레이 공정에 대한 공정 적합성이 플렉시블 기관의 사용 여부를 결정하는 중요한 요소가 된다. 즉 고온 안정성과 정밀 공정을 위한 낮은 열팽창계수 그리고 각종 화학 용제에 대한 내화학성이 필요하다. 마지막으로 디스플레이 기관으로서 요구되는 특성은 디스플레이 구현 후의 안정성이다. 즉 유리 기관 상에 구현된 디스플레이 대비 얼마나 안정성을 확보할 수 있는가 하는 것이다. 플렉시블 기관을 고분자 필름으로 구현하는 경우 유리 기관 대비 기체에 대한 투과 특성이 떨어지는 단점을 갖는다. 즉 우리는 기체 투과를 하지 않는 반면 고분자 필름은 공기 중의 수분이나 산소를 투과시키는데 구현된 디스플레이 내부로 수분과 산소가 투과되면 흡점이 발생하거나 소자의 수명이 급격히 저하되는 현상을 보이게 된다. 따라서 고분자 필름을 디스플레이 기관으로 사용하는 경우 적절한 기체투과방지막을 형성 수분과 산소를 차단해 줄 필요가 있다. 참고로 기체 투과의 척도로는 수분에 대해 g/m²/day, 산소등 기타 기체에 대해서는 cc/m²/day의 측정 단위를 사용한다. 액정디스플레이는 10⁻¹ 정도, 유기발광형 디스플레이(OLED)의 경우 10⁻⁶ 수준의 수분투과특성이 요구되는데 일반적인 투명 고분자 필름은 10-100 정도의 수분 투과 특성을 보인다.

[표 2]에서는 플렉시블 기관에 사용 가능한 다양한 소재의 특성이 소개되었다. 다양한 플렉시블 디스플레이 기관의 소재와 구현 방법이 존재할 수 있겠으나 디스플레이 산업의 특성 상 사용 가능한 플렉시블 기관은 경제성이 요구되며 이는 현재 사용되는 유리 기관 대비 신규 개발되는 기관의 가격이 얼마나 저렴할 수 있는지가 척도가 될 것이다. 플렉시블 디스플레이는 새로 개발되는 미래형 디스플레이이나 현존하는 디스플레이의 특성과 함께 저가 특성이 요구되는

[표 2] 플렉시블 기관용 소재와 특성

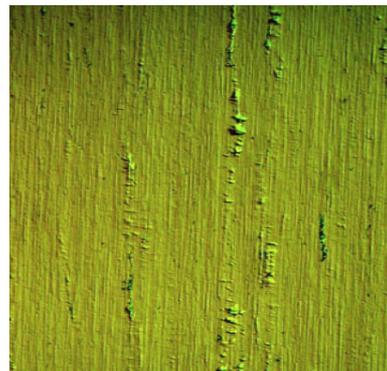
Continuous Use Temperature	Material	Characteristics
900°C	Steel	Opaque, moderate CTE, moderate chemical resistance, poor surface finish
275°C	Polyimide (Kapton)	Orange color, high CTE, good chemical resistance, expensive, high moisture absorption
250°C	Polyetheretherketon (PEEK)	Amber color, good chemical resistance, expensive, low moisture absorption
230°C	Polyethersulfone (PES)	Clear, good dimensional stability, poor solvent resistance, expensive, moderate moisture absorption
200°C	Polyetherimide (PEI)	Strong, brittle, hazy/colored, expensive
155°C	Polycarbonate(PC)	Clear, poor CTE, inexpensive, moderate moisture absorption
150°C	Polyethylenaphthalate (PEN)	Clear, moderate CTE, good chemical resistance, inexpensive, moderate moisture absorption
120°C	Polyester (PET)	Clear, moderate CTE, good chemical resistance, inexpensive, moderate moisture absorption

특징이 있다. 이는 디스플레이 공정을 roll to roll 형태로 구현하는 경우 보다 실현 가능하겠지만, 새로 개발되는 디스플레이 기관의 가격 또한 특성과 함께 고려될 것이 예상된다. 따라서 개발되는 플렉시블 기관의 소재 및 공정의 양산성의 확보가 개발에 있어 중요한 고려 사항이 될 수 있다.

III. 박막 금속 기관

앞서 언급한 대로 박막 금속 기관은 국내 디스플레이 업체가 플렉시블 디스플레이 개발에 보다 적극적으로 사용하여 그에 대한 관심이 최근 커진 바 있다.[그림 1] 박막 금속 기관은 플라스틱 필름이 부족한, 기관으로서의 다양한 특성을 확보하고 있다. 즉 플라스틱 필름 소재에서 자체로만으로는 열악한 특성인 내화학성, gas barrier 특성, 치수 안정성 등 측면에서 박막 금속 기관이 우수한 특성을 보인다. 또한 디스플레이 공정은 일반적으로 고온에서 진행되는데, 플라스틱 기관은 내열 온도에서 금속 기관에 비해 매우 열악하다. 이러한 우수한 특성을 기반으로 실리콘 기반의 태양전지 기관으로 금속 기관의 사용이 시도되고 있으며 또한 플렉시블 디스플레이로의 적용이 보다 적극적으로 검토되고 있는 상황이다. 한편 금속 소재의 특성상 광학적으로 불투명하며 무게가 플라스틱 필름 대비 6-7배에 달하는 등, 열악한 특성이 있는 점도 간과할 수 없다. 또한 금속의 특성상 전기 전도도가 높아, 디스플레이 기관으로 사용하는 경우 절연막 코팅이 반드시 요구된다.

박막 금속 기관의 디스플레이 적용에 있어 극복되어야 할 한 가지 특성은 금속 박막의 표면 특성이다. [그림 3] 박막 금속 기관은 제조 공정에서 기인한 표면상 기계연마 흔적(mill mark)이 나타나게 되며 이 표면 특성은 미세 디스플레이 공정에서 사용이 불가한 수준이다. 이러한 표면 특성을 개선하기 위해서 먼저 적용하는 공정이 표면 polish 공정이다. 표면 polish 공정은 단순 기계적 방법과 전기적 방법에 의한 방법(electro-polish) 그리고 기계화학적 방법(chemical/mechanical polish) 등이 사용된다. 적절한 polish 공정을 적용하는 경우 표면 평탄도(Ra) 10nm 수준의 표면 평탄도의 확보가 가능한 것으로 알려지고 있다. 하지만 polish



[그림 3] 박막 금속 기관 표면의 예

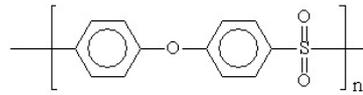
공정은 roll 공정화에 난점이 있는 것도 간과하기 어려운데, 금속 박막이 roll 형태로 공급 가능하므로 표면 평탄화 역시 roll-to-roll 공정으로 적용 가능하다면 보다 효율적일 것이다. 따라서 금속 박막 표면에 평탄화 코팅을 적용하는 공정이 필요하다. 이 경우 적용되는 코팅 소재는 유기계, 무기계 혹은 하이브리드계 등 다양한 소재가 적용 가능하며 박막 금속 기판은 롤 형태로 가공이 가능하므로 기존 롤 코팅 공정에서 표면 평탄화 코팅을 진행할 수 있다. 유기계 코팅을 사용하는 경우 기판의 사용 가능 온도가 금속 박막만을 사용하는 경우에 비해 낮아지는 특징이 있겠다. 이와 함께 금속 기판의 전기적 절연을 확보하기 위해 절연층을 코팅해야 하는 노력이 필요한 데 이는 기존의 디스플레이 공정 중 이용되는 SiNx 혹은 SiO₂ 코팅을 통해 달성이 가능한 것으로 발표된 바 있다.

IV. 고분자 필름 소재

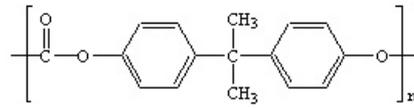
투명한 플렉시블 디스플레이 기판 소재로는 다양한 고분자 필름이 그 관심 대상으로 다양한 필름 생산 업체들이 기존의 필름 제품과 신규 개발 진행 중인 필름 제품을 디스플레이 기판 하는 노력을 기울이고 있다. 신규 고분자 소재의 개발은 보다 긴 시간을 요구하기 때문에 신규 소재의 개발보다는 기존 제품의 개선을 통한 디스플레이 공정 적용에 가능하도록 개선 제품의 개발이 병행되는 현상이 보이기도 한다. 전통적으로 PC 제품을 주력 상품으로 가진 GE(현 SABIC)나 Teijin의 경우 고내열 polycarbonate(PC) 필름을 기판용 필름 소재로 사용하도록 연구와 마케팅을 진행하고 있다.

사실 내열특성이 우수하며 상용화된 필름 소재는 그 선택의 폭이 그리 크지 않다. 범용 제품으로 사용되는 PET제품은 국내의 대기업(SK, Kolon, Toray-세한)등에서 양산되고 있으나 내열특성과 광학 이방성등 자체 특성 때문에 디스플레이 기판으로는 고려되지 않고 있다. 하지만 그 양산성을 고려할 때 저가격 구현이 가능하기 때문에 대형 디스플레이 혹은 저해상도 디스플레이용 기판 소재로 고려되고 있다. PET의 유사 제품인 PEN은 내열 특성이 PET보다는 우세한 것으로 알려져 있으며 미국의 DuPont-Teijin사와 국내의 SK사에서 개발된 것으로 DuPont-Teijin사에서는 PEN 필름을 디스플레이 기판으로 가공하고 플렉시블 디스플레이에 적용하는 노력을 기울이고 있다. 국내의 Kolon 역시 PEN 제품을 개발하고 디스플레이 기판 적용 여부를 가늠하는 것으로 여겨진다.

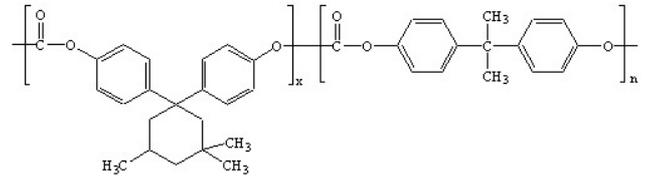
PET나 PEN보다 내열 특성이 우수하고 양산, 범용 제품으로 사용되는 필름으로 투명성을 가지는 소재로서 polycarbonate(PC)가 있다. PC는 내열성을 나타내는 척도인 유리전이온도(glass transition temperature, Tg)가 150도 수준으로 미국의 GE, Dow, 일본의 Teijin, Mitsubishi, 독일의 Bayer 등 세계적으로 양산되는 필름 소재이다. 현재 미국의 GE사와 일본의 Teijin사에서는 PC 필름을 이용한



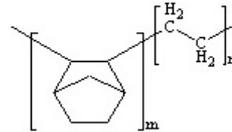
poly(ethersulfone)



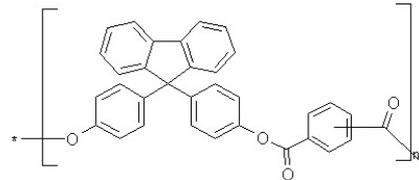
polycarbonate



high temperature polycarbonate



cyclic olefin copolymer (COC)



polyarylate

[그림 4] 다양한 기판용 고분자 필름 소재의 화학구조

디스플레이 기판을 개발하는 연구를 진행하고 있으며 Teijin사는 기판의 판매를 진행하는 것으로 알려져 있다. 또한 Tg를 220도 수준까지 상승시킨 필름 소재의 개발도 진행하고 있다.^{11), 12)} 고내열 PC와 비슷하게 내열 특성이 우수하며 투명하며 양산성이 확보된 소재로 polyethersulfone(PES)은 90년대 말 일본의 액정디스플레이 회사인 Sharp사에서 플라스틱 LCD 기판으로 사용되어진 소재이다. PES는 Tg가 225-230도 수준으로 다른 여타의 투명 고분자 소재보다 비교 우위를 점하고 있다. 일본의 Sharp사는 Sumitomo Bakelite사와 공동 개발을 통하여 PES 필름을 이용한 플렉시블 기판을 이용 passive matrix LCD를 구현하였고 이를 휴대폰에 적용한 경험이 있다.

Cyclic Olefin Copolymer (COC) 계열의 소재는 그 소재의 화학적 구성요소에 따라 다양한 내열 특성을 보이게 된다. 일반적으로 LCD용도의 광학 보상 필름으로 사용되는 COC 필름은 그 Tg가 150도 수준으로 높지 않지만, 미국의 Promerus사에서 개발 중인 Apear 제품은 그 Tg가 330도로 보고되어 매우 우수한 특성의 고분자 필름으로 기대되고 있다. 또한 polyarylate 계열의 고분자 필름을 개발하고

있는 이탈리아의 Ferrania사의 Arylite 제품 역시 높은 Tg(320도)를 보이며 좋은 광학 특성을 확보해서 투명 고분자 기관 소재로 사용이 가능한 것으로 알려져 있다.

이상의 고분자 필름 소재는 투명 광학 필름의 내열 특성을 확보하는 것으로 개발이 진행되어 왔다. 하지만 최근의 개발 동향은 단순히 높은 Tg를 가지는 광학 필름의 적용이 그 한계를 들어내고 있는 상황이다. 디스플레이 업계에서는 높은 내열도를 가진 광학 필름 기관을 디스플레이 공정에 적용하고자 개발을 진행해 왔으나 고분자 필름의 열팽창 특성이 보다 개선되어야 할 특성으로 지적하고 있다. 이는 디스플레이 미세 공정에서 높은 열팽창 계수를 가지는 플라스틱 필름의 적용이 미세 공정상 misalignment를 야기시키는 약점이 지적되었기 때문이다. 유리기관의 경우 열팽창 계수는 5ppm/°C 수준인 반면 플라스틱 필름의 경우 결정성 고분자 필름인 PEN을 제외하면 대부분 55ppm/°C 이상으로 필름의 고내열성과 무관하게 공정상 문제를 발생시키게 된다. 이를 극복하기 위해서는 고분자 필름의 CTE를 낮추는 개발이 진행되어야 하며 이는 신규 물질의 개발이 필요한 장기간의 개발이 필요할 것으로 예상된다. PEN 필름의 경우 다른 비결정성 고분자 필름과는 다르게 결정성의 특성을 적절히 이용하여 연신 공정을 적용하면 그 열팽창계수(CTE)를 15ppm/°C 수준으로 확보할 수 있다는 보고가 있다. 이러한 특성은 디스플레이 공정에 있어 매우 유리한 것으로 여타 고분자 필름 기관의 개발에 있어 benchmark가 되고 있다.

V. 기관용 고분자 필름의 제조 공정

기관용 고분자 필름은 높은 요구 특성 상 대부분 용액 캐스팅 방법에 의해 제조된다. 즉 고분자 물질을 적절한 용매에 용해시켜 이 용액을 경면 처리된 벨트나 롤 상에 도포하는 공정을 이용한다. 도포된 용액은 필요한 건조 공정을 거치면서 필름으로 성형되어지고 형성된 필름은 그 표면이 평탄하고 광학적으로 이방성이 매우 낮으며 균일성이 우수하다. 용액캐스팅 방식은 공정 중 건조되어지는 용매의 회수 및 재활용 측면에서 비교적 경제성이 떨어지지만 현재 액정 디스플레이에 사용되는 위상차 필름 등 많은 광학필름이 상기 방식을 이용 성형되고 있다. 이 방식은 공정에 필요한 경면처리와 건조에 따른 조건 조절 등이 제조되어지는 필름의 특성을 좌우한다.

용매를 이용하지 않고 고분자 소재의 온도를 상승시켜 용융 시킨 후 다이(die)등을 통과시켜 필름을 성형하는 방법인 압출법으로도 기관용 고분자 필름의 제조가 가능하다. 압출법은 용매를 사용하지 않는 대신 용융된 고분자의 이동성이 크기 때문에 작은 힘에도 분자 사슬에 변형이 쉽고 이에 따라 쉽게 등방성을 잃을 수 있는 공정의 난이도가 큰 제조 방법이다. 즉 용융 상태에서는 분자 사슬이 등방성을 유지하지만 필름 성형과 냉각과정에서 가해지는 스트레스는 분자의 배향을 유도하게 되고 배향된 분자들은 특정 방향의

광학이방성을 형성하여 편광특성이 적용되는 제품에서는 사용하기 어려운 광학 특성을 나타낸다. 일반적으로 편광특성을 사용하는 액정디스플레이의 경우 기관의 광학 이방성은 10nm 이하로 유지되어야 한다. 용융 압출법은 요구 특성 대비 제조 공법이 난이하지만 대량 생산 시 생산 효율이 우수한 것으로 알려져 있다.

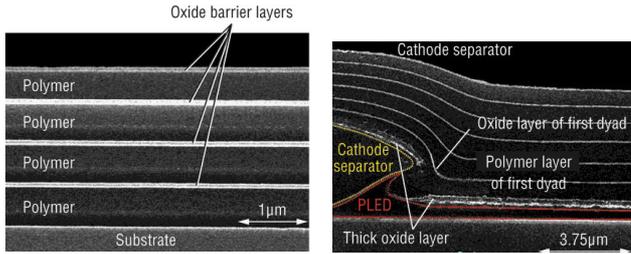
VI. 기체투과방지막 및 개발 동향

고분자 필름의 특성 중 기체투과방지막 특성은 기술적으로 도전적인 특성이다. 유리 기관의 기체투과특성이 $10^{-6}g/m^2/day$ 이하를 보이는 반면 고분자 필름은 10-100의 특성을 보이기 때문에 달성하기 힘든 기술적인 어려움이 존재한다. 고분자 필름의 특성 중 부족한 특성은 표면 처리나 코팅을 통하여 해결하는 것이 일반적인 접근법이다. 특히 기체투과방지막 특성은 고분자 물질이나 유기 물질로 해결하는 데는 한계가 있다. 유기물질을 이용한 기체투과방지막은 식품의 포장 등 제한적인 특성을 요구하는데 이용된다. 예를 들면 PVA(polyvinylalcohol)이나 연신된 nylon 필름 등을 이용하여 수분투과방지막으로 사용하기도 한다. 이 경우 수분투과방지 특성은 $1\sim 10g/m^2/day$ 수준으로 디스플레이에 적용되는데 한계가 있다. 또한 알루미늄을 고분자 필름에 증착하여 수분투과방지 특성을 구현하기도 하는데, 과자류 포장에는 일반적으로 이용되는 방법이나 물질의 광학 특성은 반사의 특성을 보이므로 디스플레이 적용되기 어려운 방식이다.

무기물을 이용하는 기체투과방지막은 습식유기물 코팅 방식을 이용하기 보다는 건식 진공 코팅 방식을 사용한다.[그림 5] 특히 고분자 필름의 가공은 roll-to-roll 방식을 이용하는 것이 일반적이며 진공 코팅 공정도 롤 필름을 진공 챔버에서 roll-to-roll 코팅을 적용하는 공정을 이용한다. 진공 코팅 공정에는 스퍼터링, evaporation, 플라즈마 화학증착(plasma-enhanced chemical vapor deposition, PECVD) 등의 방식이 주로 사용된다. 상기 기술에는 서로 상이한 물



[그림 5] 진공 증착용 roll-to-roll 코팅 장비



[그림 6] Vitex사의 기체투과방지막 구조 및 passivation

질과 공정이 적용된다. 각기 공정은 필요한 기체차단 정도, 코팅 속도, 접착력 및 플라스틱의 탄성률 그 외의 다양한 면을 고려하여 코팅 방법을 선택해야 된다. 또한 기체차단특성은 증착속도, 증착두께의 정밀도, 형성되는 박막의 조밀성 등에 따라 결정되어진다.

기판 개발 중 기체투과 방지막 기술은 미국의 Vitex Systems사가 선형 기술을 확보한 것으로 알려져 있다.[그림 6] Vitex Systems사의 기술의 핵심은 유기물과 무기물 층의 반복적인 코팅을 통하여 기체투과방지막 특성을 극대화하는 것으로 이는 유기물 층을 진공 중에서 코팅하고 경화시키는 flash evaporation 기술에 그 특화된 기술 실체가 있다고 할 수 있다.^[13]

Vitex가 밝히는 유기물 층의 역할은 플라스틱 필름의 평탄화를 통한 무기물 적층의 defect 제거가 목적이다. 이러한 유기물 층의 코팅이 상압이 아닌 진공 중에서 용제 없이 이루어지므로 그 공정의 관리에 어려움이 있으나 단량체가 용제 없이 적용될 수 있기 때문에 소자의 passivation 측면에서는 유리한 점이 있을 수 있다. 따라서 Vitex는 기술을 기판용도 혹은 passivation 용도로 적용하고 있다. 기판 용도로 코팅하는 경우 적층되는 무기물 층이 일반적으로 높은 특성의 기체투과방지 특성을 갖기보다는 유기층과 무기층의 반복적인 코팅을 통하여 나타날 수 있는 defect의 영향을 확률적으로 최소화하여 기체투과방지 특성의 극대화를 꾀한 것으로 파악된다. 본 기술의 적용에서 어려운 난점은 유기물 층의 증착 속도와 무기물 층의 증착 속도의 차이로서 매우 빠른 유기물 증착과 저속의 무기물 증착을 roll-to-roll 코팅 시 어떻게 연동시켜서 균일하게 코팅할 것인가 하는 점이다. 이 경우 기체투과방지 특성이 우수한 sputtering 법보다는 evaporation 법을 통하여 무기물 증착을 시도하게 된다. 이 경우 무기물 층의 특성이 저하될 것으로 예상되기도 한다.^[13]

Vitex와는 다르게 미국의 Symmorphix사는 고품질의 무기물 층을 이용한 기체투과방지막 형성을 시도하고 있다. 고순도 고성능 sputtering을 이용한 경우 Symmorphix사는 $10^{-3}g/m^2/day$ 수준의 기체투과방지막을 PEN 필름 상에 달성했음을 보고했다. 하지만 Symmorphix사의 기술과 결과는 roll-to-roll 장비가 아닌 batch 형태의 장비에서 도출된 것으로 판단되어 실용 가능성에 대한 검증이 필요할 것으로 예상된다.

General Atomics and Affiliated Company 는 최근 무정형의 단일층 사파이어 박막을 PET 위에 형성하여 10^{-4}

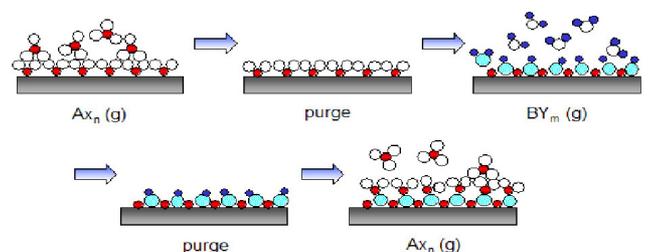
$g/m^2/day$ 의 수분차단성을 가지는 플라스틱 기판을 발표하였다.(US Application: 20040209126). 또한 기존의 calcium test를 대신할 수 있는 새로운 기체투과도 측정 방법으로서 radioactive testing method(US6,804,989)를 발표하였음.

한편 Dow-Corning은 축적된 PECVD 기술을 이용한 Silicon-Carbon alloy film을 플라스틱 필름 상에 형성하는 방법으로 기체투과방지막을 개발하고 있다.^[14] Dow-Corning사의 기술은 PECVD 공정 중에 투여되는 반응 기체의 조성을 변화하여 형성되는 단일막내에서 stress buffer의 역할을 위한 유연한 층과 기체투과방지막의 역할을 하는 밀도가 높은 투과 방지막 층을 동시에 형성하는 것으로 이 방법 역시 기판과 소자의 passivation에 동시에 적용 가능한 기술이다. Dow-Corning은 roll-to-roll 공정에 적용 가능한 파일럿 공정을 개발하는 것으로 보고되었다.^[22]

미국의 GE사는 PC 필름 상에 graded ultra high barrier를 코팅하여 기판 개발을 진행하고 있다. Graded ultra high barrier에 관한 발표 자료에는 Dow-Corning사의 개발과 비슷한 구조를 갖지만 단일층을 갖는 Dow-Corning사의 층 구조와는 다르게 반복되는 층 구조를 형성한 차이를 보인다. 이 경우 기체투과방지 특성은 $10^{-5}g/m^2/day$ 수준을 보인다.

최근 ETRI에서 발표한 박막 구조의 보호층의 경우 ALD (Atomic Layer Deposition)공정을 기반으로 하여 AlO_x 성분의 무기물을 이용한 특성을 발표하였다. Chemi-sorption과 physi-sorption의 차이를 이용해서 박막을 원자층 단위로 박막을 성장 시켜 박막 두께 조절이 용이하고, 대면적 기판에서 우수한 박막두께 균일성을 보여 재현성이 우수하나, 증착 속도가 매우 느리고 반응 원료의 제약이 있다. 한 가지 주목할 점은 ALD를 이용한 보호층 형성 전에, device위에 직접적인 Damage를 줄이기 위한 buffer layer와 박막 형성하면서 생길 수 있는 수분에 의한 피해를 줄이기 위한 수분 흡수 층을 먼저 형성시켜 주었다는 것이다. 이 두 층이 삽입 여부에 따라 달라지는 특성들은 이 층들이 아주 중요하다는 것을 알 수 있다. 특히 증착 온도는 sputter 공정보다 높아 유기 소자의 손실이 우려된다. 결론적으로, 박막형성 상태와 구조적으로 buffer layer와 보조적 수분흡수 층의 삽입이 수명 증대에 큰 기여를 할 수 있다는 것을 보여준다.

기체투과방지막 기술 개발과 함께 고분자 필름용 신규소재를 개발하는 노력도 지속되고 있다. 고분자필름의 기본 특



[그림 7] ALD를 이용한 기체투과방지막 형성

성 특히 내열특성 및 기계적 특성 등은 사용되는 소재에 의해 결정된다. 따라서 기존 소재의 개선 및 신규 소재의 개발을 통한 특성 향상을 보고하는 논문들이 최근 늘어나고 있다. 내열특성의 척도인 Tg를 향상시키는 노력은 높은 Tg를 갖지만 투명성이 떨어지는 polyimide 필름의 소재에서 분자 구조를 치환하여 투명도를 높이는 노력도 진행되고 있다. 즉 colorless PI 필름의 구현도 기대되는 바이다. 국내에서도 Kolon과 SKC의 합작 법인이 polyimide 생산과 함께 투명 polyimide 필름의 개발이 임박했다는 보고도 접할 수 있게 되었다. 투명 polyimide의 특성은 보다 정확한 시험을 통해서 확인되었지만, polyimide의 소재 특성 상 높은 내열도(Tg)를 확보할 것으로 예상된다. 내열특성과 함께 디스플레이 공정에서 중요시되는 필름 특성은 열팽창 계수(coefficient of thermal expansion, CTE)이다. 이는 가열과 감열을 반복하여 진행되는 디스플레이 제조공정 중 정밀한 위치 제어(alignment)가 필요한 미세공정에서 보다 높은 정밀도를 달성하기 위하여 낮은 CTE를 갖는 고분자 필름이 요구되는 것이다. 유리의 경우 5-7ppm 수준의 CTE를 보이는 반면 디스플레이 기판으로 사용되는 PES 필름은 50 ppm 정도의 CTE를 나타내기 때문에 CTE가 낮은 소재를 사용하는 것이 디스플레이 공정에 유리할 수 있다. 이를 위해서 일본의 Sumitomo Bakelite사는 복합재료를 이용하여 필름 소재를 개발하는 연구를 진행하고 있다. 즉 비정형, 고내열성 고분자 소재를 이용하던 기존의 필름에서 나노 입자나 나노 섬유를 보강재로 사용하여 필름을 제작용으로 필름의 CTE를 낮출 수 있음을 보고하였다.^[5] 이렇게 개발되고 있는 복합소재 필름은 250도 수준의 Tg를 기록하면서 14ppm/°C 수준의 CTE를 갖는 것으로 알려지고 있다.

VII. 결 론

플렉시블 디스플레이 기판은 플렉시블 디스플레이 구현에 있어 가장 기본적으로 요구되는 부품이다. 현재 디스플레이 업체와 연구자들이 플렉시블 디스플레이 개발에 사용하고 있는 기판으로는 박막 금속 기판과 고분자 필름 기판이 있으며 두 종류의 기판 사이에는 상호 보완적인 특성이 있다. 하지만 현재 구현되는 디스플레이가 투명한 유리 기판을 사용하는 점을 고려할 때 디스플레이 기판의 투명도가 중요한 특성으로 부각되며 고분자 필름 기판, 특히 투명 고분자 필름 기판의 특성을 확보하는 노력이 주목을 받고 있다. 고분자 필름 기판이 유리 기판에 대비 열악한 특성인 내열성, 기계투과 특성, 열팽창계수, 내화학성은 지속적으로 개선되어야 할 숙제이다. 특히 열팽창계수의 개선은 최근 국내의 디스플레이 업체에서 지적되고 있는 가장 관심을 끌고 있는 사안이다. 이는 디스플레이 업체들의 경험상 기판의 크기가 커지는 디스플레이 공정의 경향을 감안할 때 플렉시블 디스플레이 기판이 커지면서 가장 취약한 특성이 열팽창계수라는 판단에 기인한다. 이는 기존의 고분자 필름 생산 업체가 고분자 소재의 내열성 즉 Tg를 높이는 개발을 해온 노력이

현 시점에서는 CTE 개선으로 그 개발 방향의 전환을 요구하는 것이다. 또한 고분자 필름 기판의 특성개선 중 현재까지도 이슈가 되고 있는 기판투과방지 특성은 현 시점에서는 양산성 확보에 보다 큰 개발의 노력이 집중되고 있다. 이 기술이 다른 기술에 비해 난점인 이유는 기체투과방지 특성을 확보하기 위해서 치밀한 구조의 무기박막을 형성해야 하는데, 무기박막의 치밀도를 증가시키고 두께를 높이는 과정에서 고분자 필름과 무기 박막 사이의 큰 물성 차이로 인해 접착력과 잔류 응력등의 문제가 발생하기 때문이다. 이러한 문제는 지속적인 연구를 통해 해결되어야 할 과제이다. 고분자 필름 기판은 고분자 소재, 필름 구현 공정, 각종 코팅등 보다 복합적인 협력 개발이 필요한 부품이라 할 수 있다. 기초 고분자 소재의 경우 그 개발부터 양산 및 상용화까지 필요한 시간이 매우 길며, 필름화 및 기판화까지는 많은 추가 개발이 필요한 상황이다. 또한 개발된 고분자 필름 기판은 디스플레이 업체로부터 개발과 공정 투입, 양산에 따른 검증과정을 거쳐야 하는 장기간의 노력이 필요하다. 따라서 플렉시블 기판의 개발은 기판 개발 업체와 디스플레이 업체의 공조 또한 매우 중요한 개발 필요 요소라 할 수 있다.

참 고 문 헌

- [1] J. Jang and S. H. Han, "High Performance OTFTs on Flexible Substrate", SID'05 DIGEST.
- [2] M. Hong et al., "Large Area Full Color Transmission a-Si TFT-LCD Using Low Temperature Processes on Plastic Substrate" SID'05 DIGEST.
- [3] Y. Okada et al., "A 4-inch Reflective Color TFT-LCD Using a Plastic substrate", SID'02 DIGEST.
- [4] S. Aomori et al, "Reflective MIM-LCD Using a Plastic Substrate", SID'01 DIGEST.
- [5] K. Chung "Overview of Flexible Display R&D", Flexible Microelectronics & Displays Conference 2005.
- [6] P. Cirkel et al, "Towards flexible AMLCD's", IDW'02.
- [7] T. Hanada et al, "Flexible Plastic Substrate for Flat Panel Displays", IDW'02.
- [8] M. Okamoto et al, "Development of a Color Reflective TFT-LCD Using Plastic Substrate", IDW'02.
- [9] N. Hildebrand et al., "Flexible Glass Sheets", Flexible Microelectronics & Displays Conference 2003.
- [10] M. McCreary, "Flexible Displays Using E Ink's Electronic Ink Technology", Flexible Microelectronics & Displays Conference 2003.
- [11] M. Schaepekens et al., "Polycarbonate film substrates for flexible display applications", Inter-

national Display Workshop 2003.

- [12] I. Shiroishi et al., "A novel plastic substrate for a high resolution display", International Display Workshop 2003.
- [13] N. Rutherford, "Flexible Displays-A Low Cost Substrate/Encapsulation Packaging Solution", Flexible Microelectronics & Displays Conference 2005.
- [14] W. K. Weidner, "Key Findings in the Development of Silicon-Carbon Alloy Films as Protective Barriers for Ultra-low Permeability Applications", Flexible Microelectronics & Displays Conference 2005.
- [15] T. Nakao, S. Shibarhara, and W. Oka, "High Performance Plastic Substrate for Flat Panel Displays" International Display Workshop 2003.

저 자 소개



김 인 선

1986 : 서울대학교 섬유공학과졸업,
 1989 : Univ. of Michigan Macromolecular Sci & Eng과 졸업(석사),
 1995 : Univ. of Michigan Macromolecular Sci & Eng과 졸업(박사),
 1995 ~1996 : Post-Doc., Univ. of California at Davis,
 1997~2000 : 차장, LG 전선 연구소,
 2000~현재 : 상무, (주)아이컴포넌트