

# 플렉시블 디스플레이용 고분자 기판 재료

## Polymeric Substrate Materials for Flexible Displays

홍성우 | Sung Woo Hong

Research Institute of Sustainable Manufacturing System, Korea Institute of Industrial Technology (KITECH),  
89, Yangdaegiro-gil, Ipijang-myeon, Seobuk-gu, Cheonan-si, Chungcheongnam-do 31056, Korea  
E-mail: swhong@kitech.re.kr

### 1. 서론

커브드, 벤더블, 폴더블, 롤러블 등과 같은 플렉시블 디스플레이는 최근 들어 학계와 산업계 모두로부터 관심을 받고 있는 차세대 디스플레이라고 할 수 있다(그림 1).<sup>1-9</sup> 한국과 직접적인 경쟁 관계에 있는 해외 경쟁국은 차세대 플렉시블 디스플레이 산업의 중요성을 깨달아 정부 주도의 범국가적 컨소시엄을 구성하여 디스플레이 관련 소재 및 부품과 공정 기술 개발을 주도해오고 있다. 특히, 중국은 중앙 정부의 전폭적인 지원을 통해 LCD 디스플레이 산업에 막대한 투자를 진행하였으며 최근에는 OLED 디스플레이 또한 공격적인 투자를 함으로써 향후 세계 디스플레이 시장을 지배하려고 노력하는 등 디스플레이 강국으로서의 한국의 지위를 매우 강력하게 위협하고 있다. 현재 한국은 월등한 디스플레이의 기술력을 바탕으로 시장 점유율을 유지하고 있으나, 위에서 언급한 중국 기업뿐만 아니라 일본 기업 등 해외 기업의 추격이 거세기 때문에 향후 해외 경쟁 기업에 대한 기술 우위를 지속적으로 유지하기 위해서는 플렉시블 디스플레이와 같은 차세대 디스플레이와 관련된 첨단 소재를 개발해야만 하는 상황이다.

플렉시블 디스플레이는 현재 가장 널리 사용되는 평면 디스플레이에서 한 단계 진보한 차세대 디스플레이의 형태로서 기존 평면 디스플레이 개발에 적용된 기술 패러다임과는 다른 새로운 개념의 기술 패러다임이 요구되는 새로운 개발 분야라 할 수 있다. 따라서 플렉시블 디스플레이는 (1) 차세대 기능성 소재 제조 기술 개발, (2) 소재 간 시너지 효과를 극대화할 수 있는 소재 융합 기술 개발, (3) 소재의 물성을 최적화할 수 있는 공정 기술 개발, 그리고 (4) 소재와 전자 부품과의 접합 안정성을 극대화할 수 있는 신뢰성 향상 기술 개발 등 다양한 종류의 기술들이 융합되어야만 성공적으로 개발할 수 있는 첨단 산업 분야 중 하나이다. 특히, 플렉시블 디스플레이를 구성하는 다양한 종류의 소재 중 기능성 필름/코팅 재료는 플렉시블 디스플레이를 구성하는 중요한 고분자 기판 재료로서 플렉시블 디스플레이의 성공적인 구현 및 개발을 위해서 반드시 필요한 핵심 소재라 할 수 있다.<sup>10-13</sup>

본 총설에서는 이러한 플렉시블 디스플레이용 고분자 기판 재료의 요구 특성과 고분자 기판 재료로 사용될 수 있는 기능성 고분자에 관한 연구에 대해 소개하고자 한다.

Author



홍성우

2000 서울대학교 섬유고분자공학과 (학사)  
2007 서울대학교 재료공학부 (박사)  
2007-2012 UMass Amherst 고분자공학과 (박사후 연구원)  
2012-2015 삼성전자종합기술원 전문연구원  
2015-현재 한국생산기술연구원 수석연구원

## 2. 본론

### 2.1 고분자 기판 재료의 요구 특성

#### 2.1.1 형태 안정성

플렉시블 디스플레이용 고분자 기판에 요구되는 가장 중요한 물리적 특성은 바로 유연성이라고 할 수 있다(그림 2). 특히, 이러한 고분자 기판은 플렉시블 디스플레이가 반복적으로 변형을 일으키는 커빙, 벤딩, 폴딩, 롤링, 그리고 스트레칭 과정 중에서도 손상이 일어나지 않아야 할 뿐만 아니라 다양한 초기 물성 역시 잃지 말아야 한다. 이상적으로는 장기적인 반복 변형에도 유지되는 유연 특성이 필요하며, 동시에 고분자 기판 자체의 견고한 특성 역시 필요하다. 여기서 견고한 특성이란 응력 하에서의 수평 방향으로의 변형, 즉 신장이 될 경우 손상이 발생하지 않는 특성을 의미한다.

이러한 외부의 물리적 응력 뿐만 아니라 열적 안정성과 같은 내부 응력 또한 중요하게 고려되어야 할 사항이라 할 수 있다. 특히 기판은 다양한 공정 과정을 거쳐야 하기 때문에 적절한 공정 온도에 견딜 수 있는 내열 특성을 가져야 하기 때문에, 고분자 기판 재료의 용융 온도가 충분히 높아야 한다는 것을 의미한다. 또한, 고분자 기판 재료의 중요한 열적 특성인 열팽창 계수(Coefficient of Thermal Expansion, CTE) 역시 충분히 낮아야 한다(표 1).<sup>14</sup> 공정 과정 중에 고분자 기판이 심각한 수준으로 팽창, 수축, 혹은 팽창과 수축이 동시에 일어나게 되면, 일반적으로 낮은 CTE를 가지는 무기층과 접합된 고분자 기판은 외부 응력의 경우와 마찬가지로 균열 혹은 탈착 등과 같은 문제점이 발생할 수 있다.

또한 열적 안정성은 특히 제조 공정상의 이유에서도 매우 중요하다고 할 수 있는데, 왜냐하면 낮은 공정 온도를 달성하는 것은 아직까지도 산업계에서 꾸준히 연구가 진행될 정도로 쉽지 않은 일이기 때문이다. 그리고 디스플레이의 전원을 켜다가 끄는 과정에서 약간의 온도 변화가 발생할 수는 있지만, 일반적으로 디스플레이의 작동 온도는 상당히 일정하기 때문에 디스플레이 자체에 큰 응력을 주지 않는다. 또한, 다양한 외부 조건에서 사용될 수 있도록 매우 넓은 온도 범위

에서 안정적으로 디스플레이가 구동될 수 있는 열적 안정성을 확보해야만 한다.

#### 2.1.2 열 전도성

플렉시블 디스플레이와 같은 고성능 전자 기기가 유연성을 가지게 되면 다양한 열적 특성을 고려해야만 한다. 일반적으로 플렉시블 디스플레이는 두께가 얇을 뿐 아니라 대면적화가 가능하기 때문에 외부 방열판의 도움 없이 기판 자체를 통한 방열 특성을 가지는 것은 플렉시블 디스플레이에 있어 가장 이상적인 열 추출 방법이 될 수 있다(그림 3).<sup>15,16</sup> 고분자 기판 재료가 이러한 방열 특성을 가지기 위해서 기판 재료 자체의 열 전도율을 높이는 것이 매우 바람직하다고 할 수 있다.

#### 2.1.3 표면 특성

일반적으로 박막 트랜지스터(TFT)는 얇은 특성을 가지고 있기 때문에 고분자 기판 재료의 표면은 반드시 평면을 유지해야만 한다. 기판 표면 위에 발생한 돌출 부위는 인접한 다른 얇은 층을 뚫고 핀홀을 형성시킬 수 있다.

이러한 문제점은 궁극적으로 디스플레이 장치의 고장, 공정 수율의 저하로 인한 단가 상승으로 이어질 수 있다. 고분자 기판 재료는 상당한 수준의 매우 부드러운 특성을 갖는 것이 바람직하지만, 굽힘 응력에 견딜 수 있도록 다른 구성층과 강하게 접착할 수 있는 특성 또한 갖고 있어야 한다.

또한 고분자 기판 재료는 기판 위에 배치되는 능동 소자를

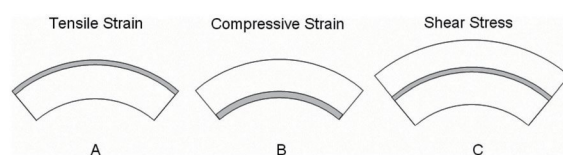


그림 2. 플렉시블 디스플레이의 굴곡 종류를 나타낸 모식도: 굴곡 형상에 따라 인장, 압축, 혹은 전단 응력을 받을 수 있음.<sup>10</sup>

표 1. 다양한 재료들의 전형적인 CTE 값을 나타낸 표(Electronic PRODUCTS (2012))

| Material                               | CTE, ppm/°C |
|----------------------------------------|-------------|
| ceramic                                | 9.5-11.5    |
| tantalum                               | 6.5         |
| glass, borosilicate                    | 3.24-4.5    |
| silicon                                | 2.6-3.0     |
| gold                                   | 14.1        |
| FR-4 PCB                               | 18          |
| polyimide/glass PCB                    | 12          |
| polyimide/Kevlar PCB                   | 7           |
| copper lead frames                     | 16-17       |
| Kovar* lead frames                     | 5.1-5.5     |
| filled epoxy resins (<T <sub>g</sub> ) | 18-25       |
| tin-lead solder alloy (60/40)          | 24.6        |
| lead-free solder alloy (Sn3.5Ag)       | 21.5        |



그림 1. 디스플레이의 진화 과정(LG Newsroom (2017)).

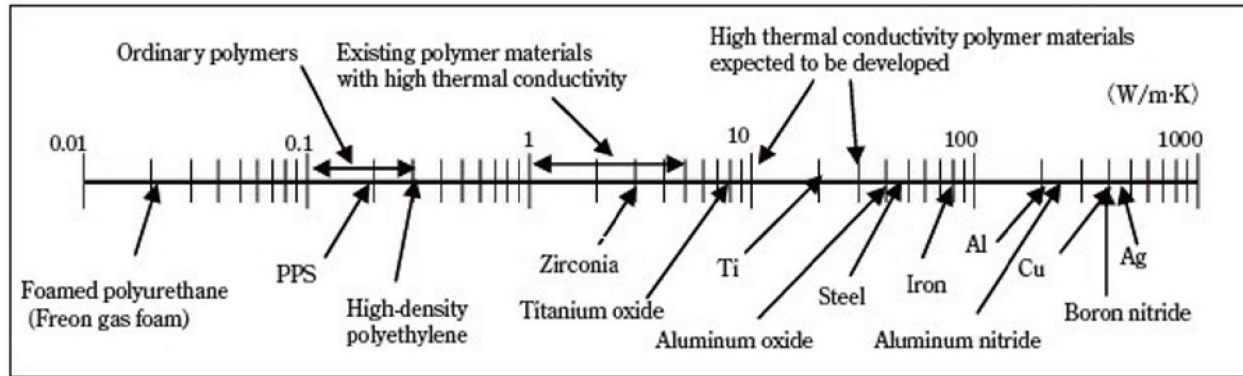


그림 3. 다양한 재료들의 열 전도성 값을 나타낸 모식도(AZO NANO (2013)).

표 2. 다양한 재료들의 전형적인 산소 및 수분 투과도 값을 나타낸 표 (IDTechEX (2017))

| Material                            | WVTR<br>g/m <sup>2</sup> /dy<br>(37.8–40°C) | OTR<br>cm <sup>3</sup> (STP)/m <sup>2</sup> /dy<br>(20–23°C) |
|-------------------------------------|---------------------------------------------|--------------------------------------------------------------|
| PET                                 | 3.9–17                                      | 1.7–7.7                                                      |
| PEN                                 | 7.3                                         | 3.0                                                          |
| PE                                  | 1.2–5.9                                     | 70–550                                                       |
| PP                                  | 1.2–5.9                                     | 93–300                                                       |
| PES                                 | 14                                          | 0.04                                                         |
| PI                                  | 0.4–21                                      | 0.04–17                                                      |
| Polystyrene (PS)                    | 7.9–40                                      | 200–540                                                      |
| 15 nm Al/PET                        | 0.18                                        | 0.2–2.9                                                      |
| SiO <sub>x</sub> /PET               |                                             | 0.007–0.03                                                   |
| ORMOCER/PET                         |                                             | 0.07                                                         |
| LCD requirement                     | 0.1                                         | 0.1                                                          |
| MOCON Aquatran 2 and Oxtran 2 limit | 0.00005                                     | 0.0005                                                       |
| OLED requirement                    | 10 <sup>-5</sup>                            | 10 <sup>-5</sup> to 10 <sup>-3</sup>                         |

형성하는데 사용되는 에칭 공정을 견디기 위해서 용제와 화학 물질에 대한 내성을 가지는 것이 바람직하다.<sup>17</sup> 하지만 이러한 내성은 특성 공정 단계에 들어가기 전에 임시로 보호층을 사용할 수도 있기 때문에 항상 반드시 필요한 것은 아니다.

## 2.1.4 투과성

일반적으로 고분자 기판 재료가 무기 기판 재료를 완벽하게 대체하기 위해서는 무기 기판 재료가 가지는 주요 특성을 모두 가지고 있어야 한다. 무기 재료의 주요 특성 중 고분자 기판 재료가 가장 달성하기 힘든 특성 중의 하나가 바로 매우 낮은 수준의 투과성이다.

디스플레이는 플렉시블 전자 기기를 개발하는데 있어 가장 중요한 개발 항목 중 하나이기 때문에, 특히 유기 발광 다이오드(OLED)의 발명과 더불어 고분자 기판 재료가 무기 기판 재료 수준의 배리어 특성을 가지는 것은 매우 중요한 문제라 할 수 있다(표 2). 유기 발광 다이오드는 대기 중의 산소와 수분에 의해 급격하게 변질되기 때문에,<sup>18-20</sup> 유기 발광 다이오드가 산소와 수분이 매우 낮은 환경에서 구동될 수 있

도록 고분자 기판 재료는 외부에서 기기로 산소와 수분이 스며들지 않는 특성을 가지고 있어야만 한다. 하지만, 액정 디스플레이(LCD)와 같은 기존의 디스플레이 기술은 위와 같은 수준의 배리어 특성이 요구되지 않기 때문에, 비록 액정 디스플레이에 적용되는 고분자 기판 재료 역시 투과성이 중요하지만 유기 발광 다이오드에 비해 상대적으로 적용되기 쉽다.

또한, 디스플레이가 필요치 않은 수많은 종류의 플렉시블 전자 장치와 관련된 응용 분야가 있다는 점도 중요하다. 한 예로, 무선 주파수 식별 장치(RFID)의 경우처럼 고분자 기판 재료는 항상 완벽하게 불투과성일 필요는 없다. 사실 스마트 밴드 등과 같은 센서 제품과 관련된 일부 응용 분야에서는 센서를 작동시키기 위해서 반투과성이 요구될 수도 있다. 하지만, 일반적으로는 플렉시블 기판 재료는 공기 및 수분에 대해 강한 배리어 특성을 갖는 것이 바람직하다.

## 2.1.5 광특성

앞에서 언급한 바와 같이, 디스플레이는 플렉시블 전자 기기를 개발하는데 있어 가장 중요한 개발 항목 중 하나이기 때문에 발광 소자에 적용되기 위해서 광학적으로 투명한 특성이 요구된다.<sup>21,22</sup> 특히 이러한 특성은 발광 소자에서 나오는 빛을 기판을 통해서 아래로 보내는 발광 방식의 디스플레이에 있어서 가장 중요하다고 할 수 있다.

또한, 고분자 기판 재료는 투명성 이외에 복굴절성을 가져서는 안된다. 복굴절성을 가지지 말아야 하는 이유는, 굴절률은 빛의 편광에 영향을 받기 때문에 종종 눈에 보이는 사물의 이미지가 다중으로 보이는 현상이 나타날 수 있기 때문이다. 이러한 문제점은 특히 액정 디스플레이에 있어 더 큰 문제가 될 수 있는데, 왜냐하면 다른 형태의 디스플레이는 빛의 편광에 큰 영향을 받지 않지만 액정 디스플레이는 빛의 편광에 큰 영향을 받기 때문에 이미지가 왜곡되어 보일 수 있기 때문이다.

## 2.1.6 가격 경쟁력

가격은 제품 개발 단계에서 필요한 재료의 특성과는 상관이 없는 항목이지만, 일단 제품의 모든 특성을 달성한 이후에는 반드시 고려되어야 하는 필수 항목이라 할 수 있다. 플렉시블 디스플레이는 일반 사용자들에게 다양한 종류의 새로운 옵션을 제공하지만, 또한 상당한 수준의 생산 비용 절감을 제공할 가능성도 있다.

유연 기판이 아닌 단단한 기판의 경우 전자 기기 제조 업체는 웨이퍼 기반의 생산 공정에 맞춰서 단단한 기판을 제조해야만 한다. 수많은 집적 회로로 구성된 웨이퍼는 몇몇의 에칭 및 화학 증착 공정단계를 제외하고는 각각 개별적으로 처리된다. 따라서 웨이퍼는 약 40여 개의 공정 단계를 거치게 되기 때문에 웨이퍼 공정은 상당한 시간과 비용이 소요되는 공정이라 할 수 있다. 또한, 이렇게 많은 단계에서 단순히 웨이퍼를 공정 기기에서 다른 공정 기기로 이동시키는 과정에서 상당한 수준의 시간이 소요된다.

최근 들어 디스플레이 공정은 최대한 많은 수의 디스플레이를 동시에 생산하고자 노력하기 때문에 기판의 크기가 점점 커지는 추세라 할 수 있다. 하지만 합리적으로 사용할 수 있는 기판 크기는 한계가 있기 때문에, 위와 같은 방법으로는 생산 비용을 크게 줄일 수는 없다. 현재 플렉시블 디스플레이 공정은 종래 공정 기술을 그대로 사용하여 개발되어 왔기 때문에 과거와 똑같거나 유사한 공정 기기를 사용해야만 한다.

플렉시블 디스플레이의 공정 비용을 실질적으로 절감하는 방법으로서 roll-to-roll 공정 방법을 들 수 있는데, 이러한 공정 방법을 통해 공정 과정 중에 중단 없이 연속적으로 디스플레이를 생산할 수 있게 된다(그림 4).<sup>23</sup>

Roll-to-roll 공정 방법은 롤 형태로 감긴 기판의 최대 생산 능력과 빠른 속도의 공정 도중에 발생하는 롤의 이탈을 재정렬하는 효율적이면서 연속적인 공정 능력이 필수적이라 할 수 있다.

## 2.2 플렉시블 디스플레이용 고분자 재료의 종류 및 특성

일반적으로 고분자 기판 재료는 상당히 유연하며, 다른 재

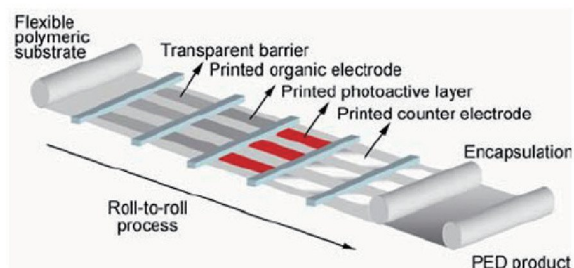


그림 4. Roll-to-roll 공정을 이용하여 플렉시블 전자 기기를 제조하는 공정 모식도.<sup>23</sup>

료 대비 가격 경쟁력이 뛰어날 뿐만 아니라 roll-to-roll 공정에 쉽게 적용될 수 있는 장점을 가진다. 그러나 위에서도 언급했듯이 고분자 기판 재료는 유리 기판 재료보다 열 안정성 및 치수 안정성이 떨어지고 산소와 물이 쉽게 침투할 수 있다. 또한, 디스플레이 공정 온도를 견딜 수 있는 높은 유리 전이 온도를 가져야 하며 열에 대한 형태 안정성 및 낮은 CTE도 가져야만 하는데, 일반적으로 고분자는 가열 및 냉각 사이클 공정 과정 중에 쉽게 수축되기 때문이다.<sup>24</sup> 고분자 기판 재료는 무기 재료에 비해 약 10~50배 낮은 모듈러스를 가지기 때문에, 열에 의해 발생할 수 있는 응력의 불균형이 아주 작은 수준이라 하더라도 디스플레이의 형태를 변형시킬 수 있을 뿐만 아니라 디스플레이를 구성하는 다양한 소자의 초기 정렬 위치를 변경시킬 수 있다.<sup>25</sup> 특히 수많은 디스플레이 공정 과정 중에 큰 온도 편차가 발생할 경우 높은 CTE를 갖는 기판 재료는 최종적으로 디스플레이에 심각한 손상을 줄 수

표 3. 다양한 고분자 기판 재료들의 물성을 비교한 표(미래창조과학부(2017))

|                                | PET<br>(Melinex <sup>®</sup> )<br>ST506 | PEN<br>(Teonex <sup>®</sup> )<br>Q65FA | PC    | PES<br>(Sumilite) | PI<br>(Kapton) |
|--------------------------------|-----------------------------------------|----------------------------------------|-------|-------------------|----------------|
| T <sub>g</sub> (°C)            | 78                                      | 120                                    | 150   | 223               | 410            |
| Upper process temperature (°C) | 150                                     | 220                                    |       |                   |                |
| CTE (-55°C to 85°C) (ppm/°C)   | 20~25                                   | 18~20                                  | 60~70 | 54                | 30~60          |
| Transmission (%)<br>400~700 nm | 89                                      | 87                                     | 90    | 90                | Yellow         |
| Moisture absorption (%)        | 0.14                                    | 0.14                                   | 0.4   | 1.4               | 1.8            |
| Young's modulus (Gpa)          | 4                                       | 5                                      | 1.7   | 2.2               | 2.5            |
| Tensile strength (Mpa)         | 225                                     | 275                                    |       | 83                | 231            |
| Density (g/cm <sup>3</sup> )   | 1.4                                     | 1.36                                   | 1.2   | 1.37              | 1.43           |
| Refractive index               | 1.66                                    | 1.5~1.75                               | 1.58  | 1.66              |                |
| Birefringence (nm)             | 46                                      |                                        | 14    | 13                |                |

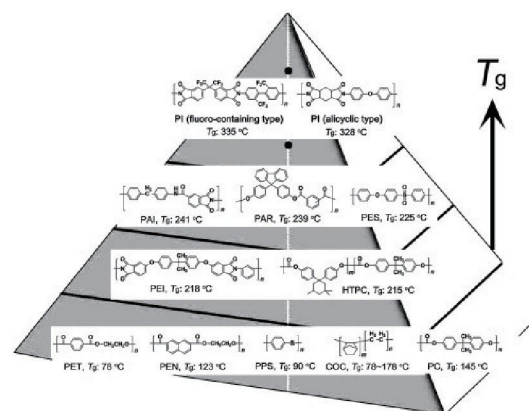


그림 5. 다양한 고분자 기판 재료들 화학 구조와 각각의 유리 전이 온도를 비교한 모식도.<sup>29</sup>

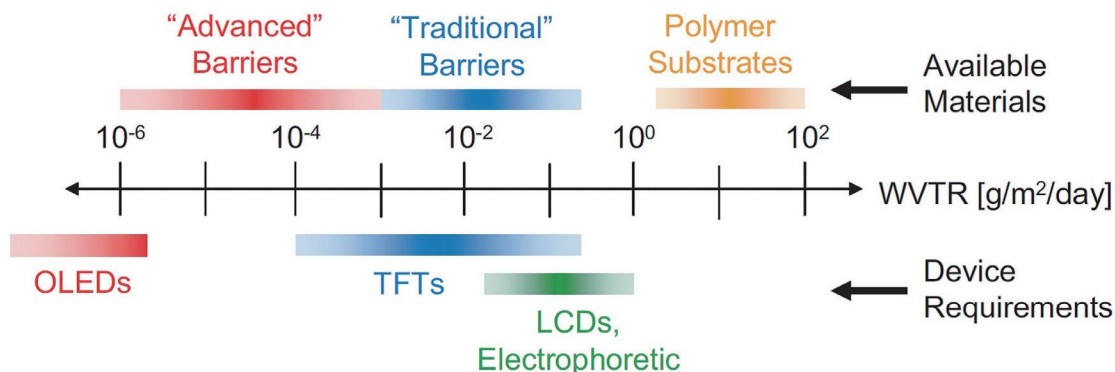


그림 6. 플렉시블 디스플레이 종류에 따라 요구되는 수분 투과 기준 및 고분자 기판 재료의 수분 투과 수준을 비교하는 모식도.<sup>10)</sup>

있다.

플렉시블 디스플레이용 고분자 기판 재료로 사용될 수 있는 후보는 크게 다음과 같이 세 가지 종류로 나눌 수 있다. 첫 번째는 열가소성 반결정성 고분자인 polyethylene terephthalate (PET)와 polyethylene naphthalate(PEN)이며, 두 번째는 열가소성 무정형 고분자인 polycarbonate(PC)와 polyethersulphone (PES)이며, 세 번째는 높은 유리 전이 온도를 가지는 고분자인 polyarylate(PAR), polycyclic olefin(PCO), polyimide (PI)이다(표 3, 그림 5).<sup>26-29</sup> PC, PES, PAR, 그리고 PCO는 PET나 PEN에 비해 광학적으로 투명하며 높은 유리 전이 온도를 가지지만 CTE가 상대적으로 높은 편이며 내화화성도 상대적으로 떨어진다. PET, PEN, 그리고 PI는 다른 고분자 재료에 비해 아주 낮은 CTE를 가지며, 매우 높은 탄성 모듈러스를 가질 뿐만 아니라 공정 중에 사용되는 화학 물질에 대한 내화화성도 매우 높은 편이다. PET와 PEN은 가시광선 범위 내에서 전광선 투과도가 85% 이상으로 광특성이 뛰어나며, 수분 흡수량도 약 0.14%로 매우 낮은 편이지만 공정 온도가 150~200 °C 정도로 매우 낮은 단점이 있다. 이와 반면 PI는 350 °C 이상의 매우 높은 유리 전이 온도를 가지지만 PI가 지니는 독특한 특성인 전하 이동 복합체(charge transfer complex, CTC) 현상으로 인해 상대적으로 황색 지수가 높은 편이며, 수분 흡수량도 약 1.8% 정도로 높은 편이다.<sup>28</sup> 현재까지는 대부분의 고분자 기판 재료는 유기 발광 다이오드 공정에서 요구되는 산소와 수분에 대한 매우 낮은 투과 기준을 완벽하게 충족시키지 못하는 실정이다(그림 6). 일반적인 고분자 기판 재료의 산소 및 수분 투과 수준은 각각 1-10 cm<sup>3</sup>/m<sup>2</sup>/day와 1-10 g/m<sup>2</sup>/day 정도인데, 유기 발광 다이오드 공정이 요구하는 투과 수준은 10<sup>-5</sup> cm<sup>3</sup>/m<sup>2</sup>/day와 10<sup>-6</sup> g/m<sup>2</sup>/day로 매우 낮다.<sup>30</sup> 이러한 문제점은 디스플레이에 배리어 층을 도입함으로써 어느 정도 해결할 수 있지만, 근본적으로 위에 언급한 고분자 재료의 기체 투과 수준을 낮출 수 있는 연구가 필요하다.

### 3. 결론

본론에서 언급한 다양한 요구 특성을 동시에 모두 만족시킬 수 있는 플렉시블 디스플레이용 고분자 기판 재료에 대한 수요는 오래전부터 있어 왔으나, 상기의 특성들은 대부분 서로 모순되는 trade-off 성격을 가지고 있기 때문에 고분자 기판 재료 개발 기술은 기술적 난이도가 매우 높은 기술이라고 할 수 있다.

하지만, 위 특성들을 동시에 모두 만족시킬 수 있는 플렉시블 디스플레이용 고분자 기판 재료를 성공적으로 개발할 수 있다면 향후 핵심 소재 기술 선점을 통해 지속적인 시장 경쟁력을 확보할 수 있을 뿐만 아니라 다양한 형태의 차세대 디스플레이 시장을 선도할 수 있을 것으로 기대할 수 있기 때문에 앞으로도 관련 연구 및 개발이 지속적으로 이루어져야 한다.

### 참고문헌

1. J. Chen and C. T. Liu, *IEEE Access*, **1**, 150 (2013).
2. H. C. Ko, M. P. Stoykovich, J. Song, V. Malyarchuk, W. M. Choi, C.-J. Yu, J. B. Geddes III, J. Xiao, S. Wang, Y. Huang, and J. A. Rogers, *Nature*, **454**, 748 (2008).
3. A. C. Siegel, S. T. Phillips, M. D. Dickey, N. Lu, Z. Suo, and G. M. Whitesides, *Adv. Funct. Mater.*, **20**, 28 (2010).
4. J. Liang, L. Li, X. Niu, Z. Yu, and Q. Pei, *Nat. Photon.*, **7**, 817 (2013).
5. W. J. Hyun, O. O. Park, and B. D. Chin, *Adv. Mater.*, **25**, 4729 (2013).
6. J. P. Rojas, G. A. T. Sevilla, M. T. Ghoneim, S. B. Inayat, S. M. Ahmed, A. M. Hussain, and M. M. Hussain, *ACS Nano*, **8**, 1468 (2014).
7. E. Menard, R. G. Nuzzo, and J. A. Rogers, *Appl. Phys. Lett.*, **86**, 093507 (2005).
8. K. Fukuda, Y. Takeda, Y. Yoshimura, R. Shiwaku, L. T. Tran,

- T. Sekine, M. Mizukami, D. Kumaki, and S. Tokito, *Nat. Commun.*, **5**, 4147 (2014).
9. T. Sekitani, U. Zschieschang, H. Klauk, and T. Someya, *Nat. Mater.*, **9**, 1015 (2010).
10. J. Lewis, *Mater. Today*, **9**, 38 (2006).
11. J. Jang, Electron-Transfer Reactions of Electron-Reservoir Complexes and Other Monoelectronic Redox Reagents in Transition-Metal Chemistry *Mater. Today*, **9**, 46 (2006).
12. M. J. Han and D.-Y. Khang, *Adv. Mater.*, **27**, 4969 (2015).
13. W. Zhao, I. I. Nugay, B. Yalcin, and M. Cakmak, *Displays*, **45**, 48 (2016).
14. X. Yu, W. Liang, J. Cao, and D. Wu, *Polymers*, **9**, 451 (2017).
15. S. Chung, J.-H. Lee, J. Jeong, J.-J. Kim, and Y. Hong, *Appl. Phys. Lett.*, **94**, 253302 (2009).
16. V. Vishwakarma, C. Waghela, and A. Jain, *Microelectron. Eng.*, **142**, 36 (2015).
17. H. Ni, J. Liu, Z. Wang, and S. Yang, *J. Ind. Eng. Chem.*, **28**, 16 (2015).
18. F. Papadimitrakopoulos, X.-M. Zhang, and K. A. Higginson, *IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron.*, **4**, 49 (1998).
19. Y.-F. Liew, H. Aziz, N.-X. Hu, H. S.-O. Chan, G. Xu, and Z. Popovic, *Appl. Phys. Lett.*, **77**, 2650 (2000).
20. P. E. Burrows, G. L. Graff, M. E. Gross, P. M. Martin, M. Hall, E. Mast, C. C. Bonham, W. D. Bennett, L. A. Michalski, M. S. Weaver, J. J. Brown, D. Fogarty, and L. S. Sapochak, *Proc. SPIE*, **4105**, 75 (2005).
21. M.-C. Choi, Y. Kim, and C.-S. Ha, *Prog. Polym. Sci.*, **33**, 581 (2008).
22. V. Zardetto, T. M. Brown, A. Reale, and A. Di Carlo, *J. Polym. Sci., Part B: Polym. Phys.*, **49**, 638 (2011).
23. S. Logothetidis, *Mater. Sci. Eng. B*, **152**, 96 (2008).
24. W. A. MacDonald, *J. Mater. Chem.*, **14**, 4 (2004).
25. I. C. Cheng, A. Kattamis, K. Long, J. C. Sturm, and S. Wagner, *J. Soc. Inf. Disp.*, **13**, 5643 (2005).
26. M. S. Weaver, *Appl. Phys. Lett.*, **81**, 2929 (2002).
27. D. S. Soane, *Polymers in Microelectronics*, Elsevier, New York, 1989.
28. B. A. MacDonald, K. Rollins, D. MacKerron, K. Rakos, R. Eveson, K. Hashimoto, and B. Rustin, "Engineered films for display technologies", in *Flexible Flat Panel Displays*, G. P. Crawford, Editor, John Wiley & Sons, New York, 2005.
29. H.-J. Ni, J.-G. Liu, Z.-H. Wang, and S.-Y. Yang, *J. Ind. Eng. Chem.*, **28**, 16 (2015).
30. J. S. Lewis and M. S. Weaver, *IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron.*, **10**, 45 (2004).