

## 고온 신뢰성 시험에서 발생된 플렉서블 OLED의 휨 변형

이미경 · 서일웅 · 정훈선 · 이정훈 · 좌성훈<sup>†</sup>

서울과학기술대학교 NID 융합기술대학원

### Warpage of Flexible OLED under High Temperature Reliability Test

Mi-Kyoung Lee, Il-Woong Suh, Hoon-Sun Jung, Jung-Hoon Lee and Sung-Hoon Choa<sup>†</sup>

Graduate School of NID Fusion Technology, Seoul National University of Science and Technology, 232 Gongneung-ro, Nowon-gu, Seoul 139-743, Korea

(Received February 21, 2016: Corrected March 15, 2016: Accepted March 27, 2016)

**초 록:** 플렉서블 OLED는 매우 다양한 유기(organic) 및 무기 물질로 이루어져 있으며, 각 층을 증착하는 과정에 의하여 고온에 의한 휨(warping)이 발생한다. 휨으로 인하여 발생한 굽힘 변형은 후속 공정에 많은 영향을 미치며, 궁극적으로 생산 수율 및 신뢰성을 저하시킨다. 본 연구에서는 플렉서블 OLED 소자의 고온 환경신뢰성 시험 및 공정 단계에서 발생하는 휨 변형을 수치해석을 이용하여 예측하였으며 실험 결과와 비교하였다. 이를 통하여 휨에 가장 큰 영향을 미치는 재료를 파악하고, 궁극적으로 휨을 최소화 함으로써 플렉서블 OLED의 신뢰성을 향상시키고자 하였다. 휨의 측정 및 수치해석 결과, 편광 필름과 베리어 필름이 휨에 많은 영향을 줄 수 있었으며, OCA가 휨에 미치는 영향은 미미하였다. 플렉서블 OLED의 휨에 가장 큰 영향을 주는 소재는 plastic cover이었으며, 휨을 최소화하기 위한 plastic cover 소재의 최적 물성을 실험계획법으로 계산한 결과, 탄성 계수는 4.2 GPa, 열팽창계수는 20 ppm/°C 일 경우 플렉서블 OLED의 휨은 1 mm 이하가 됨을 알 수 있었다.

**Abstract:** Flexible organic light-emitting diode (OLED) devices consist of multi-stacked thin films or layers comprising organic and inorganic materials. Due to thermal coefficient mismatch of the multi-layer films, warpage of the flexible OLED is generated during high temperature process of each layer. This warpage will create the critical issues for next production process, consequently lowering the production yield and reliability of the flexible OLED. In this study, we investigate the warpage behavior of the flexible OLED for each bonding process step of the multi-layer films using the experimental and numerical analysis. It is found that the polarizer film and barrier film show significant impact on warpage of flexible OLED, while the impact of the OCA film on warpage is negligible. The material that has the most dominant impact on the warpage is a plastic cover. In order to minimize the warpage of the flexible OLED, we estimate the optimal material properties of the plastic cover using design of experiment. It is found that the warpage of the flexible OLED is reduced to less than 1 mm using a cover plastic of optimized properties which are the elastic modulus of 4.2 GPa and thermal expansion coefficient of 20 ppm/°C.

**Keywords:** flexible organic light-emitting diode, multi-layer, warpage, numerical simulation

### 1. 서 론

플렉서블 디스플레이, 플렉서블 스마트 폰, 플렉서블 메모리 등과 같은 플렉서블 전자소자는 얇고, 가볍고, 깨지지 않는 특성뿐만 아니라 롤투롤 공정을 이용한 저가 격 대량 생산 공정에 적합한 전자소자 기술로 최근 많은 주목을 받고 있다.<sup>1,2)</sup> 이러한 플렉서블 전자소자는 향후 웨어러블 전자 소자 기술의 핵심이 될 것으로 예측하고 있다.<sup>3)</sup> 그러나 플렉서블 전자 소자가 상용화되기 위해서

는 아직 여러 기술적 장벽을 해결해야 한다. 현재 플렉서블 전자 소자 분야에서 개발이 가장 빠르게 진행되고 있는 기술은 플렉서블 디스플레이 기술이다. 디스플레이 기술은 거의 모든 전자 소자의 핵심 기술로서, 또한 신기술에 대한 소비자의 요구가 큰 기술로 알려져 있다. 이와 관련하여 최근 플렉서블 organic light-emitting diode (OLED) 기술이 큰 주목을 받고 있으며 굽히거나, 접힐 수 있는 기술로 발전하고 있다.<sup>4)</sup> 기존의 유리를 기반으로 한 OLED에 비하여 플렉서블 OLED는 다양한 폴리머 소재 및 무

<sup>†</sup>Corresponding author  
E-mail: shchoa@seoultech.ac.kr

© 2016, The Korean Microelectronics and Packaging Society

This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License(<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

기(inorganic) 소재를 사용하며, 사용된 각 층의 개수도 40~60 층이 넘는다고 보고되고 있다.<sup>5)</sup> 플렉서블 OLED의 각 층(주로 박막이나 필름)을 증착하는 과정은 주로 열압착 공정에 의하여 진행되며, 이때 가해진 열에 의하여 OLED 패널에 휨(warping)이 발생하게 된다. 또한 고온 혹은 고습과 같은 가혹 조건의 환경신뢰성 시험 중에서는 상온 → 고온/저온 → 상온을 반복하게 되면 OLED 소자 혹은 OLED 패널에는 휨이 발생하게 되고, OLED 소자의 각 층에는 응력이 발생하게 된다. 특히 OLED와 같은 대면적 다층 박판은 많은 공정을 거치면서 누적된 잔류 응력(residual stress)에 의하여 쉽게 변형된다.<sup>6)</sup> 또한 휨으로 인하여 발생한 굽힘 변형은 기관 제작 및 후속 과정에서 생산 라인의 공정에 많은 영향을 미치며, 궁극적으로 생산 수율 및 신뢰성을 저하시킨다.

이러한 휨 현상은 OLED 패널에 사용되는 재료들의 열팽창 계수(CTE, coefficient of thermal expansion), 탄성 계수, Poisson's ratio 및 열전도 계수 등의 소재의 물성들 차이에 의하여 발생하며, 특히 열팽창 계수의 차이(CTE mismatch)에 의하여 발생된 열응력(thermo-mechanical stress)이 주된 요인이다.<sup>5,7)</sup> 전술한 바와 같이 이러한 휨 현상은 OLED 패널 및 소자의 공정 수율과 장기 신뢰성에 영향을 미치게 되고, 궁극적으로는 OLED 소자의 크랙 혹은 층간 계면들 사이에 박리(delamination)의 발생을 초래하게 된다.<sup>8)</sup> 또한 OLED 재료의 열팽창 계수의 차이가 과도할 경우 각 층의 접합면 혹은 끝단 부분에 응력 집중이 발생하여, 계면의 전단 응력과 박리 응력으로 인한 파괴가 발생할 가능성이 매우 높다. 즉, 국부적으로 발생한 응력의 크기가 재료들의 접합 응력(bonding strength)보다 클 경우, 계면 크랙이 전파하여 파괴를 초래한다. 따라서 휨의 크기를 가능한 저하시켜야 한다. 특히, 플렉서블 OLED는 베리어 층(barrier layer), ITO(indium tin oxide)와 같은 투명전극, TFT 소자 등은 brittle 하기 때문에 휨으로 인한 응력으로 인하여 파괴가 되거나, 유연성이 감소될 수 있다.<sup>9,10)</sup> 즉, OLED 패널의 휨 현상은 패널의 크기, 각 층의 재료 물성 및 두께, 시험 온도 및 공정 온도 조건에 좌우되는데, OLED에 사용되는 유기 재료인 PET(polyethylene terephthalate) 기관, 접착 필름, 편광필름과 무기 재료인 ITO, TFT, 베리어 층들의 열팽창 계수의 차이가 크기 때문에 휨 변형이 매우 클 수가 있다. 따라서 다층 박막의 굽힘 변형의 발생 원인을 근본적으로 이해하고, 소재와 공정을 최적화함으로써 플렉서블 OLED의 굽힘 변형 문제를 해결할 필요가 있다. 다층 박막의 휨을 쉽게 계산하는 식으로 Stoney's equation 등 다양한 수식이 존재한다.<sup>11,12)</sup> 그러나, OLED는 매우 다양한 물질로 적층된 복잡한 적층 구조로 구성되어 있기 때문에 이러한 휨 현상을 간단한 수식이나 analytical solution을 의하여 예측하는 것이 거의 불가능하다. 가령, 층의 개수가 4개 이상인 경우, 휨을 수식적으로 도출한다는 것은 거의 불가능하다. 따라서 수치해석(numerical analysis)을 이용하

여 휨 현상과 응력을 정확히 예측하는 것이 매우 중요하다.<sup>13)</sup> 이를 통하여 휨을 최소화 할 수 있으며, 휨에 의한 응력이 소자에 어떤 영향을 주는지를 파악할 수 있다.

본 연구에서는 플렉서블 OLED 소자의 고온의 환경신뢰성 시험 및 공정 단계에서 발생하는 휨 변형을 수치해석을 이용하여 예측하였으며 실험 결과와 비교하였다. 이를 통하여 휨에 가장 큰 영향을 미치는 소재를 파악하고, 궁극적으로 휨을 최소화 함으로써 플렉서블 OLED의 신뢰성을 향상시키고자 하였다.

## 2. 유한요소해석

### 2.1. 유한요소 모델링

본 연구에서는 플렉서블 OLED에 사용된 재료들이 고온 신뢰성 시험에서 후에 발생한 휨을 예측하기 위하여 상용 수치 해석프로그램인 ANSYS 12.1을 사용하여 유한요소 해석(finite element analysis, FEA)을 수행하였다. 플렉서블 OLED는 Fig. 1과 같이 얇은 박막의 소재들이 적층된 구조이며, PET, PI (polyimide), PSA (pressure sensitive adhesive), 베리어 필름, 편광 필름, OCA (optical clear adhesive), 플라스틱 커버(plastic cover) 등의 재료가 순차적으로 적층되어 있다. 각 필름 혹은 박막의 크기는 80 mm × 130 mm이다.

### 2.2. 유한요소 해석 조건

수치해석을 위하여, 8절점 3차원 요소를 형성하는 Solid 186 요소 및 Shell 281 요소를 사용하였다. PET 위에 PI, PSA, 베리어 필름, 편광 필름, OCA, 플라스틱 커버 등이 적층된 구조로 절점(node)의 수는 약 10,197이며, 요소(element)의 수는 약 3318~22512으로 구성되었다. 유한요소의 휨 해석 모델에 가해지는 열 하중 조건은 고온 신뢰성 조건인 온도 80°C로 열 하중이 가해진 후, 상온인 25°C로 내려간 상태이다. 상온 조건인 25°C를 stress-free 상태로 가정하고 해석을 수행하였다. 플라스틱 커버의 탄성

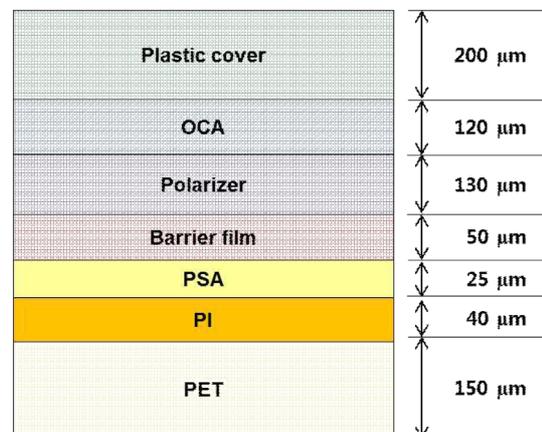
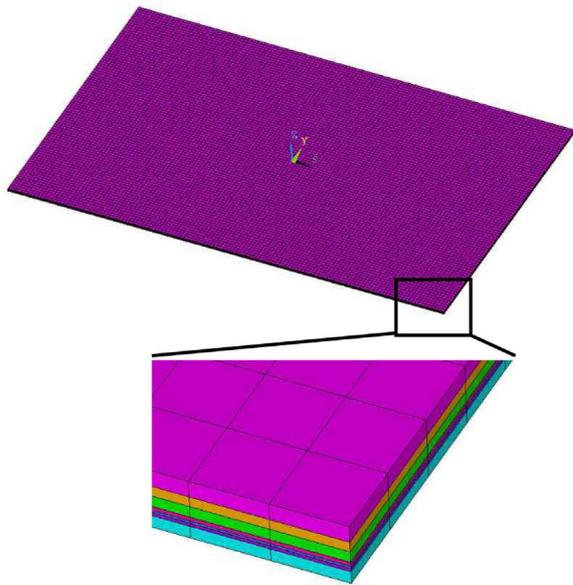


Fig. 1. Schematic illustration of flexible OLED structure used in this study.

**Table 1.** Material properties of flexible OLED layer

	Young's Modulus (GPa)	CTE (ppm/°C)	Poisson's ratio
Plastic cover	5.1	31.9	0.3
OCA	0.02	55	0.3
Polarizer	8.0	-9.2	0.3
Barrier film	2.3	81.8	0.3
PSA	0.01	40	0.49
PI	2.5	20	0.34
PET	3.6	16.9	0.3



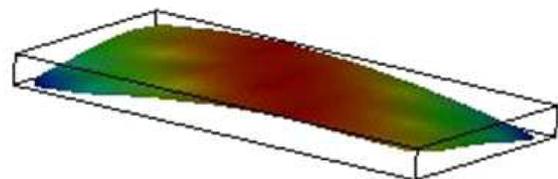
**Fig. 2.** Three-dimensional finite element modeling using 1/4 quarter model.

계수는 5.09 GPa이며, 열팽창 계수는 37 ppm/°C이었다. 각 재료들의 물성은 Table 2와 같다. 모든 재료는 탄성 영역 내에 있다고 가정하였으며, 사용된 재료들의 물성은 대부분 관련 기업에서 제공된 데이터를 사용하였다. 그러나, 물성 측정이 어려운 필름, 가령 OCA 필름의 경우 참고 문헌에 있는 데이터를 이용하였다.<sup>5,14)</sup>

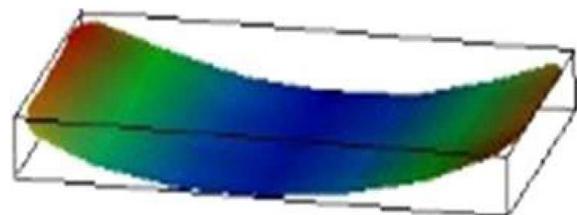
한편, OLED/TFT 층의 경우 다른 필름 혹은 박막에 비하여 두께가 매우 얇아(~1 μm) 휨에 영향을 미치는 영향이 미미할 것으로 판단된다. 더욱이 OLED/TFT 층의 물성을 측정하는 것이 매우 힘들기 때문에, 본 연구에서는 OLED/TFT 층을 생략하여 해석을 진행하였다. 본 해석에서 사용된 플렉서블 OLED의 수치적 모델은 Fig. 2와 같이 x, y 방향에 대하여 대칭 구조이므로 1/4 대칭(sym-metric)으로 모델링 하였으며 소요되는 시간과 해석의 용이성을 고려하여 결과의 오차가 크지 않은 조건 하에서 모델을 단순화하였다. 변위 경계 조건은 전체 모델의 대칭이 시작하는 부분의 중심점과 z 축 방향 일부 절점들을 x, y, z 축으로 모두 구속하여 해석을 수행하였고, 해석의 결과로서 휨의 크기를 확인하였다.

**3. 결과 및 고찰**

본 연구에서는 플렉서블 OLED의 핵심 소재이며 휨에 가장 큰 영향을 줄 것으로 예측되는 플라스틱 커버, 편광 필름, 베리어 필름 및 PET 기판에 대해서 휨의 영향을 우선적으로 검토하였다. 플라스틱 커버의 하부에 PET, 베리어 필름, 편광 필름의 필름을 OCA로 접합한 3 개의 샘플에 대해서, 80°C로 고온신뢰성 시험 후 상온인 25°C에서 휨을 각각 측정하였다. 휨의 측정은 full-field shadow moiré 방법을 사용하여 측정하였다.<sup>15,16)</sup> 또한, 고온 신뢰성 시험을 하기 위하여 준비된 초기 접합된 샘플은 고온으로 접합하는 과정에서 이미 약간의 휨이 발생하였다. 따라서 고온 신뢰성 시험 후의 휨 발생의 크기는 초기 휨의 영향을 고려하여 측정하였다. Fig. 3과 같이 플라스틱 커버 하부에 편광 필름을 OCA를 이용하여 접착한 샘플의 경우 휨을 측정한 결과 crying (∩) 형태의 휨의 발생하였으며, 휨의 크기는 35.5 mm이었다. Fig. 4와 같이 플



**Fig. 3.** Warpage measurement result for multi-layer film consisting of cover plastic, OCA, and polarizer film.



**Fig. 4.** Warpage measurement result for multi-layer film consisting of cover plastic, OCA, and barrier film.

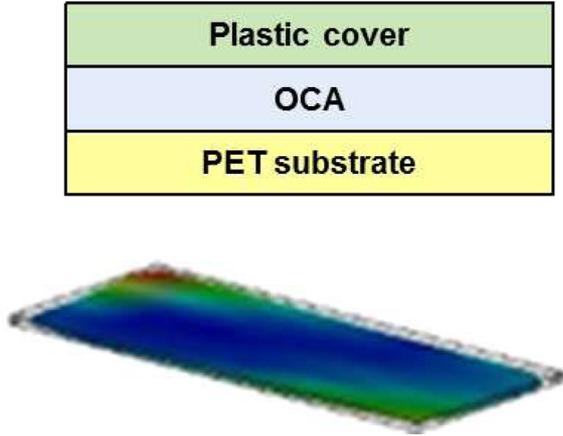


Fig. 5. Warpage measurement result for multi-layer film consisting of cover plastic, OCA, and PET.

라스틱 커버 하부에 베리어 필름을 부착한 경우 smile (∪) 형태의 휨의 발생하였으며, 6.3 mm의 휨이 발생하였다. 플라스틱 커버 하부에 PET 기판을 부착한 경우, Fig. 5와 crying (∩) 형태의 휨이 발생하였으며, 약 1.2 mm의 매우 적은 휨이 발생하였다. 휨의 측정 결과로 볼 때 편광 필름과 베리어 필름이 휨에 큰 영향을 줄을 알 수 있다.

다음으로 수치해석을 통하여 휨 측정의 실제 결과와 비교하여 보았다. 플라스틱 커버에 편광 필름이 하부에 접착된 샘플에 대해서 수치 해석한 결과 휨의 형태는 crying (∩) 형태로서 36.6 mm (∩)의 휨이 발생되었으며, 실험 결과인 35.5 mm (∪)와 비교하였을 때 약 1.1 mm 정도의 오차가 발생되었다. Fig. 4와 같이 베리어 필름이 하부에 접착된 샘플에 대해서 수치 해석한 결과, 실험 결과와 동일하게 smile (∪) 형태의 휨가 발생하였으며, 휨의 크기는 10.4 mm이었다. 실험 결과인 6.3 mm (∪)와 비교하였을 때 약 4.1 mm 정도의 오차가 발생되었다. Fig. 5와 같이 PET가 하부에 접착된 샘플을 수치 해석한 결과 0.9 mm (∩)의 휨가 발생되었으며, 실험 결과인 1.2 mm (∩)와 비교하였을 때 약 0.3 mm 정도의 오차가 발생되었다. 전체적으로 수치해석의 휨 결과는 실제 휨 측정 결과와 비교적 잘 일치함을 알 수 있었다. 베리어 필름이 부착된 샘플에서 실험 결과와 수치해석 결과가 차이가 나는 이유는 베리어 필름은 SiO<sub>2</sub> 혹은 Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>와 같은 무기 박막들이 여러 층의 유기 박막들 사이에 적층 형태로 제작된 복합 필름으로서, 열팽창 계수, 탄성 계수 및 Poisson's ratio와 같은 물성을 정확히 측정하는 것이 어렵기 때문에 발생한 오차 혹은 오류로 판단된다.

전술한 바와 같이 플렉서블 OLED는 PET 기판을 시작으로 PI 필름, PSA 필름, 베리어 필름, 편광 필름, OCA와 플라스틱 커버가 순차적으로 적층된다. 이러한 박막 및 필름은 주로 열압착 공정을 이용하여 접착을 하며, 공정 후 상온 상태가 되었을 때, 재료들의 열팽창계수의 차이에 의하여 휨가 발생한다. 적층 과정에서 발생한 휨는 다음 공정에 영향을 주기 때문에 각각의 공정에서의 휨를

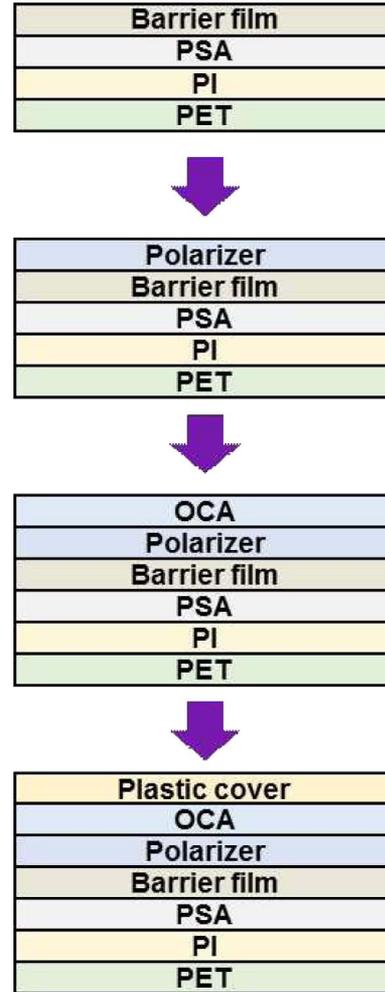


Fig. 6. Bonding process step of the flexible OLED device.

정확히 예측하는 것이 필요하다. 또한, 공정 중에 고온, 고습의 가속 신뢰성 평가를 통하여 각각 접합된 박막 및 필름들의 신뢰성을 평가하기도 한다. 따라서, 본 연구에서는 순차적으로 적층된 각각의 필름 혹은 박막들을 고온 신뢰성 시험을 통하여 휨를 측정하였으며, 수치해석을 통하여 검증하였다. 이를 통하여 각각의 필름들이 플렉서블 OLED의 휨에 미치는 영향을 분석하였으며, 각 공정에서의 휨를 최소화하고자 하였다. 휨의 측정은 80°C로 고온 신뢰성 시험 후 샘플을 고온 챔버에서 꺼내어 상온에서 측정하였다. 우선, Fig. 6과 같이 PET/PI/PSA가 적층된 기판에 베리어 필름을 적층한 경우 crying (∩) 형태의 휨가 발생하였으며, 휨의 크기는 16 mm이었다. 이때 수치해석의 의한 휨의 크기는 14.5 mm (∩)이었다. 다음으로 베리어 필름 위에 편광 필름을 적층하게 되는데, 이때 이 샘플에 대해서 고온 신뢰성 시험을 한 경우, 휨의 형태가 바뀌어 smile (∪) 형태의 휨가 발생하였으며, 크기는 56 mm이었다. 또한 수치해석을 통하여 얻어진 휨의 크기는 34 mm (∪)이었다. 따라서, 편광 필름이 휨에 큰 영향을 미치고 있음을 알 수 있다. OCA를 부착한 경우 발생한 휨는 smile (∪) 형태이며 33.6 mm의 휨가 발

생하였다. 이는 이전 공정의 휨(33.4 mm)와 휨의 크기가 차이가 거의 없다. 따라서 OCA 필름이 휨 발생에 주는 영향은 매우 미미함을 알 수 있었다. OCA의 경우 재료의 탄성 계수가 매우 낮기 때문에 휨에 영향을 미치지 않는 것으로 판단된다. 마지막으로 플라스틱 커버를 접착하였을 경우, 휨의 형태는 crying (∩)으로 휨의 형태가 바뀌었으며, 휨의 크기도 7.1 mm로 감소하였다. 수치해석의 휨 예측 결과는 7.5 mm 이었다. 결론적으로 OCA와 같은 접착 필름이 휨에 미치는 영향은 매우 적었으며, 편광 필름 및 플라스틱 커버는 다른 재료들과 비교하였을 때 휨에 대해 매우 큰 영향을 미치고 있음을 알 수 있다.

플라스틱 커버는 적층된 다른 소재들과 비교하였을 때, 두께가 가장 두껍기 때문에 영향이 제일 큰 것으로 판단된다. 또한 편광 필름의 경우 사용되고 있는 편광 필름의 종류가 거의 정해져 있고, 기계적인 물성을 변경할 경우 광학적인 물성이 크게 변하여 OLED의 광학적 특성을 저하시킬 수 있는 가능성이 있다. 따라서 편광 필름의 물성을 변경하는 것은 많은 어려움을 초래할 수 있다. 따라서 본 연구에서는 플라스틱 커버의 두께 및 물성을 변화시켜 휨의 경향이 어떻게 변화하는지 관찰하고, 휨을 줄일 수 있는 방법에 대하여 연구하였다. 플라스틱 커버의 주재료인 PET 기판 상하부에는 Fig. 7과 같이 acrylic 계통의 하드 코팅층(hard coating layer)이 증착되어 있다. 하드 코팅층은 PET 기판의 부식이나 긁힘을 방지(scratch resistance)하기 위하여 필수적으로 증착되는 층이다. 플라스틱 커버의 두께 변화에 대한 물성을 알기 위하여 200 μm 및 500 μm 두께의 플라스틱 커버의 물성을 측정하였다. 200 μm 및 500 μm 두께의 플라스틱 커버의 탄성 계수는 각각 5.1 GPa, 4.2 GPa이었으며, 열팽창계수는 각각 31.9 ppm/°C, 22.9 ppm/°C이었다. 일반적인 하드 코팅층의 물성(탄성 계수: 6.0 GPa, 열팽창 계수: 74 ppm/°C)을 고려하여 각 두께에 대한 플라스틱 커버 물성에 대하여 등가재료 상수 값(equivalent material property)을 구하여 사용하였으며, 각각의 두께 변화에 대한 플라스틱 커버에 대한 물성은 Table 2와 같다. 플라스틱 커버의 두께는 최소 200 μm에서 최대 1500 μm로 설정하여 휨을 계산하였다.

Table 2의 물성을 바탕으로 열 하중에 의한 플렉서블 OLED의 휨 경향 파악을 위하여 수치해석을 수행하였다.

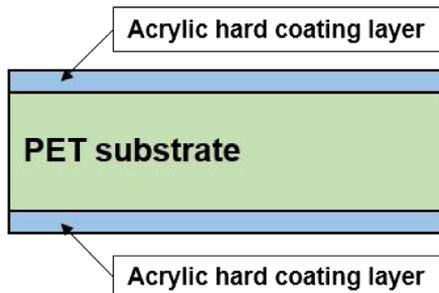


Fig. 7. Schematic illustration of flexible plastic cover.

Table 2. Equivalent material properties of plastic cover with different thicknesses

Thickness of plastic cover (μm)	Young's Modulus (GPa)	CTE (ppm/°C)	Poisson's ratio
200	5.1	31.9	0.3
500	4.2	22.9	0.3
800	4.0	20.7	0.3
1000	3.9	19.9	0.3
1500	3.8	18.9	0.3

Fig. 8은 플라스틱 커버의 두께 변화에 대한 휨의 크기를 나타내고 있으며 플라스틱 커버의 두께가 200, 500, 800, 1000, 1500 μm 일 경우 휨은 각각, 7.5, 4.4, 3, 2.4, 1.53 mm 이었다. 즉, 플라스틱 커버의 두께가 두꺼울수록 휨이 적게 발생하는 것을 관찰할 수 있다. 그러나 실질적으로 플라스틱 커버의 두께를 증가하는 것은 플렉서블 OLED 전체의 두께를 증가시키고, 플렉서블 OLED의 유연성을 저해하는 문제가 있다. 따라서 가능한 플라스틱 커버의 두께를 얇게 해야 한다. 플라스틱 커버 소재의 물성을 최적화하기 위하여 실험계획법(DOE, Design of Experiment)을 사용하였다. 플라스틱 커버의 두께를 200 μm로 고정

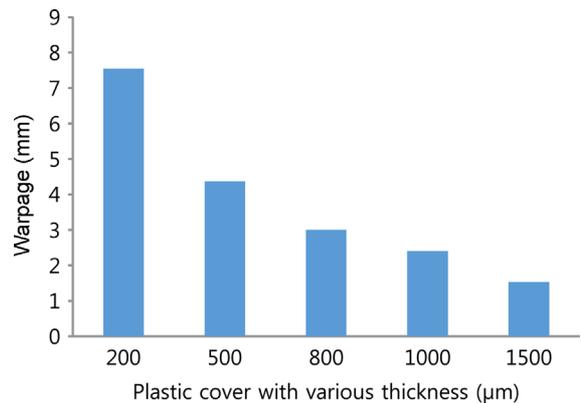


Fig. 8. Numerical results of warpage of plastic cover with different thicknesses.

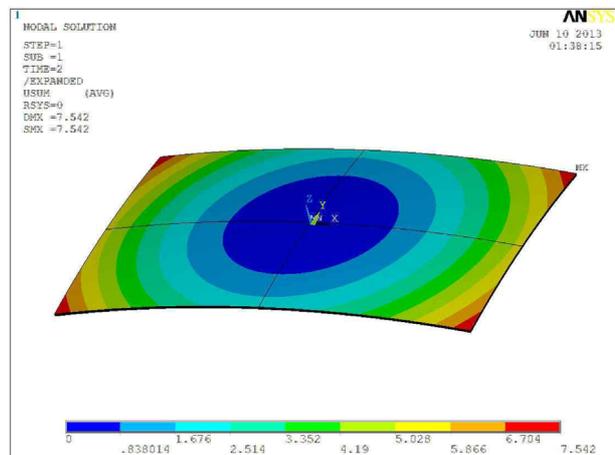


Fig. 9. Optimized warpage of the flexible OLED devices obtained with numerical simulation.

한 후 플라스틱 커버 소재의 탄성계수 값의 하한치를 2.5 GPa, 상한치를 7.5 GPa로 설정하였으며, 또한 열팽창계수의 하한치를 20 ppm/°C, 상한치를 40 ppm/°C로 설정하여 실험계획법을 사용하여 휨의 발생을 최소화할 수 있는 조건을 계산하였다. 실험계획법에 따른 수치해석 결과, 플라스틱 커버의 소재의 탄성 계수가 약 4.2 GPa, 열팽창 계수가 약 20 ppm/°C 일 경우 Fig. 9와 같이 휨 1 mm 이하로 발생되며 휨을 최소화할 수 있음을 알 수 있었다. 이 경우 하드 코팅층인 Acrylic 층과 PET 기판의 두께 비율을 조절하여 사용하거나, 탄성 계수가 적은 하드 코팅을 사용할 경우 플렉서블 OLED의 휨을 1 mm 이하로 줄일 수 있다고 예측된다.

결론적으로 휨의 실제 측정 결과와 수치해석 결과가 비교적 잘 일치함을 알 수 있었으며, 본 연구를 통하여 플렉서블 OLED의 휨을 예측하고, 휨을 줄이기 위한 가이드라인을 제시할 수 있었다.

#### 4. 결 론

본 연구에서는 플렉서블 OLED의 박막 및 필름 제조 공정 단계에서 발생하는 휨 변형을 수치해석을 이용하여 예측하였으며 실험 결과와 비교하였다. 이를 통하여 휨에 가장 큰 영향을 미치는 소재를 파악하고, 궁극적으로 휨을 최소화 함으로써 플렉서블 OLED의 신뢰성을 향상시키고자 하였다. 편광 필름, 베리어 필름 및 PET 기판이 휨에 미치는 영향을 실험과 해석을 통하여 관찰한 결과, 편광 필름과 베리어 필름이 휨에 많은 영향을 줄 수 있었다. 또한, 휨에 대한 실험결과와 수치해석 결과가 비교적 잘 일치함을 알 수 있었다. 플렉서블 OLED의 단위 제조 공정, 즉 적층 공정에서의 휨을 최소화하기 위하여 각 적층 공정에서의 샘플을 고온(80°C) 신뢰성 시험을 수행한 후 휨을 측정하였으며, 수치해석 결과와 비교하였다. 휨의 측정 결과 편광 필름 및 플라스틱 커버가 휨에 미치는 영향이 컸으며, OCA가 휨에 미치는 영향은 매우 적었다. 플렉서블 OLED의 휨에 가장 큰 영향을 주는 플라스틱 커버 소재의 최적화를 통하여 휨을 최소화 할 수 있는 조건을 연구하였다. 실험계획법을 활용하여 계산한 결과 플라스틱 커버 소재의 탄성 계수는 4.2 GPa, 열팽창 계수는 20 ppm/°C 일 경우 휨은 1 mm 이하로 발생됨을 알 수 있었다. 본 연구를 통하여 플렉서블 OLED의 제조 공정에서 발생한 휨을 예측하고, 휨을 줄이기 위한 가이드라인을 제시하였다.

#### 감사의 글

이 연구는 서울과학기술대학교 교내 학술연구비 지원으로 수행되었습니다.

#### References

1. G. P. Crawford, Editor, "Flexible flat panel displays", Wiley, Chichester (2005).
2. J. H. Ahn, H. Lee, and S. H. Choa, "Technology of flexible semiconductor/memory device", *J. Microelectron. Packag. Soc.*, 20(2), 1 (2013).
3. Y. Zhang and P. L. P. Rau "Playing with multiple wearable devices: exploring the influence of display, motion and gender", *Computers in Human Behavior*, 50, 148 (2015).
4. J. H. Kim and J. W. Park, "Improving the flexibility of large-area transparent conductive oxide electrodes on polymer substrates for flexible organic light emitting diodes by introducing surface roughness", *Organic Electronics*, 14(12), 3444 (2013).
5. A. W. J. Gielen, M. Barink, J. van den Brand, and A. M. B. van Mol, "The electro-thermal-mechanical performance of an OLED: a multi-physics model study", 10th. Int. Conf. on Thermal, Mechanical and Multiphysics Simulation and Experiments in Micro-Electronics and Micro-Systems, Euro-SimE, 1 (2009).
6. C. G. Kim, H. S. Choi, M. S. Kim, and T. S. Kim, "Packaging substrate bending prediction due to residual stress", *J. Microelectron. Packag. Soc.*, 20(1), 21 (2013).
7. T. Mizutani, T. Ikeda, K. Miyake, and N. Miyazaki, "Warp analysis of an LCD panel under thermo-mechanical and hygro-mechanical stress", *Electronic Materials and Packaging*, EMAP 2007. International Conference, 1 (2007).
8. M. K. Yeh, L. Y. Chang, and M. R. Lu, "Bending stress analysis of flexible touch panel", *Microsyst Technol*, 20 (8), 1641 (2014).
9. C. J. Chiang, C. Winscom, S. Bull, and A. Monkman, "Mechanical modeling of flexible OLED devices", *Organic Electronics*, 10(7), 1268 (2009).
10. H. Y. Low, and S. J. Chua, "Mechanical properties of organic light-emitting thin films deposited on polymer-based barrier substrate: potential for flexible organic light-emitting displays", *Mater. Lett.*, 53(4), 227 (2002).
11. G. G. Stoney, "The tension of metallic films deposited by electrolysis", *Proceedings of the Royal Society of London. Series A, Containing Papers of a Mathematical and Physical Character*, 82(553), 172 (1909).
12. K. Röhl, "Analysis of stress and strain distribution in thin films and substrates", *J Appl Phys*, 47, 3224 (1974).
13. C. C. Lee, Y. S. Shih, C. S. Wu, C. H. Tsai, S. T. Yeh, Y. H. Peng, and K. J. Chen, "Development of robust flexible OLED encapsulations using simulated estimations and experimental validations", *J. Phys. D: Appl. Phys.* 45(27), 275102 (2012).
14. N. Murata, "Adhesives for optical devices", *Electronic Components and Technology Conference*, 1178 (1998).
15. Y. Wang and P. Hassell, "On-line measurement of thermally induced warpage of BGAs with high sensitivity shadow moiré", *The International Journal of Microcircuits and Electronic Packaging*, 21(2), 191 (1998).
16. W. Lin and M. W. Lee, "PoP/CSP warpage evaluation and viscoelastic modeling", *Electronic Components and Technology Conference*, 1576 (2008).