한국정밀공학회지 제 30 권 5 호 pp. 552-558
J. Korean Soc. Precis. Eng., Vol. 30, No. 5, pp. 552-558
ISSN 1225-9071(Print), ISSN 2287-8769(Online)

http://dx.doi.org/10.7736/KSPE.2013.30.5.552

플렉시블 디스플레이에서 ITO 층의 파괴 특성을 고려한 설계연구

A Study on the Design of Flexible Display Considering the Failure Characteristics of ITO Layer

김민규 [1], 박상백 [1], 채수원 [2,✉]
Min Gyu Kim[1], Sang Baek Park[1], and Soo-Won Chae[2,✉]

1 고려대학교 대학원 기계공학과 (Department of Mechanical Engineering, Graduate school of Korea Univ.)
2 고려대학교 기계공학부 (Department of Mechanical Engineering, Korea Univ.)
✉ Corresponding author: swchae@korea.ac.kr, Tel: +82-2-3290-4032

Manuscript received: 2012.12.14 / Accepted: 2013.3.14

In recent years the interest on flexible display has been increasing as a future display due to its bendable characteristics. An ITO(indium tin oxide) layer, which is part of a flexible display, can be broken easily while bending because it is made of brittle materials. This brittle property can cause the malfunction of flexible display. To analyze fracture characteristics of ITO layer, bending test was conducted commonly. However, it is not possible to know specific phenomena on bended ITO layer by simple bending test only. Accordingly, in this study, the FE(finite element) model is developed similarly to a real flexible display to analyze stress distribution of flexible display under bending condition, especially on ITO layer. To validate FE model, actual bending test was conducted and the test results were compared with the simulation results by measuring reaction forces during bending. By using the developed model, FE analysis about the effect of design parameter (Thickness & Young's Modulus of BL) on ITO Layer was performed. By explained FE analysis above, this research draws a conclusion of reliable design guide of flexible display, especially on ITO layer.

Key Words: Finite element method (유한요소법), Flexible display (플렉시블 디스플레이), Bending test (굽힘 시험), Barrier layer (차단막), Nano-indentation (나노인덴테이션)

기호설명

β = constant on geometry of the indenter
S = stiffness
A = projected contact area
E_r = reduced modulus
E_s = modulus of sample
V_s = poisson's ratio of sample
E_i = modulus of indenter
V_i = poisson's ratio of indenter

1. 서론

모바일 기기의 발전은 현대인의 생활과 사회 문화를 급격하게 바꿔놓았고 특히 스마트폰의 대중화는 일상생활의 형태를 바꿔놓았다. 이에 따라 훌륭한 기능뿐만 아니라 디자인적 측면이 시장을 선도하는 사례가 늘고 있다. 이러한 배경에서 플렉시블 디스플레이는 모바일 기기의 기능적 측면뿐만 아니라 소비자의 감성을 자극할 수 있는 Fig. 1과 같은 디자인이 가능한 점에서 모바일 기기를 한 단계 진화시킬 혁신적인 기술로 기대되고 있다.

Fig. 1 Flexible display

플렉시블 디스플레이가 전자제품에 적용되어 혁신적인 디자인과 공간 활용을 가능하게 하기 위해서는 충분한 유연성이 확보되어야 한다. 플렉시블 디스플레이는 기존 디스플레이들이 공통적으로 가지는 유리기판 대신 플라스틱 기판을 사용함으로써 유연성을 확보 할 수 있게 된다. 그러나 실제 전자제품에 적용되기 위해서는 유연성뿐만 아니라 일정 수준 이상의 강도를 필요로 한다. 특히 기존 디스플레이 장치와 다르게 굽힘 시 현저히 큰 변형이 발생하게 되는데 이때 디스플레이 내부 주요 층, 특히 ITO (Indium-Tin-Oxide)층의 파단에 의해 상태 이상이 발생한다고 알려져 있다. 따라서 대변형이 가능한 전자 부품들은 공통적으로 내부 주요 층의 파괴 특성에 대한 연구가 수행되어야 한다.

일반적으로 플렉시블 디스플레이의 파괴 특성 분석을 위해 제품을 굽힌 후 ITO층의 전류 및 저항값을 측정하는 굽힘 시험을 수행한다.[1,2] 그러나 굽힘 시험에는 실제 제품이 사용되기 때문에 많은 비용과 시간이 소모 된다. 또한 실험을 통해서는 플렉시블 디스플레이 굽힘 시 발생하게 되는 내부 현상에 대해 정확히 알 수 없다. 따라서 본 연구에서는 유한요소모델을 활용하여 플렉시블 디스플레이 굽힘 시험에 드는 비용 및 시간을 감축시키고 굽힘 시 발생하는 내부 현상에 대해 자세히 알아 보고자 한다.

유한요소법을 이용한 구조 시뮬레이션은 실제 시제품이 제작되는데 필요한 비용과 시간을 절약할 뿐 아니라 설계와 동시에 결과를 예측해 볼 수 있는 장점을 가지고 있다. 그러나 플렉시블 디스플레이의 경우 아주 얇은 박막 구조물이기 때문에 모델링이 쉽지 않고 정확한 기계적 물성이 확인된 바가 없다. 또한 다층 박막 구조이면서 비선형 물성과 대변형 조건으로 일반적인 beam 이론을 적용하여 이론해를 구하는 것도 쉽지 않다. 이러한 어려움 때문에 유한요소법을 이용한 시뮬레이션이 많은 장점을 가지고 있음에도 개발에 널리 사용되지 못하고 있다.

본 연구에서는 실험을 통해 박막의 물성을 파악하고 모바일 용 플렉시블 디스플레이의 구조적 특징을 반영 할 수 있는 유한요소해석 모델을 개발 하고자 한다. 또한 개발된 모델을 활용하여 플렉시블 디스플레이의 굽힘 시 ITO층의 안정성 확보를 위한 설계 방향을 제시하고자 한다.

2. 모델 단순화

모바일용 플렉시블 디스플레이는 수십 나노미터에서부터 수백 마이크로미터까지의 두께를 가지는 여러 박막이 적층된 구조를 가지고 있다. 특히 플렉시블 디스플레이의 품질에 가장 큰 영향을 미치는 유기 EL (electroluminescent)층의 두께는 수십 나노미터 밖에 되지 않는다. 이러한 플렉시블 디스플레이의 구조적 특성상 플렉시블 디스플레이를 구성하는 모든 층들을 고려하여 모델링하기는 쉽지 않다. 따라서 플렉시블 디스플레이를 구성하는 여러 층 중 기계적 특성과 기능적 특성에 가장 많은 영향을 미치는 층만을 고려하여 모델을 단순화하였다. 본 연구에서 고려한 층들과 유한요소 모델은 Fig. 2와 같다.

2.1 편광필름, 플라스틱 기판

플렉시블 디스플레이에서 가장 많은 부분을 차지하는 층은 편광 필름과 플라스틱 기판이다. 편광필름과 플라스틱 기판은 플렉시블 디스플레이의 약 90% 이상을 차지하기 때문에 전체의 강성에도 큰 영향을 준다.

2.2 FTFT, ITO

플렉시블 디스플레이에서 FTFT (Flexible Thin Film Transistor)과 투명 전극인ITO층은 반복되는 굽힘으로 인해 파단이 발생 할 수 있다. 이는 플렉시블 디스플레이의 기능적 문제로 이어지게 된다.

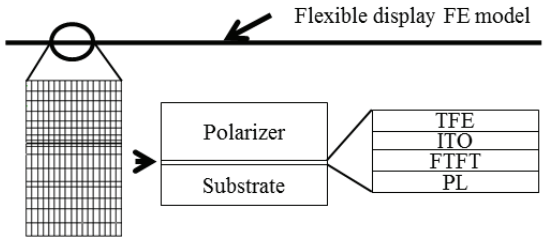


Fig. 2 Flexible display FE model and schematic picture

특히 OLED에서 양극으로 사용되는 ITO층의 경우 취성 재료이기 때문에 플렉시블 디스플레이의 굽힘 시 파손에 가장 큰 영향을 주는 것으로 알려져 있다.[3]

2.3 TFE, PL

위에서 고려한 층 외에도 ITO층과 FTFT층에 인접해 있으면서 유기 EL층에 대한 수분 침투를 막아주는 TFE (Thin Film Encapsulation) 층과 기판 평탄화를 위해 사용되는 PL (Planarization Layer) 을 고려해주었다.

3. FE modeling

플렉시블 디스플레이는 평판상태에서 가로, 세로 길이에 비해 매우 얇은 두께를 가지고 있다. 특히 내부 ITO층의 경우 그 두께가 1μm 이하로 전체 디스플레이의 최장 길이 대비 약 100000:1 수준이다. 이러한 플렉시블 디스플레이 내부 박막을 고려하여 3D 모델을 구현 할 경우 최소 500만개 이상의 요소가 필요하다. 따라서 해석 시간을 최소화 하면서 정확도를 확보하기 위해 2D 평면변형(plane strain) 요소를 사용하여 모델을 구성하였다. 그러나 2D 모델을 활용 하더라도 취약층의 두께 때문에 모델링 시 많은 수의 요소를 요하게 된다. 따라서 해석 시간 단축을 위해 요소 세장비

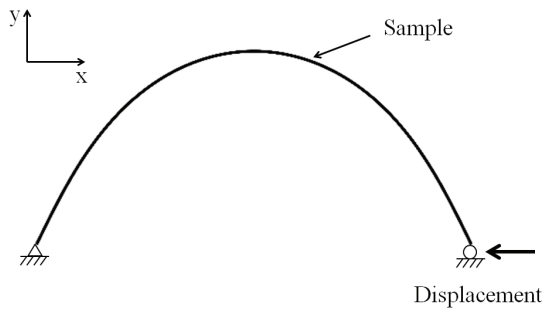


Fig. 3 Bending simulation for element aspect ratio study

Table 1 Results of element aspect ratio study

Aspect ratio	Max strain(x11)	Error
1:1	0.271%	-
1:2	0.271%	-
1:5	0.271%	-
1:10	0.271%	-
1:12	0.220%	23%

(aspect ratio)에 따른 정확도 분석을 수행하였다.

세장비가 다른 모델을 각각 제작 한 후 모델별 비교를 위해 Fig. 2와 같이 한쪽 끝을 핀 조인트로, 나머지 한쪽 끝은 롤러지지로 구속 한 후 변위를 주어 시편이 굽혀지도록 해석을 수행하였다.

Table 1은 요소 세장비에 따른 정확도 분석결과이다. 요소의 세장비가 1:10을 넘어가면 결과값에 오차가 발생한다. 따라서 각 요소의 세장비가 1:10이 넘지 않도록 모델링을 수행 하였으며 최종적으로 약 10만개의 요소를 사용하여 플렉시블 디스플레이 유한요소모델을 제작하였다.

4. 물성 분석

플렉시블 디스플레이를 구성하고 있는 박막들은 그 두께가 매우 얇기 때문에 일반적인 벌크 재료와는 다른 특성을 가진다. 특히 단순화 시킨 모델에서 내부 층인 FTFT, TFE, PL 층의 경우 그 두께가 수 마이크로미터 밖에 되지 않는 박막이기 때문에 일반적으로 물성 분석에 사용되는 인장 시험을 통해서는 물성을 분석하는 것이 불가능하다. 이러한 얇은 박막의 경우 경도 측정에 사용되는 나노인덴테이션(nano-indentation) 시험을 통해 기계적 물성 확보가 가능하다.[3-5]

나노인덴테이션은 압자가 박막에 압입 될 때의 압입 깊이, 압입 면적 등의 정보를 Eq. (1), Eq. (2)과 같은 Sneddon 강성 산출식[6]에 대입하여 박막의 대략적인 탄성계수를 예측한다.

$$E_r = \frac{1}{\beta}\frac{\sqrt{\pi}}{2}\frac{S}{\sqrt{A}} \tag{1}$$

$$\frac{1}{E_r} = \frac{(1-V_s^2)}{E_s} + \frac{(1-V_i^2)}{E_i} \tag{2}$$

이전 연구 결과에 따르면 나노인덴테이션은 박막이 적층되어 있는 기지의 종류에 따라 결과값에 많은 영향을 준다.[3,4] 그러나 압입 깊이가 매우 얕을 때에는 기지의 종류에 상관 없이 나노인덴테이션 시험을 통해 확보한 박막의 탄성계수가 기존 인장 시험을 통해 얻어진 탄성계수와 일치한다.[5] 따라서 FTFT, TFE, PL 층의 물성 분석을 위해 나노인덴테이션 시험을 수행 하여 탄성계수를 확보하였다. ITO층의 물성은 문헌을 참조하였다.[7]

플라스틱 기판과 편광 필름의 경우 그 두께가 다른 층에 비해 두껍기 때문에 일반적인 물성 시

험에 사용되는 인장 시험을 통해 탄성계수를 확보하였다.

5. 모델 검증

앞서 제작한 플렉시블 디스플레이 유한요소 모델의 유효성 검증을 위해 굽힘 시험과 굽힘 해석을 수행 한 후 그 결과 값을 비교하였다.

5.1 굽힘 시험

플렉시블 디스플레이의 경우 기존 디스플레이와는 다르게 깨짐 현상이 발생하지 않는다. 따라서 기존 디스플레이의 파괴 특성 분석을 위해 수행되는 낙하 시험 등은 큰 의미가 없다.

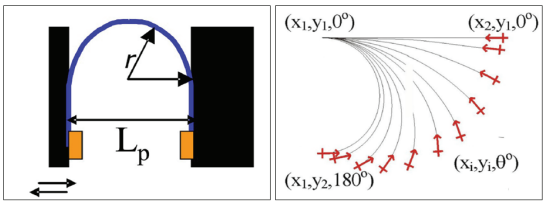
플렉시블 디스플레이는 굽힘이 주 모드이기 때문에 파괴 특성 분석을 위해서는 굽힘 시험이 가장 적합하다.

이전 연구에 따르면 굽힘 시험은 Fig. 4와 같이 크게 두 가지 방법으로 수행된다.[8] TEST 1는 양쪽 판을 좁혀가면서 시편을 굽히는 장비이다. 이 장비의 경우 굽힘 반경 값을 단순히 양쪽 판 사이 거리를 반으로 나누어 계산한다. 그러므로 장비 제작이 간편하며 굽힘 반경이 자유롭게 조절 가능하다는 장점을 가지고 있다.

그러나 굽힘 시 시편 끝 단이 완전한 원형을 이루지 않기 때문에 실제 시편이 받는 최소 굽힘 반경보다 측정되는 반경 값이 더 큰 경향이 있다.

TEST 2는 시편의 한쪽 끝 단을 고정 한 상태에서 나머지 한쪽 끝의 좌표와 각도를 변화시켜 시편을 굽히는 장비이다. 이 장비의 경우 굽힘 시 시편이 받는 최소 굽힘 반경과 측정되는 반경 값이 거의 일치 하다는 장점을 가지고 있다. 그러나 장비 제작이 어려우며 굽힘 반경 조절이 자유롭지 못하다는 단점을 가지고 있다.

본 연구에서는 굽힘 반경에 따른 플렉시블 디스플레이의 파괴 특성을 분석하는 것이 목표이기 때문에 자유롭게 굽힘 반경 값이 조절 가능한 장비가 필요하다. 따라서 TEST 1 장비와 동일한 방법을 사용하여 굽힘 테스트를 수행 하였다.



(a) Test 1 (b) Test 2

Fig. 4 Bending test methods taken from Grego, S. et al.[8]

5.2 굽힘 해석

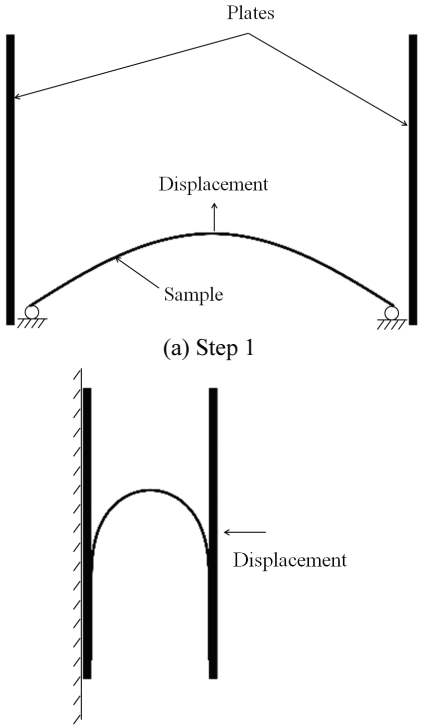
제작된 플렉시블 디스플레이 유한요소 모델을 이용하여 굽힘 시험과 같은 조건으로 시뮬레이션을 수행하였다. 해석은 ABAQUS6.9를 기반으로 수행 하였다.

Fig. 5는 본 연구에서 수행한 시뮬레이션 조건을 나타낸다. 먼저 첫 번째 스텝에서 플렉시블 디스플레이 양 끝을 롤러 지지로 구속 한 후 가운데 부분을 올려 굽힘 방향을 설정하였다.

그 후 두 번째 스텝에서 한쪽 판은 고정 한 상태에서 나머지 한쪽 판을 좁히면서 플렉시블 디스플레이가 굽혀지도록 해석을 수행 하였다.

5.3 검증 방법 및 결과

해석 모델 검증을 위해 굽힘 실험과 굽힘 시뮬레이션을 각각 수행 한 후 굽힘 반경에 따른 반력을 비교하였다.



(a) Step 1

(b) Step 2

Fig. 5 Loading and boundary conditions

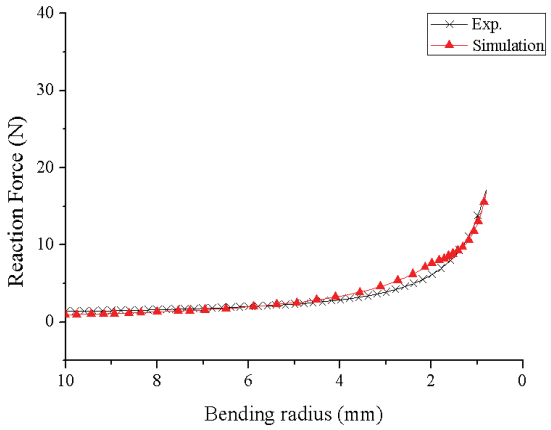


Fig. 6 Reaction force results w.r.t. bending radius

Fig. 6은 본 연구에서 수행 된 실험과 시뮬레이션 결과이다. 실험과 시뮬레이션 결과가 상당히 유사한 것을 확인 할 수 있다. 따라서 본 연구를 통해 얻어진 모델을 활용하면 굽힘 해석을 통해 실험과 유사한 신뢰성 있는 결과를 얻을 수 있다.

6. 설계 인자 설정

플렉시블 디스플레이 내부 OLED는 산소와 수분에 매우 민감하다. 따라서 수분과 산소 침투를 막기 위해 일반적으로 BL (Barrier Layer)를 추가적으로 삽입하게 된다.[9] 이때 BL는 OLED에 대한 산소 및 수분 침투를 막을 뿐만 아니라 플렉시블 디스플레이에서 취약한 층인 ITO층의 파단에도 큰 영향을 준다.

기존에도 BL의 두께와 강성에 따른 ITO층에서의 응력 값을 분석한 연구가 진행되어왔다.[10] 그러나 기존 모델은 단순히 기하학적인 방법을 통해 ITO층에서의 응력을 분석 하였기 때문에 소성 영역에 대한 고려를 할 수 없다. 또한 물성이 다른 여러 층이 적층 되어 있는 경우 중립축의 위치 파악이 어렵기 때문에 ITO층에서의 정확한 응력값을 예측하는 것은 매우 어렵다. 따라서 본 연구에서는 굽힘 시 BL의 두께와 물성 변화에 따른 ITO층에서의 응력을 해석적으로 분석하였다.

사용된 BL의 두께는 5μm, 25μm 이며 탄성계수는 논문을 참조하여 약 10GPa~70GPa사이의 값을 적용하였다.[10]

굽힘 해석은 본 연구 5.2 단락에서 언급한 방법과 동일한 방법으로 진행하였다.

7. 결과

재료가 굽힘 하중 상태에 있는 경우 Fig. 7과 같이 중립축(neutral axis)을 중심으로 위쪽은 인장응력, 아래쪽은 압축응력이 발생하게 된다. 이 때 중립축에서는 수직 응력이 Zero가 된다. 반면 전단응력은 최대가 된다.

이전 연구에 따르면 플렉시블 디스플레이가 굽힘 하중을 받을 때 취약층이 전단응력 하에 있을 경우 파단 반경이 약 0.1mm이다.[11] 이에 반해 취약층이 수직응력 하에 있을 경우 파단 반경이 약 3.5mm로 전단응력 하에 있을 때 보다 빨리 파단이 발생하게 된다.[11] 그러므로 취약층이 중립축에 위치 할 때 더 안전한 상태가 된다. 따라서 굽힘 시 중립축이 ITO층에 위치 할 수 있도록 BL의 두께와 물성을 조절하였다.

Fig. 8은 본 연구에서 수행된 굽힘 시험 시뮬레이션 결과이다. 플렉시블 디스플레이의 비선형성 때문에 변형 부위의 두께의 변화가 일정하지 않으며 굽힘 형상이 원형이 아닌 타원형인 것을 확인하였다. 굽힘 시 중립축은 수직응력 성분이 0이 되는 지점에 존재한다. 본 연구에서는 굽힘 시 ITO층의 수직응력 성분인 X11방향 응력을 분석하여 중립축과 ITO층 사이의 거리를 예측하였다.

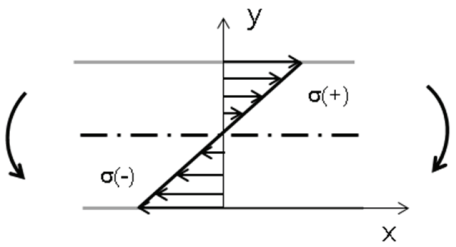


Fig. 7 Stress distribution under bending condition

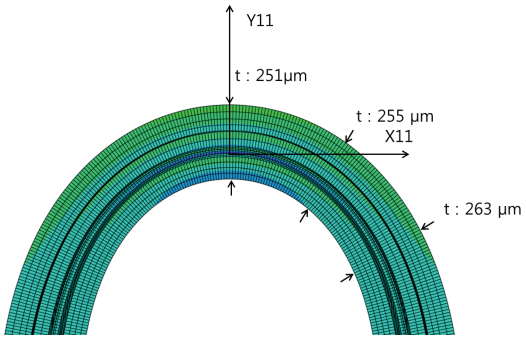
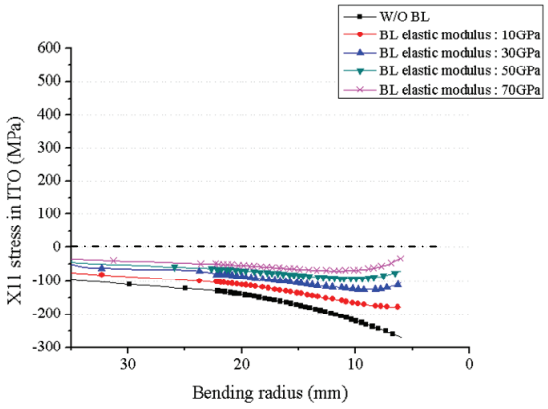
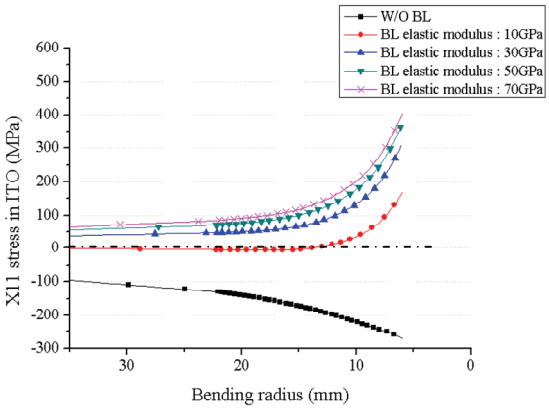


Fig. 8 Results of bending simulation



(a) BL thickness : 5μm



(b) BL thickness : 25μm

Fig. 9 X11 stresses in ITO w.r.t. bending radius for different BL elastic modulus and thickness

굽힘 해석 시 굽힘 반경에 따른 ITO층에서의 응력 변화는 Fig. 9와 같다. BL의 두께가 5μm 일 경우 탄성계수가 커질수록 ITO층 에서의 응력이 0에 가까워 진다. 그러나 BL의 두께가 25μm 일 경우 탄성계수가 작아질 수록 ITO 층의 응력이 0에 가까워진다. 이와 같이 BL의 두께와 탄성계수 조절을 통해 중립축을 ITO층에 가깝게 위치 시킬 수 있으며 이는 플렉시블 디스플레이 굽힘 시 ITO층의 기계적 안정성 확보를 위한 설계가이드로 활용이 가능하다.

8. 결론

본 연구에서는 플렉시블 디스플레이 굽힘 시험 시 ITO층의 응력 상태 평가가 가능한 유한요소모델을 개발하였다. 모델의 정합성을 검증하기 위해 플렉시블 디스플레이의 굽힘 시험을 수행 한 후 같은 조건 하에서 시뮬레이션을 수행하였고 이를 비교하였다.

또한 검증된 플렉시블 디스플레이 유한요소 모델을 이용하여 굽힘 시 BL의 두께와 물성 변화에 따른 ITO 층의 응력 상태를 분석하였다.

BL의 두께가 얇은 경우 탄성계수가 높을수록 중립축이 ITO 층에 근접하는 경향을 보였다. 그러나 BL의 두께가 두꺼울 경우 탄성계수 낮을수록 중립축이ITO층에 근접하는 경향을 보였다. 따라서 중립축을 ITO층에 위치 시키기 위해서는 BL의 두께와 재료 선정에 세심한 주의를 기울여야 할 것으로 판단된다.

본 연구를 통해 얻어진 플렉시블 디스플레이 유한요소모델은 BL에 의한 영향뿐 만 아니라 다른 설계 인자에 따른 파괴 특성 분석에도 활용이 가능할 것으로 판단된다. 또한 추후 모바일용 뿐만 아니라 다른 디스플레이 연구에도 응용 할 수 있을 것으로 기대된다.

후 기

이 논문은 2012년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국 연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업임(No. 2012-0000792).

참고문헌

1. Lewis, J., Grego, S., Chalamala, B., Vick, E., and Temple, D., “Highly flexible transparent electrodes for organic light-emitting diode-based displays,” Applied Physics Letters, Vol. 85, No. 16, pp. 3450-3452, 2004.
2. Lewis, J., “Material chanllenge for flexible organic devices,” Materialstoday, Vol. 9, No. 4, pp. 38-45, 2006.
3. Chen, X. and Vlassak, J. J., “ Numerical study on the measurement of thin film mechanical properties by means of nanoindentation,” Materials Research Society, Vol. 16, No. 10, pp. 2974-2982, 2001.
4. Chiang, C., Bull, S., Winscom C., and Monkman, A., “A nano-indentation study of the reduced elastic modulus of Alq3 and NPB thin-film used in OLED devices,” Organic Electronics, Vol. 11, No. 3, pp. 450-455, 2010.

5. Saha, R. and Nix, W. D., “Effects of the substrate on the determination of thin film mechanical properties by nanoindentation,” Acta Materialia, Vol. 50, No. 1, pp. 23-38, 2002.
6. Sneddon, I. N., “The relation between load and penetration in the Axisymmetric Boussinesq Problem for a Punch of Arbitrary profile,” International Journal of Engineering and Science., Vol. 3. No. 1, pp. 47-57, 1965.
7. Bouten, P. C. P., Slikkerveer, P. J., and Leterrier, J., “Mechanics of ITO on plastic substrates for flexible displays,” G.P. Crawford (Ed.), Flexible Flat Panel Displays, John Wiley & Sons, pp. 99-120, 2005.
8. Grego, S., Lewis, J., Vick, E., and Temple, D., “Development and evaluation of bend-testing techniques for flexible-display,” Journal of the SID, Vol. 13, No. 7, pp. 575-581, 2005.
9. Burrows, P. E., Graff, G. L., Gross, M. E., Marin, P. M., Shi, M. K., Hall, M., Mast, E., Bonham, C., Bennett, W., and Sullivan, M. B., “Ultra barrier flexible substrates for flat panel displays,” Displays, Vol. 22, No. 2, pp. 65-69, 2001.
10. Chiang, C., Winscom, C., Bull, S., and Monkman, A., “Mechanical modeling of flexible OLED devices,” Organic Electronics, Vol. 10, No. 7, pp. 1268-1274, 2009.
11. Sekitani, T., Zschieschang, U., Klauk, H., and Someya, T., “Flexible organic transistors and circuits with extreme bending stability,” Nature materials, Vol. 9, pp. 1015-1022, 2010.