

Flexible 기판 위의 Bending 처리에 따른 ITO 필름의 Stress 분포 특성

박준백, 황정연, 서대식, 박성규*, 문대규*, 한정인*

연세대학교 전기전자공학과, 전자부품연구원 디스플레이연구센터*

Stress Distribution of Indium-tin-oxide (ITO) Film on Flexible Substrate by Bending process

Jun-Back Park, Jeoung-Yeon Hwang, Dae-Shik Seo, Sung-Kyu Park*, Dae-Gyu Moon*, and Jeong-In Han*

Yonsei Univ., Information Display Research Center, KETI*

Abstract

In this paper, we investigated the position-dependent stress distribution of indium-tin-oxide (ITO) film on Polycarbonate (PC) substrate by external bending force. It was found that there are the maximum crack density at the center position and decreasing crack density as goes to the edge. In accordance with crack distribution, it was observed that the change of electrical resistivity of ITO islands is maximum at the center and decrease as goes to the edge. From the result that crack density is increasing at same island position as face-plate distance (L) decreases, it is evident that the more stress is imposed on same island position as L decreases.

Key Words : Pattern, Position, Stress, ITO film, Bending, Flexible

1. 서론

고분자 기판은 유리기판에 비해 덜 깨지기 쉽고 더 잘 구부러지기 때문에 flexible display에 사용되고 있다. Indium-tin-oxide (ITO) 코팅은 고분자 기판의 투수성 (permeability)과 광투과율을 향상시키기 위해 많이 사용되고 있다. 즉, ITO 코팅은 용매 또는 가스에 대한 barrier작용을 하는 코팅과 투명 전도 산화막 (transparent conductive oxide : TCO)으로 사용되고 있다[1]. 하지만 ITO와 같은 Young's modulus가 큰 깨지기 쉬운 (brittle) 코팅은 임계 stress보다 큰 stress가 가해졌을 때 전도성에 손상(conduction fail)이 발생하게 된다. 즉, 전도성 박막(ITO)에서 발생하는 크랙은 전도성 박막의 저항에 영향을 미치고[2-3] barrier 코팅에서

발생하는 크랙은 투수성을 증가시키게 된다[1]. 즉, 이런 코팅의 임계 stress와 결합기구를 이해하는 것이 flexible display에서 매우 중요하다. 본 연구에서는 flexible display에서 bending상태의 ITO 필름에 가해지는 stress의 위치에 따른 분포에 대해서 검토하였다.

2. 실험

RF-magnetron 스퍼터를 이용하여 증착을 하기 위해 PC필름을 기판으로 사용하였다. 공정조건은 working pressure : 3 mTorr, RF Power : 76 W, 증착시간 : 20분이었다. 증착된 ITO의 면저항은 약 35 Ω/\square 로 측정되었다.

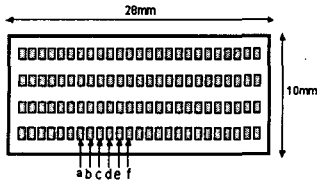


그림 1. 섬모양 배열로 이루어진 패턴.

Fig. 1. Pattern consisted of island arrays.

특히, 각각의 위치에 따라 변하는 stress의 분포를 좀더 정확히 알아보기 위해 그림 1과 같은 패턴을 사용하여 $520 \times 780 \mu\text{m}^2$ 의 크기를 가진 25개의 섬모양의 배열로 이루어진 ITO film을 제작하였다.[4] 편의를 위해 섬모양 배열에서 중앙부분인 13번째를 중심으로 가장자리부분으로 f, e, d, c, b, a로 표시하였다. 28 mm*10 mm의 크기를 가진 같은 샘플을 5개 준비하여 각각 $L=16, 14, 12, 10$ mm가 되도록 bending machine을 통하여 bending을 하였다. ITO 필름 위의 크랙관찰은 광학현미경으로 관찰하고 크랙이 발생한 ITO 필름 패턴 위의 저항변화값의 측정은 two-probe법으로 측정하였다.

3. 결과 및 고찰

그림 2는 flexible display에서 실제적인 bending 과정 중에 L값이 작아짐에 따른 ($L_0=28$ mm) 기판의 기하학적인 모양을 보여준다. 그림 2 (c)는 기판이 원형을 이루는 최소 L값일 때의 경우를 나타낸다. 즉, L값이 반원이 될 때의 L값보다 큰 경우라면 기판은 큰 원의 일부인 부채꼴 모양을 가진다. 그림 2 (c)의 경우, 기판길이 28 mm는 반지름이 R인 반원의 호의 길이와 같아지게 된다. 즉 $28 \text{ mm} = \pi R$ 에서 $R=8.91$ mm이고 이 때의 $L=2R=17.8$ mm임을 알 수 있다. 이 사실을 통해 $L=17.8$ mm보다 클 때는 기판이 8.91 mm보다 큰 반지름을 가진 반원의 부채꼴 모양의 일부를 아는 것을 알 수 있다. 즉, 기판 전체가 위치에 상관없이 같은 R (곡률반경)으로 bending되어 있다는 것을 알 수 있다. 하지만 $L=17.8$ mm보다 작아지게 되면 중앙부분의 R은 작아지지만 기판이 점점 타원형으로 변하면서 중앙부분에서 멀어질수록 R이 중앙부분에 비해 점점 커지는 것을 알 수 있다.

위에서 언급한 bending 과정은 그림 3에서 보여주는 Gulati와 Matthewson이 optical fiber에 적용한 bend의 기하학적 구조에 대한 분석으로도 설명될 수가 있다[2].

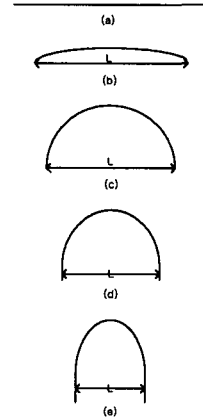


그림 2. 벤딩 과정.

Fig. 2. Bending process.

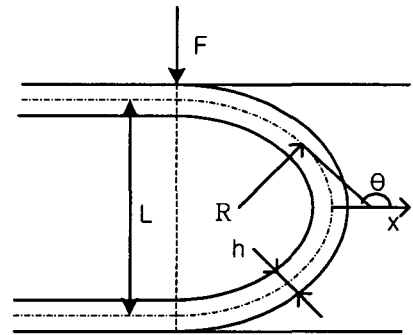


그림 3. Bend의 기하학적 구조.

Fig. 3. The geometry of a bend.

$$\frac{L}{2} = 0.847 \sqrt{\frac{EI}{F}} \quad (1)$$

$$l = 1.854 \sqrt{\frac{EI}{F}} \quad (2)$$

$$F = \frac{b \cdot h^3 \cdot C_b \cdot E}{6 L^2} \quad (3)$$

$$\sigma = E \cdot \frac{r}{R} \quad (4)$$

F[N]는 가해진 힘이고, E[Pa]은 Young's modulus, C_b 는 기하상수 (=1.1985), h (=2r)는 샘플의 두께 (200 μ m), $I[m^4]$ 는 관성 모멘트, l 은 전체 bend length의 반, b 는 샘플의 폭 (10 mm)이다.

식 (4)를 통해 그림 2 (a)~(c)의 경우는 위치 (θ)에 상관없이 R값이 일정하기 때문에 모든 위치에서 같은 stress를 받는다는 것을 알 수 있다. 하지만 그림 2 (d)~(e)의 경우는

$$\sigma(\theta) = E \cdot \frac{r}{R(\theta)} = r \sqrt{\frac{2EF \sin \theta}{I}} \quad (5)$$

위 식에서처럼 위치(θ)에 의존하는 stress가 가해지게 된다. 즉, stress가 중앙부분($\theta = \pi/2$)에서 제일 크고 가장자리부분($\theta = \pi$)에서 제일 작게 되고 $\sqrt{\sin \theta}$ 에 비례한다는 사실을 알 수 있다. 동시에 θ 값이 커지게 되면 즉, 가장자리부분으로 이동할수록 식 (5)에 나타나는 것처럼 stress가 작아지기 때문에 R(θ)은 점점 커진다는 것을 알 수 있다.

식 (5)에 $\theta = \pi/2$, 식 (4)의 결과를 대입하게 되면 다음과 같은 σ_{max} 를 얻을 수도 있다.

$$\sigma_{max} = \frac{C_b \cdot E \cdot h}{L} = E \cdot \frac{r}{R_{min}} \quad (6)$$

결과적으로는 앞의 두 식, 식 (3), (5)을 통해 $\sigma(\theta) \propto \frac{\sqrt{\sin \theta}}{L}$ 의 식을 유도할 수 있다.

그림 4와 5는 각각 L=14, 12, 10 mm일 때의 중앙부분인 13번째 패턴에서의 크랙수와 a, b, c, d, e 패턴에서의 크랙수를 보여준다.

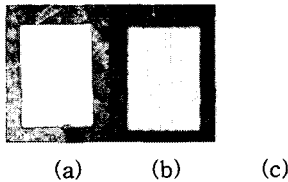


그림 4. L=14, 12, 10 mm일 때의 중앙부분인 13 번째 패턴에서의 크랙수.

Fig. 4. Crack density at 13rd island(center region).

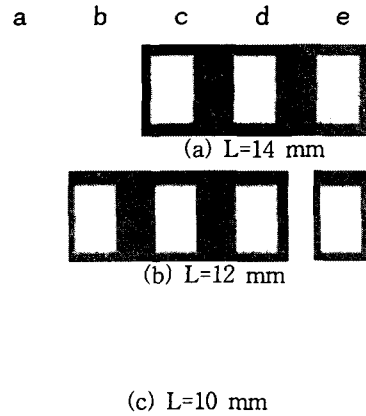


그림 5. L=14, 12, 10 mm일 때의 a, b, c, d, e 패턴에서의 크랙수.

Fig. 5. Crack density at a, b, c, d, e island position.

그림 4를 보면 L값이 작아질수록 13번째 패턴에서 더 많은 크랙이 생긴다는 것을 알 수 있다. L값이 작아질수록 중앙부분의 σ_{max} 가 커진다. 즉, $\sigma(\theta = \pi/2) \propto \frac{1}{L}$ 에서 L값에 반비례하는 관계를 가지게 된다. 그림 5를 보면 e에서 a쪽으로 갈수록 점점 크랙수가 줄어든다는 것을 알 수 있다. 크랙수는 가해지는 stress에 비례하기 때문에[3-5] 중앙에서 가장자리부분으로 갈수록 가해지는 스트레 스가 감소한다. 이는 $\sigma(\theta) \propto \frac{\sqrt{\sin \theta}}{L}$ 에서 θ 값이 커짐에 따라 $\sigma(\theta)$ 가 작아진다는 사실과 일치한다. 그림 6은 이들 위치에 대한 크랙수를 그래프 상으로 표현한 것이다.

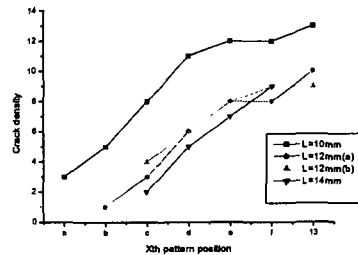


그림 6. a, b, c, d, e, f, 13번째 패턴에서의 크랙수.

Fig. 6. Crack density at a, b, c, d, e, 13rd island position.

그림 7과 8은 L값의 변화에 따른 각각 다른 위치에서의 저항의 변화값을 보여준다.

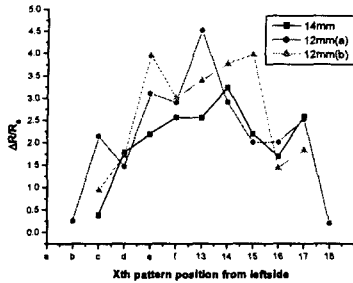


그림 7. L=14, 12 mm일 때의 모든 패턴에서의 저항값 변화.

Fig. 7. Electrical resistivity change at all island position.

그림 7을 통해 L값이 작아짐에 따라 중앙부분인 13번째 패턴의 저항변화값이 커지고 가장자리부분으로 이동할수록 저항변화값이 작아진다는 사실을 알 수 있다. 더 큰 스트레스를 받을수록 크랙수가 증가하여 결국에는 저항이 커지기 때문에 이 그래프는 크랙수의 위치에 따른 분포와 유사한 경향성을 보인다는 사실을 보여준다. 그림 8은 a에서 13번째 패턴위치까지만의 저항변화값만을 나타낸 것이다. L=10 mm인 경우 f, 13번째 패턴에서는 저항 변화값이 나머지 위치에서의 변화값에 비해 너무 크기 때문에 그래프상에 나타낼 수가 없었다. 이는 스트레스가 커지면서 크랙의 깊이가 깊어짐에 따라 conduction path(단면적)가 감소하여 저항변화값이 크게 증가하기 때문이다[3].

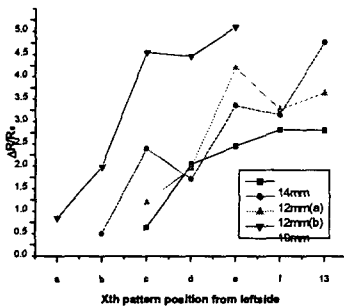


그림 8. L=14, 12, 10 mm일 때의 a, b, c, d, e, f, 13번째 패턴에서의 저항값 변화.

Fig. 8. Electrical resistivity change at a, b, c, d, e, 13rd island position.

4. 결론

L값을 바꾸면서 bending을 한 후에 중앙부분인 13번째 패턴에 가장 많이 크랙이 존재하고 가장자리부분으로 갈수록(f→a)크랙의 수가 감소하는 경향을 나타내었다. 그리고 저항변화값도 13번째 패턴에서의 변화값이 가장 크고 가장자리부분으로 갈수록 변화값이 작아진다는 사실을 알 수 있었다. 즉, L값이 작아짐에 따라 똑같은 위치에서의 크랙 수가 증가하고 저항변화값이 증가한다는 사실을 통해 더 큰 stress가 가해진다는 것을 알 수 있었다.

감사의 글

본 연구는 과학기술부 국가지정연구실사업 (M1-0203-00-0008)의 일환으로 수행되었습니다.

참고 문헌

- [1] P. C. P. Bouten, "Failure test for brittle conductive layers on flexible display substrates", EURODISPLAY, p. 313, 2002.
- [2] M. Haenen, "Failure of brittle conductive layers Bending and tensile tests on substrates for flexible displays", Koninklijke Philips Electronics N. V., p. 801, 2002.
- [3] D. R. Cairns, R. P. Witte II, D. K. Sparacin, S. M. Sachsman, D. C. Paine, G. P. Crawford, and R. R. Newton, "Strain-dependent electrical resistance of tin-doped indium oxide on polymer substrate", Appl. Phys. Lett., Vol. 76, No. 11, p. 1425, 2000.
- [4] S. K. Park, J. I. Han, D. G. Moon, and W. K. Kim, "Improvement of mechanical property of indium-tin-oxide films on polymer substrates by using organic buffer layer", IEEE trans. on Electrical and Electronic materials, Vol. 3, No. 2, p. 244, 2002.
- [5] C. H. Hsueh, "Modeling of elastic deformation of multilayers due to residual stresses and external bending", J. Appl. Phys., Vol. 91, No. 12, p. 9652, 2002.