

## Flexible Display 기판 위의 Bending에 따른 ITO 필름의 Stress 분포

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

박준백\*, 황정연\*, 서대식\*, 박성규\*\*, 문대규\*\*, 한정인\*\*  
(Jun-Baek Park\*, Jeoung-Yeon Hwang\*, Dae-Shik Seo\*, Sung-Kyu Park\*\*, Dae-Gyu Moon\*\*, and Jeong-In Han\*\*)

#### 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. 하지만 투수성 (permeability), 임계공정 온도, 광투과율과 같은 디스플레이로의 응용과 생산과정에서 중요한 사항들은 유리기판에 비해 현저히 떨어진다. 이런 고분자 기판의 단점을 보완하기 위해서 여러 가지 코팅이 고분자 기판 위에 필요하다. 그 예로 용매 또는 가스에 대한 barrier 작용을 하는 코팅과 투명 전도 산화막 (transparent conductive oxide : TCO)이 있다[1]. 특히 가장 많

이 사용되는 코팅은 고분자 기판의 투과율을 높여 주기 위한 ITO 코팅과 barrier 코팅 (SiO<sub>2</sub> 또는 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>)과 같은 깨지기 쉬운 재료 (산화물)로 이루어진 얇은 막 (<200 nm)이다[2]. 특히 ITO는 평판디스플레이에서 급속전극과 달리 투명한 성질을 가지고 있어 투과율을 높이기 위한 투명전극으로 많이 사용되고 있다. 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 막막 (ITO)에서 발생하는 크랙은 전도성 막막의 저항에 영향을 미치고[3-7] barrier 코팅에서 발생하는 크랙은 투수성을 증가시키게 된다[2]. 이런 stress로 인한 크랙 때문에 발생하는 degradation은 직접적으로 소자특성과 관련되어 있기 때문에 이에 대해 지금까지 상당히 많은 연구가 진행되어 왔다[8]. 즉, 이런 코팅의 임계 stress와 결함기구를 이해하는 것이 flexible display에서 매우 중요하다.

\* : 연세대학교 전기전자공학과  
(서울시 서대문구 신촌동 134,  
Fax: 02-3147-1351

Corresponding Author : dsseo@yonsei.ac.kr

\*\* : 전자부품연구원 디스플레이연구센터  
2003년 4월 21일 접수, 2003년 5월 27일 1차 심사완료,  
2003년 7월 10일 최종 심사완료

본 연구에서는 flexible display에서 bending상태의 ITO 필름에 가해지는 stress의 위치에 따른 분포에 대해서 검토하였다.

## 2. 실험

RF-magnetron 스퍼터링 시스템을 통하여 ITO가 제거된 PC필름을 ITO 필름을 증착하기 위한 기판으로 사용하였다. 공정조건은 working pressure : 3 mTorr, RF Power : 76 W, 증착시간 : 20분이었다. 증착된 ITO의 면저항은 약 35  $\Omega/\square$ 로 측정되었다. 이미 상용화된 ITO (150 nm)가 코팅된 PC필름(200 $\mu\text{m}$ )에서 ITO를 제거한 PC 필름을 기판으로 사용하여 residual stress에 의한 영향을 최소화하였다. 즉, ITO를 제거한 PC기판은 기판 아랫부분의 열팽창계수 (CTE)가 작은 barrier층 때문에 아래쪽으로 볼록하게 휘어지게 된다[9]. 이 PC기판에 두께가 200nm정도인 ITO를 증착함으로써 PC 기판을 ITO를 제거하기전의 평평한 상태로 어느 정도 유지할 수 있다. 즉, 잔류 stress로 인한 bending moment를 최소화할 수 있고 위치에 상관없이 똑같은 잔류 stress를 받게된다. 즉, 이 사실을 통해 bending 상태에서 각 패턴의 위치에 가해지는 stress를 외부에서 가해지는 bending moment에 의한 stress로 인한 영향이라고 가정할 수 있다.

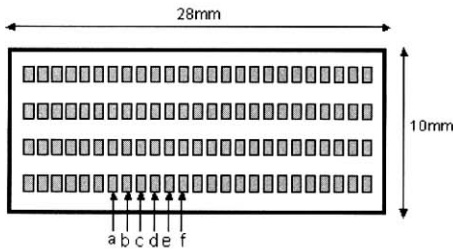


그림 1. 섬모양 배열로 이루어진 패턴.

Fig. 1. Pattern consisted of island arrays.

특히, 각각의 위치에 따라 변하는 stress의 분포를 좀더 정확히 알아보기 위해 그림 1과 같은 패턴을 사용하여 520\*780  $\mu\text{m}^2$ 의 크기를 가진 25개의 섬모양의 배열로 이루어진 ITO film을 제작하였다. 또, 패턴이 없는 똑같은 크기의 샘플을 만드는 과정에서 끝부분에 불가피하게 발생하는 스트레스의 영향을 최소화하기 위해서 패턴구조를 만들었다

[8]. 편의를 위해 섬모양 배열에서 중앙부분인 13번째를 중심으로 가장자리부분으로 f, c, d, c, b, a로 표시하였다. 28mm\*10mm의 크기를 가진 같은 샘플을 5개 준비하여 각각 L=16, 14, 12, 10 mm가 되도록 bending machine을 통하여 bending을 하였다. bending은 그림 2와 같은 bending 장치를 통해 이루어졌고, ITO 필름 위의 크랙관찰은 광학현미경으로 관찰하였다. 또, 크랙이 발생한 ITO 필름 패턴 위의 저항변화값의 측정은 two-probe법으로 측정하였다.

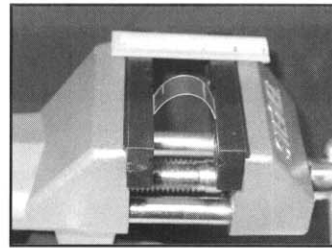


그림 2. 밴딩 장치대.

Fig. 2. Bending machine.

## 3. 결과 및 고찰

그림 3은 flexible display에서 실제로 발생하는 bending 과정 중에 L값이 작아짐에 따라(너 많이 구부러질수록)변하는 기판의 기하학적인 모양을 보여준다. L값이 작아짐에 따라 기판은 점점 원형에서 타원형으로 변하는 것을 알 수 있다. 이 실험에서 사용된 28mm의 길이를 가진 기판으로 위의 그림 3의 과정을 설명할 수 있다. 그림 3(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 3(c)의 경우, 기판길이 28mm는 반지름이 R인 반원의 호의 길이와 같아지게 된다. 즉 28mm =  $\pi R$ 에서 R=8.91mm이고 이 때의 L=2R=17.8mm임을 알 수 있다. 이 사실을 통해 L=17.8mm 보다 큰 때는 기판이 8.91mm보다 큰 반지름을 가진 반원의 부채꼴 모양의 일부라는 것을 알 수 있다. 즉, 기판 전체가 위치에 상관없이 같은 R(곡률반경)으로 bending되어 있다는 것을 알 수 있다. 하지만 L=17.8mm보다 작아지게 되면 중앙부분의 R(곡률반경)은 작아지지만 기판이 점점 타원형으로 변하면서 중앙부분에서 멀어질수록 R(곡률반경)이 중앙부분에 비해 점점 커지는 것을 알 수 있다.

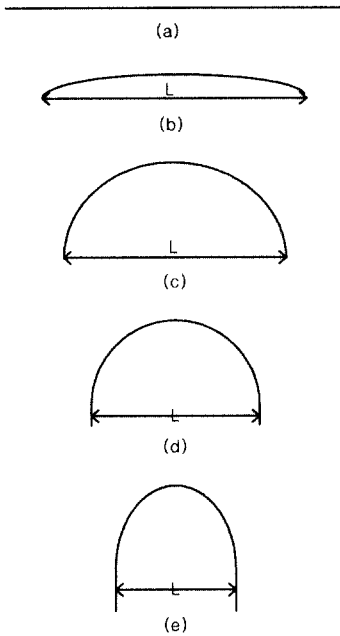


그림 3. 밴딩 처리.

Fig. 3. Bending process.

위에서 언급한 bending 과정은 그림 3에서 보여지는 Gulati와 Matthewson이 optical fiber에 적용한 bend의 기하학적 구조(그림 4)에 대한 분석으로도 설명될 수가 있다[2].

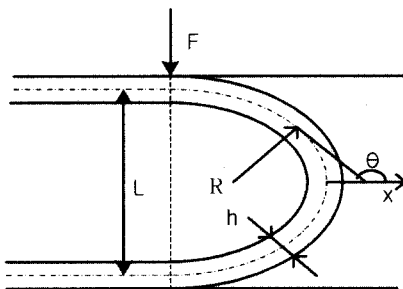


그림 4. Bend의 기하학적 구조.

Fig. 4. The geometry of a bend.

bend위의 어떤 위치에서의 곡률반경 R(반지름이 R인 원)은 다음과 같이 정의할 수 있다.

$$2\pi R \cdot \frac{d\theta}{2\pi} = ds \quad (1)$$

$$\frac{1}{R} = \frac{d\theta}{ds} \quad (2)$$

$\theta$ 는 각 위치에서의 접선과 x축이 이루는 각(단위 : radian)이고 s는 fiber axis(여기서는 neutral line)를 따라 이동한 거리이다.

각 위치에 대한 moment(bending)와 bending beam 식과 힘이 가해지는 지점에서  $1/R(\theta)=0$ 인 경계조건을 사용하면 다음과 같은 식들을 얻을 수 있다.

$$\frac{d\theta}{ds} = \sqrt{\frac{2F\sin\theta}{EI}} = \frac{1}{R(\theta)} \quad (3)$$

$$\frac{L}{2} = 0.847\sqrt{\frac{EI}{F}} \quad (4)$$

$$\ell = 1.854\sqrt{\frac{EI}{F}} \quad (5)$$

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

F[N]는 가해진 힘이고, E[Pa]은 Young's modulus,  $C_b$ 는 기하상수(=1.1985), h는 샘플의 두께(200 $\mu$ m),  $I[m^4]$ 는 관성 모멘트,  $\ell$ 은 전체 bend length의 반, b는 샘플의 폭(10mm)이다.

Bend 구조에서 전체 힘과 stress가 0이 되는 neutral line으로부터 거리 r지점에 위치한(가장 바깥부분) 각 점에서의 stress는 다음의 식으로 구할 수 있다. (실제로는 ITO 필름을 증착을 하게 되면 neutral line이 PC기판 두께의 1/2되는 지점에서 약간 위로 올라가게 되지만 ITO 필름의 두께는 기판에 비해 얇기 때문에 여기서는 neutral line이 기판 두께의 1/2되는 지점에 위치한다고 가정하도록 한다. 즉,  $r=h/2$ )

$$\sigma = E \cdot \frac{r}{R} \quad (7)$$

식 (7)을 통해 그림 3 (a)~(c)의 경우는 위치( $\theta$ )에 상관없이 R값이 일정하기 때문에 모든 위치에서 같은 stress를 받는다는 것을 알 수 있다. 하지만 그림 3 (d)~(e)의 경우는

$$\sigma(\theta) = E \cdot \frac{r}{R(\theta)} = r\sqrt{\frac{2EF\sin\theta}{I}} \quad (8)$$

위 식에서처럼 위치( $\theta$ )에 의존하는 stress가 가해지게 된다. 샘플 중앙부에서  $\theta = \pi/2$ 이고

$L/R=0$ 인 지점, 즉 힘이 가해지는 지점에서는  $\theta = \pi$  라는 사실을 통해 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  $\theta$  값이 커지게 되면 즉, 가장자리부분으로 이동할수록 식 (8)에 나타나는 것처럼 그 위치에서의 stress가 작아지기 때문에 곡률반경  $R(\theta)$ 은 점점 커진다는 것을 알 수 있다. 또  $L$ 값이 작아짐에 따라 bend length( $\ell$ )가 작아진다는 사실( $\ell \propto L$ )을 식 (5)를 통해 알 수 있다.

식 (8)에  $\theta = \pi/2$ , 식 (4)의 결과를 대입하게 되면 다음과 같은  $\sigma_{max}$ 를 얻을 수도 있다.

$$\sigma_{max} = \frac{C_b \cdot E \cdot h}{L} = E \cdot \frac{r}{R_{min}} \quad (9)$$

결과적으로는 앞의 두 식, 식 (6), (8)을 통해  $\alpha(\theta) \propto \frac{\sqrt{\sin \theta}}{L}$ 의 식을 유도할 수 있다. 왜냐하면

$$F \propto \frac{1}{L^2} \text{ 이고 } \sigma(\theta) \propto \sqrt{F \sin \theta} \text{ 이기 때문이다.}$$

위의 결과를 토대로 bending상태의 위치에 따른 stress의 분포를 알아보기 위해 크랙수의 변화와 저항값의 변화를 살펴보았다. 그림 5와 6은 각각  $L=14, 12, 10\text{mm}$ 일 때의 중앙부분인 13번째 패턴에서의 크랙수와 a, b, c, d, e 패턴에서의 크랙수를 보여준다.

그림 5를 보면  $L$ 값이 작아질수록 13번째 패턴에서 더 많은 크랙이 생긴다는 것을 알 수 있다. 즉  $L$ 값이 작아질수록 중앙부분의  $\sigma_{max}$ 가 커진다는 것을 알 수 있다. 즉,  $\alpha(\theta = \pi/2) \propto \frac{1}{L}$ 에서  $L$ 값에 반비례하는 관계를 가지게 된다.

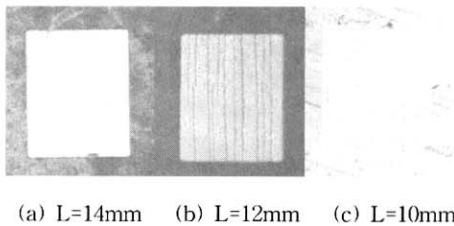


그림 5.  $L=14, 12, 10\text{mm}$ 일 때의 중앙부분인 13번째 패턴에서의 크랙수.

Fig. 5. Crack density at 13th pattern(center region).

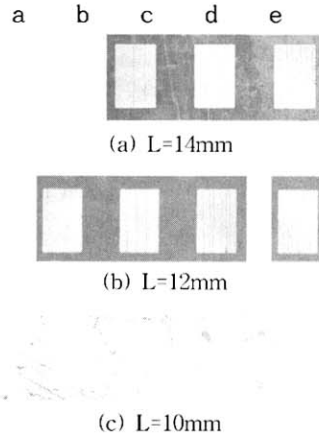


그림 6.  $L=14, 12, 10\text{mm}$ 일 때의 a, b, c, d, e 패턴에서의 크랙수.

Fig. 6. Crack density at a, b, c, d, e pattern position.

그림 6을 보면 e에서 a쪽으로 갈수록 점점 크랙수가 줄어든다는 것을 알 수 있다. 크랙수(크랙밀도)는 가해지는 stress에 비례하기 때문에[5-7] 중앙에서 가장자리부분으로 갈수록 가해지는 스트레스가 감소한다는 것을 알 수 있다. 이는

$\alpha(\theta) \propto \frac{\sqrt{\sin \theta}}{L}$ 에서  $\theta$  값이 커짐에 따라  $\sigma(\theta)$ 가 작아진다는 사실과 일치한다. 그리고  $L$ 값이 작아짐에 따라 똑같은 위치라도 더 큰  $\sigma(\theta)$ 를 받기 때문에 더 많은 크랙이 발생한다는 사실을 관찰할 수 있다. 표 1은 위의 그림 5, 6에서의 a,b,c,d,e,f,13번째 패턴에서의 크랙수를 표로 나타내고 있고, 그림 7은 이들 위치에 대한 크랙수를 그래프 상으로 표현한 것이다.

표 1. a, b, c, d, e, f, 13번째 패턴에서의 크랙수.

Table 1. Crack density at a, b, c, d, e, 13th pattern position.

		Crack number of Xth pattern position						
		a	b	c	d	e	f	13
L (mm)	10	3	5	8	11	12	12	13
	12(a)		1	3	6	8	8	10
	12(b)			4	6	8	9	9
	14			2	5	7	9	7

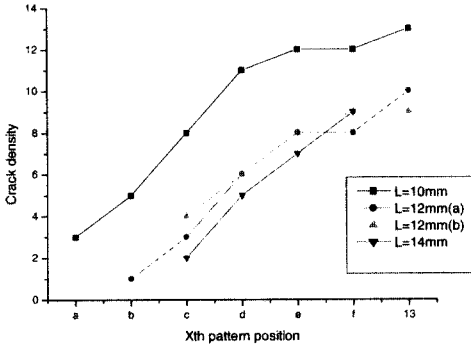


그림 7. a, b, c, d, e, f, 13번째 패턴에서의 크랙 수.

Fig. 7. Crack density at a, b, c, d, e, 13th pattern position.

실제로 L=18mm에서는 크랙이 발생하지 않았다. 하지만 L=16mm가 되었을 때 5번째 패턴에 하나의 크랙이 보이기 시작하고 21번째까지 크랙이 하나 있거나 없거나를 반복하면서 나타났다. 이 사실을 통해 크랙이 발생하게 되는 임계 stress의 값이 L=16mm일 때의  $\sigma_{max}$  값 근처라는 사실을 알 수 있고, 이 스트레스가 거의 균일하게 가해지고 있다고 알 수 있다. 이는 L=16mm일 때의 기하학적 모양은 L=18mm일 때의  $\sigma_{max} = \sigma(\pi/2 \leq \theta \leq \pi)$ 인 반원 모양과 거의 유사하게 되어 모든 위치에 거의 균일한 stress가 가해진다는 사실과 일치하게 된다. 또, bending length( $\ell$ )  $\propto$  L 인 관계식에서 알 수 있듯이 L=16mm인 경우에는 bending length가 전체 구간에서 5~21번째로 약간 줄어든다는 사실과도 일치한다는 것을 알 수 있다. 그림 8과 9는 L 값의 변화에 따른 각각 다른 위치에서의 저항의 변화값을 보여준다.

그림 8을 통해 L값이 작아짐에 따라 중앙부분인 13번째 패턴의 저항변화값이 커지고 각 위치에서의 저항변화값이 커지게 되고 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 9는 a에서 13번째 패턴 위치까지만의 저항변화값만을 나타낸 것이다.

L=10mm인 경우 f번째, 13번째 패턴에서는 저항변화값이 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[7].

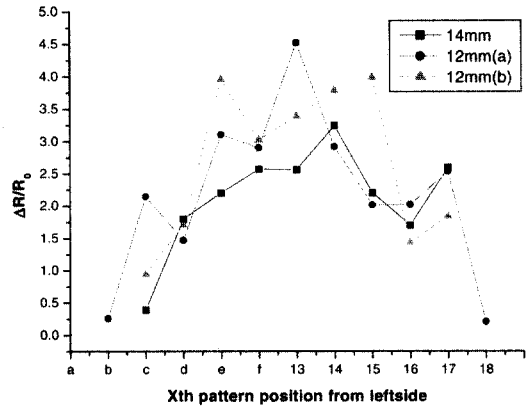


그림 8. L=14, 12mm일 때의 모든 패턴에서의 저항값 변화.

Fig. 8. Electrical resistivity change at all pattern position.

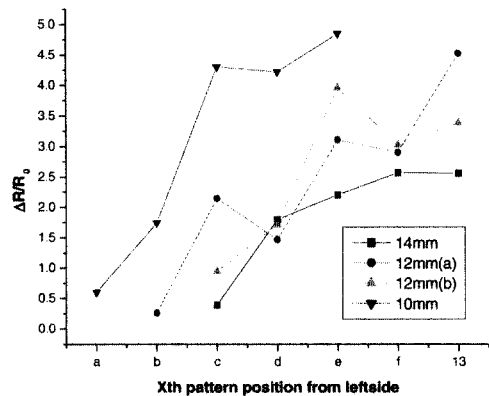


그림 9. L=14, 12, 10mm일 때의 a, b, c, d, e, f, 13번째 패턴에서의 저항값 변화.

Fig. 9. Electrical resistivity change at a, b, c, d, e, 13th pattern position.

#### 4. 결론

ITO 필름을 bending 하게되면 각 위치에 따라 받는 스트레스의 크기가 다르다는 것을 알 수 있었다. L값을 바꾸면서 bending을 한 후의 크랙수와 저항변화값의 위치에 따른 경향성을 알 수 있었다. 중앙부분인 13번째 패턴에 가장 많이 크랙이 존재하고 가장자리부분으로 갈수록 ( $f \rightarrow a$ )크랙의 수가 감소하는 경향을 나타내었다. 그리고 저항변화값도 13번째 패턴에서의 변화값이 가장 크고 가장자리부분으로 갈수록 변화값이 작아진다는 사실을 알 수 있었다. 또한, L값이 작아짐에 따라 똑같은 위치에서의 크랙수가 증가하고 저항변화값이 증가한다는 사실을 통해 더 큰 스트레스가 가해진다는 것을 알 수 있었다.

#### 감사의 글

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

#### 참고 문헌

- [1] W. J. Jeong, S. K. Kim, J. U. Kim, G. C. Kim, and H. B. Gu, "Properties of indium tin oxide transparent conductive thin films at various substrate and annealing temperature", Trans. on EEM, Vol. 3, No.1, p. 18, 2002.
- [2] P. C. P. Bouten, "Failure test for brittle conductive layers on flexible display substrates", EURODISPLAY, p. 313, 2002.
- [3] M. Haenen, "Failure of brittle conductive layers bending and tensile tests on substrates for flexible displays", Koninklijke Philips Electronics N. V., p. 801, 2002.
- [4] M. Yanaka, Y. Tsukahara, T. Okabe, and N. Takeda, "Statistical analysis of multiple cracking phenomenon of a  $\text{SiO}_x$  thin film on a polymer substrate", J. Appl. Phys., Vol. 90, No. 2, p. 713, 2001.
- [5] M. Yanaka, Y. Kato, Y. Tsukahara, and N. Takeda, "Effects of temperature on the multiple cracking progress of sub-micron

thick glass films deposited on a polymer substrate", Thin Solid Films, Vol. 355, p. 337, 1999.

- [6] 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.
- [7] H. H. Kim, M. J. Cho, W. J. Choi, J. G. Lee, and K. J. Lim, "Figure of merit for deposition conditions in ITO Films", Trans. on EEM, Vol. 3, No. 2, p. 6, 2002.
- [8] 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", Trans. on EEM, Vol. 3, No. 2, p. 32, 2002.
- [9] 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.
- [10] 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.