

## A Study on the Resistance and Crack Propagation of ITO/PET Sheet with 20 nm Thick ITO Film

Jin Yeol Kim and Sun Ig Hong<sup>†</sup>

Department of Advanced-materials Engineering, Chungnam National University, Daejeon 305-764, Korea

(Received November 17, 2008; Revised December 1, 2008; Accepted December 2, 2008)

### 20 nm 두께의 ITO층이 코팅된 ITO/PET Sheet의 저항 및 균열형성 특성 연구

김진열 · 흥순익<sup>†</sup>

충남대학교 신소재공학과

(2008년 11월 17일 접수 ; 2008년 12월 1일 수정 ; 2008년 12월 2일 송인)

#### ABSTRACT

The crack formation and the resistance of ITO film on PET substrate with a thickness of 20 nm were investigated as a function of strain. The onset strain for the increase of resistance increased with increasing strain rate, suggesting the crack initiation is dependent on the strain rate. Electrical resistance increased at the strain of 1.6% at the strain rates below  $10^{-4}/\text{sec}$  while it increased at ~2% at the strain rates above  $10^{-3}/\text{sec}$ . The critical strain at which the cracks were formed is close to the proportional limit. Upon loading, the initial cracks perpendicular to the tensile axis were observed and propagated the whole sample width with increasing strain. The spacing between horizontal cracks is thought to be determined by the fracture strength and the interfacial strength between ITO and PET. The crack density increased with increasing strain. However, the effect of the strain rate on the crack density was less pronounced in ITO/PET with 20 nm ITO thickness than ITO/PET with 125 nm ITO thickness, the strength of ITO film is thought to increase as the thickness of ITO film decreases. The absence of cracks on ITO film at a strain as close as 1.5% can be attributed to the compressive residual stress of ITO film which was developed during cooling after the coating process. The higher critical strain for the onset of the resistance increase and the crack initiation of ITO/PET with a thinner ITO film (20 nm) can be linked with the higher strength of the thinner ITO film.

**Key words :** 20nm ITO/PET, Tensile test, Crack, Resistance, Crack density

#### 1. 서 론

현재는 고도의 정보화 시대로서 정보표시매체인 디스플레이 기술의 중요성이 부각되고, 새로운 디스플레이 기술의 출현 및 기존 기술의 고급화 등으로 디스플레이 기술이 정보, 전자산업에서 차지하는 비중이 매우 높다. 새로운 디스플레이로 각광받고 있는 것이 초 경량, 저전력의 얇고, 종이처럼 가볍고 유연한 플렉시블 디스플레이이며,<sup>1,2)</sup> 이중 핵심은 소재관련 기술이다. 플렉시블 디스플레이는 휴거나 구부려도 디스플레이의 제 기능을 발휘 하여야 하므로, 코팅 층의 접착력이 우수하여 굽힘, 인장 및 압축에 대한 기능저하 및 수명 감손이 작아야 함은 물론 계속되는 반복변형에도 기능 및 신뢰성을 잃지 않는 내피로특성을 갖추어야 한다.

플렉시블 디스플레이를 실현하기 위해서는 기판을 구성하는 구성 층의 계면접합강도, ITO층의 허용 변형률,

폴리머 기지의 유연성 및 변형거동 등의 기계적 특성을 이해할 필요가 있다. 폴리머 기판에 세라믹 박막이 코팅되어 있는 구조로 이루어져 외부 변형 또는 하중에 의해 사용 중에 박막의 균열이나 층간의 박리 현상이 생길 수 있으며, ITO박막에 균열이 발생되면 전도성 박막의 저항에 영향을 미치고 전도성 손실이 발생하게 된다.<sup>3)</sup> 이와 같은 플렉시블 기판의 문제는 폴리머 기판과 세라믹 박막 간의 탄성계수 값이 100배 정도 차이가 나기 때문이며<sup>4)</sup> 기판의 기계적 특성을 확보하면서 구부릴 수 있는 신뢰성이 확보된 디스플레이를 구현하려면 각 층의 기계적 특성을 바탕으로 적절한 기판 설계가 필요하다.

플렉시블 디스플레이를 구현하기 위해서는 유리기판 대신에 유연한 폴리머 기판에 투명전극 TCO(Transparent Conducting Oxide) 박막이 코팅된 필름이 사용되며, 광 투과율이 우수한 대표적인 폴리머 기판에는 PET(Polyethylene Terephthalate), PC(Polycarbonate), PES(Polyethersulphone), PMMA(Plymethyl methacrylate) 등이 있다.<sup>5)</sup> 대표적인 투명전극으로 ITO(Indium Tin Oxide)박막이 있다. ITO(Indium Tin Oxide)는  $\text{In}_2\text{O}_3$ 에  $\text{SnO}_2$ 가 고용된 물질로서

<sup>†</sup>Corresponding author : Sun Ig Hong

E-mail : sihong@cnu.ac.kr

Tel : +82-42-821-7637 Fax : +82-42-822-9722

$\text{In}_2\text{O}_3$ 에 고용 가능한  $\text{SnO}_2$ 의 양은 약 12.4(7.4 wt%)~15 mol%(9 wt%)까지로 알려져 있다.<sup>6,7)</sup> 전기적 성질은  $\text{SnO}_2$  첨가됨에 따라 비저항이 초기에는 감소하다가 다시 증가하여  $\text{SnO}_2$ 의 첨가량이 5~10 wt%일 때 비 저항( $\rho$ )은  $10^{-5}$ ~ $10^{-1}$   $\Omega\text{cm}$ 를 가지며,  $\text{SnO}_2$ 의 첨가량이 5~7 wt%의 범위에서 가장 우수한 전기적 특성을 보이지만 상업적으로 10 wt%가 고용된 분체가 많이 사용되고 있다.<sup>6)</sup> 광학적 성질은 band gap이 3.55~3.75 eV 정도를 가져 가시광선 영역에서 투과율이 높고 근적외선 영역에서 광 반사도가 높아 우수한 전자파 차폐 특성을 나타낸다. 이러한 우수한 전기 광학적 특성 때문에 태양전지나 광 필터 이외에서 여러 평판디스플레이(FPD, Flat Panel Display) 분야에 사용되는데 특히 LCD(Liquid Crystal Display), PDP(Plasma Display Panel), VFD(Vacuum Fluorescent Display), FED(Field Emission Display) 그리고 LED(Light Emitting Diode)의 투명전극으로 널리 사용되고 있다.<sup>8-10)</sup>

본 연구에서는 20 nm의 두께를 갖는 ITO층(면저항: 300 ohms/sq.)이 코팅된 ITO/PET필름에 인장 하중을 가할 때 변형률 속도 및 변형률에 따른 ITO코팅 층의 균열형성 거동과 그에 따른 전기적 변화를 연구하였다.

## 2. 실험 방법

본 논문에서는 광학적으로 투명하고 열적으로 안정화된 PET(Polyethylen Terephthalate)필름에 투명전극인 ITO(Indium Tin Oxide)가 코팅된 ITO/PET필름(Sheldahl, USA)에 인장 하중을 가하여 ITO코팅 층에 발생한 균열 거동을

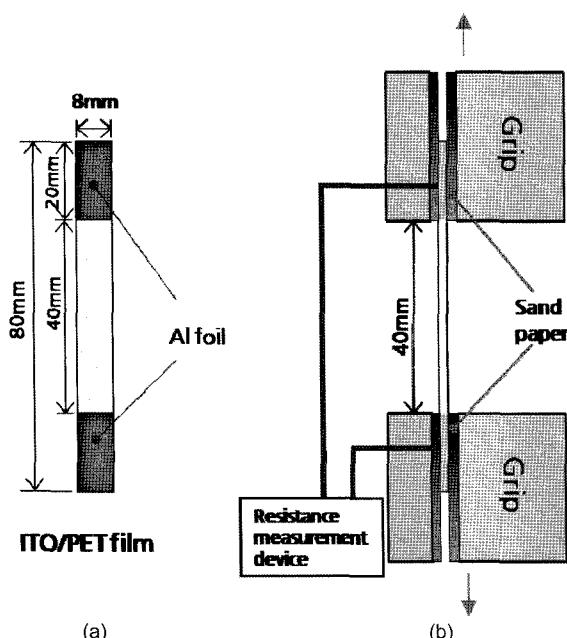


Fig. 1. Schematic configuration of (a) tensile specimen and (b) grips.

연구하였다. 본 연구에 사용한 ITO/PET필름은 125 m의 PET필름에 ITO층이 20 nm두께로 (면저항:300 ohms/sq.) 코팅되었다. ITO/PET 필름의 ITO코팅 세라믹 층의 균열거동을 파악하기 위하여  $10^{-2}/\text{sec}$ ,  $10^{-3}/\text{sec}$ ,  $10^{-4}/\text{sec}$ ,  $10^{-5}/\text{sec}$ 의 속도로 인장시험을 한 후 저항변화 및 균열 형성 및 전파 과정을 관찰하였다. 인장시편은 폭 8 mm, 길이 80 mm 크기로 절단 한 후 시험 중 저항 측정을 위해 시편의 양 끝 단에 20 mm씩 알루미늄 호일을 감아주었다. Fig. 1과 같이 그립에 시편을 장착한 다음 시편에 저항 측정 probe를 접촉시켜 인장 시험 중에 실시간으로 저항 변화 값을 얻을 수 있게 하였다. 인장시험은 United Testing Machine을 사용하였고 저항 측정은 SANWA Digital multimeter PC-500을 사용하였다. 시험 후 시편에 발생한 균열은 광학현미경(Olympus PME3)을 사용하여 관찰하였고 일부 시편은 인장시험 중에 in situ 현미경을 사용하여 균열전파 거동을 관찰하였다.

## 3. 결과 및 고찰

Fig. 2는 20 nm의 두께를 갖는 ITO층(면저항: 300 ohms/sq.)이 코팅된 ITO/PET필름의 stress-strain curve이다. 변형률 속도가 빨라 질수록 인장강도가 증가하는 것을 관찰할 수 있었으며 이러한 현상은 ITO/PET의 열적 활성화 변형의 변형률 속도 의존성에 의한 것이다. 또 stress-strain curve에서 변형률이 4.5% 이상 증가하면 PET 필름의 변형강화에 의하여 강도가 점차적으로 증가하는 것을 볼 수 있다. 이는 ITO코팅층의 두께(20 nm)가 PET기판에 비해 극도로 얇은 경우 균열빈도가 매우 균일하게 광범위하게 분포하여 초반에 균열형성에 의한 연화현상 및 후반에 PET 재료의 변형강화에 의한 것으로 설명될 수 있다.

Fig. 3의 (a)와 (b)는 20 nm의 두께를 갖는 ITO층(면저

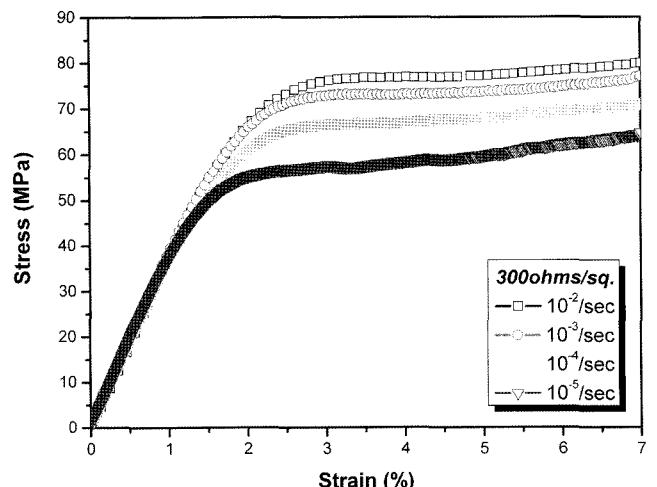
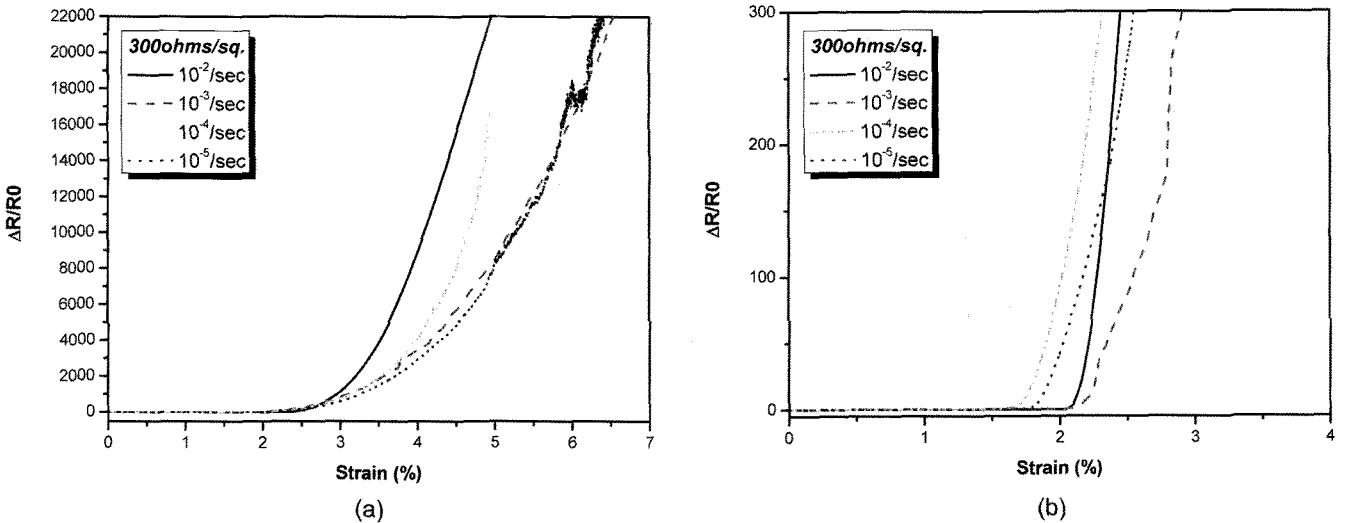


Fig. 2. Stress-strain curve of 300 ohms/sq film. The strength of ITO/PET sheet increases with increasing strain rate.



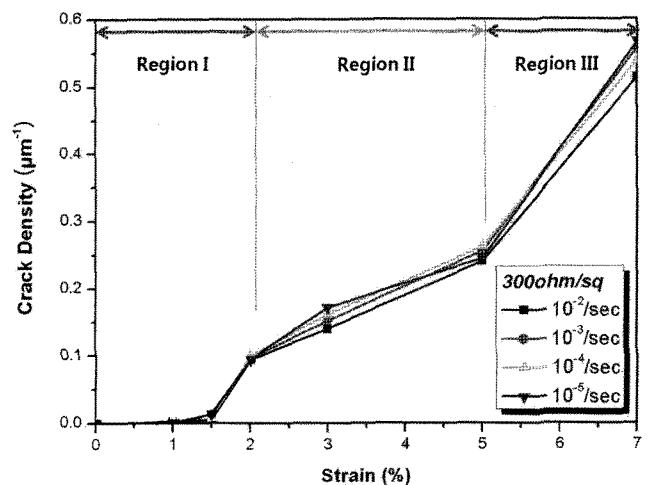
**Fig. 3.**  $\Delta R/R_0$  vs. strain curves at different strain rates (a) and the same at low strain (b). The increase of  $\Delta R/R_0$  is associated with crack formation in ITO films. The crack onset strain is 1.5~2.0%. Which is dependent on the strain rate.

항: 300 ohms/sq.)이 코팅된 ITO/PET필름을  $10^{-2}/\text{sec}$ 에서  $10^{-5}/\text{sec}$ 까지의 속도로 인장 시험을 했을 때 변형률에 따른 저항변화율( $\Delta R/R_0$ )을 나타낸다. 변형률이 증가하면서 저항변화율( $\Delta R/R_0$ )도 증가하는 것을 관찰할 수 있으며, 이는 ITO/PET필름에 인장하중이 가해짐에 따라 PET필름은 소성변형이 쉽게 일어나는데 비해 코팅된 ITO 층은 탄성영역에서 깨지기 때문에 변형률의 증가에 따라 저항이 증가하게 되며, 따라서 저항변화율( $\Delta R/R_0$ )도 증가하게 된다. Fig. 3(b)는 낮은 변형률에서 저항변화율을 나타내며  $10^{-4}/\text{sec}$  이하의 변형률 속도에서는 약 1.6%의 변형률에서 저항이 증가하기 시작하며,  $10^{-3}/\text{sec}$  이상의 변형률 속도에서는 약 2% 이상에서 저항이 증가하는 것을 관찰할 수 있었다. 이것으로 300 ohm/sq. ITO/PET필름의 저항증가 시작 변형률은 변형률 속도에 의존하며 변형률 속도에 따라 1.5~2.0% 변형률 부근에서 균열이 발생한다는 것을 알 수 있으며 실제로 1.5%까지 인장한 시편의 ITO 층 표면에서 균열을 관찰 할 수 있었다. Fig. 3(a)에서 약 4.0% 변형률까지의 저항변화율( $\Delta R/R_0$ ) 증가속도보다 그 이상에서 저항변화율( $\Delta R/R_0$ )이 급격하게 증가하였다. 이는 초기균열은 낮은 변형률에서 형성되어 변형률이 증가함에 따라 균열이 점차 축적되어 4.0% 이상에서는 더욱 많은 균열이 발생함을 보여준다. 달리 표현하면, 초기균열형성 후 균열이 점차적으로 증가하다가 급격하게 저항을 증가시킬 만큼 추가적인 균열형성 또는 성장이 빠르게 일어남을 암시한다.

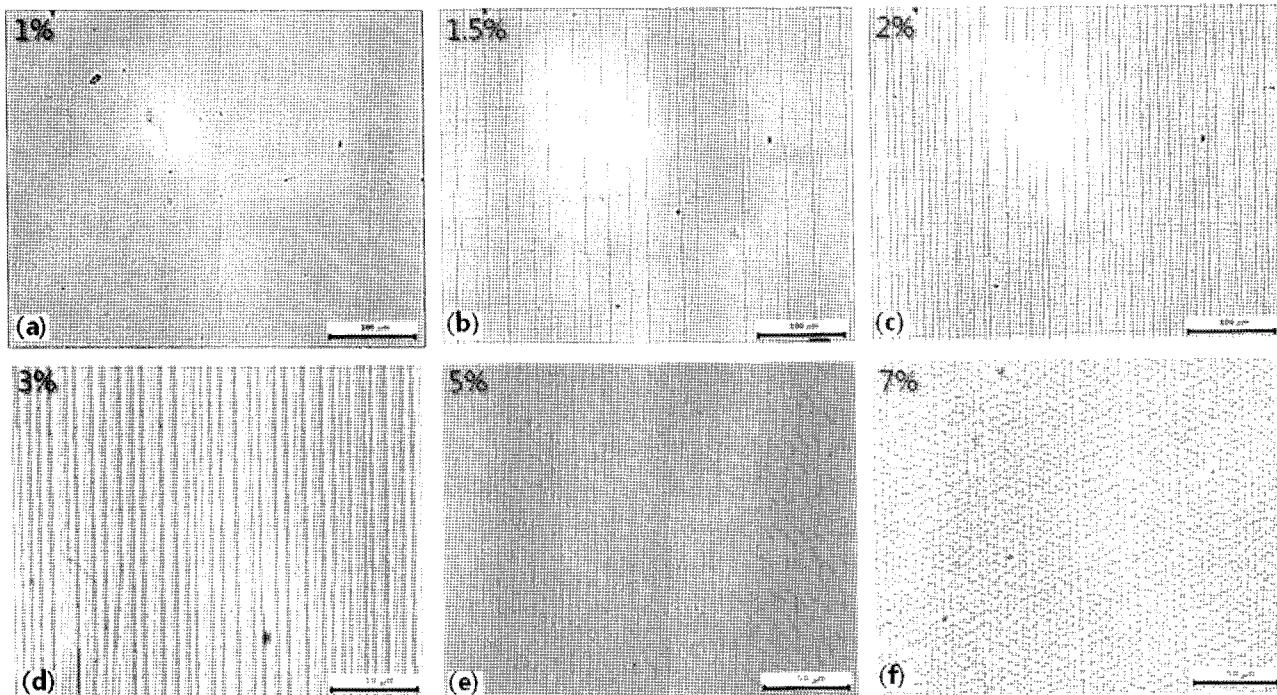
Fig. 4는 변형률에 따른 균열 밀도(Crack Density)를 나타낸 것이다. 균열 밀도(CD)는 다음 식으로 정의 하였다.

$$CD = \frac{(1+\varepsilon_p)}{k} \sum_{i=1}^k \frac{l_i}{A} \quad (1)$$

100배율에서 찍은 광학현미경 사진에서 임의로 세 개의 구역을 나누어 각 구역에서의 균열 길이 총 합을 해당 구역의 면적으로 나눈 값으로 균열 밀도를 나타냈다. 위 식에서  $\varepsilon_p$ 는 plastic strain이고,  $l_i$ 은 사진 내에 있는 균열 길이의 합,  $A$ 는 사진의 면적,  $k$ 는 사진의 개수이다. 시편을 소성변형 이상까지 인장했을 때 늘어난 길이를 반영시키기 위해  $(1+\varepsilon_p)$  항을 곱해주었다. Fig. 3에서 언급한 변형률에 따른 저항 변화 결과와 같이 1.5% 이상의 변형률에서 20 nm의 두께를 갖는 ITO층 (면저항: 300 ohms/sq.)이 코팅된 ITO/PET필름의 ITO코팅 층에 균열이 발생한 것을 볼 수 있다. 변형률이 증가할수록 균열의 수가 증가하였고, 균열 거동은 균열 밀도 증가속도에 따라 크게 3 가지 영역으로 나눌 수 있다. 이러한 결과는 Fig. 3의 변



**Fig. 4.** Crack density versus strain for ITO/PET with 300 ohms/sq. resistance at various strain rates. The crack density is weakly dependent on the strain rate, which decreases with increasing strain rate in region II.



**Fig. 5.** The progressive development of cracks as a function of total strain at the strain rate of  $10^{-2}/\text{sec}$  (a, b, c:  $\times 100$ ; d, e, f:  $\times 200$ ): (a) 1%, (b) 1.5%, (c) 2%, (d) 3%, (e) 5%, and (f) 7%.

형률에 따른 저항 변화와 유사한 거동을 나타낸다. Fig. 4의 세 영역의 균열 거동은 표면 관찰 결과에 바탕 하여 설명 할 수 있다.

Fig. 5는  $10^{-2}/\text{sec}$ 의 변형률 속도로 20 nm의 두께를 갖는 ITO층 (면 저항: 300 ohms/sq.)이 코팅된 ITO/PET필름을 7% 변형률까지 인장했을 때 ITO코팅 층의 균열 형성 과정을 보여준다. 1% 변형률에서는 ITO코팅 층에 균열이 거의 없는 시편의 처음 상태와 같은 모습이다. 1.5% 변형률에서는 초기 균열이 발생하여 인장 축에 수직인 방향으로 서서히 성장하는 단계로 인장 시험 중 응력이 집중되는 부분 즉, ITO코팅 층의 코팅 시 발생한 내부 결함이나 균열하지 않은 코팅 부분에서 균열이 시작되는 것을 볼 수 있었다. 여기서 특이한 점은 1.5% 변형률에서 초기 균열이 발생했음에도 불구하고 Fig. 3(b)의 변형률에 따른 저항 변화 결과를 보면 저항은 약 1.6% 변형률에서 증가하기 시작하는 것을 볼 수 있다. 이것으로 미루어 볼 때 1.5% 변형률 이전에 ITO코팅 층에 미세한 초기 균열이 발생하지만 이것이 ITO코팅 층의 저항 변화에는 크게 영향을 미치지 않고 ITO/PET필름의 전기적 특성에 크게 영향을 미치지 않는 것으로 예상할 수 있다. 1.5% 변형률에서 발생한 균열은 2.0% 변형률에서는 이미 시편 전체 폭까지 발전하였고 균열간의 간격도 상당히 좁아진 상태로 Fig. 4에서 보여진대로 균열 밀도도 급격히 증가하였다. 2% 이상의 변형률부터 5% 변형률까지 균열간의 간격이 점점 좁아지며 인장축에 수직이고 서로 평행한 균

열의 수가 증가하였고 7% 변형률까지 인장한 시편에서는 인장 축에 수평한 균열이 발생한 것을 볼 수 있다. 이것은 5%와 7% 변형률 사이에서 수평 균열이 발생하기 시작한다는 것을 보여준다. 이러한 인장 축에 수평한 균열은 시편이 인장 축에 따라 인장됨에 따른 횡방향의 압축변형에 따른 것이다. 이러한 횡방향의 균열은 시편의 necking현상에 따라 더욱 증가하게 된다.

Fig. 6은  $10^{-5}/\text{sec}$ 의 변형률 속도로 20 nm의 두께를 갖는 ITO층 (면 저항: 300 ohms/sq.)이 코팅된 ITO/PET필름을 7% 변형률까지 인장했을 때 ITO코팅 층의 균열 형성 과정을 보여준다. 여기에서도 Fig. 5의  $10^{-2}/\text{sec}$ 의 변형률 속도에서와 유사한 균열 거동을 볼 수 있었다. 변형률 속도가  $10^{-2}/\text{sec}$ 에서  $10^{-5}/\text{sec}$ 로 느려짐에 따라 균열의 수가 증가한 것을 보여주며 이것은 Fig. 4의 변형률에 따른 균열 밀도에서 변형률 속도가 느려질수록 균열밀도가 약간 증가한 결과와 일치한다.

Fig. 4의 세 영역은 위의 결과를 바탕으로 다음과 같이 설명 될 수 있다. Region I은 0%~2.0% 변형률까지 초기에 균열이 생성된 후 균열밀도가 비교적 빠르게 증가하는 구간으로, 균열이 일부 구역에서 형성되어 시편의 폭 넓이까지 발전하는 단계인 것으로 판단된다. Region II는 2.0%~5.0% 변형률 까지 비교적 완만하게 균열밀도가 증가하는 단계이다. 이 단계에서는 변형률이 증가하여 대부분이 시편의 폭 넓이까지 발전한 균열이 형성되며 균열간의 간격이 좁아지면서 균열의 개수가 증가한다. Region

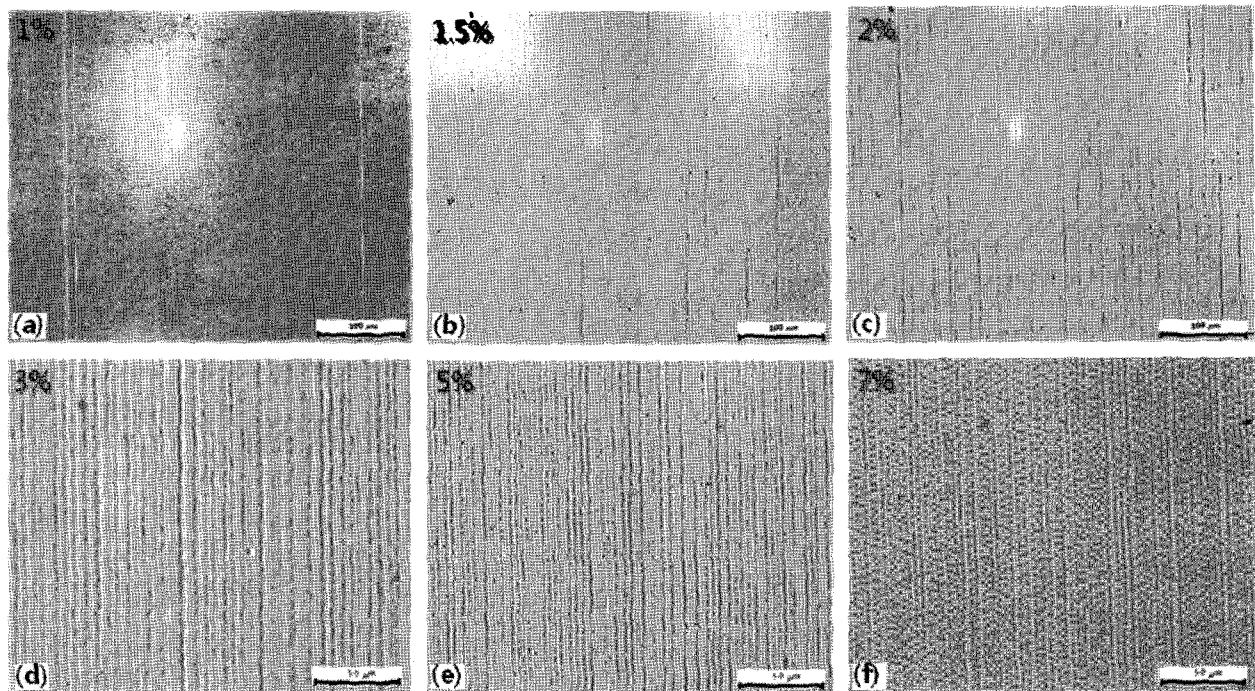


Fig. 6. The progressive development of cracks as a function of total strain at the strain rate of  $10^{-5}/\text{sec}$  (a, b, c:  $\times 100$ ; d, e, f:  $\times 200$ ): (a) 1%, (b) 1.5%, (c) 2%, (d) 3%, (e) 5%, and (f) 7%.

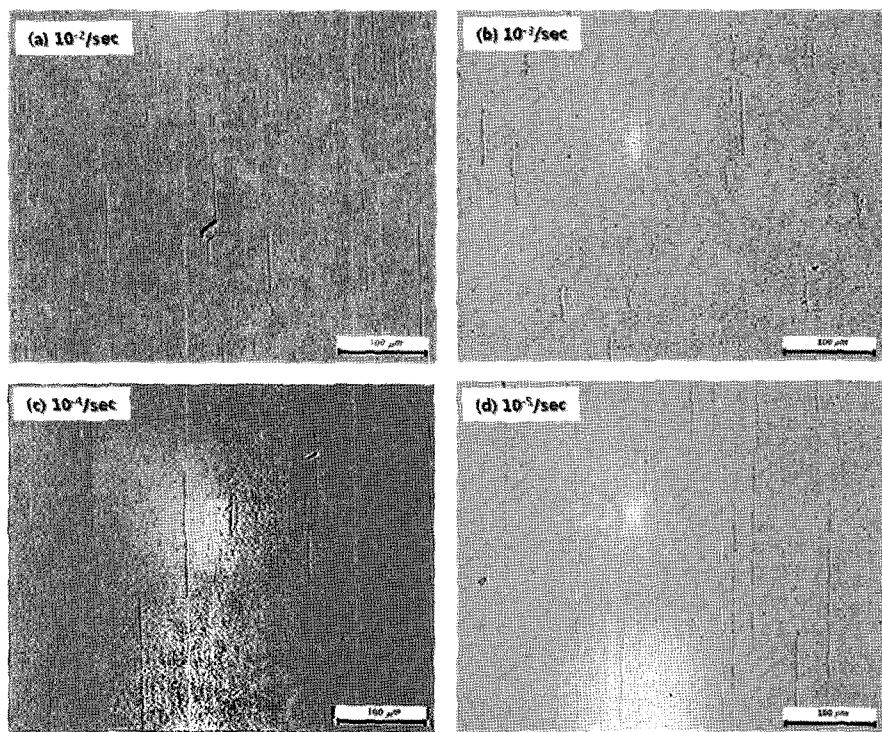
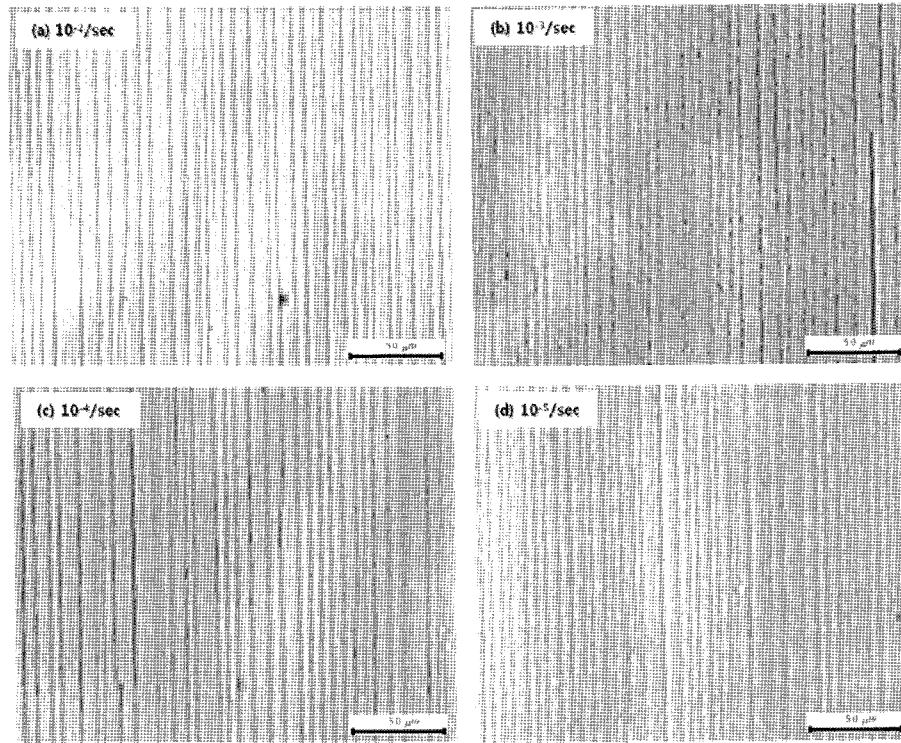


Fig. 7. Cracks of ITO film with sheet resistance 300 ohms/sq. at different strain rate. (1.5% strain,  $\times 100$ ).

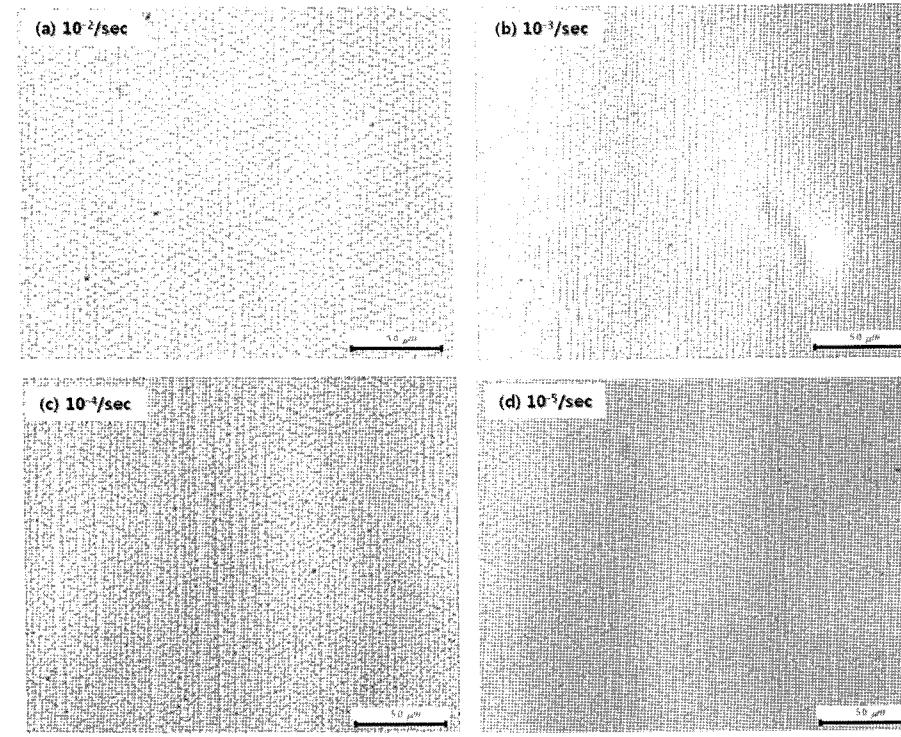
III에서는 5.0%~7.0% 변형률까지 완만하게 증가하던 균열 밀도가 급격히 증가하는 영역으로, 여기에서는 인장 축에 수직인 균열 외에 수평 한 균열이 발생하여 균열밀

도가 증가하게 된다.

Fig. 7은 20 nm의 두께를 갖는 ITO층 (면저항: 300 ohms/sq.)이 코팅된 ITO/PET필름을 1.5% 변형률까지 인장 했을 때



**Fig. 8.** Cracks of ITO film with sheet resistance 300 ohms/sq. at different strain rate. (3% strain, X200).



**Fig. 9.** Cracks of ITO film with sheet resistance 300 ohms/sq. at different strain rate. (7% strain).

변형률 속도에 따른 ITO코팅 층의 균열 거동을 나타내고 있다. 인장 축에 수직인 균열이 시편 일부에 발생한 것을 볼 수 있으며, 위에서 언급한 대로 이 균열은 ITO코팅 층

의 내부 결함 부분에서 발생하였다. Fig. 3(b)의 결과에서 저항 변화율의 증가가 낮은 변형률 속도에서 빨리 일어나는 것으로 미루어볼 때 균열의 생성은 낮은 변형률 속

도에서 더욱 빨리 일어나는 것으로 판단된다. 이것은 Fig. 7에서 균열의 수가 변형률 속도가  $10^{-5}/\text{sec}$ 일 때가  $10^{-2}/\text{sec}$ 일 때 보다 많다는 관찰결과로 뒷받침된다.

Fig. 8은 20 nm의 두께를 갖는 ITO층 (면저항: 300 ohms/sq.)이 코팅된 ITO/PET필름을 3% 변형률까지 인장 했을 때 각 변형률 속도에 따른 균열 발생 모습을 나타내고 있다. 큰 차이는 나지 않지만 변형률 속도가 느려 질수록 균열 간의 간격이 좁아지면서 균열의 수가 많아지는 것을 볼 수 있다. 본 연구의 결과는 125 nm ITO코팅 층을 갖는 ITO/PET필름의 경우보다 균열형성거동의 변형률 속도 의존성보다 민감성이 훨씬 낫아, 변형률 속도가 균열거동에 크게 영향을 미치지 못함을 나타낸다. 이러한 관찰결과를 설명하기 위해서는 더욱 깊이 있는 연구가 필요하나, 20 nm 코팅 층의 경우 강도가 높아 변형률 속도에 따른 폴리머의 미세강도 차이가 영향을 미치지 못하기 때문인 것으로 생각된다. Fig. 9는 300 ohms/sq. ITO/PET필름을 7% 변형률까지 인장 했을 때 각 변형률 속도에 따른 균열 거동을 나타내고 있다. 이러한 응력 축에 평행한 균열은 변형률 속도에 크게 의존하지 않으며 응력 축에 수직인 압축응력에 의해 발달하게 된다.

본 연구에서 흥미로운 점은 ITO코팅 층이 ITO/PET필름의 변형률 1% 이상에서도 균열이 생성되지 않는다는 점이다. 이와 같이 취성 재료인 ITO코팅 층이 1% 이상의 변형률에서도 균열이 형성되지 않는 이유는 세라믹이 코팅되는 온도에서 코팅 후 냉각될 때 ITO와 PET의 열팽창계수의 차이에 의하여 얇은 ITO코팅 층에 압축응력 및 그에 의한 압축 변형률이 생기기 때문이다.<sup>11)</sup> 즉 ITO코팅 층에 압축 응력과 압축 변형률이 가해진 경우, 전체 ITO/PET필름의 변형률이 1%에 육박해도 실제 ITO코팅 층에 부과된 인장 변형률은 훨씬 작게 된다. 또 한가지 흥미로운 결과는 본 연구에서 20 nm두께의 ITO코팅 층의 경우 균열이 형성되는 변형률이 1.5~2.0%로 135 nm의 ITO코팅 층이 코팅된 경우의 균열이 형성되는 변형률, 0.7~1.3%보다 크다는 점이다.<sup>12)</sup> 이러한 결과는 ITO코팅 층의 두께가 두꺼울수록 ITO코팅 층에 압축응력이 더 크게 작용된다는 결과로 설명이 되지 않는다. 즉 압축응력 만으로 이러한 현상을 설명하려면, 세라믹 층이 두꺼운 경우에 ITO코팅 층에 부과된 압축응력이 더 크므로 ITO 층은 더 큰 전체 인장 변형률이 부과되어야 균열이 형성되게 된다. ITO코팅 층이 얇은 본 연구의 경우에 균열이 형성되는 변형률이 1.5~2.0%로 증가하는 이유는 ITO코팅 층의 두께에 따른 파괴강도의 차이에 기인하는 것으로 생각된다. 세라믹 코팅 층의 파괴강도는 다음과 같은 식으로 표현될 수 있다.<sup>4,12)</sup>

$$\sigma_f = \sqrt{\gamma E / Zh} \quad (2)$$

위의 식에서  $\sigma_f$ 는 파괴강도,  $\gamma$ 는 표면에너지,  $E$ 는 탄성

계수,  $h$ 는 코팅 층의 두께,  $Z$ 는 균열의 형태와 기지와 코팅 층의 탄성 차이에 의존하는 상수이다. 식 (2)에서 다른 조건이 유사하다면 20 nm의 코팅 층의 강도가 125 nm의 코팅 층보다 강도가 약 2.5배 높음을 알 수 있다. 즉 코팅 층이 20 nm로 얇다면 코팅 층의 강도가 높아 균열이 쉽게 형성되지 않으며, 따라서 균열이 형성되는 변형률이 증가하게 됨을 예측할 수 있다.

#### 4. 결 론

20 nm의 두께를 갖는 ITO층 (면저항: 300 ohms/sq.)이 코팅된 ITO/PET 필름에 인장 하중을 가할 때 ITO코팅 층의 균열생성 및 성장 거동과 그에 따른 저항 변화를 연구하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

1)  $10^{-4}/\text{sec}$  이하의 변형률 속도에서는 약 1.6%의 변형률에서 저항이 증가하기 시작하며,  $10^{-3}/\text{sec}$  이상의 변형률 속도에서는 약 2% 이상에서 저항이 증가하는 것을 관찰 할 수 있었다. 이것으로 300 ohm/sq. ITO/PET필름의 저항증가 시작 변형률은 변형률 속도에 의존하며 변형률 속도에 따라 1.5~2.0% 변형률 부근에서 균열이 발생한다는 것을 알 수 있다. 저항이 증가하기 시작하는 변형률은 ITO/PET필름의 비례한계에 근접하였다. 이러한 저항의 증가는 ITO코팅 층의 균열형성 및 성장과 연관시킬 수 있다. 변형률 속도가 빨라질수록 비례한계가 증가하므로 저항이 증가하는 임계 변형률은 증가하게 된다.

2) 균열성장 거동은 균열밀도 증가속도에 따라 세 영역으로 구분된다. Region I은 초기에 균열이 생성된 후 균열밀도가 비교적 빠르게 증가하는 구간으로, 균열이 일부 구역에서 형성되어 시편의 폭 넓이까지 발전하는 단계인 것으로 판단된다. Region II는 2.0%~5.0% 변형률까지로 비교적 완만하게 균열밀도가 증가하는 단계이다. Region III는 5.0%~7.0% 변형률까지로 완만하게 증가하던 균열밀도가 급격히 증가하는 영역으로, 여기에서는 인장 축에 수직인 균열 외에 수평 한 균열이 발생하여 균열밀도가 증가하게 된다.

3) 균열밀도는 모든 변형률 속도에서 변형률이 증가함에 따라 증가하였으나, 코팅 층이 두꺼운 경우에 비해 변형률 속도에 따른 균열밀도의 증가율은 현저하게 감소하였다. 얇은 코팅 층의 경우 강도가 증가하여 변형률 속도에 따른 폴리머의 미세강도 차이가 영향을 미치지 못하기 때문인 것으로 생각된다.

4) 본 연구에서 흥미로운 점은 ITO코팅 층이 ITO/PET필름의 변형률 1% 이상에서도 균열이 생성되지 않는다는 점이다. 취성 재료인 ITO층이 1% 이상의 변형률에서도 균열이 형성되지 않는 이유는 세라믹이 코팅되는 온도에서 코팅 후 냉각될 때 ITO와 PET의 열팽창계수의 차이에 의하여 얇은 ITO코팅 층에 압축응력 및 그에 의한

압축 변형률이 생기기 때문이다.

5) ITO코팅 층이 20 nm로 얇은 본 연구의 경우에 125 nm의 코팅 층이 형성된 경우보다 균열이 형성되는 변형률이 1.5~2.0%로 증가하는 이유는 ITO코팅 층의 두께에 따른 파괴강도의 차이에 기인하는 것으로 생각된다. 즉 코팅 층이 20 nm로 얇다면 코팅 층의 강도가 125 nm의 경우보다 강도가 2.5배 높아 균열이 쉽게 형성되지 않으며, 따라서 균열이 형성되는 변형률이 증가하게 됨을 예측할 수 있다.

## REPERENCES

1. J. T. Hwang, J. M. Son, I. N. Kang, and Y. S. Bu, "The R&D Trend of Flexible Display(*in Korean*)," *Polymer Science and technology*, **14** [5] 554-68 (2003).
2. Darran R. Cairns, Richard P. Witte II, Daniel K. Sparacin, Suzanne M. Sachzman, David C. Paine, and Gregory P. Crawford, "Strain-dependent Electrical Resistance of Tin-doped Indium Oxide on Polymer Substrates," *Appl. Phys. Lett.*, **76** [11] 1425-27 (2000).
3. S. M. Kim, Y. S. Rim, H. W. Choi, M. G. Choi, and K. H. Kim, "Bending Effects of Thin Film Deposited on the Polymer Substrate(*in Korean*)," *J. of KIEEME*, **21** [7] 669-73 (2008).
4. Y. Leterrier, L. Medico, F. Demarco, J.A.E. Manson, U. Betz, M.F. Escola, M. Kharrazi Olsson, and F. Atamny, "Mechanical Integrity of Transparent Conductive Oxide Films for Flexible Polymer-based Displays," *Thin Solid Films*, **460** 156-66 (2004).
5. Tung-Lin Li and Steve Lien-Chung Hsu, "Preparation and Properties of a High Temperature, Flexible and Colorless ITO Coated Polyimide Substrate," *European Polymer Journal*, **43** 3368-73 (2007).
6. J. H. DeWit, "The High Temperature Behavior of  $In_2O_3$ ," *J. Sol. Stat. Chem.*, **13** 192-200 (1975).
7. H. Enoki, J. Echigoya and H. Suto, "The Intermediate Compound in the  $In_2O_3$ - $SnO_2$  system," *J. Mat. Sci.*, **26** 4110-11 (1991).
8. B. J. Cho and K. H. Kim, "Characteristics of ITO Thin Films prepared on PC Substrate(*in Korean*)," *J. of KIEEME*, **20** [2] 162-66 (2007).
9. Minami, T., Sonohara, H., Kakumu, T., and Takata, S., "Physics of very Thin ITO Conducting Films with High Transparency Prepared by DC Magnetron Sputtering," *Thin Solid films*, **270** 37-42 (1995).
10. Sonia Grego, Jay Lewis, Erik Vick, and Dorota Temple, "A Method to Evaluate Mechanical Performance of Thin Transparent Films for Flexible Displays," *Thin Solid Films*, **515** 4745-52 (2007).
11. C. Piet, P. Bouteren, P. J. Slikkerveer, and Y. Leterrier, "Mechanics of ITO on Plastic Substrates for Flexible Displays," In *Flexible Flat Panel Displays*, Edited by C. P. Crawford, 99-120, John Wiley and Sons, England, 2005.
12. J. Y. Kim and S. I. Hong, "Effect of Strain Rate on the Deformation and Cracking Behaviors of ITO/PET Sheets with 45 ohms/sq. Sheet Resistance(*in Korean*)," *J. of KIEEME*.