

Flexible 기판의 Bending Stress에 대한 Encapsulation Layer의 영향

박준백, 서대식, 이상극, 이준웅, 김영훈, 문대규, 한정인
연세대학교 전기전자공학과, 광운대학교 전기전자공학과, 전자부품연구원 디스플레이연구센터

The Influence of Encapsulation Layer Incorporated into Flexible Substrates for Bending Stress

Jun-Baek Park, Dae-Shik Seo, Sang-Keuk Lee, Joon-Ung Lee, Yong-Hoon Kim, Dae-Gyu Moon, and Jeong-In Han

Yonsei Univ., Kwangwoon Univ., Information Display Research Center, KETI

Abstract

This paper shows necessity of encapsulation layer to maximize flexibility of brittle indium-tin-oxide (ITO) on polymer substrates. And, Young's modulus (E) of encapsulation layer have an significant effect on external bending stress and the coefficient of thermal expansion (CTE) of that have a significant effect on internal thermal stress. To compare magnitude of total mechanical stress including both bending stress and thermal stress, the mechanical stress of triple-layer structure (substrate / ITO / encapsulation layer or substrate / buffer layer / ITO) can be quantified and numerically analyzed through the farthest cracked island position. As a result, it should be noted that multi-layer structures with more elastic encapsulation material have small mechanical stress compared to that of buffer and encapsulation structure of large Young's modulus material when they were externally bent.

Key Words : encapsulation layer, bending stress, thermal stress, flexible, polymer substrates

1. 서 론

최근 액정 디스플레이 (LCD)와 유기 EL (OLED)와 같은 flexible 디스플레이 소자에 대한 관심이 커지고 있고 폴리머 기판의 사용이 꼭 필요하다. 하지만 폴리머 기판은 기존에 사용하던 유리기판과는 달리 외부의 산소와 수분의 침투에 취약하다는 단점을 가지고 있다. 그래서 플라스틱 기판의 투습율을 향상시키기 위한 배리어 역할을 하는 산화물 코팅이 필요하다. 하지만 이런 배리어 산화물 코팅이나 투명전극으로 쓰이는 ITO등 대부분의 디스플레이에 들어가는 물질은 깨지기 쉬운 (brittle)성질을 가지게 된다. 즉, 이런 물질들로 이루어진 디스플레이소자는

임계 strain이상의 아주 작은 strain만 가해도 깨져버리게 된다[1,2]. 즉, 폴리머 기판을 사용하더라도 유연성이 작은 소자의 다른 부분이 깨져버리고, 그 곳으로 외부의 산소와 수분이 침투하게 된다. 최근에 Z. Suo가 encapsulation층의 영향을 토대로 얼마나 휘는지에 영향받지 않는 flexible 변형에 대해 언급하였다[3]. 본 논문에서는 encapsulation층이 기판에 들어간 경우에 휨 스트레스 뿐만 아니라 열적 스트레스가 어떻게 변하는지에 대해 살펴보았다.

2. 실험

본 실험에서는 polycarbonate (PC) 기판 위에

indium-tin-oxide (ITO) 와 SiO₂ 또는 폴리이미드 (PI) 코팅으로 이루어진 6가지의 3층구조로 이루어진 구조 (기판-ITO-encapsulation 또는 기판-buffer-ITO)를 증착하였다. ITO와 PC 기판의 두께는 각각 200 nm, 180 μm이다. 용매 γ-Butyrolactone 와 무게비 1:1로 혼합된 폴리이미드는 스핀 코팅과 120°C에서 소성되었고, ITO 증착은 상온에서의 RF magnetron 스퍼터링을 통해 Ar 14 sccm, 증착압 3mTorr 분위기에서 증착되었다. Electron beam으로 증착된 SiO₂의 공정온도 (T_p)는 120 °C이다. 본 실험에 사용된 물질의 Young's modulus (E)와 열팽창계수 (CTE)는 다음과 같다. PC 기판, SiO₂ 와 ITO의 열팽창계수는 각각 50ppm/K, 5ppm/K, 5ppm/K이고 Young's modulus는 각각 5 GPa, 120 Gpa, 120 Gpa이다. 그림 1은 두 개의 기본적으로 다른 구조를 보여준다. 그리고 이 기본구조에 증착물질과 그것들의 두께를 달리하면서 아래와 같은 6가지 type의 구조를 만들었다.

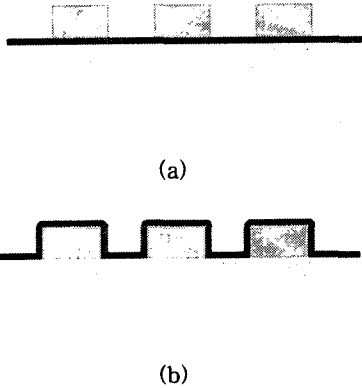


그림 1. 2가지 다른 샌드위치 구조 : (a) 버퍼 type 구조 (b) encapsulation type 구조.

Fig. 1. Two different sandwich structures : (a) buffer type structure (b) encapsulation type structure.

- 1) Type 1 : ITO (200 nm) / PI (40 nm) / PC
- 2) Type 2 : ITO (200 nm) / SiO₂ (40 nm) / PC
- 3) Type 3 : SiO₂ (40 nm) / ITO (200 nm) / PC
- 4) Type 4 : PI (40 nm) / ITO (200 nm) / PC
- 5) Type 5 : SiO₂ (250 nm) / ITO (200 nm) / PC
- 6) Type 6 : ITO (200 nm) / PC

안쪽으로 구부렸을 때의 위치에 따라 가해지는 휨 스트레스의 크기를 비교하고 픽셀 배열로 이루어진 실제 flexible 디스플레이 소자를 고려하기 위해, ITO island 배열구조를 만들었다[4,5]. 그리고, farthest cracked island 위치를 알아보기 위해 25 또는 35 개의 island 배열로 구성된 크기가 28 mm*10 mm인 샘플을 만들어 L=12 mm인 cylindrical 모양으로 휘었고[4,5] 광학현미경을 통해 발생한 크랙을 관찰하였다.

3. 결과 및 고찰

다층 구조에서의 내부 스트레스를 알아보기 위해서는 열적 스트레스, intrinsic 스트레스 모두를 고려해야 한다. 하지만 플라스틱 기판의 경우 그 위에 증착되는 산화물과의 열팽창계수차이로 인한 열적 스트레스가 상당히 우세하기 때문에 여기서는 열적 스트레스로 인한 잔류 스트레스에 대해서만 살펴볼도록 한다. 외부에서 휨을 가하여도 잔류 스트레스로 인해 발생한 휨 축의 이동이 일어나지 않기 때문에 잔류 스트레스에 대한 식뿐만 아니라 외부 휨 스트레스 모두를 고려한 다층 구조의 기계적인 스트레스에 관한 관계식을 구할 수 있다[6].

$$(1)$$

여기서 c 는 uniform strain 성분이고, t_b 는 휨 축의 위치를 나타내고, r 은 유도 반경, R 은 외부에서 휨 때의 반경을 나타낸다. 그리고 식 안의 +기호는 안쪽으로 휨 경우를 -기호는 바깥쪽으로 휨 경우에 해당한다. 이 식을 통해 전체 기계적인 스트레스는 Young's modulus와 열팽창계수, 두께에 따라 변하는 세 파라미터 c , r , t_b 와 밀접한 관련이 있다는 사실을 알 수 있다.

그림 2는 식 (1)로부터 계산된 type 1~6의 전체 기계적인 strain의 크기를 나타낸다. 그림 2의 결과로부터, encapsulation 구조의 기계적인 스트레스가 버퍼구조의 스트레스보다 더 작다는 것을 알 수 있다. 기판과 그 위의 코팅사이의 접착성은 코팅의 파괴 메커니즘에 영향을 미치는 중요한 파라미터이지만 여기서는 고려되지 않는다. 실제로, 폴리머 기판과 산화물 코팅사이의 폴리머로 이루어진 버퍼층은 표면 평탄화작용으로 인해 산화물 코팅의 접착성을 향상시킬지 모른다. 이러한 개념은 폴리머로 이루어진 버퍼층을 가진 구조가 이론적으로 계산된 기계적인

스트레스값보다 더 작은 스트레스를 가지게 할 수 있다[5]. 그리고 두께가 같은 경우에, Young's modulus가 작은 PI encapsulation구조가 Young's modulus가 큰 SiO₂ encapsulation구조보다 더 작은 스트레스를 받는다는 것을 알 수 있다. 이는 PI encapsulation구조는 SiO₂ encapsulation보다 t_b의 증가성분이 상대적으로 작지만 열적 스트레스 성분이 없기 때문이다.

그리고, SiO₂ encapsulation구조에서 박막의 두께가 두꺼워질수록 기계적인 스트레스는 작아진다는 것을 알 수 있다. 이는, SiO₂의 두께가 두꺼워질수록 열팽창계수차이로 인한 열적 스트레스는 증가하지만 |z-t_b|의 값은 감소하기 때문이다. 즉, 외부 휨 스트레스의 감소성분이 열적 스트레스의 증가성분보다 더 작기 때문에 전체 기계적인 스트레스의 크기는 작아지게 되고 이러한 결과는 참고문헌 7의 결과와 일치한다. Young's modulus (77Gpa)가 SiO_x 코팅과 거의 같은 Au가 encapsulation층으로 사용된 SiO_x/PET구조는 금 encapsulation층이 없는 구조보다 더 작은 3.5% strain에서 처음 크랙이 나타나기 시작한다. 그리고 높은 strain영역 (>10%)에서 Au의 두께가 두꺼워짐에 따라, 포화 크랙밀도는 작아진다. 즉, 기계적인 스트레스는 큰 Young's modulus를 가진 encapsulation층의 두께가 증가함에 따라 작아지게 된다. 6가지 샌드위치 구조의 기계적인 스트레스의 크기는 위 그림의 결과를 통해 Type2 > Type 3 > Type 5 > Type 1 Type 6 > Type 4이고, PI encapsulation구조 (Type 4)가 가장 작은 기계적인 스트레스를 받는다는 것을 알 수 있다.

이론식으로부터 계산된 기계적인 스트레스를 확인하기 위해, 외부 휨 스트레스 테스트 (L=12 mm)가 각 샘플에 실행되었다. 임계 스트레스이상의 스트레스가 가해짐에 따라 똑같은 위치의 island위치라도 더 많은 수의 크랙이 발생하고 farthest cracked island의 위치는 중앙부분에서 점점 멀어지게 된다. (그림 3과 4)그림 3는 35개의 island 배열을 가진 샘플의 10번째 island에서의 크랙수와 farthest cracked island 위치를 나타낸다. 그래프에 나와 있는 것처럼, type 4의 farthest cracked island위치는 12번째이고 type 2의 그 위치는 6번째이다. 즉, 중앙부분이 18번째 island위치이기 때문에 type 4에서 유도된 stress가 type2에서보다 더 작다는 것을 의미한다. cracked island위치와 크랙밀도 밀도를 고려하여 기계적인 스트레스의 상대적인 크기 비교를 하면 type2 > type 3 > type 1 type 6 > type 4과 같이 된다. 그림 4로부터 type 3 > type 5 > type 1과 같은 스트

레스의 크기 비교를 할 수 있다. 이런 결과들을 종합하면 이론적인 분석으로부터 얻은 그림 2의 결과와 아주 일치하게 된다.

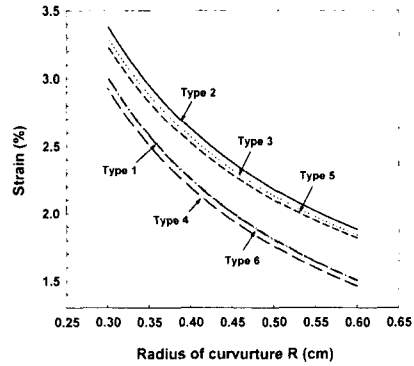


그림 2. 휨 반경에 대한 type 1~6에서의 잔류 스트레스를 고려한 외부 휨 스트레스.

Fig. 2. External bending strain included with residual stress of Type 1 to 6 regarding the radius of curvature.

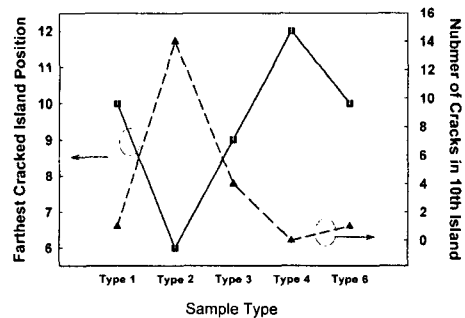


그림 3. Farthest cracked island의 위치와 10번째 ITO island에서의 크랙수.

Fig. 3. Farthest cracked island position and number of cracks in 10th ITO island.

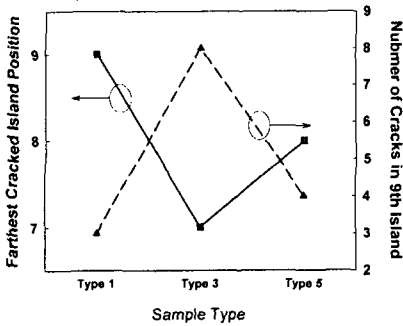


그림 4. Farthest cracked island 위치와 9번째 ITO island에서의 크랙수.

Fig. 4. Farthest cracked island position and number of cracks on 9th ITO island.

4. 결 론

여러가지 다층 구조에서의 폴리머 기판위의 ITO island에서의 기계적인 힘 스트레스에 대하여 분석하였다. 이론적인 분석과 외부 힘 스트레스 테스트를 통해 flexible 소자에서의 기계적인 스트레스는 각 구조의 type과 버퍼 또는 encapsulation층으로 사용된 물질의 기계적인 성질에 의해 영향 받는다는 사실을 알 수 있었다.

감사의 글

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

참고 문헌

[1] 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.

[2] 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.

[3] Z. Suo, E.Y. Ma, H. Gleskova, and S. Wagner,

"Mechanics of rollable and foldable film-on-foil electronics", *Appl. Phys. Lett.*, Vol. 74, No. 8, p. 1177, 1999.

[4] J. -B. Park, J. -Y. Hwang, D. -S. Seo, S. -K. Park, D. -G. Moon, and J. -I. Han, "Position dependent stress distribution of indium-tin-oxide on polymer substrate by external bending force", *Jpn. J. Appl. Phys.*, (submitted).

[5] J. -B. Park, Y. -G. Lee, J. -Y. Hwang, D. -S. Seo, S. -K. Park, D. -G. Moon, and J. -I. Han, "Study on electrical characteristics of plastic ITO film with bending on multi-barrier films", *전기전자재료학회논문지*, 17권, 1호, 2004.

[6] 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.

[7] G. Rochat, Y. Leterrier, P. Fayet, and J.-A.E. Manson, "Mechanical analysis of ultrathin oxide coatings on polymer substrates in situ in a scanning electron microscope", *Thin Solid Films*, Vol. 437, p. 204, 2003.