

비틀림 변형 중 ITO 필름의 시편 형태에 따른 기계적 전기적 파괴 연구

권용욱 · 김병준[†]

안동대학교 신소재공학부 청정에너지소재기술연구센터

Mechanical and Electrical Failure of ITO Film with Different Shape during Twisting Deformation

Y. Y. Kwon, and Byoung-Joon Kim[†]

School of Materials Science & Engineering, Andong National University, 1375 Gyeongdong-ro, Andong-si, Gyeongsangbuk-do 36729, Korea

(Received November 29, 2017; Corrected December 15, 2017; Accepted December 22, 2017)

초 록: 현재 전자 기기에서 가장 대표적인 투명전극은 ITO(Indium Tin Oxide) 필름으로, 우수한 전기적 물성과 광학적 성질로 인해 터치패널, 발광 소자 등 다양한 곳에 사용 중이다. 하지만, 세라믹 재료가 가지는 취성으로 인해, 유연 전자 소자와 같은 곳에 적용할 경우 기계적 변형 중 취성 파괴가 일어나기 쉬우므로 각별한 주의가 필요하다. 본 연구에서는 PET 위에 증착한 ITO 필름에 비틀림 변형이 가해졌을 경우 나타나는 기계적 파괴 및 이에 따라 발생하는 전기적 물성 변화에 대해 연구하였다. 다양한 형태의 시편을 준비하여 비틀림 변형 시 ITO 필름의 전기적 안정성에 대해 연구하였고, 시편의 길이가 길수록 폭이 클수록 면적이 작을수록 비틀림 변형에 취약한 것으로 나타났다. 이를 비틀림 변형 시 발생하는 복합 응력을 고려하여 ITO 필름의 비틀림 안정성에 대해 연구하였다.

Abstract: The most representative transparent electrode in the modern society is ITO (Indium Tin Oxide). ITO is widely used in general for touch panels and displays due to its high electrical and optical properties. However, in general, mechanical deformation causes deterioration and destruction of device properties because ITO is basically vulnerable to mechanical deformation. Therefore, the in-depth understanding on the stability of ITO film during various mechanical deformations is necessary. In this study, the reliability and mechanical properties ITO sample having different length, width, and area were investigated. The electrical stability was estimated according to electrical resistance change. The stability was dropped as the sample length, and width increased and the sample area decreased. The electrical stability of ITO film was correlated with twisting strain including tensile, compressive and shear stress.

Keywords: Flexible, ITO, Twisting, Strain, Reliability

1. 서 론

현대사회에는 반도체 및 디스플레이 등 다양한 전자 기기의 발달에 따라 스마트 기기의 사용이 보편화 된 상태이며, 향후 차세대 모바일 단말 기술로는 웨어러블 디바이스(wearable device) 혹은 플렉서블 디스플레이(Flexible Display)가 조명 받고 있다. 웨어러블 디바이스란 신체에 부착 또는 착용하여 컴퓨팅 행위를 할 수 있는 모든 것을 지칭하며, 이 범위에 는 신체나 사람이 직접 사용하는 장갑, 배트, 신발 모자, 안경 등에 부착하거나 내장할 수 있는 센서 종류와 스마트워치, 스마트글라스, 각종 헤드마

운트 디바이스, 피트 니스밴드, 스마트글로브, 스마트자동차와 연계된 스마트 위치 등이 포함된다.^{1,2)} 이러한 웨어러블 전자기기의 상용화를 위해 가장 중요한 기술 중 하나는 바로 플렉서블 디스플레이 기술이다. 플렉서블 디스플레이란 일반적으로 얇고 유연한 형태의 디스플레이로 손상 없이 휘고 구부릴 수 있는 기계적 물성을 가진 디스플레이를 지칭하며, 종이처럼 들릴 수 있는 롤러블 디스플레이(Rollable Display), 자유롭게 접거나 펼 수 있는 폴더블 디스플레이(Foldable Display) 등 다양한 형태의 제품으로 연구되고 있다.^{3,4)} 디스플레이를 위해 꼭 필요한 소재중 하나인 투명 전극 소재로서, 현재는 ITO

[†]Corresponding author
E-mail: bjkim@anu.ac.kr

© 2017, The Korean Microelectronics and Packaging Society

This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License(<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

(Indium Tin Oxide) 소재가 가장 널리 사용 중이며, 이는 액정 디스플레이, 플라즈마 디스플레이 패널, 유기 발광 다이오드(organic light emitting diode) 등과 같은 다양한 분야에서 투명전극으로 광범위하게 사용되고 있다.⁵⁾ 최근 웨어러블하고 플렉서블한 기기 개발을 위해 ITO 박막을 유연 소자에 적용하려는 시도가 이루어지고 있다. 그러나 Polyethylene Terephthalate(PET) 등과 같이 유연기판에 증착된 ITO는 매우 brittle 하여, 큰 변형이 가해졌을 경우 전기적 신뢰성 문제가 발생하게 된다.⁶⁾ 따라서 최근 굽힘 변형 시 ITO 필름의 전기적 안정성에 대한 많은 연구가 진행 중이다.^{7,8,9)} 하지만, 향후 실제 소자에서는 굽힘 변형 뿐만 아니라 비틀림 변형과 같이 다양한 응력이 복합적으로 가해지는 상황이 일어날 것으로 예상되며 이에 따라 비틀림과 같은 복합 응력 인가 시 ITO 필름의 전기적 신뢰성에 대한 연구가 필요한 실정이다. 특히 시편 형태에 따라 비틀림 변형 시 매우 다른 기계적 응력이 발생하게 되므로 시편 형태에 따른 기계적 전기적 신뢰성에 대한 연구가 꼭 필요하다. 본 연구에서는 PET 위에 증착된 ITO 필름의 비틀림 변형 중 전기적 특성 변화에 대해 연구하였으며, 다양한 크기와 모양의 시편에서 비틀림 변형 중 안정성에 대해 살펴 보았다. 또한 비틀림 변형 시 발생하는 응력을 기준에 제시된 모델을 통해 계산하여,¹⁰⁾ 실제 파괴 비틀림 각도와 비교하였으며, 이를 통해 시편 모양에 따른 비틀림 변형 시 신뢰성에 대해 연구하였다.

2. 실험 방법

유연 기판으로는 188 μm 두께의 PET 기판 위에 ITO 필름을 두께 100 nm로 진공 증착 한 시편을 준비하였다. 시편의 길이, 폭, 면적의 3종류의 변수가 ITO 필름의 비틀

림 변형 시 전기적 특성에 어떤 영향을 주는지 확인하기 위해 Fig. 1(a)에 나타낸 바와 같이 5 mm \times 20 mm, 10 mm \times 40 mm, 20 mm \times 20 mm, 20 mm \times 40 mm, 20 mm \times 80 mm, 40 mm \times 40 mm 크기의 시편을 각각 준비하였다. ITO 시편을 Fig. 1(b)에 나타낸 유연소자 다목적 변형 시험기에 (CKSI, Republic of Korea)에 고정하고 전기 저항 측정 장치(Keithley 2400)를 통해 시편의 네 모서리를 고정된 뒤 비틀림 실험을 하면서 각 5° 마다 4-point probe 방법으로 전기 저항의 변화를 측정하였다. Fig. 1(c)에서는 ITO 필름이 비틀어지는 형태를 보여주고 있으며, 0°에서 180°까지 비틀림 실험을 진행했으며 비틀림 속도는 10°/min로 유지하였다. 위 과정의 모든 실험은 최소 3번씩 실험하여 통계처리를 실시하였다. 시편의 표면에 일어난 현상을 확인하기 위해 FE-SEM(Field Emission Scanning Electron Microscope)을 통해 표면을 촬영하였다. 유연 전극의 비틀림 변형 중 발생하는 Multiple stress를 von-Mises strain을 통한 Equivalent Strain으로 변형하는 모델을 이용하여 각각의 비틀림 조건에서 Strain을 구한 뒤 신뢰성 평가 결과와 비교하였다.¹⁰⁾ 시편의 전기저항의 증가와 전기적 파괴를 확인할 때 일반적으로 전자제품의 전기적 파괴가 20%를 기준으로 하는 점에 근거하여 본 실험의 전기적 파괴도 20%로 결정하였다.

3. 결과 및 고찰

Fig. 2(a)는 20 mm \times 40 mm 크기의 ITO 필름의 비틀림 각도에 따른 저항의 변화 그래프를 보여주고 있다. 0°부터 180°까지 비틀림 실험을 진행한 결과 0°에서 평균 초기 저항 135 Ω 이었으며 0°부터 30°까지는 전기 저항이 거의 변화하지 않았고, 30°부터 60° 변형 구간에서는 전기 저항이 완만하게 증가하였으며 80° 비틀림 이후부터

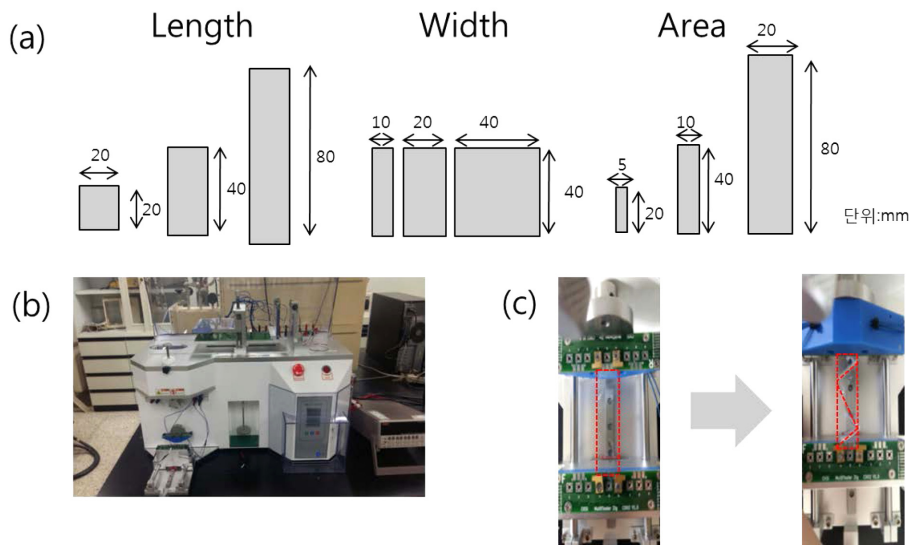


Fig. 1. (a) Schematic of sample dimension having different length, width and area (b) Multi-purpose deformation tester for flexible devices (c) Images of ITO film before and after twisting deformation.

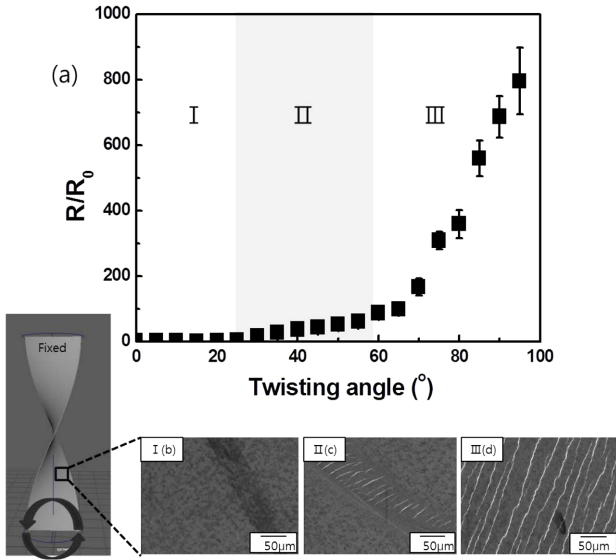


Fig. 2. (a) Electrical resistance change of ITO film with size of 20 mm × 40 mm as a function of twisting angle. The average initial resistance is 135 Ω. FE-SEM images of the surface of samples after (b) 20°, (c) 40°, and (d) 80° twisting deformation.

는 저항이 급격하게 증가하였다. 이러한 현상의 원인을 알아보기 위해 20°, 40°, 80° 만큼 비틀림 실험을 진행한 후 이 시편들의 표면을 SEM을 통해 관찰하였다. Fig. 2 (b)는 20 mm × 40 mm 시편을 20° 만큼 비틀림 실험을 진행한 후 표면을 FE-SEM을 통해 관찰한 사진으로, 시편의 표면에 별다른 손상이 없는 것으로 확인되었다. 전자의 흐름을 방해하는 것이 없기 때문에 낮은 비틀림 각도에서는 저항의 변화가 없다. Fig. 2(c)는 40° 비틀림 실험을 진행한 ITO 시편의 표면사진이며, 짧은 크랙이 국부

적으로 형성된 것을 관찰하였다. 이는 비틀림 변형 중 ITO 필름은 국부적으로 접히게 되고 이 곳에 응력이 집중되면서 접힌 곳에 크랙 형성이 시작되는 것을 의미한다. 짧은 크랙의 형성에 의해 전기 저항도 완만히 증가하였다. Fig. 2(d)는 80° 만큼 비틀림 실험을 진행한 시편의 표면 사진으로, 긴 크랙이 전 지역에 형성된 것을 볼 수 있는데 이는 점점 크랙이 전과되고 연결된 것으로 생각한다. 긴 크랙의 형성에 따라 전자 이동에 방해가 받게 되고 이에 따라 전기 저항이 가파르게 상승하는 것으로 판단된다.

유연 전극의 비틀림 변형시, 비틀림 각도가 동일할지라도 시편의 모양에 따라 각기 다른 응력이 발생하게 된다. 비틀림 변형 시 시편의 모양에 따라 전기적 신뢰성 변화에 대해 실험을 진행하였다. Fig. 3(a)는 폭의 길이를 고정된 상태로 길이의 영향을 확인하기 위해 ITO 시편을 20 mm × 20 mm, 20 mm × 40 mm, 20 mm × 80 mm 크기로 준비하고, 각각의 전기 저항의 변화를 비틀림 각도에 따라 도식화한 그래프이다. 일반적으로 전자제품의 전기적 파괴가 20%의 저항증가일 때를 고려하여 본 실험 역시 20% 저항 증가를 전기적 파괴로 규정하였고 각 그래프에서 전기적 파괴가 발생하였을 때 상황을 빨간 점선으로 표시하였다. 길이에 따른 영향을 알아보기 위해 동일 폭의 시편을 이용해 비틀림 실험을 진행한 결과, 20 mm × 20 mm 크기의 시편은 40°에서, 20 mm × 40 mm 크기의 시편은 80°에서, 20 mm × 80 mm 크기의 시편은 175°에서 전기적 파괴가 일어났다. Fig. 3(b)는 시편의 길이를 고정된 상태로 폭이 변화할 때 전기적 신뢰성을 알아보기 위해 10 mm × 40 mm, 20 mm × 40 mm, 40 mm × 40 mm 크기의 3가지 시편의 비틀림 각도에 따른 전기 저항을 나타낸 그래프이다. 10 mm × 40 mm 크기 시편에서는 135°에서, 20 mm × 40 mm 크기 시편에서는 80°에서,

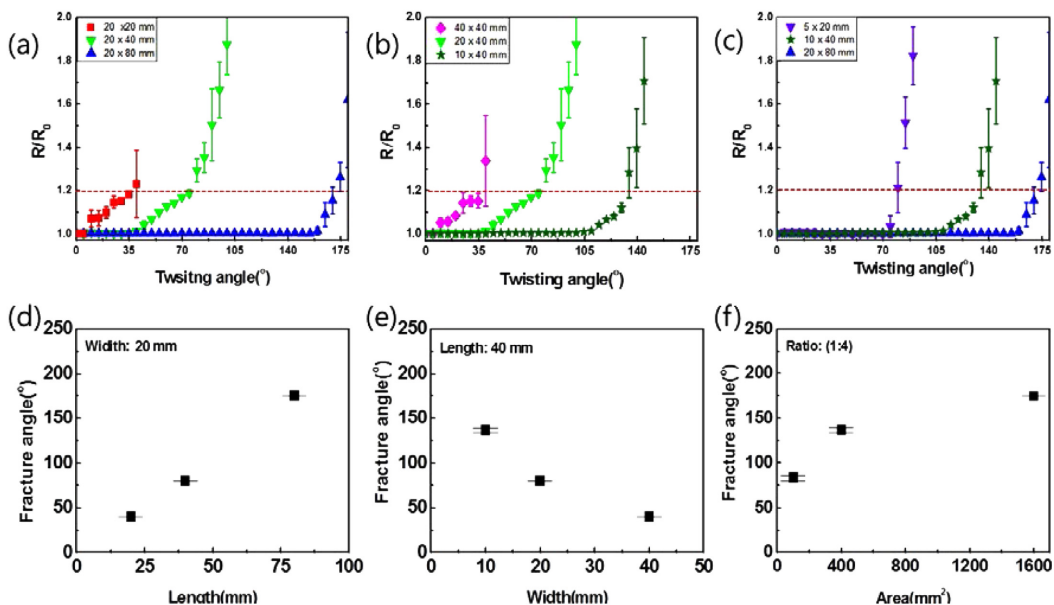


Fig. 3. Electrical resistance changes as a function of twisting angle for the sample with (a) different length, (b) different width, and (c) different area. Fracture angle during twisting deformation as a function of (d) length, (e) width, and (f) area.

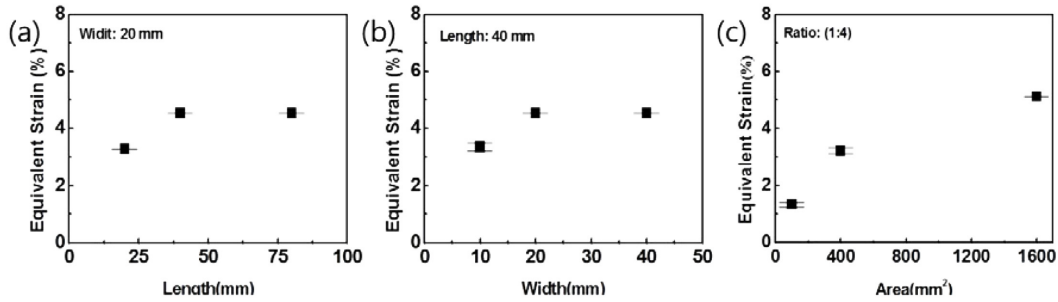


Fig. 4. Equivalent strain calculated from fracture angles during twisting as a function of (a) length, (b) width, and (c) area.

40 mm × 40 mm에서 40°에서 각각 전기적 파괴가 일어났다. Fig. 3(c)는 비율이 1:4로 일정할 때 시편의 크기 즉 면적의 영향을 확인하기 위해 시편을 5 mm × 20 mm, 10 mm × 40 mm, 20 mm × 80 mm로 준비하여, 시편의 저항변화를 비틀림 각도에 따라 도식화한 그래프이다. 전기저항의 변화를 측정해본 결과 5 mm × 20 mm 크기 시편에서는 85°에서, 10 mm × 40 mm는 135°에서, 20 mm × 80 mm는 175°에서 각각 전기적 파괴가 일어났다. Fig. 3(d)는 시편의 폭은 20 mm로 고정한 채 길이만 변화했을 때 비틀림 파괴 각도를 도식화한 그래프로, 폭이 일정할 때, 길이가 짧아질수록 비틀림 파괴에 취약한 것으로 나타났다. Fig. 3(e)는 폭에 따른 비틀림 파괴각도를 나타낸 그래프로, 길이가 일정할 때, 폭이 커지면 더 빠르게 파괴가 일어나고 기울기는 음의 방향으로 나타났다. Fig. 3(f)는 동 비율에서 면적에 따른 비틀림 파괴각도를 나타낸 그래프로, 길이와 폭의 비율(1:4)이 일정할 때, 면적이 작을수록 더 빠르게 파괴가 일어나는 것을 의미한다.

각각의 시편 모양과 비틀림 파괴 각도와와의 관계를 살펴보기 위해, 각각의 상황에서 발생하는 응력을 계산하였다. 유연 소자용 전극의 비틀림 변형 중 발생하는 응력은 다음 수식과 같다.¹⁰⁾

$$\epsilon_{equivalent} = \frac{1}{\sqrt{2(1+\nu)}} \sqrt{2 \left\{ \sqrt{1 + \left(\frac{e \cdot x}{L_0} \right)^2} - 1 \right\}^2 + \frac{3}{2} \left(\frac{\theta \cdot t}{L_0} \right)^2} \quad (1)$$

여기서 ν 는 Poisson's ratio, θ 비틀림 각도, x 는 시편 중앙에서부터 움직이는 호의길이, L_0 는 시편의 처음길이, t 시편의 두께입니다. Fig. 3에서 얻은 비틀림 파괴 각도를 위의 수식을 통해 Equivalent strain으로 변환하여 Fig. 4에 나타내었다. Fig. 4(a), (b), (c)는 각각 길이, 폭, 면적에 따라 비틀림 파괴가 발생했을 때 Equivalent strain을 나타내고 있다. Fig. 4(a)를 보면 ITO 시편의 길이에 따라 비틀림 파괴에 해당하는 equivalent strain은 약간 증가하는 경향을 보이나, 사실 3~4% 근처의 비슷한 값을 보이고 있다. 또한 Fig. 4(b)의 폭에 대한 파괴 변형률 역시 약간 증가하는 경향이나 3% 내외의 값을 나타내고 있다. 이는 ITO 시편의 비틀림 파괴는 약 3%에 해당하는 임계 변

형률에 다다랐을 때 일어나는 현상이라는 것이라 주장할 수 있다. Fig. 4(c)에 나타난 면적에 따른 파괴 변형률은 증가하는 경향을 보이나 역시 3~4% 근처의 변형률을 보이고 있다. 즉, 특정 임계 변형률에 이르렀을 때 ITO 필름에 소성 변형 및 crack 형성이 시작되고 이에 따라 전기 저항이 증가하여 파괴에 이르게 되는 것이다. 면적이 가장 작은 5 mm × 20 mm 크기 시편의 경우, 특히 작은 파괴 변형률을 나타냈는데 이는 시편의 크기가 너무 작다 보니 시편을 파지하는 그림 근처에서 응력 분포가 다르게 발생하고 이와 같은 부분이 비틀림 변형이 중첩되면서 다른 시편들과는 다르게 더 일찍 파괴가 일어난 것으로 추정된다.

4. 결 론

유연 전자 소자용 ITO 필름의 비틀림 변형 중 전기적 신뢰성에 대해 연구를 진행하였다. 각기 다른 폭, 길이, 면적을 가지는 시편을 준비하여, 비틀림 변형 중 전기 저항 변화를 실시간으로 관찰하였다. 비틀림 변형이 심해짐에 따라 ITO 필름에는 짧은 크랙이 형성되었고, 이에 따라 전기저항이 증가하기 시작하였다. 계속된 비틀림 변형에 의해 크랙의 길이가 길어지고 전기 저항은 급격하게 증가하였다. 다양한 형태의 ITO 필름의 비틀림 변형 신뢰성을 평가한 결과, 길이가 짧을수록, 폭이 클수록, 면적이 넓을수록 전기적 파괴가 급격하게 발생하였다. 이와 같은 파괴 거동을 equivalent strain을 이용한 파괴 변형률을 계산하여 정량화 해본 결과 대략 3~4% 정도의 임계 변형률에 다다랐을 경우 ITO 필름의 파괴가 나타나는 것을 확인하였다. 본 연구를 통해 향후 유연 전자 소자에 ITO 필름을 적용할 경우, 최대 가능한 기계적 변형을 제시할 수 있으며, 또한 고신뢰성 유연 전자 소자를 위한 모양 설계 가이드라인으로 활용될 수 있을 것으로 기대한다.

감사의 글

이 논문은 안동대학교 기본연구지원사업에 의하여 연

구되었음.

References

1. J. Y. Choi, D. W. Park, and T. S. Oh, "Variation of Elastic Stiffness of Polydimethylsiloxane (PDMS) Stretchable Substrates for Wearable Packaging Applications", *J. Microelectron. Packag. Soc.*, 21(4), 125 (2014).
2. J. Y. Choi, D. H. Park, and T. S. Oh, "Chip Interconnection Process for Smart Fabrics Using Flip-chip Bonding of SnBi Solder", *J. Microelectron. Packag. Soc.*, 19(3), 71 (2012).
3. J. I. Lee, "A study on the Flexible Display; Technology Design Convergence", *KOREA SCIENCE & ART FORUM*, 18, 519 (2014).
4. S. J. Bae, "An Analysis of Mobile Display Industries(in Kor)", *Journal of Korea Technology Innovation Society*, 5(3), 396 (2002).
5. K. Alzoubi, M. M. Hamasha, S. Lu, and B. Sammakia, "Bending Fatigue Study of Sputtered ITO on Flexible Substrate", *Journal of display technology*, 7(11), 593 (2011).
6. S. H. Choa, K. T. Eun, S. I. Oh, M. Y. Lee, J. W. Kang, D. G. Kim, and S. H. Jeong, "Experimental Study for Improving Mechanical Reliability of Flexible ITO Films(in Kor)", *The Korean Society of Mechanical Engineers*, 3205 (2011).
7. T. C. Li, C. F. Han, K. T. Chen, and J. F. Lin, "Fatigue Life Study of ITO/PET Specimens in Terms of Electrical Resistance and Stress/Strain Via Cyclic Bending Tests", *Journal of display technology*, 9(7), 577 (2013).
8. C. Y. Lim, J. K. Park, Y. H. Kim, and J. I. Han, "Mechanical and Electrical Stability IndiumTin-Oxide Coated Polymer Substrates under Continuous Bending Stress Condition", *Journal of International Council on Electrical Engineering*, 2(3), 237 (2012).
9. T. C. Li, and J. F. Lin, "Fatigue life study of ITO/PET specimens in cyclic bending tests", *Journal of Materials Science: Materials in Electronics*, 26(1), 250 (2015).
10. J. K. Yang, Y. J. Lee, S. M. Yi, B. J. Kim, and Y. C. Joo, "Effect of twisting fatigue on the electrical reliability of a metal interconnect on a flexible substrate", *Journal of Materials Research*, <https://doi.org/10.1557/jmr.2017.422> (2017).