

## 초박형 유리층 보호를 위한 펜 낙하 시험의 기계적 모델링

오은성<sup>1</sup> · 오승진<sup>1</sup> · 이선우<sup>1</sup> · 전승민<sup>2</sup> · 김택수<sup>1,†</sup>

<sup>1</sup>KAIST 기계공학과

<sup>2</sup>SK Innovation Co. Ltd.

### Mechanical Modeling of Pen Drop Test for Protection of Ultra-Thin Glass Layer

Eun Sung Oh<sup>1</sup>, Seung Jin Oh<sup>1</sup>, Sun-Woo Lee<sup>1</sup>, Seung-Min Jeon<sup>2</sup>, and Taek-Soo Kim<sup>1,†</sup>

<sup>1</sup>Department of Mechanical Engineering, Korea Advanced Institute of Science and Technology (KAIST)

<sup>2</sup>SK Innovation Co. Ltd.

(Received September 13, 2022: Revised September 27, 2022: Accepted September 28, 2022)

**초 록:** 초박형 유리(Ultra-Thin Glass, UTG)는 디스플레이 보호용 커버 윈도우로 폴더블(foldable) 디스플레이에 사용되고 있으며, 향후에는 롤러블(rollable) 디스플레이나 다양한 플렉시블(flexible) 전자기기에 확대 적용될 것으로 예상되고 있다. 폴더블 디스플레이의 경우, 사용자들에 의해 굽힘과 터치 펜에 의해 충격을 받게 되고, 이 외에도 낙하 등 다른 외부 충격에 쉽게 노출되어 있다. 초박형 유리는 100  $\mu\text{m}$  이하로 두께가 얇고 취성하여 여러 외부 충격에 의해 쉽게 균열이나 파단이 발생할 수 있고, 이러한 균열이나 파단은 폴더블 디스플레이에 심각한 신뢰성 문제를 야기한다. 따라서, 본 연구에서는 초박형 유리의 내충격 신뢰성을 평가하는 펜 낙하 실험을 위한 요소 모델로 구성하고, 초박형 유리의 내충격 신뢰성을 향상시키기 위한 기계적 모델링을 진행하였다. 초박형 유리층 상부 혹은 하부에 보강층을 삽입했을 때, 펜 낙하에 의해 초박형 유리층에 작용하는 응력 메커니즘을 분석하였고, 그에 따라 신뢰성 향상을 위한 최적의 구조를 제시하였다. 또한 초박형 유리의 강도에 따른 최대 펜 낙하 높이를 예측할 수 있도록 펜 낙하 높이에 따라 초박형 유리층에 작용하는 최대 주 응력 값을 분석하였다.

**Abstract:** Ultra-thin glass (UTG) has been widely used in foldable display as a cover window for the protection of display and has a great potential for rollable display and various flexible electronics. The foldable display is under impact loading by bending and touch pen and exposed to other external impact loads such as drop while people are using it. These external impact loads can cause cracks or fracture to UTG because it is very thin under 100  $\mu\text{m}$  as well as brittle. Cracking and fracture lead to severe reliability problems for foldable smartphone. Thus, this study constructs finite element analysis (FEA) model for the pen drop test which can measure the impact resistance of UTG and conducts mechanical modeling to improve the reliability of UTG under impact loading. When a protective layer is placed to an upper layer or lower layer of UTG layer, stress mechanism which is applied to the UTG layer by pen drop is analyzed and an optimized structure is suggested for reliability improvement of UTG layer. Furthermore, maximum principal stress values applied at the UTG layer are analyzed according to pen drop height to obtain maximum pen drop height based on the strength of UTG.

**Keywords:** Ultra-Thin Glass (UTG), Finite Element Analysis Modeling, Pen Drop Test, Protective Layer

## 1. 서 론

다양한 폼팩터(form factor)를 가지는 폴더블(foldable) 디스플레이가 출시되고 고객들로부터 인기를 얻게 되면서, 앞으로 시장 규모가 더욱 커질 것으로 예상되고 있다.<sup>1,2)</sup> 이러한 폴더블 디스플레이 보호를 위해 커버 윈도우로 두께가 100  $\mu\text{m}$ 이하인 초박형 유리(Ultra-Thin Glass, UTG)

가 사용되고 있고, 경쟁 관계에 있던 투명 폴리이미드 필름보다 UTG가 디스플레이 회사들에게 선택됨에 따라 UTG의 중요성이 점점 더 커지고 있다. 더욱이, UTG는 폴더블 디스플레이 이외에도 롤러블(rollable) 디스플레이나 다른 플렉시블(flexible) 전자기기에 활용 가능성을 가지고 있다.<sup>3-6)</sup>

UTG는 투명 폴리이미드 필름에 비해 주름이 적게 생

<sup>†</sup>Corresponding author  
E-mail: [tskim1@kaist.ac.kr](mailto:tskim1@kaist.ac.kr)

© 2022, 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.

기고, 심미성이 좋으며 경도가 높아 스크래치에 강하다는 장점이 있다. 하지만, 폴더블 디스플레이의 경우 사용도중 굽힘과 터치 펜에 의해 반복적인 충격을 받게 되고, 낙하와 같은 여러 외부 충격에 노출되게 된다. UTG는 취성할 뿐만 아니라 두께가 얇아 이러한 충격들에 의해 크랙이나 파단이 발생할 수 있다. 이렇게 발생한 크랙과 파단은 플렉시블 디스플레이의 신뢰성에 큰 문제를 야기한다.<sup>7-11)</sup> 이를 해결하기 위해서는 UTG의 내충격 신뢰성을 평가하는 것이 중요한데, 기존에 사용하는 실험 방법인 펜 낙하 시험(pen drop test)의 경우, 많은 비용, 재료와 시간을 요구함과 동시에 펜 사용 횟수 등이 규격화되어 있지 않아, 실험 데이터 값들 간에 상호 비교가 어려워 데이터 유효성을 확보하기가 어렵다는 단점이 있다.<sup>12)</sup>

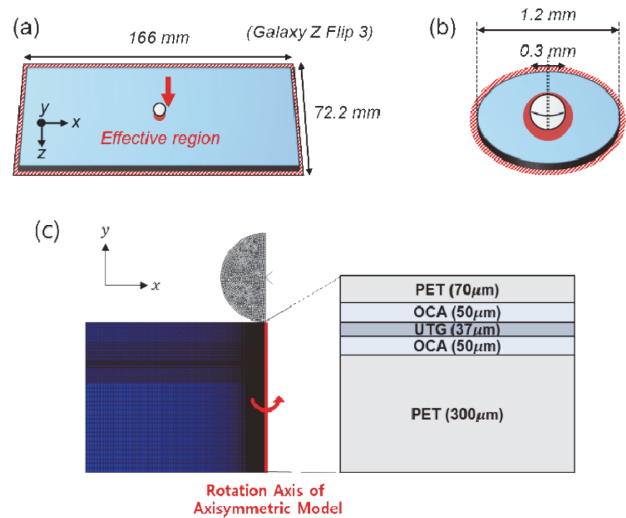
따라서, 본 연구에서는 유한 요소 모델링을 통해 펜 낙하 실험을 효과적으로 모사하여 재료와 비용, 시간 낭비를 줄이고, 규격화되지 않은 펜 낙하 실험에 의해 발생하는 실험 데이터의 낮은 유효성 단점을 보완하였다.<sup>13)</sup> 그리고 발생할 수 있는 폴더블 디스플레이의 신뢰성 문제를 해결하기 위해 취성한 물질인 UTG 층에 걸리는 최대 주 응력 값을 최소화할 수 있는 구조를 모색하였다. 따라서, UTG층의 상부와 하부에 보강층(protective layer)을 도입하여 펜 낙하에 의해 UTG층에 작용하는 응력 메커니즘을 분석하였고, 펜 낙하 높이에 따라 펜이 최대로 압입되었을 때 UTG 층 바닥에 걸리는 최대 주 응력 값을 분석하여 UTG의 파단 강도에 따라 최대 펜 낙하 높이를 예측할 수 있도록 하였다. 본 연구에서 진행한 UTG층에 대한 기계적 모델링은 폴더블 디스플레이에 국한되지 않고, UTG를 사용하는 다양한 폼팩터를 가지는 플렉시블 전자 기기의 신뢰성 향상 연구에 기여할 수 있을 것이다.

## 2. 방 법

### 2.1. 펜 낙하 시험 축대칭 모델링

펜 낙하 시험을 유한 요소 기법을 이용하여 모델링하기 위해 FEA(Finite Element Analysis) 상용 툴인 ABAQUS/Standard 6.24 버전의 explicit 모델링에서 dynamic solver를 사용하였다. 실제 UTG의 가로와 세로 값을 반영한 3D 모델링을 진행할 경우 많은 수의 요소 수를 필요로 하여 펜 낙하에 의해 응력이 발생하는 하는 부분은 매우 작은 영역에 국한됨에도 불구하고 많은 시간을 소요하게 된다.<sup>14)</sup> 따라서, 효율적인 모델링을 구축하기 위해 3D 모델링이 아닌 축대칭 모델링을 진행하였고, 이를 Fig. 1에 나타냈다.

응력이 발생하는 영역을 모두 포함하기 위해 UTG 복합체의 지름을 늘려가면서 진행한 수치 해석 결과, UTG 층 바닥에서 발생하는 최대 주 응력 값이 펜 축의 지름의 4배일 때부터 수렴하여 복합체의 지름은 펜 축의 지름의 4배로 설정하였다. 단일 UTG에 펜을 낙하하는 것이 아니라 실제 펜 낙하 실험을 모사하여, polyethylene terephthalate (PET)와 optically clear adhesive (OCA)로 구성된



**Fig. 1.** (a) Schematic of 3D modeling. (b) Schematic of axisymmetric modeling. (c) Finite element (FE) axisymmetric modeling.

**Table 1.** Mechanical properties of PET, UTG and protective layer for elastic simulation

	Thickness (μm)	Young's modulus (GPa)	Poisson's ratio
PET	70/300	5	0.3
UTG <sup>15)</sup>	37	72	0.2
Protective layer	20	0.8	0.45

**Table 2.** Mechanical properties of OCA layer for hyper-elastic simulation

Arruda-Boyce	Thickness (μm)	μ	λ <sub>m</sub>	D
OCA	50	43.59	7	0.0046875

복합체 형태로 모델링하였다. PET, UTG와 보강층의 경우에는 탄성 조건으로 가정하였고, OCA의 경우, 펜 낙하에 의한 과도한 변형을 막기 위해 초탄성 조건 중 Arruda-Boyce 모델로 가정하였다. 각 층에 대한 정보는 Table 1과 Table 2에 표기하였다.

### 2.2. UTG복합체 요소망과 펜 축 강체 모델링

PET, OCA, UTG로 구성된 UTG 복합체 요소망은 가로 모서리는 by size method와 single bias 옵션을 이용하였고, 세로 모서리는 by number method를 사용하였으며 이를 Fig. 2에 나타냈다. 펜 축의 경우, 지름 0.3 mm의 구 형태의 강체 볼로 모델링하였다. 볼을 강체로 모델링하는 것의 유효성을 검증하기 위해, 볼이 강체로 모델링 되었을 때와 steel type stainless (STS) (Young's Modulus = 200 GPa, Poisson's ratio = 0.3, Density = 0.410 kg/mm<sup>3</sup>)로 구성된 탄성체로 볼을 모델링했을 때, 볼이 최대 압입되었을 시에 UTG층 바닥에 걸리는 최대 주 응력 값을 서로 비교하여

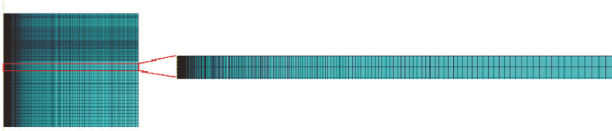


Fig. 2. FE modeling mesh of UTG complex.

Table 3. Maximum principal stress in case of rigid ball and elastic ball

Pen drop height: 60mm	Rigid ball	Elastic ball
Maximum Principal Stress (GPa)	5.392	5.300

Table 3에 나타났다. 최대 주 응력 값의 차이가 약 1.74%로 차이가 미미함을 확인하였고, 볼을 강체로 모델링하는 것이 타당함을 증명하였다.

### 3. 실험결과 및 고찰

보강층 없이 UTG 층만 있을 때와 UTG층 상부, 하부에 보강층을 삽입했을 때 UTG층에 작용하는 최대 주 응력의 최대값, 즉 볼이 UTG 복합체에 최대 압입됐을 때 UTG층의 바닥에서 발생하는 최대 주 응력 값을 비교하여 Fig. 3에 나타났다(펜 낙하 높이: 60 mm). UTG 층 바닥에서 발생하는 최대 주 응력 값은 상부 보강, 무 보강, 하부 보강 순으로 증가하는 경향을 확인할 수 있었다. 이는 Table 4에 나와 있듯이 UTG층 바닥의 곡률 값과 일치하는 경향임을 확인할 수 있고, 보강층 도입에 있어서 최적 구조는 상부 보강임을 알 수 있다.

보강층이 없는 UTG복합체를 대조군으로 했을 때, 보강층 위치에 따른 최대 주 응력 값의 경향은 Table 5에 나와있듯이 회전축 경로 상에서 UTG 층 바닥의 상대적 위치, 굽힘 강성, 중립면의 이동으로 설명할 수 있다. 회전축 경로 상에서 UTG층 바닥의 상대적 위치의 감소, 굽힘 강성의 감소, UTG층 바닥과 중립면 사이의 거리의 증가

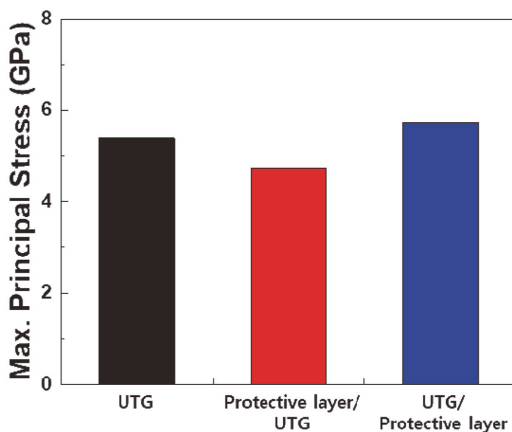


Fig. 3. Maximum principal stress at the bottom of UTG layer in three structures when pen drop height is 60 mm.

Table 4. Maximum principal stress and curvature at the bottom of UTG layer in three structures

At the bottom of UTG layer	UTG	Protective layer/UTG	UTG/Protective layer
Maximum principal stress (GPa)	5.392	4.721	5.727
Curvature (mm <sup>-1</sup> )	2.323	1.949	2.417

Table 5. Three factors related to curvature at the bottom of UTG layer in UTG complex

Factors	Increase of curvature at the bottom of UTG layer
Relative position of bottom of UTG layer on rotation axis	↓
Bending rigidity	↓
Distance from neutral plane to bottom of UTG layer	↑

가 UTG 층 바닥의 곡률 증가에 기여한다. 먼저 UTG 복합체는 볼 충돌 지점에서는 볼과 동일한 곡률을 가지고, 복합체 바닥에서는 곡률 값이 0이 되어야 하기 때문에 회전축 경로 상에서 볼 충돌 지점을 시작점으로 하는 상대적 위치 값이 증가함에 따라 곡률이 점점 0으로 수렴하게 된다. 따라서, 가장 큰 최대 주 응력 값이 발생하는 UTG 층 바닥이 회전축 경로 상에서 큰 상대적 위치 값을 가지면 더 작은 곡률을 가지게 되어 더 작은 최대 주 응력 값을 가지게 된다. 굽힘 강성의 경우, OCA가 변형률 분리(strain decoupling)를 일으키기 때문에, OCA 사이의 구조에 대해 고려해야 한다.<sup>16,17)</sup> OCA 사이의 구조를 구성하는 재료의 영률(Young's modulus)과 단면 이차 모멘트에 따라 굽힘 강성이 변하고 이에 따라 굽힘 강성이 증가하면, 더 작은 최대 주 응력 값을 가지게 된다. 중립면의 경우, 보강층 삽입에 따른 중립면의 이동이 발생하게 되고, 중립면의 위치가 UTG층 바닥과 가까워질수록 더 작은 최대 주 응력 값을 가지게 된다.

상부에만 보강했을 때는 대조군에 비해 곡률이 감소하여 최대 주 응력 값이 감소하였다. Fig. 4에 나와있듯이, 회전축 경로 상 UTG층 바닥의 상대적 위치에서 대조군은 0.227, 상부 보강은 0.251로 대조군에 비해 더 큰 값을 가져 UTG층 바닥의 곡률을 감소시키는 역할을 한다. 하지만 Table 6에 나와있듯이 OCA 사이 구조가 UTG로만 구성될 때보다 보강층과 UTG로 구성되었을 때, UTG의 영률 대비 복합재료의 영률의 감소 비율이 이차 모멘트의 증가 비율보다 큼에 따라 굽힘 강성이 감소하고, 중립면이 UTG층 하부로부터 멀어지게 되어 UTG층 바닥의 곡률을 증가시킨다. 따라서, 굽힘 강성과 중립면의 이동에 의한 곡률 증가보다 회전축 경로 상 UTG층 바닥의 상대적 위치 증가에 의한 곡률 감소가 더 큰 영향을 주는 인자임을 확인할 수 있다.

하부에만 보강했을 때는 대조군에 비해, 회전축 경로 상 UTG층 바닥의 상대적 위치가 0.227에서 0.220으로 감소하여 곡률을 증가시키는 역할을 한다. 굽힘 강성은 감소하여 곡률을 증가시키려 하고, 중립면의 이동은 곡률을 감소시키고자 하지만, 앞서 상부 보강의 경우를 고려해 봤을 때, 이 두 인자에 의한 곡률의 변화는 미미하고, 회전축 경로 상 UTG 층 바닥의 상대적 위치에 의한 곡률 증가가 주된 영향을 주었음을 알 수 있다.

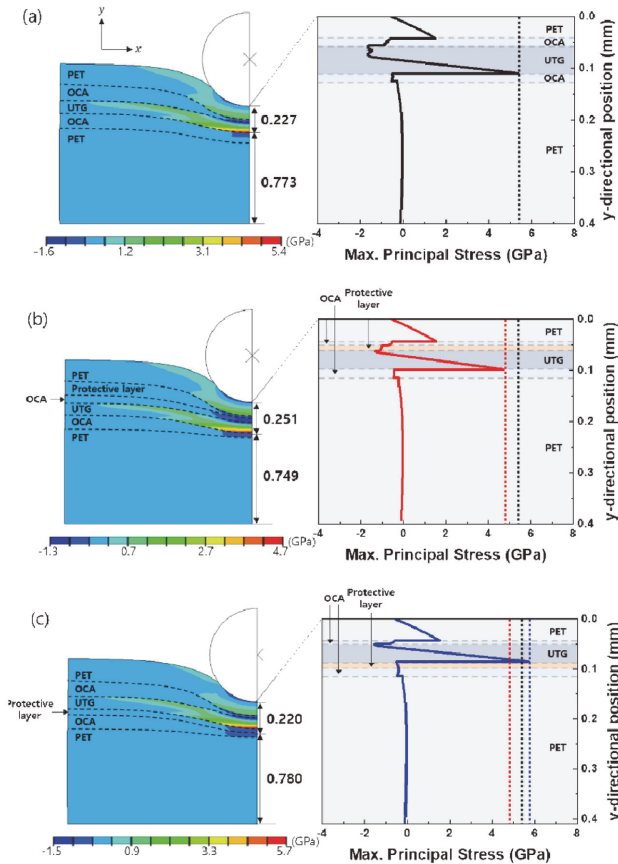


Fig. 4. FEA results of maximum principal stress distribution along y-directional position on rotation axis and relative position of bottom of UTG layer on rotation axis in three structures.

위의 결과를 종합해 보았을 때, UTG층 바닥의 곡률 값의 경우, 회전축 경로 상에서 UTG층 바닥의 상대적 위치에 의해 경향성이 결정된다. 보강층에 의한 굽힘 강성 감소와 중립면 이동이 발생하지만, 충돌 상황에서는 이 두가지 요인의 효과가 앞선 요인에 비해 미미한 것을 알 수 있었다.

각 구조별로 펜 낙하 높이에 따라 UTG층 바닥에 걸리는 최대 주 응력 값과 UTG 파단 강도 문헌 값(4.188GPa)을 Fig. 5에 나타냈다.<sup>18)</sup> 이를 통해 UTG의 파단 강도를 기준으로 각 구조별 최대 펜 낙하 높이를 구할 수 있다. 또한, 모든 구조에 대한 그래프가 자연로그 그래프 형태를 가지고 있으며, 보강에 따라 그래프가 y축으로 평행이동 하는 것을 Table 7에서 확인할 수 있다. 본 연구에서 구한 맞춤 자연로그 방정식을 통해 보강층이 삽입된 임의의 구조에서 한 높이에 대한 최대 주 응력 값을 구한다면, 다른 낙하 높이에서의 최대 주 응력 값을 예측할 수 있다. 예를 들어, 임의의 보강 구조에서 펜 낙하 높이 60 mm에 대해 5 GPa의 최대 주 응력 값을 얻었다면, 맞춤 자연로그 방정식에서 a값은 -3.38가 된다. 따라서, 원하는 펜 낙하 높이를 x에 대입하여 해당 높이에서 최대 주 응력을 수치 해석 과정 없이 쉽게 구할 수 있다.

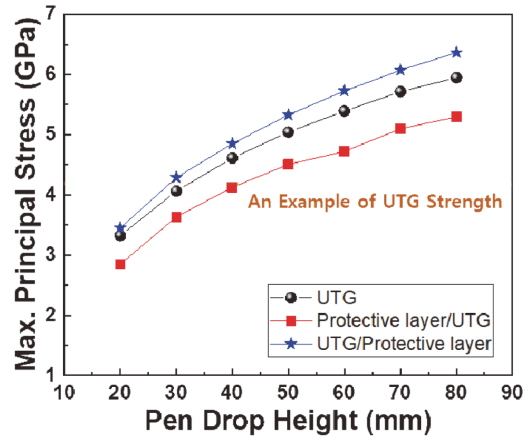


Fig. 5. Maximum principal stresses in three structures as function of pen drop height.

Table 6. Bending rigidity and distance from neutral plane to bottom of UTG layer in the three structures

Structures	UTG	Protective layer/UTG	UTG/Protective layer
Bending rigidity (GPa·mm <sup>4</sup> /m)	3.03×10 <sup>-4</sup>	2.07×10 <sup>-4</sup>	2.07×10 <sup>-4</sup>
Distance from neutral plane to bottom of UTG layer (mm)	0.01850	0.01867	0.01833

Table 7. Fitting natural logarithm equation from FEA results of three structures for expectation of maximum principal stress at any pen drop height

x unit: mm	UTG	Protective layer/UTG	UTG/Protective layer
Fitting natural logarithm equation		$a + 2.028 \times \ln(x + 2.440)$	
a	-2.99	-3.53	-2.70
R-square	0.9995	0.9448	0.9443

## 4. 결 론

본 연구에서는 펜 낙하 시험을 모사하는 축대칭 유한 요소 모델링을 진행하고, UTG 복합체 내에 보강층을 UTG층의 상부, 하부에 삽입했을 때, 볼이 최대로 압입 시, UTG 층 바닥에 가해지는 최대 주 응력 값을 계산하였다. 이를 통해 펜 낙하에 의해 UTG 층에 가해지는 응력 메커니즘을 UTG층 바닥의 곡률 값을 통해 분석하였다. 보강층 삽입 시, UTG 층 바닥의 곡률에 영향을 주는 요인을 회전축 경로 상에서 UTG층 바닥의 상대적 위치, 굽힘 강성, 중립면의 이동으로 보았다. 회전축 경로 상에서 UTG층 바닥의 상대적 위치가 최대 주 응력 값의 전체적인 경향성을 결정하는 주요 인자였다. 이에 비해 보강층 삽입에 의한 굽힘 강성 감소와, 중립면 이동의 영향은 미미한 것을 확인하였다.

또한 각 구조별 펜 낙하 높이에 따른 최대 주 응력 값을 계산하여 UTG의 파단 강도가 주어졌을 때, UTG가 파단되지 않는 최대 펜 낙하 높이를 구할 수 있게 하였다. 각 구조에 대한 그래프가 y축으로 평행이동한 자연로그 그래프 형태임을 알아내어 임의의 보강 구조에서 하나의 펜 낙하 높이에서의 최대 주 응력 값을 구하면, 다른 펜 낙하 높이에서의 최대 주 응력 값을 수치 해석 없이 쉽게 구할 수 있게 되었다. 따라서 본 연구는 보강층을 이용해 폴더블 디스플레이에 커버 윈도우로 사용되는 UTG의 신뢰성을 높이거나 낮추는 구조를 알아내고, UTG층에 가해지는 응력 메커니즘을 분석하여 폴더블 디스플레이 신뢰성 향상에 기여할 수 있다. 또한, 파단 강도에 따른 최대 펜 낙하 높이를 예측할 수 있고, 하나의 펜 낙하 높이에서의 최대 주 응력 값을 이용하여 다른 펜 낙하 높이에서의 최대 주 응력 값을 쉽게 구할 수 있어 수치 해석 효율성 증가에 이바지할 수 있을 것이다.

## 감사의 글

본 연구는 (주)SK innovation의 위탁 연구 지원을 받아 수행된 연구결과입니다.

## References

1. E. G. Jeong, J. H. Kwon, K. S. Kang, S. Y. Jeong, and K. C. Choi, "A review of highly reliable flexible encapsulation technologies towards rollable and foldable OLEDs", *J. Inf. Disp.*, 21(1), 19-32 (2020).
2. M. H. Ha, J. K. Choi, B. M. Park, and K. Y. Han, "Highly flexible cover window using ultra-thin glass for foldable displays", *J. Mech. Sci. Technol.*, 35(2), 661-668 (2021).
3. S. J. Oh, B. S. Ma, C. Yang, M. Song, and T. S. Kim, "Mechanical Property Evaluation of Dielectric Thin Films for Flexible Displays using Organic Nano-Support-Layer", *J. Microelectron. Packag. Soc.*, 28(3), 33-38 (2021).
4. J. Wu, C. Yin, J. Zhou, H. Li, Y. Liu, Y. Shen, S. Garner, Y. Fu, and H. Duan, "Ultrathin glass-based flexible, transparent, and ultrasensitive surface acoustic wave humidity sensor with ZnO nanowires and graphene quantum dots", *ACS Appl. Mater. Interfaces.*, 12(35), 39817-39825 (2020).
5. D. Kim, S. S. Shin, S. M. Lee, J. S. Cho, J. H. Yun, H. S. Lee, and J. H. Park, "Flexible and semi-transparent ultra-thin CIGSe solar cells prepared on ultra-thin glass substrate: a key to flexible bifacial photovoltaic applications", *Adv. Funct. Mater.*, 30(36), 2001775 (2020).
6. G. Macrelli, A. K. Varshneya, and J. C. Mauro, "Ultra-thin glass as a substrate for flexible photonics", *Opt. Mater.*, 106, 109994 (2020).
7. S. J. Oh, B. S. Ma, H. J. Kim, C. Yang, and T. S. Kim, "Measurement of Mechanical Properties of Thin Film Materials for Flexible Displays", *J. Microelectron. Packag. Soc.*, 27(3), 77-81 (2020).
8. A. C. Teloken, D. A. Lamb, T. O. Dunlop, and S. J. C. Irvine, "Effect of bending test on the performance of CdTe solar cells on flexible ultra-thin glass produced by MOCVD", *Sol. Energy Mater. Sol. Cells*, 211, 110552 (2020).
9. M. S. Bae, C. Park, D. Shin, S. M. Lee, and I. Yun, "Effects of mechanical stresses on the reliability of low-temperature polycrystalline silicon thin film transistors for foldable displays", *Solid-State Electron.*, 133, 1-5 (2017).
10. M. G. Kim, Y. M. Kim, and S. Y. Han, "Mechanical Reliability Prediction of Foldable Displays Using Subcritical Crack Growth in Siloxane-Based Cover Window by Two-Point Bending Test", *Int. J. Precis. Eng. Manuf.*, 1-13 (2022).
11. S. M. Lee, C. Park, and I. Yun, "Crack-guided effect on dynamic mechanical stress for foldable low temperature polycrystalline silicon thin film transistors", *Microelectron. Reliab.*, 64, 84-87 (2016).
12. S. Bouzid, A. Nyongue, Z. Azari, N. Bouaouadja, and G. Pluvinage, "Fracture criterion for glass under impact loading", *Int. J. Impact Eng.*, 25(9), 831-845 (2001).
13. B. S. Ma, W. Jo, W. Kim, and T. S. Kim, "Mechanical Modeling of Rollable OLED Display Apparatus Considering Spring Component", *J. Microelectron. Packag. Soc.*, 27(2), 19-26 (2020).
14. H. S. Kim, B. K. Ha, B. Y. Yoo, H. S. Jeong, and S. H. Park, "Numerical prediction of dynamic fracture strength of edge-mounted non-symmetric tempered glass panels under steel ball drop impact", *J. Mater. Res. Technol.*, 17, 270-281 (2022).
15. H. C. Cheng, K. H. Li, C. Y. Shih, and W. H. Chen, "Characterization of the Flexural Strength and Fatigue Life of Ultra-thin Glass After Dicing", *IEEE Trans. Compon. Packag. Manuf. Technol.*, 8(12), 2213-2221 (2018).
16. W. Kim, I. Lee, D. Y. Kim, Y. Y. Yu, H. Y. Jung, S. Kwon, W. S. Park, and T. S. Kim, "Controlled multiple neutral planes by low elastic modulus adhesive for flexible organic photovoltaics", *Nanotechnology*, 28(19), 194002 (2017).
17. T. I. Lee, W. Jo, W. Kim, J. H. Kim, K. W. Paik, and T. S. Kim, "Direct visualization of cross-sectional strain distribution in flexible devices", *ACS Appl. Mater. Interfaces.*, 11(14), 13416-13422 (2019).
18. M. H. Ha, J. K. Choi, B. M. Park, and K. Y. Han, "Highly flexible cover window using ultra-thin glass for foldable displays", *J. Mech. Sci. Technol.*, 35(2), 661-668 (2021).