


# 차세대 디스플레이를 위한 유연 기판의 스크래치 내구성 평가

최세용<sup>1</sup>, 문승재<sup>2</sup>, 이기용<sup>3</sup>, 배병성<sup>1</sup> 

<sup>1</sup> 호서대학교 반도체공학과

<sup>2</sup> 울산과학기술원 반도체 소재, 부품 대학원

<sup>3</sup> (주) 플렉시고

## Evaluation of Scratch Durability of Flexible Substrates for Next-Gen Display

Se-Yong Choi<sup>1</sup>, Seung-Jae Moon<sup>2</sup>, Ki-Yong Lee<sup>3</sup>, and Byung Seong Bae<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Department of Semiconductor Engineering, Hoseo University, Asan 31499, Korea

<sup>2</sup> Graduate School of Semiconductor Materials and Devices, Ulsan National Institute of Science and Technology (UNIST),  
Ulsan 44919, Korea

<sup>3</sup> FlexiGO Inc, Cheonan 31068, Korea

(Received December 23, 2025; Revised January 18, 2025; Accepted January 21, 2025)

**Abstract:** Next-generation display technologies, including rollable and foldable displays, are advancing rapidly, enabling innovative and versatile form factors. Flexible displays predominantly utilize materials such as Polyimide (PI), Colorless Polyimide (CPI), and Thermoplastic PolyUrethane (TPU) due to their exceptional flexibility and durability. However, a significant challenge lies in the lack of standardized criteria for evaluating the durability of these flexible substrates. In this study, the durability of these materials under rolling conditions was investigated. This study establishes a standardized methodology for evaluating flexible materials used in rollable displays. Experiments were performed on PI, including rolling and scratch tests with varying indenter sizes. Friction data from the scratch tests, combined with cross-sectional analyses, were examined using optical microscopy and Scanning Electron Microscopy (SEM). The scratch test results revealed that PI films with lower elastic recovery exhibited distinct damage patterns during rolling cycles, especially when smaller indenter radius were used. As the number of rolling cycles increased, the critical force decreased rapidly. This behavior was attributed to the weakening or breaking of atomic bonds within the film. This was further confirmed by SEM images, which revealed delamination of the film from the surface after rolling.

**Keywords:** Scratch, Rollable display, Film

## 1. 서론

최근 디스플레이 산업이 새로운 성장 기회를 모색하는 과정에서 면적이 자유롭게 변형되는 다양한 폼팩터 디스플레이에 대한 관심이 급증하고 있다 [1]. 그 결과, 롤러블 [2] 및 스트레처블 [3] 디스플레이와 같은 차세대 플렉서블 디스플레이가 현재의 상용화된 폴더블 디스플레이에 이어

✉ Byung Seong Bae; [bsbae3@hoseo.edu](mailto:bsbae3@hoseo.edu)

Copyright ©2025 KIEEME. All rights reserved.  
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.

주목을 받고 있다 [4]. 이러한 새로운 유형의 플렉서블 디스플레이는 기존의 폴더블 디스플레이와 차별화된 특징을 가지고 있으며, 폼팩터 혁신은 향후 디스플레이 산업에 큰 영향을 주게 된다.

이러한 차세대 디스플레이에 요구되는 기판은 얇고 가벼우며 유연한 기판을 활용하도록 설계되었다 [5]. 또한 성공적인 상용화를 위해서는 사용된 유연 기판의 내구성이 중요한 요구 사항으로 반복적으로 형태가 변하거나 물리적인 충격 등에도 초기 상태를 유지할 수 있어야 한다.

일반적으로 사용이 가능한 유연 기판 재료는 폴리이미드 (polyimide, PI) [6], 무색 폴리이미드(colorless polyimide, CPI) [7,8], 열가소성 폴리우레탄(thermoplastic polyurethane, TPU) [9]이 있다. 이 중 PI와 CPI는 고온 저항성과 유연성이라는 적합한 특성으로 롤러블 디스플레이에 가장 적합한 폴리머 재료로 평가되며, TPU 또한 유망한 재료 후보로 등장하고 있다. TPU는 미세 상 분리 구조를 형성할 수 있는 블록 공중합체로, 뛰어난 탄성, 유연성, 화학적 안정성, 내마모성 및 내식성을 특징으로 한다 [10-12].

이와 같은 재료는 차세대 디스플레이에 적합한 고분자 재료로 널리 인정받고 있으나, 플렉서블 디스플레이의 유연 기판의 내구성을 평가하기 위한 변형으로 인한 손상의 근본 원인을 규명하는 것과 정량화를 위한 명확한 표준화된 기준이 부족하여 이를 확립하는 것이 중요한 연구과제로 떠오르고 있다.

따라서 본 연구에서는 일반적으로 사용되는 유연기판인 PI와 TPU가 반복되는 변형에 의한 스트레스와 스크래치와 같은 물리적인 외력에 어떻게 반응하는지에 대한 연구를 하였다. 변형에 의한 스트레스는 ‘(주) 플렉시고’의 유연기판 용 롤링 장비를 활용하였고, 스크래치에 의한 물리적인 외력은 CSM사의 Scratch test 장비를 활용하여 마찰력에 따른 스크래치의 영향과, 광학 현미경과 주사전자 현미경(scanning electron microscope, SEM)을 사용하여 표면 및 단면분석을 진행하였다.

## 2. 실험

### 2.1 사용 재료 및 부착 조건

롤링에 사용된 PI와 TPU 필름은 구김과 밀림 등의 문제를 최소화하기 위해 두루마리 형태의 필름을 재단하여 사용하였다. 롤링이 진행되는 방향을 필름의 가로축으로 지정할 때, PI는 150 mm × 30 mm의 크기로 재단하여 롤링

이 진행되는 샤프트에 10 mm를 겹쳐서 부착하였다.

그림 1(a)는 롤링에 활용된 ‘(주) 플렉시고’의 장비를 보여주며 롤링 시 필름이 겹쳐 두꺼워져 시료의 들뜸을 방지하기 위하여 Z축의 높낮이를 보정하여 필름의 평형 상태를 유지하였다.

필름이 롤링 되는 개략도는 그림 1(b)와 같으며 유연기판을 무빙 플레이트와 샤프트에 부착한 후 20 R의 곡률 반경을 가진 샤프트가 돌아가며 무빙 플레이트를 이동시켜 필름의 롤링이 진행된다. 이 때 롤링은 3단계로 구분되며 1단계는 1초 동안 필름의 롤링이 진행되고, 2단계는 롤링이 된 상태가 1초 유지된 후, 마지막으로 3단계는 롤링된 필름을 다시 초기상태로 복원하는 언롤링 단계가 1초 진행

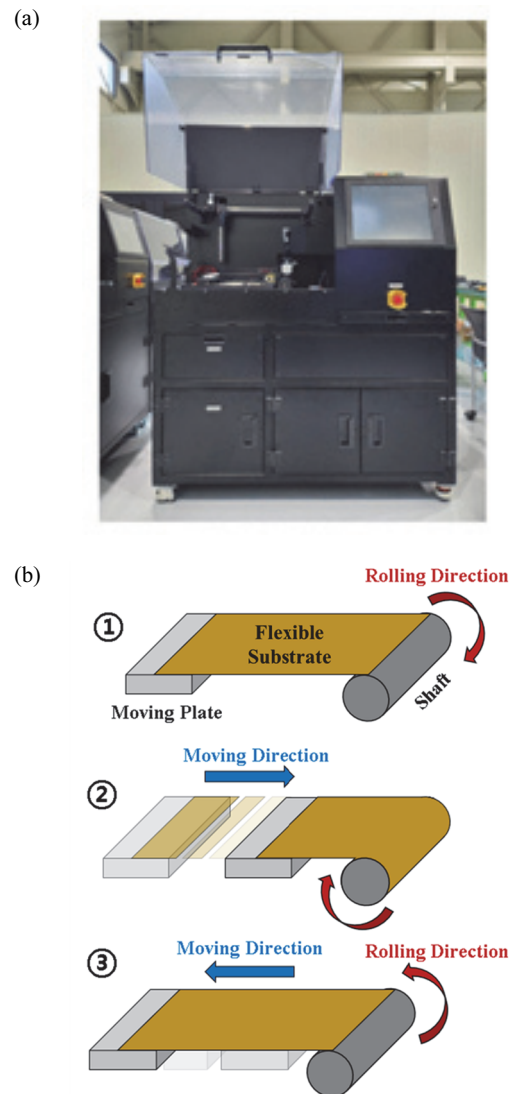


Fig. 1. Rolling test. (a) Rolling equipment and (b) rolling mechanism.

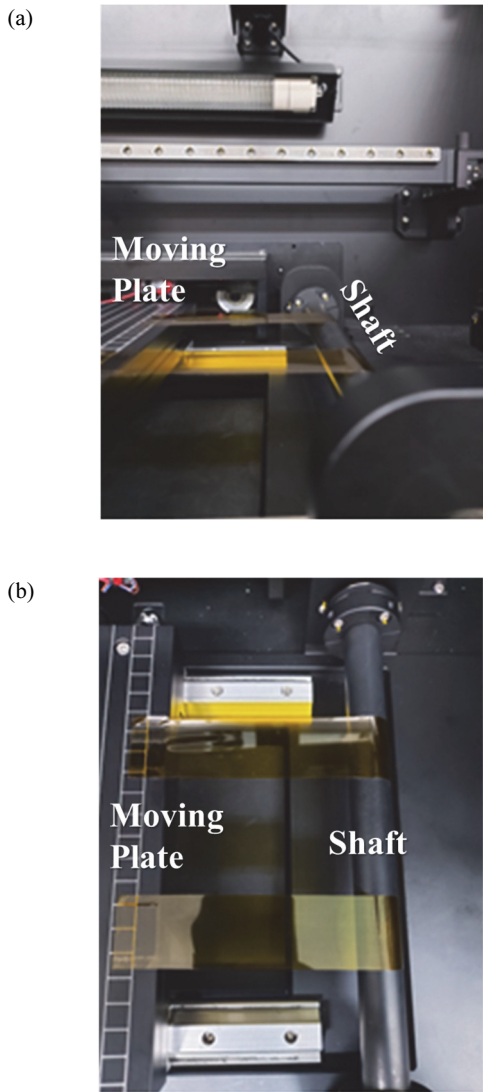


Fig. 2. Image depicting PI film. (a) Side view and (b) top view.

된다. 다음과 같은 3단계를 롤링 1회로 규정하여 0회, 10,000회, 50,000회, 100,000회, 200,000회의 롤링을 인가하여 실험을 진행하였다.

그림 2는 롤링 장비에 유연 기판을 부착한 사진으로 후면에 양면테이프를 붙여 무빙 플레이트와 샤프트에 부착하였다. 부착 후 기판이 말려 구겨지는 것을 방지하기 위해 장비가 보유한 auto tension 기능을 통하여 필름에 장력을 유지하여 롤링을 진행하였다.

2.2 스크래치 테스트 조건 및 스크래치 장비

아래 그림 3은 스크래치 실험 장비 및 분석 방법을 보여

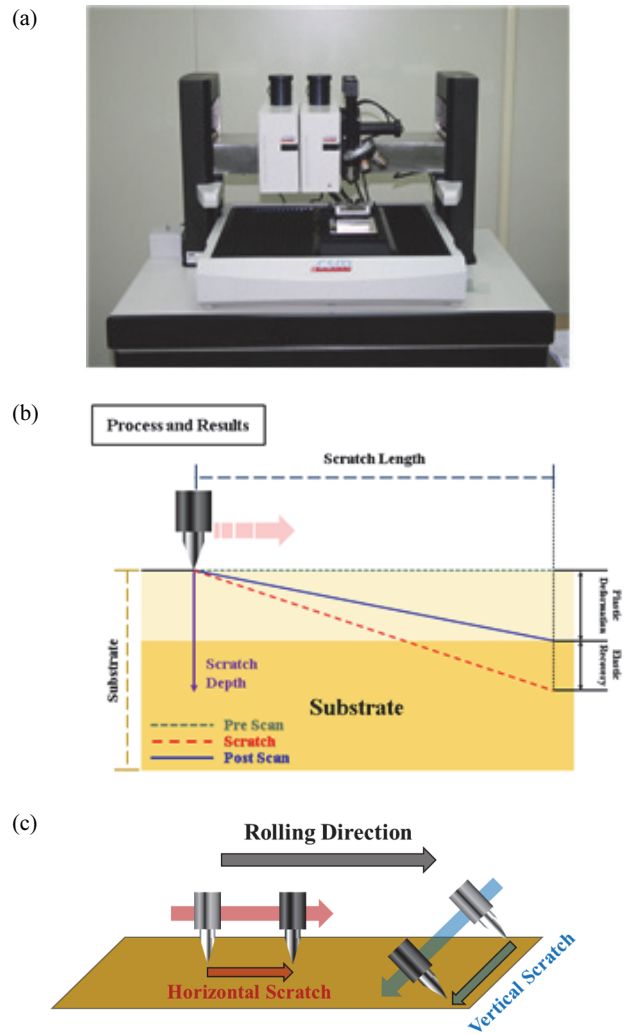


Fig. 3. Scratch test. (a) Scratch equipment, (b) scratch test mechanism, and (c) scratch direction.

준다. 스크래치 테스트는 각 횡수 별로 롤링이 진행된 시료에 표준 ISO\_19252, KS M ISO 19252의 증가 하중 평가 방법을 참고하여 스크래치 평가를 진행하였으며, 스크래치를 인가하는 인덴터의 크기에 따라 실험을 진행하였다. 그림 3(a)는 스크래치에 사용된 장비로 CSM사의 Nano Scratch 장비를 활용하였다. 스크래치 장비에 부착할 수 있는 크기의 한계로 롤링이 된 필름을 다시 10 × 10 mm의 크기로 재단하였고, 스크래치의 길이는 1 mm로 스크래치를 인가하는 인덴터를 1 mm/min의 속도로 하중을 증가해가며 진행하였으며, 하중에 따른 변형률 및 임계하중(critical load)을 정량적으로 분석하였다.

그림 3(b)는 스크래치 테스트의 개략도를 나타낸다. 스

스크래치 테스트는 총 3단계로 진행되며, 1단계는 pre-scan 단계로 0.3 mN의 힘으로 표면 측정 및 초기 표면 깊이의 측정이 진행된다. 2단계는 main scratch 단계로 스크래치가 진행될수록 증가하는 하중을 0 ~ 70 mN으로 증가해 가며 진행된다. 마지막 3단계는 post scan 단계로 main scan이 진행된 곳을 다시 0.3 mN의 힘으로 스크래치를 진행하여 스크래치 후의 표면 깊이를 측정한다.

하중에 따른 변형률은 소성변형과 탄성회복을 사용하여 분석을 하였으며, 소성변형은 외부에서 힘이 가해진 후 회복되지 않고 남은 영구적인 변형으로 1단계의 pre scan에서 측정된 초기 표면 깊이 값에 3단계의 post scan의 스크래치 후 필름이 변형된 높낮이의 차이로 계산한다. 탄성회복은 외부에서 힘이 가해진 후 물체가 원래 상태로 회복하는 성질로 2단계의 main scratch에서 스크래치가 진행된 표면의 깊이에 3단계의 post scan의 스크래치 후 표면의 깊이 차이로 계산된다.

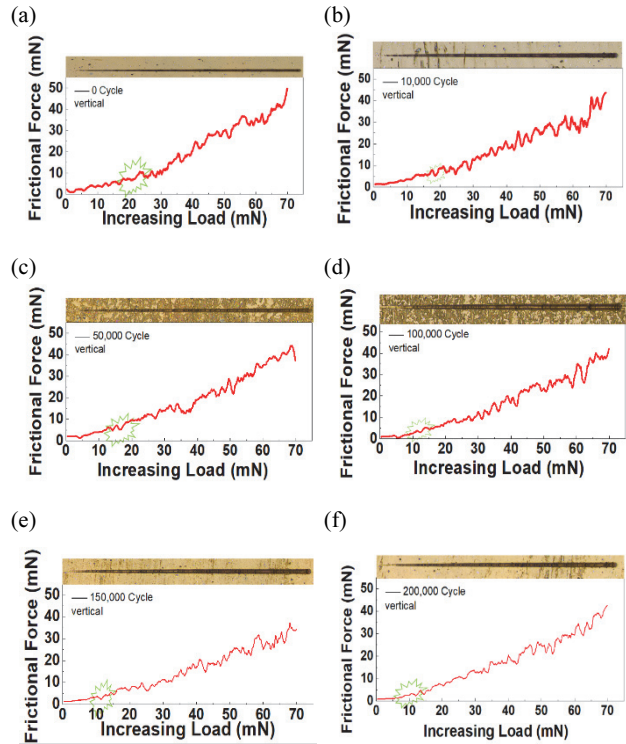
임계하중에 따른 변형은 2단계의 main scratch가 진행될 때 스크래치 테스트 중에 단계적으로 하중을 증가시키면서, 일정 하중에 도달했을 때 코팅이나 필름이 파괴되거나 박리가 시작되는 지점으로 마찰력의 값을 미분하여 기울기의 변화가 최초로 발생한 지점이다. 임계하중은 재료의 여러 중요한 특성과 관련이 있으며, 다양한 물리적 및 기계적 특성의 반영이 가능하다.

그림 3(c)는 스크래치의 진행 방향을 나타내며, 롤링이 진행되는 방향에 대하여 수평 방향인 horizontal scratch와 수직 방향인 vertical scratch로 나누어 진행하였다.

### 3. RESULTS AND DISCUSSION

#### 3.1 PI film의 critical load

그림 4(a) ~ (f)는 PI film의 롤링 횟수에 따라 scratch tester를 통해 2 μm 크기의 인덴터를 사용하여 scratch를 인가하였을 때의 현미경 사진과 frictional force 그래프로 vertical scratch 결과를 나타낸다. 분석 결과 롤링 횟수가 증가할수록 임계하중이 더 낮은 힘에서 발생하였다. 롤링 횟수가 0회일 때는 20.95 mN의 힘일 때 임계하중이 발생했고, 롤링 횟수가 증가하면서 200,000회 일 때 5.60 mN까지 낮아지는 것을 확인하였다. 이러한 결과는 롤링으로 인해 스크래치 저항성이 약해져 기판의 구조적 변형이 누적되어 스크래치 저항성에 부정적인 영향을 가하여 발생한 현상으로 확인된다.



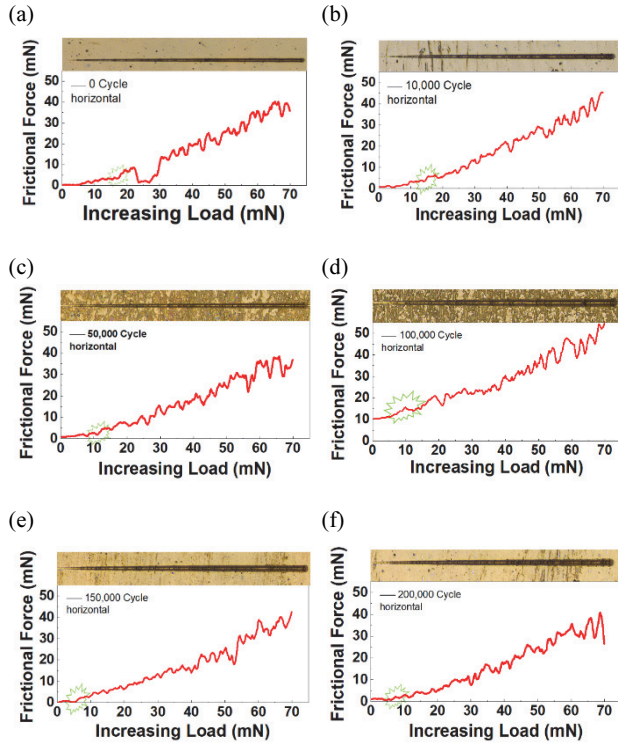
**Fig. 4.** Vertical critical load according to rolling cycles. (a) 0 cycle, (b) 10,000 cycles, (c) 50,000 cycles, (d) 100,000 cycles, (e) 150,000 cycles, and (f) 200,000 cycles.

그림 5(a) ~ (f)는 PI film의 롤링 횟수에 따라 scratch tester를 통해 2 μm 크기의 인덴터를 사용하여 scratch를 인가하였을 때의 현미경 사진과 Frictional Force 그래프로 horizontal scratch 결과를 나타낸다. Horizontal scratch에 대한 결과 또한 vertical scratch의 결과와 마찬가지로 롤링 횟수가 0회일 때 17.49 mN, 200,000회일 때 7.42 mN으로 롤링 횟수가 증가함에 따라 낮은 힘에서 발생함을 관찰하였다.

또한 롤링 횟수가 0회일 때 vertical scratch에서는 20.95 mN의 힘에서 임계 하중이, horizontal scratch에서는 17.49 mN으로 더 낮은 힘에서 관찰되었으며, 롤링 횟수가 10,000회일 때 vertical scratch에서는 19.97 mN의 힘에서 임계 하중이, horizontal scratch에서는 14.52 mN으로 더 낮은 힘에서 관찰되었다. PI film이 scratch 저항에 대해 방향성이 있는 것을 보여 주는데 롤링 방향은 필름의 제조과정에서의 장력이 증가하는 방향이기 때문에 롤링 횟수 0에서도 방향에 따른 차이가 관찰되는 것으로 생각할 수 있다. 롤링이 진행되는 방향은 롤링시의 장력에 의한 필름의 연신 등으로 롤링 방향에 대한

**Table 1.** Critical forces according to the rolling.

Rolling cycle		0	1 k	5 k	100 k	150 k	200 k
Critical load (mN)	Vertical	20.95	19.97	15.61	11.78	9.0	5.60
	Horizontal	17.49	14.52	11.13	8.87	7.41	7.42

**Fig. 5.** Horizontal critical load according to rolling cycles. (a) 0 cycle, (b) 10,000 cycles, (c) 50,000 cycles, (d) 100,000 cycles, (e) 150,000 cycles, and (f) 200,000 cycles.

결합변화가 생기고 스크래치에 대해 취약해지도록 하는 것으로 분석할 수 있으며, 정량적인 분석을 위해 추후 추가적인 연구가 필요하다. 또한 200,000회의 롤링 횟수의 경우 롤링 시 외부적인 오염에 노출되는 시간이 길어 필름 위 particle 등이 증가하는 것이 관찰되었고, 롤링 장비에 오염을 방지하는 추가적인 기능이 요구된다. 롤링 횟수 및 scratch 방향에 따른 임계하중의 총정리는 표 1과 같다.

### 3.2 PI film의 소성 변형 및 탄성 회복

그림 6(a) ~ (f)는 PI film의 롤링 횟수에 따라 scratch

tester를 통해 2  $\mu\text{m}$  크기의 인덴터를 사용하여 vertical scratch를 인가하였을 때의 증가하중에 따른 소성변형과 탄성회복 분석 결과로, 인가되는 하중을 기준으로 롤링 횟수에 따른 변화율을 계산하여 롤링 횟수가 물성에 주는 소성변형과 탄성회복의 영향을 분석하였다.

소성변형은 시료에 scratch를 인가한 후 회복되지 않은 깊이를 의미하며, 롤링을 하지 않은 0회의 시료를 기준으로 롤링 횟수 200,000회를 인가한 시료가 변화한 비율로 측정하였다. 분석 결과 PI film은 10 mN의 힘일 때의 소성 변형 변화율은 63.68% 정도로 측정되었으며, 50 mN 이상의 힘에서는 8.32%의 변화율을 확인하였다. 탄성 회복의 분석은 시료에 scratch를 인가한 후 회복된 깊이를 롤링 200,000회를 인가한 시료를 기준으로 롤링을 가하지 않은 0회 시료가 변화한 비율을 통하여 분석을 진행하였다. 분석 결과 증가 하중 10 mN에서의 탄성 회복 변화율은 21.55% 정도로 측정되었으며, 50 mN에서는 2.24%의 감소율을 확인하였다. 이와 같은 결과는 탄성이 낮은 PI film의 경우 시료가 받는 rolling에 의한 스트레스보다 기판에 가해지는 물리적인 scratch의 영향이 큰 것을 의미하며, 물리적인 스트레스의 경우 일정 하중이 지나면 기판 응력이 한계점에 도달해 변형이 더 이상 크게 진행되지 않고, 변형 및 파괴 영역에 도달하여 변형율이 감소함을 의미한다.

그림 7(a)~(f)는 PI film의 롤링 횟수에 따라 scratch tester를 통해 2  $\mu\text{m}$  크기의 인덴터를 사용하여 horizontal scratch를 인가하였을 때 분석 결과로 소성변형 및 탄성 회복의 변화율은 10 mN에서 가장 크게 측정되었다. 이와 같은 결과는 수직 방향의 결과와 동일한 양상이지만 탄성 회복의 변화율의 경우 10 mN일 때 17.61%, 50 mN일 때 6.10%로 수직 방향의 스크래치보다 낮은 변화율을 확인하였다. 이 결과는 앞선 임계하중 실험에서 확인한 기판에 가해지는 스크래치에 의한 스트레스의 경우 롤링이 진행되는 방향에 해당하는 쪽이 더 많이 가해지는 것과 같은 양상의 결과로 horizontal scratch의 경우 임계하중 뿐이 아닌 스크래치에 의한 탄성 회복력 또한 감소함을 의미한다.

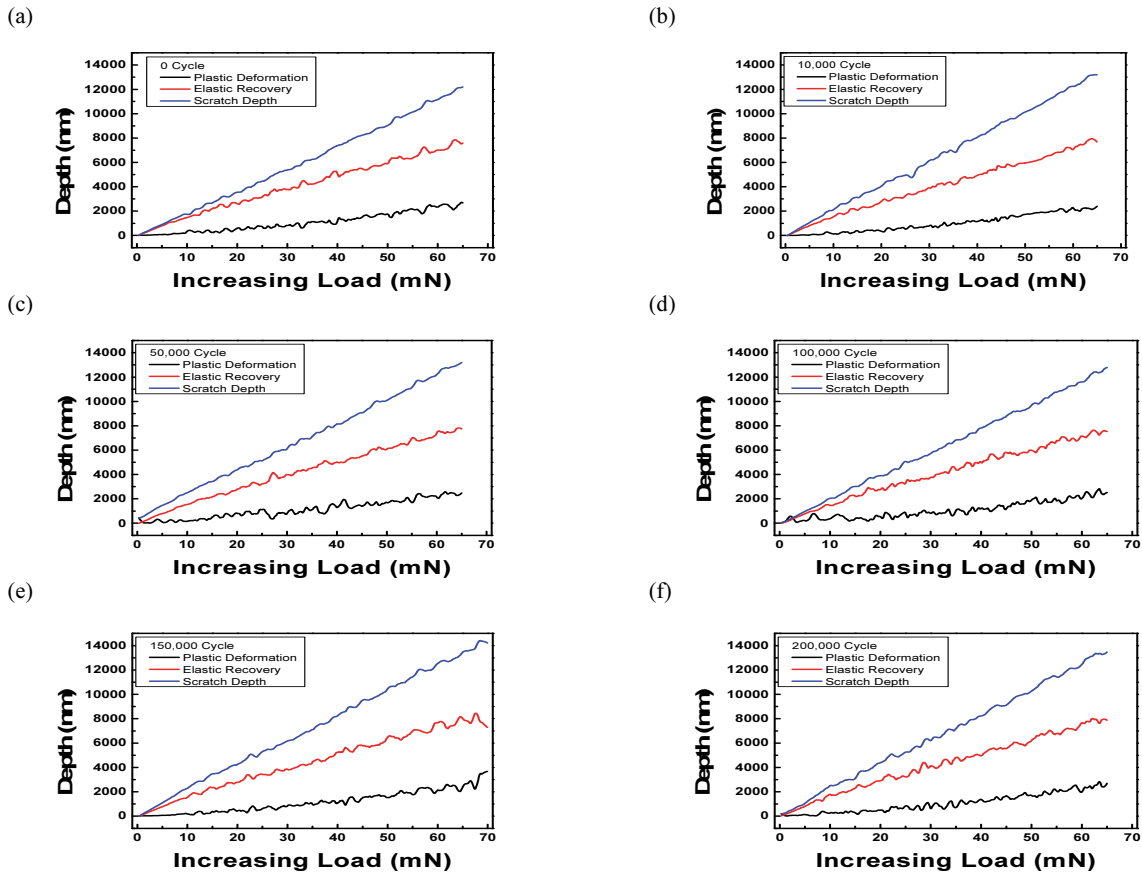
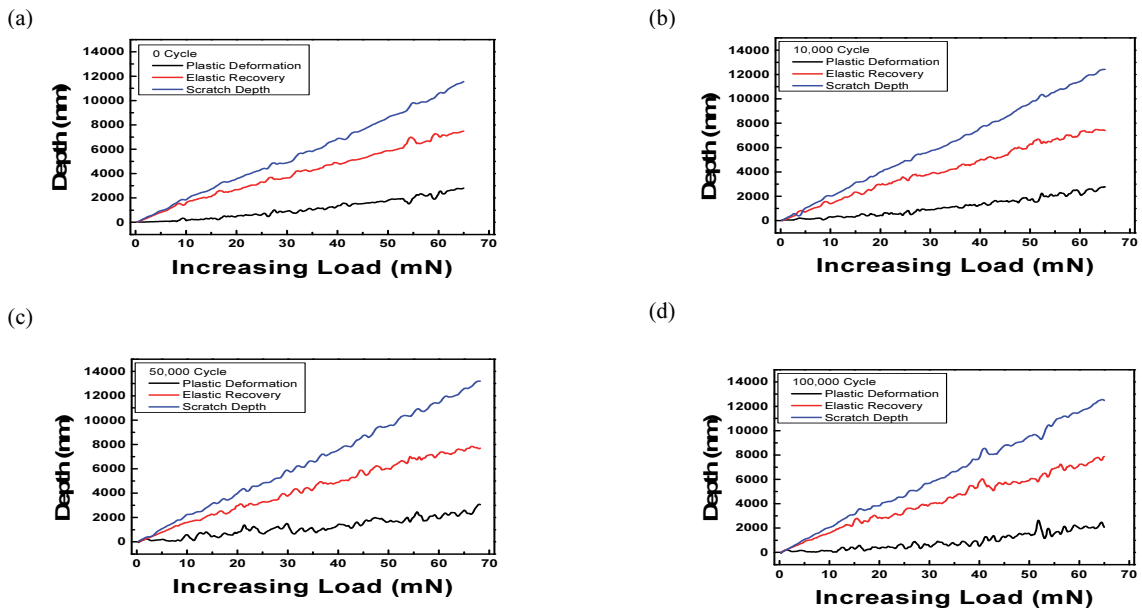


Fig. 6. Vertical scratch test. (a) 0 cycle, (b) 10,000 cycles, (c) 50,000 cycles, (d) 100,000 cycles, (e) 150,000 cycles, and (f) 200,000 cycles.



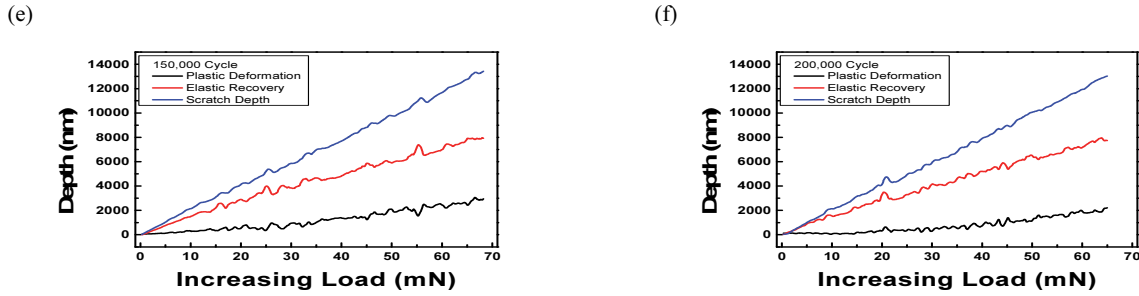


Fig. 7. Horizontal scratch test. (a) 0 cycle, (b) 10,000 cycles, (c) 50,000 cycles, (d) 100,000 cycles, (e) 150,000 cycles, and (f) 200,000 cycles

### 3.3 인덴터의 크기에 따른 scratch 형태 분석

그림 8은 스크래치를 인가하는 indenter의 크기에 따른 PI Film의 표면 현미경 분석 결과를 보여준다. 2  $\mu\text{m}$ 의 크기로 스크래치를 인가하였을 때의 현미경 분석 결과는 앞선 임계하중과 소성 및 탄성에 따른 실험으로 분석하였으며, indenter의 크기가 작음에 따라 하중이 집중되어 롤링 횟수와 관계없이 스크래치만 관찰되었고 현미경으로 확인되는 임계하중은 관찰되지 않았다. 그림 8(a)는 10  $\mu\text{m}$  크기의 indenter로 스크래치를 인가하였을 때의 분석 결과로 indenter의 크기가 커짐에 따라 하중이 분산되어 현미경으로도 임계하중이 관찰됨을 확인하였다. 또한 롤링 200,000회의 경우는 스크래치 주변의 표면 박리가 관찰되었으며, 이는 스크래치가 인가된 주변의 손상도의 경우 롤링 횟수가 증가할수록 내구성이 떨어지는 것을 의미한다. 그림 8(b)는 20  $\mu\text{m}$ 의 크기로 스크래치를 인가하였을 때의 분석 결과로 하중이 더욱 분산되어 10  $\mu\text{m}$  크기의 indenter보다 임계하중이 발생하는 지점이 더 큰 힘에서 발생함을 의미한다. 20  $\mu\text{m}$  크기의 indenter에서도 롤링 200,000회에서만 주변의 표면 박리가 관찰되었으나, indenter의 크기가 커져 스크래치 주변에 가해지는 손상도가 올라 10  $\mu\text{m}$  크기의 indenter에 비하여 빨리 관찰되는 것을 확인하였다. 그림 8(c)는 100  $\mu\text{m}$ 의 크기로 스크래치를 인가하였을 때의 분석 결과로 100  $\mu\text{m}$ 의 경우 rolling 횟수와 관계없이 현미경으로 임계하중은 확인이 불가하였다. 이 결과는 indenter의 면적이 커짐에 따라 분산되는 하중이 PI film의 탄성 회복보다 작아져 임계하중이 관찰될 만큼의 하중이 인가되지 않음을 의미하며, 스크래치 주변의 표면 박리 현상은 롤링 50,000회에서도 확인되었으며, 200,000회의 경우 20  $\mu\text{m}$ 보다 주변 박리가 빠르게 발생하는 것을 확인하였다.

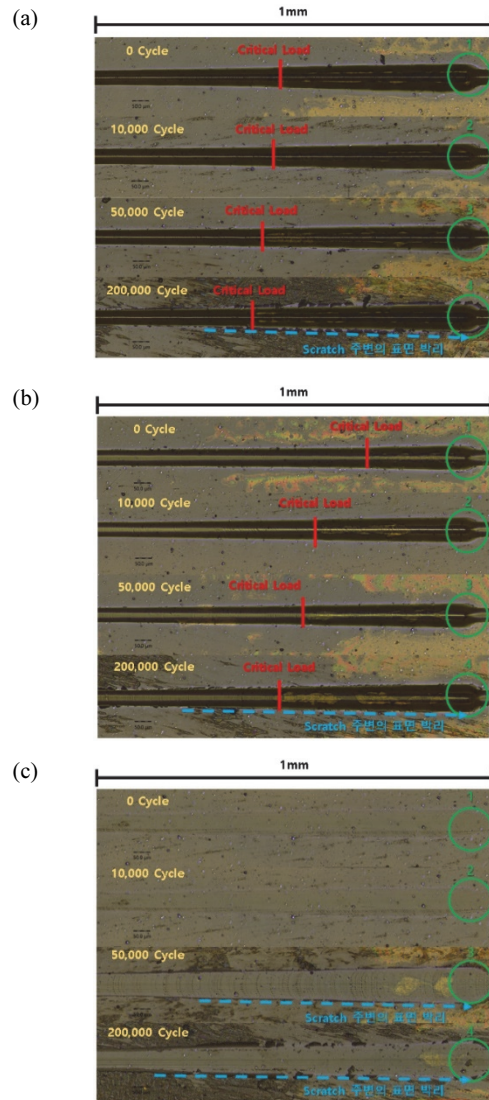
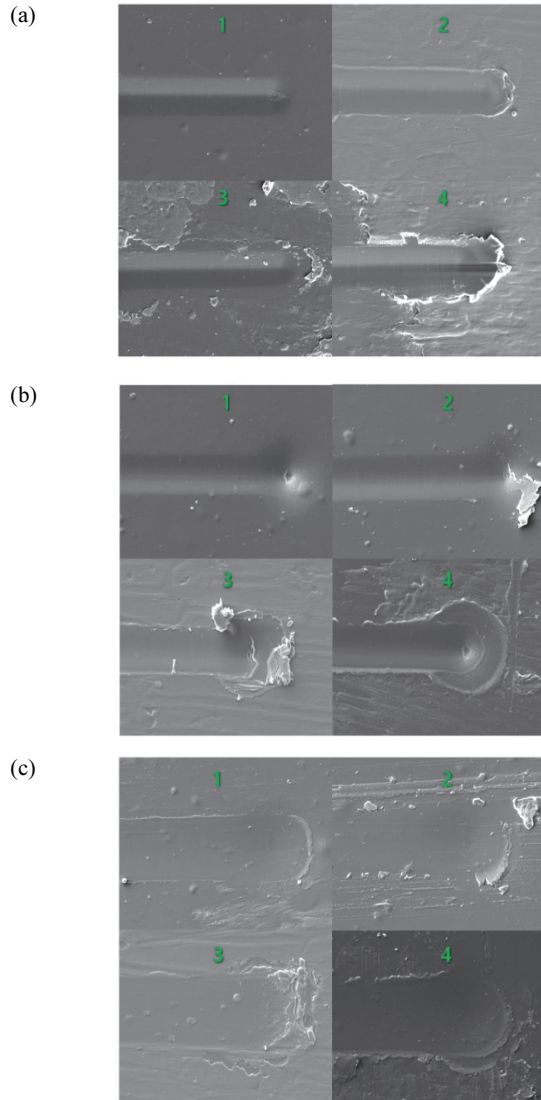


Fig. 8. Microscopic observation of PI film surface according to indenter size. (a) 10  $\mu\text{m}$ , (b) 20  $\mu\text{m}$ , and (c) 100  $\mu\text{m}$ .



**Fig. 9.** SEM images of PI film surface as a function of indenter size (a) 10  $\mu\text{m}$ , (b) 20  $\mu\text{m}$ , and (c) 100  $\mu\text{m}$ .

그림 9는 스크래치를 인가하는 인덴터의 크기에 따른 PI film의 주사 전자 현미경(scanning electron microscope) 표면분석 결과를 보여준다. SEM의 표면 촬영은 스크래치가 끝나는 하중이 최대로 인가되는 지점에서 진행되었으며, 그림 8(a)~(c)의 우측에 표기되어 있다. 분석 결과 스크래치를 인가하는 indenter의 크기가 증가할수록 하중이 분산되어 스크래치의 깊이가 얇아지며 표면의 박리는 더 적은 횟수의 롤링을 하였을 때 관찰되는 선행의 현미경 표면분석과 같은 양상의 결과를 확인하였다. 또한, 롤링이 진행될 때 PI film의 접합부가 닿는 횟수는 롤링의 횟수에 따라 증가하게 되어 indenter의 크기와 상관없이 롤링 횟수

가 증가함에 따라 표면 상태의 거칠기도 증가하는 것을 관찰하였다. 그림 9의 SEM 사진들은 공통적으로 롤링횟수가 증가할 때 필름 표면에서의 층상 박리가 증가하는 것을 보여 주고 있다. 롤링이 없을 때는 박리 현상이 관찰되지 않고 롤링횟수가 증가하면서 박리가 생기는 것은 표면이 보다 스크래치에 대해 취약해진 것으로 볼 수 있다. 박리가 생기는 필름의 표면은 스트레스가 0이 되는 뉴트럴 면에서 가장 먼 곳으로 스트레스가 가장 높게 걸리는 부분이다. 또한 스크래치에 의한 필름 표면의 박리가 롤링을 하지 않은 경우에는 관찰되지 않아 롤링시 필름 표면의 큰 스트레스가 원인이라고 생각할 수 있다. 표면의 박리는 원자간 결합력을 이기고 일어나기 때문에 표면의 원자간 결합력이 약해진 것으로 볼 수 있으며 추가적인 연구를 통한 정량적 분석이 필요하다.

#### 4. 결론

필름 소재에 대한 스크래치 평가를 기판의 롤링 횟수에 따라 평가하였다. 휴대형 디스플레이의 표면에 생기는 스크래치는 화면의 품질을 떨어뜨리므로 스크래치를 줄여야 하며 특히 롤러블 디스플레이에서 롤링 횟수가 스크래치에 미치는 영향을 처음으로 분석하였다.

롤링 횟수가 증가하면서 critical force가 줄어드는 것을 관찰하였으며 소성 변형도 증가하였다. 이러한 스크래치는 필름을 구성하는 원자들의 결합이 끊어 지면서 일어나야 되므로 구성 원자들 간의 결합력이 롤링 횟수가 증가하면서 약해지거나 끊어지는 것으로 이해할 수 있다. 이러한 현상은 SEM 표면 분석에서도 나타났으며 롤링하지 않은 필름에서는 스크래치 후 표면의 박리가 나타나지 않다가 롤링 횟수가 많아지면서 표면의 박리가 관찰이 되어 추가적인 연구를 통해 원자간 결합력의 변화에 대한 정량적인 연구가 요구된다.

#### ORCID

Byung Seong Bae

<https://orcid.org/0000-0002-3328-0286>

#### 감사의 글

본 과제(결과물)는 2024년도 교육부의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 지자체-대학 협력기반 지역 혁신 사업입니다(2021RIS-004). 이 기술은 정부(과학기술

정보통신부의 재원으로 정보통신기획평가원의 지원을 받아 수행된 지역지능화혁신인재양성사업으로 개발한 결과물임(IITP-2024-RS-2024-00436765).

## REFERENCES

- [1] S. J. Zou, Y. Shen, F. M. Xie, J. D. Chen, Y. Q. Li, and J. X. Tang, *Mater. Chem. Front.*, **4**, 788 (2020).  
doi: <https://doi.org/10.1039/C9QM00716D>
- [2] T. Sonoda, S. Murashige, K. Tanaka, K. Takase, H. Katoh, Y. Kataoka, and T. Shimizu, *AM-FPD*, pp. 35-38 (2020).  
doi: <https://doi.org/10.23919/AM-FPD49417.2020.9224484>
- [3] J. H. Koo, D. C. Kim, H. J. Shim, T. H. Kim, and D. H. Kim, *Adv. Funct. Mater.*, **28**, 1801834 (2018).  
doi: <https://doi.org/10.1002/adfm.201801834>
- [4] K. Liu, B. Ouyang, X. Guo, Y. Guo, and Y. Liu, *npj Flex Electron.*, **6**, 1 (2022).  
doi: <https://doi.org/10.1038/s41528-022-00133-3>
- [5] H. Fukagawa, T. Sasaki, T. Tsuzuki, Y. Nakajima, T. Takei, G. Motomura, and T. Shimizu, *Adv. Mater.*, **30**, 1706768 (2018).  
doi: <https://doi.org/10.1002/adma.201706768>
- [6] S. Lee, Y. J. Cho, B. Han, J. Lee, S. Choi, T. Kang, and J. Jang, *Adv. Eng. Mater.*, **24**, 2100910 (2022).  
doi: <https://doi.org/10.1002/adem.202100910>
- [7] Y. N. Kim, J. Lee, Y. O. Kim, J. Kim, H. Han, and Y. C. Jung, *Appl. Mater. Today*, **25**, 101226 (2021).  
doi: <https://doi.org/10.1016/j.apmt.2021.101226>
- [8] J. Choi, G. W. Lee, Y. C. Na, J. H. Kim, J. E. Lee, J. H. Choi, and S. N. Lee, *J. Korean Inst. Electr. Electron. Mater. Eng.*, **35**, 1 (2022).  
doi: <https://doi.org/10.4313/JKEM.2022.35.1.12>
- [9] Y. Wang, Z. Zhou, J. Zhang, J. Tang, P. Wu, K. Wang, and Y. Zhao, *Coatings*, **10**, 400 (2020).  
doi: <https://doi.org/10.1002/adfm.202409703>
- [10] S. H. Han, J. H. Shin, and S. S. Choi, *Sci. Rep.*, **13**, 5697 (2023).  
doi: <https://doi.org/10.1038/s41598-023-31936-7>
- [11] L. Li, L. Han, H. Hu, and R. Zhang, *Mater. Adv.*, **4**, 726 (2023).  
doi: <https://doi.org/10.1039/D2MA00940D>
- [12] P. Parcheta, E. Głowińska, and J. Datta, *J. Eur. Polym. J.*, **123**, 109422 (2020).  
doi: <https://doi.org/10.1016/j.eurpolymj.2019.109422>