



저작자표시-비영리-변경금지 2.0 대한민국

이용자는 아래의 조건을 따르는 경우에 한하여 자유롭게

- 이 저작물을 복제, 배포, 전송, 전시, 공연 및 방송할 수 있습니다.

다음과 같은 조건을 따라야 합니다:



저작자표시. 귀하는 원저작자를 표시하여야 합니다.



비영리. 귀하는 이 저작물을 영리 목적으로 이용할 수 없습니다.



변경금지. 귀하는 이 저작물을 개작, 변형 또는 가공할 수 없습니다.

- 귀하는, 이 저작물의 재이용이나 배포의 경우, 이 저작물에 적용된 이용허락조건을 명확하게 나타내어야 합니다.
- 저작권자로부터 별도의 허가를 받으면 이러한 조건들은 적용되지 않습니다.

저작권법에 따른 이용자의 권리는 위의 내용에 의하여 영향을 받지 않습니다.

이것은 [이용허락규약\(Legal Code\)](#)을 이해하기 쉽게 요약한 것입니다.

[Disclaimer](#)

공학석사학위논문

기계적 변형에 의한 유연전자소자의
사용 중 손상 및 전기적 특성 변화
메커니즘 분석

Analysis of mechanisms for damage and changes in
electrical properties during use of flexible
electronic devices by mechanical deformation

울산대학교 대학원

첨단소재공학과

김 동 현

기계적 변형에 의한 유연전자소자의
사용 중 손상 및 전기적 특성 변화
메커니즘 분석

지도교수 전은채

이 논문을 공학석사학위 논문으로 제출함

2024년 02월

울산대학교 대학원


첨단소재공학과

김동현

김동현의 공학석사학위 논문을 인준함

심사위원장 진 정 호 

심사위원 정 지원 

심사위원 전 은 채 

울산대학교 대학원

2024년 02 월

감사의 글

제가 대학원에 입학하여 벌써 석사학위 논문을 작성하고 있다는 것이 믿기지 않을 만큼 시간이 빠르게 지나간 것 같습니다. 처음에 입학할 때 제가 잘 해낼 수 있을까 많이 고민되었지만 무사히 졸업할 수 있게 많은 도움을 주신 모든 분들께 감사의 말씀드립니다.

가장 먼저 부족한 부분이 많은 저를 받아 주시고 지도해주신 전은채 교수님께 감사드립니다. 교수님의 지도를 받는 동안 다양한 경험들을 통해 인격적으로나 학문적으로 많은 것들을 배울 수 있었고 제가 성장하고 있다는 것을 느낄 수 있었습니다. 3년동안 배우고 느낀 것들을 잊지 않고 사회에 나가더라도 항상 마음속에 새기며 좋은 연구자가 되도록 노력하겠습니다.

그리고 저를 항상 믿고 응원해주는 가족들에게도 감사드립니다. 졸업 후 진로에 대해 고민하고 있을 때 먼저 대학원으로 진학하는 것을 추천해주신 부모님 덕분에 이렇게 좋은 기회를 얻을 수 있었습니다.

마지막으로 실험이나 고민이 있을 때 도움을 많이 준 예필이형, 동현이형, 지윤이누나, 같은 동기 화섭이, 밝은 에너지를 준 연구실 후배인 연경이, 민지, 회연이 그리고 잠깐이었지만 우리 연구실을 거쳐간 여러 학부연구생 친구들에게도 감사드립니다. 또한 뒤에서 항상 응원해준 재영이, 연구에 도움을 준 준성이, 동하, 그 외의 친구들에게도 감사드립니다.

제가 미처 언급하지 못한 분들도 있겠지만 대학원에 입학한 후 많은 도움을 주신 모든분들께 감사드립니다.

국문 요약

최근 웨어러블 기기, 차량용 디스플레이 등 곡면 형태를 지속적으로 유지하는 제품들이 많이 사용되고 있다. 이와 같이 제품이 굽힘 변형을 받을 때 고장없이 작동되기 위해서는 내부의 모든 부품도 휘어질 수 있어야 한다. 특히, 내부 부품 중 전원과 직접적인 연관이 있는 유연소자도 손상 없이 휘어질 수 있어야 한다. 유연소자는 금속 및 전도성 폴리머로 이루어져 있는 전자회로와 폴리머로 이루어져 있는 기판으로 구성되어 있다. 유연소자에 굽힘 변형이 가해지면 기판에 비해 얇고 좁은 형태로 제작되어 있는 회로에서 주로 손상이 발생하게 된다. 기존 연구들에서 이러한 손상의 원인을 파악하기 위해 굽힘 후 평면상태에서 분석을 진행했으며, 굽힘 실험 관련 인자로 전기적 특성 변화를 분석했다. 따라서 가역적인 손상을 확인하기 위해 본 연구에서는 굽힘 상태에서 크랙을 관찰하고 크랙 관련 인자들로 전기적 특성 중 하나인 저항 변화를 분석하고자 했다.

유연소자와 유사한 시편을 제작하기 위해 유연기판으로 많이 사용되는 TPU 위에 전자회로의 주 재료인 Au를 코팅하였다. 굽힘 변형 시 발생하는 크랙에 대해 관찰하기 위해 SEM을 사용하였으며, 굽힘 반지름 및 굽힘 상태에 따라서 어떻게 달라지는지 관찰하고자 한다. 시편을 굽힘 상태로 유지하기 위해 기존 SEM 지그에서 가운데 부분에 홈을 만들어 제작한다. 새로 제작 한 SEM 지그에서 판의 굽힘 식과 삼각함수를 이용하여 구현 가능한 굽힘 반지름의 범위를 찾았으며, 이 범위 안에서 시편의 길이 조절로 다양한 굽힘 반지름을 구현할 수 있다. 이러한 굽힘 조건으로 굽힘 상태에서 시편을 관찰한 결과 가해지는 굽힘 반지름이 작아질수록 시편에 더 가혹한 곡률이 적용되고 시편 표면에 가해지는 인장응력도 증가하게 되어 크랙 폭이 넓고 크랙 수도 많이 형성되는 것을 확인할 수 있다. 설정한 모든 굽힘 반지름에서 크랙이 발생한 것을 관찰할 수 있었고 이를 정량적으로 분석하기 위해 판의 굽힘 식과 항복변형률을 이용했다. 설정한 모든 굽힘 반지름을 변형률로 변환하고 항복변형률과 비교하여 크랙이 발

생한 원인을 분석하고자 했다. 굽힘 상태에 따라 크랙 폭은 변화하는 것을 확인할 수 있고 크랙 밀도는 유지되는 것을 확인할 수 있다. 이를 통해 크랙 폭은 가역적인 변형이라 명명할 수 있고 크랙 밀도는 비가역적인 변형이라 명명할 수 있다. 굽힘 반지름에 따라 크랙 폭과 크랙 밀도가 달라지므로 회귀분석을 통해 이에 대한 상관관계를 분석할 수 있다. 또한 크랙 폭과 크랙 밀도 둘 다 굽힘 반지름과 관련이 있으므로, 크랙 폭과 크랙 밀도 간의 상관관계도 분석하고자 했다.

크랙이 생성될 때 전기적 특성에 얼마나 영향을 미치는지 확인하기 위해 굽힘 상태와 앞서 설정한 조건인 굽힘 반지름에 따라 변화하는 저항 값을 측정했다. 먼저 굽힘 반지름에 따른 저항 변화를 분석하면 굽힘 반지름이 작아질수록 저항 변화가 더 많이 일어난다는 것을 알 수 있다. 그리고 굽힘 상태에 따른 저항을 분석하면 굽힘 상태가 되었을 때 크랙 폭과 크랙 밀도에 의해 저항 값이 증가하고 굽힘 후 평면상태가 되면 크랙 폭 감소로 저항이 일부 감소하는 것을 확인할 수 있다. 이를 통해 비가역적인 변형에 의해 변한 저항 값을 알 수 있고 가역적인 변형에 의해 변한 저항 값을 알 수 있으므로 전체저항 변화 값을 나누어 주면 크랙 폭과 크랙 밀도 중 어떤 인자가 저항 변화에 더 큰 영향을 미쳤는지 정량적으로 분석할 수 있다. 이와 같은 방법을 앞서 설정한 각 굽힘 반지름에 적용할 수 있었고 크랙 폭과 크랙 밀도의 기여도를 굽힘 반지름에 따라 비교할 수 있었다.

본 연구에서는 굽힘 상태를 유지한 채로 시편에서 발생하는 크랙에 대해 거동을 관찰하고 전기적 특성 변화를 분석했다. 크랙을 관찰한 결과 크랙 폭과 크랙 밀도로 나누어 관찰할 수 있었으며, 기존 문헌의 값을 사용한 항복변형률과 비교하여 설정한 모든 굽힘 반지름에서 크랙이 발생했다는 것을 입증했다. 이를 통해 크랙 폭과 같은 가역적인 변형의 영향이 있다는 사실을 확인할 수 있었다. 전기적 특성 변화에서는 굽힘 상태에 따른 저항 변화 측정 결과 크랙 폭이 크랙 밀도보다 전체 저항 변화에 더 큰 영향을 미치는 것을 확인했으며, 굽힘 반지름

이 작아질수록 크랙 폭의 기여도가 증가하는 것을 확인할 수 있었다. 이를 통해 가역적인 변형이 손상에 미치는 영향이 크다는 사실을 확인할 수 있었다. 따라서 굽힘 변형 시 굽힘 상태에서 분석을 진행해야 가역적인 변형에 대한 영향을 확인할 수 있다는 사실을 입증했다.

차 례

1. 서론	- 6 -
1.1 연구 배경 및 목적.....	- 6 -
2. 이론적 분석.....	- 10 -
2.1 굽힘 반지름 설정 조건.....	- 10 -
2.2 굽힘 변형에 의한 저항변화 메커니즘	- 14 -
3. 굽힘 반지름 및 굽힘 상태에 따른 유연소자의 크랙 관찰	- 16 -
3.1 실험 방법	- 16 -
3.2 결과 및 고찰	- 19 -
3.2.1 굽힘 반지름에 따른 크랙 관찰 결과	- 19 -
3.2.2 설정한 실험 조건에서 크랙이 발생한 원인.....	- 25 -
3.2.3 크랙 폭, 크랙 밀도의 굽힘 반지름과 상관관계.....	- 28 -
3.2.4 크랙 폭과 크랙 밀도의 상관관계 분석.....	- 30 -
4. 굽힘 반지름 및 굽힘 상태에 따른 유연소자의 저항 변화 분석	- 32 -
4.1. 실험 방법	- 32 -
4.2. 결과 및 고찰	- 35 -
4.2.1 각 굽힘 반지름에서 굽힘 상태에 따른 저항 변화 결과.....	- 35 -
4.2.2 굽힘 반지름에 따른 저항 변화 분석	- 38 -

4.2.3 굽힘 상태에 따른 저항 변화 결과	- 40 -
4.2.4 크랙 폭의 회복 양	- 44 -
5. 결론	- 46 -
6. 참고문헌	- 48 -

그림 목차

그림 1-1. 차량용 디스플레이 시장 전망 (출처: 한국디스플레이산업협회, 음디아)

그림 1-2. 웨어러블 기기 종류 별 시장 전망 (출처: statista)

그림 1-3 굽힘 후 평면상태에서 전기적 특성을 평가한 기존 연구 결과[11-16]

그림 2-1. 굽힘 상태를 유지한 채로 크랙을 관찰하기 위한 제작한 SEM 지그 이미지

그림 2-2. 굽힘 상태를 유지하기 위해 제작한 SEM 지그 모식도

그림 2-3. 제한된 범위 내에서 적용 가능한 굽힘 반지름 (a) $g=10\text{mm}$, (b) $g=15\text{mm}$, (c) $g=20\text{mm}$, (d) $g=25\text{mm}$

그림 2-4. 크랙 폭과 크랙 밀도에 의해 저항이 증가하게 되는 원인 설명 모식도

그림 3-1. (a) 제작한 시편 모식도 (b) Au 코팅 시 사용된 Au coating기계

그림 3-2. AFM을 통해 측정한 Au coating 두께

그림 3-3. 제작한 SEM 굽힘 지그에 실제 시편을 장착한 이미지

그림 3-4. 굽힘 상태에 따른 크랙 밀도 및 크랙 폭을 나타낸 모식도

그림 3-5. $r=5\text{mm}$ 에서의 굽힘 상태를 유지한 채로 관찰한 크랙의 SEM 이미지 x1000

그림 3-6. $r=7.5\text{mm}$ 에서의 굽힘 상태를 유지한 채로 관찰한 크랙의 SEM 이미지 x1000

그림 3-7. $r=10\text{mm}$ 에서의 굽힘 상태를 유지한 채로 관찰한 크랙의 SEM 이미지 x1000

그림 3-8. $r=12\text{mm}$ 에서의 굽힘 상태를 유지한 채로 관찰한 크랙의 SEM 이미지 x1000

그림 3-9. $r=5\text{mm}$ 에서의 굽힘 상태를 유지한 채로 관찰한 크랙 폭의 SEM 이미지 (a) x5000, (b) x20000

그림 3-10. $r=7.5\text{mm}$ 에서의 굽힘 상태를 유지한 채로 관찰한 크랙 폭의 SEM 이미지 (a) x5000, (b) x20000

그림 3-11. $r=10\text{mm}$ 에서의 굽힘 상태를 유지한 채로 관찰한 크랙 폭의 SEM 이미지 (a) x5000,

(b) x20000

그림 3-12. $r=12\text{mm}$ 에서의 굽힘 상태를 유지한 채로 관찰한 크랙 폭의 SEM 이미지 (a) x5000, (b) x20000

그림 3-13. 판의 굽힘을 나타낸 모식도

그림 3-14. (a) 굽힘 반지름에 따른 크랙 밀도 변화, (b) 굽힘 반지름에 따른 크랙 폭 변화

그림 3-15. 굽힘 반지름에 따른 이론 값(strain)과 측정 값(crack width x crack density) 차이

그림 4-1. (a) 지속 굽힘을 위한 장치, (b) 실제 시편 장착 이미지

그림 4-2. 저항측정 위치를 나타낸 시편의 모식도

그림 4-3. 각 굽힘 반지름에서의 굽힘 상태에 따른 저항 변화 그래프 (a) $r=5\text{mm}$, (b) $r=7.5\text{mm}$, (c) $r=8\text{mm}$, (d) $r=10\text{mm}$, (e) $r=12\text{mm}$

그림 4-4. 굽힘 상태에서 굽힘 반지름에 따른 표준화된 저항 값을 나타낸 그래프

그림 4-5. $r=7.5\text{mm}$ 에서 굽힘 상태에 따른 저항 변화 그래프

그림 4-6. 굽힘 상태에 따른 크랙 폭 및 크랙 밀도

그림 4-7. 각 굽힘 반지름에서 저항 변화에 미치는 영향의 기여도 (a) 가역적 변형, (b) 비가역적 변형

그림 4-8. 굽힘 상태에 따른 크랙 폭 회복 모식도

표 목차

- 표 1. 계산을 통해 설정한 크랙 관찰 굽힘 조건
- 표 2. 각 굽힘 반지름에서의 이론 값 및 측정 값
- 표 3. 판의 굽힘 식을 이용하여 굽힘 반지름을 변형률로 변경
- 표 4. 각 굽힘 반지름에서의 저항 변화 결과
- 표 5. 각 굽힘 반지름에서의 표준화된 저항 값
- 표 6. 각 굽힘 반지름에서의 가역적 변형과 비가역적 변형의 기여도

1. 서론

1.1 연구 배경 및 목적

최근 신체에 접촉하여 사용하는 웨어러블 기기나 운전 시 정보를 간편하게 보여줄 수 있는 차량용 디스플레이 등과 같이 곡면 형태를 유지한 디스플레이의 수요가 증가하고 있다. 이러한 곡면 형태의 디스플레이는 처음 제작될 때부터 형상을 유지하여 제작되기 때문에 한번 굽힘 변형을 받으면 그 상태를 유지한 채로 오랜 시간 동안 사용된다. 곡면형태의 디스플레이는 처음 제작 시 외부형태 뿐만 아니라 내부에서도 굽힘 변형이 유지되면서 제작되어야 하기 때문에 제품 내부의 여러 부품에서 굽힘 변형이 가해지게 된다. 굽힘 변형이 가해질 때 문제 없이 작동되기 위해서는 제품 내부에 있는 모든 부품들이 휘어질 수 있어야 하며, 특히 전원과 직접적으로 연관이 있는 유연소자의 경우 굽힘 변형에 의한 손상이 없어야 한다. 기존에 알려진 유연소자는 전자회로와 유연한 기판으로 구성되어 있으며, 전자회로는 전도성 폴리머 및 금속으로 제작되고 유연한 기판은 폴리머로 제작된다. 이러한 유연소자에 기계적 변형이 가해지면 면적이 넓고 유연한 기판에 비해 면적이 좁고 얇은 형태로 제작된 전자회로에서 주로 손상이 발생하게 된다. 손상의 원인 및 해결 파악을 위해 굽힘 변형 시 전자회로의 전기적 특성 변화 대한 연구가 많이 진행되어 왔다[1-10]. 하지만 그림 1-3과 같이 기존 연구들은 굽힘 변형에 대한 손상을 굽힘 상태를 유지한 것이 아닌 굽힘 후 평면상태에서 전기적 특성 변화를 분석하는 경우가 대부분이었다[11-16]. 이러한 분석 방법은 굽힘 상태에서 발생하는 가역적인 손상에 대한 분석이 불가능하다는 문제점이 있다. 이에 굽힘 상태에서 크랙을 관찰하는 연구가 필요하다. 또한, 생성된 크랙에 대해 굽힘 반지름이나 반복횟수와 같이 굽힘 실험 관련 인자로 전기적 특성변화를 분석한 연구가 대부분이었다. 하지만 크랙 자체가 전기적 특성 변화에 미치는 영향을 분석하려면 크랙 관련 인자로 전기적 특성 변화를 분석할 필요가

있다. 따라서 본 연구에서는 SEM을 통해 굽힘 상태에서 크랙을 관찰하고자 하였으며, 크랙 폭이나 크랙 밀도와 같은 크랙 관련인자로 저항 변화 분석을 진행하여 전기적 특성 변화를 분석하고자 하였다.

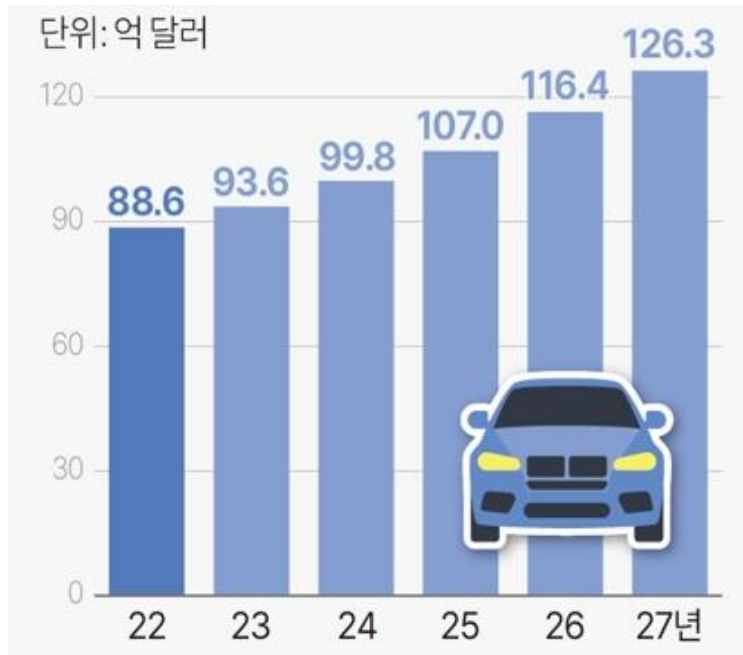


그림 1-1. 차량용 디스플레이 시장 전망

(출처: 한국디스플레이산업협회, 옴디아)

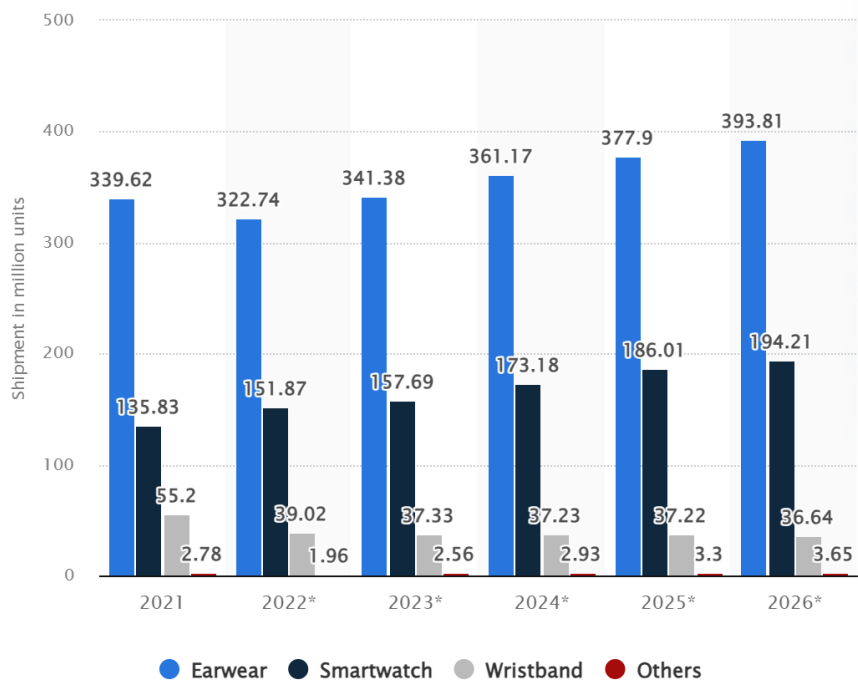


그림 1-2. 웨어러블 기기 종류 별 시장 전망

(출처: statista)

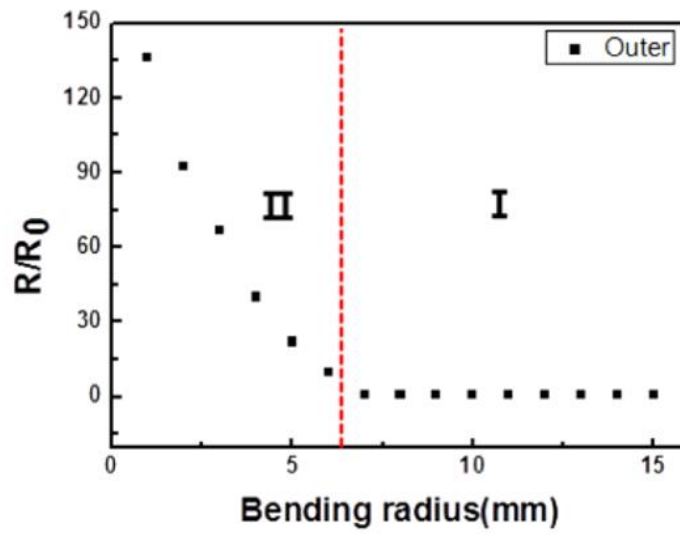
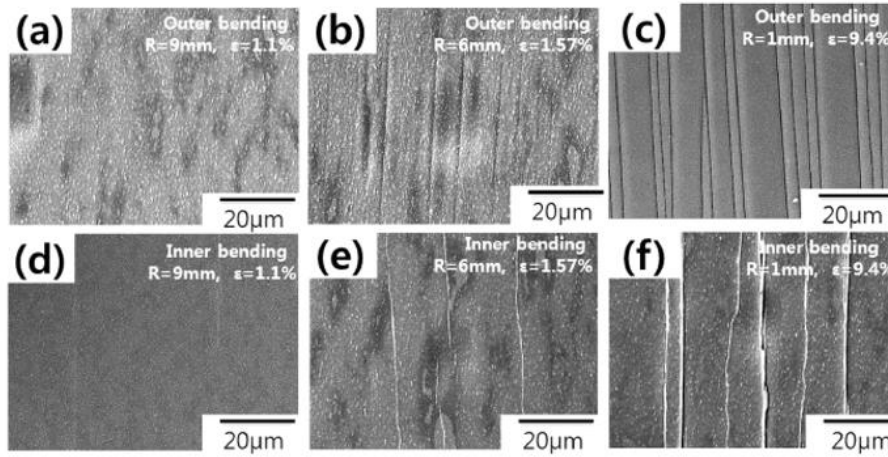


그림 1-3 굽힘 후 평면상태에서 전기적 특성을 평가한 기존 연구 결과[11-16]

2. 이론적 분석

2.1 굽힘 반지름 설정 조건

$\mu\text{m}\sim\text{nm}$ 단위의 크랙을 관찰하기 위해서는 SEM 사용이 필수적이다. 본 연구에서는 굽힘 상태를 유지한 채로 기존 SEM을 이용하여 크랙을 관찰하고자 하였으며, 기존 SEM 지그의 가운데 홈을 만들어 시편의 굽힘 상태를 유지할 수 있도록 했다. 전체 크기는 SEM 장비에 장착할 수 있게 기존 크기와 동일하게 제작했으며, 새로 만든 홈의 거리를 다양하게 설정하여 제작했다.

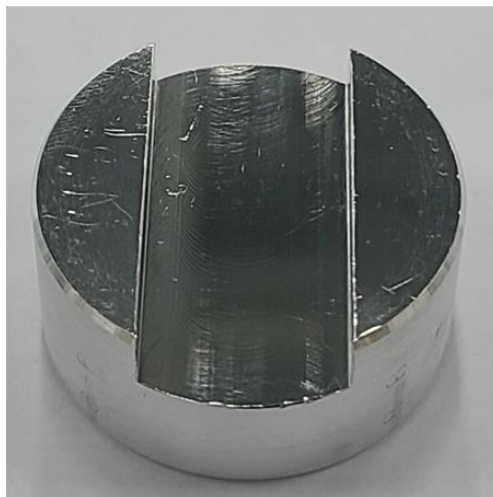


그림 2-1. 굽힘 상태를 유지한 채로 크랙을 관찰하기 위한 제작한 SEM 지그 이미지

새로 제작한 SEM 지그에서 굽힘 반지름 및 시편 길이를 계산하기 위해 그림 2-2의 모식도를 이용하여 다음과 같은 식(1)을 도출했다. 식(1)은 호의 길이를 구하는 공식과 θ 에 대한 삼각함수 공식을 결합하여 도출했다.

$$l = 2\pi r \times \frac{2\theta}{360}, \quad \theta = \sin^{-1}\left(\frac{g}{2r}\right)$$

$$l = \frac{\pi r \sin^{-1}\left(\frac{g}{2r}\right)}{90} \quad (1)$$

식(1)을 보면 제작된 홈의 거리(g), 시편길이 (l), 굽힘 반지름(r)과 같이 3가지 변수가 존재하는 것을 알 수 있다. 하나의 식에서 변수가 3개이면 원하는 변수의 값을 설정하기 어렵기 때문에 제작된 홈의 거리(g) 값을 임의의 값으로 고정하고 나머지 2가지 변수에 대하여 계산을 진행했다. 이때, 제작된 홈의 거리(g)는 기존 SEM 지그의 크기를 고려하여 32mm보다 작게 설정했다. 제작된 홈의 거리(g)값을 고정하고 굽힘 반지름(r)값을 대입하면 각 굽힘 반지름에 해당되는 시편길이(l)값을 도출할 수 있다. 그림 2-2에서 가능한 굽힘 반지름의 최소 범위는 제작된 홈의 거리가 지름이 될 때 이므로, $0.5g \leq r$ 이와 같이 나타낼 수 있다. 또한 식(1)에서 굽힘 반지름 값이 커질수록 그림 2-3에서 확인할 수 있듯이, 시편의 길이 차이는 점점 작아지게 된다. 이론적으로는 큰 굽힘 반지름 값을 이용할 수 있지만 실제 실험적인 경험을 적용하면 굽힘 반지름이 0.9g보다 커질 때 미세한 시편 길이 차이로 시편을 제작하기 어렵다는 문제가 발생한다. 따라서 실제 실험에 적용할 수 있는 굽힘 반지름의 최대범위를 $r \leq 0.9g$ 와 같이 설정했으며, 이를 통해 하나의 제작된 SEM 지그에서 $0.5g \leq r \leq 0.9g$ 의 범위를 적용하여 굽힘 반지름을 설정할 수 있다. 이를 그림 2-3과 같이 그래프로 나타냈으며, 이론적으로는 하나의 SEM 지그에서 다양한 굽힘 반지름을 설정할 수 있을 것으로 예상했지만 실제 실험에 구현 가능한 최대 최소 범위를 적용하면 매우 제한적인 것을 확인할 수 있다. 따라서 다양한 굽힘 반지름을 구현하기 위해서는 홈의 거리(g)를 하나의 값에 대해서만 제작하지 않고 여러 값을 사용해야 한다는 것을 알 수 있다. 이를 적용하여 본 연구에서는 10, 15, 20으로 설정하여 다양한 굽힘 반지름을 구현하고자 했다.

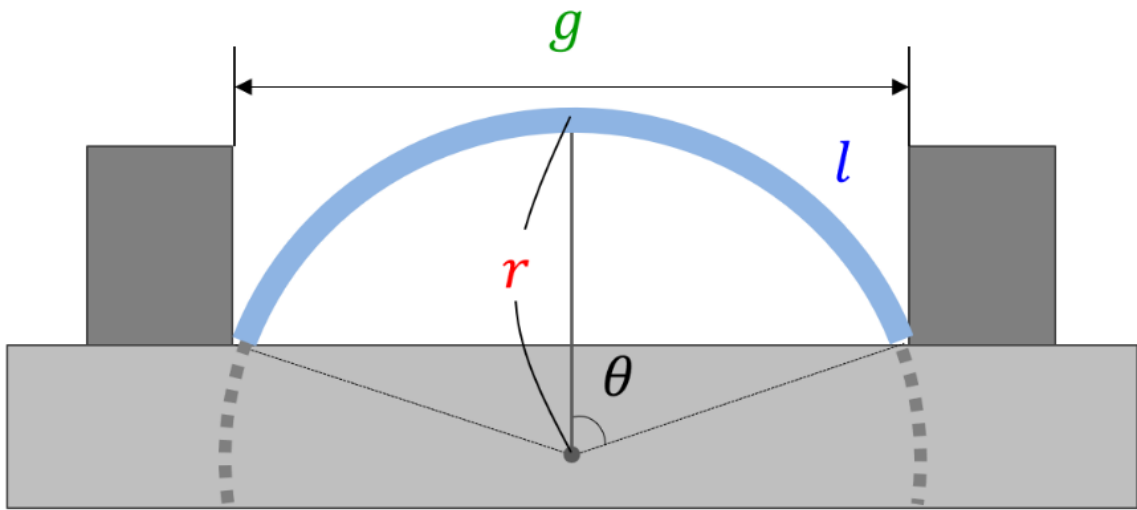


그림 2-2. 굽힘 상태를 유지하기 위해 제작한 SEM 지그 모식도

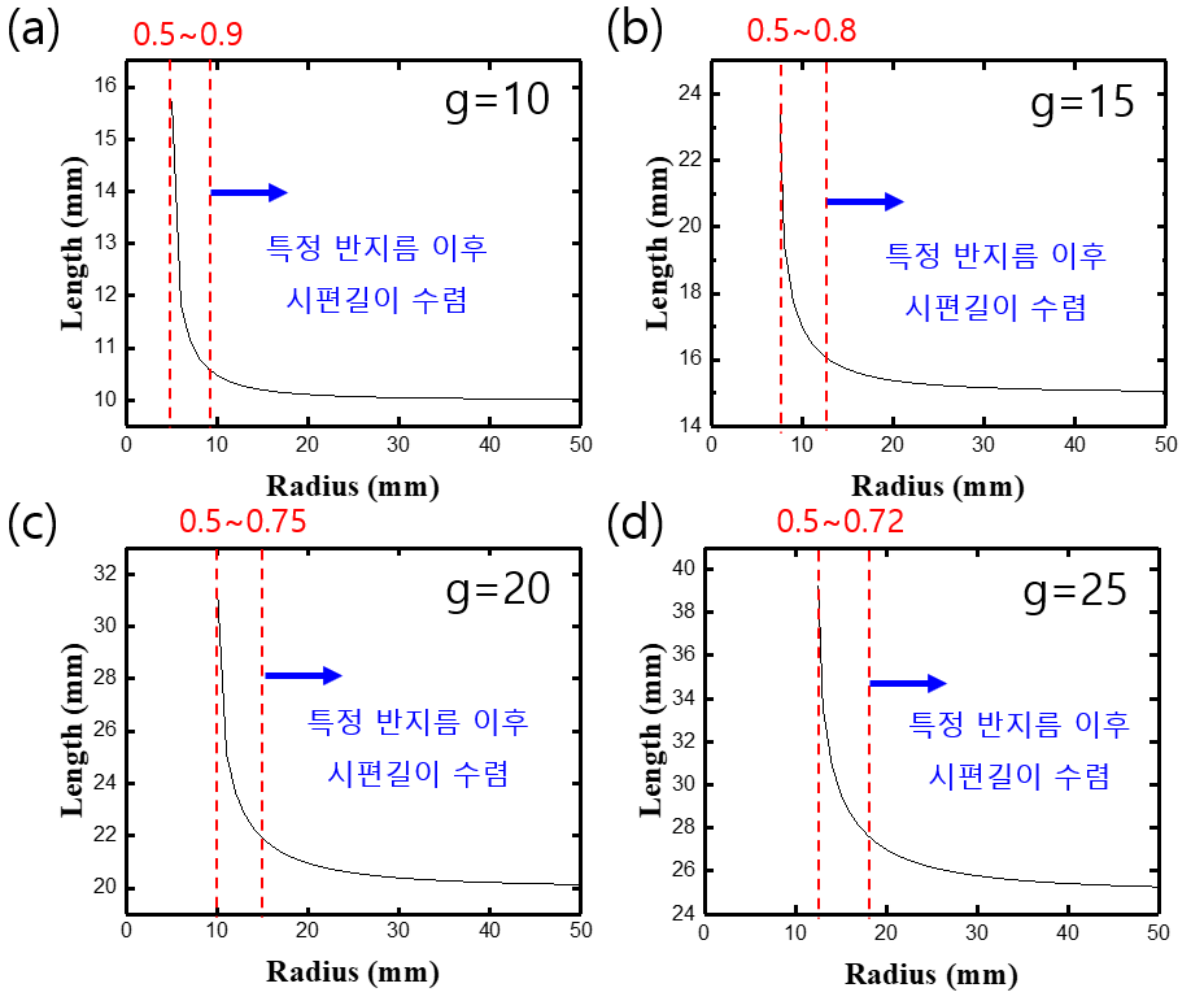


그림 2-3. 하나의 지그 거리 당 제한된 범위 내에서 적용 가능한 굽힘 반지름

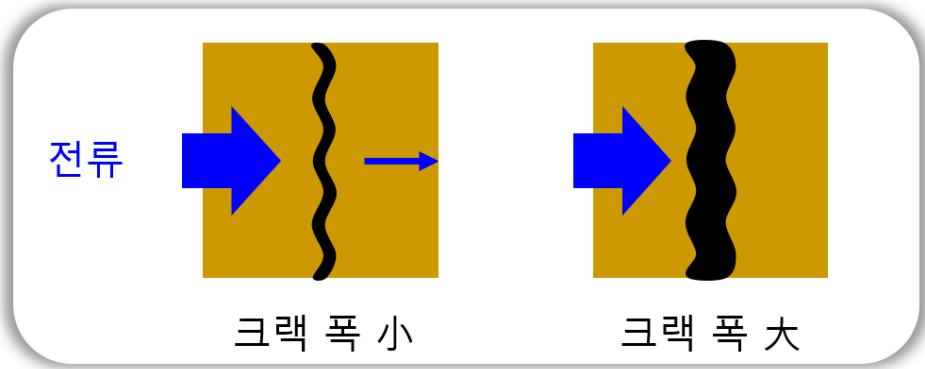
(a) $g=10\text{mm}$, (b) $g=15\text{mm}$, (c) $g=20\text{mm}$, (d) $g=25\text{mm}$

2.2 굽힘 변형에 의한 저항변화 메커니즘

얇은 Au 코팅층이 있는 시편에 굽힘 변형을 가했을 때 시편의 윗부분은 인장응력을 받게 되고 시편의 아랫부분은 압축응력을 받게 된다. 이때, 시편의 윗부분에 위치한 Au 코팅층은 인장응력을 받게 되는데 소성변형이 일어나지 않는 탄성범위 내에서는 인장 되었다가 다시 돌아오지만 탄성범위를 넘어가 소성변형에 도달하게 되면 크랙이 발생하게 된다. Au와 같이 전기 전도도가 높은 재료의 경우 크랙이 발생하게 되면 전자이동은 그림 2-4와 같이 2가지 인자에 의해 방해 받는다. 2가지 인자는 크랙 폭과 크랙 밀도로 인장응력에 의해 벌어지는 크랙 폭과 생성되는 크랙 밀도의 정도에 따라 저항변화가 달라진다. 인장응력이 가해지면 표면부는 이미 벌어지지만 두께방향으로 내부를 확인하면 일정 굽힘 변형에서는 내부가 맞닿아 있는 상태를 유지한다. 여기서 더 큰 굽힘 변형을 가하게 되면 내부에 맞닿았던 부분들도 벌어지게 되면서 나중에는 완전히 끊어져 저항이 큰 폭으로 증가하거나 측정불가 상태가 된다. 이때, 굽힘 변형을 제거하면 벌어졌던 부분이 다시 맞닿으면서 전자 이동 경로의 회복으로 저항이 일부 감소하게 된다. 하지만 이미 생성된 크랙은 미세한 크랙 폭만큼 벌어진 채로 없어지지 않으므로 이로 인한 저항 증가는 여전히 남아있게 된다.

굽힘 변형 시 이와 같은 원리로 전기적 특성이 변화한다는 것은 이미 널리 알려진 사실이며, 손상에 의해 전기적 특성이 저하될 때 원인에 대한 분석을 진행한 기존 연구들이 많이 있다[17-26]. 하지만 기존 연구들에서는 크랙의 생성 원인을 크랙 인자로 비교하지 않고 굽힘 반지름이나 반복 횟수 등과 같은 인자들로 주로 분석을 진행했다[27-32]. 따라서 본 연구에서는 크랙 폭과 크랙 밀도가 전기적 특성 변화에 얼마만큼 영향을 미치는지 정량적인 비율로 계산하여 이를 분석하고자 한다.

<크랙 폭>



<크랙 밀도>

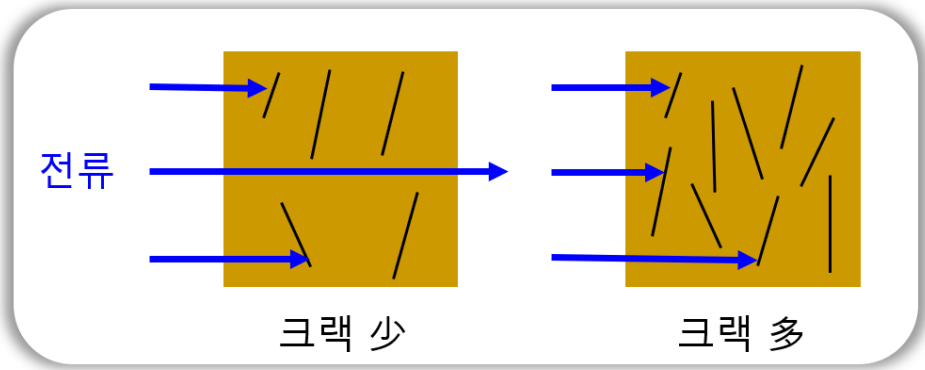


그림 2-4. 크랙 폭과 크랙 밀도에 의해 저항이 증가하게 되는 원인 설명 모식도

3. 굽힘 반지름 및 굽힘 상태에 따른 유연소자의 크랙 관찰

3.1 실험 방법

유연소자와 유사한 시편을 제작하기 위해 기판은 유연 디스플레이의 기판으로 많이 사용되는 TPU(Thermoplastic Polyurethane)를 사용하였고 회로에서 많이 사용되는 Au를 기판 위에 코팅했다. 그림 3-1 (a)와 같이 기판의 두께는 1mm를 사용했고 기판 위의 코팅은 (b)에 나타나 있는 Au coating기계를 사용하여 진행했다. 정확한 코팅 두께를 측정하기 위해 AFM(Atomic Force Microscopy)을 사용했으며, 그림 3-2와 같이 약 26nm의 두께가 코팅된 것을 확인할 수 있었다.

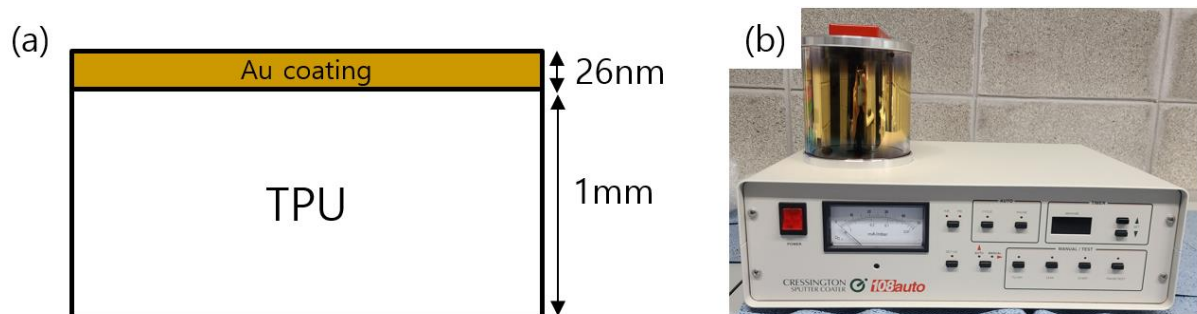


그림 3-1. (a) 제작한 시편 모식도 (b) Au 코팅 시 사용된 Au coating기계

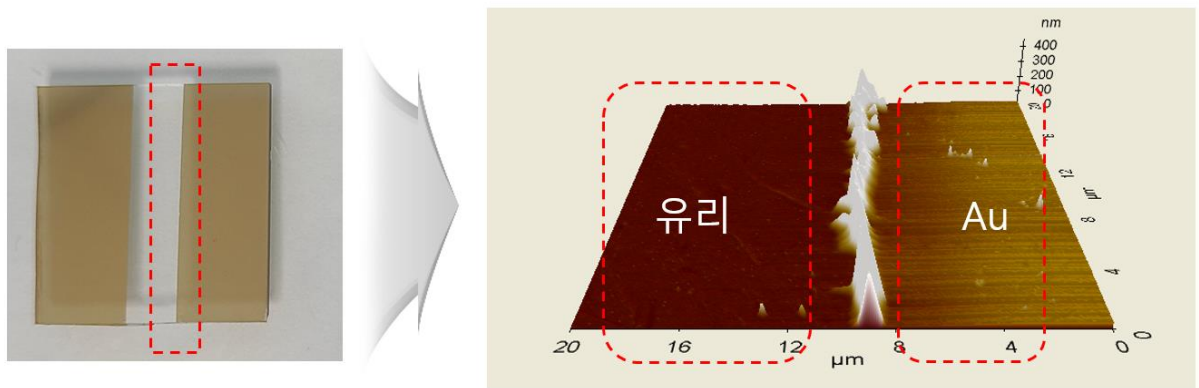


그림 3-2. AFM을 통해 측정한 Au coating 두께

굽힘 조건은 앞서 이론적 분석 2.1절에서 설명한 계산 과정을 통해 표1과 같이 굽힘 반지름을 5mm, 7.5mm, 10mm, 12mm로 설정했고 이를 구현하기 위한 시편 길이는 15.7mm, 23.5mm 31.4mm로 제작했다. 시편의 폭은 크랙 관찰 시 사용하는 SEM 지그를 고려하여 시편의 길이와 상관없이 모두 15mm로 고정했다.

표 1. 계산을 통해 설정한 크랙 관찰 굽힘 조건

Bending radius	Length	Gap
5mm	15.7mm	10mm
7.5mm	23.5mm	15mm
10mm	31.4mm	20mm
12mm	23.5mm	20mm

크랙 관찰은 JEOL 社의 SEM(Scanning Electron Microscope)을 사용했으며, 앞서 제작한 SEM 굽힘 지그로 시편의 굽힘 상태를 유지하여 관찰했다. 그림 3-3과 같이 SEM 굽힘 지그에 시편을 장착하여 굽힘 상태를 유지할 수 있다.

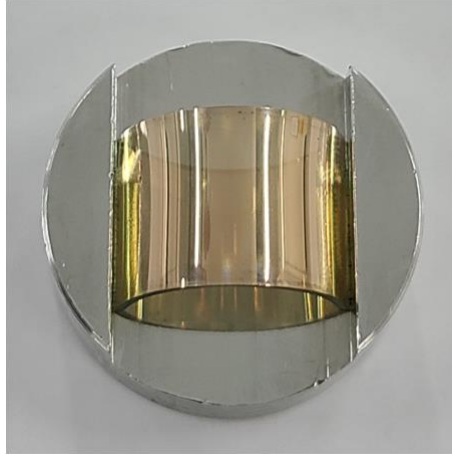


그림 3-3. 제작한 SEM 굽힘 지그에 실제 시편을 장착한 이미지

굽힘 상태의 시편을 관찰할 때 SEM 장비의 한계로 곡면의 가운데 부분은 관찰이 쉽지만 측면부분으로 갈수록 초점을 맞추기 어렵고 관찰할 수 있는 영역도 좁기 때문에 가운데 부분을 중점으로 관찰하고자 했다. 굽힘 변형에 의해 시편의 표면에 생성된 크랙은 크랙 폭과 크랙 밀도로 나누어 측정할 수 있다. 크랙 폭은 모든 부분에서 크랙 폭이 일정하게 생성되지 않기 때문에 평균 값을 사용하고자 했다. 1개의 크랙에 대해 크랙 폭을 2번 측정하고 총 10개의 크랙 폭을 측정하여 평균 값을 계산했다. 크랙 밀도는 같은 배율의 SEM 이미지에서 랜덤 방향으로 100 μm 직선을 긋고 이와 만나는 크랙 수를 측정하여 100 μm 당 크랙 수로 나타내었다. 크랙 밀도도 마찬가지로 모든 부분에서 크랙 밀도가 일정하게 생성되지 않기 때문에 평균 값을 계산했다. 하나의 SEM 이미지에서 8개의 랜덤 선을 그어 8개의 크랙 밀도 값을 계산했으며, 총 8개 영역의 크랙 밀도 평균값을 계산했다. 표1의 조건에서 굽힘 반지름에 따라 크랙 폭과 크랙 밀도가 어떻게 관찰되는지 확인했으며, 크랙 폭과 크랙 밀도의 상관관계도 분석하고자 했다.

3.2 결과 및 고찰

3.2.1 굽힘 반지름에 따른 크랙 관찰 결과

굽힘 상태에서 SEM을 통해 시편의 표면을 관찰한 결과 그림 3-4,5,6,7과 같이 관찰할 수 있었다. 그림 3-4,5,6,7에서 볼 수 있듯이 굽힘 반지름이 작아질수록 시편에 가해지는 곡률이 증가하여 크랙이 더 많이 생성된 것을 확인할 수 있다. 이를 정량적으로 비교하기 위해 3.1절에서 설명한 방법으로 크랙 밀도를 계산했으며, $r=5\text{mm}$ 일 때는 $100\mu\text{m}$ 당 약 10.5 개의 크랙이 관찰되었고 $r=12\text{mm}$ 일 때는 $100\mu\text{m}$ 당 약 6개의 크랙이 관찰되었다. 설정한 굽힘 반지름에서 가장 큰 반지름과 가장 작은 반지름의 크랙 밀도를 비교해보면 약 1.75배 정도 차이가 발생했다. 또한 그림 3-8,9,10,11과 같이 크랙을 확대한 이미지에서 볼 수 있듯이 굽힘 반지름이 작아질수록 크랙 폭이 더 넓게 나타나는 것을 확인할 수 있다. 마찬가지로 3.1절에서 설명한 방법으로 크랙 폭을 측정하여 비교해본 결과 $r=5\text{mm}$ 일 때의 평균 값은 1795.2nm 이었고, $r=12\text{mm}$ 일 때의 평균 값은 761.37nm 이었으며, 두 반지름에서의 크랙 폭은 약 2.36배 정도 차이가 발생했다. 이와 같이 모든 굽힘 반지름에서 크랙이 발생한 것을 확인할 수 있었으며, 굽힘 반지름에 따라 다르게 형성된 것을 관찰할 수 있었다. 크랙 폭과 크랙 밀도는 굽힘 상태에 따라 다르게 나타났으며, 그림 3-4와 같이 크랙 폭은 굽힘 상태에 따라 변하기 때문에 가역적인 변형이라 명명할 수 있고 크랙 밀도는 굽힘 상태에 따라 유지되기 때문에 비가역적인 변형이라 명명할 수 있다. 또한 크랙 폭과 크랙 밀도가 굽힘 반지름에 따라 변하기 때문에 굽힘 반지름과 연관성이 있다고 판단할 수 있으며, 크랙 폭과 크랙 밀도가 굽힘 반지름이라는 공통적인 인자와 관계가 있으므로 크랙 관련 두 인자사이의 상관관계도 분석하고자 했다.



굽힘 전



굽힘 상태



굽힘 후 평면

그림 3-4. 굽힘 상태에 따른 크랙 밀도 및 크랙 폭을 나타낸 모식도

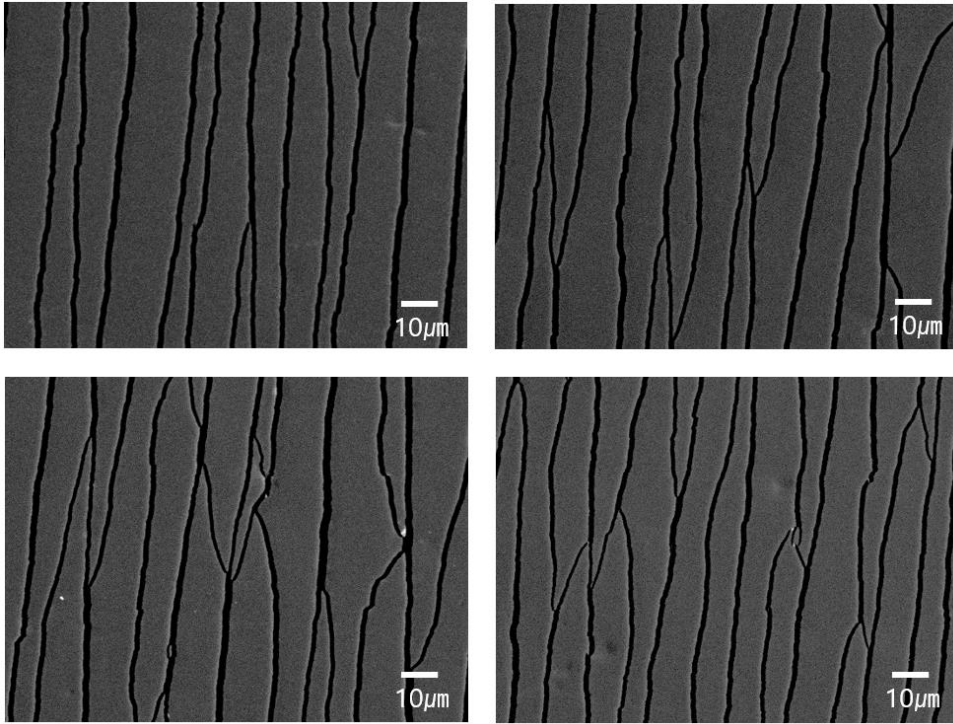


그림 3-5. r=5mm에서의 굽힘 상태를 유지한 채로 관찰한 크랙 밀도의 SEM 이미지 x1000

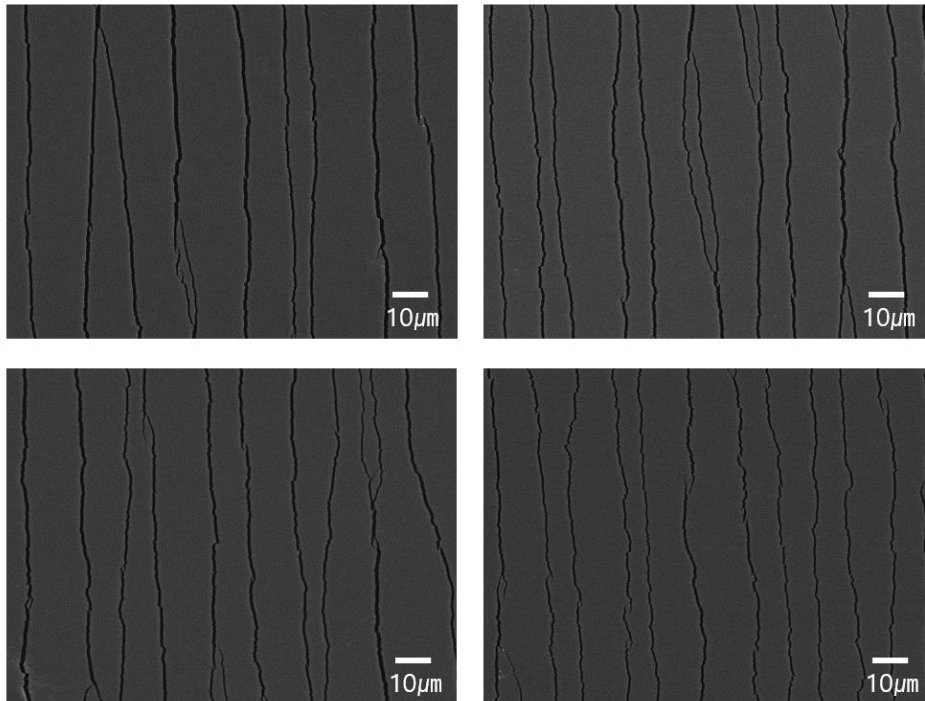


그림 3-6. r=7.5mm에서의 굽힘 상태를 유지한 채로 관찰한 크랙 밀도의 SEM 이미지

x1000

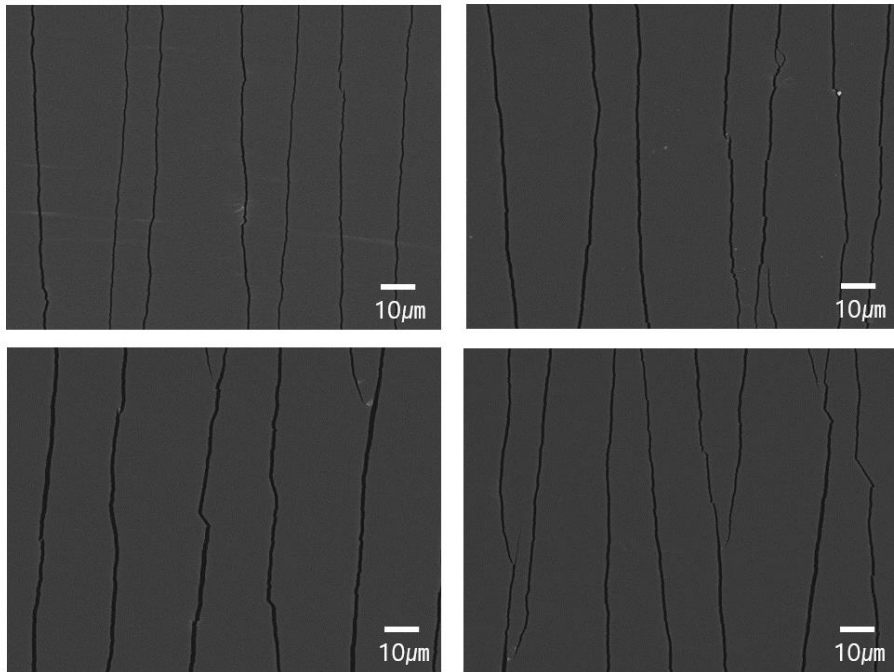


그림 3-7. r=10mm에서의 굽힘 상태를 유지한 채로 관찰한 크랙 밀도의 SEM 이미지

x1000

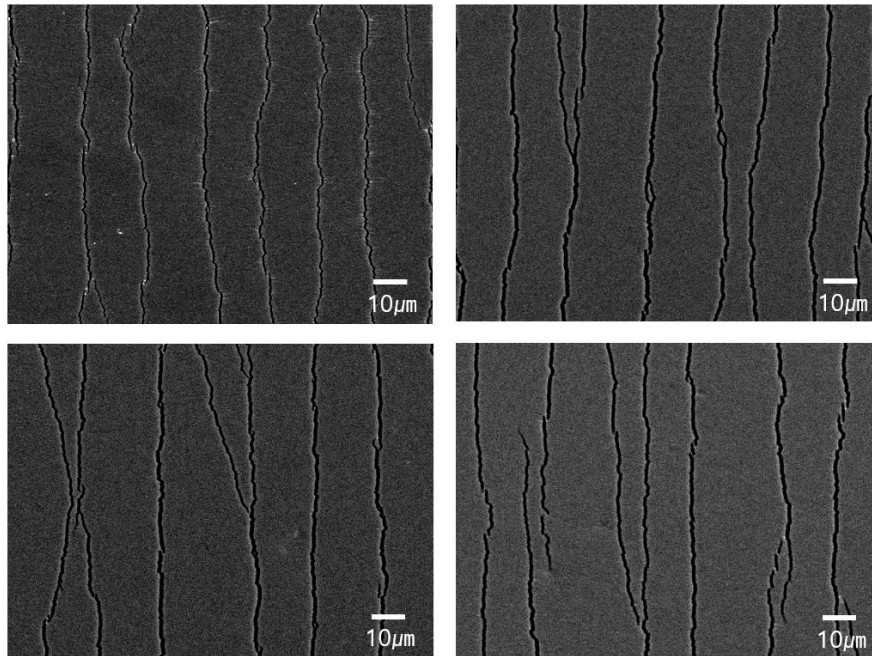


그림 3-8. r=12mm에서의 굽힘 상태를 유지한 채로 관찰한 크랙 밀도의 SEM 이미지

x1000

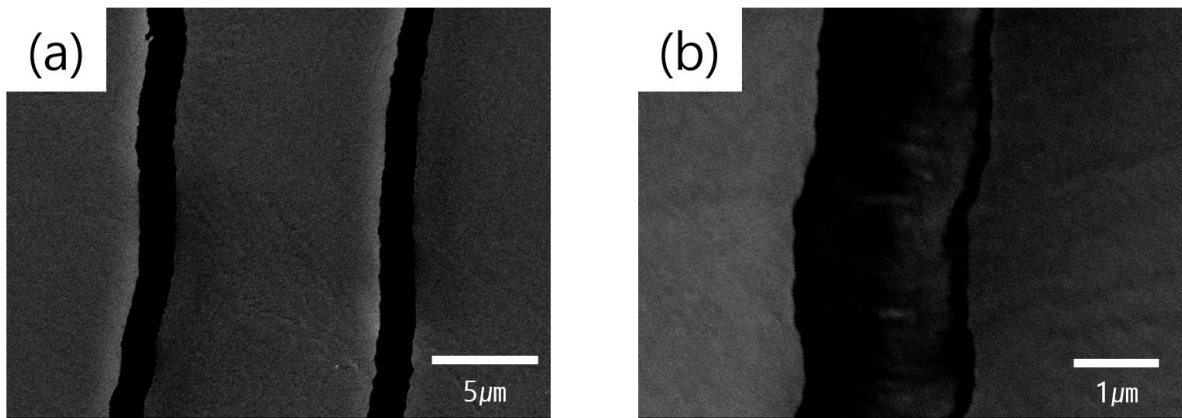


그림 3-9. $r=5\text{mm}$ 에서의 굽힘 상태를 유지한 채로 관찰한 크랙 폭의 SEM 이미지

(a) x5000, (b) x20000

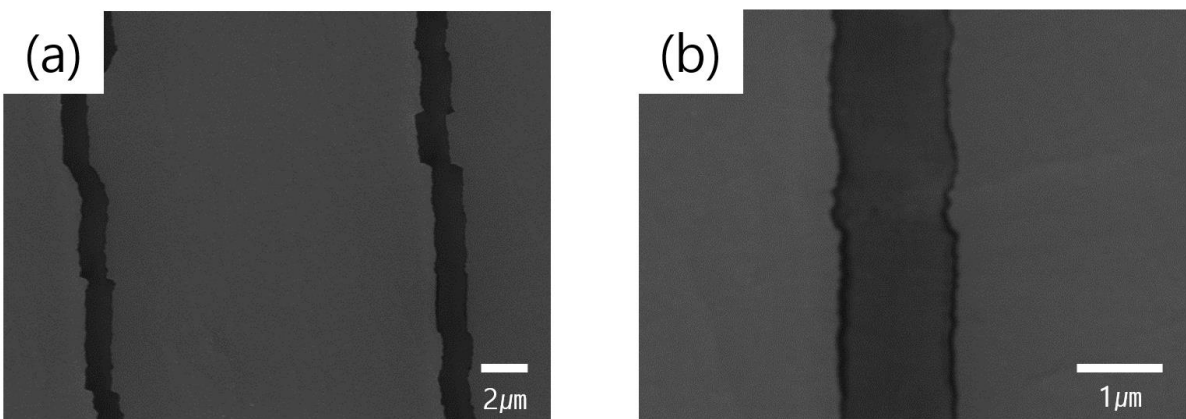


그림 3-10. $r=7.5\text{mm}$ 에서의 굽힘 상태를 유지한 채로 관찰한 크랙 폭의 SEM 이미지

(a) x5000, (b) x20000

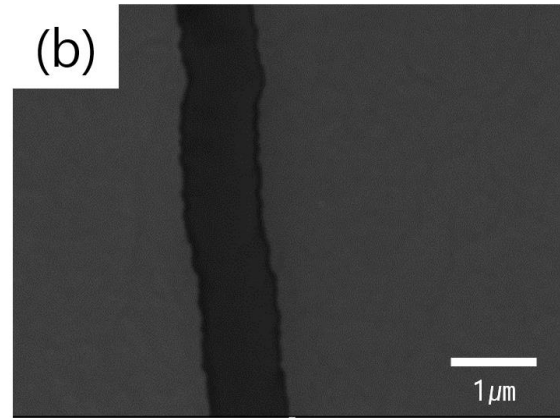
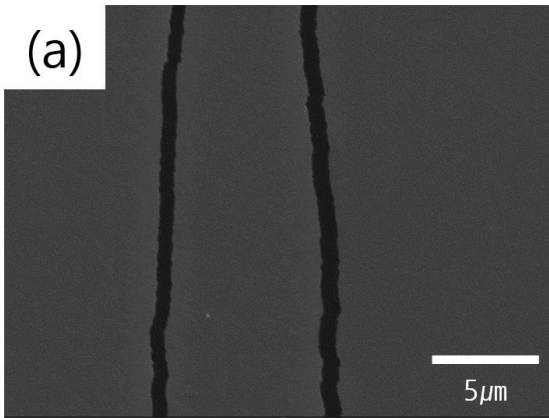


그림 3-11. $r=10\text{mm}$ 에서의 굽힘 상태를 유지한 채로 관찰한 크랙 폭의 SEM 이미지

(a) x5000, (b) x20000

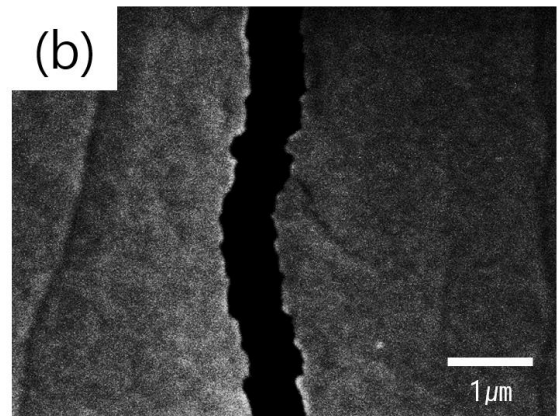
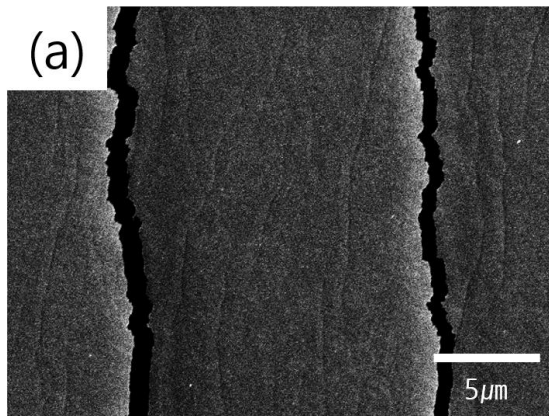


그림 3-12. $r=12\text{mm}$ 에서의 굽힘 상태를 유지한 채로 관찰한 크랙 폭의 SEM 이미지

(a) x5000, (b) x20000

3.2.2 설정한 실험 조건에서 크랙이 발생한 원인

그림 3-4,5,6,7에서 관찰할 수 있듯이 설정한 4가지 굽힘 반지름에서 모두 크랙이 발생한 것을 확인할 수 있다. 크랙이 발생한 원인은 시편 표면에 가해진 변형률이 Au 박막에서 늘어날 수 있는 최대 변형률을 벗어났기 때문이다. 따라서 Au가 버틸 수 있는 최대 변형률과 각 굽힘 반지름에서 가해지는 변형률을 비교하면 크랙의 원인을 정량적으로 분석할 수 있다. 이와 같이 설정한 굽힘 반지름을 변형률로 변환하기 위해 시편의 굽힘 원리와 유사한 판의 굽힘 식을 사용하고자 했으며, 그림 3-12의 모식도와 아래의 계산과정을 통해 식(2)를 도출할 수 있었다.

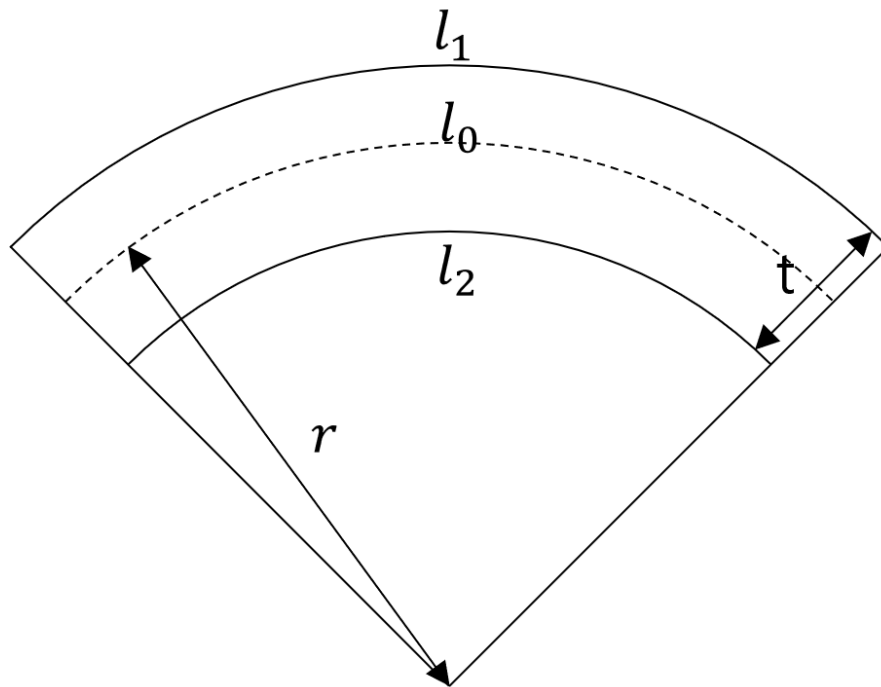


그림 3-13. 판의 굽힘을 나타낸 모식도

$$\begin{aligned}
l_1 &= \left(r + \frac{t}{2}\right)\theta = l_0 + \frac{t}{2}\theta = l_0\left(1 + \frac{t}{2r}\right) \\
l_1 - l_0 &= \frac{l_0 t}{2r} \\
\frac{l_1 - l_0}{l_0} &= \varepsilon = \frac{t}{2r}
\end{aligned} \tag{2}$$

도출한 식(2)에 굽힘 반지름(r)과 박막의 두께(t)를 대입하여 굽힘 반지름을 변형률로 바꿔서 나타낼 수 있으며, 자세한 값을 표2에 나타냈다. 이론적인 응력-변형률 곡선에 따르면 재료가 파괴되기 전까지의 최대 변형률은 인장 응력에서의 변형률로 알려져 있다. 하지만 Au 박막에 대한 기존 연구를 확인해보면 Au 박막의 두께가 얇아질수록 취성이 증가하게 되어 항복응력과 인장응력이 유사해지는 경향을 나타냈다는 연구 결과가 있다[33]. 즉, 탄성범위를 벗어나게 되면 소성변형이 일어남과 동시에 파괴가 일어난다는 것이다. 이 연구에서 약 100nm의 박막에 대해 인장물성을 측정하고, 항복응력과 인장응력이 유사하게 나타나는 것을 확인할 수 있었다. 이를 통해 본 연구에서는 기존 연구에서 사용한 Au 박막의 두께보다 더 얇은 두께인 약 26nm를 사용했으므로, 기존 연구에서 제시한 항복응력과 인장응력 값 차이보다 더 비슷하다고 판단할 수 있다. 따라서 최대 변형률을 탄성범위의 최대점인 항복 변형률로 대체하여 계산했으며, 탄성 구간에서 적용가능한 Hook's law 식 (4)를 이용하여 계산하고자 했다[34].

$$\sigma = E \cdot \varepsilon \tag{4}$$

기존 문헌에서 Au 박막이 제일 얇을 때의 항복응력을 참고하여 항복 변형률을 계산했을 때 값은 약 0.01이었다. 이를 시편에 가해진 변형률 중 가장 작은 값과 비교했을 때 가장 작은 값의 변형률이 0.04의 값을 가지기 때문에 설정한 모든 굽힘 반지름에서 크랙이 발생했다고 판단할 수 있다.

표 2. 판의 굽힘 식을 이용하여 굽힘 반지름을 변형률로 변경

Bending radius	Strain	Yield strain
5mm	0.100	0.010
7.5mm	0.067	
10mm	0.050	
12mm	0.042	

3.2.3 크랙 폭, 크랙 밀도의 굽힘 반지름과 상관관계

크랙 관찰 결과에서 확인할 수 있듯이 크랙 폭과 크랙 밀도가 굽힘 반지름에 따라 달라지는 것을 확인할 수 있었으므로, 크랙 폭 및 크랙 밀도가 굽힘 반지름과 상관관계를 가질 것으로 예상되어 이를 분석하였다. 크랙 폭과 크랙 밀도를 측정 및 계산한 실험 결과 데이터를 이용하여 그림 3-13과 같이 그래프로 나타낼 수 있었다. 크랙 폭과 굽힘 반지름, 크랙 밀도와 굽힘 반지름 두 관계 모두 완벽하게 비례하지 않기 때문에 로그를 이용하여 방정식의 차수에 대한 확인을 먼저 진행한 후 로그 식을 다시 역으로 변환하여 결과데이터에 대한 회귀분석식을 도출할 수 있었다. 그 결과 크랙 폭은 굽힘 반지름의 -0.91승과 비례했고 크랙 밀도는 굽힘 반지름의 -0.78승과 비례했다. 이를 통해 크랙 폭이 굽힘 반지름과 비례하는 정도가 더 크므로 같은 굽힘 반지름이 가해졌을 때 크랙 밀도보다 크랙 폭이 더 큰 영향을 받는다는 것을 확인할 수 있다. 또한, 그림 3-13 (a)그래프에서 $r=10\text{mm}$ 일 때보다 $r=12\text{mm}$ 에서 크랙 수가 더 많이 관찰된 것으로 나타났는데, 이는 그림 3-13 (b)그래프에서 $r=7.5\text{mm}$ 와 $r=10\text{mm}$ 일 때가 유사하다는 점에서 설명이 가능하다. 원래 이론적으로는 $r=7.5\text{mm}$ 보다 $r=10\text{mm}$ 에서 더 작은 변형률이 가해지기 때문에 더 적게 벌어져야 하지만 $r=10\text{mm}$ 에서 $r=7.5\text{mm}$ 과 유사하게 크랙 폭이 벌어졌으므로, 이론보다 큰 크랙 폭으로 크랙 수가 적게 생성되었다고 생각할 수 있다. 이러한 관계와 같이 크랙 폭과 크랙 밀도가 서로 관련이 있을 것으로 예상되어 두 인자 간의 상관관계도 분석하고자 했다.

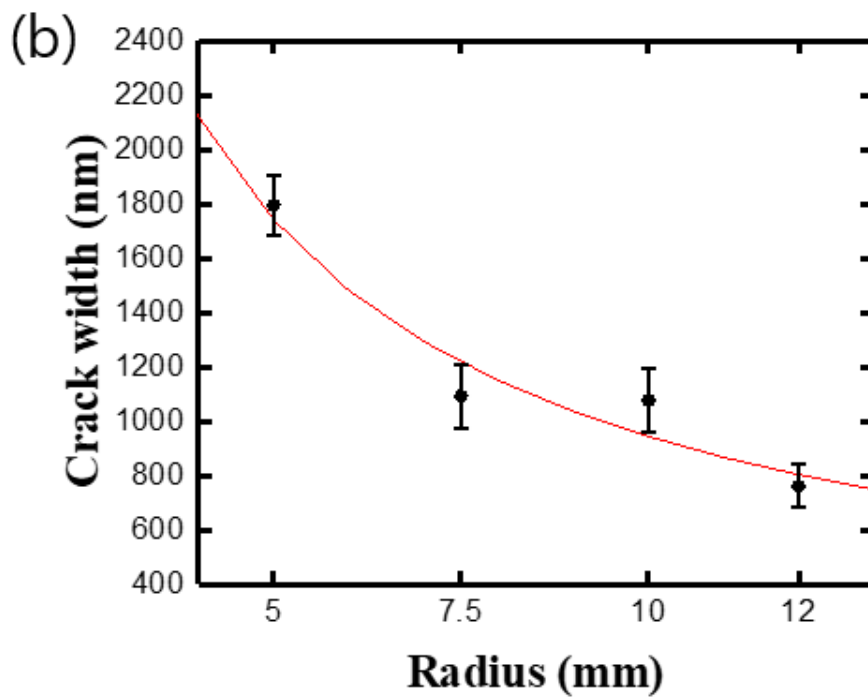
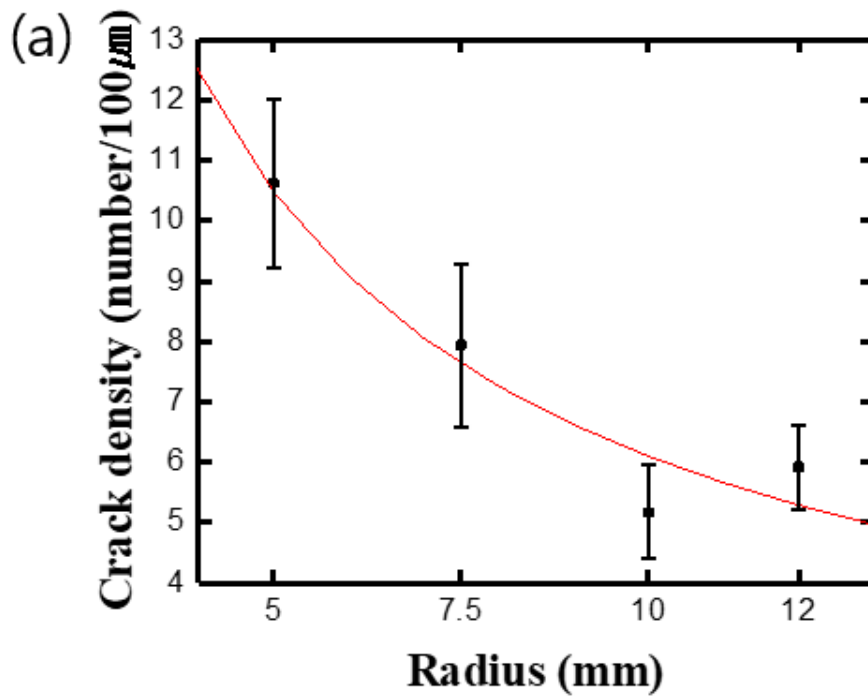


그림 3-14. (a) 굽힘 반지름에 따른 크랙 밀도 변화, (b) 굽힘 반지름에 따른 크랙 폭 변화

3.2.4 크랙 폭과 크랙 밀도의 상관관계 분석

크랙 폭과 크랙 밀도의 상관관계를 분석하기 위해 이론 값과 측정 값으로 나누어 얼마나 차이가 발생하는지 정량적으로 확인했다. 이론 값은 3.2.2절에서 도출한 판의 굽힘 식 식(2)를 이용하여 계산했고 측정 값은 굽힘 변형 시 시편 표면에 가해지는 인장응력으로 인해 늘어난 길이가 표면에 생성된 모든 크랙 폭의 합과 같다는 원리를 이용하여 식 (3)과 같은 과정을 통해 크랙 폭과 크랙 밀도를 곱한 것이 변형률과 같다고 나타낼 수 있다.

$$\Delta l = \text{크랙 폭} \times \text{크랙 밀도} \times l_0 = \text{전체 크랙}$$

$$\frac{\Delta l}{l_0} = \text{크랙 폭} \times \text{크랙 밀도} \quad (3)$$

직접 계산 및 측정한 크랙 밀도와 크랙 폭을 식 (3)에 대입하여 측정 값을 계산할 수 있다. 그림 3-14과 같이 그래프로 표현하면 이론 값과 측정 값을 비교했을 때 굽힘 반지름이 작아질수록 차이가 크게 발생하고 굽힘 반지름이 커질수록 차이가 줄어드는 것을 확인할 수 있다. 굽힘 반지름이 가장 작을 때인 5mm에서 측정 값이 이론 값의 약 2.1배 정도 크게 계산되었으며, 가장 클 때인 12mm에서 측정 값이 이론 값의 약 1.1배 정도 크게 계산되었다. 이와 같이 굽힘 반지름이 작아질수록 차이가 크게 발생하는 이유는 측정 값 계산 시 평균 값을 사용했기 때문이다. 실제 실험에서는 시편의 모든 부분에서 크랙 폭과 크랙 밀도가 일정하게 생성되지 않고 모든 부분에서 다르게 생성된다. 이에 따라 평균값을 사용한 것에 대한 차이가 발생한다고 판단했다. 또한 굽힘 반지름이 커질수록 이론 값과 측정 값의 차이가 감소하게 되는데 이는 시편 표면에 가해지는 변형률이 줄어들어 크랙 폭과 크랙 밀도의 편차가 줄어들기 때문이다. 따라서 굽힘 반지름이 매우 커지게 되면 이론 값과 측정 값 모두 나중에는 0으로 수렴하여 두 값의 차이가 발생하지 않게 된다.

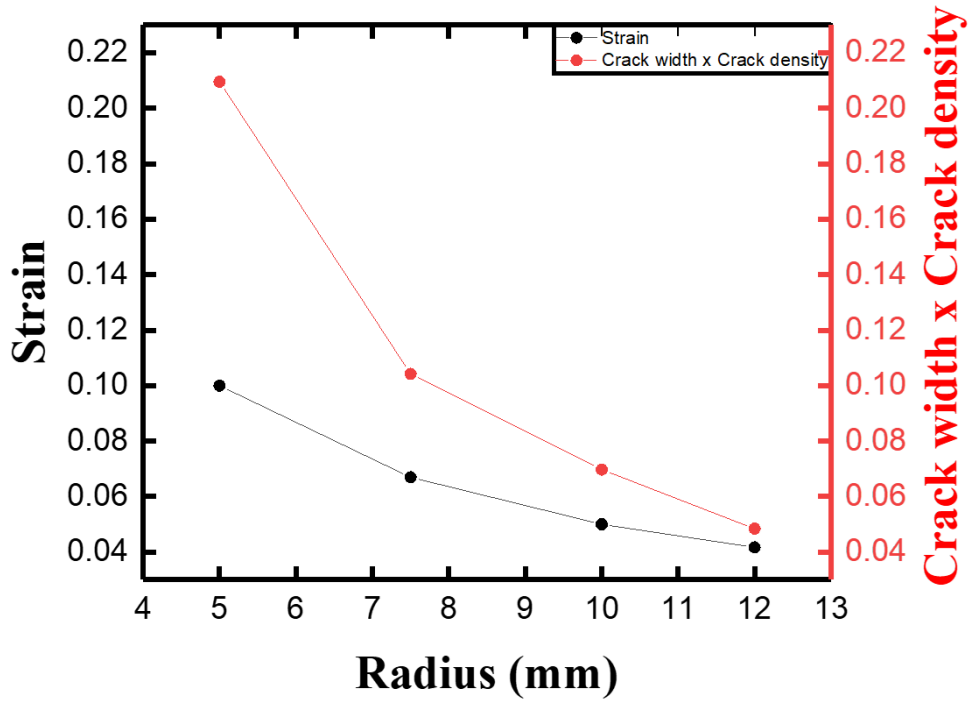


그림 3-15. 굽힘 반지름에 따른 이론 값(strain)과 측정 값(crack width x crack density) 차이

표 2. 각 굽힘 반지름에서의 이론 값 및 측정 값

굽힘 반지름	이론 값	측정 값
5mm	0.100	0.210
7.5mm	0.067	0.104
10mm	0.050	0.070
12mm	0.042	0.048

4. 굽힘 반지름 및 굽힘 상태에 따른 유연소자의 저항 변화 분석

4.1. 실험 방법

그림 4-1 (a)와 같은 장비를 이용하여 굽힘 상태를 유지했다. 앞서 크랙 관찰때와 다르게 시편 양쪽을 그립으로 잡아서 측정하기 때문에 이를 고려하여 원래 시편 길이에 20mm를 더하여 제작했다. 또한 저항을 측정할 수 있는 면적을 넓히기 위해 시편의 폭도 30mm로 수정하여 제작했다. 그림 4-1 (b)와 같이 굽힘 상태를 유지한 채로 멀티미터기를 이용하여 저항을 측정했으며, 그립이 알루미늄으로 제작되어 시편과의 전기 전도 현상이 발생하기 때문에 시편과 그립이 맞닿는 부분에 절연테이프를 부착하여 시편을 장착했다. 저항 측정 위치는 그림 4-2와 같이 그립부를 고려하여 시편의 양끝에서부터 15mm 떨어진 위치로 설정했다.

굽힘 조건은 위의 표2와 같이 설정했으며, 굽힘 반지름 5mm에서는 저항 측정이 불가하여 굽힘 반지름 8mm를 추가했다. 5mm에서 저항 측정이 불가한 이유는 뒤에 실험 결과 부분에서 설명할 예정이다. 저항 측정은 굽힘 변형 전, 굽힘 상태 유지, 굽힘 후 평면상태에서 각각 저항을 측정하여 굽힘 상태에 따라 어떻게 변하는지 분석하고자 했다. 또한 굽힘 상태에 따른 저항 변화 결과를 바탕으로 저항 변화에 어떤 인자가 영향을 많이 미치는지 확인하고자 했다. 이와 같은 분석 방법을 설정한 여러 굽힘 반지름에서 적용하여 굽힘 반지름에 따른 저항 변화 결과도 분석하고자 했다.

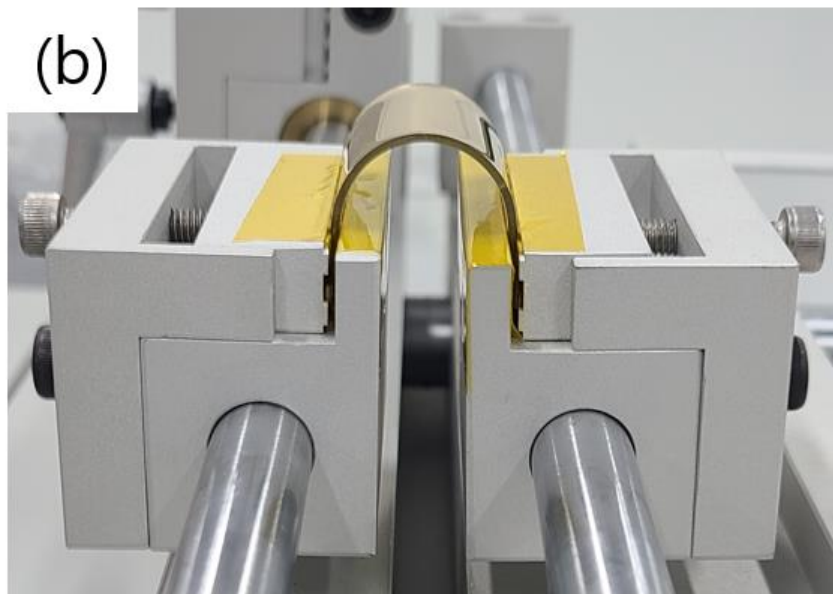
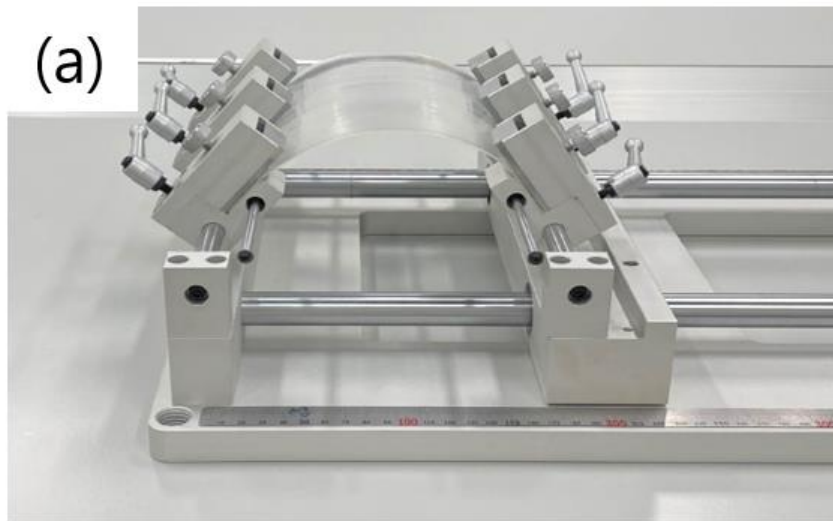


그림 4-1. (a) 지속 굽힘을 위한 장치, (b) 실제 시편 장착 이미지

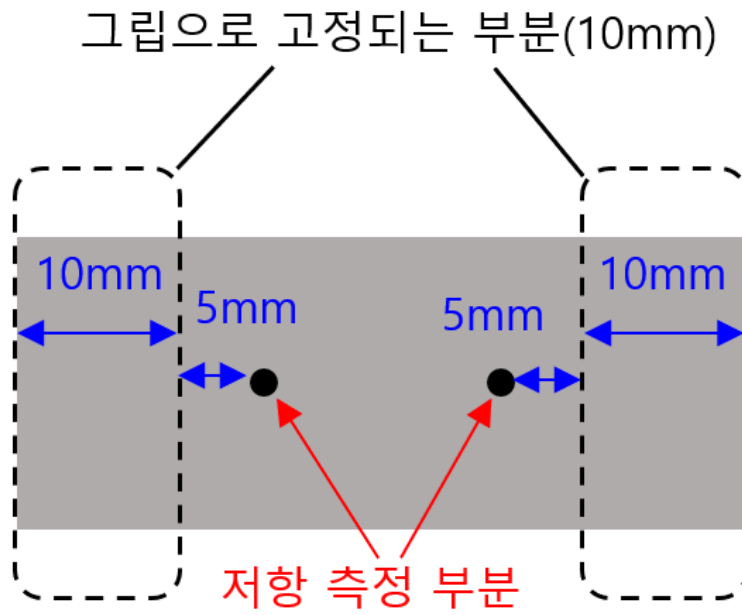


그림 4-2. 저항측정 위치를 나타낸 시편의 모식도

표 3. 계산을 통해 설정한 저항 측정 굽힘 조건

Bending radius	Length	Gap	Angle
7.5mm	43.5mm	15mm	180°
8mm	45.1mm	16mm	180°
10mm	51.4mm	20mm	180°
12mm	43.5mm	20mm	113°

4.2. 결과 및 고찰

4.2.1 각 굽힘 반지름에서 굽힘 상태에 따른 저항 변화 결과

4.1절에서 설정한 굽힘 반지름 및 실험 방법을 통해 굽힘 반지름 별 굽힘 상태에 따른 저항 측정결과 그림 4-3과 같이 나타났다. 그림 4-3에서의 각 그래프별 자세한 수치는 표 4에 나타내었다. 그래프에서 확인할 수 있듯이 $r=5\text{mm}$ 일 때 굽힘 상태에서 크랙 폭 생성 시 Au 코팅 층의 완전 벌어짐으로 인해 저항 값 측정이 안되는 것을 확인할 수 있다. 이를 통해 굽힘 반지름을 재설정 하고자 하였으며, 두 가지를 고려하여 $r=8\text{mm}$ 를 선정하였다. 첫번째는 저항 측정 용 시편을 제작할 때 $r=7.5\text{mm}$ 이후 굽힘 반지름에서 저항 측정을 위한 시편 길이가 적절하다고 판단하였고 두번째는 $r=5\text{mm}$ 가 제일 곡률이 큰 가혹한 조건이었기 때문에 $r=7.5\text{mm}$ 이후 굽힘 반지름에서 가장 가혹한 조건으로 설정하고자 $r=8\text{mm}$ 로 설정하게 되었다. 그림 4-3의 저항변화 결과를 통해 굽힘 반지름에 따른 저항변화 비교와 굽힘 상태에 따른 저항 변화 비교 분석을 진행할 수 있었다.

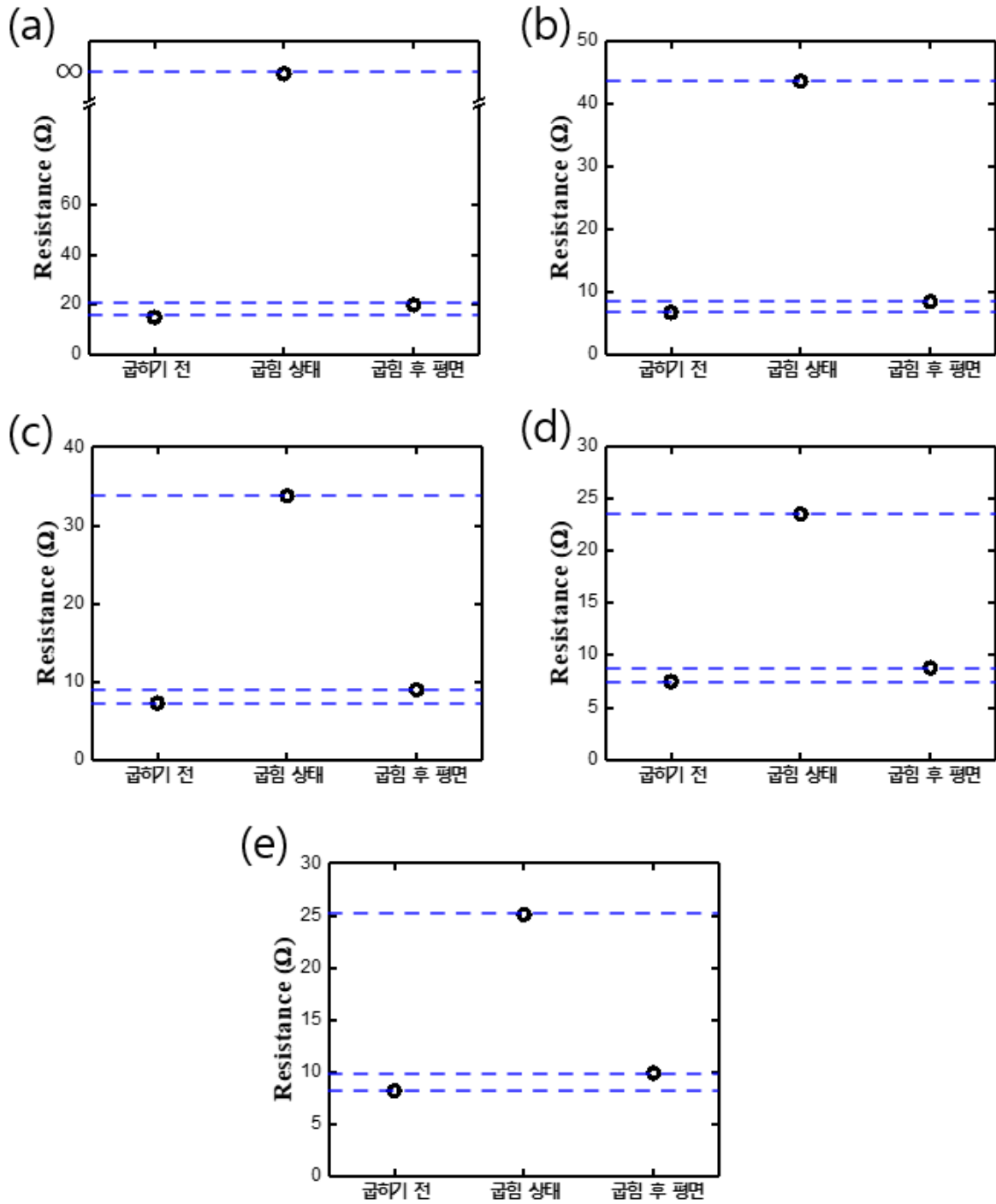


그림 4-3. 각 굽힘 반지름에서의 굽힘 상태에 따른 저항 변화 그래프

(a) $r=5\text{mm}$, (b) $r=7.5\text{mm}$, (c) $r=8\text{mm}$, (d) $r=10\text{mm}$, (e) $r=12\text{mm}$

표 4. 각 굽힘 반지름에서의 저항 변화 결과

굽힘 반지름	저항 (Ω)		
	굽히기 전	굽힘 상태	굽힘 후 평면
5mm	5.9	∞	11.4
7.5mm	6.7	43.5	8.4
8mm	7.3	33.8	9
10mm	7.5	23.5	8.8
12mm	8.2	25.1	9.9

4.2.2 굽힘 반지름에 따른 저항 변화 분석

4.2.1절에서 초기 저항 값이 모두 다르게 측정되었기 때문에 굽힘 반지름에 따른 저항 변화 분석을 진행하기 위해 초기 저항 값을 다른 굽힘 상태의 저항 값에 나누어 주는 표준화 과정을 통하여 비교할 수 있었다. 그 결과 그림 4-4와 같이 나타낼 수 있었으며, 자세한 값은 표 5에 나타내었다. 그래프에서 확인할 수 있듯이 굽힘 반지름이 작아질수록 시편의 표면에 더 큰 곡률이 가해지게 되므로 크랙 폭이 더 많이 벌어져 저항 값이 증가하는 것을 확인할 수 있다.

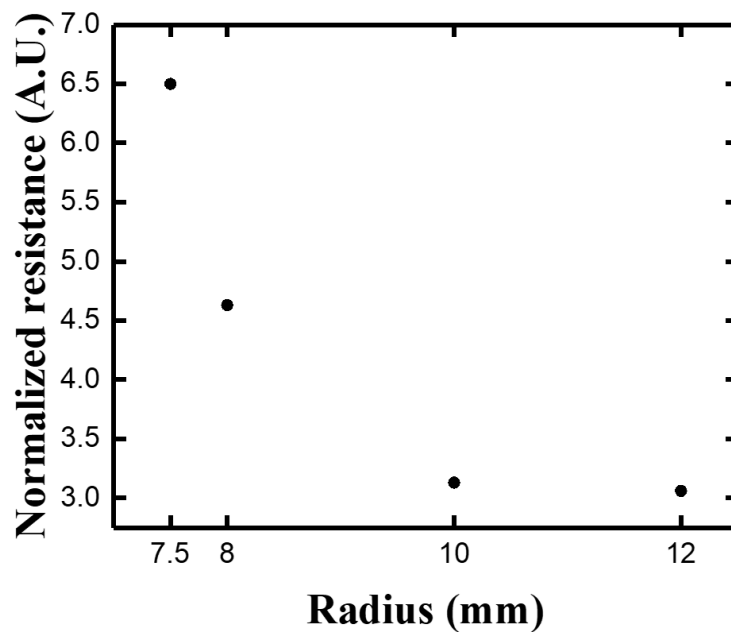


그림 4-4. 굽힘 상태에서 굽힘 반지름에 따른 표준화된 저항 값을 나타낸 그래프

표 5. 각 굽힘 반지름에서의 표준화된 저항 값

굽힘 반지름	저항 (Ω)		
	굽히기 전	굽힘 상태	굽힘 후 평면
7.5mm	1.00	6.50	1.25
8mm	1.00	4.63	1.23
10mm	1.00	3.13	1.17
12mm	1.00	3.06	1.21

4.2.3 굽힘 상태에 따른 저항 변화 결과

굽힘 상태에 따른 저항 변화를 분석했을 때 그림 4-5와 같이 그래프를 나타낼 수 있었다. 시편에 굽힘 변형을 인가하여 굽힘 상태가 되면 생성된 크랙과 크랙 폭의 증가로 저항이 증가하게 되고 그 후 굽힘 변형을 제거하여 다시 평면상태가 되면 2.2절의 이론과 같이 크랙 폭 감소로 인한 Au 코팅 층의 접촉으로 저항이 감소하게 되지만, 크랙 생성에 의한 저항 증가는 그대로 유지되어 초기저항보다 약간 증가한 값을 갖게 된다. 굽힘 상태에서 굽힘 변형을 제거하여 다시 평면 상태가 되었을 때 그림 4-6과 같이 크랙 폭과 크랙 밀도가 변화하는 것을 3.2절과 마찬가지로 확인할 수 있다. 이때, 3.2.1절에서 크랙 폭을 가역적인 변형이라 명명했고 크랙 밀도를 비가역적인 변형이라 명명했기 때문에 이 개념을 이용하여 각 굽힘 반지름에서 전체 저항 변화(ΔR)에 가역적인 변형과 비가역적인 변형이 미치는 영향을 정량적으로 분석할 수 있었다. 이를 계산하기 위해 전체저항 값으로 나누어 비율을 계산했으며, 그 결과 그림 4-7과 같이 나타낼 수 있고 자세한 수치는 표6에 나타냈다. 그래프의 경향을 확인했을 때 굽힘 반지름이 작아질수록 가역적인 변형의 영향이 더 커진다는 것을 알 수 있었고 이를 통해 크랙 자체가 생성되면서 저항이 증가한 것보다 크랙 폭에 따른 저항 변화가 더 큰 영향을 미친다는 것을 확인할 수 있었다.

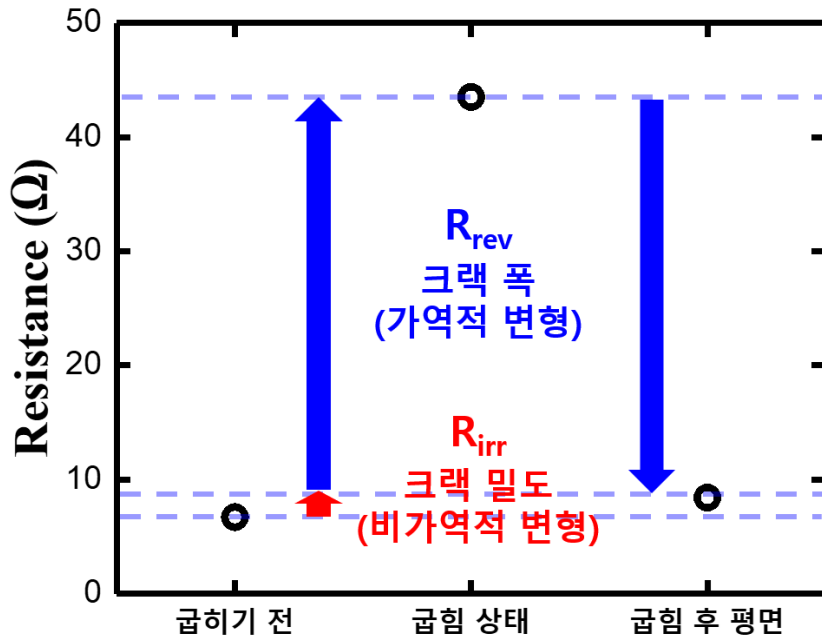


그림 4-5. $r=7.5\text{mm}$ 에서 굽힘 상태에 따른 저항 변화 그래프

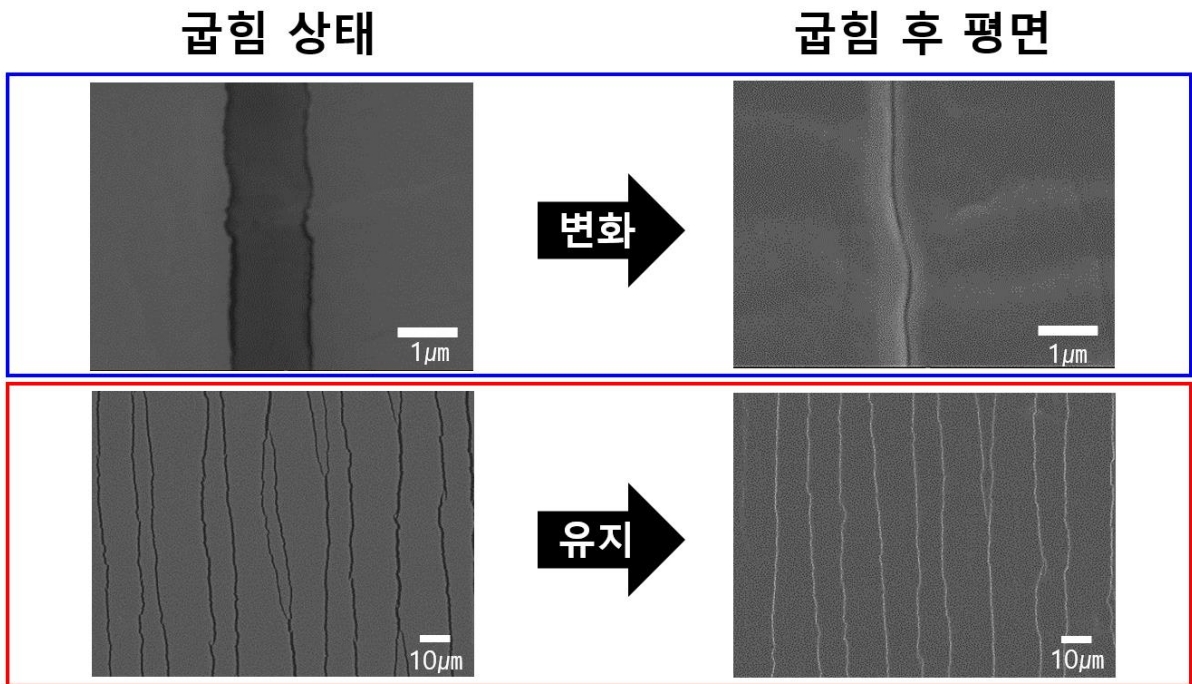


그림 4-6. 굽힘 상태에 따른 크랙 폭 및 크랙 밀도

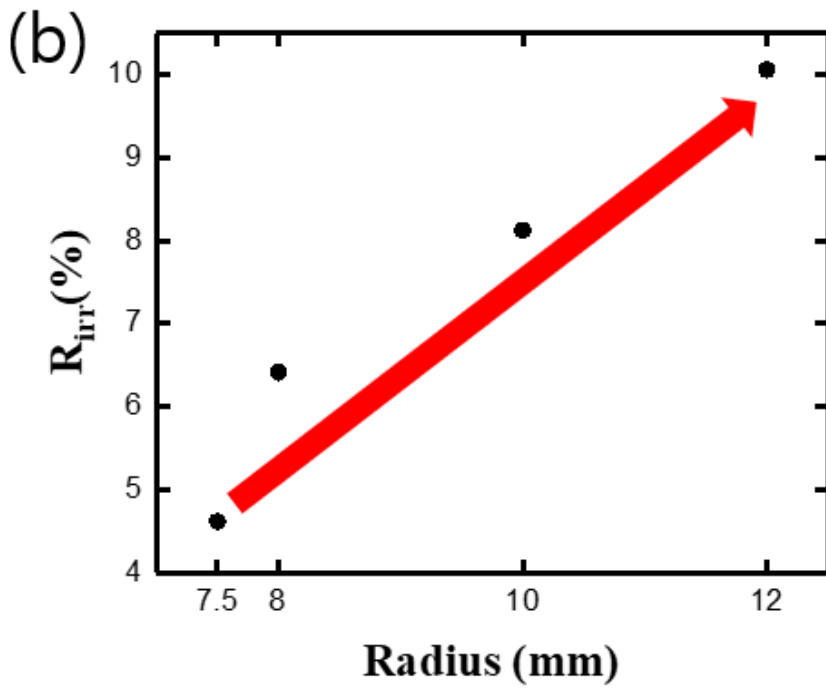
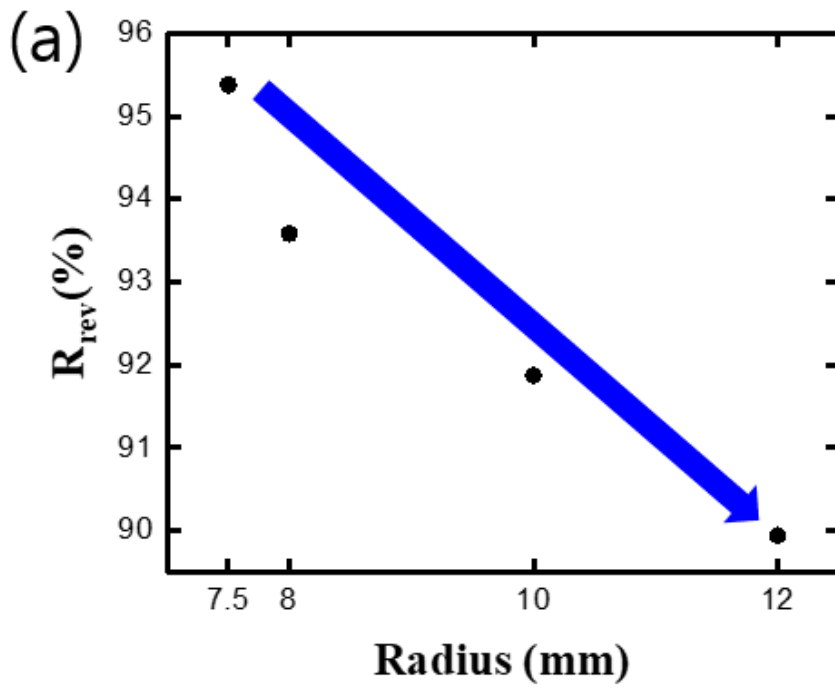


그림 4-7. 각 굽힘 반지름에서 저항 변화에 미치는 영향의 기여도

(a) 가역적 변형, (b) 비가역적 변형

표 6. 각 굽힘 반지름에서의 가역적 변형과 비가역적 변형의 기여도

Bending radius (mm)	ΔR (Ω)	R_{rev} (%)	R_{irr} (%)
7.5	36.8	95.38	4.62
8	26.5	93.58	6.42
10	16	91.88	8.12
12	16.9	89.94	10.06

4.2.4 크랙 폭의 회복 양

4.2.3절에서 전체 저항변화에 크랙 폭의 영향이 훨씬 크게 계산되었으므로 크랙 폭의 회복에 대한 분석을 진행하였다. 크랙 폭의 회복은 수직 방향인 크랙 깊이 방향으로 발생하며, 그림 4-8에서 확인할 수 있듯이 전체 두께 대비 크랙 깊이가 차지하는 비율을 식(4)와 같이 나타낼 수 있고 이를 회복 양이라고 할 수 있다.

$$\text{회복양} = \Delta h/t = \frac{h_1-h_2}{t} \quad (4)$$

식(4)를 구성하는 인자를 생각했을 때 회복 양이 증가하는 경우는 2가지가 있다. 첫번째는 식의 분모가 작아질 때이며, 이는 두께가 감소할수록 회복양이 증가하는 경우이다. 두번째는 식의 분자가 커질 때이며, 굽힘 반지름이 작아지면 시편 표면에 걸리는 변형률이 커지므로 크랙 폭이 증가하게 되고 이는 크랙 깊이를 증가시켜 회복양이 증가하는 경우이다. 따라서 두께가 얇아지고 굽힘 반지름이 작을수록 크랙 폭의 영향이 더 커지는 것을 회복 양과 관련지어 분석할 수 있었다.

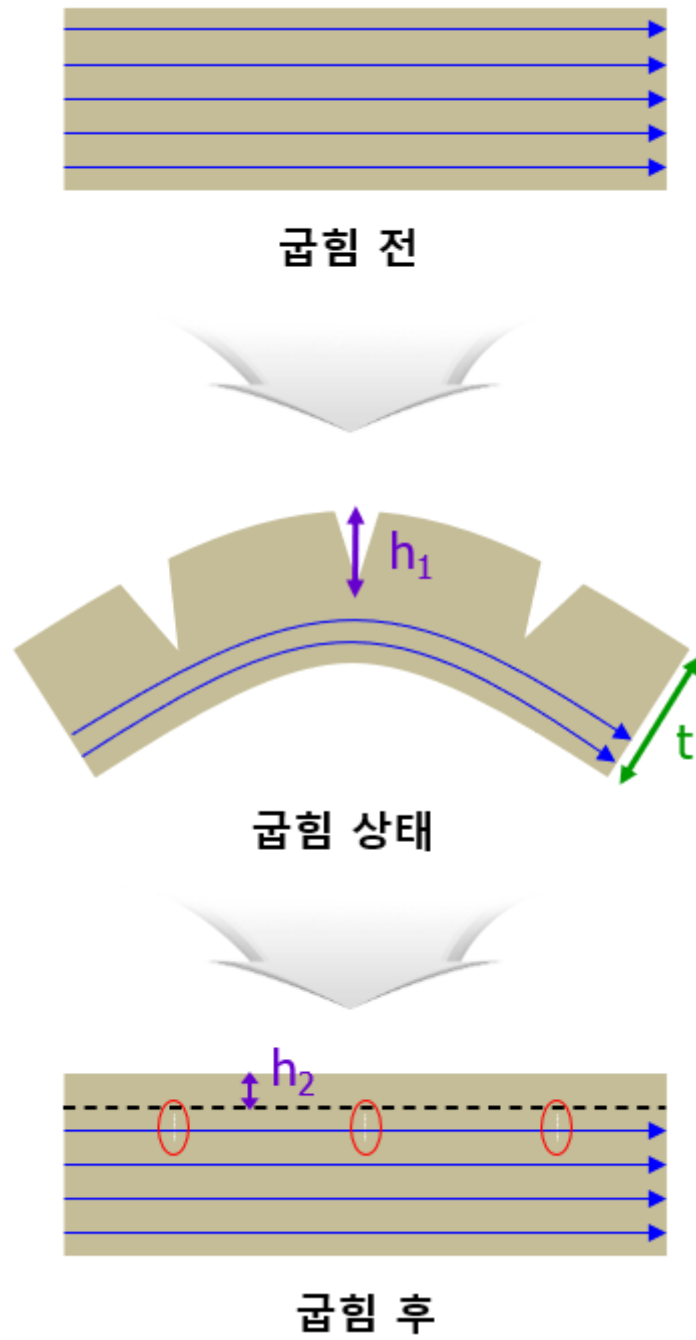


그림 4-8. 굽힘 상태에 따른 크랙 폭 회복 모식도

5. 결론

본 연구에서는 굽힘 변형 시 굽힘 상태 및 굽힘 후 평면상태에서 유연전자소자의 손상 및 전기적 특성 변화 메커니즘 분석에 대한 연구를 진행했다. 굽힘 반지름에 따라 크랙 폭 및 크랙 밀도가 어떻게 변하는지 관찰하였으며, 크랙 폭과 크랙 밀도의 상관관계를 분석하였다. 또한 전기적 특성인 저항 측정을 통해 크랙 폭 및 크랙 밀도가 저항 변화에 얼마나 기여하는지 분석할 수 있었다. 크랙 관찰과 저항변화 분석 결과 다음과 같은 결론을 도출할 수 있었다.

- 1) 굽힘 상태를 유지한 채로 크랙을 관찰한 결과 굽힘 반지름이 작아질수록 시편의 표면에 가해지는 인장응력이 커지기 때문에 크랙 폭이 증가하고 크랙 밀도가 증가하는 것을 확인할 수 있었다. 이와 같이 설정한 모든 굽힘 반지름에서 크랙이 발생하는 것을 확인하였고, 판의 굽힘 식과 기존 문헌을 통해 크랙이 발생하기 전인 항복 변형률 값을 계산할 수 있었다. 판의 굽힘 식을 이용하여 설정한 굽힘 반지름을 모두 변형률 값으로 변환할 수 있었고 이를 항복 변형률 값과 비교해본 결과 제일 작은 변형률 값이 항복 변형률보다 큰 것을 확인하여 설정한 모든 굽힘 반지름에서 크랙이 발생했다고 판단할 수 있었다. 또한, 크랙 폭과 크랙 밀도의 상관관계 분석을 위해 이론 값으로 판의 굽힘 식에서 도출할 수 있는 변형률 식을 이용했으며, 측정 값으로는 식 (3)의 과정을 통해 도출된 식을 이용했다. 이론 값과 측정 값을 비교해본 결과 굽힘 반지름이 작을수록 차이가 크게 발생했으며, 굽힘 반지름이 커질수록 그 차이가 줄어드는 것을 확인했다. 그 이유는 측정 값에 크랙과 관련된 인자들이 포함되어 있어 크랙의 영향이 크다고 판단할 수 있다. 이를 통해 크랙 폭(가역적인 변형)과 같은 가역적인 손상이 존재한다는 사실을 확인할 수 있다.
- 2) 각 굽힘 반지름에서 굽힘 상태에 따라 저항을 측정한 결과 굽힘 반지름이 작아질수록 저항변화가 더 크게 나타났다. 또한 굽힘 상태가 되면서 크랙 폭과 크랙 밀도에 의해

저항 값이 증가했고 다시 굽힘 후 평면 상태가 되면서 크랙 폭의 감소로 인해 저항이 감소했지만 크랙 밀도에 의한 저항 증가는 그대로 유지된 것을 확인할 수 있었다. 크랙 폭과 크랙 밀도가 전체 저항 변화에 미치는 기여도를 계산하기 위해 전체 저항 변화 값으로 크랙 폭과 크랙 밀도의 저항 변화 값을 나누어 주었으며, 그 결과 굽힘 반지름이 작을수록 크랙 폭이 더 크게 형성되기 때문에 그에 의한 회복량이 증가하여 크랙 폭이 크랙 밀도보다 더 큰 영향을 미친다는 것을 확인할 수 있었다. 이를 통해 가역적인 변형이 손상에 미치는 영향이 크다는 사실을 확인할 수 있다.

크랙 관찰과 저항 변화 분석 결과를 종합했을 때 굽힘 변형 시 굽힘 후 평면상태에서만 분석을 진행하면 크랙 폭과 같은 가역적인 변형에 대한 영향을 확인할 수 없기 때문에 굽힘 상태에서 분석이 필요하다는 사실을 입증하였다.

6. 참고문헌

- [1] Chen, Mengmeng, et al., "Crack Suppression in Conductive Film by Amyloid-Like Protein Aggregation toward Flexible Device," *Advanced Materials*, 33(44), 2021.
- [2] Lee, Gwang Jun, et al., "Stress release effect of micro-hole arrays for flexible electrodes and thin film transistors," *ACS applied materials & interfaces*, 12(16), 2020.
- [3] Park, Seongmin, et al., "Multilayer substrate to use brittle materials in flexible electronics," *Scientific reports*, 10(1), 2020.
- [4] Chuang, Yi-Chun, Tun-Yi Cheng, and Yao-Chuan Tsai., "Flexible Printed Circuit Board Strain Sensor Embedded in a Miniaturized Pneumatic Finger," *IEEE Sensors Journal*, 22(23), 2022.
- [5] Duan, Shengshun, et al., "A Pathway into Metaverse: Gesture Recognition Enabled by Wearable Resistive Sensors," *Advanced Sensor Research*, 2023.
- [6] Reboun, J., et al., "Bending endurance of printed conductive patterns on flexible substrates," 2016 39th International Spring Seminar on Electronics Technology (ISSE). IEEE, 2016.
- [7] Jeong, Eun Gyo, et al., "A review of highly reliable flexible encapsulation technologies towards rollable and foldable OLEDs," *Journal of Information Display*, 21(1), 2020.
- [8] Cong, Shan, et al., "Fabrication of nickel oxide nanopillar arrays on flexible electrodes for highly efficient perovskite solar cells," *Nano Letters*, 19(6), 2019.
- [9] Hwang, Byungil, et al., "Effect of Al₂O₃/Alucone nanolayered composite overcoating on reliability of Ag nanowire electrodes under bending fatigue," *Journal of Alloys and Compounds* 846, 2020.
- [10] Jeong, Seungtaek, et al., "Analysis of Repetitive Bending on Flexible Wireless Power Transfer (WPT) PCB Coils for Flexible Wearable Devices," *IEEE Transactions on Components, Packaging and Manufacturing Technology*, 12(11), 2022.

- [11] Taguchi, Ryo, et al., "Nanoscale analysis of surface bending strain in film substrates for preventing fracture in flexible electronic devices," *Advanced Materials Interfaces*, 8(5), 2021.
- [12] Xiao, Yao, et al., "Highly sensitive printed crack-enhanced strain sensor as dual-directional bending detector," *Smart Materials and Structures*, 29(4), 2020.
- [13] Yi, Seol-Min, et al., "Reliability issues and solutions in flexible electronics under mechanical fatigue," *Electronic Materials Letters*, 14, 2018.
- [14] Kim, Tae-Wook, et al., "Bending strain and bending fatigue lifetime of flexible metal electrodes on polymer substrates," *Materials*, 12(15), 2019.
- [15] Zheng, Qinghong, et al., "Cellulose-based flexible organic light-emitting diodes with enhanced stability and external quantum efficiency," *Journal of Materials Chemistry C*, 9(13), 2021.
- [16] Zhang, Yabing, et al., "Fabrication of flexible copper patterns by electroless plating with copper nanoparticles as seeds," *Applied Surface Science*, 547, 2021.
- [17] Kim, Byoung-Joon, In-Suk Choi, and Young-Chang Joo., "Electrical failure and damage analysis of multi-layer metal films on flexible substrate during cyclic bending deformation," 18th IEEE International Symposium on the Physical and Failure Analysis of Integrated Circuits (IPFA), IEEE, 2011.
- [18] Kwon, Yongmin, et al., "Effects of bending strain and crack direction on crack-based strain sensors," *Smart Materials and Structures*, 29(11), 2020.
- [19] Alzoubi, Khalid, et al., "Bending fatigue study of sputtered ITO on flexible substrate," *Journal of Display Technology*, 7(11), 2011.
- [20] Park, Byeonghak, et al., "Dramatically enhanced mechanosensitivity and signal-to-noise ratio of nanoscale crack-based sensors: effect of crack depth," *Advanced materials*, 28(37), 2016.
- [21] Park, Sung Kyu, et al., "Mechanical stability of externally deformed indium–tin–oxide films on polymer substrates," *Japanese journal of applied physics*, 42(2R), 2003.

- [22] Merilampi, Sari, Teija Laine-Ma, and Pekka Ruuskanen., "The characterization of electrically conductive silver ink patterns on flexible substrates," *Microelectronics reliability*, 49(7), 2009.
- [23] Sakamoto, Kosuke, et al., "Highly flexible transparent electrodes based on mesh-patterned rigid indium tin oxide," *Scientific reports*, 8(1), 2018.
- [24] Heremans, Paul, et al., "Mechanical and electronic properties of thin-film transistors on plastic, and their integration in flexible electronic applications," *Advanced Materials*, 28(22), 2016.
- [25] Cairns, Darran R., and Gregory P. Crawford., "Electromechanical properties of transparent conducting substrates for flexible electronic displays," *Proceedings of the IEEE*, 93(8), 2005.
- [26] Tripathi, Ashutosh Kumar, et al., "Electrical characterization of flexible InGaZnO transistors and 8-b transponder chip down to a bending radius of 2 mm," *IEEE Transactions on Electron Devices*, 62(12), 2015.
- [27] Paetzold, Ralph, et al., "Performance of flexible polymeric light-emitting diodes under bending conditions," *Applied physics letters*, 82(19), 2003.
- [28] Bag, Atanu, Ki-Seong Park, and Shi-Hoon Choi., "Effects of microcrack evolution on the electrical resistance of Cu thin films on flexible PI substrates during cyclic-bend testing," *Metals and Materials International*, 23, 2017.
- [29] Lee, Gunhee, et al., "Ultra-flexible perovskite solar cells with crumpling durability: Toward a wearable power source," *Energy & Environmental Science*, 12(10), 2019.
- [30] Fu, Zhao, et al., "Cyclic Bending Reliability and Failure Mechanism of Printed Biodegradable Flexible Supercapacitor on Polymer Substrate," *ACS Applied Materials & Interfaces*, 14(35), 2022.
- [31] Lin, Chao-Ming, Dyi-Cheng Chen, and Yen-Chun Liu., "Investigation on fracture and conductivity of flex-on-film flexible bonding using anisotropic conductive film considering repeated bending," *Microsystem Technologies*, 25(8), 2019.

[32] Glushko, Oleksandr, et al., "Monotonic and cyclic mechanical reliability of metallization lines on polymer substrates," *Journal of Materials Research*, 32(9), 2017.

[33] Baek, Chang-Wook, et al., "Mechanical characterization of gold thin films based on strip bending and nanoindentation test for MEMS/NEMS applications," *Sensors and Materials*, 17(5), 2005.

[34] Rychlewski, Jan., "On Hooke's law," *Journal of Applied Mathematics and Mechanics*, 48(3), 1984.

영문 요약

Recently, products with a continuously curved shape, such as wearable devices and vehicle displays, have been widely used. To ensure these products can endure bending deformation without damage, it's imperative that all internal components exhibit flexibility. This is especially critical for internal components related to power sources, like flexible devices. Typically, these flexible devices consist of an electronic circuit made of metal and a conductive polymer, accompanied by a polymer substrate. When bending deformation is applied to the flexible element, damage mainly occurs in electronic circuits manufactured in a thin and narrow form. In previous studies, analysis was conducted in a flat state after bending to determine the cause of such damage, and changes in electrical properties were analyzed as factors related to the bending experiment. Therefore, in order to confirm reversible damage, this study attempted to observe cracks in the bending state and analyze the resistance change, one of the electrical properties, with crack-related factors.

To replicate a flexible electronic device, we coated TPU with Au. We used SEM to observe cracks that form during bending deformation, with the aim of assessing how these cracks vary depending on the bending radius and conditions. To keep the specimen in a bending state, we designed and manufactured a groove at the center of the existing SEM jig. In the newly developed SEM jig, we calculated the range of achievable bendable radii using the bending equation and the triangular function of the plate. Various bending radii can be achieved within this range by adjusting the specimen's length. Observing the specimen under these bending conditions revealed that as the bending radius decreased, the curvature applied to the specimen became more severe. Consequently, tensile stress on

the specimen's surface increased, resulting in wider crack widths and a higher number of cracks. We observed cracks at all the determined bending radii and quantitatively analyzed them using the bending plate's equation and the yield strain. We attempted to analyze the cause of the cracks by converting the set bending radii into strain values and comparing them to the yield strain. It can be seen that the crack width changes depending on the bending state, and the crack density is maintained. Through this, the crack width can be referred to as reversible deformation, and the crack density can be referred to as irreversible deformation. Since the crack width and crack density vary depending on the bending radius, the correlation can be analyzed through regression analysis. Also, since both crack width and crack density are related to bending radius, we also wanted to analyze the correlation between crack width and crack density.

In order to determine how much the electrical properties are affected when a crack is created, the resistance value that changes depending on the bending state and the bending radius, which is the previously set condition, was measured. First, if we analyze the change in resistance according to the bending radius, we can see that the smaller the bending radius, the more the change in resistance occurs. And when analyzing the resistance according to the bending state, it can be seen that the resistance value increases depending on the crack width and crack density when it is bent, and that when it returns to a flat state after bending, the resistance decreases partially. Through this, the resistance value changed by irreversible deformation can be known, and the resistance value changed by reversible deformation can be known. Therefore, by dividing the total resistance change value, it is possible to quantitatively analyze which factor, crack width or crack density, has

a greater impact on resistance change. This method can be applied to each preset bending radius, and the contribution of crack width and crack density according to bending radius can be compared.

In this study, we observed the behavior of cracks in the specimen while maintaining a bending state and analyzed the associated changes in electrical properties. The observation of cracks revealed that they could be categorized into crack widths and crack densities. We found that cracks occurred at all the determined bending radii by comparing the values from existing literature with the yield strain. Through this, it was confirmed that there was an effect of reversible deformation such as crack width. As a result of measuring the change in resistance depending on the bending state, it was confirmed that the crack width had a greater effect on the total resistance change than the crack density, and that the contribution of the crack width increased as the bending radius became smaller. Through this, it was confirmed that reversible deformation has a significant impact on damage. Therefore, it was proven that the effect on reversible deformation can be confirmed only when analysis is performed in the bending state during bending deformation.