

유연 기판과 전극 사이의 접합력이 전극의 내구성에 미치는 영향

임도연¹ · 김병준² · 김건휘^{3,+} · 안태창^{4,+}

Effect of Adhesion Strength Between Flexible Substrates and Electrodes on the Durability of Electrodes

Doyeon Im¹, Byoung-Joon Kim², Geon Hwee Kim^{3,+}, and Taechang An^{4,+}

Abstract

Flexible electronic devices are exposed to repeated mechanical deformation; therefore, electrode performance is an important element. Recently, a new technology has been developed to improve the adhesion strength between polymer substrates and metal thin films through the cross-linking reaction of bovine serum albumin (BSA) bioconjugation proteins; however, additional performance evaluation as an electrode is necessary. Therefore, in this study, we investigated the effect of adhesive strength between a flexible substrate and a metal thin film on the performance of a flexible electrode. Cracks and changes in the electrical resistance of the electrode surface were observed through outer bending fatigue tests and tensile tests. As a result of a bending fatigue test of 50,000 cycles and a tensile test at 10% strain, the change in the electrical resistance of the flexible electrode with a high adhesion strength was less than 40%, and only a few microcracks were formed on the surface; thus, the electrical performance did not significantly deteriorate. Through this study, the relationship between the adhesion strength and electrical performance was identified. This study will provide useful information for analyzing the performance of flexible electrodes in the commercialization of flexible electronic devices in the future.

Keywords: Flexible electrode, Adhesion strength, Durability of electrodes, Reliability

1. 서 론

차세대 전자장치는 웨어러블 디바이스, 플렉시블 디스플레이, 센서, 배터리, 그리고 전자피부(e-skin)와 같은 형태로 발전하고 있으며, 이러한 기기들은 유연성과 신축성이 필수적으로 요구된다 [1-4]. 기기의 유연성은 사용자의 신체와의 밀접한 접촉을 가

능하게 하여, 더욱 편리하고 직관적인 사용자 경험을 제공할 수 있다. 유연 전자소자는 전통적인 강성 전자소자와 달리 피부 패치, 플렉시블 디스플레이, 스마트 의류, 롤러블 스크린 등 다양한 혁신적인 응용 분야에 사용될 수 있으며, 이러한 응용 분야에서는 기계적 변형이 빈번하게 발생한다 [5,6]. 유연 전자소자는 반복적인 기계적 스트레스(예: 굽힘, 접힘, 비틀림)에도 불구하고 그 기능을 유지할 수 있어야 한다 [7-9]. 유연 전자소자의 기계적 내구성은 성능 유지, 신뢰성, 안정성 및 경제성 측면에서 중요하다. 따라서, 유연 전자소자의 기계적 내구성은 유연 전자기술의 상용화에 있어 매우 중요한 요소이다.

유연 전자소자는 사용 중에 다양한 기계적 변형을 견딜 수 있어야 하며, 이러한 변형이 소자의 성능에 영향을 미치지 않아야 한다 [10,11]. 예를 들어, 유연한 디스플레이가 굽힘 스트레스에 노출될 때, 화면의 품질이나 밝기의 변화가 없어야 한다. 신뢰성 측면에서 유연 전자소자는 장기간 사용에도 불구하고 기능을 유지해야 한다 [12]. 특히 의료 분야에서 사용되는 유연 전자소자의 경우, 기계적 내구성은 사용자의 안전에 직접적인 영향을 미친다 [13]. 예를 들어, 심장 모니터링을 위한 유연한 센서는 신체의 움직임에도 정확한 데이터를 제공해야 하며, 이는 내구성이 확보되어야만 가능하다 [14,15]. 따라서, 유연 전자소자의 설계와 제조 과정에서 기계적 내구성을 고려해야 한다. 이

¹안동대학교 기계설계공학과(Department of Mechanical Design Engineering, Andong National University)

1375, Gyeongdong-ro, Andong-si, Gyeongsangbuk-do, 36729, Korea

²한국공학대학교 신소재공학과(Department of Advanced Materials Engineering, Tech University of Korea)

237, Sangidaehak-ro, Siheung-si, Gyeonggi-do, 15073, Korea

³충북대학교 기계공학부(School of Mechanical Engineering, Chungbuk National University)

1, Chungdae-ro, Seowon-gu, Chungju-si, Chungcheongbuk-do, 28644, Korea

⁴안동대학교 기계로봇공학과(Department of Mechanical Robotics Engineering, Andong National University)

1375, Gyeongdong-ro, Andong-si, Gyeongsangbuk-do, 36729, Korea

⁺Corresponding author: geonhwee.kim@chungbuk.ac.kr, tcmerias@anu.ac.kr (Received: Feb. 29, 2024, Revised: Mar. 6, 2024, Accepted: Mar. 12, 2024)

This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License(<https://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.

를 위해, 고성능의 유연한 소재 개발, 계면 접합 기술의 개선, 그리고 내구성을 고려한 구조적 설계 등이 필요하다.

최근 유연 전자소자의 기계적 내구성 향상을 위한 다양한 연구들이 활발히 진행되고 있다 [16,17]. 대부분의 연구는 유연 전자소자에 사용되는 소재의 내구성 향상에 초점을 맞추고 있다. 예를 들면, 높은 신축성과 높은 전도성을 지닌 전도성 전극 소재의 개발이 유연 전자소자의 내구성 향상을 위한 주요 연구 주제 중 하나이다. 이러한 전극 소재는 굽힘, 늘림, 압축 등의 기계적 스트레스 하에서도 전기적 성능을 유지할 수 있다. 또한, 나노와이어, 나노튜브, 그래핀과 같은 나노 구조물을 이용하여 유연 전자소자의 전도성과 기계적 성질을 동시에 개선하는 연구도 활발히 진행되고 있다 [18-20]. 최근에는 유연 전자소자의 내구성을 향상시키기 위해 자가 치유 메커니즘을 도입하는 연구도 발표되고 있다 [21,22]. 이 방법은 소자 내부에 발생하는 미세한 손상을 스스로 복구할 수 있게 함으로써, 장기간에 걸쳐 안정된 성능을 유지할 수 있도록 한다. 또한 유연 전자소자의 전기적 성능은 금속 박막의 두께, 형성 방법, 기계적 변형시에 발생하는 크랙의 양상에 따라 좌우된다. 유연 소재에 증기 증착법이나 금속성 이온을 주입하여 금속 박막을 제작할 경우 우수한 전기 전도성을 갖지만 10% 이상의 인장 변형 조건에서 금속 박막이 유연 소재에서 박리되는 현상이 발생하며 전기 전도성 저하를 야기한다 [2]. Alzoubi 외 3인은 PET 기판 위 두께가 다른 구리 박막의 높은 피로 주기에 따른 유연 전자소자의 기계적 및 전기적 성능을 연구하였다. 구리 박막의 두께가 두꺼울수록 크랙이 기판에 전파되는데 오랜 시간이 소요되며 저항 변화가 느리게 발생하였다 [23]. 이처럼 유연 전자소자의 전기적 성능은 다양한 요인들의 영향을 받으므로 내구성을 개선하는 요인과의 관련성에 관한 연구가 진행되고 있다.

그러나, 유연 전자소자의 필수 구성요소인 전극과 기판의 계면 접합력과 전극의 기계적/전기적 내구성에 대한 연구는 미흡한 실정이다. 유연 전자소자에서 전극과 기판 사이의 접합력은 소자의 기계적 내구성에 매우 중요한 영향을 미친다. 접합력은 두 재료 사이의 결합 강도를 의미하며, 이는 유연 소자가 다양한 기계적 변형을 견뎌내는 능력에 직접적으로 관련된다. 박리 현상은 유연 전자소자의 기판과 금속 박막 사이의 접합력이 약할 때 주로 발생하는 계면 분리현상으로, 유연 전자소자의 기계적, 전기적 성능 저하로 이어질 수 있다 [24]. 강한 접합력은 기계적 스트레스 상황에서 전극이 기판에서 분리되거나 벗겨지는 것을 방지하여, 전극의 전기적 연결이 손상되는 것을 방지한다.

유연 전자소자의 기판으로 사용되는 폴리머 소재들은 높은 투명성, 유연성, 내화학성 및 전기 절연성과 같은 우수한 특성을 가지고 있으나, 낮은 표면 에너지로 인한 소수성 때문에 다른 물질과의 접합력이 약하다는 단점이 있다 [25-30]. 이러한 문제를 해결하기 위한 하나의 접근법으로, 표면 처리 기술이 연구되어 왔다. 예를 들어, 플라즈마 처리나 접합 레이어 도입 등의 방법을 통해 유연 기판과 전극의 접합력을 향상시키기 위한 연구

가 진행되었다 [31-35]. 최근, Kim 외 2인은 생체 접합 단백질 BSA(Bovine Serum Albumin, 소혈청알부민)을 PET 필름과 구리층의 접합층으로 사용하여 접합력이 우수한 유연 전극을 제작하는 공정을 개발하였다 [36]. 이 연구에서는 플라즈마 처리를 통해 폴리머 기판을 친수성에서 소수성으로 변경하고 BSA 단백질을 흡착하였다. BSA 단백질은 팔라듐 이온을 팔라듐 나노 입자로 변화시켜 가교 결합되고 활성화된다. 가교 결합 및 활성화된 BSA-팔라듐 복합층은 무전해도금의 촉매층으로 사용되며 폴리머 기판에 얇은 금속 막이 형성되었다. 이 기술은 기존의 복잡한 합성 공정을 거쳐야 하는 계면 접합 물질의 한계를 극복하였으며, 90° peel test를 통해 폴리머 기판과 금속층 사이의 접합력을 측정된 결과 약 0.8 N/mm 수준의 접합력을 달성하였다. 이와 같은 기존 연구들에 의해 전극의 접합력이 향상되었으나, 유연 전자소자의 내구성과 전기적 성능에 대한 연구는 미흡하다.

본 연구에서는 반복적인 기계적 변형 하에서 폴리머 기판과 전극층 계면의 접합력에 의한 전기 저항과 표면 변화를 분석하여 접합력이 유연 전극의 전기적 성능에 미치는 영향에 대해 살펴보았다. 유연 전자소자의 기판으로 가장 널리 사용되는 PI 필름과 금속 전극층 계면의 접합력을 생체 접합 단백질 흡착 유무를 통해 각각 다른 접합력을 갖는 유연 전극을 제작하였다. 그 후 굽힘 피로 시험과 인장 시험을 기반으로 유연 전극의 전기적 성능에 대한 유연 기판과 전극층 사이 접합력의 영향을 연구하였다.

2. 연구 방법

2.1 유연 전극 제작

본 연구에서는 폴리머 기판과 전극층 계면의 접합력에 따른 유연 전극의 전기 저항 및 표면 변화를 비교하기 위해 다른 접합력을 갖는 두 유연 전극을 제작하였다. 두께 50 μm 의 PI (Polyimide) 필름을 기판으로 사용하였으며 전극층을 형성하기에 앞서 에탄올과 탈이온수로 기판을 세척하고 표면의 수분을 제거하는 과정을 거쳐 기판에 존재하는 오염물을 제거하였다. PI 필름은 본질적으로 소수성을 띠는 폴리머 소재로써, 친수성으로 표면을 개질하기 위해 산소 플라즈마 처리를 진행하였다. 개질된 PI 필름을 탈이온수 1 ml당 1 mg의 BSA를 첨가하여 제작된 BSA 수용액에 10분간 침지시켜 표면에 단백질을 흡착시켰다. BSA가 흡착된 기판을 팔라듐 수용액에 침지시켜 팔라듐 이온과 접합 단백질의 가교반응을 통해 BSA-팔라듐 복합 촉매층을 형성하였다. 팔라듐 수용액은 0.5 mg/ml의 염화팔라듐 (PdCl_2) 수용액과 1 ml당 0.5 ml의 pH 4.0 완충용액(buffer solution)을 탈이온수에 추가하여 준비되었다. BSA-팔라듐 복합 촉매층이 형성된 기판을 구리 무전해도금 용액에 5분간 침지하여 BSA

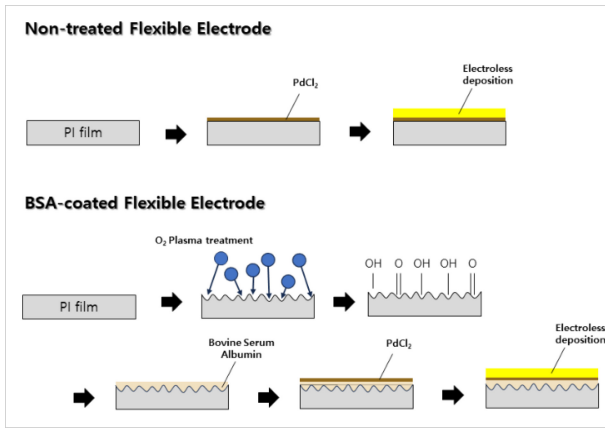


Fig. 1. A schematic illustration of fabricating NFE(Non-treated flexible electrode) with low adhesion strength and BFE(BSA-coated flexible electrode) with superior adhesion strength between PI substrate and copper thin film

흡착을 통해 PI필름과 구리 전극 사이의 접합력이 향상된 유연 전극(BSA-coated Flexible Electrode, BFE)을 제작하였다. 구리 무전해도금 용액은 1 ml당 주석산나트륨 (Potassium Sodium (+)- tartrate tetrahydrate) 14 mg, 수산화나트륨(Sodium hydroxide) 30 mg, 황산구리오수염(Copper(II)sulfate pentahydrate) 13 mg과 포름알데히드 (Formaldehyde) 40 µl를 탈이온수에 첨가하여 준비되었다. 기판은 각 용액 공정 후 탈이온수로 세척되었으며 건조 과정을 거쳤다. 또한 에탄올을 세척을 통해 표면 오염물이 제거된 PI필름을 플라즈마 처리와 BSA 흡착을 하지 않고 팔라듐 촉매 용액과 구리 무전해도금 용액에 각각 10분, 5분간 침지하여 낮은 접합력을 갖는 유연 전극(Non-treated Flexible Electrode, NFE)을 제작하였다. Fig. 1은 본 연구의 두가지 유연 전극을 제작하는 공정의 개략도를 나타낸다.

2.2 성능 평가

PI필름을 기판으로 한 유연 전극의 기판과 전극층 계면의 접합력에 따른 유연 전극의 전기적 성능을 평가하기 위해 굽힘 피로 시험과 인장 시험을 실시하였다. 굽힘 피로 시험은 50,000번 동안 1 Hz의 주파수, Strain amplitude 1.25%, 곡률 반경 4 mm의 조건하에서 수행되었다. 전기 저항 측정을 위해 두 개의 판 사이에 시편을 위치시키고 금속 그립으로 고정하였다. 굽힘 변형에 의해 유연 전극에 가해지는 변형률은 곡률과의 관계를 통해 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$\epsilon = \frac{h}{2r}$$

이때, ϵ 는 굽힘 변형률, h 는 시편의 두께, r 은 곡률 반경을 말한다. 정지한 상태에서 시편을 고정시킨 판을 4 mm의 곡률 반경에서 피로 시험을 진행하였다. 굽힘 피로 시험 중 최대

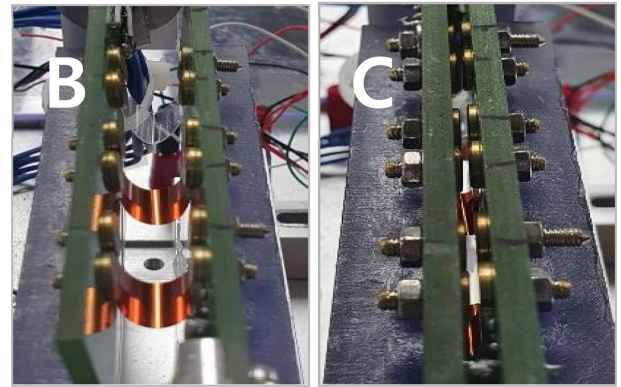
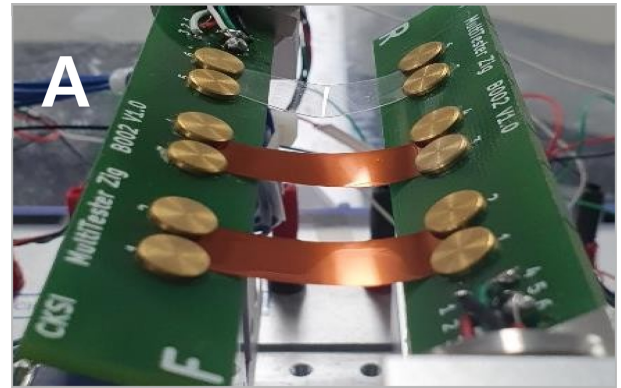


Fig. 2. A image of outer bending fatigue test (A) specimens held in metal grip, (B, C) specimens folded

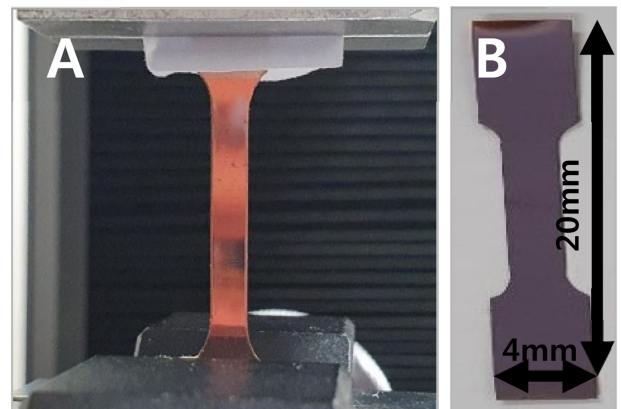


Fig. 3. A image of (A) tensile test (B) specimen

50,000번의 굽힘 사이클 동안 전기 저항을 실시간으로 측정하였다. 실험결과는 총 3개의 시편을 굽힘 피로 시험했을 때 측정된 전기 저항의 평균값으로 계산되었다. 또한 굽힘 피로 시험 후 주사전자현미경(SEM)을 사용하여 금속 박막 표면의 균열을 관찰하였다. Fig. 2는 본 연구에서 사용된 굽힘 피로 시험 장치의 이미지이다.

Fig. 3은 인장 시험 장치의 이미지로, 길이 20 mm, 폭 4 mm 크기의 시편을 사용하였다. 0.03 mm/min의 속도로 진행하였으며 금속 박막의 전기 저항과 연신율은 1초 간격으로 측정되었다.

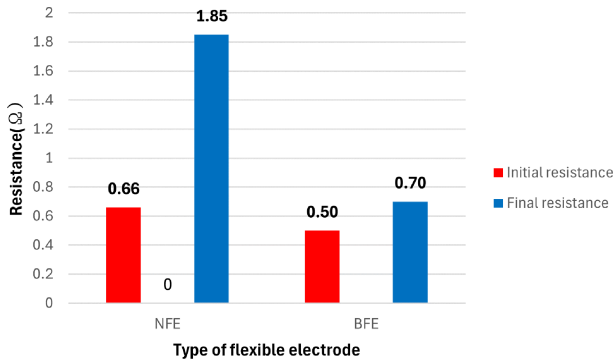


Fig. 4. A graph of the initial and final resistance of NFE(Non-treated flexible electrode) and BFE(BSA-coated flexible electrode)

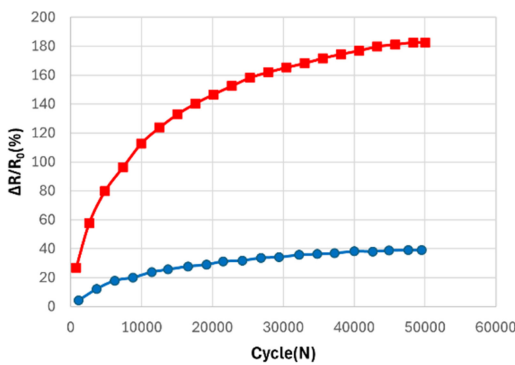


Fig. 5. A graph of changes in electrical resistance of NFE(Non-treated flexible electrode) and BFE(BSA-coated flexible electrode) after outer bending fatigue test

3. 결과 및 고찰

3.1 Outer bending fatigue test

Fig. 4와 Fig. 5는 굽힘 피로 시험 동안 굽힘 사이클 수에 따른 전기 저항 변화의 비율을 보여준다. 굽힘 변형이 발생할 때, 전극과 기판 사이의 접합부에 응력이 가해진다. 접합력이 충분히 강하면, 응력은 물리적 손상 없이 분산될 수 있지만, 접합력이 약하면 응력으로 인해 전극과 기판 사이의 박리현상이 발생할 수 있다. 이러한 박리는 전극의 크랙 형성으로 이어지며, 전기적 경로를 손상시키고 저항을 증가시킨다. 접합력이 낮은 샘플(NFE)은 굽힘 시험 사이클이 증가함에 따라 전기 저항의 증가율이 급격히 상승했다. 초기 수천 사이클 동안 전기 저항의 변화 기울기가 매우 크게 나타나며, 저항 변화율이 전극의 파단 기준인 50%를 넘어섰다. 최종적으로 50,000회의 반복 굽힘에서 180% 이상의 전기 저항의 변화를 보였다. 이는 낮은 접합력 때문에 반복적인 굽힘에 의해 전극과 기판 사이의 연결이 손상되고 전극의 분리나 박리가 발생할 수 있음을 의미하며, 이로 인해 전기적 경로가 손상되고 저항이 크게 증가하였다. 반면에 접합력이 높은 샘플(BFE)은 시험 사이클의 증가에 따른 저항의

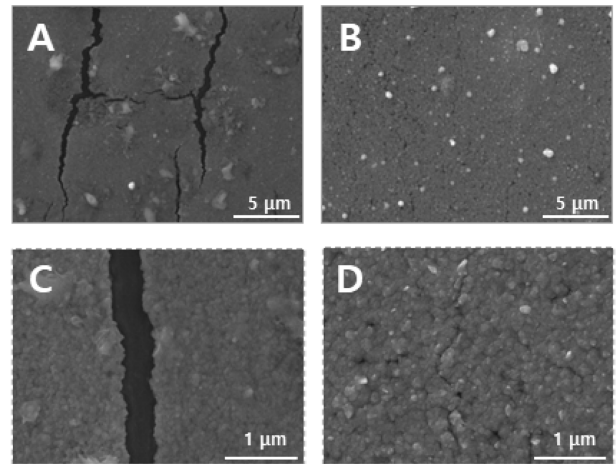


Fig. 6. SEM image of the copper thin film of (A, C) NFE(Non-treated flexible electrode), (B, D) BFE(BSA-coated flexible electrode) after outer bending fatigue test

증가율이 상당히 낮고 안정적이었다. 초기 저항 증가율이 현저히 낮으며, 사이클 수가 50,000회에 이르렀을 때도 저항 증가율은 40% 미만으로 유지되었다. 이는 강한 접합력으로 인해 전극과 기판 사이의 물리적 손상이 현저히 적음을 나타낸다. 결과적으로, 전기적 성능이 보다 안정적으로 유지되었다. 결론적으로, Fig. 5는 유연 전자소자에서 접합력이 높으면 굽힘 변형에 의한 전극의 손상과 전기 저항 증가를 최소화할 수 있음을 보여준다.

Fig. 6는 NFE와 BFE를 굽힘 피로 시험한 후 유연 전극의 구리 표면을 SEM으로 촬영한 이미지이다. NFE(Fig. 6 (A))와 BFE(Fig. 6 (B))에서 보여지는 크랙(crack)의 형태는 전극과 기판 사이의 접합력이 내구성에 미치는 영향을 명확하게 보여준다. NFE(Fig. 6 (A))에서 관찰되는 큰 균열은 기판과 전극 사이에 접합력이 낮을 때 전극의 전기적 성능 저하가 발생하는 원인을 시각적으로 보여준다. 접합력이 낮으면, 전극은 기계적 스트레스나 반복적인 굽힘 등의 외부 요인에 대해 더 취약해진다. 전극과 기판 사이의 결합이 약할 때, 외부 변형에 의해 균열과 박리현상이 발생하고, 점진적으로 균열의 크기가 커지면서 전기적 연결이 단절될 수 있다. 이는 유연 전자소자의 신뢰성과 수명을 크게 감소시키는 주요 요인이다.

반면에 BFE(Fig. 6 (B))에서는 크랙이 관찰되지 않지만, 확대한 사진(Fig. 6 (D))에서는 결정을 따라 미세한 크랙이 관찰된다. 이는 전극과 기판 사이의 접합력이 충분히 강하여 반복적인 굽힘 변형에도 불구하고 물리적인 손상이 거의 발생하지 않았음을 의미한다. 접합력이 강하면 전극이 기판에 잘 붙어 있어서 외부 스트레스에 대한 저항력이 커지고, 균열이 발생할 가능성이 감소하는 것을 확인할 수 있다.

접합력은 유연 전극의 기계적 내구성 및 전기적 성능에 직접적인 영향을 미치는 중요한 요소이다. 접합력이 높은 소자는 굽힘과 같은 물리적 변형에 대해 더 강한 내구성을 보이며, 장기적으로 안정적인 성능을 유지하였다. 반대로 접합력이 낮으면

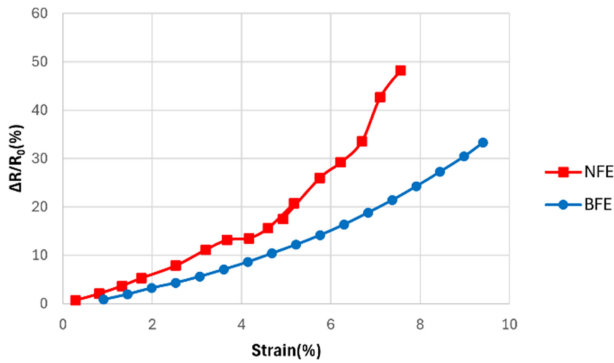


Fig. 7. A graph of changes in electrical resistance of NFE(Non-treated flexible electrode) and BFE(BSA-coated flexible electrode) after the tensile test

전극은 박리현상과 함께 쉽게 손상되고 전기적 연결이 손상될 위험이 증가한다.

3.2 Tensile test

물리적으로, 전기 저항은 재료를 구성하는 원자 또는 분자 사이의 상호 작용과 전자의 이동에 영향을 받는다. 인장 변형이 가해질 때 물질 내부의 구조적 배열이 변하면서 이러한 상호 작용과 전자의 이동 경로가 변화하면서 전기적 저항의 변화를 초래한다. 특히, 재료가 인장되면 내부에 미세 균열이나 결함이 생길 수 있으며, 이는 전자가 원활하게 흐를 수 있는 경로를 방해한다. 매우 큰 인장 변화가 가해지면 내부 결함이 끊어질 수 있으며, 이는 전기적 연속성의 상실과 함께 저항의 급격한 증가로 나타난다. Fig. 7은 인장 시험 동안 접합력이 낮은 샘플(NFE)과 접합력이 높은 샘플(BFE)의 전기 저항 변화를 나타낸다. NFE와 BFE 모두에서 변형(Strain)이 증가함에 따라 저항의 변화율이 증가하는 경향을 보인다. 이는 기판이 늘어나면서 전극의 손상과 함께 전기적 경로가 단절되었음을 의미한다. BFE의 저항 변화율은 NFE에 비하여 전반적으로 낮은 수준을 유지하면서 안정적인 변화를 보인다. 이는 접합력이 높은 전극이 인장에 의한 변형에 대한 안정성이 우수하며, 내부 구조가 더 안정적이라는 것을 의미한다. 특히, NFE에서는 저항 변화율이 변형이 증가함에 따라 비선형적으로 증가하며, 변형이 8% 이상에서 저항이 급격하게 증가하여 전기적 단절이 발생하였다. 이는 전극에서 비가역적이 손상이 발생하였음을 의미한다. 반면, BFE는 10% 변형까지 안정적인 저항 변화를 나타내었다. 따라서 접합력이 높을수록 유연 전극은 인장에 의한 변형에 더 잘 견디며, 전기적 성능이 유지되는 것을 보여준다.

4. 결 론

유연 전자장치는 일상적인 사용 중에 반복적인 굽힘, 비틀림,

인장 등의 환경에 노출되며, 이로 인해 전극의 성능 변화가 발생할 수 있다. 유연 전자장치의 전기적, 기계적 성능을 개선하기 위해서는 유연 전자소자의 내구성을 향상시키는 것뿐만 아니라 그에 따른 전기적 성능을 평가하는 것이 필수적이다. 따라서 본 연구에서는 두가지 조건에서 폴리머 기판과 전극층 사이의 접합력이 유연 전극의 전기적 성능에 미치는 영향을 연구하였다. BSA 생체 접합 단백질을 기판에 코팅하여 기판과 금속 전극의 계면 접합력을 향상시켰고 굽힘 피로 시험과 인장 시험을 통해 접합력에 따른 유연 전극의 표면 균열 및 전기 저항 변화를 관찰하였다. 표면의 균열은 시료 전체의 전기적 저항을 증가시키는 요소로써, 높은 접합력을 갖는 BFE의 경우 굽힘 피로 시험 이후에 결정립계를 따라 미세한 균열이 발생하였으나 균열의 전파가 거의 발생하지 않았다. 50,000회의 굽힘 피로 시험 이후에도 전극의 저항 변화는 약 40% 미만으로 전기적 성능이 크게 저하되지 않음을 확인하였다. 반면, 접합력이 낮은 NFE는 크고 다수의 균열이 표면에 형성되었으며 이로 인해 굽힘 시험 반복 횟수가 증가하거나 인장 변형률이 증가할수록 전기 저항 변화가 최대 180%까지 발생했다. 이는 형성된 균열의 전파로 인해 발생했다고 판단된다.

결과적으로 기판과 전극 사이에 우수한 접합력을 갖는 유연 전극은 접합력이 낮은 유연 전극에 비하여 굽힘 및 인장 시험으로 인해 표면에 형성되는 균열의 크기가 작고 적으며 이는 유연 전극의 전기 저항 변화를 감소시킬 수 있다. 이에 따라 유연 전극의 기판과 금속층 사이의 접합력이 유연 전극의 전기적 성능에 큰 영향을 미치는 요소임을 확인하였다. 이 연구를 통해 향후 rollable, foldable, stretchable 등 다양한 형태의 유연 전자 장치의 상용화를 위한 유연 전자 소자의 성능 분석에 유용한 정보를 제공할 것으로 기대한다.

감사의 글

본 연구는 2023, 2024년도 국립안동대학교 기본 연구지원사업에 의하여 연구되었습니다.

REFERENCES

- [1] S. H. Kang and S. W. Hong, "Recent Progress in Flexible/Wearable Electronics," *J. Weld. Joining*, Vol. 32, No. 3, pp. 34-42, 2014.
- [2] G. B. Lee and C. Nah, "Preparation and Property of Flexible/Stretchable Electrodes", *Elastomers and Composites*, Vol. 47, No. 4, pp. 272-281, 2012.
- [3] W. Gao, H. Ota, D. Kiriya, K. Takei, and A. Javey, "Flexible Electronics toward Wearable Sensing", *Acc. Chem. Res.*, Vol. 52, No. 3, pp. 523-533, 2019.
- [4] S. Huang, Y. Liu, and Z. Ren, "Flexible electronics: stretch-

- able electrodes and their future”, *Adv. Funct. Mater.*, Vol. 29, No. 6, pp. 1805924(1)-1805924(43), 2019.
- [5] H. Y. Lee, S. M. Yi, J. H. Lee, H. S. Lee, S. Hyun, and Y. C. Joo, “Effects of Bending Fatigue on the Electrical Resistance in Metallic Films on Flexible Substrates”, *Met. Mater. Int.*, Vol. 16, No. 6, pp. 947-951, 2010.
- [6] B. J. Kim, Y. W. Kwon, J. S. Lee, and Y. C. Joo, “Mechanical Stress and Fatigue Lifetime of Metal Interconnect for Wearable Electronics during Twisting Deformation”, *Proc. of KSPE 2019 Autumn Conf.*, p. 476, Changwon, Korea, 2019.
- [7] T. W. Kim, J. S. Lee, Y. C. Kim, Y. C. J., and B. J. K., “Bending Strain and Bending Fatigue lifetime of Flexible Metal Electrodes on Polymer Substrates”, *J. Mater.*, Vol. 12, No. 15, pp. 2490(1)-2490(9), 2019.
- [8] S. Han, B. K. Ju, and C. Yang, “Ultra-flexible and transparent electrodes with controllable crack length via metal-polymer hybrid nanostructure”, *Thin Solid Films*, Vol. 757, pp. 139388(1)-139388(8), 2022.
- [9] B. J. Kim, “Reliability of Metal Electrode for Flexible Electronics”, *J. Microelectron. Packag. Soc.*, Vol. 20, No. 4, pp. 1-6, 2013.
- [10] J. Y. Park, W. J. Lee, H. J. Nam, and S. H. Choa, “Technology of Stretchable Interconnector and Strain Sensors for Stretchable Electronics”, *J. Microelectron. Packag. Soc.*, Vol. 25, No. 4, pp. 25-34, 2018.
- [11] H. S. Jung, K. Eun, E. K. Lee, K. Y. Jung, S. H. Choi, and S. H. Choa, “Flexible durability of Ultra-Thin FPCB”, *J. Microelectron. Packag. Soc.*, Vol. 21, No. 4, pp. 69-76, 2014.
- [12] S. M. Lee, J. H. Kwon, S. Kwon, and K. C. Choi, “A Review of Flexible OLEDs Toward Highly Durable Unusual Displays”, *IEEE Trans. Electron Devices*, Vol. 64, No. 5, pp. 1922-1931, 2017.
- [13] K. Chen, J. Ren, C. Chen, W. Xu, and S. Zhang, “Safety and effectiveness evaluation of flexible electronics materials for next generation wearable and implantable medical devices”, *Nano Today*, Vol. 35, p. 100939, 2020.
- [14] S. H. Kwon and L. Dong, “Flexible sensors and machine learning for heat monitoring”, *Nano Energy*, Vol. 102, pp. 107632(1)-107632(45), 2022.
- [15] T. Zhang, N. Liu, J. Xu, Z. Liu, Y. Zhou, Y. Yang, S. Li, Y. Huang, and S. Jiang, “Flexible electronics for cardiovascular healthcare monitoring”, *The Innovation*, Vol. 4, No. 5, p. 100485, 2023.
- [16] K. D. Harris, A. L. Elias, and H. J. Chung, “Flexible electronics under strain: a review of mechanical characterization and durability enhancement strategies”, *J. Mater. Sci.*, Vol. 51, pp. 2771-2805, 2016.
- [17] S. W. Jin, Y. H. Lee, K. M. Yeom, J. Yun, H. Park, Y. R. Jeong, S. Y. Hong, G. Lee, S. Y. Oh, J. H. Lee, J. H. Noh, and J. S. Ha, “Highly Durable and Flexible Transparent Electrode for Flexible Optoelectronic Applications”, *ACS Appl. Mater. Interfaces*, Vol. 10, No. 36, pp. 30706-30715, 2018.
- [18] J. H. Yoo, Y. Kim, M. K. Han, S. Choi, K. Y. Song, K. C. Chung, J. M. Kim, and J. Kwak, “Silver Nanowire-Conducting Polymer-ITO Hybrids for Flexible and Transparent Conductive Electrodes with Excellent Durability”, *ACS Appl. Mater. Interfaces*, Vol. 7, No. 29, pp. 15928-15934, 2015.
- [19] K. A. Sierros, D. S. Hecht, D. A. Banerjee, N. J. Morris, L. Hu, G. C. Irvin, R. S. Lee, and D. R. Cairns, “Durable transparent carbon nanotube films for flexible device components”, *Thin Solid Films*, Vol. 518, No. 23, pp. 6977-6983, 2010.
- [20] D. Koo, S. Jung, J. Seo, G. Jeong, Y. Choi, J. Lee, S. M. Lee, Y. Cho, M. Jeong, J. Lee, J. Oh, C. Yang, and H. Park, “Flexible organic solar cells over 15% efficiency with polyimide-integrated graphene electrodes”, *Joule*, Vol. 4, No. 5, pp. 1021-1034, 2020.
- [21] H. Park, T. Kang, H. Kim, J. C. Kim, Z. Bao, and J. Kang, “Toughening self-healing elastomer crosslinked by metal-ligand coordination through mixed counter anion dynamics”, *Nat. Commun.*, Vol. 14, No. 1, pp.5026(1)-5026(10), 2023.
- [22] B. Kang, J. Yun, S. G. Kim, and M. Yang, “Adaptive Fabrication of a Flexible Electrode by Optically Self-Selected Interfacial Adhesion and Its Application to Highly Transparent and Conductive Film”, *Small*, Vol. 9, No. 12, pp. 2111-2118, 2013.
- [23] K. Alzoubi, S. Lu, B. Sammakia, and M. Poliks, “Experimental and Analytical Studies on the High Cycle Fatigue of Thin Film Metal on PET Substrate for Flexible Electronics Application”, *IEEE Trans. Compon., Packaging Manuf. Technol.*, Vol. 1, No. 1, pp. 43-51, 2011.
- [24] B. J. Kim, “Reliability of Metal Electrode for Flexible Electronics”, *J. Microelectron. Packag. Soc.*, Vol. 20, No. 4, pp. 1-6, 2013.
- [25] A. Laskarakis, S. Logothetidis, S. Kassavetis, and E. Papaioannou, “Surface modification of poly (ethylene terephthalate) polymeric films for flexible electronics applications”, *Thin Solid Films*, Vol. 516, No. 7, pp. 1443-1448, 2008.
- [26] Y. Wang, Y. Wang, J. J. Chen, H. Guo, K. Liang, K. Marcus, Q. L. Peng, J. Zhang, and Z. S. Feng, “A facile process combined with inkjet printing, surface modification and electroless deposition to fabricate adhesion-enhanced copper patterns on flexible polymer substrates for functional flexible electronics”, *Electrochim. Acta*, Vol. 218, No. 10, pp. 24-31, 2016.
- [27] P. Fabbri and M. Messori, “5-Surface Modification of Polymers: Chemical Physical, and Biological Routes”, *Modification of Polymer Properties*, pp. 109-130, 2017.
- [28] S. J. Park, T. J. Ko, J. Yoon, M. W. Moon, K. H. Oh, and J. H. Han, “Highly adhesive and high fatigue-resistant copper/PET flexible electronic substrates”, *Appl. Surf. Sci.*, Vol. 427, No. Part B, pp. 1-9, 2018.
- [29] M. G. Faraj, K. Ibrahim, and M. K. M. Ali, “PET as a plastic substrate for the flexible optoelectronic applications”, *Optoelectron. Adv. Mater. Rapid Commun.*, Vol. 5, No. 8, pp. 879-882, 2011.
- [30] V. Zardetto, T. M. Brown, A. Reale, and A. Di Carlo, “Substrates for flexible electronics: A practical investigation on the electrical, film flexibility, optical, temperature, and solvent resistance properties”, *J. Polym. Sci. B Polym. Phys.*,

- Vol. 49, No. 9, pp. 638-648, 2011.
- [31] M. Iqbal, D. K. Dinh, Q. Abbas, M. Imran, H. Sattar, and A. Ul Ahmad, "Controlled surface wettability by plasma polymer surface modification", *Surfaces*, Vol. 2, No. 2, pp. 349-371, 2019.
- [32] C. Alemán, G. Fabregat, E. Armelin, J. J. Buendía, and J. Llorca, "Plasma surface modification of polymers for sensor applications", *J. Mater. Chem. B*, Vol. 6, No. 41, pp. 6515-6533, 2018.
- [33] I. Y. Yang, S. W. Myung, H. S. Choi, and I. H. Kim, "Surface Modification of Polyurethane Film Using Atmospheric Pressure Plasma", *Polymers*, Vol. 29, No. 6, pp. 581-587, 2005.
- [34] S. K. Hong, I. S. You, I. T. Song, and H. S. Lee, "Material-Independent Surface Modification Inspired by Mussel-Adhesion", *Polymer Sci. Technol.*, Vol. 23, No. 4, pp. 396-406, 2012.
- [35] D. Y. Im, "Study on Enhancement of Adhesion between Electrode and Substrate Through Surface Modification of Flexible/Stretchable Substrate", M. S. thesis, Andong National University Graduate School, Andong, KR, 2024.
- [36] G. H. Kim, H. Y. Hwang, and T. An, "In Situ BSA (Bovine Serum Albumin) Assisted Electroless Plating Method with Superior Adhesion Property", *Adv. Mater. Interfaces*, Vol. 9, No. 2, p. 2101203, 2022.