

강체-연성 소자 분리 가능한 접이식 구조 기반 약물 전달 및 센싱 통합 피부 패치에 관한 시뮬레이션 연구

송수정, 이혁준, 장경인*

*대구경북과학기술원

{thong486, sa1408, *kijang}@dgist.ac.kr

A Simulation Study on a Foldable Heterogeneous Skin Patch with Rigid-Soft Separation for Integrated Sensing and Drug Delivery

Soojoeng Song, Hyeokjun Lee, Kyung-In Jang*

DGIST

요 약

본 논문은 생체 신호 센싱과 약물 전달 기능을 통합한 시스템 수준의 접이식 웨어러블 전자 패치를 제안한다. 개인 맞춤형 헬스케어의 확산과 함께 웨어러블 기기를 통한 생체 신호 수집이 활발히 이루어지고 있으며, 이를 기반으로 한 실시간 약물 전달 기능의 필요성 또한 증가하고 있다. 이러한 통합 시스템을 구현하기 위해서는 생체신호 센서, 약물 전달 유닛, 통신 및 제어 모듈, 전원 장치 등이 포함되어야 하나, 각 구성 요소의 기계적 특성 차이로 인해 기능적 충돌이 발생할 수 있다. 특히, 통신 및 제어와 같은 강체 소자는 피부 밀착을 방해하고, 연성 소자에 전달되는 기계적 변형은 전체 시스템 성능을 저하시킬 수 있다. 이를 해결하기 위해 본 연구에서는 접이식 구조를 도입하여 강체 소자와 연성 피부 접촉 인터페이스를 효과적으로 분리하였다. 유한요소해석(FEA)을 통해, 강체 소자가 탑재된 기관과 연성 전극이 배치된 기관 간의 기계적 응력 분리가 성공적으로 이루어졌음을 확인하였다. 또한, 접힌 상태의 약물 전달 채널을 통한 유량 변화는 펼친 상태 대비 1% 이하로 유지되었으며, 광도파로를 통한 광 신호 전송도 정상적으로 수행되었다. 본 연구는 구조적 분리를 기반으로 약물 전달과 생체 신호 센싱 기능을 동시에 구현할 수 있는 웨어러블 플랫폼의 가능성을 제시한다.

I. 서 론

고령화 사회의 진입과 함께 만성 질환과 개인 맞춤형 헬스케어에 대한 관심이 높아지면서, 생체 신호를 장기간 모니터링하고 필요 시 치료까지 연계할 수 있는 웨어러블 생체의료기기의 중요성이 커지고 있다. 이에 따라 생체 감지와 약물 전달 기능을 하나의 시스템에 통합한 폐루프(closed-loop) 기반 플랫폼이 주목받고 있으며, 이는 차세대 헬스케어 솔루션으로 기대를 모으고 있다. 그러나 이러한 통합 시스템을 단일 장치 내에서 안정적으로 구현하려면 유연성과 기계적 내구성, 정밀 제어 성능을 동시에 만족시켜야 하며, 이는 구조 설계와 공정 측면에서 상당한 기술적 도전과제를 수반한다.

기존의 비아홀 기반 다층 구조는 전기적 연결성과 공간 활용에 있어 이점을 가지지만, 복잡한 제조 공정과 유체 누출 위험으로 인해 약물 전달을 포함하는 다중 모달 시스템에는 한계가 있다. 이러한 문제를 해결하기 위해 본 연구에서는 단일 평면 구조를 기반으로 접이식 설계를 도입하였다. 시스템을 평면 상태에서 제조한 뒤 접는 방식은, 제어·통신 등 강체 모듈과 피부 접촉 전극 및 센서와 같은 연성 인터페이스를 효과적으로 분리하고, 각 구성 요소가 요구하는 물리적 특성을 독립적으로 구현할 수 있도록 한다.

제안된 다중 모달 피부 패치는 전기적 및 광학적 센서를 이용한 생체 신호 측정 기능과, 마이크로펌프 기반의 약물 전달 기능을 통합하고 있다. 특히, 설계 구조의 타당성을 정량적으로 평가하기 위해 유한요소해석(Finite Element Analysis, FEA)을 중점적으로 수행하였다. 분석 결과, 접이식 구조에 포함된 변형 분리층은 외부 응력을 효과적으로 분산시키며, 강체 소자와 연성 전극 사이의 기계적 간섭을 최소화함을 확인하였다. 또한, 구조의 굽힘에 따른 약물 전달 채널 내 유속 변화는 1% 미만으로 유지되어, 약물 전달 성능의 일관성이 확보되었으며, 광 신호 전달 역시 굽힘 상태에서도 정상적으로 유지됨이 FEA 기반 광전 시뮬레이션을 통해 검증되었다. 따라서, 본 연구는 유한요소해석을 기반으로 제안된 구조의 기계적 안정성과 기능 통합 가능성을 정량적으로 분석하고, 이를 통해 차세대 웨어러블 헬스케어 플랫폼으로의 적용 가능성을 평가하고자 한다.

II. 본론

그림 1은 기계적 유연성과 무선 동작을 동시에 구현한 다중 모달 장치(fMMD)를 개략적으로 나타낸다. 해당 장치는 심박수, 움직임, 피부 온도 등의 생체 신호를

측정하는 센서 모듈, 힘-전기 변환형 약물 전달 모듈, BLE 기반 통신 모듈, 리튬 폴리머 배터리로 구성되며, 전 시스템은 실리콘 엘라스토머로 캡슐화되어 피부에 안정적으로 부착된다. 전체 회로는 아일랜드-브릿지 구조를 적용한 연성 인쇄회로기판(FPCB) 위에 형성되며, 접이식 구조를 통해 공간 효율을 극대화하고, 부피가 큰 부품들이 피부 접촉을 방해하는 것을 방지한다.

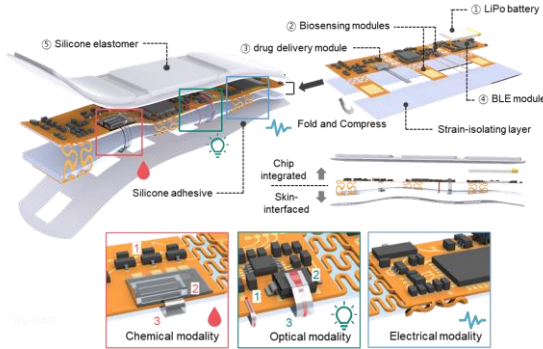


그림 1. 접이식 구조 기반 약물 전달 및 센싱 통합 피부 패치 개략도

장치의 접힘 과정에서는 서펜타인 인터랙트를 통해 기계적 응력이 분산되며, 최대 변형률은 0.03 이하로 유지되어 회로 연결의 안정성이 확보된다. 특히 변형 분리층 역할을 하는 실리콘 기반 중간층은 굽힘, 비틀림, 인장 등의 다중 변형 조건에서도 피부 접촉면과 칩 집적 면 사이의 응력 전달을 차단하는 데 효과적이다.

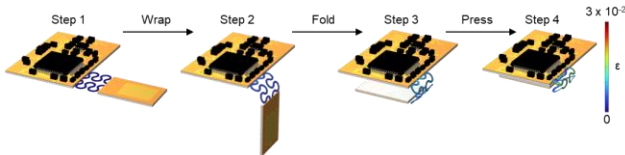


그림 2. 장치의 접힘 과정 및 기계적 응력 분석

마이크로유체 채널은 접힘 구간에서 압축 변형을 수용할 수 있도록 버클링 구조로 설계되었으며, 굽힘 전후의 속도 변화는 0.1% 이하로 유지되었다. 채널 내 압력 구배도 최대 굽힘 지점에서 9% 이내의 변화를 보여, 실시간 약물 주입 성능이 구조 변형의 영향을 거의 받지 않음을 확인하였다.

광 도파관은 굴절률이 다른 PDMS 재료를 조합한 릿지-코어 구조로 설계되었으며, 끝단은 45 도로 절단하여 수평으로 입사된 광을 수직 방향으로 전환시켜 피부에 도달하게 한다. 접힘에 따른 일부 손실은 존재하지만, 광 투과율은 70% 이상을 유지하여 광용적맥파(PPG) 신호 측정에 충분한 성능을 보장한다. 이러한 구조적 설계는 전기적, 화학적, 광학적 모달리티의 통합을 가능케 하며, 무선 데이터 전송과 피드백 제어를 통해 실시간 감지 및 약물 주입이 동시에 가능한 차세대 피부 부착형 시스템의 구현 기반을 제공한다.

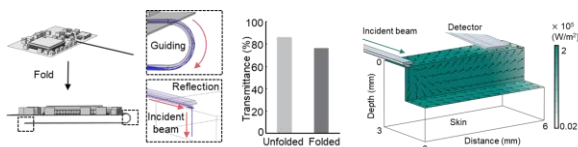


그림 3. 접이식 구조에서 광 도파관 FEA 분석

III. 결론

본 연구에서는 접이식 구조를 기반으로 강체 부품과 연성 피부 접촉 인터페이스를 효과적으로 분리할 수 있는 시스템 수준의 다중 모달 웨어러블 장치를 설계하고 구현하였다. 기계적 안정성 분석, 마이크로유체 채널의 내변형성 분석, 광 도파관의 광학적 신뢰성 분석을 통해 다양한 기계적 변형 조건 하에서도 장치의 성능이 안정적으로 유지됨을 확인하였다. 특히, 유한요소해석(FEA)을 통해 구조적 응력 분산과 신호 전달 경로의 기능 유지가 정량적으로 검증되었으며, 굽힘과 압축, 비틀림 등의 변형에도 불구하고 약물 전달 및 생체 신호 감지 성능이 저하되지 않음을 실험적으로 입증하였다.

제안된 접이식 구조는 공간 활용도와 기계적 내구성을 동시에 향상시키며, 피부 밀착성과 신뢰성 있는 신호 측정을 가능하게 한다. 본 연구의 결과는 차세대 웨어러블 헬스케어 기기의 통합 설계 및 기능적 안정성 확보에 실질적인 기여를 할 수 있으며, 실시간 생체 신호 기반 약물 전달 등 맞춤형 치료 플랫폼으로의 활용 가능성을 제시한다.

ACKNOWLEDGMENT

본 과제(결과물)은 한국연구재단의 재원으로 지원을 받아 수행된 연구 결과입니다.

참 고 문 헌

- [1] Kim, J., et al., "Wearable biosensors for healthcare monitoring," *Nature Biotechnology*, vol. 37, pp. 389– 406, 2019.
- [2] Tan, M., et al., "Recent advances in intelligent wearable medical devices integrating biosensing and drug delivery," *Advanced Materials*, vol. 34, 2108491, 2022.
- [3] Wang, X., et al., "Silk-molded flexible, ultrasensitive, and highly stable electronic skin for monitoring human physiological signals," *Advanced Materials*, vol. 26, pp. 1336– 1342, 2013.
- [4] Kim, J., et al., "Simultaneous monitoring of sweat and interstitial fluid using a single wearable biosensor platform," *Advanced Science*, vol. 5, 1800880, 2018.
- [5] Jinno, H., et al., "Self-powered ultraflexible photonic skin for continuous bio-signal detection via air-operation-stable polymer light-emitting diodes," *Nature Communications*, vol. 12, 2234, 2021.