

신축성 무기 압전 에너지 하베스터를 위한 전극에 관한 연구

예준우, 하정대, 장경인
대구경북과학기술원

kijang@dgist.ac.kr

Optimized Electrode for stretchable inorganic piezoelectric energy harvester

Junwoo Yea, Jeongdae Ha, Kyung-In Jang

Department of Robotics and Mechatronics Engineering, Daegu Gyeongbuk Institute of Science and Technology (DGIST)

요약

본 논문은 3D 베클링과 같은 구조가 소자에 신축성을 부여하는 데 널리 활용되고 있으나, 변형 과정에서 내부 변형률이 고르게 분포되지 않아 압전 소자 적용에 한계가 있음을 다룹니다. 특히, 반대 방향의 변형률이 동시에 작용할 경우 전기 출력이 상쇄되어 감소하는 문제가 발생할 수 있습니다. 본 연구에서는 변형률 방향에 최적화된 전극 설계와 출력 상쇄를 방지하는 회로 구성을 제안합니다. 이를 통해 압전 나노발전기(PENG)에 신축성을 부여하고 전기 출력 손실을 최소화하여, 최대 출력 8.34 mW/cm^2 를 달성한 에너지 손실이 적은 신축성 PENG를 구현하였습니다. 또한, 이론적 모델링을 통해 기계적-전기적 특성의 결합을 분석하고, *in vitro* 및 *in vivo* 실험으로 생체역학적 에너지 수확 효과를 검증하였습니다. 이러한 결과는 웨어러블 전자기기와 생체전자 소자를 위한 효율적이고 견고한 솔루션을 제시합니다.

I. 서론

구조적으로 신축성을 갖지 않는 소재에 신축성을 부여하기 위해 뱀 모양(serpentine), 3D 베클링, 키리가미(kirigami) 설계를 활용한 전략이 널리 사용되고 있습니다. 그러나 이러한 접근 방식을 압전 나노발전기(PENGs)에 적용하는 것은 여전히 큰 도전 과제로 남아 있습니다. 이러한 구조적 전략은 복잡한 내부 변형률을 유발하여 압전 재료에서 출력 전압 방향의 정렬을 방해하며, 결과적으로 PENGs의 출력을 크게 감소시킵니다. 따라서, 기존의 구조적 전략은 PENGs 소자에 신축성을 제공하지만, 동시에 출력 성능을 크게 저하시킨다는 한계를 가지고 있습니다. 일부 연구에서는 베클링된 PZT 기반 신축성 PENGs(S-PENGs)를 제작하려는 시도가 있었으나, 에너지 수확 성능의 큰 감소 문제를 극복하지는 못했습니다. [1], [2] 이러한 한계로 인해 PENGs에 신축성을 부여하기 위한 기존의 구조적 전략은 연구자들 사이에서 선호되지 않는 상황입니다.

본 연구에서는 반대 방향의 변형이 유발되는 압전 소자에서 출력을 효율적으로 수확할 수 있는 고급 전극 구조를 제안합니다. 우리는 변형 방향성을 정확히 예측하도록 설계된 3D 베클링 구조의 S-PENGs 용 전극을 설계하였습니다. 기존의 d31-타입 PENGs 소자와는 달리, 곡률 방향에 따라 전극을 분리하고 동일한 극성으로 연결하여 S-PENGs에서 출력 감소 문제를 해결하였습니다. 또한, 이론적 및 수치적 분석을 통해 제안된 설계의 효용성을 입증하였습니다. 착용형 및

이식형 응용 사례를 통해 제안된 설계가 고효율 S-PENGs 제작에 활용될 수 있음을 확인하였습니다.

II. 본론

새롭게 제안된 곡률 기반 전극 설계는 기존 압전 나노발전기(PENGs)의 한계를 극복하기 위해 도입되었습니다. 기존 설계에서는 곡률이 반대인 영역을 동일한 전극으로 연결하여 내부 전류가 발생하고, 이로 인해 생성된 전기 에너지가 열로 소산되는 문제가 있었습니다. 이는 출력 전압 감소를 초래하며, 에너지 수확 효율을 크게 저하시키는 원인으로 작용했습니다. 이에 반해, 곡률 기반 전극 설계는 각 곡률 영역을 개별적으로 분리하고, 동일한 곡률 영역끼리 직렬로 연결함으로써 이러한 내부 전류의 흐름을 원천적으로 차단합니다(Figure 1a).

곡률 기반 전극 설계는 전극 간 내부 전류 흐름을 방지하는 동시에, 반대 곡률 영역을 직렬로 연결하여 총 출력 전압을 기존 설계 대비 두 배로 증가시키는 효과를 가집니다. 이를 통해 곡률 기반 설계는 에너지 소산을 최소화하고, 생성된 전기 에너지를 외부 부하를 통해 효율적으로 활용할 수 있도록 합니다.

수치 해석(Finite Element Analysis, FEA)을 통해 이 설계의 효과를 검증하였습니다(Figure 1b). 해석 결과, 곡률 기반 전극 설계를 적용한 경우 변형률 분포는 기존 설계와 큰 차이가 없으나, 출력 전압의 경우 현저히 개선된 결과를 보였습니다. 특히, 기존 설계에서는 변형

후 약 10ns 이내에 출력 전압이 급격히 감소했으나, 곡률 기반 설계를 적용한 경우 내부 전류 흐름이 차단되어 출력 전압 감소가 억제되었습니다. 이로 인해 곡률 기반 전극 설계는 생성된 전기 에너지를 효율적으로 수확할 수 있었으며, 외부 부하에 전달되는 에너지 비율도 크게 증가하였습니다.

이와 같은 결과는 곡률 기반 전극 설계가 기존의 d31 모드 압전 나노발전기 설계 대비 뛰어난 성능을 제공하며, 신축성 에너지 수확 소자의 에너지 효율을 크게 향상시킬 수 있음을 보여줍니다. 이러한 설계는 착용형 및 이식형 응용 분야에서 고효율 압전 나노발전기 개발을 위한 중요한 기반을 제공합니다.

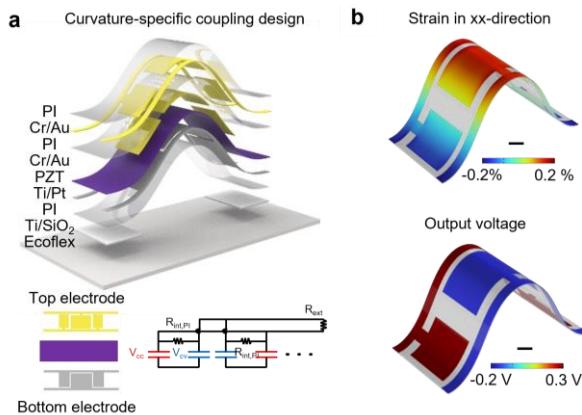


Figure 1. 곡률 기반 결합 전극을 적용한 S-PENG 의 설계와 출력 분석.

곡률 기반 결합 전극 설계를 적용한 S-PENG 소자를 제작하고, 이를 실험적으로 평가하여 설계의 효율성과 출력 성능을 검증하였습니다. Figure 2a 는 회로 구성(직렬 연결 또는 병렬 연결)에 따라 S-PENG 의 출력 전압이 어떻게 변화하는지를 보여줍니다. 볼록(convex) 및 오목(concave) 영역이 병렬로 연결될 경우, S-PENG 의 등가 회로는 기존 전극 설계와 동일하게 작동하며, 각 영역에서 생성된 전압이 서로 상쇄되어 상쇄 간섭(destructive interference)이 발생합니다. 이로 인해 전압 출력이 급격히 감소하며, 에너지 수확 효율 또한 크게 저하됩니다.

반면, 볼록 및 오목 영역이 직렬로 연결된 경우, 각 영역에서 생성된 전압이 보강 간섭(constructive interference)을 통해 합쳐지면서 출력 전압이 크게 증가합니다. 이러한 설계는 내부 전류 손실을 최소화하며, 각 영역에서 생성된 에너지를 효율적으로 활용할 수 있도록 합니다. 결과적으로, 직렬 연결은 병렬 연결에 비해 전체 에너지 수확 효율을 현저히 개선할 수 있음을 보여줍니다.

측정된 데이터를 기반으로, 직렬 연결 회로 구성에서 S-PENG 의 전력 밀도(power density)는 약 $50 \text{ M}\Omega$ 의 외부 저항 조건에서 8.34 mW/cm^2 로 최대치를 기록하였습니다. 이는 S-PENG 의 출력 전압 및 에너지 수확 효율이 해당 조건에서 최적화되었음을 나타냅니다. 이러한 결과는 곡률 기반 결합 설계가 기존 방식에 비해 출력 성능을 크게 향상시킬 수 있음을 명확히 보여줍니다.

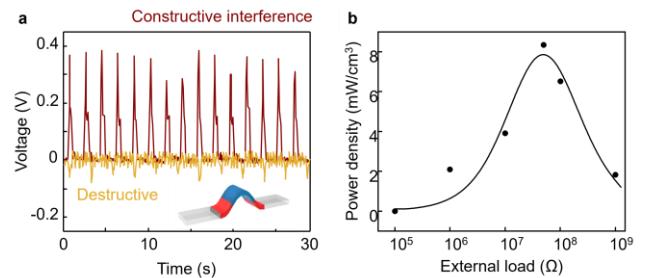


Figure 2. 곡률 기반 결합 전극을 적용한 S-PENG 의 출력 성능 평가

III. 결론

본 연구에서는 신축성 압전 나노발전기(S-PENGs)의 내부 변형 방향에 맞게 설계된 고급 전극 설계를 제안합니다. 기존 전극 설계는 반대 방향의 출력을 동시에 수확함으로써 S-PENGs 의 에너지 효율을 크게 감소시키는 한계가 있습니다. 이러한 제한은 구조적 전략을 S-PENGs 에 적용하는 데 있어 큰 도전 과제로 작용해 왔습니다. 본 설계는 압전 나노발전기(PENGs)에 신축성을 부여하면서도 에너지 손실을 방지할 수 있도록 구현되었습니다. 본 연구는 변형 방향에 특화된 결합 전극 설계를 통해 신축성 압전 에너지 하베스터(SPEHs)를 설계하려는 연구자들에게 중요한 통찰을 제공합니다.

ACKNOWLEDGMENT

This work was supported by the National Research Foundation of Korea (NRF) funded by Ministry of Science and ICT (24-KUJoint-03, RS-202400415347, 24-SENS-01, HR22C1832). This research was also supported by the NAVER Digital Bio Innovation Research Fund, funded by NAVER Corporation (Grant No. 3720230070).

참고 문헌

- [1] Feng, X. et al, "Stretchable ferroelectric nanoribbons with wavy configurations on elastomeric substrates," ACS Nano 2011, 5 (4), 3326–3332.
- [2] Qi, Y. et al, "Enhanced piezoelectricity and stretchability in energy harvesting devices fabricated from buckled PZT ribbons," Nano Lett. 2011, 11 (3), 1331–1336.