

A Fabric-Based Wearable Piezoelectric Energy Harvester Fabricated by a Simple and Low-Cost Screen-Printing Technique

HyoMin Jeon^{1,2}, Momayi Amos Okirigiti^{1,2}, Dahye Shin³, Kyoung Jin Jung^{3,*}, Kwi-Il Park^{1,2,4,*} 

¹ Department of Materials Science and Metallurgical Engineering, Kyungpook National University, Daegu 41566, Korea

² Innovative Semiconductor Education and Research Center for Future Mobility, Kyungpook National University, Daegu 41566, Korea

³ Agency for Defense Development, Daejeon 34186, Korea

⁴ Research Institute of Automotive Parts and Materials, Kyungpook National University, Daegu 41566, Korea

단순 저비용 스크린 프린팅 공정을 활용한 섬유 기반 웨어러블 압전 에너지 하베스터 개발

전효민^{1,2}, 모마니 아모스 오키리기티^{1,2}, 신다혜³, 정경진^{3,*}, 박귀일^{1,2,4,*} 

¹ 경북대학교 금속재료공학과

² 경북대학교 미래 모빌리티용 시스템반도체 혁신인재 교육연구단

³ 국방과학연구소

⁴ 경북대학교 자동차부품소재연구소

✉ Corresponding author(s): kipark@knu.ac.kr (K. I. Park); charley@add.re.kr (K. J. Jung)

Cite as J. Electr. Electron. Mater., 39(3), 295–301 (2026), DOI: <https://doi.org/10.4313/JEEM.2026.39.3.9>

Received March 11, 2026; Revised March 25, 2026; Accepted March 25, 2026

ABSTRACT: The expansion of smart healthcare and wearable electronics has intensified the need for fabric-based sensors that integrate conformally with the human body for continuous bio signal monitoring. However, the heavy reliance of conventional devices on external batteries remains a major obstacle to commercialization, necessitating the development of flexible piezoelectric energy harvesters that convert biomechanical energy into sustainable power. Here, we present a highly flexible and wearable piezoelectric energy harvester (PEH) fabricated by a screen-printing of BaTiO₃ nanoparticle–PDMS composites onto a fabric substrate. An optimized piezo-ceramic filler concentration of 70 wt% yielded a peak output voltage of 0.52 V and a current of 40 nA under the mechanical bending deformations. The fabricated PEH demonstrated exceptional mechanical and electrical stability, showing no performance degradation of over 5,000 repetitive bending cycles. These results indicate that a PEH can function as a stable self-powered source within complex clothing environments, offering a promising pathway for next-generation autonomous wearable sensor systems.

KEYWORDS: Piezoelectric, Screen-printing, BaTiO₃, Energy harvesting, Wearable

최근 섬유 기반의 회로, 디스플레이, 센서 등 다양한 소자에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다. 특히, 인체로부터 실시간 생체 신호를 획득할 수 있는 섬유 기반 센서는 스마트 헬스케어 분야의 핵심 요소로 주목받고 있다 [1,2]. 그러나 기존 웨어러블 디바이스는 외부 배터리에 대한 전력 의존도가 높으며, 빈번한 충전 및 교체의 번거로움은 실질적인 상용화의 주요 저해 요인으로 작용한다.

이를 해결하기 위해 주변 환경의 에너지를 전기 에너지로 변환하는 에너지 하베스팅(energy harvesting) 기술을 도입하여, 반영구적 자가발전 센서 시스템을 구현하려는 연구가 가속화되고 있다 [3-6]. 다양한 에너지 하베스팅 기술 중 압전 효과(piezoelectric effect) 기반의 방식은 소자 구조의 단순성, 경량성 및 우수한 기계적 내구성을 바탕으로 의복 및 신체 부착형 디바이스 통합에 최적화된 특성을 갖는다. 압전 물질로는 유연성이 뛰어난 Polyvinylidene Fluoride (PVDF) 계 고분자, Cellulose, Polylactic Acid (PLA) 등 고분자 소재와 압전 계수가 우수한 $\text{Pb}(\text{Zr},\text{Ti})\text{O}_3$ (PZT), BaTiO_3 , $(\text{K},\text{Na})\text{NbO}_3$ 등의 세라믹 소재가 주로 활용된다. 특히 비납계 소재인 BaTiO_3 는 친환경적 특성과 우수한 강유전성을 동시에 보유하여 고성능 웨어러블 소자 구현에 유리하다 [7-13].

기존 유연 압전 필름 제조에는 스펀-젤(spin-spray), 박막 증착(thin film deposition), 잉크젯 프린팅(inkjet printing), 슬러리 캐스팅(slurry casting), 에어로졸 스프레이(aerosol spray deposition), 스퍼터링(sputtering), 열 증착(thermal evaporation) 등 다양한 기술이 적용되어 왔다 [14-21]. 하지만 기존 공정은 대개 장비가 고가이거나 공정 시간이 길고, 대면적 제작 및 복잡한 패턴 구현에 한계가 있다. 또한, 섬유와 같은 유연 기판에 직접 적용하기 어렵다는 공정상의 난점이 존재한다. 반면 스크린 프린팅(screen printing) 기술은 보다 간단하고 빠른 공정으로 복잡한 패턴 구현과 대면적 제조를 동시에 실현할 수 있는 대안으로 주목받고 있다 [22-26]. 스크린 프린팅은 기능성 잉크를 스크린 상에 도포한 뒤 스퀴지(squeegee)를 사용하여 일정한 압력으로 메쉬 구조를 통해 잉크를 기판에 전사하는 방식이다. 이 과정에서 스퀴지의 각도와 이동 속도와 같은 핵심 공정 변수를 정밀하게 제어함으로써 인쇄층의 두께를 최적화할 수 있으며, 스크린과 기판 사이의 간격(snap-off distance) 조정을 통해 패턴의 해상도를 높이고 번짐 현상을 효과적으로 억제할 수 있다. 또한, 상온 공정이 가능하고 다양한 기능성 소재를 잉크화하여 적용할 수 있다는 높은 범용성을 갖추고 있어, 대량 생산 체제 구축과 공정 효율성 극대화를 달성할 수 있다는 강점을 지닌다 [27-29]. 이러한 스크린 프린팅 기술은 특히 섬유(fabric) 기반 기판과 결합될 때 가치가 더욱 극대화된다. 섬유 기판은 뛰어난 유연성, 통기성, 경량성을 제공할 뿐만 아니라 인체와의 밀착

성과 착용감을 향상시킬 수 있어 웨어러블 디바이스에 매우 적합하다 [30,31]. 이러한 기판 특성 덕분에 복잡한 표면 형태나 격렬한 신체 움직임이 동반되는 동적 환경에서도 안정적인 작동을 유지할 수 있다. 특히 스크린 프린팅으로 제작된 섬유 기반 압전 에너지 하베스터는 외부의 미세한 기계적 자극을 전기 에너지로 스스로 변환함으로써, 별도의 전원 없이도 운동량, 호흡 패턴, 건강 상태 등의 실시간 생체 신호(bio-signals)를 정밀하게 모니터링하는 자가발전형 웨어러블 센서로서 압도적인 응용 잠재력을 지닌다 [32-35].

본 연구에서는 단순하고 경제적인 스크린 프린팅을 활용하여 섬유 기반의 압전 에너지 하베스터(piezoelectric energy harvester, PEH)를 제작하였다. 스크린 프린팅 기법은 섬유 기판의 물리적 특성을 유지하면서 소자의 유연성과 공정 재현성을 동시에 확보할 수 있는 방법으로 활용되었다. BaTiO_3 나노입자를 PDMS에 분산시킨 압전 나노발전기를 구성하였으며, 분산재 함량 최적화를 통해 70 wt%에서 0.52 V의 전압과 40 nA의 전류 신호를 출력하였으며, 100 M Ω 의 외부 저항 하에서 최대 순간 전력 6 nW를 생성하였다. 또한 제작된 하베스터의 출력 전압이 5,000회의 반복 변형에도 일정하게 유지됨을 확인함으로써, 개발 소자가 우수한 기계적-전기적 내구성을 가짐을 입증하였다.

그림 1(a)는 본 연구에서 사용된 압전 복합소재의 하베스터 제작 공정 개략도이다. BaTiO_3 나노 입자는 전형적인 고상 합성법(solid-state reaction)을 통해 제조되었다. BaCO_3 (>99%, Sigma-Aldrich)와 TiO_2 (>99%, Sigma-Aldrich) 분말을 혼합한 후, 볼밀(ball-milling)을 통해 충분히 혼합하였다. 혼합된 분말은 전기로를 이용하여 975°C에서 4시간 동안 하소(calcination) 공정을 거쳤다. 이후 합성된 분말의 입도를 제어하기 위해 3 mm 직경의 지르코니아 비드를 이용하여 24시간 동안 2차 볼밀을 수행하여 최종적인 BaTiO_3 나노입자를 확보하였다.

전도성 전극 형성을 위한 실버 잉크는 Silver flake(HP-0202E, LT메탈)와 Polymer binder(BNMR-215-40, BN Chemical), 공용매인 DG(dimethyl glutarate, Sigma-Aldrich)와 ECA (ethyl carbitol acetate, Dae Jung)를 혼합하여 제조하였다. 오버헤드 교반기를 통해 균일하게 분산시킨 후, 용액 내 용매 함량을 조절하여 최종적으로 70 wt%의 실버 잉크를 합성하였다. 압전층 형성을 위한 BaTiO_3 /PDMS 복합체 잉크는 BTO 분말을 함량별(10~70 wt%)로 준비하여 분말을 IPA (Isopropyl alcohol)에 분산시켜, 초음파 분산기(ultrasonicator)에서 30분간 처리하는 전처리를 수행하였다. 이후 PDMS 주체와 혼합하여 12시간 이상 교반하였으며, 열 인가 교반기(hot plate)에서 잔류 IPA를 완전히 제거하였다. 마지막으로 경화제를 10:1 비율로 첨가한 뒤 진공 데시케이터(vacuum desiccator)

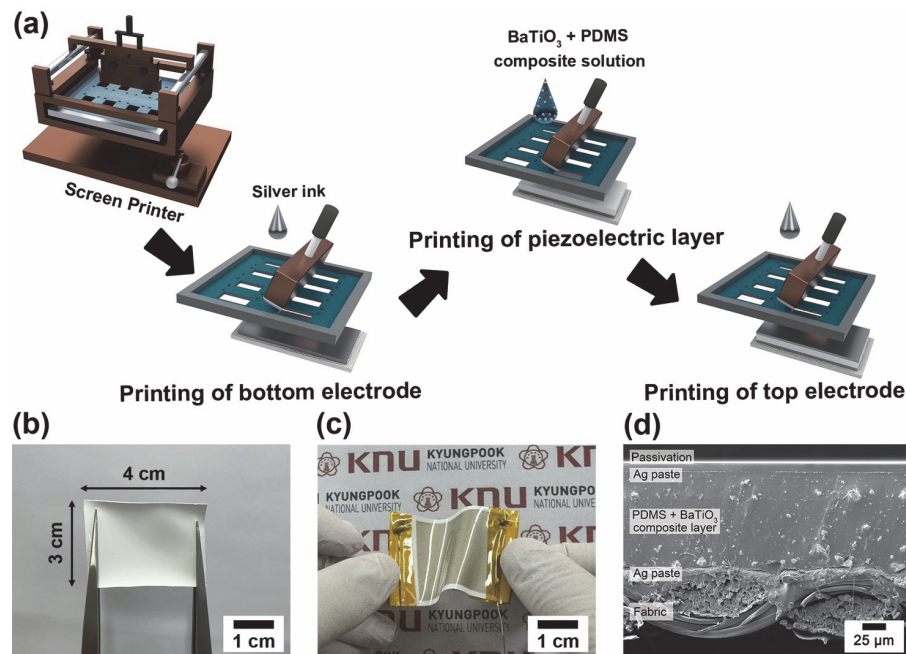


Fig. 1. (a) Schematic illustration for the fabrication procedure of the fabric-based piezoelectric energy harvester (PEH), (b, c) photographs of the nylon/polyurethane fabric substrate (b) and a fabricated PEH showing the superior flexibility (c), and (d) cross-sectional SEM image of the wearable PEH fabricated by the screen-printing of piezoelectric and conductive layers onto the fabric substrate

내에서 1시간 탈포 공정을 거쳐 기포를 제거하였다. 섬유 기반의 에너지 하베스터 제작을 위해 나일론 기반의 폴리우레탄(polyurethane)이 코팅된 섬유 기판($4 \times 3 \text{ cm}^2$)을 사용하였다. 소자의 전극 및 압전층 형성을 위해 325 mesh 스텔리스 마스크를 이용한 스크린 프린팅 공정을 도입하였다. 먼저 기판 상에 실버 잉크를 인쇄하여 약 $8 \mu\text{m}$ 두께의 하부 전극을 형성한 후, 80°C 오븐에서 1시간 건조하였다. 이어 동일한 스크린 프린팅 방식을 통해 $\text{BaTiO}_3/\text{PDMS}$ 복합체를 하부 전극 위에 적층하여 약 $100 \mu\text{m}$ 의 압전층을 형성하였으며 80°C 에서 2시간 동안 경화시켰다. 상부 실버 전극을 형성한 뒤, 외부 환경으로부터 소자를 보호하기 위해 약 $15 \mu\text{m}$ 의 PDMS 보호층(passivation)을 형성하여 섬유 기반 압전 하베스터를 완성하였다. 제작된 소자의 발전성능을 극대화하기 위해 130°C 의 온도 조건에서 50 kV/cm 의 전기장을 인가하는 분극 공정을 수행하여 압전체의 쌍극자 도메인을 특정 방향으로 정렬시켰다. 그림 1(b)와 (c)는 각각 프린팅된 압전층과 최종 제작된 소자의 실물 이미지를 보여주며 이를 통해 제작된 소자가 매우 우수한 유연성(flexibility)을 보유하고 있음을 확인하였다. 그림 1(d)는 섬유 기판 위에 스크린 프린팅된 소자의 단면 SEM 이미지이다. 나일론/폴리우레탄 섬유 기판 위에 실버 전극과 $\text{BaTiO}_3/\text{PDMS}$ 기반의 압전 복합층이 층상

구조로 견고하게 적층되어 있음을 확인하였다.

소자 제작을 위해 사용된 BaTiO_3 는 고온 확산 기반의 고상 합성법(solid-state reaction)을 통해 합성되었으며, 그림 2(a)는 이의 전체적인 공정 개략도를 나타낸다. X선 회절 분석(X-ray diffraction, XRD)과 주사전자현미경(scanning electron microscope, SEM) 이미지 분석을 통해, 제조된 BaTiO_3 나노 압전 분말이 기존에 보고된 강유전 페로브스카이트 결정구조(JCPDS No. 01-073-1739)와 고상법을 통해 합성되는 전형적인 나노입자의 형상을 확인하였다(그림 2(b)). 그림 2(c)는 전극 형성에 사용된 Ag flake의 SEM 이미지와 XRD 패턴으로, Ag flake는 스크린 프린팅 공정 시 입자 간 접촉 면적을 극대화할 수 있는 평평한 판상 구조를 지니고 있으며, 불순물 없는 순수한 은의 결정 구조로 소자의 하부 및 상부 전극으로서 우수한 전기 전도도를 제공할 수 있음을 입증한다. 개발 에너지 하베스터의 발전성능과 내구성 평가를 위해 굽힘장치(bending machine system)를 이용하여 반복적이고 규칙적인 변형을 인가하였다. 이때, 소자에서 생성되는 개방 회로 전압(open-circuit voltage, V_{oc})과 단락 전류(short-circuit current, I_{sc})는 전위계(electrometer)를 이용하여 실시간으로 측정되었다. 자체 제작한 에너지 하베스팅 성능 평가 시스템(그림 3(a))을 이용하여, 하베스터를 길이 방향으로 5 mm 의

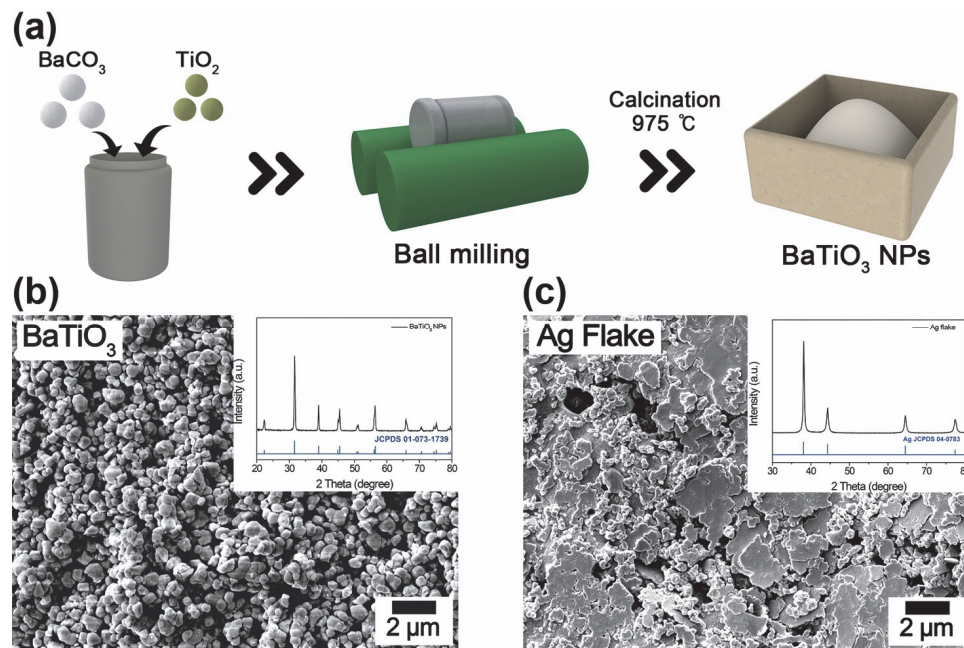


Fig. 2. (a) Schematic illustration of the solid-state reaction process for the synthesis of piezoelectric BaTiO_3 nanoparticles, (b, c) SEM images and XRD patterns (the inset) of the synthesized BaTiO_3 nanoparticles (b) and the silver flakes (c) used for the fabricating fabric-based PEH

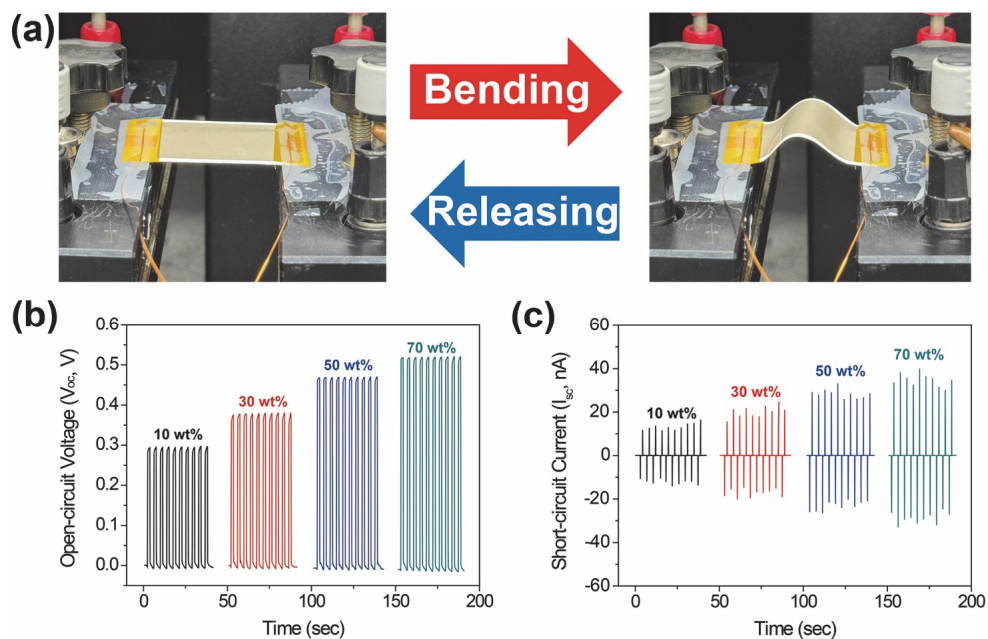


Fig. 3. (a) Photographic images of the energy harvesting measurement system showing the deformed PEH under the periodically mechanical bending and releasing, (b, c) open-circuit voltage (V_{oc}) (b) and short-circuit current (I_{sc}) (c) generated from the fabricated wearable PEH with various BaTiO_3 concentrations (10, 30, 50, and 70 wt%) during repetitive bendings

최대 변위와 0.2 m/s의 변형률을 유지하면 굽힘에 따른 발전 성능을 평가하였다. 그림 3(b, c)와 같이 굽힘 변형에 따른 하베스터의 출력 전압 및 전류 신호를 측정하였다. 압전 나노입자의 함량이 증가함에 따라 V_{oc} 와 I_{sc} 가 점진적으로 향상되는 경향을 보였으며, 70 wt%의 함량에서 최대 0.52 V 전압과 40 nA 전류를 생성하였다. 이는 PDMS 매트릭스 내에 분산된 $BaTiO_3$ 나노입자의 밀도가 높아짐에 따라 외부 응력에 의해 유도되는 유효 분극량이 증가했기 때문으로 판단되며, 최적화된 함량인 70 wt%에서도 섬유 기판과의 우수한 밀착력과 유연성을 유지하여 안정적인 출력 수집이 가능함을 입증하였다.

그림 4(a)는 측정된 전기적 신호가 소자의 압전 효과에 기인한 것임을 검증하기 위한 스위칭 테스트(switching test) 결과이다. 소자와 전위계의 연결 방향을 반대로 설정하였을 때 출력 전압 및 전류 신호가 반대로 반전됨을 확인하였으며, 이를 통해 검출된 신호가 노이즈가 아닌 순수한 압전 효과에 의한 결과임을 입증하였다. 또한, 소자의 기계적 신뢰성을 평가하기 위해 약 5,000번의 반복적인 굽힘 변형을 인가하는 내구성 테스트를 수행하였다. 그림 4(b)와 같이 장기간의 반복 변형 후에도 성능 감소 없이 일정하게 유지되어 실

제 웨어러블 환경에서 사용 가능한 우수한 기계적·전기적 내구성을 확보했음을 확인하였다. 제작된 하베스터의 출력 전력을 평가하기 위해 외부저항을 100 K Ω 에서 500 M Ω 의 저항을 회로에 각각 병렬로 연결하여 부하전압을 측정하였다. (그림 4(c)와 (d)) 측정된 부하전압은 외부 저항이 커질수록 점차 증가하며, 출력 전력은 옴의 법칙($P = V \times I$)을 이용하여 전압과 전류를 곱하여 도출하였다. 100 M Ω 에서 약 6 nW의 최대 순간 전력을 생성함을 확인하였다.

본 연구에서는 자가발전 웨어러블 시스템에 적용 가능한 고신축성 섬유 기반 압전 에너지 하베스터를 구현하기 위해 고상합성법으로 제조된 $BaTiO_3$ 나노입자와 스크린프린팅 공정을 도입하였다. 유연한 압전 복합체는 $BaTiO_3$ 나노입자를 PDMS 고분자 기상 내에 균일하게 분산하여 제조하였다. 스크린 프린팅 기법은 섬유 기판 위에 하부전극, 압전층, 상부 전극을 정교하게 적층하여 소자의 유연성을 확보할 수 있는 간단한 공정이다. 제작된 하베스터의 발전 성능은 압전 분말의 함량이 증가함에 따라 점진적으로 향상되었으며 70 wt%의 최적 함량에서 최대 0.52 V의 전압과 40 nA의 전류가 출력됨을 확인하였다. 하베스팅 발전성능은 향후 소자 구조의 다변화 및 폴링 조건의 정밀 제어를 통해 더욱 개선될

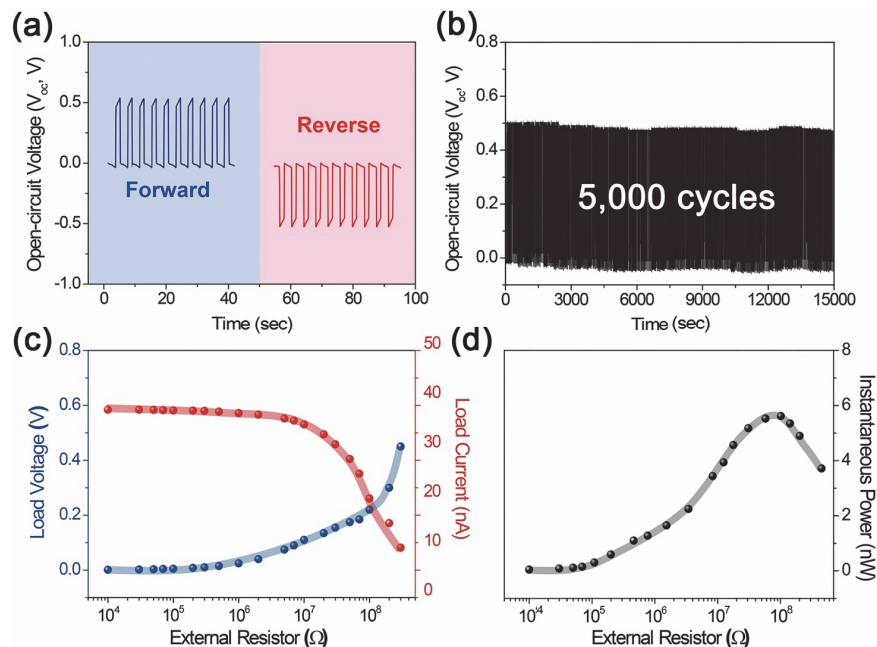


Fig. 4. (a) Switching polarity test results in forward and reverse modes to confirm the piezoelectric origin of the measured output signals from the fabricated PEH, (b) mechanical durability test results of an energy device over 5,000 bending cycles, and (c, d) the measured load voltage and current curves (c) the calculated instantaneous power curve (d) of the fabric-based PEH across various external load resistances from 100 K Ω to 500 M Ω

수 있으며, 보호층의 재질 및 두께 최적화를 통해 외부 환경에 대한 안전성을 더욱 향상시킬 수 있을 것으로 생각된다. 이러한 결과를 바탕으로, 스크린 프린팅 공정을 도입한 섬유 기반 압전 하베스터 제작 기술은 웨어러블/굴곡진 기기 및 스마트 의류 등 다양한 형태의 기계적 변형이 존재하는 환경에서 자가 발전 전력원으로 활용이 가능할 것으로 기대된다.

ORCID

Kwi-II Park <https://orcid.org/0000-0002-9140-6641>

Acknowledgement

This study was supported by a grant from the Agency for Defense Development of Korea (project No. 915050201).

Conflict of Interest

Kwi-II Park currently serves on the editorial board of JEEM, but was not involved in any part of the publication process. Other than this, the authors declare that they have no relevant potential conflicts of interest.

Author Contributions

HyoMin Jeon: Writing – Original Draft, Software, Data curation, Conceptualization.

Momayi Amos Okirigiti: Software, Data curation.

Dahye Shin: Data curation, Conceptualization.

Kyoung Jin Jung: Supervision, Investigation, Funding acquisition, Conceptualization.

Kwi-II Park: Writing – review & editing, Supervision, Investigation, Funding acquisition, Conceptualization.

Data Availability

Data available on request from the authors.

References

- [1] A. Nag, A. Chakraborty, M. R. Ortega Vega, S. Nuthalapati, H. Harija, M. S. Özer, and M. E. Altinsoy, *IEEE Sens. J.*, **23**, 28640 (2023).
doi: <https://doi.org/10.1109/JSEN.2023.3310588>
- [2] G. H. Büscher, R. Köiva, C. Schürmann, R. Haschke, and H. J. Ritter, *Robot. Autonomous Syst.*, **63**, 244 (2015).
doi: <https://doi.org/10.1016/j.robot.2014.09.007>
- [3] S. P. Beeby, M. J. Tudor, and N. M. White, *Meas. Sci. Technol.*, **17**, R175 (2006).
doi: <https://doi.org/10.1088/0957-0233/17/12/R01>
- [4] J. W. Matiko, N. J. Grabham, S. P. Beeby, and M. J. Tudor, *Meas. Sci. Technol.*, **25**, 012002 (2014).
doi: <https://doi.org/10.1088/0957-0233/25/1/012002>
- [5] M. L. Ku, W. Li, Y. Chen, and K. J. Ray Liu, *IEEE Commun. Surv. Tutor.*, **18**, 1384 (2016).
doi: <https://doi.org/10.1109/COMST.2015.2497324>
- [6] H. Ryu, H. J. Yoon, and S. W. Kim, *Adv. Mater.*, **31**, 1802898 (2019).
doi: <https://doi.org/10.1002/adma.201802898>
- [7] K. I. Park, M. Lee, Y. Liu, S. Moon, G. T. Hwang, G. Zhu, J. E. Kim, S. O. Kim, D. K. Kim, Z. L. Wang, and K. J. Lee, *Adv. Mater.*, **24**, 2999 (2012).
doi: <https://doi.org/10.1002/adma.201200105>
- [8] K. I. Park, C. K. Jeong, J. Ryu, G. T. Hwang, and K. J. Lee, *Adv. Energy Mater.*, **3**, 1539 (2013).
doi: <https://doi.org/10.1002/aenm.201300458>
- [9] C. Baek, J. E. Wang, S. Ryu, J. H. Kim, C. K. Jeong, K. I. Park, and D. K. Kim, *RSC Adv.*, **7**, 2851 (2017).
doi: <https://doi.org/10.1039/C6RA26285F>
- [10] H. Jeon, C. M. Kim, H. J. Park, B. Bae, H. Choi, H. Jang, and K. I. Park, *J. Powder Mater.*, **32**, 104 (2025).
doi: <https://doi.org/10.4150/jpm.2024.00458>
- [11] K. I. Park, *J. Korean Powder Metall. Inst.*, **25**, 263 (2018).
doi: <https://doi.org/10.4150/KPMI.2018.25.3.263>
- [12] F. Liu, N. A. Hashim, Y. Liu, M.R. Moghareh Abed, and K. Li, *J. Membr. Sci.*, **375**, 1 (2011).
doi: <https://doi.org/10.1016/j.memsci.2011.03.014>
- [13] M. Acosta, N. Novak, V. Rojas, S. Patel, R. Vaish, J. Koruza, G. A. Rossetti, Jr., and J. Rödel, *Appl. Phys. Rev.*, **4**, 041305 (2017).
doi: <https://doi.org/10.1063/1.4990046>
- [14] H. Jeon, S. Y. Yoon, N. R. Alluri, M. A. Okirigiti, H. Jang, C. Baek, T. Zhang, G. T. Hwang, M. K. Lee, G. J. Lee, and K. I. Park, *Sustain. Mater. Technol.*, **47**, e01888 (2026).
doi: <https://doi.org/10.1016/j.susmat.2026.e01888>
- [15] J. Hong, H. Wagata, K. I. Katsumata, K. Okada, and N. Matsushita, *Jpn. J. Appl. Phys.*, **52**, 110108 (2013).
doi: <https://doi.org/10.7567/JJAP.52.110108>
- [16] S. M. Rossmagel, *J. Vac. Sci. Technol. A*, **21**, S74 (2003).

- doi: <https://doi.org/10.1116/1.1600450>
- [17] M. A. Shah, D. G. Lee, B. Y. Lee, and S. Hur, *IEEE Access*, **9**, 140079 (2021).
doi: <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2021.3119219>
- [18] R. Burapa, S. Janudom, T. Chuchep, R. Canyook, and J. Wannasin, *Trans. Nonferrous Metals Soc. China*, **20**, s857 (2010).
doi: [https://doi.org/10.1016/s1003-6326\(10\)60595-x](https://doi.org/10.1016/s1003-6326(10)60595-x)
- [19] D. Hanft, J. Exner, M. Schubert, T. Stöcker, P. Fuierer, and R. Moos, *J. Ceram. Sci. Technol.*, **6**, 147 (2015).
doi: <https://doi.org/10.4416/JCST2015-00018>
- [20] D. Depla, S. Mahieu, and J. E. Greene, *Handbook of Deposition Technologies for Films and Coatings* (Third Edition) (William Andrew Publishing, Norwich, NY, USA, 2010) pp. 253–296.
doi: <https://doi.org/10.1016/B978-0-8155-2031-3.00005-3>
- [21] B. D. Yao, Y. F. Chan, and N. Wang, *Appl. Phys. Lett.*, **81**, 757 (2002).
doi: <https://doi.org/10.1063/1.1495878>
- [22] K. Dong, X. Peng, and Z. L. Wang, *Adv. Mater.*, **32**, 1902549 (2020).
doi: <https://doi.org/10.1002/adma.201902549>
- [23] R. R. Suresh, M. Lakshmanakumar, J. B. B. Arockia Jayalatha, K. S. Rajan, S. Sethuraman, U. M. Krishnan, and J. B. B. Rayappan, *J. Mater. Sci.*, **56**, 8951 (2021).
doi: <https://doi.org/10.1007/s10853-020-05499-1>
- [24] Z. Taleat, A. Khoshroo, and M. Mazloum-Ardakani, *Microchimica Acta*, **181**, 865 (2014).
doi: <https://doi.org/10.1007/s00604-014-1181-1>
- [25] M. Ali, L. Lin, S. Faisal, I. A. Sahito, and S. I. Ali, *Pigment & Resin Technol.*, **48**, 456 (2019).
doi: <https://doi.org/10.1108/prt-05-2019-0043>
- [26] H. W. Lin, C. P. Chang, W. H. Hwu, and M. D. Ger, *J. Mater. Process. Technol.*, **197**, 284 (2008).
doi: <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2007.06.067>
- [27] W. J. Hyun, E. B. Secor, M. C. Hersam, C. D. Frisbie, and L. F. Francis, *Adv. Mater.*, **27**, 109 (2015).
doi: <https://doi.org/10.1002/adma.201404133>
- [28] J. Suikkola, T. Björninen, M. Mosallaei, T. Kankkunen, P. Iso-Ketola, L. Ukkonen, J. Vanhala, and M. Mäntysalo, *Sci. Rep.*, **6**, 25784 (2016).
doi: <https://doi.org/10.1038/srep25784>
- [29] B. Fasolt, M. Hodgins, G. Rizzello, and S. Seelecke, *Sens. Actuators Phys.*, **265**, 10 (2017).
doi: <https://doi.org/10.1016/j.sna.2017.08.028>
- [30] N. A. Baharuddin, N. F. Abdul Rahman, H. Abd. Rahman, M. R. Somalu, M. A. Azmi, and J. Raharjo, *Int. J. Energy Res.*, **44**, 8296 (2020).
doi: <https://doi.org/10.1002/er.5518>
- [31] Q. Lin, S. Song, I. D. Castro, H. Jiang, M. Konijnenburg, R. van Wegberg, D. Biswas, S. Stanzione, W. Sijbers, C. Van Hoof, F. Tavernier, and N. Van Helleputte, *IEEE Sens. J.*, **21**, 1108 (2021).
doi: <https://doi.org/10.1109/jsen.2020.3016115>
- [32] M. R. Karim and M. T. H. Sarker, *Am. J. Adv. Technol. Eng. Solut.*, **4**, 1 (2024).
doi: <https://doi.org/10.63125/d0zkrx67>
- [33] K. Sasikala, C. Sharanya, G. R. Jothilakshmi, A. Vijayalakshmi, M. B. Sahaai, and E. N. Ganesh, *AIP Conf. Proc.*, **2463**, 020017 (2022).
doi: <https://doi.org/10.1063/5.0081453>
- [34] G. Giannakakis, D. Grigoriadis, K. Giannakaki, O. Simantiraki, A. Roniotis, and M. Tsiknakis, *IEEE Trans. Affective Comput.*, **13**, 440 (2022).
doi: <https://doi.org/10.1109/TAFFC.2019.2927337>
- [35] E. J. Rechy-Ramirez and H. Hu, *Digital Commun. Netw.*, **1**, 85 (2015).
doi: <https://doi.org/10.1016/j.dcan.2015.02.004>