


# 압전 폴리머를 접목한 초전-자기-압전 발전소자의 출력 특성 향상 연구

백창민<sup>1</sup>, 이 건<sup>1</sup>, 류정호 <sup>1,2</sup>

<sup>1</sup> 영남대학교 신소재공학부

<sup>2</sup> 영남대학교 재료기술연구소

## Enhancement of Power Generation in Hybrid Thermo-Magneto-Piezoelectric-Pyroelectric Energy Generator with Piezoelectric Polymer

Chang Min Baek<sup>1</sup>, Geon Lee<sup>1</sup>, and Jungho Ryu<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup> School of Materials Engineering, Yeungnam University, Gyeongsan 38541, Korea

<sup>2</sup> Institute of Materials Technology, Yeungnam University, Gyeongsan 38541, Korea

(Received August 2, 2023; Revised August 15, 2023; Accepted August 17, 2023)

**Abstract:** Energy harvesting technology, which converts wasted energy sources in everyday life into usable electric energy, is gaining attention as a solution to the challenges of charging and managing batteries for the driving of IoT sensors, which are one of the key technologies in the era of the fourth industrial revolution. Hybrid energy harvesting technology involves integrating two or more energy harvesting technologies to generate electric energy from multiple energy conversion mechanisms. In this study, a hybrid energy harvesting device called TMPPEG (thermo-magneto-piezoelectric-pyroelectric energy generator), which utilizes low-grade waste heat, was developed by incorporating PVDF polymer piezoelectric components and optimizing the system. The variations in piezoelectric output and thermoelectric output were examined based on the spacing of the clamps, and it was found that the device exhibited the highest energy output when the clamp spacing was 2 mm. The voltage and energy output characteristics of the TMPPEG were evaluated, demonstrating its potential as an efficient hybrid energy harvesting component that effectively harnesses low-grade waste heat.

**Keywords:** Piezoelectric, Pyroelectric, Hybrid, Energy harvesting, Low-grade heat

수많은 무선 센서가 4차 산업 시대의 핵심 기술 중 하나인 IoT (internet of things) 연결을 위해 사용되고 있다. 광범위한 IoT 기술의 적용을 위해서는 센서 구동을 위한 배터리의 충전, 교체 및 관리가 어렵다는 문제점을 해결해야만 한다 [1-5]. 에너지 하베스팅 기술은 일상생활에서 발생하는 다양한 종류의 에너지원 중 실제로 사용하지 못하

는 에너지를 사용 가능한 에너지원으로 변환하는 기술로서 IoT용 무선 센서 전원 문제를 보완할 수 있는 기술로 주목받고 있다. 다양한 에너지 하베스팅 기술 중 대표적인 기술로 압전 방식과 초전 방식을 들 수 있다. 압전 에너지 하베스팅은 일상생활에서 발생하는 진동, 충격 등과 같은 기계적 에너지를 전기에너지로 변환하는 기술이다 [6-9]. 압전 에너지 하베스팅은 다른 전기 장치들과 전자기 간섭이 없고, 구조가 단순하며 발생하는 에너지의 밀도가 높기 때문에 다양한 분야에서 연구가 이루어지고 있다.

폐열은 에너지의 생산 및 소비 과정 중에서 사용되지 못하고 버려지는 열을 뜻한다. 온도 범위에 따라 고급 폐열

✉ Jungho Ryu; [jhryu@ynu.ac.kr](mailto:jhryu@ynu.ac.kr)

Copyright ©2023 KIEEME. All rights reserved.

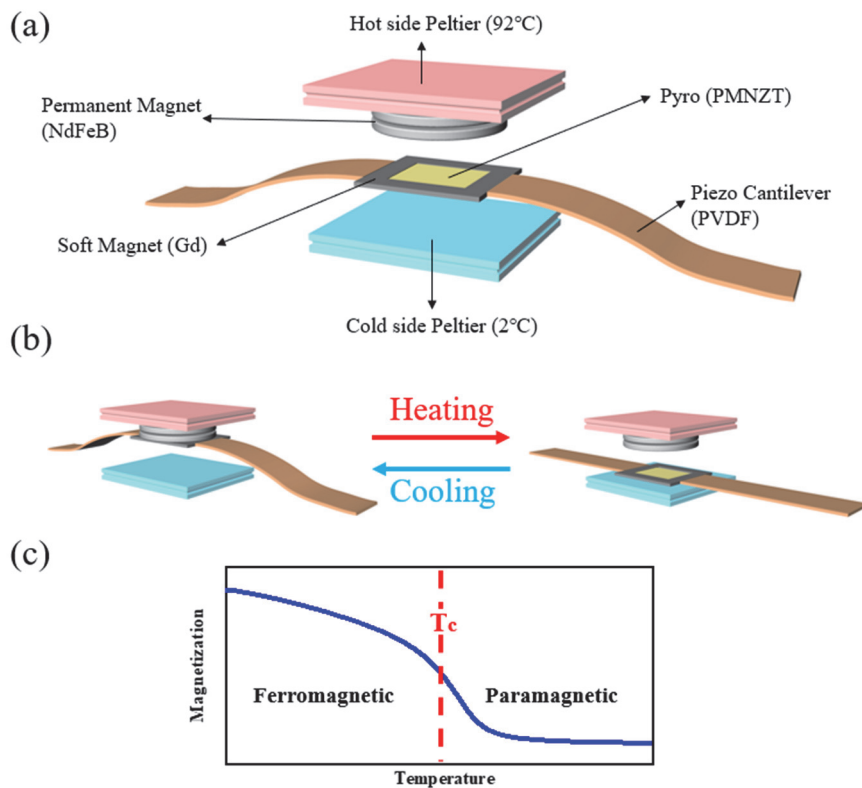
This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

(>400°C), 중급 폐열(100~400°C), 저급 폐열(<100°C)로 나눌 수 있는데, 저급 폐열은 전체 폐열의 60% 이상을 차지하지만, 고급 폐열과 중급 폐열에 비교하여 에너지가 크지 않아서 활용하기가 어렵다 [10-15]. 공간적인 온도 차이를 이용하는 열전 에너지 하베스팅 기술에 비하여, 초전 에너지 하베스팅(pyroelectric energy harvesting)은 저급 폐열을 활용하는 에너지 하베스팅으로 시간당 온도 변화에 따라 내부의 분극 배열이 변화하게 되면서 전기 에너지를 발생하게 된다.

하이브리드 에너지 하베스팅 기술은 하나의 에너지원에서 두 가지 이상의 하베스팅 에너지 출력을 만들어내는 기술을 말한다 [16,17]. 단일 에너지 하베스팅 기술만으로는 IoT 센서에서 요구하는 에너지를 완벽히 충당할 수 없으므로 최근 하이브리드 에너지 하베스팅 기술에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다 [18-20].

TMEG (thermo-magneto electric generator)는 저급 폐열의 온도 구간에서 작동하는 발전소자이다 [21,22]. 강자성 재료는 그림 1(c)와 같이 온도 범위에 따라서 자기

적 특성이 달라진다. 상전이 온도(curie temperature) 이상의 온도에서는 상자성(paramagnetic) 특성을 가져, 영구자석과의 인력이 감소하므로, 영구자석에 붙어 있던 강자성 재료가 cold side Peltier로 떨어지게 된다. 반면, 강자성 재료가 상전이 온도 이하의 온도로 냉각되면 강자성 특성을 가지게 되면서 강자성 재료와 영구자석의 인력이 회복되어 영구자석과 붙게 된다. 즉 hot side Peltier와 cold side Peltier에 부착됨에 따라서 강자성체의 온도는 반복적으로 변화하게 되고, 이에 따른 강자성-상자성 반복적 상전이로 영구자석과의 부착/탈착에 의한 actuating part의 변형이 발생하게 된다. 따라서 강자성 재료가 상전이에 의하여 온도차를 발생시키는 Peltier의 사이를 그림 1(b)와 같이 왕복 운동하게 되면서 진동이 발생하게 되고, 진동이 압전소재로 전달되어 전기 에너지를 발생시킨다. 이때 연자성체 재료는 온도의 변화에 가장 크게 영향을 받기 때문에 강자성 재료에 초전 재료를 부착하게 되면 연자성체 재료가 상전리로 운동하게 될 때 초전 재료에서 전류가 발생하게 된다. 즉 TMEG 발전소자에 초전 물질을 조합



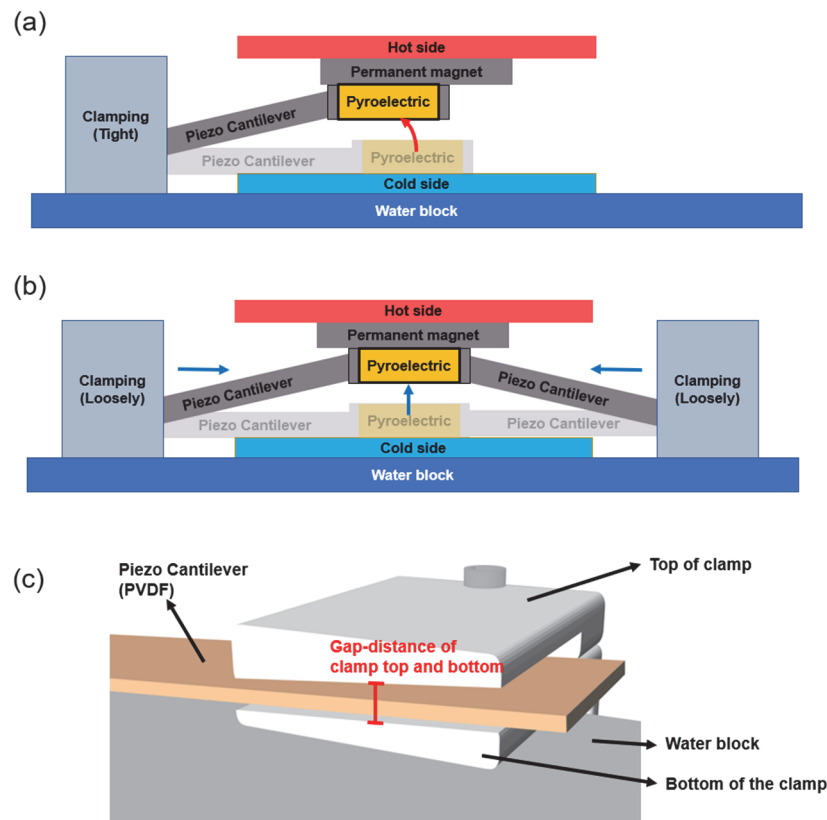
**Fig. 1.** (a) Schematic of the TMPPEG consisted of heat exchanger part and actuating part [Heat exchanger part comprised of hot side Peltier attached with permanent magnet and cold side Peltier. Actuating part comprised of two piezoelectric cantilevers coupled with soft magnet and pyro material (PMNZT single crystal)], (b) schematic of the TMPPEG working over second order phase transition of a soft magnet during go and return between hot side Peltier and cold side Peltier, and (c) magnetization (M) - temperature (T) hysteresis loop of a soft Gd magnet.

함으로써, 압전 효과와 초전 효과를 동시에 이용하여 진동과 열에너지를 전기에너지로 변환할 수 있는 하이브리드 TMPPEG (thermo-magneto-piezoelectric-pyroelectric energy generator) 발전소자의 구현이 가능하다 [22].

본 연구에서는 TMPPEG 발전소자에서 초전-압전 하이브리드 에너지의 출력 향상 연구를 진행하였다. 기존의 TMPPEG의 발전소자에서 추가로 압전 소재를 부착하여 저급 폐열의 온도 구간에서 하나의 초전 출력과 두 개의 압전 출력을 확인하였고, 압전 외팔보 구조의 clamp의 조건을 바꾸었을 때 압전과 초전 출력의 변화를 확인하였다 [22]. 이를 통해 저급 폐열의 온도 구간에서 압전과 초전을 이용한 하이브리드 에너지 하베스팅의 발전 가능성을 확인하였다.

TMPPEG의 발전소자는 그림 1과 같이 heat exchanger part와 actuating part의 두 부분으로 구성된다. Heat exchanger part는 2개의 Peltier (TEC1-12706, ShenzhenAV, China)와 영구자석(neodymium magnet, NdFeB, 30πx3t, Jeilmagnet, Korea)으로 구성하였다. 영

구자석은 열전도성 접착제(8329TCS, MG Chemicals, Canada)를 통해 hot side의 Peltier와 붙어 있고, hot side Peltier는 알루미늄 방열판과 XYZ stage에 부착하여 cold side의 Peltier와의 거리를 정밀하게 조절하였다. Cold side의 Peltier는 냉각 팬, water block, 펌프로 구성된 냉각장치에 열전도성 접착제로 고정하였다. 각 Peltier의 온도는 연결된 장치들을 통하여 hot side가 92°C, cold side가 2°C로 일정하게 유지하였다. Actuating part는 2개의 PVDF 압전소자[polyvinylidene fluoride, 57 mm × 15 mm × 0.5 (t) mm, PolyK, USA]와 연자성체 [gadolinium: Gd, 15 mm × 15 mm × 0.62 (t) mm, 99% purity, Alfa Aesar Co., Inc., USA]로 외팔보(cantilever) 구조를 구성하고, 은선과 전도성 에폭시를 사용하여 배선을 한 (001) PMNzT 단결정[Pb(Mg<sub>1/3</sub>Nb<sub>2/3</sub>)O<sub>3</sub>-Pb(Zr,Ti)O<sub>3</sub> single crystal, Trt: 110°C, 15 mm × 15 mm × 0.5 (t) mm, Ceracomp Co. Ltd., Korea]를 에폭시 접착제를 이용하여 Gd 연자성체의 내부에 부착하였다. 외팔보 구조의 PVDF 소자는 3D 프린터(Form 3, Formlabs,



**Fig. 2.** (a) Schematic of the TMPPEG with single piezoelectric cantilever operation (When TMPPEG operates, piezoelectric cantilever works in a semicircle. The semicircular movement of the piezoelectric cantilever by clamping tightly hinder the operation of TMPPEG with two piezoelectric cantilevers), (b) schematic of the TMPPEG with two piezoelectric cantilever operation (By clamping loosely make the operation of TMPPEG smoothly), and (c) schematic of the cutting plane of the clamp which loosely fix the piezoelectric cantilever.

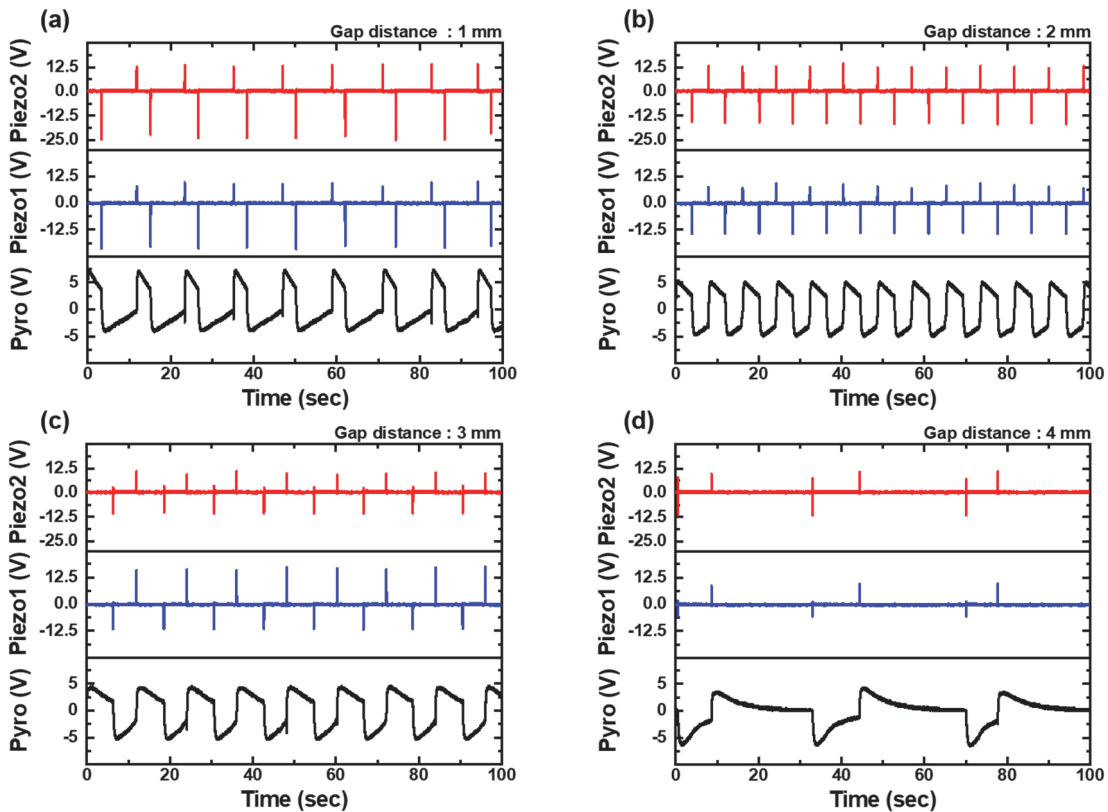
USA)를 통해 제작된 clamp로 고정하였다. 외팔보를 구성하는 압전소재는 압전 세라믹 또는 단결정 소재를 사용할 경우, 우수한 압전 상수와 전기기계결합계수를 가지지만 세라믹 고유의 취성과 높은 탄성계수로, 충격이 인가되면 쉽게 파손될 수 있으며, 굴곡 변형에 한계가 있다 [23]. 따라서 높은 유연성을 가지는 압전 폴리머인 PVDF 소자를 압전 에너지 하베스팅 소자로 사용하였다.

그림 2(a)는 TMPPEG 발전소자에서 한 개의 PVDF 압전소자가 연자성체에 부착되었을 때 소자의 움직임을 보여준다. PVDF 압전소자가 연결된 연자성체의 경우 수직으로 Peltier의 사이를 움직이지 않고 상하운동 시 원의 궤적을 따라서 움직이게 된다. 이는 clamp에 고정된 PVDF 압전소자의 길이가 신장/수축하지 않고 일정하기 때문에 발생한다. 그러므로 2개의 PVDF 압전소자가 연자성체를 기준으로 180°의 평행한 각도를 이루며 구성되어 있게 된다면 각 압전소자가 clamp 방향으로 서로 원의 궤적을 따라 움직이려 하기 때문에 TMPPEG의 발전소자의 정상적인 작동이 어렵다. 따라서 그림 2(b)와 같이 clamp의 상부와 하부의 간격을 1~4 mm로 제작하여 clamp와 actuating part가 미끄러져 TMPPEG의 작동이 원활하게 이루어지도록

만들었다.

TMPPEG 발전소자의 actuating part를 구성하는 압전소자를 heat exchanger part의 Peltier 사이에 clamp를 통해 고정시킨 뒤 DC power supply를 사용하여 각 Peltier의 온도를 92°C, 2°C로 설정하였다. 초전과 압전의 출력을 최대로 하기 위하여 Peltier의 간격은 6 mm로 설정하였고, 연자성체의 상전이를 통한 상하운동을 효율적으로 하기 위해 clamp의 각도를 4°로 제작하여 압전소자를 고정하여 최적화하였다 [22]. 오실로스코프를 사용하여 최적화된 거리 및 각도에서 압전 하베스팅 소자와 초전 하베스팅 소자의 출력을 확인하였다.

그림 3은 하이브리드 에너지 하베스터의 압전 하베스터를 고정하는 clamp의 상하부 거리를 1 mm 간격으로 변화함에 따른 출력 전압 특성을 보여준다. 최적화된 조건에서 clamp의 상하부 간격에 따른 TMPPEG의 출력전압을 오실로스코프의 Ch 1, Ch 2, Ch 3에 초전소자와 압전소자를 연결하여 open circuit voltage로 직접 모니터링하였을 때, 압전 출력의 경우 clamp의 상하부 간격이 커질수록 출력이 감소하는 것을 알 수 있다. 초전 효과에 의한 출력의 경우 압전 출력의 경향과는 다르게 출력이 감소하다



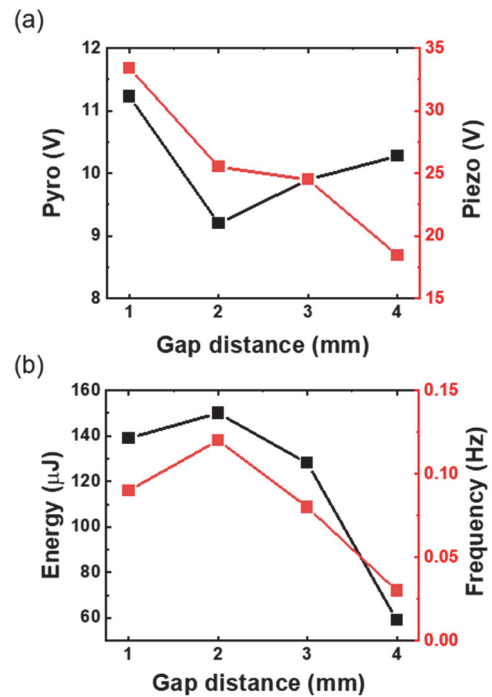
**Fig. 3.** The open-circuit output voltages from hybrid TMPPEG with different gap-distance between clamp top and bottom. (a) 1 mm, (b) 2 mm, (c) 3 mm, and (d) 4 mm of hybrid energy harvesters under 92°C (hot Peltier side) and 2°C (cold Peltier side).

가 다시 증가하는 것을 확인하였다. 평균 peak-peak voltage는 clamp의 상하부 거리가 1 mm일 때 압전 출력 전압이 33.4 V, 초전 출력이 11.2 V로 가장 높은 출력전압을 나타냈다.

표 1에 clamp의 상하부 거리를 1 mm 간격으로 4 mm 까지 설정하여 최적화를 진행하였을 때의 전압, 에너지, 주파수, actuating part가 heat exchanger part의 각 Peltier에 머무르는 시간을 요약하였다. 에너지의 경우 오실로스코프의 10 M $\Omega$ 의 내부 impedance를 적용하여 계산하였다. Peltier 간의 간격을 6 mm, clamp의 각도를 4°로 설정한 후에 clamp의 상하부 간격에 따른 하이브리드 에너지 하베스터의 출력전압을 오실로스코프를 통해 측정하였을 때, 간격이 넓어질수록 압전 에너지 발전소자의 출력전압이 33.4 V에서 18.5 V로 감소하는 것을 확인하였다. 그러나 초전 에너지 발전소자의 출력전압의 경우 clamp의 상하부의 간격이 1 mm에서 2 mm로 변경 시 출력전압이 11.2 V에서 9.2 V로 감소하였으나 4 mm로 간격을 넓게 하였을 때 출력이 10.3 V로 증가하였다. 이렇게 압전 에너지 발전소자와 초전 에너지 발전소자의 출력전압의 경향이 차이가 나는 것은 actuating part가 hot side Peltier와 cold side Peltier에 머무르는 시간이 다르기 때문이다 [22,24]. 표 1에서 확인할 수 있듯이 actuating part가 Peltier에 머무르는 시간은 clamp 상하부의 간격이 1 mm에서 2 mm로 조건을 변화하였을 때 hot side 유지시간과 cold side 유지시간이 거의 동일하게 바뀌었지만 3 mm, 4 mm로 간격을 변경하였을 때 두 Peltier에서의 유지시간의 차이가 점점 증가하였다. 이러한 유지시간의 변화로 인하여 초전 에너지 발전소자로 사용된 PMNZT 단결정의 온도 변화속도에 변화가 생겨서 초전 에너지 발전소자와 압전 에너지 발전소자의 경향이 차이가 나는 것으로 사료된다. 압전 에너지 발전소자의 출력전압이 점차 감소하는 경향을 보이는 것은 clamp의 상하부 간격이 증가할수록 상하운동 시 상하부의 간격만큼 압전소자가 움직인 후에 bending이 작용하게 된다. 따라서 clamp의 간격이 증가

할수록 압전소자의 출력전압이 감소하는 경향을 보이는 것이라 생각된다.

Clamp의 상하부 거리에 따른 TMPPEG의 전압 출력, energy, frequency를 측정하여 요약된 결과를 그림 4에 도시하였다. 100초 동안 측정한 압전과 초전의 전압 출력을 바탕으로 계산한 energy와 frequency의 경우 clamp의 상하부 거리가 2 mm일 때 150  $\mu$ J과 0.12 Hz로 가장 높은 출력을 보였다.



**Fig. 4.** (a) Pyroelectric and piezoelectric output voltage and (b) total energy and frequency of TMPPEG as a function of gap-distance between top and bottom of clamp (The output voltage of pyroelectric energy harvester is 11.2 V and piezoelectric energy harvester is 33.4 V at gap-distance between top and bottom of clamp is 1 mm. The total energy and frequency of TMPPEG is 150  $\mu$ J and 0.12 Hz at gap-distance between top and bottom of clamp is 2 mm).

**Table 1.** Summary of energy harvesting performance with respect to the gap-distance in the clamping part.

Gap distance between clamp top and bottom	Pyroelectric output voltage $V_{pp}$ [V]	Average piezoelectric output voltage $V_{pp}$ [V]	Energy [ $\mu$ J]	Frequency [Hz]	Contact time between actuating part and cold side Peltier [sec]	Contact time between actuating part and hot side Peltier [sec]
1 mm	11.2	33.4	139	0.09	8.5	3.2
2 mm	9.2	25.5	150	0.12	4.1	4.1
3 mm	9.9	24.5	128	0.08	5.5	6.5
4 mm	10.3	18.5	59	0.03	9.7	25.0

본 연구에서는 저급 폐열의 온도 구간에서 전기에너지를 생산하는 TMPPEG 발전소자에 폴리머 압전소자를 적용하여, clamp의 상하부 간격에 따른 출력값을 비교하며 최적화하였다. Clamp의 상하부 간격을 1~4 mm로 설정하여 최적화를 진행하였을 때, 압전 에너지 발전소자의 출력의 경우 간격이 멀어질수록 전압 출력이 감소하는 것을 확인하였다. 그러나 초전 에너지 발전소자의 전압 출력의 경우 감소하다가 다시 증가하는 경향을 확인하였다. 측정된 전압 출력을 바탕으로 최대 에너지 출력을 계산하였을 때, clamp의 상하부 간격이 2 mm일 때 150  $\mu$ V로 가장 높은 출력을 가지는 것을 확인하였다. 앞으로 PMNZT의 결정면을 (011), (111) 등 다양하게 설정하여 초전 에너지 발전소자의 출력을 확인하고, 실제 회로를 구성하여 센서 및 LED 등을 구동해 볼 예정이다.

## ORCID

Jungho Ryu

<https://orcid.org/0000-0002-4746-5791>

## 감사의 글

본 논문은 산업통상자원부 산업혁신인재성장지원사업의 재원으로 한국산업기술진흥원의 지원을 받아 수행된 연구임(친환경 금속소재산업 전문인력양성, #P0023676).

## REFERENCES

- [1] M. Alaa, A. A. Zaidan, B. B. Zaidan, M. Talal, and M.L.M. Kiah, *J. Network Comput. Appl.*, **97**, 48 (2017).  
doi: <https://doi.org/10.1016/j.jnca.2017.08.017>
- [2] M. Shirvanimoghaddam, K. Shirvanimoghaddam, M. M. Abolhasani, M. Farhangi, V. Z. Barsari, H. Liu, M. Dohler, and M. Naebe, *IEEE Access*, **7**, 94533 (2019).  
doi: <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2019.2928523>
- [3] D. Ma, G. Lan, M. Hassan, W. Hu, and S. K. Das, *IEEE Commun. Surv. Tutorials*, **22**, 1222 (2020).  
doi: <https://doi.org/10.1109/COMST.2019.2962526>
- [4] E. Manavalan and K. Jayakrishna, *Comput. Ind. Eng.*, **127**, 925 (2019).  
doi: <https://doi.org/10.1016/j.cie.2018.11.030>
- [5] S. Vaidya, P. Ambad, and S. Bhosle, *Proc. Manuf.*, **20**, 233 (2018).  
doi: <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2018.02.034>
- [6] M. Peddigari, G. Y. Kim, C. H. Park, Y. Min, J. W. Kim, C. W. Ahn, J. J. Choi, B. D. Hahn, J. H. Choi, D. S. Park, J. K. Hong, J. T. Yeom, K. I. Park, D. Y. Jeong, W. H. Yoon, J. Ryu, and G. T. Hwang, *Sensors*, **19**, 2196 (2019).  
doi: <https://doi.org/10.3390/s19092196>
- [7] L. Gu, *Microelectron. J.*, **42**, 277 (2011).  
doi: <https://doi.org/10.1016/j.mejo.2010.10.007>
- [8] G. T. Hwang, Y. Kim, J. H. Lee, S. K. Oh, C. K. Jeong, D. Y. Park, J. Ryu, H. S. Kwon, S. G. Lee, B. Joung, D. Kim, and K. J. Lee, *Energy Environ. Sci.*, **8**, 2677 (2015).  
doi: <https://doi.org/10.1039/c5ee01593f>
- [9] C. K. Jeong, J. Lee, S. Han, J. Ryu, G. T. Hwang, D. Y. Park, J. H. Park, S. S. Lee, M. Byun, S. H. Ko, and K. J. Lee, *Adv. Mater.*, **27**, 2866 (2015).  
doi: <https://doi.org/10.1002/adma.201500367>
- [10] Y. Ammar, S. Joyce, R. Norman, Y. Wang, and A. P. Roskilly, *Appl. Energy*, **89**, 3 (2012).  
doi: <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2011.06.003>
- [11] S. Pandya, G. Velarde, L. Zhang, J. D. Wilbur, A. Smith, B. Hanrahan, C. Dames, and L. W. Martin, *NPG Asia Mater.*, **11**, 26 (2019).  
doi: <https://doi.org/10.1038/s41427-019-0125-y>
- [12] S. Brückner, S. Liu, L. Miró, M. Radspieler, L. F. Cabeza, and E. Lävemann, *Appl. Energy*, **151**, 157 (2015).  
doi: <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2015.01.147>
- [13] M. Bendig, F. Maréchal, and D. Favrat, *Appl. Therm. Eng.*, **61**, 134 (2013).  
doi: <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2013.03.020>
- [14] Z. Y. Xu, R. Z. Wang, and C. Yang, *Energy*, **176**, 1037 (2019).  
doi: <https://doi.org/10.1016/j.energy.2019.04.001>
- [15] H. Fang, J. Xia, K. Zhu, Y. Su, and Y. Jiang, *Energy Policy*, **62**, 236 (2013).  
doi: <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2013.06.104>
- [16] H. Ryu, H. J. Yoon, and S. W. Kim, *Adv. Mater.*, **31**, 1802898 (2019).  
doi: <https://doi.org/10.1002/adma.201802898>
- [17] Y. Bai, H. Jantunen, and J. Juuti, *Front. Mater.*, **5**, 65 (2018).  
doi: <https://doi.org/10.3389/fmats.2018.00065>
- [18] Y. Pang, Y. Cao, M. Derakhshani, Y. Fang, Z. L. Wang, and C. Cao, *Matter*, **4**, 116 (2021).  
doi: <https://doi.org/10.1016/j.matt.2020.10.018>
- [19] A. Koyuncuoglu, O. Özyurt, T. Okutucu, H. Külah, and O. Zorlu, *Proc. 11th International Energy Conversion Engineering Conference* (2013) p. 4030.  
doi: <https://doi.org/10.2514/6.2013-4030>
- [20] L. Feng, G. Liu, H. Guo, Q. Tang, X. Pu, J. Chen, X. Wang, Y. Xi, and C. Hu, *Nano Energy*, **47**, 217 (2018).  
doi: <https://doi.org/10.1016/j.nanoen.2018.02.042>
- [21] S. Hur, S. Kim, H. S. Kim, A. Kumar, C. Kwon, J. Shin, H. Kang, T. H. Sung, J. Ryu, J. M. Baik, and H. C. Song, *Nano Energy*, **114**, 108596 (2023).  
doi: <https://doi.org/10.1016/j.nanoen.2023.108596>
- [22] H. S. Choi, S. Hur, A. Kumar, H. Song, J. M. Baik, H. C. Song,

- and J. Ryu, *Appl. Energy*, **344**, 121271 (2023).  
doi: <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2023.121271>
- [23] J. Guo, H. Zhou, T. Fan, B. Zhao, X. Shang, T. Zhou, and Y. He, *J. Mater. Res. Technol.*, **9**, 14254 (2020).  
doi: <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2020.10.022>
- [24] M. Ujihara, G. P. Carman, and D. G. Lee, *Appl. Phys. Lett.*, **91**, 093508 (2007).  
doi: <https://doi.org/10.1063/1.2775096>