


마찰전기 효과가 접목된 하이브리드 자기-기계-전기 발전 소자의 출력 특성 향상연구

백창민¹, 김민우¹, 이지원¹, 김현아¹, 정지윤¹, 윤준현¹, 김호일¹, 박예진¹,
김기훈¹, 김소화¹, 김승헌¹, 김정민¹, 이혜선¹, 장정원¹, 정민교¹, 최진혁¹,
하승연¹, 이승아¹, 최한승¹, 류정호^{1,2} 

¹ 영남대학교 신소재공학부

² 영남대학교 재료기술연구소

Enhancement of Power Generation in Hybrid Magneto-Mechano-Electric Generator with Triboelectric Effect

Chang Min Baek¹, Min Woo Kim¹, Ji Won Lee¹, Hyun Ah Kim¹, Ji Yun Jung¹, Jun Hyeon Yoon¹, Hyo Il Kim¹,
Ye Jin Park¹, Gi Hun Kim¹, So Hwa Kim¹, Seung Heon Kim¹, Jeong Min Kim¹, Hye Seon Lee¹, Jeong Won Jang¹,
Min Gyo Jeong¹, Jin Hyeok Choi¹, Seung Yun Ha¹, Seungah Lee¹, Han Seung Choi¹, and Jungho Ryu^{1,2}

¹ School of Materials Engineering, Yeungnam University, Gyeongsan 38541, Korea

² Institute of Materials Technology, Yeungnam University, Gyeongsan 38541, Korea

(Received August 29, 2022; Revised September 2, 2022; Accepted September 2, 2022)

Abstract: Energy harvesting technologies that can convert wasted various energy into usable electrical energy have been widely investigated to overcome the limitation of batteries for the powering of IoT sensors and small electronic devices. Hybrid energy harvesting is known as a technology that enhances the output power of single energy harvesting device by housing two or more various energy harvesting mechanisms. In this study, we introduce a hybrid MME (Magneto-Mechano-Electric) generator coupled with the triboelectric effect. Through FEA modeling, four triboelectric materials, including PI (Polyimide), PFA (Teflon), Cu, and Al, were selected and compared with the expected triboelectric potentials. The effect of surface morphology was investigated as well. Among various combination of triboelectric materials and surface morphologies, PFA-Al combination with the surface morphology having nano-scale square projections showed highest output potential under triboelectrification. It is also experimentally confirmed that output voltage and power of the hybrid MME generator with triboelectric material combinations.

Keywords: Piezoelectric, Triboelectric, Hybrid, Energy harvesting, IoT, FEA

✉ Jungho Ryu; jhryu@ynu.ac.kr

Chang Min Baek, Min Woo Kim, Ji Won Lee, Hyun Ah Kim, Ji Yun Jung, Jun Hyeon Yoon, and Hyo Il Kim equally contributed to this work.

Copyright ©2022 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.

에너지 하베스팅 기술은 자연현상에서 이용되지 못하고 버려지는 에너지를 이용 가능한 전기에너지로 변환하는 기술로 4차 산업혁명의 핵심 기술인 IoT 센서나 무선 네트워크 구동용 배터리를 대체하거나 보조할 수 있는 전원기술로 주목받고 있다 [1,2]. IoT 무선 센서는 감지와 주기적인 실시간 데이터 전송을 위해 많은 전력을 필요로 하지만 배터리의 제한적인 에너지 저장용량 및 수명 때문에 주기적

으로 교체하거나 충전, 관리해야 한다. 이때, 인력과 비용이 소모되는 문제점과 폐기 시의 자연환경 오염의 문제점을 가지고 있다. 따라서 IoT 무선 센서에 반영구적인 전원을 공급할 수 있는 친환경적인 에너지 하베스팅 기술이 활발하게 연구되고 있다 [3]. 다양한 에너지 하베스팅 기술 중 진동에너지를 전기에너지로 변환하는 대표적인 기술로 압전 방식과 마찰전기 방식을 들 수 있다. 압전 에너지 하베스팅은 생활 주변의 환경에서 발생하는 미세한 진동과 압력, 충격과 같은 기계적 에너지를 압전 소재를 이용하여 전기에너지로 변환하는 기술로, 수확한 에너지를 저장한 뒤 IoT 무선센서의 전력으로 활용할 수 있는 대표적인 기술이다 [4]. 압전 에너지 하베스팅은 동일한 기능을 하는 에너지 발전 소자보다 단위 면적당 발생 전력이 우수하고 다른 전기장치들과 전자기 간섭이 일어나지 않는 장점이 있어서 [5], 큰 규모의 발전장치부터 소형 나노기계까지 다양한 분야에서 응용 연구가 활발히 진행되고 있다.

마찰전기 에너지 하베스팅(triboelectric energy harvesting)은 서로 다른 물질이 마찰할 경우 발생하는 대전 현상을 응용하여 전기 에너지를 발생시키는 기술이다 [6]. 마찰 시 대전체 표면 상에 서로 반대 극성의 전하가 형성되어 전위차가 발생하고, 이 전위차는 정전기적 평형을 유지하기 위해 표면전하가 소자의 외부회로를 따라 이동하면서 전류가 발생한다 [7]. 마찰전기 에너지 하베스터는 소자 특성상 가볍고 저렴하며 다양한 물질들이 이용 가능하다는 장점들이 있다. 특히, 보다 높은 출력과 다기능성 구현을 위해 서로 다른 물성의 물질들을 조합한 여러 복합체들이 이 마찰전기 에너지 하베스터에 광범위하게 이용되고 있다 [8]. 또한, 소자의 표면적이 유도 전하에 큰 영향을 미치기 때문에 표면 형태를 나노 또는 마이크로 단위로 제어하는 기술이 최근 활발히 진행되고 있다 [9].

하이브리드 에너지 하베스팅 기술은 두 가지 이상의 다양한 에너지 하베스팅 기술을 융합하여 단일 에너지 하베스팅 이상의 출력을 만들어 낼 수 있는 기술로 최근 연구가 활발히 진행되고 있다 [10]. 진동을 이용하는 에너지 하베스팅 기술 중 압전 에너지 하베스터와 마찰전기 에너지 하베스터의 소자는 모두 공진 진동환경에서 더욱 효율적인 하베스팅 출력을 낼 수 있고, 비교적 용이하게 조합되어 하이브리드화 될 수 있다 [11,12].

자기-기계-전기 발전기(magneto-mechano-electric, MME Generator)는 교류 자기장 하에서 자왜효과와 자석 질량체의 자기토크에 의해 진동이 발생하게 되고, 이 진동이 압전소재에 전달되어 전기에너지가 발생하는 소자이다 [13,14]. MME 발전기는 전력선로에 표유하는 자기장을 효율적으로 전기에너지로 변환하기 때문에 일반적인 전자기

유도 방식의 자기장 에너지 하베스팅 소자에 비하여 작은 부피와 무게를 가지는 장점이 있다 [15]. 이때 교류 자기장 하에서 진동하는 압전 소자에 다른 재료를 접촉시키면 주기적인 마찰이 발생한다. 즉, 기존의 MME 발전소자에 마찰전기 대전체를 조합함으로써, 압전과 마찰전기를 동시에 활용할 수 있는 하이브리드 MME 에너지 하베스터의 구현이 가능하다.

본 연구에서는 유한요소해석(finite element analysis, COMSOL Multiphysics® (ver.6.0))을 통해 다양한 대전체 재료를 조합하여 재료 간의 발생전압을 모델링하고 하이브리드 MME 소자에 적용할 수 있는 마찰전기 하베스팅용 대전체를 선정하였다. 모델링 결과를 바탕으로 선정된 대전체의 조합을 이용하여 마찰전기 발전소자가 접목된 하이브리드 MME 소자를 제작하고, 자기장 하에서의 발전 성능을 평가하였다. 음의 대전체로 PFA와 양의 대전체로 Aluminum 조합의 출력값이 가장 높은 것을 확인하였고, 이를 통해 하나의 교류 자기장 하에서 압전과 마찰전기를 이용한 하이브리드 에너지 하베스터의 발전이 가능함을 확인하였다.

마찰전기 발전 소자의 대전체 재료 조합 간 출력 특성을 비교하기 위하여, 그림 1에 도시된 triboelectric series를 바탕으로 표면전하밀도(surface charge density)가 각기 다른 4가지 재료(PI (polyimide), PFA (polytetrafluoroethylene), Al (aluminum), Cu (copper))를 선정하여 PI-Al, PI-Cu, PFA-Al, PFA-Cu 4가지 소자 조합의 유한요소해석을 진행하였다.

외부 환경을 대기 상태로 설정하여 실제 실험 조건과 동일한 환경을 구현하였으며 음 대전체(PI, PFA)를 Lower Material에 배치하고, 양 대전체(Al, Cu)를 Upper

Polyformaldehyde 1.3-1.4	(continued)	
Etylcellulose	Polyester (Dacron)	
Polyamide 11	Polysobutylene	
Polyamide6-6	Polyuretane flexible sponge	
Melanime formol	Polyethylene Terephthalate	
Wool, knitted	Polyvinyl butyral	
Silk, woven	Polychlorobutadiene	
Aluminum	Natural rubber	
Paper	Polyacrilonitrile	
Cotton, woven	Acrylonitrile-vinyl chloride	
Steel	Polybisphenol carbonate	
Wood	Polychloroether	
Hard rubber	Polyvinylidene chloride (Saran)	
Nickel, copper	Polystyrene	
Sulfur	Polyethylene	
Brass, silver	Polypropylene	
Acetate, Rayon	Polyimide (Kapton)	
Polymethyl methacrylate (Lucite)	Polyvinyl Chloride (PVC)	
Polycinyl alcohol	Polydimethylsiloxane (PDMS)	
(continued)	Polytetrafluoroethylene (Teflon)	

Fig. 1. A triboelectric series for hybrid energy harvester [16].

Material에 배치하여 각 조합을 구성하였다. 각 대전체 재료의 두께는 실제 소자 상황과 유사하게 Lower Material는 0.1 mm, Upper Material는 0.3 mm로 설정하였으며, 대전체 소재 PI, PFA, Al, Cu의 표면전하밀도는 각각 $-95 \mu\text{C}/\text{m}^2$, $-190 \mu\text{C}/\text{m}^2$, $100 \mu\text{C}/\text{m}^2$, $50 \mu\text{C}/\text{m}^2$ 로 입력하였다 [17].

대전체가 서로 접촉되는 면의 반대편에 전자가 쌓일 수 있도록 각 대전체 외부 면에 floating potential을 지정하였다. 각 모델링마다 대전체 재료 내부에 tetragonal 형상의 mesh를 설정하여 영역을 구분한 후, 유한요소해석을 진행하였다. 마찰전기 효과에 의한 발생 전압을 알아보기 위하여 lower material과 접촉된 상태의 upper material에 parametric sweep를 설정하고 0.1 mm씩 상승하여 3 mm 거리가 되는 지점에서 멈추도록 구성하였다. 본 과정을 유한요소해석으로 반복하여 4가지 소자 조합의 최대 마찰전기 효과에 의한 발생 전압 특성을 비교하였다.

그림 2는 유한요소해석을 통해 얻어진 potential voltage를 2D color gradation으로 도시한 결과이다. Cu-PFA 조합이 210 V, Al-PI 조합이 170 V, Cu-PI 조합이 120 V, 그리고 Al-PFA 조합이 가장 높은 값인 310 V로 나타났다. 표면전하밀도 차이가 클수록 potential voltage값도 커져 더 많은 전하가 쌓임을 확인하였다.

다음으로 표면적에 따른 마찰전기의 출력 potential voltage를 비교하였다. 마찰전기의 출력을 향상시키는 방법으로 두 층 사이 간 이동하는 전하량(Q), triboelectric film의 두께(t), 등이 큰 재료를 사용하거나 표면적을 늘리는 방법이 있다.

$$V = -\frac{Q}{S\epsilon_0} \left(\frac{t_1}{\epsilon_{r1}} + \frac{t_2}{\epsilon_{r2}} + d \right) + \frac{\sigma d}{\epsilon_0} \quad (1)$$

위 식 (1)은 마찰 전기 출력값을 나타내는 식이다. Q는 두 층 사이 간 이동하는 전하량, $S\epsilon_0$ 는 전극의 면적, t_1 과 t_2 는 Triboelectric film의 두께, ϵ_{r1} 과 ϵ_{r2} 는 Triboelectric film의 유전율, d는 Triboelectric film 간의 간격, σ 는 표면 전하밀도를 의미한다 [18-20]. 또한 표면전하밀도(σ)와 potential voltage(V) 값은 비례한다. 본 연구에서는 동일한 가로 길이에 표면 형태를 달리하여 표면 전하 밀도를 높이기 위한 유한요소해석을 진행하였다.

앞선 유한요소해석을 통해 확인된 최대 potential voltage를 가지는 PFA-Al 조합으로 표면 형태에 따른 마찰전기 발생 효과를 유한요소해석을 통하여 예측하였다. 다른 유한요소해석 조건은 앞선 모델링과 동일하며, lower material의 표면을 plane, semicircle, triangle, square의 4가지 형태로 구성하였다. 표면적에 따른 출력을 면밀하게 비교하기 위해 대전체의 가로 길이를 1 mm 하였고, semicircle, triangle, square의 지름은 50 nm로 지정하였으며, 돌출 중심 간 거리는 100 nm로 설정하여 각 표면 간 10,000개의 돌출 표면 형태를 구성하였다. Plane의 표면적 길이는 1,000,000 nm이다. Semicircle 하나의 표면적 길이는 $(2\pi \times 25 \text{ nm})/2 = 78.54 \text{ nm}$ 으로 전체 표면적 길이는 $(78.54 \text{ nm} + 100 \text{ nm}) \times 10,000 = 1,085,400 \text{ nm}$ 이다. Triangle 하나의 표면적 길이는 $50 \text{ nm} + 50 \text{ nm} = 100 \text{ nm}$ 로 전체 표면적 길이는 $(100 \text{ nm} + 100 \text{ nm}) \times 10,000 = 2,000,000 \text{ nm}$ 이다. Square 하나의 표면적 길이는 $50 \text{ nm} + 50 \text{ nm} + 50 \text{ nm} = 150 \text{ nm}$ 로 전체 표면적 길이는 $(100 \text{ nm} + 150 \text{ nm}) \times 10,000 = 2,500,000 \text{ nm}$ 이다. 4가지 형태 중 Square의 표면적 길이가 가장 넓었다. 본 과정을 유한요소해석으로 반복하여 표면적에 따른 발생 전압 특성을 비교하였다.

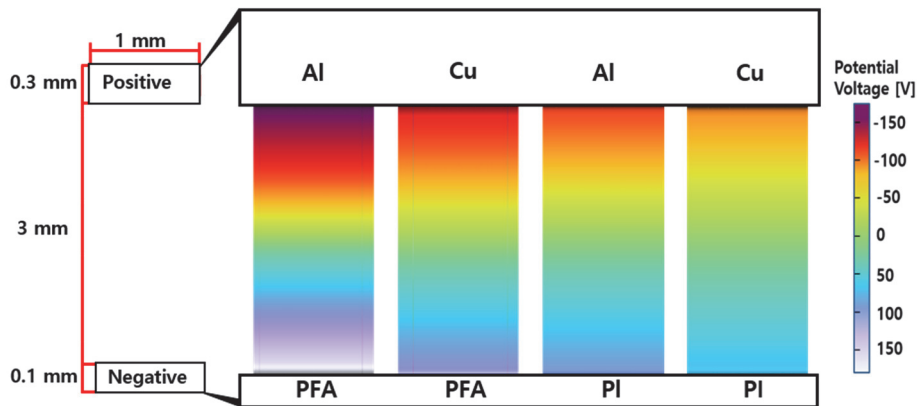


Fig. 2. Finite element analysis (FEA) results of the potential voltage distribution with respect to the each combination of triboelectric materials (Al-PFA, Cu-PFA, Al-PI, Cu-PI).

그림 3에 도시된 바와 같이 유한요소해석을 통해 표면 형태에 따른 potential voltage를 2D color gradation으로 확인하였을 때, Plane 형태가 13 V, semicircle 형태가 15 V, triangle 형태가 17 V 그리고 square 형태가 가장 높은 값인 18 V로 나타났다. 표면적이 넓어질수록 표면에 더 많은 전하가 쌓여 발전 전압이 높아질 수 있음을 확인하였다.

유한요소해석 결과를 바탕으로 실험적인 소자를 제작하고, 특성을 확인하였다. 그림 4는 본 연구의 소자제작, 특성평가의 전반적인 과정을 보여준다. 하베스팅 소자의 제작, 하베스팅 소자 구동 및 특성평가 순으로 진행하였으며, 각 단계의 세부적인 내용은 아래와 같다.

하베스팅 소자는 외팔보 구조의 압전기반 MME 발전 소자에 음의 마찰대전체와 양의 마찰대전체로 구성된 마찰전기 하베스팅 소자로 하이브리드화하였다. 압전 하베스팅 소자의 경우 절단된 초탄성 Ti 합금(20 mm × 80 mm × 0.25 mm)에 에폭시 접착제 (DP-460, 3M, USA)를 사용하여 PMN-PZT (Pb(Mg_{1/3}Nb_{2/3})O₃-PbZrO₃-PbTiO₃) 단결정 섬유 복합체(single crystal fiber composite, SFC)(Adhesive Type C & Hard-Type CSH1 SC - (011) d32 Mode, Ceracomp, Korea)와 접착하였다. 압전 하베스팅 소자를 헬름홀츠 코일 내부에 고정된 후 압전기반 MME 발전 소자의 자기 회전력에 의한 기계적 변형을 발생시키기 위해 자석 질량체(NdFeB)를 압전 하베스팅 소자에 부착하였다 [21,22]. 음의 마찰대전체의 경우 PI (polyimide tape, 3M, USA), PFA (Teflon film PFA 0.025T)에 진공증착장비 (Sputter Coater 108auto, Ted Pella, USA/Canada)를 사용하여 Au를 10분 동안 증착하였다. 이후 Au 증착면 위에 은선 (Silver Wire)과 전도성 에폭시(conductive epoxy)(Chemtronics, USA)를 사

용하여 배선하고 50 mm × 50 mm의 크기로 제작하여 압전 하베스팅 소자에 양면테이프로 부착하였다.

마찰전기 하베스팅 소자의 경우 양의 마찰대전체인 Al (36251 크린호일, 에버랩, Korea), Cu (Copper Foil Shielding Tape 1181, 3M, USA)에 배선을 하여 제작하였다. Rigid 4000 VI 레진을 이용한 3D 프린터(Form 3, Formlabs, USA)를 통해 Clamp 구조를 제작하여 양의 마찰대전체를 고정하였다. 음의 마찰대전체와 양의 마찰대전체의 접촉 면적을 최대로 하기 위해 폴리우레탄 재질을 사용한 다리를 Clamp 구조에 부착하여 에너지 하베스팅 특성 평가를 진행하였다.

압전 하베스팅 소자를 헬름홀츠 코일에 고정시킨 뒤 소스 미터(source meter)(2611A, Keithley), 고속 바이폴라 증폭기를 사용하여 7 Oe, 100 Hz로 설정했다. 양 대전체 소자를 3D 프린터를 통하여 제작한 Clamp 구조에 고정하였다. 마찰전기 하베스팅 소자의 출력이 최대가 되도록 Clamp 구조를 XYZ 스테이지에 장착하여 대전체 간의 거리를 최적화하였다. 오실로스코프(WaveSurfer 44MXs-A, Teledyne LeCroy)를 통하여 최적화한 거리에서의 압전 하베스팅 소자와 마찰전기 하베스팅 소자의 출력을 확인하였다. 최적화된 위치에서의 마찰전기 하베스팅 소자의 전력을 계산하기 위해 1 kΩ에서 1 MΩ까지 다양한 외부 부하저항을 연결하여 마찰전기의 출력 전압을 측정 후 $P=V^2/R$ 을 통하여 마찰전기 하베스팅 소자의 전력을 계산하였다.

그림 5는 하이브리드 에너지 하베스터의 마찰전기 하베스터용 대전체 소재의 조합에 따른 출력 전압 특성을 보여준다. 최적화된 위치에서 마찰전기 재료에 따른 하이브리드 에너지 하베스터들의 출력전압을 측정하였을 때, 압전 출력의 경우 음 대전체로 PFA를 사용하였을 때, PI보다 약

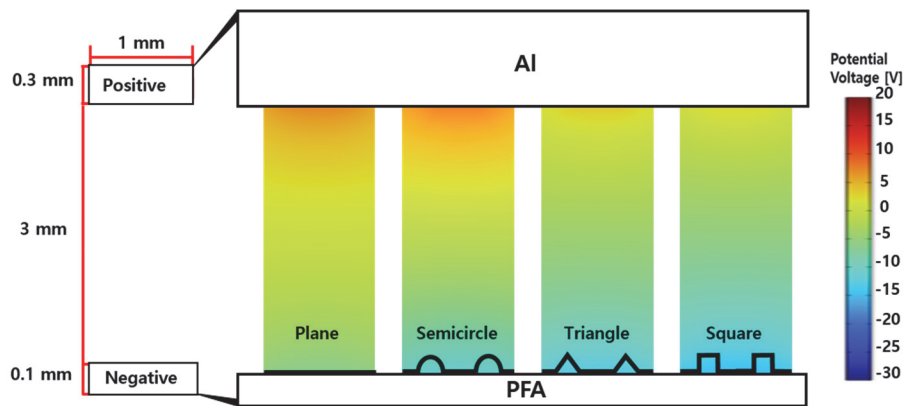


Fig. 3. Finite element analysis (FEA) results of the potential voltage distribution with respect to the each surface shapes of triboelectric materials (plane, semicircle, triangle, square).



Fig. 4. Flow diagram of the overall experiment procedure; fabrication of piezoelectric harvester and triboelectric harvester, and characterization of hybrid energy harvester.

간 더 높지만 크게 변화하지 않는 것을 확인했다. 마찰전기 효과에 의한 하베스팅 출력의 경우 유한요소해석 결과와 마찬가지로 표면전하밀도 차이가 클수록 출력 전압이 높은 것을 확인하였다. 평균 peak-peak Voltage 값은 Al-PFA 조합이 85.9 V, Cu-PFA 조합이 72.5 V, Al-PI 조합이 43.9 V, Cu-PI 조합이 32.8 V로 Al-PFA 조합이 가장 높은 출력전압을 나타내었다.

표 1은 4가지 조합에 따른 전압을 요약한 표로 실험을 통해 측정된 출력전압은 유한요소해석 결과와 경향성이 일치하는 것을 확인하였다. 또한 결과값과 triboelectric

series를 비교해 보았을 때, 음 대전체와 양 대전체의 표면 전하밀도 차이가 클수록 높은 전압을 나타내는 것을 확인할 수 있었다. 가장 차이가 큰 PFA와 Al을 사용했을 때 85.85 V로 가장 높은 전압을 얻었으며, 가장 차이가 적은 PI와 Cu를 사용했을 때 32.83 V로 가장 낮은 전압을 얻었다. 다만 유한요소해석의 결과와 실제 실험 결과의 수치가 2~3배 차이 나는 것은 유한요소해석의 환경조건과 다르게 실제 실험 환경은 주변의 온도나 습도 등이 발생 전압에 영향을 주기 때문에 발생한 것으로 사료된다. 또한 유한요소해석의 이상적인 경계조건 대비, 실험적인 소자에서의 대

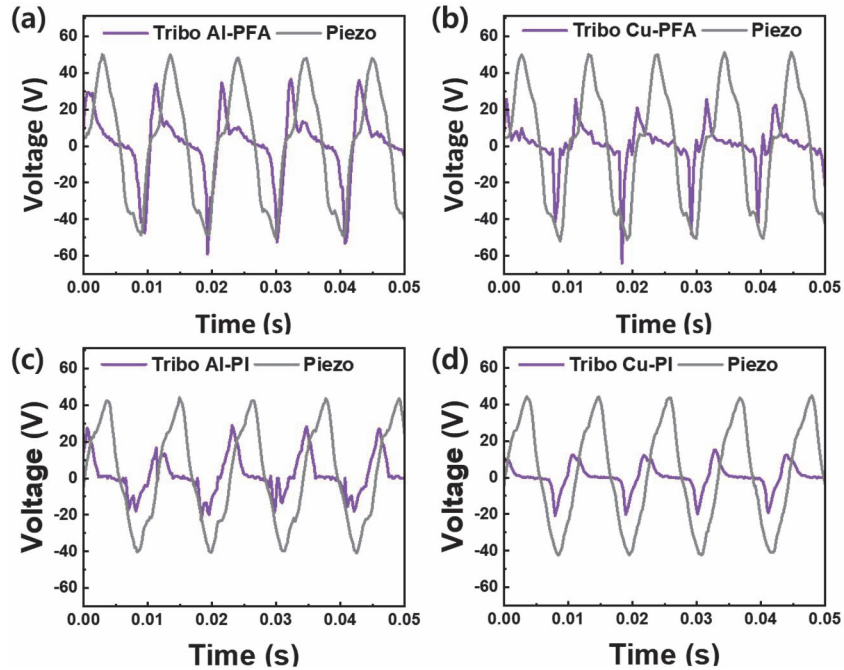


Fig. 5. The open-circuit output voltages from piezoelectric and triboelectric generators with different combinations of materials. (a) Al-PFA, (b) Cu-PFA, (c) Al-PI, and (d) Cu-PI of hybrid energy harvesters under a 100 Hz AC magnetic field of 7 Oe.

Table 1. Summary of FEA and experience results.

	Al-PFA	Cu-PFA	Al-PI	Cu-PI
FEA modeling triboelectric potential [V]	304	195	158	117
Triboelectric output voltage V_{p-p} [V]	85.85	72.5	43.94	32.83
Piezoelectric output voltage V_{p-p} [V]	97.2	101.2	82.7	85.0

전체의 표면상태, 동작 변위 등의 차이가 두 결과의 차이를 발생시킬 수 있다.

최적화된 거리에서 음의 대전체로 PFA와 양의 대전체로 Al을 사용한 마찰전기 에너지 하베스터의 출력을 측정하여 그 결과를 그림 6에 도시하였다. 외부저항에 따른 출력 전압을 측정한 후 전류와 전력을 계산하였다. 마찰전기 에너지 하베스터의 최고 전력은 820 kΩ에서 1.5 μW의 출력을 보였다.

본 연구에서는 자기장의 환경에서 전기에너지를 생산하는 하이브리드 MME 발전기에 사용될 마찰전기 재료를 선정하여, 여러 조건에서의 출력값을 비교하며 최적화하였다. 마찰전기재료로 Triboelectric Series를 바탕으로 표면전하밀도가 각기 다른 4가지 재료를 선정하였다. 유한요

소해석과 실험을 통해 비교하였을 때, 표면전하밀도 차이가 클수록 출력 또한 높아지는 것을 확인하였다. 하지만 표면전하밀도 차이에 따른 출력값은 선형적으로 증가하지 않는 것으로 확인되었다. 유한요소해석을 통하여 선정된 표면전하밀도 차이가 가장 큰 PFA-Al 조합을 가지는 하이브리드 에너지 하베스팅 소자를 제작하였으며, 100 Hz, 7 Oe에서 1.5 μW의 전력을 얻었다. 추가적으로 유한요소해석을 통해 PFA 표면 특성에 따른 전기적 potential 값을 분석한 결과, 표면적이 넓어질수록 전압이 높아지는 것을 확인할 수 있었다. 따라서 표면적의 형태가 plane의 경우 보다 square일 때 1.4배의 차이로 가장 높은 값을 가졌다. 앞으로 aerosol deposition (AD)와 xenon flash annealing (XFA)을 이용한 stamping 기법을 실제로 적

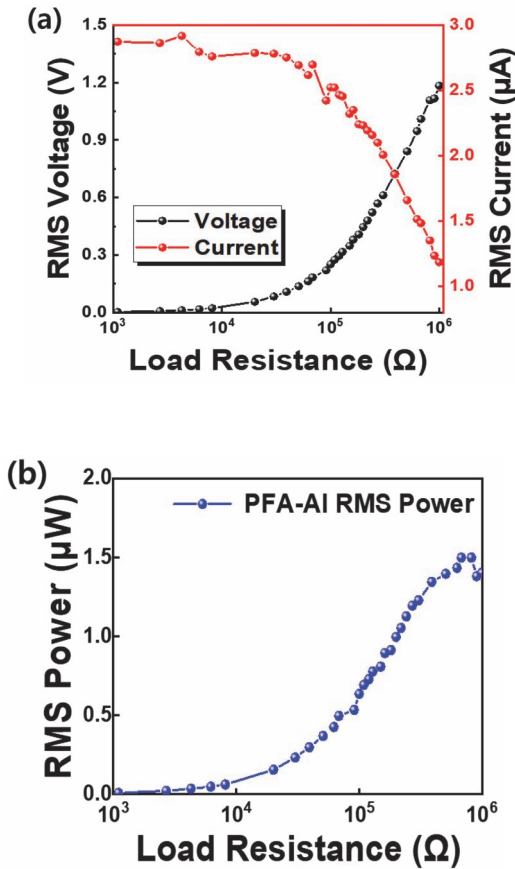


Fig. 6. (a) Triboelectric output voltage and current and (b) triboelectric output power of hybrid energy harvester using PFA-AI as a function of external load resistance. The peak output power of triboelectric energy harvester is 1.5 μW at load resistance of 820 k Ω .

용하여 출력값을 확인할 예정이다 [23]. 개선된 마찰 전기 에너지 하베스팅을 이용해 하이브리드 에너지 하베스터로 이용되어 IoT 센서에 필요한 반영구적인 배터리로 대체될 수 있기를 기대한다.

ORCID

Jungho Ryu

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

감사의 글

본 연구는 한국 연구재단의 기본연구사업 (2022R1F1A1073594)을 통하여 진행되었습니다.

REFERENCES

[1] H. J. Kim, J. Y. Park, K. N. Jin, and M. H. Noh, *LHI J.*, **5**, 99 (2014). [DOI: <https://doi.org/10.5804/LHIJ.2014.5.2.099>]

[2] J. H. Jung, D. M. Lee, Y. J. Kim, and S. W. Kim, *Ceramist*, **22**, 110 (2019). [DOI: <https://doi.org/10.31613/ceramist.2019.22.2.03>]

[3] G. T. Hwang, J. Ryu, and W. H. Yoon, *J. Korean Inst. Electr. Electron. Mater. Eng.*, **34**, 271 (2021). [DOI: <https://doi.org/10.4313/JKEM.2021.34.5.271>]

[4] S. Y. Lee and Y. Choi, *Polymer Science and Technology.*, **31**, 484-489 (2020).

[5] W. Kim, H. U. Ko, S. C. Mun, J. H. Kim, and H. S. Kim, *KIC News*, **16**, 27 (2013).

[6] U. Khan and S. W. Kim, *ACS Nano*, **10**, 6429 (2016). [DOI: <https://doi.org/10.1021/acsnano.6b04213>]

[7] H. E. Lee, J. H. Park, D. Jang, J. H. Shin, T. H. Im, J. H. Lee, S. K. Hong, H. S. Wang, M. S. Kwak, M. Peddigari, C. K. Jeong, Y. Min, C. H. Park, J. J. Choi, J. Ryu, W. H. Yoon, D. Kim, K. J. Lee, and G. T. Hwang, *Nano Energy*, **75**, 104951 (2020). [DOI: <https://doi.org/10.1016/j.nanoen.2020.104951>]

[8] M. Ibrahim, J. Jiang, Z. Wen, and X. Sun, *Nanoenergy Adv.*, **1**, 58 (2021). [DOI: <https://doi.org/10.3390/nanoenergyadv1010004>]

[9] M. S. Kwak, K. W. Lim, H. Y. Lee, M. Peddigari, J. Jang, C. K. Jeong, J. Ryu, W. H. Yoon, S. N. Yi, and G. T. Hwang, *Nanoscale*, **13**, 8418 (2021). [DOI: <https://doi.org/10.1039/d1nr01336j>]

[10] H. Ryu, H. J. Yoon, and S. W. Kim, *Adv. Mater.*, **31**, 1802898 (2019). [DOI: <https://doi.org/10.1002/adma.201802898>]

[11] A. Rasheed, H. Park, M. K. Sohn, T. H. Lee, and D. J. Kang, *Ceramist*, **23**, 54 (2020). [DOI: <https://doi.org/10.31613/ceramist.2020.23.1.05>]

[12] S. Parandeh, N. Etemadi, M. Kharaziha, G. Chen, A. Nashalian, X. Xiao, and J. Chen, *Adv. Funct. Mater.*, **31**, 2105169 (2021). [DOI: <https://doi.org/10.1002/adfm.202105169>]

[13] V. Annapureddy, H. Palneedi, G. T. Hwang, M. Peddigari, D. Y. Jeong, W. H. Yoon, K. H. Kim, and J. Ryu, *Sustainable Energy Fuels*, **1**, 2039 (2017). [DOI: <https://doi.org/10.1039/c7se00403f>]

[14] J. Ryu, J. E. Kang, Y. Zhou, S. Y. Choi, W. H. Yoon, D. S. Park, J. J. Choi, B. D. Hahn, C. W. Ahn, J. W. Kim, Y. D. Kim, S. Priya, S. Y. Lee, S. Jeong, and D. Y. Jeong, *Energy Environ. Sci.*, **8**, 2402 (2015). [DOI: <https://doi.org/10.1039/C5EE00414D>]

[15] M. S. Kwak, M. Peddigari, H. Y. Lee, Y. Min, K. I. Park, J. H. Kim, W. H. Yoon, J. Ryu, S. N. Yi, J. Jang, and G. T. Hwang, *Adv. Funct. Mater.*, **32**, 2112028 (2022). [DOI: <https://doi.org/10.1002/adfm.202112028>]

[16] Z. L. Wang, *ACS Nano*, **7**, 9533 (2013). [DOI: <https://doi.org/10.1021/nn404614z>]

- [17] H. Zou, Y. Zhang, L. Guo, P. Wang, X. He, G. Dai, H. Zheng, C. Chen, A. C. Wang, C. Xu, and Z. L. Wang, *Nat. Commun.*, **10**, 1427 (2019). [DOI: <https://doi.org/10.1038/s41467-019-09461-x>]
- [18] K. W. Lim, M. Peddigari, C. H. Park, H. Y. Lee, 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, W. H. Yoon, J. Ryu, S. N. Yi, and G. T. Hwang, *Energy Environ. Sci.*, **12**, 666 (2019). [DOI: <https://doi.org/10.1039/C8EE03008A>]
- [19] J. Nie, X. Chen, and Z. L. Wang, *Adv. Funct. Mater.*, **29**, 1806351 (2019). [DOI: <https://doi.org/10.1002/adfm.201806351>]
- [20] M. A. Parvez Mahmud, J. J. Lee, G. H. Kim, H. J. Lim, and K. B. Choi, *Microelectron. Eng.*, **159**, 102 (2016). [DOI: <https://doi.org/10.1016/j.mee.2016.02.066>]
- [21] H. Song, D. R. Patil, W. H. Yoon, K. H. Kim, C. Choi, J. H. Kim, G. T. Hwang, D. Y. Jeong, and J. Ryu, *Energy Environ. Sci.*, **13**, 4238 (2020). [DOI: <https://doi.org/10.1039/D0EE01574A>]
- [22] R. Sriramdas, M. G. Kang, M. Meng, M. Kiani, J. Ryu, M. Sanghadasa, and S. Priya, *Adv. Energy Mater.*, **10**, 1903689 (2020). [DOI: <https://doi.org/10.1002/aenm.201903689>]
- [23] H. E. Lee, J. H. Park, D. Jang, J. H. Shin, T. H. Im, J. H. Lee, S. K. Hong, H. S. Wang, M. S. Kwak, M. Peddigari, C. K. Jeong, Y. Min, C. H. Park, J. J. Choi, J. Ryu, W. H. Yoon, D. Kim, K. J. Lee, and G. T. Hwang, *Nano Energy*, **75**, 104951 (2020). [DOI: <https://doi.org/10.1016/j.nanoen.2020.104951>]