


자동차 진동 에너지 변환을 위한 압전 에너지 하베스팅에 관한 연구

이현영¹, 김광원¹, 예지원¹, 우수현¹, 이건¹, 이승아¹, 정성록¹, 정선헌¹,
김호성¹, 남가현¹, 조윤영¹, 최한승¹, 류정호^{1,2} 

¹ 영남대학교 신소재공학부

² 영남대학교 재료기술연구소

Study on the Piezoelectric Energy Harvesting Technology for the Energy Conversion of Vibration in Automobiles

Hyeon Yeong Lee¹, Kwangwon Kim¹, Jiwon Ye¹, Suhyeon Woo¹, Geon Lee¹, Seungah Lee¹, Seong Rok Jeong¹,
Seon Hye Jeong¹, Ho Seong Kim¹, Ga Hyeon Nam¹, Yun Yeong Jo¹, 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 September 3, 2021; Revised September 15, 2021; Accepted September 16, 2021)

Abstract: Energy Harvesting is a technology that can convert wasted energy such as vibration, heat, light, electromagnetic energy, etc. into usable electrical energy. Among them, vibration-based piezoelectric energy harvesting (PEH) has high energy conversion efficiency with a small volume; thus, it is expected to be used in various autonomous powering devices, such as implantable medical devices, wearable devices, and energy harvesting from road or automobiles. In this study, wasted vibration energy in an automobile is converted into electrical energy by high-power piezoelectric materials, and the generated electrical energy is found to be an auxiliary power source for the operation of wireless sensor nodes, LEDs, etc. inside an automobile. In order to properly install the PEH in an automobile, vibration characteristics includes frequency and amplitude at several positions in the automobile is monitored initially and the cantilever structured PEH was designed accordingly. The harvesting properties of fabricated PEH is characterized and installed into the engine part of the automobile, where the vibration amplitude is stable and strong. The feasibility of PEH is confirmed by operating electric components (LEDs) that can be used in practice.

Keywords: Piezoelectric, Energy harvesting, Vibration, Wireless sensor, Automobile

✉ Jungo Ryu; jhryu@ynu.ac.kr

Hyeon Yeong Lee, Kwangwon Kim, Jiwon Ye, Suhyeon Woo,
Geon Lee, and Seungah Lee contributed equally to this work.

Copyright ©2021 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(energy harvesting) 기술은 태양광, 진동, 열, 풍력 등과 같이 자연에 일상적으로 존재하지만 이용되지 못하고 버려지는 에너지를 전기 에너지로 전환, 저장한 후 효율적으로 사용하는 기술을 일컫는다. 에너지 원료의 고갈과 환경 오염 문제로 인하여, 전 세계적으로 지속 가능한 친환경 에너지의 확보가 중요한 이슈로 떠오르고 있다. 다양한 지속 가능 신재생 에너지 기술 중 에너지 하베스팅 기술은 대표적인 4차 산업의 핵심 기술인 사물인

터넷(IoT)과 융합될 수 있는 기술로, 미래 4차 산업 발전에 큰 영향을 끼칠 것으로 기대된다 [1]. IoT 센서의 전원 공급을 위해 많은 경우 배터리가 사용되지만, 배터리의 에너지 저장용량 및 수명은 제한적이라 주기적으로 교체해야 한다. 하지만 향후 전 세계에 설치될 수십~수백억 개 IoT 센서의 배터리를 주기적으로 교체하기 위해서는 천문학적 인 인력과 비용이 소모되는 문제점과 폐기 시의 자연환경 오염의 문제점을 가지고 있다. 따라서 다양한 종류의 에너지원을 활용하여 스스로 전기 에너지를 생산하고 IoT 센서에 전원을 공급할 수 있는 자율전원 기술로 에너지 하베스팅 기술이 주목받고 있다 [2].

에너지 하베스팅 기술 중 압력, 진동과 같은 기계적 에너지를 전기 에너지로 변환하는 진동 에너지 하베스팅 기술은 압전(piezoelectric) 방식, 정전(electrostatic) 방식, 전자기 방식(electromagnetic) 방식, 자왜(magnetostrictive) 방식, 마찰전기(triboelectric) 방식, 등으로 나눌 수 있다. 이들은 모두 외부에서 인가되는 진동을 구조 설계를 통하여 전기 에너지로 변환하는 특성을 극대화할 수 있는 공통점을 갖고 있다. 특히, 압전 방식의 경우 기계적 에너지를 전기 에너지로 변환하여 주는 압전 소재의 정압전효과를 활용한다. 저주파수의 진동환경에서 일반적으로 외팔보 구조(cantilever형)의 전력변환 구조물을 이용하게 되며, 외부 진동이 발생할 경우 cantilever 표면에 접합되어 있는 압전 소재의 변형을 통해 전기 에너지가 발생하게 된다 [3].

압전 에너지 하베스팅 기술은 자동차의 진동, 인체의 움직임, 건물의 환기 덕트, 전동기를 이용하는 가전제품 및 산업용 장비의 기계적 에너지를 활용하여 전기 에너지로 변환할 수 있는 기술이다. 특히 자동차의 경우, 내연기관의 연료 연소에 의해 발생하는 에너지는 30~40%만 활용되며, 60%가량의 에너지는 열과 진동 에너지로 버려지고 있어 진동 에너지 하베스팅 적용 분야로 큰 관심을 받고 있다.

현재의 자동차들은 자기 센서(magnetic sensor), 가속도 센서(acceleration sensor), 각속도 센서(gyro sensor), 레이더 센서(RADAR sensor), 라이다 센서(LIDAR sensor), 비전 센서(vision sensor), 적외선 센서(infrared sensor), 초음파 센서(ultrasonic sensor)가 각 시스템에 신경망처럼 분산 배치되어 차량의 상태를 실시간으로 파악하는 핵심적인 기능을 하고 있다 [4]. 이러한 센서에 압전 소재를 사용한 진동 에너지 하베스팅 기술을 적용시키면, 기존의 차량내 배터리에 복잡한 배선으로 연결되어 있는 센서노드를 각 센서에 자가전원 공급을 할 수 있어 센서노드 간 배선을 없앤 무선 센서 네트워크 구성이 용이할 뿐만 아니라, 반영구적인 수명을 가지기 때문에 지속적, 주기적인 관리가 필요하지 않은 장점이 있다.

Peking University의 X. Gao 연구팀은 차량용 진동 에너지 하베스팅 기술로서 barbell-shape의 압전 에너지 하베스터를 보고하여 일반적인 cantilever 구조의 깨짐 현상을 보완할 수 있는 새로운 방향을 제시한 바 있다. 차량 엔진에 직접 압전 에너지 하베스터와 가속도계를 부착하여 연구를 진행하였고 엔진이 작동하기 시작한 순간부터 시간이 지남에 따라 주파수와 가속도 값의 변화를 측정하였다. 출력은 가속도 1 G일 때 약 30 μ W으로 상온에서 기존에 보고된 barbell-shape의 에너지 하베스터보다 6배 더 높다고 발표했지만 기존의 cantilever형에 압전 에너지 하베스터에 비하여 출력은 크게 향상되지는 않았으며, 가속도 1 G는 극단적인 상황이라 실제 상황과는 맞지 않는 것으로 판단된다 [5].

또한, Ulsan University의 B. C. Lee 연구팀은 다양한 진동 환경에서 적용이 가능하도록 공진 주파수 변경이 가능한 튜닝용 에너지 하베스터를 설계했다. 이는 기존의 튜닝 시스템과 비교하여 스프링의 회전을 이용하는 방식으로 주파수 변경이 쉽고 부피 증가가 없는 장점이 있다. 차량용 엔진에 적용에 적용할 경우 약 40 Hz 영역에서 1.78 V의 전압이 발생되었다. 차량용 무선 센서를 구동하기에는 부족한 전력으로 향후, 추가적인 에너지 변환 회로의 연구를 통해 안정적인 전원 공급이 가능한 발전 소자의 개발이 가능할 것으로 밝혔다 [6].

차량이 주행 중일 때 가장 큰 진동이 나타나는 곳 중 하나는 휠 부분이다. 최근 D. Maurya 연구팀이 타이어에 에너지 하베스터를 부착하여 무선센서의 전원으로 활용 가능함을 보고하였다 [7]. 타이어 단면에 장착된 하베스터는 16 Hz (~112 km/h)에서 최대 580 μ W의 출력을 보였고 이는 78개의 LED를 점등할 수 있었다. 이들은 저장된 전기 에너지로 타이어 변형 데이터를 전송하는 무선 센서의 작동 가능성 또한 확인하였다. 하지만 주행 중 타이어는 외부와의 접촉이 생길 수 있어 하베스터 손상으로 이어질 수 있는 것이 단점이고 이를 보완하기 위한 연구가 계속되어야 한다고 밝혔다 [7]. 상기와 같은 많은 연구기관에서의 연구들은 압전 소재를 이용한 진동 에너지 하베스팅 기술이 자동차의 진동 에너지를 전기 에너지로 변환시킬 수 있는 유력한 기술 중 하나임을 의미한다.

본 연구에서는 진동 에너지 하베스터의 자동차 적용 시 가장 출력이 큰 에너지를 발생시킬 수 있는 부분을 확인하기 위해서 가속도 센서와 3D 프린터를 사용하여 진동 측정 센서 모듈을 제작하였으며 차량의 각 부분에 대한 진동 특성을 분석하였다. 차량의 엔진, 배터리, 머플러 부분을 가속도 센서로 측정하고 진동이 큰 부분에 대한 진동의 성분(주파수, 방향, 진폭)을 분석하여 이에 적합한 진동 에너지

하베스팅 소자를 설계 및 제작하였다. 하베스터를 실제 차량의 엔진에 실장하여 최대 $146 \mu W_{rms}$ 출력을 얻을 수 있었고, 이를 통해 LED 모듈을 점등함으로써, 압전 진동 에너지 하베스팅 소자가 차량 진동 에너지 변환 기술로 활용 가능성을 확인하였다.

그림 1은 본 연구의 전체적인 과정을 보여주는 개략도이다. PZT 기반 압전 세라믹스의 제작, 소재의 물성 측정, 자동차의 진동 특성 분석, 하베스팅 소자의 제작 및 특성 평가, 차량에 실장된 상황에서의 하베스팅 특성 분석의 과정을 진행하였으며, 각각에 대한 자세한 내용은 아래와 같다.

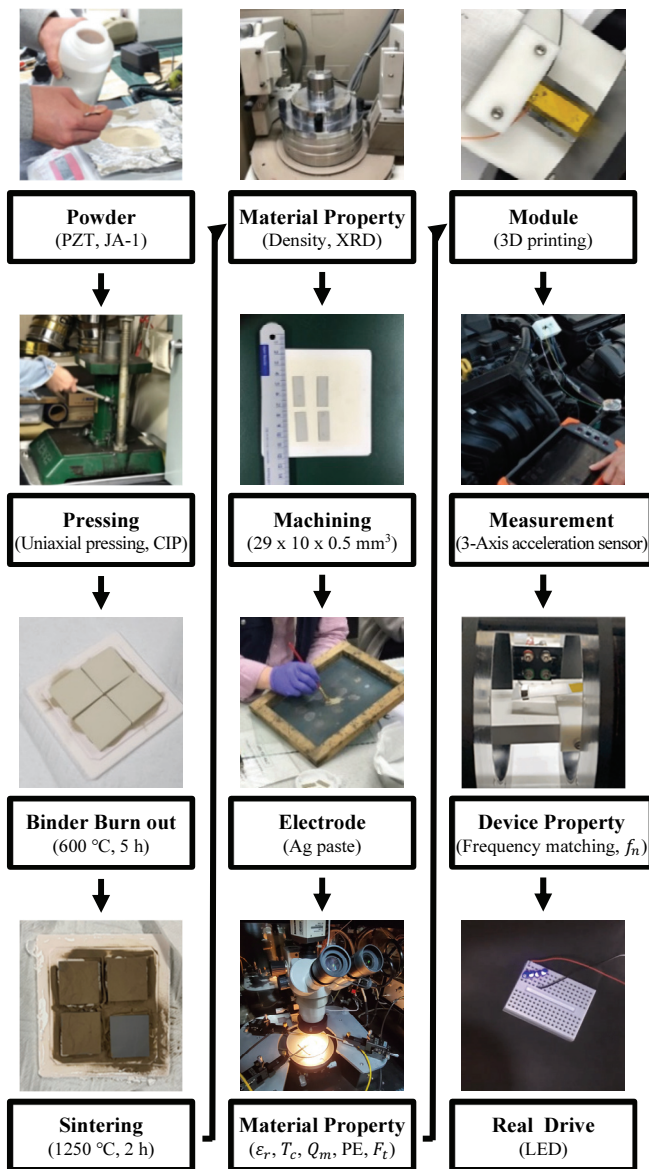


Fig. 1. Schematic flow chart of this study; piezoelectric ceramic fabrication, characterization of material properties, device fabrication and characterization.

압전 진동 에너지 하베스팅 소자에 적용하기 위한 압전 세라믹 판을 일반적인 세라믹 소결 공정을 통하여 제작하였다. 사용된 압전 소재는 과립 상태의 상용 PZT계 압전 세라믹(JA-1, JK정밀, Korea) 분말로, Hard 압전 특성을 가지고 있으며, 이는 하베스팅 소자와 같이 공진 환경에서 안정적인 출력 특성을 낼 수 있는 것으로 알려져 있다 [8]. 균일한 고밀도 성형체를 제작하기 위하여, 과립의 PZT계 압전 세라믹 분말을 일축가압성형법으로 1차적인 성형 후, 150 MPa의 압력으로 냉간정수압성형(CIP-120/360, KOVACO, Korea)을 1분간 진행하여 $40 \times 40 \times 3 \text{ mm}^3$ 크기로 성형하였다.

성형체는 전기로(AJ-DKB4, Ajeon Heating Industrial Co. Ltd, Korea)를 사용하여 600°C에서 5시간 동안 탈지(binder burn out) 공정을 거친 뒤, 1,250°C에서 2시간 동안 소결하였다. 이때, 소결 과정 중 휘발할 수 있는 PbO의 휘발을 억제하기 위하여 성형체를 powder muffle 방식으로 장입하여 조성이 일정하게 유지될 수 있도록 하였다. 소결체는 표면 연마 후 X-선 회절 분석기(X-ray diffractometer, XRD, X'Pert Pro, PANalytical, Netherlands)를 통하여 결정상 분석을 실시하여 이차상이 소결 중 발생하지 않았음을 확인하였다.

소결된 PZT 기반 압전 소재의 밀도 측정을 위해 분석용 저울(Precisa, XT220A, Swiss)으로 측정된 무게를 아르키메데스 밀도 측정법에 따라 계산하였다.

$$\rho = \frac{W_a}{W_a - W_l} \times \rho_l \quad (1)$$

이때 ρ_l 는 소결체의 밀도, ρ_l 액체의 밀도, W_a 공기 중 샘플의 무게, W_l 액체 속 샘플의 무게이다. 밀도 측정을 위한 용매로는 m-Xylene을 사용하였다.

PZT 기반 압전 세라믹 소결체를 켈틸레버형 진동 에너지 하베스팅 소자 제작에 적용함과 동시에 전기-기계적 특성평가를 위하여 표면 연마와 절단의 과정을 거쳐 $29 \times 10 \times 0.5 \text{ mm}^3$ 크기의 판형으로 가공하였다. 전극은 Ag paste를 스크린 프린팅 공정을 통하여 도포한 뒤 650°C에서 30분간 소부하였다. 스크린 프린팅은 세라믹 전자부품 및 모듈에서 전자 회로나 디바이스를 비교적 간단하고 효율적으로 생산할 수 있어 전극 회로 형성 기법 중 하나로 널리 사용되는 방법이다 [9].

전극이 형성된 압전 세라믹 판은 분극 전 상온에서 주파수에 따른 유전 특성과 상전이 온도를 확인하였다. 상온 유전 특성은 impedance analyzer (E4990A, KEYSIGHT, USA)를 이용하여 유전 용량을 측정 후 아래 식을 통해 유전 상수(ϵ_r)를 계산하였다.

$$\varepsilon_r = \frac{C \times d}{\varepsilon_0 \times A} \quad (2)$$

이때, C는 유전용량, A는 전극의 면적, d는 PZT 기반 압전 세라믹 판의 두께, ε_0 는 진공의 유전율에 해당한다.

PZT 기반 압전 세라믹 판의 상전이 큐리 온도(T_C)는 컴퓨터로 제어되는 오븐(PolyK Technologies, PK-SPIV17, USA)과 impedance analyzer (4284A, HP, USA)를 이용하여 상온에서 400°C까지의 유전 특성을 1 kHz의 주파수에서 측정하였다.

압전 소자로서의 적용을 위해 100°C 환경에서 4 kV/mm의 고전기장을 10분간 인가하여 분극 과정을 거쳤다. 이후, impedance analyzer (E4990A, KEYSIGHT, USA)를 통하여 만들어진 압전 소재의 공진 거동 분석과 압전 특성 평가를 진행하였다. 제작된 PZT 기반 압전 세라믹 판의 압전 특성은 일본 JEITA EM 4501A 표준 평가 방법에 제시된 아래의 식을 통해 계산하였다 [10].

$$\frac{k^2}{1-k^2} = -\frac{\pi}{2} \times \frac{f_a}{f_r} \cot\left(\frac{\pi}{2} \times \frac{f_a}{f_r}\right) \quad (3)$$

$$Q_m = \frac{1}{2\pi f_r [1 - (\frac{f_r}{f_a})^2] RC} \quad (4)$$

$$g = \frac{d}{\varepsilon_r \varepsilon_0} \quad (5)$$

이때, k 는 전기기계 결합계수, f_r 는 공진 주파수, f_a 는 반공진 주파수, R 은 임피던스, C 는 유전용량, d 는 압전 상수, ε_r 는 소재의 유전율, ε_0 는 진공의 유전율이다.

주파수에 따른 임피던스 스펙트럼 결과를 통하여 전기기계결합계수(k_{31})와 기계적 품질계수(Q_m)를 계산하였으며, 압전 상수(d_{33})는 Berlincourt형 압전 d_{33} 미터(ZJ-6BN, IACAS, China)로 측정하였다 [11].

하베스터 소자의 탄성 금속으로서 사용된 초탄성 Ti 합금판과 소결 압전 세라믹 판을 에폭시 접착제(DP-460, 3M, USA)를 사용하여 접착하였다. 제작된 압전 진동 하베스팅 소자의 PZT 기반 압전 세라믹 판 전극 표면에 납땀하여 배선하였다. 캔틸레버 구조의 압전 진동 에너지 하베스팅 구조는 소자의 한쪽 끝은 고정(clamp)되어 있고 반대쪽 끝은 질량체 부착을 통하여 진동 에너지 인가 시, 굴곡 변형을 하게 된다. 소자의 clamp 구조를 rigid 4,000 VI 레진을 이용하여 3D 프린터(Formlabs, Form 3, USA)를 통해 제작한 뒤, PZT/Ti 접합 소자를 조립하여 진동 에너지 하베스팅 모듈로 완성하였다.

하베스터가 장착될 자동차의 진동 측정을 위하여 MEMS (LIS344ALH, ST microelectronics, Switzerland)형 가속도 센서 보드(MAI 3AXIS-AN, MAI, Korea)와 3D 프린터(Form 3, Formlabs, USA)를 이용하여 가속도 센서 모듈을 제작하였다. 차량 내, 엔진, 머플러, 배터리 등 여러 부위에 가속도 센서를 부착하고 엔진 구동 시 발생하는 가속도센서의 출력 전압을 휴대용 오실로스코프(GDS-307, GW Instek, Taiwan)로 측정하였다. 이를 바탕으로 진동 하베스터가 가장 안정적이고 높은 효율을 가질 것으로 기대되는 큰 진동을 가지는 위치를 선정하였다. 또한, 측정 에 따른 진동 주파수를 제작한 에너지 하베스터의 공진 주파수가 일치하도록 하는 주파수 매칭 과정을 통해 최대 하베스팅 출력 조건을 갖출 수 있도록 하였다.

차량 내 최적의 위치로 선정된 부분에 하베스팅 소자의 부착 시 발전 특성을 확인하고, 실제적인 사용 가능성 확인을 위하여 정류회로와 LED를 이용하여 실제 LED 소자가 진동 에너지 하베스팅에 의해 구동 가능한지 확인하였다.

그림 2(a)는 압전 진동 에너지 하베스터 소자 적용을 위한 PZT 기반 압전 세라믹 판의 X-선 회절 패턴을 보여준다. 20~70° 범위의 2 θ 스캔을 통한 분석 결과, 일반적인 페로브스카이트 결정구조를 가지는 소재에서 나타나는 것과 같이 약 31°의 (011) 회절면에서 강도가 가장 높은 것으로 나타났다. 약 43.8~45.2°에 위치한 (002)와 (020) 피크와 약 55.1~55.9°에 위치한 (112)와 (121) 피크가 나뉘어 분석되었다. 소결된 PZT 기반 압전 세라믹은 일반적인 순수한 tetragonal 구조의 페로브스카이트 상에 의한 피크들 이외의 다른 피크는 관찰되지 않은 것으로 보아 이차상이 없는 순수 페로브스카이트 상의 PZT 기반 압전 세라믹 판이 소결된 것을 확인하였다.

압전 진동 에너지 하베스터를 제작하기 전에 소결된 PZT 기반 압전 세라믹 판의 강유전, 압전 특성을 평가하였다. 그림 2(b)는 소결된 PZT 기반 압전 세라믹 판의 강유전 분극-전기장 이력특성(polarization-electric field hysteresis, P-E hysteresis)을 보여준다. 전형적인 강유전의 P-E 이력곡선 특성을 나타냈으며, 최대 분극은 60 kV/cm의 전기장에서 약 24 $\mu\text{C}/\text{cm}^2$ 이고 잔류 분극은 약 10 $\mu\text{C}/\text{cm}^2$ 로 확인되었다. 본 연구에서 사용된 PZT 기반 압전 세라믹 소재는 acceptor가 도핑된 하드 압전 세라믹으로 항전계(E_c)는 약 10 kV/cm를 가짐을 확인할 수 있다. 이는 공진상태에서 높은 변위의 진동이 발생하더라도 분극의 안정성이 커서 소자의 안정성이 우수할 것임을 예측할 수 있다.

또한 자동차 엔진부와 같은 고온환경에서 동작하는 소자는 엔진 내의 고온환경에서 안정적인 동작이 확보되어야만

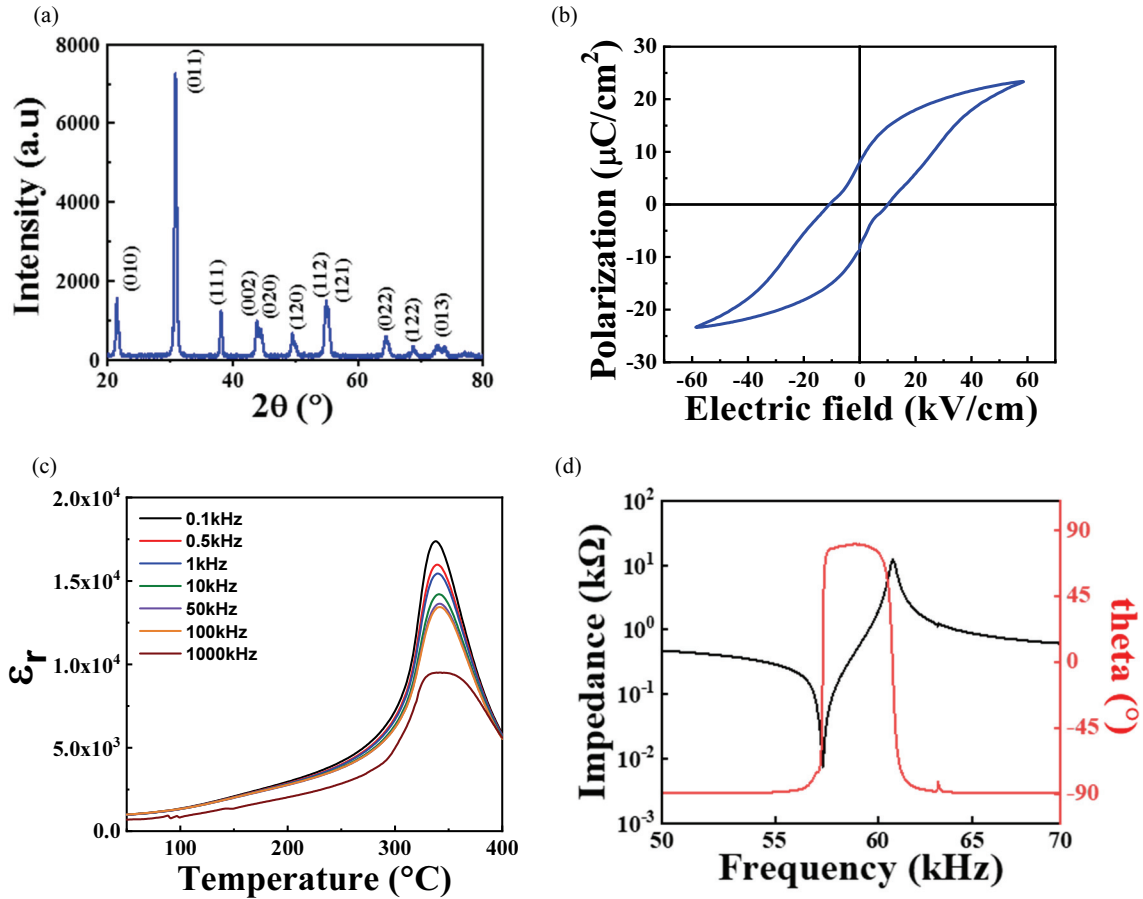


Fig. 2. (a) X-ray diffraction pattern of sintered piezoelectric plate for vibration energy harvester, (b) polarization-electric (P-E) hysteresis loops of piezoelectric plate measured at 10 Hz, (c) temperature dependency of dielectric constant of piezoelectric plate, and (d) impedance spectrum of piezoelectric plate with driving frequency change at room temperature (poling was performed at 4 kV at 100 °C for 10 min).

한다. 따라서 하베스팅 소자에 적용된 압전 소재는 고온의 환경에서도 압전 특성을 유지할 필요가 있다. 압전 소재의 고온 안정성은 상전이 큐리 온도(T_c)를 측정함으로써 예측이 가능하다. 그림 2(c)에 소결된 PZT 기반 압전 세라믹 판의 온도에 따른 유전 특성 변화를 측정하여 소재의 큐리 온도를 확인하였다. PZT 기반 압전 세라믹 판의 큐리 온도는 약 340°C로 자동차의 엔진에 적용하기에 충분히 높은 것을 확인했으며, 자동차의 실제 내연기관의 작동 온도 범위인 75~95°C에서 유전 상수 값의 폭이 크지 않아 실장 상황에서 충분한 온도 안정성을 갖을 것으로 예측하였다 [12].

Ag 전극이 도포된 PZT 기반 압전 세라믹 판을 고온, 고전기장 하에서 분극 과정을 거친 뒤 주파수 변화에 따른 임피던스 변화를 측정하여 그림 2(d)에 나타냈다. 공진 주파수(f_r)는 57.26 kHz이고 반공진 주파수(f_a)는 60.74 kHz로 확인하였다. 또한 공진, 반공진 주파수에서의 위상차는 약

170° 정도로 충분한 수준의 분극이 되어 있음을 확인하였다. 따라서 얻어진 스펙트럼을 통해 전기기계결합계수(k_{31})와 기계적 품질계수(Q_m)를 계산하여 주요 압전 특성을 계산하였으며, 표 1에 PZT 기반 압전 세라믹 판의 주요 유전, 압전 특성을 요약하였다.

제작된 PZT 기반 압전 세라믹 판의 전기기계결합계수(k_{31})는 약 37%, 기계적품질계수(Q_m)는 약 630을 가지며,

Table 1. Characteristics of piezoelectric PZT material for energy harvester.

	d_{33} (pC/N)	Dielectric permittivity ϵ_r (1 kHz)	Dielectric loss (1 kHz)	k_{31} (%)	Q_m	$d_{33} \times g_{33}$
Ag	343	1,030	0.4%	37.1	631.80	12.89×10^{12}

압전 상수(d_{33})는 약 340 pC/N, 유전 상수는 1,030, 유전 손실은 0.4%로 전형적인 하드 압전 세라믹스의 특성에 해당한다. k_{31} 는 전기적 입력에 대한 기계적 에너지 변환 효율을 나타내고 Q_m 는 에너지 변환 시 시편 내부에서 발생하는 기계적 손실의 역수를 나타낸 값이다 [13]. 따라서 압전 특성 측정 결과 모두 양호한 특성값을 나타냈고 이것을 통해 자동차의 진동환경에서 공진 시 충분한 출력을 얻을 수 있을 것으로 예상하였다.

압전 진동 에너지 하베스팅 소자 부착이 가능한 최적의 위치를 확인하기 위하여 자동차 진동환경을 가속도 센서를 이용하여 분석하였다. 3D printing을 이용하여 그림 3(a)와 같이 가속도 센서 모듈을 제작한 후 자동차에서 가장 큰 진동이 나타날 것으로 생각되는 엔진, 배터리, 머플러에 그림 3(b)와 같이 부착하여 측정하였다. 시간에 따른 진폭, 가속도 등의 측정 결과를 그림 4에 도시하였다.

가속도 센서 모듈의 부착 위치에 따라 또한 x, y, z 축 방

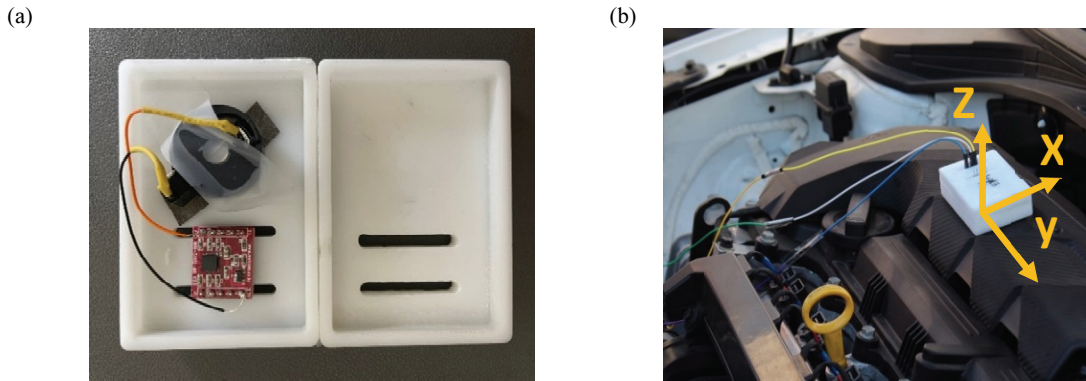


Fig. 3. (a) Acceleration sensor module and (b) attachment of acceleration sensor module on automobile engine.

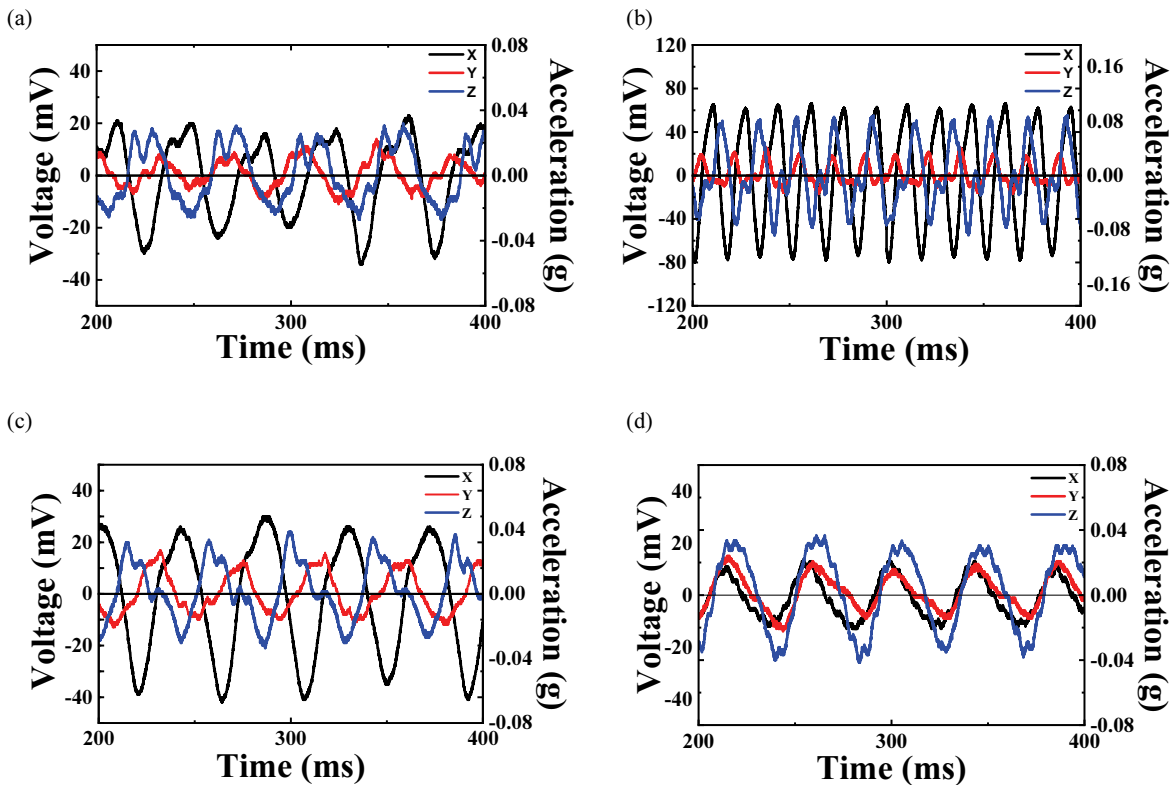


Fig. 4. Vibration analysis results on (a) engine idling, (b) engine at 2,000 rpm, (c) battery, and (d) muffler.

Table 2. Vibration characteristic of each location in x, y, and z direction.

Direction	Engine		Engine (2,000 rpm)		Battery		Muffler	
	Frequency (Hz)	Acceleration (g)	Frequency (Hz)	Acceleration (g)	Frequency (Hz)	Acceleration (g)	Frequency (Hz)	Acceleration (g)
X	26.7	0.1	59.09	0.22	23.20	0.11	23.32	0.04
Y	26.5	0.04	59.06	0.05	23.40	0.045	23.11	0.05
Z	23.2	0.06	40.20	0.13	23.41	0.06	23.32	0.08

향에 따라 각기 다른 진동의 형태와 진폭을 가졌지만 머플러를 제외한 모든 위치의 x축 방향에서 상대적으로 높은 진동을 가지는 것을 확인하였다.

표 2는 각 부착 위치에서 측정된 진동 특성을 x, y, z 축 방향에 대해서 요약한 결과이다. 엔진의 경우 정차(공회전) 상태(~700 rpm)와 주행 중 엔진 가동 상태(~2,000 rpm)에서의 2가지 진동 특성을 측정하였다.

정차 상태에서는 평균적으로 약 25 Hz 주파수를 가지는 진동이 발생하였고, 주행 중 상황인 약 2,000 rpm에서는 정차 상태에서의 주파수보다 약 2배 이상 높은 주파수의 진동이 발생하였다. 자동차의 진동은 정차 중과 실제 운전 상태 모두, 100 Hz 이하의 낮은 진동 주파수를 가지는 것으로 확인되었으며, 자동차의 위치에 따라서 진동주파수는 차이가 크지 않은 것을 알 수 있다. 이는 자동차의 진동은 엔진의 진동에 의해서 결정됨을 의미한다. 반면 진동의 방향에 있어서는 약간의 주파수 차이가 있을 수 있음이 확인되었다.

진동의 진폭은 부착 위치에 관계없이 x축 방향에서 가장 큰 값을 가졌다. 따라서 압전 진동 에너지 하베스팅 소자는 차량의 진폭이 가장 큰 x 축 방향의 진동을 이용하는 것이 유리하며, 소자의 공진 주파수는 100 Hz 이내를 가지도록 설계하여야 한다.

실제 자동차 엔진에 압전 진동 에너지 하베스터를 부착하여 측정을 진행하기 전, 자동차 엔진 진동 환경과 유사한 실험실 환경을 설정하여 소자의 출력과 전력 등을 파악하였다. 자동차 엔진의 평균 진동수 25 Hz와 유사한 주파수를 가지는 교류 자기장 진동을 헬름홀츠 코일을 이용해 소자에 인가하여 이에 대응하여 발생하는 하베스팅 출력 전압을 그림 5(a), (b)에 나타내었다. 본 연구에서 하베스팅 소자의 주파수 조정을 위한 질량체는 NdFeB 영구자석을 사용하였다. 영구자석 질량체는 자기장의 변화에 따라 자기토크가 발생하고, 이에 따라 하베스팅 소자는 진동하게 된다 [14,15].

그림 5(a)는 소자의 공진 주파수가 외부 인가 진동 주파수인 25 Hz와 일치하지 않을 때의 출력전압 그래프를 보

여주며, 그림 5(b)는 소자의 공진 주파수와 외부 인가 교류 진동 주파수가 일치하였을 때의 출력전압 그래프를 보여준다. 이때, 외부 진동 주파수는 25 Hz로 일정하게 유지하였으며, 캔틸레버 구조의 압전 진동 에너지 하베스터의 탄성체인 Ti 기판에 부착된 질량체의 위치를 조절하여 소자의 공진 주파수를 외부 진동 주파수와 일치하도록 조정하였다. 소자의 공진 주파수가 외부 인가 자기장 주파수와 일치하지 않을 때(비공진, off-resonance) 약 50 V_{pp}의 출력전압이 얻어졌으며 질량체를 이동시켜 외부 교류 진동 주파수와 일치하도록 고정하였을 때 120 V_{ppm} 이상의 전압 출력을 보이는 것을 확인하였다.

일반적인 압전 에너지 하베스터 소자는 공진 주파수가 외부 주파수와 일치할 때 최대의 출력 전압을 보이며, 본 연구에서도 동일한 결과를 얻을 수 있었다. 이는 차량 내에 진동 압전 에너지 하베스팅 소자를 장착을 할 때에도 동일하게 자동차 내의 부착 위치에서 측정된 진동 주파수와 하베스팅 소자의 공진 주파수를 일치시키면 우수한 하베스팅 특성을 얻을 수 있음을 의미한다.

공진 주파수에서 최대의 출력을 얻을 수 있는 조건을 설정한 후, LED 소자 구동 가능 여부를 확인하였다. 압전 하베스터 소자의 교류 출력 전압을 정주기 연결 후 직류 전압으로 변환, 9개의 blue LED를 구동하였다.

압전 하베스터의 공진 주파수 설정 후 PZT 기반 압전 세라믹 판의 두께에 따른 특성을 비교하여 실제 환경에서 출력이 우수한 소자를 제작하고자 하였다. 제작한 PZT 기반 압전 세라믹 판의 두께는 0.5 mm, 0.7 mm 두 종류이며 하베스팅 과정 중 전력(P_{RMS}, RMS power)을 측정하기 위하여 PC로 자동화된 power testing system을 사용하였다.

1 KΩ에서 1 MΩ까지의 부하 저항에 따른 V_{rms}를 측정하여 RMS 출력을 계산하였으며, 그림 6에 결과를 도시하였다. PZT 기반 압전 세라믹 판의 두께에 관계없이 약 700 KΩ의 부하저항에서 소자와의 임피던스 매칭을 통해 최대 전력을 얻을 수 있음을 확인할 수 있다.

계산된 RMS power 최댓값은 PZT 기반 압전 세라믹 판의

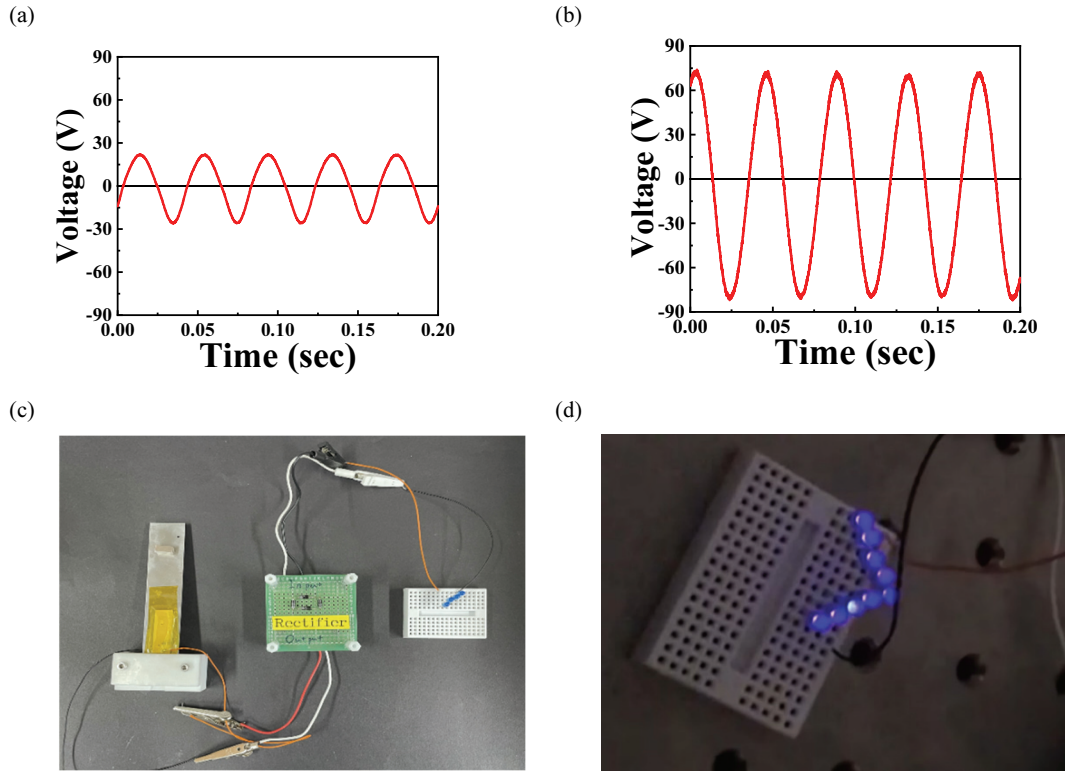


Fig. 5. The resonance frequency tuning by modulating the position of the proof mass. Output voltage in laboratory environment at (a) off-resonance and (b) resonance frequency. (c) Photograph of piezoelectric energy harvester, rectifier circuit, and LED board. (d) Photograph of LEDs illuminated using piezoelectric energy harvester.

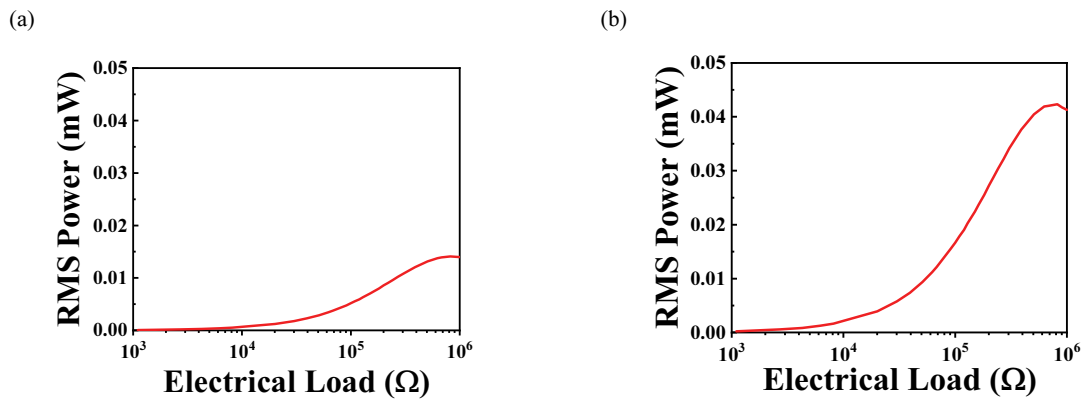


Fig. 6. Harvested output power with load resistance. Output power of energy harvester with piezoelectric plate (a) thickness of 0.7 mm and (b) thickness of 0.5 mm.

두께가 0.7 mm인 소자가 14 μ W, 0.5 mm인 소자가 42 μ W으로, PZT 기반 압전 세라믹 판과 Ti 기판의 두께 비율에 따라 압전층에 전달되는 응력이 달라지며, 탄성 굴곡 변형량도 달라져 두께가 얇은 PZT 기반 압전 세라믹 판이 적용된 소자가 우수한 특성을 보임을 확인하였다 [16].

앞서 제작한 캔틸레버 구조의 압전 진동 에너지 하베스팅 모듈과 전파정류회로(full bridge rectifier), LED 소자를 연결하여 자동차 엔진에 그림 7과 같이 실장 후 하베스팅 구동 테스트를 실시하였다.

이때 발생하는 하베스팅 전압파형을 오실로스코프를 이용하여 측정해 그림 8에 도시하였다. 그림 8(a)는 PZT 기반 압전 세라믹 판의 두께가 0.7 mm일 때, 그림 8(b)는 두



Fig. 7. Attachment of energy harvesting module on automobile.

께가 0.5 mm일 때의 출력 전압 그래프이다. 측정된 전압을 바탕으로 계산된 하베스팅 소자의 출력 전력은 PZT 기반 압전 세라믹 판의 두께가 0.5 mm일 때 $146 \mu W_{rms}$, 0.7 mm일 때 $68.4 \mu W_{rms}$ 이다. 이는 앞서 보인 바와 같이 PZT 기반 압전 세라믹 판의 두께가 적정 수준으로 얇을 때 외부 진동에 따라 하베스터의 공진 진폭이 크게 진동할 수 있기 때문이다.

하지만 너무 얇은 PZT 기반 압전 세라믹 판을 사용하게 되면, 소자 내 응력의 neutral plane이 PZT 기반 압전 세라믹 판 내부에 존재하게 되어 하베스팅 출력이 감소할 수 있으며, 기계적인 안정성이 떨어져 쉽게 파손될 가능성이 있다. 따라서 적절한 PZT 기반 압전 세라믹 판과 금속 탄성체의 두께 비율을 조절할 필요가 있다 [16].

자동차 실장 상황에서 발생하는 하베스팅 전력으로 실제 소자를 구동할 수 있는지 확인을 위하여 LED 모듈을 연결하여 점등 테스트한 결과를 그림 9에 나타내었다. PZT

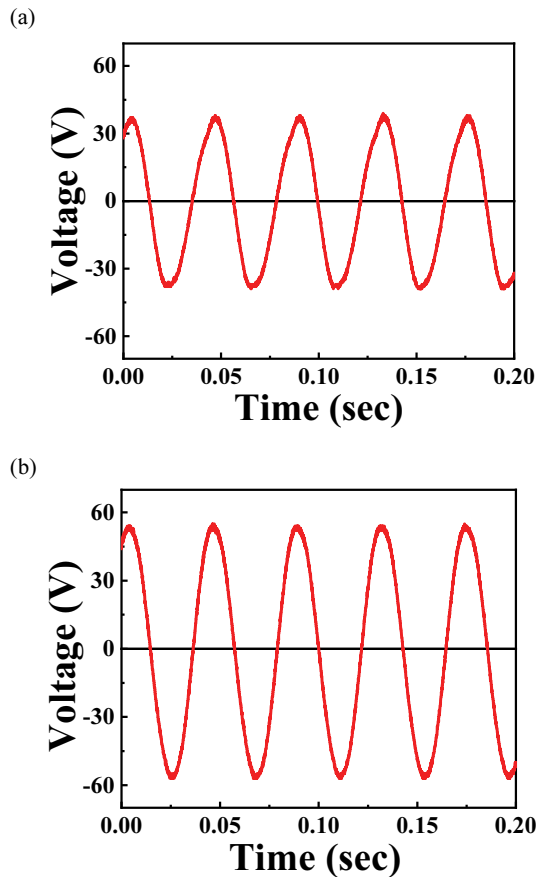


Fig. 8. Wave forms of generated voltage from piezoelectric vibration energy harvesting with different thickness of piezoelectric plate (a) 0.7 mm and (b) 0.5 mm.

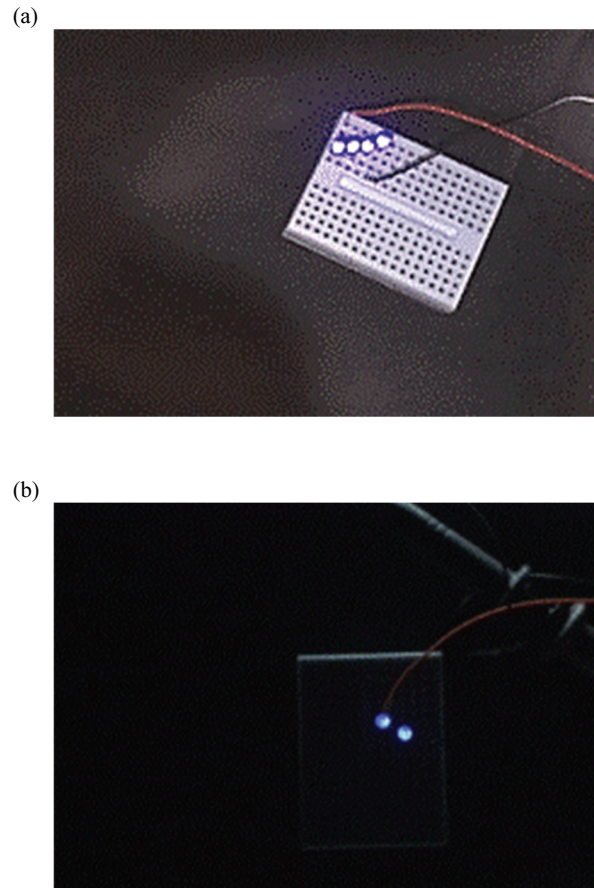


Fig. 9. Powering of LED array module with piezoelectric vibration energy harvester different thickness of piezoelectric plate (a) 0.5 mm and (b) 0.7 mm.

기반 압전 세라믹 판의 두께가 0.5 mm, 0.7 mm일 때 각각 4개, 2개가 구동하는 것을 최종 확인할 수 있다.

본 연구의 결과로 압전 진동 에너지 하베스터를 실제 자동차 환경에서 독립 전원으로 사용 가능성을 확인하였으며, PZT 기반 압전 세라믹 판의 두께의 최적화, 하베스팅 소자의 부착시 발생할 수 있는 진동 흡수를 최적화하는 등 추가적인 연구를 통해 전력량을 더 높일 수 있을 것으로 기대된다.

ORCID

Jungho Ryu

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

감사의 글

본 연구는 국가과학기술연구회 창의성 융합사업(CAP-17-04-KRISS)의 지원을 받아 수행되었습니다.

REFERENCES

- [1] S. Y. Lee, *Electrical & Electronic Materials*, **31**, 17 (2018).
- [2] 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>]
- [3] Y. H. Jeong, *Trans. KIEE*, **63**, 18 (2014).
- [4] G. B. Yeon, *The Magazine of the IEEK*, **6**, 18 (2013).
- [5] X. Gao, J. Wu, Y. Yu, and S. Dong, *Appl. Phys. Lett.*, **111**, 212904 (2017). [DOI: <https://doi.org/10.1063/1.5001803>]
- [6] B. C. Lee and G. S. Chung, *J. Sens. Sci. Technol.*, **23**, 202 (2014). [DOI: <https://doi.org/10.5369/JSST.2014.23.3.202>]
- [7] D. Maurya, P. Kumar, S. Khaleghian, R. Sriramdas, M. G. Kang, R. A. Kishore, V. Kumar, H. C. Song, J. M. Park, S. Taheri, and S. Priya, *Appl. Energy*, **232**, 312 (2018). [DOI: <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2018.09.183>]
- [8] V. Annareddy, S. M. Na, G. T. Hwang, M. G. Kang, R. Sriramdas, H. Palneedi, W. H. Yoon, B. D. Hahn, J. W. Kim, C. W. Ahn, D. S. Park, J. J. Choi, D. Y. Jeong, A. B. Flatau, M. Peddigari, S. Priya, K. H. Kim, and J. Ryu, *Energy Environ. Sci.*, **11**, 818 (2018). [DOI: <https://doi.org/10.1039/C7EE03429F>]
- [9] N. Y. Lee, D. C. Kim, D. H. Yeo, J. S. Lee, S. O. Yoon, H. S. Shin, and J. H. Lee, *J. Korean Inst. Electr. Electron. Mater. Eng.*, **33**, 355 (2020). [DOI: <https://doi.org/10.4313/JKEM.2020.33.5.355>]
- [10] JEITA EM-4501A, Electrical Test Methods for Piezoelectric Ceramic Vibrators, Revised in October 2015.
- [11] W. S. Kang, G. J. Lee, and W. Jo, *J. Korean Inst. Electr. Electron. Mater. Eng.*, **34**, 301 (2021). [DOI: <https://doi.org/10.4313/JKEM.2021.34.5.301>]
- [12] J. C. Moon and J. H. Jeong, *J. Korean Soc. Power Syst. Eng.*, **23**, 32 (2019). [DOI: <https://doi.org/10.9726/kspse.2019.23.6.032>]
- [13] S. W. Kim, Y. J. Jeong, and H. C. Lee, *J. Korean Powder Metall. Inst.*, **25**, 487 (2018). [DOI: <https://doi.org/10.4150/KPMI.2018.25.6.487>]
- [14] 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>]
- [15] 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>]
- [16] G. Y. Kim, M. Peddigari, K. W. Lim, G. T. Hwang, W. H. Yoon, H. S. Choi, J. W. Lee, and J. Ryu, *Electron. Mater. Lett.*, **15**, 61 (2019). [DOI: <https://doi.org/10.1007/s13391-018-00103-w>]