

3-3 진동 모드 압전 캔틸레버 에너지 하베스터의 제조 및 전기적 특성

이민선^{1,2}, 김창일¹, 윤지선¹, 박운익¹, 홍연우¹, 백종후¹, 조정호¹, 박용호², 장용호³,
 최범진³, 정영훈^{1,a}

¹ 한국세라믹기술원 전자소재부품센터

² 부산대학교 재료공학과

³ (주)센볼 기술연구소

Fabrication and Electric Properties of Piezoelectric Cantilever Energy Harvesters Driven in 3-3 Vibration Mode

Min-seon Lee^{1,2}, Chang Il Kim¹, Ji-sun Yun¹, Woon-ik Park¹, Youn-woo Hong¹, Jong-hoo Paik¹, Jeong-ho Cho¹,
 Yong-ho Park², Yong-ho Jang³, Beom-jin Choi³, and Young-hun Jeong^{1,a}

¹ Electronic Materials & Component Center, Korea Institute of Ceramic Engineering and Technology, Jinju 52851, Korea

² Department of Material Science and Engineering, Pusan University, Busan 46241, Korea

³ Technology & Research Center, Senbool Corporation, Incheon 21639, Korea

(Received February 20, 2017; Revised March 15, 2017; Accepted March 16, 2017)

Abstract: A piezoelectric cantilever energy harvester (PCEH) driven in longitudinal (3-3) vibration mode was fabricated, and its electrical properties were evaluated by varying the resistive load. A commercial PZT piezoelectric ceramic with a high piezoelectric charge constant (d_{33}) of 520 pC/N and the interdigitated (IDT) electrode pattern was used to fabricate the PCEH driven in longitudinal vibration. The IDT Ag electrode embedded piezoelectric laminates were co-fired at 850°C for 2 h. The 3-3 mode PCEH was successfully fabricated by attaching the piezoelectric laminates to a SUS304 elastic substrate. The PCEH exhibited a high output power of 3.8 mW across the resistive load of 100 k Ω at 100 Hz and 1.5 G. This corresponds to a power density of 10.3 mW/cm³ and a normalized global power factor of 4.56 mW/g²·cm³. Given the other PCEH driven in transverse (3-1) vibration mode, the 3-3 mode PCEH could be better for vibration energy harvesting applications.

Keywords: Interdigitated, Piezoelectrics, Screen printing, Actuator, Tape casting, Energy harvester

1. 서론

에너지 하베스팅 기술은 다양한 에너지 원(source)을

통해 주위 환경으로부터 소량의 에너지를 획득하는 기술이다. 이에 사용가능한 에너지는 주로 태양광(solar), 무선 주파수(RF), 열 또는 진동 등의 기계적 요인에 의해 공급된다 [1-4]. 센서에 기반한 사물 인터넷을 통해 생산기기와 생산품 간 상호 소통 체계를 구축하고 생산 과정의 최적화를 구축하는 4차 산업혁명은 센서의 크기와 소비전력의 감소, CMOS (complementary metal-oxide semiconductor) 전자 회로의 저전력 기능 개선

a. Corresponding author; jyhlyk@naver.com

Copyright ©2017 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.

을 통해 에너지 하베스팅 기술의 상용화에 대한 새로운 장을 열었다.

진동과 같은 기계적 에너지 원을 이용하는 에너지 하베스팅 기술 중에서, 압전 변환(piezoelectric transduction) 기술은 정전 변환(electrostatic transduction) 기술보다 높은 전력 밀도(power density)를 가진다 [5,6]. 압전 효과는 압전 소재의 결정격자(crystal lattice)의 기본구조를 기반으로 기계적 변형(strain)을 전류 또는 전압으로 변환한다. 이러한 압전 변환 기술을 이용한 에너지 하베스팅 시스템은 외부 진동이 인가될 때 고정된 관성 질량(inertial mass)이 진동을 전달하도록 설계된 기계적 진동 구조물로 구성되며, 압전 소재로부터 발생하는 기계적 변형을 이용하여 전기 에너지를 생산하게 된다. 이 때, 최대 출력의 전기 에너지는 압전 소재, 관성 질량, 댐퍼(damper)가 결합된 하나의 진동 구조물이 공진(resonance)을 이루는 주파수 환경에서 발생하게 된다. 압전 캔틸레버(cantilever)는 진동 에너지 원을 기반으로 하는 압전 에너지 하베스터의 대표적인 구조물로서 필름 형태로 구성되는 압전 소재 및 이와 결합하는 탄성 기판, 기판의 한쪽 끝단에 고정된 질량체(tip mass)로 기본 구성을 이룬다 [7-9]. 압전 캔틸레버 구조의 에너지 하베스터의 전기 출력의 극대화를 위하여 길이 진동(3-1 모드), 두께 진동(3-3 모드), 전단(1-5 모드) 모드 등의 다양한 공진 구조 [10-12]를 이용한다 (그림 1). 이들 중 1-5 모드는 구조가 복잡하고 제조 공정이 어려운 반면, 3-1 모드나 3-3 모드는 전극 구조 설계 및 압전 소재 제조 공정이 비교적 용이하여 양산 공정 친화적이다. 그러나 일반적으로 PZT 압전 세라믹 소재의 전기기계결합계수 (k)와 압전변위상수 (d)의 경우 3-1 모드 보다 3-3 모드에서 훨씬 높은 특성을 나타내기 때문에 동일한 압전 소재를 활용할 경우, 3-1 모드 보다는 3-3 모드를 활용할 때 높은 출력 발전 특성을 기대할 수 있다 [13]. 3-3 모드의 경우, 진동 발생 시 압전 캔틸레버의 탄성 기판의 길이 방향의 변형(strain)을 가장 효과적으로 이용하기 위하여 IDT (interdigitated) 전극 구조를 주로 이용한다 [13-15].

이에 본 연구에서는 양산 공정 적용이 가능한 테이프 캐스팅(tape casting) 공정을 이용하여 IDT 전극 구조를 가지는 3-3 모드의 압전 캔틸레버 에너지 하베스터를 제조하였다. 제조한 압전 에너지 하베스터의 전기적 특성을 평가하기 위하여 임피던스, 주파수 특성 및 전압 출력 특성을 평가하였다. 이로부터 기존의 3-1 모드의

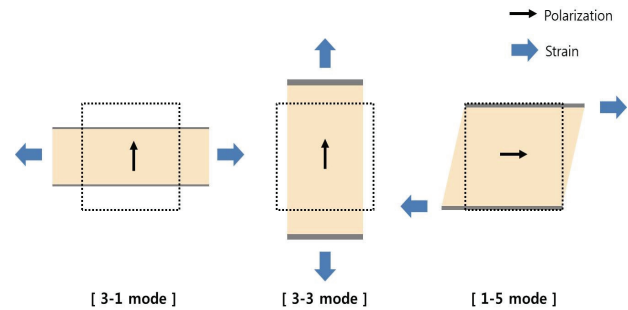


Fig. 1. Various transduction mode for piezoelectric cantilever energy harvester.

압전 캔틸레버 에너지 하베스터의 normalized power factor와 비교하여 본 연구에서 개발한 에너지 하베스터의 출력 전력 성능을 평가하였다.

2. 실험 방법

2.1 압전 후막 세라믹 제조

본 연구에서는 압전 세라믹 후막을 제조하기 위하여 일반적으로 사용되는 테이프 캐스팅 공정을 이용하였다. 사용된 원료는 soft Pb (Zr,Ti)O₃계 상용 압전 파우더 (AC750, Hayashi Chemicals, Japan)를 이용하였으며, 8.3Φ 크기의 소결된 AC750 디스크(disk) 시편의 압전 물성을 아래 표 1에 나타내었다.

테이프 캐스팅용 슬러리를 제조하기 위해 준비된 압전 파우더 분말에 톨루엔(purity 99.5%, Samchun Pure

Table 1. Piezoelectric properties of commercial piezoelectric material (AC750) produced from Hayashi Chemicals, Japan.

Piezoelectric properties	Values
Sintering temperature (°C)	850°C
Curie temperature (T _c)	225°C
Coupling coefficient (k _t)	61.7%
Mechanical quality factor (Q _m)	138
Piezoelectric charge constant (d ₃₃)	520×10 ⁻¹² C/N
Piezoelectric voltage constant (g ₃₃)	24×10 ⁻³ Vm/N
ε ₃₃ ^T /ε ₀	2462
tanδ	0.9%

Chemical, Korea), 에탄올(purity 99.5%, Samchun Pure Chemical, Korea), polyvinyl butyral (BM-SZ, Sekisui, Japan), dibutyl phthalate (purity 99.0%, Daejung Chemical & Metals, Korea) 및 분산제 (BYK-111, BYK-Chemie GmbH, Germany)를 최적 비율로 첨가 및 혼합하였다. 혼합된 슬러리(slurry)는 폴리에틸렌 재질의 병에 주입한 후, 다양한 지름의 지르코니아 볼($\phi=3$ mm, 5 mm, 10 mm, 15 mm) 미디어를 이용하여 24 시간 동안 혼합 분쇄하였으며, 망(mesh) 구조의 스크린(screen)을 이용해 혼합 슬러리를 균일한 크기로 체거름한 후, 진공 탈포기를 이용하여 -760 mmHg 진공도로 1 시간 동안 슬러리 내부의 기포를 제거하였다. 탈포된 슬러리는 테잎 캐스팅 장비(TCA-2000, Techgen, Korea)를 사용하여 닥터 블레이드(doctor blade)로 두께 약 26 μm 의 그린 시트(green sheet)를 제조하였으며 너비와 길이를 각각 15 cm, 20 cm로 절단하였다.

2.2 길이(3-3) 모드 적층형 압전 캔틸레버 에너지 하베스터 제조

제조한 압전 후막 그린 시트의 표면에 3-3 모드 구현을 위하여 그림 2(a)에서 보듯이 IDT 전극 패턴을 설계하였다. 이는 100 μm 의 선폭과 1 mm의 간격을 가지는 IDT 전극 핑거(finger) 어레이와 직교하며 길이 방향으로 연결 구성된 IDT 전극 comb 패턴 2개가 서로 마주보며 핑거 간 간격이 500 μm 로 이루어져 있고, 전체 면적은 16.56 mm (너비) \times 53.5 mm (길이) 크기를 이루는 프린팅용 스크린 마스크(CA640, Sejinsmark, Korea)를 제작하였다. 스크린 마스크(screen mask)는 640 mesh, 25 μm 의 opening size 규격을 가지며, 전극으로는 850°C에서 동시 소성이 가능하기 때문에 Ag 페이스트(WT-APPL7-1, Winner Technology, Korea)를 사용하였다. IDT Ag 전극이 한 쪽 면에 인쇄된 10 장의 압전 세라믹 그린 시트(green sheet)를 라미네이터(Woori system, Korea)로 60°C에서 적층하고 3,000 psi, 65°C에서 10분 동안 WIP (warm isostatic press) 처리한 후 다이싱(dicing) 하여 IDT 전극 패턴이 적용된 3-3 모드의 압전 세라믹 적층형 그린 바디(green body)를 제조하였다. 내부와 외부 전극을 측면에서 서로 연결한 후 850°C에서 2 시간 동안 동시 소성하였으며, 소결된 시편은 휘거나 배불림 현상 없이 평평하고 IDT 전극 패턴

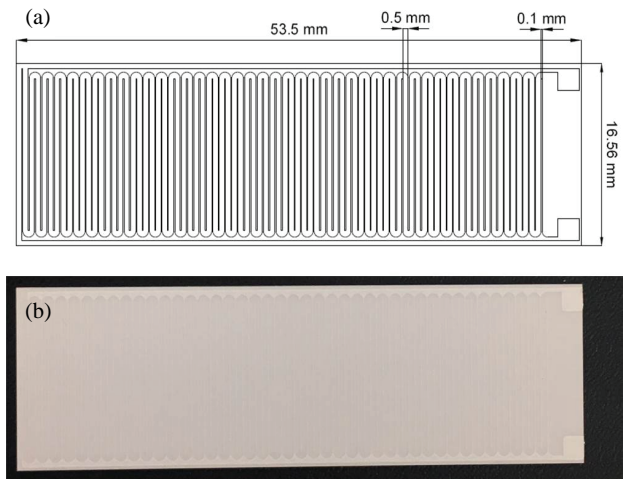


Fig. 2. (a) Designed IDT electrode pattern and (b) fabricated IDT electrode printed piezoelectric specimen.

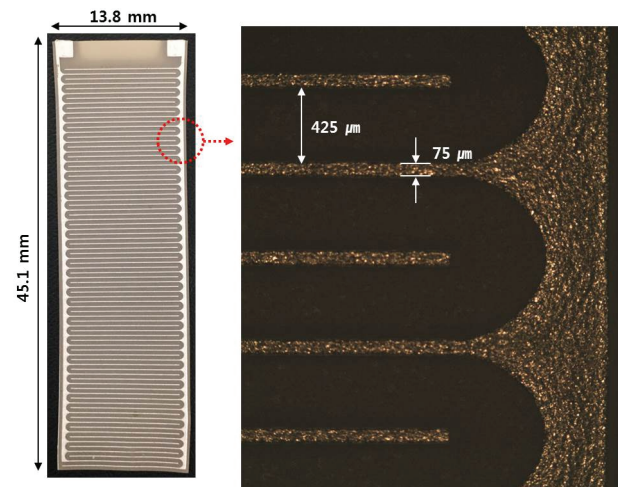


Fig. 3. Optical microscope image of the IDT electrode on piezoelectric ceramic laminates after sintering.

도 매우 균일한 형상을 나타내었다(그림 2(b) 참조).

소결 후 IDT 전극 패턴의 형상을 면밀히 관찰하기 위하여 광학현미경(BX51, Olympus, Japan)을 이용하여 그림 3의 붉은 점원으로 나타낸 IDT 전극 핑거 주변 영역을 확대 관찰하였다. 그림 3의 오른쪽 확대 이미지에서 보듯이, 소성 후에도 인쇄된 Ag 전극은 응집이나 끊어짐 없이 균일하게 형성되었으며, IDT 전극 패턴의 형상도 설계한 형태로 원활하게 구현되었음을 알 수 있었다. 하지만, 850°C의 소결 온도에서 열처리하는 동안 수

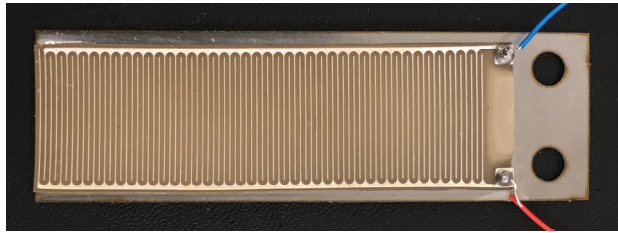


Fig. 4. Fabricated piezoelectric cantilever energy harvester driven in 3-3 mode.

축되면서 제조된 시편의 IDT 전극 핑거의 너비와 전극 간격은 설계된 수치보다 각각 25%, 15% 수축된 $75\ \mu\text{m}$, $425\ \mu\text{m}$ 로 확인되었다. 동시 소성 후 IDT 전극 핑거 간격을 고려하여 $3\ \text{V}/\mu\text{m}$ 의 전계 조건으로 100°C 에서 10분 동안 분극(polarization)을 실시하였다.

제작된 IDT 전극 구조를 갖는 3-3 모드의 적층형 압전 세라믹 소자는 $0.3\ \text{mm}$ 두께와 $15\ \text{mm}$ (너비), $50\ \text{mm}$ (길이)의 크기를 가지는 SUS (stainless steel) 304 재질의 탄성 기판 상단에 완전히 부착되도록 에폭시를 도포한 후, 가압 접착하여 60°C 에서 2시간 동안 경화 처리하였다. 그런 후, 탄성 기판 하단의 한 쪽 끝 부분은 나사를 이용하여 고정하고 다른 한 쪽 끝 부분은 $2.3\ \text{g}$ 의 중량을 갖는 질량체(tip mass)를 부착하여 $60\ \text{Hz}$ 의 공진 주파수를 가지도록 설계한 후, 최종적으로 3-3 진동 모드 구현이 가능한 압전 캔틸레버 에너지 하베스터를 제조하였다(그림 4 참조).

2.3 전기적 특성 평가

본 연구에서 제조된 IDT 전극 구조를 갖는 3-3 모드 적층형 압전 캔틸레버 에너지 하베스터의 임피던스(impedance) 특성은 임피던스 분석기(E4990A, KEYSIGHT, USA)를 이용하였으며, tip mass 및 부하 저항(resistive load)의 크기에 따른 출력 전압 특성은 오실로스코프(Wavejet 322, LeCroy, Japan)와 주파수 특성을 평가하기 위하여 shaker (Bruel & Kjaer, 4809, Denmark), 고속 bipolar amplifier (NF, HSA4014, USA), functional generator (Agilent, 33220A, USA), accelerometer (ACO, 3116, Japan)를 사용하였다. 3-3 모드 적층형 압전 캔틸레버 에너지 하베스터의 출력 전력은 부하 저항을 변화시키면서 측정된 전압으로부터 $P_{\text{out}}(\text{출력전력})=V(\text{전압})^2/R(\text{저항})$ 식을 이용하여 계산하였다.

3. 결과 및 고찰

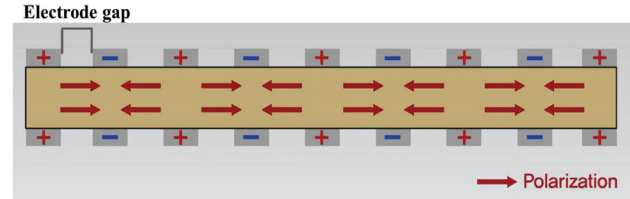


Fig. 5. Polarization of the 3-3 mode piezoelectric laminate with IDT electrodes.

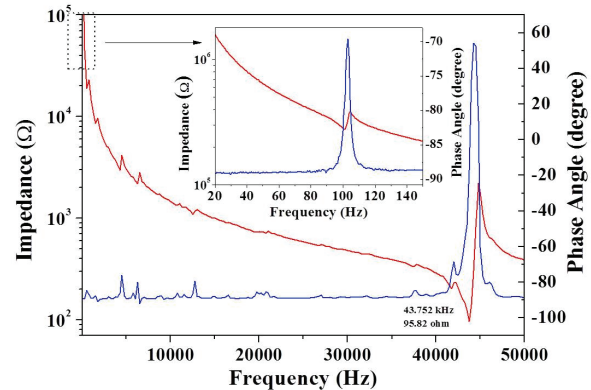


Fig. 6. Impedance and phase angle of the fabricated 3-3 mode piezoelectric cantilever energy harvester with variation of frequency (tip mass-free).

그림 5는 3-3 모드 적층형 압전 소자를 이용한 캔틸레버 에너지 하베스터의 분극이 형성된 이미지를 보여준다. 제조된 시편은 총 8층의 압전 세라믹 후막 적층체로 구성되어 있으며, 소결 후 적층 시편의 총 두께는 약 $230\ \mu\text{m}$ 를 나타내었다. IDT 전극 구조를 가지는 3-3 모드 압전 세라믹 적층 구조체의 단면에서 분포되는 분극 구조에서 각 IDT 전극 핑거는 시편의 동일한 표면에서 이웃에 위치하는 다른 IDT 전극 핑거와는 서로 반대 극성의 전기 신호가 인가되고 시편의 두께 방향으로 투영된 동일한 IDT 전극 핑거와는 같은 극성의 전기 신호가 인가되어 시편의 내부에서 형성되는 도메인의 분극 방향은 그림 5와 같다.

그림 6은 850°C 에서 두 시간 동안 소결한 3-3 모드 적층형 압전 소자를 이용한 캔틸레버 에너지 하베스터의 tip mass-free 조건에서 기판부의 한 쪽 측면을 고정 후 주파수 변화에 따른 임피던스와 위상각(phase

angle) 변화 특성을 보여준다. 3-3 모드 캔틸레버 에너지 하베스터의 주(principal) 공진은 50 kHz까지 측정 한 경우, 약 43.752 kHz에서 관찰되었다. 이 외에도 비교적 약한 공진 피크가 520 Hz, 1.52 kHz, 4.27 kHz, 6.27 kHz, 12.5 kHz, 37.5 kHz, 41.2 kHz 등에서 관찰되었다. 이러한 기생 공진들이 발생하는 원인은 주로 IDT 전극 구조에서 길이 방향의 분극 공정 시 IDT 전극 핑거의 바로 아래의 분극이 원활하게 형성되지 않는 국부 비활성 영역(local inactive area)에 기인 [16]하거나 IDT 전극 핑거의 shift 현상으로 인하여 비선형 진동(non-linear vibration)이 일어나는 것으로부터 발생할 수 있다. 위상각 변화 경향도 임피던스 특성에서 관찰된 여러 공진 주파수 발생 위치에서 동일하게 모든 피크가 관찰되었다. 주 공진 피크를 제외한 나머지 기생 공진 피크 위치에서는 압전 벌크 시편에서 일반적으로 관찰되는 공진-반공진(resonance-antiresonance) 밴드에서의 위상 역전(capacitor to inductor) 현상이 관찰되지 않았다. 주 공진 주파수에서는 임피던스가 최소화되면서 위상각이 양(positive) 영역으로 변환되며 최대 55 degree까지 증가하였다. 이는 IDT 전극 구조에 기인하여 압전 에너지 하베스터 내부에서 이상적으로 형성되지 못한 분극 구조 때문인 것으로 추정된다. 하지만, 그림 6의 삽화에서 볼 수 있듯이, 우리 주변 환경에서 진동 에너지 하베스터로 응용이 가능한 주파수 범위인 150 Hz 이하의 영역에서는 임피던스가 감소하는 공진 특성을 나타내는 100 Hz에서 고유 주파수(natural frequency)를 가지는 것으로 나타났다. 이 100 Hz 공진 주파수는 유니몰프(unimorph) 소자 구조의 비대칭성으로 인한 bending resonance frequency이다.

그림 7은 850°C에서 두 시간 동안 소결한 3-3 모드 적층형 압전 소자를 이용한 캔틸레버 에너지 하베스터의 주파수 변화에 따른 출력 전압 특성의 변화를 보여주고 있다. tip mass가 없는 고유 주파수를 나타내는 경우 100 Hz, 1.5 G (1G=9.8 m/s²)에서 약 35.7 V의 최대 출력 전압을 나타내었으며 2.3 g의 tip mass를 적용한 경우 공진 주파수는 50 Hz로 감소하였다. 하지만, tip mass의 유도 하중으로 인하여 기판의 굴곡 변형이 크게 증가하면서 기판의 strain 크기는 증가하게 된다. 이 때, 길이 방향으로 분극된 압전 세라믹 적층체의 변형 역시 증가하기 때문에 3-3 모드로 인가된 strain으로 인하여 압전 캔틸레버 에너지 하베스터의 출력 전압이 점차 증가하게 된다. 이는 본 연구에서 적용된 유니

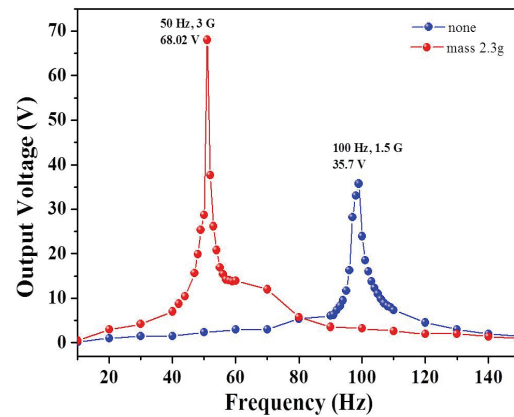


Fig. 7. Frequency dependant output voltage of the fabricated 3-3 mode piezoelectric cantilever energy harvester with variation of proof mass under specific applied force.

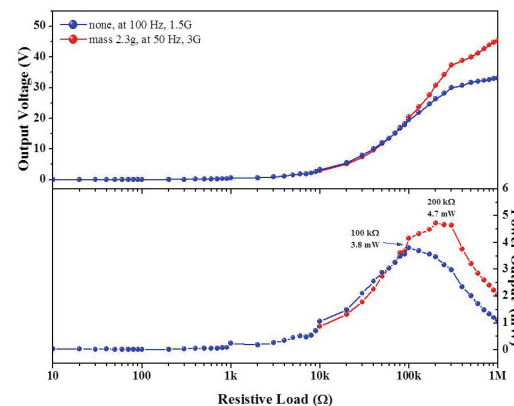


Fig. 8. Output voltage and output power dependant on resistive load at 50 Hz (3 G) and 100 Hz (1.5 G) for the fabricated 3-3 mode PCEH, respectively.

몰프(unimorph) 캔틸레버 구조의 공진 조건에서 출력 전압의 크기는 압전 변환 소재의 물리적 변형, 즉 elastic strain에 따른 커플링 효과로 압전 변위상수 (d)와 관계가 있다. tip mass로 인하여 3G의 가속도 조건에서 제작한 캔틸레버 에너지 하베스터의 출력 전압은 tip mass가 없는 경우에 비해 무려 2배 가까이 급격히 증가한 약 68 V를 나타내었다.

그림 8은 tip mass가 없는 경우와 2.3 g tip mass가 부착된 3-3 모드 캔틸레버 에너지 하베스터로부터 50 Hz, 100 Hz의 주파수에서 부하 저항(resistive load)의 크기를 10 Ω에서 1 MΩ까지 변화시키면서 측정된 전압과 P_{out} (출력전력)= V (전압)²/ R (저항) 식을 이용하여 계산

Table 2. Comparison of the output performance of the cantilever piezoelectric energy harvesters using various materials.

Material	Power density (mW/cm ³)	Power factor (mW/g ²)	Normalized power factor (mW/g ² ·cm ³)	Ref.
Cr, Nb doped PZT-PZNN	2.1	1.1	0.1	[17]
PMN-PT single crystalline	0.5	3.8	1.7	[18]
PMN-PZT single crystalline	-	0.2	-	[19]
PZT	0.077	-	0.0014	[20]

으로 도출한 출력 전력 성능의 변화를 보여주고 있다. 부하 저항의 크기가 10 kΩ까지 출력 전압은 tip mass의 유무에 관계없이 1 V 내외 수준으로 전압의 변화량은 무시할 수 있는 정도였다. 하지만 저항의 크기가 10 kΩ 이후부터 출력 전압은 급격히 증가하기 시작하였으며, 본 연구에서 사용한 가변 저항기의 조절 가능한 저항 범위인 1 MΩ까지도 지속적으로 증가하였다. 특히, 2.3 g의 tip mass를 적용한 경우 큰 변형으로 인해 100 kΩ 이후의 저항에서부터 tip mass가 없는 경우보다 더 높은 출력 전압을 나타내었다. 출력 전력은 고유 주파수인 100 Hz에서 측정한 경우, 100 kΩ의 저항과 1.5 G의 가속도 조건에서 최대 3.8 mW 크기를 나타내었으며, tip mass를 부착한 50 Hz의 경우, 200 kΩ, 3 G 조건에서 최대 4.7 mW를 나타내었다. 본 연구에서 제조한 3-3 모드 캔틸레버 에너지 하베스터의 총 부피(global system)인 0.68 cm³ (압전소자: 0.14 cm³, 탄성체 기판: 0.23 cm³, tip mass: 0.31 cm³)를 고려하여 전력 밀도로 환산하면 고유 주파수(100 Hz)에서 10.3 mW/cm³의 높은 전력 밀도를 나타내었고, tip mass를 부착한 50 Hz에서는 약 6.9 mW/cm³의 전력 밀도를 나타내었다. 일반적으로 진동 에너지 하베스터의 성능을 비교하는 경우, 부피만을 고려하여 도출된 전력 밀도 외에 입력 가속도의 크기를 고려한 normalized power factor (mW/g²·cm³)를 이용하여 하베스터 성능의 상대적인 비교가 가능하다. 본 연구에서 개발한 3-3 모드 압전 캔틸레버 에너지 하베스터의 normalized power factor는 고유 주파수(100 Hz)에서 4.56 mW/g²·cm³, tip mass를 부착한 50 Hz에서 0.77 mW/g²·cm³로 변환 가능하였다. 도출된 normalized power factor 성능

은 기존에 보고된 3-1 모드의 PZT 압전 소재 [17-20]를 이용한 캔틸레버 에너지 하베스터의 성능(표 2 참조)과 비교하여 훨씬 우수한 결과를 나타냈음을 알 수 있었다.

4. 결론

본 연구에서는 약 520×10^{-12} C/N의 압전변위상수를 가지는 AC750 상용 압전 세라믹 원료를 이용하여 테입 캐스팅 공정을 통해 후막 세라믹을 제조하였다. 길이 진동(3-3) 모드 동작 구현이 가능하도록 IDT 구조의 Ag 전극을 압전 후막 시트 위에 인쇄한 후 총 8층을 적층한 후 850°C에서 두 시간 동안 동시 소성한 후, SUS304 재질의 탄성 기판에 에폭시로 부착한 압전 캔틸레버 에너지 하베스터를 제조하였다. IDT 전극이 임베딩된 3-3 모드의 적층형 압전 세라믹 소자는 약 230 μm의 두께를 가지며 동시 소성 후에 측정된 IDT 전극 핑거는 2.4 μm의 두께와 75 μm의 선폭 및 425 μm의 선 간격을 나타내었으며 균일하고 선명한 IDT Ag 전극 패턴을 얻을 수 있었다. 제조한 3-3 모드 적층형 압전 소자를 이용한 캔틸레버 에너지 하베스터는 고유 주파수인 100 Hz에서 약 35.7 V의 최대 출력 전압을 나타내었으며 100 kΩ의 부하 저항에서 최대 3.8 mW 크기의 최고 출력 전력을 나타내었다. 이는 3-3 진동 모드 캔틸레버 에너지 하베스터의 총 부피(global system)를 고려하면, 약 10.3 mW/cm³의 전력 밀도로 환산되며, 입력 가속도를 고려한 normalized power factor는 4.56 mW/g²·cm³을 나타내었다. 이는 3-1 모드를 이용한 캔틸레버 에너지 하베스터의 출력 성능과 상대적으로 비교하여 훨씬 우수한 성능을 나타냄을 알 수 있었다. 이러한 우수한 전력 출력 특성은 3-3 모드를 이용한 진동 에너지 하베스터의 실제 응용 가능성이 매우 높음을 의미한다.

감사의 글

본 연구는 2016년도 산업통상자원부의 재원으로 한국 에너지기술평가원(KETEP)의 지원을 받아 수행한 에너지 기술개발사업 연구 과제입니다(No. 20151120100260).

또한 이 논문은 미래창조과학부·산업통상자원부가 공동 지원한 '나노융합2020사업(www.nanotech2020.org)'

으로 지원을 받아 수행된 연구 결과입니다[과제명: 포락선 방식의 신호처리 알고리즘과 나노 패턴 전사 기술을 이용한 PFC 초지향성 스피커 개발]

REFERENCES

- [1] C. Alippi and C. Galperti, *IEEE T. Circuits Syst.*, **55**, 1742 (2008). [DOI: <https://doi.org/10.1109/TCSI.2008.922023>]
- [2] X. Lu, P. Wang, D. Niyato, D. I. Kim, and Z. Han, *IEEE Communications Survey & Tutorials*, **17**, 757 (2015). [DOI: <https://doi.org/10.1109/COMST.2014.2368999>]
- [3] R. Calio, U. B. Rongala, D. Camboni, M. Milazzo, C. Stefanini, G. Petris, and C. M. Oddo, *Sensors*, **14**, 4755 (2014). [DOI: <https://doi.org/10.3390/s140304755>]
- [4] H. A. Sodano, D. J. Inman, and G. Park, *Shock Vib. Digest*, **36**, 197 (2004). [DOI: <https://doi.org/10.1177/0583102404043275>]
- [5] W. G. Li, S. He, and S. Yu, *IEEE T. Ind. Electron.*, **57**, 868 (2010). [DOI: <https://doi.org/10.1109/TIE.2009.2030761>]
- [6] C. D. Richard, M. J. Anderson, D. F. Bahr, and R. F. Richard, *J. Micromech. Microeng.*, **14**, 717 (2004). [DOI: <https://doi.org/10.1088/0960-1317/14/5/009>]
- [7] S. G. Kim, S. Priya, and I. Kanno, *MRS Bull.*, **37**, 1039 (2012). [DOI: <https://doi.org/10.1557/mrs.2012.275>]
- [8] A. Erurk and D. J. Inman, *Smart Mater. Struct.*, **18**, 025009 (2009). [DOI: <https://doi.org/10.1088/0964-1726/18/2/025009>]
- [9] D. Shen, J. H. Park, J. Ajitsaria, S. Y. Choe, H.C.W. Ill, and D. J. Kim, *J. Micromech. Microeng.*, **18**, 055017 (2008). [DOI: <https://doi.org/10.1088/0960-1317/18/5/055017>]
- [10] M. Han, Y. C. Chan, W. Liu, S. Zhang, and H. Zhang, *Proc. The IEEE MEMS 8th Annual IEEE International Conference on Nano/Micro Engineered and Molecular Systems* (IEEE, Suzhou, China, 2013) p. 440-443. [DOI: <https://doi.org/10.1109/NEMS.2013.6559767>]
- [11] H. W. Kim, S. Priya, H. Stephanou, and K. Uchino, *IEEE T. Ultrason. Ferr.*, **54**, 1851 (2007). [DOI: <https://doi.org/10.1109/TUFFC.2007.469>]
- [12] D. A. Wang and N. Z. Liu, *Sens. Actuators A Phys.*, **167**, 449 (2011). [DOI: <https://doi.org/10.1016/j.sna.2011.03.003>]
- [13] R. R. Knight, C. Mo, and W. W. Clark, *J. Electroceram.*, **26**, 14 (2011). [DOI: <https://doi.org/10.1007/s10832-010-9621-8>]
- [14] W. J. Choi, Y. Jeon, J. H. Jeong, R. Sood, and S. G. Kim, *J. Electroceram.*, **17**, 543 (2006). [DOI: <https://doi.org/10.1007/s10832-006-6287-3>]
- [15] M. S. Lee, J. S. Yun, U. I. Park, Y. W. Hong, J. H. Paik, J. H. Cho, Y. H. Park, Y. H. Jang, B. J. Choi, and Y. H. Jeong, *J. Korean Inst. Electr. Electron. Mater. Eng.*, **29**, 581 (2016). [DOI: <https://doi.org/10.4313/JKEM.2016.29.9.581>]
- [16] W. Beckert and W. S. Kreher, *Comp. Mater. Sci.*, **26**, 36 (2003). [DOI: [https://doi.org/10.1016/S0927-0256\(02\)00390-7](https://doi.org/10.1016/S0927-0256(02)00390-7)]
- [17] K. B. Kim, C. I. Kim, Y. H. Jeong, Y. J. Lee, J. H. Cho, J. H. Paik, and S. Nahm, *J. Eur. Ceram. Soc.*, **33**, 305 (2013). [DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jeurceramsoc.2012.09.001>]
- [18] H. C. Song, C. Y. Kang, S. J. Yoon, and D. Y. Jeong, *Metals Mater. Int.*, **18**, 499 (2012). [DOI: <https://doi.org/10.1007/s12540-012-3018-y>]
- [19] M. A. Karami, O. Bilgen, and D. J. Inman, *IEEE Trans. Ultrason. Ferroelectr. Freq. Control.*, **58**, 1508 (2011). [DOI: <https://doi.org/10.1109/TUFFC.2011.1969>]
- [20] T. H. Ng and W. H. Lizo, *J. Intell. Mater. Syst. Struct.*, **16**, 785 (2005). [DOI: <https://doi.org/10.1177/1045389X05053151>]