

PZT 라미네이트 Trapezoidal Piezoelectric Cantilever Generator의 모드(3-1, 3-3)별 에너지 하베스팅 특성 비교

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

¹ 한국세라믹기술원 전자소재부품센터

² 부산대학교 재료공학과

Comparison of Energy Harvesting Characteristics in Trapezoidal Piezoelectric Cantilever Generator with PZT Laminate Film by Longitudinal (3-3) Mode and Transverse (3-1) 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, 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

(Received September 16, 2017; Revised October 11, 2017; Accepted October 12, 2017)

Abstract: Energy harvesting characteristics of trapezoidal piezoelectric cantilever generator, which has a lead zirconate titanate (PZT) laminate film, were compared by longitudinal (3-3) and transverse (3-1) modes. The PZT laminate film, fabricated by a conventional tape casting process, was cofired with Ag electrode at 850°C for 2 h. A multi-layered Ag electrode by a planar pattern and an interdigitated pattern was applied to the PZT laminate to implement the 3-3 and 3-1 modes, respectively. The energy harvesting performance of the 3-3 mode trapezoidal piezoelectric cantilever generator was better than that of the 3-1 mode. An extremely high output power density of 26.7 mW/cm³ for the 3-3 mode was obtained at a resonant frequency of 145 Hz under a load resistance of 50 kΩ and acceleration of 1.3 G, which is ~3-times higher than that for the 3-1 mode. Therefore, the 3-3 mode is considered significantly efficient for application to high-performance piezoelectric cantilever generator.

Keywords: Piezoelectric, Laminate, Vibration mode, Energy harvesting, Cantilever generator

1. 서론

최근 에너지 고갈 문제와 기존의 화석연료, 핵연료 등의 유해성 때문에 이를 대체할 수 있는 에너지 개발이 시급하다. 에너지 하베스팅은 이러한 문제들을 해결하기 위한 기술로 많은 연구가 이루어지고 있다. 에너지 하베스팅은 태

양광, 열, 전자기파 등 우리 주변에서 버려지는 에너지원을 수확하여 전기 에너지를 얻는 기술이다 [1-3]. 특히 압전 에너지 하베스팅은 다른 발전 방법에 비해 높은 전력 밀도와 효율을 가지고, 다양한 기계적 에너지를 전기 에너지로 변환하여 소형 전자기기, 무선센서 네트워크, 해양플랜트, 마이크로 로봇, 웨어러블 전자회로 등 넓은 분야에 적용이 가능하다.

압전 에너지 하베스터는 저주파수 대역에서 구동이 가능한 캔틸레버 형태가 주로 사용된다 [4-7]. 캔틸레버 압전 에너지 하베스터는 공진주파수에서 최대 변위 및 에너지를 얻을 수 있는 장점이 있다. 공진형 하베스터에

a. Corresponding author; ykjeong@kicet.re.kr

서의 출력은 quality factor 등 손실 부분이 고려되어야 한다 [8]. 일반적으로 이용되는 사각형 형태의 캔틸레버 빔의 경우 벤딩에 의한 응력이 클램핑(clamping)된 부분에서 반대편 끝으로 갈수록 선형적으로 감소하는 경향을 보인다. 이를 보완하기 위해 클램핑된 부분이 많은 응력을 받을 수 있도록 너비를 늘리고, 응력을 비교적 적게 받는 끝부분의 너비를 줄여 trapezoidal 형태로 캔틸레버 빔을 제조하게 되면 캔틸레버 표면에 응력이 비교적 균일하게 분포될 수 있다 [9-14].

또한 압전 캔틸레버 발전기의 전기적 출력은 압전체의 에너지 변환 구동 모드에 의해 크게 좌우된다. 대표적으로 압전체의 분극 방향과 인가되는 기계적 응력/변형의 방향에 따라 변환 구동 모드가 결정되며, 기계적 변형의 방향과 전기적 분극의 방향이 동일한 길이 (3-3) 모드와 서로 수직 방향을 갖는 두께 (3-1) 모드를 활용한다. 압전 캔틸레버 발전기에서 통상적으로 사용되는 3-1 모드의 경우, 그림 1(a)에서 보듯이 압전 필름 소재의 위, 아래 표면에 전면 전극을 사용하는 반면에 3-3 모드의 경우, 그림 1(b)에서 보듯이 IDE (interdigitated electrode) 패턴을 이용하게 된다. 이러한 3-3 모드를 이용한 압전 캔틸레버 발전기는 주로 MFC (micro fiber composite)나 MEMS (micro electro mechanical system) 등의 연구에서 활용되었다 [15-18].

주어진 진동에서 많은 전기 에너지를 얻기 위해서는 큰 전기-기계결합계수 (k)와 압전변위상수 (d)를 필요로 한다. 3-3 모드의 경우 3-1 모드보다 높은 k 및 d 특성을 갖기 때문에 보다 우수한 압전 에너지 하베스

팅 특성을 기대할 수 있다 [19]. 그러나 3-1 모드는 분극 공정 시 압전 세라믹 내부의 전기장 분포가 두께 방향으로 비교적 균일하게 형성되는 반면 3-3 모드는 IDE 구조를 활용하기 때문에 두께 방향으로 동일한 극성의 전기 신호가 인가되어 전극 하단부 주변에는 전기장의 영향을 거의 받지 않는 분극 비활성 영역이 발생한다. 이로 인하여 3-3 모드의 경우 압전 소재의 에너지 변환이 발생하는 유효 부피가 상대적으로 줄어드는 단점을 갖게 된다. 그러므로 3-1 모드와 3-3 모드를 갖는 압전 캔틸레버 발전기의 모드 차이에 따른 에너지 하베스팅 성능을 비교할 필요가 있다.

이에 본 연구에서는 최적화된 IDE 구조를 가지는 티탄산 지르콘산 납(lead zirconate titanate, PZT) 라미네이트 필름을 이용하여 trapezoidal cantilever generator를 제조하였다. 모드에 따른 PZT 라미네이트 필름의 구조적 특성을 분석한 후, 압전 에너지 하베스팅 특성을 평가하기 위하여 길이 (3-3) 모드와 두께 (3-1) 모드를 갖는 trapezoidal cantilever generator의 전기적 출력 성능을 비교하였다.

2. 실험 방법

2.1 PZT 라미네이트 필름 제조

본 연구에서는 압전 세라믹 후막을 제조하기 위하여 일반적으로 사용되는 테이프 캐스팅 공정을 이용하였다. 사용된 원료는 soft $\text{Pb}(\text{Zr},\text{Ti})\text{O}_3$ 계 상용 압전 파우더(AC750, Hayashi Chemicals, Japan)를 이용하였으며, 8.3 Φ 크기의 소결된 AC750 디스크(disk) 시편의 압전 물성을 Table1에 나타내었다.

테이프 캐스팅용 슬러리를 제조하기 위해 준비된 압전 파우더에 톨루엔(purity 99.5%, Samchun Pure 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 24시간 동안 혼합 분쇄하였으며, 망(mesh) 구조의 스크린(screen)을 이용해 혼합 슬러리를 균일한 크기로 체거름한 후, 진공 탈포기를 이용하

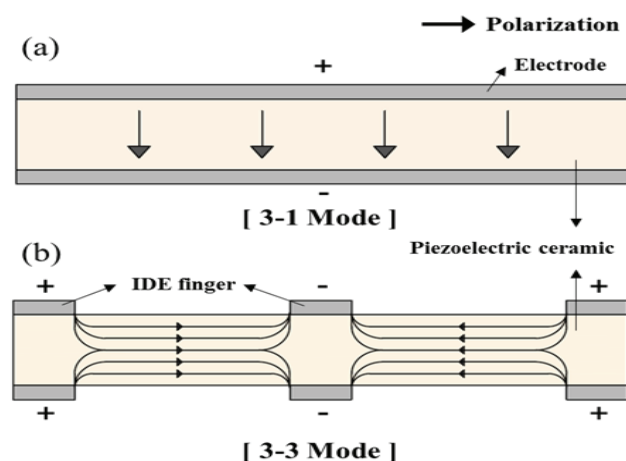


Fig. 1. Cross-sectional schematic images of electric field distribution for (a) transverse (3-1) mode and (b) longitudinal (3-3) mode.

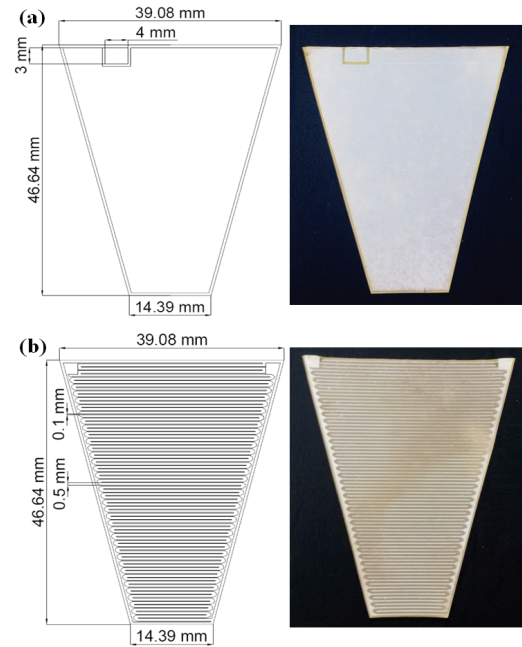
Table 1. Piezoelectric properties of commercial piezoelectric material (AC750) produced from Hayashi Chemicals, Japan.

Piezoelectric properties	Values
Sintering temperature (°C)	850°C
Curie temperature (T_c)	225°C
Coupling coefficient (k_p)	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
$\epsilon_{33}^T/\epsilon_0$	2,462
$\tan\delta$	0.9%

여 -760 mmHg 진공도로 30분 동안 슬러리 내부의 기포를 제거하였다. 탈포된 슬러리는 테이프 캐스팅 장비 (TCA-2000, Techgen, Korea)를 사용하여 닥터 블레이드(doctor blade)로 두께 약 40 μm 의 그린 시트 (green sheet)를 제조하였다.

2.2 Trapezoidal cantilever generator 제조

제조한 PZT 압전 그린 시트는 캔틸레버 빔 (beam)을 이용한 진동 에너지 하베스터의 성능을 개선하기 위하여 trapezoid 모양으로 설계하였다. 그림 2에 나타난 것처럼 설계된 trapezoid는 39.08 mm와 14.39 mm의 길이를 갖는 두 개의 평행한 변과 이들과 직교하며 46.64 mm의 변 길이를 갖는다. 3-1 모드의 경우 그림 2(a)에서 보듯이 압전 시트의 표면에 전면 전극을 가지며, 전극 신호 처리를 위해 3 mm × 4 mm 크기의 사각 전극 패드가 패터닝되어 있다. 그림 2(b)는 3-3 모드 구현을 위한 전극 패턴으로 3-1 모드와 동일한 크기의 trapezoidal 패턴을 가지며, 100 μm 의 선폭과 500 μm 의 선 간격을 가지는 IDE 구조를 가진다. 서로 마주 보며 교차되어 배열된 전극은 전기적으로 절연되어 있으며 전기 신호 처리를 위한 2개의 전극 패드가 장변의 양 끝단에 위치한다. 그림 2의 오른쪽 이미지는 실제로 제작한 PZT 라미네이트 시편의 이미지를 보여주고 있다. 설계된 각 모드별 패턴의 형상대로 스크린 프린팅용 마스크 (Sejinsmark, Korea)를 제작하였다. 스크린 마스크 (screen mask)는 전극 입도를 고려하여 640 mesh, 25 μm 의 opening size 규격으로 선정하였으며, 전극으로는 850°C에서 동시 소성이 가능한 Ag 페이스트 (WT-APPL7-1, Winner Technology, Korea)를 사용하였다. 테이프 캐스팅 공정으로 제조한

**Fig. 2.** Designed electrode patterns (left) and practically fabricated PZT laminates (right) for (a) 3-1 mode and (b) 3-3 mode.

PZT 그린 시트를 라미네이션하여 압전 변환용 필름을 제조하였으며, 3-1 모드의 경우 표면 Ag 전극층 외에 내부에 두 개의 Ag 전극층을 추가 삽입하였다. 3-3 모드의 경우 Ag IDE 표면 전극 외에 내부에 9개 Ag IDE 전극층을 삽입하였으며, 캔틸레버 구조에서 동작 시 전체 PZT 라미네이트 필름의 유효 두께가 서로 유사하도록 제작하였다. 3-3 모드에서 내부전극의 삽입은 분극 공정 시 캐패시터 구조를 가지는 적층형 압전체의 내부 전계 분포를 고르게 하여 캐패시턴스가 향상되는 효과를 가진다. 압전 세라믹 그린 시트를 각각 라미네이터 (Keko, Slovenia)로 60°C에서 14 MPa의 압력으로 적층하고 25 MPa, 65°C에서 20분 동안 WIP (warm isostatic press) 처리한 후 다이싱 (dicing)하여 전면 전극 패턴이 적용된 3-1 모드와 IDE 전극 패턴이 적용된 3-3 모드의 압전 세라믹 적층형 그린 바디 (green body)를 제조한 후, 내부와 외부 전극을 측면에서 서로 연결하였으며, 이를 850°C에서 2시간 동안 동시 소성하였다.

제조된 trapezoidal 압전 세라믹 소자는 전극 간 간격을 고려하여 3 V/ μm 의 전계 조건으로 100°C에서 10분 동안 분극 (polarization) 공정을 실시하였다.

분극 완료된 trapezoidal PZT 라미네이트 필름은 0.3 mm 두께와 37 mm (윗변) × 10 mm (아랫변) × 61

mm (높이)의 크기를 가지는 trapezoidal 모양의 SUS (stainless steel) 304 탄성 기판을 캔틸레버 빔으로 하며, 이의 상단에 완전히 부착되도록 에폭시를 도포한 후, 고압 가열오븐(PO1- 700-20, Korea)을 이용하여 65°C, 3.5 bar 에서 20분간 동안 가압 경화하여 trapezoidal cantilever generator를 제조하였다.

2.3 구조/전기적 특성 평가

본 연구에서 제조된 모드별 PZT 라미네이트 필름의 미세 구조 관찰은 FE-SEM (JSM-7610F, JEOL, Japan)을 이용하였다. 제작한 trapezoidal cantilever generator의 임피던스(impedance) 특성은 임피던스 분석기(E4990A, KEYSIGHT, USA)를 이용하였으며, 부하 저항(resistive load)의 크기에 따른 출력 전압 특성과 주파수 특성을 평가하기 위하여 shaker (Bruel & Kjaer, 4809, Denmark), 고속 bipolar amplifier (NF, HSA4014, USA), functional generator (Agilent, 33220A, USA), accelerometer (SQ-S-32902Y, Sequoia, Italy)를 사용하였다(그림 3).

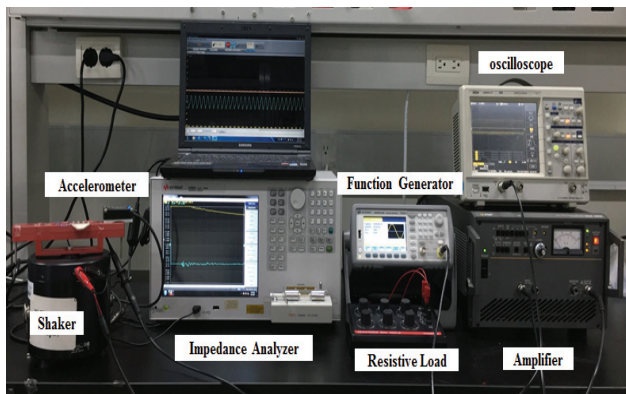


Fig. 3. Experimental set up for the measurement of electrical properties for the trapezoidal piezoelectric cantilever generator.

3. 결과 및 고찰

그림 4는 850°C에서 2시간 동안 소결한 PZT 라미네이트 필름의 모드별 단면 FE-SEM 이미지를 보여준다. 그림 4(a)는 3-1 모드에 해당하는 시편의 단면 구조로 압전 세라믹은 총 4개의 층으로 구성되었으며, 각 층의 상단에는 전극이 자리하고 있다. 가장 아래층에 있는 압전층은 전기 분극이 형성되지 않는 더미(dummy)층으로 캔틸레버 제조 시 빔과 접합하기 위

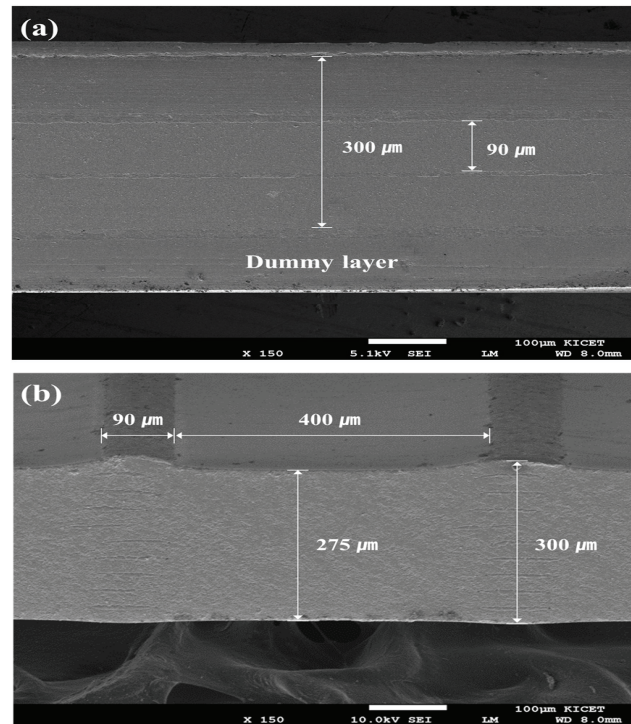


Fig. 4. Cross-sectional FE-SEM images of the PZT laminate films co-fired at 850°C for 2 h. (a) 3-1 mode and (b) 3-3 mode.

해 사용된다. 분극이 형성되는 3개의 유효층은 총 두께 300 μm를 가지며 전극층과 압전체층의 계면은 치밀하게 접합되어 있음을 알 수 있다. 또한 그림 4(b)는 3-3 모드에 해당하는 시편의 단면 구조로 압전체는 총 275 μm의 두께를 가지나 10개의 IDE 핑거가 수직으로 형성되어 있는 부분은 전극 두께로 인하여 약 300 μm로 두께가 25 μm 정도 증가하였다. 3-1 모드의 경우와 마찬가지로 가장 아래층은 더미층으로 사용된다. 시편은 소결 후 수축되어 IDE 핑거의 간격은 약 400 μm로 측정되었으며, IDE 핑거의 너비는 90 μm를 나타내었다. 서로 다른 모드 구현을 위해 제작된 두 시편의 경우 모두 압전 세라믹층은 기공(pore)이나 크랙(crack)과 같은 구조적 결함이 관찰되지 않아 치밀하게 형성되어 있음을 알 수 있다.

그림 5(a)는 trapezoidal cantilever generator의 모드별 주파수 변화에 따른 임피던스 변화 특성을 보여준다. 캔틸레버 빔의 한쪽 끝을 단단히 클램핑한 후 일반적으로 우리 주변 환경에서 진동 에너지 하베스터로 동작할 수 있는 20 Hz에서 180 Hz의 주파수 범위에서 특성평가를 실시하였다. 캐패시터 구조를 가지는 PZT 라미네이트 필름을 이용한 trapezoidal cantilever generator는 주

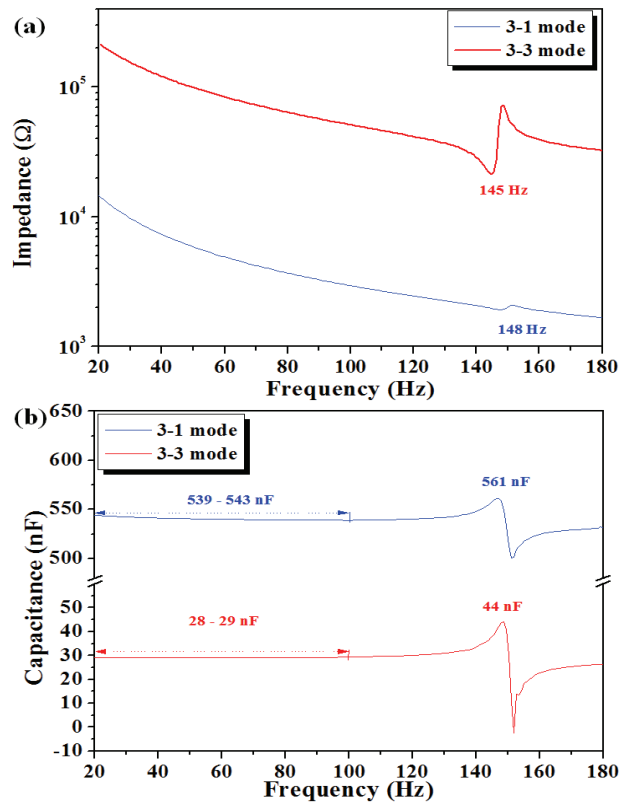


Fig. 5. (a) Impedance and (b) capacitance of the trapezoidal piezoelectric cantilever generator by 3-1 and 3-3 mode as a function of frequency.

파수가 증가할수록 임피던스가 감소하는 경향을 보였다. 3-1 모드와 3-3 모드 trapezoidal cantilever generator의 bending resonance frequency는 148 Hz, 145 Hz에서 각각 확인하였다. 이때의 임피던스는 3-1 모드에서 약 2 kΩ을 나타냈으며, 3-3 모드에서의 임피던스는 10배 이상 증가하여 약 20 kΩ을 나타냈다. 이는 전면 전극이 사용된 3-1 모드의 경우, 캐패시터의 유효 면적이 크기 때문에 임피던스가 낮게 측정되었다. 또한 그림 5(b)는 trapezoidal cantilever generator의 모드별 주파수 변화에 따른 캐패시턴스 특성을 보여준다. 3-1 모드의 캐패시턴스는 비공진(off-resonance) 영역인 100 Hz 이내의 주파수에서 539~543 nF과 bending resonance frequency에서 561 nF의 높은 값을 나타내었다. 반면 3-3 모드는 100 Hz 이내의 동일한 비공진 주파수 영역에서 28~29 nF, bending resonance frequency에서 44 nF의 캐패시턴스를 나타내었다. 이는 용량형 임피던스 특성을 나타내는 식 (1)에 의해 상대적으로 낮은 캐패시턴스를 가지는 3-3 모드 trapezoidal cantilever generator가

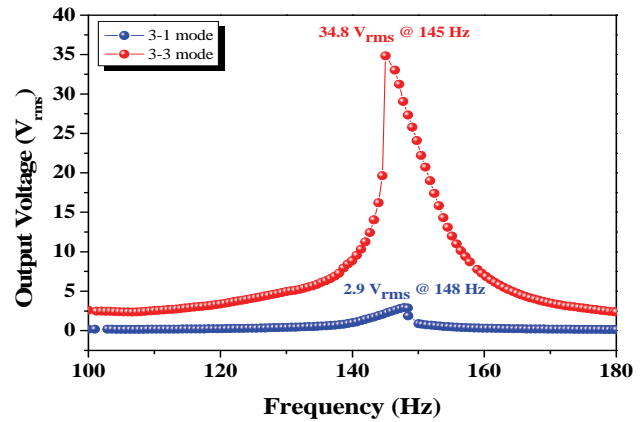


Fig. 6. Frequency dependent output voltage of trapezoidal cantilever generator by 3-1 mode and 3-3 mode.

더 높은 임피던스를 나타내는 것을 알 수 있다 [20]. 이때, Z 는 임피던스, ω 는 각속도, C 는 캐패시턴스를 나타낸다.

$$Z = \frac{1}{j\omega C} \quad (1)$$

공진영역을 제외한 모든 주파수에서는 3-3 모드의 경우 임피던스는 3-1에 비해 약 15.5~17.5배 정도 증가하였지만 캐패시턴스 특성은 3-3 모드의 경우가 약 18배 정도 낮은 값을 나타내었다. 공진주파수(145 Hz) 근처에서는 3-3 모드의 경우 임피던스는 약 10배 정도 높은 반면 캐패시턴스는 약 14배 정도 낮은 값을 나타내었다. 식 (1)과 달리 각 모드별 임피던스와 캐패시턴스 비의 차이가 발생하는 이유는 테스트 시편에 형성되어 있는 전극 성분에 기인하여 주파수 변화에 따른 인덕턴스 성분의 미세한 변화에 기인한 것이다.

그림 6은 trapezoidal cantilever generator의 모드별 주파수 변화에 따른 출력 전압 특성을 나타낸 것이다. 이때, 출력 전압은 실효값(root mean square, rms)으로 나타내었다. 3-1 모드 trapezoidal cantilever generator의 출력 전압은 bending resonance frequency인 148 Hz에서 2.9 V_{rms} 를 나타내었으며, 3-3 모드 trapezoidal cantilever generator는 bending resonance frequency인 145 Hz에서 약 34.8 V_{rms} 의 높은 출력전압을 나타내었다. 두 경우, 모두 일반적인 캔틸레버 압전 발전기에서 나타나는 좁은 frequency band를 가지는 경향을 보여주었다. 3-3 모드의 경우 IDE 핑거 간격이 약 400 μm 로 3-1 모드의 전극 간격인 90 μm 보다 훨씬 넓기 때문에

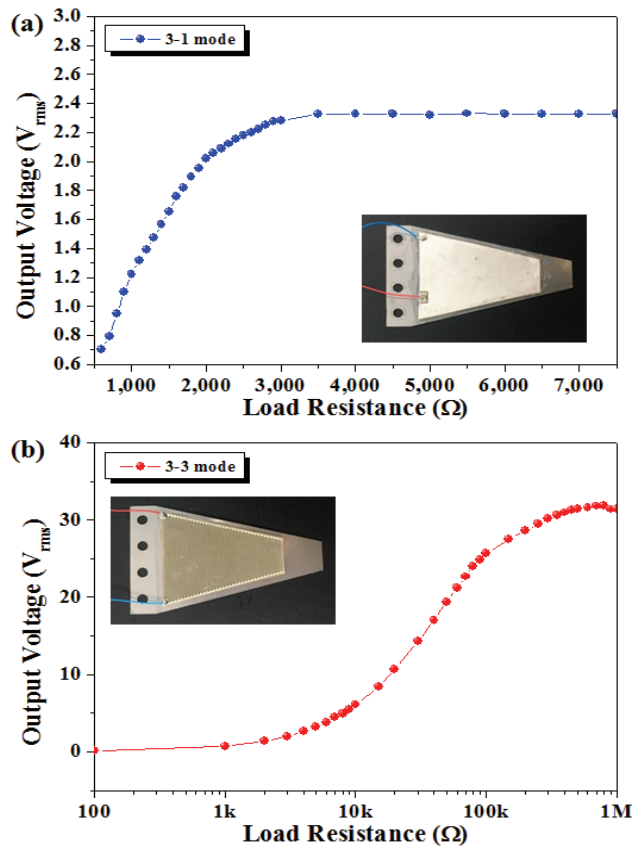


Fig. 7. Output voltage of the fabricated trapezoidal piezoelectric cantilever generator as a function of load resistance at resonant frequencies of (a) 148 Hz (3-1 mode) and (b) 145 Hz (3-3 mode).

상대적으로 높은 출력 전압 특성을 나타내었다.

그림 7은 trapezoidal cantilever generator의 bending resonance frequency에서 모드별 부하 저항(load resistance) 크기 변화에 따른 출력 전압 변화를 보여준다. 압전 에너지 하베스팅 기술에서 최대치의 전력 출력을 얻기 위해서는 매우 큰 인덕터를 필요로 하기 때문에 인덕터를 이용한 직접적인 임피던스매칭을 하기보다는 통상적으로 부하 저항을 이용하여 임피던스 매칭을 수행하는 것이 일반적이다. 부하 저항이 증가함에 따라 출력 전압도 증가하는 경향을 나타내었으며, 임피던스 매칭에 의해 적정 부하저항에서 최대치의 출력 전압을 나타내었다. 그러나 압전 에너지 변환 소스(source)인 PZT 라미네이트 필름의 임피던스 특성이 차이를 나타내듯 최대치의 출력 전압을 나타내는 부하 저항의 크기는 두 모드에서 상당한 차이를 나타내었다. 부하저항을 이용한 임피던스 매칭 시 최적 부하저항의 크기와 테스트 시편의 임피던스 크기는 비례

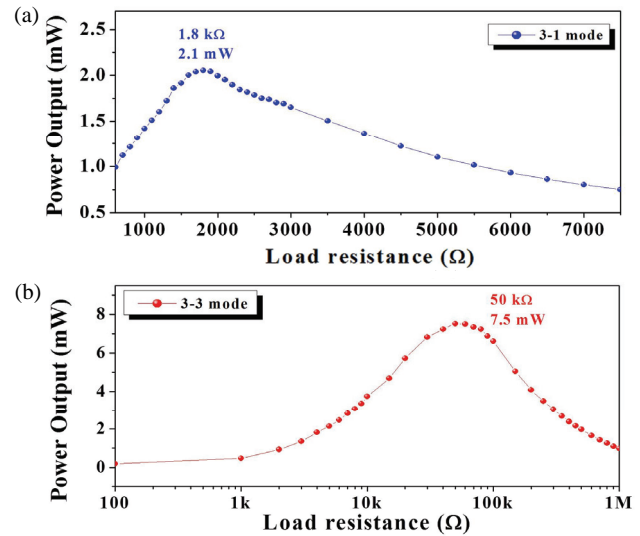


Fig. 8. Power output of the fabricated trapezoidal piezoelectric cantilever generator as a function of load resistance at resonant frequencies of (a) 148 Hz (3-1 mode) and (b) 145 Hz (3-3 mode).

하는 경향을 나타낸다. 그림 7(a)의 삽화에 나타난 3-1 모드 trapezoidal cantilever generator는 부하 저항이 3.5 kΩ까지 증가함에 따라 출력전압도 지속적으로 증가하다가 3.5 kΩ 이후의 부하저항에서는 포화된 출력 전압에 이르며 약 2.3 V_{rms}를 유지하였다. 반면, 3-3 모드 trapezoidal cantilever generator는 3-1 모드와 달리 훨씬 높은 부하 저항 700 kΩ에서 최대 출력 전압 31.8 V_{rms}를 나타내었다. 그림 8은 trapezoidal cantilever generator의 bending resonance frequency에서 모드별 부하 저항(load resistance) 크기 변화에 따른 출력 전력 변화를 보여준다. 출력 전력은 식 (2)에 따라 계산되었으며, 이때 P는 출력 전력, V_{rms}는 출력 전압, R은 부하저항을 나타낸다.

$$P = \frac{V_{rms}^2}{R} \quad (2)$$

3-1 모드의 경우, 600 Ω에서부터 출력 전력이 서서히 증가하다가 1.8 kΩ에서 최대 2.1 mW의 출력 전력을 나타내었다. 반면, 3-3 모드의 경우, 1 kΩ부터 출력 전력이 급격하게 증가하기 시작하여 50 kΩ에서 7.5 mW의 최대 출력 전력 특성을 나타내었다. 이는 3-1 모드의 경우와 비교하여 출력 성능이 개선되어 약 3배 이상 높은 출력 전력 성능을 가짐을 의미한다. 본 연구에서 제조한 trapezoidal cantilever generator를

Table 2. Comparison of energy harvesting performance of the trapezoidal piezoelectric energy harvesters by 3-1 and 3-3 modes.

Vibration mode	3-1 mode	3-3 mode
Resonance frequency (Hz)	148	145
Output voltage (V_{rms})	2.9	34.8
Power output (mW)	2.1	7.5
Power density (mW/cm^3)	9	26.7
Normalized power factor ($mW/G^2 \cdot cm^3$)	5.3	15.8

총 부피를 고려하여 출력 전력 특성을 power density로 나타내면 3-1 모드와 3-3 모드에서 각각 $9 mW/cm^3$ 와 $26.7 mW/cm^3$ 로 환산할 수 있다. 또한 측정 주파수 환경에서의 진동 가속도 1.3 G (gravity)를 고려한 normalized power factor로 나타낼 경우 각각 $5.3 mW/G^2 \cdot cm^3$ 와 $15.8 mW/G^2 \cdot cm^3$ 로 변환 가능하며 이를 표 2에 비교하였다. 이를 통하여 3-1 모드에 비해 3-3 모드의 경우 trapezoidal cantilever generator가 약 3배 이상 우수한 에너지 하베스팅 성능이 개선됨을 확인할 수 있었다.

4. 결론

본 연구에서는 우수한 압전 물성을 가지는 PZT 라미네이트 필름을 이용하여 trapezoidal cantilever generator를 제조한 후, 3-1 및 3-3 진동 모드에 따른 압전 에너지 하베스팅 특성을 비교 평가하였다. 우선 PZT 세라믹을 이용하여 테이프 캐스팅 공정을 통해 압전 후막 시트를 제조하였다. 3-1 모드를 구현할 전면 평면 전극 패턴과 3-3 모드 구현이 가능한 IDE 패턴을 이용하여 다층 구조의 Ag 전극이 인쇄된 PZT 라미네이트 필름을 $850^\circ C$ 에서 두 시간 동안 동시 소성하였다. 제조한 PZT 라미네이트 필름은 소결 후 안정적으로 전극 패턴이 형성되었음을 확인하였으며, 이를 이용하여 trapezoidal cantilever generator를 성공적으로 제조할 수 있었다. 압전 에너지 하베스팅 성능을 평가하기 위하여 tip mass가 없는 조건에서 3-1 모드와 3-3 모드의 경우, 각각 148 Hz와 145 Hz의 bending resonance frequency를 가짐을 확인하였다. 또한, 이때의 최대 출력 전압 특성은 각각 $2.9 V_{rms}$ 와 $34.8 V_{rms}$ 를 나타내었다. 공진 조건에서 저항 매칭을 통하여 3-1 모드의 경우, 1.8 k Ω 에서 최대 2.1 mW, 3-3 모드의 경우, 50 k Ω 에서 최대 7.5 mW의 우수한 출력

전력 특성을 나타내었다. 이를 전력 밀도로 환산하면 $9 mW/cm^3$ 와 $26.7 mW/cm^3$ 로 나타낼 수 있으며, 진동 가속도를 아울러 고려한 normalized power factor로 환산하면 각각 $5.3 mW/G^2 \cdot cm^3$ 와 $15.8 mW/G^2 \cdot cm^3$ 로 변환할 수 있다. 이 결과로부터, 본 연구에서 제조한 trapezoidal cantilever generator는 3-3 모드의 경우 3-1 모드와 비교하여 약 3배 정도 우수한 에너지 하베스팅 성능을 가짐을 확인할 수 있었다.

감사의 글

본 연구는 2017년도 산업통상자원부의 재원으로 한국 에너지기술평가원(KETEP)의 지원을 받아 수행한 에너지기술개발사업 연구 과제입니다(No.20152020104960).

REFERENCES

- [1] Z. Abidin, M. A. Alim, R. Saidur, M. R. Islam, W. Rashmi, S. Mekhilef, and A. Wadi, *Renew. Sust. Energ. Rev.*, **26**, 837 (2013). [DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2013.06.023>]
- [2] M. A. Lazar, D. Al-Masri, D. R. MacFarlane, and J. M. Pringle, *Phys. Chem. Chem. Phys.*, **18**, 1404 (2016). [DOI: <https://doi.org/10.1039/C5CP04305K>]
- [3] V. Kuhn, C. Lahuec, F. Seguin, and C. Person, *IEEE Trans. Microwave Theory Tech.*, **63**, 1768 (2015). [DOI: <https://doi.org/10.1109/TMTT.2015.2416233>]
- [4] M. Song, Y. Zhang, M. Peng, and J. Zhai, *Nano Energy*, **6**, 66 (2014). [DOI: <https://doi.org/10.1016/j.nanoen.2014.02.009>]
- [5] Q. Zhao, Y. Liu, L. Wang, H. Yang, and D. Cao, *Int. J. Pavement Res. Technol.*, In Press (2017). [DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijprt.2017.08.001>]
- [6] S. Leadenham and A. Erturk, *Nonlinear Dyn.*, **79**, 1727 (2015) [DOI: <https://doi.org/10.1007/s11071-014-1770-x>]
- [7] H. Li, C. Tian, and Z. D. Deng, *Appl. Phys. Rev.*, **1**, 041301 (2014) [DOI: <https://doi.org/10.1063/1.4900845>]
- [8] V. Annapureddy, M. Kim, H. Palneedi, H. Y. Lee, S. Y. Choi, W. H. Yoon, D. S. Park, J. J. Choi, B. D. Hahn, C. W. Ahn, J. W. Kim, D. Y. Jeong, and J. Ryu, *Adv. Energy Mater.*, **6**, 1601244 (2016). [DOI: <https://doi.org/10.1002/aenm.201601244>]
- [9] E. K. Reily, F. Burghardt, R. Fain, and P. Wright, *Smart Mater. Struct.*, **20**, 125006 (2011). [DOI: <https://doi.org/10.1088/0964-1726/20/12/125006>]
- [10] R. Hosseini and M. Hamed, *J. Micromech. Microeng.*, **25**, 125008 (2015). [DOI: <https://doi.org/10.1088/0960-1317/25/125008>]

- 25/12/125008]
- [11] S. B. Ayed, F. Najar, and A. Abdelkefi, *Proc. 2009 3rd International Conference on Signals, Circuits and Systems (SCS)* (IEEE, Medenine, Tunisia, 2009) p. 1. [DOI: <https://doi.org/10.1109/ICSCS.2009.5412553>]
- [12] D. Benasciutti, L. Moro, S. Zelenika, and E. Brusa, *Microsyst. Technol.*, **16**, 657 (2010). [DOI: <https://doi.org/10.1007/s00542-009-1000-5>]
- [13] V. Annapureddy, H. Y. Lee, W. H. Yoon, H. J. Woo, J. H. Lee, H. Palneedi, H. J. Kim, J. J. Choi, D. Y. Jeong, S. N. Yi, and J. H. Ryu, *Appl. Phys. Lett.*, **109**, 093901 (2016). [DOI: <https://doi.org/10.1063/1.4962047>]
- [14] C. M. Kim, C. I. Kim, J. H. Lee, J. H. Paik, J. H. Cho, M. P. Chun, Y. H. Jeong, and Y. J. Lee, *Trans. Electr. Electron. Mater.*, **11**, 206 (2010). [DOI: <https://doi.org/10.4313/TEEM.2010.11.5.206>]
- [15] B. Tian, H. Li, N. Yang, H. Liu, and Y. Zhao, *Proc. 2017 IEEE 12th International Conference on Nano/Micro Engineered and Molecular Systems (NEMS)* (IEEE, Los Angeles, CA, USA, 2017) p. 185 [DOI: <https://doi.org/10.1109/NEMS.2017.8017002>]
- [16] Y. Chen, B. Lu, D. Ou, and X. Feng, *Sci. China: Phys., Mech. Astron.*, **58**, 594601 (2015). [DOI: <https://doi.org/10.1007/s11433-015-5692-5>]
- [17] R. Paradies and P. Ciresa, *Smart Mater. Struct.*, **18**, 035010 (2009). [DOI: <https://doi.org/10.1088/0964-1726/18/3/035010>]
- [18] H. Yu, J. Zhou, L. Deng, and Z. Wen, *Sensors*, **14**, 3323 (2014). [DOI: <https://doi.org/10.3390/s140203323>]
- [19] C. H. Nguyen, U. Hanke, and E. Halvorsen, *Proc. SPIE 9799, Active and Passive Smart Structures and Integrated Systems 2016* (SPIE, Las Vegas, Nevada, United States, 2016) p. 97991C. [DOI: <https://doi.org/10.1117/12.2218843>]
- [20] H. A. Sodano, J. Lloyd, and D. J. Inman, *Smart Mater. Struct.*, **15**, 1211 (2006). [DOI: <https://doi.org/10.1088/0964-1726/15/5/007>]