

사다리꼴 PZT/Ag Laminate 외팔보 발전기의 압전 에너지 하베스팅 특성

나용현^{1,2}, 이민선¹, 윤지선¹, 홍연우¹, 백종후¹, 조정호¹, 이정우², 정영훈^{1,a}

¹ 한국세라믹기술원 전자소재부품센터

² 부산대학교 재료공학과

Piezoelectric Energy Harvesting Characteristics of Trapezoidal PZT/Ag Laminate Cantilever Generator

Yong-Hyeon Na^{1,2}, Min-Seon Lee¹, Ji-Sun Yun¹, Youn-Woo Hong¹, Jong-Hoo Paik¹, Jeong-Ho Cho¹,
 Jung Woo Lee², and Young-Hun Jeong^{1,a}

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

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

(Received August 21, 2018; Revised September 7, 2018; Accepted September 13, 2018)

Abstract: The piezoelectric energy harvesting characteristics of a trapezoidal cantilever generator with lead zirconate titanate (PZT) laminate were investigated with various Ag inner electrodes. The piezoelectric mode of operation was a transverse mode by using a planar electrode pattern. The piezoelectric cantilever generator was fabricated using trapezoidal cofired-PZT/Ag laminates by five specimens of 2, 3, 4, 7, and 13 layers of Ag. As the number of Ag electrodes increased, impedance and output voltage at resonant frequency significantly decreased, and capacitance and output current showed an increasing tendency. A maximum output power density of 7.60 mW/cm³ was realized for the specimen with seven Ag layers in the optimal condition of acceleration (1.2 g) and resistive load (600 Ω), which corresponds to a normalized power factor of 5.28 mW/g² · cm³.

Keywords: Piezoelectric, Laminate, Trapezoidal, Transverse mode, Energy harvesting

1. 서론

압전 에너지 하베스팅 기술은 최근 신재생 에너지 기술 개발에 대한 급격한 수요에 따라 태양광, 열전, 전자기파 등 에너지 변환 기술을 이용한 여러 기술과 함께 지속적인 개발이 이루어져 오고 있다 [1-4]. 특히 압전 에너지 하베스팅은 다른 에너지원을 사용하는 발전방식과 비교하여 볼 때 높은 전력 밀도와 에너지 변

환 효율을 나타내기 때문에 마이크로로봇, 소형전자기기, 무선센서, 해양플랜트, 웨어러블 디바이스 등 다양한 분야에 에너지원으로서 응용이 기대되고 있다 [5-8]. 이러한 압전 에너지 하베스팅 기술은 주변의 진동 환경에서 구동이 가능한 외팔보(cantilever) 형태로 주로 사용되며, 공진주파수에서 최대 에너지를 얻을 수 있는 특징을 가지고 있다 [9-12]. 일반적으로 사용되는 압전 외팔보의 진동 환경에서 발생하는 응력 분포의 경우, 클램핑(clamping)되어 고정된 한쪽 측면에서부터 질량체(tip mass)가 부착되는 맞은편의 개방 측면으로 갈수록 점차 응력이 감소하게 된다. 균일한 응력 분포를 가질 수 있도록 외팔보의 형상을 변화시켜 에너지 변환 성능을 개선하기 위한 연구가 진행되었다.

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

Copyright ©2018 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.

예로서, 클램핑 부위의 너비가 넓고 개방된 끝단으로 갈수록 너비가 선형적으로 좁아지는 사다리꼴 형태 외팔보를 사용하게 되면 진동 환경에서 외팔보의 변형 시 직사각형 형태의 외팔보에 비해 상대적으로 응력의 분포가 균일하게 되어 압전 외팔보 발전기의 개발에 활발히 활용되고 있다 [13-17].

또한, 압전 외팔보 하베스터의 에너지 변환 구동모드는 압전체의 분극 방향과 인가되는 기계적 응력/변형의 방향에 따라 변환 구동 모드가 결정되며, 기계적 변형의 방향과 전기적 분극의 방향이 서로 수직인 방향을 갖는 횡축 (3-1) 모드를 주로 활용한다. 일반적으로 사용되는 압전 외팔보 발전기의 경우 단판형 세라믹 필름 구조를 갖는 압전체 소재가 많이 사용되며, 진동 환경에서 압전 변환 효과에 따라 출력되는 전기적 신호를 추출하기 위하여 압전체 표면에 전면 전극(planar electrode)을 형성하여 사용하게 된다. 그러나 효율적인 진동 에너지 변환을 위하여 일정 수준의 두께를 가지는 압전체 필름은 외팔보 하베스터의 공진 환경에서 임피던스 특성을 개선하여 출력 성능을 극대화하게 된다. 일반적으로 적층 세라믹 축전기(multi-layer ceramic capacitor, MLCC)는 축전기의 성능을 극대화하기 위하여 많은 내부 전극층을 사용한다. 압전 외팔보 하베스터도 에너지 변환을 위한 활성부(active area)가 압전 세라믹 축전기로 구성되기 때문에 내부 전극층을 사용하면 임피던스의 감소를 통한 출력 성능의 개선 및 낮은 전기장의 분극을 통한 양산 공정 시 전기 비용 효과의 개선을 기대할 수 있다. 이에 본 연구에서는 $Pb(Zr, -Ti)O_3$ (PZT) 세라믹 라미네이트 필름을 이용한 압전 에너지 하베스터 특성을 파악하기 위하여 다양한 층수의 Ag 전극을 가지는 PZT/Ag laminate를 동시 소성 공정을 통해 제조한 후, 이를 에너지 변환용 활성 물질로 사용한 사다리꼴 외팔보 발전기를 제작하여 에너지 하베스팅 특성을 평가하였다.

2. 실험 방법

2.1 PZT 후막 세라믹 제조

적층형 압전소자를 만들기 위해 압전 세라믹 후막을 테이프 캐스팅 공정으로 제조하였으며, PZT 계열의 상용 압전 세라믹 분말(AC750, Hayashi Chemicals, Japan)을 원료로 사용하였다. 압전 세라믹 분말의 물성치는 선행연구에 의해 $8.3 \text{ } \phi$ 크기로 소결된 디스크

Table 1. Piezoelectric properties of commercial piezoelectric material (AC750) produced from Hayashi Chemicals, Japan [18].

Piezoelectric properties	Values
Sintering temperature ($^{\circ}C$)	850 $^{\circ}C$
Curie temperature (T_c)	225 $^{\circ}C$
Coupling coefficient (k_p)	61.7%
Mechanical quality factor (Q_m)	138
Piezoelectric charge constant (d_{33})	$520 \times 10^{-12} \text{ C/N}$
Piezoelectric voltage constant (g_{33})	$24 \times 10^{-3} \text{ Vm/N}$
$\epsilon_{33}^T/\epsilon_0$	2,462
$\tan\delta$	0.9%

(disk) 시편의 압전 물성 값을 표 1에 나타내었다.

압전 세라믹 후막용 슬러리를 제조하기 위해 폴리에틸렌 재질의 병에 압전 세라믹 분말과 polyvinyl butyral (BM-SZ, Sekisui, Japan), 에탄올(purity 99.5%, Samchun Pure Chemical, Korea), 톨루엔(purity 99.5%, Samchun Pure Chemical, Korea), dibutyl phthalate (purity 99.0%, Daejung Chemical & Metals, Korea) 및 분산제(BYK-111, BYK-Chemie GmbH, Germany)를 일정 비율로 첨가 및 혼합하였으며, 다양한 지름의 지르코니아 볼($\phi = 3 \text{ mm}, 5 \text{ mm}, 10 \text{ mm}, 15 \text{ mm}$) 미디어를 이용하여 24시간 동안 혼합 분쇄하였다. 망(mesh) 구조를 가지는 스크린(screen)을 이용하여 혼합 슬러리(slurry)를 균일하게 체거름하였으며, 진공 탈포기를 사용하여 -760 mmHg 진공도로 15분간 2회에 걸쳐 내부의 기포를 제거하였다. 제조된 슬러리는 테이프 캐스팅 장비(TCA-2000, Techgen, Korea)를 사용하여 닥터 블레이드(doctor blade)로 두께 약 $33 \text{ } \mu\text{m}$ 로 전체적으로 균일한 두께를 갖는 그린시트(green sheet)를 제조하였다.

2.2 사다리꼴 외팔보 발전기 제조

제조한 압전 그린시트는 사다리꼴 외팔보 형상을 구현하기 위하여 아래 그림 1과 같이 제작되었다.

설계된 사다리꼴 패턴에서 PZT 판의 경우, 두 개의 마주 보는 평행한 변의 길이는 각각 39.08 mm와 14.39 mm이며 이들 변 간의 거리는 46.64 mm를 가진다. PZT 판의 표면에 형성되는 전극 패턴은 동일한 사다리꼴 형상을 가지며 약 1 mm의 여백을 가지도록 설계하였다. 또한 분극 및 신호 처리를 위해 반대 전

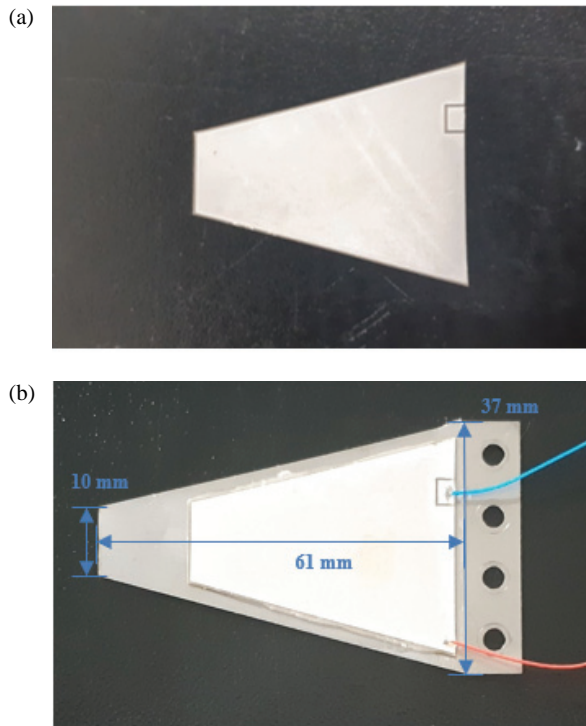


Fig. 1. (a) Co-fired the trapezoidal PZT/Ag laminate and (b) the fabricated trapezoidal piezoelectric cantilever beam.

극으로 사용되는 3 mm × 4 mm 크기의 터미널 패턴을 설계하였다. 설계도면을 바탕으로 스크린 프린팅용 마스크(Sejinsmark, Korea)를 제작하였으며, 스크린 마스크(screen mask)는 850°C에서 동시 소성 가능한 전극으로 사용되는 Ag 페이스트(WT-APPL7-1, Winner Technology, Korea)의 입도를 고려하여 640 mesh, 25 μm의 opening size 규격으로 선정하였다.

테이프 캐스팅을 통해 제조한 압전 후막 그린시트는 총 13층이 적층되었으며, Ag 전극 수량을 달리하여 그림 2와 같은 전극구조를 가지는 PZT/Ag laminate을 제조하였다. 내부 전극 층수에 따라 제작된 시편을 각각 A~E로 표현하였으며, 총 전극층의 개수가 2개인 경우 A, 3개인 경우 B, 4개인 경우 C, 7개인 경우 D, 13개인 경우 E로 표기하였다.

PZT 그린시트를 각각 수동적층기(Keko, Slovenia)를 이용하여 60°C에서 10 MPa의 압력으로 가압, 적층한 후 25 MPa, 65°C에서 20분간 WIP (warm isostatic press) 공정을 진행한 후 블레이드 커터(blade cutter)를 이용하여 사다리꼴 형태로 절단 및 제조하였다. 시편의 구조별로 적층된 Ag 전극층을 터미널 전극을 통해 서로 연결하였으며, 850°C에서 2시간 동안 동시 소

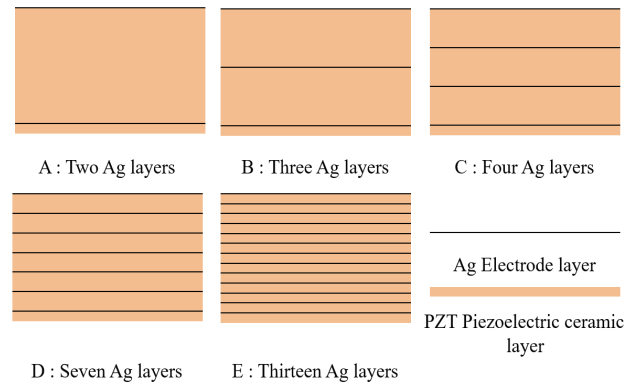


Fig. 2. Schematic images of the PZT/Ag laminate with various Ag electrode layers.

성하였다. 소성이 완료된 PZT/Ag laminate는 각 변을 따라 약 20% 수축률을 가지며 안정적으로 소성되었다. 시편 A의 압전체 한 층은 312 μm, B는 144 μm, C는 96 μm, D는 48 μm, E는 24 μm의 두께를 가진다.

제조된 압전 세라믹 소자는 각 구조에 따른 전극 간 간격을 고려하여 3 kV/mm의 전계 조건으로 100°C의 실리콘 오일에서 10분 동안 분극(poling) 공정을 실시하였다. 분극 완료된 PZT/Ag laminate는 0.3 mm 두께와 37 mm (윗변) × 10 mm (아랫변) × 61 mm (높이)의 크기를 가지는 사다리꼴 모양 SUS (stainless steel) 304 탄성 기판을 외팔보로 사용하며, 표면에 완전 부착되도록 에폭시를 도포하여 고압가열오븐(PO1-700-20, Korea)을 이용하여 65°C, 3.5 bar에서 20분 동안 가압 경화하여 사다리꼴 외팔보 발전기를 제조하였다.

2.3 구조/전기적 특성 평가

본 연구에서 제조된 PZT/Ag laminate의 미세구조 관찰은 FE-SEM (MIRA3 LM, TESCAN, Czech Republic)을 이용하였으며, 제작된 시편의 임피던스(impedance)와 캐패시턴스(capacitance)는 임피던스 분석기(E4990A, KEYSIGHT, USA)를 이용하였으며, 부하 저항(resistive load)의 크기에 따른 출력 전압 특성과 공진상태의 전기적 특성을 평가하기 위해 가진기(Bruel & Kjaer, 4809, Denmark), 고속 양극 증폭기(NF, HSA4014, USA), 디지털 전력 계측기(WT310, Yokogawa, Japan), 함수발생기(Agilent, 33220A, USA), 가속도계(SQ-S-32902Y, Sequoia, Italy)를 사용하였다. 그림 3은 사다리꼴 외팔보 발전기의 에너지 하베스팅 성능 분석을 위한 전기적 특성 평가 시스템을 보여준다.

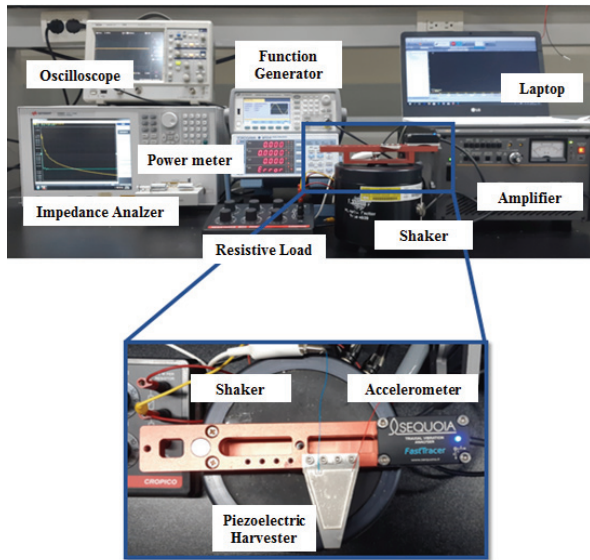


Fig. 3. Experimental set up for the measurement of electrical properties of the trapezoidal PZT/Ag laminate piezoelectric cantilever generator.

3. 결과 및 고찰

그림 4는 850°C에서 2시간 동안 동시 소성한 다양한 내부전극 층수를 가지는 PZT/Ag laminate의 FE-SEM 단면 이미지를 보여주고 있다. 모든 시편에서 외팔보 제조 시 기관으로 사용되는 SUS 빔과 접합되는 보완층을 관찰할 수 있다. 소결된 PZT 라미네이트 필름의 Ag 내부 전극은 약 3 μm의 두께를 가졌으며, 제작된 시편 A (318 μm), B (321 μm), C (324 μm), D (333 μm), E (351 μm)는 내부전극의 개수에 따라 다른 두께를 나타내었다. 제작된 모든 시편은 기공(pore)이나 크랙(crack) 같은 주목할 만한 기계적 결함은 관찰되지 않았으며, 각 세라믹층은 매우 치밀하게 형성되었음을 확인할 수 있었다. 또한, PZT/Ag laminate를 구성하는 각 PZT 압전 그린 시트는 소성 공정 이후에도 이웃하는 각 층과 안정적으로 결합되어 있음을 확인할 수 있었다. 시편 A에서부터 시편 E에 이르기까지 총 전극층의 수는 그림 2에 나타난 설계 구조대로 성공적으로 형성되었음을 확인할 수 있었다.

표 2는 PZT/Ag laminate 구조의 시편 A-E를 이용하여 제조된 사다리꼴 외팔보 발전기의 임피던스와 캐패시턴스 특성을 나타낸다. 전극 층수의 증가에 따라 시편 A의 경우부터 시편 E로 변화하면서 측정된 범위에서 임피던스는 감소하는 경향을 나타내었다. 각 시편

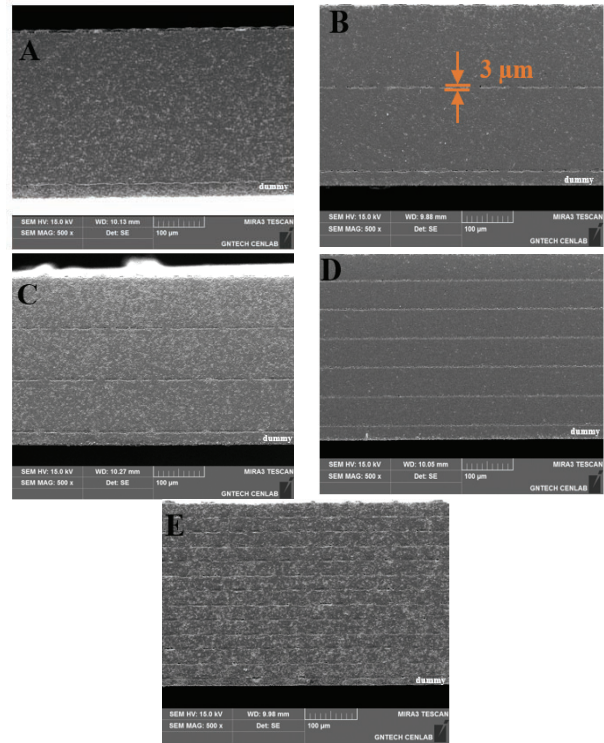


Fig. 4. Cross-sectional FE-SEM images of specimens A, B, C, D and E co-fired at 850°C for 2 h.

에 따라 공진주파수에서 임피던스는 146 Ω까지 감소하였으며, 캐패시턴스는 최대 7.320 nF까지 증가하였다. 이는 전극 층수가 증가할수록 전극의 유효면적이 증가하는 특성을 나타내는 것으로 용량형 회로의 임피던스를 표현하는 식 (1)에 의하여 이러한 경향이 나타나게 된다.

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

(Z는 임피던스, ω 는 각속도, C는 캐패시턴스)

그림 5는 다양한 전극 층수를 가지는 PZT/Ag laminate를 이용하여 제조된 사다리꼴 외팔보 발전기의 주파수 변화에 따른 출력 전압 및 전력 특성을 그래프로 나타내었다. f_0 는 각 시편의 공진 주파수를 의미하며 시편 A (148 Hz), B (149 Hz), C (148 Hz), D (150 Hz), E (148 Hz)는 동일한 형태로 인해 148~150 Hz 사이의 비슷한 공진 주파수로 나타났다. 진동 조건은 1.2 g (g: 중력가속도)의 동일한 조건을 형성하여 실험을 진행하였으며, 이때 출력되는 전압은 실효값인 rms (root

Table 2. Impedance and capacitance of the trapezoidal cantilever generators as on/off resonance frequency.

	A	B	C	D	E
Off resonance impedance (kΩ)	133	62.5	6.72	4.17	1.18
On resonance impedance (Ω)	15,900	7,450	2,340	476	146
Off resonance capacitance (nF)	59.5	127	376	1,910	6,690
On resonance capacitance (nF)	68.0	143	417	2,190	7,320

※ Off resonance is 20 Hz, on resonance range is 148~150 Hz.

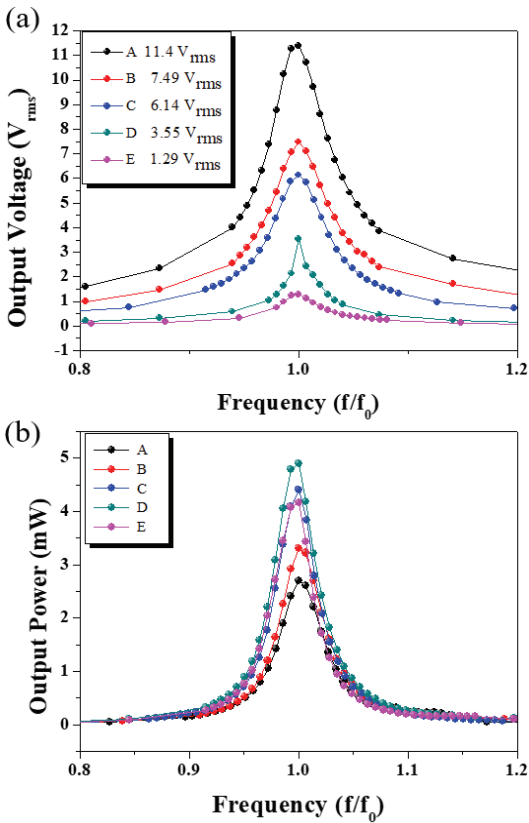


Fig. 5. (a) Frequency dependent output voltage and (b) output power of various trapezoidal cantilever generators.

mean square) 수준으로 표기하였다. 임피던스가 최소인 공진주파수 부근에서 출력 전압 및 전력은 최대치를 나타내었으며, 내부전극 층수가 증가하면서 공진주파수에서 출력 전압은 지속적으로 감소하는 경향을 나타내었고, 출력 전력은 내부 전극 층수가 증가하면서 공진주파수에서 증가하는 경향을 보였으나, 가장 많은

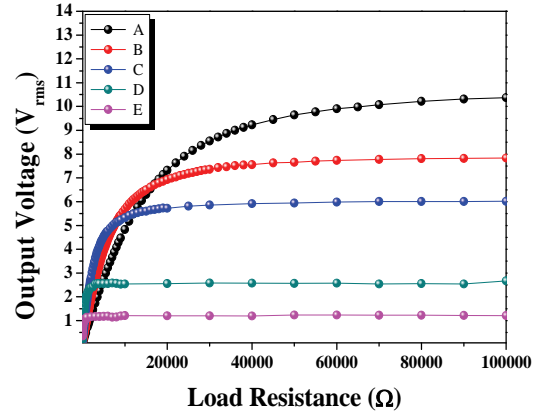


Fig. 6. Output voltage characteristics of various trapezoidal cantilever generators as a function of load resistance at resonant frequency.

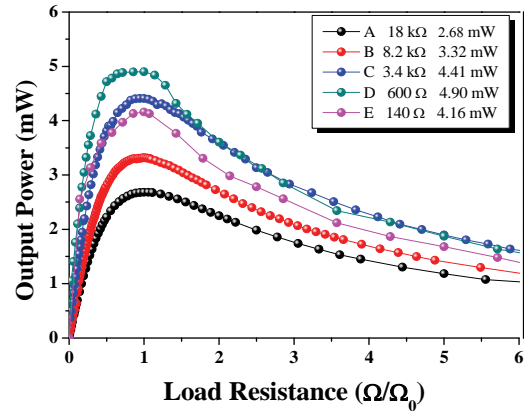


Fig. 7. Output power characteristics of various trapezoidal cantilever generators as a function of load resistance at resonant frequency.

내부 전극층이 삽입된 시편 E의 경우 감소하였다. 주파수 응답 특성을 바탕으로 내부 전극의 사용을 통해 높은 출력 전력을 가질수록 동작 주파수 밴드 대역이 서서히 증가하는 현상을 관찰하였으며, 이를 통해 외팔보 발전기의 동작 주파수 대역을 확장하기 위해 전극층의 증가는 에너지 하베스터 응용 시 주파수 안정성 측면에서 효과적인 방법이 될 수 있음을 확인할 수 있었다.

그림 6은 다양한 전극 층수를 가지는 PZT/Ag laminate를 이용하여 제조된 사다리꼴 외팔보 발전기의 공진주파수에서 부하저항(load resistance)에 따른 출력 전압 특성 그래프이다. 부하저항이 증가함에 따라 하베스터에서 출력되는 전압도 증가하는 경향을 보였으며, 최대 출력 전압을 나타내는 부하저항의 크기는 큰 차이를 나타내었다.

그림 7은 이들의 공진주파수에서 부하저항 크기 변

화에 따른 출력 전력 특성을 보여준다. 압전 에너지 하베스팅 효율을 높이기 위해서는 인덕터를 필요로 하나 인덕터를 이용한 임피던스 매칭보다 부하저항을 이용한 임피던스 매칭을 통해 출력되는 전력 효율을 높이는 방식이 일반적으로 사용되고 있다 [19]. 출력 전력은 아래의 식 (2)를 통해 도출하였다.

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

(P 는 전력, V_{rms} 는 전압, R 은 부하저항)

출력되는 전력은 임피던스 매칭 공정을 통해 최적 부하 저항을 전후하여 증가하였다가 감소하는 경향을 나타내었으며, 내부 전극 층수의 증가에 따라 부하 저항에 따른 출력 전력 변화율이 급격히 커지는 경향을 나타내었다. 최대 출력 전력은 아래 식 (3)과 (4)에서 유추할 수 있듯이, P_L 값을 최대로 만드는 부하저항의 값은 내부저항의 값과 동일한 값을 가질 때이다 [8].

$$P_L = I^2 R_L = \left(\frac{V}{R_S + R_L} \right)^2 R_L = \frac{V^2 R_L}{(R_S + R_L)^2} \quad (3)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial P_L}{\partial R_L} &= \frac{V^2}{(R_S + R_L)^2} - 2 \frac{V^2 R_L}{(R_S + R_L)^3} \\ &= V^2 \frac{(R_S - R_L)}{(R_S + R_L)^3} \end{aligned} \quad (4)$$

(P_L 은 출력전력, R_S 는 내부저항, R_L 은 부하저항)

그 결과 시편 A는 18 k Ω 의 부하저항에서 2.68 mW의 최대 출력을 보였으며, B는 8.2 k Ω 에서 3.32 mW, C는 3.4 k Ω 에서 4.41 mW, D는 600 Ω 에서 4.90 mW, E는 140 Ω 에서 4.16 mW를 나타내었으며, 최대 출력은 시편 D에서 나타났다. 가장 높은 출력 특성을 가진 시편 D는 공진주파수 150 Hz에서 최대 3.55 V 출력 전압, 출력전력 4.90 mW, 전력밀도 760 mW/cm³, normalized power factor 5.28 mW/g²·cm³를 나타내었다. 나머지 시편들도 표 3에 에너지 하베스팅 특성을 요약하여 정리하였으며, 표 4에 본 연구와 유사한 PZT 계열의 압전 소재를 이용한 외팔보 발전기의 에너지 하베스팅 특성을 비교하여 상대적으로 높은 특성을 가짐을 알 수 있다.

PZT/Ag laminate의 Ag 전극 층수가 증가할수록 제작된 사다리꼴 PZT/Ag laminate 외팔보 발전기의

Table 3. Comparison of energy harvesting performance of the trapezoidal PZT/Ag cantilever generator.

	A	B	C	D	E
Impedance matching resistance (Ω)	180 k	8.20 k	3.40 k	600	140
Maximum output voltage (Vrms)	11.4	7.49	6.14	3.55	1.29
Output power (mW)	2.68	3.32	4.41	4.90	4.16
Power density (mW/cm ³)	4.22	5.20	6.88	7.60	6.30
Normalized power factor (mW/g ² ·cm ³)	2.93	3.61	4.78	5.28	4.37

※ Resistance tolerance is $\pm 1\%$

Table 4. Comparison of energy harvesting performance of cantilever piezoelectric generators using various materials.

Material	Power density (mW/cm ³)	Power factor (mW/g ²)	Normalized power factor (mW/g ² ·cm ³)	Ref.
PZT-based ceramic	0.0822	0.337	0.154	[20]
PMN-PZT	-	0.226	-	[21]
PZT-5A	0.375	1.48	1.48	[22]
PZT-5H	0.349	0.319	1.21	[23]

출력 전력 특성이 증가하는 경향이 나타났으나, 가장 많은 전극층이 형성된 시편 E의 경우에는 출력 전력의 크기가 시편 D보다 오히려 감소하는 현상이 관찰되었다. 이는 접합과정에서 사용되는 에폭시의 불균일한 두께 및 접착 상태에 기인한 것으로 추정되나 보다 면밀한 분석을 위한 추가 실험이 요구된다.

4. 결론

본 연구에서는 PZT/Ag laminate를 이용하여 제조한 사다리꼴 PZT/Ag laminate 외팔보 발전기의 에너지 하베스팅 특성을 평가하기 위해 PZT/Ag laminate의 Ag 전극 층수를 변화시킨 시편을 제작하였다. 시편 A는 2개의 Ag 전극층이 삽입되었으며, B는 3개, C는 4개, D는 7개, E는 13개의 Ag 전극층이 존재한다. 주파수 응답 특성 결과 전극 층수가 증가함에 따라 출력 성능을 나타내는 동작 주파수 영역이 증가하여 진동 에

너지 하베스터의 주파수 사용 안정성을 높일 수 있음을 확인하였다. 최대 전력 효율을 비교하기 위해 공진주파수 환경에서 부하저항을 통한 임피던스 매칭 방식으로 출력되는 전력 특성 평가 결과 가장 높은 출력 특성을 나타내는 시편 D는 600 Ω 의 부하저항과 진동가속도 1.2 g 조건에서 출력전력 4.90 mW를 나타내었으며, 전력밀도 7.60 mW/cm³, normalized power factor 5.28 mW/g² · cm³로 높은 하베스터 특성을 나타내었다.

감사의 글

본 연구는 2018년도 산업통상자원부의 재원으로 한국 에너지기술평가원(KETEP)의 지원을 받아 수행한 에너지기술개발사업 연구 과제입니다(No.20182020700430).

REFERENCES

- [1] S. Chalasani and J. M. Conrad, *Proc. IEEE SoutheastCon 2008* (IEEE, Huntsville, USA, 2008) p. 442.
- [2] K. A. Cook-Chennault, N. Thambi, and A. M. Sastry, *Smart Mater. Struct.*, **17**, 043001 (2008). [DOI: <https://doi.org/10.1088/0964-1726/17/4/043001>]
- [3] N. J. Guilar, T. J. Kleeburg, A. Chen, D. R. Yankelevich, and R. Amirtharajah, *IEEE Trans. VLSI Syst.*, **17**, 627 (2009). [DOI: <https://doi.org/10.1109/TVLSI.2008.2006792>]
- [4] S. Li, J. Yuan, and H. Lipson, *J. Appl. Phys.*, **109**, 026104 (2011). [DOI: <https://doi.org/10.1063/1.3525045>]
- [5] R. Kashyap, T. R. Lenka, and S. Baishya, *IEEE Trans. Electron Devices*, **63**, 1281 (2016). [DOI: <https://doi.org/10.1109/TED.2015.2514160>]
- [6] H. S. Kim, J. H. Kim, and J. Kim, *Int. J. Precis. Eng. Manuf.*, **12**, 1129 (2011). [DOI: <https://doi.org/10.1007/s12541-011-0151-3>]
- [7] S. B. Kim, H. Park, S. H. Kim, H. C. Wickle, J. H. Park, and D. J. Kim, *J. Microelectromech. Syst.*, **22**, 26 (2013). [DOI: <https://doi.org/10.1109/JMEMS.2012.2213069>]
- [8] S. Du, Y. Jia, S. T. Chen, C. Zhao, B. Sun, E. Arroyo, and A. A. Seshia, *Sens. Actuators, A*, **263**, 693 (2017). [DOI: <https://doi.org/10.1016/j.sna.2017.06.026>]
- [9] C. J. Rupp, A. Evgrafov, K. Maute, and M. L. Dunn, *J. Intell. Mater. Syst. Struct.*, **20**, 1923 (2009). [DOI: <https://doi.org/10.1177/1045389X09341200>]
- [10] W. G. Ali and G. Nagib, *Proc. 2012 International Conference on Engineering and Technology (ICET)* (IEEE, Cairo, Egypt, 2012), p. 1.
- [11] T. Galchev, E. E. Aktakka, and K. Najafi, *J. Microelectromech. Syst.*, **21**, 1311 (2012). [DOI: <https://doi.org/10.1109/JMEMS.2012.2205901>]
- [12] L. Gu, *Microelectron. J.*, **42**, 277 (2011). [DOI: <https://doi.org/10.1016/j.mejo.2010.10.007>]
- [13] R. Hosseini and M. Hamed, *J. Micromech. Microeng.*, **25**, 125008 (2015). [DOI: <https://doi.org/10.1088/0960-1317/25/12/125008>]
- [14] S.M.K. Tabatabaei, S. Behbahani, and P. Rajaeipour, *Microsyst. Technol.*, **22**, 2435 (2016). [DOI: <https://doi.org/10.1007/s00542-015-2605-5>]
- [15] R. Hosseini, and M. Hamed, *Microsyst. Technol.*, **22**, 1127 (2016). [DOI: <https://doi.org/10.1007/s00542-015-2583-7>]
- [16] A. Shebeeb and H. Salleh, *Proc. 2010 IEEE International Conference on Semiconductor Electronics (ICSE2010)* (IEEE, Melaka, Malaysia, 2010), p. 275.
- [17] A. Loui, F. T. Goericke, T. V. Ratto, J. Lee, B. R. Hart, and W. P. King, *Sens. Actuators, A*, **147**, 516 (2008). [DOI: <https://doi.org/10.1016/j.sna.2008.06.016>]
- [18] M. S. Lee, C. I. Kim, J. S. Yun, W. I. Park, Y. W. Hong, J. H. Paik, J. H. Cho, Y. H. Park, and Y. H. Jeong, *J. Korean Inst. Electr. Electron. Mater. Eng.*, **30**, 768 (2017). [DOI: <https://doi.org/10.4313/JKEM.2017.30.12.768>]
- [19] N. Kong, D. S. Ha, A. Erturk, and D. J. Inman, *J. Intell. Mater. Syst. Struct.*, **21**, 1293 (2010). [DOI: <https://doi.org/10.1177/1045389X09357971>]
- [20] H. C. Song, C. Y. Kang, S. J. Yoon, and D. Y. Jeong, *Met. Mater. Int.*, **18**, 499 (2012). [DOI: <https://doi.org/10.1007/s12540-012-3018-y>]
- [21] M. A. Karami, O. Bilgen, D. J. Inman, and M. I. Friswell, *IEEE Trans. Ultrason. Eng.*, **58**, 1508 (2011). [DOI: <https://doi.org/10.1109/TUFFC.2011.1969>]
- [22] S. Roundy and P. K. Wright, *Smart Mater. Struct.*, **13**, 1131 (2004) [DOI: <https://doi.org/10.1088/0964-1726/13/5/018>]
- [23] D. Zhu, A. Almusallam, S. P. Beeby, J. Tudor, and N. R. Harris, *Proc. PowerMEMS 2010* (PowerMEMS, Belgium, 2010) p. 335.