

## Hard PZT IDE 유니몰프 캔틸레버의 압전 에너지 하베스팅 특성

이민선<sup>1,2</sup>, 김창일<sup>1</sup>, 윤지선<sup>1</sup>, 박운익<sup>1</sup>, 홍연우<sup>1</sup>, 조정호<sup>1</sup>, 백종후<sup>1</sup>,  
 박용호<sup>2</sup>, 장용호<sup>3</sup>, 최범진<sup>3</sup>, 정영훈<sup>1,a</sup>

<sup>1</sup> 한국세라믹기술원 전자소재부품센터

<sup>2</sup> 부산대학교 재료공학과

<sup>3</sup> (주)센볼 기술연구소

### Piezoelectric Energy Harvesting Characteristics of Hard PZT Interdigitated Electrode (IDE) Unimorph Cantilever

Min-seon Lee<sup>1,2</sup>, Chang-il Kim<sup>1</sup>, Ji-sun Yun<sup>1</sup>, Woon-ik Park<sup>1</sup>, Youn-woo Hong<sup>1</sup>,  
 Jeong-ho Cho<sup>1</sup>, Jong-hoo Paik<sup>1</sup>, Yong-ho Park<sup>2</sup>, Yong-ho Jang<sup>3</sup>,  
 Beom-jin Choi<sup>3</sup>, and Young-hun Jeong<sup>1,a</sup>

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

<sup>2</sup> Department of Material Science and Engineering, Pusan University, Pusan 46241, Korea

<sup>3</sup> Technology & Research Center, Senbool Corporation, Incheon 21639, Korea

(Received May 19, 2017; Revised June 13, 2017; Accepted June 29, 2017)

**Abstract:** A unimorph piezoelectric cantilever generator with an interdigitated electrode (IDE) was developed for vibration energy harvester applications driven in the longitudinal mode. Hard lead zirconate titanate (PZT) ceramic with a high  $Q_m$  of 1,280 was used as the piezoelectric active material. Ten PZT sheets produced by tape casting were laminated and co-fired with an Ag/Pd IDE at 1,050°C for 2 h. The approximately 280  $\mu\text{m}$ -thick co-fired PZT laminate with the IDE was attached to a stainless steel substrate with an adhesive epoxy for the fabrication of an IDE unimorph cantilever. Its energy harvesting characteristics were evaluated: an output power of 1.1  $\mu\text{W}$  at 120 Hz across the resistive load of 700  $\text{k}\Omega$  was obtained, corresponding to a normalized power factor of 4.1  $\mu\text{W}/(\text{G}^2 \cdot \text{cm}^3)$ .

**Keywords:** Hard PZT, Unimorph cantilever, Piezoelectric, Longitudinal vibration, Tape casting, Energy harvester

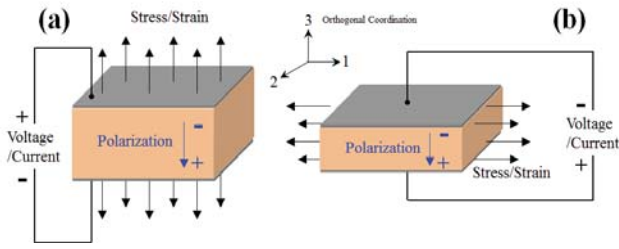
### 1. 서론

압전 에너지 하베스팅은 진동, 압력과 같은 기계적 에너지와 전기에너지를 상호 변환할 수 있는 압전 효과를 효율적으로 이용하는 대표적인 에너지 하베스팅

기술들 중 하나이다 [1-5]. 최근 사물인터넷(internet of things, IoT) 기술의 보급화로 초저전력 센서의 전원 공급 기술 수요가 증가하면서 공장, 발전소의 모터, 변압기, 컨베이어, 리액터, 컴프레서 등과 같은 전기설비물의 풍부한 진동 에너지를 이용하여 자체 설비물의 동작 상태를 모니터링하는 IoT 시스템의 센서 자가 전원 기술로 압전 에너지 하베스팅 기술이 주목받고 있다. 지금까지 수많은 압전 에너지 하베스터에 관한 연구가 이루어져 오고 있지만 여전히 낮은 에너지 변환 효율 문제는 상용화에 주요한 걸림돌로 인식되고 있다.

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

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.



**Fig. 1.** Schematics of (a) 3-3 mode and (b) 3-1 mode vibration mode for piezoelectric resonators.

압전 에너지 하베스터는 제조가 용이한 캔틸레버(cantilever) 구조가 일반적으로 활용되고 있다 [6-8]. 캔틸레버 구조는 굽힘 진동 모드(flexural vibration mode)를 주로 활용하기 때문에 수백 Hz 이하의 비교적 낮은 진동 주파수를 이용하는 압전 에너지 하베스팅 기술에 적용하기 매우 적합하다. 특히, 유니몰프 캔틸레버(unimorph cantilever)는 압전 변환 기능을 가지는 필름 소재가 탄성을 가지는 금속 shim의 위쪽 면에 부착된 구조로 진동 구조물의 한 끝단을 고정하고 이 진동 구조물의 고유 진동 주파수와 캔틸레버의 공진을 유도하기 위하여 고정되지 않은 다른 한 쪽 끝단을 적정한 질량체(proof mass)로 부착하게 된다 [9,10]. 압전 캔틸레버는 진동이 유발되면 고정되지 않은 캔틸레버 끝단의 proof mass에 의하여 shim이 위아래로 진동하면서 금속 shim의 굴곡 변형이 일어나면서 길이 방향으로 인장, 압축 변형(strain)이 유도된다. 이러한 길이 방향의 변형은 단단히 접합된 압전 필름 소재 면의 길이 방향으로 그대로 전달되어 기계적 변형을 유발하게 된다. 이를 통해 압전 소재는 전기-기계 커플링 효과에 의하여 전기 에너지로 변환된다.

압전 캔틸레버 구조의 에너지 하베스터는 그림 1(b)에서 보듯이 전기적으로 분극을 형성하고 있는 방향과 수직인 면으로 인가되는 stress/strain을 이용하는 3-1 진동 모드를 주로 활용하고 있으나 IDE (interdigitated) 전극을 이용하여 분극 방향과 동일한 방향으로 인가되는 stress/strain을 이용하면 그림 1(a)의 3-3 진동 모드를 구현할 수 있어 보다 우수한 에너지 하베스팅 성능을 기대할 수 있다 [11-13]. 이는 압전 소재의 압전 전하 상수(piezoelectric charge constant:  $d$ )와 에너지 변환 효율( $k^2$ )이 일반적으로  $|d_{33}| \approx |2d_{31}|$  과  $3k_{31}^2 \leq k_{33}^2 \leq 5k_{31}^2$ 의 특성을 가지기 때문이다. 여기서,  $k$ 는 전기기계결합계수(electromechanical coupling factor)를 나타낸다. 뿐만 아니라, 공진을 이용한 캔틸

레버 에너지 하베스터의 경우, 압전 소재의 성능지수 (figure of merit)를 나타내는 식 (1)에 따르면, 압전 소재의 탄성 용량(elastic compliance:  $s^E$ )과 반비례하나, 에너지 변환 효율 및 기계적 품질계수( $Q_m$ )에 비례하는 특성을 가지기 때문에 이들은 공진 주파수에서 동작하는 압전 캔틸레버 하베스터의 소재 설계에서 중요한 인자이다.

$$\text{Figure of Merit} = \frac{k_{33}^2 \times Q_m}{s_{33}^E} \quad (\text{on resonance}) \quad (1)$$

이에 본 연구에서는 높은  $Q_m$ 을 가지는 hard  $\text{Pb}(\text{Zr},\text{Ti})\text{O}_3$  (PZT)계 상용 세라믹 원료로 제조한 후막 압전 세라믹 필름을 이용하여 IDE 전극 구조의 유니몰프 캔틸레버를 제조하였다. 이를 이용하여 에너지 하베스터로의 응용 성능을 확인하기 위하여 미세구조 및 주파수 응답 특성(frequency response function, FRF)을 평가하였다.

## 2. 실험 방법

### 2.1 Hard PZT 후막 세라믹 제조

본 연구에서는 캔틸레버용 압전 세라믹 후막 필름을 제조하기 위하여 일반적으로 사용되는 테일 캐스팅 공정을 이용하였다. 사용된 원료는 hard PZT계 상용 압전 파우더(MPT, Hayashi Chemicals, Japan)를 이용하였으며, 16.5Φ 크기의 지름을 갖는 압전 세라믹 디스크(disk) 형태의 소결 시편의 압전 물성을 아래 표 1

**Table 1.** Piezoelectric properties of a sintered disk body using commercial piezoelectric material (MPT) produced from Hayashi Chemicals, Japan.

| Piezoelectric properties            | Values                                   |
|-------------------------------------|--|
| Sintering temperature               | 1,050 °C                                 |
| Density (g/cm <sup>3</sup> )        | 8  |
| Curie temperature                   | 290 °C                                   |
| Coupling coefficient ( $k_{33}$ )   | 61.1%                                    |
| Mechanical quality factor ( $Q_m$ ) | 1,280                                    |
| Elastic compliance ( $s_{33}^E$ )   | $20.2 \times 10^{-12}$ m <sup>2</sup> /N |
| $\epsilon_{33}^T/\epsilon_0$        | 1,398                                    |
| $\tan\delta$                        | 0.6%                                     |

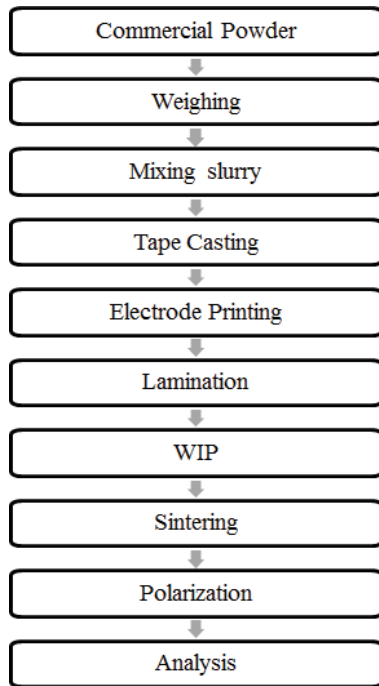


Fig. 2. Schematic of fabrication process for hard PZT laminate.

에 나타내었다.

테잎 캐스팅용 슬러리를 제조하기 위해 준비된 압전 파우더 분말에 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( $\phi = 3 \text{ mm}, 5 \text{ mm}, 10 \text{ mm}, 15 \text{ mm}$ ) 미디어를 이용하여 24시간 동안 혼합 분쇄하였으며, 망(mesh) 구조의 스크린(screen)을 이용해 혼합 슬러리를 균일한 크기로 체거름한 후, 진공 탈포기를 이용하여  $-760 \text{ mmHg}$  진공도로 1시간 동안 슬러리 내부의 기포를 제거하였다. 탈포된 슬러리는 테잎 캐스팅 장비(TCA-2000, Techgen, Korea)를 사용하여 닥터 블레이드(doctor blade)로 두께 약  $35 \mu\text{m}$ 의 그린 시트(green sheet)를 제조하였다 (그림 2 참조).

## 2.2 Hard PZT 유니몰프 캔틸레버

제조한 압전 후막 그린 시트의 표면에 3-3 모드 구

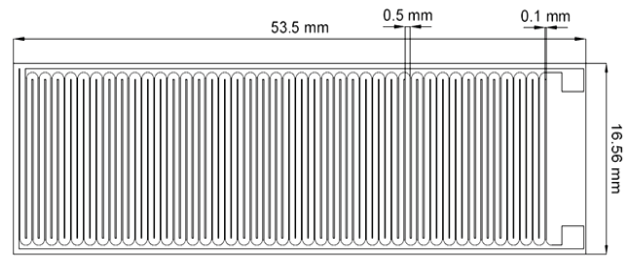
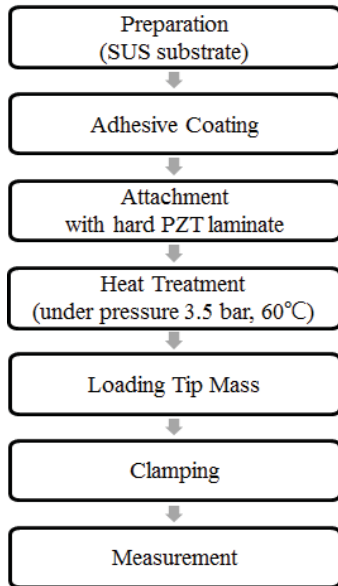


Fig. 3. Configuration of designed IDE pattern.

현을 위하여 그림 3과 같은 IDE 전극 패턴을 설계하였다. 이는  $100 \mu\text{m}$ 의 선폭과  $1,100 \mu\text{m}$ 의 간격을 가지는 전극 핑거(finger) 어레이와 직교하며 길이 방향으로 선형 연결 구성된 strip 구조를 갖는 comb 패턴 2개가 서로 마주보며,  $500 \mu\text{m}$ 의 IDE finger 간격을 갖는 IDE 구조로 전체 면적은  $16.56 \text{ mm}$  (너비)  $\times$   $53.5 \text{ mm}$  (길이) 크기를 이루는 IDE 패턴이 다수 형성된 프린팅용 스크린 마스크(ST325, Sejinmark, Korea)를 제작하였다. 스크린 마스크(screen mask)는 325 mesh,  $50 \mu\text{m}$ 의 opening size 규격을 가지며, 전극으로는  $1,050^\circ\text{C}$ 에서 동시 소성이 가능한 Ag/Pd(7:3) 페이스트 (WT-SPD30-A, Winner Technology, Korea)를 사용하였다. IDE 패턴이 한 쪽 면에 인쇄된 2장의 압전 세라믹 그린 시트(green sheet)가 IDE 전극이 없는 시트 8장의 가장 위, 아래층에 놓이도록 겹쳐 놓은 후 (총 10장), 이를 라미네이터(Keko, Slovenia)로  $60^\circ\text{C}$ 에서  $13 \text{ MPa}$ 의 압력으로 적층하고  $250 \text{ bar}$ ,  $65^\circ\text{C}$ 에서 20분 동안 WIP (warm isostatic press) 처리한 후 다이싱(dicing)하여 IDE 패턴이 적용된 3-3 모드 압전 세라믹 적층형 그린 바디(green body)를 제조하였다. 내부와 외부 전극을 측면에서 서로 연결한 후 IDE 구조의 PZT laminate를  $1,050^\circ\text{C}$ 에서 2시간 동안 동시 소성하였다. 소성 후 수축된 시편의 IDE 핑거 간격을 고려하여  $2.5 \text{ V}/\mu\text{m}$ 의 전계 조건으로  $100^\circ\text{C}$ 에서 10분 동안 분극(polarization)을 실시하였다. 분극 처리된 제작 시편은  $0.3 \text{ mm}$  두께와  $15 \text{ mm}$  (너비),  $52 \text{ mm}$  (길이)의 크기를 가지는 SUS (stainless steel) 기판 상단에 완전히 부착되도록 에폭시를 도포한 후,  $3.5 \text{ bar}$ 로 가압 접착하여  $60^\circ\text{C}$ 에서 2시간 동안 경화 처리하였다. 그런 후, 탄성 기판의 한 쪽 끝 부분에  $3 \text{ g}$ 의 질량체 (tip mass)를 부착하여  $60 \text{ Hz}$ 의 공진 주파수를 가지도록 설계한 후, 최종적으로 3-3 진동 모드 구현이 가능한 Hard PZT 유니몰프 캔틸레버(unimorph cantilever)를 제조하였다 (그림 4 참조).



**Fig. 4.** Schematic of fabrication process for unimorph piezoelectric cantilever.

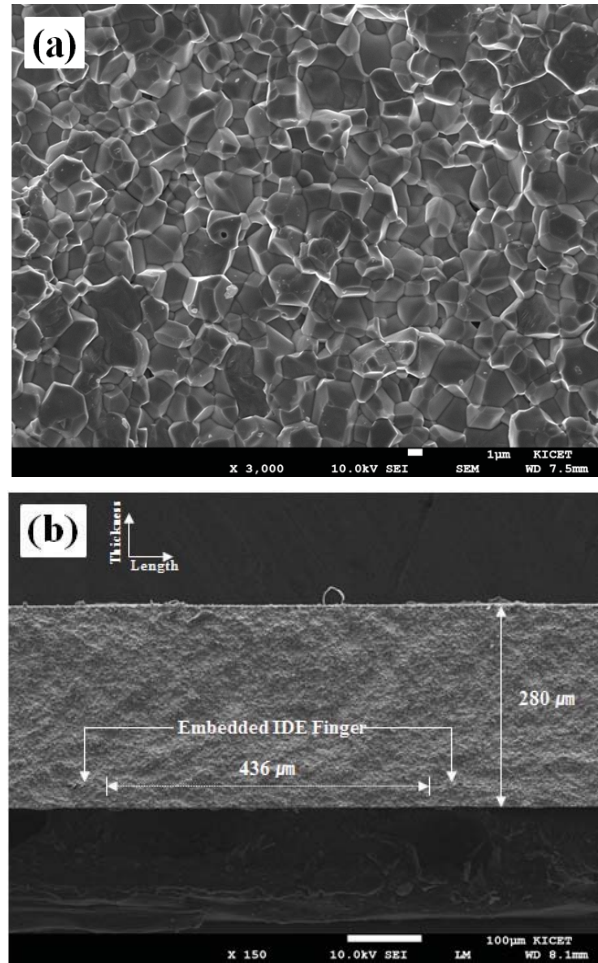
### 2.3 압전 에너지 하베스터 특성 평가

본 연구에서 제조된 hard PZT 유니몰프 압전 캔틸레버(piezoelectric cantilever)의 임피던스(impedance) 및 캐패시턴스(capacitance) 특성은 임피던스 분석기(E4990A, KEYSIGHT, USA)를 이용하였으며, 오실로스코프(Wavejet 322, LeCroy, Japan)와 shaker (Bruel & Kjaer, 4809, Denmark), 고속 bipolar amplifier (NF, HSA4014, USA), functional generator (Agilent, 33220A, USA), accelerometer (ACO, 3116, Japan)를 사용하여 인가 주파수 변화에 따른 출력 전압, 출력 전력, power density의 주파수 응답 특성을 도출하였다. 유니몰프 캔틸레버의 출력 전력( $P_{out}$ )은 부하저항( $R_{load}$ )에서의 출력 전압 ( $V_{out}$ )으로부터 아래 식 (2)를 이용하여 계산하였다.

$$P_{out} = \frac{V_{out}^2}{R_{load}} [W] \quad (2)$$

### 3. 결과 및 고찰

그림 5(a)와 (b)는 1,050°C에서 2시간 동안 동시 소



**Fig. 5.** (a) Surface and (b) cross-sectional FE-SEM images of the hard PZT laminate with Ag/Pd IDE electrode cofired at 1,050°C for 2 h.

성한 Ag/Pd IDE 전극 구조의 hard PZT laminate의 표면과 단면 부위의 FE-SEM 이미지를 각각 보여준다. 소성된 PZT 결정 입자는 약 2.1 μm 크기의 비교적 균일한 입도를 나타내었으며, 기공이 없는 치밀한 구조를 형성하고 있음을 알 수 있다. 총 10장의 PZT sheet로 적층된 시편은 소결 후 약 280 μm의 균일한 두께를 가지고 있으며, 꺾인 화살표가 나타내는 embedded IDE finger가 길이방향으로 각각 형성되었음을 관찰할 수 있다 (그림 5(b) 참조). 또한 동시 소성 후 길이 방향으로 크게 수축되어 IDE finger의 간격이 약 436 μm를 나타냄을 알 수 있으며, 동시 소성이 이루어지기 전, hard PZT 그린 시트 표면에 인쇄된 IDE 전극 구조의 핑거의 간격이 500 μm 이었던 것을 고려하면 1,050°C 동시 소성 공정을 통해 대략 13%의 수축률을

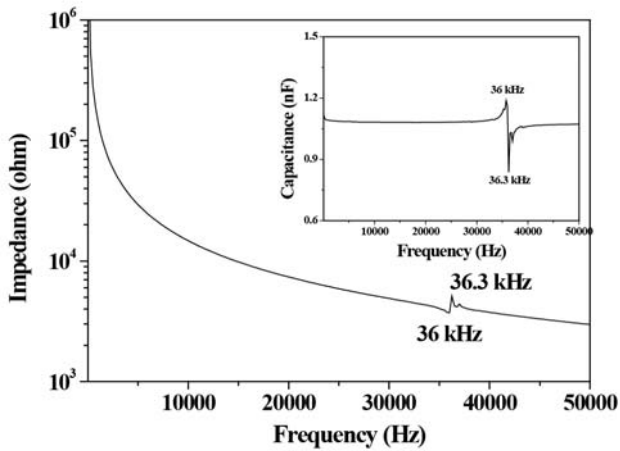


Fig. 6. Impedance and capacitance (inset) for the hard PZT laminate with IDE electrode as a function of frequency.

가짐을 알 수 있었다.

그림 6은 1,050°C에서 2시간 동안 동시 소성한 IDE 구조의 Hard PZT laminate의 주파수 변화에 따른 임피던스와 캐패시턴스(삽화)의 변화를 보여준다. 본 연구에서는 20 Hz에서 50 kHz의 인가 주파수 범위에서 측정하였다. 제조한 hard PZT laminate는 캐패시터 구조를 갖기 때문에 해당 주파수 범위에서 주파수가 증가함에 따라 임피던스가 지속적으로 감소하는 경향을 나타내었다. IDE 구조로 인하여 분극 방향은 IDE strip의 길이 방향으로 형성되기 때문에 교류 전기신호 인가 시 그림 1(a)에서 보여준 3-3 모드의 길이 방향으로 팽창 수축되는 진동 모드를 가지며, 36 kHz와 36.3 kHz에서 각각 공진(resonance) 및 반공진(antiresonance) 피크(peak)가 관찰되었다.

본 연구에서 제조한 IDE 구조의 Hard PZT laminate를 SUS 기판에 부착한 유니몰프 압전 캔틸레버의 실제 이미지를 그림 7에 나타내었다. Tip mass가 부착되지 않은 유니몰프 캔틸레버 구조로서 Ag/Pd IDE 패턴이 서로 마주하는 2개의 comb 구조를 형성한 채, 진한 갈색으로 보이는 소성한 PZT laminate의 표면에 균일하게 형성되었음을 확인할 수 있다. 또한, 제일 아래 쪽 면에 놓여있는 SUS 탄성 기판의 한 쪽 측면에는 2개의 hole을 관찰할 수 있으며, 이는 압전 에너지 하베스터의 특성을 평가하기 위하여 vibrator의 진동 환경에서 캔틸레버의 한 쪽 측면을 단단하게 고정하기 위한 스크루(screw) 볼트가 체결될 때 사용된다.

그림 8은 IDE 구조의 Hard PZT laminate를 active film으로 활용하는 유니몰프 압전 캔틸레버의 tip mass

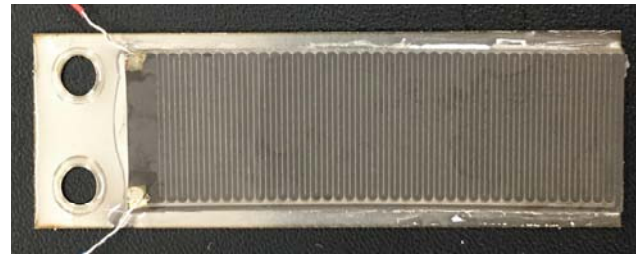


Fig. 7. Real picture of the fabricated tip-mass free unimorph piezoelectric cantilever with IDE electrode.

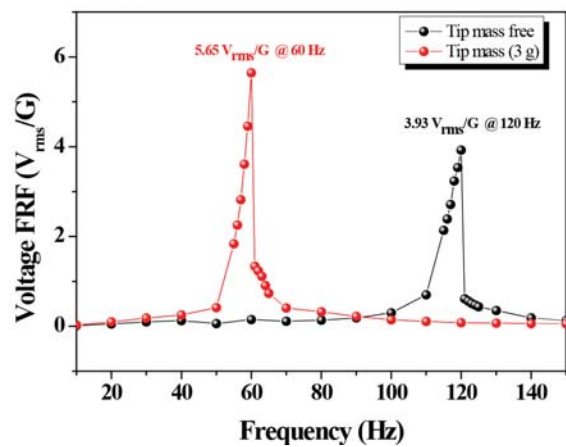


Fig. 8. Frequency response function of voltage for the fabricated unimorph piezoelectric cantilever with IDE electrode for tip-mass free and 3 g.

가 없는 경우와 3 g의 tip mass를 부착한 경우의 출력 전압의 주파수 응답 특성을 나타내고 있다. Tip mass가 없는 경우(tip mass free), 한 쪽 측면이 고정된 유니몰프 캔틸레버는 PZT laminate와 SUS 기판의 비대칭 구조로 인하여 120 Hz의 fundamental bending resonance frequency를 나타내었다. 이 때, 측정된 출력 전압은 vibrator의 진동 가속도( $G: 9.8 \text{ m/s}^2$ )를 표준화(normalization)하여 나타난 출력 전압의 실효값(root mean square, RMS)으로 약  $3.93 \text{ V}_{\text{rms}}/G$ 로 나타났다. 하지만, 약 3 g의 tip mass를 부착한 경우 bending resonance는 60 Hz로 줄어들었으며 출력 전압 특성은 약  $5.65 \text{ V}_{\text{rms}}/G$ 로 상승하였다.

본 연구에서 제작한 유니몰프 캔틸레버의 경우 tip mass의 존재 여부와 관계없이 bending resonance frequency 이후 측정된 출력 전압 크기는 급격히 감소하였음을 알 수 있다. 제조한 캔틸레버의 출력 전압 특성의 공진 주파수에서의 FWHM (full width at half

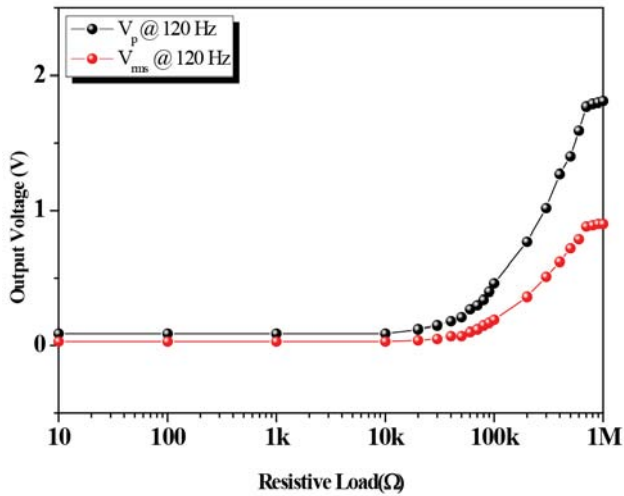


Fig. 9. Output voltage at 120 Hz under 1 G with a variety of resistive load for the tip-mass free unimorph piezoelectric cantilever.

maximum)는 약 4 Hz를 나타내었다.

그림 9는 120 Hz의 bending resonance frequency에서 Hard PZT laminate를 active film으로 활용하는 tip-mass가 없는 유니몰프 압전 캔틸레버의 부하 저항(resistive load)의 크기 변화에 따른 출력 전압의 변화를 보여주는 그래프이다. 피크 전압( $V_p$ )과 실효 전압( $V_{rms}$ )을 동시에 나타내었으며, 부하 저항의 크기는 10  $\Omega$ 에서 1 M $\Omega$ 까지 변화시켰다. 10 k $\Omega$ 까지는 1 G 가속도 환경에서 출력 전압의 변화가 전혀 나타나지 않았지만, 10 k $\Omega$  이후 부하 저항은 서서히 증가하기 시작하여 100 k $\Omega$  이후부터 700 k $\Omega$ 까지 급격히 증가하여 실효 출력 전압은 0.88 V 정도에 도달하였다. 이후, 출력 전압은 매우 미미하게 증가하는 경향을 나타내었으며, PZT laminate 캔틸레버에 1 G의 환경에서 생성된 전력은 약 700 k $\Omega$ 의 부하저항에서 임피던스 매칭이 이루어져 최대 진동 에너지를 전달하는 것으로 판단된다. 본 연구에서는 인가할 수 있는 가변 저항의 범위가 1 M $\Omega$ 으로 제한되어 있어 1 M $\Omega$  이상의 부하저항에서의 출력 특성은 확인할 수 없었다.

그림 10은 tip-mass가 없는 유니몰프 캔틸레버의 부하 저항을 변화시키면서 120 Hz, 1 G의 진동환경에서 평가한 출력 전력 특성을 나타낸다. 부하 저항의 변화에 따른 출력 전압 특성의 경향에서 예상하였듯이, 700 k $\Omega$ 의 부하 저항에서 출력 전력은 최대치를 나타내었으며, 실효 전력은 약 1.1  $\mu$ W의 크기를 나타내었다. 이는 가속도와 전력 밀도를 고려한 normalized

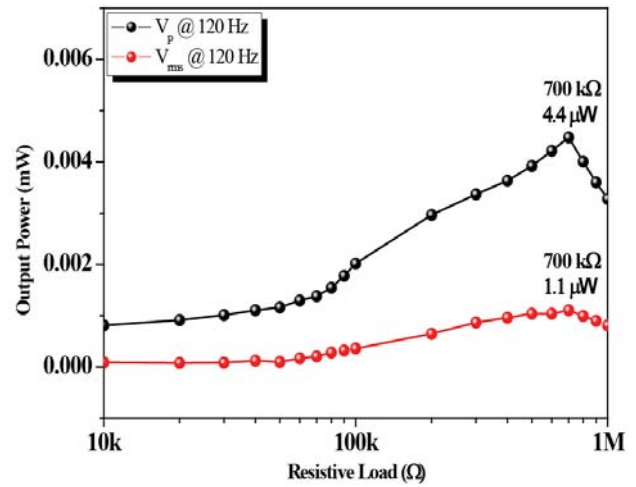


Fig. 10. Output power at 120 Hz with a variety of resistive load for the tip-mass free unimorph piezoelectric cantilever.

power factor로 환산하면, 약 4.1  $\mu$ W/G<sup>2</sup>·cm<sup>3</sup>를 나타낸다. 본 연구에서 제작한 hard PZT laminate를 이용한 유니몰프 캔틸레버의 출력 전력 특성은 이전에 보고한 soft PZT를 이용한 IDE 유니몰프 캔틸레버의 출력 전력(4.56 mW/G<sup>2</sup>·cm<sup>3</sup> @ 100 Hz)과 비교하여 매우 낮은 특성을 나타내었다 [14]. 압전소재의 성능지수는  $k^2$ 와  $Q_m$ 에 비례한다고 알려져 있다.  $k$ 의 경우, hard PZT와 soft PZT의 두 경우 모두 0.60~0.65 수준으로 큰 차이가 없었으나,  $Q$ 의 경우는 각각 1,280과 138로 hard PZT가 약 9.3배 크기 때문에 우수한 압전 에너지 하베스팅 특성을 나타낼 것으로 기대하였다. 하지만, 두 경우 모두 3-3 모드를 구현하기 위한 IDE 구조를 이용하였음에도 불구하고, 큰 출력 전력 특성 차이를 나타내는 이유는 hard PZT의 경우 soft PZT와 비교하여 상대적으로 낮은 유전율을 가져 높은 임피던스를 형성하기 때문이다. 또한, 본 연구에서의 hard PZT IDE 구조는 기 보고된 soft PZT 경우와 달리 최외부층 부위만 IDE 패턴이 형성되어 있어 상대적으로 낮은 캐패시턴스를 형성하며 이는 분극 공정에서 낮은 잔류 분극 형성으로 나타나 압전 변환 성능의 저하에 기여하게 된다. 뿐만 아니라, IDE 구조의 경우, 분극 공정에서 발생하게 되는 dead/transition area와 같은 길이 방향과 동일한 방향의 분극 도메인을 갖지 못하는 비활성 영역(inactive area)의 비율이 상대적으로 높게 형성될 경우, 역시 낮은 압전 에너지 변환 성능의 결과로 나타날 수 있다 [15-17].

#### 4. 결론

본 연구에서는 hard Pb(Zr,Ti)O<sub>3</sub>(PZT)계 상용 세라믹 원료를 이용하여 테잎 캐스팅 공정을 통해 압전 시트를 제조하였다. IDE 전극 구조를 이용하여 3-3 모드 구현이 가능한 hard PZT laminate를 또한 제조하였다. Ag/Pd IDE 전극 구조가 가장 위, 아래층에 위치한 10장의 sheet로 구성된 PZT laminate는 1050°C에서 2시간 동안 동시 소성을 통해 치밀한 미세구조의 소결체를 형성하였다. 이를 이용하여 SUS 기판에 부착한 IDE 전극 구조의 유니몰프 압전 캔틸레버를 제조하여 압전 에너지 하베스팅 특성을 평가하였다. 제조한 유니몰프 압전 캔틸레버는 tip-mass가 없는 경우, 120 Hz의 fundamental bending resonance frequency를 나타내었으며, 이 때, 3.93 V<sub>rms</sub>/G의 출력 전압의 실효값(root mean square; rms)을 나타내었다. 또한, 700 kΩ의 부하저항에서 임피던스 매칭이 이루어져 출력 전력은 최대치를 나타내었으며, 실효 전력은 약 1.1 μW (4.1 μW/G<sup>2</sup>·cm<sup>3</sup>)의 크기를 나타내었다. 본 연구에서 제작한 3-3 모드의 hard PZT laminate를 이용한 유니몰프 압전 캔틸레버의 에너지 하베스팅 특성은 soft PZT laminate를 이용한 유니몰프 압전 캔틸레버의 성능과 비교하여 낮은 유전율 및 낮은 캐패시턴스에 기인한 낮은 잔류 분극 특성으로 인하여 상대적으로 낮은 압전 에너지 변환 성능의 결과로 나타났다.

#### 감사의 글

본 연구는 2016년도 산업통상자원부의 재원으로 한국 에너지기술평가원 (KETEP)의 지원을 받아 수행한 에너지기술개발사업 연구 과제입니다 (No. 20151120100260 및 No.20152020104960).

#### REFERENCES

- [1] C. A. Howells, *Energy Convers. Manage.*, **50**, 1847 (2009). [DOI: <http://doi.org/10.1016/j.enconman.2009.02.020>]
- [2] H. A. Sodano, D. J. Inman, and G. Park, *J. Intell. Mater. Syst. Struct.*, **16**, 799 (2005). [DOI: <http://doi.org/10.1177/1045389X05056681>]
- [3] A. Erturk and D. J. Inman, *Smart Mater. Struct.*, **18**, 025009 (2009). [DOI: <http://doi.org/10.1088/0964-1726/18/2/025009>]
- [4] H. A. Sodano, G. Park, and D. J. Inman, *Strain*, **40**, 49 (2004). [DOI: <http://doi.org/10.1111/j.1475-1305.2004.00120.x>]
- [5] W. Wang, J. Cao, C. R. Bowen, S. Zhou, and J. Lin, *Energy*, **118**, 221 (2017). [DOI: <http://doi.org/10.1016/j.energy.2016.12.035>]
- [6] R. Hosseini, M. Hamed, J. Im, J. Kim, and J. Dayou, *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing*, **18**, 415 (2017). [DOI: <http://doi.org/10.1007/s12541-017-0050-3>]
- [7] N. Chen, H. J. Jung, H. Jabbar, T. H. Sung, and T. Wei, *Sens. Actuators, A: Physical*, **254**, 134 (2017). [DOI: <http://doi.org/10.1016/j.sna.2016.12.006>]
- [8] L. Jin, S. Gao, X. Zhou, and G. Zhang, *Microsyst. Technol.*, (2017). [DOI: <http://doi.org/10.1007/s00542-016-3261-0>]
- [9] 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: <http://doi.org/10.1016/j.jeurceramsoc.2012.09.001>]
- [10] K. B. Kim, D. Song, Y. H. Jeong, J. H. Paik, S. Nahm, H. J. Kim, and T. H. Sung, *J. Electroceram.*, **34**, 109 (2015). [DOI: <http://doi.org/10.1007/s10832-014-9958-5>]
- [11] M. Colin, Q. Mortier, S. Basrour, and N. Bencheikh, *J. Phys. Conf. Ser.*, **476**, 012135 (2013). [DOI: <http://doi.org/10.1088/1742-6596/476/1/012135>]
- [12] T. B. Xu, E. J. Siochi, J. H. Kang, L. Zuo, W. Zhou, X. Tang, and X. Jiang, *Smart Mater. Struct.*, **22**, 065015 (2013). [DOI: <http://doi.org/10.1088/0964-1726/22/6/065015>]
- [13] Q. Q. Zhang, S. J. Gross, S. Tadigadapa, T. N. Jackson, F. T. Djuth, and S. Trolier-McKinstry, *Sens. Actuators, A: Physical*, **105**, 91 (2003). [DOI: [http://doi.org/10.1016/S0924-4247\(03\)00068-2](http://doi.org/10.1016/S0924-4247(03)00068-2)]
- [14] M. S. Lee, C. I. Kim, J. S. Yun, W. 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.*, **30**, 263 (2017). [DOI: <http://doi.org/10.4313/JKEM.2017.30.5.263>]
- [15] W. Becker and W. S. Kreher, *Comput. Mater. Sci.*, **26**, 36 (2003). [DOI: [http://doi.org/10.1016/S0927-0256\(02\)00390-7](http://doi.org/10.1016/S0927-0256(02)00390-7)]
- [16] B. B. Nielsen, M. S. Nielsen, and I. F. Santos, *J. Intell. Mater. Syst. Struct.*, **28**, 78 (2017). [DOI: <http://doi.org/10.1177/1045389X16642537>]
- [17] R. R. Knight, C. Mo, and W. W. Clark, *J. Electroceram.*, **26**, 14 (2011). [DOI: <http://doi.org/10.1007/s10832-010-9621-8>]