

## IDT 전극 패턴 임베디드 압전 에너지 하베스터의 특성

이민선<sup>1,2</sup>, 김창일<sup>1</sup>, 윤지선<sup>1</sup>, 박운익<sup>1</sup>, 홍연우<sup>1</sup>, 백종후<sup>1</sup>, 조정호<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

### Energy Harvesting Characteristics of Interdigitated (IDT) Electrode Pattern Embedded Piezoelectric Energy Harvester

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>, Jong Hoo Paik<sup>1</sup>, Jeong Ho Cho<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 July 13, 2016; Revised July 26, 2016; Accepted August 1, 2016)

**Abstract:** Piezoelectric thick films of a soft Pb(Zr,Ti)O<sub>3</sub> (PZT) based commercial material were produced by a conventional tape casting method. Thereafter, the interdigitated (IDT) Ag-Pd electrode pattern was printed on the 25  $\mu\text{m}$  thick piezoelectric film at room temperature. Co-firing of the 10-layer laminated piezoelectric thick films was conducted at 1,100°C and 1,150°C for 1 h, respectively. Piezoelectric cantilever energy harvesters were successfully fabricated using the IDT electrode pattern embedded piezoelectric laminates for 3-3 operation mode. Their energy harvesting characteristics were investigated with an excitation of 120 Hz and 1 g under various resistive loads (ranging from 10 k $\Omega$  to 200 k $\Omega$ ). A parabolic increase of voltage and a linear decrease of current were shown with an increase of resistive load for all the energy harvesters. In particular, a high output power of 3.64 mW at 100 k $\Omega$  was obtained from the energy harvester (sintered at 1,150°C).

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

### 1. 서 론

지난 수십 년 동안 배터리를 대체하기 위한 에너지

기술로서 압전을 이용한 에너지 하베스터에 관한 연구는 재료(세라믹, 폴리머, 복합체 등), 부품(유니몰프, 바이몰프, 멀티몰프 등), 회로(SSD, SCE, SSHI 등)와 같은 에너지 하베스팅 요소 기술 전 분야에 걸쳐 다양하게 연구 개발이 이루어져 왔다 [1-6]. 특히, 압전재료 분야에 있어서, 전통적으로 사용되어 오던 BaTiO<sub>3</sub>, Pb(Zr,Ti)O<sub>3</sub>계 세라믹 소재나 PVDF (polyvinylidene difluoride)계 유기소재에 관한 연구는 물론, 나노 기

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

Copyright ©2016 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.

술을 이용한 ZnO 같은 반도체 압전 소재는 상합성과 제조 공정이 용이한 장점으로 인하여 수많은 연구가 이루어져 왔다 [7-11]. 심박 조율기(pace maker), 혈압 측정 센서와 같은 의료 산업 응용을 타겟으로 한 나노 디바이스의 개발은 단위 면적당 높은 에너지 출력력을 보고하며, 압전 에너지 하베스팅 기술의 상용화에 대한 기대 수요를 높였다. 그럼에도 불구하고, 압전 에너지 하베스팅 기술은 여전히 낮은 에너지 변환 효율로 인하여 상용화 측면에서 만족스러운 솔루션을 제시하지 못하고 있다.

압전 에너지 하베스터를 제조함에 있어 에너지 변환 효율을 개선하기 위한 방법은 주로 높은 에너지 밀도 특성을 갖는 소재의 개발에 집중되어 왔다. 즉, 소재의 기계적 에너지를 전기적 에너지로 변환하는 물성을 나타내는 지표인  $d \times g$  ( $d$ : piezoelectric strain constant,  $g$ : piezoelectric voltage constant)의 향상을 위한 연구가 많이 이루어졌다 [12-14]. 이는 소재 내부에 형성된 압전 도메인(domain)의 분포량과 상대 유전율의 크기 등에 의해 결정되는 인자로서, 소재의 고유한(intrinsic) 물성과 밀접한 관계가 있다. 하지만, 소재 이외의 외적인(extrinsic) 구조, 예로서 전기기계 변환 모드의 제어는 압전 에너지 하베스터의 에너지 변환 효율을 개선할 수 있는 방법이 될 수 있다. 즉, 압전 소재의 구조 형상에 따른 전극 구조를 제어하면서 에너지 변환 효율을 개선하는 것이다. 일반적으로 활용되고 있는 진동 에너지 하베스터의 압전 캔틸레버(cantilever) 구조는 압전체의 위·아래 표면 전면에 전극이 도포되어 캔틸레버 shim의 길이 방향으로 인가된 인장, 압축 스트레스에 대응하여 두께 방향으로 생성되는 전하량의 변화를 활용하는 3-1 모드가 활용되고 있다 [15-17]. 에너지 하베스터의 공진 조건에서 성능지수(figure of merit)는 아래 식 (1)에서 보듯이, 컵플라이언스 ( $s$ )에 반비례하나 기계품질계수( $Q_m$ )와 에너지 변환 효율 ( $k^2$ )에 비례하는 특성을 가진다 [18].

$$Figure\ of\ Merit = \frac{k_{31}^2 \times Q_m}{s_{11}^E} \quad (on\ resonance) \quad (1)$$

그러나, 표 1에서 보듯이 대부분 압전 세라믹 소재의 전기기계결합계수( $k$ )는 텐서(tensor)의 경우 3-1 모드 보다 3-3 모드에서 거의 두 배에 가까운 훨씬 우수한 특성을 나타내고 있다. 따라서 동일한 압전 소재를 활용할 경우, 3-1 모드 보다는 3-3 모드를 활용할 때 높은 에너지 변환 효율( $k^2$ ) 특성을 기대할 수 있어

**Table 1.** Comparison of piezoelectric properties of various commercial piezoelectric materials.

| Properties                 | Soft PZT materials |                |               | Hard PZT materials |              |
|----------------------------|--------------------|----------------|---------------|--------------------|--------------|
|                            | PIC151<br>[19]     | PIC255<br>[19] | PZT5H<br>[20] | PIC181<br>[19]     | PZT8<br>[20] |
| $k_{31}$                   | 0.38               | 0.35           | 0.388         | 0.32               | 0.30         |
| $k_{33}$                   | 0.69               | 0.69           | 0.752         | 0.66               | 0.64         |
| $Q_m$                      | 100                | 80             | 65            | 2000               | 1000         |
| $S_{11}^E$<br>( $pm^2/N$ ) | 15                 | 16.1           | 16.5          | 11.8               | 11.5         |
| $S_{33}^E$<br>( $pm^2/N$ ) | 19                 | 20.7           | 20.7          | 14.2               | 13.5         |

공진 구조 설계 시 에너지 하베스터의 성능지수를 개선할 수 있을 것으로 예상된다.

이에 본 연구에서는 테일 캐스팅 공정을 이용하여 압전체 후막을 제조한 후, 스크린 프린팅 공정을 이용하여 3-3 모드 동작 구현이 가능한 IDT (interdigitated) 패턴의 전극을 인쇄하였으며, 동시 소성 공정을 통해 적층형 압전 소자를 제조하였다. 이를 이용하여 특정 주파수에서 공진이 가능한 캔틸레버 구조의 IDT 전극 패턴 임베디드 압전 에너지 하베스터를 설계 및 제작하였으며, 이의 전기적 출력 특성 및 주파수 의존성 등의 에너지 하베스팅 특성을 평가하였다.

## 2. 실험 방법

### 2.1 압전 후막 세라믹 제조

본 연구에서는 압전 세라믹 후막을 제조하기 위하여 일반적으로 사용되는 테일 캐스팅 공정을 이용하였다. 사용된 원료 분말은 soft계 압전 소재로 아래 표 2에서와 같이 우수한 압전물성을 가지는  $Pb(Zr,Ti)O_3$ 계 상용 압전 파우더 (S55, Sunnytec, Taiwan)를 이용하였다.

테일 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.

**Table 2.** Piezoelectric properties of commercial piezoelectric material (S55) from Sunnyspec Electronics, Taiwan.

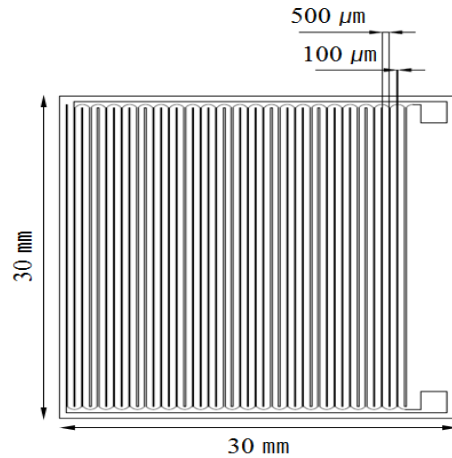
| Piezoelectric Properties                    | Values                                   |
|---|--|
| Curie temperature ( $T_c$ )                 | 170°C                                    |
| Coupling coefficient ( $k_{33}$ )           | 65%                                      |
| Mechanical quality factor ( $Q_m$ )         | 55                                       |
| Piezoelectric charge constant ( $d_{33}$ )  | $750 \times 10^{-12}$ C/N                |
| Piezoelectric voltage constant ( $g_{33}$ ) | $18.4 \times 10^{-3}$ Vm/N               |
| Elastic constant ( $s_{33}^E$ )             | $32.7 \times 10^{-12}$ m <sup>2</sup> /N |

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 이용하여 -760 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 25  $\mu\text{m}$ 의 그린 시트(green sheet)를 제조하였으며 너비와 길이를 각각 15 cm, 20 cm로 절단하였다.

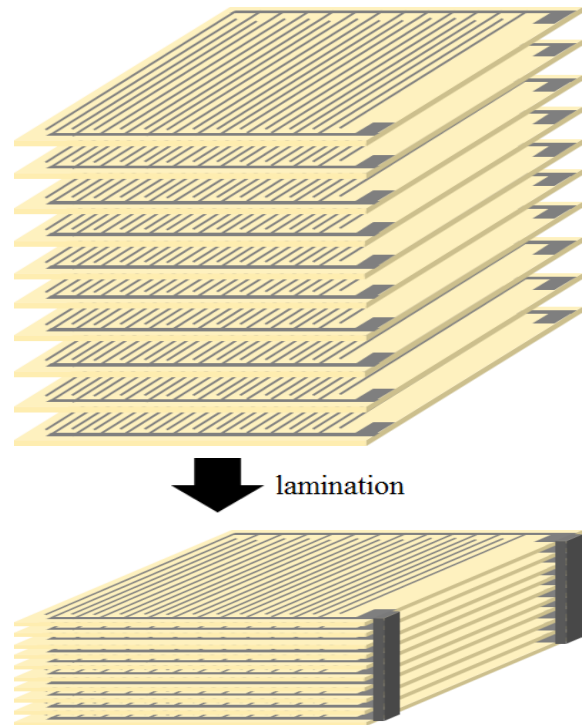
## 2.2 IDT 전극 패턴 임베디드 압전 하베스터 제조

제조한 압전 후막 그린 시트의 표면에 3-3 모드 구형을 위한 IDT 전극 패턴을 인쇄하기 위하여 100  $\mu\text{m}$ 의 선폭과 500  $\mu\text{m}$ 의 선 간격을 가지는 30 mm (가로)  $\times$  30 mm (세로)의 크기의 IDT 전극 패턴을 설계 및 프린팅용 스크린 마스크(Sejinsmark, Korea)를 제작하였다 (그림 1). 해당 스크린 마스크(screen mask)는 325 mesh, 50  $\mu\text{m}$ 의 opening size 규격을 가지며, 전극으로는 압전 파우더의 소성 온도를 고려하여 30%의 팔라듐(Pd) 성분이 함유된 은(Ag) 페이스트(WT-SPD30-A, Winner Technology, Korea)를 사용하였다.

전극이 인쇄된 10장의 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 30 mm (가로)  $\times$  30 mm (세로)의 크기를 갖는 IDT 전극 패턴 임베디드 적층형 압전 세라믹 소자를 제조하였다 (그림 2). 내부와 외부 전극을 측면에서 서로 연결한 후 1,100°C에서 1,150°C까지 1시간 동안 열처리 공정을 수행하였으며, 동시 소성된 각 시편



**Fig. 1.** Designed IDT electrode pattern image.



**Fig. 2.** Schematic diagram of lamination for the IDT electrode pattern embedded piezoelectric thick film.

은 소결 후 IDT 전극 패턴의 선 간격을 고려하여 2.5 V/ $\mu\text{m}$ 의 전계 조건으로 상온에서 30분 동안 분극(polarization)을 실시하였다.

IDT 전극 패턴 임베디드 적층형 압전 세라믹 소자는 캔틸레버 구조를 갖는 압전 에너지 하베스터를 제작하

기 위하여 500  $\mu\text{m}$  두께와 37 mm (너비)  $\times$  61 mm (길이)의 크기를 가지는 SUS (stainless steel) 재질의 metal shim의 한쪽 면에 완전히 부착되도록 에폭시를 도포하여 상온에서 접착하였다.

### 2.3 특성평가

본 연구에서 제조된 IDT 전극 패턴 임베디드 적층형 압전 세라믹 소자의 표면 및 미세구조를 관찰하기 위하여 FE-SEM (JSM-7610F, JEOL, Japan)을 이용하였다. 제작한 압전 하베스터의 출력 전력 특성을 평가하기 위하여 shaker (Bruel & Kjaer, 4809, Denmark), 고속 bipolar amplifier (NF, HSA4014, USA), functional generator (Agilent, 33220 A, USA), accelerometer (ACO, 3116, Japan)를 사용하였으며, 부하 저항에서 주파수 특성에 따른 출력 전압과 전류의 크기를 디지털 파워미터 (Yokokawa, WT310, Japan)를 이용하여 측정하였으며, 이로부터 제조한 IDT 전극 패턴 임베디드 적층형 압전 에너지 하베스터의 전기적 출력 특성을 평가하였다.

### 3. 결과 및 고찰

그림 3은 1,100°C에서 한 시간 동안 소결한 적층형 압전 세라믹 후막 소자의 앞면, 측면 및 뒷면을 각각 보여주고 있다. 양면 모두 인쇄된 IDT 전극 패턴과 압전체 표면과의 명확한 경계가 관찰되었으며 IDT 패턴을 형성하고 있는 모든 각 선은 균일한 선폭과 선 간격을 유지하고 있는 것으로 관찰되었다. IDT 전극 패턴은 두 개의 전극이 깎지형으로 서로 맞물려 동일한 평면 위에 배치되어 있는 구조로 전기적으로 상호 개방(open)되어 있다. 시편의 내부에 내장된 IDT 전극 패턴과 표면에 노출되어 있는 외부 IDT 전극 패턴을 연결하는 터미네이션(termination) 공정은 양 끝단 전극 라인의 상부 끝에 위치한 가로, 세로 각각 2 mm 크기의 사각 전극 패드 부분의 측면에 이루어져 있다. 1,100°C의 고온에서 소결 후 시편은 가로와 세로 축 방향으로 각각 13.9%, 15.6%의 수축률을 나타내었으며, 두께는 21  $\mu\text{m}$ 의 크기를 나타내었다. 그림 3의 side view에서 확인할 수 있듯이 적층 소자 시편의 측면은 매우 편평한 구조로서, 뒤틀림(warping) 현상이나 배불림(camber) 현상 같은 구조적 결함은 전혀 관찰되지 않았으며, 이러한 결함은 1,150°C에서 소결한 적층형 압전 세라믹 소자에서도 관찰되지 않았다.

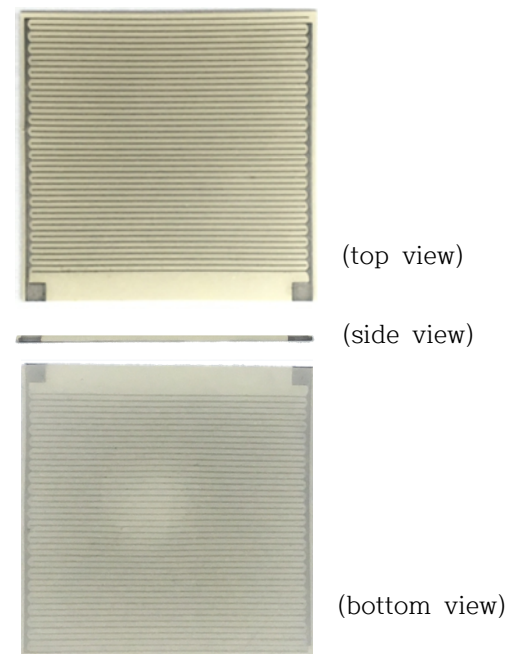
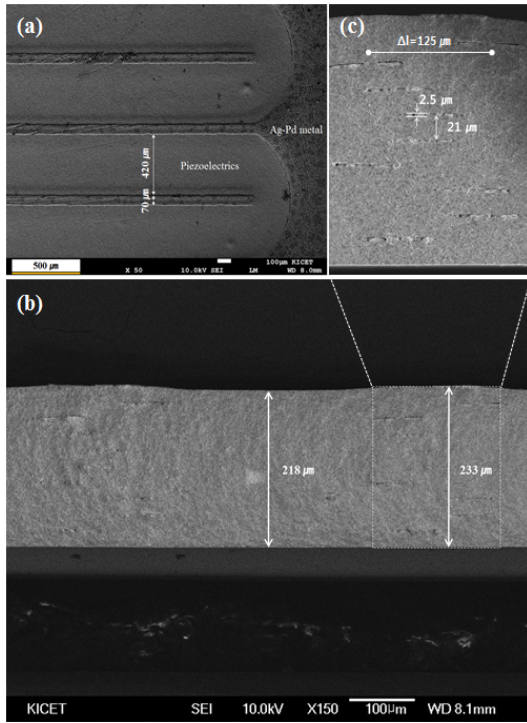


Fig. 3. IDT electrode pattern embedded piezoelectric thick film sintered at 1,100°C for 1 h.

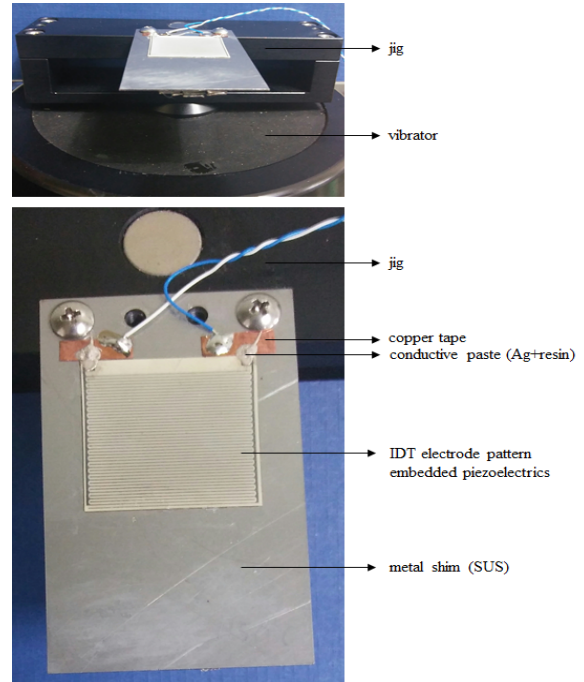
그림 4(a)는 1,100°C에서 한 시간 동안 소결한 적층형 압전 세라믹 후막 소자의 표면 일부분을 관찰한 FE-SEM 이미지를 나타낸다. 스크린 프린팅 공정으로 인쇄된 IDT 전극 패턴이 설계한 패턴 형상대로 뚜렷하게 형성되어 있는 것으로 관찰되었다. 하지만 100  $\mu\text{m}$ 의 선폭과 500  $\mu\text{m}$ 의 선 간격으로 설계된 IDT 전극 패턴은 1,100°C에서 소결 공정을 거치는 동안 선폭은 70  $\mu\text{m}$ , 선 간격은 420  $\mu\text{m}$ 로 각각 수축되었음을 확인하였다. 또한, 동시 소성 공정을 위해 사용된 Ag-Pd 전극은 열처리 과정에서 흔히 발생하는 응집(agglomeration) 현상이 나타나지 않고 치밀한 패턴을 이루고 있음을 알 수 있다. 그림 4(b)는 동일 시편의 단면 미세구조를 보다 면밀히 관찰하기 위하여 IDT 전극 패턴의 전극 line이 정렬하고 있는 방향의 수직 방향으로 절단한 시편의 단면 FE-SEM 이미지이다. 제작한 적층형 압전 후막은 총 10 층의 단위 압전 세라믹 층으로 이루어져 있으며, IDT 패턴 임베디드 전극 line이 각 층 구조에서 안정적으로 형성되어 있음을 확인할 수 있었다. 각 전극 라인의 두께와 너비는 광학 현미경으로 표면에서 관찰된 전극 라인의 크기와 동일한 결과를 얻을 수 있었다. 하지만, 그림 3의 광학 현미경에서 관찰되진 않았지만, 제조한 시편은 흰색 점선 사각형으로 표시한



**Fig. 4.** (a) Surface and (b) cross-sectional FESEM images of the IDT electrode pattern embedded multi-layered piezoelectric thick film sintered at 1,100°C for 1 h ((c) shows an enlarged image of white spotted rectangular area).

233 μm 두께의 (c) 영역 (IDT 패턴의 각 전극 라인이 적층 형성된 영역 확대)과 218 μm 두께의 압전체 층만의 적층 영역과 최대 약 15 μm 정도의 두께 편차를 나타내었다. 또한 (c) 영역에서 각 층별 IDT 패턴의 각 전극 라인의 위치가 가로 방향으로 조금씩 shift되어 있고 최대로 이격되어 위치한 두 전극 라인의 중심 간 거리 편차(Δl)는 최대 125 μm의 크기를 나타내었다. 두께 방향의 편차는 약 2.5 μm의 두께와 70 μm의 너비를 가지는 전극 line의 불균일한 적층 구조에 기인한 것이며, 가로 방향의 편차는 라미네이션(lamination) 공정에서 발생한 것으로, 각 압전 시트의 IDT 전극 패턴 정렬(alignment)을 위해 인쇄된 reference hole의 위치가 동일하게 설정되었음에도 불구하고 라미네이션 시 수직 하중이 인가되면서 각 시트별 횡방향으로 밀리는 현상에 기인한 것으로 추정된다.

1,100°C, 1,150°C에서 각각 소결한 적층형 압전 세라믹 후막 소자를 이용한 캔틸레버 구조의 IDT 전극 패턴 임베디드 에너지 하베스터를 제작하였다.



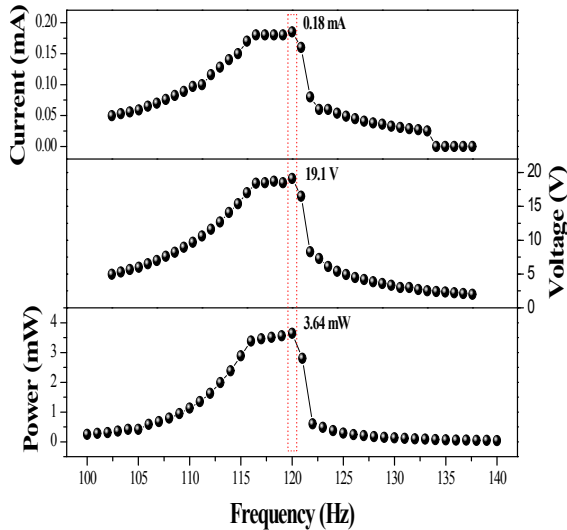
**Fig. 5.** Image of the fabricated cantilever energy harvester using the IDT electrode pattern embedded in the multi-layered piezoelectric thick films co-fired at 1,100°C for 1 h.

제작한 에너지 하베스터의 진동 환경에서 도출 가능한 에너지 하베스팅 성능을 극대화하기 위하여 캔틸레버 구조의 공진 주파수 합수를 통해 shim의 끝단에 적절한 tip mass를 부착하였다. 일반적으로 스프링 구조의 캔틸레버가 가지는 공진주파수 ( $f_r$ )는 아래 식 (2)와 같은 관계식을 가진다. 여기서, E는 탄성계수, I는 관성 모멘텀, l은 캔틸레버 빔의 길이, m은 캔틸레버 몸체 (body)의 질량을 의미한다.

$$f_r = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{3EI}{l^3m}} \quad (2)$$

본 연구에서는 제조한 캔틸레버 구조의 진동에너지 하베스터의 설계 주파수는 산업용 진동 구조물에 적용하기 위하여 120 Hz에 최적화되도록 설계 및 제조하였다. 사용된 metal shim의 크기는 37 mm (너비) × 61 mm (길이) × 0.5 mm (두께)를 가지며 고정되지 않은 측면 끝단에 0.8 g의 proof mass를 부착한 후 1 G (gravity, 중력 가속도)의 가진 조건에서 120 Hz의 공진주파수를 가짐을 확인하였다.

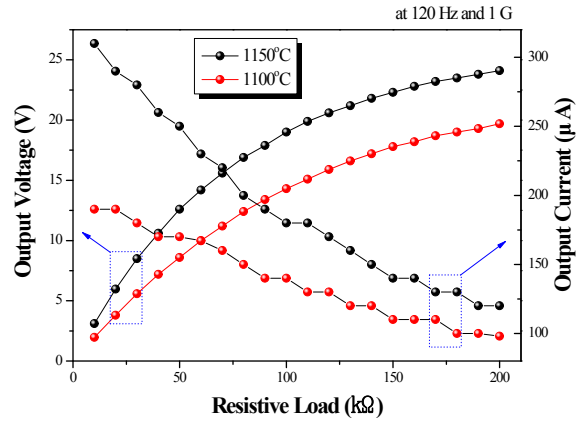




**Fig. 6.** Frequency response of the IDT electrode pattern embedded piezoelectric energy harvester using the multi-layered piezoelectric thick films co-fired at  $1,100^{\circ}\text{C}$  with a proof mass of 0.8 g under 1 G of applied force.

그림 5에서 실제로 제조한 IDT 전극 패턴 임베디드 적층형 압전 세라믹 소자( $1,100^{\circ}\text{C}$  소결)를 이용한 캔틸레버 에너지 하베스터의 외형을 보여주고 있다. 그림 5의 위쪽 사진은 가진기(vibrator) 상단에 설치된 지그(jig)에 한 쪽 측면이 고정된 에너지 하베스터의 약간 기울어진 이미지를 보여주고 있으며 그림 5의 아래쪽 사진은 가진기 지그에 장착된 에너지 하베스터의 위에서 바라본 모습이다. 압전 소자의 표면에 형성된 IDT 전극 패턴을 확인할 수 있으며, IDT 전극 패턴의 양쪽 끝단에 위치한 사각형 전극 패드는 가진기의 교류 전기 신호, 즉 120 Hz, 1 G의 sine 파동 신호에서 발생하는 진동에너지로부터 압전 소자에서 발생하는 전기 신호를 측정하기 위하여 SUS shim에 부착된 전도성 구리(Cu) 필름을 이용하여 Ag/resin 혼합 전도성 페이스트를 각각 도포하여 전기적으로 연결하였다. 이는 일반적으로 사용되는 납(Pb) 솔더(solder)를 이용하여 압전체 표면에 금속 wire를 직접 연결 시 공진 조건과 같은 반복되는 진동 환경에서 쉽게 탈리되는 현상을 막기 위함이다.

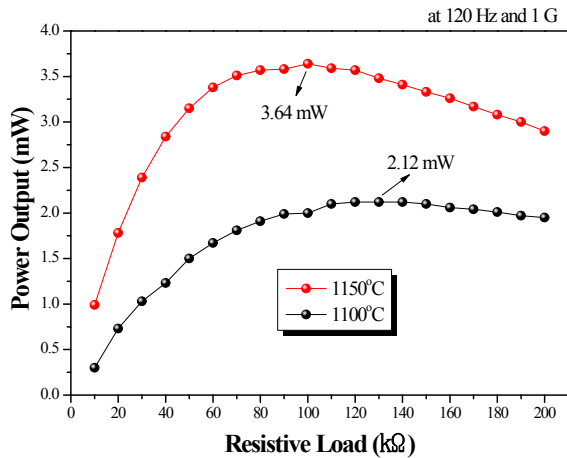
그림 6은  $1,150^{\circ}\text{C}$ 에서 소결한 적층형 압전 세라믹 후막 소자를 이용하여 제조한 캔틸레버 에너지 하베스터의 100 Hz에서 140 Hz까지 주파수 변화에 따른 출력 전류, 전압, 전력의 크기를 각각 보여주고 있다.



**Fig. 7.** Output voltage and output current dependant on resistive load at 120 Hz and 1 G for the IDT electrode pattern embedded piezoelectric energy harvester.

이미 언급하였지만, 에너지 하베스터의 공진 주파수는 proof mass의 조절을 통해 0.8 g의 조건에서 120 Hz에 최적화되도록 구조 설계를 하였기 때문에 주파수 변화에 따른 하베스터의 출력 성능 최대치 (전류: 약 0.18 mA, 전압: 약 19.1 V, 전력: 약 3.64 mW)는 120 Hz에서 나타났다. 압전 소자의 소결 온도의 차이에 따라 시편의 수축률을 차이가 낮음에도 불구하고 제조한 에너지 하베스터의 공진 주파수는 모두 120 Hz를 나타낸 것으로 보아 공진 주파수는 metal shim의 dimension에 상당히 의존하는 것으로 판단된다. 통상적으로 캔틸레버 구조를 이용한 진동 에너지 하베스터는 진동 주파수가 공진 주파수로부터  $\pm 10\%$ 를 초과하여 벗어나면 출력 전력이 80~90%까지 급격히 감소하는 특성을 가진다. 본 연구에서 제작한 에너지 하베스터는 공진 주파수를 중심으로 출력 전력의 패턴이 대칭적인 구조를 형성하지 않고, 115 Hz까지 급격히 증가한 후 포화되어 공진 주파수인 120 Hz까지 완만하게 증가하다가 120 Hz 이후부터 출력 전력 특성이 급격히 저하되는 패턴을 나타내었다. 이러한 주파수 broadening 현상은 주파수 sweep 과정에서 캔틸레버를 jig에 고정하는 볼트 나사의 아주 미세한 풀림 현상에 기인한 것으로 판단된다.

그림 7은  $1,100^{\circ}\text{C}$ ,  $1,150^{\circ}\text{C}$ 에서 각각 동시 소성한 IDT 전극 패턴 임베디드 적층형 압전 세라믹 소자를 이용하여 제조된 캔틸레버 에너지 하베스터의 상용 부하 저항(load resistance)의 크기 변화에 따라 측정된 전압과 전류의 변화를 보여주고 있다.



**Fig. 8.** Power output characteristics with a variety of resistive load from 10 kΩ to 200 kΩ for the fabricated cantilever energy harvester using the multi-layered piezoceramics cofired at 1,100°C and 1,150°C, respectively.

부하저항의 크기가 10 kΩ에서 200 kΩ까지 10 kΩ 단위로 꾸준히 증가함에 따라 출력 전압의 크기는 포물선 형상을 나타내며 지속적으로 증가하는 경향을 나타내는 반면에 출력 전류는 선형적으로 꾸준히 감소하는 경향을 나타내었다. 1,150°C에서 소결한 경우, 높은 열처리 온도에 기인한 적층형 압전 소자의 치밀한 미세구조로 인하여 1,100°C에서 소결한 경우보다 출력 전압과 전류 특성 모두 상대적으로 높은 결과를 나타낼 수 있다.

$$P_{output} = V_{output} \times I_{output} \quad (3)$$

제조한 캔틸레버 에너지 하베스터의 전기적 성능을 평가하기 위하여 식 (3)으로부터 계산한 출력 전력 특성을 그림 8에 나타내었다.

그림 8은 IDT 전극 패턴 임베디드 적층형 압전 세라믹 소자를 이용하여 제조된 캔틸레버 에너지 하베스터의 공진주파수인 120 Hz, 1 G의 가진 조건에서의 상용 부하 저항의 크기에 따른 출력전력 특성을 나타낸다. 출력 전력의 크기는 부하 저항의 크기가 10 kΩ에서 약 70 kΩ까지 증가하면서 출력 전력이 급격히 증가하였으나, 이후 100 kΩ을 전후하여 완만하게 증가하여 최대 출력 전력을 가지는 peak를 보이다가 이후 200 kΩ까지 부하 저항이 증가하면서 서서히 감소하는 경향을 나타내었다. 본 연구에서 조절한 부하 정

항의 크기 범위에서 1,150°C의 경우 출력 전력 변화의 폭이 최소 1 mW에서 최대 3.64 mW까지 2.64 mW의 변화 폭을 나타내었으며, 1,100°C의 경우 최소 0.3 mW에서 최대 2.12 mW까지 1.82 mW의 변화 폭을 나타내었다. 1,150°C의 경우 100 kΩ에서 최대 3.64 mW의 출력 전력을 나타낸 반면에, 1,100°C의 경우 110 kΩ에서 150 kΩ까지 2.12 mW에서 1% 이하의 출력 전력의 변화 특성의 변화를 나타내며 일정한 값을 유지하였다.

#### 4. 결론

상용 압전세라믹 파우더를 이용하여 테일 캐스팅 공정으로 압전체 후막 시트를 제조한 후, 스크린 프린팅 공정을 이용하여 3-3 모드 동작 구현이 가능한 IDT (interdigitated) 패턴의 전극을 압전 시트 표면에 인쇄하였다. 100 μm의 선폭과 500 μm의 선 간격을 가지는 IDT 전극 패턴이 인쇄된 30 mm (가로) × 30 mm (세로) 크기의 압전 세라믹 후막은 총 10층을 적층 및 라미네이션 공정 후, 1,100°C, 1,150°C에서 각각 1시간 동안 동시 소성 공정을 통해 소결하여 치밀한 적층 구조를 가지는 218 μm ~ 233 μm의 두께 편차를 가지는 IDT 전극 패턴 임베디드 압전 소자를 제조하였다. 이를 이용하여 1G의 가속도, 0.8 g의 proof mass의 조건에서 120 Hz의 공진 주파수를 가지는 캔틸레버 구조의 진동 에너지 하베스터를 설계 및 제작하였다. 제작한 하베스터는 37 mm (너비) × 61 mm (길이) × 0.5 mm (두께)를 가진 metal shim의 표면에 IDT 전극 패턴 임베디드 압전 소자가 부착되어 있으며 설계한 대로 주파수 응답 특성은 120 Hz에서 최대 전압을 나타내었다. 제조한 진동 에너지 하베스터는 부하 저항의 증가에 따라 출력 전압 특성은 포물선 형상으로 증가하고 출력 전류는 선형적으로 감소하는 경향을 나타내었다. 1,100°C 보다 1,150°C에서 소결한 압전 소자를 적용한 에너지 하베스터의 출력 전압, 출력 전류 모두 우수한 특성을 나타내었으며, 1,150°C에서 소결, 제조한 에너지 하베스터의 경우, 100 kΩ의 부하 저항 조건에서 최대 3.64 mW의 높은 출력 전력 특성을 나타내었다. 향후, 본 연구를 통해 제조한 에너지 하베스터를 사물인터넷(IoT) 기반 무선 센서 네트워크(wireless sensor network)의 센서 전원으로 활용하기 위한 응용 실험을 통하여 실용화를 위한 후속 연구가 요구된다.

### 감사의 글

본 연구는 2015년도 산업통상자원부의 재원으로 한국 에너지기술평가원(KETEP)의 지원을 받아 수행한 에너지 기술개발사업 연구 과제입니다. (No. 20151120100260)

### REFERENCES

- [1] H. Shen, J. Qiu, and M. Balsi, *Smart Mater. Struct.*, **19**, 115017 (2010). [DOI: <http://dx.doi.org/10.1088/0964-1726/19/11/115017>]
- [2] K. B. Kim, C. I. Kim, J. S. Yun, Y. H. Jeong, J. H. Nahm, J. H. Cho, J. H. Paik, S. Nahm, and T. H. Seong, *J. Korean Inst. Electr. Electron. Mater. Eng.*, **25**, 943 (2012).
- [3] S. Pang, J. Kan, and W. Li, *J. Comput. Inform. Syst.*, **11**, 3203 (2015).
- [4] E. Lefeuvre, A. Badel, C. Richard, and D. Guyoma, *J. Intel. Mat. Syst. Str.*, **16**, 865 (2005). [DOI: <http://dx.doi.org/10.1177/1045389X05056859>]
- [5] Y. Wu, A. Badel, F. Formosa, W. Liu, and A. E. Agbossou, *J. Intel. Mat. Syst. Str.*, **24**, 1445 (2013).
- [6] C. Richard, D. D. Guyomar, D. Audigier, and G. Ching, *1999 Symposium on Smart Mater. Struct.*, 104 (1999).
- [7] W. Y. Hur, T. Y. Lee, K. C. Lee, H. S. Hwang, and J. T. Song, *J. Korean Inst. Electr. Electron. Mater. Eng.*, **24**, 422 (2011).
- [8] D. Vatansever, R. L. Hadimani, T. Shah, and E. Siores, *Smart Mater. Struct.*, **20**, 055019 (2011). [DOI: <http://dx.doi.org/10.1088/0964-1726/20/5/055019>]
- [9] Y. Jiang, S. Shiono, H. Hamada, T. Fujita, K. Higuchi, and K. Maenaka, *Power MEMS*, 375378 (2010).
- [10] Y. Qi, J. H. Kim, T. D. Nguyen, B. Lisko, P. K. Purohit, and M. C. McAlpine, *Nano Lett.*, **11**, 1331 (2011). [DOI: <http://dx.doi.org/10.1021/nl104412b>]
- [11] B. Kumar and S. W. Kim, *Nano Energy*, **1**, 342 (2012). [DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.nanoen.2012.02.001>]
- [12] I. Mahmud, S. C. Ur, and M. S. Yoon, *Electron. Mater. Lett.*, **10**, 223 (2014). [DOI: <http://dx.doi.org/10.1007/s13391-013-3060-z>]
- [13] R. A. Islam and S. Priya, *J. Am. Ceram. Soc.*, **89**, 3147 (2006). [DOI: <http://dx.doi.org/10.1111/j.1551-2916.2006.01205.x>]
- [14] I. T. Seo, Y. J. Cha, I. Y. Kang, J. H. Choi, S. Nahm, T. H. Seong, and J. H. Paik, *J. Am. Ceram. Soc.*, **94**, 3629 (2011). [DOI: <http://dx.doi.org/10.1111/j.1551-2916.2011.04817.x>]
- [15] R. Ly, M. Rguiti, S. D'Astorg, A. Hajjaji, C. Courtois, and A. Leriche, *Sensor. Actuat. A-Phys.*, **168**, 95 (2011). [DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.sna.2011.04.020>]
- [16] D. Shen, J. H. Park, J. Ajitsaria, S. Y. Choe, H. C. Wickle III, and D. J. Kim, *J. Micromech. Microeng.*, **18**, 055017 (2008). [DOI: <http://dx.doi.org/10.1088/0960-1317/18/5/055017>]
- [17] A. Erturk and D. J. Inman, *Smart Mater. Struct.*, **18**, 025009 (2009). [DOI: <http://dx.doi.org/10.1088/0964-1726/18/2/025009>]
- [18] S. Priya, *IEEE Trans. Ultra. Ferro. Freq. Const.*, **57**, 2610 (2010). [DOI: <http://dx.doi.org/10.1109/TUFFC.2010.1734>]
- [19] Material Data, [www.pic ceramic.com](http://www.pic ceramic.com)
- [20] D. Berlincourt and H.H.A. Krueger, Properties of Morgan Electro Ceramic Ceramics, [www.morgan-electroceramics.com](http://www.morgan-electroceramics.com)