

MEMS 공정을 통한 마이크로 Pb(Zr,Ti)O₃ 박막 압전 외팔보 에너지 수확소자의 제작 및 특성 연구

이준명¹, 천인우¹, 김문근¹, 권광호¹, 이현우^{2,a}

¹ 고려대학교 제어계측공학과

² 한서대학교 전자컴퓨터통신공학부

A Study on the Fabrication and Characterization of Micro Pb(Zr,Ti)O₃ Film Piezoelectric Cantilever Using MEMS Process for Energy Harvesting

Junmyung Lee¹, Inwoo Chun¹, Moonkeun Kim¹, Kwang-Ho Kwon¹, and Hyun Woo Lee^{2,a}

¹ Department of Control and Instrumentation Engineering, Korea University, Sejong 339-700, Korea

² Division of Electronic, Computer and Communication Engineering, Hanseo University, Seosan 356-706, Korea

(Received September 6, 2013; Revised September 30, 2013; Accepted October 11, 2013)

Abstract: In this study, we fabricated a micro Pb(Zr,Ti)O₃ (PZT) film piezoelectric cantilever with a Si proof mass and dual beams through MEMS process. The size of the beam and the integrated Si proof mass were about 4,320 μm × 290 μm × 12 μm and 1,380 μm × 880 μm × 450 μm each. To reduce the air damping and have the larger displacement of dual beams was used for design. After mounting micro PZT film piezoelectric cantilever on shaker, we measured the resonance frequency and a output voltage while making resonant frequency changed. The resonant frequency and the highest average power of the cantilever device were 110.2 Hz and 0.36 μW each, at 0.8 g acceleration and 23.7 kΩ load resistance, respectively.

Keywords: MEMS, Cantilever, Energy harvesting, PZT, Resonance frequency

1. 서 론

에너지 수확기술은 우리 주변에 존재하는 미활용 에너지를 유용한 전기 에너지로 변환하여 전력을 수확하는 기술이다. 최근 반도체 기술의 발전에 의해

무선 센서 노드 및 유비쿼터스와 같은 저전력형 소자 및 모듈의 개발이 활발하게 이루어지고 있으며, 이에 에너지원으로 적용 가능한 에너지 수확기술은 친환경 에너지원으로써 연구가 활발히 진행되고 있다 [1-3]. 이 중 압전 (piezoelectric) 소자는 압전체에 기계적 변형이 가해지면, 전기 에너지가 발생하는 효과를 이용한 소자이며, 에너지 변환 효율이 높을 뿐만 아니라, 소형 및 경량화가 용이하다 [4]. MEMS (micro electro mechanical system) 공정으로 제작된 압전 외팔보 에너지 수확소자는 낮은 주파수에서 적은 힘으

a. Corresponding author; hwlee@hanseo.ac.kr

로 큰 변위를 생성할 수 있는 장점이 있다. 따라서 미세 소자 전압원으로 적합한 압전 특성을 이용한 MEMS 소자 연구가 활발히 진행되고 있다 [5].

외팔보 수확소자에서는 낮은 공진 주파수 특성 (100 ~ 120 Hz)이 중요하며, 일상생활에서 발생하는 진동 주파수와 외팔보 에너지 수확 소자의 공진 주파수가 일치 할 때 가장 큰 에너지를 수확할 수 있다 [6-8]. 이러한 결과를 얻기 위하여, 본 연구에서는 Pb(Zr,Ti)O₃ (PZT) 압전 박막을 사용하였으며, 낮은 공진 주파수를 가지도록 실리콘 무게 추 (Si proof mass)를 설계하여 외팔보 에너지 수확소자를 제작하였다. 또한 두 개의 보 (dual beam)로 제작하였으며, 보의 중간을 식각하여 비움으로써, 공기 감쇄 (air damping)에 대한 영향을 줄였다. 또한 이중 보 구조로 제작함으로써, 지지대의 면적이 줄어들고, 스트레스는 작아지고, 스트레인은 증가함으로써 높은 전력 수확을 얻을 수 있도록 하였다. 이에 따른 공진 주파수 및 전력 특성을 조사하여, 단일 빔을 사용한 이전 연구와 비교하여 [8], 더 낮은 공진주파수에서 더 큰 에너지를 수확하고자 하였다.

2. 실험 방법

2.1 제조 공정

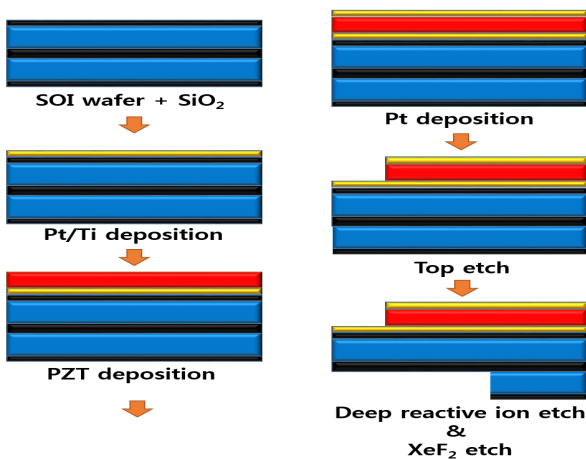


Fig. 1. Schematic of the fabrication process.

MEMS제조 공정은 주로 박막 증착과 패턴 식각으로 구성되어 있다. 외팔보 에너지 수확소자의 공진주

파수는 외팔보 끝에 실리콘 무게 추를 사용하였을 때와 외팔보의 길이가 길어질수록 낮아지는 것을 발표된 연구를 통해서 확인할 수 있었다 [9,10]. 이 결과를 응용하여 마이크로 외팔보 에너지 수확소자의 빔 길이는 약 $4,320 \pm 100 \mu\text{m}$, 폭은 약 $290 \pm 10 \mu\text{m}$, 두께는 $12 \pm 0.1 \mu\text{m}$ 로 제작되었고, 선행된 실험에서의 시뮬레이션을 통해 최적화된 실리콘 무게 추를 설계하였으며 [8], 길이는 약 $1,380 \pm 50 \mu\text{m}$, 폭은 $880 \pm 10 \mu\text{m}$, 두께는 $450 \pm 10 \mu\text{m}$ 이다.

본 연구에서는 MEMS공정을 이용하여 이전 연구의 단일 빔과 다른 특성을 연구하기 위해 이중 빔을 가지는 마이크로 PZT 외팔보 에너지 수확소자를 제작하였다. 이중 빔을 위한 중간 식각 부분의 길이는 약 $2940 \mu\text{m} \pm 100 \mu\text{m}$, 폭은 $293.3 \mu\text{m} \pm 10 \mu\text{m}$, 두께는 $12 \mu\text{m} \pm 10 \mu\text{m}$ 으로 제작하였다. 기판으로는 100 mm SOI (silicon on insulator) 기판을 사용하였고, 중간 절연막 (insulator)층의 두께는 100 nm 이다. 상부 silicon 층은 10 μm 를 사용하였으며, 외팔보 구조의 지지대 층으로 사용되었다. SOI 기판 위에 Pt/PZT/Pt/SiO₂를 다중 증착하였으며, SiO₂층은 500 nm이며, 상·하부의 전극으로 사용되는 Pt는 DC 마그네트론 증착법 (DC magnetron sputtering) 으로 각각 100 nm씩 증착하였다. 압전 박막으로 사용한 PZT는 sol-gel 방식으로 증착하였으며, Pb/(Zr+Ti)에서 Zr/Ti의 비율은 52/48을 사용하였다.

외팔보 구조체를 제작하기 위하여 유도결합플라즈마 (ICP, inductively coupled plasma, MMPLEX-46143, STS, England) 식각을 사용하여 공정하였다 [11,12]. 기판 뒤 부분 (back side) 식각을 하기 위해 심도 반응성 이온 식각 (DRIE, deep reactive ion etch)을 사용하였으며, 식각 공정 진행 중 외팔보 에너지 수확 소자 손상을 방지하기 위하여 XeF₂ 식각을 사용하였다 [13,14].

2.2 측정

제작한 외팔보 에너지 수확소자의 크기 및 형태는 FE-SEM (field emission scanning electron microscope, VEGA, TESCAN, Czech)를 이용하여 측정하였으며, 외팔보의 공진주파수와 출력전압을 측정하기 위해서 가진기 위에 고정시키고, 가진 주파수의 크기를 변화시키면서 측정하였다. 제작한 외팔보의 공진 주파수는 LDV (laser doppler vibrometer, OFV-501, POLYTEC, Germany)와 가속도 센서를 이

용하여 측정하였으며, 출력되는 전압은 DSA (dynamic signal analyzer, 35670A, AGILENT, United States)를 사용하여 연결되는 회로의 저항 값과 가속도의 크기를 변화시켜 가며 측정하였다.

3. 결과 및 고찰

그림 2는 마이크로 외팔보 에너지 수확소자의 주사 전자현미경 (scanning electron microscope, SEM) 사진이다. 무게 추의 위치가 외팔보의 끝이 아닌 지점에 생긴 원인은 기관의 균일도 및 공정상의 오차로 인하여 생성된 것이다.

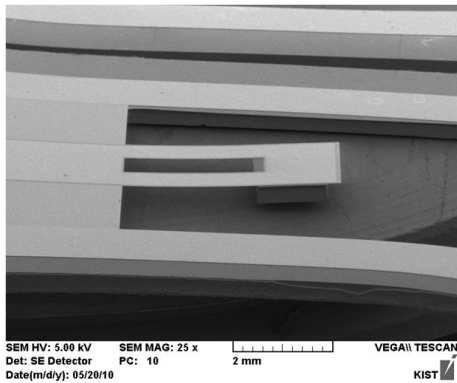


Fig. 2. SEM image of the cantilever device.

그림 2의 압전 외팔보 에너지 수확소자의 구조는 각각의 박막의 스트레스를 서로 상쇄 가능하게 설계하였으나 완전히 상쇄되지 못하여 약간의 잔류 스트레스에 의한 휨 현상이 관찰되었다 [15].

그림 3은 제작된 외팔보 에너지 수확소자의 공진주파수 특성을 LDV를 통해 얻어낸 보드선도이다. 진동하는 변위의 크기의 단위는 LDV를 통해 dB로 환산되었다. 실험 중 보에 가해진 공진 가속도는 0.5 g ($g = 9.8 \text{ m/s}^2$)이다. 그림 3의 진동하는 보의 변위크기는 주파수가 약 110.2 Hz에서 가장 크게 발생하는 것을 확인할 수 있다. 또한, 위상은 1차 공진에 의해 110.2 Hz에서 약 180° 에서 0° 로 위상 천이 (phase shift)되는 것을 확인할 수 있다 [16]. 이를 통해 외팔보 에너지 수확소자의 공진 주파수가 110.2 Hz임을 확인할 수 있다.

외팔보 에너지 수확소자에서 피크전압 및 평균 전

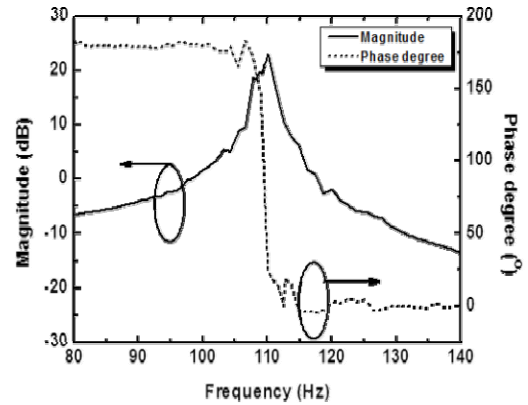


Fig. 3. Magnitude and phase angle of cantilever device as functions of frequency at 0.5 g (9.8 m/s^2). The resonant frequency was 110.2 Hz.

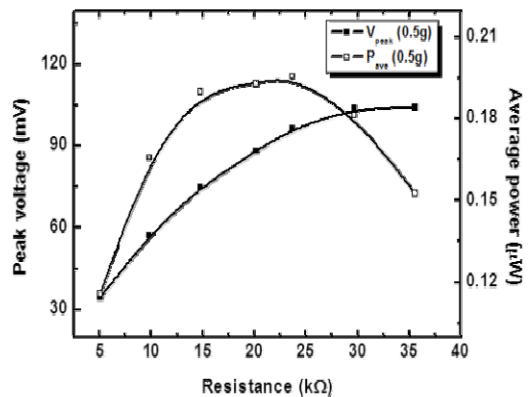


Fig. 4. Peak voltage and average power of cantilever as functions of resistance at 0.5 g (9.8 m/s^2).

력의 특성은 부하저항에 따라서 다르게 나타나며, 등가저항일 때 최대전력 값이 나타난다 [17]. 따라서 등가 저항을 조사하기 위하여, 부하저항 값을 변화시키면서 DSA를 통해 공진 주파수에서의 피크 전압과 평균 전력 특성을 조사하여 그림 4에 보였다. 실험 중 보에 가해진 공진 가속도는 0.5 g ($g = 9.8 \text{ m/s}^2$)이다. 부하저항의 크기는 5 kΩ에서 40 kΩ까지 변화를 주었으며, 이때 DSA를 통해 피크 전압 값을 얻어 내었고, 이를 옴의 법칙을 통해 전력 값을 계산하였다. 그림 4에서 보면 저항이 증가함에 따라, 피크 전압은 증가하는 경향을 나타내었고, 평균 전력은 증가하다가

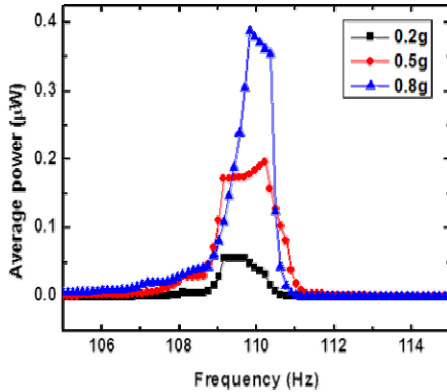


Fig. 5. Average power of cantilever as a functions of acceleration of gravity $g(9.8 \text{ m/s}^2)$ at $23.7 \text{ k}\Omega$.

감소하는 경향을 보이고 있다. 하지만 평균 전력은 저항 변화에 따라 증가하다가 감소하는 경향을 보이며, 저항 값이 약 $23.7 \text{ k}\Omega$ 일 때 약 $0.19 \mu\text{W}$ 로 가장 큰 전력 값을 나타내었다. 따라서 제작된 외팔보 에너지 수확소자의 등가 저항은 $23.7 \text{ k}\Omega$ 임을 알 수 있었다.

그림 5는 인가되는 가속도 크기의 변화에 따른 외팔보 에너지 수확소자의 평균 전력의 변화를 나타내었다. 일상생활에서 발생하는 가속도 값의 범위는 보통 0.2 g 에서 0.8 g 이다. 따라서 앞선 실험에서 얻어낸 최대의 전력 값을 나타내는 $23.7 \text{ k}\Omega$ 의 등가 저항에서 인가되는 가속도의 크기를 0.2 g 에서 0.8 g 로 변화 시켜가면서 실험을 진행하였다. 가속도 값이 증가함에 따라서, 수확되는 평균 전력 또한 증가하는 경향을 확인할 수 있었다. 0.2 g 에서는 $0.056 \mu\text{W}$, 0.5 g 에서는 $0.16 \mu\text{W}$, 0.8 g 에서는 $0.36 \mu\text{W}$ 의 피크 전력을 얻을 수 있었으며, 0.8 g 에서 최대 전력을 수확할 수 있음을 확인하였다. 이때의 공진주파수는 앞선 결과와 비슷하게 110.2 Hz 를 나타내었다.

이 실험을 통해, 이전 단일 빔 외팔보 에너지 수확 실험에서 1.3 g 의 공진 가속도에서 공진주파수 112.3 Hz 로 진동시켰을 때 $0.346 \mu\text{W}$ 의 전력을 얻어낸 결과와는 다르게 [8], 중간 식각을 통한 이중 빔 구조를 설계함으로써 공기 감쇄에 대한 영향 및 스트레스를 줄이고, 스트레인을 높임으로써 낮은 공진주파수 및 높은 전력 값을 MEMS 공정을 통해 얻어낼 수 있었다.

4. 결론

본 연구에서는 $\text{Pb}(\text{Zr},\text{Ti})\text{O}_3$ (PZT) 압전 박막을 사용하였으며, 낮은 공진 주파수를 갖게 하기 위해 무게 추를 사용하여 외팔보 에너지 수확소자를 제작하였다. 이전 실험 결과에 비해 높은 전력 값을 얻기 위해, 보의 중간부분을 식각한 두 개의 보로 제작함으로써, 단일 보와 다르게 지지대의 스트레스와 공기 감쇄의 영향이 줄어들고, 스트레인이 증가하여 낮은 공진주파수 및 높은 전력 특성을 얻어내었다. 일상생활에서 발생하는 진동주파수는 주로 200 Hz 이하로 발생되기 때문에, 외팔보를 이용한 에너지 수확소자는 공진 주파수가 낮을수록 전력 수확이 용이하다. 제작한 마이크로 외팔보 에너지 수확소자를 통해 낮은 공진 주파수 특성을 얻을 수 있었으며, 이때의 공진 주파수는 110.2 Hz 를 갖는다. 또한, 등가저항은 $23.7 \text{ k}\Omega$ 을 가졌으며, 가속도 0.8 g 에서 최대 평균 전력 $0.36 \mu\text{W}$ 을 얻을 수 있었다.

REFERENCES

- [1] S. P. Beeby, M. J. Tudor, and N. M. White, *J. Meas. Sci. Technol.*, **17**, 175 (2006).
- [2] A. Kansal, J. Hsu, S. Zahedi, and M. B. Srivastava, *ACM Transactions on Embedded Computing System*, **6**, 32 (2007).
- [3] S. Priya, *Appl. Phys. Lett.*, **87**, 184101 (2005).
- [4] H. C. Song, J. Y. Kang, and S. J. Yoon, *J. KIEEME*, **23**, 28 (2010).
- [5] K. P. Ashok and P. Rudra, *J. Micromech. Microeng.*, **17**, 2475 (2007).
- [6] M. K. Kim, B. S. Hwang, J. H. Jeong, N. K. Min, and K. H. Kwon, *J. KIEEME*, **24**, 515 (2011).
- [7] J. Q. Liu, H. B. Fang, Z. Y. Xu, X. H. Mao, X. C. Shen, D. Chen, H. Liao, and B. C. Cai, *Microelectronics Journal.*, **39**, 802 (2008).
- [8] M. Kim, B. Hwang, Y. H. Ham, J. Jeong, N. K. Min, and K. H. Kwon, *J. Micro/Nanolith. MEMS MOEMS.*, **11**, 033009 (2012).
- [9] M. Kim, B. Hwang, N. K. Min, J. Jeong, K. H. Kwon, and K. B. Park, *J. Nanosci. Nanotechnol.*, **11**, 6510 (2011).
- [10] S. N. Yun and D. G. Kim, *J. KSPSE.*, **13**, 65 (2009).
- [11] K. H. Kwon, S. Y. Kang, G. Y. Yeom, N. K. Hong, and J. H. Lee, *J. Electron. Soc.*, **147**, 1807 (2000).
- [12] A. M. Efremov, D. P. Kim, and C. I. Kim, *Thin Solid*

- Films*, **474**, 267 (2005).
- [13] Y. B. Jeon, R. Sood, J. H. Jeong, and S. G. Kim, *Sensor Actuat.*, **A122**, 16 (2005).
- [14] K. Sugano and O. Tabata, *Microsyst. Technol.*, **9**, 11 (2002).
- [15] D. Shen, J. H. Park, J. H. Noh, S. Y. Choe, S. H. Kim, H. C. Wickle III, and D. J. Kim, *Sensor Actuat.*, **A154**, 103 (2009).
- [16] P. Gardonio, Y. S. Lee, S. J. Eloit, and S. Debot, *J. Acoust. Soc. Am.*, **110**, 3025 (2001).
- [17] S. Wolf and R. F. M. Smith, *Student Reference Manual for Electronic Instrumentation Laboratories* (Pearson, Upper Saddle River, 2004) p. 80.