

MEMS 공정을 이용한 마이크로 PZT 외팔보 에너지 수확소자의 제작 및 특성

김문근¹, 황범석¹, 정재화¹, 민남기¹, 권광호^{1,a}

¹ 고려대학교 제어계측공학과

Fabrication and Characteristics of Micro PZT Cantilever Energy Harvester Using MEMS Technologies

Moonkeun Kim¹, Beomseok Hwang¹, Jaehwa Jeong¹, Nam Ki Min¹, and Kwang-Ho Kwon^{1,a}

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

(Received February 25, 2011; Revised May 18, 2011; Accepted May 24, 2011)

Abstract: In this work, we designed and fabricated a multilayer thin film Pb(Zr,Ti)O₃ cantilever with a Si proof mass for low frequency vibration energy harvesting applications. A mathematical model of a multi-layer composite beam was derived and applied in a parametric analysis of the piezoelectric cantilever. Finally, the dimensions of the cantilever were determined for the resonant frequency of the cantilever. We fabricated a device with beam dimensions of about 4,930 μm × 450 μm × 12 μm, and an integrated Si proof mass with dimensions of about 1,410 μm × 450 μm × 450 μm. The resonant frequency, maximum peak voltage, and highest average power of the cantilever device were 84.5 Hz, 88 mV, and 0.166 μW at 1.0 g and 23.7 Ω, respectively. The dimensions of the cantilever were determined for the resonance frequency of the cantilever.

Keywords: Energy harvesting, PZT, Cantilever, Resonant frequency

1. 서론

최근 들어 반도체 기술의 발전으로 저전력형 소자와 모듈 개발이 가능하게 되었다. 이러한 저전력형 소자의 구동을 위한 에너지원으로 에너지 수확 기술은 전 세계의 많은 연구자들에게 주목을 받고 있다. 또한 환경오염에 대한 문제가 대두 되면서 친환경적인 에너지원에 대한 연구가 주목받고 있다. 친환경에 에너지원에 대한 대표적인 연구는 태양광, 지열, 풍력 등이 연구되고 있다 [1-4]. 하지만 압전 특성을 이용한 MEMS (microelectromechanical system) 소자 보

다 상대적으로 큰 크기를 갖기 때문에 미세 소자 전압원으로 적합한 압전 특성을 이용한 MEMS 소자 연구가 활발히 진행되고 있다. 압전 특성을 이용하여 진동 에너지를 수확하는 대표적인 구조는 외팔보구조를 갖는다.

MEMS 기술로 제작된 외팔보 에너지 수확소자는 유비쿼터스 및 무선 센서노드 등으로 대표되는 원격 시스템에서의 자체 전력 공급원으로서 무한한 가능성을 가진다. 이러한 진동에너지를 이용하는 외팔보 수확소자에서는 100 Hz 이하의 낮은 공진주파수특성이 가장 중요하다 [5,6]. 이는 일상생활에서 발생하는 공진주파수가 낮은 대역에서 나타나며, 외팔보소자는 공진주파수가 이와 일치할 때 가장 큰 에너지를 수확

a. Corresponding author; kwonkh@korea.ac.kr

하기 때문이다.

본 연구에서는 $\text{Pb}(\text{Zr},\text{Ti})\text{O}_3$ (PZT) 압전 박막을 사용하였고, Si proof mass를 설계하여 낮은 공진 주파수를 갖는 외팔보 에너지 수확소자를 제작하여 공진 주파수 및 전력 특성을 추출하였다.

2. 실험 방법

외팔보의 공진주파수는 외팔보 끝단에 proof mass를 사용하였을 때 및, 외팔보의 길이가 길어질수록 낮아지는 것을 선행 연구를 통해서 확인하였다 [7]. 유한요소 해석에서 proof mass의 크기는 동일한 조건에서 길이가 3 mm에서 6 mm으로 변할 때 공진주파수는 약 225 Hz에서 66 Hz로 변화했다. 본 연구에서는 MEMS 공정을 이용하여 적정길이를 가지는 마이크로 PZT 외팔보 에너지 수확소자를 제작하였다. 100 mm의 SOI (silicon on insulator) 기판을 사용하였고, insulator 층의 두께는 100 nm이다. 상부의 silicon 층은 10 μm 를 사용하였고, 이는 외팔보 구조의 지지층으로 사용되었다. SOI 기판 위에 Pt/PZT/Pt/SiO₂를 다중증착을 하였다. 이때의 SiO₂층은 외팔보의 스트레스 감소를 위해 사용되었다.

SiO₂는 500 nm로 wet 방식으로 성장하였으며, 상,하부 전극으로 사용되는 Pt는 DC magnetron sputter 방식으로 100 nm 씩 증착하였다. 압전 박막인 PZT는 sol-gel 방식으로 증착되었으며, $\text{Pb}/(\text{Zr}+\text{Ti})$ 에서 Zr/Ti의 비율은 52/48을 사용하였다. 그림 1과 같은 외팔보 구조체를 제작하기 위하여 ICP (inductively coupled plasma) 식각을 사용하여 공정을 하였다 [8, 9]. 공진 주파수를 낮추기 위해 Si proof mass를 제작하였고, 이는 DRIE (deep reactive ion etch)를 사용하여 back side 식각 공정을 수행하였다. DRIE 공정 진행중의 damage로 인한 소자 손상을 방지하기 위해, XeF₂ 식각을 사용하여 외팔보 소자 손상을 최소화 하였다 [10,11].

제작한 외팔보의 공진주파수 및 출력전압을 측정하기 위해 외팔보를 가진기 위에 고정시키고 가진기의 가진 주파수 및 크기를 변화시켜가며 실험을 진행하였다. 제작한 외팔보의 공진주파수는 가속도 센서와 LDV (laser doppler vibrometer)를 이용하여 측정하였으며, 출력되는 전압은 DSA (dynamic signal analyzer)를 사용하여 연결되는 회로의 저항값을 변화시키거나 인가되는 가속도의 크기를 변화시켜가며 측정하였다.

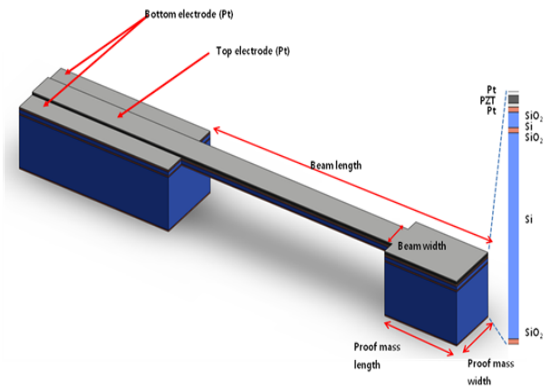


Fig. 1. Schematic view of the layer structure of the cantilever device.

3. 결과 및 고찰

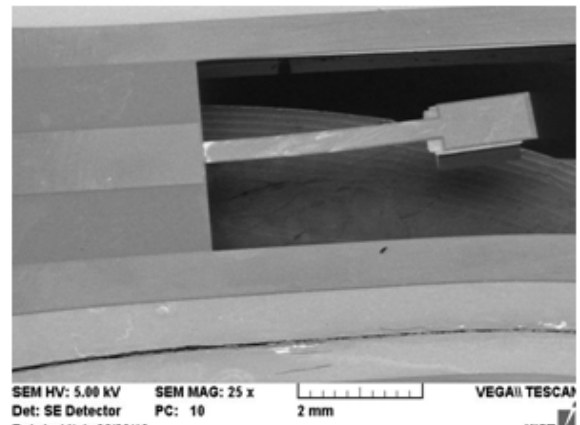


Fig. 2. SEM image of the cantilever device.

그림 2는 마이크로 외팔보 에너지 수확소자의 SEM 사진이다. 그림 1과는 다르게 Si proof mass의 위치의 오차가 생긴 원인은 기판의 균일도와 공정상의 오차로 인하여 생성되었다. 마이크로 외팔보 에너지 수확소자의 빔 길이는 약 $4,930 \pm 100 \mu\text{m}$, 폭은 $450 \pm 10 \mu\text{m}$, 두께는 $12 \pm 0.1 \mu\text{m}$ 로 제작되었고, Si proof mass의 길이는 약 $1,410 \pm 50 \mu\text{m}$, 폭은 $450 \pm 10 \mu\text{m}$, 두께는 $450 \pm 10 \mu\text{m}$ 이다.

그림 2에서 보면 각각 박막의 스트레스를 서로 상쇄할 수 있는 구조로 내부 스트레스에 의한 휨 현상 없이 제작된 것을 알 수 있다 [12].

그림 3은 제작된 외팔보의 공진주파수 특성에 대한

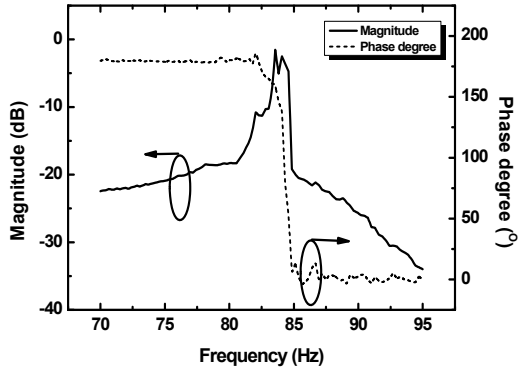


Fig. 3. Magnitude and phase angle of cantilever device as functions of frequency at 0.5 g(9.8 m/s²). The resonant frequency was 84.5 Hz.

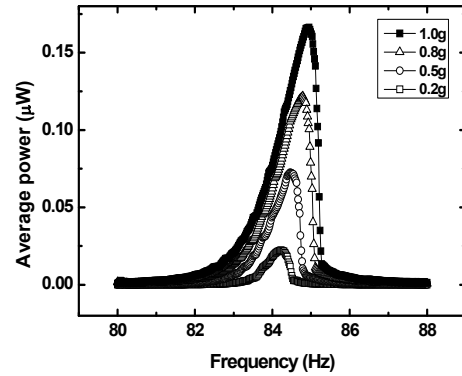


Fig. 5. Average power of cantilever as a function of acceleration of gravity g(9.8 m/s²) at 23.7 kΩ.

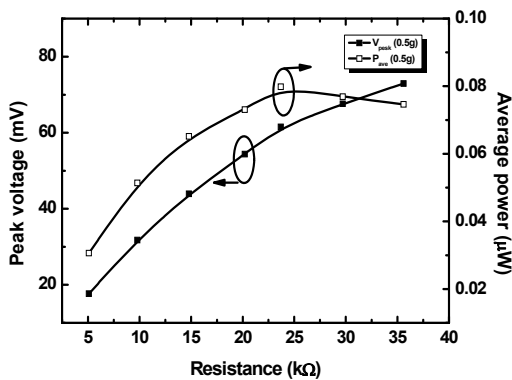


Fig. 4. Peak voltage and average power of cantilever as functions of resistance at 0.5 g(9.8 m/s²).

보드선도이다. 외팔보 에너지 수확소자에서 피크 전압은 공진 시 가장 크게 발생되므로 일상생활에서 발생하는 진동에너지를 이용하기 위한 에너지 수확소자는 낮은 공진주파수 특성을 갖도록 제작되었고, 크기와 위상에 대한 정보로부터 외팔보의 공진이 주변 환경에 적합한 84.5 Hz에서 발생하는 것을 확인할 수가 있다.

외팔보 에너지 수확소자에서 피크전압과 평균 전력의 특성은 등가회로의 저항에 따라 다르게 나타난다. 이는 저항에 따른 피크 전압이 다르고 평균 전력은 음에 법칙에 의해 계산되어지기 때문이다. 그림 4는 공진 주파수에서의 피크 전압과 평균 전력 특성이고, 이때의 공진 가속도는 0.5 g($g = 9.8\text{m/s}^2$)이다. 외팔보

소자의 등가 저항을 찾기 위해 저항 값을 5 kΩ에서 40 kΩ 까지 변화시켜 가면서 피크 전압을 측정하였다. 외팔보 에너지 수확소자는 등가 저항일 때 가장 큰 전력을 수확할 수 있기 때문이다. 그림 4에서 보면 저항이 증가하면서 피크 전압은 증가하는 경향을 나타내었다. 하지만 평균 전력은 23.7 kΩ에서 0.08 µW로 가장 큰 전력을 나타내었다. 따라서 제작된 마이크로 외팔보의 등가 저항은 23.7 kΩ에서 가장 큰 전력을 수확하는 것을 알 수 있다.

그림 5는 인가되는 가속도 크기의 변화에 따른 평균 전력의 변화를 나타내었다. 23.7 kΩ의 등가 저항으로 인가되는 가속도의 크기를 0.2에서 1.0 g로 변화 시켜가면서 실험을 진행하였다. 일상생활에서 발생하는 가속도 값의 범위가 0.2에서 1.0 g이기 때문이다.

가속도 값이 증가함에 따라 수확되는 평균 전력도 증가하는 경향을 나타내었다. 이때의 평균 전력은 0.166 µW로 1.0 g에서 가장 큰 에너지가 수확되는 것을 알 수 있다. 이때의 공진주파수는 84.5 Hz를 나타내었다.

4. 결론

본 연구에서는 Pb(Zr,Ti)O₃ (PZT) 압전 박막을 사용하였고, Si proof mass를 설계하여 낮은 공진 주파수를 갖는 외팔보 에너지 수확소자를 제작하여 공진주파수 및 전력 특성을 추출하였다. 주변 환경에서 발생하는 주파수대역은 200 Hz 이하로 발생된다. 따

라서 마이크로 외팔보를 이용한 에너지 수확 소자에서는 낮은 공진주파수를 갖을수록 전력 수확이 용이하다.

마이크로 외팔보 에너지 수확소자 제작에서 Si proof mass를 사용함으로써 낮은 공진 주파수 특성을 얻을 수 있었다. 이 때의 공진 주파수는 84.5 Hz를 갖는다. 등가 저항 23.7 k Ω , 가속도 1 g 에서 최대 피크 전압 88 mV 와 평균 전력 0.166 μ W를 얻을 수 있었다.

감사의 글

이 논문은 2009년도 교육과학기술부 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 연구되었습니다. (No. 2009-0085863)

REFERENCE

- [1] S. P. Beeby, M. J. Tudor, and N. M. White, *J. Meas. Sci. Technol.*, **17**, 175 (2006).
- [2] S. Priya and D. J. Inman, *Springer Science Business Media, LLC.* (2009).
- [3] Y. H. Ko and J. S. Yu, *J. Nanosci. Nanotechnol.*, **10**, 8095 (2010).
- [4] S. Priya, *Appl. Phys. Lett.*, **87**, 184101 (2005).
- [5] S. Roudy, *J. Intell. Mater. Syst. Struct.*, **16**, 809 (2005).
- [6] S. Roundy, P. K. Wright, and J. Rabaey, *Comput. Commun.*, **26**, 1131 (2003).
- [7] M. Kim, B. Hwang, N. K. Min, K. H. Kwon, and K. B. Park, *J. Nanosci. Nanotechnol.*, **11**, 1 (2011).
- [8] K. H. Kwon, S. Y. Kang, G. Y. Yeom, N. K. Hong, and J. H. Lee, *J. Electron. Soc.*, **147**, 1807 (2000).
- [9] A. M. Efremov, D. P. Kim, and C. I. Kim, *Thin Solid Films*, **474**, 267 (2005).
- [10] Y. B. Jeon, R. Sood, J. H. Jeong, and S. G. Kim, *Sensor Actuat.*, **A122**, 16 (2005).
- [11] K. Sugano and O. Tabata, *Microsyst. Technol.*, **9**, 11 (2002).
- [12] 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).