

## 캔틸레버형 모듈을 이용한 광대역 압전 하베스터 개발 및 평가

박범근 · 백종후<sup>+</sup>

### Development and Evaluation of Broadband Piezoelectric Harvesters using a Cantilever-Type Module

Buem-Keun Park and Jong-Hoo Paik<sup>+</sup>

#### Abstract

In cantilever type piezoelectric energy harvester, the amount of power generation decreases rapidly when outside a certain frequency. The thickness and weight of the cantilever metal plate were modified to develop cantilevers that could produce high power over a wide frequency range. The thicker the cantilever, the higher the power in the higher frequency range. As the weight of the mass increased, the cantilever tended to generate higher power, and the frequency band decreased. A 0.6 mm metal plate cantilever that had a mass of 3.3 g generated power that exceeded 3 mW within the 91–102 Hz range, with average and output values of 9.484 mW and 20.748 mW, respectively, at 99 Hz.

**Keywords:** Piezoelectric transducer, Energy harvesting, Broadband, High power, Cantilever

#### 1. 서 론

사물인터넷(Internet of Thing, IoT)은 사물에 다양한 센서를 결합하여 유선과 무선으로 실시간 데이터를 주고받는다. 다양한 IoT 기술을 원활히 사용하기 위해서는 배터리 교체가 필요 없는 무선 센서 노드가 필요하다. 배터리를 대체하기 위해서는 자가발전이 가능한 에너지 하베스팅 기술이 적합하다[1]. 에너지 하베스팅 기술 중 압전 에너지 하베스터를 활용할 경우 온도 센서, 진동 센서, 전압 센서 등의 데이터를 무선으로 송신하는 것이 가능하며 기존에 사용되는 배터리를 대체할 수 있다[2,3]. 압전 에너지 하베스팅의 기본 구조는 금속판의 한 쪽만 고정하는 캔틸레버 방식이다. 일반적으로 이러한 방식은 많은 연구에도 불구하고 공진 주파수 부근의 좁은 영역에서만 높은 발전량이 나타나기 때문에 상용화에 한계가 있다[4-8].

캔틸레버를 다중 연결하여 에너지 하베스터 모듈을 제작하였다. 각기 다른 진동 주파수에서 전력을 얻을 수 있는 압전 모듈

을 하베스터 형태로 조합하면 폭넓은 진동 주파수 영역에서 높은 발전량을 얻을 수 있다. 튜닝전의 캔틸레버를 연결한 에너지 하베스터의 경우 일반적으로 주변 사물들이 나타내는 주파수영역보다 높은 영역에서 진동주파수가 나타난다. 무게 추를 연결하기 전의 경우 충분하지 못한 발전량을 보였다.

본 연구에서는 이를 해결하기 위해 캔틸레버 금속판의 두께를 증가시켜 넓은 범위의 주파수를 가지는 에너지 하베스터를 제작하였다. 또한 무게 추의 무게를 증가시켜 에너지 하베스터의 발전량이 증가하는 것을 확인하였다[9-13].

#### 2. 실험 방법

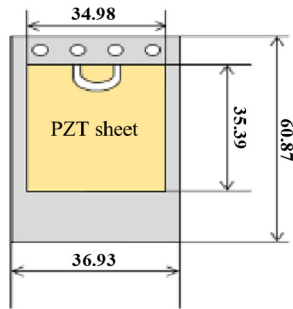
##### 2.1 압전 에너지 하베스터 설계 및 제작

Fig. 1은 압전 에너지 하베스터를 제작하기 위해 설계한 압전 소자와 금속판(Metal plate, SUS304)의 구조를 나타낸다. 금속판 위에 압전 시트를 부착하였으며, 홀을 직경 3 mm로 하여 상부 면에 내었다. 이는 캔틸레버와 케이스를 결합할 때 사용하기 위함이다. 압전 시트의 두께는 0.185 mm이며 금속판의 두께는 0.3 mm, 0.4 mm, 0.5 mm, 0.6 mm로 변경해 가며 실험하였다.

캔틸레버는 볼트를 사용하여 결합하였다. 캔틸레버의 압전 시트의 전극 양단을 정류회로에 각각 연결하고 이들을 다시 병렬로 연결하여 구성하였다.

한국세라믹기술원 전자융합본부 (Electronic Convergence Division, Korea Institute of Ceramic Engineering & Technology), Jinju 52851, Korea  
<sup>+</sup>Corresponding author: jhpaik@kicet.re.kr  
 (Received : Jul. 17, 2020, Revised : Jul. 28, 2020, Accepted : Jul. 30, 2020)

This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License(<https://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.



Thickness of PZT sheet is 0.185mm.  
Thickness of Metal plate is 0.3~0.6mm.

Fig. 1. Schematic of the piezoelectric cantilever.

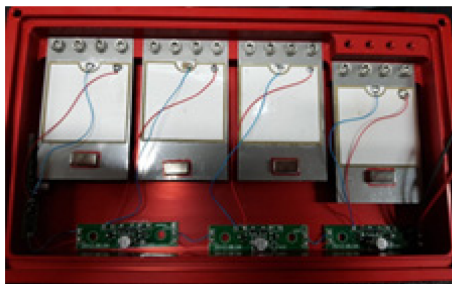


Fig. 3. Photograph of the piezoelectric energy harvester.

### 2.2 발전 특성 평가 방법

Fig. 4는 압전 에너지 하베스터의 발전량을 평가하기 위한 실험장치의 모습이다. 진동을 발생시키기 위해서 Waveform Generator(KEYSIGHT, 335500B)로 파형을 발생시키고 이를 High Speed Bipolar Amplifier (NF, HSA4052)로 파형을 증폭한다. 이 파형을 Vibration Exciter(Bruel & Kjaer, Type 4809)에 인가하여 진동을 발생시킨다. 진동 가속도를 측정하기 위해서 Vibration Exciter 위에 3축 센서를 고정하였다. 압전 하베스터에서 발생된 전기 에너지는 특정저항을 연결하고 Digital Power Meter (YOKOGAWA, WT310)에 연결하여 전압, 전류, 전력을 측정하였다.

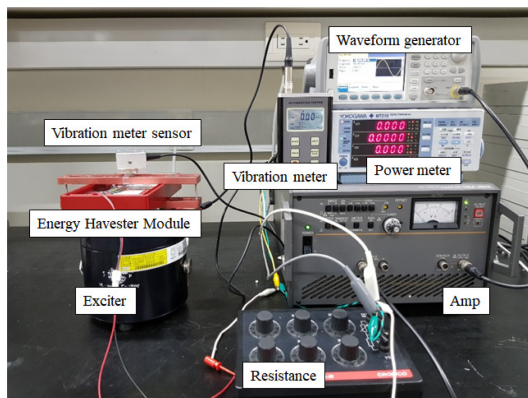


Fig. 4. Photograph of the piezoelectric energy harvester.

였다. 이때 파형은 사인파로 진동 가속도는  $1.0 \text{ g} (1 \text{ g}=9.8 \text{ m/sec}^2)$  인 상태로 50~165 Hz 범위의 진동을 인가하였다. 발생 전압, 전류를 측정하기 위해서 임피던스 매칭을 통하여 10 kohm 저항을 연결하였으며 전력계를 통하여 발생 전력을 계측하였다.

### 3. 결과 및 고찰

Fig. 5는 캔틸레버 금속판의 두께를 각 0.3 mm, 0.4 mm, 0.5 mm, 0.6 mm로 하였을 때의 캔틸레버별 무게 추 변화에 따른 발전량을 나타낸다.

Fig. 5(a)는 0.3 mm 금속판에서 무게 추 변화에 따른 발전량을 나타낸다. 무게 추가 없는 0 g 일 때 113 Hz에서 최대의 발전량이 나타났으며, 무게 추가 1.1 g 일 때는 92 Hz, 2.2 g 일 때는 80 Hz, 3.3 g 일 때는 73 Hz에서 최대 발전량이 나타났다.

Fig. 5(b)는 0.4 mm 금속판에서 무게 추 변화에 따른 발전량을 나타낸다. 무게 추 0 g, 1.1 g, 2.2 g, 3.3 g 일 때 각각 주파수 130 Hz, 114 Hz, 102 Hz, 94 Hz에서 최대 발전량이 나타났다.

Fig 5(c)는 0.5 mm 금속판에서 무게 추 변화에 따른 발전량을 나타낸다. 무게 추 0 g, 1.1 g, 2.2 g, 3.3 g 일 때 각각 주파수 144 Hz, 129 Hz, 118 Hz, 109 Hz에서 최대 발전량이 나타났다.

Fig 5(d)는 0.6 mm 금속판에서 무게 추 변화에 따른 발전량을 나타낸다. 무게 추 0g, 1.1 g, 2.2 g, 3.3 g 일 때 각각 주파수 137 Hz, 120 Hz, 108 Hz, 99 Hz 에서 최대의 발전량이 나타났다.

캔틸레버의 금속판 두께가 두꺼워 질수록 높은 공진주파수를 보이는 경향을 나타내며 일정 두께 이상의 금속판을 사용할 경우 공진주파수 낮아지는 것으로 보였으며 두께가 두꺼워 질수록 높은 출력량을 보이는 것을 확인하였다.

Fig. 6(a)는 무게 추의 증가에 따른 최대전력을 나타낸 것이며 Fig. 6(b)는 무게 추의 증가에 따른 최대전력이 발생하는 주파수를 나타내며 것이다.

Fig. 6(a)에서 캔틸레버의 금속판 두께가 0.1 mm 증가할수록 7~22 Hz 증가된 주파수 영역에서 최대 발전량이 나타났다. Fig. 6(b)는 무게 추가 증가할수록 최대 전력값이 증가하는 경향을 나타낸다. 금속판의 두께가 0.1 mm 증가할수록 3.6~13.4 mW 더 높은 최대 전력값이 나타났다. 금속판의 두께가 얇아지고 무게 추가 증가할수록 낮은 주파수 영역에서 더 높은 발전량을 얻을 수 있는 것을 확인할 수 있었다.

Table 1은 금속판의 두께와 무게 추의 무게에 따른 발전량 3 mW 이상과 5 mW 이상의 평균 발전량을 나타낸 표이다. 금속판의 두께가 0.1 mm 두꺼워 질수록 평균 발전량이 1.5~4.7 mW 높아졌고, 무게 추가 1.1 g씩 증가할수록 평균 발전량이 0.4~2.3 mW 높아지는 것을 확인하였다.

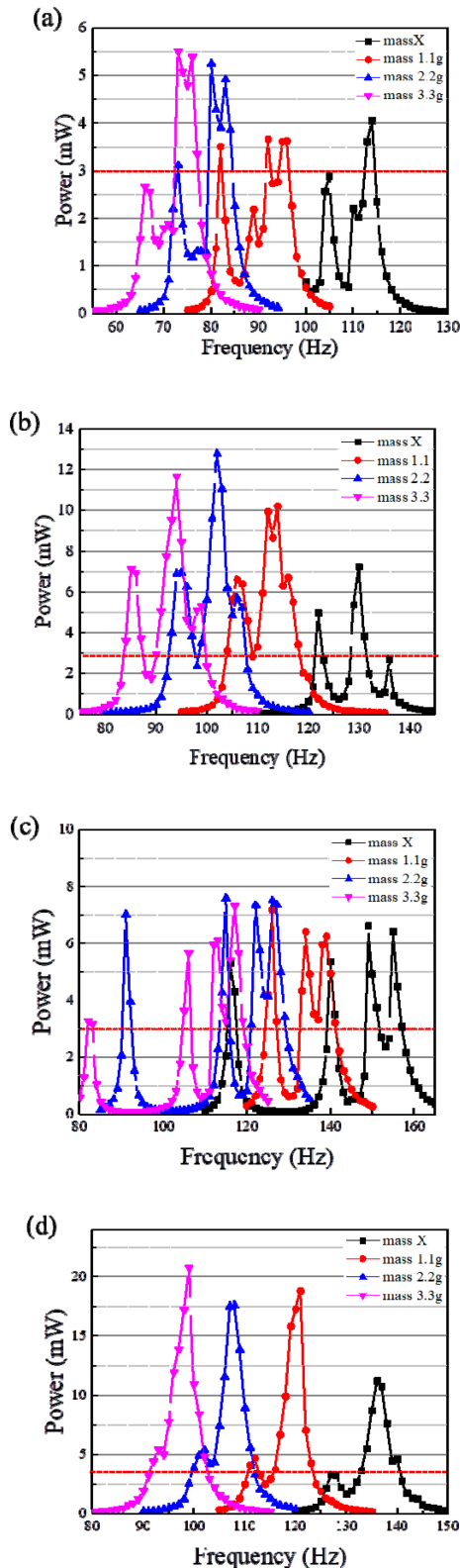


Fig. 5. Comparison of power generation by piezoelectric cantilever by thickness according to weight change (a)0.3 mm (b)0.4 mm (c)0.5 mm (d)0.6 mm.

Table 2는 금속판의 두께와 무게 추의 무게에 따른 발전량

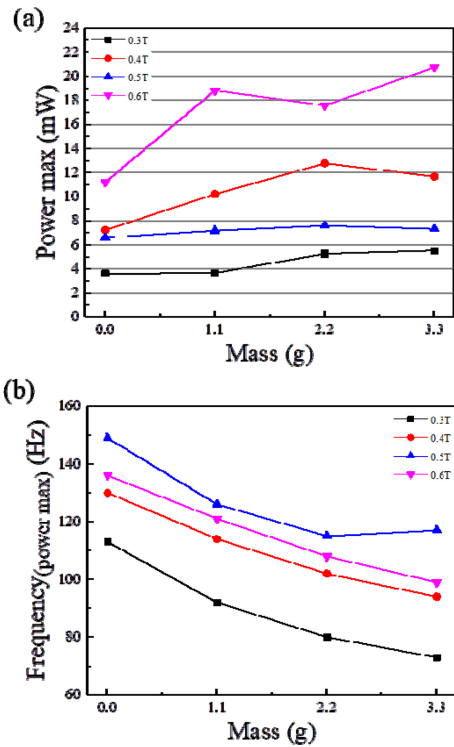


Fig. 6. Thickness of piezoelectric cantilever according to weight change (a)maximum power (b)frequency of maximum power.

Table 1. Average power generation over 3mW, 5mW according to cantilever thickness and mass change.

mass/ Thickness	Power average(3mW over) (mW)			
	0.3 mm	0.4 mm	0.5 mm	0.6 mm
0 g	3.834	5.344	4.771	6.291
1.1 g	3.602	6.174	4.793	8.683
2.2 g	4.222	6.609	5.440	8.341
3.3 g	4.824	6.398	4.707	9.484
mass/ Thickness	Power average(5mW over) (mW)			
	0.3 mm	0.4 mm	0.5 mm	0.6 mm
0 g	-	6.297	5.919	8.753
1.1 g	-	7.198	6.451	12.581
2.2 g	5.246	7.632	7.096	10.976
3.3 g	5.325	7.442	6.022	12.048

3 mW 이상과 5 mW 이상의 발전량을 보이는 구간의 주파수폭을 나타낸 표이다. 금속판의 두께가 증가될수록 주파수폭이 넓어지는 것을 확인하였다. 무게 추가 증가할수록 주파수폭이 넓어지다 3.3 g의 무게 추를 부착 하였을 때 주파수폭이 줄어드는 것을 확인하였다.

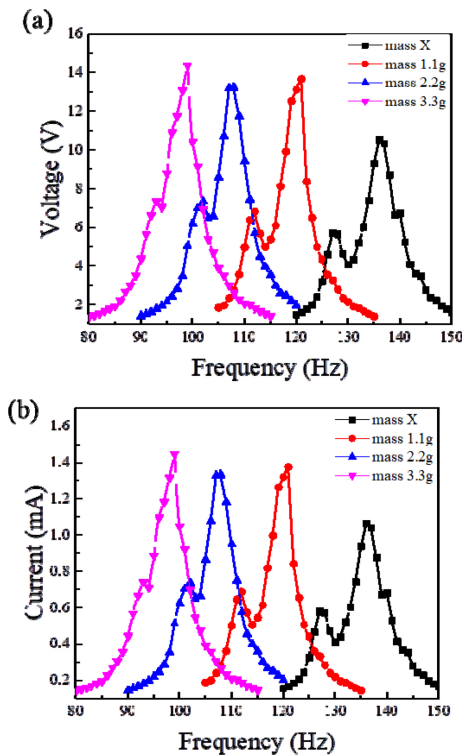
Fig 7은 가장 좋은 특성을 보인 0.6 mm 두께의 캔틸레버에서 전압과 전류 값을 나타낸 그래프이다. 무게 추의 무게가 늘어남에 따라 전압과 전류 값이 상승하는 것을 확인하였으며 무게 추

**Table 2.** Width of the frequency range when the generation is greater than 3 mW, 5mW depending on the thickness and weight of the cantilever.

mass/ Thickness	Frequency width(3mW over) (Hz)			
	0.3 mm	0.4 mm	0.5 mm	0.6 mm
0 g	2	3	10	10
1.1 g	4	14	12	11
2.2 g	6	14	13	13
3.3 g	5	13	12	12

mass/ Thickness	Frequency width(5 mW over) (Hz)			
	0.3 mm	0.4 mm	0.5 mm	0.6 mm
0 g	0	2	4	5
1.1 g	0	10	4	6
2.2 g	1	10	6	8
3.3 g	3	9	6	8



**Fig. 7.** (a)Voltage and (b)current according to mass change on 0.6T metal plate.

의 무게가 늘어날수록 중간에 감소하는 발전량과 발전량이 감소하는 폭이 감소하는 것을 확인할 수 있었다.

#### 4. 결 론

본 연구에서는 캔틸레버 형태 압전 모듈의 단점인 좁은 주파수폭을 보완하고자 캔틸레버의 두께와 무게 추의 무게를 조절

하여 제작하였다. 다양한 진동환경에서의 발생 전력을 조사하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 캔틸레버형 압전 모듈은 무게 추의 무게가 1.1g 증가할수록 주파수 대역대가 10~20 Hz씩 낮아지고 발전량이 증가하는 경향을 나타내었다.

2. 캔틸레버의 금속판 두께가 0.1mm 증가함에 따라 최대 발생 전력이 나타나는 진동 주파수대역이 15~20 Hz 높아지는 것을 확인하였다.

3. 캔틸레버 금속판의 두께가 증가함에 따라 평균 발전량이 증가하는 것을 확인하였으며 동일한 금속판 두께에서 무게 추의 무게가 늘어날수록 평균 발전량이 증가하였다.

4. 3.3g의 무게 추와 0.6mm의 금속판으로 제작된 압전 에너지 하베스터는 91-102 Hz 범위에서 3 mW 이상의 발전량을 보였으며, 평균 발전량은 9.484 mW이고 99 Hz에서 최대 전력 20.748 mW을 얻었다.

#### REFERENCES

- [1] S. Roundy, P. K. Wright, and J. Rabaey, "A study of low level vibrations as a power source for wireless sensor nodes", *Comput. Commun.*, Vol. 26, No. 11, pp. 1131-1144, 2003.
- [2] C. I. Kim, Y. H. Jeong, W. I. Park, J. H. Cho, Y. H. Jang, B. J. Choi, S. S. Park, and J. H. Paik, "Development and Evaluation of Rack Type Piezoelectric Harvester for Smart-Street Lamps Control", *J. Korean Inst. Electr. Electron. Mater. Eng.*, Vol. 29, No. 11, pp. 696-701, 2016.
- [3] C. I. Kim, Y. H. Jeong, J. S. Yun, Y. W. Hong, Y. H. Jang, B. J. Choi, S. S. Park, C. M. Son, D. K. Seo, and J. H. Paik, "Development and Evaluation of Self-powered Energy Harvester in Wireless Sensor Node for Diagnosis of Electric Power System", *J. Sens. Sci. Technol.*, Vol. 25, No. 5, pp. 371-376, 2016.
- [4] M. Ferrari, V. Ferrari, M. Guizzetti, B. And'ò, S. Baglio, and C. Trigona, "Improved energy harvesting from wideband-vibrations by nonlinear piezoelectric converters", *Sens. Actuators A*, Vol. 162, No. 2, pp. 425-431, 2010.
- [5] I.-H. Kim, H.-J. Jung, B. M. Lee, and S.-J. Jang, "Broad-band energy harvesting using a two degree-of-freedom vibrating body", *Appl. Phys. Lett.*, Vol. 98, pp. 214102(1)-214102(3), 2011.
- [6] A. Hajati and S.-G. Kim, "Ultra-wide bandwidth piezoelectric energy harvesting", *Appl. Phys. Lett.*, Vol. 99, pp. 083105(1)-083105(3), 2011.
- [7] P. Pillatsch, L. M. Miller, E. Halvorsen, P. K. Wright, E. M. Yeatman, and A. S. Holmes, "Self-tuning behavior of acclamped-clamped beam with sliding proof mass for broadband energy harvesting", *J. Phys. Conf. Ser.*, Vol. 476, pp. 1-5, 2013.
- [8] N. Aboufotouh, J. Twiefel, M. Krack, and J. Wallaschek, "Experimental study on performance enhancement of piezoelectric vibration energy harvester by applying sel-

- fresonating behavior”, *Energy Harvest. Syst.*, Vol. 4, pp. 131-136, 2017.
- [9] W. Wu, Y. Chen, B. Lee, J. He, and Y. Peng, “Tunable resonant frequency power harvesting devices”, *Proc. SPIE*, Vol 6169, 61690A(1)-61690A(8), 2006.
- [10] E. S. Leland and P. K. Wright, “Resonance tuning of piezoelectric vibration energy scavenging generators using compressive axial preload”, *Smart Mater. Struct.*, Vol. 15, pp. 1413-1420, 2006.
- [11] Y. Hu, H. Xue, H. Hu, “A piezoelectric power harvester with adjustable frequency through axial preloads”, *Smart Mater. Struct.*, Vol. 16, pp. 1961-1966, 2007.
- [12] C. Eichhorn, F. Goldschmidtboeing, and P. Woias, “A frequency tunable piezoelectric energy converter based on a cantilever beam”, *Proc. PowerMEMS*, Vol. 9, No. 12, pp. 309-312, 2008.
- [13] T. Reissman, E. M. Wolff, and E. Garcia, “Piezoelectric resonance shifting using tunable nonlinear stiffness”, *Proc. SPIE*, Vol. 7288, 72880G(1)-72880G(12), 2009.