

주파수 조정에 따른 에너지 하베스팅용 압전 캔틸레버의 특성

김형찬* · 송현철 · 정대용[†] · 김현재 · 윤석진 · 주병권*

한국과학기술연구원 박막재료연구센터

*고려대학교 전자전기공학과

Frequency Tuning of Unimorph Cantilever for Piezoelectric Energy Harvesting

Hyung-Chan Kim*, Hyun-Cheol Song, Dae-Yong Jeong[†], Hyun-Jai Kim, Seok-Jin Yoon and Byeong-Kwon Ju*

Thin Film Materials Research Center, Korea Institute of Science & Technology, Cheongryang, Seoul 130-650, Korea

*School of Electrical Engineering, College of Engineering, Korea Univ. Korea

(2007년 9월 21일 접수 : 2007년 12월 6일 채택)

Abstract Piezoelectric energy harvesting from our surrounding vibration has been studied for driving the wireless sensor node. To change the vibration energy into the electric-energy efficiently, the natural frequency of cantilever needs to be adjusted to that of a vibration source. When adding 6.80g mass on the end of the fabricated cantilever, a natural frequency shifts from 136 Hz into 49.5 Hz. In addition, electro-mechanical coupling factor increased from 10.20% to 11.90% and resulted in the 1.18 times increase of maximum output power.

Key words Energy harvesting, Piezoelectric, Frequency tuning.

1. 서 론

반도체 기술의 발전에 의한 저전력형 CMOS의 개발로 자기 발전형 USN (Ubiquitous Sensor Networks) 구축에 관한 관심이 높아지고 있다. USN은 많은 수의 무선 센서노드(wireless sensor node)를 넓은 면적에 임의로 분포시켜 주위환경을 감시하고, 실시간으로 모니터링하는 것을 주요 쟁점으로 하고 있다. 그러나 넓은 면적에 임의적으로 분포된 센서노드를 구동하기 위하여, 배터리를 이용하여 주기적으로 교환하거나 전원코드를 이용하기 위하여 전선을 연결하는 것은 현실적으로 매우 어려운 일이다. 따라서, 외부의 버려지는 태양열, 진동, 열 등의 에너지를 유용한 전기에너지로 변환시키는 에너지 하베스터(harvester)를 이용하여 센서노드를 구동시키는 방법이 관심을 끌고 있다.¹⁻⁶⁾

에너지 하베스팅을 위한 에너지원으로는 온도차, 기계적 진동, 태양열, 바람 등 많은 방법들이 있으나 그중 기계적 진동은 power density가 높으며, 기후에 영향을 받지 않으며, 실내외에 구애를 받지 않아 에너지 하베스팅 응용에 많은 관심을 받아 왔다.

기계적인 진동에서 전기에너지를 생산하기 위해서는 일반적으로 전자석, 정전기, 압전현상을 이용한다. 그 중 압전현상을 이용한 발전은 높은 에너지 밀도와 비교적 간

단한 발전기기의 구조로 많이 연구되고 있다. 압전발전에서 생성되는 전기적인 에너지는 기계적 에너지를 전기 에너지로 변환하는 재료의 기계-전기 결합계수(k)의 제공에 비례하며, k 값이 0.5인 세라믹 압전재료 $Pb(ZrTi)O_3$ 가 많이 이용되고 있다.⁷⁾ 그러나 세라믹은 매우 단단하여 적은 진동에서 에너지를 발생할 수 없으며, 또한 잘 깨져서 큰 변형에는 사용할 수 없는 단점이 있다. 따라서, 압전 에너지 하베스팅에는 외부의 진동을 효과적으로 세라믹에 전달하여 세라믹의 변형을 크게 만들 수 있는 구조를 이용한다. 그중, “세라믹/유연한 기판” 구조의 캔틸레버(cantilever)는 작은 진동을 효과적으로 큰 변위로 확대할 수 있고, 세라믹의 깨지는 것을 억제할 수 있어 에너지 하베스팅에 많이 이용되고 있다.⁸⁾

캔틸레버에서 외부 진동 에너지가 효과적으로 전기적인 에너지로 변환되기 위해서는 캔틸레버의 고유 진동수(natural frequency)가 진동원(vibration source)의 주파수와 일치하여 공진(resonance)을 일으켜야 한다. 그런데 일반적으로 사용되는 압전체 캔틸레버의 고유주파수는 우리 주변에서 쉽게 접할 수 있는 진동원인 냉장고, 전자레인지 등의, 진동 주파수인 수십~300 Hz에 비해 높아서 압전발전 효율을 높이기 위해서는 압전체 캔틸레버의 고유주파수를 낮추어야 한다. 압전 캔틸레버의 고유주파수를 낮추기 위해서는 압전 캔틸레버의 길이를 길게 하거나, 캔틸레버의 끝에 표준질량(proof mass)를 달아 무게를 증가시켜야 한다. 그런데, 압전 캔틸레버의 길이를

[†]Corresponding author

E-Mail : dyjeong@kist.re.kr (D. Y. Jeong)

크게 하면 전체 에너지 하베스팅 기기의 크기가 증가하여 소형화에 적합하지 않기 때문에, 일반적으로 캔틸레버의 끝의 일정무게의 표준질량(*proof mass*)을 달아 무게를 증가시켜 캔틸레버의 주파수를 낮춘다.⁹⁻¹¹⁾

본 연구에서는 압전 세라믹을 비교적 유연한 기관인 FRP (Fiber Reinforced Plastic)에 부착하여 에너지 하베스터를 제작하였으며, 캔틸레버 끝에 표준질량을 달아 압전 캔틸레버의 고유주파수의 변화를 관찰하고, 이를 이용하여 압전 캔틸레버의 에너지 하베스팅 특성을 관찰하였다.

2. 실험 방법

Fig. 1은 실험에서 사용하기 위하여 제작한 유니몰프(*uni-morph*)형 캔틸레버의 모식도이다. 본 실험에서 사용한 기관은 FR-4 (Young's modulus는 17 GPa)로 비교적 탄성이 우수하며 크기는 85×12×1.6 mm³이며, 사용한 세라믹은 PZT계 세라믹으로 (동일기연, D223, piezoelectric constant $d_{31} = 250 \text{ pm/V}$, 유전율 = 17.6 nF) 크기는 10×35×0.3 mm³이었다. 캔틸레버의 고정부분을 vibration excitor (Type 4809 : brel & kjær)의 진동부위에 완전 밀착하여 흔들리지 않도록 고정 한 후 캔틸레버에 진동을 가했으며, 캔틸레버의 고유 주파수를 변화시키기 위해서 캔틸레버

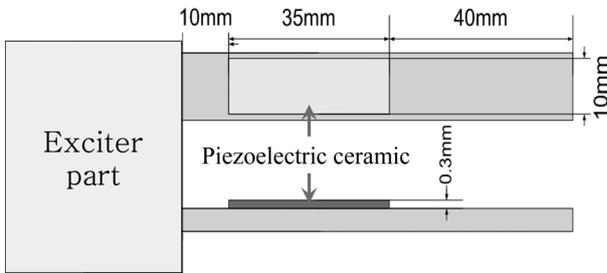


Fig. 1. Schematics of the piezoelectric unimorph cantilever.

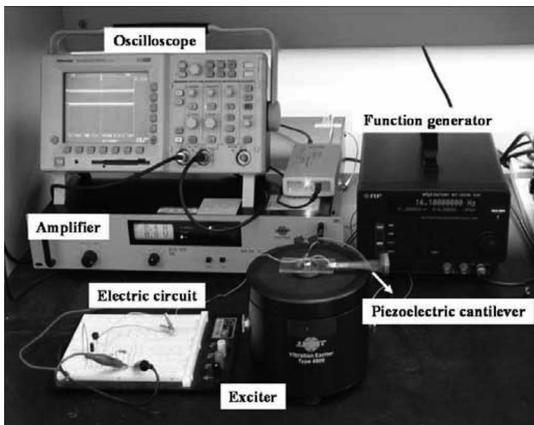
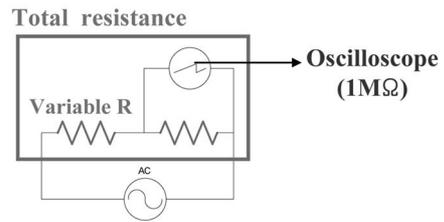


Fig. 2. Experimental setup with artificial exciter, electric circuit and oscilloscope.



Piezoelectric Energy Harvester

Fig. 3. Schematics of the measurement system of the piezoelectric Energy harvester with resistance

끝에 금속 표준질량을 달아 무게를 변화시켰다.

캔틸레버의 고유 주파수와 출력 전압은 Fig. 2의 측정 장치들을 이용하여 측정하였다. 캔틸레버는 고유주파수에서 운동이 최대가 되며, 이 때 출력 전압의 크기도 최대가 된다. 따라서 캔틸레버의 고유 주파수는 Fig. 2의 function generator의 주파수를 변화시키면서 출력전압이 최대가 되는 곳에서 결정하였다. 또한, 캔틸레버의 고유 주파수의 변화는 캔틸레버의 끝에 표준질량의 무게를 변화시켜 관찰하였다. 한편, 압전하베스터에 의해 발생하는 출력파워는 Fig. 3에서 외부회로의 저항을 변화시키면서 발생하는 전압을 오실로스코프(TDS3032 : Tektronix) 로 측정하여 계산하였다.

3. 결과 및 고찰

Fig. 4은 캔틸레버의 끝에 표준질량(*m*)을 변화시키면서 측정한 고유 주파수를 나타낸 결과이다. 무게를 가해 주지 않을 때의 고유 주파수는 136.0 Hz였으며, 표준질량의 무게가 증가할수록 고유 주파수가 감소하였다. 일반적으로 캔틸레버의 고유 주파수(f_n)는 가해주는 무게에 반비례하는 것으로 알려져 있어 ($f_n \propto \frac{1}{\sqrt{m}}$),¹²⁾ 측정한 값으로부터 가해주는 무게에 따른 고유주파수의 변화 관계식을 다음과 같이 유도하였다.

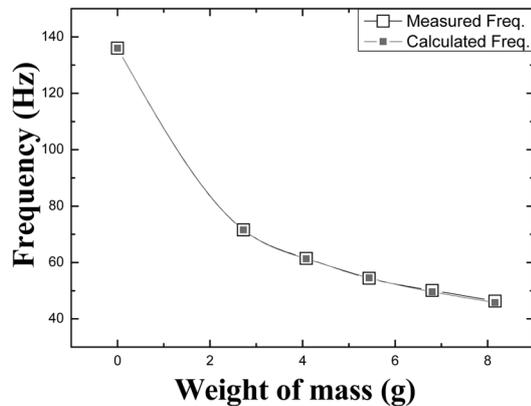


Fig. 4. Variation of measured and calculated natural frequency of cantilever with the addition of proof mass.

$$f_n = \frac{f_0}{\sqrt{\alpha m + 1}} \quad (1)$$

여기서 f_n 은 캔틸레버의 고유 주파수(Hz)이며, f_0 는 캔틸레버에 표준질량을 붙이지 않았을 때의 고유 주파수로 본 실험에서는 136.0 Hz이다. α 는 캔틸레버의 종류에 따라 변화하는 상수로 본 실험에서는 0.9587을 얻을 수 있었다. m 은 캔틸레버에 가해진 표준질량이며 단위는 g이다. Fig. 4에서 표준질량을 변화시키면서 측정된 주파수 값과 식 1을 이용하여 계산한 값이 비교적 잘 일치하는 있음을 알 수 있다. 이러한 결과는 표준질량의 무게를 변화시키므로써 특정 주파수를 가지는 진동원에서 최대 출력을 보이는 캔틸레버를 제작할 수 있음을 보여준다.

캔틸레버의 진동 크기는 캔틸레버의 고유진동수가 진동원의 주파수와 일치할 때 최대가 되며, 진동원의 주파수가 고유진동수에서 벗어나면 진동의 크기는 급격히 감소한다. 이와 같은 캔틸레버의 고유진동수가 주파수에 민감한 정도는 캔틸레버의 기계적 품질계수(Q)로 나타낼 수 있다. 캔틸레버의 품질계수(Q)가 클수록, 캔틸레버가 공진하는 주파수 영역이 상대적으로 좁아져 캔틸레버의 진동이 주파수에 따라 급격하게 줄어들게 된다. 반면에 기계적 품질계수(Q)가 작으면, 주파수에 따른 캔틸레버의 고유진동수 범위가 상대적으로 넓으므로 공진 진동이 넓은 범위의 주파수대역에서 일어나게 된다. 그러므로 주파수가 약간씩 변화하는 심체 진동에 사용하기 위해서는 캔틸레버의 공진주파수 대역이 어느 정도 넓은 영역을 가지도록 제작할 필요가 있다. Fig. 5는 0, 4.08, 6.80 g의 서로 다른 무게의 표준질량을 캔틸레버 끝에 달았을 때 캔틸레버의 주파수에 따른 출력전압을 측정된 결과이다. 여기의 측정된 결과로부터 캔틸레버의 기계적 품질계수를 다음 식을 이용하여 계산 하였다.

$$Q = \frac{f_{center}}{\Delta f} \quad (2)$$

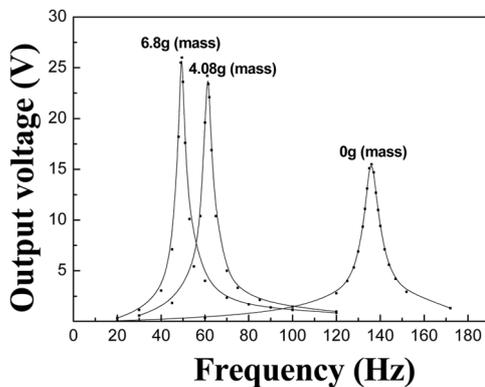


Fig. 5. Output voltage according to different weight of proof mass.

위 식에서 f_{center} 는 각 캔틸레버의 출력이 최대가 되는 중심주파수(center frequency)로 캔틸레버의 고유 주파수와 일치하며, Δf 는 최대출력이 1/2 이 되는 지점에서의 주파수의 폭을 나타낸다.¹³⁾ 위식으로부터 기계적 품질계수는 무게가 0, 4.08, 6.80 g일 때 각각 12.40, 9.04, 8.28로 감소하는 경향을 보였다. 이러한 결과는 캔틸레버의 끝에 무게를 가할수록 캔틸레버의 고유주파수는 감소하고, 캔틸레버의 출력이 진동원의 주파수변화에 민감해지는 것을 알 수 있다.

Fig. 6는 각각 무게를 가하지 않은 캔틸레버와 6.80g 가한 캔틸레버의 고유 주파수 136.0 Hz와 49.5 Hz에서 동일한 기계적인 에너지를 가하면서 측정된 출력전압 결과이며, Fig. 7은 측정된 출력전압으로부터 계산한 파워를 나타낸 결과이다. 외부 저항이 증가함에 따라 출력전압이 증가하였으며, 외부저항이 각각 70 k Ω , 190 k Ω 일 때 최대 파워를 얻을 수 있었으며, 여기에서 전기적 임피던스 매칭 (electrical impedance matching)이 각각 일어났다고 볼 수 있다. 압전하베스터의 출력이 최대가 되는 압전체의 임피던스는 다음의 식에 의해 계산되어질 수 있다.

$$Z = \frac{1}{2\pi fC} \quad (3)$$

Z는 캔틸레버의 임피던스, f 는 캔틸레버의 주파수, C는 세라믹의 전기용량(capacitance)을 각각 나타낸다. 위 식을 이용하여 캔틸레버의 임피던스를 계산한 결과 67.30 k Ω , 184.88 k Ω 값을 얻을 수 있었으며, 측정값과 계산값이 거의 비슷한 결과를 나타내고 있음을 알 수 있다. 6.80 g의 표준질량을 가한 캔틸레버의 경우, 세라믹의 전기용량은 같으나 고유 진동수가 무게를 가하지 않는 경우에 비해 감소하여 파워가 최대가 되는 임피던스 값이 증가하였다. 한편, 표준질량 6.80 g을 붙인 캔틸레버의 최대 출력파워는 0.4543 mW로 표준질량을 붙이지 않는 캔틸레버의 최대 파워 0.3679 mW 보다 1.23배 큰 값을 나타내었다. 이러한 결과는 표준질량의 무게를 증가시킬 때

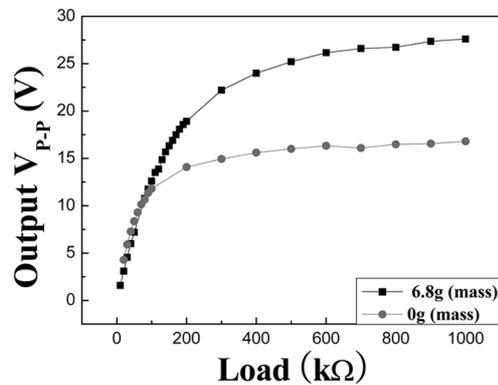


Fig. 6. Variation of measured output voltage with the electrical load.

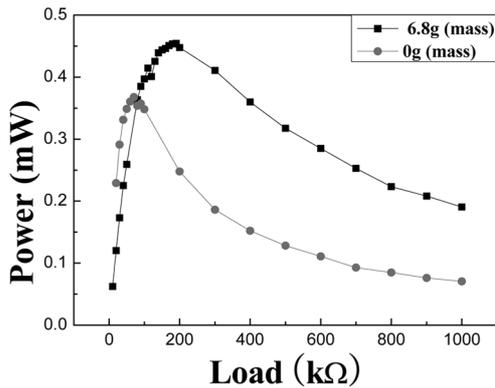


Fig. 7. Variation of calculated power with the electrical load.

출력이 증가한다는 Roundy 등의 계산결과와 일치하며,¹⁴⁾ 캔틸레버의 끝에 무게를 가함으로써 가해주는 기계적인 에너지가 효과적으로 기관에 전달되어 기관의 변위를 증가시켜서 세라믹의 변형을 크게 한 것으로 판단된다.

압전 에너지 발전기의 출력파워는 캔틸레버의 전기-기계결합계수의 제곱에 비례하며, 표준질량의 무게를 변화시킨 캔틸레버의 전기-기계결합계수 k_{31} 값은 다음과 식을 이용하여 측정할 수 있다.¹⁵⁾

$$k_{31} = \sqrt{\frac{f_{open}^2 - f_{short}^2}{f_{short}^2}} \quad (4)$$

f_{short} 는 세라믹을 전기적으로 short시킨 상태에서 측정된 고유주파수이며, f_{open} 는 세라믹을 전기적으로 open시킨 상태에서 측정된 고유 주파수이다. 캔틸레버의 전기-기계결합계수는 0, 6.80 g 가했을 때 각각 10.20%, 11.09%로 계산되었다. 최대 출력전압은 전기-기계결합계수의 제곱에 비례하므로, 6.80 g을 가했을 때 최대 출력전압은 0 g을 가했을 때보다 1.18배 큼을 알 수 있다.¹⁶⁾ 이러한 결과는 Fig. 7에서 계산한 1.23배와 비교적 일치함을 알 수 있다. 따라서 캔틸레버의 끝에 무게를 가하면 캔틸레버의 전기-기계 결합계수가 증가하고 이로 인해 출력파워가 증가한 것으로 생각된다.

4. 결 론

본 연구에서는 유연한 압전 캔틸레버에 무게를 가하여 고유진동수의 변화를 관찰하고, 에너지 하베스팅 특성을 평가하였다. 캔틸레버에 표준질량을 가해줌에 따라, 고유주파수는 표준질량의 무게에 제공근에 반비례함을 확인하였으며, 표준질량이 증가함에 따라 캔틸레버의 기계적 품질계수는 감소하는 것을 관찰하였다. 또한 표준질량이 증가함에 따라 압전하베스터의 전기-기계적 결합계수가 증

가하고 이에 따라 파워가 증가함을 관찰하였다. 본 연구에서 제작한 유연한 캔틸레버의 경우, 표준질량을 가지 않았을 때 고유진동수는 136 Hz, 품질계수는 12.40, 전기-기계결합계수는 10.20%였으나, 6.80 g의 표준무게를 가했을 때 고유주파수는 49.5 Hz, 품질계수는 8.28, 전기-기계결합계수는 11.09%를 나타내었다. 이러한 측정, 계산한 결과를 사용하면 실제 다양한 진동환경에서 구동할 수 있는 고효율의 캔틸레버형 압전에너지 하베스터를 디자인 할 수 있을 것으로 생각된다.

감사의 글

연구는 KIST의 기관고유(코드번호 2E19860)와 기초기술이사회 정책과제(코드번호 2N30500) 지원에 의하여 연구되었으며 이에 감사드립니다.

참 고 문 헌

1. J. M. Rabaey, M. J. Ammer, J. L. da Silva Jr, D. Patel, and S. Roundy, *Comput.*, **33**(7), 42 (2000).
2. P. Smalser, U.S. Patent, 5703474 (1997).
3. S. Roundy, P. K Wright, and J. M. Rabaey, *Energy Scavenging for Wireless Sensor Networks with special Focus on Vibrations*, Kluwer Academic Pub., Norwell (2004).
4. K. Ren, Y. Liu, X. Geng, H. F. Hofmann, and Q. Zhang, *IEEE Trans. Ultrason. Ferroelect. Freq. Contr.*, **53**(3), 631 (2006).
5. H. W. Kim, A. Batra, S. Priya, K. Uchino, D. Markley, R. E. Newnham, and H. F. Hofmann, *Jpn. J. Appl. Phys.*, **43**(9), 6178 (2004).
6. G. K. Ottman, H. F. Hofmann, and G. A. Lesieutre, *IEEE Trans. Power Electron.*, **18**(2), 696 (2003).
7. K. Uchino and J. R. Giniewicz, *Micromechanics*, Marcel Dekker, Inc., New York, (2003).
8. H. C. Kim, D. Y. Jeong, S. J. Yoon and H. J. Kim, *Kor. J. Mater. Res.*, **17**(2), 121 (2007).
9. S. Roundy, P K Wright, *Smart Mater. Struct.* **13**, 1131 (2004).
10. S. Roundy, E. S. Leland, J. Baker, E. Carleton, E. Reilly, E. Lai, B. Otis, J. M. Rabaey, P. K. Wright and V. Sundararajan, *IEEE Pervasive Computing* **1**, 28-36 (2005).
11. H. B. Fang, J. Q. Liu, Z. Y. Xu, L. Dong, D. Chen, B. C. Cai, Y. Liu, *CHIN. PHYS. LETT.* **23**(3), 732 (2006).
12. R. D. Blevins, *Formulas for natural frequency and more shape*. Krieger publishing company, Malabar, Florida (2001).
13. Z. Y. Cheng, T. B. Xu, Q. Zhang, R. Meyer Jr, D. Van Tol, J. Hughes, *IEEE Trans. Ultrason. Ferroelect. Freq. Contr.*, **49**(9), 1312 (2002).
14. S. Roundy, *Energy Scavenging for Wireless Sensor Nodes with a Focus on Vibration to Electricity Conversion*, Ph.D. Dissertation, The University of California, Berkeley (2003).
15. C. H. Park, *J. Sound and Vibration*, **268**, 115 (2003).
16. Y. Liu, K. L. Ren, Hofmann H. F, Q. Zhang, *IEEE Trans. Ultrason. Ferroelect. Freq. Contr.*, **52**(12), 2411 (2005).