

마이크로 머시닝 기술을 이용한 니켈기반의 압전 진동형 에너지 하베스터 제작

차두열¹, 이재혁¹, 장성필^{1,a}

¹ 인하대학교 전자공학과

Fabrication of Nickel-based Piezoelectric Energy Harvester from Ambient Vibration with Micromachining Technology

Doo-Yeol Cha¹, Jai-Hyuk Lee¹, and Sung-Pil Chang^{1,a}

¹ Department of Electronic Engineering, Inha University, Incheon 402-751, Korea

(Received December 20, 2011; Revised December 22, 2011; Accepted December 24, 2011)

Abstract: Owing to the rapid growth of mobile and electronic equipment miniaturization technology, the supply of micro mobile computing machine has been fast raised. Accordingly they have performed many researches on energy harvesting technology to provide promising power supply equipment to substitute existing batteries. In this paper, in order to have low resonance frequency for piezoelectric energy harvester, we have tried to make it larger than before by adopting nickel that has much higher density than silicon. We have applied it for our energy harvesting actuator instead of the existing silicon based actuator. Through such new concept and approach, we have designed energy harvesting device and made it personally by making with micromachining process. The energy harvester structure has a cantilever type and has a dimension of $10 \times 2.5 \times 0.1 \text{ mm}^3$ for length, width and thickness respectively. Its electrode type is formed by using Au/Ti of interdigitate d_{33} mode. The pattern size and gap size is $50 \text{ }\mu\text{m}$. Based on the measurement of the nickel-based piezoelectric energy harvester, it is found to have 778 Hz for a resonant frequency with no proof mass. In that resonance frequency we could get a maximum output power of $76 \text{ }\mu\text{W}$ at $4.8 \text{ M}\Omega$ being applied with 1 g acceleration.

Keywords: Piezoelectric energy harvester, Resonance frequency, Actuator

1. 서론

최근에는 이동 정보통신기술 및 전자기기의 소형화 기술의 급속한 발전에 힘입어 소형 모바일 컴퓨팅 기기의 보급이 비약적으로 증가하고 있다. 특히 입는 컴퓨터의 등장으로 이동 전자 통신기기의 개념은 새로운 국면을 맞고 있으며 인간의 생활 패턴을 크게

바꾸어 놓을 것으로 예상된다. 현재까지 이러한 모바일 기기의 전력은 주로 2차 전지로부터 공급되고 있다. 비록 전자기기의 저전력 소모화가 진행되고 있기는 하지만 하나의 기기 내에 다양한 기능이 추가 통합되고 있기 때문에 전력 소모는 지속적으로 늘어나고 있는 추세이다. 2차 전지 재료, 기술의 발전으로 용량은 지속적으로 증가되고 있지만 전력수요를 충분히 따라가지 못하고 있는 실정이다. 따라서 기존의

a. Corresponding author: spchang@inha.ac.kr

전지를 보완하거나 대체할 수 있는 신개념 전원 공급 장치로써 에너지 하베스팅 기술을 개발하여 적용할 필요가 있다 [2,3,6].

모바일 컴퓨팅 기기 및 입는 컴퓨터의 경우 인체의 움직임으로부터 에너지를 취하여 전원을 공급하는 방법을 고려해 볼 수 있다. 실제로 숨쉬기, 체온, 혈액 순환, 걷기, 팔 운동, 타이핑 등 인간의 움직임으로부터 상당히 큰 에너지가 발생하기 때문에 이를 이용하고자 하는 시도가 있다. 여러 인체 움직임 중에 걷기가 가장 큰 에너지를 발생하는 것으로 알려져 있는데 신발 밑창에 압전체를 장착하여 신발 뒷굽이 지면에 닿을 때 가해지는 압전체의 변형에 의해 전력을 생산할 수 있다.

모바일 컴퓨팅 이외에 장기간 전력 공급이 필요한 중요한 분야 중 하나는 구조 안전진단 시스템 (Structural Health Monitoring System, SHMS)이다. SHMS는 교량, 대형건물, 송유관, 가스관, 비행기 및 자동차 등 수송체의 구조 안정성을 실시간으로 파악 진단하는 시스템으로써 구조의 변위 및 안정성을 측정하는 센서와 센서로부터 전송되는 신호를 처리하여 위험을 판단하는 네트워크로 구성된다. 구조물에는 수많은 센서가 장착되게 되는데 모든 센서의 전력을 유선으로 공급하는 것은 현실적으로 불가능하다. 전지를 사용하여 전력을 공급하게 되지만 전력 공급기간이 제한적이다. 따라서 영구적 자체 전원을 각 센서마다 장착해주는 방안을 마련할 필요가 있다 [6,7].

자체 영구 전원공급 장치로 태양광 또는 풍력발전기를 고려할 수 있을 것이다. 그러나 이러한 장치를 소형 센서에 장착하기에는 비효율적으로 클 뿐만 아니라 가격이 비싸고 일조량과 풍량이 일정치 않은 기상 때문에 안정적 전원공급이 어려워 전원공급 장치로써 적합하지 않다 [8,9].

구조물에는 고유의 진동이 지속적으로 발생한다. 따라서 이러한 진동을 이용하여 에너지를 발생시키는 에너지 하베스팅 기기를 개발하여 기존 전지의 수명을 늘리기 위한 보조 전원 또는 대체 전원으로 사용하는 방안을 고려해 볼 필요가 있다.

본 논문에서는 마이크로 스케일의 압전 에너지 하베스터의 높은 고유진동수를 보완하기 위한 방법으로 치수를 크게 설계하고 기존의 실리콘 기반의 액추에이터가 아닌 실리콘 보다 밀도가 훨씬 높은 니켈을 에너지 하베스팅 액추에이터에 도입하여 새로운 접근 방법을 통한 에너지 하베스팅 디바이스를 구현하였다.

2. 실험 방법

2.1 압전 에너지 하베스터 설계

압전 에너지 하베스팅은 기본적으로 외부의 기계적 에너지를 압전재료에 전달하는 단계, 전달된 기계적 에너지를 압전재료를 이용하여 전기 에너지로 변환하는 단계, 변환된 에너지를 전기적인 회로를 통하여 super-capacitor나 2차 전지에 축전하는 단계 등 크게 3단계의 과정으로 이루어져 있다고 할 수 있다. 따라서 기계적인 에너지를 효과적으로 전기적 에너지로 변환, 저장하기 위해서는 첫 번째로, 외부의 진동을 효과적으로 압전체에 전달할 수 있도록 기계적인 구조들 사이에 mechanical to mechanical coupling이 이루어야 한다. 즉 다시 말해서, 캔틸레버 구조와 같이 외부의 기계적 에너지를 효율적으로 압전체에 전달할 수 있도록 에너지 하베스터의 구조를 효율적으로 설계하는 것이 필요하다고 할 수 있으며 외부 진동과 에너지 하베스터가 기계적 공진을 일으킬 수 있도록 에너지 하베스터의 고유진동수를 외부 진동수에 맞춰주는 frequency tuning 또한, mechanical to mechanical coupling과 관련이 깊다고 할 수 있다. 두 번째로, 기계적 에너지를 전기적 에너지로 효율적으로 변환하는 것이 필요하며, 이는 에너지 하베스터에 사용되는 압전재료의 물성과 관련이 깊다. 2단계에서 얘기하는 mechanical to electrical coupling은 압전재료의 에너지 변환효율을 나타내는 전기-기계결합 계수를 의미한다고 볼 수 있다. 즉 압전 하베스터의 에너지 변환효율을 높이기 위해서는 하베스터에 사용되는 재료 자체의 에너지 변환효율을 높이는 것이 필요하며, 하베스터에 적합한 압전재료를 개발하는 것이 필요하다.

끝으로, 생성된 전기 에너지를 외부회로에 효율적으로 전달하기 위해서 electrical to electrical coupling이 되어야 한다. 교류형태로 발생된 전기 에너지를 이용하거나 충전하기 위해서는 정류회로를 이용하여 직류로 변환하는 것이 필요한데, 이때 정류회로를 지나면서 생기는 에너지 손실을 최소화하는 것이 필요하며, 이를 위해서는 저손실 정류회로에 대한 연구 또한 이루어져야 된다. 뿐만 아니라 회로와 압전체 사이의 임피던스 매칭을 통해 회로와 압전체 사이의 임피던스 불일치에서 오는 에너지 손실을 최소화할 필요가 있다.

앞에서 언급된 것처럼, 압전 에너지 하베스터에서

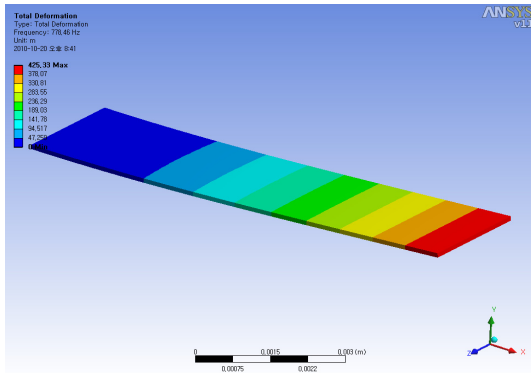


Fig. 1. Cantilever modal simulation.

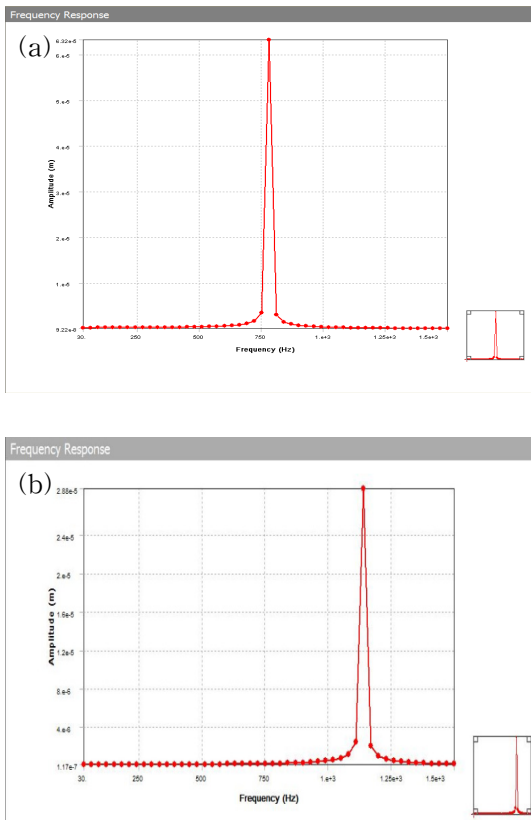


Fig. 2. Cantilever harmonic response. (a) harmonic response of nickel-based cantilever, (b) harmonic response of silicon-based cantilever.

최대 에너지를 얻기 위해서는 에너지 하베스터가 주변 진동과 공진을 이루어야 한다. 우리 주변에서 얻을 수 있는 대부분의 진동 에너지들의 주파수는 200 Hz 이하가 거의 대부분이다. 그러나 마이크로 스케일

압전 에너지 하베스터의 경우, 아래의 캔틸레버의 고유진동수를 나타낸 식에서 알 수 있는 것처럼, 캔틸레버의 고유진동수는 사이즈에 반비례하기 때문에 작은 사이즈의 마이크로 스케일 에너지 하베스터의 고유진동수는 수백 Hz 이상, 심지어는 수 M~GHz를 나타내게 된다. 그러므로 마이크로 스케일의 압전 에너지 하베스터를 실제적으로 적용하기 위해서는 마이크로 스케일 압전 에너지 하베스터의 고유진동수를 낮추어서 주변 진동과 진동수를 매칭하는 것이 필수적이다.

$$f = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{k}{m}} = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{E \cdot w \cdot t^3}{4 \cdot \rho \cdot v \cdot l^3}} \quad (1)$$

f : 고유진동수 w : 캔틸레버의 폭
 k : 스프링 상수 t : 캔틸레버의 두께
 m : 질량 ρ : 밀도
 E : 영률 l : 캔틸레버의 길이

본 논문에서 압전 에너지 하베스터의 고유진동수 및 구동을 알아보기 위하여 유한요소해석 프로그램인 ANSYS를 이용하여 시뮬레이션을 수행하였다. 그림 1은 모드해석을 통해 캔틸레버의 고유진동수를 찾기 위한 시뮬레이션을 나타낸 그림이다. 위와 같은 방법으로 니켈기반의 캔틸레버의 고유진동수를 시뮬레이션을 통하여 예측해 보았다. 주파수해석 결과 1g의 중력가속도를 캔틸레버에 인가했을 때 니켈기반 캔틸레버의 고유진동수가 778.46 Hz가 나오는 것을 확인하였고 최대 변위는 6.32×10^{-5} m의 값을 얻었다. 이 결과는 그림 2(b)의 실리콘 기반의 캔틸레버의 고유진동수인 1137.7 Hz 보다 낮고 최대변위 역시 실리콘 기반의 캔틸레버의 2.88×10^{-5} m 보다 크다는 것을 알 수 있다. 이를 통해 니켈 기반의 캔틸레버가 실리콘 기반의 캔틸레버 보다 낮은 주파수의 진동영역에서 더 효과적인 에너지 하베스터라는 것을 알 수 있다.

2.2 제작

압전 에너지 하베스터 캔틸레버는 니켈기반으로 제작하였고 전극은 금을 사용하여 d_{33} 모드의 전극을 형성하였다. 전체 제작과정은 그림 3의 (a)-(h)에 나타내었다.

우선 기판은 두께가 100 μ m인 니켈 시트이며 그 위에 spin coating으로 PZT (lead zirconate titanate)를 증착하였다. (그림 3(b)) 공정조건으로는 spin coating 방법으로 4,000 rpm에서 20초 간 진행하고 baking으로 hot plate에서 300°C에서 5분 간 진행하였다.

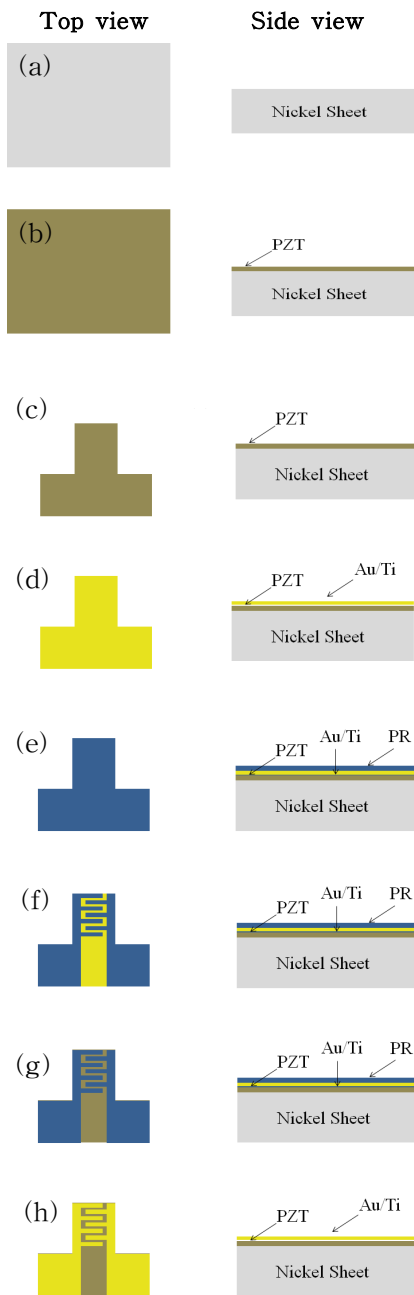


Fig. 3. Fabrication process of nickel-based piezoelectric energy harvester.

PZT를 1 μm 의 두께로 증착하기 위해 위의 과정을 7번 반복하였다. 마지막 annealing 공정을 위해서 RTP (rapidly thermal process)로 650 $^{\circ}\text{C}$ 에서 90초 간 진행하였다. 그 후 상온에서 30분 정도의 냉각으로 1 μm 두께의 PZT 증착이 완료되었다.

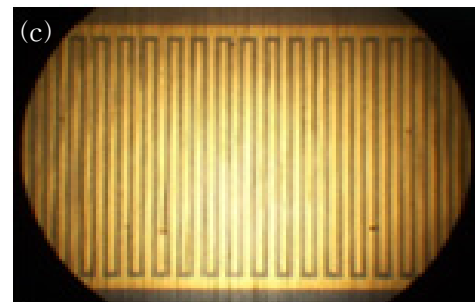
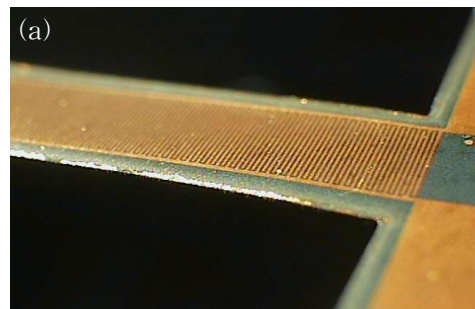


Fig. 4. Fabricated nickel-based piezoelectric energy harvester.

Annealing 공정 시 대부분 550 $^{\circ}\text{C}$ ~700 $^{\circ}\text{C}$ 사이의 온도에서 진행을 하는데 550 $^{\circ}\text{C}$ 로 진행을 하면 성능이 좋지 않게 나와 하베스터로는 무리가 있고 700 $^{\circ}\text{C}$ 로 공정을 진행하는 게 가장 좋으나 메탈에서는 메탈의 산화 등의 이유로 온도가 너무 높아 650 $^{\circ}\text{C}$ 로 진행하였다. 그 다음 laser cutter를 이용하여 원하는 치수의 캔틸레버 모양에 맞춰서 cutting 공정을 진행하였다. (그림 3(c)) 캔틸레버의 크기로는 길이, 폭, 두께가 각각 10 \times 2.5 \times 0.1 mm³로 제작하였다. Cutting으로 원하는 모양과 치수의 캔틸레버를 제작하고 전극을 형성하기 위해 Au/Ti를 RF sputter를 이용하여 증착하였고, 전극의 패턴 및 간격의 사이즈는 50 μm 이다. (그림 3(d)) 증착된 전극을 PR (AZ4620)을 이용하여 align

을 잘 맞춘 후 패턴을 형성하고 (그림 3(f)), 습식 식각으로 드러난 부분의 Au/Ti를 식각하였다. (그림 3(g)) 마지막으로 남은 PR을 아세톤을 이용하여 다 제거함으로써 최종적으로 (그림 3(h))와 같은 니켈기반의 압전 에너지 하베스터를 제작할 수 있었다.

그림 4는 실제로 제작한 니켈기반의 압전 에너지 하베스터의 사진이다.

3. 결과 및 고찰

앞의 공정 과정을 통해 제작한 니켈기반의 압전 에너지 하베스터의 측정에 앞서 우선 무질서한 쌍극자의 d_{33} 모드로의 정렬을 위하여 power supply로 300 V 정도의 고전압을 가해준다. 출력 전압 및 출력 전력 측정을 위해 미리 준비한 shaker (B&K Type 4809)에 제작한 에너지 하베스터를 장착하고 shaker에 function generator를 연결하여 정현파를 가해주었다.

또한 accelerometer (B&K Type 4381)로 1 g의 가속도를 가해주고 가변저항을 이용하여 저항을 변화시켜 주며 oscilloscope로 나오는 출력의 파형을 측정하였다.

측정 결과 778 Hz 대역에서 공진이 일어나는 것을 확인할 수 있었고, 그림 5에서 보는 바와 같이 공진 주파수에서 1 g의 가속도를 가했을 때 4.8 MΩ에서 최대 전력인 76 μW가 발생하는 결과를 얻었다.

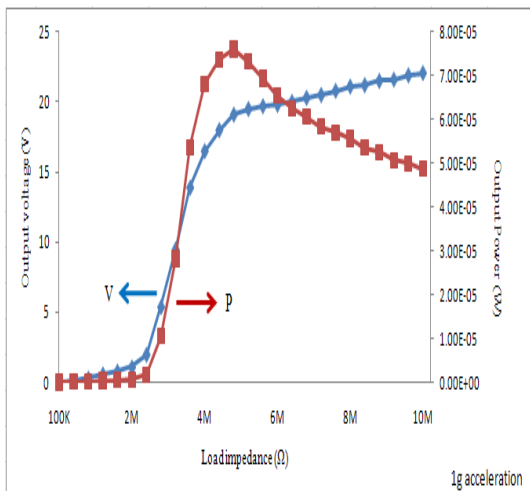


Fig. 5. Graph of output voltage and output power at different resistive loads excited from 1 g acceleration at resonant frequency.

4. 결론

본 논문에서는 마이크로 스케일의 압전 에너지 하베스터의 높은 고유진동수를 보완하기 위한 방법으로 마이크로 단위가 아닌 밀리미터 단위까지 크기를 크게 하고 또한 기존의 실리콘 기반의 액추에이터가 아닌 실리콘보다 밀도가 훨씬 높은 니켈을 에너지 하베스팅 액추에이터에 도입하여 새로운 접근방법을 통한 에너지 하베스팅 디바이스를 설계하고 마이크로 머시닝 공정을 이용하여 직접 제작 후 측정하였다.

제작된 니켈기반의 압전 에너지 하베스터는 시험질량 (proof mass) 없이도 현저하게 고유진동수가 낮은 것을 확인할 수 있었고, 또한 치수를 크게 함으로써 출력 전압 및 전력도 기존의 압전 에너지 하베스터 보다 뛰어난 성능을 나타냄을 확인할 수 있었다. 주파수 778 Hz 대역에서 공진이 일어나고 1 g의 가속도를 가했을 때 4.8 MΩ에서 최대 전력인 76 μW가 발생하는 결과를 얻었다.

또한 다른 공정과정 필요 없이 니켈 캔틸레버의 끝부분에 시험 질량용으로 자석을 붙임으로써 더욱더 공진주파수를 낮추고 제어할 수 있을 것으로 예상되고, 자석을 붙이고 밑단에 인덕터를 설치하여 압전효과 방식과 전자기효과 방식을 동시에 구현하여 자가발전 기술을 접목하여 더욱 고효율의 에너지 하베스터로 에너지 변환효과를 극대화할 수 있을 것으로 예상된다.

그러나 PZT의 annealing 공정 시 700°C 이상에서 진행을 하면 더욱 더 뛰어난 성능을 얻을 수 있는데 메탈의 산화 등의 문제로 650°C에서 진행한 것과 니켈의 단점인 retention loss와 fatigue 등의 점들을 감안하여 새로운 다른 메탈을 도입하여 제작하면 위의 단점들을 보완할 수 있을 것으로 생각된다.

감사의 글

- (1) 이 논문은 2011년 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임
- (2) 본 연구는 지식경제부 IT융합 고급인력과정 지원사업 지원(C6150-1102-0001)으로 수행되었음.

REFERENCES

- [1] D. Y. Cha and S. P. Chang, *J. KIEEME*, **24**, 416 (2011).

- [2] T. W. Choi, C. S. Lee, and S. C. Yoo, *Proc. 2002 Summer Conf. KIEEME* (Korea, 2002) p. 10.
- [3] T. W. Choi and S. C. Yoo, *J. KIEEME*, **15**, 10 (2001).
- [4] T. W. Choi and S. C. Yoo, *J. Mater. Sci.*, **15**, 10 (2001).
- [5] B. S. Lee and W. J. Wu, *IEEE Ultrasonic Symposium* (2007).
- [6] J. H. Lin, X. M. Wu, T. L. Ren, and L. T. Liu, *Integ. Ferroelectr.*, **95**, 128 (2007).
- [7] S. Roudy, E. S. Leland, J. Baker, E. Carleton, E. Reilly, E. Lai, and B. Otis, *IEEE Pervasive Computing*, **4**, 28 (2005).
- [8] R. P. Ribas, J. Lescot, J. L. Leclercq, J. M. Karam, and F. Ndagihimana, *IEEE Trans. Microwave Theory Tech.*, **48**, 2415 (2000).
- [9] J. B. Yoon, Y. S. Choi, B. I. Kim, Y. S. Eo, and E. S. Yoon, *IEEE Electron Devices Lett.*, **23**, 591 (2002).
- [10] T. Biondi, A. Scuderi, E. Ragonese, and G. Palmisano, *IEEE Trans. Microw. Theory Tech.*, **54**, 2203 (2006).