

압전 MEMS 발전기 설계 및 제작

남운우*, 박종철*, 박재영*, 장영수**, 이윤표**
 광운대학교 전자공학과*, 한국과학기술연구원 에너지메카닉센터**

Design and Fabrication of Piezoelectric MEMS Power Generator

Woon-Woo Nam*, Jong Cheol Park*, Jae Yeong Park*, Young Soo Jang**, Yoon Pyo Lee**
 Kwangwoon University*, Korea Institute of Science & Technology**

Abstract - 본 논문에서는 박막 PZT(Pb(Zr,Ti)O3)를 이용한 d33모드의 자가 발전 소자를 설계 및 제작 하였다. 자가 발전 소자는 진동 에너지를 압전 현상을 통해 전기 에너지로 변환하는 소자로서, 제한된 구조는 단일 외팔보가 아닌 20개 이상의 외팔보를 원형으로 집적한 구조를 갖기 때문에, 기존의 단일 외팔보 위주의 자가발전 소자보다 출력 전력이 우수하다. 자가 발전 소자의 성능 최적화를 위해 유한요소기법(FEM)을 통해 기계적 특성을 분석하였으며, 마이크로 머시닝 기법을 이용하여 초박형의 자가 발전 소자를 제작할 수 있었다. 제작된 자가발전 소자는 1.2mm × 1.2mm × 0.5mm (높이)의 크기를 갖는다.

1. 서 론

무선 센서 네트워크 대한 관심이 날로 증가하면서, 무선 센서 디바이스에 전원을 공급하는 방법이 큰 쟁점이 되고 있다. 대부분의 무선 디바이스는 전기 화학 방식을 이용하여 전원을 공급한다. 전기 화학 방식은 수명이 제한적이기 때문에 주기적으로 배터리를 교환해야하며, 보관 조건이 까다롭다. 예를 들어 타이어 압력 모니터링 시스템용 압력 센서의 경우 센서의 수명은 센서에 내장된 배터리의 수명으로 제한된다. 따라서 반영구적이면서 소형화가 가능하여 기존의 전기 화학 방식을 대체할 수 있는 전원 방식에 대한 연구가 필요하다 하겠다.

무선 디바이스를 효과적인 동작을 위해 자체 발생된 전원으로 동작되는 에너지 수집에 관한 연구가 많이 이루어지고 있다 [1]. 에너지 수집을 위한 에너지원으로 온도차, 기계적 진동, 태양열, 바람 등 많은 방법이 있지만, 그 중에서 기계적 진동은 실내외, 기후에 영향을 받지 않기 때문에 극한의 환경에서 사용될 수 있는 무선 디바이스에 매우 적합하다 할 수 있다.

기계적 진동에서 전기에너지를 생산하기 위해서는 전자석, 정전기, 압전 현상을 이용한다. 그 중에서도 압전 현상을 이용한 발전은 높은 에너지 변환 효율과 비교적 간단한 발전기기의 구조를 갖기 때문에 많이 연구되고 있다. 압전 현상은 석영, 전기석과 같이 결정에 일정한 방향으로 압력을 가할 때 그 변형에 비례해서 양전하 또는 음전하가 발생하는 현상이다. 가장 많이 사용되는 압전 물질로인 PZT (Pb(Zr,Ti)O3)는 효과적으로 기계적 변형을 전기적 신호로 변환하기 때문에, 진동 에너지를 전기 에너지로 변환하기 위해 매우 적합한 물질이다 [2].

이 논문에서는 PZT 압전 박막 필름을 이용한 MEMS 기술 기반의 자가 발전 소자를 설계 및 제작 하였다. 압전 현상에 의해 생기는 표면 전하를 효율적으로 수집하기 위해 엇갈림 구조 (interdigit)의 전극을 사용하였으며, 진동에 의한 변위에 의해 발생하는 응력을 효율적으로 활용하기 위해 외팔보의 양단을 고정시킨 구조로 설계하였다. 특히 압전 박막 필름에 의해 생기는 전력의 누수현상을 막기 위해 ZrO2를 장벽층으로 사용하였다.

2. 본 론

2.1 설계

압전 박막에서 전하를 수집하기 위한 전극은 두 가지 방법으로 구성할 수 있다. 압전 박막에 가해지는 변형과 전극이 수집하는 전하에 의해 생기는 전기장의 방향에 따라 d31과 d33이 있다. d31모드는 압전 박막에 가해지는 변형에 수직 방향으로 전극이 구성되며, d33모드는 변형에 수평 방향으로 구성된다. 이에 따른 전계와 변형과의 상관관계는 다음과 같다.

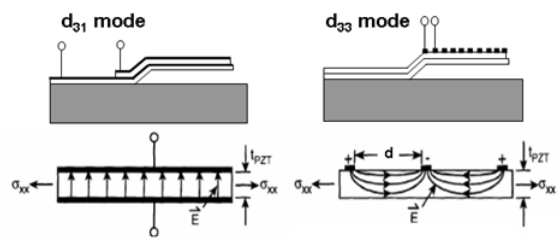
$$\delta_3 = d_{31}E_i \quad (1)$$

$$V_{3i} = \sigma_{xx}g_{3i}L_i \quad (2)$$

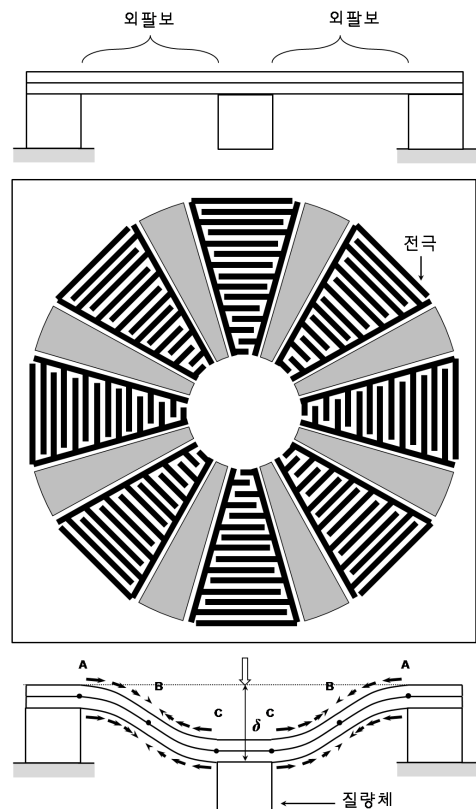
여기에서 δ 는 변형(strain), d 와 g 는 압전 상수 (piezoelectric constant), E 는 전계(electric field), V 는 발생하는 전압, σ 는 변형력(stress), L 은 전극 사이의 간격을 의미한다.

식 (1)에서처럼, 진동에 의한 압전 박막의 변형이 크면 클수록 박막 표면에 생기는 전하량도 커지기 때문에 효과적인 변환을 위해서는 압전 박막을 갖는 구조물의 고유 주파수가 진동원의 주파수와 일치하여 공진을 일으켜야 한다.

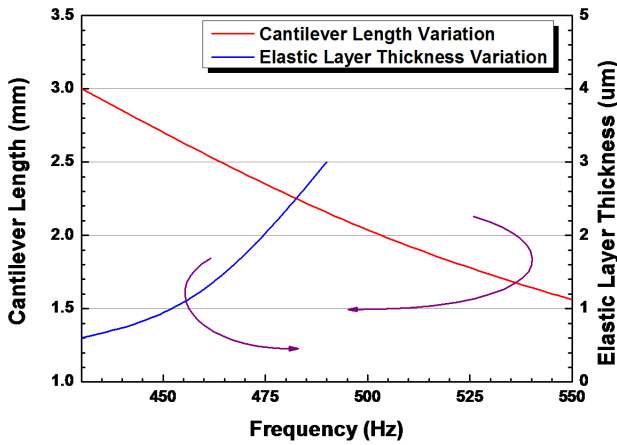
또한 식 (2)에서 보여주는 것처럼, 출력 전압은 두전극사이의 간격과 압전 상수에 비례한다. 그림 1의 d31모드를 이용하기에는 압전 박막 층의 두께는 제한이 있기 때문에, d33모드를 이용하면 전극 사이의 간격을 크게 할 수 있다. 그리고 압전 상수 또한 d31모드와 d33모드가 2-2.5 배 정도 차이이기 때문에, d33모드는 d31모드 보다 수집 배의 더 높은 전압을 얻을 수 있다. 게다가 d31모드로 동작하기 위해서는 압전 박막 상·하부에 전극이 구성되어야 하는데, 이것은 d33모드가 상부에만 전극을 구성하는 것에 비해서 추가 공정을 요구한다.



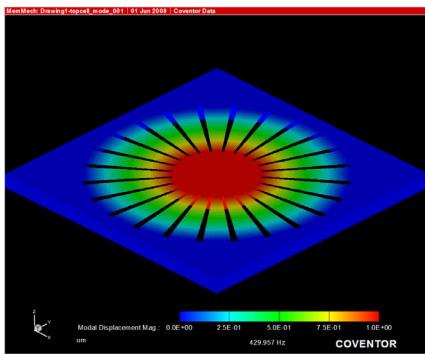
<그림 1> 변위를 전기 에너지로 변환시키는 두 가지 압전 모드



<그림 2> d33모드를 이용한 MEMS 압전 자가 발전 소자의 구조



(a)



(b)

〈그림 3〉 유한요소기법을 통한 자가 발전소자의 해석 결과 : (a) 외팔보 길이 및 탄성 박막의 두께에 따른 고유주파수 해석결과 및 (b) 해석을 위해 사용된 3차원 구조

마이크로 머시닝 기법을 이용한 자가발전 소자는 그 크기가 미세하여 소형화에는 유리하지만 출력 전압에 한계가 있다. 따라서 이것을 보완하기 위해 그림 2와 같이 여러 개의 압전 외팔보를 집적 할 수 있는 구조를 고안하였다. 고안된 구조는 외팔보의 양쪽 끝이 고정되어있어, 단일 외팔보의 변형이 한쪽이 집중되는데 반해 변형이 양쪽에서 이루어지는 장점과 함께 여러 개의 외팔보를 집적시킬 수 있는 구조이다. 그리고 외팔보의 고유주파수를 낮추기 위해 사용된 질량체는 실리콘 기관을 이용하였다.

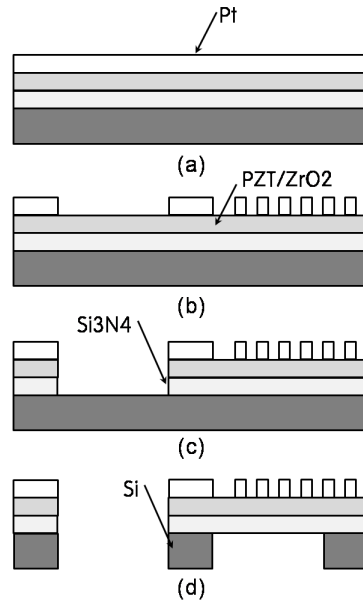
제안된 자가 발전 소자의 성능을 최적화 하기위해 유한요소기법(FEM)을 이용한 구조 해석을 실시하였다. 제안된 구조의 외팔보의 길이는 1.5mm에서 3mm 까지, 탄성 박막의 두께는 0.6um에서 3um까지 변수를 두어 수행하였는데, 해석 결과 외팔보의 길이 및 탄성 박막의 두께에 따라서 400Hz에서 최고 550Hz 까지 공진 주파수를 갖는 것을 알 수 있었으며, 그 길이를 3mm로 약 430 Hz의 공진 주파수를 갖도록 설계하였다.

2.2 제작

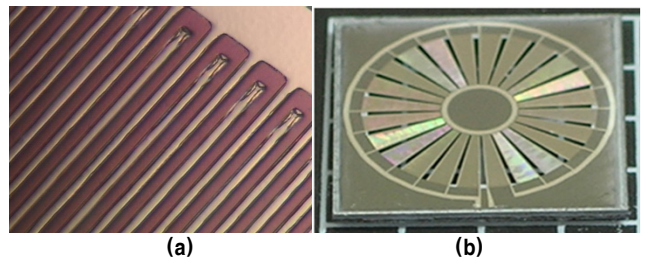
그림 3의 구조는 실리콘 기관위에 탄성박막, 압전 박막에서 형성될 전하의 누수 방지 및 압전 박막 구성을 위한 장벽층, 압전 박막 그리고 외팔보 구조의 전극으로 구성되어 있다.

탄성 박막을 실리콘 기관 위 0.6um의 Si3N4를 LPCVD를 이용해 증착한다. 그리고 그 위에, 100 nm 두께의 ZrO2를 sol-gel spin 공정으로 증착한다. 증착 후에 furnace를 이용하여 450°C로 10분, 650°C로 2분동안 baking을 하고, 700°C에서 2시간동안 annealing을 하게 된다. 압전 박막은 110(52/48) PZT solution을 4000 rpm으로 20sec로 spin coating 한 후, 450°C에서 10분, 650°C에서 2분동안 baking하고, 650°C에서 30분 annealing하여 PZT 500nm 증착하게 된다. ZrO2와 PZT는 이러한 방식으로 몇 번 정도의 cycle을 반복하여 필요한 두께를 얻어낸다. 상부 전극은 Sputter를 이용하여 50nm의 Pt를 증착하였다

그림 4는 자가 발전 소자의 공정 순서로서 상부 Pt 전극 패드를 형성한 후 압전층과 탄성박막은 건식 식각하였다. 그리고 질량체 구성과 외팔보의 릴리즈는 KOH 습식 식각을 이용 하였다. 이렇게 제작된 압전 자가 발전소자는 그림 5와 같으며, 1.2mm × 1.2mm × 0.5mm (높이)의 크기를 갖는다.



〈그림 4〉 자가 발전 소자의 공정 순서



(a)

(b)

〈그림 5〉 제작된 MEMS 자가 발전 소자: (a) d31모드를 이용하기 위한 Pt 전극 및 (b) 제작된 자가 발전 소자

3. 결 론

본 논문에서는 압전 현상을 기반으로 한 d33모드로 동작하는 자가 발전 소자를 설계 및 제작하였다. 자가 발전 소자는 마이크로 머시닝기법을 이용한 초박형의 소자로써, 유한 요소 기법을 통해 자가 발전 소자의 기계적 해석을 실시하여 성능을 최적화하여 설계 하였다. 이번 제작된 발전기는 앞으로 공진 주파수에 근접한 진동원 이용한 측정으로 어느 정도의 전력이 발생하는지 실험을 통해서 알아볼 것이며, 신뢰성 및 구조 최적화를 실시 할 것이다. 압전 현상을 이용한 본 MEMS 기반의 자가발전 소자는 발전 과정에서 유해한 부산물을 생성하지 않으며, 반영구적으로 사용할 수 있기 때문에 무선 지능형 센서 노드와 같은 초소형 무선기기에 사용되는 전기 화학 방식의 전원을 대체할 수 있을 것이다.

〔참 고 문 헌〕

- [1] Stephen R. Platt, Shane Farritor, and Hani Haider, "On Low-Frequency Electric Power Generation With PZT Ceramics", IEEE/ASME Transactions on Mechatronics, vol. 10, no. 2, 2005.
- [2] K. Uchino and J. R. Giniewicz, "Micromechanics", Marcel Dekker, Inc., New York, 2003.
- [3] Bor-Shun Lee, Jyun-Jhang He, Wen-Jong Wu, and Wen-Pin Shih, "MEMS Power Receiver using Piezoelectric Cantilever Beams and Interdigitated Electrodes", IEEE International Conference on Systems, Man, and Cybernetics, 2006.
- [4] R. Sood, Y.B. Jeon, J.-h. Jeong and S.G. Kim, "PIEZOELECTRIC MICRO POWER GENERATOR FOR ENERGY HARVESTING", Sensors and Actuators A: Physical, 2005.
- [5] Hyung-Chan Kim, Hyun-Cheol Song, Dae-Yong Jeong, Hyun-Jai Kim, Seok-Jin Yoon and Byeong-Kwon Ju, "Frequency Tuning of Unimorph Cantilever for Piezoelectric Energy Harvesting", 한국재료학회지 vol. 17, no. 12, 2007.
- [6] S. TROLIER-MCKINSTRY & P. MURALT, "Thin Film Piezoelectrics for MEMS", Journal of Electroceramics, 12, pp.7 - 17, 2004