

진동에 의한 압전 마이크로 발전기의 모델링 및 해석

김준홍^{†*}, 박문수*, 이상호*

Modeling And Analysis of a Piezoelectric Vibration-Induced Micro Power Generator

JoonHong, Kim, MoonSoo Park, Sang-Ho, Lee

Key Words: piezoelectric(압전 현상), vibration-induced micro power generator(압전 미소발전기)

Abstract

Supplying power to microsystems that have no physical connection to the outside is difficult, and using batteries is not always appropriate. This paper discusses how to generate electricity from mechanical energy when vibrated in a cantilever beam. A model for the system predicts that the output power of the system is maximized when the mechanical damping in the system is minimized. Furthermore, to cover a wide frequency range and to be useful in a number of applications, a system of beams with different resonant frequencies has been designed and optimized. This information makes it possible to determine what design alternatives are feasible for the creation of a micro power supply for any specific application of MEMS.

기호설명

m : 빔의 질량
k : 등가 스프링 계수
y(t) : 외부 입력 변위
z(t) : 질량의 상대 변위
c : 댐핑 계수
k₃₁ : 전기-기계 결합 계수
d : 압전 상수(charge density / stress)
super script E : 전기장 일정
super script T : 응력 일정

1. 서 론

현재 전자기기들은 소형화 및 휴대용으로 사용범위가 확대되고 있으며, 전원으로 배터리를 사용함에 있어서 여러 제약이 있어 절전형 전자 소자의 개발이 진행되고 있다. 따라서 앞으로도 계속 사용전력은 계속 줄어들 것으로 예상되어진다. Table 1은 사용전력을 보여주고 있다. 이와 함께 배터리 전원의 대안으로써 우리주변에 에너지를 변환하여 전원을 생산하는 기술이 개발이 많은 곳에서 진행되고 있으며, 이러한 기술들은 센서에서의 사용뿐만 아니라 수명에 한계가 있는 배터리에 의존하고 있는 휴대용 시스템에서의 적용도 가능할 것으로 예상된다. 주변에서 전력으로 변환이 가능한 에너지원으로는 진동, 태양열 그리고 온도차 등이 있으며 이번 논문에서는 진동에 의한 압전효과를 이용하여 전력을 생산하는 시스템에 관한 연구를 수행하였다.

† 회원, 한국생산기술연구원 마이크로 시스템 팀
E-mail : kjh7903@kitech.re.kr
TEL : (041)589-8338 FAX : (041)589-8410

* 한국생산기술연구원 마이크로시스템 팀

Table 1 Comparisons of common energy sources and common power requirements⁽¹⁾

Common Power Requirement	
Desktop computer	10 ² W
Notebook computer	10W
Embeded CPU board	1W
Low-Power micro controller chip	10 ⁻³ W

2. 전력 생산 이론

전체적으로 시스템을 단순화 시켜 나타내면 Fig. 1와 같이 나타낼 수 있다. 이 시스템은 아래 식 (1)과 같이 표현되어 진다.

$$m\ddot{z}(t) + c\dot{z}(t) + kz(t) = -m\ddot{y}(t) \quad (1)$$

식 (1)에 $y(t) = Y_0 \cos(\omega t)$ 로 가진을 시켜준 경우에 최종적으로 정리하면 발생하는 전력에 관한 식 (2)가 만들어 진다⁽²⁾.

$$Power = \frac{m\zeta Y_0 \frac{\omega^4}{\omega_n}}{\left[1 - \left(\frac{\omega^2}{\omega_n^2}\right)\right]^2 + \left[2\zeta\left(\frac{\omega}{\omega_n}\right)\right]^2} \quad (2)$$

식 (2)에서 고유 진동수에서 최대의 전력을 나타낸다는 것을 볼 수 있으며, 사실 위 식은 진동에 의해서 캔틸레버 빔에서 발생된 에너지에 관한 식으로써 실제로 전력을 생산하는 압전 효과에 의한 실제 전력 생산은 고려되지 않았다.

Fig. 2에 나타난 캔틸레버 빔의 경우에 진동에 의한 굽힘에 의해서 축(1) 방향으로 인장력과 압축력이 빔에 작용한다. 그리고 분극 방향이 축(3) 방향이므로 압전 효과에 의한 전력생산을 고려하기 위해서는 k_{31} 이 가장 중요하다.

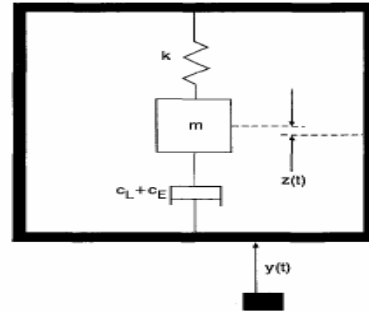


Fig. 1 First-order model of generator

따라서 압전체에 전달되는 에너지양을 알기 위해서는 식(3)에 나타나 있는 전기기계 결합계수가 필요하다.

$$k^2 = \frac{\text{converted electrical energy}}{\text{input mechanical energy}} \quad (3)$$

식 (4)는 k_{31} 계수를 구하는 식이며 재료의 특성만으로 구할 수 있다.

$$k_{31} = \frac{d_{31}}{\sqrt{s_{11}^E \epsilon_3^T}} \quad (4)$$

여기서 d 는 압전 상수, s 는 컴플라이언스 그리고 ϵ 은 유전율을 나타낸다. 하지만 실제로는 k_{31} 계수의 값은 형상에 의한 영향을 받아 바뀔 수 있으며 식 (5)로 평판에서의 3-1모드의 전기기계 결합 상수를 구할 수 있다⁽³⁾.

$$k_{31} = \sqrt{\frac{f_2^2 - f_1^2}{f_2^2}} \quad (5)$$

여기서 f_1 은 공진주파수, 즉 단락 상태에서의 고유 진동수를 나타내고 f_2 는 반공진주파수, 즉 개방상태에서의 고유 진동수를 나타낸다⁽⁴⁾. 공진 상태에서는 커다란 변형 내지는 용량의 변화가 있어, 큰 전류가 흘러들고, 한편 반공진 상태에 있어서는 변형은 소자 내에서 제거되기 때문에 용량 변화는 없고, 전류가 흐르지 않는다고 추정한다.

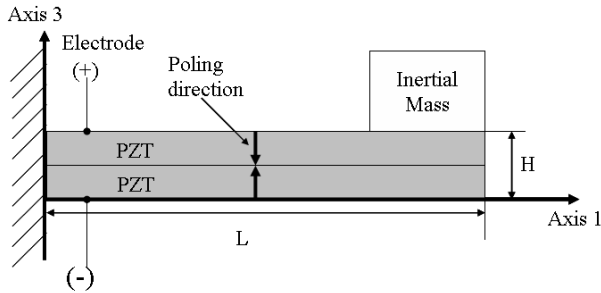


Fig. 2 A two-layer bimorph mounted as cantilever

위의 Table 2는 실험과 유한요소법을 이용한 계산을 비교한 것으로써 해석의 타당성을 보여주며 이번 연구에서도 이 방법을 식 (5)에 적용하여 전기기계 결합 계수를 구하였다.

3. 발전기 해석

진동에 의한 압전 발전기를 해석하기 위해서 Fig. 2에 보여 지는 것과 같이 2개의 압전층으로 직렬 연결된 전력 발전기의 구조로 구성하였다.

해석을 하기 위해서 사용된 재료의 물성치는 Morgan Electro Ceramics사에서 제공하는 PZT-5H의 물성치를 사용하였으며 Table 3, 4에 정리하였다⁽⁶⁾.

Table 2 Comparing Measurement and FEM

	Frequency(kHz)		Ratio
	Measure ⁽⁶⁾	FEM	
Resonance	66.56	66.45	0.998
	88.01	90.71	1.031
Anti resonance	81.59	84.26	1.033
	93.41	96.99	1.038

Table 3 Properties of PZT-5H elastic stiffness constant at constants electric field in $c_{ij}(10^{10} \text{Pa})$

c_{11}^E	c_{12}^E	c_{13}^E	c_{33}^E	c_{44}^E	c_{66}^E
12.6	7.95	8.41	11.7	2.30	2.35

Table 4 Properties of PZT-5H piezoelectric constants $e(\text{C/m}^2)$ and dielectric constants (ϵ/ϵ_0)

e_{15}	e_{31}	e_{33}	ϵ_{11}^S	ϵ_{33}^S
17.0	-6.55	23.3	1700	1470

3.1 모드 해석(Modal analysis)

각 모델에 대해서 공진주파수와 반공진주파수를 구하기 위하여 유한요소 프로그램인 ANSYS를 이용하여 모드해석을 우선 수행하였다.

$$f_0 = \sqrt{\frac{k}{m}} = \sqrt{\frac{EH^3w}{4L^3m}} \quad (6)$$

식 (6)은 일반적으로 간단하게 사용되는 캔틸레버 빔에서의 고유진동수를 구하는 식이다. 이 식의 경우 빔의 자체 질량이 고려되지 않고 부가되는 질량만 고려되므로 유한요소해석이 더 정확하게 해석을 할 수 있으며 여기서 구하는 고유진동수는 반공진 주파수가 된다. Fig. 3은 공진주파수에서의 1 차 모드시의 굽힘 형태를 보여주고 있다. 여기서 경계 조건은 각 전극에 같은 전위차를 주어 단락 시켜서 해석함으로써 얻을 수 있다.

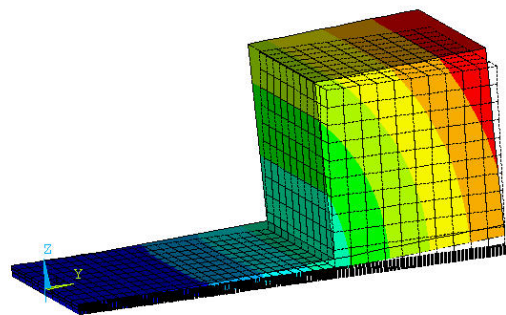


Fig. 3 Bending mode of plat for short-circuit boundary condition

3.1 전력 해석

모드 해석에서 구한 범위에서 전력량을 구하였다. 조건은 중력 가속도를 9.8m/s^2 으로 하였으며

진동에 기인하여 발생하는 관성력에 의해서 생산되는 전력을 계산하였다.

4. 결과 및 토론

형상에 따라서 전기기계 결합 계수를 구하여 영향을 확인하였다. 식 (4)에 의해서 구해진 PZT-5H의 k_{31} 은 0.388이며 Fig. 4에 L_0 는 처음의 빔의 길이를 의미하며 L_0 를 기준으로 길이를 변화 시켜가며 해석을 하였다. 결과적으로 빔의 길이가 길어질수록 결합계수는 점차적으로 작아지는 경향을 보였다. 하지만 그 차이가 5% 내외로 나타나며 두께의 경우 2%내외로 나타났다. 즉, 바이모프형 캔틸레버 빔의 경우 전기기계 결합 계수가 비슷한 수준으로 나타남을 확인 할 수 있었고 전력 생산에는 큰 영향을 주지 않는다는 것을 해석을 통하여 확인하였다.

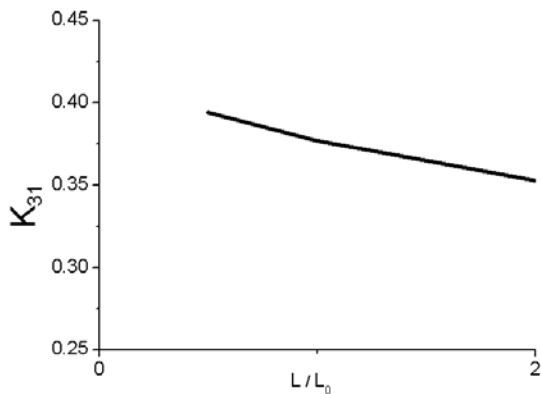


Fig. 4 Relationship between coupling coefficient k_{31} and Length ratio

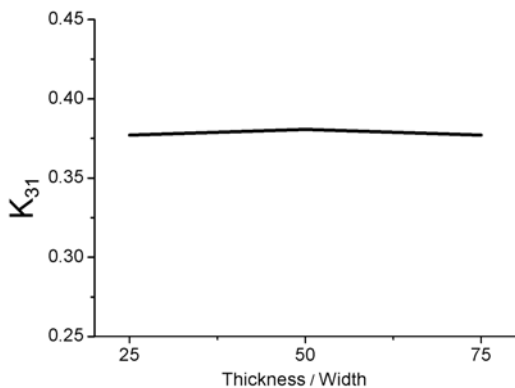


Fig. 5 Relationship between coupling coefficient k_{31} and width to thickness ratio

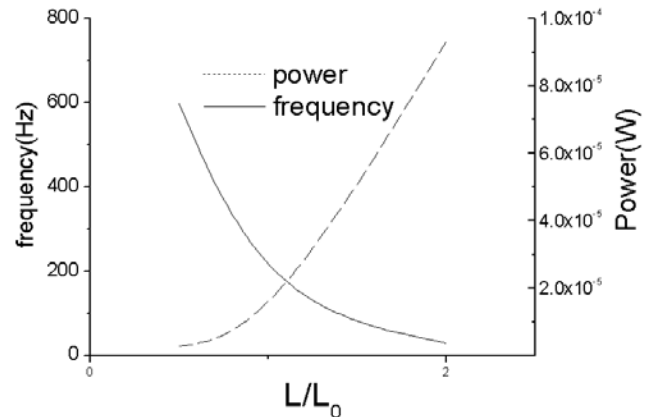


Fig. 6 Relationship between Resonancy frequency and Power

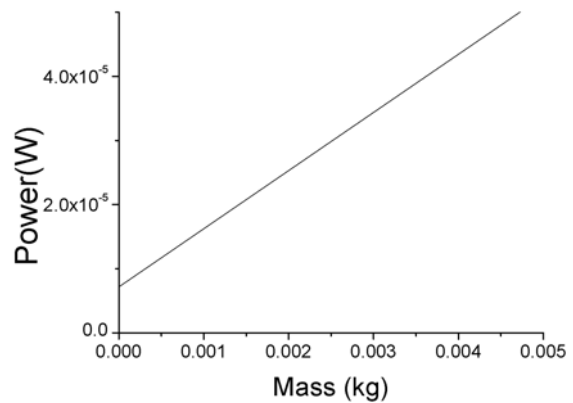


Fig. 7 Relationship between mass and Power

빔의 길이가 증가할수록 공진 주파수는 줄어 들고 그와 동시에 생산되는 전력이 증가됨을 Fig. 6에서 볼 수 있다. 앞의 Fig. 4에서의 전기기계 결합 계수는 거의 변화가 없는 반면 진동수에 반비례 하여 영향을 받는 것을 알 수 있다.

Fig.7은 질량에 따른 전력의 관계를 나타내고 있다. 부가되는 질량이 증가 할수록 생산 되는 전력은 선형적으로 증가함을 확인할 수 있으며 질량을 인가할 경우 동시에 공진 주파수도 작아지므로 역시 관계가 있다는 것을 알 수 있다. Table 6은 기존에 발표된 발전기의 자료를 가지고 해석한 자료와 비교를 하였다⁽⁷⁾. 압전 재료는 가장 많이 사용되는 PZT-5H로 가정을 하여 같은 치수와 질량을 부과하여 같은 진동수를 가진 발전기의 전력생산을 비교하였다. 발표된 것 약 3배 정도 더 큰 결과가 나왔다. 하지만 재료에 대한

좀 더 정확한 자료와 형상에 대한 자료가 있다면 더 정확할 것이라고 생각되어진다.

Table 5 Computation and measurement of power

	Dimension(inch)	freq (Hz)	power (µm)
measure	1.25" x 0.5" x .02"	26.8	450
FEM	1.25" x 0.5" x .02"	27	1400

5. 결 론

이번 연구에서는 진동에 의한 압전체가 기계적인 에너지를 전기적인 에너지로 변환하여 전기 발전기로써 사용되었을 경우의 생산될 수 있는 전력량에 대해서 유한 요소법을 이용하여 해석을 수행 하였다. 전기회로로의 등가를 통하여 이론적인 원리를 확인 하였고 다른 치수를 가지는 변환기에 대해서 해석을 수행하여 캔틸레버 빔에서의 각 형상이 미치는 고유진동수가 어떻게 전력량이 변화하는지 관찰 할 수 있었다. 그리고 최대의 효율을 얻기 위해서 ANSYS를 이용하여 공진 주파수 얻을 수 있었으며 공진주파수 근처에서 최고의 전력이 발생함을 확인 할 수 있었으며 부과되는 질량이 증가함에 따라 고유진동수는 작아지는 반면 전력량은 증가함을 알 수 있었고 기존의 연구 결과와 비교하였다.

참고문헌

(1) Starner, Thad. 1996, "Human-Powered Wearable Computing" IBM System Journal Vol. 35, pp. 618-629
 (2) C.B Williams, R.B. Yates. 1995, "Analysis of a microelectric generator for microsystems" , Transducers '95- Eurosensors
 (3) Razvan, Jeffrey J. Dosch and Gerge A. Lesieuter, 2002, "Design of a Single-crystal Piezoceramic Vibration Absorber", j. intelligent material system and structures, pp. 705-712.
 (4) kenji uchino "Ferroelectric Devices.",Marcel

Dekker, Inc
 (5) <http://www.morgan-electroceramics.com>
 (6) D.Boucher, M. Lagier, C. Maefeld, , 1981, "Computation of the vibration modes for piezoelectirc array Transducers using a mixed Finite Element perturbations method." IEEE Trans. Sonics and Ultrasonics, Vol. SU-28 No. 5, pp. 318-330
 (7) <http://kingkong.berkley.edu>