

압전 재료를 이용한 에너지 변환 시스템의 출력 파워 예측 및 평가

Prediction and Evaluation of Power Output for Energy Scavengers using the Piezoelectric Material

오재응[†] · 김성현* · 심현진* · 이정윤**
Jae-Eung Oh, Seong-Hyeon Kim, Hyoun-Jin Sim, Jung-Yoon Lee

Key Words: Piezoelectric Material(압전 재료), Self Powered Device(자가 발전기), Vibration Energy(진동 에너지),
Electric Energy(전기 에너지), Energy Converting(에너지 변환)

ABSTRACT

With recent advanced in portable electric devices, wireless sensor, MEMS and bio-Mechanics device, the new typed power supply, not conventional battery but self-powered energy source is needed. Particularly, the system that harvests from their environments are interests for use in self powered devices. For very low powered devices, environmental energy may be enough to use power source. In the generality of cases, these energy harvesting systems are used in the piezoelectric materials as mechanisms to convert mechanical vibration energy into electric energy. Through the piezoelectric materials, the ambient vibration energy could be used to prolong the power supply or in the ideal case provide endless energy for the devices. Therefore, the piezoelectric power harvesting cantilever beam is developed. Also, the output voltage and power are predicted in this study. We also discuss the developing system of the piezoelectric energy scavenger. An experimental verification of the model is also performed to ensure its accuracy.

1. 서 론

최근 휴대용 전자 장치(portable electric device), 무선 센서(wireless sensor), MEMS 구조물 등에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다. 이러한 장치들은 시스템이 발전됨에 따라 시스템을 장시간 운용하기 위한 배터리 기술의 발달을 요하고 있다. 하지만 현재 상용화되고 있는 화학 기반의 에너지 저장용 장시간 사용함에 따라 유한한 수명을 가지며, 또한 큰 부피로 인한 장치의 소형화에 문제점을 가지고 있다.⁽¹⁾ 이에 따라 시스템이 장기적으로 운용되는 장치의 에너지원으로 기존의 배터리가 아닌 주변의 에너지 원을 이용하는 자체 동력원의 개발이 요구되고 있다.

자체 동력원에 사용되는 환경 에너지 원으로 가장 흔하게 발생할 수 있는 것은 진동 에너지를 들 수 있다. 시스템에 가해지는 외부 입력에 따라 발생하는 진동 에너지는 압전 재료를 이용하여, 전기 에너지로 형태를 변환시킬 수 있다.

이에 따라 본 연구에서는 자가 발전 시스템을 개발하기 위한 일환으로 압전 재료가 적층된 외팔보에서 발생하는 전기에너지를 이론적으로 해석하였다. 먼저 진동 에너지에 의해 압전 재료로부터 출력되는 전압과 전력을 예측하였고 또한 실험을 통해 예측 모델의 해석 결과와 실험 결과를 비교해 보았다.

2. 압전 재료에서 발생하는 전력의 이론적 모델

2.1 압전 재료와 외팔보의 모델링

압전 재료가 적층된 외팔보는 오일러 베르누이 방법에 의해 모델링 하였다. 적층된 면의 단면을 보았을 때 압전 재료는 하나의 층을 이루고, 외팔보와 이상적으로 결합한다고 가정하였으며 중립축은, modulus weighted algorithm 에 의해 계산되었다.⁽²⁾ Fig. 1 과 같이 압전 재료가 적층된 외팔보의 굽힘을 고려할 때, 중립축 으로부터 압전 재료까지의 거리는 식 (1)과 같이 구할 수 있다.

$$z_s = \frac{\sum_{i=1}^n z_i \frac{E_i}{E_r} A_i}{\sum_{i=1}^n \frac{E_i}{E_r} A_i} = \frac{\frac{t_a}{2} t_a \frac{E_a}{E_b} b + \left(t_a + \frac{t_b}{2} \right) t_a \times b}{t_a \frac{E_a}{E_b} b + t_a \times b} \quad (1)$$

[†] 한양대학교 기계공학부
E-mail : jeoh@hanyang.ac.kr
Tel : (02) 2220-0452, Fax : (02) 2299-3153

* 한양대학교 기계공학과

** 경기대학교 기계시스템디자인공학부

여기서 t_a, t_b 는 각각 압전 재료와 외팔보의 두께, E_a, E_b 는 압전 재료와 외팔보의 영률이다. 그리고 b 는 외팔보의 너비이다.

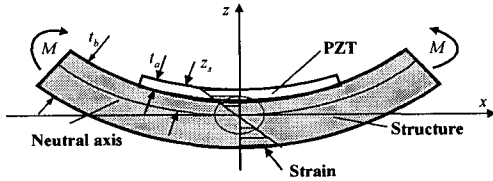


Fig. 1 Euler Bernoulli model of PZT and structure (2)

적층이 있는 외팔보에서의 평균 변형률은 다음과 같다.

$$\varepsilon_a = -\frac{M}{(E_a I_a + E_b I_b)} \left(z_s - \frac{t_a}{2} \right) \quad (2)$$

여기서 I_a, I_b 는 다음과 같이 정의된다.

$$I_a = \int_{z_s - t_a}^{z_s} b z^2 dz = \frac{1}{3} b \left[z_s^3 - (z_s - t_a)^3 \right] \quad (3)$$

$$I_b = \int_{z_s - t_a - t_b}^{z_s - t_a} b z^2 dz = \frac{1}{3} b \left[(t_a + t_b - z_s)^3 + (z_s - t_a)^3 \right] \quad (4)$$

평균 변형률은 식 (1)에서 구한 z_s 를 식 (2)에 대입하여 다음과 같이 유도된다.

$$\varepsilon_a = \frac{\sigma_a}{E_a} = \frac{6ME_b t_b (t_a + t_b)}{b \left[E_a^2 t_a^4 + E_b^2 t_b^4 + 2E_a t_a E_b t_b (2t_a^2 + 3t_a t_b + t_b^2) \right]} \quad (5)$$

평균 변형률과 $\sigma_a = E_a \varepsilon_a$ 의 관계로부터 평균 응력을 구할 수 있고, 이를 통해 압전 재료에서 발행하는 전압은 다음과 같다.

$$V = g_{31} t_a \sigma_a = \frac{6g_{31} t_a t_b E_a E_b (t_a + t_b) \int_x^{x+L} M dx}{E_a^2 t_a^4 + E_b^2 t_b^4 + 2E_a t_a E_b t_b (2t_a^2 + 3t_a t_b + 2t_b^2)} \quad (6)$$

2.2 최대 전력 전달

일반적으로 압전 재료는 내부 임피던스를 갖는 AC 전원으로 모델링 할 수 있다.

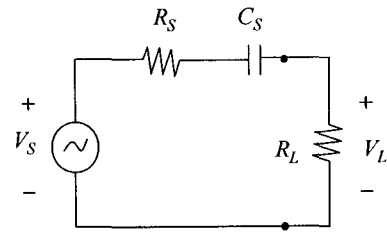


Fig. 2 PZT generator circuit model

압전 재료를 Fig. 2 와 같은 전기 회로로 모델링 하였을 때 부하 전력은 다음과 같다.

$$P = \frac{\bar{V}_S^2 R_L}{(R_S + R_L)^2} \quad (7)$$

여기서 \bar{V}_S 는 압전 재료에서 발생하는 RMS 전압이고, R_S 는 소스의 저항, R_L 은 부하 회로의 저항이다. 부하 전력의 최대값은 식 (7)을 R_L 로 미분하여 구할 수 있으며, 부하 전력이 최대가 될 조건은 다음과 같다.

$$R_L = R_S \quad (8)$$

이와 같이, 최대 전력을 부하에 전달하기 위해서는 소스 저항과 부하 저항이 서로 동일한 정합을 이뤄야 한다.⁽³⁾

2.3 이론적 전력 예측

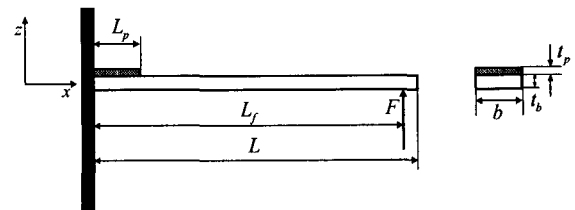


Fig. 3 Cantilever beam model

압전 재료에서 발생하는 전력의 값은 외팔보의 변형률의 함수로 나타낼 수 있다. 그러므로 최대 전력을 발생 시키기 위해서는 외팔보의 최대 변형이 발생하는 지점에 압전 재료를 부착해야 한다. 이에 따라 본 연구에서는 압전 재료를 외팔보의 고정단 부위에 부착한 모델을 대상으로 설정하였다. 외팔보의 가진 방법으로는 점 가진으로 하고 고유 진동수의 조화함수로 설정하였다. 압전 재료에서 발생하는 전력을 예측하기 위해서는 외팔보

의 모멘트를 계산해야 하는데, 이 때 모멘트는 외팔보의 처짐의 함수로부터 얻을 수 있다. 조화 가진을 받는 외팔보의 운동 방정식은 식 (9)와 같이 나타낼 수 있고 그 해는 식 (10)과 같다.

$$\frac{E_b I_b}{\rho A} \frac{\partial^4 w(x,t)}{\partial x^4} + \frac{\partial^4 w(x,t)}{\partial t^4} = \frac{F_0}{\rho A} \sin(\omega t) \delta(x-L_f) \quad (9)$$

여기서 $w(x,t)$ 는 z 방향의 변위, E 는 영률, ρ 는 외팔보의 밀도, ω 는 가진 주파수이며 L_f 는 고정 단에서 가진력까지의 거리이다.

$$w(x,t) = \sum_{i=1}^{\infty} q_i(t) X_i(x) \quad (10)$$

여기서 $q_i(t)$ 는 외팔보의 i 번째 모달 좌표계이고 X_i 는 i 번째 모드 형상이다. 모드 형상은 식 (11)과 같은 특성 방정식으로 유도할 수 있다.

$$\cosh(\beta_i L_b) \cos(\beta_i L_b) = -1 \quad (11)$$

특성 방정식으로부터 유도된 모드 형상은 식 (12)와 같다.⁽⁴⁾

$$X_i(x) = \cosh \beta_i x - \cos \beta_i x - \frac{\sinh(\beta_i L_b) - \sin(\beta_i L_b)}{\cosh(\beta_i L_b) + \cos(\beta_i L_b)} (\sinh \beta_i x - \sin \beta_i x) \quad (12)$$

여기서 L_b 는 외팔보의 길이이며, $\beta_i^4 = \frac{\omega_{ni}^2}{c^2}$, ω_{ni} 는 i 번째 고유진동수이다.

또한 직교성의 원리에 따라 가진력은 식 (13)과 같이 나타낼 수 있다.⁽²⁾

$$F_i(t) = \frac{F_0}{\rho A} \sin(\omega t) X_i(L_f) \quad (13)$$

합성곱 적분을 사용하여 모달 좌표계 $q_i(t)$ 는 식 (14)와 같이 결정 된다.

$$q_i(t) = \frac{1}{\omega_{di}} e^{-\zeta \omega_{ni} t} \int_0^t F_i(\tau) e^{\zeta \omega_{ni} \tau} \sin(\omega_{di}(t-\tau)) d\tau \quad (14)$$

여기서 ω_d 는 감쇠 고유 진동수이고 ζ 는 감쇠비이다.

한편, 외팔보의 곡률은 식 (15)과 같이 나타낼 수 있는데, 이로부터 외팔보에 가해지는 모멘트는 식 (16)과 같이 나타낼 수 있다.

$$\kappa(x,t) = \frac{\partial^2 w(x,t)}{\partial x^2} \quad (15)$$

$$M(x,t) = E_b I_b \frac{\partial^2 w(x,t)}{\partial x^2} \quad (16)$$

위에서 구한 모멘트를 식(6)에 대입하면 압전 재료로부터 발생하는 전압을 얻을 수 있다.

3. 압전 재료에서 발생하는 전력의 이론적 해석

압전 재료로부터 발생하는 전압과 전력을 해석하기 위한 외팔보와 압전 재료의 물성치는 Table 1.과 같다.

Table 1. Dimensions and properties of the beam and PZT

Material	Parameter	value	Units
beam	length	0.283	m
	width	52e-3	m
	thickness	3e-3	m
	density	2700	kg/m ³
	elastic modulus	70.56	GPa
PZT	length	52e-3	m
	width	52e-3	m
	thickness	0.27e-3	m
	elastic modulus	66	GPa
	k_{31}	0.35	
	d_{31}	-190e-12	m/V
	g_{31}	-11.6e-3	Vm/N

외부의 부하 저항이 정합이 되어 인가되었을 경우 최대 전력 전달이 발생한다. 이에 따라 Fig. 4는 부하 저항을 1 mΩ 까지 범위를 두고, 전력 출

력 양상을 나타낸 것으로서, 약 $30\text{ k}\Omega$ 에서 최대 출력을 보이는 것을 알 수 있다. 또한 부하 저항이 $30\text{ k}\Omega$ 일 때의 출력 전압은 Fig. 5 와 같다. 외팔보가 조화 함수로 가진 됨에 따라, 출력 전압도 역시 일정한 크기로 나타남을 알 수 있다.

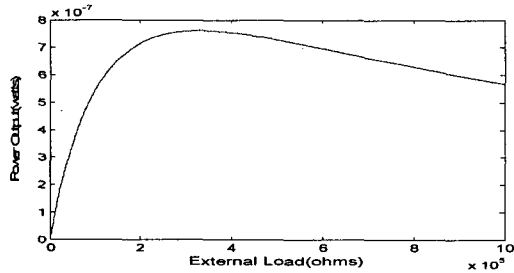


Fig. 4 Power output by External load

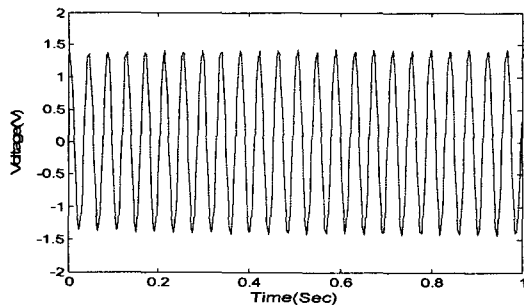
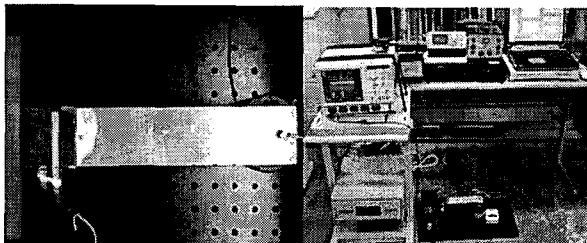


Fig. 5 PZT voltage calculated from analytical beam model

4. 실험

출력 전압과 출력 전력을 측정하기 위한 가진원은 미니 셰이커 (B&K Type4810)를 이용한 점 가진을 사용하였다. 미니 셰이커는 신호 발생기 (SEINTEK G5100)를 통해 공진 주파수로 가진하였다. 압전 재료를 통해 발생하는 신호는 오실로스코프 (LeCroy OC9003KS)를 통해 분석하였다.



(a) Piezoelectric attached beam
(b) Test facility set up

Fig. 7 은 압전 재료를 통해 출력되는 전압을 측정하여 이론적 해석값과 비교한 것이고 Fig. 8 은 이

때 출력되는 전력을 나타낸 것이다. 실험 결과 이론적 해석 모델과 그 출력 전압의 크기는 거의 일치했으며, 평균 출력 전압은 $2.88\ \mu\text{W}$ 로 측정되었다.

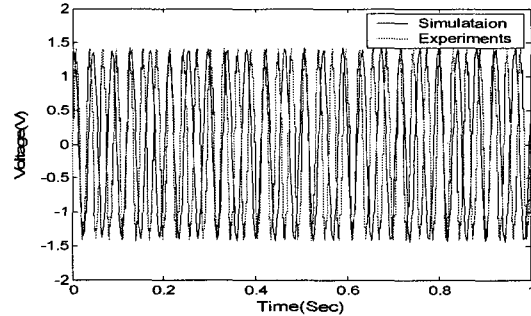


Fig. 7 PZT voltage calculated from simulation and experiment

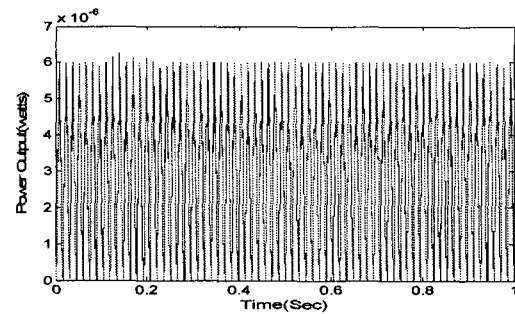


Fig. 8 Power output about excitation.

5. 결론

본 연구에서는 압전 재료가 적층된 외팔보에 대하여 출력 전압과 전력을 이론적으로 도출하였다. 또한 이론 모델을 실험으로 구현하여 그 출력 전압을 구하였고, 진동 가진에 따른 전력을 측정하였다. 현재 외팔보에 대한 연구를 바탕으로 AC 출력 전압을 DC 로 정류하고 커패시터 혹은 배터리로 전기 에너지를 축전하는 연구를 진행하고 있다.

참고문헌

- (1) 금명훈 등, 2004, 압전 재료를 이용한 진동에너지 변환 전력발생 시스템 해석 및 설계? 대한기계학회 논문집 A 권, 제 28 권 제 6 호, pp. 717~725
- (2) Timothy Egghorn, 2003, "Analytical Models to Predict Power Harvesting with Piezoelectric Materials? M.S. Thesis, Virginia Polytechnic Institute and State University
- (3) Giorgio R., 2000, Principles and Applications of Electrical Engineering, McGRAW-HILL, Korea.
- (4) Daniel J. Inman, 2000, Engineering Vibration, Pearson Education Asia Pte.,Ltd