

측정 가능한 물리량으로 표현된 압전 진동 에너지 변환 모델의 개발

Development of a Piezoelectric Vibration Energy Conversion Model with Measurable Physical Quantities

이소원† · 김재은* · 윤한솔** · 김홍진** · 윤병동*** · 김윤영***

Sowon Lee, Jae Eun Kim, Hansol Yoon, Hongjin Kim, Byeng Dong Youn and Yoon Young Kim

1. 서 론

에너지 수확장치는 주변환경에 존재하는 진동, 열 에너지 등을 전기에너지로 바꾸어주는 장치를 말한다. 그 중에서도 압전 진동 에너지 수확장치는 변환 효율이 높고, 단순한 구성으로 소형화가 가능하기 때문에 많은 연구가 이루어지고 있다. 이러한 압전 진동 에너지 수확장치의 설계 및 성능 평가를 위해서는 수학적 모델의 정립이 필요하다. 하지만, 기존의 수학 모델들은 균일 보 형상을 가정한 것이기 때문에 일반적인 형상의 압전 외팔보 진동 에너지 수확 장치에 대한 성능 예측 값이 부정확할 수 밖에 없다. 또한, 성능 예측을 위해 전기-역학 물성치 및 기하학적 치수에 대한 정보가 필수적이지만, 기존에 이미 제작된 에너지 수확 장치에 대해서는 이러한 정보를 모두 얻는 것은 매우 어렵다.

본 연구에서는 이러한 단점들을 해결하기 위해 기본 진동 실험에 의해 측정 가능한 물리량으로만 표현된 식을 유도하고, 이를 기반으로 직접 제작한 압전 진동 에너지 수확 장치의 전력 예측량을 구하였다. 또한, 제안된 식의 타당성을 검증하기 위해 ANSYS 를 이용한 압전 유한 요소 해석 결과 및 실험 결과와도 비교하였다.

2. 수학 모델의 유도

외팔보 압전 진동에너지 수확장치의 거동을 기술하는 전기-역학적 지배방정식은 첫 번째 고유진동

수 근처에서 다음과 같이 표현된다 [1].

$$M_{eq}z_{rel}(t) + C_{eq}z_{rel}(t) + K_{eq}z_{rel}(t) + \alpha \cdot V(t) = -M_r M_{eq}z_b \alpha \cdot z_{rel}(t) - C_p \cdot V(t) = -Q_e(t) \quad (1)$$

위 식에서 M_{eq} , C_{eq} 및 K_{eq} 는 각각 등가 질량, 감쇠 및 강성을 나타내며, α 는 전기-역학 상호작용 계수, C_p 는 변형율이 존재하지 않는 경우의 전기 용량, M_r 은 기저 가진 운동 방정식에서의 보정 계수를 나타낸다. 또한 z_b 및 z_{rel} 은 각각 기저의 변위 및 기저 대비 외팔보 끝단의 상대 변위를 나타내며, $Q_e(t)$ 및 $V(t)$ 는 각각 전극에서 발생하는 전하량 및 전압을 나타낸다.

압전 에너지 수확장치가 폐회로 상태의 고유 진동수 ($f_{sc} = \omega_{sc}/2\pi$) 와 일치하는 외부 가진 주파수로 가진 될 경우, 주어진 압전 에너지 수확장치에서 얻을 수 있는 최대 전력은 다음과 같다.

$$P_{max} = \frac{M_r^2 \alpha^2 A_b^2}{8\zeta_m \omega_{sc} C_p \left(k_{sys}^2 \omega_{oc}^2 + \sqrt{4\omega_{sc}^4 \zeta_m^2 + k_{sys}^4 \omega_{oc}^4} \right)} \quad \text{at } R_L^{opt} = \frac{1}{\omega_{sc} C_p} \cdot \frac{2\zeta_m}{\sqrt{k_e^4 + 4\zeta_m^2}} \quad (2)$$

위 식에서 A_b 는 기저의 가진 가속도, ζ_m 은 첫 번째 고유 모드에서의 모드 감쇠비를 나타내며, ω_{oc} 는 개회로 상태의 고유 진동수를 나타낸다. 또한 k_e^2 은 전기 출력 식을 간단히 유도하기 위해 정의된 편의 전기-역학 연성계수로서 일반적인 전기-역학 연성 계수 k_{sys}^2 와 다음과 같은 관계를 가진다 [2].

$$k_e^2 = \frac{k_{sys}^2}{1 - k_{sys}^2} \quad \text{with } k_{sys}^2 = \frac{\omega_{oc}^2 - \omega_{sc}^2}{\omega_{oc}^2} \quad (3)$$

† 이소원; 서울대학교 기계항공공학부
E-mail : rosusuave@snu.ac.kr
Tel : 02-880-1689, Fax : 02-872-5431

* 대구가톨릭대학교 기계자동차공학부 교수

** 서울대학교 기계항공공학부

*** 서울대학교 기계항공공학부 교수

그런데, 식 (2)를 이용하여 임의의 외팔보 압전 에너지 수확장치의 성능을 실험으로 평가하기 위해서는 전기-역학 물성치 및 기하학적 치수가 필요하며, 일반적인 형상의 압전 외팔보에 대한 α 계수는 정확한 예측이 어렵다. 따라서, 본 연구에서는 식 (2)를 기반으로 기본 진동 실험에 의해 측정 가능한 물리량으로만 표현된 식을 다음과 같이 유도하였다.

$$P_{out} = \frac{1}{4} \frac{M_r^2 M_{eq} Q_m^2 k_e^2}{Q_m k_e^2 + \sqrt{1 + Q_m^2 k_e^4}} \frac{A_b^2}{\omega_{sc}} \quad (4)$$

$$= \left[\frac{1}{2} \frac{M_r^2 M_{eq} Q_m^2 k_e^2}{Q_m k_e^2 + \sqrt{1 + Q_m^2 k_e^4}} \right]_{PEH} \cdot \left[\frac{1}{2} V_b A_b \right]_{Excitator}$$

위 식에서 $Q_m (=1/2\zeta_m)$ 은 품질 계수를 나타내며 아래와 같은 식이 유도과정에서 사용되었다.

$$C_p = \frac{1}{k_e^2} \frac{\alpha^2}{K_{eq}} = \frac{1}{k_e^2} \frac{\alpha^2}{\omega_{sc}^2 M_{eq}} \quad (5)$$

3. 해석 및 실험을 통한 검증

간단한 외팔보 진동 에너지 수확 장치를 제작한 후 얻을 수 있는 최대 전력량을 예측하기 위해 식 (4)에서 필요한 값들을 실험으로 측정하였다. 이를 식에 대입하여 구한 전력 값은 113.68 μW 이다.

ANSYS를 이용한 해석 결과를 Table 1과 Fig 1에 나타내었다. Fig 1에서 볼 수 있듯이, 출력전력의 최대값은 외부 저항이 10 k Ω 일 때 109.31 μW 로 제안된 수학 모델로부터 예측한 값과 약 3.8%의 오차를 보였다.

Table 1 Analysis results by ANSYS

f_{sc}	f_{oc}	Q_m	k_e^2
57.03	59.27	31.68333	0.080098
f_b	f_a	A_b	M_{eq}
57.9	56.1	1	0.0103

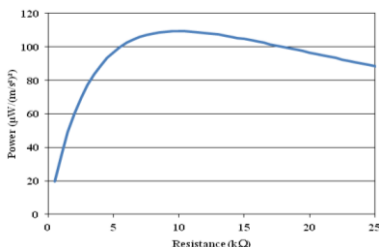


Fig1 Output Power for varying external resistance by ANSYS

Table 2 Output Power for some values of external resistance: experimental results

저항(k Ω)	전압(V)	가속도(m/s ²)	전력/ms ² (μW)
4	0.73	0.835	95.525
5	0.87	0.864	101.427
6	0.985	0.878	104.821
10	1.23	0.921	89.092

제작한 외팔보 진동 에너지 수확장치에 가변 저항을 부착하여 외부 저항 값의 변화에 따른 전압을 측정하고, 출력 전력을 구하였다. 그 결과는 Table 2에 나타난 바와 같이 외부저항이 6 k Ω 일 때 출력 전력이 104.82 μW 로, 제안된 수학 모델로 예측한 값과 약 7.8%의 오차를 보였다.

4. 결 론

본 연구에서는 압전 에너지 수확장치의 전력량을 예측하기 위해 실험으로 측정 가능한 물리량으로만 표현된 새로운 수학적 모델을 제안하였고, 해석 및 실험을 통해 이를 검증하였다. 제안한 수식을 이용하여 예측한 전력 값은 해석 및 실험 값과 비교하여 각각 3.8%, 7.8%의 오차를 보였다. 제안한 수학적 모델은 정확하면서도 사용하기 쉬운 형태로 표현되어 압전 외팔보 진동 에너지 수확장치의 전력량 예측에 매우 유용하게 사용될 것으로 보인다.

후 기

이 논문은 POSCO(과제번호: 2011Z085)와 2012년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국 연구재단의 기초 연구사업 (과제번호: 2012-0003494) 및 WCU (과제번호: R31-2008-000-10083-0)의 지원을 받은 것으로 이에 감사 드립니다.

참고 문헌

- [1] Kim, J. E and Kim, Y. Y., 2011, Analysis of piezoelectric energy harvesters of moderate aspect ratio with a distributed tip mass, Journal of Vibration and Acoustics, Vol. 133: 041010.
- [2] Ikeda, T, 1996, Fundamentals of Piezoelectricity, Oxford University Press Inc., New York.