

스프링의 탄성력을 이용한 압전 하베스팅 시스템 설계

Design of piezoelectric energy harvesting system using elastic force

홍성광* · 양찬호* · 김정훈* · 김세빈* · 성태현†

Seong Kwang Hong, Chan Ho Yang, Jeong Hun Kim, Se Bin Kim and Tae Hyun Sung

1. 서 론

에너지 하베스팅 기술은 주변에 버려지거나 미활용되는 에너지를 수확(harvest)하여 사용할 수 있는 전기에너지로 변환하는 기술이다. 그 중에서 압전을 이용한 에너지 하베스팅 기술은 다양한 곳에서 얻을 수 있는 진동 및 충격과 같은 기계적인 에너지원을 사용하기 때문에 많은 관심을 받아오고 있으며 활발한 연구가 진행되는 분야이다. 그럼에도 불구하고 아직까지 압전 에너지 하베스팅은 수 μ W ~ 수 mW 처럼 적은 양의 발전을 하고 있기 때문에 마이크로 센서와 같은 분야에서 주로 사용되고 있다.

폭넓은 분야에서 다양하게 전력원으로 사용되기 위해서는 발전량을 향상시키는 연구가 진행되어야 한다. 기존의 연구에 따르면 2 가지의 방법으로 발전량을 향상시킬 수 있다. 첫번째 방법은 재료적으로 압전상수 d , g 값을 증가시키는 방법이다. 재료적 차원에서는 큰 $d_{33} \times g_{33}$ 의 값이 작은 유전손실(dielectric loss)을 만들기 때문이다. 두번째 방법으로는 효율적인 시스템 구조를 도입하는 것이다. 기존의 연구는 외팔보(cantilever beam) 구조 방법이 전형적으로 연구 되어 왔다. 일반적으로 외팔보 구조는 다른 보에 비해 4배의 휨 모멘트를 받기 때문에 미세한 진동과 같은 에너지를 수확하기에 좋은 특징을 가지고 있다.

본 연구에서는 외팔보 구조에 스프링을 적용하여 전체 시스템의 탄성력을 변화를 확인하였다. 또한 FFT를 통하여 압전 소자의 고유 진동 주파수를 확인하고 이에 따른 매칭 저항 값의 변화와 전기적 출력의 변화를 연구하고자 하였다.

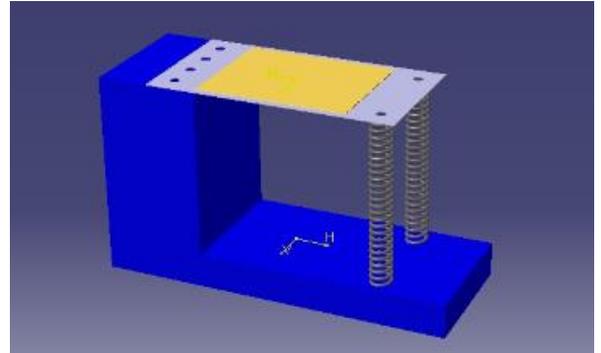


Fig. 1 Schematic of the additional spring system

2. 실험장치 및 방법

2.1 스프링 시스템

본 논문에서는 전체 시스템의 탄성력의 변화를 위해 외팔보 자유단 양쪽에 스프링을 추가한 모델이 사용되었다. Fig.1에 보여지듯이, 자유단에 연결된 2개의 스프링은 병렬로 연결되어 있으며, 스프링과 보는 직렬로 연결되어 있다. 전체 합성된 탄성력은 Hook's law를 사용하여 구할 수 있다.

$$k_{total} = k_{spring} + k_{substrate} = \frac{F}{x}$$

선경(wire diameter)이 다른 스프링을 사용하여 시스템을 설계하였으며, 스프링의 특성은 Table 1에 표시되어 있다.

Table 1 Spring Properties

Spring Type	Shear modulus (Gpa)	Wire diameter (mm)	Turns	Free length (mm)
A	80	0.4	12	50
B	80	0.5	12	50
C	80	0.6	12	50
D	80	0.7	12	50

† 교신저자; 정회원, 한양대학교

E-mail : sungth@hanyang.ac.kr

Tel : +82-2-2220-4317, Fax : +82-2-2220-4316

* 한양대학교 전기공학과

Table 2 Properties of PZT and SUS304

Material Properties		
PZT Material	d33 (10-12m/V)	364
	g33 (10-3 V·m/N)	38
	kp Radial (%)	82.4
	eT33/e0	1096
SUS304 Substrate	Young's Modulus (MPa)	199,900
	Poisson's ratio	0.3

압전 소자는 Pb (Zr_{0.54}Ti_{0.46}) O₃ + 0.2 wt% Cr₂O₃ + 1.0 wt% Nb₂O₅ 의 조성을 사용하였으며 두께, 길이, 넓이는 각각 0.23 mm, 43 mm, 33 mm 이다. 세라믹의 특성상 크랙(crack)을 방지하기 위해 압전 소자 위에 UV 코팅을 하였다. 보조재는 SUS304 알루미늄이 사용되었으며, Table 2에 각 소자의 특성이 표시되어 있다.

2.2 실험 방법

압전 소자가 부착된 외팔보의 자유단으로부터 1.5 mm 떨어진 지점에 타격막대를 설치한 모터를 이용하여 보조재를 타격하였다. 스프링이 추가된 전체 시스템의 탄성력에 대한 고유 진동수 변화를 보기 위해 모터를 1회전 하여 보조재의 변위를 측정하였고, FFT 기법을 이용하여 고유 진동수를 분석하였다. 또한 모터를 150 rpm으로 고정하였을 때, 매칭 저항 값의 변화와 전기적 출력 변화를 확인하였다.

보조재의 변위는 레이저센서(ZS; OMRON, Japan) 을 사용하여 측정하였으며, 데이터 측정은 오실로스코프(DPO4015, Textronix Inc.)를 사용하였다. 보조재에 추가된 스프링은 다양한 선경(0.4, 0.5, 0.6, 0.7 mm)을 사용하여 전체 시스템의 탄성력의 변화를 주었으며 보조재의 자유단에 부착하였다.

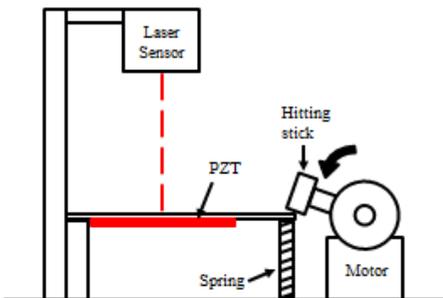


Fig. 2 Schematic of the experimental setup

3. 실험결과 및 토의

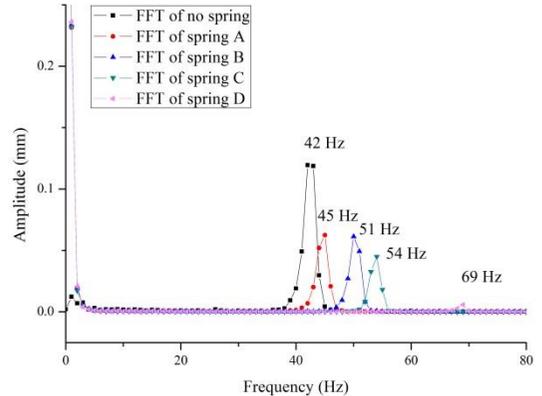


Fig. 3 FFT responses for the cantilever beam with additional springs

Fig.3은 모터를 1회전 하였을 때 보조재 변위 값에 대하여 해닝 윈도우(Hanning window) 기법을 통해 얻은 FFT 응답 그래프이다. 외팔보의 자유단에 스프링을 달지 않은 경우에는 고유 진동수가 42 Hz 이지만, 스프링을 추가하여 탄성력을 증가시킬수록 고유 주파수가 증가함을 알 수 있다. 스프링 D를 연결한 경우에는 69 Hz로 고유 주파수가 약 163% 증가함을 보였다.

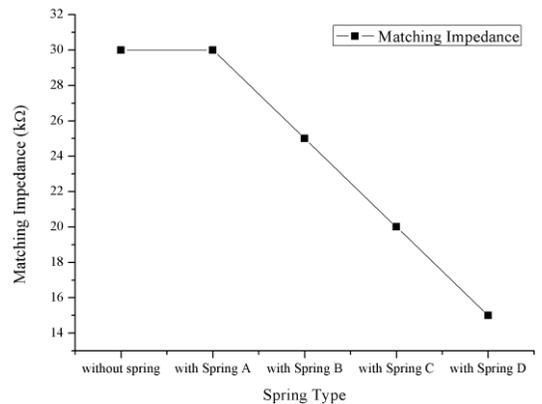


Fig. 4 Matching impedance with additional springs

Fig.4는 모터를 150 rpm으로 회전 하였을 때 각각의 시스템에 대한 매칭 저항 값이다. 외팔보 자유단에 두꺼운 선경을 연결할수록 매칭 저항 값이 낮아짐을 알 수 있다. 스프링을 부착하지 않은 경우와 스프링 A를 부착한 경우에는 30 kΩ에서 매칭 값을 보였으며 스프링 B, 스프링 C 그리고 스프링 D로

탄성력이 증가할수록 매칭 저항값도 각각 25 k Ω , 20 k Ω 그리고 15 k Ω 으로 감소하는 경향을 보였다.

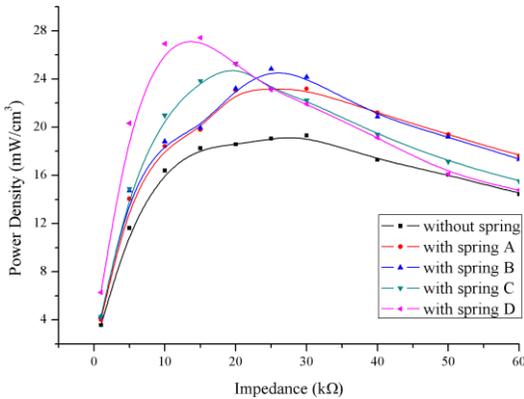


Fig. 5 Power density for each additional spring system

Fig.5는 각각의 시스템에 대한 전력밀도 그래프이다. 스프링을 부착하지 않은 상태는 30 k Ω 에서 19.3 mW/cm³의 전력밀도를 보였으며 스프링 A, 스프링 B, 스프링 C 그리고 스프링 D의 경우 각각 30 k Ω 에서 23.2 mW/cm³, 25 k Ω 에서 24.8 mW/cm³, 20 k Ω 에서 25.3 mW/cm³ 그리고 15 k Ω 에서 27.4 mW/cm³의 결과를 보였다. 스프링을 연결하여 전체 시스템의 탄성력이 증가할수록 매칭 저항 값이 낮아지며 결과적으로 전력밀도가 증가함을 보였다.

4. 결 론

본 연구는 외팔보의 탄성력을 변화시켰을 때 외팔보의 고유 주파수 및 그에 따른 전기적 출력의 변화를 관찰하였다. 다양한 선径의 스프링과 보조재의 연결을 통하여 외팔보의 탄성력을 변화시켰고, 이 변화는 전체 시스템의 탄성을 변화시켰다. 결과적으로 모터를 이용하여 보조재에 1번의 타격이 가해졌을 때 탄성력이 높을수록 외팔보의 고유 주파수가 증가하였으며, 이러한 이유로 인해 낮은 저항에서 매칭이 되는 것으로 분석되었다.

최대 전력밀도는 탄성도가 높으면서 매칭 저항 값이 낮은 시스템에서 나왔으며, 탄성도가 낮아지고 저항이 높아질수록 최대 전력밀도가 감소함을 보였다. 본 연구에서는 탈부착이 가능한 스프링을 사용하여 전체 시스템의 탄성도를 변화하였기 때문에 압전 소재를 바꾸지 않아도 된다는 장점이 있다. 이러한 시스템을 이용하여 외부에 존재하는 힘의 크기에 최적화된 탄성을 선택함에 따라 효과적인 압전 하베스팅을 할 수 있을 것으로 기대된다.