

## 저주파 진동을 이용한 압전 구동 방식의 광대역 에너지 수확 소자 연구

조현욱, 미 아, 박재영\*  
 광운대학교 전자공학과의\*

### Fabrication and characterization of piezoelectric wide band energy harvesters using low frequency vibrations

Hyunok Cho, Miah A. Halim, Jae Yeong Park\*  
 Department of electronic engineering, Kwangwoon University\*

**Abstract** - 본 연구에서는 기계적 충격 방식을 통한 주파수 상향방식을 이용하여 저주파 진동원으로부터 충분한 에너지를 수확할 수 있는 압전 구동 방식의 광대역 에너지 수확 소자를 제작하고 평가하였다. 유연한 외팔보의 진동으로 인한 기계적 충격은 압전 외팔보에 큰 두 번째 힘을 전달한다. 변형률이 커지고 주파수 상향방식을 사용한 결과로 출력 전력과 동작 주파수의 대역폭 또한 향상되었다. 제작된 에너지 수확소자의 질량체 비율은  $\mu = 5.8$ , 스토퍼의 거리는  $d = 0.5 \text{ mm}$ 이며, 17 Hz의 주파수, 30 kΩ의 최적 부하저항에서 449  $\mu\text{W}$ 의 최대 피크 전력을 전달하였다. 또한 1 g로 가진하였을 때 11 Hz부터 28 Hz의 주파수 대역에서 동작이 가능하였고, 저주파수의 무작위 진동에서도 효율적으로 에너지 수확이 가능하다는 것을 입증하였다.

### 1. 서 론

전자기기의 소형화 및 저전력화에 따라 자체 전력 수급을 위한 에너지 수확 기술에 대한 연구가 활발히 이루어지고 있다. 특히 주변 어디에나 존재하며 높은 에너지 밀도를 가지고 있는 진동 에너지를 이용한 압전 에너지 수확 기술은 높은 에너지 변환 효율을 가지는 압전 효과를 이용하여 웨어러블 기기 혹은 오토모바일의 주 전원 혹은 보조 전원과 같은 다양한 응용 분야의 전원장치에 적용이 가능할 것으로 보인다 [1].

보편적인 진동 에너지 수확소자 (SDOF 방식)는 소자의 첫 번째 공진 주파수의 부근에서만 효율적이며, 두 번째 공진주파수 혹은 더 높은 공진주파수에서는 일반적으로 수확할 수 있는 에너지가 적다. 첫 번째 공진주파수와 두 번째 공진주파수의 간격을 줄이기 위해 적절히 설계된 2-DOF 방식의 에너지 수확 소자는 대역폭의 효율이 증가한다 [2]. 하지만 이와 같은 2-DOF 방식의 에너지 수확 소자 같은 경우에는 여전히 두 번째 공진 주파수에서의 출력이 낮고 또한 첫 번째 공진주파수로부터 멀리 떨어져 있기 때문에 완벽한 광대역에서 에너지를 수확할 수 없다. 또한 이와 같은 구조의 소자는 30 Hz의 주파수보다 낮은 주파수에서는 효율적으로 에너지를 수확하기 어렵다.

본 연구에서는 주 질량체의 충격에 의해 두 번째 외팔보로 응력이 가해지는 주파수 상향방식을 이용하여 저주파수 대역의 무작위 진동범위에서 동작이 가능한 광대역 에너지 수확소자를 제안하였다.

### 2. 본 론

#### 2.1 설계 및 제작

제작에 앞서 제안된 시스템은 그림 1. (a)에서와 같이 진동-충격의 형태로 구분하여 모델링 할 수 있다. 진동이 가해질 때 주 질량체  $m_1$ 은 스토퍼를 가격한다. 두 번째 충격은 두 번째 스프링-매스 시스템에 전달되며, 이는 두 번째 질량체  $m_2$ 의 변위  $z_2$ 와 연관되어 기하급수적으로 감소하는 파형을 발생시킨다. 이는 식 (1)처럼 뒤아델의 적분으로 표현할 수 있다 [3].

$$z_2(t) = \frac{\int_0^t p(\tau) e^{-\zeta_2 \omega_2 (t-\tau)} \sin[\omega_2 \sqrt{1-\zeta_2^2} (t-\tau)] dt}{m_2 \omega_2 \sqrt{1-\zeta_2^2}} \quad (1)$$

식 (1)에서  $p(\tau)$ 는 시간  $\tau$ 에서 임의로 다양하게 가해진 힘이고,  $\zeta_2$ 와  $\omega_2$ 는 각각 두 번째 스프링-매스 시스템의 감쇠비와 공진 주파수이다. 두 번째 질량체의 변위가 발생함에 따라 압전 외팔보의 표면에는 응력이 가해진다. 이 응력은 압전효과에 의해 식 (2)처럼 전압을 발생시킨다.

$$v_{open}(t) = \frac{-d_{31} t_p k_2 l_s t_{eq}}{2\epsilon_r \epsilon_0 I_{eq}} z_2(t) \quad (2)$$

$-d_{31}$ 은 압전 변형상수이며,  $\epsilon_r$ 은 압전 물질의 유전율,  $\epsilon_0$ 는 공기중의 유전율이고  $t_p$ 는 압전층의 두께,  $k_2$ 는 압전 외팔보의 스프링상수,  $l_s$ 는 압전 외팔보의 길이,  $t_{eq}$ 와  $I_{eq}$ 는 각각 등가 외팔보 두께와 외팔보의 관성 모멘트이다.

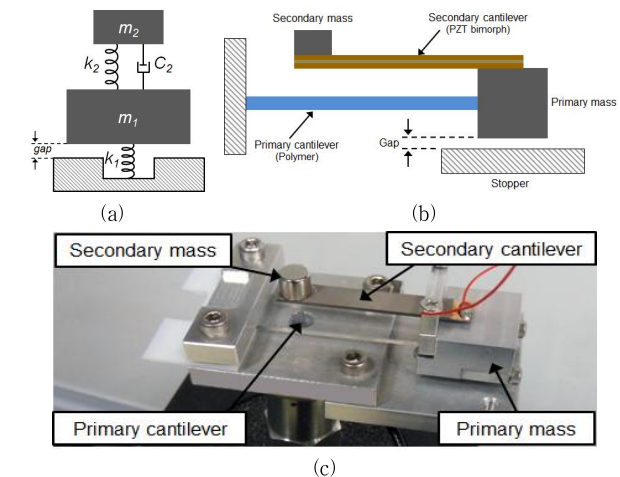
그림 1. (b)는 제안된 소자의 모식도이다. 첫 번째 외팔보는 폴리머로 제작되어 변위가 크기 때문에 비선형적 주파수의 진동에서 기계적 충격을 발생시켜 동작 주파수 범위를 더 넓히게 된다. 기계적 충격에서 발생된 순간적인 힘은 압전 물질로 제작된 두 번째 외팔보에 충격을 줌으로써 주파수가 상향된다.

그림 1. (c)는 제작된 프로토타입의 사진이다. 거시적 스케일로 제작된 프로토타입은 유연한 주 외팔보 ( $32 \times 11 \times 1 \text{ mm}^3$  polycarbonate)와 그 끝에 부착된 주 질량체 (알루미늄)으로 구성되고, 비교적 작고 단단한 두 번째 외팔보 ( $28 \times 6 \times 0.6 \text{ mm}^3$  PZT bimorph)와 작은 두 번째 질량체 (NdFeB 원기둥)로 구성된다. 두 외팔보는 서로 병렬로 고정되어 있고, 질량체의 비율은  $\mu = 5.8$ 이다. 전체의 시스템은 주 질량체의 진동에 의해 충격효과를 줄 수 있는 스토퍼가 달린 고정단에 부착되어 있다.

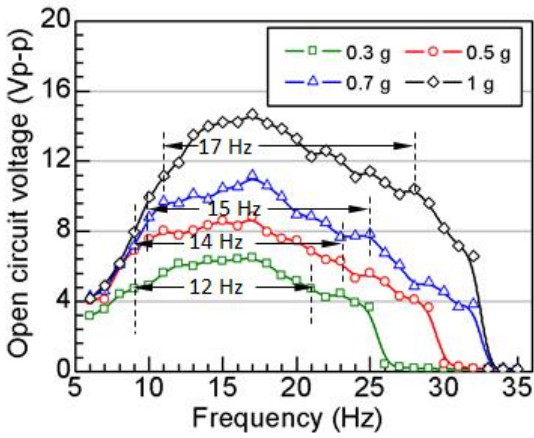
#### 2.2 측정 및 평가

제작된 에너지 수확 소자는 가진기를 이용하여 저주파수 대역의 무작위 진동 범위에서 측정되었다. 가진기에 소자를 고정시킨 후 진동 주파수와 가속도를 조절하며 오실로스코프 (TDS 5052B)를 통해 출력 전압을 확인하였다.

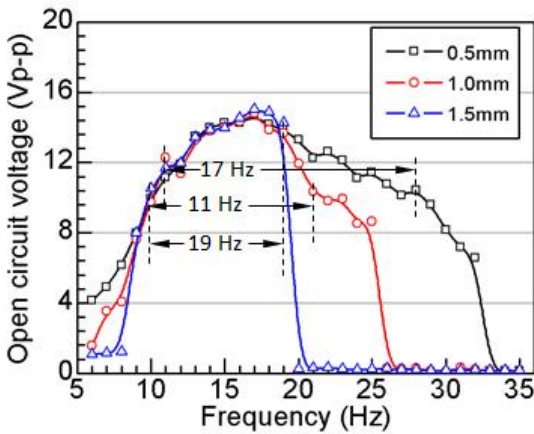
그림 2는 제작된 에너지 수확 소자의 주파수 응답을 보여준다. 그림 2. (a)에서처럼 0.3 g부터 1 g까지 가속도를 조절하며 측정 하였으며, 가해진 진동의 가속도가 높을수록 주파수 대역폭이 넓어지는 것을 볼 수 있다. 또한 그림 2. (b)에서처럼 주 질량체로부터 스토퍼의 거리가 멀어질수록 주파수 대역폭이 좁아지는 것을 볼 수 있다. 1 g의 가속도에서 주 질량체와 스토퍼의 거리가 0.5 mm일 때 최대 17 Hz (11 Hz부터 28 Hz)의 -3dB 대역폭을 가지며, 17 Hz의 주파수에서 14.66  $V_{pp}$ 의 최대 전압이 출력되었다. 그림 3은 제작된 소자의 부하저항에 따라 얼마의 최대 전력이 전달되는지 보여준다. 1 g의 가속도로 가진하였을 때 17 Hz의 주파수에서 최적 부하저항 30 kΩ에 449 $\mu\text{W}$  최대 피크 전력을



〈그림 1〉 (a) 제안된 에너지 수확 소자의 등가 모델, (b) 제안된 에너지 수확 소자의 모식도, (c) 제작된 주파수 상향 방식의 광대역 압전 구동 에너지 수확 소자



(a)



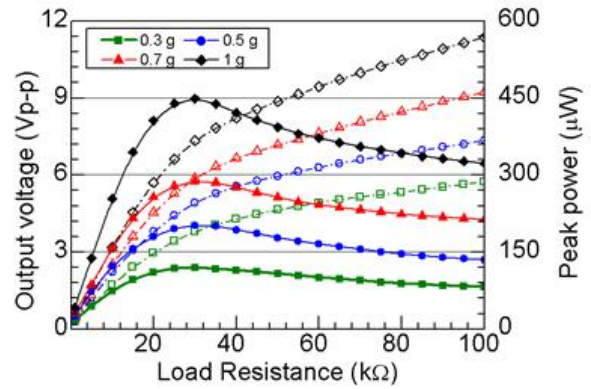
(b)

〈그림 2〉 제작된 광대역 에너지 수확 소자의 주파수 특성, (a) 인가된 가속도에 따른 주파수 특성, (b) 주 질량체와 스톱퍼 사이의 간격에 따른 주파수 특성

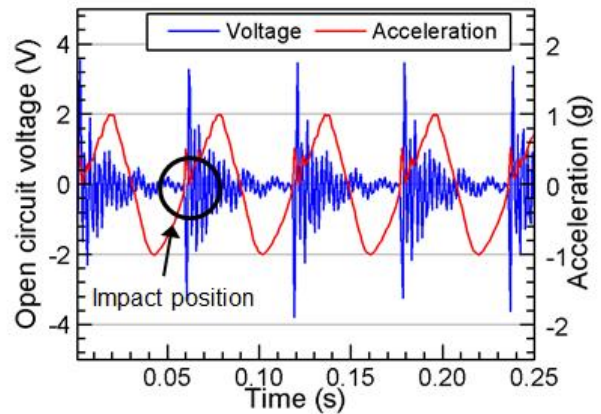
전달한다. 충격이 가해지자 마자 전압은 감쇄로 인해 기하급수적으로 감소하는 모양을 보인다. 그 결과로 실효전압은 피크 투 피크 전압에 비해 7.35 V에서 0.8 V로 현저히 감소하는 것을 확인하였다. 때문에 평균전력 또한 21.4  $\mu$ W로 줄어든다. FFT로 출력 주파수를 분석해 본 결과 그림 4에서처럼 출력된 전압의 주파수는 375 Hz로 17 Hz의 인가된 진동 주파수에 비해 주파수 상향이 이루어진 것을 볼 수 있다.

### 3. 결 론

본 연구에서는 충격을 이용한 주파수 상향방식의 압전 구동 진동 에너지 수확 소자를 설계하고 제작하였다. 제작된 에너지 수확 소자는 저주파수 대역의 무작위 진동 범위에서 넓은 대역폭으로의 에너지 수확이 가능하다. 또한 유연한 외팔보와 스톱퍼는 충격 진동이 가해지는 상황에서도 신뢰성 있는 동작이 가능하다. 제작된 소자는 1 g 가속도의 진동 아래 17 Hz의 출력 대역폭을 가지며, 이는 일반적인 진동 뿐만 아니라 오토모바일 등에서 발생하는 충격에 의한 에너지 수확에 기여할 수 있을 것이라 기대한다.



〈그림 3〉 제작된 광대역 에너지 수확 소자의 부하 저항에 따른 전압과 최적 부하 저항에 전달되는 최대 피크 전력



〈그림 4〉 제작된 광대역 에너지 수확 소자에 인가된 진동과 출력 전압 파형

[감사의 글]

본 연구는 한국연구재단을 통해 미래창조과학부의 미래유망 융합기술 파이오니어사업 (2010-0019313)과 기초연구사업 (2013R1A1A2A10064 810)의 지원을 받아 수행되었습니다.

[참 고 문 헌]

- [1] S Roundy and P. K. Wright, "A piezoelectric vibration based generator for wireless electronics", Smart Mater. Struct., vol. 13, pp. 1131-1142, 2004
- [2] O. Aldraihem and A. Baz, "Energy harvester with a dynamic magnifier", J. Intell. Mater. Syst. Struct., 2011
- [3] C. Lalanne, "Mechanical Vibration and Shock Analysis-volume 2: Mechanical Shock, second ed., Wiley, pp. 51-94, 2009