

외팔보 압전 에너지 수확장치의 형상 설계

Shape design of a cantilever-type piezoelectric energy harvester

김재은† · 김윤영*
Jae Eun Kim and Yoon Young Kim

1. 서론

최근 들어 에너지 수확 기술⁽¹⁻²⁾이 세계적으로 주목을 받고 있다. 그 이유는 MEMS, 지능 재료 및 저전력 전자 소자 기술의 비약적인 발전으로 에너지 수확 장치가 USN/ WSN(Ubiquitous- Wireless Sensor Network)의 센서 노드 등으로 대표되는 원격, 임베디드 시스템에 대한 자체 전력 공급원으로서의 가능성이 있기 때문이다. 에너지 수확 기술을 실용 가능한 수준으로 발전시키기 위한 노력의 결과로 몇몇 상용 제품이 실현된 경우도 있으나, 아직 대다수의 에너지 수확 장치가 다양한 분야에 사용될 만큼의 성능(출력 전류, 전력 등)을 발휘하지 못하고 있다.

이러한 배경 아래 본 연구에서는 에너지 수확 장치의 성능을 향상시켜 보고자 하였다. 이를 위해 주기적으로 가진되는 진동 에너지를 압전 소자를 이용하여 전기 에너지로 수확하는 장치의 형상에 대해 최적화 연구를 수행하였다. Fig. 1의 위 부분에 제시된 초기 에너지 수확 장치로부터 아래 부분에 있는 설계 모델을 도출하였다. 설계 모델의 옆면을 Bezier 3 점으로 매개 변수화하고, 끝단 질량의 크기와 매개 변수를 설계 변수로 하여 형상 최적화를 수행하였다. 최적화시 전기-기계 결합 계수 (EMCC; Electro Mechanical Coupling Coefficient), 고유 진동수와 가진 주파수를 동시에 고려하였다.

2. 최적 설계 형식화

전기-기계 결합 계수만을 최대화하면 외팔보 압전 에너지 수확 장치가 삼각형 형상으로 수렴하게 되며, 더불어 그 고유 진동수도 감소하게 된다. 진동 에너지를 이용하는 경우 가진 주파수를 반드시 고려해야 하므로 본 연구에서는 전기-기계 결합 계수와 고유 진동수를 동시에 고려하여 다음 식과 같은 목적 함수를 제안하였다.

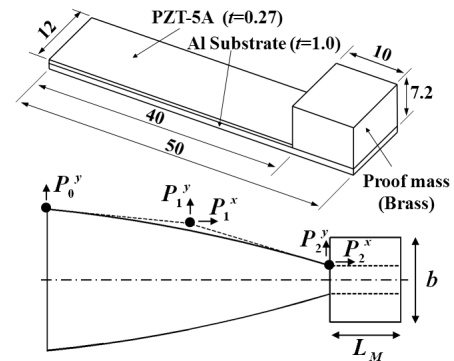


Fig. 1 Baseline design (top) and model for shape optimization (bottom)

$$\text{Maximize } \alpha \cdot \frac{U_E^{OC}}{U_M^{OC} + U_E^{OC}} + (1-\alpha) \cdot fq \quad (1a)$$

$$\text{subject to } V_{piezo} \leq \bar{V}_{piezo}; \quad fq \leq \bar{fq}_{dr} \quad (1b)$$

위의 식에서 U_M^{OC}, U_E^{OC} 는 각각 개회로 상태에서 1 차 급힘 모드에 저장된 기계, 전기 에너지를 나타낸다. 그리고, fq 는 1 차 급힘 진동수, \bar{fq}_{dr} 은 외부 가진 주파수 (120 Hz), V_{piezo} 은 사용된 압전 물질의 부피를 나타낸다. 유한 요소 해석 프로그램인 ANSYS를 사용하였으며, 민감도는 유한 차분법으로, 최적화 알고리즘은 SQP (Sequential Quadratic Programming) 방법을 사용하였다.

3. 형상 최적 설계 결과 및 토의

3.1 끝단 질량의 영향

외팔보 형태의 압전 에너지 수확 장치에 있어서 끝단 질량은 장치의 고유 진동수가 저주파수 대역에 놓이게 하는 역할과 동시에 압전 물질내의 변형을 증가시켜 출력 파워를 증가시키는 역할을 한다. 먼저, 끝단 질량의 변화 없이 주어진 설계 영역만의 조정으로 출력 파워의 증가가 어느 정도 가능한지를 알아 보기 위해 최적화를 수행해 보았다. Fig. 2는 최대 사용된 압전 재료가 초기 형상의 수확 장치에 사용된 압전 재료와 동일하도록 조건을 주어 최적화를 수행한 결과이다. 이 결과로부터 끝단 질량의 변경 없이는 큰 성능 향상을 이룰 수 없음을 알게 된다.

† 김재은; 서울대학교 정밀기계설계 공동연구소
E-mail : jekim@idealab.snu.ac.kr
Tel : (02) 880-7130, Fax : (02) 872-5431
* 서울대학교 기계항공공학부

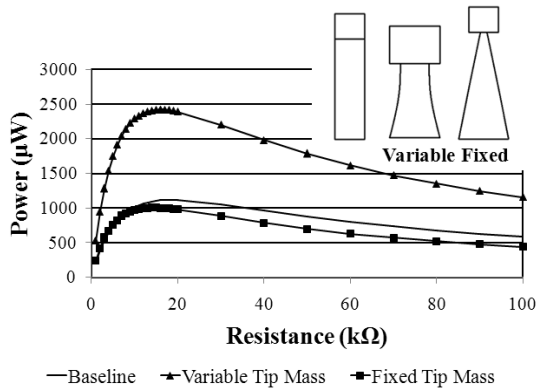


Fig. 2 Results of shape optimization for variable and fixed tip masses. Output power with respect to external resistive loads and the corresponding optimized shapes are shown

3.2 압전 물질 사용량에 따른 성능 비교

압전 재료에 대한 비용 및 에너지 수확 장치의 무게에 대한 제한을 고려하여, 사용된 압전 재료의 부피에 따른 최적화를 수행하였다. 허용 압전 재료 물질이 초기 설계에 사용된 압전 재료 물질 이내가 되도록 한 조건에서 최적화를 수행한 결과, 최적화된 수확 장치는 초기 형상에서 사용된 압전 재료의 92%만을 사용하였다. 이것은 현 설계 영역 범위 내에서 일정 이상의 압전 재료의 사용은 추가적인 성능 향상을 달성할 수 없다는 뜻이다.

Fig. 3 에서 보듯이 압전 물질을 많이 사용할 수록 출력 파워가 증가한다. 하지만, 초기 설계 대비 80%만 사용되어도 성능이 처음에 비해 약 2 배 정도가 된다. 이 때, 압전 에너지 수확 장치의 최적 임피던스도 감소한다. 이 현상은 압전 재료가 차지하는 면적이 증가하기 때문이며 동시에 출력 전류가 증가하는 것을 의미한다.

3.3 변형 (Strain) 분포와 최적화와의 관계

일반적으로 압전 물질의 변형량과 발생하는 전압은 비례한다. 따라서, 외부 진동에너지가 압전 물질에 전달되었을 때 동적 변형이 가능한 크고 고르게 분포되는 것이 바람직하다. 이런 이유로 외팔보 구조의 진동 에너지 수확 장치의 최적 형상이 삼각형 형상⁽³⁻⁴⁾으로 수렴한다. 그러나, 최적 설계시 첫 번째 굽힘 모드에서의 평균 변형량을 최대화 함과 동시에 고유 진동수를 가진 주파수에 맞춰야 하므로 최적화된 수확 장치가 그 주파수에서 항상 가장 큰 출력 파워를 발생시키지는 않는다. 실제 최적화를 수행해 보면 단지 그렇게 최적화된 장치는 초기 장치보다 조금 개선된 결과를 줄 뿐이다 (Fig. 4 참조).

4. 결 론

외부 기계적 가진에 의해 진동하는 외팔보 형태의 압전 에너지 수확 장치의 형상 최적화로 초기 설계

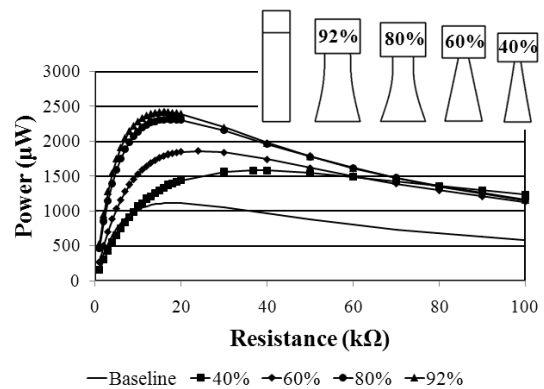


Fig. 3 Results of shape optimization for different mass of piezoelectric material

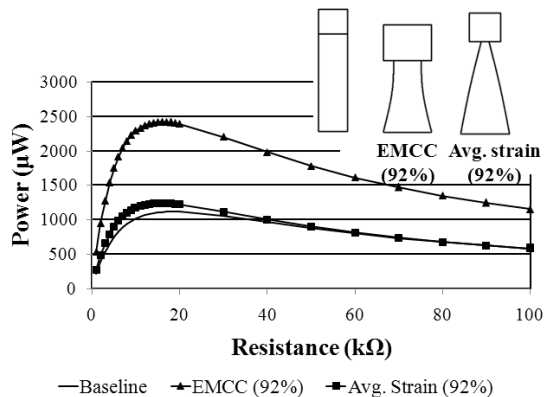


Fig. 4 Results of shape optimization using EMCC and average strain as objective functions

에 비해 2 배 가까운 출력을 내는 최적 장치를 도출하였다. 이 연구를 통해 전통적으로 사용되고 있는 삼각형 형상의 수확 장치로는 실제 외부 가진시 큰 출력을 얻지 못한다는 점도 확인하였다.

후 기

본 연구는 서울대학교 정밀기계설계공동연구소를 통해 체결된 창의적연구진흥사업 (한국과학재단, 과제 번호 2008-011)의 지원으로 수행되었습니다.

참 고 문 헌

- (1) Beeby, S. P., Tudor, M. J. and White, N. M., 2006, "Energy harvesting vibration sources for microsystems applications" Meas. Sci. Technol., Vol. 17, R175-R195.
- (2) Priya, S. and Inman, D. J., 2009, "Energy Harvesting Technologies", Springer Science+Business Media, LLC.
- (3) Mateu, L. and Moll F., 2005, "Optimum Piezoelectric Bending Beam Structures for Energy harvesting using Shoe Inserts", J. Intell. Mater. Syst. Struct., Vol. 16, pp. 835-845.
- (4) Goldschmidtboeing, F. and Woias, P., 2008, "Characterization of different beam shapes for piezoelectric energy harvesting", J. Micromech. Microeng., Vol. 18, 104013 (7pp).