

주파수 가변용 외팔보형 압전발전기의 발전특성

정성수¹, 박충호^{1,a}, 강신출², 김종욱¹, 임정훈¹, 김명호¹, 박태곤¹

¹ 창원대학교 전기공학과

² 경남도립남해대학 전기과

Generating Characteristics of a Cantilever Type Piezoelectric Generator for Changeable Frequency

Seong-Su Jeong¹, Choong-hyo Park^{1,a}, Shin-chul Kang², Jong-wook Kim¹, Jung-Hoon Lim¹, Myong-ho Kim¹, and Tae-gone Park¹

¹ Department of Electrical Engineering, Changwon National University, Changwon 641-773, Korea

² Department of Electricity, Gyeongnam Provincial Namhae College, Namhae 668-801, Korea

(Received September 30, 2011; Revised October 18, 2011; Accepted October 21, 2011)

Abstract: A cantilever-type piezoelectric generator has advantages of simple structure, ease of fabrication and large displacement by transverse vibration of a beam. It is easy to control the natural frequency, and also possible to increase the output power by changing the length, width, and thickness of the generator. In particular, the length increases, the natural frequency sharply decreases, and vice versa. Hence, the natural frequency can widely be controlled by using change in the length of elastic body. In this paper, the generator was designed and fabricated to change natural frequency using the slides of the case. In addition, the generating characteristics were confirmed through finite element analyses and vibration experiment. As a result, the maximum output characteristics could be generated due to resonance phenomenon although any frequency of external force was applied.

Keywords: Piezoelectric generator, Unimorph, Cantilever type, Changeable frequency, FEM

1. 서론

현재 산업 전반적으로 그린 에너지의 활용이 대두됨에 따라 압전체를 이용한 자가 발전 장치의 필요성이 증가되고 있다. 모든 생활 주변에서 버려지거나 낭비되고 있는 물리적인 외력을 입력으로 하여 전기적인 출력을 내는 압전 에너지 하베스팅은 청정한 전기 에너지를 수확하는 데에 있어서 자연환경의 영향을 받지 않아 안정적이고 지속적인 발전이 가능할 뿐만 아니라 센서를 포함한 소형 장비의 전원장치로 사용이

가능할 정도의 발전량을 가져 기존의 전원 시스템을 대체할 수 있다는 장점을 가지고 있다 [1-4].

압전 발전의 경우 외력의 크기, 주파수에 따라 발전량이 큰 차이를 보이는데 외력이 크면 클수록 발전량 또한 선형적으로 증가하는 결과를 보인다. 하지만 주파수의 경우 특정 주파수에서 공진 현상으로 인해 비선형적으로 출력이 증가하므로 발전기의 고유 주파수를 외력의 주파수와 일치시켜서 설계해야 최대 출력을 얻을 수 있다. 생활 주변의 진동원이 갖는 주파수는 수 Hz에서 수백 Hz까지 다양하기 때문에 압전 발전기를 사용하기 위해서는 변화하는 공진 주파수에

a. Corresponding author; magicpotato@naver.com

대응할 수 있는 발전소자의 개발이 필요하다 [5,6].

본 연구에서는 공진주파수를 폭넓게 가변할 수 있는 압전 발전소자를 개발하기 위하여 외팔보형 압전 발전기를 설계하고, 주파수 튜닝을 위한 기계적인 구조를 제안하였다. 먼저 유한요소 해석 프로그램 (FEM) 을 이용하여 공진 주파수 가변이 가능한 외팔보형 압전 발전소자를 최적 설계하였고, 출력을 증가시키기 위하여 발전소자를 직병렬로 연결한 발전장치를 설계 및 제작하여 출력특성을 실험하였다.

2. 실험 방법

2.1 압전 발전소자의 구조 및 원리

외팔보형 압전 발전소자는 그림 1과 같은 기본적인 형상을 갖는다. 얇은 탄성체의 윗면에 압전세라믹이 접합되어 있고, 한쪽 끝부분은 발전소자의 지지를 위한 탄성체로 이뤄져있으며 나머지 반대쪽 끝 부분은 공진 주파수의 미세조정을 위한 질량체로 구성되어 있다. 탄성체의 고정점을 중심으로 외팔보가 상하의 진동을 하게 되면 그 외력은 탄성체에 결합된 압전세라믹에 전달되어서 압전효과 (direct piezoelectric effect) 에 의하여 전력을 얻을 수 있다 [7]. 그림 1에서 제시된 각각의 변수는 유한요소 해석 파트에서 최적 설계를 위한 변수로 지정하기 위함이며, 질량체는 하부의 고정부와 탈부착 및 이동이 가능한 상부 질량체로 구성되어 있다.

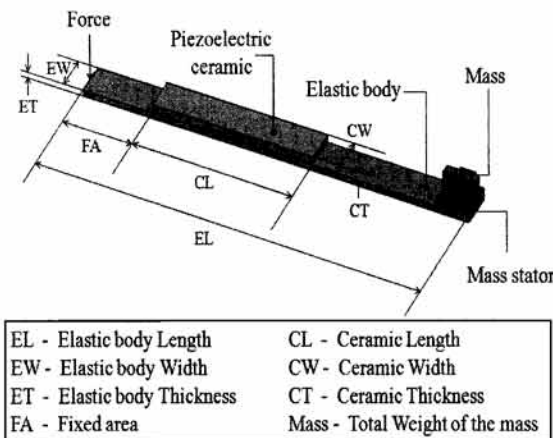


Fig. 1. Structure of a cantilever type piezoelectric generator.

그림 2는 발전소자의 측면도이며 얇은 탄성체의 좌측부에 위치한 발전소자 지지대는 좌우로 이동이 가능하며, 이것은 곧 탄성체의 길이 조절에 의해 공진 주파수의 변화에 큰 영향을 줄 수 있으며 발전기로 구성될 때 이동이 가능한 슬라이드 부분이 되며, 길이 변화에 따른 공진주파수 특성은 유한요소 해석과 실험을 통하여 검증될 것이다 [8].

2.2 유한요소 해석

외팔보형 압전 발전소자 각각의 변수에 따른 최적 설계를 위해 범용 유한요소 해석 프로그램인 ANSYS 를 이용하여 해석을 진행하였다. 먼저 공진 주파수 및 진동형상을 modal 해석을 이용하여 진행하였고, PDS (probabilistic design system) 해석을 통하여 발전소자 길이-폭-두께와 탄성체 재료의 변수가 출력에 미치는 영향을 파악하였다. 마지막으로 harmonic 해석으로 출력특성을 규명하여 발전기 제작을 위한 자료를 구축하였다 [9].

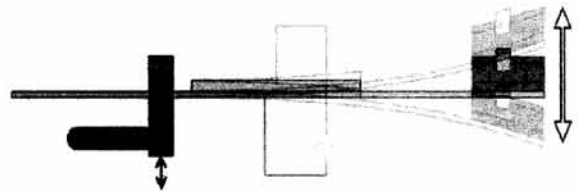


Fig. 2. Design of the slide and mass for changing the resonance frequency.

그림 3은 모델링된 발전소자에 modal 해석을 수행한 결과로써(a)는 1차 진동모드, (b)는 2차 진동모드를 보여준다. 본 연구에서는 밴딩모드를 가지면서 저주파 영역에 적용이 용이한 1차 진동모드를 중심으로 해석을 진행하였다.

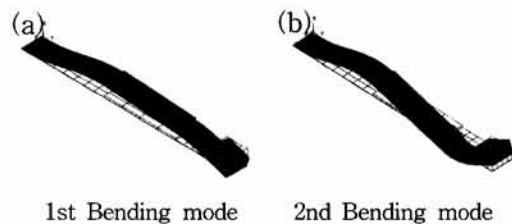


Fig. 3. Vibration modes using modal analysis.

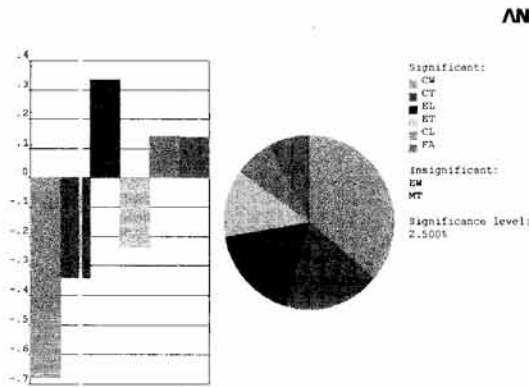


Fig. 4. Influence on output characteristics of each parameter using PDS analysis.

Table 1. Resonance and output characteristics depending on each parameter.

Increase parameter	Resonance frequency	Output voltage (Influence)
EL	Sharp decrease	Increase (3)
EW	No change	No change
ET	Sharp increase	Decrease (4)
EM	Brass<Copper<SUS304	Brass<Copper<SUS304
FA	Increase	Increase (6)
CL	little increase	Increase (5)
CW	No change	Decrease (1)
CT	No change	Decrease (2)
Mass	Little decrease	No change

※ EL : Elastic body length CL : Ceramic length
 EW : Elastic body width CW : Ceramic width
 ET : Elastic body thickness CT : Ceramic thickness
 EM : Elastic body material Mass : Total mass
 FA : Fixing area

그림 4는 각각의 변수들이 출력에 미치는 영향도를 파악하기 위해서 실시한 PDS (probabilistic design system) 해석 결과를 보여준다. PDS 해석 결과, 1)세라믹의 폭이 감소할수록, 2)세라믹의 두께가 감소할수록, 3)탄성체의 길이가 증가할수록, 4)탄성체의 두께가 감소할수록, 5)세라믹의 길이가 증가할수록, 6)고정거리가 증가할수록 출력 전압이 증가함을 확인하였으며 각 변수가 공진 주파수에 미치는 영향과 출력에 미치는 영향력의 순서를 표 1에서 자세하게 나타내었다.

공진 주파수 튜닝을 위한 방법은 탄성체의 길이 변화와 질량치의 변화로 정의하고 있으며, 이 중에서 탄성체의 길이 변화는 큰 폭의 공진 주파수 변화에 의해 유도된다. 그림 5는 탄성체의 길이 변화에 따른 공진

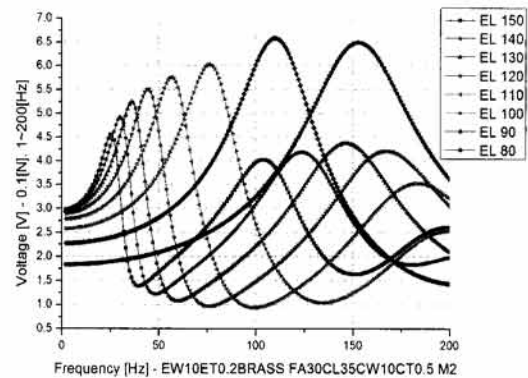


Fig. 5. Resonance characteristics depending on change in the elastic body length.

주파수와 출력 특성을 해석한 결과로써 약 20[Hz]에서 200[Hz]의 범위에서 공진 주파수가 변화되었다. 이러한 공진 주파수의 변화는 아래에 제시된 외팔보의 횡운동에 관한 고유 주파수 공식과 일치하였으며, 특히 탄성체 길이 변화에 따라서 주파수가 크게 바뀔 수 있다. 압전발전기를 생활 속의 진동에 응용한다면 비교적 낮은 주파수에서 공진하는 발전기 설계가 필요하며, 이 때 탄성체의 길이만으로 공진 주파수를 낮추게 되면 굴곡 진동 등의 복합 진동이 발생하기 때문에 해석을 통해서 진동 형상을 확인할 필요가 있다. 유한요소해석을 통해서 설계된 압전발전기 모델은 제작 및 실험을 통해 발전 특성과 비교 분석하였다.

$$\omega_n = (\beta_n l)^2 \sqrt{\frac{EI}{\rho A l^4}}$$

E : Young's modulus
 I : Moment of inertia
 ($w \times h^3 / 12$)
 ρ : Density
 A : Area ($w \times h$)
 l : Length
 $\beta_n l$: Both ends condition

3. 결과 및 고찰

유한요소 해석 결과를 바탕으로 제작한 압전 발전소자를 그림 6에서 보여준다. 모델명은 다음의 [EL90EW10ET0.2BrassFA40CL35CW10CT0.75M2]로

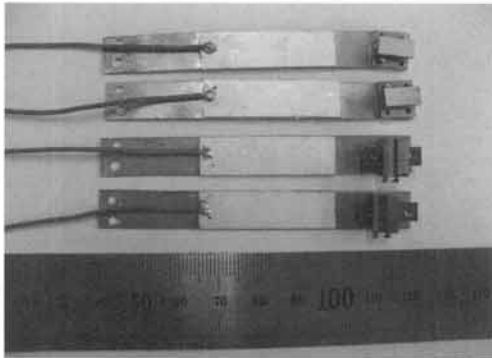


Fig. 6. Fabricated cantilever type piezoelectric generator.

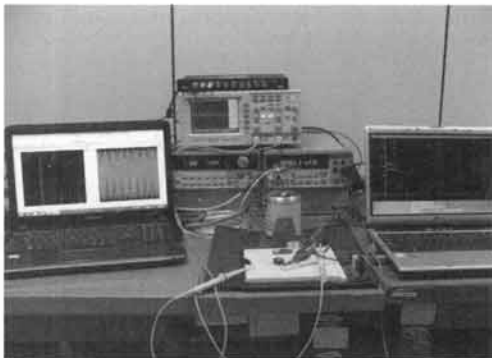


Fig. 7. Equipment for vibration experiment using shaker.

약식 표기하였으며, 이는 그림 1에서 제시한 각각의 변수 값을 나타낸다. 그림 6과 같이 실험을 위한 네 개의 초기 모델을 제작하였으며, 진동 실험을 위하여 구축한 가진기 및 그 외 측정 장비를 그림 7에서 보여 준다. 실험 장치의 구성으로는 외력을 인가하기 위한 가진기, 가진기의 주파수 및 가속도 변화를 위한 함수 발생기 및 파워앰프, 가진력 측정을 위한 가속도센서 및 DAQ보드-모니터링 장비, 그 외에 출력 측정을 위한 오실로스코프와 디지털 멀티미터가 사용되었다.

실험 장치를 이용하여 압전 발전소자의 출력 특성을 그림 8~10에서 보여준다. 그림 8은 탄성체의 길이 변화에 따른 출력전압 특성으로써 길이가 길어질수록 낮은 공진 주파수를 보였으며, 출력전압은 길이가 짧을수록 높게 나타났다. 탄성체의 길이와 공진주파수의 관계는 유한요소 해석의 결과와 동일하게 나타났다. 탄성체의 진동이 길어질수록 진동이 전달되면서 복합진동의 발생으로 출력전압은 조금씩 낮아지는 것으로 판단된다. 20[Hz]부근의 저주파 일부 영역에서도 발전 특성을 보였으나 명확하지 않은 주파수

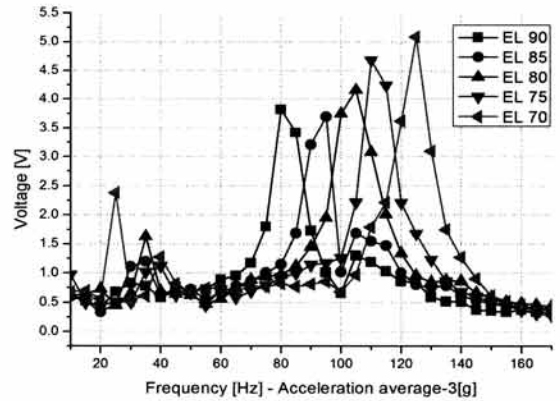


Fig. 8. Output voltage depending on change in the elastic body length (location of slide).

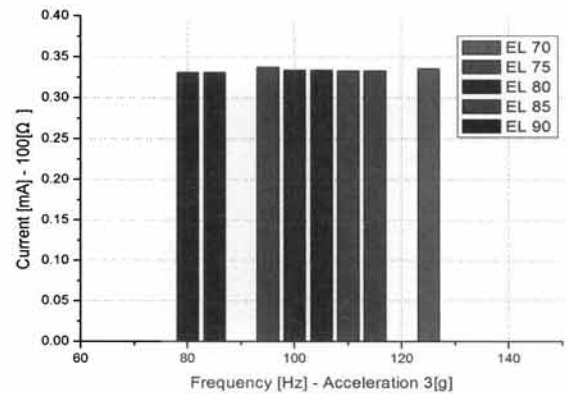


Fig. 9. Output current depending on change in the elastic body length (location of slide).

특성과 낮은 출력전압 때문에 발전영역에서는 제외시키기로 하고 나머지 전류특성을 측정하였다. 탄성체의 길이 변화 실험에서 미세한 주파수 튜닝은 발전소자 끝에 부착된 질량체로 조절하였으며, 이는 질량체의 무게 및 위치 변화로 미세 주파수 조절이 가능하다는 것을 의미한다.

그림 9에서는 탄성체 길이 변화에 따른 출력 전류를 보여준다. 부하저항은 100[Ω]으로 고정하여 실험하였고, 각 모델의 공진 주파수 영역에서 부하전류가 흐름을 확인할 수 있었으며 모델 간의 전류값은 큰 차이를 보이지 않았다. 탄성체의 길이 변화를 준 각 모델의 출력전압은 차이를 보였지만 전류가 크게 변하지 않은 것은 전력을 생산하는 압전 세라믹의 크기가 같도록 설계되었기 때문으로 판단된다. 그림 10은 탄성체의 길이 변화에 따라서 발전이 가능한 전체적인

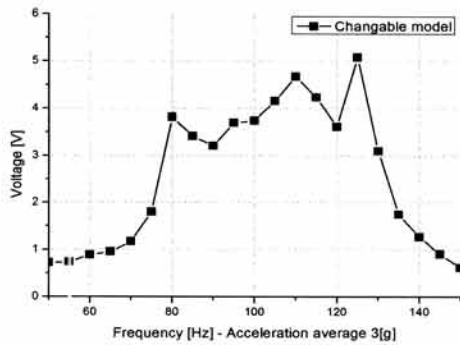


Fig. 10. Range of output voltage depending on location of the slides.

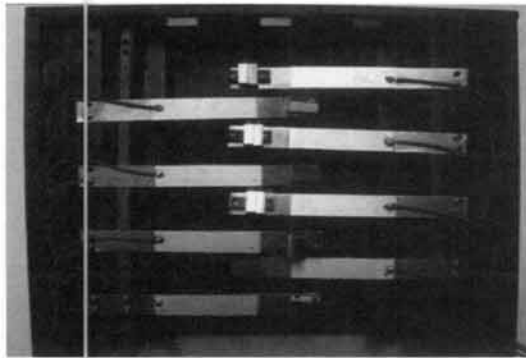


Fig. 11. Fabricated generator for changeable resonance frequency.

주파수 영역을 보여준다. 이는 그림 5와 같은 출력전압을 보이는 주파수 영역으로써 약 70~140[Hz]영역에서 주파수 튜닝에 따른 출력을 얻을 수 있는 것으로 측정되었다.

4. 결론

본 연구에서는 저주파 영역에서 주파수 가변이 가능한 외팔보형 압전발전기를 제안하였다. 유한요소해석의 modal 해석으로 주파수 및 진동형상을 규명하고, harmonic 해석과 PDS 해석을 통하여 각 변수에 따른 특성을 해석하여 발전소자의 최적설계를 시행하였다. 또한 최적모델의 주파수 튜닝을 위한 탄성체 길이변화와 질량체 변화 (미세 주파수 튜닝)의 해

석을 통해 주파수 가변이 가능하였다. 제작된 발전소자의 실험을 위하여 주변에서 일어나는 진동원을 구현하기 위하여 가진장치를 고안하였으며, 이를 이용하여 발전소자의 출력특성을 측정하였다. 그 결과 저주파 영역에서 안정된 출력을 보였고, 탄성체의 길이 변화에 따른 주파수 튜닝이 가능하였다. 발전소자의 사이즈 변화에 따라 다른 주파수 영역에서 발전이 되는 모델의 제작이 가능하였다.

발전량을 증대시키기 위해서는 다수의 발전소자를 하나의 모듈로 제작하면 되고, 슬라이드의 이동으로 전체적인 주파수 튜닝을 할 수 있으며 질량체 조절로 미세 주파수 튜닝 또한 가능하기 때문에 진동원의 변화에도 고출력을 갖는 압전발전기로 활용이 가능하다.

감사의 글

본 연구는 교육과학기술부에서 시행한 「경남 창원 과학연구단지육성사업」 기초·원천 R&D 과제 지원 사업으로 수행되었음.

이 연구에 참여한 연구자는 "2단계 BK21" 사업의 지원비를 받았음.

REFERENCES

- [1] J. L. Gonzalez, A. Rubio, and F. Moll, *International Journal of the Society of Materials Engineering for Resource*, 7 (2001).
- [2] H. I. Jun, *J. KIEEME*, 9, 315 (2008).
- [3] J. Kymissis, C. Kendall, J. Paradiso, and N. Gershendeld, *2nd IEEE International Conference on Wearable Computing*, 34 (1998).
- [4] T. G. Park, B. J. Kim, M. H. Kim, and K. Uchino, *Jpn. J. Appl. Phys.*, 41, 7139 (2002).
- [5] K. Uchino, *Piezoelectric Actuators and Ultrasonic Motors* (Kluwer Academic Publishers, USA, 1997) p. 129.
- [6] Phillips Components, *Piezo Ceramic Products* (Technical Information, USA, 2000) p. 3.
- [7] H. W. Kim, *Impedance Adaptation Methods of The Piezoelectric Energy Harvesting*, Ph. D. Thesis, p. 27 (2006).
- [8] S. S. Rao, *Mechanical Vibrations* (Addison-Wesley Publishing Company, 1990) p. 427.
- [9] ANSYS, Inc. "ANSYS, Theory Manual".