

## 압전 발전소자의 변형모델에 따른 출력특성

정성수<sup>1</sup>, 전호익<sup>1</sup>, 천성규<sup>1</sup>, 강신출<sup>2</sup>, 박태곤<sup>1,a</sup>

<sup>1</sup> 창원대학교 전기공학과

<sup>2</sup> 경남도립남해대학 전기과

### Power Output Characteristics of an Modified Piezoelectric Energy Harvester

Seong-Su Jeong<sup>1</sup>, Ho-Ik Jun<sup>1</sup>, Seong-Kyu Cheon<sup>1</sup>, Shin-Chul Kang<sup>2</sup>, and Tae-Gone Park<sup>1,a</sup>

<sup>1</sup> Department of Electrical Engineering, Changwon National University, Changwon 51140, Korea

<sup>2</sup> Department of Electrical Engineering, Gyeongnam Provincial Namhae College, Namhae 52422, Korea

(Received October 17, 2016; Revised October 30, 2016; Accepted November 1, 2016)

**Abstract:** Recently, energy harvesting technology is increasing due to the fossil fuel shortages. To compensate problem of low generating power than other energy harvesters, many researchers have studied about piezoelectric harvester for obtaining high output. In this paper, four kinds of unimorph based piezoelectric harvesters were proposed and its generating characteristics were studied. Each of the piezoelectric harvesters has three, four, and six unimorph arms, respectively, and the arms are symmetrically arranged from one central point. The centrosymmetric structure of the harvesters guarantees more stable and multiplied generation than a cantilever-type harvester since the arms of the harvester resonate at same frequency. Resonance frequency, output voltage, displacement, and stress characteristics of the generator were analyzed by using a FEM (finite element method) program. Harvesters were fabricated on the basis of analysis results. Experimental results were compared with simulated results.

**Keywords:** Piezoelectric energy harvester, Unimorph, Centrosymmetric structure, FEM

#### 1. 서론

기존자원의 고갈로 인한 에너지 부족으로 자연에너지를 이용한 에너지 하베스팅 기술이 발전하고 있다. 태양, 파도, 바람, 압력, 진동, 열 등 주변에서 쉽게 볼 수 있는 자연적인 에너지를 전기적인 신호로 바꾸는 에너지 하베스팅 기술은 전기적신호로 변환하는 과정에서 낮은 효율을 보이고 있다. 이러한 단점으로 군사,

우주항공 등 특수한 분야에서만 이용되던 기술이 최근 무선기기 및 모바일 기기가 급증하면서 자가발전 및 전력변환 에너지 하베스팅 기술로 꾸준히 발전하고 있다. 에너지 하베스팅은 버려지는 에너지를 재사용하는 기술이므로 화석 에너지의 고갈을 대체 할 수 있으며 친환경적이므로 미래의 새로운 에너지 자원이 될 수 있다. 이중 압전에너지 하베스팅은 대표적인 녹색 에너지 시스템이며, 압전효과를 이용하여 주변에 버려지는 진동에너지원을 이용하여 전기에너지를 생성하기 때문에 낮은 비용과 높은 효율의 장점을 갖는다. [1-10]

본 연구는 다양한 압전에너지 하베스터 중에서 가장 기본이 되며, 높은 에너지 변환 효율을 갖는 유니몰프형 압전발전소자의 대칭변환 모델들의 특성을 규

a. Corresponding author; [tgpark@changwon.ac.kr](mailto:tgpark@changwon.ac.kr)

명하였다. 먼저 하나, 셋, 넷, 여섯 개의 팔을 갖는 유니몰프형 기반의 대칭모델을 설계하였다. 기본 공진형 모델의 1차 공진주파수를 상용주파수 환경에 적용하기 위해 60 Hz가 되도록 유한요소해석 프로그램을 이용하여 설계하였다. 단일 유니몰프형 압전발전소자를 기본으로 중심 대칭이 되는 모델들의 출력특성을 규명하기 위하여 유한요소해석 결과 값과 실험 결과 값을 비교 검증하였다.

## 2. 실험 방법

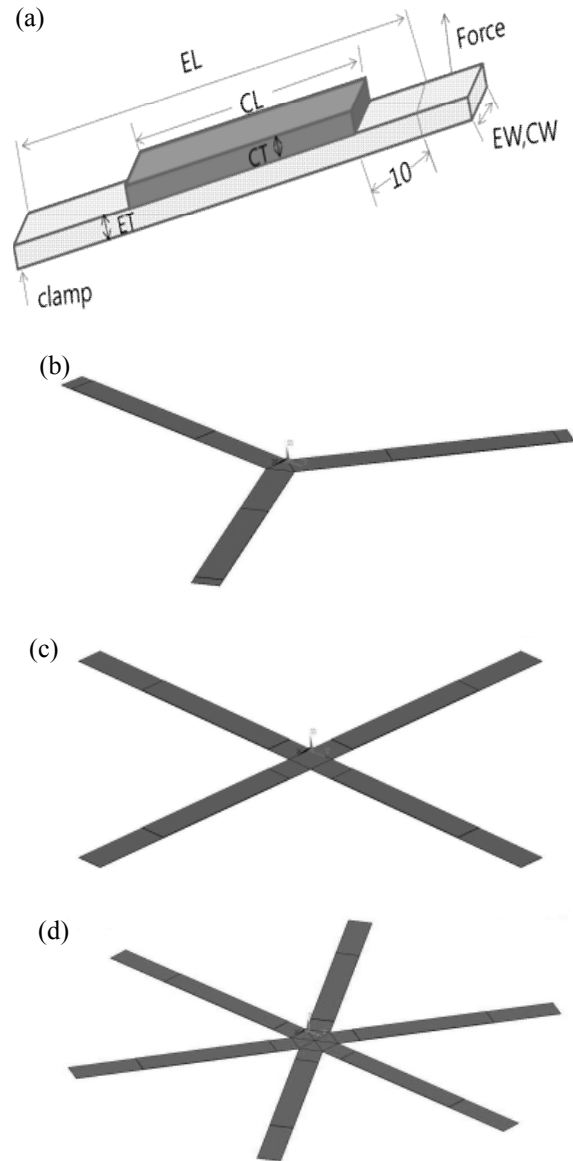
### 2.1 변형된 압전 발전소자의 구조

그림 1은 기본 유니몰프형 압전발전소자와 대칭구조를 갖는 변형된 발전소자들을 보여준다. 그림 1(a)는 단일 유니몰프와 관련 표기에 대해 보여준다. 탄성체의 두께(ET), 탄성체 및 세라믹 폭(EW, CW), 탄성체 길이(EL), 세라믹 두께(CT), 세라믹 길이(CL), 그리고 고정점(clamp)과 인가되는 힘(force)을 중심으로 디자인 되었다. 유한요소해석 프로그램(ANSYS)를 이용하여 1차 공진이 60 Hz를 갖는 모델을 설계하였다.

압전발전소자는 100 mm 이하의 길이에서 60 Hz 공진 모델을 목표로 하였으며, 유한요소해석(FEM)은  $EL=100$  mm,  $EW=CW=10$  mm,  $ET=0.2$  mm,  $CL=30$  mm,  $CT=0.5$  mm의 초기모델로 항응(영응  $92$  N/m<sup>2</sup>, 밀도  $8,270$  kg/m<sup>3</sup>)을 탄성체의 재질로 사용하였다.

**Table 1.** Physical properties of PZT (lead zirconium titanate) [PSI-5A4E].

|  |               |       |
|--|---------------|-------|
| Density (g/cm <sup>3</sup> )                           | $\rho$        | 7.56  |
| Curie temperature (Tc)                                 | °C            | 280   |
| Dielectric constant                                    | $K^T_3$       | 2200  |
|  | $K_p$         | 80    |
|  | $K_t$         | 51    |
| Coupling factor (%)                                    | $K_{31}$      | 43    |
|  | $Q_m$         | 70    |
| Piezoelectric charge constants (10 <sup>-12</sup> m/V) | $d_{33}$      | 550   |
|  | $d_{31}$      | -260  |
| Piezoelectric voltage constant (10 <sup>-3</sup> Vm/N) | $g_{33}$      | 28.2  |
|  | $g_{31}$      | -11.5 |
| Dissipation factor (%)                                 | $\tan \delta$ | 1.8   |



**Fig. 1.** Structures of single and modified cantilevers. (a) Single cantilever, (b) three cantilevers, (c) four cantilevers, and (d) six cantilevers.

### 2.2 유한요소해석

그림 2는 탄성체의 길이변화에 따른 공진주파수와 출력력압 특성을 해석한 그래프이다. 주파수 150 Hz 이상에서 나타나는 공진모드는 2차 공진모드이며, 본 연구에서는 1차 공진모드를 중심으로 설계를 진행하였다.

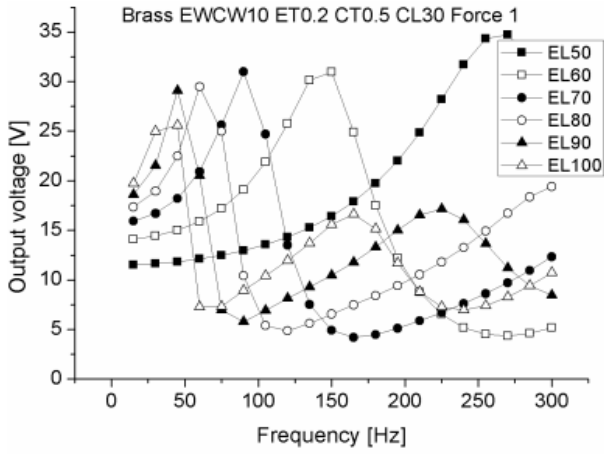


Fig. 2. Dependence of voltage on elastic body length.

50~100 mm의 범위에서 진행한 결과 공진주파수는 길이에 반비례하고 출력전압은 길이에 비례하여 미세하게 증가하는 결과를 보였다. 길이 변화에 다른 특성으로 볼 때 출력전압의 변화는 크게 나타나지 않은 반면 공진주파수의 변화가 크게 나타남으로 60 Hz 공진 설계에 유효한 변수로 볼 수 있다.

그림 2에서 60 Hz 공진 모델의 초기 변수로 EL 100 mm를 선정하였으며, 탄성체 길이(EL)가 짧아지면서 공진주파수가 올라가는 모습을 볼 수 있다. 본 연구에서는 100 mm의 모델을 선정하여 실험하였다. 탄성체의 두께변수에 따른 출력 및 공진특성은 그림 2의 길이 특성과 유사한 결과를 보였으며, 적절한 탄성을 유지시키기 위하여 본 연구에서는 0.2 mm 모델로 결정하여 진행하였다.

그림 3은 세라믹의 두께변화에 따른 특성으로 공진 주파수에는 큰 영향을 보이지 않았으며, 두께가 얇을수록 높은 출력전압을 보였다. 사전연구를 통해 획득한 결과로 볼 때 세라믹의 얇은 두께는 낮은 전류의 출력과 진동에 의한 파손의 우려가 예상되어 본 연구에서는 0.2 mm의 세라믹 두께를 지정하여 실험 진행하였다 [2,7,10].

그리고 세라믹의 길이 변화에 따른 특성을 그림 4에서 보여준다. 100 mm로 고정된 탄성체에 세라믹의 길이를 30~80 mm 범위에서 변화시켜 해석한 결과이며, 출력전압과 공진주파수는 세라믹의 길이에 비례하는 결과를 보였다. 본 연구에서는 세라믹 길이(CL)를 60 Hz 공진에 근접하며, 비교적 높은 출력값을 갖는 'CL60'으로 선정하였다.

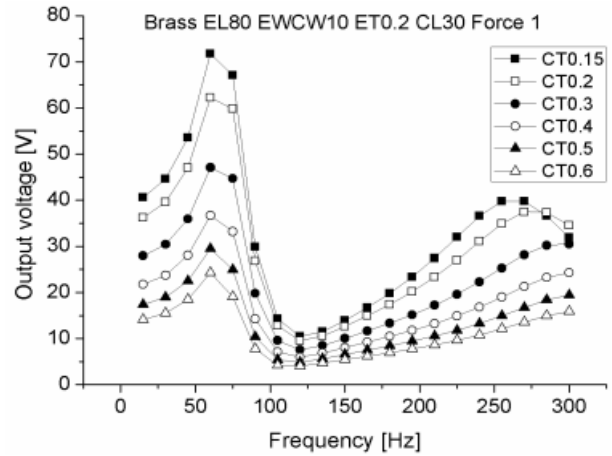


Fig. 3. Dependence of voltage on ceramic thickness.

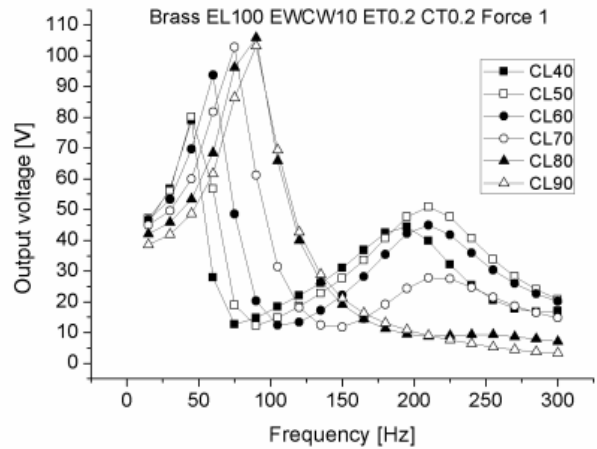


Fig. 4. Dependence of voltage on ceramic length (EL100).

이상의 유한요소해석결과를 바탕으로 황동재질의 탄성체에 'EL100-EW-CW10 ET0.2-CL60-CT0.2' 모델로 60 Hz 공진에서 최대 출력전압을 갖는 단일 유니몰프형 압전발전소자를 선정하였다. 본 단일 모델을 이용하여 변형모델들을 디자인하였으며, 그 각각의 출력특성 실험을 통하여 검증하였다.

### 3. 결과 및 고찰

#### 3.1 제작

그림 5는 유한요소해석을 통해 선정한 단일 유니몰프형 압전발전소자와 이를 대칭구조로 제작한 모델들을

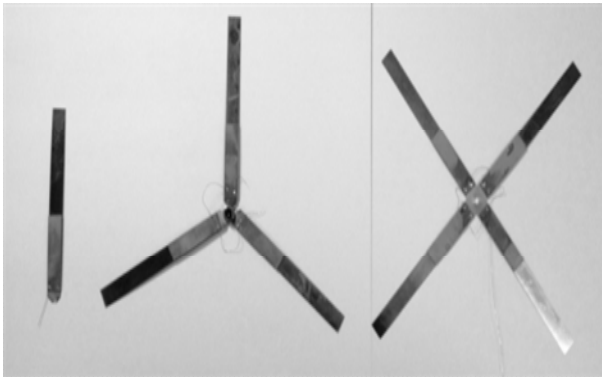


Fig. 5. Photo of the fabricated piezoelectric energy harvester.

보여준다. 압전 발전소자의 세라믹은 독일 PI사의 PZT 계열의 세라믹을 사용하였으며 탄성체의 재질은 황동을 사용하였다. 탄성체와 세라믹의 접착은 에폭시 접착제(EPO-TEK 353ND)를 이용하여 열처리 과정을 거쳐 완성하였다.

### 3.2 실험

그림 6은 임의의 진동변위를 주기 위한 바이브레이터와 출력값을 측정하기 위한 실험 장비이다. 함수발생기(33120A Agilent Ltd.)에서 교류 신호를 설정한 후 전력증폭기(TV51075 BAA120, TIRA GmbH.)에 인가하였다. 인가받은 교류파형을 설정한 이득 값만큼 증폭시킨 후 가진기(TV51075 S51075, TIRA GmbH.)에 인가하면 진동이 발생하게 된다. 가진기의 진동으로 인하여 발전소자가 출력을 일으키게 되고 그 때 출력된 전압의 출력 파형은 오실로스코프(GDS-840c, GW Instek Ltd.)로 측정하였다. 가속도 센서를 통하여 발전 소자에 인가되는 외력의 크기를 산정할 수 있으며 진동 변위는 함수발생기의 인가전압과 파워앰프의 gain 값으로 가변 할 수 있고 함수발생기의 주파수 조절만으로 바이브레이터의 진동 주파수 설정이 가능하다. 본 실험에서 인가된 힘은 0.3 N(아마추어 질량으로 산정한 가속도 값은 약 1 G)으로 측정되었으며 동일한 가진력으로 각각의 모델에 적용하여 실험하였다.

그림 7은 동일한 가진력 0.3 N과 동일한 부하저항 1 MΩ으로 주파수변화에 따른 출력전압 특성을 보여준다. 다수의 유니몰프가 결합된 모델의 전기적 결선은 AC 병렬로 결선하여 측정하였다. 교류 직-병렬, 직류 직-병렬의 다양한 결선 방법 중에 제안된 모델은 동일



Fig. 6. Measuring setup for applying tensions to the harvester.

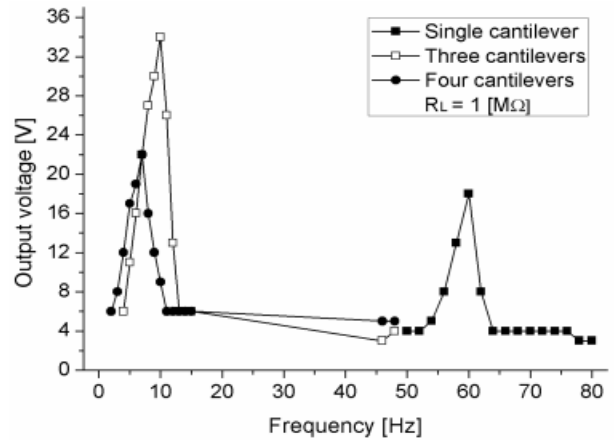


Fig. 7. Dependence of the output voltage on the frequency.

한 진동이 인가되어 동 위상에 가까운 출력을 보이므로 교류측 병렬로 단일 컨버터를 적용함이 유리할 것이라는 판단으로 연구를 진행하였다. 단일 유니몰프형과 세 개 및 네 개의 유니몰프가 결합된 모델을 실험한 결과 세 개의 유니몰프가 대칭결합된 모델에서 가장 큰 출력을 보임을 확인하였다. 단일 모델의 출력전압은 약 16 V, 세 개의 대칭모델은 약 34 V, 네 개의 대칭모델은 약 23 V의 최대 출력전압을 보였다.

변형된 대칭모델의 공진주파수는 단일모델의 60 Hz와 달랐으나 안정적인 대칭형태의 진동전달로 높은 출력을 발생함을 확인하였다. 최대 출력을 갖는 세 개의 유니몰프 결합 모델을 60 Hz 공진모델로 설계하기 위해서는 유한요소해석에서 규명한 탄성체의 길이변화로 최적모델 선정이 가능할 것으로 사료된다.

#### 4. 결 론

본 논문에서는 단일 유니몰프형 압전발전소자를 60 Hz 공진 모델로 설계하고, 이를 다수의 대칭모델로 변형하여 각각의 특성을 유한요소해석 프로그램을 이용하여 규명하고, 제작실험을 통해 검증하였다. 출력전압에 가장 큰 영향을 미치는 변수는 세라믹의 두께로 나타났으며, 공진주파수에 가장 큰 영향을 미치는 변수는 탄성체의 길이로 나타났다. 진동원의 적용에 최적의 조건을 맞추기 위하여 공진모델을 설계할 때 탄성체의 두께를 중심으로 탄성체의 재질과 세라믹의 길이가 추가로 설계변수로 지정될 수 있다. 또한 최대출력을 갖는 모델선정에 있어서 세라믹의 두께를 진동에 의한 기계적 파손의 측면에서 최소 두께를 설정할 필요가 있다. 단일 형태의 유니몰프 출력개선을 위하여 대칭구조를 갖는 모델이 높은 출력을 보임을 확인하였으며, 이중 삼각형태의 대칭구조가 진동(응력)전달에 가장 효율적인 모델로 확인 되었다.

상기 연구결과를 바탕으로 상용주파수 60 Hz 및 그 이하의 생활 주파수 영역에서 발생하는 진동원을 적용한 고효율 에너지 하베스팅이 가능하며, 이를 이용하여 무선센서 노드의 전원 공급 외 다양한 저전력 자가발전장치에 적용이 가능할 것이다. 최종적으로 높은 전압과 높은 전류밀도를 갖는 모델을 선정하기 위하여 전류밀도 최적화 연구 및 AC-DC-DC 전력변환의 고효율화 연구가 추가로 요구되며, 이를 통하여 소자영역과 기계적-전기적 에너지 변환의 고효율화를 이룰 수 있을 것으로 사료된다.

#### 감사의 글

이 논문은 2015~2016년도 창원대학교 자율연구과제 연구비 지원으로 수행된 연구결과임.

#### REFERENCES

- [1] J. L. Gonzalez, A. Rubio, and F. Moll, *Int. J. Soc. Mater. Eng.*, **49**, 7 (2001).
- [2] H. I. Jun, *J. Korean Inst. Electr. Electron. Mater. Eng.*, **9**, 129 (2008).
- [3] Y. H. Kim, *J. Korean Inst. Electr. Electron. Mater. Eng.*, **3**, 250 (2010).
- [4] C. H. Park and T. G. Park, *App. Mech. Mater.*, **2**, 217 (2011). [DOI: <http://dx.doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMM.110-116.217>]
- [5] J. H. Lim and T. G. Park, *J. Electroceram.*, **10**, 1007 (2012).
- [6] D. Y. Cha, S. J. Lee, and S. P. Chang, *J. Korean Inst. Electr. Electron. Mater. Eng.*, **24**, 416 (2011).
- [7] T. G. Park, B. J. Kim, M. H. Kim, and K. Uchino, *Jpn. J. Appl. Phys.*, **41**, 7139 (2002). [DOI: <http://dx.doi.org/10.1143/JJAP.41.7139>]
- [8] J. Hu, *Jpn. J. Appl. Phys.*, **38**, 3208 (1999). [DOI: <http://dx.doi.org/10.1143/JJAP.38.3208>]
- [9] H. Miyabuchi and T. Yoshimura, *JKPS*, **59**, 2524 (2011).
- [10] T. G. Park, M. H. Kim, and H. H. Chong, *J. Electroceram.*, **17**, 561 (2006).