

## EYE-type 압전 발전소자의 설계 및 출력특성

정성수<sup>1</sup>, 이병하<sup>1</sup>, 강신출<sup>2</sup>, 박태곤<sup>1,a</sup>

<sup>1</sup> 국립창원대학교 전기공학과

<sup>2</sup> 경남도립남해대학 전기과

### Design and Power Output Characteristics of an EYE-type Piezoelectric Energy Harvester

Seong-Su Jeong<sup>1</sup>, Byeong-Ha Lee<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 January 8, 2016; Revised January 18, 2016; Accepted January 24, 2016)

**Abstract:** We present the results of a study of a piezoelectric generator that generates electricity by the application of tension to an element. A device is named “EYE-type generator”. The EYE-type generator consists of a rectangular ceramic and two elastic body plates that are attached to upper and lower surfaces of a ceramic. If tension is applied to both ends of the elastic body, that tension is transformed to pressure on the ceramic through a change in the form of the elastic body, causing a piezoelectric effect whereby electricity is generated by the ceramic. This generator is relatively durable because a forces are not applied directly to the ceramic. We examined dependencies of the generator’s output characteristics on the size of the ceramic and elastic body. A resonance and output characteristics were analyzed by using a finite element method. The generator was fabricated based on results of the analysis, and this was attached to a frequency-controllable vibrator to measure the output characteristics. The measured results were compared with results of the simulation, and the results pointed to the practicality of the design.

**Keywords:** Energy harvester, Piezoelectric, EYE type, FEM

#### 1. 서론

십 수 년 전부터 기존자원의 고갈로 인한 에너지난이 예상되어 왔다. 과학기술의 발달로 인한 전자기기의 보급으로 전력 수요량이 증가하였으며, 이에 자원 고갈이 가속화 되어 전기수요량에 대한 공급이 부족하여

실제로 2003년 미국에서 블랙아웃 현상과 2011년 한국에서 부분 정전현상이 발생하였다. 이 상황을 대처할 방안으로 대체에너지 사용에 대한 관심이 높아지고 있으며 특히, 자연 에너지를 이용한 에너지 하베스팅 (energy harvesting) 기술이 각광받고 있다. 에너지 하베스팅 기술은 태양, 바람, 압력, 진동, 열 등 주변에서 쉽게 볼 수 있는 자연적인 에너지를 전기적인 신호로 바꾸어 재생산 하는 것이다. 자연적인 에너지를 전기적인 신호로 바꾸게 되면 변환 효율성이 많이 떨어져 그 동안은 항공용이나 군용 등 특수기기의 전원 장치로만 이용되었다. 최근 생활패턴이 변화하면서 무

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

선기기 및 휴대용기기 사용이 급증하게 되었으나 대부분의 배터리가 소모성이거나 주기적으로 충전을 해 줘야 한다는 단점이 있다. 이러한 단점을 보완하기 위한 대체 에너지로서 주변 환경으로부터 에너지를 얻어 자가 발전과 충전이 가능한 에너지 하베스팅 기술 연구가 꾸준히 증가하고 있다. 에너지 하베스팅은 버려지는 에너지를 재사용하는 기술이므로 화석 에너지의 고갈을 대체 할 수 있으며 친환경적이므로 미래의 새로운 에너지 자원이 될 수 있다 [1,2].

본 연구는 에너지 하베스팅 기술 중에서 압전세라믹의 정효과를 이용하여 진동이나 충격 등의 에너지를 전기에너지로 변환하여 에너지를 수확하는 압전 발전에 대한 연구결과이다 [3]. 지금까지의 발전소자는 킨틸레버형, 크로스형, 심벌형, 벌집형 등 압력만을 이용하는 방법이 다양하게 연구되어왔으며, 이 압전 발전소자들은 진동이나 압력이 발생하는 지역에만 적용될 수 있다. 이러한 점을 보완하기 위해 전선이나 케이블 및 스프링 등에 적용이 가능하도록 장력을 이용하는 EYE-type 압전 발전소자에 대해 연구하였다. 제안한 발전소자는 교량이나 전력선 등에 각종 센서 네트워크를 위한 장비 전원으로 활용이 가능하다. 장력을 사용하는 새로운 구조의 발전소자 최적화를 위하여 유한요소해석 및 제작실험을 진행하였다. 제안된 압전 발전소자의 완성도를 높이고 구동 형상 및 특성을 확인하기 위한 방법으로 유한요소해석을 진행하였다. 유한요소해석 프로그램인 ANSYS를 사용하여 압전 발전소자의 진동 형상을 확인하기 위해 모달 해석을 진행하고, 형상을 확인한 다음 다양한 변수 변화를 통해 가장 좋은 출력특성을 갖는 압전 발전소자를 확인하기 위하여 하모닉 해석을 진행 하였다. 유한요소해석을 바탕으로 제작된 압전 발전소자의 출력 특성을 해석 결과와 비교하여 소형 장비의 전원으로 적용이 가능함을 확인하였다.

## 2. 실험 방법

### 2.1 EYE-type 압전 발전소자의 구조

본 논문에서 설계 한 EYE-type 압전 발전소자는 그림 1과 같이 상하방향으로 분극을 가진 세라믹의 양면에 각각 탄성체의 중앙 부분이 접촉되어 있고 탄성체 양 끝이 붙어있는 구조이다. 선행연구 되었던 심벌타입 압전 발전소자나  $\theta$ -타입 압전 발전소자에서 수직방향의 압력을 이용하는 제한적인 사용처를 보완하기 위하여

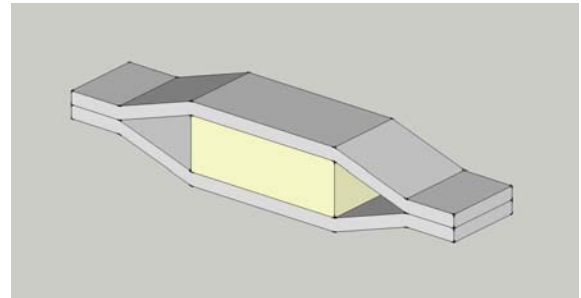


Fig. 1. The structure of the EYE-type piezoelectric generator.

Table 1. Parameter of the EYE-type piezoelectric generator.

C T	Ceramic Thickness
E T	Elastic body Thickness
C W	Ceramic Width
C L	Ceramic Length
D L	Diagonal Length

이를 응용한 장력타입을 고안하였다 [3-8]. EYE-type 압전 발전소자의 원리는 탄성체의 양끝이 장력에 의해 당겨질 때 발생하는 변위가 접촉되어있는 세라믹에 수축력의 변위를 발생시켜 전압을 발생시킨다. 이 발전소자는 선행 연구 되었던 두 모델과 달리 세라믹에 직접적인 충격을 받지 않아 세라믹의 파손을 줄일 수 있는 장점이 있다. EYE-type 압전 발전소자의 각 부분 명칭은 위의 표 1 과 같다.

### 2.2 EYE-type 압전 발전소자의 원리

EYE-type 압전 발전소자의 원리는 탄성체 양 끝에 장력이 발생하게 되면 두 탄성체 사이의 간격이 좁아지게 되는 동작이 발생하면서 수평적인 방향으로 받는 힘이 압전세라믹에 수직인 방향으로 전달된다. 이때 EYE-type 압전 발전소자에 장력이 인가될 때 탄성체에 작용되는 힘을 그림 2에서 벡터로 확인할 수 있다. 탄성체의 구조에 따른 힘의 방향 벡터를 알아보기 위해 한 면의 탄성체를 절반으로 축소하여 표현하였다. 탄성체의 면을 벡터A, 벡터B, 벡터C로 가정하고, 이에 벡터 합성에 의해 벡터A의 시작점과 벡터 C의 끝점이 이어지는 선과 같은 합성 벡터를 얻게 된다. 이는 압전 발전소자의 탄성체만 존재한다고 할 때 최종적으로 변화

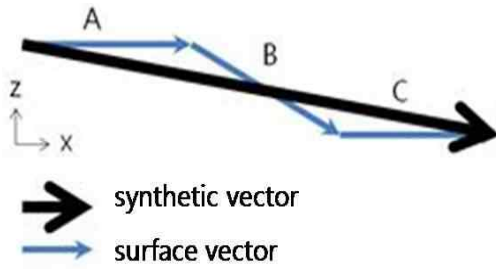


Fig. 2. Direction of force at the piezoelectric energy harvester using tension.

될 탄성체의 모습이라 할 수 있으며, 합성된 벡터는 x 축 방향의 힘의 성분과 -z축 방향의 힘의 성분으로 나누어진다. 합성된 벡터는 그림 2에서와 같은 변화로 C의 방향으로 발생하는 장력이 압전 세라믹에 부착된 부분인 A면에 -z축의 방향으로 힘을 전달하게 되어 수직 변위가 발생하는 것을 볼 수 있다. 이로 인해 발전 소자에서 수축 팽창이 한 번 발생하였을 때, 압전 세라믹의 수직방향으로 인장과 압축이 발생한다. 따라서 일정한 주파수를 가지는 장력에 의해 압전 세라믹에 인장과 압축 응력이 반복해서 발생되어 전력을 생산할 수 있다. 이는 압전 발전소자의 33 모드 발전 원리와 유사하다고 할 수 있다.

### 2.3 유한요소해석

설계된 모형을 바탕으로 EYE-type 압전 발전소자의 출력 특성을 알아보기 위해 해석프로그램인 ANSYS를 사용하여 유한요소해석을 진행하였다.

그림 3은 장력에 대한 모달 해석의 결과이다. 모델링된 EYE-type 압전 발전소자의 고유 진동모드를 모달 해석을 통해서 확인해 보았다.

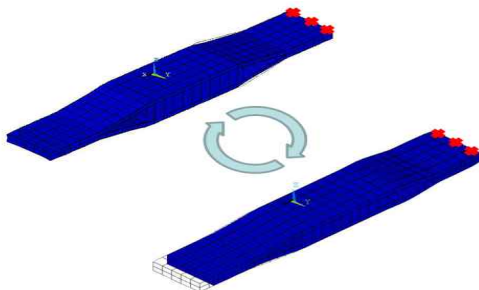


Fig. 3. Modal analysis of the EYE-type piezoelectric generator.

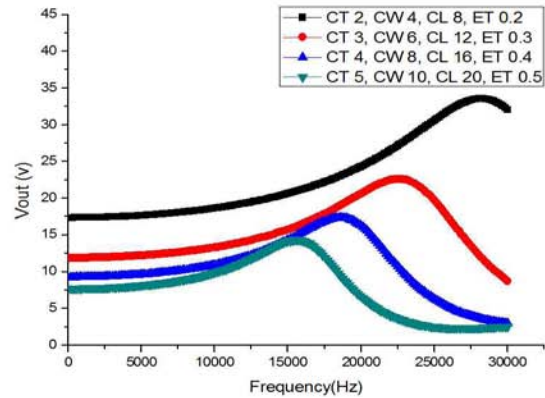


Fig. 4. Output characteristics depending on rate of change of the size.

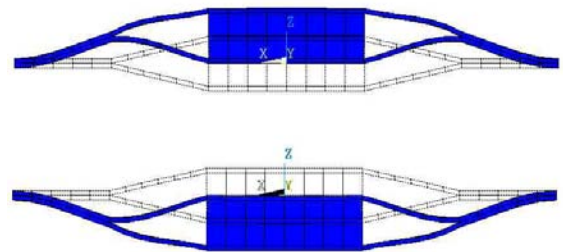


Fig. 5. Modal analysis of the EYE-type piezoelectric generator at bent.

EYE-type 압전 발전소자의 기본 동작원리인 장력방향 x축 방향으로 수축 팽창하는 것을 볼 수 있다. 주파수 변화에 따른 출력 전압을 하모닉 해석을 통해서 확인 하였다. 하모닉 해석은 압전 발전소자의 세라믹의 두께, 폭, 길이, 탄성체의 두께의 변경으로 소자의 크기변경에 따른 출력 특성을 확인하였다.

그림 4는 압전 발전소자의 크기변경에 따른 출력 전압의 해석 결과를 보여준다. 전체 비율을 변경하여 압전 발전소자의 그 크기가 커질수록 달라지는 출력특성을 확인해 보았다. 해석결과 압전 발전소자의 크기가 작아질수록 출력 전압은 증가 하였으며 공진주파수는 낮아짐을 확인 하였다. 이는 비율증가에 따른 여러 변수들의 복합적인 영향에 따라 변화겠지만 출력 전압의 증가는 압전세라믹의 폭이 줄어들는데 가장 큰 영향을 받았으며, 압전 발전소자의 크기가 작아질수록 공진주파수는 높아짐을 확인하였다.

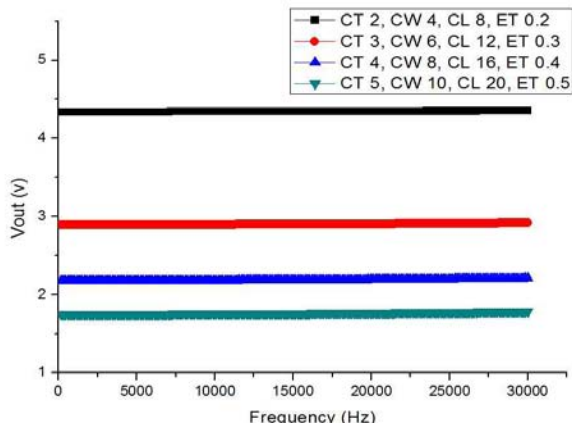


Fig. 6. Output characteristics depending on bent.

그림 5는 휘어지는 힘에 대한 모달 해석의 결과이다. 장력용 압전 발전소자는 와이어나 케이블에 적용되어 사용될 목적으로 발생하는 힘은 장력에만 국한되지 않는다. 평소 장력이 발생하지 않고 출력거림에 의해 압전 발전소자가 휘어지며 소자에 전달되는 힘에 의해 발생하는 출력특성을 알아보기 위해 휘어짐에 대한 모달 해석을 실시하였다. 모델링된 EYE-type 압전 발전소자의 고유 진동모드를 모달 해석을 통해서 확인한 결과 양끝이 고정된 상태로 가운데 부분이 휘어지는 모습을 확인할 수 있었다.

주파수 변화에 따른 출력 전압을 하모닉 해석을 통해서 세라믹의 두께, 폭, 길이, 탄성체의 두께의 변경으로 압전 발전소자의 크기변경에 따른 출력 특성을 확인하였다. 그림 6은 압전 발전소자의 휘어짐에 따른 출력 전압의 해석결과를 나타낸다. 장력을 이용하는 EYE-type 압전 발전소자는 케이블에 적용을 하게 되면 압전 발전소자는 장력이 전달 될 뿐만 아니라 케이블이 휘어짐에 따른 힘을 전달 받게 된다. 이때의 전달 받는 힘에 대한 출력 전압을 확인 하였다. 장력에 비해 적은 양의 발전이지만 1.5~4.5 V 상간의 출력 전압은 배터리 대체 또는 충전하는데 유용할 것으로 사료된다.

### 3. 결과 및 고찰

#### 3.1 제작

그림 7은 유한요소해석 결과를 바탕으로 세라믹 폭과 세라믹 길이를 변수로 하여 4가지 모델의 EYE-type 압전



Fig. 7. Photo of the fabricated eye-shape energy harvester.

Table 2. Properties of ceramic PSI-5A4E.

Relative Dielectric Constant (@ 1 KHz)	$K^T_3$		1,800
	$d_{33}$	meter/Volt	$390 \times 10^{-12}$
	$d_{31}$	meter/Volt	$-190 \times 10^{-12}$
	$g_{33}$	Volt-meter/Newton	$24.0 \times 10^{-3}$
	$g_{31}$	Volt-meter/Newton	$-11.6 \times 10^{-3}$
Coupling Coefficient	$k_{33}$		0.72
	$k_{31}$		0.35
Polarizing Field	$E_p$	Volt/meter	$> 2 \times 10^6$
Initial Depolarizing Field	$E_c$	Volt/meter	$\sim 5 \times 10^5$
Coercive Field	$E_c$	Volts/meter	$\sim 1.2 \times 10^6$
Density	$\rho$	Kg/meter <sup>3</sup>	7,800
Mechanical Q			80
Elastic Modulus	$Y^E_3$	Newton/meter <sup>2</sup>	$5.2 \times 10^{10}$
	$Y^E_1$	Newton/meter <sup>2</sup>	$6.6 \times 10^{10}$

발전소자를 제작한 것이다. 표 2는 압전 발전소자의 제작에 사용된 압전세라믹의 물성치를 나타내고 있다. 출력 특성에 영향을 크게 미치는 물성치는  $d_{33}$ ,  $g_{33}$ , 기계 결합계수인  $k_{33}$  그리고 밀도를 나타내는  $\rho$  로 판단된다. 표 2에서 확인되는 각각의 값은 압전 발전소자로 적용하기에 충분한 특성을 보임을 알 수 있다. EYE-type 압전 발전소자의 세라믹은 독일 PI사의 PZT계열의 세라믹(PIC255)을 사용하였으며 탄성체의 재질은 스테인레스 스틸(SUS304)을 사용하였다. 탄성체와 세라믹의 접착은 에폭시 접착제(353ND)를 이용하여 열처리 과정을 거쳐 완성하였다.

### 3.2 실험



Fig. 8. Measuring setup for applying tensions to the harvester.

그림 8은 임의의 진동변위를 주기 위한 바이브레이터와 출력값을 측정하기 위한 실험 장비이다. 함수발생기(33120A Agilent Ltd.)에서 입력할 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. 실험 주파수 범위는 생활 주파수 영역대인 5~30 [Hz]로 설정하였으며 5 [Hz]씩 증가시키면서 측정을 진행하였다. 유한요소해석을 통해 나타난 공진 주파수 대역은 수십 [kHz]이지만, 생활주변 발생주파수 영역에 이용을 목적으로 하였으므로 저주파수 대역에서 나타나는 출력 값을 중심으로 실험이 진행 되었다. 앞서 진행된 유한요소해석 결과 압전 발전소자의 크기가 작아질수록 출력 전압은 증가 하였으며 공진주파수가 높아짐을 확인 하였다. 이는 비율증가에 따른 여러 변수들의 영향이 있지만 출력 전압은 압전세라믹의 폭데 가장 큰 영향을 받는 것으로 나타났다.

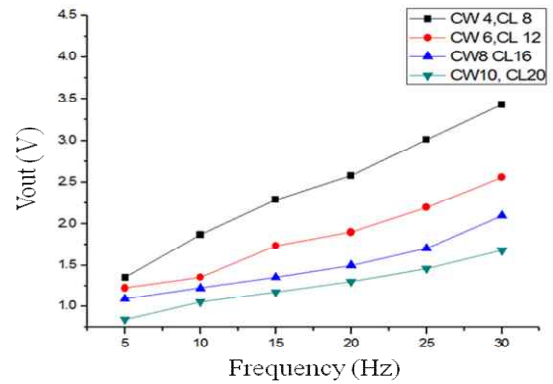


Fig. 9. Output characteristics depending on rate of change of the size.

그림 9는 EYE-type 압전 발전소자를 이용하여 주파수 변화에 따른 출력 전압( $V_{rms}$ )값을 보여준다. 동일한 세라믹 두께에 폭과 길이변화를 갖는 4개의 모델에 가진력을 일정한 힘으로 고정하고 주파수 변화에 따른 출력 전압을 측정하였다. 실험 주파수가 증가 할수록 출력 전압이 소폭 상승하는 것을 확인 하였다. 이는 급격한 출력변화를 보이는 공진점이 아닌 비공진 영역에서도 전압의 변화가 있음을 보여주며, 특히 실험에 적용한 생활주파수(5~30 Hz) 영역에서도 주파수가 높아질수록 높은 전압을 출력함을 확인 할 수 있었다. 실험결과 세라믹의 폭이 좁고 길이가 짧은 모델에서서 최고 3.5 V의 출력 전압을 보였다.

### 4. 결론

본 논문에서는 압전 에너지 하베스팅소자의 내구성을 높이면서 출력을 향상시키기 위해 EYE-type 압전 발전소자를 제안하였다. 제안된 소자는 탄성체의 끝이 당겨지는 구조로 세라믹이 직접 타격을 받지 않아 내구성이 높고, 비교적 높은 공진주파수를 가지지만 생활 주파수 영역인 저주파수 대역에서도 일정한 출력을 나타내었다. EYE-type 압전 발전소자는 생활주변에 존재하는 대형 케이블 및 장력이 발생하는 장소에 적용할 수 있어 기존의 상하진동 모드 발전소자가 적용되지 못한 장소에서도 사용 가능한 장점을 갖는다. 설계된 소자를 먼저 유한요소해석 프로그램의 모달 해석을 통하여 진동 형상을 파악하였고 하모닉 해석을 통해 탄성체 재질 변화, 탄성체 두께 변화, 세라믹 폭 변화,

세라믹 길이 변화, 압전 발전소자의 전체 비율 변화 따른 출력 특성을 규명하였다. 대표모델을 선정하여 제작 및 실험을 하였다. 그 결과 유한요소해석과 실험결과는 유사한 특성을 보였으며, 특히 5~30 Hz인 생활 주파수 영역에서의 출력 전압이 소형배터리 및 저전력 통신용으로 적용이 가능한 값을 출력함을 확인하였다.

본 연구결과를 바탕으로 생활 주파수 영역에서 발생하는 장력을 이용하여 전력을 생산하고, 생산된 전력으로 무선 센서 네트워킹 전원 외 자가발전 전원으로 적용이 가능할 것으로 사료된다.

### 감사의 글

본 논문은 중소기업청에서 지원하는 2015년도 산학협력 기술개발사업(No. C0269266)의 연구수행으로 인한 결과물임을 밝힙니다. 이 논문은 2011년도 정부(미래창조과학부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임 (NO. 2011-0030058).

### 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] 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>]
- [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] Y. H. Kim, *J. Korean Inst. Electr. Electron. Mater. Eng.*, **3**, 250 (2010).
- [8] J. Hu, *Jpn. J. Appl. Phys.*, **38**, 3208 (1999).  
[DOI: <http://dx.doi.org/10.1143/JJAP.38.3208>]