

# 심벌형 압전 에너지 하베스터 에너지 수율 향상 연구

나영민\*, 박종규\*,#

\*창원대학교 기계공학과

## Research on the Efficiency Improvement of the Cymbal-type Piezoelectric Energy Harvester

Yeong-Min Na\*, Jong-Kyu Park\*,#

\*School of Mechanical Engineering, Changwon National Univ.

(Received 10 October 2016; received in revised form 28 November 2016; accepted 1 December 2016)

### ABSTRACT

The pollution problem of fossil energy sources has caused the development of green energy harvesting systems. Piezoelectric energy harvesting technology has been developed under those external environmental factors. A piezoelectric energy harvester can be defined as a device which transforms mechanical vibration or impact energy into electrical energy. Most researches have focused on bender structures. However, these have a limitation on energy efficiency because of the small effective electromechanical coupling factor, around 10%. Therefore, we should look for a new design for energy harvesting. A cymbal energy harvester can be a good candidate for the high-power energy harvester because it uses a high amplification mechanism using endcaps while keeping a higher electromechanical coupling factor. In this research, we focused on energy efficiency improvements of the cymbal energy harvester by changing the polarization direction, because the electromechanical coupling factor of the k33 mode and the k15 mode is larger than that of the k31 mode. Theoretically, we checked the cymbal harvester with radial polarization and it could obtain 6 times larger energy than that with the k31 direction polarization. Furthermore, we verified the theoretical expectation using the finite element method program. Consequently, we could expect a more efficient cymbal harvester with the radial polarization by comparing two polarization directions.

**Key Words** : Piezoelectric Energy Harvester(압전 에너지 하베스터), Energy Efficiency(에너지 효율), Polarization Direction(분극 방향)

### 1. 서 론

최근 화석 에너지의 고갈과 환경오염 문제로 인하여 친환경 에너지 하베스터에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다<sup>[1]</sup>. 에너지 하베스팅이란 Fig. 1과 같이 태양광 및 태양열, 지열, 바람, 빛 등 다양한

종류의 버려지는 에너지를 전기에너지로 변환하는 기술을 일컫는다. 특히 진동과 같은 방식의 운동에너지를 전기에너지로 변환하는 압전소자의 경우 Table 1과 같이 기존의 에너지 하베스터 보다 전력 밀도 및 효율이 높고 엔진, 구동 팬 등 압력 및 진동이 발생하는 모든 장치에 적용할 수 있어 이를 활용한 연구가 주목받고 있다<sup>[2]</sup>.

압전 에너지 하베스팅은 Fig. 2와 같이 앞서 언급한 진동 및 응력이 외부에서 압전 소자에 전달되

# Corresponding Author : chong@changwon.ac.kr

Tel: +82-54-478-7653, Fax: +82-54-478-7679

면 이를 구조적 임피던스 매칭을 하고 정류회로를 통하여 전기에너지로 변환한다. 이러한 압전 에너지 하베스팅은 기계, 전기, 재료가 복합적으로 작용하며 또한 압전 소자의 개수, 형상, 크기, 운동방향에 따라 다양한 종류로 구분된다. 이전의 압전 에너지 하베스팅 연구는 굽힘 운동을 이용하는 벤더형 압전 하베스터 소자가 주를 이뤘다. 이는 비교적 단순한 공정으로 소형 장치를 제작할 수 있으며 특정 공진주파수에 맞춰 설계가 가능하기 때문이나 에너지 수확량이 0.1 mW 보다 훨씬 작기 때문에 에너지 하베스터로서 활용분야가 적은 게 사실이다. 그러므로 이 단점을 극복하기 위해서는 압전 소자의 단순 굽힘 변형이 아닌 복합적인 변형을 적용하여, 에너지 발생량을 높일 방법이 필요하다<sup>[4]</sup>.

이에 따라 수직 및 반경 방향으로 변형이 가능한 심벌형 압전 하베스터에 대한 연구가 주목받게 되었다. 심벌형 압전 에너지 하베스터는 최초 미국 해군에서 소나용으로 사용되었으며 그 구조로는 상, 하에 각각 캡이 있고 그 사이에 압전 디스크가 설치되어 있다. 심벌형 압전 소자는 수직 방향의 힘을 증폭시켜 수평방향으로 전달하고 이에 압전 디스크에 변위를 발생시켜 전력을 생성하는 메커니즘을 가진다. 또한 외부의 큰 힘이나 압력에 대한 구조적 안정성이 높아 자동차나 철도와 같은 높은 하중을 이용하기에 적합한 구조를 가지고 있다. 그러나 여전히 유의미한 에너지를 수확하기 위해서는 에너지 변환 효율을 향상시킬 필요가 있다. 이러한 문제는 일반적으로 재료의 분극변화를 통해 전압을 높게 하여 에너지 수확량을 극대화하거나 재료의 전극 면적을 넓게 하여 전류량을 증가 시켜서 전력량을 극대화하는 방안이 있다. 본 연구에서는 첫 번째 방안인 분극의 방향 변화를 통해 전압의 크기를 향상시키고 재료의 전기기계 결합 효율이 높은 33 분극방향을 이용함으로써 전체 전력량을 향상시키고자 한다.<sup>[5]</sup>

본 연구 과정에서는 다물리 해석프로그램인 COMSOL을 활용하여 31 및 반경 방향으로의 시뮬레이션을 진행하였다. 이를 통해 최적의 분극 방향을 확인하여 향상된 변환효율을 가진 심벌형 압전 에너지 하베스터를 도출하였다.



Fig. 1 Energy harvesting field

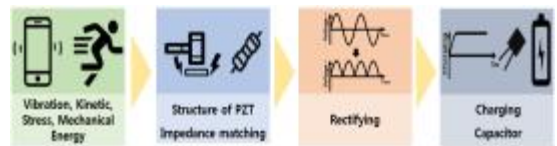


Fig. 2 Process of piezoelectric energy harvesting

Table 1 Power Density and Efficiency of Energy Harvesting<sup>[3]</sup>

| Energy source   | Power Density [mW/cm <sup>2</sup> ] | Efficiency [%] |
|-----------------|-------------------------------------|----------------|
| Photovoltaic    | 500-5000                            | 5-40           |
| Piezoelectric   | 0.001-90                            | 25-60          |
| Electromagnetic | 0.1-50                              | 30-40          |
| Thermoelectric  | 50-500                              | 0.1-10         |

## 2. 이론

### 2.1 압전 효과

압전 효과란 Fig. 3과 같이 외부에서 전달된 응력 또는 변위를 발생시키는 기계적 에너지가 압전 분극에 의해 전기에너지로 변환되는 현상을 의미한다. 이러한 압전효과는 응력에 의하여 이 물질 자체의 전기 분극이 변하는 정 압전 효과와, 물질에 전기를 인가할 때 기계적 변형이 생기는 역 압전 효과로 구분된다. 그리고 압전 소자의 성능은 압전

상수로 나타내며 압력 또는 전기를 가하는 상황에 따라 각각 다른 상수를 적용한다. 먼저 기계 변형 계수인  $d$  상수는 입력을 전압, 출력을 왜형으로 나타내며 단위는  $10^{-12}$  m/V 이다. 다음으로 기계적 응력에 의해 발생하는 전계를 나타내는 계수인  $g$  상수는 입력을 응력, 출력을 전압으로 나타내며 단위는  $10^{-3}$  Vm/N 이다<sup>[6-10]</sup>.

Fig. 4와 같이 본 논문에서 제안하는 심벌형 압전 에너지 하베스터는 외부에서 발생하는 진동을 이용하며 이를 통해 압전 소자에서 생산할 수 있는 전류의 크기는 다음과 같다.

$$i = \frac{A\Delta P}{dt} \quad (1)$$

여기에서  $i$ 는 생성되는 전류의 크기,  $A$ 는 압전 재료의 면적,  $\Delta P$ 는 분극 변화,  $dt$ 는 시간의 변화를 의미 한다. 식 (1)에서 알 수 있듯이 생성되는 전류는 압전 소자의 면적과 분극변화에 비례하며 시간 변화를 의미 한다. 또한 생성되는 전류는 압전 소자의 면적과 분극변화에 비례하며 시간 변화에 반비례한다. 위 식에서 시간의 변화는 진동원의 주파수에 의해 결정되므로 빠른 진동환경에서 많은 전류를 생산할 수 있다<sup>[11]</sup>.

압전 소자의 분극 방향은 Fig. 5와 같이 31, 33, 15 방향이 대표적이다. 먼저 31 방향은 Z축 방향 분극(3방향)에 X축 방향 변위(1방향), 33 방향은 Z축 방향 분극(3방향)에 Z축 변위(3방향)를 뜻하며 15 방향은 X축 방향 분극(1방향) Y축 회전 방향 변위(5방향)를 나타낸다<sup>[12]</sup>. 본 논문에서는 심벌형 에너지 하베스터의 분극 방향을 31과 33방향으로 달리하여 변형에 의해 생산되는 에너지를 비교하고자 한다.

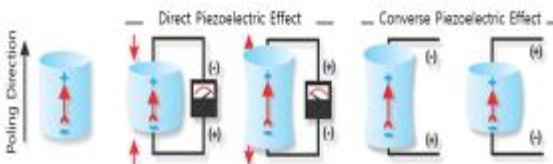


Fig. 3 Piezoelectric effect<sup>[13]</sup>

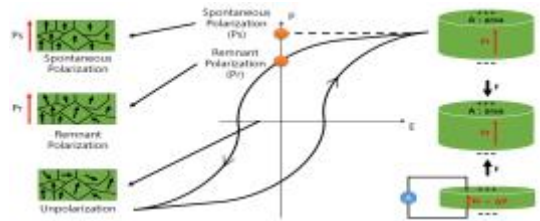


Fig. 4 Concept of current production of piezoelectric material

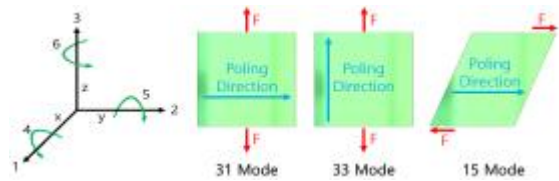


Fig. 5 31, 33, 15 mode

## 2.2 심벌형 하베스터의 이론적 분석

심벌형 하베스터는 디스크형 압전 소자에 의해 에너지 변환 효율을 계산할 수 있으며, 여기서 압전 소자는 저주파수의 운동에서 하나의 커패시턴스로 가정할 수 있다. 본 하베스터는 100 Hz의 주파수로 동작하는 엔진을 기준으로 설계하였으므로 저주파수로 가정하고 생산 전력  $P$ 는 다음과 같이 계산할 수 있다.

$$P = 0.5d \cdot g \cdot \sigma^2 \cdot V \cdot f \quad (2)$$

여기서  $d$ 는 압전 상수이며  $g$ 는 압전 전압 상수,  $\sigma$ 는 응력,  $V$ 는 부피,  $f$ 는 구동 주파수이다. 위 식에서의 생산 전력은 압전 상수나 스트레스 등에 의해 결정됨을 알 수 있다. 특히 압전 상수와 압전 전압 상수의 곱에 따라 변화하므로 이 값들을 극대화한다면 생산 전력 또한 높일 수 있다.

일반적으로 심벌 구조의 경우 수직인 힘을 가했을 시 반경 및 힘과 평행한 방향으로 변위가 발생하는 구조이다. 이에 압전 상수는 다음과 같다.

$$d^{eff} = d_{33} + |Ad_{31}| \quad (3)$$

여기서 A는 증폭비가 되며 최소 10에서 100까지 증가시킬 수 있다<sup>[14]</sup>. 본 연구에서는 Fig. 6과 같이 압전 상수를 극대화하기 위해 기존의 31방향의 분극(Polarization)이 아닌 반경 방향으로 변화시켰다. 이에 압전 소자의 전극면적을 넓혀 에너지 수확 효율을 높일 수 있다. 먼저 반경 방향의 압전 상수는 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$d_{radial}^{eff} = d_{rzz} + |Ad_{rrr}| \quad (4)$$

여기서  $d_{zrr} \approx d_{31}$  and  $d_{rrr} \approx d_{33}$ 로 바꿔 표현하면 다음과 같다.

$$\therefore d_{radial}^{eff} \approx d_{31} + |Ad_{33}| \quad (5)$$

여기서 반경 방향으로의  $d_{31}$ 은  $d_{33}$ 에 비해 매우 미소하므로 무시할 수 있고 PZT-4의 경우  $2.35d_{31} = d_{33}$ 의 관계식이 성립하기 때문에 다음과 같이 적을 수 있다.

$$\therefore d_{radial}^{eff} \approx d_{31} + |Ad_{33}| \approx Ad_{33} \approx 2.35Ad_{31} \quad (6)$$

이렇게 도출된 압전 상수 값을 전력으로 바꿔 표현하면 다음과 같다.

$$Power \propto (d_{radial}^{eff})^2 \propto 5.55(Ad_{31}^{eff})^2 \quad (7)$$

이는 반경 방향으로 분극 방향을 수정하면 31 방향에 비해 약 5.55배 많은 전력을 출력할 수 있다는 것을 시사한다.

### 3. 해석

본 연구에서는 심벌형 하베스터 구조의 개선에 대한 비교 분석을 위해, 분극 방향이 31 및 반경 방향의 모델링에 관한 해석을 동시에 진행하였다. 해석에는 다물리 해석 상용 프로그램인 COMSOL

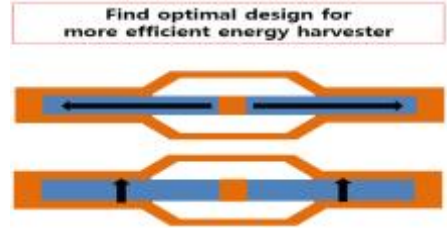


Fig. 6 Piezoelectric constant maximization through change of polarization direction

Multiphysics를 이용하였으며 해석에 사용된 기본 형상 모델링은 Fig. 7과 같다. 전체 길이는 29 mm이며 가운데 홀 및 상부 캡 원의 지름은 각각 17, 5 mm로 설정하였다. 재질이 구조강(Structural steel)인 캡의 두께 및 높이는 각각 0.4, 1 mm로 설정하였고 압전의 두께는 1 mm이다. 압전소자의 경우 단순 비교를 위해 소재는 PZT-4(Lead Zirconate Titanate-4), 분극방향은 Fig. 8, 9와 같이 31 및 반경 방향으로 나누어 설정하였으며 물성치는 Table 2, 3과 같다.

경계조건으로는 엔진이 지지부에 가하는 힘과 주파수를 기준으로 각각 70 N, 100 Hz로 설정하였으며 31, 반경 방향의 메시는 Mapped mesh를 사용하여 약 77,000 개로 작성하였다. 그리고 메시를 재작성하는 Adaptive mesh refinement 기능을 통해 해석 값의 정확도를 높이고자 하였으며, 해석 시간은 0에서 0.04 초 동안 0.002 초 간격으로 진행하였다. 또한 임피던스 매칭을 위해 Closed circuit을 설정하여 31 방향에서는 100 ~ 1000 kΩ, 반경 방향에서는 10 ~ 100 MΩ까지 저항 값을 Parametric sweep 하며 전력 값을 확인하였다.

해석 결과, Fig. 10, 11과 같이 Open circuit에서 확인된 31 및 반경 방향에서의 평균 전압은 각각 20, 310 V로 확인되었다. 31 및 반경 방향에서의 커패시턴스는 각각 5.01, 0.2 nF로 계산되므로 전력을 구하는 공식인  $P = 0.5CV^2f$ 를 통해 각각의 전력을 계산하면 0.1, 0.96 mW인 것을 알 수 있다. 또한 Closed circuit에서 Parametric sweep을 통해 전력 값을 확인한 결과, Fig. 12와 같이 31 방향에서 400 kΩ일 때 평균 0.325 mW, 반경 방향에서는 Fig. 13과 같이 20 MΩ일 때 평균 1.3 mW가 출력되는 것을 확인하였다. 이를 통해 분극 방향을 전환시켜

31 방향에 비해 반경 방향이 약 4배의 전력을 출력 되는 것을 알 수 있다.

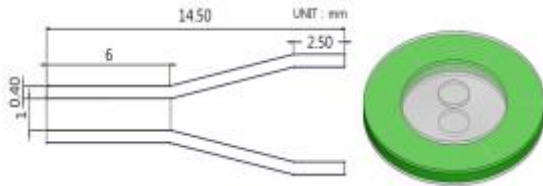


Fig. 7 Shape of the device

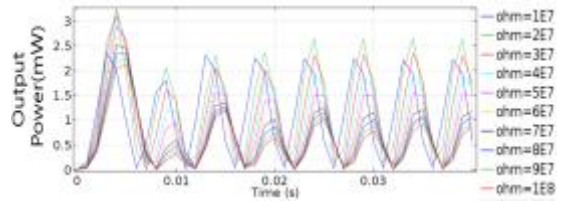


Fig. 11 Harvested power of radial direction depending on resistance

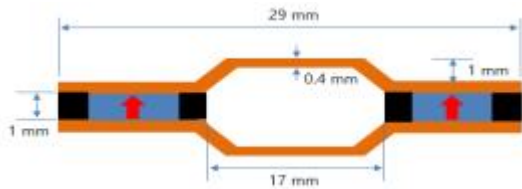


Fig. 8 Analysis of direction 31

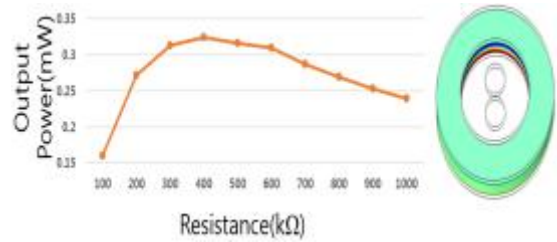


Fig. 12 Result of impedance matching of direction 31

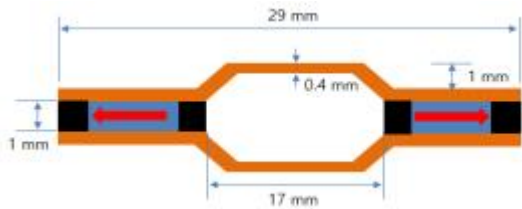


Fig. 9 Analysis of radial direction

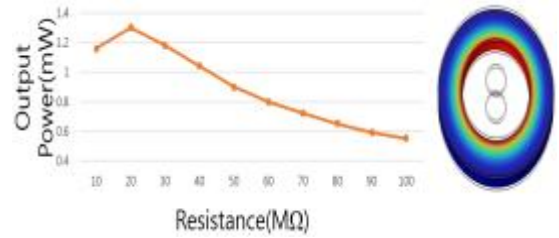


Fig. 13 Result of impedance matching of radial direction

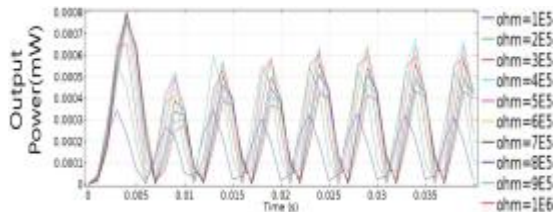


Fig. 10 Harvested power of direction 31 depending on resistance

Table 2 Properties of structural steel

| Property        | Unit              | Value |
|-----------------|-------------------|-------|
| Density         | kg/m <sup>3</sup> | 7850  |
| Young's Modulus | GPa               | 200   |
| Poisson's Ratio |                   | 0.33  |

**Table 3 Properties of PZT-4**

| Property                | Unit              | Value                                  |
|-------------------------|-------------------|--|
| Density                 | kg/m <sup>3</sup> | 2700                                   |
| Elastic Stiffness       | N/m <sup>2</sup>  | C <sub>11</sub> =1.39·10 <sup>11</sup> |
|                         |                   | C <sub>12</sub> =7.78·10 <sup>10</sup> |
|                         |                   | C <sub>13</sub> =7.43·10 <sup>10</sup> |
|                         |                   | C <sub>33</sub> =1.15·10 <sup>11</sup> |
|                         |                   | C <sub>44</sub> =3.06·10 <sup>10</sup> |
|                         |                   | C <sub>66</sub> =2.56·10 <sup>10</sup> |
| Piezoelectric Constants | C/m <sup>2</sup>  | e <sub>31</sub> =-5.2                  |
|                         |                   | e <sub>33</sub> =15.1                  |
|                         |                   | e <sub>15</sub> =12.7                  |
| Permittivity Constants  | F/m <sup>2</sup>  | ε <sub>11</sub> =6.74·10 <sup>-9</sup> |
|                         |                   | ε <sub>33</sub> =5.87·10 <sup>-9</sup> |

#### 4. 결론

본 연구에서는 심벌형 압전 에너지 하베스터의 분극 방향에 따른 에너지 수확 효율 향상 연구를 실시하였다. 이에 분극방향의 분석을 실시하고 그 방향을 31 방향이 아닌 반경방향으로 전환하여 에너지 수확량을 향상시키고자 하였다. 그리고 이론 분석을 토대로 해석을 실시하였으며 임피던스 매칭에 의해 31 및 반경 방향에 따른 생산 전력을 최대화하였다. 해석결과, 분극 방향이 31 일 때 Open circuit에서 0.1 mW 였던 출력이, Closed circuit에서 임피던스 매칭을 한 결과 평균 0.325 mW가 생산됨을 확인하였다. 또한 분극 방향이 반경 일 때 Open circuit에서 약 0.9 mW였던 출력이, Closed circuit에서 평균 1.3 mW 생산됨을 확인하였다. 결론적으로 분극 방향 전환 및 임피던스 매칭을 통하여 기존의 심벌형 에너지 하베스터에 비해 높은 에너지 효율이 나타난 것을 확인하였다.

#### 후 기

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

#### REFERENCES

1. Kang T. H., Na Y. M., Lee H. S., Park J. K., Park T. G., "The Design and Experiment of Piezoelectric Energy-Harvesting Device Imitating Seaweed", The Korean Society of Manufacturing Process Engineers, Vol. 14, No. 4, pp. 73 - 84, 2015.
2. Kim. I. S., Kim. Y. S., Hwnag. Y. S., "Motion Control of the Precise Stage using Piezoelectric Actuator", Journal of the Korean Society of Manufacturing Process Engineers, Vol. 10, No. 4, pp. 102 - 108, 2011.
3. Fred Pimparel(2013), "Harnessing Piezoelectric Energy - An Interview with Fred Pimparel", Retrieved 11 September 2016, from <http://www.azom.com/article.aspx?ArticleID=9782>
4. E. Tufekcioglu., A. Dogan., "A flextensional piezo-composite structure for energy harvesting applications", Sensors and Actuators A: Physical, Vol. 216, pp. 355 - 363, 2014.
5. Lee S. J., Kim S. W., Ham Y. B., "Prospect and Trend of Piezoelectric Energy Harvesting", Korea Institute of Science and Technology Inforamtion pp. 21 - 22, 2013.
6. Kim. H. K., Sin. B. C., Piezoelectric and Electrostrictive Ceramics, Bando publisher, pp. 188 - 192, 1991.
7. Jun. H. I., "Research of the Energy Harvesting Technology Using Cymbal Type Piezoelectric Generator", A Thesis for a Master, Changwon National University, Republic of Korea, 2009.
8. Lee. H. S., "A study on energy harvesting technology using piezoelectric shock absorber of a vehicle", A Thesis for a Master, Changwon National University, Republic of Korea, 2012.
9. Jang. H. S., "A study on measurement technology of wind direction and speed using piezoelectric unimorph bender", A Thesis for a Master, Changwon National University, Republic of Korea, 2013.
10. Kenji Uchino., "Ferroelectric Devices", Hongrung Publishing Company, pp. 20 - 20, 72 - 72, 183 -



183, 2001.

11. Lee S. J., Kim S. W., Ham Y. B., "Prospect and Trend of Piezoelectric Energy Harvesting", Korea Institute of Science and Technology Inforamtion pp. 22, 2013.
12. Kang. H. O., Park. H. Y., Han. S. H., Lee. H. K., "Vibration Mode of Piezo Ceramic and Measurement of Piezo Characteristics", The Journal of the Korean Institute of Electrical and Electronic Material Engineers, Vol. 25. No. 4, pp. 4 - 5, 2012.
13. "Piezoelectricity" <https://www.americanpiezo.com/knowledge-center/piezo-theory/piezoelectricity.html>(accessed 17, Aug., 2016)
14. H. W. Kim., A. Batra., S. Priya., K. Uchino., D. Markley., R. E. Newnham., H. F. Hofmann, "Energy Harvesting Using a Piezoelectric Cymbal Transducer in Dynamic Environment" Japanese Journal of Applied Physics, Vol. 43 No. 9A, pp. 6178 - 6183, 2004.