

Cymbal Type 압전 발전기의 발전 특성

Generating Characteristics of the Cymbal Type Piezoelectric Generator

전호익^{1,a}, 정성수¹, 정현호¹, 박태곤¹, 김명호²

(Ho-ik Jun^{1,a}, Sung-su Jeoung¹, Hyon-ho Chong¹, Tae-gone Park¹, and Myung-ho Kim²)

Abstract

On this paper, piezoelectric generators using piezoelectric ceramics were designed and fabricated. Generators were made by attaching cymbal type metal plates on upper and bottom sides of a disc type piezoelectric ceramic. Generator converts wasting mechanical energy to electrical energy. Output voltage was increased when thickness of ceramic and displacement of vibration were increased. Temperature of the ceramic was increased when it generates, but the temperature rising was saturated at certain temperature.

Key Words : Energy harvesting, Piezoelectric generator, Cymbal

1. 서론

압전체는 일반적인 고체와는 달리 기계적 응력을 받으면 변형과 더불어 압전 세라믹의 분극 현상에 의해 전하가 발생한다. 이것을 압전 정효과라고 하는데, 에너지 수확 기술(Energy Harvesting : EH)의 한 가지 방안으로서 이러한 압전 효과를 바탕으로 진동이나 충격 같은 버려지는 기계적 에너지를 사용하여 발전하는 에너지 회수 시스템(Energy Recovery System)은 최근 USN(Ubiquitous Sensor Network)과 Hybrid 기술 분야에서 많은 주목을 받고 있다[1]. 일본 도쿄의 전철역 계단에 압전 발전기를 이용하여 개찰구의 전력을 충당하고 있고, 신발의 바닥이나 가방의 스트랩 부분에 압전체를 사용하여 충전장치로 사용하고 있다[2]. 따라서, 본 연구에서는 유한요소해석 프로그램을 통해 발전기의 최적 사이즈와 형태를 선정하고, 실제 제작한 발전기를 이용한 실험으로 특성을 조사하였다. 본

논문에서는 원판형 압전 세라믹에 심벌즈(Cymbals) 형태의 금속판을 부착하여 최대의 발전효과를 얻기 위한 최적의 형태를 시뮬레이션 기법으로 찾고, 실험을 통하여 그 특성을 측정하였다.



그림 1. 압전 발전기의 응용.

Fig. 1. Application of the piezoelectric generator.

2. 압전 소자 및 발전 소자

2.1 압전 소자

압전(piezoelectric)세라믹은 인장하거나 압축시키면 전하를 발생시켜 그림 2와 같이 한쪽 면은 양으로 대전되고, 반대편은 음으로 대전되어 양쪽 면간에 전기장으로 인해 전위차가 발생된다.

이때 각 표면의 총 전하량 q 는 전하이동변위 x 에 비례하고 이 x 는 가해진 힘에 비례하여

$$q = kx = SF$$

1. 창원대학교 전기공학과
(경남 창원시 사림동 9)
2. 창원대학교 세라믹공학과
a. Corresponding Author : tsobw1@naver.com
접수일자 : 2009. 3. 12
1차 심사 : 2009. 3. 19
심사완료 : 2009. 3. 24

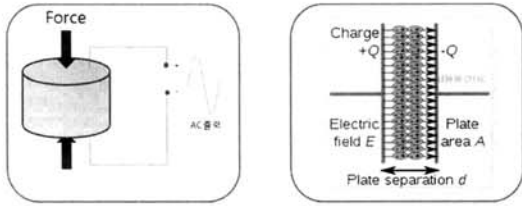


그림 2. 압전 효과의 원리.
Fig. 2. Principle of the piezoelectric effect.

가 성립한다. 여기서 k 는 상수, S 는 전하감도이다. 이 전하감도는 물질에 따라 다르고, 결정의 방향에 따라 달라진다. 발생된 전압은 인가된 압력에 비례하며, 전압 감도는 수정의 경우 약 0.055 V/mPa, 티탄산바륨($BaTiO_3$)은 약 0.011 V/mPa 정도이며, PZT는 Hard type의 경우 10.5 V/mPa, Soft type의 경우 12.4 V/mPa이다[3,4]. 압전 센서는 압력, 힘, 가속도의 계측에 사용된다. 그런데, 압력 변화에 의하여 생성된 전하는 오래 유지되지 않고 곧 사라지므로 과도 변화의 계측에 이용된다[5]. 정압전 효과라고 하는 것은 전압발생 기능으로 압전 소자에 외부 응력, 진동 변위 등을 가해 주면 그 출력 단에 전기 신호가 발생하는 현상을 말한다. 이것은 착화용 압전소자나 각종 센서에 응용된다. 그리고 역압전 효과라고 하는 것은 변위 발생 기능으로 압전 소자에 외부로부터 전압을 걸어 주면 소자가 기계적 변위를 일으키는 현상을 말하며, 액츄에이터 등에 적용되는데, 이를 통칭해서 압전 효과(piezoelectric effect)라고 한다[6,7].

2.2 발전 소자의 구동 원리

그림 3은 0.3 mm 두께의 황동 금속판을 Cymbal 형태로 압착 제조하여 원판형 세라믹의 상·하부에 접착제로 부착한 발전 소자를 나타낸다. 그림 3(a)는 발전 소자에 힘 F 가 가해지기 이전의 모습이며 세라믹의 직경이 늘어나지 않은 상태이다. 그림 3(b)는 힘 F 가 가해져 Cymbal 금속판의 형태에 의해 수직 방향 힘 F 가 세라믹의 직경이 늘어나는 방향으로 세라믹에 힘이 전달되는 모습을 나타냈다. 이러한 힘은 g_{31} 계수에 의해 세라믹 상하 전극에 분극을 발생시켜 발전을 하게 된다. 이러한 발전 소자의 구조를 이용하여 버려지는 기계적 진동 에너지를 압전 발전기의 입력으로 이용하고 압전체의 압전 정효과에 의해 전기적인 출력을 발생시킨다[5].

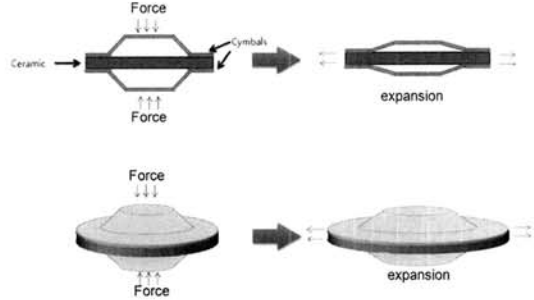


그림 3. Cymbal 발전 소자의 원리.
(a) 힘 인가 전. (b) 힘 인가 후.
Fig. 3. Principle of the cymbal type generator.
(a) Before applying force. (b) After applying force.

표 1. 에너지 변환 식.

Table 1. Energy transduction equation.

| | |
|-------|---|
| 출력 전압 | $V = g \times \frac{F(N) \times t(m)}{A(m^2)} \quad (g = \frac{d}{\epsilon_0 \epsilon_r})$ |
| 출력 전력 | $P = \frac{1}{2} CV^2 \cdot f$ $= \frac{1}{2} \cdot g_{31} \cdot d_{31} \cdot F^2 \cdot \frac{t}{A} \cdot f$ |
| 발전 효율 | $E \propto g \cdot d$ |

3. 실험

3.1 유한요소해석 Simulation

유한요소해석 프로그램인 ANSYS 10.0을 이용하여 실제 발전기를 제작하기 전에 시뮬레이션을 통해 여러 가지 특성을 예측하고 최적 사이즈와 형태를 선정했다. 탄성체의 물성치로는 재질은 황동, 두께를 0.3 mm, 직경을 28 mm, 높이를 0.5 mm로 고정했고, 세라믹의 물성치로는 재질은 PZT4, 직경을 28 mm로 고정했다. 각각의 시뮬레이션은 세라믹의 두께를 0.5 mm, 1 mm, 1.5 mm, 2 mm로 변화 시키면서 수행되었다. 첫 번째 시뮬레이션은 입력 진동의 주파수의 변화에 따른 발전기의 출력 전압을 알아보았다. 주파수의 증가에 따라 출력 전압도 증가 하였고, 1 kHz의 주파수에서 두께 1 mm의 세라믹으로 만든 발전기가 두께 0.5 mm의 세라믹으로 만든 발전기에 비해 30 V 더 높은 전압을 출력하는 것을 볼 수 있었다. 두 번째 시뮬

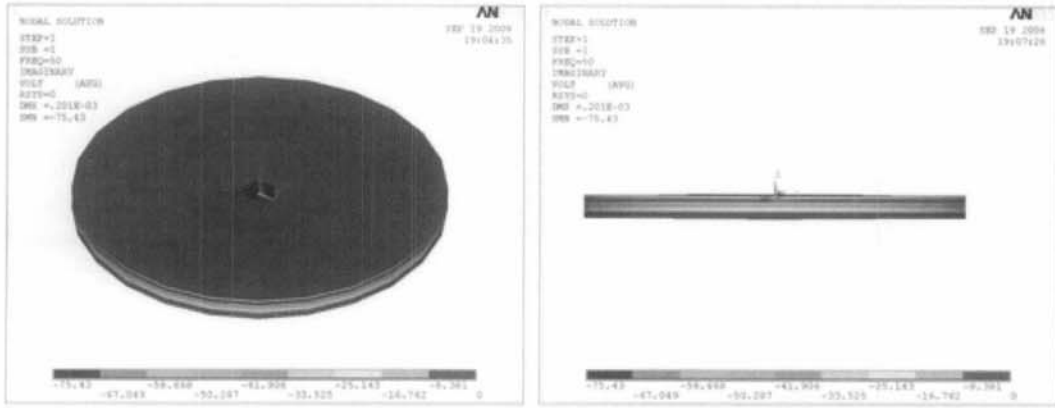


그림 4. 최적 설계 된 압전 발전기.
 Fig. 4. Optimal designed piezoelectric generator.

레이션은 Cymbals의 꺾인 각도를 5도, 15도, 45도로 변화 시켰을때의 주파수에 따른 출력 전압을 알아보았다. 주파수의 증가에 따라서 출력 전압은 증가했고, Cymbals의 각도가 5도에서 최대의 출력 전압이 나타나는 것을 볼 수 있었다. 이는 수직 진동력을 수평 진동력으로 변환시키는 과정에서 Cymbals의 각도가 작을수록 변환 효율이 높아지는 것을 알 수 있었다. 그림 4는 이러한 시뮬레이션을 토대로 최적화 된 직경 28 mm, 세라믹의 두께 1 mm, Cymbals의 각도 5도인 압전 발전기의 모델이다.

3.2 최적 설계 된 발전기의 제작

시뮬레이션 결과에 따라 제작 할 발전기의 최종 종류를 표 1과 같이 선정하였다. 최적 설계 된 모델에서의 Cymbals의 각도는 5도였으나, 세라믹의 직경과 세라믹과 Cymbals의 접착을 고려한 결과 실제 제작 될 Cymbals의 각도는 45도가 가장 적당했다. 시뮬레이션의 결과로는 Cymbals의 각도가 낮아질수록 효율이 높았으나, 실제 제작시에 Cymbals의 각도를 5도까지 낮추면 전체 발전기의 크기 때문에 진동에너지를 받을 윗 면적이 없어지게 된다. 또한 각도를 최대한 낮추어 제작을 하게 되면 진동을 받는 Cymbals와 세라믹의 간격이 아주 좁아지기 때문에 발전기에 진동을 가하게 되면 쉽게 파손이 된다. 결론적으로, 진동에너지의 인가의 용이성과 발전기의 파손 방지를 위해 45도라는 각도를 선정하게 되었다.

탄성체로 사용할 황동을 와이어 커팅으로 발전기의 크기에 맞게 제작하고 몰더를 이용하여 커팅된 탄성체를 Cymbal 형태로 찍어내었다.

표 2. 선정 된 발전기 사양.
 Table 2. Selected generator specification.

| 변수 | 제작 종류 |
|----------|-----------|
| 세라믹 직경 | 28 mm |
| 세라믹 두께 | 0.5, 1 mm |
| 탄성체 제질 | Brass |
| 탄성체 두께 | 0.3 mm |
| 탄성체의 굴절각 | 45° |

그림 5(a)는 Cymbal 형태의 금속판을 제작하기 위한 압착용 몰더이며, 그림 5(b)는 몰더를 사용하여 압착 제조한 Cymbal 구조 탄성체 이다. 그림 5(c)는 압착 제조 된 탄성체와 세라믹의 접착과 전선

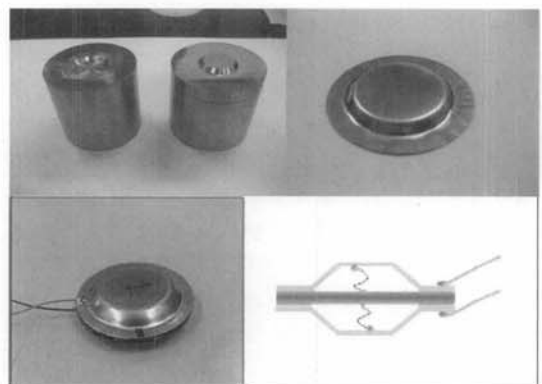


그림 5. 몰더와 제작 된 Cymbal 구조 압전 발전기.
 Fig. 5. Molder and fabricated cymbal type piezoelectric generator.

접합을 마친 완성된 압전 발전기이다. 가공된 탄성체와 원판형 세라믹의 각 전극을 내부에서 전선으로 연결하고 에폭시를 사용하여 탄성체를 세라믹의 윗면과 아랫면에 접착한 후 130 °C에서 30분 동안 가열 건조 시키고 각 탄성체에 외부로 나가는 전선을 접합하였다. 제작에 사용된 세라믹은 독일의 PI사의 PZT를 사용하였으며, 표 3은 사용된 PZT의 사양이다.

표 3. Soft PZT의 사양.

Table 3. Specification of the soft PZT.

| | | | |
|------------------------------------|-----------------------------------|------------------------------|-------|
| Material type | | PIC 155 | |
| Parameter | | | |
| Physical and Dielectric Properties | | | |
| Density | ρ (g/cm ³) | 7,80 | |
| Curie Temperature | T _c (°C) | 345 | |
| Permittivity | in the polarization direction | $\epsilon_{33}^T/\epsilon_0$ | 1450 |
| | perpendicular to the polarity | $\epsilon_{11}^T/\epsilon_0$ | 1400 |
| Dielectric loss factor | $\tan \delta$ (10 ⁻³) | 20 | |
| Electromechanical Properties | | | |
| Coupling factors | k _p | | 0,62 |
| | k _t | | 0,48 |
| | k ₃₁ | | 0,35 |
| | k ₃₃ | | 0,69 |
| | k ₁₅ | | |
| Piezoelectric charge constants | d ₃₁ | (10 ⁻¹² C/N) | -165 |
| | d ₃₃ | | 360 |
| | d ₁₅ | | |
| Piezoelectric voltage constants | g ₃₁ | (10 ⁻³ V/mN) | -12,9 |
| | g ₃₃ | | 27 |

발전 효율은 d값과 g값의 곱에 비례하므로 Soft 계가 적합하다. 본 실험에서는 Soft PZT 중에서도 전압 감도가 가장 높은 PIC-155 모델을 사용하여 발전기를 제작했다.

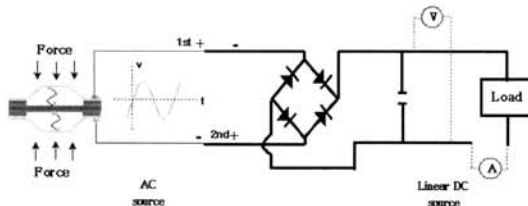


그림 6. 정류 회로.

Fig. 6. Rectification circuit.

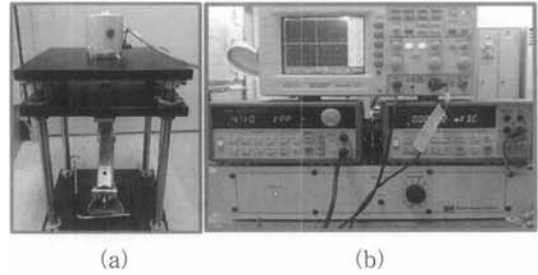


그림 7. 실험 장비.

(a) 홀더 (b) 계측 장비

Fig. 7. Experiment equipment.

(a) Holder (b) Measuring equipment

제작된 압전 발전기를 그림 6과 같은 정류 회로를 통해 정류 시키고, 그림 7의 실험 장비들을 이용해 구동 특성을 파악하고 Simulation 결과와 비교 분석했다. 그림 7(b)의 Function Generator에서 발생한 정현파 신호가 증폭기를 거쳐 그림 7(a)의 Vibrator에 전달되면 Vibrator는 주파수와 진폭이 가변 가능한 진동을 하게 된다. 이 진동이 압전 발전기에 전달되어 전기적인 출력이 발생한다. 그림 7(a)의 Vibrator는 영국 LDS사의 v201/3 모델이며, 그림 7(b)의 증폭기는 같은 회사의 PA25E 모델이다. 그림(a)에서 Vibrator와 압전 발전기를 고정시키는 홀더는 자동차용 Jack을 사용하여 Vibrator와 압전 발전기의 거리를 조절할 수 있게 만들어졌다.

4. 실험 결과 및 고찰

그림 8은 두께 0.5 mm의 세라믹으로 제작된 발전기의 주파수 변화에 따른 출력 전압과 저항에 따른 출력 전압, 전류를 나타낸 그래프이다. 주파수의 증가에 따라 출력 전압이 증가하였고, 부하 저항의 증가에 따라 출력 전압은 증가하고 전류는 감소하였다.

그림 9는 두께 1 mm의 세라믹으로 제작된 발전기의 주파수 변화에 따른 출력 전압과 저항에 따른 출력 전압, 전류를 나타낸 그래프이다. 0.5 mm의 세라믹으로 제작된 발전기와 마찬가지로 주파수의 증가에 따라 출력 전압이 증가했고, 부하 저항의 증가에 따라 출력 전압은 증가하고 전류는 감소하였으나, 0.5 mm 두께의 발전기에 비해 많은 양의 출력을 보였다.

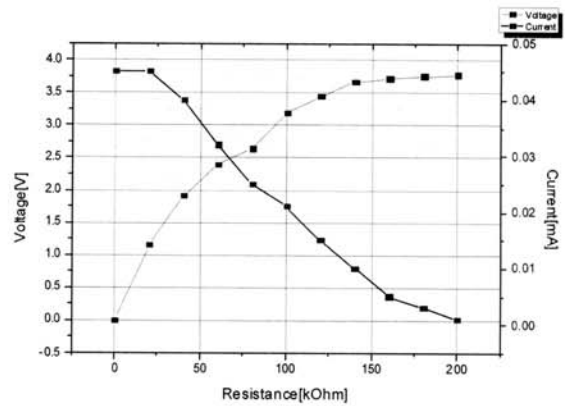
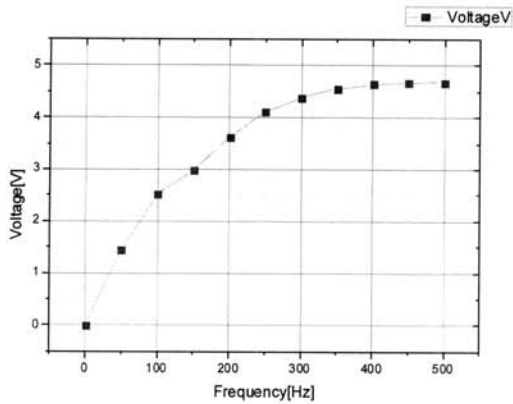


그림 8. 주파수와 저항에 따른 출력 특성 그래프(세라믹의 두께 0.5 mm).

Fig. 8. Output characteristic dependant on frequencies(Thickness of the ceramic 0.5 mm).

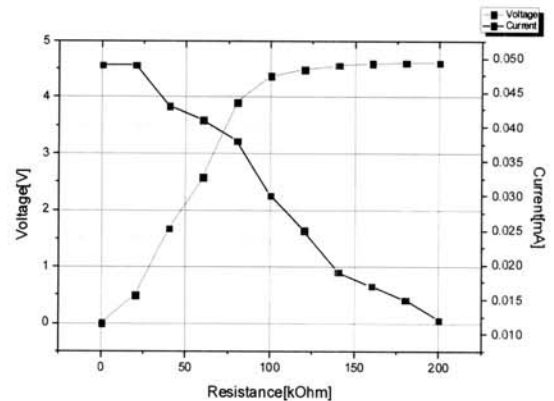
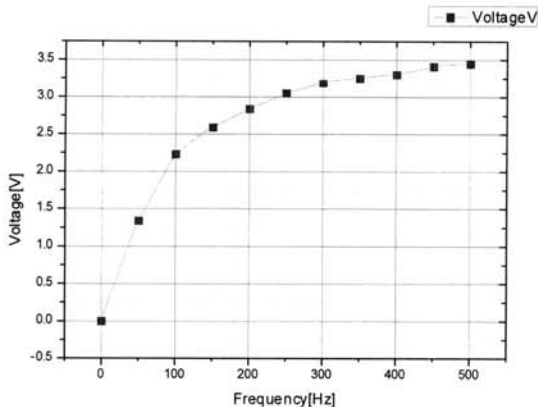


그림 9. 주파수와 저항에 따른 출력 특성 그래프(세라믹의 두께 1 mm).

Fig. 9. Output characteristic dependant on frequencies(Thickness of the ceramic 1 mm).

그림 10은 Vibrator와 발전기의 간격에 따른 출력 전압, 전류를 나타낸 그래프이다. 발전기의 세라믹 두께는 각각 0.5 mm와 1 mm였다. 주파수의 증가에 의해 진동의 속도가 빨라짐에 따라 Vibrator의 진동 변위가 작아지므로 최대 출력을 위한 Vibrator와 발전기의 간격은 주파수가 증가함에 따라 가까워졌다.

5. 결론

입력 진동의 주파수가 증가함에 따라 발전기의 출력은 증가함을 알 수 있었다. 이는 주파수의 증

가에 의해 진동의 속도가 증가하므로 그에 따라 충격량과 진동량이 증가하기 때문으로 사료 된다. 부하 저항의 증가에 따른 출력은 비교적 선형적으로 나타났다. 발전기의 세라믹 두께에 따른 출력은 두꺼운 세라믹을 이용한 발전기에서 크게 나타났는데, 이는 세라믹의 용량을 생각하면 당연한 결과이나 두꺼운 세라믹일수록 진동에 대한 민감성은 떨어질 것이라고 사료 된다. Vibrator와 발전기의 간격에 따른 출력은 실험 결과, 저주파의 진동에서의 최고 출력 간격은 고주파 진동에서의 최고 출력 간격보다 큰 것으로 나타났다. 진동 주파수가 커짐에 따라 최고 출력 간격은 감소하는 것을 볼 수 있었다. 본 실험에서는 Cymbal의 굴절 각도를

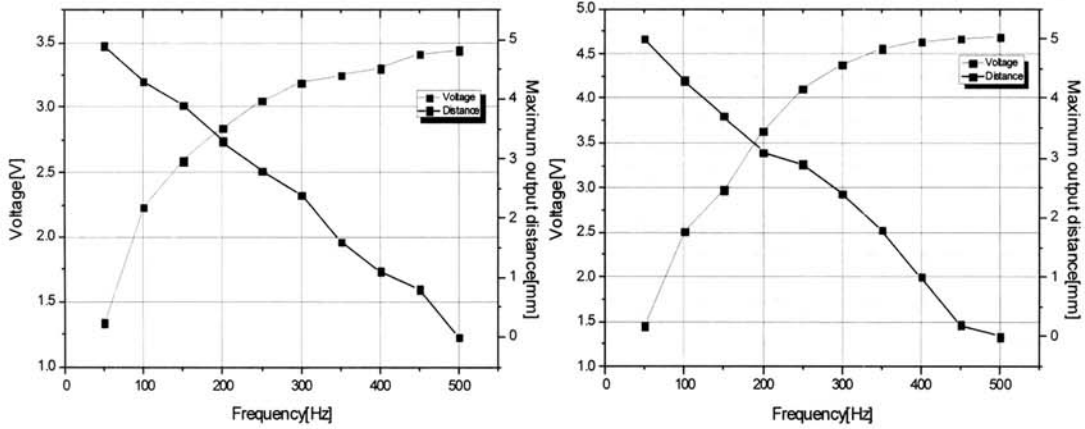


그림 10. Vibrator와 발전기의 간격에 따른 발전 특성.

(a) 세라믹 두께 0.5 mm (b) 세라믹 두께 1 mm

Fig. 10. Output voltage dependant on maximum output distance.

(a) Thickness of the ceramic 0.5 mm (b) Thickness of the ceramic 1 mm

45도로 고정해서 실험을 했는데, 차후의 실험에서는 수직 변위에 의한 최대 수평 변위를 가지는 각도를 산출해서 새로운 Cymbal을 이용한 발전기를 제작해 볼 필요성이 있다고 사료 된다.

감사의 글

본 연구는 교육 과학 기술부와 한국 산업 기술 재단의 지역 혁신 인력 양성 사업으로 수행 된 연구 결과임.

이 논문은 2008년도 창원대학교 연구비에 의하여 연구 되었음.

참고 문헌

[1] J. L. Gonzalez, A. Rubio, and F. Moll, "Human powered piezoelectric batteries to supply power to wearable electronic devices", International Journal of the Society of Materials Engineering for Resources, Vol. 49, p. 7, 2001.
 [2] H.-W. Kim, PhD Thesis, "Impedance Adaptation

Methods of The Piezoelectric Energy Harvesting", Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements for the Degree of Doctor of Philosophy, p. 27, 2006.

[3] H. A. Sodano, G. Park, and D. J. Inman, "Estimation of Elastic Charge Output for Piezoelectric Energy Harvesting", 2004 Blackwell Publishing Ltd | Strain, p. 40, 2004.
 [4] 박창엽, "전기전자용 압전 세라믹스", 반도체출판사, p. 20, 1997.
 [5] J. Kymissis, C. Kendall, J. Paradiso, and N. Gershenfeld, "Parasitic Power Harvesting in Shoes", Second IEEE International Conference on Wearable Computing, p. 34, 1998.
 [6] 윤소남, 김동건, 함영복, 박중호, 최상규, "압전 액추에이터를 이용한 에너지 수확", 대한기계학회 2007춘계학술대회논문집, p. 2251, 2007.
 [7] Richards Cecilia D., Anderson Michael J., Bahr David F., and Richards Robert F., "Efficiency of energy conversion for devices containing a piezoelectric component", Journal of micromechanics and microengineering, Vol. 14, No. 5, p. 717, 2004.