

벌집형 압전 발전 소자의 구동방식에 따른 출력 특성

정성수¹, 강신출², 박태곤^{1,a}

¹ 국립창원대학교 전기공학과

² 경남도립남해대학 전기과

A Study on the Generating Characteristics Depending on Driving System of a Honeycomb Shaped Piezoelectric Energy Harvester

Seong-Su Jeong¹, Shin-chul Kang², and Tae-Gone Park^{1,a}

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

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

(Received September 1, 2014; Revised September 11, 2014; Accepted December 22, 2014)

Abstract: Recently, energy harvesting technology is increasing due to the fossil fuel shortages. Energy harvesting is generating electrical energy from wasted energies as sunlight, wind, waves, pressure, and vibration etc. Energy harvesting is one of the alternatives of fossil fuel. One of the energy harvesting technologies, the piezoelectric energy harvesting has been actively studied. Piezoelectric generating uses a positive piezoelectric effect which produces electrical energy when mechanical vibration is applied to the piezoelectric device. Piezoelectric energy harvesting has an advantage in that it is relatively not affected by weather, area and place. Also, stable and sustainable energy generation is possible. However, the output power is relatively low, so in this paper, newly designed honeycomb shaped piezoelectric energy harvesting device for increasing a generating efficiency. The output characteristics of the piezoelectric harvesting device were analyzed according to the change of parameters by using the finite element method analysis program. One model which has high output voltage was selected and a prototype of the honeycomb shaped piezoelectric harvesting device was fabricated. Experimental results from the fabricated device were compared to the analyzed results. After the AC-DC converting, the power of one honeycomb shaped piezoelectric energy harvesting device was measured 2.3[mW] at road resistance 5.1[KΩ]. And output power was increased the number of harvesting device when piezoelectric energy harvesting device were connected in series and parallel.

Keywords: Energy harvester, Piezo sensor, FEA, ANSYS, Piezoelectric energy harvesting device

1. 서 론

최근 에너지 부족 현상으로 인한 위기의식이 고조되

면서 자연 에너지를 이용한 에너지 하베스팅 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 전원장치로만 이용되었다.

최근 생활패턴이 변화하면서 무선기기 및 휴대용 기

a. Corresponding author; tpark@changwon.ac.kr

기 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 화석에너지의 고갈을 대체할 수 있으며 친환경적이므로 미래의 새로운 에너지 자원이 될 수 있다 [1-9].

본 논문에서는 압전 재료가 가지는 단점을 보완하고자 정육각형 형태의 새로운 압전 발전 소자를 제안하여 특성을 해석하고 제작 실험하였다. 정육각형 압전발전 소자는 가운데가 비어있는 형태로 압전 재료에 직접적으로 진동을 가하지 않게 설계 되어 내구성을 높였으며 출력을 향상시키기 위하여 여러 개의 소자를 직병렬 연결할 때 공간 효율성이 가장 높은 장점을 가진다. 유한요소해석 프로그램을 사용하여 발전소자가 최대전압을 출력하는 모델을 선정하여 제작 및 실험을 통해 해석 결과를 검증하였다. 또한 안정적인 전원 공급을 위해 컨버터를 통해 교류 전압을 직류로 변환시키고 여러 개의 소자를 직병렬 구동하여 출력 전력을 향상시켰다.

2. 실험 방법

2.1 구조 및 원리

2.1.1 Honeycomb shaped 구조

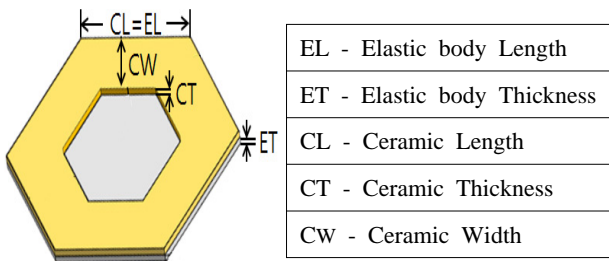


Fig. 1. Structure of the Honeycomb shaped piezoelectric energy harvesting device.

벌집형 압전발전 소자는 벌집의 형태를 모방하여 설계된 것으로서 얇은 탄성체 위에 가운데가 뚫린 얇은 세라믹이 접합된 정육각형의 형태를 가진 압전 발전 소자이다.

그림 1은 벌집형 압전 발전 소자를 나타낸다. 꿀벌이 원형에 가까우면서도 공간 효율성이 좋은 정육각형 형태의 집을 짓는 것처럼 압전발전 소자도 작은 면적에서 가장 좋은 출력을 나타내야 하는 점을 고려하여 정육각형으로 고안되었다. 탄성체와 결합된 세라믹의 가운데가 비어있는 것을 확인할 수 있다.

이 구조는 세라믹이 외부의 충격에 쉽게 부서지는 것을 보완하기 위해 진동이 세라믹에 직접 전달되지 않고 탄성체를 거쳐 전달되게 하는 것이다. 따라서 세라믹이 받는 스트레스가 줄어들어 세라믹이 쉽게 손상되는 것을 막을 수 있을 뿐만 아니라 탄성체에 의해 진동이 증폭되어 세라믹이 더 많은 출력을 나타내게 할 수 있는 장점을 가진다.

벌집형 압전 발전 소자의 설계 변수는 세라믹의 길이(CL)와 두께(CT), 폭(CW), 탄성체의 길이(EL), 두께(ET), 외부 힘(F)으로 선정하였으며 각 약어의 정의 또한 그림 1에 나타내었다.

2.1.2 발생 원리

벌집형 압전발전 소자의 발전원리는 비교적 간단하다. 정육각형의 여섯 꼭짓점을 고정한 뒤 소자의 정 가운데에 가진력이 가해지면 탄성체는 상하진동을 일으키게 된다. 탄성체의 진동으로 인해 접합되어 있는 세라믹은 신축을 반복하면서 교류전압을 출력하게 된다. 진동 한 번이 사인파의 한 주기라고 했을 때, 0에서 π 까지의 주기 동안 압전 세라믹의 윗면에는 압축 응력이 발생하고 아랫면에는 인장 응력이 발생한다. 반대로 π 에서 2π 까지의 주기 동안 압전 세라믹의 윗면에는 인장 응력, 아랫면에는 압축 응력이 발생하게 된다. 따라서 일정한 주파수를 가지는 진동에 의해 압전 세라믹에 인장과 압축 응력이 반복해서 발생되어 전력을 생산하게 되는 것이다 [2]. 압전발전 소자는 크게 진동을 간접적으로 전달하는 진동형과 직접적인 진동을 여기시키는 타격형으로 구별할 수 있으며, 본 연구에서 제안한 벌집형 압전발전 소자는 타격형으로 분류될 수 있다. 직접적인 타격을 받는 경우에 압전세라믹의 파손이 무엇보다 우려되는 상황이며 기존에 발표된 타격형 모델에 비해서 제안된 벌집형 발전소자는 타격 지점 주변부에 압전세라믹이 위치해 있기 때문에 보다 안정적인 구조라고 볼 수 있으며, 동일 공간에서 육각형의 소자들의 배열은 안정적이고 효율적인 구조라고 할 수 있다.

2.2 유한요소해석

2.2.1 공진모드

벌집형 압전발전 소자의 고유 진동형상 및 출력 특성을 시뮬레이션하기 위해 유한요소해석 프로그램인 ANSYS 11.0을 사용하였다.

그림 2는 ANSYS를 이용하여 벌집형 압전 발전 소자의 모델링된 형상을 나타낸 것이다.

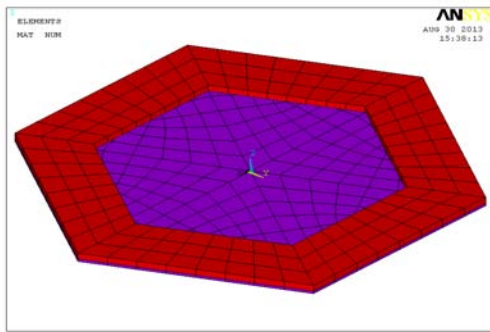


Fig. 2. Modeling of the honeycomb-shaped piezoelectric energy harvester.

발전소자를 모델링 한 뒤 소자가 가지는 고유 진동 모드를 찾기 위하여 모달 해석을 진행하였다. 발전소자는 굽힘진동이나 전단진동 또는 여러 진동을 복합적으로 가지는 복합진동 등 다양한 형상의 진동모드를 가진다. 그 중에서 1차 굽힘진동은 발전소자의 여섯 꼭짓점이 고정되어 있을 때 외부의 힘이 인가되면 힘이 인가 된 방향과 같은 방향으로 세라믹이 상하로 진동하게 되고 여러 진동 모드 중에서 가장 낮은 공진주파수를 가진다. 따라서 본 논문에서는 1차 굽힘진동 영역에서 하모닉 해석을 진행하였으며 그림 3은 1차 굽힘진동을 가지는 모달해석 결과를 나타내고 있다.

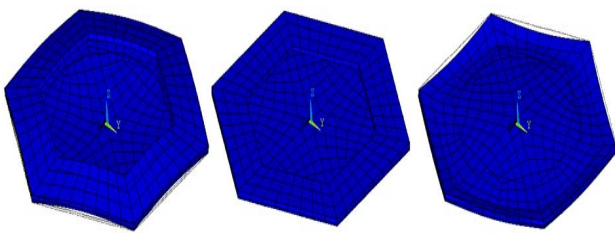


Fig. 3. The 1st bending vibration mode of the honeycomb-shaped piezoelectric energy harvester.

2.2.2 세라믹 폭 변화에 따른 유한요소해석

그림 4는 세라믹 폭의 변화에 따른 출력 특성을 나타낸다. 여기서 고정 변수는 CL30CT0.2ET0.2이며, PZT 세라믹스, 발전소자의 탄성체 재질은 황동을 사용하였으며, 가해진 힘은 1 G이다.

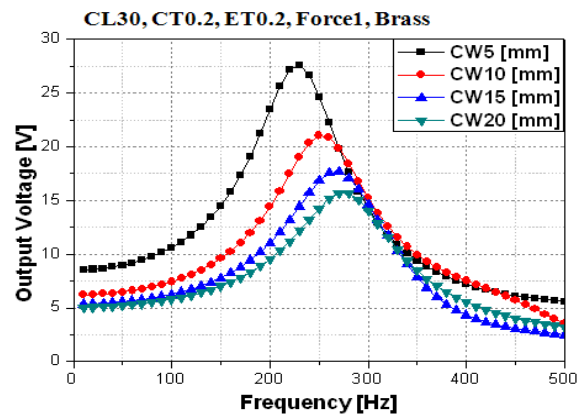


Fig. 4. Output characteristics depending on ceramic width.

해석 결과 세라믹의 폭이 넓어질수록 공진 주파수는 거의 변화가 없고 출력 전압은 감소하는 것을 확인하였다. CW5[mm] 모델의 최대 출력 전압은 약 28[V]이고 세라믹 단면적은 716[mm²]이다. CW20[mm] 모델의 최대 출력 전압은 약 15[V]이고, 단면적은 2,080[mm²]이다. 세라믹의 폭 즉, 면적이 전류의 출력에 큰 영향을 미친다는 것을 고려했을 때, 면적대비 전압 감소가 적은 CW20 모델을 선정하여 실험을 진행하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1 발전 특성 실험

3.1.1 벌집형 압전 발전 소자

그림 5는 제작이 완료된 발전 소자를 나타내고 있다. 탄성체와 세라믹스를 가공하고, 에폭시 접착제를 사용하여 열처리된 발전소자이다. 세라믹과 탄성체의 접합이 완성된 소자의 여섯 모서리를 고정하여 중심부 진동이 원활하도록 하였고, 출력용 전원선을 연결하였다.

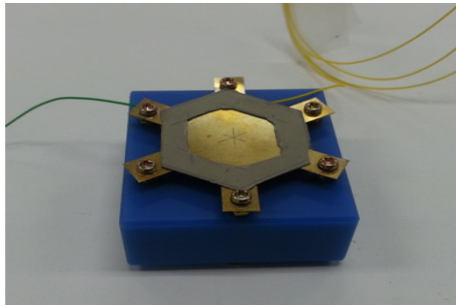


Fig. 5. Fabricated energy harvesting device.

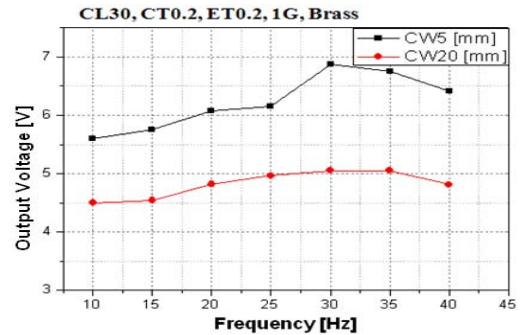


Fig. 7. Output voltage depending on ceramic width.

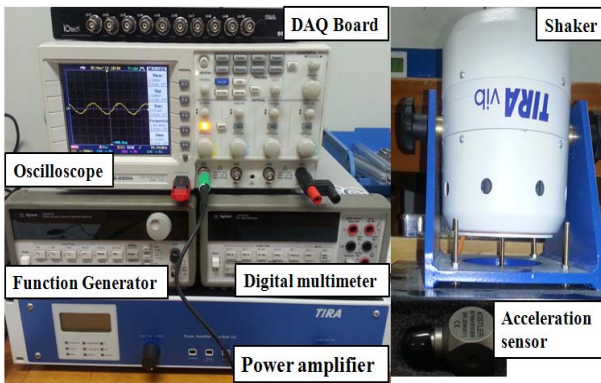


Fig. 6. Equipment for vibration experiment.

진동 실험을 위한 측정 장비는 그림 6에서 보여준다. 함수발생기에서 선정한 교류 신호를 파워앰프에 인가하여 증폭시킨 후 셰이커에 인가되면 셰이커가 진동하게 된다. 셰이커의 진동으로 인하여 발전소자가 전압을 출력하게 되고 출력된 전압의 파형은 오실로스코프에서 측정하며 전류는 디지털 멀티미터로 측정하였다. 가속도 센서를 이용하여 발전소자에 인가되는 외력의 크기를 산정할 수 있다. 진동의 변위는 함수발생기의 인가전압과 파워앰프의 gain 값으로 가변할 수 있고 함수발생기의 주파수 조절만으로 셰이커의 진동 주파수 선정이 가능하다.

3.1.2 세라믹의 폭 변화에 따른 출력 특성

그림 7은 세라믹 폭 변화에 따른 출력 전압을 나타낸다. 세라믹의 폭이 5 mm, 20 mm 두 개의 모델을 비교하였다. 여기서 고정 변수는 CL30CT0.2ET0.2이며, 탄성체는 황동, 가해진 힘은 1 G이다. 실험 결과 세라믹의 폭이 증가로 인하여 출력 전압이 1[V] 가량 감

소하는 것을 확인하였다. 교류로 출력된 전압을 AC-DC 컨버터(EHE004, Mide Ltd.)를 이용하여 DC 전압을 만든 뒤 10[K Ω]의 저항이 연결되었을 때 출력되는 전류를 측정하였다. 컨버터 소자 내부 커패시터는 200[μ F]이며 커패시터가 충전된 뒤 방전을 할 때 전류를 측정하는 것이다. 실험 결과 1초 동안 충전되는 전류는 CW20[mm] 모델의 전류가 18[μ A]였고, CW5[mm] 모델의 전류는 11.6[μ A]였다. CW20[mm] 모델의 전류가 CW5[mm] 모델의 전류보다 높게 출력되었고, 전류 유지 시간이 좀 더 길게 나타나는 것을 확인하였다. 이상의 결과로 전압 감소에 비해 전류 증가 값이 크므로 전체 전력 획득 면에서 넓은 면적의 세라믹이 유리함을 확인하였다.

3.1.3 소자의 직·병렬에 따른 출력 특성

AC-DC 컨버팅을 한 후 부하저항에 따른 출력 특성 및 여러 개의 소자를 연결하였을 때 출력이 비례적으로 상승하는지에 대한 특성 실험을 진행하였다. 부하저항 변화에 따른 출력은 5.1[K Ω]일 때 가장 큰 출력전력이 나타나는 것을 그림 8에서 확인하였다.

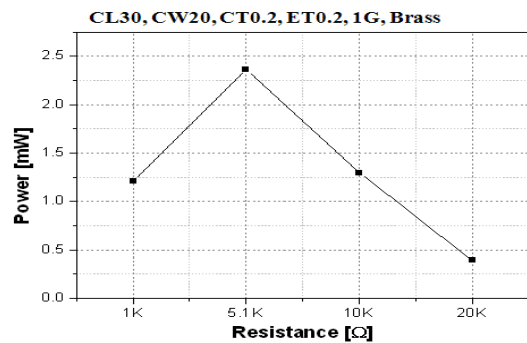


Fig. 8. Output power depending on road resistance.

3.1.4 구동방식에 따른 출력 특성

발전소자 한 개의 출력으로는 무선장비의 전원이나 배터리로서의 역할을 하기에는 부족하다. 따라서 발전소자의 출력을 향상시키기 위해 소자를 병렬 혹은 직렬로 연결하여 그 때의 출력 특성을 비교 실험해 보았다. 먼저 각각의 소자에서 출력되는 교류 전압을 AC-DC 컨버터를 통해 직류로 변환시킨 뒤 직렬 및 병렬 연결하여 출력 특성을 측정하였다.

그림 9는 발전 소자에 동일한 진동을 인가하기 위한 시스템을 보여주고 있다.

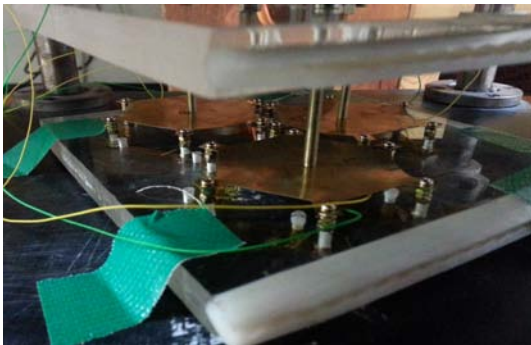


Fig. 9. Piezoelectric generator system.

발전소자를 병렬로 연결하였을 때의 출력 특성을 실험하였다. AC-DC 컨버팅 된 소자들의 출력 전압은 각각 3.6[V]로 측정되었다.

그림 10은 소자에서 출력되는 직류 전압을 나타낸다. 컨버팅 소자의 입력 전압, 즉 발전 소자에서 출력되는 교류 전압의 rms 값이 3.6[V] 이상이었으므로 컨버팅 소자의 설정에 맞게 안정된 직류전압 3.6[V]가 출력되었다. 두 개의 소자를 직렬로 연결하였을 때 출력 전압은 3.6[V] 전압의 2배 정도 높은 7.29[V]로 상승하는 것을 오실로스코프로 확인하였다.

그림 11은 직렬 연결된 소자의 출력 전압을 나타내고 있다. 전류 또한 소자가 한 개 일 때보다 두 개 일 때의 충전 시간이 약 3배 정도 줄어들었다. 즉, 1 초에 출력되는 전류의 양이 34[μA]에서 소자 두 개가 직렬 연결되었을 때 80[μA]로 약 2.3배 증가하는 것을 실험을 통해 측정하였다.

그림 12는 병렬 연결된 소자의 전류 유지 시간을 나타내고 있다. 기계적 입력으로부터 전기적 출력 관계의 효율은 약 5% 정도로 계산되었다.

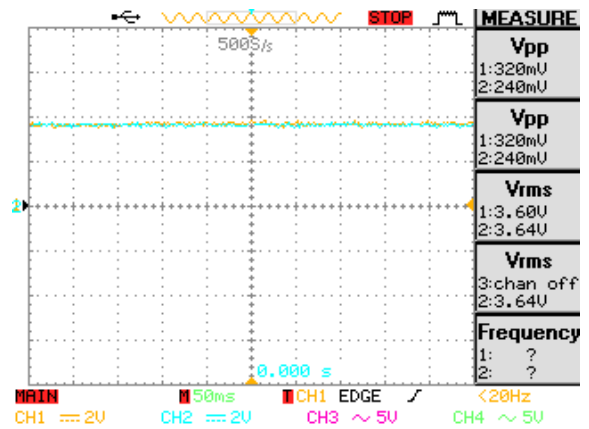


Fig. 10. DC output voltage of each piezoelectric generator.

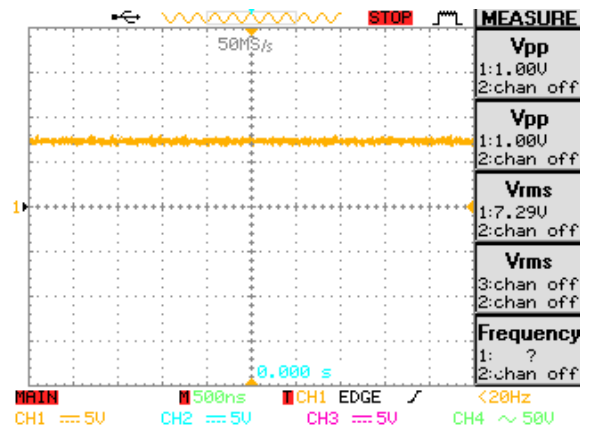


Fig. 11. Output voltage of device in series connection.

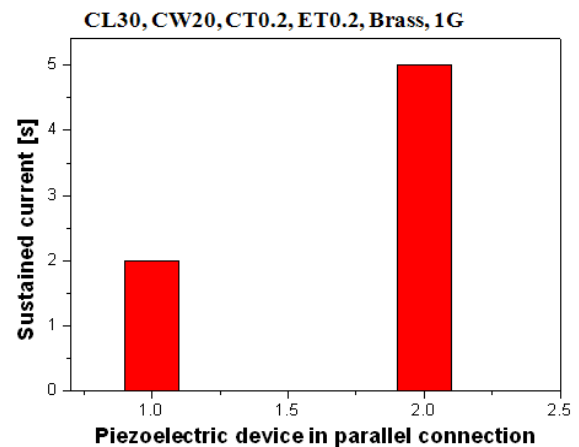


Fig. 12. Sustained current time of device in parallel connection.

기계적 입력은 진동자 내 아마추어의 무게와 중력가속도, 가진력[g]으로 계산하였으며, 전기적 출력은 발진소자 3개가 병렬 연결하였을 때의 출력 전력을 적용하였다.

4. 결론

1. 유한요소해석 결과를 바탕으로 제작 및 실험하여 해석결과와 비교 분석해 보았다. 실험은 생활 주파수 영역에서 진행되었고 실험 결과는 해석 결과와 비슷한 양상을 나타내었다.
2. 출력 특성이 가장 좋았던 CL30CW20CT0.2ET0.2 모델을 선정하여 컨버팅 소자인 EHE004 컨버터를 이용하여 교류 전압을 직류 전압으로 변환시킨 뒤 부하 저항이 5.1[K Ω]일 때 출력 전력이 가장 높게 나타났다.

여러 개의 소자를 연결하여 출력 전력을 향상시키기 위해서 직렬 및 병렬 연결하였을 때 출력을 비교한 결과, 소자 두 개를 직렬 연결한 출력전압은 정확히 2배로 상승하였으며 전류 또한 약 2배 증가하여 출력 전력이 소자가 증가함과 비례하여 상승하는 것을 확인하였다. 소자 두 개를 병렬 연결하여 실험한 결과 출력 전압은 소자 한 개의 전압인 3.6[V]로 일정하게 나타났으며 전류는 소자가 한 개일 때보다 유지 시간이 2배 이상 증가하여 효율이 높아지는 것을 확인하였다.

이상의 결과로 생활 주변에서 발생하는 진동원을 이용하여 소형 모바일기기 및 센서구동용 전원으로 제안된 벌집형 압전발전 소자의 적용이 가능할 것으로 사료된다.

감사의 글

본 연구는 교육부와 한국연구재단의 지역혁신인력양성 사업으로 수행된 연구 결과임(No. 2013H1B8A2032206).

이 논문은 2014년도 정부(미래창조과학부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임 (NO. 2011-0030058).

REFERENCES

- [1] Y. H. Kim, *J. KIEEME*, **3**, 250 (2010).
- [2] S. R. Anton and H. A. Sodano, *Smart Mater. Struct.*, **16**, R1 (2007).
- [3] J. Hu, *Jpn. J. Appl. Phys.*, **38**, 3208 (1999).
- [4] J. L. Gonzalez, A. Rubio, and F. Moll, *International Journal of the Society of Materials Engineering for Resource*, **7** (2001).
- [5] H. I. Jun, *J. KIEEME*, **9**, 315 (2008).
- [6] J. Kymissis, C. Kendall, J. Paradiso, and N. Gershendeld, *Second IEEE International Conference on Wearable Computing*, **34** (1998).
- [7] T. G. Park, B. J. Kim, M. H. Kim, and K. Uchino, *Jpn. J. Appl. Phys.*, **41**, 7139 (2002).
- [8] H. W. Kim, *Impedance Adaptation Methods of The Piezoelectric Energy Harvesting*, Ph D. Thesis, p. 27 (2006).
- [9] S. S. Rao, *Mechanical Vibrations* (Addison-Wesley Publishing Company, 1990) p. 427.