

## 압전 바이몰프 액츄에이터의 진동에 따른 자가 발전특성

### Self Power Generation from Vibration using Piezoelectric Bimorph Actuator

김창일<sup>1</sup>, 정영훈<sup>2</sup>, 이영진<sup>2</sup>, 백종후<sup>2,a</sup>, 남 산<sup>1</sup>

(Chang-Il Kim<sup>1</sup>, Young-Hun Jeong<sup>2</sup>, Young-Jin Lee<sup>2</sup>, Jong-Hoo Paik<sup>2,a</sup>, and Sahn Nahm<sup>1</sup>)

#### Abstract

This paper presents the self power generation from vibration using the piezoelectric bimorph actuator. The piezoelectric bimorph actuator was well developed with PZT-PNN-Fe piezoelectric ceramics. As the applied voltage was increased, a linear change of displacement was obtained with a relatively high ratio of 12.53  $\mu\text{m}/\text{V}$  for the bimorph actuator. Moreover, when the motor's rotational speed was 2000 rpm, the bimorph actuator, which has a resonance frequency of 68 Hz, exhibited the most efficient generation voltage of 10.4 V. This bimorph actuator could make the LED, emitting 60 mW, working successfully. Therefore, it is anticipated that the bimorph actuator will be useful as a power source for the next-generation electronic devices.

**Key Words** : Piezoelectrics, Energy harvesting, Bimorph actuator, PZT

#### 1. 서 론

기계적 에너지를 전기적 에너지로 변환하는 에너지 변환소자인 압전세라믹스는 액츄에이터, 변압기, 초음파모터, 초음파 소자 및 각종 센서로 응용되어 왔다. 최근에는 외부충격이나 진동과 같은 기계적 에너지를 전기에너지로 변환하여 압전 소자에 접속된 축전지를 통해서 배터리의 전원에 충전하는 방식의 에너지 하비스팅 시스템에 대한 연구가 다양하게 보고되고 있다[1-5]. 이러한 에너지 하비스팅 시스템을 이용한 에너지변환 소자를 유틸리티스 환경에서 무선용 휴대 전자제품, 즉 wearable 컴퓨터, MP3, GSM, Bluetooth 등의 정보통신기기, robotics, 항공우주, 자동차, 의료, 건축, MEMS 분야 등의 대체 에너지원으로 응용하기 위한 연구가 활발하게 진행되고 있다. 특히 호흡, 걸음 등과 같은 인간의 일상적인 동작으로부터

변환된 전기 에너지를 이용하여 에너지 하비스팅 시스템을 구성하는 소자를 구동하기 위해 필요한 전력을 얻을 수 있다고 보고되고 있다[6,7]. 압전세라믹 소자를 이용하면, 전자 노이즈 (noise)가 발생되지 않아서 반영구적으로 사용이 가능하므로, 기존의 이차전지, 연료전지를 대체 또는 보완 할 수 있는 방안도 검토되고 있다.

일반적으로 압전체 에너지 하비스터는 압전체 바(Bar)의 한쪽 끝을 고정시킨 칸티레버(Cantilever) 형태로 제작하는데 칸티레버를 지지하는 지지바 상부에만 압전체를 배치한 유니몰프(Unimorph)형과 상하부에 모두 형성시킨 바이몰프(Bimorph)형으로 구분할 수 있다. 칸티레버는 외부의 진동에 의해서 떨리게 되고 칸티레버가 상하로 휘어짐에 따라 수평방향으로 발생하는 압전체의 변형에 의해 전류가 생성된다. 지지 바는 상하 방향으로 교대로 휨이 발생하기 때문에 압전체에는 수평방향으로 압축응력과 인장응력이 번갈아 인가된다. 따라서 생성되는 전류의 방향이 교대로 바뀔으로써 교류가 생성된다. 바이몰프의 경우 두 개의 압전체에서 병렬로 전력이 생성되기 때문에 낮은 전압에서도 비교적 큰 변위량을 얻을 수 있다[8]. 게다가 비교적 높은 출력을 얻을 수 있어 에너지 하비스

1. 고려대학교 신소재공학과  
2. 요업(세라믹)기술원 전자부품팀  
(서울시 금천구 가산동 233-5)  
a. Corresponding Author: jhpaik@kicet.re.kr  
접수일자 : 2008. 10. 15  
1차 심사 : 2008. 11. 17  
심사완료 : 2008. 11. 24

팅 시스템을 구축하기 위해서 매우 유리하다.

본 연구에서는 압전전하계수( $d_{33}$ )가 큰 0.25 wt%의  $Fe_2O_3$ 를 도핑한  $0.6Pb(Zr_{0.405}Ti_{0.595})O_3 - 0.4Pb(Ni_{1/3}Nb_{2/3})O_3$ (PZT-PNN-Fe) 압전세라믹[9]을 이용하여 바이몰프 형태의 액추에이터를 제조한 후, 에너지 하비스팅을 위한 전기회로 시스템을 설계하였다. 그리고, 공조 시스템의 덕트(Duct), 생산용 조립기계, 소형 가전제품 등의 고유 진동수인 60~200 Hz 정도의 낮은 주파수를 나타내는 진동체[8,10,11]에 부착하여 PZT-PNN-Fe 압전세라믹 바이몰프 액추에이터의 진동에 따른 발전 특성을 평가하였다.

## 2. 실험 방법

바이몰프 액추에이터를 제작하기 위하여 사용된 PZT-PNN-Fe 압전세라믹은 일반적인 고상합성법을 이용하여 1150 °C에서 2시간 동안 소결하였다. 비교적 얇은 두께와 대면적의 구조를 가지는 액추에이터 제작을 위해 PZT-PNN-Fe 압전세라믹 시트는 tape casting 방법을 사용하여 제작하였다. 적층공정은 프레스를 이용하여 50 °C에서 20초 동안 가열한 후 일축 성형하였으며, 시트 사이의 불균일 접합을 막고 전체적으로 균일한 성형 밀도를 얻기 위해 WIP (Warm Isotropic Press) 방법을 이용하여 75 °C에서 10분간 수행하였다. 적층한 시트의 절단은 WIP를 통하여 stress 분포를 완화시킨 이후에 이루어졌으며 가열판 위에 세라믹 sheet를 부착하고 blade가 상하 운동하여 이루어지는 절단기(Cutting Machine)를 사용하였다. 소결체의 압전 특성을 측정하기 위하여 외부전극은 스퍼터링(sputtering)법을 사용하여 Ni/Ag의 순서로 약 1 μm 두께로 증착하였다. 분극은 silicon oil bath에서 120 °C의 온도에서 2.5 kV/mm의 전기장을 인가하여 30분간 행하였다. 소결체의 밀도 측정은 아르키메데스 방법을 사용하였고, 유전특성 측정은 LCR meter (Agilent 4285A, USA)를 이용하였으며, 압전 특성은  $d_{33}$  meter(PIEZOTEST, PiezoMeterSystem PM100)를 이용하여 측정하였다.

그림 1은 PZT-PNN-Fe 조성의 압전세라믹 바이몰프 액추에이터를 이용한 에너지 하비스팅 시스템과 바이몰프 액추에이터에 사용된 압전세라믹의 면적을 보여준다. 바이몰프 액추에이터는 그림 1(a)의 면적(dimension)을 가지는 두 개의 압전세라믹 층의 사이에 SUS (Steel Use Stainless) 재질의 내부전극(inner electrode)을 삽입하고 삽입된

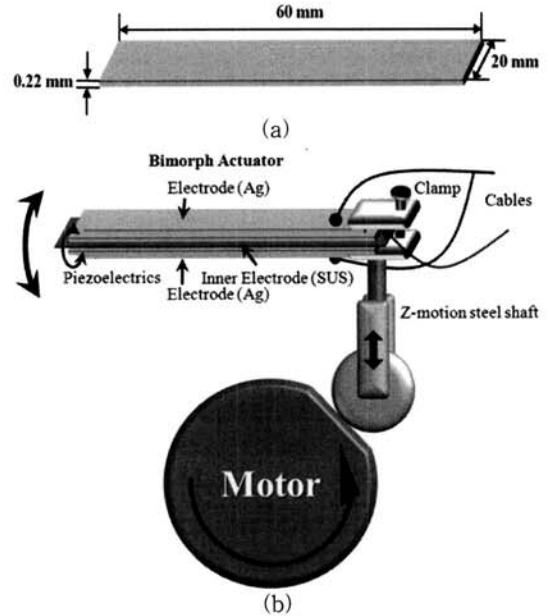


그림 1. (a) 바이몰프 액추에이터의 압전세라믹 크기 (b) 압전 바이몰프 액추에이터를 사용한 에너지 하비스팅 시스템 구조.

Fig. 1. (a) The dimension of piezo-ceramics used for the bimorph actuator and (b) a schematic diagram of the energy harvesting system using the piezoelectric bimorph actuator.

전극과 접촉하지 않은 압전세라믹의 표면이 은으로 코팅된 전극으로 구성되어 있다(그림 1(b) 참조). 바이몰프 액추에이터의 전계에 대한 미소변위를 측정하기 위하여 비접촉식 레이저 (MTI Instruments, Microtrak 7000) 방식을 사용하였다. 그림 1(b)에서 보듯이 모터의 축 끝단을 일부 절단된 디스크 형태로 가공하여 이 부분과 상하 수직운동을 하는 축(Z-motion shaft)과 서로 맞물린다. Z-motion shaft의 반대쪽 끝단은 클램프를 연결하여 바이몰프 액추에이터를 클램프에 물린다. 모터가 일정한 속도로 회전함에 따라 Z-motion shaft가 상하로 주기적으로 움직이고 바이몰프 액추에이터는 반복적인 진동을 하게 된다. 바이몰프 액추에이터가 일정한 주파수를 가지고 상하로 진동함에 따라서 서로 반대방향으로 풀린 압전세라믹으로부터 전기가 발생되며 이 때 발생하는 전기신호는 각 전극에 연결된 케이블을 통해 에너지 하비스팅 회로로 전달된다.

그림 2는 그림 1의 압전세라믹 바이몰프 액츄에이터를 이용하여 생성된 전기신호로부터 에너지 하비스팅을 구현하기 위한 전기적 구동회로 시스템의 개략도를 보여준다. 내부 정전용량 ( $C_p$ )를 가지는 PZT-PNN-Fe 조성의 압전 세라믹 바이몰프 액츄에이터는 모터의 진동에 의하여 교류전류( $i_p$ )가 흐르는 전력을 생성하게 된다. 생성된 교류전류는 AC를 DC로 전환시켜주는 정류기 (AC/DC rectifier)인 브릿지 다이오드 (bridge diode)에 의해서 정류작용을 거치게 된다. 정류된 전기신호는 일시적으로 정류전압  $V_{rec}$ 를 가지는 캐패시터  $C_o$ 에 저장되었다가 DC/DC 컨버터 (converter)를 거쳐 최종적으로 에너지 저장 장치에 충전되게 된다. 이때, 충전된 전하량은 switch-off 상태에서는 캐패시터 내부에서 계속 유지되며 switch-on 상태에서 파형의 진폭을 변조시켜 직류전압을 안정적으로 공급하는 PWM 방식의 DC-DC 컨버터를 설계하였다.

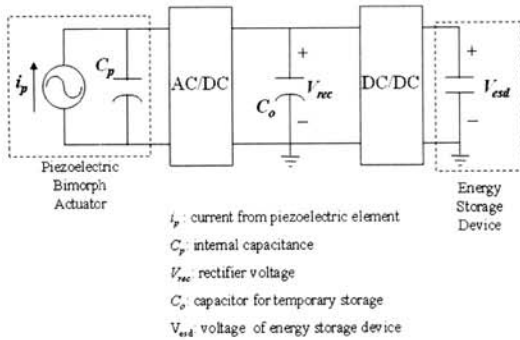


그림 2. 일반화된 압전 에너지 하비스팅 회로.  
 Fig. 2. Generalized piezoelectric energy harvesting circuit.

### 3. 결과 및 고찰

표 1에 벌크 PZT-PNN-Fe 압전세라믹의 밀도, 유전 특성 및 압전 특성을 요약하여 나타내었다. 특히 압전상수  $d_{33}$ 가 705 pC/N으로 높은 변위특성을 가지며, 전기기계결합계수  $k_p$ 역시 71.1 %로 에너지 하베스팅을 위한 액츄에이터 소재로서 우수한 특성을 보여주었다.

그림 3은 PZT-PNN-Fe 세라믹을 이용한 압전 바이몰프 액츄에이터에 DC 전압을 인가했을 때의 변위 특성을 나타내었다. 인가한 전압이 10 V에서

표 1. 1150 °C에서 2시간 소결한 0.6Pb(Zr<sub>0.405</sub>Ti<sub>0.595</sub>)O<sub>3</sub> - 0.4Pb(Ni<sub>1/3</sub>Nb<sub>2/3</sub>)O<sub>3</sub> + 0.25 wt% Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 조성의 밀도, 유전 및 압전특성.

Table 1. Density, dielectric and piezoelectric properties of 0.6Pb(Zr<sub>0.405</sub>Ti<sub>0.595</sub>)O<sub>3</sub> - 0.4Pb(Ni<sub>1/3</sub>Nb<sub>2/3</sub>)O<sub>3</sub> + 0.25 wt% Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> ceramics sintered at 1150 °C for 2 h.

Properties	Value
Bulk density	8.16 (g/cm <sup>3</sup> )
$\epsilon_r$	4669
$\tan\delta$	0.021
$k_p$	0.774
$Q_m$	55
$d_{33}$	810 (pC/N)

100 V까지 증가함에 따라 액츄에이터의 변위는 선형적으로 증가하였으며 약 12.53  $\mu\text{m}/\text{V}$ 의 선형변형률을 나타내었다.

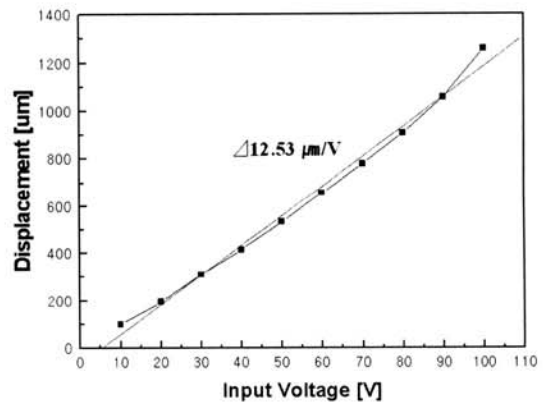


그림 3. 인가전압에 대한 압전 바이몰프 액츄에이터의 변위변화.

Fig. 3. Displacement variation of the piezoelectric bimorph actuator as a function of input voltage.

그림 4는 2000 rpm의 회전속도를 가지는 모터의 상하 진동에 의하여 바이몰프 액츄에이터에서

발생하는 전압의 변화를 보여주고 있다. 모터가 진동을 시작한 지 15초가 경과한 후에는 출력전압이 68 Hz의 주파수를 가지는 규칙적인 특성을 나타내었다. 시간의 경과에 따른 주파수 특성은 모든 측정시간 영역에서 최대 약 2% 이내의 오차범위를 가지고 규칙적으로 변화하였으며 ( $68.0 \pm 0.6$  Hz), 모터의 회전속도를 변화시켰을 경우에도 유사한 결과를 얻을 수 있었다.

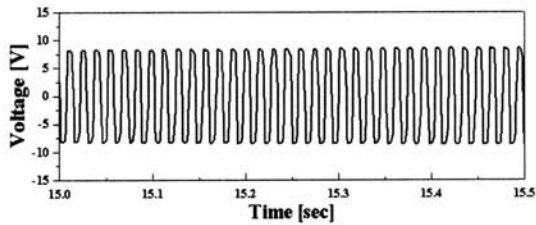


그림 4. 회전속도 2000 rpm에서 진동발생기에 의한 바이몰프 액추에이터의 사인파형태의 출력전압.

Fig. 4. Continuous sinusoidal output voltage of the bimorph actuator excited by the vibration generator (motor) with rotational speed of 2000 rpm.

그림 5는 모터의 회전속도를 변화시켰을 때 바이몰프 액추에이터에서 생성되는 전압의 변화를 보여주고 있다. 모터가 가동되기 시작한 후, 바이몰프 액추에이터의 출력전압이 생성될 때까지 약간의 지연시간  $t_d$ (delaytime)이 존재하였으며,  $t_d$ 는 모터의 회전속도가 500 rpm에서 2000 rpm까지 증가함에 따라 서서히 감소하였다. 또한 모터가 가동된 이후 60초까지 생성된 초기 전압 및 최대 전압의 크기는 모터의 회전속도가 증가함에 따라 모두 비례하여 증가하는 경향을 나타내었다. 또한 최대 전압을 나타낼 때까지 걸리는 시간은 모터의 회전속도가 증가함에 따라 감소하는 경향을 나타내었다. 특히 그림 5(c)에서 보듯이 2000 rpm의 회전속도를 가지는 경우,  $t_d$ 는 약 2.8초를 나타냈으며, 생성된 초기 전압은 약 2.25 V, 최대 전압은 18.5초가 경과한 후 약 10.4 V를 나타내었다. 그러나 회전속도를 2500 rpm 이상으로 더욱 증가시키면 비록 그림에는 나타나지 않았지만 최대 전압이 오히려 감소하는 결과가 나타났다.

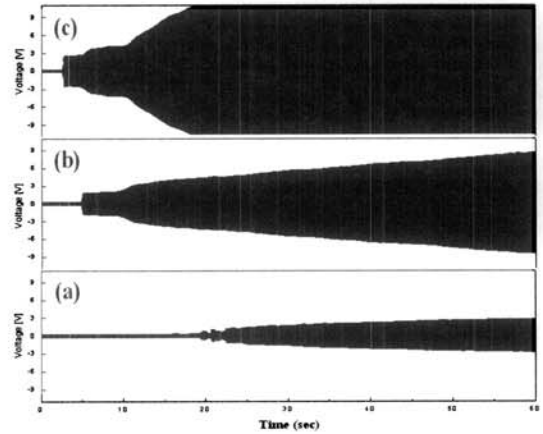


그림 5. 모터 회전 속도에 따른 발생 전압의 변화 (a) 500 rpm, (b) 1000 rpm, and (c) 2000 rpm.

Fig. 5. Variation of the generation voltage with time as a function of the motor's rotational speed: (a) 500 rpm, (b) 1000 rpm, and (c) 2000 rpm.

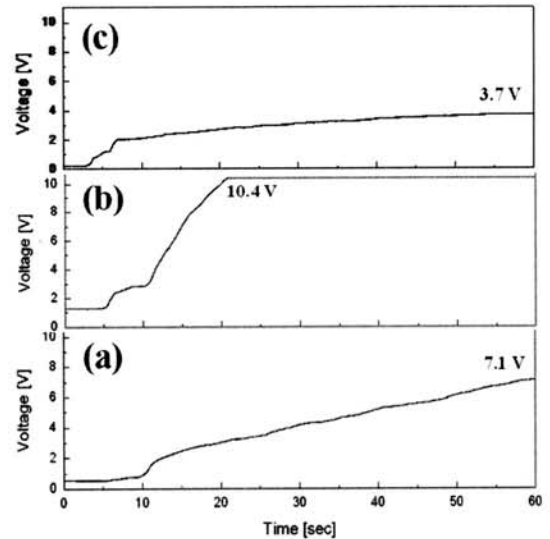


그림 6. 모터 회전속도((a) 1000 rpm, (b) 2000 rpm, and (c) 2500 rpm)에 대한 캐패시터의 출력 전압 변화.

Fig. 6. Variation of the output voltage of the capacitor dependent on the motor's rotational speed of (a) 1000 rpm, (b) 2000 rpm, and (c) 2500 rpm as a function of time.

그림 6은 다양한 모터 회전 속도를 인가하였을 때, 캐패시터에 저장되는 출력전압의 변화를 보여 준다. 그림 6(a)에서처럼, 모터의 회전속도가 1000 rpm인 경우, 10초가 경과하는 동안 캐패시터의 출력전압은 0.5 V 정도로 일정한 값을 유지하다가 10 초가 지난 후부터 시간의 경과에 따라 캐패시터의 출력전압은 서서히 증가하기 시작하였으며 60초가 지난 후에도 완충되지 않았다. 그러나 그림 6(b)에서 보듯이 모터의 회전속도가 2000 rpm으로 증가하면 캐패시터의 출력전압은 6초까지 1.3 V를 유지하다가 그 이후부터 급격히 증가하기 시작하여 20 초에서 10.4 V로 포화된 최대 출력전압을 나타내었다. 캐패시터의 출력 전압이 포화상태를 보이는 것은 사용한 캐패시터의 최대 정전용량의 한계 (470  $\mu$ F)에 기인한 것이다. 그러나 모터의 회전속도가 2500 rpm을 유지하면, 바이몰프 액츄에이터의 최대 출력전압은 오히려 감소하여 약 3.7 V의 최대전압을 나타내었다. 모터의 회전속도가 최적일 때, 바이몰프 액츄에이터 및 캐패시터에서 최대의 출력전압이 나타나는 현상은 바이몰프 액츄에이터가 가지고 있는 고유진동수와 모터의 회전에 기인한 진동수와의 공진에 기인한 것으로 추정된다. 이를 확인하기 위하여 바이몰프 액츄에이터의 주파수 변화에 따른 최대 출력전압의 변화를 표 2에 나타내었다.

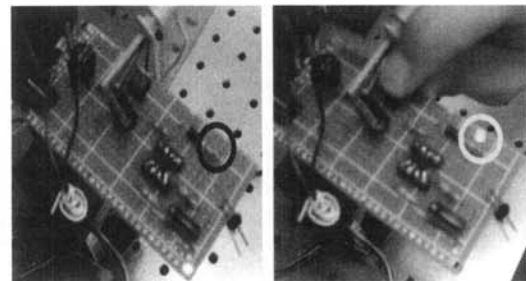
표 2. 모터 회전 속도에 따른 측정된 바이몰프 액츄에이터의 주기와 캐패시터의 최대 발생전압.

Table 2. The measured frequency of bimorph actuator and the maximum output voltage of the capacitor as a function of the motor's rotational speed.

Rotational Speed (rpm)	Frequency (Hz)	Output Voltage Max. (V)
2500	80	3.7
2000	68	10.4
1500	77	8.57
1000	78	8.15
500	82	2.45

모터의 회전속도가 500 rpm에서 2000 rpm까지 증가함에 따라 측정된 바이몰프 액츄에이터의 주

파수는 82 Hz에서 68 Hz까지 감소한 반면, 캐패시터의 최대 출력전압은 2.45 V에서 10.4 V까지 꾸준히 증가하였다. 그러나 모터의 회전속도가 2500 rpm으로 더욱 증가하면 바이몰프 액츄에이터의 주파수는 오히려 증가하였고, 캐패시터의 최대 출력전압은 감소하였다. 즉 캐패시터에 축적되는 최대 출력전압은 모터의 회전속도에 의존하는 것이 아니라 바이몰프 액츄에이터의 진동과 PZT-PNN-Fe 압전세라믹의 고유진동에 의한 공진주파수에 의존하는 것으로 추정된다. 유사하게 압전성의 PVDF (poly vinylidene fluoride) 막을 사용한 바이몰프 형태의 트랜스듀서에서도 공진주파수에서 최대의 출력전압이 구현됨을 관찰할 수 있다[11]. 상기의 표 2에 의하면, PZT-PNN-Fe 압전세라믹 바이몰프 액츄에이터의 공진주파수는 약 68 Hz 정도로 추정된다. 아래 그림 7은 본 연구를 통해서 제작한 PZT-PNN-Fe 압전세라믹 바이몰프 액츄에이터의 공진 조건에서 최대 출력전압의 구현을 통해서 60 mW 급의 LED (Light Emitting Diode)가 구동되는 것을 보여주고 있다. 그림 7(b)의 노란색 원 표시에서 확인할 수 있듯이, Switch-on 상태에서는 60 mW 급의 연두색 LED가 구동됨을 알 수 있다.



(a) LED light OFF (b) LED light ON

그림 7. LED 점등 사진.

Fig. 7. Photograph of LED lighting.

#### 4. 결론

본 연구에서는 PZT-PNN-Fe 압전세라믹 바이몰프 액츄에이터를 이용한 에너지 하비스팅 시스템으로부터 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 인가전압에 따른 바이몰프 액츄에이터는 인가전압의 증가에 따른 변위는 일정한 비율로 증가하였으며 12.53  $\mu$ m/V의 비교적 큰 변형률을 나타내었다.

2. 모터의 회전속도가 증가함에 따라 바이몰프 액츄에이터의 주파수가 감소하다가 다시 증가하는 경향을 보였으며 2000 rpm의 회전속도를 가질 때, 68 Hz의 공진주파수를 가지며, 최대의 출력 전압 특성이 나타났다.
3. 충전회로 설계 및 특성평가를 실시하여 바이몰프 액츄에이터의 공진주파수가 68 Hz 일 때, 캐패시터에 축적된 최대 구동전압은 10.4 V로 60 mW급의 LED를 구동할 수 있었다.  
향후 PZT-PNN-Fe 압전세라믹을 이용한 에너지 하비스팅 시스템은 전자노이즈가 발생되지 않을 뿐 아니라 반영구적으로 사용할 수가 있어서 의료용이나 구조물 진단용 센서의 전원과 같은 소규모 전원 뿐만 아니라, 상용화 개발을 통하여 e-paper, mobile phone, IMT2000, PDA등과 같은 차세대 전자장치의 전원으로의 응용이 기대된다.

### 감사의 글

본 연구는 환경부 환경기술 개발사업의 연구비 지원으로 수행되었습니다.

### 참고 문헌

- [1] N. S. Shenck and J. A. Paradiso, "Energy scavenging with shoe-mounted piezoelectrics", *IEEE Micro*, Vol. 21, No. 3, p. 30, 2001.
- [2] E. S. Leland and P. K. Wright, "Resonance tuning of piezoelectric vibration energy scavenging generators using compressive axial preload", *Smart Mater. Struct.*, Vol. 15, p. 1413, 2004.
- [3] E. Minazara, D. Vasic, F. Costa, and G. Poulain, "Piezoelectric diaphragm for vibration energy harvesting", *Ultrason.*, Vol. 44, p. 699, 2006.
- [4] M. Ericka, D. Vasic, F. Costa, and G. Poulain, "Predictive energy harvesting from mechanical vibration using a circular piezoelectric membrane", *Proc. IEEE Ultrason. Symp.*, p. 946, 2005.
- [5] H. A. Sodano, J. Lloyd, and D. J. Inman, "An experimental comparison between several composite actuators for power generation", *Smart Mater. Struct.*, Vol. 15, p. 1211, 2006.
- [6] T. Starner, "Human-powered wearable computing", *IBM Systmes, J.*, Vol. 35, No. 3&4, p. 618, 1996.
- [7] J. A. Paradiso and T. Starner, "Energy scavenging for mobile and wireless electronics", *IEEE Pervasive Computing*, Vol. 4, No. 1, p. 18, 2005.
- [8] H. J. Sun and J. H. Lee, "Piezoelectric energy harvesting using vibration (in Korean)", *Bulletin of the Korean Institute of Electrical and Electronic Material Engineers*, Vol. 20, No. 4, p. 3, 2007.
- [9] E. K. Lim, C. I. Kim, Y. J. Lee, J. I. Im, and J. H. Paik, "Effects of  $Fe_2O_3$  addition on piezoelectric properties of  $Pb(Ni_{1/3}Nb_{2/3})O_3 - PbZrO_3 - PbTiO_3$  ceramics for actuator applications", *J. of KIEEME(in Korean)*, Vol. 19, No. 10, p. 935, 2006.
- [10] S. Roundy, P. K. Wright, and J. Rabaey, "A study of low vibrations as a power source for wireless sensor nodes", *Comput. Commun.*, Vol. 26, p. 1131, 2003.
- [11] S. Roundy and P. K. Wright, "A piezoelectric vibration based generator for wireless electronics", *Smart Mater. Struct.*, Vol. 13, p. 1131, 2004.
- [12] C. S. Lee, J. Joo, S. Han, J. H. Lee, and S. K. Koh, "Poly (vinylidene fluoride) transducers with highly conducting poly (3,4-ethylenedioxythiophene) electrodes", *Synthetic Metals*, Vol. 152, p. 49, 2005.