

와전류를 이용한 에너지 포집의 개념과 모델

한지훈* · 박성근* · 주광일* · 임승현** · 오일권†

Concept and Model of Energy Harvesting using Eddy Current

Ji-Hoon Han*, Sung-Keun Park*, Gwang-Il Ju*, Seung-hyun Lim**, Il-Kwon Oh†

Key Words: Energy Harvesting(에너지 포집), Magnetic field(자기장), Eddy Current(와전류), Vibration Damping(진동 감쇠)

Abstract

The energy harvesting using smart materials has been extensively investigated to supply electric power to wireless sensor systems. In this paper, the energy harvesting using eddy current was studied with the integrated magnetic cantilever beam system. If a large conductive metal plate moves through a magnetic field which intersects perpendicularly to the sheet, the magnetic field will induce small rings of current which will actually create internal magnetic fields opposing the change. This eddy current that was induced in the coiled conductive sheet from the mechanical vibration was converted to chemical energy by charging batteries. The experimental results show that the eddy current generated the electric power up to max $31.2mW$. Additionally the vibration reduction of the mechanical cantilever beam was observed by the energy dissipation in the electro-magnetic coupled system. The present result shows that the vibration level of the first natural frequency was reduced up to 7.7dB

1. 서론

기계장비에 있어서 센서는 사람의 감각과 같은 역할을 수행함으로써, 기계가 작동하는데 필요한 정보를 수집한다. 이러한 센서가 작동 하는 데에는 전력이 필요 하는데, 이를 얻기 위하여 엔진 등의 동력원으로부터 발생 시킨 동력을 변환하여 사용하는 것이 일반적인 방법이다. 하지만 이와 같은 방법은 실제 필요한 동력이 전력을 생산하기 위하여 소모될 뿐만 아니라 시스템을 설계하는데 있어서 동력과 센서를 전선을 통해 연결해야만 하는 제약사항이 발생한다. 따라서 이에 따

른 불편함을 해결하고자 개발 된 것이 배터리를 통해 전력을 공급하는 무선 센서 이다. 그러나 이 방법 또한 배터리 용량의 한계로 인하여 지속적인 관리가 필요하다는 제약사항이 존재한다. 따라서 이에 대한 문제 인식은 센서 자체에서 동력을 발생시키는 연구에 대한 필요성을 증가시켰으며 piezoelectric power generator는 이러한 연구의 대표적인 예라 할 수 있다.

본 연구에서는 PZT외에 배터리를 대체할 또 다른 에너지원으로 와전류(변화하고 있는 자기장 안의 도체에 전자기 유도로 생기는 소용돌이 모양의 전류)를 이용하였다. 와전류를 이용한 진동 감쇠 연구는 이미 진행된바 있다[1]. 이러한 와전류를 범의 진동 감쇠만을 위해 사용하는 것이 아닌 배터리를 대체할 또 다른 에너지원으로 발전시켜 사용해 보고자 자기장을 이용한 에너지 포집 연구를 진행하였다. 변화하고 있는 자기장 안에 에나멜 와이어를 원형으로 설치하여 와전류를

† 책임저자, 전남대학교 기계시스템공학부

E-mail : ikoh@chonnam.ac.kr

TEL : (062)530-0076 FAX : (062)530-1689

* 전남대학교 기계시스템공학부

** 전남대학교 기계공학과 대학원

발생시키는 도체로써 그리고 와전류 자체가 흐름 통로의 두 가지 역할을 하게 함으로써 와전류를 사용가능 하도록 유도하였으며 도체가 부착된 진동체의 진동 감쇠의 효과도 동일하게 작용하는지 고찰하였다.

2. 자기장을 이용한 에너지 포집의 모델

2.1 와전류(Eddy Current)

(1) 와전류의 유도

도체 판에 직각으로 자기장이 발생하면 도체 판에는 자기장 방향에 대하여 좌회전하는 와전류가 생겨 자기장의 증가를 방해 하려고 한다. 또한 자기장 안에 위치한 도체를 이동시키면 와전류가 생기며 와전류의 자기장은 도체의 이동을 방해한다.

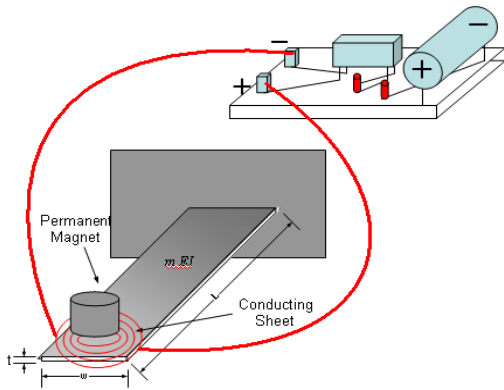


Fig. 1 Cantilever beam in magnetic field generated by permanent magnet and simplified energy harvesting circuit

Fig. 1은 와전류 발생계의 형태를 묘사한 그림이다. 이는 하나의 실린더 형 영구자석과 이에 의하여 발생하는 자기장 내에 위치한 에나멜선, 그리고 캔틸레버 빔으로 구성되어 있다. Fig. 2(a)와 같이 두께 δ 의 에나멜선이 거리 d 만큼 이격된 상태에서 속도 v 가 발생하였을 경우, 자기력장 내에서 빔의 표면이 아래로 굽어지고 전도된 에나멜선에 전기장이 생성된다. 이때 진동은 수직 방향이기 때문에 자기장의 수직방향 성분은 와전류의 생성에 영향을 미치지 않는다. 따라서 전도체 위의 전기장은 자기장의 수평방향 성분인 B_y 에 의존한다. Fig. 2(b)에 보이는 바와 같이 자기

장에 의하여 발생한 와전류는 전도된 에나멜선의 x-y평면을 순환하는 형태로 발생한다. 표면 전하

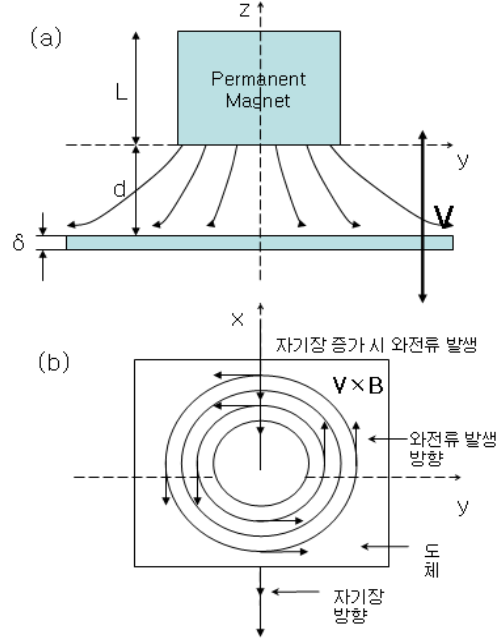


Fig. 2 (a)Magnetic field and (b)the eddy currents induced in the cantilever beam[1]

가 무시 할 만하다고 가정할 때, 전류밀도 J 는 수직방향으로 움직이는 전도된 시트에 유도되며 이는 (1)과 같다. 자기력선속 밀도(B)가 일정하다면, 캔틸레버 빔의 속도가 증가할수록 와전류의 발생이 증가하고, 와전류의 증가는 발생교류전압을 증가시킨다.[1]

$$J = \sigma(v \times B) \quad (1)$$

감쇠력은 전류 밀도 J 와 자기력선속 밀도(B)의 외적을 부피로 적분하여 나타낸다. 최종식은 (2)와 같다. [1]

$$F = \int_V J \times B dV = -k\sigma\delta v \int_0^{2\pi} \int_0^r y B_y^2(y, l_g) dy d\phi \quad (2)$$

$$= -k2\pi\sigma\delta v \int_0^r y B_y^2(y, l_g) dy$$

식 (2)를 살펴보면 감쇠력의 증가에 중요한 요소에는 전도성(σ), 캔틸레버 빔의 두께(δ), 그리고 캔틸레버 빔의 Z방향속도(v)가 있으며, 이 3요소가 일정하다면 자석과 캔틸레버 빔 사이의 거리(lg)에 따라 감쇠력이 증가함을 알 수 있다. 이를 이용하여 와전류에 의한 진동감쇠 효과를 알

아보았다.

(2) 와전류의 추출

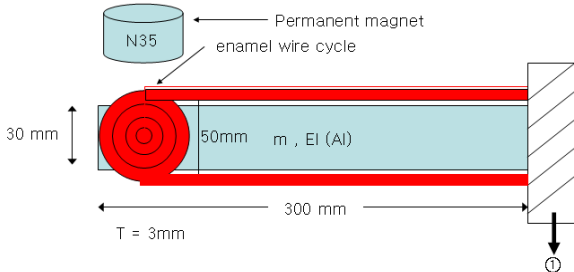


Fig. 3 Schematic diagram of the integrated magnetic cantilever beam system.

Fig. 3에서 보는 바와 같이 캔틸레버 빔에 에나멜선을 부착시켰으며 그림에서 표시된 ①부분을 shaker에 고정하였다. 자석은 Table 1에 보이는 N35 자석을 사용하였다.

에나멜선은 자기장 안에서 와전류를 발생 시키는 도체로써의 역할과 발생된 와전류가 에너지 포집 회로로 흘러 들어가는 통로의 역할을 동시에 수행 하게 된다. 실제 실험에서는 Shaker (VG100M-4, VTS)를 통하여 캔틸레버 빔을 진동 시킴으로서 와전류를 발생하였으며 이 때 발생된 와전류는 에나멜선을 타고 흐르게 된다. 발생된 와전류는 캔틸레버 빔의 진동 방향에 따라서 극성이 바뀌는 교류파형으로 출력되므로 이 에너지를 실제에 이용하기 위해서는 정류를 통하여 직류로 변환하는 과정이 필요하다.

(3) 와전류의 정류

▶ 정류기의 모델링과 시뮬레이션

캔틸레버 빔의 진동에 의하여 발생한 와전류를 배터리에 저장하기 위해서는 1.2V이상의 직류전압이 요구된다. 직류전압은 발생된 교류전압을 정류하여 얻을 수 있는데, 이때 실험에 드는 비용과 시행착오를 줄이기 위해 Matlab을 통한 모의실험을 시행하였다. 따라서 Fig. 4와 같이 Matlab을 이용하여 정류회로의 모델을 구성하였으며 그 구성조건으로서 교류전압 소스는 1.6V의 12.0Hz로 설정하였고, Diode(1N5817)는 forward voltage drop = 0.45V, 저항은 20kΩ 그리고 캐패시터는 400μF으로 설정하였다.

Table 1 The Properties of N35 cylinder type permanent magnet

Property	Value
Remanence	BR(GS) 11.8~12.5
	BR(MT) 1.18~1.25
Max. Energy(BH)	MGoe 33~37
Working Temperature	≤ 80°C
Size	50φ×10t (mm)

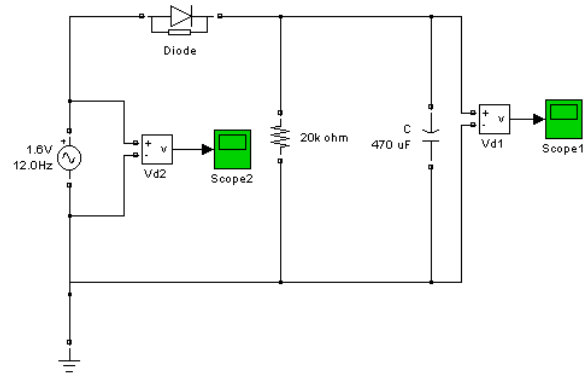


Fig. 4. Schematic of rectifier circuit with MATLAB.

Matlab을 이용한 모의실험을 통하여 Fig. 5와 같은 교류전압에 대한 직류전압을 얻었다. 입력

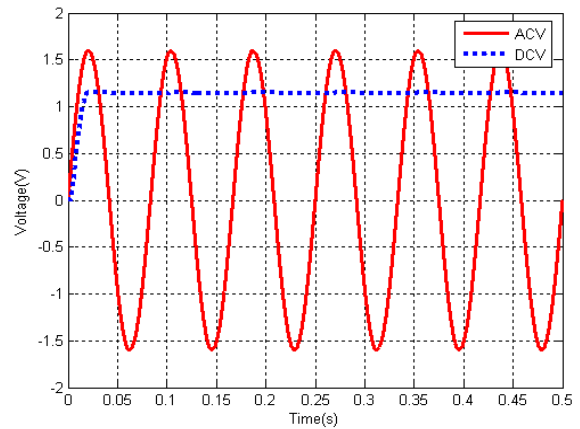


Fig. 5. The result of simulation with Matlab

조건인 1.6V의 교류전압은 정류를 통하여 1.15V의 직류전압으로 출력됨을 알 수 있다. 배터리를 충전하기 위해서는 1.2V이상의 직류전압이 필요한데, 모의실험 결과 1.6V이상의 교류전압을 인가할 경우 배터리 충전이 가능함을 알 수 있었다.

3. 에너지 포집 실험

3.1 실험 방법

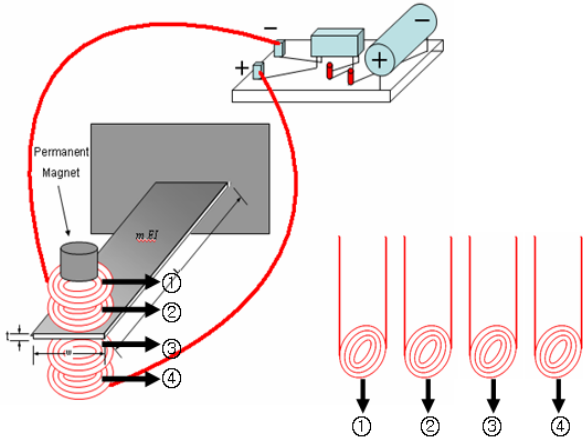


Fig. 6 Modeling of cantilever beam in magnetic field for increasing eddy current.

캔틸레버 빔의 진동은 가진기(shaker)를 통하여 이루어진다. 가진기는 임의함수 발생기 (AFG3022, Tektronics)에 캔틸레버 빔의 제1차 공진주파수와 입력전압을 입력하여 작동하였다. 부착된 에나멜선의 수에 따라 캔틸레버 빔의 무게가 바뀌므로 인하여 공진주파수가 바뀐다. 따라서 각각의 경우에 대하여 임의파형 발생기에 입력하는 주파수는 변화된 공진 주파수와 일치하도록 설정하였다. Fig. 6과 같이 캔틸레버 빔에 여러 개의 에나멜선을 직렬 연결함으로써 발생하는 교류 전압의 크기를 높일 수 있다. 배터리의 충전을 위해서는 교류전압을 정류기에 통과함으로써 1.2V의 직류전압으로 정류하여야 한다. 이를 위해서 Fig. 4에 보이는 시뮬레이션 모델과 동일한 에너지포집 회로를 제작하여 교류전압을 직류 전압으로 정류한 후 Table 2의 배터리 충전하였다. 배터리에 시간 당 충전된 전압과 전류는 오실로스코프(TDS-2024, tektronics)와 검류계를 이용하여 측정하였다.

3.2 와전류의 증가를 위한 방법

발생 전압과 와전류의 증가를 위해서 Fig. 6에 나타난 바와 같이 에나멜선을 캔틸레버 빔 상/하

Table 2 Battery Type.

Property	Value
Voltage	1,2 V
Capacity	280 mAh
Typical Capacity	300 mAh
Weight	11 g

단부에 각각 1개씩, 2개씩, 4개씩 부착하여 실험을 진행하였다. 결국 에나멜선을 2개, 4개, 8개를 부착하여 실험을 진행하였고, 각각의 에나멜선은 직렬로 연결하였다.

4. 결과

4.1 와전류를 이용한 전압발생

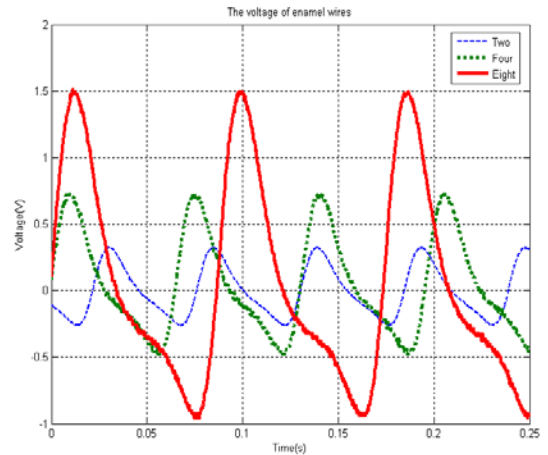


Fig. 7 Experimental output voltage waveforms obtained with each enamel wires.

Fig. 7과 8은 에나멜선수에 따른 발생한 교류전압과 정류된 직류전압을 나타낸다. 8개의 에나멜선에서 1.2V의 직류전압을 얻었고, 실험에서 얻은 데이터는 Fig. 9에 나타내었다. 그리고 1.2V의 직류전압을 이용하여 배터리를 충전하였으며 결과는 Table 2와 같다.

Table 3 Output signal according to number of enamel wire

Number of enamel	output signal				
	frequency	AC	DC	mA	mW
2개	18.4Hz	328mv	164mv	2.2mA	0.36mW
4개	15.3Hz	720mv	480mv	8.0mA	3.84mW
8개	12.0Hz	1480mv	1200mv	26.0mA	31.2mW

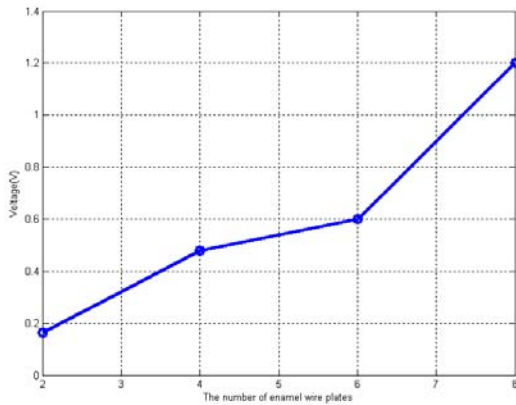


Fig. 8 Output Direct current voltage obtained with each enamel wires.

4.2 배터리의 충전

배터리의 충전은 가장 높은 DCV와 mA를 얻을 수 있는 enamel wire가 8개가 부착 된 캔틸레버 빔을 사용하였다.

▶ Input frequency=12.0Hz , Input Voltage= 1.0V

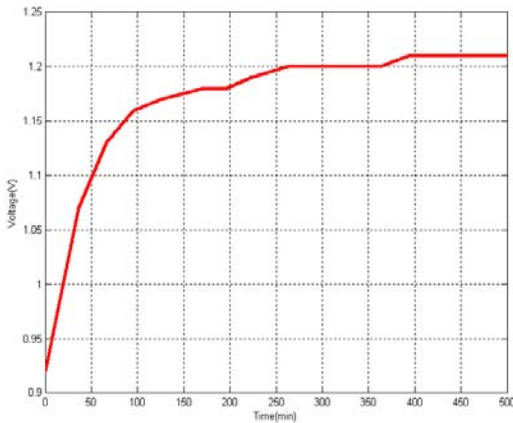


Fig. 9 Charge history of a 300mAh battery charged with eight enamel wires

Fig. 9는 배터리의 시간에 따른 충전 전압을 나타내고 있다. 1.2V의 직류전압을 이용하여 battery를 10시간동안 충전하였다. 시간이 지남에 따라 배터리에 충전되는 전하는 1.18V에서부터 완충되기까지 완만한 곡선을 그리며 충전된다.

4.3 공진 주파수에서 진동 감쇠 현상

캔틸레버 빔의 진동을 레이저 변위계를 이용하

여 공진주파수에서 와전류 발생과 에너지 포집에 의한 진동 감쇠량을 조사하기 위해 주파수 응답 함수를 실험적으로 구하여 비교하였다. Fig. 11을 보면 1차 공진은 11.8Hz에서 발생하였고, 2차 공진은 122Hz에서 발생하였다.

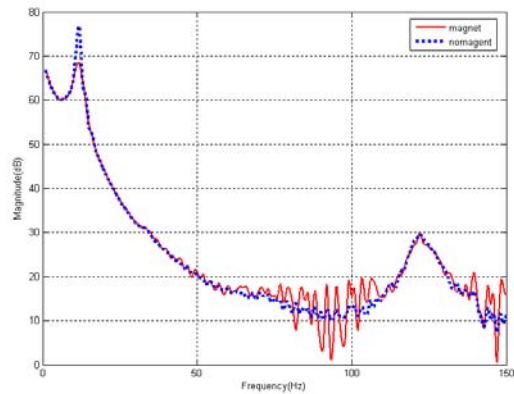


Fig. 10 Frequency response function of the cantilever beam with magnet and without magnet.

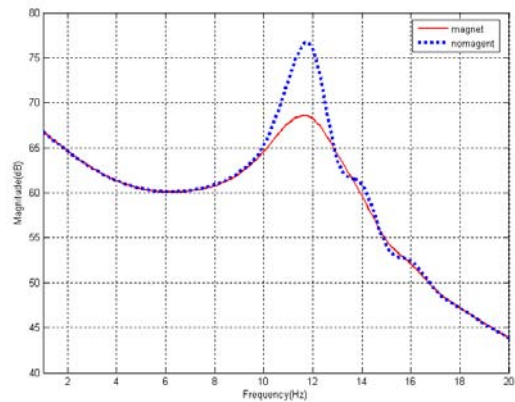


Fig. 11 Vibration reduction at the first resonance frequency.

Fig. 10과 11을 분석해 본 결과 1차 공진 주파수에서 자석이 없는 경우 75.91dB이던 경우 자석 부착에 따른 에너지 포집에 의해 68.22dB로 진동이 감쇠되었다. 즉 와전류에 의한 에너지 포집으로 7.7dB의 진동감쇠가 발생하였다.

Fig. 12는 2차 공진 주파수를 나타내고 있다. 배터리의 충전에 필요한 만큼의 전압차를 발생시키는데 사용한 8개의 에나멜선의 무게로 진동이 큰 1차 공진 주파수에서의 진동 감쇠 현상은 관찰 되었으나 상대적으로 진동이 적은 2차 공진 주파수에서의 진동감쇠 현상은 관찰되지 않았다.

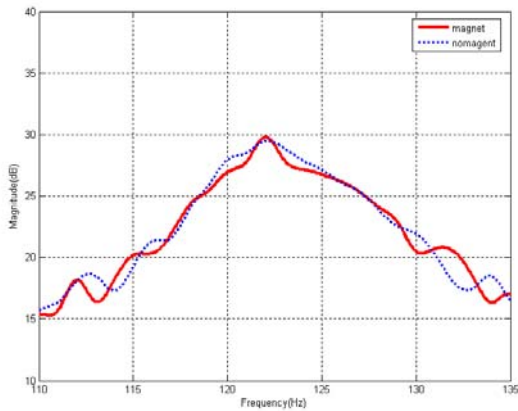


Fig. 12 Experimentally measured magnet(solid) and no-magnet(dot) second resonance frequency

5. 결론

본 연구에서는 와전류를 이용하여 배터리를 충전하고 진동체의 진동감쇠 효과에 관하여 고찰하였다. 와전류 발생계에서 도체의 역할과 발생된 와전류가 흐를 수 있는 통로의 역할을 동시에 수행 하는 에나멜선을 캔틸레버 빔에 와전류의 발생 방향과 같은 방향으로 감아 부착 한 후 캔틸레버 빔을 진동시킴으로써 와전류를 얻을 수 있었다. 그리고 이 와전류를 교류에서 직류로 변환 시켜 배터리에 저장하는데 성공하였다. PZT와 같은 스마트 재료를 이용한 에너지 포집에 대한 연구는 진행 되어진 바 있지만 와전류를 에너지 원으로 처음 사용한 연구라는 점에서 그 의미가 크다고 생각된다. 이는 이 시스템을 진동체에 부착시킴으로써 진동체에 사용되는 무선센서 등에 전기 에너지를 공급하는 가능성을 보여주고 있다.

후 기

본 연구는 NURI 사업의 지원으로 수행 되었다.

참 고 문 헌

- (1) Henry A. Sodano 등, 2005, "Concept and model of eddy current damper for vibration suppression of beam", *Journal of Sound and Vibration* 288, pp.1177~1195.
- (2) Elic Lefevre 등, 2005, "Piezoelectric Energy Harvesting Device Optimization by synchronous

Electric charge extraction, pp.865~870

(3) T . H HG 등, 2005, "Sensitivity Analysis Energy Harvesting for a Self-Powered Piezoelectric Sensor", *Journal of Intelligent material systems and structures*, pp.793~796

(4) D.A Kienholtz 등, 1994, "Demonstration of solar array vibration suppression", *Proceedings of SPIE's Conference on Smart Structures and Materials*, Vol. 2193, pp.14~16.

(5) P.J.Cornwell 등, 2005, "Enhancing Power Harvesting using a Tuned Auxiliary Structure", *Journal of Intelligent material systems and structures*, Vol. 16 pp.825~834

(6) Y.B.Jeon 등, 2005, "MEMS power generator with transverse mode thin film PZT", *Sensors and Actuators*, pp.16~22.

(7) Elie Lefevre 등, 2005, "Piezoelectric Energy Harvesting device optimization by synchronous electric charge extraction", *Journal of Intelligent material systems and structures*, Vol. 16, 865~876