

압전소자를 이용한 에너지 수확에 관한 연구 A Study on Energy Harvesting Technique using Piezoelectric Element

윤소남 · 김동건
S. N. Yun and D. G. Kim

(접수일 : 2009년 3월 2일, 수정일 : 2009년 4월 15일, 채택확정 : 2009년 6월 18일)

Key Words : Piezoelectric Element(압전소자), Energy Harvesting(에너지 수확), Piezoelectric Effect(압전효과), Energy Storage Circuit(에너지 저장회로)

Abstract : This paper presents the energy harvesting technique which is carried out by vibration system with a piezoelectric element. In this study, low frequency characteristics of the piezoelectric element bonded to the aluminum cantilever were experimentally investigated. The piezoelectric element of size of 45L×11W×0.6H and piezoelectric constant(d_{31}) of $-180 \times 10^{-12} \text{C/N}$ was used. The material of cantilever is an aluminum and two kinds of cantilever of which dimensions are (150, 190)[mm]×13[mm]×1.5[mm] were experimented, respectively. The cantilever was fixed on the magnetic type vibrator and the vibrator was operated by power input with a sine wave. The characteristics of frequency and mass variation of cantilever end part such as 0, 2.22, 4.34, 5.87, 8.66, 11.01[g] were investigated.

Finally, this paper suggests a method of generating electrical energy with a piezoelectric element using wind, an energy source that is easily applied and from which we can obtain "clean" energy.

1. 서 론

VLSI(Very Large Scale Integration)와 CMOS공정과 같은 반도체 기술의 발전으로 저전력형 소자와 모듈 개발이 가능케 되어 센서에 의해서 계측된 데이터를 먼 곳까지 전송이 가능해져 무선 센서 네트워크화가 촉진되었다. 2010년부터 상용화 될 유비쿼터스 센서 네트워크(USN)는 여러 장소에 부착된 태그와 센서노드로부터 사물 및 환경 정보를 감지, 저장, 가공 그리고 통합하고 상황 인식 및 지식 콘텐츠 생성을 통하여 언제, 어디서, 누구나 원하는 맞춤형 지식 서비스를 자유로이 이용할 수 있는 첨단 지능형 사회의 기반 인프라이다. USN에 사용되는 VLSI와 CMOS 공정으로 제작된 반도체 회로는 외부에서 전원을 인가하여 사용하거나 배터리를 이용하여 회로에 전원을 공급해 주어야만 동작할 수

있다. 통상적으로 USN에 사용되는 무선 센서 시스템은 배터리를 사용하여 회로에 전원을 공급해주는 방식을 사용하는 것으로 알려져 있다^{1,2)}. 현재 개발된 배터리의 용량으로 무선 센서 시스템에 전원으로 사용한다면 1년에서 3년 정도에 사용기간을 갖는 것으로 알려지고 있다. 무선 센서 시스템에 적합한 전원장치의 조건은 안정적인 전원 공급이 가능하며, 유지 보수를 위한 노력과 비용이 전혀 들지 않으면서 무선 센서 시스템에 전원을 공급할 수 있어야 한다. 이러한 조건을 충족시키기 위해 자가발전이 가능하면서 작동 수명이 반영구적이고, 설치 후 전원이나 배터리의 교체가 필요 없는 태양광·열, 진동, 풍력과 같은 생활 속에서 무의식적으로 버려지는 에너지를 활용하여 쉽고 간단하게 사용 가능한 전기에너지로 변환시키는 에너지 수확에 대한 연구가 필요하다. 이와 같은 연구 예로서, 현재 사람이 움직이는 동안 신발에 압전소자를 삽입하여 전력을 얻을 수 있는 기술³⁾, 무릎의 관절사이에 압전소자를 삽입하여 전력을 생산하여 사용할 수 있는 방법⁴⁾, 벤더형이 아닌 심벌즈 구조를 갖는 압전

윤소남(책임저자) : 한국기계연구원 에너지플랜트연구본부
E-mail : ysn688@kimm.re.kr, Tel : 042-868-7155
김동건 : 한국기계연구원 에너지플랜트연구본부

소자를 이용하여 에너지를 수확하는 방법⁵⁾ 등 많은 연구들이 진행되고 있다.

압전소자에 기계적 에너지를 가할 수 있는 에너지원으로 건물이나 교량과 같은 대형 구조물, 도로, 차량의 진동이나 기계설비의 진동, 자연에너지(풍력, 파력, 조력 등) 등이 있다^{6,7)}. 이러한 에너지원 중에서 풍력을 에너지원으로 사용하고, 풍력과 기계적 에너지를 이용하여 전기에너지로 변환할 수 있는 전자석, 정전기, 압전 소자 중 높은 에너지 밀도를 갖는 압전소자를 결합하여 사용하게 된다면, 구조가 간단하며 소형의 발전기를 제작이 가능하다는 특징이 있다. 하지만, 압전 소자는 매우 단단하여 작은 진동에 의해서는 에너지를 발생시킬 수 없을 뿐만 아니라 큰 변형을 가하게 되면 깨져버리는 단점을 갖고 있다. 이런 단점 때문에 본 연구에서는 압전 소자를 이용한 에너지 수확에는 압전 소자에 가해지는 기계적 에너지를 효과적으로 압전 소자에 전달하기 위하여 압전캔틸레버(탄성이 우수한 긴 관위에 압전 소자를 부착하는 형태)를 적용하였다.

본 연구의 목적은 기존 압전 발전기의 압전 소자가 잘 깨지는 단점을 보완하기 위해 압전캔틸레버를 적용함으로써 무선 센서 시스템에 안정적인 전원공급이 가능하도록 하여 센서 네트워크 사용기간을 연장할 수 있고, 유선을 이용할 때 배선의 문제와 이 시스템을 유지하기 위한 비용의 문제를 해결하기 위함이다.

압전캔틸레버형 에너지 변환 시스템의 특성을 알아보기 위하여 전자석식 바이브레이터(Vibrator)를 이용한 에너지수확장치를 꾸며 실험을 수행하였으며, 일반적으로 사용되는 PZT계 압전 소자를 이용하여 캔틸레버의 길이 및 끝 질량 변화에 따른 출력전압 특성과 에너지를 효과적으로 변환하기 위한 회로에 대한 연구를 수행하였다

2. 실험 방법

본 연구에서는 풍차에 증가하는 모델로서 본 연구에서는 바람을 대신하여 유사한 기계적 에너지를 캔틸레버에 가할 수 있는 실험장치인 바이브레이터를 이용하여 실험을 수행하였다.

Fig. 1은 바이브레이터를 이용한 실험장치 및 측정 장비의 개략도이다. 바이브레이터를 이용한 실험장치는 캔틸레버형 압전세라믹에 기계적 에너지를 가하여 전기적 에너지로 변환될 때 압전세라믹에서

출력되는 전압, 전류, 전력을 측정하기 위한 것으로, 바이브레이터에 일정한 파형을 넣어줄 수 있는 Function generator, 일상생활에서 발생하는 진동을 일으키는 Vibrator와 Vibrator용 Amp.로 구성되어 있다.

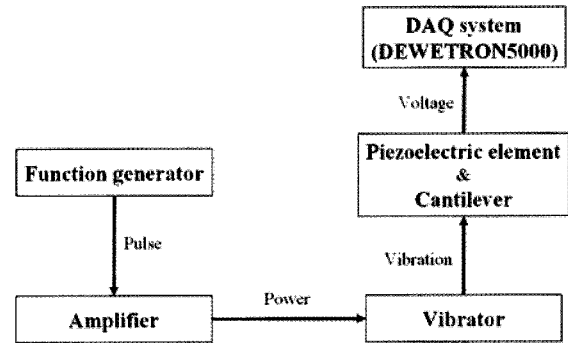


Fig. 1 Block diagram of experimental setup

2.1 바이브레이터를 이용한 실험장치

Fig. 2는 실험에서 사용하기 위하여 제작된 캔틸레버의 개략도이다. 본 연구에서 사용한 캔틸레버의 재질은 탄성이 우수한 알루미늄을 사용하였고, 기판의 크기는 $L \times 13 \times 2$ [mm]이며, 길이 L의 크기를 150, 190 [mm]으로 제작하였다. 사용된 압전소자는 Hard PZT계 Bimorph형 세라믹(PI, PL140.10, Piezoelectric constant(d_{31}) = -180×10^{-12} [C/N], Coupling factor(k_p) = 55%, Piezoelectric capacitance(C_p) = 4.0 [μ F])으로 크기는 $45 \times 11 \times 0.6$ [mm]이다.

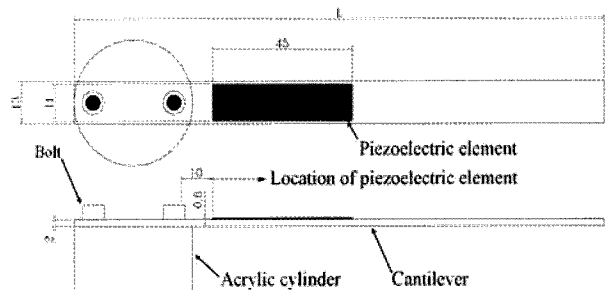
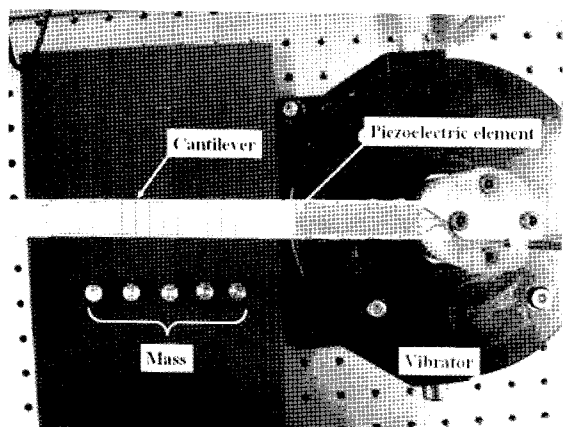


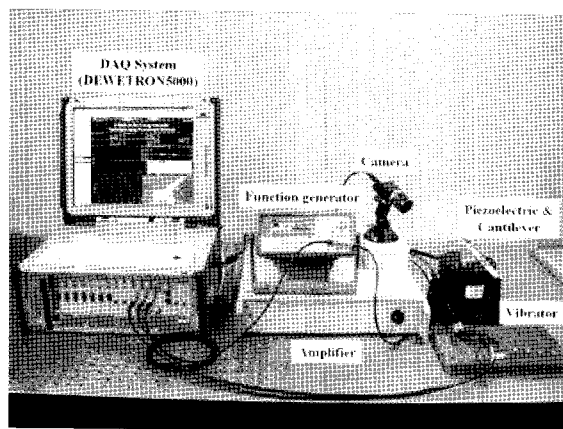
Fig. 2 Schematic diagram of cantilever with a piezoelectric element

Fig. 3은 Fig. 1과 Fig. 2에 나타난 캔틸레버에 압전소자를 부착한 압전캔틸레버를 바이브레이터에 고정된 실험 장치 및 측정 장비를 보여주는 사진이다. 바이브레이터를 이용한 실험 장치는 압전캔틸레버에 기계적 에너지를 가하여 전기적 에너지로 변

환될 때 압전 소자에서 출력되는 전압을 측정하기 위한 것으로, 일상생활에서 발생하는 진동을 일으킬 수 있는 바이브레이터(BVMIF, HEV-50)와 바이브레이터에 전원을 공급해주는 바이브레이터용 Amp. (ELIEZER, EA155), 바이브레이터에 일정한 파형을 넣어줄 수 있는 함수발생기(Agilent Technologies, 33220A)로 실험 장치를 구성하였다. 또한, 함수발생기에서 출력되는 신호와 기계적 에너지에 의해 압전 소자에서 출력되는 전압과 에너지를 저장하기 위한 회로의 특성을 확인하기 위하여 DAQ system (DEWETRON Ges.m.b.H., DEWETRON5000)을 사용하여 측정하였다.



(a) Part view of vibrator with a piezoelectric cantilever



(b) Total view of experimental setup

Fig. 3 Photo view of experimental setup

2.2 바이브레이터를 이용한 실험방법

실험은 알루미늄으로 제작된 캔틸레버 위에 Fig. 2와 같이 캔틸레버에 아크릴 원통과 고정하기 위하여 뚫어 놓은 구멍(Hole)에서 10[mm]정도 떨어진 곳에 압전 소자를 Fig. 3에 (a)처럼 고정하고, 볼트를

이용하여 캔틸레버와 아크릴 원통을 고정시킨 후 바이브레이터의 동작부 위에 아크릴 원통을 고정시킨다.

바이브레이터를 구동하기 위하여 바이브레이터용 Amp.에서 나오는 출력단자를 바이브레이터에 연결한 후, 일정한 파형을 입력시킬 수 있는 함수발생기의 출력단자를 바이브레이터용 Amp.에 연결하였다. 함수발생기에서 출력되는 신호는 $\pm 1[V_{pp}]$ 로 하였으며, 바이브레이터용 Amp.의 출력전압을 $\pm 12[V]$ 에 맞춰 바이브레이터를 구동할 수 있도록 하여 실험을 수행하였다. 이때 함수발생기에서 출력되는 신호의 주파수는 바이브레이터의 주파수 범위에서 벗어나지 않는 10~200[Hz]까지 가하도록 하였으며, 캔틸레버의 고유 진동수는 함수발생기의 주파수를 0.1[Hz] 단위로 변화시켰다. 이때 압전소자에서 출력되는 전압이 최대가 됐을 때 함수발생기의 주파수 값을 고유 진동수로 결정하였다.

압전캔틸레버의 인가 조건인 캔틸레버의 길이와 끝 무게의 변화에 따른 출력되는 전압의 특성을 알아보기 위해 캔틸레버의 길이를 150, 190[mm] 중의 한 가지를 선택하여 캔틸레버 끝 부분에 0, 2.22, 4.34, 5.87, 8.66, 11.01[g]을 순서대로 바꿔가면서 실험을 수행하였다. 또한, 압전소자에서 출력되는 에너지를 효율적으로 저장하기 위하여 Fig. 4에 나타난 회로의 정류를 위한 브릿지 다이오드와 정류된 전압을 직류로 변화시키기 위한 콘덴서 용량을 조절하여 효율적으로 저장할 수 있는 간단한 에너지 변환회로를 구성하여 실험을 수행하였다.

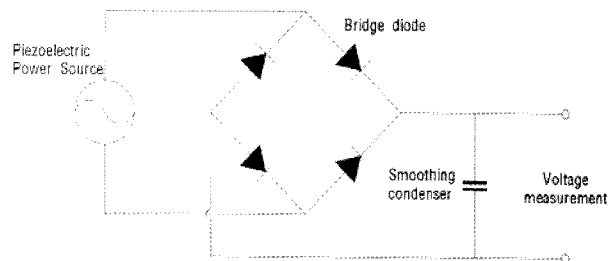


Fig. 4 Conversion circuit for energy harvesting of piezoelectric energy harvesting system

데이터 수집 도중에 데이터에 섞여 오는 노이즈를 제거하기 위하여 DAQ system에 내장된 IIR Filter이며, IIR Filter의 Type은 Low pass, Prototype은 Butterworth로 두고 Order 6, FHigh 200Hz로 설정하여 출력되는 전압을 측정하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1 캔틸레버 길이 및 끝 질량 변화에 따른 출력전압 특성

Fig. 5와 Fig. 6은 길이가 150[mm]과 190[mm]인 캔틸레버에 압전 소자를 “0” 위치에 고정하였을 때 주파수 변화에 따른 출력전압의 특성 결과와 압전소자에서 출력되는 전압에 의해 계산된 에너지를 나타낸 것으로, Fig. 5와 Fig. 6에 (a), (b), (c), (d), (e), (f)는 각각 캔틸레버 끝 부분에 0, 2.22, 4.34,

5.87, 8.66, 11.01[g]의 질량을 달았을 때, 출력전압과 출력에너지를 peak to peak값을 나타낸 것이다.

Fig. 5와 Fig. 6에서 얻어진 결과에 의하여 에너지의 크기를 식 (1)에 의해 계산하였다.

$$E_p = \frac{1}{2} C_p V^2 \quad (1)$$

여기에서, E_p : 압전소자에서 출력되는 에너지[J], C_p : 압전소자의 전기용량[F], V_p : 압전소자의 출력전압[V]이다. 식(1)로부터 계산된 에너지는 Fig. 5와 Fig. 6에 굵은 선으로 표시를 하였다.

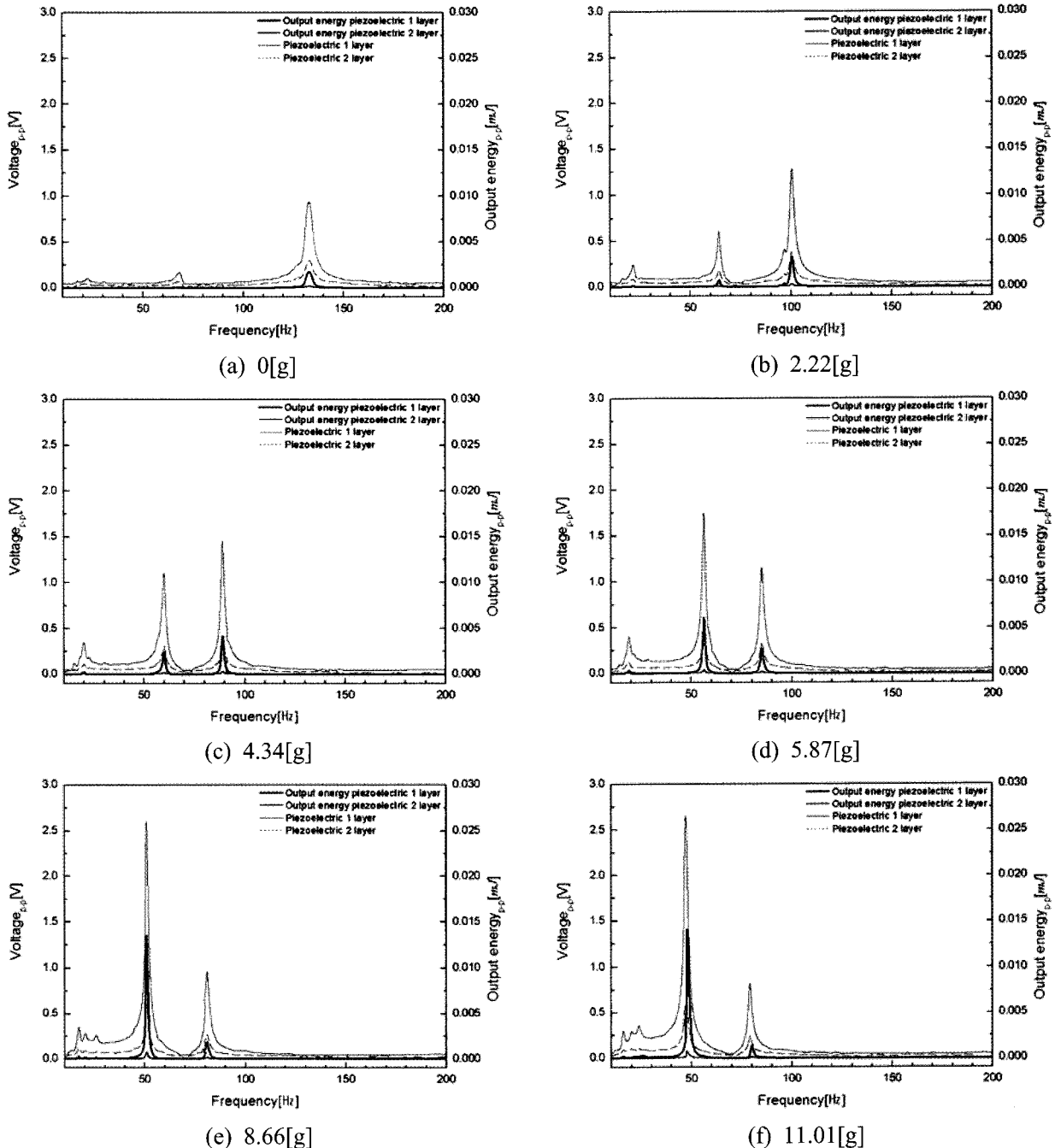


Fig. 5 Characteristics of output voltage by mass variation(cantilever length:150[mm])

본 실험에서 나타난 특성은 캔틸레버 끝의 질량이 늘어날수록 고유 진동수가 낮아지면서 출력전압 및 에너지의 크기가 점점 커지는 경향을 보이고 있는데, 그 이유는 고유진동수가 낮을수록 캔틸레버의 변위가 커지고, 변위크기에 비례하여 출력특성이 커지는 압전소자의 특성 때문이다. Fig. 5에 나타난 캔틸레버의 길이가 150[mm]일 때에는 출력전압 및 에너지의 크기가 꾸준히 증가하였지만, Fig. 6에 나타난 캔틸레버의 길이가 190[mm]일 때 캔틸레버 끝에 질량을 늘려가며 실험한 결과 캔틸레버의 고

유 진동수가 37[Hz] 이상에서는 출력되는 전압의 크기가 꾸준히 증가하였지만, 고유 진동수가 37[Hz] 미만에서는 큰 변화가 없는 것으로 나타났다. 또한, 압전소자를 동일 지점에 고정하고 캔틸레버의 길이와 추의 무게를 변화시키면 압전소자에 가해지는 응력이 크기가 변하는 것이 확인되었고, 캔틸레버의 길이가 길수록, 캔틸레버 끝단에 장착한 추의 무게가 클수록 고유 진동수가 낮게 나타나고, 이때 최대응력이 발생하는 것을 확인하였다. 따라서 구조해석틀을 이용하여 최적의 캔틸레버 형태와 길이 및

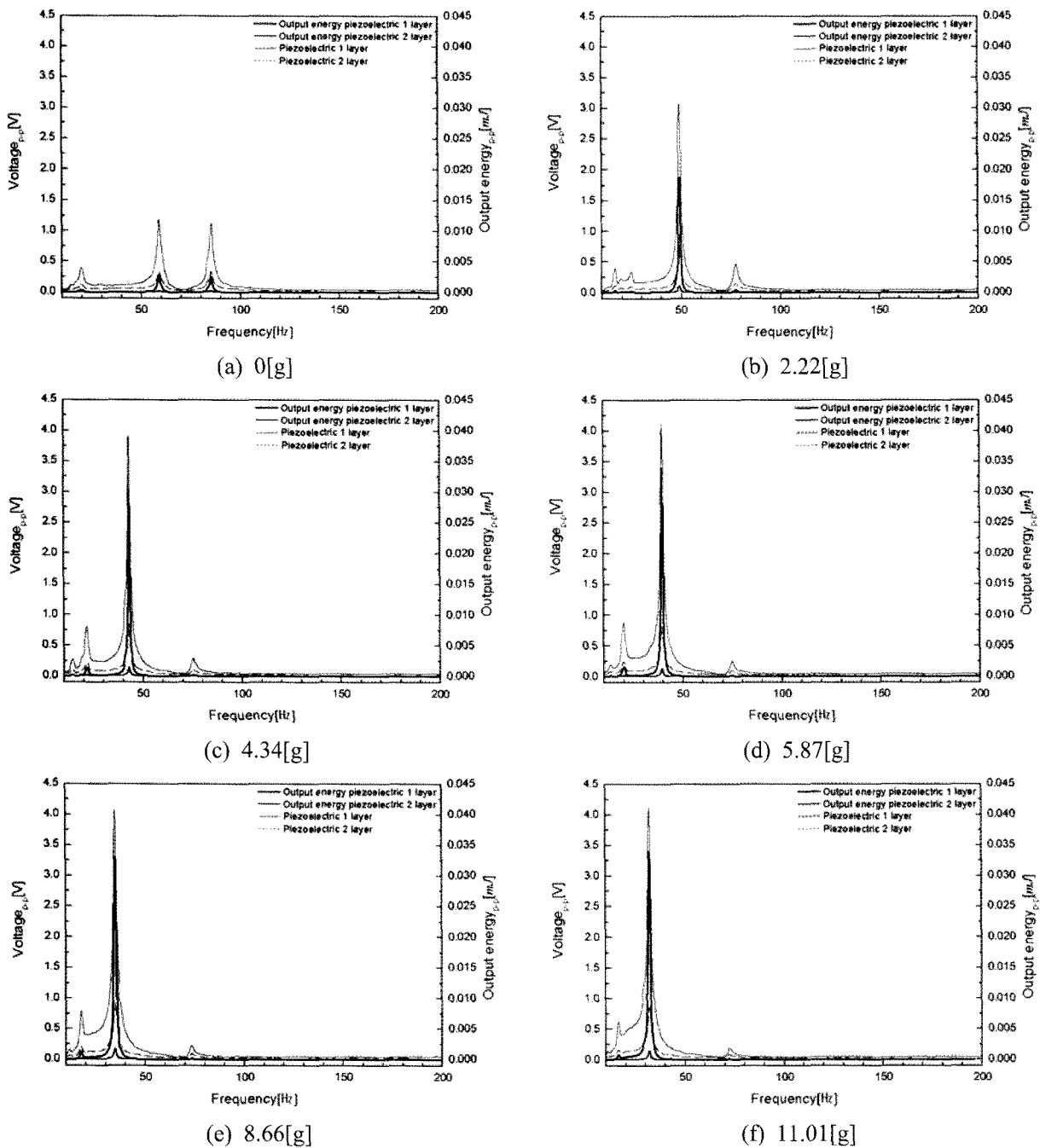
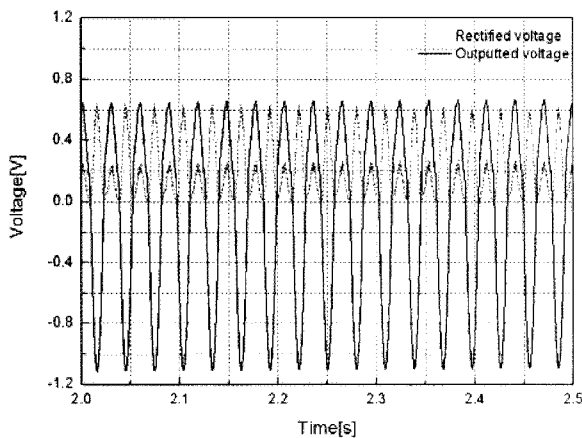


Fig. 6 Characteristics of output voltage by mass variation(cantilever length:190[mm])

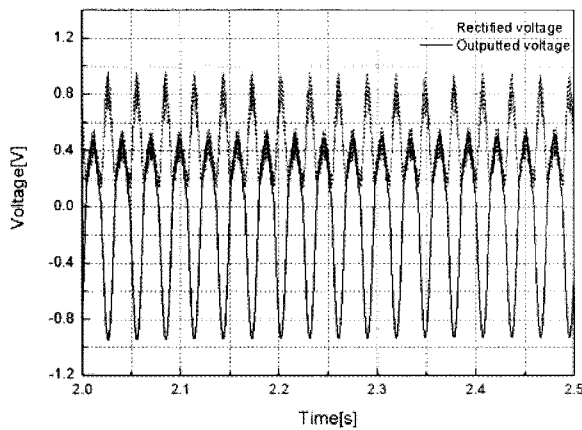
추의 무게를 결정하여 압전소자의 항복응력에 해당 하는 전단응력이 가해지지 않도록 캔틸레버의 작동 영역과 압전소자의 위치를 조절한다면 발전효율을 극대화 할 수 있을 것으로 사료된다.

3.2 에너지 변환부 특성

Fig. 7과 Fig. 8은 캔틸레버의 길이가 190[mm]에 캔틸레버 끝에 무게를 8.66[g]을 고정시키고, 캔틸레버에 가하여진 고유 진동수는 34.1[Hz]이고, Fig. 4의 에너지 변환회로를 이용하여 각 부분에서 출력되는 전압을 측정하여 나타낸 결과이다.



(a) 1N4004 diode

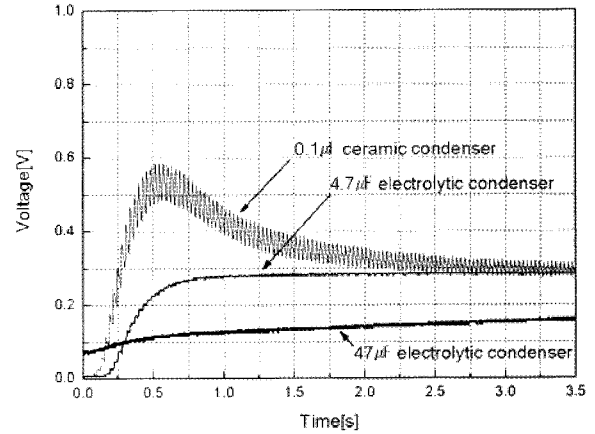


(b) 1N4148 diode

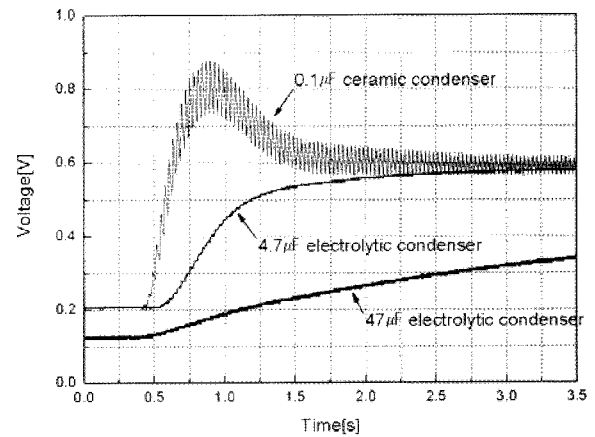
Fig. 7 Output voltage and rectified voltage by kinds of bridge diode

Fig. 7은 압전소자에서 출력되는 전압과 1N4004 다이오드와 1N4148 다이오드를 사용하여 브릿지 다이오드를 구성하였을 때 브릿지 다이오드를 거쳐서 출력되는 전압을 나타낸 것이다. 실험결과 1N4004 다이오드를 사용하여 압전소자에서 출력되는 전압을 정류하였을 때에는 출력되는 전압이 절반정도로

낮아졌다. 반면, 1N4148 다이오드를 사용한 브릿지 다이오드에서는 1N4004 다이오드를 사용하였을 때보다 압전소자에서 출력되는 전압이 커졌으며, 전압을 정류하였을 때에도 손실이 거의 없는 것으로 보아 1N4148 다이오드를 사용한다면 에너지를 효율적으로 저장할 수 있음을 확인하였다.



(a) 1N4004 diode



(b) 1N4184 diode

Fig. 8 Output voltage by kinds of bridge diode and smoothing condenser

Fig. 8은 브릿지 다이오드에서 정류된 전압을 직류 성분의 전압으로 변환시키기 위해 콘덴서를 추가하였을 때 변하는 전압의 특성을 나타낸 것이다. 콘덴서는 세 가지 종류를 사용하였으며, 각각 0.1 [μ F] 세라믹 콘덴서, 4.7 [μ F] 전해 콘덴서, 47 [μ F] 전해 콘덴서이다. 1N4004와 1N4148 다이오드를 사용한 두 종류의 브릿지 다이오드를 사용하여 가장 빠르게 평활 시킬 수 있는 콘덴서는 두 종류 모두 4.7 [μ F] 전해 콘덴서를 사용하였을 때이다. 0.1 [μ F] 세라믹 콘덴서와 47 [μ F] 전해 콘덴서의 경우 콘덴서의 용량의 너무 적거나 커서 늦게 직류 성분으로 변화되는 것으로 보인다.

Fig. 7과 Fig. 8 실험 결과에서 보이는 것처럼 교류성분의 전압을 정류시키기 위하여 사용된 브릿지 다이오드와 정류된 전압을 직류 성분으로 변환시키기 위한 평활용 콘덴서의 종류에 따라서 에너지의 양이 줄어들거나 늘어나는 것을 확인할 수 있었다. 에너지 변환회로에서 브릿지 다이오드에 사용되는 다이오드와 평활용 콘덴서의 용량을 적절하게 사용하면 효과적으로 에너지를 얻을 수 있음을 확인하였다.

4. 결 론

본 연구에서는 캔틸레버의 고유 진동수를 낮춰 적은 바람에 의해서도 효율적으로 에너지를 얻기 위한 방법들이 실험적으로 검토되었으며, 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

1) 캔틸레버 끝의 무게와 캔틸레버의 길이를 각각 증가시켰을 때 고유 진동수가 낮아지면서 출력 전압이 증가하거나 낮아지는 것이 관찰되었다. 따라서, 캔틸레버의 끝 무게와 길이 두 조건을 적절하게 조절하거나 에너지 변환회로의 다이오드와 콘덴서의 용량을 적절하게 조절하여 사용한다면 효율이 좋은 에너지 수확기가 개발될 것으로 사료된다.

2) 기존에 배터리를 사용하고 있던 야생동물 추적 시스템, 오지의 생태관찰시스템 및 USN과 같은 시스템에 캔틸레버형 압전에너지 수확기를 적용한다면, 배터리를 대신할 수 있는 전원을 사용함으로써 현재 겪고 있는 전원 문제를 해결할 수 있을 것으로 사료된다.

참 고 문 헌

1. K. Stangel et al., 2001, "A programmable intraocular CMOS pressure sensor system implant", IEEE J. of Solid State Circuits, Vol. 36, No. 7, pp. 1094~1100.
2. J. A. Paradiso et al., 2000, "Sensor systems for interactive surfaces", IBM Systems Journal, Vol. 39, No. 5, pp. 592~914.
3. John Kymissis et al., 1998, "Parasitic Power Harvesting in Shoes", Proceeding of the Second IEEE International Conference on Wearable Computing(ISWC), pp. 132~139.
4. Stephen R. et al., 2005, "The Use of

Piezoelectric Ceramics for Electric Power Generation Within Orthopedic Implants", IEEE/ASME TRANSACTIONS ON MECHATRONICS, pp. 455~461.

5. H. W. Kim et al., 2004, "Energy Harvesting Using a Piezoelectric "Cymbal" Transducer in Dynamic Environment", International Center for Actuator and Transducers (ICAT), pp. 6178~6183.
6. Shashank Priya, 2005, "Modeling of Electric Energy Harvesting Using Piezoelectric Windmill", APPLIED PHYSICS LETTERS, Vol. 87, No. 18, 184101-1~3.
7. B. K. Choi and W. H. Lee, 2008, "A Study on the Energy Harvesting System Using Piezoelectric Direct Effect of Piezo Film", Journal of the Korean Society for Precision Engineering, Vol. 25, No. 9, 78~85.