

碩士學位論文

에너지 수확용 압전캔틸레버의  
주파수 특성에 관한 연구

The background features a large, faint watermark of the Jeju National University logo. The logo is circular, containing a stylized flame or leaf design in blue, green, and purple. The text 'JEJU NATIONAL UNIVERSITY 1952' is written around the perimeter, and 'JEJU 1952' is in the center.

濟州大學校 大學院

메카트로닉스공학과

金 東 建

2009年 2月

# 에너지 수확용 압전켄틸레버의 주파수 특성에 관한 연구

指導教授 林 鍾 桓

金 東 建

이 論文을 工學 碩士學位 論文으로 提出함

2009年 2月

金東建의 工學 碩士學位 論文을 認准함

審査委員長 \_\_\_\_\_ (印)

委 員 \_\_\_\_\_ (印)

委 員 \_\_\_\_\_ (印)

濟州大學校 大學院

2009年 2月

# A Study on the Frequency Characteristics of Piezoelectric Cantilever for Energy Harvesting

Dong-Gun Kim

(Supervised by professor Jong-Hwan Lim)

A thesis submitted in partial fulfillment of the requirement  
for the degree of Master of Engineering

Department of Mechatronics Engineering  
GRADUATE SCHOOL  
CHEJU NATIONAL UNIVERSITY

2009. 2

# 목 차

|   |     |
|---|-----|
| List of Figures .....                       | iii |
| List of Tables .....                        | iv  |
| Nomenclature .....                          | v   |
| Summary .....                               | vi  |
| <br>  |     |
| 1. 서 론 .....                                | 1   |
| 1.1. 연구 배경 .....                            | 1   |
| 1.2. 연구 목적 .....                            | 3   |
| 1.3. 관련 분야 연구 동향 .....                      | 4   |
| <br>  |     |
| 2. 압전 효과와 에너지 변환 .....                      | 6   |
| 2.1. 압전 효과 .....                            | 6   |
| 2.1.1. 압전 효과의 원리 .....                      | 7   |
| 2.1.2. 압전 소자의 거동 .....                      | 10  |
| 2.2. 바이모프(Bimorph)를 이용한 에너지 변환 이론 .....     | 14  |
| <br>  |     |
| 3. 압전캔틸레버의 에너지 변환 특성 실험장치 및 실험방법 .....      | 19  |
| 3.1. 압전캔틸레버의 에너지 변환 특성 실험장치 구성 .....        | 19  |
| 3.2. 압전캔틸레버의 에너지 변환 특성 실험방법 .....           | 23  |
| <br>  |     |
| 4. 압전캔틸레버의 에너지 변환 특성 실험결과 및 고찰 .....        | 25  |
| 4.1. 주파수 변화에 따른 출력전압 특성 .....               | 25  |
| 4.1.1. 캔틸레버의 길이 및 끝 질량 변화에 따른 출력전압 특성 ..... | 26  |
| 4.1.2. 압전 소자의 이동거리에 따른 출력전압 특성 .....        | 30  |
| 4.2. 압전 소자 및 인가조건에 따른 출력전력 특성 .....         | 31  |

5. 결 론 ..... 33

참고문헌 ..... 35



# List of Figures

|   |    |
|---|----|
| Fig. 1-1 Evolution of the different technologies for wearable electronics .....                                   | 2  |
| Fig. 2-1 Piezoelectric effect and inverse piezoelectric effect .....  | 6  |
| Fig. 2-2 Crystal structure of a traditional piezoelectric ceramic .....   | 7  |
| Fig. 2-3 Polarizing a piezoelectric ceramic .....   | 8  |
| Fig. 2-4 Hysteresis curve of piezoelectric element .....  | 9  |
| Fig. 2-5 Generator and motor actions of piezoelectric element .....   | 10 |
| Fig. 2-6 Constituent equation of the piezoelectrics .....   | 10 |
| Fig. 2-7 Generator system for stress-voltage conversion .....   | 11 |
| Fig. 2-8 31-mode : Stress direction-1, Electrode direction-3 .....  | 12 |
| Fig. 2-9 33-mode : Stress direction-3, Electrode direction-3 .....  | 13 |
| Fig. 2-10 Structure of the bimorph bender .....   | 14 |
| Fig. 3-1 Block diagram of experimental setup .....  | 20 |
| Fig. 3-2 Schematic of cantilever with a piezoelectric element .....   | 21 |
| Fig. 3-3 Photo view of experimental setup .....   | 22 |
| Fig. 3-4 Electrical circuit for power measurement .....   | 24 |
| Fig. 4-1 Resonant frequency by change of cantilever length and mass .....   | 26 |
| Fig. 4-2 Characteristics of output voltage according to the end<br>mass(cantilever length:150mm) .....            | 27 |
| Fig. 4-3 Characteristics of output voltage according to the end<br>mass(cantilever length:190mm) .....            | 28 |
| Fig. 4-4 Output voltage and resonant frequency according to the change of<br>cantilever length and end mass ..... | 29 |
| Fig. 4-5 Output voltage according to the locations of piezoelectric element ..                                    | 30 |
| Fig. 4-6 Variation of measured output voltage by electrical load .....  | 32 |
| Fig. 4-7 Variation of measured power by electrical load .....   | 32 |

# List of Tables

|  |    |
|--|----|
| Table 1-1 Energy and power sources comparisons .....                                     | 4  |
| Table 3-1 Model and spec. of experiment device .....                                     | 20 |
| Table 3-2 Piezoelectric constants of the Hard PZT ceramic piezoelectric<br>element ..... | 21 |



## Nomenclature

|            |                                    |
|------------|------------------------------------|
| $\gamma$   | : Mechanical strain                |
| $\sigma$   | : Mechanical stress                |
| $Y$        | : Young's modulus                  |
| $d$        | : Piezoelectric strain coefficient |
| $E$        | : Electric field                   |
| $D$        | : Electric displacement            |
| $D_i$      | : Electric charge density          |
| $\epsilon$ | : Dielectric constant              |
| $U$        | : Energy                           |
| $C$        | : Capacitance                      |
| $h_p$      | : Piezoelectric layer thickness    |
| $h_m$      | : Substrate layer thickness        |
| $Q$        | : Charge                           |
| $F$        | : Force                            |
| $M$        | : Moment                           |
| $\rho$     | : Curvature                        |
| $W, L$     | : Width and length                 |
| $V_{p-p}$  | : Peak to peak of voltage          |
| $V_{RMS}$  | : Root mean square of voltage      |



## Summary

Recently, semiconductor production technology was able to improve by development of a new type elements and modules by the technology of VLSI(Very Large Scale Integration), and CMOS has increased the interest about the USN which has been commercialized since 2010. The USN is infrastructure of the high-intelligent society to play with anyone, anytime and anywhere through the context-awareness and knowledge contents generation of things or environment information from tag or sensor node which is attached to somewhere. To drive the USN using sensor node, the method of using a battery or connecting the power is expansive to keep use and has a possibility to destroy the environment. Therefore researchers who study for getting energy from low density energy such as solar heat, solar light, vibration, wind power and wave power study out wireless energy harvesting. This study suggests the method for getting the energy effectively by piezoelectric element from unused energy such as abandoned low energy density. In addition, the optimum energy harvesting equipment which used piezoelectric element is introduced.

# 1. 서 론

## 1.1 연구배경

VLSI(Very Large Scale Integration)와 CMOS공정과 같은 반도체 기술의 발전으로 저전력형 소자와 모듈 개발이 가능케 되어 센서에 의해서 계측된 데이터를 먼 곳까지 전송이 가능할 뿐만 아니라 센서 네트워크화가 촉진되었으며, 2010년부터 상용화 될 유비쿼터스 센서 네트워크(USN)에 관한 관심이 높아지고 있으며, 이에 대한 많은 연구 결과들이 도출되고 있다.

USN은 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].

Fig. 1-1은 휴대 가능한 전자제품에 사용되는 여러 기술들에 대해서 1990년부터 2001년까지의 발전상황을 나타낸 것으로, 배터리의 용량을 증가시키기 위하여 디스크 용량 및 CPU 속도를 증가시키는데 필요한 기술 및 개발비와 같은 요소들이 동일한 조건하에서 개발된 결과 디스크 용량 및 CPU 속도는 증가하였다. 하지만, 배터리의 용량은 1993년에서 1994년 사이에 약간 증가 하였지만, 배터리의 크기가 커지게 되었다. 그 후 배터리의 용량은 2001년 까지 거의 증가하지 않았다[3, 4].

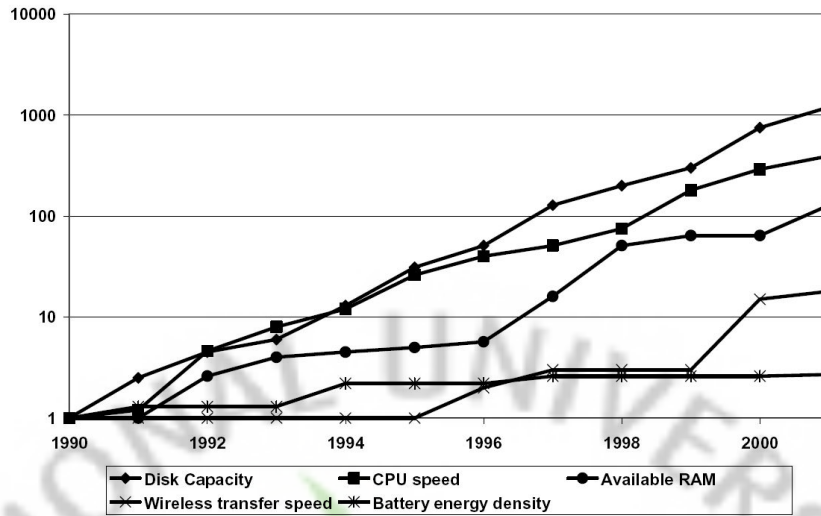


Fig. 1-1 Evolution of the different technologies for wearable electronics

이와 같이 현재의 배터리를 전원으로 사용한다면 무선 센서 시스템에서 계속된 데이터를 무선으로 전송 가능한 기간은 1년에서 3년이며, 장기간의 사용을 요구할 경우에는 현재의 배터리 용량으로 무선 센서 시스템에 전원 공급원으로서는 제한적일 수밖에 없다.

무선 센서 시스템에 적합한 전원장치의 조건은 장기적으로 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. 최근에 이와 관련하여 전 세계적으로 많은 연구가 진행 중에 있으며, 에너지 수확에 관한 많은 연구 결과 및 성과물들이 도출되고 있다[5].

본 연구에서는 무의식적으로 버려지는 에너지와 압전 소자를 활용하여 에너지를 효과적으로 얻기 위한 방법 및 압전소자를 이용한 최적의 에너지수확장치를 제시하였다.

## 1.2 연구목적

본 연구에서는 건물이나 교량과 같은 대형 구조물, 도로, 차량의 진동이나 기계설비의 진동, 자연에너지(풍력, 파력, 조력 등)에서 발생하는 기계적 에너지를 이용하여 전기에너지로 변환할 수 있는 전자석, 정전기, 압전 소자 중 높은 에너지 밀도를 가지면서 발전기의 구조를 간단하게 할 수 있는 압전 소자를 이용하였다. 압전 소자는 매우 단단하여 작은 진동에 의해서는 에너지를 발생시킬 수 없을 뿐만 아니라 큰 변형을 가하게 되면 깨져버리는 단점을 갖고 있다[6]. 이런 단점 때문에 압전 소자를 이용한 에너지 수확에는 압전 소자에 가해지는 기계적 에너지를 효과적으로 압전 소자에 전달하기 위하여 압전캔틸레버(탄성이 우수한 판위에 압전 소자를 부착하는 형태)를 적용하였다.

또한, 압전캔틸레버에 기계적 에너지를 효과적으로 전달하기 위해서는 압전캔틸레버의 고유 진동수가 진동원의 주파수와 일치하여 공진을 일으켜야 한다. 하지만, 압전 소자의 고유 진동수는 건물, 자동차, 비행기 및 냉장고, 세탁기와 같은 전자제품에서 발생하는 수십~300Hz보다 높으며, 이와 같은 곳에 적용하기 위하여 압전 소자의 고유 진동수를 낮춰야 한다. 본 연구에서 고유 진동수를 낮추기 위하여 캔틸레버의 길이를 길게 하는 방법과 캔틸레버 끝에 질량을 무겁게 하여 구동하는 방법을 사용하여 고유 진동수를 낮췄으며, 이때 출력되는 전압의 특성을 분석하였다.

본 연구는 기존 압전 발전기의 압전 소자가 잘 깨지는 단점을 보완하기 위해 압전캔틸레버를 적용하여 무선 센서 시스템에 안정적인 전원공급이 가능케 되어 센서 네트워크 사용 기간을 연장할 수 있고, 유선을 이용할 때 배선의 문제와 이 시스템을 유지하기 위한 비용의 문제를 해결하는데 목적이 있다.

압전캔틸레버형 에너지 변환 시스템의 특성을 알아보기 위하여 전자석식 진동기를 이용한 에너지수확장치를 꾸며 실험을 수행하였으며, 일반적으로 사용되는 PZT계 압전 소자를 이용하여 캔틸레버의 길이 및 질량과 압전 소자의 이동거리 변화에 따른 출력전압 특성과 부하저항 변화에 따른 출력 전력 특성에 대한 연구를 수행하였다.

### 1.3 관련 분야 연구 동향

무선으로 센서의 정보를 송신할 수 있는 시스템과 같은 저전력 전자부품의 사용을 위해 이런 시스템이 적용될 주변 환경으로부터 안정적으로 에너지를 얻기 위한 많은 방법들이 고려되고 있다. 에너지를 수집하는 방법 중 가장 널리 사용되고 가장 발전된 방법은 태양전지를 이용한 발전 방식이다. 태양전지인 경우 설치장소에 따라 얻을 수 있는 에너지의 양이 크게 차이가 나며, 온도, 공기의 흐름 및 압력의 변화에 의해서는 각각  $40\mu W/cm^2$ ,  $380\mu W/cm^2$  및  $17\mu W/cm^2$ 를 얻을 수 있는 것으로 보고되고 있다. Table 1-1은 다양한 에너지 수확에 활용될 수 있는 에너지원과 무선 센서 시스템에 에너지를 공급할 수 있는 공급원을 정리하여 비교한 것이다.

Table 1-1 Energy and power sources comparisons[7]

| Power source                   | Power $\mu W/cm^2$  | Energy Joules/cm <sup>3</sup> | Power $\mu W/cm^2/yr$ | Secondary storage needed? | Voltage regulation? | Commercially available? |
|--------------------------------|---------------------|-------------------------------|-----------------------|---------------------------|---------------------|-------------------------|
| Primary battery                | N/A                 | 2,880                         | 90                    | No                        | No                  | Yes                     |
| Secondary battery              | N/A                 | 1,080                         | 34                    | N/A                       | N/A                 | Yes                     |
| Micro fuel cell                | N/A                 | 3,500                         | 110                   | Maybe                     | Maybe               | No                      |
| Ultra capacitor                | N/A                 | 50~100                        | 1.6~3.2               | No                        | Yes                 | Yes                     |
| Heat engine                    | $1 \times 10^6$     | 3,346                         | 106                   | Yes                       | Yes                 | No                      |
| Radioactive( <sup>63</sup> Ni) | 0.52                | 1,640                         | 0.52                  | Yes                       | Yes                 | No                      |
| Solar(outside)                 | 15,000 <sup>★</sup> | N/A                           | N/A                   | Usually                   | Maybe               | Yes                     |
| Solar(inside)                  | 10 <sup>★</sup>     | N/A                           | N/A                   | Usually                   | Maybe               | Yes                     |
| Temperature                    | 40 <sup>★†</sup>    | N/A                           | N/A                   | Usually                   | Maybe               | Soon                    |
| Human power                    | 330                 | N/A                           | N/A                   | Yes                       | Yes                 | No                      |
| Air flow                       | 380 <sup>‡</sup>    | N/A                           | N/A                   | Yes                       | Yes                 | No                      |
| Pressure variation             | 17 <sup>¶</sup>     | N/A                           | N/A                   | Yes                       | Yes                 | No                      |
| Vibrations                     | 375                 | N/A                           | N/A                   | Yes                       | Yes                 | No                      |

★ Measured in power per square centimeter, rather than power per cubic centimeter.

† Demonstrated from a 5°C temperature differential.

‡ Assumes an air velocity of 5m/s and 5 percent conversion efficiency.

¶ Based on 1cm<sup>3</sup> closed volume of helium undergoing a 10°C change once a day.

서강대학교에서는 자동차 주행 중 타이어 공기압 감시 장치(Tire Pressure Monitoring System : TPMS)와 같이 실시간으로 압력과 온도를 계측하여 무선으로 자동차 내부로 전송하는 시스템에 대한 연구를 진행하였다. 이 연구에서는 무선으로 압력과 온도의 정보를 전송하기 위한 전원을 압전 에너지 수확장치를 통하여 전기 에너지를 얻고 무선으로 데이터를 전송하는 시스템에 대한 고찰을 수행하였다[8]. MIT공대에서는 PZT와 PVDF를 사용하여 신발 밑창에 삽입하여 실험한 결과 PZT의 최대 전압은 부하저항이 250k $\Omega$ 일 때 150V가 발전되며 이때 최대 전력은 80mW, 평균 전력은 1.8mW가 발생되고, PVDF의 경우 최대 전압은 60V(부하저항은 250k $\Omega$ 일 때)이며, 최대 전력은 20mW, 평균 전력은 1.1mW가 발전된다고 발표하였다[9, 10]. 네브래스카대학의 Stephen R. Platt 교수는 무릎관절에 에너지 수확장치를 삽입하여 무릎관절에 힘이 가해졌을 때 압전소자에서 출력되는 전력을 이용하여 에너지 수확장치의 상태에 대한 정보를 전달할 수 있는 마이크로프로세서와 센서의 전원으로 사용할 수 있는 압전형 에너지 수확장치에 대한 연구를 수행하였다[11]. 텍사스대학에 Shashank Priya는 저주파영역에서 바이모프방식의 압전소자로부터 발생하는 전력을 계산하기 위한 이론적 모델을 제안했으며, 이론 해석의 타당성을 검증하기 위하여 시제품 풍차를 통하여 풍속 10mph에서 7.5mW의 전력 생산이 가능하다는 것을 발표하였으며[12, 13], 독일의 EnOcean사는 전송모듈에 압전 에너지 수확기를 적용하여 배터리가 필요 없이 스위치를 눌렀을 때 발생하는 에너지를 센서구동, RF 무선신호 송신, 각종 변환기를 작동시키는데 활용하였으며, 또한 버튼방식의 경우 3mm $\times$ 5N의 힘을 가하였을 때 200 $\mu$ W의 에너지를 얻을 수 있는 장치를 개발하였다. 미국의 Ferro Solutions 사는 'Energy Harvester'라는 이름의 에너지 발전시스템을 개발하여 각종 무선전자기기, 센서, MEMS 등에 응용하고 있다. 미국의 Advanced Cerametrics 사에서는 제작한 압전파이버합성물을 사용하여 13초 동안 30Hz의 진동으로 880mJ(40V)을 얻을 수 있는 에너지 수확장치를 제작하였으며, 이와 관련하여 일본의 세이코사에서는 발전 성능이 1mm의 진폭으로 2Hz 주기로 진동을 가하였을 때 30분에 0.66J 정도 얻을 수 있는 에너지 수확장치를 제안하였으며, 이 장치를 이용하면 전자시계의 전원 확보가 충분할 것으로 보고하였다[14].

## 2. 압전 효과와 에너지 변환

### 2.1 압전 효과

1880년대에 피에르와 폴 자크 퀴리 형제가 석영, 전기석, 로셀염과 같은 결정에 일정한 방향에서 압력 또는 장력을 가하면 그 외력에 비례하여 결정 표면에 전압이 발생하는 현상을 발견하였다. 그 다음해인 1881년에는 이 관계와는 반대로 전압을 가하면 결정체가 변형을 일으키는 현상도 확인하였다. 이렇게 전압 생성 결정 중에 하나가 전기장에 노출이 된다면 전기장의 극성에 따라 신장도 되고 수축도 되어 이것 역시 전기장의 세기에 비례하여 발생한다. 이런 현상들을 압전 효과(Piezoelectric effect)와 역압전 효과(Inverse piezoelectric effect)라 하였으며, 'Piezo'는 압력을 의미하는 그리스어 "piezein"에서 온 단어이다. 또한, 발명자의 이름을 따서 압전 효과를 퀴리효과, 역압전 효과를 리프먼 효과라고도 한다.

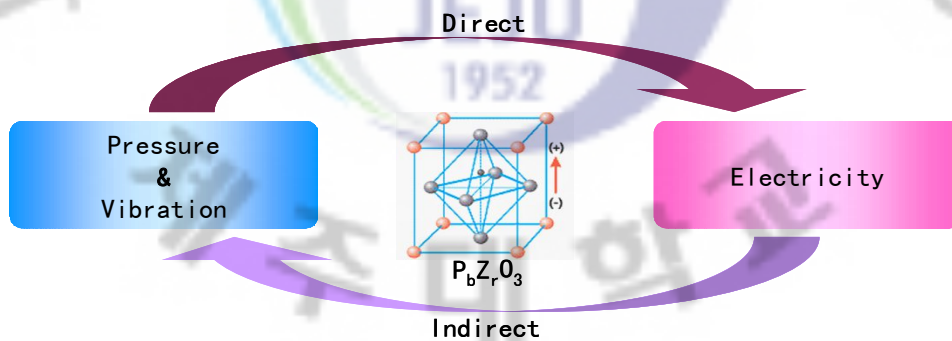


Fig. 2-1 Piezoelectric effect and inverse piezoelectric effect

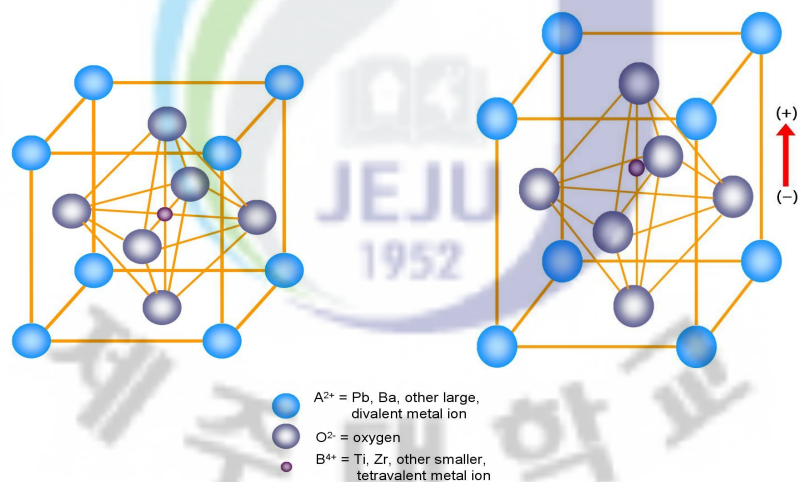
압전 소자는 전기적 거동, 기계적 거동을 유발할 수 있는 재료로 그 응용 분야는 매우 광범위하다. 압전 효과는 가속도 센서, 유량 센서, 압력 센서와 같은 센서 분야와 음파, 초음파를 수신할 수 있는 하이드로폰 또는 마이크로폰에서 사

용할 수 있고, 역압전 효과는 초음파 모터, 잉크젯 프린터, 압전 팬, 압전 펌프 또는 압전 밸브에 적용할 수 있는 액추에이터로 사용이 가능하며, 음파와 초음파를 발생시키는 초음파 세척기, 가습기, 버저 또는 스피커에 이용되기도 한다.

### 2.1.1 압전 소자의 원리

일반적인 압전 세라믹은 Fig. 2-2와 같은 Perovskite 구조로, 큰 격자 구조 안에 작은 4개의 금속 이온(Titanium 또는 Zirconium), 2개의 금속 이온(Lead 또는 Barium)과  $O^{2-}$  이온으로 구성되어 있다. Fig. 2-2(b)와 같이 결정내에 사면체 또는 Rhombohedral 대칭이라 불리는 조건 안에서 각 결정은 쌍극 모멘트를 갖는다.

압전 세라믹은 금속 산화물의 미세한 파우더를 일정 비율로 혼합시켜 열을 가하여 제조하는데, 유기 접착물과 파우더를 혼합하여 원하는 모양의 압전 소자를 형성할 수 있다. 일정 시간과 온도에 따라 파우더를 소결시키면 재료는 충분한 결정 구조를 갖게 되고, 이 재료를 식혀 적합한 표면에 전극을 입히면 된다.



(a) Temperatures above Curie point (b) Temperatures below Curie point

Fig. 2-2 Crystal structure of a traditional piezoelectric ceramic

Fig. 2-2(a)와 같이 퀴리점(Curie point)에 해당하는 온도 이상에서 소결된 세라믹 내부 각각의 perovskite 구조는 쌍극 모멘트를 형성하지 않는 단순 육면체의 대칭을 보인다. 하지만, Fig. 2-2(b)처럼 퀴리점 이하가 되는 온도에서 각



결정은 사면체 또는 rhombohedral 대칭을 갖고, 쌍극 모멘트를 형성하게 된다. 근접한 쌍극자들은 ‘domain’이라 불리는 국부적으로 정렬된 영역을 형성하게 된다. Fig. 2-3(a)와 같은 정렬은 도메인에 알짜 쌍극 모멘트를 형성시키고 이웃한 도메인 사이에서 극성의 방향은 무작위 형성되어 있어 압전 세라믹은 전체적으로 극성을 갖지 않는다.

Fig. 2-3(b)처럼 압전 세라믹에서 도메인은 퀴리점 보다 약간 낮은 온도에서 강전계에 노출됨으로써 정렬을 하게 된다. 이런 극성화 과정을 통해, 전기장과 일치하는 방향으로 형성된 도메인은 일치하지 않는 도메인으로 영역을 확장하여 전기장 형성 방향으로 신장하게 된다. 그리고 Fig. 2-3(c)처럼 전기장이 제거되면 대부분의 쌍극자들은 정렬된 형태와 비슷한 양상으로 고정된다. 그 후 압전 세라믹은 영원히 그 상태의 극성을 띠게 되고, 확장된 상태에 머물게 된다.

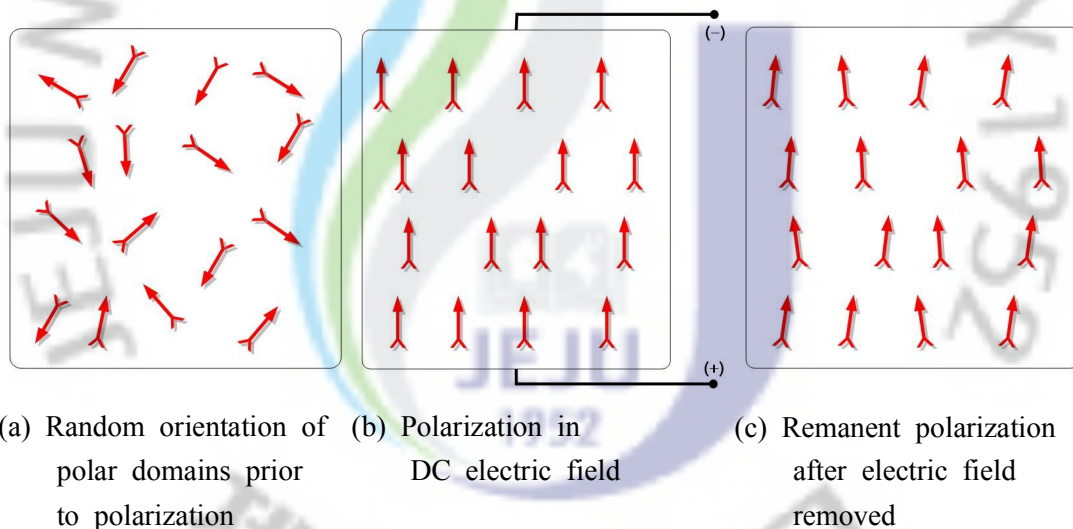


Fig. 2-3 Polarizing a piezoelectric ceramic

강자성체 재료의 특성에 따라, 극성을 띤 재료는 히스테리시스를 나타낸다. 압전 세라믹 역시 강자성체 재료로 그 특성을 따른다. Fig. 2-4는 전형적인 히스테리시스 곡선을 보여준다. 최대 극화가 될 때까지 압전 세라믹에 전기장을 인가한 뒤, 잔류 극성을 형성하기 위해 전기장을 0으로 줄였다가 다시 반대 극을 인가시키고, 음의 최대 극성에 도달한 뒤 전기장을 제거하면 또다시 잔류 극성을 형성하게 된다.

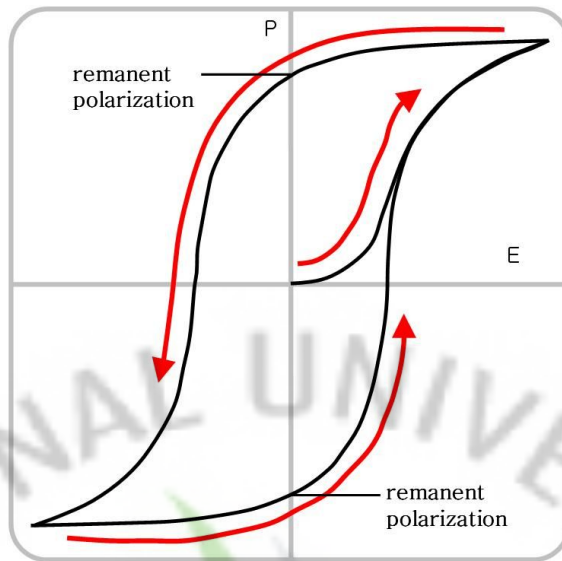


Fig. 2-4 Hysteresis curve of piezoelectric element

이렇게 형성된 압전 세라믹에 압축력 또는 팽창력을 인가하면 쌍극 모멘트가 변하여, 전압을 형성하게 된다. Fig. 2-5(b)에 나타낸 것처럼 극성과 일치하는 방향으로의 압축 또는 극성 방향에 수직하게 팽창을 시키면 같은 극의 전압이 발생한다. Fig. 2-5(c)처럼 극성의 방향으로 팽창을 시키거나 극성 방향에 수직하게 압축을 시키면 극성의 전압 방향과 반대로 전압이 생성된다. 이런 압전 소자의 거동은 발전기(수확기)의 기능으로, 압축력과 팽창력 같은 기계 에너지를 전기 에너지로 변환시킬 수 있음을 알려주며, 실제 점화 장치, 고체 전지, 가속도 및 진동, 압력센서와 같은 곳에 이용할 수 있다. 압축 스트레스의 값과 발생된 전압과의 관계는 재료의 특성에 따라 선형성을 띠게 된다. 그리고 이와 반대로 Fig. 2-5(d)에 나타낸 것처럼 poling 전압처럼 같은 극성의 전압이라면 poling 전압의 방향에서 세라믹 요소에 적용되며, 이 요소의 길이가 길어지게 된다면 직경은 줄어들게 된다. Fig. 2-5(e)에 나타낸 것처럼 poling 전압이 적용된 반대극성의 전압이라면 이 요소의 길이는 짧아지게 되고 직경은 넓어진다. 이러한 압전 소자의 거동은 액추에이터의 기능으로, 압전 세라믹에 가해지는 전압의 크기에 따라 변형을 유도할 수 있는데, 이런 특성을 이용하여 압전 모터, 압전 펌프, 압전 밸브, 스피커, 초음파를 생성하는 초음파 세척기, 플라스틱 용접기, 가습기에서 응용된다[15].

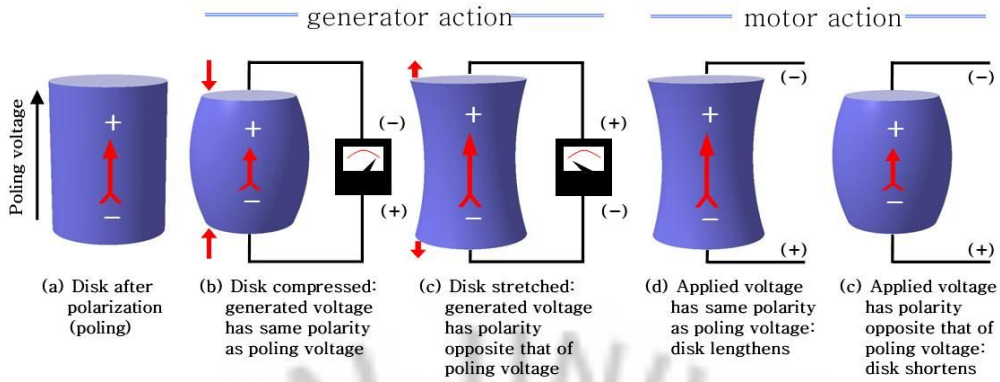


Fig. 2-5 Generator and motor actions of piezoelectric element

### 2.1.2 압전 소자의 거동

압전소자에 기계 에너지를 인가하였을 때 변환되어 발생하는 전기 에너지 또는 전기 에너지를 인가하였을 때 발생하는 수축, 신장과 같은 기계적 거동은 압전 소자 특성에 따라 외부 자극에 선형성을 띠면서 발생하게 된다. 이런 압전 소자를 에너지 변환 시스템에 효율적으로 적용하기 위한 이론적 연구로서 응력과 전압의 관계를 나타내는 압전 소자의 구성 방정식은 다음과 같이 쓸 수 있다.

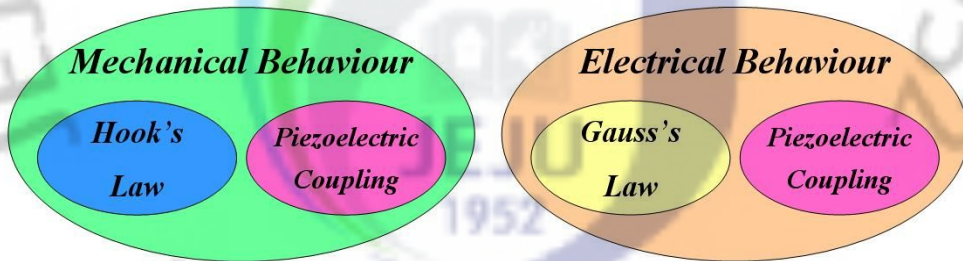


Fig. 2-6 Constituent equation of the piezoelectrics

$$\gamma = \frac{\sigma}{Y} + dE \quad (2-1)$$

$$D = \epsilon E + d\sigma \quad (2-2)$$

식 (2-1)에서 압전 커플링과 관련한 성분( $dE$ )을 제외하면 후크 법칙과 유사하다. 마찬가지로 식 (2-2)에서 압전 커플링 성분( $\epsilon E$ )을 제외하면 전기장에 대한 가우스 법칙과 흡사하다. 식 (2-1)과 식 (2-2)로부터 압전 효과에 의한 에너지

지 변환은 압전 커플링에 의해 발생함을 알 수 있다. 즉, 압전 소자의 전기장은 압전 소자의 기계적 변형에 영향을 미치고 반대로 압전 소자에 가해진 외부의 기계적 응력은 압전 소자의 유전성질에 영향을 주고 있음을 식 (2-1)과 식 (2-2)로부터 유추할 수 있다. 압전 소자에 가해지는 응력과 전압 발생 구조를 위해 도입한 등가회로는 압전 소자의 개방 회로 특성으로 나타낼 수 있다.

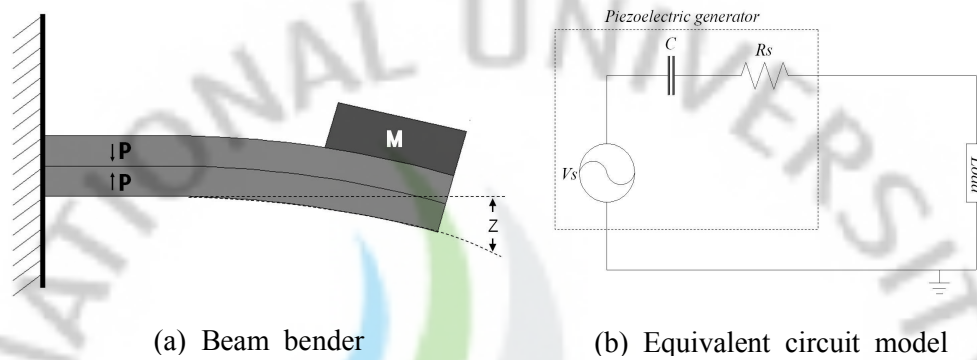


Fig. 2-7 Generator system for stress-voltage conversion

Fig. 2-7(b)에서 전압원( $V_s$ )은 식 (2-2)으로부터 유도된 개방 회로 전압으로 간주되므로 개방 회로 전압( $V_{OC}$ )은 식 (2-2)으로부터 다음과 같이 유도된다.

$$V_{OC} = -\frac{dt}{\epsilon} \sigma \quad (2-3)$$

여기서  $t$ 는 압전소자의 두께이다.

압전 소자에 응력이 주기적으로 가해진다면 식 (2-3)과 같은 개방 회로 전압은 압전 소자의 전압을 측정할 수 있다. 하지만, Fig. 2-7(b)와 같이 압전 소자와 저항을 연결할 경우 AC 전압은 부하 저항 양단에서  $V_{load}$ 로 나타나게 된다. 이때 부하 저항에서 나오는 평균적인 전력은  $P = V_{load}^2 / 2R_{load}$ 로 나타낼 수 있지만 실제의 경우 단순한 저항 연결은 압전 물질의 응력-전기 변환 효율에 관한 기초 물성 실험에는 쓰임새가 있으나 유용한 방법에는 사용하지 못함으로, 실제 압전 발전기로서 활용하기 위해서는 정류회로와 신호처리가 수반되어야 한다.

압전 소자를 통해 이루어지는 에너지 변환에서 중요한 관계식은 압전 소자에 가해지는 응력과 분극에 의해 생성되는 전하 사이의 관계이며 식 (2-2)에서  $d$ 는 정적 부하에서는 상수값을 나타내지만 동적 부하 조건 중 특히 공진 조건에서는 값이 변하게 되고 이것은 식 (2-4)와 같이 나타낼 수 있다.

$$D_i = d_{ij} + \sigma_j \quad (2-4)$$

여기서  $i, j$ 는 1부터 6까지의 범위를 갖게 되며 횡방향 응력이 가해지게 될 경우 식 (2-4)는 다음과 같이 변환된다.

$$D_3 = d_{31} + \sigma_1 \quad (2-5)$$

Fig. 2-8은 식 (2-5)에 대한 응력-전극 방향에 대하여 도시한 것이다.



Fig. 2-8 31-mode : Stress direction-1, Electrode direction-3

상용화된 PZT는 5개의 압전 상수( $d_{31}, d_{32}, d_{33}, d_{15}, d_{24}$ )를 갖고 있으며, 나머지 방향의 성분은 모두 '0'이 된다. 압전 소자에서  $d_{31}$ 은  $d_{32}$ 과 같으며  $d_{15}$ 는  $d_{24}$ 와 같다. 따라서 압전 상수 텐서는 3개의 독립적인 압전 상수를 갖게 된다. 3개의 압전 상수 사이의 크기 관계는  $d_{15} > d_{33} > d_{31}$ 과 같다. 일례로 상용 PZT(4mm Class)에서  $d_{15}$ 는  $d_{31}$ 에 비해 5배 정도 큰 값을 갖고,  $d_{33}$ 은  $d_{31}$ 보다 약 2배 정도 큰 값을 갖게 된다.  $d_{15}$ 가 다른 텐서 방향에 비해 더 큰 에너지 변환 효율을 갖고 있음에도 불구하고  $d_{15}$  방향은 전단응력 방향에 해당하므로 실제 압전 소자를 이용한 발전 장치에서는 구현하기 어려운 구조이다. 따라서 대부분의 압전 소자

는 31방향 혹은 33방향의 압전 방향을 사용하게 된다.

$$D_3 = d_{33} + \sigma_3 \quad (2-6)$$

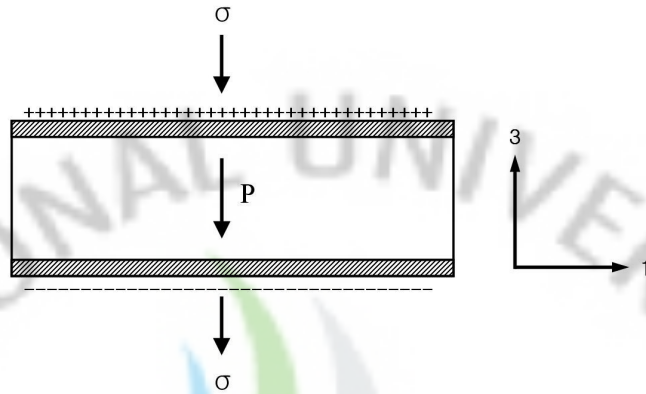


Fig. 2-9 33-mode : Stress direction-3, Electrode direction-3

본 연구에서는 바이모프의 압전 에너지 변환 장치를 제작하여 압전 소자가 잘 깨어지는 문제를 보완하기 위한 실험을 수행하였으며, 실제 압전 소자를 이용한 에너지 변환 시스템은 바이모프를 이용하여 연구를 수행하였다. 압전 소자는 크기는 직선 변위형과 굴곡 변위형으로 나뉘고, 세부적으로는 단판형, 적층형(직선 변위형)과 모노모프, 유니모프, 바이모프, 멀티모프로 나뉘게 되며 여러 형태로 제작이 가능하다. 본 연구에서 추구하는 무선 센서 시스템의 센서 노드로 활용하기 위해 가격이 비교적 싸고, 제작이 쉬운 직사각형 바이모프를 사용하여 에너지 변환에 대한 실험을 수행하였다.

## 2.2 바이모프를 이용한 에너지 변환 이론

바이모프를 이용하여 외팔보를 해석하는 경우, 응력은 길이 방향으로만 분포한다는 가정으로부터 에너지법을 이용하여 해석을 수행하면 복잡한 해석을 수월하게 수행할 수 있는 장점이 있다. 바이모프 벤더는 얇은 직사각형으로 만들어지며, 바이모프 벤더의 압전 필름은 필름 형태의 압전층과 전극을 위한 금속층의 접합으로 만들어진다.

압전 소자 구성 방정식 중 식 (2-5)을 보면, 양의 전기장이 형성될 조건은 음의 응력이 인가될 때이다. 따라서 바이모프 형태의 압전 소자에서 음의 전기장이 형성될 경우 압전 소자의 구성 방정식은 식 (2-7)과 같이 표현할 수 있다.

$$\begin{aligned} \varepsilon_1 &= s_{11}^E \sigma_1 - d_{31} E_3 \\ D_3 &= -d_{31} \sigma_1 + \epsilon_{33}^T E_3 \end{aligned} \quad (2-7)$$

전극이 형성되는 비압전층에서는 단순한 응력-변형을 관계를 도입한다. 만약 비압전층의 영 계수가  $1/s_m$ 로 표현된다면 후크 법칙에 따른 비압전층의 응력-변형을 관계는 다음과 같다.

$$\varepsilon_1 = s_m \sigma_1 \quad (2-8)$$

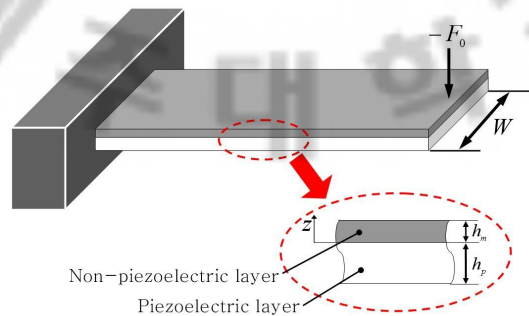


Fig. 2-10 Structure of the bimorph bender

바이모프 벤더 구조는 Fig. 2-10과 같이 압전층과 비압전층의 집합으로 이루어져 있으므로 각각의 층은 서로 다른 방식의 에너지법에 의해 계산하고 최종적으로 다시 더하여서 구조물의 에너지를 계산한다. 압전 소자에 외부 응력이 인가되었을 때의 내부 에너지는 기계적인 탄성 에너지와 전기에너지 및 기계-전기적 결합 에너지로 나뉘며 압전층에서는 이 에너지 식을 이용하고 비압전층에서는 외부 인가 응력에 의해 탄성에너지( $U_p$ )만 존재하므로 이를 각각 구하면 다음과 같다.

$$\begin{aligned}
 dU_p &= \frac{1}{2}(s_{11}^E \sigma_1 - d_{31} E_3) \sigma_1 + \frac{1}{2}(-d_{31} \sigma_1 + \epsilon_{33}^T E_3) E \\
 &= \frac{1}{2} s_{11}^E \sigma_1^2 - d_{31} \sigma_1 E_3 + \frac{1}{2} \epsilon_{33}^T E_3^2 \\
 dU_p &= \frac{1}{2} s_m \sigma_1^2
 \end{aligned} \tag{2-9}$$

Fig. 2-10과 같은 바이모프 구조에서 모멘트 성분( $M$ )을 구하면 다음과 같다.

$$\begin{aligned}
 M &= \int_A \sigma_1 (z - z_c) dy dz = \int_z \sigma_1 (z - z_c) W dz \\
 \sigma_1 &= \frac{1}{s_{11}^E} (\epsilon_1 + d_{31} E_3), \text{ for piezoelectric layer} \\
 \sigma_1 &= \frac{1}{s_m} \epsilon_1, \quad \text{for non-piezoelectric layer} \\
 \therefore M &= \int_0^{h_p} \frac{1}{s_{11}^E} (-\rho(z - z_c) + d_{31} E_3) W (z - z_c) dz \\
 &\quad + \int_{-h_m}^0 -\frac{1}{s_m} W \rho (z - z_c)^2 dz
 \end{aligned} \tag{2-10}$$

여기서,  $\rho$ 는 바이모프 벤더의 곡률이며,  $z_c$ 는 바이모프 벤더의 표면이다. 식 (2-10)에서 모멘트( $M$ )와 곡률( $\rho$ )이 미지수로 존재하는데, 곡률은  $z$ 의 함수가 아니므로 쉽게 구할 수 있다.



$$M = -\frac{\rho W B_{11}}{12 s_m s_{11}^E (s_{11}^E h_m + s_m h_p)} + \frac{d_{33} h_p h_m (h_m + h_p) W}{2 (s_{11}^E h_m + s_m h_p)} E_3 \quad (2-11)$$

$$B_{11} = s_m^2 h_p^4 + 4 s_{11}^E s_m h_m h_p^3 + 6 s_m s_{11}^E h_p^2 h_m^2 + 4 s_{11}^E s_m h_p h_m^3 + (s_{11}^E)^2 h_m^4$$

그리고 외팔보 구조에서  $F_0(L-x_1) = M(x_1)$ 와 같은 모멘트와 곡률사이의 관계가 성립하고, 곡률과 변형률 사이의 관계는  $\varepsilon_1 = -\rho(z-z_c)$ 와 같이 성립하므로 앞서 구한 모멘트, 곡률 사이의 관계로부터 압전층과 비압전층의 내부 에너지를 구한 식 (2-9)를 중첩하여 전체 바이모프 구조의 에너지를 구할 수 있다.

$$F_0(L-x_1) = -\frac{\rho W B_{11}}{12 s_m s_{11}^E (s_{11}^E h_m + s_m h_p)} + \frac{d_{31} h_p h_m (h_m + h_p)}{2 (s_{11}^E h_m + s_m h_p)} E_3 \quad (2-12)$$

$$\rho = -\frac{12 s_m s_{11}^E (s_{11}^E h_m + s_m h_p) (L-x_1)}{B_{11} W} F_0 + \frac{6 d_{31} s_m s_{11}^E h_p h_m}{B_{11}} E_3 \quad (2-13)$$

$$\sigma_1 = \frac{1}{s_{11}^E} (-\rho(z-z_c) + d_{31} E_3), \text{ for piezoelectric layer}$$

$$\sigma_1 = -\frac{1}{s_m} \rho(z-z_c), \text{ for non-piezoelectric layer} \quad (2-14)$$

$$s U_p = \frac{1}{2} s_{11}^E \left( \frac{-\rho(z-z_c) + d_{31} E_3}{s_{11}^E} \right)^2 - d_{31} \left( \frac{1}{s_{11}^E} (-\rho(z-z_c) + d_{31} E_3) \right) E_3 + \frac{1}{2} \epsilon_{33}^T E_3^2$$

$$d U_m = \frac{1}{2} (s_m \sigma_1) \sigma_1 = \frac{1}{2} s_m (-\rho(z-z_c))^2 \quad (2-15)$$

식 (2-13)은 외력( $F_0$ ) 혹은 전압( $E_3$ )이 외팔보 형태의 압전 소자에 인가되었을 때의 변형 곡률 방정식이다. 식 (2-15)로부터 외력에 의해 형성된 압전 소자 내부의 전체 에너지는 바이모프를 적분함으로써 구할 수 있다.

$$U = \int_0^L \int_0^W \left( \int_0^{h_p} d U_p dz + \int_{-h_m}^0 d U_m dz \right) dy dx$$

$$\begin{aligned}
&= \frac{2s_{11}^E s_m s_h L^3}{WB_{11}} F_0^2 - \frac{3d_{31} s_{11}^E s_m h_p h_m (h_p + h_m) L^2}{B_{11}} E_3 F_0 \\
&\quad + \frac{\epsilon_{33}^T WL h_p}{2} \left( 1 + \left( \frac{3(s_{11}^E)^2 s_m h_p^2 h_m^2 (h_m + h_p)^2}{s_h B_{11}} - 1 \right) K_{31}^2 \right) E_3^2
\end{aligned} \tag{2-16}$$

여기서,  $s_h = s_{11}^E h_m + s_m h_p$ ,  $K_{31} = \frac{d_{31}}{\sqrt{\epsilon_{33}^T s_{11}^E}}$  이다.

전체 에너지를 구하기 위해 고려해야 될 사항은 전압과 전하이다. 전기 에너지는 전하와 전압의 곱의 형태이므로 압전 소자에서 전하의 생성은 이 전기 에너지에 대해 전압의 편미분을 취하여 계산할 수 있다. 그러나 식 (2-16)의 경우 전압에 대한 에너지 관계식이 아니고 전기장으로 표현한 에너지 관계식인데, 압전 소자의  $z$  방향으로 형성된 전기장으로부터 전압차를 계산할 수 있다.

$$\text{전기장}(E_3) = \frac{\text{두 전극 사이의 전압}(V)}{\text{두 전극 사이의 압전소자의 두께}(h_p)} \tag{2-17}$$

따라서 식 (2-16)과 식 (2-17)로부터 외력( $F_0$ )로 인해 생성된 전하를 계산할 수 있다.

$$\begin{aligned}
Q = \frac{\partial U}{\partial V} = & - \frac{3d_{31} s_m s_{11}^E h_m (h_m + h_p) L^2}{B_{11}} F_0 \\
& + \frac{\epsilon_{33}^T WL}{h_p} \left( 1 + \left( \frac{3(s_{11}^E)^2 s_m h_p^2 h_m^2 (h_m + h_p)^2}{s_h B_{11}} - 1 \right) K_{31}^2 \right) V
\end{aligned} \tag{2-18}$$

식 (2-18)은 외부로부터 힘과 전압이 동시에 인가되었을 때 압전 소자 내부에서 생성되는 전하를 나타내므로 순수하게 외력( $F_0$ )에 의해 생성되는 전하( $Q_{gen}$ )는 외부 인가 전압을 '0'으로 놓고 계산하면, 외력에 의해 생성된 전하로부터 이때의 발생 전압( $V_{gen}$ )과 에너지( $U_{gen}$ )를 구할 수 있다[16].

$$Q_{\geq n} = -\frac{3d_{31}s_m s_{11}^E h_m (h_m + h_p)L^2}{B_{11}} F_0 \quad (2-19)$$

$$C_{free} = \frac{\epsilon_{33}^T WL}{h_p} \left( 1 + \left( \frac{3(s_{11}^E)^2 s_m h_p h_m^2 (h_m + h_p)^2}{s_h B_{11}} - 1 \right) K_{31}^2 \right) \quad (2-20)$$

$$V_{gen} = \frac{Q_{gen}}{C_{free}} = -\frac{3d_{31}s_{11}^E s_m h_p h_m (h_m + h_p)L}{\epsilon_{33}^T WB_{11} \left( 1 + \left( \frac{3(s_{11}^E)^2 s_m h_p h_m^2 (h_m + h_p)^2}{s_h B_{11}} - 1 \right) K_{31}^2 \right)} F_0 \quad (2-21)$$

$$U_{gen} = \frac{9d_{31}^2 s_{11}^{E2} s_m^2 h_p h_m^2 (h_m + h_p)^2 L^3}{\epsilon_{33}^T WB_{11}^2 \left( 1 + \left( \frac{3(s_{11}^E)^2 s_m h_p h_m^2 (h_m + h_p)^2}{s_h B_{11}} - 1 \right) K_{31}^2 \right)} F_0^2 \quad (2-22)$$

### 3. 압전캔틸레버의 에너지 변환 특성 실험장치 구성 및 실험방법

본 장에서는 바이브레이터를 사용하여 압전캔틸레버에 외력을 가하였을 때 캔틸레버의 길이 및 끝 질량의 변화에 따른 출력 전압과 압전 소자의 이동거리에 따른 출력 전압의 특성을 알아보기 위한 실험장치의 구성과 압전캔틸레버의 구조에 대해 살펴보고 본 연구를 수행하기 위한 실험방법을 서술하고자 한다.

#### 3.1 압전캔틸레버의 에너지 변환 특성 실험장치 구성

Fig. 3-1은 바이브레이터를 이용한 실험장치 및 측정 장비의 개략도이다. 바이브레이터를 이용한 실험 장치는 압전캔틸레버에 기계적 에너지를 가하여 전기적 에너지로 변환될 때 압전 세라믹에서 출력되는 전기에너지의 특성을 알아보기 위한 장치로 바이브레이터를 이용하였다. 실험 장치는 건물, 자동차 및 항공기 외에 일상생활에서 발생하는 진동과 비슷한 진동을 일으킬 수 있는 바이브레이터와 바이브레이터에 전원을 공급해주는 바이브레이터용 앰프, 바이브레이터에 일정한 파형을 넣어줄 수 있는 함수발생기로 구성되었다.

데이터 수집은 기계적 에너지에 의해 압전 소자에서 출력되는 전압과 부하 저항에 의해 출력되는 전류를 측정하여 데이터를 수집할 수 있는 데이터 수집 장치를 사용하였다.

Table 3-1은 본 연구에서 사용된 실험장치의 모델명과 간단한 사양을 나타낸 것이다.

Table 3-1 Model and spec. of experiment device

| Experiment device  | Model        | Specifications   |
|--------------------|--------------|--|
| Vibrator           | HEV-50       | Rated output power : 50N<br>Frequency range : 10Hz ~ 5.0kHz            |
| Amplifier          | EA155        | Output power : 40W<br>Output current : 7A<br>Input voltage : -12 ~ 12V |
| Function Generator | 33220A       | 20MHz  |
| DAQ system         | DEWETRON5000 | Modules of using: DAQP-V-BNC   |

Fig. 3-1 (a)는 압전 소자에서 출력되는 전압을 측정하기 위한 실험장치의 개략도이며, Fig. 3-1 (b)의 경우는 간단한 회로를 이용하여 전류를 측정할 수 있는 실험장치의 개략도를 나타낸 것이다.

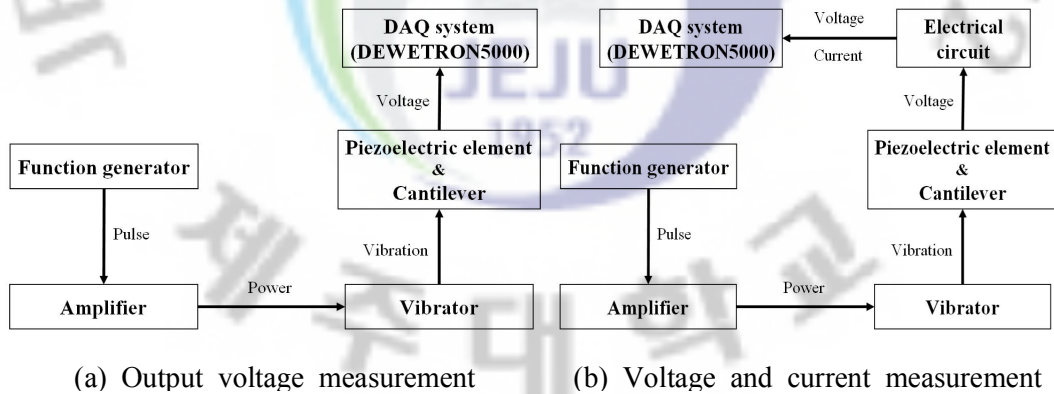


Fig. 3-1 Block diagram of experimental setup

Fig. 3-2는 실험에 사용하기 위하여 제작된 압전캔틸레버의 개략도이다. 본 연구에서 사용한 캔틸레버의 재질은 탄성이 우수한 알루미늄이고, 기관의 크기는  $L \times 13 \times 2\text{mm}$ 이며, 길이 L의 크기를 150, 170, 190, 210mm으로 제작하였다. 제작된 캔

틸레버와 바이브레이터를 연결하기 위하여 아크릴 원통을 제작하였으며, 이 아크릴 원통의 기능은 바이브레이터가 진동할 때 캔틸레버가 바이브레이터 본체에 부딪히는 것을 막는 것이다. 사용한 압전 소자는 Hard PZT계 바이모프형 세라믹이며, Table 3-2에 본 논문에서 사용한 압전 소자의 물성을 표기하였다.

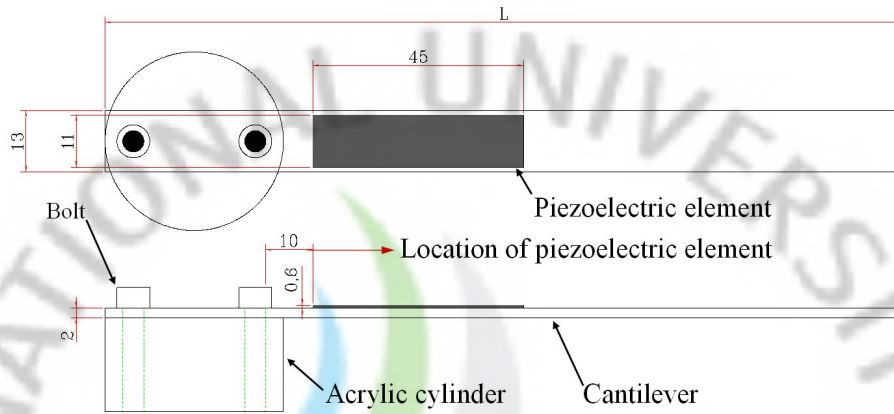
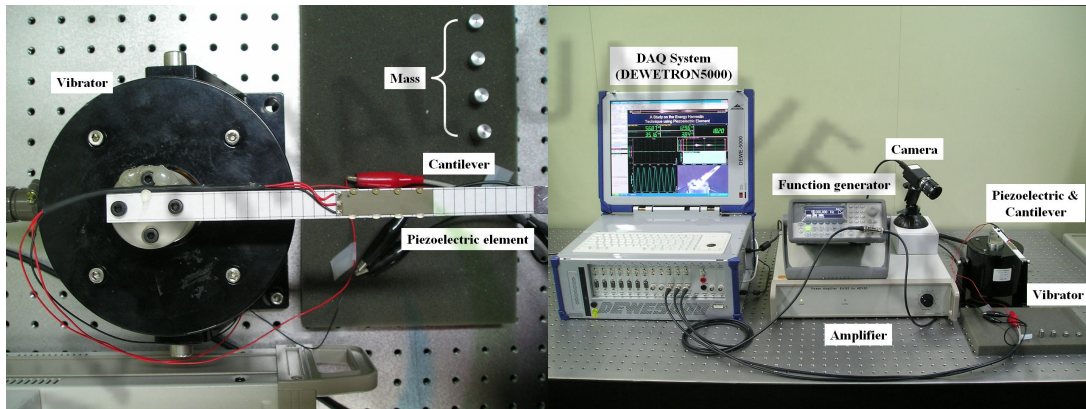


Fig. 3-2 Schematic of cantilever with a piezoelectric element

Table 3-2 Characteristics of the Hard PZT ceramic piezoelectric element

|                                   | Symbol                | Unit                                | Hard PZT ceramic |
|-----------------------------------|-----------------------|-------------------------------------|------------------|
| Size                              | $L \times W \times H$ | mm                                  | 45×11×0.6        |
| Density                           | $\rho$                | kg/m <sup>3</sup>                   | 78               |
| Piezoelectric charge coefficient  | $d_{31}$              | 10 <sup>-12</sup> C/N               | -180             |
| Piezoelectric voltage coefficient | $g_{31}$              | 10 <sup>-3</sup> Vm/N               | -11.3            |
| Coupling factor                   | $k_{31}$              | -                                   | 0.35             |
| Mechanical quality factor         | $Q_m$                 | -                                   | 80               |
| Elastic constants                 | $S_{11}^E$            | 10 <sup>-12</sup> m <sup>2</sup> /N | 16.1             |
|                                   | $S_{33}^E$            |                                     | 20.7             |
| Electrical capacitance            | $C$                   | μF                                  | 4.0              |

Fig. 3-3 (a)는 Fig. 3-2에 나타난 캔틸레버에 압전소자를 고정하고, 아크릴 원통을 이용하여 캔틸레버를 바이브레이터에 고정한 것을 보여주는 사진이며, Fig. 3-3 (b)은 Fig. 3-1에 나타난 개략도와 같이 실험 장치 및 측정 장비를 보여주는 사진이다.



(a) Part view of vibrator with a piezoelectric cantilever

(b) Total view of experimental setup

Fig. 3-3 Photo of experimental setup

## 3.2 압전캔틸레버의 에너지 변환 특성 실험방법

본 절에서는 앞서 소개된 압전캔틸레버형 에너지 변환 시스템의 실험 장치를 이용하여 압전캔틸레버에 가해지는 조건에 따라서 출력되는 에너지의 특성을 알아보기 위한 실험방법에 대해 서술하였고, 실험은 다음과 같은 순서로 진행하였다.

1. 알루미늄으로 제작된 캔틸레버 위에 Fig. 3-2와 같이 캔틸레버에 아크릴 원통과 고정하기 위하여 뚫어 놓은 구멍에서 10mm정도 떨어진 곳에 압전 소자를 Fig. 3-3에 (a)처럼 고정하고, 볼트를 이용하여 캔틸레버와 아크릴 원통을 고정시킨 후 바이브레이터의 동작부 위에 아크릴 원통을 고정시킨다.
2. 바이브레이터를 구동하기 위하여 바이브레이터용 앰프에서 나오는 출력 단자를 바이브레이터에 연결한 후, 일정한 파형을 입력시킬 수 있는 함수발생기의 출력단자를 바이브레이터용 앰프에 연결하였다. 함수발생기에서 출력되는 신호는  $\pm 1V_{pp}$ 로 하였으며, 바이브레이터용 앰프의 출력전압을  $\pm 12V$ 에 맞춰 실험을 수행하였다. 이때 함수발생기에서 출력되는 신호의 주파수는 바이브레이터의 주파수 범위에서 벗어나지 않는 10~200Hz까지 가하도록 하였다.
3. 압전캔틸레버의 인가 조건인 캔틸레버의 길이와 끝 질량의 변화에 따른 출력 전압의 특성을 알아보기 위하여 캔틸레버의 길이를 150, 170, 190, 210mm 중에 한 가지를 선택하여 '실험방법 1'처럼 캔틸레버를 고정하였고, Fig. 3-2에 나타낸 이동거리를 시작점으로 하여 이동거리에 압전 소자를 고정하고 캔틸레버 끝 부분에 0, 2.22, 4.34, 5.87, 8.66, 11.01g을 순서대로 바꿔가면서 실험을 수행하였다.



4. 압전캔틸레버의 인가 조건인 압전 소자의 이동거리에 따른 출력 전압 특성을 알아보기 위한 실험으로써, 실험은 앞서 명시된 ‘실험방법 3’처럼 캔틸레버를 고정시키고, Fig. 3-2에 나타난 압전소자 위치의 시작점 ‘0’으로 두고 그 지점부터 0, 10, 20, 30, … 90, 100mm와 같이 캔틸레버의 끝부분에서 약 15mm정도 남는 지점까지 압전 소자의 위치와 캔틸레버의 끝 질량을 변화시켜가며 전압을 측정하였다.
5. 데이터 수집 도중에 데이터에 섞여 오는 노이즈를 제거하기 위하여 데이터 수집 장치에 내장된 필터를 사용하였다. 압전 소자에서 출력되는 전압을 측정하는데 사용된 필터의 종류는 IIR 필터이며, IIR 필터의 타입은 저역통과필터, 프로토타입은 Butterworth로 두고 Order 6, FHigh 200Hz로 설정하여 출력되는 전압을 측정하였으며, 초당 500개의 데이터를 얻을 수 있도록 조정하였다. 또한, 입력 주파수의 데이터는 함수발생기에서 나오는 신호를 주파수로 알려주는 기능을 사용하여 데이터를 수집하였다.
6. 압전캔틸레버에서 발생하는 출력 전력은 Fig. 3-4에 나타난 회로에 있는 18종류의 고정저항을 이용하여 저항값을 변화시켰을 때 출력되는 전압 및 전류의 값을 얻기 위하여 고정저항 양단의 전압을 측정하였으며, 이때 측정된 전압값과 저항값에 의해 전류와 전력을 구하였다.

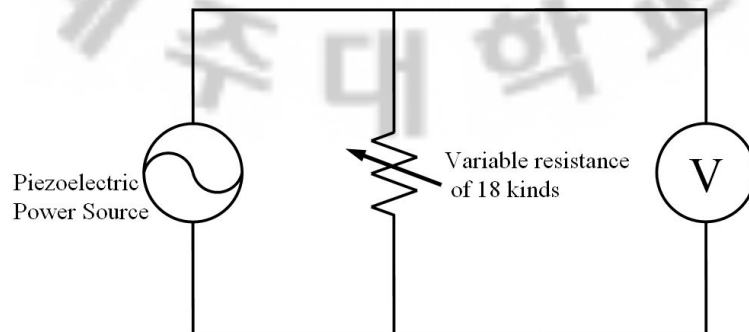


Fig. 3-4 Electrical circuit for power measurement

## 4. 압전캔틸레버의 에너지 변환 특성 실험결과 및 고찰

본 장에서는 Hard PZT계 바이모프 압전소자를 캔틸레버와 결합하고, 압전 소자를 결합하는 캔틸레버의 길이와 끝 질량을 변화시켰을 때의 출력 전압 특성을 분석하고 그 결과를 서술하고자 한다. 또한, 압전 소자의 이동 거리에 따른 출력 전압의 특성에 대해 분석을 하였고, 부하저항의 변화에 따른 출력 전력의 특성을 확인하였다.

### 4.1 주파수 변화에 따른 출력전압 특성

우선 Hard PZT계 Bimorph형 세라믹(이하 Hard PZT)을 이용하여 캔틸레버의 길이 및 끝 질량 변화와 압전 소자의 이동거리에 따른 출력전압 특성을 나타내고자 한다.

Fig. 4-1은 Hard PZT를 시편으로 사용하여 캔틸레버의 길이 및 끝 질량을 변화시키면서 측정된 고유 진동수를 나타낸 것이다. 캔틸레버 끝 질량이 0g일 때의 고유 진동수는 각각 132.6, 99.5, 58.9, 50.5Hz로 나타났으며, 캔틸레버 끝 질량이 11.01g일 때의 고유 진동수는 각각 47.1, 38.0, 31.9, 26.6Hz로 나타났으며, 이 결과로 캔틸레버 끝의 질량을 증가시킬수록 고유 진동수가 감소된다는 것이 확인되었다. 캔틸레버의 고유 진동수( $f_n$ )는 캔틸레버 끝에 가해주는 질량에 반비례하는 것으로 알려지고 있으며( $f_n \propto \frac{1}{\sqrt{m}}$ )[17], 본 연구의 실험 결과에서 나타나는 것처럼 이론과 비슷한 결과를 얻을 수 있어, 캔틸레버에 질량을 증가시켰을 때 고유 진동수를 낮출 수 있음을 확인 할 수 있었다. 또한, 캔틸레버의 길이가 길어짐에 따라서 고유 진동수가 낮아진다는 것을 실험을 통하여 확인하였다.

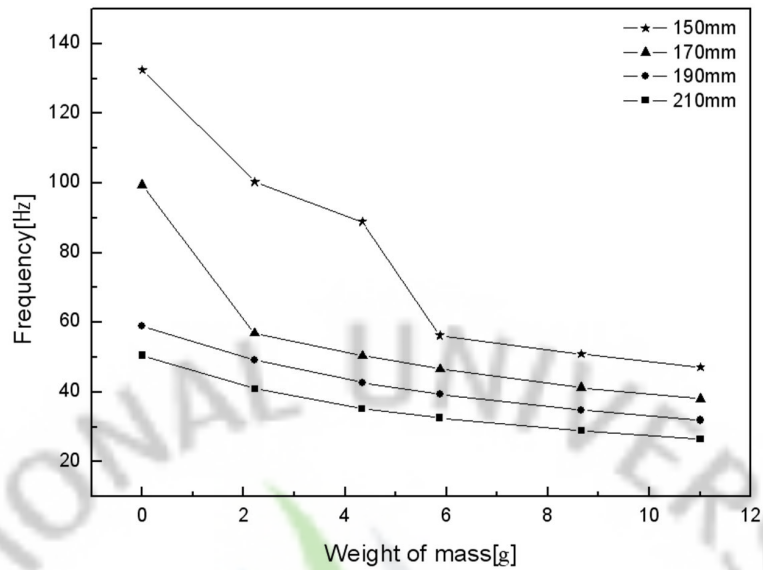


Fig. 4-1 Resonant frequency by change of cantilever length and mass

#### 4.1.1 캔틸레버의 길이 및 끝 질량 변화에 따른 출력전압 특성

Fig. 4-2와 Fig. 4-3은 길이가 150mm인 캔틸레버에 압전 소자를 “0” 위치에 고정하였을 때 주파수 변화에 따른 출력전압의 특성을 알아보기 위하여 수행한 결과를 나타낸 것이다. Fig. 4-2와 Fig. 4-3에 (a), (b), (c), (d), (e), (f)는 각각 캔틸레버 끝 부분에 0, 2.22, 4.34, 5.87, 8.66, 11.01g의 질량을 달았을 때, 출력전압의 peak to peak값을 나타낸 것이다.

뚜렷하게 보이는 특성으로는 캔틸레버 끝의 질량이 늘어날수록 고유 진동수가 낮아지면서 출력되는 전압의 크기가 점점 커지는 경향을 보이고 있다. Fig. 4-2에 나타낸 캔틸레버의 길이가 150mm일 때에는 출력되는 전압의 크기가 꾸준히 증가하였지만, Fig. 4-3에 나타낸 캔틸레버의 길이가 190mm일 때 캔틸레버 끝에 질량을 늘려가며 실험한 결과 캔틸레버의 고유 진동수가 37Hz 이상에서는 출력되는 전압의 크기가 꾸준히 증가하였지만, 고유 진동수가 37Hz 미만에서는 큰 변화가 없는 것으로 나타났다. 이 결과만 봤을 때에는 캔틸레버의 길이와 끝 질량을 무작정 늘린다고 출력되는 전압이 증가하지 않을 것으로 보인다. 캔틸레버의 길이와 끝 질량을 적절하게 조절하였을 때 발전효율을 극대화 할 수 있을 것이다. 압전 소자를 일정한 부분에 고정하였을 때, 캔틸레버의 길이가 길어질수록 캔틸레버의 각 부분마다 가해지는 힘의 크기가 변하게 되어 압전 소자에 가

해지는 힘의 크기도 변하기 때문에 캔틸레버의 길이가 길다고 출력되는 전압이 커지지 않을 것으로 사료된다.

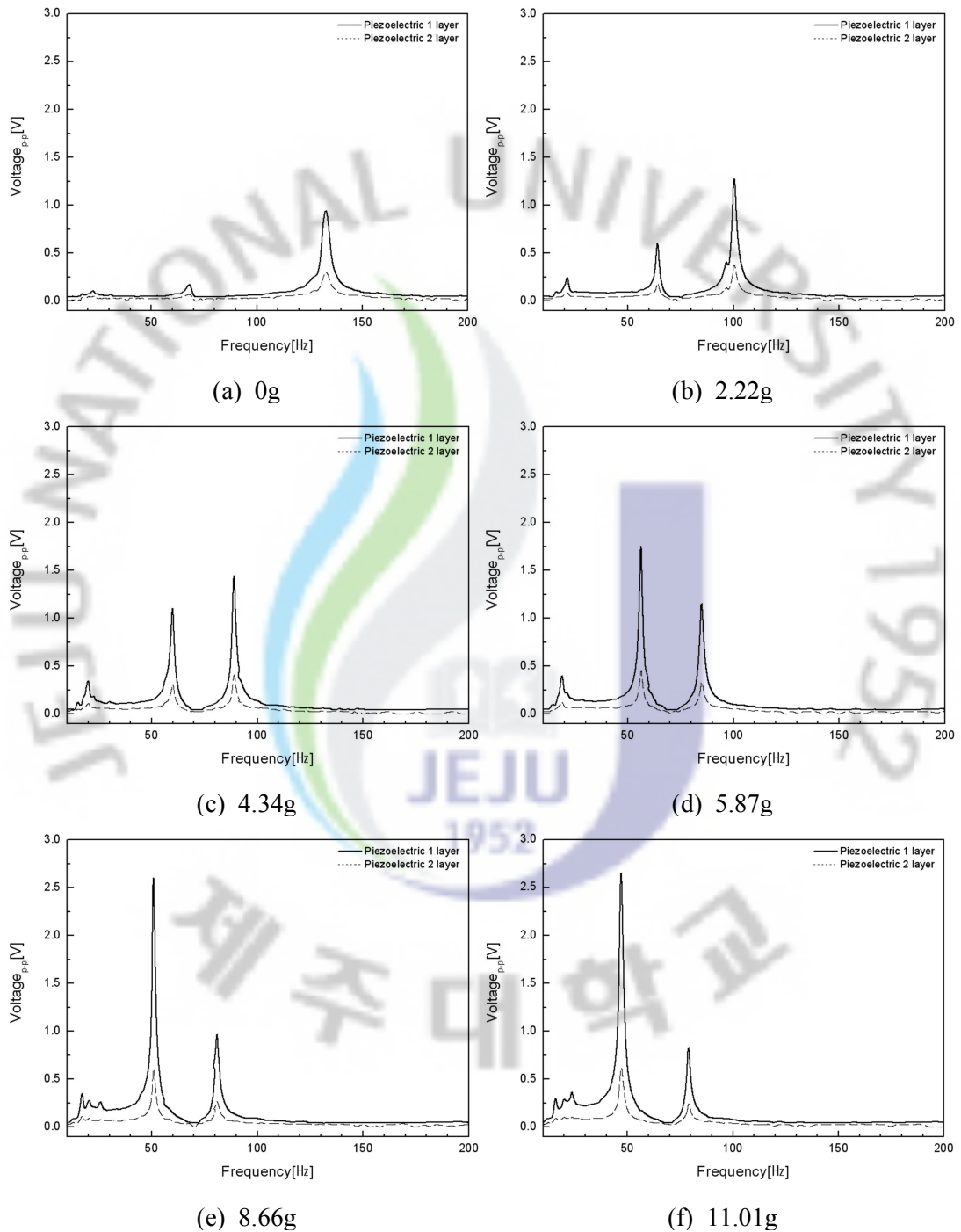


Fig. 4-2 Characteristics of output voltage according to the end mass(cantilever length:150mm)

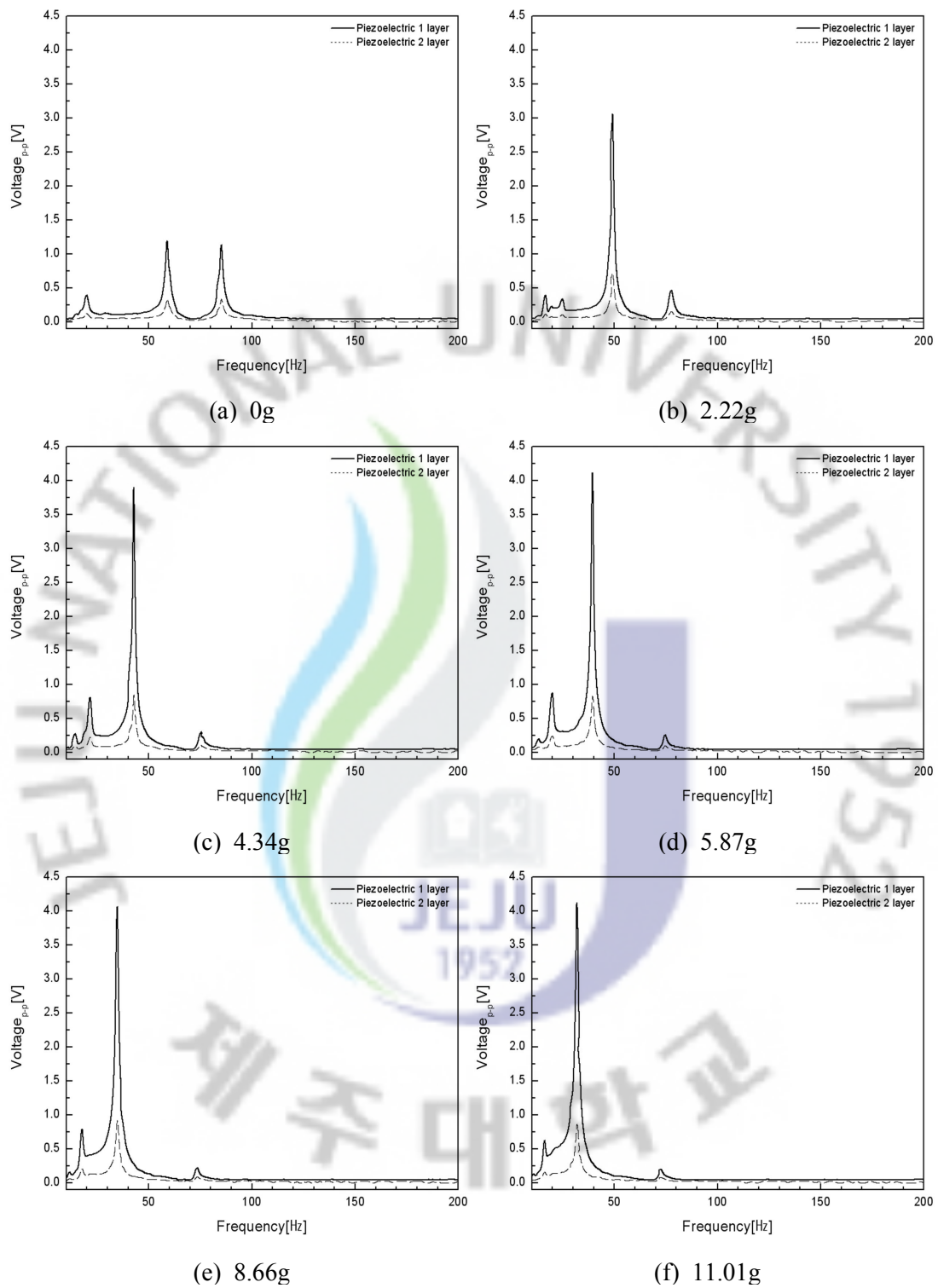


Fig. 4-3 Characteristics of output voltage according to the end mass(cantilever length:190mm)

Fig. 4-4는 캔틸레버의 길이를 고정하고 캔틸레버의 끝 질량을 변화시켜가면서 실험한 결과를 정리한 것이다. Fig. 4-4 (a), (b), (c), (d)는 각각 캔틸레버의 길이가 150, 170, 190, 210mm을 일 때 캔틸레버 끝의 질량 변화에 따라 출력 전압의 peak to peak값 및 RMS값과 고유 진동수를 나타낸 것이다.

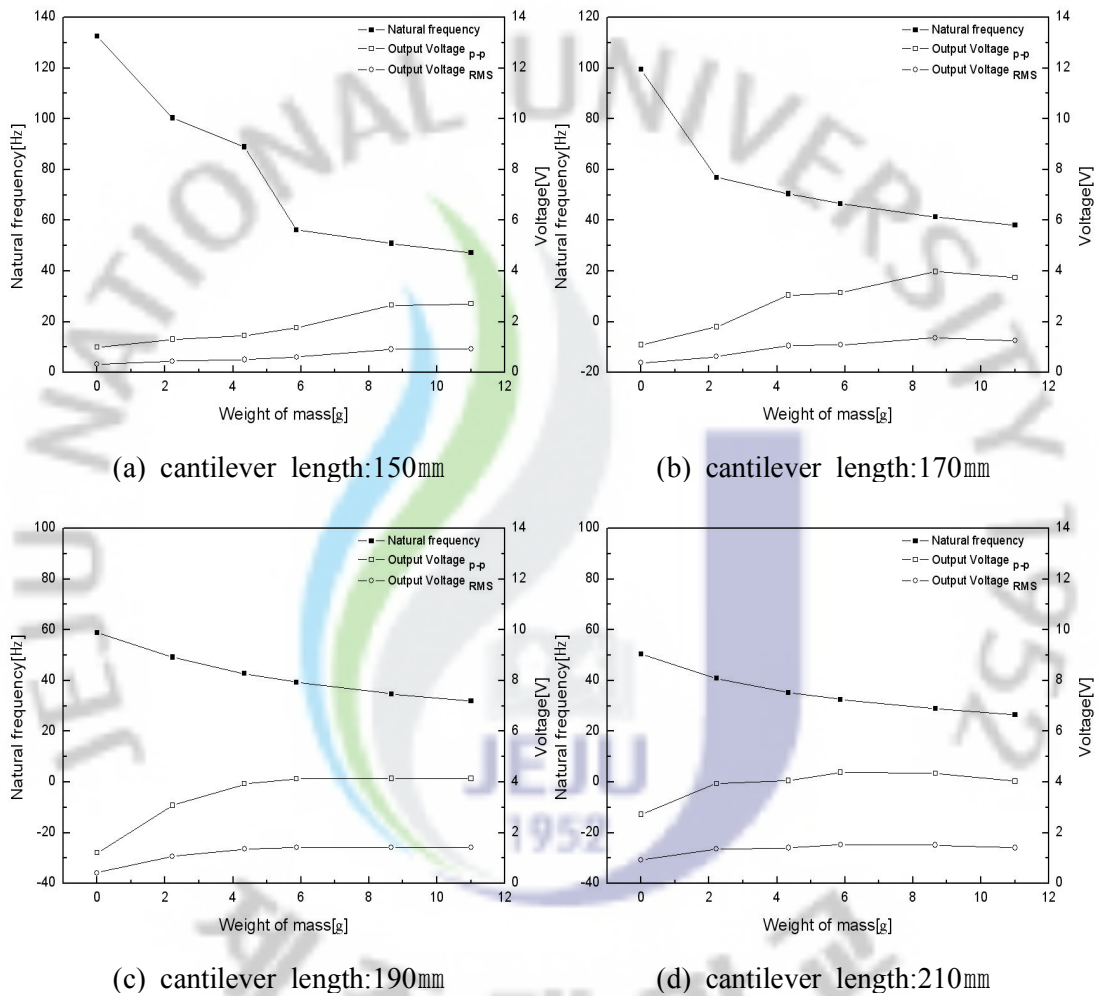


Fig. 4-4 Output voltage and resonant frequency according to the change of cantilever length and end mass

#### 4.1.2 압전 소자의 이동거리에 따른 출력전압 특성

Fig. 4-5는 캔틸레버의 길이를 고정하고 캔틸레버의 끝 질량과 압전 소자의 이동거리에 따른 출력전압 특성을 나타낸 것이다.

실험결과 자유로운 부분보다 고정된 부분과 가까운 곳에서 출력되는 전압의 크기가 큰 것으로 나타났으며, 이는 압전 소자가 깨지지 않는 범위 내에서는 최대 응력이 발생하는 부분에서 최대 출력이 발생하는 것으로 사료된다.

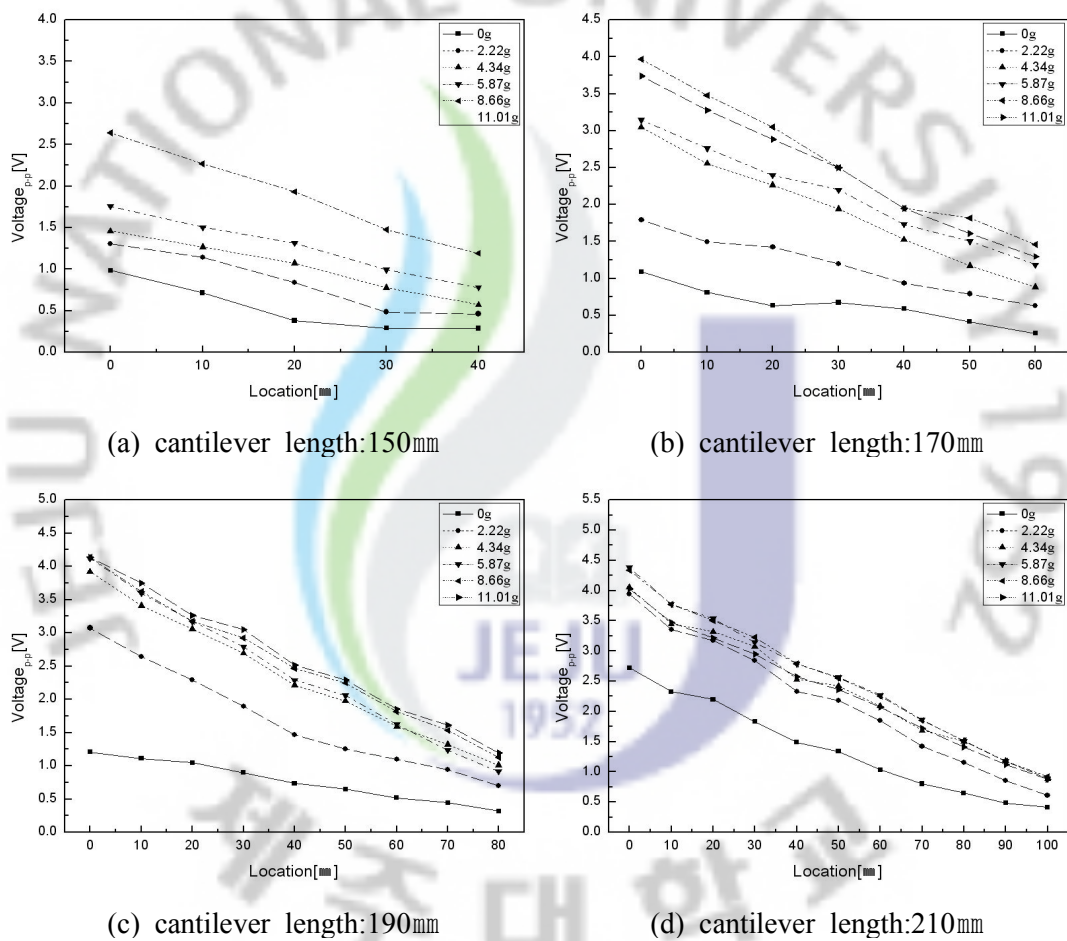


Fig. 4-5 Output voltage according to the locations of piezoelectric element

## 4.2 압전 소자 및 인가조건에 따른 출력전력 특성

Fig. 4-6과 Fig. 4-7은 길이가 190mm인 캔틸레버 끝에 질량을 각각 0g와 11.01g을 달았을 때 각각의 캔틸레버에 가하여진 고유 진동수는 58.9Hz와 31.9Hz이고, 이때 부하저항에 의해 측정된 출력전압 및 전력 결과를 나타낸 것이다.

18종류의 고정저항의 저항 값이 증가함에 따라 출력전압이 증가하다가 0[g]을 달았을 때에는 1.123V에서 일정해졌으며 11.01g을 달았을 때에는 2.710V에서 일정해지는 것으로 나타났다. 저항 값이 각각 678Ω, 993Ω일 때 최대 파워를 얻을 수 있었으며, 이 부분에서 전기적 임피던스 매칭이 일어난 것으로 보인다. 출력이 최대가 될 때 압전 소자의 임피던스는 다음 식 (4-1)[5]에 의해 계산될 수 있다.

$$Z = \frac{1}{2\pi f C} \quad (4-1)$$

$Z$ 는 압전 소자의 임피던스이고,  $f$ 는 캔틸레버의 입력 주파수,  $C$ 는 세라믹의 전기용량을 각각 나타낸 것이다. 식 (4-1)을 사용하여 캔틸레버의 임피던스를 계산한 결과 675.5Ω과 1.247kΩ값을 얻을 수 있었으며, 실험결과와 거의 일치하는 것으로 나타났다. 11.01g의 질량을 가하였을 때 압전 소자의 전기용량은 동일하지만, 질량을 올려놓지 않았을 경우보다 11.01g의 질량을 가하였을 때 고유 진동수가 낮아져 캔틸레버의 임피던스 값이 증가하였다. 길이가 190mm인 캔틸레버 끝에 0g와 11.01g의 질량을 올려놓았을 때에 출력되는 전력의 크기는 각각 0.845mW와 4.036mW로 나타났으며, 이때 질량을 올렸을 때와 올려놓지 않았을 때의 전력은 약 4.78배 정도 차이나는 것으로 나타났다. 이 결과 일정한 캔틸레버의 길이 끝에 질량을 올려둔다면 압전캔틸레버의 고유진동수가 낮아져 압전캔틸레버의 임피던스 값이 증가함에 따라 출력되는 전력이 증가한다는 사실을 알 수 있었다.



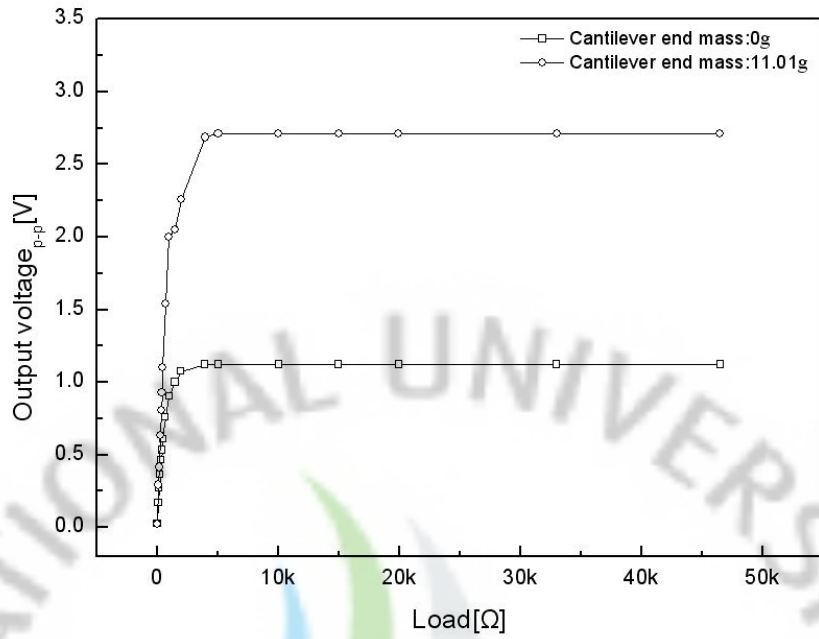


Fig. 4-6 Variation of measured output voltage by electrical load

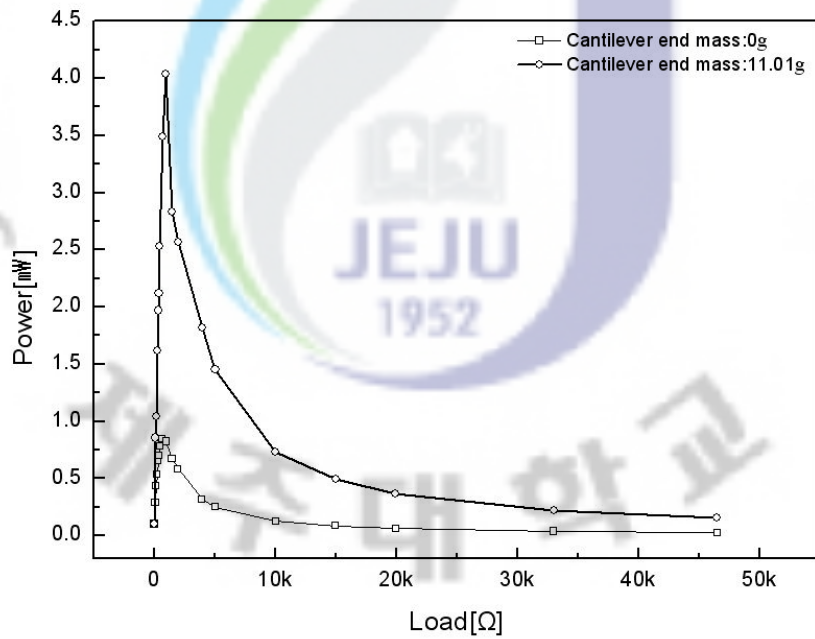


Fig. 4-7 Variation of measured power by electrical load

## 5. 결 론

본 연구에서는 압전 소자를 이용한 에너지 수확기법의 타당성을 제시하는 동시에 주위에서 쉽게 얻을 수 있는 에너지수확시스템 제안을 위하여 다음의 조건으로 실험을 수행하였다.

- 실험에 사용된 캔틸레버는 알루미늄의 재질을 사용하였으며, 길이는 각각 150, 170, 190, 210mm이다.
- 부하에 따라서 변동되는 압전 캔틸레버의 주파수 특성을 확인하기 위하여 캔틸레버 끝단에 0, 2.22, 4.34, 5.87, 8.66, 11.01g의 질량을 고정하였다.
- 압전 캔틸레버에 부착되는 압전 소자의 크기는  $45 \times 11 \times 0.6$ mm이며, 초기 부착점을 "0"점으로 하여 캔틸레버의 길이가 150mm일 때에는 40mm까지 0, 10, 20, 30, 40mm 순으로 압전 소자를 이동시켜 부착하였으며, 캔틸레버의 길이가 길어짐에 따라 20mm씩 압전 소자의 이동거리도 늘렸다.

실험을 통하여 얻은 결론을 정리하면 다음과 같다.

1. 캔틸레버의 길이와 질량을 적절하게 조절하여 압전 캔틸레버의 고유 진동수를 변화시켜 적용할 대상의 주파수와 일치 되었을 때 최대 에너지를 얻을 수 있었다.
2. 압전 소자를 캔틸레버 위에서 이동시켜가며 실험한 결과 캔틸레버를 아크릴 원통에 고정시킨 부분과 가까운 곳에 압전 소자를 고정하였을 때 최대 전압을 출력하였다. 이는 캔틸레버가 고정된 부분과 가까운 곳이 자유롭게 움직이는 부분보다 가해지는 응력이 크게 되며 이때 캔틸레버에 가해지는 응력이 압전 소자에도 가해져 출력되는 전압이 다른 부분보

다 더 높게 출력되는 것으로 사료된다. 하지만, 큰 에너지를 얻기 위해 압전 소자가 깨질 수 있는 응력을 가하지 않도록 주의해야 할 것이다.

3. 부하저항에 의해 출력되는 전력을 알아보기 위한 실험을 수행한 결과 동일한 캔틸레버 끝에 질량을 올렸을 때가 올려놓지 않았을 때보다 더 큰 전력을 얻을 수 있는 것으로 나타났다. 이것은 일정한 캔틸레버의 길이 끝에 질량을 올려둔다면 압전캔틸레버의 고유 진동수가 낮아져 압전캔틸레버의 임피던스 값이 증가함에 따라 출력되는 전력이 증가할 것으로 판단된다.
4. 본 연구에서 얻어진 실험결과와 제안된 실험 장치는 압전 소자를 이용한 에너지 수확장치의 특성을 확인하는데 매우 유용하게 쓰일 것으로 사료된다.

최근에 야생동물 추적시스템, 농작품 재배환경 모니터링 시스템, 교량 모니터링 시스템, 실내환경 관리 시스템, 기상관측 시스템과 같은 유비쿼터스 센서 네트워크에 전원으로 사용되고 있는 배터리를 대신하여 압전캔틸레버형 에너지 수확장치를 적용한다면 장기적으로 안정적인 전원 공급이 가능하고, 유지 보수를 위한 노력과 비용이 전혀 들지 않으면서 전원을 공급할 수 있을 것이다.

## 참고문헌

- [1] K. Stangel, S. Kolnsberg, D. Hammerschmidt, B. J. Hosticka, H. K. Trieu and W. Mokwa, 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, K. Hslao, J. Strickon, J. Lifton and A. Adler, 2000, "Sensor systems for interactive surfaces", IBM Systems Journal, Vol. 39, No. 5, pp.592-914.
- [3] Joseph A. Paradiso and Thad Starner, 2005, "Energy Scavenging for Mobile and Wireless Electronics", IEEE Pervasive Computing, Vol. 4, Issue 1, pp.18-27.
- [4] T. Starner, 2002, "Thick Clients for Personal Wireless Devices", IEEE Computer, Vol. 35, No. 1, pp.133-135.
- [5] Steven R Anton and Henry A Sodano, 2007, "A review of power harvesting using piezoelectric materials (2003-2006)", SMART MATERIALS AND STRUCTURES, Vol. 16, No. 3, pp.R1-R21.
- [6] Hyung-Chan Kim, Hyun-Cheol Song, Dae-Yong Jeong, Hyun-Jai Kim, Seok-Jin Yoon and Byeong-Kwon Ju, 2007, "Frequency Tuning of Unimorph Cantilever for Piezoelectric Energy Harvesting", Korean Journal of Materials Research, Vol. 17, No. 12, pp.660-663.
- [7] 문석준 and 광문규, 2006, "진동을 이용한 Energy Harvesting 기술의 연구동향", 기계와 재료, 18권, 2호, pp.104-111.
- [8] Oh Jae-geun, 2005, "SAW Based Passive Radio Sensors using Energy Gathering Method", Ph.D. Dissertation, Sogang University, pp.1-212.
- [9] John Kymissis, Clyde Kendall, Joseph Paradiso and Neil Gershenfeld, October 1998, "Parasitic Power Harvesting in Shoes", Proceeding of the Second IEEE International Conference on Wearable Computing(ISWC), pp. 132-139.
- [10] Paradiso, J. A. and Starner T., 2005, "Energy Scavenging for Mobile and Wireless Electronics", IEEE Pervasive Computing, Vol. 4, No. 1, pp. 18-27.
- [11] Stephen R. Platt, Shane Farritor and Hani Haider, 2005, "On Low-Frequency Electric Power Generation with PZT Ceramics", IEEE/ASME TRANSACTIONS ON MECHATRONICS, Vol. 10 No. 2, pp.240-252.
- [12] Shashank Priya, 2005, "Modeling of Electric Energy Harvesting Using Piezoelectric Windmill", APPLIED PHYSICS LETTERS Vol. 87, No. 18, pp. 184101-1-3.
- [13] Robert Myers, Mike Vickers, Hyeoungwoo Kim and Shashank Priya, 2007, "Small scale windmill", Applied Physics Letters, Vol. 90, Issue 5, pp.054106-1-3.

- [14] [http://cafe.naver.com/bestsol.cafe?iframe\\_url=/ArticleRead.nhn%3Farticleid=1176](http://cafe.naver.com/bestsol.cafe?iframe_url=/ArticleRead.nhn%3Farticleid=1176)
- [15] [http://www.americanpiezo.com/piezo\\_theory/index.html](http://www.americanpiezo.com/piezo_theory/index.html)
- [16] S.J. Roundy, 2003, "Energy scavenging for wireless sensor nodes with a focus on vibration to electricity conversion", Ph.D. Dissertation, University of California, Berkeley, pp. 1-287.
- [17] R. D. Blevins, 2001, "Formulas for natural frequency and more shape", Krieger publishing company, Malabar, Florida.



## 감사의 글

처음 대학원 생활을 시작하게 되면서 처음으로 접하게 되었던 압전은 저에게 너무나 생소하였던 분야였습니다. 하지만, 2년 동안의 대학원 생활을 하면서 많은 경험을 쌓게 되면서 때론 좌절을 맛볼 때가 있었고, 때론 자신감을 얻을 수 있었던 귀중한 시간 이었습니다. 이러한 시간을 보내다가 해이해질 때쯤 이런 저를 바로 잡아주기 위해 지도와 충고를 아끼지 않으셨던 분들에게 감사의 마음을 전해드리고자 합니다.

학연과정이라 멀리 떨어져 있어도 많은 지도와 충고를 아끼지 않으셨던 지도교수님이신 임중환 교수님께 깊은 감사의 마음을 전합니다. 이번 졸업논문심사 때 많은 도움과 격려를 해주셨던 조경호 교수님, 항상 조언을 아끼지 않으셨던 김상재 교수님, 언제나 힘이 되어주신 최경현 교수님, 학생들을 먼저 생각해주는 강철웅 교수님, 이렇게 제자들을 위해 노력해주시는 메타트로닉스공학과 다섯 분의 교수님들과 2년 동안의 대학원 생활을 할 수 있도록 많은 도와주신 양형찬 조교선생님과 고동관 조교선생님께 감사의 마음을 전합니다.

제가 지금 여기까지 올 수 있었던 원동력은 아마 저희 지능로봇실협실의 선·후배님일 것입니다. 우리 실험실의 정신적 지주이자 대뺨이신 강승균 선배님, 항상 저희 실험실 후배들을 챙겨주시는 김재철 선배님, 어떤 일이든지 최선을 다하시는 최민호 선배님, 후배들에게 뭔가를 한 가지라도 더 가르쳐주시는 김상철 선배님, 항상 걱정 해주시고 도움을 주시는 송도성 선배님, 연락이 될 때마다 저를 항상 응원 해주셨던 오동훈 선배님, 이제 곧 결혼하시는 희철이형, 항상 바쁜 연승이형, 대전에서 외로울 때면 연락해줬던 승보형, 정보형에게 감사하며, 우리 실험실 후배인 동진이, 수희, 덕남이, 준호, 상윤이, 정현이께도 고맙다는 말을 전합니다.

대전에서 대학원 생활을 하는데 있어서 많은 지원과 격려를 아끼지 않으시고, 경험과 많은 것을 배울 수 있도록 도움을 주셨던 같은 고향 출신이신 윤소남 박사님, 저에게 자신감을 불어 넣어주시는 함영복 박사님, 저에게 격려와 가르침을 주셨던 박중호 박사님, 2년 동안 조언을 아끼지 않으셨던 서우석 박사님, 감사의 글에 이름 넣지 말라고 하시면서 도움을 주셨던 공태우 박사님, 지금은 옆에 없으시지만 그동안 대전에서 지낼 수 있도록 많은 도움을 주셨던 찬용이형, 준혁이형, 원용이형, 정미, 이제 곧 떠날 덕용씨, 이것저것 부탁들어준 유리, 이런저런 얘기 다 들어주었던 재곤이형, 형일이형, 평원이형, 나의 짜증 다 받아주면서 많이 힘들어 했을 우리 팀의 막내 훈아, 이렇게 한 식구였던 스마트디바이스연구팀이었던 모든 분들께 감사드립니다.

고등학교 시절부터 지금까지 함께 있어주었던 친구들 항상 힘이 되어주고 질타를 멈추지 않았던 지금은 유부남이 된 상훈이, 실험실 생활을 함께 했던 군집이, 지금은 자주 볼 수 없지만 열심히 생활하고 있을 상수, 우리 친구 중에 제일 멋진 순조, 친구 중에 노래 제일 잘 부르는 채훈이, 말이 많은 현석이, 이제 정신 차리고 대학생활 즐기고 있는 대근이, 열심히 살고 있는 연종이, 일주일 내내 일에 쫓겨는 명식이, 비록 고등학교 친구는 아니지만 정말 친

하게 지냈던 승주에게 감사합니다. 일일이 이름을 거론하지 못하지만 대학생활을 함께 했던 대학교 선배님들과 동기 후배들에게도 감사의 마음을 전합니다. 2년 동안의 대학원 생활을 같이 했던 준철이형과 준우형에게는 축하드립니다.

처음 대학원 입학할 때 기뻐 해주시고, 많은 격려를 아끼지 않으셨던 가족이 있습니다. 홀로 계시는 할머니, 지금은 만나 볼 수 없는 곳으로 떠나신 저희 가족의 정신적 지주이셨던 큰아버지, 큰어머니, 가장 성공한 우리 명훈이형, 진훈이형, 말쑥 아버지네 가족, 작은 아버지네 가족, 우리 가족에 하나밖에 없는 고모네 가족 모두에게 감사의 마음을 전해드리고 싶습니다. 그리고 24년 동안 많이 싸우기도 하고 옆에 항상 있어줬던 저의 동생 경건이, 마지막으로 28년 동안 저를 키워주시고 뒷바라지 해주셔서 너무 고생하셔서 지금 병마와 싸우고 계시는 아버지, 저를 항상 믿어주시는 어머니께 이 논문을 받치고자 합니다.

2009년 1월 어느 날 논문을 마치며……

