

碩士學位論文

분극전계가 Morphotropic 상경계 PZT  
세라믹스 기판의 공진주파수 온도의존성에  
미치는 영향



濟州大學校 大學院

電氣工學專攻

梁 完 碩

2009 年 12 月

# 분극전계가 Morphotropic 상경계 PZT 세라믹스 기판의 공진주파수 온도의존성에 미치는 영향

指導教授 李 開 明

梁 完 碩

이 論文을 工學 碩士學位 論文으로 提出함

2009年 12月

梁完碩의 工學 碩士學位 論文을 認准함

審査委員長

金 豪 贊



委 員

吳 性 寶



委 員

李 開 明



濟州大學校 大學院

2009年 12月

**The Effect of Polling Intensity on Temperature  
Stability of Resonance Frequency of PZT  
Ceramic Substrates with the Compositions near  
Morphotropic Phase Boundary**

**Wan-Seok Yang**

**(Supervised by professor Gae-Myoung Lee)**

**A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT  
OF THE REQUIREMENT FOR THE DEGREE OF  
MASTER OF ENGINEERING**

**FACULTY OF APPLIED ENERGY SYSTEM  
GRADUATE SCHOOL  
JEJU NATIONAL UNIVERSITY**

**2009. 12.**

## 목 차

LIST OF FIGURES .....	i
LIST OF TABLE .....	iii
SUMMARY .....	iv
I. 서 론 .....	1
II. 압전세라믹스의 이론적 배경 .....	3
1. 강유전성 결정 .....	3
2. 세라믹스의 전기분극에 의한 압전현상 .....	4
3. 공진주파수 온도변화 특성 .....	6
4. 압전세라믹스 공진자의 특성 .....	7
III. 에너지 하비스팅 .....	10
1. 에너지 하비스팅의 배경 .....	10
2. 압전소자의 전망 .....	11
3. 연구동향 및 응용 분야 .....	12
4. 기본 원리 .....	14
IV. 실 험 .....	16
1. 시편 제작 .....	16
2. 측정 .....	18
1) 밀도 측정 .....	18
2) 유전율 측정 .....	18

3) 전기기계 결합계수 .....	18
4) X-ray 회절 분석 .....	18
5) 공진주파수 온도안정성 측정 .....	19
<b>V. 실험결과 및 고찰 .....</b>	<b>20</b>
1. 분극 전과 분극전계의 세기에 따른 유전율 .....	20
2. 각 조성 분극세기별 전기기계 결합계수 .....	20
3. 각 조성 온도에 따른 분극세기별 전기기계 결합계수 .....	21
4. 각 조성 분극별 X-ray 회절 분석 .....	24
5. 각 조성 분극별 온도변화에 따른 공진주파수의 변화 .....	26
<b>VI. 결 론 .....</b>	<b>30</b>
<b>참 고 문 헌 .....</b>	<b>31</b>

## LIST OF FIGURES

Fig. 1	Classification of crystal class .....	3
Fig. 2	Lattice structure .....	4
Fig. 3	Poling of ferroelectric ceramics .....	5
Fig. 4	Polarization characteristics of PZT .....	6
Fig. 5	Temperature coefficient of resonance frequency in Pb(Zr <sub>1-x</sub> Ti <sub>x</sub> ) O <sub>3</sub> -based ceramics .....	7
Fig. 6	A symbol and an electrical equivalent circuit of a piezoelectric ceramic resonator .....	8
Fig. 7	Impedance and phase characteristics of a piezoelectric ceramic resonator .....	8
Fig. 8	An equivalent circuit of a piezoelectric ceramic resonator in the frequency band $f_r \leq f \leq f_a$ .....	9
Fig. 9	Energy harvesting using a piezoelectric material .....	10
Fig. 10	The rectifier with a capacitor for filtering .....	11
Fig. 11	Fabrication process of piezoelectric ceramics .....	13
Fig. 12	The aspect of the standard piezoelectric ceramic specimen for the length extensional vibration .....	15
Fig. 13	Measuring system of temperature characteristics .....	19
Fig. 14	Relative dielectric constants change of the specimens according to the composition ratio before and after electric poling(1.5, 2.5, 3.5[kV/mm]) .....	20
Fig. 15	Electromechanical coupling factors for length extensional vibration of the specimens with the respective composition ratio(1.5 ,2.5, 3.5[kV/mm]) .....	21
Fig. 16	Electromechanical coupling factors for length extensional vibration of the specimens with the temperature for respective composition ratioPb(Zr <sub>0.51</sub> Ti <sub>0.49</sub> )O <sub>3</sub> (1.5 ,2.5, 3.5[kV/mm]) .....	22
Fig. 17	Electromechanical coupling factors for length extensional vibration of the specimens with the temperature for respective composition ratioPb(Zr <sub>0.52</sub> Ti <sub>0.48</sub> )O <sub>3</sub> (1.5 ,2.5, 3.5[kV/mm]) .....	22
Fig. 18	Electromechanical coupling factors for length extensional	

	vibration of the specimens with the temperature for respective composition ratio $\text{Pb}(\text{Zr}_{0.53}\text{Ti}_{0.47})\text{O}_3$ (1.5, 2.5, 3.5[kV/mm]) .....	23
Fig. 19	Electromechanical coupling factors for length extensional vibration of the specimens with the temperature for respective composition ratio $\text{Pb}(\text{Zr}_{0.54}\text{Ti}_{0.46})\text{O}_3$ (1.5, 2.5, 3.5[kV/mm]) .....	23
Fig. 20	Electromechanical coupling factors for length extensional vibration of the specimens with the temperature for respective composition ratio $\text{Pb}(\text{Zr}_{0.55}\text{Ti}_{0.45})\text{O}_3$ (1.5, 2.5, 3.5[kV/mm]) .....	24
Fig. 21	XRD patterns of the specimens with $\text{Pb}(\text{Zr}_{0.51}\text{Ti}_{0.49})\text{O}_3$ composition according to the poling strength .....	24
Fig. 22	XRD patterns of the specimens with $\text{Pb}(\text{Zr}_{0.52}\text{Ti}_{0.48})\text{O}_3$ composition according to the poling strength .....	25
Fig. 23	XRD patterns of the specimens with $\text{Pb}(\text{Zr}_{0.53}\text{Ti}_{0.47})\text{O}_3$ composition according to the poling strength .....	25
Fig. 24	XRD patterns of the specimens with $\text{Pb}(\text{Zr}_{0.54}\text{Ti}_{0.46})\text{O}_3$ composition according to the poling strength .....	26
Fig. 25	XRD patterns of the specimens with $\text{Pb}(\text{Zr}_{0.55}\text{Ti}_{0.45})\text{O}_3$ composition according to the poling strength .....	26
Fig. 26	Temperature characteristics of resonance frequency of the specimens with $\text{Pb}(\text{Zr}_{0.51}\text{Ti}_{0.49})\text{O}_3$ composition according to the poling strength .....	27
Fig. 27	Temperature characteristics of resonance frequency of the specimens with $\text{Pb}(\text{Zr}_{0.52}\text{Ti}_{0.48})\text{O}_3$ composition according to the poling strength .....	28
Fig. 28	Temperature characteristics of resonance frequency of the specimens with $\text{Pb}(\text{Zr}_{0.53}\text{Ti}_{0.47})\text{O}_3$ composition according to the poling strength .....	28
Fig. 29	Temperature characteristics of resonance frequency of the specimens with $\text{Pb}(\text{Zr}_{0.54}\text{Ti}_{0.46})\text{O}_3$ composition according to the poling strength .....	29
Fig. 30	Temperature characteristics of resonance frequency of the specimens with $\text{Pb}(\text{Zr}_{0.55}\text{Ti}_{0.45})\text{O}_3$ composition according to the poling strength .....	29

## LIST OF TABLE

Table 1 Evolution of the power consumption .....	12
Table 2 Example of the power consumption .....	12
Table 3 Grade and the manufacturers of starting materials .....	17





## SUMMARY

Effects of poling electrical intensity on resonance frequency and electro-mechanical coupling factor of PZT ceramics with the composition near morphotropic phase boundary were investigated.

The dielectric constant of specimens with tetragonal phase increased according to increasing poling intensity. Impedance matching of ceramic filters depends on dielectric constant of the substrates. In fabrication process of the devices, poling electrical intensity must be carefully controlled.

The electromechanical factors of the specimens with all compositions did not almost changed in the temperature range  $-20\sim+80$ [ $^{\circ}\text{C}$ ]. As the composition of the specimen come to the one nearer to morphotropic phase boundary, the changing degree of resonance frequency according to increasing poling electrical intensity increased. So, careful control of poling intensity is necessary to fabricating ceramic resonator or filter using the specimens with the morphotropic phase boundary because the devices have exact operating frequency.

## I. 서론

압전재료의 역사는 1880년 프랑스의 Curie형제가 전기석(tourmalin)에서 압전 효과를 발견함으로써 시작되었다. 1940년 까지는 단결정이 초음파 탐지기나 공진자(resonator) 등의 응용분야에 가장 중요한 압전재료였다. 그러다가 1947년 미국의 S. Roberts가 BaTiO<sub>3</sub> 세라믹스를 발견함으로써 세라믹계 압전재료의 연구가 시작되었다.

압전체는 일반적인 고체와 달리 기계적 응력을 받으면 변형과 더불어 압전 세라믹의 분극 현상에 의해 전하가 발생한다. 이것을 압전 정효과라고 하는데, 에너지 수확 기술(energy harvesting)의 한 가지 방안으로서 이러한 압전 효과를 바탕으로 진동이나 충격 같은 버려지는 기계적 에너지를 사용하여 발전하는 에너지 회수 시스템(energy recovery system)은 최근 USN(ubiquitous sensor network)과 hybrid 기술 분야에서 많은 주목을 받고 있다[1].

외부의 버려지는 태양열, 진동, 열등의 에너지를 유용한 전기에너지로 변환시키는 에너지 하베스터(harvester)를 이용하여 센서노드를 구동시키는 등 에너지를 회수하는 방법이 관심을 끌고 있다. 최근에는 MEMS 기구의 급격한 발달등으로 기계적 진동을 전기적에너지로 변환 할 수 있는 압전 소자가 그 대안으로 떠오르고 있다. 압전소자의 압전 현상을 이용한 발전은 높은 에너지 밀도와 비교적 간단한 발전기기의 구조로 많이 연구되고 있다. 압전발전에서 생성되는 전기적인 에너지는 기계적 에너지를 전기 에너지로 변환하는 재료의 기계-전기 결합계수(k)의 제공에 비례하며, k 값이 0.5인 세라믹 압전재료 Pb(ZrTi)O<sub>3</sub>가 많이 이용되고 있다.

B. Jaffe가 발견한 우수한 압전성과 특징의 안정성을 갖는 PZT는 PbZrO<sub>3</sub>과 PbTiO<sub>3</sub>의 두 성분이 합해진 조성을 가지므로 기본 2성분계 조성이라 한다. 이 PZT에 하나 이상의 페로브스카이트 구조, ABO<sub>3</sub>구조의 산화물이 첨가된 조성을 복합형 3성분계 또는 복합형 다성분계라 하며, 기본 2성분계 PZT보다 폭넓은 압전 특성 범위를 얻을 수 있고, 다양한 조성이 개발되어 주파수 소자용 재료로 사용되어지고 있다.

주파수 소자와 밀접한 관련이 있는 재료특성은 전기기계결합계수, 유전율, 기

계적 품질계수, 온도특성, 경시변화 특성 등이 있으며, 이 특성들은 세라믹스의 입계의 크기, 입계의 구조, 분극 정도 등에 의해서도 크게 변화될 수 있다[2].

소성된 압전세라믹스는 미시적으로는 자발분극(spontaneous polarization)이 한 방향으로 배열한 분극(polarization)이 존재하지만 각각의 분역(domain)이 무질서하게 배열되어 서로 상쇄되므로 거시적으로는 분극이 나타나지 않고 압전성도 띠고 있지 않는다. 따라서 소성된 시편에 강한 직류 고전압을 일정시간 인가하면 각각의 결정 입자 내에 있는 자발분극이 가해준 전계 방향으로 재배열하게 되며 전계를 제거하여도 이 상태는 거의 그대로 보존되게 되어 압전 성질이 존재하게 된다. 이때 전체적인 분극의 크기는 전계 방향 성분 크기의 합으로 되어 매우 큰 분극이 존재하는 것과 같이 된다. 이런 과정을 분극(poling)을 통해 다른 물성도 변화시킴을 알려져 있다[3]. 이 과정 중에 분역이 재배열하면서 입자(grain)간에 스트레스가 발생한다.

이러한 내부스트레스와 결정의 불완전성, 첨가물 등에 의해 발생하는 공간전하 분극이, 압전세라믹스가 갖는 특성의 시간과 온도에 대한 안정성에 영향을 미치는 것으로 설명되고 있다[3],[4].

PZT 세라믹스의 주된 응용 분야 중의 하나가 필터나 공진자와 같은 전기신호의 발생과 변조 소자 분이며, 이 분야로의 응용 시에 요구되는 중요한 특성중의 하나가 동작 주파수의 시간과 온도에 대한 안정성이다[5].

PZT 세라믹스는 조성의 변경이나 첨가물의 유무와 종류에 의해 온도특성이 크게 변하지만 분극과정이 소자의 제작에 필수적인 처리 과정이므로 분극 전계의 세기가 온도특성에 미치는 영향을 규명하는 것이 세라믹스 소자의 온도특성 개선에 필수적이다.

본 논문에서는 에너지 수확 기술(energy harvesting)에 사용되어지고 있는 PZT 세라믹스는 전기기계결합계수가 큰 영향을 미치게 된다. 따라서, PZT 계열 세라믹스의 Morphotropic 상경계인 부근의 Zr/Ti = 51/49, 52/48, 53/47, 54/46, 55/45 조성 5가지 세라믹스를 제작하고 각 조성에서 분극전계의 크기가 전기기계결합계수의 온도의존성에 미치는 영향을 실험으로 알아보고, 또한 분극 전계의 세기가 세라믹스 소자의 공진주파수 온도특성에 미치는 영향 및 특성을 조사하였다.

## II. PZT세라믹스의 이론적 배경

### 1. 강유전성 결정

모든 결정은 Fig. 1과 같이 그 대칭관계에 의해 32개의 결정군으로 분류되며, 이중 대칭중심을 갖는 11개 그룹은 압전성이 없고, 나머지 대칭중심을 갖지 못하는 21개 그룹중에서 20개의 결정그룹이 전기적으로 부도체인 결정에서 압전특성이 존재한다. 이 중에서 비대칭성이 큰 10개 그룹은 전계나 응력이 가해지지 않는 상태 하에서 자발적으로 분극되어 있는데 이를 초전성 결정이라 한다. 이 중에서 전계에 의해 극성의 방향이 바뀌는 것이 강유전성이며 압전현상은 강유전성 결정에서 현저하게 나타난다.

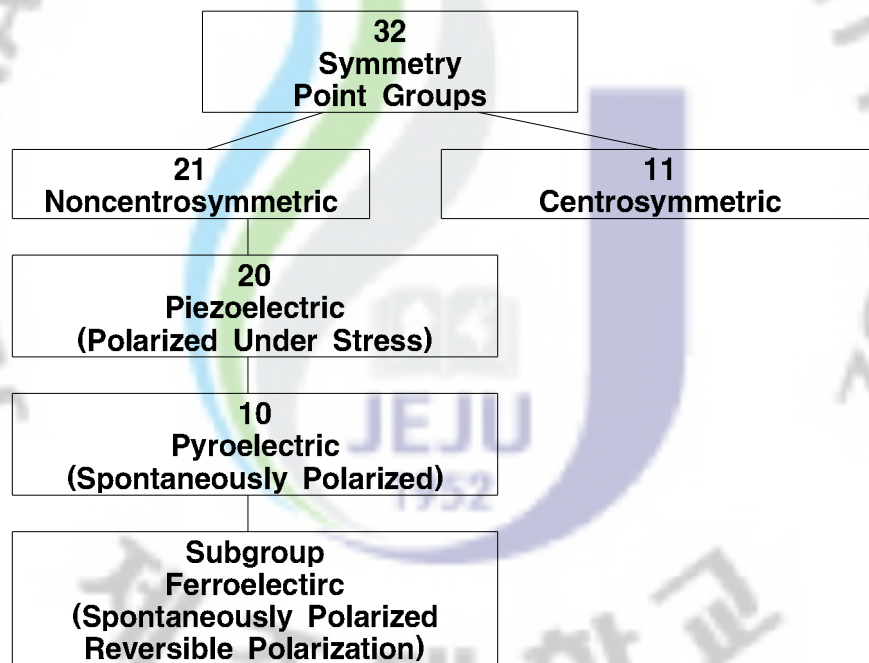


Fig. 1 Classification of crystal class

Fig. 2의 (a)는 등방성 결정 구조이고 (b)는 전기적인 면에서 이방성 결정 구조를 갖고 있기 때문에 외부에 힘을 가하면 각  $\theta$ 가 변하고 따라서 분극의 크기가 변하게 되어 전계가 발생하는데 이를 정효과라 하고 역으로 결정의 외부에 전계를 가하면 분극치가 변하며 이에 따라 응력이 생기는데 이를 역효과라 하며 이

두 효과를 압전효과라 한다.

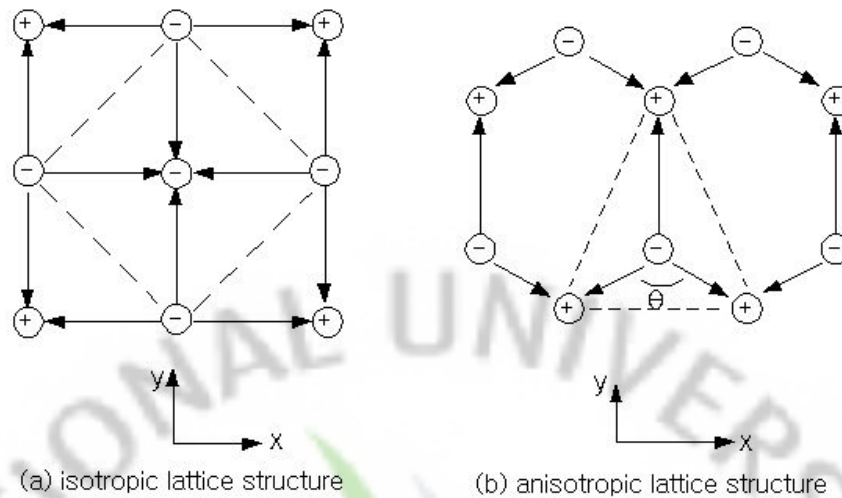


Fig. 2 Lattice structure

## 2. 세라믹스의 전기분극에 의한 압전현상

고체인 무기물은 원자와 이온의 배열이 3차원의 규칙적 배열로 되어있는 결정(crystal)과 불규칙적으로 배열되어 있는 비정질(amorphous)로 분류되는데, 결정은 수정처럼 하나의 입자로 이루어진 단결정과 이러한 단결정들의 집합으로 이루어진 다결정으로 나뉘며 세라믹스는 다결정의 구조를 갖는다.

결정체는 장력, 압력, 또는 응력(stress)을 받게되면 비틀림(strain)이 생기며 결정체내에 유기분극(polarization)을 발생하거나 압전을 발생하는데, 역으로 결정체에 전계를 가해 분극을 일으키면 결정체는 비틀리거나 응력을 갖는다. 이러한 결정체는 기계에너지로서의 응력, 비틀림 또는 전기에너지로서의 분극 및 전위차로 변화되는데 이것이 압전현상이다.

PZT 세라믹스는 소성시 자발분극이 존재하지만 각각의 방향이 랜덤하기 때문에 서로 상쇄되어서 전체적으로 보면 분극이 존재하지 않는 결과를 나타내고 압전성도 띠고 있지 않다.

소성된 세라믹스에 강한 직류전계를 일정 시간 가하는 분극(poling) 처리를 함으로써 압전성질은 부여되는데, 강유전체 세라믹스에 강한 직류전계를 가하는 분극과정을 통해 각각의 결정 입자 내에 있는 분극의 방향은 가해진 전계 방향으로 배열되게 되며, 이 상태는 전계를 제거하더라도 거의 그대로 보존되게 되어 전체적인 분극의 크기는 전계방향으로 배열된 각 성분크기의 합

으로 되어 Fig. 3 과 같이 매우 큰 분극이 존재하는 것과 같이 된다.  
 분극이 완료된 압전세라믹 기판에 외부 미소 전계가 가해졌을 경우 이 전계의 방향이 내부 전계의 방향과 일치하면 신장, 반대 방향이면 수축하게 되는데, 이것이 압전 현상이다.

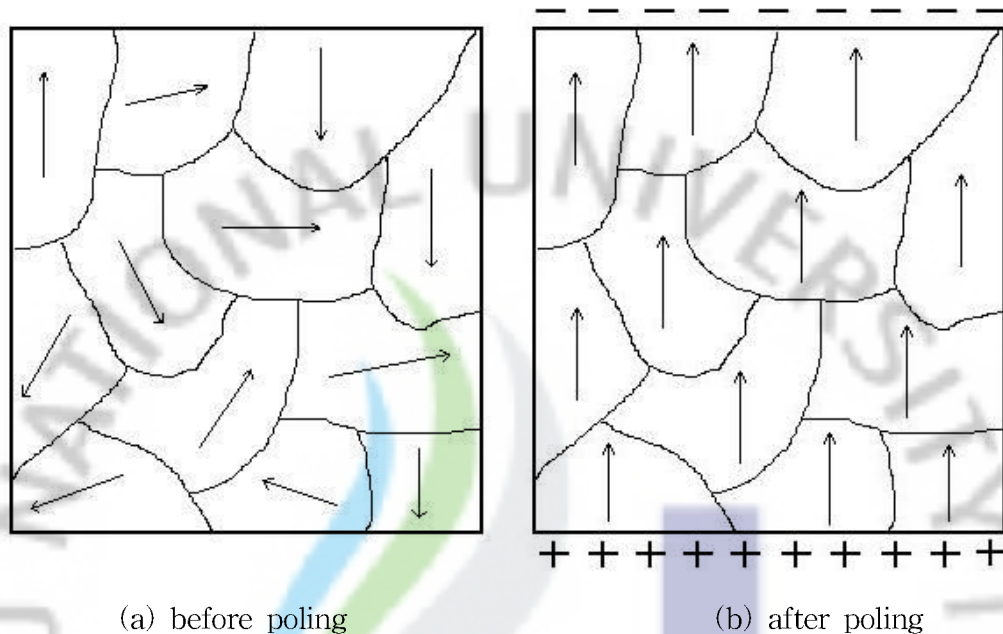
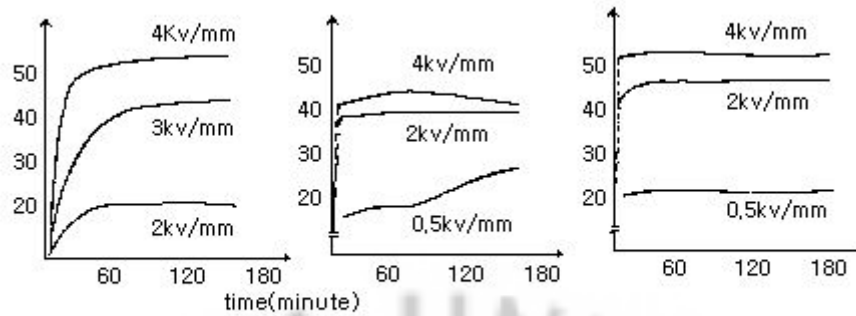


Fig. 3 Poling of ferroelectric ceramics

분극전계 과정에서 중요한 요인으로 직류전계의 세기, 분극온도 및 시간이다. 일반적으로 연화제(softner) 첨가시가 경화제(hardener) 첨가시 보다 더 낮은 전계하에서 분극(poling)을 할 수가 있다. 또한 분극시 전계의 세기나 분극시간은 Fig. 4에 나타나 있는 바와 같이 PZT 압전체의 전기기계 결합계수에 주로 큰 영향을 미친다.

반면, 분극전계를 낮추려면 분극시간을 길게 하여야 하고 분극시간을 짧게 할 경우에는 분극온도를 높여야 한다. 실제 양산시에는 2~5초 동안에 고전압 펄스를 수회 반복하여 분극하는 것이 효과적인 방법이라고 알려져 있다.



(a) hard material (b) soft material (c) high stability material

Fig. 4 Polarization characteristics of PZT

### 3. 공진주파수 온도변화 특성

PZT 압전세라믹스가 세라믹 필터로 이용되기 위해서 요구되는 특성 중 가장 중요한 것 중의 하나가 온도에 따른 공진주파수(resonance frequency)의 변화가 작아야 한다는 것이다. 공진주파수( $f_r$ )는 재료 특성인 주파수 정수( $N_r$ )와 시편의 치수에 의해 결정되며 식 (1)과 같다.

$$N_r = f_r \cdot l = \frac{1}{2} \sqrt{\frac{c}{\rho}} \quad (1)$$

여기서,  $l$ 은 시편의 길이,  $\rho$ 는 밀도,  $c$ 는 탄성계수(elastic compliance)이다.

위 식으로부터 온도에 따른 공진주파수의 변화는 재료의 탄성특성과 열팽창에 의하여 영향을 받음을 알 수 있고, 재료의 이방성, 분역의 재배열등에 의해서도 영향을 받는다. 그리고 공진주파수의 온도계수(temperature coefficient of resonance frequency)에 가장 큰 영향을 주는 인자는 탄성계수의 온도에 따른 변화이다.

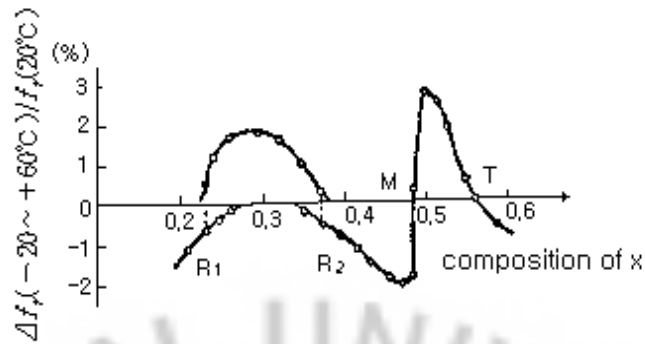


Fig. 5 Temperature coefficient of resonance frequency in  $\text{Pb}(\text{Zr}_{1-x}\text{Ti}_x)\text{O}_3$ -based ceramics

PZT계 세라믹스의 공진주파수의 온도계수를 결정하는 가장 중요한 요인이 Zr/Ti비이며, Fig. 5에서와 같이 Zr/Ti비가 증가함에 따라 공진주파수의 온도계수는 음에서 양으로 다시 음으로 변화하며, 정방정상(Tetragonal phase)영역과 MPB영역에서 '0'이 되는 조성점이 존재한다. MPB(morphotropic phase boundary) 영역의 '0'이 되는 조성점 근처에서는 Zr/Ti비에 따른 온도계수의 변화가 매우 급격하기 때문에 정방정상영역에서 공진주파수의 온도계수가 '0'이 되는 조성이 실제로 많이 응용되어지고 있[7],[8].

#### 4. 압전세라믹스 공진자의 특성

PZT계 세라믹스는 형태와 재질에 따라 고유 진동 주파수를 갖고 있으며, 외부에서 가해진 전기의 주파수가 이 고유의 진동주파수와 일치하게 되면 세라믹 기판은 최대 진폭으로 진동하게 되고, 공진자로서의 이용이 가능해진다. 이것이 세라믹 공진자의 원리이다.

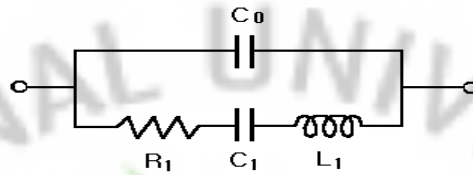
이러한 세라믹 공진자는 거의 대부분 2단자형이며, 이 공진자의 기호는 Fig. 6(a)와 같고, 공진주파수 부근에서 전기적으로 Fig. 6(b)와 같은 등가회로로 나타낼 수가 있다. 이 등가회로의 직렬단위  $R_1$ ,  $L_1$ ,  $C_1$  은 세라믹 기판의 기계적인 진동을 전기적으로 등가화 한 부분이다.  $C_0$ 는 시편의 전기적인 정전용량을 의미



한다. 여기서  $R_1$ 은 등가 저항,  $C_1$ 은 등가 컵플아이언스,  $L_1$ 은 등가 질량,  $C_0$ 는 병렬 등가 정전용량이다.



(a) Symbol



(b) An electrical equivalent circuit

Fig. 6 A symbol and an electrical equivalent circuit of a piezoelectric ceramic resonator

Fig. 7은 주파수의 변화에 따른 세라믹 공진자의 임피던스 및 위상특성을 나타내었다.

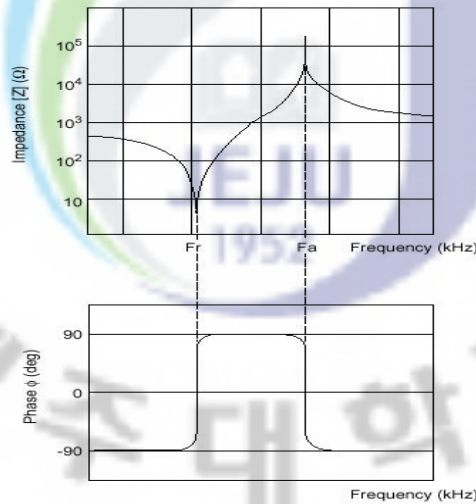


Fig. 7 Impedance and phase characteristics of a piezoelectric ceramic resonator

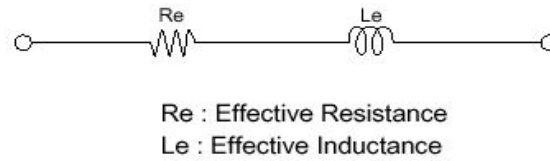


Fig. 8 An equivalent circuit of a piezoelectric ceramic resonator in the frequency band  $f_r \leq f \leq f_a$

임피던스가 최소, 최대가 되는 점에서의 주파수를 각각 공진주파수( $f_r$ ), 반공진주파수( $f_a$ )라고 하고 그 사이의 위상은  $90^\circ$  로 전기적으로 인덕턴스의 특성을 갖게 되고 그 밖의 주파수대에서는 위상이  $-90^\circ$  로 커패시턴스 특성을 갖는다. 따라서 세라믹 공진자는 Fig. 8과 같이  $f_r \leq f \leq f_a$ 인 범위에서 손실이  $R_e$ 로 표시되는 인덕터( $L_e$ )로 동작한다. 그리고 공진주파수( $f_r$ ) 및 반공진주파수( $f_a$ )는 식 (2), 식 (3)으로 나타낼 수 있다.

$$f_r = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_1 C_1}} \quad (2)$$

$$f_a = f_r \sqrt{1 + \frac{C_1}{C_0}} \quad (3)$$

이때 공진자의 임피던스  $Z(f)$ 는 다음과 같이 주파수 ( $f$ )의 함수로 나타낼 수 있다.

$$Z(f) = \frac{1}{j2\pi f C_0} \cdot \left( \frac{\frac{f^2 - f_r^2}{f_a^2 - f_r^2} + j2\pi f C_0 R_1}{\frac{f^2 - f_r^2}{f_a^2 - f_r^2} + 1 + j2\pi f C_0 R_1} \right) \quad (4)$$

### Ⅲ.에너지 하비스팅

#### 1.에너지 하비스팅의 배경

반도체 기술의 발전에 의한 저전력형 CMOS 의 개발로 자기 발전형 USN (Ubiquitous Sensor Networks) 구축에 관한 관심이 높아지고 있다. USN 은 많은 수의 무선 센서노드 (wireless sensor node) 를 넓은 면적에 임의로 분포시켜 주위환경을 감시하고, 실시간으로 모니터링 하는 것을 주요 쟁점으로 하고 있다. 그러나 넓은 면적에 임의적으로 분포된 센서노드를 구동하기 위하여, 배터리를 이용하여 주기적으로 교환하거나 전원코드를 이용하기 위하여 전선을 연결하는 것은 현실적으로 매우 어려운 일이다. 따라서, 외부의 버려지는 태양열, 진동, 열 등의 에너지를 유용한 전기에너지로 변환시키는 에너지 하베스터(harvester)를 이용하여 센서노드를 구동시키는 방법이 관심을 끌고 있다.

에너지 하베스팅을 위한 에너지원으로는 온도차, 기계적 진동, 태양열, 바람 등 많은 방법들이 있으나 그중 기계적 진동은 Power density가 높으며, 기후에 영향을 받지 않으며, 실내외에 구애를 받지 않아 에너지 하베스팅 응용에 많은 관심을 받아 왔다.

최근에는 MEMS 기구의 급격한 발달등으로 기계적 진동을 전기적에너지로 변환 할 수 있는 압전 소자가 그 대안으로 떠오르고 있다. 압전 소자는 액츄에이터와 같이 전기적 에너지를 가하여 기계적 에너지를 얻어 낼 수 있고, 반대로 발전기와 같이 기계적 에너지를 가하여 전기적 에너지를 만들어 낼 수 있는 물질이다[11].

압전 소자를 이용한 전기에너지 회수에 관한 개념은 Fig. 12 과 같이 설명된다 [12].

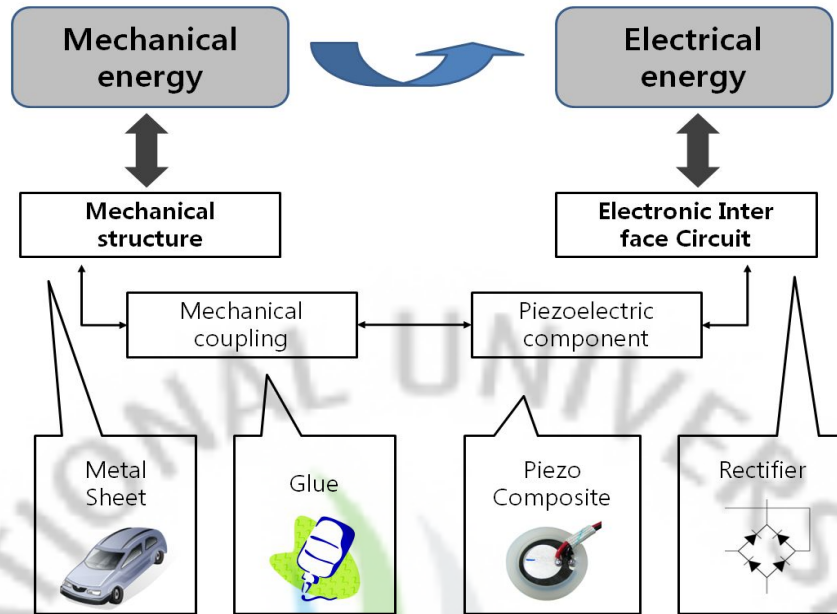


Fig 9. Energy harvesting using a piezoelectric material

Fig. 9 에 도시된 자동차의 경우 차체의 기계적 진동 에너지는 자동차가 운행 중이면 항상 발생되지만, 이 에너지는 단지 열에너지로 변환되어 소진되어 버린다. 만약 이러한 에너지를 모두 회수할 수 있는 방법이 있다면, 자동차의 연료가 절감된다고 볼 수 있다. 이와 같이 유용한 에너지로 변환되지 않고 버려지는 기계적 에너지는 일상 생활에서 많이 찾을 수 있다.

## 2. 압전 소자의 전망

압전 소자를 이용한 전력 생성 방법은 대부분의 전자 기기에 사용하기에는 압전 소자에서 생성되는 전력이 너무 작다는 문제가 있다. 따라서 이 전기 에너지 회수 기술이 유용한 적용 분야는 센서 응용, 마이크로 컨트롤러 전원, 원격 제어 기기, 저소모 전력의 아날로그 및 디지털 전자 기기, LED, LCD 등과 같은 저 전력으로 작동되는 전자 기기들이다. 대표적 휴대 기기의 소비 전력을 Table 1 에 기능별로 표시하였다. 이 소비 전력을 앞으로 Table 2 에 표시한 바와 같이 점점 감소되는 추세이므로 전기 에너지 회수 기술도 그 적용 범위가 더 넓어 질수 있

을 것이다[13].

Device/Year	Low	Typical	Intensive
GSM/1998	17.7 mW	37 mW	110 mW
GSM/2005 max.performance	9 mW	25 mW	70 mW
Bluetooth system/1998	12.5 mW	26.5 mW	48.5 mW
Bouetooth system/2005 max.performance	6.1 mW	19 mW	34 mW

Table 1. Evolution of the power sonsumption

Device	Function & Power consumption
Microprocessor (ARM 720T)	Load mode (50Mhz) : 90mW Stanby mode (50kHz) : 90 μW
MP3 player	110mW

Table 2. Example of the power consumption

### 3. 연구동향 및 응용 분야

압전 소자를 이용한 압전 연구 사례들을 보면 MIT 의 Shenk N.S 등은 신발에 PZT 와 PVDF 필름을 부착하여 사람이 걸을 때 발뒤꿈치에 가해지는 압력을 전기에너지로 변환하는 연구를 하였고[14], Lu F. 등은 압전재료를 이용한 발전기의 개념을 소개하며 외부저항에 따른 출력의 변화와 압전 재료에 작용하는 외력의 주파수에 따른 출력의 변화를 관찰하였다. Jeon Y.B. 등은 얇은 압전 필름을 이용하여 MEMS 기반의 발전기를 연구하였고[15], Sodano H.A. 등은 변환된 진동에너지를 2차전지에 축적해서 쓸 것을 제안했다.

그리고 PZT 를 이용해 발생시킨 전력을 2차전지에 충전하기 위해 여러 가지 연구들이 진행되어 왔다. Sodano H.A. 등은 자동차에서 발생하는 임의의 진동을

PZT를 이용하여 전기에너지로 변환시키고 브리지 정류기와 커패시터만을 이용한 간단한 정류회로를 이용해서 2차전지를 충전하는 실험을 하였고[16], Ottman G.K. 등은 압전 재료를 이용하여 진동에너지를 전기에너지로 변환하고 변환된 전기에너지를 2차전지에 효과적으로 전달하기 위한 회로를 연구하여 기본적인 정류기를 이용한 회로보다 4배 가량 더 높은 효율을 가지는 회로를 제안했다. 그리고 Chung G. 과 N해 K. D.T. 는 MOSFET 을 이용한 새로운 AC/DC 정류기를 제안하여 다이오드와 커패시터가 없는 소형 정류기의 가능성을 확인하였다 [17].

현재, Piezoelectric Energy Harvesting은 군수용 발전장치, 의료용 장치의 보조 전원, 자동차의 2차 발전장치, Wearable 전자제품등에 적용하기 위한 연구가 진행 중에 있으면, USN의 에너지원으로 검토가 되고 있다. 또한 Artificial heart, Pacemaker 용이나 Healthcare System 그리고 구조물 진단용 센서 전원 등의 소규모 전원뿐만 아니라, 로봇 등의 차세대 전자장치의 전원으로 응용 가능할 것으로 생각된다[18]. 이러한 여러 응용을 위해서 미국, 독일을 중심으로 연구가 활발히 진행되고 있으며, 특히 미국의 경우 Mechanical Engineering, Univ. of California at Berkeley, Center for Acoustics&Vibration, Pennsylvania State Univ., Center for Intelligent Material Systems and Structures, Virginia Polytechnic Institute and State Univ. 를 중심으로 이론적 접근뿐 아니라 energy harvesting 기술과 관련된 회로연구도 수행하고 있다.

현재 개발되고 있는 인간의 보행동작을 이용한 발전방법으로 압전 고분자 PVDF 와 유니몰프 압전 세라믹소재를 사용하였다. 이러한 소재를 이용한 발전 장치를 신발에 장착하여 걸기를 통해서 0.9mJ 정도의 에너지를 얻음을 보고하였다.

독일 EnOcean 사는 Transmitter module 에 압전 방식의 Power Generator 를 채택하고, 배터리가 필요 없이 스위치를 눌렀을 때 발생하는 에너지를 센서구동, RF 무선신호 송수신, 각종 변환기를 작동 시키는데 활용하였다.

또한 압전소자를 이용하여 Button push 방식의 Power Generator 의 경우 3mm×5N 의 힘으로 작동시 200 $\mu$ W 의 에너지를 얻을 수 있으며, 상대적으로 높은 효율을 보여준다.

미국의 Ferro Solutions Inc.는 Energy Harvester 라는 이름의 에너지 발전시스템을 개발하여 각종 무선 전자기기, 센서, MEMS 등에 응용하고 있으며 독일 업체인 nanoNet 사는 Macro Fiber Component(MFC) 블레이드의 진동을 이용하여 발전을 함과 동시에 RF 로 신호를 보내는 기술을 보유하고 몇가지 모델의 제품을 출시하고 있으며, 이때 작동전압은 2.7~3.6 V 이다[19], [20]. 특히 상대적으로 적은 진동으로도 배터리 없이도 데이터를 언제든지 보낼 수 있어서, 환경모니터링, 의료, 안전 시스템, 진동모니터링, 송수신 시스템 등의 응용이 가능하다.

한편 자동차 응용에 있어서 미래에는 환경보호 측면에서 전기자동차의 보급이 확대될 것이 확실해 된다. 이 경우 배터리 충전시간의 단축이 큰 과제로 남아 있으며, 이를 개선시키기 위한 방안으로 주행 중이나 공회전 중에도 자동차 엔진을 이용한 압전 발전 시스템에 대한 연구가 미국을 중심으로 진행되고 있다.

미국 MIDE, Inc.에서는 자동차에 사용가능한 발전장치와 무선 브레이크 측정 시스템을 개발하였다. 최근 일본의 도요타자동차는 자사 하이브리드 자동차에 자동차 엔진의 진동에너지로 압전 소재를 이용하여 전기에너지로 변화하여 배터리에 충전하는 시스템을 연구하고 있다.

#### 4. 기본 원리

압전 현상을 이용한 발전은 높은 에너지 밀도와 비교적 간단한 발전기기의 구조로 많이 연구되고 있다. 압전발전에서 생성되는 전기적인 에너지는 기계적 에너지를 전기 에너지로 변환하는 재료의 기계-전기 결합계수(k)의 제곱에 비례하며, k 값이 0.5인 세라믹 압전재료  $Pb(Zr/Ti)O_3$ 가 많이 이용되고 있다. 그러나 세라믹은 매우 단단하여 적은 진동에서 에너지를 발생시킬 수 없으며, 또한 잘 깨져서 큰 변형에는 사용할 수 없는 단점이 있다. 따라서, 압전 에너지 하베스팅에는 외부의 진동을 효과적으로 세라믹에 전달하여 세라믹의 변형을 크게 만들 수 있는 구조를 이용한다. 그중, “세라믹/유연한 기관” 구조의 캔틸레버(cantilever)는 작은 진동을 효과적으로 큰 변위로 확대할 수 있고, 세라믹의 깨지는 것을 억제할 수 있어 에너지 하베스팅에 많이 이용되고 있다[18].

Fig 10. 는 Piezoelectric Energy Harvesting 의 발전 구성도의 한 예를 나타낸

것이다. 구동회로의 원리를 살펴보면 먼저 압전 발전소자에 가해지는 외부충격이나 진계인가에 의한 진동에 의해서 압전 효과로 인해 압전소자에 교류신호가 발생되고 이를 직류로 정류하기 위해 Bridge Diode를 설치한다. 그리고 평활을 위한  $C_{rect}$  를 설치한다.

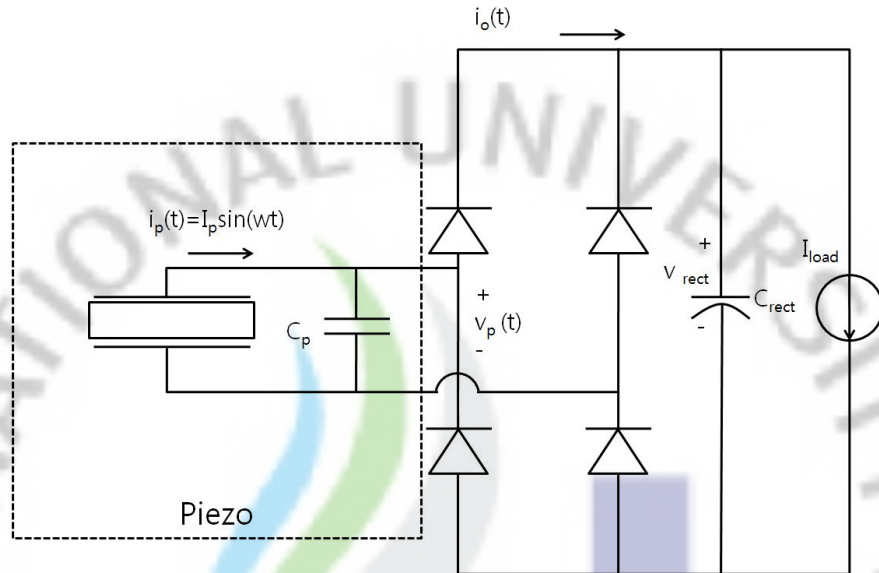


Fig 10. The rectifier with a capacitor for filtering

$C_p$  = internal electrode capacitance

$C_{rect}$  = dc filter capacitance

$v_p$  = piezoelectric voltage



## IV. 실험

### 1. 시편 제작

PZT 압전세라믹 시편의 제작 과정은 Fig. 11와 같다.

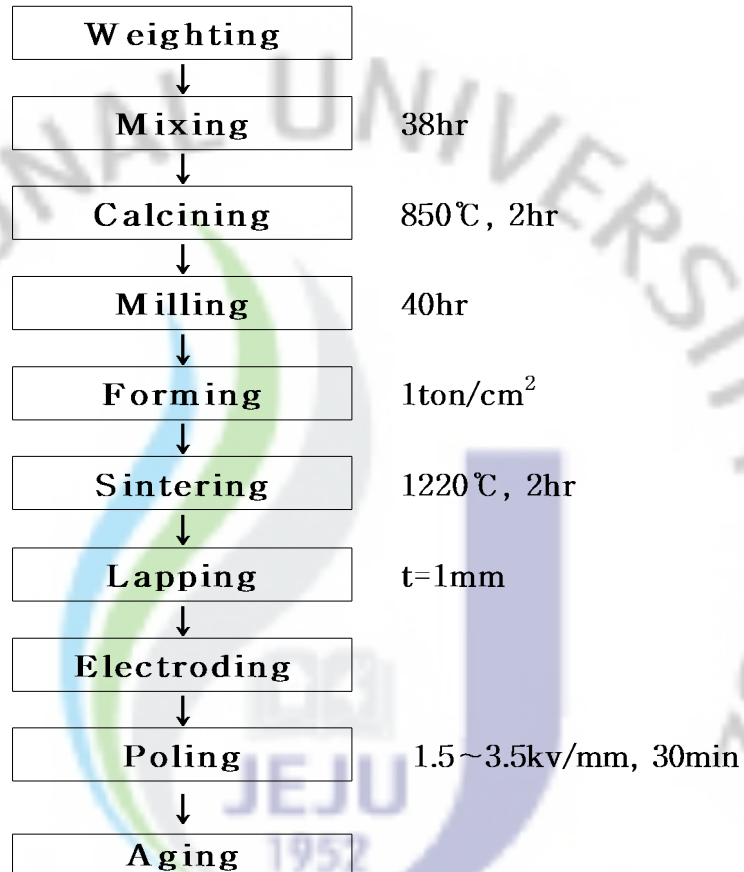


Fig. 11 Fabrication process of piezoelectric ceramics

시편은  $Pb(Zr_xTi_{1-x})O_3$  세라믹스의 Zr/Ti비가 각각 51/49, 52/48, 53/47, 54/46, 55/45인 조성의 분말을 산화물 혼합법으로 제조하였고, 이 PZT분말을 보통 소성법으로 Fig. 11와 같이 시편을 제작하고, 제작에 사용된 소원료의 순도와 제조회사를 Table 3 에 나타내었다. 소원료의 평량은 전자천평으로  $10^{-3}[g]$ 까지 하였고, 혼합은 소원료, 불(옥석)과 아세톤을 부피비로 1:1:1이 되도록 배합하여 nalgene병에 넣고 불밀로 320[rpm]의 속도로 38시간 습식 혼합하였다. 이 혼합된 원료는 150[°C] 온도에서 8시간 건조시킨 후 알루미나 도가니에 넣고 850[°C]에

서 2시간동안 1차열처리를 하였고, 다시 불밀로 40시간 건식 분쇄하였다.

분쇄된 시료에 5%의 PVA액을 5[wt%] 첨가하여 사각 몰드에 넣고 1[ton/cm<sup>2</sup>]의 압력으로 성형하였으며, 성형체를 650[°C]에서 2시간동안 유지하여 결합제를 제거하였고, 150[°C/h]의 승온속도로 1220[°C]에서 2시간 유지한 후 400[°C]까지 150[°C/h]로 강온하고, 그 이후로는 전기로안에서 자연 냉각시켜 2차 열처리를 하였다.

열처리가 완료된 시편은 Fig. 10과 같은 EMAS-6004 규격[L/w≥4, w/t≥3, L≥12]에 맞도록 1[mm]두께로 연마하여 은전극을 도포하였다[9].

Raw material	Purity [%]	Manufacturer
PbO	99.5	Hayashi Pure Chemical Industries. LTD.
TiO <sub>2</sub>	99.0	Hayashi Pure Chemical Industries. LTD.
ZrO <sub>2</sub>	99.0	Sigma Chemical Co.

Table 3. Grade and the manufacturers of starting materials

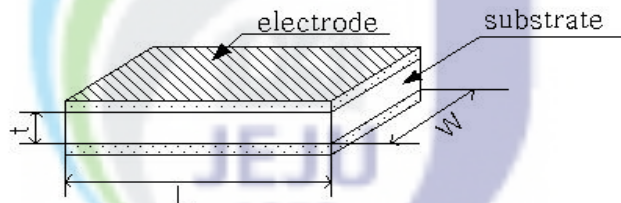


Fig. 12 The aspect of the standard piezoelectric ceramic specimen for the length extensional vibration

분극전계의 실험은 시편을 80[°C] 실리콘유 중에서 1.5, 2.5, 3.5 [kV/mm]의 직류 전계로 30분간 고온 분극하였다. 분극처리한 다음 20시간 가량 경과 후 시편의 특성을 측정하였다.

## 2. 측정

### 1) 밀도 측정

제작된 시편의 외형 치수와 질량을 측정하여 밀도를 계산하였다.

### 2) 유전율 측정

LCR미터로 시편의 정전용량을 측정한 후 식 (5)를 사용하여 비유전율  $\epsilon_r$ 을 계산하였다.

$$\epsilon_r = \frac{C_0 \cdot t}{S \cdot \epsilon_0} \quad (5)$$

여기에서 각각

$C_0$  : 시편의 커패시턴스[nF]

$S$  : 시편의 면적[mm<sup>2</sup>]

$t$  : 시편의 두께[mm]

$\epsilon_0$  : 공기중의 유전율 ( $8.854 \times 10^{-12}$ [F/m])

이다.

### 3) 전기기계 결합계수

전기기계 결합계수  $k_{31}$ 은 압전소자가 전기적인 에너지를 기계적인 에너지로 변환시키는 효율을 나타내는 것으로 사각판의 길이진동모드인 경우  $k_{31}$ 은 식 (6)과 같다[10].

$$\frac{1}{k_{31}^2} = 0.405 \frac{f_r}{f_a - f_r} + 0.595 \quad (6)$$

따라서 공진·반공진주파수를 측정함으로써 전기기계 결합계수를 구할 수 있다.

### 4) X-ray 회절 분석

PZT계 시료의 X-ray 회절 분석은 기존에는 분말시료에 대한 시험이 일반적이었으나 최근에 세라믹기판 시료에 대한 시험이 이루어지고 있다. 이것은 덩어리 상태의 시편을 파우더 상태로 만드는 과정에서 기계적인 충격이 가해져 결정상의 변화가 야기되는 것을 피하기 위해서이다

이 실험에서  $2\theta$ 가  $42\sim 45^\circ$  범위에서 X-ray 회절시험을 통해 시료의 특성을 파악하고자 하였다. 여기서  $\theta$ 는 X-ray 회절 시험에서의 입사각을 나타낸다.

#### 5) 공진주파수 온도안정성 측정

온도안정성을 살펴보기 위해 항온조와 네트워크어널라이저를 사용하여 길이 진동의 공진주파수 변화를 Fig. 11과 같이 측정한다.

공진주파수의 측정은 항온조의 온도를  $-20[^\circ\text{C}] \sim 80[^\circ\text{C}]$ 까지  $2\sim 3[^\circ\text{C}/\text{min}]$ 의 속도로 상승시키면서  $10[^\circ\text{C}]$ 간격으로 이들 값의 변화를 측정하였다. 열에 이징 처리한 시편은 열에이징 처리 후 24시간이 경과된 뒤 측정을 행하였다.

공진주파수의 온도에 따른 변화율을 분석하기 위해 온도가  $30[^\circ\text{C}]$ 일 때 공진주파수를 기준으로  $10[^\circ\text{C}]$  간격으로 이들 값이 변화율을 구하였다.

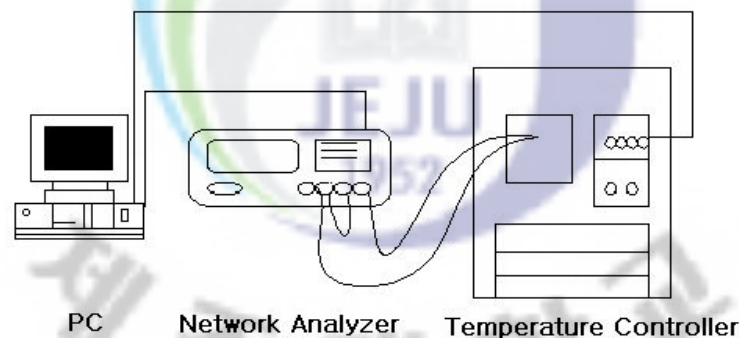


Fig. 13 Measuring system of temperature characteristics

## V. 실험결과 및 고찰

### 1. 분극 전과 분극전계의 세기에 따른 유전율

Fig. 14 각 조성별 분극(Poling) 전과 분극전계(1.5kv, 2.5kv, 3.5kv)의 크기에 따른 각 조성 시편의 비유전율을 나내고 있다. 시편 Zr/Ti=54/46, 55/45 조성은 분극전에 비해 유전율이 감소함을 보였다. 반면, 정방정계의 구조를 갖는 시편 Zr/Ti=52/48, 51/49 조성의 경우에는 분극 후 유전율이 증가됨을 보여주고 있다. 특히 정방정계 구조의 시편의 경우에는 분극전계가 증가함에 따라 유전율이 비교적 크게 증가함을 보여 준다. 이는 유전율이 세라믹필터의 입출력임피던스에 영향을 주게 되므로 이 조성의 기관으로 세라믹필터의 제작 시에는 분극공정에서 전계의 크기에 대한 세심한 관리가 필요함을 말해준다.

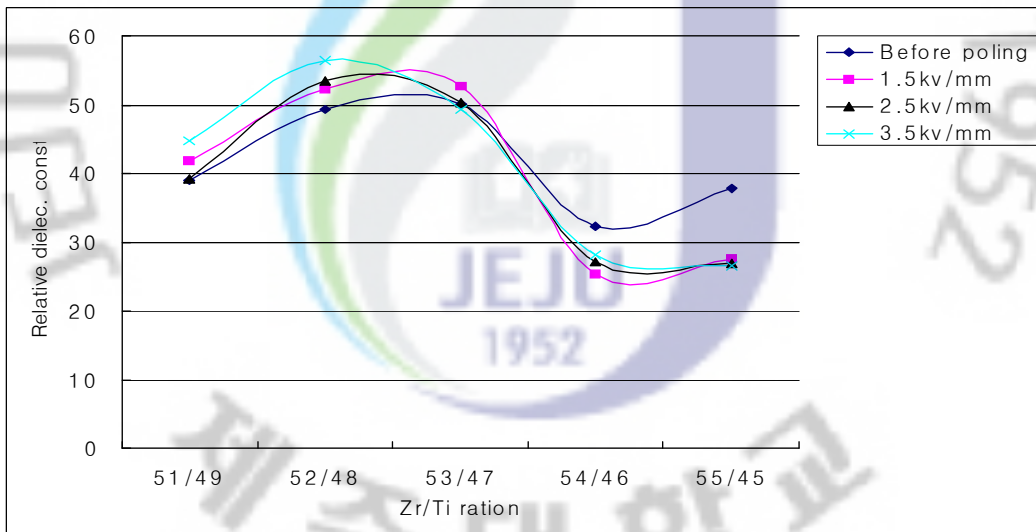


Fig 14. Relative dielectric constants according to before poling and poling intensity

### 2. 각 조성 분극세기별 전기기계 결합계수

Fig. 15 각 조성 Zr/Ti=( 51/49, 52/48, 53/47, 54/46, 55/46)을 분극세기별로 시편의 전

전기기계결합계수( $K_{31}$ )를 나타내고 있다. 상경계구조를 갖는 Zr/Ti=53/47의 경우 전기기계결합계수가 가장 높음을 보였고, 나머지 조성 Zr/Ti=(51/49, 52/48, 54/46, 55/46) 역시 분극전계가 증가함에 따라 전기기계결합계수도 증가함을 Fig. 13 에서 보여주고 있다. 상경계 조성이 높은 전기기계결합계수를 나타내는 현상은 오래 전부터 알려져 있지만 낮은 분극전계일 경우에는 이러한 현상이 나타나지 않고 높은 분극전계인 경우에만 나타남을 본 실험결과가 보여준다.

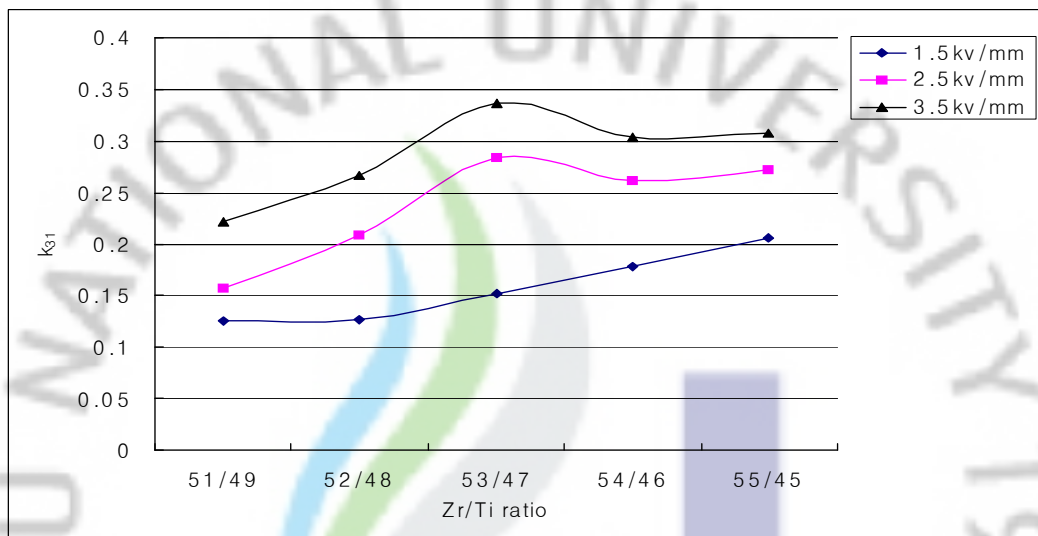


Fig. 15 Electromechanical coupling factors for length extensional vibration of the specimens with the respective composition ratio

### 3. 각 조성 온도에 따른 분극세기별 전기기계 결합계수

Fig. 16부터 Fig. 20까지 각 조성에서 분극전계의 크기가 전기기계결합계수의 온도의존성에 미치는 영향이 나타나 있다. Zr/Ti=51/49, 52/48인 정방정계 영역에서는 온도가 증가함에 따라 분극전계의 크기에는 의존하지 않고 전기기계결합계수가 약간 작아지는 현상을 보여 주고 있다. 반면에 Zr/Ti=54/46, 55/45인 능면체정계 영역에서는 온도가 증가함에 따라 분극전계의 크기에는 의존하지 않고 전기기계결합계수가 약간 커지는 현상을 보여 주고 있다. 이것은 큐리온도가 능면체정계가 정방정계보다 낮은 점을 고려하면 의외의 결과이다. 일반적으로 큐리온도가 더 낮은 능면체정계가 온도가 높아지면 전기기계결합계수가 더 낮아질

가능이 높다고 예상할 수 있다.

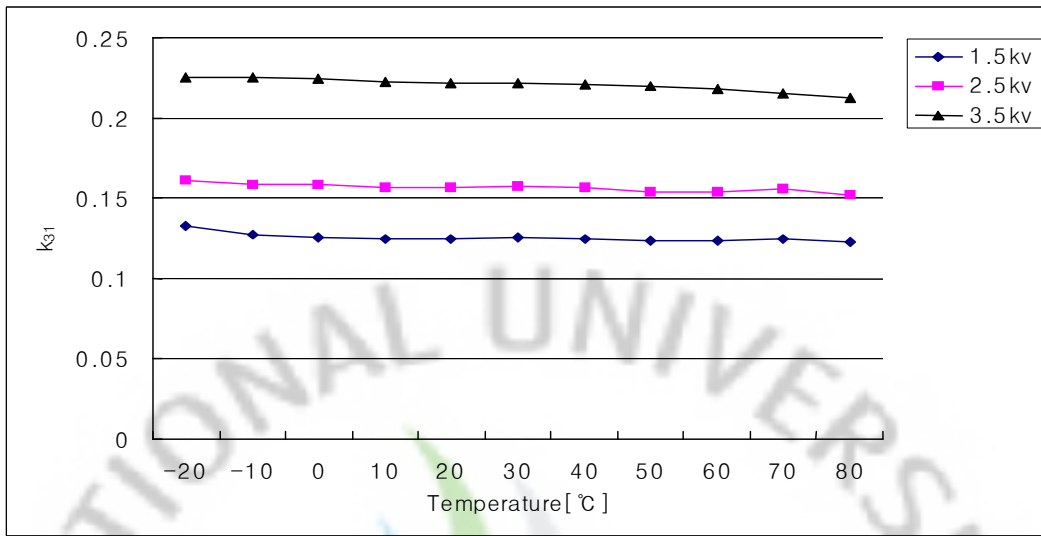


Fig. 16 Electromechanical coupling factors for length extensional vibration of the specimens with the temperature for respective composition ratio  $\text{Pb}(\text{Zr}_{0.51}\text{Ti}_{0.49})\text{O}_3$  (1.5 ,2.5, 3.5[kV/mm])

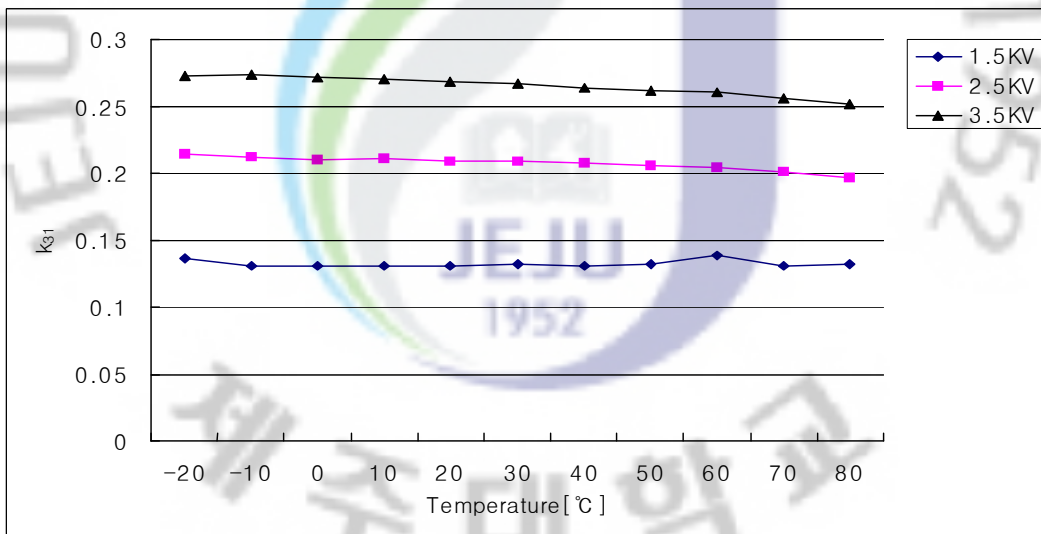


Fig. 17 Electromechanical coupling factors for length extensional vibration of the specimens with the temperature for respective composition ratio  $\text{Pb}(\text{Zr}_{0.52}\text{Ti}_{0.48})\text{O}_3$  (1.5 ,2.5, 3.5[kV/mm])

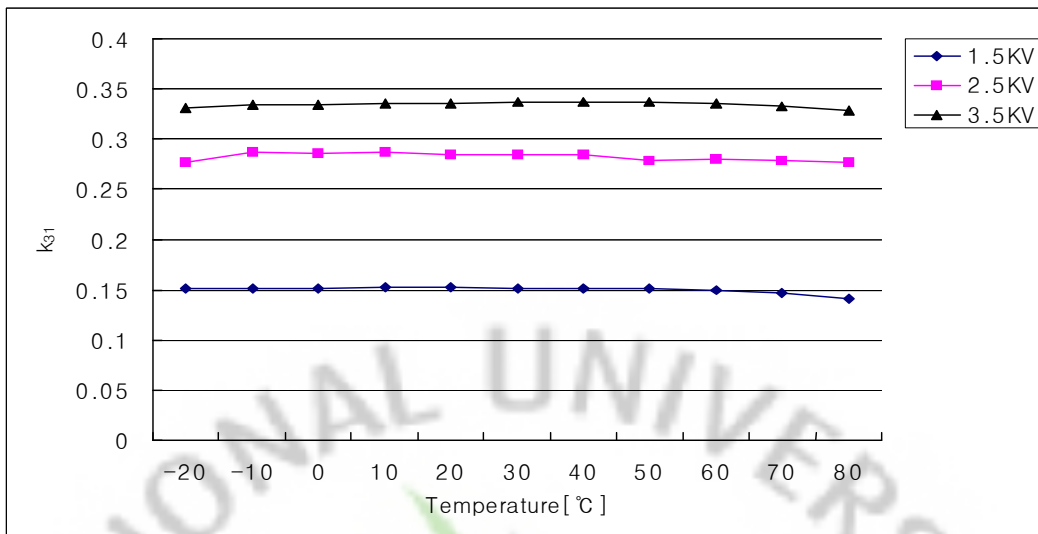


Fig. 18 Electromechanical coupling factors for length extensional vibration of the specimens with the temperature for respective composition ratio  $\text{Pb}(\text{Zr}_{0.53}\text{Ti}_{0.47})\text{O}_3$  (1.5 ,2.5, 3.5[kV/mm])

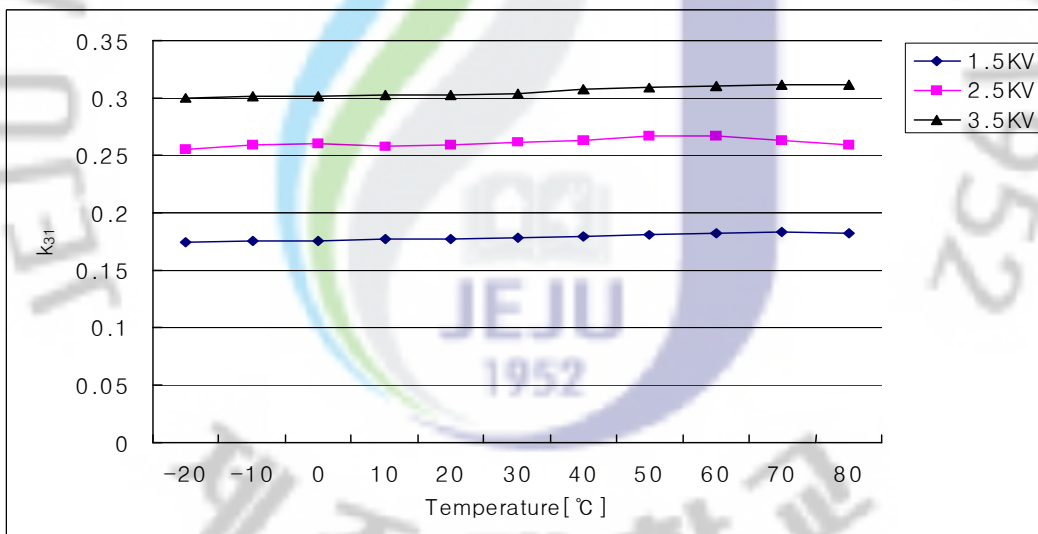


Fig. 19 Electromechanical coupling factors for length extensional vibration of the specimens with the temperature for respective composition ratio  $\text{Pb}(\text{Zr}_{0.54}\text{Ti}_{0.46})\text{O}_3$ (1.5 ,2.5, 3.5[kV/mm])



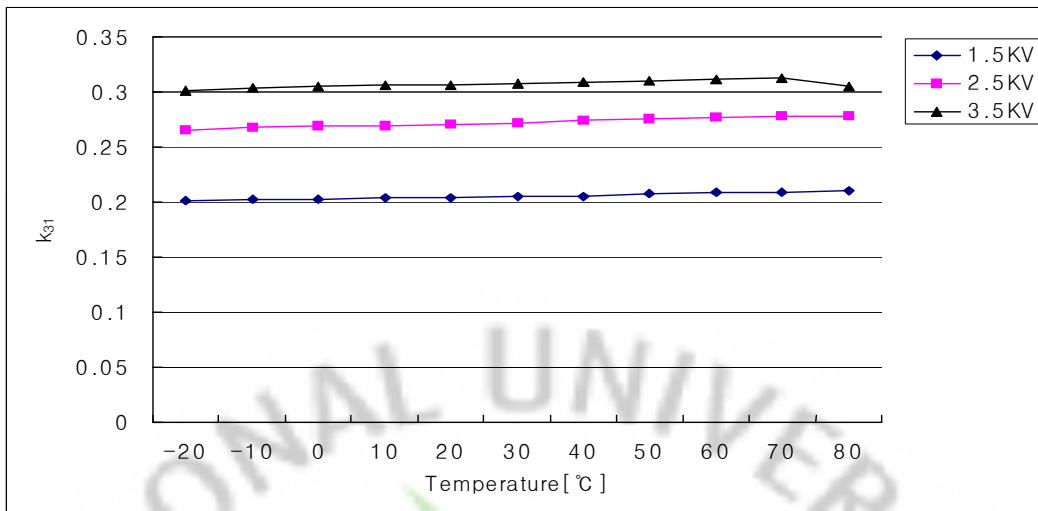


Fig. 20 Electromechanical coupling factors for length extensional vibration of the specimens with the temperature for respective composition ratio  $\text{Pb}(\text{Zr}_{0.55}\text{Ti}_{0.45})\text{O}_3$  (1.5, 2.5, 3.5[kV/mm])

#### 4. 각 조성 X-ray 회절 분석

Fig. 21~25 은 각 조성별 Zr/Ti=(51/49, 52/48, 53/47, 54/46, 55/46)과 분극 세기별 (1.5kv, 2.5kv, 3.5kv)로 X-ray회절 패턴의 변화를 나타내었다. 여기에서 2θ는 40°~50° 범위를 나타낸다. X-ray회절시험 θ는 입사각을 나타낸다.

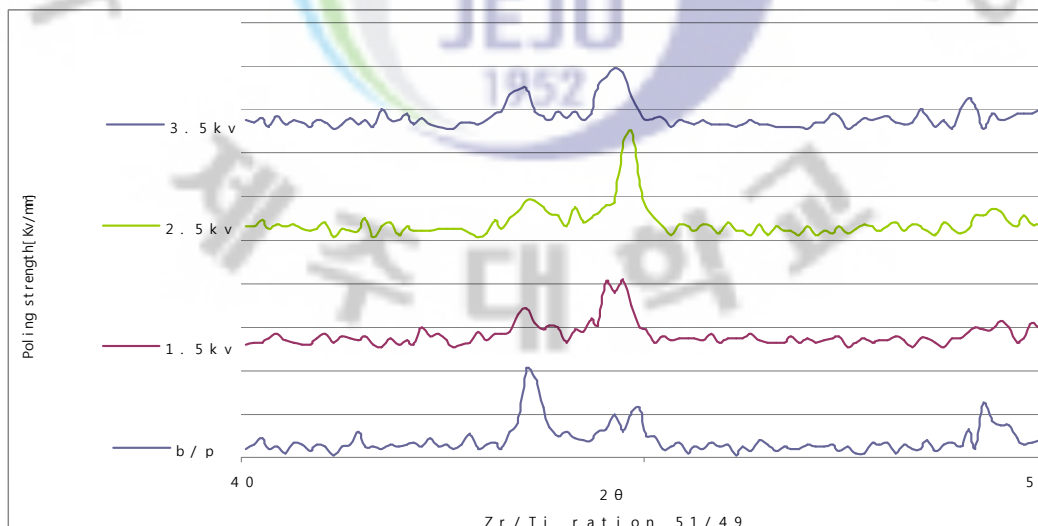


Fig. 21 XRD patterns of the specimens with  $\text{Pb}(\text{Zr}_{0.51}\text{Ti}_{0.49})\text{O}_3$  composition according to the poling strength

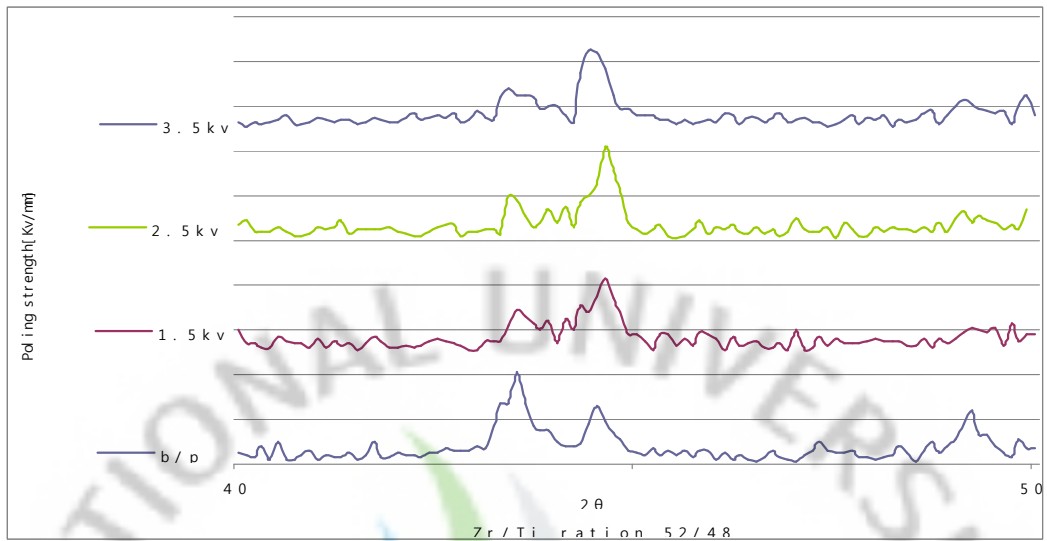


Fig. 22 XRD patterns of the specimens with  $\text{Pb}(\text{Zr}_{0.52}\text{Ti}_{0.48})\text{O}_3$  composition according to the poling strength

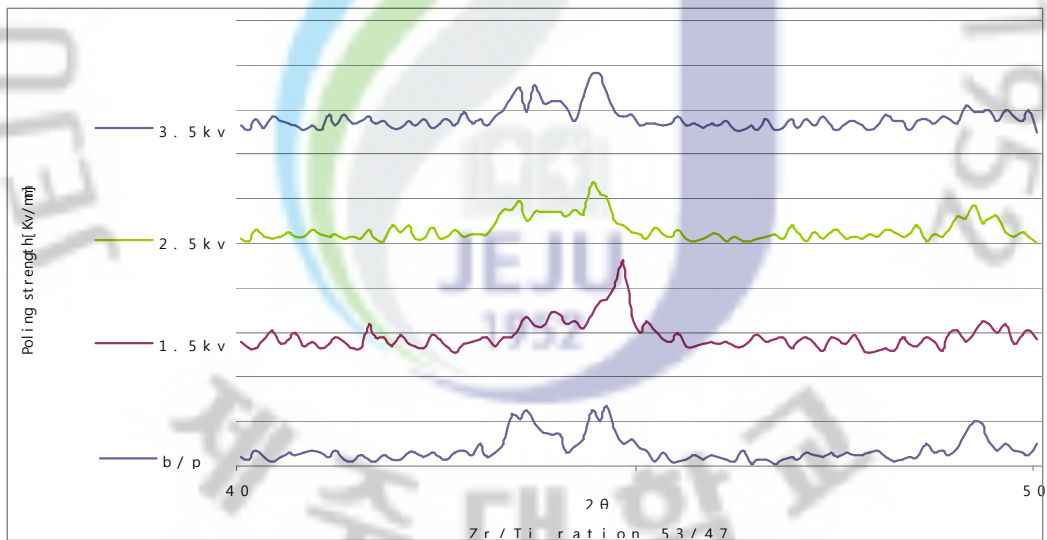


Fig. 23 XRD patterns of the specimens with  $\text{Pb}(\text{Zr}_{0.53}\text{Ti}_{0.47})\text{O}_3$  composition according to the poling strength

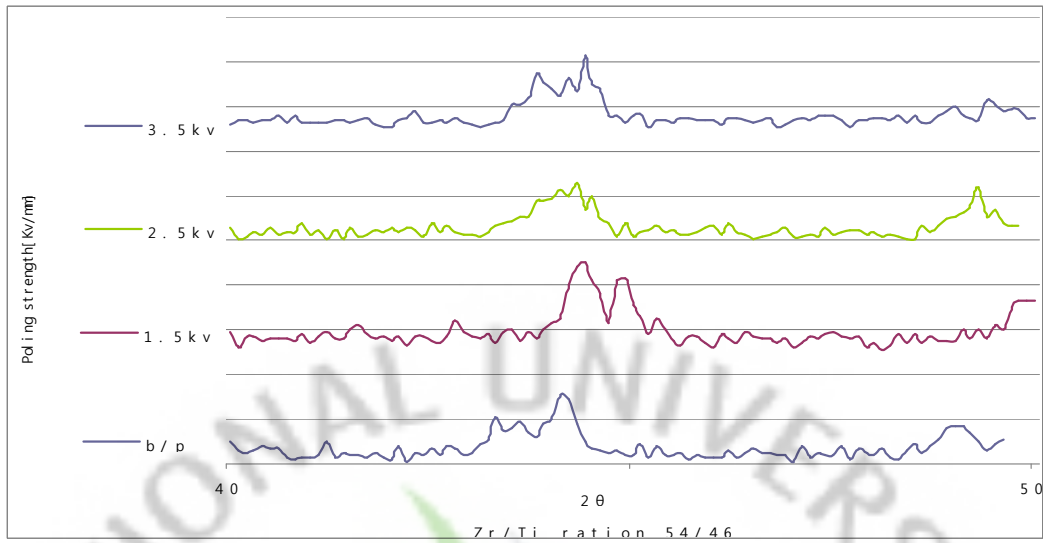


Fig. 24 XRD patterns of the specimens with  $\text{Pb}(\text{Zr}_{0.54}\text{Ti}_{0.46})\text{O}_3$  composition according to the poling strength

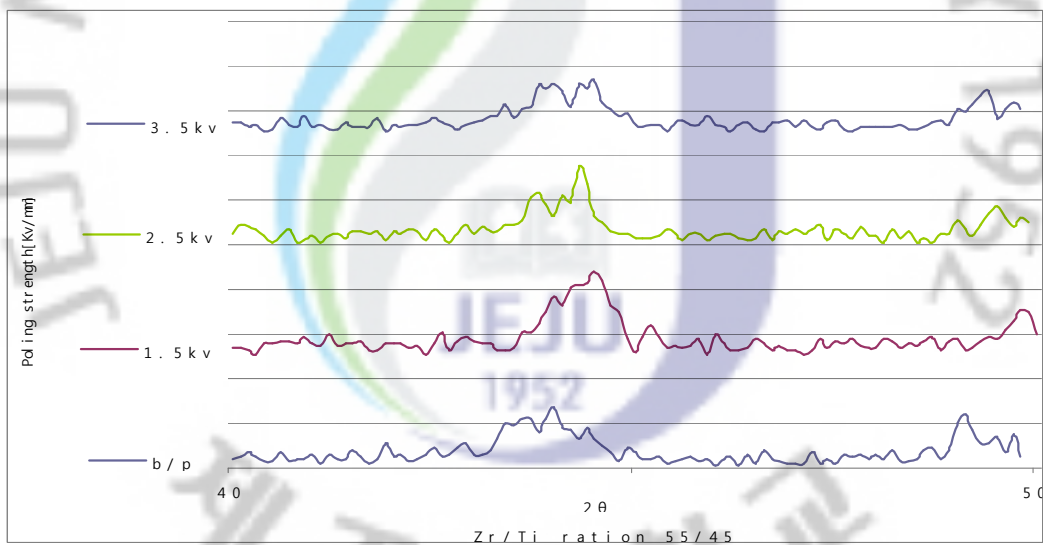


Fig. 25 XRD patterns of the specimens with  $\text{Pb}(\text{Zr}_{0.55}\text{Ti}_{0.45})\text{O}_3$  composition according to the poling strength

##### 5. 각 조성 분극별 온도변화에 따른 공진주파수의 변화

PZT세라믹스 사각기판의 공진주파수 온도특성을 각 조성  $\text{Zr}/\text{Ti}=(51/49, 52/48,$

53/47, 54/46, 55/46)을 분극 세기별 (1.5kv, 2.5kv, 3.5kv)로 공진주파수를 30[°C]로 기준하여 온도변화 [-20°C~80°C]에 따른 각 시편의 공진주파수( $f_r$ )를 변화율[%]로 나타내었다

Fig. 26~30 에서는 Zr/Ti 조성에 따라 공진주파수의 변화율을 나타내고 있다. 각 조성별 분극전계를(1.5kv, 2.5kv, 3.5kv) 3단계로 달리하여 동일하게 측정하였다. 능면체정계 51/49, 52/48 와 정방정계 54/46, 55/45 는 온도와 분극세기에 영향으로 기울기가 커짐을 알수있었다. 반면, 상경계부근 53/47은 분극세가 높아질수록 공진주파수의 온도 변화율 기울기가 작아짐을 보였다. 분극세기에 따른 공진주파수 온도특성의 변동폭이 상경계 조성에서 가장 크다. 따라서 상경계 조성의 시편을 이용해 동작주파수의 고정밀성이 엄격하게 요구되는 세라믹 공진자와 필터의 제작 시에는 분극전계의 세심한 관리가 필요하다.

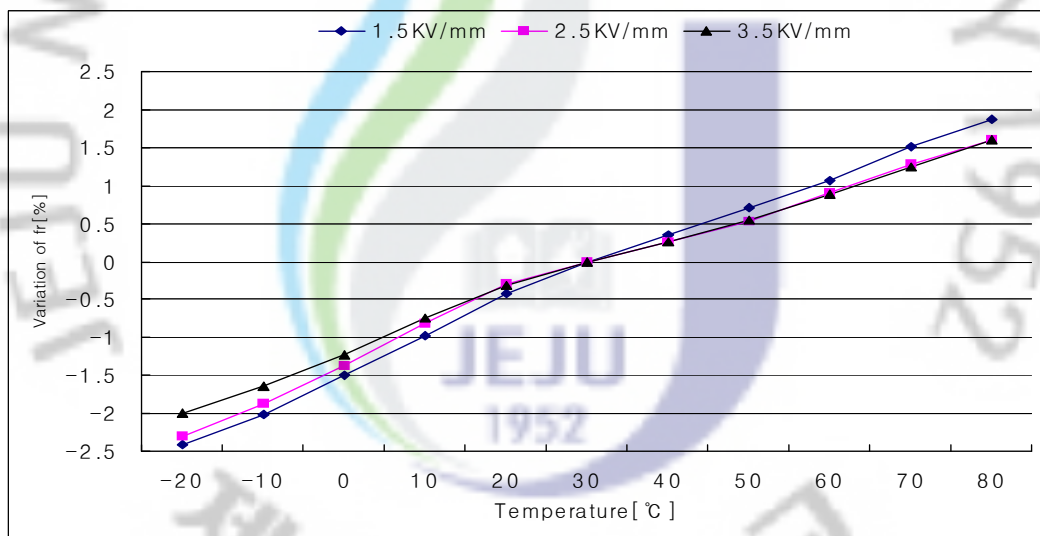


Fig. 26 Temperature characteristics of resonance frequency of the specimens with  $\text{Pb}(\text{Zr}_{0.51}\text{Ti}_{0.49})\text{O}_3$  composition according to the poling strength

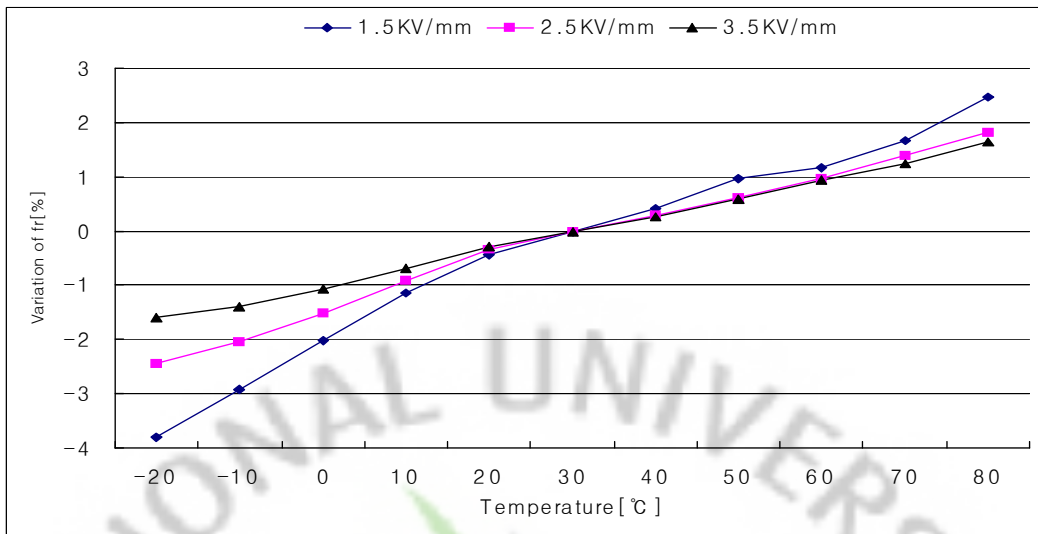


Fig. 27 Temperature characteristics of resonance frequency of the specimens with  $\text{Pb}(\text{Zr}_{0.52}\text{Ti}_{0.48})\text{O}_3$  composition according to the poling strength

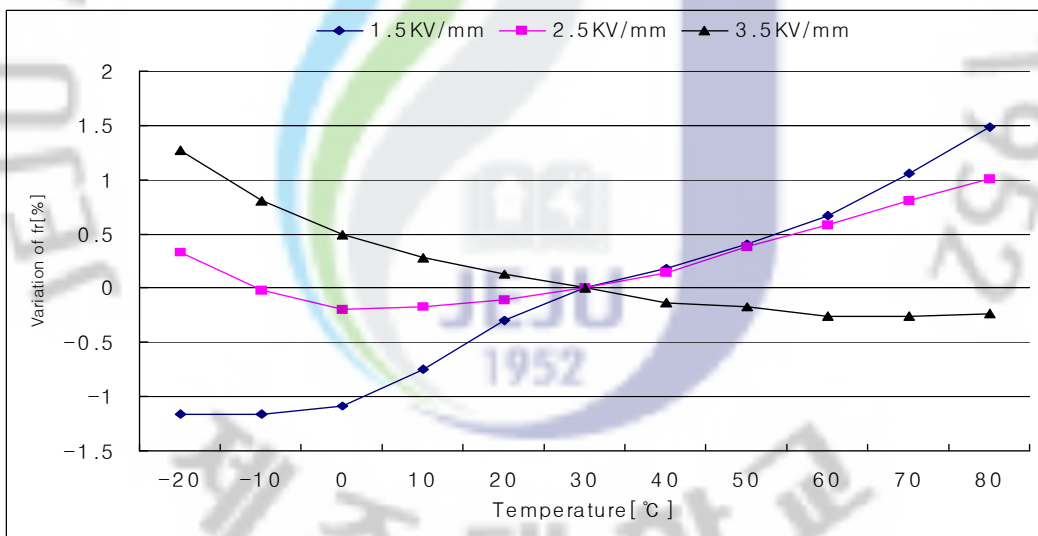


Fig. 28 Temperature characteristics of resonance frequency of the specimens with  $\text{Pb}(\text{Zr}_{0.53}\text{Ti}_{0.47})\text{O}_3$  composition according to the poling strength

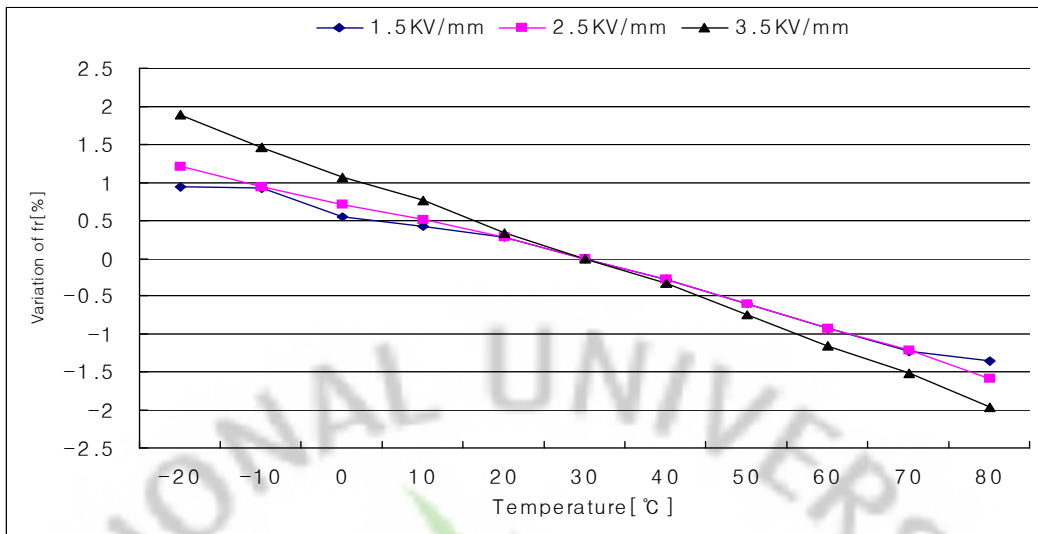


Fig. 29 Temperature characteristics of resonance frequency of the specimens with Pb(Zr<sub>0.54</sub>Ti<sub>0.46</sub>)O<sub>3</sub> composition according to the poling strength

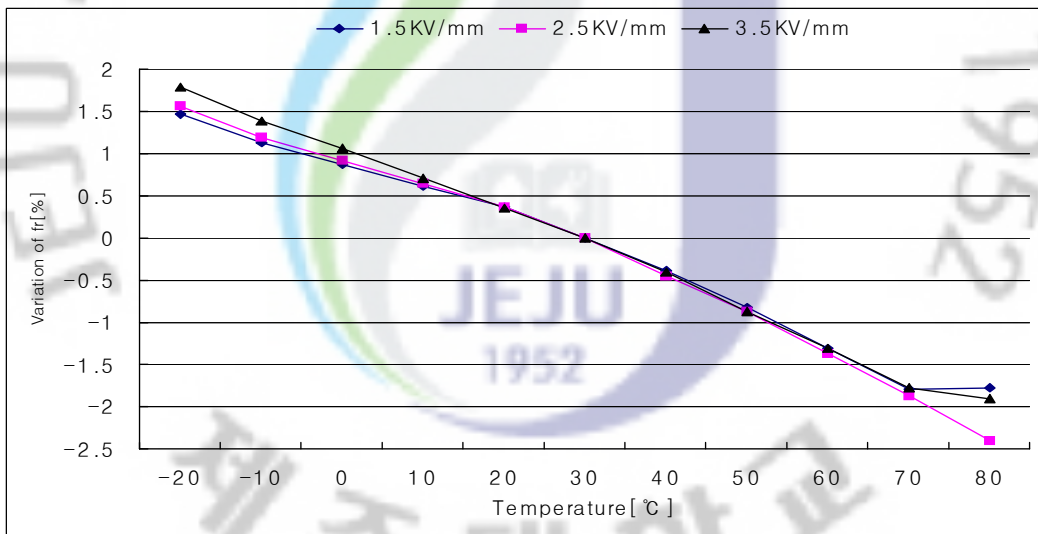


Fig. 30 Temperature characteristics of resonance frequency of the specimens with Pb(Zr<sub>0.55</sub>Ti<sub>0.45</sub>)O<sub>3</sub> composition according to the poling strength

## VI. 결론

분극전계가 모포트로픽 상경계 부근 조성의 PZT세라믹스 기판의 공진주파수와 전기계결합계수에 미치는 영향을 조사하였다.

정방정계 구조의 시편의 경우에는 분극전계가 증가함에 따라 유전율이 비교적 크게 증가함을 보여 준다. 이는 이러한 조성을 채택한 세라믹필터의 공정에서는 소자의 임피던스 매칭을 위해 분극전계의 크기를 정밀하게 관리할 필요가 있음을 보여 주는 것이다.

전기계결합계수는 모든 조성에서 분극전계의 크기에 별로 영향을 받지 않고  $-20\sim+80[^\circ\text{C}]$  온도범위에서 거의 일정함을 보여 주었다. Zr/Ti=51/49, 52/48인 정방정계 영역에서는 온도가 증가함에 따라 분극전계의 크기에는 의존하지 않고 전기계결합계수가 약간 작아지는 현상을 보여 주었고, 반면에 Zr/Ti=54/46, 55/45인 능면체정계 영역에서는 온도가 증가함에 따라 분극전계의 크기에는 의존하지 않고 전기계결합계수가 약간 커졌다.

조성이 Zr/Ti=53/47 모포트로픽 상경계 조성으로부터 벗어날수록 분극전계에 의한 공진주파수 온도특성의 변화가 더 약하게 일어났다. 모포트로픽 상경계 부근 조성을 채택한 세라믹 공진자나 필터와 같이 동작주파수의 정밀도가 중요한 소자의 공정에서는 분극전계를 정밀하게 관리하여야 한다.

## 참 고 문 헌

- [1] J. L. Gonzalez, 2001, A. Rubio, and F. Moll, "Human powerd piezoelectric batteries to supply power to wearable electronic devices", International Journal of the Society of Materials Engineering for Resources, Vol. 49, p. 7.
- [2] B. Jaffe et al, 1955, Properties of piezoelectric ceramics in the solid-solution series lead titanate-lead zirconate-lead oxide, Tin oxide and lead titanate-lead hafnate, J. Res. Natl. Bur. Standards, 55 (5), pp. 239-254.
- [3] B. Jaffe, W. R. Cook, Jr. and H. Jaffe, 1971, Piezoelectric Ceramics, Academic Press, p. 72.
- [4] 岡崎清, 1970, セラミック 誘電體工學, 學獻社, pp. 180-198.
- [5] 이개명, 1997 압전세라믹스 주파수 소자의 소개와 개발 동향, 전기전자재료학회, 10 권 2호, pp.172~178
- [6] N. Uchida and T. Ideda, 1971, Studies on  $\text{Pb}(\text{ZrTi})\text{O}_3$  Ceramics With Addition of  $\text{Cr}_2\text{O}_3$ , J. of Appl. Phys., Vol. 6, No. 11, pp. 265-270.
- [7] Hisao Banno and Tsutomu Tsunooka, 1967, Piezoelectric Properties and Temperature Dependences of Resonant Frequency of  $\text{WO}_3$ - $\text{MnO}_2$ -Modified Ceramics of  $\text{Pb}(\text{Zr-Ti})\text{O}_3$ , Jpn. J. Appl. Phys. Vol. 6, No. 8, pp. 954-962.
- [8] 천채일, 1995. 8, PZT계 압전세라믹스에서 공진주파수의 온도안정성, 電子研究.
- [9] 일본전자재료공업회, 1982, EMAS-6004.



- [10] 尾上, 1964. 5, 日本音響學會講演論文集, 十文字, p.11.
- [11] K. Uchino and J. R. Giniewicz, *Micromechatronics*, Mareel Dekker, Inc., New York.
- [12] Daue, T., "Energy Harvesting Using Flexible Piezo Fiber Composites," Technical Document, Institute Keramische Technologien and Sinterwerksoffe & Smart Material,
- [13] Gonzalez, J. L., Rubio, A. and Moll, F., "Human Powered Piezoelectric Batteries Power to Wearable Electronic Devices," *Int. J. Soc. Mater. Eng. Resour.*, Vol. 10,
- [14] Shenck N. S. and Paradiso J. A., 2001, "Energy scavenging with show-mounted piezoelectrics," *IEEE Micro* Vol.21
- [15] Jeon Y. B., Sood R., Jeong J.-h., Kim S.-G., 2005, "MEMS power generator with transverse mode thin film PZT," *Sensors and Actuators A*, Vol. 122, No.1
- [16] Sodano H. A, Inman J. and Park G., 2005, "Generation and storage of electricity from power harvesting device," *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, Vol. 16
- [17] Chung G. B. and Ngo K. D.T., 2005, "Analysis of an AC/DC resonant pulse power converter for energy harvesting using a micro piezoelectric device," *Journal of Power Electronics*, Vol. 5, No. 4

- [18] H. C. Kim, D. Y. Jeong, S. J. Yoon and H. J. Kim, Kor. J. Mater. Res., 17(2),
- [19] On the efficiency of electric power generation with piezoelectric ceramic;' Goldfarb, Michael, Jones, Lowell D., Journal of Dynamic Systems Measurement&Control
- [20] 'Adaptive piezoelectric energy harvesting circuit for wireless remote power supply', Ottman, Geffery K., Hofmann, Health F., Bhatt, Archin C., Lesieutre, George A., IEEE Trans. Power Electron. (USA)
- [21] 'Efficiency of energy conversion for devices containing a piezoelectric component', Richards Cecilla D.; Anderson Michael J.; Bagr David F.; Richards Robert F.;, Journal of micromechanics and microengineering.

## 감 사 의 글

어느덧, 시간이 흘러 졸업이라는 문턱 앞에서 그동안 많은 도움과 격려 해주신 분들께 감사의 뜻을 전하려합니다.

우선, 학위논문이 완성되기까지 많은 가르침과 격려, 지원을 아끼시지 않으셨던 지도교수 이개명 교수님께 머리숙여 깊은 감사의 뜻을 전해드립니다.

아울러 그동안 학위논문을 준비하면서 관심과 가르침을 주신 좌종근, 오성보, 김세호, 김일환, 김호찬 교수님들께도 감사하다는 말씀을 드립니다.

또한, 연구실 선배인 고영진, 양정보, 성백훈 선배님께 감사드리며 최태영 원생과 강형규 원생에게도 감사의 뜻을 전하며 항상 옆에서 힘이되어준 친구 강상수, 고영준 에게도 고맙다는 말을 전합니다. 그리고 학과후배 고정석, 문영필, 박미리 진심으로 고마움을 전합니다.

언제나 옆에서 정신적으로 버팀목이 되어준 사랑하는 내 아내 강유란 항상 웃음을 잊지 않게 해준 내 아들 지용아 사랑하고 고맙다.

그리고 석사과정을 무사히 마칠 수 있게 해주신 아버지, 어머니 그리고 누님과 형님 분께도 감사를 드리며 본 학위 논문출간의 기쁨을 함께 누리고자 합니다.

마지막으로 병중에 계신 아버님의 빠른 쾌유와 건강을 빕니다.

2009년 12월

양 완 석 드림