

## DC-DC 컨버터용 압전 세라믹의 분극전계에 의한 전기적 특성

논문  
12-12-6

### Effect of Poling Field on Electrical Characteristics of Piezoelectric Ceramics for DC-DC Converter

임인호\*, 김성진\*\*, 이수호\*\*\*, 홍재일\*\*\*\*, 류주현\*\*

(I. H. Im\*, S. J. Kim\*\*, S. H. Lee\*\*\*, J. I. Hong\*\*\*\*, J. H. Yoo\*\*)

#### Abstract

(PbCa)(TiMnSb)O<sub>3</sub> family ceramics with large anisotropy were manufactured. The structural, electrical and piezoelectric properties of the ceramics were investigated. A new structure for a piezoelectric transformer, operating in thickness extensional vibration mode was fabricated. The electro-mechanical coupling coefficients,  $k_t$ , of 53.6% and  $k_p$ , of 4.5%, which give rise to large anisotropic property,  $k_t/k_p$ , were obtained from the specimen sintered at 1270°C. Piezoelectric transformer was fabricated that is 20 mm long, 20 mm wide and 3.1 mm thick. Resonant frequency of second thickness extensional vibration mode of the piezoelectric transformer are 1.417 and 1.428 MHz at loading resistance 50 Ω and 100 Ω, respectively. And maximum voltage gain of piezoelectric ceramics is showed 0.997 and 1.365 at resonant frequency of second thickness extensional vibration mode at loading resistance 50 Ω and 100 Ω, respectively.

**Key Words(중요용어)** : Piezoelectric transformer(압전변압기), Voltage gain(전압이득), Poling Field(분극전계), Thickness vibration mode(두께진동모드)

#### 1. 서 론

최근에 전자제품이 소형, 경량화로 되어짐에 따라, 전원공급 장치 및 DC-DC 컨버터등의 소형화가 요구되어지고 있다. 그러나 기존의 권선형 변압기를 이용한 컨버터의 경우 소형화를 위하여 고주파수의 switching 주파수가 필요하지만, switching 주파수의 증가에 따라 동손과 철손의 증가에 의해 소형화에 한계를 가지고 있다. 따라서 최근 소형, 박형화가 가능하며 고주파수에서 높은 전력 전송 디바이스로 각광을 받고 있는 압전 변압기에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다[1~2] 그러나 고전압 발생을 위한

길이방향 진동모드를 구동시키는 압전 변압기는 최대 구동 주파수가 200~300 KHz 미만이기 때문에 고전력 밀도를 가지기는 어려우며, 또한 출력 임피던스가 높아 사용하기가 어렵다. 그러나 두께방향 진동모드를 이용한 압전 변압기는 공진주파수를 1 MHz 이상으로 할 수 있기 때문에 변압기의 소형, 박형이 가능하며, 고전력 밀도를 갖게 할 수 있는 장점을 가지고 있다[3~5]. 그러나 MHz대에서 구동하기 위하여 μm 정도의 두께를 가져야 하기에 가공과 분극의 어려움 을 가지고 있다.

이러한 두께 진동 모드를 이용한 압전 변압기는 압전 세라믹 중에서 전기기계 결합계수의 이방성( $k_t/k_p$ )이 큰 조성물질이 이롭다. 일반적으로 압전특성이 우수하다고 알려져 있는 PZT계 세라믹스는 고주파수에서 두께방향 진동모드를 사용할 때 경방향 진동 전기기계 결합계수  $k_p$ 가 두께 방향 진동모드의 전기기계 결합계수  $k_t$ 와 거의 같기 때문에  $k_p$ 에 의한 불요진동이 발생하여 우수한 두께방향 진동모드의 압전 변압기를 제작하기가 어렵다. 반면 전기기계 결합계수의 이방성이 큰 PbTiO<sub>3</sub>계 세라믹스를 사용함으로써 2차 두께방향 진동모드로 동작하는 압전 변압기

\* : 연세대학교 전기공학과

\*\* : 세명대학교 전기공학과

\*\*\* : 세경대학 전기과

(강원도 영월군 영월읍 하송리 산57번지, Tel : 0373-374-0277 E-mail : leesh@cc.saekyung-c.ac.kr)

\*\*\*\* : 동서울대학 전기과

1999년 8월 16일 접수, 1999년 11월 23일 심사완료

를 제작, 1 MHz 이상의 고주파 영역에서 switching 이 가능한 DC-DC 컨버터에 응용에 관한 연구가 보고된 바 있다[6~7]. 따라서 본 연구에서는 소결성을 향상시키고, 분극을 용이하게 하고, 전기기계 결합계수의 이방성을 높이고자 Pb-site에 Ca를 Ti-site에 ( $Mn_1Sb_3$ )를 치환시켜 제작된 세라믹스의 최적의 분극조건을 찾기 위하여 분극 전계와 시간의 변화에 따른 압전 특성을 살펴 보았으며, 이를 토대로 제작된 압전 변압기의 전압이득 등의 특성을 검토하여 DC-DC 컨버터 제작을 위한 기본 자료로 활용하고자 하였다.

## 2. 실험

### 2-1 시편 제조

본 실험에서는  $(Pb_{0.76}Ca_{0.24})[Ti_{0.96}(Mn_1Sb_3)_{0.04}]O_3$  계 압전 세라믹스를 산화물 혼합법으로 제조하였고, 제조된 시편의 구조적, 전기적 특성을 측정하였다.

$PbTiO_3$ 계 압전 세라믹스를 두께 진동형 압전 변압기 소자로 사용하는데 있어서 가장 기본적인 조건은 크랙이 없는 시편의 제조이다. 시편의 제조는 시편의 조성비대로 전자 천평을 사용하여  $10^{-6}[g]$ 까지 평량하였으며, 평량한 시료를 아세톤과 함께 20시간 동안 지르코니아 볼밀을 이용하여 분쇄 및 혼합한 후, 80℃ 오븐에서 24시간 동안 건조시킨 다음 건조된 분말을 100 mesh로 조립한 후, 알루미나 도가니에 넣어 전기로 속에서 850℃에서 2시간 동안 하소하였다. 하소된 분말을 지르코니아 볼밀로 24시간 동안 분쇄한 후 80℃오븐에서 24시간 동안 건조시켰다.

건조된 분말을 100 mesh로 조립한 후, uniaxial press법으로 1 ton/cm<sup>2</sup>의 압력을 가하여 성형한 후, 1270℃로 2시간 소성하였다. 측정용 시편을 만들기 위해 소성된 원판형 시편을 #1000의 SiC분말을 이용, 시편의 양면을 연마한 후, 초음파로 세척하고 건조시킨 후, Ag 전극을 실크 스크린 법으로 부착하여 600℃에서 10분간 열 처리하였다. 또한 압전정수  $d_{33}$ 와  $k_p$ ,  $k_t$  측정을 위해 전극 부착된 원판형 시편을 EMMAS(Electronic Materials Manufacturers Association Standard) 규격에 따라 연마하여 각각  $k_p$  모드(17.5φ×1.1mm),  $k_t$  모드(17.5φ×1.7mm)로 가공하였다. 분극은 1~5 [kV/mm] 범위의 전계로 150℃의 실리콘유 속에서 0.5~2시간 동안 분극하였다.

### 2-2 시편의 물성 및 압전특성 측정

시편의 소성 상태를 판별하는데 중요하고 기본적인 변수인 밀도를 측정하는 방법에는 습식법과 수은법등이 있으나 본 연구에서는 물을 사용하여 시편의 부력을 이용한 측정법을 택하여 계산하였다. 제조된 시편의 입자(grain)의 크기와 기공의 분포 등을 관찰하기 위하여 모든 시편을 SEM(scanning electron microscope)으로 촬영하였으며, 평균 입자의 크기는 Linear Intercept Technic법에 의해 계산하였다. 강유전체가 상유전체로 바뀌는 상 변이 온도를 찾기 위하여 온도에 따른 유전 상수의 변화를 측정하였다. 전기로 속에 시편을 넣고 20~400[℃] 범위에서 LCR meter(HP4263A)를 사용하여 정전 용량을 측정 후 비유전율을 계산하였다.

또한, 분극 처리한 시편의 압전특성은 공진-반공진법에 의하여 측정하였으며 이때 사용된 계기는 Impedance Analyzer(HP4194A)이었다. 측정된 공진, 반공진 주파수와 공진 시의 저항을 이용하여 전기기계 결합계수( $k_p$ ,  $k_t$ )를 각각 계산하였다.

### 2-3 압전 변압기 제작 및 특성 측정

두께방향 진동모드를 이용한 압전 변압기는 그림 1과 같이 제작하였으며, 길이 20mm, 폭 20mm, 입력층과 출력층의 두께는 각각 1.4mm로 제작하였으며, 입력층과 출력층 사이에 0.3mm의 분극을 행하지 않는 동일재료의 절연층을 두어 입력층과 출력층을 분리시켰다. 또한, 입력층과 출력층은 반대의 두께방향으로 분극을 행하였다.

제작된 압전 변압기의 입력전압과 부하저항에 따른 출력전압측정은 Funtion Generator와 Oscilloscope (Lecroy, 400MHz)를 사용하여 측정하였다.

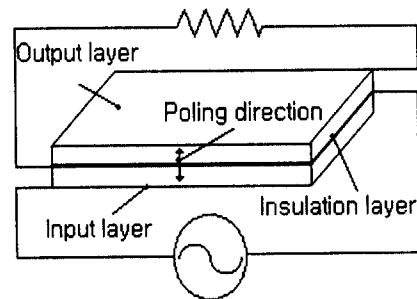


그림 1. 압전세라믹 변압기의 구조

Fig. 1. Construction of piezoelectric ceramic transformer

### 3. 결과 및 고찰

본 연구에서는  $(\text{Pb}_{0.76}\text{Ca}_{0.24})[\text{Ti}_{0.96}(\text{Mn}_1\text{Sb}_3)_{0.04}]$   $\text{O}_3$ 계 압전 세라믹스에 대하여 미세구조와 결정구조를 관찰하고 유전 및 압전 특성을 분석하여 두께 진동형 압전 변압기의 응용 가능성을 고찰하였다. 이에 대한 결과는 표 1에 나타내었다.

표 1.  $(\text{PbCa})(\text{TiMnSb})\text{TiO}_3$  세라믹스의 압전 및 물리적 특성  
Table 1. Physical and piezoelectric properties of  $(\text{PbCa})(\text{TiMnSb})\text{TiO}_3$  ceramics

재료 정수	측정치
유전상수( $\epsilon_{33}^T/\epsilon_0$ )	192
밀도( $\text{g}/\text{cm}^3$ )	6.9
전기기계결합계수( $k_p$ )	0.045
전기기계결합계수( $k_t$ )	0.536
전기기계결합계수( $k_{31}$ )	0.0695
$d_{31}$ ( $10^{-12}$ C/N)	-1.936
큐리온도	275 °C
grain size	3 $\mu\text{m}$
결정구조	Tetragonal

압전 변압기를 두께방향 진동모드로 이용하기 위해서는 전기결합계수의 이방성( $k_t/k_p$ )이 커야 한다. 그러나 전기기계결합계수 및 각종 특성이 우수하다고 알려져 있는 PZT계 세라믹스는 압전 stiffend 효과를 위한 큰 전기기계결합계수  $k_t$ 를 가질뿐만 아니라 압전 unstiffend효과를 가지는  $k_{31}$ 과  $k_p$ 를 가지고 있다. 따라서, PZT세라믹스는 두께방향 진동모드로 공진되는 AC전압을 공급시킬 때 두께진동보다 경방향 진동이 더 크게 발생하는 문제점을 가지고 있다.

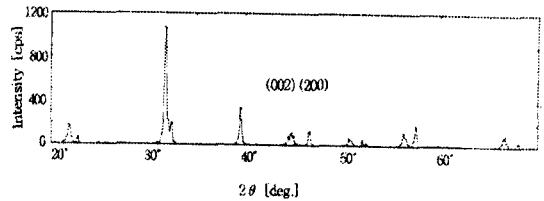
그러므로 본 실험에서는, 전기기계결합계수의 이방성( $k_t/k_p$ )을 높이고자 Pb-site에 Ca를 Ti-site에 ( $\text{Mn}_1\text{Sb}_3$ )를 치환시켜 압전 변압기를 제작하였으며, 표 1에 나타낸 것과 같이 높은 이방성을 가지게 되었다. 이는 페로브스카이트형 미세구조를 가진 세라믹이 상대적으로 높은 %의  $90^\circ$  domain 재배열을 이루기 위해 분극될 때  $90^\circ$  domain의 재배열로 인해 미소 crack과 같은 어떠한 결함으로 인해 결합부에서 에너지 흡수와 탄성파의 분산이 이루어져 기계적 품질계수  $Q_m$ 을 저하시키고, 경진동 모드의 전

기기계 결합계수  $k_p$ 를 감소 시킨 것으로 생각된다.

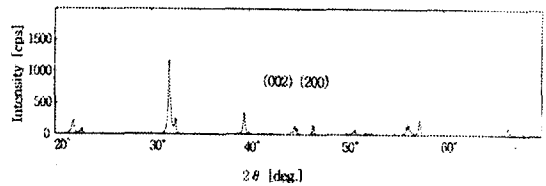
그림 2는 이를 확인하기 위하여 분극전계의 변화에 따른 X선 회절 측정결과를 나타내었으며, 회절각  $2\theta$ 가  $30^\circ \sim 34^\circ$ 와  $42^\circ \sim 49^\circ$  범위에서 peak의 분리가 나타나는 것으로 보아 정방정계(tetragonal system)임을 알 수 있었다. 따라서 분극전계가 증가함에 따라  $90^\circ$  domain 회전이 증가하여  $90^\circ$  domain 재배열 %를 나타내는  $N_{RX}^{90}$ 가 점차 증가하는 경향을 나타내었다.  $90^\circ$  domain 재배열 %( $N_{RX}^{90}$ )는 [8] 정방정계 구조에서 (200)면과 (002)면의 peak의 강도사이의 R과 R'의 비로부터 아래 식 (1)으로 계산하여 표 2에 정리하였다.

$$N_{RX}^{90}(\%) = \frac{R' - R}{(R' + 1)(R + 1)} \times 100(\%) \quad (1)$$

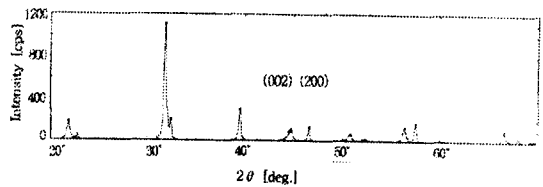
여기서 R과 R'는 각각 분극전과 분극후의 (002)와 (200)면의 peak 강도비를 나타낸다.



(a) 분극 전



(b) 10[kV/mm]



(c) 20[kV/mm]

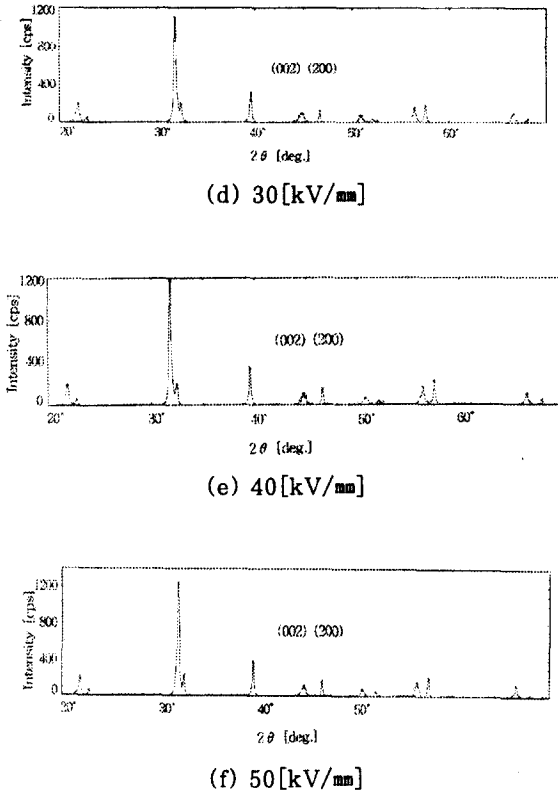


그림 2. 분극전계에 따른 XRD  
Fig. 2. X-ray diffraction pattern as a function of poling field.

표 2. 분극전계에 따른  $N_{RX}^{90}$  (%)  
Table 2.  $N_{RX}^{90}$  (%) as a function of poling field.

Pro. E[kV/mm]	R	R'	$N_{RX}^{90}$
1.0	1.1509433	2.5505617	18.35
2.0	1.1509433	3.7142857	25.27
3.0	1.1509433	3.3207547	23.36
4.0	1.1509433	3.360902	23.98
5.0	1.1509433	3.9298245	26.23

그림 3에 두께 진동 모드를 이용한 컨버터의 제작을 위해 중요한 상수인 전기기계 결합계수  $k_t$ 를 분극전계의 변화에 따라 나타내었다. 분극전계의 증가에 따라

$k_t$ 는 증가함을 알 수 있다. 이는 90°도메인의 배향이 분극전계의 증가에 의해 많이 이루어진 것으로 생각된다. 또한 분극시간이 30분 보다는 1시간에서 비교적 낮은 전계인 3[kV/mm] 이하에서 크게 나타났으며, 그 이상에서는 분극시간에 별 차이가 없음을 알 수 있다. 이는 항전계가 0.85[kV/mm]이므로 이것의 적어도 3배인 2.5[kV/mm] 이상에서는 분극이 포화되기 때문으로 생각된다. 따라서  $k_t$ 의 증가폭이 적음을 알 수 있다.

그림 4에서는 압전정수인  $d_{33}$ 를 분극전계와 분극시간의 변화에 따라 나타낸 것으로  $k_t$ 에서와 같이 3[kV/mm] 이상에서는 증가폭이 크지 않음을 알 수 있는데 이 또한  $k_t$ 에서와 같이 분극의 포화에 의한 것으로 사료되어진다. 표 3에 분극전계와 분극시간의 변화에 따른 제반 특성을 정리하여 나타낸 것으로 분극시간에는 별 영향을 받지 않으며, 단지 항전계의 3배 이상인 분극전계 4[kV/mm] 정도가 가장 타당할 것으로 생각된다.

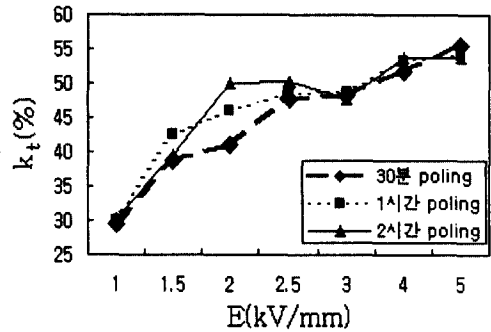


그림 3. 분극전계에 따른 전기기계 결합계수  $k_t$   
Fig. 3. Electromechanical coupling factor( $k_t$ ) as a function of poling field.

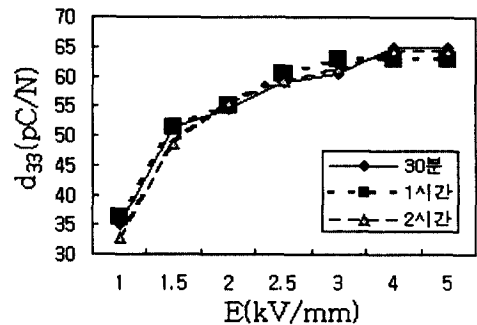


그림 4. 분극전계에 따른 압전정수  $d_{33}$   
Fig. 4. Piezoelectric constant  $d_{33}$  as a function of poling field.

표 3. 분극전계 및 분극시간에 따른 제반 특성  
Table 3. Characteristics as a function of poling field and poling time.

E [kV/mm]	Time Pro.	30분 분극		1시간 분극		2시간 분극	
		k <sub>t</sub> (%)	d <sub>33</sub> [pC/N]	k <sub>t</sub> (%)	d <sub>33</sub> [pC/N]	k <sub>t</sub> (%)	d <sub>33</sub> [pC/N]
1.0		29.4	35.1	29.9	36.1	30.2	32.8
1.5		38.7	51.4	42.6	51.4	39.44	48.7
2.0		40.94	54.4	46.05	55	50.07	55.6
2.5		47.85	59	48.6	60.3	50.23	59.3
3.0		48.3	60.5	48.78	63	47.65	61.3
4.0		51.8	65	53.27	63	53.67	64.4
5.0		55.48	65	53.99	63	53.64	64.2

그림 5는 주파수에 따른 시편의 임피던스특성을 나타낸 것이다. 출력측을 단락하여 측정한 결과 1차 공진이 664 KHz(R=131.36Ω), 2차 공진이 1.41 MHz(R=9.49Ω), 3차공진이 2.092 MHz(R=97.32Ω)을 나타 내었다. 2차 공진에서 공진저항이 최소로 되어 고주파수에서 구동될 경우 손실이 가장 작을 것으로 생각된다. 이는 2차 공진일 경우 입력측과 출력측에서 확장과 수축이 교대로 일어나며, 또한 stress분포도 입력측과 출력측의 가운데서 각각 최대 stress가 공급되기 때문이다. 또한, 입력측을 단락하여 같은 방법으로 주파수에 따른 임피던스특성을 측정된 결과 1차 공진이 663.5 KHz(R=140.0Ω), 2차 공진이 1.41 MHz(R=10.33Ω), 3차공진이 2.1 MHz(R=88.27Ω)을 나타내었다. 마찬가지로 2차공진에서 공진저항이 최소로 되어 구동시 최저의 손실을 가져올 것으로 생각된다. 또한 출력측을 단락하여 측정된 결과와 입력측을 단락하여 측정된 결과가 거의 같은 값으로 나타남을 확인 할 수 있었다.

그림 6은 부하저항 변화에 따른 전압이득을 주파수 변화에 따라 측정된 결과이다. 전압이득은 아래의 식 (2)과 같이 구하였다. 부하저항이 증가함에 따라 약간씩 주파수가 높아지고 있으며, 전압이득도 높아감을 알 수 있었다. 5Ω일 경우 전압이득이 얻어지는 피크가 가장 넓은 것을 확인 할 수 있었는데 이는 등가회로에서 출력단 임피던스가 5Ω에 가깝기 때문이며, 이 때가 최대전력이 전달되는 부하저항이다.

표 4은 실측한 최대 전압이득과 공진 주파수 관계를 나타낸 것이다. 50Ω에서 전압이득이 0.997이였으며, 100Ω에서 전압이득이 1.365로 나타났다.

$$\text{전압이득}(G) = \frac{V_{out}}{V_{in}} \quad (2)$$

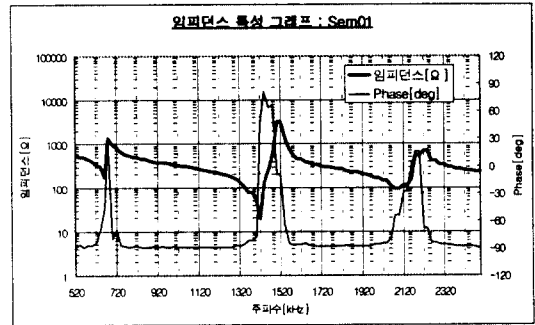


그림 5. 주파수에 따른 임피던스  
Fig. 5. Impedance characteristics with frequency

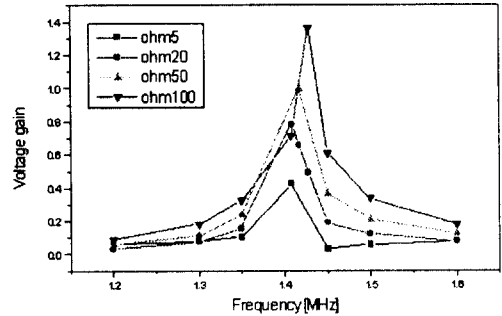


그림 6. 주파수에 따른 전압이득  
Fig. 6. Voltage gain according to frequency

표 4. 부하저항에 따른 공진주파수 및 최대 전압이득.  
Table 4. Resonance frequency and maximum voltage gain according to load resistance

저항(Ω)	공진주파수(MHz)	전압이득
5	1.408	0.428
10	1.408	0.798
20	1.409	0.778
30	1.409	0.893
50	1.417	0.997
100	1.428	1.365

#### 4. 결 론

본연구에서는  $(\text{Pb}_{0.76}\text{Ca}_{0.24})[\text{Ti}_{0.96}(\text{Mn}_{\frac{1}{3}}\text{Sb}_{\frac{2}{3}})_{0.04}]\text{O}_3$

세라믹을 제조하여 물성 및 압전특성을 조사하였으며, 또한 분극전계에 따른 특성을 검토하여 실제로 두께방향진동모드로 동작하는 압전 변압기를 제작하여 그에 관한 특성을 고찰하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 유전상수( $\epsilon_{33}^T/\epsilon_0$ )가 192, 밀도( $g/cm^3$ )는 6.9, 전기기계결합계수  $k_p$ 가 0.045,  $k_t$ 는 0.536, 큐리온도가 275℃를 나타내었다.
- (2) 분극전계는 항전계의 3배 이상의 전계(4kV/mm)가 적당하며, 분극시간에는 별 영향을 받지 않음을 나타내었다.
- (3) 두께진동형 압전 변압기의 주파수에 따른 임피던스특성을 출력측을 단락하여 측정한 결과 2차 공진 1.41 MHz( $R=9.49\Omega$ )에서 공진저항이 최소로 되었으며, 가장 우수한 특성을 나타내었다. 또한, 입력측을 단락하여 측정한 결과도 거의 같은 특성을 얻었다.
- (4) 50 $\Omega$ 에서 공진주파수 1.417 MHz 전압이득이 0.997이었으며, 100 $\Omega$ 에서 공진주파수 1.428 MHz, 전압이득이 1.365로 나타났다.

### 참 고 문 헌

[1] O. Ohnishi, H. Kishie, A. Iwamoto, Y. Sasaki, T. Zaitzu and T. Inoue, "Piezoelectric ceramic transformer operating in thickness extensional vibration mode for power supply", IEEE Ultrasonic Symp. Proc., pp. 483-488, 1992.  
 [2] T. Zaitzu, T. Inoue, O. Ohnishi, A. Iwamoto,

"2MHz power converter with piezoelectric ceramic transformer", IEEE INTELEC '92 Proc., pp. 430-437, Oct. 1992.  
 [3] S. Kawashima, O. Ohnishi, H. Hakamata, S. Tagami, A. Fukuoka, T. Inoue, and S. Hirose, "Third order longitudinal mode piezoelectric ceramic transformer and its application to high-voltage power inverter", IEEE Int. Ultrasonic Symposium Proc., Nov. 1994.  
 [4] 大西修, 岸江宏美, 岩本明夫, "厚み縦振動を利用した電力電送用壓電トランス", 信學技報, US92-20, 1992.  
 [5] 田上悟, 田洋代, 川島進吾, 福岡晃, 坂口龍夫, 座間浩一, "壓電トランス式インバータ開發", NEC 技報, Vol. 47, pp. 106~110, 1994.  
 [6] 홍재일, 류주현, 윤현상, 윤광희, 장낙원, 박창엽, "MnO<sub>2</sub> 첨가에 따른 PbTiO<sub>3</sub>계 세라믹스의 구조적, 전기적 특성", 대한전기학회 논문지, Vol. 44, No. 11, pp. 1488~1493, 1995.  
 [7] J. H. Yoo, S. H. Lee, Y. H. Jeong, C. Y. Park, "Voltage Gain Characteristics of Piezoelectric Transformer Using PbTiO<sub>3</sub> System Ceramics"(Sensor & Actuator에 99년 1.11에 accept).  
 [8] L. Pardo, et. al. "Role of 90° Domain on the Electromechanical Anisotropy of Ca Modified PbTiO<sub>3</sub> Ceramics", Ferroelectrics, Vol. 94, p. 189, 1989.