

# PMS-PZT, PMN-PZT계 세라믹스를 이용한 압전변압기의 특성

## Characteristics of Piezoelectric Transformer Using PMS-PZT, PMN-PZT Ceramics

이동균\*, 윤석진\*\*, 김현재\*\*, 안형근\*, 한득영\*

Dong-Kyun Lee\*, Seok-Jin Yoon\*\*, Hyun-Jai Kim\*\*, Hyung-Keun Ahn\*, Deuk-Young Han\*

### Abstract

The piezoelectric material for piezoelectric transformer needs the high electromechanical coupling factor( $k_p$ ), the piezoelectric constant( $d_{33}$ ) and the mechanical quality factor( $Q_m$ ) in order to obtain high voltage step-up ratio and low temperature rising. In this study, the piezoelectric transformers were fabricated using  $Pb(Zr_{0.45}Ti_{0.48}Lu_{0.02}(Mn_{1/3}Sb_{2/3})_{0.05})O_3$  (PMS-PZT) and  $Pb(Zr_{0.25}Ti_{0.375}(Mg_{1/3}Nb_{2/3})_{0.375})O_3 + 0.5wt\%MnO_2$  (PMN-PZT) ceramics. The piezoelectric properties of PMS-PZT and PMN-PZT were measured. The voltage set-up ratios of the piezoelectric transformers using PMS-PZT and PMN-PZT were the value of 15, 20 respectively under 100kHz in Rosen type transformer.

**Key Words(중요어)** : Piezoelectric transformer(압전변압기), Voltage set-up ratio(전압이득),  $Lu_2O_3$ , PMS-PZT, PMN-PZT

### 1. 서 론

압전특성이란 결정질 재료가 기계적 응력을 받으면 전하가 발생하는 현상이다. 이런 특성을 갖는 압전재료는 H. Jaffe<sup>(1)</sup> 등이 온도안정성이 뛰어나며 정방정상과 능면체정상의 상경계영역(morphotropic phase boundary, MPB)에서 압전특성이 우수한  $Pb(Zr,Ti)O_3$  (PZT)계 세라믹스를 개발한 이후 PZT계 세라믹스에 다른 원소를 첨가하거나  $ABO_3$  형태의 페로브스카이트형 복합산화물을 결합시켜 소결성, 압전특성, 유전특성을 개선시키는 연구가 이루어졌다.<sup>(2)</sup> 이들은 의료기기, 비파괴 검사, sonar 등의 초음파 응용뿐만 아니라 공장자동화, 정밀 위치결정 등에 이용되는 액츄에이터 등 그 응용 범위가 점차 증가되고 있다.

압전변압기의 원리는 전기적 에너지를 기계적 에너지로 변

환시킨 후 그 기계적 에너지를 다시 전기적 에너지로 변환시키는 것이다.<sup>(3)</sup> 이 압전변압기는 권선형 변압기(coil transformer)에 비해 전류가 적고 주파수 대역폭이 좁다는 단점을 가지고 있으나 구조가 간단하고 소형, 경량이며 전기적 손실이 적다는 장점을 가지고 있어서 음이온 발생기, 전자복사기, 치한퇴치기, 고주파변압기 등 고전압 소전류원을 필요로 하는 분야에 사용될 수 있다. 최근 노트북 컴퓨터의 수요 증가에 따라 LCD 백라이트용 인버터에 활용하기 위한 연구와 압전변압기의 승압비를 높이기 위한 연구가 활발히 이뤄지고 있다.<sup>(4-6)</sup>

점차 화면(display)이 대형화됨에 따라 고효율의 압전변압기가 요구되고 있으나 높은 입력전압을 인가할 경우 소자에 열이 발생을 하게되고<sup>(7-8)</sup> 이 열은 승압비의 저하와 공진 주파수의 변화 등 압전특성을 저하시킨다. 이와같은 소자의 열발생 원인은 재료의 손실요소 때문이라고 알려져 있다.<sup>(7)(9)</sup> 따라서 압전변압기에 사용되는 압전재료는 전기-기계 결합계수( $k_p$ )가 클 뿐만 아니라 전기기계변환 과정에서의 에너지 손실에 대한 척도가 되는 기계적 품질계수( $Q_m$ )가 큰 재료를

\* : 전국대학교 전기공학과  
\*\* : 한국과학기술연구원 박막기술연구소  
(주소:서울성북구 하월곡동 39-1, Tel:958-5554  
E-mail : dklee@kist.re.kr)  
1999년 5월 23일 접수, 2000년 2월 17일 심사완료

선택해야 한다. 그러나  $Q_m$ 은 그 값이 너무 크게되면 사용주파수의 범위가 협소해진다는 문제점이 있으므로 500~1000이 적당하다.

본 연구에서는 송압비가 높고 고출력에서 열의 발생이 적은 압전변압기를 개발하기 위하여 압전특성이 우수하고 기계적 품질계수가 비교적 큰  $Pb(Mn_{1/3}Sb_{2/3})O_3$ - $Pb(Zr,Ti)$ 계 세라믹스와 전기-기계 결합계수가 크고 기계적 품질계수가 높은 조성과 압전특성이 우수한 조성인  $Pb(Mg_{1/3}Nb_{2/3})O_3$ - $Pb(Zr,Ti)$ 계 세라믹스를 이용하여 Rosen형 압전변압기를 제작한 후 각각의 특성을 비교 평가함으로써 실용화의 가능성을 검토하고자 하였다.

## 2. 압전변압기의 등가회로

본 논문에서는 Mason<sup>(10)</sup>이 유도한 압전진동자의 등가회로를 기본으로 입력단의 구동부와 출력단의 발전부 각각의 등가회로를 결합하여 그림 1과 같은 등가회로를 구성하였다. 이때 입력단은 내부저항  $R_g$ 를 갖는 일정한 전압원  $V_g$ 로 구동하고 출력단에는 부하저항  $R_L$ 이 연결된 경우를 고려한다.

등가회로상의 여러 가지 값들은 식(1)과 같이 나타내는데  $Z_0$ 은 기계적 특성 임피던스,  $L$ 은 길이,  $W$ 는 폭,  $T$ 는 두께,  $\epsilon_{33}^T$ 은 응력  $T$ 가 일정할 때의 유전율,  $s_{33}^E$ 은 전계  $E$ 가 일정할 때의 탄성 컴플라이언스,  $N$ 은 변형비,  $k_{31}$ ,  $k_{33}$ 은 전기-기계결합계수,  $g_{33}$ 은 압정상수이다.

$$Z_0 = WT\sqrt{\rho Y^E}$$

$$Z_1 = Z_2 = \frac{2Z_0}{\tanh(\frac{yL}{2})}, \quad Z_3 = 2Z_0 \tanh(\frac{yL}{2})$$

$$N_i = wd_{31} Y_i^E, \quad X_i = \frac{T}{w \epsilon_{33}^E (1 - k_{31}^2) WL}$$

$$N_0 = \frac{WT}{L} \frac{g_{33} \epsilon_{33}^T}{s_{33}^E}, \quad X_0 = \frac{L}{w \epsilon_{33}^E (1 - k_{33}^2) WL} \quad (1)$$

이를 다시 시스템의 해석을 위해 전기적인 성분과 기계적

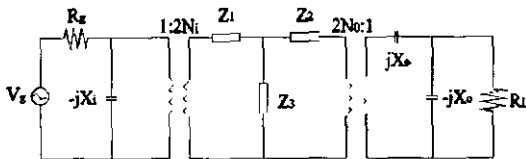


그림 1. Rosen형 압전변압기의 등가회로  
Fig. 1. Equivalent circuit of Rosen-type piezoelectric transformer

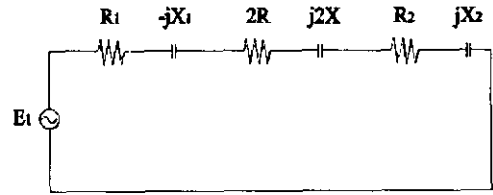


그림 2. 단순화된 등가회로  
Fig. 2. Simplified equivalent circuit transformed to mechanical circuit

인 성분을 기계적인 성분만 있는 회로로 변환하면 그림 2와 같이 단순화할 수 있다.

무부하시의 송압비  $A_v$ 는 그림 2로부터 식(2)와 같이 나타낼 수 있다. 이 식으로부터 송압비는 기계적 품질계수( $Q_m$ )와 두께에 대한 길이의 비에 비례한다는 것을 알 수 있다.

$$A_v = \frac{4Q_m}{\pi^2} k_{31} k_{33} \frac{L}{T} \quad (2)$$

## 3. 실험 및 측정

본 실험에서는  $Pb(Zr_{0.45}Ti_{0.46}Lu_{0.02}(Mn_{1/3}Sb_{2/3})_{0.05})O_3$  (PMS-PZT)<sup>(11)</sup>와  $Pb(Zr_{0.25}Ti_{0.375}(Mg_{1/3}Nb_{2/3})_{0.375})O_3 + 0.5wt\%MnO_2$  (PMN-PZT)<sup>(12)</sup>계 세라믹스를 이용하여 제작한 압전변압기 특성을 조사하였다.

고순도의  $PbO$ (99.9%)와 Aldrich의  $ZrO_2$ (99.9%),  $TiO_2$ (99.9%),  $Lu_2O_3$ (99.9%),  $MnO_2$ (99.99%),  $Sb_2O_5$ (99.995%),  $MgO$ (A.C.S. reagent),  $Nb_2O_5$ (99.9%) 등의 출발물질을 이용하여 산화물 혼합법으로 압전체 분체를 제조하였으며 전체적인 실험공정은 그림 3에 나타내었다.

정확한 조성의 원료분체를 제조하기 위해 전자저울을 이용하여 10<sup>-4</sup>g 까지 평량한 출발물질을 증류수를 분산매로 지르코니아 볼과 함께 플라스틱통에 주입한 후 12시간 습식 혼합, 분쇄하였다. 혼합된 원료는 완전히 건조한 후 알루미늄 도가니에 넣어 850℃에서 1시간 하소하였다.

하소가 끝난 시료는 유발로 재분쇄한 후 결합조제 polyvinyl alcohol (217-C) 5wt%수용액을 5wt%첨가하여 균일하게 섞은 후  $\phi 18mm$  mold로 700kg/cm<sup>2</sup>의 압력을 가하여 성형하였다. 성형시편의 결합조제를 600℃, 1시간 열처리하여 완전 연소시켰다. 탈지된 시편들은  $PbO$ 의 휘발을 억제하기 위해 시료조성과 동일한 분위기 분말을 사용하여 2중 알루미늄 도가니에 넣고 소결하였다. 소결조건은 송하강

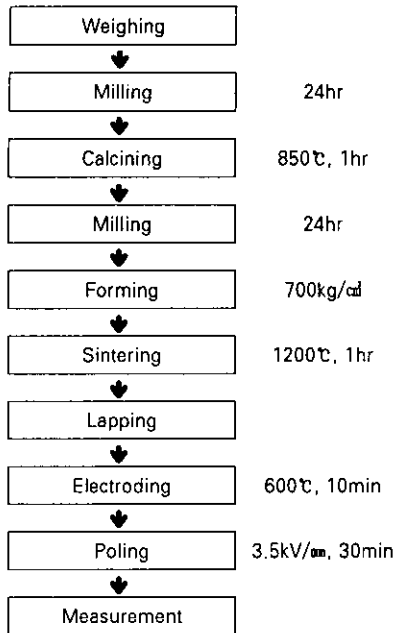


그림 3. 제작 공정도  
Fig. 3. Schematic diagram of experimental procedure

온도를 5°C/min로 1200°C에서 1시간동안 유지하였다.

소결이 끝난 시편은 양면 연마기를 이용하여 두께가 1mm가 되도록 연마한 다음 silver paste (Dupont #7095)를 도포하고 600°C에서 10분간 열처리를 하여 전극을 형성하였으며 전극이 형성된 시편은 domain의 방향성을 부여하기 위하여 120°C의 silicon oil속에서 3.5kV/mm의 직류전계를 30분간 가하여 분극을 하였으며 분극 후 24시간이 경과한 후 시편의 특성을 측정하였다.

압전변압기는  $Pb(Zr_{0.45}Ti_{0.48}Lu_{0.02}(Mn_{1/3}Sb_{2/3})_{0.05})O_3$ 와  $Pb(Zr_{0.25}Ti_{0.375}(Mg_{1/3}Nb_{2/3})_{0.375})O_3 + 0.5wt\%MnO_2$  조성을 각각 위와 동일한 과정으로 제작하였다. 얻어진 세라믹시편을 길이 42mm, 폭 10mm, 그리고 두께 1.2mm로 가공한 다음 스크린 프린터(screen printer)를 이용하여 그림 4와 같이 전극의 패턴을 형성시킨 후 길이방향과 두께방향으로 각각 3.5kV/mm의 직류전계로 분극 하였다.

압전특성은 EMAS(Electronic Material Manufacture Association Standard)-6003에 근거한 공진-반공진법에 의해서 Piezometer (Model CPDP 3300, Channel Products Inc.), Network Analyzer (HP3577A)와 LF Impedance Analyzer를 사용하여 압전상수( $d_{33}$ ), 전기-기

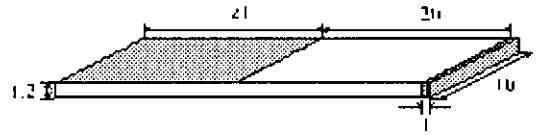


그림 4. 압전변압기의 전극형태  
Fig. 4. Electrode patterns of the piezoelectric transformer

계 결합계수( $k_p$ )와 기계적 품질계수( $Q_m$ )을 구하였다.

또한, 압전변압기의 입출력 전압은 Digital Oscilloscope (Tektronix TM524A), 입출력 전류는 Current Amplifier (Tektronix TM520A)를 사용하여 측정하였다.

## 4. 결과 및 고찰

### 4.1 PMS-PZT와 PMN-PZT의 압전특성

표 1과 그림 5~9는  $Pb(Zr_{0.45}Ti_{0.5-x}Lu_x(Mn_{1/3}Sb_{2/3})_{0.05})O_3$  ( $0 \leq x \leq 0.03$ ) 세라믹스의 압전특성을 나타낸다.

그림 5에서 전기-기계 결합계수( $k_p$ )는  $x=0.02$ 일 때 최고치인 58.5%를 나타내며  $Lu^{3+}$ 의 양이 그 이상으로 증가함에 따라서는 감소한다.

또한 그림 6과 7에서는 전기-기계 결합계수( $k_p$ )가 최고치를 나타내는  $x=0.02$ 에서 압전상수( $d_{33}$ )와 유전상수( $\epsilon_{33}^T$ )도 최고치를 보이고 있다. 압전상수( $d_{33}$ )은 상전이 부근에서 최고치를 나타내는데 본 실험에서는  $x=0.02$ 일 때  $370$  ( $\times 10^{-12}C/N$ )의 값을 나타낸다. 또한  $Lu^{3+}$ 의 농도 증가에 따라  $d_{33}$ 가 현저히 증가하고 이와 유사한 현상이  $0 \leq x \leq 0.02$  범위의  $\epsilon_{33}^T$ 에서도 나타나는데 그 최고치는 1321이다.

그림 8과 9는 기계적 품질계수( $Q_m$ )과 유전손실( $\tan\delta$ )를 나타내고 있다.  $Q_m$ 은  $x$ 의 증가에 따라 서서히 감소하며 특히  $x=0.01 \sim 0.02$ 에서 급격히 감소하였다.

표 1. PMS-PZT의 압전 및 유전특성.  
Table 1. Piezoelectric and dielectric properties of PMS-PZT ceramics.

x	d (g/cm²)	$\tan\delta$ (%)	$\epsilon_{33}^T$	$k_p$ (%)	$Q_m$	$d_{33}$ ( $10^{-12}C/N$ )
0	7.86	0.2	1041	47.2	1933	251
0.01	7.73	0.53	1244	50.0	1602	292
0.02	7.83	0.98	1321	58.5	714	373
0.03	7.84	1.29	943	54.0	680	288

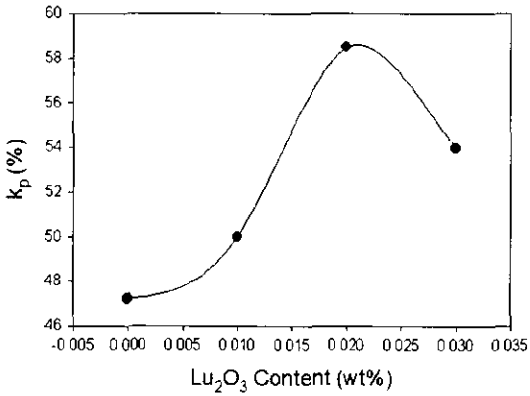


그림 5. PMS-PZT의 전기-기계 결합계수  
Fig. 5. Electromechanical coupling factor of PMS-PZT

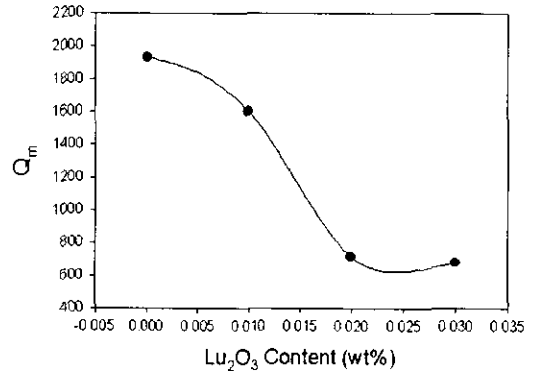


그림 8. PMS-PZT의 기계적 품질계수  
Fig. 8. Mechanical quality factor of PMS-PZT

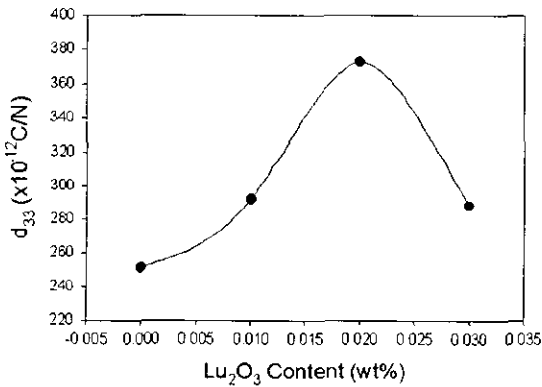


그림 6. PMS-PZT의 압전상수  
Fig. 6. Piezoelectric constant of PMS-PZT

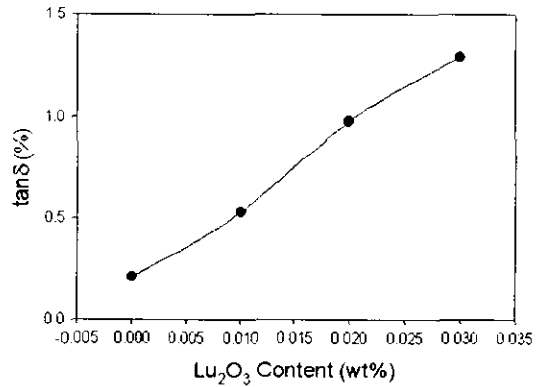


그림 9. PMS-PZT의 유전손실  
Fig. 9. Dielectric loss of PMS-PZT

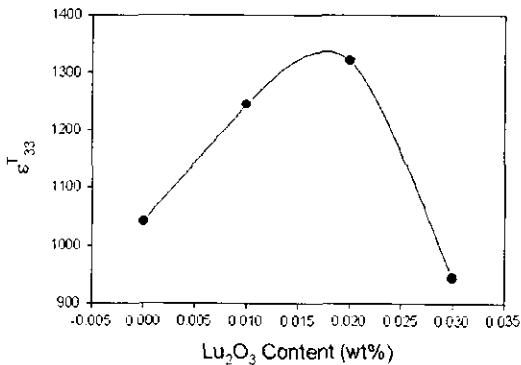


그림 7. PMS-PZT의 유전상수  
Fig. 7. Dielectric constant of PMS-PZT

그러나  $\tan\delta$ 는 0.21~1.29%로 점차적인 증가를 나타낸다.  $Q_m$ 의 크기가 적은 경우 액츄에이터의 동작 중 열이 발생하는데 이는 압전특성을 저하시키는 원인이 되므로 클수록 좋으나 너무 크게되면 사용주파수의 범위가 협소해진다는 문제점이 있으므로  $Q_m$ 값을 고려할 때  $x=0.02$ 일 때의 특성이 압전변압기에 가장 적합하다고 판단된다.

표 II는 압전변압기를 제작한 PMS-PZT, PMN-PZT의 대표적인 압전특성을 보여주고 있다. PMS-PZT, PMN-PZT의 기계적 품질계수( $Q_m$ )은 약 1000의 차이를 나타낸다.

#### 4.2 압전변압기의 특성

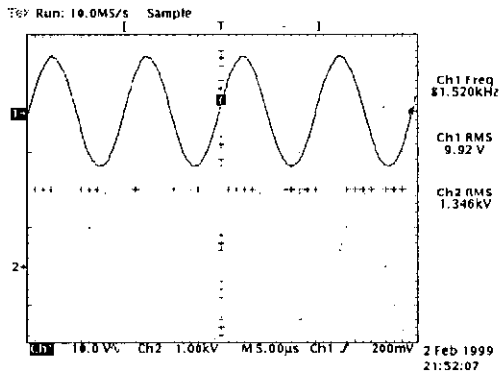
PMS-PZT와 대표적인 압전재료인 PMN-PZT로 제작한

표 II. 압전변압기 제작에 사용된 PMS-PZT, PMN-PZT의 특성

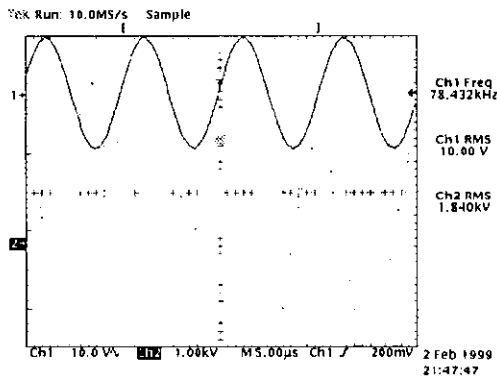
Table II. The properties of PMS-PZT, PMN-PZT for fabricated piezoelectric transformers

	d (g/cm <sup>2</sup> )	tanδ (%)	ε <sub>T</sub> <sup>33</sup>	k <sub>p</sub> (%)	Q <sub>m</sub>	d <sub>33</sub> (10 <sup>-12</sup> C/N)
PZT -PMS	7.83	0.98	1321	58.5	714	373
PZT -PMN	7.67	0.23	777	53.8	1729	315

압전변압기의 무부하시 전압특성, 입출력 전압특성, 부하에 따른 전압이득과 동작시간에 따른 온도상승률을 평가하였다. 그림 10은 무부하시 입력전압이 10Vrms일 때 압전변압기의 출력전압을 나타낸 것으로 PMS-PZT의 경우 약 136배, PMN-PZT의 경우 약 184배의 전압이득을 나타냈으며



(a)PMS-PZT



(b)PMN-PZT

그림 10. 무부하시 입출력 전압  
Fig. 10. Input, output voltages under no load

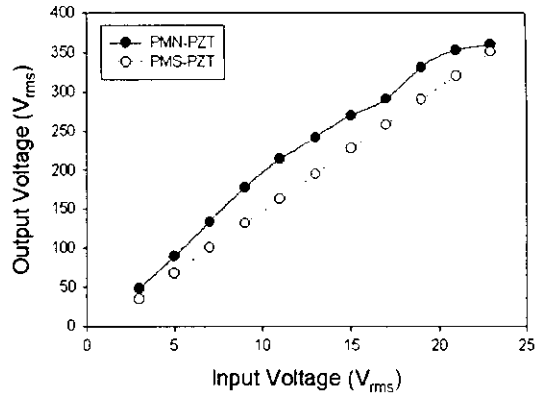


그림 11. 입출력 전압 특성 (부하 : 100kΩ)  
Fig. 11. Output-to-input voltage characteristics (Load : 100kΩ)

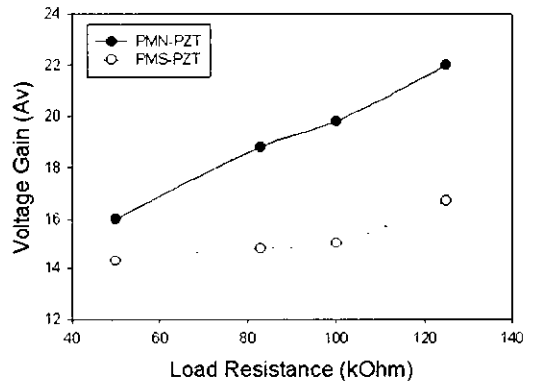


그림 12. 전압이득 특성  
Fig. 12. Voltage set-up ratio characteristics

이때의 동작 주파수는 약 80kHz이다.

그림 11은 압전변압기의 출력단에 100kΩ의 부하를 연결한 후 입력전압에 따른 출력전압의 크기를 나타낸 것으로 입력전압의 증가에 따라 거의 선형적으로 증가한다. 이때 입력전압이 10V<sub>rms</sub>일 때 PMS-PZT의 경우 150V<sub>rms</sub>, PMN-PZT의 경우 198V<sub>rms</sub>의 출력전압을 나타냈다.

그림 12는 10V<sub>rms</sub>의 입력전압을 인가했을 때 출력측 부하 변화에 따른 전압 이득을 나타낸 것으로 부하의 크기가 증가함에 따라 전압이득이 증가하며 PMN-PZT가 PMS-PZT보다 높은 전압이득 특성을 나타냈다.

그림 13은 100kΩ의 부하를 연결하고 10V<sub>rms</sub>의 입력전압을 인가했을 때 동작시간에 따른 압전변압기의 온도 상승률

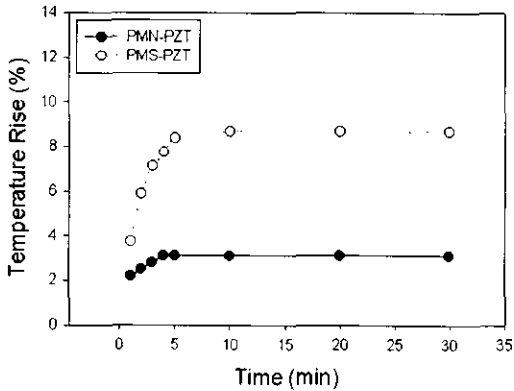


그림 13. 동작시간에 따른 온도상승 특성  
 Fig. 13. Temperature rise characteristics with variation of operating time

을 나타낸 것으로 초기단계에는 급속히 증가하다가 5분이 경과한 후부터 PMN-PZT, PMS-PZT의 온도 상승률이 각각 9%, 3%정도로 일정하게 유지된다.

### 5. 결 론

기계적 품질계수( $Q_m$ )와 압전상수( $d_{33}$ )가 큰 PMN-PZT와  $Lu^{3+}$  첨가량에 따라 최적의 특성을 나타내는 PMS-PZT를 이용하여 압전변압기를 제작하고 그 특성을 평가한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1)  $Pb[Zr_{0.45}Ti_{0.5-x}Lux(Mn_{1/3}Sb_{2/3})_{0.05}]O_3$ 에서는  $x=0.02$ 일 때 전기-기계 결합계수( $k_p$ ), 유전상수( $\epsilon_{33}^T$ ) 및 압전상수( $d_{33}$ )는 최고값을 보였으나  $x$ 가 증가함에 따라 감소하였다.
- (2)  $Lu_2O_3$ 를 0~0.02mol%첨가한 경우 기계적 품질계수( $Q_m$ )는 1933에서 714로 감소하였으나 전기-기계 결합계수( $k_p$ )는 47.2%에서 58.5%로 증가하였다.
- (3) 무부하상태에서 압전변압기에 10V<sub>rms</sub>의 전압을 인가하였을 때 PMS-PZT, PMN-PZT 각각의 전압이득은 136, 184배로 PMN-PZT가 더 높은 전압이득을 나타냈다.
- (4) 입력전압 증가에 따른 출력전압의 크기는 거의 선형적으로 증가하였으며 입력전압이 10V<sub>rms</sub>일 때 100 $\mu$ 의 부하에서 PMS-PZT는 150V<sub>rms</sub>, PMN-PZT는 198V<sub>rms</sub>의 출력전압을 나타냈다.
- (5) 100 $\mu$ 의 부하를 연결하고 10V<sub>rms</sub>의 입력전압을 인가

시 동작시간에 따른 압전변압기의 온도상승률은 초기 단계에서 급속히 증가하다가 5분이 경과한 후부터 PMN-PZT, PMS-PZT의 온도 상승률이 각각 9%, 3%정도로 일정하게 유지됐다.

### 참 고 문 헌

- [1] B. Jaffe, W. R. Cook, and H. Jaffe, "Piezoelectric Ceramics", Academic Press, 140-60, 1971.
- [2] B. Jaffe, R. S. Roth, and S. Marzullo, "Properties of Piezoelectric Ceramic in the Solid-Solution Series Lead Titanate-Lead Zirconate-Lead Oxide : Tin Oxide and Titanate-Lead Hafnate", J. Res. Natl. Std., Vol. 55, No. 5, 239, 1955.
- [3] A. Mizutana, Y. Hashiguchi, M. Fujisawa, and H. Ishikawa "New Transformer Shrinks LCD Backlight Inverter Thickness", Nikkei Electronics Asia, 76-80, 1995.
- [4] J. H. Kim, D. Y. Han, and M. H. Nam, "Analysis of a Three Layered Piezoelectric Ceramic Transformer Filter", IEEE Trans. Circuit & Systems-1, Vol. 42, No. 6, 307-13, 1995.
- [5] S. Hirose and H. Shimizu, "An Advanced Design of Piezoelectric Transformer for High Voltage Source", IEEE Ultrasonic Symposium Proc., Vol. 1, 471-75, 1989.
- [6] W. Wersing, M. Schnoeller, and H. Wahl, "Monolithic Multilayer Piezoelectric Ceramics", Ferroelectrics, Vol. 68, 145-56, 1986.
- [7] S. Takahashi and S. Hirose, "Vibration-Characteristics of Lead-Zirconia-Titanate Ceramics", Jpn. J. Appl. Phys., Vol. 31, 3055-77, 1992.
- [8] H. Kawai, Y. Sasaki, T. Inoue, T. Inoi, and S. Takahashi, "High Power Transformer Employing Piezoelectric Ceramics", Jpn. J. Appl. Phys., Vol. 35, 5015-17, 1996.
- [9] S. Takahashi, S. Hirose and K. Uchino, "Stability of PZT Piezoelectric Ceramics under Vibration Level Change", J. Am. Ceram. Soc., Vol. 77, No. 9, 2429-32, 1994.

[10] W. P. Mason, *Electromechanical Transducers and Wave Filters*, 2nd Ed., New York, D. Van Nostrand Co., 11-100, 1948.

[11] S. J. Yoon, H. W. Kang, S. I. Kucheiko, H. J. Kim, H. J. Jung, D. K. Lee and H. K. Ahn, "Piezoelectric Properties of  $Pb[Zr_{0.45}Ti_{0.5-x}Lu_x(Mn_{1/3}Sb_{2/3})_{0.05}]O_3$  Ceramics", *Journal of the American Ceramic Society*, Vol. 81, No. 9, 2473-76, 1998.

[12] 일본 특허 53-664, 1953.