

## 저온소결 PMN-PNN-PZT 세라믹스를 이용한 고출력 강압용 적층 압전변압기의 전기적 특성

### Electrical Properties of High Power Step Down Multilayer Piezoelectric Transformer using Low Temperature Sintering PMN-PNN-PZT Ceramics

류주현<sup>1,a</sup>, 김국진<sup>1</sup>, 백동수<sup>2</sup>, 윤현상<sup>3</sup>

(Ju-Hyun Yoo<sup>1,a</sup>, Kook-Jin Kim<sup>1</sup>, Dong-Soo Paik<sup>2</sup>, and Hyun-Sang Yoon<sup>3</sup>)

#### Abstract

In this study, multilayer piezoelectric transformer was manufactured using the PMN-PNN-PZT ceramic and then the electrical characteristics were investigated according to the variations of frequency and load resistance. The voltage step-up ratio of multilayer piezoelectric transformer showed the maximum value at the vicinity of 75 kHz and increased according to the increase of load resistance. When the output impedance coincided with the load resistance, the multilayer piezoelectric transformer showed the temperature rise of less than 20 °C at the output power of 20 W. As the results, the multilayer piezoelectric transformer manufactured at low co-firing temperature of 940 °C using PMN-PNN-PZT ceramics could be stably driven as the step-down transformers.

**Key Words** : Low temperature sintering, Multilayer piezoelectric transformer, Tape casting

#### 1. 서론

압전 세라믹스는 액츄에이터, 초음파 모터, 압전 변압기등으로 넓은 응용분야에 사용될 수 있어, 최근들어 괄목할만한 연구가 이루어지고 있다[1]. 특히, TFT-LCD backlight 구동용 인버터에 압전 변압기가 적용될 수 있음을 연구결과를 통해 확인한 후 압전변압기로 적용될 수 있는 조성 개발, 특성 평가 방법등에 대한 연구가 적극적으로 이루어지고 있다. 압전변압기에 대한 연구는 응용분야에 있어서 IT 산업의 한 축으로서 크게 성장하고 있는 LCD display, DC-DC converter, AC-DC converter,

기타 고전압전원장치 등과 같이 그 범위가 상당히 넓다[2-6]. 압전변압기는 권선형 변압기와 비교했을 때 누설자속이 없어 노이즈 발생이 없고, 공진주파수만을 이용하므로 출력의 파형이 정현파에 가까워 고조파 잡음이 없으며, 불연성의 특징을 가지고 있다. 특히 소형화, 슬립화, 경량화가 가능하고 90 %이상의 높은 효율을 얻을 수 있다[2]. 또한, 압전변압기에 대한 최근 연구는 단판형 압전변압기의 출력한계를 개선하기 위해 높은 승압비와 고출력을 갖는 적층 압전변압기가 제안되었다[7]. 하지만, 적층 압전변압기의 제작시 그 구조적 특성상 내부전극과 함께 소결하여야 하는데, 이때 소결온도가 높으면 값비싼 Pd함량이 높은 전극을 사용하여야 한다. 따라서, Pd함량이 10 %미만인 Ag/Pd 전극을 사용하기 위해서는 950 °C이하에서 저온소결이 가능한 조성개발이 필수적이라 할 수 있다. 따라서 본 연구에서는 소결온도가 낮으면서도 유전 및 압전특성이 우수한 조성을 사용하여 적층 압전변압기를 제작하였으며 적층 압전변압기의 전기적 특성을 조사하였다.

1. 세명대학교 전기공학과  
(충북 제천시 신월동 579)

2. 이투스(주)

3. 국제대학 철도전기과

a. Corresponding Author : juhyun57@semyung.ac.kr

접수일자 : 2007. 1. 30

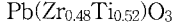
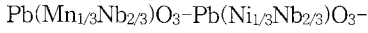
1차 심사 : 2007. 3. 20

심사완료 : 2007. 3. 21

## 2. 실험

### 2.1 시편의 제조 및 특성측정

본 실험은 다음 조성식을 사용하여 적층 압전변압기를 제작하였다.



조성의 batch size를 1700 g으로 하여 시료의 물비를  $10^{-4}$ 까지 평량하여 24시간동안 아세톤을 분산매로 혼합분쇄 후, 80 °C의 항온조에서 12시간 이상 건조하였다. 건조가 끝난 시료를 850 °C에서 2시간동안 하소하였다. 하소가 끝난 시료에 첨가제로  $\text{CuO-Bi}_2\text{O}_3\text{-Li}_2\text{CO}_3$ 를 첨가하여 24시간동안 재 혼합분쇄 하였다. 건조된 파우더와 PVB(Ferro B73305)의 비율을 무게비로 72:28로 혼합하여 Doctor Blade 법으로 Tape Casting을 하여 70  $\mu\text{m}$ 로 시트를 뽑아냈다. 내부전극은 90Ag/10Pd (Daejoo DS-9165IE) 전극을 이용하였으며 출력측을 interdigital 구조로 3층으로 적층하였다. 적층된 시트를 70 °C에서 300  $\text{kgf}/\text{cm}^2$ 의 압력으로 일축성형 한 후 340 °C에서 3시간동안 Burn Out 과정을 거치고, 940 °C에서 2시간동안 소결하였다. 소결을 마친 적층 압전변압기의 크기는  $27\times 27\times 2.8\text{ mm}^3$ 로 제작하고, 연마하여 전극을 발라 600 °C에서 10분간 열처리하였다. 전극이 형성된 시편을 120 °C의 실리콘유 속에서 20  $\text{kV}/\text{cm}$ 로 분극하였다. 24시간이 지난후에 공진 및 반공진법에 따라 Impedance analyzer (Agilent 4294A)를 사용하여 주파수 및 impedance 특성을 측정하였고, LCR meter (ANDO AG-4304)를 사용하여 주파수에 따른 임피던스, 공진·반공진 주파수 및 제반 등가회로 정수를 측정하였으며, 적층 압전변압기의 유효 전기기계결합계수 $k_{\text{eff}}$ , 출력임피던스  $Z_{\text{out}}$ , 기계적품질계수 $Q_m$ 은 다음 식으로 구하였다[8].

$$k_{\text{eff}} = \sqrt{\frac{f_a^2 - f_r^2}{f_a^2}} \quad (1)$$

$$Z_{\text{out}} = \frac{1}{2\pi f_r C_{\text{out}}} \quad (2)$$

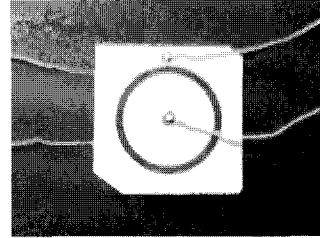
$$Q_m' = \frac{1}{2\pi f_r \left[ 1 - \left( \frac{f_r}{f_a} \right)^2 \right] RC} \quad (3)$$

적층 압전변압기의 전기적 특성을 측정하기 위해 입력전압에 따른 출력전압 및 출력전력은 Power Amp. (Trek50/750), Function generator (HP33120A) 및 오실로스코프 (Tektronix TDS3054) 를 이용하여 측정하였고, 출력전력에 따른 온도상승은 접촉식 온도계로 측정하였다[9].

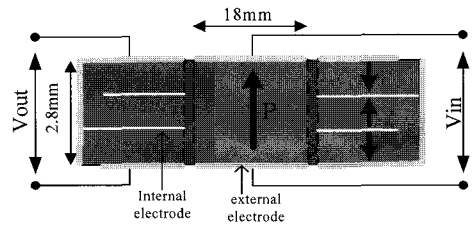
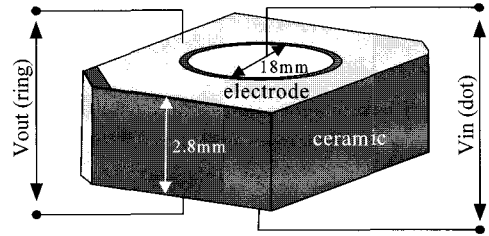
표 1. 시편의 압전특성.

Table 1. Piezoelectric properties of specimens.

Sintering Temp[°C]	Density [g/cm <sup>3</sup> ]	Dielectric constant[ε <sub>r</sub> ]	kp	Q <sub>m</sub>	d <sub>33</sub> [pC/N]
940	7.89	1423	0.59	1384	363



(a) 제작된 적층 압전변압기



(b) 적층 압전변압기의 구조

그림 1. 적층 압전변압기.

Fig. 1. Multilayer piezoelectric transformer.

### 2.2 적층 압전변압기의 제작

표 1은 시편의 압전특성을 나타낸 것이다.

본 실험에서 제작한 조성세라믹은 940 °C의 낮은 소결온도에서 전기기계결합계수 $k_p$ 가 0.59이고, 기계적품질계수 $Q_m$ 가 1,354으로 매우 높아 고효율 압전변압기로 적용하기에 우수한 특성을 나타내었다.

그림 1은 적층 압전변압기의 크기 및 구조, 모양을 나타낸 것이다. 여기서, Dot size는 18 mm $\Phi$ 로 하였다. 적층 압전변압기는 입력측이 직렬로 되어 있기 때문에 입력 임피던스가 크고, 출력측은 병렬로 되어있어 정전용량이 크게 되므로 출력 임피던스가 작고 출력전류를 크게 할 수 있는 구조이며, 강압되도록 설계하였다[10].

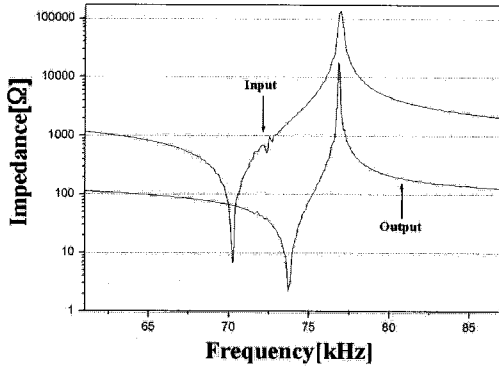


그림 2. 적층 압전변압기의 임피던스 특성곡선.  
Fig. 2. Impedance characteristic curve of multilayer piezoelectric transformer.

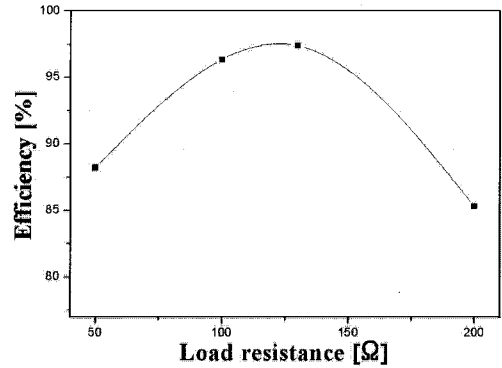


그림 4. 부하저항에 따른 효율.  
Fig. 4. Efficiency according to load resistance.

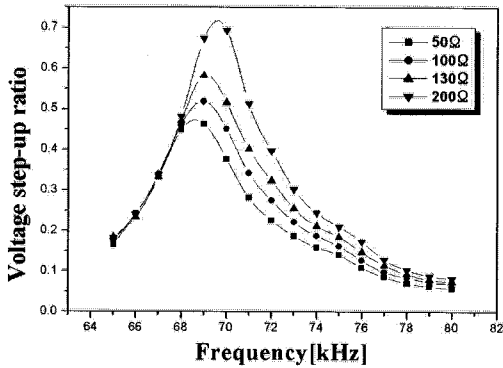


그림 3. 주파수와 부하저항에 따른 승압비.  
Fig. 3. Voltage step-up ratio according to frequency and load resistance.

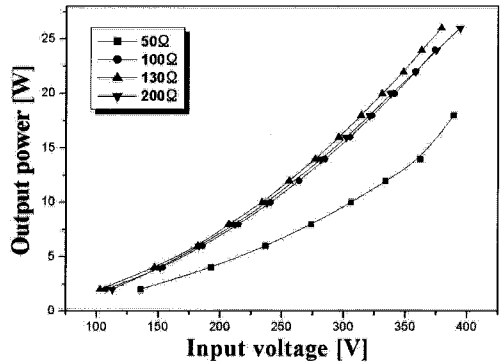


그림 5. 입력전압과 부하저항에 따른 출력전력.  
Fig. 5. Output power according to input voltage and load resistance.

### 3. 결과 및 고찰

그림 2는 적층 압전변압기에 대한 임피던스 특성곡선을 나타낸 것이다. 입·출력의 유효전기기계결합계수  $k_{eff}$ 가 각각 0.449, 0.303으로 우수한 압전특성을 나타내었다.

그림 3은 적층 압전변압기의 입력전압을 일정하게 유지한 상태에서 주파수와 부하저항에 따른 승압비를 나타낸 것이다. 부하저항은 50 Ω, 100 Ω, 130 Ω, 200 Ω을 사용하여 측정하였다. 부하저항의 증가에 따라 승압비는 증가하는 특성을 보였고 부하저항이 클수록 승압비는 다소 높은 주파수에서 나타났으며 승압비도 커지는 특성을 보였다. 이러한 결과는 압전변압기의 일반적인 특성으로 부하저항의 증가에 따라 승압비가 증가하고 이에 따라 2차측의 탄성진동이 증가하여 공진주파수가 증

가하기 때문이다. 부하저항 50 Ω을 연결했을 때 주파수 69 kHz에서 0.46배, 100 Ω을 연결했을 때 주파수 69 kHz에서 0.52배, 130 Ω을 연결했을 때 주파수 69 kHz에서 0.58배, 200 Ω을 연결했을 때 주파수 70 kHz에서 0.69배로 각각 최대 승압비를 나타내었다.

그림 4는 부하저항에 따른 적층 압전변압기의 효율을 측정된 것이다. 효율의 측정은 각 부하저항에서 20분간 구동후, 입력측과 출력측의 전력을 측정하여  $\eta = P_{out}/P_{in} \times 100$  %식으로 계산하였다. 130 Ω의 부하저항에서 가장 높은 97.3 %의 효율을 나타내었는데, 이러한 결과는 적층 압전변압기의 출력측 임피던스가 부하저항과 일치할 때 최대의 효율을 나타내기 때문이다. 따라서 최대전력전달 효율을 얻기 위해서는 적층 압전변압기의 출력측 임

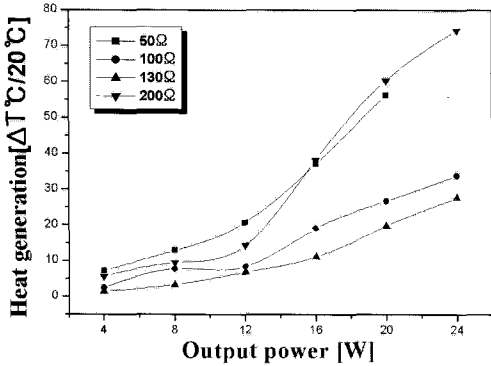


그림 6. 출력전력에 따른 발열.

Fig. 6. Heat generation according to output power.

피드백과 부하저항과의 정합이 중요할 것으로 판단된다.

그림 5는 적층 압전변압기의 구동주파수에서 입력전압과 부하저항에 따른 출력전력을 나타낸 것이다. 인가된 입력전압에 따른 출력특성은 인가전압이 높아질수록 출력 또한 높아졌으며, 매칭저항 부근인 130 Ω에서 가장 높은 출력전력을 나타내었다.

그림 6은 부하저항에 따른 각 출력전력에서 20 분간 구동 후에 측정된 온도상승의 결과를 나타낸 것이다. 적층 압전변압기의 온도는 출력전력이 증가함에 따라 증가하는 특성을 나타내었고, 부하저항이 증가할수록 온도상승의 폭이 커지는 것을 확인하였다. 이러한 결과는 부하저항이 커지게 되면서 압전변압기의 출력 임피던스와 부하저항의 임피던스 매칭이 되지 않아 발열이 생기는 일반적인 압전변압기의 특성에 기인한 결과로 사료된다. 100 Ω과 130 Ω의 부하저항에서 12 W까지는 거의 같은 온도상승을 나타내었고 50 Ω과 200 Ω의 부하저항 연결시 12 W이상에서 급격한 온도상승을 나타내었다. 130 Ω의 부하저항 연결시 20 W까지 안정된 온도상승을 나타내었다. 압전변압기의 최대 허용 발열량  $P_L(max)$ 을 30 °C 이내의 범위로 볼 때, 130 Ω의 부하저항에서 24 W까지 사용가능할 것으로 판단된다.

표 2에 제작한 적층 압전변압기의 압전 및 구동 특성을 나타내었다. 20분 구동후, 입력전압 320 V, 입력전류 64 mA, 출력전압 52 V, 출력전류 382 mA 출력전력 20 W, 온도상승 19.7 °C 효율 97.3 %로 안정적인 구동이 가능하였다.

표 2. 적층 압전변압기의 압전 및 구동특성.

Table 2. Piezoelectric and driving properties of the multilayer piezoelectric transformer.

	$F_r$ [kHz]	$F_a$ [kHz]	$R$ [Ω]	$C$ [nF]	$k_{eff}$	$Q_m'$	$Z_{out}$ [Ω]	
Input	70.15	76.9	10.52	1.43	0.449	899	-	
Output	73.65	76.95	2.15	18	0.303	666	126	
$F_0$ [kHz]	$V_{in}$ [V]	$V_{out}$ [V]	$I_{in}$ [mA]	$I_{out}$ [mA]	$P_{in}$ [W]	$P_{out}$ [W]	$\eta$ [%]	$\Delta T$ [°C]
75	320.2	52.4	64.2	382.5	20.52	20	97.3	19.7

#### 4. 결 론

본 연구에서는 저온소결에서도 압전 및 유전특성이 우수한 PMN-PNN-PZT 조성을 사용하여 강압용 적층 압전변압기를 제작하여 주파수와 부하저항에 따른 압전변압기의 전기적 특성에 관하여 조사하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 적층 압전변압기의 임피던스 특성곡선의 입력단은  $f_r=70.15$  kHz,  $f_a=76.9$  kHz 출력단은  $f_r=73.65$  kHz,  $f_a=76.95$  kHz의 공진 및 반공진 주파수를 나타내었다.
2. 주파수와 부하저항에 따른 승압비를 측정된 결과 50 Ω, 100 Ω, 130 Ω, 200 Ω의 부하저항과 69~70 kHz의 주파수에서 최대 승압비가 0.46, 0.52, 0.58, 0.69를 나타내었다.
3. 입력전압과 부하저항에 따른 출력전력을 측정된 결과 입력전압이 증가할수록 출력전력이 증가하였으며, 공진저항 부근에서 비교적 큰 출력전력을 나타내었다. 또한, 매칭저항 부근인 130 Ω에서 20 W까지 20 °C미만의 온도상승을 보임으로서 안정적인 20 W급 적층 압전변압기로의 적용가능성을 확인하였다.

#### 감사의 글

본 연구는 2004년도 전력산업연구개발사업 (과제번호: R-2004-0-114)의 연구비로 이루어졌으며, 이에 감사드립니다.

#### 참고 문헌

- [1] H. Chung, S. Lim, G. Kim, D. Li, E. Lee, B. Ahn, S. Lee, "Fabrication and characterization

- of piezoelectric  $\text{Pb}(\text{Zr},\text{Ti})\text{O}_3\text{-Pb}(\text{Mn},\text{W},\text{Sb},\text{Nb})\text{O}_3$  step-down piezoelectric transformer”, *Sensors and Actuators A.*, Vol. 128, No. 2, p. 350, 2006.
- [2] F. Narita, S. Lin, and Y. Shindo, “Electroelastic fracture mechanics analysis of central active piezoelectric transformer”, *European J. of Mechanics-A/Solids.*, Vol. 24, No. 3, p. 377, 2005.
- [3] Y. D. Hou, M. K. Zhu, C. S. Tian, and H. Yan, “Structure and electrical properties of PMZN-PZT quaternary ceramics for piezoelectric transformers”, *Sensors and Actuators A: Phys.*, Vol. 116, p. 455, 2004.
- [4] H. L. Du, S. B. Qu, J. Che, Z. Y. Liu, X. Y. Wei, and Z. B. Pei, “The effect of composition on microstructure and properties of PNW-PMS-PZT ceramics for high-power piezoelectric transformer”, *Materials Science and Engineering A.*, Vol. 393, p. 36, 2005.
- [5] L. Hwang, J. Yoo, E. Jang, D. Oh, Y. Jeong, I. Ahn, and M. Cho, “Fabrication and characteristics of PDA LCD backlight driving circuits using piezoelectric transformer”, *Sensors and Actuators A: Phys.*, Vol. 115, p. 73, 2004.
- [6] 정수태, 조상희, “적층압전변압기의 전기적 특성”, *전기전자재료학회논문지*, 19권, 2호, p. 138, 1996.
- [7] 류주현, 오동언, “PNW-PMN-PZT세라믹스를 이용한 윤곽진동모드 압전트랜스포머의 전기적 특성”, *전기전자재료학회논문지*, 15권, 7호, p. 602, 2002.
- [8] 윤광희, 오동언, 류주현, 윤현상, “Adaptor용 압전트랜스포머조성  $\text{Pb}(\text{Sb}_{1/2}\text{Nb}_{1/2})\text{O}_3\text{-Pb}(\text{Ni}_{1/3}\text{Nb}_{2/3})\text{O}_3\text{-Pb}(\text{Zr},\text{Ti})\text{O}_3$  세라믹스의 전기적 특성”, *전기전자재료학회논문지*, 15권, 6호, p. 499, 2002.
- [9] 이창배, “AC-DC converter용 고효율 강압형 적층 압전변압기의 전기적 특성에 관한 연구”, *세명대학교 석사논문*, 2006.