

논문 20-11-5

## 저온소결 (Pb,Ca,Sr),(Ti,Mn,Sb)O<sub>3</sub> 세라믹스를 이용한 두께진동모드 적층 압전 변압기의 전기적 특성

### Electrical Properties of Thickness-Vibration-Mode Multilayer Piezoelectric Transformer using Low Temperature Sintering (Pb,Ca,Sr),(Ti,Mn,Sb)O<sub>3</sub> Ceramics

류주현<sup>1,a</sup>, 유경진<sup>1</sup>, 김도형<sup>1</sup>  
(Ju-hyun Yoo<sup>1,a</sup>, Kyung-Jin Yoo<sup>1</sup>, and Do-hyung Kim<sup>1</sup>)

#### Abstract

In this study, a low temperature sintering multilayer piezoelectric transformer for a DC-DC converter was manufactured using (Pb,Ca,Sr),(Ti,Mn,Sb)O<sub>3</sub> ceramics. Its electrical properties were investigated according to the variation in frequency and load resistance. The voltage step-up ratio of the multilayer piezoelectric transformer showed a maximum value at a resonant frequency of input part and increased with an increase of load resistance. The efficiency of the multilayer piezoelectric transformer showed the highest value at a load resistance of 17 Ω. The output power was increased with increasing input voltage. Temperature increase of the multilayer piezoelectric transformer was increased with the increase of output power. At the load resistance of 17 Ω, the multilayer piezoelectric transformer showed the temperature rises of about 20 °C at the output power of 18 W, and stable driving characteristics.

**Key Words :** Low temperature sintering, Multilayer piezoelectric transformer, Thickness vibration mode, PbTiO<sub>3</sub>, Tape casting

#### 1. 서론

최근 전자기기의 소형화와 고효율에 따라 이들 기기에 적용하기 위한 전자부품에 대한 연구가 상당히 중요한 요소로 부각되고 있다. 특히 전원장치에 있어서는 현재 주요 부품으로 사용되고 있는 권선형 변압기와 전자변환기의 대체품으로서 압전 변압기의 개발과 연구가 국·내외적으로 활발히 진행 중 이다[1-3]. 기존의 권선형 변압기는 1 MHz 이상의 switching 주파수에서 동손과 철손의 증가에 의해 효율이 감소하는 문제점을 가지고 있다. 그러나 두께진동모드를 이용한 압전 변압기는 MHz

대에서 공진이 일어나기 때문에 고주파에서 구동이 가능하며 전송전력 밀도도 우수하게 된다.

압전 변압기는 LED driving inverter, DC-DC converter, AC-DC converter 및 형광등 ballast 등의 고전압전원장치 등과 같이 그 응용범위가 상당히 넓으며, 기존의 권선형 변압기에 비하여 소형화, 슬림화, 경량화가 가능하고 90 %이상의 높은 효율을 얻을 수 있으며 전자기적 소음이 없고 불연성의 장점을 갖고 있다[4]. 더불어, 현재 단판형 압전 변압기의 높은 입력전압에 의한 발열에 따른 승압비와 공진주파수의 이동등과 같은 문제점을 해결하기 위해 적층형 압전 변압기의 개발이 활발히 연구되고 있다[5,6]. 하지만 적층형 압전 변압기의 소결온도가 높을 경우 층간의 내부 전극이 도포된 상태에서 소결되기 때문에 용점이 약 960 °C 정도로 낮은 Ag 전극 대신 값비싼 Pd나 Pt가 다량 함유된 Ag/Pd, Ag/Pt 전극이 사용되고 있어 경제적인 문제가 발생하게 된다. 따라서 순수한

1. 세명대학교 전기공학과

(충북 제천시 신월동 579)

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

접수일자 : 2007. 9. 3

1차 심사 : 2007. 9. 12

심사완료 : 2007. 9. 28

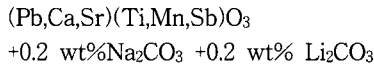
Ag 내부전극을 사용하기 위해서는 900 °C 이하의 낮은 온도에서 소결이 가능하여야 한다[7]. 일반적으로 순수한 PbTiO<sub>3</sub>계 세라믹스는 높은 큐리온도(490 °C), 유전상수의 작은 경시변화율, 전기기계결합계수의 이방성( $k_r/k_p$ )이 크기 때문에 두께방향 진동모드로 동작하는 압전 변압기에 적용하기에 적합한 특성을 가지고 있다[8-10].

본 연구에서는 900 °C의 낮은 소결온도에서도 우수한 압전 및 유전특성을 갖는 PbTiO<sub>3</sub>계 세라믹스 조성[11]을 사용하여 1 MHz 이상에서 구동하는 두께진동모드 적층 압전 변압기를 제작 후 그 전기적 특성을 조사하였다.

## 2. 실험

### 2.1 시편제조 및 실험방법

본 실험은 다음의 조성식을 사용하여 일반적인 산화물 혼합법으로 압전 변압기를 제조하였다.



위의 조성을 순도 99 %이상의 파우더로 10<sup>-4</sup> g 까지 평량 하였으며, 아세톤을 분산매로 하여 zirconia ball을 사용하여 24시간동안 분말 하였다. 분말 한 분말을 항온조에서 12시간 이상 건조 후 850 °C에서 2시간 동안 하소하였다. 하소된 분말에 소결조제로 Li<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>-Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>를 첨가하여 24시간동안 재혼합 분쇄 후 건조 하였다. 건조된 파우더와 PVB(Ferro B73305)의 비율을 72:28로 하여 혼합하여 Doctor Blade법으로 Tape Casting을 하여 75 μm로 시트를 뽑아냈다. 시트를 쌓아 70 °C에서 3200 psi의 압력으로 일축성형 한 후 340 °C에서 3 시간동안 Burn Out 과정을 거치고 900 °C에서 90 분 동안 소결하였다. 소결을 마친 후 두께 3.5 mm로 연마하여 전극을 발라 600 °C에서 10분간 열처리하였다. 전극이 형성된 시편을 50 °C 실리콘유 속에서 45 kV/cm로 분극 하였다. 24시간이 지난 후에 공진 및 반공진법에 따라 유전 및 압전특성을 측정하였고, IEEE규정에 따라 압전 변압기의 유효 전기기계결합계수  $k_{eff}$ , 출력임피던스  $Z_{out}$ , 기계적품질계수  $Q_{mt}$ 을 다음 식으로 구하였다.

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

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

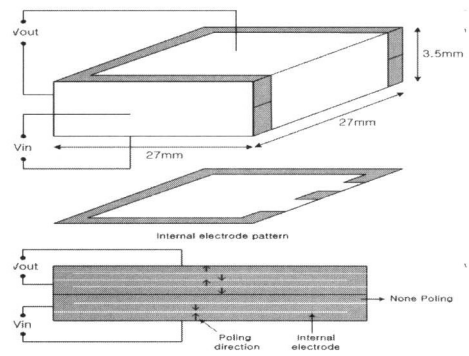
$$Q_{mt} = (2\pi f_r |Z_m| C_0 \frac{f_a^2 - f_r^2}{f_a^2})^{-1} \quad (3)$$

여기서,  $Z_m$ 은 공진주파수의 임피던스[Ω],  $C$ 은 분극 후 1 MHz에서 측정된 시편의 정전용량[pF],  $f_r$ 은 공진주파수,  $f_a$ 은 반공진주파수이다.

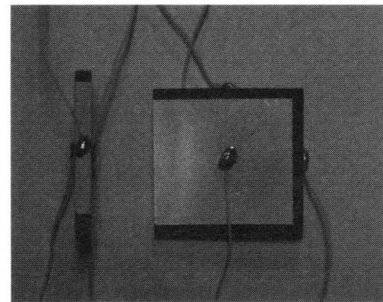
적층 압전변압기의 전기적 특성을 측정하기 위해 입력전압에 따른 출력전압 및 출력전력은 Power Amp.(BA4825), Function generator(HP33120A) 및 오실로스코프 (Tektronix TDS3054)를 이용하여 측정하였고, 출력전력에 따른 온도상승은 접촉식 온도계로 측정하였다.

### 2.2 적층 압전 변압기의 제작

적층 압전 변압기의 크기 및 구조, 내부전극패턴과 제작된 변압기를 그림 1에 나타내었다. 적층 압전 변압기의 크기는 27×27×3.5 mm<sup>3</sup>로 제작하였다. 제작된 적층 압전 변압기는 4층의 출력부와 2층의 입력부로 설계하였으며, 강압형으로 제작되었다.



(a) 적층 압전 변압기구조 및 내부전극 패턴



(b) 제작된 적층 압전 변압기

그림 1. 적층 압전 변압기의 구조.

Fig. 1. Structure of multilayer piezoelectric transformer.

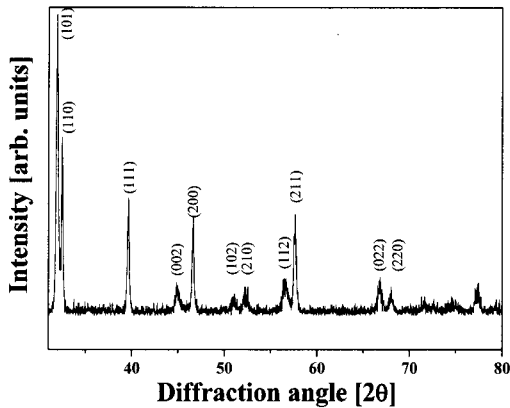


그림 2. 시편의 X선 회절 패턴.  
Fig. 2. X-ray diffraction pattern of specimens.

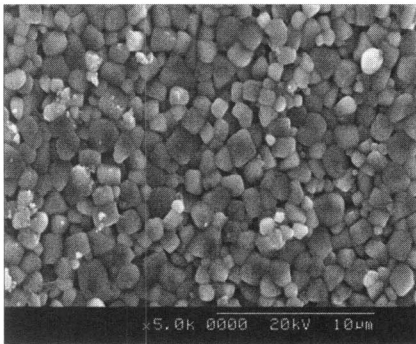


그림 3. 시편의 미세구조.  
Fig. 3. Microstructure of specimens.

### 3. 결과 및 고찰

그림 2는 적층 압전 변압기로 제작하려는 시편의 X-ray 회절패턴을 나타낸 것이다. 시편의 결정 구조는 42° - 47° 사이에서 정방정상(tetragonal phase)의 특성 피크인 (002), (200) 피크를 나타내었고 이차상은 발생 하지 않았다.

그림 3은 적층 압전 변압기로 제작하려는 시편의 미세구조를 주사전자현미경(SEM)으로 나타낸 것이다. 시편의 결정립 크기는 전반적으로 균일하게 나타내었다.

표 1은 적층 압전 변압기로 제작하려는 시편의 압전특성을 나타낸 것이다. 900 °C의 소결온도에서 밀도, 유전상수  $\epsilon_r$ , 두께진동모드 전기기계결합계수  $k_t$ , 두께진동모드 기계적품질계수  $Q_{mt}$ , 압전상수  $d_{33}$ , 상대밀도는 각각 6.77 g/cm<sup>3</sup>, 237, 0.5, 1575,

표 1. 시편의 압전특성.

Table 1. Piezoelectric properties of specimens.

Sintering Temp.[°C]	Density [g/cm <sup>3</sup> ]	$k_t$	$Q_{mt}$	Dielectric constant	$d_{33}$ [pC/N]	Relative density[%]
900	6.77	0.5	1575	237	70	94

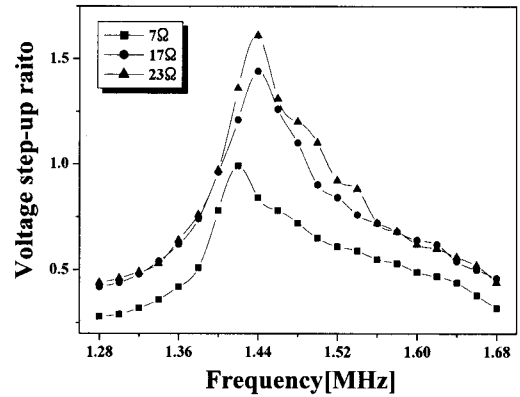


그림 4. 주파수와 부하저항에 따른 승압비.  
Fig. 4. Voltage step-up ratio as a function of frequency and load resistance.

70 pC/N, 94 %의 값을 나타내며, 저온 소결 두께진동모드 압전변압기로 적용하기에 적절한 특성을 나타내었다.

그림 4는 적층 압전 변압기의 출력 전력 6 W로 일정하게 유지한 상태에서 주파수와 부하저항에 따른 승압비를 나타낸 것이다. 부하저항은 7 Ω, 17 Ω, 23 Ω을 사용하여 측정하였다. 최대 승압비는 공진 주파수 부근에서 나타났으며, 부하저항이 증가함에 따라 승압비는 증가하는 특성을 보였다. 부하저항 7 Ω을 연결했을 때 주파수 1.42 MHz에서 0.99배, 17 Ω을 연결했을 때 주파수 1.44 MHz에서 1.44배, 23 Ω을 연결했을 때 주파수 1.44 MHz에서 1.61배로 최대 승압비를 나타내었다.

그림 5는 부하저항에 따른 적층 압전 변압기의 효율을 측정된 것이다. 효율  $\eta$ 는 다음 식으로 구하였다.

$$\eta = \frac{P_{out}}{P_{in}} \times 100\% \quad (4)$$

여기서,  $P_{out}$ 은 출력전력,  $P_{in}$ 은 입력전력이다. 부하저항이 17 Ω일 때 가장 높은 효율을 나타

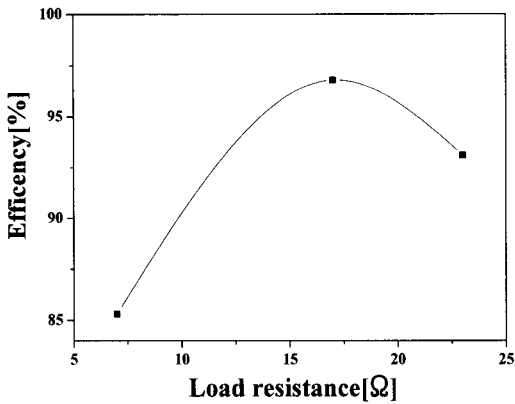


그림 5. 부하저항에 따른 효율.  
Fig. 5. Efficiency as a function of load resistance.

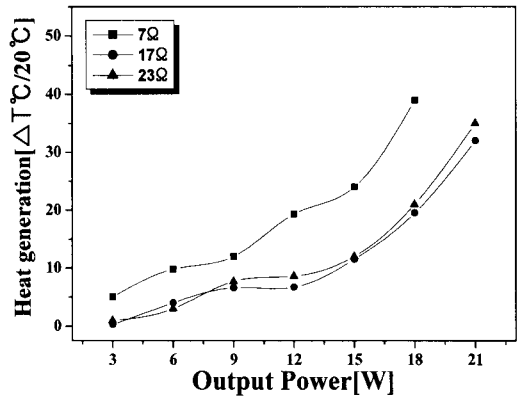


그림 7. 출력전력에 따른 발열.  
Fig. 7. Heat generation as a function of output power.

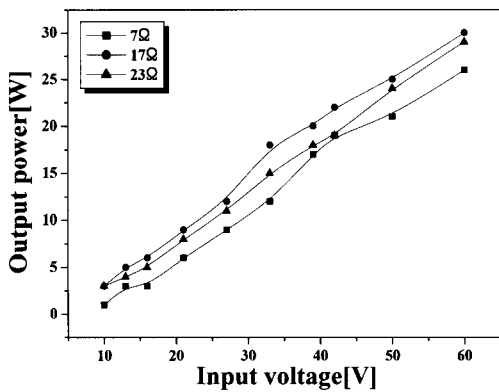


그림 6. 입력전압과 부하저항에 따른 출력전력.  
Fig. 6. Output power as a function of input voltage and load resistance.

내었는데, 이러한 결과는 적층 압전 변압기의 출력측 임피던스가 부하저항과 일치할 때 최대 효율을 나타내기 때문인 것으로 사료된다. 따라서 최대 전력전달 효율을 얻기 위해서는 적층 압전 변압기의 출력측 임피던스와 부하저항의 정합이 중요할 것으로 판단된다.

그림 6은 적층 압전 변압기의 공진 주파수에서 입력전압과 부하저항에 따른 출력전력을 나타낸 것이다. 적층 압전 변압기의 입력전압이 증가함에 따라 출력전력 또한 증가하였으며, 공진 저항 부근인 17 Ω에서 가장 높은 출력전력을 나타내었다. 7 Ω과 23 Ω에서 비교적 낮은 출력전력을 나타냈는데, 이러한 결과는 부하저항이 매칭저항에서 멀어지기 때문에 발열이 커지면서 손실이 생겨 감소된 것으로 사료된다.

그림 7은 부하저항에 따른 각 출력전력에서 20분간 구동 후에 측정된 온도상승의 결과를 나타낸 것이다. 적층 압전 변압기의 온도는 출력전력이 증가함에 따라 증가하는 특성을 나타내었고, 부하저항이 매칭저항에서 멀어질수록 온도상승의 폭이 커지는 것을 확인하였다. 이러한 결과는, 부하저항이 매칭저항에서 멀어지면서 압전 변압기의 출력 임피던스와 부하저항의 임피던스 매칭이 되지 않아, 발열이 생기는 일반적인 압전 변압기의 특성에 기인한 결과로 사료된다.

표 2는 적층 압전 변압기의 압전 및 구동특성을 나타낸 것이다. 압전 변압기의 구동은 17 Ω을 사용하여 18 W에서 20분간 구동 후 그 특성을 나타낸 것이다. 18 W의 출력전력에서 약 20.4 °C의 온도상승과 97 %의 효율을 보였다. 따라서 압전 변압기의 허용 발열량을 20 °C이내의 범위로 볼 때, 17 Ω의 부하저항에서 18 W까지 장시간 구동하여도 안정적인 구동이 가능할 것으로 판단된다.

표 2. 적층 압전 변압기의 압전 및 구동특성.

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

	$f_r$ [MHz]	$f_s$ [MHz]	$R$ [Ω]	$C_0$ [nF]	$C_1$ [nF]	$k_{eff}$	$Q_{mt}$	$Z_{out}$ [Ω]
Input	1.441	1.601	1.25	3.5	3.5	0.49	604	
Output	1.462	1.612	4.7	8.2	2.46	0.47	519	13.5
$f_d$ [MHz]	$V_{in}$ [V]	$V_{out}$ [V]	$I_{in}$ [mA]	$I_{out}$ [mA]	$P_{in}$ [W]	$P_{out}$ [W]	$\eta$ [%]	$\Delta T$ [°C]
1.444	45	33	445	645	18.37	18	96.9	20.4

#### 4. 결 론

본 연구에서는 저온소결 두께진동모드 압전 변압기의 개발을 위해 900 °C의 소결온도에서 우수한 압전 및 유전특성을 나타내는 조성을 이용하여 Tape casting법으로 두께진동모드 적층 압전 변압기를 제작하고, 부하저항과 주파수에 따라 전기적 특성을 조사하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 압전 변압기용 조성세라믹스는 900 °C의 소결온도에서 밀도, 유전상수  $\epsilon_r$ , 두께진동모드 전기기계결합계수  $k_t$ , 두께진동모드 기계적품질계수  $Q_m$ , 압전상수  $d_{33}$ 는 각각 6.77 g/cm<sup>3</sup>, 237, 0.5, 1575, 70 pC/N의 값을 나타내며, 저온 소결 두께진동모드 압전 변압기로 적용하기에 적절한 특성을 나타내었다.
2. 주파수와 부하저항에 따른 승압비를 측정된 결과 부하저항의 증가에 따라 승압비도 증가하였고 7 Ω, 17 Ω 그리고 23 Ω 주파수 1.42 MHz ~ 1.44 MHz에서 최대승압비가 나타났으며, 각각의 최대 승압비는 0.99, 1.44 그리고 1.58배의 승압비를 나타내었다.
3. 부하저항에 따른 효율은 17 Ω에서 96.9 %의 최대효율을 나타내었다.
4. 입력전압과 부하저항에 따른 출력전력을 측정한 결과 입력 전압이 증가할수록 출력전력이 증가하였고, 매칭저항 부근에서 비교적 큰 출력전력을 나타내었다.
5. 공진저항 부근인 17 Ω에서 18 W까지 약 20 °C의 온도상승을 보임으로서 DC-DC converter용 적층 압전 변압기로서의 적용 가능성을 확인하였다.

#### 감사의 글

본 연구는 2005년 산자부 에너지 관리공단 에너지기술학술진흥사업(과제번호:2005-03-0013-0-000)의 연구비로 이루어졌으며, 이에 감사드립니다.

#### 참고 문헌

[1] K. Nagata, J. Thongrueng, and K. Kato,

"Evaluation of the reliability of piezoelectric ceramic transformers", Jpn. J. Appl. Phys., Vol. 36, No. 9B, p. 6103, 1997.

[2] O. Ohnishi, Y. Sasaki, T. Zaitzu, H. Kishie, and T. Inoue, "Piezoelectric ceramic transformer for power supply operating in thickness extensional vibration mode", IEICE Trans. Funda., Vol. E77-A, No. 12, p. 2098, 1994.

[3] T. Zaitzu, "AC/DC converter with a piezoelectric transformer", US Patent, No. 5969954, 1999.

[4] J. H. Yoo, K. H. Yoon, Y. W. Lee, S. S. Suh, J. S. Kim, and C. S. Yoo, "Electrical characteristics of the contour-vibration-mode piezoelectric transformer with ring/dot electrode area ratio", Jpn. J. Appl. Phys., Vol. 39, No. 5A, p. 2680, 2000.

[5] T. Endow and S. Hirose, "Multilayered piezoelectric transformers for small power supplies", Jpn. Appl. Phys., Vol. 42, No. 9B, p. 6128, 2003.

[6] S. Priya, S. Ural, H. W. Kim, K. Uchino, and T. Ezaki, "Multilayered unipoled piezoelectric transformers", Jpn. J. Appl. Phys., Vol. 43, No. 6A, p. 3503, 2004.

[7] Y. Sato, H. Kanai, and Y. Yamashita, "Effect of silver and palladium doping on the dielectric properties of 0.9Pb(Mg<sub>1/3</sub>Nb<sub>2/3</sub>)O<sub>3</sub>-0.1PbTiO<sub>3</sub> ceramic", J. Am. Ceram. Soc., Vol. 79, No. 10, p. 261, 1996.

[8] 정광현, 유경진, 류주현, 조봉희, 윤현상, 백동수, "저온소결 Pb<sub>0.76</sub>Ca<sub>0.24</sub>[(Mn<sub>1/3</sub>Sb<sub>2/3</sub>)<sub>0.04</sub>Ti<sub>0.96</sub>]O<sub>3</sub> 세라믹스의 분극전계에 따른 압전특성", 전기전자재료학회논문지, 19권, 3호, p. 228, 2006.

[9] 민석규, 오동언, 윤광희, 류주현, 박창엽, 김종선, "Pb(La,Ce)TiO<sub>3</sub>계 세라믹스의 길이와 두께비(l/t)에 따른 공진특성", 전기전자재료학회논문지, 14권, 9호, p. 720, 2001.

[10] 류주현, 홍재일, "하이드로폰용 PbTiO<sub>3</sub>계 세라믹스의 압전특성", 전기학회논문지, 44권, 4호, p. 479, 1995.

[11] K. J. Yoo, K. H. Chung, J. H. Yoo, and H. S. Yoon, "The low temperature sintering properties of modified PbTiO<sub>3</sub> ceramics", Integrated Ferroelectrics, Vol. 90, No. 1, p. 20, 2007.