

논문 19-7-10

## PMN-PZN-PZT 세라믹스를 이용한 적층형 압전변압기의 전기적 특성

### Electrical Properties of Multilayer Piezoelectric Transformer using PMN-PZN-PZT Ceramics

이창배<sup>1</sup>, 류주현<sup>1,a</sup>, 백동수<sup>2</sup>, 강진규<sup>3</sup>, 조봉희<sup>4</sup>, 이성일<sup>5</sup>  
(Chang-Bae Lee<sup>1</sup>, Ju-Hyun Yoo<sup>1,a</sup>, Dong-Soo Paik<sup>2</sup>, Jin-Kyu Kang<sup>3</sup>, Hong-Hee Cho<sup>4</sup>, and Sung-Il Lee<sup>5</sup>)

#### Abstract

Dielectric and piezoelectric properties of PMN-PZT ceramics with a high mechanical quality factor( $Q_m$ ) and a low temperature sintering temperature were investigated as a function of PZN substitution in order to develop multilayer piezoelectric transformer for AC-DC converter. Multilayer piezoelectric transformers were subsequently manufactured using the PMN-PZN-PZT ceramic offering the optimal behavior and then the electrical performance were investigated. At the sintering temperature of 940 °C, density, electromechanical coupling factor( $k_p$ ), mechanical quality factor( $Q_m$ ) and dielectric constant( $\epsilon_r$ ) of 8 mol% PZN substituted specimen were 7.73 g/cm<sup>3</sup>, 0.524, 1573 and 1455, respectively. The PZN substitution caused a increase in the dielectric constant and the electromechanical coupling factor. The voltage step-up ratio of multilayer piezoelectric transformer showed the maximum value at near the resonant frequency of 76.65 kHz and increased according to the increase of load resistance. The multilayer piezoelectric transformer with the output impedance coincided with the load resistance showed the temperature increase of less than 20 °C at the output power of 10 W. Based on the results, the manufactured multilayer transformer using the low temperature sintered PMN-PZN-PZT ceramics can be stably driven for both step up and down transformers.

**Key Words** : PZN, Piezoelectric properties, Multilayer piezoelectric transformer,  $Q_m$

#### 1. 서론

최근 TFT-LCD backlight 구동용 인버터에 압전변압기가 적용될 수 있음을 연구결과를 통해 확인한 후 압전변압기로 적용될 수 있는 조성 개발

1. 세명대학교 전기공학과  
(충북 제천시 신월동 산21-1)
2. 이투에스(주)
3. 대림대학 전기과
4. 수원대학교 전기공학과
5. 충주대학교 안전공학과

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

접수일자 : 2006. 4. 6

1차 심사 : 2006. 4. 26

2차 심사 : 2006. 6. 13

심사완료 : 2006. 6. 14

[1], 특성 평가 방법[2-5]등에 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 고전압원장치 등과 같이 그 범위가 상당히 넓다[6]. 압전변압기는 기존의 권선형 변압기에 비하여 누설자속이 없어 노이즈 발생이 없고, 공진주파수만을 이용하므로 출력파형이 정현파에 가까워 고조파 잡음이 없으며, 불연성의 장점을 갖고 있다. 특히 소형화, 슬림화, 경량화가 가능하고 90 %이상의 높은 효율을 얻을 수 있다. 또한, 단관형 압전변압기의 출력한계를 개선하기 위해 높은 승압비와 고출력을 얻을 수 있는 적층형 압전변압기가 제안되었다. 하지만, 적

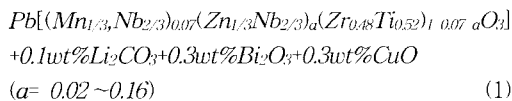
층 압전변압기 제작 시 단관형 압전변압기에 비하여 여러 가지 문제점을 가지고 있다[8,9]. 압전변압기의 실용적인 사용을 위해서는 높은 기계적 품질계수( $Q_m$ )와 전기기계 결합계수( $k_p$ )가 필요하다[7]. 또한, 적층형 압전변압기는 제작시 그 구조적 특성상 내부전극과 함께 소결하여야 하는데, 이때 소결 온도가 높으면 값비싼 Pd함량이 높은 전극을 사용하여야 한다. 따라서, Pd함량이 적은 Ag/Pd 전극을 사용하기 위해서는 저온소결이 가능한 조성개발이 필수적이라 할 수 있다[10,11].

$Pb(Mn_{1/3}Nb_{2/3})O_3-Pb(Zr,Ti)O_3$  시스템은 매우 높은 기계적 품질계수를 나타내는 것으로 알려져 있으며,  $Pb(Zn_{1/3}Nb_{2/3})O_3-Pb(Zr,Ti)O_3$  시스템은 전기기계 결합계수가 높은 것으로 알려져 있다. 따라서, 본 연구에서는 PMN-PZT 시스템에 PZN을 치환하여 치환량에 따른 유전 및 압전특성을 조사하였고, 소결 온도가 낮으면서 특성이 우수한 조성을 선정하여 적층형 압전변압기를 제작하였으며 적층형 압전변압기의 전기적 특성을 조사하여 AC-DC converter로의 적용가능성을 고찰하고자 한다.

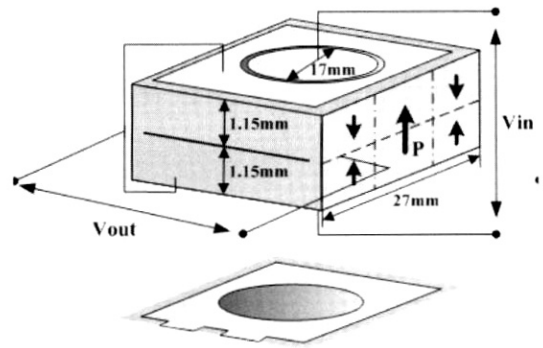
## 2. 실험

### 2.1 시편의 제조 및 특성측정

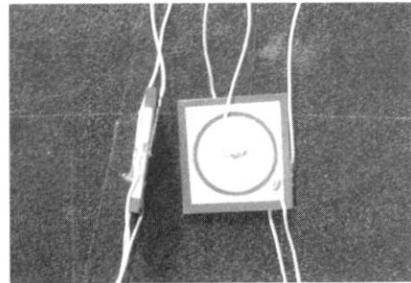
본 실험에서는 일반적인 산화물 혼합법으로 시편을 제작하였으며, 실험에 사용된 조성식은 다음과 같다.



조성에 따른 시료의 정확한 물비를  $10^{-4}$ 까지 평량하였고, 아세톤을 분산매로 볼밀을 사용하여 24시간동안 혼합 분쇄하였으며, 항온조에서 건조 후  $850\text{ }^\circ\text{C}$ 에서 2시간동안 하소하였다. 24시간동안 재혼합 분쇄 후 PVA(5 wt% 수용액)를 5 wt% 첨가하여  $k_p$  mode로써 제작하기 위해 직경 21 mm  $\Phi$  물더로  $1\text{ ton/cm}^2$ 의 압력을 가하여 성형하였다. 성형한 시편을  $600\text{ }^\circ\text{C}$ 의 온도로 3시간동안 burn out 과정을 거치고,  $1000, 970, 940\text{ }^\circ\text{C}$ 의 온도로 각각 소결하였다. 소결을 마친 후 특성 측정을 위해 1 mm 두께로 연마하였고, Ag paste를 도포하고  $650\text{ }^\circ\text{C}$ 에서 10분간 열처리하였다. 전극이 형성된 시편을  $120\text{ }^\circ\text{C}$  실리콘유 속에서  $30\text{ kV/cm}$ 의 전계를 30분 동



Internal electrode pattern  
(a) 적층압전변압기구조 및 내부전극 패턴



(b) 제작된적층압전변압기

그림 1. 적층 압전변압기.

Fig. 1. Multilayer piezoelectric transformer.

안 인가하여 분극 하였다. 24시간이 지난 후에 공진 및 반공진법에 따라 impedance analyzer (Agilent 4294A)를 사용하여 유전 및 압전 특성을 측정하였다.

### 2.2 적층형 압전변압기의 제작

조성 실험 중 소결온도가 낮으면서 우수한 압전 특성을 나타내는 압전 세라믹스를 사용하여 적층형 압전변압기를 제작하였다. 먼저, 선정된 조성을 이용하여 batch size를 1700 g으로 하여 casting 용 분말을 제작하였으며 제작된 분말은 Ferro사의 B73305를 바인더로 첨가하여 슬러리로 제작하였다. 이 때 세라믹 파우더와 바인더의 배합 비는 70 : 30으로 하였다. 제작된 슬러리는 casting machine을 사용하여  $70\text{ }\mu\text{m}$ 의 두께로 casting 하였으며, 내부전극은 90Ag/10Pd (Daejoo DS-9165IE) 전극을 이용하였으며 interdigital구조로 2층으로 적층하였다. 적층된 시편은  $340\text{ }^\circ\text{C}$ 의 온도에서 3시간동

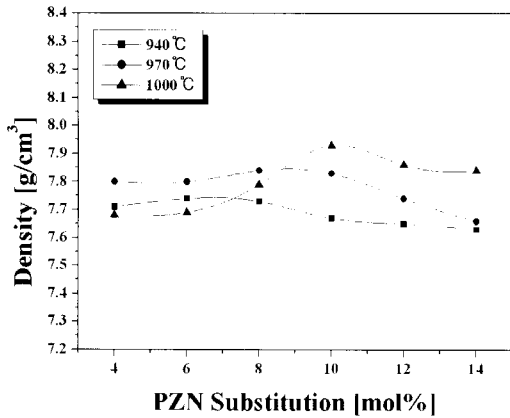


그림 2. PZN 치환량에 따른 밀도.  
Fig. 2. Density according to the amount of PZN substitution.

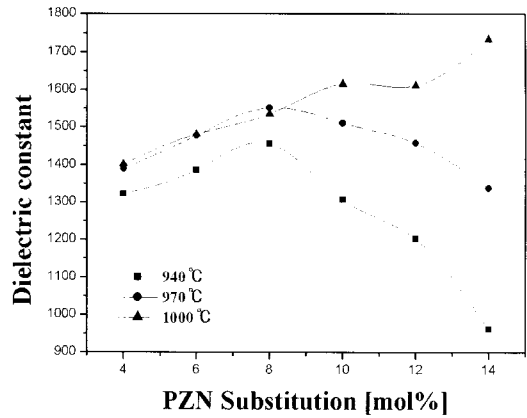


그림 3. PZN 치환량에 따른 유전상수.  
Fig. 3. Dielectric constant according to the amount of PZN substitution.

안 binder burn out하여 950 °C의 온도에서 1시간 동안 소결하였다. 적층형 압전변압기의 최종사이즈는 27×27×2.3 mm의 크기로 제작하였다. 적층형 압전변압기의 크기 및 구조, 내부전극패턴과 제작된 변압기를 그림 1에 나타내었다. 적층형 압전변압기는 입력임피던스가 크고 출력임피던스가 작은 강압형으로 설계하였다. 적층형 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.

### 3. 결과 및 고찰

#### 3.1 시편의 유전 및 압전특성

그림 2는 PZN 치환량과 소결온도 변화에 따른 시편의 소결밀도를 나타낸 것이다. 940 °C의 소결 온도에서는 6 mol% PZN 치환 시 7.78 g/cm<sup>3</sup>의 최대 값을 나타내었고, 970 °C의 소결온도에서는 8 mol% PZN 치환 시 7.84 g/cm<sup>3</sup>, 1000 °C의 소결온도에서는 10 mol% PZN 치환 시 7.93 g/cm<sup>3</sup>의 최대 값을 나타내었다. 이러한 결과는 소성온도가 높아짐에 따라 최대밀도를 나타내는 PZN치환량이 증가하는 이유는 소성온도가 증가하면 PZN의 고용한계가 증가하기 때문이며, 최고값 이후의 밀도가 감소하는 경향은 PZN 과다치환에 따라 소결성이 떨어지기 때문으로 생각 된다.

그림 3은 PZN 치환량과 소결온도 변화에 따른 유전상수의 변화를 나타낸 것이다. 940 °C와 970 °C의 소결온도에서는 8 mol%의 PZN 치환 시까지 증가하여 1455와 1551의 최대 값을 나타내었고, 10 mol% 이상 치환 시 점차 감소하였다. 이러한 결과는 밀도와 유사한 경향이며, 고용한계를 넘어선 PZN이 유전율이 낮은 불순물 상태로 그레인 경계에 존재하여 그레인 성장을 방해하기 때문으로 사료 된다. 또한 PZN 치환 량이 8 mol%까지 유전상수가 증가하는 이유는 PZN 치환에 의해 tetragonal phase에서 rhombohedral phase로 이동하며 상경계에 가까워지기 때문으로 생각된다. 1000 °C의 소결 온도에서는 PZN 치환 량이 증가함에 따라 계속 증가하면서 14 mol% 치환시 1733의 최대값을 나타내었다. 이는 역시 소성온도증가에 따라 PZN의 고용한계가 증가하기 때문이다.

그림 4는 PZN 치환량과 소결온도 변화에 따른 전기기계 결합계수를 나타낸 것이다. 전기기계 결합계수는 940 °C의 소결온도에서는 8 mol% PZN 치환시 0.524의 최대 값을, 970 °C의 소결온도에서는 10 mol% 치환 시 0.543, 1000 °C의 소결온도에서는 12 mol% 치환 시 0.545의 최대 값을 각각 나타내었다. 940 °C 소결한 시편의 경우 PZN 치환량이 8 mol%이후에 급격하게 감소하는 것을 볼 수 있는데 이는 소결온도가 낮기 때문에 PZN의 고용한계가 작기 때문으로 사료된다. 1000 °C 소결된 시편의 경우 유전상수와 같은 경향으로 전기기계 결합계수가 감소하지 않고 계속 증가하였다. 위와

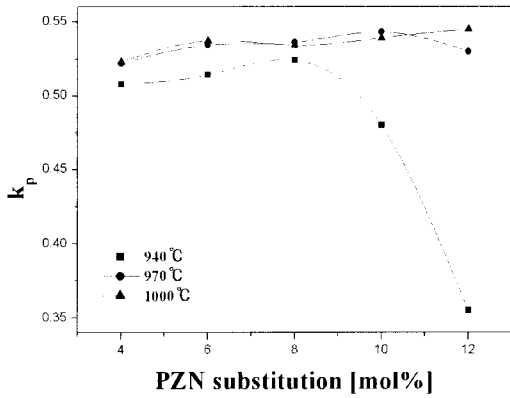


그림 4. PZN 치환량에 따른 전기기계결합계수( $k_p$ ).  
 Fig. 4. Electromechanical coupling factor according to the amount of PZN substitution.

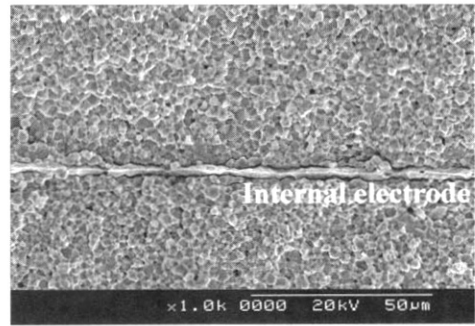


그림 6. 적층 압전변압기의 내부전극과 세라믹스 계면.  
 Fig. 6. Internal electrode and ceramic interfacial surface of multilayer PT.

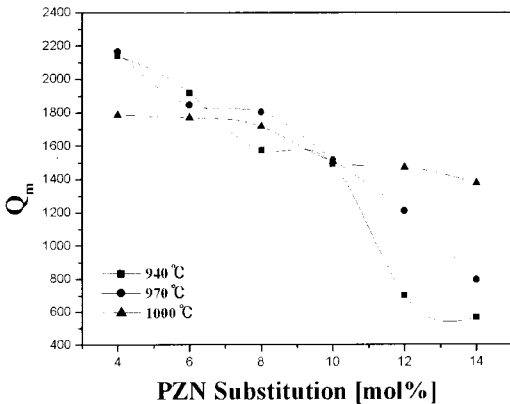


그림 5. PZN 치환량에 따른 기계적품질계수( $Q_m$ ).  
 Fig. 5. Mechanical quality factor according to the amount of PZN substitution.

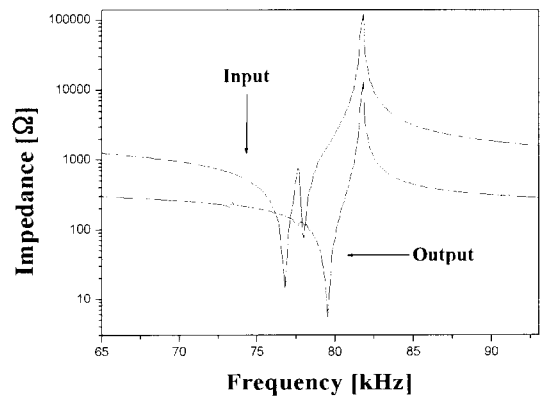


그림 7. 적층 압전변압기의 임피던스특성.  
 Fig. 7. Impedance characteristic curve of multi-layer PT.

같은 결과는 1000 °C의 소결온도에서는 큰 고용한계로 인해 유전상수와 전기기계결합계수가 크게 감소하지 않고 PZN 치환량이 증가함에 따라 상경계로 근접하기 때문으로 사료 된다.

그림 5는 PZN 치환량과 소결온도 변화에 따른 기계적품질계수를 나타낸 것이다. PZN 치환량이 증가함에 따라 기계적품질계수는 계속 감소하는 것을 알 수 있다. 이러한 결과는 결정구조가 tetragonal phase에서 rhombohedral phase로 이동할 때 볼 수 있는 일반적인 특성이며, 또한 파인도로 첨가된 PZN이 그레인 경계에 편석 되어 유전손실이 증가하기 때문으로 생각된다.

### 3.2 적층형 압전변압기의 전기적 특성

적층형 변압기의 단면을 그림 6에 나타내었다. 사진에서 알 수 있듯이 내부전극이 세라믹과 delamination 없이 일체 소결된 것을 확인할 수 있다.

그림 7은 적층 압전변압기에 대한 임피던스특성을 나타낸 것이다. 입, 출력의 유효전기기계결합계수  $k_{eff}$ 가 각각 0.34, 0.23을 나타내어 우수한 압전 특성을 나타내었다.

그림 8은 적층 압전변압기의 입력전압을 일정하게 유지한 상태에서 주파수와 부하저항에 따른 승압비를 나타낸 것이다. 부하저항은 100 Ω, 250 Ω, 500 Ω, 750 Ω, 무부하를 사용하여 측정하였다 부

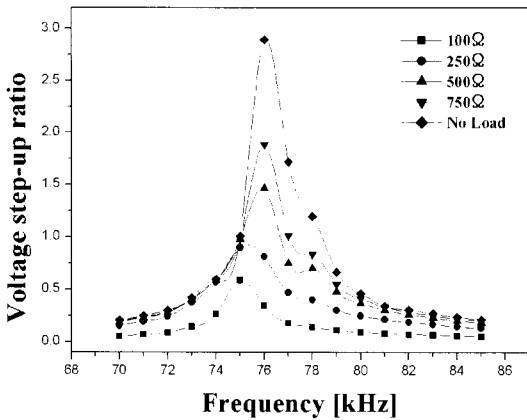


그림 8. 주파수와 부하저항에 따른 승압비.  
 Fig. 8. Voltage ratio according to frequency and load resistance.

하저항의 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 증가하기 때문이다[12]. 부하저항 100 Ω을 연결했을 때 주파수 75 kHz에서 0.59배, 250 Ω을 연결했을 때 주파수 75 kHz에서 0.9배, 500 Ω을 연결했을 때 주파수 76 kHz에서 1.47배, 750 Ω을 연결했을 때 주파수 76 kHz에서 1.88배, 무부하시 주파수 76 kHz에서 2.89배의 최대 승압비를 나타내었다.

그림 9는 부하저항에 따른 적층 압전변압기의 효율을 측정 한 것이다. 부하저항 250 Ω, 500 Ω에서 가장 높은 효율을 나타내었는데, 이러한 결과는 적층 압전변압기의 출력측 임피던스가 부하저항과 일치할 때 최대의 효율을 나타기 때문이다. 따라서 최대전력전달 효율을 얻기 위해서는 적층 압전변압기의 출력측 임피던스와 부하저항과의 정합이 중요할 것으로 판단된다.

그림 10은 적층 압전변압기의 공진주파수에서 입력전압과 부하저항에 따른 출력전력을 나타낸 것이다. 인가된 입력전압에 따른 출력특성은 인가전압이 높아질수록 출력 또한 높아졌으며 배칭 저항부근인 250 Ω과 500 Ω에서 가장 높은 출력전력을 나타내었다. 500 Ω과 750 Ω에서 비교적 낮은 출력전력을 나타냈는데, 이러한 결과는 부하저항의 증가에 따라 매칭저항에서 멀어지기 때문에 발열이 커지면서 손실이 생긴 것으로 사료된다.

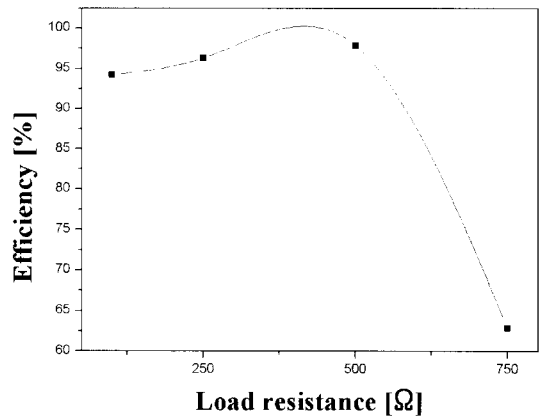


그림 9. 부하저항에 따른 효율.  
 Fig. 9. Efficiency according to load resistance.

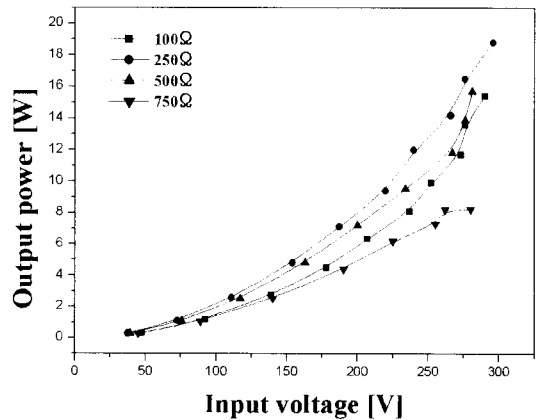


그림 10. 입력전압과 부하저항에 따른 출력전력.  
 Fig. 10. Output power according to input voltage and load resistance.

그림 11은 부하저항에 따른 각 출력전력에서 20분간 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.

100~500 Ω의 부하저항에서 6 W까지는 거의 같은 온도상승을 나타내었고 100 Ω과 500 Ω의 부하저항 연결 시 8 W이상에서 급격한 온도상승

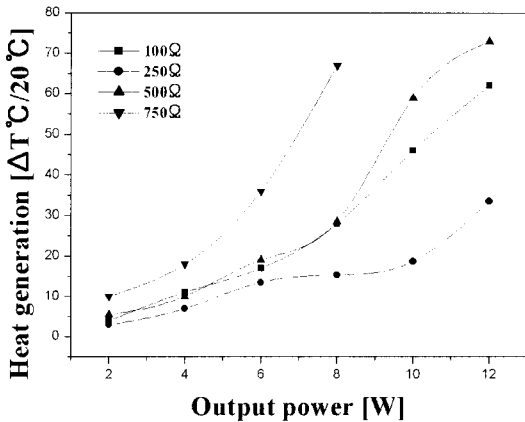


그림 11. 출력전력에 따른 발열.

Fig. 11. Heat generation according to output power.

을 나타내었으나 250 Ω의 부하저항 연결 시 10 W까지 안정된 온도상승을 나타내었다. 압전변압기의 허용 발열량을 20 °C이내의 범위로 볼 때, 250 Ω의 부하저항에서 10 W까지 장시간 구동하여도 안정적인 구동이 가능한 것으로 판단된다.

#### 4. 결론

본 연구에서는 AC-DC converter용 적층 압전 변압기를 개발하기 위하여 기계적품질계수가 높은 것으로 알려진 PMN-PZT 세라믹스에 전기기계 결합계수를 높이기 위하여 PZN을 치환하여 PZN 치환량에 따른 유전 및 압전특성을 조사한 후, 가장 뛰어난 조성으로 적층 압전변압기를 제작하여 압전변압기의 전기적 특성에 관하여 조사한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) PZN 치환량 및 소결온도에 따라 제작된 시편은 소결온도가 증가할수록 PZN의 고용한계가 늘어나면서 최대 소결밀도가 소결온도 증가에 따라 PZN의 치환량이 많은 곳으로 이동하였다.
- (2) 소결밀도의 증가와 함께 전기기계 결합계수( $k_p$ )와 유전상수가 증가하였고, 기계적 품질계수( $Q_m$ )는 PZN 치환량에 따라 점차 감소하는 경향을 나타내었다.
- (3) 소결온도 970, 940 °C, 8 mol% PZN 치환시 밀도 7.84, 7.73 g/cm<sup>3</sup>, 유전상수 1551, 1455 전기기계 결합계수 0.536 0.524, 기계적 품질계수

1803, 1573을 각각 나타냄으로써 적층 압전 변압기로의 응용가능성을 나타내었다.

- (4) 적층 압전변압기의 임피던스 특성곡선의 입력단은  $f_r=76.65$  kHz,  $f_a=81.75$  kHz 출력단은  $f_r=79.45$  kHz,  $f_a=81.7$  kHz의 공진 및 반공진 주파수를 나타내었다.
- (5) 주파수와 부하저항에 따른 승압비를 측정된 결과 100 Ω, 250 Ω, 500 Ω, 750 Ω 그리고 무부하시 주파수 75 kHz~76 kHz에서 최대승압비가 나타났으며, 각각의 최대승압비는 0.59, 0.9, 1.47, 1.88 그리고 2.89배의 승압비를 나타내었다.
- (6) 입력전압과 부하저항에 따른 출력을 측정된 결과 입력전압이 증가할수록 출력전력이 증가하였으며, 공진저항 부근에서 비교적 큰 출력전력을 나타내었다. 또한, 공진저항 부근인 250 Ω에서 10 W까지 20 °C미만의 온도상승을 보임으로서 AC-DC converter용 적층 압전변압기로의 적용 가능성을 확인하였다.

#### 감사의 글

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

#### 참고 문헌

- [1] T. Ohno, N. Tsubouchi, M. Takahashi, Y. Matsuo, and T. Akashi, "The piezoelectric, dielectric and elastic constants of the ternary and quaternary system consisting of PbZrO<sub>3</sub>-PbTiO<sub>3</sub> and others", Tech. Rep. IEICE Jpn. US71-37, p. 1, 1972.
- [2] S. Hirose, Y. Yanayoshi, M. Taga, and H. Shimizu, "A method for measuring the vibration level dependance of impedance-type equivalent circuit constants", Jpn. J. Appl. Phys. Supp., Vol. 30 No. 1, p. 1117, 1992.
- [3] S. Takahashi, S. Hirose, and K. Uchino, "Stability of PZT piezoelectric ceramics under vibration level change", J. Am. Ceram. Soc., Vol. 77, No. 9, p. 2429, 1994.
- [4] S. Takashi, S. Hirose, K. Uchino, and K. I. Oh, "Electro-mechanical characteristics of

- lead zirconate-titanate ceramics under vibration level change", in Proc. 9<sup>th</sup> IEEE Int. Symp. Application of Ferroelectrics, Penn. State, p. 377, 1995.
- [5] S. Hirose, S. Takahashi, M. Aoyagi, and Y. Yamamoto, "High power characteristics of piezoelectric materials", in Proc. 9<sup>th</sup> IEEE Int. Symp. Application of Ferroelectrics, Penn. State, p. 766, 1995.
- [6] P. A. Van Berkum, J. C. Sinclair, and K. Randy. "High Voltage Ceramic Transformer", IRE Rrans. Broadcast and Television Receivers, BTR-8, Pt. 1, p. 22, 1962.
- [7] C. A. Rosen, "Ceramic transformer and filters", Proc. of Electronics Symposium, p. 205, 1957.
- [8] H. W. Katz, "Solid state magnetic and dielectric device", New York, Jhon Wiley & Sons, p. 35, 1959.
- [9] S. Takahashi and H. Hirose, "Vibration characteristics of lead-zirconate-titanate ceramics", Jpn. J. Appl. Phys., Vol. 31, p. 3055, 1992.
- [10] 정광현, 이덕출, 류주현, "소결조제 변화에 따른 PCW-PMN-PZT 세라믹스의 저온소결 및 압전특성", 전기전자재료학회논문지, 17권, 12호, p. 1320, 2004.
- [11] 류주현, 이현석, 정광현, "Pb(Mg<sub>1/2</sub>W<sub>1/2</sub>)O<sub>3</sub> 치환에 따른 저온소결 Pb(Mg<sub>1/2</sub>W<sub>1/2</sub>)O<sub>3</sub>-Pb(Mn<sub>1/3</sub>Nb<sub>2/3</sub>)O<sub>3</sub>-Pb(Zr<sub>1/2</sub>Ti<sub>1/2</sub>)O<sub>3</sub> 세라믹스의 압전 및 유전특성", 전기전자재료학회논문지, 19권, 5호, p. 417, 2006.
- [12] 栗祐一, "壓電セラミクトランス用素子の考察", 日本音響學會誌, 32卷, 8號, p. 470, 1976.