Journal of the Korean Institute of Electrical and Electronic Material Engineers. Vol. 13, No. 4, pp. 286~293, 2000.

PSN-PZT계 세라믹스를 이용한 고출력 압전 트랜스포머의 전기적 특성

논 문 13-4-3

Electrical Characteristics of the High Power Piezoelectric Transformer Using PSN-PZT system ceramics

이용우*, 류 주현*, 윤광희*, 정회승**, 서성재***, 김종선****

(Y. W. Lee, J. H. Yoo, K. H Yoon, H. S. Jung, S.J.Suh,J. S. Kim)

Abstract

In this paper, we investigated the structural, dielectric and piezoelectric properties of $0.03Pb(Sb_{1/2}Nb_{1/2})-0.97Pb(Zr_{0.495}Ti_{0.505})O_3$ + 0.5 wt% excess PbO + x wt% MnO (X = 0, 0.1, 0.3, 0.5, 0.7) ceramics to develop the high-power piezoelectric transformer. The piezoelectric transformers with dimension of $27.5\times27.5\times2.5[mm^3]$ were fabricated and their electrical properties were measured. Maxima of piezoelectric properties such as electro-mechanical coupling factor of 0.534 and mechanical quality factor of 1487 were obtained for the PSN-PZT with 0.3wt% MnO. Voltage step-up ratios of piezoelectric transformers at 500[Ω] and no load were 0.78, 12.82, respectively. The maximum efficiency of piezoelectric transformer was 98.6% at 800[Ω]. While the 14W fluorescent lamp were driven by the piezoelectric transformer for more than 20[min], increment of temperature in the piezoelectric transformer was 7[℃].

Key words(중요 용어) : Dielectric and Piezoelectric properties, Piezoelectric transformer, Voltage step-up ratio, efficiency

1. 서 론

압전 트랜스포머가 고전압 발생장치로서 주목받게 된 것은 1957년 C. E. Rosen 등에 의해 $BaTiO_3$를 이용한 장방형 압전 트랜스포머가 개발된 이후 부터이며, $BaTiO_3$를 사용한 압전 트랜스포머는 30-40배 정도의 승압비를 얻을 수 있어 실용화가 이루어지지 않았다. 그러나 Jaffe등[1]에 의해 개발된 $Pb(Zr,Ti)O_3$계 압전 세라믹스를 이용한 압전 트랜스포머는 승압비가 높아 TV, 정전도장장치, 집진장치 등의 고압 전원용으로 활용하려는 연구가 이루어졌으나 대용량화, 신뢰성의 문제로 인해 응용이 어려웠다. 최근 들어 고출력 압전 재료의 개발과 LCD backlight용 인버터의 고전압 전원으로 실용화가 이루어지고 있으나, LCD backlight에 사용되는 냉음극관은 저전력인 2-4[W] 정도로 구동이 가능하지만 고출력이 요구되는 형광등과 같은 조명기구나 A/D converter, 가스점화장치 등으로의 응용을 위해서는 고출력 압전 트랜스포머가 필요하다. 이러한 고출력 압전 트랜스포머를 위한 압전 세라믹스는 높은 진동 속도로 구동되므로 발열, 비선형성, 압전 특성의 열화 및 세라믹스 기판의 기계적인 강도 등과 같은 문제점들이 해결되어야 한다[2]. 그러므로 고출력 압전 트랜스포머를 개발하기 위해서는 압전 세라믹스의 grain 크기를 미세하게 만들면 효과적이나, grain 크기가 작아지면 grain 경계층이 증가하여 압전 특성을 저하시키

* 세명대학교 전기공학과
(충북 제천시 신월동 산21-1 ,
E-mail : juhyun57@venus.semyung.ac.kr)
** 주성대학 전기전자소자전공
*** 한남대학 산업기술연구소
**** 삼성전기 종합연구소
2000년 1월 12일 접수, 2000년 3월 16일 심사완료

는 경향이 있다. 따라서 고출력 압전 트랜스포머로의 응용을 위해 압전 특성의 저하 없이 grain 크기를 감소시키는 것이 매우 중요한데, grain의 크기를 작게 하고 미세구조가 치밀한 세라믹스을 제조하기 위해서 물질 자체가 grain 성장을 느리게 하는 조성이어야 하며 조성 분말의 크기와 분포는 각각 작고 좁아야 한다. Sub-μm 크기의 조성 분말은 저온 소결과 미세한 grain을 갖는 세라믹스 제조에도 효과적이다.[3] 따라서, 본 연구에서는 복합 페로브스카이트 화합물인 $Pb(Sb_{1/2}Nb_{1/2})O_3$계 세라믹스가 grain 성장을 억제하는데 효과적이라고 보고한 C. Tapaonoi[4]의 연구 결과를 이용하여 압전 세라믹스의 grain 크기를 작게 만들기 위해 $Pb(Sb_{1/2}Nb_{1/2})O_3$를 고용시킨 $Pb(Sb_{1/2}Nb_{1/2})O_3$-$Pb(Zr,Ti)O_3$ 3성분계를 기본 조성으로 하였다. 그러나 $Pb(Sb_{1/2}Nb_{1/2})O_3$-$Pb(Zr,Ti)O_3$계 압전 세라믹스는 기계적 품질계수가 작아서 압전 트랜스포머의 승압비가 낮으므로, MnO를 불순물로 첨가하여 유전 및 압전 특성의 큰 저하없이 기계적 품질계수를 증가시키고자 한다. 또한 고출력 압전 트랜스포머로의 응용에 가장 적합한 조성 세라믹스로 압전 트랜스포머를 제작하여 승압비, 효율, 발열 특성 등을 조사하고, 14W 형광등 점등시의 전기적 특성을 측정하여 응용가능성을 고찰하였다.

2. 실 험

2.1 시편의 제조

본 실험에서는 다음의 조성식에 의해 산화물 혼합법으로 시편을 제조하였다.

$$Pb[(Sb_{1/2},Nb_{1/2})_{0.03}-(Zr_{0.495},Ti_{0.505})_{0.97}]O_3 + 0.5wt\%excessPbO + xwt\%MnO \quad -(1)$$

여기서, x = 0, 0.1, 0.3, 0.4, 0.5, 0.7이다. 조성에 따른 시료의 정확한 몰비를 10^{-4}g까지 평량하였고, 아세톤을 분산매로 볼밀을 사용하여 24시간 동안 혼합 분쇄한 후 건조하였다. 건조된 시료는 알루미나 도가니로 850[℃]에서 2시간 동안 하소하였다. 하소가 끝난 시료를 재분쇄한 후 PVA (5wt% 수용액)을 5wt% 첨가하여 직경 21[mm] 몰더로 1[ton/㎠]의 압력을 가하여 성형하고 승하강 온도 300[℃/h]로 하여 1200[℃]에서 2시간 동안 소결하였다. 소결된 시편들은 특성 측정을 위해 1[mm] 두께로 연마하여 실버 페이스트를 도포하고 600[℃]에서 10분간 열처리하였다. 전극이 형성된 시편은 100[℃] 실리콘유 속에서 30[kV/cm]의 전계를 30분 동안 인가하여 분극하였다.

2.2 특성 측정

소결된 시편의 조성변화에 따른 소결성을 판단하기 위하여 공기중에서의 질량과 물속에서의 질량을 측정하여 밀도를 구하였다. MnO 첨가에 따른 결정구조의 변화를 조사하기 위하여 X선 회절기로 λ=1.5406Å인 Cukα를 사용하여 회절각 20°~80° 사이에서 측정하였다. 또한 MnO 첨가에 따른 미세구조를 관찰하기 위해 소결된 시편들의 표면을 연마하여 10% HCl 용액에 소량의 HF가 첨가된 용액내에서 화학적 에칭을 하여 주사전자 현미경(SEM, RJ Lee Instruments)으로 관찰하였다. 유전상수의 온도에 따른 특성을 조사하기 위해서 20~400[℃]의 온도 범위내에서 LCR meter (ANDO AG-4304)로 1[kNz]에서 정전용량을 측정하여 유전상수를 구하였고, Sawyer-Tower 회로로 이력곡선을 관찰하여 항전계를 구하였다. 압전 특성을 나타내는 전기기계결합계수, 기계적 품질계수 등은 IRE 규정[5,6]에 따라 Impedance Analyzer(HP4194A)로 공진 및 반공진 주파수를 측정하여 산출하였다.

2.3 압전 트랜스포머의 제작 및 특성 측정

압전 트랜스포머는 그림 1의 새로운 타입의 Dot-Ring형 구조이며, 시편 크기는 27.5×27.5×2.5[mm]이고, Diamond 모양의 Dot 크기는 13×13[mm]로 설계된 전극 패턴으로 실버 페이스트를 도포하여 제작하였다.

입력부 전극(Dot 전극부)를 Diamond 형으로 한 압전 트랜스포머 구조는 경방향 진동 모드를 이용하는 것이다. 경방향 전기기계결합계수 k_p가 일반적으로 길이방향 전기기계결합계수 k_{31} 보다 크기 때문에 길이방향 진동 모드를 이용하는 압전 트랜스포머 보다 에너지 변환 효율이 높고 출력부의 정전용량이 커지기 때문에 출력부 임피던스를 떨어뜨리는 작용을 하여 출력 전류 및 전력을 높일 수 있다. 그러나 상대적으로 승압비는 줄게 되어 점등시에 낮은 임피던스를 갖는 형광등 점등에 유용한 압전 트랜스포머 형상을 갖게 된다. 기존의 Ring-Dot 형상의 경우에는 각판일 때 진동이 크게 발생하는 부분, 즉 변의 모서리 부분이 너무 좁아 그다지 좋은 효율을 갖지 못한다. 이를 개선하고자 본 연구에서는 방사상 대칭 구조를 사방으로 진동

하는 형태를 극대화시키고 진동이 작게 발생하는 부분을 줄임으로서 최대의 출력 전달 및 효율을 높히고자 그림 1과 같은 새로운 모양의 압전 트랜스포머로 전극 설계를 하여 제작하였다.

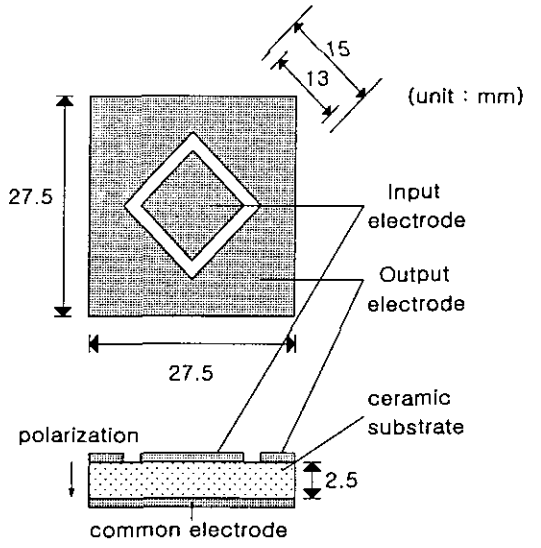


그림 1. 새로운 Diamond dot-Ring형 압전 트랜스포머의 구조

Fig. 1. Structure of new Diamond dot-Ring type piezoelectric transformer

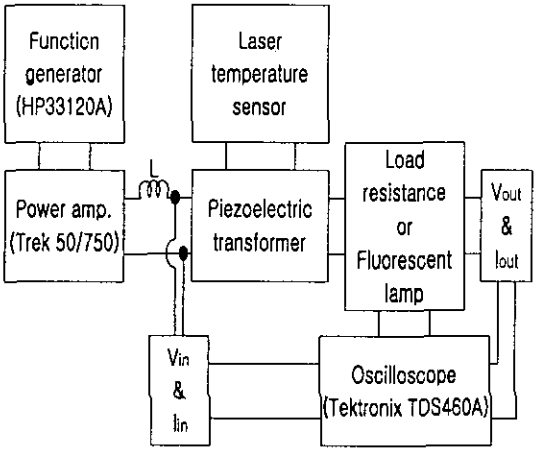


그림 2. 압전 트랜스포머의 구동 및 측정 시스템

Fig. 2. Driving and measuring system for piezoelectric transformer.

제작된 시편은 두께 방향으로 25[kV/cm]의 전계를 30분 동안 인가하여 분극시켰다. 압전 트랜스포머의 특성 평가를 위해 그림 2의 압전 트랜스포머 구동 및 측정 시스템으로 주파수와 부하저항에 따른 승압비, 효율, 인가전압에 따른 출력전력 및 출력전력에 따른 압전 트랜스포머의 발열에 의한 온도 상승 등을 측정하였다. 또한 실제 응용이 가능한 14W(T5, 16mm) 형광등을 점등시켜, 입력 전류, 전압 및 전력과 출력 전류, 전압 및 전력 특성을 측정하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1 MnO 첨가량에 따른 구조 및 전기적 특성

MnO 첨가량에 따른 결정구조를 조사하기 위하여 관찰한 X 선 회절 모양을 그림 3에 나타내었는데, 회절각 45° 부근의 (200)과 (002)면에 대한 피크를 고려하면 분리된 피크가 관찰되는 것으로 보아 정방정계의 결정구조인 것으로 보인다. 그러나 분리된 피크의 폭이 작아 정방정상에 능면체정상이 다소 혼재된 상경계 근처의 조성으로 판단되며, MnO 첨가에 따라 정방성(c/a)의 큰 변화가 관찰되지 않았다.

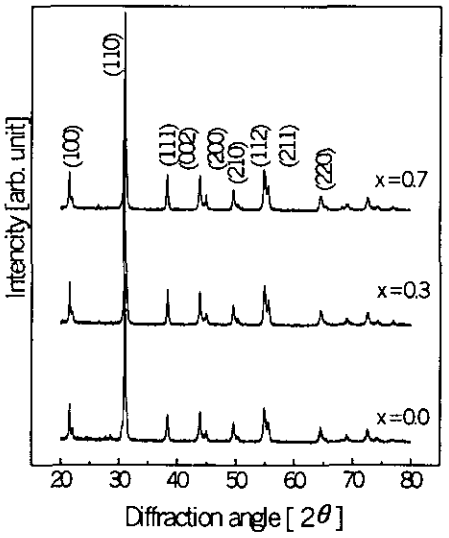
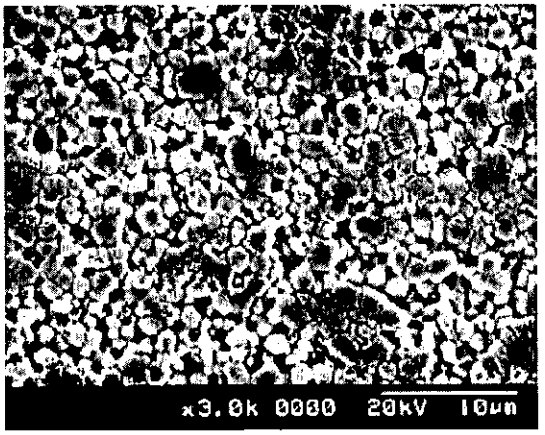


그림 3. MnO 첨가량에 따른 X선 회절 모양

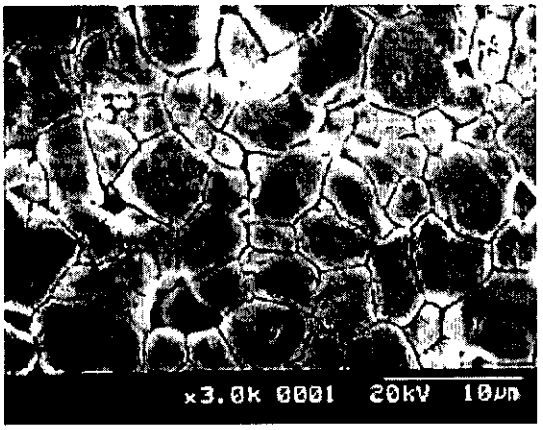
Fig. 3. X-ray diffraction patterns with the addition amount of MnO

그림 4는 MnO 첨가량에 따른 미세구조를 나타낸 SEM 사진으로, MnO 첨가량이 증가할수록 grain 크기가 증가하다가 다시 감소하는 경향을 나타내었다. MnO 0.7wt% 첨가된 조성에서 grain 크

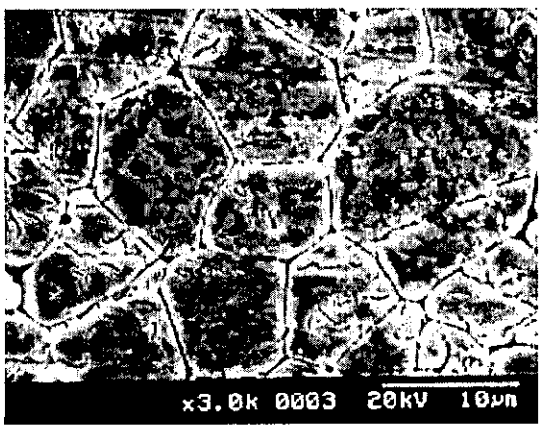
기가 감소한 것은 고용한계를 넘은 MnO가 grain 경계에 편석되어 grain 성장을 억제하였기 때문으로 생각된다[7].



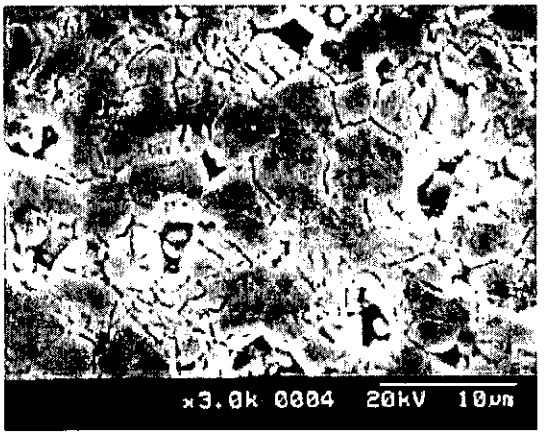
(a) MnO 0wt%



(b) MnO 0.3wt%



(c) MnO 0.5wt%



(d) MnO 0.7wt%

그림 4. MnO 첨가량에 따른 미세구조
Fig. 4. Microstructure with the addition amount of MnO

그림 5는 MnO 첨가량에 따른 밀도의 변화를 나타낸 것으로, 첨가량이 증가할수록 밀도는 감소하다가 0.7wt% 첨가시 밀도가 약간 증가하였다. 밀도가 감소하다가 다시 증가한 이유는 MnO 첨가량이 0.5wt%가 넘어서면서 고용한계를 초과한 Mn이 고용되지 못하고 grain 경계에 편석되어 grain 크기가 작아져 밀도를 증가시키는 것으로 보인다.

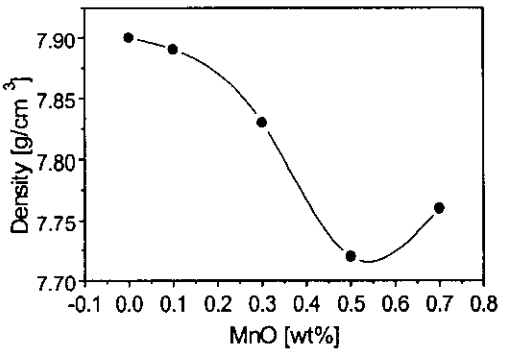


그림 5 MnO 첨가량에 따른 밀도
Fig. 5 Density with the addition amount of MnO

MnO 첨가량에 따른 상온에서의 유전상수와 상전이 온도를 그림 6에 나타내었고, 항전계의 변화를 그림 7에 나타내었다. MnO 첨가량이 증가할수록 상전이 온도와 유전상수가 감소하였고 항전계는 증가하고 있다. 이는 Mn^{3+} 이온이 PZT계 세라

믹스에서 페로브스카이트 구조의 B-자리로 고용되면서 억셉터로 작용하여 공간전하중성을 유지하기 위하여 산소공공을 유발하고, 이 산소공공이 분역벽의 움직임을 감소시켜 유전상수를 저하시키고, 항전계를 증가시키는 것으로 보인다[8].

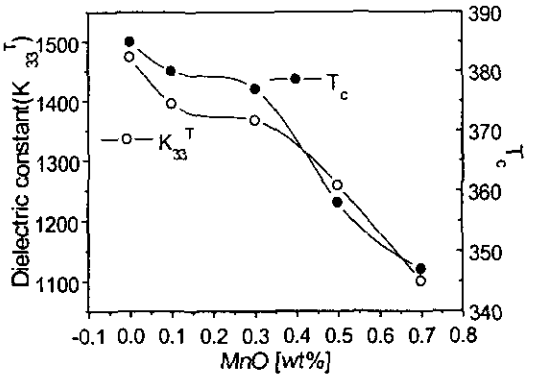


그림 6 MnO 첨가량에 따른 유전상수와 상전이 온도
Fig. 6 Dielectric constant and curie temperature with the addition amount of MnO

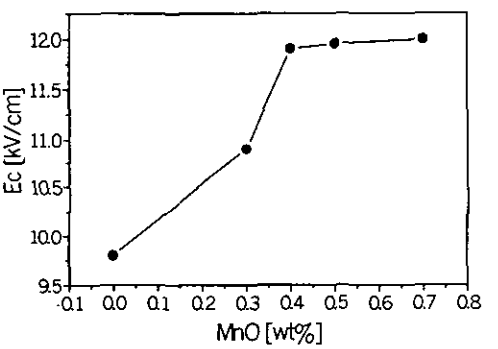


그림 7 MnO 첨가량에 따른 항전계
Fig. 7 Coercive field with the addition amount of MnO

그림 8은 MnO의 첨가량에 따른 전기기계결합계수 kp와 기계적 품질계수 Qm를 나타낸 것이다. 첨가량이 증가할수록 kp가 감소하고 있으며, Qm은 MnO 0.3wt%까지는 고용이 잘되어 증가하고 있으나 0.5wt% 이상 첨가시 Qm이 감소하는 경향을 나타내고 있다. MnO를 불순물로 첨가할 때 기계적 품질계수 Qm이 증가하는 이유는 MnO 첨가에 따라 PZT계 세라믹스의 소결 온도 범위에서 Mn 이온이 +3가로 존재한다고 Alexander[9]가 보고한 결과와 같이 Mn^{3+}이온이 치환되어 들어감에 따라 억셉터로 작용하여 분역벽의 움직임을 감소시켜 안정화시키기 때문으로 판단된다.

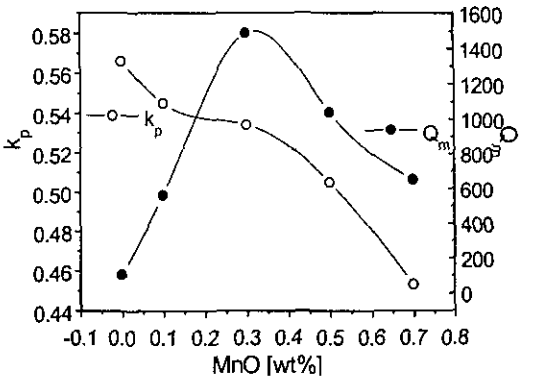


그림 8 MnO 첨가량에 따른 전기기계결합계수 kp와 기계적 품질계수 Qm
Fig. 8 Electromechanical coupling factor kp and mechanical quality factor Qm with the addition amount of MnO

3.2 압전 트랜스포머의 전기적 특성

압전 트랜스포머의 전기적 특성를 고찰하기 위하여 주파수와 부하저항에 따른 승압비, 효율, 인가전압에 따른 출력전력 및 출력전력에 따른 압전 트랜스포머의 발열에 의한 온도 상승 등을 측정하였다.

그림 9는 제작된 압전 트랜스포머의 주파수와 부하저항에 따른 승압비를 나타낸 것이다. 입력전압은 220[Vrms]이고, 부하저항은 300, 500, 800 [Ω], 1[kΩ], 2.5[kΩ] 및 무부하일 때 측정하였다. 압전 트랜스포머를 형광등 부하에 사용하기 위해서는 무부하와 500[Ω] 정도에서의 승압비가 중요한데, 이는 14W 형광등의 경우 점등전에는 무부하와 같이 높은 저항을 나타내지만 점등 후에는 500 [Ω] 정도로 작아지기 때문이다. 14W 형광등은 점등개시전압 230[V], 점등 후 출력전압 82[V], 출력전류 172[mA]의 정격을 가지고 있으므로, 압전 트랜스포머의 구동주파수에서 무부하시 승압비의 약 1.045배, 500[Ω]에서의 승압비가 0.37배 이상으로 되도록 설계하여야 한다. 본 연구에서 사용된 압전 트랜스포머의 구동주파수에서의 승압비는 무부하시 2.928배, 부하저항 500[Ω]에서의 승압비가 0.408배 정도로 응용가능할 것으로 보인다. 그림 10은 압전 트랜스포머의 부하저항에 따른 효율을 나타낸 것이다. 부하저항이 800[Ω]일 때 최대효율 98.6%를 나타내었고, 이는 압전 트랜스포머의 출력단 임피던스와 부하 임피던스의 정합이 잘 이루

어졌기 때문으로 생각된다. 14W 형광등 점등 후의 임피던스인 500[Ω]일 때의 효율은 97.6%로 우수한 특성을 나타내었다.

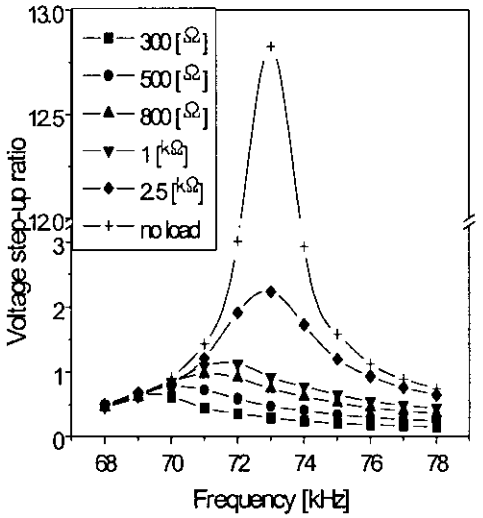


그림 9 주파수와 부하저항에 따른 승압비
Fig. 9 Voltage step-up ratio with frequency and load resistance

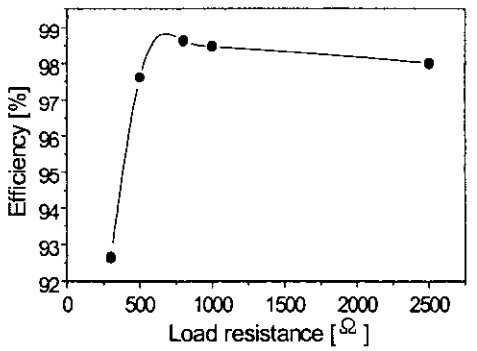


그림 10 부하저항에 따른 효율
Fig. 10 Efficiency with load resistance

그림 11은 압전 트랜스포머를 공진주파수에서 구동하는 경우, 부하저항를 변화시켰을 때 입력전압에 따른 출력전력을 나타낸 것이다. 입력전압이 증가함에 따라 출력전력이 증가하고 있으며, 부하저항 800[Ω]에서 출력이 37[W]까지 크게 나타남을 알 수 있다. 또한 고출력으로 압전 트랜스포머를 구동함에 있어 발열에 의한 온도 상승이 중요하게 고려할 요소이므로 그림 12에 압전 트랜스포머의 공진주파수에서 출력전력에 따른 발열에 의한 온도 상승을 나타내었다. 출력전력이 증가함에 따라 발열이 증가하고 있으나, 실용상 온도 증가분 △T가 20[℃] 이내의 범위에서 나타나는 출력을 최대출력으로 볼 수 있으므로, 14W 형광등을 구동할 때 발열에 의한 온도 상승으로 인한 영향은 거의 없을 것이다.

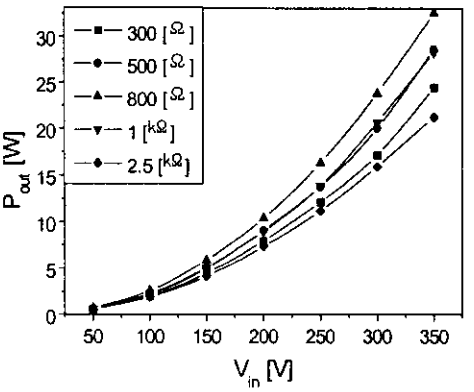


그림 11 입력전압에 따른 출력전력
Fig. 11 Output power with input voltage

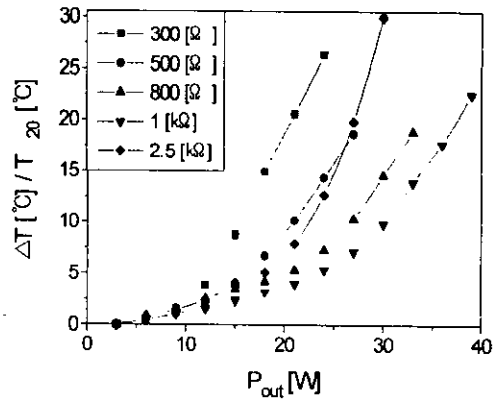


그림 12 출력전력에 따른 발열
Fig, 12 Heat generation with output power

그림 13은 압전 트랜스포머를 사용하여 14W 형광등을 점등시켰을 때의 사진이다. 입력전압 210[Vrms]를 인가하였을 때 출력전력이 14.89[W]로 형광등을 구동시키기에 충분하였다.

표 1은 14watt 형광등을 구동하였을 때 측정한 전기적 특성을 나타낸 것이다. 압전 트랜스포머를 20분 이상 구동하여 형광등을 점등시 온도 상승은 7[℃] 정도에서 더 이상 증가되지 않았으므로 장시간 구동하여도 안정적임을 알 수 있다.

표 1 14watt 형광등 구동시의 전기적 특성
Table 1 Electrical properties of piezoelectric transformer in driving 14W fluorescent lamp

f [kHz]	V_{in} [V]	I_{in} [mA]	V_{out} [V]	I_{out} [mA]	P_{out} [W]	ΔT [℃]	efficiency [%]
74	210	105	85.6	174	14.9	7	97.6

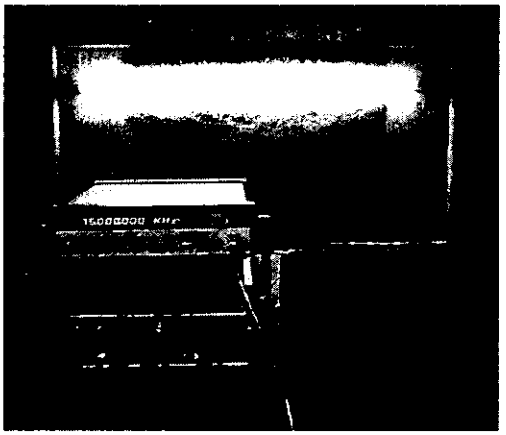


그림 13. 압전 트랜스포머로 점등된 14watt 형광등
Fig. 13. 14W fluorescent lamp(T5) driven by piezoelectric transformer

4. 결 론

$Pb(Sb_{1/2},Nb_{1/2})_{0.03}(Zr_{0.495},Ti_{0.505})_{0.97}O_3$ + 0.5wt% excess PbO + x wt% MnO(x=0, 0.1, 0.3, 0.5, 0.7)의 조성으로 유전 및 압전 특성을 조사한 결과는 다음과 같다.

1. MnO 첨가량에 따른 grain 크기는 증가하다 0.5wt% 이상 첨가시 감소하였다.
2. 큐리 온도는 모든 조성에서 300[℃]이상으로 나타났으며, 유전상수는 MnO의 첨가량이 증가할수록 감소하는 경향을 나타내었다.
3. 전기기계결합계수 kp는 MnO 첨가량이 증가할수록 감소하였으며, 기계적 품질계수 Qm은 MnO 0.3wt%가 첨가된 시편에서 1,487로 가장 높은 값을 나타내었다.
4. 항전계는 MnO의 첨가량이 증가할수록 증가하는 경향을 나타내었다.

이상의 결과로 MnO 0.3wt% 첨가된 세라믹스로 압전 트랜스포머를 제작하여 전기적 특성을 측정한 결과 다음과 같은 결과를 얻었다.

5. 부하저항이 증가할수록 승압비는 증가하였으며, 공진주파수에서 측정할 때, 무부하, 500[Ω]일 때 각각 12.82, 0.78배이었다.
6. 부하저항에 따른 효율은 800[Ω]일 때 98.6%로 최대 효율을 나타내었다.
7. 입력전압이 증가할수록 출력전력은 증가하여으며, 입력전압 350[V]에서 37[W]의 높은 출력값을 얻을 수 있었다.
8. 출력전력에 따른 발열에 의한 온도 상승을 측정한 결과 20분 이상 구동시 7[℃]로 더 이상 증가하지 않았다.
9. 압전 트랜스포머를 사용하여 14watt 형광등을 구동한 결과 입력전압 210[V], 출력전압 85.6[V], 출력전류 174[mA], 출력전력 14.89[W], 효율 97.6%, 온도 상승 7[℃]로 우수한 특성을 나타내었다.

감사의 글

본 연구는 한국과학재단 특정기초연구(과제번호 : No. 1999-1-302-004-3)의 연구비로 이루어진 것으로 감사를 드리며, 측정에 도움을 주신 삼성전기 종합연구소에도 감사를 드립니다.

참고문헌

[1] B. Jaffe, R. S. Roth and S. Mazullo, "Piezoelectric Properties of Lead Zirconate -Lead Titanate Solid-Solution Ceramic", J. Appl. Phys., Vol. 25, No. 6, pp. 809-810, 1954.

[2] Yasushi Kawamura and Hiromu Ohuchi, "Electric properties of $PbZrO_3$ - $PbTiO_3$ - $Pb(Sb_{1/2}Nb_{1/2})O_3$ Ceramics" , Jpn. J. Appl. Phys, vol. 33, pp. 5332-5335, 1994.

[3] S. kudo, S. Tashiri and H. Igarashi, "Oxygen-Atmosphere Firing of Piezoelectric lead Zirconate Ceramics Substituted with Lead Antimonate Niobate Having Susmicron Particle Sizes", Jpn. J. Appl. Phys, vol. 34 pp. 5303-5305, 1995.

[4] Chanin Tapaonoi, Shinjiro Tashiro and Hideji Igarashi, "Piezoelectric properties of Fine -grained Lead Zirconate Titanate

Ceramics Modified with $Pb(Sb_{1/2}Nb_{1/2})$", Jpn. J. Appl Phys, vol. 33 pp. 5336-5340, 1994.
[5] EMAS-6001, 日本 電子材料 工業會, 1977.
[6] EMAS-6003, 日本 電子材料 工業會, 1977.
[7] R. B. Atkin and R. M. Fulrath, "Point Defects and Sintering of Lead Zirconate Titanate", J. Am. Ceram. Soc., Vol. 54, No. 5, pp. 265-270, 1971.
[8] J. O. Genter, P. Gerthsen, N. A. Schmidt and R. E. Send, "Dielectric Losses in Ferroelectric Ceramics Produced by Domain-Wall Mobility", J. Appl. Phys., Vol. 49, No. 8, pp. 4485-4489, 1978.
[9] Y. S. Ng and S. M. Alexander, "Structural Studies of Manganese Stabilized Lead Zirconate Titanate", Ferroelectric, Vol. 51, pp. 81-86, 1983.