

저온소결 PCW-PMN-PZT세라믹스를 적용한 압전변압기의 전기적 특성

Electrical Characteristics of Piezoelectric Transformer using Low Temperature Sintering PCW-PMN-PZT Ceramics

정광현¹, 류주현^{1,a}
(Kwang-Hyun Chung¹ and Ju-Hyun Yoo^{1,a})

Abstract

In this study, piezoelectric transformer was manufactured at the sintering temperature of 950 °C, and then the feasibility of application to low temperature sintering piezoelectric transformers was investigated by evaluating the electrical characteristics of it. The voltage ratio of piezoelectric transformer showed the maximum value at the resonant frequency of input part, and increased according to the increase of load resistance. The output power and efficiency of piezoelectric transformer showed the superior properties when the output impedance of it coincides with the load resistance. Piezoelectric transformer manufactured at the low temperature of 950 °C showed the heat generation less than 20 °C at the output power of 30 W, and stable driving characteristics.

Key Words : Piezoelectric transformer, Low temperature sintering, Voltage ratio, Efficiency, Output power

1. 서론

최근 전자기기의 소형화와 고효율화에 따라 이들 기기에 적용하기 위한 전자부품에 대한 연구가 상당히 중요한 요소로 부각되고 있다. 특히 전원장치에 있어서는 현재 주요 부품으로 사용되고 있는 권선형변압기와 같은 전자변환기의 대체품으로서 압전세라믹스 소재의 특성을 이용한 압전변압기의 개발과 응용연구가 국, 내외적으로 활발히 진행 중이다[1-3]. 압전변압기는 LCD backlight용 인버터, 형광등램프용 안정기, 오존발생기, DC-DC컨버터, 어댑터, 기타 고전압전원장치 등과 같이 그 응용범위가 상당히 넓으며, 특히 무부하시에는 승압비가 높고 부하가 감소하면 승압비가 감소하는 전기적

특성을 갖추고 있기 때문에 이를 이용한 인버터는 형광등 점등에 적합한 특성을 갖는다. 기존의 압전변압기 구조는 Rosen형이 많이 이용되고 있으나, 이 형태는 출력측의 임피던스가 높아 고전압 저전류의 응용기기에는 적합하나, 100 mA 이상의 전류를 필요로 하는 형광등구동용과 같은 고전력장치에는 적용하기 어렵다. 따라서, 기존 Rosen형에서 전극배치를 바꾼 다양한 형태의 압전변압기와[4] 일반적으로 경방향 전기기계결합계수(k_p)가 길이방향 전기기계결합계수(k_{31})보다 높은 점을 고려하여 윤곽진동모드를 이용한 압전변압기가 제작되어 연구되고 있다[5,6]. 또한, 이를 더욱 고출력으로 하기 위하여 입력측의 정전용량을 증가시켜 임피던스를 감소시키고 상대적으로 증가된 출력측의 임피던스에 의해 승압비를 향상시키며, 단판형 압전변압기의 높은 입력전압에 의한 발열에 의한 승압비와 공진주파수의 이동등과 같은 문제점을 해결하기 위해 적층형 압전변압기의 개발이 활발히 연구되고 있다[7,8]. 그러나 적층형 압전변압기의 경우, 층간의 내부 전극이 도포된 상태에서 소결하여야

1. 세명대학교 전기공학과

(충북 제천시 신월동 산 21)

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

접수일자 : 2006. 2. 8

1차 심사 : 2006. 2. 17

심사완료 : 2006. 2. 27

하며[9], 고온에서 소결시에 낮은 용점을 갖는 Ag 전극보다는 높은 용점을 갖는 Pd전극이 다양으로 함유된 Ag/Pd 내부전극을 사용해야 하기 때문에 Pd전극의 함유량을 줄인 비교적 저가의 내부전극을 사용하거나, 약 960 °C의 용점을 갖고 있는 순수한 Ag내부전극을 사용하기 위해서 960 °C 이하의 낮은 온도에서 소결 가능한 세라믹스 조성에 대한 연구개발이 필요한 실정이다[10,11]. 본 연구에서는 위와같은 이유로 고효율 압전변압기용 저온소결세라믹스를 적용한 저온소결 압전변압기를 제작하고 전기적특성을 평가하여 형광등 구동용 압전변압기로서의 적용가능성과, 추후 Pd함유량이 감소된 내부전극을 사용하여 적층형 압전변압기의 제작가능성을 연구하고자 한다.

2. 실험

2.1 압전변압기 제작

본 연구에서 제작한 압전변압기의 기본조성식은 다음과 같으며 산화물 혼합법으로 시편을 제조하였다.

$$\text{Pb}[(\text{Co}_{1/2}\text{W}_{1/2})_{0.02}(\text{Mn}_{1/3}\text{Nb}_{2/3})_{0.07}(\text{Zr}_{0.48}\text{Ti}_{0.52})_{0.91}]\text{O}_3$$

$$+ 0.1 \text{ wt}\% \text{MnO}_2$$

$$+ 0.3 \text{ wt}\% \text{CuO} + 0.3 \text{ wt}\% \text{Bi}_2\text{O}_3 + 0.2 \text{ wt}\% \text{Li}_2\text{CO}_3$$

위의 조성을 순도 99 %이상의 파우더로 10⁴ g 까지 칭량하였으며, 아세톤을 분산매로 하여 지르코니아 불을 이용해 24시간 불밀하였다. 불밀한 파우더를 항온조에서 12시간 이상 건조하였으며, 건조된 시료를 850 °C의 온도에서 2시간 동안 하소하였다. 하소된 파우더에 소결조제로써 사용된 CuO, Bi₂O₃, Li₂CO₃를 첨가하여 24시간 재혼합 분쇄, 건조 후 PVA 5 wt%수용액을 8 wt%첨가하고 100 mesh로 조립하였으며, 30×30 mm²의 물더를 사용해 1 ton/cm²의 힘을 가해 일축 성형하였다. 성형된 시편은 600 °C에서 3시간 동안 burn-out 하였으며, 950 °C의 온도에서 2시간 동안 소결하였다. Ring-dotg형 압전변압기를 제작하기 위하여 27×27×2.6 mm³의 크기로 연마하고, 압전변압기의 입력부와 출력부의 정전용량을 변화시키기 위해 Ag전극을 출력부인 dot직경을 15~17 mmΦ (PT1, PT2, PT3)로 변화시켜 단판형 압전세라믹스의 양면에 screen printing법으로 도포하였다. 도포된 전극은 600 °C에서 10분간 열처리 하고, 120 °C의 실리콘유에서 DC 25 kV/cm의 전계를 가해 30분 동안 분극처리 하였다. 그림 1은 제작된 압전변압기의 구조를 나타낸 것이다.

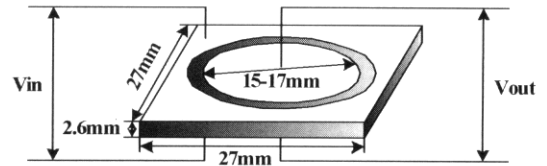


그림 1. 압전변압기의 구조.

Fig. 1. Structure of piezoelectric transformer.

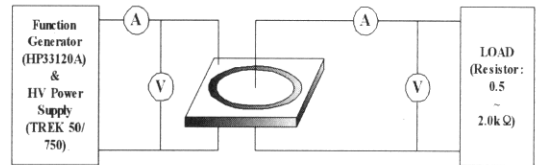


그림 2. 압전변압기(PT)의 구동 및 측정시스템.

Fig. 2. Driving and measuring system for PT.

2.2 측정방법

제작된 압전변압기의 압전특성을 측정하기 위하여 Impedance Analyzer(Agilent 4294A)로 공진 및 반공진 주파수와 공진저항을 측정하여 유효전기기계결합계수(k_{eff})와 기계적품질계수(Q_m)를 산출하였으며, 압전변압기의 전기적특성을 평가하기 위하여 그림 2와 같은 압전변압기의 구동 및 측정 시스템에서 오실로스코프(Tektronix TDS3032)와 전류프로브(Tektronix TCP202)를 사용하여 입력 및 출력측의 전압과 전류를 측정하고 주파수와 부하저항(0.5, 1.0, 1.5, 2.0 kΩ)에 따른 승압특성, 효율을 측정하였으며, 최대출력을 평가하기 위하여 인가전압에 따른 출력전력 및 온도상승특성을 측정하였다.

3. 결과 및 고찰

표 1은 실험에 사용한 압전변압기용 세라믹스의 소결조제와 MnO₂의 첨가에 따른 물성의 변화를 비교한 것이다. 소결조제 및 MnO₂의 첨가에 의해 압전 및 유전특성은 향상되어 0.3 wt%의 CuO와 Bi₂O₃, 0.2 wt%의 Li₂CO₃ 및 0.1 wt%의 MnO₂첨가시 950 °C의 소결온도에서 전기기계결합계수(k_p), 기계적품질계수(Q_m), 유전상수(ε_r), 압전상수(d₃₃), 큐리온도(T_c)는 각각 0.57, 1502, 1503, 356 pC/N, 337 °C의 값을 나타내며, 압전변압기용 저온소결 세라믹스 조성으로서 최적의 특성을 나타내었다.

표 1. 첨가제의 첨가에 따른 물성 비교(950 °C).
Table 1. Comparison of physical properties according to addition of additives(950 °C).

Addition [wt%]	Density [g/cm ³]	kp	Qm	Dielectric constant	d ₃₃ [pC/N]	Tc [°C]
Not addition (1200°C)	7.84	0.52	2199	1182	276	360
+ 0.3[wt%] CuO	7.65	0.48	1869	1246	243	353
+ 0.3[wt%] Bi ₂ O ₃	7.74	0.45	1707	1233	212	350
+ 0.2[wt%] Li ₂ CO ₃	7.90	0.57	1213	1623	376	340
+ 0.1[wt%] MnO ₂	7.75	0.57	1502	1503	356	337

표 2. 압전변압기의 압전특성 및 등가회로상수.
Table 2. Piezoelectric properties and equivalent circuit constant of piezoelectric transformer.

	Input part			Output part		
	PT1	PT2	PT3	PT1	PT2	PT3
f _r [kHz]	72.12	72.46	72.78	71.87	71.53	71.15
f _a [kHz]	76.48	76.43	76.22	76.51	76.44	76.23
R[Ω]	4.82	6.21	8.23	6.56	6.03	5.86
C ₀ [nF]	2.45	2.17	1.94	1.53	1.84	2.12
k _{eff}	0.33	0.32	0.30	0.34	0.35	0.36
Q _m '	1688	1612	1553	1877	1614	1398
Z _{out} [Ω]	-			1448	1210	1056

표 2는 제작된 압전변압기의 압전특성 및 등가회로상수를 나타낸 것이다. 압전변압기의 출력부인 dot직경이 증가함에 따라 입, 출력부의 반공진주파수는 일치하고 있으나 입력부의 공진주파수는 압전변압기의 입력전극부가 감소함에 따라 점차 감소하는 특성을 나타냈다. 일반적으로 장방향 윤곽진동모드에서 압전세라믹스의 공진 주파수는 다음 식으로 나타낼 수 있다[12].

$$f_r \propto \frac{1}{2L} \sqrt{\frac{Y}{\rho(1-\sigma)}} \quad (1)$$

여기서, ρ는 밀도, σ는 Poissons ratio, Y는 Youngs module이고, L은 소자의 한변의 길이이다. 소자에 ring과 dot전극을 형성하여 ring부분에서의 공진주파수를 유도하기 위해서는 전면전극을 도포한 상태와는 다소 달라지며, 이때의 공진주파수는 식 (1)에 비례상수 G를 추가해야 한다. 비례상수를 추가하여 정리하면 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$f_r = \frac{G}{2L} \sqrt{\frac{Y}{\rho(1-\sigma)}} \quad (2)$$

여기서, G는 출력부/입력부의 전극면적비에 의존하는 비례상수이다. 즉, 입력측 공진주파수의 증가는 진동을 유기 할 수 있는 전극면적이 감소되어 점차 증가하고 있음을 알 수 있다. 또한, 출력부의 유효전기기계결합계수(k_{eff})가 증가하는 반면에 입력부의 유효전기기계결합계수가 감소하는 이 유도 전극면적비의 증가에 의한 공진주파수의 증가에 기인한 것으로 생각할 수 있다. 입력부의 기계적품질계수(Q_m')는 전극면적비가 증가함에 따라 입력부의 정전용량은 감소하지만, 공진저항이 크게 증가하여 감소하는 특성을 나타냈고, 출력부는 공진저항의 감소에 비해 정전용량의 증가가 크게되어 점차 감소하는 특성을 나타내며 유효전기기계결합계수와 반대의 경향을 나타냈다. 압전변압기의 구동시 발열의 관점에서 볼때, 진동을 발생시키는 입력측에서 PT1이 가장 높은 값을 보이며 가장 안정적인 특성을 나타내었고, 출력측 임피던스는 정전용량의 증가로 인해 점차 감소하는 특성을 나타냈다.

그림 3은 입력전압을 일정하게 유지한 상태에서 부하저항과 주파수에 따른 압전변압기의 승압특성을 나타낸 것이다. 최대 승압비는 공진주파수 부근에서 나타났으며, 전극면적비가 증가함에 따라 입력측의 공진주파수가 증가하기 때문에 최대 승압비는 다소 높은 주파수로 이동하는 특성을 보였다. 또한, 부하저항의 증가에 따라 승압비는 증가하는 특성을 보였고, 이에 따라 2차측의 탄성진동이 증가하여 최대 승압비는 다소 높은 주파수에서 나타났으며[13], 전극면적비가 증가함에 따라 승압비는 입력부의 유효전기기계결합계수의 감소와 출력측의 임피던스의 감소로 점차 감소하는 특성을 나타냈다. 형광등과 같은 고출력을 요하는 부하는 점등전에 무부하와 같이 높은 저항값을 보이고, 점등후에는 관의 직경과 길이에 관계된 저항값을 나타낸다. 35 W(T5)의 경우, 점등개시전압은 380 V이고 정격전압과 정격전류는 각각 209 V, 170 mA의 값을 나타내며, 32 W의 경우, 점등개시전압은 270 V이고 점등후 정격전압과 정격전류는 137 V, 265 mA이며, 28 W(T5)의 경우, 점등개시전압은 357 V이고 정격전압, 정격전류는 167 V, 170 mA이다. 표 3에 각 형광등의 정격특성을 나타내었다. 따라서, 점등 후 각 형광등의 저항은 약 1.5, 0.5, 1.0 kΩ

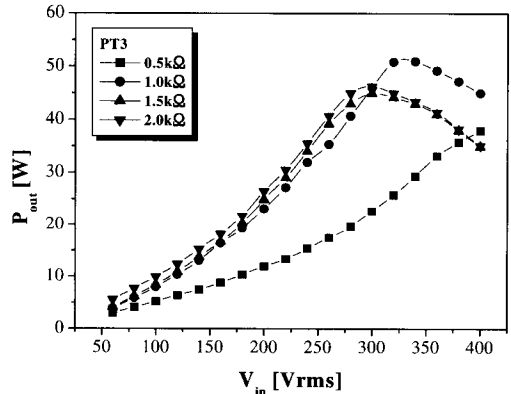
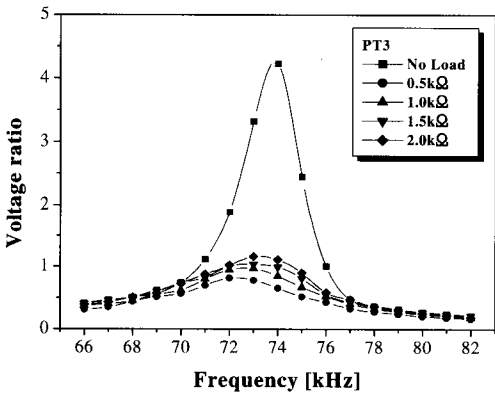
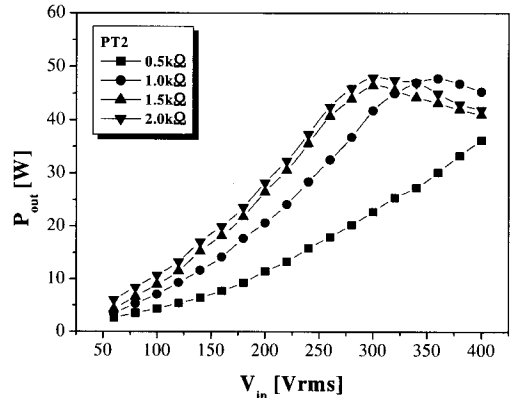
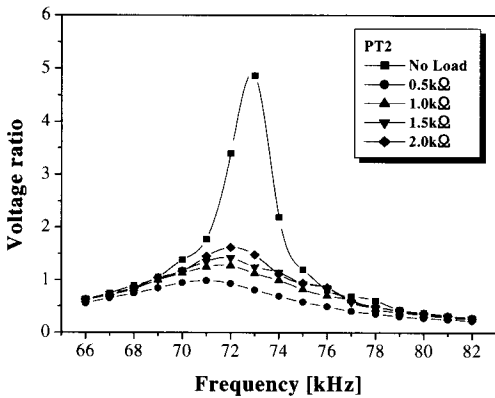
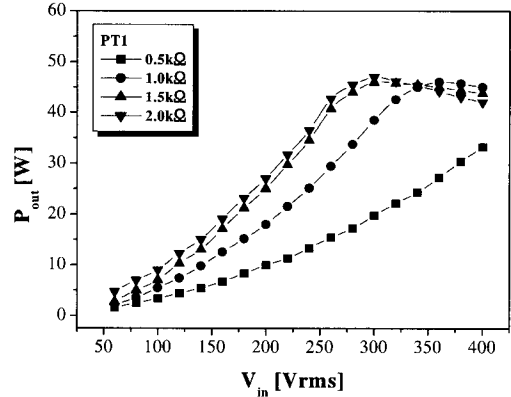
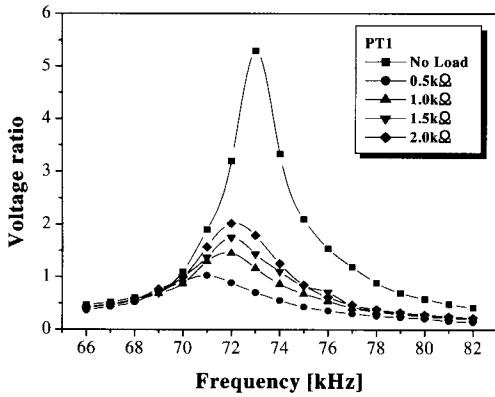


그림 3. 구동주파수에 따른 전압비.
Fig. 3. Voltage ratio with driving frequency.

그림 4. 입력전압에 따른 출력전력.
Fig. 4. Output power with input voltage.

의 값을 나타내며, 220 V의 입력전압을 구동전압으로 하는 경우, 점등개시시에 35 W(T5), 32 W, 28 W(T5) 형광등의 무부하시에 승압비는 각각 1.72, 1.22, 1.62배 이상이 되어야 하고 점등 후에는 각각 0.95, 0.62, 0.75배 정도가 되어야 한다. 본 실험

에서 제작한 PT1, PT2, PT3압전변압기는 무부하시에 4배 이상의 승압특성을 보였고, 각 부하저항에 대하여 위의 조건을 만족하는 특성을 보였다. 표 4에 부하저항에 따른 압전변압기의 승압비를 나타내었다.

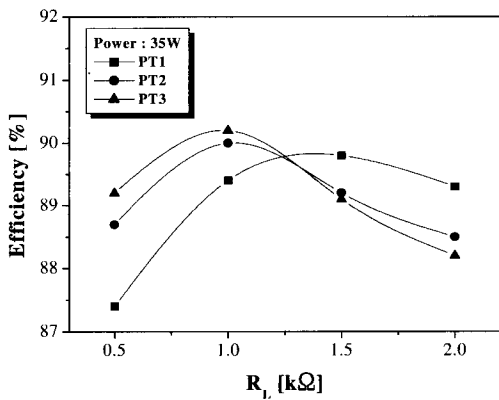
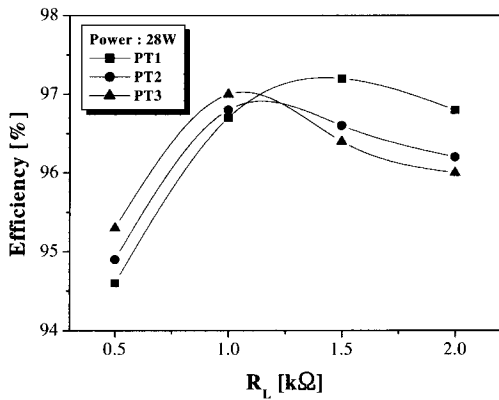


그림 5. 부하저항에 따른 효율.
Fig. 5. Efficiency with load resistance.

그림 4는 압전변압기의 공진주파수에서 입력전압과 부하저항에 따른 출력전력을 나타낸 것이다. 압전변압기의 입력전압과 부하저항이 증가함에 따라 출력전력도 증가하는 특성을 나타냈다. 부하저항이 증가함에 따라 출력전력이 증가하는 것은 부하저항에 따른 승압특성에서 알 수 있듯이, 부하저항이 증가함에 따라 승압비가 증가하여 일정한 입력전압하에서 부하저항이 클수록 보다 높은 출력전력을 얻는 것으로 생각되며, 부하저항의 증가에 따라 출력전류의 감소로 전력의 증가폭이 감소하였다. 또한, 전극면적비가 증가함에 따라 출력측 정전용량의 증가로 인한 압전변압기의 출력측 임피던스가 감소하여 출력전력은 1.5 kΩ, 2 kΩ의 부하인 경우, 출력측 dot직경이 증가함에 따라 점차 감소하는 특성을 나타내었고, 1 kΩ의 부하인 경우, 출력측 임피던스와 부하저항의 크기가 점차 같아지면서 점차 증가하는 특성을 나타냈으며, 0.5 kΩ

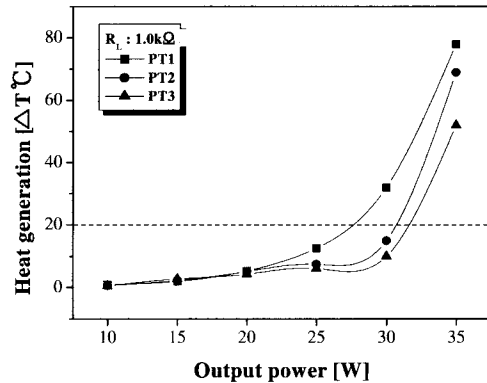


그림 6. 출력전력에 따른 온도상승.
Fig. 6. Temperature increase with output power.

표 3. 형광등의 정격특성.

Table 3. Regular properties of fluorescent lamp.

FL (T5)	점등개시전압 [V]	정격전압[V]	정격전류[mA]	저항 [Ω]	220 V 입력시 점등전승압비	220 V 입력시 점등후승압비
28 W	357	167	170	1.0 k	1.62	0.75
32 W	270	137	265	0.5 k	1.22	0.62
35 W	380	209	170	1.5 k	1.72	0.95

표 4. 부하저항에 따른 압전변압기의 승압비.

Table 4. Voltage ratio of PT according to load resistance.

PT	0.5 kΩ	1.0 kΩ	1.5 kΩ	2.0 kΩ	no load
PT1	1.02	1.45	1.75	2.02	5.30
PT2	0.98	1.27	1.42	1.62	4.87
PT3	0.81	0.96	1.03	1.16	4.23

의 부하인 경우에는 낮은 입력전압에서는 거의 같은 크기를 나타내다가 입력전압이 증가할수록 높은 전력특성을 나타냈다. 또한, 각 부하에 대하여 최대전력은 한계치를 나타내며 열발생에 의한 손실에 의하여 점차 감소하는 특성을 보였다. 따라서, 압전변압기의 입력전압에 대한 출력전력은 승압비에 의한 특성과 출력측 정전용량의 변화에 의한 압전변압기의 출력측 임피던스와 부하저항의

크기에 크게 의존하는 것으로 판단되며, 온도상승에 의한 출력전력의 손실을 방지하기 위해서는 낮은 구동전압하에서 형광등 램프를 구동하는 것이 중요하며, 제작된 Ring-dot형 압전변압기는 부하의 건지에서 볼때 정상상태에서 1.5 k Ω 과 1 k Ω 의 부하를 갖는 35 W(T5)와 28 W(T5) 형광등에 적합할 것으로 판단된다.

그림 5는 각각 출력전력을 28 W와 35 W로 일정하게 유지한 상태에서 부하저항에 따른 압전변압기의 효율을 측정한 것이다. PT1의 경우, 부하저항이 1.5 k Ω 에서 가장 높은 효율을 나타내었고 PT2와 PT3는 1 k Ω 에서 가장 높은 효율을 나타내었다. 이러한 결과는 압전변압기의 출력측 임피던스가 부하저항과 일치할 때 최대의 효율을 나타낸다는 기존의 연구결과로 볼때 표 2에서 알 수 있듯이, 각각 1448, 1210, 1056 Ω 의 출력임피던스를 나타낸 PT1, PT2, PT3의 특성과 일치함을 알 수 있다. 또한, 35 W에서의 효율은 28 W에서의 효율 특성과 비교해 매우 낮은 값을 나타내고 있는데 이것은 압전변압기가 안정적으로 동작되는 출력전력의 크기를 초과하여 온도상승에 의한 손실의 증가로 효율이 크게 감소한 것으로 생각된다. 따라서 최대전력전달 효율을 얻기 위해서는 압전변압기의 출력측 임피던스와 부하저항과의 정합이 중요할 것으로 판단되며, 측정결과로 볼때 28 W(T5)에서 가장 안정적인 구동을 할 것으로 생각된다.

그림 6은 효율측정 결과에서 가장 안정적인 구동특성을 나타낸 1 k Ω 의 부하저항을 사용하여 각 출력전력에서 20분간 구동후에 측정된 온도상승의 결과를 나타낸 것이다. 압전변압기의 온도는 출력전력이 증가함에 따라 증가하는 특성을 나타내었고 출력측 임피던스가 부하저항에 비해 큰 압전변압기가 보다 높은 온도상승을 나타내었다. 이러한 결과는 출력전력의 증가에 따른 출력전류의 증가에 의하여, 일반적으로 출력전류에 비례하는 진동변위의 크기가 증가하여 이에 따라 진동속도의 증가에 의한 기계적손실이 증가한 것으로 볼 수 있다[14]. 또한, 모든 압전변압기는 20 W까지는 거의 같은 온도상승을 나타내다가 25 W부근에서부터 PT2와 PT3에 비해 PT1의 온도상승이 크게 나타난 것은 효율측정 결과에서 알 수 있듯이 압전변압기의 출력임피던스가 부하저항과 일치하지 않기 때문인 것으로 생각된다. 압전변압기의 허용 발열량을 20 $^{\circ}\text{C}$ 이내의 범위로 볼때, PT2와 PT3는 30 W를 최대출력으로 볼 수 있으며, 1 k Ω 의 부하저항을 갖는 28 W(T5) 형광등에 적용 가능할 것으로 판단된다.

4. 결론

본 연구에서는 저온소결 압전변압기를 개발하기 위해 950 $^{\circ}\text{C}$ 의 소결온도에서 최적의 압전 및 유전 특성을 나타내는 압전세라믹스 조성을 이용하여 Ring-dot형 압전변압기를 간이적으로 제작하고, 부하저항에 따른 압전변압기의 전기적 특성을 검토하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 압전변압기의 승압비는 입력측의 공진주파수 부근에서 최대값을 나타내었고 부하저항의 증가에 따라 증가하는 특성을 나타내었으며, 압전변압기의 출력임피던스와 부하저항이 일치할수록 낮은 입력전압에서 높은 출력을 보였다.
- (2) 압전변압기의 출력임피던스와 부하저항이 일치할수록 높은 효율을 나타내었고, 28 W에서 모든 압전변압기가 95 %이상의 효율을 나타내었다.
- (3) 부하저항과 일치하는 출력임피던스를 보인 압전변압기는 30 W이하에서 20 $^{\circ}\text{C}$ 이내의 온도상승을 보이며 안정적인 동작특성을 나타내었다.

이상의 결론으로부터 저온소결 압전변압기는 승압비, 입력전압에 따른 출력전력, 효율, 온도상승에 있어서 매우 안정적인 동작특성을 나타내었으며 추후 저온소결 적층형 압전변압기로의 적용가능성을 나타내었다.

감사의 글

본 연구는 2002년도 산자부 전력산업연구개발사업(과제번호 : R-2002-B-249)의 지원으로 연구되었으며, 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] S. Hirose, N. Magami, and S. Takahashi, "Piezoelectric ceramic transformer using piezoelectric lateral effect on input and output", *Jpn. Appl. Phys.*, Vol. 35, No. 5B, p. 3038, 1996.
- [5] J. Yoo, K. Yoon, Y. Lee, S. Suh, J. Kim, and C. 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.
- [6] 이용우, 류주현, 윤광희, 정희승, 서성재, 김중선, "PSN-PZT계 세라믹스를 이용한 고출력 압 전트랜스포머의 전기적 특성", *한국전기전자재료학회논문지*, 13권, 4호, p. 286, 2000.
- [7] T. Endow and S. Hirose, "Multilayered piezoelectric transformers for small power supplies", *Jpn. Appl. Phys.*, Vol. 42, No. 9B, p. 6128, 2003.
- [8] 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.
- [9] R. Zno, L. Li, and Z. Gui, "Modified cofiring behaviors between PMN-PNN-PZT piezoelectric ceramics and PZT-doped 70Ag-30Pd alloy metallization", *Mat. Sci. Eng.*, Vol. A326, p. 202, 2002.
- [10] C.-W. Ahn and K. Uchino, "Effect of CuO and ZnO additives on sintering temperature and piezoelectric properties of $0.41\text{Pb}(\text{Ni}_{1/3}\text{Nb}_{2/3})\text{O}_3$ - 0.36PbTiO_3 - 0.23PbZrO_3 Ceramics", *Jpn. J. Appl. Phys.*, Vol. 43, No. 1, p. 205, 2004.
- [11] K. Shiratsuyu, K. Hayashi, A. Ando, and Y. Sakabe, "Piezoelectric characterization of low-temperature-fired $\text{Pb}(\text{Zr,Ti})\text{O}_3$ - $\text{Pb}(\text{Ni,Nb})\text{O}_3$ Ceramics", *Jpn. J. Appl. Phys.*, Vol. 39, No. 9B, p. 5609, 2000.
- [12] 박창엽, "압전 세라믹스", 김영사, p. 203, 1987.
- [13] 栗祐一, "壓電セラミックス用素子の考察", *日本音響學會誌*, 32卷, 8號, p. 470, 1976.
- [14] Y. Gao, Y. Chen, J. Ryu, K. Uchino, and D. Viehland, "Eu and Yb substituent effects on the properties of $\text{Pb}(\text{Zr}_{0.52}\text{Ti}_{0.48})\text{O}_3$ - $\text{Pb}(\text{Mn}_{1/3}\text{Sb}_{2/3})\text{O}_3$ ceramics: Development of a new high-power piezoelectric with enhanced vibrational velocity", *Jpn. J. Appl. Phys.*, Vol. 40, No. 2A, p. 687, 2001.