

## 디스크형 압전 변압기의 전기적 특성

### Electric Characteristics of Disk-type Piezoelectric Transformer

김동수<sup>1,a</sup>, 김광일<sup>1</sup>, 김홍락<sup>1</sup>, 정우철<sup>1</sup>, 남효덕<sup>2</sup>

(Dong-Soo Kim<sup>1,a</sup>, Kwang-Il Kim<sup>1</sup>, Heung-Rak Kim<sup>1</sup>, Woo-Cheol Jeong<sup>1</sup>, and Hyo-Duk Nam<sup>2</sup>)

#### Abstract

In this study, a step-down piezoelectric transformer was fabricated to utilize as an adapter for charging batteries of mobile electronic appliances. The ceramic part of the transformer is  $Pb[(Mn_{1/3}Sb_{2/3})_{0.05}Zr_{0.475}Ti_{0.475}]O_3$  with mechanical quality factor of 1600, electromechanical coupling coefficient 59 %, and piezoelectric constant  $d_{33}$  1300, which can be utilized as a piezoelectric transformer. A simply fabricated disk-typed test pattern of diameter 28 mm and thickness 2 mm was used to characterize output voltage, step-down ratio as a function of electrode area with the input remained constant, and power, efficiency as a function of input voltage, and temperature-dependent electric characteristics were evaluated. The sample APT1 showed the best properties. The highest admittance, effective electromechanical coupling coefficient and an appropriate mechanical quality factor were obtained at the sample with the input/output area ratio of 1:1.5 at the common electrode, and the condition of 20 V<sub>rms</sub>, 50 Ω made the maximum efficiency of 95 %. The temperature was increased by 14.7 °C as the input voltage was increased for 50 V<sub>rms</sub>, 50 Ω.

**Key Words** : Piezoelectric transformer, Step-down, Piezoelectric ceramic, Disk type

#### 1. 서 론

압전 변압기는 하나의 압전소자에 입력부와 출력부가 구성되어 있고, 이들은 전기적으로 절연되어 있으나 역학적으로는 서로 연결되어 있는 상태이다. 입력부에 인가된 전기에너지가 압전 역효과에 의해 역학적인 진동으로 나타나고, 이러한 역학적 진동이 출력부에서 압전 정효과에 의해 전기적인 에너지로 변환되는 것이 압전 변압기의 기본 동작 원리이다. 압전형 변압기는 권선형 변압기에 비해 에너지밀도가 높기 때문에 작게 만들 수 있고, 세라믹이므로 불에 타지 않으며, 전자기장에

의한 노이즈가 없는 장점을 갖고 있어, LCD(liquid crystal display)의 back-light unit와 FPD(flat panel display) 등에 고전압 발생용 압전 변압기가 응용되고 있다[1,2]. 압전 변압기 응용은 승압과 함께 강압효과로 각종 Converter나 Adapter가 있다. 휴대용 정보 처리 장비에 가장 큰 비중을 차지하는 전원부의 전자기 변압기를 압전변압기로 대체하므로 부피와 무게를 줄여 소형화하기 위해 많은 연구개발이 진행되고 있다[3-5].

입력부와 출력부사이의 에너지 전달은 기계적 에너지에 의해 이루어지므로 입력부와 출력부의 접촉부에 응력이 집중된다. 그러므로 로젠형 변압기의 원리를 이용한 강압용 압전변압기를 구성할 경우 입력측과 출력측의 접촉부가 좁으므로 이 부위에 응력이 집중하게 되어 기계적으로 견고하지 못하며[6], 길이 방향 전기기계결합계수  $k_{31}$  가 경방향 전기기계결합계수  $k_p$ 에 비해 낮은 특성이 있다[7].

1. 포항산업과학연구원 센서·시스템연구실  
(경북 포항시 남구 효자동 산 32)  
2. 영남대학교 전자공학과  
a. Corresponding Author : kidosu@rist.re.kr  
접수일자 : 2005. 9. 1  
1차 심사 : 2005. 9. 22  
심사완료 : 2005. 9. 29

본 연구에서는 모바일 전자제품의 배터리 충전용 Adapter로서의 응용 가능성을 고찰 하고자 기계적 품질계수가 높은 Hard계 PMS-PZT계의 압전 세라믹스를 이용[8]하여 입력부와 출력부의 분극방향을 동일하게 하여 고 전계 인가시 압전체가 결합으로 파괴되지 않도록 하고 비교적 제작이 용이한 단일층의 디스크 타입의 압전변압기를 제조하였다. 제조된 압전 변압기는 입·출력 전극의 면적비와 부하의 변화에 따른 전기적 특성을 조사하였다.

## 2. 실험

### 2.1 시편 제조

압전변압기에 사용되는 재료는 High-power로 구동 되는 Hard계 압전 세라믹이 일반적이다. Hard계 압전 세라믹의 화학조성으로는 티탄산 지르콘산납계 세라믹(PZT)을 기본으로 압전 변압기 용으로 적합한 특성을 가질 수 있도록 제3성분이나 첨가물로 물성을 개선한 재료가 사용되는데 전기기계결합계수(k)와 기계적품질계수(Q<sub>m</sub>)가 큰 재료가 적절하다. 실용적인 관점에서 대전폭 구동시 발열, 기계적 피로가 적고, 입출력 특성이 우수하여야 한다. 본 실험에서는 이러한 조건을 만족하도록 높은 전기기계결합계수와 기계적품질계수를 가지고 있는 정방정상과 능면체상의 상경계 지점인  $Pb[(Mn_{1/3}Sb_{2/3})_{0.06}Zr_{0.475}Ti_{0.475}]O_3$ 을 기본조성으로 갖는 재료를 선택하였다. 고순도의 PbO, ZrO<sub>2</sub>, TiO<sub>2</sub>, Mn<sub>3</sub>O<sub>4</sub> 및 Sb<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 원료분말을 24시간 습식 혼합한 후 건조하였다. 건조된 분말은 850 °C에서 2시간 동안 하소하였다. 하소한 분말을 재분쇄한 후, 2 wt% PVA를 첨가하고, 2 Ton/cm<sup>2</sup>의 압력을 가하여 그림 1과 같은 원판형으로 성형하였다. 성형체에 포함된 유기물들은 550 °C의 온도를 5시간 동안 유지하여 제거하였다. 소결은 1200 °C에서 2시간 동안 분위기 분말 속에서 행하였다. 소결된 시편은 직경은 28 mm, 두께는 2 mm이다. 전극은 Ag(Dupont #7059)를 사용하여 실크 스크린을 이용 그림 1과 같이 도포한 후 열처리 하였다. 입력측과 출력측의 임피던스는 내부와 외부 전극 면적 비를 변화시키기에 따라 조절 가능하므로, 적절한 전극 면적에 대한 검토를 위하여 전극의 입력부는 지름이 16 mm이며, 출력부는 내경이 20 mm, 22 mm 두 가지로서 입출력 면적비를 각각 1 : 1.5, 1.17로 하였다. 또한 입력부와 출력부의 전극 구조는 그림 1과 같이 상, 하면이 서로 대칭을 이루고 있어서 입출력이 완전히 분리된 디스크 형태로 제작된 압전

표 1. 압전 세라믹의 특성.

Table 1. Properties of Piezoelectric ceramic

Properties	Value
Input Capacitance [C]	1.18 nF
Bulk density [ρ]	7.7 g/cm <sup>3</sup>
Dielectric Constant [ε <sub>r</sub> ]	1300
coupling factor [k <sub>p</sub> ]	59 %
Mechanical quality factor, [Q <sub>m</sub> ]	1600

표 2. 압전 변압기의 치수 및 정전용량.

Table 2. Dimensional specification and Capacitance of piezoelectric transformers.

	APT1	APT2	BPT1	BPT2
X [mm]	20	22	20	22
입력[mm]	16			
C <sub>in</sub> [nF]	1.18		1.04	
C <sub>out</sub> [nF]	1.86	1.52	1.56	1.27
area ratio	1.5	1.17	1.5	1.17

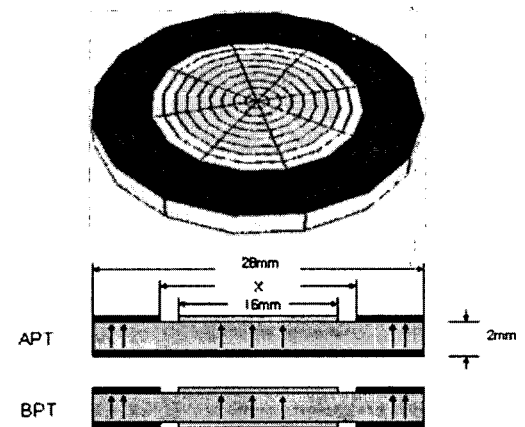


그림 1. 디스크형 압전변압기.

Fig. 1. Disk-type piezoelectric transformer.

변압기를 BPT라 칭하고, 아래쪽 전극을 공동단자로 사용하는 형태를 APT라 칭하였다. 분극은 시편의 두께 방향으로 2.5 kV/mm의 직류 전계를 20분 동안 인가하여 분극 하였으며, 이때 온도는 150 °C로 하였다. 제작된 압전 변압기의 기본 물성값과 치수를 표 1과 표 2에 나타내었다.

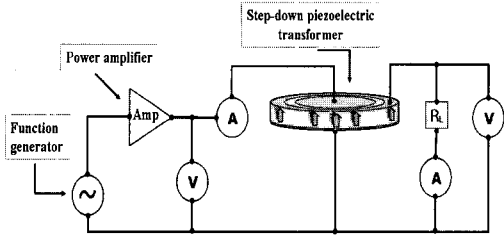


그림 2. 압전변압기 특성측정회로 블록 다이어그램.  
Fig. 2. Block diagram of piezoelectric transformer driving circuit.

### 2.2 실험 방법 및 측정

본극 처리된 APT와 BPT 압전변압기는 Frequency Response Analyzer(NF, FRA5096)를 이용하여 공진, 반공진주파수 및 임피던스를 측정하였고 전기기계결합계수 및 기계적품질계수가 계산되었다. 오실로스코프(Tektronix, TDS3054B)와 전류프루브(Tektronix, A6302)를 이용하여 입력과 출력부의 전압 및 전류를 측정하였으며, 적외선 비접촉식 온도계(OPTEX, Q185)를 이용하여 입력 파워와 부하에 따른 온도특성을 측정하였다. 이 때 출력부의 부하는 5 Ω ~ 500 Ω의 범위에서 점진적으로 변화시키면서 출력특성을 측정할 수 있도록 하였다. 압전변압기의 입력신호는 신호발생기(NF, WF1946A Multifunction Synthesizer)에서 발생한 출력신호를 신호증폭기(NF, HSA 4052 High speed Bipolar Amplifier)를 이용하여 5 V<sub>rms</sub>에서 50 V<sub>rms</sub>까지 5 V<sub>rms</sub> 단위로 변화시키면서 그림 2와 같이 회로를 구성하여 측정하였다.

### 3. 결과 및 고찰

본 연구에서 사용된 PMS-PZT 세라믹의 유전, 압전특성을 표 1에 나타내었다. 보는 바와 같이 Pb[(Mn<sub>1/3</sub>Sb<sub>2/3</sub>)<sub>0.05</sub>Zr<sub>0.475</sub>Ti<sub>0.475</sub>]O<sub>3</sub>는 압전 변압기에 사용될 수 있는 물질로서 높은 압전상수(d<sub>33</sub>), 전기기계적결합계수, 기계적품질 계수를 얻었다.

감압용 압전 변압기의 전극구조는 디스크판의 내부 전극부분에서 발생하는 진동을 출력부인 외부 원판상에 전달되도록 하는 구조를 지니고 있다. 이 때 내부와 외부 전극의 비는 표 2에 나타내었으며 이에 따른 전기적 특성을 조사하기 위하여 주파수 응답 분석기(NF, FRA5096)를 이용하여 무부하시 저전력에서 측정하였다. 감압용 압전 변압

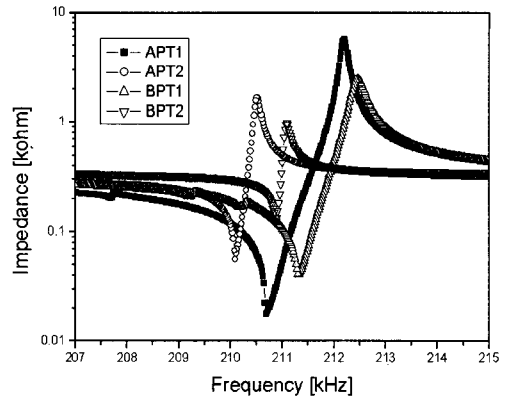


그림 3. 압전 변압기의 임피던스 커브.  
Fig. 3. Impedance curve of piezoelectric transformer with no load resistance.

기의 경우 압전변압기의 부하에 대한 출력비는 주파수의 크기에 비례하므로 높은 주파수에서 구동시킬수록 높은 출력전력과 효율을 얻을 수 있으므로[9], 본 연구에서는 2차모드를 사용하였다. 측정 결과 그림 3에 나타난 것처럼 제작된 압전변압기들의 공진 주파수는 210 kHz ~ 215 kHz 사이에 위치한다는 것을 알 수 있다. 공진 주파수 변화는 전극의 면적과 공동 전극의 배치에는 크게 영향을 받지 않고 소체 크기에 의존한다. 출력측 전극의 면적이 넓을수록 임피던스는 감소하였으며, 전기기계적결합계수 값은 증가하였다. APT와 BPT 샘플의 비교에서 상부 전극을 동일하게 하였을 때는 아래쪽 전극을 공통으로 했을 때(APT)가 임피던스 값이 작고 전기기계적결합계수와 기계적 품질계수 값이 크다. 압전변압기 제작을 위한 소자특성은 APT1 샘플이 가장 우수하였다.

그림 4의 기계적품질계수 및 유효전기기계적결합계수는 주파수응답 분석기에서 측정한 공진 반공진주파수를 이용하여 아래 식 (1)과 (2)에 대입하여 계산된 값을 나타낸 것이다.

$$Q_m = \frac{f_r}{f_2 - f_1} \tag{1}$$

$$k_{eff} = \sqrt{\frac{f_a^2 - f_r^2}{f_a^2}} \tag{2}$$

여기서 f<sub>r</sub>과 f<sub>a</sub>는 공진 주파수와 반공진 주파수 f<sub>1</sub>, f<sub>2</sub>는 최대 어드미턴스로부터 3 dB 아래의 상하주파수이다.

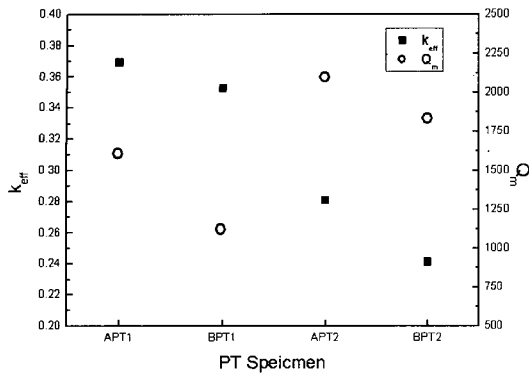


그림 4. 각 샘플의 기계적 품질계수( $Q_m$ ) 및 유효 전기기계결합계수( $k_{eff}$ ).

Fig. 4. Mechanical Quality factors and effective electromechanical coupling coefficient of sample piezoelectric transformers.

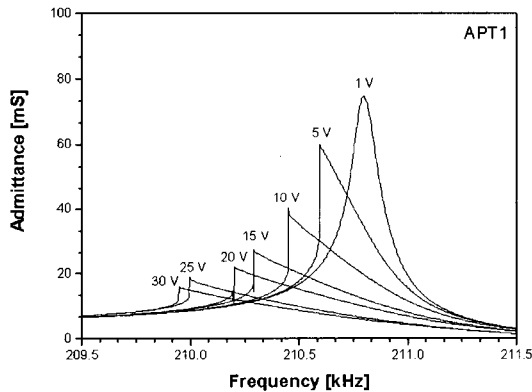


그림 5. 압전 변압기의 어드미턴스 커브.

Fig. 5. Admittance curve of piezoelectric transformer with variable input voltage.

APT1 압전변압기의 무부하에서 측정된 어드미턴스를 그림 5에 나타내었다. 입력측의 전압변화에 따른 공진주파수의 변화를 알아보기 위해서 1 V<sub>rms</sub>에서 30 V<sub>rms</sub> 까지 5 V씩 증가시켜가며 측정하였다. 그림에서 알 수 있듯이 어드미턴스가 최대값을 나타낼 때의 주파수가 공진주파수임을 알 수 있으며 전압이 증가함에 따라 공진주파수는 주파수가 낮은 방향으로 이동하였다. 공진주파수의 평균적인 이동 범위는 150 Hz 정도였다. 또한 주파수가 좌측으로 편이 하는 경향과 함께 어드미턴스는 전압이

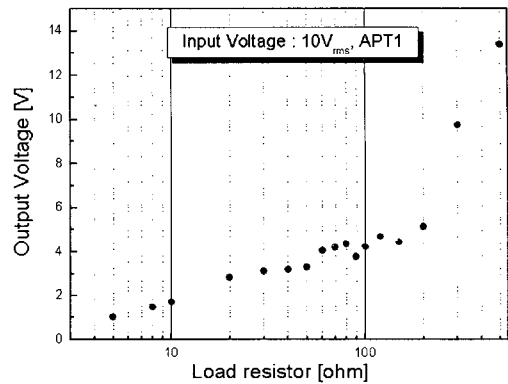


그림 6. 부하 변동에 따른 압전변압기의 출력 전압.

Fig. 6. Output Voltage as a function of load resistance (Input Voltage : 10 V<sub>rms</sub>).

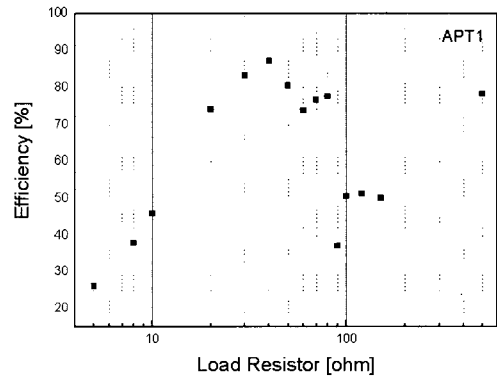


그림 7. 부하 변동에 따른 압전변압기의 효율.

Fig. 7. Efficiency of the transformer as a function of load resistance (Input Voltage : 10 V<sub>rms</sub>).

높아짐에 따라 급격히 감소하고, 어드미턴스 커브의 양상이 주파수가 낮은 쪽에서 급격한 기울기를 나타내다가 완만하게 기울어지는 형태로 나타난다.

강압 응용에 사용을 위해 제작된 디스크형 압전 변압기는 부하에 따른 강압비를 알아보기 위한 실험을 위해 입력전압을 10 V<sub>rms</sub>로 고정하고 부하를 변동시키며 출력전압을 측정하여 그림 6에 나타내었다. 2 Ω에서 200 Ω까지의 강압비는 10:1~2:1의 분포를 나타내었다. 이 때 가해진 입력 전압의 주파수는 그림 5에 나타난 측정 결과를 토대로 10 V<sub>rms</sub>에서 최대 어드미턴스 값을 나타낸 210.5 kHz 이었다.

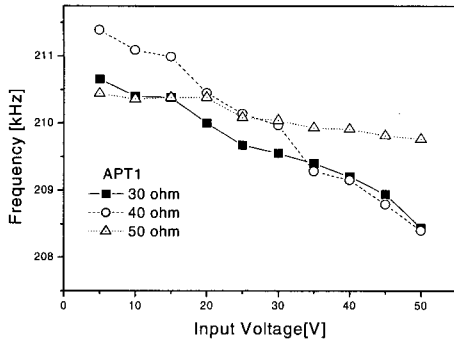


그림 8. 입력전압에 따른 공진주파수의 변화(부하 저항 : 30, 40, 50 Ω).

Fig. 8. Characteristic of resonant frequency with input voltage(load resistance : 30 Ω, 40 Ω, 50 Ω).

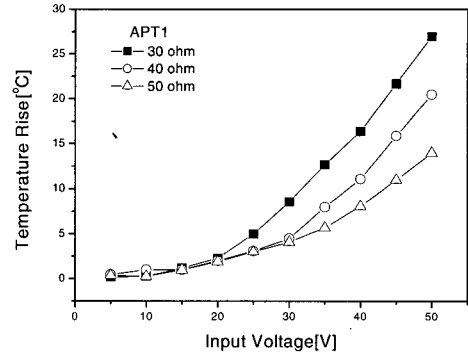


그림 10. 부하별 입력 전압에 따른 온도 상승.

Fig. 10. Temperature rise distribution of input voltage.

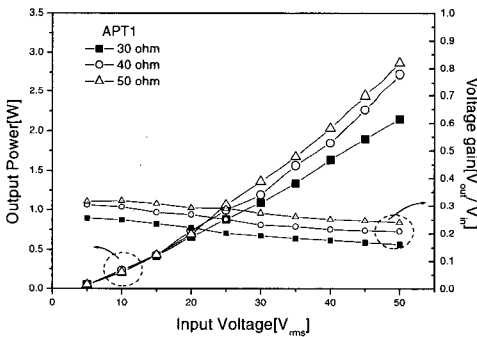


그림 9. 입력전압에 따른 출력파워 및 강압비.

Fig. 9. Output power and step-down ratio of the transformer as a function of Input voltage(resistance : 30, 40, 50 Ω).

강압이 이루어지는 부하들 중에 1차적으로 저전력에서 실험을 통하여 그림 7에서 보는 바와 같이 부하에 따른 효율을 계산한 결과 부하저항 40 Ω에서 최대효율을 보였다. 계산된 효율을 보면 10 Ω이하의 낮은 저항과 90 Ω이상의 높은 저항에서는 공진주파수가 40 Ω일 때의 공진주파수와는 크게 어긋난다는 것을 알 수 있다.

입력 전압에 따른 주파수의 편이와 함께 그림 6에서 확인한 것처럼 출력측의 부하변동에 따른 주파수 편이에 대하여 측정하였다. 실험은 입력전압을 5 V<sub>rms</sub>에서 5 V<sub>rms</sub>씩 점진적으로 증가시키면서 50 V<sub>rms</sub>까지 측정하였다. 출력 효율이 좋은 30, 40,

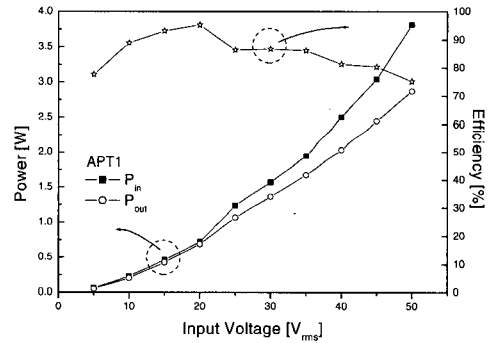


그림 11. 입력력 파워와 효율.

Fig. 11. Power and efficiency of transformer.

50 Ω의 부하에 대하여 실험을 하였으며, 전압을 변화시킬 때 마다 임피던스 특성곡선을 통하여 공진주파수를 찾았다. 실험 결과 그림 8과 같이 각 부하에 대하여 공진주파수는 30 Ω과 40 Ω일 때 각각 2.2 kHz, 3 kHz정도 이동하였으며 50 Ω일 때는 0.7 kHz정도로 이동하였다. 이는 인가전압이 증가하면서 압전변압기가 대진폭 구동되어 공진주파수(fr)의 쉬프트, Q<sub>m</sub>의 감소, 낮은 Q<sub>m</sub>에 기인하는 열 발생 등[10,11]으로 인한 유전 및 압전특성이 변화하면서 나타난 결과로 해석 할 수 있다. 실험 결과 부하 50 Ω일 때 주파수 안정도가 가장 우수하다는 것을 알 수 있다.

그림 9는 출력이 최대가 되도록 입력전압과 부하에 따라 변동하는 공진주파수를 고려하여 부하 저항에 따라 입력전압 값을 변화시키면서 전압이

득과 출력과워 변화를 나타낸 것이다. 여기서 전압이득은 입력전압에 대한 출력전압의 비로 정의된다. 전압이득은 부하 50 Ω일 때 가장 크며, 입력전압이 증가함에 0.32에서 0.24까지 점진적으로 감소하였다. 출력 파워는 부하 50 Ω이 가장 크며, 50 V<sub>rms</sub>에서 2.8 W였다.

압전 변압기의 각위치마다 열 분포가 다르므로 온도 측정은 적외선 비 접촉식 온도계의 초점이 입력부의 중심을 향하도록 측정기를 고정하여 측정하였다. 그림 10에서 보는 바와 같이 입력전압 20 V<sub>rms</sub>까지는 온도는 크게 두드러지지 않다가 그 이상의 입력전압을 인가하자 온도가 상승하기 시작하였고 부하 30 Ω에서는 입력전압이 50 V<sub>rms</sub> 일 때 27 °C정도 상승했으며 50 Ω에서는 14.7 °C정도 상승했다. 이러한 발열은 압전변압기 효율의 저하를 가져왔다.

그림 11은 전기적 특성이 가장 양호한 부하 50 Ω일 때 압전변압기의 입출력 파워와 효율을 나타내었다. 50 V<sub>rms</sub>에서 입 · 출력파워는 각각 3.82 W 2.87 W로 나타내었다. 20 V<sub>rms</sub>를 인가하였을 시 최대 효율을 나타내었으며, 이때 효율은 95 %였다. 20 V<sub>rms</sub> 이후 효율의 감소는 열로 인한 손실로 보인다.

#### 4. 결 론

본 연구는 두께가 2 mm이며 지름이 28 mm인 비교적 간단히 제작할 수 있는 단일층의 디스크형 압전변압기를 제작하였다. 제작된 압전 변압기는 강압용으로써 모바일 전자제품의 배터리 충전용 Adapter로서의 응용 가능성을 고찰하고자 전극의 배치와 면적을 달리하여 실험을 수행한 결과에 대하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 압전변압기 제작을 위한 소자특성은 기계적품질 계수, 전기기계결합계수 및 어드미턴스 값이 큰 APT1 샘플이 가장 우수하였다.
2. APT1 압전변압기의 무부하에서 전압이 1 V<sub>rms</sub>에서 30 V<sub>rms</sub> 까지 5 V씩 증가함에 따라 공진 주파수는 낮은 방향으로 평균 150 Hz정도씩 이동하였다. 이 때 어드미턴스는 급격히 감소하고, 주파수가 낮은쪽에서 급격한 기울기를 나타내다가 완만하게 기울어지는 형태로 나타났다.
3. 부하변동에 따른 주파수 변화는 50 Ω 일 때 가장 안정적이며, 0.7 kHz정도 이동하였다.
4. 입력전압에 따른 온도는 20 V<sub>rms</sub>까지는 크게 두

드러지지 않다가 그 이상에서 온도가 상승하기 시작하여 입력전압이 50 V<sub>rms</sub> 일 때 30 Ω과 50 Ω에서 각각 27 °C, 14.7 °C정도 상승했다.

5. 본 연구에서 제작된 압전변압기의 최적의 부하라 할 수 있는 50 Ω에서 최대 전압이득과 출력 파워를 나타내었으며, 50 V<sub>rms</sub>에서 입 · 출력파워는 각각 3.82 W 2.87 W이다. 20 V<sub>rms</sub>에서 95 %의 최대효율을 보였다.

#### 참 고 문 헌

- [1] M. Shoyama, K. Horikoshi, T. Ninomiya, T. Zaitso, and Y. Sasaki, "Steady - state characteristics of the push - Pull piezoelectric transformer inverter", IEEE PESC '97 Record, p. 715, 1997.
- [2] M. Yamamoto, Y. Sasaki, T. Inoue, A. Ochi, and S. Hamamura, "Piezoelectric transformer for 30 W output AC-DC converters", IEEE ISAF2002, Proc., p. 347, 2002.
- [3] K. Ishii, N. Akimoto, S. tashiro, and H. Igarashi, "Analysis of nonlinear phenomena in piezoelectric ceramics under high-power vibration", J. Ceram. Soc. Jpn., Vol. 106, No. 6, p. 555, 1998.
- [4] S. Hamamura and T. Zaitso, "AC- DC converter using piezoelectric transformer", NEC Technical Journal, Vol. 51, No. 4, p. 92, 1998.
- [5] T. Zaitso, Y. Fuda, Y. Okabe, T. Ninomiya, S. Hamamura, and M. Kat suno, "New piezoelectric transformer converter for AC-adapter", IEEE APEC '97 Proc., p. 568, 1997.
- [6] K. Uchino, B. Koc, P. Laoratankul, and A. Vazquez Carazo, "Piezoelectric transformer new perspective", Ferroelectrics, Vol. 264. p. 91, 2001.
- [7] T. W. Choi, C. S. Lee, and S. C. Yoo, "Electrical ceramics", Proc. 2002 Summer Conf. KIEEME, p. 10, 2002.
- [8] D. S. Kim, Y. D. Kim, K. I. Kim, J. H. Sohn, and H. D. Nam, "Output characteristics of the PMS-PZT piezoelectric transformer driving high power amplifier", Proc. 2004

Summer Conf. KIEEME, p. 830, 2004.

- [9] J. h. Hu, "A study on the rectangular-bar-shaped multilayer piezoelectric transformer using length extensional vibration mode", J. J. Applied Physics, Vol. 38, No. 5B, p. 3208, 1999.
- [10] 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", J. J. Applied Physics, Vol. 39, p. 2680, 2000.
- [11] S. Priya, D. Viehland, A. Vazquez Carazo, J. Ryu, and K. Uchino, "High-power resonant measurements of piezoelectric materials: Importance of elastic nonlinearities", J. Applied Physics, Vol. 90, No. 3, p. 1, 2001.