

# 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> 세라믹스를 이용한 변형 Ring/Dot형 압전세라믹 변압기의 감압특성

## Voltage Step-down Characteristics of Modified Ring/Dot-type Piezoelectric Transformer using 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> Ceramics

남성진<sup>1</sup>, 남효덕<sup>2,a</sup>, 손준호<sup>3</sup>, 이준형<sup>4</sup>  
(Sung-Jin Nam<sup>1</sup>, Hyo-Duk Nam<sup>2,a</sup>, Joon-Ho Sohn<sup>3</sup>, and Joon-Hyung Lee<sup>4</sup>)

### Abstract

Voltage step-down characteristics in Ring/Dot type piezoelectric transformer were examined as a function of the area of input electrode when the area of output electrode is fixed. The effects of driving frequency and load resistance on the voltage step-down characteristics were also examined. Voltage gain was greatly dependent on the driving frequency and load resistance, and showed a maximum gain at resonance frequency of the step-down transformer. The frequency where the maximum output voltage appears increased about 0.2% as the load resistance increased from 10 to 150 Ω. As the area of input electrode increased, the voltage gain and the efficiency of the transformer increased. Frequency dependence of efficiency of the step-down transformer revealed a similar tendency with the voltage gain curves. The maximum efficiency remarked 94% when the input voltage and the load resistance were 20 V<sub>rms</sub> and 120 Ω, respectively.

**Key Words** : Piezoelectric transformer, Step-down transformer, Ring/dot type

### 1. 서 론

전기적 에너지를 기계적 에너지로 1차 변환시킨 후 다시 전기적 에너지로 2차 변환시키는 압전 변압기는 권선형 변압기에 비하여 소형, 저 손실, 고 절연성, 고 효율 및 불연성 등의 장점을 가지고 있기 때문에 차세대 전기-전자부품으로 기대되고 있다. 최근의 압전 변압기에 대한 연구 동향은 high Qm, high k, high vibration velocity(v), low loss

등과 같이 압전 재료의 특성을 향상시키는 것[1-4] 뿐만 아니라 cost down면에서의 저온 소성 재료의 개발, 적층화[5,6] 및 전극 pattern[7-12]의 개발 등을 통하여 고 효율의 고 전력용(high power) 압전 변압기 개발에 초점을 두고 있다. 이러한 연구를 통하여 최근에는 전력밀도가 전술한 여러 모델보다 획기적으로 높은 두께방향 적층 변압기가 보고되었다[12]. 이는 radial 진동모드를 이용한 것으로 Rosen type에서의 에너지 변환효율인 k<sub>31</sub>의 약 2배 값을 가지는 k<sub>radial</sub>(=2 · k<sub>31</sub>)을 이용함으로써 최대효율이 98%, 전력밀도는 40 W/cm(1.5 W/g)가 됨을 보고하였다. 전술한 연구들은 모두 저압을 고압으로 바꾸는 승압 변압기에 대한 연구경향으로써 대표적인 실용화 예로 휴대용 컴퓨터의 칼라 LCD 백라이트용 인버터에 압전 변압기가 적용되고 있다.

전기전자기기에는 승압 못지않게 AC-DC adapter 등과 같이 감압을 해야 할 필요성도 상당

1. 영남대학교 대학원 나노시스템공학과  
2. 영남대학교 전자정보공학과  
(경북 경산시 대동 214-1)  
3. 에스테크  
4. 경북대학교 무기재료공학과  
a. Corresponding Author : hdnam@yu.ac.kr  
접수일자 : 2003. 8. 27  
1차 심사 : 2003. 9. 8  
심사완료 : 2003. 10. 9

히 있다. 압전 변압기의 입·출력 단자를 반대로 연결하여 전압을 인가하면 감압이 이루어지지만 대표적인 승압 변압기인 Rosen type의 장방향 압전 변압기의 경우 단자를 반대로 연결하면 구동 전계가 매우 작아 만족할 만한 감압효율을 얻기 어렵다. 따라서 효율 및 성능면에서 우수한 감압 변압기의 개발을 위해서는 Rosen type이 아닌 새로운 구조의 감압형 압전 변압기에 대한 연구가 필요하다 하겠다.

저자들은 입·출력부의 크기가 일정한 변형 ring/dot type의 전극구조를 가진 압전 변압기가 감압특성을 나타냄을 보고 한 바 있다[13]. 이는 cylinder wall electrode 형태의 radial 진동모드와 원판상의 두께 모드진동을 동시에 이용한 것이다. 본 연구에서는 압전 세라믹스의 감압특성을 조사하기 위한 기초 연구로서 구조가 비교적 간단한 변형 ring/dot type의 압전 세라믹스를 제조하고 감압 특성을 조사하였다. 재료는 고 전력 압전 특성이 우수한  $Pb[(Mn_{1/3}Sb_{2/3})_{0.05}Zr_{0.475}Ti_{0.475}]O_3$  조성을 선택하고 입력부의 크기를 변화시킨 동일한 형태의 압전 변압기에서 부하저항과 구동 주파수를 변화시키기에 따른 감압용 변압기의 효율과 전압이득에 대한 특성을 조사하였다.

## 2. 실험방법 및 측정

### 2.1 시편 제조

압전 변압기용 재료로서 적합한 특성을 가지고 저온소결이 가능하여 적층 압전 변압기로 응용 가능할 것으로 판단되는  $Pb[(Mn_{1/3}Sb_{2/3})_{0.05}Zr_{0.475}Ti_{0.475}]O_3$ 을 본 실험의 기본조성으로 선택하였다. 고순도의  $PbO$  (99.5%),  $ZrO_2$  (99.5%),  $TiO_2$  (99.9%),  $Mn_2O_4$  (99%) 및  $Sb_2O_3$  (99.79%)를 출발 물질로 하였다. 조성식에 따라 칭량한 원료분말은 zirconia ball과 함께 polyethylene 병에 넣고 에탄올을 매체로 하여 24시간 습식 혼합한 후 건조하였다. 건조된 분말은 alumina 도가니를 사용하여  $850^{\circ}C$ 에서 2시간 동안 하소하였다. 하소한 분말을 재분쇄한 후, 2 wt% PVA(중합도 #500)를 첨가하고,  $2\text{ ton/cm}^2$ 의 압력을 가하여 원판형으로 성형하였다. 성형체에 포함된 유기물은  $550^{\circ}C$ 에서 5시간 동안 유지하여 제거하였다. 이때 승온 속도는  $33^{\circ}C/h$ 로 하였다. 소결은 alumina 도가니 안에 시편을 넣고  $1200^{\circ}C$ 에서 2시간 동안 행하였으며, 분위기 분말로  $PbZrO_3+10wt\%ZrO_2$ 를 사용하였다. 소결된 시편은 직경이 28 mm이며, 두께는 각각 1.5, 2.0,

3.0 mm로 하였다. 시편의 두께가 1.5, 2.0, 3.0 mm인 경우 각각을 PT-1, PT-2, PT-3로 칭하기로 한다. 은 전극(dupont #7095)은 실크 스크린을 이용하여 그림 1과 같이 도포한 후 열처리 하였다. 입력부와 출력부의 전극구조는 그림에 나타난 것처럼 압전 변압기의 상·하면이 서로 대칭을 이루고 있는 변형 ring/dot type(변형 Rosen type)이다. 출력부는 압전 변압기의 중심에 있으며 전극면적은 일정하다. 그리고 입력부는 가장자리에 위치하며 입력부와 출력부의 사이에 절연층( $R_{gap}$ )이 존재하고 있다. 분극은 상하 출력부를 단락시킨 상태에서 시편의 반경 방향으로  $2.5\text{ kV/mm}$ 의 직류전계를 20분 동안 인가하여 1차 분극처리한 후 같은 조건으로 두께 방향으로 2차분극 하였다. 이때 온도는  $150^{\circ}C$ 로 하였다.

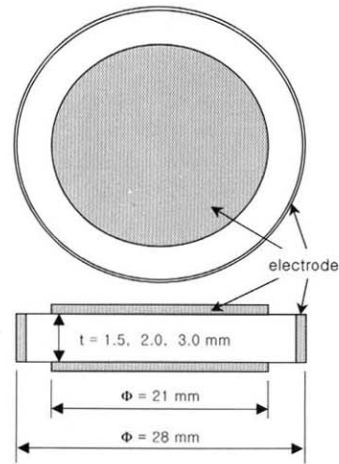


그림 1. 감압용 압전 변압기의 도식도.

Fig. 1. Schematic diagram of step-down piezoelectric transformer.

### 2.2 특성 측정

분극 처리된 시편은 24시간 경과 후, 저 전력에서 각 시편의 유전특성, 공진주파수 및 임피던스를 Impedance gain/phase analyzer(HP 4194A)를 이용하여 측정하였다. 압전 변압기의 전기적 출력 특성은 그림 2와 같이 회로를 구성하여 측정하였다. 3단자 감압용 압전 변압기의 입력전원으로 function/sweep generator (HP 3324A)를 사용하였다. 입력부의 최대전압은 40 Vpp였다. 오실로스코프(Tektronix, TDS 3032)로 전압을 측정하고, 입출력단의 전류는 AC current probe(Tektronix)를

사용하였다. 그리고 출력부의 부하는 무유도성 저항을 이용하여 저항값을 10-150 Ω으로 변화시키면서 감압특성을 측정하였다.

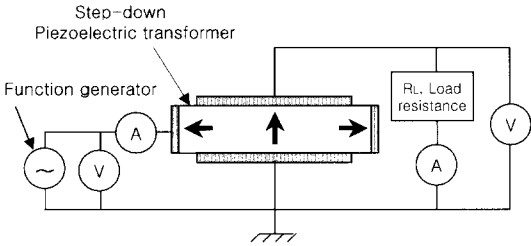


그림 2. 감압용 압전 변압기의 측정회로.

Fig. 2. Circuit for the characterization of step-down piezoelectric transformer.

### 3. 결과 및 고찰

#### 3.1 재료특성

본 연구에서 선택한  $Pb[(Mn_{1.3}Sb_{2.3})_{0.05}Zr_{0.475}Ti_{0.475}]O_3$  은 고 전력에서 압전 특성이 우수한 정방정상과 능면체상의 상경계 지점의 조성이었다. 합성된 분말은 제2상이 존재하지 않는 perovskite 단일상이었다. X-선 회절 분석장치 (M03-XHF, Mac, Japan)으로 분석한 이 조성의 격자정수는  $a=4.031 \text{ \AA}$  및  $c=4.103 \text{ \AA}$ 였으며, 소결체의 상대밀도는 약 97%였다.

표 1.  $Pb[(Mn_{1.3}Sb_{2.3})_{0.05}Zr_{0.475}Ti_{0.475}]O_3$  ceramics의 특성.

Table 1. Properties of  $Pb[(Mn_{1.3}Sb_{2.3})_{0.05}Zr_{0.475}Ti_{0.475}]O_3$  ceramics.

Properties	Symbol	Unit	Value
Bulk density	$\rho$	$g/cm^3$	7.70
Dielectric constant	$\epsilon_r$		1300
Dielectric loss	$\tan\delta$		0.002
Electro-mechanical coupling factor	$k_p$	%	59
	$k_{31}$	%	36
Mechanical quality factor	$Q_m$		1600
Curie Temperature	$T_c$	$^{\circ}C$	320

표 1에는  $Pb[(Mn_{1.3}Sb_{2.3})_{0.05}Zr_{0.475}Ti_{0.475}]O_3$  조성의 기본적인 물성을 조사하기 위하여 직경 20mm, 두께 1mm의 표준시편을 제작한 뒤 측정된 물성을 나타내었다. 유전 및 압전 특성은 저 전력에서 측정되었다. 상온에서의 유전상수는 1300이고 유전손실은 0.002였다. 압전 특성으로서 경방향 진동모드의 전기기계 결합계수  $k_p$ 는 0.59였으며, 기계적 품질계수  $Q_m$ 은 1600이었다. 전계에 대한 변위량을 나타내는 압전 상수  $d_{33}$ 는  $300 \times 10^{-12} \text{ m/V}$ 였으며,  $d_{31}$ 은  $-140 \times 10^{-12} \text{ m/V}$ 였다.

#### 3.2 압전변압기의 감압특성

감압용 압전 변압기의 전극구조는 입력부의 tube wall 전극에서 발생하는 경방향 진동을 출력부인 원판상에 전달하게 설계되었다. 그 결과 출력부인 원판상에 2차 전압이 발생하게 된다. 이러한 전극형태는 일종의 변형 ring/dot 형이라 할 수 있다. 즉, ring 전극부에 인가된 교류전원에 의한 기계적 진동이 dot 전극부에서 전기적 출력 신호로 전달되도록 한 것이라 할 수 있다. 입력부에 압전 변압기의 공진주파수에 해당되는 교류신호를 인가하게 되면, 그때의 경방향 진동 변위는 인가전압과  $d_{31}$ 의 곱으로 나타나며, 또한 두께 방향의 진동 변위는  $d_{33}$ 과 인가전압에 비례하고, tube wall의 두께에 반비례한다. 이러한 진동이 출력부의 원판상 전극에서 전압으로 나타나게 되는 것이다[14]. 표 2는 감압용 압전 변압기에서 저 전력 신호를 인가하였을 때, 입·출력단자의 전극면적, 전기용량, 유효 전기기계 결합계수( $k_p'$ ) 및 기계적 품질계수( $Q_m'$ )를 나타낸 것이다. 여기서  $f_r$ 와  $f_a$ 의 측정값은 상하 출력부를 단락한 상태에서 입력부와 출력부 사이의 측정값으로 하였고, 전기용량의 측정주파수는 1 kHz였다. 여기서  $k_p'$  및  $Q_m'$ 의 계산은 다음 식을 이용하여 구하였다.

$$k_p' = \sqrt{1 - \left(\frac{f_r}{f_a}\right)^2}$$

$$Q_m' = \frac{1}{2\pi f_r Z_c \left[1 - \left(\frac{f_r}{f_a}\right)^2\right]}$$

시편의 직경을 고정하고 두께를 증가시키에 따라 출력단자의 전극면적은 일정한 반면 입력단자의 전극 면적은 PT-1에서 PT-3으로 갈수록 증가하였다. 출력 전력은  $k_p'$  및  $Q_m'$ 가 상대적으로 조

화롭게 큰 값일수록 증가하기 때문에[11] 출력 전력의 크기는 표 2에 나타난  $k_p'$  및  $Q_m'$ 에 의해 추정할 수 있다.

그림 3은 입력전압( $V_{in}$ )이 20 Vpp일 경우의 출력전압의 주파수 의존성을 나타낸 것이다. 이때 부하저항( $R_L$ )은 90  $\Omega$ 이었다. 입력부의 전극 면적이 증가할수록 복잡한 spurious vibration이 발생됨을 알 수 있고, 이것은 입력부의 전극면적인 tube wall 두께와 출력부의 전극직경과의 size factor 차이에서 발생된 진동으로 생각할 수 있다. 그러나 PT-1의 경우 실험 주파수 범위에서 깨끗한 3개의 피크를 관찰할 수 있다. 그림에서 피크 부근은 저 전력 압전 특성 측정(HP 4194A)에서 관찰된 공진주파수와 거의 일치하였다. 또한 그림에는 나타나지 않았지만, 저 전력에서 측정된 결과 300 ~ 350 kHz사이에서 가장 낮은 임피던스를 나타내었으며, 이 부근에서 가장 높은 출력전압과 효율을 얻을 수 있을 것으로 생각된다. 따라서 본 연구에서는 300 ~ 350 kHz사이의 구동주파수에서 감압용 압전 변환기 특성을 조사하였다.

표 2. 감압용 압전 변환기의 입력 및 출력단에서의 측정값.

Table 2. Designated values at input/output terminals of step-down piezoelectric transformer.

Item		PT-1	PT-2	PT-3	
Area of electrode	input	mm <sup>2</sup>	132	176	264
	output	mm <sup>2</sup>	346	346	346
Capacitance, C	input	pF	290	317	530
	output	pF	2660	2000	1340
Resonant frequency, $f_r$		kHz	329.40	324.55	311.98
Anti-resonant frequency, $f_a$		kHz	339.90	336.65	338.71
Effective coupling factor, $k_p'$		%	24.7	26.6	38.9
Effective quality factor, $Q_m'$			1750	1720	1740

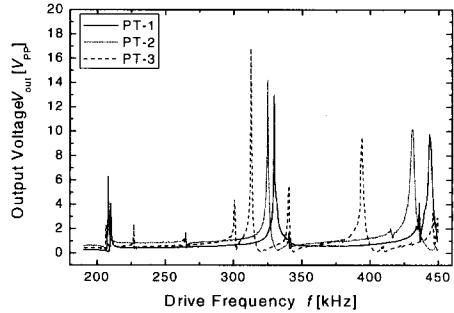


그림 3. 구동 주파수에 따른 압전 감압기의 출력 전압 특성.

Fig. 3. Output voltage of step-down transformer as a function of drive frequency.

그림 4는 입력전압을 20 Vpp로 고정하고 부하저항을 변화시킨 경우에 출력전압의 주파수 의존성을 나타낸 것이다. 출력전압은 부하저항에 크게 의존하였는데 부하저항이 증가함에 따라 전반적으로 증가하였다. 또 최대전압을 나타내는 주파수는 부하저항이 증가함에 따라 증가하였다. 그리고 입력단의 전극면적이 클수록 출력전압이 증가하였다. 이것은 저 전력 특성에서 측정된 Table 2의  $k_p'$ 의 결과와 잘 일치함을 알 수 있다.

그림 5(a)는 부하저항에 따른 최대 전압이득의 변화를 나타낸 것이다. 여기서 전압이득이란 입력 전압에 대한 출력전압( $V_{out}$ )의 비를 나타낸 것으로서,  $G_v = V_{out}/V_{in}$ 이다. 이때 입력전압은 20 Vpp였다. 전체적으로 부하저항이 증가함에 따라 전압이득은 선형적으로 증가하다가 포화됨을 알 수 있고, 이는 Wada 등[15]에 의해서 3영역으로 해석한 경우와 잘 일치하고 있다.

또한 그림 4와 그림 5(a)의 결과로부터 감압용 압전 변환기의 특성은 공진주파수 및 부하저항에 강하게 의존하고 있음을 확인할 수 있으며 이것을 그림 5(b)에 나타내었다. 여기서  $\Delta f$ 는 부하저항을 변화시킬 경우 최고 전압이득을 나타내는 주파수의 편이값을 나타낸 것으로 10  $\Omega$ 에서의 공진주파수를 기준값으로 하여 부하저항을 변화시킬 경우 공진주파수 편차를 나타내었다. 일반적으로 압전 공진자에 교류전압을 인가하면 구동전류가 클 때 압전체의 비선형 현상, 공진주파수의 이동 및 발열에 따른 압전 특성의 급격한 변화 등이 생긴다 [16].

여기서 진동자의 공진주파수가 변화하는 원인은

공진시 발생하는 탄성응력, 소자에 인가되는 직류 전계 및 구동전류 등에 기인되는 것으로 알려져 있다. 본 연구에서도 부하저항이 증가함에 따라 최고 전압이득을 나타내는 주파수는 20  $\Omega$  까지는 일정하다가 선형적인 증가현상을 보이고 있다. 그러나 주파수 편이량은 부하저항이 120  $\Omega$  에서도 0.2%정도로 미미함을 알 수 있다.

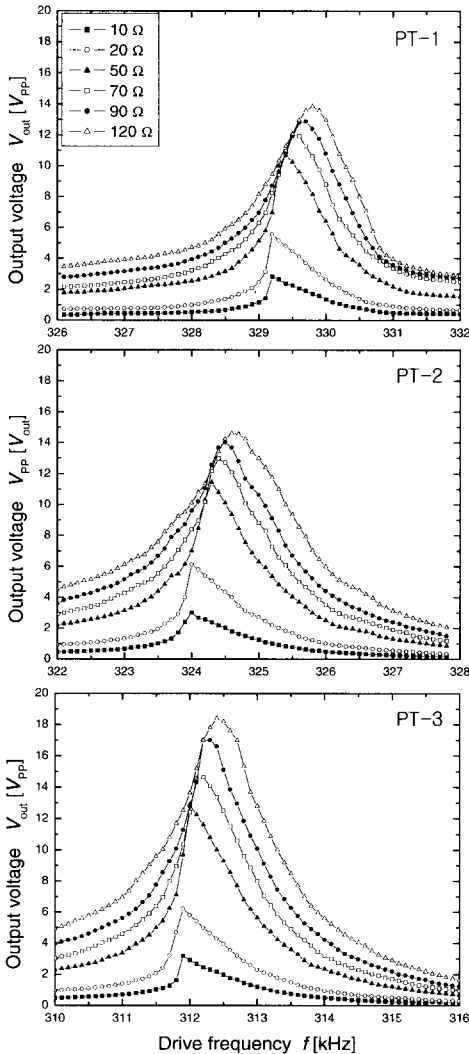


그림 4. 구동 주파수 및 부하저항에 따른 감압 변압기의 출력전압.

Fig. 4. Output voltage of step-down transformer as functions of drive frequency and load resistance.

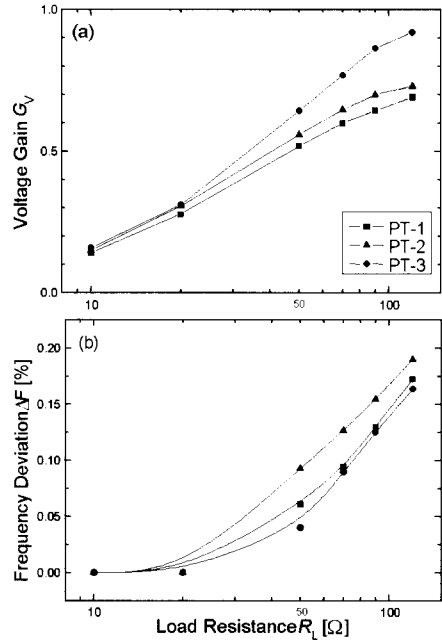


그림 5. 부하저항에 따른 (a) 전압이득 및 (b) 주파수 편이량의 상관관계.

Fig. 5. Correlations of (a) voltage gain and (b) frequency deviation as a function of load resistance.

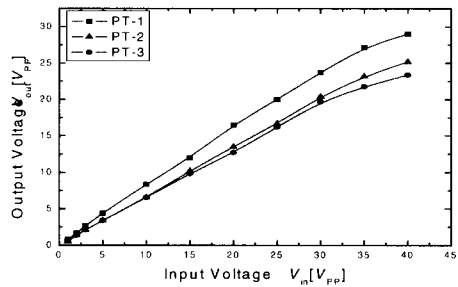


그림 6. 입력 및 출력전압의 상관관계.

Fig. 6. Relationship between input and output voltage.

그림 6은 부하저항을 90  $\Omega$ 으로 한 경우의 입력 전압에 따른 출력전압의 변화를 나타낸 것이다. 입력전압이 증가함에 따라 출력전압은 선형적으로 증가하고 있으며, 40 Vpp에서 약간 포화됨을 알 수 있다. 그리고 그림 5에서와 마찬가지로 PT-1과 PT-2에 비하여 PT-3의 출력전압이 전반적으로 높게 나타났다.

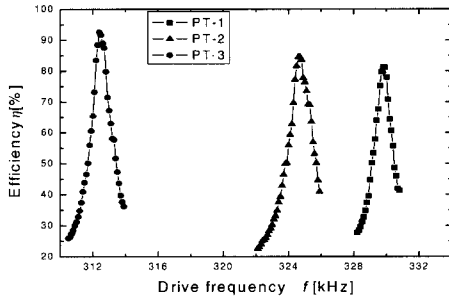


그림 7. 구동주파수에 따른 감압 변압기 효율특성.  
Fig. 7. Frequency characteristics of efficiency.

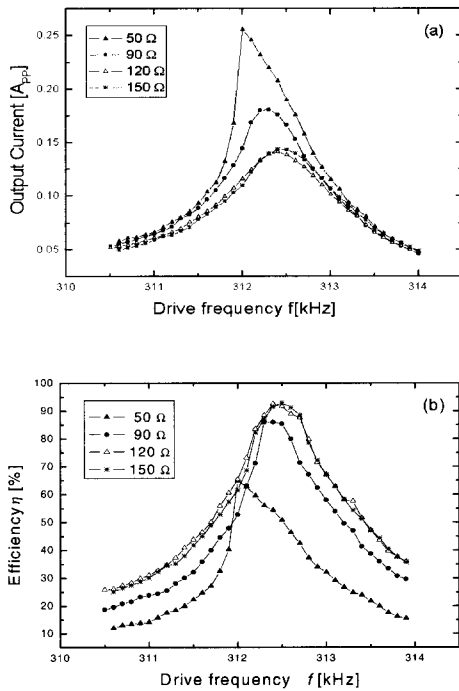


그림 8. 부하저항에 따른 감압 변압기의 (a) 출력 전류 및 (b) 효율의 주파수 특성.  
Fig. 8. Efficiency of step-down transformers as a function of (a) output current and (b) load resistance.

그림 7은 입력전압을 20 V<sub>pp</sub>로 인가하고 부하 저항이 120 Ω일 경우의 구동주파수에 따른 압전 변압기의 효율( $\eta = P_{out}/P_{in}$ , 단  $P = I_{pp}^2 \times R_L$ )을 각각 비교한 것이다. 효율은 Fig. 4에 나타낸 출력전압의

경우와 같이 강한 주파수 의존성을 나타내고 있으며 PT-3에 대하여 20 V<sub>pp</sub>를 인가할 경우 부하저항 변화에 대한 출력전류와 효율을 그림 8에 나타내었다. 출력 전류는 공진주파수에서 최대치를 보였으며 부하저항이 증가할수록 감소하였다. 그러나 출력전류의 감소정도는 부하저항이 증가할수록 감소하여 120Ω 과 150Ω에서의 큰 차이를 나타내지 않았다. 여기서 얻은 출력전류를 근거로 20 V<sub>pp</sub>를 인가한 경우의 출력전력은 약 2 W 정도로 나타났다. 효율은 부하저항이 120 Ω 정도에서부터 포화치를 나타내었는데 이때의 최고 효율은 약 94%의 높은 값을 보이고 있다.

#### 4. 결론

고 전력 압전 특성이 우수한  $Pb[(Mn_{1/3}Sb_{2/3})_{0.05}Zr_{0.475}Ti_{0.475}]O_3$  조성을 선택하여 합성하고 감압용 압전 변압기를 제작하였다. 그리고 출력단의 전극 면적을 일정하게 한 후, 입력단의 전극 면적 변화에 따른 변압기의 제반 특성을 조사하였다.

1. 입력전압이 증가함에 따라 출력전압은 선형적으로 증가하였다. 전압이득은 구동주파수 및 부하저항에 크게 의존하며, 공진주파수에서 전압이득이 최대가 되었다.
2. 최대전압을 나타내는 주파수는 부하저항이 증가함에 따라 주파수가 증가하는 쪽으로 이동하였고, 주파수 편이량은 10 Ω의 부하저항을 기준으로 하여 120 Ω에서 0.2%였다.
3. 변압기 효율의 주파수 의존성은 전압이득곡선과 같은 양상을 나타내었다. 입력전압 20 V<sub>pp</sub>, 부하저항 120 Ω일 경우 최고 효율은 94%였다.
4. 출력단의 크기를 고정한 경우, 입력부의 전극면적이 클수록 전압이득이 증가하였고 효율도 증가하였다.

#### 참고 문헌

[1] Y. Gao, Y. H. Chen, J. Ryu, K. Uchino, and D. Viehland, "Eu and Yb substituent on the properties of  $Pb(Zr_{0.52}Ti_{0.48})O_3-Pb(Mn_{1/3}Sb_{2/3})O_3$  ceramics: development of a new high-power piezoelectric with enhanced vibrational velocity", Jpn. J. Appl. Phys., Vol. 40, p. 687, 2001.

- [2] J. Yoo, Y. Kee, K. Yoon, S. Hwang, S. Suh, J. Kim, and C. Yoo, "Microstructural, electrical properties and temperature stability of resonant frequency in  $\text{Pb}(\text{Ni}_{1/2}\text{W}_{1/2})\text{O}_3\text{-Pb}(\text{Mn}_{1/3}\text{Sb}_{2/3})\text{O}_3\text{-Pb}(\text{Zr,Ti})\text{O}_3$  ceramics for high-power piezoelectric transformer", *Jpn. J. Appl. Phys.*, Vol. 40, p. 3256, 2001.
- [3] 윤석진, K. Uchino, " $\text{Pb}(\text{Y}_{2/3}\text{W}_{1/3})\text{O}_3 - \text{Pb}(\text{Zr, Ti})\text{O}_3$ 계 세라믹스의 고출력 특성", *전기전자재료학회논문지*, 11권, 5호, p. 394, 1998.
- [4] 이동근, 윤석진, 김현재, 안형근, 한득영, "PMS-PZT, PMN-PZT계 세라믹스를 이용한 압전변압기의 특성", *전기전자재료학회논문지*, 13권, 3호, p. 220, 2000.
- [5] H. S. Jeong, B. C. Choi, J. H. Yoo, I. H. Im, and C. Y. Park, "Parrel driving of piezoelectric transformers", *Jpn. J. Appl. Phys.*, Vol. 38, p. 5166, 1999.
- [6] Y. Sasaki, S. Takahashi, and M. Yamamoto, "Mechanical quality factor of multilayer piezoelectric ceramics transducers", *Jpn. J. Appl. Phys.*, Vol. 40, p. 3549, 2001.
- [7] O. Ohnishi, H. Kishie, A. Iwamoto, Y. Sasaki, T. Zaitzu, and T. Inoue, "Piezoelectric ceramic transformer operating in thickness extensional vibration mode for power supply", *Ultrasonic Sym., Proc. IEEE* p. 483, 1992.
- [8] T. Zaitzu, Y. Fuda, Y. Okabe, T. Ninomiya, S. Hamamura, and M. Katsuno, "New piezoelectric transformer converter for AC-Adapter", *APEC'97 Conference Proc. Twelfth Annual*, 2, p. 567, 1997.
- [9] Y. Sasaki, M. Yamamoto, A. Ochi, and S. Takahashi, "Small Multilayer Piezoelectric Transformers with High Power Density", *Jpn. J. Appl. Phys.*, Vol. 38, p. 5598, 1999.
- [10] M. Yamamoto, Y. Sasaki, A. Ochi, T. Inoue and S. Hamamura, "Step-down piezoelectric transformer for AC-DC converters", *Jpn. J. Appl. Phys.*, Vol. 40, p.3637, 2001.
- [11] 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, p. 2680, 2000.
- [12] A. V. Carazo, "Piezoelectric Transformers at Face Electronics", 35th ICAT Smart Actuator Symposium, April, 2002.
- [13] 김오수, 손준호, 이준형, 손정호, 남효덕, 조상희, "PZT계 압전 세라믹 변압기의 감압특성", *전기전자재료학회논문지*, 14권, 11호, p. 885, 2001.
- [14] 壓電セラミックスとその應用, 電波新聞社, p. 159, 1974.
- [15] 和田利彦, 萩原述史, 三枝武男, "磁器變壓器の基礎特性の三領域表現法とひずみ波驅動," *電氣學會論文誌 A*, 104(4), p.7, 1984.
- [16] 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.