

## PZT계 압전 세라믹 변압기의 감압특성

### Characteristics of Step-Down Transformer in PZT Piezoelectric Ceramics

김오수\*, 손준호\*\*, 이준형\*, 손정호\*\*\*, 남효덕\*\*\*\*, 조상희\*

(O-Su Kim\*, Joon-Ho Sohn\*\*, Joon-Hyung Lee\*, Jeong-Ho Sohn\*\*\*, Hyo-Duk Nam\*\*\*\*, Sang-Hee Cho\*)

#### Abstract

Ring/dot-type step-down piezoelectric transformer was manufactured by using  $Pb[(Mn_{1/3}Sb_{2/3})_{0.05}Zr_{0.475}Ti_{0.475}]O_3$  ceramics, which have excellent high-power piezoelectric properties. The characteristics of step-down piezoelectric transformer as a function of load resistance at output terminal was examined. Voltage gain was greatly dependent on drive frequency and load resistance, and showed maximum voltage gain at the resonance frequency. The output voltage was linearly increased as the input voltage increased. Voltage gain of the step-down piezoelectric transformer with respect to input voltage was very stable when the load resistance was in the range of 50-500  $\Omega$ .

**Key Words** : step-down transformer, piezoelectric ceramics, PZT.

#### 1. 서론

압전세라믹스의 응용은 저전력용 소자(buzzer, filter, resonator, ignitor, speaker 등)뿐만 아니라 고전력용 소자(변압기, 초음파 모터, transducer, actuator 등)로 폭 넓게 확대되어 가고 있다.[1-4] 그 중에서 전기적 에너지를 기계적 에너지로 1차 변환시킨 후 다시 전기적 에너지로 2차 변환시키는 압전변압기는 차세대 전기-전자부품으로 기대되고 있다. 즉 권선형 변압기에 비하여 압전변압기는 소형, 저손실, 고절연성 및 불연성 등의 장점을 가지고 있기 때문이다.[5] 압전변압기로서의 응용 타당성에 대한 최초의 연구는 1950년대 말에 Rosen[6]에 의해 보고되었다. 1960년대에는 압전변압기를 TV 수신기의 수평편향회로에 응용하려고

시도하였으나, 압전변압기에서 발생하는 열과 더불어 만족할 만한 고전력 특성이 나타나지 않아서 중도에 그만두게 되었다. 1990년 이후의 압전변압기에 대한 연구 동향은 압전재료의 특성을 향상시키는 것[7,8] 뿐만 아니라 적층화[9-11] 및 전극 pattern[12,13]의 개발에 의하여 압전변압기의 효율을 향상하는 것에 초점을 두고 있다. 이러한 활발한 연구에 편승하여 송압용 압전변압기로서의 응용이 가능하게 되었다. 실제적으로 수요가 폭발적으로 증가하고 있는 휴대용 컴퓨터의 칼라 LCD(liquid crystal display) 백라이트(backlight) 인버터(inverter)에 장착될 압전변압기가 개발되었다.[14-16]

한편 고전력능과 저출력 임피던스를 겸비한 AC-DC converter 및 adapter로 감압용 압전변압기가 대두되고 있다.[17,18] 압전변압기의 기본인 Rosen type의 압전 변압기는 입·출력부의 정전용량 차이를 각기 다른 진동형태에 적용한 것이다. 이 Rosen type의 장방향 압전변압기에서 입·출력 단자를 반대로 연결하여 전압을 인가할 경우는 입력부가 너무 길기 때문에 구동 전계가 매우 작

\* : 경북대학교 무기재료공학과  
(대구광역시 북구 산격동 1370번지,  
Fax : 053-950-5645  
E-mail: jhlee@icm.re.kr)

\*\* : 경북대학교 E8-216, 에스테크

\*\*\* : 가야대학교 신소재공학부 전자재료전공

\*\*\*\* : 영남대학교 전자정보공학부

2001년 8월 21일 접수, 2001년 9월 15일 1차심사완료  
2001년 9월 24일 2차심사완료

으므로 감압용 변압기로서는 사용하기 어렵게 된다. 따라서 Yamamoto 등[19]은 임피던스를 매우 작게 하기 위해 출력단을 사각형태의 얇은 시트상으로 하여 여러 장 적층함으로써 출력부의 정전용량도 크게 하고, 또 전극형태를 원형으로 하여 전체적으로 윤곽진동이 되게 하여 감압용 변압기를 제작한 바 있다. 그리고 Yoo 등[20]은 일반적인 세라믹스 필터의 전극구조인 ring/dot 형태의 전극구조를 가진 압전변압기에서 입·출력 단의 간격을 일정하게 한 후, 전극 면적 비를 변화시키면서 변압기의 특성을 보고한 바 있다.

본 연구에서는 감압용 압전변압기의 특성을 조사하여 소자로서의 적용 가능성을 검토하였다. 즉 고전력 압전특성이 우수한  $Pb[(Mn_{1/3}Sb_{2/3})_{0.05}Zr_{0.475}Ti_{0.475}]O_3$  조성을 선택하여 합성하고 감압용 압전변압기를 제작하였다. 여기서 감압 압전변압기 용으로의 새로운 전극구조를 제시하였다. 또한 출력부의 부하저항을 변화시킴에 따른 감압용 압전변압기 특성을 조사하였다.

## 2. 실험

### 2.1 실험장치

본 실험에서는 압전변압기용 재료로서 적합한 특성을 가지며 저온소결이 가능하여 적층 압전변압기로 응용 가능할 것으로 판단되는  $Pb[(Mn_{1/3}Sb_{2/3})_{0.05}Zr_{0.475}Ti_{0.475}]O_3$ 를 기본조성으로 선택하였다.[7,8] 고순도의  $PbO(99.5\%)$ ,  $ZrO_2(99.5\%)$ ,  $TiO_2(99.9\%)$ ,  $Mn_3O_4(99\%)$  및  $Sb_2O_3(99.79\%)$ 를 출발물질로 하였다. 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 4시간 동안 하소하였다. 하소한 분말은 혼합과 동일한 조건으로 분쇄한 후 건조하였다. 10wt% PVA(중합도 #500) 수용액을 무게비로 15% 혼합한 다음 과립을 만들었다. 직경 30 mm의 시편을  $2\text{ ton/cm}^2$ 의 압력으로 성형하였다. 성형체에 포함된 유기물은  $3^\circ C/h$  승온속도로  $250^\circ C$ 에서 5시간 동안 유지한 후, 다시  $100^\circ C/h$ 의 승온속도로  $550^\circ C$ 에서 5시간 동안 유지하여 제거하였다. 소결은  $1200^\circ C$ 에서 2시간 동안 열처리하였으며, 이때 분위기분말로  $PbZrO_3+10wt\%ZrO_2$ 를 사용하여 밀봉된 alumina 도가니에서 행하였다. 소결된 시편의 미세구조는 전자주사현미경(SEM; JEOL, JML 5400, Tokyo, Japan)을 이용하여 파단면을 관찰하였다.

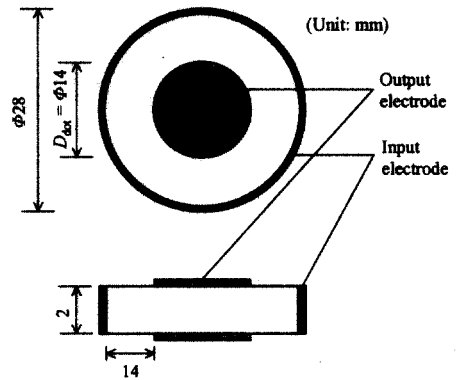


그림 1. 감압용 압전 트랜스포머의 모식도.  
Fig. 1. Schematic diagram of step-down piezoelectric transformer.

소결된 시편은  $28 \times 2$  mm의 원판형으로 가공하여 silver paste(dupont #7095)를 스크린 인쇄 후,  $600^\circ C$ 에서 10분간 열처리하여 전극을 부착하였다. 그림 1은 감압용 압전변압기의 구조를 모식적으로 나타낸 것이다. 입력부와 출력부의 전극구조는 그림에 나타낸 것처럼 압전변압기의 상하면이 서로 대칭을 이루고 있다. 출력부는 압전변압기의 중심에 있으며, 입력부는 시편의 두께부분에 위치하고 있다. 그리고 입력부와 출력부의 사이에 절연층( $R_{gap}$ )이 존재하고 있다. 출력부에 대한 입력부의 전극면적비는 0.88로서 출력부의 면적이 입력부와 비교하여 조금 작다고 할 수 있다. 그러나 승압용 단판 Rosen형 압전변압기[6]의 입·출력부의 전극면적비와 비교하면, 본 연구에서 설계한 감압용 압전변압기에서 출력부의 전극면적이 상당히 넓어졌다고 볼 수 있다. 감압용 압전변압기의 분극처리는 두께방향으로  $5\text{ kV/mm}$ , 길이방향으로  $1.5\text{ kV/mm}$ 의 직류전계를 인가하여 행하였다. 분극이 종료된 시편은 24시간 경과 후, 저전력에서 각 시편의 유전특성, 공진주파수 및 임피던스를 Impedance gain/phase analyzer(HP4194A)를 이용하여 측정하였다.

그림 2는 고전력에서 압전변압기의 감압특성 측정 회로를 나타낸 것이다. 3단자 감압용 압전변압기의 입력전원으로 Function/sweep generator(HP3324A)를 사용하였다. 그리고 출력부의 부하저항( $R_L$ )은 1-1000  $\Omega$ 으로 변화시켜 감압특성을 측정하였다.

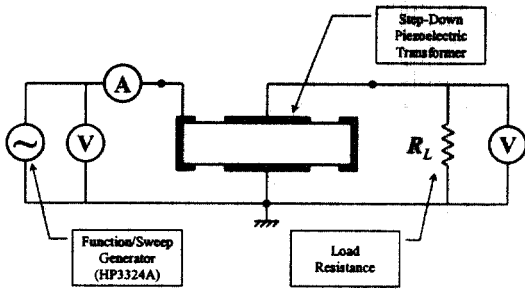


그림 2. 감압용 압전 트랜스포머의 측정회로.  
 Fig. 2. Circuits for the measurements of step-down piezoelectric transformer.

3. 결과 및 고찰

3.1 재료특성

일반적으로 PZT 화합물에서 Zr/Ti 비가 증가함에 따라 정방정 (tetragonal) 상에서 능면체 (rhombohedral) 상으로 변화한다. 본 실험에서 선택한  $Pb[(Mn_{1/3}Sb_{2/3})_{0.05}Zr_{0.475}Ti_{0.475}]O_3$ 은 압전특성이 우수한 정방정상과 능면체상의 경계 지점으로 추측 가능한 조성이었다.[8] 그림 3은  $Pb[(Mn_{1/3}Sb_{2/3})_{0.05}Zr_{0.475}Ti_{0.475}]O_3$  조성을 1200°C에서 2시간 소결한 시편의 분말 X-선 회절분석을 나타낸 것이다. Perovskite상 이외의 다른 피크는 나타나지 않은 것으로 보아 제2상은 존재하지 않는 것으로 생각된다.  $2\theta=45^\circ$  부근에서 (002), (200) 피크가 검출된 것으로 보아 상경계에서 정방정상 쪽으로 치우친 조성으로 판단할 수 있었다. 이 조성의 격자정수는  $a=4.031\text{Å}$  및  $c=4.103\text{Å}$ 였으며,  $c/a=1.017$ 이었다.

그림 4는 소결 시편의 파단면에 대한 미세구조 사진을 나타낸 것이다. 단선 분석법[21]을 통해 측정된 평균 입자경은 약  $3\mu\text{m}$ 였다. 아르키메데스 원리를 이용하여 측정한 소결체의 상대밀도는 약 97%였다. 이상의 결과로부터 시편의 소결은 치밀화가 잘 이루어졌음을 알 수 있었다.

그림 5는 유전상수 및 유전손실의 온도의존성을 나타낸 것이다. 590 K 부근에서 정방정상에서 입방정(cubic)상으로 추정되는 상전이 피크를 볼 수 있으며, 주파수에 의존하는 유전완화(relaxation) 현상을 볼 수 있다. 그 이유는 Mn, Sb, Zr 및 Ti의 무질서 배열에 기인된 것으로 생

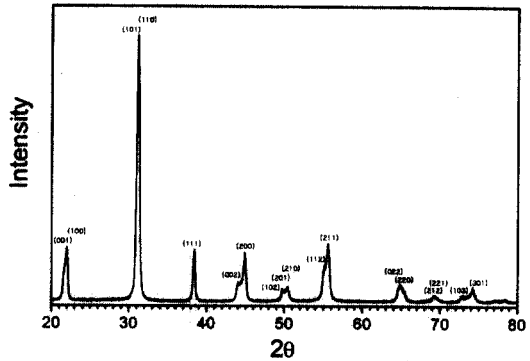


그림 3. 200°C에서 2시간 소결된  $Pb[(Mn_{1/3}Sb_{2/3})_{0.05}Zr_{0.475}Ti_{0.475}]O_3$  세라믹스의 X-선 회절분석.

Fig. 3. X-ray diffraction patterns of  $Pb[(Mn_{1/3}Sb_{2/3})_{0.05}Zr_{0.475}Ti_{0.475}]O_3$  system, fired at 1200°C for 2h.

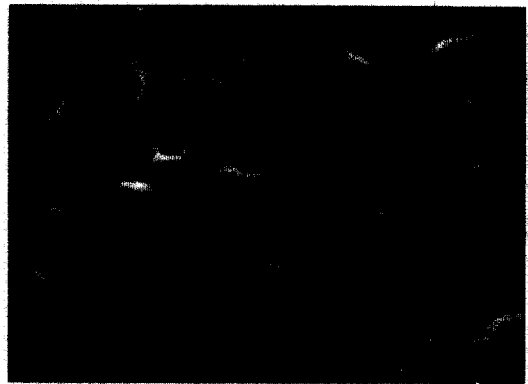


그림 4. 1200°C에서 2시간 소결된  $Pb[(Mn_{1/3}Sb_{2/3})_{0.05}Zr_{0.475}Ti_{0.475}]O_3$  세라믹스의 미세구조.

Fig. 4. Microstructure of  $Pb[(Mn_{1/3}Sb_{2/3})_{0.05}Zr_{0.475}Ti_{0.475}]O_3$  system, fired at 1200°C for 2h.

각 할 수 있다. 주파수가 100 Hz에서의 최대유전상수는 16000이며, 상온에서의 유전상수는 1300이었다. 한편, 이 조성의 저전력 압전특성으로서  $k_p$ 는 0.59이며,  $Q_m$ 은 1600였다. 이상의 결과로부터  $Pb[(Mn_{1/3}Sb_{2/3})_{0.05}Zr_{0.475}Ti_{0.475}]O_3$  조성에 대한 재료특성은 표 1에 나타내었다.

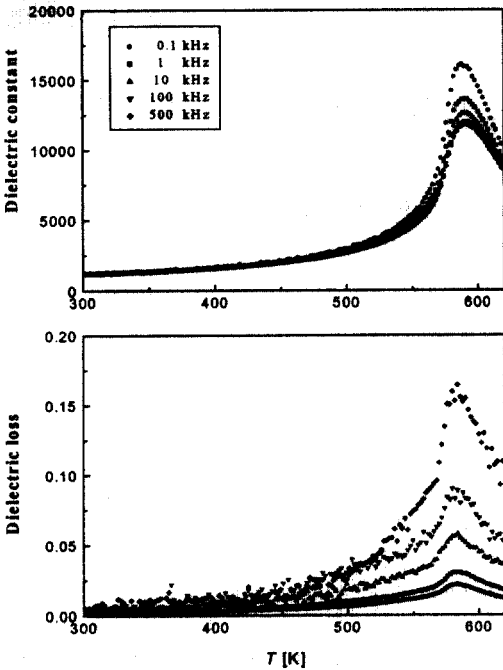


그림 5. 1200℃에서 2시간 소결된  $Pb[(Mn_{1/3}Sb_{2/3})_{0.05}Zr_{0.475}Ti_{0.475}]O_3$  세라믹스의 주파수에 따른 유전율 및 유전손실의 온도 의존성.

Fig. 5. Temperature dependence of dielectric constant and dielectric loss at various frequencies of  $Pb[(Mn_{1/3}Sb_{2/3})_{0.05}Zr_{0.475}Ti_{0.475}]O_3$  system, fired at 1200℃ for 2h.

표 1.  $Pb[(Mn_{1/3}Sb_{2/3})_{0.05}Zr_{0.475}Ti_{0.475}]O_3$  세라믹스의 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 <sup>3</sup>	7.70
Dielectric constant	$\epsilon_r$		1300
Dielectric loss	$\tan \delta$		0.002
Electromechanical coupling factor	$k_p$	%	59
	$k_{31}$	%	36
Mechanical quality factor	$Q_m$		1600
Curie Temperature	$T_C$	°C	320

### 3.2 압전변압기의 감압특성

감압용 압전변압기용으로 설계한 새로운 전극구조는 그림 1에 나타내었다. 이 전극구조는 입력부에서 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 압전변압기의 공진주파수에 해당되는 교류신호를 인가하게 되면, 그때의 경방향 진동 변위는 인가전압과  $d_{33}$ 의 곱으로 나타나며, 또한 길이 방향의 진동 변위는  $d_{31}$ 과 인가전압에 비례하고, tube wall의 두께에 반비례한다. 이러한 진동이 출력부의 원판상 전극에서 전압으로 나타나게 되는 것이다.[22]

표 2는 감압용 압전변압기에서 저전력 신호를 인가하였을 때, 입·출력단자의 전극면적, 전기용량, 공진주파수,  $k_p'$  및  $Q_m'$  을 나타낸 것이다. 여기서 전기용량의 측정주파수는 1 kHz 였다. 그리고 출력 전력의 크기는 표2에 나타낸 전기기계 결합계수와 기계적 품질계수에 의해 추정할 수 있다. 왜냐하면 출력 전력은  $k_p'$  및  $Q_m'$ 가 상대적으로 조화롭게 큰 값일수록 증가하기 때문이다.[20] 일반적으로 평행판 커패시터의 전기용량은 전극면적에 의존한다. 본 실험에서 선택한 감압용 압전변압기의 전극구조는 평행판 커패시터의 경우와 다르지만 전기용량은 전극면적에 의존하고 있음을 볼 수 있다. 즉 전극면적이 일정한 출력부의 전기용량은 두 시편 모두 거의 일정하게 나타났지만, 입력부의 전기용량은 전극면적에 비례적으로 증가함을 알 수 있다.

표 2. 감압용 압전트랜스포머의 입력 및 출력 단자에서의 측정값.

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

Item	Input terminal	Output terminal
Capacitance at 1 kHz (pF)	157	820
Resonant frequency (kHz)	205.3	205.3
Effective coupling factor $k_p'$ (%)	18.2	23.4
Effective mechanical quality factor $Q_m'$	1887	1827

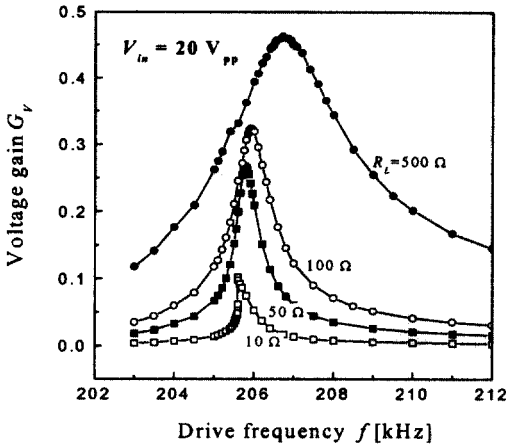


그림 6. 구동 주파수 및 부하저항에 따른 감압 트랜스포머의 전압이득.

Fig. 6. Voltage gain of step-down transformer as functions of drive frequency and load resistance.

그림 6은 감압용 압전변압기에 연결한 부하저항 ( $R_L$ )의 변화에 따른 전압이득( $G_V$ )의 주파수 의존성을 나타낸 것이다. 이때 입력전압( $V_{in}$ )은 20 V<sub>pp</sub>였다. 여기서 전압이득은 입력전압에 대한 출력전압( $V_{out}$ )의 비를 나타낸 것으로서,  $G_V = V_{out}/V_{in}$ 이다. 전압이득 특성은 부하저항에 크게 의존하여 나타났다. 즉 부하저항이 증가함에 따라 전반적으로 증가하였다. 또한 최대전압이득 주파수는 부하저항이 증가함에 따라 주파수가 증가하는 쪽으로 이동하였다.

그림 7은 부하저항의 변화에 따른 최대 전압이득(그림 6)을 나타낸 것이다. 이때 입력전압은 20 V<sub>pp</sub>였다. 부하저항이 증가함에 따라 전압이득은 선형적으로 증가하였다. 그림 6과 7의 결과로부터 감압용 압전변압기는 공진주파수 및 부하저항에 강하게 의존하고 있음을 알 수 있다.

그림 8은 입력전압의 변화에 대한 출력전압을 나타낸 것이다. 이때 부하저항은 100 Ω였다. 입력전압이 증가함에 따라 출력전압은 선형적으로 증가하고 있음을 보여주고 있다.

그림 9는 입력전압에 따른 전압이득을 부하저항의 변화에 따라 나타낸 것이다. 부하저항이 10 Ω에서 입력전압이 증가함에 따라 전압이득은 다소 감소하였다. 그러나 그 이상의 부하저항에서는 입력전압의 변화에 따라 전압이득은 거의 일정하게

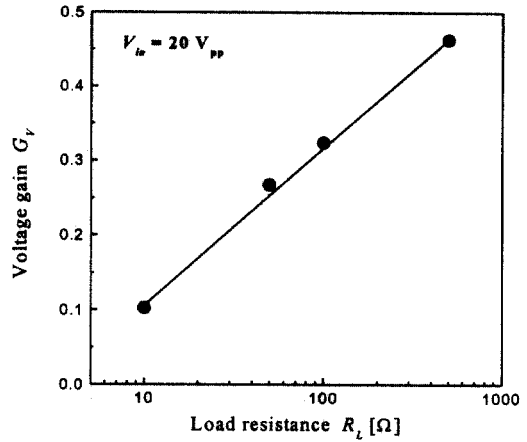


그림 7. 입력전압이 20 V<sub>pp</sub>인 경우 전압이득과 부하저항의 상관관계.

Fig. 7. Correlation between voltage gain and load resistance when the input voltage is 20 V<sub>pp</sub>.

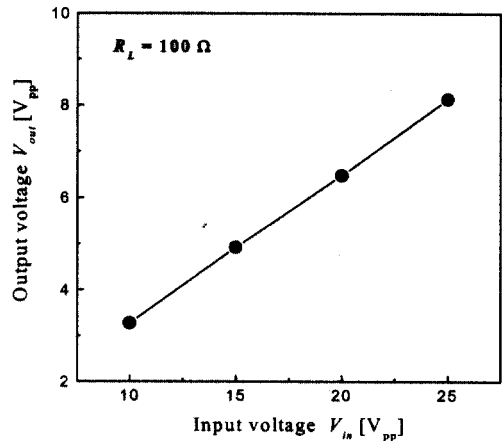


그림 8. 부하저항이 100 Ω인 경우 입력 및 출력 전압의 상관관계.

Fig. 8. Correlation between input and output voltage when the load resistance is 100Ω.

나타났다. 따라서 이 감압용 압전변압기는 50 Ω 이상의 부하저항을 연결하면 안정된 전압이득을 가진다고 할 수 있다.

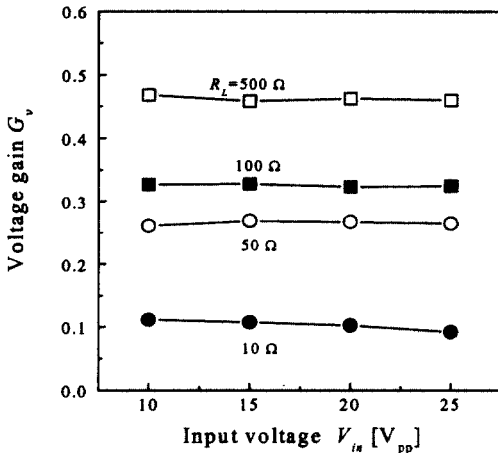


그림 9. 전력전압과 부하저항에 따른 감압 트랜스포머의 전압이득.

Fig. 9. Voltage gain of step-down transformer as functions of input voltage and load resistance.

#### 4. 결론

고전력 압전특성이 우수한  $Pb[(Mn_{1/3}Sb_{2/3})_{0.05}Zr_{0.475}Ti_{0.475}]O_3$  조성을 선택하여 합성하고 감압용 압전변압기를 제작하였다. 여기서 압전변압기용의 새로운 전극구조를 제시하였다. 또한 출력부의 부하저항을 변화시키기에 따른 감압용 압전변압기 특성을 조사한 결과는 다음과 같다.

1. 변형 ring/dot 형의 전극구조가 감압용 변압기 특성을 나타내었다.
2. 전압이득은 구동주파수 및 부하저항에 크게 의존하며, 공진주파수에서 전압이득이 최대가 되었다.
3. 입력전압이 증가함에 따라 출력전압은 선형적으로 증가하였다.
4. 50-500 Ω의 부하저항에서 입력전압의 변화에 따른 전압이득은 거의 일정하였다. 따라서 이 범위의 부하저항을 연결하면 안정된 전압이득을 얻을 수 있었다.

#### 참고 문헌

- [1] B. Jaffe, W. R. Cook, Jr. and H. Jaffe, Piezoelectric Ceramics, Academic Press. London & New York, pp. 271-280, 1971.
- [2] K. Uchino, Piezoelectric/Electrostrictive Actuators, Morikita-Synppan. Tokyo, Japan, pp. 135-197, 1991, (in Japanese).
- [3] J. Zheng, S. Takahashi, S. Yoshikawa and K. Uchino, J. Am. Ceram. Soc., 79[12], pp. 3193-3198, 1996.
- [4] 조봉희, 손은영, 김현재, 박창엽, "초음파 센서(수신기)용 PZT-PNN계 압전세라믹스에 MnO<sub>2</sub> 첨가가 미치는 영향", 전기전자재료학회지, 1권 4호, pp. 311-318, 1988.
- [5] 이수호, 류주현, 홍재일, "압전세라믹 converter의 특성 및 기술동향", 전기전자재료, 12권 5호, pp.21-25, 1999.
- [6] C. A. Rosen, Proc. Electronic Component Sym., pp. 205-211, 1956.
- [7] 허수정, 손준호, 손정호, 이준형, 김정주, 정우환, 박명식, 조상희, 한국세라믹학회지, 37[4], pp. 295-301, 2000.
- [8] J.-H. Sohn, S.-J. Heo, J.-H. Sohn, J.-H. Lee, W.-H. Jung, D.-B. Kim and S.-H. Cho, Kor. J. Ceram., 5[2], pp. 171-177, 1999.
- [9] H. Tsuchiya and T. Fukami, Ferroelectrics, 68, pp. 225-234, 1986.
- [10] Li Long Tu, D. Weiti, C. Jinghe, G. Zhilun and Z. Xiaowen, Ferroelectrics, 101, pp. 193-200, 1990.
- [11] 김동범, 이재열, "압전트랜스 적층화 기술", 전기전자재료학회논문지, 12권 5호, pp.7-11, 1999.
- [12] Y. L. Lee, S. Y. Cheng, Y. T. Chen and S. F. Liao, Ferroelectrics, 156, pp. 25-30, 1994.
- [13] K. Kanayama and N. Maruko, Jpn. J. Appl. Phys., 36, pp. 3048-3049, 1997.
- [14] H. Sasaki, J. Thongrueng and K. Kato, NEC Tech. Rep., 50, pp. 80-83, 1997.
- [15] S. Kawashima, O. Ohnishi, H.Hakamata, S. Tagami, A. Fukuoka, T. Inoue and S. Hirose, Proc. 1994 IEEE Int. Ultrasonic Symp., p. 525, 1994.
- [16] S. Tagami, Y. Shimada, S.Kayashima, K. Isobe, O. Ohnishi, T. Inoue and S. Hirose,

- Proc. 1995 Society for Information Display Int. Symp., p. 382, 1995.
- [17] T. Zaitso, O. Ohnishi, T. Inoue, M. Shoyama, F. C. Lee, and G. C. Hua, IEEE, pp. 585-589, 1994.
- [18] T. Zaitso, T. Shigehisa, M. Shoyama, T. Ninomiya, IEEE APEC '96 Proc., pp. 279-283, 1996.
- [19] M. Yamamoto, Y. Sasaki, A. Ochi, T. Inoue and S. Hamamura, Jpn. J. Appl. Phys., 40[5B], pp. 3637-3642, 2001.
- [20] J. Yoo, K. Yoon, Y. Lee, S. Suh, J. Kim and C. Yoo, Jpn. J. Appl. Phys., 39[5A], pp. 2680-2684, 2000.
- [21] F. L. Fullman, Trans. AIME, Vol. 3, pp.447-452, 1953.
- [22] 壓電 セラミックスとその應用, 電波新聞社, pp.159-175, 1974.