

## 두께방향 진동형 압전트랜스포머의 특성에 관한 연구

### A Study on the Properties of Piezoelectric Transformer with a Thickness Vibration Mode

남 성이\* 세명대학교 공대 전기공학과  
이 수호 영월공업전문대학 전기과  
홍 재일 대유공업전문대학 전기과  
류 주현 세명대학교 공대 전기공학과

Seong-Yi Nam\* Dept. of Electrical Eng., Semyong Uni.  
Su-Ho Lee Dept. of Electrical, Yongwol Jun. Coll.  
Jae-Il Hong Dept. of Electrical, Daiyoo Jun. Coll.  
Joo-Hyun Yoo Dept. of Electrical Eng., Semyong Uni.

#### Abstract

A new piezoelectric transformer is proposed as a key device for high power transmission. The piezoelectric transformer made of lead titanate solid solution ceramic is operated with a thickness extensional vibration mode. This transformer can operate at high frequency over several megahertz with about 90% high efficiency.

#### 1. 서 론

1950년대 말에 미국의 G.E사에서 개발된 압전 트랜스포머(Piezoelectric Transformer)는<sup>1-2)</sup> 고출력으로 장시간 구동될 때 발열현상과 기계적 피로로 인한 파괴를 수반하는 단점을 나타내어 실용화가 어려웠다. 그러나 최근에 고출력에 견디는 압전재료의 개발이 진행되면서 다시 연구가 활발히 진행되고 있다.<sup>3-4)</sup>

한편 종래의 Rosen형<sup>1)</sup> 압전 트랜스포머는 높은 내부임피던스에 의해 수십~수백 kHz에서 공진주파수를 가져 고전력 전송에는 다소 불리한 점이 있다. 따라서 최근에 낮은 내부 임피던스를 가지는

새로운 압전 트랜스포머의 디자인이 제안되고 있는데, 이는 두께 진동모드를 이용한 압전 트랜스포머이다. 이는 압전 트랜스포머의 입력부에 고유 공진주파수의 AC전압을 인가하면 전왜 효과에 의한 기계적인 진동이 발생되고, 이 기계적인 진동이 출력부에 전달되어 압전효과에 의해 전하가 발생하여 전압이 얻어지며, 전압의 전송비는 입력과 출력층의 두께비에 의해 조절될 수 있다<sup>2)</sup>.

이러한 압전 트랜스포머는 종래의 권선형 트랜스포머에 비해 전자 노이즈가 발생하지 않으며 철손 및 동손이 거의 없어 수 MHz이상의 고주파 영역에서 고효율이 가능하며 권선을 사용하지 않아 구조가 간단하고 소형, 경량 및 박형화가 가능하다.<sup>5,6)</sup> 따라서 본 연구에서는 두께 진동형 압전 트랜스

포머에 사용하기 위해 전기기계결합계수의 이방성 ( $k_t/k_p$ )이 큰 물질인  $PbTiO_3$ 계 조성<sup>7)</sup>에 부분적으로  $Pb^{2+}$ 와  $Ti^{4+}$ 자리에 다른 조성을 치환시킴과 더불어 불순물을 첨가에 의해 임경을 제어하여 전기기계 결합계수의 이방성을 더욱 강하시킨 새로운 조성을 개발하고자 하였으며, 나아가 이를 사용하여 적층형 압전트랜스포머를 설계 제작하고자 한다.

## 2. 두께진동형 압전트랜스포머의 구동원리

### 2-1. 구동원리

압전트랜스포머는 진동자의 공진특성을 이용한 소자이다. 진동자의 고유공진주파수가 트랜스포머의 두께와 반파장이 일치할 경우 반파장 모드( $\lambda/2$  공진)라 하면 그림 1(a)에서와 같은 진동변위와 stress 분배를 가지게 되어 입력과 출력층은 동시에 수축과 확장이 일어난다. 한편 그림 1(b)는 전파장 모드( $\lambda$  공진)라 하며 공진주파수는 반파장 모드의 두배가 되며, 입력과 출력층의 확장과 수축은 다르게 된다. 또한 압전세라믹에서 전하량의 발생은 stress 값에 비례하기 때문에 가장 효율적으로 사용하기 위하여 stress의 분포가 그림 1(b)에 나타난 것 처럼 입, 출력단의 중간 부분에 최대가 되는 것이 진동에너지를 더욱 효과적으로 사용할 수 있다.

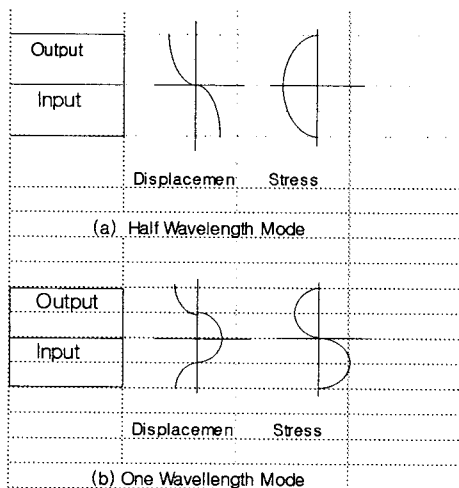


그림 1. 두께방향 진동의 변위와 stress 분포

### 2-2. 압전 트랜스포머의 해석

압전 트랜스포머의 해석은 탄성진동-용력<sup>8)</sup>을 적용한 것과 전기적 등가회로를 적용한 것이 있으나 대개 공진자의 전기적 등가회로를 적용하고 등가회로 정수는 선형으로 취급하고 있다. 그림 2는 압전 트랜스포머의 전기적 등가회로를 나타내고 있으며 변압기 특성을 알기 위하여 그림 3과 같이 2차측을 1차측으로 환산시켰다.

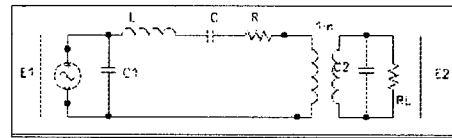


그림 2. 전기적 등가회로

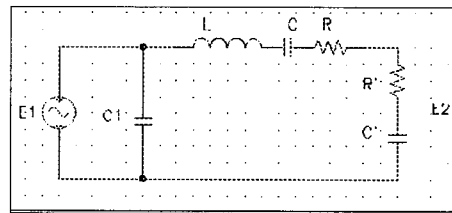


그림 3. 1차측으로 환산한 등가회로

그림 3에서 알 수 있듯이 압전트랜스포머의 공진 주파수는 이차측 병렬 캐패시턴스와  $C_2$ 와 부하저항  $R_L$ 에 의해 영향을 받음을 알 수 있다. 즉 부하저항  $R_L$ 의 증가에 따라 공진주파수가 증가한다. 또한 그림 3의 회로에서 방정식을 세우면 다음과 같이 표현된다.

$$nE_1 = n^2 R(i_R + i_C) + E_2 \quad (1)$$

$$i_C = j\omega_s C_2 E_2 \quad (2)$$

$$i_R = E_2 / R_L \quad (3)$$

여기서  $\omega_s$ 는 공진각주파수이고,  $1/\sqrt{LC}$ 로 주어

진다.

식 (2), (3)을 식 (1)에 대입하여 전압비를 구하면 식 (4)와 같이 된다.

$$\frac{E_2}{E_1} = \frac{n}{1 + \frac{n^2 R}{R_L} + j\omega_s C_2 n^2 R} \quad (4)$$

식 (4)에 의해 2차측을 개방시켰을 때 전압비는 최대가 되며, 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\left(\frac{E_2}{E_1}\right)_{MAX} = \frac{n}{\sqrt{1 + (\omega_s C_2 n^2 R)^2}} \quad (5)$$

이차측의 출력  $P_2$ 는 다음과 같으며,

$$P_2 = \frac{|E_2|^2}{R_L} = \frac{n^2 E_1^2}{R_L [(1 + \frac{n^2 R}{R_L})^2 + (\omega_s C_2 n^2 R)^2]} \quad (6)$$

식 (6)에서  $R_L$ 의 값은

$$R_L = \frac{n^2 R}{\sqrt{1 + (\omega_s C_2 n^2 R)^2}} \quad (7)$$

또한  $(\omega_s C_2 n^2 R)^2 \ll 1$ 인 경우  $R_L$ 은 다음과 같다.

$$R_L = n^2 R \quad (8)$$

따라서 입력  $P_1$ 은 다음과 같이 나타난다.

$$P_1 = n^2 R |i_C + i_R|^2 + P_2 = E_1^2 \left[ \frac{n^2 R + R_L}{R_L^2} + (\omega_s C_2)^2 n^2 R \right] \quad (9)$$

효율  $\eta$ 는 다음과 같다.

$$\eta = \frac{P_2}{P_1} = \frac{1}{1 + \frac{n^2 R}{R_L} + (\omega_s C_2)^2 n^2 R R_L} \quad (10)$$

이상의 결과에서 알 수 있듯이 부하저항  $R_L$ 이  $n^2 R$ 인 경우 이차측 출력은 최대가 되고 또한 부하저항이  $1/\omega_s C_2$ 가 되면 최대 효율을 얻을 수 있음을 알 수 있다.

### 3. 실험방법

두께 진동 모드를 사용하는 압전트랜스포머는 큰 전기기계결합계수  $k_t$ 를 가지는 압전재료가 필요하다. 일반적으로 널리 알려져 있는 PZT 세라믹은 높은 전기기계결합계수  $k_t$ 를 가지고 있으나 경방향의 전기기계결합계수  $k_p$ 도 높고 PZT 세라믹을 두께 진동모드로 트랜스포머를 제작시 경방향으로 큰 진동이 발생할 수 있다. 따라서 두께방향 진동 모드를 사용하기 위해서는 압전 이방성이 큰 물질이 필요하다. 그래서 본 실험에서는 비교적 이방성이 큰  $PbTiO_3$ 계 세라믹을 기본조성으로 하여 불순물인  $MnO_2$ 를 1.5(mol%) 첨가한  $(Pb_{0.76}Ca_{0.24})[(Co_{1/2}W_{1/2})_{0.04}Ti_{0.96}]O_3$  조성으로 하여 산화물 혼합법으로 원료 분말을 준비하였으며, 850°C에서 2시간 하소한 다음 1000[kg/cm<sup>2</sup>]의 압력으로 성형한 후 1150°C에서 2시간 소성하였다. 제조된 시편은 초음파로 세척하고 건조시킨 후에 전극(Dupont 7095)을 실크스크린법으로 부착하여 600°C에서 10분간 열처리하였다. 이렇게 처리된 시편은 100°C의 실리콘 오일 속에서 30(kV/cm)의 전계로 20분간 분극처리를 한 후 각종 특성을 측정하였다.

### 4. 실험결과 및 고찰

그림 4는 1150°C에서 2시간 동안 소결한 시편의 XRD결과로서 (101), (110) 및 (002), (200)의 피크가 분리되어 나타나는 것을 보아 정방정계임을 알

수 있다. 또한 표 1에 나타낸 바와 같이 불순물인  $MnO_2$ 를 첨가 되어 있는 것이 다소 정방성이 감소한 것을 볼 수 있는데 이는 첨가된 Mn이온이  $ABO_3$  구조를 가지는 강유전체에서 B site에 치환되면서  $MnO_2$ 의 이온반경(0.66Å)이 Ti의 이온반경(0.68Å)보다 적으므로 평균 부피가 감소되어 격자 상수 c와 단위 격자의 부피가 감소하기 때문이라 생각된다. 또한 밀도는 다소 증가하였는데 이는 그레인의 크기가 다소 작아져 치밀화가 쉽게 일어나기 때문이라 생각한다.

표 1. 시편의 구조적 특성

MnO <sub>2</sub> 의 량	a	c	tetragonality	density
0.0mol%	3.900	4.076	1.045	7.04
1.5mol%	3.911	4.065	1.039	7.06

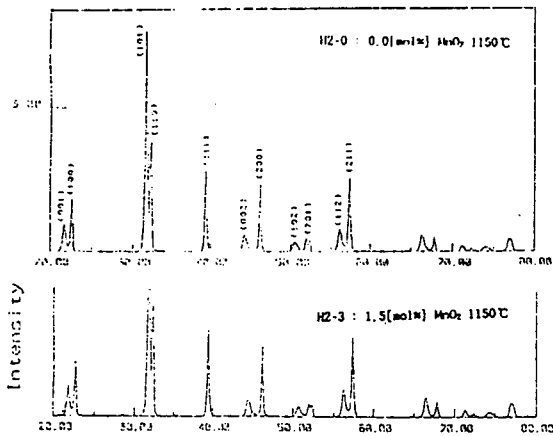


그림 4. XRD 분석

표 2는 제조된 시편의 전기기계결합계수인  $K_p$ 와  $K_t$ 를 나타낸 것으로  $MnO_2$ 가 첨가한 시편의 경우  $K_p$ 가 거의 0에 가까이 나타났다. 이는  $MnO_2$ 의 첨가에 의해 그레인내에 존재하는  $90^\circ$  도매인이 분극시에 높은 비율로 도매인의 재배열이 이루어진 것으로 생각되며, 이는 L. Pardo등이 발표한 높은 비율로  $90^\circ$  도매인 재배열로 인해 결합부분에서 에너지 흡수와 탄성파의 분산이 이루어져 기계적품질계수를 저하시키고 경진동 전기기계결합계수  $K_p$ 가 감소시킨다고 한 것과 잘 일치하였다. 또한 그림 5

는  $MnO_2$ 를 첨가한 시편의 공진특성을 나타낸 것이다.

표 2. 시편의 결합계수

MnO <sub>2</sub> [mol%]	$\epsilon_r$	Nt [Hz]	$k_t$ [%]	$k_p$ [%]	$d_{31}$ [ $10^{-12}C/N$ ]	$d_{33}$ [ $10^{-12}C/N$ ]
0.0	190.6	2238	35.0	8.5	-3.42	48
1.5	202.9	2180	49.0	≈0	-1.24	67

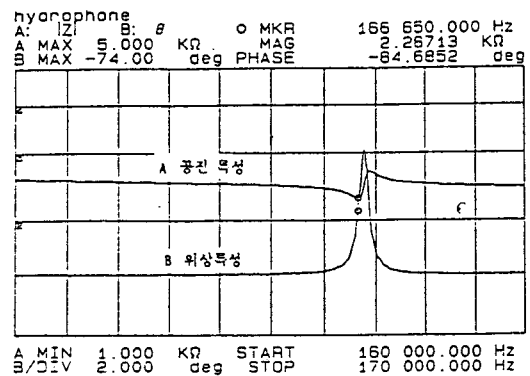


그림 5. 공진 및 위상특성

## 5. 결론

본 실험에서는  $MnO_2$ 를 1.5(mol%)를 첨가한 ( $Pb_{0.76}Ca_{0.24}[(Co_{1/2}W_{1/2})_{0.04}Ti_{0.96}]O_3$ ) 시편을 제조하여 두께진동을 이용한 압전트랜스포머 제작의 타당성을 조사하여 비교적 높은 이방성을 지닌 압전 세라믹을 제조할 수 있었으며, 또한 불순물을 첨가하여 경방향 전기기계결합계수를 거의 0으로 만들 수 있어 매우 우수한 두께 진동형 트랜스포머를 제조할 수 있을 것으로 생각된다.

- 1)  $MnO_2$ 의 첨가에 따라 그레인의 크기가 작아져 소결시에 밀도의 향상 및 정방성이 다소 떨어졌다.
- 2)  $MnO_2$ 을 첨가하여 경방향 전기기계결합계수를 거의 0으로 만들 수 있었으며, 압전특성도 개선되었다.

### 참 고 문 헌

- 1) C.R.Rosen, "Ceramic Transformers and Wave Filters", Proc. Electronic Component Symp., pp.205~211, 1957.
- 2) H.W.Katz편, "Solid State Magnetic and Dielectric Divices", John Wiley and Sons, pp.170~197, 1959.
- 3) 廣頼精二, 青柳學, 富川義朗, "壓電セラミック振動子の 大振幅振時における 誘電體損失", 信學技報, US92-42,1992.
- 4) 大西修, 岸江宏美, 岩本明夫, "厚み 縦振動を 利用した電力電送用", 信學技報, US92-20,1992.
- 5) 田上悟, 袴田洋代, 川島進吾, 福岡晃, 坂口龍夫, 座間浩一, "壓電トランス式インバータ 開發", NEC技報, Vol.47, pp.106~110,1994.
- 6) 諸橋久雄, "Back Light 用 部材の 開發動向", NEC技報, Vol.47, pp.36~43,1994.
- 7) 홍재일, 류주현, 윤련상, 윤광희, 장낙원, 박장엽, "MnO<sub>2</sub> 첨가에 따른 PbTiO<sub>3</sub>계 세라믹스의 구조적, 전기적 특성", 대한전기학회 논문지, Vol. 44, No. 11, pp.1488~1493, 1995.
- 8) P.A.Van Berkum, J.C. Sinclair and K. Raney, "High Voltage Ceramic Transformers", IRE Trans., BTR-81, pp.22~35, 1962.