

적층형 PZT 압전변압기의 특성 해석

Analysis of the Face-Mounted PZT Piezoelectric Transformer

論 文
33~9~4

朴 昌 燁* · 韓 得 永**
 (Chang-Yup Park · Deuk-Young Han)

Abstract

An ideal and an approximate equivalent circuits of a face-mounted PZT piezoelectric transformer were introduced from the equivalent circuit taking into account the mechanical loss of a PZT piezoelectric disk vibrator. And several expressions for the resonant frequencies and for the voltage ratios were derived from the approximate circuit of the transformer.

From the experiments on the voltage ratios regarding the frequency variation without load and on the load variation at resonant frequency, it was found that the voltage ratio increased with the increase of load resistance and decreased sharply with the slight deviation from the resonant frequency, and that no-load voltage ratio at the resonant frequency was proportional to the product of the mechanical quality factor and the square of the electromechanical coupling factor of the vibrator.

1. 서 론

압전변압기는 점화소자와 세라믹필터의 중간적 존재로서 그 두 기능을 합친 것과 같은 특성을 가지며, 원리는 전기적 에너지를 기계적 에너지로 변환시킨 후 그 기계적 에너지를 다시 전기적 에너지로 변환시키는 장치이다.¹⁾

이러한 압전변압기는 코일을 이용하는 일반적인 변압기에 비하여 주파수대역이 좁고 취급하는 전류가 적다는 단점이 있으나, 한편으로는 구조가 간단하며, 제작이 용이하고, 소형이며, 전기적 손실이 적다는 등의 장점이 있어서 특히 고전압소전류원을 필요로 하는 음극선관, 음이온발생기, 집진기, 전자복사기, 고주파변압기 등에 응용되고 있으며, 다른 분야에도 그 응용이 시도되고 있다.^{2,3)}

이에 대한 연구는 주로 장방형과 원판형에 관해 진행되어 왔으며, 그 중에서 장방형에 관해서는 1956년 Rosen⁴⁾과 Veen⁵⁾에 의하여 시작되어 최근에 일

본, 자유중국, 소련 등에서 그에 관한 연구 및 개발이 다시 활발해지고 있고,^{6),7),8)} 원판형에 관한 연구는 1961년 Lungo⁹⁾ 등에 의하여 시작되어 Munk¹⁰⁾를 거쳐 현재도 그에 관한 연구가 진행되고 있다.¹¹⁾

본 논문에서는 재료의 특성, 반경 및 두께가 각각 같은 일반적인 원판형 PZT 압전진동자 2개를 진동자 / 얇은 절연판 / 진동자의 순으로 적층한 압전변압기의 주파수특성과 부하특성에 관하여 해석하고자 한다.

2. 적층형 PZT 압전변압기의 등가회로

그림 1과 같이 전극이 양면에 부착되어 있고, 그 면적이 A이며, 반경 r 이 두께 τ 보다 훨씬 큰 원판형 PZT 압전진동자를, 그 기계적 손실을 고려한 등가회로로 나타내면 그림 2와 같이 된다.¹²⁾

그림 1과 그림 2에서 V_i 및 I_i 는 진동자에 인가한 각주파수 ω 인 입력전압 및 전류이고, F_1 과 F_2 는 진동자의 양면에서의 힘이며, U_1 과 U_2 는 그 양면의 진동속도이다. 또 그림 2에서 C_0 , N , Z 는 각각 고정용량 (clamped capacitance), 변성비 (turn ratio), 기계적 특성임피던스라 하며

*正 會 員 : 延世大 工大 電氣工學科 教授 · 工博
 **正 會 員 : 建國大 工大 電氣工學科 助教授
 接受日字 : 1984年 7月 5日

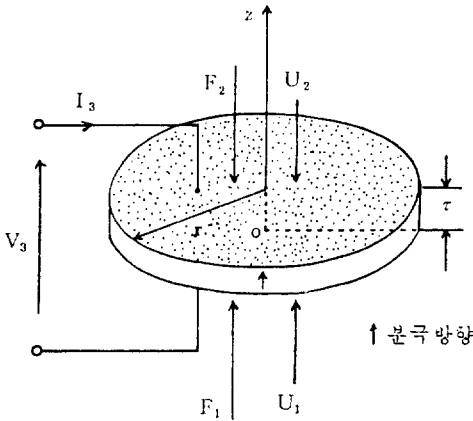


그림 1. 원판형 PZT 압전진동자
Fig. 1. PZT piezoelectric disk vibrator

$$C_0 = \epsilon_{33}^s \frac{A}{\tau}$$

$$N = h_{33} C_0$$

$$Z_0 = A \sqrt{\rho c_{33}^D}$$

의 관계가 있다. 여기서 ϵ_{33}^s 는 변형 (strain) S 가 일정할 때의 유전율이고 h_{33} 은 압전정수이며, ρ 는 밀도이다. 또 c_{33}^D 는 전속밀도 D 가 일정할 때의 탄성정수 (elastic stiffness constant)로서 그 압전진동자의 기계적 손실을 고려하면

$$c_{33}^D = c_1^p + j c_2^p$$

로 나타낼 수 있다. 한편 탄성파의 전파정수 (propagation constant) τ 는 $C_1^p \gg C_2^p$ 인 일반적인 PZT 압전진동자의 경우

$$\tau \approx j \omega \sqrt{\frac{\rho}{c_1^p}} \left(1 - \frac{j}{2Q_m} \right)$$

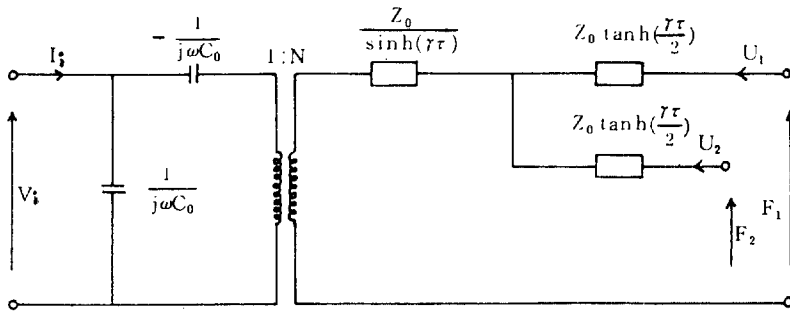


그림 2. 원판형 PZT 압전진동자의 등가회로
Fig. 2. Equivalent circuit of a PZT piezoelectric disk vibrator

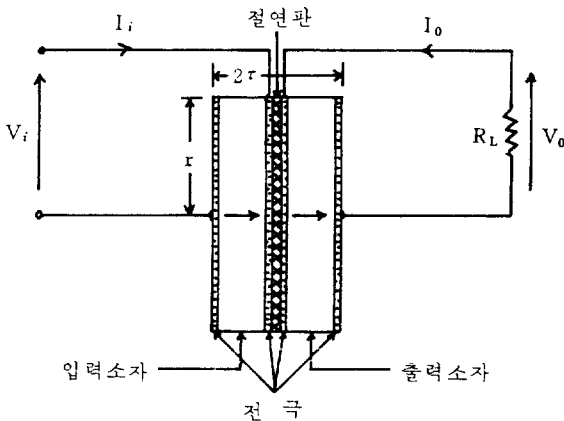


그림 3. 적층형 PZT 압전변압기
Fig. 3. A face-mounted PZT piezoelectric transformer

로 나타낼 수 있으며, Q_m 은 그 진동자의 기계적 품질계수 (mechanical quality factor)로서

$$Q_m = \frac{c_1^p}{c_2^p}$$

의 관계가 있다.¹²⁾

여기서 그림 1과 같은 진동자 2개를 적층하고 그 사이에 얇은 절연판을 삽입하여 그림 3과 같은 적층형 PZT 압전변압기를 구성한다. 이때 두 압전진동자의 면적 A 와 두께 τ 및 물리정수 $c_{33}^D, h_{33}, \epsilon_{33}^s$ 가 각각 서로 같고, 변압기의 반경 r 이 그 두께 2τ 보다 훨씬 큰 경우의 등가회로는, 그림 2의 회로를 이용하여 그림 4와 같이 나타낼 수 있다.¹³⁾

그림 4에서 Z_f 와 Z_f' 는 각각 변압기의 입력소자와 출력소자의 자유면에서의 지지임피던스 (backing impedance)이며, R_L 은 부하저항이다. 또 F_2, F_2' 는 각각 입력소자와 출력소자의 접촉면에서의 힘이

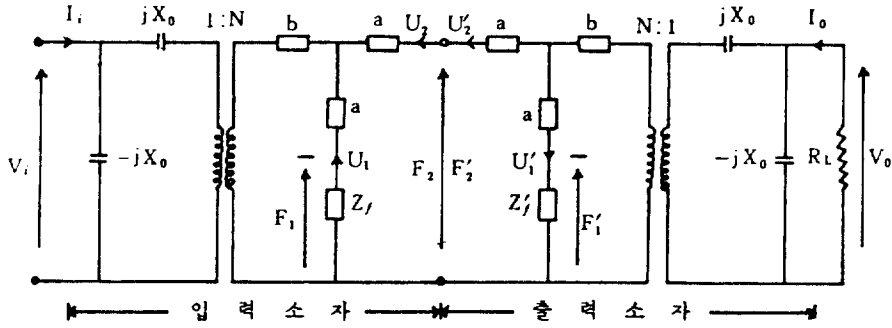


그림 4. 적층형 PZT 압전변압기의 일반적인 등가회로

Fig. 4. General equivalent circuit of a face-mounted PZT piezoelectric transformer

고, U_2 와 U_2' 는 그 면들에서의 입자속도이며,

$$a = Z_0 \tan h \left(\frac{\gamma \tau}{2} \right) \quad (1)$$

$$b = \frac{Z_0}{\sin h (\gamma \tau)} \quad (2)$$

$$X_0 = \frac{1}{\omega C_0}$$

의 관계가 있다.

이때 이상적인 경우로서, 입력소자와 출력소자의 자유면을 지지하는 지지물의 영향을 무시하고, 또 전극과 절연판의 두께가 얇아서 그 영향을 무시하면

$$Z_f = Z_f' = 0$$

$$F_2 = F_2'$$

$$U_2 = U_2'$$

가 되므로, 그림 4로부터 전기적 입력 V 와 I_i , 전기적 출력 V_o 와 I_o 사이에

$$\begin{bmatrix} V_o \\ I_o \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{a+b+jN^2X_0}{aN} & \frac{a+2b+j2N^2X_0}{N} \\ -\frac{a+b}{jaNX_0} & -\frac{a+2b}{jNX_0} \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} -\frac{a+2b}{jNX_0} & -\frac{a+2b+j2N^2X_0}{N} \\ -\frac{a+b}{jaNX_0} & -\frac{a+b+jN^2X_0}{aN} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_i \\ I_i \end{bmatrix} \quad (3)$$

의 관계를 구할 수 있다.

한편 $c_1^p \gg c_2^p$ 인 압전진동자에서 f_s 를 그 진동자의 직렬공진주파수, f 를 압전변압기의 동작주파수라 하면, 식(1), (2)로부터

$$a + 2b = \frac{Z_0}{\tan h \left(\frac{\gamma \tau}{2} \right)} \approx \frac{1}{4} (R_m + jX_m)$$

$$\text{단, } R_m = \frac{\pi Z_0}{Q_m}, \quad X_m = 2\pi Z_0 \frac{f - f_s}{f_s}$$

의 관계를 얻을 수 있으며,¹²⁾ 이 압전변압기를 전파장모드로 동작시키면 $\gamma \tau \approx j\pi$ 이므로 식(3)은

$$\begin{bmatrix} V_o \\ I_o \end{bmatrix} \approx \begin{bmatrix} \frac{R_m + jX_m + j4N^2X_0}{j4N^2X_0} & \frac{R_m + jX_m + j8N^2X_0}{4N^2} \\ -\frac{R_m + jX_m}{4N^2X_0^2} & \frac{R_m + jX_m + j4N^2X_0}{j4N^2X_0} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_i \\ I_i \end{bmatrix} \quad (4)$$

로 나타낼 수 있다.

또 그림 4의 등가회로로부터

$$V_o = -I_o R_L$$

의 관계와 식(4)를 이용하여 그 변압기의 입력임피던스 Z_m 을 구하면

$$Z_m = \frac{1}{4N^2} \frac{(-j4N^2X_0) \{ (R_m + R_e) + j(X_m + 4N^2X_0 + X_e) \}}{(-j4N^2X_0) + \{ (R_m + R_e) + j(X_m + 4N^2X_0 + X_e) \}}$$

이 된다. 여기서

$$R_e = \frac{4N^2X_0^2 R_L}{R_L^2 + X_0^2}, \quad X_e = \frac{4N^2X_0^2}{R_L^2 + X_0^2}$$

이다.

위의 입력임피던스에 관한 식을 이용하여 그림 3과 같은 압전변압기의 전파장모드에 관한 이상적인 등가회로를 그리면 그림 5와 같다.¹⁰⁾

그림 5의 등가회로는 변압기를 구성하는 압전진동자의 반경 및 두께와 특성들이 각각 서로 같고, 지지물과 접착면의 전극 및 절연판의 영향을 무시한 경우의 전파장모드에 관한 이상적인 회로이었으나,

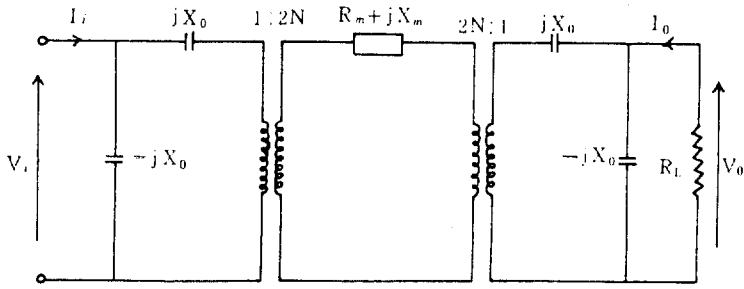


그림 5. 적층형 PZT 압전변압기의 이상적인 등가회로
 Fig. 5. Ideal equivalent circuit of a face-mounted PZT piezoelectric transformer

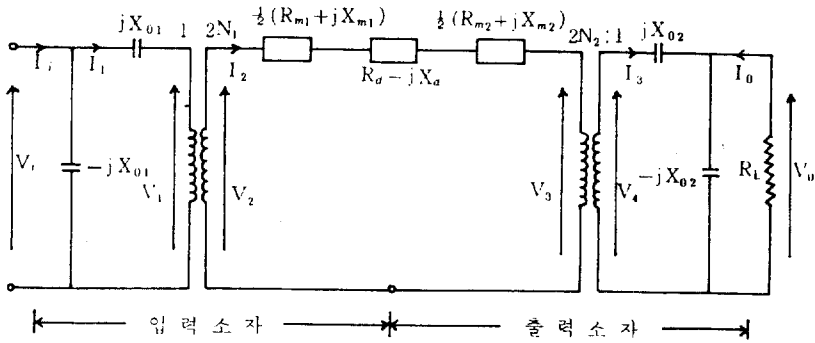


그림 6. 적층형 PZT 압전변압기의 근사적인 등가회로
 Fig. 6. Approximate equivalent circuit of a face-mounted PZT piezoelectric transformer

이 회로를 기본으로하여 입력소자와 출력소자의 특성들이 약간 다르고 절연판에 의한 정전용량 C_d 와 접착면에서의 저항 R_d 를 고려한 근사적인 등가회로를 구하면 그림 6과 같이 나타낼 수 있다.¹⁶⁾

이 그림 6에서 첨자중 1은 입력소자를, 2는 출력소자를 나타낸다.

위의 그림에서 X_d 는

$$X_d = \frac{4 N_1 N_2}{\omega C_d}$$

이다.

3. 적층형 PZT 압전변압기의 특성식

그림 6에서 이 변압기의 공진조건을 구하면

$$\bar{X}_m + 4N_1^2 X_{o1} + X'_e - X_d = 0 \quad (5)$$

이 된다. 이 식에서

$$\bar{X}_m = \frac{1}{2} (X_{m1} + X_{m2})$$

$$\approx 2\pi \bar{Z}_o \frac{f - \bar{f}_s}{\bar{f}_s}$$

$$X'_e = \frac{4N_2^2 X_{o2}^3}{R_L^2 + X_{o2}^2}$$

의 관계가 있으며, 또 Z_o , \bar{f}_s 는 각각

$$\bar{Z}_o = \frac{1}{2} (Z_{o1} + Z_{o2})$$

$$\bar{f}_s = \frac{1}{2} (f_{s1} + f_{s2})$$

이다. 위의 식들에서 첨자에 포함된 1과 2는 각각 입력소자와 출력소자를 의미한다.

한편 이러한 압전변압기는 강유전체인 PZT 압전 세라믹 진동자를 입력소자 및 출력소자로 사용하므로 입력 및 출력전류가 적으며 대체로 부하저항이 큰 경우에 적합하다. 특히 부하저항 R_L 이 X_{o2} 보다 훨씬 큰 경우는

$$X'_e \approx \frac{4N_2^2 X_{o2}^3}{R_L^2}$$

이므로 이때의 공진주파수 f_L^R 은, 식(5)로부터

$$f_L^R \approx \bar{f}_s \left\{ 1 + \frac{1}{\pi^2 \bar{Z}_0 \bar{f}_s} \left(\frac{N_1 N_2}{C_d} - \frac{N_1^2}{C_{01}} - \frac{X_{02}^2}{R_L^2} - \frac{N_2^2}{C_{02}} \right) \right\} \quad (6)$$

가 구해진다. 또 부하저항을 개방한 무부하시의 공진주파수 f_∞^R 은 $X_0 = 0$ 이 되므로 식(5)로부터

$$f_\infty^R \approx \bar{f}_s \left\{ 1 + \frac{1}{\pi^2 \bar{Z}_0 \bar{f}_s} \left(\frac{N_1 N_2}{C_d} - \frac{N_1^2}{C_{01}} \right) \right\} \quad (7)$$

이 되며, 부하저항을 단락하면 $X_0' = 4N_2^2 X_{02}$ 가 되므로 그때의 공진주파수 f_0^R 은

$$f_0^R \approx \bar{f}_s \left\{ 1 + \frac{1}{\pi^2 \bar{Z}_0 \bar{f}_s} \left(\frac{N_1 N_2}{C_d} - \frac{N_1^2}{C_{01}} - \frac{N_2^2}{C_{02}} \right) \right\}$$

가 된다.

한편 그림 6 으로부터 일반적인 경우의 전압비 A 를 구하면

$$A = \frac{V_0}{V_1} = \frac{-j4N_1 N_2 X_{02}}{(1 - j \frac{X_{02}}{R_L}) \{ (\bar{R}_m + R_0' + R_d) + j(\bar{X}_m + 4N_2^2 X_{01} + X_0' - X_d) \}} \quad (8)$$

이 된다. 이 식에서

$$\bar{R}_m = \frac{1}{2} (R_{m1} + R_{m2}) \approx \frac{\pi \bar{Z}_0}{Q_m}$$

$$R_0' = \frac{4N_2^2 X_{02}^2 R_1}{R_L^2 + X_{02}^2}$$

의 관계가 있으며, Q_m 는 두 압전진동자의 기계적 품질계수의 평균치이다.

식(5)와 식(8)로부터 공진시의 전압비 A^R 을 구하면

$$A^R = \frac{-j4N_1 N_2 X_{02}}{(1 - j \frac{X_{02}}{R_L}) (R_m + R_0' + R_d)}$$

이 되고, 이때 무부하인 경우는 $R_0' = 0$, $X_0' = 0$ 이므로 이때의 전압비 A_∞^R 은

$$A_\infty^R \approx \frac{-j4N_1 N_2 X_{02}}{\bar{R}_m + R_d} \quad (9)$$

가 되며, 또 $R_L \gg X_{02}$ 인 경우는

$$R_0' = \frac{4N_2^2 X_{02}^2}{R_L}$$

이므로, 이때의 전압비 A_L^R 은

$$A_L^R \approx \frac{-j4N_1 N_2 X_{02}}{\bar{R}_m + \frac{4N_2^2 X_{02}^2}{R_L} + R_d} \quad (10)$$

이 된다.

한편 접착면에서의 저항 R_d 를 무시하면, 무부하시의 전압비의 크기 $|A_\infty|$ 은 식 (8)로부터

$$|A_\infty| \approx \frac{2N_1 N_2}{\pi^2 \bar{Z}_0 C_{02} f \left[\left(\frac{1}{Q_m} \right)^2 + 4 \left\{ \frac{f}{\bar{f}_s} - 1 + \frac{1}{\pi^2 \bar{Z}_0 f} \right. \right]}$$

$$\left(\frac{N_1^2}{C_{01}} - \frac{N_1 N_2}{C_d} \right)^2 \Big]^{1/2} \quad (11)$$

이 얻어지며, 공진시 $R_L \gg X_{02}$ 인 경우의 전압비의 크기 $|A_L^R|$ 은 식(10)으로부터

$$|A_L^R| \approx \frac{4N_1 N_2 X_{02} R_L}{\bar{R}_m R_L + 4N_2^2 X_{02}^2} \quad (12)$$

가 구해진다.

또한 출력측을 단락한 경우의 전압비 A_0 는 식 (8)로부터 0임을 알 수 있다.

이상에서 유도한 공진주파수와 전압비에 관한 식들은 변압기의 두 압전진동자의 특성들이 약간 다른 경우에 대한 것들이었으며, 두 압전진동자의 특성들이 같고 $R_L \gg X_{02}$ 인 경우의 공진주파수 \bar{f}_L^R 는 식 (6)과 (7)로부터

$$\bar{f}_L^R \approx \bar{f}_\infty^R \approx \bar{f}_s \left\{ 1 + \frac{2k_t^2}{\pi^2} \left(\frac{C_0}{C_d} - 1 \right) \right\} \quad (13)$$

이 구해진다. 위의 식에서 k_t 는 압전진동자의 전기기계결합계수 (electromechanical coupling factor)로서

$$k_t = \sqrt{\frac{\epsilon_{33}^S}{c_{33}^D}} h_{33} = \sqrt{\frac{\pi f_s}{2 f_P} \tan \frac{\pi (f_P - f_s)}{2 f_P}} \quad (14)$$

의 관계가 있다.¹⁴⁾ 여기서 f_P 는 압전진동자의 병렬 공진주파수이다.

또 이때 접착면에서의 저항 R_d 를 무시하면, 식(9)와 (12)로부터 무부하 공진시의 전압비 A_∞^R 는

$$A_\infty^R \approx \frac{-j4 Q_m k_t^2}{\pi^2} \quad (15)$$

가 된다.

4. 실험

실험에서는 반경 30.07 (mm), 두께 6.94 (mm), 무게 150.0 (g)인 압전동자 5개를 사용하였으며, 이들 진동자의 기본특성은 표 1과 같다.

표 1. 원관형 PZT 압전진동자의 기본특성
Table 1. Basic properties of PZT piezoelectric disk vibrators

시편번호	f_s [kHz]	f_P [kHz]	k_t [%]	C_0 [pF]	Q_m
A	303.16	324.67	39.14	1863	925.0
B	303.48	324.83	38.99	1856	935.2
C	302.31	324.75	39.92	1828	906.8
D	302.67	324.55	39.46	1807	941.8
E	302.88	324.27	39.06	1895	914.3

표 2. 원판형 PZT 압전진동자의 물리정수

Table 2. Physical constants of PZT piezoelectric disk vibrators

구분 시편번호	c_{33}^S	c_{33}^D	c_1^P	h_{33}	Z_0	R_m	N
	$\times 10^{-9}$ [F/m]	$\times 10^{10}$ [N/m ²]		$\times 10^8$ [V/m]	$\times 10^4$ [kg/sec]	[kg/sec]	[N/V]
A	4.553	15.48		22.82	9.754	331.3	4.251
B	4.535	15.49		22.79	9.757	327.8	4.230
C	4.467	15.46		23.49	9.741	337.0	4.294
D	4.416	15.44		23.33	9.735	324.7	4.216
E	4.631	15.42		22.54	9.729	334.3	4.271

표 1의 결과들을 이용하여 이들 압전진동자의 물리정수들을 구하면 표 2와 같다.⁴⁾

표 1 및 2의 특성을 갖는 압전진동자 중에서 임의로 선택한 진동자 2개, 외부회로의 연결을 위한 두께 0.05 [mm]의 알루미늄전극 2장, 그리고 두께 0.05 [mm]의 폴리테렌비닐절연판 1장을 진동자 / 전극 / 절연판 / 전극 / 진동자의 순으로 적층하여 그림 3과 같은 압전변압기를 제작하였다. 이때 절연판의 비유전율이 2.26¹⁵⁾이고 그 유효면적이 진동자의 면적과 같으므로 절연판에 의한 정전용량 C_d 는 1,136 [pF]이다.

이와같이 제작한 압전변압기를 그림 7과 같이 연결하여 무부하시 주파수에 의한 전압비의 변화와 공진시 부하저항에 의한 전압비의 변화를 측정하였다.

이때 변압기의 자유단인 양면의 전극으로는 진동자 자체에 부착되어 있는 전극의 중심을 지지하는 핀을 사용하였으며, 그 핀에는 가능한 한 힘이 가해

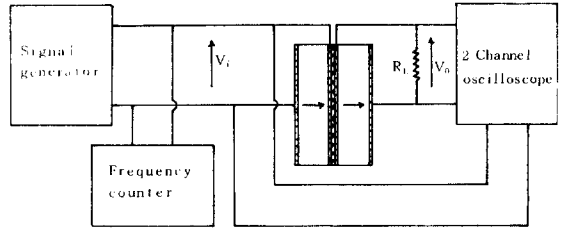


그림 7. 적층형 PZT 압전변압기의 전압비 측정회로
Fig. 7. Measuring circuit for the voltage ratio of face-mounted PZT piezoelectric transformers

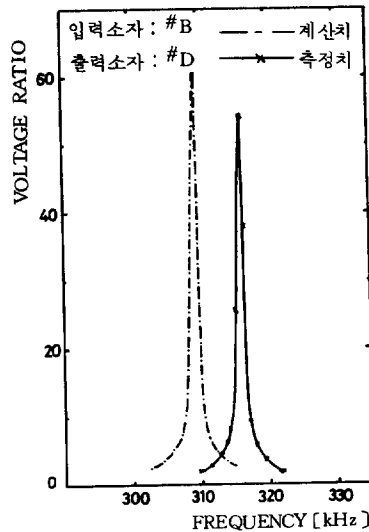
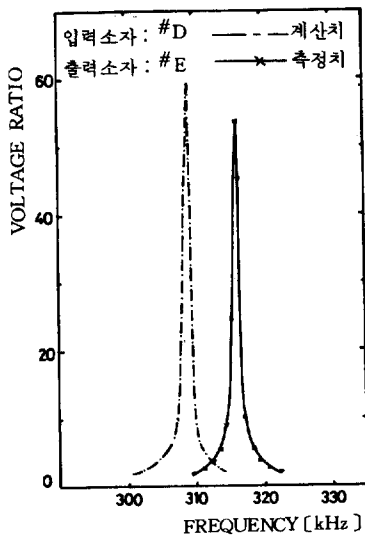


그림 8. 적층형 PZT 압전변압기의 주파수 - 전압비특성 (무부하시)

Fig. 8. Frequency - voltage ratio characteristics of face-mounted PZT piezoelectric transformers (without load)

표 3. 적층형 PZT 압전변압기의 공진주파수 (무부하시)
Table 3. Resonant frequencies of face-mounted PZT piezoelectric transformers (without load)

변압기 구분		무부하공진주파수 [kHz]			
입력소자	출력소자	측정치: f_{∞}^R	계산치: $(f_{\infty}^R)'$	계산치: \bar{f}_{∞}^R	계산치: $(f_{\infty}^R)''$
A	B	317.63	309.68	309.29	293.25
A	D	316.22	309.23	308.75	292.83
B	D	316.11	309.37	308.86	293.05
B	E	317.50	309.70	309.27	293.15
D	E	316.05	309.04	308.73	292.53

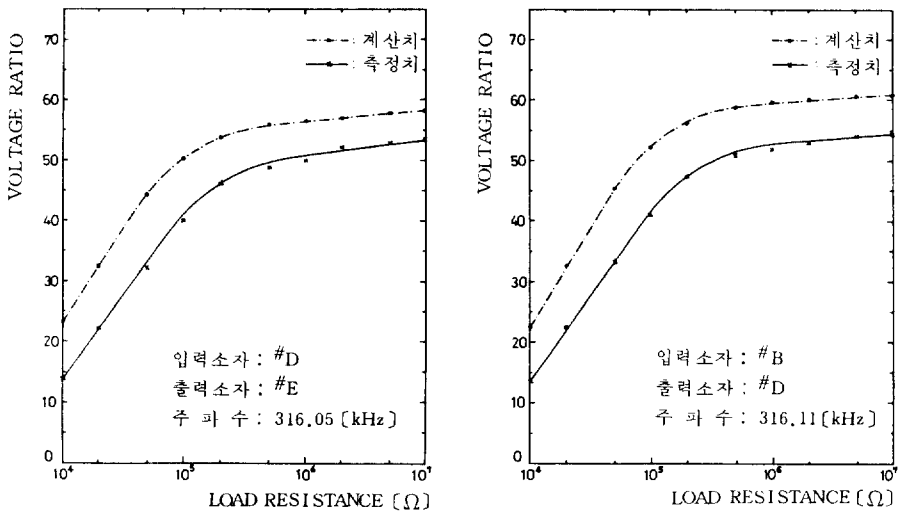


그림 9. 적층형 PZT 압전변압기의 부하저항 - 전압비 특성 (공진시)
Fig. 9. Load resistance - voltage ratio characteristics of face-mounted PZT piezoelectric transformers (at resonance)

지지 압도록 유의하였다. 지지편에 힘을 가하면 전압비는 감소하였다.

우선 변압기의 부하저항을 개방한 무부하시에 주파수의 변동에 의한 전압비의 변화를 조사하였다.

대표적인 경우로서 입력소자와 출력소자를 각각 시편번호 D와 E로하여 제작한 변압기 #D - #E와 입력소자와 출력소자를 각각 시편번호 B와 D로하여 제작한 변압기 #B - #D의 무부하 주파수 - 전압비 특성곡선을 그림 8에 나타냈다. 이 그림에서 계산치를 나타내는 곡선은 식(1)을 그린 것이다.

몇가지의 변압기에 대한 무부하 공진주파수의 측정치와 계산치를 표 3에 나타냈다. 이 표에서 계산치 $(f_{\infty}^R)'$ 는 식(7)로부터 구한 것이고, 계산치 \bar{f}_{∞}^R 는 식(13)을 기초로하여 구한 것이며, 계산치 $(f_{\infty}^R)''$ 는 식(7)에서 $C_d \rightarrow \infty$ 인 경우, 즉 절연판의 두께를 무

시하고 구한 값이다.

표 3에서 계산치 $(f_{\infty}^R)'$ 에 대한 측정치 f_{∞}^R 의 상대오차는 평균 2.36 (%)로서 계산치와 측정치는 비교적 잘 일치함을 알 수 있으며, 오차의 원인은 진동자와 진극및 절연판 사이의 공기층에 의한 것이라 생각된다.

또 그림 7의 회로에서 입력전원의 주파수를 각 변압기의 무부하 공진주파수에 고정시켜 놓고 부하저항 R_L 을 10 [kΩ]에서 10 [MΩ]까지 변화시켰을 때 전압비의 변화를 조사하였다. 변압기 #D - #E와 변압기 #B - #D에 대한 결과를 그림 9에 나타냈다. 이 그림에서 계산치를 나타내는 곡선은 식 (12)를 그린 것이다.

몇가지 경우에 대한 공진시의 무부하전압비의 측정치와 계산치를 표 4에 나타냈다. 이 표에서 계산

표 4. 적층형 PZT 압전변압기의 무부하전압비 (공진시)

Table 4. No-load voltage ratios of face-mounted PZT piezoelectric transformers (at resonance)

변압기		구분	공진시 무부하전압비		
입력소자	출력소자	측정치: $ A_{\infty}^R $	계산치: $ A_{\infty}^R '$	계산치: $ A_{\infty}^R ''$	계산치: $ A_{\infty}^R '''$
A	B	52.70	58.92	57.53	63.73
A	D	53.83	60.91	58.43	65.67
B	D	54.31	60.90	58.52	65.65
B	E	52.50	57.75	57.06	62.47
D	E	53.91	58.10	57.97	62.64

치 $|A_{\infty}^R|'$ 는 식(9)에서 접착면에서의 저항 R_d 를 무시하고 구한 것이며, 계산치 $|A_{\infty}^R|''$ 는 식(15)를 기초로 하여 구한 것이고, 계산치 $|A_{\infty}^R|'''$ 는 식(9)에서 저항 R_d 와 절연판의 두께를 무시한 경우의 값이다.

표 4에서 계산치 $|A_{\infty}^R|'$ 에 대한 측정치 $|A_{\infty}^R|$ 의 상대오차는 평균 9.86 [%] 이었다. 이러한 오차의 주된 원인은 계산치 $|A_{\infty}^R|'$ 의 값을 구할 때 접착층의 저항 R_d 와 지지임피던스 Z_f 및 Z_f' 를 무시한 것과 절연층 부근에서의 유향임피던스의 부정합 때문이라고 생각된다. 그러나 그림 9에서 보듯이 계산치의 곡선과 측정치의 곡선이 그 형태가 유사함을 알 수 있다.

5. 결 론

지금까지 유도한 식들과 실험결과를 통하여 적층형 PZT 압전변압기에 관한 다음의 결론을 얻을 수 있었다.

1) 적층형 PZT 압전변압기의 공진주파수는 그 변압기에 사용된 압전진동자의 직렬공진주파수에 크게 의존하고, 또 그 진동자의 고정용량과 전기기계 결합계수 및 절연판에 의한 정전용량에 의해서도 영향을 받으며, 부하저항이 큰 경우의 공진주파수는 부하저항에 거의 무관하다.

2) 이들 적층형 PZT 압전변압기의 전압비는 주파수와 부하저항에 의존하며, 부하저항이 일정한 경우의 전압비는 공진주파수에서 최대가 되고, 그 공진주파수를 벗어나면 급격히 감소하며, 공진시의 전압비는 부하저항이 증가함에 따라 증가하여 무부하에서 최대가 되고, 부하저항이 큰 경우의 전압비는 부하저항의 변화에도 안정하다. 특히 공진시 무부하에서의 전압비는 압전진동자의 전기기계 결합계수의 제곱과 기계적 품질계수의 곱에 비례한다.

3) 따라서 이러한 적층형 PZT 압전변압기를 이용하여 높은 전압비를 얻으려면 변압기를 전기기계 결합계수와 기계적 품질계수가 큰 압전진동자로 제작하고, 또 그 변압기를 저항이 큰 부하에서 공진주파수로 동작시키는 것이 좋으며, 절연판의 두께 및 재질에 의한 공진주파수의 조정에 관하여 더욱 연구할 필요가 있다고 본다.

참 고 문 헌

- 1) 電子材料工業會, 圧電セラミックスとその応用, 電波新聞社, 東京, 1974, pp. 159-175.
- 2) A. A. Tyshko & V. N. Baryshnikov; "Compact regulated photomultiplier power supply using a piezoelectric transformer," Instrum. & Exp. Tech., 18 (1975), pp. 1185-1186.
- 3) D. V. Igumnov & V. V. Drozhzhev; "The piezoelectric transformer as an emitter of electromagnetic waves," Telecom. & Radio Eng., 34 (1979), p. 87.
- 4) C. A. Rosen; "Ceramic transformer and filter," Ph. D. Dissertation, Syracuse University, 1956.
- 5) B. v. d. Veen; "The equivalent network of a piezoelectric crystal with divided electrodes," Philips Res. Repts., 11 (1956), pp. 66-79.
- 6) K. Saito & T. Wada; "Analysis of equivalent circuit of a ceramic transformer and its set-up characteristics for driving frequencies," Sci. & Eng. Rep. Nat. Def. Acad., 18 (1980) pp. 171-184.
- 7) Li Tong Tu, Yao Yi Jin, & Mu Zhen Han; "Piezoelectric ceramic transformer," Ferro-

- lectrics, 28 (1980), pp. 403-406.
- 8) A. A. Erofeev; "Dynamic properties of piezo-electric transformers and of systems based on them," Automation & Remote Control, 40 (1979), pp. 285 - 292.
 - 9) A. Lungo & F. A. Sauerland; "Ceramic band-pass transformer and filter elements," IRE. Intern. Conv. Record, 9 (1961), pp. 189 - 203.
 - 10) E. C. Munk; "The equivalent electrical circuit for radial modes of a piezoelectric ceramic disc with concentric electrodes," Philips Res. Repts. 20 (1965), pp. 170 - 189.
 - 11) V. L. Karlash; "Radial modes of piezoceramic disks with open circuit electrodes," Soviet Applied Mechanics, 17 (1981), pp. 836 - 839.
 - 12) H. W. Katz; Solid state magnetic and dielectric devices, John Wiley & Sons, Inc., N. Y. 1959, pp. 119 - 122.
 - 13) G. E. Martin; "Vibrations of coaxially segmented, longitudinally polarized ferroelectric tubes," J. Acoust. Soc. Am., 36 (1964), pp. 1496 - 1506.
 - 14) "IRE standards on piezoelectric Cr stals; Measurements of piezoelectric ceramics, 1961," Proc. IRE., 49 (1961), pp. 1161 - 1169.
 - 15) R. C. Weast (ed.), Handbook of Chemistry and Physics (54th ed.; Cleveland :CRC Press, 1973), p.E - 59.
 - 16) 박 창엽, 한 득염; "Langevin 형 PZT 압전변압기의 등가회로," 대한전기학회 1984년 하계 학술회의 논문집, pp. 188 - 190.