

전극 분할 적층형 압전변압기의 전기적 특성

이용국* 이상철 허두오 한득영
 건국대학교 전기공학과

Electrical Properties of a Laminated Piezoelectric Transformer with the Divided Electrodes

Yong-Kuk Lee* Sang-Cheal Lee Doo-Oh Hur Deuk-Young Han
 Dept. of Electrical Eng. Kon-kuk Univ.

Abstract-The transformer is fabricated with two piezoelectric vibrator with the divided electrodes and adhesive insulator. We applied the electric input to the driving vibrator in parallel and connect the output voltage to the generating vibrator in series to the resistor load near its fundamental resonance frequency. Then we investigate output voltage in series twice as large as in parallel. Moreover we investigate the load characteristics at resonance frequencies under various resistor and the frequency characteristics near the resonance frequency under no load. Its equivalent circuit is derived from the Mason's model of a thickness-driven piezoelectric vibrator. By its equivalent circuit, symbolic expressions for input impedances, voltage ratios, resonance frequencies, and bandwidths have been derived. The values calculated from those symbolic expressions are shown to agree well with the measurement values.

I. 서론

Rosen[1]과 Katz[2]에 의해 압전세라믹 변압기와 필터의 여러가지 형태에 관한 해석이 소개된 이후, 최근에는 다층형 압전 세라믹스가 압전변압기에 응용되어 그 전압비를 더욱 높이는 연구가 진행되고 있다[3][4].

본 연구에서는 주파수 특성과 크기 및 각 압전상수값이 유사한 두 개 진동자의 양면에 부착되어 있는 전극을 같은 크기로 분할하여 집착 접연체로 적층한 후 구동측 진동자의 입력은 병렬로, 발전측 진동자의 출력은 직렬로 접속함으로써 미분할 된 기존의 압전변압기에 비하여 전압비가 2배가 되도록 하였다.

이 변압기의 부하 특성과 주파수 특성을 해석하기 위하여, 기계적 손실을 고려한 압전진동자의 등가회로를 구하고, 그것을 기초로 하여 전극 분할 적층형 압전변압기의 일반적인 등가회로를 구하였으며, 이 등가회로로부터 압전변압기의 전기적 입력 및 출력에 관한 일반적인 관계식을 유도하였다. 또 그 관계식을 이용하여 공진주파수 부근에서의 등가회로를 구하였으며 이 등가회로로부터 압전변압기의 전기적 입력과 출력사이의 전압비, 대역폭, 공진주파수에 관한 식들을 해석하였으며 이러한 식들에 의한 계산치들과 실험치들을 비교고찰하였다.

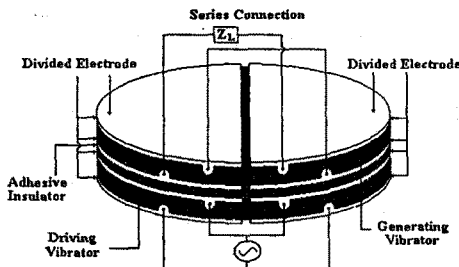


그림 1. 전극 분할 적층형 압전변압기

II. 전극 분할 적층형 압전변압기의 등가회로

그림1은 전극을 2분할했을 경우 적층형 압전변압기를 나타낸다. 그림 1에서 구동진동자(driving vibrator)에 전기적 입력을 인가하면 발전진동자(generating vibrator)의 각 전극에 전하가 유기되는 전하량 Q는 전극을 분할하지 않은 경우의 1/2로 감소하지만 면적도 1/2이 되므로 커패시턴스 C가 1/2이 된다. 즉 발전진동자의 각 부분에서 인출되는 출력전압이 전극을 분할하지 않은 경우와 동일하게 됨으로, 이들 두 출력전압을 직렬 연결하면 전극 미분할시의 출력전압의 2배가 된다.

이 전극 분할 적층형 압전변압기의 해석은 그림 2에서와 같이 Mason이 유도한 압전진동자의 등가회로를 기본으로 하며, 여기서 C_0 는 고정용량(clamped capacitance), ϕ 는 변심비, F와 U는 각각 진동자 표면에서의 힘과 입자속도이며 Z_0 , γ , r 는 이 압전진동자의 기계적 특성 임피던스, 전파정수, 두께를 나타낸다.

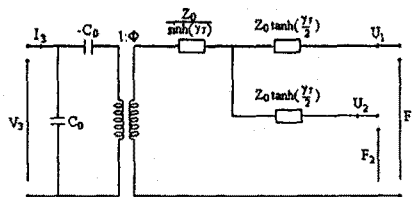


그림 2. 압전진동자의 등가회로

그림 1의 전극분할형 압전변압기를 해석하기 위해서 각 진동자의 면적 A와 두께 r 및 물리정수가 서로 같고 전극과 접연 집착체의 두께는 그 영향을 무시할 수 있을만큼 얇으며 진동자의 방사상방향의 진동이 두께방향의 진동에 영향을 미치지 않을만큼 그 변형이 두께보다 훨씬 크다고 가정한다. 이러한 조건하에서 전극분할시의 등가회로 그림 3과 같이 나타낼 수 있다.

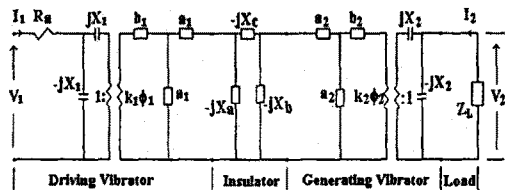


그림 3. 전극 미분할시 적층형 압전변압기의 등가회로

그림 3에서 첨자 i=1은 입력을, i=2는 출력을, 또 ω 를 동작시의 각 주파수라고 할 때 $X_1 = 1/\omega C_0$ 이며 계수 k_1, k_2 는 진동자 사이에 삽입된 접연체 내에서의 여러가지 영향들을 고려한 값들을 나타내며 저항 R1은 입력부분에서의 손실을 고려한 값을 나타낸다. 또한 π 회로

망에서의 X_a , X_b , X_c 는 절연체의 기계적 리액턴스라 다음과 같다.

$$X_a = (k_1\phi_1)^2 / aC_a, \quad X_b = (k_2\phi_2)^2 / aC_b, \quad X_c = (k_1\phi_1 k_2\phi_2) / aC_c$$

또한 a_1 , b_1 , a_2 , b_2 은 그림 2의 등가회로에서 대치된 식으로 $a_1 = Z_0 \tanh(\gamma_1 r_1/2)$, $b_1 = Z_0 / \sinh(\gamma_1 r_1)$ 를 나타낸다.

회로를 단순화하기 위해서 X_a , X_b 의 영향은 입력 진동자와 출력 진동자의 등적용량 (motional capacitance) C_{11} , C_{12} 에 포함시키고, $k_1\phi_1$, $k_2\phi_2$ 는 각각 N_1 , N_2 로 대치시킨 후, 진동자 양면에 부착된 각각의 전극을 2개로 분할하였을 때의 등가회로를 나타내면 그림 4와 같은 단순화된 회로로 나타낼 수 있다.

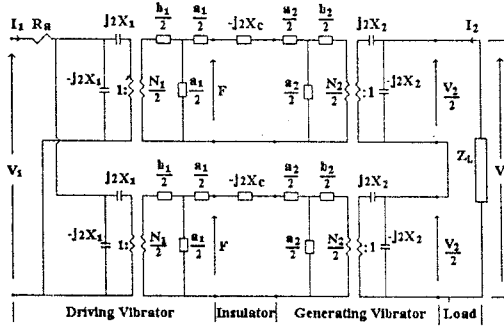


그림 4. 전극 분할 직층형 압전변압기의 단순화된 회로

III. 공진주파수 부근에서

전극 분할 직층형 압전변압기의 등가회로

그림 4의 등가회로로부터 각 진동자의 전극을 m 분할 하였을 때의 전기적 입력 V_1 (전압), I_1 (전류)와 기계적 출력 F (힘), U (입자 속도)사이의 전기-기계적 관계식은 다음과 같다.

$$\begin{bmatrix} F \\ U \end{bmatrix} = \frac{1}{jmN_1X_1} \begin{bmatrix} A_{11} & A_{12} \\ A_{21} & A_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_1 \\ I_1 \end{bmatrix} \quad (1)$$

$$A_{11} = -(a_1 + 2b_1)$$

$$A_{12} = (R_a - jX_1)(a_1 + 2b_1) + 2N_1^2X_1^2$$

$$A_{21} = -m(a_1 + b_1)/a_1$$

$$A_{22} = m[(R_a - jX_1)(a_1 + b_1) + N_1^2X_1^2] / a_1$$

또한, 전기적 출력 V_2 (전압), I_2 (전류)와 기계적 입력 F , U 의 전기-기계적 관계식은 다음과 같이 유도할 수 있다.

$$\begin{bmatrix} V_2 \\ I_2 \end{bmatrix} = -\frac{1}{jN_2X_2} \begin{bmatrix} B_{11} & B_{12} \\ B_{21} & B_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} F \\ U \end{bmatrix} \quad (2)$$

$$B_{11} = -jm^2X_2(a_2 + b_2 + jN_2^2X_2)/a_2$$

$$B_{12} = -jmX_2(a_2 + 2b_2 + jN_2^2X_2) + m^3X_2X_c(a_2 + b_2 + jN_2^2X_2)/a_2$$

$$B_{21} = (a_2 + b_2)/a_2$$

$$B_{22} = (a_2 + 2b_2)/m - jmX_c(a_2 + b_2)/a_2$$

이 때 기계적 품질계수 Q_m 이 큰 진동자의 기본 공진주파수 f_0 부근에서는 $\alpha \ll \beta$ 이므로 $\gamma \approx j\beta r \approx j\pi r$ 의 관계가 얻어지며, 다음과 같은 근사식을 얻을 수 있다.

$$(a_1 + b_1)/a_1 \approx 1/2, \quad N_1^2X_1/a_1 \ll 0, \quad a_1 + 2b_1 \approx (R_m + jX_m)/\approx Z_0/A,$$

$$R_m = \pi Z_0/Q_m, \quad X_m = 2\pi Z_0(f_1 - f_0)/f_1$$

이러한 근사식과 식 (1), (2)로부터 전기적 입력과 전기적 출력 사이의 기본관계를 유도할 수 있다.

$$\begin{bmatrix} V_2 \\ I_2 \end{bmatrix} = \frac{1}{16m^2N_1N_2X_1X_2} \begin{bmatrix} C_{11} & C_{12} \\ C_{21} & C_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_1 \\ I_1 \end{bmatrix} \quad (3)$$

$$C_{11} = j2m^3X_2(Z_1 + Z_2 - j2m^2X_c + j8N_2^2X_2)$$

$$C_{12} = -j2m^3X_2[(R_a - jX_1)(Z_1 + Z_2 - j2m^2X_c + j8N_2^2X_2) + 8N_1^2X_1^2]$$

$$C_{21} = -2m(Z_1 + Z_2 - j2m^2X_c)$$

$$C_{22} = 2m[(R_a - jX_1)(Z_1 + Z_2 - j2m^2X_c) + 8N_1^2X_1^2]$$

또한 위의 식으로부터 부하 임피던스가 Z_L 일 때 입력 임피던스 Z_i 를 유도하면 다음과 같다.

$$Z_i = \frac{1}{8N_1^2} \left\{ 8N_1^2R_a + \frac{(-j8N_1^2X_1)(Z_1 + j8N_1^2X_1)}{(-j8N_1^2X_1) + (Z_1 + j8N_1^2X_1)} \right\} \quad (4)$$

$$Z_a = Z_1 + Z_2 - j2m^2X_c + R_a + jX_a$$

$$R_a = \text{Re}[(8m^2N_2^2X_2)/(Z_L - jm^2X_2)],$$

$$X_a = \text{Im}[(8m^2N_2^2X_2)/(Z_L - jm^2X_2)]$$

식 (4)의 괄호안의 항은 $(-j8N_1^2X_1)$ 와 $(Z_1 + j8N_1^2X_1)$ 이 병렬 연결되어 있고 거기에 $8N_1^2R_a$ 이 직렬로 접속된 임피던스 형태로 되어 있다. 이러한 결과로부터 공진주파수 부근에서 그림 4는 그림 5와 같은 등가회로로 나타낼 수 있다.

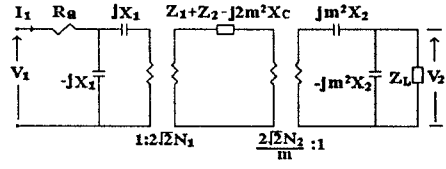


그림 5. 공진주파수 부근에서 전극 분할 직층형 압전변압기의 등가회로.

IV. 전극 분할 직층형 압전변압기의 전기적 특성

그림 5의 등가회로에서 이 변압기가 공진이 되기 위해서는

$$X_0 + X_m - 2m^2X_c + X_{m2} + X_a = 0 \quad (5)$$

이 되어야 한다. 여기서 $X_0 = \text{Im}[(8N_1^2X_1^2)/(R_a - jX_1)]$ 를 나타내며, 또한 전압비 $G = V_2/V_1$ 은 식 (3) 또는 그림 5로부터 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$G = -\frac{8mN_1N_2X_1X_2Z_L}{(Z_L - jm^2X_2)(R_a - jX_1)(R_0 + jX_0 + Z_a)} \quad (6)$$

$$R_0 = \text{Re}[(8N_1^2X_1^2)/(R_a - jX_1)]$$

를 나타내며, 이 식에 식 (5)를 대입하면 공진시 전압비 G 을 구할 수 있다.

$$G_r = -\frac{8mN_1N_2X_1X_2Z_L}{(Z_L - jm^2X_2)(R_a - jX_1)(R_0 + R_m + R_{m2} + R_a)} \quad (7)$$

대역폭은 $20 \log |G/G_r| = -3$ 으로부터 구해지는 다음의 관계로부터 구할 수 있다.

$$R_0 + R_m + R_{m2} + R_a = \pm(X_0 + X_m - 2m^2X_c + X_{m2} + X_a) \quad (8)$$

V. 실험 및 고찰

그림 1과 같은 전극 분할 직층형 압전변압기는 그림 6에서 보여지며 여기에 사용된 각각의 진동자의 특성과 절연 접촉체의 정전 용량은 표 1에 나타냈다.

표 III-1. 압전진동자의 특성

특성	시료	
	A	C
반경 [mm]	a	25
	b	25
두께 [mm]	a	1.5
	b	1.5
무게 [g]	a	46
	b	45.9
공진주파수 [kHz]	a	670.0
	b	670.0
반공진주파수 [kHz]	a	752.3
	b	752.3
등가저항 [Ohm]	a	1.26
	b	1.30
자유정전용량 [pf]	a	1.82
	b	1.80
절연정전용량 [pf]		0.536

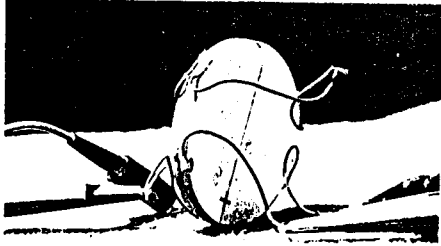


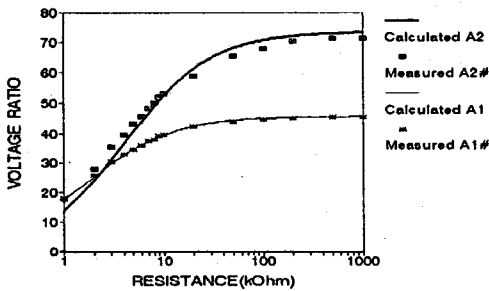
그림 6. 제작된 전극 분할 직충형 압전변압기

여기서 시료 A는 전극 2분할시에, B는 미분할시에 사용되었으며, 각각의 구동진동자와 발전진동자는 시료번호 a, b로 표시하였다. 또한 진동자 사이의 접착 절연체로는 시아노아크릴산 에스테르 접착제를 사용하였으며, 이 때 발생된 절연체 내에서의 여러가지 영향들을 고려한 손실 k_1 , k_2 와 입력부분에서의 손실 R_a 는 표 2에서 나타냈다. 여기서 A2는 발전진동자를 직렬연결했을 경우를, A1은 병렬로 연결했을 경우를 나타내며 분할된 전극과 전극 사이의 간격은 0.2[mm]로 하였다.

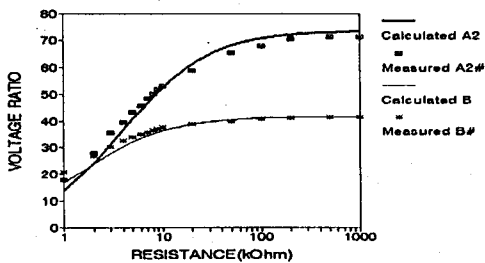
표 2. 압전진동자의 손실계수

	A2	A1	B
k_1	0.90	0.97	0.96
k_2	1.20	1.08	1.07
R_a	1.2	1.2	1.1

공진시 부하변화에 대한 주파수 특성은 그림 7에 보였으며, 여기서 A2, A1는 각각 출력 단자를 직렬과 병렬로 연결했을 경우의 이론적 계산치를 나타내며, A2#, A1#는 이 때의 실험치를 나타낸다. 실험측정을 위한 부하저항값은 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 20, 50, 100, 200, 500, 1000 [kΩ]을 사용하였으며 전압비 측정은 GAIN ANALYZER(HP 4194A)를 사용하였다. 또한 시료 B에 대한 전압비 특성과 시료 A2에 대한 전압비 특성을 비교하여 그림 8에 보았다.



8(a)

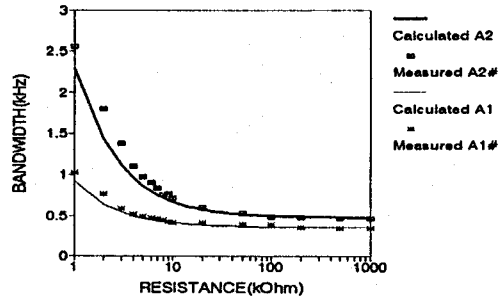


8(b)

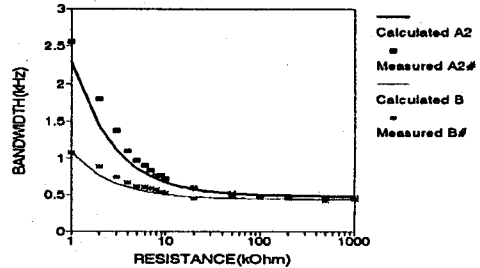
그림 8. 공진시 전압비 특성

그림 III-8에서 보여지듯이 부하저항이 높아질수록 전압비가 증가함을 알 수 있으며 전극 2분할시 발전진동자의 단자를 직렬연결했을 때 (A2)의 전압비가 병렬연결 했을 때(A1)의 전압비, 즉 전극 미분할시 (B) 전압비보다 2배 가까이 증가함을 알 수 있다. 낮은 부하저항 부근에서 발생하는 실험치와 이론치의 오차는 이상적으로 분할되지 못하고 제작시 발생된 오차와 전극과 전극사이의 영향을 계산에 넣지 못하므로 생성된 오차로 생각된다.

그림 9는 공진시 부하변화에 대한 대역폭 특성을 나타내고 있으며 실험치와 이론치가 대체로 잘 일치함을 보여주고 있다.



9(a)



9(b)

그림 9. 공진시 대역폭 특성

IV. 결론

특성들이 각각 거의 같은 압전진동자 두개와 접착 절연체를 이용하여 각 진동자 양면에 부착된 전극을 같은 크기로 2분할하고 구동진동자의 단자는 병렬로, 발전진동자는 직렬로 연결하여 구성된 전극 분할 직충형 압전변압기의 동가회로와 전압비, 부하특성에 관한 식들을 유도하고 전극 미분할의 경우와 비교하였다. 이 때 전극 분할시 입출력 전압비가 전극 미분할시 전압비보다 2배 가까이 증가하였으며, 이와 관련한 실험치가 이론치와 잘 일치하였다.

Reference

- [1]. C.A. Rosen, "Ceramic Transformers and Filters," Proc. Electronic Components Symposium, pp.205-211, 1957.
- [2]. H.W.Katz, "Solid State Magnetic and Dielectric devices," John Wiley and Sons, Inc., New York, pp.35-197, 1959.
- [3]. Deuk-Young Han, "A Study on the Characteristics of Laminated PZT Piezoelectric Transformers," Ph.D. dissertation, Yon-sei Univ., Seoul, 1984.
- [4]. E.D.Adler & J. K. Slaboszewics, et al, "PC Software For SAW Propagation in Anisotropic Multilayer," IEEE Ultrason. Ferroelectrics and Freq. Cont., Vol.37, No. 2, pp.215-223, 1990.
- [5]. A.A.Tyshko and V. N. Baryshnikov, "Compact Regulated hoto-multiplier Power Supply Using a Piezoelectric Transformer," Instrum. & Exp. Tech., 18(1975), pp.1185-1186.