

3중 적층형 압전 세라믹 트랜스듀서의 전기적 특성

이 상 칠* 정 영 우* 유 영 한** 한 득 영*
*건국대학교 전기공학과 **한양공업전문대학교

Electrical Properties of a Three-layered Piezoelectric Ceramic Transducer

Sang-Churl Lee* Young-Woo Jeong* Young-Han Yu** Deuk-Young Han*
*Dept. of Electrical Eng. Kok-Kuk Univ. **Han-Young Technical Junior College

ABSTRACT- A three-layered piezoelectric ceramic transducer is fabricated with three piezoelectric ceramic disk transducers and two sheets of thin insulator. Its equivalent circuit is derived from the Mason's model of a thickness-driven piezoelectric transducer. We applied the electric input near its fundamental resonant frequency to the center transducer and connect the output voltages across the left and right transducers in series to the resistor load. Then we investigate the load characteristics at resonant frequencies under various resistor loads and the frequency characteristics near the resonant frequency under no load. Moreover, symbolic expressions for input impedances, voltage ratios, resonant frequencies, and bandwidths have been derived. The values calculated from those symbolic expressions are shown to agree well with the measurement values.

1. 서론

Rosen[1]과 Katz[2]에 의해 압전세라믹 변압기와 필터의 여러 가지 형태에 관한 해석이 소개된 이후, 최근 몇년동안 다층형 압전변압기와 필터가 높은 전압비와 견고한 구조로 인해 많은 관심을 끌게 되었다[3-5]. 또한 압전진동자 사이의 매개층들의 효과와 부하효과가 여러 연구자들에 의해 다루어졌다[6,7].

본 논문에서는 3개의 압전세라믹 진동자와 2개의 얇은 절연판으로 구성된 3중 적층형 압전세라믹 트랜스듀서(이하 복합 압전 트랜스듀서라 함)에서 공진주파수 부근의 전기적 입력이 중앙의 압전 세라믹 진동자에 가해질 때 압전 역효과에 의한 기계적 진동이 일어나며, 그 진동은 양편의 진동자에 전달되어 각각의 전극에 전하를 발생시키며 이 전하는 직렬로 연결된 부하에서 출력 전압으로 나타난다. 압전 진동자의 기계적 품질계수 Q_m 이 큰 경우, 중앙의 진동자에 가해지는 입력전원의 주파수가 공진주파수 근처에 있을 때 출력 전압은 입력 전압보다 높게 된다.

본 논문에서는 여러가지 부하저항을 사용하여 공진시 복합 압전 트랜스듀서의 부하특성과 무부하시 공진주파수 부근에서의 주파수특성을 해석하고, 공진주파수 부근에서의 등가회로를 구하고자 한다. 또한 입력전압과 출력전압 사이의 전압비, 공진주파수에 대한 식들을 유도하고 이러한 식들에 의한 계산치들과 실험치들을 비교 연구하고자 한다.

2. 복합 압전트랜스듀서의 등가 모델

복합 압전트랜스듀서의 형태는 그림 1에 보인 것과 같고, 출력 진동자에서의 전압이 직렬로 접속되어 있는 경우에 대해서 등가 회로를 구하기로 한다. V_1 , V_2 , Z_L 는 각각 입력 전압, 출력 전압, 부하를 나타낸다.

이 복합 압전트랜스듀서를 해석하기 위해서 그림 2에서 보여진 것처럼 압전 진동자에 관한 Mason의 등가회로[2]를 이용한다. 이 등가회로에서 C_0 는 고정용량, ϕ 는 이상적인 변환 권수비, F 와

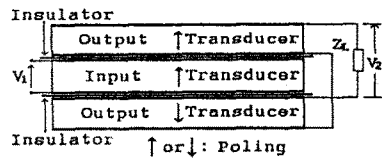


그림 1. 복합 압전 트랜스듀서

U 는 각각 진동자 표면에서의 힘과 입자속도이며 a , b 는 각각 다음과 같이 표현된다.

$$a = Z_0 \tanh(\gamma\tau/2), \quad b = Z_0 / \sinh(\gamma\tau)$$

여기서 Z_0 , γ , τ 는 각각 압전 진동자의 기계적 특성임피던스, 전과정수, 두께를 나타낸다.

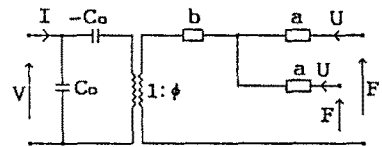


그림 2. 압전 진동자에 관한 Mason의 등가회로

그림 1의 복합 압전 트랜스듀서를 해석하기 위하여 다음과 같이 가정한다.

- (1). 원판형 압전 세라믹 진동자의 반경 r 은 두께 t 에 비하여 매우 크고, 입력 세라믹 진동자와 두개의 출력 세라믹 진동자의 크기 및 물리적 특성은 거의 같다.
- (2). 압전 진동자 사이에 삽입된 절연판의 두께는 아주 얇다고 가정하여 정전용량을 제외하고 무시하며 각각의 물리적 특성은 같다.
- (3). 절연판과 각 층 사이의 접촉, 그리고 지지장치에 분포된 손실의 일부는 입력전원에 직렬로 연결되고, 그 손실의 나머지 부분은 그림 2의 등가회로의 권수비를 변환시킨다.

이런 조건하에서 진동자 사이에 삽입된 절연판의 전기-기계적 등가회로를 그림 3에서와같은 π 회로로 대체 시킬 수 있다.

그림 3에서 첨자 $i=1$ 은 입력측, $i=2$ 는 출력측, 또 ω 를 동작시의 각주파수라고 할 때 $X_i = 1/j\omega C_0$ 이다. 저항 R_a , 계수 k_1 , k_2 는 지지장치와 각 층들 사이에 삽입된 절연판 내에서의 여러가지 손실들을 고려한 값들이다. X_a , X_b , X_c 는 절연판의 기계적 리액턴스를 나타내며, 다음과 같은 관계가 있다.

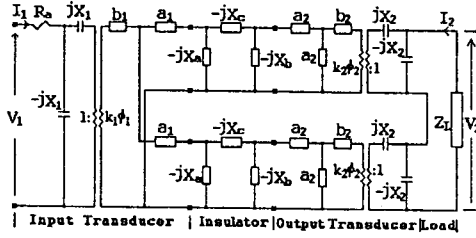


그림 3. 복합 압전 트랜스듀서의 전기-기계적 등가회로

$$X_a = (k_1\phi_1)^2/\omega C_a, \quad X_b = (k_2\phi_2)^2/\omega C_b, \quad X_c = (k_1\phi_1 k_2\phi_2)/\omega C_c$$

회로를 단순화하기 위해서 X_a, X_b 는 입력 진동자와 출력 진동자의 고정용량에 포함시키고, $k_1\phi_1, k_2\phi_2$ 는 각각 N_1, N_2 로 대체시켜서 그림 3에서의 전기적 회로를 기계적 회로로 변환시키면 그림 4와 같이 단순화된 기계적 회로로 나타낼 수 있다.

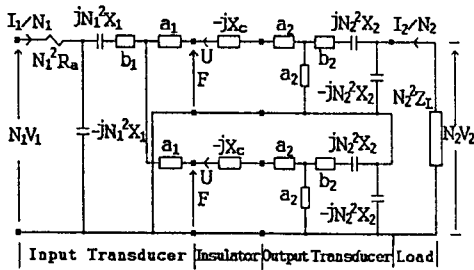


그림 4. 복합 압전 트랜스듀서의 단순화된 회로

3. 복합 압전 트랜스듀서의 전기-기계적 해석

그림 4로부터 전기적 입력 V_1 (전압), I_1 (전류)와 기계적 출력 F (힘), U (입자속도)사이의 전기-기계적 관계식은 식 (1)과 같이 표현된다.

$$\begin{bmatrix} F \\ U \end{bmatrix} = \frac{1}{j2N_1X_1} \begin{bmatrix} -(a_1+b_1) [(R_a-jX_1)(a_1+b_1)+2N_1^2X_1] & \\ -1 & R_a-jX_1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_1 \\ I_1 \end{bmatrix} \quad (1)$$

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

$$\begin{bmatrix} V_2 \\ I_2 \end{bmatrix} = \frac{-1}{jN_1X_1} \begin{bmatrix} A_{11} & A_{12} \\ A_{21} & A_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} F \\ U \end{bmatrix} \quad (2)$$

여기서

$$\begin{aligned} A_{11} &= -j2X_2(a_2+b_2+jN_2^2X_2)/a_2, \\ A_{12} &= -j2X_2[(a_2+2b_2+j2N_2^2X_2)-jX_c(a_2+b_2+jN_2^2X_2)]/a_2, \\ A_{21} &= (a_2+b_2)/a_2, \\ A_{22} &= [a_2(a_2+2b_2)-jX_c(a_2+b_2)]/a_2 \end{aligned}$$

높은 기계적 품질계수 Q_m 를 가진 진동자가 기본 공진주파수 근처에서 동작하게 될 때, $\gamma\tau$ 는 $j\omega$ 에 접근하게 되어 다음과 같은 근사식을 얻을 수 있다.

$$\begin{aligned} (a_1+b_1)/a_1 &= 1/2, \quad (a_2+2b_2) = (Rm_1+jXm_1)/4 = Z_L/4, \\ N_2^2X_2/a_2 &\ll 1 \end{aligned}$$

여기서

$$\begin{aligned} Rm_1 &= \pi Z_a/Qm_1, \quad Xm_1 = 2\pi Z_a(f-f_n)/f_n, \\ (f_n: \text{진동자의 기본공진주파수}, f: \text{동작 주파수}) \end{aligned}$$

이러한 근사식과 식 (1), (2)으로부터 다음과 같이 전기적 입력과 전기적 출력사이의 기본관계를 유도할 수 있다.

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

여기서

$$\begin{aligned} B_{11} &= jX_2(Z_1+2Z_2+j16N_2^2X_2-4X_c)/4, \\ B_{12} &= -jX_2[(R_a-jX_1)(Z_1+2Z_2+j16N_2^2X_2-4X_c)+8N_1^2X_1]/4, \\ B_{21} &= -(Z_1+2Z_2-j4X_c)/8, \\ B_{22} &= [(R_a-jX_1)(Z_1+2Z_2-j4X_c)+8N_1^2X_1]/8 \end{aligned}$$

식(3)으로부터 부하 임피던스가 Z_L 일 때 입력 임피던스 Z_{is} 를 유도하면 다음과 같다.

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

여기서

$$\begin{aligned} Z_s &= Z_1+2Z_2-j4X_c+R_s+jX_s, \\ R_s &= \text{Re}[(32N_2^2X_2)/(Z_L-j2X_2)], \\ X_s &= \text{Im}[(32N_2^2X_2)/(Z_L-j2X_2)] \end{aligned}$$

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

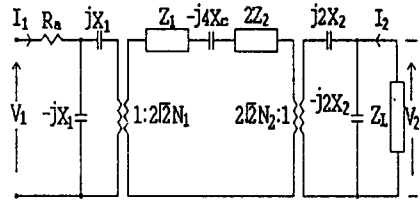


그림 5. 기본공진주파수부근에서 복합 압전트랜스듀서의 등가회로.

전압비 $G = (V_2/V_1)$ 은 식 (3) 또는 그림 5로부터 다음과 같이 구해진다.

$$G = \frac{-16N_1N_2X_1X_2Z_L}{(R_a-jX_1)(Z_L-j2X_2)(Z_s+R_0+jX_0)} \quad (5)$$

여기서

$$R_0 = \text{Re}[(8N_1^2X_1)/(R_a-jX_1)], \quad X_0 = \text{Im}[(8N_1^2X_1)/(R_a-jX_1)]$$

또한 이 복합트랜스듀서의 기본공진주파수는 그림 5로부터 구할 수 있다.

$$Xm_1+2Xm_2+X_s+X_0-4X_c=0 \quad (6)$$

공진주파수에서의 전압비 G_r 은 식 (6)로부터 다음 식 (7)이 얻어진다.

$$G_r = \frac{-16N_1 N_2 X_1 X_2 Z_L}{(R_a - jX_1)(Z_L - j2X_2)(R_{m1} + 2R_{m2} + R_0 + R_S)} \quad (7)$$

대역폭은 $20 \log_{10}(G/G_r) = -3$ 으로부터 구해지는 다음의 관계로부터 구할 수 있다.

$$R_{m1} + 2R_{m2} + R_0 + R_S = \pm (X_{m1} + 2X_{m2} + X_S + X_0 - 4X_C) \quad (8)$$

4. 실험결과 및 고찰

그림 1과 같은 복합 압전트랜스듀서에 사용된 각각의 진동자의 크기와 특성은 표 1에 나타냈고, 지지장치를 포함한 복합 압전트랜스듀서는 그림 6에서 보여준다.

표 1. 압전 진동자의 크기와 특성

	Disk #1	Disk #2	Disk #3
반경 [mm]	25.1	25.1	25.1
두께 [mm]	2.5	2.5	2.5
무게 [g]	38	38	38
공진주파수 [kHz]	790.00	789.25	790.75
반공진주파수 [kHz]	884.50	884.50	884.50
동기저항 [Ω]	0.51	0.41	0.50
자유정전용량 [pF]	8,108	8,075	8,163

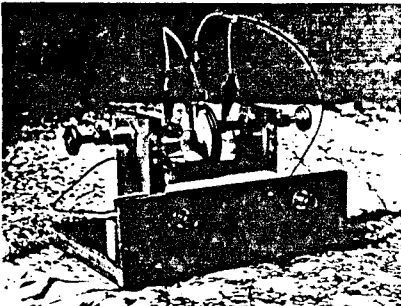


그림 6. 지지장치를 포함한 복합 압전트랜스듀서

각 진동자 사이의 절연판으로 얇은 PET(두께:0.05[mm]) 2장을 사용하였다. 지지장치는 2개의 2중 스프링과 가느다란 핀으로 이루어졌으며 지지장치 스프링의 힘으로 이 트랜스듀서를 지지하였다. 진동자 #1을 입력진동자로, 진동자 #2, #3을 출력진동자로 사용할 때, 입력전압과 출력전압사이의 전압비에 대한 특성을 그림 7에 보였으며, 또한 부하저항이 3.2, 4.7, 10, 47, 100, 470, 1,000 [kΩ]일 때 공진시 대역폭을 그림 8에 나타냈다. 표 1에서 진동자 #2, #3의 크기 및 물리적 특성의 평균값을 출력진동자의 변수로 계산에 사용하였다. 또 절연판과 지지장치의 영향을 나타내는 손실율 $R_a = 3[\Omega]$, 정전용량은 입력진동자에서 $C_{11} = 16.97[\text{pF}]$, 출력진동자에서 $C_{12} = 522.32[\text{pF}]$, $C_c = 58.74[\text{pF}]$, $k_1 = 0.82$, $k_2 = 1.18$ 를 계산에 사용하였다.

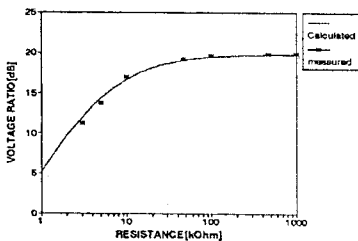


그림 7. 공진시 전압비 특성

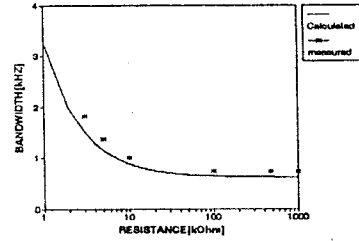


그림 8. 공진시 대역폭 특성

그림 7과 8에서 볼 수 있듯이 전압비와 대역폭은 계산치와 측정치가 잘 일치하며, 100[kΩ]이상의 부하저항에서는 거의 변화가 없음을 보여주고 있다. 또 무부하시 공진 주파수 부근에서의 전압비는 그림 9와 같다.

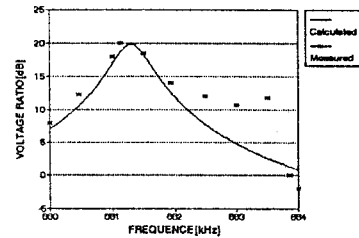


그림 9. 무부하시 주파수대 전압비

그림 9에서 전압비의 계산값들은 불요 모드에 기인하여 발생하는 883[KHz]이상에서의 차이를 제외하고는 측정값과 잘 일치한다.

5. 결론

3개의 압전 세라믹 진동자와 그 사이사이에 삽입한 두장의 얇은 절연판으로 이루어진 3중 복합 압전트랜스듀서에서 중앙의 진동자에 공진주파수의 전기적 입력을 인가하였을 때 양편의 진동자에서의 출력을 부하저항에 직렬로 연결한 경우의 동가회로와 전압비, 부하특성, 주파수 특성 등에 관한 식들을 유도하였고, 이 관계식으로부터 계산된 값들이 불요 모드 근처를 제외하고는 측정값과 잘 일치함을 보였다. 부하저항값이 클 때, 이 복합 압전트랜스듀서의 전압비, 대역폭은 안정된 특성을 보여주었다.

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.K.Sittig, "Transmission Parameters of Thickness-Driven Piezo-electric Transducers Arranged in Multilayer Configuratoin," IEEE Trans.Sonics and Ultrasonics, Vol.SU-14, No.4, pp.167-174, 1967.
- [5]. H.Tsuchiya and T.Fukami, "Design Principles for Multilayer Piezoelectric Transformar," Ferroelectrics, Vol.68, pp.225-234, 1986.
- [6]. E.K.Sittig "Effects of Bonding and Electrodes Layers on the Transmission Parameters of Piezoelectric Trasnducers Used in Ultrasonic Digital Delay Lines," IEEE Trans.Sonics and Ultrasonics, Vol.SU-16, No.1, pp2-10, 1968.
- [7]. G.Kossoff, "The Effects of Backing and Matching on the Performance of Piezoelectric Ceramic transducers," IEEE Trans.Sonics and Ultrasonic, Vol.SU-13, No.1, pp.20-30, 1966.