

복합 압전 트랜스듀서의 전기적 특성

Electrical Properties of a Composite Piezoelectric Transducer

논문
9-1-4

안형근*, 한득영

(Hyungkeun Ahn, Deuk-Young Han)

Abstract:

A composite piezoelectric ceramic transducer is fabricated with three piezoelectric ceramic disk vibrators and two sheets of thin insulator. Its equivalent circuit is derived from the Mason's model of a thickness-driven piezoelectric vibrator. When the electric input near its fundamental resonance frequency is applied to the center vibrator and the output voltages across the left and the right vibrators are connected in series to the resistor loads, the load characteristics at resonance frequencies under the various resistor loads and the frequency characteristics near the resonance frequency without load are investigated. Furthermore, symbolic expressions for input impedances, voltage ratios, resonance frequencies, and bandwidths are derived. The data calculated from those symbolic expressions are agreed well with the measurement data.

Key Words:(중요용어) Composite Piezoelectric Transducer (복합압전 트랜스듀서), Vibrator(진동자), Voltage Ratio (전압비), Resonance Frequency(공진주파수), Bandwidth(대역폭), Equivalent Circui(등가회로), Load Characteristics(부하특성), Frequency Characteristics.(주파수특성)

1. 서론

Rosen¹⁾과 Katz²⁾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 되었다³⁻⁷⁾. 또한 압전진동자 사이의 매개층들의 효과와 부하효과가 여러 연구자들에 의해 다루어졌다⁸⁻¹⁰⁾.

본 연구에서 다루려는 복합 압전 트랜스듀서는 3개의 압전세라믹 진동자와 2개의 얇은 절연판으로 구성되어 있으며, 공진주파수 부근의 전기적 입력이 중앙의 압전 세라믹 진동자에 가해질 때 압전 역효과에 의한 기계적 진동이 일어나며, 그 진동은 양편의 진동자에 전달되어 각각의 전극에 전하를 발생시키고 이 전하는 직렬로 연결된 부하에

서 출력 전압으로 나타난다. 압전 진동자의 기계적 품질계수 Q_m 이 큰 경우, 중앙의 진동자에 가해지는 입력 전원의 주파수가 공진주파수 근처에 있을 때 출력전압은 입력 전압보다 높게 된다.

이 출력 측에 여러 가지 부하저항을 사용하여 공진시 이 트랜스듀서의 부하특성과 무부하시 공진주파수 부근에서의 주파수 특성을 해석하고, 공진주파수 부근에서의 등가회로를 구하고자 한다. 또한 입력전압과 출력전압 사이의 전압비, 위상차, 대역폭, 공진주파수에 대한 식들을 유도하고 이러한 식들에 의한 계산치들과 실험치 들을 비교 연구하고자 한다.

2. 복합 압전 트랜스듀서의 등가 모델

그림 1에 보인 것과 같은 복합 압전 트랜스듀서에서 출력진동자에서의 전압이 직렬로 접속되어 있는 경우에 대해서 등가회로를 구하기로 한다. V_1, V_2, Z_L 는 각각 입력전압, 출력전압, 부하를 나타낸다.

* : 건국대학교 공대 전기공학과

접수일자 : 1995년 9월 5일

심사완료 : 1995년 10월 5일

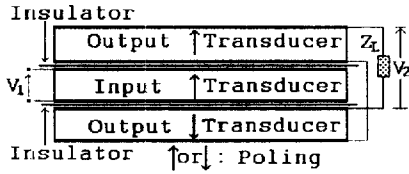


그림 1. 복합 압전 트랜스듀서
Fig 1. A composite piezoelectric transducer.

이 복합 압전트랜스듀서를 해석하기 위해서 그림 2에서 보여진 것처럼 압전 진동자에 관한 Mason의 등가회로²⁾를 이용한다. 이 등가회로에서 C_o 는 고정용량(clamped capacitance), ϕ 는 이상적인 변환 권수비, F 와 U 는 각각 진동자 표면에서의 힘과 입자 속도이며, a , b 는 각각 다음과 같이 표현된다.

$$a = Z_o \tanh(\gamma\tau/2)$$

$$b = Z_o / \sinh(\gamma\tau)$$

여기서 Z_o , γ , τ 는 각각 압전 진동자의 기계적 특성임피던스, 전파정수, 두께를 나타낸다.

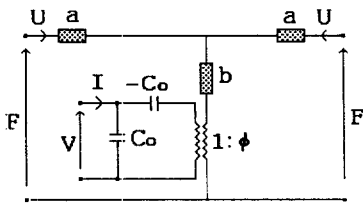


그림 2. 압전 진동자에 관한 Mason의 등가회로
Fig 2. Mason's equivalent circuit of a piezoelectric vibrator.

그림 2의 등가회로를 이용하고 진동자 사이에 삽입된 절연판을 π 회로로 대체하여 그림 1의 트랜스듀서에 관한 등가회로를 그림 3과 같이 표현할 수 있다.

그림 3에서 첨자 $i=1$ 은 입력을, $i=2$ 는 출력을 의미하고, 또 ω 를 동작자의 각주파수라고 할때

$$X_i = \frac{1}{\omega C_{oi}}$$

이다. 저항 R_a , 계수 k_1 , k_2 는 지지 장치와 각 층들 사이에 삽입된 절연판 내에서의 여러 가지 영향들을 고려한 값들이며 π 회로망의 X_a , X_b , X_c 는 절연판의 기계적 리액턴스를 나타낸다.

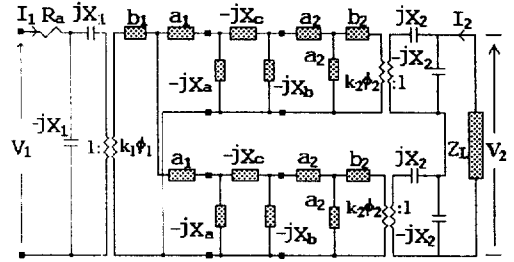


그림 3. 복합 압전 트랜스듀서의 전기-기계적 등가회로
Fig 3. Electro-mechanical equivalent circuit of a composite piezoelectric transducer.

회로를 단순화하기 위해서 X_a , X_b 의 영향은 입력진동자와 출력진동자의 동적용량(motional capacitances: C_{11}, C_{12})에 포함시키고 $k_1\phi_1, k_2\phi_2$ 는 각각 N_1, N_2 로 대체시켜서 그림 3의 전기적 회로를 기계적 회로로 변환시키면 그림 4와 같이 단순화된 기계적 회로로 나타낼 수 있다.

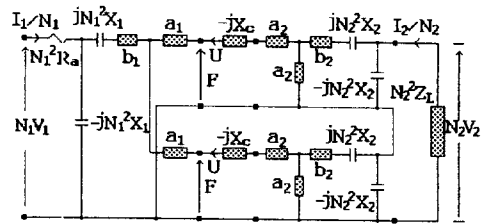


그림 4. 복합 압전 트랜스듀서의 단순화된 등가회로
Fig 4. Simplified circuit of a composite piezoelectric transducer.

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.

$$\begin{bmatrix} F \\ U \end{bmatrix} = \frac{1}{j2N_1X_i} \begin{bmatrix} -(a_1+2b_1) & Z_{V1}^2 \\ -1 & R_a - jX_1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_1 \\ I_1 \end{bmatrix} \quad (1)$$

$$\text{여기서 } Z_{V1}^2 = (R_a - jX_1)(a_1 + 2b_1) + 2N_1^2X_1^2$$

이다.

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.

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

여기서

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

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

$$(a_1+b_1)/a_1 \approx 1/2 \cdot (a_1+2b_1) \approx (R_{mi} + jX_{mi})/4 \approx Z_L/4,$$

$$N_1^2X_1/a_1 \ll 1$$

여기서

$$R_{mi} = \pi Z_{oi}/Q_{mi}, \quad X_{mi} = 2\pi Z_{oi}(f - f_{ri})/f_{ri}$$

(f_{ri} : 진동자의 기본공진주파수, f : 동작 주파수)

이러한 근사식으로부터 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

$$\begin{aligned} B_{11} &= jX_2(Z_1+2Z_2+j16N_2^2X_2-j4X_C)/4, \\ B_{12} &= -jX_2[(R_a-jX_1)(Z_1+2Z_2+j16N_2^2X_2-j4X_C) + 8N_1^2X_1^3]/4 \\ B_{21} &= -(Z_1+2Z_2-j4X_C)/8 \\ B_{22} &= [(R_a-jX_1)(Z_1+2Z_2-j4X_C) + 8N_1^2X_1^3]/8 \end{aligned}$$

식 (3)으로부터 부하 임피던스가 Z_L 일때 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

$$\begin{aligned} Z_S &= Z_1 + 2Z_2 - j4X_C + R_s + jX_s, \\ R_s &= \text{Re}[(32N_2^2X_2^2)/(Z_L - j2X_2)], \\ X_s &= \text{Im}[(32N_2^2X_2^2)/(Z_L - j2X_2)]. \end{aligned}$$

식 (4)의 괄호 안의 항은 ($Z_S + j8N_1^2X_1$)와 ($-j8N_1^2X_1$)이 병렬 연결되어 있고 거기에 $(8N_1^2R_a)$ 이 직렬로 접속된 임피던스 형태로 되어있다. 이러한 결과로부터 기본공진주파수 부근에서 그림 4와 그림 5와 같은 등가회로로 나타낼 수 있다.

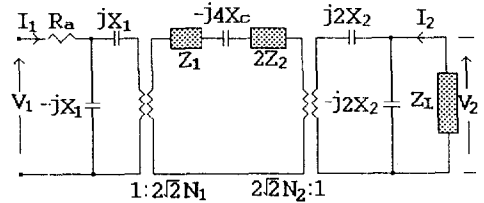


그림 5. 기본 공진주파수 부근에서 복합 압전 트랜스듀서의 등가회로

Fig 5. Equivalent circuit of a composite piezoelectric transducer near the fundamental resonance frequency.

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

$$G = \frac{-16N_1N_2X_1X_2Z_L}{(R_a - jX_1)(Z_L - j2X_2)(Z_S + R_o + jX_o)} \quad (5)$$

여기서

$$\begin{aligned} R_o &= \text{Re}[(8N_1^2X_1^2)/(R_a - jX_1)], \\ X_o &= \text{Im}[(8N_1^2X_1^2)/(R_a - jX_1)]. \end{aligned}$$

또한 이 복합트랜스듀서의 기본공진주파수는 그림 5로부터 구해지는 다음과 같은 식 (6)으로부터 구할 수 있다.

$$X_{m1} + 2X_{m2} + X_s + X_o - 4X_C = 0. \quad (6)$$

공진주파수에서의 진압비 G_r 은 식 (6)으로부터 식 (7)이 얻어지며, 대역폭은 $20\log_{10}(G/G_r)=-3$ 로부터 구해지는 다음의 관계식 (8)로부터 구할 수 있다. 입출력 전압 사이의 위상차는 다음식 (9)로부터 얻어진다.

$$G_r = \frac{-16N_1N_2X_1X_2Z_L}{(R_a - jX_1)(Z_L - j2X_2)(R_{m1} + 2R_{m2} + R_o + Z_s)} \quad (7)$$

$$R_{m1} + 2R_{m2} + R_o + R_s = \pm(X_{m1} + 2X_{m2} + X_s + X_o - 4X_c) \quad (8)$$

$$\theta = \tan^{-1}[\text{Im}(G)/\text{Re}(G)] \quad (9)$$

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.

Table 1. Dimensions and properties of piezoelectric ceramic transducers.

	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
등가저항[Ω]	0.51	0.41	0.50
자유정전용량[pF]	8,108	8,075	8,163

각 진동자 사이의 절연판으로 얇은 PET(두께 : 0.05 [mm]) 2장을 사용하였다. 지지장치는 2개의 스프링과 가느다란 핀으로 이루어졌으며 지지장치의 힘으로 이 트랜스듀서를 지지하였다. 진동자 #1을 입력 진동자로, 진동자 #2, #3를 출력진동자로 사용하고 부하저항이 3.2, 4.7, 10, 47, 100, 470, 1,000 [kΩ]일 때, 입력 전압과 출력 전압 사이의 공진주파수(그림 7), 진압비(그림 8), 대역폭(그림 9), 위상차(그림 10)에 대한 특성을 나타냈다. 표 1에서 진동자 #2, #3의 크기 및 물리적 특성의 평균 값을 출력진동자의 변수로 계산에 사용하였다. 또 절연판의 영향을 나타내는 손실을 $R_a=3[\Omega]$, 정전용량은 입력진동자에서 $C_{11}=16.97[\text{pF}]$, 출력진동자에서 $C_{12}=522.32[\text{pF}]$, 그리고 $C_c=58.74[\text{pF}]$, $k_1=0.82$,

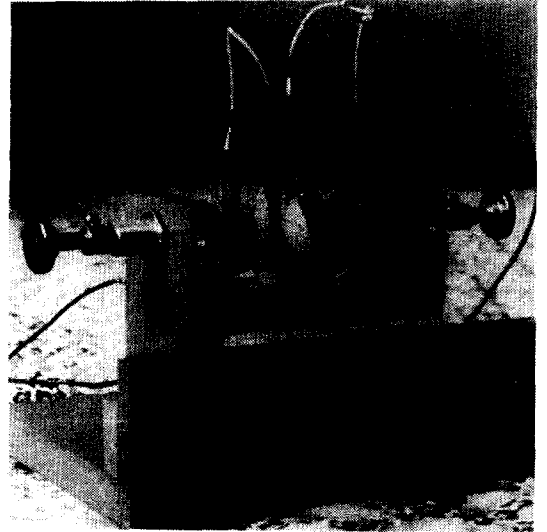


그림 6. 지지장치를 포함한 복합 압전 트랜스듀서
Fig. 6. A composite piezoelectric transducer with a supporting device.

$k_2=1.18$ 을 계산에 사용하였다.

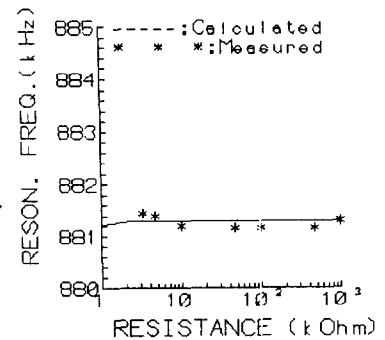


그림 7. 부하저항과 공진주파수의 관계
Fig. 7. Resonance frequency to the load

그림 7, 8, 9, 10에서 볼 수 있듯이 공진주파수, 진압비, 대역폭 그리고 위상차는 계산치와 측정치가 비교적 잘 일치하며, 100[kΩ]이상의 부하저항에서는 거의 변화가 없음을 보여주고 있다. 또 무부하시 공진주파수 부근에서의 진압비와 위상차는 그림 11, 12와 같다.

그림 11의 진압비의 계산값과 그림 12의 위상차의 계산값들은 불요 모드에 기인하여 발생하는 883[kHz]이상에서의 차이를 제외하고는 측정값과 잘 일치한다.

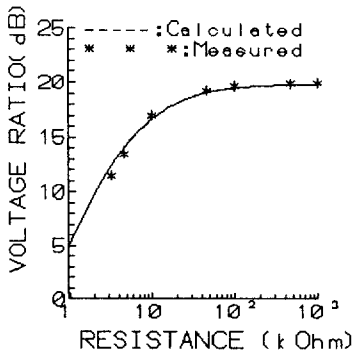


그림 8. 부하저항과 전압비의 관계
Fig. 8. Voltage ratio to the load resistance.

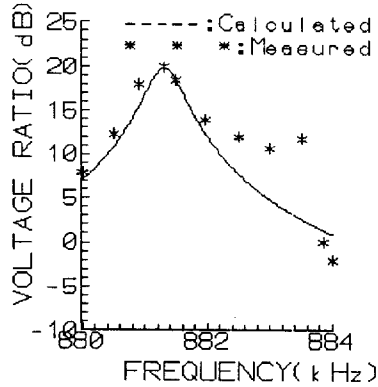


그림 11. 주파수와 전압비의 관계
Fig. 11. Voltage ratio to the frequency.

resistance.

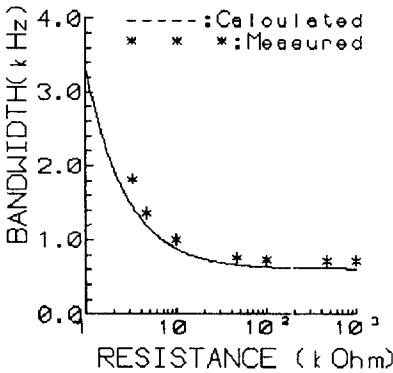


그림 9. 부하저항과 대역폭의 관계
Fig. 9. Bandwidth to the load resistance.

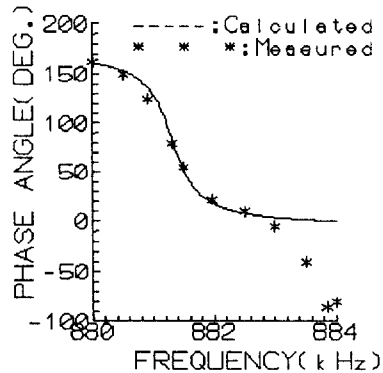


그림 12. 주파수와 위상차의 관계
Fig. 12. Phase angle to the frequency.

resistance.

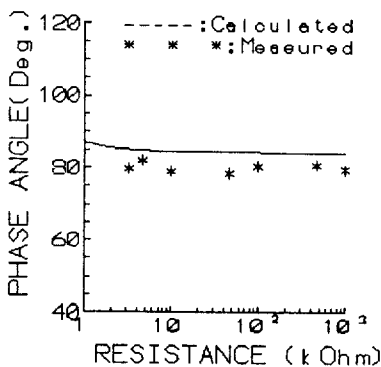


그림 10. 부하저항과 위상차의 관계
Fig. 10. Phase angle to the load resistance.

5. 결 론

3개의 압전 세라믹 진동자와 그 사아사이에 삽입한 두장의 얇은 절연판으로 이루어진 3중 복합 트랜스듀서에서 중앙의 진동자에 공진주파수의 전기적 입력을 인가하였을 때 양편의 진동자에서의 출력을 부하저항에 직렬로 연결한 경우의 등가회로와 전압비, 위상차, 부하특성, 주파수특성 등에 관한 식들을 유도하였고, 이 관계식으로부터 계산된 값들이 불요 모드 근처를 제외하고는 측정값과 잘 일치함을 보였다. 부하저항 10[k Ω] 이상 일때 이 복합 압전트랜스듀서의 전압비, 대역폭은 안정된 특성을 보여주었으며 공진주파수는 1[k Ω] 이상의 부하저항에서 거의 일정하였으며, 부하저항이 작을수록 전압비도 낮았다.

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, Yonsei Univ., Seoul, 1984.
4. E. K. Sittig, "Transmission Parameters of Thickness-Driven Piezoelectric Transducers Arranged in Multilayer Configurations," 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 Transformer," Ferroelectrics, Vol. 68, pp. 225-234, 1986.
6. Li Tong Tu and Deng Wei Ti, " Monolithic Piezoelectric Transformer," 1987 Proc. 37th Electronic Components Conf., pp.623-625, 1987.
7. E. L. Adler, "Matrix Methods Applied to Acoustic Waves in Multilayers," IEEE Trans. Ultrasonics, Ferroelectrics, and Freq. Cont., Vol. 37, No. 6, pp.485-490, 1990.
8. 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.
9. E. K. Sittig, " Effects of Bonding and Electrodes Layers on the Transmission Parameters of Piezoelectric Transducers used in Ultrasonic Digital Delay Lines," IEEE Trans. Sonics and Ultrasonics, Vol. SU-16, No. 1, pp.2-10, 1968.
10. D. Rose, " Load resonance Measurements of Quartz Crystals, " 45th Annual Symposium on Freq. Cont., pp.191-200, 1991.

저자소개

안형근



1959년 9월 26일생. 1983년 연세대학교 전기공학과 졸업. 1985년 연세대학교 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1993년 Univ. of Pittsburgh, Pittsburgh 전기공학과 졸업(Ph.D.). 1986~1990년 LG 반도체연구소 주임연구원. 1993~1995년

Univ. of Pittsburgh, Postdoctorate, 현재 건국대학교 전기공학과 조교수.

한득영



1947년 7월 5일생. 1974년 연세대학교 전기공학과 졸업. 1979년 연세대학교 대학원 졸업(석사). 1984년 연세대학교 전기공학과 졸업(Ph.D.). 1974~1976년 현대중공업 근무. 1982년 Univ. of Texas, Austin 교환연구원. 1992년 Univ. of

Illinois, Urbana- Campaign, 교환교수. 1981년~현재 건국대학교 전기공학과 교수.