

복합압전진동자의 공진주파수 이동에 관한 연구

이종우* 한득영

A Study on the Shift of Resonant Frequency in a Composite Piezoelectric Vibrator

Joung-Woo Lee Deuk-Young Han
Dept. of Electrical Eng. Kon-Kuk Univ

Abstract- This paper introduces a technique of shifting the resonant frequency and of depressing the spurious modes in the composite piezoelectric vibrator laminated in the order of piezoelectric vibrator/thin insulator/piezoelectric vibrator, whose vibrators have the same sizes and the same properties, respectively. The composite vibrator has shown the characteristics that the fundamental resonant frequency has decreased and spurious modes have depressed with increase of the capacitance of the inserted insulator. And the frequency characteristics of the composite vibrator without insulator have been nearly the same as those of each vibrator.

1. 서 론

동일한 특성을 갖는 2개의 압전세라믹 진동자를 진동자/절연판/진동자의 순서로 적층하여 만든 압전변압기나 압전필터의 공진주파수는 그 압전진동자 자체의 공진주파수에 크게 의존하지만 두 진동자의 사이에 삽입한 얇은 절연판에 의해서도 약간 변화한다.

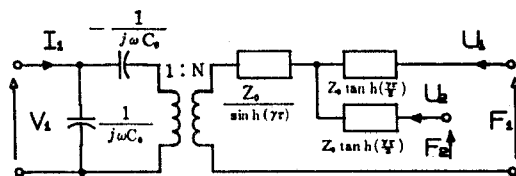
기존의 직육면체형 압전변압기나 압전필터에서는 사용되는 압전진동자의 크기에 의해서 공진주파수가 결정되므로 각각의 요구되는 공진주파수에 맞는 특정한 크기의 진동자를 설계·제작 하여야 하는 어려움이 있는 반면에, 1) 복합압전장치의 경우는 두 진동자의 사이에 삽입된 절연판의 정전용량을 변화시킴으로써 수 %의 범위내에서 공진주파수를 이동할 수 있으므로 진동자의 설계·제작이 용이하다. 그 뿐만 아니라 기존의 압전변압기나 필터의 경우는 전극의 형상이 특수하고 정교하여야 하고, 본공과정도 2번이 필요한 경우가 있는 반면에²⁾ 적층형의 경우는 절연판과 진동자 2개가 필요하고 외부회로와의 연결을 위한 단자처리가 요구되지만 전극의 형상이 특수하거나 정교할 필요가 없고 본공과정도 한번만 필요하여 대량생산에도 유리하고 기계적으로도 강한 점이 있다.

본 논문에서도 사용되는 압전진동자의 공진주파수와 반공진주파수, 그리고 그 두 특성주파수 사이에 있는 여러 불요모드(spurious mode) 중에서 가장 두드러진 모드에 관한

공진주파수와 반공진주파수, 각각의 등가저항, 등가인덕턴스, 등가커패시턴스, 고정용량 등을 측정하고, 그 값들을 이용하여 공진주파수 부근에서의 압전진동자에 관한 전기적 등가회로를 구하며, 그 등가회로와 절연판에 의한 정전용량을 고려하여 적층형 복합압전진동자의 등가회로를 구한 다음, 그 회로를 이용하여 절연판에 의한 정전용량이 그 복합압전진동자의 반공진주파수에 미치는 영향을 분석하고 실험에 의해 확인하고자 한다.

II. 복합압전진동자의 등가회로

반경 γ 이 그 두께 τ 보다 훨씬 큰 원판형 압전진동자의 전기-기계적인 등가회로는 그림 1 과 같이 나타낼 수 있다.³⁾



〈그림 1〉 압전진동자의 전기-기계적 등가회로

〈그림 1〉에서 v_1 와 I_1 는 각각 전기적 입력전압과 전류이고, F_1, F_2 및 U_1, U_2 는 각각 진동자 양면에서의 기계적 출력인 힘과 입자속도이며, Z_0, N, C_0 는 각각 압전진동자의 기계적 특성임피던스, 변성비, 고정용량으로서 다음의 관계가 있다.⁴⁾

$$Z_0 = A\sqrt{\rho C^D_{33}}$$

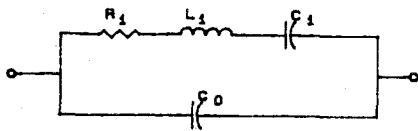
$$N = h_{33}C_0$$

$$C_0 = \epsilon^s_{33}A/\tau$$

위의 식들에서 $A, \rho, C^D_{33}, h_{33}, \epsilon^s_{33}$ 는 각각 그 압전진동자의 주면적, 밀도, 탄성정수, 압전정수, 유전율을 의미한다.

〈그림 1〉의 등가회로를 이용하여 양면이 자유단이고 불요모드를 고려하지 않을 경우 공진주파수 부근에서의 등가회로는 〈그림 2〉와 같이 간단히 표현할 수 있다.⁵⁾

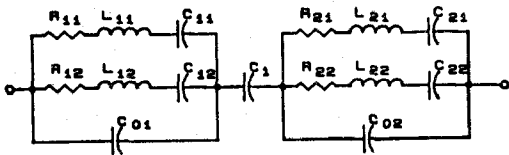
<그림 2>에서 R_1, L_1, C_1 은 각각 그 진동자의 등가저항, 등가인덕턴스, 등가캐패시턴스로서 측정 가능한 값들이다.



<그림 2> 공진주파수 부근에서의 압전진동자의 등가회로

<그림 2>의 등가회로와 두 진동자의 사이에 삽입한 얇은 절연판에 의한 정전용량 C_1 , 그리고 가장 두드러진 불요모드 하나만을 고려하여 복합압전진동자의 등가회로를 그리면 <그림 3>과 같이 나타낼 수 있다.

<그림 3>에서 $R_{11}, R_{21}, L_{11}, L_{21}, C_{11}, C_{21}$ 은 각 진동자의 기본모드와 관계되는 등가저항, 등가인덕턴스, 등가캐패시턴스이고, $R_{12}, R_{22}, L_{12}, L_{22}, C_{12}, C_{22}$ 는 각 진동자에서 고려한 불요모드와 관계되는 등가저항, 등가인덕턴스, 등가캐패시턴스이며, C_{01}, C_{02} 는 각 진동자의 고정용량이다.



<그림 3> 복합압전진동자의 등가회로

<그림 3>의 등가회로에서 그 합성임피던스 Z 를 구하면 식 (1)과 같다.

$$Z = \frac{-jX_{01}Z_{11}Z}{Z_{11}Z_{12} - jX_{01}(Z_{11} + Z_{12})} - jK_1 + \frac{-jX_{02}Z_{21}Z_{22}}{Z_{21}Z_{22} - jX_{02}(Z_{21} + Z_{22})} \quad (1)$$

식 (1)에서 Z_{1j} ($1, j = 1, 2$), X_{0j}, X_j 는 각각

$$Z_{11} = R_{11} + j(\omega L_{11} - 1/\omega C_{11}) = R_{11} + jX_{11}$$

$$Z_{12} = R_{12} + j(\omega L_{12} - 1/\omega C_{12}) = R_{12} + jX_{12}$$

$$Z_{21} = R_{21} + j(\omega L_{21} - 1/\omega C_{21}) = R_{21} + jX_{21}$$

$$Z_{22} = R_{22} + j(\omega L_{22} - 1/\omega C_{22}) = R_{22} + jX_{22}$$

$$X_{01} = 1/\omega C_{01}, \quad X_{02} = 1/\omega C_{02}, \quad X_j = 1/\omega C_j$$

의 관계가 있다.

특히 두 압전진동자의 특성과 크기가 각각 동일한 경우, 즉 $R_{11} = R_{21} = R_1, R_{12} = R_{22} = R_2, X_{11} = X_{21} = X_1, X_{12} = X_{22} = X_2, X_{01} = X_{02} = X_0$ 인 경우 <그림 3>의 합성임피던스의 크기 $|Z_L|$ 은 식 (2)와 같이 표현된다.

$$|Z_L| = \sqrt{\frac{\langle 2R_n + X_i X_d \rangle^2 + \langle 2X_n + X_i R_d \rangle^2}{R_d^2 + X_d^2}} \quad (2)$$

식(2)에서 R_d, X_d, R_n, X_n 은 각각 다음과 같다.

$$R_d = R_1 R_2 - X_1 X_2 + X_0 (X_1 + X_2)$$

$$X_d = R_1 X_2 + R_2 X_1 - X_0 (R_1 + R_2)$$

$$R_n = X_0 (R_1 X_2 + R_2 X_1)$$

$$X_n = X_0 (R_1 R_2 - X_1 X_2)$$

또 각 진동자의 임피던스의 크기 $|Z_{vj}|$ 는

$$|Z_{vj}| = \sqrt{\frac{R_n^2 + X_n^2}{R_d^2 + X_d^2}} \quad (3)$$

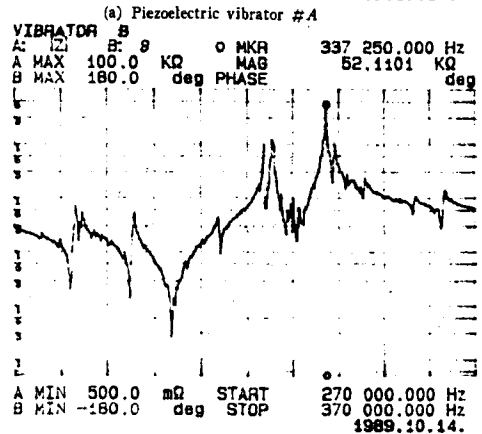
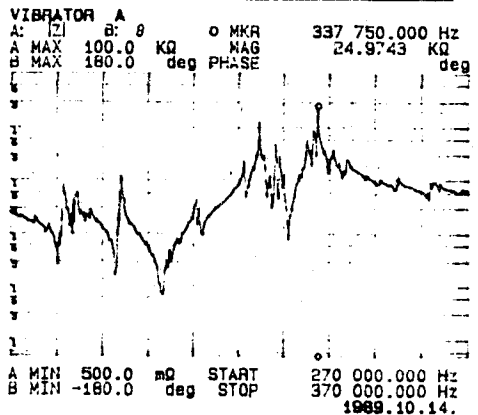
으로 표현된다.

I. 실 험

복합압전진동자에서 그 사이에 삽입한 얇은 절연판에 의한 정전용량이 공진주파수에 미치는 영향을 확인하기 위하여 반경이 30mm, 두께가 7mm,이며 <표 1> 및 <그림 4>(a), (b)와 같은 특성을 갖는 2개의 압전진동자를 사용하여 <그림 5>와 같은 구조의 적응형 복합압전진동자를 구성하였다.

<표 1> 압전진동자의 특성

압전진동자	R_1 [Ω]	R_2 [Ω]	L_1 [μH]	L_2 [μH]	C_1 [pF]	C_2 [pF]	C_0 [pF]
#A	5.61	80	2.84	12.9	96.8	1.8	442.8
#B	3.87	180	2.28	16.3	120.2	1.4	547.0



(b) Piezoelectric vibrator #B
<그림 4> 압전진동자의 무파수특성

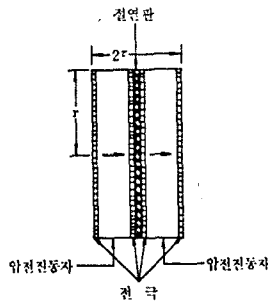
두 압전진동자 사이에 삽입한 절연판에 의한 정전용량은 동일 재질의 얇은 비닐을 1장과 2장, 그리고 절연판을 넣지 않은 경우에 관해 실험하였으며, 비닐 1장과 2장을 넣은 경우의 절연판에 의한 정전용량의 측정치는 각각 380[pF]과 190[pF]이었다.

<그림 5>와 같은 구조의 복합압전진동자의 양면을 편으로 약하게 지지하고 270[KHz]에서 370[KHz] 사이에서의 임피던스의 크기 변화를 조사한 결과 <그림 6> (a), (b), (c)와 같은 특성을 얻었다. 측정기로는 Hewlett-Packard 사의 Impedance Gain-Phase Analyzer 4194A 를 사용하였다.

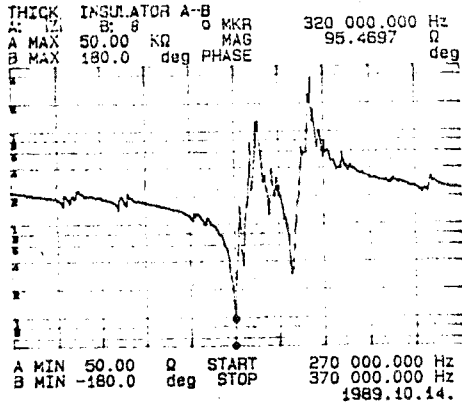
W. 결과 고찰

진동자 #A와 #B의 공진·반공진주파수 $f_{r1}, f_{r2}, f_{a1}, f_{a2}$ 의 측정치와 계산치를 <표 2>에 보인다. 이들 주파수의 측정치는 <그림 4>(a), (b)로부터 구하였고, 계산치는 <표 1>의 특성값을 이용하여 구하였다.

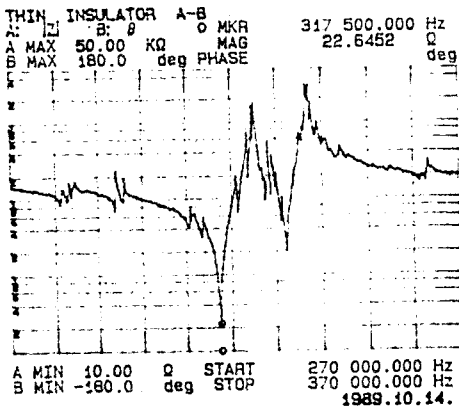
<표 2>에서 알 수 있듯이 진동자 #B의 반공진주파수 f_{a1} 에서 측정치에 대한 실험치의 오차가 최대로서 0.74% 이었으며, 실험결과와 계산결과가 잘 일치함을 보여 준다.



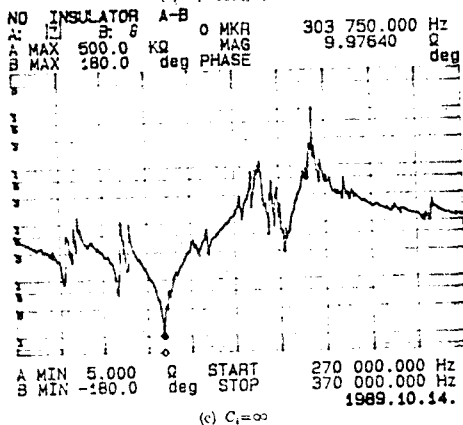
<그림 5> 복합압전진동자



(a) $C_i = 190(\text{pF})$



(b) $C_i = 380(\text{pF})$



(c) $C_i = \infty$

<그림 6> 복합압전진동자의 주파수특성

<표 2> 압전진동자의 공진·반공진 주파수

구분	공진 주파수		반공진 주파수	
	$f_{r1}[\text{kHz}]$	$f_{r2}[\text{kHz}]$	$f_{a1}[\text{kHz}]$	$f_{a2}[\text{kHz}]$
	측정치	계산치	측정치	계산치
압전진동자 #A	303.25	303.25	331.0	330.0
			324.6	326.8
			317.75	339.1
압전진동자 #B	303.75	304.20	330.5	330.2
			325.2	327.6
			337.25	339.3

복합압전진동자에서 관심의 대상인 공진·반공진주파수 $f_{r1}, f_{r2}, f_{a1}, f_{a2}$ 의 측정치와 계산치를 <표 3>에 보인다. 이들 주파수의 측정치는 <그림 6>(a), (b), (c)로부터 구하였고, 계산치는 <표 1>의 각 특성치와 식 (1)을 이용하여 구하였다.

<표 3>에서 알 수 있듯이 측정치에 대한 계산치의 오차는 어느 경우나 f_{a1} 에서 0.9%로 최대였으며, 실험결과와 계산결과가 잘 일치함을 알 수 있다.

<표 3>에서 보듯이 C_i 가 증가하면 공진주파수 f_{r2} 는 약간씩 감소하는 경향 있고, 관심의 주대상인 공진주파수 f_{r1} 은 그 감소율이 상당히 큰 반면에 반공진주파수 f_{a1}, f_{a2} 는 C_i 의 변화에도 거의 변화가 없음을 알 수 있다.

또 <표 2>의 특정주파수의 측정치와 <표 3>의 $C_i = \infty$ 인 경우, 즉 절연판을 삽입하지 않은 경우의 대응주파수를 비교하면 최대오차가 압전진동자 #B의 공진주파수 f_{r2} 와 복합압전진동자의 공진주파수 f_{r2} 사이에서 0.23%로서 두 경우의 특성이 거의 동일함을 보여주고 있다.

<표 3> 복합압전진동자의 공진·반공진 주파수

구분	공진 주파수		반공진 주파수	
	$f_{r1}[\text{kHz}]$	$f_{r2}[\text{kHz}]$	$f_{a1}[\text{kHz}]$	$f_{a2}[\text{kHz}]$
	측정치	계산치	측정치	계산치
$C_i = 190[\text{pF}]$	320.00	321.24	333.12	330.98
			325.0	327.77
			337.2	337.73
$C_i = 380[\text{pF}]$	317.50	316.27	332.50	330.49
			325.0	327.77
			330.2	337.73
$C_i = \infty$	303.75	303.71	331.25	330.10
			325.0	327.76
			337.2	337.74

V. 결 론

크기와 특성이 거의 동일한 2개의 압전진동자를 진동자/얇은 절연판/진동자의 순서로 적층하여 만든 적층형 압전진동자에서 절연판에 의한 정전용량이 그 복합진동자의 공진주파수에 미치는 영향을 해석하고 실험을 통하여 확인한 결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

1. 두 압전진동자의 사이에 삽입한 절연판에 의한 정전용량이 증가하면 기본공진주파수는 상당히 감소하였으나, 반공진주파수는 거의 변하지 않았다.

2. 절연판에 의한 정전용량이 감소할수록 불요모드가 감소하였다.

3. 절연판을 삽입하지 않은 경우의 주파수특성은 각 진동자의 주파수특성과 유사하였다.

4. 위의 사실들로부터 절연판을 이용하여 복합압전진동자의 공진주파수를 조정하고 불요모드를 억제함으로써 특성이 단일진동자의 경우보다 우수한 센서나 액츄에이터의 설계 및 제작이 가능하리라 기대된다.

본 논문에서는 주로 특성주파수에 관해서만 취급하였으나 그 주파수에서의 임피던스에 관한 연구가 더 필요하다고 생각된다.

참 고 문 헌

- [1] 電子材料工業會, 壓電セラミクスとその應用, 電波新聞社, 東京, 1974.
- [2] H.W Katz, Solide State Magnetic and Dielectric Device, John Wiley and Sons, Inc., New York, 1959.
- [3] V.I. Ivanov, "Equivalent Circuit and Input Impedance of a Piezoelectric Transducer with Internal Losses," Soviet Nondestruct. Test, 18, PP. 589~593, 1982.
- [4] W.P. Mason, Physical Acoustics, Vol. IA, Academic Press, New York, 1964.
- [5] "IEEE Standard on piezoelectricity," IEEE Std. 176-1978, IEEE Inc., New York, 1978.