

적층형 압전세라믹 필터의 해석

Analysis of a Laminated Piezoelectric Ceramic Filter

韓 得 永*
(Deuk-Young Han)

요 약

본 논문은 압전진동자/얇은 절연판/압전진동자의 순서로 적층한 세라믹필터에 관한 것으로서, 출력소자의 전극을 n 등분한 경우의 등가회로부터 공진주파수 부근에서의 전기적입출력, 입력전압과 출력전압 사이의 이득과 위상차, 공진주파수, 대역폭 등에 관한 일반적인 식들을 유도하였고, $n=1$ 인 경우의 관련 실험들을 통하여 그 식들이 실험결과들을 잘 설명함을 보여주었다.

Abstract- This paper is concerned with a ceramic filter laminated in the order of piezoelectric vibrator/thin insulator/piezoelectric vibrator, and introduces general expressions near the resonant frequency, related with electrical inputs and outputs, gain and phase difference between input and output voltages, resonant frequency, and bandwidth, when the electrodes of the output element are divided by n equi-sections. This paper also shows that those expressions describe well the related experimental phenomena when $n=1$.

1. 서 론

기존의 압전세라믹 필터는 요구되는 공진주파수에 합당한 크기의 압전진동자에 전극을 정교하게 부착하여 특정주파수의 전기적 신호를 통과시키는 기능을 갖도록 제작된 장치로서 주파수 선택도가 높기때문에 AM 및 FM 라디오 등 여러 분야에 사용되고있다. 그러나 그러한 필터는 전극의 형상과 배치가 정교해야 되고 분극과정도 어려운 경우

가 많으며, 주로 입력신호를 증폭없이 통과시켜주는 기능만을 갖는 경우가 대부분이다. (1, 2) 또한 기존의 적층형 압전필터의 경우는 2개 또는 그 이상의 압전진동자를 적층하였으나 출력소자의 전극을 분할하지 않은 것이다. (1, 2, 6)

본 논문에서는 동일한 크기와 특성을 갖는 범용의 압전진동자 2개를 사용하여, 양면의 전극을 분할하지 않은 진동자는 입력소자로, 양면의 전극을 n 등분한 진동자는 출력소자로 하고, 그 사이에 얇은 절연판을 삽입한 적층형 압전세라믹 필터에 관해, 그 등가회로를 유도하고, 공진주파수 부근에서의 전기적 입출력 관계와, 입출력 전압사이의 이득과 위상차, 공진주파수, 대역폭 등에 관한 일

*正 會 員 : 建國大 工大 電氣工學科 副教授 · 工博
接 受 日 字 : 1989年 11月 30日
1 次 修 正 : 1990年 9月 6日

반적인 식들을 구하고자 하며, $n=1$ 인 경우, 즉 출력소자의 전극을 분할하지 않은 경우의 전압이득, 입출력 전압사이의 위상차, 공진주파수, 대역폭 등에 관한 실험을 통하여 그 식들의 타당성을 확인하고, 그로부터 이 필터가 외부의 별도전원이나 coil 또는 capacitor 없이 증폭과 필터기능을 함께 지닌 증폭형 필터임을 보이고자 한다.

이 필터의 특징은 출력소자의 전극을 등분하고 그 각각의 출력을 직렬형 연결함으로써 전극을 분할하지 않은 경우보다 높은 전압이득을 얻을 수 있을 뿐만 아니라 그 전압이득도 조절할 수 있고, 또 이 필터의 공진주파수도 진동자 사이에 삽입한 절연판의 두께나 재질에 의해 조절할 수 있는 것이다. (3)

이러한 필터는 기존의 필터와 증폭기를 조합하여 사용하던 곳에 별도의 증폭기 없이 대응할 수 있으리라 기대된다.

2. 적층형 압전세라믹 필터의 특성해석

2.1 전기적 입출력 관계식

압전진동자의 물리적 특성과 반경 r 및 두께 t 가 각각 서로 같은 2개의 원판형 진동자를, 그 하나는 입력소자로, 다른 하나는 양면의 전극을 n 등분하여 출력소자로 하고, 그 소자들 사이에는 얇은 절연판을 삽입하여 그림 1과 같은 구조의 적층형 필터를 구성한다.

이러한 필터의 특성을 해석하기 위해서 압전진동자에 관한 Mason의 등가회로를 이용하여 그림 1의 필터를 등가회로로 표현하면 그림 2와 같이 된다. (4)

그림 2의 등가회로에 포함된 기호는 다음과 같은 관계가 있다.

$$a = Z_o \tanh(\gamma t/2), \quad b = Z_o \sinh(\gamma t)$$

$$X_o = 1/\omega C_o, \quad X_a = 1/\omega C_a, \quad N = h_{33} C_o$$

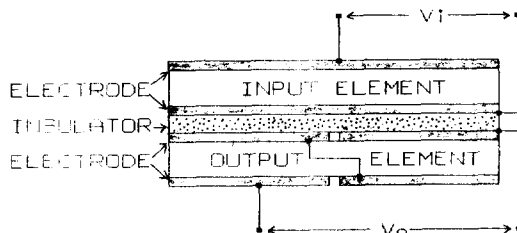


그림 1 적층형 압전세라믹 필터
Fig. 1 Laminated piezoelectric ceramic filter

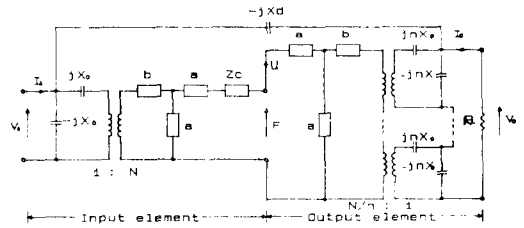


그림 2 적층형 압전세라믹 필터의 등가회로
Fig. 2 Equivalent circuit of a laminated piezoelectric ceramic filter

이들 식에 포함된 $Z_o, \gamma, N, C_o, h_{33}$ 은 각각 압전진동자의 기계적 특성임피던스, 전파정수, 변성비, 고정용량, 압전상수이며, C_a 는 절연판과 공기층에 의한 정전용량이고, Z_o 와 C_o 는 그 진동자의 주면적을 A , 밀도를 ρ, C_{33}^D 를 탄성상수 ϵ_{33}^S 를 유전율이라 할 때 다음의 관계가 있다.

$$Z_o = A \sqrt{\rho C_{33}^D}, \quad C_o = \epsilon_{33}^S A / t$$

여기서 탄성 상수 C_{33}^D 은 반공진주파수 f_p 를 이용하여 근사적으로 다음과 같이 구할 수 있다. (8)

$$C_{33}^D = 4\rho(zf_p)^2$$

그림 2에서 X_a 를 기계적 리액턴스 X_i 로 변환하여 근사적으로 전극 및 절연판과 공기층의 기계적 임피던스 Z_c 와 직렬연결한 경우, 절연판을 포함시킨 입력소자에서의 입력전압 및 전류 V_i 및 I_i 와, 접촉면에서의 힘 F 및 입자속도 U 사이에는 공진주파수 부근에서 근사적으로 다음의 관계식을 유도할 수 있다. (5, 6, 7)

$$\begin{bmatrix} F \\ U \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{Z_m + 2Z_c - j2X_i}{j4NX_o} \\ \frac{1}{j2NX_o} \\ -\frac{Z_m + 2Z_c + j8N^2X_o - j2X_i}{4N} \\ -\frac{1}{2N} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_i \\ I_i \end{bmatrix} \quad (1)$$

식 (1)에서

$$a + 2b = Z_m/4 = (R_m + jX_m)/4$$

$$R_m = \pi Z_o / Q_m, \quad X_m = 2\pi Z_o (f - f_o) / f_o$$

$$Q_m = 2\pi f_o L_1 / R_1$$

$$X_i = 4N^2 X_a, \quad Z_c = R_c + jX_c$$

의 관계가 있으며, Q_m, R_i, L_1, f_o 는 각각 진동자의 기계적 품질계수, 등가저항, 등가인덕턴스, 공진 주파수이고, R_c, X_c 는 각각 전극, 공기층, 절연판에서의 기계적 저항과 기계적 리액턴스이다.

또 출력소자에서 분할전극 사이의 간격을 좁게 하여 그 영향을 무시하고, 각 전극부분에서의 전기적 출력을 직렬연결한 경우, 입력소자로부터의 기계적 입력 F, U 와 출력소자의 전기적 출력 V_o, I_o 사이에는 공진주파수 부근에서 근사적으로 다음의 관계를 구할 수 있다.

$$\begin{bmatrix} V_o \\ I_o \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{n}{2N} & \frac{n(Z_m + j8N^2X_o)}{4N} \\ -\frac{1}{j2nNX_o} & \frac{Z_m}{j4nNX_o} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} F \\ U \end{bmatrix} \quad (2)$$

식 (1)과 (2)를 조합하여 간단히 하면 다음 식과 같은 전기적 입출력에 관한 식이 구해진다.

$$\begin{bmatrix} V_o \\ I_o \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{n(Z_m + Z_c + j4N^2X_o - jX_i)}{j4N^2X_o} \\ -\frac{Z_m + Z_c - jX_i}{4nN^2X_o^2} \\ \frac{n(Z_m + Z_o + j8N^2X_o - jX_i)}{4N^2} \\ \frac{Z_m + Z_c + j4N^2X_o - jX_i}{j4nN^2X_o} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_i \\ I_i \end{bmatrix} \quad (3)$$

2.2 전압이득과 위상차

그림 2에서와 같이 부하로서 저항 R_L 을 연결한 경우 전압이득 $G = V_o/V_i$ 는 식 (3)으로부터 다음과 같이 구해진다.

$$G = \frac{-j4nN^2X_oR_L/(R_L - j^2n \times 0)}{(R_m + R_e + R_c) + j(X_m + 4N^2X_o + X_e + X_c - X_i)} \quad (4)$$

식 (4)에서 R_e, X_e 는 각각 다음의 관계가 있다.

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

특히 $R_L \gg n^2X_o$ 이고 R_c, X_c 를 무시한 경우, 전압이득 G_v 는 식 (4)로부터

$$G_v = \frac{-j4nN^2X_o}{(R_m + R_c) + j(X_m + 4N^2X_o + X_c - 4N^2X_d)} \quad (5)$$

이 구해지며, 무부하시 전압이득크기 $|G^\infty|$ 는

$$|G^\infty| = \frac{2nN^2Q_m/\pi^2Z_oC_of}{\sqrt{[1 + 4Q_m^2((f-f_o)/f_o + N^2(1-C_o/C_d))/(\pi^2Z_oC_of)]^2}} \quad (6)$$

의 관계가 있다.

또 공진은 식 (4)에서

$$X_m + 4N^2X_o + X_e + X_c - X_i = 0 \quad (7)$$

일 때 일어나며, 이 경우의 전압이득 G_R 은

$$G_R = \frac{-j4nN^2X_o}{R_m + R_e + R_c}$$

이 구해지고, 무부하 공진시의 전압이득크기 $|G^{R\infty}|$ 는 식 (6)으로부터

$$|G^{R\infty}| = \frac{2nN^2Q_m}{\pi^2Z_oC_of^{R\infty}} \quad (8)$$

으로 표현된다.

입력전압과 출력전압 사이의 위상차 θ_v 는 식 (5)로부터

$$\theta_v = \tan^{-1}[(R_m + R_e)/(X_m + 4N^2X_o + X_e - 4N^2X_d)] \quad (9)$$

이 구해지며, 특히 공진시의 위상차는 90° 임을 알 수 있다.

2.3 공진주파수와 대역폭

공진조건은 식 (7)로 표현되며 그 식으로부터 공진주파수 f_{RL}^R 을 구하면 X_c 를 무시할때,

$$f_{RL}^R = \frac{f_o}{2} + \frac{\sqrt{f_o^2 - (4N^2f_o/(\pi^2Z_o)[1/C_o - 1/C_d + n^4X_o^2/(R_L^2 + n^4X_o^2)/C_o])}}{2} \quad (10)$$

이 되고, 특히 무부하시의 공진주파수 $f^{R\infty}$ 은 근사적으로

$$f^{R\infty} = f_o - \frac{N^2}{\pi^2C_oZ_o}(1 - C_o/C_d) \quad (11)$$

으로 표현할 수 있다. 식 (10)과 (11)을 비교하면 $R_L \gg n^2X_o$ 인 경우 공진주파수는 부하저항 R_L 에 무관하게 거의 일정함을 알 수 있다.

무부하상태에서 공진주파수 $f^{R\infty}$ 로 부터 미소한 주파수 $\pm \Delta f$ 만큼 편차가 생길 경우의 전압이득크기 $|G^\omega|$ 는 식 (6)과 (11)로 부터 근사적으로

$$|G^\omega| = \frac{|G^{R\infty}|}{\sqrt{[1 + (2Q_m\Delta f/f_o)^2]}}$$

이 구해지고, 이 식으로부터 대역폭 BW 를 구하면

표 1 압전진동자의 특성

Table 1 Properties of piezoelectric vibrators.

진동자 번호	공진주파수 fo[kHz]	반공진주파수 fp[kHz]	R ₁ [Ω]	L ₁ [mH]	C ₁ [pF]	C _o [pF]	Z _o [kg/sec]
#A	303.2	337.75	5.61	2.843	96.8	442.8	101,002
#B	304.0	337.25	3.87	2.278	120.2	547.0	100,852

$$BW = f_o / Q_m$$

이 된다.

3. 실험 및 결과고찰

위에서 유도한 식들의 타당성을 확인하기 위하

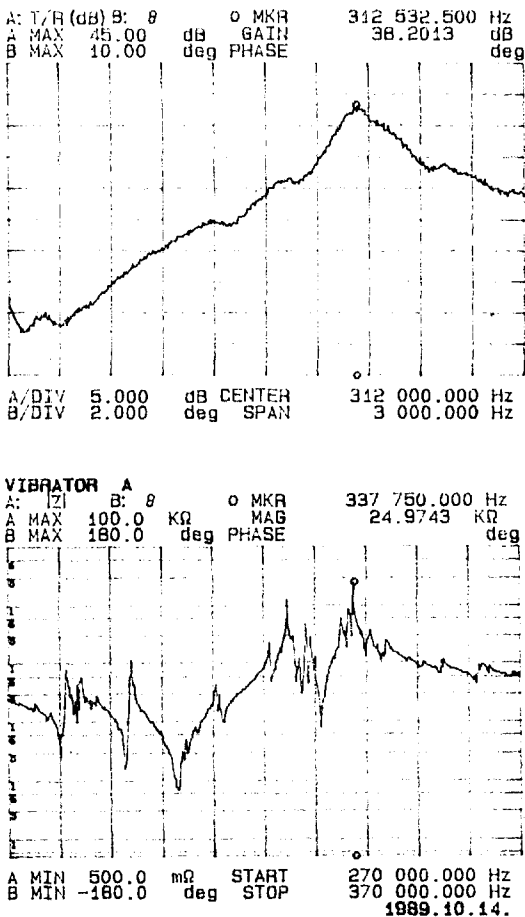


그림 3 압전진동자 #A 및 #B의 주파수 특성

Fig. 3 Frequency characteristics of the piezoelectric vibrators #A and #B

여 $n=1$, 즉 출력소자의 전극을 분할하지 않은 압전진동자를 사용하여 그림 1과 같은 구조의 필터를 만들었다. 이때 도선을 연결하기 위하여 진동자와 절연판 사이에 알루미늄 박막을 한장씩 넣었으며, 절연판에 의한 정전용량 C_i 는 측정결과 1134[pF]이었다.

사용한 진동자는 두께 6.94[mm], 반경 30[mm], 밀도 7.62×10^3 [kg/m³]이었으며 다른 특성은 표 1에 보인 바와 같다.

압전진동자 #A, #B의 주파수 특성을 그림 3(a), (b)에 각각 보였으며, 이들 그림으로부터 각진동자의 공진, 반공진 주파수를 구하였다.

각 진동자들의 양면에서의 진동이 방해받지 않도록 양면과 하단을 끝이 날카로운 나사못으로 가볍게 지지하고, 전압이득과 위상차를 오실로스코프로 측정하였다.

진동자 #B를 입력소자로하고 #A를 출력소자로한 경우, 부하저항 300[kΩ]에서 공진시에 그림 4(a), (b)와 같은 결과를 얻었다.

그림 4(a)에서 $\Delta V_1 = 96.5$ [mV]는 입력전압의 $p-p$ 값이고, 그 반주기가 $\Delta T = 1.6$ [μs]로서 공진주파수는 312.5[kHz]임을 보여주고 있으며, 그림 4(b)에서 $\Delta V_2 = 6.08$ [V]가 출력전압의 $p-p$ 값이고, 공진주파수는 역시 312.5[kHz]임을 보여주고 있다. 이들 값들로부터 전압이득은 63.3배임을 알 수 있으며, 식 (5)를 이용하여 구한 전압이득은 68.1배가 된다. 또한 공진시의 입출력 전압사이의 위상차는 그림 4(a), (b)로부터 알 수 있듯이 거의 90°이고, 이는 식 (9)로부터 구한 결과와 일치한다.

또 양쪽의 진동자 사이에 삽입한 2장의 전극용 알루미늄 박막과 1장의 절연판 사이사이에 생기는 4번의 공기층에 의한 정전용량 C_i 는 직렬연결되어 있으므로 그 합성정전용량 C_a 는, 공기층의 두께를 t_a , 절연판의 두께와 비유전율을 각각 t_i, ϵ_r 이라할 때

$$C_i = \frac{\epsilon_o \epsilon_r A}{t_i + 4t_a \epsilon_r}$$

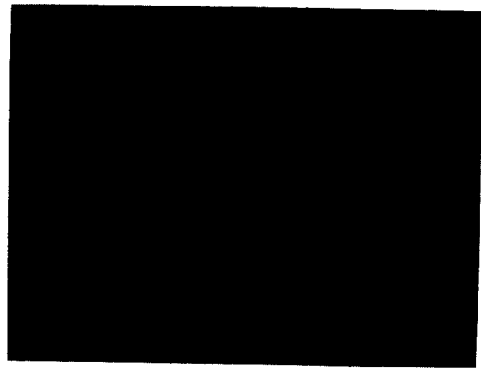
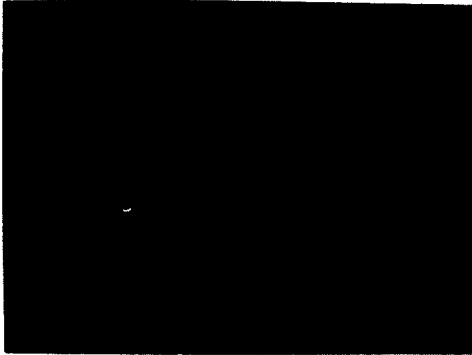


그림 4 압전세라믹필터의 입출력 전압, 위상차, 공진주파수(부하 : 300[kΩ])

Fig. 4 Input and output voltages, phase difference, and resonant frequency of the piezoelectric ceramic filter (load : 300[kΩ])

의 관계가 있으며, 이때 ϵ_r 이 2.26인 폴리에틸렌의 경우 근사적으로 $t_i + 4\epsilon_r t_a \cong 4t_i$ 라 하면

$$C_a \cong C_i/4$$

가 되며, 이 경우 식 (10)으로부터 계산한 공진주파수는 314.1[kHz]이고, 실험결과는 312.5[kHz]이었다.

전압이득의 경우 실험치에 대한 계산치의 오차는 7.6%이고, 공진주파수의 실험치에 대한 계산치의 오차는 0.5%이다. 전압이득에서의 오차는 식 (4)에서 무시한 전극박막 및 절연판에 의한 기계적

저항 R_c 와 자유면을 지지한 지지물의 영향이 원인이라 생각되며, 실험과정에서 지지못에 힘을 가하면 출력전압이 낮아지는 것이 이를 뒷받침한다.

또 대표적인 경우로서 부하저항 10[MΩ]을 연결한 경우 주파수의 변화에 따른 전압이득의 특성을 그림 5에 나타내었다.

그림 5에서 볼 수 있듯이 이 필터는 312.5[kHz]에서 공진이 일어나고 그때의 전압이득은 38.2[dB], 즉 81.3배였으며, 식 (5)로부터 구한 전압이득의 계산치는 87.9배이고 전압이득의 실험치에 대한 계산치의 오차는 8.1%로서 그림 4(a), (b)의 경우와 비슷하였다. 또한 그림 5로부터 구한 대역폭은 260[Hz]이었으며, 식 (12)로부터 구한 대역폭은 290[Hz]이었다.

또 부하저항의 변화에 따른 전압이득과 공진주파수의 관계를 표 2에 보인다.

표 2에서 볼 수 있듯이 부하저항이 증가하면 전

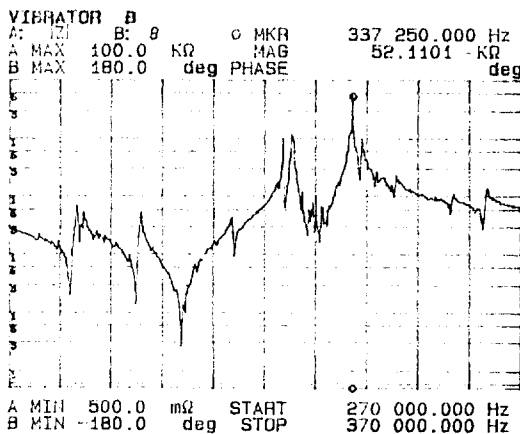


그림 5 압전세라믹필터의 전압이득 특성(부하 : 10[MΩ])

Fig. 5 Voltage gain characteristics of the piezoelectric ceramic filter (load : 10[MΩ])

표 2 압전세라믹필터의 부하저항, 전압이득 및 공진주파수

Table 2 Load resistance, voltage gain, and resonant frequency of the piezoelectric ceramic filter

부하저항[kΩ]	전압이득[dB]		공진주파수[kHz]	
	계산치	실험치	계산치	실험치
300	36.66	36.02	314.10	312.50
1,000	38.20	38.08	314.10	312.55
10,000	38.88	38.20	314.10	312.53
무부하	38.96	38.38	314.10	312.65

압이득은 계산치와 실험치가 모두 증가하면서 포화되었으나, 공진주파수는 실험치의 경우 약간씩 증가하는 반면 식(10)으로부터 구한 계산치는 거의 변동이 없었다.

4. 결론

특성이 유사한 2개의 압전진동자를 사용하여 적층형 압전필터를 만들고, 출력소자의 양면전극을 n 등분한 경우의 등가회로로부터 전압이득, 입출력전압 사이의 위상차, 공진주파수, 대역폭 등에 관한 식들을 유도하고, 출력소자의 전극을 분할하지 않은 경우, 즉 $n=1$ 인 경우에 관한 실험을 통하여 그 식들의 타당성을 검토하였으며, 그 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

전압이득은 입력보다 출력이 커지는 증폭기능이 있었으며, 공진주파수에서는 입력전압과 출력전압 사이에 90° 의 위상차가 있었다.

공진주파수는 부하저항이 큰 경우 부하의 변동에 거의 무관하게 일정하였고, 절연판에 의한 정전용량에 의해 약간 변화하였으며, 대역폭은 진동자의 기계적 품질계수에 반비례하였다.

또 출력소자의 양면전극을 등분하여 그 각각의 출력을 직렬연결하면 전압이득을 더 높일 수 있리라 기대되며, 앞으로 각 진동자의 상이한 특성을 고려한 경우의 식들과, 입력임피던스, 절연판의 영향 등에 관해 더욱 연구할 필요가 있다고 본다.

참 고 문 헌

- [1] 電子材料工業會, 壓電セラミックスとその應用, 電波新聞社, 憧憬, 1974
- [2] H.W.Katz, Solid State Magnetic and Dielectric Devices, John Wiley and Sons, Inc., N.Y., 1959.
- [3] 이종우, 한득영, "복합압전진동자의 공진주파수 이동에 관한 연구," '90대한전기학회 하계학술대회 논문집, pp.269~272, 1990.
- [4] W.P.Mason(Ed.), Physical Acoustics, vol. IA, Academic Press, N.Y., 1964
- [5] A. Ballato, H.L. Bertoni, & T. Tamir, "Systematic Design of Stacked Crystal Filters by Microwave Network Methods," IEEE Trans. Microwave Theory & Tech., MTT-22, pp.14~25, 1974.
- [6] E.K. Sittig, "Transmission Parameter of Thickness-Driven Piezoelectric Transducers Arranged in Multilayer Configuration," IEEE Trans. Sonics & Ultrasonics, SU-14, pp.167~174, 1967.
- [7] H.F. Tiersten, "Thickness Vibrations of Piezoelectric Plates," J. Acoust. Soc. Am., Vol. 35, pp.53~58, 1963.
- [8] "IEEE Standard on Piezoelectricity," IEEE Std. 176~1978, IEEE Inc., N.Y., 1978.