

3중적층형 압전세라믹 필터의 Simulation에 관한 연구

김정현* 한득영 남문현
 건국대학교 전기공학과

A Study on the Simulation of a Triple Laminated Piezoelectric Ceramic Filter

Jung Hyun Kim* Deuk Young Han Moon Hyun Nam
 Electrical Engineering Dept., Kon-Kuk University

ABSTRACT : This paper suggests a triple laminated piezoelectric ceramic filter composed of three piezoelectric ceramic vibrators and two sheets of thin insulator, and an equivalent circuit of the filter and several expressions for the resonant frequency; voltage, current, and power gains under the various loads and frequencies; and phase differences between the input and the output voltages are introduced and simulated from its equivalent circuit when two outputs from the side vibrators are connected in series. Those expressions show that this filter has not only a filtering function but also an amplifying function.

입이 유기되는 현상을 응용하는 장치로서 본 논문은 양측 진동자의 출력을 직렬연결한 경우에 관한 것이다. 이 필터의 특성을 이해하기 위해서는 그 동가회로를 해석하는 것이 편리하며, 그 동가회로는 필터의 구성요소인 압전진동자의 기계적 손실을 고려한 그림 2-2와 같은 Mason의 동가회로를 이용하여 구할 수 있다(5). 그림 2-2에서 a, b는 다음의 관계가 있으며, 식(1)에서 Z_0 , τ , γ 는 각각 그 진동자의 기계적 특성 임피던스와 두께, 탄성파의 전파상수를 나타낸다.

$$a = Z_0 \tanh\left(\frac{\gamma\tau}{2}\right) \quad b = \frac{Z_0}{\sinh(\gamma\tau)} \quad (1)$$

1. 서론

압전세라믹 필터는 주로 특정 주파수대역을 통과시키는 것으로서 AM 및

FM 라디오용, TV용, 무선전화기용, 위성통신용 등에 기존의 RLC 필터를 대신하여 널리 사용되고 있다. 이들 압전세라믹 필터는 이용하는 탄성파가 세라믹 내부를 진행하는 bulk형 필터와 탄성파가 세라믹 표면을 따라 진행하는 SAW 필터로 분류할 수 있다. 그러나 bulk형 필터는 하나의 얇은 압전세라믹 진동자를 사용하므로 기계적으로 약하고, SAW 필터는 그 표면의 전극이 정교해야 하는 단점이 있다(1,2).

본 논문에서는 두께, 반경, 전기 및 기계적 상수들이 각각 서로 같으며 그 두께가 반경보다 훨씬 큰 3개의 원반형 압전세라믹 진동자와 2장의 얇은 절연판을 진동자/절연판/진동자/절연판/진동자의 순서로 적층한 3중적층형 압전세라믹 필터를 제안하고, 그 필터의 주파수 특성, 전압이득, 전류이득, 전력이득, 부하 특성, 입력력 전압사이의 위상차, 입력 임피던스 등에 관한 이론식들을 구하고 이들 특성에 대해 simulation하고자 한다.

이 필터는 3장의 압전진동자를 적층한 것이므로 기계적으로 보다 강하고, 필터의 기능 외에 증폭의 기능도 있으며, 전극이 양면 전체에 부착되어 정교하지 않아도 되는 범용의 진동자를 사용할 수 있는 장점이 있다(3,4).

2. 3중적층형 압전세라믹 필터의 동가회로

본 필터는 그림 2-1과 같은 원반형 압전세라믹 진동자 3개와 얇은 절연판 2장을 고대로 적층하여 구성하며, 그 필터의 중앙에 있는 진동자에 두께방향의 공진주파수를 갖는 입력을 인가하면 압전현상의 역효과에 의하여 그 진동자가 진동하게 되고, 그 진동이 양측에 있는 두 진동자에 전달되면 압전현상의 정효과에 의하여 그 두 진동자로부터 전

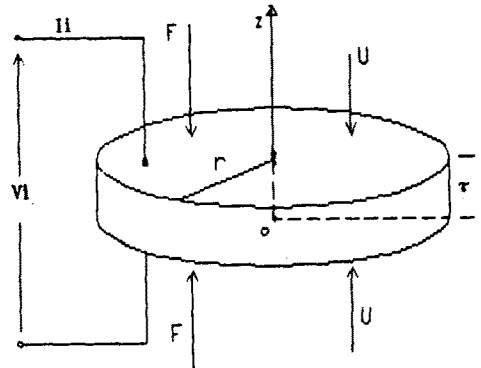


그림 2-1. 원반형 압전세라믹 진동자
 Fig. 2-1. Piezoelectric ceramic disk vibrator.

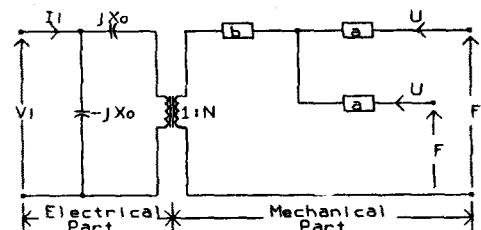


그림 2-2. 압전세라믹 진동자의 동가회로
 Fig. 2-2. Equivalent circuit of a piezoelectric ceramic vibrator.

그림 2-1과 같은 압전세라믹 진동자와 절연판을 이용하여 그림 2-3과 같은 필터를 구성하고, 그 중에 있는 진동자에 입력을 인가하고 그 양측에 있는 진동자의 출력을 직렬연결한 경우의 동가회로는 그림 2-2를 이용하여 그림 2-4와 같이 나타낼 수 있다.

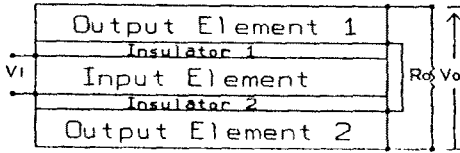


그림 2-3. 3중적층형 압전세라믹 필터의 구조
Fig. 2-3. Structure of a triple laminated piezoelectric ceramic filter.

이때 이 필터를 두께방향의 기본과 공진주파수 부근의 입력전압으로 동작시키면 $r \approx j\omega$ 의 관계가 있으며, 이 경우 식(2)와 (3)을 조합하여 다음 식(4)와 같은 이 필터의 전기적 입력력에 관한 기본식을 얻을 수 있다.

$$\begin{bmatrix} V_0 \\ I_0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{3R+j3X+j16N^2X_0}{j8N^2X_0} & \frac{3R+j3X+j24N^2X_0}{8N^2} \\ -\frac{3R+j3X}{16N^2X_0^2} & \frac{3R+j3X+j8N^2X_0}{j16N^2X_0} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_1 \\ I_1 \end{bmatrix} \quad (4)$$

식(4)에서 R, X는 각각 다음의 관계가 있다.

$$R = \frac{\pi Z_0}{Q_m}, \quad X = 2\pi Z_0 \frac{f - f_r}{f_r} \quad (5)$$

식(5)에서 f_r 와 f 는 각각 진동자의 두께방향 공진주파수 그 부근의 동작주파수이다.

식 (4)와 $V_0 = -I_0R_0$ 의 관계로부터 이 필터의 입력임피던스 Z_i 를 구하면 다음과 같이 된다.

$$Z_i = \frac{1}{8N^2} \frac{(-j8N^2X_0)[(3R+R_s)+j(3X+X_s+8N^2X_0)]}{(-j8N^2X_0)+[(3R+R_s)+j(3X+X_s+8N^2X_0)]} \quad (6)$$

위 식에서 R_s, X_s 는 각각 다음의 관계가 있다.

$$R_s = \frac{32N^2X_0^2R_0}{R_0^2 + (2X_0)^2}, \quad X_s = \frac{32N^2X_0^2(2X_0)}{R_0^2 + (2X_0)^2} \quad (7)$$

위의 식(6)에서 이 필터의 직렬공진은

$$X_{ms} = 3X + X_s + 8N^2X_0 = 0 \quad (8)$$

일때 일어난다.

또 식(4)와 $V_0 = -I_0R_0$ 의 관계로부터 전압이득 V_0/V_1 의 크기 G_v , 전류이득 I_0/I_1 의 크기 G_i , 전력이득 $(V_0I_0)/(V_1I_1)$ 의 크기 G_p 를 구하면 각각 다음과 같다. 이들 식에서 $R_{ms} = 3R + R_s, R_m = R_{ms}^2 - X_{ms}^2 + 8N^2X_0X_{ms}, X_m = 2R_{ms}X_{ms} - 8N^2X_0R_{ms}$ 의 관계가 있다.

$$G_v = \frac{16N^2X_0R_0}{\sqrt{(R_0R_{ms} + 2X_{ms}X_0)^2 + (R_0X_{ms} - 2R_{ms}X_0)^2}} \quad (9)$$

$$G_i = \frac{16N^2X_0^2}{\sqrt{[R_0R_{ms} + 2X_0(X_{ms} - 8N^2X_0)]^2 + [R_0(X_{ms} - 8N^2X_0) - 2X_0R_{ms}]^2}} \quad (10)$$

$$G_p = \frac{256N^4X_0^2R_0}{\sqrt{[(R_0^2 - 4X_0^2)R_m + 4R_0X_0X_m]^2 + [(R_0^2 - 4X_0^2)X_m - 4R_0X_0R_m]^2}} \quad (11)$$

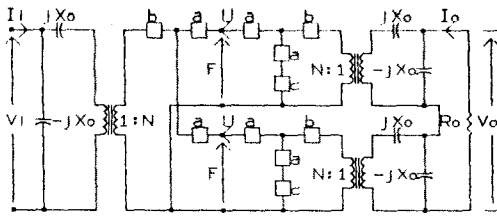
또 입력임피던스와 출력력 전압사이의 위상차는 각각 식(6)및 (9)로부터 다음과 같이 구할 수 있다.

$$Z_i = X_0 \frac{R_{ms}^2 + X_{ms}^2}{\sqrt{R_{ms}^2 + (X_{ms} - 8N^2X_0)^2}} \quad (12)$$

$$\theta_s = \tan^{-1} \left[\frac{R_0R_{ms} + 2X_{ms}X_0}{R_0X_{ms} - 2R_{ms}X_0} \right] \quad (13)$$

또한 이 필터의 대역폭 BW는 식(8)과 (9)를 이용하여 근사적으로 다음과 같이 구해진다.

$$BW = \frac{f_r}{Q_m} \quad (14)$$



K- Input Element - * Output Elements - X

그림 2-4. 3중적층형 압전세라믹 필터의 동가회로
Fig. 2-4. Equivalent circuit of a triple laminated piezoelectric ceramic filter.

그림 2-4에서 V_1, I_1 와 V_0, I_0 및 R_0 는 각각 입력전압과 전류 및 출력전압과 전류, 부하저항을 의미하며, F와 U는 각각 진동자 양면에서의 힘과 입자속도를 나타내고, N은 이 상적인 전기기계적 변성기의 변성비를 나타낸다.

3. 3중적층형 압전세라믹 필터의 특성해석

이때 사용하는 진동자들의 두께, 반경, 전기 및 기계적 상수들이 각각 서로 같고, 또 각 진동자의 기계적 품질계수 Q_m 이 높으며, 절연판의 두께가 극히 얇고, 이 필터를 지지하는 힘이 약하여 진동을 억제하지 않는다면 그림 2-4에서 입력진동자와 출력진동자에서의 전기기계적 관계식은 다음 식(2) 및 (3)과 같이 나타낼 수 있다(3,6).

$$\begin{bmatrix} F \\ U \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{a+2b}{j2NX_0} & -\frac{a+2b+j2N^2X_0}{2N} \\ -\frac{1}{j2NX_0} & -\frac{1}{2N} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_1 \\ I_1 \end{bmatrix} \quad (2)$$

$$\begin{bmatrix} V_0 \\ I_0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{2(a+b+jN^2X_0)}{aN} & \frac{2(a+2b+j2N^2X_0)}{N} \\ -\frac{a+b}{jaNX_0} & -\frac{a+2b}{jNX_0} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} F \\ U \end{bmatrix} \quad (3)$$

식(2)와 (3)에서 X_0 는 진동자의 고정용량을 C_0 라 할 때 다음의 관계가 있다.

$$X_0 = \frac{1}{2\pi f C_0}$$

4. 3중적층형 압전세라믹 필터의 Simulation

위에서 구한 식들에 다음의 표 1에 보인바와 같은 특성을 갖는 Vernitron사의 PZT 압전진동자의 상수들을 적용하여 simulation하기토한다. 이 표에서 ϵ_{33}^s 는 변형(strain) S가 일정한 때의 유전율, c_{33}^D 과 v_{33}^D 는 각각 전속밀도 D가 일정한 때의 탄성stiffness와 탄성파속도, ρ 는 세라믹의 밀도, N_t 와 k_t 는 각각 주파수상수와 전기기계 결합계수를 의미한다.

표 1. PZT 압전세라믹의 특성(7)

Table 1. Properties of PZT piezoelectric ceramics.

특성	세라믹	PZT-4	PZT-5A	PZT-5H	PZT-8
$\epsilon_{33}^s / \epsilon_0$		635	830	1470	580
Q_m		500	75	65	1000
N_t (Hz·m)		2000	1890	2000	2070
v_{33}^D (m/sec)		4600	4350	4560	4580
ρ (10^3 kg/m ³)		7.5	7.75	7.5	7.6
k_t		0.51	0.49	0.505	0.48
c_{33}^D (10^{10} N/m ²)		15.9	14.7	15.7	16.1

위의 표 1과 같은 특성의 압전세라믹을 이용하여 두께 5[mm], 반경 30[mm]의 압전진동자를 만들면 표 1의 특성으로부터 이들 진동자의 공진주파수 f_r , 반공진주파수 f_a , 변성비 N, 기계적 특성임피던스 Z_0 , 고정용량 C_0 등을 구할 수 있다. 그 결과는 표 2와 같다.

표 2. PZT압전 진동자의 특성

Table 2. Properties of PZT ceramic vibrators.

특성	진동자	PZT-4	PZT-5A	PZT-5H	PZT-8
f_r (kHz)		400	378	400	414
f_a (kHz)		460	435	456	458
N(N/V)		8.622	9.108	12.909	7.805
Z_0 (kg/sec)		97639	95434	97023	98904
C_0 (pF)		3179	4156	7360	2904

표 1 및 2의 결과와 식(8)으로부터 그림2-3과 같은 필터의 부하저항-공진주파수 특성을 그림4-1에 나타낸다. 이 그림에서 부하저항이 1 [k Ω] 이상인 경우 필터의 공진주파수는 거의 일정함을 보여주고 있다.

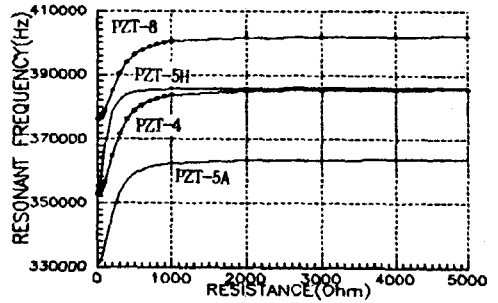


그림 4-1. 필터의 부하저항 - 공진주파수 곡선
Fig. 4-1. Load resistance-resonant frequency curves of the filter.

표 2의 결과와 식 (9)로부터 이 필터의 무부하시 주파수 변화에 따른 전압이득 특성과 공진시 부하저항 변화에 따른 전압이득 특성을 각각 그림 4-2와 4-3에 보인다. 그림 4-2와 4-3으로부터 이 필터의 전압이득은 진동자의 기계적 품질계수 Q_m 과 부하저항이 클수록 높으며, Q_m 이 클수록 그 대역폭은 좁아진다. 또 부하저항이 증가하면 전압이득도 증가하다가 일정하게 되며, 절연판의 영향을 무시할 경우 전압이득의 최대치는 진동자의 공진주파수보다 낮은 주파수에서 나타난다.

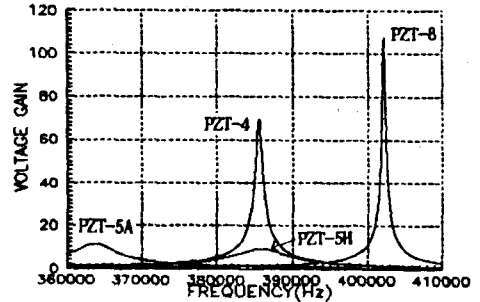


그림 4-2. 필터의 무부하시 주파수-전압이득 곡선
Fig. 4-2. Frequency-voltage gain curves of the filter at no load.

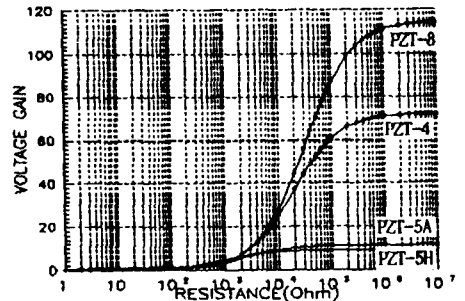


그림 4-3. 필터의 공진시 부하저항-전압이득 곡선
Fig. 4-3. Load resistance-voltage gain curves of the filter at resonant frequency.

또 전류이득은 각각 다음의 그림 4-4와 4-5에 보인다. 이들 그림에서 전류이득의 최대치는 진동자의 공진주파수에서 나타나고, 또 기계적 품질계수가 클수록 그 최대치도 큼을 보여주며, 부하저항이 작을 때는 전류이득이 1에 근접하지만 그 저항이 증가하면 전류이득은 감소하여 0에 접근함을 보여주고 있다.

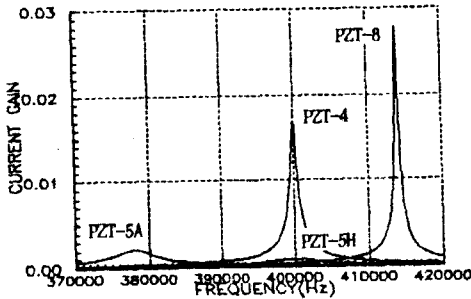


그림 4-4. 필터의 무부하시 주파수-전류이득 특성
Fig. 4-4. Frequency-current gain characteristics of the filter at no load.

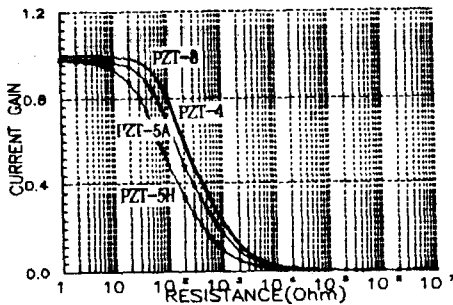


그림 4-5. 필터의 공진시 부하저항-전류이득 특성
Fig. 4-5. Load resistance-current gain characteristics of the filter at resonant frequency.

5. 결론

본 논문은 3중적층형 압전세라믹 필터를 동일한 특성의 PZT 압전세라믹 진동자 3개로 구성된 경우의 전기적 특성을 해석하고 그에 대해 simulation한 것으로서, 이 장치는 진동자의 공진주파수 부근의 좁은 대역을 통과시키는 필터의 기능과 공진주파수 부근에서 증폭의 기능을 동시에 갖고 있으며, 그 공진주파수는 진동자의 공진주파수에 크게 의존하고 부하저항의 증가에 따라 약간 증가하다가 일정하게 되었다. 또 기계적 품질계수가 클수록 대역폭은 좁아지고 전압이득과 전류이득은 커지는 특성이 있으며, 전압이득의 최대치는 진동자의 공진주파수보다 낮은 주파수에서, 전류이득의 최대치는 진동자의 공진주파수에서 나타남을 보여주었고, 부하저항이 증가하면 전압이득은 0에서부터 증가하다 일정하게 되었으며 전류이득은 1에서부터 감소하여 거의 0으로 됨을 보여 주었다.

참고 문헌

1. 一ノ瀬 昇 外, 振動子, 共振器, フィルタ 最新技術, 86年版, 綜合技術出版, 東京, 1985, pp.137-203.
2. H.W.Katz, Solid State Magnetic and Dielectric Devices, John Wiley and Sons, Inc., New York, 1959, pp.35-197.
3. 한득영, "적층형 압전세라믹 필터의 해석", 전기학회 논문지 39권 10호, 1990, pp.1044-1049.
4. H. Tsuchiya & T. Fukami, "Design Principles for Multilayer Piezoelectric Transformer", Ferroelectrics, Vol. 68, No. 1-4, 1986, pp. 225-234.
5. W. Thomson, Jr., "Collection of Equivalent Circuit Representations of Electric Field Coupled Transducers", J. Acoust. Soc. Am., Vol. 72, No. 3, 1982, pp.1062-1064.
6. S. Hirose & H. Shimizu, "An Advanced Design of Piezoelectric Ceramic Transformer for High Voltage Source", IEEE 1989 Ultrasonics Symposium Proceedings, Vol. 1, 1989, pp. 471-475.
7. O.E. Mattiat, Ultrasonic Transducer Materials, Plenum press, New York, 1971, pp.102-107.