

에너지 트래핑 효과를 이용한 이중전극 세라믹 필터의 특성

김진석*, 박기엽**, 송준태*
*성균관대학교 전기공학과 **부산전문대학 전자과

The characteristics of two-electrod-ceramic filter using energy trapping effect

Kim Won Seok*, Park Gi Yub**, Song Jun Tai*
*Dept. of Electrical Eng. Sungkyunkwan Univ. **Dept. of Electronics Pusan Junior College

Abstract

The method of suppression based on the principle of energy trapping effect is very effective at high frequency. In this paper, We intended to get resonant frequency and bandpass filter characteristics in applying to vibration mode of PZT-4 and PZT-8 using trapped energy phenomenon.

First, we theoretically analyzed a piezoelectric ceramic filter characteristics changing the thickness of ceramic plate, electrode spacing and distance between the two pairs of electrodes. We also experimentally investigated characteristics of ceramic filter made.

1. 서론

고주파영역에서 원하는 공진주파수와 대역폭을 보이는 대역필터는 무선전화, 라디오, TV, 음향기기, 초음파 기기, 위성통신 기기 등에서 이용되고 있으며, 그 이용범위는 점차로 넓어지고 있다. 에너지 트래핑 이론은 압전세라믹을 이용한 대역필터를 이론적으로 해석하고 제조하는 분야에서 이용되기 시작하였다. 에너지 트랩 현상을 이용한 진동소자의 연구들 가운데 세라믹 필터는 수정필터보다 제조공정이 용이하고 제정수 산출이 간단하며, 세라믹필터의 전기기계결합계수(electro-mechanical coupling onstant)가 수정의 그것보다 크므로 세라믹을 필터소자로 사용할 경우 고주파수에서 공진점을 보이는 대역필터(bandpass filter)를 제작할 수 있다.

본 연구에는 Mindlin, Tierstene 등이 취한 접근방법을 이용하여 TS진동모드의 세라믹필터를 이론적으로 해석하고 설계하며, 실험을 수행하여 이론과 실험의 결과를 비교검토하고자 한다.

에너지 트랩 현상을 이용해 VALPEY-FISHER사에서 제조한 PZT-4와 PZT-8에 적용시켜 비교적 고주파에서 공진점을 보이며, 에너지 트랩이 나타나는 대역 필터 특성을 얻고자 한다. 시편의 분극은 두께 방향으로 하고, PZT-4와 PZT-8 세라믹 재료의 제정수와 설계제작된 필터의 제정수들을 입자변위와 경계조건에 적용시켜 고찰을 한다.

본 논문은 세라믹 재료와 전극 재료의 제정수 및 진동모드를 적용해서 세라믹 필터 특성을 얻고 시편의 두께와 전극폭 및 전극간의 간격을 변화시켜 공진주파수 이동과 대역폭을 조정할 수 있음을 확인하고자 한다.

2. 본론

그림1과 같이 전극이 두쌍이고 중간에 무전극 부분이 존재하는 경우에 입자운동 방정식을 해석한다. 여기서 d는 세라믹의 두께, 2b는 전극폭, s는 무전극폭을 의미 한다. α_m 과 β_m 은 각각 x_1 과 x_3 방향의 파수(wave number)이다. 그리고 ρ_a 를 전극 부분의 밀도, ρ_b 를 무전극 부분의 밀도라 한다.

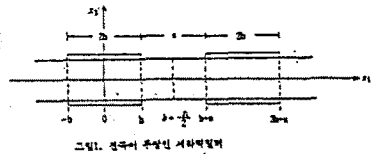


그림1. 전극이 두쌍인 세라믹필터

전극부분의 파동방정식 u_e 와 무전극부분의 파동방정식 u_s 는 다음 관계를 만족한다. 즉,

$$\nabla^2 u_e - \left(\frac{1}{v_e^2}\right) \frac{\partial^2 u_e}{\partial t^2} \quad |Z| \leq b$$

$$\nabla^2 u_s - \left(\frac{1}{v_s^2}\right) \frac{\partial^2 u_s}{\partial t^2} \quad |Z| > b$$

이며, 여기서 u 는 입자의 변위, v_e, v_s 는 각각 전극부분에서와 무전극부분에서의 파속도이다. x_2 방향은 무한대이고,

x_3 방향은

$$\frac{\partial u}{\partial x_3} \Big|_{x_3=0, d} = 0$$

이므로 식(1)의 해는

$$u = \sin \beta_m x_3 [Ae^{(\beta_m x - \omega t)} + Be^{(\beta_m x - \omega t)}]$$

이다. 그리고 x_3 방향의 파수 β_m 은 $\beta_m = \frac{\pi}{d}$ 이며, x_1 방향의 파수 α_m 은

$$\alpha_m^2 = \frac{\omega^2}{v_e^2} - \beta_m^2 = \alpha_e^2 - \beta_m^2 \quad |Z| \leq b$$

$$\alpha_m^2 = \frac{\omega^2}{v_s^2} - \beta_m^2 = \alpha_s^2 - \beta_m^2 \quad |Z| > b$$

이 되며, 여기서 $\alpha_e = \omega/v_e, \alpha_s = \omega/v_s$ 이다.

무전극부분에서의 차단주파수 ω_s 와 전극부분에서의 차단주파수 ω_e 는 다음과 같이 된다.

$$\omega_s = \frac{\pi v_s}{d} \quad \omega_e = \frac{\pi v_e}{d}$$

$\omega < \omega_s$ 인 주파수에서 무전극부분의 파수 α_m 은 허수(imaginary)가 되어 감쇄상수가 된다. 즉,

$$\alpha_m = \pm j\gamma_m$$

이라고 놓을 수 있다. 위의 관계들을 이용하여 입자운동방정식을 정리하면 다음과 같다. [2][3]

$$u_e = (A \cos \alpha_m x_1 + B \sin \alpha_m x_1) \sin \beta_m x_3 \quad -b \leq x_1 \leq b$$

$$u_s = (C e^{-\gamma_m x_1} + D e^{-\gamma_m (2b + s - x_1)}) \sin \beta_m x_3 \quad x_1 > b$$

$$u_s = E e^{-\gamma_m x_1} \sin \beta_m x_3 \quad x_1 < -b$$

경계인 $x_1 = \pm b$ 에서 다음과 같이 정리할 수 있다.

$$A \cos \alpha_m b + B \sin \alpha_m b = C e^{-\gamma_m b} + D e^{-\gamma_m(2b+s-b)} \quad (1)$$

$$-a_m A \sin \alpha_m b + a_m B \cos \alpha_m b = -\gamma_m C e^{-\gamma_m b} + \gamma_m D e^{-\gamma_m(2b+s-b)} \quad (2)$$

$$A \cos \alpha_m b - B \sin \alpha_m b = E e^{-\gamma_m b} \quad (3)$$

$$a_m A \sin \alpha_m b + a_m B \cos \alpha_m b = \gamma_m E e^{-\gamma_m b} \quad (4)$$

1) 대칭모드(symmetric mode)

그림2와 그림3과 같이 입자운동방정식이 좌우대칭인 대칭모드를 해석한다. 경계값인 $x_1 = b + s/2$ 을 대입하고 정리해서 계수행렬식을 풀면, 다음과 같다.

$$\tan 2\alpha_m b = \frac{-2\alpha_m \gamma_m}{((\gamma_m^2 - \alpha_m^2) - (\gamma_m^2 + \alpha_m^2)e^{-\gamma_m s})}$$

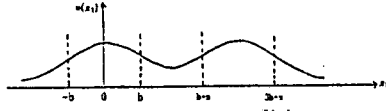


그림2. 대칭모드에서의 대칭모드

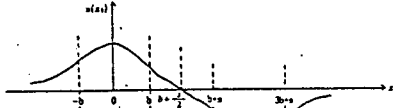


그림3. 대칭모드에서의 비대칭모드

(가) 대칭모드에서의 대칭모드(symmetric mode of symmetric mode)

그림2와 같이 전극이 두쌍인 경우의 대칭에서 전극이 한쌍씩 대칭이 되는 경우를 해석한다.

$$u_e = A \cos \alpha_m x_1 \sin \beta_m x_3 \quad -b \leq x_1 \leq b$$

$$u_s = (C e^{-\gamma_m x_1} + D e^{-\gamma_m(2b+s-x_1)}) \sin \beta_m x_3 \quad x_1 > b$$

$$u_s = E e^{\gamma_m x_1} \sin \beta_m x_3 \quad x_1 < -b$$

$x_1 = \pm b$ 와 $x_1 = b + s/2$ 의 경계에서 풀어 행렬식을 제로가 되도록 정리하면 다음과 같다.

$$\tan \alpha_m b = \frac{\gamma_m(1 - e^{-\gamma_m s})}{\alpha_m(1 + e^{-\gamma_m s})} \quad (6)$$

(나) 대칭모드에서의 비대칭모드(symmetric mode of antisymmetric mode)

그림3에서와 같이 비대칭모드가 좌우대칭인 경우를 해석한다.

$$u_e = B \sin \alpha_m x_1 \sin \beta_m x_3 \quad -b \leq x_1 \leq b$$

$$u_s = (C e^{-\gamma_m x_1} + D e^{-\gamma_m(2b+s-x_1)}) \sin \beta_m x_3 \quad x_1 > b$$

$$u_s = E e^{\gamma_m x_1} \sin \beta_m x_3 \quad x_1 < -b$$

$x_1 = \pm b$ 와 $x_1 = b + s/2$ 의 경계에서 풀어 행렬식을 제로가 되도록 정리하면 다음과 같다.

$$\tan \alpha_m b = -\frac{\gamma_m(1 + e^{-\gamma_m s})}{\alpha_m(1 - e^{-\gamma_m s})} \quad (7)$$

2) 비대칭모드(antisymmetric mode)

그림4, 그림5와 같이 입자운동방정식이 좌우 비대칭인 대칭모드를 해석한다.

경계선인 $x_1 = b + s/2$ 에서

$$C e^{-\gamma_m(b+s/2)} + D e^{-\gamma_m(b+s/2)} = 0$$

$$C = -D \quad (8)$$

식(8)을 식(1), (2)에 대입하고 식(1), (2), (3), (4)를 정리하면 아래와 같다.

$$\tan 2\alpha_m b = \frac{-2\alpha_m \gamma_m}{((\gamma_m^2 - \alpha_m^2) + (\gamma_m^2 + \alpha_m^2)e^{-\gamma_m s})}$$

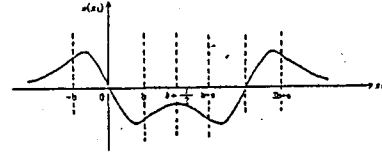


그림4. 비대칭모드에서 대칭모드

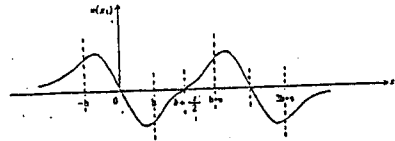


그림5. 비대칭모드에서 비대칭모드

(가) 비대칭모드에서 대칭모드(antisymmetric mode of symmetric mode)

$$u_e = A \cos \alpha_m x_1 \sin \beta_m x_3 \quad -b \leq x_1 \leq b$$

$$u_s = (C e^{-\gamma_m x_1} + D e^{-\gamma_m(2b+s-x_1)}) \sin \beta_m x_3 \quad x_1 > b$$

$$u_s = E e^{\gamma_m x_1} \sin \beta_m x_3 \quad x_1 < -b$$

$x_1 = \pm b$ 와 $x_1 = b + s/2$ 의 경계에서 풀고 앞에서와 같이 정리하면 다음과 같다.

$$\tan \alpha_m b = \frac{\gamma_m(1 + e^{-\gamma_m s})}{\alpha_m(1 - e^{-\gamma_m s})} \quad (9)$$

(나) 비대칭모드에서 비대칭모드(antisymmetric mode of antisymmetric mode)

$$u_e = B \sin \alpha_m x_1 \sin \beta_m x_3 \quad -b \leq x_1 \leq b$$

$$u_s = (C e^{-\gamma_m x_1} + D e^{-\gamma_m(2b+s-x_1)}) \sin \beta_m x_3 \quad x_1 > b$$

$$u_s = E e^{\gamma_m x_1} \sin \beta_m x_3 \quad x_1 < -b$$

$x_1 = \pm b$ 와 $x_1 = b + s/2$ 의 경계에서 풀면 이를 정리하면 다음과 같다.

$$\tan \alpha_m b = -\frac{\alpha_m(1 - e^{-\gamma_m s})}{\gamma_m(1 + e^{-\gamma_m s})} \quad (10)$$

3) PZT-4와 PZT-8에 적용한 이론적인 해석

두께가 $0.3[\text{mm}]$ 이고 x_3 방향으로 분극이 형성된 PZT-4와 PZT-8세라믹기판에 앞에서 분석정리한 결과식을 대입하여 시뮬레이션하였다. 세라믹기판이 진동할 때 대칭모드에서의 대칭모드와 대칭모드에서의 비대칭모드가 주로 나타나리라고 보여 두 모드를 분석처리한다. PZT-4의 탄성정수는 $S_{11}^E = 12.3 \times 10^{-12} [\text{m}^2/\text{N}]$ 이며, 밀도는 $\rho = 7.5 \times 10^3 [\text{kg}/\text{m}^3]$ 이고 PZT-8의 경우 $S_{11}^E = 11.5 \times 10^{-12} [\text{m}^2/\text{N}]$ 이며, 밀도는 $\rho = 7.6 \times 10^3 [\text{kg}/\text{m}^3]$ 이다. 그리고 전극부분의 차단주파수 (ω_e)와 무전극부분의 차단주파수 (ω_s) 사이에 다음과 같은 관계가 성립한다. [4][5]

$$\omega_s = \sqrt{1+R} \omega_e$$

이 식에서 R 은 질량부하(mass loading)이며, 다음과 같은 관계를 갖는다.

$$R = \frac{\bar{\rho} \bar{d}}{\rho d}$$

여기서 $\bar{\rho}$ 는 전극의 밀도, \bar{d} 는 전극의 두께, ρ 는 세라믹의 밀도 그리고 d 는 세라믹의 두께를 의미한다. 여기서는 백금을 전극재료로 사용하였고 백금의 밀도는 $\bar{\rho} = 21400[\text{kg/m}^3]$ 이다.

그림6, 그림7, 그림8, 그림9는 각각 PZT-4와 PZT-8의 비전극부분의 폭과 세라믹의 두께 비를 가로축으로 하고 기본공진주파수($\Omega = \omega - \omega_e / \omega_s - \omega_e$)를 세로축으로 그린 그래프이다. 그래프에서 윗부분은 비대칭모드이고, 아랫부분은 대칭모드이다. 그림에서 비전극부분의 폭이 커지면 대역폭이 줄어들음을 알 수 있다.

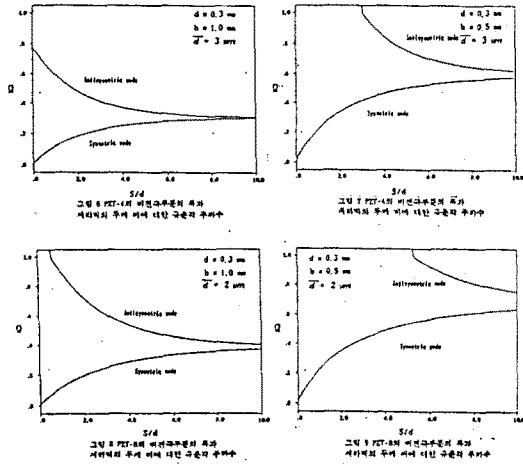


그림10, 그림11은 각각 PZT-4와 PZT-8에 대해 전극부분의 폭과 세라믹의 두께 비를 가로축으로 하고 기본공진주파수(fundamental normalized angular frequency)를 세로축으로 그린 그래프이다. 그래프에서 SS는 대칭모드에서의 대칭모드이고, AS는 비대칭모드에서의 대칭모드, SA는 대칭모드에서의 비대칭모드 그리고 AA는 비대칭모드에서의 비대칭모드를 의미한다. 그림에서 전극부분의 폭이 커지면 필터의 공진주파수가 줄어들음을 알 수 있다.

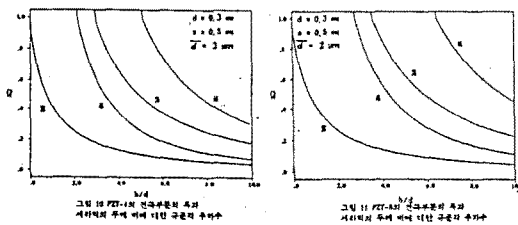
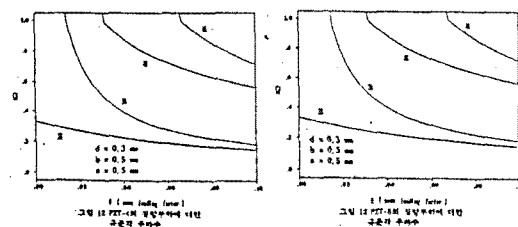


그림12, 그림13은 PZT-4와 PZT-8에 대해 질량부하를 가로축으로 하고 기본공진주파수를 세로축으로 그린 그래프이다. 그림에서 질량부하가 커지면 대역폭이 줄어들며, 공진주파수가 작아짐을 알 수 있다. 이로부터 필터의 특성을 이론식을 통하여 설계할 수 있음을 확인할 수 있다.



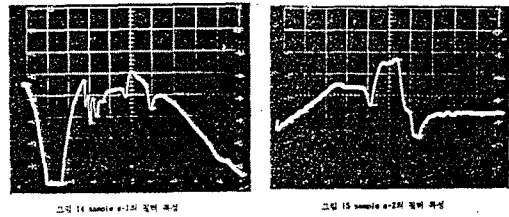
4) 실험방법 및 고찰

세라믹 시편에 백금을 증착시켜 전극을 만들어 아래 표 1과 같이 sample을 만들었다. sample을 Spectrum Analyzer를 이용하여 세라믹 시편의 필터 특성을 측정하였다.

sample	세라믹시편	d[mm]	2b(b)[mm]	s[mm]
s-1	PZT-4	0.3	1.0(0.5)	0.5
s-2	PZT-4	0.3	2.0(1.0)	0.5
s-3	PZT-8	0.3	1.0(0.5)	0.5
s-4	PZT-8	0.3	2.0(1.0)	0.5

표 1. 제조한 sample들

그림14와 그림15는 sample s-1과 s-2의 필터 특성이다. sample s-1의 측정값은 각각 center frequency: 7.618 MHz, band width: 1.0 kHz, sweep rate: 2 MHz이고 s-2의 측정값은 center frequency: 7.623 MHz, band width: 30 kHz, sweep width: 0.2 MHz이다



4. 결론

에너지 트랩 현상을 이용한 이중전극의 세라믹 필터에 대해서 이론적으로 분석 정리하였고 VALPEY-FISHER사에서 제조한 PZT-4와 PZT-8를 사용하여 필터를 설계하였다. 세라믹 재료와 전극 재료의 제정수들을 정리한 이론에 적용시켜 시뮬레이션하여 세라믹 필터의 특성을 얻고 시편의 두께와 전극폭 및 전극간의 간격을 변화시켜 공진주파수 이동과 대역폭을 고찰하였다.

1. 비전극부분의 폭이 커지면 대역폭이 줄어들음을 알 수 있다.
2. 전극부분의 폭이 커지면 필터의 공진주파수가 줄어들음을 알 수 있다.
3. 질량부하가 커지면 대역폭이 줄어들며, 공진주파수가 작아짐을 알 수 있다.
4. 전극 두께가 클수록 전극 부분의 폭과 세라믹두께 비가 작은 부분에서 공진주파수가 빨리 감소한다.
5. 두께가 같으면 공진주파수가 일치한다.

5. 참고 문헌

- [1] W.Shockley, D.R.Curran and D.J.Koneval, "Trapped Energy Modes in Quartz Filter Crystals" J. Acoust. Soc. Am, Vol. 41, No. 4, pp.981-993(1967)
- [2] R.D.Mindlin, "An Introduction to the Mathematical Theory of Vibrations of Elastic Plates", U.S. Army Signal Corps Eng. Lab., Fort Monmouth, N.J. Signal Corps Contract DA-36-039 SC-56772(1955)
- [3] H.F.Tiersten, "Thickness Vibration of Piezoelectric Plates", J. Acoust. Soc. Am., Vol. 35, No. 1, pp. 53-58(1963)
- [4] D.V.Shick "Analytical Studies of Thickness-Extensional Trapped Energy Mode Resonators and Transducers", Ph.D Thesis of RPI(1984)
- [5] 송준태, 정인영, "에너지 트랩 효과를 이용한 단일전극 세라믹 필터에 관한 연구", 대한전기학회논문지 40권 1호, pp73-81(1990)