

에너지 트래핑 효과를 이용한 세라믹 필터의 특성에 관한 연구

논문
8-2-3

The Characteristics of Ceramic Filter Using Energy Trapping Effect

박기엽*, 김원석**, 송준태*

(Park Gi-Yub, Kim Won-Seok, Song Joon-Tae)

Abstract

Ceramic filter using energy trapping effect is used bandpass filter at high frequency. In this paper, the resonant points of the symmetrical modes and antisymmetrical modes were theoretically analysed and synthesized these modes in order to know the filter characteristics. We simulated them using the computer and also fabricated the ceramic filter using PZT-4 piezoelectric plate made by Valpey Fisher Co., The 1.5[μ m] - thick platinum electrode were deposited on the ceramic plates with the various masks. The characteristics of the fabricated filters were measured using the spectrum analyzer. Experimental data were compared with the theoretical results. The maximum-pass frequencies coincided exactly. The bandwidths of the fabricated filters were slightly different between theoretical and experimental results. We found that these phenomenon were caused by the stray capacitance between the two neighbor electrodes..

Key Words(중요용어) : Ceramic filter(세라믹 필터), Energy trapping effect(에너지트랩 효과), PZT, Bandpass filter(대역필터).

1. 서 론

에너지 트랩 현상을 이용한 압전필터의 연구는 1967년 W. Schockley¹⁾등이 처음 이론을 발표한 이후에 많은 연구들이 진행되었다. 연구의 흐름은 두 가지로 요약할 수 있으며, 그 하나는 전기등가 회로를 이용한 해석²⁾과 기계적인 접근으로 압전방정식을 이용하여 이론적으로 정리하는 해석이다. 이글 연구는 서로 보완관계에 있으나 한 이론으로 둘을 동시에 수용하기는 까다롭다. 본 연구에서는 후자의 방법을 택하여 이론적인 해석을 시도하였다. 즉, Mindlin³⁾, Tiersten⁴⁾등이 취한 접근방법을 이용하여 two strip TS 모드(Thickness shear mode)의 압전세라믹 필터를 이론적으로 해석 정리하고, 이를 컴퓨터를 이용하여 필터를 제작하기 전

에 시뮬레이션 과정을 통하여 설계할 수 있도록 하며, 실험을 수행하여 이론과 실험의 결과를 비교 검토하고자 한다. 세라믹 시편은 분극방향이 두께 방향인 Valpey-Fisher사에서 제조한 PZT-4를 사용하고, 세라믹 재료와 전극재료의 제정수 및 진동 모드를 적용해서 세라믹 필터 특성을 얻고 시편의 두께와 전극폭을 변화시켜 공진주파수 이동과 대역폭을 조정할 수 있음을 확인하고자 한다.

2. 파동모드 해석

그림 1과 같이 전극이 두 쌍이고 중간에 무전극

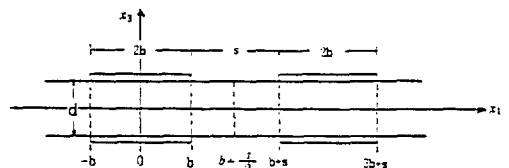


그림 1. 전극이 두쌍인 세라믹 필터
Fig. 1. 2 Strip ceramic filter.

* : 부산전문대학 전자과

** : 성균관대학교 전기공학과

접수일자 : 1994년 11월 5일

심사완료 : 1994년 12월 30일

부분이 존재하는 경우에 입자의 파동운동방정식을 해석한다. 여기서 d는 세라믹의 두께, 2b는 전극 폭, s는 무전극폭을 의미한다.

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

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

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

이며, 여기서 u는 입자의 변위, v_e , v_s 는 각각 전극부분에서와 무전극부분에서의 파속도이다. x_2 방향은 무한대라고 가정하고, x_2 방향은

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

이므로 위의 식의 해는

$$u = \sin \beta_m x_3 [A e^{j\alpha_m x_1 - \omega t} + B e^{-(j\alpha_m x_1 - \omega t)}] \quad (1)$$

이다. α_m 과 β_m 은 각각 x_1 과 x_3 방향의 파수(Wave number)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.

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

ω_s 와 ω_e 사이의 구간에서 에너지트랩이 일어나게 된다. $\omega < \omega_s$ 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 파동운동방정식을 정리하면 다음과 같다.^{2,3)}

경계인 $x_1 = \pm b$ 에서 다음과 같이 정리할 수 있다.

$$u_e = (A \cos \alpha_m x_1 + B \sin \alpha_m x_1) \sin \beta_m x_3$$

$$-b \leq x_1 \leq b$$

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

$$x_1 > b$$

(2)

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

2. 1. 대칭모드(symmetric mode)

입자운동방정식이 좌우대칭인 대칭모드를 해석한다. 식 (1)에 경계값인 $x_1 = b + s/2$ 을 대입하고 정리해서 계수행렬식을 풀면, 다음과 같다.

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

2. 1. 1. 대칭모드에서의 대칭모드(symmetric mode of symmetric mode)

전극이 두 쌍인 경우의 대칭에서 전극이 한 쌍씩 대칭이 되는 경우를 해석한다. $x_1 = \pm b$ 와 $x_1 = b + \frac{s}{2}$ 의 경계에서 풀어 행렬식을 제로가 되도록 정리하면 다음과 같다. 입자변위는 그림 2에 나타내었다.

$$\tan \alpha_m b = \frac{\gamma_m (1 - e^{-\gamma_m s})}{\alpha_m (1 + e^{-\gamma_m s})} \quad (3)$$

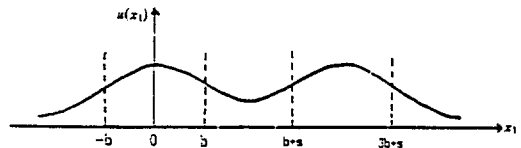


그림 2. 대칭모드에서의 대칭모드

Fig. 2. Symmetric mode of symmetric mode.

2. 1. 2. 대칭모드에서의 반대칭모드(antisymmetric mode of symmetric mode)

반대칭모드가 좌우대칭인 경우를 해석한다., $x_1 = \pm b$ 와 $x_1 = b + s/2$ 의 경계에서 풀어 행렬식을 제로가 되도록 정리하면 다음식과 같으며, 입자변위는 그림 3에 나타내었다.

$$\tan \alpha_m b = -\frac{\gamma_m (1 + e^{-\gamma_m s})}{\alpha_m (1 - e^{-\gamma_m s})} \quad (4)$$

2. 2. 반대칭모드(antisymmetric mode)

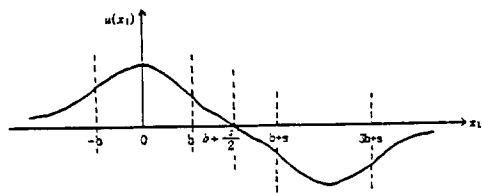


그림 3. 대칭모드에서의 반대칭모드
Fig. 3. Antisymmetric mode of symmetric mode.

입자운동방정식이 좌우 반대칭인 대칭모드를 해석한다. 경계선인 $x_1=b+s/2$ 에서 정리하면 아래의 식과 같다.

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

2. 2. 1. 반대칭모드에서 대칭모드(symmetric mode of antisymmetric mode).

$x_1=\pm b$ 와 $x_1=b+s/2$ 의 경계에서 풀고 앞에서와 같이 정리하면 다음과 같고 X축에 대한 입자변위는 그림 4에 나타내었다.

$$\tan \alpha_m b = \frac{\gamma_m(1+e^{-\gamma_m s})}{\alpha_m(1-e^{-\gamma_m s})} \quad (5)$$

2. 2. 2. 반대칭모드에서 반대칭모드(antisymmetric mode of antisymmetric mode)

$x_1=\pm b$ 와 $x_1=b+s/2$ 의 경계에서 정리하면 다음과 같으며, 입자변위는 그림 5에 나타내었다.

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

2. 3. PZT-4에 적용한 시뮬레이션

두께가 각각 0.3[mm], 0.5[mm]이고 x_3 방향으로 분극이 형성된 PZT-4 세라믹기판에 앞에서 분석 정리한 결과식을 대입하여 시뮬레이션하였다. 전극부분의 차단주파수 (ω_c)와 무전극부분의 차단주파수 (ω_s) 사이에 다음과 같은 관계가 성립한다.^{4,5)}

$$\omega_s = \sqrt{1+R} \omega_c \quad (7)$$

이 식에서 R은 질량부하(mass loading)이며, 다음과 같다.

$$R = \frac{2\bar{P}\bar{d}}{\rho d} \quad (8)$$

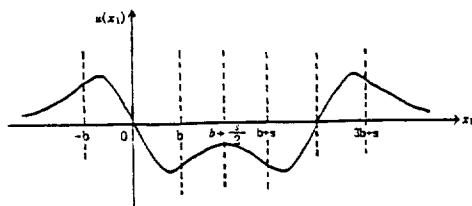


그림 4. 반대칭모드에서의 대칭모드
Fig. 4. Symmetric mode of antisymmetric mode.

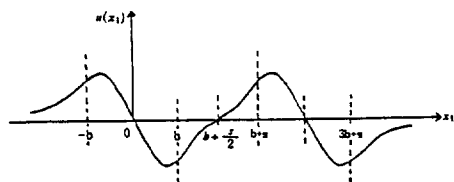


그림 5. 반대칭모드에서의 반대칭모드
Fig. 5. Antisymmetric mode of antisymmetric mode.

여기서 $\bar{\rho}$ 는 전극의 밀도, \bar{d} 는 전극의 두께, ρ 는 세라믹의 밀도 그리고 d는 세라믹의 두께를 의미한다. 본 실험에서 사용한 전극재료는 밀도가 높은 백금 ($\bar{\rho} = 21400 [kg/m^3]$)을 사용하였으며, 두께를 1.5[μm]로 증착하였다. 이를 대입하여 질량부하 R을 구하면 두께가 0.3[mm]인 필터는 0.0285이며, 두께가 0.5[mm]인 경우는 0.0171로 산출되었다. half-interval search algorithm을 이용하여 IBM-PC를 통해서 식 (3),(4),(5),(6)을 해석하였다. 그림 6, 그림 7은 각각 PZT-4의 비전극부분의 폭과 세라믹의 두께 비를 가로축으로 하고 기본규준각주파수(fundamental normalized angular frequency, $\Omega = \omega - \omega_c / \omega_s - \omega_c$)를 세로축으로 그린 그래프이다., 그래프에서 SS는 대칭모드에서의 대칭모드이고, AS는 대칭모드에서의 반대칭모드, SA는 반대칭모드에서의 대칭모드, 그리고 AA는 반대칭모드에서의 반대칭모드를 의미한다. 그림에서 세라믹 기판의 두께에 비해 비전극부분의 폭이 커지면 대역폭이 줄어들음을 알 수 있다.

그림 8, 그림 9는 각각 전극부분의 폭과 세라믹의 두께 비를 가로축으로 하고 기본규준각주파수를 세로축으로 그린 그래프이다. 여기서 s/d가 커질수록 기본규준각주파수가 작아짐을 확인할 수 있다.

그림 10, 그림 11은 PZT-4에 대해 질량부하를 가로축으로 하고 기본규준각주파수를 세로축으로 그린 그래프이다. 그림에서 질량부하가 커지면 기

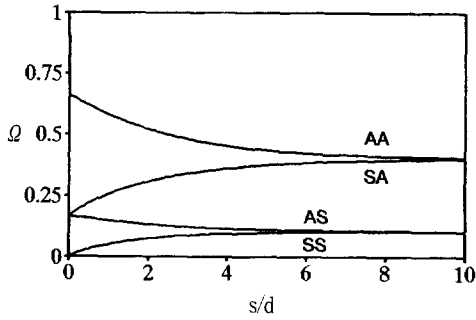


그림 6. s-1의 비전극부분의 폭과 세라믹의 두께비에 대한 기준각주파수

Fig. 6. Dependency of normalized frequency on s/d in s-1.

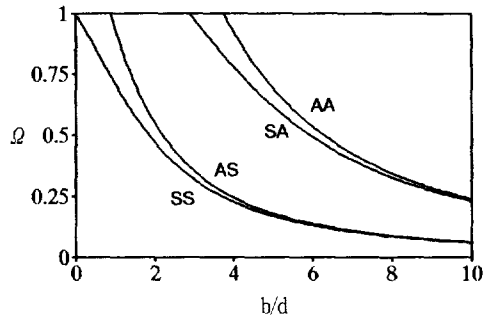


그림 8. s-1의 전극부분의 폭과 세라믹의 두께비에 대한 기준각주파수

Fig. 8. Dependency of normalized frequency on b/d in s-1.

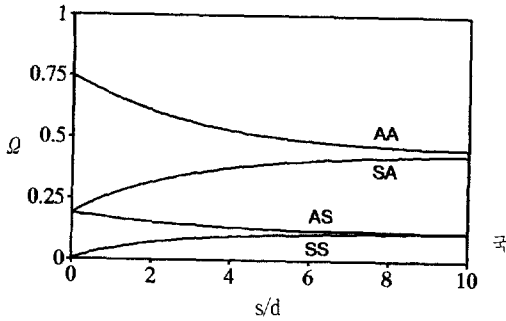


그림 7. s-4의 비전극부분의 폭과 세라믹의 두께비에 대한 기준각주파수.

Fig. 7. Dependency of normalized frequency on s/d in s-4.

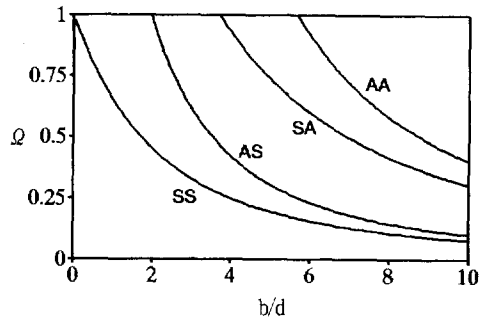


그림 9. s-4의 전극부분의 폭과 세라믹의 두께비에 대한 기준각주파수.

Fig. 9. Dependency of normalized frequency on b/d in s-4.

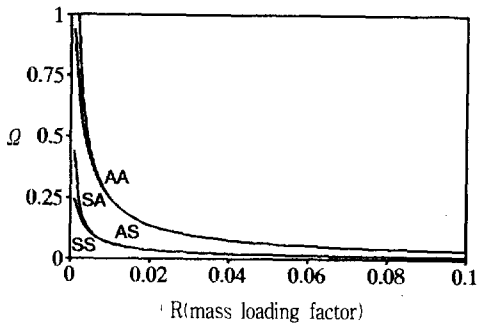


그림 10. s-1의 질량부하에 대한 기준각주파수

Fig. 10. Dependency of normalized frequency on R in s-1.

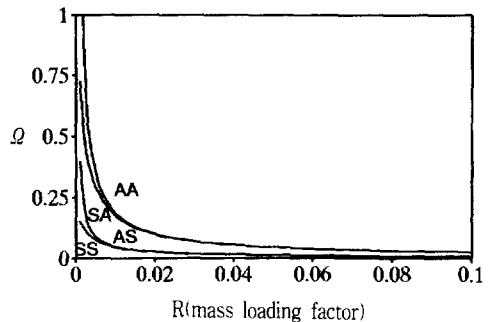


그림 11. s-4의 질량부하에 대한 기준각주파수

Fig. 11. Dependency of normalized frequency on R in s-4.

본 기준각주파수가 줄어들음을 알 수 있다. 그림 12에서 SS, AS, SA, AA가 대역필터의 공진주파수와 대역폭에 미치는 영향을 도시하였다. SS는 상측파대역이며, AA는 하측파대역이고 대역폭은 두 주

파수의 차에 해당한다. 그리고 AS와 SA의 중간점이 공진점이 된다.⁶⁾ 이들의 그래프와 대역필터의 해석에 의하여 에너지 트래핑 효과를 이용한 쌍전극 필터의 특성을 이론적으로 설계할 수 있음을

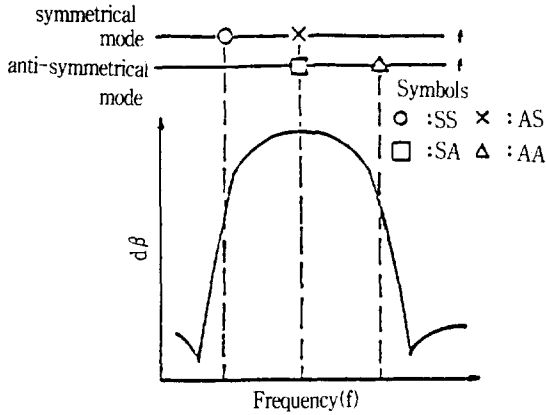


그림 12. 이중모드 필터의 배열
Fig. 12. Arrangement of 2 strip filter.

확인할 수 있었다.

2. 4. 실험 및 고찰

가로와 세로의 길이가 각각 2.54cm인 PZT-4 세라믹 시편에 그림 1과 같이 전극과 전극 사이의 갭 s, 전극의 폭 b 그리고 시편의 두께 d가 표 1과 같이 제작된 마스크(mask)를 부착하고, 진공증착기[V I -43N]를 이용하여 백금을 두께 1.5[μm]가 되도록 증착시켰다. 사진 1에 제작한 필터의 모양을 나타내었다.

제작한 필터의 특성을 스펙트럼 분석기(HP8590 B)를 이용하여 측정하였다. 각 필터에 대하여 앞에서 정리한 이론식에 의하여 산출한 이론치와 측정을 통하여 확인한 실험치를 표 2와 표 3에 정리하였다.

f_s 는 무전극부분의 공진주파수, f_e 는 전극부분의 공진주파수를 의미하며 다음과 같이 구했다.⁷⁾ PZT-4의 탄성정수는 $C_{11}^D = 14.5 \times 10^{10} [N/m^2]$ 이며, 밀도는 $\rho = 7.5 \times 10^3 [kg/m^3]$ 이므로 이를 적용하였다.⁸⁾

$$\omega_s = \frac{\pi}{d} \sqrt{C_{11}^D / R} \quad f_s = \omega_s / 2\pi$$

$$\omega_e = \omega_s / \sqrt{1 + R}, \quad f_e = \omega_e / 2\pi$$

공진주파수와 대역폭이 두 주파수의 사이에 있도록 설계해야만 에너지 트래핑 효과가 나타나게 된다.

그림 13~15는 스펙트럼 분석기로 관측한 s-2, s-3, s-6의 필터 특성이다. 그리고 나머지 필터의 특성을 표 2, 표 3에 정리하였다.

공진주파수의 이론치는 시뮬레이션하여 필터 s-

표 1. 제작한 필터의 외형

Table 1. Sizes of the manufactured filters.

filter No.	세라믹 시편	s [mm]	b [mm]	d [mm]
s-1	PZT-4	2.0	2.0	0.283
s-2	PZT-4	2.0	2.25	0.255
s-3	PZT-4	2.0	2.5	0.266
s-4	PZT-4	2.0	4.0	0.468
s-5	PZT-4	2.0	4.25	0.479
s-6	PZT-4	2.0	4.5	0.500

표 2. 필터 s-1 - s-3의 실험치와 이론치 (s=2.0[mm]).

Table 2. Theoretical value and experimental value of s-1 - s-3 (s=2.0[mm]).

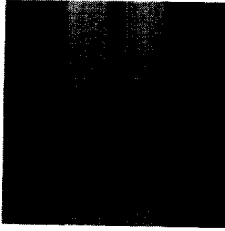
filter No.	mode	이론치				실험치			
		f_s [MHz]	f_e [MHz]	Ω [MHz]	f 대역폭 [KHz]	$R(\frac{2b}{\rho d})$	f 대역폭 [KHz]		
s-1	SS	7.768	7.654	0.1015	7.6653	36	3.025e-2	7.68	50
	AS			0.1059	7.6658				
	SA			0.3910	7.6985				
	AA			0.4169	7.7013				
s-2	SS	8.622	8.480	0.0662	8.4897	28	3.357e-2	8.51	38
	AS			0.0673	8.4879				
	SA			0.2605	8.5171				
	AA			0.2666	8.5180				
s-3	SS	8.265	8.135	0.0615	8.1430	25	3.218e-2	8.16	36
	AS			0.0628	8.1433				
	SA			0.2421	8.1666				
	AA			0.2492	8.1675				

표 3. 필터 s-4 - s-6의 실험치와 이론치 (s=2.0[mm]).

Table 3. Theoretical value and experimental value of s-4 - s-6 (s=2.0[mm]).

filter No.	mode	이론치				실험치			
		f_s [MHz]	f_e [MHz]	Ω [MHz]	f 대역폭 [KHz]	$R(\frac{2b}{\rho d})$	f 대역폭 [KHz]		
s-4	SS	4.698	4.655	0.0967	4.6593	18	1.829e-2	4.67	20
	AS			0.1305	4.6608				
	SA			0.3784	4.6713				
	AA			0.5196	4.6773				
s-5	SS	4.590	4.549	0.0923	4.5530	17	1.787e-2	4.56	19
	AS			0.1261	4.5544				
	SA			0.3627	4.5640				
	AA			0.500	4.5700				
s-6	SS	4.397	4.360	0.0912	4.3632	16	1.712e-2	4.38	19
	AS			0.1292	4.3646				
	SA			0.3609	4.3732				
	AA			0.5149	4.3789				

1~s-6의 b/d가 각각 7.07, 8.82, 9.40, 8.55, 8.87, 9 이므로 각 mode에 대입하여 구한 것이다. 실험치의 공진주파수 f는 이론치의 f_s 와 f_e 사이에 존재하였고, 이 주파수 대역 사이에 에너지 트랩이 일어



사 진 1. 제작한 필터의 모양
Photo. 1. The feature of manufactured filter.

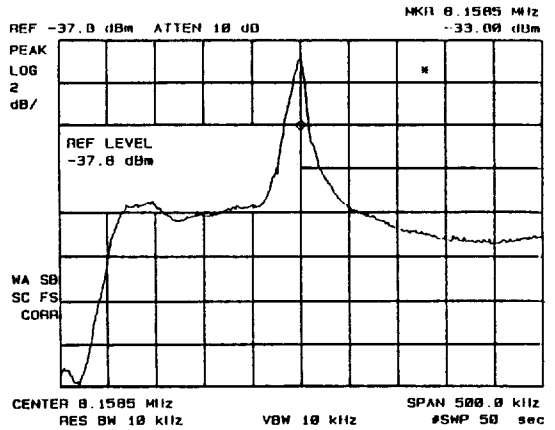


그림 14. s-3의 필터특성
Fig. 14. The filter characteristics of s-3.

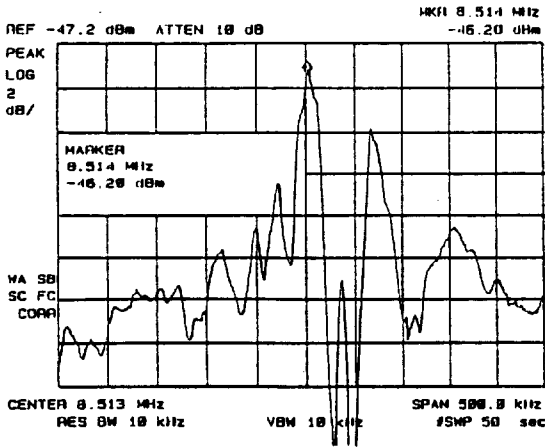


그림 13. s-2의 필터특성
Fig. 13. The filter characteristics of s-2.

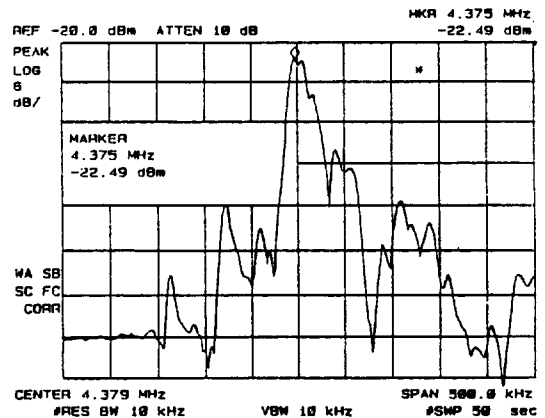


그림 15. s-6의 필터특성
Fig. 15. The filter characteristics of s-6.

남을 알 수 있다. 시편의 두께가 같은 경우 전극부분의 길이가 클수록 공진주파수가 f_s 에서 f_e 쪽으로 점차 접근하여 작아짐을 알 수 있었고, 전극부분의 폭이 커지는 처음 부분에서 공진주파수가 큰 비율로 감소하였으며, 점차 그 감소비율은 완만하였다. 표 2와 표 3에서 공진주파수는 거의 완전하게 일치하고 있음을 확인할 수 있었다.

이중모드필터에서 각 모드의 배열을 그림 12와 같이 나타내면, 대역폭의 이론치는 3[dB]주파수가 되는 AA모드에서 구한 주파수와 SS모드에서 구한 주파수의 차로 정하고, 실험치는 중심주파수에서 3[dB]차이가 나는 좌우 주파수의 폭을 측정함으로써 구할 수 있다.

s-1, s-2, s-3은 이론치와 실험치의 값이 차이가 있으며, 이는 전극이 마주하고 있는 부분의 정전용량 때문이라고 생각되나, 보다 심도있는 연구가 수행되어야 한다고 본다. 그러나 대역폭의 추세는 이론치와 실험치의 대역폭이 줄어드는 경향에서 일

치하고 있음을 표 2를 통해서 확인할 수 있다. s-4, s-5, s-6의 공진점과 대역폭은 이론치와 실험치가 거의 일치하고 있음을 표 3을 통해서 확인할 수 있다. 공진주파수와 대역폭을 이론적으로 그리고 실험을 통하여 확인해 본 결과, 본 논문에서 정리한 이론식이 타당함을 알 수 있다고 사료된다.

3. 결 론

에너지 트랩 현상을 이용한 이중전극의 세라믹 필터에 대해서 이론적으로 분석 정리하였고 Valpey Fisher사에서 제조한 PZT-4를 사용하여 필터를 설계하였다. 세라믹 재료와 전극 재료의 제정수들을 정리한 이론에 적용시켜 시뮬레이션하여 세라믹 필터의 특성을 얻고 시편의 두께와 전극폭을 변화시켜 공진점과 대역폭을 비교 고찰하여 다음

과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 에너지트랩 조건을 만족하는 모드를 대칭모드에서의 대칭모드, 대칭모드에서의 반대칭모드, 반대칭모드에서의 대칭모드, 반대칭모드에서의 반대칭모드의 네가지로 분류하여 각각을 이론적으로 정립하였다.
- 2) 정립된 이론식을 시뮬레이션하여 변수들의 관계들을 처리하여 조건에 맞는 에너지 트래핑 효과를 보이는 대역필터를 용이하게 설계할 수 있음을 확인하였다.
- 3) 이론식에 의한 공진점과 실험에 의한 공진점이 일치하였다.
- 4) 이론적으로 산출한 대역폭에 비하여 실험에 의한 대역폭이 차이가 있었으나, 이론치와 실험치의 대역폭이 감소하는 것은 일치하였다.

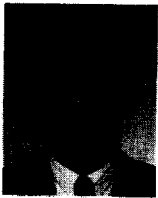
이 결과를 필터설계에 적용하면, 보다 용이하고 정확한 대역필터를 제조하는데 도움이 되리라고 사료되며 대역폭에서 이론치와의 차이를 심도있게 분석하는 일이 다음 과제로 남는다.

이 논문은 1993년도 한국학술진흥재단의 공모과제 연구비에 의하여 연구되었으며, 저자 일동은 당 재단에 사의를 표합니다.

참 고 문 헌

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. 田中, 清水等, 電子通信學會, 超音波研資, US 71-3, (1971).
3. R. D. Mindlin and M. A. Medick, J. Appl. Mechanics, 26, Trans. ASME, 81, Series E, 561~559(1959).
4. H. F. Tiersten, "Thickness Vibrations of Piezoelectric Plates", J. Acoust. Soc. Am., Vol. 35, no. 1, pp. 53-58, (1963).
5. G. C. Temes and S. K. Mitra, "Modern Filter theory and Design" John Willy & Sons, Inc. (1973).
6. 이개명, "PMN-PZT 압전세라믹스를 사용한 고주파 필터에 관한 연구", 박사학위 논문 pp. 11,(1990).
7. Spencer, W. J. "Physical Acoustics"(W.P. Mason and R.N. Thurston, ed.) Vol. 9, pp. 178. Academic Press, New York and London. (1972).
8. "Tables for PZT-4", The Valpey-Fisher Co. (1990).

저자소개



박기엽

1959년 8월 11일생. 1986년 부산공업대학교 전자공학과 졸업. 1988년 동아대학교 전자공학과 졸업(석사). 1993년 성균관대학교 전기공학과 박사과정 수료. 현재 부산전문대학 전자과 조교수.



김원석

1971년 1월 1일생. 1993년 성균관대학교 전기공학과 졸업. 성균관대학교 대학원 전기공학과 졸업(석사). 현재 일진 전기기술연구소 VCB 개발팀 연구원.



송준태

1952년 2월 15일생. 1975년 연세대학교 전자공학과 졸업. 1977년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1981년 동 대학원 전기공학과 졸업(박사). 1986년 미국 Rensseler Polytechnic Institute 연구교수. 현재 성균관대학교 공대 전기공학과

교수.