

압전세라믹을 이용한 고주파대역의 단일체  
대역통과필터에 관한 연구

Monolithic Bandpass Filter in High Frequency Band  
Using Piezoelectric Ceramics

박창엽\* · 이개명\*

(Chang-Yub Park · Kae-Myeng Lee)

요 약

압전세라믹을 이용한 에너지포획형 단일체 대역통과필터는 ‘에너지포획’과 ‘탄생결합’이라는 두 중요한 원리를 사용한다. 본 연구의 주된 목적은 이중결합필터의 전극변수가 필터 특성에 미치는 영향을 규명하는 것이다. 예비단계로 에너지포획형 공진자의 부분전극의 단위 면적당 무게나 부분전극의 크기가 주파수특성에 미치는 영향을 조사하여 에너지포획을 야기시킬 수 있는 부분전극의 조건을 설정하였다.

Abstract

The energy-trapped monolithic ceramic filters utilize two important principles that are called ‘energy trapping’ and ‘acoustic coupling’. The main purpose of this study is to clear up the influence of electrode variables in the double-coupled filter on its characteristics. As a preliminary step, the conditions for a partial electrode to be able to cause energy trapping were investigated by measuring frequency characteristics of an energy-trapped resonator as expanding the area of its partial electrode and increasing the weight of its partial electrode.

---

\* 연세대학교 전기공학과

1. 서 론

HF대역 ( 3 ~ 30 MHz )의 단일체 대역통과 필터는 60년대 초반에 W.Shockley<sup>1)</sup>, M. Onoe<sup>2)</sup> 등에 의해서 ‘에너지포획 현상’ ( Energy Trapping Effect ) 이 발견됨에 따라 제작이 가능해 졌으며, 초기에는 주로 AT-cut 석영결정 기판의 두께비틀림모드를 이용한 단일체 결절필터에 대한 연구가 3)4) 진행되었으나, 단결정 기판은 가격이 비싸며 품질계수 ( Quality Factor )가 커서 좁은 대역폭을 갖으므로 70년대 중반부터는 값싸며 적당한 품질계수를 갖는 압전세라믹 시편의 두께진동모드를 이용한 단일체 세라믹필터가 연구되고 있다.<sup>5)</sup>

윤곽모드의 고주파 성분과 반대파의 영향이 제거된 온전한 두께진동모드나 두께비틀림진동모드는 압전기판에 에너지포획효과를 적용하여 얻을 수 있다. 에너지포획은 얇은 압전 기판의 양면에 부착시킨 부분전극의 무게 (mass loading)에 의해 야기된다. 전극 무게로 인해 한 쌍의 부분전극으로 샌드위치된 압전체 부분의 차단주파수 ( Cut-Off Frequency )가 그 주변 압전체 부분의 차단주파수보다 낮아 지게 된다. 이 차단주파수의 차이로 인해 전기적으로 여기되는 기계적인 진동에너지를 전극이 부착된 압전체 부분으로 포획시킬 수 있다. 에너지포획 메커니즘에서 부분전극의 무게와 시편 면적에 대한 부분전극 면적의 상대적인 크기가 에너지포획 효과를 응용한 소자의 특성에 큰 영향을 미치게 된다.<sup>6)7)</sup>

두 에너지포획 모드 간의 탄성결합은 한 개의 압전기판 위에 두 쌍의 부분전극을 인접하여 나란히 부착시킴으로써 이루어 지게 된다.

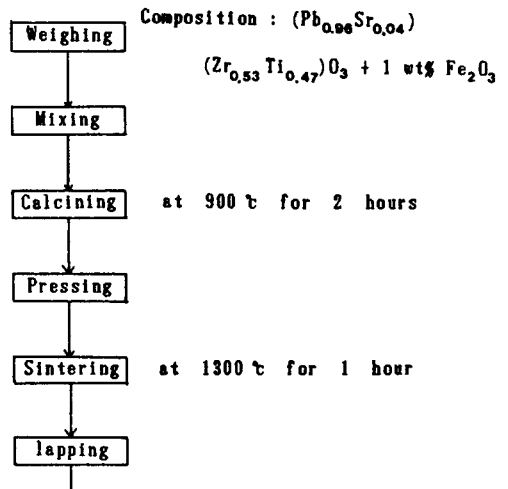
탄성결합이 이루어진 기판에는 두 종류의 모드 - 대칭모드와 반대칭모드 -가 동시에 형성

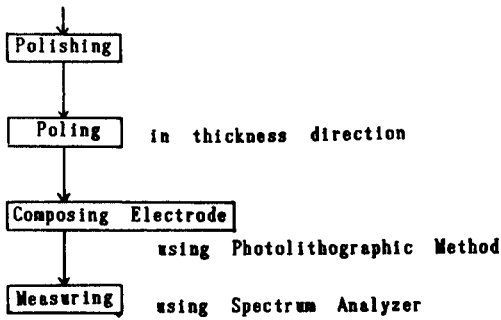
되며, 반대칭모드의 공진주파수가 대칭모드의 공진주파수보다 더 높다. 이 두 모드의 공진주파수의 차이로 인해 사다리형 필터(Ladder Filter)와 같이 대역통과필터의 주파수특성을 갖게 된다.<sup>8)9)</sup> 이런 필터를 이중결합필터 ( Double-Coupled Filter )라 하며, 이 필터에서 두 에너지포획형 공진자 전극 간의 간격과 개개의 부분전극 폭이 탄성결합, 곧 필터특성에 큰 영향을 미친다.

본 연구에서는 먼저 에너지포획모드를 얻는데 적합한 부분전극의 조건을 얻기 위해서 부분전극의 무게와 크기에 따른 에너지포획형 진동자의 특성 변화를 조사할 것이다. 이 실험을 통해 이 두 변수가 진동자의 공진주파수, 삽입손실 그리고 공진·반공진 특성에 미치는 영향이 드러날 것이며, 이를 활용하여 이중결합필터를 설계·제작하고, 이중결합필터의 전극 간격과 폭에 따른 주파수특성 변화를 규명하고자 한다.

2. 실험과정

세라믹 공진자와 필터의 제작과정은 다음과 같다.





제작된 세라믹 시편의 밀도는  $7.4 [g/cm^3]$  이었으며, 두께진동모드에 대한 전기기계 결합계수는 약 0.41 이었다. 전기기계결합계수는 다음 식으로 계산되었다.

$$k_t^2 = \frac{\pi f_r}{2 f_a} \tan \frac{\pi \Delta f^{10}}{2 f_a} \quad \begin{matrix} f_r : \text{공진주파수} \\ f_a : \text{반공진주파수} \\ \Delta f = f_a - f_r \end{matrix}$$

### 3. 실험결과 및 고찰

#### 3-1. 전극무게에 따른 에너지포획형 공진자의 특성 변화

그림 1에 보이는 에너지포획형 공진자에서 정사각형 부분전극의 한 변의 길이  $a$ 를 3

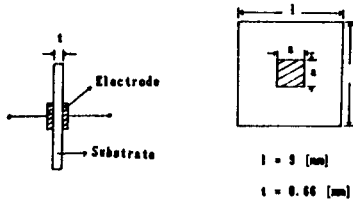


그림 1. 에너지포획형 공진자의 구조  
 Fig 1. The shape of energy-trapped resonator

[mm]로 고정하고 전극의 단위 면적당 무게를 0.0174, 0.0267, 0.0348, 0.0425 [g/cm<sup>2</sup>]로 변화시키면서 주파수 특성을 측정하여 그림 2와 그림 3에 나타내었다.

이들 결과는 에너지포획형 공진자의 부분전

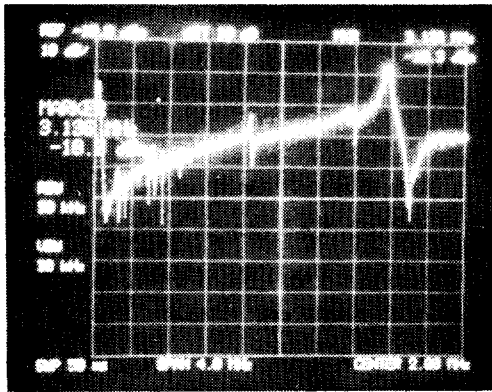
극 무게가 증가함에 따라 공진주파수가 낮아지고 공진·반공진 특성 또는 두께진동모드가 보다 분명해 지나 삽입손실이 커지고 품질계수가 작아짐을 보여 준다.

본래 두께진동모드의 공진주파수는  $N = f_r \cdot t$  ( $N$ : 주파수상수,  $f_r$ : 공진주파수,  $t$ : 기판의 두께)의 관계에서 같은 매질에서는  $N$ 이 일정하므로 기판의 두께  $t$ 에 따라 크게 좌우된다.<sup>11)</sup> 그러나 위 결과를 통해 에너지포획 방식의 두께진동모드를 이용하는 공진자의 공진주파수는 전극의 무게에 따라서도 변화됨을 알 수 있다.

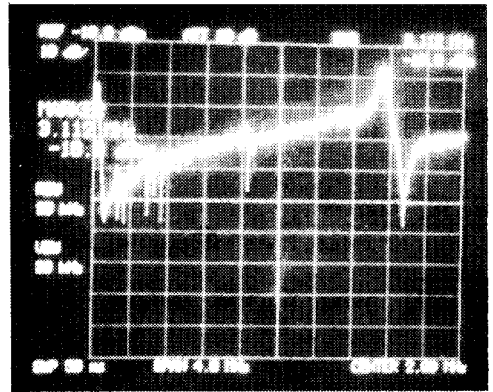
무한 압전기판에서 차단주파수,  $W_c$ 는  $W_c = (2m-1) \frac{\pi}{t} \sqrt{c/p}$ <sup>9)</sup>로 표시되며, 여기서  $m$ 은 고조파 차수,  $t$ 는 시편의 두께,  $c$ 는 탄성경도상수 (Elastic Stiffness Constant),  $p$ 는 유효밀도를 나타낸다. 부분전극의 무게가 증가함에 따라 부분전극으로 샌드위치된 압전체 부분의 유효밀도가 증가하게 되어 그 부분의 차단주파수,  $W_c$ 가 낮아지게 된다. 이 때문에 결과적으로 공진자의 공진주파수가 낮아진다고 해석할 수 있겠다.

부분전극의 무게를 증가시킴에 따라 공진·반공진 특성이 명확해지나 전극무게가 기계적인 진동을 억제하게 되므로 손실이 증가한다. 공진·반공진 특성이 명확해지는 것은 전극의 무게가 증가함에 따라 부분전극 밑 부분의 압전체의 차단주파수와 부분전극 주변 부분의 압전체의 차단주파수 간의 차이가 커져, 전극 부분의 압전체에서 여기된 탄성파의 극히 일부만이 전극 주변 부분의 압전체로 전파하게 되므로 그만큼 되돌아 오는 반사파의 영향을 적게 받게 되기 때문이라 판단된다.

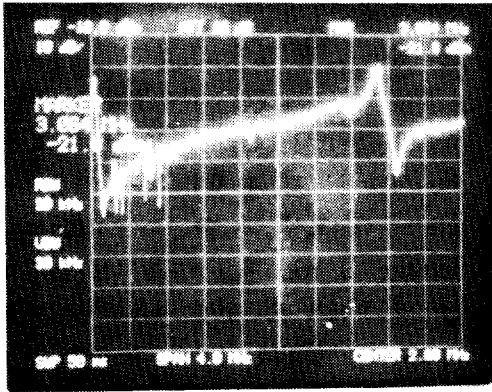
전극 무게가 0.0348 [g/cm<sup>2</sup>]일 때와 0.0471



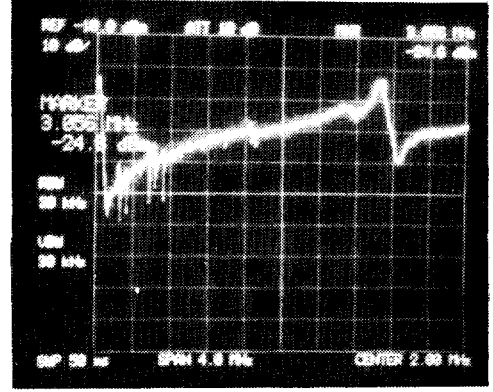
(a) 0.0174 [g/cm<sup>2</sup>]



(b) 0.0261 [g/cm<sup>2</sup>]



(c) 0.0348 [g/cm<sup>2</sup>]



(d) 0.0435 [g/cm<sup>2</sup>]

그림 2. 부분전극의 무게에 따른 에너지포획형 공진자의 주파수특성 변화  
 Fig 2. Frequency characteristic changes of the energy-trapped resonator increasing its partial electrode weight

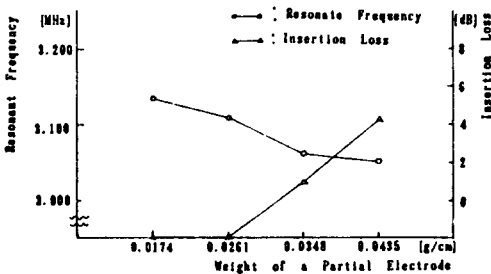


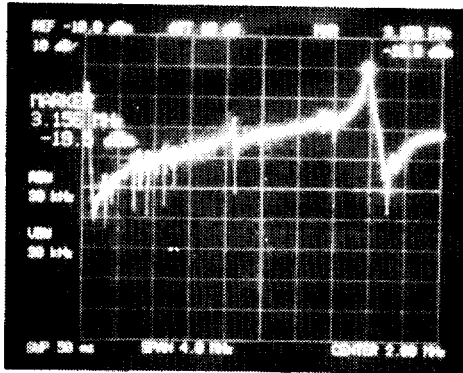
그림 3. 부분전극의 무게에 따른 에너지포획형 공진자의 삽입손실과 공진주파수의 변화

Fig 3. Changes of the insertion loss and the resonant frequency its partial electrode

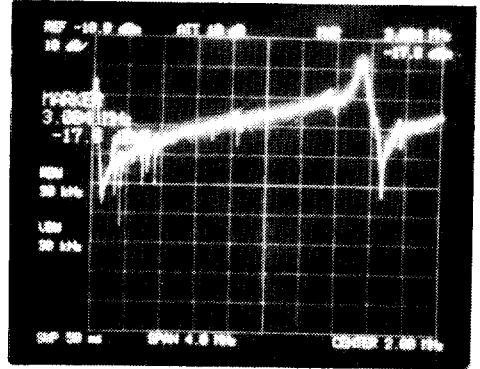
[g/cm<sup>2</sup>]일 때의 손실이 전극 무게가 0.0174 [g/cm<sup>2</sup>]일 때보다 3.0 [dB]이상 커지므로 전극 무게의 증가에는 한계가 있음을 알 수 있다.

### 3-2. 전극 면적에 따른 에너지포획형 공진자의 특성 변화

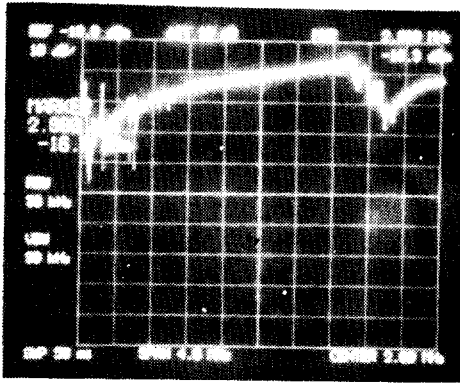
그림 1에 보이는 에너지포획형 공진자에서 정사각형 부분전극의 한 변의 길이 a를 2 [mm]로 부터 9 [mm]까지 1 [mm]씩 증가시키면서 공진자의 특성 변화를 스펙트럼 분석기로 측정하여, 그림 4와 그림 5에 그 결과를



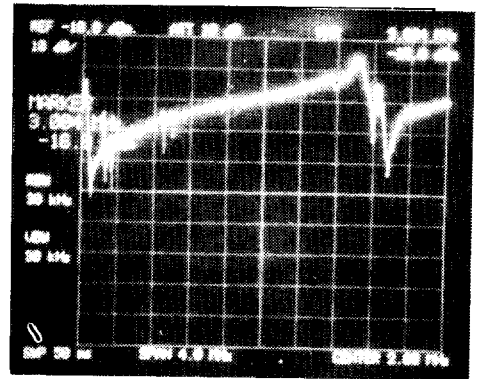
(a)  $a/l = 2/9$



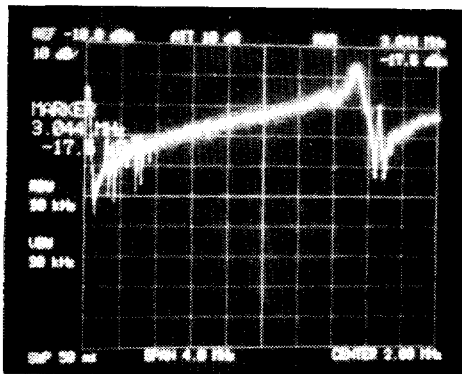
(b)  $a/l = 4/9$



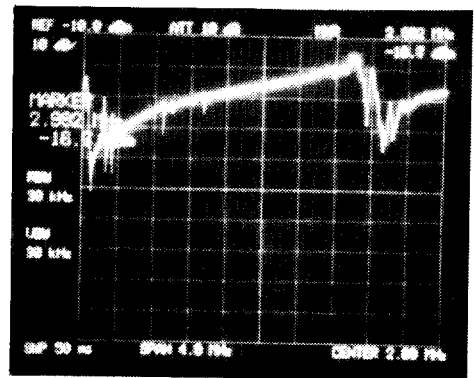
(c)  $a/l = 5/9$



(d)  $a/l = 6/9$



(e)  $a/l = 7/9$



(f)  $a/l = 8/9$

그림 4. 부분전극의 면적 확장에 따른 에너지 포획형 공진자의 주파수특성 변화  
 Fig 4. Frequency characteristic changes of the energy-thapped resonator according to expanding the area of its partial electrode

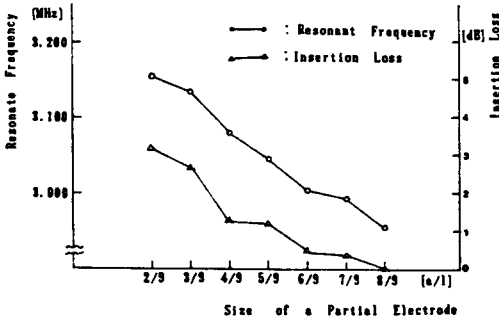


그림 5. 부분전극의 면적확장에 따른 에너지 포획형 공진자의 삽입손실과 공진주파수의 변화

Fig 5. Changes of insertion loss and the resonant frequency of the energy-trapped resonator according to expanding the area of its partial electrode

나타내었다.

측정 결과로 부터 전극 면적이 넓어 짐에 따라 공진주파수가 낮아 지고, 손실이 감소하며, 공진점을 중심으로 한 대역폭 ( $\Delta 3\text{dB}$ ) 이 넓어 지고, 3.2[MHz] 부근의 두께진동 모드에 해당되는 공진·반공진특성은 불분명해 지나 0.4[MHz] 부근의 윤탁진동모드에 해당되는 공진·반공진특성은 명확해 짐을 알 수 있다.

손실이 감소하는 것은 전극 면적이 증가함에 따라 전기에너지가 기계적인 에너지로 바뀌고 다시 기계적인 에너지가 전기에너지로 바뀌는 변환 과정에 참여하는 일정 효율(또는, 일정한 전기기계결합계수)의 압전체 부분이 증가하기 때문이라고 생각된다. 또 에너지포획 효과가 감소하는 것은 전극 면적이 넓어 짐에 따라 반사파의 영향이 커지고 윤탁모드의 고조파 성분과 기본 두께진동모드가 탄성적으로 결합하는 정도가 심해 지기 때문이다.

에너지포획형 공진자의 공진주파수는 시편의 두께에 크게 좌우되나 앞절에서 언급한 부분전극의 무게뿐만 아니라 부분전극의 크기에 의해서도 상당히 영향을 받으므로 에너지포획모드를 응용한 소자를 설계함에 있어 유념할 필요가 있겠다. 또 W.J.Spencer에 의해 일정한 크기의 부분전극을 갖는 에너지포획형 공진자의 시편 크기를 줄임에 따라 공진주파수가 높아 진다고<sup>12)</sup> 보고한 바 있다.

그림 4의 결과는 온전한 두께진동모드 또는 분명한 공진·반공진 특성을 갖는 에너지포획형 공진자를 구성하기 위해서는 시편의 두께가 0.66[mm]일 때 부분전극의 면적 크기, a/l을 4/9보다 작게 유지해야 됨을 보여 준다.

### 3-3. 전극 변수 조절에 따른 이중결합필터의 특성 변화

그림 6과 같은 이중결합필터를 제작하였다. 대역통과필터의 중심주파수가 4.5[MHz]가 되도록 기관의 두께를 0.46[mm]로 조정하였다. 중심주파수가 4.5[MHz]인 대역통과필터는 TV 음성단에 사용되고 있으며 Group Delay 특성을 요구하지 않는다.

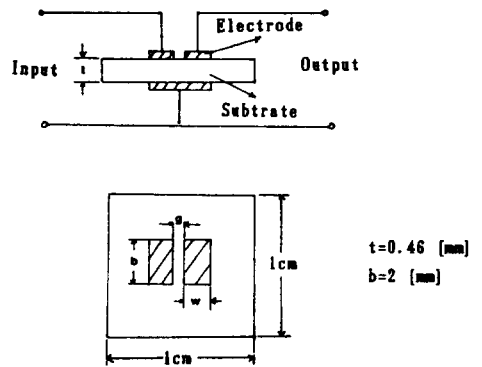
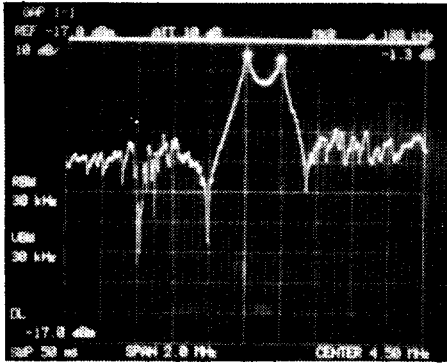
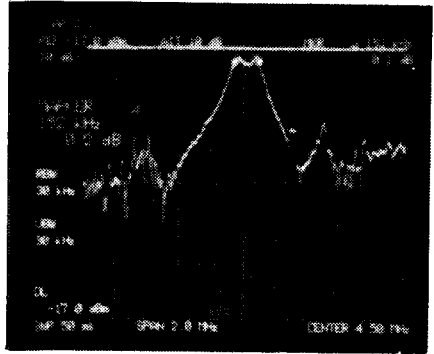


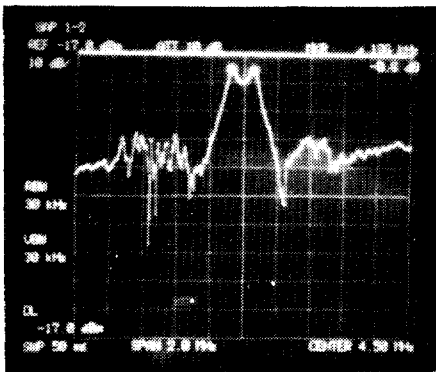
그림 6. 이중결합필터의 전극구조  
Fig 6. The electrode shape of the double-coupled filter



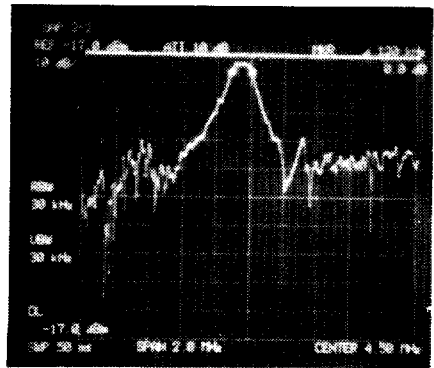
$$g = 2/14 [mm], w = 1 [mm]$$



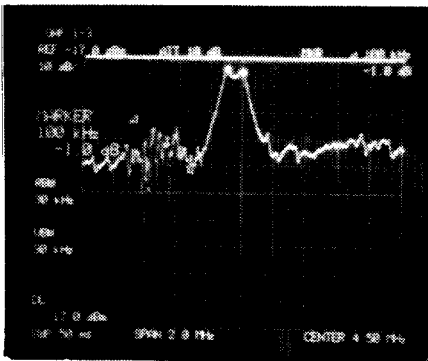
$$g = 7/14 [mm], w = 1 [mm]$$



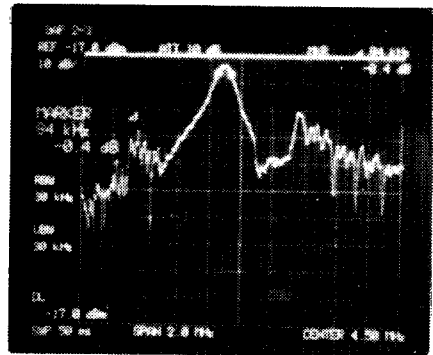
$$g = 2/14 [mm], w = 1.5 [mm]$$



$$g = 7/14 [mm], w = 1.5 [mm]$$

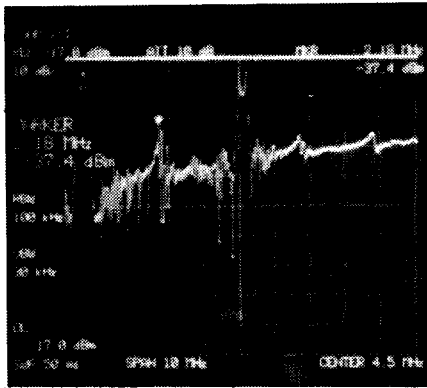


$$g = 2/14 [mm], w = 2 [mm]$$

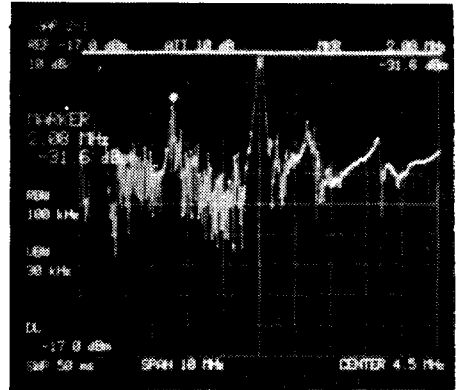


$$g = 7/14 [mm], w = 2 [mm]$$

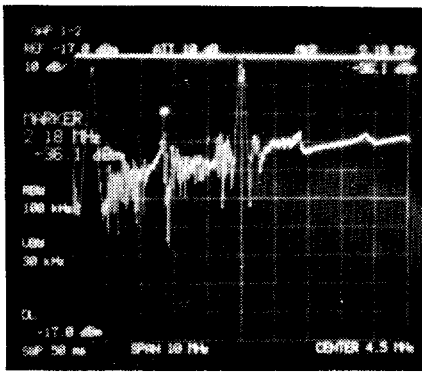
(a) spread frequency range



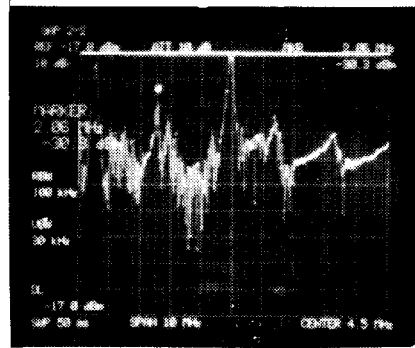
$g = 2/14 [mm], w = 1 [mm]$



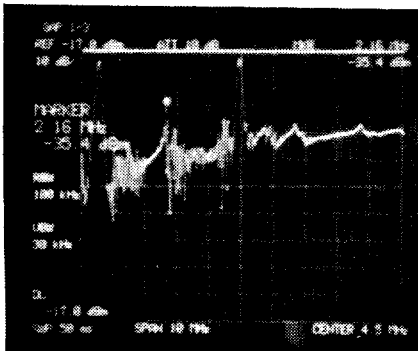
$g = 7/14 [mm], w = 1 [mm]$



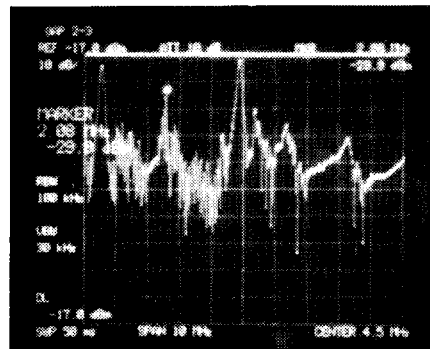
$g = 2/14 [mm], w = 1.5 [mm]$



$g = 7/14 [mm], w = 1.5 [mm]$



$g = 2/14 [mm], w = 2 [mm]$



$g = 7/14 [mm], w = 2 [mm]$

(b) narrow frequency range

그림 7. 이중결합필터 전극변수 조절에 따른 주파수특성의 변화  
 Fig 7. Frequency characteristic changes according to adjusting electrode variables in the double-coupled filter



에너지포획형 공진자의 전극에 대한 앞 부분의 실험결과를 참고하여 이중결합필터의 전극 조건을 설정함에 있어 단위 면적당 전극 무게를 대략  $0.02 [g/cm^2]$  로 정하고, 부분전극의 크기,  $a/1$  를  $3/10$  이내로 정하였다.

그림 6의 이중결합필터의 전극 폭 “w”와 전극 간격 “g”가 필터 특성에 미치는 영향을 조사하기 위하여, g를  $2/14$ ,  $7/14$ 로 변화시키고 각각에 대해 w를  $1$ ,  $1.5$ ,  $2 [mm]$ 로 변화시키면서 스펙트럼 분석기로 주파수 특성을 조사하였다. 이 결과를 두 크기의 주파수 대역으로 그림 7의 (a)와 (b)에 나타내었다.

그림 7(a)의 결과로 부터 필터의 대역폭은 전극 간격이 넓어 지거나 전극 폭이 늘어 남에 따라 줄어들게 되고, 선택도는 전극 간격이  $2/14 [mm]$ 일 때가  $7/14 [mm]$ 일 때보다 높으며, 중심주파수는 전극 폭과 간격에 관계 없이 전체 전극 면적이 커 짐에 따라 낮아 지게 되고, 통과대역의 리플 (Ripple) 정도는  $g = 7/14 [mm]$ ,  $w = 1.5 [mm]$ 일 때가 가장 작음을 알 수 있다. 여기서 전체 전극 면적이 넓어 짐에 따라 중심주파수가 낮아 지는 것은 공진자의 경우와 일치한다.

그림 7(b)로 부터 잡음인 반조화모드의 형태는 전극 폭에 무관하고 전극 간격에만 의존함을 알 수 있다.

g와 w를 각각  $5/14 [mm]$ 와  $1.5 [mm]$ 로 조절하였을 때 비교적 작은 리플에 넓은 대역폭을 갖는 필터가 되었다. 이 필터의 주파수 특성을 그림 8에 하나의 사진 화면 속에 두 가지 주파수 대역으로 나타내었다. 이 필터는 대역폭이  $143 [kHz]$ 로 중심주파수,  $4.5 [MHz]$ 의 약  $4.5 [%]$ 에 해당하고 삽입손실은 약  $4 [dB]$  정도임을 보여 준다.

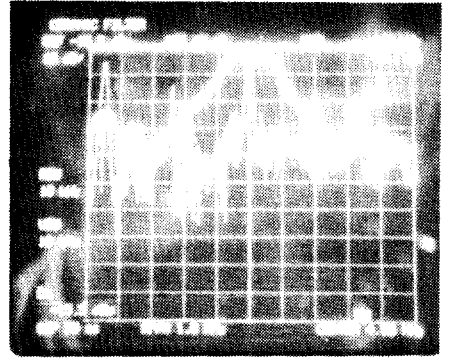
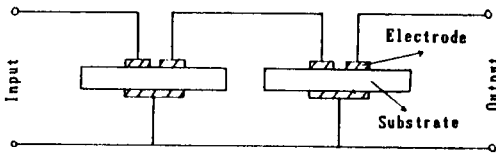


그림 8. 전극조건  $g = 5/14 [mm]$ ,  $w = 1.5 [mm]$ 를 갖는 이중결합필터의 주파수특성  
**Fig 8. The frequency characteristics of the double-coupled filter with electrode conditions, conditions,  $g = 5/14 [mm]$ ,  $w = 1.5 [mm]$**

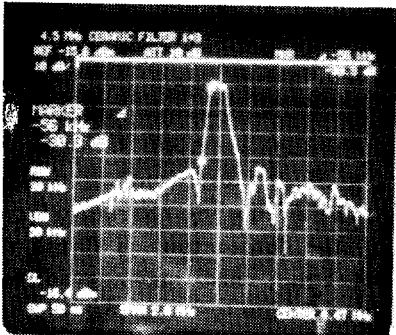
#### 3-4. 이중결합필터의 직렬연결

2개의 이중결합필터  $g = 2/14 [mm]$ ,  $w = 1.5 [mm]$ 와  $g = 7/14 [mm]$ ,  $w = 1.5 [mm]$ 를 그림 9(a)와 같이 직렬연결하여 스펙트럼분석기로 측정된 결과를 그림 9(b)에 나타내었다.

2개의 대역통과필터를 직렬연결하였으므로 선택도가 놀라게 향상되었으며 통과대역의 리플도 거의 없음을 보여 주고 있다. 그러나 손실은 크게 증가되었다. 만일 2개 이상의 이중결합필터 전극을 하나의 압전기판 위에 상호 탄성결합이 이루어지지 않게 집적하게 되면, 위의 결과와 같이 고선택도를 갖으며 Group Delay 특성을 요하는 경우에 필요한 통과대역의 특성을 어느 정도 조절할 수 있는 단일체 대역통과필터를 구성할 수 있으리라 생각된다. 여기서 삽입손실의 증가 문제는 보다 큰 전기기계결합계수와 이론 밀도에 가까운 밀도를 갖는 압전기판의 제작과 효율적인 전극 설계와 부착을 통해 해결할 수 있으리라 본다.



(a) 두 개의 이중결합필터의 직렬연결



(b) 주파수특성

그림 9. 두 개의 이중결합필터의 직렬연결과 그 주파수특성

Fig 9. Cascading two double-coupled filters and its frequency characteristics

#### 4. 결 론

본 연구를 통해 얻은 결론은 다음과 같다.

- 1) 에너지포획형 공진자의 단위 면적당 전극 무게가 증가함에 따라 공진주파수가 낮아 지고, 품질계수가 작아 지며, 손실이 증가하고, 공진·반공진 특성이 다소 명확해 진다.
- 2) 에너지포획형 공진자의 부분전극의 크기가 넓어 짐에 따라 공진주파수가 낮아 지고, 품질계수가 작아 지며, 손실이 감소하고, 공진·반공진 특성이 불분명해 진다.
- 3) 이중결합필터의 대역폭은 전극 간격,

$g$ 가 넓어 지거나 전극 폭,  $w$ 가 커 짐에 따라 좁아 지게 되고, 중심주파수는 전체 전극 면적이 확장됨에 따라 낮아 지게 되며, 반조화모드의 형태는 주로 전극 간격,  $g$ 에 좌우 된다.

- 4) 다수의 이중결합필터 전극을 하나의 압전기관 위에 상호 탄성결합이 이루어지지 않게 집적 시키면 고선택도의 대역통과필터를 제작할 수 있다.

#### 참 고 문 헌

- 1) W. Shokley, D.R. Curran and D.J. Koneval; *Proc. 17th Freq. Symp.*, 88~125(1963)
- 2) M. Onoe and H. Jumonji; No. 9, 84-93 Sept.(1965)
- 3) W. Shokley, D.R. Curran and D.J.Koneval; *J.acoust. Soc. Amer.*, 41 pt. 2, 981~993.(1967)
- 4) Dworsky; *IEEE Trans. on Son. Ultrason.*, su-28 No.4, July.(1981)
- 5) G. Schuessler; *IEEE Trans. on Son. and Ultrason.*, su-21, 257~268, Oct.(1974)
- 6) 鹽崎忠外; “壓電材料의 製造と 應用”, CMC社, 178~188.(1984)
- 7) H.Shimizu and K.Yomada; *Ultrasonics Symposium.* 383~387.(1984)
- 8) 박창엽; “압전세라믹스” 201~210, 김영출판사(1987)
- 9) G.C.Tems and S.K.Mitra; *Modern Filter Theory and Design*, John Wiley & Sons, Inc., 199~206.(1973)

- 10) IRE Standards on Piezoelectric Crystals,  
*Proc. IRE*, **49**, 1162~1169(1961)
- 11) R.A. Johnson; *Mechanical Filters in Electro-*  
*nics*, John Wiley & Sons. Inc., 60~63(1983)
- 12) W.J.Sponcer; *J. Acoust. Soc. Amer.*, **41**, 994  
-1001, Apr(1967)
- ( 1989년 3월 10일 접수 )