

## 고주파용 세라믹 필터의 제작을 위한 디자인 해석

### The Design Simulation for Manufacture of High Frequency Ceramic Filter

이수호\*, 석정영\*, 류기홍\*, 사공건\*\*, 윤광희\*\*\*, 류주현\*\*\*, 박창엽\*\*\*

(S.H. Lee, J.Y. Seok, G.H. Ryu, G. Sa-Gong, K.H. Yoon, J.H. Yoo, C.Y. Park)

#### Abstract

The ceramic filters were developed using technology similar to that of quartz crystal and electro-mechanical filter. However, the key to this development involved the theoretical analysis of vibration modes and material improvements of piezoelectric ceramics. The primary application of ceramic filters has been for consumer-market use. Accordingly, a major emphasis has involved mass production technology, leading to low-priced devices. A typical ceramic filter includes monolithic resonators and capacitors packaged in unique configurations. Nakazawa developed a double-mode resonator as two acoustically coupled single resonators. And he developed 10.7MHz crystal filters using multi-energy trapping mode of thickness shear vibration. He succeeded in realizing a two-pole band pass filter response without external inductance by splitting a dot electrode to create coupled symmetric and anti-symmetric vibration modes. Accordingly, the simulation for ceramic filter were important. So that, this paper were investigated the pass frequency of filter on the electrode length and thickness of ceramic.

**Key Words :** Ceramic Filter, Frequency, Simulation

#### 1. 서 론

최근 정보통신 기술의 발달로 인하여 다양한 주파수 신호가 필요하게 되어 주파수의 영역이 넓어지고 있다. 이러한 사용 주파수의 대역을 확장시키기 위하여 점차 고주파수의 사용이 필요하게 되었다. 또한 전자기기의 소형화에 따라 SMD (Surface Mounted Device) 형태의 필터에 대한 연구가 많이 되어지고 있다.[1] 필터의 동작 영역을 고주파수로 하기 위하여 압전세라믹의 두께 방향 진동모드를 이용하여야 하며, 더욱 동작 주파수를

높이기 위하여 두께방향 진동모드 중에 1차 진동모드, 3차 진동모드, 5차 진동모드 등 고차 진동모드를 이용함으로 가능하다.[2] 따라서 두께 방향 진동모드를 이용하는 필터의 경우  $k_t$ (1차 두께진동모드),  $k_3$ (3차 두께진동모드)와 같이 사용하고자 하는 두께 방향 진동모드의 전기기계결합계수가 크야 한다. 또한 고주파에서 손실이 적고 선택도를 높이기 위하여 기계적품질계수  $Q_m$ 이 커야 한다.

고주파수에서 사용되어지는 세라믹 필터는 두께가 얇아져야 함으로 soldering이 진행되는 동안 상당히 높은 온도에서의 열적 충격에서 공진주파수가 변화되지 않아야 한다.[3]

이러한 SMD타입의 필터의 제작을 위해서는 전극의 기하학적 구조의 변화를 통하여 고주파수용 필터를 제작하여야 하지만 필터의 사이즈가 너무 작아 전극의 기하학적 구조의 변화와 세라믹 필터의 두께 변화에 대한 오차가 크기 때문에 실험을

\* : 경북대학교 전자전기공학부  
(대구시 북구 산격동,  
Tel : 053-950-7321  
E-mail : leesuho@knu.ac.kr )

\*\* : 동아대학교 전기공학과

\*\*\* : 세명대학교 전기공학과

통하여 정확히 측정은 어렵다. 따라서 본 논문에서는 이미 발표되었던 이중모드 전극 필터의 분포등가회로를 사용하여 수치해석을 행함으로써 전극의 구조 변화에 따라 필터의 중심주파수의 변화를 예측하였으며, 이를 필터 제작에 응용하고자 하였다.

## 2. 이중모드필터설계 및 구성조건

### 2.1 에너지트랩형 압전공진자의 해석

에너지트랩형 공진자와 monolithic필터를 해석하는 경우 엄밀하게 고차의 두께 모드의 등가회로도 고려할 필요가 있지만 어떤 1개의 두께차수의 모드에서 고려하면 다른 차수의 모드에서 등가회로는 무시할 수 있다. 그림 1의 (a)에 두께차수의 에너지트랩형 공진자를 나타내었으며, (b)에는 분포정수등가회로를 표시하였다. 압전세라믹판의 두께 종진동모드의 경우에 전극부와 무전극부의 특성 임피던스를  $Z_0, Z_0'$ 이며, 전파정수를  $r, r'$ , 제동용량을  $C_d$ , 변성비를  $N$ 이라 한다.

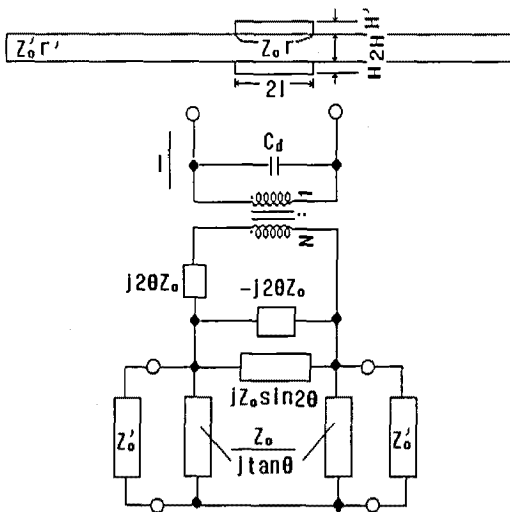


그림 1. 압전진동자와 분포정수등가회로

공진자의 동작주파수는 규준화 차단 주파수를 구함으로써 계산이 가능하다. 규준화 차단 주파수의 일반형은  $\Omega = 2\pi fH/v_s$  (여기서  $\Omega$ : 규준화 차단 주파수,  $f$ : 주파수,  $v_s$ : 횡파속도이다.) 또한 전극부와 무전극부의 차단주파수는 각각  $\Omega_0 = 2\pi f_0 H/v_s$ ,  $\Omega_0' = 2\pi f_0' H/v_s$ 로 나타나며,  $(2n-1)$ 차 두께 종진동모드의 경우  $\Omega_0' = (2n-1)\pi/2$ 이다. 또한  $\Omega_0$ 는 아래

식 (1)에서  $n$ 번째 근이다.

$$\Omega_0 \cot \Omega_0 = k_t^2 + \Omega_0^2 R \quad (1)$$

여기서  $k_t$ 는 전기기계결합계수이며,  $R (= \rho' H' / \rho H)$ 은 전극저항량이다.

또한 그림 1(b)의 등가회로에서 어드미턴스  $Y$ 를 구하면 아래 식 (2)와 같이 되며, 이를 0와  $\infty$ 로 등에 따라 반공진과 공진주파수를 찾을 수 있다.

$$Y = G + jB = j\omega C_d + N^2 \left[ \frac{1}{j2\theta Z_0} - \frac{1}{j2\theta^2 Z_0 (\cot \theta + j \frac{Z_0'}{Z_0})} \right] \\ = j \left( \frac{v_s C_d}{H} \right) \Omega \left[ 1 + 2k_t^2 \sin^2 \Omega_0 \left\{ -\frac{1}{\Omega^2 - \Omega_0^2} + \frac{1}{\frac{1}{H} (\Omega^2 - \Omega_0'^2)^{3/2} \left( \cot \frac{1}{H} \sqrt{\Omega^2 - \Omega_0^2} - \frac{\sqrt{\Omega^2 - \Omega_0^2}}{\sqrt{\Omega_0'^2 - \Omega^2}} \right)} \right\} \right] \quad (2)$$

### 2.2 이중모드필터의 설계

그림 2의 (a)에 2전극부의 이중모드필터, (b)에 분포정수등가회로를 나타내었다. 이를 이용하여 Image Parameter법에 의해 설계하였으며, 이는 대칭모드의 반공진주파수와 비대칭모드의 공진주파수를 일치시키는 것에 의해 얻어진다. 그림 2를 대칭적자형으로 변환하고, 격자단(대칭모드)과 직렬단(비대칭모드)의 어드미턴스  $y_a, y_b$ 를 구하면 식 (3)과 (4)처럼 된다.

$$Y_a = j\omega C_d + N^2 \left[ \frac{1}{j2\theta Z_0} - \frac{1 + (j - 2(Z_0'/Z_0) \tan \theta)) \tan \theta'}{j(2\theta)^2 Z_0 \cot 2\theta \cdot (1 + j \tan \theta') + j \frac{Z_0'}{Z_0} - \frac{Z_0'}{Z_0} \tan \theta'} \right] \quad (3)$$

$$Y_b = j\omega C_d + N^2 \left[ \frac{1}{j2\theta Z_0} - \frac{1 + j \tan \theta' + (j 2Z_0'/Z_0) \tan \theta}{j(2\theta)^2 Z_0 \cot 2\theta \cdot (1 + j \tan \theta') + j \frac{Z_0'}{Z_0} - \frac{Z_0'}{Z_0} \tan \theta'} \right] \quad (4)$$

이를 정리하여 규격화시키면 식 (5)와 (6)처럼 표현된다.

여기서  $\Omega_0$ 는 규준화 차단주파수로서 식 (1)을 이용하여 구할 수 있다. 또한  $D (= l/H)$   $D' (= l'/H)$ 는 식 (5)와 (6)를 무한대와 0로 등으로 구할 수 있어 이중모드필터의 전극의 기하학적 구조에 따른 필터 사용 주파수를 얻을 수 있다.

$$Y_a = y_a / \left( \frac{v_s}{H} \right) C_d \quad (5)$$

$$= j\Omega \left[ 1 - A \left[ \frac{1}{\Omega^2 - \Omega_0^2} - \frac{1 + \tanh D \sqrt{\Omega'^2 - \Omega_0'^2} + 2B \frac{\sqrt{\Omega_0'^2 - \Omega^2}}{\sqrt{\Omega^2 - \Omega_0^2}} \tanh D \sqrt{\Omega^2 - \Omega_0^2} \tanh D \sqrt{\Omega'^2 - \Omega^2}}{2D(\Omega^2 - \Omega_0^2)^{3/2} \left[ \cot 2D(\sqrt{\Omega^2 - \Omega_0^2}(1 + \tanh D \sqrt{\Omega'^2 - \Omega^2}) - \frac{1}{B} \sqrt{\frac{\Omega^2 - \Omega_0^2}{\Omega'^2 - \Omega^2}} + B \sqrt{\frac{\Omega_0'^2 - \Omega^2}{\Omega^2 - \Omega_0^2}} \tanh D \sqrt{\Omega'^2 - \Omega^2} \right]} \right] \right]$$

$$Y_a = y_a / \left( \frac{v_s}{H} \right) C_d \quad (6)$$

$$= j\Omega \left[ 1 - A \left[ \frac{1}{\Omega^2 - \Omega_0^2} - \frac{1 + \tanh D \sqrt{\Omega'^2 - \Omega_0'^2} + 2B \frac{\sqrt{\Omega_0'^2 - \Omega^2}}{\sqrt{\Omega^2 - \Omega_0^2}} \tanh D \sqrt{\Omega^2 - \Omega_0^2}}{2D(\Omega^2 - \Omega_0^2)^{3/2} \left[ \cot 2D(\sqrt{\Omega^2 - \Omega_0^2}(1 + \tanh D \sqrt{\Omega'^2 - \Omega^2}) + B \sqrt{\frac{\Omega_0'^2 - \Omega^2}{\Omega^2 - \Omega_0^2}} - \frac{1}{B} \sqrt{\frac{\Omega^2 - \Omega_0^2}{\Omega_0'^2 - \Omega^2}} \tanh D \sqrt{\Omega'^2 - \Omega^2} \right]} \right] \right]$$

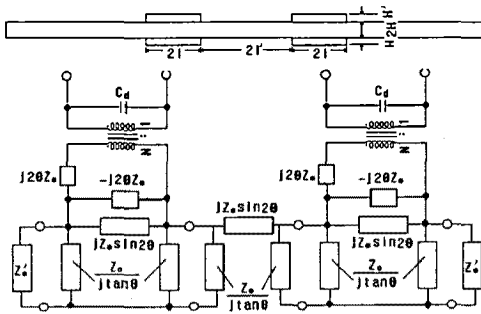


그림 2. 이중모드 필터와 분포정수등가회로

### 3. 시뮬레이션

이중모드 필터의 사용하고자 하는 주파수에 맞는 전극의 기하학적 구조를 결정하기 위한 시뮬레이션은 앞에서 언급한 식들의 수치해석을 행함으로 가능하다. 본 연구에서는 간편한 해석을 위하여 필요한 상수를 가장 널리 알려져 있는 PZT의 재료정수를 이용하였다. 즉, 전기기계결합계수  $k_t$ 와 전극저하량  $R$ 값들을 상수로 두었으며, 그 값들은 아래 표 1과 같다.

표 1. 재료상수

$k_t$	$\rho$ (g/cm <sup>3</sup> )	$\rho'$ (g/cm <sup>3</sup> )	$H$ (mm)	$C_{33}^v$ ( $\times 10^{10}$ Nm <sup>-2</sup> )
0.45	7.8	7.0	1.5	14.5

필터 해석을 위하여 우선 전극부의 규준화 차단 주파수를 식 (1)에 의해 구하여야 한다. 또한 3차 공진 모드를 이용하기 위하여 얻었으며, 이를 그림 3에 나타내었다. 여기에서 만나는 교점이 근임을 알 수 있으며, 세 번째의 교점이 3차 진동 모드임을 알 수 있다.

또한 세라믹 필터의 중심주파수와 전극의 길이

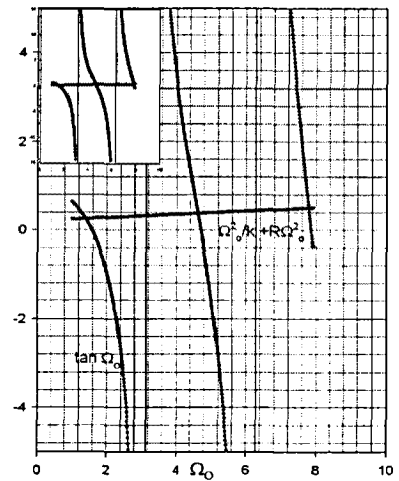


그림 3. 전극부 규준화 차단 주파수

및 전극간의 간격등을 결정하는 상수를 알기 위하여 대칭모드의 반공진주파수와 비대칭모드의 공진 주파수를 일치시킴으로서 전극의 기하학적 구조에 대한 관련식을 알 수 있다. 따라서 식 (5)를 0로 두고 정리하여 식 (7)이 얻어지며, 식(6)  $\infty$ 가 되기 위한 조건으로 식 (8)을 얻을 수 있다. 이들 식 (7)과 (8)을 연립하여 정리하면 식(9)를 얻어 이를 수치해석을 통하여 세라믹 필터의 두께( $H$ )와 전극의 길이( $l$ )간의 관계식인  $D (= l/H)$ 를 찾아으며, 이를 식 (8)에 대입하여 정리하면  $D' (= l'/H)$ 를 얻어 최종적으로 구조적인 해석을 할 수 있다.

그림 4에  $D$ 와 규준화 차단 주파수( $\Omega$ ) 및 필터의 동작 중심 주파수인  $f_c$ 의 관계를 수치해석을 통하여 구한 것을 나타내었다. 또한 그림 5에서도 전극간의 간격과 필터의 동작주파수의 관련식을 수치해석을 통하여 얻어진 것을 나타내었다.

$$0 = \frac{1}{\Omega^2 - \Omega_0^2} - \frac{1}{A} - \frac{\frac{1}{B} \sqrt{\frac{\Omega^2 - \Omega_0^2}{\Omega_0^2 - \Omega^2}} + B \sqrt{\frac{\Omega_0^2 - \Omega^2}{\Omega^2 - \Omega_0^2}} + 2B^2 \left( \frac{\Omega_0^2 - \Omega^2}{\Omega^2 - \Omega_0^2} \right) \tan D \sqrt{\Omega^2 - \Omega_0^2} + 2B \sqrt{\frac{\Omega_0^2 - \Omega^2}{\Omega^2 - \Omega_0^2}} \cot 2D \sqrt{\Omega^2 - \Omega_0^2} \tan D \sqrt{\Omega^2 - \Omega_0^2}}{2D(\Omega^2 - \Omega_0^2)^{3/2} \left[ B^2 \left( \frac{\Omega_0^2 - \Omega^2}{\Omega^2 - \Omega_0^2} \right) - \frac{1}{B^2} \left( \frac{\Omega^2 - \Omega_0^2}{\Omega_0^2 - \Omega^2} \right) + 2 \cot 2D \sqrt{\Omega^2 - \Omega_0^2} \left( B \sqrt{\frac{\Omega_0^2 - \Omega^2}{\Omega^2 - \Omega_0^2}} + \frac{1}{B} \sqrt{\frac{\Omega^2 - \Omega_0^2}{\Omega_0^2 - \Omega^2}} \right) \right]} \quad (7)$$

$$\cot 2D \sqrt{\Omega^2 - \Omega_0^2} = \frac{\frac{1}{B} \sqrt{\frac{\Omega^2 - \Omega_0^2}{\Omega_0^2 - \Omega^2}} \tanh D \sqrt{\Omega_0^2 - \Omega^2} - B \sqrt{\frac{\Omega_0^2 - \Omega^2}{\Omega^2 - \Omega_0^2}}}{1 + \tanh D \sqrt{\Omega_0^2 - \Omega^2}} \quad (8)$$

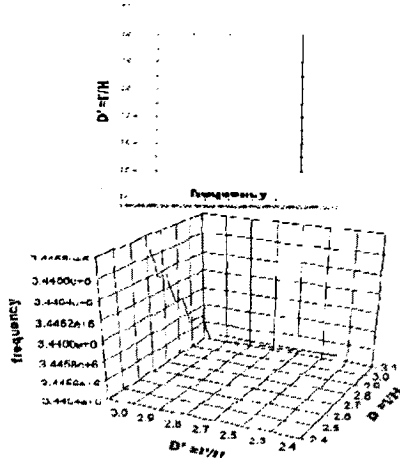


그림 4. 필터의 중심주파수와 전극의 기하학적 관계(D와 f)

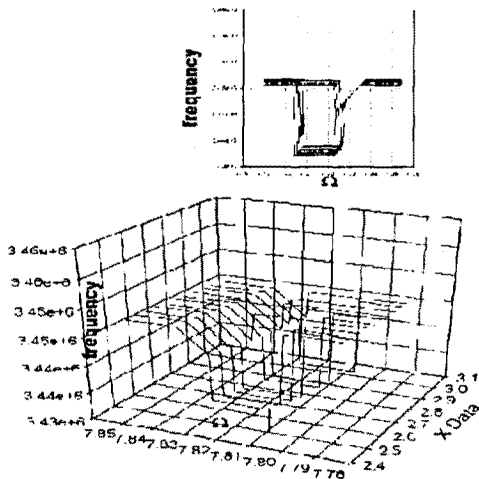


그림 5. 필터의 중심주파수와 전극의 기하학적 관계(D'와 f)

#### 4. 결론

이중모드 필터의 분포정수등가회로의 수치해석을 통하여 전극의 기하학적 구조의 변경을 통하여 세라믹 필터 제작시 나타나는 중심 동작주파수를 예측하고자 하였으며, 이를 이용하여 원하는 주파수 필터의 설계에 이용할 수 있을 것으로 기대된다. 그러나 계속적으로 재료정수의 변화에 따른 기대 동작 주파수의 예측 및 대역폭에 대한 예측등은 진행되어야 할 것으로 생각된다.

#### 감사의 글

본 논문은 2000년도 학술진흥재단 협동연구과제 (과제번호:KRF-2000-042-E00023)로 연구되었으며, 이에 감사드립니다.

#### 참고 문헌

- [1] 류주현, 민석규, 오동언, 윤광희, 박창엽, 김종선, "Pb(La,Ce)TiO<sub>3</sub>계 세라믹스의 길이와 두께 비( $l/t$ )에 따른 공진특성", 전기전자재료학회는 문지, 14권, 9호, pp.720, 2001.
- [2] 이개명, "고차진동을 이용하는 에너지 포획형 압전진동자와 필터의 변위 분포에 관한 연구", 전기전자재료학회, 11권, 11호, pp.954-962, 1998.
- [3] Yi-Yeh Lee, Long Wu, "The Effect of PbO Content on the Properties of Modified Lead Titanate Ceramic Resonator", Ferroelectrics Letters, Vol. 16, pp.103-111, 1993.