

# 압전 세라믹 필터의 압전 특성에 의한 대역폭 의존성에 관한 연구

## The Frequency Band on the Pizoelectric Characteristic of the Piezoelectric Ceramic Filter

이수호, 석정영, 하숙정, 류기홍, 김한근\*, 류주현\*\*

(S. H. Lee, J. Y. Seok, S. J. Ha, G. H. Ryu, H. G. Kim\*, J. H. Yoo\*\*)

### 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 creat 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, Center Frequency, Frequency Band

### 1. 서 론<sup>1)</sup>

최근 Hand Held Cellular Phone등과 같은 각종 통신기기의 수요의 급증으로 인하여 다양한 주파수 신호가 필요하게 되어 주파수의 영역이 넓어지고 있다. 이러한 사용 주파수의 영역을 확장시키기 위하여 점차 고주파수의 사용이 필요하며, 또한 전자부품 소자들이 소형화됨에 따라 SMD(Surface Mounted Device) 형태의 고주파 세라믹 필터에 대한 연구가 많이 되어지고 있다.[1] 세라믹 필터의 동작 영역을 고주파수로 하기 위하여 압전세라믹의 두께 방향 진동모드를 이용하여야 하며, 더욱 동작 주파수를 높이기 위하여 두께방향 진동모드 중에 3차 진동모드, 5차 진동모드 등 고차 진동모

드를 이용함으로 가능하다.[2] 따라서 두께 방향 진동모드를 이용하는 필터의 경우  $k_1$ (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]

사용하고자 하는 주파수에 맞는 SMD타입의 세라믹 필터를 제작하기 위해서는  $\mu m$  단위의 세라믹 두께의 가공과 전극의 간격처리등 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 통하여 정확

\* : 경북대학교 전자전기컴퓨터공학부  
leesuho@knu.ac.kr 053)950-7321

\*\* : 경남정보대학 제어계측과

\*\*\* : 세명대학교 전기공학과

히 측정은 어렵다. 따라서 본 논문에서는 이중모드 전극 필터의 분포등가회로[4]를 사용하여 수치해석을 행함으로써 세라믹의 두께 및 전극의 구조 변화 등에 의한 세라믹 필터의 중심주파수와 주파수 대역폭의 변화를 예측하였으며, 또한 압전상수의 변화에 대한 중심주파수와 대역폭의 변화를 관찰함으로써 최적의 조건을 만족하는 세라믹 필터 제작에 응용하고자 하였다.

## 2. 이중모드필터설계 및 구성조건

공진자의 동작주파수는 규준화 차단 주파수를 구함으로서 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  $\Omega_o = 2\pi f_o H/v_s$ ,  $\Omega_o' = 2\pi f_o' H/v_s$ 로 나타나며,  $(2n-1)$ 차 두께 종진동 모드의 경우  $\Omega_o' = (2n-1)\pi/2$ 이다. 또한  $\Omega_o$ 는 아래 식 (1)에서  $n$ 번째 근이다.

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

여기서  $k_t$ 는 전기기계결합계수이며,  $R = (\rho' H' / \rho H)$ 은 전극저항이다.  $\rho'$ 와  $H'$ 는 각각 전극의 밀도와 두께이며,  $\rho$ 와  $H$ 는 세라믹 진동자의 밀도와 두께이다.

### 2.1 이중모드필터의 설계

그림 1에 이중모드필터와 분포정수등가회로를 나타내었다. 여기서  $H$ 는 세라믹의 두께이며,  $H'$ 은 전극의 두께이다. 또한  $l$ 은 도포된 전극의 폭이며,  $l'$ 은 전극간의 간격이다. 이를 이용하여 Image Parameter법에 의해 설계하였으며, 이는 대칭모드의 반공진주파수와 사대칭모드의 공진주파수를 일치시키는 것에 의해 얻어진다. 그림 2를 대칭격자형으로 변환하고, 격자단(대칭모드)와 직렬단(사대칭모드)의 어드미턴스  $y_a, y_b$ 를 구하면 식 (2)과 (3)처럼 된다.

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

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

이를 정리하여 규격화시키면 식 (4)와 (5)처럼 표현된다.

여기서  $\Omega_o$ 는 규준화 차단주파수로서 식 (1)를 이용하여 구할 수 있다. 또한  $D = (l/H)$ ,  $D' = (l'/H)$ 는 식 (4)와 (5)를  $\infty$ 와 0로 뚫음으로 구할 수 있어 이중모드필터의 전극의 기하학적 구조에 따른 필터 사용 주파수를 얻을 수 있다.

$$Y_a = y_s \left( \frac{l}{H} \right) C_d + N^2 \left[ 1 - A \left| \frac{1}{\Omega_o^2} \right. \right. \\ \left. \left. \frac{1 - \tanh D \sqrt{\Omega^2 - \Omega_o^2} - 2B \frac{\sqrt{\Omega^2 - \Omega_o^2}}{\sqrt{\Omega_o^2 - \Omega_o'^2}} \tan D \sqrt{\Omega^2 - \Omega_o^2} \tanh D' \sqrt{\Omega^2 - \Omega_o'^2}}{2D(\Omega^2 - \Omega_o^2)^{1/2} \cot 2D(\sqrt{\Omega^2 - \Omega_o^2}) [1 + \tanh D \sqrt{\Omega^2 - \Omega_o^2}] - \frac{1}{B} \left| \frac{\Omega^2 - \Omega_o^2}{\Omega_o^2 - \Omega_o'^2} \right| \cdot \frac{1}{\Omega_o^2 - \Omega_o'^2} \tanh D \sqrt{\Omega^2 - \Omega_o^2}} \right] \quad (4)$$

$$Y_b = y_s \left( \frac{l}{H} \right) C_d + N^2 \left[ 1 - A' \left| \frac{1}{\Omega_o'^2} \right. \right. \\ \left. \left. \frac{1 - \tanh D' \sqrt{\Omega^2 - \Omega_o'^2} - 2B' \frac{\sqrt{\Omega^2 - \Omega_o'^2}}{\sqrt{\Omega_o^2 - \Omega_o'^2}} \tan D' \sqrt{\Omega^2 - \Omega_o'^2}}{2D'(\Omega^2 - \Omega_o'^2)^{1/2} \cot 2D'(\sqrt{\Omega^2 - \Omega_o'^2}) [1 + \tanh D' \sqrt{\Omega^2 - \Omega_o'^2}] - \frac{1}{B'} \left| \frac{\Omega^2 - \Omega_o'^2}{\Omega_o^2 - \Omega_o'^2} \right| \cdot \frac{1}{\Omega_o^2 - \Omega_o'^2} \tanh D' \sqrt{\Omega^2 - \Omega_o'^2}} \right] \quad (5)$$

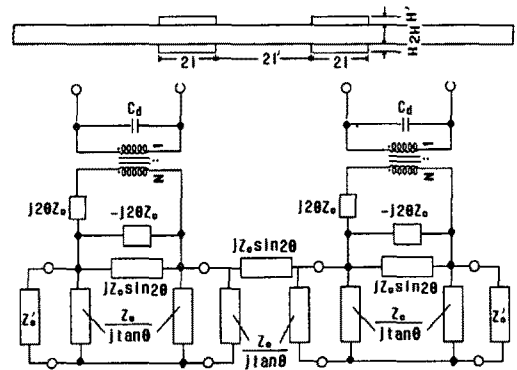


그림 1. 이중모드 필터와 분포정수등가회로  
Fig. 1. Double-mode filter and distributed constant equivalent circuit.

### 3. 시뮬레이션 및 고찰

이중모드 필터의 사용하고자 하는 주파수에 맞는 전극의 기하학적 구조와 세라믹 필터의 두께에 따른 중심주파수 및 대역폭을 알기 위하여 아래 표 1에 나타낸 기본 상수를 중심으로 시뮬레이션을 통하여 앞에서 언급한 식들의 수치해석을 행하여 분석하였다. 세라믹 필터를 제조하기 위하여 사용된 기본 조성식은 (6)과 같이 선택하였으며, 이는 고주파수 필터를 사용하여 두께공진을 이용하여야 함으로 이방성이 큰  $PbTiO_3$  계열의 세라믹스를 사용하였다.

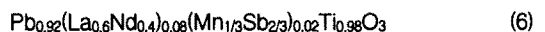


표 1. 재료상수

Table 1. Material Properties

$k_t$	$\rho$ (g/cm <sup>3</sup> )	$C_{33}^U$ (10 <sup>10</sup> N/m <sup>2</sup> )	$d_{33}$ (10 <sup>-12</sup> C/N)	$\epsilon_{33}$	$\rho'$ (g/cm <sup>3</sup> )
0.42	7.617	12.1	72.3	259	4.45

필터 해석을 위하여 우선 전극부와 무전극부의 규준화 차단 주파수를 식 (1)에 의해 구하였다. 또한 3차공진 모드를 이용하기 위하여 세 번째 근을 선택하였으며, 이를 그림 2에 나타내었다. 여기에서 만나는 교점이 근임을 알 수가 있으며, 세 번째의 교점이 3차 진동 모드임을 알 수 있다.

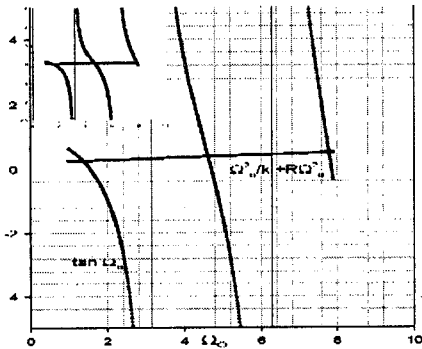


그림 2. 전극부 규준화 차단 주파수  
Fig. 2. Normalization Frequency of an electrode

또한 세라믹 필터의 중심주파수와 전극의 길이 및 전극간의 간격등을 결정하는 상수를 알기 위하여 대칭모드의 공진주파수와 비대칭모드의 반공진주파수를 일치시킴으로서 전극의 기하학적 구조에 대한 관련식을 알 수 있다. 따라서 식 (4)를 0로 두고 정리하여 식 (7)이 얻어지며, 식(5) ∞가 되기 위한 조건으로 식 (8)을 얻을 수 있다. 이들 식 (7)과 (8)을 연립하여 정리하였으며, 이를 수치해석을 통하여 세라믹 필터의 두께(H)와 전극의 길이(L)간의 관계식인  $D(= L/H)$ 를 찾아오며, 이를 식 (8)에 대입하여 정리하면  $D'(= L'/H)$ 를 얻어 최종적으로 구조적인 해석을 할 수 있다.

그러나 본 연구에서는 모든 변수에 대한 중심주파수와 대역폭의 변화를 살펴보지 않았으며, 단지 세라믹의 두께 H, 전극의 두께 H', 세라믹과 전극의 밀도인  $\rho, \rho'$  및 압전상수인  $C_{33}$ 의 값의 변화에 대한 것만을 검토하였다. 또한 각각의 변수를 변화시키는 동안에 다른 변수들은 H 및 H'는 각각 0.4mm, 1 $\mu$ m 그리고 재료상수 값들은 표 1에 나타낸 것과 같은 초기값을 설정하였다.

그림 3에 H와 필터의 동작 중심 주파수인  $f_c$ 의 관계를 수치해석을 통하여 구한 것을 나타내었다. 일

반적으로 알려져 있는 것과 같이 세라믹 두께의 증가에 따라 지수 함수적으로 감소하였다. 또한 그림 4에서 전극의 두께 변화에 따른 필터의 동작 중심 주파수인  $f_c$ 를 나타낸 것으로 다소 감소하는 경향을 나타내고 있지만 10 $\mu$ m 차원의 전극 두께 변화이기에 세라믹스의 변화에 비하여 큰 영향을 받지 않았다.

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

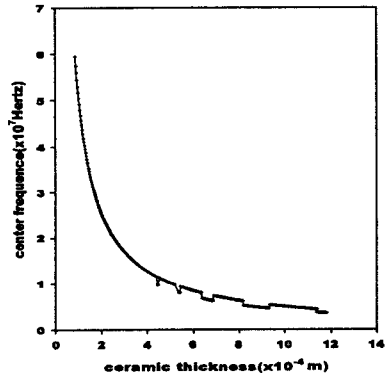


그림 3. 세라믹스의 두께와 중심주파수  
Fig. 3. Center frequency on the ceramics thickness.

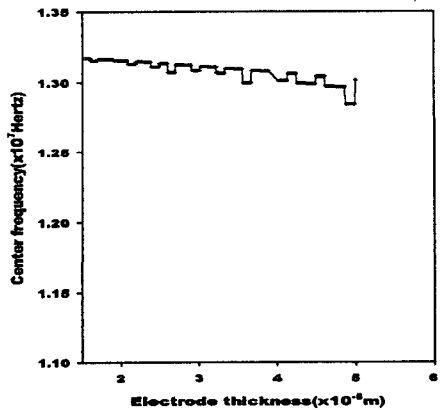


그림 4. 전극의 두께와 중심주파수  
Fig. 4. Center frequency on the electrode thickness.

또한 그림 5와 6에 세라믹스의 밀도( $\rho$ )와 탄성정수( $C_{33}$ )에 의한 중심주파수의 변화를 살펴보았다. 세라믹스 밀도의 증가에 따라서는 비례적으로 감

소하였는데, 이는 밀도의 증가에 따라 matching 임피던스의 증가에 의한 것으로 생각된다. 또한 탄성정수의 증가에 의해서는 비례적으로 증가함을 알 수 있었다.

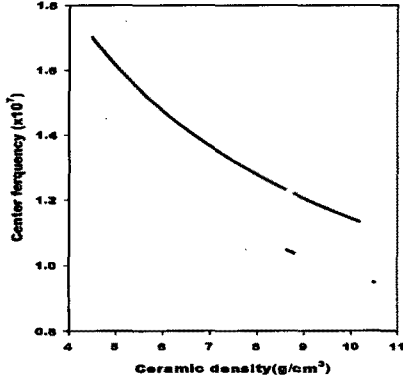


그림 5. 세라믹스의 밀도와 중심주파수  
Fig. 5. Center frequency on the ceramics density.

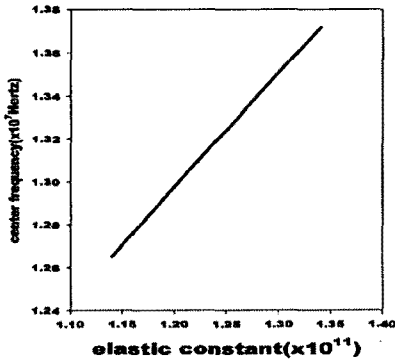


그림 6. 탄성정수(C33)와 중심주파수  
Fig. 6. Center frequency on the elastic constant.

또한 세라믹 필터의 비대역폭과 필터의 대칭정도를 알기 위하여 대칭모드의 공진주파수( $f_1$ )과 비대칭모드의 반공진주파수( $f_2$ )를 아래 식 (9)와 (10)을 이용하여 구할 수 있다. 이렇게 구해진  $f_1$ 과  $f_2$ 를 이용하여 세라믹 필터의 비대역폭은  $2(f_2-f_1)/(f_1+f_2)$ 로 구할 수 있으며, 세라믹 필터의 대칭정도는  $(f_2-f_0)/(f_0-f_1)$ 으로 계산할 수 있다.

$$\cot 2D\sqrt{\Omega^2 - \Omega_0^2} = \frac{\frac{1}{B} \sqrt{\frac{\Omega^2 - \Omega_0^2}{\Omega^2 - \Omega_1^2}} + B \sqrt{\frac{\Omega_0^2 - \Omega^2}{\Omega^2 - \Omega_0^2}} \tanh D\sqrt{\Omega_0^2 - \Omega^2}}{1 + \tanh D\sqrt{\Omega_0^2 - \Omega^2}} \quad (9)$$

$$\Omega = \frac{1}{2}(\Omega_1 + \Omega_2)$$

(10)

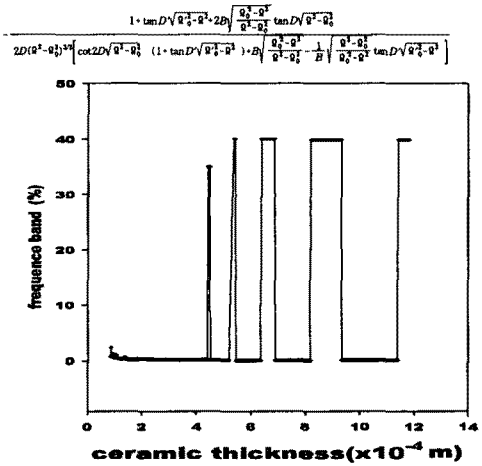


그림 7. 세라믹스의 두께와 비대역폭  
Fig. 7. Frequency band on the ceramics thickness.

그림 7과 8은 세라믹과 전극의 두께 변화에 따른 비대역폭의 변화를 나타내었다. 일정한 세라믹 두께에 있어 비대역폭의 급증을 볼 수 있는데, 이는 세라믹스의 두께에 상응하는 공진주파수의 영역이 좁기때문으로 생각된다. 또한 세라믹스의 두께가 두꺼울수록 최대 대역의 폭이 넓어지고 있는데 이는 세라믹스의 두께가 두꺼워질수록 동작 주파수가 저주파수로 이동되어 나타난 것으로 생각된다. 또한 전극의 두께가 증가할수록 비대역폭은 다소 증가하는 것으로 나타내었다. 이는 높은 밀도를 가진 세라믹스에 비해 비교적 낮은 밀도를 가지는 전극의 두께가 증가함에 따라 matching 임피던스의 저하에 따른 것으로 생각된다.

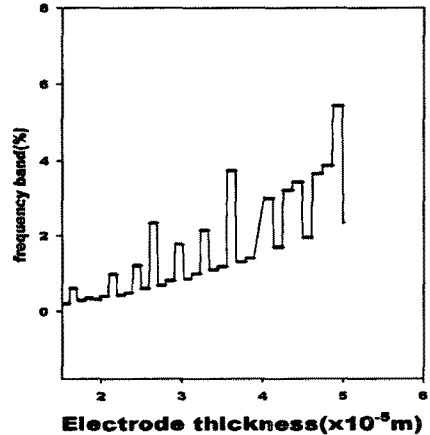


그림 8. 전극의 두께와 비대역폭  
Fig. 8. Frequency band on the electrode thickness.

그림 9와 10에는 세라믹스의 밀도와 탄성정수의 변화에 따른 비대역폭을 나타내었다. 세라믹 밀도의 증가에 따라 대역폭은 감소하는 것을 알 수 있었다. 이는 앞에서 언급한 것과 같이 높은 밀도에 의해 matching 임피던스가 증가에 의한 것으로 생각되며, 탄성정수에는 영향을 받지 않음을 알 수 있었다.

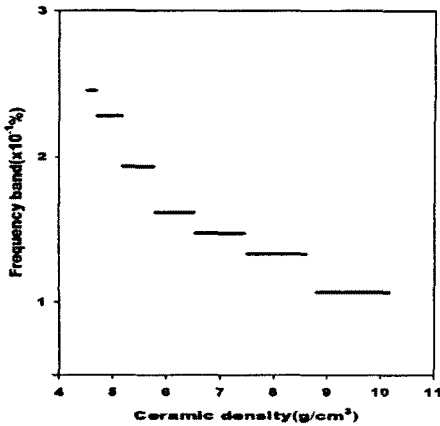


그림 9. 세라믹스의 밀도와 비대역폭  
Fig. 9. Frequency band on the ceramics density.

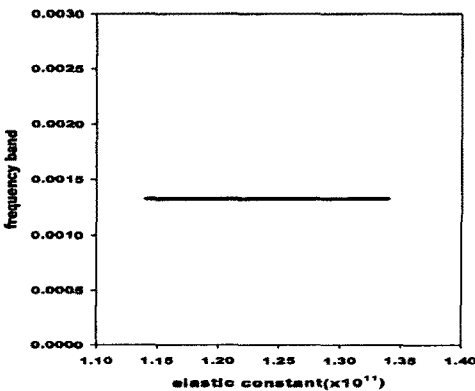


그림 10. 탄성정수(C33)와 비대역폭  
Fig. 10. Frequency band on the elastic constant.

#### 4. 결론

이중모드 필터의 분포정수등가회로의 수치해석을 통하여 세라믹스와 전극의 두께 및 재료정수들의 변화에 따른 중심주파수와 비대역폭의 변화를 검토하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 세라믹 필터의 동작 중심 주파수는 세라믹스의

두께에 지수적으로 비례하여 감소하였지만, 전극의 두께에는 큰 영향을 받지 않았다. 또한 세라믹의 밀도에는 비례적으로 감소하였지만, 탄성정수에는 비례적으로 증가하였다.

2. 세라믹 필터의 비대역폭은 일정한 세라믹 두께에서 높은 비대역폭을 나타낸다. 또한 세라믹 밀도의 증가는 비대역폭의 감소를 가져오며, 전극의 두께 증가는 비대역폭의 증가를 가져왔다.

따라서 원하는 세라믹 필터의 설계를 위해서는 세라믹의 두께뿐만 아니라 밀도와 탄성정수도 설계시 고려하여야 한다. 그러나 좀 더 정확한 시뮬레이션을 위하여 전극의 기하학적 구조 변화와 세라믹스 임피던스에 영향을 줄 수 있는 기생용량등을 고려한 새로운 모델에 대한 연구가 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", 전기전자재료학회논문지, 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.