

논문 15-8-4

전극직경 크기에 따른 SMD형 PbTiO₃계 세라믹 공진자의 전기적 특성

Electrical Characteristics of SMD Type Ceramic Resonators using PbTiO₃ System as a Function of Electrode Radius Size

민석규, 류주현
(Suk Kyu Min and Ju Hyun Yoo)

Abstract

In this study, the high frequency SMD ceramic resonators with the size of $3.7 \times 3.1 \times 0.385 \text{mm}^3$ were fabricated using $\text{Pb}_{0.88}(\text{La}_{0.6}\text{Nd}_{0.4})_{0.08}(\text{Mn}_{1/3}\text{Sb}_{2/3})_{0.02}\text{Ti}_{0.98}\text{O}_3$ ceramics with the variations of electrode radius size. With increasing the electrode radius size, resonant resistance in third overtone mode was decreased and electromechanical coupling factor(k_{t3}) in third overtone mode was showed constant values. Taking into consideration mechanical quality factor(Q_{m3}) of 5,552 and dynamic range(D.R) of 60.72dB in third overtone mode, the ceramic resonator with the electrode radius size of $\phi 1.13 \text{mm}$ was suitable for 20MHz resonator application.

Key Words : SMD, Resonator, Dynamic range, Mechanical quality factor(Q_{m3})

1. 서론

고주파용 세라믹 공진자는 가격이 수정에 비해 싸며, oscillation 할 때의 rising time이 빠르기 때문에 최근들어 수정 진동자를 많이 대체하고 있다. 공진자는 마이크로프로세서, 디지털 신호처리를 위한 clock 발생 오실레이터 등에 폭넓게 사용되고 있으며, 종래의 15 MHz의 한계를 넘어 50 MHz까지 동작주파수를 높이고 있으며, 이 역시 SMD (Surface Mount Device) 타입으로 전환되고 있다.

이들은 주파수가 높기 때문에 두께진동모드를

이용해야 한다. 두께진동모드는 기본진동모드(1차 모드), 3차 진동모드, 5차 진동모드 등이 있으며, 주파수를 20MHz 이상으로 높이기 위해서는 고차 진동모드쪽을 이용해야 한다[1,2].

1930년대말 Bechmann에 의하여 처음으로 발견되어진 에너지 트랩모드 이론에 의하면 시편의 크기 및 두께를 일정하게 유지한 상태에서 전극의 크기를 변화시키면, 비조화 고조파 모드(In-harmonic overtone)가 사라져 전극의 영역을 효과적으로 설계한 공진자 및 필터를 구현 할 수 있다 [3]. 에너지트랩을 이용한 공진자용 조성으로서 Pb-TiO₃계 세라믹스는 전기기계결합계수의 이방성이 커서 두께진동모드를 이용한 공진자에 이롭다[4]. 그러나, PbTiO₃계 세라믹스는 기본모드를 이용할 시에는 Poission ratio가 1/3보다 작기 때문에 부분 전극 구조에서 에너지 트랩이 생기지 않게 되어, 일반적으로 3차 진동모드를 이용하고 있다[4]. 3차

세명대학교 전기공학과
(제천시 신월동,
TEL : 043-649-1301
E-mail : juhyun57@semyung.ac.kr)
2002년 1월 21일 접수, 2002년 3월 21일 1차 심사완료,
2002년 4월 8일 2차 심사완료, 2002년 4월 24일 최종 심사완료

진동모드를 이용한 고주파 세라믹 공진자 소자가 갖추어야 할 조건은 고주파에서 손실이 작고 선택도를 높이기 위해 기계적 품질계수 Q_{m13} 가 커야 한다. 또한, 안정한 진동을 유지하기 위해서 3차 진동모드에서의 공진 및 반공진 임피던스비의 척도인 D.R (dynamic range)이 커야한다. 더불어, 두께 진동모드를 이용해야 하므로 두께가 얇아짐에 따라 가공을 용이하게 하기 위하여, 고밀도, 고강도의 특성을 가져야 한다. 본 연구에서는 전기기계결합계수의 이방성이 크고, 큐리온도가 높고 경시변화율이 작은 $PbTiO_3$ 계 세라믹스에 기계적품질계수를 높이고자 MnO_2 를 첨가하였으며, 결정립 성장을 억제하며 밀도 및 기계적 강도를 증가시키기 위하여 Sb 등을[5] Ti-자리에 치환시키고 MnO_2 , CuO 등의 불순물을 excess로 첨가하였다. 따라서, 본 연구에서는 3차 진동모드를 이용하여 세라믹 공진자를 구성하고자 하며, 전극직경크기가 공진특성에 미치는 영향을 고찰하여, 최종 20MHz 공진자를 개발하고자 한다.

2. 압전공진자의 해석 및 실험

2.1 에너지트랩형 압전공진자의 해석

에너지트랩형 공진자와 monolithic 필터를 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. 공진자의 동작주파수는 규준화 차단 주파수를 구함으로써 계산이 가능하다. 규준화 차단 주파수의 일반형은 $\Omega = 2\pi fH/v_s$ (여기서 Ω : 규준화 차단 주파수, $2H$: 압전판의 두께, 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 종진동 모드의 경우 $\Omega_0 = (2n-1)\pi/2$ 이다. 또한 Ω_0 는 아래 식 (1)에서 n 번째 근이다.

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

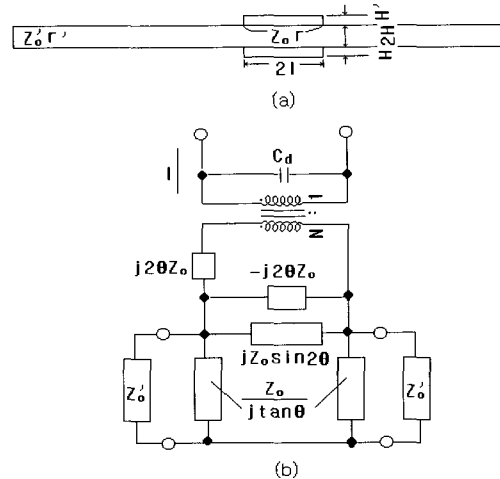


그림 1. 압전공진자와 분포정수등가회로.

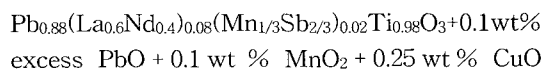
Fig. 1. Lumped constant equivalent circuit of piezoelectric resonator.

여기서 k_t 는 전기기계결합계수이며, $R(= \rho'H'/\rho H)$ 은 전극저항이다. 또한 그림 1(b)의 등가회로에서 어드미턴스 Y 를 구하면 아래 식 (2)와 같이 되며, 이를 0와 ∞ 로 둘에 따라 반공진과 공진주파수를 구할수 있다. 식 (2)에서 알수 있듯이 어드미턴스 Y 는 전극의 길이 l 과 시편의 두께 H 와 밀접한 관계를 가지게 된다.

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

2.2 세라믹 공진자 제작

본 실험에서는 화합물 혼합법으로 시편을 제조하였으며, 실험에 사용된 조성식은 다음과 같다.



조성에 따른 시료의 정확한 물비를 $10^{-4}g$ 까지 평량하였고, 24시간 동안 혼합 분쇄한 후 건조하여

표 1. 시편의 사양.

Table 1. Specification of specimen.

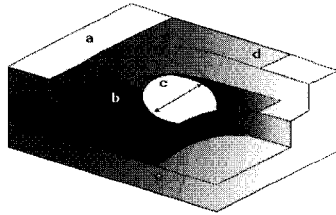
Sample No	S1	S2	S3	S4	S5
Electrode radius size(mm ϕ)	0.95	0.98	1.1	1.13	1.25

표 2. 에칭 용액 및 조건.

Table 2. Etching solution & condition.

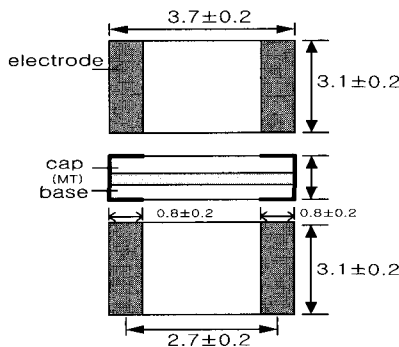
Etching	용액 CrO ₂ + H ₂ SO ₄ (aq.) 2min
Photo Resist 제거	NaOH 10min, 170 $^{\circ}$ C 10분 건조

850 $^{\circ}$ C에서 2시간 동안 하소하였다. 하소가 끝난 시료에 CuO를 0.25wt%로 첨가하여 재분쇄한 후 PVA (5wt% 수용액)을 8wt% 첨가하여 직경 30mm 몰더로 성형하였으며, 승하강 온도 300 $^{\circ}$ C/h로 하여 1200 $^{\circ}$ C에서 각각 2시간 동안 소결하였다. 소결된 시편들은 0.385mm로 정밀가공한 후 성막, 분극, 사이즈별(electrode radius size : 0.95, 0.98, 1.1, 1.13, 1.25 mm ϕ) 포토레지스터 인쇄, 에칭, 포토레지스터 제거 등의 공정을 거친후 완성되었으며, 샘플의 명칭 선정 및 에칭 솔루션을 표 1과 표 2에 나타내었다. 그림 2에 세라믹 공진자의 내부구조 및 각 부분의 치수를 나타내었다. 기판의 사이즈는 가로 3.7mm, 세로 3.1mm로서 이는 두계진동모드로 이용시에 면적 진동모드 등의 불요잡음이 적게 나타나는 IRE Standard의 두께와 길이의 비가 10정도에서의 최적조건이 나타나는 형상과 유사하다. 또한 각 설계치수의 오차는 $\pm 0.2mm$ 로 제한하였다[6].



(a:전극, b:세라믹기판, c:부분전극, d:cap, e:base)

(a) 내부구조



(b) 공진자의 치수(단위:mm)

그림 2. 세라믹 공진자의 구조와 치수.

Fig. 2. Structure and dimension of SMD type ceramic resonator.

2.3 공진자의 특성측정

공진자의 압전 특성을 나타내는 전기기계결합계수, 기계적품질계수 등은 IRE 규정에 따라 Network Analyzer(HP5100)로 공진주파수 및 반공진주파수, 공진임피던스 및 반공진임피던스를 측정하여 아래 식에 의하여 IRE 표준방법에 따라 계산하였다.

$$k_{t3} = \frac{\pi}{2} \frac{f_r}{f_a} \tan\left(\frac{\pi}{2} \frac{f_a - f_r}{f_a}\right) \quad (3)$$

$$Q_{mt3} = (2\pi f_r |Z_m| C_0 \frac{f_a^2 - f_r^2}{f_a^2})^{-1} \quad (4)$$

여기서, k_{t3} 와 Q_{mt3} 는 각각 3차 진동모드에서의 전기기계결합계수와 기계적품질계수이다. f_r , f_a 는 공진주파수와 반공진주파수, C_0 는 정전용량이다. 또한, 3차모드에서의 dynamic range (D.R)를 다음 식에 의하여 계산하였다.

$$D.R. = 20 \log \left| \frac{Z_{\max}}{Z_{\min}} \right| \quad (5)$$

여기서 f_{t3} 는 3차모드의 공진주파수, t 는 공진자의

두께이며, Z_{max} 와 Z_{min} 은 각각 소자의 공진주파수와 반공진주파수에서의 임피던스를 나타낸다.

3. 결과 및 고찰

공진자를 고주파 대역에서의(10MHz이상) 사용은 원하는 진동모드 이외의 불요진동을 억제시키는 것이 매우 중요하다[7-9]. 본 실험에서는 1차진동모드를 억제하고, 3차진동모드를 최대화 가능한 $PbTiO_3$ 계 시스템을 이용하였다. 순수한 $PbTiO_3$ 는 tetragonality가 매우 커서 소결이 곤란하기 때문에 Pb자리에 (La,Nd), Ti자리에 (Mn,Sb)를 각각 치환시켰으며, 더욱 소결성을 좋게하여[10], 밀도를 높

표 3. 시편의 물성.

Table 3. Physical properties of specimens.

Dielectric constant	211
Grain size [μm]	1.18
Tc [$^{\circ}C$]	325
Density [g/cm ³]	7.72
Tetragonality (c/a)	1.028
TcF _r (-20~80 $^{\circ}C$)[ppm/ $^{\circ}C$]	17

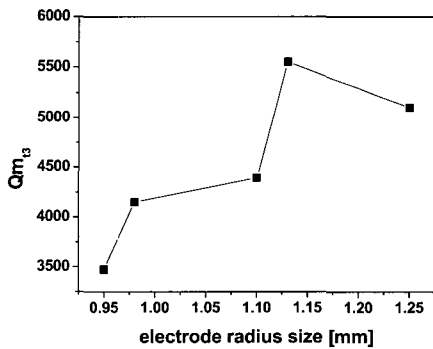


그림 3. 전극직경크기에 따른 Q_{m3} 의 변화.

Fig. 3. Variation of Q_{m3} as a function of electrode radius size.

히고자 CuO를 하소후에 첨가하였다. CuO는 미반응한 PbO와 액상을 형성하여 재료의 치밀화를 도와준다. 여기서 하소후에 첨가한 이유는 가급적 조성의 주성분과의 반응을 억제하고 단순히 액상효과를 증대하기 위함이었다. 또한, 기계적품질계수를 높이고자 과잉으로 MnO_2 를 첨가하였다. 이는 Mn이 3가로 작용하여 액선택 불순물로 작용 시킴이었다. 표 3은 제작된 시편의 물성을 나타낸 것이다.

그림 3은 3차 진동모드에서의 기계적품질계수를 나타낸 것이다. S4에서 5,552로 가장 우수한 특성을 나타내었다. 이는 이 부분전극구조가 에너지트랩이 가장 확실시되는 직경크기 1.13mm로서 아울

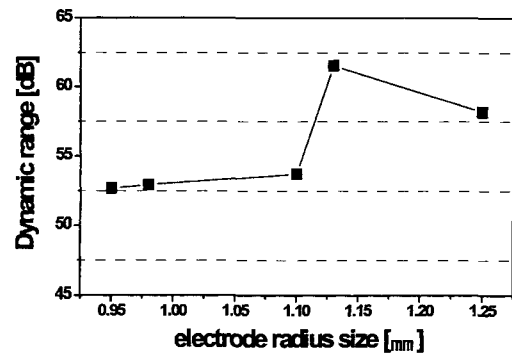


그림 4. 전극직경크기에 따른 Dynamic range값의 변화.

Fig. 4. Variation of dynamic range with electrode radius size.

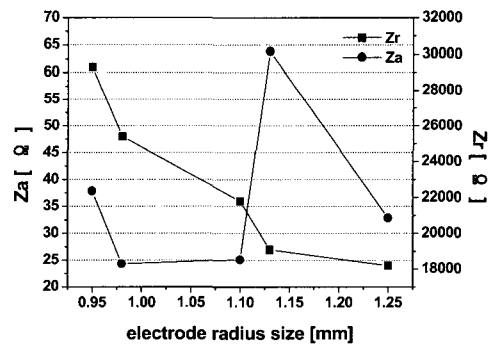
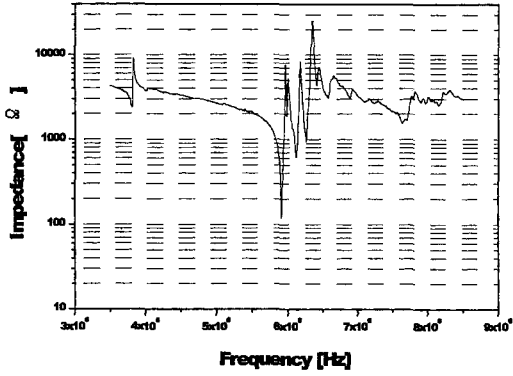
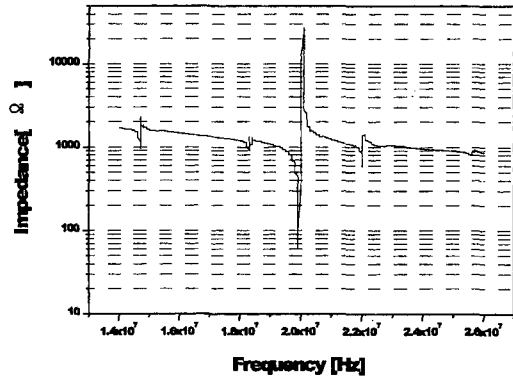


그림 5. 전극직경크기에 따른 Zr, Za 값의 변화.

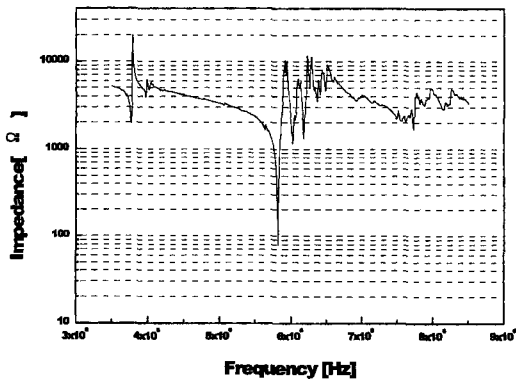
Fig. 5. Variation of Zr and Za as a function of electrode radius size.



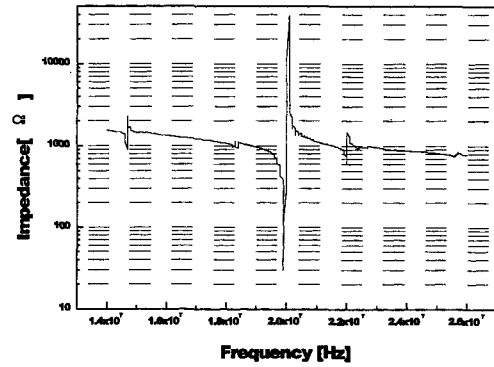
(a1) 전극직경 0.95mm 기본모드



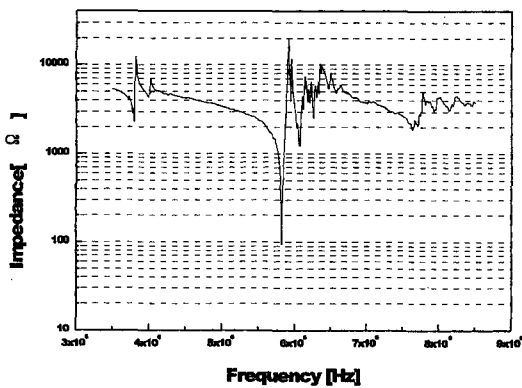
(a2) 전극직경 0.95mm 3차모드



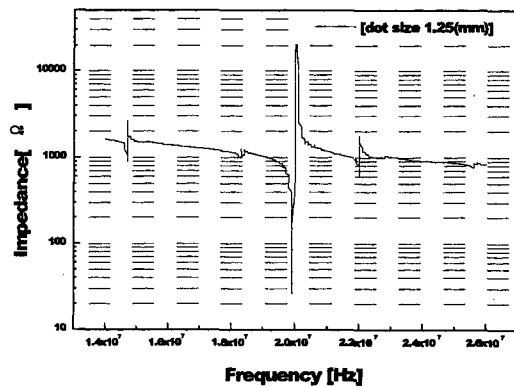
(b1) 전극직경 1.13mm 기본모드



(b2) 전극직경 1.13mm 3차모드



(c1) 전극직경 1.25mm 1차모드



(c2) 전극직경 1.25mm 3차모드

그림 6. 전극직경크기에 따른 1차와 3차진동모드의 임피던스 특성곡선.

Fig. 6. Impedance plot of fundamental and third vibration mode as a function of electrode radius size.

러 그림 4에서 알 수 있듯이 D.R도 같은 특성을 나타내었다. 이 역시 부분전극 구조로 공진자를 구현하였을 경우 전면전극의 경우보다 D.R특성이 많이 향상되었는데, 이는 에너지가 전극내부에 트랩되면서 즉, 진동에너지가 전극외부에는 감쇄하고, 전극부분에 집중되는 소위 에너지 집중현상이 생기기 때문이다. 또한 1차에서의 임피던스곡선 특성을 보면, 전면전극시보다 상당히 감쇄한 특성을 나타내고 있다. 가장 특성이 좋은 전극직경크기는 1.13mm의 경우 60.72dB으로 D.R특성이 가장 크게 향상됨을 나타내었다.

그림 5는 전극직경크기에 따른 공진 및 반공진 임피던스를 나타낸 것이다. 전극직경크기가 1.13mm에서 반공진 임피던스가 증가하고 있음을 알 수 있는데, 이는 식 (5)로부터, D.R증가로 이어지며, 반공진임피던스의 증가가 공진자에서 중요한 요소로 작용함을 알 수 있었다.

시편의 D.R특성 변화는 조성의 정전용량과 밀접한 관련을 갖고 있기 때문에 조성의 유전율값의 선정에 주의하여야 한다. 또한 포토레지스터 인쇄시 포토레지스터의 점도 및 프린팅의 속도 등은 실제 내부전극의 크기 오차에 크게 관여하며, 이러한 제작조건외 성립 이후에도 유전율의 크기가 너무 작으면 내부전극의 크기가 기판의 크기와 비교하여 너무 커질 수 있으며, 또한 유전율이 너무 크면 내부전극의 크기가 너무 작아져 작업상의 곤란을 가져올 수 있다. 따라서 조성의 선정시에 유전율과 내부전극사이즈는 사전에 충분히 고려되어야 할 부분이라 생각 되어진다.

전기기계 결합계수 k_{t3} 는 표 3에서 나타낸 것처럼

표 4. 전극직경크기에 따른 압전 및 공진특성.
Table 4. Piezoelectric and resonant characteristics as a function of electrode radius size.

electrode radius size [mm]	f_r [MHz]	f_a [MHz]	Z_r [Ω]	Z_a [Ω]	D.R [dB]	Q_{m13}	k_{t3}
0.95	19.94	20.05	61	22365	51.24	3477	0.116
0.98	19.92	20.03	48	18290	51.62	4152	0.116
1.1	19.92	20.03	36	18531	54.23	4394	0.116
1.13	19.92	20.03	27	30158	60.72	5552	0.116
1.25	19.92	20.03	24	20863	58.68	5105	0.116

전극직경크기에 따라 일정하였다. 그림 6에는 내부전극 크기 변화에 따른 압전 및 공진특성을 나타내었으며 3차에서는 제반 특성이 많이 향상되었으나 1차에서는 SMD형으로 구현함에 따라 제반 그 D.R 특성이 많이 감쇄 되었으며, 반공진주파수에서의 분할특성이 심하여 경향은 나타나지 않았다. 이는 PbTiO₃계 세라믹스는 기본모드를 이용할시에는 Poission ratio가 1/3보다 작기 때문에 부분전극 구조에서 에너지 트랩이 생기지 않게 되기 때문이다.

그림 6에서 알 수 있는 것처럼 전극직경크기에 따른 1, 3차 진동모드의 임피던스 특성곡선을 도시한 것이다. 기본진동모드의 경우PbTiO₃계 세라믹 일어나지 않으므로 공진주파수 및 반공진주파수 등의 분할 현상을 관찰할 수 있었다. 또한, 3차에 가까운 22MHz근방에서 미소하지만 임피던스 특성 peak가 나타나고 있음을 알 수 있는데, 이는 횡방향 진동모드의 고차모드인 것으로 생 각된다. 표 4에 제반 전극직경크기에 따른 공진특성과 압전특성을 정리하였다.

4. 결 론

본 연구에서는 SMD형 20MHz 공진자를 개발하기 위하여 $Pb_{0.88} (La_{0.6}Nd_{0.4})_{0.08} (Mn_{1/3}Sb_{2/3})_{0.02} - Ti_{0.98} O_3$ 세라믹스를 제조한 후 공진자 크기를 $3.7 \times 3.1 \times 0.385mm^3$ 로 하여 설계 제작하였으며, 이 공진자의 두께진동의 1차 및 3차 임피던스특성을 조사한 결과, 전극직경크기의 변화에(0.5mm~2.5mm)따른 내부전극의 크기가 커질수록 공진저항은 점차 감소하는 경향을 나타내었으며, 이때 감소하는 공진저항의 영향으로 Q_{m13} 는 전극직경크기가 1.13mm일 때 5,552로 최대값을 나타내었다. 또한, 가장 높은 D.R 값은 전극직경 1.13mm로 하였을때 60.72[dB]로 나타났으며, 20MHz SMD 형 공진자에 응용하기 적합한 특성을 나타내었다.

감사의 글

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

참고 문헌

- [1] 민석규, 오동언, 윤광희, 류주현, 박창엽, 김종선, "Pb(La,Ce)TiO₃계 세라믹스의 길이와 두께비(l/t)에 따른 공진특성", 전기전자재료학회논문지, 14권, 9호, p. 720, 2001.
- [2] 이개명, "고차진동을 이용하는 에너지 포획형 압전진동자와 필터의 변위 분포에 관한 연구", 전기전자재료학회논문지, 11권, 11호, p. 954, 1998.
- [3] 박기엽, 김원석, 송준태, "에너지 트래핑 효과를 이용한 세라믹 필터의 특성에 관한 연구" 전기전자재료학회논문지, 8권, 2호, p. 144, 1995.
- [4] Y.-Y. Lee and Long Wu, "The Effect of PbO Content on the Properties of Modified Lead Titanate Ceramic Resonator", Ferroelectrics Lett., Vol. 16, p. 103, 1993.
- [5] 中尾類, 日本特許 8-133831 (日本特許廳 1994)
- [6] 김동범, "두께종진동모드 압전세라믹 공진자의 에너지 트랩현상에 관한 연구", 연세대학교대학원, 박사학위논문, 1985.
- [7] C. Tapaonoi, S. Tashiro, and H. Igarashi, "Piezoelectric properties of fine-grained lead zirconate titanate ceramics modified with Pb(Sb_{1/2}Nb_{1/2})O₃", Jpn. J. Appl. Phys., Vol 33, p. 5336, 1994.
- [8] W. Shockley, D. R. Curran, and D. J. Koneval, "Energy trapping and studies of multiple electrode filter crystal", Proc. 17th Annu. Frequency Control Symp., p. 88, 1963.
- [9] D. R. Curran and D. J. Koneval, "Energy trapping and the design of single and multi-electrode filter crystals", Proc. 18th Annu. Frequency Control Symp., p. 93, 1964.