

사각 기판의 길이진동을 이용하는 초소형 공진자에 있어서 사각 기판의 세변의 길이비가 공진특성에 미치는 영향

Effects of Three Side Ratios of the Rectangular Substrate on the Resonant Characteristics of the Ultra-small Size Resonator Using Its Length Extensional Vibration

이개명*, 한성훈*, 김병효*

(Gae-Myoung Lee*, Seong-Hun Han*, Byung-Hyo Kim*)

Abstract

The length extensional vibration mode of a piezoelectric ceramic substrate is used in fabricating the ultra-small size resonators and filters. In general, the three side ratios of the rectangular substrate affect the resonant characteristics of the resonator using its length extensional vibration. In this paper, their relationships are studied. We know that changing the ratio of its length to its width makes possible to change the resonant frequency of the width vibration without degrading the length extensional vibration. And frequency constant for length extensional vibration becomes slightly small as the substrate thickness becomes thin, but it does not change as its length changes. Electro-mechanical coupling factor for length extensional vibration, k_{31} does not change as its length changes within length/width ≥ 4 , but it becomes small as its width increases.

Key Words : Piezoelectric resonator, Resonant frequency, Length extensional vibration mode

1. 서 론

PZT계 세라믹스는 공진자나 필터와 같은 전자 부품, 초음파 발생과 수신 기능을 수행하는 변환자, 코일을 이용하지 않는 초소형 초음파 모터 등에 사용되고 있다.

* 제주대학교 전기전자공학부, 제주대학교 산업기술연구소, 제주대학교 정보통신 연구소
(제주도 제주시 아라1동 1번지 제주대학교)
Fax: 064-756-5281
E-mail : myounglk@cheju.cheju.ac.kr

2000년 9월 7일 접수, 2000년 10월 18일 심사 완료

IF 신호의 처리에 관계된 공진자와 필터는 수정 결정이나 압전세라믹스 기판을 이용하고 있다. 수정 결정은 공진 주파수의 온도 안정성이 뛰어나지만 시편의 품질계수가 매우 커서 좁은 대역폭을 가지게 되고, 수정 자체도 고가여서 제작비용이 많이 소요되는 단점이 있다[1]. 이에 반하여 압전세라믹스는 적당한 품질계수를 가지며, 제조단가가 적게 소요되고 공업적으로도 대량생산이 용이하므로 압전세라믹스를 이용한 공진자나 필터가 0.3~30 MHz 영역에서 주류를 형성하고 있다[2]. 1 MHz 이하의 영역에서는 압전기판 윤곽진동을 이용하며 1MHz이상 영역에서는 두께 종진동, 두께 전단진동 그리고 이들 두

계 진동의 고차 진동이 에너지 포획 방식으로 이용되고 있다[3,4,5].

최근에 개인 휴대 통신기기가 급속히 보급됨에 따라 각종 부품의 소형화가 강력하게 요구되고 있다. 450 kHz 부근의 IF 신호처리에 필요한 압전세라믹 공진자, 필터 등의 부품도 이러한 요구를 받고 있다. 450 kHz 부근에서 동작주파수를 갖는 공진자와 필터 등은 근래까지도 대부분 압전 기판의 유파진동을 이용하여 설계 제작되고 있다[6,7,8]. 길이진동을 이용할 경우에는 기판의 크기가 작아짐으로 인해 제작이 어려워지므로 LF 대역(30~300 kHz)의 공진자나 필터의 제작에만 길이진동모드가 이용되었다[8]. 그러나 제작공정의 발달과 부품 소형화의 강력한 요청으로 인해 기존의 유파진동을 이용한 것보다 크기를 1/3이하로 줄인 길이진동을 이용한 공진자와 필터가 적층형으로 개발되었다[9]. LF 대역 공진자나 필터의 시장규모가 극히 미미한 탓으로 인해 압전 기판의 길이진동에 대해서는 최근까지 연구가 별로 진행되지 못했다. 길이진동을 이용한 초소형 공진자나 필터 등의 설계와 제작을 위해서는 압전 기판의 길이진동에 대한 기초적인 연구가 필요하다.

길이진동을 이용하는 압전세라믹 공진자의 공진 특성은 이용하고자 하는 길이진동의 공진특성 이외에 폭진동과 두께진동 및 이들의 고차진동이 합쳐진 매우 복잡한 공진 특성을 갖게 된다. 원하지 않는 잡음 응답(spurious response)은 충분히 억제되거나 이용하고자 하는 동작주파수에서 멀리 위치시켜야 한다. 길이진동의 공진 특성뿐만 아니라 잡음응답의 크기와 주파수는 기판의 외형에 의존하여 나타나기 때문에, 길이진동을 이용하는 특정 소자의 설계에 있어서 사각기판의 외형결정은 매우 중요하다고 할 수 있다.

본 연구에서는 기판의 외형이 길이진동 모드를 이용한 공진자의 공진특성과 잡음응답에 미치는 영향을 규명하고자 한다. 이러한 목표를 달성하기 위해 사각판의 길이진동에 대한 일본 규격 EMAS-6004의 표준시편의 외형비를 기준으로 하고 이 비를 변화시키면서 길이진동의 공진 특성과 잡음응답의 변화를 조사하고자 한다[10].

2. 실험

2.1 시편의 제작

$Pb(Zr_{0.53}Ti_{0.47})O_3+0.3 [wt\%] Cr_2O_3$ 조성의 세라믹스 기판을 산화물 혼합법으로 제조하였다. 분쇄된 하소분말에 5 wt% PVA 수용액을 5 wt% 정도 혼

합하여 과립으로 만든 후, 1 ton/cm²으로 press하여 사각형 시편을 제작하였다. 성형체를 650℃에서 2 시간 동안 유지하여 결합제를 제거하였고, 4 °C/min의 승온속도로 1200 °C에서 2시간 유지하여 소결하였다. 기판의 외형이 진동특성에 미치는 영향을 알아보기 위하여 각 변의 크기를 표 1처럼 변화시킨 시편을 제작하였다. EMAS-6004에 의거한 규격시편은 $L/w \geq 4$, $w/t \geq 3$, $L \geq 12$ mm로 규정되어 있다(그림 1). 가공된 세라믹 기판 양면에 전면 은전극을 형성하였으며, 분극은 100 °C의 실리콘유 중에서 3.5 kV/mm의 전계를 가하여 30분간 행하였다.

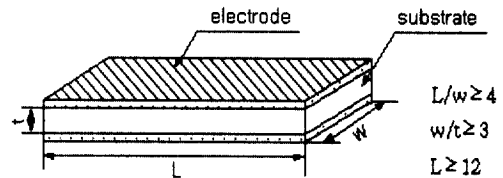


그림 1 길이진동에 대한 압전세라믹 표준시편의 외형

Fig. 1 The aspect of the standard piezoelectric ceramic specimen for the length extensional vibration

표 1 시편의 외형비에 따른 시편의 기호 표시
Table 1 The symbol signs of specimens according to aspect ratios

		L[mm]	w[mm]	t[mm]	specimen symbols	
L/w=4	w/t=	1	12	3	3	A1
		2	12	3	1.5	A2
		3	12	3	1	A3
		4	12	3	0.75	A4
		5	12	3	0.6	A5
w/t=3	L/w=	2	4	2	0.67	B20
		2.5	5	2	0.67	B25
		3	6	2	0.67	B30
		3.5	7	2	0.67	B35
		4	8	2	0.67	B40
		4.5	9	2	0.67	B45
		5	10	2	0.67	B50
L/t=12	w/t=	2.4	12	2.4	1	W0
		2.7	12	2.7	1	W1
		3	12	3	1	W2
		3.3	12	3.3	1	W3

2.2 측정

제작된 세라믹 기판의 치밀성을 파악하기 위해 밀도를 측정하였고, LCR 미터로 측정된 정전용량으로부터 비유전율을 계산하였다. Network Analyzer(HP E5100a)로 공진특성을 측정하였으며 다음 식을 사용하여 전기기계 결합계수(k_{31})를 계산하였다[11].

$$\frac{k_{31}^2}{1 - k_{31}^2} = \frac{\pi}{2} \cdot \frac{f_p}{f_s} \tan\left(\frac{\pi}{2} \cdot \frac{\Delta f}{f_s}\right) \quad (1)$$

여기서, f_p 는 병렬공진 주파수, f_s 은 직렬공진 주파수, $\Delta f = f_p - f_s$ 이다. 주파수상수 N_l 은 다음 식을 사용하여 계산하였다.

$$f_s l = N_l \quad (2)$$

여기서, l 은 시편의 길이, f_s 는 직렬공진 주파수이다.

3. 결과 및 고찰

실험에 사용된 소결체의 소결밀도는 이론 밀도의 94 % 정도인 7.4 g/cm² 이상이었고, 비유전율은 평균 1000이었다.

그림 2에 두께를 달리한 시편 A1에서 A5의 기본 길이진동모드의 공진특성을 나타내었다. A1에서 A5로 갈수록 즉, 시편의 두께가 얇아질수록 공진주파수가 낮아지는 경향을 나타낸다. 이는 공진자의 집중정수 증가회로에서 직렬공진주파수 f_s 는 $1/2\pi\sqrt{L_1C_1}$ 로 결정되며, L_1 이 진동체의 질량에, C_1 이 진동체의 compliance에 해당되는데 사각기판 두께

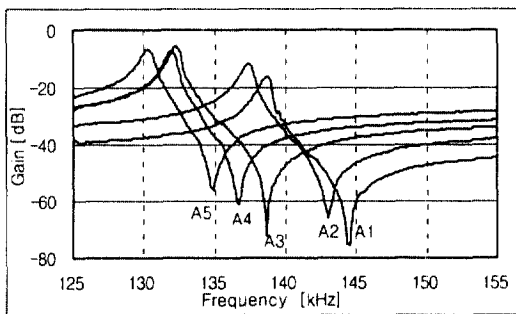


그림 2 시편의 두께가 길이진동의 주파수특성에 미치는 영향

Fig. 2 Effects of thickness of the specimens on frequency characteristics of the length extensional vibration

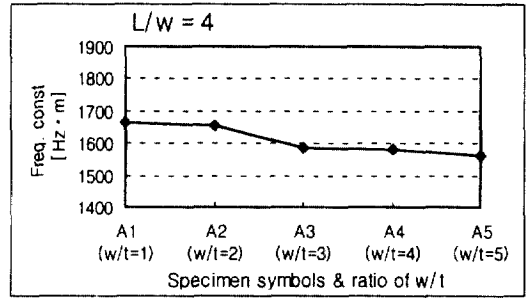


그림 3 시편의 두께가 길이진동의 주파수상수에 미치는 영향

Fig. 3 Effects of thickness of the specimens on frequency constants of the length extensional vibration

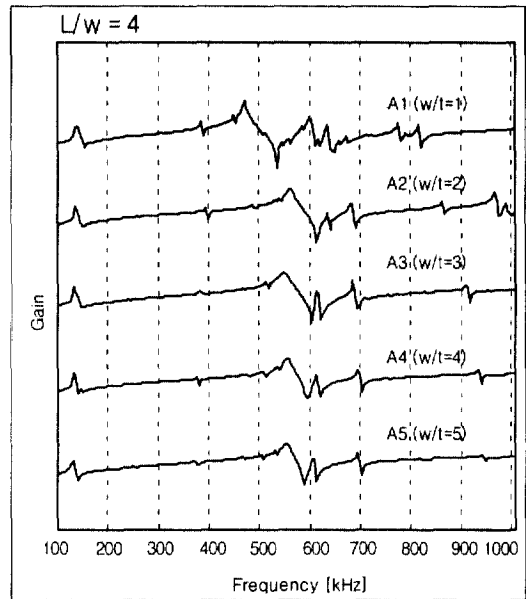


그림 4 시편의 두께조절에 따른 광대역 주파수특성

Fig. 4 Changes of frequency characteristics in wide frequency range according to thickness variations of the specimens

가 감소함에 따라 질량감소 효과보다는 compliance 증가 효과가 더 현저함에 기인하여 f_s 가 감소하는 것으로 사료된다. 따라서 그림 3처럼 식(2)에서 주파수상수는 시편의 두께가 얇아질수록 낮아진다. 특히, 기판의 두께가 얇아질수록 정전용량이 증가하므로

공진주파수의 감소보다 반공진주파수의 감소가 더 크게 나타났다.

그림 4에 폭진동을 포함한 넓은 주파수영역에서의 A시편들에 대한 주파수특성을 나타내었다. 시편의 두께가 얇아질수록 폭진동의 공진주파수의 피크가 완만해지고, 폭진동의 반공진주파수 부근에서 잡음이 많이 생기게 됨을 보여준다.

시편의 길이 변화에 따른 전기기계 결합계수의 변화를 그림 5에 나타내었다. B20에서 B40까지 전기기계 결합계수가 거의 선형적으로 증가하고 B40에서 B60까지는 일정한 값을 유지하고 있다. B40~B60은 일본의 EMAS-6004규격의 표준시편 규정에 속하는

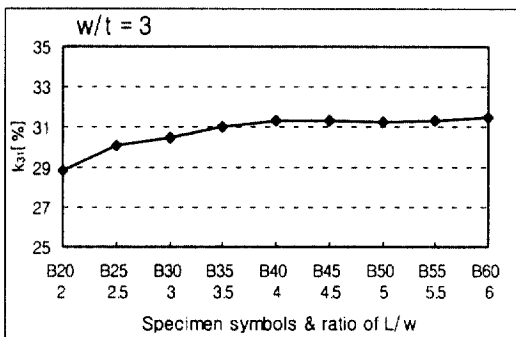


그림 5 시편의 길이가 길이진동의 전기기계 결합계수에 미치는 영향

Fig. 5 Effects of length of the specimens on electro-mechanical coupling factors of the length extensional vibration

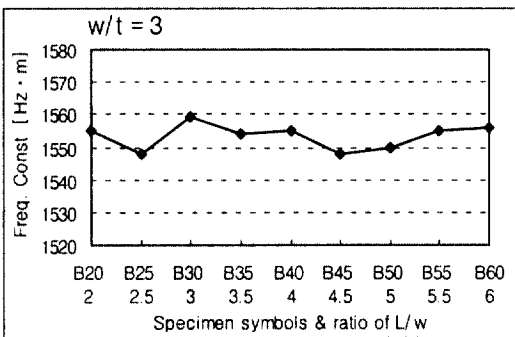


그림 6 시편의 길이가 길이진동의 주파수상수에 미치는 영향

Fig. 6 Effects of length of the specimens on frequency constants of the length extensional vibration

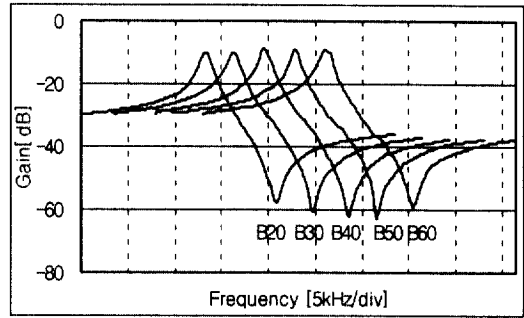


그림 7 시편의 길이가 길이진동의 주파수특성에 미치는 영향

Fig. 7 Effects of length of the specimens on frequency characteristics of the length extensional vibration

외형을 갖는다.

그림 6에 시편의 길이 조절에 따른 주파수 상수의 변화를 나타내었다. 시편의 길이 조절에 따른 주파수상수의 변화는 1%정도로 이 정도는 측정오차를 고려하면 변화가 없는 것으로 판단된다.

그림 7에 시편의 길이 조절에 따른 길이진동의 주파수 특성의 변화를 나타내었다. 각 시편의 길이가 크게 변하므로 이에 따라 각 시편의 길이진동의 공진주파수가 크게 변하게 된다. 그림 7에서 공진주파수가 다른 각 시편들의 공진 및 반공진특성을 비교하기 위해 주파수 축 상에서 평행 이동시켜 함께 나타내었다. 시편의 길이를 조절하면 시편의 전기적인 정전용량이 변화함에도 불구하고 공진특성에는 거의 영향을 주지 못함을 알 수 있다.

그림 8에 시편 길이의 조절이 폭진동의 주파수특성을 포함한 넓은 주파수영역에서의 주파수특성에 미치는 영향을 보여주고 있다. 시편 길이를 변화시키므로 폭진동의 공진주파수는 거의 변화가 없고, 길이진동의 공진주파수는 길이가 커짐에 따라 점차 낮아지고 있음을 보여준다. 폭진동의 반공진주파수보다 높은 주파수영역에서의 잡음특성은 길이에 따라 민감하게 변하는 것으로 보아 길이진동의 고차진동의 공진특성으로 판단된다.

시편의 폭 조절에 따른 길이진동에 대한 주파수상수의 변화를 그림 9에 나타내었다. 폭은 50%정도 조절되었는데 주파수상수는 1%도 안 바뀌었으므로 폭의 조절에 따른 길이진동에 대한 주파수상수의 변화는 거의 무시할 수 있다

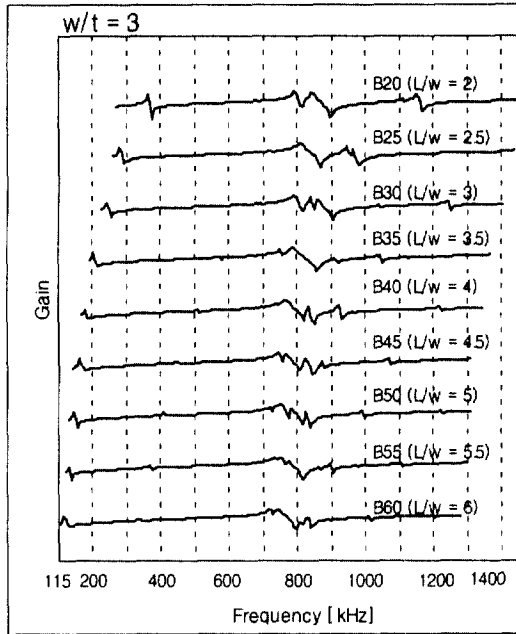


그림 8 시편의 길이조절에 따른 광대역 주파수특성

Fig. 8 Changes of frequency characteristics in wide frequency range according to length variations of the specimens

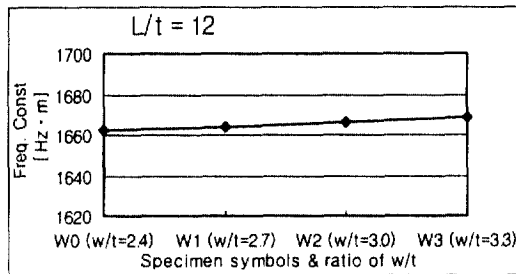


그림 9 시편의 폭이 길이진동의 주파수상수에 미치는 영향

Fig. 9 Effects of the width of the specimens on frequency constants of the length extensional vibration

그림 10에 시편의 폭 조절에 따른 길이진동에 대한 전기기계 결합계수의 변화를 나타내었다. 폭이 증가함에 따라 전기기계 결합계수가 약간씩 감소하고 있다. 이는 사각기판의 폭이 증감함에 따라 폭진동이 더 강하게 발생하므로 그 결과 길이진동으

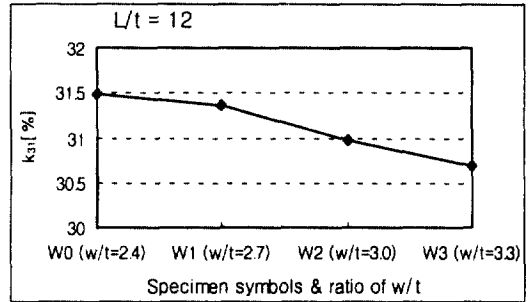


그림 10 시편의 폭이 길이진동의 전기기계 결합계수에 미치는 영향

Fig. 10 Effects of the width of the specimens on electro-mechanical coupling factors of the length extensional vibration

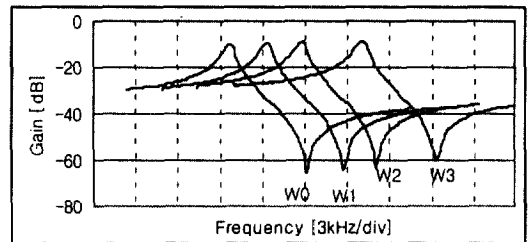


그림 11 시편의 폭이 길이진동의 주파수특성에 미치는 영향

Fig. 11 Effects of the width of the specimens on frequency characteristics of the length extensional vibration

로 변환되는 에너지가 감소 한데 그 원인이 있는 것으로 판단된다.

그림 11에는 시편 폭의 조절에 따른 길이진동의 공진·반공진 특성을 보여주고 있다. 그림 11에서 각 시편의 길이가 같음으로 인해 각 시편의 공진 및 반공진특성이 중첩되어 구분하기 어려우므로 각 시편의 공진 및 반공진특성을 주파수 축 상에서 평행 이동시켜 나타내었다. 폭이 증가함에 따라, 공진 저항이 약간씩 감소하고 공진주파수에서 손실이 약간씩 감소함을 알 수 있다. 폭이 증감함에 따라 공진 주파수에서 손실이 약간씩 감소하였는데, 이는 바이어스 되는 면의 면적이 증가하고 이에 따라 공진자의 공진주파수에서 저항값이 감소하고 이로 인해 공진 주파수에서 삽입손실이 감소한 것으로 판단된다.

그림 12에는 시편의 폭 조절에 따른 넓은 주파수 영역에서의 주파수 특성의 변화를 나타내었다. 길이

의 크기는 고정되어 있으므로 길이진동의 공진·반공진주파수는 변화되지 않고 폭진동의 공진·반공진주파수는 폭이 넓어짐에 따라 점차 낮아짐을 보여주고 있다. 따라서 길이에 대한 폭의 비를 작게 함으로써 길이진동의 공진·반공진주파수로부터 폭진동의 공진·반공진주파수를 주파수가 높은 쪽으로 멀리 떨어지게 할 수 있을 것이다.

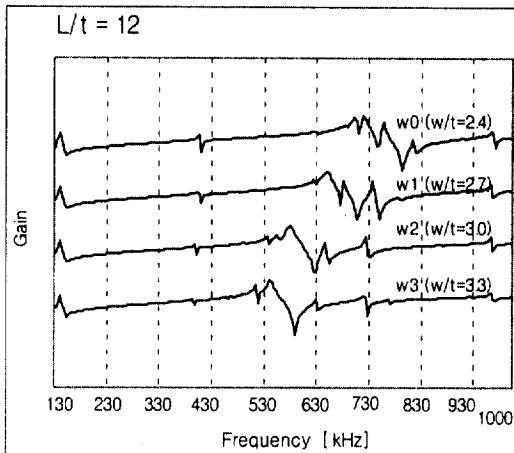


그림 12 시편의 폭 조절에 따른 광대역 주파수 특성

Fig. 12 Changes of frequency characteristics in wide frequency range according to width variations of the specimens

4. 결 론

$Pb(Zr_{0.53}Ti_{0.47})O_3 + 0.3[wt\%]Cr_2O_3$ 의 조성을 가지는 세라믹스 기판을 제작하였고 제작된 기판의 외형을 변화시켜 가공된 시편들의 주파수 특성을 측정할 실험을 통하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 시편의 두께가 얇아질 수록 길이진동에 대한 주파수상수가 작아지고, 공진주파수에서의 손실이 작아진다.

(2) 시편의 두께가 얇아질 수록 길이진동의 공진주파수에서의 피크의 완만해짐이 폭진동의 공진주파수에서의 피크의 완만해짐보다 덜하다.

(3) 시편의 길이가 변화하여도 주파수 상수는 거의 변화하지 않으며, 전기기계 결합계수는 시편의 길이가 증가함에 따라 증가하다가 일본의 EMAS-6004 규격에 적합한 외형에서부터는 거의 변화가 없다.

(4) 시편의 폭이 증가할 수록 길이진동의 공진주파수에서의 손실이 약간씩 감소하며, 전기기계 결합계수도 약간씩 감소한다.

(5) 시편의 길이를 고정하고 폭을 줄여 가면 길이진동의 공진·반공진주파수는 변화가 없고 폭진동의 공진·반공진주파수만을 주파수가 높은 쪽으로 이동시킬 수 있다.

참고 문헌

- [1] 박창엽, "전기전자용 세라믹스", 반도체판사, pp. 131-132, 1997.
- [2] 電子材料工業會, "壓電セラミックスとその応用", 電波新聞社, pp. 235-237, 昭和49
- [3] 박창엽, 이개명, "압전세라믹을 이용한 고주파 대역의 단일체 대역통과 필터에 관한 연구", 한국전기전자재료학회지, Vol. 2, No. 1 pp. 41-51, 1989
- [4] 이개명, "압전체 기판에서 에너지 포획된 두께 전단 진동의 변위분포", 한국전기전자재료학회지, Vol. 9, No. 9, pp. 954-963, 1996.3
- [5] 이개명, "고차 진동을 이용하는 에너지 포획형 압전 공진자와 필터의 변위분포에 관한 연구", 한국전기전자재료학회지, Vol. 11, No. 11, pp. 954-962, 1998
- [6] Hans H. Schuessler, "Ceramic Filters and Resonators", IEEE Transactions on Sonics and Ultrasonics, Vol. SU-21, No. 4, pp. 257-268, October 1974.
- [7] 藤島 啓, 野阪俊二, "最新のセラミックフィルタとその特性", エレクトロニクス, pp. 564-571, 昭和40年5月号.
- [8] 谷 健六 外, "ラダー-形セラミックフィルタ", National Technical Report, Vol. 18, No. 4, pp. 438-446, AUG. 1972.
- [9] 塩崎 忠 外, "新・壓電材料の製造と應用", CMC, pp. 150-163, 1987.
- [10] Jiro Inoqe and Toshihiko Unami, "Multilayer Ceramic Resonator using the Piezoelectrically Stiffened Length Mode Vibration", Jpn. J. Appl. Phys. Vol. 38, Part 1, No. 5B, pp. 3237-3238, 1999.
- [11] 일본전자재료공업회, EMAS-6004, 昭和57.
- [12] IRE Standards on Piezoelectric Crystals, "The Measurement of Piezoelectric Ceramics", Proc. 61 IRE 14. S1, pp. 1161-1169, 1961.