

논문 2005-42TE-1-2

FEM을 이용한 수정진동자의 진동 및 주파수 해석

(An Analysis of Vibration and Frequency Characteristics for Quartz Crystal Using the Finite Element Method)

박재성*, 고영준**

(Jae-Sung Park and Young-Jun Go)

요약

유한요소해석 프로그램인 ANSYS를 이용하여 수정진동자의 진동 및 주파수특성을 해석하였다. 수정진동자의 직경을 고정하고 두께를 변화시키면서 주파수특성을 조사하였다. 전극박막을 금, 은, 알루미늄으로 적층하였을 경우, 금속의 종류에 따른 공진주파수를 구하였다. 그 결과 유한요소법을 이용하여 수정진동자의 최적조건을 예측할 수 있었다. 또 수정편 두께가 0.2mm보다 작은 영역에서의 주공진주파수는 8.102 MHz이상의 고주파를 얻을 수 있는 것을 확인하였다. 전극박막으로 사용한 금속의 종류에 따른 수정진동자의 주공진주파수 변화를 조사한 결과, 금이나 은에 비해 알루미늄이 우수한 주파수특성을 나타내었다.

Abstract

It was analyzed that the vibration and frequency characteristics for quartz crystal using a finite element method, ANSYS. It was investigated that the resonant frequency of quartz crystal by fixing the diameter of quartz crystal for the various its thickness. There were also studied that the resonant frequency value with different electrode thin films of Au, Ag and Al. As the result of this study, the best condition for quartz crystal unit was determined by the finite element method. If the thickness of quartz crystal is smaller than 0.2 mm, the high frequency over 8.102 MHz was obtained. In addition, as to the change of resonant frequency on electrode thin film, Al turned out to be superior to Au or Ag in frequency response.

Keywords : quartz crystal, finite element method, resonant frequency

I. 서론

최근 정보통신 산업이 발달함에 따라서 전자부품들은 점차 소형, 경량화 되고 있으며, 고품질, 고안정성이 요구되고 있다. 또한 레이저나 카메라 등의 광학기기, 컴퓨터, 통신기기, 사무자동화기기 등을 정밀하게 제어하는데 있어서 미세변위소자의 필요성은 더욱 증가하고 있다. 그 중 수정진동자는 두께에 따라 주파수를 발생

시키는 기본 소자로서 주변 온도변화와 환경변화 그리고 장기간 사용 등의 경우에도 매우 안정되고 정밀한 주파수를 공급한다. 한편 기계, 전기 및 전자소자 등의 모델링 방법으로는 유한요소법을 많이 활용하고 있으며,^[1] 복잡한 기하학적 형상의 구조물을 해석하는데 적절한 도구로서 사용되고 있다. 수정진동자는 그 기능의 안정성 면에서 주파수발생 기능, 주파수선택 기능, 진동과 기능, 편광이나 복굴절 및 선광 기능으로 구분할 수 있다. 그리고 현재 수정진동자가 이용되는 제품으로는 TV, 컴퓨터, 마이크로프로세서, 카 폰, 시계 등을 비롯한 모든 가전제품과 각종 통신기기 및 전자기기, 차세대 단거리 무선통신제품 등이 있으며, 주파수 제어환경의 필수 부품으로 많은 부분에서 다양하게 쓰

* 정회원, 영남이공대학 전자정보계열
(Dept. of Electronic & Information Engineering,
YNC)

** 정회원, 성조파인세라믹

(SUNG JO FINE CERAMICS CO.)

접수일자: 2004년10월12일, 수정완료일: 2005년1월7일

여 지고 있다.

1920년 Cady에 의하여 압전기 소자의 공진 특성이 발견된 이후로 1923년 Pierce에 의해 수정진동자는 그 중요성이 인정되었다. 1932~1934년에 걸쳐 Faie, Beckmann, Koga, Willard 등에 의하여 영 온도계수 수정편이 발명되었으며, 전자소자로서의 기능을 다하게 되었다.^[2] 또한 1960년부터 시계용 소자를 비롯하여 컴퓨터용의 기준 클럭신호 발생원 등 많은 분야에 확대 사용되었다. 수정제품은 1970년대와 1980년대를 거치면서 광학적 기능분야를 제외하고는 모든 분야의 기본적인 윤곽이 형성되었으며, 고안정성과 고주파용 수정제품에 대한 연구가 지속적으로 진행되었다.^[3-5] 현재 수정진동자를 제조하는 기술력의 척도는 주공진주파수를 결정하는 요인들을 정밀하게 제어하고 설계하는 것에 있다. 수정진동자의 주파수를 결정하는 외부적인 인자에 대한 측정과 검증은 여러 가지 환경시험을 통하여 적절히 규정되어 있다. 하지만 내부적인 인자에 대해서는 직접적인 규정이 없고, 측정이 힘들며 많은 시간과 경비가 든다.

본 연구에서는 일일이 측정하기 힘든 내부적인 요인들, 즉 수정진동자의 수정편 두께, 전극박막의 종류, 진동모드 및 발진시 응력 등에 따른 진동특성을 유한요소 프로그램인 ANSYS^{[6],[7]}를 이용하여 해석하였다.

AT-cut^[8]으로 절단된 수정진동자 수정편을 택하여 직경을 8 mm 로 고정하고, 두께를 0.1~0.8 mm까지 변화시켰으며, 수정편의 두께와 수정편의 직경/두께, 수정편의 넓이/두께에 따라 변화하는 공진 주파수특성을 조사하였다. 전극 형성물질로는 금(Au), 은(Ag), 알루미늄(Al), 크롬(Cr), 니켈(Ni) 또는 두 가지 이상의 혼합층이 사용되고 있다. 그 중 일반적으로 가장 많이 사용되는 알루미늄과 대표적인 전극인 금과 은을 수치해석에 사용하였다. 전극박막의 종류를 금, 은, 알루미늄으로 바꾸어 가면서 전극박막에 따른 공진주파수의 영향을 확인하였다.

II. 수치 해석

1. 수정진동자의 주파수 해석

본 연구에서는 수정편의 주공진주파수와 이에 영향을 미치는 부차적인 공진주파수를 이론적으로 수치해석하였다.

그림 1은 AT-cut으로 절단된 수정편의 좌표축이다. AT-cut 수정발진자의 좌표축은 Z'축 방향으로 35° 15'

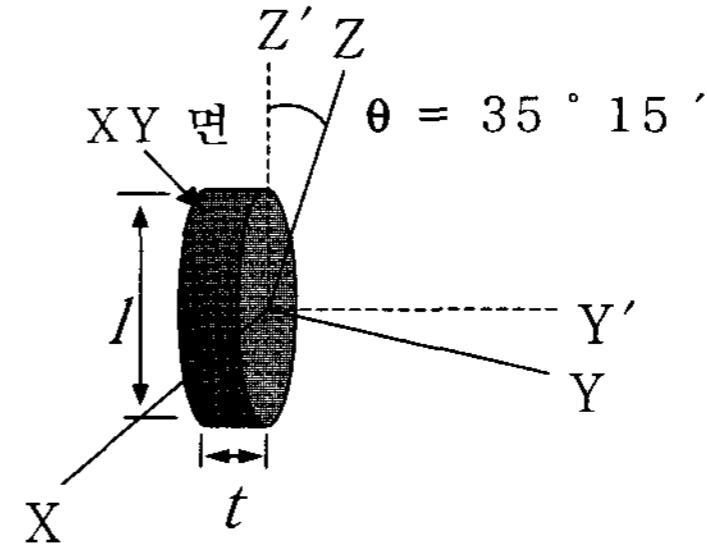


그림 1. AT-cut으로 절단된 수정편의 좌표축
Fig. 1. Axis of the AT-cut quartz crystal.

5° 기울어져 있으며, 수정편의 좌표축 Y'차원은 진동주파수를 결정하며, X차원은 지지계와 수정편의 활성 영역간의 격리도를 결정한다. Z'차원은 적지만 X차원과 같은 작용을 한다. 주공진주파수에 영향을 미치는 공진주파수로는 Z'방향으로 넓이차원의 신축진동 및 XY' 굴곡 진동이 있으며, 같은 방향으로 길이차원의 신축진동이 있다. 이들 공진주파수는 주진동인 두께 전단진동의 주파수를 변화시킬 수 있다.

Z'방향인 넓이 차원의 진동으로서는 주진동인 두께 전단진동과 부차진동인 신축진동이 있다. 신축진동은 주진동과 강한 진동결합을 일으킬 수 있으며, 주진동인 두께 전단진동의 주파수(f_t)와 부차진동인 신축진동의 주파수 f_{us} 는 다음과 같다.

$$f_t = \frac{1}{2t} \sqrt{\frac{c'_{66}}{\rho}} \quad (1)$$

$$f_{us} = \frac{n}{2w} \sqrt{\frac{c'_{55}}{\rho}} \quad (2)$$

여기서 t 는 X축 방향의 두께, w 는 Z'축 방향의 넓이, n 은 Z'축 방향의 배조파 차수이며, C'_{55} 와 C'_{66} 은 각각 Zx축의 탄성률 ($\theta=35^\circ 15'$ 일 때 66.97×10^9 N/m²)과 Xy축의 탄성률 ($\theta=35^\circ 15'$ 일 때 29.3×10^9 N/m²)이다. 그리고 ρ 는 수정편의 밀도이다.

AT-cut 수정진동자의 주진동은 XY' 굴곡 진동의 우수배 배조파와 강한 결합을 갖는다. 이 XY' 굴곡 진동은 X차원이 주파수 결정 차원이며, 재단 각이 35°15'의 AT-cut에서 식(3)과 같은 진동주파수를 갖는다.

$$f = \frac{1}{2} - \frac{p}{l} \sqrt{\frac{23 \tanh(pt/l)}{\rho}} \quad (3)$$

여기서, l 은 X축 방향의 길이이며, p 는 X축 방향의 배조파 차수이다.

또 하나의 결합진동인 신축진동주파수 f_{we} 는

$$f_{we} = \frac{n}{2w} \sqrt{\frac{c'_{33}}{\rho}} \quad (4)$$

로 나타내며, C'_{33} 은 Z' 방향의 탄성률 ($\theta=35^\circ 15'$ 일 때 $103.01 \times 10^9 \text{ N/m}^2$)이다.

2. 수정진동자의 물리적 성분

유한요소해석법을 이용하여 수정편의 두께에 따른 공진주파수를 수치해석하였다. 또한 전극박막의 종류를 백금, 은, 알루미늄으로 바꾸어가면서 각각의 공진주파수를 유한요소법을 이용하여 구하였다.

그림 2는 본 연구에서 사용한 수정진동자의 기하학적인 외형모델이다. 해석모델의 형상은 디스크형을 택하였으며, 수정편 위에 전극박막이 적층된 형태로 구성되어 있다. t_q 는 수정편의 두께, t_f 는 수정편 위에 적층된 전극박막의 두께이다. l_q 와 l_f 는 각각 수정편의 직경과 전극박막의 직경이다.

수정진동자의 유한요소해석에 사용된 수정편의 재료정수와 수정편 위에 적층시킨 금(Au), 은(Ag), 알루미늄(Al)의 물리적인 성분의 값을 표 1과 2에 각각 나타내었다.

3. 유한요소법을 이용한 수정진동자의

진동모드 해석

유한요소해석법을 이용하여 수정진동자의 진동모드와 공진주파수에 의한 수정편의 응력을 조사하였다. 해석시 수정편의 두께는 0.2mm, 전극박막의 두께는 0.0001mm로 고정하였고, 전극박막의 재질은 일반적으로 가장 많이 쓰이는 알루미늄을 택하였다.^[9]

그림 3은 수정편-전극박막으로 적층된 수정진동자의 전극을 유한요소해석한 것이다. 유한요소해석시 수정편에 적층된 전극박막은 수정편의 양쪽 끝단을 기준으로 수정편에 요소분할 되어진 절점을 고정하는 방법으로 해석되었으며,^[10] 수정편의 양쪽 면에 동일하게 적용하였다. 또한 2438개로 요소분할된 각 절점은 X와 Y방향의 변위 및 회전에 의한 변위를 모두 구속하였다.

III. 결과 및 고찰

1. 수정편의 두께에 따른 공진주파수

그림 4는 수정편의 두께 변화에 대한 공진주파수 변화를 보여주고 있다. 수정편의 직경은 8mm로 고정하

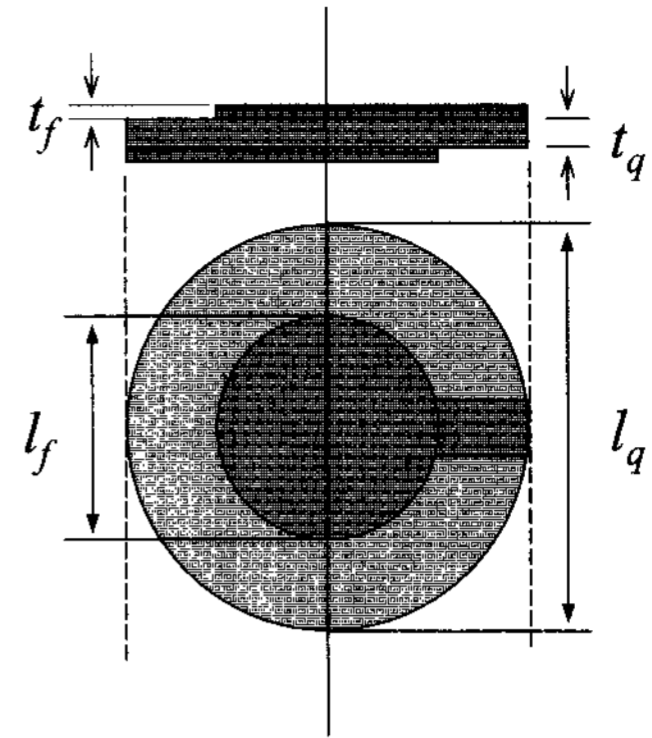


그림 2. 수정진동자의 해석모델
Fig. 2. Geometry of quartz crystal.

표 1. 수정편의 재료정수

Table 1. Material of quartz crystal.

Material	SiO ₂
$\rho(10^3 \text{ kg/m}^3)$	6.50
$\epsilon'_{33}(10^{-8} \text{ F/m})$	2.79
$C'_{33}(10^9 \text{ N/m}^2)$	103.01
$C'_{55}(10^9 \text{ N/m}^2)$	66.97
$C'_{66}(10^9 \text{ N/m}^2)$	29.30

표 2. 적층된 전극의 재료정수

Table 2. Material of electrode thin film.

Item	Au	Ag	Al
Physical constant			
Density (kg/m ³ at 20°C)	1932.0	1050.0	2700.0
Thermal conductivity (kcal/mh°C)	60.0	360.0	190.5
Specific heat (kcal/kg°C)	0.032	0.056	0.215
Young's modulus	8.0	7.9	7.0

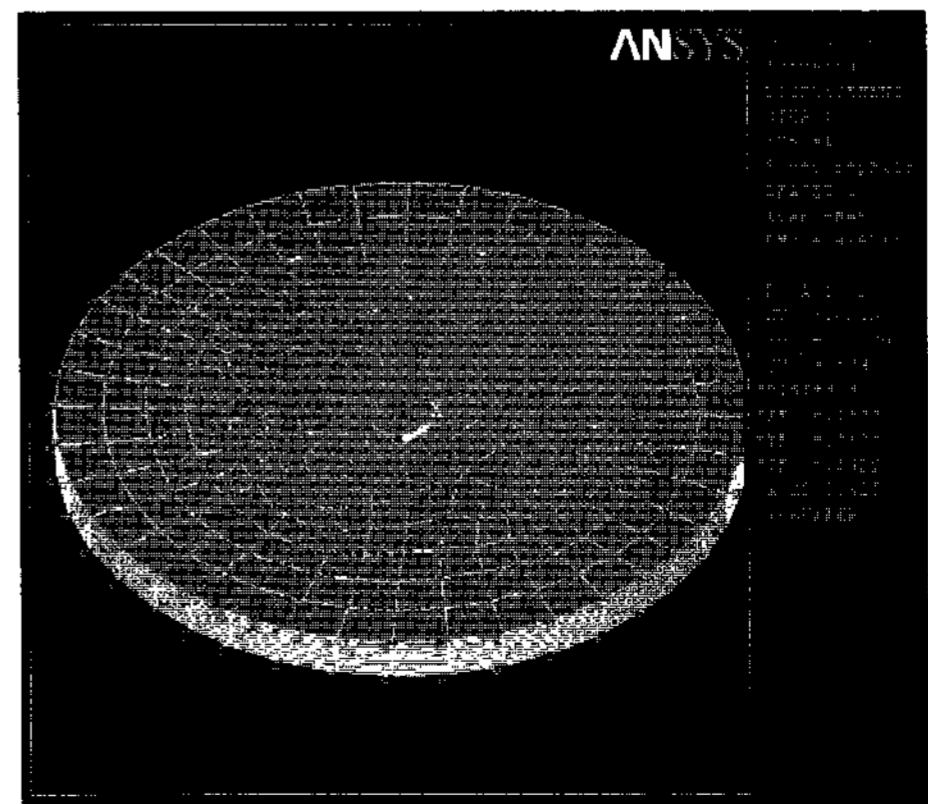


그림 3. 수정진동자의 유한요소해석 모델
Fig. 3. FEM modelling of the quartz crystal.

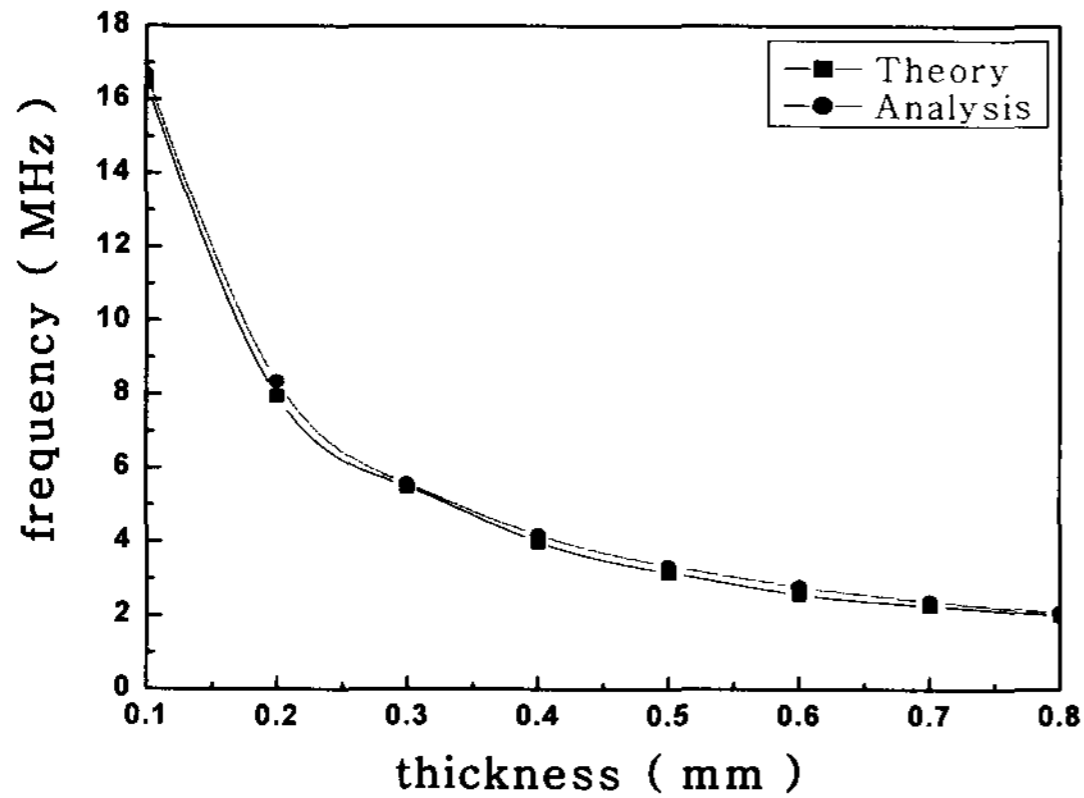


그림 4. 수정편의 두께변화에 따른 공진주파수
Fig. 4. The resonance frequency of the quartz crystal for the various thickness.

고, 두께를 0.1~0.8mm까지 변화시켜 공진주파수를 해석하였다. 수정편의 진동방정식인 식(1)의 두께 전단진동의 이론값과 유한요소 해석값은 비교적 잘 일치하였으며, 수정편의 두께가 커질수록 수정편의 공진주파수는 낮아지는 것을 확인하였다.

2. 전극박막 종류에 따른 수정편의 공진주파수

AT-cut으로 절단된 수정편 위에 각각 금, 은, 알루미늄을 전극박막으로 증착시켜 전극박막이 수정편의 공진주파수에 미치는 영향을 유한요소법으로 해석하였다. 그림 5, 그림 6 그리고 그림 7은 각각 수정진동자의 수정편에 금, 은, 알루미늄의 전극을 적층시킨 경우 나타나는 주공진주파수를 유한요소해석법으로 해석하고, 범용공학계산 프로그램인 MATLAB으로 해석한 이론값과 비교하였다. 해석결과 Au와 Ag를 전극박막으로 사용하였을 경우의 주공진주파수는 MATLAB을 이용하여 해석한 이론값 보다 작은 값이 나타났으며, Al을 전극박막으로 사용하였을 경우 Au와 Ag를 사용하였을 때 보다 공진주파수의 값은 이론값 보다 전체적으로 커지는 것을 확인하였다. 또한 Au, Ag, Al을 전극박막으로 사용하였을 때 두께 0.2mm이하에서는 3종류 모두 공진주파수가 높게 나타났다. 고주파 발진용 수정진동자의 설계시 두께 0.2mm 이하에서 수정발진자의 설계가 이루어져야 함을 확인하였다.

3. 유한요소법을 이용한 수정진동자의 진동모드 해석

그림 8은 수정편-전극박막으로 적층된 수정진동자의 주진동모드로서 주진동인 두께 전단진동에 의해 수정편

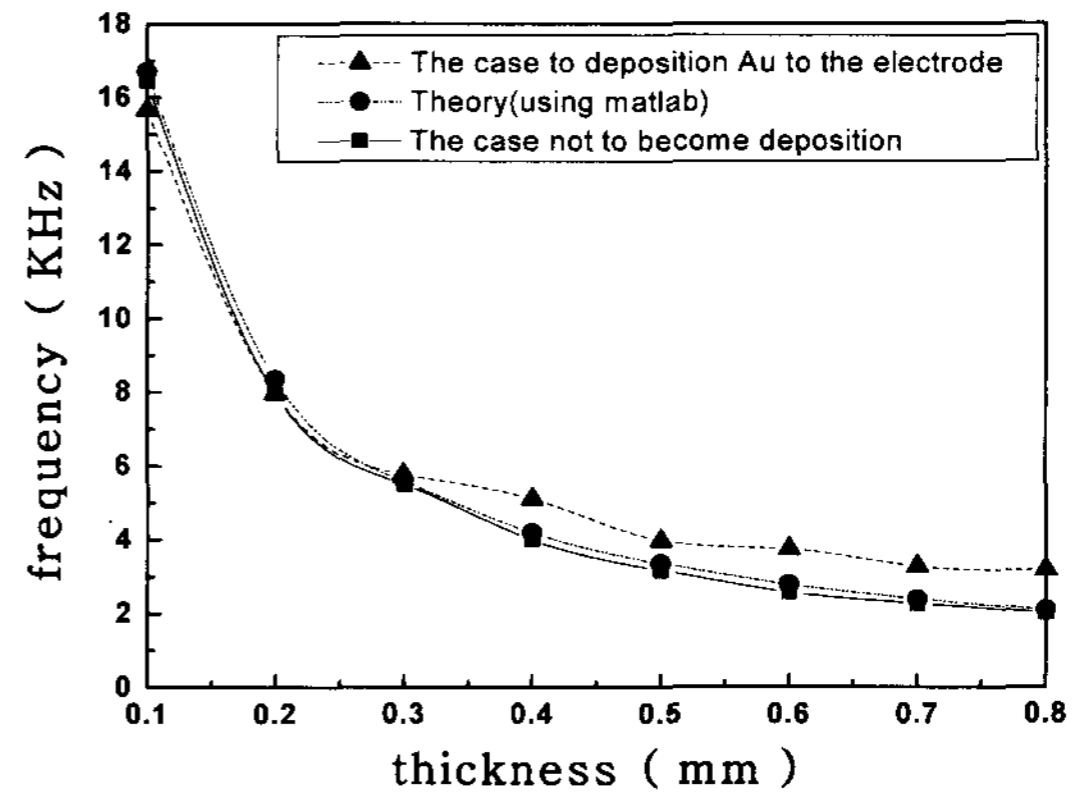


그림 5. 금 전극을 사용한 수정진동자의 두께변화에 따른 공진주파수

Fig. 5. The resonance frequency of the quartz crystal using Au electrode for the various thickness.

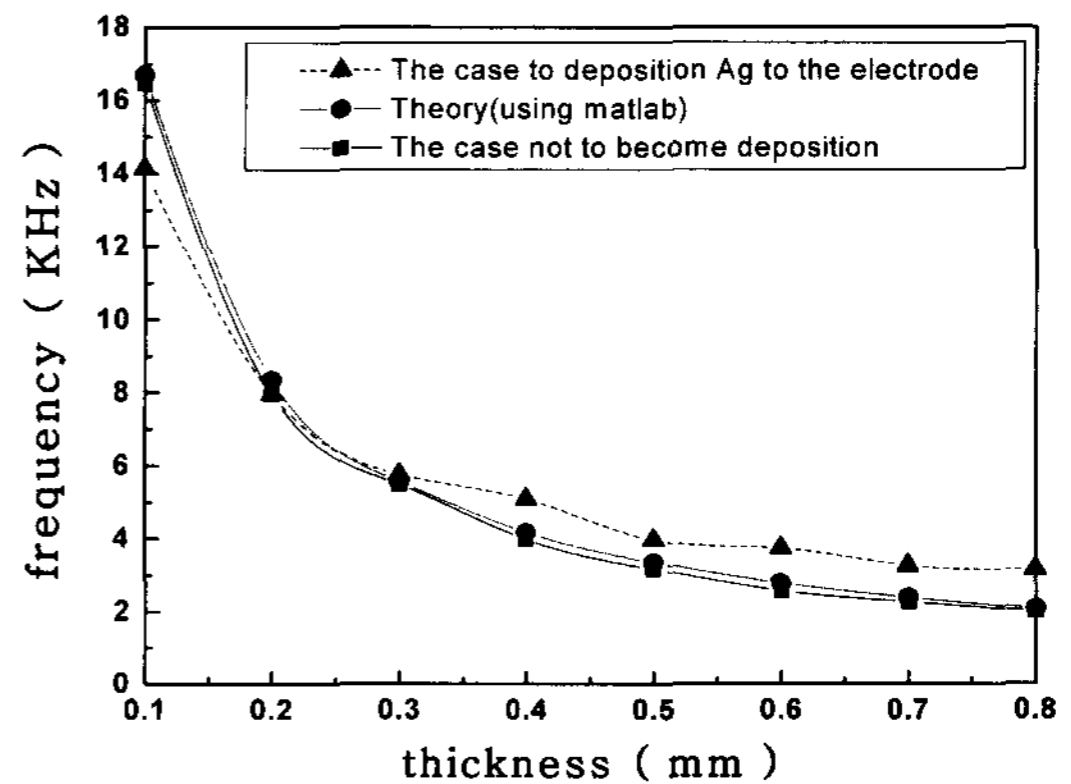


그림 6. 은 전극을 사용한 수정진동자의 두께변화에 따른 공진주파수

Fig. 6. The resonance frequency of the quartz crystal using Ag electrode for the various thickness.

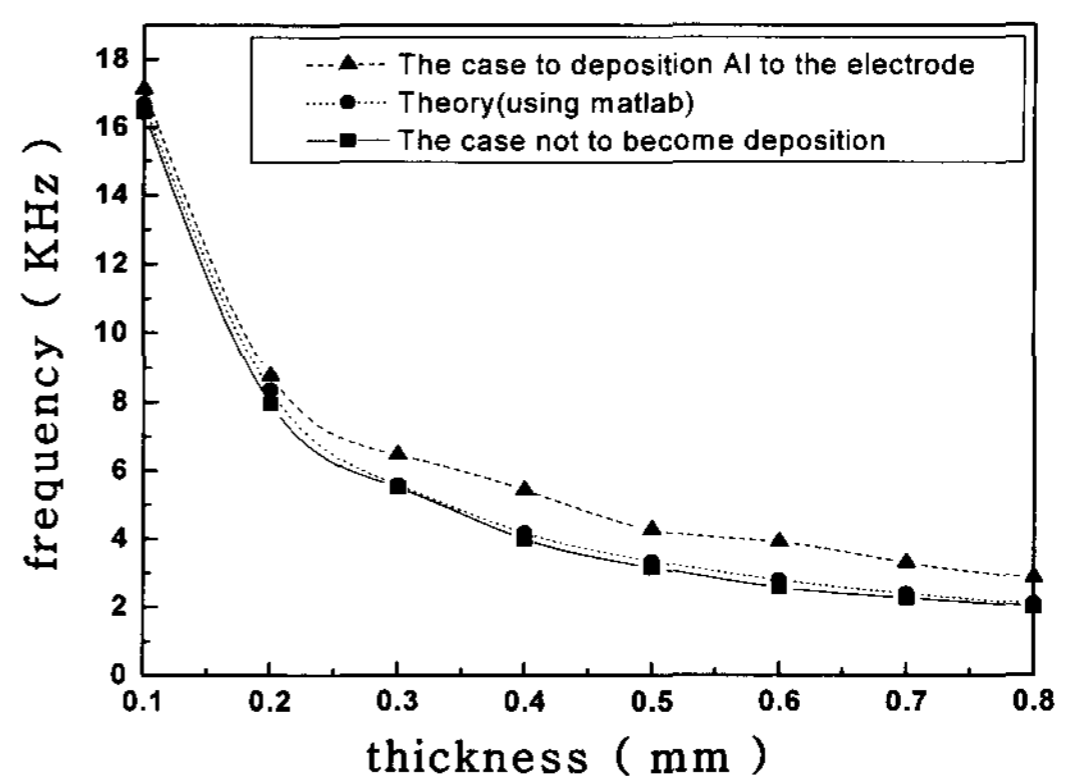


그림 7. 알루미늄 전극을 사용한 수정진동자의 두께변화에 따른 공진주파수.

Fig. 7. The resonance frequency of the quartz crystal using Al electrode for the various thickness.

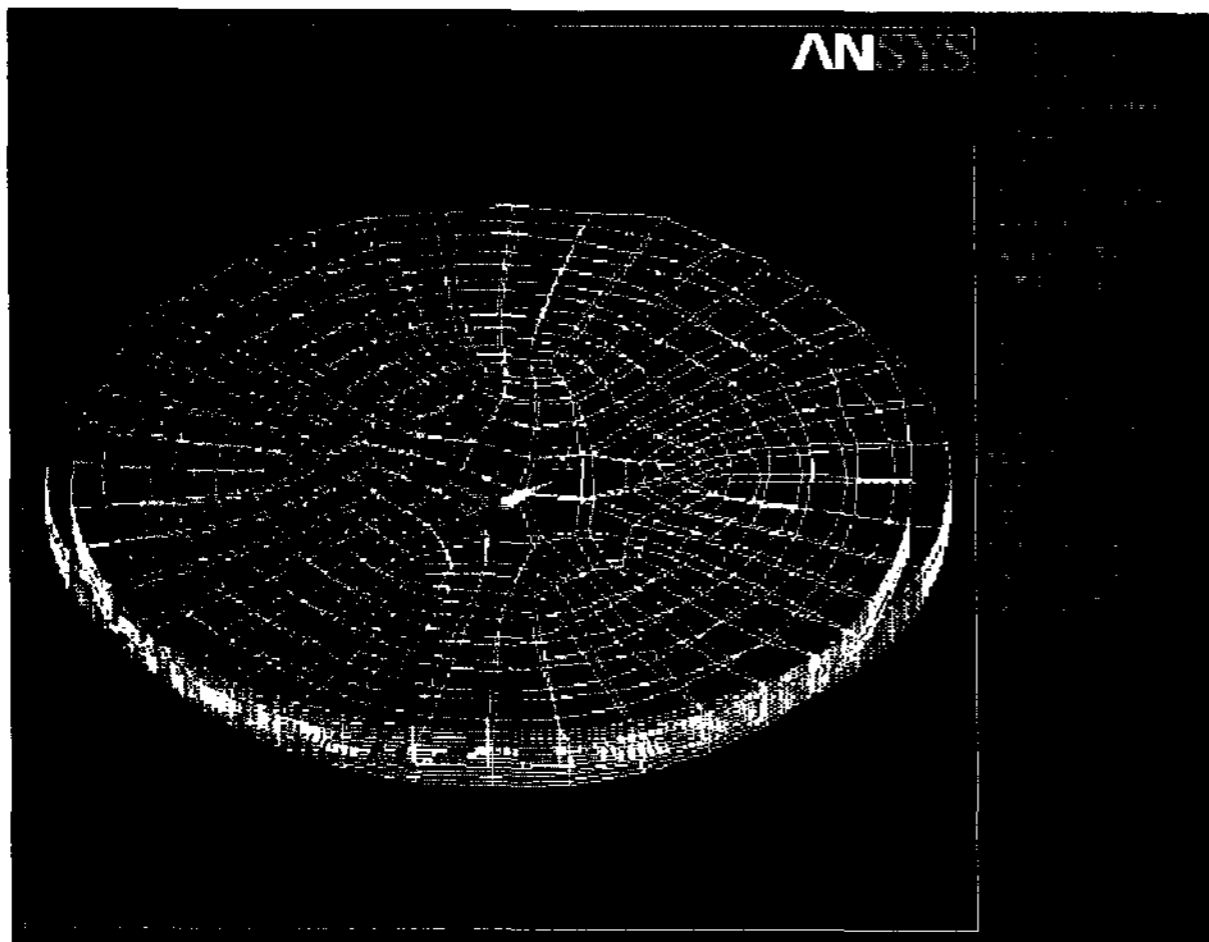


그림 8. 수정진동자의 주공진모드
Fig. 8. The first resonance mode for the quartz crystal.

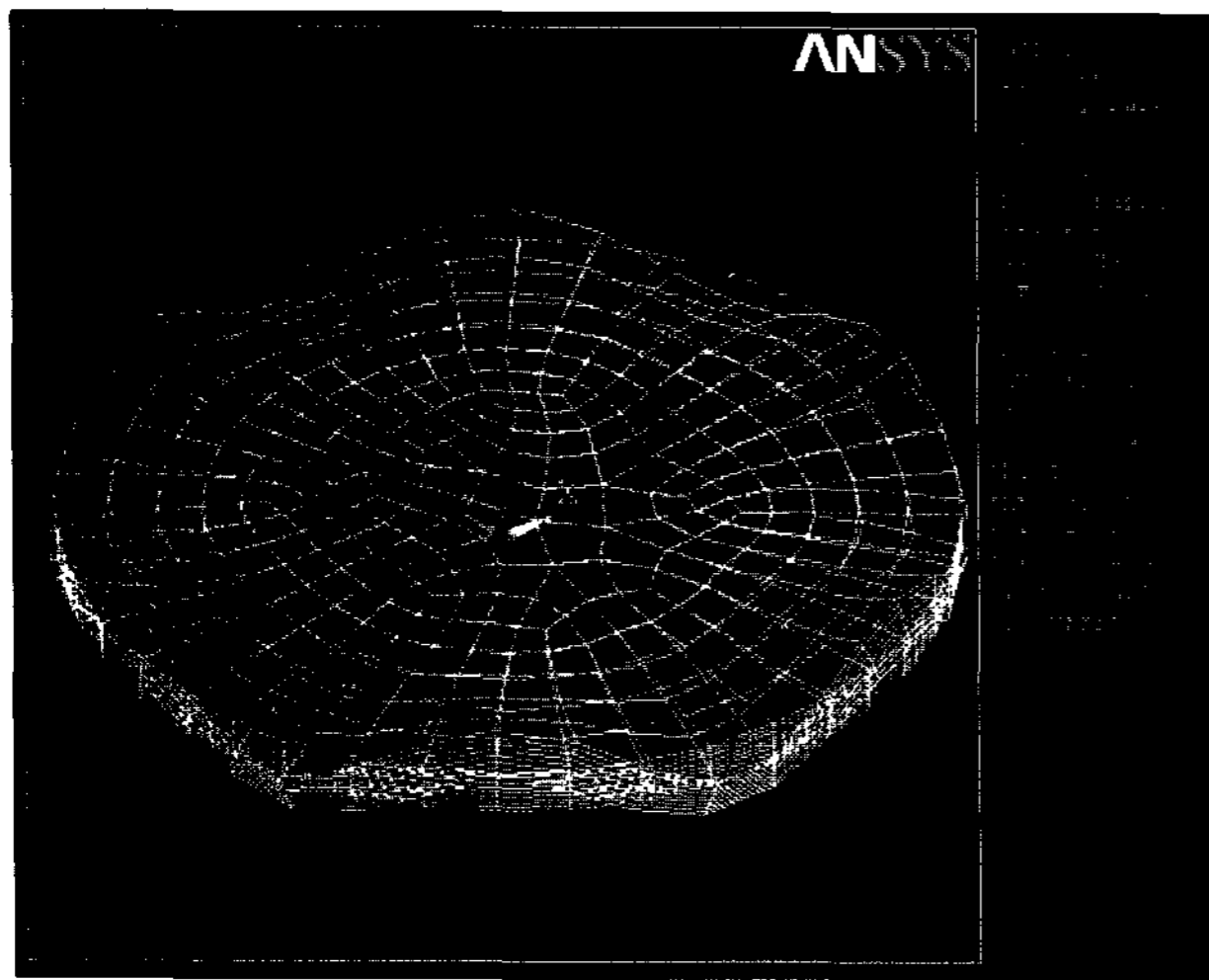


그림 9. 수정진동자의 반공진모드
Fig. 9. The radial anti-resonance mode for the quartz crystal.

의 두께방향인 Z'방향으로 진동하는 것을 가시적으로 확인할 수 있었다. 이때 수정진동자의 공진주파수는 8.102 MHz로 나타났으며, 공학계산 프로그램인 MATLAB으로 해석한 이론값과 비교적 일치하는 것을 확인하였다.

그림 9는 수정편-전극박막으로 적층된 수정진동자의 반공진모드를 유한요소해석법으로 해석한 결과이다. 반경방향의 공진모드인 XY' 굴곡 진동은 진동패턴이 수정진동자의 두께방향인 양의 Z'-방향과 음의 Z'-방향으로 나누어지는 것을 볼 수 있으며, 해석결과 주진동인 Z'방향의 두께 전단진동에는 크게 영향을 미치지 않는 것을 확인하였다.

IV. 결 론

본 연구에서는 유한요소프로그램인 ANSYS를 이용하여 수정진동자의 공진주파수와 주공진 모드 및 반공진 모드를 해석하였다. 또한 전극박막을 금, 은, 알루미늄으로 적층하였을 경우, 금속의 종류에 따른 공진주파수를 각각 구하였다.

수정편의 두께에 따른 주파수 특성을 조사한 결과 수정편의 두께가 0.2mm보다 작은 영역에서의 공진주파수는 8.102 MHz이상의 고주파를 얻을 수 있는 것을 확인하였다. 한편, 전극박막으로 사용한 금속의 종류에 따른 수정진동자의 공진주파수 변화를 조사한 결과, 금이나 은에 비해 알루미늄이 우수한 특성을 나타내었다. 또 수정진동자의 두께 전단진동에 의한 응력을 해석해 볼 때, 수정편의 둘레부분에 응력이 집중되며, 지지계 설계 시 이 결과를 우선적으로 고려해야 하겠다.

참 고 문 헌

- [1] 홍재일, 류주현, "유한요소해석법과 ANSYS 프로그램" 한국전기전자재료학회, Vol.11, No.11 pp.86-91, 1998.
- [2] Dr. R. Beckmann, "AT type crystal filter (0.7~60MHz)" Quartz Resonator Hand Book, union Thermoelctronic division Comptometer Corporation Niles, Illinois, 1960.
- [3] 이원고, "전자계산기를 이용한 중간대역 수정필터의 설계", 한국과학원, pp.4-5, 6-7, 1975.
- [4] 이대열, "수정여파기에 있어서의 기생신호 제거에 관한 연구", 한양대학교 산업대학원 석사학위 청구논문, 1981.
- [5] 이대훈, "측면자극 DC필드에서 수정진동자의 두께 모드에 관한 연구", 충주공업전문대학 논문집, 25, pp.477-486, 1991.
- [6] M. R. Draheim. "Finite Element Modeling and Experimental study of Ultrasonic Impedance Matching Layer for Medical Transducers", M.S. Thesis, Pennsylvanis State University, 1997.
- [7] (주)태성에스엔이, "제3판 유한요소해석 입문과 선형해석", 계림, p.3-7, 2000.
- [8] M. R. Deakin, D. A. Buttry. Anal. Chem. 1147A, pp.61, 1989.
- [9] 고영준, 남효덕, 장호경, "등가화 방법을 이용한 금속-압전 세라믹 적층평판의 진동해석", 한국전기전자재료학회 논문집, 13(1), pp.39-46, 1998.
- [10] G.. Barron., J.. Brauer,"Finite Element. Analysis, Marcel .Dekker Inc., 1993.

 저 자 소 개



박재성(정회원)
 1986년 영남대학교 전자공학과
 학사.
 1990년 영남대학교 전자공학과
 석사.
 2000년 영남대학교 전자공학과
 박사.

1990년~1993년 (주) 제일세라믹
 2002년~현재 영남이공대학 전자정보계열 조교수
 <주관심분야 : 반도체 설계, 센서 및 시스템>



고영준(정회원)
 1995년 영남대학교 물리학과
 학사.
 1997년 영남대학교 물리학과
 석사.
 2002년 영남대학교 센서및시스템
 공학과 박사.

2000년~2004년 무열산업(주)
 2004년~현재 성조파인세라믹스
 <주관심분야 : 음향, 센서 및 시스템, 반도체>