

유한 요소법(FEM)을 이용한 압전 박막 공진기(FBAR)의 공진 모드 해석

송영민*, °정재호*, 이용현*, 이정희*, 최현철*
경북대학교 전자, 전기 공학부

Finite Element Method Analysis of Film Bulk Acoustic Resonator

Young-Min Song*, Jae-Ho Jung°, Yong-Hyun Lee*, Jung-Hee Lee*, Hyun-Chul Choi*
Electronic Engineering, Kyung-Pook National Univ.

Abstracts

Film bulk acoustic resonator used in microwave region can be analyzed by one-dimension Mason's model and one-dimensional numerical method, but it had several constraints to analyze effects of area variation, electrode-area variation, electrode-shape variation and spurious characteristics. To overcome these constraints film bulk acoustic resonator must be analysed by three dimensional numerical method. So, in this paper three dimensional finite element method was used to analyze several modes of resonance and was compared with the one dimension Mason's model analysis and analytic solution.

I. 서론

현재 무선이동통신에 사용되고 있는 초고주파용 소자 중 그 수요와 필요성은 높으나 집적화가 어려워 소형화, 저가격화에의 문제점을 안고 있는 소자로 초고주파용 공진기를 들 수 있다. 초고주파 대역에서 사용되는 공진기로는 유전체 공진기와 금속 공동 공진기를 들 수 있으며 이들은 삽입 손실이 작고 주파수특성이나 온도 안정성은 우수하나 물리적인 크기가 크고 반도체 기판 위에 실장 할 수 없기 때문에 소형, 경량화와 집적회로화에는 근본적인 문제점을 가지고 있다. 그러나 압전 박막 공진기는 유전체 공진기나 LC 공진기에 비해 초소형 구현이 가능하고 실리콘, GaAs 기판 상에 구현이 가능하며, 표면탄성과 공진기에 비해 적은 삽입 손실을 가지는 장점을 가지고 있다^[1].

압전체 공진기는 두께진동모드, 면적진동모드, 비틀림 진동 모드 등 여러 가지 진동모드가 있으나 압전 박막 공진기는 이중 두께 진동 모드를 이용하는

것으로 두께가 수 μm 이내로 얇은 압전 물질 윗 면과 아래 면에 전극을 부착한 평판형 구조로 이루어져 있다. 두께 진동 모드를 이용한 압전 박막 공진기에서 공진 주파수와 주파수에 따른 임피던스 특성은 박막으로 사용된 압전 재료와 공진기의 물리적인 크기에 의해 결정된다^[2]. 압전 물질로는 주로 AlN이나 ZnO가 있으나 ZnO는 AlN에 비해 성장 조건이 적은 이고 큰 전기기계 결합 계수를 가지고 있기 때문에 대역폭이 좁은 응용에 주로 사용된다^[3].

지금까지 압전 박막 공진기의 해석은 주로 일차원 Mason 모델을 이용하여 수행되어져 왔다. 일차원 Mason 모델을 이용한 해석은 두께에 따른 공진 주파수 추출이나 고조파 특성 해석은 가능하지만 압전체 면적의 영향이나 전극의 면적, 그리고 전극의 형태에 따른 특성 해석이 불가능하고 대역내의 불요파 특성 해석이 불가능하기 때문에 본 논문에서는 삼차원 유한 요소법을 이용하여 공진 주파수를 추출하였으며 각 모드 해석뿐만 아니라, 단면적 크기에 따른 입력 임피던스 특성 변화에 대한 해석을 수행하였다.

II. 본론

1. 해석 구조

대표적인 압전 박막 공진기는 멤브레인(Membrane) 형태^[4]와 Air gap 형태, 그리고 브래그 반사기(Brag reflector)^[5] 형태가 있다. 멤브레인(Membrane) 형태는 멤브레인(Membrane)을 실리콘 p+층을 이온 성장법으로 실리콘 위에 증착하거나 SiO₂를 실리콘 위에 증착하고 실리콘 기판 반대 면을 이방성 에칭(Isotropic Etching)함으로써 에칭정지가 일어나도록 하여 에칭 공동(Cavity)를 형성하는 방법으로 공정의 번거로움과 개별 소자로의 절단 시 소자 자체의 약점으로 많은 불량률 일으키는 문제점을 가지고 있다. 그리고 Air gap 형태의 공진기는 마이크로머시닝(Micro-machining) 기법을 이용하여 실리콘 기판 표면에 희생층(Sacrificial)을 형성해 Air gap을 만듦으로써 소자 제조 공정을 단순화시켜 종래의 멤브레인(Membrane) 형성을 위한 반대면 에칭에서의 긴 공정 시간을 단축시킬 수 있는 장점을 가지고 있다. 또 브래그 반사기(Brag reflector) 형태의 공진기는 실리콘 기판 위에 탄성 임피던스가 큰 물질을 격층으로 증착하여 브래그(Brag) 반사를 유발하여 탄성과 에너지가 전극 층 사이에 모이도록 하여 공진이 발생토록 하는 방법을 이용하는 것으로 제조시간이 절약되고 외부 충격에 강한 소자를 구현할 수 있는 장점을 가지고 있다. 본 논문에서는 Air gap 형태의 공진기를 단순한 구조로 모델링한 다음 해석을 수행하였다. 그림 1에 모델링한 형태와, 표 1에 해석에 사용된 기준 물질 및 구조를 나타내고 있다.

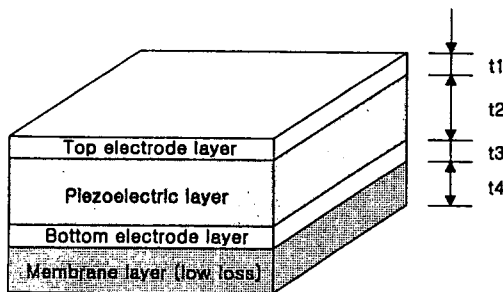


그림 1. 압전 박막 공진기의 모델

표 1. 해석 모델의 기준 구조

	물질	두께 [m]
상부전극	Al	1.0E-7
압전체	ZnO	1.0E-6
하부전극	Au,	1.0E-7
Substrate	SiO2	2.5E-7

2. 압전 방정식의 유한요소 정식화

해석 영역에 적용되는 지배 방정식은 기계적 운동을 표현하는 변수인 응력(T), 변위(u), 그리고 변위의 공간 변화율인 변형(S)이 전기적 장을 표현하는 전속 밀도(D)와 전장의 세기(E)에 주어진 계수로서 상호 결합된 형태로 표현될 수 있다. 일반적으로 주어진 변수들은 제한된 범위 내에서 서로 선형 관계를 유지하는데 이러한 선형 압전 이론에 의해 식 (1), 식 (2)와 같은 한 쌍의 압전 방정식을 유도할 수 있다^[6].

$$T = -[e]E + [c^E]S \quad (1)$$

$$D = [\epsilon^S]E + [e]S \quad (2)$$

여기서 [e]는 전기계와 기계계의 결합 상수로 텐서(Tensor)량으로 표현되며 3×6행렬이고, [c^E]는 전장이 일정한 공간에서의 탄성 상수를 나타내는 텐서(Tensor)량으로 6×6행렬이며, [ε^S]는 변형이 일정한 공간에서의 유전율을 나타내는 텐서(Tensor)량으로 3×3행렬로 주어진다.

압전 막막 공진기의 공진 모드를 해석하기 위해 손실이 없고 선형인 압전 매질을 가정하여 유한 요소법을 적용하였다. 일반적인 유한 요소법을 압전매질에 적용하기 위한 지배방정식은 다음 식과 같은 행렬 형태로 나타낼 수 있다.

$$[B_u][c^E][B_u]^T \{u\} + [B_u][e][B_\phi]^T \phi + \rho \omega^2 \{u\} = 0 \quad (3)$$

$$[B_\phi][e]^T [B_u]^T \{u\} - [B_\phi][\epsilon^S][B_\phi]^T \phi = 0 \quad (4)$$

여기서 ρ는 물질의 밀도를 나타내는 상수이고, [B_u], [B_φ]는 공간 기울기(Gradient)의 행렬 표현식이며, 위 첨자 T는 각 행렬의 전치행렬(Transpose Matrix)을 나타낸다.

위의 지배 방정식을 하나의 요소에 대한 적분 형태의 유한 요소법으로 나타내면 다음과 같이 표현된다.

$$\begin{aligned} & \int \int \int_V^{(e)} [B_{N_e}^{(e)}]^T [c^E] [B_{N_e}^{(e)}] [u^{(e)}] dv \\ & + \int \int \int_V^{(e)} [B_{N_e}^{(e)}]^T [e]^T [B_{N_e}^{(e)}] [\phi^{(e)}] dv \\ & - \rho \omega^2 \int \int \int_V^{(e)} [N_v^{(e)}]^T [N_v^{(e)}] [u^{(e)}] dv \\ & = \int \int_S^{(e)} [N_u] [T] \cdot d\vec{s} \end{aligned} \quad (5)$$

$$\begin{aligned} & \int \int \int_V^{(e)} [B_{N_e}^{(e)}]^T [e] [B_{N_e}^{(e)}] [u^{(e)}] dv \\ & - \int \int \int_V^{(e)} [B_{N_e}^{(e)}]^T [e^S]^T [B_{N_e}^{(e)}] [\phi^{(e)}] dv \\ & = \int \int_S^{(e)} [N_\phi] [D] \cdot d\vec{s} \end{aligned} \quad (6)$$

위 식을 행렬 형태로 다시 쓰면

$$\begin{bmatrix} [K_{uu}^{(e)}] - \omega^2 [M_{uu}^{(e)}] & [K_{u\phi}^{(e)}] \\ [K_{u\phi}^{(e)}]^T & [K_{\phi\phi}^{(e)}] \end{bmatrix} \begin{bmatrix} [u^{(e)}] \\ [\phi^{(e)}] \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} [F^{(e)}] \\ [Q^{(e)}] \end{bmatrix} \quad (7)$$

와 같이 표현될 수 있는데, 여기서 $[K_{uu}]$ 는 일반 탄성체의 탄성 상수를 나타내는 행렬, $[K_{u\phi}]$ 는 압전체의 탄성 상수를 나타내는 행렬, $[K_{\phi\phi}]$ 는 유전율을 나타내는 행렬, $[M_{uu}]$ 는 각 물질의 질량을 나타내는 행렬이고, $[F^{(e)}]$ 는 압전체에 가해지는 외부 힘의 합이고 $[Q^{(e)}]$ 는 압전체 표면 전하를 나타낸다. 또한 $[u^{(e)}]$ 와 $[\phi^{(e)}]$ 은 각각 변위와 전위 벡터를 나타낸다.

3차원 구조를 해석하기 위해 전체 해석 영역을 사면체 요소로 분할한 다음 사면체 요소에 대해 식 (7)에 경계조건을 적용한다. 기계적 경계조건은 변위가 상수로서 주어지거나 응력이 상수로 주어진다.

$$u = \bar{u}, \text{ essential B.C.}$$

$$T_{\text{outward}} = \bar{t}, \text{ natural B.C.}$$

그러므로 본 논문에서는 경계가 고정되어 있지 않고 자유운동을 할 수 있기 때문에 $T=0$ 인 경계 조건을 사용하였다. 그리고 전기적 경계 조건은 전위가 상수로 주어지거나 전극 면에서의 전하가 상수로 주어진다.

$$\phi = \bar{\phi} \text{ essential B.C.}$$

$$D_{\text{outward}} = \bar{\sigma}, \text{ natural B.C.}$$

전하는 압전체 경계에서의 값을 알 수 없기 때문에 전위를 상수로 주는 경계조건을 사용하였다. 주어진 경계조건을 적용하여 고유치(Eigenvalue)와 고유벡터(Eigenvector)를 구함으로써 공진 및 반공진 주파수와 각 모드에 대한 정상 상태 응답을 얻을 수 있다.

3. 시뮬레이션 결과

그림 2에는 전극의 두께 효과가 없는, 압전체 하나의 층으로 이루어진 공진기의 일차원 Analytic 해석 결과와 Mason 모델을 이용한 해석 결과, 그리고 삼차원 유한 요소법을 이용한 해석 결과를 나타내었다. 압전 공진기는 직렬공진 형태의 공진과 병렬공진 형태의 반공진이 동시에 나타나게 되는데 그림에서 보는 바와 같이 모든 해석 방법에서 정확히 일치하는 것으로 나타났다. 특히 일차원 해석에서는 볼 수 없었던 두께 공진 모드 외의 다른 공진 모드가 삼차원 유한 요소법 해석에서 나타났다.

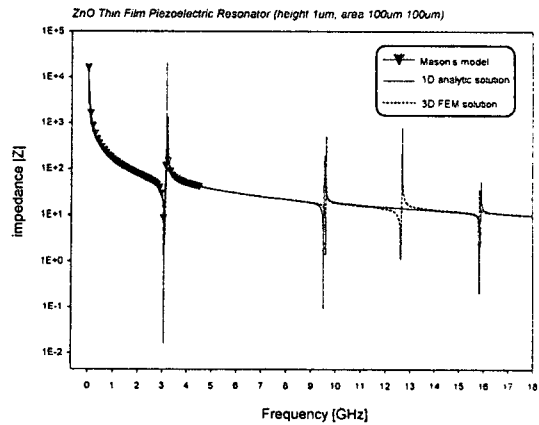


그림 2. 해석방법에 따른 임피던스 비교

그림 3은 단면적을 $20 \times 20 \mu\text{m}$ 로 줄여서 삼차원 유한 요소법을 이용하여 각 모드에 대한 해석을 수행한 결과를 도시한 것이다. 단면적을 줄임으로써 전체적인 임피던스의 크기가 증가했으며, $100 \times 100 \mu\text{m}$ 일 때는 나타나지 않았던 면적 공진 모드와 여러 가지 공진 모드가 혼합되어 나타나는 불요파 공진 모드들이 나타났다.

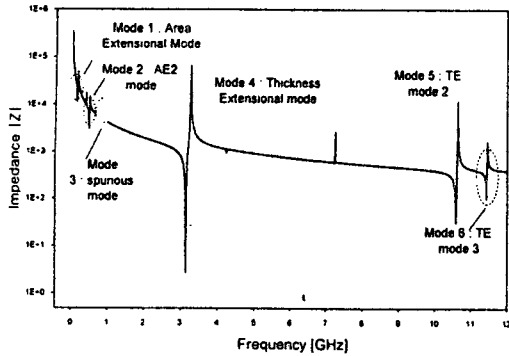


그림 3. 압전 박막 공진기의 공진 모드

그림 4는 공진기 단면적을 변화 시키면서 삼차원 유한 요소법을 이용하여 해석한 결과를 도시한 것이다. 단면적이 작아 질수록, 기본 공진 주파수의 변화는 크지 않으나 두께 공진 모드에 대한 공진 보다 면적 공진 모드나 비틀림 공진 모드, 그리고 불요파의 영향이 더 커지는 결과를 나타내었다.

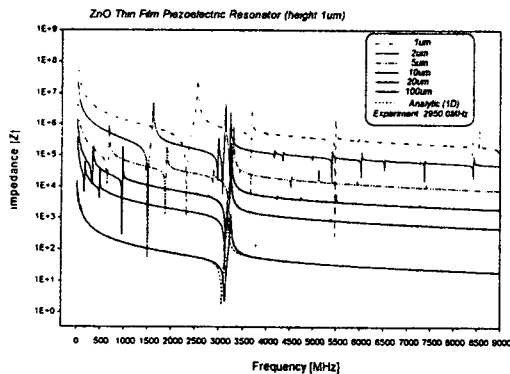


그림 4. 공진기 면적에 따른 임피던스

III. 결론

본 논문에서는 삼차원 유한 요소법을 이용하여 압전 박막 공진기의 공진 주파수를 추출하여 일차원 Mason 모델을 이용한 해석 결과, Analytic 해석 결과와 비교하여 삼차원 유한 요소법의 해석이 타당함을 보였으며 공진기의 면적이 작아 질수록 두께 진동 모드보다 면적 진동 모드, 비틀림 진동 모드에 의한 공진의 영향이 커지는 결과를 나타내었다. 그러므로 안정된 공진기로 동작시키려 할 경우 면적과 두께의 비가 최소 20:1 이상이 되어야 하며 면적 공진 모드나 비틀림 공진 모드를 이용한 공진기의 설계나

제작도 가능하다. 탄성파의 손실을 고려한 해석을 통해 공진기의 양호도 추출과 온도 변화에 따른 공진 특성 해석이 수행되면 해석 결과와 제작 결과를 보다 근접시킬 수 있다.

압전 박막 공진기는 고주파 대역에서의 필터로 합성하거나 듀플렉스(Duplexer)로 응용 가능하며 전체적인 크기가 매우 작고 기판 위에 장착이 가능하기 때문에 단결정 초고주파 집적회로 (MMIC : Monolithic Microwave Integrated Circuit)에 응용이 가능할 것이다.

참고 문헌

1. B. L. Smith and M. H. Carpentier, "The Microwave Engineering Handbook" Vol.1, Chapman & Hall, 1993
2. K. M Lakin, G. R. Kline and K. T. McCron, "High-Q Microwave Acoustic Resonators and Filters", IEEE Trans. MTT, Vol. 41, No. 12, December 1993
3. 한국과학재단, 압전체 박막을 이용한 마이크로파 공진소자 연구, 1996.
4. T. W. Grudkowski, J. F. Black, T. M. Reeder, D. E. Cullen and R. A. Wagner, "Fundamental Mode VHF/UHF Miniature Acoustic Resonators and Filter on Silicon. Appl. Phys. Lett. 37(11), 1 December 1980
- 5 C. W. Seabury, P. H. Kobrin and R. Addison "Thin Film ZnO Based Acoustic Mode Filters" IEEE MTT-S Digest, 1997
- 6 J. F. Rosenbaum, Bulk Acoustic Wave Theory and Devices, Artech House. 1988