

시간 영역 유한 차분법(FDTD)을 이용한 마이크로파 대역의 압전 박막 공진기 해석

송영민*, 정재호**, 이용현*, 이정희*, 최현철*

* : 경북대학교, ** : 한국전자 통신연구원

Tel : 053)940-8652 PCS : 0178-538-2522

Finite Difference Time Domain Analysis for Film Bulk Acoustic Wave Resonator used in Microwave Region

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

Abstract

Film Bulk Acoustic Wave Resonator(FBAR) used in microwave region was analyzed with Finite Difference Time-Domain Methods(FDTD) in this paper. FBAR have been analyzed with one dimensional Mason model analysis or Finite Element methods(FEM), but the first couldn't analyze effect of area variation and spurious characteristics, the second had difficulty in element separation because of thin electrode. So in this paper FBAR was analyzed by Finite Difference Time-Domain Methods and it's results were transformed to frequency domain using Discrete Fourier Transform.

서론

압전 박막 공진기의 해석은 주로 일차원 Mason 모델을 이용하여 수행되어져 왔으나, 일차원 Mason 모델을 이용한 해석은 두께에 따른 공진 주파수 추출이

나 고주파 특성 해석은 가능하지만 압전체 면적의 영향이나 전극의 면적, 그리고 전극의 형태에 따른 특성 해석이 불가능하고 대역내의 불요파 특성 해석이 불가능하기 때문에 완전한 해석을 위해서는 삼차원 수치해석 기법을 이용해야만 한다. 지금까지의 수치 해석은 주로 주파수 영역에서의 해석기법인 유한 요소법이 사용되어 왔다^[1]. 유한 요소법은 복잡한 구조에 대한 적용과 경계조건의 적용이 용이한 장점을 가지고 있다. 그러나 압전 박막 공진기의 해석에 있어 유한 요소법을 사용한 해석은 전극의 두께가 압전체의 두께에 비해 매우 얇기 때문에 사면체 요소로의 분할이 어렵고 사면체 요소의 크기를 줄일 경우 컴퓨터 메모리의 한계 때문에 주어진 구조의 완전한 해석이 불가능하였다. 따라서 본 논문에서는 삼차원 시간영역 유한 차분법^[2]을 이용하여 압전체 하나의 층으로 이루어진 구조와 압전체 양면에 전극이 있는 세 개의 층으로 이루어진 형태, 그리고 하부 전극 아래에 Substrate가 있는 구조에서의 공진 주파수와 반공진 주파수를 추출하였고 하부 전극에 사용되는 금속의 종류에 따른 공진 주파수 변화에 대한 해석을 수행하여 일차원 Mason 모델을 통한 해석 결과와 삼차원 유한 요소법을 이용한 해석 결과와 비교하였다.

본문

1. 해석 구조

대표적인 압전 박막 공진기는 멤브레인(Membrane) 형태^[3]와 Air gap 형태, 그리고 브레그 반사기(Brag reflector)^[4] 형태가 있으나 본 논문에서는 멤브레인 형태의 공진기와 Air-gap 형태의 공진기를 단순 구조로 모델링한 다음 해석을 수행하였다. 그림 1과 표 1에 모델링한 형태와 기준 해석 구조에 대하여 나타내었다.

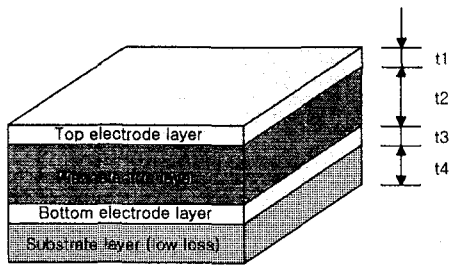


그림 1. 압전 박막 공진기 해석 모델

표 1. 해석 기준 구조

	물질	두께 [m]
상부전극	Al	0.1E-6
압전체	ZnO	1.0E-6
하부전극	Au,Al	0.1E-6
Substrate	SiO2	0.25E-6

압전 박막 공진기의 압전체로 사용되는 압전 물질로는 주로 AlN이나 ZnO가 있으나 ZnO는 AlN에 비해 성장 조건이 저온이고 큰 전기기계 결합 계수를 가지고 있기 때문에 대역폭이 좁은 응용에 주로 사용된다.

기본적인 공진기의 동작은 압전체와 양면의 전극으로 가능하지만 공진기의 물리적인 지지와 양호도(Quality Factor)의 조절을 위해 하부층(Substrate)이 필요하다. 예를 들면 양호도가 낮은 광대역 적용을 위해서는 탄성손실(Acoustic loss)이 매우 큰 물질로서

하부층(Substrate)을 구성함으로써 광대역에서 동작 가능하게 한다^[5].

2. 압전 방정식의 유한 차분법 정식화

해석 영역에 적용되는 지배 방정식은 기계적 운동을 표현하는 변위인 응력(T), 변위(u), 그리고 변위의 공간 변화율인 변형(S)이 전기적 장을 표현하는 전속밀도(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^[5].

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

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

여기서 [e]는 전기기계와 기계계의 결합 상수로 텐서(Tensor)량으로 표현되는 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 박막 공진기를 유한 차분법 해석에 적용하기 위해서 주어진 압전 방정식을 이용하여 시간 미분과 공간 미분이 동시에 존재하는 미분 방정식 형태로 바꾸어 표현하여야 한다. 주어진 압전 박막 공진기의 구조와 같이 얇은 판 형태의 압전체에 얇은 전극이 있고 전원을 두께 진동 모드로 여기하면 압전체 내에서의 전속밀도(D)가 영이 된다^[5]. 그러므로 식 (1)과 식(2)를 이용하여 식 (3) 같은 관계식을 얻을 수 있다.

$$T = \{[e]'[\epsilon^S]^{-1}[e] + [c^E]\}S \quad (3)$$

식 (3)의 양변에 시간 미분을 하면 식 (4)와 같은 응력과 입자속도에 대한 미분 방정식을 얻을 수 있다.

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \{[e]'[\epsilon^S]^{-1}[e] + [c^E]\}\nabla_s v \quad (4)$$

여기서 ∇_s 는 공간 기울기로서

$$\nabla_s = \begin{bmatrix} \frac{\partial}{\partial x} & 0 & 0 & 0 & \frac{\partial}{\partial z} & \frac{\partial}{\partial y} \\ 0 & \frac{\partial}{\partial y} & 0 & \frac{\partial}{\partial z} & 0 & \frac{\partial}{\partial x} \\ 0 & 0 & \frac{\partial}{\partial z} & \frac{\partial}{\partial y} & \frac{\partial}{\partial x} & 0 \end{bmatrix}$$

또 뉴턴의 제 2법칙에 의한 응력과 입자의 속도에 대한 방정식을 표현하면 식(5)와 같은 미분 방정식으로 표현 할 수 있다.

$$\nabla \cdot T = \rho \frac{\partial v}{\partial t} \quad (5)$$

주어진 식(4)와 식(5)를 시간과 공간에 대하여 유한 차분법으로 표현하여 공진기의 해석에 적용하게 된다.

3. Source 여기 및 경계 조건

공진기 해석에 사용된 전원은 시간에 대한 가우시안(Gaussian) 펄스를 이용하였다^[6]. 공진기의 양쪽 면이 금속 전극이므로 전극과 압전체의 경계면에 주어진 전위에 대응되는 응력을 계산하여 응력을 가우시안 펄스 형태로 여기 하였다.

압전체의 해석에 사용되는 경계 조건은 기계적 경계 조건과 전기적 경계 조건이 있다. 기계적 경계 조건은 변위가 상수로서 주어지거나 응력이 상수로 주어진다.

$$u = \bar{u} \quad \& \quad T_{outward} = \bar{t}$$

본 논문에서는 경계가 고정되어 있지 않고 자유운동을 할 수 있기 때문에 공진기와 공기의 경계에 응력이 영($T=0$)인 경계 조건을 사용하였고, 전기적 경계 조건은 전위가 상수로 주어지거나, 전극 면에서의 전하량이 상수로 주어지게 된다.

$$\phi = \bar{\phi} \quad \& \quad D = \bar{\sigma}$$

전하량은 경계에서의 정확한 값을 알 수 없기 때문에 상부 전극에는 전원 전위를 인가하고 하부 전극에는

전위가 영($\phi=0$)인 경계조건을 사용하였다.

4. 공진 주파수 추출 및 고찰

압전 박막 공진기의 공진은 임피던스가 최소인 공진(Resonance)과 최소인 반공진(Anti-resonant)이 있다. 공진 주파수의 추출은 시간 영역에서 해석 결과인 응력(T)과 입자속도(v)에서 각각 전압과 전류를 계산하여 주파수 영역으로 이산 푸리에 변환(Discrete Fourier Transform)하여 입력 임피던스를 계산함으로써 추출할 수 있다. 그러나 이산 푸리에 변환이 분해능(Resolution)이 다소 떨어지는 결점을 가지고 있기 때문에 Pade 근사를 이용하여 더욱 정확한 주파수를 추출하였다^[7]. 그림 2에 시간 영역 유한 차분법을 이용한 입력 임피던스와 Mason 모델을 이용한 입력 임피던스를 비교하여 나타내었으며 그림 3에 공진 주파수 근처에서의 Pade 근사를 이용한 결과를 나타내었다. 그리고 표 2에 공진기의 구조와 전극의 물질을 변화 시 공진 주파수의 변화를 나타내었다.

압전체 두께가 고정되어 있음에도 공진기의 층수가 증가할수록 전체 공진기의 두께가 증가함으로써 탄성파의 왕복 시간이 길어져 공진 주파수와 반공진 주파수가 낮아짐을 알 수 있다. 주파수 편차는 수 %이내로서 본 해석의 적용이 타당함을 알 수 있다.

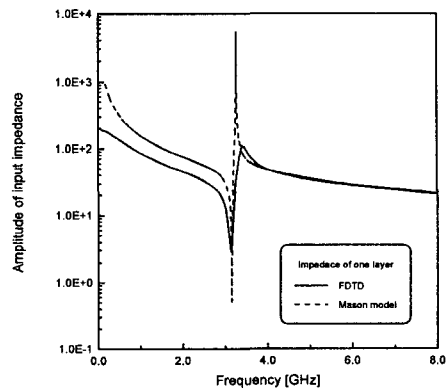


그림 2. 박막 압전 공진기의 입력 임피던스

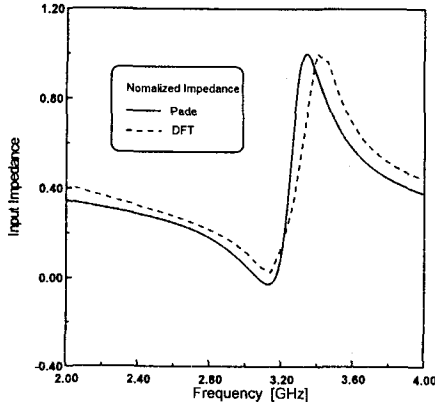


그림 3. Pade 근사와 DFT의 비교

표 2. 공진 주파수 비교

구조	층수	1		3		4	
	물질	ZnO	Al-ZnO	Al-ZnO-	Al-ZnO-	Al-ZnO-	Al-ZnO-
공진 [GHz]	FDTD	3.128	2.805	2.384	2.115		
	FEM	3.135	-	-	-		
	Mason 모델	3.150	2.779	2.348	2.121		
반 공진 [GHz]	FDTD	3.266	2.865	2.479	2.240		
	FEM	3.288	-	-	-		
	Mason 모델	3.335	2.888	2.423	2.193		

결론

본 논문에서는 삼차원 시간 영역 유한 차분법을 이용하여 압전 박막 공진기의 공진 주파수를 추출하여 일차원 Mason 모델을 이용한 해석, 삼차원 유한 요소법을 이용한 해석 결과와 비교하여 압전 박막 공진기의 해석에 삼차원 시간 영역 유한 차분법의 적용이 타당함을 보였으며 삼차원 유한 요소법으로 해석이 불가능했던 다층(Multi-layer)구조의 공진기 해석이 가능함을 보였다. 압전 박막 공진기의 주요 진동 모드는 두께 진동 모드로 동작하기 때문에 전체 공진기의 두께

가 증가할수록 공진 주파수와 반공진 주파수가 낮아짐을 알 수 있으며 하부 전극 Al을 탄성파의 위상 속도가 느린 Au로 대체함으로써 공진 주파수가 낮아짐을 알 수 있다. 향후 각 층에 사용된 물질들의 필름 형태에서의 물질 상수 값이 정확히 측정되어 해석에 적용되고, 탄성파의 손실을 고려한 해석과 온도 변화에 따른 공진 특성 해석이 수행되면 해석 결과와 제작 중인 소자의 특성을 보다 근접시킬 수 있다.

참고 문헌

1. H. Allik and Hughes, "Finite element method for Piezoelectric", *Int. J. Numerical methods in Eng.*, vol. 2, pp.151-157, Dec. 1970
2. K. S. Yee, " Numerical solution of initial boundary value problems involving Maxwell's equations in isotropic media", *IEEE Trans. Antennas Propag.*, vol. 14, pp. 302-307, May 1966
3. 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.
4. C. W. Seabury, P. H. Kobrin and R. Addison "Thin Film ZnO Based Acoustic Mode Filters" *IEEE MTT-S Digest*, 1997.
5. J. F. Rosenbaum, Bulk Acoustic Wave Theory and Devices, *Artech House*. 1988.
6. R. J. Luebbers, K. S. Kunz, and K. A. Chamberlin, "An Interactive Demonstration of Electromagnetic Wave Propagation Using Time-Domain Finite Differences." *IEEE Trans. on Education*. vol. 33. No. 1, Feb. 1990.
7. S. Dey, and R. Mittra, "Efficient Computation of Resonant Frequencies and Quality Factors of Cavities via a Combination of the Finite-Difference Time-Domain Technique and the Pade Approximation." *IEEE Microwave and Guided Wave Letters*, vol. 8, No. 12, Dec. 1998.