

박막공진기에 대한 새로운 모델링 기법

°김 종 수, 구 명 권*, 육 종 관
연세대학교, (주)엠에스 솔루션*
E-mail : jongsookim@yonsei.ac.kr

A New Modeling Methodology of TFBAR

°Jong-Soo Kim, Myeong-Gweon Gu*, Jong-Gwan Yook
Yonsei University, MEMS Solutions Inc*.

Abstract

In this paper, a new modeling methodology of thin film bulk acoustic resonator (TFBAR) is presented. The new model is started from the Mason model that is a good model to explain the physical characteristics of TFBAR. After simplifying the modified Mason model added dielectric loss term to conventional Mason model, the improved Modified Butterworth-Van Dyke (MBVD) model similar to conventional MBVD model is complete. The proposed model has three optimization variables those are half of the MBVD model. As a result, the curve fittings for the measured data are faster and smarter than any other model.

Key words : TFBAR, Mason model, MBVD model

I. 서 론

박막공진기에 대한 정확하고 효과적인 모델링을 위해 지금까지 다양한 연구들이 수행되어 왔다 [1]-[4]. 그 중에서 그림 1에 나타난 Mason 모델은 박막공진기의 수직구조를 분석하기가 용이하여 가장 널리 알려진 모델이다. 그러나 다양한 물질 변수와 복잡한 구조로 이루어지기 때문에 컴퓨터 모의 실험을 위한 구조로는 적합하지 않다는 것이 전반적인 의견이었다.

박막공진기에 대한 보다 정확한 해석을 위해 FEM (Finite Element Method)이나 FDTD (Finite Difference Time Domain)같은 3차원 EM 모의실험을 사용한 방법도 시도되었다[5]. 하지만 정확한 결과를 얻을 수 있는 반면 모델링을 위한 시간이 너무 많이 소비된다는 단점으로 인해 널리 사용되는 방법은 아니었다.

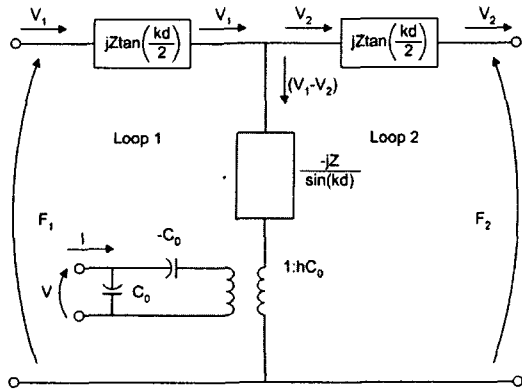
한편 그림 2에 보인 것과 같은 MBVD 모델은 6개의 수동소자로 이루어지기 때문에 비교적 간단하게 구현할 수 있고, 박막공진기에 대한 모델링 결과도 우수하다. MBVD 모델의 수동소자 값을 구하기 위한 공식은 아래 식 (1)과 같다[6].

$$C_0 = \frac{\epsilon_r \epsilon_0 A}{d} = \frac{\epsilon_r \epsilon_0 A w_r}{\pi v_a}, \quad C_m = \frac{8}{\pi^2} k_t^2 C_0 \quad (1)$$

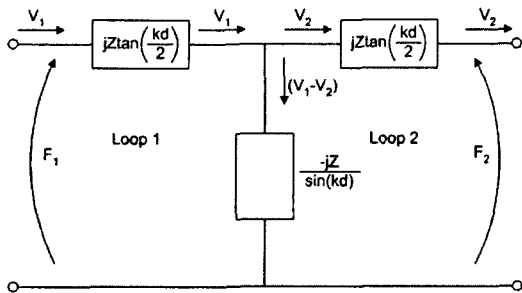
$$R_m = \frac{\pi \eta \epsilon_r \epsilon_0}{8 k_t^2 \rho A w v_a}, \quad L_m = \frac{\pi^3 v_a}{8 \epsilon_r \epsilon_0 A w^3 k_t^2}$$

여기서, ϵ_r 은 압전물질의 유전율이고, ϵ_0 는 공기의 유전율, η 는 음향 점성도(acoustic viscosity), ρ 는 밀도, v_a 는 음향 속도(acoustic velocity), w_r 은 공진 주파수, k_t^2 는 electromechanical 결합상수, d 는 압전 물질의 두께, A 는 공진기 면적이다. 하지만 식 (1)에 주어진 수동소자 값에 대한 공식은 온도나 기압, sputtering 속도, DC 바이어스와 같은 공정 조건에 따라 값이 달라지는 압전물질에 대한 물질변수들만으로 구성되기 때문에 실제 제작된 박막공진기의 특성을 정확히 표현할 수가 없다. 따라서 MBVD 모델을 이용하여 제작된 박막공진기의 특성을 표현하기 위해서는 6개의 수동소자들에 대한 최적화 (optimization) 과정이 필요하다.

상용 틀에서 제공하는 최적화 프로그램은 최적화 과정이 끝날 때마다 조금씩 다른 결과를 보인다. 또한 최적화 과정을 이용하여 수동소자 값을 구하면 설계자의 의도라고 할 수 있는 디자인 파라미터



(1) 압전물질에 대한 등가회로



(2) 비압전물질에 대한 등가회로

그림 1. Mason 등가회로

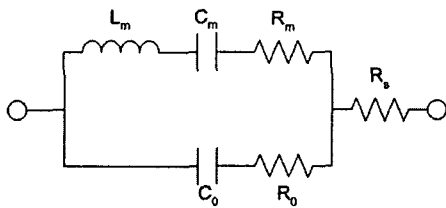


그림 2. MBVD 등가회로

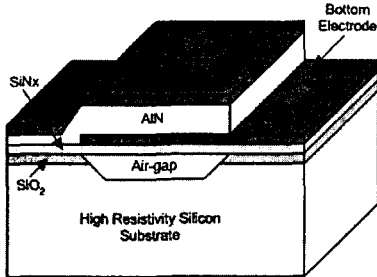


그림 3. 제작된 박막공진기 구조

가 전혀 반영되지 않기 때문에 원하는 결과를 얻기 위한 적절한 박막공진기를 설계할 수 없게 된다. 본 논문에서는 이러한 기존모델들의 단점을 극복하고자 박막공진기에 대한 새로운 모델링 기법을 제시하였다. 제안된 모델은 디자인 파라미터를 이용하여 수동소자 값을 계산하게 되며 MBVD 모델의 절반에 불과한 3개의 최적화 변수로 구성되기 때문에 최적화 과정에 의해 조금씩 달라지는 경향을 줄일

수 있다. 또한 3개 변수에 대해서만 최적화 과정을 수행하기 때문에 기존의 MBVD 모델에 비해 빠른 시간 안에 측정값에 대한 커브 피팅 (curve fitting) 을 완성할 수 있다.

II. 본론

2-1 박막공진기에 대한 새로운 모델링

본 논문에서는 기판의 로딩효과에 의한 오버모드 현상을 제거하기 위하여 그림 3에 보인 것처럼 1 μm 의 공기층을 맴브레인과 HRS(High Resistivity Silicon) 기판사이에 위치시켰다. 압전물질로는 AIN를 사용하였고, 두 개의 전극은 백금(Pt)으로 제작되었다. 공기층과 HRS 기판의 영향으로 인하여 음향파(acoustic wave)의 전파범위는 상위 전극으로부터 맴브레인까지로 한정시킬 수 있다. 따라서 그림 1의 등가모델들을 이용하여 아래 그림 4와 같이 제작된 박막공진기에 대한 Mason 모델을 완성할 수 있다. 그러나 이 모델은 최적화 과정의 반복 횟수를 증가시켜도 측정값에 일치하는 결과를 얻을 수 없다. 이런 문제점을 해결하기 위하여 그림 5에 주어진 것처럼 기존의 Mason 모델에 유전체 손실을 의미하는 저항 R_0 를 추가하였다. 개선된 Mason 모델은 여러 가지 물질 변수들에 대한 최적화 과정을 수행해야 하기 때문에 많은 시간이 걸리는 하지만 측정값과 거의 일치하는 결과를 얻을 수 있다.

그림 5의 개선된 Mason 모델은 박막공진기를 이루고 있는 각 레이어의 기계적 임피던스로 이루어지기 때문에 아래 식 (2)에 주어진 것처럼 변압기 전단에서 기계적 임피던스의 총합을 구할 수 있다.

$$Z_M = \frac{Z_p (1 + z_l z_r) \sin(kd) - j(z_l + z_r) \cos(kd)}{h^2 C_0^2 (z_l + z_r) \sin(kd) + j4 \sin^2(kd/2)} \quad (2)$$

여기서 Z_M 은 총 기계적 임피던스이고, h 는 변환상수, z_l 과 z_r 은 압전물질 좌, 우의 모든 기계적 임피던스를 압전물질의 임피던스로 정규화 한 것이다. 식 (2)의 총 기계적 임피던스 Z_M 을 이용하여 그림 5의 개선된 Mason 모델을 단순화 시키면 그림 6과 같은 형태의 간단한 회로로 표현할 수 있다.

그림 7은 Z_M 과 Z_M 에 $-C_0$ 가 직렬로 연결된 회

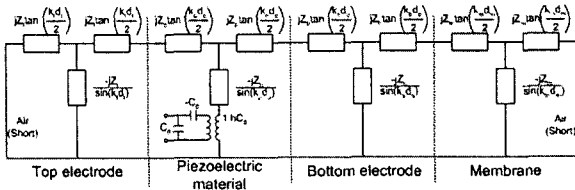


그림 4. 기존의 Mason 모델

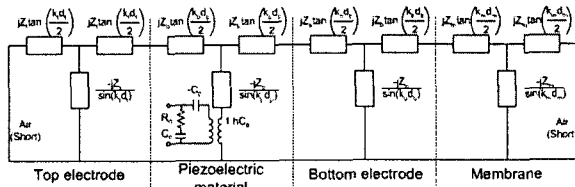


그림 5. 개선된 Mason 모델

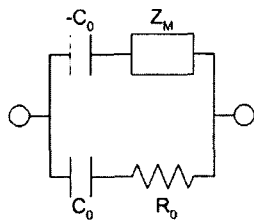


그림 6. 개선된 Mason 모델의 단순화된 형태(I)

로를 S 파라미터 모의실험한 결과이다. Z_M 만을 모의실험하면 L 과 C 가 직렬로 연결된 공진기와 같은 주파수 응답을 보이면서 제작된 박막공진기의 반공진주파수에서 공진점을 갖는다. Z_M 에 $-C_0$ 가 직렬로 연결된 회로는 비슷한 특성을 유지하며 공진점이 박막공진기의 공진주파수로 이동하게 된다. 이런 사실들을 바탕으로 Z_M 이 기계적 인덕턴스 L_m 과 기계적 캐패시턴스 C_m 의 직렬연결로 표현될 수 있다는 가정을 하고 다음과 같이 공진주파수와 반공진주파수의 함수로써 L_m 과 C_m 의 값을 유도하였다.

$$L_m = \frac{1}{C_0(\omega_a^2 - \omega_r^2)}, \quad C_m = C_0 \left(1 - \frac{\omega_r^2}{\omega_a^2}\right) \quad (3)$$

여기서 $C_0 = \epsilon_r \epsilon_0 A/d$ 로써 두 전극사이의 정적 캐패시턴스(static capacitance)이다.

L_m 과 C_m 의 직렬연결이 Z_M 의 공진주파수 및 반공진주파수 특성을 잘 표현하기는 하지만 Z_M 이 가지고 있는 모든 특성을 표현할 수는 없기 때문에 임피던스 모의실험을 추가적으로 수행하였다. 그림 8은 Z_M 의 허수부 임피던스와 L_m, C_m 직렬연결의

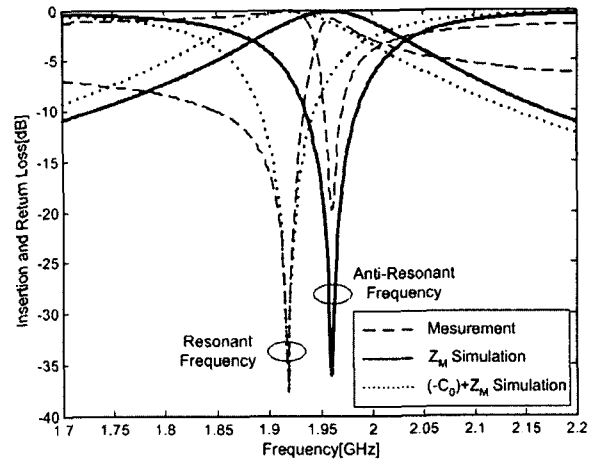


그림 7. Z_M 과 $(-C_0) + Z_M$ 의 S 파라미터 모의실험 결과

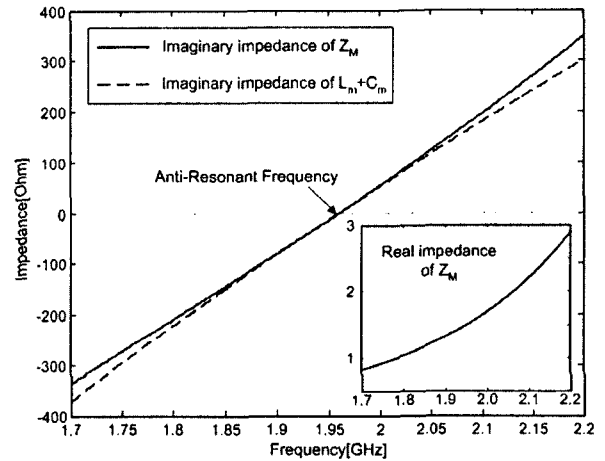


그림 8. Z_M 의 임피던스 모의실험

허수부 임피던스를 겹쳐서 그린 것이다. 그림에서 볼 수 있듯이 제작된 박막공진기의 반공진주파수에서 멀어질수록 두 모의실험 결과의 차이가 커지게 된다. 이를 통해 L_m, C_m 이외에 또 다른 허수부 임피던스 성분이 필요하다는 결론을 내리고 여러 번의 모의실험 결과를 토대로 하여 아래와 같은 공식을 만들어 낼 수 있었다.

$$Z_{add} = jz_w \sqrt{(\omega_r - \omega)^2 (\omega_a - \omega)^2} \quad (4)$$

여기서 Z_{add} 는 추가된 허수부 임피던스 성분이고, z_w 는 적절한 가중치로써 최적화 과정을 통해 구해 내게 된다. 또한 그림 8의 작은 창에서 볼 수 있듯이 총 기계적 임피던스 Z_M 은 실수부 임피던스 성분도 가지고 있기 때문에 기계적 저항 R_m 을 가정할 수 있고 이상의 결론을 토대로 그림 6을 그림 9와 같은 형태로 나타낼 수 있다.

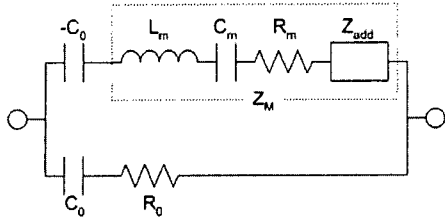


그림 9. 개선된 Mason 모델의 단순화된 형태(II)

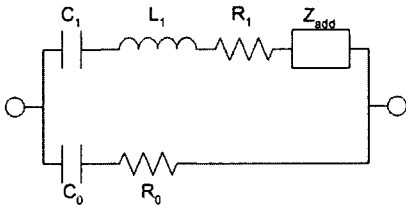


그림 10. 제안된 모델

2-2 모델링 결과

그림 9에서 부성 저항 $-C_0$ 와 C_m 의 직렬연결을 합하여 하나의 캐패시터로 표현하면 그림 10과 같은 본 논문에서 제안하는 새로운 모델이 완성된다. 제안된 모델의 수동소자 값들을 정리하면 다음과 같다.

$$\begin{aligned}
 C_1 &= (-C_0 // C_m) = C_0 \left(\frac{w_a^2}{w_r^2} - 1 \right) \\
 L_1 &= L_m = \frac{1}{C_0 (w_a^2 - w_r^2)} \\
 Z_{add} &= jz_w \sqrt{(w_r - w)^2 (w_a - w)^2} \\
 R_1 &= R_m, \quad C_0 = \frac{\epsilon_r \epsilon_0 A}{d}, \quad R_0 = \frac{d}{\sigma A}
 \end{aligned}
 \tag{5}$$

여기서 z_w, σ, R_1 은 상용 틀에서 제공하는 최적화 알고리즘을 이용하여 구해야 하는 최적화 변수이다. 본 논문에서 제작된 박막공진기의 면적은 $120000 \mu m^2$ 이고, 압전물질의 두께는 $0.8 \mu m$, 공진주파수는 1.914 GHz , 반공진주파수는 1.956 GHz 이다. 이런 디자인 파라미터들과 최적화 변수들을 이용하여 실제 제작된 박막공진기의 측정값에 커브 피팅을 수행하면 그림 11과 같은 결과를 얻을 수 있다. 그림에서 볼 수 있듯이 측정된 결과와 거의 일치하는 특성을 얻을 수 있으며, 커브 피팅 시간 또한 단축시킬 수 있다.

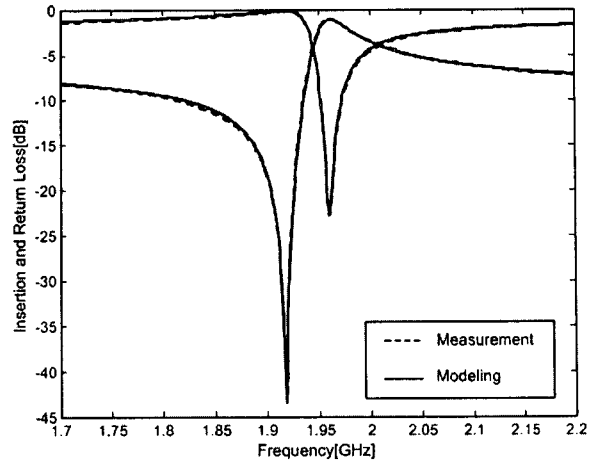


그림 11. 제안된 모델을 이용한 커브 피팅 결과

III. 결론

본 논문에서는 박막공진기의 새로운 모델링 기법을 소개하고, 각 수동소자들의 값을 여러 가지 디자인 파라미터에 대한 함수로써 구하였다. 제안된 모델은 기존의 Mason 모델보다 훨씬 간단한 형태로 표현되며, MBVD 모델의 절반에 불과한 최적화 변수로 구현되므로 더욱 정확하고 빠른 시간에 주어진 측정값에 대한 커브 피팅을 완성할 수 있었다.

IV. 참고문헌

- [1] J. D. Larson III, P. D. Bradley, S. Wartenberg and R. C Ruby, "Modified Butterworth-Van Dyke circuit for FBAR resonators and automated measurement system," 2000 IEEE Ultrasonics Symposium Digest, vol. 1, pp. 863-868, 2000.
- [2] K. M. Lakin, "Modeling of Thin Film Resonators and Filters," 1992 IEEE MTT-S Digest, vol. 1, pp 149-152, 1992.
- [3] S. A. Morris and C. G. Hutchens, "Implementation of Mason's Model on Circuit Analysis Program," IEEE Trans. on UFFC, vol. 33, No. 3, pp 295-298, May 1986.
- [4] W. M. Leach, "Controlled-Source Analogous Circuits and SPICE Models for Piezoelectric Transducers," IEEE Trans. on UFFC, vol. 41, No.

1, pp. 60-66, Jan. 1994.

- [5] R.Lerch, "Simulation of piezoelectric devices by two and three dimensional finite element," *IEEE Trans. Ultrasonics, Ferroelectrics and Frequency Control.*, vol. 37, pp. 233-247, May, 1990.
- [6] J. Rosenbaum, *Bulk Acoustic Wave Theory and Devices*, Artech House, Norwood, 1988