

박막공진기 면적변화에 따른 대역통과여파기의 성능개선 연구

준회원 김 건 욱*, 정회원 육 중 관*, 박 한 규*

A Study on the Thin-Film Bulk Acoustic Resonator Size Effects on Ladder Filter Performance

Kun-Wook Kim Associate Member, Jong-Gwan Yook, Han-Kyu Park Regular Members

요 약

본 논문에서는 이동통신용 박막공진기를 이용한 여파기를 모의실험하고 제작하였다. 수직구조의 해석을 위해 일차원 CAD 모델을 사용하였고, 여파기의 설계를 위해 수정된 Butterworth-Van Dyke 모델이 이용되었다. 압전 물질로는 AlN를, 전극도체로는 백금을 사용하였다. CAD 모델의 검증을 위하여 전극 두께의 변화에 따른 실험결과를 모의실험 결과와 비교하였으며 반공진점의 비교에서 0.5 %의 오차범위 이내에서 일치하였다. 네 가지 형태의 박막공진여파기를 제작하였으며, 또한 여파기의 병렬단에 위치한 단위 공진자의 면적에 대한 영향을 고려하기 위하여 병렬단의 단위 공진자의 크기가 각각 직렬단의 두 배와 세 배의 크기를 가지는 여파기를 설계 제작하여 모의 실험결과와 비교하였다. 병렬단 공진자의 면적이 증가할수록 전체 크기의 변화없이 우수한 저지대역특성을 얻을 수 있으며, 3/2단 사다리형 여파기에서 병렬단에 직렬단 공진기 면적의 두 배인 공진기를 사용할 경우 6 dB, 세 배인 공진기의 경우 11 dB의 저지대역 성능 개선을 보였다.

ABSTRACT

TFBAR filters for wireless applications are simulated and fabricated in this work. A CAD model is developed for the air-gap type resonator and the modified Butterworth-Van Dyke model (MBVD) is used in filter design. The aluminum nitride is chosen in this paper as the piezoelectric material with top and bottom platinum electrodes. To verify the developed CAD model, simulated and measured results are compared for various top electrode thicknesses, and it is confirmed that the agreement is within 0.5 % for the parallel resonance frequency. Four types of the ladder type bandpass filters are designed and their responses are compared with measured data. The effects of different series and shunt TFBARs area sizes are also predicted and it is revealed that the size of the resonators significantly affects sideband rejection performance without changing the number of ladder filter stages. It is observed that 6 dB out-of-band rejection improvement for 3/2 stage filters is obtained with double-sized shunt TFBARs, while 11 dB improvement is achieved with triple-sized shunt TFBARs.

1. 서 론

최근의 이동통신 시장에 있어서 통신용 단말기는 시장을 주도하고 있는 중요한 분야이다. 이동통신 서비스는 사용자들의 다양한 요구에 부합하고자 계

속하여 새로운 서비스를 제공하고 있으며, 그에 따라 통신용 단말기도 기능이 다양화, 소형화되고 있다. 공정상의 문제점이 해결되면서 RF 단말기의 소형화가 가능해 졌으며, 대부분의 통신용 단말기에는 채널 선택용 혹은 영상제거용으로 한 개 이상의 여

* 연세대학교 전기전자공학과(kwkimys@yonsei.ac.kr, jgyook@yonsei.ac.kr hkpark@yonsei.ac.kr)
논문번호 : 020159-0412, 접수일자 : 2002년 4월 12일

파기가 사용되고 있어, 여파기는 단말기 제작에 있어 중요한 소자이다. 현재 단말기에 사용되는 초고주파용 여파기로는 세라믹 공진기를 이용한 여파기와 Surface Acoustic Wave (SAW) 기술을 이용한 여파기가 주로 사용되고 있으나, 이들 여파기는 on-chip 시스템에 집적화 되기 어렵고, 또한 고전력을 견딜 수 없고, 사용 주파수에 한계가 있다는 단점을 가지고 있다^[11-21]. GHz 대역 이상의 고주파대역에서 사용될 수 있는 수동소자들은 몇 가지가 있으나, 이들을 이용하여 여파기를 구현할 경우 1-2%의 대역폭을 가지고, 낮은 삽입손실을 가지는 여파기는 구현할 수 없다. 박막공진기(Thin film bulk acoustic resonator : TFBAR)를 이용한 여파기가 근래에 들어 이동통신용 대역통과여파기의 대안으로 제시되고 있는데 박막공진여파기는 실리콘기판 위에 제작될 수 있어 기존의 회로들과의 집적화에 문제가 없으며, 위에 언급한 단점들을 극복할 수 있다^[22-51].

박막공진기는 AlN, ZnO, PZT 등의 얇은 압전체를 두 개의 도체사이에 위치시켜 제작되며, 최근의 연구들에 의하면, AlN 와 ZnO를 이용한 박막공진기 여파기가 1~2 GHz 대역의 이동통신용 RF 여파기로 제안되었다^[6-10]. 박막공진기의 공진주파수는 구조와 물질 변수들에 의해 결정되는데 그 중에서도 압전물질과 도체를 포함하는 두께가 가장 큰 영향을 미친다. 박막공진기는 사다리형(Ladder) 혹은 격자형(Lattice)으로 배열되어 여파기를 구성하는데, 격자형의 경우 같은 성능을 내기 위해 사다리형 보다 약 2배 정도의 공진기들이 필요하다는 단점 때문에 주로 사다리형 구조를 사용한다. 사다리형 구조에 있어서 병렬단의 공진기는 직렬단의 공진기에 비해 약 2~3 %정도 낮은 공진주파수를 가지도록 설계되며, 주로 위쪽 도체의 두께를 조절함으로써 얻어진다.

박막공진기의 수직구조를 해석하는데 있어, 수직구조를 모델링하기 위한 많은 연구가 진행되었다^[11-14]. 그 중 가장 널리 쓰이는 해석 방법은 일차원 해석법인 Mason 모델^[11]인데, 이 모델은 회로적으로 구현이 어려운 transformer 와 negative capacitance를 포함하고 있어 CAD 모델을 구성하는데 어려움이 있었다. Redwood^[12]와 Morris^[13]는 Mason 모델을 재구성하여 CAD모델에 적당한 구조를 제시하였으며, 기존의 연구를 토대로 Leach^[14]는 transformer와 negative capacitance 대신 제어전원들을 사용하여 CAD 모델에 적합한 SPICE 모델을 제안하였다. 일차원 모델들은 공진기의 하모닉 성분들을 표현할

수 없다는 단점이 있지만, 여파기들은 주모드에서 설계되므로 공진기의 수직구조 해석에 있어 충분한 설계 변수들을 제공한다. 본 논문에서는 Leach 모델을 이용한 CAD 모델을 박막공진기의 해석에 사용하였다.

1990년대 초반에 Rosenbaum과 Horwitz^[4]는 외부에 inductor와 capacitor를 연결하여 박막공진기 여파기가 GHz 대역에서도 동작할 수 있는 가능성을 제시하였으며, 1990년대 후반에는 Micro Electro-Mechanical System(MEMS)의 등장으로 박막공진기의 제작이 용이해 짐으로써 압전물질의 선택이나 두께의 조절 및 여파기의 구조들에 대한 다양한 연구가 진행되었다. Lakin^[6-7]과 Larson^[8]은 Solidly Mounted Resonator(SMR) 형태의 박막공진기를 셀룰러 및 PCS 응용분야에 적용가능한 연구 결과를 발표하였고, Ruby^[10]는 박막공진기를 이용한 PCS 대역의 듀플렉서에 대한 연구를 발표하였다. Kirby^[9]는 edge-supported형태의 ZnO와 PZT를 이용한 박막공진기의 도체두께 및 면적에 따른 성능을 분석하였으나 여파기 전체에 대한 면적의 효과는 제시하지 못했다. 기존의 사다리형 여파기의 경우 공진기의 면적은 일정하게 하고, 여파기의 단수를 증가시켜 필요한 스펙의 성능을 얻어야 했으나, 병렬단의 공진기의 면적을 다르게 하면 단수를 증가시키지 않고도 저지대역의 성능을 향상시킬 수 있다.

본 논문에서는 일차원 CAD 모델의 타당성을 검증하기 위하여 각각 4개의 다른 위쪽 도체두께를 가지는 박막공진기를 제작하여 모의실험결과와 비교하였으며, 4개의 박막공진기 여파기를 제작하여, 이 중 두 개는 기존의 구조인 2/1단과 3/2 단 여파기로, 공진기의 추가 효과를 살피기 위해 나머지 두 개는 4/1단 및 4/2단 여파기로 제작하였다. 공진기의 면적에 따른 효과를 보기 위해서는 3/2단 구조의 여파기와 병렬단 공진기의 크기가 각각 두 배와 세 배인 여파기를 제작하여 모의실험결과와 비교분석 하였다.

II. 박막 공진기 CAD 모델 해석

1. 박막공진기의 구조

박막공진기의 종류는 제작방법에 따라 세 가지 정도로 구분할 수 있으며, air-gap형, back-etched형, solidly mounted형이 그것이다. Air-gap형의 박막공진기는 다른 두 가지 형태에 비해 공정상의 잇점을

가지고 있는데 back-etched형은 실리콘 기판의 아래를 깎아내야 하고, solidly mounted형은 Bragg 반사판을 구성하기 위해 도체 아래에 성질이 다른 물질을 몇 개의 층으로 쌓아야 하며 게다가 그 층의 두께를 조절하기가 쉽지 않다는 단점이 있다. 그림 1에 본 논문에서 사용된 박막공진기의 평면사진과 단면사진이 나타나 있다. 사진에서 보듯이 두 개의 도체 사이에 얇은 AIN가 압전물질로 사용되었고, 그 도체 아래와 기판 사이에 air-gap이 위치한다. 이 air-gap은 기판과의 접합에 의한 압전체의 overmode를 제거시켜주는 역할을 하며, 두 개의 air-bridge를 사용하여 입출력 평면형 평형선로(Coplanar waveguide : CPW)와 도체를 연결하였다.

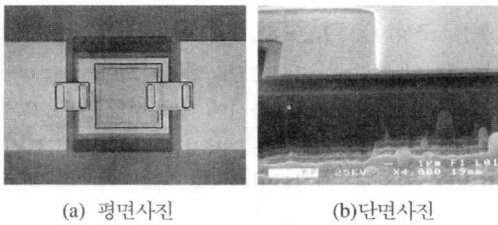


그림 1. 박막공진기의 구조사진

2. CAD 모델의 구성

Leach의 등가모델은 thickness-mode 와 side-electrode bar mode 두 가지에 대하여 정의되었는데, 박막공진기의 면적이 작으면 side-electrode bar model은 무시할 수 있으므로 본 논문에서는 thickness-mode만이 고려되었다. 그림 2는 Leach의 등가회로 모델을 이용하여 구성한 CAD 모델이며, 비압전물질들 즉 도체, 공기층, membrane, 실리콘 등을 모델링하는 데에는 전송선로 모델이 사용되었다. 전송선로모델의 변수는 세 가지로 정의될 수 있는데 각각 acoustic 임피던스 Z , 전기적 길이 E , 그리고 전기적 길이를 정의하기 위한 물질의 고유 공진주파수 F 이고, 식 (1)-(3)에 정의되었다.

$$Z = \rho v_a A \tag{1}$$

$$E = \frac{360dF}{v_a} \tag{2}$$

$$F = \frac{v_a \sqrt{\pi^2 - 8k_t^2}}{2\pi d_p} \tag{3}$$

이 때, ρ 는 물질의 밀도, v_a 는 물질의 acoustic 속

도, A 는 공진기의 면적, d 는 물질의 두께, k_t^2 는 electromechanical 결합상수, d_p 는 압전물질의 두께이다. 그림 2의 회로도에서는 전압제어전압원 한 개와 두 개의 전류제어 전류원이 Mason 모델의 transformer와 negative capacitance를 대신하여 사용되었으며, 전류제어 전류원의 이득은 각각 $G_1 = hC_0$ 와 $G_2 = h$ 이고, h 는 물질강도로부터 얻을 수 있다. C_0 는 두 도체 사이의 전기적 정전용량이며, 압전물질의 유전율, 공진기의 면적, 압전물질의 두께에 의해서 결정된다. R_n 과 C_n 은 그 접점이 부동점이 되지 않게 하여 회로가 동작하도록 하여 준다. 전송선로모델의 변수들은 표 1에서 주어진 물질변수들로부터 얻을 수 있다.

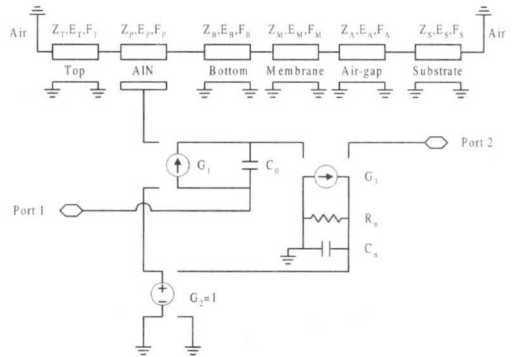


그림 2. 박막공진기의 CAD 모델

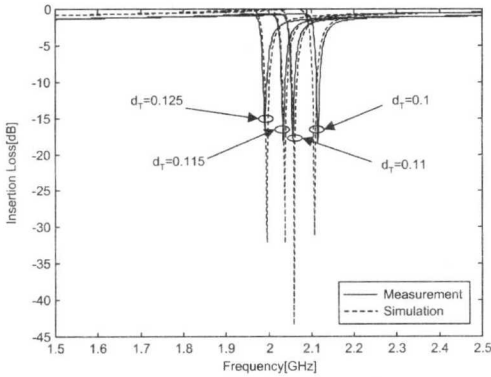
3. CAD 모델의 검증

구성된 CAD 모델은 범용설계 프로그램들을 이용해 모의실험 할 수 있으며 그 모의 실험결과와 실제로 제작된 결과와의 비교를 그림 3에 나타내었다. 제작된 박막공진기의 수직구조의 두께들은 각각, AIN 1 μm , 아래도체 두께 0.2 μm , SiNx 0.2 μm , 공기층 1.5 μm , 실리콘 기판 500 μm 이며, 위쪽 도체의 두께를 조절하여 공진점의 변화를 얻었다. 변화된 위쪽 두께는 각각 0.1 μm , 0.11 μm , 0.115 μm , 0.125 μm

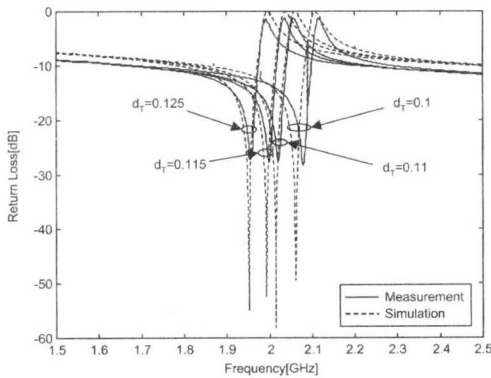
표 1. CAD 모델에 사용된 물질변수

특성(단위)	Pt.	AIN	Air	SiNx	Si
Acoustic 임피던스(Mrayls)	69.8	37	4e-3	20.8	19.7
Acoustic 속도(m/s)	3250	6350	330	6700	8430
밀도(kg/m ³)	21500	11350	12	3100	2332

μm 이며, 공진기의 면적은 150μm×150μm 이다. 그림 3에서 볼 수 있듯이 도체의 두께가 두꺼워질수록 공진점과 반공진점은 낮은 주파수로 이동하게 되며 이는 acoustic 파장이 길어지게 되어 공진 주파수가 낮아짐으로써 발생하게 된다. 표 2 에 정리된 모의 실험결과와 측정결과는 반공진점을 기준으로 비교하였으며, 네 가지의 경우 모두에 대하여 약 0.5%이하의 오차를 가진다.



(a) 삽입손실(S21)



(b) 반사손실(S11)

그림 3. 도체 두께에 따른 공진기의 주파수 응답(d_T: 위쪽 도체 두께)

표 2. 두께변화에 따른 모의실험 및 측정결과비교

위쪽도체두께 (μm)	반공진주파수 (GHz)		오차 (%)
	모의실험	측정치	
0.125	1.996	1.991	0.25
0.115	2.038	2.034	0.19
0.11	2.060	2.056	0.19
0.1	2.107	2.115	0.37

III. 사다리형 여파기의 구성

단일 박막공진기는 앞절에서 설명한 CAD 모델을 이용하여 정확히 해석을 수행하고, 원하는 변수들을 얻어낼 수 있다. 그러나 CAD 모델은 2단자 변수들을 추출하고, 다단으로 연결하여 전체의 응답을 계산하는 데에는 불편하다는 단점을 가지고 있고, 박막공진기의 도체의 두께가 무시할 수 있을 정도로 얇다는 가정을 하면, 제어전원을 이용한 복잡한 모델을 수동소자들로 이루어진 단순한 구조의 Butterworth-Van Dyke (BVD)모델로 변환할 수 있다. BVD모델은 전기적 가지와 기계적 가지로 이루어져 있고, 전기적 가지에는 도체의 정전용량 C₀와 도체저항손실 R_s가, 기계적 가지에는 acoustic 공진부를 구성하는 L_m-C_m-R_m이 직렬로 연결되어 있는 5개의 소자를 가지는 모델이었으나, Larson^[8]이 그림 4처럼 전기적 가지에 물성저항손실 R₀를 추가하여 6개의 소자를 가지는 수정된 BVD (MBVD) 모델을 제시하였다. 몇 가지 가정을 하면, 주파수에 대한 등가회로의 임피던스는 참고문헌 [8]에서 정의된 것처럼 식 (4)와 같이 주어진다.

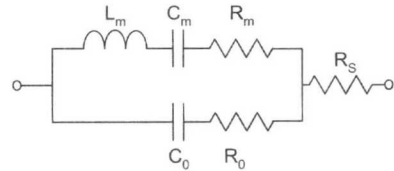


그림 4. 수정된 BVD 모델

$$Z(\omega) = \frac{X_p}{j\left(\frac{\omega}{\omega_p}\right)} \frac{\left[1 - \left(\frac{\omega}{\omega_s}\right)^2 + j\left(\frac{\omega}{\omega_s}\right)\frac{1}{Q_{so}}\right]}{\left[1 - \left(\frac{\omega}{\omega_p}\right)^2 + j\left(\frac{\omega}{\omega_p}\right)\frac{1}{Q_{po}}\right]} \quad (4)$$

이 때,

$$r = \frac{C_0}{C_m}, \omega_s = \frac{1}{\sqrt{L_m C_m}}, \left(\frac{\omega_p}{\omega_s}\right)^2 = 1 + \frac{1}{r}$$

$$X_p = \frac{1}{\omega_p C_0}, \frac{1}{Q_s} = \omega_s R_m C_m, \frac{1}{Q_e} = \frac{\omega_s R_m C_m}{r}$$

$$\frac{1}{Q_{so}} = \frac{1}{Q} \left(1 + \frac{R_s}{R_0}\right), \frac{1}{Q_{po}} = \left(\frac{\omega_p}{\omega_s}\right) \left(\frac{1}{Q_s} + \frac{1}{Q_e}\right)$$

이 때, r은 전기적 가지와 기계적 가지의 정전용량의 비이고 ω_s는 공진주파수, ω_p는 반공진주파수이다. 사다리형 여파기 구조의 한 단은 직렬공진자와 병렬공진자로 구성되며, 식(5)의 직렬공진자의 임피

턴스와 병렬공진자의 어드미턴스를 이용한 2단자 ABCD 파라미터를 사용하면 다단의 응답을 행렬곱을 계산함으로써 얻을 수 있다.

$$\begin{bmatrix} a & b \\ c & d \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & Z_a \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ Y_b & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1+Z_a Y_b & Z_a \\ Y_b & 1 \end{bmatrix} \quad (5)$$

이 때, Z_a 는 직렬 임피던스, Y_b 는 병렬 어드미턴스이다. ABCD 파라미터의 행렬곱의 특성을 이용하면 다단의 ABCD 파라미터를 구할 수 있고, ABCD 파라미터는 식(6)의 관계를 이용하여 2단자 S 파라미터로 변환된다.

$$S_{21} = \frac{2}{a + b/Z_0 + cZ_0 + d} \quad (6)$$

$$S_{11} = \frac{a + b/Z_0 - cZ_0 - d}{a + b/Z_0 + cZ_0 + d}$$

이 때, Z_0 는 단자의 특성 임피던스이다.

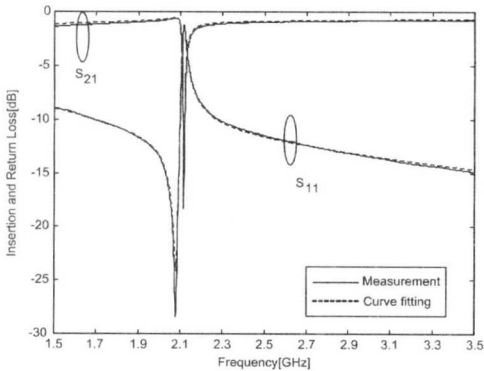


그림 5. 단일공진자의 수정된 BVD 모델링

그림 5는 박막공진기의 MBVD 모델링과 측정된 S 파라미터 결과의 비교를 보여주고 있다. 모델링된 결과는 낮은 저항값과 약 2.4 pF의 전기적 정전용량 값을 가진다. Electromechanical 결합상수 k_t^2 과 공진점에서의 선택도 인자 Q_s 는 측정값이나 모델링값에서 식(7)과 식(8)의 관계를 이용하여 얻을 수 있다.

$$k_t^2 = \frac{\pi^2}{4} \left(\frac{f_p - f_s}{f_p} \right) \quad (7)$$

$$Q_s = \frac{2\pi f_s L_m}{R_m} \quad (8)$$

이 때, f_p 는 반공진주파수, f_s 는 공진주파수이다. 단일박막공진자의 경우 k_t^2 는 약 4.9 %, Q_s 는 공진점에서 약 900~1200의 값을 가진다.

IV. 대역통과여파기의 설계 및 결과

1. 박막공진기의 추가효과

사다리형 대역통과여파기 구조는 박막공진기를 이용할 때 널리 사용되어지며, 고전력을 전달하고, 낮은 삽입손실과 높은 저지대역 감쇠를 가지는 장점을 가지고 있다. 사다리형 구조에서 공진기를 추가할 경우 삽입손실특성은 나빠지면서 저지대역특성은 좋아지므로, 사다리형 구조의 단수는 원하고자 하는 스펙에 의해 결정된다. 그림 6과 그림 7은 2/1 단과 3/2단의 사다리형 대역통과 여파기의 S 파라미터 특성을 나타내며, -3 dB 이내의 좋은 삽입손실과 매우 날카로운 저지대역 특성을 보여주고 있다. 그림 8은 그림 6의 2/1단 구조의 양쪽 직렬단에 공진기를 하나씩 모두 두 개를 추가하여 4/1단을 구성한 경우의 결과이다. 이 때는 여파기의 저지대역에서 약 6 dB 정도의 추가적인 성능향상을 보이고 있다. 그림 9는 그림 7의 3/2단 구조의 가운데에

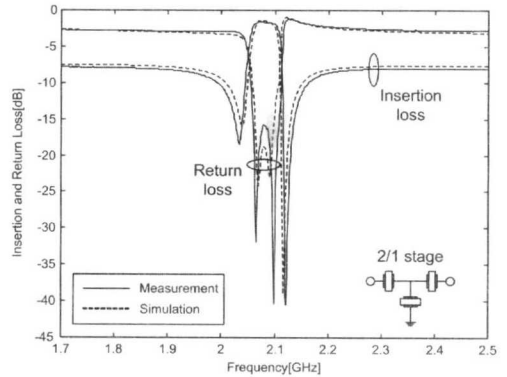


그림 6. 2/1단 여파기의 주파수 응답

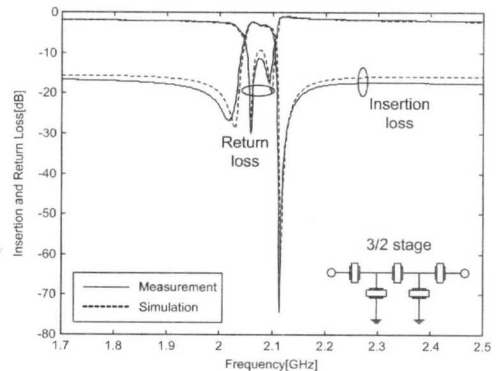


그림 7. 3/2단 여파기의 주파수 응답

공진기 하나를 추가하여 4/2단을 구성한 경우이며, 약 3 dB의 저지대역감쇠 성능 향상을 볼 수 있다. 네 가지의 대역통과여파기 모두 약 52 MHz의 대역폭을 가지므로 2 GHz 대역에서 약 2.5 %의 대역폭을 가지게 되어 주파수 선택을 위한 RF 여파기로서 적합한 특성을 보이고 있다. 표 3에 네 가지 여파기의 특성을 요약하였다.

4.2 공진기 면적변화 효과

앞절에서 보았듯이 공진기를 추가할 경우 더 나은 저지대역 감쇠특성을 얻을 수 있는데, 사다리형 여파기의 병렬단 공진기의 크기를 크게 할 경우 비슷한 결과를 얻을 수 있다. 그림 10은 II절에서 설명한 CAD 모델을 이용한 공진기의 크기가 각각 두 배, 세 배인 경우의 모의실험결과이며, 그림 11은 실제 제작된 공진기의 주파수 응답을 보여준다. 두 그림에서 볼 수 있듯이 공진기의 면적을 증가시키게 되면 공진주파수의 변화는 없이 반사손실 S₁₁의 특성이 우수해 지는 것을 볼 수 있는데 이는 면적

이 커짐에 따라 전기적 정전용량의 값도 커지기 때문이다. 그림 12는 병렬단 공진자의 면적이 다른 제작된 3/2단 대역통과여파기들의 사진이다. 그림 13은 병렬단 공진기의 면적이 다른 경우 3/2단 여파기의 모의실험결과를 나타내며, 그림 14는 그 측정된 결과의 삽입손실과 반사손실을 보여준다. 두 그림에서 보듯이 병렬단 공진기의 면적이 증가할수록 여파기의 단수를 늘리는 것처럼 저지대역 특성이 향상되는 것을 알 수 있으며, 병렬단 공진자의 면적이 두 배인 경우 약 6 dB, 면적이 세 배인 경우는 약 11 dB의 성능향상을 보인다.

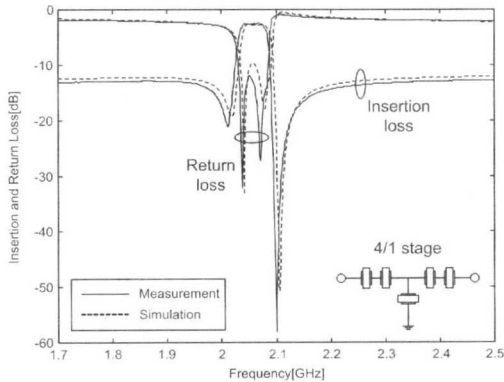


그림 8. 4/1단 여파기의 주파수 응답

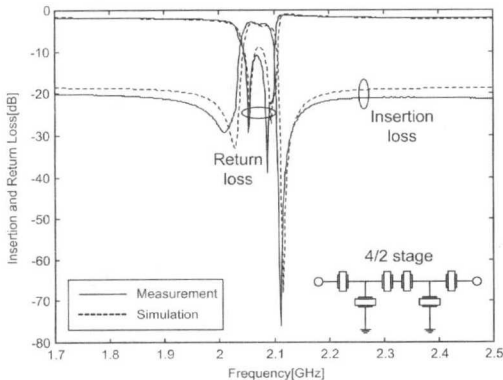


그림 9. 4/2단 여파기의 주파수 응답

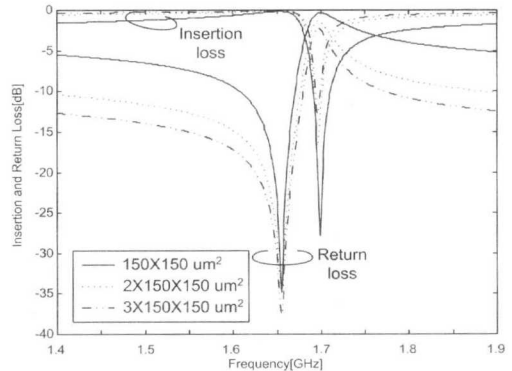


그림 10. 면적변화에 따른 단일공진기의 모의실험결과

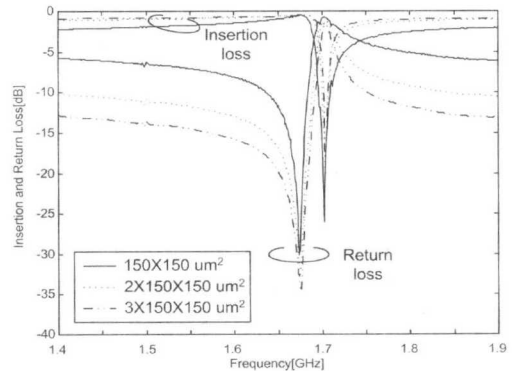
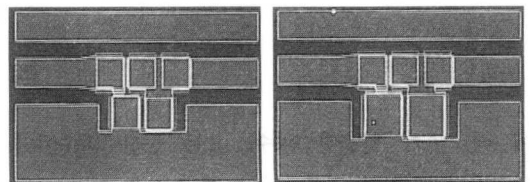
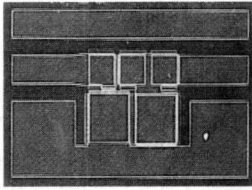


그림 11. 면적변화에 따른 단일공진기의 측정된 결과



(a) 직렬단과 같은 크기 (b) 병렬단이 두 배 큰 경우



(c) 병렬단이 세 배 큰 경우

그림 12. 면적변화에 따른 제작된 3/2단 여파기의 사진

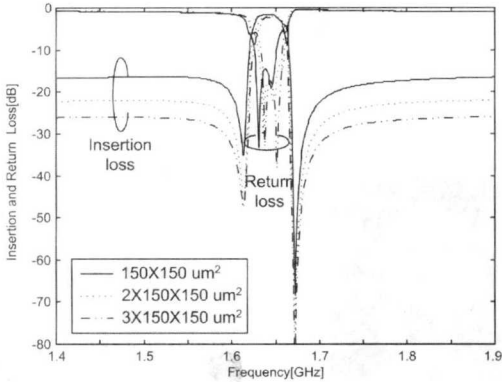


그림 13. 병렬단 공진기의 면적변화에 따른 3/2단 여파기의 모의실험결과

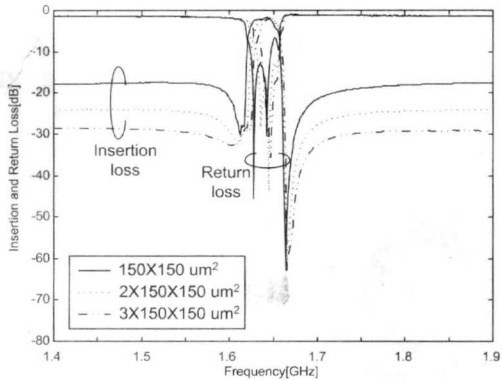


그림 14. 병렬단 공진기의 면적변화에 따른 3/2단 여파기의 측정된 결과

V. 결론

본 논문에서는 여러 가지 형태의 박막공진기를 이용한 대역통과여파기를 모의실험하고, 제작하여 그 결과를 비교하였다. Air-gap 형태의 박막공진기에 AlN를 압전물질로, 백금을 도체로 사용하였으며, 단일공진자는 k_p^2 이 4.9%, Q_p 가 약 900~1200의 값을 가졌다. 수직구조를 해석하기 위하여 Leach의 등가모델을 이용한 CAD 모델을 사용하였으며, 모

표. 3. 여파기의 특성요약

여파기 형태	삽입손실 (dB)	대역내 반사손실 (dB)	저지대역 감쇠 (dB)	대역폭 (MHz)
2/1단	-1.50	-7~40	-8.2	57.5
3/2단	-2.36	-11~30	-17.2	51.0
4/1단	-2.45	-11~32	-14.1	52.5
4/2단	-2.75	-11~39	-20.4	52.4

델의 검증을 위하여 4개의 다른 도체두께를 가지는 공진기를 제작하여 결과와 비교하였다. 이 모델은 반공진점의 비교에서 약 0.5 %이내의 오차를 가졌다. 네 가지의 다른 사다리형 대역통과여파기를 제작하였으며 네 가지 모두 -3 dB 이내의 좋은 삽입손실과 약 52 MHz의 대역폭을 나타내어 주파수 선택이나 영상제거가 필요한 이동통신용 RF 여파기로의 응용이 가능하다. 사다리형 구조에서 공진기를 직렬단에 추가할 경우 하나당 약 3 dB정도의 저지대역감쇠 향상을 얻을 수 있으며, 병렬단 공진기의 면적을 증가시키면, 전체 크기를 증가시키지 않고도, 비슷한 성능향상을 얻을 수 있고, 병렬단의 면적이 두 배이면 약 6 dB, 세 배이면 약 11 dB의 저지대역감쇠 성능향상을 얻을 수 있다.

참고 문헌

- [1] J. Rosenbaum, Bulk Acoustic Wave Theory and Devices, Artech House, Norwood, 1988.
- [2] R.S. Naik, J.J. Lutsky, R. Rief, and C.G. Sodini, "Electromechanical coupling constant extraction of thin-film piezoelectric materials using a bulk acoustic wave resonator," IEEE Trans. on UFFC, vol. 45, no. 1, pp. 257-63, Jan. 1988.
- [3] S. Horwitz and C. Milton, "Application of Film Bulk Acoustic Resonators," 1992 IEEE MTT-S Digest, vol. 1, pp. 165-168, 1992.
- [4] C. Vale, J. Rosenbaum, S. Horwitz, S. Krishnaswamy and R. Moore, "FBAR Filters at GHz Frequencies," IEEE Symposium on Frequency Control, vol. 1, pp. 332-336, 1990.
- [5] J.J. Lutsky, R.S. Naik, R. Rief and C.G. Sodini, "A Sealed Cavity TFR Process for RF Bandpass Filters," 1996 International Electron Devices Meeting, pp 95 -98 , 1996.
- [6] K.M. Lakin, G.R. Kline, and K.T. McCarron,

“Thin film bulk acoustic wave filters for GPS,”
1992 Ultrasonics Symposium Digest, vol. 1, pp.
471-76, 1992.

- [7] K.M. Lakin, “Modeling of thin film resonators and filters,” 1992 IEEE MTT-S Digest., vol. 1, pp.149-52, 1992.
- [8] 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. 863-68, 2000.
- [9] Q.X. Su, P. Kirby, E. Komuro, A. Imura, Q. Zhang, and R. Whatmore, “Thin-film bulk acoustic resonators and filters using ZnO and Lead-Zirconium-Titanate thin films,” IEEE Trans. Microwave Theory and Techniques, vol. 49, no. 4, pp. 769-78, April 2001.
- [10] P.D. Bradley, R.C. Ruby, J.D. Larson III, Y. Oshmyansky and D. Figueredo, “A Film Bulk Acoustic Resonator (FBAR) Duplexers for USPCS Handset Applications,” 2001 IEEE MTT-S Digest, vol. 1, pp. 367-70, 2001.
- [11] W.P. Mason, Electromechanical Transducers and Wave Filters, D. Van Nostrand, Newyork, 1942.
- [12] M. Redwood, “Transient Performance of a Piezoelectric Transducer,” J. acoust. Soc. Amer, vol.33, pp527-536, 1961.
- [13] S.A. Morris and C.G. Hutchens, “Implementation of Masons Model on Circuit Analysis Programs,” IEEE Trans. on UFFC, vol. 33, No. 3, pp. 295-298, May 1986.
- [14] 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.
- [15] K.W. Kim, J.G. Yook, M.G. Gu, W.Y. Song, Y.J. Yoon and H.K. Park, “TFBAR Filters for 2 GHz Wireless Applications,” 2002 IEEE S Digest, vol. 2, pp. 1181-1184, 2002.

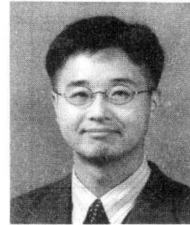
김 건 욱(Kun-Wook Kim)



1995년 : 연세대학교
전자공학과(공학사)
1997년 : 연세대학교
전자공학과(공학석사)
1997년~현재 : 연세대학교
전기전자 공학과
박사과정

<주관심 분야> 마이크로파회로 설계, 박막공진 여파
기 설계, MEMS

육 종 관(Jong-Gwan Yook)



1987년 : 연세대학교
전자공학과 (공학사)
1989년 : 연세대학교
전자공학과 (공학석사)
1998년 : 미시간대학교
전기전자공학과
(공학박사)

1997년~1998년 : 미시간 대학교 Research Fellow
1998년~1999년 : Qualcomm Inc. Senior Engineer
1999년~2000년 : 광주과학기술원 조교수
2000년~현재 : 연세대학교 전기전자공학과 조교수
<주관심 분야> 마이크로파 구조 해석 및 설계, RF
MEMS, 박막공진 구조

박 한 규(Han-Kyu Park)



1964년 : 연세대학교
전기공학과 (공학사)
1968년 : 연세대학교
전기공학과 (공학석사)
1975년 : 불란서 파리 제6대학
(공학박사)

1976년~현재 : 연세대학교 전기전자공학과 교수
1979년~1980년 : 스탠포드대학교 교환교수
1989년~1994년 : 대통령 21세기 위원회 위원
1995년~1997년 : 정보통신부 전파위원회 위원장
1997년~현재 : 한국과학재단 이사
<주관심 분야> 마이크로파 소자, 무선 이동통신 시
스템, 전파 전파, SAR