고효율 광대역 마이크로스트립 대역통과 필터 특성

이 영 훈*

Characteristics of High Efficiency Wideband Microstrip Band Pass Filter

Young-Hun Lee*

요 약

본 논문에서는 구형공진기와 SIOS를 사용하여 삽입손실이 작고, 차단특성이 아주 좁고, 광대역 특성을 갖는 마이크로스트립 대역통과필터를 연구하였다. 계단 임피던스 스터브는 일반 0.25λ 스터브 보다 약 30%의 길이를 줄일 수 있고, 또한 스터브의 임피던스의 크기를 변경할 수 있는 장점이 있음으로 필터의 특성 개선에 적용할 수 있다. 본 논문의 객관성을 입증하기 위해서 이중모드 구형공진기를 사용한 최적화된 광대역 대역통과 필터를 구현하였다. 전송선로 모델을 사용하여 계산한 주파수 특성 결과는 실험값과 아주 잘 일치하였다. 구현된 필터의 주파수 특성은 $L_4 = 1.94mm$인 경우에 필터의 3dB 대역폭은 52.5%(3.267GHz)이고, 삽입손실은 0.33dB, 30dB 차단특성은 저주파수 대역에서 221MHz, 고주파수대역에서 0.181MHz이다. 최대 차단특성은 저주파 대역에서 -54dB, 고주파 대역에서 -60dB이다.

ABSTRACT

This paper presents a compact, low insertion loss, sharp rejection and wide band microstrip band pass filter that is composed rectangular loop resonator and step-impedance-open-stub(SIOS) for wireless data communication. The SIOS can be reduce length about 30% more than general 0.25λ stub. And the stub can the advantage of tuning impedance magnitude. In order to demonstrate agrement of this paper prove, the optimized wide band pass filters are realized and experimented. A transmission line model used to calculate the frequency response of the new filters shows good agreement with measurements. The filter has 3dB fractional bandwith of 52.5%(3.267GHz), an insertion loss of better than 0.33dB from 4.587GHz to 7.854GHz, and two rejection of greater than 30dB within 221MHz(4.366GHz~4.587GHz) at low frequency band , 181MHz(7.854GHz~8.035GHz) at high frequency band. Maximum rejection characteristics of the filter are -54dB at low frequency and -60dB at high frequency.

키워드

wide bandpass filter, step-impedance-open-stub, perturbation, sharp rejection

* 금오공과대학교 전자공학부

접수일자 2008. 11. 06

Ⅰ. 서 론

현재 통신사업은 무선과 유선이 결합되고, 방송과 통신이 결합되고, 산업 간의 결합을 통하여 새로운 산업을 창출하고 있다. 특히 무선통신분야에서는 무선시스템의 고성능화, 소형화, 저가격등을 요구하고 있다. 아울러 통신모듈에서 중요한 역할을 하는 마이크로파 대역의 필터는 광대역, 고 효율, 좁은 차단특성을 갖으면서 동시에 저렴한 가격으로 구현이 가능한 필터가 필요하다. 일반적인 구형공진기 결합구조는 높은 삽입손실 특성을 갖고 있다. 삽입손실의 영향을 줄이기 위해서 공진기 간의 결합구조를 변경하고, 수동소자를 사용하여 필터의 특성을 개선하였다.[1~5] 삽입손실을 줄이기 위하여 공진기는 HTS(High Temperature Superconductor)를 사용하여 필터를 구현하였다[6].

본 논문에서는 고속 무선데이터 통신을 위하여 구형공진기와 계단 임피던스 개방 스터브(Step- Impedance-Open-Stub : SIOS)를 사용하여 삽입손실이 작고, 차단특성이 아주 좁고, 광대역 특성을 갖는 마이크로스트립 대역통과필터를 제안하였다. 본 논문에서 제안한 계단 임피던스 스터브는 일반 0.25λ 스터브 보다 길이를 30% 줄일 수 있고, 또한 스터브의 임피던스의 크기를 변경할 수를 줄일 수 있는 장점을 가지고 있음으로 필터의 특성 개선에 적용할 수 있다. 두 개의 구형공진기에 계단 임피던스 개방 스터브를 적용하여 광대역 특성을 갖는 필터를 연구하였으며, 구형공진기의 이중모드 특성을 사용하여 필터의 특성을 개선하였다. 그리고 구형공진기와 급전구조는 결합구조를 사용하지 않고 직접결합 구조를 사용하여 필터의 삽입손실을 줄일 수 있는 구조를 제안하였다.

Ⅱ. SIOS 특성

스터브는 필터 및 증폭기 등의 설계에서 아주 중요한 소자로 사용하고 있다. 특히 필터에서 스터브는 공진기 사이에서 K-inverter로 사용되며, 스터브의 길이를 변화시켜서 저지대역에서 Notch 주파수를 조정하는데 사용된다[1]. 즉 스터브의 특성임피던스의 감쇄극점을 통과대역으로 이동 시킬 수 있다.

그림 1은 서로 다른 특성임피던스와 전송선로 길이를 갖는 SIOS이다. 좁은 선로는 특성임피던스는 Z_1이고, 전기적인 선로길이는 θ_1이고, 넓은 선로는 특성임피던스는 Z_2이고, 전기적인 선로길이는 θ_2이며, 오른쪽 끝은 개방되어 있다. 선로의 불연속과 개방면의 영향을 무시하였을때, 좁은 선로의 왼쪽 끝에서의 SIOS의 입력 임피던스는

$$Z_{in} = -jZ_1 \frac{Z_2\cot\theta_2 - Z_1\tan\theta_1}{Z_1 + Z_2\tan\theta_1\cot\theta_2} \quad (1)$$

이다. SIOS의 공진은 $Y_{in} = 1/Z_{in} = 0$일때 이다.

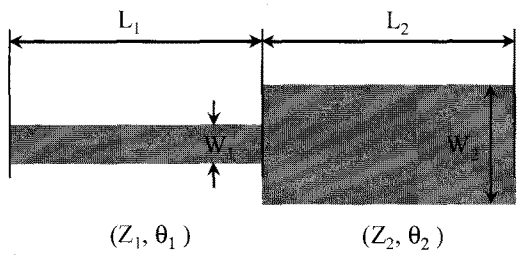


그림 1. SIOS 구조
Fig.1 Structure of Stepped-Impedance-Open-stub

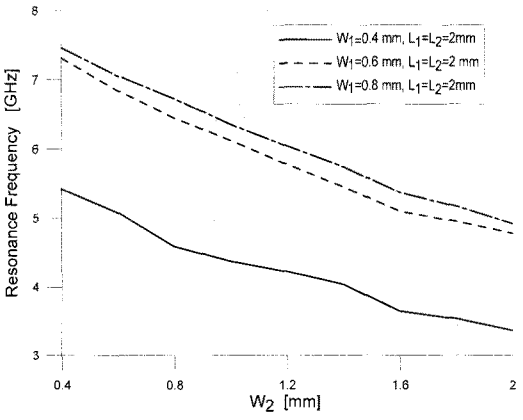


그림 2. SIOS의 선로 폭 W_1의 변화에 의한 공진주파수
Fig. 2 Resonance frequency varying line width W_1 of SIOS

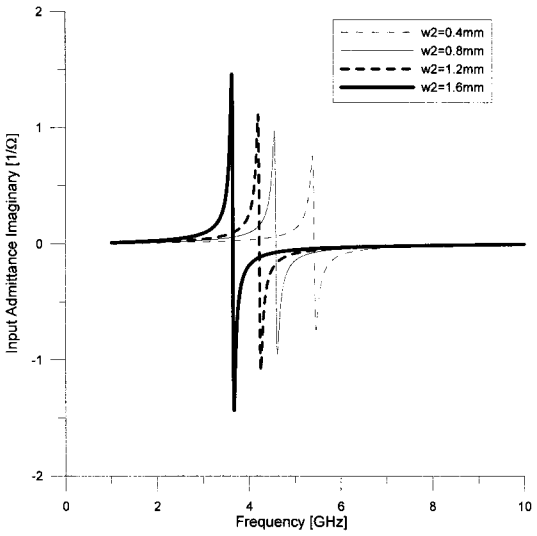


그림 3. W_2의 폭에 따른 SIOS의 입력 어드미턴스 허수값

Flg.3 Input admittance imaginary of SIOS varying W_2

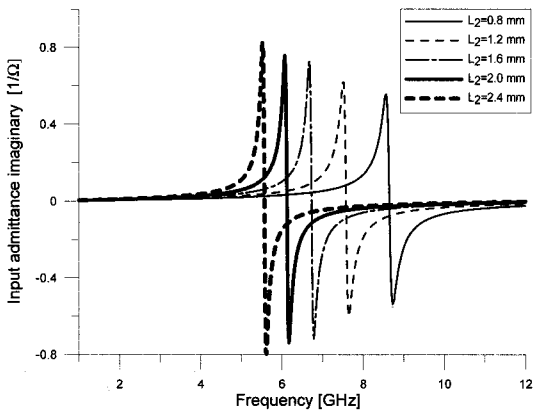


그림 4. L_2의 길이에 따른 SIOS의 입력 어드미턴스 허수값

Flg.4 Input admittance imaginary of SIOS varying L_2

그림 2는 유전율이 9.5, 두께가 0.64mm, 유전손실이 0.0035인 기판을 사용하여 수치해석한 결과이다. 그림1에서 SIOS의 $L_1 = L_2 = 2mm$이고, W_1가 0.4mm, 0.6mm, 0.8mm 인 각각의 경우에 W_2를 0.4mm~2mm 변화하였을 때의 전체 스터브 공진길이에 대한 공진주파수를 그림 2에 나타내였다. 일반적으로 개방 스터브의 0.25λ의 공진길이는 5.23mm이다. 그러나 본 논문에서 제안한 SIOS를 사용하면 전체스터브의 길이를 30%이상 줄일 수 있음을 알 수 있다.

그림 3은 그림 1에서 $L_1 = L_2 = 2mm$, $W_1 = 0.4mm$이고, $W_1 = 0.4mm \sim 1.6mm$ 일때 입력어드미턴스의 허수값을 나타내고 있다. 이때 공진주파수는 W_2의 선로폭이 증가하면 공진점이 낮은 주파수 대역으로 이동한다.

그림 4는 $L_1 = 2mm$, $W_1 = 0.4mm$, $W_2 = 1.2mm$이고, $L_2 = 0.8mm \sim 3.2mm$ 일때 입력어드미턴스의 허수값을 나타내고 있다. 이때 공진주파수는 L_2의 선로폭이 증가하면 공진점이 낮은 주파수 대역으로 이동한다. 따라서 W_2, L_2의 폭과 길이를 변화시킴으로써 공진주파수를 변화시킬 수 있음을 알 수 있다. 따라서 그림 2~그림 4로부터 기존의 0.25λ 스터브에 비하여 SIOS는 공진길이를 소형화를 할 수 있고, 또한 임피던스의 크기를 임의로 조정할 수 있다.

Ⅲ. 구형공진기와 SIOS를 이용한 필터 특성

1. 구형공진기 특성

구형공진기와 급전선 간의 간급 결합과, 급전선의 위치에 따라서 대역통과필터와 대역제거필터를 구현할 수 있다[3~5]. 구형공진기를 사용한 대역통과필터는 구형공진기를 이중모드로 동작하도록 구현하며, 급전선의 위치는 에너지가 최대가 되는 점에 위치하도록 하게함으로서 구현한다. 반면에 대역제거필터는 급전선의 출력단자를 에너지가 최소가 되는 점에 위치하도록 함으로써 구현한다. 그러므로 출력단자에서 구형공진기로부터 에너지를 받을 수 없도록 한다. 그림 4는 구형공진기와 입출력 급전선의 연결은 간급결합(gap coupling) 방법을 사용하지 않고 직접결합(direct coupling) 방법을 사용하였으며, 급전선의 위치는 직각이다. 전체 구형공진기의 공진길이는 L_r은 식(2)와 같이 나타낸다[2].

$$L_r = n\lambda_g \tag{2}$$

여기서 n은 정수이고, λ_g는 관내파장이다.

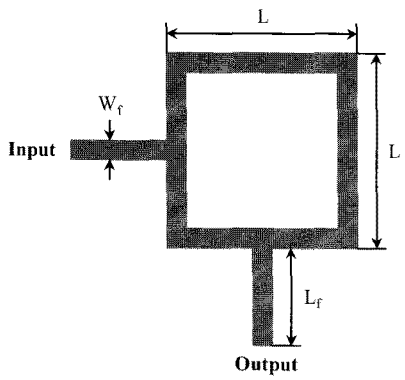


그림 5. 직각 급전구조를 갖는 구형공진기 구조
Fig. 5 Structure of ring resonator having orthogonal feeders

그림 5를 수치해석하기 위한 기판 사양은 앞에서 제시한 것과 동일하다. 구형 공진기의 설계는 기본 모드의 공진주파수는 $f_0 = 6.0GHz$이고, 구형공진기의 전체길이와 폭은 각각 23.48mm, 0.64mm, 급전선의 길이와 폭은 5mm, 0.64mm이다. 그림 6는 수치해석과 실험결과이며, S_{11}과 S_{21}를 나타내며, 이론적인 결과와 실험결과가 일치함을 알 수 있다. 따라서 이 경우는 대역저지필터 특성을 나타냄을 알 수 있다.

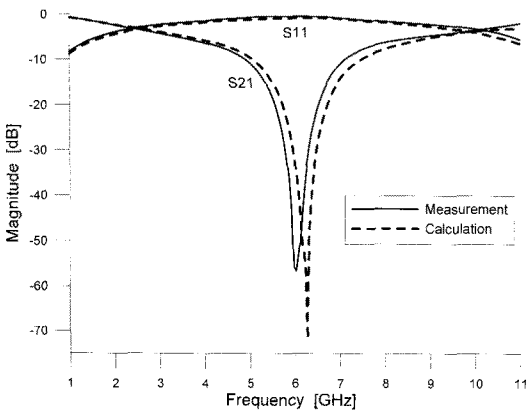


그림 6. 직각 급전구조를 갖는 구형공진기의 수치해석 결과
Fig. 6 Simulation results of ring resonator having orthogonal feeders

2. 구형공진기와 한개의 SIOS를 갖는 구조의 특성

간급결합구조를 갖는 구형 공진기에 0.25λ의 조정 스터브(tuning stub)를 사용한 특성에 대한 특성은 연구하였다[8]. 본 연구에서는 SIOS의 길이와 폭을 변화함으로써 공진점의 특성변화를 연구하고자 한다. 그림 6은 구형공진기에 한 개의 SIOS를 $\theta = 0^\circ$, $\theta = 90^\circ$에 부착하였을 때의 구조이며, 구형공진기의 한 변의 중간에 SIOS를 부착함으로서 비대칭 구조를 갖게 됨으로 공진기에서 축퇴모드를 발생한다.

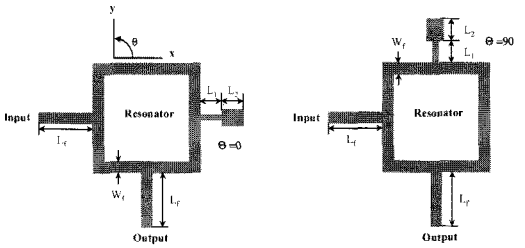


그림 7. 하나의 SIOP를 갖는 구형공진기 구조
Fig.7 Configuration of the rectangular loop resonator with a SIOS

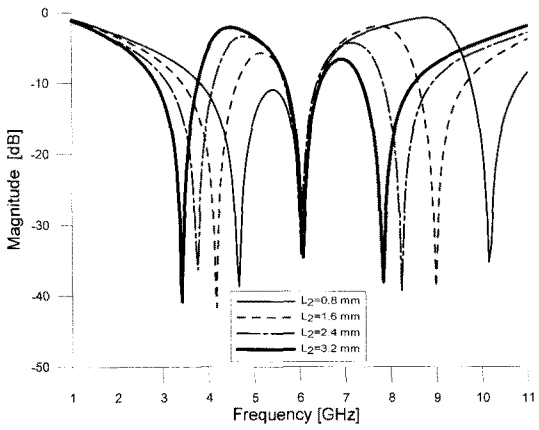


그림 8. $\theta = 0^\circ$에서 하나의 SIOS를 갖는 구형공진기 구조의 S_{21} 특성
Fig. 8 S_{21} characteristics for configuration of the rectangular loop resonator with a SIOS at $\theta = 0^\circ$

그림 8은 구형공진기에 하나의 SIOS를 $\theta = 0^\circ$에 놓고, 그림 1의 SIOS구조의 크기는 $W_1 = 0.4mm$,

$L_1 = 2mm$, $W_2 = 0.8mm$이고, L_2 길이는 0.8mm ~ 3.2mm인 경우에서의 S_{21}이다. 표 1은 SIOP의 L_2의 길이에 대한 공진기의 기본 모드와 축퇴모드의 공진주파수를 나타내고 있다. 그림 8과 표 1로 부터 SIOS의 길이가 증가함으로써 발생하는 축퇴모드(degenerate modes)는 낮은 주파수로 이동하고, 기본 모드는 6GHz에서 동작한다.

표 1. $\theta = 90^{\circ}$에서 하나의 SIOS를 갖는 구형공진기 구조의 극점

Table 1. Poles of the rectangular loop resonator with a SIOS at $\theta = 0^{\circ}$

모드 / L_2의 길이	낮은 주파수의 축퇴모드 공진주파수	기본 모드의 공진주파수	높은 주파수의 축퇴모드 공진주파수
0.8mm	4.66 GHz	6.02GHz	10.14GHz
1.6mm	4.16 GHz	6.07GHz	9.00GHz
2.4mm	3.71 GHz	6.02GHz	8.23GHz
3.2mm	3.41 GHz	6.07GHz	7.83GHz

그림 9은 구형공진기에 $\theta = 0^{\circ}$에서 $W_1 = 0.4mm$, $L_1 = 2mm$, $W_2 = 0.8mm$이고, $L_2 = 2.18mm$인 크기의 SIOS가 있는 경우에 산란계수를 나타내고 있다. 세 개의 감쇄극점은 $f_1 = 3.945GHz$에서 -37.8dB, $f_2 = 6.430GHz$에서 -31.1dB, $f_3 = 8.551GHz$에서 -32.2 dB 이다.

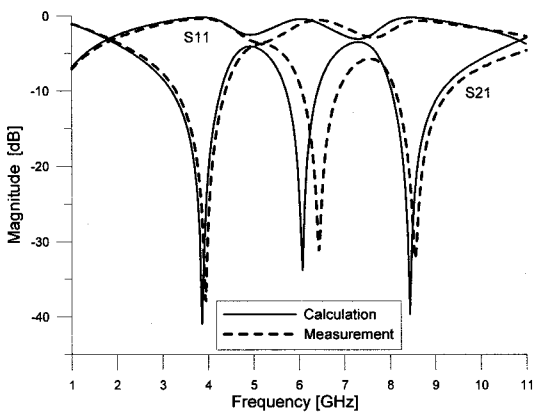


그림 9. $\theta = 0^{\circ}$에서 하나의 SIOS를 갖는 구형공진기의 산란계수

Fig. 9 Scattering Coefficients of the rectangular loop resonator with a SIOS at $\theta = 0^{\circ}$

3. 구형공진기와 두개의 **SIOS**를 사용한 필터 특성

그림 10은 하나의 구형공진기에 두 개의 SIOS를 $\theta = 0^{\circ}$, $\theta = 90^{\circ}$에 부착한 구조이다. 입/출력포트와 두 개의 SIOS로 나누어 지며, 대칭 구조이다. 두 개의 SIOS를 조정함으로서 공진기의 주파수 특성을 조정 할 수 있다.

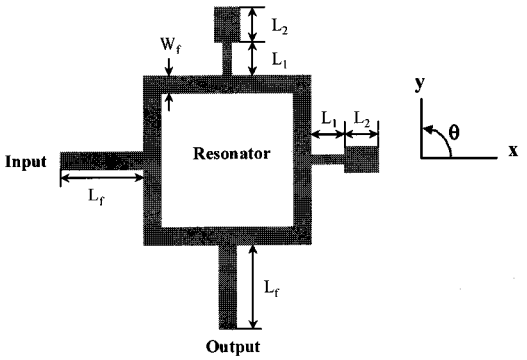


그림 10. 두 개의 SIOS와 구형공진기를 이용한 필터 구조

Fig. 10 Filter configuration having two SIOS and a rectangular

그림 11은 그림 10에서 $W_1 = 0.4mm$, $L_1 = 2mm$, $W_2 = 0.8mm$이고, L_2의 길이에 따른 S_{21}의 특성을 나타내고 있다. 즉 SIOS의 길이가 증가함으로써 낮은 주파수의 극점과 높은 주파수의 극점이 낮은 주파수로 이동하고, 광대역 대역통과 필터를 특성을 나타낸다.

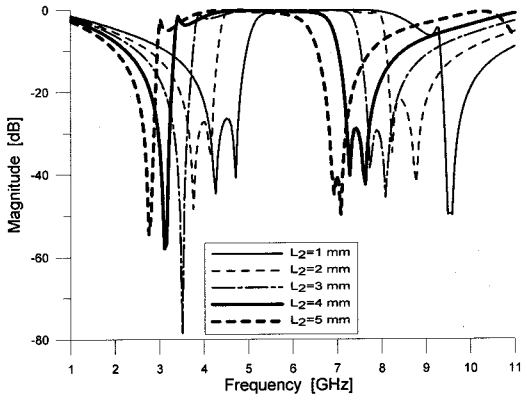


그림 11. $\theta = 0^{\circ}$, $\theta = 90^{\circ}$에서 SIOS의 길이에 따른 구형공진기의 S_{21} 특성

Fig. 11 S_{21} characteristics of rectangular resonators varying line length at $\theta = 0^{\circ}$, $\theta = 90^{\circ}$

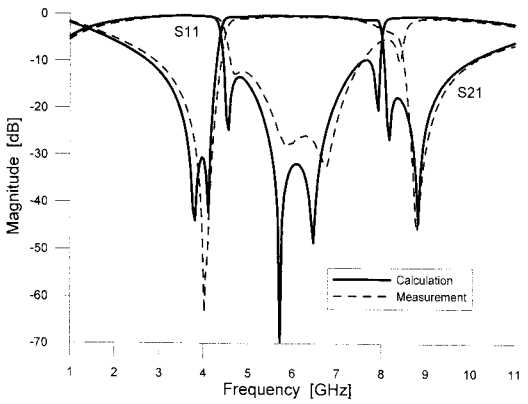


그림 12. $\theta = 0^{\circ}$, $\theta = 90^{\circ}$에서 $L_2 = 1.88mm$의 대역통과필터 특성
Fig. 12 Bandpass filter characteristics of $L_2 = 1.88mm$ at $\theta = 0^{\circ}$, $\theta = 90^{\circ}$

그림12은 $W_1 = 0.4mm$, $L_1 = 2mm$, $W_2 = 0.8mm$, $L_2 = 1.88mm$ 일때 최적화된 대역통과 필터의 주파수 특성이다. 구현된 필터의 3dB 대역은 4.316GHz ~ 8.015GHz 이고, 대역폭은 3.799GHz(61.1%)이다. 주파수 극점은 4.115GHz에서 -42.1dB, 8.899GHz에서 -44.3dB이다. 30dB 차단 특성은 낮은 대역에서 0.181GHz이고, 높은 대역에서 0.144GHz이다. 그리고 계산된 결과와 실험결과의 차이는 입/출력포트의 커넥터에 의한 특성과 제작과정에서 오차로 인한 결과로 사료된다.

Ⅲ. 구형공진기의 이중모드를 이용한 광대역 필터 특성

1. 이중모드 특성

그림 12에서 두 개의 SIOS를 사용한 구형공진기의 주파수 특성은 차단 특성이 우수함을 나타내고 있다. 아주 좁은 차단특성을 갖기 위해서는 구형공진기의 이중모드 특성을 사용해서 구현할 수 있다[7~8]. 구형공진기에 모드발생스터브(Perturbation Stub) 를 45°에 첨가함으로써 구형공진기는 이중모드로 동작한다.

본 논문에서는 그림 13과 같이 구형공진기에 45°에서 사각형 스터브를 사용하였다. 모드발생스터브는 구형공진기의 전자계 특성을 교란시킴으로써 구형 공진기는 이중모드로 동작하고, 발생한 이중 모드는 대역통과 필터의 감쇄특성을 개선시키는 역할을 한다. 모드발생 스터브의 크기를 증가시키거나 감소시킴으로써 스터브의 리액턴스 값이 변함으로써 대역통과필터의 차단특성을 변경할 수 있다.

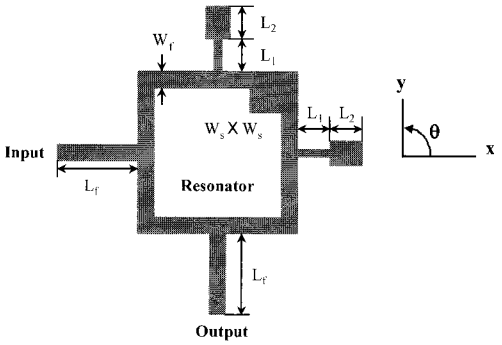


그림 13. 두 개의 SIOS와 이중모드 구형공진기를 이용한 필터 구조
Fig. 13 Filter configuration having two SIOS and a dual mode rectangular resonators

2. 두 개의 이중모드 구형공진기를 사용한 필터 특성

본 논문의 객관성을 입증하기 위해서 그림 14와 같이 두 개의 이중모드 구형공진기를 사용한 최적화된 광대역 대역통과 필터 3가지를 구현하였다. 구형공진기는 주파수 6GHz에서 설계하였으며, 공진기 전체길이의 크기와 폭은 23.48mm, 0.64mm, 입출력 급전선의 길이와 폭은 5mm, 0.64mm, 모드발생스터브는 0.5mm×0.5mm, SIOS의 길이와 폭은 $W_1 = W_3 = 0.4mm$, $L_1 = L_3 = 2mm$, $W_2 = W_4 = 0.8mm$ 이고, $L_2 = 2.10mm$ L_4는 2.10mm, 2.16mm, 2.20mm이다.

그림 15은 L_4가 2.10mm, 2.16mm, 2.20mm 일때 구현된 필터의 주파수 특성이다. $L_4 = 1.94mm$인 경우에 필터의 3dB 대역폭은 52.5%(3.267GHz)이고, 삽입손실은 0.33dB, 30dB 차단특성은 저 주파수 대역에서 221MHz, 고주파수대역에서 0.181MHz이다. 일반적으로 필터의 차단특성 개선하기 위해서 다수의 공진기를 이용하여 필터를 구현하지만 삽입손실이 증가하는 단점을 가지고 있다. 본 논문에서는 제안한 구조는 필터 특성이 다른 구조에 비하여 아주 우수한 결과를 얻을 수 있음을 확인하였다.

표 2. 최적화된 이중모드 구형공진기의 필터 특성
Table 2. Optimized dual mode rectangular resonator filter characteristics

L2 (mm)	구분	대역폭(GHz)	최소삽입손실 (dB)	극점 주파수(GHz(dB))		30dB 차단특성(GHz)	
				저 주파수대역	고 주파수대역	저 주파수대역	고 주파수대역
1.94	이론 값	4.587-7.854 BW=3.267	-0.33	3.261(-50.0)	8.587(-60.2)	4.366-4.587 BW=0.221	7.854-8.035 BW=0.181
	측정 값	4.647-7.893 BW=3.246	-0.59	3.284(-47.9)	9.256(-54.8)	4.066-4.647 BW=0.581	7.893-8.374 BW=0.481
2.04	이론 값	4.507-7.814 BW=3.307	-0.33	3.261(-52)	8.58(-63.2)	4.216-4.507 BW=0.291	7.814-8.085 BW=0.271
	측정 값	4.577-7.983 BW=3.406	-0.65	3.284(-47.4)	7.31(-56.2)	4.145-4.577 BW=0.432	7.983-8.424 BW=0.441
2.10	이론 값	4.547-7.804 BW=3.257	-0.31	3.261(-51.0)	9.190(-66.2)	4.246-4.577 BW=0.331	7.804-7.984 BW=0.180
	측정 값	4.510-8.010 BW=3.500	-0.61	3.284(-49.6)	9.163(-57.2)	5.156-4.510 BW=0.646	8.010-8.324 BW=0.314

표 2는 본 논문에서 구현한 최적화된 이중모드 구형 공진기의 필터 필터의 계산값과 실험값이다. 이론값과 실험값사이의 오차는 커넥터와 기판의 제작상의 오차이다.

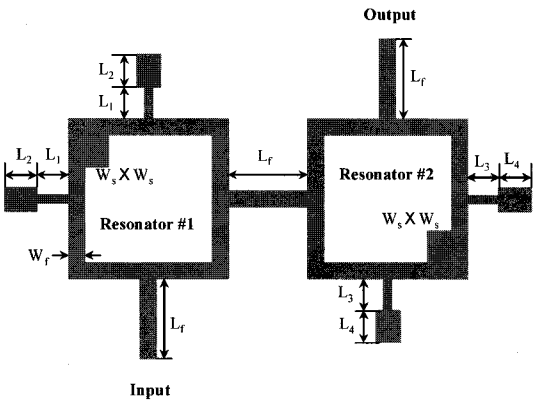
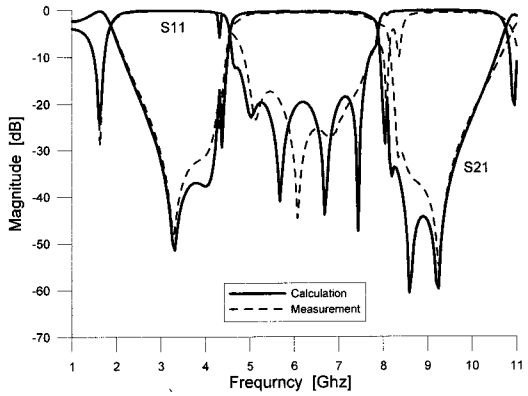
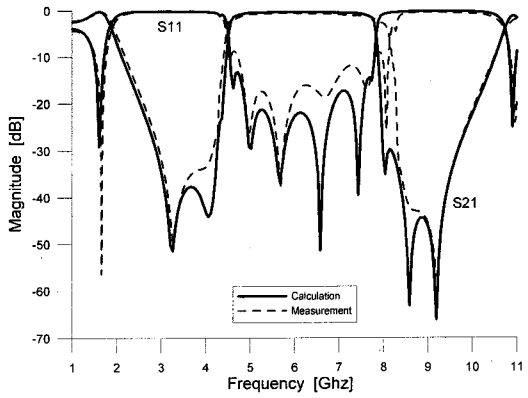


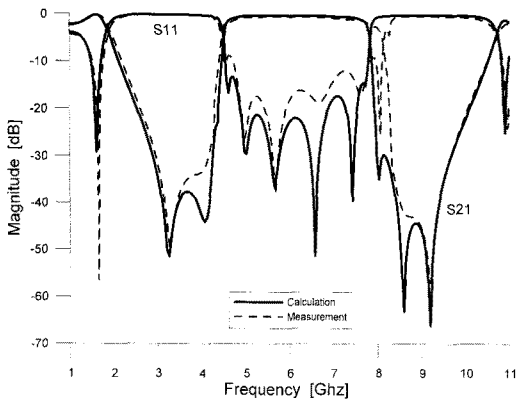
그림 14. 두 개의 이중모드 구형공진기를 사용한 광대역통과 필터 구조
Fig. 14 Structure of wideband pass filter with two dual mode rectangular resonators



(a)



(b)



(c)

그림 15. 최적화된 이중모드 구형 공진기 필터의 주파수 특성 (a) L2=1.94mm (b) L2=2.04mm (c) L2=2.10mm

Fig. 15 Frequency characteristics of dual mode rectangular resonator filter (a) L2=1.94mm (b) L2=2.04mm (c) L2=2.10mm

Ⅳ. 결론

본 논문에서는 구형공진기와 SIOS를 사용하여 삽입손실이 작고, 차단특성이 아주 좁고, 광대역 특성을 갖는 마이크로스트립 대역통과필터를 제안하였다. 제안한 계단 임피던스 스터브는 일반 0.25λ보다 30%의 길이를 줄일 수 있고, 또한 스터브의 임피던스의 크기를 변경할 수를 줄일 수 있는 장점이 있음으로 필터의 특성 개선에 적용할 수 있다. 또한 구형공진기에 두 개의 계단 임피던스 개방 스터브를 적용하여 광대역 특성을 갖는 필터에 관하여 연구하였으며, 구형공진기의 이중모드 특성을 사용하여 필터의 특성을 개선하였다. 그리고 구형공진기와 급전구조는 결합구조를 사용하지 않고 직접결합으로써 필터의 삽입손실을 줄일 수 있는 구조를 제안하였다.

본 논문의 객관성을 입증하기 위해서 최적화된 광대역 대역통과 필터를 3가지를 구현하였다. 구형공진기는 주파수 6GHz에서 설계하였으며, 공진기 전체길이의 크기와 폭은 23.48mm, 0.64mm, 입출력 급전선의 길이와 폭은 5mm, 0.64mm, 모드발생스터브는 0.5mm×0.5mm, SIOS의 길이와 폭은 이 $W_1 = 0.4mm$, $L_1 = 2mm$, $W_2 = 0.8mm$ 이고, L_2는 2.10mm, 2.16mm, 2.20mm이다. $L_4 = 1.94mm$인 경우에 필터의 3dB 대역폭은 52.5%(3.267GHz)이고, 삽입손실은 0.33dB, 30dB 차단특성은 저 주파수 대역에서 221MHz, 고주파수대역에서 0.181MHz이다. 최대 차단특성은 저주파 대역에서 -54dB, 고주파 대역에서 60dB이다. 일반적으로 차단특성을 개선하기위해서 다수의 공진기를 이용하여 필터를 구현하지만 삽입손실이 증가하는 단점을 가지고 있다. 본 논문에서는 제안한 구조는 필터 특성이 다른 구조에 비하여 아주 우수한 결과를 얻을 수 있음을 확인하였다.

참고문헌

1. J.R. LEE, J.H. Cho, S.W. Yun, " New Compact Bandpass filter Using Microstrip $\lambda/4$ Resonators with Open Stub Inverter", IEEE Microwave and Guided Wave Letters, Vol. 10, No.12, pp.526~527, Dec. 2000
2. L.-H. Hsieh and K. Chang, ""Compact dual-mode elliptic-function bandpass filter using a single ring resonator with one coupling gap,"" *Electron. Lett.*, vol. 36, no. 19, pp. 1626 - -1627, Sept. 2000.
3. L. Zhu and K. Wu, ""A joint field/circuit model of line-to-ring coupling structures and its application to the design of microstrip dual-mode filters and ring resonator circuits,"" *IEEE Trans. Microwave Theory Tech*, vol. 47, pp. 1938 - -1948, Oct. 1999.
4. M. Matsuo, H. Yabuki, and M. Makimoto, ""Dual-mode steppedimpedance ring resonator for bandpass filter applications,"" *IEEE Trans. Microwave Theory Tech.*, vol. 49, pp. 1235 - -1240, July 2001.
5. L.-H. Hsieh and K. Chang, "Dual-mode quasi-elliptic-function bandpass filters using ring resonators with enhanced-coupling tuning stubs," *IEEE Trans. Microwave Theory Tech.*, vol. 50, pp. 1340 - -1345, May 2002.
6. J. S. Hong, M. Lancaster, D. Jedamzik, and R. B. Greed, "On the development of superconducting microstrip filters for mobile communications applications," *IEEE Trans. Microwave Theory Tech.*, vol. 47, pp.1656 -

-1663, Sept. 1999.
7. K. Chang, *Microwave Ring Circuits and Antennas*. New York: Wiley, 1996.
8. 이영훈 외, "무선데이터 통신을 위한 고효율 광대역 마이크로스트립 대역통과 필터 특성에 관한 연구", 전기전자학회논문지, 12(4), pp. 225- 232, 2008년 12월.

저자소개

이영훈(Young Hun Lee)

1986.2. 광운대학교 졸업(공학사)
1988.8. 연세대학교 대학원 졸업 (공학석사)
1995.2. 연세대학교 대학원 졸업 (공학박사)
1995.3.~2002.2. 호남대학교 전파공학과
2002.3.~현재 금오공과대학교 전자공학부 부교수
2009.4.~현재 금오공과대학교 공학교육혁신센터장
※관심분야 : RF 수동 및 능동 부품 설계, RFIC, EMI/EMC, 안테나 해석 및 설계 등