

Non-decaying 모드 해석을 이용해서 설계한 원통형 유전체 공진기 여파기의 최적 결합 방법에 대한 분석

(An Analysis in Optimum Coupling Method of Cylindrical Dielectric Resonator Filter Designed by Non-decaying Mode Analysis)

李元熙*, 朴章遠**, 金泰辛*, 許正*, 李相永***

(Won-Hui Lee, Chang Won Park, Tai Shin Kim, Jung Hur, and Sang Young Lee)

요약

본 논문에서는 유전체가 삽입된 공진기를 이용하여 C-band용 대역통과 여파기를 설계, 제작하였다. 공진기의 높이는 인접 유전체 공진기의 도파관 차단 주파수로부터 결정된다. 공진기의 지름은 도체 손실을 고려하여 유전체의 두 배로 결정하였다. 유전체 공진기의 공진주파수는 비소멸(non-decaying) 모드 해석법으로 계산하였다. 일반적으로 원통형 유전체 공진기의 공진주파수는 Cohn 모델로 해석하였는데, 이것은 공진기의 벽과 유전체벽 사이에서 전자파가 소멸(decaying)된다는 가정 하에 해석한 방법이다. 그러나, 이 방법은 근사적인 해석방법이다. 외부양호도(external quality factor)인 Q_{ex} 는 Ansoft의 Maxwell 시뮬레이션 툴을 사용하여 결정하였다. 유전율 45인 유전체를 사용하여 설계한 대역통과 여파기는 5.065GHz의 중심주파수를 가졌다. 삽입손실은 1dB, 밴드 폭은 20MHz, 감쇠 특성은 30dB($f_0 \pm 15$ MHz)로 설계목표에 만족함을 알 수 있다.

Abstract

In this paper, we designed and fabricated C-band bandpass filter using dielectric resonators. From waveguide cutoff frequency which applied the region between adjacent dielectric resonators, the height of cavity is determined. The cavity's diameter is determined to the twice of dielectric resonator's diameter considering the conductor loss. The resonant frequency of the DR-cavity is calculated with non-decaying mode analysis. Conventionally, cylindrical dielectric resonator is analysed by Cohn's model which use the decaying mode in the region between dielectric resonator wall and circular cavity wall, which is an approximated method. The external quality factor, Q_{ex} has found with simulation result using Ansoft's Maxwell simulation tool. The designed filter using dielectric resonators with dielectric constant of 45 has the passband center at 5.065GHz. The bandpass filter using dielectric resonators has about 1dB insertion loss, 20MHz bandwidth and more than 30dB attenuation at $f_0 \pm 15$ MHz

* 正會員, 建國大學校 電子·情報通信工學科

(Dept. of Electronics, Information & Communication Eng., Konkuk University)

** 正會員, 해리컴(주)

*** 正會員, 建國大學校 物理學科

(Dept. of Physics, Konkuk University)

接受日: 2001年2月13日, 수정완료일: 2001年6月8日

I. 서론

유전체 공진기(DR: Dielectric Resonator)를 사용한 여파기는 1980년대 초에 10,000이상의 높은 Q(quality factor) 값과 작은 크기 때문에 위성 통신 등에 널리 사용되기 시작하였다. 또한 유전체 공진기 여파기는 매우 낮은 손실과 높은 온도 안정성 때문에 위성과 이동통신을 포함한 여러 분야에서 응용되고 있다^[1]. 높은 Q 값을 갖는 유전체 공진기는 저지 대역(rejection band)에서 아주 가파르게 떨어지는 특성을 가지고 있어, 일정 대역폭의 대역 효율을 높이기 위해서 사용된다. 우리나라에서는 PCS 사업을 시작하면서, 중계기용 여파기로서 대역효율을 최대 한도로 높일 수 있는 SAW(Surface Acoustic Wave) 여파기를 다수 업체에서 사용하고 있다. SAW 여파기는 우수한 특성을 가지는 반면 GHz 대역에서 구현이 힘들다는 문제점이 있어서 GHz 대역에서 직접 사용하기 힘든 실정이다. 최근 여러 논문에서 높은 Q 값을 갖는 유전체 공진기를 이용해서 여러 주파수 대역에서의 여파기를 설계하는 방법에 대해서 연구되고 있다.

본 논문에서는 Cohn 모델^[2]을 사용하여 유전체 공진기 구조를 해석했던 기존의 여파기 설계 방법과는 달리 유전체 공진기와 도체면 사이의 영역을 비소멸(non-decaying) 모드 표현으로 가정하여 해석한 방법을 여파기 설계방법에 적용하였다. 비소멸 모드 표현은 정확한 전자계 표현식을 이용한 방법으로 공진주파수 계산과 측정 오차가 유전체 봉이 삽입된 경우는 0.3%, 유전체 디스크가 삽입된 경우는 1.6%로 매우 정확한 해석법이다^{[3],[4]}. 비소멸 모드 방법으로 공진주파수를 결정하는 것은 기존의 유전체 공진기 여파기가 많은 튜닝(tuning) 과정을 거쳐야 하는 것을 개선할 수 있다. 그리고, 입·출력 커플링을 위해 다양한 결합 방법에 대한 시뮬레이션 결과를 통해 가장 적합한 입·출력 커플링 방법을 찾았다.

II. 유전체 공진기와 입·출력단의 결합

유전체 공진기를 이용하여 여파기를 제작하기 위해서는 유전체 공진기와 입·출력단의 결합을 나타내는 외부양호도(external quality factor), Q_{ex} 를 어떤 디자인으로 구현할 것인지를 고려해야 한다. 유전체 공진기

와 입·출력단의 결합은 프로브, 마이크로스트립 선로, 도파관 등을 이용해 결합시킨다. 마이크로스트립 선로를 이용한 결합은 마그네틱 커플링을 이용하여 커플링을 시키는 방법으로 IC등가 회로^{[5]-[7]}를 이용하여 Q_{ex} 의 값을 쉽게 거리의 함수로 바꿀 수 있다. 프로브를 이용한 커플링 방법은 보통 유전체 높이의 1/2되는 지점에 위치시켜 전계와 자계 모두의 커플링을 이용한다. 프로브를 이용한 커플링 방법은 수식에 의해 구한 커플링 옵션이 잘 일치하지 않는 단점이 있어 시뮬레이션 방법에 주로 의존한다. 도파관을 이용한 결합 방법은 전계나 자계를 이용하여 커플링 시키며 비교적 계산에 의해 구한 값과 잘 일치한다. 그러나 입·출력단 커플링에 사용하기에는 실제 회로 상에 구현하기가 어려운 단점을 가지고 있어서, 입·출력 커플링보다는 공진기간 커플링의 해석이나 적용에 사용된다. 유전체 공진기의 경우 모드별 공진주파수가 다르게 나타나 설계 주파수 근처에서 원하지 않는 주파수 성분이 나타날 수 있기 때문에 설계에 응용할 수 있는 공진 모드를 올바르게 급전하는 것은 매우 중요하다.

III. External quality factor, Q_{ex} 의 계산

외부양호도, Q_{ex} 는 시뮬레이션이나 직접적인 실험을 통해서 얻어질 수 있다. 일반적으로 Q_{ex} 는 다음과 같이 정의된다^[5].

$$\frac{1}{Q_{ex}} = \frac{1}{Q_U} - \frac{1}{Q_L} \quad (1)$$

Q_L 은 3dB·방법으로 측정할 수 있다. 즉, $Q_L = f_0 / \Delta f_{3dB}$ 로 계산된다. 여기서, f_0 는 공진주파수를, Δf_{3dB} 는 3dB 대역폭을 의미한다. 그리고 무부하시의 Q 값인 Q_U 는 다음과 같이 계산된다^[8].

$$Q_U = Q_L(1 + \beta_1 + \beta_2) \quad (2)$$

여기서,

$$\beta_1 = \frac{1 - S_{11}(f_0)}{S_{11}(f_0) + S_{22}(f_0)} \quad (3)$$

$$\beta_2 = \frac{1 - S_{22}(f_0)}{S_{11}(f_0) + S_{22}(f_0)} \quad (4)$$

이다. 그러므로, 외부양호도, Q_{ex} 의 식은 다음과 같이

정리된다.

$$\begin{aligned}
 Q_{ex} &= \left(\frac{1}{Q_U} - \frac{1}{Q_L} \right)^{-1} \\
 &= \left\{ \frac{\Delta f_{3dB}}{f_0} \frac{S_{11}(f_0) + S_{22}(f_0)}{S_{11}(f_0) + S_{22}(f_0) + 2 - S_{11}(f_0) - S_{22}(f_0)} - \frac{\Delta f_{3dB}}{f_0} \right\}^{-1} \\
 &= \left[\frac{\Delta f_{3dB} f_0 (S_{11}(f_0) + S_{22}(f_0))}{2f_0} - \frac{\Delta f_{3dB}}{f_0} \right]^{-1} \\
 &= \frac{2f_0}{[(S_{11}(f_0) + S_{22}(f_0))f_0 - 2]\Delta f_{3dB}}
 \end{aligned}
 \tag{5}$$

IV. 유전체 공진기 결합

유전체 공진기 결합은 그림 1과 같이 자계에 의한 결합으로 표현할 수 있다. 유전체 공진기 간 자계의 결합은 자계의 크기와 방향을 동일하게 여진한 짝모드(even mode)와 자계의 크기는 동일하나 방향이 서로 반대가 되도록 여진한 홀모드(odd mode)의 두 가지 자계들로 존재한다. 유전체 공진기는 그림 2와 같이 인덕턴스 L과 커패시턴스 C를 갖는 공진회로로 등가화시킬 수 있다.

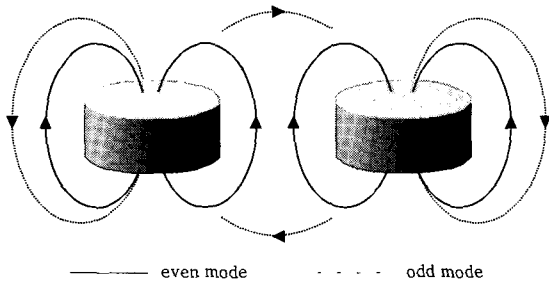


그림 1. 유전체 공진기 결합
Fig. 1. Coupling of dielectric resonators.

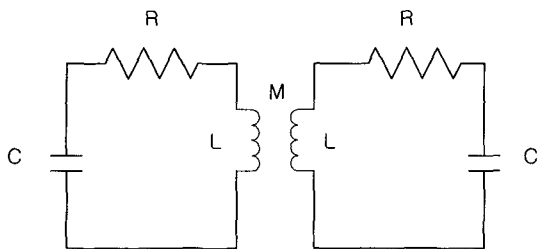


그림 2. 유전체 공진기 결합 등가회로
Fig. 2. Equivalent circuit of coupled dielectric resonators.

유전체 공진기 결합은 자체 결합이므로 인덕턴스 간의 결합으로 가정할 수 있고, 결합계수 k는 다음과 같이 상호 인덕턴스와 자기 인덕턴스 간의 비로 나타낼 수 있다.

$$k = \frac{L_m}{L} = \frac{V_2 I_1}{j 2 \omega W_{m1}} \tag{6}$$

V. 유전체 공진기를 이용한 여파기의 설계 및 제작

V-1. 여파기의 설계 목표

본 논문에서는 유전체가 삽입된 공진기에서 비소멸 모드 표현으로 해석된 모델^{[3],[4]}을 이용하여 공진주파수를 구하였다.

표 1. 여파기의 설계 목표 및 유전체의 제원
Table 1. Design specifications of filter and resources of dielectric resonator.

항 목	설계목표	항 목	규 격
중심주파수(f_0)	4.953GHz	항 목	세라믹 (유전율 45)
대역폭(BW)	20MHz		
삽입손실	1dB	직경(D)	10.6mm
저지대역 감쇠 ($f_0 \pm 15\text{MHz}$)	30dB	높이(H)	5.4mm
차수	3	온도계수 (ppm/°C)	± 1
응답특성	체비세프		

그리고, 다양한 포트 시뮬레이션을 통해 원하는 Q_{ex} 를 구할 수 있는 급전 방법을 설정하고, 이 결과를 차단 특성을 갖는 도파관에 적용하여 여파기를 설계하였다. 먼저, 비유전율 $\epsilon_r = 45$ 인 유전체 공진기를 사용한 공진기를 비소멸 모드 해석 모델에 근거하여 필터 설계를 하였고, 최적 결합 특성을 갖는 포트를 찾고자 하였다. 4.953GHz에서 중심주파수를 갖고 20MHz의 대역폭을 갖는 여파기를 설계하였으며, 설계목표 및 유전체 공진기의 제원은 표 1에 있다.

V-2. 유전체 공진기가 삽입된 공동의 크기 결정

공동의 높이는 유전체 높이의 2~3배 정도 되어야 손실이 비교적 적게 된다. 공동의 지름은 유전체 공진

기 지름의 약 1.5배 이상으로 해주어야 손실이 적다. 본 논문에서는 공동의 높이를 9mm로 설정했고, 공동의 지름을 24mm로 설정했다. 이는 공동의 윗면에서의 손실에 대한 성분과 공진주파수의 정확도 사이에서 적절한 값을 취한 것이다. 공동의 지름은 유전체 공진기에 비해 2배 이상 충분히 크게 하여 옆면에서의 손실을 줄이면서 적절한 여기 방법을 찾기 위한 공간적인 여유를 두었다.

V-3. 유전체가 삽입된 공동의 공진주파수 계산

그림 3과 같이 유전체 디스크가 삽입되었을 때 유전체와 도체 사이의 영역에서 비소멸 모드 표현으로 가정할 경우에 공진주파수를 계산할 수 있다^[4]. 이렇게 구한 공진주파수에 대한 그래프가 그림 4와 그림 5에 나타나 있다. 그림 4는 공동의 반지름을 12mm로 고정시킨 상태에서 공동의 높이 변화에 따른 공진주파수의 변화를 그래프화한 것이다.

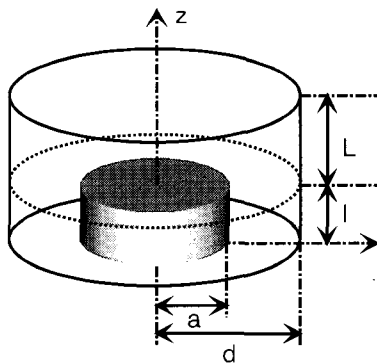


그림 3. 유전체가 삽입된 원통형 공진기
Fig. 3. The cylindrical cavity resonator with dielectric-disc.

그림 5는 공동의 높이를 9mm로 고정시킨 상태에서 반지름 변화에 따른 공진주파수의 변화를 그래프화한 것이다. TE_{010} 가 4.953GHz일 때의 주파수에서 공진할 때 공동의 반경, 높이 및 계산된 공진주파수는 표 2와 같다.

V-4. 공진기와 프로브 간의 커플링

유전체 공진기의 경우 모드별 공진주파수가 다르게 나타나 설계 주파수 근처에서 원하지 않는 주파수 성분이 나타날 수 있기 때문에 설계에 응용할 수 있는 공진 모드를 올바르게 급전하는 것이 중요하다.

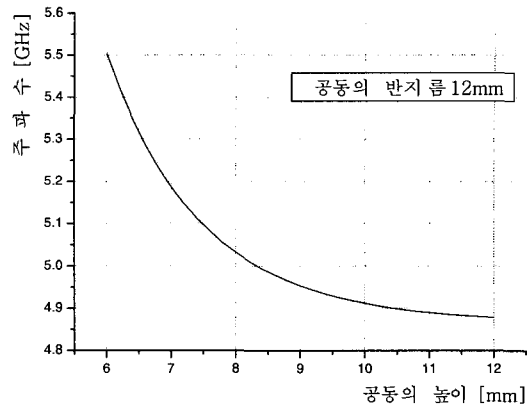


그림 4. 공동의 높이에 따른 공진주파수
Fig. 4. Resonant frequencies by the vertical direction of cavity.

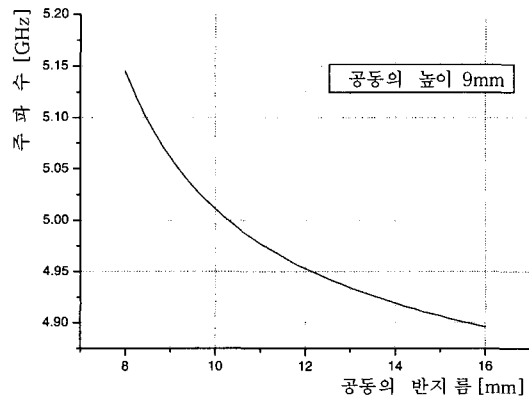


그림 5. 공동의 반지름에 따른 공진주파수
Fig. 5. Resonant frequencies by the radial direction.

따라서, 본 논문에서는 Ansoft사의 Maxwell 7.0을 이용한 시뮬레이션을 통해 단일 공진기 상에서 가장 적절한 급전 방법을 찾고자 하였다.

표 2. 공진기 치수 및 그에 따른 공진주파수
Table 2. The number of inches of cavity and resonant frequency.

항 목	계산 결과
공동의 반경(d)	12mm
공동의 높이(L+l)	9mm
계산된 공진주파수	4.953GHz

여기서 공동은 시뮬레이션의 편이를 위해 완전도체로 가정하여 시뮬레이션 하였다. 그림 6에서 그림 11까지는 각 급전모델에 대해서 시뮬레이션을 통해 찾은 가장 좋은 결과들을 담고 있다. 이 결과들을 통해 근사적으로 Q_{ex} 가 설계치인 298.25에 근사한 값을 나타내는 급전 방법들을 선택하여 급전시켰다.

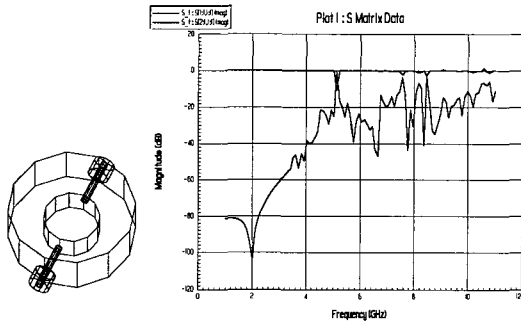


그림 6. 1자형 급전 : 1.3mm 지름을 갖는 프로브가 DR과 1mm 간격을 갖는 경우
Fig. 6. Coupling line of 1 shape.

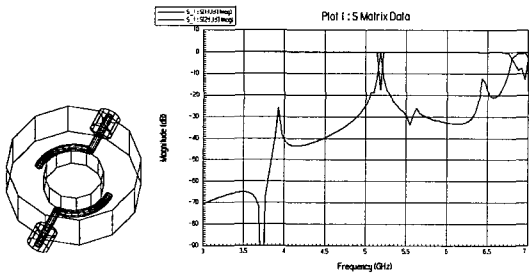


그림 7. 호 급전 : 유전체와 2mm 간격을 두고, 유전체를 따라 20° 회전 시킨 경우
Fig. 7. Coupling line of arc shape.

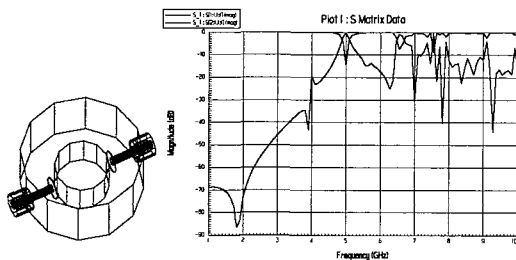


그림 8. 원판 급전 : 유전체와 1mm 떨어진 곳에서 원판 지름=4mm, 두께=0.7mm인 경우
Fig. 8. Coupling line of a circle plate shape.

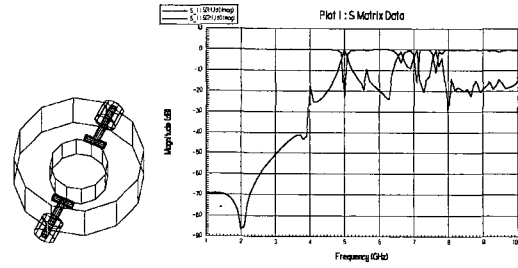


그림 9. T자형 급전 : 유전체와 1mm 떨어진 곳에서 8mm길이의 바가 달려있는 경우
Fig. 9. Coupling line of T shape.

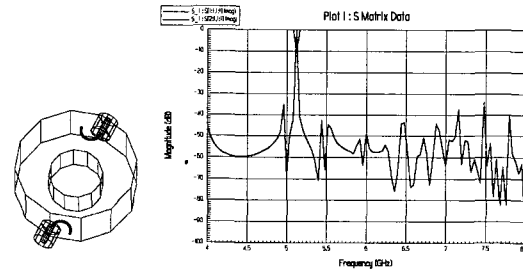


그림 10. U자형 급전 : 1mm의 반경을 갖고 접지
Fig. 10. Coupling line of U shape.

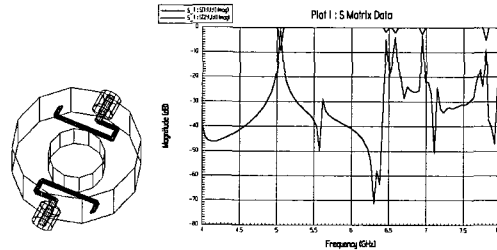


그림 11. 변형된 U자형 급전 : 유전체와 1mm 간격
Fig. 11. Coupling line of transformed U shape.

1자형 급전의 경우 길이 변화와 상관없이 스푸리어스(spurious) 공진이 유난히 심하게 나타났다. 호 급전의 경우 특정 각도에서는 특성이 좋게 나타나지만 조급만 벗어나게 되면 쉽게 특성이 틀어지는 단점을 가지고 있었다. 원판형 급전의 경우도 대체적으로 다른 스푸리어스 모드의 공진이 심했고, T자형 급전의 경우, 길이 변화에 덜 민감하고 주 공진모드에서의 공진이 강하게 일어나지만 Q_{ex} 값이 좋지 않았다. U자형 급전의 경우 적절한 거리로 접지를 잘 시키면 다른 모드의 공진을 막고 원하는 공진 성분만을 얻을 수 있었다. 그러나 프로브 끝단의 접지로 말미암아 결합량이 비교적

작을 것으로 예측된다. 그림 11의 형태는 U자형 급전에서 야기될 수 있는 결합량의 부족을 극복하기 위해서 개량된 방법이다. 다른 모드의 공진을 일부 막아주면서 충분한 결합량을 얻을 수 있었다.

V-5. 3단 여파기 시뮬레이션

앞서 계산된 모든 여파기의 제원을 가지고 여파기의 시뮬레이션을 하였다. 프로브 급전은 앞서의 시뮬레이션에서 가장 근사적인 Q_{ex} 를 나타내는 개량된 U자형 방법을 사용하였다. 그림 12는 여파기의 시뮬레이션 구조 및 그에 따른 결과를 나타낸다.

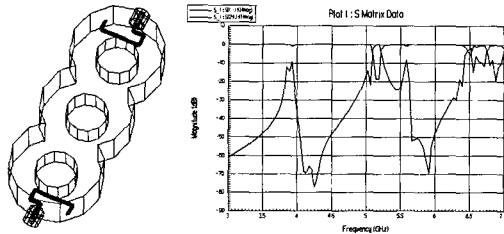


그림 12. 여파기의 구조 및 시뮬레이션 결과
Fig. 12. Structure of filter and simulated response.

VI. 실험 및 고찰

그림 13은 제작된 여파기의 그림을 보여주고 있다. 계산된 공진주파수와 결합계수에 포함된 약간의 오차를 극복하기 위하여 각각을 보정할 수 있는 보정용 나사를 부착하였다. 그림 13에서 굵은 나사부분은 공진주파수의 보정을 위해, 그리고 가는 나사는 결합계수의 보정을 위해 준비된 것이다. 여파기의 측정은 HP사의 8510C 네트워크 분석기(Network Analyzer)를 사용하였다. 프로브의 급전은 앞서의 시뮬레이션에서 설계 값과 비교적 근사한 Q_{ex} 값을 나타내는 개량된 U자형 급전을 사용하였다.

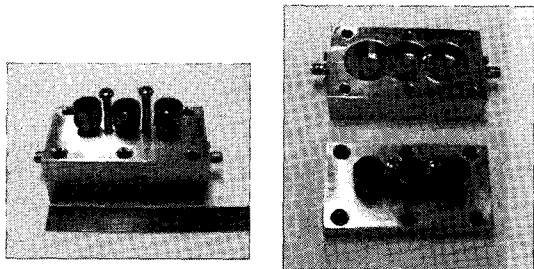


그림 13. 제작된 여파기
Fig. 13. A fabricated filter.

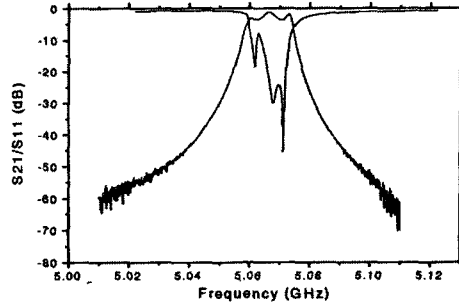


그림 14. 제작된 여파기의 실측 특성
Fig. 14. Measured response of fabricated filter.

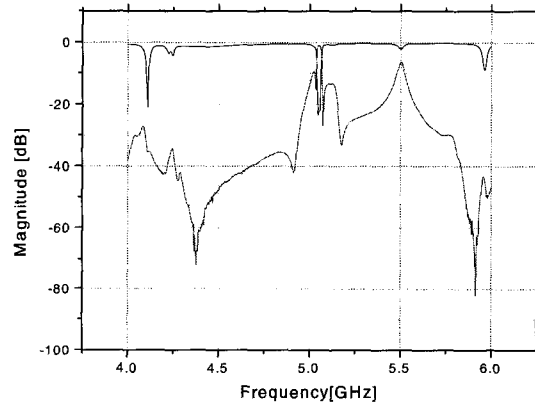


그림 15. 제작된 여파기의 의사응답특성
Fig. 15. Spurious response of fabricated filter.

그림 14, 그림 15의 측정 결과를 보면, 중심주파수는 5.065GHz, 삽입손실은 1dB, 밴드폭은 20MHz, 감쇠특성은 30dB($f_0 \pm 15\text{MHz}$)로 설계목표에 만족함을 알 수 있다. 그러나, 설계된 중심주파수에서 대략 2%정도 상향된 주파수 특성을 나타내고 있다. 이는 비소멸 모드 해석법이 유전체 디스크가 삽입된 경우의 공진주파수 계산 시 1.6%의 오차를 발생^[4]하기 때문에 제작 과정에서 1.6%의 오차를 보상하여 제작하면 될 것이다.

VII. 결론

본 논문에서는 유전체 공진기를 사용하여 체비셰프 응답을 갖는 3-pole 유전체 공진기 여파기를 비소멸 모드 해석법을 적용하여 설계하였다. 제작 결과 중심주파수는 5.065GHz, 삽입손실은 1dB, 밴드 폭은 20MHz, 감쇠특성은 30dB($f_0 \pm 15\text{MHz}$)로 설계 목표에 만족함을 알 수 있다. 그러나, 설계된 중심주파수에서 대략 2% 정도 상

향된 주파수 특성을 나타내고 있다. 이는 비소멸 모드 해석법이 공진주파수의 계산시 1.6%의 오차를 발생하기 때문에 제작 과정에서 1.6%의 오차를 보상하여 제작하면 될 것으로 사료된다.

참 고 문 헌

[1] D. Kajfez and P. Guillon, Dielectric Resonator, Artech House, 1986.

[2] S. B. Cohn, "Microwave bandpass filters containing high-Q dielectric resonators", IEEE Trans. Microwave Theory and Tech., vol. MTT-16, pp. 218-227, April 1968.

[3] 최홍주, 이원희, 허정, 최광재, 이상영, "동심 유전체 봉이 삽입된 원통형 공진기의 정확한 전자계 표현", 한국전자과학회논문지, 제 11권 제 8호, pp. 1399-1406, 2000년 12월

[4] 최홍주, 이원희, 허정, 최광재, 이상영, "유전체 디스크가 삽입된 원통형 공동 공진기에서 Contour Graph 방법을 이용한 공진주파수 계산", 한국전자

과학회논문지, 제 11권 제 8호, pp. 1420-1427, 2000년 12월

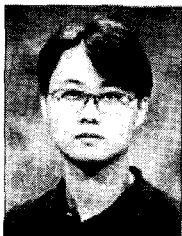
[5] D. M. Pozar, Microwave Engineering, Addison Wesley, 1993.

[6] G. Matthaei, L. Young, and E. M. T. Jones, Microwave Filters, Impedance Matching Networks, and Coupling Structures, Artech House, 1980.

[7] J. K. Plourde and C. L. Ren, "Application of Dielectric Resonators in Microwave Components", IEEE Trans. Microwave Theory and Tech., Vol. MTT-29, No. 8, pp. 754-770, August 1981.

[8] S. Y. Lee et al., "Use of a Dielectric-Loaded Cylindrical Cavity in Measurements of the Microwave Surface Resistances of High-Tc Superconducting Thin Films", IEEE Transaction on Applied Superconductivity, 1997.

저 자 소 개



李元熙(正會員)
 1998년 2월 : 영동대학교 전자공학과(공학사). 2000년 2월 : 건국대학교 대학원 전자·정보통신공학과(공학석사). 2000년~현재 : 건국대학교 대학원 전자·정보통신공학과 박사과정. <주관심분야> 안테나 및 전파전파, 마이크로파 회로 설계, 마이크로파 소자 등



許正(正會員)
 1981년 서울대학교 전자공학과(공학사), 1983년 서울대학교 대학원 전자공학과(공학석사), 1991년 서울대학교 대학원 전자공학과(공학박사), 현재 : 건국대학교 전자·정보통신공학과 교수, <주관심분야> 안테나 및 전파전파, 마이크로파 회로설계, 마이크로파 소자 등



金 泰 辛(正會員)

2000년 8월 : 건국대학교 전자·정보통신공학과(공학사). 2000년 8월~현재 : 건국대학교 전자·정보통신공학과 석사과정. <주관심분야> 안테나, 마이크로파 회로 설계, 마이크로파 소자 등.



李 相 永(正會員)

1979년 2월 : 서울대학교 물리학과 (이학사). 1984년 12월 : 미국 오하이오 주립대학교 물리학과 M.S. 1987년 12월 : 미국 오하이오 주립대학교 Ph.D(실험고체물리학 전공). 1992년 5월 : 한국과학기술연구원 물리전부 선임연구원, 현재 : 건국대학교 물리학과 부교수 및 한국초전도학회 편집이사. <주관심분야> 고온초전도체의 마이크로파소자응용 및 특성평가, 고온초전도체-유전체 접합을 이용한 고주파소자 응용, 고온 초전도체 박막 및 고주파소자의 제작

朴 章 遠(正會員)

2000년 8월 : 건국대학교 대학원 전자·정보통신공학과 (공학석사). 2000년 8월~현재 : 해리컴 연구원. <주관심분야> 안테나 및 전파전파, 선형전력증폭기, 고전력 증폭기 등