

진행모드 해석을 이용한 유전체 공진기 대역통과 필터의 결합 특성 개선에 관한 연구

이원희 · 박장원* · 양재혁* · 허정* · 이재훈** · 이상영**
*건국대학교 전자·정보통신공학과, ** 건국대학교 물리학과

A Study on the Coupling Performance Improvement of Cylindrical DR Bandpass Filter using Travelling Wave Mode Analysis

Won-Hui Lee · Chang Won Park* · Jae Hyuck Yang* · Jung Hur* · J. H. Lee** · Sang Young Lee**

*Dept. of Electronics, Information & Communication Eng., Konkuk University,

**Dept. of Physics, Konkuk University

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 travelling wave mode analysis. Conventionally, circular cylindrical dielectric resonator is analysed by Cohn's model which use the evanescent 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 have about 1dB insertion loss, 20MHz bandwidth and more than 30dB attenuation at $f_0 \pm 15$ MHz.

I. 서론

유전체 공진기(DR: Dielectric Resonator)를 사용한 필터는 1980년대 초에 10,000이상의 높은 quality factor와 작은 크기 때문에 위성 통신 등에 널리 사용되기 시작하였다. 또한 유전체 공진기 필터는 매우 낮은 손실과 높은 온도 안정성 때문에 위성파 이동통신을 포함한 여러 분야에서 응용되고 있다^[1]. 높은 quality factor 값을 갖는 유전체 공진기는 저지 대역(rejection band)에서 아주 가파르게 떨어지는 특성을 가지고 있어, 일정 대역폭의 대역 효율을 높이기 위해서 사용된다. 우리나라에서 PCS 사업을 시작하면서, 중계기용 필터로서는 대역효율을 최대한도로 높일 수 있는 SAW(Surface Acoustic Wave) 필터를 다수 업

체에서 사용하고 있다. SAW 필터는 우수한 특성을 가지는 반면 GHz 대역에서 구현이 힘들다는 문제점이 있어서 GHz 대역에서 직접 사용하기 힘든 실정이다. 최근 여러 논문에서 높은 quality factor 값을 갖는 유전체 공진기를 이용해서 여러 주파수 대역에서의 필터를 설계하는 방법에 대해서 연구되고 있다.

본 논문에서는 Cohn 모델^[2]을 사용하여 유전체 공진기 구조를 해석했던 기존의 필터 설계방법과는 달리 유전체 공진기와 도체면 사이의 영역을 진행모드 표현으로 가정하여 해석한 방법을 필터 설계방법에 적용하였다. 그리고, 입·출력 커플링을 위해 다양한 결합 방법에 대한 시뮬레이션 결과를 통해 가장 적합한 입·출력 커플링 방법을 찾았다. 그리고 공진기간 결합 계수를 거리의 함수로 얻기 위해서 도파관을 이용한 기존의 방법을 적용하였다.

II. 유전체 공진기와 입·출력단의 결합

유전체 공진기를 이용하여 필터를 제작하기 위해서는 유전체 공진기와 입·출력단의 결합을 나타내는 외부 양호도 Q_{ex} 를 어떤 디자인으로 구현할 것인지를 고려해야 한다. 유전체 공진기와 입출력단의 결합은 프로브, 마이크로스트립 선로, 도파관 등을 이용해 결합시킨다. 마이크로스트립 선로를 이용한 결합은 마그네틱 커플링을 이용하여 커플링을 시키는 방법으로 LC동가회로를 이용하여 Q_{ex} 의 값을 쉽게 거리의 함수로 바꿀 수 있다. 프로브를 이용한 커플링 방법은 유전체 높이의 1/2되는 지점에 보통 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 결합방법은 전계나 자계를 이용하여 커플링 시키며 비교적 계산에 의해 구한 값과 잘 일치한다. 그러나 입·출력단 커플링에 사용하기에는 실제 회로상에 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. 외부양호도 Q_{ex} 의 계산

외부양호도 Q_{ex} 는 시뮬레이션이나 직접적인 실험을 통해서 얻어질 수 있다. 일반적으로 Q_{ex} 는 다음과 같이 정의된다.

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

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 양호도 Q_U 는 다음과 같이 계산된다.

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

여기서,

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

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

이다. 그러므로, 외부양호도 Q_{ex} 의 식은 다음과 같이

정리된다.

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

IV. 유전체 공진기간 결합

유전체 공진기간의 결합은 그림 1과 같이 자계에 의한 결합으로 표현할 수 있다. 유전체 공진기는 그림 2와 같이 인덕턴스 L과 커패시턴스 C를 갖는 공진회로로 동가화 시킬 수 있다. 유전체 공진기간의 결합은 자계 결합이므로 인덕턴스 간의 결합으로 가정할 수 있고, 결합계수 k는 다음과 같이 상호 인덕턴스와 인덕턴스 간의 비로 나타낼 수 있다.

$$k = \frac{L_m}{L} = \frac{V_2 I_1}{j2\omega W_{m1}}$$

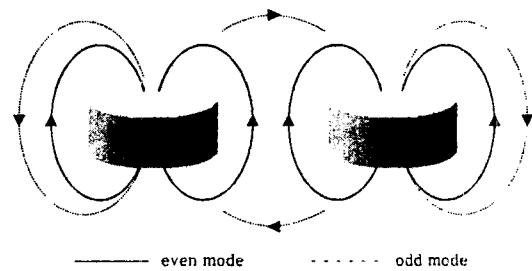


그림 1. 유전체 공진기간 결합

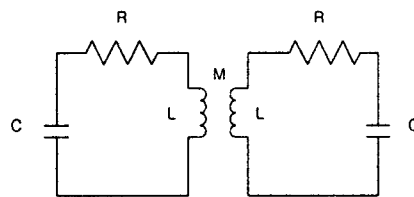


그림 2. 유전체 공진기간의 결합 동가회로

V. 유전체 공진기를 이용한 필터의 설계 및 제작

V-1. 필터의 설계 목표

본 논문에서는 유전체가 삽입된 공진기에서 진행모

는 표현으로 해석된 모델을 이용하여 공진주파수를 구하였다. 그리고 다양한 포트 시뮬레이션을 통해 원하는 외부양호도 Q_{ext} 를 구할 수 있는 급전방법을 설정하고, 이 결과를 차단 특성을 갖는 도파관에 적용하여 필터를 설계하였다. 먼저, 비유전율 $\epsilon_r = 45$ 인 유전체 공진기를 사용한 공진기를 진행모드 해석모델에 근거하여 필터 설계를 하였고, 여러 가지 설계 상의 접근점을 찾아보았다. 4.953GHz에서 중심주파수를 갖고 20MHz의 대역폭을 갖는 필터를 설계하였으며, 설계목표는 표 1에 있다.

표 1. 필터의 설계, 목표

항 목	설계목표
중심주파수 (f_0)	4.953GHz
대역폭(BW)	20MHz
삽입손실	1dB
저지대역 감쇠 ($f_0 = 15\text{MHz}$)	30dB
차수	3
응답특성	Chebyshev

표 2. 유전체 공진기의 제원

항 목	규 격
	세라믹 (유전율 45)
직경(D)	10.6mm
높이(H)	5.4mm
온도계수 (ppm/°C)	± 1

V-2. 유전체 공진기가 삽입된 공동의 크기 결정

공동의 높이는 유전체 높이의 2~3배 정도 되어야 손실이 비교적 작게 된다. 공동의 지름은 유전체 공진기 지름의 약 1.5배 이상으로 해주어야 손실이 작다. 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

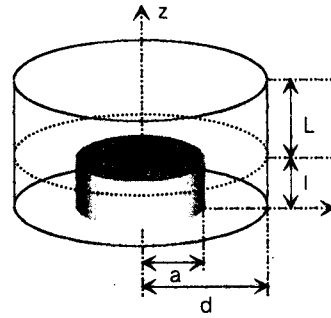


그림 3. 유전체가 삽입된 원통형 공진기

그림 3과 같이 유전체 디스크가 삽입되었을 때 유전체와 도체 사이의 영역에서 진행모드 표현으로 가정할 경우에 공진주파수를 계산할 수 있다. 이렇게 구한 공진주파수에 대한 그래프가 그림 4와 그림 5에 나타나 있다. 그림 4는 공동의 반지름을 12mm로 고정시킨 상태에서 공동의 높이 변화에 따르는 공진주파수의 변화를 그래프화한 것이다. 그림 5는 공동의 높이를 9mm로 고정시킨 상태에서 반지름 변화에 따르는 공진주파수의 변화를 그래프화한 것이다.

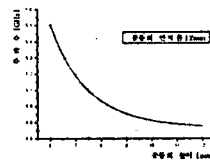


그림 4. 공동의 높이에 따른 공진주파수의 변화

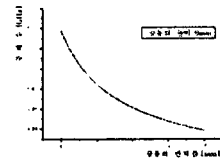


그림 5. 공동의 반지름에 따른 공진주파수의 변화

TE_{010} 가 4.953GHz일 때의 주파수에서 공진할 때 유전체 디스크와 공동의 반경 및 직경은 표 3과 같다.

표 3. 공진기 치수 및 그에 따른 공진주파수

항 목	계산 결과
공동의 반경	12mm
공동의 높이	9mm
계산된 공진주파수	4.953GHz

V-4. 공진기와 프로브 간의 커플링

유전체 공진기의 경우 모드별 공진주파수가 다르게 나타나 설계 주파수 근처에서 원하는 주파수 성

분이 나타날 수 있기 때문에 설계에 응용할 수 있는 공진 모드를 올바르게 급전하는 것이 중요하다. 따라서, 본 논문에서는 Ansoft사의 Maxwell 7.0을 이용한 시뮬레이션을 통해 단일 공진기 상에서 가장 적절한 급전 방법을 찾고자 하였다. 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.

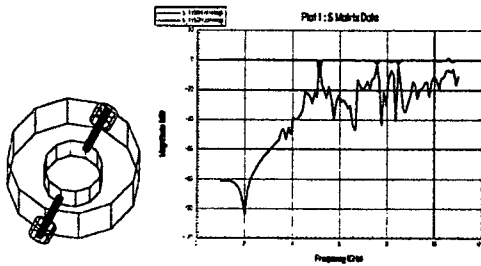


그림 6. 1자형 급전 : 1.3mm 지름을 갖는 프로브가 DR과 1mm 간격을 갖는 경우

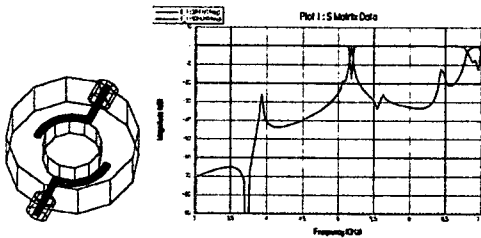


그림 7. 호 급전 : 유전체와 2mm 간격을 두고, 유전체를 따라 20° 회전 시킨 경우

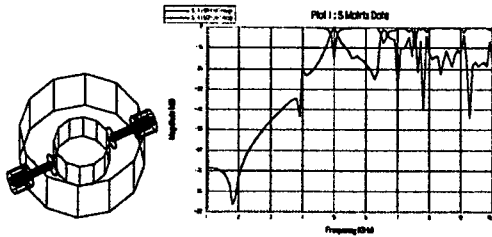


그림 8. 원판 급전 : 유전체와 1mm 떨어진 곳에서 원판 지름=4mm, 두께=0.7mm인 경우

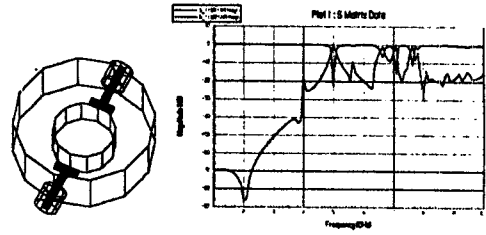


그림 9. T자형 급전 : 유전체와 1mm 떨어진 곳에서 8mm길이의 바가 달려있는 경우

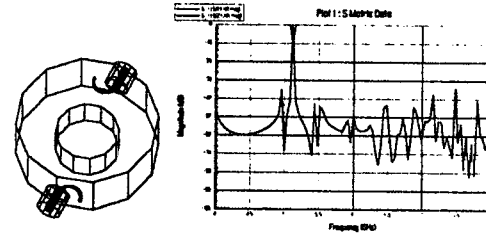


그림 10. U자형 급전 : 1mm의 반경을 갖고 접지

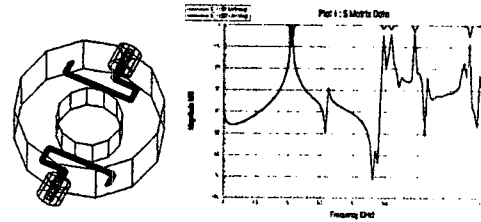


그림 11. 변형된 U자형 급전 : 유전체와 1mm 간격

1자형 급전의 경우 길이 변화와 상관없이 spurious 공진이 유난히 심하게 나타났다. 호 급전의 경우 특정 각도에서는 특성이 좋게 나타나지만 조금만 벗어나게 되면 쉽게 특성이 틀어지는 단점을 가지고 있었다. 원판형 급전의 경우도 대체적으로 다른 spurious 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 공진성분만을 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 필터 시뮬레이션

앞서 계산된 모든 필터의 재원을 가지고 필터의 시

시뮬레이션을 하였다. 프로브 급전은 앞서의 시뮬레이션에서 가장 근사적인 Q_{ex} 를 나타내는 방법을 사용하였으며, 그림 12는 필터의 시뮬레이션 구조 및 그에 따른 결과를 나타낸다.

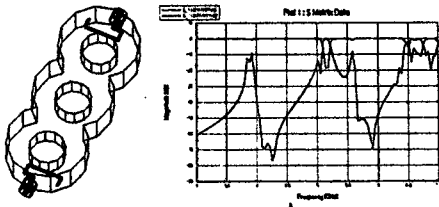


그림 12. 필터의 구조 및 시뮬레이션 결과

VI. 실험 및 고찰

그림 13에 제작된 필터의 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. 필터의 측정은 HP사의 8510C Network Analyzer를 사용하였다. 프로브의 급전은 앞서의 시뮬레이션에서 설계값과 비교적 근사한 Q_{ex} 값을 나타내는 개량된 U자형 급전을 사용하였다.

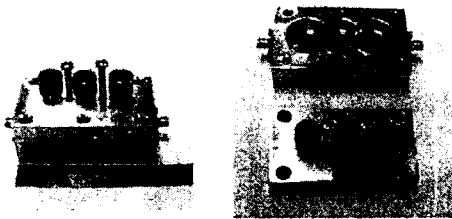


그림 13. 제작된 필터

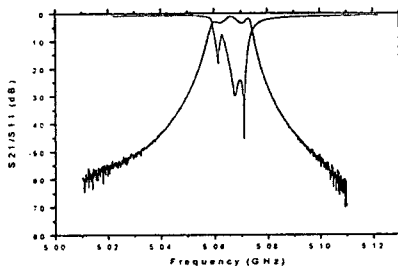


그림 14. 제작된 필터의 실측 특성

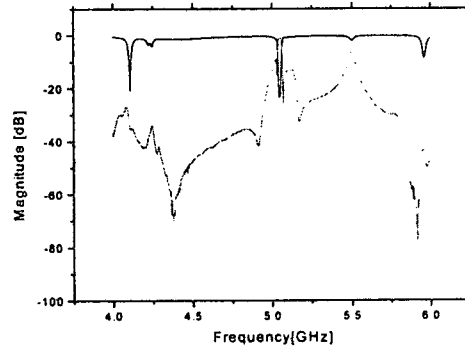


그림 15. 제작된 필터의 의사용담 특성

그림 14, 그림 15의 측정 결과를 보면, 중심 주파수는 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 진행모드 해석법이 공진주파수의 계산시 1.6%의 오차를 발생하기 때문에 제작 과정에서 1.6%의 오차를 보상하여 제작하면 될 것이다.

VII. 결론

본 논문에서는 유전체 공진기를 사용하여 체비세프 응답을 갖는 3-pole 유전체 공진기 필터를 진행모드 해석법을 적용하여 설계하였다. 제작 결과 중심 주파수는 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 진행모드 해석법이 공진주파수의 계산시 1.6%의 오차를 발생하기 때문에 제작 과정에서 1.6%의 오차를 보상하여 제작하면 될 것으로 사료된다.

참고문헌

- [1] D. Kajfez and P. Guillon, *Dielectric Resonator*. Dedham, 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.

「이 연구는 정보통신연구관리단의 대학기초연구지원 및 과학기술부의 지원에 의해 수행되었습」