

논문 2017-54-5-15

## DR을 이용한 대역통과 필터 설계

( The Design of BPF with Dielectric Resonators )

강 은 균\*, 전 형 준\*\*

( Eun Kyun Kang<sup>©</sup> and Hyung Jun Jeon )

## 요 약

본 논문에서는 비유전율 38을 갖는 유전체 공진기를 이용하여 S-Band 내 대역폭 20MHz를 갖는 대역통과 필터를 설계 및 제작하였다. 제작에 사용한 유전체 공진기는 TE<sub>016</sub> 모드로 동작하며 중심이 관통된 링형이다. 대역통과 필터는 여섯 개의 유전체 공진기를 이용하여 6-Pole로 구성하였으며 비인접 결합을 통해 타원함수 응답을 구현하였다. 대역통과 필터는 대역폭 내에서 평균 0.97dB의 삽입손실과 25dB 이상의 반사손실을 나타내었다. 비인접 공진기 간의 결합특성으로 체비셰프 응답 대역통과 필터에 비해 주파수 선택도를 더욱 향상시킬 수 있었다.

## Abstract

In this thesis, a BPF(band-pass filter) at the center frequency of 2.14GHz, and bandwidth of 20MHz is designed and implemented using high Q dielectric resonators with  $\epsilon_r=38$ . The DR(dielectric resonator) is resonated by TE<sub>016</sub>-mode and it has a hole in the center of DR. The BPF consists of 6-poles dielectric resonators and the characteristic of elliptic function is obtained by non-adjacent coupling. It has the average insertion loss of 0.97dB and the return loss over 25dB in its passband. In this thesis, the frequency selectivity is more improved by the coupling characteristics between non-adjacent resonators than that of dielectric resonator filters with a Chebyshev response.

**Keywords** : 유전체공진기, TE<sub>016</sub> 모드, 6-Pole, 비인접 결합, 주파수 선택도

## I. 서 론

유전체 공진기를 이용하여 필터를 제작하는 경우에는 유전체 공진기의 특성상 동일한 주파수에서 도파관을 이용하는 공동 공진기(metal air cavity resonator) 필터보다 크기를 소형화시킬 수 있으며 열에 민감하게 반응하는 combline 필터에 비해서 뛰어난 온도 안정성

으로 대전력에도 견딜 수 있다.<sup>[1]</sup> 본 논문에서는 이러한 유전체 공진기의 원리를 바탕으로 비유전율( $\epsilon_r$ ) 38을 갖는 유전체 공진기를 사용하여 2.140GHz대 주파수에서 20MHz 대역폭을 갖는 6-pole 대역통과 필터를 제작하였다.

## II. 본 론

## 1. 유전체 공진기

유전체 공진기는 일반적으로 고유전율의 재료로 만들어지며 따라서 이러한 유전체 공진기에 전자계 에너지가 여기(exciting)되었을 경우 대부분의 에너지는 유전

\* 정회원, 동양미래대학교 정보통신과

(Dept. Information &amp; Communication Eng., Dongyang Mirae University)

\*\* 정회원, LS산전 (LSIS Co., Ltd)

© Corresponding Author(E-mail : ktejin@daum.net)

Received ; February 13, 2017 Revised ; March 9, 2017

Accepted ; April 24, 2017

체 공진기 내부에 존재하게 되고 일부만이 유전체 외부 공간에 분포하게 된다. 그림 1.은 유전체 공진기의 기본 공진 모드인 TE<sub>016</sub>모드를 나타낸다.

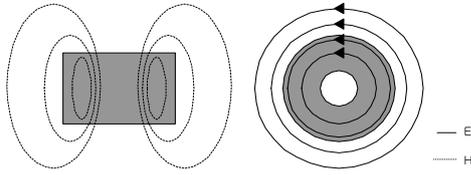


그림 1. TE<sub>016</sub>모드 유전체 공진기의 전자계 분포  
Fig. 1. Field distribution of TE<sub>016</sub>-mode dielectric resonator.

그림 1.에서 나타난 바와 같이 TE<sub>016</sub>모드 유전체 공진기의 전자계는 유전체 내부와 외부에 동시에 존재하며 유전체 공진기 반경과 길이 방향(z축)의 자계 성분 H<sub>r</sub>와 H<sub>z</sub> 그리고 방위각을 따라서 변화하는 전계 성분 E<sub>φ</sub>로 표현할 수 있다. 유전체 공진기를 사용하는 일반적인 마이크로웨이브 회로들은 필드방사(radiation)등으로 인한 유전체 공진기 자체의 Q(quality factor)의 저하와 외부 전자계 필드의 유입으로 인한 방해(interference)를 막고 회로의 용이한 처리를 위해 금속 하우징(metal housing)으로 차폐되어진다. 이 때 금속 하우징의 크기는 곧 유전체 공진기 필터의 전체 크기가 된다. 따라서 소형경량을 요구하는 마이크로웨이브 시스템에서 하우징의 크기는 작을수록 좋다. 그러나 금속 하우징이 유전체 공진기에 근접할수록 하우징에 의한 도전 손실(conductor loss)이 커지므로 증가하는 도전손실을 막고 그에 따른 Q의 저하를 고려하여 유전체 공진기는 금속 하우징과 적당한 거리에 있어야 한다.

그림 2.는 차폐된 링형 유전체 공진기의 구조를 나타내고 있다. 일반적으로 1GHz~3GHz(L, S-band)대역에서 유전체 공진기 필터 하우징의 너비(a)는 유전체 공진기 직경(D)의 1.5배 이상, 하우징의 높이(b)는 공진기 길이(L)의 약 3배 이상이다.

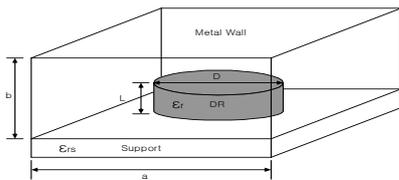


그림 2. 차폐된 유전체 공진기의 구조  
Fig. 2. Structure of shielded dielectric resonator.

양호도(quality factor)는 공진 시스템 특히 필터의 삽입손실에 관계된 가장 중요한 부분이다. 유전체 공진기

를 사용하는 필터 또는 발진기(oscillator)에서 양호도는 각각 부하 양호도(loaded quality factor: Q<sub>L</sub>), 무부하 양호도(unloaded quality factor: Q<sub>U</sub>), 외부 양호도(external quality factor: Q<sub>ex</sub>)의 세 가지 요소로 나눌 수 있으며 상호간에 다음과 같은 관계를 가진다.

$$\frac{1}{Q_L} \approx \frac{1}{Q_u} + \frac{1}{Q_{ex}} \quad (1)$$

공진 시스템의 부하 양호도는 식(2)와 같이 정의할 수 있다.

$$Q_L = \frac{\omega_r W}{P} = 2\pi \frac{W}{P T_r} \quad (2)$$

여기서 ω<sub>r</sub>는 공진기의 공진 주파수이며 W는 공진 시스템내의 전자계의 총 저장된 에너지이다. 또 P는 공진기와 부하에서의 총 전력손실, T<sub>r</sub>은 공진 주파수의 한 주기를 나타낸다.

총 전력손실은 부하에서의 전력손실(P<sub>L</sub>)과 유전체 공진기 시스템내의 손실(P<sub>r</sub>)로 식(3)과 같이 나타낼 수 있다.

$$P = P_r + P_L \quad (3)$$

유전체 공진기 시스템 내의 손실은 식(4)로 나타낼 수 있다.

$$P_r = P_R + P_D + P_C \quad (4)$$

여기서 P<sub>R</sub>는 방사손실(radiation loss), P<sub>D</sub>는 유전손실(dielectric loss), P<sub>C</sub>는 하우징 표면에서 발생하는 도전손실(conduction loss)을 나타낸다. 따라서 각 양호도들은 식(5)~식(7)과 같이 정의할 수 있다.

$$\begin{aligned} \frac{1}{Q_L} &= \frac{P T_r}{2\pi W} = \frac{(P_r + P_L) T_r}{2\pi W} \\ &= \frac{P_r T_r}{2\pi W} + \frac{P_L T_r}{2\pi W} \\ &= \frac{1}{Q_U} + \frac{1}{Q_e} \end{aligned} \quad (5)$$

$$Q_U = \frac{2\pi W}{P_L T_r} \quad (6)$$

$$Q_e = \frac{2\pi W}{P_r T_r} \quad (7)$$

유전체 공진기 내부에 저장되는 에너지는 전자장 이론에 따라 다음과 같이 정의한다.<sup>[3]</sup>

$$W = \int_v \frac{\mu |H|^2}{2} dV = \int_v \frac{\epsilon |E|^2}{2} dV \quad (8)$$

여기서  $\int_v$ 는 유전체 공진기 전체의 체적을 의미한다. 식(8)을 회로이론에 적용하면 식(9)와 같이 유전체 공진기 내의 저장되는 에너지를 인덕턴스와 캐패시턴스를 이용하여 나타낼 수 있다.

$$W = \frac{L_r I^2}{2} = \frac{C_r V^2}{2} \quad (9)$$

따라서 식(6)의 무부하 양호도는 식(10)과 같이 나타낼 수 있다.

$$Q_U = \frac{\omega_r L_r}{R_r} \quad (10)$$

위 식에서  $R_r$ 은 공진기 내부의 물리적인 저항을 나타내며  $L_r$ 은 공진기의 인덕턴스를 나타낸다.

### 2. 유전체 공진기 결합

유전체 공진기를 이용하여 대역통과 필터를 제작하기 위해서는 먼저 유전체 공진기의 필드 분포를 이용하여 유전체 공진기와 유전체 공진기 간의 결합을 나타내는 결합계수  $k$ 를 계산하여야 한다. 또한 외부 회로와 연결을 위한 결합 구조를 고려해야 한다. 먼저 유전체 공진기와 입출력 회로간의 결합은 공진기 외부에 존재하는 전자계를 모두 이용할 수 있다. 여기서  $TE_{016}$ 모드는 전자계 분포가 공진기 내부에만 국한되지 않고 인접 영역까지 퍼져 있어서 이러한 전계 및 자계 분포를 고려하여 loop 혹은 probe 형태의 connector와 연결 할 수 있다.

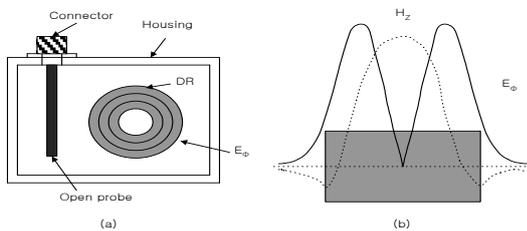


그림 3. (a) 유전체 공진기와 probe 간의 결합  
(b) 유전체 공진기의 전자계 분포  
Fig. 3. (a) Coupling between dielectric resonator and probe.  
(b) Electric and magnetic field distribution of dielectric resonator.

그림 3.은 본 논문에서 사용한 open형 반파장 probe를 갖는 입출력 구조를 나타낸다. 그림 3(b)는 그림 1.에서 표현한  $TE_{016}$ 모드 유전체 공진기의 전자계 필드의 세기를 나타낸 것이다. 그림 3(a)와 같은 probe를 공진

기의 전계가 가장 강한  $H/2$  부분에 위치시키고 유전체 공진기와 입출력 프루브 간의 결합은 외부 양호도 (external Q:  $Q_{ex}$ )에 의해서 표현할 수 있으므로 이를 고려하여 유전체 공진기에서 일정거리를 떨어뜨리면 Ampere의 주회법칙에 의해 프루브에 발생하는 자계와 전계 성분을 원하는 만큼 동시에 여기 시킬 수 있다.

### III. 실험

본 논문에서는 비유전율( $\epsilon_r$ ) 38을 갖는 유전체 공진기를 이용하여 수신용 6-pole 대역통과필터를 설계, 제작하였다. 유전체 공진기의 사양은 표 1.과 같다.

표 1. 유전체 공진기 사양  
Table1. Outline dimensions for dielectric resonator.

| 항 목    | 규 격                          |
|--------|------------------------------|
| 직 경    | 27 mm                        |
| 높 이    | 8.75 mm                      |
| 온도 계수  | $2 \pm 0.5$ ppm/ $^{\circ}C$ |
| 비유전율   | $\epsilon_r = 38$            |
| 무부하 Qu | 15000~18000<br>@ 2.14 GHz    |
| 주파수 범위 | S Band                       |

표 2에 나타낸 데이터를 이용하여 양단이  $50\Omega$ 으로 정합되고 ripple 특성이 0.2dB인 6차 elliptic 응답 대역통과 필터를 설계하기 위해서 체비세프 응답 필터의 설계시와 같이 외부 양호도와 결합계수를 계산하여야 한다. 그러나 타원함수 응답의 경우 체비세프형 프로토타입 저역통과 필터의 소자값을 사용할 수 없다. 따라서 원하는 타원함수 응답의 전달함수를 구하여 저역통과 필터를 설계하고 결합행렬 계산을 통해 외부 양호도와 결합계수를 구한다. 그림 4.는 직접결합을 이용하여 설계한 대역통과 필터(direct coupled band-pass filter)의 등가회로이다.

표 2. 유전체 공진기 대역통과 필터의 설계 사양  
Table2. Design specification of dielectric resonator band-pass filter.

| 항 목    | 규 격      |
|--------|----------|
| 중심주파수  | 2.14 GHz |
| 대역 폭   | 20 MHz   |
| 리플특성   | 0.2 dB   |
| 저지대역감쇠 | -60 dB   |
| 필터 차수  | 6        |
| 응답 특성  | elliptic |

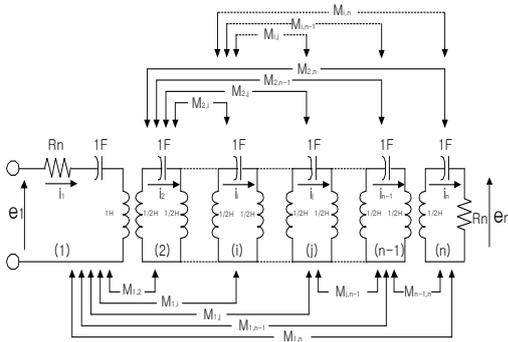


그림 4. 직접결합 대역통과 필터의 등가회로  
Fig. 4. Field distribution of TE<sub>018</sub>-mode dielectric resonator.

그림 4와 같이 한 쌍의 영점을 가지는 타원함수 응답 6-pole 대역통과 필터의 특성함수는 식 (11)과 같다.

$$K(S) = \frac{F(S)}{P(S)} = \prod_{i=1}^3 \frac{(S^2 + z_i^2)}{(S^2 + p_i^2)} \quad (11)$$

$$= \frac{(S^2 + z_1^2)(S^2 + z_2^2)(S^2 + z_3^2)}{(S^2 + p_1^2)}$$

여기서 S는 복소 주파수 변수, z<sub>1</sub>, z<sub>2</sub>, z<sub>3</sub>은 감쇄영점, 또 p<sub>1</sub>은 감쇄극점의 주파수이다. 아래에 그림 4.의 등가 회로와 전달함수를 이용하여 구한 결합행렬을 나타내었다.

$$R_1 = R_6 = 1.078$$

|       |        |       |       |        |       |
|-------|--------|-------|-------|--------|-------|
| 0     | 0.931  | 0     | 0     | 0      | 0     |
| 0.931 | 0      | 0.697 | 0     | -0.214 | 0     |
| 0     | 0.697  | 0     | 0.543 | 0      | 0     |
| 0     | 0      | 0.543 | 0     | 0.697  | 0     |
| 0     | -0.214 | 0     | 0.697 | 0      | 0.931 |
| 0     | 0      | 0     | 0     | 0.931  | 0     |

모든 결합은 유전체 공진기 간의 거리로 나타냈으나 비인접 공진기 결합은 probe의 길이로 구현하였다. 이때 probe는 공진 파장의 짝수와 홀수 배로 길이를 변화시켜 실험하였다. 그 결과 타원함수 응답을 보인 probe의 길이는 λ<sub>0</sub>의 배수인 n×λ<sub>0</sub>와 1/4×λ<sub>0</sub>(n=1,2,3...)인 것으로 나타났다. probe의 길이와 오차는 약 16%였다. 하우징의 단면이 갖는 차단주파수는 3.75GHz이며 크기는 너비, 높이, 길이가 각각 51.4mm×51.4mm×296.8 mm이다. 두 유전체 공진기 사이에 금속 봉을 삽입하여 공진기 간의 결합량을 미세 조정하였으며 유전체 공진기의 공진 주파수를 조정하기 위해 하우징의 윗면에 튜닝판을 설치하였다.

$$\text{gray level} = \sum_{i=1}^{8_r} 2^{i-1} SF(i) \quad (1)$$

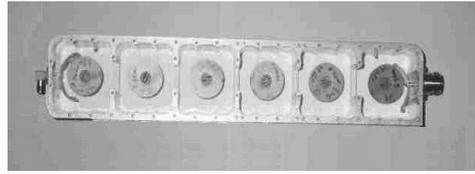


그림 5. 6-pole 타원함수 응답 대역통과 필터  
Fig. 5. 6-pole elliptic band-pass filter.

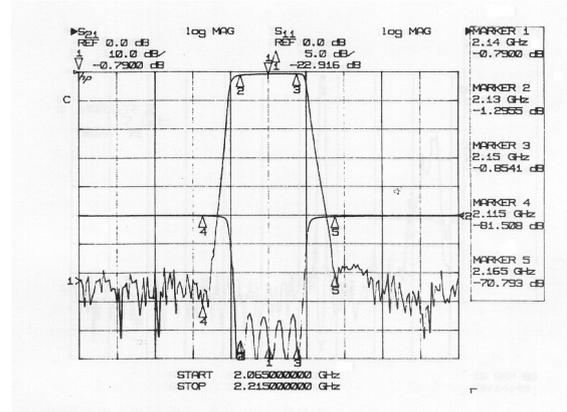


그림 6. 유전체 공진기 대역통과 필터의 협대역 응답  
Fig. 6. Narrowband response of dielectric resonator BPF.

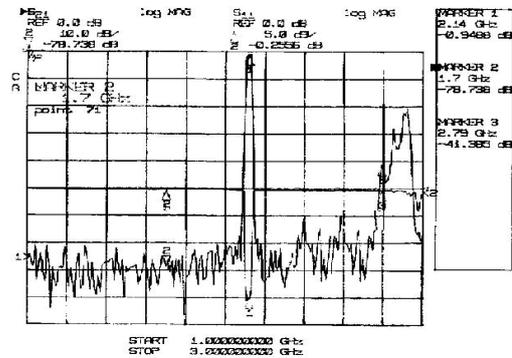


그림 7. 유전체 공진기 대역통과 필터의 광대역 응답  
Fig. 7. Wideband response of dielectric resonator BPF.

#### IV. 결론

본 논문에서는 높은 양호도와 우수한 온도 안정성을 가지는 유전체 공진기를 사용하여 기존 비유전율 30 DR을 이용한 공동 공진기 필터와 비교시 개별 공진기의 약 15% 정도 크기를 줄이고 그에 따른 상대적 무게를 줄일 수 있었다.

당초 설계 사양(목표)인 저지대역의 감쇠량 -60dB에 비하여 -10dB 이상의 감쇠 특성(-81.5dB @2.115GHz, -70.1dB @2.165GHz)을 나타내어 통과 대역내의 주파수 선택도를 향상시킨 6-pole 유전체 공진기 대역통과

필터를 제작하였다.

설계 사양상의 삽입손실을 만족시키기 위해서 비유전율 38의 유전체 공진기를 이용하였으며 자계 벽 방법에 의한 세분화된 필드영역 구분을 사용하여 차폐된 상태에서 유전체 공진기의 필드 분포를 해석하였다. 유전체 공진기 간의 결합을 해석하기 위해서 자기 축적 에너지와 마그네틱 다이폴 모멘트의 계산을 통해 외부양호도  $Q_{ex}$ 와 결합계수  $k$ 를 유도하였고 이를 전달함수 해석으로부터 얻은 결합행렬의 이론값과 비교하여 공진기와 공진기간의 거리를 함수로 표현하였으며, 타원함수 특성을 갖는데 필요한 비인접 공진기 결합시의 전기적 길이를 실험적으로 구하여 통과대역에 인접한 주파수대에서 높은 선택도를 만족하도록 설계, 제작하였다.

REFERENCES

- [1] D.Kajfez and P.Guillon, "Dielectric resonator", Dedham, Artec House, 1998.
- [2] S.B.Cohn, "Direct-coupled-resonator filters", IRE Proceedings, pp. 187-196, February 1957.
- [3] Robert E. Collin, "Field Theory of Guided Waves", IEEE Press, 1991.
- [4] 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.
- [5] H J Jeon, C S Kang, "The Design of Ku-Band Cavity BPF" Journal of Institute of Electronics and Engineers Vol. 42, NO. 4, Dec 2005, pp. 69-76.

저 자 소 개



강 은 균(정회원)  
 1998년 광운대학교 전자공학과 (공학석사).  
 2013년 광운대학교 전자공학과 (공학박사)  
 2015년 3월~현재 동양미래대학교 정보통신과 조교수  
 <주관심분야: 초고주파, 신호처리, 반도체>



전 형 준(정회원)  
 1993년 광운대학교 전자공학과 공학사 졸업.  
 1995년 광운대학교 전자공학과 공학석사 졸업.  
 2003년 광운대학교 전자공학과 공학박사 졸업.  
 2004년 삼성에스원 기술연구소  
 2008년 LS전선 SBG  
 2017년~현재 LS산전 연구개발본부  
 <주관심분야: 무선통신, 통신 시스템, 회로설계, 신뢰성 대책 설계>