

## 3중모드 공진기를 이용한 대역통과 필터(BPF)의 설계

### Design of Band Pass Filter using the Triple-Mode Resonators

황 재 호

Jae-Ho Hwang

요 약

본 논문에서는 저손실 필터의 소형(경량화)을 목적으로 간단한 구조의 3중모드 유전체 공진기를 제안하였다. 대역통과 필터(BPF)의 설계에 있어서는 유한 요소법(FEM)을 근거로 하는 HFSS의 시뮬레이션 결과를 사용하였으며, 세라믹 유전체 공진기를 사용하여 시제작 하였다. 이와 같은 방법으로 3단의 BPF를 설계 제작한 결과, 중심주파수 1.93 GHz 에서의 삽입손실은 약 0.9 dB, 대역폭은 25 MHz를 나타냈다. 한편, 보다 복잡한 특성이 요구되는 경우에는 3중모드 유전체 공진기간에 슬롯을 사용하여 결합시킬 수 있는 방법을 제시했다. 이와 같은 BPF는 차세대 이동 통신인 IMT-2000시스템에 응용될 수 있다.

#### Abstract

This paper presents a triple-mode dielectric resonator for low loss and simple structure filter design. The BPF(Band Pass Filter) was designed using HFSS simulation results and fabricated using proposed resonators. The filter (3-stage BPF) has an insertion loss of about 0.9 dB at the center frequency of 1.93 GHz and a 3 dB bandwidth of about 25 MHz. If more complex characteristic is required, slot coupling between resonators can be used. Especially, the proposed BPF can be applied to the next generation mobile communication IMT-2000 system.

Keyword: BPF(Band Pass Filter), Dielectric resonator, Triple-mode resonance, IMT-2000, Attenuation pole

#### I. 서 론

중대 저 손실 소형 필터를 실현하기 위해 무부하  $Q$ 가 큰 유전체 공진기를 사용한 필터가 소개되어져 왔다<sup>[1],[2]</sup>. 특히 저 손실 특성이 중요시 되는 필터는 동작 원리적으로 도체손실이 최소가 되는  $TE_{01\delta}$ 모드의 유전체 공진기를 사용하여 필터를 구성하는 경우가 많다<sup>[3]</sup>.

한편, 필터의 소형화를 위하여는 유전율이 높고 손실이 적은 유전체 재료를 사용하고 있다. 그러나 여러 단의 유전체 공진기를 사용하여 필터를 구성

하는 경우, 하나의 공진을 위해 한 개의 공진기가 필요하고 게다가 각 공진기간에는 결합을 위한 공간이 필요하므로 필터의 소형,경량화가 곤란하다. 그래서 유전체 공진기를 사용하는 장점을 충분히 활용하면서 소형의 대역통과 필터를 구현함에  $TE_{101}$ ,  $TE_{11\delta}$ 모드에 대해 2개의 공진모드의 축퇴 결합이 제안되었으며<sup>[4],[5]</sup>, 직방체 형상의 유전체 블럭에 있어 직각 좌표계의 각면(x-y면, y-z면, x-z면)에 평행하게 생기는  $TM_{01\delta}$ 모드 및  $TE_{01\delta}$ 모드를 이용하는 3중모드 공진기의 사용이 제안되었다<sup>[6]-[8]</sup>. 그러나 이와 같은 2중 공진모드를 이용함에 있어서

경주대학교 컴퓨터전자공학부(School of Computer Electronics Engineering, Kyongju University)

· 논문 번호 : 20010521-069

· 수정완료일자 : 2001년 7월 10일

는 유전체 공진기가 점유하는 용적이 커지는 단점이 있으며, 또 종래 제안된 3중모드 유전체 공진기의 경우 공간적으로 직교하는 3개의  $TE_{101}$  모드를 사용하는 형태로 이론적으론 간단하나 현실성이 결여되어 있으며, 그밖에 공간적으로 직교하는  $TM_{010}$  모드 및  $TE_{010}$  모드의 혼성결합을 이용하는 경우 유전체 공진기의 두께를 공진주파수에 맞출 필요가 있어 제조공정이 복잡해지는 문제가 있다.

본 논문은 이와 같은 종래의 문제를 해결하기 위하여 동일주파수의  $TE_{010}$  3중모드 공진이 가능하면서 아주 간단한 구조의 유전체 공진기를 제안하였으며, 이와 같은 3중모드 공진기를 이용한 필터를 설계 제작하여 그 유효성을 입증하였다.

## II. 3중모드 공진기

그림 1은 3중모드 공진기의 기본구조를 나타낸다. 입방체 유전체 블록 내부에 그림과 같이 전자기적으로 독립된 3면  $m_1$ ,  $m_2$ ,  $m_3$ 에  $TE_{010}$  모드의 공진이 존재하고 유전체 블록의 3개의 모서리를 그림과 같이 잘라냄으로써 각 공진 모드간의 결합이 형성된다. 이와 같은 현상은 외부 요인에 따른 약간의 전자계의 변화에 모드간의 독립성이 붕괴되어 그들간의 에너지결합이 생긴 것이라 생각할 수 있다.

공진기간의 결합은 입출력 프로브(Probe)의 위치 및 방향에도 관계되며 그림 2와 3은 3중모드 공진기의 공진상태를 확인하기 위하여 그림과 같이 단일공진 모드만을 여기시켰을 경우, 다시 말해서 무결합 상태일 때의 주파수 특성과 유전체 블록 내부의 전계 분포를 시뮬레이션한 결과를 나타내고 있

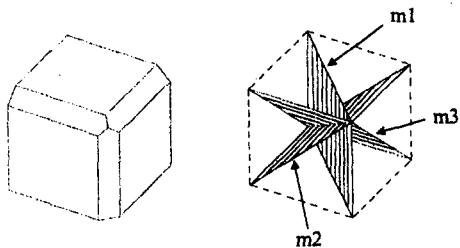


그림 1. 3중모드 공진기 및 공진모드  
Fig. 1. Triple mode resonator and resonance mode.

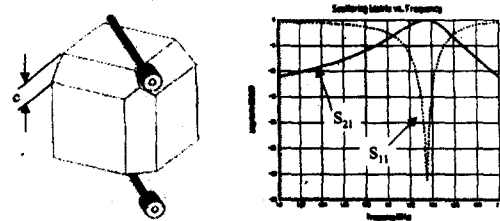


그림 2. 단일모드 공진의 주파수 특성  
Fig. 2. Frequency characteristic of single mode resonance.

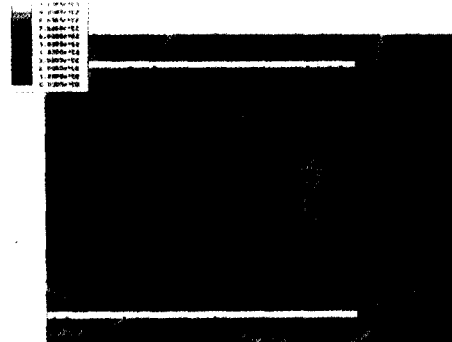
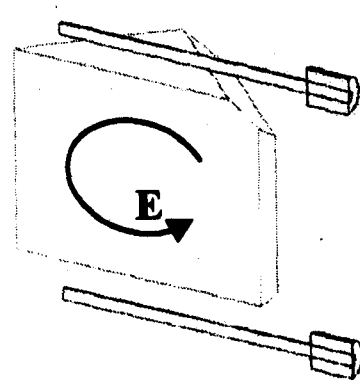


그림 3. 단일모드 공진의 전계분포  
Fig. 3. Electric field distribution of single mode resonance.

다. 여기서 유전체 공진기의 크기는  $23.5 \times 23.5 \times 23.5$  mm, 3군데 모서리부분은  $c=5$  mm로 잘라냈으며 비유전율은 37이다. 유전체 공진기는  $38 \times 38 \times 38$  mm의 금속 캐비티 중앙에 배치되어 있다.

단일면에서의 주파수특성을 보면 약 1.93 GHz대에서 공진하는 것을 알 수 있으며 그때의 공진모드가 TE<sub>01</sub> 모드임을 전계 분포로 확인할 수 있다. 한편 다른 2면에 대해서도 동일한 결과가 나타났으며, 결국 그림 2에 표시한 m1, m2, m3평면에 각각 독립적인 공진이 존재한다고 생각할 수 있다.

### Ⅲ. 대역통과 필터의 설계

일반적으로 필터의 설계에 있어서 필요한 파라미터로는 중심주파수, 입출력부의 외부 Q와 공진기간의 결합계수 K를 들 수 있다. 여기서는 3중모드 공진기를 사용한 필터의 구성함에 이와 같은 파라미터의 관련성을 명확히 하고, 필터설계에 필요한 외부 Q와 결합계수 K의 값을 시뮬레이션을 사용하여 구한다.

#### 3-1 중심주파수

유전체 공진기에 있어 유전체의 크기와 비유전율은 공진주파수를 결정하는 중요한 요인이 된다. 따라서 3중모드 공진기의 경우 공진기간의 결합을 위해 모서리부분의 잘라낸 양은 중심주파수의 천이를 유발시키게 된다. 그림 4는 그림 2에서와 같이 무결합상태에서 모서리부분의 잘라낸 양 c에 대한 중심주파수의 변화를 나타낸다. c를 1~7 mm로 함에

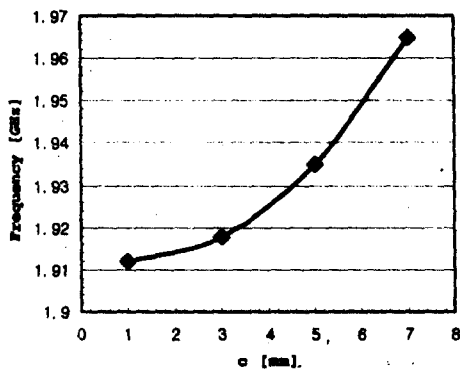


그림 4. 중심주파수의 변화  
Fig. 4. Variation of center frequency.

#### 3중모드 공진기를 이용한 대역통과 필터(BPF)의 설계

있어 중심주파수가 1.91 GHz~1.96 GHz의 변화가 생김을 알 수 있다. 단, 여기서 유전체의 크기는 23.5×23.5×23.5 mm, 비유전율은 37이며 금속 캐비티는 크기가 38×38×38 mm인 완전도체로 가정한다.

#### 3-2 외부 Q

외부 Q는 단일모드 공진조건으로부터 구할 수 있다. 그림 5와 같이 입출력 프로브를 공진기의 상하에 배치하고 중심선으로 부터의 각도  $\theta$ 를 45°로 하여 단일모드를 여기시키며 이때 유전체 공진기와 입출력 프로브간의 간격 d를 변화시킴에 따라 부하 Q가 변화됨을 알 수 있다. 외부 Q는 식 (1)로부터 구할 수 있다.

$$\frac{2}{Q_e} = \frac{1}{Q_L} - \frac{1}{Q_0} \quad (1)$$

여기서  $Q_L$ 과  $Q_0$ 는 각각 부하 Q와 무부하 Q를 나타내며 식 (2)로 정의된다.

$$Q_L = \frac{f_0}{\Delta f}, \quad Q_0 = \frac{Q_L}{1 - 10^{-1/L/20}} \quad (2)$$

그림 6은 공진기의 3부분의 모서리의 잘라낸 양 c를 3, 5, 7 mm로 했을 때의 공진기와 프로브간의 간격 d에 대한 외부 Q의 변화를 나타내고 있다. 여기서 사용한 유전체 공진기와 금속 캐비티는 그림 4의 조건과 동일하다.

그림 6의 결과로부터 유전체 공진기와 입출력 프로브간의 간격 d가 커질수록 외부 Q가 커지는 것을 알 수 있으며 또한 유전체 공진기의 3부분의 모서리의

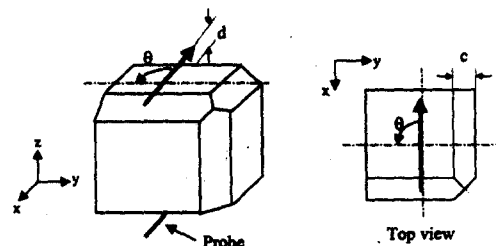


그림 5. 공진기와 입출력 프로브  
Fig. 5. Resonator with I/O probe.

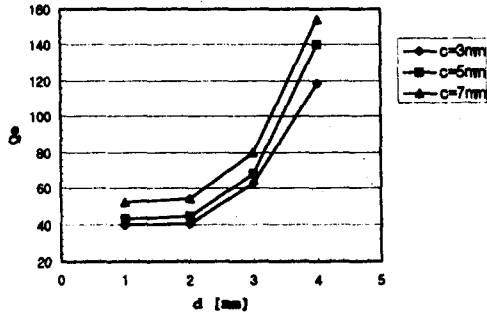


그림 6. 외부 Q  
Fig. 6. External Q.

잘라낸 양 c가 적을수록 외부 Q가 작아지는 것을 알 수 있다.

### 3-3 결합계수 K

결합계수는 공진기간의 결합정도를 나타내는 파라미터로 2개의 공진상태에서 구해진다. 3중모드 유전체 공진기의 경우 입출력 프로브를 공진기의 중심부 상하에 평행하게 배치함으로써 2중 모드간의 결합상태를 알 수 있으며 이때 공진기의 3부분의 모서리의 잘라낸 양 c에 따라 결합량의 변화를 알 수 있다. 이외에도 결합량에 관계되는 요소로는 입출력 프로브의 배치각도가 있는데 이는 결합 정도가 매우 작으므로 결합량의 미세조절에 유용할 수 있다.

이와 같은 결합정도는 결합계수 K로 나타낼 수 있으며 식 (3)에 의해 정의된다.

$$K = 2 \frac{f_2 - f_1}{f_2 + f_1} \quad (3)$$

본 절에서는 위의 두 가지 요인에 따른 결합계수의 변화를 검토한다.

#### 3-3-1 공진기 구조에 의한 결합

그림 5의 입출력 프로브 배치각  $\theta$ 를  $0^\circ$ 로 하면 공진기 내부에는 2개의 공진모드가 결합되어지고 이때 공진기 모서리의 잘라낸 양 c에 따라 결합량이 변화된다. 그림 7은 c에 따른 공진 모드간의 결합량 (K)을 나타내고 있다. 여기서 d는 공진기와 입출

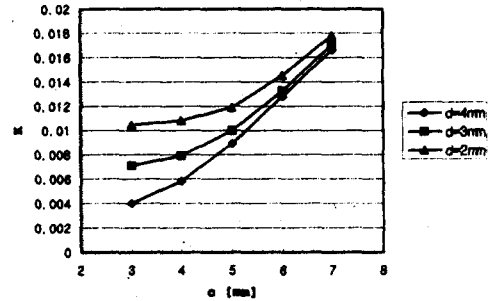


그림 7. 결합 (1)  
Fig. 7. Coupling (1).

력 프로브간의 간격이며 유전체 공진기와 금속 캐비티는 그림 4의 조건과 동일하다.

공진기간의 결합량은 c가 커질수록 증가하며 공진기와 프로브간의 간격에 따라 차이가 남을 알 수 있다

#### 3-3-2 프로브의 배치각도에 의한 결합

본 3중모드 공진기에 있어 모드간의 결합에 영향을 미치는 요인 중의 하나로 프로브의 배치를 들 수 있다. 그림 8은 그림 5의 입출력 프로브 배치각  $\theta$ 를  $-15^\circ \sim +15^\circ$ 로 했을 경우의 결합량을 나타내고 있다. 여기서 공진기 모서리의 잘라낸 양 c는 3 mm, 공진기와 입출력 프로브간의 간격 d는 3 mm로 하며 유전체공진기와 금속 캐비티는 그림 4의 조건과 동일하다.

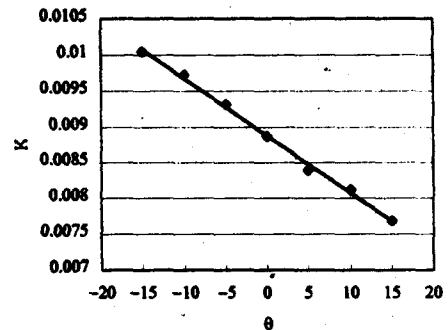


그림 8. 결합(2)  
Fig. 8. Coupling (2).

3중모드 공진기를 이용한 대역통과 필터(BPF)의 설계

그림 8의 결과를 보면 입출력 프로브의 배치 각에 따른 결합량의 변화는 그림 7의 결합량에 비해 아주 작음을 알 수 있고 이는 결합량의 미세 조절에 유효하게 사용될 수 있다.

3-4 BPF의 설계

본 절에서는 제안한 3중모드 공진기를 사용하여 대역통과 필터를 설계하기 위해 3-1~3-3절에서 구한 중심주파수, 외부 Q, 결합계수 K를 이용하여 3중모드 공진기 1개를 사용하는 3단의 BPF를 설계(Butterworth 설계)하여 시뮬레이션 결과와 시제작에 의한 측정치를 비교한다. 또한 3중모드 공진기 2개를 사용하는 보다 복잡한 특성의 6단 BPF설계하고 검토한다.

3-4-1 3단 BPF

원하는 필터특성을 얻기 위한 외부 Q와 공진기간의 결합계수 K값은 각각 다음의 식으로 구해진다.

$$Q_e = q \frac{f_m}{bw_{3dB}} \quad (4)$$

$$K = k \frac{bw_{3dB}}{f_m} \quad (5)$$

여기서  $f_m$ 은 중심주파수,  $q$ 와  $k$ 는 3단의 경우(무손실 가정)  $q_1=q_3=1$ ,  $k_{12}=k_{23}=0.7071$ 이 된다<sup>[9]</sup>.

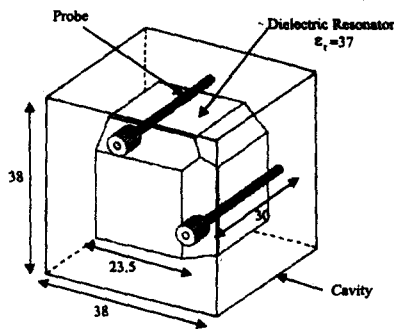


그림 9. 3단 BPF의 구조  
Fig. 9. Structure of the 3-stage BPF.

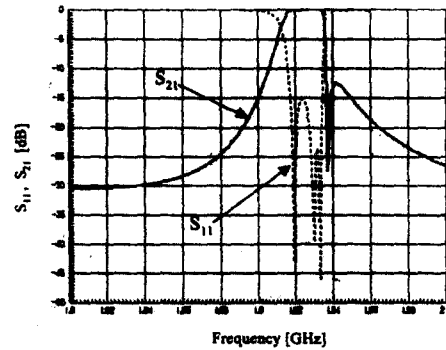


그림 10. 3단 BPF의 주파수 특성(계산치)  
Fig. 10. Frequency characteristic of the 3-stage BPF (simulated).

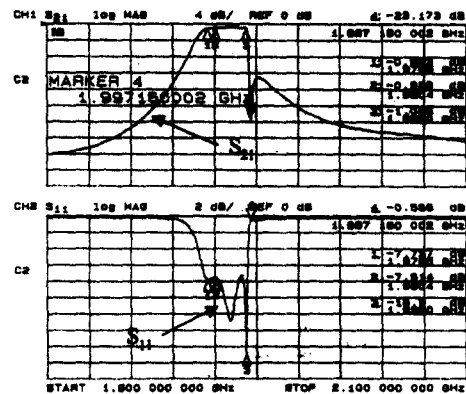


그림 11. 3단 BPF의 주파수 특성(측정치)  
Fig. 11. Frequency characteristic of the 3-stage BPF (measured).

이제 중심주파수 1.93 GHz, 3 dB대역폭 25 MHz, 20 dB대역폭 60 MHz의 BPF를 설계할 경우, 식 (4), (5)에 의해  $Q_e=77.2$ ,  $K=0.0091$ 이 되며 그림 4, 6, 7로부터  $d=3.15$  mm,  $c=5$  mm가 결정된다. 그림 9은 이와 같이 설계된 필터의 구조와 크기를 나타낸다.

그림 10과 그림 11은 위의 구조로 설계된 BPF의 주파수 특성으로 각각 시뮬레이션에 의한 계산치와 시제작품의 측정치를 나타내고 있다. 시제작에 있어 사용된 세라믹 유전체 블록의 재료는 BaO-TiO<sub>2</sub>계로 비유전율이 약 37이며 5000이상의 높은 Q특성을 갖고 있다. 또한 금속 캐비티는 두께 0.5 mm의 동판

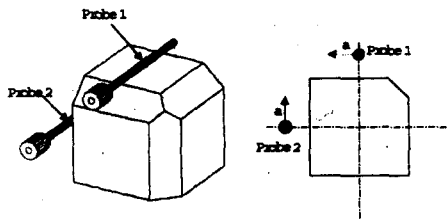


그림 12. 입출력 프로브 배치  
Fig. 12. Location of I/O probes.

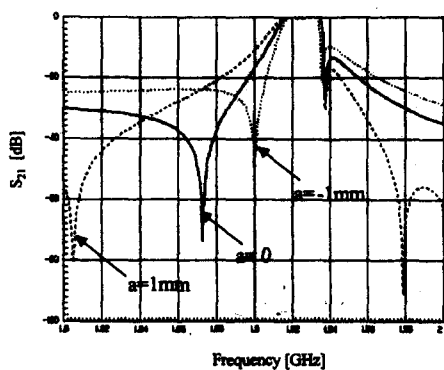


그림 13. 감쇄극 특성  
Fig. 13. Characteristics of attenuation poles.

을 사용하여 구성했으며 공진기를 중앙에 배치하기 위해 저유전율의 지지대를 사용하였다.

계산치의 경우 중심주파수가 약 1.93 GHz, 3 dB 대역폭이 약 23 MHz 정도로 설계시의 특성과 거의 일치함을 알 수 있으며 측정치의 경우 시제작에 있어 정밀도 등의 문제로 인하여 중심주파수가 약 0.05 GHz 정도 높아졌다.

한편 상측 대역에 감쇄극(attenuation pole)이 나타남을 알 수 있는데, 이와 같은 감쇄극은 프로브간의 직접결합에 의해 발생하는 것으로 프로브의 배치에 따라 그 위치가 변동됨을 알 수 있다. 그림 12는 프로브간의 거리와 방향을  $a$ 와 같이 변화시키는 구조를 나타내고 있으며 이때 나타나는 감쇄극의 특성은 그림 13과 같다.

### 3-4-2 6단 BPF

그림 14는 3중모드 공진기 2개를 배열한 6단의

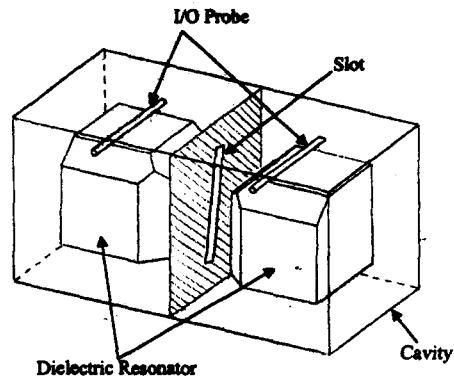


그림 14. 6단 BPF의 구조  
Fig. 14. Structure of the 6-stage BPF.

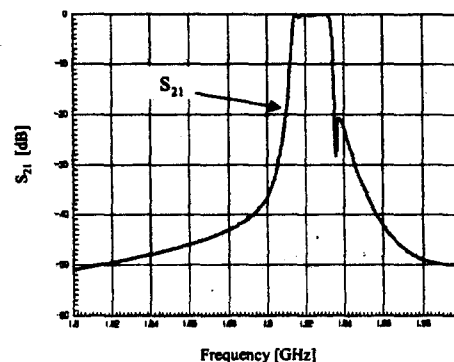


그림 15. 6단 BPF의 주파수 특성(계산치)  
Fig. 15. Frequency characteristic of the 6-stage BPF (simulated).

필터구조를 나타낸다. 분리된 공진기간의 결합은 차폐된 금속판에 슬롯(slot)을 형성, 그 크기와 배치 각도로 구성한다.(3-3-2참조).

그림 15는 폭 3 mm, 길이 26 mm의 슬롯을 수직축에서  $10^\circ$ 로 하여 2개의 공진기를 결합한 6단 필터의 특성을 나타내고 있다.

## IV. 결 론

저 손실 필터의 소형(경량화)를 목적으로 동일주파수에서 3중모드 공진이 가능하며 극히 간단한 구조의 유전체 공진기를 제안하여 그 타당성을 시뮬레이션으로 확인하였다.

또한 3중모드 유전체 공진기를 사용하는 필터의 설계에 있어 시뮬레이션 결과를 토대로한 설계수법을 정립하였으며, 한 예로 중심주파수 1.93 GHz, 3 dB 대역폭 25 MHz, 20 dB 대역폭 60 MHz의 BPF를 설계한 결과, 시뮬레이션의 경우 설계시의 특성과 거의 일치함을 알 수 있었으며 측정치의 경우 시제작의 정밀도 등의 문제로 인하여 중심주파수가 약 3% 정도 높아졌다. 이와 같은 필터는 구조상 상하측 대역에 감쇄극이 발생하는데, 이는 프로브간의 직접결합에 의한 현상으로 프로브의 배치에 따라 그 위치를 가변시킬 수 있으므로 특정위치의 감쇄특성이 요구되는 필터의 설계에 효과적으로 이용할 수 있다.

한편 보다 복잡한 특성이 요구되는 BPF에 있어서는 3중모드 유전체 공진기를 다수 배열할 수 있다. 공진기 2개를 배열한 6단 필터를 구성할 경우 분리된 공진기간의 결합은 공진모드가 변화되지 않도록 차폐된 금속판에 슬롯(slot)을 형성하여 실현하였으며, 결합량은 슬롯의 크기와 배치 각으로 결정하였다.

본 3중모드 공진기는 복잡한 특성이 요구되면서 동시에 소형(경량화가 필요한 차세대 이동 통신인 IMT-2000시스템등에 유용할 수 있다.

### 참 고 문 헌

[1] 小西 「實用マイクロ波回路設計ガイド」, 総合電子出版社, pp. 124-138  
 [2] 小林, 福岡, 吉田 「しゃへい形誘電體圓柱共振器の共振モード」, 電氣通信學會誌, J64-B, No.5,

pp. 433-441, 1981.  
 [3] Y. Konishi, "Novel dielectric waveguide components-Microwave applications of new ceramic materials", *Proc. IEEE*, vol. 79, pp.726-740, June 1991.  
 [4] Y. Kobayashi and K. Kubo, "Canonical band-pass filters using dual-mode dielectric resonators", *IEEE MTT-S Dig.*, D-3, pp.137-140, 1987.  
 [5] Y.Ishikawa, J.Hattori, M.Andoh and T.Nishikawa, "800MHz high power duplexer using TM dual mode dielectric resonators", *IEEE MTT-S Dig.*, II-3, pp.1617-1620, 1992.  
 [6] H. Tanaka, H. Nishida, and Y. Ishikawa, "Spherical dielectric resonator coupled with NRD Guide", *Proc. IEICE Japan, Spring Conf.*, C-103, 1991.  
 [7] T. Nishikawa, K. Wakino, H. Wada and Y. Ishikawa, "800MHz band dielectric channel dropping filter using TM110 triple mode resonance", *IEEE MTT-S Dig.*, K-5, pp.289-292, 1985.  
 [8] K. Wakino, T. Nishikawa and Y. Ishikawa, "Miniaturization technologies of dielectric resonator filters for mobile communications", *IEEE Trans. MTT*, vol. 42, no. 7, pp.1295-1300, July 1994.  
 [9] Anatol I.Zverev "Handbook of Filter synthesis", John Wiley & Sons, 1967.

### 항 재 호



1987년: 광운대학교 (공학사)  
 1992년: 한양대학교 (공학석사)  
 1998년: 일본 동북대학교 (공학박사)  
 1997년~1998년: 일본 동북대학교 조수  
 1998년~1999년: 일본 (주)Tokin 연구원

2000년~2001년: 삼성전자 통신연구소 책임연구원  
 2001년~현재: 경주대학교 컴퓨터전자공학부 전임강사  
 한국전자파학회 정회원, 일본전자정보통신학회 정회원  
 [주 관심분야] 안테나 해석 및 설계, RF부품, 전자파의 인체영향 등.