

논문 2005-42TE-4-11

Ku-Band Cavity BPF 설계

(The Design of Ku-Band Cavity BPF)

전 형 준*, 강 창 수**

(Jeon, HyungJoon and Kang ChangSoo)

요 약

본 논문에서는 삼중모드 공동 공진기를 이용하여 위성 탑재용 2단 6-pole 대역통과 필터를 설계·제작하였다. 대역통과 필터는 중심 주파수 14.5GHz(Ku-band)에서 대역폭 100MHz로 설계하였으며 응답은 Chebyshev 함수를 이용하였다. 공동 공진기의 공진모드는 TE113과 TM012 모드를 이용하였다. 공동 공진기 간의 결합(intercavity coupling)은 Chebyshev 필터 응답을 구현하기 위하여 TE113 모드의 자계 성분만을 결합하였다. 따라서 원통형 공동 공진기 내의 TE모드와 TM모드에 대한 E-,H-field 기본식으로부터 결합계수 수식을 유도하여 이를 intercavity 슬롯의 위치와 크기를 결정하는데 이용하였다. 설계·제작된 2단 6-pole 삼중모드 공동 공진기 대역통과 필터의 통과 대역폭내의 평균 삽입손실은 2.4dB이며 통과 대역의 반사손실 S11은 평균 15dB 이상으로 측정되었다. 본 논문에서 제작된 삼중모드 필터는 위성 탑재 장치내에 채널 필터 및 일반 시스템의 필터 어셈블리를 소형화시키는데 적용가능할 것으로 판단된다.

Abstract

In this paper, a 2 stage 6-pole bandpass filter(BPF) is designed and implemented by using triple-mode cavity for satellite payload system. The BPF has a 100MHz bandwidth at the center frequency of 14.5GHz(Ku-band) and the response of the filter is the Chebyshev function. The cavity filter uses two orthogonal TE₁₁₃ modes and one TM₀₁₂ mode. The coupling between the adjacent cavityes(intercavity coupling) results in a Chebyshev response and is accomplished by only H-field component of TE modes. The size and location of intercavity slot is determined by the coupling equation from E- and H-field of TE and TM resonant modes in circular cavity. The 2-stage 6-pole triple-mode cavity BPF has the insertion loss of 2.4dB and the reflection loss of 15dB in the passband. The triple-mode BPF proposed in this thesis can be used as channel filters for satellite payload system and can minimize filter assembly in general wireless communication system.

Keywords : 14.5GHz 대역통과 필터, 삼중모드, Chebyshev 필터, 공동 공진기, 옵셋형태 슬롯

I. 서 론

마이크로 웨이브 수동회로 중 대표적 소자인 필터나 듀플렉서 분야에는 고출력에 견딜 수 있으며 적은 삽입 손실을 갖는 도파관을 이용하여 주로 구현한다.^[1] 일반적인 위성탑재용 대역통과 필터는 6-pole 이상의

sharpness 특성을 요구하므로 기존의 단일 모드 공동 공진기 필터로는 그 무게 및 부피가 상당하여 무선통신 단의 소형·경량화에 최대 걸림돌이 되어왔다. 이러한 문제를 해결하기 위한 한 가지 방법으로서 다중모드(multi-mode) 기술을 이용하여 그 부피 및 크기를 줄이는 방법이 제안되었으며 현실적으로 모드의 운용 기술 및 제작상의 한계에 의해서 이중모드(dual-mode) 혹은 삼중모드(triple-mode)을 이용하는 것이 보편적이다.^[2,3]

하나의 물리적 공동 공진기 내에서 3개의 축퇴 모드(degenerate mode)를 동시에 공진시키는 삼중모드 기술은 효율적이고 독립적인 모드 제어와 공진기간의 에너

* 정희원, LS전선 기술개발본부 SBMO 차장
(LS Cable, SBMO)

** 정희원, 유한대학 전자정보과 교수
(Yuhan University)

접수일자: 2005년10월17일, 수정완료일: 2005년12월1일

지 결합이 중요하다. 특히 삼중모드 필터를 다단 연결 할 때 가장 중요한 요소는 원하는 필터 응답을 얻기 위한 공동공진기 슬롯을 설계·제작하는 것으로, 본 논문에서는 기존의 단일모드 필터에 비해 대략 2/3, 이중모드 필터에 비해서는 1/3의 크기 감소 효과를 갖는 삼중모드 기술을 이용하여 Chebyshev 응답을 갖는 2단 6-pole 공동 공진기 대역통과 필터를 설계·제작하였다.^[4]

II. 본 론

1. Chebyshev 응답을 갖는 슬롯 구조

공동 공진기의 입력과 출력단의 결합은 외부 양호도 (external quality factor) Q_e 에 의해서 표현할 수 있다. 필터의 응답이 Chebyshev 함수 특성을 갖는 경우에는 Q_e 를 정규화 파라메터에 의해서 식 (1)과 같이 결정할 수 있다. 이러한 외부 양호도 Q_e 와 slot의 기본 형태에 의해 결정되는 초기 자계 분극을 Minitial간의 관계는 식 (2)로 표현되며 정규화 서셉턴스는 식 (3)와 같다.

$$Q_E = \frac{g_0 g_1}{W_f} \text{ 또는 } \frac{g_n g_{n+1}}{W_f}$$

$$W_f = \frac{BW}{f_0} \quad (1)$$

$$M_{initial} = \sqrt{\frac{ab\lambda_{gw}L_c^3D_c^2}{16Q_e\lambda_0^2p^2}} \quad (2)$$

$$\frac{B}{Y_0} = -\sqrt{\frac{abQ_e\lambda_{gw}\lambda_0^2p^2}{\pi^2 L_c^3 D_c^2}} \quad (3.a)$$

$$L_c = p \frac{\lambda_{gc}}{2} \quad | \quad p: \text{정수} \quad (3.b)$$

여기서 W_f 는 비대역폭(fractional bandwidth)이고 g 는 저역통과 원형 필터(lowpass-prototype filter)의 정규화 파라메타이다. D_c 와 L_c 는 각각 원통형 공동 공진기의 직경 및 길이를 나타내고 a 와 b 는 공진기에 연결되는 구형 도파관의 크기를 나타낸다.

λ_0 는 자유공간에서의 파장이고 λ_{gw} 는 공진기 입출력 단에 연결되는 도파관의 관내파장이며 λ_{gc} 는 원통형 공동 공진기의 관내파장이다.

그림 1은 원통형 공동 공진기와 구형 도파관이 슬롯으로 결합된 구조를 나타낸다. 그림 1.에서 나타낸 바와 같이 입·출력단에서 슬롯의 형태는 도파관부분과 공

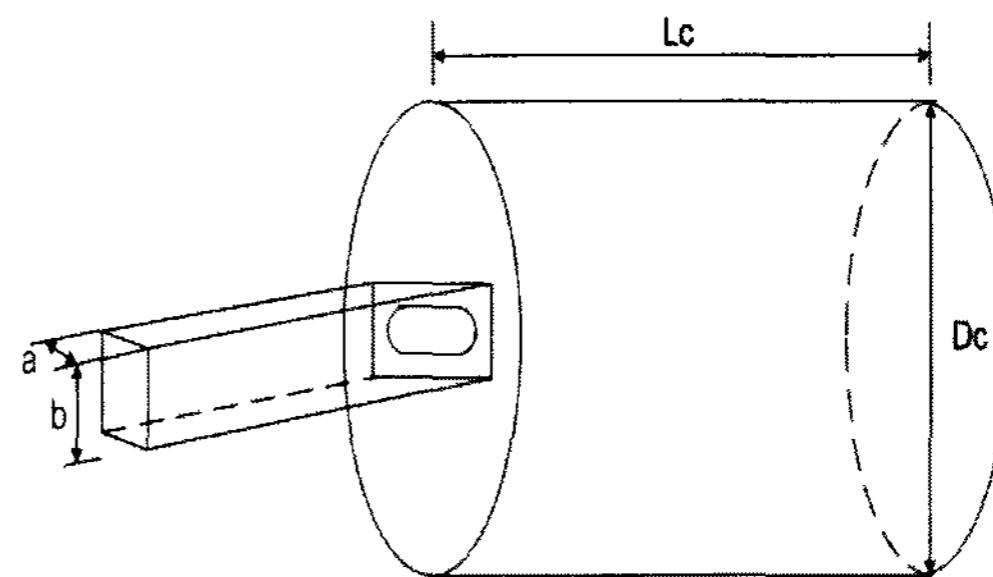


그림 1. 원통형 공동 공진기와 구형 도파관 간의 결합

Fig. 1. Coupling between cylindrical cavity and rectangular waveguide.

동 공진기부분 간에 유도성 결합(inductive coupling)을 구현하기 위해서 longitudinal-type을 사용한다.

그림 2는 이중모드 공동 공진기 필터의 입·출력단에서 사용할 수 있는 inductive 슬롯을 나타낸다. 그림 2.와 같은 round-end형 슬롯의 크기와 분극율과의 관계는 식 (4)로 구할 수 있다.

$$M_{initial} = f \left(\frac{W}{L} \right) L^3 \quad (4.a)$$

$$f \left(\frac{W}{L} \right) = \frac{0.187 + 0.052 \left(\frac{W}{L} \right) \left(1 - \frac{W}{L} \right)}{\ln \left(1 + \frac{2.12}{\left(\frac{W}{L} \right)} \right)} \quad (4.b)$$

도파관 구조를 갖는 필터에서 필터 응답은 intercavity 슬롯의 형태에 의해서 좌우된다. 본 논문에서는 Chebyshev 함수 응답을 갖는 필터를 구현하고자 하므로 공진기 설계에 있어서 비 인접(non-adjacent) 공진기 간의 결합, 즉 그림 3에서 #3(TEh)과 다음단의 #4(TEh)를 제외한 결합은 발생되지 않도록 하는 것이 중요하다.

따라서 삼중모드 공진부를 선택적으로 결합해야 하는 조건을 만족시켜야 하므로 삼중모드에서 TM01q 모드의 Ez 성분이 서로 결합되지 않도록 하는 슬롯 구

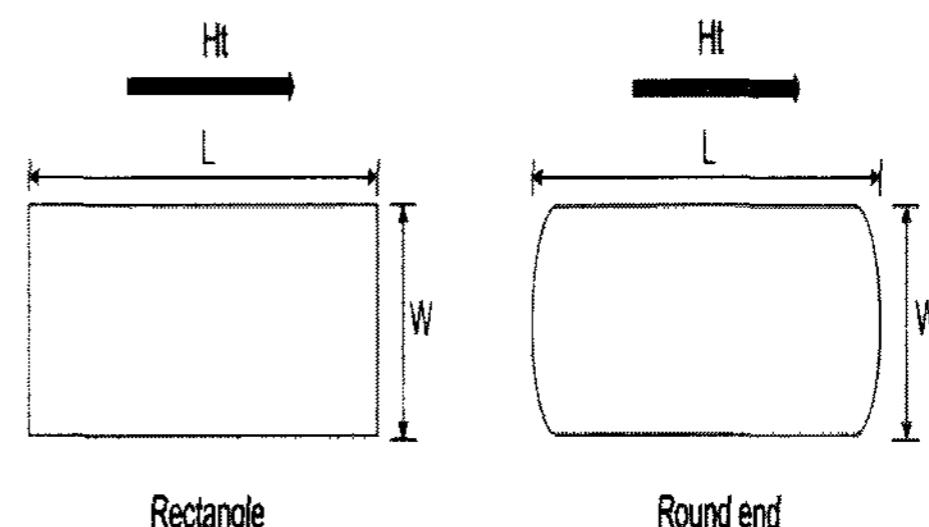


그림 2. 공동 공진기 입출력단의 슬롯

Fig. 2. Slot of cavity at input and output.

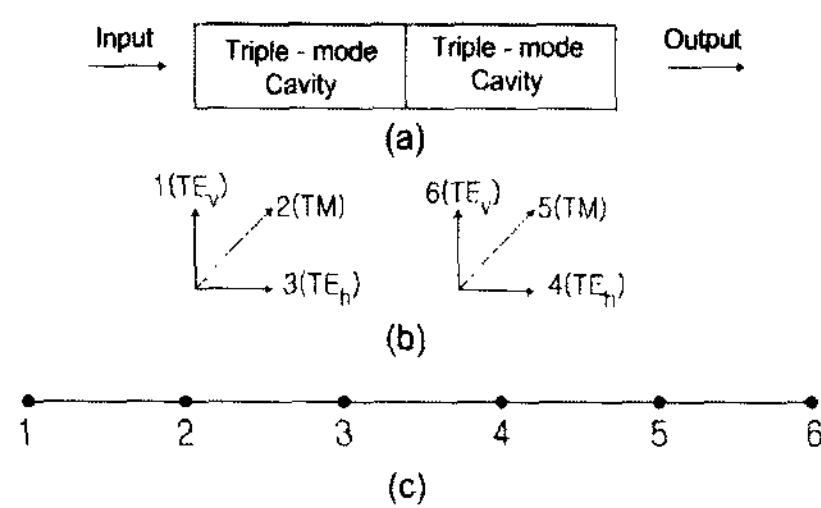


그림 3. 6-pole 대역통과 필터의 설계 개념
 (a) 6-pole 대역통과 필터의 구성
 (b) 6-pole 대역통과 필터의 운용 모드
 (c) 6-pole 대역통과 필터의 신호 흐름
 Fig. 3. Design concept of 6-pole BPF.
 (a) Schematics of 6-pole BPF
 (b) Operating mode of 6-pole BPF
 (c) Signal flow of 6-pole BPF

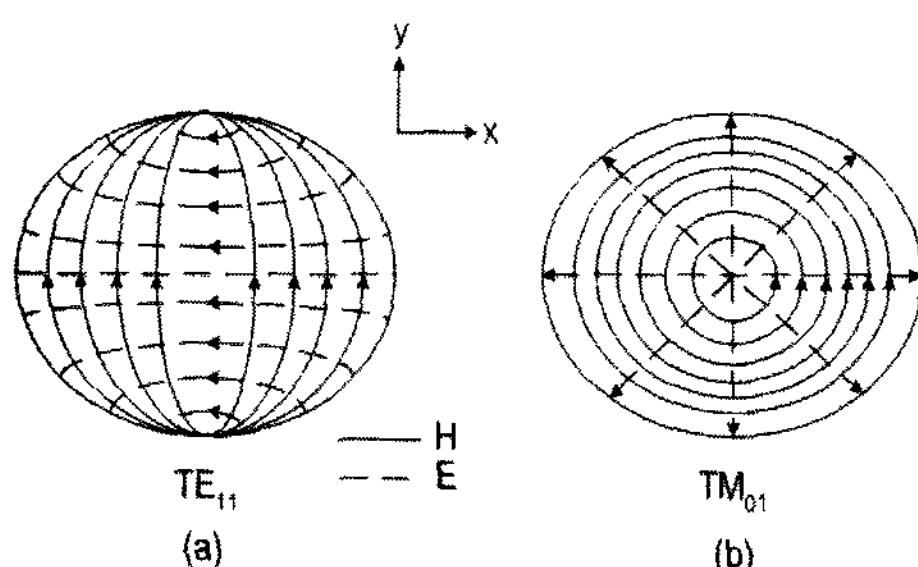


그림 4. Intercavity 슬롯 단면에서의 전자계 분포
 (a) TE₁₁ 모드의 전자계 분포
 (b) TM₀₁ 모드의 전자계 분포
 Fig. 4. Electromagnetic field configuration of a intercavity slot plane.
 (a) electromagnetic field configuration of TE₁₁-mode
 (b) electromagnetic field configuration of TM₀₁-mode

조가 필요하다. 본 논문에서는 전기적 공진 #3과 #4의 결합을 위해 TE 모드의 tangential H-field를 이용하였다. 그림 4는 원통형 공동공진기의 공동 공진기 슬롯 단면에서 TE₁₁과 TM₀₁ 모드의 전자계 분포를 나타낸다.

그림 4.에서 원통형 도파관의 공동공진기 슬롯 평면에 존재하는 TE₁₁과 TM₀₁ 모드의 전자계 분포식은 식 (5)와 같이 표현할 수 있다.

$$Hy \mid TE \propto \frac{R}{x_{11} \cdot \rho} J_1 \left(\frac{x_{11} \cdot \rho}{R} \right) \sin^2 \phi + J_1' \left(\frac{x_{11} \cdot \rho}{R} \right) \cos^2 \phi \quad (5.a)$$

$$Ey \mid TM \propto J_0 \left(\frac{x_{01} \cdot \rho}{R} \right) \quad (5.b)$$

$$Hy \mid TM \propto J_0 \left(\frac{x_{01} \cdot \rho}{R} \right) \sin \phi \quad (5.c)$$

$$\sin \phi = Y \sqrt{X^2 + Y^2}$$

$$\cos \phi = X \sqrt{X^2 + Y^2}$$

여기서, R은 공동의 반지름이며 ρ는 공동의 중심과 슬롯 중심 사이의 거리 $\sqrt{x^2 + y^2}$ 를 나타낸다.

그림 5, 그림 6, 그림 7은 식 (7)에서 계산한 TE₁₁과 TM₀₁모드의 전계와 자계 분포를 나타낸 것이다. 이 때 옵-셋 거리는 공진기 반경 R로 정규화하였다. 그림 5는 TE₁₁ 모드에서의 tangential한 Hy 필드이며 그림 6. 과 그림 7은 TM₀₁ 모드에서의 tangential한 Hy 필드와 longitudinal한 Ez 필드이다.

그림 5에서 TE₁₁ 모드의 Hy는 ρ = 0, 즉 x=y=0에서 최대로 표현됨을 알 수 있고 그림 6에서 TM₀₁ 모드의 Hy는 y=0, x/R=0.76 인 지점에서 최대값을 가진다. 또한 그림 7에서 TM₀₁ 모드의 최대 Ez는 ρ = 0에서 이루어진다.

그림 8은 원하는 모드간의 결합만을 위한 옵-셋 형태의 공동 공진기 슬롯을 나타낸다. 그림 8에서 Chebyshev 응답을 얻기 위한 결합 즉, 전기적 공진 #3과 #4의 연결은 TE11p-TE11p 모드 결합계수인 kTE로

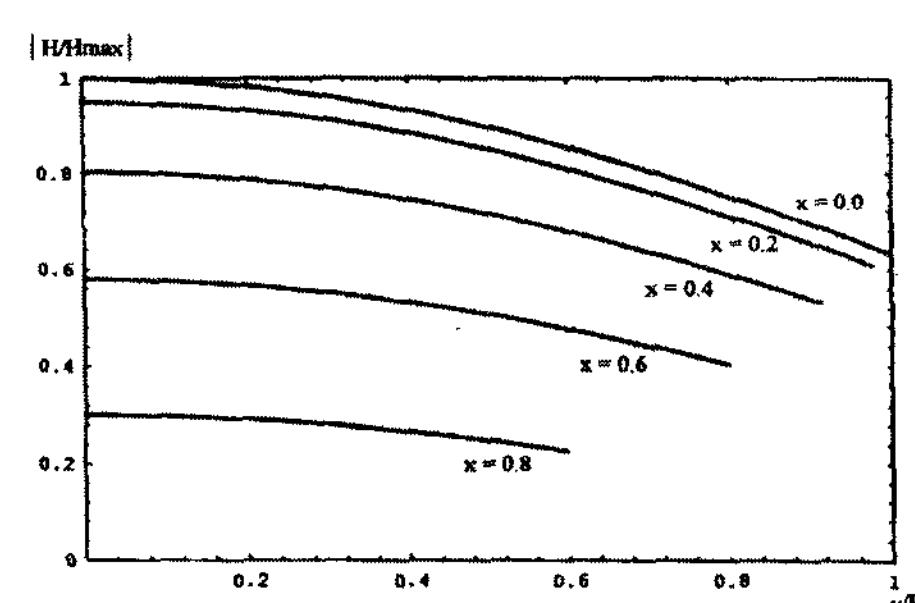


그림 5. TE11 모드의 Hy 필드
 Fig. 5. Hy field of TE11 mode.

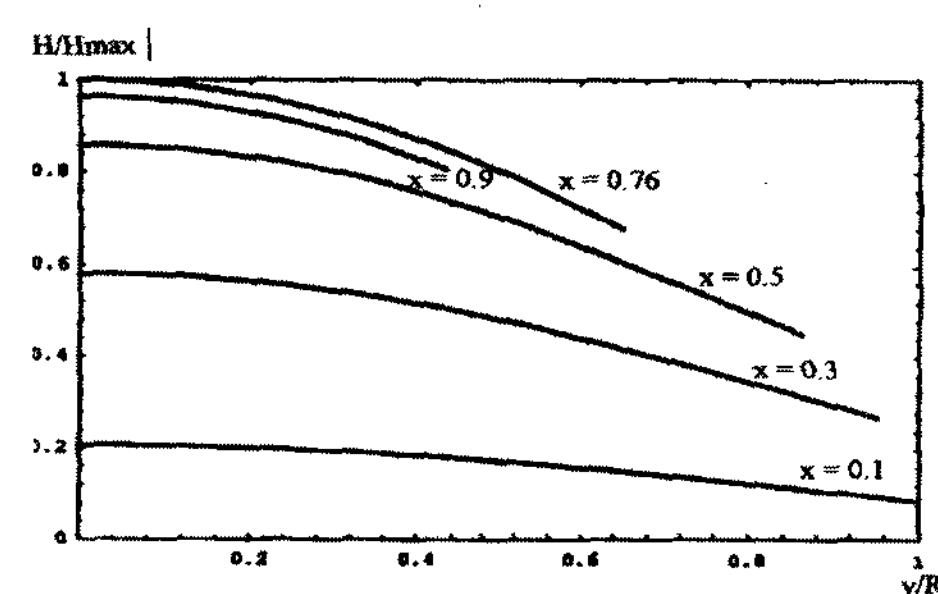


그림 6. TM01 모드의 Hy 필드
 Fig. 6. Hy field of TM01 mode.

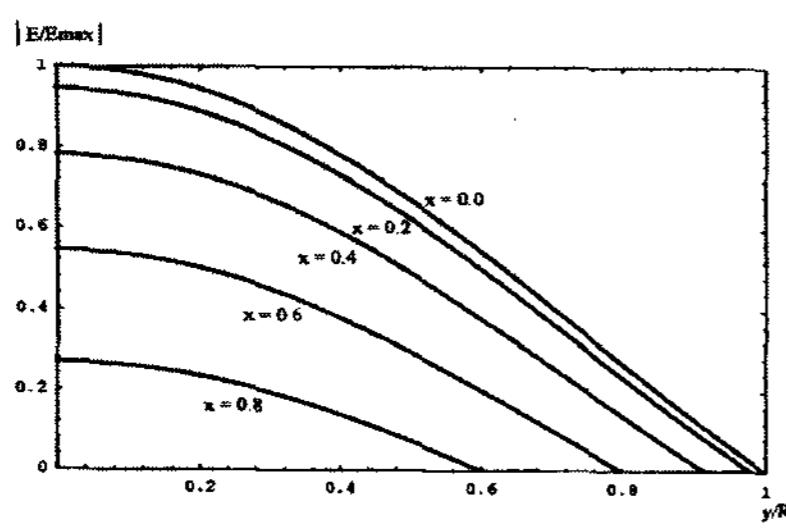


그림 7. TM01 모드의 Ez 필드
Fig. 7. Ez field of TM01 mode.

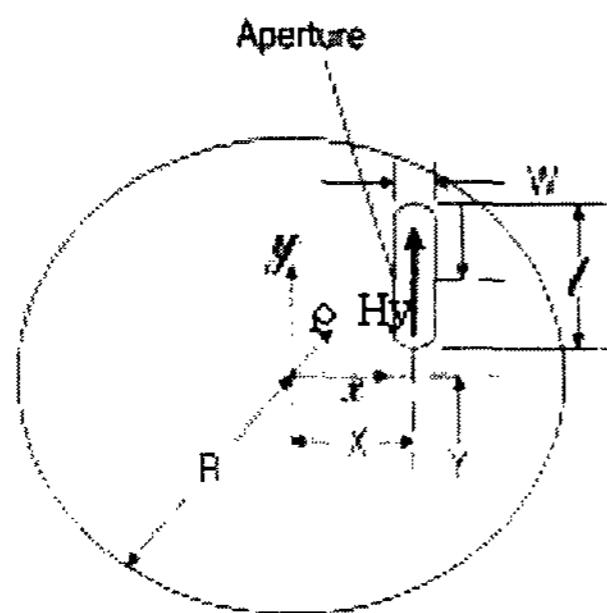


그림 8. 옵-셋형 intercavity 슬롯의 구조
Fig. 8. Structure of offset-typed intercavity slot.

나타낼 수 있으며 식 (6)과 같이 정의 할 수 있다.

$$k_{TE} = \frac{\mu P_{M(c)} |H_t|^2}{W} \frac{f_0}{\Delta f} \quad (6.a)$$

슬롯 단면($z=0$)에서의 tangential H성분 H_t 는

$$|H_t| = (\sqrt{|H_\rho|^2 + |H_\phi|^2}) / 2 \quad (6.b)$$

$$H_\rho \cong -j \frac{k_\rho k_z}{\omega \mu \epsilon} J_1'(k_\rho \cdot \rho) \cos \Phi \quad (6.c)$$

$$H_\phi \cong j \frac{1}{\omega \mu \epsilon} \frac{k_z}{\rho} J_1(k_\rho \cdot \rho) \sin \Phi \text{ 이고,}$$

공동 공진기의 저장 축적 에너지 W 는

$$W = \epsilon \int_v (|E_\rho|^2 + |E_\phi|^2) dv \cong 0.281 \frac{L\pi}{2\epsilon} \quad (6.d)$$

이다.

또한 ρ 및 z 방향으로 위상상수 $k\rho$ 및 kz 는

$$k\rho = \frac{x'_{11}}{R}, \quad x'_{11} = 1.841, \quad kz = \frac{\rho\pi}{L} \quad (6.e)$$

이다. PM(c)는 슬롯의 두께와 크기를 고려한 자기분극율

값을 나타낸다. 식 (6)에 의해서 TE11p모드간의 결합계수 k_{TE} 를 유도하면 식(7)과 같다.

$$k_{TE} =$$

$$\frac{\mu P_{M(c)} \frac{k_z^2}{(\omega \mu \epsilon)^2} k_\rho^2 J_1'^2(k_\rho \rho) + \frac{1}{\rho^2} J_1^2(k_\rho \rho)}{0.281 \frac{L\pi}{2\epsilon}} \frac{f}{\Delta f} \quad (7)$$

식 (7)에서 결합계수 k_{TE} 는 슬롯이 중심으로부터 떨어진 위치(ρ)와 슬롯의 크기에 따른 자계분극율 PM(c)로 표현됨을 알 수 있다.

이와 같은 결과로 본 연구에서 채택한 필터 구조에서는 TE11p 모드를 사용하는 일반적인 이중모드 공진기와는 달리 슬롯이 plate의 중심에서 옵-셋되게 된다.

2. 삼중모드 공동 공진기 대역통과 필터의 설계

본 연구에서는 원통형 공동 공진기를 사용하여 Chebyshev 응답을 갖는 대역통과 필터를 각각 삼중모드로 공진하는 두 단의 공동 공진기를 서로 결합하여 구현하였다. 대역통과 필터는 중심 주파수 14.5GHz에서 대역폭 100MHz를 갖도록 하였다. 필터의 설계사양은 표 1과 같다.

표 1의 설계 조건에 따른 필터의 Q_e 와 각 공진기간의 결합계수 k 를 구하면 다음과 같다.

$$Q_e = 169.29$$

$$k_{12} = 5.4 \times 10^{-3}$$

$$k_{23} = 4.06 \times 10^{-3}$$

$$k_{34} = 2.94 \times 10^{-3}$$

$$k_{45} = 4.06 \times 10^{-3}$$

$$k_{56} = 5.4 \times 10^{-3}$$

표 1. 6-pole 대역통과 필터 설계 규격

Table 1. Design specifications of 6-pole bandpass filter.

항 목	규 격
중심 주파수(f0)	14.5GHz
주파수 대역폭(BW)	100 MHz
삽 입 손 실	1 dB
Ripple 특 성	0.1 dB
저지대역 감쇠 (BW*2)	-30 dB
필 터 차 수	6
응답 특 성	Chbyshev 함수
필 터 구 조	longitudinal 구조

3. 삼중모드 공동 공진부 설계

본 논문에서는 하나의 물리적인 공동 공진기내에서 세 개의 전기적 공진을 일으키는 삼중모드 방법을 이용하여 대역통과 필터를 설계하였다.

그림 9은 TE_{112} 모드와 TM_{012} 모드를 축퇴관계로 하는 2단 6-pole 삼중모드 필터의 구조를 나타낸다. 그림 9에서 T1과 T3 그리고 T4와 T6은 TE_{113} 모드를 조절하기 위한 나사이며 T2와 T5는 TM_{012} 모드를 결합하는 나사이다. 또한 공동 공진기간의 결합을 위한 공동 공진기 슬롯은 Chebyshev 응답을 구현하기 위해서 옵션시켰다. 그림 10은 2단 6-pole 삼중모드 공동 공진기 대역통과 필터에 대한 설계 흐름도이다.

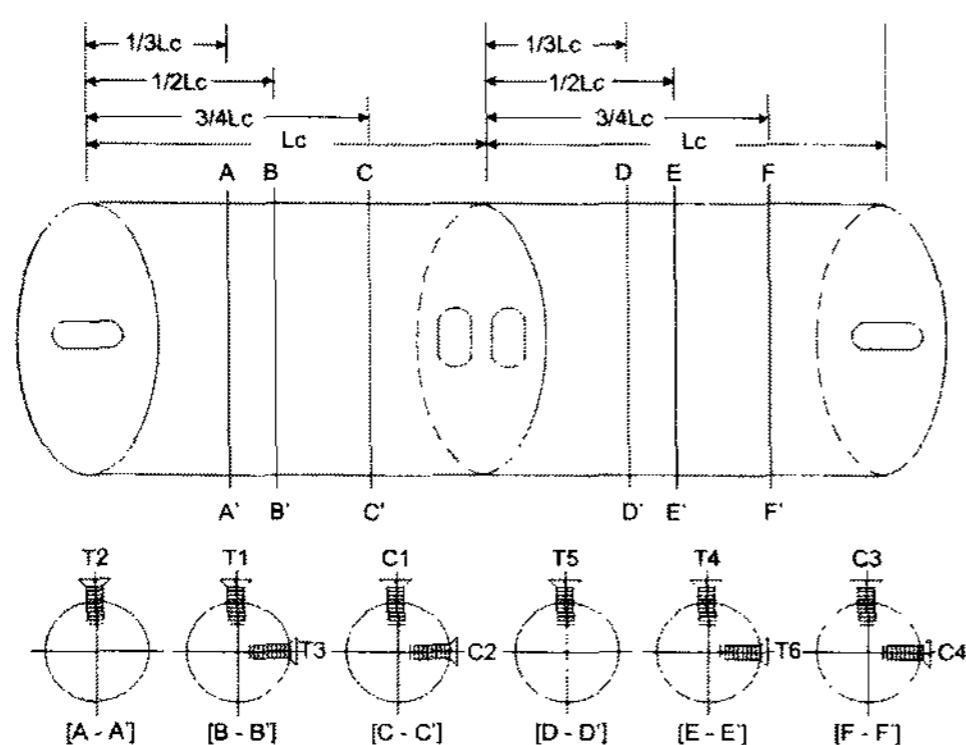


그림 9. 2단 6-pole 삼중모드 필터의 구조

Fig. 9. Structure of 2-stage 6-pole triple-mode filter.

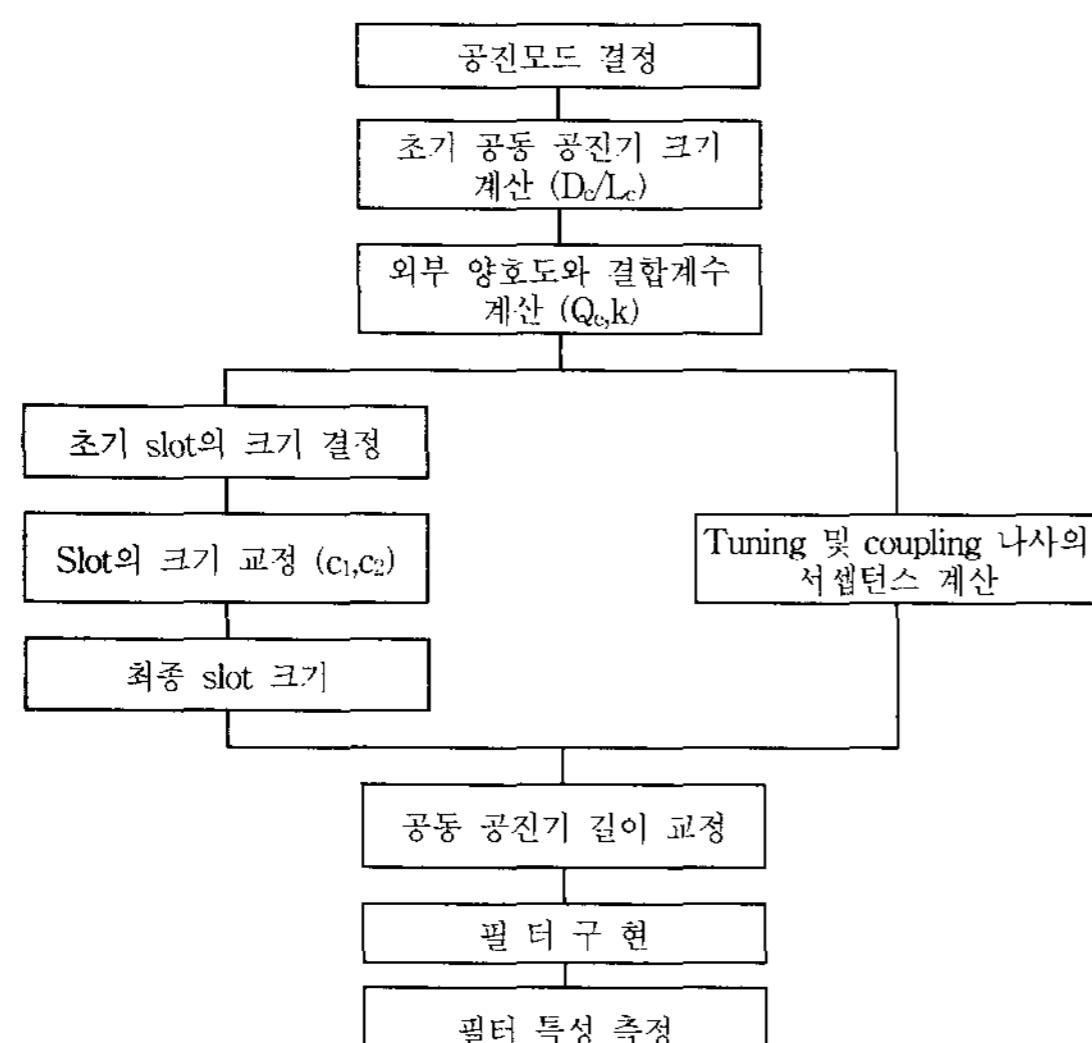


그림 10. 공동 공진기 필터의 설계 흐름도

Fig. 10. Flowchart of the cavity filter design.

III. 대역통과 필터 제작과 측정

본 논문에서 삼중모드 공동 공진기 대역통과 필터는

표 2. 6-pole 대역통과 필터 규격 사양

Table 2. Design specifications of 6-pole bandpass filter.

항 목	크 기 [mm]
슬롯	
- 두께	0.2
- 입·출력부	8.4 × 0.7
- 공동공진기(옵션 거리)	5.4 × 0.6 (0.2a)
도파관	
- 직경	18.28Φ
- 길이	40.54
Adaptor	「Flann」 17091-SF90
나사 직경	2.5Φ

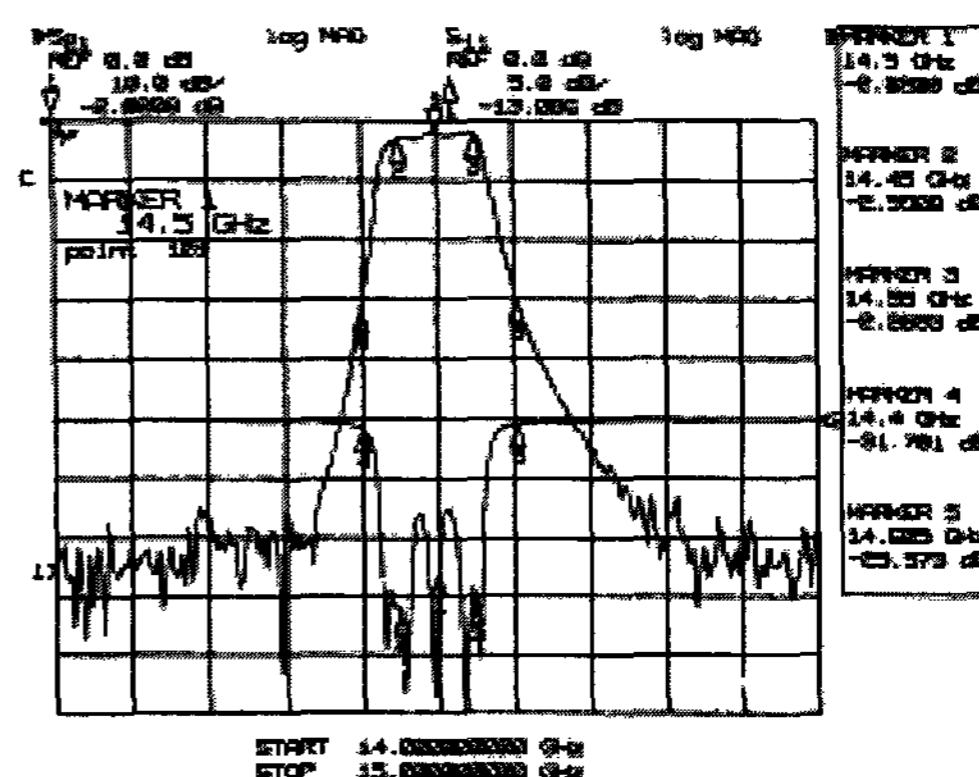


그림 11. 필터의 대역통과 특성 - Span 1GHz

Fig. 11. A bandpass characteristics of filter-Span 1GHz.

구리 합금을 가공하여 원통형으로 만들었으며 longitudinal형으로 제작하였다.

SMA-connector와 waveguide간의 transition인 Adaptor는 상용제품인 Flann Microwave사의 17091-SF90을 사용하였다. 기구물의 측정에는 HP 사의 Vector Network Analyzer를 사용하여 측정하였다.

표 2에 제작된 2단 6-pole Chebyshev 응답 삼중모드 공동 공진기 필터의 외부 사양을 나타내었다.

그림 11은 중심 주파수 14.5GHz에서 대역폭 100MHz를 갖는 6-pole 필터의 응답을 span 1GHz로 측정한 것이다. 그림에서 marker 1은 중심 주파수를 나타내고 marker 2와 marker 3는 통과 대역폭 100MHz를 나타낸다. marker 4와 marker 5는 통과 대역폭 100MHz의 2배를 나타낸다.

그림 11에서 필터의 중심 주파수는 14.5GHz에서 정확히 동작하며 통과 대역폭에서의 삽입손실은 평균 평균 2.4dB로 측정되었고 통과 대역의 반사 손실 S_{11} 은 15dB

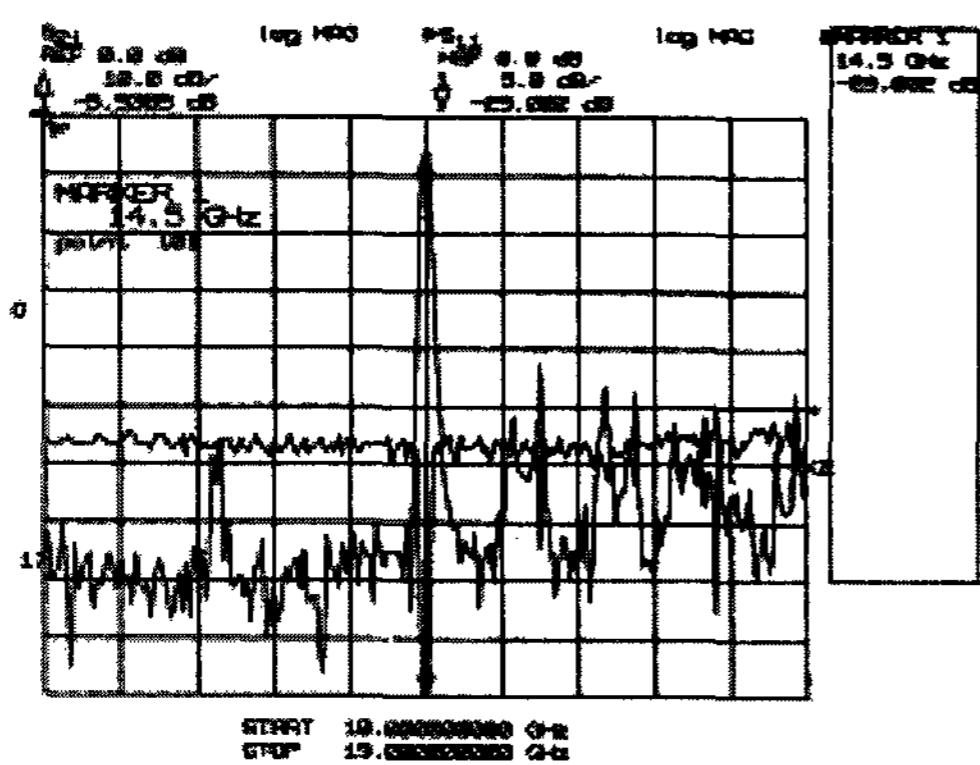


그림 12. 필터의 대역통과 특성 – Span 9GHz
Fig. 12. A bandpass characteristics of filter-Span 9GHz.

표 3. 6-pole 대역통과 필터의 설계 사양과 측정 데이터의 비교
Table 3. Comparision of design specifications and measurement datas of 6-pole bandpass filter.

항 목	설 계 사 양	측정 데이터
중심 주파수 (f_0)	14.5 GHz	14.5 GHz
주파수 대역폭(BW)	100 MHz	100 MHz
삽 입 손 실	1 dB	2.4 dB
Ripple 특 성	0.1 dB	0.37 dB
저지대역 감쇠(BW×2)	- 30 dB	- 30.9 dB
필 터 차 수	6	6

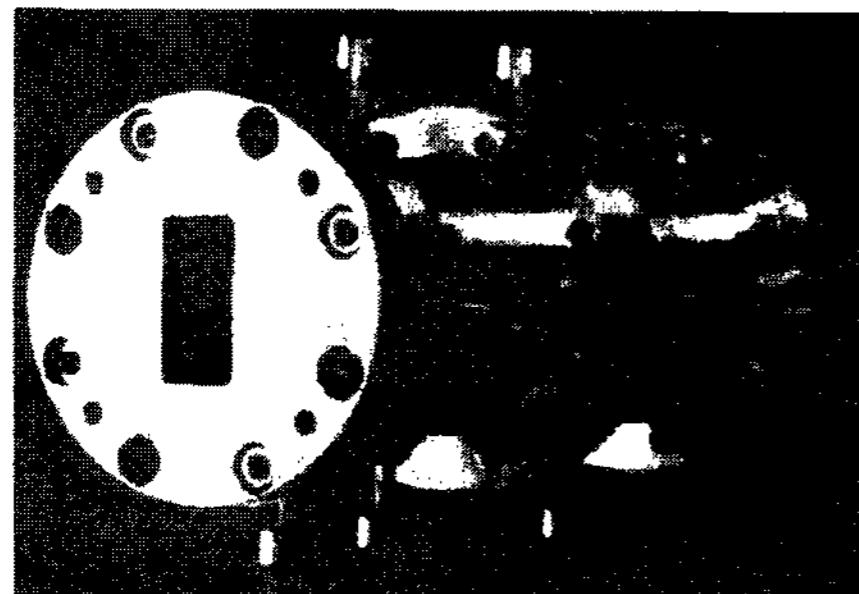


그림 13. 2단 6-pole 삼중모드 공동 공진기 필터
Fig. 13. 2 stage 6-pole triple-mode cavity filter.

이상이었다. 또한 대역폭의 2배 지점에서 30dB의 저지 대역 감쇠를 가지며 S_{11} 응답이 6-pole 특성으로 나타

나 설계상의 필터 차수인 6차를 만족하는 것으로 나타 났다.

측정결과 제작된 대역통과 필터는 통과 대역폭내에 서 삽입손실이 다소 크게 측정되었다. 이러한 손실량은 공동 공진기의 내벽과 슬롯 및 나사를 전도성이 좋은 재료를 사용하여 제작한다면 보완할 수 있을 것이다. 또한 공동 공진기간의 결합인 공동공진기 슬롯의 제작 시 작은 dimension으로 인한 많은 제작오차가 발생하였는데 이러한 점은 공동공진기 슬롯을 좀 더 미세한 triming 과정을 거쳐 제작하거나 슬롯의 두께를 늘이는 방법을 이용하면 개선할 수 있을 것이다. 또한 통과 대역폭내에서 flatness 특성이 0.37dB로 설계상의 리플 값인 0.1dB보다 크게 측정되었다. 이러한 flatness 특성은 조절 및 결합 나사를 보다 작은 직경을 갖도록 제작하여 사용한다면 세부적 조절이 가능하여 개선할 수 있을 것이다. 그림 12은 필터의 응답을 9GHz span으로 측정한 것을 나타낸다. 그림에서 저지대역에서 감쇄는 67dB 이상으로 나타났다.

표 3에 2단 6-pole 삼중모드 공동 공진기 대역통과 필터의 설계 사양과 측정 데이터를 비교하였고 그림12에는 제작된 필터를 보였다.

IV. 결 론

본 논문에서는 하나의 공동 공진기에서 세 개의 상호 수직한 공진 모드를 이용하여 2단 6-pole 삼중모드 대역통과 필터를 설계·제작하였다. 삼중모드는 TE_{113} 모드의 수평, 수직필드와 축퇴관계에 있는 TM_{012} 모드로 공진하며 longitudinal 형태로 연결하였다.

삼중모드를 연결하는 공동공진기 슬롯은 Chebyshev 필터 응답을 구현하기 위한 선택적인 결합을 위해 슬롯 평면에 수평한 TE 모드의 자계 성분만을 결합하도록 하였다. 이를 위해 슬롯 평면에서의 TM 모드와 TE모드의 tangential 과 longitudinal field의 세기분포를 구하여 이로부터 TE_{11p} 모드간의 결합계수에 대한 수식을 정확히 유도하여 옵-셋 형태의 슬롯을 제작하였다. 제작된 2단 6-pole 삼중모드 공동 공진기대역통과 필터는 중심주파수 14.5GHz에서 대역폭 100MHz를 가지며 대역폭의 2배 지점에서 30dB의 감쇄를 가져 설계 사양의 6차를 만족하였다.

본 논문에서 제시한 삼중모드 공동 공진기 필터는 기

존의 이중모드 공동 공진기 필터와 비교할 때 크기와 무게를 삼분의 일까지 줄일 수 있는 장점이 있어 향후 위성중계기용 채널 필터 및 무선통신 시스템내의 필터 어셈블리 제작 등에 널리 이용될 수 있다.

참 고 문 헌

- [1] C. Kudsia, R. Cameron and W.C. Tang "Innovation in Microwave Filters and Multiplexing Networks for Communications Satellite System", IEEE Trans. Microwave Thory Tech, MTT-40, No.6, pp. 1133 ~ 1149, Jun 1992.
- [2] A. E. Atia and A. E. Williams, "New Types of waveguide Band Pass Filters for Satellite Transponders" COMSAT Tech, No 1, pp. 21-43, Fall 1971.
- [3] W. C. Tang "A true Elliptic-Function Filter Using Triple-mode degenerate Cavities" IEEE Trans. Microwave Thory Tech, MTT-32, No.11, pp. 1449 ~ 1454, Nov 1984.
- [4] Mcdonald "Simple Aprocimations for the Longitudinal magnetic polarizabilities of some small apertures" IEEE Trans. Microwave Thory Tech, MTT-36, No.7, pp. 1141 ~ 1144, July 1988.

저자소개



전형준(정회원)

1993년 광운대학교 전자공학과
1995년 광운대학교 전자공학과
석사
2003년 광운대학원 전자공학과
박사
2005년 현재 LS전선 기술개발본부

<주관심분야:RF회로, 근거리 무선통신>



강창수(정회원)

1982년 광운대학교 전자공학과
1984년 한양대학교 공학석사
1992년 광운대학교 전자공학과
박사
1995년~1996년 Clemson Univ.
(美) Post Doctor

2005년 현재 유한대학 전자정보과 교수

<주관심분야:신경회로망, 반도체 회로설계 등>