

삼중모드 기법을 이용한 소형 공동 공진기 대역통과 필터

A Small Cavity Bandpass Filter using Triple-Mode Technique

홍 의 석

Ui-Seok Hong

요 약

본 논문에서는 삼중모드 공동 공진기를 이용하여 위성 탑재용 2단 6-pole 대역통과 필터를 설계·제작하였다. 대역통과 필터는 중심 주파수 14.5 GHz(Ku-band)에서 대역폭 100 MHz로 설계하였으며 응답은 Chebyshev 함수를 이용하였다. 공동 공진기의 공진모드는 TE_{113} 과 TM_{012} 모드를 이용하였다. 공동 공진기간의 결합(intercavity coupling)은 Chebyshev 필터 응답을 구현하기 위하여 TE_{113} 모드의 자계 성분만을 결합하였다. 따라서 원통형 공동 공진기내의 TE 모드에 대한 H-field 기본식으로부터 결합계수 수식을 유도하여 이를 intercavity 슬롯의 위치와 크기를 결정하는데 이용하였다. 측정된 필터 응답은 설계 사양과 잘 일치하였다.

Abstract

A 2 stage 6-pole bandpass filter(BPF) is designed and implemented by using triple-mode cavity for satellite payload system. The BPF has an 100 MHz bandwidth at the center frequency of 14.5 GHz, Ku-band. The cavity filter uses two orthogonal TE_{113} modes and one TM_{012} mode. The intercavity coupling between the adjacent cavities results in a Chebyshev response and is accomplished by H-field component of TE modes. The size and location of intercavity slot are determined by the coupling equation from H-field of TE resonant modes in circular cavity. The measured filter response agrees well with the theoretical data.

I. 서 론

무선통신 서비스 분야는 언제, 어디서나, 누구나(anytime, anywhere, anybody)란 구호 아래 최근에는 휴대가능한 이동 위성통신 서비스로까지 발전하게 되었다. 이와 같은 무선 통신 발달은 고성능이면서도 소형·경량의 통신 부품을 요구한다.

마이크로 웨이브 수동회로 중 대표적 소자인 필터나 듀플렉서 분야에는 고출력에 견딜 수 있으며 적은 삽입손실을 갖는 도파관을 이용하여 주로 구

현된다. 일반적인 위성탑재용 대역통과 필터는 6-pole 이상의 sharpess 특성을 요구하므로 기존의 단일 모드 공동 공진기 필터로는 그 무게 및 부피가 상당하여 무선통신단의 소형·경량화에 최대 걸림돌이 되어왔다. 이러한 문제를 해결하기 위한 한 가지 방법으로서 다중모드(multi-mode) 기술을 이용하여 그 부피 및 크기를 줄이는 방법이 제안되었다^{[1],[2]}.

본 논문에서는 기존의 단일모드 필터에 비해 대략 2/3, 이중모드 필터에 비해서는 1/3의 크기 감소 효과를 갖는 삼중모드 기술을 이용하여 2단

「이 논문은 1998년도 광운대학교 학술연구비에 의하여 연구되었음.」
 광운대학교 전파공학과(Dept. of Radio Sciences and Eng., Kwangwun University)
 · 논문 번호 : 980415-043
 · 수정완료일자 : 1998년 6월 15일

6-pole 공동 공진기 대역통과 필터를 설계·제작하였다. 본 논문에서 제작한 필터는 기존의 이중 및 삼중모드 공동 공진기로 구성된 2단 5-pole 대역통과 필터^[3]와 달리 삼중모드만으로 구성되어 있어 같은 2단에서 6-pole 동작을 하므로 보다 우수한 sharpness 특성을 얻을 수 있다.

하나의 물리적 공동 공진기 내에서 3개의 축퇴 모드(degenerate mode)를 동시에 공진시키는 삼중모드 기술은 효율적이고 독립적인 모드 제어와 공진기간의 에너지 결합이 중요하다. 특히 삼중모드 필터를 다단 연결할 때 가장 중요한 요소는 원하는 필터 응답을 얻기 위한 intercavity 슬롯을 설계·제작하는 것이다^[4].

본 논문에서는 TE 모드의 tangential field 성분을 이용하여 TE_{11p} 모드간 결합에 대한 결합계수 수식을 정확하게 해석하였다. 또한 해석된 수식에 근거하여 오프셋(offset) 형태의 슬롯을 설계하였으며 이러한 슬롯구조를 2단 6-pole 삼중모드 대역통과 필터를 제작하는데 이용하였다^[5]. 실험결과 대역통과 필터는 Chebyshev 응답 특성을 얻었으며 설계상의 필터차수인 6차를 만족하였다.

II. 다중모드 공동 공진기 필터

2-1 삼중모드 공동 공진기

삼중모드 공동 공진기는 1개의 물리적인 공동 공진기내에 세번의 전기적 공진을 이용하는 것이다. 본 논문에서는 삼중모드 공진 구조에 TE₁₁₃ 모드와 TM₀₁₂ 모드의 2 종류 모드를 이용하였으며 특히 TE₁₁₃ 모드를 이중모드화하여 전기적 공진을 유도하였다^[3].

그림 1은 Chebyshev 응답을 갖는 2단 6-pole 대역통과 필터를 구현하기 위한 설계 개념을 나타낸다. 여기서 필터 응답이 Chebyshev 함수 특성을 나타내도록 하기 위해서 공동 공진기간의 결합은 첫번째 공진기의 TE_n모드(그림 1(b)의 3번 모드)와 두번째 공진기의 TE_n모드(그림 1(b)의 4번 모드)만 연결되도록 하였다.

삼중모드 공동 공진기 필터는 직교하는 세 개의 공진모드가 동일한 주파수에서 공진할 수 있도록

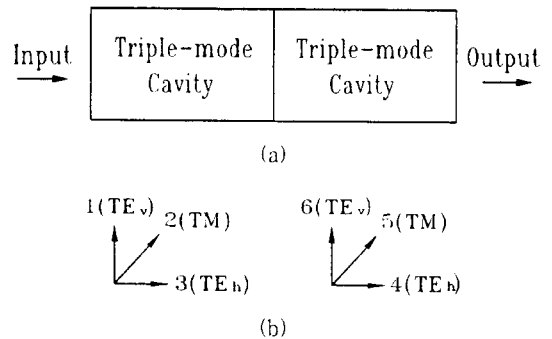


그림 1. 6-pole 대역통과 필터
(a) 구조 (b) 공진 모드

Fig. 1. 6-pole bandpass filter
(a) Structure (b) Resonance modes.

설계되어야 한다. 식 (1)과 (2)는 공동의 직경(D_c)과 길이(L_c)에 대한 공진주파수와와의 관계를 나타낸다.

$$\left(\frac{1}{\lambda_r}\right)_{TE}^2 = \left(\frac{x'_{mn}}{\pi D_c}\right)^2 + \left(\frac{p}{2L_c}\right)^2 \quad (1)$$

$$\left(\frac{1}{\lambda_r}\right)_{TM}^2 = \left(\frac{x_{mn}}{\pi D_c}\right)^2 + \left(\frac{p}{2L_c}\right)^2 \quad (2)$$

여기서 λ_r 는 공진 파장이고 x'_{mn} 과 x_{mn} 은 Bessel 함수 $J'_m(x)$ 과 $J_m(x)$ 의 n 번째 근이다. 또한 p 는 반파장의 수를 나타내는 정수이다.

TE₁₁₃과 TM₀₁₂ 모드를 만족시키는 공동의 직경 및 길이에 관한 식은 두 모드의 공진길이가 서로 같아야 하므로 TE₁₁₃과 TM₀₁₂ 모드가 동시에 공진하도록 공동의 직경과 길이를 정한다. 공동의 직경과 길이에 관한 식은 식 (3)과 같다.

$$\frac{D_c}{L_c} = \frac{2}{\pi} \sqrt{\frac{x_{mn}^2 - x'^2_{mn}}{p^2_{TE} - p^2_{TM}}} \quad (3)$$

2-2 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 파라미터에 의해서 식 (4)와 같이 결정할 수 있다. 이러한 외부 양호도

Q_e 와 공진기의 기본 형태에 의해 결정되는 초기 자계 분극을 $M_{initial}$ 간의 관계는 식 (5)로 표현되며 정규화 서셉턴스 성분 $\frac{B}{Y_0}$ 는 식 (6)과 같다^[6].

$$Q_e = \frac{g_0 g_1}{W_f} \quad \text{혹은} \quad \frac{g_n g_{n+1}}{W_f} \quad (4)$$

여기서 $W_f = \frac{BW}{f_0}$ 이다.

$$M_{initial} = \sqrt{\frac{ab\lambda_{gw} L_c^3 D_c^2}{16Q_e \lambda_0^3 p^2}} \quad (5)$$

$$\frac{B}{Y_0} = -\sqrt{\frac{abQ_e \lambda_{gw} \lambda_0^3 p^2}{\pi^2 L_c^3 D_c^2}} \quad (6)$$

여기서 $L_c = p \frac{\lambda_{gc}}{2}$ | p :계수이다.

위 식에서 W_f 는 비대역폭(fractional bandwidth)이고 g 는 저역통과 원형 필터의 정규화 파라미터이다. 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 입출력단에 연결되는 도파관의 관내파장이며 λ_{gc} 는 원통형 공동 공진기의 관내파장이다.

그림 2는 삼중모드 공동 공진기 필터의 입·출력단에서 사용할 수 있는 inductive 슬롯을 나타낸다. 그림 2와 같은 끝이 둥근 슬롯의 크기와 분극율과의 관계는 식 (7)로 구할 수 있다^{[7],[8]}.

$$M_{initial} = f\left(\frac{W}{L}\right) L^3 \quad (7)$$

여기서

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

이다.

도파관 구조를 갖는 필터에서 그의 응답은 intercavity 슬롯의 형태에 의해서 좌우된다. 본 논문에서는 Chebyshev 함수 응답을 갖는 필터를 구

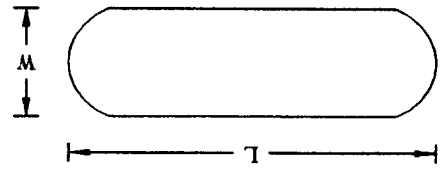


그림 2. 공동 공진기 입·출력단의 슬롯

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

현하고자 하므로 공진기 설계에 있어서 비 인접(non-adjacent) 공진모드간의 결합, 즉 그림 1(b)에서 3번의 TE_h 모드와 다음단의 4번의 TE_h 모드를 제외한 모드결합은 발생되지 않도록 하는 것이 중요하다. 따라서 삼중모드 공진부를 선택적으로 결합해야 하는 조건을 만족시켜야 하므로 삼중모드에서 TM_{01q} 모드의 E_z 성분이 서로 결합되지 않도록 하는 슬롯 구조가 필요하다. 본 논문에서는 그림 1(b)의 공진모드 3번과 4번의 전기적 결합을 위해 슬롯 단면에서의 TE 모드 tangential H-field를 이용하여 읍셋 형태의 슬롯을 사용하였다.

그림 3은 TE_{11p} 모드간의 결합을 위한 읍셋 형태의 intercavity 슬롯을 나타낸다. 그림 3에서 그림 1(b)의 공진모드 3번과 4번의 연결은 TE_{11p}-TE_{11p} 모드 결합계수인 k_{TE} 로 나타낼 수 있으며 식 (8)과 같이 정의할 수 있다^{[5],[6]}.

$$k_{TE} = \frac{\mu M_c |H_i|^2}{W} \frac{f_0}{\Delta f} \quad (8)$$

여기서 M_c 는 슬롯의 두께와 크기를 고려한 자계 분극율 값을 나타낸다^[6]. 또한 식 (8)에서 슬롯단

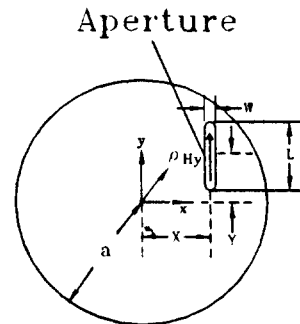


그림 3. 읍셋형 intercavity 슬롯의 구조

Fig. 3. Structure of offset-typed intercavity slot.

면($z=0$)에서의 tangential H 성분 H_t 는

$$|H_t|^2 = (|H_\rho|^2 + |H_\phi|^2) \tag{9}$$

여기서,

$$H_\rho \cong -j \frac{k_\rho k_z}{\omega \mu \epsilon} J_1'(k_\rho \cdot \rho) \cos(\phi)$$

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

이고, 공동 공진기 내에 저장되는 축적 에너지 W 는

$$W = \epsilon \int_V (|E_\rho|^2 + |E_\phi|^2) dv \tag{10}$$

$$\cong 0.281 \frac{L\pi}{2\epsilon}$$

이다. 또한 ρ 및 z 방향으로 위상 상수 k_ρ 및 k_z 는

$$k_\rho = \frac{x'_{11}}{R}, \quad x'_{11} = 1.841 \tag{11}$$

$$k_z = \frac{p\pi}{L}$$

이다. 식 (8)에서 (11)을 이용하여 TE_{11p} 모드간의 결합계수 k_{TE} 를 유도하면 식 (12)와 같다.

$$k_{TE} = \frac{\mu M_c \frac{k_z^2}{(\omega \mu \epsilon)^2} \left\{ k_\rho^2 J_1'^2(k_\rho \rho) + \frac{1}{\rho^2} J_1^2(k_\rho \rho) \right\}}{0.281 \frac{L\pi}{2\epsilon}} \cdot \frac{f_0}{\Delta f} \tag{12}$$

식 (12)에서 결합계수 k_{TE} 는 슬롯이 중심으로부터 떨어진 위치(ρ)와 슬롯의 크기에 따른 자계분극을 M_c 로 표현되므로 슬롯의 크기가 결정되면 결합계수 값과 슬롯의 위치와의 관계를 알 수 있다^[9].

III. 삼중모드 공동 공진기 대역통과 필터의 설계

본 논문에서는 원통형 공동 공진기를 사용하여 Chebyshev 응답을 갖는 대역통과 필터를 각각 삼중모드로 공진하는 두 단의 공동 공진기를 서로 결합하여 구현하였다. 필터의 설계사양은 표 1과 같다.

표 1의 설계 조건에 따른 필터의 외부 양호도 Q_e 와 각 공진 모드간의 결합계수 k 를 구하면 표 2와

같다.

그림 4는 TE_{113} 모드와 TM_{012} 모드를 축퇴관계로 하는 2단 6-pole 삼중모드 필터의 구조를 나타낸다. 그림 4에서 T1과 T3 그리고 T4와 T6은 TE_{113} 모드

표 1. 6-pole 대역통과 필터 설계 규격

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

항 목	규 격
중심 주파수(f_0)	14.5 GHz
주파수 대역폭(BW)	100 MHz
Ripple 특성	0.1 dB
삽입 손실	1 dB
저지대역 감쇠($BW \times 2$)	-30 dB
필터 차수	6
응답 특성	Chebyshev 함수

표 2. 외부 양호도와 결합계수 값

Table 2. Values of external quality factor and coupling coefficient.

Q_e	169.37	k_{34}	2.94×10^{-3}
k_{12}	5.4×10^{-3}	k_{45}	4.06×10^{-3}
k_{23}	4.06×10^{-3}	k_{56}	5.4×10^{-3}

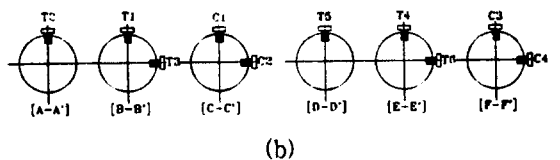
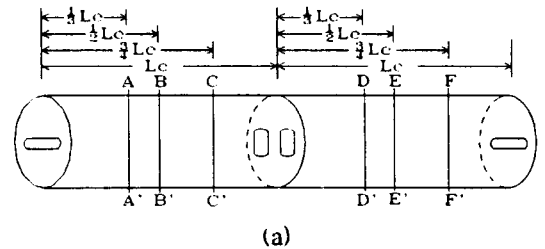


그림 4. 2단 6-pole 삼중모드 필터

(a) 구조 (b) 조절 및 결합나사

Fig. 4. 2-stage 6-pole triple-mode filter.

(a) Structure (b) Tuning and coupling screws

를 조절하기 위한 나사이며 T2와 T5는 TM_{012} 모드를 조절하기 위한 나사이다. 그리고 C1과 C2, C3과 C4는 TE_{113} 모드와 TM_{012} 모드를 결합하는 나사이다. 공동 공진기간의 결합을 위한 intercavity 슬롯은 중앙에서 TM_{012} 모드의 전계가 최대이므로 TM_{012} 모드의 전계성분과 TE_{113} 모드의 자계성분이 서로 결합하는 것을 줄이기 위해 공진기의 중앙에서 양쪽으로 읍-셋시켰다.

IV. 대역통과 필터 제작과 측정

4-1 제작

본 논문에서 대역통과 필터는 구리 합금을 가공하여 원통형으로 만들었으며 longitudinal형으로 제작하였다. 표 3은 제작된 2단 6-pole 삼중모드 공동 공진기 필터의 외부 사양이며 그림 5는 제작된 공동 공진기 대역통과 필터를 나타낸다.

4-2 측정 및 결과 고찰

그림 6은 중심 주파수 14.5 GHz에서 대역폭 100 MHz를 갖는 6-pole 필터의 응답을 협대역으로 측정한 것이다. 그림 6에서 marker 1은 중심 주파수를, marker 2와 3은 통과 대역폭 100 MHz를 나타낸다. marker 4와 5는 통과 대역폭 100 MHz의 2

표 3. 대역통과 필터의 제원

Table 3. Dimensions of bandpass filter. 단위[mm]

항 목	크 기
슬롯	
- 두께	0.2
- 입·출력부	8.4 × 0.7
- intercavity	5.4 × 0.6
- 읍-셋 거리	0.2a
도파관	
- 직경	18.28 ϕ
- 길이	40.54
Adaptor	「Flann」17091-SF90
나사 직경	2.5 ϕ

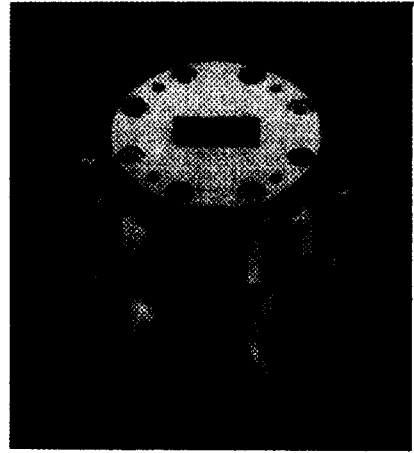


그림 5. 2단 6-pole 삼중모드 공동 공진기 필터
Fig. 5. 2 stage 6-pole triple-mode cavity filter.

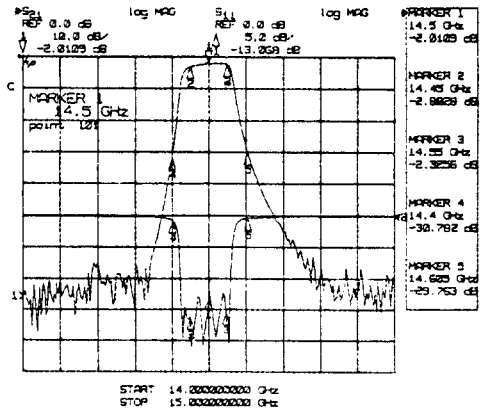


그림 6. 필터의 협대역 대역통과 특성
Fig. 6. A narrowband bandpass characteristics of filter.

배를 나타낸다. 그림 6에서 필터의 중심 주파수는 14.5 GHz에서 정확히 동작하며 통과 대역폭에서의 삽입 손실은 평균 2.4 dB로 측정되었고 통과 대역의 반사 손실 S_{11} 은 평균 15 dB 이상이었다.

측정결과 제작된 대역통과 필터는 설계사양과 잘 일치하였으나 삽입손실은 약간 크게 나타났다. 그러나 이러한 손실은 기구물 제작시 전도성 개선을 위해 은도금 등을 하고 슬롯 제작시 1 mil ($\approx 2.54 \times 10^{-2}$ mm) 이상의 정밀 가공과 슬롯판의 표면

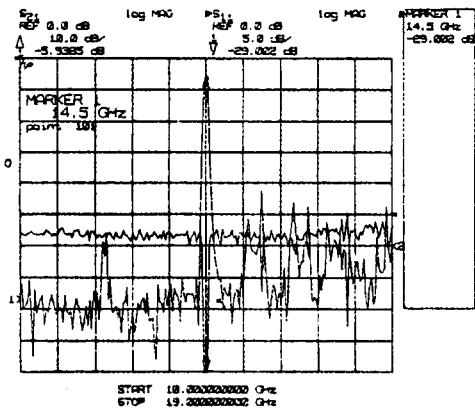


그림 7. 필터의 광대역 대역통과 특성
 Fig. 7. A broadband bandpass characteristics of filter.

거칠기를 $8 \mu\text{inch} (\approx 2 \times 10^{-4} \text{ mm})$ 이내로 한다면 보완할 수 있을 것이다.

그림 7은 필터의 응답을 광대역으로 측정된 것을 나타낸다. 그림에서 필터는 대역폭의 6배되는 지점에서의 감쇠가 67 dB 이상으로 양호한 특성을 나타내고 있다.

V. 결 론

본 논문에서는 하나의 공동 공진기에서 세 개의 상호 수직한 공진 모드를 이용하여 2단 6-pole 삼중 모드 대역통과 필터를 설계·제작하였다. 삼중모드는 TE_{113} 모드의 수평, 수직필드와 축퇴관계에 있는 TM_{012} 모드로 공진하며 longitudinal 형태로 연결하였다. 삼중모드를 연결하는 intercavity 슬롯은 Chebyshev 필터 응답을 구현하기 위한 선택적인 결합을 위해 슬롯 평면에 수평한 TE 모드의 자체 성분만을 결합하도록 하였다. 이를 위해 슬롯 평면에서의 TE 모드 tangential H 성분을 이용하여 TE_{11p} 모드간의 결합계수에 대한 수식을 정확히 유도하였고 이를 이용하여 읍-셋 형태의 슬롯을 제작하였다. 제작된 2단 6-pole 삼중모드 공동 공진기 대역통과 필터는 중심주파수 14.5 GHz에서 대역폭 100 MHz를 가지며 대역폭의 2배 지점에서 30 dB의 감쇠를 가져 설계 사양의 6차를 만족하였다.

본 논문에서 제시한 삼중모드 공동 공진기 필터는 기존의 이중모드 공동 공진기 필터와 비교할 때, 크기와 무게를 1/3까지 줄일 수 있는 장점이 있어 multichannel 운용이 요구되는 위성 탑재용 증계기에 필수적인 채널 필터를 소형화시킬 수 있다. 또한 일반적인 마이크로파대 무선통신 증계 장치용 협대역 필터 및 필터 어셈블리인 듀플렉서와 멀티플렉서의 제작 등에 널리 이용될 수 있다.

참 고 문 헌

- [1] A. E. Atia and A. E. Williams, "New types of waveguide bandpass filters for satellite transponders," *COMSAT Tech. rev.*, vol. 1. no. 1, pp. 21-43, Fall 1971.
- [2] W. C. Tang, "A true elliptic-function filter using triple-mode degenerate cavities", *IEEE Trans. Microwave Theory Tech.*, vol. MTT-32, no. 11, pp. 1449-1454, Nov. 1984.
- [3] 김상철, 홍의석, "이중 및 삼중모드 공동 공진기로 구성된 2단 5-pole 대역통과 필터", 한국통신학회 논문지, 제22권, 제6호, pp.1251-1258, 1997.
- [4] U. Rosenberg, "Filter design using in-line triplemode cavity and novel iris couplings", *IEEE Trans. Microwave Theory Tech.*, vol. MTT-37, no. 12, pp. 2011-2019, Dec. 1989.
- [5] J. Uher, J. Bornemann and U. Rosenberg, *Waveguide components for antenna feed systems : theory and CAD*, Artech House, Chap. 3, 1993.
- [6] G. L. Matthaei, L. Young and E. M. T. Jones, *Microwave Filters, Impedance-Matching networks, and Coupling Structures*, Artech House, Chap. 5, 1980.
- [7] R. L. Gluckstern, R. Li and R. K. Cooper, "Electric polarizability and magnetic susceptibility of small holes in a thin screen," *IEEE Trans. Microwave Theory*

Tech., vol. MTT-38, no. 2, pp. 186-192, Feb. 1990.

[8] McDonald, "Simple approximations for the longitudinal magnetic polarizabilities of some small apertures", *IEEE Trans. Microwave Theory Tech.*, vol. MTT-36, no. 7, pp. 1141-1144, July 1988.

[9] P. Couffignal, H. Bandrand and B. Theorn, "A new rigorous method for the determination of iris dimensions in dual-mode cavity filters," *IEEE Trans. Microwave Theory Tech.*, vol. MTT-42, no. 7, pp. 1314-1320, July 1994.

홍 의 석



1982년 12월 : 독일 Aachen공대 전자공학과 졸업(공학박사)
1983년 1월~1986년 2월 : 광운대학교 전자통신공학과 부교수
1986년 2월~1987년 2월 : 미국 University of Texas(Austin) 객원교수
1987년 3월~1992년 2월 : 광운대학교

전자통신공학과 교수

- 1992년 3월~현재 : 광운대학교 전파공학과 교수
 - 1988년 2월~현재 : 국가기술자격제도 전문위원
 - 1991년 1월~현재 : 통신위성·우주산업연구회 이사
 - 1993년 3월~현재 : 국제 기능올림픽 한국위원회 심사위원
 - 1994년 9월~현재 : 광운대학교 신기술연구소 연구원
 - 1996년 10월~1997년 12월 : 대한전자공학회 평의원
 - 1997년 2월~현재 : 중소기업청 기술개발 평가단 평가위원
 - 1998년 1월~현재 : 한국통신학회 교육이사
- [주 관심분야] 초고주파 회로설계, 이동 및 위성통신, 안테나