

http://dx.doi.org/10.7236/JIWIT.2012.12.1.173

JIWIT 2012-1-22

T-DMB 송신용 고출력 6소자 Cavity Delay Filter의 구현

Implementation of 6-Element High Power Cavity Filter for T-DMB

고남규*, 손태호**, 이용창***

Nam-Gyu Go, Tae-Ho Son, Yong-Chang Lee

요약 본 연구에서는 국내 T-DMB 시스템에서 대역통과필터 기능을 수행 하는 cavity 필터를 설계하고자 HFSS 툴을 사용하여 그 특성을 시뮬레이션 하였으며, 이를 활용하여 필터를 제작하여 측정된 특성을 시뮬레이션 결과와 비교하였다. 전자계 3D 시뮬레이션 Tool인 HFSS를 사용하여 cavity 필터를 시뮬레이션 하는 것은, 실제로 필터를 제작하기 전에 성능을 미리 점검함으로써 최적화된 모델을 구축하여 시간과 비용을 최대한 절약할 수 있도록 하는 것이다. 원통형 도파관의 특성을 파악하여 필터의 최적의 조건들을 얻도록 연구하였으며, 이를 바탕으로 HFSS 시뮬레이션 및 제작을 하여 특성을 측정하여 설계값과 비교하였다.

Abstract In this study, cavity filter performing BPF function in Korea T-DMB system was designed by using of HFSS simulation tool, and we compared measured results with the simulated data. By simulation of HFSS that is magnetic and electric 3D simulating tool, we can save time and money maximumly by checking performances before actual filter implementation. Optimum conditions for the cavity filter were delivered based on the cylindrical waveguide characteristics. Measured results by implementation were compared with the simulation data.

Key Words : cavity filter, T-DMB, HFSS, Wave guide, High power

1. 서 론

원형 도파관 형태의 cavity 필터는 손실이 적고 대역폭이 작은 대역통과 필터에 적합하며, 다른 필터에 비하여 고출력으로 송신 할 수 있는 장점 때문에 방송의 송신용 필터로 많이 사용되고 있다.^[1]

TE₁₁ 모드의 cavity 필터는 Q값이 크며, 이로 인하여 높은 선택도를 요구하는 방송시스템에 적합하다.

cavity 필터는 고전력에서 주로 요구되며 특정 밴드에

최적화된 군지연 특성, 위상의 선형성 그리고 표면 장각 구조를 가지는 광대역의 대역 통과 필터이지만, 크기 등의 문제로 설계 및 제작에 어려움을 겪어왔다.

최근에는 높은 감도와 적은 손실 및 작은 온도계수를 지닌 절연체 물질이 개발되어 전통적인 필터의 1/5 정도의 부피보다 작은 band pass 필터 등이 개발되어 활용되고 있다. 하지만, 송·중계소 등에 활용되는 방송용 BPF의 경우에는 아직까지 안정적인 적용에 초점이 맞추어져 있어 부피에 대한 고려하지 않고 있다.^[2,3]

*정회원, (주)춘천문화방송 기술팀(교신저자)

**정회원, 순천대학교 정보통신공학과

***정회원, 동아방송예술대학 방송통신과

접수일자 2012.1.10, 수정완료 2012.2.4

게재확정일자 2012.2.10

Received: 10 January 2012 / Revised: 4 February 2012 /

Accepted: 10 February 2012

**Corresponding Author: thson@sch.ac.kr

Dept. of Information and Communications Engineering,
Soon Chun Hyang University, Korea

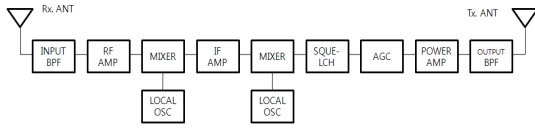


그림 1. UHF TV 송신 기본 구성도
Fig. 1. Block diagram of UHF television translator equipment

그림 1은 UHF 텔레비전 자동중계기의 block diagram으로 입력 BPF와 RF AMP 등의 구성으로 이루어져 있다. 이러한 필터의 고려 대상들은 구조가 간단하여 쉽게 제작이 가능하여야 하며, 높은 안정적인 온도계수와 손실이 적어야 한다.

본 논문에서는 전자계 3D 시뮬레이션 tool인 HFSS를 사용하여 6소자 배열 cavity 필터를 시뮬레이션 하였으며, 실제로 제작하여 그 성능을 비교하였다. 이러한 과정은 실제로 필터를 제작하기 전에 성능을 미리 점검함으로써 최적화된 모델을 구축하여 시간과 비용을 최대한 절약할 수 있도록 하는 것이다.

II. 원통 도파관의 특징

1. 모드의 직교성

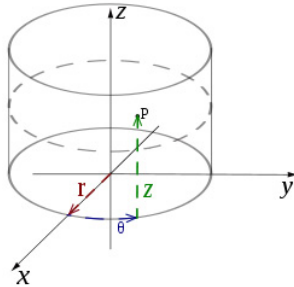


그림 2. 원통 도파관 구조
Fig. 2. Structure of cylindrical waveguide

TE모드와 TM모드의 전자계 성분은 삼각함수로 표시되므로 이들 모드는 θ 가 0에서 2π 의 범위일 때 각각 직교성을 갖는다. 따라서 원형 도파관에서도 각 모드는 다른 모드의 존재에 무관하게 에너지를 전송할 수 있다.

2. 차단주파수, 차단파장

구형 도파관에서의 같이 $k_c = \omega_c \sqrt{\epsilon\mu}$ 이므로

$f_c = k_c / 2\pi \sqrt{\epsilon\mu}$ 이라고 할 때, TE모드에서의 전자계는 다음식과 같이 구해진다.

$$E_r = \sum_{m=0}^{\infty} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{j\omega\mu ma^2 H_{mn}}{(P'_{mn})^2} \frac{J_m(\frac{P'_{mn}}{a}r)}{r} \sin m\theta e^{-j\beta_g z} \quad (1)$$

$$E_\theta = \sum_{m=0}^{\infty} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{j\omega\mu ma^2 H_{mn}}{(P'_{mn})^2} \left[\frac{mJ_m(\frac{P'_{mn}}{a}r)}{r} - \frac{P'_{mn}}{a} J_{m+1}(\frac{P'_{mn}}{a}r) \right] \quad (2)$$

$$H_r = \sum_{m=0}^{\infty} \sum_{n=1}^{\infty} -\frac{j\beta_g a^2 H_{mn}}{(P'_{mn})^2} \left[\frac{mJ_m(\frac{P'_{mn}}{a}r)}{r} - \frac{P'_{mn}}{a} J_{m+1}(\frac{P'_{mn}}{a}r) \right] \quad (3)$$

$$H_\theta = \sum_{m=0}^{\infty} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{j\beta_g ma^2 H_{mn}}{(P'_{mn})^2} \frac{J_m(\frac{P'_{mn}}{a}r)}{r} \sin m\theta e^{-j\beta_g z} \quad (4)$$

식 (1)~(4)에서

$$k_c = \frac{P'_{mn}}{a} \quad (TE_{mn} \text{ 모드}) \quad (5)$$

$$k_c = \frac{P_{mn}}{a} \quad (TM_{mn} \text{ 모드})$$

이므로 TE모드와 TM모드의 차단주파수는

$$f_c = \frac{P'_{mn}}{2\pi a \sqrt{\epsilon\mu}} \quad (TE_{mn} \text{ 모드}) \quad (6)$$

$$f_c = \frac{P_{mn}}{2\pi a \sqrt{\epsilon\mu}} \quad (TM_{mn} \text{ 모드})$$

이 된다. 차단 파장은 $k_c = 2\pi / \lambda_c$ 이므로

$$\lambda_c = \frac{2\pi a}{P'_{mn}} (TE_{mn} \text{ 모드}) \quad (7)$$

$$\lambda_c = \frac{2\pi a}{P_{mn}} (TM_{mn} \text{ 모드})$$

가 된다. f_c 보다 높은 주파수, 즉 λ_c 보다 짧은 파장의 파만을 전송 가능하다.

3. 관내파장

구형 도파관과 같이

$$\lambda_g = \frac{\lambda}{\sqrt{1 - (\frac{\lambda}{\lambda_c})^2}} \quad (8)$$

로 표시된다. 여기서 λ_c 에 앞에서 얻어진 식을 대입한다. 이 경우도 $\lambda_g > \lambda$ 이다.

4. 기본모드

원형 도파관의 기본 모드는 차단파장 λ_c 가 제일 큰 것이므로 a 에 대하여 P'_{mn} , P_{mn} 중에서 최소를 선택하면 그 모드가 기본 모드이다. 이런 결과에서 가장 작은 값을 찾아보면 $P'_{11} = 1.841$ 이며, 따라서 TE_{11} 모드가 원형 도파관의 기본 모드가 된다. TE_{11} 모드의 차단 파장은 $\lambda_c = 3.41a$ 이다.

III. cavity 필터 등가회로

cavity 필터의 구조는 $1/4\lambda$ 동축선의 양단을 Open, Short로 처리하여 L, C공진 분포정수회로를 구성한 것으로 VHF 또는 UHF에서 High Q, high power로 가장 적합하고 가장 많이 쓰이고 형태의 필터이다. $1/4\lambda$ wave coaxial cavity를 사용한 band pass filter로서 입력단의 $1/4\lambda$ wave 동축 공진기와 출력단을 자기결합(magnetic coupling) 함으로써 필요한 주파수만 여과시키는 고성능 필터로 구성하였다. 즉 입력단자의 loop(probe)의 전류에 의해 암페어의 오른손법칙으로 자계가 형성되고 그 자계의 변화가 동축 내심표면과 외심표면에 전류를 유기시킨다.

이 유기된 전류는 다시 원통방향으로 자계를 형성하고 그 자계에 의해 출력단의 loop에 전류가 유기되는 형태이다.

통과형 원통 공동 공진기의 구조에서의 등가회로를 그림 3에 나타내었다. 이 등가회로에서 2단자 산란행렬을 구한다.^[4,5]

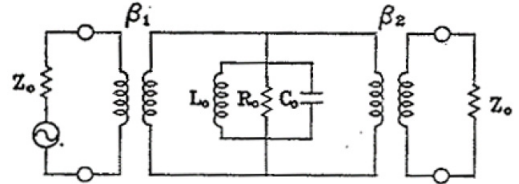


그림 3. 통과형 반동축 공진기의 등가회로

Fig. 3. Equivalent circuit of transmission type half coaxial resonator

$$\begin{bmatrix} V_1 \\ I_1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} n_1 & 0 \\ 0 & 1/n_1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_2 \\ -I_2 \end{bmatrix} \quad (9)$$

$$\begin{bmatrix} V_1' \\ I_1' \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} n_2 & 0 \\ 0 & 1/n_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_2' \\ -I_2' \end{bmatrix} \quad (10)$$

또한, 공진가회로의 통과행렬을 구하면

$$\begin{bmatrix} V_{1r} \\ I_{1r} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ Y_r & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_{2r} \\ -I_{2r} \end{bmatrix} \quad (11)$$

$$Y_r = \frac{1 + jQ_0(\omega/\omega_0 - \omega_0/\omega)}{R_0} \quad (12)$$

따라서 통과형 공진기회로의 전체 통과행렬 (A_t, B_t, C_t, D_t)은 다음과 같이 주어진다.

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} A_t & B_t \\ C_t & D_t \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} n_1 & 0 \\ 0 & 1/n_1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ Y_r & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} n_2 & 0 \\ 0 & 1/n_2 \end{bmatrix} \\ &= \begin{bmatrix} n_1/n_2 & 0 \\ Y_r/n_1 & n_2/n_1 \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (13)$$

통과행렬과 산란행렬과의 관계를 이용하여 산란행렬을 구하여보자. 먼저 통과행렬을 아래의 식과 같이 변환시킨다.

$$A' = A_t = \frac{n_1}{n_2} \quad (14)$$

$$B' = \frac{B_t}{Z_0} = 0 \quad (15)$$

$$C' = C_t Z_0 = \frac{Z_0 Y_r}{n_1} \quad (16)$$

$$D' = D_t = \frac{n_2}{n_1}$$

$$\Delta = A' + B' + C' + D' = \frac{n_1^2 + n_2 Z_0 Y_r + n_2^2}{n_1 n_2} \quad (17)$$

로 놓으면 2단자 산란행렬은 다음과 같은 관계를 갖는다.

$$S_{11} = \frac{A' + B' - C' - D'}{\Delta} \quad (18)$$

$$= \frac{n_1^2 - n_2 Z_0 Y_r - n_2^2}{n_1^2 + n_2 Z_0 Y_r + n_2^2}$$

$$S_{11} = \frac{-A' + B' - C' + D'}{\Delta} \quad (19)$$

$$= \frac{n_2^2 - n_1 Z_0 Y_r - n_1^2}{n_1^2 + n_2 Z_0 Y_r + n_2^2}$$

$$S_{21} = S_{12} = \frac{2}{\Delta} = \frac{2 n_1 n_2}{n_1^2 + n_2 Z_0 Y_r + n_2^2} \quad (20)$$

식 (18)~(20)들에 Y_r 의 값을 대입하고 주파수의 범위가 공진주파수를 기준으로 매우 좁다고 가정하면,

$$\delta = \frac{\omega - \omega_0}{\omega_0} = \frac{\omega}{\omega_0} - \frac{\omega_0}{\omega} \quad (21)$$

이므로 2단자 통과형 공진기의 산란행렬은 다음과 같이 주어진다.

$$S_t = \begin{bmatrix} \frac{\beta_1 - \beta_2 - 1 - j2Q_0\delta}{1 + \beta_1 + \beta_2 + j2Q_0\delta} & \frac{\sqrt[3]{\beta_1\beta_2}}{1 + \beta_1 + \beta_2 + j2Q_0\delta} \\ \frac{\sqrt[3]{\beta_1\beta_2}}{1 + \beta_1 + \beta_2 + j2Q_0\delta} & \frac{\beta_1 - \beta_2 - 1 - j2Q_0\delta}{1 + \beta_1 + \beta_2 + j2Q_0\delta} \end{bmatrix} \quad (22)$$

여기서 β_1 과 β_2 는 다음과 같이 주어진다.

$$\beta_1 = \frac{n_1^2 R_0}{Z_0}$$

$$\beta_2 = \frac{n_2^2 R_0}{Z_0}$$

또한 공진시에는 $\delta = 0$ 이므로 산란행렬 (Scattering matrix)은

$$S_t = \begin{bmatrix} \frac{\beta_1 - \beta_2 - 1}{1 + \beta_1 + \beta_2} & \frac{\sqrt[3]{\beta_1\beta_2}}{1 + \beta_1 + \beta_2} \\ \frac{\sqrt[3]{\beta_1\beta_2}}{1 + \beta_1 + \beta_2} & \frac{\beta_1 - \beta_2 - 1}{1 + \beta_1 + \beta_2} \end{bmatrix} \quad (f = f_0) \quad (23)$$

와 같이 된다. 결합시키는 루프(Coupling Loop)와 결합된 공진기는 1단 대역통과 여파기(band-pass filter)의 특성을 나타낸다.^[6,7]

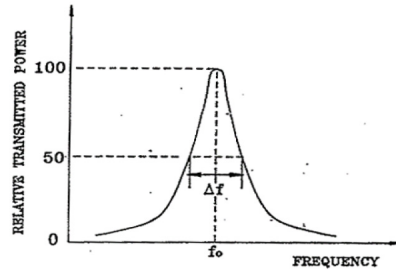


그림 4. 통과형 공진기의 출력특성

Fig. 4. Output characteristic of transmission type resonator

IV. 실험 및 결과

1. 단일소자 cavity 필터의 제작

본 연구에서 제안하여 설계된 형태는 원통형 필터로써 직사각형 필터보다 제작의 어려움이 있지만, 실제 방송에서 많이 사용되는 형태이다. 급전방식의 영향이 가장 민감하므로 port의 설정에 따라 그 특성이 민감하게 변화되는 결과를 나타내며, 동축선로로 급전하여 loop를 통한 matching 방법을 이용하였다.

각 변수에 대한 특성을 고찰하여 resonator의 수를 확장 할 때 가장 최적화된 결과를 도출하기 위하여 단일 소자 cavity 필터에 대하여 3차원 고주파 전자장 해석 소프트웨어인 HFSS tool을 이용하여 simulation하였다. HFSS 설계를 바탕으로 필터를 시뮬레이션과 제작을 하였고, 네트워크 분석기(network analyzer)를 이용하여 임피던스 매칭과 이득을 측정하여 성능을 분석하였다.

시뮬레이션은 Outer tube의 직경을 200mm, 높이를 350mm로 고정하였으며, 재질은 1mm 두께의 copper로 하였다. 또한, Inner tube 직경은 52mm로 고정하였다.

주파수는 춘천문화방송 T-DMB 송출 주파수 대역인 211.8MHz(중심주파수, 1.5MHz 대역)로 하였다.

우선, Inner tube의 길이에 따른 특성을 알아보기 위하여 Input 및 Output loop의 길이를 80mm로 고정하고 Inner tube의 길이를 300, 305, 310, 315, 320, 325mm로 각각 조정하여 시뮬레이션 하였다.

Input 및 Output Loop의 길이가 80mm로 조정하였을 때가 S11 특성이 -44.92[dB]로 가장 좋은 값을 얻을 수 있었다.

표 1. Input 및 Output Loop 조절 특성
Table 1. S11 character obtained by adjusting input and output

Inner tube 길이(mm)	Input 및 Output Loop 길이(mm)	주파수 특성 (MHz)	S11 특성 (dB)
315	80	210.78	-44.92
315	85	210.84	-41.44
315	90	211.09	-37.35
315	100	211.34	-36.28

시뮬레이션 결과에서 얻어진 loop 및 tube의 길이를 바탕으로 주파수 특성 및 반사계수의 변화량을 예상치와 같은 값을 얻을 수 있었다.

단일 소자에 대한 특성들을 알아보기 위하여 Inner tube와 input 및 output Loop의 길이를 조절하여 최적화된 설계 조건을 얻기 위한 시뮬레이션과 실제 제작하여 그 특성들을 비교하였다.

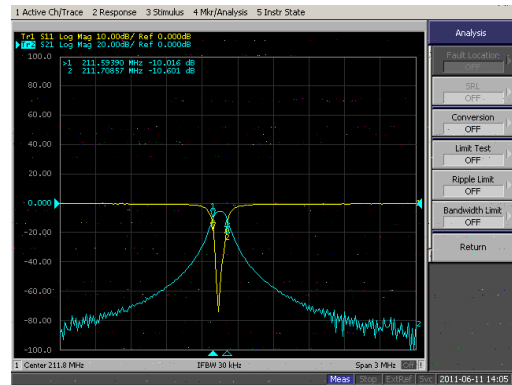


그림 5. 제작된 단일소자 cavity 필터의 S11 특성
Fig. 5. Measured S11 of produced single element cavity filter

그림 5와 같이 제작하여 측정된 결과는 시뮬레이션 과정에서 예측하였던 바와 같이 중심주파수 211.8MHz에서 -74dB 이상의 반사계수 및 투과계수 특성을 나타냈으며, 이는 시뮬레이션 예상치보다 더 narrow한 특성 및 깊은 반사계수 특성을 나타나는 것을 확인하였다.

2. 6소자 cavity 필터의 제작

아래의 그림 6은 HFSS tool을 이용하여 6소자 cavity 필터를 시뮬레이션을 하고자 설계한 모습이다.

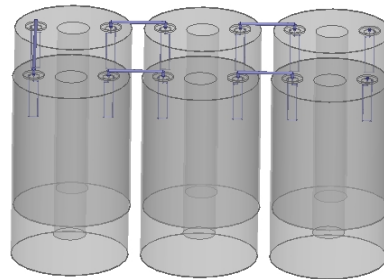


그림 6. HFSS를 이용한 6소자 배열 cavity 필터
Fig. 6. HFSS used 6 element array cavity filter

아래의 그림 7과 그림 8은 단일소자 cavity 필터를 6개 배열로 확장하여 제작된 필터이며, 이에 대한 측정을 실시한 결과들이다. Port와 port의 연결은 12 ϕ 동축선을 사용하였으며, 커넥터는 N타입을 사용하였다.

단일소자에서의 조건들을 기반으로 각각의 소자에 loop의 길이와 방향을 조절하는 방법으로 수치를 적용 시킬 수 있었다.

앞에서 단일소자 측정에 사용하였던 방법과 동일하게 제작하여 측정한 결과들을 나타내었다.

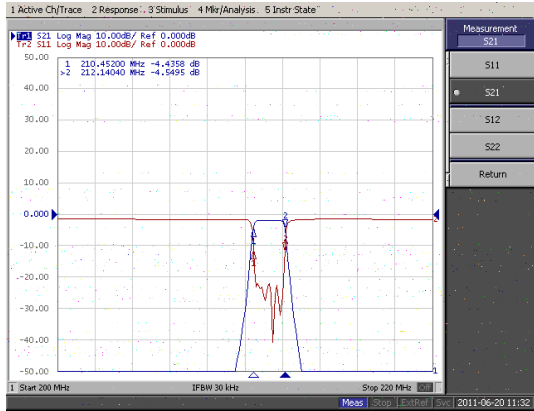


그림 7. 제작된 6소자 cavity 필터의 S11 측정 결과
Fig. 7. Measured S11 of produced 6 element cavity filter

측정 결과에서는 그림 7에서도 보이는 바와 같이 중심 주파수 211.8MHz에서 사용주파수 대역이 1.7MHz 대역이 나오는 것을 반사계수와 투과계수를 통하여 확인 할 수 있었다. 이는 실제로 방송국에서 사용되는 DMB방송 송출 주파수에 적합한 것으로 우리가 예측하였던 것과 일치함을 확인 할 수 있는 것이다. 반사계수 및 투과계수 특성에서는 사용주파수 211.8MHz대역에서 최대 -60dB까지의 특성을 나타내는 것을 확인 할 수 있다.

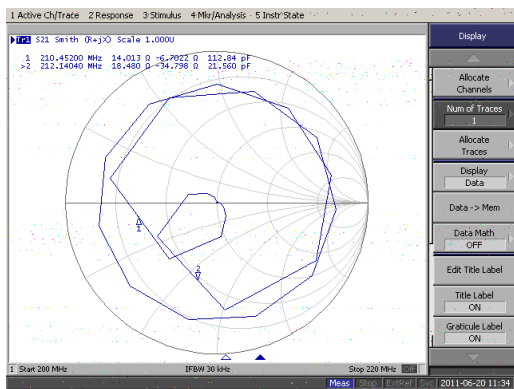


그림 8. 6소자 cavity 필터의 스미스 차트 측정 결과
Fig. 8. Measured result (smith-chart) of produced 6 element cavity filter

이로써 본 연구에서 얻고자 하였던 시뮬레이션 및 측정치를 얻었으며, 설계한 내용들이 적합한 방법임을 확인 할 수 있었다.

V. 결론

본 연구에서는 T-DMB 주파수 대역에서 BPF 기능을 수행 하는 단일소자 cavity 필터를 설계하고 HFSS tool 을 사용하여 그 특성을 시뮬레이션 하였으며, 이를 활용 하여 필터를 제작하여 특성값을 시뮬레이션 결과와 비교 분석하였다.

본 연구에서는 Inner tube의 길이와 Input 및 Output Loop의 길이를 조절하여 최적의 설계 조건을 찾는 방법으로 진행하였다. 단일소자 필터를 제작하여 측정한 결과는 시뮬레이션 결과와 같은 중심주파수 211.8MHz 대역에서 -74dB 이상의 반사계수 및 투과계수 특성을 보였다. 또한 6소자의 serial 배열을 통한 제작 및 측정 결과에서도 중심주파수 211.8MHz에서 사용주파수 대역이 1.7MHz 대역이 나오는 것을 반사계수와 투과계수를 통하여 확인 할 수 있었다. 이는 실제로 방송국에서 사용되는 DMB방송 송출 주파수에 적합한 것으로 우리가 예측 하였던 것과 일치함을 확인 할 수 있는 것이다. 반사계수 및 투과계수 특성에서는 사용주파수 211.8MHz대역에서 최대 -60dB까지의 특성을 나타내는 것을 확인하였다.

참고 문헌

- [1] 홍경희, “모드정합법을 이용한 TE011-mode cavity bandpass filter의 설계연구”, 1998 춘계 마이크로 파 및 전파학술대회 논문집 Vol.21 No.1, p225-226, 98/5/23.
- [2] G. Matthaei, L. Young,, Microwave Filters Impedance-Matching Networks, and Coupling Structure, E.M.T. Jones, Artech House
- [3] Randall W. Rhea, HF Filter Design and Computer Simulation, Noble Publishing Atlanta, 1994
- [4] CHATTERJEE, S. K: “Microwave Cavity Resonators as Circuit Elements”, J.Indian Inst. Sci., p99, 1952,34B,
- [5] CHATTERJEE, S. K: “Interaction of Modes in a Microwave cavity Resonator”, J. Indian Inst. Sci., p77, 1953, 35B,
- [6] 김영권 편저, 마이크로파공학, 진영사, p85-160, 1995

[7] Thomas L. Martin, JR. Ultrahigh Frequency Engineering, PRENTICE-HALL, Inc. New York, p285-327

저자 소개

고 남 규(Ko, Nam-Gyu)(정회원)



(주) 기술국 국장

- 2001년 2월 : 서울과학기술대학교 전자공학과(공학사)
- 2003년 2월 : 서울과학기술대학교 산업대학원 전자공학과(공학석사)
- 2004년 3월 ~: 순천향대학교대학원 정보통신공학과 박사과정
- 1982년 10월 ~현재 : 춘천문화방송

손 태 호(Son, Tae-Ho)(정회원)



구원

- 1979년 2월 한양대학교 전자통신공학과 (공학사)
- 1986년 2월 한양대학교 전자통신공학과 (공학석사)
- 1990년 2월 한양대학교 전자통신공학과 (공학박사)
- 1980년~1981년: 영국 Ferranti사 연구원
- 1978년~1987년: 금성정밀(주) 연구소 근무
- 1992년~1994년: 천문우주연구원 객원연구원
- 1999년~2000년: University of Illinois 연구교수
- 2000년~2003년: (주)닛시텔레콤 위촉 연구소장
- 2002년~2006년: (주)에스비텔콤 기술고문
- 2005년~2008년: (주)하이트랙스 기술고문
- 2006년~2009년: (주)동원 위촉 연구소장
- 2007년~현재: (주)스카이크로스코리아 기술고문
- 1990년~현재: 순천향대학교 정보통신공학과 교수

이 용 창(Lee, Yong-Chnag)(정회원)



반도체 부설연구소 주임연구원

- 2001년 3월 ~ 현재 : 동아방송예술 대학 방송통신과 교수
- 1996년 4월~2001년 2월 : (주)나우시스 부설연구소 소장
- 1998년 2월~2001년 2월 : 순천향대학교대학원 공학박사
- 1993년 10월~1995년 4월 : (주)내의반도체 부설연구소 주임연구원
- 1991년 10월~1993년 9월 : (주)하나계기 연구원