

유한요소법에 의한 1.9 GHz대 유전체 일체형 필터의 설계

논문
12-10-25

Design of 1.9 GHz Dielectric Monoblock Filter Using Finite Element Method

강중운*, 최지원*, 윤석진*, 김현재*, 박창엽**

(C. Y. Kang*, J. W. Choi*, S. J. Yoon*, H. J. Kim*, C. Y. Park**)

Abstract

A new band-pass filter (BPF) prepared by dielectric monoblock and its design techniques is presented, which has the benefits of low cost and small size because additional coupling elements are not needed. Monoblock dielectric BPF with an attenuation pole at below the passband has been realized without mechanical tuning. The modeling of the three-pole dielectric monoblock BPF has been carried out by CAD. The equivalent circuit of the BPF was established by transmission lines and lumped capacitors. The transmission line characteristic impedances were computed using 2-D FEM. The BPF for PCS has been designed to have a 60 MHz pass-bandwidth with center frequency of 1960 MHz and an attenuation pole below the passband using a commercial 3-D structure simulator. The experimental results are in good agreement with 3-D structure simulations. The error between the measured and simulated center frequency is 0.2%.

Key Words(중요용어) : Monoblock dielectric filter(일체형 유전체 필터), FEM(유한요소법), $(Zr_{0.8}Sn_{0.2})TiO_4$ system (ZST), CAD

1. 서 론

최근 이동 통신 송수신 시스템의 급격한 발전과 소형화의 필요성에 의해, 이동 통신 시스템의 핵심 부품인 대역 통과 필터의 소형화 및 경량화에 대한 요구가 증가하고 있다. 현재 필터의 소형화를 위해 높은 유전 상수와 높은 품질 계수를 갖는 마이크로파 유전체의 개발이 진행되는 동시에, 필터 구조에 대한 연구 또한 활발히 진행되고 있다[1]. 여러 개의 동축형 유전체 공진기를 결합한 결합형 유전체 필터[2]에 비해 소형의 구조를 가지며, 경제성이 우수한 일체형 유전체 필터는 하나의 유전체 블록내에 복수개의 홀이 존재하고[3] 외부 입출력 단자 및 각 공진홀 간의 결합용 단자가 블록 위에 존재하는 형태로 이에 대한 등가 회로는 블록내의 공진홀 간의 자체 결합을 고려

하여 설계되어야 한다.

본 연구에서는 각 공진홀의 우모드 및 기모드 특성 임피던스를 이차원 FEM을 이용하여 해석하였으며, 해석된 우모드 및 기모드 특성 임피던스에 의해 일체형 유전체 블록을 전송선으로 등가화 하여 필터의 등가회로를 구현하였다. 이 등가회로를 바탕으로 삼차원 고주파 구조 해석 소프트웨어인 HFSS(High-Frequency Structure Simulator, HP)를 이용하여 일체형 유전체 필터의 구조를 설계 및 해석하였다. 이와 같은 방법을 이용함으로써 이전의 마이크로파 소자 개발에 필수적이었던 튜닝 과정이 생략된 필터를 개발하고자 한다. 따라서, 1.5~2 GHz 대의 마이크로파 필터 응용에 적합한 $\epsilon_r=38$, $Q \cdot f_0=38,000$, $\tau_f=0$ ppm/°C의 마이크로파 유전 특성을 갖는 $(Zr_{0.8}Sn_{0.2})TiO_4$ 계 세라믹스를 이용하여 PCS용 일체형 유전체 필터의 구조를 설계 후 제작하여 시뮬레이션 결과와 실험 결과를 비교, 분석하였다.

2. 2-D FEM을 이용한 병렬 결합 전송선 해석

본 연구에서 사용된 유전 상수 38인 유전체 블록의

* : 한국과학기술연구원 박사기술연구센터
** : 연세대학교 전기·컴퓨터공학과
1999년 7월 15일 접수, 1999년 10월 4일 심사완료
<'99 춘계학술대회에서 추천된 논문임>

개방단에서 본 공진홀간의 결합은 그림 1과 같다. 3×7 mm 유전체 블록내에 전극으로 도포된 직경 1 mm의 원주형 공진홀 3개가 존재하는 형태로, 각 공진홀간의 간격은 1 mm이며, 유전체 블록의 외부는 전극으로 도포되어 있다. 공진홀의 직경은 높은 값의 무부하 Q를 갖도록 결정하였다. 이와 같은 구조[4]에서는 공진홀 사이에 두 개의 다른 형태의 전자기 분포가 존재하는데, 공진홀에 흐르는 전류의 방향이 같을 때의 전자기 분포를 우모드라고 하며, 방향이 다를 때를 기모드라고 한다.

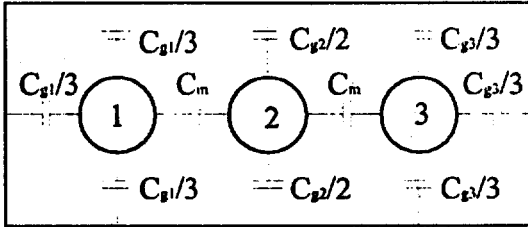


그림 1. 유전체 블록내의 공진홀간의 결합
Fig. 1. Coupled circular cylindrical resonant holes in rectangular ground

우모드인 경우, 공진홀 사이의 대칭축상에 접선 방향의 자계가 존재하지 않으므로 이 대칭축을 자기 장벽이라고 하며, 기모드인 경우, 접선 방향의 전계가 존재하지 않으므로 전기 장벽이라고 한다. 각 모드에서 특성 임피던스는 다르며, 우모드 특성 임피던스를 Z_{oo} , 기모드 특성 임피던스를 Z_{go} 라고 나타낸다. 이와 같은 특성 임피던스는 그림 1에서와 같이 나타낸 내부 공진홀과 접지면 사이의 전체 캐패시턴스값과 밀접한 관계를 갖는데, 여기서 공진홀 사이에 형성되는 상호 캐패시턴스를 C_m 으로, 각 공진홀의 자체 캐패시턴스를 C_g 로 나타낼 때, 기모드의 경우 각 공진홀과 접지면사이의 캐패시턴스는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

공진홀 1 : $C_{o1} = C_{g1} + 2C_m$ (1)

공진홀 2 : $C_{o2} = C_{g2} + 4C_m$ (2)

공진홀 3 : $C_{o3} = C_{g3} + 2C_m$ (3)

우모드일 경우, 하나의 공진홀과 접지면 사이의 전체 캐패시턴스는 다음과 같다.

$C_o = C_g$ (4)

(1)과 (4)로부터 다음과 같이 C_m 은 유도된다.

$C_m = (C_{o1} - C_{g1})/2$ (5)

(2)와 (4)로부터 C_m 은 다음과 같다.

$C_m = (C_{o2} - C_{g2})/4$ (6)

TEM 모드 전송선의 특성 임피던스 Z_o 와 캐패시턴스는 식 (7)과 같은 관계를 갖는다.

$Z_o = 1/\nu C$ (7)

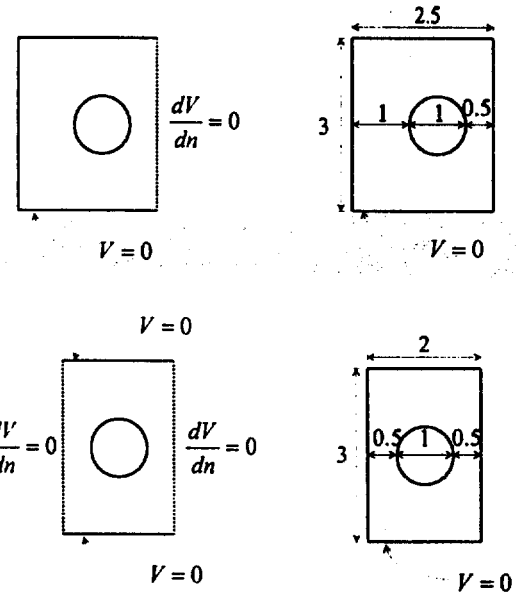


그림 2. Z_{oo} and Z_{go} 계산을 위한 이차원 FEM 모델
Fig. 2. 2-D FEM models for solving Z_{oo} and Z_{go}

표 1. 2차원 FEM에 의한 각 공진기의 Z_{oo} 와 Z_{go}
Table 1. Computed Z_{oo} and Z_{go} in each rod

	Z_{oo}	Z_{go}
공진기1	14.10	9.93
공진기2	18.38	8.77
공진기3	14.10	9.93

여기서, ν 는 매질내에서 파의 전파속도이고, C 는 전송선에 의한 단위 길이당 캐패시턴스이다.

Z_{12} 는 각각 식(5)와 (7)로부터 식(8)과 같이, 식(6)과 (7)로부터 식(9)와 같이 계산된다.

$$Z_{12} = 2Z_{o01}Z_{o01} / (Z_{o01} - Z_{o01}) \quad (8)$$

$$Z_{12} = 4Z_{o02}Z_{o02} / (Z_{o02} - Z_{o02}) \quad (9)$$

일체형 유전체 블록내의 각 공진기의 우모드 및 기모드 특성 임피던스를 계산하기 위해 2차원 FEM 모델을 그림 2와 같이 설정하였다. 우모드 대칭축은 완전 자기 경계면으로, 기모드 대칭축은 완전 전기 경계면으로 설정하였다. 공진기 1, 3의 경우 그림 2 a), (b)와 같이 2차원 FEM 모델을 설정하였고, 공진기 2의 경우 그림 2 (c), (d)와 같이 설정하였다. 이에 따른 공진기 1, 2, 3의 우모드 및 기모드 특성 임피던스는 표 1과 같이 계산되었다. 식(8)에 의해 $Z_{12} = 67.15\Omega$ 로 계산되며, 식(9)로부터 $Z_{12} = 67.09\Omega$ 로 계산된다. 이 값들은 다소 차이를 보이나, 그 차이를 무시할 수 있을 만큼 작으므로 본 연구에서는 두 값의 평균인 $Z_{12} = 67.12\Omega$ 로 정하였다. 이와 같이 해석된 일체형 유전체 블록의 동가 회로는 그림 3과 같다.

3. 동가회로 설계

본 연구에서 설계하고자 하는 대역 통과 필터의 사양은 표 2에 나타나 있다. 이와 같은 사양을 만족하려면, 듀플렉서로서의 용용이 가능하도록 통과 대역 아래쪽 저지 대역에 감쇠극을 삽입함으로써 통과 대역 아래쪽 저지 특성을 향상시킨 주파수 전달 특성을 갖는 필터를 설계하고자 하였다. 앞서 구한 일체형 유전체 블록내의 각 공진기의 특성 임피던스를 기초로 그림 3과 같은 일체형 유전체 필터의 동가회로를 설계하였다. J-inverter 법을 이용하여 입출력 단자의 결합 캐패시턴스, C_{01} 을 구하고[5], 각 공진기와 접지면 사이의 캐패시턴스 C_{g1} , C_{g2} 를 이용하여 공진기 사이의 결합에 의해 야기되는 음의 임피던스를 흡수하도록 하였다. 공진기 사이의 캐패시턴스 C_{12} 와 Z_{12} 의 공진에 의해 필터의 주파수 전달 특성은 감쇠극을 가지게 되는 데, 본 연구에서는 1850 MHz에 감쇠극이 존재하도록 Z_{12} 의 값을 식 (10)을 이용하여 결정하였다.

$$C_{12} = 1/\omega_0 Z_{12} \tan(\theta_g \omega_0 / \omega_0) \quad (10)$$

여기서, ω_0 는 필터의 중심 주파수이고, ω_g 는 감쇠극

의 주파수이며, θ_g 은 공진기의 전기적 길이이다.

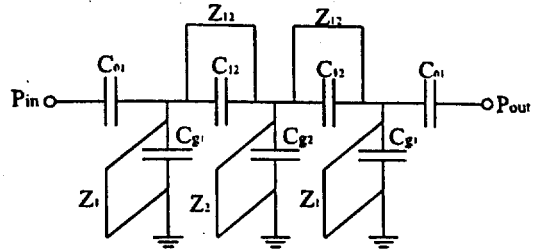


그림 3. 설계된 일체형 유전체 필터의 동가 회로
Fig. 3. Equivalent circuit configuration for the monoblock dielectric BPF

표 2. 필터의 설계 사양
Table 2. Specification of filter for design

중심 주파수	1960 MHz
통과 대역	1930~1990 MHz
삽입 손실	3 dB Max.
반사 손실	10 dB Min.
감쇠 특성	30 dB Min(<1910 MHz)
입출력 임피던스	50 Ω

4. 일체형 유전체 필터의 구조 설계

설계된 필터의 동가회로를 기초로 하여 그림 4와 같이 필터의 구조를 설계하였다. 유전상수 38인 유전체 필터 블록에서 공진기간의 결합을 위하여 필터의 개방단 상부에 캐패시터를 구현하였고, 표면 실장이 가능하도록 필터의 한 쪽 측면에 외부 접지 전극과 분리하여 입출력 포트를 구성하였다.

전극 간격에 따른 C_g 와 C_{12} 값의 변화를 알아보기 위해 그림 5와 같은 가상 모델을 사용하였다. 이와 같은 모델에서 전극 간격에 따라 HFSS를 이용하여 해석함으로써 공진 주파수를 결정하고, 이 공진 주파수를 식 (11)에 대입함으로써 그림 6과 같이 전극 간격에 따른 캐패시턴스의 변화를 구할 수 있다.

$$C = 1/\omega_0 Z_A \tan \theta, \quad (11)$$

여기서, ω_0 는 필터의 중심 주파수이고, Z_A 는 공진기의 특성 임피던스이며, θ 은 공진기의 전기적 길이이다.

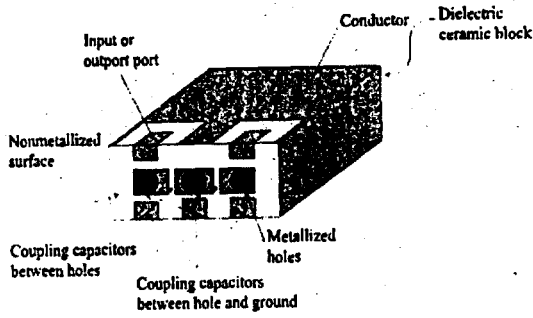


그림 4. 설계된 일체형 유전체 필터의 구조
Fig. 4. Equivalent circuit configuration for the monoblock dielectric BPF

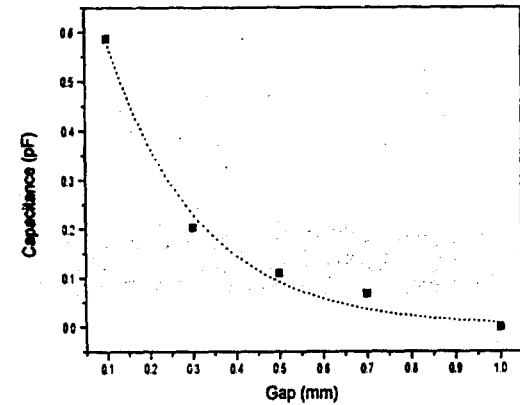


그림 6. C_g 전극간격에 따른 캐패시턴스의 변화
Fig. 6. Capacitance vs. C_g gap

HFSS를 이용하여 반복 해석함으로써 최적화된 일체형 유전체 필터의 구조를 설계하였고, 그 결과는 그림 7과 같다. 중심 주파수는 1960 MHz, 대역폭 60 MHz이며 감쇠극은 1850 MHz에 존재하는 주파수 전달 특성을 보였다. 또한, 구조 시뮬레이션 결과는 개방단 상부에 설계된 결합용 캐패시터의 원하지 않는 상호 간섭에 의해 저지 대역에서 50 dB 이상의 감쇠 특성을 갖는 것은 다소 어려운 것으로 나타났다.

5. 결과 및 고찰

설계된 일체형 유전체 필터의 구조를 바탕으로 $\epsilon_r = 38$, $Q \cdot f_0 = 38,000$ GHz, $\tau_f = 0$ ppm/°C 인 $(Zr_{0.9}Sn_{0.2})TiO_4$ 계 세라믹스를 이용하여 PCS용 일체

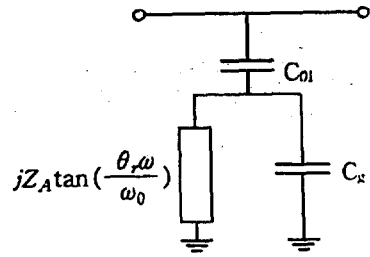


그림 5. C_g 계산을 위한 등가 모델
Fig. 5. Equivalent model for computing C_g

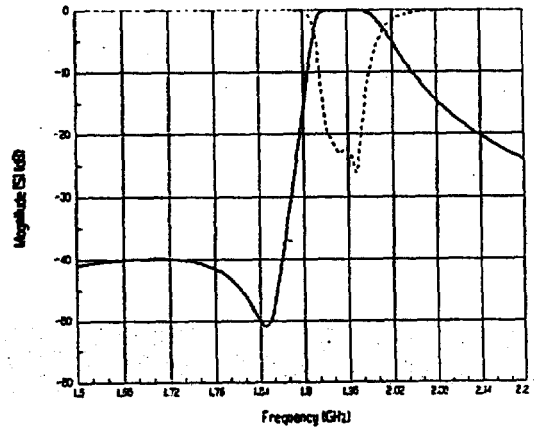


그림 7. 설계된 필터 구조 시뮬레이션 결과
Fig. 7. Structure simulation result

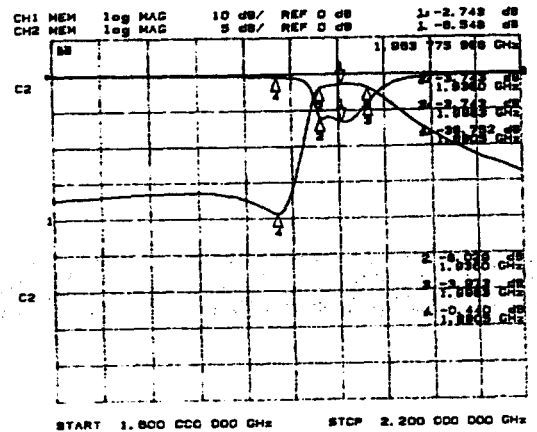


그림 8. 제작된 일체형 유전체 필터의 주파수 전달 특성

Fig. 8. Electrical characteristics of the filter

형 유전체 필터를 제작하였다. 유전체 블록은 구조설계를 통하여 계산된 치수에 따라 제작된 물드를 이용하여 일축 성형하여 제작하였으며, 소결된 유전체 블록 위에 패턴이 있는 면을 제외한 모든 면과 원주 홈을 은전극으로 코팅한 후, 스크린 프린팅 방법을 이용하여 원하는 전극 패턴을 구현하였다. 제작된 필터의 주파수 전달 특성 및 반사 특성은 그림 8과 같다. 중심 주파수는 1963.8 MHz, 1 dB-대역폭은 62.3 MHz, 삽입손실은 2.743 dB이며, $f_0=80$ MHz에서 감쇠극이 존재하여, 감쇠극이 없는 필터에 비하여 우수한 감쇠 특성을 보였다. 비록, 감쇠극의 위치는 구조 시뮬레이션 결과와 다소 차이를 보이나, 제작된 필터의 중심 주파수는 설계된 중심 주파수와 비교하여 0.2%의 오차를 나타내었다.

6. 결 론

통과 대역 아래쪽 저지 대역에 감쇠극을 갖는 일체형 유전체 대역 통과 필터를 튜닝 과정 없이 제작하였다. 이 필터의 설계 과정은 고주파 구조 해석 시뮬레이터를 이용한 해석 및 설계를 기초로 한다. 일체형 유전체 필터의 각 공진기의 특성 임피던스는 이차원 유한 요소법으로 해석하였고, 필터 구조의 주파수 해석은 삼차원 유한 요소법을 이용하였다. 제작된 필터의 주파수 특성은 삼차원 구조 해석 결과와 거의

유사함을 보였고, 따라서, 튜닝 과정이 생략된 필터의 설계, 제작이 가능함을 검증하였다. 또한, 본 논문에서 설계된 대역 통과 필터는 한 쪽 저지 대역에 감쇠극을 가지므로 듀플렉서로 응용 가능하다.

참 고 문 헌

- [1] S. Urabe, "Developments in Mobile/Portable Telephones and Key Devices for Miniaturization", IEICE TRANS. ELECTRON., E79-C, No. 5 pp. 600-605 MAY 1996.
- [2] T. Nishikawa, "Miniaturized Duplexer Using Rectangular Coaxial Dielectric Resonators for Cellular Portable Telephone", IEICE TRANSACTIONS, E74 [5] 1214-1220, 1991.
- [3] Cheng-Chyi You, Single-Block Ceramic Microwave Bandpass Filters, Microwave J. 24-35 November 1994.
- [4] G. L. Matthaei, Comb-line Band-pass Filters of Narrow or Moderate Bandwidth, Microwave J. 82-91, August 1963.
- [5] G. L. Matthaei, Microwave Filters, Impedance-Matching Networks, and Coupling Structures, MA : Artech House, 1985.