

상·하측 대역의 대역폭 조절이 가능한 이중 대역 대역 통과 필터 설계

A Design of the Dual-Band Bandpass Filter Using a Coupling Controllable Dual-Mode Resonators

표현성 · 안재민 · 김경근 · 임영석

Hyunseong Pyo · Jaemin An · Kyoungkeun Kim · Yeongseog Lim

요 약

E 모양의 이중 모드 공진기를 변형하여 상·하측 대역의 대역폭 조절이 가능한 이중 대역 통과 필터를 설계·제작하였다. 변형된 E 모양의 이중 모드 공진기를 이용하여 even 모드 간의 결합이 odd 모드 공진점에 영향을 미치지 않게 만들었고, 이를 통하여 상측 대역의 대역폭을 효과적으로 조절할 수 있다. 그리고 급전 선로 간의 결합을 통하여 차단 대역에 전송 영점을 발생시켜 차단 특성을 높였다. 대역폭 조절이 가능함을 보이기 위해 중심 주파수 2 GHz와 3 GHz에서 140 MHz의 동일한 대역폭을 갖는 필터를 설계하였다.

Abstract

In this paper, we designed and fabricated a dual-band bandpass filter which can control upper and lower bandwidth using the transformed E-shaped dual-mode resonator. The filter is made the coupling between even-mode not to affect odd-mode resonant frequency by the transformed resonator to control upper bandwidth effectively. The cross coupling between input and output feed lines was employed to improve stopband characteristic. The bandpass filter has been designed to indicate the same bandwidth at center frequency 2 GHz and 3 GHz to show to control bandwidth.

Key words : Dual-Mode, Dual-Band Bandpass Filter, I/O Cross Coupling

I. 서 론

주파수 자원이 한정되어 있고 이동 통신 시스템 및 전파 응용 분야가 늘어나고 있는 현실에서 주파수 간섭을 최소화하기 위하여 좁은 대역폭과 높은 선택도를 갖는 대역 통과 필터가 널리 이용되고 있다. 무선 및 이동 통신 시스템 등에서 우수한 특성의 RF 필터 설계 연구가 이루어지고 있고, 최근 하나의 공진기에서 두 개의 공진을 발생시켜, 결과적으로 필터 설계시 사용되는 공진기의 숫자를 감소시킬 수 있는 이중 모드 공진기를 이용한 필터의 설계가 활

발히 진행되고 있다. 또한 이중 모드 공진기를 활용하여 적은 손실과 소형화된 크기, 쉬운 제작 등의 장점과 함께 통과 대역 밖에서 전송영점을 발생시켜 높은 선택도를 가진 필터를 설계할 수 있다^[1].

이중 모드 공진기는 Wolff에 의해 최초로 제안된 이중 모드 링 공진기(dual-mode ring resonator) 이후, 사각 루프, 원형 디스크, 사각 패치 등의 한 파장 공진기 형태로 구현되었다^{[2],[3]}. 하지만, 기존의 스테브가 삽입된 그림 3과 같은 E 형태의 이중 모드 공진기 간의 결합을 이용한 이중 대역 통과 필터는 공진기 간의 결합이 even, odd 모드 공진점이 동시에 영

전남대학교 전자컴퓨터공학과(Department of Electronic and Computer Engineering, Chonnam National University)

· 논문 번호 : 20100827-123

· 교신저자 : 임영석(e-mail : limys@chonnam.ac.kr)

· 수정완료일자 : 2010년 11월 1일

향을 받기 때문에 각각의 대역폭을 독립적으로 조절하기 어렵다. 또한 고조파 성분을 이용한 Stepped-Impedance Resonator(SIR) 대역 통과 필터는 하측의 주파수 조절과 대역폭 조절은 쉬우나, 고조파를 이용한 상측 대역은 하측의 품질 계수 값에 의해 상측의 대역폭이 정해지기 때문에 대역폭 조절이 어렵다는 단점이 있다^[4]. 본 논문에서는 이중 모드 공진기를 응용하여, 상측과 하측의 공진점 및 대역폭 조절이 용이한 이중 대역 통과 필터 설계를 제안한다.

II. 이중 대역 통과 필터 설계

2-1 Stub-Loaded Resonator

그림 1은 스텝바가 삽입된 반파장 공진기를 도시하였다. 전송 선로 해석을 적용하기 전에 해석의 편의를 위해 헤어핀 공진기의 길이 L_1 은 $\theta_1/2$, 마이크로스트립 선로의 특성 어드미턴스 값은 Y_1 으로 놓았고, 개방 스텝바의 어드미턴스는 Y_2 , 길이는 L_2 로 표현하였다.

공진기 특성을 파악하기 위해 전송 선로 해석법을 사용하여 그림 1의 구조를 아래 식 (1)로 표현하였다.

$$\begin{pmatrix} A & B \\ C & D \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos \frac{\theta_1}{2} & jZ_1 \sin \frac{\theta_1}{2} \\ jY_1 \sin \frac{\theta_1}{2} & \cos \frac{\theta_1}{2} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ Y_2 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \cos \frac{\theta_1}{2} & jZ_1 \sin \frac{\theta_1}{2} \\ jY_1 \sin \frac{\theta_1}{2} & \cos \frac{\theta_1}{2} \end{pmatrix} \quad (1)$$

Y_s 는 개방 스텝바의 입력 어드미턴스로 식 (2)와 같이 정의된다.

$$Y_s = jY_2 \tan \theta_2 \quad (2)$$

좀 더 공진기의 해석을 용이하게 하기 위해 even-, odd- 해석 방법을 이용하여 A-A'를 단락, 개방시켜 해석하였다.

Odd 모드는 그림 1(b)의 등가회로로 나타낼 수 있고, ABCD 매트릭스 해석은 식 (3)과 같다.

$$\begin{pmatrix} A & B \\ C & D \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos \frac{\theta_1}{2} & jZ_0 \sin \frac{\theta_1}{2} \\ jY_0 \sin \frac{\theta_1}{2} & \cos \frac{\theta_1}{2} \end{pmatrix} \quad (3)$$

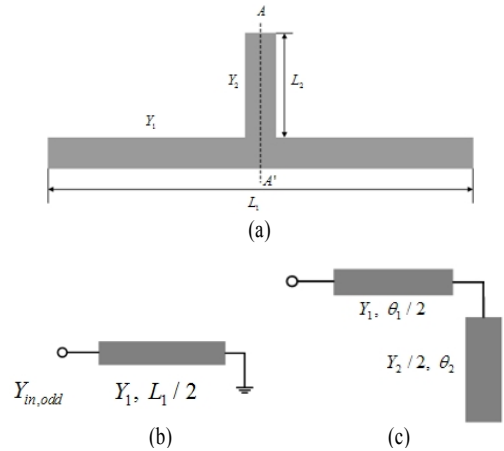


그림 1. (a) 스텝바가 삽입된 이중 모드 공진기, (b) Odd 모드 등가회로, (c) Even 모드 등가회로
Fig. 1. (a) Stub loaded dual-mode resonator, (b) Odd-mode equivalent circuit, (c) Even-mode equivalent circuit.

식 (3)의 ABCD 매트릭스를 정리하여 odd 모드일 때 공진기에서 바라본 전체 입력 임피던스 값은 다음과 같다.

$$\begin{aligned} Z_{in,odd} &= \frac{A \cdot Z_L + B}{C \cdot Z_L + D} \Big|_{Z_L=0} = \frac{B}{D} = \frac{jZ_1 \sin \frac{\theta_1}{2}}{\cos \frac{\theta_1}{2}} \\ &= jZ_1 \tan \frac{\theta_1}{2} \end{aligned} \quad (4)$$

$$Y_{in,odd} = \frac{Y_1}{j \tan \frac{\theta_1}{2}} \quad (5)$$

Odd 모드의 어드미턴스 $Y_{in,odd}$ 이 0일 때, 공진이 일어나므로 식 (4), (5)로부터 식 (6)과 같이 공진 주파수를 구할 수 있다.

$$f_{odd} = \frac{(2n-1)c}{2L_1 \sqrt{\epsilon_{eff}}} \quad (6)$$

또한, even 모드는 그림 1(c)의 등가회로로 나타낼 수 있고, ABCD 매트릭스 해석은 식 (7)과 같다.

$$\begin{pmatrix} A & B \\ C & D \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos \frac{\theta_1}{2} & jZ_1 \sin \frac{\theta_1}{2} \\ jY_1 \sin \frac{\theta_1}{2} & \cos \frac{\theta_1}{2} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \cos \theta_2 & j2Z_2 \sin \theta_2 \\ j\frac{Y_2}{2} \sin \theta_2 & \cos \theta_2 \end{pmatrix} \quad (7)$$

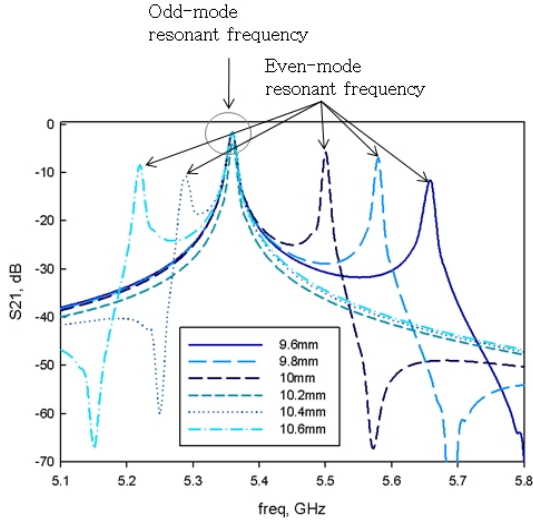


그림 2. 스텐브 길이 L_2 에 따른 주파수 응답 변화
Fig. 2. Frequency response against stub length L_2 .

식 (7)의 ABCD 매트릭스를 정리하여 even 모드일 때 공진기에서 바라 본 전체 입력 어드미턴스 값은 식 (9)와 같다.

$$Z_{in, even} = \frac{A \cdot Z_L + B}{C \cdot Z_L + D} \Big|_{Z_L = \infty} = \frac{A}{C} \quad (8)$$

$$Y_{in, even} = \frac{C}{A} = jY_1 \frac{2Y_1 \tan(\theta_1/2) + Y_2 \tan(\theta_2)}{2Y_1 - Y_2 \tan(\theta_1/2) \tan(\theta_2)} \quad (9)$$

$Y_{in, even}$ 이 0이 되는 조건은 $Y_2 = 2Y_1$ 이므로, 식 (9)로부터 even 모드 공진 주파수는 다음과 같이 정리된다.

$$\theta_1/2 + \theta_2 = n\pi \quad (10)$$

$$f_{even} = \frac{nc}{(L_1 + 2L_2) \sqrt{\epsilon_{eff}}} \quad (11)$$

식 (6)과 (11)을 통해, 스텐브의 길이는 odd 모드 공진 주파수에 영향을 미치지 않는 것을 확인할 수 있다. 스텐브 길이에 따른 주파수 응답 변화는 그림 2와 같고, 그림에서도 스텐브 길이 변화에 따른 odd 모드 공진 주파수의 변화가 거의 없는 것을 확인할 수 있다.

2-2 변형된 이중 모드 공진기를 이용한 필터 설계



그림 3. E 형태의 이중 모드 공진기를 이용한 필터의 구조
Fig. 3. The structure of the filter using E-shaped dual-mode resonator.

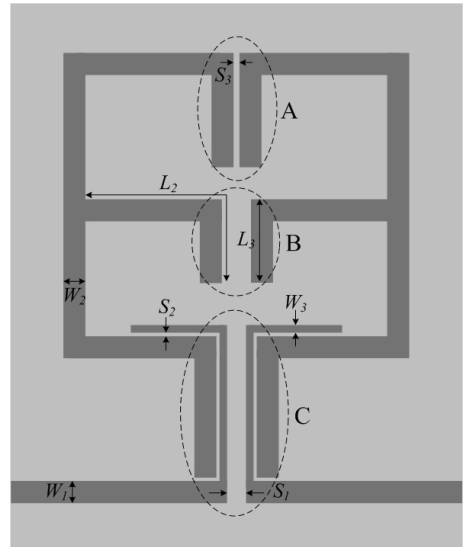


그림 4. 제안된 필터의 구조
Fig. 4. The structure of the proposed filter.

그림 3과 같은 일반적인 E 형태의 이중 모드 공진기를 이용해서 필터를 설계할 때 점선 박스 안의 커플링은 odd 모드와 even 모드에 모두 영향을 미치기 때문에 각각의 대역폭 조절이 어렵다는 단점이 있다^[5].

이러한 문제를 해결하기 위해 그림 4와 같은 구조의 이중 대역 통과 필터를 제안하였다. 일반적인 E 모양의 이중 모드 공진기를 변형하여 각각 A, B 부분으로 커플링 조절이 가능하도록 구조를 변형하였다. A부분을 이용하여 odd 모드 공진점과 even 모드 공진점의 커플링을 조절할 수 있다. 그러나 A 부분의 조절만으로는 even 모드 공진점에서 높은 커플링의 구현이 어렵기 때문에 B 부분의 조절을 통하여, 기존 구조와 달리 even 모드의 공진점에서 높은 커플링을 구현할 수 있다.

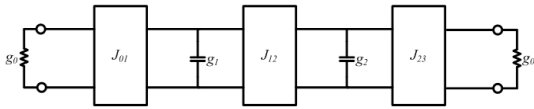


그림 5. 저역 통과 필터 프로토타입
Fig. 5. Prototype of lowpass filter.

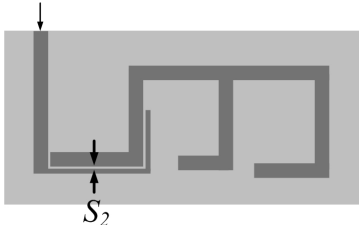


그림 6. S_2 에 따른 품질 계수를 추출하기 위한 급전 선로와 공진기의 구조도
Fig. 6. The structure of feed line and resonator for S_2 to extract quality factor.

제안한 공진기를 이용하여 2 GHz와 3 GHz의 중심 주파수를 갖고, 통과 대역 리플은 0.04 dB, 대역폭은 상하측이 모두 140 MHz인 이중 대역 필터를 설계하였다.

먼저 하측 필터 설계를 위해 그림 5와 같은 인버터로 이루어진 Prototype 저역 통과 필터의 등가회로를 이용하였고, $g_0 = 1$, $g_1 = g_2 = 1.5$, $J_{01} = J_{23} = 1$, $J_{12} = 1.1$ 의 값을 갖는다.

이를 0.04 dB 통과 대역 리플, 중심 주파수 2 GHz, 대역폭 140 MHz에 맞게 스케일링하면, 하측 필터의 결합 계수를 K_L , 외부 품질 계수를 Q_e 라 했을 때, $K_L = 0.051$, $Q_e = 21.415$ 의 값을 갖는다.

그림 7은 그림 6의 공진기와 급전 선로 간의 간격에 따른 하측 대역과 상측 대역의 외부 품질 계수 변

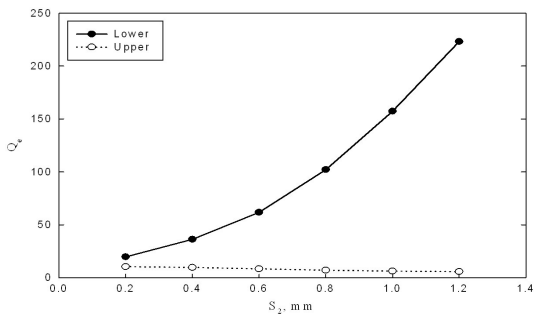


그림 7. 외부 품질 계수
Fig. 7. External quality factor.

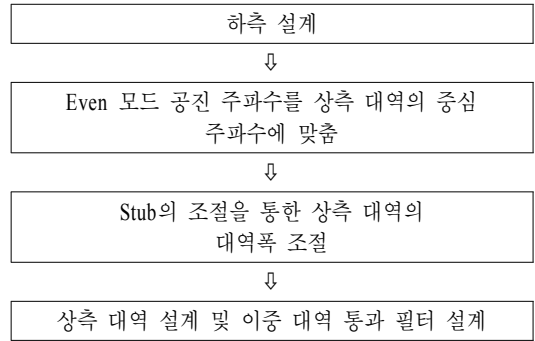


그림 8. 상측 대역 설계 과정
Fig. 8. Design procedure of upper-band.

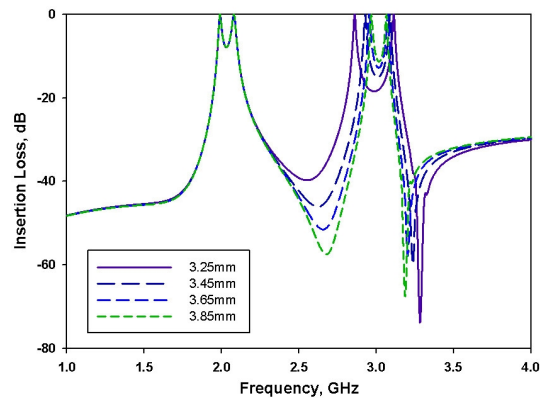


그림 9. Stub 변화에 따른 주파수 응답 변화
Fig. 9. Frequency responses against stub.

화를 나타낸 그래프이다. 외부 품질 계수는 하측 대역을 설계할 때 정해지지만, 그래프에서 보이는 바와 같이 상측 대역의 외부 품질 계수는 매우 작고, 변화가 거의 없기 때문에 그림 9에서 확인할 수 있듯이 스텐브의 커플링 조절만으로 충분히 상측 대역의 대역폭 조절이 가능하다.

앞의 K_L 과 Q_e 를 바탕으로 하측 필터를 설계한 후에는 그림 8과 같은 과정을 거쳐 상측 필터를 설계할 수 있다.

그림 9는 공진기의 스텐브 L_2 의 길이를 고정하고, L_3 의 길이를 조절하였을 때, 그에 따른 주파수 응답의 변화를 나타낸 그래프이다. 스텐브 변화는 odd 모드의 공진 주파수에 영향을 미치지 않고, even 모드의 공진 주파수에만 영향을 미치므로 그림 9와 같이 스텐브의 커플링 조절을 통하여 상측 대역의 대역폭을 효과적으로 조절할 수 있음을 확인할 수

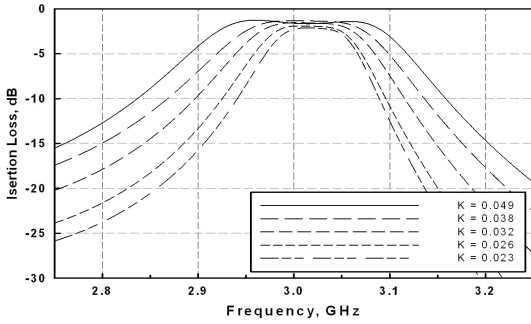


그림 10. 결합 계수 K 에 따른 상측 필터의 FBW 변화
Fig. 10. FBW of upper filter for various coupling coefficient K .

있다.

그림 10은 스테브 간의 결합 계수 K 값에 따른 상측 필터의 FBW의 변화를 나타낸 그래프이고, 이 때 K 값은 S_3 와 L_2 를 고정하고 L_3 를 조절하면서 구하였다. 3 GHz의 중심 주파수에서 Q_e 값의 조절 없이 K 의 조절만으로 약 2.6~8.2%의 대역폭의 확보가 가능하다.

2.3 급전 선로 간의 교차 결합

차단 대역의 특성을 좋게 하기 위해 앞 절에서 설계한 필터의 구조를 적절히 변형하여 그림 4의 C와 같이 급전 선로 사이의 커플링을 유도하였다. 이와 같은 급전 선로 간의 커플링 효과는 통과 대역 양단에 전송 영점을 발생시켜, 차단 특성 개선을 가능하게 한다^{[6],[7]}.

그림 11은 급전 방법에 따른 주파수 응답의 변화를 나타낸 그래프이다. Case (b)는 급전 선로 간의 간격 s 가 1.29 mm로 좁아 급전 선로 간의 커플링의 영

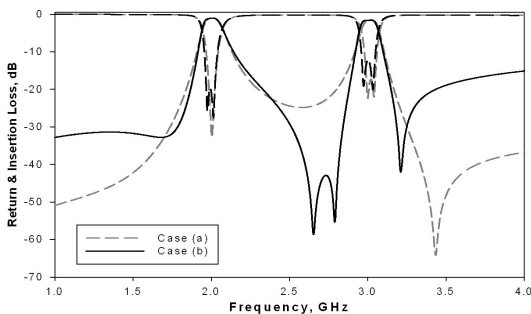


그림 11. 급전 방법에 따른 전송 영점 변화
Fig. 11. Transmission zeros for feed type.

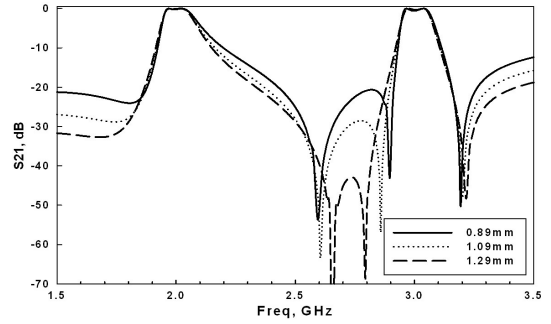


그림 12. 급전 선로 간의 간격 S_1 에 따른 전송 영점 변화
Fig. 12. Transmission zeros for feed gap S_1 .

향으로 급전 선로 간의 간격 s (9.29 mm)가 큰 Case (a)의 형태로 급전을 줄 때보다 차단 대역에서 2개의 전송 영점을 더 발생시킴으로 차단 대역 특성을 높였다.

그림 12는 그림 4의 S_1 에 따른 주파수 응답 변화를 나타낸 그래프이다. 급전 선로 간의 커플링은 대역폭에는 거의 영향을 미치지 않고, 전송 영점의 위치만 변화시키는 것을 확인할 수 있다.

III. 측정 및 결과

제안된 이중 대역 대역 통과 필터는 비유전율 2.4, 두께 0.79 mm의 Teflon 유전체를 사용하여 제작하였고, S_1 은 1.19 mm, S_2 는 0.3 mm, S_3 는 0.39 mm, L_3 는 6.4 mm의 값을 갖는다. 그림 13은 제작된 필터의 외형을 보여주며, 그림 14는 주파수 응답의 측정 결과를 나타낸다. 측정은 Anritsu社의 37325A를 사용하

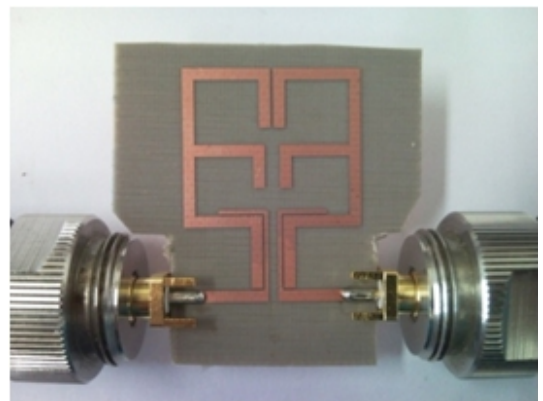


그림 13. 제작된 이중 대역 통과 필터
Fig. 13. The fabricated dual-band BPF.

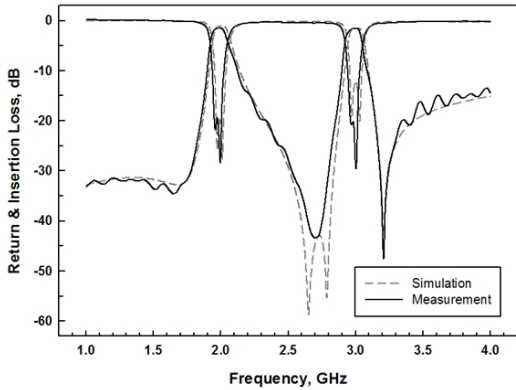


그림 14. 주파수 응답의 측정 결과
Fig. 14. Measured frequency responses for dual-band bandpass filter.

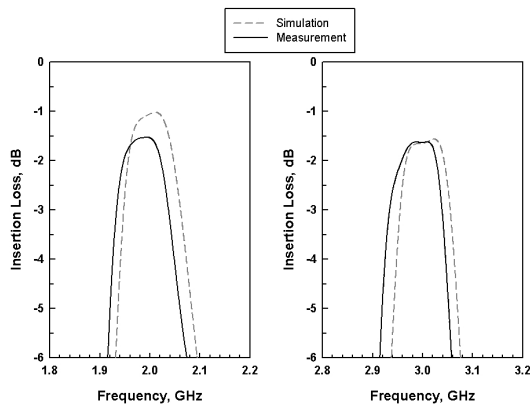


그림 15. 통과 대역의 주파수 응답 측정 결과
Fig. 15. Measured frequency responses for passband.

였다.

대역폭 조절이 가능함을 보이기 위해 2 GHz와 3 GHz의 중심 주파수에서 140 MHz의 동일한 대역폭이 되도록 구현하였다. 특히, 통과 대역 양단에 발생한 전송 영점들은 필터의 선택도를 높였다.

IV. 결 론

본 논문에서는 변형된 이중 모드 공진기를 이용하여, even 모드와 odd 모드 공진점에서 각각 커플링 조절이 자유로운 필터를 제작·설계하였다.

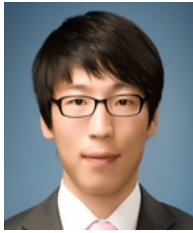
삽입된 스테브 사이의 간격을 조절하여 even 모드 공진점에서 결합 계수를 독립적으로 조절하였고, 이

를 이용하여 하측 대역의 대역폭 변화 없이 상측의 대역폭을 약 2.6~8.2 %까지 조절함을 보였다. 또한 급전 선로 사이의 교차 결합을 이용하여 상·하측 통과 대역 양단에 전송 영점을 발생시켜 차단 특성을 개선하였다. 이를 검증하기 위해 중심 주파수 2, 3 GHz에서 대역폭이 140 MHz로 동일한 필터를 설계·제작하였다. 제작한 필터는 측정 결과, 중심 주파수 2 GHz와 3 GHz에서 140 MHz의 대역폭을 보였고, 통과 대역 양단에 3개의 전송 영점이 발생하였다.

참 고 문 헌

- [1] J. -R. Lee, J. -H. Cho, and S. -W. Yun, "New compact bandpassfilter using microstrip $\lambda/4$ resonators with open stub inverter", *IEEE Microwave Guided Wave Lett.*, vol. 10, pp. 526-527, Dec. 2000.
- [2] I. Wolff, "Microstrip bandpass filter using degenerate modes of a microstrip ring resonator", *Electron. Letters*, vol. 8, no. 12, pp. 302-303, Jun. 1972.
- [3] J. -S. Hong, M. J. Lancaster, "Bandpass characteristics of new dualmode microstrip square loop resonators", *Electron. Letters*, vol. 31, no. 11, pp. 891-892, Nov. 1995.
- [4] 표현성, 안재민, 이해선, 김유선, 임영석, "SIR을 이용한 이중 대역 통과 필터 설계", 대한전자공학회 2010년 하계종합학술대회, pp. 1143-1145, 2010년 6월.
- [5] X. Zhang, J. Hen, Q. Xue and S. Li, "Dual-band bandpass filter using stub-loaded resonators", *IEEE Micro. Comp. Lett.*, vol. 17, no. 8, pp. 583-585, Aug. 2007.
- [6] H. Shaman, J. S. Hong, "A novel ultra-wideband (UWB) bandpass filter(BPF) with pairs of transmission zeros", *IEEE Microw. Wireless Compon. Lett.*, vol. 17, no. 2, pp. 121-123, Feb. 2007.
- [7] 안재민, 김유선, 표현성, 이해선, 임영석, "우수한 차단 대역 특성과 통과 대역 내에 저지 대역을 갖는 UWB 대역 통과 필터 설계", 한국전자과학회논문지, 21(1), 2010년 1월.

표 현 성



2009년 2월: 전남대학교 전자컴퓨터정보통신공학부 (공학사)
2009년 3월~현재: 전남대학교 전자컴퓨터공학과 석사과정
[주 관심분야] 초고주파 회로 설계 및 해석, RF 소자 설계, 전자파 수치 해석

김 경 근



2005년 2월: 전남대학교 정보통신공학부 전자공학전공 (공학사)
2007년 8월: 전남대학교 전자정보통신공학과 (공학석사)
2007년 9월~현재: 전남대학교 전자컴퓨터공학과 박사과정
[주 관심분야] 전자파 수치 해석, RF 소자 설계

안 재 민



2009년 2월: 전남대학교 전자컴퓨터정보통신공학부 (공학사)
2009년 3월~현재: 전남대학교 전자컴퓨터공학과 석사과정
[주 관심분야] 초고주파 회로 설계 및 해석, RF 소자 설계

임 영 석



1980년 2월: 서울대학교 전자공학과 (공학사)
1982년 2월: 서울대학교 전자공학과 (공학석사)
1989년 2월: 전북대학교 전자공학과 (공학박사)
1984년 9월~현재: 전남대학교 전자공학과 교수
[주 관심분야] 전자파 수치 해석, 초고주파 회로 설계 및 해석, RF 소자 설계, 안테나