

# 대역저지 필터 캐스케이드를 사용한 기판집적도파관 대역통과 필터의 저지대역 개선

이태학<sup>1\*</sup>, 이건명<sup>2</sup>

<sup>1</sup>유한대학교 전자공학과, <sup>2</sup>(주)아모텍 안테나 개발팀

## Substrate Integrated Waveguide Bandpass Filter with Improved Stopband using Bandstop Filter Cascade

Tae-Hak Lee<sup>1\*</sup>, Keonmyung Lee<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Department of Electronic Engineering, <sup>2</sup>AMOTECH Co., Ltd. Antenna R&D group

**요약** 본 논문에서는 기판집적도파관 공진기를 사용해 대역통과 필터를 설계하고 원하지 않는 공진으로 인한 저지대역의 성능저하를 대역저지 필터와 캐스케이드를 통해 개선하였다. 기판삽입도파관 형태의 공진기를 사용하여 대역통과 필터를 설계하며 공진기 내부에 위치하여 섭동으로 동작하는 두 개의 도체 기둥의 크기와 위치를 변화시켜 기본모드와 첫 번째 이중모드의 공진주파수를 조정하였다. 이를 통해 두 공진 모드가 함께 대역통과 필터의 통과대역을 생성하도록 한다. 대역통과 필터와 캐스케이드 되는 대역저지 필터는 대역통과 필터의 급전선 구조인 접지면을 지나는 동일평면 도파관(GB-CPW: Ground Backed CoPlanar Waveguide)에 삽입 가능한 단락 스텐브 기판으로 설계하였다. 대역통과 필터의 저지대역에 존재하는 원하지 않는 통과대역의 대역폭을 고려하여 낮은 품질계수를 지니도록 대역저지 필터를 설계하였다. 본 논문에서 제안된 설계방법에 따라 8 GHz 대역에서 10%의 비대역폭을 지니는 대역통과 필터를 제작하였으며 대역저지 필터 캐스케이드 여부에 따른 저지대역 성능의 개선을 확인하였다. 대역저지 필터를 캐스케이드 하여 제작된 대역통과 필터의 경우 저지대역폭이 100% 증가한 것을 확인하였다.

**Abstract** This research designed a substrate-integrated waveguide-based bandpass filter. Further, it mitigated the undesired performance degradation due to the higher-order resonant mode at the stopband of the bandpass filter (BPF) by cascading bandstop filters (BSF). A substrate-integrated waveguide type resonator is used for the BPF. Its resonant frequencies of the fundamental and the first degenerate mode are tuned to generate the passband using two perturbation conductive posts inside the resonator. The BSF cascaded to the BPF is designed based on short-circuited stubs and embedded in CB-CPW used as the feeding transmission line. The BSF is designed to have a relatively low Q-factor, considering the bandwidth of the undesired passband. The fabricated BPF designed at 8 GHz with 0.01 fractional bandwidth shows 100% increased bandwidth of the stopband when it is cascaded with CB-CPW BSF.

**Keywords** : Bandpass Filter, Bandstop Filter, Cascade, Substrate Integrated Waveguide, Ground-Backed Coplanar Waveguide, Harmonics, Stopband

---

이 논문은 2021학년도 유한대학교 정책과제 연구비의 지원을 받아 수행된 연구임.

\*Corresponding Author : Tae-Hak Lee(Yuhan Univ.)

email: taehaklee@yuhan.ac.kr

Received December 29, 2021

Revised January 20, 2022

Accepted February 4, 2022

Published February 28, 2022

## 1. 서론

이중 혹은 다중 공진모드를 사용하는 공진기 기반의 필터는 단일 공진모드를 사용한 공진기보다 물리적인 크기 및 대역폭과 같은 요구성능을 만족시키기 용이하다. 위성 통신용 송수신기를 위한 이중모드를 사용한 도파관형 공진기 기반 대역통과 필터가 제안된 이후 수많은 연구자로부터 이를 응용한 연구 결과가 발표되었다[1-3]. 기판집적도파관 공진기를 사용한 필터는 필터 주위 회로와 연결하기에 용이한 평판형 구조를 지니고 있으면서 마이크로스트립 공진기와 비교하여 높은 품질계수를 구현할 수 있으므로 효율성이 높다[4,5]. 이에 단일 혹은 다중 공진모드를 지닌 기판집적형 공진기를 사용한 필터에 대한 연구가 발표되었다[6-8]. 오버사이즈 공동 공진기를 사용한 대역통과 필터와 이중 모드 공진기를 사용한 필터, 다이플렉서가 제안되었다[6]. [7]과 [8]에서는 Ka 혹은 Q 대역에서 사용가능한 기판집적형도파관 기반 다중 모드 대역통과 필터가 인접한 두 개의 고차 공진모드를 사용하여 설계, 제안되었다. 삼중 공진모드를 지닌 공진기를 구현하기 위해 비아홀 공정을 사용해 사각형 구조 공진기의 기본모드인  $TE_{101}$  모드와 첫 번째 이중모드인  $TE_{102}$ ,  $TE_{201}$  모드를 함께 사용한 공진기 구조가 제안되었다[9].

본 논문에서는 원형의 기판삽입도파관 공진기의 기본 모드 (fundamental mode)의 공진주파수를 공진기 중심에 위치한 도체 기둥을 사용해 조정하며 해당 기본모드와 첫 번째 이중모드 (first degenerate mode)를 함께 사용해 통과대역을 생성한다. 제안된 공진기를 사용해 8.4 GHz에서 0.02의 비교적 넓은 비대역폭을 구현한다. 추가로 통과대역 인근 저지대역에 존재하는 원치 않는 공진 모드로 인해 발생하는 저지대역 성능 저하 현상은 설계된 대역통과 필터와 GB-CPW 전송선로에 설계된 대역저지 필터의 캐스케이드를 통해 개선한다.

이하에서는 모의실험을 통해 원하는 주파수 대역에서 동작하는 기판집적도파관 공진기를 설계하며 요구 성능을 만족하기 위한 내, 외부 결합구조의 치수를 결정해 대역통과 필터를 설계한다. 또한 원하지 않는 통과대역의 감쇠를 위한 대역저지 필터를 설계, 캐스케이드를 통한 대역통과 필터의 성능 향상을 확인한다. 이를 바탕으로 3장에서는 제안된 구조를 제작, 측정된 결과를 나타내었으며 4장에서 본 논문의 결론을 서술하였다.

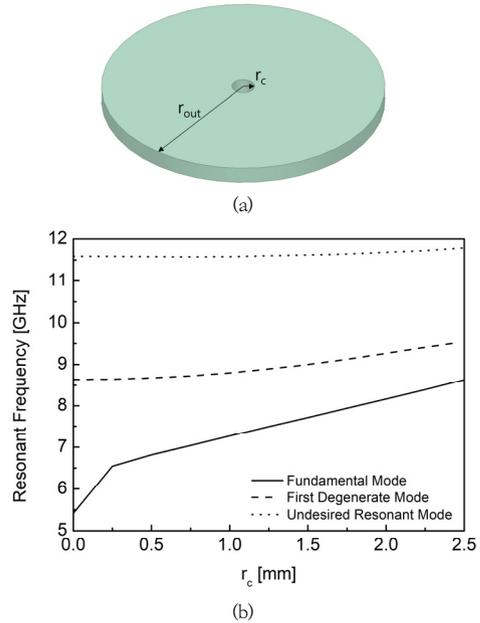


Fig. 1. Eigen mode simulation  
(a) Simulation setup (b) Simulation results

## 2. 필터 설계

먼저 기판삽입도파관 공진기가 원하는 주파수 대역에서 공진하도록 공진기의 크기를 결정하는 모의실험을 수행한다. Fig. 1에서는 이상적 원통형 공진기와 공진기 내부에 존재하는 도체 기둥의 크기에 따른 공진주파수 변화를 알아보기 위한 모의실험 세팅과 그 결과를 나타내었다.

모의실험은 Ansoft사의 High-Frequency Structure Simulator를 사용하였다. 먼저 효율적인 모의실험을 위해 공진기의 외곽 반지름을 뜻하는  $r_{out}$ 은 12.4 mm로 선택하여 공진기가 X 대역에서 공진하도록 한다. 이후 내부 도체 기둥의 반지름을 나타내는  $r_c$ 를 변화시켜 첫 번째 공진모드인 기본 모드(fundamental mode)가 첫 번째 이중모드 (first degenerate mode) 근처에서 동작하도록 하여 필터가 요구되는 비대역폭을 나타낼 수 있도록 한다. Fig. 1(b)의 모의실험 결과에서 볼 수 있듯이 공진기 내부 도체 기둥의 반지름 변화에 따라 기본 모드는 공진 주파수는 쉽게 높은 주파수 대역으로 이동하지만 첫 번째와 두 번째 이중모드의 공진 주파수는 크게 변화하지 않는다. 이는 Fig. 2의 각 공진 모드의 전계 분포에서 그 원인을 유추해볼 수 있다. 공진기 내부의 도체 기

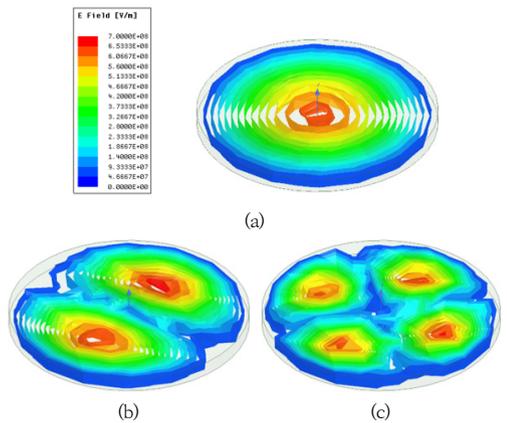


Fig. 2. Electric field distribution of resonant modes ( $r_c = 0$ )  
 (a) Fundmental mode (b) First degenerate mode  
 (c) undesired resonant mode

등이 기본모드의 전계 강도가 가장 센 공진기의 중심에 위치하고 크기가 변함에 따라 기본모드의 전계를 크게 변화시킨다. 전계 분포의 변경에 따른 공진주파수의 변화는 반작용 이론 (reaction theory)에 따라 유추할 수 있다[10]. 기본 모드 외의 공진 모드는 공진기 중심에서 상대적으로 약한 전계강도를 지녀 공진주파수의 변화가 적다. 그러므로 내부에 도체 기둥을 포함하고 있는 기판 삽입도파관 공진기를 설계함에 있어 첫 번째 이중모드가 원하는 주파수 대역에서 공공진하도록  $r_{out}$ 을 설정하고  $r_c$ 를 변경한 후 원하는 주파수 대역에서 통과대역을 생성하도록 치수를 미세 조정하는 것이 효율적이다.

위의 모의실험 결과를 바탕으로 기판삽입도파관 공진기의 치수를 확정된 후, Fig. 3에서는 공진기가 입출력단과의 적절한 외부 결합을 지니기 위한 결합 슬롯의 크기와 공진기 내부 결합을 결정하는 내부 섭동 (perturbation)의 위치를 결정하기 위한 모의실험 세팅을 나타내고 있다. Fig. 3(a)는 외부결합을 위한 결합 슬롯의 크기를 결정하기 위한 모의실험 세팅이며 슬롯의 크기를 나타내는  $\theta_f$ 의 변화에 따른 기본모드와 첫 번째 이중모드에 대한 외부 품질계수  $Q_e$  계산 결과를 Fig. 3(c)에 검은색, 빨간색 실선을 사용해 나타내었다. 결합 슬롯의 크기가 커지면서 외부 품질계수가 작아지며 요구 비대역폭을 구현하기 용이해 지는 것을 볼 수 있다. 본 모의실험에서는  $r_{out} = 12.4$  mm,  $r_c = 2.05$  mm,  $W_{feed} = 0.5$  mm를 사용하였으며 최종적으로  $\theta_f$ 는  $23.1^\circ$ 로 결정되었다. 참고로 첫 번째 이중모드의 적절한 외부 결합량 도출을 위해 본 모의실험을 수행하는 동안 perturbation을 제거하고 이중

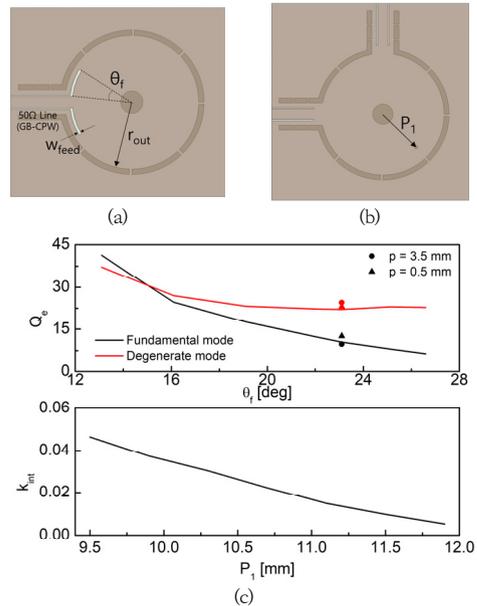


Fig. 3. Simulation setup for external and internal couplings  
 (a) external coupling (b) internal coupling  
 (c) simulation result

모드가 분리되지 않은 상태에서 모의실험을 진행하였다.

Fig 3(b)에서는 공진기 내부의 결합량을 나타내는  $k_{int}$  값을 얻기 위한 모의실험 세팅을 나타내고 있다. 50  $\Omega$  임피던스를 갖도록 설계한 GB-CPW 전송선로에 결합 슬롯을 제거한 상태로 기판집적형 공진기에 연결되어 내부결합에 대한 모의실험을 적절히 수행할 수 있는 약한 외부 결합 (loosely coupled external coupling)을 이루었다. 이중모드의 분리를 위해 공진기 내부 중심에 위치한 도체 기둥 외에 추가로 0.35 mm 반지름을 갖는 도체 기둥을 perturbation으로 사용하였다. 공진기 중심에서 perturbation까지의 거리를 나타내는  $P_1$ 의 변화에 따라 이중모드 중 하나의 모드에 대한 전계 분포가 변화하여 각 공진 모드가 perturbation 이론에 따라 분리되어 모드 간 결합이 발생한다. 이중모드의 각 공진주파수를  $f_1, f_2$ 라고 했을 때 내부 결합량  $k_{int}$ 는 아래의 식(1)을 사용하여 계산할 수 있으며 계산 결과를 Fig. 3(c)에 나타내었다[11]. 이를 바탕으로  $P_1$ 는 11.6 mm 로 결정하였다.

$$k_{int} = \left| \frac{f_2^2 - f_1^2}{f_2^2 + f_1^2} \right| \quad (1)$$

위의 모의실험 과정을 통해 필터 성능을 결정지을 수

있는 공진기의 크기  $r_{out}$ , 공진기 내부의 도체 기둥의 크기  $r_c$ , 외부 결합을 위한 결합 슬롯의 크기  $W_{feed}$  와  $\theta_i$ , 공진기 내부 결합을 위한 perturbation의 위치  $P_1$  치수를 결정지을 수 있다. 언급한 치수를 결정하여 8.4 GHz 에서 0.02의 비대역폭을 지닌 필터를 설계하고자 한다. 아래의 식(2)는 제안되는 대역통과 필터 구조의 결합계수 행렬이다.

$$M_{multi} = \begin{bmatrix} 0 & M_{s1} & M_{s2} & M_{s3} & M_{s4} & M_{s5} & 0 \\ M_{s1} & M_{11} & 0 & 0 & 0 & 0 & -M_{s1} \\ M_{s2} & 0 & M_{22} & M_{23} & 0 & 0 & M_{s2} \\ M_{s3} & 0 & M_{23} & M_{33} & 0 & 0 & -M_{s3} \\ M_{s4} & 0 & 0 & 0 & M_{44} & M_{45} & -M_{s4} \\ M_{s5} & 0 & 0 & 0 & M_{45} & M_{55} & M_{s5} \\ 0 & -M_{s1} & -M_{s2} & -M_{s3} & -M_{s4} & M_{s5} & 0 \end{bmatrix} \quad (2)$$

요구 성능을 만족하기 위해 사용된 정규화 된 결합 계수는  $M_{s1} = 0.55$ ,  $M_{11} = 1.265$ ,  $M_{22} = 0.041$ ,  $M_{33} = -0.665$ ,  $M_{s2} = 0.65$ ,  $M_{s3} = 0.32$ ,  $M_{44} = -2.74$ ,  $M_{55} = -3.18$ ,  $M_{s4} = 0.45$ ,  $M_{s5} = 0.05$ 이며 그에 따른 주파수 응답특성은 Fig. 4(c)에 모의실험 결과와 함께 점선으로 표시하였다. 점선으로 표시된 모의실험 결과에서 볼 수 있듯이 약 11 GHz 에서 원하지 않는 통과대역이 존재하는 것을 볼 수 있으며 이는 Fig. 1(b) 와 Fig. 2(c) 에서 확인할 수 있는 두 번째 이중모드로 인해 발생하였다. 원하지 않는 공진 모드가 대역통과 필터의 저지대역 성능을 저하시켰으며 이에 따라 설계된 대역통과 필터는 송수신단에 바로 적용되기 부적합하다. 이러한 문제를 해결하기 위해 대역통과 필터의 급전선으로 사용된 CB-CPW 전송선로에 쉽게 적용 가능한 단락 스텐브 기반의 대역저지 필터를 설계하고 대역저지 필터와 대역통과 필터 캐스케이드를 통해 대역통과 필터의 성능을 개선하고자 한다.

Fig. 4(b)에서는 CB-CPW에 적용 가능한 단락 스텐브 기반 대역저지 필터 구조를 나타내었다. 스텐브의 길이  $l_{bs}$ 는 11 GHz에서 공진하도록 설계하였으며 스텐브 공진기 간 거리를 의미하는  $d_{bs}$ 는 설계된 대역저지 필터의 대역폭을 고려하며 미세 조정하였다. 모의실험 결과  $l_{bs} = 4.725$  mm,  $d_{bs} = 4.55$  mm 로 결정하였으며 이를 사용한 모의실험 결과를 Fig. 4(d)에 나타내었다. 참고로 단락 스텐브의 경우 전송선로의 신호면 혹은 접지면에 위치할 수 있지만 현재 설계된 대역통과 필터의 저지대역의 성능을 개선하는 데 필요한 감쇠 대역폭 등을 고려하여 낮은 품질계수를 갖도록 대역저지 필터를 설계하였

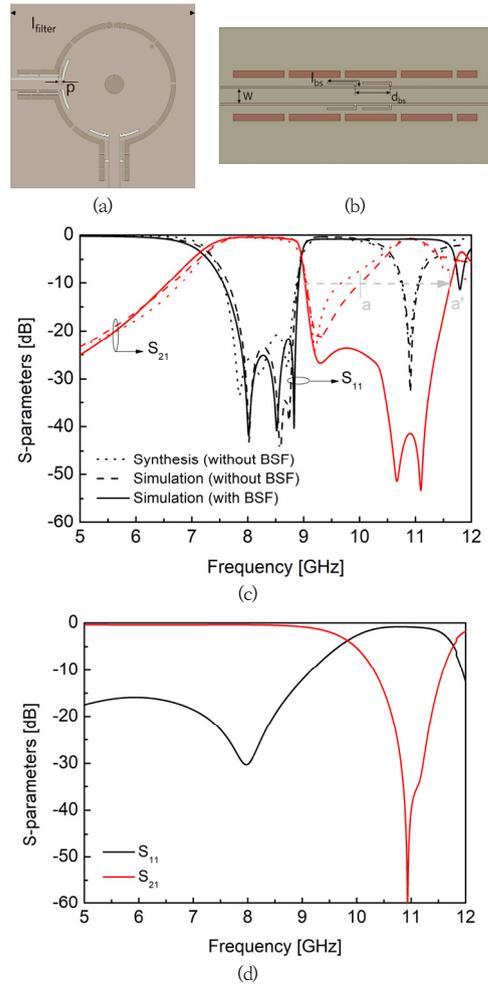


Fig. 4. Simulation setups and results  
 (a) simulation setup for BPF connected with BSF  
 (b) short circuited stub based BSF (c) simulation results of BPFs (d) simulation result of BSF

다[12].

설계된 대역통과 필터와 대역저지 필터 캐스케이드 구조에 대한 모의실험 결과를 Fig. 4(c)에 실선으로 표시하였다. 추가로 설계된 대역저지 필터와 앞서 설계된 대역통과 필터의 물리적 거리에 따른 대역통과 필터의 외부 결합의 변화를 확인하기 위해 Fig. 4(a)에서 나타낸 치수  $p$ 에 대해 외부결합 모의실험을 수행하였으며 그 결과를 Fig. 3(c)에 나타내었다. 모의실험 결과 대역저지 필터의 위치에 따른 대역통과 필터의 외부결합에 대한 영향은 미미하지만, 그 영향을 최소화하며 제작을 고려해  $p = 0.5$  mm 로 결정하였다. Fig 4(c)의 모의실험 결과 볼 수 있듯이 대역저지 필터로 인해 대역통과 필터의 저지대역

특성이 개선되었다. Fig. 4(c)에 회색 점선을 나타낸 것과 같이 대역통과 필터의 저지대역을 3 dB 대역폭의 상측 주파수에서 -10 dB 감쇠 주파수까지로 정의하였을 때 대역통과 필터에 대역저지 필터를 캐스케이드한 경우 저지대역의 폭이 약 2.685GHz이며 이는 대역저지 필터가 없는 경우 약 1.063 GHz인 것을 고려하면 대역폭이 약 150% 증가한 것을 확인할 수 있다.

### 3. 제작 및 검증

전술한 단락된 스티브 기반의 대역저지 필터를 사용한 대역통과 필터의 저지대역 성능 개선 설계 방법을 검증하기 위해 1.524 mm 두께의 TMM3 기판을 사용해 필터를 제작하였다. 공정한 비교를 위해 CB-CPW 전송선로에 대역저지 필터를 포함한 대역통과 필터와 포함하지 않은 대역통과 필터를 제작하여 측정 결과를 비교하였다. 제작한 대역통과 필터의 사진을 Fig. 5(a)와 5(b)에 나타내었으며 회로 양 변의 길이를 나타내는  $l_{\text{filter}}$ 는 40 mm로 대역저지 필터를 포함한 필터와 포함하지 않은 필터의 크기를 같게 설계하였다. 사진에서 볼 수 있듯이 공진기 중심의 도체 기둥과 첫 번째 이중모드의 perturbation은 비아-홀 (via-hole) 공정을 통해 구현하였다.

두 필터의 측정 결과를 Fig. 5(c)에 점선과 실선을 사용해 표시하였다. 제작된 대역통과 필터의 측정 결과를 필터의 각 통과대역과 저지대역에서의 성능으로 분리하여 설명하고자 한다. 먼저 통과대역에서의 필터 특성을 살펴보면 CB-CPW에 대역저지 필터를 삽입한 경우에도 통과대역 내 임피던스 정합 및 삽입손실은 대역저지 필터가 없는 경우와 유사하였다. 대역저지 필터가 있는 경우 통과대역에서 약 0.1 dB 삽입손실이 증가한 것을 확인하였다. 저지대역의 대역폭을 Fig. 4(c)의 모의실험과 동일하게 정의하였을 때 대역저지 필터가 대역통과 필터와 캐스케이드되어 있는 경우 10 dB 감쇠지점이 a에서 a'으로 이동하여 약 2.02 GHz의 대역폭을 나타냈다. 이는 대역저지 필터가 없는 경우 약 1.015 GHz인 것을 감안하면 약 100%의 대역폭 증가를 확인할 수 있다.

저지대역에서의 삽입손실이 모의실험 결과와 같이 약 30 dB 이상을 나타내도록 기대하였으나 이에 미치지 못하는 성능을 나타내었다. 이에 대한 원인을 분석하기 위해 추가적인 모의실험을 수행해 Fig. 5(c)에 점선으로 표시하였다. 먼저 모의실험을 통해 설계된 약 780 MHz의 3dB 대역폭이 제작된 대역통과 필터에서 약 900MHz를

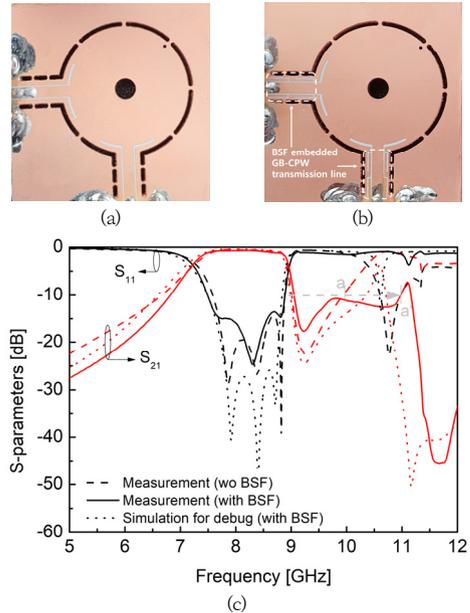


Fig. 5. Simulation and measurement results for BPFs with or without short circuited stub based BSF (a) picture of the fabricated BPF without BSF (b) picture of the fabricated BPF with BSF (c) measurement and simulation results

나타내었다. 이러한 통과대역의 증가는 저지대역에 존재하는 원하지 않는 공진모드로 인한 통과대역의 대역폭 또한 증가하는 것을 의미한다. 이러한 설계와 제작 간의 차이는 동일한 공정을 통해 제작된 여러 필터에서 동일하게 나타난 현상이었으므로 제작상의 오류라기보다 부정확한 모의실험의 결과로 예상된다. 그러므로 추가적인 모의실험에서는  $\theta_1$ 에 0.5°,  $l_{bs}$ 를 0.3 mm 감소시켜 외부 결합량과 대역저지 필터의 공진주파수에 변화를 통해 측정 결과와 유사한 모의실험 결과를 얻었다. 이를 통해 기판집적도파관 대역통과 필터를 설계, 제작할 때 설계자가 좀 더 유의하여 모의실험을 수행해야 하는 변수를 확인할 수 있다.

### 4. 결론

본 논문에서는 기판집적도파관 기반 대역통과 필터를 설계하고 저지대역에서 발생하는 성능저하를 대역저지 필터와 캐스케이드를 통해 개선하였다. 대역저지 필터는 1/4 파장의 단락 스티브를 사용해 CB-CPW 전송선로에 설계하였으며 원하지 않는 공진모드로 인한 통과대역을

감쇠시켰다. 제안한 필터 설계 방법을 검증하기 위해 필터를 제작하였으며 대역저지 필터가 없는 대역통과 필터와 비교해 대역저지 필터를 캐스케이드한 경우 약 100% 저지대역 폭이 증가하였음을 확인하였다.

## References

- [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, 1971.
- [2] A. E. Atia and A. E. Williams, "Narrow-bandpass waveguide filters," *IEEE Trans. Microw. Theory Techn.*, Vol. 20, No. 4, pp. 258-265, 1972.  
DOI: <http://dx.doi.org/10.1109/TMTT.1972.1127732>
- [3] L. Accatino, G. Bertin, M. Mongiardo, and G. Resnati, "Dual-mode filters with grooved/splitted dielectric resonators for cellular-radio base stations," *IEEE Trans. Microw. Theory Techn.*, Vol. 50, No. 12, pp. 2882-2889, 2002.  
DOI: <http://dx.doi.org/10.1109/TMTT.2002.805286>
- [4] D. Deslandes and K. Wu, "Millimeter-wave substrate integrated waveguide filters," in *Can. Elect. Comput. Eng. Conf.*, Montreal, QC, Canada, vol. 3, pp. 1917-1920, 2003, May 4-7.  
DOI: <http://dx.doi.org/10.1109/CCECE.2003.1226288>
- [5] D. Deslandes and K. Wu, "Substrate integrated waveguide dual-mode filters for broadband systems," in *Proc. IEEE Radio Wireless Conf.*, Boston, MA, pp. 385-388, 2003.  
DOI: <http://dx.doi.org/10.1109/RAWCON.2003.1227973>
- [6] P. Chu, W. Hong, M. Tuo, K.-L. Zheng, W.-W. Yang, F. Xu, and K. Wu, "Dual-mode substrate integrated waveguide filter with flexible response," *IEEE Trans. Microw. Theory Techn.* Vol. 65, No. 3, pp. 824-830, 2017.  
DOI: <http://dx.doi.org/10.1109/TMTT.2016.2633346>
- [7] Y. Dong, W. Hong, H. Tang, and K. Wu, "Millimeter-wave dual-mode filter using circular high-order mode cavities," *Microw. Opt. Tech. Lett.*, Vol. 51, No. 7, pp. 1743-1745, 2009.  
DOI: <http://dx.doi.org/10.1002/mop.24456>
- [8] Y. Dong, W. Hong, H. Tang, J. Chen, and K. Wu, "Planar realization of a Q-band triple-mode filter using high-order resonances," *Microw. Opt. Tech. Lett.*, Vol. 51, No. 3, pp. 600-603, 2009.  
DOI: <http://dx.doi.org/10.1002/mop.24114>
- [9] M. Rezaee and A. R. Attari, "Realisation of new single-layer triple-mode substrate-integrated waveguide and dual-mode half-mode substrate integrated waveguide filters using a circular shape perturbation," *IET Microw. Antennas Propag.* Vol. 7, No. 14, pp. 1120-1127, 2013.  
DOI: <http://dx.doi.org/10.1049/iet-map.2013.0181>
- [10] R. Harrington, *Time harmonic electromagnetic fields*, McGraw-Hill, NY, 1961.  
DOI: <http://dx.doi.org/10.1109/9780470546710>
- [11] J. S. Hong and M. L. Lancaster, *Microstrip Filters for RF/Microwave Applications*, New York, NY, Wiley, 2001.  
DOI: <http://dx.doi.org/10.1002/0471221619>
- [12] G. E. Ponchak and L. P. B. Katehi, "Open- and Short-circuit terminated series stubs in finite-width coplanar waveguide on silicon," *IEEE Trans. Microw. Theory and Techn.*, Vol. 45, No. 6, pp. 970-976, 1997.  
DOI: <http://dx.doi.org/10.1109/22.588611>

### 이 태 학(Tae-Hak Lee)

[정회원]



- 2007년 2월 : 건국대학교 전자공학과 (공학사)
- 2015년 2월 : 고려대학교 컴퓨터전파통신공학과 (공학박사)
- 2015년 3월 ~ 2016년 9월 : 고려대학교 컴퓨터정보통신연구소 (박사후연구원)
- 2016년 12월 ~ 2019년 11월 : Ecole Polytechnique, PolyGrames (박사후연구원)
- 2019년 11월 ~ 2021년 2월 : 한국항공우주연구원 위성탐재체연구부 (박사후연구원)
- 2021년 3월 ~ 현재 : 유한대학교 전자공학과 교수

<관심분야>

RF/Microwave 통신 소자, 위성통신

### 이 건 명(Keonmyung Lee)

[정회원]



- 2008년 2월 : 한양대학교 전자공학과 (공학사)
- 2010년 2월 : 고려대학교 컴퓨터전파통신공학과 (공학석사)
- 2010년 3월 ~ 현재 : ㈜아모텍 안테나개발팀

<관심분야>

RF/Microwave 통신 소자, 안테나 설계