

# Split-Ring 공진기와 Spiral 공진기를 이용한 새로운 소형의 마이크로스트립 대역 저지 필터 설계

## A Design of Novel Compact Microstrip Bandstop Filters Based on Split-Ring Resonators and Spiral Resonators

이 종혁 · 오 영 철 · 명 로 훈

Jong-Hyuk Lee · Young-Chul Oh · Noh-Hoon Myung

### 요 약

이 논문에서는 split-ring 공진기와 spiral 공진기를 complementary 형태로 구현한 새로운 형태의 두 가지 마이크로스트립 대역저지 필터를 제안하였다. 첫 번째는 마이크로스트립 전송 선로의 중앙 선로에 세 개의 split-ring 공진기를 일렬로 배열시켜 에칭 시킨 것이다. 중앙 선로에 구현된 세 개의 split-ring 공진기와 수직으로 시간에 따라 변하는 전계가 걸리면 특정 공진 주파수에서 유효 투자율이 음이 되는 현상이 벌어지며, 이에 따라 전파가 더 이상 진행하지 못하게 된다. 이는 특정 공진 주파수에서 대역저지 현상이 나타나는 것을 의미한다. 두 번째는 첫 번째 것과 비슷하게 마이크로스트립의 중앙 선로에 spiral 공진기를 세 개 나열하여 에칭하였다. Spiral 공진기는 그 축에 수직인 방향으로 전계가 걸렸을 때 특정 공진 주파수에서 self-resonance 현상이 일어나며, 이것이 대역저지 특성으로 나타난다.

제안된 두 필터는 쉽게 공진 주파수와 대역저지 폭을 결정할 수 있고, 매우 작은 크기를 갖으며, 통과대역 내에서 삽입손실이 거의 없으며, 매우 날카로운 스퀘트 특성을 갖는다. 또한 제작하기 쉽고, 향후 MMIC에 적용하기 쉬운 것으로 예상된다.

### Abstract

In this paper, two novel compact microstrip bandstop filters using complimentary split ring resonators(CSRRs) and spiral resonators is proposed.

The first one is the bandstop filter using an array of CSRRs etched on the center line of a microstrip. The bandstop is due to the presence of negative effective permittivity and positive permeability near resonant frequency which prevent the wave propagation. The second one is the bandstop filter using an array of spiral resonators etched on the center line of a microstrip. The bandstop is due to the self-resonance of spiral circuit.

We have achieved controllable resonance frequency and bandwidth, super compact dimension, low insertion losses in the passband and high level of rejection in the stopband with sharp cutoff. The electrical sizes of two proposed filter are very small. Additionally, they can be easily fabricated and compatible with MMIC or PCB technology.

Key words : Bandstop, Filter, Split-ring Resonator, Spiral Resonator

## I. 서 론

### 1-1 연구 배경

「본 연구는 정보통신부 및 정보통신연구진흥원의 대학 IT연구센터 지원사업의 연구비 지원과 한국과학기술원 전파탐지 특화연구센터(KAIST RDRC)를 통한 국방과학연구소의 연구비 지원으로 수행되었습니다.」

한국과학기술원 전기 및 전자공학과(Department of Electrical Engineering and Computer Science, KAIST)

· 논 문 번 호 : 20061220-03S

· 수정완료일자 : 2007년 7월 16일

마이크로웨이브(microwave) 필터(filter)는 입력된 여러 주파수 성분 중 원하는 주파수만 통과시키고 나머지는 감쇄시켜 통과하지 못하게 하는 역할을 한다. 결국 filter는 주파수를 선택해 주는 역할을 하며, 주파수 선택 특성에 따라 저역 통과(low pass), 고역 통과(high pass), 대역 통과(bandpass), 대역 저지(bandstop) 필터로 나뉜다. 대역 저지 필터는 모든 주파수 대역은 잘 통과시키면서 특정 대역의 주파수만 통과시키지 않는 형태의 필터이다. 대역 저지 필터는 마이크로웨이브 회로에서 발생하는 하모닉(harmonic) 성분이나 기생 성분들을 제거하는 등 주로 특정 주파수의 유입을 차단하기 위해 사용된다.

필터의 기본 원리는 바로 L과 C의 조합에 의한 공진이다. 집중 정수 소자인 L과 C를 직접 이용한 필터뿐 아니라 구조적인 공진 필터도 분석을 해보면 결국 등가의 인덕턴스(inductance) 성분과 캐패시턴스(capacitance) 성분을 추출해낼 수 있다. L과 C로 구성된 대역 저지 필터의 기본형은 그림 1과 같다.

필터의 특성 중 가장 중요한 것은 그림 1에서 나타낸 바와 같이 삽입 손실(insertion loss)과 스커트(skirt) 특성이다. 삽입 손실이란, 신호가 필터를 통과 하면서 조금씩 손해를 보는 전력을 의미하며, 스커트 특성은 통과 대역과 저지대역이 얼마나 구분이 잘 되느냐를 말한다. 삽입 손실은  $S_{21}$ 이 0 dB에서 떨어

어진 차이만큼을 말하며 당연히 적을수록 좋은 필터이고, 스커트 특성은 스커트가 더 큰 각으로 날카롭게 서야지 좋은 필터라 할 수 있다.

최근 들어 마이크로웨이브 회로들이 점점 더 소형, 경량, 박형의 필요성이 증가하고 있으며, 필터 역시 이 흐름에 발맞추어 소형화의 추세에 있다. 따라서 필터 설계에 대한 가장 중요한 주안점은 앞서 설명했던 필터의 좋은 특성을 보이면서도 작게 설계할 수 있는가 라고 할 수 있다.

### 1-2 PBG(Photonic Band Gap) 구조

대역 저지 필터를 구현하는 방법 중 최근 들어 가장 각광을 받고 있는 것이 PBG 구조이다. 그 이유는 바로 소형화의 길을 열어 주었기 때문이다. 주기적인 유전체 구조는 특정 주파수 대역에서 어떠한 전자기파도 통과하지 못하게 하는 특성을 갖는다. 이를 이용하여 임의의 방향을 제어하고 전자기파의 진행을 조절할 수 있게 되는데, 이 주파수 대역을 PBG (Photonic Band Gap)이라 부른다.

PBG는 기본적으로 주기적인 모양을 띄는데, 이 주기성을 확보하기 위해서는 최소한 대역폭 2번 이상의 반복이 필요하다. 또한, 정지 대역을 결정하는 한 주기의 전기적인 길이는 정지 대역 주파수의 반 파장으로 주어지므로 PBG 구조의 크기는 최소한 세 파장 이상이 되어야 하는 문제가 있었다. 예를 들어 살펴보면, 초기 모델은 마이크로스트립 선로의 접지 부분에 원형 구멍을 뚫은 PBG 구조이다<sup>[1]</sup>. 접지면에 구멍은 3×9개를 뚫었으며, 전체 크기는 구멍의 반지름이 50 mil을 기준으로 하면  $\lambda_g \times 3 \lambda_g$ , 90 mil을 기준으로 하면  $1.5 \lambda_g \times 4.5 \lambda_g$ 이다. 초기의 PBG 구조가 너무 크다는 문제점을 해결하기 위해 UC-PBG(Uniplanar Compact PBG)가 등장하게 된다<sup>[2]</sup>. UC-PBG는 Coplanar Waveguide(CPW), 여파기, 안테나, 증폭기 등의 여러 가지 회로에 응용되었으며, 특히 정지 대역이 나타나는 주파수를 기준으로 크기가 약  $\lambda_g \times 2 \lambda_g$ 로 많이 줄어들었다<sup>[3]</sup>. UC-PBG보다 크기를 더 줄인 것이 anisotropic PBG 구조이다<sup>[4]</sup>. 한 셀의 크기는 정지 대역이 시작되는 cut-off 주파수를 기준으로 약  $\lambda_g/15$ 이므로 7×7셀의 경우 크기가 약  $\lambda_g/2 \times \lambda_g$ 가 된다. 이것은 기존의 여러 PBG 구조에 비해 획기적으로 크기를 줄인 결과이다. 그럼에도 불구하고

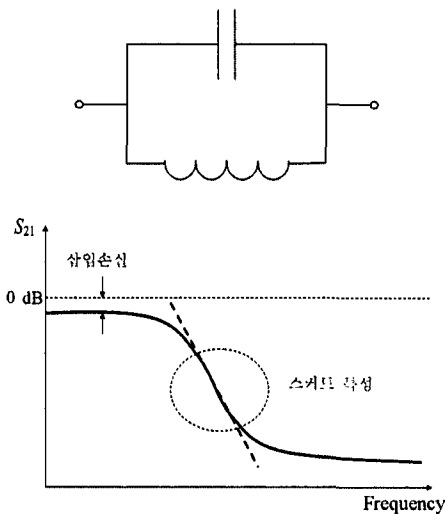


그림 1. 대역 저지 필터의 등가 회로 및 특성  
Fig. 1. Equivalent circuit and characteristic of a band-stop filter.

PBG는 여전히 크기가 크고, 기관의 뒷면에 공정을 한 번 더 추가해야 한다는 단점이 있다.

### 1-3 연구 동기

앞서 살펴본 대역 저지 특성을 나타내는 PBG 구조는 비교적 제작이 간단하고, 소형화의 가능성이 크다는 측면에서 최근 각광을 받고 있다. 그러나 여전히 PBG 구조는 크기의 문제점이 있다고 하겠다. 근본적으로 PBG 구조는 주기적인 구조로 한 주기가 전기적으로 반 파장이 되는 주파수에서 정지 대역이 형성되고, 주기적인 특성을 얻기 위해서는 적어도 대여섯 주기 이상이 요구되었다. 따라서 PBG 구조는 적어도 약 세 파장의 크기를 가지게 되는데, 이것은 초고주파 분야에서 사용하기에는 너무 큰 크기이다. 최근 들어 소형화에 대한 많은 연구 덕분에 그 크기가 한 파장 정도로 줄여졌지만, 그래도 여전히 크다 하겠다. 본 논문에서 제안한 split-ring 공진기와 spiral 공진기를 이용한 새로운 형태의 마이크로스트립 필터는 PBG 구조에 비해 더 작은 크기를 가진다.

## II. SRR을 이용한 대역 저지 필터 설계

### 2-1 SRR(Split-ring Resonator)에 대한 분석

#### 2-1-1 유효 투자율(Effective Permeability)을 통한 분석

이 하위 장에서는 J. B. Pendry에 의해 처음 제안된 Split-ring 공진기로부터 음의 유효 투자율이 발생되는 것을 수식적으로 분석하도록 하겠다<sup>[6]</sup>.

먼저 그림 2에서 보여지는 바와 같이, 세 축이 서로 직각이 되는  $a$ 의 크기를 같은 단위 셀(cell)을 가정하자. 만약 단위 셀의 크기  $a$ 가 한 파장보다 매우 작다면, 다음과 같이 유효 투자율(effective permeability)을 정의할 수 있다.

$$B_{ave} = \mu_{eff} \mu_0 H_{ave} \quad (1)$$

먼저 그림 2에 나타난 매우 간단한 구조인 모델 (model) A에 대해 유효 투자율을 구해 보자. 원통의 축에 평행한 방향으로 외부에서 필드  $H_0$ 가 가해진다고 하자. 또한, 단위 길이 당 전류  $j$ 가 흐르도록 원통은 도체로 되어 있다고 할 때 원통 내부의 필드는

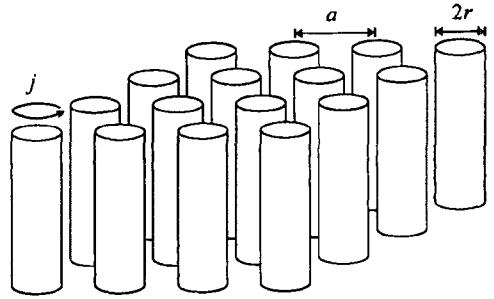
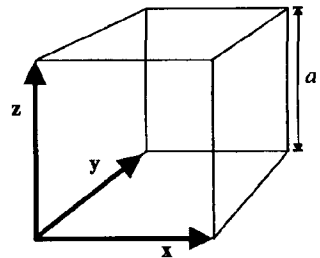


그림 2. 단위 셀(cell)과 모델 A: 금속 원통의 주기적 배열

Fig. 2. A unit cell model A: periodic array of metallic cylinders.

식 (2)와 같다.

$$H = H_0 + j - \frac{\pi r^2}{a^2} j \quad (2)$$

여기서 우변의 두 번째 변수는 전류에 의해 직접적으로 발생하는 필드이며, 세 번째 변수는 떨어져 있는 원통의 끝단들에서 발생한 필드가 원통 내부의 필드의 극성을 상쇄시키는 필드(depolarizing field)이다. 원통 주위를 감싸는 총 기전력(electromotive force)을 구해 보면 다음과 같다.

$$\begin{aligned} emf &= -\frac{d\Phi}{dt} - RI \\ &= i\omega\pi r^2\mu_0 \left( H_0 + j - \frac{\pi r^2}{a^2} j \right) - 2\pi r\sigma j \end{aligned} \quad (3)$$

여기서  $\sigma$ 는 단위 면적당 원통 표면의 저항(resistance)이다. 총 기전력은 KVL(Kirchhoff's Voltage Law)에 의해 다음과 같이 정리된다.

$$\begin{aligned} j &= \frac{-i\omega\pi r^2\mu_0 H_0}{i\omega\pi r^2\mu_0 \left[ 1 - \frac{\pi r^2}{a^2} \right] - 2\pi r\sigma} \\ &= \frac{-H_0}{\left[ 1 - \frac{\pi r^2}{a^2} \right] + i \frac{2r\sigma}{\omega r^2\mu_0}} \end{aligned} \quad (4)$$

이제  $\mu_{eff}$ 를 계산하기 위한 관련된 평균값들을 계산해 보자. 전체 단위 셀에 대한  $B$ 와  $H$  필드의 평균을 구하면 식 (5), (6)과 같다.

$$B_{ave} = \mu_0 H_0 \quad (5)$$

$$H_{ave} = H_0 - \frac{\pi r^2}{a^2} j$$

$$= H_0 \frac{1 + i \frac{2\sigma}{wr\mu_0}}{\left[1 - \frac{\pi r^2}{a^2}\right] + i \frac{2\sigma}{wr\mu_0}} \quad (6)$$

따라서 식 (2)에 의해  $\mu_{eff}$ 를 구하면 식 (7)과 같다.

$$\mu_{eff} = \frac{B_{ave}}{\mu_0 H_{ave}} = 1 - \frac{\pi r^2}{a^2} \left[1 + i \frac{2\sigma}{wr\mu_0}\right]^{-1} \quad (7)$$

이제 그림 3에 나타낸 모델 B, 즉 spit-ring 형태의 금속 원통의 주기적 배열에 대한 유효 투자율을 구해 보자.

외부에서 원통에 평행하게 H-필드  $H_0$ 이 가해졌을 때 split-ring에 전류가 유기된다. 이때 안쪽과 바깥쪽의 원통 사이의 캐패시턴스가 더 크면, 더 큰 전류가 유기된다. 그러므로 발생된 캐피시턴스를 고려해 모델 A를 통해 구했던 유효 투자율과 비슷한 방법으로 모델 B에 대한 유효 투자율을 구하며, 정리

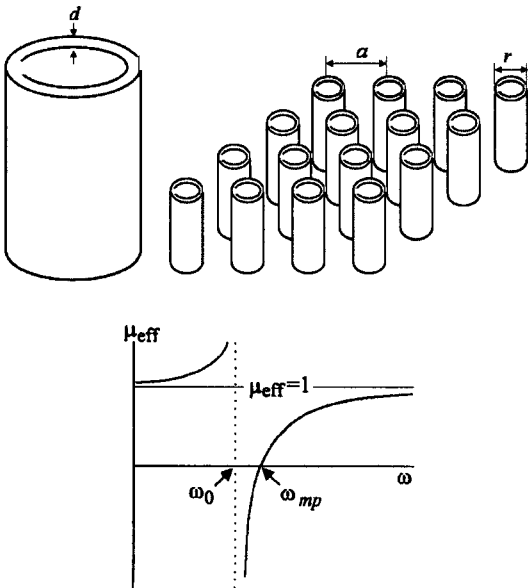


그림 3. 모델 B 및 유효 투자율 그래프  
Fig. 3. Model B and effective permeability.

한 결과는 식 (8)과 같다.

$$\mu_{eff} = 1 - \frac{\frac{\pi r^2}{a^2}}{1 + \frac{2\sigma i}{wr\mu_0} - \frac{3dc_0^2}{\pi^2 w^2 r^3}} \quad (8)$$

그림 3과 같이 원통에 전류가 흐르면서 생기는 인덕턴스와 원통 사이의 캐패시턴스가 균형을 이루기 때문에,  $\mu_{eff}$ 는 공진하는 형태가 된다. 그림에서 보듯이  $w_0 < \omega < w_{mp}$ 에서  $\mu_{eff}$ 가 음수가 된다.  $w_0$ 와  $w_{mp}$ 를 결정하는 것은 원통의 내부 구조의 크기이므로 split-ring 형태의 원통의 크기로 유효 투자율이 음수가 되는 주파수 구간을 결정할 수 있다. 여기서 중요한 점은 파장보다 매우 작은 크기에서 유효 투자율이 음이 되는 구조를 구현할 수 있다는 것이며, 음의 유효 투자율은 진행파의 방향을 반대로 가게 만든다. 따라서 split-ring 공진기를 이용하면 매우 작은 크기의 대역 저지 구조를 만들 수 있다는 말이다.

### 2-1-2 등가 회로(Equivalent Circuit)를 통한 분석

Split-ring 공진기의 일반적 형태를 그림 4에 나타내었다<sup>[6]</sup>.

이 split-ring에 외부에서 시간에 따라 변하는 자계(time varying magnetic field)가 가해지면, 두 링에는 전류가 유기된다. 이 전류 루프에 의해 인덕턴스가 발생한다. 또한 틈(slit)이 있는 두 링에 유기된 전류에 의해 전압 분포는 그림 4와 같이 되며, 안쪽과 바깥쪽 링 상이에 캐패시턴스가 발생하며, 반대 방향으로 나 있는 틈 사이에 가장자리(edge) 캐패시턴스가 발생한다. 따라서 총 캐패시턴스는 이 두 캐패시터가 직렬로 연결되어 있다고 할 수 있다. 결과적으로 split-ring 공진기의 등가 회로 모델은 그림 4와 같이 나타낼 수 있다. 그림에서 보듯이 split-ring 공진기의 등가 회로는 일반적인 대역 저지 필터의 LC 공진 회로와 같다. 등가 회로에 대한 공진 주파수는 식 (9)와 같이 표현된다.

$$\omega_0 = \sqrt{\frac{2}{\pi r_0 LC_{p.u.l}}} \quad (9)$$

여기서  $C_{p.u.l}$ 는 링 사이의 단위 길이 당(per unit length) 캐패시턴스,  $L$ 은 split-ring 공진기의 총 인덕

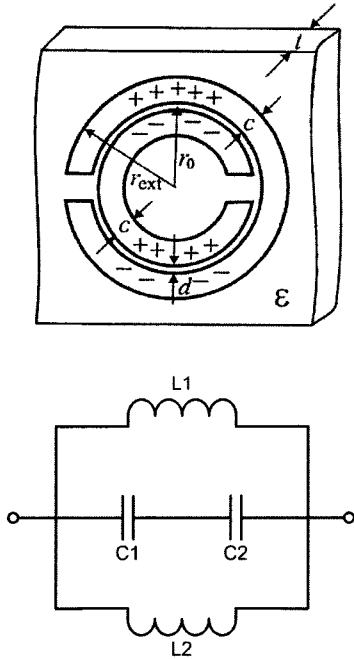


그림 4. SRR의 외부 필드에 의한 전압분포 및 등가 회로  
 Fig. 4. Voltage distribution and equivalent circuit of SRR applied with external time varying magnetic field.

턴스,  $r_0$ 는 두 링의 평균 반지름이다.

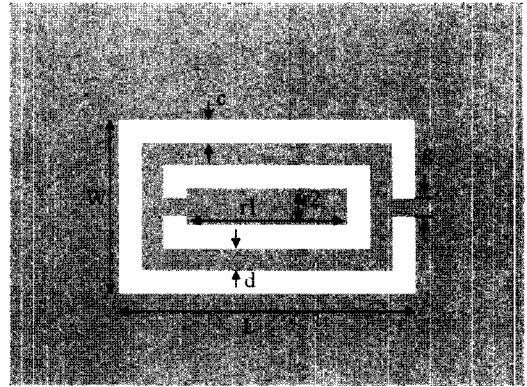
## 2-2 필터 설계

### 2-2-1 Split-ring 공진기 설계

2-1절에서 설명한 split-ring 공진기를 마이크로스트립 전송 선로에 적용시켜 대역 저지 필터를 구현하고자 한다. 제안된 split-ring 공진기를 이용한 대역 저지 필터의 공진 주파수는 전적으로 split-ring의 크기에 따라 결정되므로 필터의 공진 주파수를 결정하기 위해 split-ring 공진기의 크기를 결정해야 한다. Ansoft사의 HFSS를 이용하여 7.2 GHz에서 공진하도록 split-ring 공진기를 설계하도록 하였으며, 사용한 기판은 Taconic RF-35로 유전율은 3.5, 높이는 0.76 mm이다.

### 2-2-2 Split-ring 공진기를 이용한 필터 설계

2-2-1에서 설계한 split-ring 공진기를 마이크로스트립 전송 선로의 중앙 선로에 적용시켜 설계한 대역



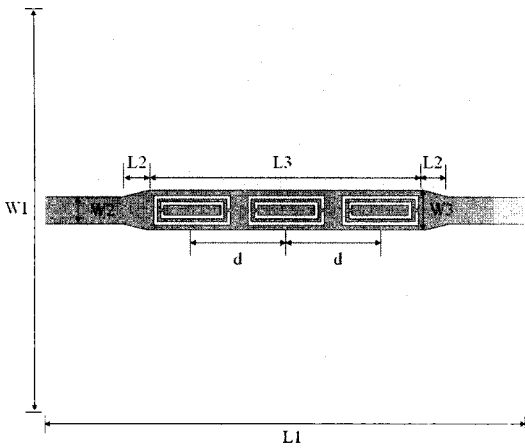
| 파라미터  | 수치(mm) |
|-------|--------|
| $r_1$ | 1.3    |
| $r_2$ | 0.6    |
| $d$   | 0.2    |
| $c$   | 0.2    |
| $g$   | 0.2    |
| $W$   | 1.8    |
| $L$   | 2.5    |

그림 5. Split-ring 공진기와 수치(위에서 본 모양, 진한 영역이 금속)  
 Fig. 5. Design of split-ring resonator.

저지 필터를 그림 6에 나타내었다. 중앙 선로는 50  $\Omega$ 에 해당하는  $W_3=1.67$  mm(Taconic RF-35 기판:  $\epsilon_r=3.5$   $h=0.76$  mm)과 split-ring 공진기를 넣은 부분인  $W_3=2$  mm로 구성했으며, 이 둘 사이의 임피던스 매칭을 위해 테이퍼 라인을 사용하였다. Split-ring 공진기는 중앙 선로 안에 complementary의 형태로 적용시켰으며, 이는 금속인 중앙 선로에서 split-ring 공진기를 파낸 형태이다.

설계된 필터를 HFSS를 이용하여 모의 실험한 결과는 그림 7에 나타내었다. 설계된 필터에서 split-ring 공진기 사이의 거리  $d$ 는 중요한 변수가 될 수 있다. 공진기 사이의 거리에 따라 필터의 특성이 변할 수 있기 때문이다. 따라서 거리  $d$ 에 따른 모의 실험을 수행하였다.

그림 7에서 볼 수 있듯이 split-ring 공진기 사이의 거리  $d$ 에 따라  $S_{11}$ 이나  $S_{22}$ 의 특성도 조금씩 다르게 나타나는 것을 볼 수 있으며, 거리가 약  $\lambda_g/4$  ( $d=6.2$  mm)일 때  $S_{11}$ 과  $S_{22}$ 의 특성이 가장 날카로운 스킵트



| 파라미터  | 수치(mm) |
|-------|--------|
| $W_1$ | 25     |
| $W_2$ | 1.67   |
| $W_3$ | 2.4    |
| $L_1$ | 30     |
| $L_2$ | 0.8    |
| $L_3$ | 17     |
| $d$   | 5~6.2  |

그림 6. 3개의 split-ring 공진기를 이용한 대역 저지 필터 및 수치

Fig. 6. Bandstop filter using 3 split-ring resonators.

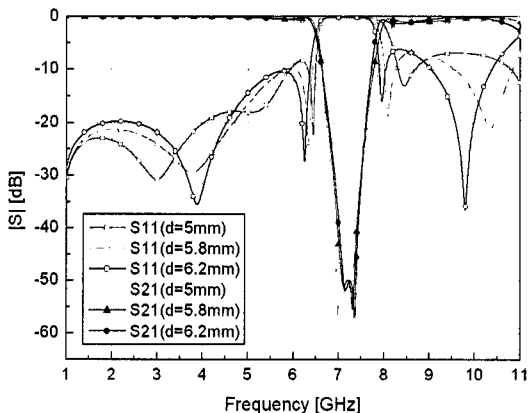
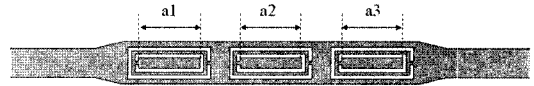


그림 7. 3개의 split-ring 공진기를 이용한 대역 저지 필터의 모의 실험 결과

Fig. 7. Result of the designed filter.

특성을 보이며, 또한 좌우 대칭의 모양을 보이기 때문에 가장 적절한 거리라 할 수 있겠다.  $\lambda_g/4(d=6.2$



|        | $a_1$ (mm) | $a_2$ (mm) | $a_3$ (mm) |
|--------|------------|------------|------------|
| Case 1 | 3.5        | 3.5        | 3.5        |
| Case 2 | 3.2        | 3.5        | 3.8        |
| Case 3 | 3.0        | 3.5        | 4.0        |

그림 8. 각각 크기가 다른 3개의 split-ring 공진기를 이용한 필터

Fig. 8. Bandstop filter using 3 split-ring resonators with different sizes.

mm)의 거리를 갖는 필터를 기준으로 보면 공진 주파수는 7.2 GHz이며, 공진 주파수에서의 대역 저지 수준은 -55 dB까지 떨어지는 것을 볼 수 있다. 3 dB 대역폭은 1.3 GHz(6.5~7.8 GHz)이고, 10 dB 대역폭은 1 GHz(6.63~7.7 GHz)였다. 결과에서 볼 수 있듯이 설계된 필터는 통과 대역에서 리플(ripple)이 없고, 삽입 손실(insertion loss)이 거의 없으며, 날카로운 스킵트 특성을 갖는 장점이 있음을 알 수 있다.

필터의 정지 대역의 대역폭을 자유자재로 조절할 수 있는지 알아보기 위해 그림 8과 같이 3개의 split-ring 공진기를  $\lambda_g/4(d=6.2 \text{ mm})$ 의 거리를 두고 배치하되 그 각각의 크기를 조금씩 다르게 설계하였다. 3가지 경우로 나뉘어  $a_1, a_2, a_3$ 를 다르게 설정하였다. Case 1은 기준으로 삼기 위해 그림 6에서 설계한 필터와 마찬가지로 세 개의 공진기가 모두 같은 크기를 갖도록 했다. 공진기의 크기가 모두 같으므로 공진점은 7.2 GHz 한 곳으로 모일 것이다. Case 2는 case 1에서  $a_1$ 은 조금 줄이고,  $a_3$ 는 조금 크게 만들었기 때문에 세 개의 공진점을 다르게 설정하였다. 즉,  $a_1$ 에 의한 공진점은 7.2 GHz로 동일하나  $a_1$ 에 의한 공진점은 그보다 조금 올라가고,  $a_3$ 에 의한 공진점은 그보다 조금 내려가게 하였다. 이렇게 공진점을 7.2 GHz를 중심으로 좌우로 넓힘으로써 대역 저지의 대역폭을 넓혀보고자 한다. Case 3는 case 2의 경우와 비슷하나, 그 변화의 폭을 조금 더 넓게 하였다. 이렇게 3가지 경우에 대한 모의 실험 결과는 그림 9에 나타

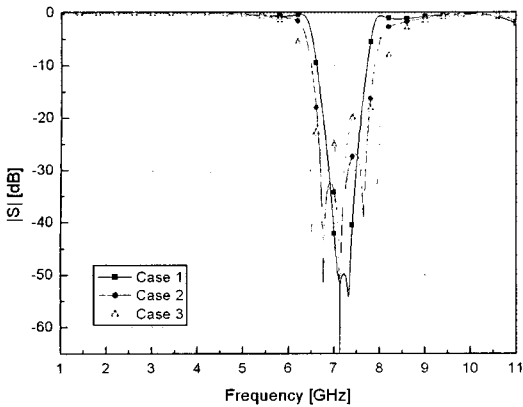


그림 9. 세 가지 경우에 대한 모의 실험 결과  
Fig. 9. Result of designed filter.

내었다.

그림 9의 결과에서 보듯이, case 1의 경우는 공진점이 7.2 GHz 한 곳으로 모인 반면 case 2, case 3은 7.2 GHz를 중심으로 좌우로 벌어졌음을 확인할 수 있다. 따라서 대역 저지의 대역폭도 넓어짐을 볼 수 있다. 이 세 가지 경우에 대한 비교는 다음의 표 1에 정리하였으며, 이를 통해 보듯이 제안된 필터는 정지 대역폭을 자유롭게 설정할 수 있음이 확인되었다.

결론적으로 split-ring 공진기를 마이크로스트립 중앙 선로에 적용시켜 만든 대역 저지 필터의 공진 주파수는 순전히 split-ring 공진기의 크기에 따라 결정되므로 설계 방법이 매우 간단함을 알 수 있다. 또한 단지 3개의 공진기만 이용해서도 충분한 대역 저지 수준을 얻을 수 있으며, 날카로운 스퀘트 특성을 보임을 확인할 수 있다. 그리고 공진기 사이의 거리에 따라  $S_{11}$ 과  $S_{21}$ 의 특성이 조금씩 변하며, 거리가  $\lambda_g/4$ ( $d=6.2$  mm)일 때 가장 좋은 대역 저지 특성을 보였으며, 3개의 공진기 크기를 변화시키면 정지 대역의

표 1. 세 가지 경우에 대한 비교  
Table 1. Comparison of three cases.

|        | 공진 주파수(GHz) |       |       | 10 dB 대역폭 (GHz) | 대역 저지 수준 (dB) |
|--------|-------------|-------|-------|-----------------|---------------|
|        | $f_1$       | $f_2$ | $f_3$ |                 |               |
| Case 1 | 7.2         | 7.2   | 7.2   | 1.07(6.63~7.7)  | -55           |
| Case 2 | 6.76        | 7.2   | 7.65  | 1.4(6.49~7.89)  | -46           |
| Case 3 | 6.5         | 7.2   | 7.94  | 1.82(6.32~8.14) | -40           |

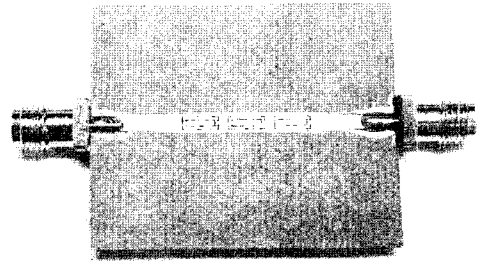


그림 10. 제작된 대역 저지 필터  
Fig. 10. Bandstop filter fabricated.

대역폭도 자유롭게 변화시킬 수 있음을 알 수 있다.

### 2-3 제작 및 측정

3-2절에서 모의 실험으로 설계한 필터를 바탕으로 split-ring 공진기 3개를 사용하여 대역 저지 필터를 제작하였으며, 이는 그림 10에 나타내었다. 사용된 기판은 Taconic RF-35로 유전율( $\epsilon_r$ )은 3.5 높이( $h$ )는 0.76 mm이다. 3개의 split-ring 공진기를 직렬로 주기적으로 배치시켰고, 그 사이의 간격은 가장 좋은 특성을 보인  $\lambda_g/4$ ( $d=6.2$  mm)로 설정하였다. 필터의 전체 크기는 테이퍼 선로를 사용한 정합 구간을 합쳐서  $0.68 \lambda_g \times 0.1 \lambda_g$ ( $17 \times 2.4$  mm)이다.

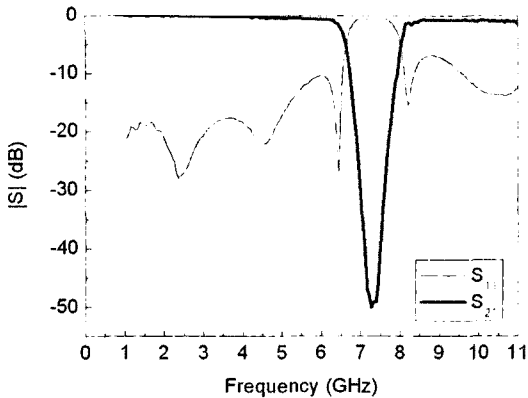
그림 11는 제작된 대역 저지 필터의 측정 결과와 모의 실험 결과를 비교한 것이다.

그림 11에서 보면 제작해서 측정한 결과와 모의 실험 결과가 거의 일치함을 볼 수 있으며, 비교한 결과는 표 2에 나타내었다. 모의 실험보다 삽입 손실이 약 1 dB 정도 낮게 나왔고, 중심 주파수에서 대역 저지 수준이 -5 dB 정도 낮게 나왔는데, 이는 모의 실험에서는 중앙 선로나 접지면의 금속을 PEC(Perfect Electric Conductor)를 사용하였으나, 실제 제작은 구리이기 때문이다. PEC는 손실이 없는 반면에 구리는 손실이 있다. 이 때문에 삽입 손실이 발생했다. 또한,  $S_{21}$ 이 조금 차이 나는 것도 같은 이유로 설명될 수 있다.

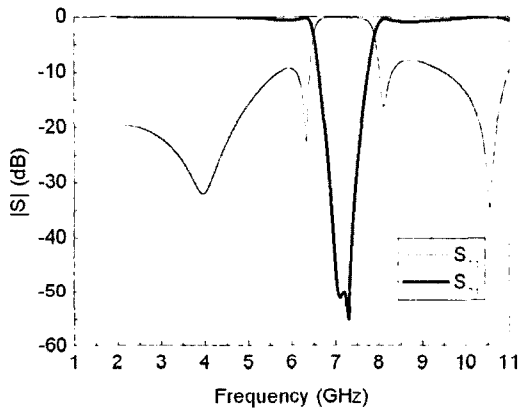
## III. Spiral 공진기를 이용한 대역 저지 필터

### 3-1 Spiral 공진기에 대한 분석

Spiral 공진기 역시 LC 공진 등가 회로 모델을 통



(a)



(b)

그림 11. (a) 제작된 대역 저지 필터의 측정 결과, (b) 모의 실험 결과

Fig. 11. (a) Result of fabricated filter, (b) Result of simulation.

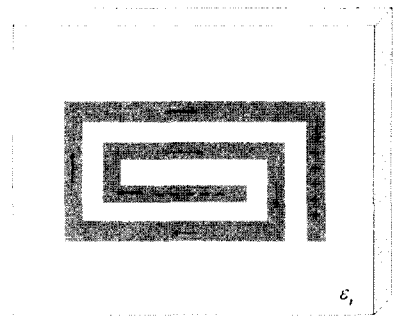
표 2. 모의 실험과 측정 결과의 비교

Table 2. Comparison of simulation result and measurement result.

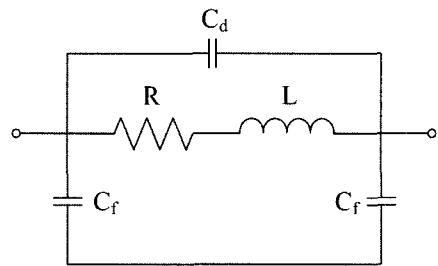
|                | 모의 실험 결과      | 측정 결과        |
|----------------|---------------|--------------|
| 중심 주파수(GHz)    | 7.2           | 7.2          |
| 3 dB 대역폭(GHz)  | 1.3(6.5~7.8)  | 1.4(6.5~7.9) |
| 10 dB 대역폭(GHz) | 1.0(6.63~7.7) | 1.1(6.7~7.8) |
| 대역 저지 수준(dB)   | -55           | -50          |

해 해석할 수 있다<sup>[7]-[9]</sup>. 마이크로스트립 전송 선로 위해 구현된 spiral 공진기의 일반적 형태를 그림 12에 나타내었다.

그림 12(a)는 spiral 공진기의 일반적인 형태를 나타내며, 유전체 기판위에 에칭되어 있다. Spiral 선로



(a)



(b)

그림 12. (a) 직사각형 모양의 Spiral 공진기(진한 영역이 금속), (b) 등가 회로

Fig. 12. (a) Spiral resonator with square shape, (b) Equivalent circuit.

에 외부에서 시간에 따라 변하는 자계(time varying magnetic field)가 가해지면, spiral 선로에 전류가 유기된다. 유기된 전류가 흐르는 선로의 길이만큼 분산 인덕턴스(distributed inductance)가 발생하며, 선로들 사이의 상호 인덕턴스(mutual inductance)가 발생한다. 선로에 유기된 전류에 의해 전압 분포는 그림 12와 같이 되며 안쪽과 바깥쪽 선로 사이에 분산 캐패시턴스(distributed capacitance)와 양 끝단에서 가장 자리 캐패시턴스(fringing capacitance)가 발생한다. 이 두 캐패시턴스는 직렬로 연결되어 있다고 할 수 있다. 결과적으로 spiral 공진기의 등가 회로 모델은 그림 12(b)와 같이 나타낼 수 있다<sup>[16]</sup>.

그림 12(b)에서  $C_d$ 는 분산 캐피시턴스,  $R$ 은 Spiral 선로의 저항,  $L$ 은 분산 인덕턴스(상호 인덕턴스는 무시),  $C_f$ 는 가장자리 캐패시턴스이다. 그림에서 보듯이 spiral 공진기의 등가 회로는 일반적인 대역 저지 필터의 LC 공진 회로와 같다. 등가 회로에 대한 공진 주파수는 식 (10)과 같이 표현된다.



$$w_0 = \sqrt{\frac{1}{L_T C_T}} \quad (10)$$

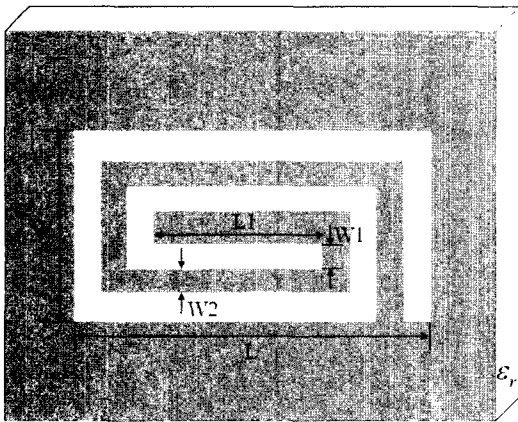
여기서  $C_T$ 는 분산 캐패시턴스와 가장자리 캐패시턴스의 합이며,  $L_T$ 는 상호 인덕턴스와 분산 인덕턴스의 합이다.

### 3-2 필터 설계

#### 3-2-1 Spiral 공진기 설계

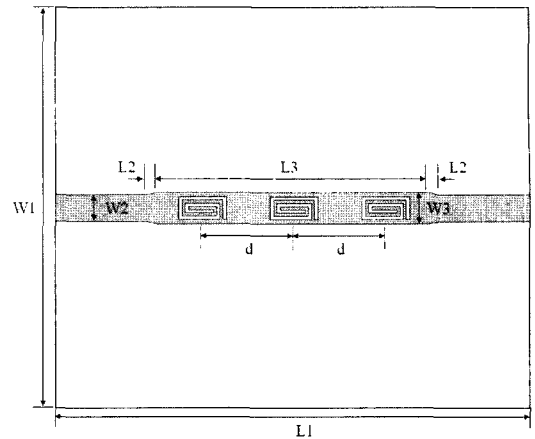
3-1절에서 설명한 spiral 공진기를 마이크로스트립 전송 선로에 적용시켜 대역 저지 필터를 구현하고자 한다. 제안된 spiral 공진기를 이용한 대역 저지 필터의 공진 주파수는 전적으로 spiral의 크기에 따라 결정되므로 필터의 공진 주파수를 결정하기 위해 spiral 공진기의 크기를 결정해야 한다. Ansoft사의 HFSS를 이용하여 7.2 GHz에서 공진하도록 spiral 공진기를 설계하도록 하였으며, 사용한 기판은 Taconic RF-35로 유전율은 3.5, 높이는 0.76 mm이다.

#### 3-2-2 Spiral 공진기를 이용한 필터 설계



| 파라미터  | 수치     |
|-------|--------|
| $W$   | 1.4 mm |
| $W_1$ | 0.2 mm |
| $W_2$ | 0.2 mm |
| $L$   | 3.0 mm |
| $L_1$ | 1.6 mm |

그림 13. Spiral 공진기와 수치(진한 영역이 금속)  
Fig. 13. Dimension of the spiral resonator.



| 파라미터  | 수치(mm) |
|-------|--------|
| $W_1$ | 25     |
| $W_2$ | 1.67   |
| $W_3$ | 2      |
| $L_1$ | 30     |
| $L_2$ | 0.8    |
| $L_3$ | 17     |
| $d$   | 5~6.2  |

그림 14. 3개의 spiral 공진기를 이용한 대역 저지 필터와 수치

Fig. 14. Bandstop filter using three spiral resonators and its dimension.

3-2-1에서 설계한 spiral 공진기를 마이크로스트립 전송 선로의 중앙 선로에 적용시켜 설계한 대역 저지 필터를 그림 14에 나타내었다. 중앙 선로는 50 Ω에 해당하는  $W_2=1.67$  mm(Taconic RF-35 기판:  $\epsilon_r=3.5$ ,  $h=0.76$  mm)과 spiral 공진기를 넣은 부분인  $W_3=2$  mm로 구성했으며, 이 둘 사이의 임피던스 매칭을 위해 테이퍼 라인을 사용하였다. Spiral 공진기는 중앙 선로 안에 complementary의 형태로 적용시켰으며, 이는 금속인 중앙 선로에서 spiral 공진기를 파 낸 형태이다.

설계된 필터를 HFSS를 이용하여 모의 실험한 결과는 그림 15에 나타내었다. 설계된 필터에서 spiral 공진기 사이의 거리  $d$ 는 중요한 변수가 될 수 있다. 공진기 사이의 거리에 따라 필터의 특성이 변할 수 있기 때문이다. 따라서 거리  $d$ 에 따른 모의 실험을 수행하였다.

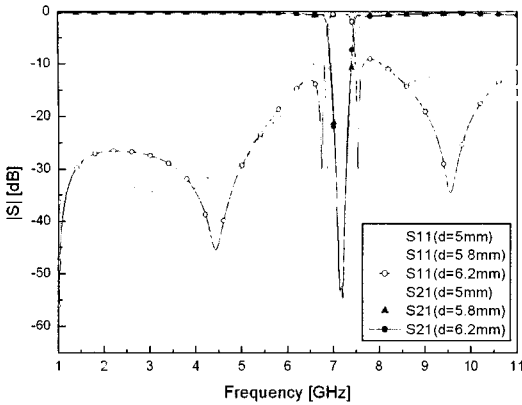


그림 15. 3개의 spiral 공진기를 이용한 대역 저지 필터의 모의 실험 결과  
 Fig. 15. The simulation result of the designed filter.

그림 15에서 볼 수 있듯이 spiral 공진기 사이의 거리  $d$ 에 따라  $S_{11}$ 이나  $S_{22}$ 의 특성도 조금씩 다르게 나타나는 것을 볼 수 있으며, 거리가 약  $\lambda_g/4(d=6.2\text{ mm})$ 일 때  $S_{11}$ 과  $S_{22}$ 의 특성이 가장 날카로운 스키트 특성을 보이며, 또한 좌우 대칭의 모양을 보이기 때문에 가장 적절한 거리라 할 수 있겠다.  $\lambda_g/4(d=6.2\text{ mm})$ 의 거리를 갖는 필터를 기준으로 보면 공진 주파수는 7.2 GHz이며, 공진 주파수에서의 대역 저지 수준은 -55 dB까지 떨어지는 것을 볼 수 있다. 3 dB 대역폭은 0.58 GHz(6.86~7.44 GHz)이고, 10 dB 대역폭은 0.45 GHz(6.93~7.38 GHz)였다. 결과에서 볼 수

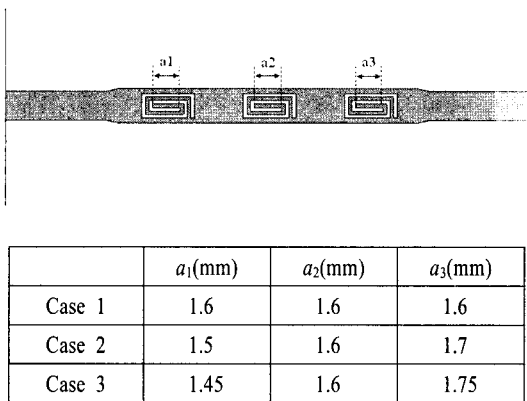


그림 16. 각각 크기가 다른 3개의 spiral 공진기를 이용한 필터  
 Fig. 16. Bandstop filter using three spiral resonators with different sizes.

있듯이 설계된 필터는 통과 대역에서 리플(ripple)이 없고, 삽입 손실(insertion loss)이 거의 없으며, 날카로운 스키트 특성을 갖는 장점이 있음을 알 수 있다.

필터의 정지 대역의 대역폭을 자유자재로 조절할 수 있는지 알아보기 위해 그림 16과 같이 3개의 spiral 공진기를  $\lambda_g/4(d=6.2\text{ mm})$ 의 거리를 두고 배치 하되, 그 각각의 크기를 조금씩 다르게 설계하였다. 3가지 경우로 나눠  $a_1, a_2, a_3$ 를 다르게 설정하였다. Case 1은 기준으로 삼기 위해 그림 14에서 설계한 필터와 마찬가지로 세 개의 공진기가 모두 같은 크기를 갖도록 했다. 공진기의 크기가 모두 같으므로 공진점은 7.2 GHz 한 곳으로 모일 것이다. Case 2는 case 1에서  $a_1$ 은 조금 줄이고,  $a_3$ 는 조금 크게 만듦으로서 세 개의 공진점을 다르게 설정하였다. 즉  $a_1$ 에 의한 공진점은 7.2 GHz로 동일하나  $a_1$ 에 의한 공진점은 그보다 조금 올라가고,  $a_3$ 에 의한 공진점은 그보다 조금 내려가게 하였다. 이렇게 공진점을 7.2 GHz를 중심으로 좌우로 넓힘으로써 대역 저지의 대역폭을 넓혀 보고자 한다. Case 3는 case 2의 경우와 비슷하나 그 변화의 폭을 조금 더 넓게 하였다. 이렇게 3가지 경우에 대한 모의 실험 결과는 그림 17에 나타내었다.

그림 17의 결과에서 보듯이, case 1의 경우는 공진점이 7.2 GHz 한 곳으로 모인 반면 case 2, case 3는 7.2 GHz를 중심으로 좌우로 벌어졌음을 확인할 수 있다. 따라서 대역 저지의 대역폭도 넓어짐을 볼 수 있다. 이 세 가지 경우에 대한 비교는 표 3에 정리하

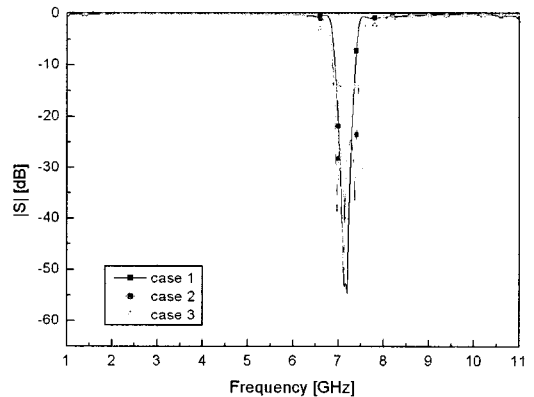


그림 17. 세 가지 경우에 대한 모의 실험 결과  
 Fig. 17. The result of the designed filter.

표 3. 세 가지 경우에 대한 비교  
Table 3. Comparison of three cases.

|        | 공진 주파수(GHz) |       |       | 10 dB 대역폭 (GHz) | 대역 저지 수준 (dB) |
|--------|-------------|-------|-------|-----------------|---------------|
|        | $f_1$       | $f_2$ | $f_3$ |                 |               |
| Case 1 | 7.2         | 7.2   | 7.2   | 0.45(6.93~7.38) | -55           |
| Case 2 | 7.0         | 7.2   | 7.4   | 0.61(6.87~7.48) | -35           |
| Case 3 | 6.9         | 7.2   | 7.5   | 0.9(6.72~7.62)  | -30           |

였으며, 이를 통해 보듯이 제안된 필터는 정지 대역 폭을 자유롭게 설정할 수 있음이 확인되었다.

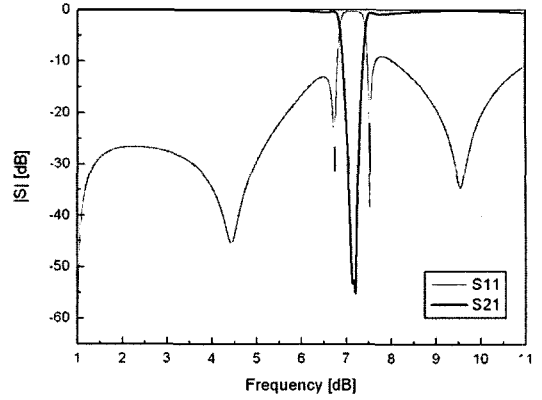
결론적으로 spiral 공진기를 마이크로스트립 중앙 선로에 적용시켜 만든 대역 저지 필터의 공진 주파수는 순전히 spiral 공진기의 크기에 따라 결정되므로 설계 방법이 매우 간단함을 알 수 있다. 또한, 단지 3개의 공진기만 이용해서도 충분한 대역 저지 수준을 얻을 수 있으며, 날카로운 스킵트 특성을 보임을 확인할 수 있다. 그리고 공진기 사이의 거리에 따라  $S_{11}$ 과  $S_{21}$ 의 특성이 조금씩 변하며, 거리가  $\lambda_g/4$ ( $d=6.2$  mm)일 때 가장 좋은 대역 저지 특성을 보였으며, 3개의 공진기 크기를 변화시키면 정지 대역의 대역폭도 자유롭게 변화시킬 수 있음을 알 수 있다.

3-3 제작 및 측정

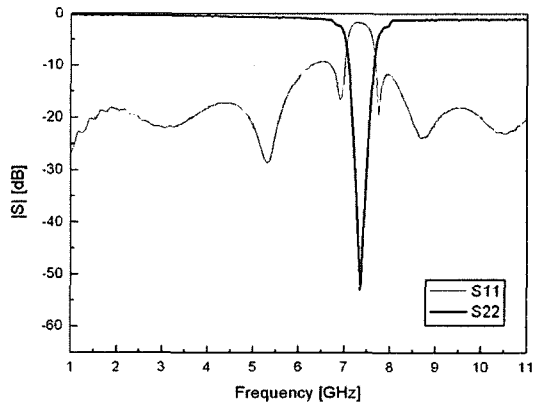
3-2절에서 모의 실험으로 설계한 필터를 바탕으로 spiral 공진기 3개를 사용하여 대역 저지 필터를 제작하였으며, 이는 그림 18에 나타내었다. 사용된 기판은 Taconic RF-35로 유전율( $\epsilon_r$ )은 3.5 높이( $h$ )는 0.76 mm이다. 3개의 spiral 공진기를 직렬로 주기적



그림 18. 제작된 대역 저지 필터 사진  
Fig. 18. Fabricated bandstop filter.



(a) 모의 실험 결과  
(a) Simulation result



(b) 측정 결과  
(b) Measurement result

그림 19. 모의 실험과 측정 결과 비교  
Fig. 19. Comparison of simulation result and measurement result.

으로 배치시켰고, 그 사이의 간격은 가장 좋은 특성을 보인  $\lambda_g/4$ ( $d=6.2$  mm)로 설정하였다. 필터의 전체 크기는 테이퍼 선로를 사용한 정합 구간을 합쳐서  $0.68 \lambda_g \times 0.08 \lambda_g$ ( $15 \times 2$  mm)이다.

그림 19는 제작된 대역 저지 필터의 측정 결과와 모의 실험 결과를 비교한 것이다.

그림 19에서 보면 제작해서 측정한 결과와 모의 실험 결과가 거의 일치함을 볼 수 있으며, 비교한 결과는 표 4에 나타내었다. 모의 실험보다 삽입 손실이 약 1 dB 정도 낮게 나왔는데, 이는 모의 실험에서는 중앙 선로나 접지면의 금속을 PEC(Perfect Electric Conductor)를 사용하였으나, 실제 제작은 구리이기 때문이다. PEC는 손실이 없는 반면에 구리는 손실이

표 4. 모의 실험과 측정 결과의 비교

Table 4. Comparison of simulation result and measurement result.

|                | 모의 실험 결과                | 측정 결과                      |
|----------------|-------------------------|----------------------------|
| 중심 주파수(GHz)    | 7.2                     | 7.3                        |
| 3 dB 대역폭(GHz)  | 0.58 GHz<br>(6.86~7.44) | 0.7 GHz<br>(6.95~7.65 GHz) |
| 10 dB 대역폭(GHz) | 0.45 GHz<br>(6.93~7.38) | 0.5 GHz<br>(7.1~7.6 GHz)   |
| 대역 저지 수준(dB)   | -55                     | -53                        |

있다. 이 때문에 삽입 손실이 발생했다. 또한,  $S_{21}$ 이 조금 차이 나는 것도 같은 이유로 설명될 수 있다.

#### IV. 결 론

제안된 두 개의 마이크로스트립 대역 저지 필터는 날카로운 스킵트 특성을 가지며, 통과 대역에서 리플이 없고, 삽입 손실이 매우 낮은 것을 볼 수 있다. 또한 정지 대역의 대역폭을 자유자재로 조절할 수 있음을 보였다. 그리고 필터의 전체 크기는 Split-ring 공진기를 이용한 필터는  $0.68 \lambda_g \times 0.1 \lambda_g$  ( $17 \times 2.4$  mm), Spiral 공진기를 이용한 필터는  $0.68 \lambda_g \times 0.08 \lambda_g$  ( $15 \times 2$  mm)에 불과하다. 이것은 1장에서 설명한 바 있는 PBG 구조가 초기 형태의 것의 경우  $1.5 \lambda_g \times 4.5 \lambda_g$ 의 크기를 갖고, Anisotropic PBG의 경우  $\lambda/2_g \times \lambda_g$ 의 크기를 갖는 것에 비해 훨씬 작다고 할 수 있다. 또한, 그들보다 설계 방법이 간단하고 명확하며, 여기서 제시된 필터는 중앙 선로와 같이 에칭이 이루어지나, PBG의 경우는 접지 면도에 패턴(pattern)을 넣어야 하므로 공정과 제작 비용을 줄일 수 있다.

#### 참 고 문 헌

- [1] V. Radisic, Y. Qian, R. Coccioli, and T. Itoh, "Novel 2-D photonic bandgap structure for microstrip lines", *IEEE Microwave Guided and Wave Letters*, vol. 8, no. 2, pp. 69-71, Feb. 1998.
- [2] F-R. Yang, K-P. Ma, Y. Qian, and T. Itoh, "Uniplanar compact photonic bandgap(UC-PBG) structure and its applications for microwave circuits", *IEEE Trans. Microwave Theory and Tech.*, vol. 47, no. 8, pp. 1509-1514, Aug. 1999.
- [3] F-R. Yang, K-P. Ma, Y. Qian, and T. Itoh, "Uniplanar compact photonic bandgap(UC-PBG) structure and its applications for microwave circuits", *IEEE Trans. Microwave Theory and Tech.*, vol. 47, no. 8, pp. 1509-1514, Aug. 1999.
- [4] C. Caloz, T. Itoh, "Multilayer and anisotropic planar compact PBG structures for microstrip applications", *IEEE Trans. Microwave Theory and Tech.*, vol. 50, no. 9, p. 2206-2208, Sep. 2002.
- [5] J. B. Pendry, A. J. Holden, D. J. Robbins, and W. J. Stewart, "Magnetism from conductors and enhanced nonlinear phenomena", *IEEE Transactions on Microwave Theory and Tech.*, vol. 47, pp. 2075-2084, Nov. 1999.
- [6] R. Marqués, F. Mesa, J. Martel, and F. Medina, "Comparative analysis of edge- and broadside-coupled split ring resonators for metamaterial design-Theory and experiments", *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 51, pp. 2572-2581, 2003.
- [7] F. J. Schmückle, "The method of lines for the analysis of rectangular spiral inductors", *IEEE Transactions on Microwave Theory and Tech.*, vol. 41, no. 6/7, Jun./Jul. 1993.
- [8] Zunfu Jiang, P. S. Excell, and Z. M. Hejazi, "Calculation of distributed capacitances of spiral resonators", *IEEE Transactions on Microwave Theory and Tech.*, vol. 45, no. 1, Jan. 1997.
- [9] Z. M. Hejazi, P. S. Excell, and Z. Jiang, "Accurate distributed inductance of spiral resonators", *IEEE Microwave and Guided Wave Letters*, vol. 8, no. 4, Apr. 1998.

이 중 혁



2005년 2월: 광운대학교 전자공학과 (공학사)  
2007년 2월: 한국과학기술원 전자전산학과 (공학석사)  
2007년 2월~현재: LG텔레콤 [주 관심분야] 마이크로웨이브 공학, 안테나, 필터, RFID 등

명 로 훈



1976년 2월: 서울대학교 전기공학과 (공학사)  
1982년 12월: 미국 The Ohio State University 전기공학과 (공학석사)  
1986년 8월: 미국 The Ohio State University 전기공학과 (공학박사)  
1986년 9월~현재: 한국과학기술원

전자전산학과 교수

2004년 3월~현재: 전파탐지 특화연구센터 소장  
[주 관심분야] 전파산란 해석, 전파환경 예측모델, 레이더 및 안테나 공학, 이동 및 위성통신, EMI/EMC/EMS 등

오 영 철



2005년 2월: 한양대학교 전자공학과 (공학사)  
2007년 2월: 한국과학기술원 전자전산학과 (공학석사)  
2007년 2월~현재: KT [주 관심분야] 마이크로웨이브 공학, 안테나, 필터, RFID 등