

# 슬롯과 개방 스테르브의 특성을 결합한 소형 저역통과 여파기

## A Compact and High Performance Lowpass Filter using Combined Characteristics of Slot and Open Stub

김경훈 · 김상인 · 박익모 · 임한조

Kyung-Hoon Kim · Sang-In Kim · Ikmo Park · H. Lim

### 요 약

본 논문에서는 접지면의 슬롯과 급전면의 병렬 개방 스테르브를 이용하여 초광대역의 저지대역과 우수한 cutoff 특성을 갖는 저역통과 여파기를 제안하였다. 슬롯과 병렬 개방 스테르브로 형성된 저지대역을 중첩시켜 매우 넓은 저지대역을 얻을 수 있었으며 접지면에 형성된 두 슬롯 사이의 커플링을 이용하여 기존의 저역통과 여파기보다 우수한 cutoff 특성을 얻을 수 있었다. 제안한 여파기는 20.1 mm × 18.7 mm의 크기로 통과대역 삽입손실은 1 GHz 까지 -0.4 dB 이하이고 1.187 GHz에서 -3 dB 차단 주파수를 갖는다. 저지대역은 -20 dB 기준으로 1.33 GHz에서 20 GHz 이상의 광대역을 이루어 이상적인 여파기에 가까운 우수한 특성을 얻을 수 있었다.

### Abstract

In this paper, we proposed a novel compact microstrip lowpass filter with an ultra-wide stopband and prominent cutoff sharpness using slot on the ground plane and microstrip shunt open stub. The microstrip shunt open stub and slot exhibit the different stopband response. The combined characteristics of these structures gives the ultra-wide stopband characteristics and the coupling effect between slots on the ground plane makes the prominent cutoff sharpness. The fabricated microstrip lowpass filter with the size of 20.1 mm × 18.7 mm has -3 dB cutoff frequency at 1.187 GHz and -20 dB stopband from 1.33 GHz to over 20 GHz and the insertion loss in the passband is less than -0.4 dB from DC to 1 GHz.

Key words : Microstrip Lowpass Filter, Coupled Line, Ultra-Wide Stopband

### I. 서 론

최근 위성통신과 이동통신과 같은 무선통신이 발달함에 따라 주파수 대역의 사용이 점점 다양화, 세분화되고 있다. 또한 마이크로파 소자는 점점 더 소형화, 집적화 되고 있으며 이와 더불어 우수한 특성이 요구되고 있다. 일반적으로 저역통과 여파기는 믹서(mixer), 오실레이터(ocsillator) 등과 같은 능동 혹은 수동 마이크로파 회로에서 하모닉(harmonic) 성분이나 스푸리어스(spurious) 성분과 같은 불필요한

성분을 제거하기 위해 사용한다<sup>[1],[2]</sup>. 따라서 저역통과 여파기에 있어서 넓은 저지대역과 우수한 cutoff 특성은 여파기의 성능을 좌우하는 중요한 요소라 할 수 있다. 저역통과 여파기를 구현하는 가장 일반적인 방법은 스텝 임피던스나 병렬 스테르브를 이용하는 것이다<sup>[3]</sup>. 그러나 이러한 구조는 저지대역이 좁을 뿐 아니라 cutoff 특성 역시 완만하다는 단점을 가지고 있다. 이러한 단점을 해결하기 위해서는 배열 주기의 수를 늘려주어야 하며 이는 현재의 소형화 추세에 맞지 않는 크기의 단점을 가져온다. 최근에는 주

아주대학교 전자공학부(School of Electrical and Computer Engineering, Ajou University)

· 논문 번호 : 20031021-143

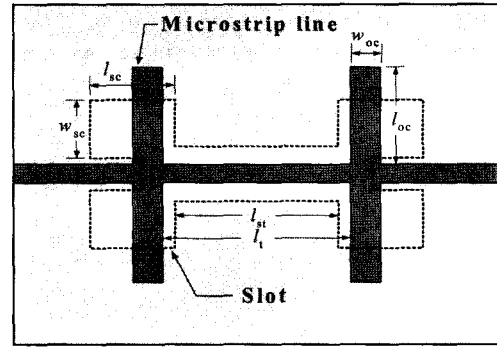
· 수정완료일자 : 2003년 12월 17일

기적인 특성을 갖는 PBG(Photonic Band Gap) 구조가 저역통과 여파기로서 많이 연구되어지고 있다. 단순히 단위구조의 배열 주기를 늘려줌으로써 저지대역을 늘릴 수 있고 cutoff 특성을 향상시킬 수 있다는 장점이 있지만, 다른 한편으로는 단위구조의 수가 늘어나면서 여파기의 크기가 커지고 통과대역에서의 특성이 악화되는 단점을 가지고 있다. 또한 다른 주기를 갖는 PBG 셀(cell)들을 연결함으로써 저지대역을 늘리려는 연구도 있어왔다<sup>[4],[5]</sup>. 그러나 동일한 주기를 갖는 구조가 적어도 5~6회 이상 반복되어야 하기 때문에 앞서 언급한 것과 마찬가지로 전체 여파기의 크기가 커지며 통과대역의 특성이 악화되는 단점을 가져온다.

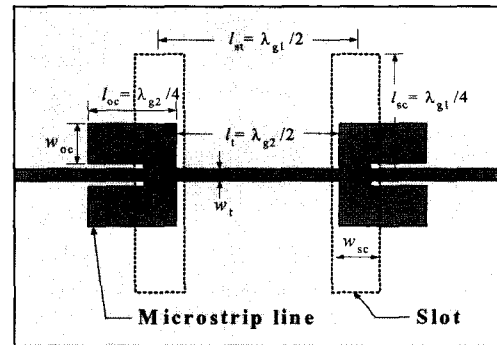
최근에 접지면과 급전면에 각각 슬롯과 개방 스테브를 형성하여 매우 넓은 저지대역과 우수한 cutoff 특성을 갖는 여파기가 제안되었다<sup>[6]</sup>. 슬롯과 개방 스테브는 주기적으로 저지대역을 형성하기 때문에 두 구조의 길이를 조절함으로써 서로의 통과대역이 발생하는 주파수 대역에 저지대역을 위치시켜 매우 넓은 저지대역을 형성하였고 개방 스테브 사이의 커플링을 이용하여 우수한 cutoff 특성을 얻었다. 본 논문에서는 이와 동일한 원리를 이용하는 dual 구조를 구현함으로써 매우 넓은 저지대역과 우수한 cutoff 특성을 갖는 저역통과 여파기를 제안하였다. 개방 스테브로 인한 감쇄극이 먼저 형성되어 전체 여파기의 차단주파수와 cutoff 특성을 결정하는 기존 여파기와는 달리 제안한 여파기는 접지면의 슬롯으로 인한 감쇄극을 먼저 발생하도록 하여 저주파 대역의 특성을 결정하였다. Cutoff 특성의 경우, 기존 구조에서는 두 개방 스테브 사이에서 발생하는 커플링을 이용한 반면 제안한 구조에서는 두 슬롯의 폭을 증가시켜 슬롯 사이에서 발생하는 커플링을 이용하였고, 보다 우수한 cutoff 특성을 얻기 위해 커플링 갭을 미앤더 라인(meander line) 모양으로 변화시켜 종래의 여파기보다 향상된 cutoff 특성을 얻을 수 있었다.

제안한 여파기는 1.187 GHz에서 -3 dB 차단 주파수를 가지며 저지대역은 -20 dB를 기준으로 1.33 GHz에서 20 GHz 이상의 광대역을 이루었다.

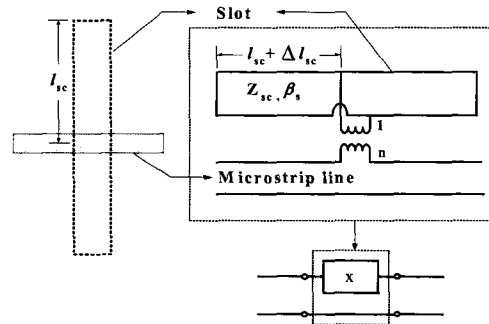
## II. 저역통과 여파기의 설계



(a) 기존 여파기의 기본 구조  
(a) Basic layout of conventional low-pass filter



(b) 제안한 여파기의 기본 구조  
(b) Basic layout of proposed low-pass filter



(c) 기본 구조의 단일 슬롯에 대한 등가모델  
(c) Equivalent circuit of unit slot of proposed low-pass filter

그림 1. 제안한 여파기의 기본 구조  
Fig. 1. Basic layout of the low-pass filter.

그림 1(a)에 최근에 제안된 광대역 저역통과 여파기의 기본 구조를 나타내었다<sup>[6]</sup>(이하 설명에서는 이 여파기를 '기존 여파기'로 표기하였다). 기존 여파기는 접지면과 급전면에 형성된 두 구조의 특성을 중첩함으로써 우수한 특성을 얻을 수 있다. 이 구조는

급전면의 병렬 스테르브만이 존재할 때와 급전면의 전송선과 접지면의 슬롯만이 존재할 때의 두 구조로 나누어 볼 수 있다. 각각의 구조는 서로 다른 주파수 대역에서 주기적으로 감쇄극을 형성하기 때문에 길이를 조절함으로써 서로의 통과대역을 억제하여 넓은 저지대역을 형성할 수 있다.

그림 1(b)에 본 논문에서 제안한 여파기의 기본 구조를 나타내었다. 기본 구조와 그림 1(a)를 비교해보면, 그림 1(a)의 슬롯과 그림 1(b)의 병렬 개방 스테르브, 그리고 그림 1(a)의 병렬 개방 스테르브와 그림 1(b)의 슬롯은 유사한 모양을 하고 있다. 즉 기존 여파기의 개방 스테르브와 슬롯의 특성을 제안한 여파기에서의 슬롯과 개방 스테르브의 특성으로 대체하여 dual 구조를 구현함으로써 기존 여파기와 동일한 동작 원리를 갖도록 하였다. 따라서 제안한 여파기에서는 슬롯의 첫 번째 감쇄극이 개방 스테르브의 첫 번째 감쇄극보다 먼저 형성되어 전체 여파기의 저주파 대역 특성을 결정한다. 그림 1(a)의 기존 여파기와 마찬가지로 제안한 여파기의 기본 구조는, (1) 마이크로스트립 전송선과 접지면의 슬롯만이 존재할 때의 구조 (slot structure) 와 (2) 급전면의 마이크로스트립 구조 (microstrip structure) 만이 존재할 때의 2가지 구조로 나눌 수 있으며 각각의 구조에 대한 입력 임피던스와 입력 어드미턴스를 구할 수 있다. 먼저 전송선과 슬롯으로 구성된 첫 번째 구조(slot structure)에서, 단일 슬롯일 경우의 등가모델을 그림 1(c)에 나타내었다<sup>[7]</sup>. 슬롯은 전송선을 중심으로 끝단이 단락된 병렬 스테르브로 나타내었으며 마이크로스트립 전송선과 커플링에 의해 결합되어 있기 때문에 결합계수  $n$ 을 갖는 트랜스포머를 사용하여 등가화하였다.  $\Delta l_{sc}$ 는 슬롯 끝단의 리액티브 성분으로 인한 보정길이를 나타낸다<sup>[8]</sup>. 등가모델에 의해 단일 슬롯의 리액턴스를 구하면 다음의 식 (1)과 같다<sup>[7]</sup>.

$$X = jZ_s \tan \beta_s l_s \quad (1)$$

$$Z_s = n^2 \frac{Z_{sc}}{2} \quad (2)$$

$$l_s = l_{sc} + \Delta l_{sc} \quad (3)$$

여기서  $Z_{sc}$ ,  $\beta_s$ ,  $l_{sc}$ 는 각각 슬롯의 임피던스, 위상상수 그리고 길이를 나타낸다. 그러므로 2개의 슬롯이 그림 1(b)와 같이 특정한 간격으로 배열되어 있는

경우 급전선에서 본 입력 임피던스는 다음과 같이 구할 수 있다<sup>[3]</sup>.

$$Z_{input} = jZ_s \tan \beta_s l_s + Z_1 \frac{(Z_o + jZ_s \tan \beta_s l_s) + jZ_1 \tan \beta_1 l_1}{Z_1 + j(Z_o + jZ_s \tan \beta_s l_s) \tan \beta_1 l_1} \quad (4)$$

식 (4)에서  $Z_o$ ,  $Z_1$ 는 급전선과 전송선의 임피던스를 나타내고, 슬롯의 길이와 슬롯간의 간격이 각각  $\lambda_g/4$ 와  $\lambda_g/2$ 이면 입력 임피던스는 무한대가 되며 이 길이에 해당하는 주파수에서 감쇄극을 형성하게 된다.

그림 1(b)에서 급전면에 마이크로스트립 구조만이 존재할 경우(microstrip structure)에는, 그림 1(a)의 병렬 개방 스테르브만이 존재할 때와 동일한 특성을 갖는다. 따라서 앞서 설명한 슬롯 구조와 동일한 방법으로 입력 어드미턴스를 구할 수 있으며 전송선과 병렬 개방 스테르브의 길이에 따라서 감쇄극을 형성한다. 결과적으로 전송선에 특정한 길이  $l$ 을 갖는 개방 스테르브나 단락 스테르브와 같은 리액티브(reactive) 소자가 구현되어 있다면 다음 식 (5)에 보여진 바와 같이 감쇄극을 중심으로 주기적으로 저지대역을 형성한다<sup>[3]</sup>.

$$f_n = \frac{nc}{4N \epsilon_{eff}} \quad \text{또는} \quad l = \frac{n\lambda_g}{4} \quad (5)$$

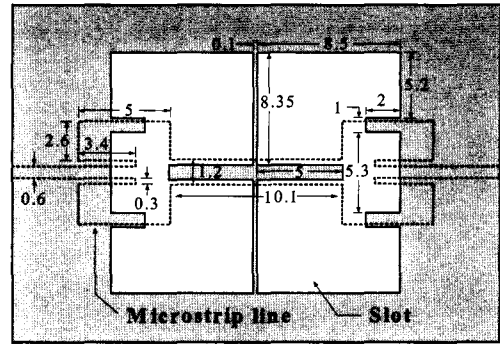
여기서  $n$ 은 홀수,  $c$ 는 빛의 속도,  $\epsilon_{eff}$ 는 실효 유전상수,  $\lambda_g$ 는 관내 파장을 각각 나타낸다. 식 (5)와 같이 감쇄극이 홀수배를 주기로 형성되기 때문에 통과대역은 처음 발생하는 통과대역 주파수의 짝수배를 주기로 발생하게 된다. 따라서 슬롯과 개방 스테르브의 길이를 조절하여 서로의 통과대역을 차단할 수 있는 주파수 대역에 저지대역을 위치시킴으로써 저지대역이 순차적으로 배열되어 넓은 저지대역을 형성할 수 있다<sup>[6]</sup>. 더욱이, 마이크로스트립 개방 스테르브와 슬롯이 접치는 부분에서 불연속면(discontinuity)이 증가되기 때문에 더욱 깊은 저지대역 특성을 얻을 수 있다. 이러한 기본적인 동작원리를 이용하여 다음 절에서 우수한 특성을 갖는 저역통과 여파기를 설계하였다. 여파기의 특성을 고찰하기 위한 시뮬레이션과 제작에는 비유전율  $\epsilon_r=10.2$ 이며 두께  $h=0.635$  mm인 기판을 사용하였으며, 상용 시뮬레이터인 Ansoft의 Ensemble을 사용하여 무한 접지

면에서 시뮬레이션하였다. 그리고 실제 제작한 여파기는 HP8510C vector network analyser를 사용하여 측정하였다.

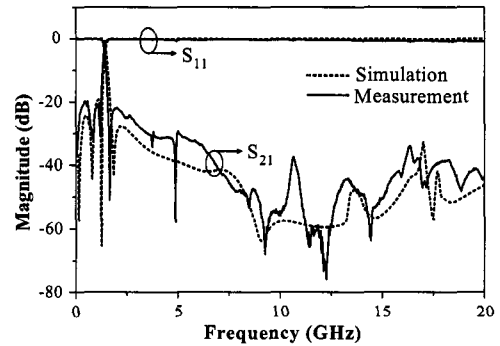
### III. 저역통과 여파기의 특성

앞절에서 넓은 저지대역을 형성하는 원리를 알아 보았다. 그러나 그림 1(b)의 여파기는 cutoff 특성을 향상시킬 수 있는 여러 배열주거나 커플링이 없기 때문에 cutoff 특성은 상당히 완만하다. 따라서 넓은 저지대역과 더불어서, 급격한 스킷(skirt) 특성을 얻기 위해서 그림 1(b)의 구조를 다음과 같은 과정을 거쳐 최적화하였다. (1) 접지면 슬롯의 폭과 길이를 조절함으로써 두 슬롯이 매우 좁은 커플링 갭을 갖도록 변형하여 슬롯 사이에서 발생하는 커플링을 이용하였다. (2) 접지면 슬롯의 변화로 인한 여파기의 특성변화에 따라 급전면 마이크로스트립 구조의 설계변수를 조절하여 최적화된 특성을 얻었다. (3) 위의 두 과정을 거쳐 설계한 여파기의 커플링 갭을 미앤더 라인 모양으로 변형하였으며 그에 따라 마이크로스트립 구조의 설계변수를 조절하여 최적화된 특성을 갖는 여파기를 설계하였다.

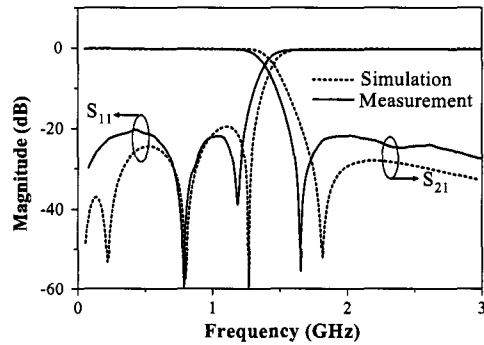
그림 2에 (1)과 (2)의 과정을 거쳐 최적화한 직선형의 커플링 갭을 갖는 여파기의 구조와 특성을 나타내었다. Cutoff 특성을 향상시키는 가장 중요한 요소는 그림 1(b) 구조의 슬롯으로 인해 발생하는 첫 번째 감쇄극의 스킷(skirt) 특성이다<sup>[6]</sup>. 따라서 슬롯의 폭을 증가시켜 두 슬롯을 인접하게 위치시키면, 슬롯 사이의 커플링으로 인해 감쇄극이 저주파 대역으로 이동하여 매우 우수한 cutoff 특성을 얻을 수 있다<sup>[9]-[11]</sup>. 한편 슬롯의 폭이 증가함에 따라 cutoff 특성은 우수해지지만 고주파 대역의 저지대역 내에서 불필요한 공진 모드가 발생하며 통과대역의 특성도 악화된다. 이러한 공진 모드는 앞절에서 살펴본 바와 같이 슬롯의 저지대역 특성이 변함에 따라 급전면과 접지면의 각각의 구조가 적절한 저지대역을 형성하지 않았기 때문이며, 급전면의 마이크로스트립 구조의 설계 변수를 조절함으로써 최적화시킬 수 있다. 먼저 개방 스텐브의 길이가 잘 맞지 않을 경우 저지대역 내에 다수의 공진극(resonant peak)이 형성되기 때문에 시뮬레이션에 의하여 적절한 길이를 선택



(a) 여파기의 구조  
(a) Layout



(b) 광대역 특성  
(b) Wideband characteristics



(c) 통과대역 특성  
(c) Passband characteristics

그림 2. 직선형 커플링 갭을 갖는 여파기의 구조와 특성

Fig. 2. Layout and characteristics of low-pass filter with conventional coupling gap.

하였다. 또한 개방 스텐브의 폭( $w_{oc}$ )과 중앙 전송선( $w_i$ )의 폭은 통과대역 특성에 민감한 영향을 준다. 그림 3에 전송선의 폭( $w_i$ ) 변화에 대한 반사손실 특성을 나타내었다.

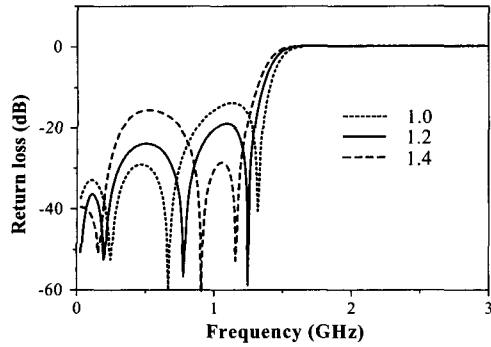


그림 3. 전송선의 폭 변화에 대한 반사손실 특성  
Fig. 3. Return loss characteristics for different widths of transmission line.

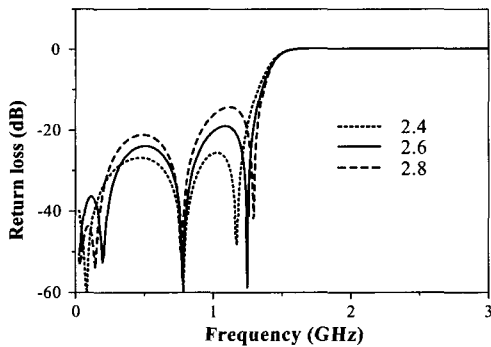
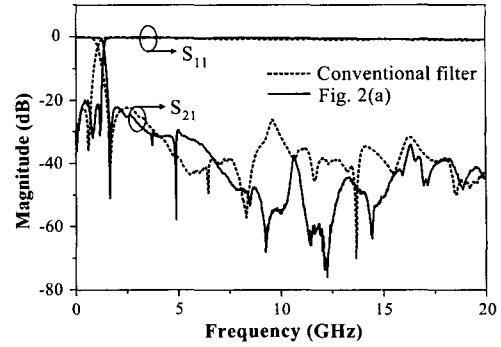


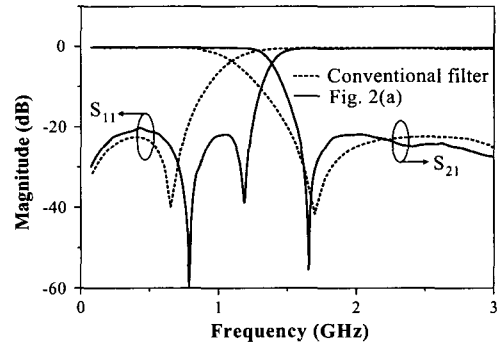
그림 4. 개방 스텐브의 폭 변화에 대한 반사손실 특성  
Fig. 4. Return loss characteristics for different widths of open stub.

전송선의 폭이 증가할수록 저주파대역은 조금씩 넓어지며 폭 1.2 mm를 기준으로 폭이 변화함에 따라 반사손실 역시 증가한다. 이러한 특성은 병렬 개방 스텐브의 폭에도 의존하며 그림 4에 전송선의 폭이 1.2 mm일 경우 개방 스텐브의 폭 변화( $w_{oc}$ )에 대한 반사손실 특성을 나타내었다.

개방 스텐브의 폭이 감소할수록 반사손실은 감소하며 2.4 mm가 될 경우 매우 낮은 반사손실 값을 갖는다. 그러나 개방 스텐브의 폭이 너무 얇아지면 적절한 저주파대역을 형성하지 않기 때문에 고주파대역의 저주파대역내에 공진극을 형성한다. 이러한 특성들은 전송선과 개방 스텐브의 폭이 양쪽 입력단 간의 임피던스 정합에 영향을 미치기 때문이다. 따라서 이러한 마이크로스트립 구조의 변수들을 조절하여 그림 2(a)와 같은 구조를 설계하였으며, 그림 2(b)와 그림 2(c)에서와 같이 깊은 저주파대역과 우수한 cutoff



(a) 광대역 특성  
(a) Wideband characteristics



(b) 통과대역 특성  
(b) Passband characteristics

그림 5. 기존 여파기와의 특성 비교  
Fig. 5. Comparison with conventional filter.

특성을 갖는다. 그림 2에 나타난 시뮬레이션과 측정된 값이 약간 차이나는 것은 제작 과정에서의 오차로 사료된다. 그림 2(a)의 구조는 앞서 언급하였듯이 슬롯으로 인한 감쇄극이 가장 먼저 형성되어 저주파대역의 특성을 결정하기 때문에 개방 스텐브의 특성에 의해 저주파 대역 특성이 결정되는 기존 여파기와는 그 특성에 차이가 있다. 그림 5에 기존 여파기와 그림 2(a) 구조의 특성을 비교하였다.

고주파 대역에서는 두 구조 모두 우수한 저주파대역 특성을 보이는 반면 통과대역에서는 특성의 차이가 명확히 나타난다. 제안한 구조는 1.36 GHz에서 -3 dB 차단 주파수를 갖지만 기존의 여파기는 1.1 GHz의 비교적 낮은 차단 주파수를 갖는다. 그러나 cutoff 특성에서는, 차단 주파수에서 -20 dB까지 400 MHz의 주파수 변화를 갖는 기존 여파기에 비해 제안한 여파기의 주파수 변화는 200 MHz로 더욱 우

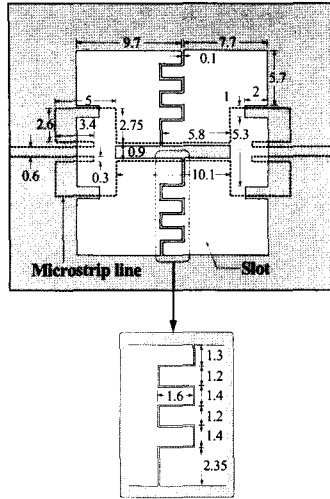


그림 6. 미앤더 라인 커플링 갭을 가지는 저역통과 여파기의 구조

Fig. 6. Layout of low-pass filter with meander line coupling gap.

수한 cutoff 특성을 갖는다. 즉 제안한 여파기는 차단 주파수가 높은 반면 더 급격한 cutoff 특성을 갖는다. 제안한 여파기에서 차단 주파수를 내리기 위해서는 슬롯의 전체적인 크기가 더욱 커져야 하며 이는 전체 여파기의 크기를 증가시키는 단점을 가져온다. 따라서 제안한 여파기의 커플링 갭을 미앤더 라인 모양으로 변형함으로써 더욱 낮은 차단 주파수와 더욱 급격한 cutoff 특성을 갖는 여파기를 설계하였다.

그림 6에 본 논문에서 제안한 미앤더 라인 모양의 커플링 갭을 가지는 저역통과 여파기의 구조를 나타내었다. 낮은 차단 주파수와 더욱 향상된 cutoff 특성을

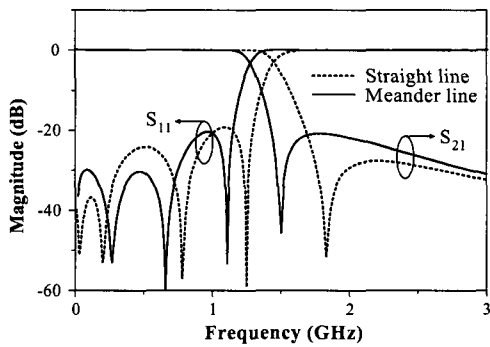
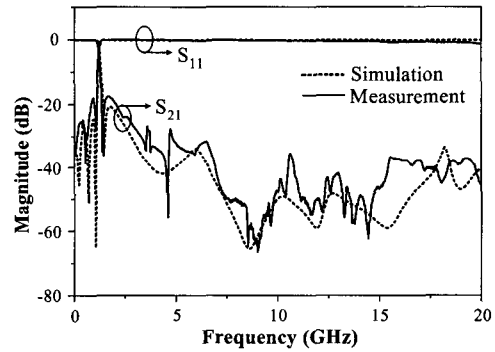


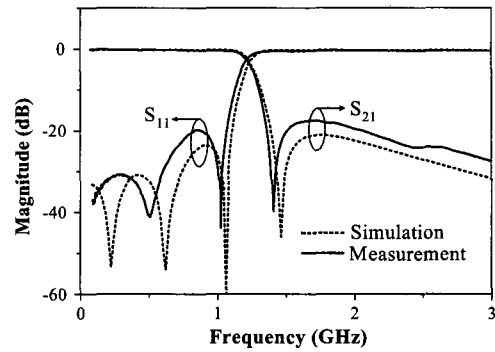
그림 7. 커플링 갭 구조에 대한 여파기 특성  
Fig. 7. Characteristics of low-pass filter for different coupling gap structure.

얻기 위하여 그림 2(a)의 커플링 갭을 미앤더 라인 모양으로 변형하였고<sup>[12]</sup>, 이로 인하여 슬롯의 특성이 변하기 때문에 앞서 언급한 직선형의 커플링 갭을 갖는 여파기의 최적화 과정과 마찬가지로 마이크로 스트립 구조의 설계변수를 조절하여 그림 6과 같은 최적화된 구조를 설계하였다. 그림 7에 직선형의 커플링 갭을 갖는 여파기(그림 2)와 커플링 갭을 미앤더 라인 모양으로 변형한 제안한 여파기(그림 6)의 통과대역 특성을 비교하였다.

직선형의 커플링 갭을 갖는 여파기의 경우 삽입 손실을 기준으로 -3 dB 차단 주파수인 1.36 GHz에서 -20 dB까지의 주파수 변화는 200 MHz로 기존 여파기에 비해서 우수한 특성을 갖는다. 커플링 갭을 미앤더 라인 모양으로 변화시켰을 경우에는 차단 주



(a) 광대역 특성  
(a) Wideband characteristics



(b) 통과대역 특성  
(b) Passband characteristics

그림 8. 미앤더 라인 커플링 갭을 가지는 저역통과 여파기의 특성

Fig. 8. Characteristics of lowpass filter with meander line coupling gap.

파수 1.187 GHz를 기준으로 -20 dB까지의 주파수 변화는 143 MHz로 직선형의 커플링 갭을 형성하였을 때 보다 더욱 향상된 cutoff 특성을 얻을 수 있다. 또한 미앤더 라인 모양의 커플링 갭을 형성하였을 경우 전체적인 커플링 갭의 길이가 증가하기 때문에 차단 주파수를 내릴 수 있는 장점이 있다.

그림 8(a)에 미앤더 라인 커플링 갭을 가지는 저역통과 여파기의 시뮬레이션 및 측정 결과를 나타내었으며 그림 8(b)에 3 GHz까지의 통과대역 특성을 확대하여 나타내었다.

제작한 여파기의 측정 결과와 시뮬레이션 결과를 비교해 보면, 전 주파수 대역에서 비교적 잘 일치하며 20 GHz 부분에서의 약간의 오차는 주파수가 증가함에 따라 커넥터에서 발생하는 손실로 사료된다. 제안한 저역통과 여파기는 1.187 GHz에서 -3 dB 차단 주파수를 가지며 삽입손실 -20 dB를 기준으로 1.33 GHz에서 20 GHz 이상의 광대역의 저지대역을 형성하였다. 이는 차단 주파수의 5~6배의 저지대역을 갖는 기존의 여파기와 비교하여 획기적인 것이라 할 수 있다. 또한 cutoff 특성에 있어, 차단 주파수에서 -20 dB까지 주파수 변화는 143 MHz로 매우 우수한 cutoff 특성을 얻을 수 있었다.

#### IV. 결 론

본 논문에서는 기존 저역통과 여파기의 완만한 cutoff 특성과 좁은 저지대역의 단점을 보완하여 매우 우수한 특성을 갖는 저역통과 여파기를 제안하였다. 병렬 개방 스텐브를 이용한 기존 여파기의 접지면에 슬롯을 형성함으로써 접지면 슬롯의 특성과 기존 병렬 스텐브를 이용한 여파기의 특성을 결합하여 매우 넓은 저지대역을 얻을 수 있었다. 또한 우수한 cutoff 특성을 얻기 위하여 접지면 슬롯의 폭을 증가시켜 슬롯 사이의 커플링을 이용하였고 더불어 커플링 갭을 미앤더 라인 모양으로 변형하여 더욱 우수한 cutoff 특성을 얻을 수 있었다. 제안한 저역통과 여파기는 1.187 GHz에서 -3 dB의 차단주파수를 가지며 저지 대역폭은 삽입손실 -20 dB를 기준으로 1.33 GHz에서 20 GHz 이상의 광대역을 이루어 기존의 저역통과 여파기와 비교해 훨씬 넓은 저지대역을 얻을 수 있었다.

#### 참 고 문 헌

- [1] M. J. Lancaster, J. S. Hong, *Microstrip Filters For RF/Microwave Applications*, New York: John Wiley & Sons, 2001.
- [2] F. Yang, Y. Qian and T. Itoh, "A novel uniplanar compact PBG structure for filter and mixer application", *IEEE MTT-S Int. Microwave Symp. Dig.*, Boston, MA, pp. 919-922, Jun. 1999.
- [3] D. M. Pozar, *Microwave Engineering*, New York: John Wiley & Sons, 1998.
- [4] T. Kim, C. Seo, "A novel photonic bandgap structure for low-pass filter of wide stopband", *IEEE Microwave Guided Wave Lett.*, vol. 10, no. 1, pp. 13-15, Jan. 2000.
- [5] I. Rumsey, M. Piket-May and P. K. Kelly, "Photonic bandgap structures used as filters in microstrip circuits", *IEEE Microwave Guided Wave Lett.*, vol. 8, no. 10, pp. 336-338, Oct. 1998.
- [6] 김경훈, 정중호, 기철식, 임한조, 박익모, "초광대역의 저지대역을 갖는 3단 저역통과 필터", 대한전자공학회 논문지, 40(3), pp. 25-31, 2003년 3월.
- [7] J. P. Kim, W. S. Park, "Microstrip lowpass filter with multislots on ground plane", *Electron. Lett.*, vol. 37, no. 25, pp. 1525-1526, Dec. 2001.
- [8] K. C. Gupta, R. Garg, I. Bahk and P. Bhartia, *Microstrip Lines and Slotlines*, Boston: Artech House, 1996.
- [9] E. A. Mariani, J. P. Agrios, "Slot-line filters and couplers", *IEEE Tran, Microwave Theory Tech.*, vol. 18, no. 12, pp. 1089-1095, Dec. 1970.
- [10] J. B. Knorr, K. Kuchler, "Analysis of coupled slots and coplanar strips on dielectric substrate", *IEEE Tran, Microwave Theory Tech.*, vol. 23 no. 7, pp. 541-548, Jul. 1975.
- [11] R. N. Simons, R. K. Arora, "Coupled slot line field components", *IEEE Tran, Microwave Theory Tech.*, vol. 30, no. 7, pp. 1094-1098, Jul. 1982.
- [12] J. T. Kuo, J. Shen, "A compact distributed low-pass filter with wide stopband", *2001 APMC Proc.*, vol. 1, pp. 330-333, Dec. 2001.

김 경 훈



2002년 2월: 단국대학교 전자공학과 (공학사)  
2002년 3월~현재: 아주대학교 전자공학과 석사과정  
[주 관심분야] Electromagnetic band gap (EBG), 초고주파 수동 소자

박 익 모



1984년: 뉴욕주립대학교 전기전자공학과 (공학사)  
1989년: 일리노이대학교 전기전자 및 컴퓨터공학과 (공학석사)  
1994년: 일리노이대학교 전기전자 및 컴퓨터공학과 (공학박사)  
1994년~1996년: LG전자기술원

1996년~현재: 아주대학교 전자공학부  
[주 관심분야] 초고주파 수동소자 (안테나 포함) 설계 및 해석

김 상 인



1992년: 한국과학기술원(KAIST) 전기 및 전자공학과 (공학사)  
1995년: 미네소타대학교 전기 및 컴퓨터공학과 (공학석사)  
1997년: 미네소타대학교 전기 및 컴퓨터공학과 (공학박사)  
1997년~2003년: KT 연구개발 본부

2003년~현재: 아주대학교 교수  
[주 관심분야] Photonic Crystal, 광통신 및 소자

임 한 조



1971년 2월: 서울대학교 문리과대학 물리학과 (이학사)  
1974년 2월: 서울대학교 대학원 물리학과 (이학석사)  
1982년: Montpellier II 대학 (USTL: 불) (이학박사)  
1975년 9월~현재: 아주대학교 전자공학과 교수

[주 관심분야] Photonic Crystal, 결합 및 계면물리, III-V족 반도체 소자 및 물성특성