

論文2003-40TC-3-4

초광대역의 저지대역을 갖는 3단 저역통과 필터

(A Compact Three Stage Low-Pass Filter with an Ultra-Wide Stopband)

金京勳*, 鄭鍾鎬*, 奇喆埴*, 林漢祚*, 朴益模*

(Kyung-Hoon Kim, Jong-Ho Jung, Chul-Sik Kee, H. Lim, and Ikmo Park)

요약

본 논문에서는 초광대역의 저지대역과 우수한 cutoff 특성을 가지는 새로운 저역통과 필터를 제안하였다. 우수한 cutoff 특성을 얻기 위해 여러단을 배열하는 기존의 저역통과 필터의 단점을 극복하기 위해 두 개방 스텐브 사이의 커플링 효과를 이용하였고, 접지면에 슬롯을 형성하여 고주파 부분에서의 저지대역 특성을 개선하였다. 제작한 저역통과 필터는 19.2 mm × 14.9 mm 의 크기로 통과대역에서의 삽입손실은 -0.15 dB 이하이며 1.1 GHz에서 -3 dB의 차단주파수를 가진다. 저지대역폭은 삽입손실 -20 dB를 기준으로 1.5 GHz에서 30 GHz 이상의 광대역을 이루어 기존 저역통과 필터의 저지대역폭을 획기적으로 증가시켰다.

Abstract

In this paper, we proposed a novel compact microstrip lowpass filter with an ultra-wide stopband and a sharp cutoff frequency response. To improve the cutoff response of the conventional filter, the coupling effect between two open stubs is used. The slot on the ground with conventional shunt open stubs plays an important role of increasing the stopband at a high frequency. The combination of these structures gives the filter the characteristics of an ultra-wide stopband with a prominent cutoff sharpness. The fabricated microstrip lowpass filter with the size of 19.2 mm × 14.9 mm has -3 dB cutoff frequency at 1.1 GHz and -20 dB stopband from 1.5 GHz to over 30 GHz. The insertion loss is less than -0.15 dB in the passband.

Keywords : Microstrip lowpass filter, Coupled line, Ultra-wide stopband

I. 서론

오늘날 이동통신, 위성통신 같은 무선통신 시스템이 발달함에 따라 저역통과 필터의 우수한 주파수 특성과 더불어 크기의 소형화가 요구되어지고 있다. 저역통과 필터는 믹서, 오실레이터등에서 불필요한 주파수와 고조파를 제거시키기 위해 사용하며 일반적으로 병렬 스텐브나 스텝 임피던스로 구현되어 진다^[1-3]. 그러나 이런 기존의 필터들은 우수한 cutoff 특성과 낮은 차단주파수를 만족시키기 어렵다. 우수한 cutoff 특성을 얻기 위해

* 正會員, 亞州大學校 電子工學部

(Department of Electrical and Computer Engineering Aju University)

※ 이 연구의 일부는 산업자원부가 주관하는 차세대신 기술사업인 차세대무선통신용 트랜시버시스템 개발의 연구비 지원에 의한 것이며 이에 감사드립니다.

接受日字:2003年1月9日, 수정완료일:2003年2月24日

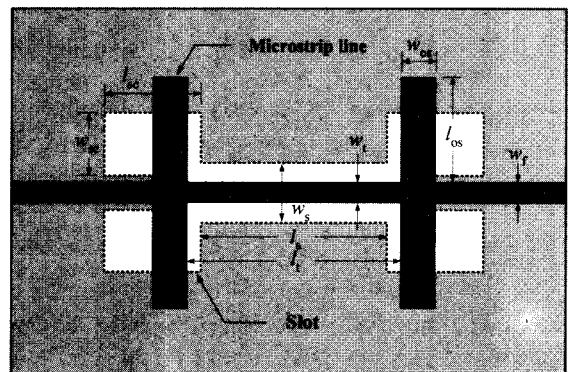
서는 여러 배열주기가 필요하며 이는 필터의 크기와 삽입손실을 증가시키는 결과를 가져온다. 더욱이 두가지 방법 모두 불필요한 통과대역을 생성한다는 문제점을 가지고 있다. 최근에는 계단 임피던스 공진기 (SIR: Stepped Impedance Resonator), 마이크로스트립 선로의 접지면을 식각한 DGS (Defected Ground Structure) 구조와 PBG (Photonic Band Gap) 구조가 저역통과 필터로서 많이 연구되고 있다. DGS 구조는 접지면을 식각하여 접지면 복귀전류의 흐름을 변화시켜 LC 공진회로로 동작하여 특정 주파수대역에서 저지대역을 형성한다^[4]. 그러나 DGS 구조는 우수한 스킷특성과 넓은 저지대역을 얻기 위해서 주기를 늘려주어야 하는 단점을 가지고 있다. 낮은 차단주파수를 얻기 위해서는 슬롯의 크기가 커져야 하고 결국 앞서 언급한 크기와 삽입손실의 문제에 부딪히게 된다. 또한 주파수가 높아짐에 따라 접지면에 식각한 슬롯에서 복사가 일어남으로써 불필요한 복사손실이 발생하게 된다. PBG는 전자기파의 전파가 허용되지 않는 특정주파수 영역을 뜻하며 이는 특성 임피던스가 주기적으로 바뀌는 구조에서 형성되어진다. 최근에는 서로 다른 구조의 PBG 구조를 연결함으로써 그 배열주기를 줄여 크기를 줄이면서도 넓은 저지대역을 형성하려는 연구가 진행되었다^[5, 6]. 그러나 넓은 저지대역을 얻기 위해서는 서로 다른 구조의 PBG 구조가 세 번 이상의 주기를 가져야 하므로 넓은 저지대역을 얻을 수는 있지만 크기가 커지며 서로 다른 저지대역의 겹침에 의한 불필요한 공진 모드가 발생하는 단점이 있다. SIR은 스테르브를 서로 커플 시키거나 임피던스비를 이용하여 크기를 줄일 수 있으나 저지대역폭이 좁다는 단점을 가지고 있다^[7-9].

본 논문에서는 일반적인 방법의 저역통과 필터에 슬롯과 커플링 효과를 도입하였다. 기존 필터의 병렬 스테르브를 변형하여 커플링 효과를 사용함으로써 여러 배열 주기를 가져야 해결할 수 있었던 cutoff 특성을 개선하였으며 접지면의 슬롯구조를 사용하여 기존 저역통과 필터의 저지대역을 넓힐 수 있었다. 낮은 주파수 영역은 커플링 효과를 이용한 마이크로스트립 저역통과 필터를 구현함으로써 접지면의 슬롯과의 특성이 중첩되어 낮은 차단주파수와 우수한 스킷특성 그리고 광대역의 저지대역을 만들 수 있었다. 기존의 저역통과 필터는 차단주파수의 약 5, 6배의 저지대역을 갖는 것에 비하여 본 논문에서 제안한 저역통과 필터는 차단주파수의 25배 이상의 저지대역을 갖는다. 본 논문에서는 먼저 고주파대역

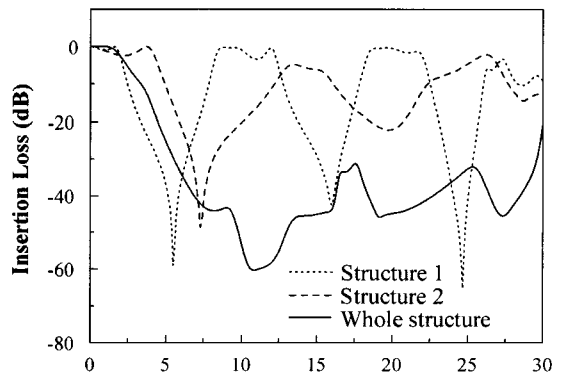
의 넓은 저지대역을 형성하는 기본구조의 설계와 동작 원리등을 알아보고 그 후에 제안한 필터 전체의 설계 방법과 특성을 알아보도록 하겠다.

II. 저역통과 필터의 동작원리

<그림 1(a)>는 본 논문에서 제안한 필터의 기본 구조로서 마이크로 스트립 필터와 접지면의 슬롯으로 구성되어 있다. 접지면의 슬롯이 없는 상면의 마이크로 스트립으로만 구성된 구조는 일반적인 방법의 병렬 스테르브로 설계된 필터이며 $\lambda_g/4$ 의 길이를 갖는 2개의 개방 스테르브가 병렬로 연결되어 있고 그 사이에 $\lambda_g/2$ 의 길이를 갖는 전송선이 연결되어 있다. 개방 스테르브의 길이는 7 mm로 5.5 GHz에서 $\lambda_g/4$ 의 길이를 갖고 전송선의 경우



(a)



(b)

그림 1. 제안한 필터의 기본구조와 특성 (a) 기본구조 (b) 기본구조의 특성

Fig. 1. Basic layout of the proposed filter and its characteristics. (a) Basic layout (b) Characteristics of basic layout

$\lambda_g/2$ 길이는 11.7 mm로 최적화하였다. 이러한 일반적인 필터는 <그림 1(b)>에서 점선으로 나타난 특성과 같이 저지대역이 좁고 통과대역과 저지대역 사이에 완만한 cutoff 특성을 나타내며 이러한 특성들은 결국 기존 필터의 단점으로 나타난다. 그러나 이러한 단점을 극복하기 위해서는 배열 주기를 늘려주어야 하므로 크기가 커지는 또다른 결점을 가져온다. 따라서 본 논문에서는 기존의 단점들을 보완하기 위해 다음과 같은 과정을 거쳐 새로운 저역통과 필터를 제안하였다. 첫째로, 기존 저역통과 필터의 접지면에 슬롯을 위치시켜 넓은 저지대역을 형성한 후 둘째로, 마이크로스트립의 개방 스테르브를 변형하여 급격한 cutoff 특성과 낮은 차단주파수를 구현하였다. 제작은 RT/Duroid 6006 기판을 사용하였으며 기판두께는 0.635 mm이고 유전상수 $\epsilon_r = 6.15$ 이다. 시뮬레이션은 MoM 방식에 기반한 Ansoft사의 Ensemble 을 사용하였다.

<그림 1(a)>에서 $l_{sc} = 5.5$ mm, $w_{sc} = 4.0$ mm, $l_{os} = 7.0$ mm, $w_{os} = 1.65$ mm, $w_t = 0.9$ mm, $w_s = 3.0$ mm, $l_s = 8.5$ mm, $l_t = 11.7$ mm, $w_t = 0.9$ mm로 기본구조 (Whole structure)는 다음의 두 구조로 나눌 수 있다. (1) 접지면에 슬롯이 없는 기존의 마이크로 스트립 구조의 병렬 스테르브로 구성되어 있는 구조(Structure 1)와, (2) 상면의 마이크로 스트립 구조에서 양쪽의 병렬 스테르브가 없이 전송선만 존재할 때 접지면에 슬롯이 있는 구조(Structure 2)로 구성된다. 일반적으로 전송선에 개방이나 단락된 회로와 같은 reactive 소자가 구현되어 있을 경우 저지대역이나 통과대역의 특성을 얻을 수 있다. 결국 위에서 언급한 두 구조는 길이가 l 인 전송선에 개방이나 단락된 회로로 구성되어 있기 때문에 다음 식에 의해 길이 l 에 따라서 감쇄극을 형성한다^[3].

$$f_n = \frac{nc}{4l\sqrt{\epsilon_{eff}}} \text{ 또는 } l = \frac{n\lambda_g}{4} \quad (1)$$

여기서 n 은 홀수의 정수, c 는 빛의 속도, ϵ_{eff} 는 실효 유전상수, λ_g 는 관내 파장을 각각 나타낸다. 먼저 첫번째 구조(Structure 1)를 살펴보면 병렬 개방 스테르브와 전송선은 $\lambda_g/4$ 와 $\lambda_g/2$ 의 길이를 가지고 있다. 급전선에서의 입력 어드미턴스는 잘 알려진 전송선로 이론에 의해 다음과 같이 구할 수 있다^[3].

$$Y_m = 2jY_s \tan \beta_s l_s$$

$$+ Y_t \frac{(Y_o + 2jY_s \tan \beta_s l_s) + jY_t \tan \beta_t l_t}{Y_t + j(Y_o + 2jY_s \tan \beta_s l_s) \tan \beta_t l_t} \quad (2)$$

Y_m, Y_s, Y_t, Y_o 는 각각 입력 어드미턴스, 개방 스테르브의 어드미턴스, 전송선의 어드미턴스, 급전선의 어드미턴스를 나타내며, $l_s, l_t, \beta_s, \beta_t$ 는 각각 개방 스테르브의 길이, 전송선의 길이, 개방스테르브의 위상상수, 전송선의 위상상수를 나타낸다. 이 식에서 $l_s = \lambda_g/4, l_t = \lambda_g/2$ 의 길이를 가지게 되면, 개방 스테르브의 끝단에서의 어드미턴스는 0이 되고 전송선과 만나는 부분에서는 무한대가 된다. 따라서 개방 스테르브의 길이인 $\lambda_g/4$ 의 주파수에서 신호는 모두 반사되게 된다. 결국 $\lambda_g/4$ 주파수에서 감쇄극이 형성되며, 식 (1)에서와 같이 홀수배의 주기를 가지며 감쇄극이 발생한다.

마이크로 스트립 전송선과 접지면의 슬롯으로 구성되어 있는 두 번째 구조(Structure 2)에서 슬롯은 중앙의 슬롯과 양끝단에서 두개로 갈라진 구조를 가지고 있다. 양쪽의 슬롯은 $\lambda_g/4$ 의 길이를 갖는 끝단이 단락된 두개의 슬롯이 병렬로 연결되어 있어 끝단이 개방되어진 $\lambda_g/4$ 의 스테르브와 흡사하며, 식 (2)와 유사한 형태의 Z_{in} 으로 표현될 수 있다. 이 경우 $\lambda_g/4$ 의 슬롯의 끝단은 단락이 되기 때문에 두개의 갈라진 슬롯이 만나는 부분에서 입력 임피던스는 무한대가 되며 이 주파수에서 감쇄극을 형성한다. 또한 식 (1)에 의해서 일정한 주기를 갖는 감쇄극을 형성한다.

<그림 1(b)>에 시뮬레이션 결과를 나타내었다. 점선으로 나타난 특성이 첫 번째 구조 즉 기존 필터의 특성으로 5.5, 16.0, 24.7 GHz의 주변에서 주기적으로 감쇄극이 형성되며 대위선으로 나타난 두 번째 구조는 7.3, 19.8 GHz에서 감쇄극이 발생한다. 두 구조의 길이가 각각 다르기 때문에 감쇄극은 서로의 저지대역을 보완해 줄 수 있는 다른 위치에서 나타난다. 두 구조가 합쳐져 <그림 1(a)>와 같은 구조(Whole structure)가 되었을때 두 구조는 전기적으로 결합되어 있기 때문에 각각의 저지대역이 순차적으로 배열되어짐으로써 실선으로 나타난 것과 같이 매우 넓은 저지대역을 형성한다.

III. 최적화 및 측정

<그림 1(a)>의 기본구조는 매우 넓은 저지대역과 우수한 차단 특성을 가지고 있지만, 일반적으로 필터에서 요구되어지는 날카로운 cutoff 특성을 만족시키기에는

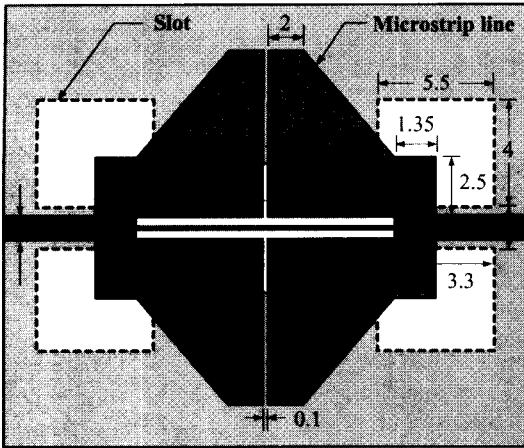


그림 2. 제안한 저역통과 필터의 구조
Fig. 2. Proposed lowpass filter structure.

한계가 있다. 본 논문에서는 아래에 서술한 방법으로 날카로운 cutoff 특성과 통과대역에서의 낮은 삽입손실을 얻었다. <그림 2>는 <그림 1(a)>의 기본구조에서 최적화 과정을 거쳐 제안한 저역통과 필터의 구조이다. 필터의 특성을 향상시키기 위하여 <그림 2>의 구조와 같이 병렬 개방 스테르브를 변형하여 양쪽 스테르브 사이의 간격을 0.1 mm로 하였으며 전송선의 폭(w_t)을 얇게 하였다. 개방 스테르브 사이의 간격이 작아지면 커플링이 증가하여 스테르브의 임피던스는 홀모드(odd mode)와 짝모드(even mode)의 임피던스로 나누어지게 된다. 간격이 작을수록 홀모드와 짝모드의 임피던스의 차이는 더욱 늘어나며 이로 인하여 한개의 감쇄극은 각각의 모드에 대한 두개의 감쇄극으로 분리되어 나타나게 된다. <그림 1(b)>의 점선으로 나타난 스테르브의 감쇄극은 두개의 감쇄극으로 나누어지며 이로 인하여 낮은 차단 주파수와 급격한 cutoff 특성을 얻을 수 있다^{9, 10}.

개방 스테르브의 모양은 cutoff 특성뿐 아니라 저지대역에서의 차단 특성에 영향을 준다. 개방 스테르브의 폭이 넓어지면 저지대역의 깊이가 깊어져 우수한 차단 특성을 얻을 수 있지만 통과대역에서 높은 삽입 손실을 나타내기 때문에 시뮬레이션을 통하여 <그림 1(a)>의 구조를 <그림 2>와 같이 사다리꼴 모양으로 변형하였으며 전송선의 폭(w_t)은 0.1 mm를 갖도록 하였다. 일반적으로 넓은 폭의 개방 스테르브는 낮은 임피던스를 나타낸다. <그림 2>에서 개방 스테르브는 위,아래 두개의 구조가 병렬로 연결 되어 있어 그 임피던스는 더욱 낮아지게 되며 이는 급전선의 임피던스보다 급격히 낮아지기 때문에 통과대역에서 임피던스 정합이 되지 않아 높은

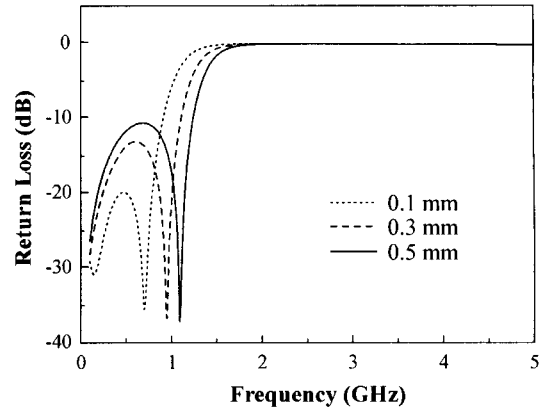


그림 3. 전송선의 폭 변화에 대한 반사손실 특성
Fig. 3. Return loss characteristics for different widths of transmission line.

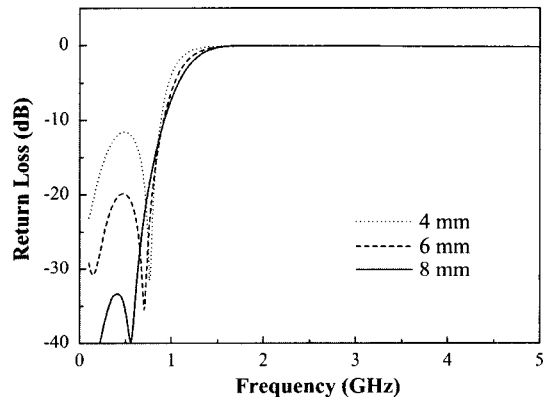
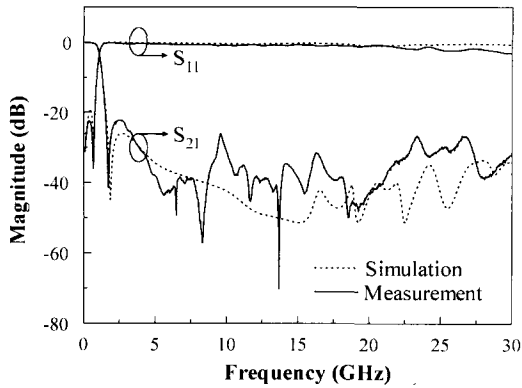


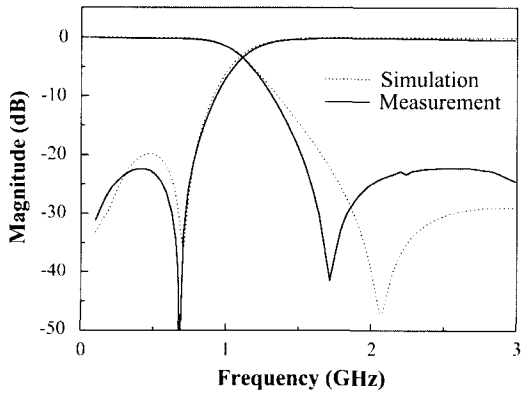
그림 4. 슬롯의 폭 변화에 대한 반사손실 특성
Fig. 4. Return loss characteristics for different widths of center slot.

삽입손실을 나타낸다. 따라서 임피던스 정합을 위해서 0.1 mm의 높은 임피던스를 갖는 전송선을 사용하였다. 이것은 통과대역에서의 삽입손실을 줄일뿐 아니라 저지대역의 대역폭을 늘리는 효과를 가져온다. <그림 2>에서 중앙에 위치한 슬롯의 폭은 6 mm로 고정하고 전송선의 폭(w_t)의 변화에 대한 시뮬레이션 결과를 <그림 3>에 나타내었다.

전송선의 폭이 넓을수록 임피던스 정합이 되지 않아 통과대역에서 높은 반사손실을 나타내며 저지대역폭 역시 줄어들게 된다. 또한 이는 통과대역에서의 높은 삽입손실을 수반하기 때문에 임피던스를 높여 반사손실을 낮춰 주어야 한다. 그러나 <그림 3>에서와 같이 전송선의 폭을 0.1 mm로 하여도 통과대역에서의 특성은 최적화되지 않았다. 최적화된 특성을 얻기 위해서는 전송선



(a)



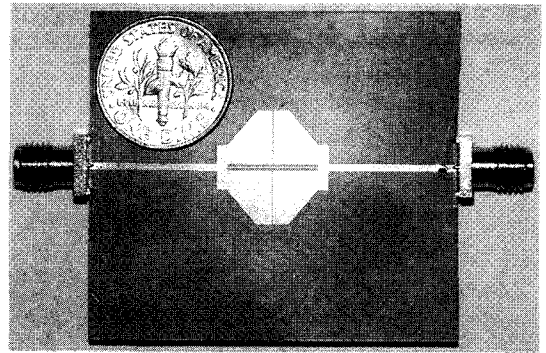
(b)

그림 5. 제안한 저역통과 필터의 특성 (a) 광대역 특성 (b) 통과대역 특성

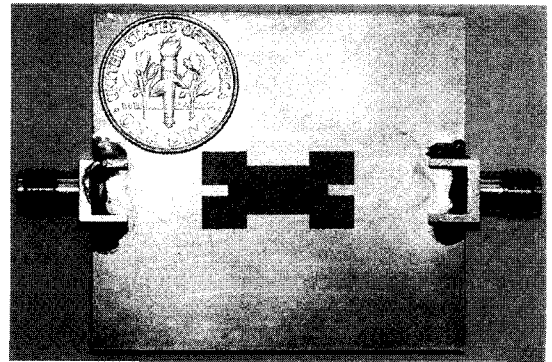
Fig. 5. Characteristics of the proposed lowpass filter. (a) Wideband characteristics (b) Passband characteristics

의 폭을 더 얇게 하여 임피던스를 높여주어야 하는데 이것은 제작상의 단점이 될 수 있기 때문에 아래와 같은 방법을 통하여 최적화 하였다. 전송선로의 접지면을 식각하게 되면 실효유전율은 낮아지게 되고 결과적으로 전송선로의 임피던스를 증가시키게 된다^[11]. 따라서 <그림 2> 구조의 중앙에 위치한 슬롯의 폭(w_s)을 각각 4 mm, 6 mm, 8 mm 로 하여 시뮬레이션 하였다. <그림 4>에 슬롯의 폭에 대한 특성을 나타내었다.

접지면의 슬롯의 폭에 따라 실효 유전율이 감소하게 되고 전송선의 임피던스가 높아져서 슬롯의 크기에 비례하여 통과대역에서의 반사손실은 줄어들게 된다. 따라서 본 논문에서는 두 특성을 최적화하여 <그림 2>와 같은 구조를 제안하였고 최적화된 설계변수를 나타내었다.



(a)



(b)

그림 6. 제작된 저역통과 필터 (a) 상면도 (b) 하면도
Fig. 6. Photographs of the fabricated lowpass filter. (a) Top side (b) Bottom side

<그림 5(a)>에 본 논문에서 제안한 저역통과 필터의 특성을 나타내었으며 <그림 5(b)>에는 통과대역의 특성을 3 GHz까지 확대하여 나타내었다. <그림 1(b)>의 실선으로 보여진 특성과 비교하여 단일 구조로서 낮은 차단 주파수와 우수한 cutoff 특성을 얻을 수 있었다. 또한 통과대역에서의 특성 역시 우수함을 알 수 있다.

측정은 HP8510C Network Analyser를 사용하였고 <그림 6>은 측정용을 위해 <그림 2>와 동일하게 실제 제작된 필터의 모습이다. 제안한 저역통과 필터는 우수한 스킷특성과 낮은 차단주파수를 가지며 높은 주파수대역에서도 -20 dB 이하의 저지대역을 형성한다. <그림 5>의 측정치와 실험치를 비교해 보면 낮은 주파수대역에서는 비교적 잘 일치하지만 주파수가 20 GHz를 넘어서면 2-3 dB의 차이를 보인다. 이는 측정시 사용한 커넥터에서의 손실때문으로 사료된다. 기존의 저역통과 필터는 차단주파수를 기준으로 약 5, 6배의 저지대역을 갖는데 비하여 본 논문에서 제시한 저역통과 필터는 차단

주파수 1.1 GHz를 기준으로 25배이상의 저지대역을 형성하여 기존의 저역통과 필터의 저지대역을 획기적으로 증가시켰다.

IV. 결 론

본 논문에서는 기존 저역통과 필터의 완만한 cutoff 특성과 좁은 저지대역의 단점을 보완하기 위하여 기존 필터의 병렬 스테브 모양을 변형하고 접지면에 슬롯을 형성한 새로운 구조를 제안하였다. 병렬 스테브를 변형하여 두 스테브를 커플시켜 급격한 cutoff 특성을 얻을 수 있었으며 접지면에 슬롯을 형성하여 기존 필터의 저지대역을 넓힐 수 있었다. 제안한 저역통과 필터는 1.1 GHz에서 3 dB의 차단주파수를 가지며 저지 대역폭은 삽입손실 -20 dB를 기준으로 1.5 GHz에서 30 GHz이상의 광대역을 이루어 기존의 저역통과 필터와 비교해 훨씬 넓은 저지대역을 얻을 수 있었다.

참 고 문 헌

- [1] M. J. Lancaster and 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 Digest, Vol. 3, pp. 919~922, 1999.
- [3] D. M. Pozar, Microwave Engineering, New York: John Wiley & Sons, 1998.
- [4] D. Ahn, J. S. Park, C. S. Kim, Y. Qian, and T. Itoh, "A design of the low-pass filter using the novel microstrip defected ground structure," IEEE Tran, Microwave Theory Tech., vol. 49, no. 1, pp. 86~93, Jan. 2001.
- [5] T. Kim and 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.
- [6] 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.
- [7] M. Makimoto and S. Yamashita, Microwave Resonators and Filters for Wireless Communication, Berlin: Springer, 2001.
- [8] S. Y. Lee and C. M. Tsai, "New cross-coupled filter design using improved hairpin resonators," IEEE Trans. Microwave Theory Tech., vol. 48, no. 12, pp. 2482~2490, Dec. 2000.
- [9] L. H. Heish and K. Chang, "Compact lowpass filter using stepped impedance hairpin resonator," Electron. Lett., vol. 37, no. 14, pp. 899~900, July 2001.
- [10] R. Mongia, I. Bahl, and P. Bhartia, RF and Microwave coupled-line circuits, Boston: Artech House, 1999.
- [11] K. C Gupta, R. Garg, I. Bahk, and P. Bhartia, Microstrip Lines and Slotlines, Boston: Artech House, 1996.

저 자 소 개



金京勳(正會員)

2002년 2월 : 단국대학교 전자공학과(공학사). 2002년 3월~현재 : 아주대학교 전자공학과 석사과정. <주관심분야 : Microwave photonic bandgap(PBG), 초고주파 수동 소자>



鄭鍾鎬(正會員)

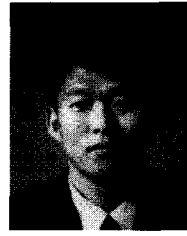
2001년 8월 : 아주대학교 전자공학부(공학사). 2001년 9월 : 아주대학교 전자공학과 석사과정. <주관심분야 : 안테나 설계 및 해석, 밀리미터파 수동소자 설계>



奇 喆 埴(正會員)

1992년 2월 : 부산대학교 물리교육과(이학사). 1996년 2월 : KAIST 물리학과(이학석사). 2000년 2월 : KAIST 물리학과(이학박사). 2000년 8월~현재 : 아주대학교 연구교수. <주관심분야 : Photonic crystals,

transparent metal>



朴 益 模(正會員)

1984년 : 뉴욕 주립대학교 전기전자공학과(공학사). 1989년 : 일리노이 대학교 전기전자 공학과(공학석사). 1994년 : 일리노이 대학교 전기전자 공학과(공학박사). 1996년~현재 : 아주대학교 부교수. <주관심분야 :

EMI & EMC, 안테나 설계, 수치 해석>



林 漢 祚(正會員)

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. <주관심분야 : 결합 및 계면물리, III-V족 반도체 물성, III-V족 반도체 소자, Photonic Crystal>