

# 접지면 어퍼처를 사용한 Hairpin-Comb 대역통과 여파기 설계

## Design of Hairpin-Comb Bandpass Filter using Ground Aperture

이진택 · 박정훈\* · 김상태\*\* · 신철재

Jin-Taek Lee · Jeong-Hoon Park\* · Sang-Tae Kim\*\* · Chull-Chai Shin

### 요약

본 논문에서는 접지면에 어퍼처를 갖는 hairpin-comb 대역 통과 여파기를 제안하였다. Hairpin-comb 공진기는 두 공진기 사이의 간격이 매우 좁더라도 약한 커플링을 유지하는 특성이 있으므로 협대역 대역통과 여파기 제작시 여파기의 전체적인 크기를 작게 할 수 있는 장점이 있다. 그러나 일반적인 마이크로 스트립에서는 공진기 사이가 최소한의 거리가 되더라도 커플링이 너무 미약하여 사용할 수 없다. 그러므로 본 논문에서는 접지면에 어퍼처를 사용하여 약한 커플링을 보상함으로써 일반 마이크로 스트립에서도 협대역 대역통과 여파기를 제작할 수 있었다. 또한 공진기 사이의 거리 변환 없이 어퍼처의 크기에 의해서 커플링을 조절함으로써 전체 여파기의 크기를 고정시킨 상태에서 대역폭을 조절할 수 있는 장점이 있다. 본 논문에서는 중심 주파수가 1.78 GHz 이고 대역폭이 62 MHz (3.5%)인 여파기를 제작하였다.

### Abstract

This paper presents hairpin-comb bandpass filter using ground aperture. Hairpin-comb resonator maintains the weak coupling though the space between two resonators is very small. This has the good merit that the entire filter size is small for narrowband bandpass filter. The coupling between two hairpin-comb resonators so very weak that can't be applicable to general microstrip. We compensate the coupling by using ground aperture. It makes the hairpin-comb filter possible that can be applicable to general microstrip. Also it has the good merit which adjusts the bandwidth by changing the size of aperture without changing the space. In this paper, we fabricate the bandpass filter, which has 1.78 GHz center frequency and 62 MHz (3.5%) fractional bandwidth.

Key words : Hairpin-Comb, Bandpass Filter, Narrowband, Aperture, Compact Size

### I. 서론

대역 통과 여파기는 마이크로 웨이브 통신 시스템에서 필수적인 부품이다. 이 여파기는 일반적으로 RF 시스템 중단이나 증폭기, 혼합기 등에 사용된다. 최근 무선 통신과 이동통신의 급격한 성장은 부품의 크기, 성능에 있어서 새로운 기술에 대한 요구를

빠르게 증가시키고 있다. 여파기 구조에 있어서 크기는 매우 중요한 문제이다. 특히, 협대역 대역 통과 여파기에 있어서 이러한 문제는 기관의 유전율이 클 때 기모드와 우모드의 파동속도의 차이가 커져 매우 중요한 문제를 유발하게 된다. 즉, 이러한 현상은 두 공진기 사이의 커플링을 커지게 하는 역할을 하게 되며 협대역을 얻기 위해서는 공진기 사이의

아주대학교 전자공학과(Dept. of Electronic Engineering, Ajou University)

\*인천전문대학 통신과(Dept. of communication Engineering, Incheon College)

\*\*산업기술정책연구소(Korea Institute of Industrial Technology Evaluation & Planning)

· 논문 번호: 20031102-04S

· 수정완료일자: 2002년 12월 5일

간격을 크게 띄워야 하며 결과적으로 여파기의 전체적인 크기를 커지게 하는 결과를 초래한다<sup>[1],[2]</sup>. 그러므로 여파기의 전체적인 크기를 최소화하기 위한 연구가 많이 진행되어 왔으며, hairpin-comb 여파기는 이러한 문제점을 해결하기 위해 제안되었다<sup>[3]</sup>. 그러나 이 hairpin-comb 공진기는 일반적인 마이크로 스트립에서 두 공진기 사이의 간격이 매우 좁더라도 매우 약한 커플링을 가지게 되어 사용할 수 없으며 최근의 많은 연구에서 초고온 전도체 (High Temperature Superconductor)에 많이 응용되었다<sup>[4]</sup>.

접지면에 어퍼처를 이용하여 대역폭을 확장하는 기법이 많은 논문에서 제안되었다. 즉 결합되는 두 공진기 사이 하단의 접지면에 어퍼처를 적용하여 커플링을 강하게 함으로써 대역폭을 확장시키는 방법이 연구되어졌다<sup>[5],[6]</sup>. 그러므로 본 논문에서는 hairpin-comb 여파기의 접지면에 어퍼처를 적용함으로써 hairpin-comb 공진기의 약한 커플링을 보상하였다. 이렇게 함으로써 hairpin-comb 여파기를 일반적인 마이크로 스트립에서도 적용할 수 있었다. 접지면에 어퍼처를 갖는 hairpin-comb 여파기는 공진기 사이의 간격이 작아 전체적인 여파기의 크기를 작게 유지하면서 협대역을 얻을 수 있는 장점을 가졌다. 또한 공진기 사이의 간격을 일정하게 고정시킨 상태에서 어퍼처의 크기를 변화시켜 커플링을 조절함으로써 여파기의 전체적인 크기의 변화없이 대역폭을 변화시킬 수 있는 장점을 가졌다. 이러한

장점을 살리기 위해 hairpin-comb 공진기 사이의 간격을 제작상의 톨러런스를 고려하여 최소한으로 고정시켜 놓고 접지면의 어퍼처를 조절하여 대역통과 여파기를 설계하였다. 본 논문에서는 여파기 설계시에 어퍼처의 크기에 의해서만 대역폭을 조절할 수 있음을 보이기 위해 두가지의 대역통과 여파기를 설계하였다. 하나는 중심주파수가 1.78 GHz이고 대역폭이 62 MHz (3.5 %)인 대역통과 여파기이고 다른 하나는 중심주파수가 1.86 GHz이고 대역폭이 180 MHz (10 %)인 대역통과 여파기이다. 이때 여파기 설계를 위한 결합 계수 및 외부 Q 값은 MoM에 기초한 EM 시뮬레이터인 IE3D를 이용해 계산하였다. 본 논문에서는 중심주파수가 1.78 GHz이고 대역폭이 62 MHz (3.5 %)인 대역통과 여파기를 제작하여 시뮬레이션 결과와 측정 결과를 비교함으로써 소형 협대역 대역 통과 여파기를 설계 가능함을 확인할 수 있었다.

## II. 접지면에 어퍼처를 사용한 hairpin-comb 대역통과 여파기 구조

Hairpin 공진기는 일반적인 공진기의 전체적인 길이( $\lambda/2$ )를 반으로 접었기 때문에 높이가 약  $\lambda/4$ 이며 많은 대역 통과 여파기 설계에 사용되었다. 그러나 hairpin 공진기로 협대역 대역통과 여파기를 만들기 위해서는 공진기 사이의 결합 크기를 작게

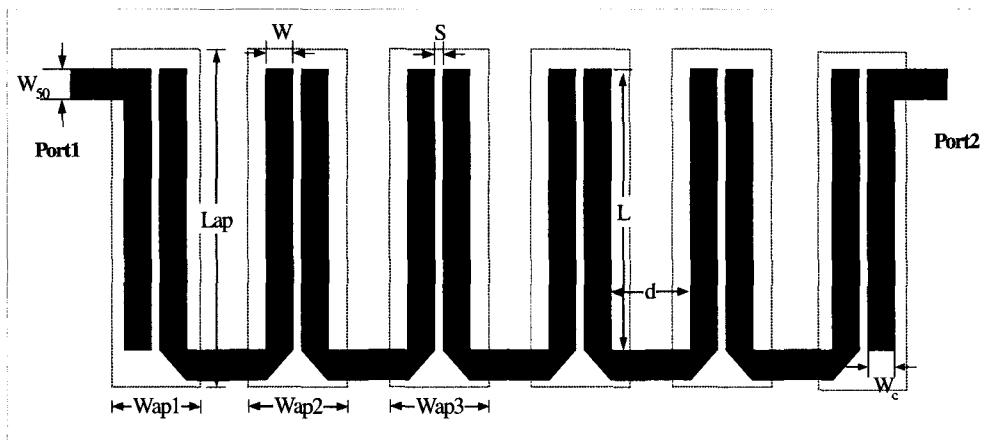


그림 1. 제안된 접지면 어퍼처를 사용한 hairpin-comb 대역통과 여파기  
 Fig. 1. Proposed hairpin-comb bandpass filter using ground aperture.

하기 위하여 공진기 사이의 간격을 띄어야 하며 이런 현상은 여파기의 전체적인 크기를 크게 한다. 이러한 단점을 해결하기 위해 제안된 것이 콤팩트한 여파기를 응용한 hairpin-comb 공진기이다. 그림 1은 접지면에 어퍼처를 사용한 hairpin-comb 공진기를 나타낸다. 기존의 hairpin-comb 여파기는 커플링이 약하여 실제로 일반적인 마이크로 스트립구조에서는 사용하기 힘들다. 그러므로 그림 1에서 처럼 결합되는 공진기 사이의 하단 접지면에 어퍼처를 적용함으로써 기존의 hairpin-comb 공진기의 약한 커플링을 보상하여 일반 마이크로 스트립에서도 적용 가능하게 하였다. 본 논문에서는 설계변수를 간단히 하기 위하여 공진기간의 간격을 동일하게 배열하였으며, 어퍼처는 여파기의 중심을 기준으로 좌·우측을 대칭으로 설계하였다. 입력과 출력 포트는 협대역 대역통과 여파기에서 많이 사용되는 간접 커플링 방법을 적용하였다<sup>[4]</sup>.

### III. 접지면에 어퍼처를 갖는 공진기 특성

대역통과 여파기를 설계하는데 있어서 공진기 사이의 결합 계수 및 입·출력단에서 공진기와 급전선 사이의 결합 정도를 나타내는 외부 Q값을 알아내는 것은 매우 중요한 일이다. 이는 여파기를 구성하는 공진기의 구조와 그 배열이 점점 더 복잡할수록 등가 회로를 이용하여 여파기를 설계하는 것보다 공진기 사이의 결합 계수와 공진기의 외부 Q를 이용해서 여파기를 설계하는 것이 훨씬 효율적이기 때문이다<sup>[7]</sup>. 그러므로 본 논문에서는 설계 변수중 중요하게 고려되었던 접지면 어퍼처의 크기가 외부 Q값 및 공진기 사이의 결합 계수에 미치는 특성을 살펴보았다. 이 특성에 기초하여 대역통과 여파기 설계시에 접지면 어퍼처의 크기에 의해서만 대역폭을 조절할 수 있었다. 본 논문에는 비유전율  $\epsilon_r = 6.15$ 이며, 두께  $h = 0.635$  mm인 기판을 이용하여 외부 Q값과 결합 계수를 계산하였다.

#### 3-1 외부 Q

그림 2(a)는 외부 Q값을 계산하기 위한 회로이다. 앞의 그림 1의 접지면 어퍼처를 사용한 hairpin-

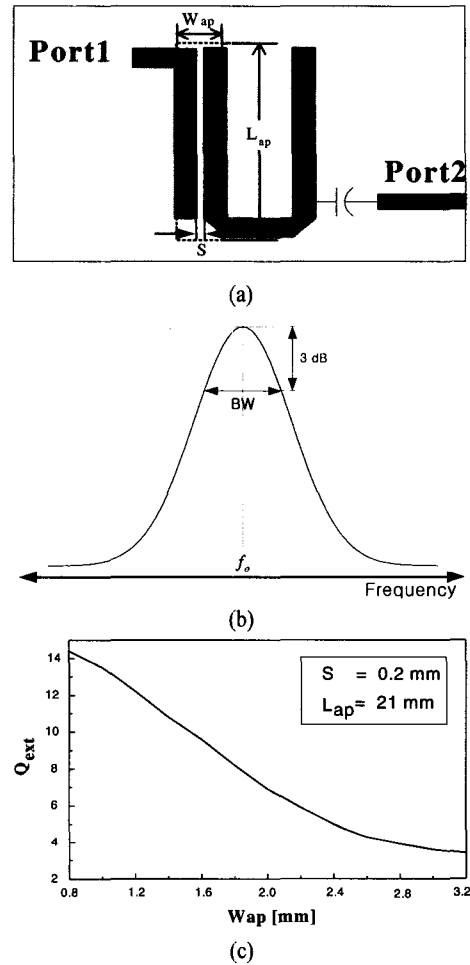


그림 2. 외부 Q값 계산  
 (a) 외부 Q값을 계산하기 위한 구조  
 (b) 주파수 응답  
 (c) 계산된 외부 Q값

Fig. 2. External Q calculation.  
 (a) Structure for calculating the external Q  
 (b) Frequency response  
 (c) Calculated external Q

comb 여파기의 입·출력 포트 부분으로 위에서 본 그림만 도시하였다. 접지면에 어퍼처를 갖는 hairpin-comb 공진기의 외부 Q값은 공진기와 신호 인가 포트와의 간격과 어퍼처의 크기에 의해서 변화된다. 입력 및 출력포트의 두께는 마이크로 스트립 선로의  $50 \Omega$  특성을 위해  $0.95$  mm로 하였으며, 공진기는 전체적인 길이가  $\lambda/2$  되게 하기 위하여  $L = 18$  mm,  $d = 4$  mm로 하였다. 포트 1은 제안된 대역통과 여파

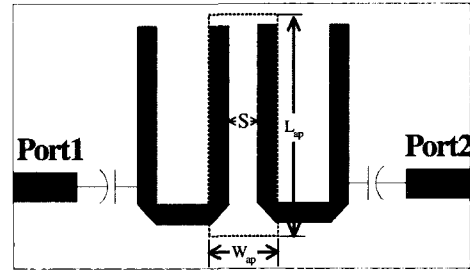
기에 적용된 간접 커플링 구조로 되어 있으며, 포트 2는 정확한 외부  $Q$ 값을 얻기 위하여 디커플링 캐패시터와 연결되어져 있다. 주파수 응답은 그림 2(b)에서 처럼 나타내어지며 이때 외부  $Q$ 는 다음과 같이 표현된다<sup>[8]</sup>.

$$Q_{ex} = \frac{f_o}{BW_{3dB}} \quad (1)$$

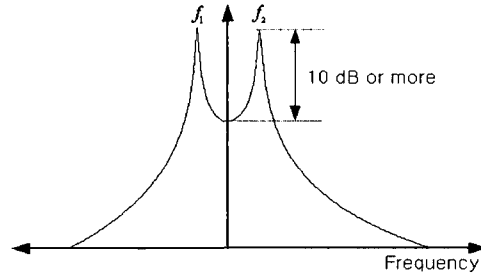
앞에서 설명한 바와 같이 여파기 설계에 있어서 공진기와 신호 인가 포트의 거리는  $S=0.2 \text{ mm}$ 로 고정하였다. 그러므로 어퍼처의 크기에 대해서 외부  $Q$ 값의 변화를 살펴 보았다. 그림 2(c)는 어퍼처의 크기를 변화시키면서 신호 인가 포트와 공진기 사이의 외부  $Q$ 를 구한 것이다. 이때 어퍼처의 크기에서 길이는  $L_{ap}=21 \text{ mm}$ 로 고정하고 어퍼처의 폭  $W_{ap}$ 만을 변화시켰다. 이때 주파수 응답 특성은 MoM에 기초한 EM 시뮬레이터인 IE3D를 이용하여 계산하였다. 그림에서 보듯이 외부  $Q$ 값은 접지면 어퍼처의 크기가 작아질수록 전체적인 외부  $Q$ 값이 커짐을 알 수 있다. 이러한 현상은 어퍼처의 크기가 작아질수록 신호 인가 포트에서 공진기로 신호를 인가할 때 많은 신호가 손실됨을 의미한다.

### 3-2 결합 계수

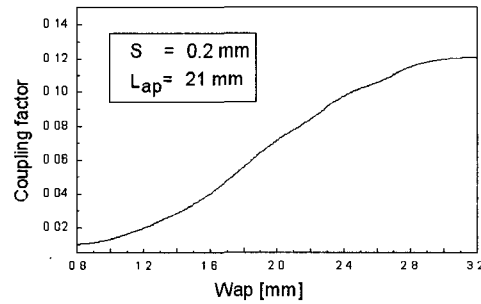
일반적인 대역통과 여파기에서는 공진기간의 결합 계수는 공진기간의 거리에 의해서 결정된다. 그러나 접지면 어퍼처를 사용한 hairpin-comb 공진기는 공진기간의 간격뿐만 아니라 어퍼처의 크기에 의해서 결합계수가 결정된다. 그림 3(a)는 결합 계수를 구하기 위한 회로이다. 두 hairpin-comb 공진기를 간격  $S$ 를 두고 배열하고 디커플링을 위한 캐패시터를 두 포트에 연결시킨 구조이다. 공진기 간격  $S$ 는 어퍼처의 크기만을 조절하여 결합크기를 조절하여 대역통과 여파기를 설계하기 위해 앞에서와 동일하게  $S=0.2 \text{ mm}$ 로 고정하였다. 어퍼처의 크기에 따른 결합 계수의 변화를 알아보기 위하여 접지면 어퍼처의 길이는  $L_{ap}=21 \text{ mm}$ 로 고정시켜 놓고 어퍼처의 폭만을 변화시키면서 결합계수를 계산하였다. 결합 계수 계산을 위한 주파수 응답은 그림 3(b)에서 보는 바와 같이 두 번의 공진을 가져야 하며,



(a)



(b)



(c)

그림 3. 커플링 계수 계산

- (a) 커플링 계수를 계산하기 위한 구조
- (b) 주파수 응답
- (c) 계산된 커플링 계수

Fig. 3. Coupling factor calculation.

- (a) Structure for calculating the coupling factor
- (b) Frequency response
- (c) Calculated coupling factor

또한  $f_1, f_2$ 에서의 신호 값이 중심 주파수인  $f_0$ 의 신호 값에 비해서 약 10 dB 이상의 큰 값이어야 한다. 이때 공진기 사이의 결합계수는 다음과 같이 나타내어진다<sup>[8]</sup>.

$$K = 2 \frac{f_2 - f_1}{f_2 + f_1} \quad (2)$$

그림 3(c)는 어퍼처의 폭에 따른 결합 계수를 나타낸 그림이다. 그림에서 어퍼처의 크기가 작아질수록 결합 계수가 감소한다. 대역폭은 결합상수에 비례하므로 역협대 대역통과 여파기를 제작하기 위해서는 어퍼처의 크기를 작게 유지해야 함을 알 수 있다.

#### IV. 대역통과 여파기 설계 및 측정

본 논문에서는 공진기간의 간격을 유지한 상태에서 어퍼처의 크기에 의해서만 대역폭이 조절 가능함을 보이기 위해 두 가지 경우의 대역통과 여파기를 설계하였다. 하나는 중심주파수가 1.78 GHz이고 대역폭이 62 MHz (3.5 %)인 대역통과 여파기이고, 다른 하나는 중심주파수가 1.86 GHz이고 대역폭이 180 MHz (10%)인 대역통과 여파기이다. 이때 공진기간의 거리와 어퍼처의 길이는 각각  $S=0.2$  mm와  $W_{ap}=21$  mm로 두 가지 경우에 대하여 동일하게 고정하였다. 이때 앞에서 계산된 외부 Q값과 결합 계수에 기초하여 IE3D 시뮬레이터를 사용하여 몇 번의 시행 착오를 거쳐 어퍼처의 폭을 계산하였다. 두 가지 경우의 대역 통과 여파기에 대한 계산된 설계 변수를 표 1에 나타내었다. 설계된 변수를 살펴보면 대역폭이 3.5 %인 대역통과 여파기는 어퍼처의 폭이 약 1 mm이고 대역폭이 10 %인 여파기는 1.7 mm 임을 알 수 있다. 즉 다른 변수는 동일한 상태로써 전체적인 여파기의 크기의 변화없이 어퍼처의 크기만을 변화시켜 여파기의 대역폭을 조절할 수 있었다. 본 논문에서 반사손실 특성을 개선하기 위한 튜닝으로 입력 및 출력 포트에서 공진기의 결합선로 두께를  $W_c=1.15$  mm로 하였고, 3번째 공진기의 길이를 다른 4개보다 약 0.15 mm 작게 하였다.

표 1. 접지면 어퍼처를 사용한 Hairpin-comb 대역통과 여파기의 설계 변수

Table 1. Design parameter of hairpin-comb band-pass filter using ground aperture.

(단위 : mm)

변 수	3.5 % 대역폭	10 % 대역폭	공 통
$W_{ap1}$	0.92	1.70	Lap=21.0, L=18.0
$W_{ap2}$	1.10	1.80	$W_{50}=0.95, W_c=1.15,$
$W_{ap3}$	0.92	1.70	$W=0.9, S=0.2, d=4.0$

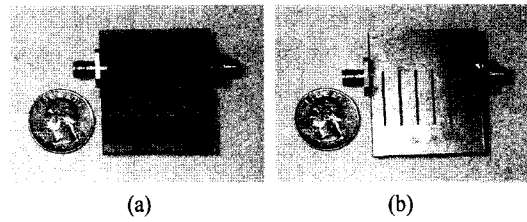
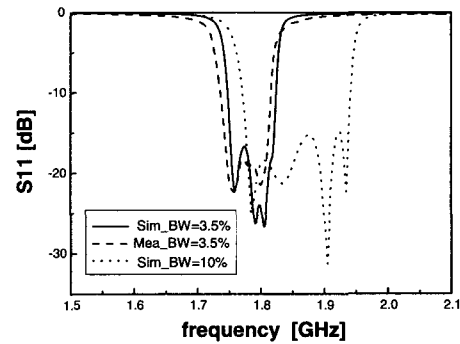
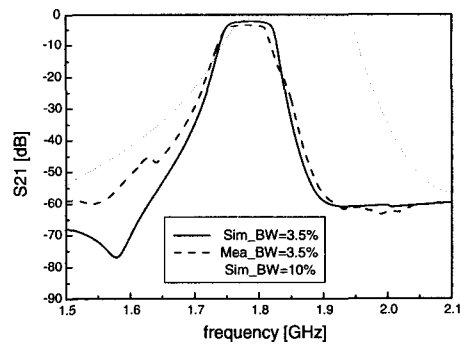


그림 4. 제작된 5 Pole 대역 통과 여파기 (a) 상면도, (b) 하면도

Fig. 4. Fabricated 5-pole bandpass filter. (a) Top view, (b) Bottom view



(a)



(b)

그림 5. 대역통과 여파기의 반사손실 및 삽입손실의 계산된 결과와 측정된 결과

(a) 반사손실, (b) 삽입손실

Fig. 5. Computed and measured insertion and return loss of bandpass filter.

(a) Return loss, (b) Insertion loss

앞에서 설계된 여파기중 중심주파수가 1.78 GHz이고 대역폭이 62 MHz (3.5 %)인 대역통과 여파기를 비유전율  $\epsilon_r = 6.15$ 이며, 두께  $h = 0.635$  mm이고 접지면의 크기가  $40 \times 45$  mm<sup>2</sup>인 Duroid 기판에

제작하였다. 그림 4는 제작된 5 pole 접지면 어퍼처를 사용한 hairpin-comb 대역통과 여파기이다. 그림에서 보듯이 윗면은 기존의 hairpin-comb 여파기 구조이며 아래의 접지면은 커플링 보상을 위한 어퍼처가 존재한다.

제작된 여파기기는 HP8510C network analyzer를 사용하여 반사손실 및 삽입손실을 측정하였다. 그림 5는 대역통과 여파기의 삽입손실 및 반사손실의 계산된 결과와 측정된 결과를 비교한 그래프이다. 그림에서 보여지듯이 중심주파수가 1.78 GHz이고 대역폭이 62 MHz (3.5 %)인 대역통과 여파기의 두 결과를 비교하면 거의 유사한 특성을 보임을 알 수 있다. 그러나 1.5~1.7 GHz의 저지대역에서 측정된 삽입손실( $S_{21}$ )이 계산된 삽입손실( $S_{21}$ )보다 약간 높게 나타났으며, 통과대역에서 삽입손실( $S_{21}$ )이 계산된 결과는 약 2 dB 정도이나 측정된 결과는 약 3.7 dB 로써 약 1.7 dB의 차이를 보였다. 두 결과가 정확히 일치하지 않는 것은 시뮬레이션시 전체적인 손실이 고려되지 못한 점과 제작 공정상에서 어퍼처의 위치가 공진기와 공진기가 결합되는 지점과 정확하게 일치하지 않아 발생한 오차로 사료된다.

### V. 결 론

접지면 어퍼처를 사용한 hairpin-comb 대역 통과 여파기가 제안되었다. Hairpin-comb 공진기의 약한 커플링을 이용하여 전체적인 여파기의 크기를 작게 하였으며 접지면의 어퍼처에 의해서 hairpin-comb 공진기의 약한 커플링을 보상함으로써 협대역 대역통과 여파기를 설계할 수 있었다. 중심 주파수 1.78 GHz이고 대역폭이 62 MHz(3.5 %)인 5 pole 대역통과 여파기를 제작하여 계산된 결과와 비교적 잘 일치함을 알 수 있었다. 본 논문에서 제안된 접지면에 어퍼처를 갖는 협대역 hairpin-comb 대역 통과 여파기는 전체적인 여파기 크기의 변화없이 어퍼처의 폭을 조절함으로써 대역폭을 조절할 수 있는 장점이 있을 뿐만 아니라 hairpin-comb 공진기를 이용하여 공진기 사이의 간격을 작게 유지함으로써 전체적인 여파기의 크기를 소형화 할 수 있는 장점을 가진다.

### 참 고 문 헌

- [1] G. L. Matthai, G. L. Hey-Shipton, "Concerning the use of high temperature super conductivity in planar microwave filters", *IEEE Trans. Microwave Theory Tech.*, vol. 42, pp. 1287-1293, July 1994.
- [2] M. Sagawa, K. Takahashi and M. Makimoto, "Miniaturized Hairpin Resonator Filters and Their Application to Receiver Front-End MIC's", *IEEE Trans. Microwave Theory Tech.*, vol. 37, no. 12, pp. 1991-1997, Dec. 1989.
- [3] G. L. Matthai, N. O. Fenzi, R. J. Forse and S. M. Rohlfing, "Hairpin-comb filters for HTS and other narrow-band applications", *IEEE Trans. Microwave Theory Tech.*, vol. 45, pp. 1226-1231, Aug. 1997.
- [4] H. T. Kim, B. C. Min, Y. H. Choi, S. H. Moon, S. M. Lee and B. Oh, "A compact narrowband HTS microstrip filters for PCS application", *IEEE Trans. Appl. Superconductivity*, vol. 9, pp. 3909-3912, June 1999.
- [5] J. S. Hong, M. J. Lancaster, "Aperture-Coupled microstrip open-loop resonators and their applications to the design of novel microstrip band-pass filters", *IEEE Trans. Microwave Theory Tech.*, vol. 47, pp. 1848-1855, Sep. 1999.
- [6] S. Im, C. Seo, J. Kim, Y. Kim and N. Kim, "Improvement of microstrip open loop resonator filter using aperture", *IEEE MTT-S Int. Symp. Dig., Seattle, WA*, vol. 3, pp. 1801-1804, June 2002.
- [7] R. Mongia, I. Bahl, P. Bhartia, *RF and Microwave Coupled-line Circuits*, Artech House, 1999.
- [8] J. S. Hong, M. J. Lancaster, *Microstrip filters for RF/Microwave application*, John Williy & Sons, Inc., 2001.

이진택



1997년 2월: 아주대학교 전자공학과 (공학사)  
2002년 8월: 아주대학교 전파공학과 (공학석사)  
2002년 8월~현재: 아주대학교 전자공학과 박사과정

김상태



1985년 2월: 아주대학교 전자공학과 (공학사)  
1984년 12월~1985년 8월: 대우중공업(주) 연구소  
1987년 8월: 아주대학교 전자공학과 (공학석사)  
2001년 2월: 아주대학교 전자공학과 (공학박사)  
1991년 3월~현재: 한국생산기술연구원 산업기술정책 연구소 선임연구원

박정훈



1984년 2월: 아주대학교 전자공학과 (공학사)  
1993년 2월: 아주대학교 전자공학과 (공학석사)  
1998년 2월: 아주대학교 전자공학과 박사과정 수료  
1994년 3월~현재: 시립인천전문

대학 통신과 교수

신철재



1964년 2월: 연세대학교 전자공학과 (공학사)  
1968년 2월: 연세대학교 전자공학과 (공학석사)  
1983년 3월: 연세대학교 전자공학과 (공학박사)  
1977년~현재: 아주대학교 전자공

학부 교수