

집중 소자 캐패시터와 접지를 이용한 평행 결합 선로 필터의 소형화 연구

Miniaturization of Parallel Coupled-Line Filter using Lumped Capacitors and Grounding

명 성 식 · 육 종 관

Seong-Sik Myoung · Jong-Gwan Yook

요 약

본 논문은 집중 소자 캐패시터와 접지를 사용하여 평행 결합 선로 필터의 새로운 소형화 기법을 제안하였다. 본 논문에서 제안한 기법은 설계와 제작이 간단하여 RF(Radio Frequency) 필터로 많이 사용되고 있는 평행 결합 선로 필터를 소수의 캐패시터와 접지만을 이용하여 필터의 크기를 임의의 길이로 줄일 수 있는 기법이다. 본 논문은 기존의 단일 전송 선로와 평행 결합 선로의 소형화 기법을 평행 결합 선로 필터에 적용하였으며, 접지를 이용해 소형화에 사용될 캐패시터의 개수를 줄이는 기법을 제안한다. 본 논문에서 제안한 기법은 필터의 소형화와 더불어 집중소자 캐패시터를 사용함으로써 필터의 고조파 특성이 개선되며 이로 인해 고주파 영역의 차단 특성이 개선되는 장점이 있다. 제안된 소형화 기법에 대한 검증을 위해 Duroid ($\epsilon_r=10$) 기판을 사용하여 셀룰러폰 대역인 900 MHz 대역의 FBW(Fractional Band Width) 10 %의 필터를, 제안한 기법을 적용하여 공진기의 길이를 $\lambda/4$ 로 줄인 헤어핀 형태로 제작 및 측정하여 제안된 기법의 타당성을 확인하였다.

Abstract

This paper proposes new miniaturization method of parallel coupled line filter by using capacitors and grounding. Proposed method can reduce resonator size by using only a small number of capacitor and grounding of parallel coupled line filter which is conventional in field of RF filters because of its design and fabrication simplicity. This paper applies the miniaturization method of transmission line and parallel coupled line to parallel coupled line filter, and presents that grounding can reduce the number of shut capacitors. Presented miniaturized method has merits of miniaturization of parallel coupled line, harmonic suppression, and improvement of high frequency skirt with harmonic suppression. For verification of proposed method, this paper presents a hairpin filter, which has 900 MHz center frequency and 10 % FBW, miniaturized to $\lambda/4$ by proposed method.

Key words : Miniaturization, Parallel Coupled-Line Filer, Capacitor, Grounding, Hairpin

I. 서 론

최근 정보 통신 기술이 급속히 발전함에 따라 무선 통신 영역의 비중이 점점 확대되고 있다. 이러한 무선 통신이 발달함에 따라 이동성의 편의를 위하여

시스템의 소형화가 대두되고 있고, 이에 따라 무선 통신에 필요한 부품의 소형화, 경박화가 중점 연구 되는 한편 성능 향상에 대한 새로운 기술에 대한 필요성이 급속히 증가되고 있다. 이로 인해 RF 단의 핵심 부품인 필터의 소형화에 대한 연구가 중요한

연세대학교 전기전자공학부(Dept. of Electrical and Electronic Eng., Yonsei University)

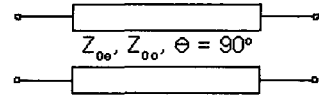
· 논문 번호 : 20040608-077

· 수정완료일자 : 2004년 8월 2일

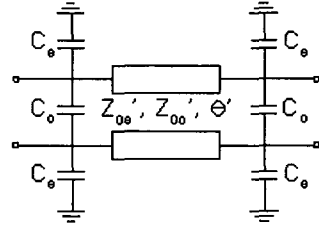
과제가 되었다. 마이크로 스트립 필터나 CPW(Co-Planar Wave guide) 등의 평면형 전송 선로를 이용한 필터는 그 구조가 간단하고 제작이 용이해 RF 필터에 많이 적용되어왔으며 크기의 소형화에 대해 과거에 많은 연구가 이루어져왔다. 과거에 이루어진 평면형 전송 선로를 이용한 필터의 소형화에 대한 연구는 주기적 구조를 이용하여 슬로우 웨이브 특성을 이용한 Ladder 필터^[1], 공진기의 형태를 구부리는 등의 방법을 이용하여 변형시킨 pseudointerdigital 필터^[2]와 헤어핀 필터^[3] 등과 집중 소자를 이용한 Combline 필터^[4] 등이 있다. 이러한 과거의 필터 소형화 연구는 주기적인 구조를 이용한 경우와 공진기 형태를 변형한 경우 매우 정확한 Full-wave EM(Electromagnetic) 시뮬레이션이 필요하고 소형화의 한계가 있다는 단점이 있으며, 집중 소자를 이용한 Combline 필터의 경우 역시 자기 캐패시터와 상호 캐패시터의 계산이 매우 복잡하며 설계가 어렵고 Combline 구조에 대한 정확한 해석이 필요하다는 단점이 있다. 이에 본 논문에서는 설계가 매우 간단한 결합 선로 필터를 집중 소자 캐패시터와 접지를 이용하여 상호 임피던스 계산이 필요 없어 설계가 매우 간단한 새로운 기법을 제안하였다.

II. 소형화 이론

본 논문에서 제안한 집중 소자 캐패시터와 접지를 이용한 필터의 소형화 기법은 기존의 집중 소자를 이용한 전송 선로의 소형화 기법을 결합 선로에 적용하고, 그것을 평행 결합 선로 필터에 적용하고 접지를 이용하여 소형화에 사용되는 캐패시터의 개수를 줄이는 방법이다. 임의의 특성 임피던스와 길이를 갖는 전송 선로는 병렬 캐패시터를 이용하여 더 높은 특성 임피던스를 가지는 전송 선로로 소형화가 가능하다^[5]. 이러한 단일 전송 선로의 소형화 기법을 평행 결합 선로에 적용함으로써 평행 결합 선로의 소형화 기법에 적용할 수 있다^[6]. 그림 1(a)와 같이 길이 θ 를 가지며, 우모드 기모드 특성 임피던스가 Z_{0e} , Z_{0o} 인 평행 결합 선로는 그림 1(b)와 같이 C_e , C_o 를 이용하여 우모드 기모드 특성 임피던스가 Z_{0e}' , Z_{0o}' 이며, 길이가 θ' 를 가지는 평행 결합 선로로 소형화가 가능하며, 각각의 값은 아래 식 (1)~(4)와 같다.



(a) 일반적인 평행 결합 선로
(a) Conventional parallel coupled-line



(b) 캐패시터를 이용하여 소형화된 평행 결합 선로
(b) Miniaturized parallel coupled-line with parallel capacitance

그림 1. 캐패시터를 이용한 평행 결합 선로의 소형화
Fig. 1. Miniaturization of parallel coupled-line with capacitors.

$$Z_{0e}' = Z_{0e} / \sin \theta' \quad (1)$$

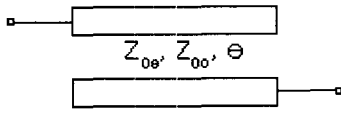
$$Z_{0o}' = Z_{0o} / \sin \theta' \quad (2)$$

$$C_e = (1 / \omega Z_{0e}) \cos \theta' \quad (3)$$

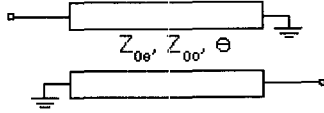
$$C_o = (1 / 2\omega Z_{0o}) \cos \theta' - C_e / 2 \quad (4)$$

평행 결합 선로 필터는 각각 특성이 다른 다수의 평행 결합 선로의 캐스케이드 연결이므로 위에서 구한 캐패시터를 이용한 평행 결합 선로의 소형화 기법을 그대로 적용 가능하다. 하지만 그림 1(b)와 같은 소형화된 평행 결합 선로를 다수 연결하여 필터를 구현할 경우 N 차의 필터를 구현할 때 약 $6(N+1)$ 개의 캐패시터가 필요하여 너무 많은 캐패시터가 사용되며, 좁은 공간에 다수의 캐패시터를 연결함으로써 각 캐패시터간의 상호 결합 등으로 전체 필터의 성능 열화가 발생할 수 있으며, 집적화의 문제가 발생할 수 있다. 이러한 문제점을 극복하고자 본 논문에서는 양쪽 끝이 접지되어 있는 형태의 평행 결합 선로와 캐패시터를 이용한 소형화 기법을 제안하였다.

그림 2와 같이 끝이 개방된 결합 선로와 접지된 결합 선로의 각각 임피던스 파라미터와 어드미턴스 파라미터는 다음 식과 같다. 단 z_{0e} , z_{0o} 는 정규화된 우모드 기모드 특성 임피던스이다^[7].



(a) 끝이 개방된 결합 선로
(a) Open ended parallel coupled line



(b) 끝이 접지된 결합 선로
(b) Short ended parallel coupled line

그림 2. 끝이 개방된 평행 결합 선로와 접지된 평행 결합 선로

Fig. 2. Open and short ended parallel coupled line.

$$z_{open.11} = -(j/2)(z_{0e} + z_{0o}) \cot \theta \quad (5)$$

$$z_{open.12} = -(j/2)(z_{0e} - z_{0o}) \csc \theta \quad (6)$$

$$y_{short.11} = -(j/2)(1/z_{0o} + 1/z_{0e}) \cot \theta \quad (7)$$

$$y_{short.12} = -(j/2)(1/z_{0o} - 1/z_{0e}) \csc \theta \quad (8)$$

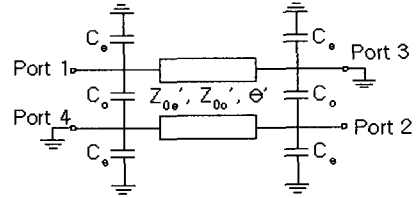
이때 평행 결합 선로의 특성 임피던스 Z_c 가 50 Ohm일 경우, $z_{0e} = 1/z_{0o}$ 가 되며, 이로 인해 끝이 개방된 결합 선로의 임피던스 행렬($[Z]_{open}$)과 끝이 접지된 결합 선로의 어드미턴스 행렬($[Y]_{short}$)과 각각의 산란계수 행렬은 아래 관계를 갖게 된다.

$$[Z]_{open} = [Y]_{short} \quad (9)$$

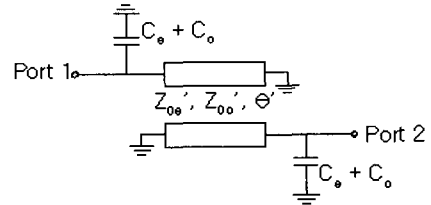
$$[S]_{open} = [S]_{short} \begin{bmatrix} 1 \angle 180^\circ & 0 \\ 0 & 1 \angle 180^\circ \end{bmatrix} \quad (10)$$

평행 결합 선로 필터의 경우 각단의 평행 결합 선로의 특성 임피던스가 거의 50 Ohm이며, 식 (10)을 통해 끝이 개방된 평행 결합 선로 필터의 양쪽 끝을 접지시켜도 동일한 크기 전달 특성을 얻을 수 있음을 알 수 있다.

위의 결과를 이용하여 캐패시터를 이용하여 소형화된 평행 결합 선로의 양쪽 끝을 접지시켜도 동일한 전달 특성을 얻음을 이용하여 소형화에 사용되는 캐패시터의 개수를 줄일 수 있다. 아래 그림 3(a)와 같이 끝이 접지된 평행 결합 선로를 캐패시터를 이용하여 소형화 할 경우 접지된 포트인 Port 3과 Port



(a) 끝이 접지된 평행 결합 선로의 소형화
(a) Miniaturization of short ended parallel coupled line



(b) 접지를 이용하여 캐패시터의 소거
(b) Elimination of capacitors by grounding

그림 3. 접지를 이용한 소형화를 위한 캐패시터의 소거
Fig. 3. Elimination of capacitors for miniaturization.

4에 연결된 C_e 는 양쪽 노드가 접지되었으므로 사라지게 되며 각각 Port 2와 Port 1 사이에 연결된 C_o 는 Port 1과 Port 2에 연결된 C_e 와 하나로 합해지게 되어 결과적으로 그림 3(b)와 같이 된다. 즉 각 단의 평행 결합 선로를 소형화하기 위해 단 두 개의 캐패시터만 필요하게 되며, 필터에 적용할 때에는 전단의 캐패시터와 합해져 N 차의 필터 설계 시 단 $(N+2)$ 개만의 캐패시터를 이용하여 전체 필터의 크기를 임의로 줄일 수 있게 되고, 소형화를 위한 캐패시터의 개수가 끝이 개방된 평행 결합 선로 필터의 소형화를 위한 캐패시터의 수가 $6(N+1)$ 에서 대폭 감소하게 된다. 최종적으로 소형화된 평행 결합 선로 필터의 구조는 그림 4와 같다.

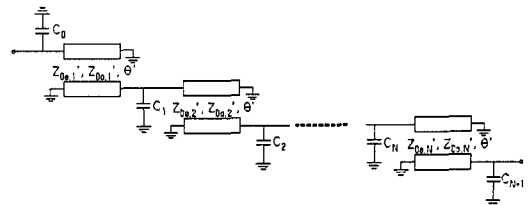


그림 4. 캐패시터와 접지를 이용하여 소형화된 평행 결합 선로 필터

Fig. 4. Miniaturized parallel coupled line filter by using capacitors and grounding.

그림 4에서 결합 선로의 길이가 θ' 으로 소형화된 평행 결합 선로 필터의 병렬 캐패시터 및 우모드 기 모드 특성 임피던스의 값은 아래와 같다. 단 $Z_{0e,n}$ 및 $Z_{0o,n}$ 은 설계하고자 하는 필터의 n 번째 단에서의 우 모드 기 모드 특성 임피던스이다.

$$Z_{0e,n}' = Z_{0e,n} / \sin \theta', \quad n = 1, 2, \dots, N+1 \quad (11)$$

$$Z_{0o,n}' = Z_{0o,n} / \sin \theta', \quad n = 1, 2, \dots, N+1 \quad (12)$$

$$C_0 = (1/2\omega)(1/Z_{0e,1} + 1/Z_{0o,1}) \cos \theta' \quad (13)$$

$$C_n = (1/2\omega)(1/Z_{0e,n} + 1/Z_{0o,n} + 1/Z_{0e,n+1} + 1/Z_{0o,n+1}) \cos \theta', \quad n = 1, 2, \dots, N \quad (14)$$

$$C_{N+1} = (1/2\omega)(1/Z_{0e,N+1} + 1/Z_{0o,N+1}) \cos \theta' \quad (15)$$

이상의 내용을 필터 설계 이론에 적용하여 캐패시터와 접지를 이용하여 임의의 길이로 소형화된 평행 결합 선로 필터의 설계를 간단히 할 수 있다. 본 논문에서 제안한 평행 결합 선로 필터의 소형화 기법은 매우 간단하여 단지 종이와 연필만으로 필터의 소형화가 가능하다는 장점이 있으며, 집중 소자 캐패시터를 사용함으로써 인해 필터의 고조파 특성이 개선되며, 고조파 특성의 개선으로 인해 고주파 영역의 차단 특성이 개선되는 장점이 있다. 또한 제안된 소형화 기법은 평행 결합 선로를 구부림으로 헤어핀 형태의 결합 선로 필터의 소형화에도 동일하게 적용할 수 있다. 그림 5는 본 논문에서 제안된 기법을 적용한 소형화된 헤어핀 필터이다.

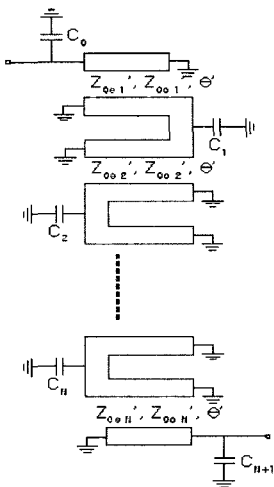


그림 5. 헤어핀 필터의 소형화
Fig. 5. Miniaturization of hairpin filter.

III. 소형화된 필터의 설계

본 논문에서 제안한 필터의 소형화 기법을 검증하기 위해 제안된 기법을 이용하여 소형화된 필터를 설계하였다. 설계 대역은 셀룰러폰 대역인 900 MHz 중심 주파수를 가지며 FBW가 10 %이며, 0.5 dB 통과 대역 리플을 가지는 Chebyshev 3 단 필터이다. 주어진 스펙을 만족하기 위한 소형화되지 않은 일반적인 필터의 우모드 기 모드 임피던스는 아래 표 1과 같다.

위의 필터와 동일한 동작을 하며, 공진기의 길이가 $\lambda/4$, $\lambda/8$, $\lambda/16$ 으로 소형화된 평행 결합 선로 필터의 각각의 우모드 기 모드 특성 임피던스 및 소형화를 위한 커패시턴스 값을 식 (11)~(15)를 이용해 계산하여 표 2에 정리하였다.

표 2에 계산된 값을 이용하여 대역 통과 필터를 설계하여 시뮬레이션 하였다. 시뮬레이션은 ADS-2002(Advanced Design System 2002)를 사용하였으며, 시뮬레이션에 사용된 평행 결합 선로는 ADS에 포함

표 1. 소형화되지 않은 필터의 우모드 기 모드 임피던스

Table 1. Even and odd mode impedance of conventional filter.

공진기 길이는 $\lambda/2$ ($\theta = 90^\circ$)		
n	$Z_{0e,n}$ [Ω]	$Z_{0o,n}$ [Ω]
1	70.61	39.24
2	56.64	44.77
3	56.64	44.77
4	70.61	39.24

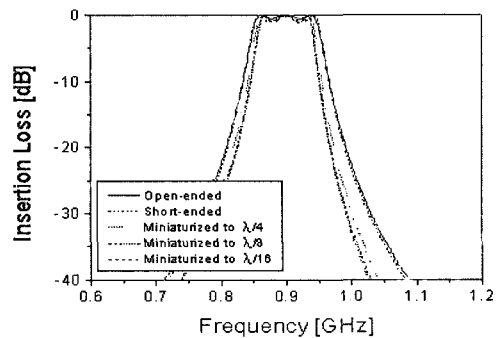


그림 6. 시뮬레이션 결과
Fig. 6. Simulation results.

표 2. 소형화된 필터의 우모드 기모드 특성 임피던스 및 커패시턴스
Table 2. Even and odd mode impedance and capacitance of miniaturized filter.

공진기 길이 = $\lambda/4$ ($\theta' = 45^\circ$)					
n	$Z_{0e,n}' [\Omega]$	$Z_{0o,n}' [\Omega]$	C_e [pF]	C_o [pF]	C_n [pF]
0	-	-	-	-	2.489
1	99.86	55.49	1.771	0.708	4.989
2	80.11	63.31	2.208	0.297	5.000
3	80.11	63.31	2.208	0.297	4.989
4	99.86	55.49	1.771	0.708	2.489
공진기 길이 = $\lambda/8$ ($\theta' = 22.5^\circ$)					
n	$Z_{0e,n}' [\Omega]$	$Z_{0o,n}' [\Omega]$	C_e [pF]	C_o [pF]	C_n [pF]
0	-	-	-	-	3.239
1	184.51	102.54	2.314	0.925	6.506
2	148.01	116.99	2.885	0.382	6.534
3	148.01	116.99	2.885	0.382	6.506
4	184.51	102.54	2.314	0.925	3.239
공진기 길이 = $\lambda/16$ ($\theta' = 11.25^\circ$)					
n	$Z_{0e,n}' [\Omega]$	$Z_{0o,n}' [\Omega]$	C_e [pF]	C_o [pF]	C_n [pF]
0	-	-	-	-	3.438
1	361.93	201.14	2.456	0.982	6.906
2	290.33	229.48	3.062	0.406	6.936
3	290.33	229.48	3.062	0.406	6.906
4	361.93	201.14	2.456	0.982	3.438

되어 있는 이상적인 평행 결합 선로 모델을 사용하였다. 시뮬레이션 결과는 그림 6에 정리되어 있다. 그림 6의 결과 커패시터를 이용하여 소형화함에 따라 특성이 거의 일치하지만 대역폭이 약간 감소하는 것을 알 수 있다. 이는 소형화를 위한 커패시턴스 값을 유도하는 식 (1)~(4)가 협대역에서 만족하기 때문이다. 따라서 좀더 정확한 대역폭을 얻기 위해서는 처음 설계 시 설계하고자 하는 대역폭에 비해 약간 더 넓은 대역폭을 목표로 설계함으로써 원하는 대역폭을 얻을 수 있다.

IV. 제작 및 측정

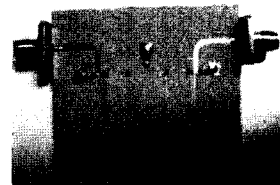
앞에서 계산한 결과를 이용하여 실제 소형화된 필터를 제작 및 측정하였다. 제작을 위해 사용한 기판은 $\epsilon_r = 10$ 인 Duroid 기판을 사용하였으며, 필터의 형태는 헤어핀 형태를 사용하였다. 제작된 필터의 크기는 끝이 개방된 소형화되지 않은 필터와 끝이 접지된 소형화되지 않은 필터와 본 논문에서 제안한



(a) 끝이 개방된 소형화되지 않은 필터($15 \times 5 \text{ cm}^2$)
(a) Open ended not miniaturized filter($15 \times 5 \text{ cm}^2$)

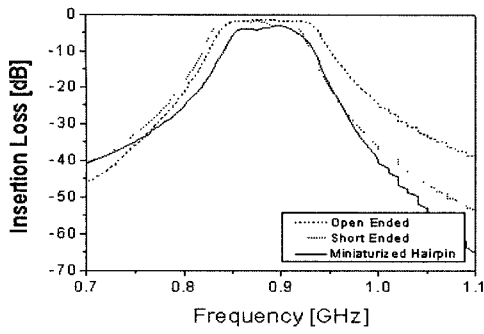


(b) 끝이 접지된 소형화되지 않은 필터($15 \times 5 \text{ cm}^2$)
(b) Short ended not miniaturized filter($15 \times 5 \text{ cm}^2$)

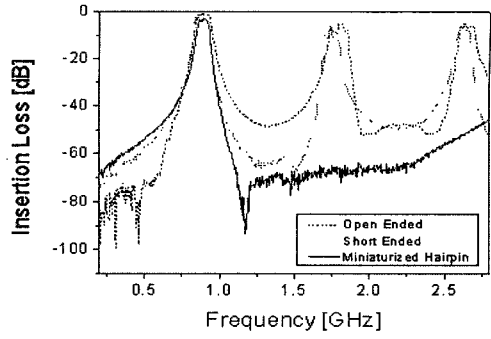


(c) $\lambda/4$ 로 소형화된 헤어핀 형태의 필터($5 \times 4.5 \text{ cm}^2$)
(c) Miniaturized to $\lambda/4$ hairpin filter($5 \times 4.5 \text{ cm}^2$)

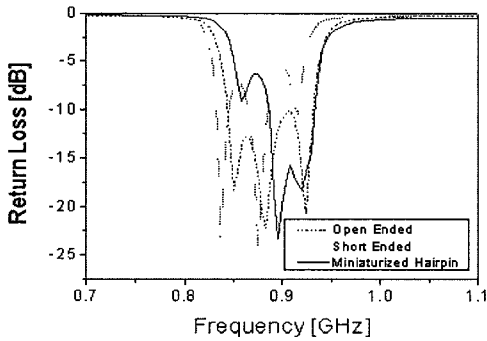
그림 7. 제작된 필터의 사진
Fig. 7. Photographs of fabricated filters.



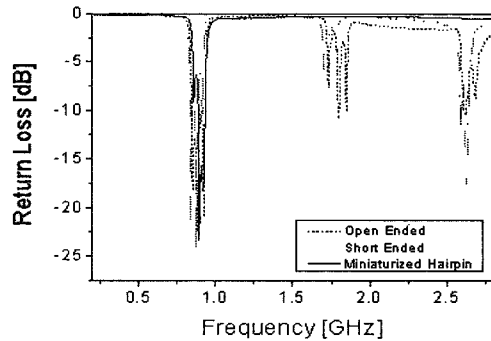
(a) 삽입 손실(협대역)
(a) Insertion loss(in narrow band)



(b) 삽입 손실(광대역)
(b) Insertion loss(in wide band)



(c) 반사 손실(협대역)
(c) Return loss(in narrow band)



(d) 반사 손실(광대역)
(d) Return loss(in wide band)

그림 8. 측정 결과
Fig. 8. Measurement results.

기법을 적용하여 공진기의 길이가 $\lambda/4$ 로 소형화된 헤어핀 형태의 필터이다. 소형화를 위해 사용한 캐패시터는 표 2에서 제시한 2.489 pF 대신 2.5 pF와 4.989 pF 대신 5.0 pF의 캐패시터를 사용하였다. 이는 각 용량의 차이가 0.5 % 수준으로 시뮬레이션 결과 필터의 특성에 거의 영향을 주지 않았다. 실험에서 원하는 용량을 갖는 캐패시터를 구할 수 없는 경우, 식 (13)~(15)를 각 단 별로 다른 길이(θ_n')로 소형화된 결합 선로와 캐패시터와의 관계식으로 수정한 후, 그 역함수를 통해 원하는 캐패시터를 이용할 경우의 소형화된 결합 선로의 길이를 구해 그 길이를 조정함으로써 동일한 특성을 얻을 수 있다. 제작된 필터의 크기는 끝이 개방된 소형화되지 않은 필터와 끝이 접지된 소형화되지 않은 필터는 $15 \times 5 \text{ cm}^2$ 의 크기를 가지며, 캐패시터와 접지를 이용하여 공진기의 길이가 $\lambda/4$ 로 소형화된 헤어핀 형태의 필터는 5

$\times 4.5 \text{ cm}^2$ 의 크기를 가진다.

벡터 회로망 분석기를 이용하여 측정한 결과는 그림 8과 같다. 측정 결과 본 논문에서 제안한 기법을 적용하여 소형화한 헤어핀 필터의 특성이 소형화되지 않은 두 필터에 비해 약간 대역이 감소하였으며, 1 dB 정도의 손실이 더 발생하였다. 소형화된 필터는 공진기의 길이가 $\lambda/4$ 로 소형화되었음에도 동일한 중심 주파수를 가지며, 전체적으로 거의 비슷한 통과 대역 특성을 보였다. 또한 2차 3차 고조파가 소형화되지 않은 필터에 비해 약 60 dB 이상 억압되는 특성이 나타났다. 또한 고조파 특성이 개선되면서 더불어 고주파 영역의 차단 특성이 개선되는 것이 함께 측정되었다. 그림 8(a)를 보면 1.1 GHz에서 소형화된 필터가 소형화되지 않은 끝이 개방된 필터에 비해 약 25 dB 이상 차단 특성이 개선되었음을 알 수 있다.

V. 결 론

본 논문은 집중 소자 캐패시터와 접지를 이용하여 평행 결합 선로 필터의 새로운 소형화 기법을 제안하였다. 제안된 소형화 기법은 기존의 평행 결합 선로의 소형화 기법을 통해 소형화를 위한 캐패시터를 계산하였다. 또한 평행 결합 선로의 끝이 개방되어있는 경우와 접지되어 있는 경우 동일한 전달 특성을 갖는 점을 이용하여 평행 결합 선로의 끝을 접지하여 소형화를 위한 캐패시터의 개수를 최소화하는 방법을 제안하였다. 본 논문에서 제안한 방법은 평행 결합 선로 필터의 길이를 임의의 크기로 줄일 수 있으며, 그 방법이 매우 간단하여 기존에 제시된 방법과 달리 단지 종이와 연필만으로 원래 필터와 동일한 특성을 가지는 소형화된 평행 결합 선로 필터의 설계가 가능하다는 장점이 있다. 또한 집중 소자 캐패시터를 사용하므로 고조파 특성이 대폭 개선되며, 그로 인해 고주파 영역의 차단 특성이 개선되는 장점이 있다. 본 논문에서 제안한 기법은 공정에 집중 소자 캐패시터와 접지를 위한 추가 공정이 필요하다는 단점이 있으나, 이러한 점은 IC(Integrated Circuit) 공정에서 단점이라고 할 수 없으며, CPW를 사용한 필터에 적용할 경우 접지를 위한 공정 자체가 필요 없다.

본 논문에서 제안한 소형화 기법에 대한 검증으로 셀룰러폰 대역인 900 MHz 중심 주파수를 가지며, FBW 10 %의 3 단 Chebyshev 필터를 제작하였다. 제작된 필터는 끝이 개방된 소형화되지 않은 필터, 끝이 접지된 소형화되지 않은 필터, 그리고 본 논문에서 제안한 기법을 적용하여 공진기의 길이가 $\lambda/4$ 로 소형화된 헤어핀 형태의 필터이다. 세 가지 필터 모두 동일한 중심 주파수의 통과 대역 특성을 보였으며, 집중 소자 캐패시터와 접지를 이용해 소형화된 필터는 2차 3차 고조파가 완전히 사라졌으며, 고주파 영역 차단 특성이 개선되었다. 이를 통해 본 논문에서 제안한 기법의 타당성을 확인하였다.

본 논문에서 제안한 필터의 소형화 기법은 마이

크로스트립 형태의 전송 선로뿐만 아니라 CPW, 스트립 라인, 또는 다층 구조의 전송 선로 등 다양한 구조에 적용 가능하며, MMIC(Monolithic Microwave Integrated Circuit), LTCC(Low Temperature Co-fired Ceramic) 등의 집적회로 설계 시 미세한 필터의 설계를 가능하게 할 것으로 기대된다.

참 고 문 헌

- [1] J. -S. Hong, M. J. Lancaster, "A novel microwave periodic structure-The ladder microstrip line", *Microwave and Optical Technology Letters*, vol. 9, pp. 207-210, Jul. 1995.
- [2] J. -S. Hong, M. J. Lancaster, "Investigation of Microstrip pseudo-interdigital bandpass filters using a full-wave electromagnetic simulator", *Int. J. Microwave and Millimeter-Wave Computer-Aided Engineering*, vol. 7, pp. 231-240, May 1997.
- [3] E. G. Cristal, S. Frankel, "Design of hairpin-line and hybrid hairpin-parallel-coupled-line filters", *IEEE MIT-S, Digest*, pp. 12-13, 1971.
- [4] G. L. Matthaei, "Comb-line band-pass filters of narrow or moderate bandwidth", *The Microwave Journal*, vol. 6, pp. 82-91, Aug. 1963.
- [5] Inder Bahl, Prakash Bhartia, *Microwave Solid State Circuit Design*, John Wiley & Sons, Inc., Hoboken, New Jersey, Second Edition, 2003.
- [6] Yong-Tae Kim, Young-Ju Kim, Sun-Hyeong Kim, and Jun-Seok Park, "Design and implementation of lumped/distributed-elements direction coupler for NMT 450 SYSTEM", *2003 Asia-Pacific Microwave Conference proceedings*, vol. 1, pp. 498-501, 2003.
- [7] E. M. T. Jones, J. T. Bolljahn, "Coupled-strip-transmission-line filters and directional coupler", *IRE Trans., PGMIT-4*, vol. 2, pp. 75-81, Apr. 1956.

명 성 식



설계

2002년 2월: 숭실대학교 전자공학과 (공학사)
2004년 2월: 연세대학교 전기전자공학과 (공학석사)
2004년 3월~현재: 연세대학교 전기전자공학과 박사과정
[주 관심분야] 초고주파 집적회로

육 중 관



기전자공학과 교수

[주 관심분야] MEMS, 초고주파 회로, EMI/EMC

1987년 2월: 연세대학교 전자공학과 (공학사)
1989년 2월: 연세대학교 전자공학과 (공학석사)
1996년 2월: University of Michigan (공학박사)
2000년 2월~현재: 연세대학교 전