

고온 초전도체를 이용한 협대역 대역통과 여파기 설계

정희원 윤형국*, 윤영중*, 김성민**, 이상렬**

A Desing of Narrowband Bandpass Filter using High-Temperature Superconductor

Hyung-Kuk Yoon*, Young-Joong Yoon*, Sung-Min Kim**, Sang-Yeol Lee** *Regular Members*

요 약

본 논문에서는 위성통신용 멀티플렉서에 사용 가능한 협대역 대역통과 여파기를 설계하기 위해 협대역 특성을 가지며 삽입 손실 및 소자의 크기를 최소화시킬 수 있는 고온 초전도체를 이용하여 hairpin-line 및 hybrid hairpin-line/parallel-coupled-line 여파기를 설계하고 실험을 통해 그 특성을 고찰하였다. Hairpin-line만으로 설계된 대역통과 여파기는 surface wave에 의한 spurious mode가 발생한다는 단점이 있지만 본 논문에서 제안된 hybrid hairpin-line/parallel-coupled-line 여파기를 사용하여 spurious mode를 줄일 수 있다. 동작 주파수가 14.25 GHz인 협대역 대역통과 여파기는 고온 초전도체를 이용하여 동일한 3극에서 일반금속 마이크로스트립 여파기보다 더 좁은 1%미만의 협대역과 3 dB이상 적은 삽입손실을 갖도록 하였으며 따라서 같은 성능을 보이코자 할 때 그 크기를 최소화시킬 수 있도록 설계하였다.

Abstract

In this thesis, a narrowband bandpass filter using HTS is proposed for the multiplexer of the satellite communication subsystems. The proposed structure using HTS provides the narrower band and the lower insertion loss characteristics than the conventional parallel-coupled-line bandpass filter. The filter structure using hairpin-line only causes the spurious modes due to the surface waves. But these modes can be lessened by using the hybrid hairpin-line/parallel-coupled-line proposed in this thesis. The narrowband bandpass filters using HTS at the operating frequency of 14.25 GHz are fabricated to have the narrow bandwidth less 1% and the insertion loss less 3dB in comparison with the normal metal microstrip filter with the same three poles. The experimental results show that the filter using HTS has the characteristics of the narrower bandwidth and less insertion loss and can be fabricated with more compact size in comparison with the bandpass filter using normal metal.

* 연세대학교 전기·컴퓨터공학과 마이크로파 및 안테나 연구실(yjyoon@bubble.yonsei.ac.kr)

** 연세대학교 전기·컴퓨터공학과 레이저공학 연구실(sylee@bubble.yonsei.ac.kr)

논문번호 : 99119-0328, 접수일자 : 1999년 3월 28일

※ 본 연구는 한국과학재단 특정기초 지원(과제번호:96-0102-08-01-3)에 의한 연구 결과의 일부입니다.

I. 서론

차세대를 겨냥한 위성통신은 초고속 정보통신망의 구축과 함께 그 중요성이 매우 높아지고 있으며 그에 따라 RF 및 마이크로파 통신시스템을 구성하는 핵심소자의 소형화 및 고성능화 연구가 절실히 요구되고 있다. 소자의 소형화 및 경량화를 이루기 위해서 마이크로파 소자를 구성하는 전송선로로서 마이크로스트립 선로를 이용한 소자에 대한 연구가 활발히 진행되어 왔으며, 1911년 네덜란드의 과학자 온네스(K. Onnes)^[1]가 초전도 현상을 발견한 이후에 마이크로스트립 선로와 비슷한 장점을 지니고 있지만 일반금속 마이크로스트립 소자에 비해 높은 Q값과 적은 삽입 손실을 보이는 초전도 마이크로스트립 소자에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다.^[2] 마이크로파 통신소자 개발을 위한 초전도체의 도입은 아직은 제작이 어렵고 가격 경쟁 면에서 뒤떨어지는 단점이 있기는 하지만, 기존의 일반 금속 통신소자에 비해 초전도체가 갖는 무저항 특성에 의한 저손실 특성 및 매우 낮은 마이크로파 표면저항, 일반 마이크로스트립 공진기나 여파기에 비해 매우 높은 Q값 등의 이점으로 인하여 통신시스템의 성능을 매우 향상시켜 줄 것으로 예상되며, 특히 위성에 탑재될 때에는 우주 공간의 극저온으로 인해 냉각 장치가 필요치 않다는 매우 큰 장점을 지니고 있어 마이크로스트립 소자가 가지는 소형 및 경량화의 특성을 충분히 살려줄 수 있다는 장점이 있다.^{[3][4]} 따라서 본 연구에서는 위성 통신용 멀티플렉서 등에 쓰일 수 있는, 14.25 GHz의 중심 주파수에서 1%미만의 협대역 특성을 갖고 같은 극수로 제작될 때 삽입손실 특성이 일반금속 마이크로스트립 소자에 비해 훨씬 우수한 고온 초전도체 대역통과 여파기를 설계, 제작하였으며, 대역통과 여파기의 설계에 가장 일반적으로 쓰이는 평행결합선방식의 여파기와, 그보다 더 소형으로 제작이 가능하고 같은 극수로 설계될 때 더 성능이 우수한 hairpin-line 여파기, 그리고 hairpin-line 여파기가 가지고 있는 표면파에 의한 spurious mode 발생의 단점을 극복할 수 있는 hybrid hairpin-line/half-wave parallel-coupled-line 여파기 등을 설계, 제작하였다

II. Hairpin-line을 이용한 대역통과 여파기

Hairpin-line 여파기는 그림 1에서 나타낸 것처럼 일반적인 평행결합선 공진 회로에서 반파장 선로를 구부림으로 해서 얻어질 수 있다. 따라서 그 크기면에서 평행결합선 방식의 여파기보다 소형으로 제작될 수 있다는 장점이 있으나 표면파에 의한 spurious mode가 발생한다는 단점을 가지고 있다

Hairpin-line 여파기에서 여파기를 구성하는 공진기의 수는 원하는 대역폭 및 skirt특성에 의해 결정되어 질 수 있으며, N을 low-pass prototype 여파기의 차수라고 한다면 hairpin-line 여파기는 2N+2개의 $\lambda_g/4$ 평행결합 선로로 구성되어진다.

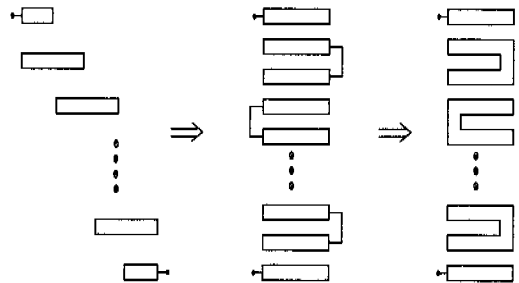


그림 1 Hairpin-line 여파기의 형태

Hairpin-line 여파기를 설계하는 데 있어 필요한 변수들을 정의하면 다음과 같다.^[5]

- N : low-pass prototype filter의 차수
- g_i : low-pass prototype filter의 성분값($i=0,1,2, \dots, N+1$)
- ω_1' : low-pass prototype filter의 차단 주파수
- L_n : 단일 마이크로스트립의 자기 인덕턴스값
- L_0 : 마이크로스트립간의 상호 인덕턴스값

$$\Delta f = 2 \frac{f_2 - f_1}{f_2 + f_1} = \frac{f_2 - f_1}{f_0} \tag{1}$$

$$\theta_1 = \frac{\pi}{2} \left(1 - \frac{\Delta f}{2}\right) \tag{2}$$

$$\tau = \frac{1}{2} \tan \theta_1 \tag{3}$$

$$G_i = \frac{1}{\sqrt{\omega_1 g_{i-1} g_i}}, \text{ for } i=1 \text{ and } N+1 \tag{4}$$

$$G_i = \frac{1}{\omega_i \sqrt{g_{i-1} g_i}}, \text{ for } i=2, 3, \dots, N \quad (5)$$

$$cp = -10 \log_{10} \frac{L_{ij}}{\sqrt{L_{ii} L_{jj}}}, \text{ for } j=i+1 \quad (6)$$

$$k = 10^{-|cp/10|} = \frac{L_{ij}}{\sqrt{L_{ii} L_{jj}}}, \text{ for } j=i+1 \quad (7)$$

h : 여파기 내부의 immittance level을 조정하며 1보다 작은 임의의 양의 값을 갖는 변수

여기서 식(6)은 단일 hairpin-line 공진기를 구성하는 선로사이의 커플링 정도를 decibel값으로 나타내는 변수로서 결과적으로는 공진기 사이의 거리를 나타내며 인접한 hairpin-line 공진기와는 관련이 없다. 위의 변수 값들로부터 식(8)부터 식(13)까지를 이용하여 실제 hairpin-line 여파기를 설계하는데 필요한 인덕턴스 L행렬의 성분들을 구할 수 있다. 여기서 P는 2이고 i가 1부터 N까지의 자연수일 때,

$$L_{pp} = \frac{A_{22}^{(i)} + A_{11}^{(i+1)}}{2(1-k)} \quad (8)$$

$$L_{p+1, p+1} = L_{pp} \quad (9)$$

$$L_{11} = A_{11}^{(i)} \quad (10)$$

$$L_{2N+2, 2N+2} = A_{11}^{(N+1)} \quad (11)$$

P가 2i-1이고 i는 1부터 N+1까지의 자연수일 때,

$$L_{p, p+1} = A_{12}^{(i)} \quad (12)$$

P가 2이고 i는 1부터 N까지의 자연수일 때,

$$L_{p, p+1} = kL_{pp} \quad (13)$$

이며, i가 1과 N+1일 때는

$$A_{11}^{(i)} = 1 \quad (14)$$

$$A_{12}^{(i)} = \sqrt{h} G_i \quad (15)$$

이며, i가 2부터 N까지의 자연수일 때는

$$A_{22}^{(i)} = M [G_i^2 + \tau] \quad (16)$$

$$A_{11}^{(i)} = h \tau \quad (17)$$

$$A_{12}^{(i)} = h G_i \sin \theta_1 \quad (18)$$

이다. 식(1)으로부터 식(18)까지의 식들로부터 인덕턴스 L 행렬을 구하면 식(19)과 같다.

$$L_{ij} = l_{ij} / (Z_A v^{-1}) = \begin{bmatrix} L_{11} & L_{12} & 0 & \cdot & \cdot & 0 \\ L_{12} & L_{22} & L_{23} & 0 & & \\ 0 & L_{23} & L_{33} & L_{34} & \cdot & 0 \\ \cdot & 0 & L_{34} & L_{44} & L_{45} & \\ \cdot & & & \cdot & & \\ \cdot & & & & & \\ \cdot & & & & & L_{2N+2, 2N+2} \end{bmatrix} \quad (19)$$

여기서

v : 매질에서의 전파 속도

l_{ij} : i와 j번째 도체의 단위길이당 자기 또는 상호 인덕턴스값

Z_A : source 임피던스

이다. 위 식에서 구한 인덕턴스 행렬로부터 정현화된 캐패시턴스 행렬을 식(20)에 의하여 구할 수 있다.

$$[C] = [L]^{-1} \quad (20)$$

$$C_{ij} = c_{ij} / (Y_A v^{-1}) \quad (21)$$

여기서

v : 매질에서의 전파 속도

C_{ij} : i 와 j 번째 도체의 단위길이당 자기 또는 상호 캐패시턴스값

Y_A : source 어드미턴스

이다. 여기서 C_{ij} 는 식(22)에 의해서 C_{ij}/ϵ 으로 변환되어지고

$$C_{ij}/\epsilon = \frac{376.7}{\sqrt{\epsilon_r}} Y_A C_{ij} \quad (22)$$

이다. 식(22)에서 구한 C_{ij}/ϵ 값으로부터 [6]의 식을 참조하여 실제 결합선로의 크기를 구할 수 있다. 여기서 만일 협대역 여파기를 구현하고자 한다면 행렬의 diagonal 성분과 subdiagonal 성분만이 의미를 갖게 되고 그 외의 행렬 성분은 상대적으로 작게 되어 무시할 수 있게 된다.

다단으로 결합된 hairpin-line 결합구조는 그림 1에서 보여지듯이 interdigital line 결합구조로 등가 화시킬 수 있기 때문에 그림 2에서 보여지는 N 개의 마이크로스트립 선로가 평행 결합된 구조로부터 마이크로스트립 선로의 폭과 마이크로스트립 선로 사이의 간격을 구할 수 있다.^[6]

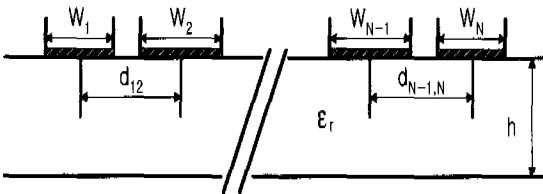
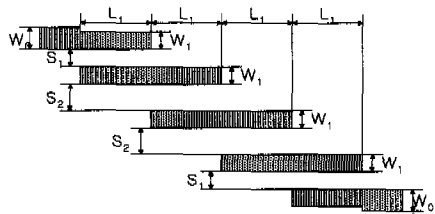


그림 2. N 개의 마이크로스트립 선로의 결합 형태

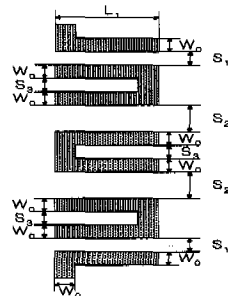
Hybrid hairpin-line/half-wave parallel-coupled-line 여파기는 hairpin-line과 parallel-coupled-line을 같이 연결하여 여파기를 형성함으로써 hairpin-line 여파기에서 발생하는 표면파에 의한 spurious mode를 줄일 수 있다. L 행렬로부터 cp 값이 결정되면 여파기를 구성하는 모든 공진기들이 같은 cp 값을 갖게 되고, 만일 cp 값이 무한대의 값을 갖게 되면 공진기 사이의 커플링이 없다는 것을 의미하며 이에 해당되는 두 개의 공진기는 하나의 linear half-wave line 공진기로 변환된다. 따라서 설계하고자 하는 여파기의 형태를 결정하고 나서

공진기를 decoupling 해주면 Hybrid hairpin-line/half-wave parallel-coupled-line 여파기를 설계할 수 있다.

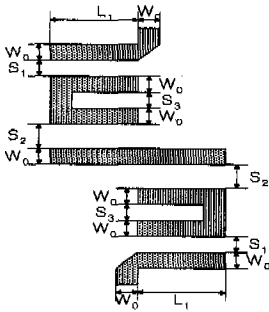
그림 3에는 본 논문에서 설계된 여파기의 형태들을 나타내었고 그 제원은 표 1과 표 2에 나타내었다. 고온 초전도체의 측정 특성상 측정용 cavity와 기판의 크기가 같아야 하기 때문에 1×1 (cm)의 크기에 맞추기 위하여 3단으로 설계를 하였고 3단으로 설계할 때 얻을 수 있는 최대 협대역으로 설계하여 약 0.5%-1%의 대역폭을 갖도록 설계하였다. 일반금속 여파기의 경우는 고온 초전도 여파기와 그 특성을 비교하기 위해 같은 gap size를 갖도록 설계하였다. 그림 4와 그림 5에는 설계된 일반금속 및 고온 초전도 여파기의 S-parameter 응답특성 시뮬레이션 결과를 나타내었다. Hairpin-line을 사용한 여파기는 같은 극수로 설계될 때 일반적인 평행결합선 방식의 여파기에 비해 소형으로 제작될 수 있다는 장점이 있으며 소형으로 제작되어지면서도 더 협대역 특성을 나타내는 것이 시뮬레이션으로 확인되었다. 그림 5에서 보여지듯이 일반금속으로 설계되어진 여파기보다 고온 초전도체로 설계된 여파기가 더 우수한 성능을 나타내는 것을 알 수 있고 평행결합선 방식의 여파기보다 더 우수한 협대역 특성과 적은 삽입 손실을 나타내는 것을 알 수 있다.



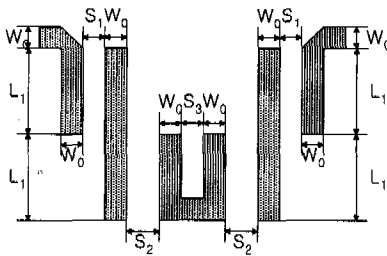
(a) 평행결합선로 여파기



(b) Hairpin-line 여파기



(c) Hybrid hairpin-line/half-wave parallel-coupled-line 여파기 (Hybrid(A))



(d) Hybrid hairpin-line/half-wave parallel-coupled-line 여파기 (Hybrid(B))

그림 3. 제작된 여파기의 Layout

표 1. 고온 초전도체 여파기의 설계값

단위(mm)

	W_0	W_1	L_1	S_1	S_2	S_3
Parallel	0.5	0.4	1.92	0.59	3.8	
Hairpin	0.5		2.08	0.5	1.6	0.44
Hybrid(A)	0.5		1.94	0.59	1	0.683
Hybrid(B)	0.5		1.89	0.6	1.55	0.9

표 2. 일반금속 마이크로스트립 여파기의 설계값

단위(mm)

	W_0	W_1	L_1	S_1	S_2	S_3
Parallel	0.596	0.5	1.81	0.59	3.8	
Hairpin	0.596		1.99	0.5	1.6	0.44
Hybrid(A)	0.596		1.83	0.59	1	0.683
Hybrid(B)	0.596		1.78	0.6	1.55	0.9

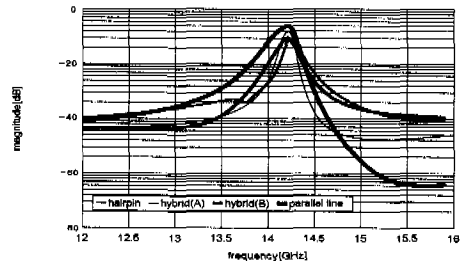


그림 4. 일반금속 여파기의 simulation 결과

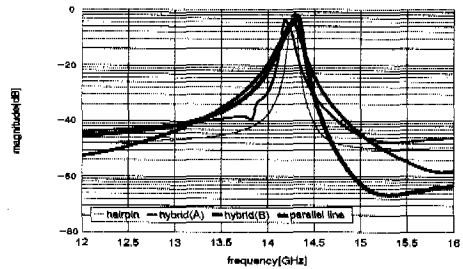
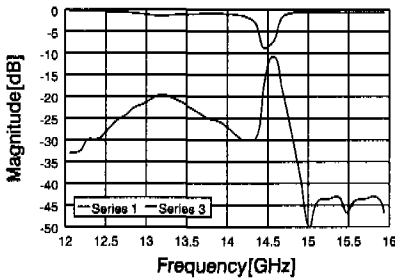


그림 5. HTS 여파기의 simulation 결과

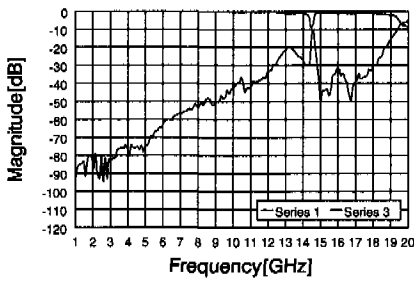
III. 실험 및 결과

본 논문에서 제작된 여파기의 중심주파수는 14.25 GHz이며 대역폭은 협대역으로 설정하여 고온 초전도체 여파기의 경우 1% 미만의 대역폭을 가지도록 설계되었고, 3dB 미만의 삽입손실을 갖는 고온 초전도체 여파기와 그와 같은 spec.을 갖는 일반금속 여파기를 각각 설계, 제작하여 실험하였다. 고온 초전도체는 PLD (Pulsed Laser Deposition) 방법으로 MgO기판 위에 YBCO를 증착하여 제작하였다. 그림 6부터 그림 9까지는 고온 초전도체와 일반금속 여파기의 각각의 실험결과를 나타내었다. 그림 6과 그림 7의 hairpin-line 여파기의 실험 결과를 비교해 보면 고온 초전도체 여파기가 삽입손실 면에서 3 dB 이상 우수하고 3 dB 대역폭 면에서도 일반금속 여파기가 158 MHz, 고온 초전도체 여파기가 62.5 MHz로서 고온 초전도체 여파기가 2배 이상의 협대역을 나타낸다는 것을 알 수 있다. 광대역 특성에서도 hairpin-line 여파기의 spurious mode 특성을 볼 수 있다. 그림 8과 그림 9는 hybrid hairpin-line/half-wave parallel-coupled-line 여파기의 실험결과를 나타내었다. 그림 8과 그림 9의 hybrid(B)

여파기의 광대역 특성면에서는, 삽입된 parallel-line의 증가로 인하여 hairpin-line 여파기에 비해 spurious mode 특성이 많이 감소한 것을 볼 수 있고 hybrid(B) 형태의 고은 초전도체 여파기와 일반금속 여파기의 3 dB 대역폭은 각각 178.6 MHz과 333.3 MHz로 고은 초전도체 여파기가 역시 2배 가까운 협대역을 나타낸다는 것을 확인할 수 있었다. 그림 9의 고은 초전도체 hybrid(B) 여파기의 삽입손실은 -3.7 dB로, 같은 spec.으로 설계된 일반금속 여파기의 삽입손실 -12 dB보다 월등히 우수한 특성을 보이는 것을 볼 수 있다. 표 3에는 본 논문에서 제작된 여파기들의 simulation 및 측정결과를 나타내었다.

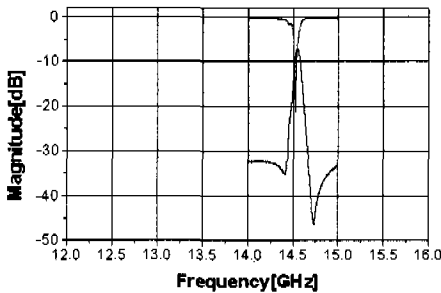


(a) 협대역 특성 실험결과

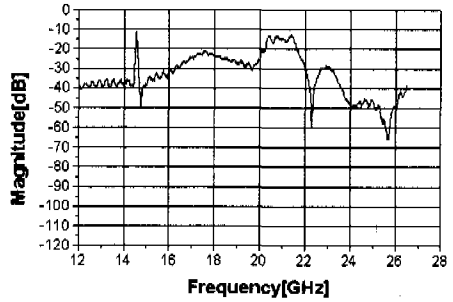


(b) 광대역 특성 실험결과

그림 6. 일반금속 hairpin-line 여파기 s-parameter 응답특성 실험결과

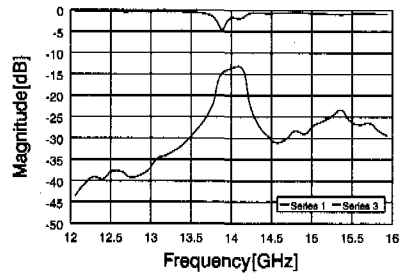


(a) 협대역 특성 실험결과

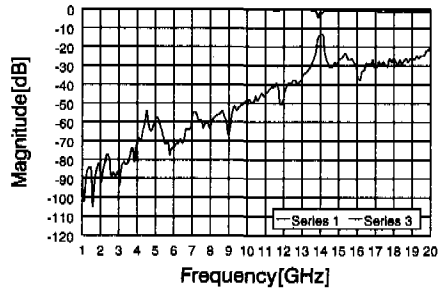


(b) 광대역 특성 실험결과

그림 7. 고은 초전도체 hairpin-line 여파기 s-parameter 응답특성 실험결과

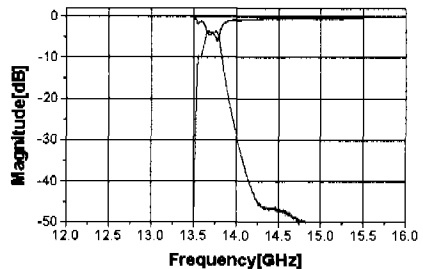


(a) 협대역 특성 실험결과

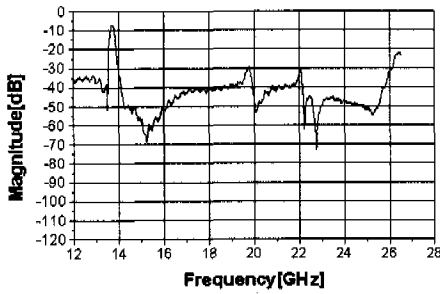


(b) 광대역 특성 실험결과

그림 8. 일반금속 hybrid hairpin-line/half-wave parallel-coupled-line 여파기 s-parameter 응답특성 실험결과(Hybrid(B))



(a) 협대역 특성 실험결과



(b) 광대역 특성 실험결과

그림 9. 고온 초전도체 hybrid hairpin-line/half-wave parallel-coupled-line 여파기 s-parameter 응답 특성 실험결과(Hybrid(B))

표 3. 제작된 여파기들의 simulation 및 측정결과

Type	Insertion Loss(dB)				3dB Bandwidth(%)			
	YBCO		Copper		YBCO		Copper	
	Sim	Exp	Sim	Exp	Sim	Exp	Sim	Exp
Parallel	-2.26	-5.01	-6	-9.7	0.73	1.27	1.54	1.56
Hairpin	-0.7	-7.1	-8.0	-10.7	0.38	0.4	0.87	1.044
Hybrid(A)	-3.0	-11.6	-11.3	-10.3	0.49	1.4	1.16	2.367
Hybrid(B)	-4.4	-3.7	-10.3	-13.1	0.86	1.78	1.16	2.397

IV. 결론

본 논문에서는 위성통신에 사용하는 대역인 14.25GHz 대역에서 1% 미만의 협대역을 갖는 대역통과 여파기를 기존의 평행결합선 방식의 여파기에 비해 더 소형화가 가능한 hairpin-line 여파기와 hybrid hairpin-line/half-wave parallel-coupled-line 여파기로 구현하고 고온 초전도체를 사용하여 제작하였다. 시뮬레이션과 실험을 통해 hairpin-line 여파기와 hybrid hairpin-line/half-wave parallel-coupled-line 여파기가 같은 극수를 가질 때 기존의 평행결합선 방식의 여파기에 비해 같은 성능을 가지면서 더 소형으로 제작될 수 있다는 사실을 확인했으며, hybrid hairpin-line/half-wave parallel-coupled-line 여파기가 hairpin-line 구조에 의한 spurious mode 특성을 감소시키는 것도 확인하였다. 또한, 일반 금속 여파기와 고온 초전도체 여파기의 비교, 분석을 통해 일반금속에

비해 고온 초전도체 여파기가 갖는 협대역 특성과 적은 삽입손실을 확인할 수 있었다. 본 논문에서 제작된 여파기는 위성 통신용 멀티플렉서나 안테나 등에도 적용이 가능하다고 생각되며 이동 통신 기지국용 system에도 사용 가능하다.

참고 문헌

- [1] Onnes, H. K., "The Resistance of Pure Mercury at Helium Temperatures," *Leiden Comm.*, 120b, 1911.
- [2] Seok Kil Han, Yeon-Su Ha, Jeha Kim, and Kwang-Yong Kang, "Characteristics of High Power Capability for High Temperature Superconducting Microwave Multiplexer," *APMC-97*, pp. 109-112, 1997.
- [3] Salvador H. Talisa, Michael A. Janocko, Charles Moskowitz, John Talvacchio, J. F. Billing, R. Brown, Daniel C. Buck, C. K. Jones, Bruce R. McAvoy, George R. Wagner, and D. H. Watt, "Low-and High -Temperature Superconducting Microwave Filters" *IEEE Trans. Microwave Theory Tech.*, Vol. 39, pp. 1448-1454, Sept. 1991.
- [4] Charles Wilker, Zhi-Yuan Shen, Philip Pang, Face, William L. Holstein, Amy L. Matthews, and Daniel B. Laubacher, "5GHz High-Temperature-Superconductor Resonators with High Q and Low Power Dependence up to 90K," *IEEE Trans. Microwave Theory Tech.*, Vol. 39, No. 9, pp. 1462-1466, Sept. 1991.
- [5] Edward G. Cristal and Sidney Frankel, "Hairpin-line and hybrid hairpin-line/half-wave parallel-coupled-line filter", *IEEE Trans. Microwave Theory Tech.*, Vol. 20, No. 11, pp. 719-728. 1972.
- [6] Florian Sellberg, "Simple Determination of All Capacitances for a Set of Parallel Microstrip Lines," *IEEE Trans. Microwave Theory Tech.*, Vol. 46, No. 2, Feb. 1998, pp. 195-198.

윤 형 국(Hyung-Kuk Yoon) 정회원



1996년 2월 : 연세대학교 전파
공학과 졸업(공학사)

1998년 8월 : 연세대학교 대학원
전파공학과 졸업
(공학석사)

1998년-현재 : 연세대학교 대학원
전기·컴퓨터공학과
박사과정

<주관심 분야> 고온 초전도체 소자, 마이크로스
트립 안테나

김 성 민(Sung-Min Kim) 정회원



1998년 8월 : 수원대학교 전자공
학과 졸업(공학사)

1998년-현재 : 연세대학교 대학원
전기·컴퓨터공학과
석사과정

<주관심 분야> 전기재료, 레이저응용

윤 영 중(Young-Joong Yoon) 정회원

한국통신학회 논문지 제 24권 제 3A호 참조

이 상 렬(Sang-Leol Lee) 정회원



1986년 : 연세대학교전기공학과
졸업(공학사)

1990년 : 뉴욕주립대 Buffalo 전기
및 컴퓨터공학과 졸업
(공학석사)

1992년 : 뉴욕주립대 Buffalo 전기
및 컴퓨터공학과 졸업
(공학박사)

1993-1995년 : ETRI senior researcher

1995-현재 : 연세대학교 기계전자공학부 조교수

<주관심 분야> 전기재료, 레이저 응용