

마이크로파 응용을 위한 고온초전도 필터 서브-시스템

강광용 · 김현탁 · 박민환

한국전자통신연구원
반도체 · 원천기술연구소

요 약

고온초전도 필터의 무부하 양호도 값(unloaded Q-value)이 매우 높기 때문에, 삽입손실의 증가없이 극수(pole number)를 크게 증가시킨 대역통과 및 저역통과 필터를 제작할 수 있다(현재, 70-pole 대역통과 필터가 개발). 초전도 필터는 급준한 스킷 특성과 차단대역에 대한 양호한 감쇠수준을 얻을 수 있고, 집중상수형 공진기(lumped element resonators)를 사용하거나 지연파(slow wave) 특성을 활용하면 소형화가 가능하다.

다성분계인 산화물(oxide) 고온초전체를 에피택셜 박막 및 대면적(4-인치급) 박막으로 제조함으로써 다양한 구조의 평면형(planar type) 필터 개발뿐만 아니라, 전력처리력(power handling capability)도 향상시킬 수 있게 되었다.

최근에 고온초전도 평면형 필터는 반도체 저잡음 증폭기(GaAs-based LNA), 초소형 냉각기(mini-cooler)와 집적되어 서브-시스템화 되었다. 그리고 이동통신 기지국용 수신전치부(receiver front-end) 서브-시스템으로 발전하여 통신시스템의 잡음수준과 인접한 주파수 대역에 의한 전파간섭을 현저히 줄일 수 있고, 동시에 주파수 이용효율의 향상과 통신시스템의 용량증대도 가능케 하고 있다.

본고에서는 고온초전도체 필터의 원리, 종류 및 설계법, 그리고 초전도 필터의 특징과 상품화의 요구사항에 대해 알아보고, 이동통신 기지국 수신 전치부용으로 사용되고 있는 고온초전도 필터 시스템

개발과 관련된 연구 및 시장 동향의 특징들을 살펴보고자 한다.

Abstract

Since unloaded Q-value of a high-temperature superconductor(HTS) filter is very high, a bandpass filter(BPF) and a lowpass filter(LPF) with an increase of pole numbers can be fabricated without an increase of an insertion loss(IL) ; recently a 70-pole BPF is developed in USA. They have an abrupt skirt property and an excellent attenuation level for out-of band. Moreover, they can be miniaturized when lumped element resonators or the slow-wave characteristic are used. Technology of fabricating a HTS epitaxial film as well as a film of a 4 inch area also makes the planar type filter with a various structure and an enhanced power handling capability possible.

Recently, the HTS filter subsystems composed of a planar-type HTS filters, a GaAs-based LNA and a mini-cryocooler are developed. The extended receiver front-end subsystems for mobile radio communications decrease the noise-figure level of the communication system and the frequency interference interacted adjacent bands, and increase the efficiency of frequency and the capacity of communication system.

In this paper, theory for developing the HTS filter, its kinds, its design rules, its characteristics are reviewed. The feature of the research and market trends related to the HTS filter systems for the receiver front-end subsystem of mobile base station are surveyed.

I. 서 론

고온초전도체의 전자응용에서 가장 먼저 실용화가 기대되는 분야가 마이크로파 수동부품 개발분야이며, 특히 고온초전도 필터는 저 손실, 고주파수 선택성, 높은 帶域外(out-of-band) 遮斷特性 등 우수한 특징을 보여주고 있다. 이러한 특징을 살려서 이동통신 기지국용 대역통과 필터가 미국에서는 이미 실용화되고 있으며 1000세트 이상의 초전도 필터시스템이 현재 가동되고 있고, 기존의 필터시스템을 초전도 필터 시스템으로 교체해가는 사업도 진행되고 있다. 초전도 응용연구가 핵심 전자부품을 전부 실용화시키지 못했지만, 초전도양자간섭소자(SQUID)에 이어서 초전도필터가 전자시장에 출현하였다는 것은 초전도 분야의 연구자에게는 반가운 소식이 아닐 수 없다^{[1]-[3]}.

미국, 일본 및 유럽 등에서 무선이동통신 부품의 고성능화를 위하여 공진기, 필터, 안테나 및 듀플렉서(공용기) 등 초전도 수동소자의 개발과 다성분 산화물(oxide) 고온초전도체의 에피택셜 박막개발에서 괄목할 만한 성과를 올렸다. 그러나 이동통신의 고성능화를 위한 수동부품의 개발보다도 통신방식(예, CDMA 등)의 개발이 더 중요시되었기 때문에, '90년도 초반에 고온초전도 마이크로파 수동부품의 개발연구는 잠시 주춤해지기도 했다. 그런데 미국 해군성(Naval Research Lab.)이 우주통신에 고온초전도 소자를 이용하기 위하여 추진한 HTSSE(high temperature superconductivity space experiment) 프

로젝트 덕분에 주요국에서 다시 초전도 수동부품 연구를 심도있게 연구하게 됨과 동시에 상당한 기술력을 배양하게 되었다. 이 무렵에 무선이동통신 부품과 휴대전화 단말기가 폭발적인 증가세로 이어지면서 이동통신 기지국의 대역분리와 잡음저감을 위한 초고성능 필터의 필요성이 제고되고, 고온초전도 마이크로파 필터 기술의 연구개발 방향은 무선이동통신 기지국으로 옮겨지게 되었다^{[4]-[6]}.

최근에 미국, 일본, 한국 및 중국 등 각국에 보급된 휴대전화기의 대수가 1억대를 넘어서고, 고품질 통신서비스를 시작할 무렵에 크게 문제삼지 않았던 여러 가지 상황이 전개되기 시작하였다. 예를 들어, 의료기기 등 미약 신호를 이용하는 기기에 대한 방해 신호의 문제, 인체에 대한 전자파 영향의 문제, 다른 시스템간(특히, 국가간)의 무리없는 이용문제(국제 로밍 포함), 그리고 단말기 통화시간의 연장 과 통화 커버리지의 확대에 대한 요구 등 이용자가 증가하면 증가할수록 기술적 문제 등이 증가되고 중요시되기 시작하였다. 더 나아가 市街地에서의 기지국 설치장소와 설치비용의 문제, 산간지에서 효율 좋은 기지국 배치, 또는 무선 멀티미디어 통신시스템에 있어서 디지털 전송에 의한 고품질 정보의 이용을 위한 통화 품질 향상(고감도화) 등의 문제해결은 향후의 무선이동통신 시스템(3 G, 4 G 등)의 개발을 위해서 매우 중요한 요인으로 부각되고 있다^{[7]-[9]}.

본 논문에서는 초전도 필터시스템의 마이크로파 응용이라는 제목으로 다음과 같은 주제들을 논의하고자 한다.

- (1) 고온초전도 필터의 종류와 설계법(개요)
- (2) 고온초전도 필터의 소형화 및 고전력화 연구 동향
- (3) 고온초전도 필터시스템의 특징과 개발동향 (소형냉각기 포함)

II. 고온초전도 필터의 종류와 설계법(개요)

2-1 필터의 종류

고온초전도 평면형 마이크로파 필터는 스트립 선로, 마이크로스트립 선로, 코플레나 선로 및 슬롯라인 선로 등을 응용하여 제작되며, 원리적으로는 종래의 기법을 그대로 설계에 응용할 수 있다. 현재 검토, 개발 및 활용 중에 있는 필터로서는 무선이동통신 기지국용 대역통과 필터(bandpass filter: BPF)가 주류를 이루고 있는 관계로, 여기에서는 대역통과 필터에 국한하여 논의하고자 한다^[10].

대역통과 필터는 크게 ① Chebyshev type, ② Maximally Flat type, ③ Elliptic Function type의 세 가지로 분류되며, 그중에서 실용화된 기지국용 초전도 필터는 체비셰프형이 대부분이다. 그리고 마이크로파 평면형 대역통과 필터는 集中常數線路形과 分布常數線路形으로 나누어질 수 있지만, 상용화되고 있는 고온초전도 필터는 분포상수선로형 필터로 개발되고 있으므로 분포상수선로형 Chebyshev 필터에 대하여 기술한다.

여기서 지적할 점은 평면형 필터는 분포상수선로형 공진기로 구성되기 때문에 현재의 이동통신 부품으로 응용하기에는 필터의 크기와 무게가 크다는 단점이 있다. 원래 평면구조는 도파관과 같은 입체구조와 비교할 때 대폭적인 소형화와 경량화가 가능하지만, 동시에 통신부품 시장에서 상당한 성능향상의 요구를 받고 있다. 또한 평면형 필터개발에서 대전력화와 대역외(저지대역) 특성개선 요구도 거세지고 있으므로, 회로설계자는 다양한 새로운 공진기 구조와 설계방식을 개발하여야 한다.

2-2 필터의 근원적인 설계법(개요)

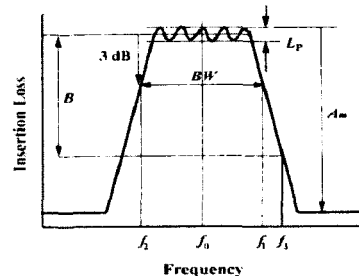
필터의 설계이론은 주로 집중상수 LC(Inductance L : 코일, Capacitance C : 콘덴서)를 이용해서 구성하기 때문에, 분포상수선로형 공진기는 일반적으로 중심주파수에서 LC 집중상수 회로에 近似시킨다.

즉, 일정한 LC회로를 근사적으로 표현하는 분포상수회로에는 다양한 가능성이 내포되어 있다.

초전도 필터는 통상 $\lambda/2$ (λ : 파장)를 가지는 공진기를 직렬로 배열한 분포상수 회로로 구성되는데, 회로 패턴(pattern)을 결정하는 방법은 아래와 같다^[11].

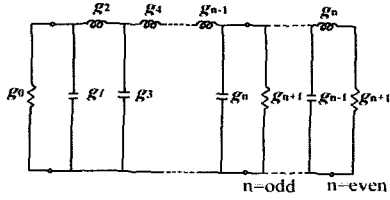
필터를 설계할 경우, 먼저 구현하고자 하는 필터의 특징을 결정해야 한다. 필터의 특성은 [그림 1]에 나타낸 바와 같이 중심주파수 f_0 (GHz), Ripple L_p (dB), 대역폭 BW(GHz), 감쇄특성 $B(f)$ 에 대한 감쇄량 BdB, 대역외 차단특성 A_m 등의 파라메타(parameter: 변수)로서 표시된다. 이 변수들을 우선 결정하고, 원하는 필터의 등가회로(L, C)를 결정한다. 필터의 특성에서 직접 대역통과 필터의 각 L, C 값을 數値解析의으로 산출하는 것은 매우 어렵다. 따라서 우선 프로토타입(prototype) 저역통과 필터(lowpass filter)의 등가회로를 구하고, 여기서 구해진 L, C 변수값을 이용하여 대역통과 필터로 변환하는 방법이 주로 이용된다.

[그림 2]에 L, C 변수로 표시된 프로토타입 대역통과 필터의 등가회로를 나타내었다. 실제의 경우, 그림의 등가회로를 50Ω 로 규격화했던 값이 사용된다. 그림에 나타낸 g 값이 얻어지면 대역통과 필터로 변환하는 것은 아주 쉽다. 그리고 g 를 구하는 공식

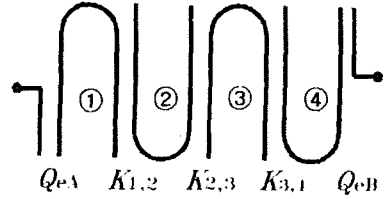


[그림 1] 필터와 관련된 주요 파라메타

f_0 : center frequency, $f_1 \sim f_2 = BW$: bandwidth, A_m : cutoff characteristics of out-of-band, L_p : passband ripple)



[그림 2] 저역통과 필터의 등가회로



[그림 3] 4-단 헤어핀 필터의 개요도와 결합계수

을 아래에 나타내었다. 50 Ω으로 규격화했기 때문에 전원의 내부 임피던스(이것은 필터의 입력 임피던스와 같게 함)는 1로 한다.

따라서,

$$g_0 = 1 \quad (1)$$

$$g_1 = \frac{2a_1}{\gamma} \quad (2)$$

$$g_{k-1} g_k = \frac{4 \sin\left(\frac{(2k-3)\pi}{2n}\right) \sin\left(\frac{(2k-1)\pi}{2n}\right)}{\gamma^2 + \sin^2\left(\frac{(k-1)\pi}{n}\right)} \quad (k = 2, 3, \dots, n) \quad (3)$$

$$g_{(n+1)} = 1 \quad (n \text{은 홀수}), \quad (4)$$

$$g_{n+1} = \tanh \frac{\beta}{4} \quad (n \text{은 짝수})$$

$$\beta = \ln\left(\coth \frac{A_m}{17.37}\right) \quad (5)$$

$$\gamma = \sinh \frac{\beta}{2n} \quad (6)$$

또한, 대역의 차단특성(계수) A_m 은 통과대역(passband)의 電壓定在波比 VSWR 과 통과 대역 리플(ripple) L_p 에 의해 다음 식으로 구해진다.

$$A_m = -10 \log(1 - 10^{-L_p}) \quad (7)$$

$$L_p = -10 \log\left(\frac{VSWR-1}{VSWR+1}\right)^2 \quad (8)$$

g 값이 결정되면, 이 값으로부터 $\lambda/2$ 를 가지는 공진기를 배열한 패턴(pattern)을 결정한다. 등가회로 g 값을 사용하고, 평면형 필터로 변환하는 방법을 4-단 hairpin bandpass filter를 예를 들어 설명하였다.

[그림 3]에 표시된 바와 같이 4개의 헤어핀 공진

기에 외부 給電線이 연결되어 있는 필터를 생각하자. 헤어핀 공진기의 중심 주파수는 f_0 , 선로의 특성 임피던스는 50 Ω이 되도록 결정한다. i 번째와 $i+1$ 번째 공진기 사이의 結合係數를 $K_{i, i+1}$ 이라고 하고, 외부 Q 값을 Q_{eA} , Q_{eB} 로 한다. 여기서 외부 Q 값은 필터와 급전선과의 結合係數를 나타내는 것이다. 이 $K_{i, i+1}$ 와 g_{i+1} 의 관계는 다음 식으로 나타낼 수 있다.

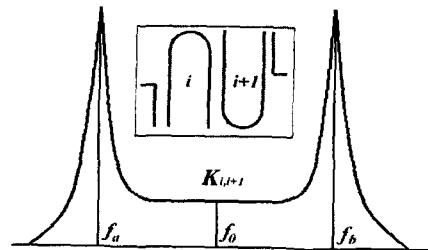
$$K_{i+1} = \frac{FBW}{\sqrt{g_i g_{k+1}}} \quad (9)$$

$$Q_{eA} = \frac{g_0 g_5}{FGW} = Q_{eB} \quad (10)$$

여기서 FBW(frequency bandwidth)는 통과대역의 주파수 대역폭(GHz)이다.

필터의 등가회로 g 로부터 K 값을 식 (9)로 구해내면, 다음에 이 값을 만족하는 회로패턴을 전자계 시뮬레이션(EM simulation)으로 결정한다.

[그림 4]에 2개의 hairpin 공진기를 연결한 모양과



[그림 4] 삽입된 2개의 헤어핀 공진기에 대한 시뮬레이션 결과(주파수 특성)

이 공진기의 주파수 통과(응답)특성을 나타내었으며, 주파수 통과특성은 전자계 시뮬레이터를 사용하여 계산한다. [그림 4]와 같은 통과특성이 얻어졌다고 하면, $K_{i, i+1}$ 은 f_a , f_b , f_o 과 다음 식을 사용하여 구할 수 있다.

$$K_{i, i+1} = \frac{f_b - f_a}{f_o} \quad (11)$$

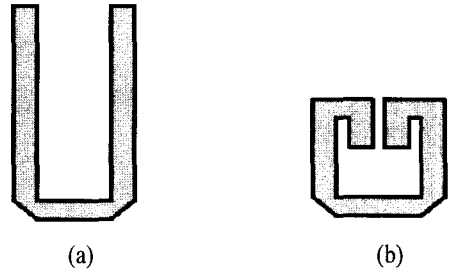
실제로 원하는 $K_{i, i+1}$ 값이 되도록, 공진기의 간격을 조정하고 몇 번에 걸쳐 simulation을 반복하는 공정을 거쳐 Chebyshev형 필터를 설계할 수 있다. 타원함수형 필터도 같은 기법으로 설계할 수 있다.

Ⅲ. 필터의 소형화 연구동향

이동통신 기지국을 목표로 하여 평면형 필터를 개선하려는 노력의 주로 소자의 소형화에 중안점을 두고 있다. 평면형 필터의 소형화를 위하여 다양한 이론과 구조가 개발되었는데, 여기서는 5 분야로 나누어 분류·정리하였다. 한편, 필터 소형화에 따라 손실(loss)이 증가하거나, 전력처리력(power handling capability)이 열화되는 결점도 보이는데, 이를 보완하는 연구결과도 간략히 서술하였다.

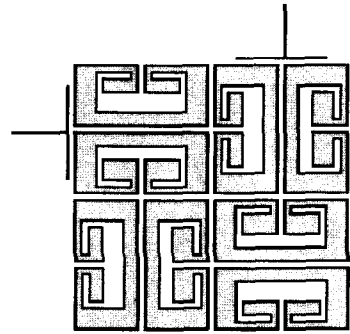
3-1 구부림

평면형 필터의 기본이 되는 $\lambda/2$ 개방선로형 공진기를 이용하는 대역통과 필터는 공진기 길이에 의해 전체 크기가 매우 커지게 되므로, 각 공진기를 [그림 5]의 (a)와 같이 U자형으로 구부려 전체 길이를 상당히 짧게 할 수 있다^[12]. 이와 같은 소자를 헤어핀 필터라고 부르고 각 공진기의 방향을 같은 방향으로 정렬하는 경우와 역 방향으로 정렬하는 2가지 방법이 있다. 전자 쪽은 결합(coupling)이 약하여 협대역 설계에 이용되고 있다^[13]. 이것을 더욱 소형화한 것이 [그림 5]의 (b)에 나타난 구조인데, U자 내부의 결합선로에 의해 소형화가 실현되지만, [그

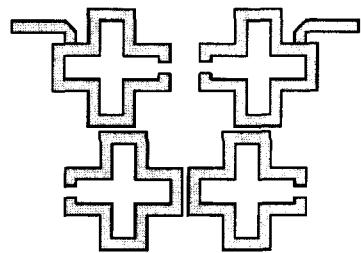


[그림 5] 구부림에 의한 소형화 :

(a) 헤어핀, (b) 결합선로 헤어핀



[그림 6] 구부린 2중 공진기에 의한 4-단 타원함수형 대역통과 필터



[그림 7] 십자형 $\lambda/2$ 공진기에 의한 4-단 타원함수형 대역통과 필터

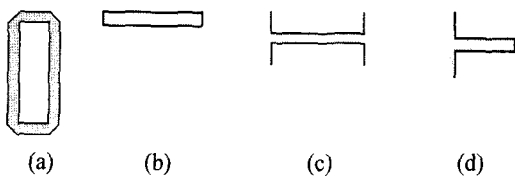
림 5]의 (a)에서는 발휘되지 않는 별도의 결합이 발생한다^[14]. [그림 6]은 U자형을 더욱 구부린 것으로, 4-단 타원함수형 필터를 구성한 예이다^[15]. 그림은 십자가 모양으로 구부려서 더욱 소형화를 실현한 예이고^[16], 선로 선포이 좁아지게 되면 전도손실은

증가하지만 집중상수형 필터나 초전도 박막을 이용한 필터에서는 이러한 손실은 거의 무시할 수 있다.

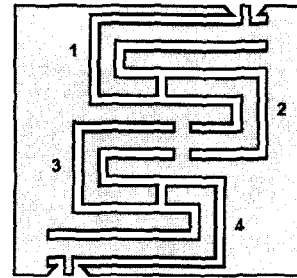
3-2 $\lambda/4$ 공진기의 이용

분포상수 선로형 공진기는 [그림 8]과 같이 4 종류의 기본모양이 있다. [그림 8]의 (a)처럼 링(ring) 형이 결합된 경우는 전체 길이가 1λ (파장)으로 공진하지만, (B), (C)와 같이 양단을 개방 또는 단락하면 $\lambda/2$ 로 공진한다. 또 (d)와 같이 한단을 단락, 한단을 개방하면 $\lambda/4$ 공진이 되고 가장 큰 폭으로 소형화를 이룰 수 있다. 여기에서 유의해야 할 점은 각 공진기의 導體損失과 誘電損失은 이들 전체의 공진기에서 거의 같다는 점이다^[17]. 한편, 放射損失에 있어서도 $\lambda/4$ 공진기는 중간 정도이고 무부하 Q가 나빠지는 일이 없어, 소형화라는 관점에서 보면 이 공진기가 가장 우수하다. 그러나 $\lambda/4$ 공진기는 반드시 한단을 단락해야 하기 때문에 특히 마이크로 스트립 구조에서는 이용하기가 어렵다. 이것에 비하면 코플레나(coplanar: CPW) 구조에서는 접지면이 信號線과 동일면 상에 있기 때문에, 몇 종류의 $\lambda/4$ 공진기 결합형 필터가 제안되었다^{[18],[19]}. [그림 9]의 (a), (b)는 $\lambda/4$ 공진기를 세로방향으로 연결시킨 코플레나 구조의 필터이며, 공진기 1번과 3번, 2번과 4번 간에는 교차(상호)결합(cross coupling)이 생겨 주파수 응답특성에서 감쇠곡이 생긴다^[18].

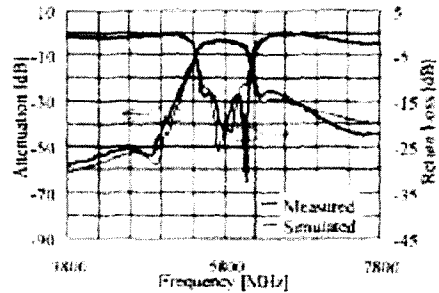
참고로, 이동통신에서 널리 사용되고 있는 다층 세라믹 필터의 기본구조는 평형 스트립라인이다. 이 경우는 측면에 접지면을 배치하는 것으로 차폐



[그림 8] 1차원 선로형 공진기



(a)



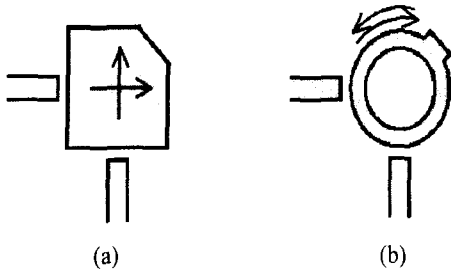
(b)

[그림 9] (a) 코플레나 $\lambda/4$ 공진기에 의한 4-단 타원 함수형 대역통과 필터, (b) 필터의 주파수 응답특성

(shield) 측면에서도 유효하기 때문에 비교적 용이하게 $\lambda/4$ 공진기를 실현할 수 있었고, 또한 초소형·경량화 필터 제작에서도 성공을 거두었다^[20].

3-3 공간의 다중이용

2중 縮退모드를 이용하는 기법인데 즉, 물리적으로는 1개의 공진기를 가지면서 또 하나의 공진모드를 결합시켜(이중모드를 이용하여) 공진하는 방법이다^[21]. [그림 10]에 나타낸 바와 같이, 종류는 패치(patch) 공진기형과 링(ring) 공진기형 필터로 분류한다. 전자에 있어서는 가로 및 세로 방향으로 電流가 흐르는 모드가 2중 縮퇴를 형성하고, 후자에 있어서는 오른쪽 및 왼쪽으로 회전하는 2개의 파가 縮퇴된다고 일반적으로 생각할 수 있다. 그러나 링 공진기도 중형모드로 생각할 수 있으므로, 둘다 한가



[그림 10] 2중 축퇴모드 공진기형 대역통과 필터 :
(a) 패치형, (b) 링형

지로 통일시켜 논의하는 추세이다^[22].

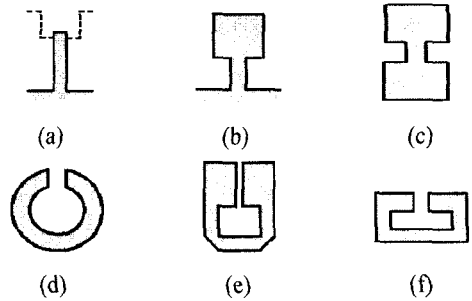
2개 모드의 결합은 [그림 10]과 같이 45° 위치의 모퉁이를 잘라버린 경우와凹凸과 같은 섭동(perturbation)을 가하는 경우에 일어난다. 그리고 이 섭동의 크기에 의해 결합이 강해지거나 약해진다. 따라서 섭동으로 대역폭을 제어할 수가 있다.

참고로, 이중모드 공진기의 크기는 중횡모드로 고려하면 반파장($\lambda/2$), 회전모드로 고려하면 한파장이 되는데 어떻게 하든 필터의 크기가 상당히 크다. 이 때문에 3-1절의 구부리는 기법을 병용하여 소형화를 시도하는 연구(초전도)도 있다^[23].

3-4 용량(커패시터 등)달기

개방형 $\lambda/2$ 공진기의 양단에 용량을 달아주면, 공진주파수가 낮은 주파수 쪽으로 내려가는 것은 잘 알려져 있다. 이 원리로 인하여 다양한 형태로 생기는데, [그림 11]에 구체적 예들을 나타내었다. L 밴드 이하의 낮은 주파수에서는 chip capacitor를 사용하는 것도 허용되지만, 여기서는 분포상수형 소자로서만 한정해서 논의한다.

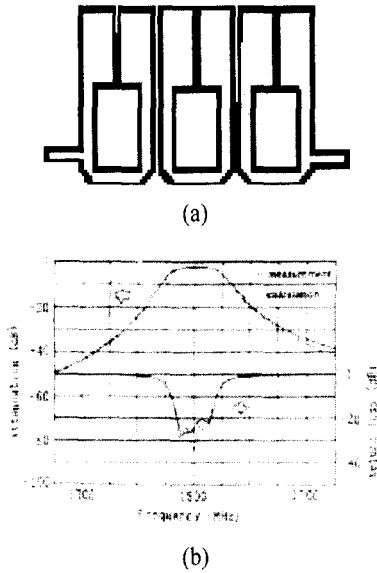
(a)는 다층기판의 본래 접지층보다도 가까운 층에 접지층을 설치하여 개방 $\lambda/2$ 공진기에 용량을 달아주는 예이고, 이것을 $\lambda/4$ 공진기에 응용하는 예는 많은 연구에서도 볼 수 있다(예를 들면 문헌 [20]). 약간의 Q값 저하와 용량값을 바꿈에 따라 소



[그림 11] 용량을 단 공진기 : (a) 다층구조 $\lambda/2$ 공진기, (b) $\lambda/4$ 계단형 임피던스 공진기, (c) $\lambda/2$ 계단형 임피던스 공진기, (d) 개방 링 공진기, (e) 헤어핀 분라-링 공진기, (f) 지연과 구조 공진기

형화가 달성된다. 한편 (b)는 $\lambda/4$ 공진기의 앞단 면적을 크고 넓게 하여 等價的으로 용량을 증가시킨 예로서 SIR(stepped impedance resonator)라고 부른다. 3-2절에서 기술한 바와 같이 信號面과 동일면에 접지면을 설치해야 하기 때문에 $\lambda/4$ SIR은 코플레나 또는 평형 스트립구조로 널리 이용되고 있다. 넓은 부분과 좁은 부분의 특성 임피던스 比를 크게 하면, 소형화가 가능하지만 도체손실도 같이 증가하게 된다^{[24],[25]}. (c)는 $\lambda/2$ SIR이고 접지가 필요 없으므로 마이크로스트립 구조를 포함한 모든 구조에서 이용할 수 있다. 그러나 $\lambda/4$ 공진기와 비교하면 공진기가 크기 때문에, 감쇠극이 생기는 등 부가적인 이득이 없으면 많이 사용하지 않는다.

(d)의 경우는 링 공진기의 구조에서 중간부분(선로)를 잘라서 개방시킨 구조이다. 그 결과 한파장 공진기에서 $\lambda/2$ 공진기로 되어, 전체 길이가 $1/2$ 로 감소할 뿐만 아니라, 앞단(잘라버린 사이의 겹을 말함)의 용량에 따라 공진주파수가 변하고 소형화도 가능하다^[26]. 그러나 이대로 앞단 용량을 크게 하면, 겹(gap)을 극단적으로 작게 해야 하기 때문에, 현실적으로는 부적합하다(구현의 한계). 따라서 [그림 5]의 (b)처럼 링 공진기의 개방단 부분을 거둬 구부러



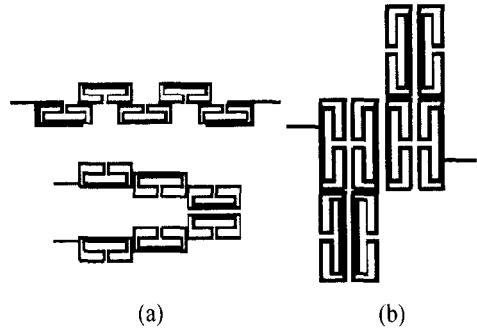
[그림 12] (a) 스플릿-링 공진기형 3-단 대역통과 필터 패턴도와 (b) 입출력특성

서 용량을 증가시키거나, [그림 11]의 (e)처럼 스플릿(split)-링의 앞단을 잡아늘리는 방법이 있다. 이러한 방법을 이용하여 구현한 BPF의 예를 [그림 12]의 (a)에 주파수 특성 [그림 12]의 (b)와 함께 실었다¹²⁷⁾.

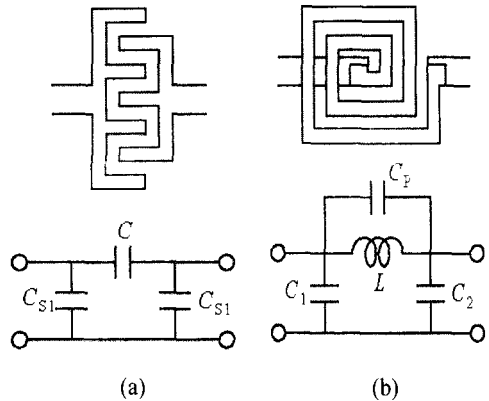
[그림 11]의 (f)는 오픈 링이나 split-ring 공진기와는 전혀 다른 아이디어로부터 출발하여 개발한 공진기이다¹²⁸⁾. open-ring 등은 앞단 용량을 증가시켜서 공진주파수를 줄이는 것에 비해, [그림 11]의 (f)는 용량달기를 주기적으로 늘려나가는 기법(아이디어)에 기초를 둔 것이다. 즉 이 구조는 [그림 13]과 같은 다양한 배치법에 의해(3가지 경우를 보임), 타원함수형 필터 등에서 帶域外(out-of band) 특성을 개선할 수가 있다.

3-5 집중상수화

평면회로적으로 집중상수 LC 소자를 제작하는 것은 엄밀한 의미로는 불가능하지만, [그림 14]에 나타낸 소자가 이들에 가깝다고 생각되고 있다.

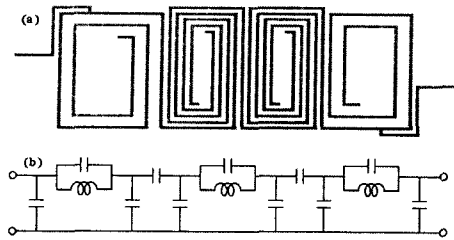


[그림 13] 자연과 구조 공진기의 다양한 배치에 따른 대역통과 필터



[그림 14] 평면형 회로로서 제작된 LC 소자 : (a) 캐패시터, (b) 인덕터

그러나 평면회로에는 반드시 접지면이 있고 이들 LC 소자들로부터도 부유용량(浮遊容量)이 접지면에 대응하여 생기기 때문에, [그림 15] 하단에 나타낸 등가회로가 보다 현실적이다. 특히, 스파이얼 인덕터의 경우 선간용량(線間容量)의 영향이 오히려 커지므로 그림 중에 C_p 로 나타내었다. 따라서 스파이얼 인덕터의 경우 그 자신이 공진소자로서 취급되는 경우도 있고, [그림 15]에 그 예를 나타내었다¹²⁹⁾. 이것은 3-단 BPF이고, 서로 이웃하는 인덕터의 線間容量이 결국 段間結合(段間 결합)을 부여하

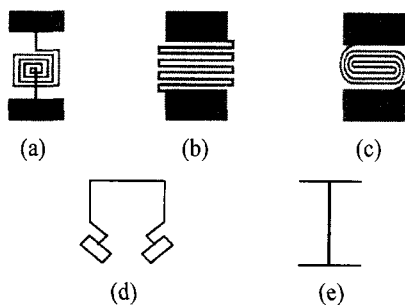


[그림 15] 쌍 스파이얼 인덕터로 구성된 3-단 대역통과 필터

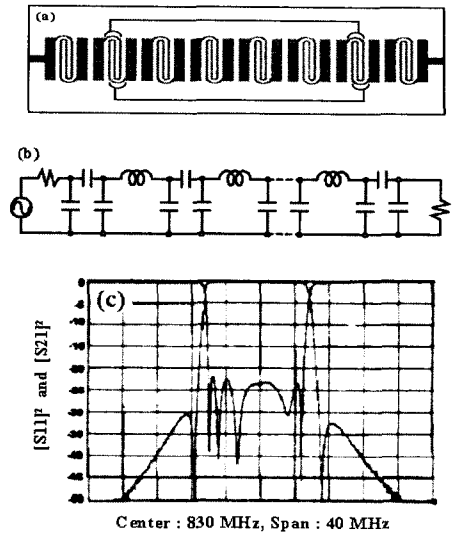
게 된다. 지금까지의 논의한 분포상수형 필터에 비하면 크기는 상당히 줄었지만, 도체 양호도 $Q(Q_c)$ 의 감소가 심하므로, 초전도 박막으로 제작할 경우에만 메리트가 있다(거의 대부분으로 집중상수형 공진기에 해당함).

[그림 14]의 (b)와 같은 인덕터에도 對地容量(대지용량: 공중에서 지상에 대응하는 캐패시턴스)이 가해지기 때문에 실제로 있다면 오히려 그것을 적극적으로 활용하는 것도 좋은 방법이다. [그림 16]에 그러한 생각을 기초로 한 각종 공진소자들을 나타내었다.

(a)는 스파이얼 인덕터, (b)는 미앤더(蛇形) 인덕터, (c)는 양자의 혼합형 인덕터로 對地容量 패턴(캐패시터)을 부가한 것 등이다. (c)의 공진기를 이용한 8-단 擬似(pseudo) 타원함수형 BPF의 예를 [그림 17]에 나타내었다^[30]. 등가회로 중의 직렬 C는 段間的 J-인버터로 되고, 나머지 C-L-C π -형회로가



[그림 16] 인덕터 양단에 대지용량을 가한 공진기류

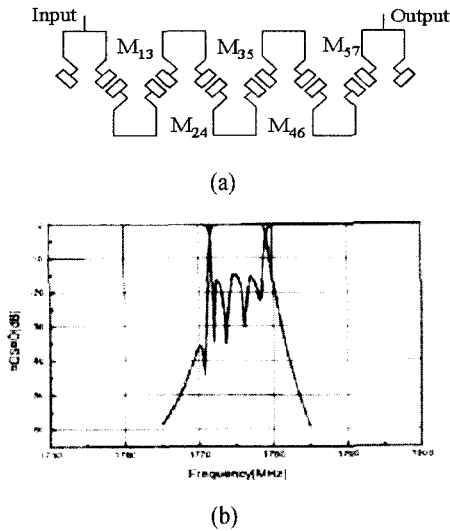


[그림 17] 스파이얼, 미앤더 인덕터로 구성된 8-단 의사 타원함수형 대역통과 필터 : (a) 회로패턴도, (b) 등가회로, (c)는 주파수 특성(초전도 필터임)

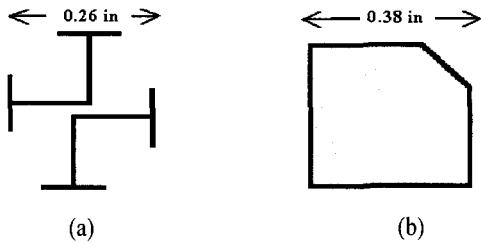
등가적으로 병렬형 LC 공진기를 구성한다. 이 회로 형식은 넓게 이용되고 있다.

중양부 L(인덕터)의 모양을 조금 변화시켜 [그림 16]의 (d)와 같이 整形化하면 공진기 사이에서 교차결합(cross-coupling)을 얻는 데에 편리하다. [그림 18]에 (d)구조를 이용한 의사(擬似)타원함수형 7-단 BPF의 회로패턴과 응답특성을 나타내었다^[31]. 공진기 1개에 대해 교차결합이 생기면 그 결과로 帶域外(out-of-band)에 감쇄극이 1개 생긴다. 참고로, 이러한 공진기는 3-4절에 논의한 SIR 공진기의 변형이라고도 말할 수 있다.

한편, [그림 16]의 (e)에 나타낸 스트레이트 공진기를 직각으로 굽힌 2개의 공진기를 기초로 하여 상호결합하는 경우는 [그림 19]의 (a)에 나타내었다^[32]. 이 구조는 [그림 19] (b)에 이중모드 공진기 구조와 상당히 유사하다. 그러나 [그림 19]의 (b)는 [그림 10]의 (a)에 대하여 설명하였던 2중 축퇴모드가 상호결



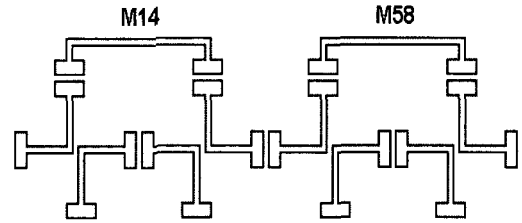
[그림 18] 폴리곤 인덕터로 구성된 7-단 의사 타원함수형 대역통과 필터 : (a) 회로패턴도, (b) 주파수 특성(초전도 필터임)



[그림 19] (a) 준(準) 이중모드 공진기와 (b) 2중 모드 공진기

함에 의해, 오히려 축퇴가 해소된(깨어진) 상태라고 볼 수 있다.

[그림 19]의 (a)는 각 공진기의 종단에 배치한 용량(캐패시터) 덕택에 전체길이가 짧게 되고, [그림 19] (b)의 공진기 구조에 비해 크기가 2/3 정도로 감소한다. 이러한 특성을 이용하여 8-단 타원함수형 대역통과 필터를 구성한 예가 [그림 20]에 실려 있다. 상호결합 M14, M58은 공진기를 엮는 선로의 길이에 의해 조정된다. 집중상수화가 완전할수록 분포



[그림 20] 준 이중모드 공진기로 구성된 8-단 타원함수형 대역통과 필터^[32]

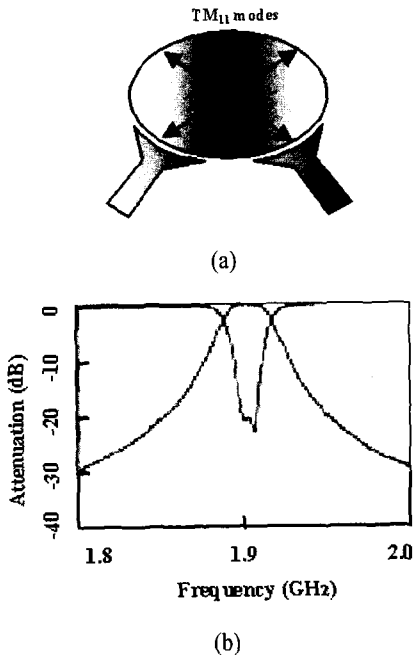
상수형 공진기 특유의 고조파(harmonics) 억압기능 발휘도 가능하다.

IV. 초전도 필터의 고전력화

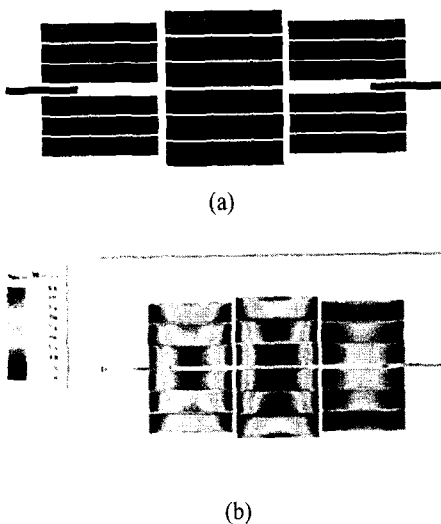
재료측면과 회로설계(형식) 측면으로부터 고전력화를 얻는 방법이 있지만 주로 후자에 한정해서 논의하게 되고 결국 그 내용은 「전자계 분포의 평균화」로 귀결된다. 전계의 집중에 의해서 생기는 방전, 유전체 손실 및 3차 왜곡의 증가를 피하자는 것과 전류의 집중에 의한 도체손실 및 3차 왜곡의 증가를 피하는 것이 주된 내용이다.

우선, [그림 21]의 (a)는 과도한 銳角部分(예각부분)을 없애고, 전계집중을 억제하기 위해 개발한 2중(축퇴)모드 공진기([그림 10] 참조)이다. 이 연구는 원형패치 공진기에서 2중 모드를 결합시키기 위하여, 섭동을 원형에서 타원형으로 바꾼 것에 메리트가 있다^[33]. LaAlO₃상에서 YBCO(고온초전도체) 박막을 성장하고, 1.9 GHz의 2-단 필터를 제작한 후, 40 W의 전력을 가해서 [그림 21]의 (b)와 같은 특성을 얻었으며, 100 W 이상도 가능하다고 보고하였다.

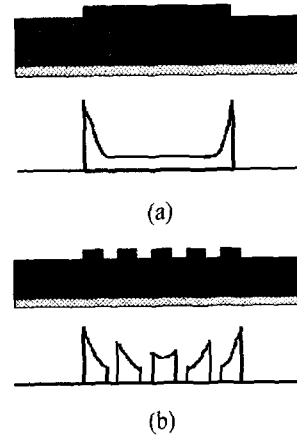
한편, [그림 22]는 전류집중을 배제하기 위해 사용한 3-단 BPF이다^[34]. [그림 23]의 (a)와 같이 마이크로스트립 선로를 흐르는 전류는 가장자리에 극도로 집중한다. 그러나 선로를 [그림 23]의 (b)와 같이



[그림 21] (a) 마이크로스트립 타원 패치 공진기를 이용한 2-단 대역통과 필터(개요도)
(b) 필터의 주파수 응답특성



[그림 22] (a) 분할 공진기를 이용한 3-단 BPF,
(b) 전류밀도 분포상태



[그림 23] (a) 마이크로스트립 선로의 전류분포,
(b) 선로를 분할했을 때의 전류분포

분할하면 집중이 완화되는 것을 쉽게 상상할 수 있다.

그 결과, 도체손실이 감소함과 동시에 도체(초전도체)의 비선형성에 기초한 신호왜곡도 감소한다. 따라서, [그림 23]과 같이 분할시킨 공진기는 전류집중 배제라는 개선효과가 기대되고, 동시에 幅方向 ([그림 22]에서는 상하방향) 모드의 공진주파수가 분할하여 고주파측으로 이동하기 때문에 스퓨리어스 특성이 크게 개선된다. 더욱이 분리된(split) 공진기의 갭(gap) 사이에 외부회로를 삽입하는 것도 가능하며, 외부에서 공진기 Q-값을 제어하는 것도 가능하다.

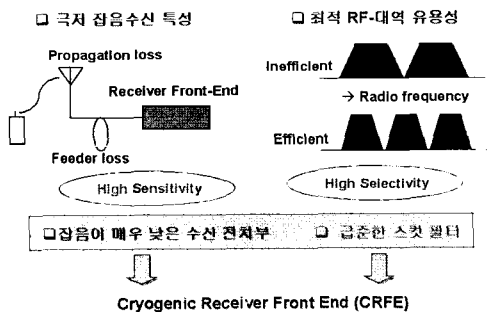
V. 고온초전도 필터 시스템의 특징과 개발동향

5-1 개요

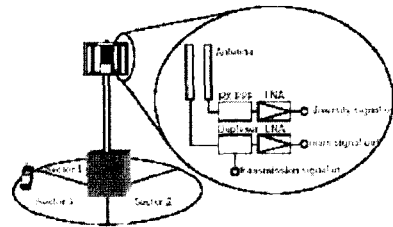
최근에 무선통신 응용을 위한 최고 수준의 필터 성능이 고온초전도 박막으로 제조된 대역통과 필터에서 검증되었으며(미국의 (주)Conductus, 70-극(pole) 대역통과 필터에서), 통신선진국에서는 최대

감도(저잡음 특성)와 최대 선택도(첨단 필터기술)를 결합시킨 기술을 사용하여 독특한(unique) 고온초전도 전치부(HTS Front-End) 기술을 낳았으며, 이러한 고온초전도 마이크로파 기술을 계속적으로 발전시켜 다양한 고주파 전치부를 개발해가고 있다. 그리고 이동통신 부품기술은 점차 고집적화, 초고속화, 저전력화 및 저가격화의 방향으로 발전되고 있으며, 향후 시스템 자체가 하나의 모듈로 구현될 전망이므로 이러한 고온초전도 전치부의 개발은 당연한 기술적 흐름이라고 할 수 있다. 또한 중요한 점은 이러한 고온초전도 통신부품의 연구개발과 상용화에 힘입어, 여러가지 선택도를 만족시키면서 새로운 주파수 대역에도 적용할 수 있는 신구조 초전도 필터가 계속 개발되고 있다는 것이다^[35].

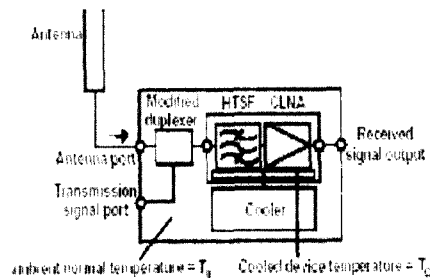
먼저, 기대되는 고온초전도 필터시스템의 잇점(merits)을 [그림 24]에 나타내었다. 한편 무선 이동통신 기지국(base station)의 통신 용량(capacity)을 향상시키기 위하여 고안·설치된 고층형(tower-top) 수신 프론트-엔드(전치부)의 구성(configuration)과 관련하여, 기존의 전치부(a)와 비교한 저온 수신전치부(CRFE)의 구성(b)을 [그림 25]에 도시하였다. 참고로, 고온초전도 에피박막을 이용하여 개발한 전치부용 평면형 대역통과 필터 중에서 큰 주목을 끌었던 HTS 필터 2종류를 [그림 26]의 (a), (b)에 나



[그림 24] 기대되는 무선통신용 고온초전도 필터시스템의 잇점

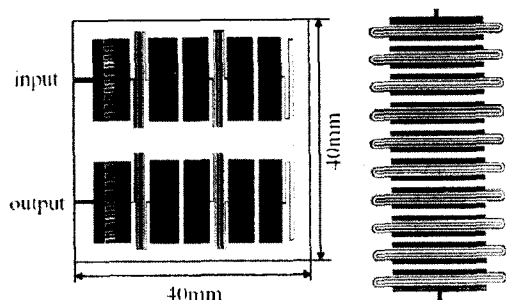


(a)



(b)

[그림 25] (a) 기존의 고층형 수신 전치부(front-end), (b) 고층형 저온 수신전치부(CRFE)



(a)

(b)

[그림 26] 개발된 고온초전도 전치부용 평면형 대역통과 필터(2종류)

타내었다^{[25],[36]}.

[그림 26]의 (a)는 일본의 사이타마(Saitama) 대학의 고바야시(Kobayashi) 교수 그룹에서 개발한 264 MHz(중심주파수) 5-극 집중상수형(lumped element type) 대역통과 필터로서 YBCO/MgO 박막을 사용

하였으며, 우수한 주파수 특성을 보여주었다. [그림 26]의 (b)는 미국의 STI(주)에서 상용화한 Super Filter™(필터시스템의 제품명)에 활용하기 위하여 개발한, 분포상수형 10-극 대역통과 필터이며 고성능을 구현한 것으로 보고되었다.

최근에는, 차세대(3 G 및 4 G: ~5 GHz 대역) 이동통신 시스템을 목표로 하며, 다음에 기술한 장점을 갖는 코플레나 도파관형(CPW=Coplanar waveguide type) 고온초전도 필터가 주목을 받고 있다. CPW형 필터의 장점은 저가격 소자구현, 손쉬운 초전도 층(layer) 성장, 接地와 연결이 필요없는 無(no) via-hole 공정 가능 및 소형화가 가능하다는 점 등이다.

5-2 국내·외 HTS 필터 서브-시스템의 연구개발 동향

무선 이동통신 기지국용 수신시스템의 평가지수는 수신감도, 선택도 및 안정도이다. 해를 거듭할수록 폭증하는 이용자 수에 대응하여 통신품질의 향상이 핵심 기술요인이 되고 있다. 즉, 통신기지국의 서비스(멀티미디어 포함) 범위와 가입자 용량의 확대, 인접주파수에 의한 왜곡과 저감대책 및 간섭잡음의 저감을 강하게 요구하고 있다. 이러한 수신기의 평가조건과 전파환경을 만족시키고, 고감도·고선택도·저잡음 특성을 구현할 수 있는 새로운 컨셉(신소재, 신구조)의 고성능 수신시스템이 필요한데, 이에 대한 강력한 대안으로 고온초전도 필터 시스템이 개발되고 있으므로, 국내·외 개발국의 기술동향과 특징을 기술코자 한다.

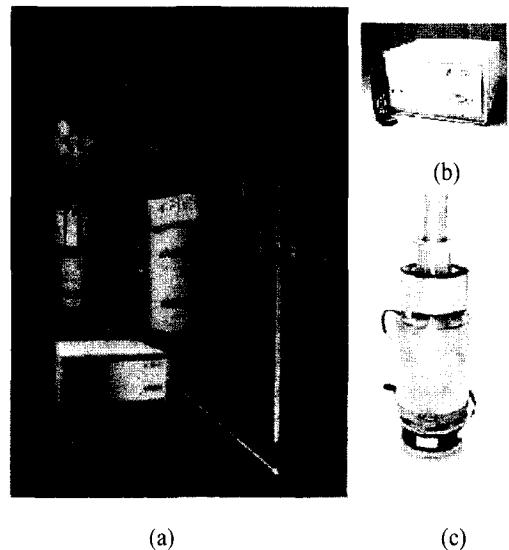
5-2-1 미국의 경우

미국에는 초전도 필터 서브-시스템의 시장이 형성되었으며(1000여대 이상이 판매됨), 제조업체는 벤처가 주도하고 있다는 점이 가장 큰 특징이다. 상용제품은 안테나 타워(塔)에 설치하는 고층형(to-

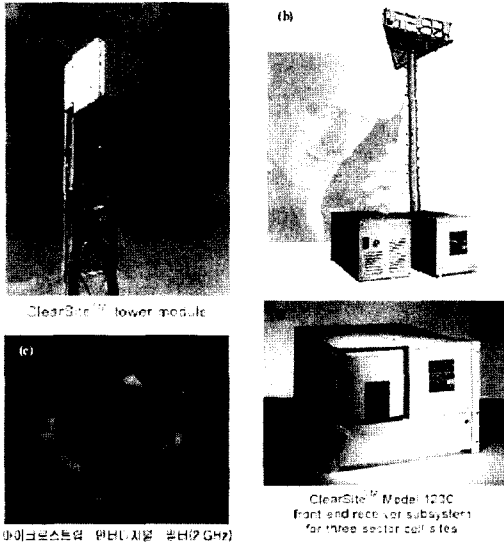
wer-top type 또는 tower-mount type) 뿐만 아니라, 지상의 통신 및 제어 시스템에 결합시키는 표준랙형(rack-mount type) HTS 필터 서브-시스템을 개발하고 있다. STI(사)의 경우는 이를 SuperFilter™ 및 SuperLink™라 하며, 최근 STI(사)를 합병했다고 하는 (주)Conductus의 경우는 ClearSite™라고 한다. 그리고 다양한 제품군을 개발하면서 아시아 시장을 공략할 준비를 서두르고 있다.

[그림 27]에는 STI(사)에서 개발한 제품 SuperLink™ (b)와 초전도성을 유지시키는 소형쿨러((c), 10년간 장수명(MTBF)을 보장한다고 하는 Stiling type mini-cooler)가 표시되어 있다. 특히, (a)에는 HTS 필터의 제작에서 패키징 그리고 HTS 서브-시스템을 제작하는 공정을 도시하고 있다(참고: MTBF = mean time between failure: 평균고장간격).

[그림 28]에는 Conductus(사)에서 개발한 (a) 고층형(tower-mount type) 및 (b) 표준랙형(rack-mount type) HTS 필터 서브-시스템을 실었으며, 특히 rack-type은 분리형 및 결합형이 있음을 보여준다.



[그림 27] 미국의 (주)STI가 개발한 HTS 필터 서브-시스템



[그림 28] 미국의 (주)Conductus가 개발한 HTS 필터 및 필터 서브-시스템

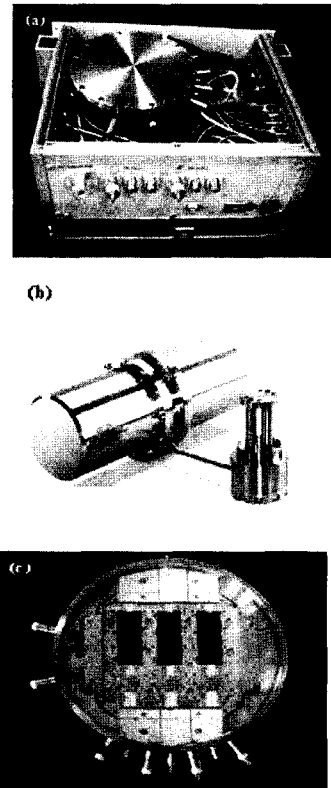
(c)에는 내장된 HTS 평면형 대역통과 필터를 나타내었다.

5-2-2 유럽의 경우

먼저, 가장 큰 특징은 독일, 영국 및 프랑스의 기업 및 대학이 참여하는 유럽공동 연구프로젝트(SUCOMS: ACTS 프로그램의 하나임)를 통해 공동으로 HTS 서브-시스템(고층형 DCS 1800)을 개발했으며, 동시에 다양한 구조의 HTS 대역통과 필터를 개발하고 발표하기도 하였다. 그리고 세계최고 수준의 Stirling형 소형 냉각기(Leybold社 제품)를 사용하고 있다.

(*참고: SUCOMS =Superconducting Systems for Communications/ACTS =Advanced Communications Technologies and Services/DCS =Digital Communication System)

[그림 29]에는 SUCOMS 프로젝트를 통해 개발된 (a) 이동통신용 고층형 HTS-based 송수신 서브-시스템(약 37 kg)과 세계 최고 수준을 자랑하는 Ley-



[그림 29] 유럽공동체(SUCOMS 프로젝트)에서 개발한 HTS-based 송·수신 서브-시스템

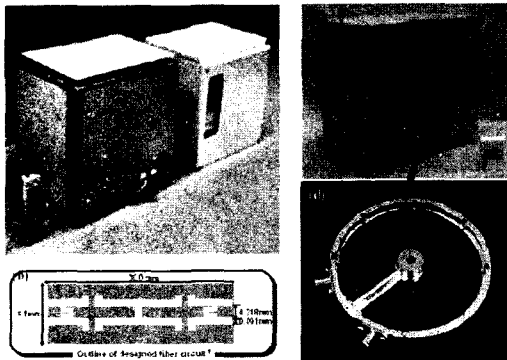
bold(주) 제품의 하나인 Stirling형 소형쿨러(b)를 나타내었으며, (c)에는 HTS 필터와 GaAs LNA를 결합한 6-채널용(양면부착형) RF-모듈을 나타내었다.

5-2-3 일본의 경우

일본은 초전도 필터 서브-시스템 시장의 개장(open)을 준비 중에 있으며, 미국과는 달리 대기업(NTT, 히타치, 도시바 등)이 연구개발을 주도하고 있다. 고층형(tower-mount type) 뿐만 아니라 표준랙형(rack-mount type) HTS 필터 서브-시스템을 개발하고 있다. 최근에는 다양한 HTS 대역통과 필터뿐만 아니라 튜너블 및 선택성(selective) HTS 필터도 개발하고 있으며(고성능화), 중국과 한국 및 동남아

시장의 개장과 공략을 준비하고 있다.

[그림 30]에 일본을 대표하는 통신회사인 NTT DoCoMo(주)에서 개발한 HTS-based 저온수신 전치부(분리형: CRFE) 서브-시스템(a)과 최근에 개발한 5 GHz용 CPW형 대역통과 필터(b)를 실었으며, 또 다른 대기업인 DENSO그룹에서 개발한 펄스-튜브형 cryocooler-based 전치부 서브-시스템과 IEEE-MTT(IMS) 국제마이크로파 학회에서 크게 주목을



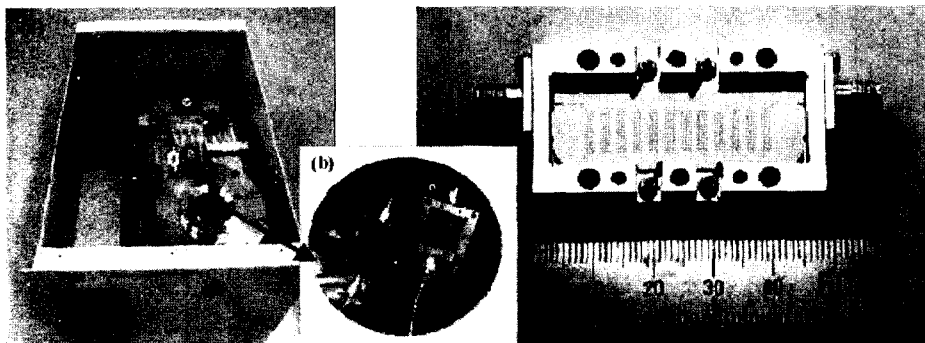
[그림 30] (a) 일본의 (주)NTT DoCoMo가 개발한 HTS 필터 시스템, (b) CPW 필터, (c) DENSO(주)가 개발한 HTS 필터-시스템, (d) 32-극 대역통과 필터

받았던 32-극 대역통과 필터 (d)를 나타내었다. 이 32-극 대역통과 필터 연구결과는 고온초전도 박막을 이용할 경우, 단수(pole number)를 30단 이상으로 해도 성능에 문제가 없음을 밝히는 결과이었다.

5-2-4 한국의 경우

한국은 CDMA 종주국이며 4G(세대) 이동통신을 적극적으로 준비하는 나라이므로, 향후의 잠재시장이 크다는 것이 가장 큰 특징이다. 그러나 연구개발은 연구소(국가출연 및 대기업) 수준을 벗어나지 못하고 있으나, 무선통신 기지국용 HTS 서브-시스템을 ETRI와 LG에서 주로 개발하였다. 아직 우수한/장수명의 소형냉각기(mini-cooler)의 독자적인 개발이 늦어지고 있지만, 최근 (주)우영의 연구개발팀에서 공동으로 Stirling형/펄스-튜브형 소형 냉각기의 국산화에 앞장 서고 있다.

[그림 31]에 한국의 ETRI에서 개발한 (a) HTS Mixer-based 다운-컨버터(하향변환기) 서브-시스템과 여기에 결합되는 1 GHz 대역용 저역통과 필터 및 30 GHz급 집적 믹서 (b)를 개발하였다. LG 연구팀이 개발한 comb-line형 12-극 대역통과 필터 (c)도 우수한 특성을 보였으며, 실제로 PCS 기지국용 전



[그림 31] ETRI에서 개발한 (a) HTS Mixer-based 다운-컨버터 서브-시스템(표준력), 그리고 소형 진공챔버에 내장한 (b) HTS 집적 믹서 및 저역통과 필터 (c) 한편, LG에서 개발한 12-극 comb-line형 대역통과 필터(packaged).

치부 시스템(rack-type)을 개발하고, 특성평가도 수행하였다.

5-2-5 중국의 경우

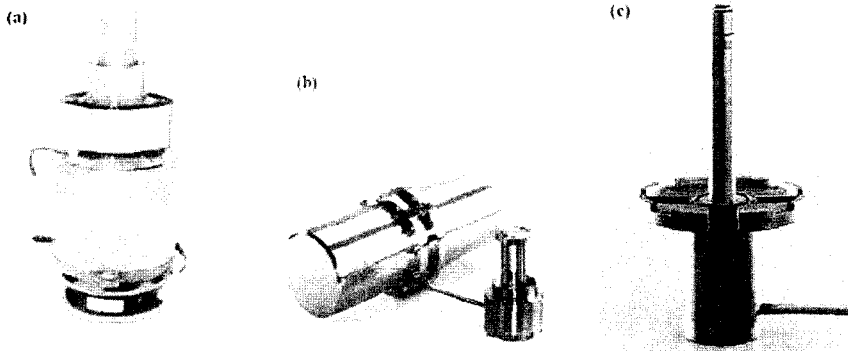
중국도 일본과 비슷한 상황으로 가고 있다. 급증하는 휴대전화에 대처하기 위하여 중국에서도 IMT-2000용 휴대전화를 보급시키는 움직임이 있다. 그러나 일본과 같이 IMT-2000 대역 가까이에 제 2 세대의 휴대전화 주파수가 존재한다는 점과 각社の 주파수 할당이 매우 근접해 있다는 등 문제점이 생기고 있다. 최근 중국(칭허대학과 텐진연구단지)에서도 의욕적으로 그리고 국가의 지원아래 대규모로 초전도 필터 시스템 개발을 진행하고 있다^[37].

5-3 저온 소형 냉각기의 연구 개발 동향

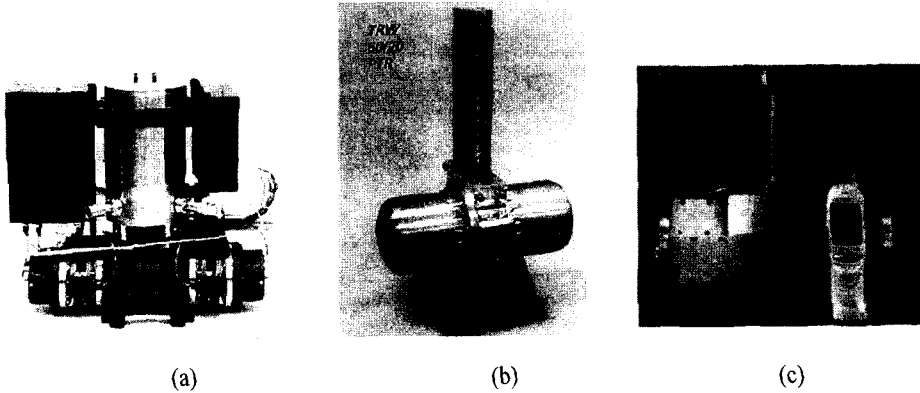
고온초전도 소자/부품을 이동통신에 적용할 경우, 현단계에서 대단히 중요한 과제는 우수한 소형 냉각기(mini cryocooler)의 개발이다. 이에 요구되는 주요한 특성은 다음과 같다. 1) 고 냉각효율, 2) 저 자기잡음(低 磁氣雜音), 3) 소형 및 4) 장수명 등이다. 현재의 기술수준을 고려하면 스텔링형(stirling type) 냉각기가 더 소형이며 고효율이다. 한편, 통신용으로 사용할 경우 특히 중요한 것은 장수명이며

이 점만 고려하면 Gifford-McMahon형 냉각기가 우수하다. 그러나 냉각능력은 떨어지지만 잡음이 적은 제품이 Joule-Thomson형 및 펄스-튜브(管)형 소형 냉각기이다. 이러한 냉각기의 대부분은 연구용이나 특수용으로 사용하기 위하여 개발된 것이며, 진공용 저온펌프(cryo-pump) 등의 부품 이외에는 대부분 가격이 고가이다.

최근, 미국의 저온공학 학술회의에서 발표된 주요한 연구결과로부터 펄스-튜브 냉각기가 대단한 주목을 받고 있다. 즉, 냉각효율은 조금 나쁘지만 무진동과 신뢰성이 높은 펄스-튜브 냉각기에서 가스 피스톤(예, flexible planar spring)과 콤프레셔(compressor)의 효율을 향상시키면, 소형이며 개량된 펄스-튜브형 냉각기를 개발할 수 있고 통신용으로도 적합한 냉각기가 가능하다는 것이었다. 실제로 최근에 미국, 일본 등은 “고온초전도체의 이동통신 실용화”의 프로젝트로서 장수명(2~10만 시간용)/저가격이 가능한 소형 펄스-튜브형 냉각기를 개발하고 있다. [그림 9]에는 각국에서 개발된 대표적인 Stirling 방식의 소형 냉각기를 나타내었고, [그림 10]에는 최근에 개발된 pulse-tube 방식의 대표적인 소형 냉각기를 나타내었다. 한편 [그림 32]에는 이러한 소형·고성능 냉각기 개발동향과 제안된 재원을 실었



[그림 32] 개발된 대표적인 Stirling형 쿨러 : (a) STI사(미국)의 제품, (b) Leybold사(독일)의 제품, (c) (주)우영(한국)의 제품



[그림 33] 개발된 대표적 펄스-튜브형 쿨러 : (a) DENSO사(일본)의 제품, (b) NIST/TRW (미국)의 제품, (c) 주)Daikin(일본)의 제품

으며, 그리고 [그림 33]에는 현재 개발된 대표적인 3종류 냉각기의 특성 비교치를 실었다.

VI. 초전도 필터의 향후 문제점

초전도 필터시스템이 이미 실용화 되고 있다는 것을 앞에서 기술하였지만, 그것은 대부분이 수신용 필터에 한정되어 있다. 기지국에서는 당연히 송신용 필터도 필요하며, 초전도 송신필터도 검토하고 있다. 초전도 필터를 송신용에 응용할 경우, 다음의 두 가지 문제 - (1) 耐電力 특성과 (2) 비선형성 - 가 대두된다.

고온초전도 박막을 이용한 마이크로스트립 선로형 필터에서는 고전력(high power)의 송신전력에 견디는 것이 어렵다. 이유인 즉, 마이크로스트립 선로의 임피던스를 50 Ω에 맞추기 위해서는 선폭을 넓힐 수가 없기 때문이다. 내 전력 특성이 보다 뛰어난 필터 개발이 시도되고 있다³³⁾.

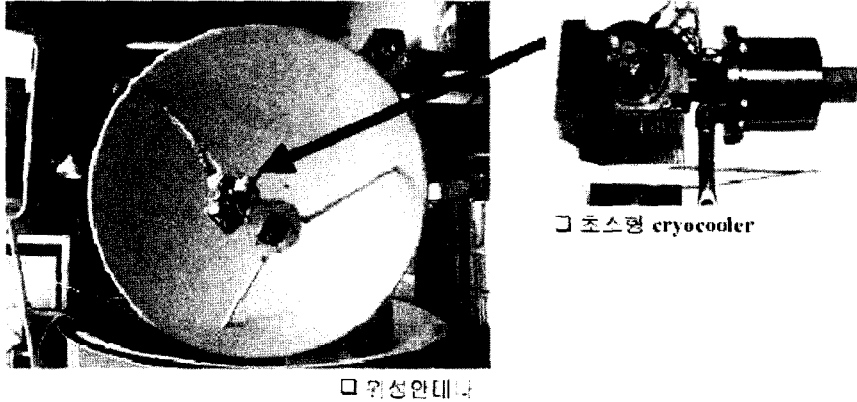
또한, 초전도체의 非線形特性은 초전도의 본질적인 문제인데, 이것을 극복하는 것이 매우 어렵다. 그러나 박막의 품질을 향상시키면 비선형 효과가 작아지고, 고전력용 초전도 필터가 실현될 것으로 보고되고 있다.

VII. 결 론

미국에서 이미 실용화되고 있는 초전도 필터시스템이 일본, 유럽에서는 아직 실용화 되지 않고 있다. 이것은 "경제적 이유" 등에 따른 普及遲延이라고 생각되지만, "전자파가 미치는 사회 문제", "통신의 품질 향상" 등을 극복하기 위한 수단으로서 초전도필터시스템의 보급은 필수적이라고 판단된다. 그 뿐만 아니라 "경제적 논리"를 넘어 "쾌적하고 안전한 생활의 보장"이라는 관점에서 볼때 실용화가 기대되고 있다.

한편, 고온초전도 전자부품 시장은 아직 활성화 단계에 있지 않지만 HTS 예피박막 성장용 기관 및 타깃 등 재료시장, 저온 초고주파 계측장비 시장, HTS 박막 및 소자 제조용 장비시장, 저온 패키지 및 통신부품 시장 그리고 저온 냉각기 및 제어시스템 시장 등이 차츰 확대되고 있다. 특히, 선진국에서 (미국) 발표한 초전도기술의 시장예측 분석결과에 따르면, 전세계 초전도 시장이 2000년에는 300억\$, 2010년에는 1,100억\$, 2020년에는 2,440억\$의 규모로 확대될 것으로 전망되고 있다.

끝으로, 최근 무선통신시장이 확대되고 통신이용자의 수가 급증하면서, 통화품질의 제고가 강력히



[그림 34] 소형화를 이룬 HTS 필터 시스템의 예(미국 (주)Conductus 제공)^[1]

대두되고, 고속 데이터 통신을 다루게 될 향후의 무선네트워크는 보다 혁신된 수준의 전치부 성능을 요구하게 될 것이다. 따라서 전세계적으로 혁신적인 고온초전도 서브-시스템의 개발이 진행될 전망이다, 동시에 시제품(상용제품)의 소형화도 지속적으로 진행될 것이다. 참고로, [그림 34]에는 미국의 (주) Conductus가 선보인 위성안테나에 탑재된 HTS 필터-시스템(소형쿨러 포함하여 2 kg 이하의 무게임) 소개하면서 본고를 마무리한다.

참 고 문 헌

[1] J. P. Simmons, Jr., "Superconductor Front End Benefits for Advanced Wireless Network", APMC-2002, Nov. 20, 2002, Conductus (presentation matter)
 - <http://www.conductus.com>
 - <http://www.sti.com>

[2] Jia-Sheng Hong, M. L. Lancaster, "Microstrip Filters for RF/Microwave Applications", Wiley Series in Microwave and Optical Engineering, Kai Chang Series Editor, 2001.

[3] N. Klein, "High-frequency applications of high-

temperature superconductor thin films", *Rep. Prog. Phys.* 65, pp. 1387-1425, 2002.

[4] M. Nisenoff, W. J. Meyers, "Editor of a special issue on the microwave and millimeter applications for high-temperature superconductor", *IEEE Trans. Microwave Theory Tech.*, MTT-44, July 1996. (HTSSE와 관련된 결과만 실었음)

[5] J. M. Rowelp, M. R. Beasley and R. W. Ralston, "WTEC Panel Report on Electronic Applications of Superconductivity in Japan", July 1998.
 - <http://www.itri.loyola.edu>

[6] N. Sakakibara, "Compact high-temperature superconductor filter", *Oyo Buturi*, 72(1), pp. 21-26, 2003.

[7] IMT-2000 기술특집, 대한전자공학회지, 27(12), 2000년.

[8] "Special Issue on Microwave and Communication Applications at Low Temperature", *IEEE Trans. Microwave Theory Tech.*, MTT-48, no. 9 Part-II, pp. 1171-1291, July 2000.

[9] M. H. Kwak, K. Y. Kang, C. K. Choi and S.

-
- H. Kim, "High-temperature superconducting Lowpass filter for suppressed harmonics", *Physica C* 372-376, pp. 532-535, Aug. 2002.
- <http://www.elsevier.com>
- [10] S. Ohshima, "The principle of the superconducting filter", *Oyo Buturi*, 72(2), pp. 210-213, 2003.
- [11] I. Bahl, P. Bhartia, "*Microwave Solid State Circuit Design*", John Wiley and Sons, New York, pp. 237, 1988.
- [12] E. G. Cristal, S. Frankel, "Hairpin-line and hybrid hairpin-line/ half-wave parallel-coupled-line filters", *IEEE Trans. Microwave Theory Tech.*, MTT-20, no. 11, pp. 719-728, Nov. 1972.
- [13] G. L. Mattaei, 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.*, MTT-45, no. 8, pp. 1266-1231, Aug. 1997.
- [14] 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.*, MTT-37, no. 12, pp. 1991-1997, Dec. 1989.
- [15] M. Reppel, H. Chaloupka, "Novel approach for narrow bandsuperconducting filters", *IEEE MTT-S Int. Microwave Symp. Dig.*, pp. 1563-1566, June 1999.
- [16] F. Rouchaud, V. Mandrangeas, M. Aubourg, P. Guillon, B. Theron and M. Maignan, "New classes of microstrip resonators for HTS microwave filters applications", *IEEE MTT-S Int. Microwave Symp. Dig.*, pp. 1023-1026, June 1998.
- [17] X. Wu, I. Awai, "Numerical and experimental investigation on quality factors of coplanar wave-guide resonator", *IEICE Trans. Electron.*, E83-C, no. 12, pp. 1923-1929, Dec. 2000.
- [18] T. Tsujiguchi, H. Matsumoto and T. Nishikawa, "A Miniaturized end-coupled bandpass filter using 4-hairpin coplanar resonators", *IEEE MTT-S Int. Microwave Symp. Dig.*, pp. 829-832, June 1998.
- [19] Ikuo Awai, X. Wu and L. Zhan, "Coplanar stepped-impedance-resonator bandpass filter", *China-Japan Joint Meeting on Microwaves Proceeding*, pp. 1-4, Apr. 2000.
- [20] T. Ishizaki, M. Fujita, H. Kagata, T. Uwano and H. Miyake, "A very small dielectric planar filter for portable telephones", *IEEE Trans. Microwave Theory Tech.*, MTT-42, no. 11, pp. 2017-2022, Nov. 1994.
- [21] J. A. Curtis, S. J. Fiedziuszko, "Mini-ature dual mode microstrip filters", *IEEE MTT-S Microwave Symp. Dig.*, pp. 443-446, May 1991.
- [22] I. Awai, "General theory of a circular dual-mode resonator and filter", *IEICE Trans. Electron.*, E-81-C, no. 11, pp. 1757-1763, Nov. 1998.
- [23] Z. M. Hejazi, P. S. Excell and Z. Jiang, "Compact dual-mode filters for HTS satellite communication systems", *IEEE Microwave Guided Wave Lett.*, vol. 8, no. 8, pp. 275-277, Aug. 1998.
- [24] M. Makimoto, S. Yamashita, "Compact band-pass filters using stepped impedance resonators", *IEEE Trans. Microwave Theory Tech.*, MTT-67, no. 1, pp. 16-19, Jan. 1979.
- [25] K. Wada, I. Awai, "A $N/2$ CPWresonator BPF with multiple attenuation poles and Its mini-aturization", *IEEE MTT-S Int. Microwave*

-
- Symp. Dig.*, pp. 1139-1142, June 1999.
- [26] I. Wolff, V. K. Tripathi, "The microstrip opening resonator", *IEEE Trans. Microwave Theory Tech.*, MTT-32, no. 1, pp. 102-107, Jan. 1984.
- [27] 矢吹博幸, 遠藤晴良, 佐川守一, 牧本三夫, "Hairpin structure stripline split-ring resonators and its applications", *신학논지 J75-C-1*, no. 11, pp. 711-720, 1992.
- [28] J. S. Hong, M. J. Lancaster, "Microstrip slow-wave open-loop resonator filters", *IEEE MTT-S Int. Microwave Symp. Dig.*, pp. 713-716, June 1997.
- [28] C. K. Ong, L. Chen, J. Lu, C. Y. Tan and B. T. G. Tan, "High-temperature superconducting bandpass spiral filter", *IEEE Microwave and Guided Wave Lett.*, vol. 9, no. 10, pp. 407-409, Oct. 1999.
- [30] G. L. Hey-Shipton, "Efficient computer design of compact planar band-pass filters using electrically short multiple coupled lines", *IEEE MTT-S Int. Microwave Symp. Dig.*, pp. 1547-1550, June 1999.
- [31] B. K. Jeon, J. H. Kim, C. J. Lee, B. C. Min, Y. H. Choi, S. K. Kim and B. Oh, "A novel HTS microstrip quasi-elliptic function bandpass filter using pseudo-lumped element resonator", *IEEE MTT-S Int. Microwave Symp. Dig.*, pp. 1197-1200, June 2000.
- [32] R. R. Mansour, S. Ye, S. Peik, V. Dokas and B. Fitzpatrick, "Quasi dual-mode resonators", *IEEE MTT-S Int. Microwave Symp. Dig.*, pp. 183-186, June 2000.
- [33] K. Setsune, A. Enokihara, "Elliptic-disc filters of high-Tc superconducting films for power-handling capability over 100 W", *IEEE Trans. Microwave Theory Tech.*, MTT-48, no. 7, pp. 1256-1264, July 2000.
- [34] R. R. Mansour, S. Ye, V. Dokas, B. Jolley, W. C. Tang and C. M. Kudsia, "Feasibility and commercial viability issues for high-power output multiplexers for space applications", *IEEE Trans. Microwave Theory Tech.*, MTT-48, no. 7, pp. 1199-1208, July 2000.
- [35] H. Kanaya, Y. Koga, J. Fujiyama, G. Urakawa, and K. Yoshida, "Design and Performance of High Tc Superconducting Coplanar Waveguide Matching Circuit for RF-CMOS LNA", *IEICE Trans. Electron.*, E-86-C, no. 1, pp. 37-41, Jan. 2003.
- [36] K. Saito, N. Sakakibara, Y. Ueno, Y. Kobayashi, D. Yamaguchi, K. Sato and T. Mimura, "264 MHz HTS lumped element band-pass filter", *IEICE Trans. Electron.*, E83-C, no. 1, pp. 15-19, Jan. 2000.
- [37] G. Zhang, M. Zhu, B. Cao, W. He, X. Guo, S. He, B. Liu, Y. Wang, X. Zhang, Y. Zhao, M. Liu, Z. Han, and B. Gao, "Design and Performance of a Compact Forward-Coupled HTS Microstrip Filter for a GSM System", *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, AS-12, no. 4, pp. 1897-1901, April 2003.

≡ 필자소개 ≡

강 광 용



1975년 2월: 서울대학교 공과대학
 섬유고분자공학과 (공학사)
 1988년 2월: 부산대학교 자연대 물리
 학과 (이학박사)
 1989년 3월~ 현재: 한국전자통신연구원
 반도체·원천기술연구소 (책임연구원)
 [주 관심분야] 고온초전도 마이크로파
 수동·능동 부품 설계 및 제작, 금속-절연체 상전이형 초고
 속 트랜지스터 개발, THz-photonics 소자 및 응용분야 개발

곽 민 환



1995년 2월: 경상대학교 전자재료공학과
 (공학사)
 1998년 2월: 경상대학교 전자재료공학과
 (공학석사)
 2002년 2월: 경상대학교 전기공학과 (공
 학박사)
 2002년~현재: 한국전자통신연구원, 반도
 체·원천기술연구소(선임연구원)
 [주 관심분야] 산화물(oxide) 에피 박막 성장 및 고온초전도
 수동소자 개발, 강유전체 튜너블 수동소자 설계 및 개발

김 현 탁



1982년 2월: 부산대학교 물리학과 (이
 학사)
 1984년 2월: 서울대학교 자연대학원 물
 리학과 (이학석사)
 1992년: (주) 시스템베이스 (개발부장)
 1995년: 썬쿠바대 공학연구과 (공학박
 사)

1998년: 썬쿠바대 물리공학계 문부교관 (조수)
 1998년~현재: 한국전자통신연구원, 반도체·원천기술연
 구소 선임연구원
 [주 관심분야] 고온초전도 메카니즘 및 금속-절연체 상전이
 현상 연구, 금속-절연체 상전이형 초고속 트랜지스터개발