

고온초전도 통신소자 - 마이크로파 필터



오 병 두

LG종합기술원 책임연구원

1. 서 론

고온초전도체가 1986년에 발견된 이후에 기초 및 응용연구가 활발히 진행되고 있다. 고온초전도체의 응용분야 중에서도 특히 박막을 이용한 통신소자는 상용화단계에 가장 근접한 분야라고 할 수 있으며, 이중에서도 특히 공진기, 필터와 같은 수동소자의 발전은 주목할 만하다. 본 논문에서는 이러한 수동소자 중에서도 특히 마이크로파 필터를 위주로 고온초전도 통신소자의 기술의 현황과 전망에 대해서 다루도록 하겠다.

현재의 무선통신 시스템으로는 감당할 수 없을 정도로 무선통신 시장이 폭발적으로 발전하고 있다. 전 세계적으로 무선통신 가입자수는 1997년에 1억7천5백만이며 2000년에는 3억7천5백만으로 예상된다. 그리고, 2002년이 되면 무선통신 기지국이 cellular phone의 경우 11만개, PCS(Personal Communication Service)의 경우 18만개가 필요할 것으로 예측한

다. 이러한 무선통신 시장에서의 성공요소는 Capacity, Coverage, Cost이다. 이 중에 Capacity, Coverage에서 고온초전도 마이크로파 필터가 현재 기존의 필터에 대해 경쟁력을 갖고 있다. 그러나, Cost에서는 초전도 filter system의 가격이 \$30,000 ~ \$50,000로 기존 filter의 가격의 약 3배 이상이다. 현재 고온초전도 박막을 이용한 마이크로파 필터 시스템의 실용화의 가장 큰 요인으로는 소형냉각장치가 고가인 점이나, 조만간 저가의 신뢰성 있는 냉각장치가 개발될 것으로 예상되며, 특히 대량 생산시에는 가격이 많이 내려갈 것으로 전망된다.

초전도체는 일반 도체와는 달리 일정 주파수 이하에서 전자파 침투 깊이의 주파수 의존성이 거의 없고, 고온초전도체의 경우 수 THz 이하의 주파수에서는 전자파 침투 깊이가 일정하다. 따라서, 초전도체를 통과하는 마이크로파 신호의 위상속도가 주파수에 관계없이 일정하여 분산이 없게 된다. 그리고, 초전도체는 낮은 표면저항을 지니고 있다. 고온초전도체인 YBCO 박막의 경우 액체 질소 온도(77 K) 및 10 GHz의 주파수에서 표면저항의 크기가 약 $100 \mu \Omega$ 이다. 이는 같은 조건에서 구리가 지닌 표면저항의 약 1/100에 해당한다. 특히 2 GHz 부근에서는 약 1/1000의 값을 갖고 있다. (그림1) 이와 같은 특성을 지닌 고온초전도체를 이용하면 기존의 마이크로파 소자보다 월등히 우수

한 특성, 즉 매우 작은 입력 손실, 좁은 통과 대역, 높은 out-of-band rejection ratio를 지닌 소형의 마이크로파 필터 제작

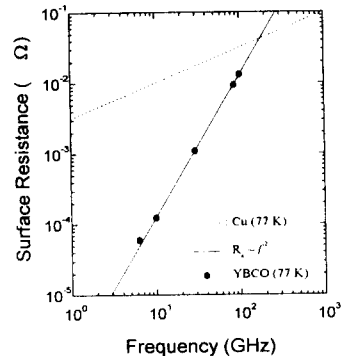


그림 1. 액체질소온도(77 K)에서 구리와 고온초전도 YBCO 표면저항(R_s)의 주파수의 의존성

이 가능하다.[1-3]

선진 외국의 경우를 보면 초전도 고주파 필터의 개발은 주로 2" 이상의 양면 대면적 YBCO 박막을 이용하여 제작한 high-Q 초전도 필터와 저온 저잡음 증폭기를 냉동기에 일체화시킨 저온 저잡음 RF 수신 전단 모듈 구현에 초점을 두고 있다. 더불어 기지국 tower의 안테나와 기지국 건물 내부의 RF 수신 전단 모듈 사이의 긴 전송선으로 인한 신호 전송 손실을 줄이기 위해 기지국 tower에 안테나와 RF 수신 시스템을 직접 연결하는 tower-top형식의 RF 수신 전단 모듈을 개발하였다. 그림

2는 이러한 무선통신 전단 모듈에 대한 개략도를 나타낸다.

현재 무선 통신 기지국용 저잡음 RF 전단 모듈 상온에서 동작하는 waveguide형 필터와 저잡음 증폭기로 구현되어져 있는데, waveguide 필터의 부피 및 무게가 매우 커서 송수신 RF 전단 모듈은 기지국 실내에 설치되어 있고, 50 ~ 100 미터 길이의 cable을 통하여 건물 옥상의 안테나와 연결되어진다. 이때, 전송 cable loss를 포함한 전체 잡음 지수는 5 ~ 6 dB 정도이다. 그러나, 고온초전도 필터와 GaAs LNA를 냉각하여 60 K 정도에서 작동시킬 경우 초전도 필터의 low loss, 저온 저잡음 증폭기의 low noise 때문에 전체 잡음 지수는 1dB 이하가 가능하다. 저온 RF 전단 모듈의 경우, 초전도 필터의 사이즈가 작아 tower top 형식으로 적용하면 cable loss도 줄일 수 있다.

이로 말미암아 기지국의 coverage area가 30% ~ 50% 증가할 뿐만 아니라, 통화 착신율이 20% 정도 증가한다는 장점을 갖고 있다. [4,5]

고온초전도 박막의 마이크로파 필터 특성은 Receiver Front-end에 적용시 기존의 waveguide보다 월등히 우수하나, Transmit에 사용하기 위한 power 처리 용량은 아직도 개선되어야 할 점이다. 그리고, 고온초전도 박막의 마이크로파 및 밀리미터파의 표면저항이 매우 작은 손실 특성을 이용한 delay line, 오실레이터에 대한 연구도 활발히 진행되고 있으며, 고온 초전도 다층박막을 이용한 초고주파 안테나에 대한 연구도 진행되고 있다. 고온초전도체를 이용한 마이크로파 소자 관련 기술은 인공위성, 무선통신 등 미래 정보, 통신분야에 끼칠 영향이 매

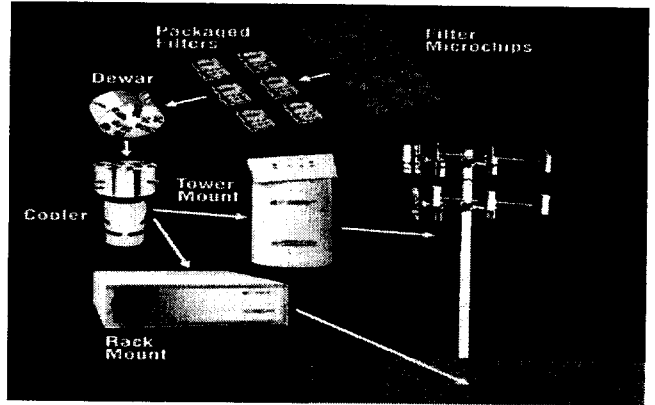


그림 2. 고온초전도 필터를 이용한 무선통신 전단 모듈의 개략도

우 크며, 기존의 마이크로파 소자 관련 기술과 고온초전도체 관련 기술의 접합을 통해 신 개념, 신 기능의 마이크로파 소자 개발도 가능하므로, 연구 개발의 여지가 많은 분야이다.[6]

2. 요소기술

고온초전도 박막을 이용한 통신 소자를 만들어 이것을 실제로 응용하는데 필요한 요소기술은 박막 제작기술, 기판, 소자설계 및 시물레이션, 소자제작 및 측정평가, 냉각기 및 저온팩키징등을 들 수 있다. 이러한 각각의 요소 기술에 대하여 간략히 설명하고, 다음 장에서 필터에 관련하여 좀더 자세히 알아 보기로 하자.

- **박막제작** : 통신소자로서의 우수한 특성을 갖기위해서, 고온초전도 박막은 표면저항이 작고, 임계전류밀도가 크며, 표면 상태가 매끄러워야한다. 현재 이러한 우수한 고주파 특성을 갖는 박막은, Pulsed Laser Deposition (PLD), 스퍼터링, e-빔/thermal 동시 증착법 (co-evaporation)등을 사용하고 있다. 대면적 박막 기술로는 독일의 Kinder 등이 동시증착법을

사용하여, 직경 9 인치의 사파이어 기판 양면에 양질의 $YBa_2Cu_3O_{7-x}$ (YBCO)를 증착하는데 성공 하였다.[7] 박막자체의 특성으로 중요한 것은 표면저항, 침투깊이, 임계전류밀도가 있다. 표면저항은 신호의 손실을 좌우하고, 침투깊이는 박막의 유효 표면저항을 결정짓는 물리량이고, 임계전류값은 박막이 처리할수 있는 최대의 신호량 (power handling capability)과 비례한다. 따라서 보통 박막의 두께는 침투깊이의 2 ~ 3 배 이상이 되도록 하며, 작은 표면저항과 큰 임계전류밀도를 갖도록 박막을 제작하는 것이 중요하다. 이러한 좋은 특성을 갖기 위하여 박막은 적절한 기판위에 에피택시로 매끄러운 표면을 갖도록 만드는 것이 중요하다.

- **기판** : 고주파특성이 우수한 통신소자를 만들기 위한 기판 특성으로는, loss tangent ($\tan \delta$)가 아주 작아야 하고, 증착될 고온초전도체와 격자상수의 차이가 작아야 하며, thermal expansion coefficient가 비슷하여야 한다. 그리고, 기판의 유전율, twin 등도 기판 선택의 중요 변수라고 하겠다. 표 1에서는 중요한 기판 재료

와 그 특성들을 보여 주고 있다. 이 표에서 사파이어(Al_2O_3)는 가장 좋은 $\tan \delta$ 특성을 갖고 있으나, 고온 초전도 물질이 그위에 에피택시하게 자라지 않는 단점이 있어서, 이것을 해결하기 위하여 얇은 CeO_2 를 buffer layer로 사용하여 좋은 특성을 갖는 YBCO 박막을 제작하고 있다. 그리고, 현재 가장 많이 쓰이는 $LaAlO_3$ 의 경우는 twin을 고려하여야 하고, twin이 없는 $NdGaO_3$ 는 $\tan \delta$ 값이 큰 것이 단점이다. 그리고, 기관의 열전도성은 송신단에 사용될 수동소자의 경우와 같이 많은 power가 필요한 경우, 생성되는 열을 빨리 제거해 주어야하므로 중요하게 고려되어야 하며, Al_2O_3 의 경우는 이러한 열전달 특성이 우수하다.[8]

- **소자설계 및 시뮬레이션** : 초전도체에 전류가 흐를 경우, 초전도체 내부와 주변의 전자기장은 도체의 경우와는 아주 다르다. 따라서 기존의 도체의 경우에 사용되는 설계 시뮬레이션들은 초전도체의 경우에 잘 맞지 않을 수가 있다. 그러므로 이러한 software를 사용하여 시뮬레이션 할 때는 그 결과를 잘 해석하여야 한다.

- **소자제작 및 측정평가** : 초전도 박막의 미세 패터닝은 포토리토그래픽한 방법으로 한 후에, 화학적 식각 방식이나 아르곤 아이온 밀링 방식에 의하여 만들어 진

다. 이때의 패터닝의 가장자리 부분이 손상되지 않도록 주의한다. 측정평가는 만들어진 박막을 패터닝하기 전에 그 박막의 고주파 특성 중에서 가장 중요한 표면저항의 크기를 측정하는 것과, 박막을 패터닝하여 통신 소자를 만든 후에 그 소자의 고주파 특성을 측정하는 두가지로 나눌수 있으며, 마이크로파 필터의 주파수 특성과 삽입손실을 정확히 측정하기 위하여는, 측정 set-up의 calibration이 아주 중요하다.

- **냉각기 및 저온 패키징** : 고온초전도 통신소자를 작동시키기 위하여 온도를 낮추고 이것을 안정하게 유지시키는 것은 통신소자의 응용에 있어서 빼 놓을수 없는 분야이다. 고온초전도 박막의 임계온도 부근에서는 표면저항이 급격히 증가하므로, 대략 임계온도의 80% 이하(YBCO의 경우에 ~ 70 K 이하)에서 온도를 고정시켜 사용하여야 한다. 그리고, 현재의 고온초전도 기지국용 필터 sub-system의 가격을 결정 짓는 가장 중요한 요소가 cryo-cooler로서, 이것의 가격을 하락시키는 것이 전체 시스템의 가격을 하락시켜서 실용화를 촉진할 수 있다. 극저온 냉동기는 현재의 가격의 약 1/10인 1000달러 정도를 목표로 하고 있다.

현재 고온초전도 마이크로파 필터에 적용할 수 있는 몇가지 타

입의 극저온 냉동기중 초기 출시가 예상되는 냉동기는 개발이 용이한 Gifford-McMahon 타입이나, 향후에는 신뢰성이 높고 cost가 낮은 Pulsed Tube 타입이 주류를 이룰 것으로 보인다. 그리고, 실제로 Field에서 장시간 사용할 때 신뢰성있는 저온패키징 기술의 정립이 필요하다.

4. 연구개발동향

1) 해외 연구개발 동향

국외에서는 미국을 중심으로 cellular phone 및 PCS용 수신기 전단 모듈 개발이 활발히 진행되고 있다. 이 분야에 대표적인 업체로 STI, SCT, Conductus 등을 들 수 있다. 일본에서도 AMTEL이라는 같은 목적의 회사가 설립되어 고온초전도필터 개발에 박차를 가하고 있다. 이 업체들은 나름대로의 대면적 박막 제조 기술, 필터 설계기술, 저온 패키징 기술을 확립하고 소형 극저온 냉동기와 결합하여 초기 시험제품을 내놓고 있는 상황이다. 특히 미국의 세 업체들은 cellular phone, GSM 및 PCS용 수신기 전단 모듈 상용화하여 각국의 통신회사들과 함께 현장 성능시험을 진행하고 있다.

현재 미국의 Conductus, STI사는 다양한 형태의 저온 저잡음 RF 수신 전단모듈을 시판 중이다. 이들 회사가 내세우고 있는

표 1. 고온초전도 마이크로파 필터용 기관의 종류 및 특성 (격자상수차이는 YBCO와 비교함)

기관	유전율	$\tan \delta$	격자상수차이(%)	twinning
$LaAlO_3$	21 ~ 27	7.6×10^{-6}	2	Yes
$SrLaAlO_4$	17	1.5×10^{-5}	2	No
$NdGaO_3$	23	4×10^{-4}	0.04	No
$\alpha-Al_2O_3$	9.4 ~ 11.6	10^{-8}	6 (γ -cut)	No
MgO	9.6 ~ 10	6.2×10^{-6}	9	No

저은 RF 수신 전단 모듈의 공통적인 장점은 High Q 초전도 필터를 통한 통과 대역 외의 외부 간섭 신호 70dB 이상 제거와 Tower Top 방식, 저은 저잡음 증폭기 사용 등으로 인한 RF 수신 전단 모듈의 잡음 지수 3 dB ~ 6 dB 향상, 기지국의 통화 면적 (Coverage area)의 35% ~ 50% 증가이다. 다음은 각 회사의 간략한 상품 소개이다.

-STI (Superconductor Technologies Inc.) : 이미 SuperFilter라는 상표의 cellular phone 및 PCS용 수신기 전단 모듈(Front End Subsystem)을 개발하여 Field test를 진행하고 있다. 이 수신기 전단 모듈은 고온초전도 필터 및 LNA를 Stirling type의 극저온 냉동기를 결합한 형태이다. 전단에서의 잡음 수준(Noise Figure)이 0.5 dB 이하이며, 미국 통신시장에 적합한 다양한 형태의 시제품을 선보이고 있다.

-CONDUCTUS : 1995년에 삽입 손실 0.5 dB의 900 MHz용 19-pole 고온초전도 필터를 선보인 이래, CLEAR SITE라는 상표의 cellular phone 및 PCS용 고온초전도 필터 및 수신기 전단 모듈을 개발하였다. 이 시스템은 고온초전도 필터 및 LNA를 Gifford-McMahon 방식의 극저온 냉동기와 결합한 형태이다. 미국 여러 통신회사와 협력하여 현장시험을 시행 중이며, 최근에는 일본 통신회사에서도 이 회사의 제품을 도입하여 성능시험 중이다. 이 회사는 수신단뿐만 아니라 송신단에도 쓰일 수 있는 High-power용 필터 개발에도 박차를 가하고 있다. 연간 2000장의 양면 고온초전도 박막을 생산할 수 있는 장비를 제작하여, 연간 500-1000개의 수신기 전단 모듈 생산능력을 갖추

고 있다.

-일본 AMTEL (Advanced Mobile Telecommunication Technology) : '94년 Japan Key Technology Center와 Denso 사, Alps사가 합작 설립한 회사로서 무선통신 및 위성통신에 이용할 수 있는 초전도 RF Filter시스템의 개발을 목적으로 하고 있다. 40 × 40 mm²의 기판 양면에 Sputtering 방법을 이용하여 YBCO 박막을 증착했으며, 이 박막으로 Hair-pin type의 필터를 제작해 선보인 바 있다. 아직은 미국의 회사들처럼 상품을 내놓은 상태는 아니지만, Stirling cycle 냉동기도 독자적으로 개발해 고온초전도 필터, LNA, 극저온 냉동기가 결합된 수신기 전단 모듈 제작을 계획하고 있다. 그리고, 초전도 필터 시스템에 사용될 Oxford type compressor를 채용한 Pulse Tube Refrigerator도 개발 중이다.

2) 국내 연구개발 동향

1990년대 초반부터 주로 1cm x 1cm 기판 위에 초전도 공진기를 제작하여 초전도 박막의 Q 값과 표면 저항을 측정하는 연구와 더불어 5-pole 이하의 x-band 필터 설계 및 제작에 관한 연구를 진행하였다. 본 LG 종합기술원에서는 2" 대면적 양면 YBCO 박막 제작에 성공하여 무선 통신용 초전도 필터 제작이 가능해 졌고, 국내 최초로 PCS 기지국용 11-pole 고온초전도 band pass filter를 개발하여, 현재 국내와 선진국과의 초전도 필터 설계 및 제작 기술의 격차를 한층 좁히게 되었다. 마이크로파 초전도 연구와 관련된 국내 일부 타연구기관의 현재까지의 중요 연구 실적으로는 ETRI의 X-band 고온초전도 필터, 듀플렉서 설계 및 제작,

packaging 개발 ; 삼성 종합기술원의 450 MHz 대역 고온초전도 meander line 공진기 설계 제작, X-band 고온초전도 필터 설계 제작 ; 건국대/KIST의 X-band 고온초전도 필터 설계 및 packaging 기술 개발, X-band 고온초전도 공진기 + GaAs FET 이용한 오실레이터 구현등이다. 이외에도 초전도 박막의 마이크로파 특성 평가를 위하여, 고온초전도체 마이크로 스트립 공진기, cavity 공진기 등을 통해 마이크로파 영역에서 저은의 고온초전도 박막의 Q값, 표면저항, 침투 깊이 등을 측정하는 기술이 확보되어 고온초전도 박막의 고주파특성 평가에 응용되었다. 또한 High Power용 초전도 송신 필터 제작시 필요한 고온초전도 박막 표면저항의 Power 의존성을 측정하는 기술이 확보되었다.

3) LG종합기술원의 연구개발 내용 및 결과

LG종합기술원 초전도팀에서는 90° Off-axis Pulsed Laser Deposition (PLD) 방법을 (그림 3) 사용하여 지름 50 mm의 LaAlO₃ 기판 위에 양면 YBCO박막을 성공적으로 제작하였다. 이 박막은 두께 3000 Å 이상, 전이온도 88 K 이상, 전류밀도 2 × 10⁶ A/cm² (at 77 K) 이상으로 외국에서 제작한 가장 우수한 박막과 동일한 특성을 지니고 있다.[9] 대면적 양면 박막 제조 기술을 통해 Cellular, PCS, IMT2000, LMDS 등의 다양한 주파수 대역의 무선 통신 기지국 필터 제작이 가능해졌다.

본 연구기관에서는 1998년 초에 국내 최초로 PCS용의 compact한 저손실 band pass filter를 설계, 제작하여 학계에 발표한 바

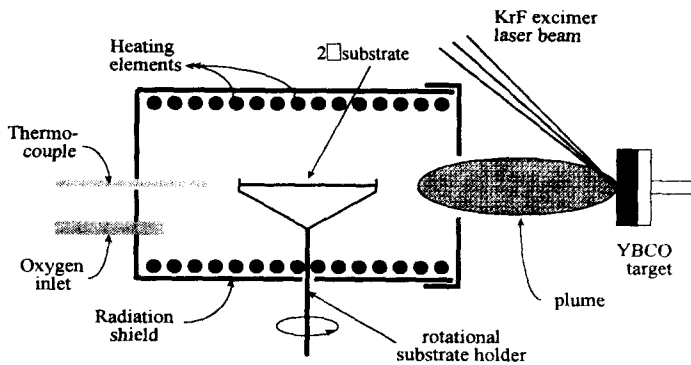


그림 3. Off-axis PLD 시스템의 구성도

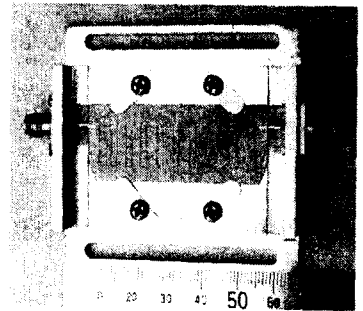
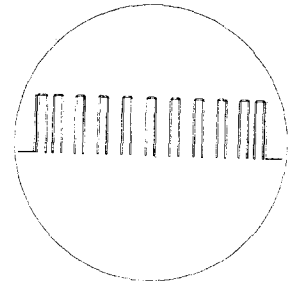


그림 4. 11-pole 헤어핀 대역 필터의 포토마스크 layout과 제작된 필터 사진

있다.[9] 이 필터는 현재까지 확보한 필터 설계기술, 양면박막 제작 기술, 패키징 기술을 토대로 개발되었으며, 국내기술로 고온초전도 필터를 실용화할 수 있다는 것을 입증하였다. 그림 4에서 나타난 바와 같이 이 필터는 11-pole 헤어핀-콤(hairpin-comb) 타입의 대역통과필터(band pass filter)로 중심주파수 1.78 GHz, 통과대역 10 MHz (fractional bandwidth ~ 0.6%), 최소입력손실 0.6 dB이하, 통과대역에서의 ripple 0.5 dB, 통과대역 양 끝단에서 20dB /MHz 정도의 스킨트 특성, out-of-band rejection 80dB ($f_0 \pm 20\text{MHz}$ 에서) 이상인 좋은 특성을 보여주고 있다.[10] 이러한 측정결과와 시뮬레이션 특성은 그림 5에 보여지고 있다. 이 연구결과로 multi-pole 고온초전도 필터의 설계 및 제작 기술이 확보되었고 주파수 변화에 빠르게 대응하여 필터를 설계, 제작할 수 있는 기술이 확보되었다. 앞으로는 기판의 유전율을 변화 등에 따른 주파수 튜닝(tuning) 기술, 필터의 저온 packaging기술, 소자와 냉동기의 결합 기술등을 확보하여 고온초전도 RF 전달모듈을 제작하는 연구를 수행할 예정이다.

5. 앞의로의 전망

해외 선진국의 고온초전도 마이크로파 필터 생산 업체들은 이미 초기단계의 제품 개발을 마쳤고, 각 통신회사들이 이 필터를 현장에서 성능 시험하고 있는 중이다. 일단 고온초전도 필터가 시

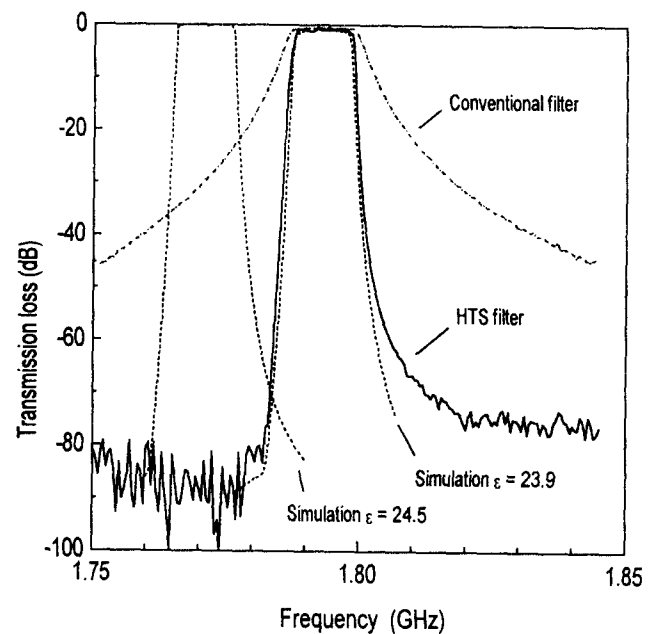


그림 5. 11-pole hairpin-comb 필터의 65 K에서 측정 및 시뮬레이션 결과. Insertion Loss의 최소치는 0.4 dB. 기존의 (conventional) 3-pole cavity filter 데이터가 함께 보여짐.

장에 진입하면 처음에는 특정한 환경 (인구밀도가 높지 않은 지역, 혼선이 가중되는 도시지역) 등에서 점차 시장이 확대 될 것으로 기대된다. 그리고, 이러한 시장에서 고온초전도 필터 시스템이 그 신뢰성이 입증되면, 기존의 필터가 노후된 경우에 장비 교체시 고온초전도 필터가 채택될 확률이 높으며, 점차로 고온초전도 필터가 기존의 필터를 대체할 것으로 예상된다. 이렇게 되기 위하여는 신뢰성있는 저렴한 가격의 소형 냉동기의 개발도 중요하다. 현재 국외의 선진 초전도 필터 제작사들은 기존 냉동기 개발 사업자와 배타적인 관계를 맺고 시스템을 개발하고 있다. 따라서 국내에서도 독자적인 냉동기 개발에 관심을 적극 기울일 필요가 있다. 국내에서는 현재 일부 국책연구소와 기업체가 협력하여 본 과제에 적합한 타입의 극저온 냉동기를 개발하고 있다.

무선통신 기지국용 고온초전도 마이크로파 소자의 활용성을 극대화하기 위해서는 수신단 뿐만 아니라 송신단 필터도 고온초전도체를 사용하는 것이 바람직한데, 이를 위해서는 개발된 필터의 파워 처리 용량 (power handling capability)를 높이는 연구에 주력해야 한다. 그리고, 이러한 송신 (transmit)에 필요한 파워용량 (power capability) 문제가 해결된다면, 고온초전도 마이크로파 필터의 사용은 급격히 증대될 것으로 기대된다. 또한, 개발된 시스템의 성능 향상과 더불어 생산 방법의 개선으로 인한 가격 경쟁에서의 우위 확보 등도 중요하다.

초전도 필터 시스템의 가격과 적용 안정성이 확보가 되면 앞으로 선진 PCS 기지국 설립이나, IMT 2000 등의 RF 전단 모듈에

초전도 필터 시스템이 상당수 적용될 것으로 판단된다. 그리고, 현재에도 시골이나, 중국과 같은 기지국의 coverage 증가가 요구되는 환경에서는 특히 경쟁력이 있을 것으로 예상된다. 또한 초전도 고주파 소자의 사용으로 말미암아 RF 설계의 폭이 넓어지므로 특히 고성능이 요구되어지는 국방이나, 위성 통신에 관련된 밀리미터파 통신 시스템에 초전도 소자의 응용이 매우 중요하게 이루어질 것으로 생각된다. 이제 고온초전도 기술은 먼 미래에나 적용될 수 있는 불안정한 기술이 아니라, 조만간 실생활과 밀접한 정보통신분야에 고온초전도 기술을 만날 것으로 기대된다.

참 고 자 료

[1] G. L. Matthaei and G. L. Hey-Shipton, "Novel staggered resonator array superconducting 2.3 GHz bandpass filters", in 1993 IEEE Microwave Symposium", IEEE Trans. Applied Superconduct., 5, 2656 (1995).

[4] G. L. Matthaei, N. O. Fenzi, R. J. Forse, and S. M. Rohlfing, IEEE Trans. Microwave Theory Tech., Vol. 45, pp.1226-1231 (1997).

[5] D. Zhang, G. -C. Liang, IEEE Trans. Microwave and Guided Wave Lett. vol. 5, pp. 405-407 (1994).

[6] IEEE Trans. Microwave Theory and Tech., Vol. 44 (1996), the special issue for details on the microwave and millimeter wave applications of high temperature

superconductor.

[7] B. Utz, R. Semerad, M. Bauer, W. Prusseit, P. Berbercih and H. Kinder, Deposition of YBCO and NBCO films on areas of 9 inches in diameter, IEEE Trans. on Appl. Supercond 7, 1272-1277 (1997).

[8] 이상영, "고온초전도 마이크로파 소자 제작 및 응용", 요업 기술, Vol. 12, No. 5, 340-349 (1997).

[9] 민병철, 최영환, 문승현, 이승민, 김홍득, 문승현, "펄스 레이저 증착법으로 2인치 LaAlO₃ 웨이퍼 양면에 제작한 고온초전도 YBa₂Cu₃O₇ 박막", 응용물리 11, 423-247 (1998).

[10] H. T. Kim et al., "A Compact Narrowband HTS Microstrip Filter for PCS Applications", Applied Superconductivity Conference, Palm Desert, CA, USA, Sept. 13-18, (1998). (submitted to IEEE Trans. on Appl. Supercond.)

Dig., Atlanta, Georgia, June 1993. pp. 1269-1272.

[2] D. Zhang, G. -C. Liang, "A 19-pole Cellular Bandpass Filter Using 75-mm-Diameter High-Temperature Superconducting Thin Films", IEEE Trans. Microwave and Guided Wave Lett. 5, 405 (1994).

[3] D. Zhang, G. -C. Liang, "Compact Forward Coupled Superconduct Microstrip Filters for Cellular Commu-

< 이상렬 위원 >