

超傳導체의 군사적 응용

● 朴 勝 萬 / 국방과학연구소

1911년 Kamerlingh Onnes¹⁾에 의해 초전도 현상이 발견된 후 거의 80년 동안 초전도는 특수한 몇가지 경우를 제외하고는 대학의 강의실과 실험실에서만 찾아볼 수 있는 것이었다. 그 이유는 매우 낮은 온도(절대온도 10K 근방)에서 밖에 초전도 현상을 이용할 수 없기 때문이었다. 그러던 중 1986년 Bednorz와 Muller박사에 의해 고온 초전도체가 발견되어 물리학자 뿐만 아니라 공학자들에게 놀라운 충격을 주었다.²⁾

이는 저온 초전도체가 극저온 상태를 요구하여 실용화를 어렵게 했던 문제점을 고온초전도의 출현으로 훨씬 덜어줄수 있기 때문이다. 지금까지 밝혀진 고온 초전도 물질중 가장 임계온도(T_c)가 높은 물질은 TI 계열의 산화물에서 125K로서 액체질소 온도(77K)에서 사용하는데 충분하다. 게다가 액체질소 가격은 값비싼 액화헬륨(비등점 4K)과 비교하면 매우 값싼 편이다(액체질소는 ℓ당 6백원 정도).

고온초전도체의 발견이 제2의 산업혁명 또는 금세기 최대의 발견으로 표현되는 배경에는 무엇보다도 초전도체의 다양한 응용가능성 때

문으로 생각된다. 공기의 5분의 4정도가 질소인 점과 다양한 응용가능성을 고려할때 초전도는 80년 가까운 세월 동안 느린 걸음을 걷다가 고온초전도체의 출현으로 이제는 우리 일상생활을 향해 뛰어 들어오고 있다.

많은 사람들은 초전도란 말을 듣거나 읽은 적이 있을 것이며, 적어도 초전도에 관한 글을 읽은 분이라면 초전도가 저항을 나타내지 않으면서 전류를 흘릴수 있는 저항이 0이 되는 현상을 기억할수 있을 것이다.

보통 초전도체라 하면 적어도 2가지 현상을 만족시키는 물질을 총칭한다. 그 첫번째가 전기적 현상으로 저항이 없다는 것이며, 두번째는 자기적 현상인 Meissner 효과이다.

또한 고온 초전도체라 함은 액체질소의 비등점(77K) 이상의 임계온도에서 초전도 현상을 나타내는 초전도체를 말하며, 이들은 1986년 이후 발견된 산화물 초전도체를 말한다.

초전도체의 군사 응용을 크게 두 범주로 분류하면 전자포, 자유전자 레이저등의 대규모 응용과 전자파 탐지소자, 자기탐지소자등의 소규모 응용으로 구분할수 있으며, 이들의 대강을



정리한 것이 <표 1>이다.³⁾

이 글에서는 이들중 소규모 응용에 대해서 살펴보기로 한다. 이 글의 전반부에서는 응용을 이해하는데 필요한 Josephson효과와 Meissner효과에 대해 알아보고, 응용부분에서는 infrared 및 millimeter wave 등의 전자파 탐지기, 자기센서를 중심으로 기술하고, 디지털 응용에 대해 언급하기로 한다.

Meissner효과와 Josephson효과

1911년 Onnes에 의해 초전도 현상이 발견된 후 초전도 현상을 이해하려 하는 물리학자들이 여러가지 현상을 발견하게 된다. 그중의 대표적인 2가지 현상이 마이스너와 죄셉슨이 발견한 현상이다.

먼저 Meissner효과는 초전도체가 임계온도 이하로 냉각되어 초전도 상태가 되면 외부에서 오는 자기장이 초전도체 내부로 들어가지 못하고 밀려나는 현상이다. 보통의 常傳導體에서는 외부에서 가한 자기장은 내부를 통과하게 된다.

<그림 1>(p. 20 참조)은 상전도와 초전도 상태일 때 외부 자기장이 어떻게 통과하는가를 표현한 그림으로, 초전도 임계온도(T_c)이상의 온도에서는 자기장이 ring 내부를 통과하며 임계온도 이하에서는 자기장이 ring 외부로 밀려남을 보인다. 이 현상을 마이스너 효과라 하며, 1933년 Meissner에 의해 발견되었다.

고전 물리학으로 설명할 수 없는 놀라운 사실인 죄셉슨효과가 1962년 짧은 물리학도에 의해 예견되고, 뒤이어 실험실에서 검증되었다. 죄셉슨효과는 얇은 장벽으로 차단된 두 초전도체 사이에 한쪽에 있는 초전도 전자쌍(Cooper pair라 함)이 장벽을 가로질러 다른 한쪽으로 이동할 수 있다는 것이다.

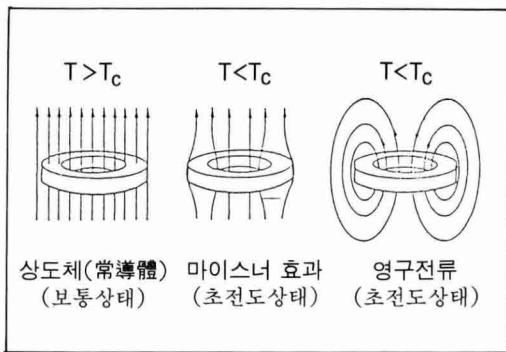
이들 전자쌍의 이동은 전압강하를 유발하지 않으며(저항이 없다는 의미), 단지 장벽 양쪽의 상태를 기술하는 파동함수의 위상이 서로 연관성을 갖는다는 것이다.

죄셉슨 현상을 나타내는 소자형태는 보통 초전도체 – 절연층 – 초전도체(Superconductor-Insulating layer-Superconductor, SIS) 형태의 박막으로 이루어진다. 보통 insulating layer(절연층)의 두께는 산화물층으로 할경우 10~20Å, 반도체물질인 경우 50~100Å의 두께로 제조되며, 이 절연층 양쪽으로 초전도 박막이 있는 형태이다. 이런 구조를 SIS 접합이라 한다.

이들 죄셉슨 접합의 전류 전압곡선은 주의 깊게 살펴볼 필요가 있다. <그림 2>는 죄셉슨 접합의 대표적인 전류 – 전압 곡선을 그림으로

<표 1> 초전도체의 응용

전자분야	高전력분야
磁氣場 센서	자석(磁石)
IR 센서	전기 기계류
마이크로파/밀리미터파 센서	전자포(E.M.L)
DC~UHF 센서	에너지 전송
아날로그/디지털 변환자	MHD 추진선박
아날로그 신호처리	에너지 저장 장치
디지털 데이터 프로세서	



〈그림 1〉 마이스너 효과의 도식적 모형

나타낸 것이다.

이 그림에서 보이듯이 대부분의 조셉슨 접합의 전류-전압곡선은 이력현상(hysteresis)을 나타낸다. 먼저 전압이 0인 상태에서 매우 작은 양의 전류를 흘리기 시작하면 전압강하 없이 어느정도까지의 전류를 흘릴수 있다.

전류가 어떤 임계치(I_c)를 넘게되면 갑자기 전압 강하가 생기게 되며, 그 이후로는 보통의 저항치와 비슷한 형상을 지닌다. 이런 상태에서 전류를 점점 감소시키면 다시 초전도 전류 성분쪽으로 돌아가지 않고 전류가 감소하는 동안 전압이 거의 일정한 구간이 생겨나게 된다.

이러한 일정한 전압구간은 초전도체의 에너지 캡 voltage에 해당하는 값 근처에서 나타나게 된다. 전압의 변화가 거의 없이 전류가 갑작스럽게 변화하는 두성분을 〈그림 2〉와 같이 초전도 전류 성분과 의사입자에 의한 전류 성분(quasiparticle current)이라 한다.

초전도소자의 대부분은 이 전류-전압곡선의 비선형성을 이용한 것으로, 초전도 전류성분을 이용하기도 하고 의사입자 전류성분을 이용하기도 한다. 때에 따라서는 두 전류성분중 한 전류성분을 없애야 하는 경우도 있으며, 두 성분을 모두 이용하는 경우도 있다.

마이스너효과는 초전도의 특성중 하나로 초전도 상태에서 외부에서 작용하는 자기장을 모두 밀어내는 현상을 말한다. 조셉슨효과는 장벽으로 분리된 두 초전도체 사이를 초전도

전자가 넘을수 있으며, 조셉슨효과를 나타내는 형태의 초전도체를 조셉슨 접합이라 한다.

이들의 전류-전압곡선은 매우 비선형성을 가지며 이력형상을 보인다. 전류-전압곡선의 전류성분은 2가지가 있으며, 전압이 0일때 나타나는 전류 성분은 초전도 전류 성분, 에너지 캡 voltage 근처에서 나타나는 전류를 의사입자 전류성분이라 한다.

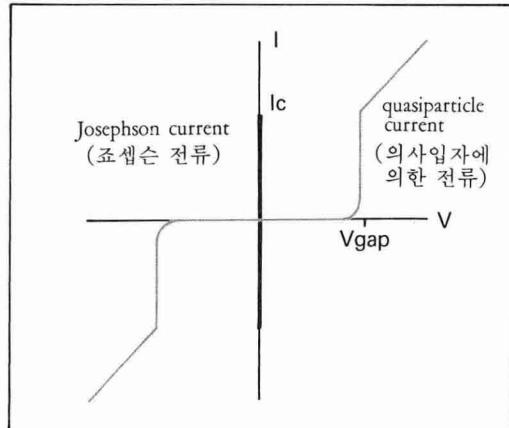
응용

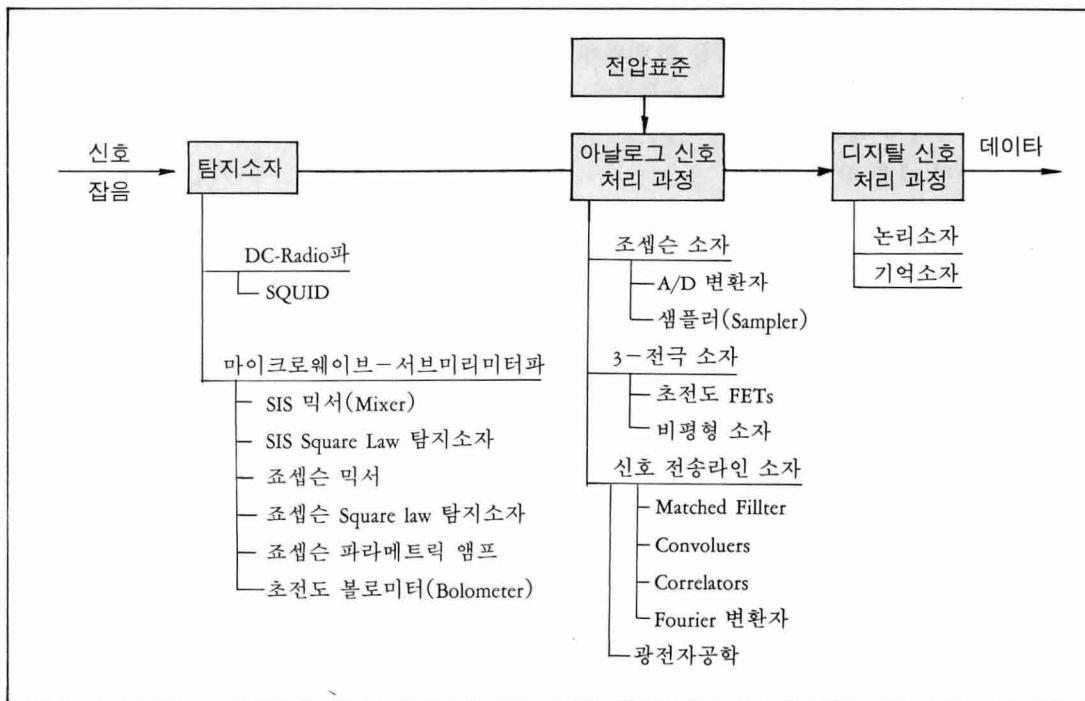
초전도 전자공학을 신호의 이동과정에 따라 크게 분류하면 외부에서 신호를 탐지하는 감지기, 감지기로부터 얻은 신호를 샘플링하거나 증폭하는 등의 아나로그 프로세싱, 그리고 아나로그신호를 A/D 변환기에 의해 디지털 신호화하여 사람이 인식할수 있는 신호로 만들거나 저장하기 쉽도록 하는 디지털 프로세싱으로 나눌수 있다.

감지기는 시스템의 외부로부터 원하는 신호를 탐지해 내는 것으로 신호와 함께 원하지 않는 noise가 반드시 수반된다. 초전도 소자로 탐지 할수 있는 波는 수 Hz 정도의 매우 낮은 저주파에서부터 마이크로 웨이브에서 far-infrared 까지 탐지가 가능하다.

아나로그 프로세싱은 감지기에서 얻은 신호

〈그림 2〉 조셉슨 접합의 전류-전압곡선





〈그림 3〉 초전도 전자공학의 3대 범주

(보통전류 또는 전압형태)를 샘플링, 증폭, 필터링하는 과정을 거치면서 원하는 신호만을 골라내는 일련의 작업이다. 이 과정에서 초전도체를 사용했을 때의 잇점은 「고속처리와 매우 낮은 전력소모」로 특징지을 수 있다.

디지털 프로세싱은 A/D 변환기에 의해 디지털화된 신호를 어떤 논리과정을 통해 사람에게 의미있는 정보로 만들어주는 과정을 말한다. 이 과정에서도 초전도의 잇점은 「고속처리와 매우 낮은 전력소모」로 특징지을 수 있다. 대강의 과정을 나타낸 것이 〈그림 3〉이다.⁴⁾

여기서는 전자파 탐지 소자 (미리미터 웨이브, IR 감지기)의 원리와 특성 등을 주로 살펴보고, 자기 필드 센서(SQUID)의 성능에 관한 고려 및 디지털 응용원리 및 “고속처리” 특성을 살펴보기로 한다.

- Radiation Detector(전자파 탐지소자)
앞서 알아본 바와 같이 조셉슨 접합의 전류 – 전압(I-V) 곡선은 매우 비선형성을 갖는다

(〈그림 2〉 참조). 대부분의 초전도 소자는 이 비선형성을 이용하는 것으로 전자파 탐지 소자도 이것을 이용한 것이다.

매우 비선형적인 전류–전압 곡선에서 전압/전류가 급격히 변화하는 부분에 전류/전압의 bias를 가하고 있을 때, 외부에서 어떤 에너지의 전자파(photon)가 접합내로 입사하면 전압/전류의 차이가 나타나게 된다. 즉 외부의 전자파에 의해 탐지기에 전류 또는 전압의 변화를 유기시키는 것이다.

이런 면에서 볼 때 잘 알려진 반도체의 pn 접합과도 매우 흡사하나 조셉슨 접합과 pn 접합으로 전자파를 탐지해 내는데는 근본적인 차이점이 있다.

첫째, 에너지 캡의 차이다. 에너지 캡은 탐지할 수 있는 전자파의 파장 범위를 제한하는 인자로, 대부분의 반도체는 수 eV의 값을 갖는다. 이 때문에 반도체로는 주로 가시광선과 그 이상의 전자파를 탐지한다.

반도체를 사용하여 적외선 영역을 탐지하는 소자로는 HgCdTe, InSb 등의 화합물 반도체가 사용되고 있으나 이들은 다소 특수한 경우이다. 그러나 초전도체의 에너지 갭은 수 meV로 반도체에 비하여 매우 작다.

이처럼 작은 에너지 갭 때문에 반도체가 탐지할 수 없는 영역을 탐지할 수 있게 한다. 초전도체로 탐지할 수 있는 영역은 마이크로 웨이브에서 약 $20\mu\text{m}$ 파장의 far-infrared까지 걸쳐 있으며 이 영역의 미리미터 웨이브와 infrared 영역은 표적 획득 및 추적, 감시장비 등 군사용 목적으로 사용하기에 좋은 전자파이다.

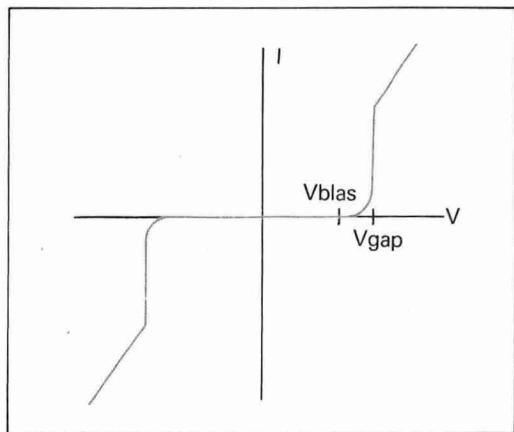
전자파 탐지소자는 탐지하는 파장 영역에 따라 광대역 전자파 탐지소자(wide band detector)와 협대역 전자파 탐지소자(narrow band detector)로 분류할 수 있다.

죠셉슨 접합으로 전자파를 탐지하는 경우에는 square law detector와 초전도 bolometer가 wide band detector에 속하며, mixer가 narrow band detector로 분류할 수 있다.

square law detector나 초전도 bolometer 등의 광대역 탐지소자는 비교적 넓은 영역의 전자파를 탐지해낼 수 있으며, square law detector와 초전도 bolometer는 전자파의 에너지만을 탐지해내는 감지기이다. 이에 반하여 믹서는 특정한 영역의 전자파를 탐지하는 것으로, 전자파의 에너지 뿐만 아니라 주파수 및 위상 정보도 함께 탐지한다.

square law 탐지기와 믹서는 죠셉슨 접합의 전류-전압 곡선에서 초전도 전류 성분을 이용하느냐, 의사 입자에 의한 전류 성분을 이용하느냐에 따라 Josephson 탐지기(or 믹서)와 SIS 탐지기(or 믹서)로 구분할 수 있다.

square law 탐지기에서는 죠셉슨 square law 탐지기와 SIS square law 탐지기로 구분되고, 믹서에도 죠셉슨 믹서와 SIS 믹서로 구분할 수 있다. 그러면 square law 탐지기와 믹서의 전자파 탐지원리를 살펴보기로 한다.



〈그림 4〉 SIS detector의 I-V 곡선

square law 탐지기의 전자파 탐지 원리를 편의상 SIS square law 탐지기를 택하여 설명하기로 한다. 죠셉슨 square law 탐지기도 단지 전류-전압곡선에서 초전도 전류 성분을 이용한다는 것 이외에는 별다른 차이가 없다.

죠셉슨 접합의 전류-전압곡선에서 〈그림 4〉와 같이 에너지 갭보다 다소 적은 bias 전압을 가하고 있을 때, 에너지 갭과 bias 전압의 차에 해당하는 에너지의 전자파(photon)가 탐지기에 입사하면 의사 입자에 의한 전류가 급격히 증가하게 된다.

이 전류의 증가분을 탐지기의 검출신호로 사용하는 것이다. 이때 bias 전압은 탐지하고자 하는 전자파의 photon 에너지에 의해 결정되므로, 이 bias 전압을 조정함으로써 여러파장의 전자파를 탐지할 수 있다. 이러한 SIS square law 탐지기로 탐지할 수 있는 전자파의 범위는 근본적으로 사용한 초전도체의 에너지 격차에 의해 결정된다.

고온 초전도체의 경우 에너지 격차에 대한 정확한 실험 결과를 기다려 보아야 하지만, 소자를 제조해 결과치에 의하면 수 μm 단파장의 전자파까지 탐지할 수 있다는 보고가 있다.^{5), 6)}

square law 감지기와 비교할 때 믹서는 다소 다른 원리로 작동된다. 믹서는 탐지하고자 하는 주파수 f_s 와 local oscillator 주파수 f_{LO} 를 혼합하여

두 주파수의 차이 $f_s - f_{LO}$ 를 I. F. (Intermediate Frequency) 중폭기에 의해 중폭함으로써, 원하는 정보를 전류(또는) 전압으로 바꾼다. 바로 혼합(mixing)하는 과정에서 죄셉슨 접합의 비선형성의 전류-전압특성을 이용한다.⁴⁾

이 초전도 믹서는 수백 gigahertz까지의 주파수 범위에서 사용 가능한 탐지기중에 가장 민감한 탐지기이며, detector의 성능도 현대 물리학의 불확정성의 원리에 근본적으로 제한되는 선에 접근한다.⁵⁾

〈그림 5〉는 여러가지 믹서의 주파수대역에 따른 성능비교를 나타내며, 이 그림에서 보듯이 SIS 믹서는 다른 믹서보다 noise temperature (noise temperature는 믹서의 성능비교에 사용되는 값으로 낮을수록 성능이 좋다고 생각하면 된다)가 낮다.

특히 100GHz 근처(MMW 영역)에서는 불확정성의 원리에 의해 제한되는 noise temperature에 접근함을 볼수 있다. SIS 믹서는 36GHz와 94GHz 주파수 수신기로 사용되고 있다.⁹⁾

전자파 탐지소자를 만들기 위해 고온 초전도체를 사용할 경우 무엇보다도 중요한 일은 에너지 gap에서 전류가 예리하게 증가하는 전류-전압곡선을 나타내는 죄셉슨 접합을 제조해야 하는 것이다. 어떤 형태의 접합이든 77K에서 예리한 비선형성을 나타내는 죄셉슨 접합을 제조하는 일은 용이한 일이 아니다.

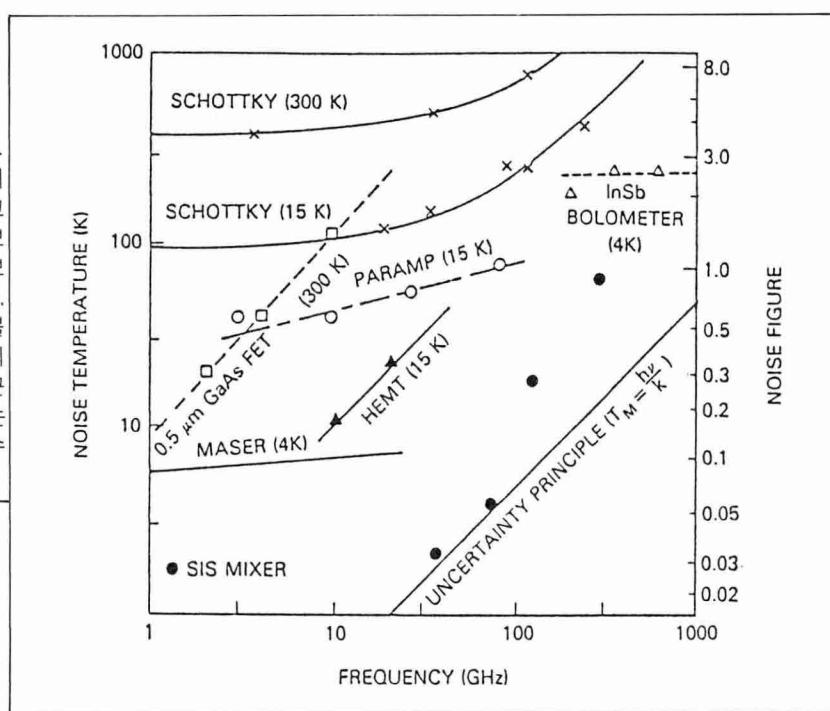
또 한가지는 저온초전도 SIS 믹서에 대한 이론을 고온 초전도체에 그대로 적용하기 어렵다는 점이며, 이 때문에 고온 초전도재료를 사용했을 때의 성능예측이 늦어지고 있다.

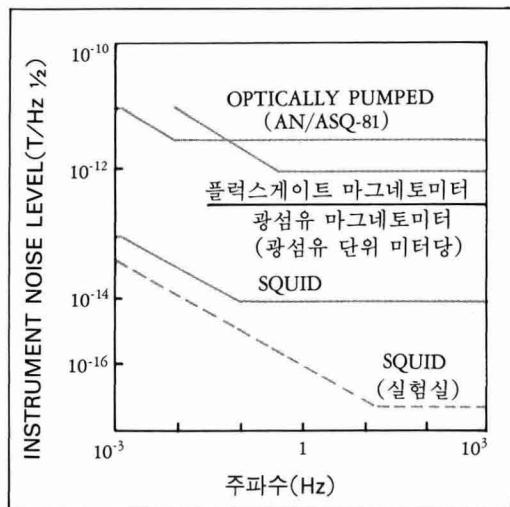
Wide band 탐지기 가운데 square law 탐지기와 다른 종류로 초전도 bolometer가 있다. 초전도 bolometer는 열을 잘 흡수하는 기판에 초전도 박막이 입혀 있고, 이 기판은 thermal bath에 약하게 연결되어 초전도 저항이常傳導 상태 일때와 초전도 상태의 중간점에 온도평형을 이루도록 되어 있다.

이렇게 되어 있을때 외부에서 열(radiation)이 들어오면 이 때문에 초전도 박막의 온도가 증

〈그림 5〉는 여러가지 믹서의 주파수대역에 따른 성능비교를 나타내며, 이 그림에서 보듯이 SIS 믹서는 다른 믹서보다 noise temperature가 낮다. 특히 100GHz 근처에서는 불확정성의 원리에 의해 제한되는 noise temperature에 접근함을 볼수 있다. SIS 믹서는 36GHz와 94GHz 주파수 수신기로 사용되고 있다

〈그림 5〉 여러가지 믹서 기술의 비교⁸⁾





〈그림 6〉 磁氣場 센서의 성능비교

가하고 따라서 저항 변화가 일어난다. 이 저항 변화를 초전도 박막에 일정 전류를 흘려줌으로써 전압변화로 탐지할 수 있다. 액체 헬륨 온도(4K)에서 저온 초전도 bolometer는 성공적으로 작동하고 있으며, 이 감지기는 주로 분광 실험 등의 실험실에서 사용되고 있다.

• 磁氣場 센서(SQUID)

대부분의 군용 장비가 자성을 띠고 있는 철(Fe)로 되어져 있다는 점을 상기하면 자기장 센서의 필요성을 쉽게 느낄 수 있을 것이다. 대표적인 예로 수십 또는 수백 Km 떨어진 바다 속의 적 잠수함을 조기 발견하여 현재의 위치 및 이동 상황을 추적할 수 있다면 잠수함의 공격으로부터 피해를 줄일 수 있을 것이다.

이 때문에 해군에서는 오래전부터 자기탐지 센서를 사용해 왔으나 지금까지 사용되는 자기탐지센서로는 근거리에 있는 잠수함의 존재는 파악할 수 있으나 위치를 파악할 수 없었다. 이를 가능하게 할 수 있는 것이 초전도를 이용한 자기탐지센서이다.

이 자기탐지는 Superconducting QUantum Interference Device(SQUID)라고 하는 초전도 소자로 탐지하며, SQUID는 초전도 전류가 자기장에 매우 민감한 반응을 나타내는 현상을 이

용한 것이다.

SQUID는 직류(D.C.)와 R.F. SQUID의 두 종류가 있으며, 이들 모두 죄셉슨 접합을 1개이상 포함하는 초전도 loop로 이루어지며, 이 loop 내로 자속(magnetic flux)이 통과하면 가한 전류가 loop내로 통과한 자속의 함수로 변화하는 특성을 이용한 것이다.

이 SQUID 자기탐지센서로 地球자기장의 10 억분의 1만큼의 微小 자기장도 탐지할 수 있어 美 해군에서 잠수함에 의한 자기 이상 탐지(magnetic Anomaly Detection, MAD)에 SQUID를 사용하는 듯하다.¹⁰⁾

〈그림 6〉은 몇가지 자기센서의 성능을 주파수에 따라 비교한 표로 SQUID 자기센서의 성능은 다른 자기센서에 비해 약 10²배정도 우수함을 알 수 있다.

또한 〈그림 7〉에서는 보통 사용되고 있는 자기탐지센서와 초전도 자기탐지소자(SQUID)의 sensitivity를 비교한 것으로, SQUID 센서는 source 자기장의 세기와 위치까지도 측정할 수 있다.

—笑—少—怒—老—

어느 쪽이 먼저?

돈많은 실업가가 중혼죄로 고소를 당했다.

그는 일류 변호사를 고용하여 무죄를 얻어냈다.

변호사가 그에게 말했다.

「당신은 이제 자유로운 몸입니다. 부인에게 빨리 알려 주십시오.」

한참동안 머뭇거리던 실업가는 두툼한 봉투하나를 변호사에게 건네면서 말했다.

『정말 대단하군요. 그런데 어느쪽 마누라에게 먼저 알리면 좋을까요?』

구 분	현재 사용중인 자기장 센서	저온 초전도체를 이용한 자기장 센서	고온 초전도체를 이용한 자기장 센서
감 도 (Sensitivity)	10^{-5} 에서 10^{-8} Gauss	10^{-9} 에서 10^{-10} Gauss	저온초전도 센서보다 다소 뒤지는 감도
측정능력 (Measurement Capability)	10^{-8} Gauss에서 자기장의 세기만 탐지가능 자기장 원(Source)의 위치와 세기 측정 불가	자기장 원(Source)의 위치와 세기 측정 가능	자기장 원(Source)의 위치와 세기 측정 가능

〈그림 7〉 보통의 자기장센서와 초전도 자기장 센서의 비교

SQUID는 자기탐지소자 이외에도 해양표면으로부터 1백m 깊이 이상에서 오는 매우 약한 극저주파(Extreamly Low Frequency, ELF)를 탐지하는데에도 사용된다. 이러한 체계는 잠수함이 운용되는 깊이에서 모항과 통신을 유지할수 있도록 하는 ELF통신에서 수신용 안테나로 사용할수 있으며, 美 해군에서는 여러차례의 ELF통신체계에 대해 시험했던 것으로 알려지고 있다.¹⁰⁾

• 디지털 응용

죠셉슨 접합의 비선형적인 전류-전압특성을 이용하여 매우 적은 전력을 소모하는 고속 디지털 프로세싱이 가능하다. 죠셉슨 접합의 디지털 응용은 접합을 가로질러 흐를수 있는 초전도 전류가 어떤 임계값을 갖는 것을 이용한 것이다.

좀 더 자세히 기술하면 접합(junction)의 전류 전압곡선에서 어떤 양의 초전도 전류가 흐르고 있을때($V=0$) 전류가 증가하여 I_c 값이상이 되면 전압이 나타나게 된다. 즉 전류가 I_c 이하일때는 영($V=0$), I_c 이상일때에는 어떤 값($V=V_0$)을 갖게 된다.

. 이러한 소자가 零 상태에서 어떤 값을 갖는데 걸리는 스위칭 시간은 소자 자체만은 0.1 picosecond(10^{-13} 초)로 매우 고속이며, 실제 회로내에서는 회로와 device의 시정수(time constant) 때문에 다소 느려져 약 10 picoseconds가 된다.¹¹⁾

죠셉슨 소자는 매우 빠른 디지털 스위치 일뿐만 아니라 매우 적은 전력 소모특성을 지닌다. 앞서 논의한 것처럼 초전도 상태($V=0$)일때는

전력 소모가 없으며, 상전도 상태일때($V=V_0$)에도 초전도의 에너지 차가 수 mV이므로 초전도 전류가 1mA 이하이다. 그러므로 어떤 전압($V=V_0$) 값을 갖는 때에도 전력소모는 10^{-6} watts 정도이다.

죠셉슨 device는 기억소자로 사용될수 있으며, 대형 Focal Plane Array에서 나오는 신호를 디지탈화하는데 사용될수 있는 고속의 analog to digital 변환기로 사용될수 있다.³⁾ *

참 고 자 료

- 1) H. Kamerlingh Onnes, Akad. Van Wetenschappen (Amsterdam) 14, 113, 818 (1911)
- 2) J. G. Bednorz and K. A. Muller, Z. Phys. B64, 189 (1986)
- 3) 「Military Applications of Superconductors」, 〈 Miltech 〉, 1989년 5월호
- 4) J. Clarke, Nature 335, 29 (1988)
- 5) W. D. Donaldson, A. M. Kadin, P. H. Ballentine, and R. Sobolewski, Appl. Phys. Lett. 54, 2470 (1989)
- 6) H. S. Kwok, J. P. Zheng, and Q. Y. Ying, Appl. Phys. Lett. 54, 2473 (1989)
- 7) J. R. Tucker, IEEE J. Quantum Electron. QE-15, 1234 (1979)
- 8) M. Nisenoff, Cryogenics 28, 47 (1988)
- 9) S. Rudner and T. Claeson, SQUID '85, p 963 (Walter de Gruyter & Co., Berlin, 1985)
- 10) M. Nisenoff, J. L. Smith, D. G. Jablonski, E. Edelsack, and T. G. Berlincourt, Naval Research Reviews. (1985)
- 11) H. Hayakawa, Physics today p.46, MARCH (1986)