

초전도 SQUID자기센서의 응용



김상재

(토우호쿠대학 전기통신연구소 연구원)

초전도체를 이용한 SQUID(Superconducting quantum interference device)는 10^{-15} 테슬라(Tesla)의 미소 자장을 검출할 수 있는 초고감도 자기센서로서, 다양한 응용 분야가 개척되고 있다. 본 보고에서는 SQUID센서를 사용한 미약 자체 측정시스템 및 그 응용에 관한 최근의 진전에 대해서 소개한다. 그리고 SQUID센서의 동작 메카니즘 및 지금까지 SQUID센서를 사용할 경우 난관이었던 센서 냉각문제 및 자기실드(magnetic shield) 등에 대해서도 언급하였다.

1. 서론

초전도 상태에서 출현하는 자속의 양자화를 이용한 SQUID(Superconducting quantum interference device)는 초고감도의 자기센서로서, 지금까지 불가능하였던 극히 미약한 자체의 계측이 가능하며, 새로운 분야의 응용이 개척되고 있다 [1,2]. 그 중에서도 뇌에서 발생하는 자체를 측정하여, 뇌기능의 해명과 진단을 행하는 뇌자체 계측의 분야는 다른 장치로는 구현이 불가능하기 때문에 SQUID의 가장 큰 응용분야 중의 하나이다[3,4]. 현재 100채널(Channel)이상의 SQUID를 어레이 모양으로 배치한 뇌기능 진단 시스템이 개발되어서 판매되고 있다. 일본내에서도 각 대학병원 및 연구기관에 이미 수십대를 넘는 시스템이 도입되어 의학분야에서 큰 성과를

거두고 있다.

최근까지 SQUID 센서 시스템 보급의 가장 큰 장벽은 SQUID를 동작시키기 위한 센서의 극저온(액체헬륨온도) 냉각 및 환경자기 잡음을 제거하기 위한 자기실드(Magnetic shield)의 필요였으며, SQUID센서의 응용에 있어서 큰 어려움이 되어왔다. 뇌기능 진단 시스템 등과 같은 대규모시스템에 있어서 이러한 것들은 치명적인 장애물이 되는 것은 아니지만, SQUID의 응용분야를 넓히기 위해서는 이러한 장애물을 제거하는 것이 필수조건이다. 최근, 고온초전도체의 발견과 더불어 액체질소 온도에서 동작하는 센서의 제작이 가능하게 되었고, 냉각기의 성능 향상으로 인해 센서냉각의 문제는 크게 완화되어 있다. 또한 자기잡음의 제거기술도 향상되고 있고, 자기 실드없이 동작하는 센서시스템도 개발되어 있다. 이러한 진전으로 SQUID 센서 시스템은 표 1에서 보이는 것과 같이 많은 응용분야에 적용되어 지고 있다.

SQUID의 대표적인 응용분야로는 의학, 재료평가, 물질분석, 정밀계측, 지하자원탐사, 고감도 전류계 등이 될 수 있다. 이미 이들 응용에 있어서 SQUID센서의 우위성을 나타내는 많은 데이터가 나오고 있고, 응용분야가 크게 진전되고 있다.

본 보고에서는 이들 SQUID센서의 응용에 있어서의 최근의 성과를 소개함과 더불어 금후의 전개에 대해서 알아보기로 한다.

표 1. SQUID 센서의 응용분야.

응용분야	용도	
의학관계	뇌자계	뇌기능 맵핑 고차 뇌기능의 해석
	심장자계	부정맥, 허혈등의 검출 태아의 심자계측
	생리반응	항원 항체반응의 검출 유전자 해석
재료평가응용	비파괴검사	항공기, 대교 등의 구조물의 결합검사, 자성 불순물의 검사
	자기현미경	전자회로의 전류분포의 계측 미소영역의 자기특성의 평가
	물성평가	미량시료의 자기특성 역학적 스트레스와 자성의관계
지구물리응용	지하구조 검사	자원검사, 오염검사
	해양탐사	
고감도 전류계	광 X선 검출기	단일포톤 검출기 에너지 분산형 X선 검출기
	고속산호 측정	피코초의 전류파형계측

2. SQUID 자기센서의 동작 원리 및 중요 파라메터

SQUID는 일반적으로 dc SQUID 와 rf SQUID로 분류되지만, 전자가 후자에 비하여 잡음특성이 뛰어나기 때문에, 폭 넓게 연구되고 있다. 이단락에서는 dc SQUID (이하 SQUID로 칭함) 를 중심으로 설명한다.

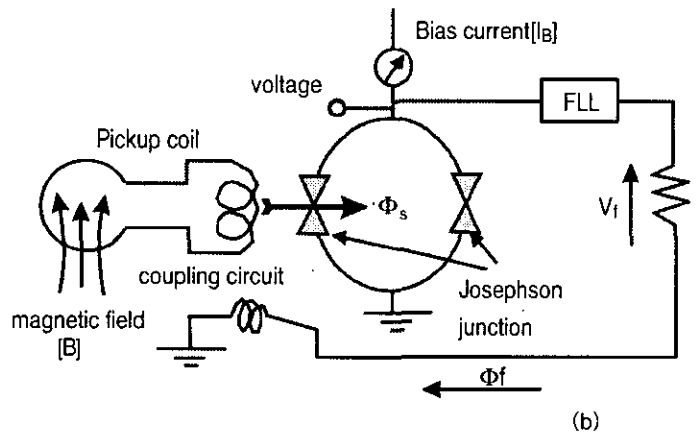
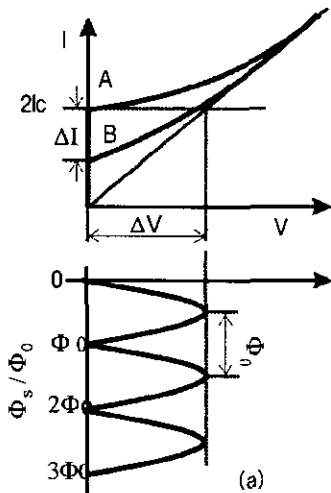


그림 1. (a) Current(I)-voltage(V) and flux (Φ_s)-voltage(V) characteristics of the SQUID
(b) Schematic figure of the SQUID sensor system

SQUID는 2개의 조셉슨 접합을 포함하는 초전도 루프 (Loop)로, SQUID의 특성 및 동작에 관해서 그림 1(a)에서 설명할 수 있다. 루프중에 들어 오는 자속 Φ_s 가 자속양자 ($\Phi_0 = 2.07 \times 10^{-15}$ Wb)의 정수배 일 때, SQUID는 전압을 발생하지 않은 최대전류 $2I_c$ 의 상태로 되고 SQUID의 전류-전압특성 (I-V특성)은 A에서 보이는 곡선이 된다. Φ_s 가 자속양자 Φ_0 의 (정수+1/2)배의 경우, 전류는 $2I_c - \Delta I$ 로 되고, SQUID의 I-V 특성은 B에서 보이는 곡선이 된다. Φ_s 를 계속해서 늘려가면 I-V특성은 이 두 개의 곡선간을 왕복하고 그 주기는 Φ_0 가 된다. 따라서 $I_B = 2I_c$ 가 되도록 전류를 바이어스하여 전압을 측정하면 그림 1(a)의 밑 그래프와 같은 주기 Φ_0 의 자속-전압 ($\Phi_s - V$)곡선이 얻어진다. $1/2I_c$ 의 값은 SQUID의 변조깊이 (Modulation depth)로 불리는 것으로, 차폐파라메타 $\beta_L (= 2LI_c/\Phi_0, L_s$ 는 루프 인덕턴스)의 함수로써 계산된다. 대략적으로는 $1/2I_c = (1 + \beta_L)^{-1}$ 로, β_L 가 클 수록 변조깊이는 얇게 나타난다.

SQUID자기센서 구성의 개략을 그림 1(b)에서 보인다. 그림에서 보이는 바와 같이 자계검출코일과 자기결합회로, SQUID, 구동용전자회로(Flux Locked Loop: FLL)의 3개의 요소로부터 구성되어 있고, 그 동작은 이하에서 설명하는 바와 같다. 검출코일을 사용하여 신호자계 B를 검출하고, 자기결합회로로부터 SQUID루프에 자속 Φ_s 를 쇄교시킨다. 앞에서 설명한 바와 같이 SQUID의 I-V 특성은 이 자속에 의해 변조되고, 일정바이어스전류 I_B 를 인가한 상태에서는 그 출력전압 V는 자속 Φ_s 에 대해서 주기적으로 변화한다. 입력자속에 의한 출력전압의 미소한 변화를 검출함으로써 자속양자 Φ_0 의 $1/10^5$ 정도의 자속변화를 검출하는 것이 가능하므로,

극히 고감도의 자기센서가 실현가능하다. 단, SQUID의 입출력(Φ_s -V) 특성은 그림 1(a)에서 보이는 바와 같이 주기적으로 나타나기 때문에 센서로서의 선형성은 저하된다. 이러한 문제를 해결하기 위하여, 그 구조에는 FLL이라고 불리는 피이드백회로가 사용된다. 신호자속 Φ_s 와 같은 양의 귀환자속 Φ_f 를 피이드백 함으로써 SQUID 루프 중의 자속을 항상 영으로 고정하여 ($\Phi_s + \Phi_f = 0$), 선형성의 문제를 해결하고 있다.

이 3개의 요소들은 SQUID의 응용대상에 따라서 최적화하여 설계할 필요가 있다. 즉 응용대상에 요구되는 센서의 자체분해능, 공간 분해능, 응답속도, 내잡음성을 최적화 하도록 이 3개의 요소가 설계되어야 한다. 또한 자체검출코일의 크기는 자체분해능과 공간분해능의 상호관계를 고려 해야 되며, 통상은 한번 1cm 정도의 코일이 사용될 경우 공간분해능으로는 수 mm정도가 되지만, 높은 공간분해능을 요구하는 SQUID 현미경등의 경우에는 50 μ m 정도의 것이 사용된다 [5]. 단, 센서의 공간분해능은 검출코일과 측정대상물과의 거리에 의해 제한되기 때문에, 공간분해능을 높이기 위해서는 양자의 거리를 가능한 한 가깝게하는 것이 중요하다. 또한 자체분해능을 높이기 위해서는 검출코일으로써 모은 자속을 효율적으로 SQUID루프에 전달할 필요가 있고, 이를 위해서 여러 종류의 자기결합회로가 개발되어 있다. 자속의 전달함수는 $A_{eff} = \Phi_c/B$ 로 주어지고, A_{eff} 는 유효면적(effective area) 이라고 부른다. SQUID의 성능은 입력자속 Φ_s 를 출력전압 V로 변환하는 변환효율($dV/d\Phi_s$) 과 SQUID가 검출가능한 최소자속에 대응하는 자속노이즈 n 로 표시되고, $dV/d\Phi_s = 100 \text{ V}/\Phi_0$, $\Phi_n = 10^{-6} \sim 10^{-5} \Phi_0/\text{Hz}^{1/2}$ 가 전형적인 값이다. 또한 지자기에 의한 이른바 자속트랩(Flux trap)이 발생하여 SQUID의 성능을 저하 시키기 때문에, 이러한 저하를 방지하기 위한 구조가 필요로 하게된다. 단, SQUID센서의 자체분해능은 $B_n = \Phi_n/A_{eff}$ 로 주어지기 때문에, 높은 자체 분해능을 얻기 위해서는 SQUID의 자속노이즈 Φ_n 을 작게 함과 더불어 자기결합회로의 유효면적 A_{eff} 을 크게할 필요가 있다.

SQUID의 출력전압은 극히 작기때문에 FLL회로와 같은 저잡음의 증폭회로를 필요로 한다. 현재로서는 전자회로의 잡음(전형적으로는 $1\text{nV}/\text{Hz}^{1/2}$)에 의해 센서의 성능이 제한된다고 할 수 있다. 이를 해결하기 위하여, $0.1\text{nV}/\text{Hz}^{1/2}$ 정도의 저잡음 앰프도 개발되어 있다. 또한, 센서의 응답속도는 FLL회로의 주파수 대역에 의해 제한된다. SQUID의 응용에서는 직류로부터 수MHz의 신호가 주로 측정 되지만, 측정대상에 따라서 필요로하는 대역을 설정할 필요가 있다. 특히, 큰잡음 환경하에서의 SQUID를 정상적으로 동작시키기 위해서는 회로의 대역을 크게 하는 것이 유효하기 때문에 수MHz 정도의 대역을 갖는 FLL회로가 개발되어 있다 [5-6].

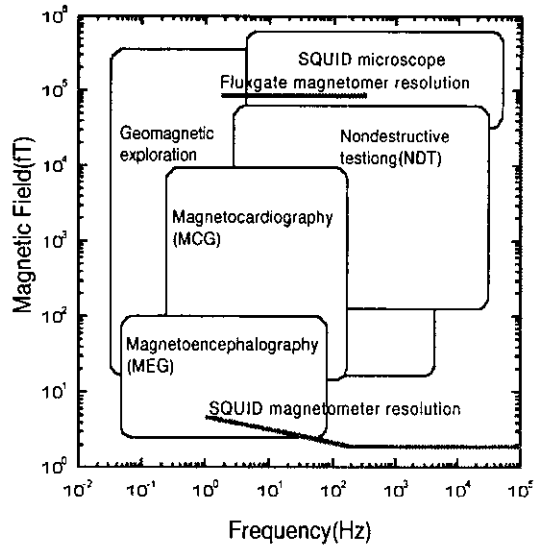


그림 2. Resolution and frequency of the magnetic signal used for the applications of the SQUID sensor.

SQUID센서의 대표적인 응용에 있어서의 측정신호의 크기와 주파수 대역을 그림 2에서 나타내었다. 이 그림에서는 플럭스게이트 자속계와 초전도체를 이용한 SQUID 자속계의 성능을 함께 표시하고 있다. 그림에서 보이는 SQUID 자속계의 분해능은 저온 초전도체의 경우로서 액체질소 온도에서 동작하는 고온 초전도 SQUID의 성능은 너저게 계측을 제외한 모든 응용에 있어서 충분한 성능을 가지고 있다.

다음은 환경자기잡음의 제거에 대해서 알아보기로 하자. SQUID 센서로 측정하는 신호자체의 크기는 1nT 이하로서, 이러한 미약자계를 측정하기 위해서는 환경자기 잡음을 효과적으로 제거하는 것이 필요하다. 자기실드를 사용하면 환경자기잡음의 제거는 비교적 간단하게 가능하지만 시스템이 고가이다. 또한, 비파괴검사와 지하구조의 검사 등 자기실드를 사용할 수 없는 응용분야도 많이 존재한다. 이러한 경우에는 큰 자기잡음하에서 측정을 할 필요가 있고, SQUID 센서의 내잡음성을 높이는 것과 더불어, 지자기, 전원잡음, 도시잡음 등을 효과적으로 제거한 SN비를 높이는 것이 중요하다. 이러한 방법으로는 그림 3에서 보이는 바와같은 그라디오메터(Gradiometer)를 사용한 자기실드를 필요로 하지 않는 측정시스템이 개발되어 있다. 일반적으로 환경자기잡음의 발생원은 측정대상보다 멀리에 있기 때문에, 그라디오메터는 자체의 공간미분을 측정하는 것에 의해 공간적으로 균일한 환경잡음을 제거하고 있다. 즉, 자체의 1차미분 혹은 2차미분을 측정하는 것에 의해, 환경자기 잡음의 영향을 수만분의 1 정도까지 감소시키는 것이 가능하다. 자체 공간미분을 측정하기 위해서는 자속계의 검출코일 대신에, 그림 3에서와 같은, 동일 면적의 2

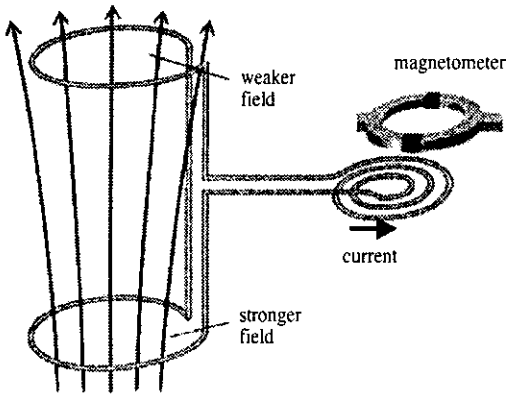


그림 3. Schematic figure of the symmetric (1st-order) gradiometer.

개의 코일을 차동형(직렬로서 반대방향)으로 접속시킨 것이 사용된다. 이 코일자계의 공간미분만이 SQUID에 전달 측정된다[7]-[10]. 다른방법으로서는 신호 검출용 자속계를 신호 원으로부터 떨어진 위치에 배치하여 잡음검출용 자속계의 출력의 차분을 전자회로적으로 제거하여 공간미분을 검출하는 이른바 전기적 그라디오메터가 있다 [8]-[10].

3. SQUID의 응용분야

SQUID센서의 대표적인 응용분야는 표1 에서 보인바와 같다. 의학분야에서는 뇌자계와 심장자계 등의 생체자기계측에의 응용이 중심이 되어 있다. 특히 뇌기능의 맵핑(Mapping)을 위한 멀티채널 뇌자계시스템은 이미 시판되어 있고 이 분야에 있어서 큰 실적을 올리고 있다. 최근, 새로운 응용으로써

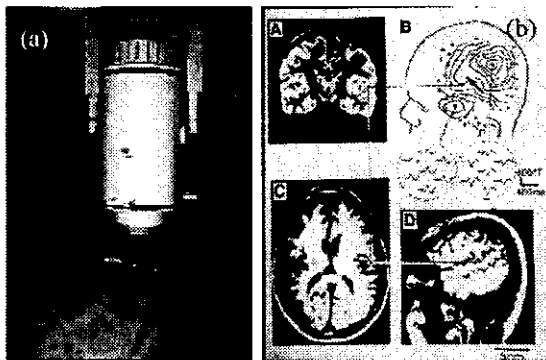


그림 4. Photograph of MEG system in Kyushu University Hospital (a) and the recording of the magnetic field distribution on the skull (b). 37 channel SQUID system is placed on the bottom of container in (a).

자기마커(Marker)를 이용한 항원-항체반응등의 생리 기능을 조사하는 연구도 시작되고 있다[11]. 재료평가 관계에서는 항공기와 대교등의 구조를 비파괴 검사와 불순물 검사를 위한 응용연구가 활발히 진행되고 있다. 종래의 방법에서는 곤란했던, 구조물 내부의 결함 검출과 미량의 불순물 검출등이 가능한 것으로 기대를 모으고 있다. 또한 나노메터에서 마이크로메터정도의 미소한 영역의 자기특성을 측정하기 위한 이른바 SQUID 자기 현미경도 개발 시판되고 있다. 자원 검사와 지하구조의 해석에 SQUID센서를 응용하는 연구도 활발히 행하여 지고 있고, 야외에서의 현장시험에 의해 그 우수성이 실증되고 있다. SQUID를 고감도의 전류계로서 사용하는 것도 가능하다. 적외선부터 X선의 넓은 범위에 걸치는 고감도 초전도검출기와 SQUID 전류계를 구성함으로써 종래의 반도체검출기를 상회하는 성능을 실증하고 있고, 이들 검출기를 사용한 고감도 분석시스템도 개발되어 있다[12]. 또한, 피코초(Pico-second)대의 고도의 전류파형을 마이크로 암페어의 정확도로 관찰하기 위한 이른바 샘플러(Pampler)도 개발도 진행중이다 [13,14].

3.1 뇌자계 계측

생체에서 발생하는 자계를 계측하여 생체기능의 해명과 진단을 행하는 생체자기계측분야는 SQUID 센서의 중요한 응용분야 중의 하나이다. SQUID센서는 밀리초대의 높은 시간정확도와 밀리메터 정도의 높은 공간정확도로 신호원을 추정가능한 탁월한 특징을 가지고 있다. 뇌 계측에 있어서는, 두부 전체를 한번에 계측하기 위하여 100 채널정도의 SQUID 센서 어레이를 탑재한 뇌 자계 시스템이 시판되고 있고, 뇌 외과에 있어서는 임상응용에서부터 뇌의 고차기능해명에 이르는 넓은 분야에 사용되고 있다. 특히, 임상응용에서의 뇌기능 맵핑은, 각종의 감각 자극에 의한 대뇌피질에서 유발되는 뇌자도를 계측하는 것에 의해 뇌기능의 맵핑(Mapping)이 가능하다. 이 결과는 뇌외과 수술과 뇌기능 장애등의 진단에 사용된다[15]. 그림 4 (a), (b)에서는 일본 큐슈대학 부속병원에 설치되어 있는 37 채널 SQUID를 장비한 MEG 시스템과 두부의 뇌파 측정결과를 나타내고 있다. 뇌자계 계측의 또하나의 응용은 언어 혹은 문자의 인식 기억 등의 뇌의 고차기능의 해명이다. SQUID센서의 높은 시간 정확도를 이용한 문자인식 등의 처리활동을 밀리초 단위로 시간에 따라서 조사하는 것이 가능하다. 이러한 특징을 활용하여 뇌인식의 메카니즘과 인식 부위의 해명, 단기 기억메카니즘과 기억부위의 해명등이 행하여 지고 있다[16].

더욱 폭 넓은 응용을 위한 앞으로의 과제로서는 뇌자계의 계측시스템으로서의 신뢰성을 높이는 측정평가 시스템의 알고리즘의 개발과 시스템의 가격을 내리기 위해 간편한 자기실드에서도 동작하는 시스템의 개발이 필요하다.

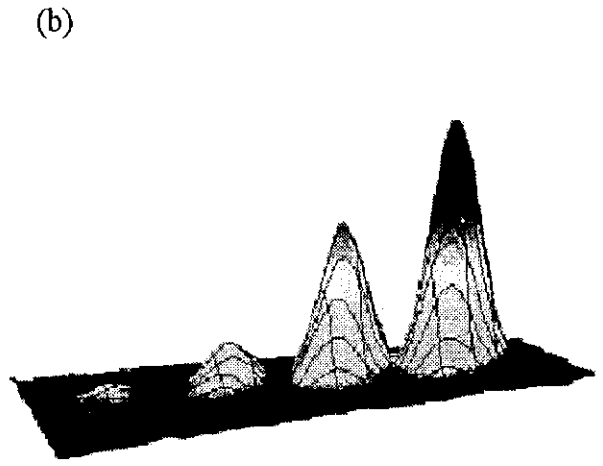
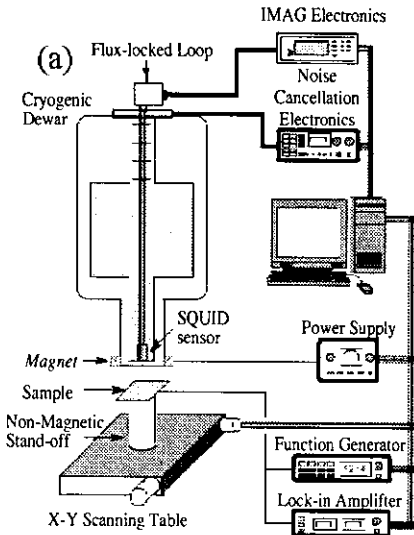


그림 5. (a) Scheme and components of commercial scanning SQUID microscope system by Tristan Technologies Co. (b) Scan of 1, 3, 5 and 10 mm holes in a steel plate.

3.2 재료평가에의 응용

3.2.1 비파괴 검사

SQUID를 사용한 비파괴검사는 구조재료의 크랙 및 부식등의 결함의 검출, 재료내부의 불순물 검출과 피로 손상변형의 검출 등이 주된 응용분야이다[17]. 결함검출에 있어서는 항공기 등에 사용되는 알루미늄합금과 탄소강과 플라스틱의 심부의 결함검사, 대교 등의 콘크리트내부의 강재의 결함검사 등에의 적용이 검토되고 있다. 이러한 결함검사에는 지금까지 와전류법이 사용되어 왔지만 1kHz 정도의 주파수까지만 사용이 가능하고, 항공기등에서 사용되는 알루미늄 합금의 표피깊이는 1kHz에서 2.6mm 정도 이어서 표면하깊이 수 mm의 부식과 결함 등을 발견하는 것은 쉽지 않다. SQUID 센서는 수Hz에서 수100Hz정도의 주파수를 사용함으로 수cm정도의 심부까지 검사가 가능하다. 또한 측정주파수를 변화시킴으로써 다층판의 어느위치에 결함이 있는지를 검출할 수 있다. 이미 비파괴검사용 SQUID검사 시스템이 개발되어 있고, 실제의 항공기와 대교 등의 검사에 적용되고 있으며, 고순도의 동선을 제작하는 경우 미량 철불순물의 검출 등에 대한 응용이 검토되고 있다 [18,19].

또한, 재료에 기계적 스트레스가 가해지면 내부에 전이 등의 내부결함이 발생하여, 그 응력에 대응한 재료의 자기적 변화가 일어난다. 이러한 성질을 이용한 강재와 자성재료의 피로 손상변형에 의한 금속피로의 조기발견을 위한 연구도 진행되고 있다[20]. 그림 5에서는 트리스탄 테크놀로지에서 시판되고 있는 SQUID 현미경의 개략도 및 강판상에 위치한 1, 3, 5, 10 mm 의 홀의 측정 결과이다.

3.2.2 SQUID 자기현미경

공간 분해능을 마이크로미터부터 나노미터영역까지 높은 이른바 주사형의 SQUID 자기현미경이 개발되어 있다 [5],[20]. 공간분해능을 확보하기 위해서는 자계검출코일과 더불어, 시료와 SQUID와의 거리를 가깝게 할 필요가 있다. SQUID를 동작시키기 위해서는 SQUID를 극저온에 냉각시킬 필요가 있기 때문에, 실온의 시료를 측정하기 위한 특수한 냉각용기가 개발되어있다.

현재로서는 시료와 센서의 간격을 50 μm 정도까지 근접시키는 것이 가능하며 공간분해능은 50 μm 정도이다. 이 장치를 사용하여 멀티칩모듈 기반상의 전자회로 혹은 칩패키지에 있어서의 전류 분포가 재측되었다. 냉각용기의 개선에 의해 공간분해능은 10 μm 정도까지는 개선될 것으로 보인다.

저온시료측정에 있어서는 공간분해능의 확보가 비교적 간단하며 수 마이크로미터 정도의 분해능이 얻어지고 있고, 이를 이용하여 초전도체의 양자자속의 분포와 자성미립자의 자기특성등을 관측하고 있다. 또한 고투자율을 갖는 자성의 침을 자속의 가이드로 병용함으로써 나노미터의 공간분해능이 얻어져있고, 자성다층박막의 자기구조와 자성콜로이드 등의 구조를 관측하고 있다.

3.3 샘플러를이용한 고속전류 파형의 측정

조셉슨소자에 전류를 인가한 경우에는 임계전류라고 불리는 최소치를 경계로하여 재료전압상태에서 유한전압 상태로 전이한다. 이 전이시간의 속도와 전류에 대한 고감도를 이용하여, 고속의 미소한 전류파형을 측정하는 이른바 조셉슨 샘플러를 이용한 측정 방법이다.

4. 결론

SQUID센서의 동작원리 및 최근의 개발동향에 대해서 개략적으로 알아 보았다. SQUID센서를 이용할 경우 큰 장벽이었던 센서의 냉각과 자기실드의 문제는, 고온 초전도체를 사용한 SQUID가 개발되고 고성능 크라이오메터가 개발됨으로써 최근에는 크게 완화되었다.

이 결과 SQUID 자기센서가 의학, 재료평가, 물질분석, 정밀계측, 자원탐사등의 다양한 분야에 응용되고 있다. 이미 시험의 단계를 넘어서 시판되고 있는것도 있으며, 종래의 센서에 비교하여 그 유용성을 실증하는 많은 데이터가 발표되고 있다. 가까운 장래에 SQUID 자기 센서의 우수한 특성을 이용한 측정기기가 널리 보급 되어질 것으로 기대된다.

참고문헌

- [1] S. -J. Kim, J. Chen, Y. Mizugaki, K. Nakajima, and T. Yamashita, "YBCO SQUIDS Fabricated by Field-Emission Electron Beam Source", IEEE Trans. Appl. Supercond. vol. 9(2), pp. 3089-3092, 1999.
- [2] K. Enpuku and T. Minotani, "Improvement of high Tc SQUID magnetometer", Oyo Buturi vol.66(4), pp. 377-380, 1997.
- [3] Y. Taniguchi, E. Yamamoto, and K. Tsukada, "Using an MRI simulator to evaluate image quality and to develop an artifact suppression method in hybrid-echo imaging", IEICE Trans. Electron. vol. J83-D-II(9), pp. 1916-1925, 2000.
- [4] N. Ishikawa and H. Kado, "Biomagnetism Measurement with SQUID" Oyo Buturi vol.60(6), pp. 591-595 1991.
- [5] F. F. Fleet, S. Chatrathorn, F. C. Wellstood, S. M. Green and I. A. Knauss, "HTS scanning SQUID microscopy of active circuits", IEEE Trans. Appl. Supercond. vol. 9(2), pp. 3704-3707, 1999.
- [6] SQUID Sensors: Fundamentals, Fabrication and Applications, ed., H. Weinstock, Kluwer Academic Publishers, Boston, 1995.
- [7] K. Enpuku, "Recent development of high-Tc dc SQUID magnetometer", IEICE Trans. Electron., vol.80-C(10), pp. 1240-1246, 1997.
- [8] E. Danksker, O. M. Froehlich, S. Tanaka, K.

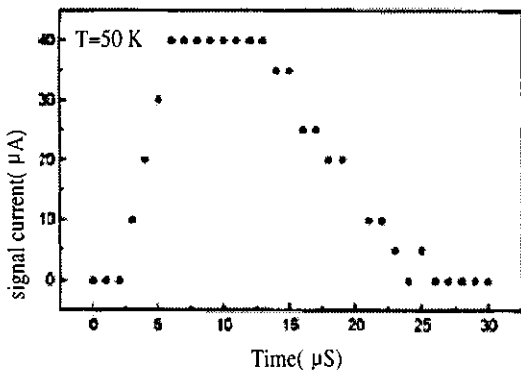
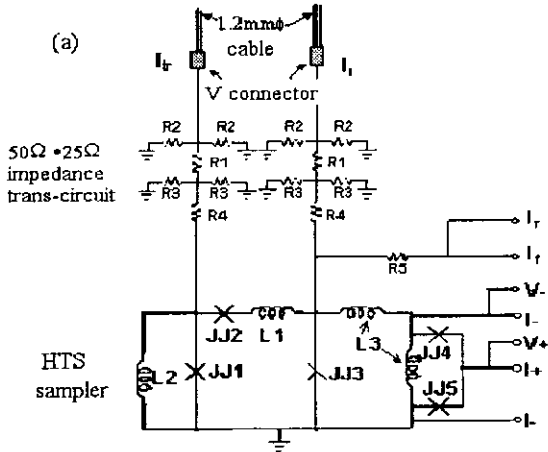


그림 6. (a) Circuit design of the high-Tc superconducting (HTS) sampler circuit. V+, V- and I+, I- are voltage current terminal of the readout SQUID (JJ: Josephson junctions). (b) The experimentally obtained signal current using the HTS sampler circuit. The operating temperature of the circuit is 50 K.

플러가 개발되어 있다[14],[21]. 그림 6은 일본 NEC의 연구 그룹에 의해 개발된 고온초전도체를 이용한 샘플러의 회로도와 측정결과를 보인다. 소형냉동기로 동작이 가능한 고온초전도체를 사용한 샘플러로서, 피코초 정도의 시간 정확도와 마이크로 암페어대의 전류정확도가 기대된다. 반도체와 전기광학효과를 이용한 샘플러가 전위와 전계측정을 하는 것에 대해, 조셉슨 샘플러는 전류파형을 고정도로 직접 관찰 가능한 이점이 있다. 또한 회로제작기술을 높임으로써 샘플러의 성능을 더욱 고도화하는 것이 가능하므로 앞으로의 진전이 기대되며, 소자수를 100개정도로 늘림으로써 카운터와 A/D 컨버터에의 응용도 기대된다.

- Kouznetov, J. Clarke, Z. Lu, Matijasevic, and K. Char, "High-Tc superconducting gradiometer with a long baseline asymmetric flux transformer", Appl. Phys. Lett. vol.71(12), pp. 1712-1714, 1997.
- [9] J. Borgmann, P. David, G. Ockenfuss, R. Otto, J. Schubert, W. Zander, and A. I. Braginski, "Electronic high-temperature radio frequency superconducting quantum interference device gradiometers for unshielded environment", Rev. Sci. Instrum. vol.68(7), pp. 2730-2734, 1997.
- [10] D. F. He, H. J. Krause, Y. Zhang, M. Bick, H. Scltner, N. Wolters, W. Wolf, and H. Bousack, "HTS SQUID magnetometer with SQUID vector reference for operation in unshielded environment". IEEE Trans. Appl. Supercond. vol.9(2), pp. 3684- 3687, 1999.
- [11] K. Enpuku, T. Mimotani, T. Gima, Y. Kuroki, Y. Itoh, M. Yamashita, Y. Katakura, and S. Kuhara, "Detection of magnetic nanoparticles with SQUID magnetometer and application to immunoassays", Jpn. J. Appl. Phys. vol.38 (10A), 1999.
- [12] G. C. Hilton, D. A. Wollman, K. D. Irwin, L. L. Dulcie, N. F. Bergren, and J. M. Martinis, "Superconducting transition-edge microcalorimeter for X-ray microanalysis", IEEE Trans. Appl. Supercond. vol.9(2), pp. 3177-3181, 1999.
- [13] S. A. Faris, "Generation and measurement of ultrashort current pulses with Josephson devices", Appl.Phys.Lett. Vol.36(12), pp.1005-1007, 1980.
- [14] M. Hidaka, T. Satoh, H. Terai, and S. Tahara, "A High-Tc superconductor Josephson sampler", IEICE Trans. Electron. vol.E80-C(10), 1997.
- [15] N. Nakasato, R. Shirane, and T. Yoshimoto, "Clinical application of magnetoencephalography by multichannel SQUID system", Oyo Buturi, vol.66(11), pp. 1229-1232 1997.
- [16] Y. Taniguchi, E. Yamamoto, and K. Tsukada, "Using an MRI simulator to evaluate image quality and to develop an artifact suppression method in hybrid-echo imaging", IEICE, vol. J83-D-II(9), pp. 1916-1925, 2000.
- [17] N.Kasai, "Nondestructive evaluation of materials using a superconducting quantum interference device", Oyo Buturi, vol.67(4), pp. 417-423, 1998.
- [18] H. Itozaki, T. Nagaishi, H. Toyoda, and H. Kugai, "Detection of fine iron particles in high-speed scrolled wre by HTS SQUID", IEICE trans. Electron. vol.80-C(10), pp. 1247-1251, 1997.
- [19] Y. Tavrin, M. Siegel, and J. H. Hinken, "Standard method for detection of magnetic defects in aircraft engine discs using a HTS SQUID gradiometer", IEEE Trans. Appl. Supercond. vol.9(2), pp. 3809-3813, 1999.
- [20] Y. Morooka, S. Nakayama, A. Odawara, M. Ikeda, S. Tanaka, and K. Chinone, "Micro-imaging system using scanning dc-SQUID microscope", IEEE Trans. Appl. Supercond. vol.9, pp. 3491-3494, 1999.
- [21] M. Hidaka, T. Satoh and S. Taha, "High-resolution measurements using high-Tc superconductor materials", Oyo Buturi, vol.67(10), pp. 1167-1170, 1998.

저 자 약 력

성명 : 김 상 재

◆ **학 력**

1984년-1993년 부산수산대학 기계공학과(공학석사)
1993년-1997년 일본 토우호쿠대학 전기통신공학전공
(공학박사)

◆ **경 력**

1997년-현재 일본 토우호쿠대학 전기통신연구소 연구원
2001년 4월 일본 미답과학기술협회 초전도과학기술상
수상