

# SQUID

문 승 현  
LG 종합기술원

## I. 머릿말

SQUID(Superconducting Quantum Interference Device)는 외부 자기장의 변화를 출력전압으로 표시하는 일종의 변환기로, 이름에서 나타나듯이 초전도체의 거시적인 양자현상의 간섭을 이용한 소자이다. SQUID는 자기장 감지 센서로 현존하는 어떤 종류의 센서보다 가장 민감하여, 그 한계가 양자역학적 불확정성 원리에 의해 제한될 뿐이다. SQUID의 이러한 고감도성은 미세한 자기장의 측정뿐만 아니라 자기장으로 변환될 수 있는 다양한 물리량들—전류, 전압, 기계적 진동 등—의 미세한 변화를 측정하는데 응용할 수 있다. 따라서 인체의 뇌에서 나오는 미세한 자기장을 측정하여 기능의 이상이 있는 부위를 정확히 찾아 내는 일, 초신성의 폭발로 인한 중력파의 검출, 비행기 날개의 깊숙한 위치에 발생한 미세결함의 탐지, 잠수함이나 기뢰의 위치 탐지 등 기존의 방법으로 수행할 수 없는 많은 측정들이 SQUID를 이용하여 행해지고 있다. 1963년 최초로 개발된 이래 SQUID는 발전을 거듭하여 현재 초전도를 이용한 소규모 응용분야에서 가장 널리 쓰이는 소자로 자리잡고 있다.

이러한 우수한 특성에도 불구하고, 초전도성을 이용하여야만 하는 SQUID는 액체헬륨을 냉매로 이용하여 4.2 K라는 낮은 온도에서 사용하여야 했으므로 그 사용의 범위가 저온물리 실험실이나, 뇌파 측정 등 특수한 분야에 제한되어 왔다. 그러나 1986년 산화물 고온초전도체가 발견되어 훨씬 높은 온도인 액체질소 온도(77K)에서 동작하는

SQUID의 제작이 가능하게 되었고, 다루기 쉽고 값이 저렴하며 보관이 용이한 액체질소를 냉매로 사용하는 고온초전도 SQUID의 등장은 그 응용 범위를 크게 확장할 수 있도록 하였다. 고온초전도 SQUID의 응용범위는 전자 계측기 등의 전자공학 분야, 자원탐사 등의 지구과학 분야, 심자계 등의 의료기기 분야, 기초과학 측정분야 및 방위 산업 등을 포함한 산업계 전 분야로 확산되리라 기대되고 있다.

## II. SQUID의 원리와 구조

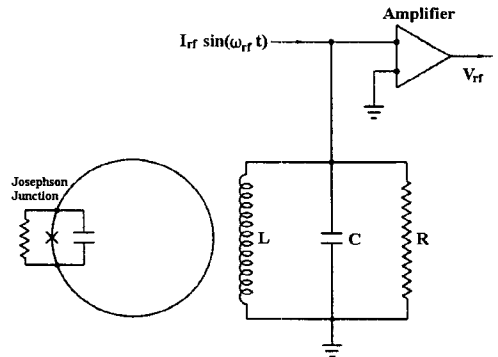
SQUID는 고유한 초전도체 특유의 조셉슨 효과(Josephson effect)와 자속 양자화(fluxoid quantization)의 두 가지 현상을 이용하여 만든 소자이다.<sup>[1]</sup> 1911년 네덜란드의 H. Kamerlingh Onnes에 의해 수은의 전기저항이 4.2K에서 사라지는 초전도 현상이 처음 발견되었고<sup>[2]</sup>, 초전도체는 전기저항이 없을 뿐 아니라 내부의 자기장을 밖으로 밀어내는 완전 반자성(diamagnetism) 현상(흔히 Meissner 효과로 불리어짐<sup>[2]</sup>)을 나타낸다는 사실이 1933년 발견되었다. 이러한 현상에 대한 설명은 1957년 J. Bardeen, L. N. Cooper, J. R. Schrieffer에 의하여 비로소 이루어졌다.<sup>[2]</sup> BCS 이론이라 불리는 이 이론의 핵심은 쿠퍼쌍(Cooper pair)이라 불리는 전자쌍의 형성이다. 초전도 현상이 일어나는 임계온도 이하로 온도가 내려가면 반대방향의 스핀과 모멘텀을 갖는 전자쌍은 고체의 격자 진동인 포논(phonon)을 매개하여

이루어지며 정상상태보다 낮은 에너지 상태에 있게 된다. 이 에너지 간격(energy gap)은 새로운 질서 매개변수(order parameter)로, 거시적인 초전도체는 하나의 양자역학적 파동함수로 기술할 수 있게 된다. 1962년 영국의 대학원생인 B. D. Josephson은 두 개의 초전도체가 아주 얇은 절연막으로 서로 약하게 연결되어 있을 경우 쿠퍼쌍이 양자역학적 터널링을 할 수 있을 것이라고 제안하였다.<sup>[2]</sup> 즉 초전도체의 양자역학적 파동함수가 장벽을 넘어 서로 중첩되는 현상이 일어나고, 두 파동함수의 위상 잠김(phase lock)에 의해 쿠퍼쌍의 터널링, 다시 말해 전압이 걸리지 않은 상태에서 초전류가 흐른다는 것이다. 즉 조셉슨 접합은 약화된 초전도체로 볼 수 있으며, 이때 흐르는 전류의 크기는 양쪽 초전도체의 위상차의 사인(sine) 값에 비례하며, 최대전류는 초전도 재료, 접합의 크기와 형태, 온도에 따라 다르다. 이를 직류 조셉슨 효과라 부르며, 논문이 발표된 지 몇 개월 후 실험적으로 증명되었다. 교류 조셉슨 효과는 접합의 양단에 직류 전압이 걸릴 경우 접합에 흐르는 전류가 진동한다는 것으로, 그 값은  $1\mu\text{V}$ 당 483.6 MHz( $=1\mu\text{V}/\Phi_0$ )로 증가한다는 것이다. 이런 특성의 조셉슨 접합은 SQUID에 이용될 뿐 아니라 국가표준기관에서의 전압표준을 정하는데 이용되기도 하고, 1ps 이하의 스위칭 속도를 갖는 초고속, 저전력 디지털 소자-network switching, ADC 등의 주요 요소로 연구되고 있다.

자속 양자화는 초전도체로 이루어진 고리 내부로 들어갈 수 있는 자속(자기장과 고리내부 면적의 곱)의 양은 자속 양자(flux quantum :  $\Phi_0 = h/2e \approx 2.068 \times 10^{-15} \text{Wb} (\equiv \text{T} \cdot \text{m}^2)$ )의 정수배만 허용된다는 특성이다. 이는 원자핵 주위를 운동하는 전자의 에너지 준위가 불연속적이며, 전자궤도가 원자핵 주위를 한 바퀴 돌 때 위상차가  $2\pi$ 의 정수배만큼 차이가 나야 한다는 대표적인 양자 현상과 맥락을 같이 한다. 다만 원자의 경우 0.1nm 정도의 작은 크기에서 기인하는 양자 현상이지만, 초전도체의 경우 그 자체가 파동함수의 결맞음으로 인한 거시적 양자효과를 보이고 있으므로, 같은 현상이 일어나는 고리의 크기가 수백  $\mu\text{m}$ 에 이르고 있

고, 유한한 온도에 기인하는 열요동을 고려하지 않을 경우 그 크기의 제한은 사실상 없다 하겠다. SQUID에서 자속 양자화를 조금 자세히 설명하면, 초전도 고리에 자기장이 가해지면 마이스너 효과에 의해 고리 내부의 자기장을 상쇄시키려는 차폐전류가 흐르게 되고, 고리에 접합이 있는 경우에는 일부 자기장이 차폐되지 않고 내부로 들어가게 된다. 이때 외부 자기장에 의해 고리 내부에 걸린 외부 자속과 차폐전류에 의한 유도자속의 합, 즉 고리 내부에 침투한 자속의 양은 자속양자  $\Phi_0$ 의 정수배만 허용된다. 자속양자  $\Phi_0$ 의 크기는 지구 자기장(약 0.5gauss)이 머리카락의 지름(약  $70\mu\text{m}$ )을 통과할 경우의 약 1/100 크기로 매우 작은 값이며, SQUID의 감도는 약  $10^{-6}\Phi_0$ 에 이르고 있다.

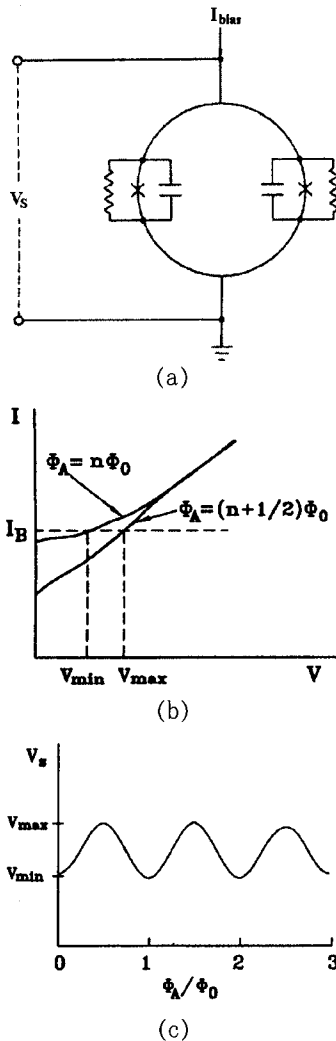
SQUID는 작동시에 걸어주는 전류의 종류에 따라 rf SQUID와 dc SQUID의 두 종류로 구분된다.<sup>[3]</sup> rf SQUID는 한 개의 조셉슨 접합이 초전도 고리에 있는 구조로, 인덕터-축전기 공진기가 이 초전도 고리에 자기적으로 유도 결합되어 라디오 주파수의 전류를 인가 시킬 수 있게 되어 있다.(그림 1) 보통 인가전류의 주파수는 공명회로의 공진 주파수(수십 MHz~수 GHz)를 사용하고, 초전도 고리에 자속이 변화하면 자속 양자화로 공진기의 유효 임피던스가 주기적으로 변하며 따라서 공진기의 전압도 주기적으로 변한다. rf SQUID는 한 개의 조셉슨 접합으로 이루어지므로 비교적 만들기가 쉽고, 인가전류가 SQUID에 직접 걸리지 않



(그림 1) rf SQUID의 구성도

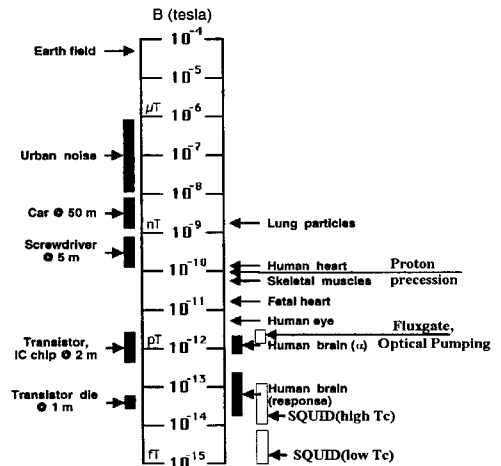
므로 갑작스러운 전기적 변화에 대해 안전한 장점 등으로 먼저 실용화되어 현재 많이 쓰이고 있다. 그러나 dc SQUID가 rf SQUID 보다 내재적 감도가 더 우수하고, 박막 기술의 발달로 유사한 특성을 갖는 두개의 조셉슨 접합을 제작하는데 큰 어려움이 없으므로 dc SQUID에 관한 연구가 최근에는 더욱 활발하며, 널리 응용되고 있다.

dc SQUID는 초전도 고리에 두개의 조셉슨 접합이 병렬로 연결된 모양을 하고 있다.(그림2(a)) 자기장이 없는 상태에서 dc SQUID에 직류 전류



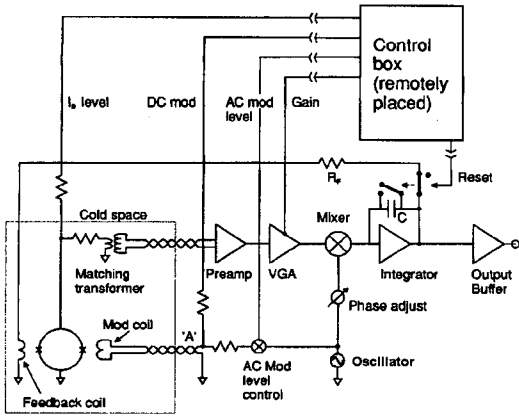
(그림 2) dc SQUID의 구성도(a)와 자속-전압 변환의 원리((b),(c))

를 인가하면 두 접합에 반씩 전류가 흐르게 된다. 이때, 자기장을 걸면 초전도 고리에 차폐전류가 흐르게 되어 전류의 흐름이 바뀌게 되며, 따라서 SQUID의 임계전류 값이  $\Phi_0$ 의 주기로 바뀌게 된다. 즉, 전류-전압 특성을 살펴보면 자기장의 변화에 따라 임계전류가 최대인 자기장이  $n \Phi_0$  일 때의 곡선과 임계전류가 최소인  $(n+1/2)\Phi_0$  일 때의 곡선 사이를 오가게 된다.(그림 2(b)) 따라서 자기장의 변화에 따라 임계전류는  $\Phi_0$ 의 주기를 갖게 되며, 임계전류 이상의 인가전류를 일정하게 흘려주고 양단의 전압을 측정하는 경우 주기가  $\Phi_0$ 인 정현파의 출력 전압을 얻을 수 있다.(그림2(c)) 이렇게 인가전류를 직류로 흘려 주기 때문에 dc SQUID라 부르나, 실제 조셉슨 접합 양단에는 높은 주파수(~수십 GHz)의 전류가 흐르며 실제 측정시의 전압은 시간에 대한 평균값이다.[4] 그림 3은 여러 가지 자기신호의 세기와 SQUID를 포함한 여러 자력계의 감도를 나타내고 있다.



(그림 3) 여러 가지 자기신호의 세기와 SQUID를 포함한 여러 가지 자력계의 감도

이와 같은 정현파 특성은 SQUID의 양자간섭 현상을 직접적으로 보여 주고 있지만, 실제 외부 자기장의 변화가  $\Phi_0$  보다 큰 경우 정확한 측정이 어렵다. 따라서 외부자기장에 대하여 전압의 변화가 선형적으로 일어나도록 SQUID 주변회로를 설치



(그림 4) 변조방법을 이용한 SQUID FLL 회로의 예시<sup>[6]</sup>

하면  $\Phi_0$  보다 아주 작은 자기장부터 아주 큰 자기장까지 정확하게 측정할 수 있다. 이런 회로를 FLL(flux locked loop)이라 하며 그림 4에 나타나 있는 것처럼 SQUID에서의 자속 변화량에 정확히 상쇄되도록 되먹임 저항과 코일을 이용하여 SQUID에 역되먹임 함으로써 SQUID를 null detector로 사용하게 한다. 이때 되먹임 저항 양단에 걸리는 전압은 SQUID에서의 자속변화에 선형적으로 비례하는 값을 갖는다. FLL을 구성하는 방법에는 100kHz에서 수십 MHz의 modulation 방법과 직류 방법으로 크게 나뉘어 지며, 최근 디지털 SQUID도 등장하고 있다.<sup>[3,6]</sup>

초기의 SQUID는 초전도체 덩어리에 구멍을 뚫는 방법이 이용되었으나, 1980년대 초반 M. B. Ketchen과 J. M. Jaycox에 의해 제안된 다층 박막화된 SQUID가 현재에는 저온초전도 SQUID의 주종을 이루고 있다. 임계온도 9.2K의 Nb 초전도체가 SQUID 제작에 가장 널리 쓰이고 있으며, AlOx를 조셉슨 접합의 절연막으로 사용한 Nb-AlOx-Nb의 삼층 구조를 기초로 하고 있다. 현재 발전된 실리콘 반도체 기술에 기반하여 sub- $\mu$ m 기술이 채용된 SQUID를 하나의 실리콘 웨이퍼 위에서 수백 개씩 제작할 수 있는 수준에 이르러 있다.

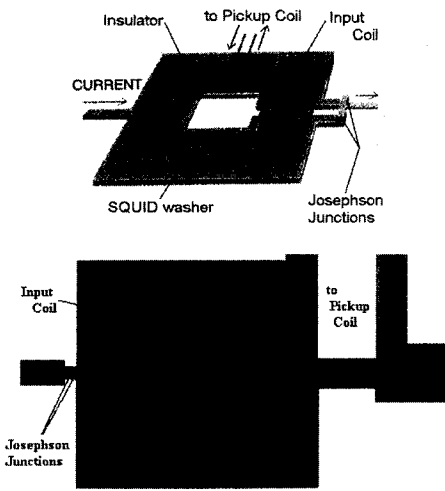
SQUID의 감도는 흔히 단위시간당 측정할 수 있는 가장 작은 자속 변화에 해당하는 에너지로 나

타내며, 우수한 특성의 Nb SQUID의 경우 4.2K에서 약 100 감도를 갖는데 이는 지구중력장에서 전자를 1mm 들어올리는데 필요한 에너지에 해당하는 매우 작은 값이다. 현재까지 보고된 가장 우수한 SQUID의 감도는 IBM Watson의 D. D. Awshalom 등이 0.3K이하의 온도에서 기록한 1.7h로 Heisenberg의 불확정성 원리에 의한 측정 한한선에 거의 근접하고 있다.

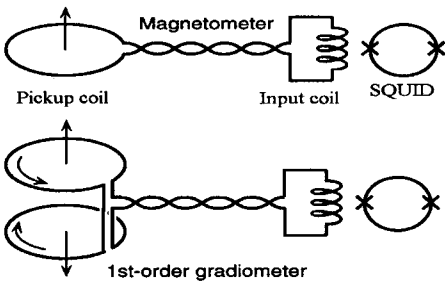
### III. SQUID 자력계

SQUID를 자기 센서로 이용하기 위해서는 자속이 아닌 자기장에 대한 감도가 중요하다. SQUID를 구성하는 초전도 고리의 크기를 단순히 증가시키는 것은 유한한 온도하에서 SQUID의 성능을 급격히 저하시키므로 자기장을 효과적으로 모아주는 구조를 채택하는 것이 중요하다. 대개 자기장을 감지하는 안테나에 해당하는 넓은 면적의 감지 코일(pickup coil)을 SQUID에 결합시켜 사용하는데, 감지코일을 직접 SQUID의 몸체에 연결하는 직접결합(directly couple) 방법과 자기장을 SQUID에 집속시켜 주는 입력코일(input coil)에 감지코일을 직렬로 연결하고 입력코일과 SQUID는 인덕터 결합(inductively couple)하는 두 가지 방식으로 나눌 수 있다. 후자의 경우 제작 공정은 복잡하지만 효율이 우수하여 더욱 널리 쓰이고 있으며, 이때 감지코일과 입력코일이 연결된 장치를 흔히 자속변환기(flux transformer)라 한다.(그림 5(a))

자속변환기는 넓은 면적의 감지코일에 발생한 차폐전류를 좁은 면적의 SQUID 위에 여러 번 감긴 입력코일에 전달하여 상대적으로 강한 자기장을 전달하도록 하는 역할을 한다. 이 이득은 대개 100배 이상으로 SQUID의 주기는  $1nT/\Phi_0$  내외가 되며, 이때 자기장에 대한 감도는  $1 fT/Hz^{1/2}$ 에 이른다. 또 자속변환기에서 감지코일의 형태에 따라 자기장을 측정하는 자력계(magnetometer)가 될 수도 있고, 자기장의 공간적 기울기(gradient)



(a) 입력 회선 코일과 SQUID의 결합예시<sup>[5]</sup> 및 자속 변환기가 합쳐진 고온초전도 SQUID 자력계의 사진(U. C. Berkeley),



(그림 5) b) SQUID 자력계(magnetometer)와 gradiometer.

를 측정하는 gradiometer가 될 수도 있다. 1차 gradiometer의 예를 들면 두 개의 고리가 서로 반대 방향으로 감겨 직렬로 연결되게 감지코일을 배치할 경우 균일한 자기장 하에서는 크기가 같고 방향이 반대인 차폐전류가 발생해 입력코일로는 전류가 전혀 전달되지 않는 반면에, 두 개의 고리에 크기가 다른 자기장이 가해질 경우 그 차이 만큼의 전류가 입력코일에 전달되게 된다. (그림 5 (b))<sup>[5]</sup> 이러한 gradiometer는 심장 등에서 발생하는 생체자기 신호를 측정할 때 대단히 유리하다. 그림 3에서 보는 바와 같이 우리 주변에는 지자기

를 비롯하여 전원에서 발생하는 60Hz의 자기장, 자동차, 엘리베이터 등에서 발생하는 자기장으로 둘러싸여 있으며, 이 크기는 측정하여야 하는 대상에서 나오는 자기신호에 비하여 대단히 크다. 그러나 대부분의 이러한 신호원은 SQUID에서 멀리 떨어져 있으므로 공간적으로 균일한 반면에 생체자기 신호는 SQUID 가까이에 위치하여 큰 자기장 기울기를 갖기 때문에 gradiometer를 사용하면 신호의 분리가 가능해진다. 실제의 경우 뇌파에서 나오는 자기장의 측정을 위해서는 고가의 자기 차폐실 내부에서 자력계, 또는 1차 gradiometer를 사용하거나, 일반 환경에서 고가의 gradiometer를 사용한다.

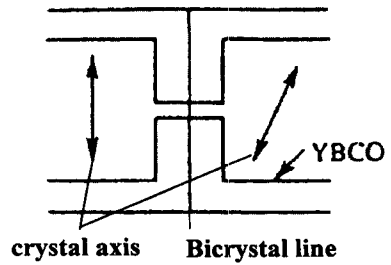
#### IV. 고온초전도 SQUID

1986년 임계온도가 약 30K인 구리 산화물 La-Ba-Cu-O 물질이 스위스 IBM 그룹의 J. G. Bednorz와 K. A. Müller에 의해 발견된 이후<sup>[2]</sup>, 이듬해 초 임계온도가 90K가 넘는 YBa<sub>2</sub>Cu<sub>3</sub>O<sub>7-δ</sub> (YBCO) 물질이 발견됨으로써 세계적으로 폭발적인 고온초전도 연구가 시작되었다. 임계온도가 액체질소의 비등점(77K)을 넘는 초전도체의 발견이 큰 주목을 받은 이유는 초전도체 응용의 가장 큰 걸림돌인 냉각문제의 완화이다. 액체질소는 액체 헬륨과 비교하여 증발열이 100배 가까이 커서 냉각이 손쉽고, 세계 어느 곳에서나 손쉽게 구할 수 있고 가격도 수 십분의 일에 불과하여 경제적이기 때문이다. 현재까지 발견된 산화물 고온초전도체 중 YBCO는 SQUID 등의 박막소자 제작에 가장 널리 쓰이고 있는 물질이다. YBCO는 임계온도가 90K로 액체질소 온도보다 높으며, 높은 임계전류 밀도를 갖는 에피(epitaxial) 성장된 박막의 제작이 비교적 용이하며, 안정성이 있고 자속과 관련된 잡음이 적어서 소자 응용에 적합하다.

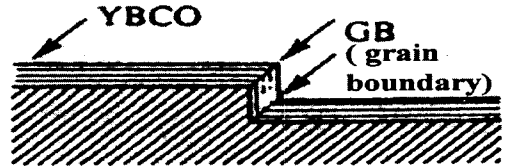
고온초전도 SQUID의 제작을 위해서는 자속의 움직임의 영향이 적은 결합(defect)이 없는 양질의 박막과 안정화된 조셉슨 접합 기술이 기반이

되어야 한다. 초기에 어려움을 겪었던 고온초전도 박막화 기술은 계속 개선되어 현재 직경 2인치 이상의 양질의 박막을 대량으로 성장시킬 수 있는 수준에 이르러 있으며, 이러한 기술의 발전은 고온초전도 소자의 상용화를 시작할 수 있게 했을 뿐 아니라, CMR, ferroelectric 물질 등의 산화물에 대한 박막화 기술을 제공하여 이 분야의 연구 발전에 기여했다고 할 수 있다. 현재 가장 널리 쓰이고 있는 고온초전도 박막 제작 기술은 펄스 레이저 증착법(pulsed laser deposition), thermal coevaporation, off-axis sputtering 등의 방법들이다. YBCO 박막은 이러한 방법들로 약 750°C 내외의 기판온도와 수십 mTorr 이상의 산소분압 하에서 성장시키며 정확한 조성비와 산소량에서만 우수한 박막- 임계온도 ~90K, 임계전류밀도 > 106A/cm<sup>2</sup>@ 77K-으로 성장한다.

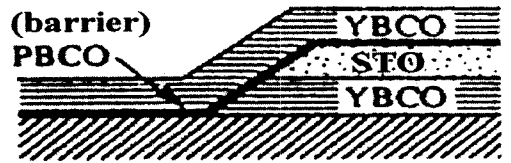
고온초전도체는 결맞음 길이(coherence length) - 초전도체의 질서계수(order parameter)가 변할 수 있는 길이 -가 약 ~1nm로 저온초전도체의 수십분의 일에 불과하므로 조셉슨 접합을 만드는 것이 지극히 어렵다. 기존의 부도체 장벽을 이용한 저온초전도 접합 기술을 사용할 경우 단원자층 수준의 접합 장벽 기술이 요구된다. 그러나, 고온초전도체의 경우 산화물의 낱알 경계(grain boundary)가 약결합(weak-link)로 작용하여 조셉슨 효과를 나타낸다는 사실이 밝혀져 이를 이용한 조셉슨 접합 제작이 활발히 이루어지고 있다. 현재 고온초전도 SQUID 제작에 가장 많이 사용되는 조셉슨 접합은 쌍결정(bicrystal) 접합이다.(그림 6(a)) 대개 두 SrTiO<sub>3</sub>(STO) 단결정 기판을 결정축이 어긋나게(30° 내외) 접합시켜 제작한 쌍결정 기판 위에 초전도 박막을 에피 성장시키면 결정 경계면에 인공적인 낱알 경계가 생기게 되고, 이 부분을 적당한 선폭(수 μm)으로 패터닝하면 조셉슨 접합이 형성된다. 또 기판에 경사각이 큰(> 60°) 계단을 200~300nm로 제작하고 그 위에 계단 높이보다 낮은 두께로 박막을 에피 성장시키면 계단의 상하에 낱알 경계가 형성되어 조셉슨 접합이 되는데 이를 step-edge 조셉슨 접합이라 한다.(그림 6(b)) 그 밖에도 이방성이 큰 YBCO의 ab



(a) bicrystal 접합



(b) step-edge 접합



(c) ramp-edge 접합

〈그림 6〉 고온초전도 조셉슨 조합의 예

면의 결맞음 길이가 c축과 비교하여 크고, 부도체 장벽보다는 도체 장벽에서 결맞음 길이가 큰 점을 이용하여 PBCO, doped YBCO등을 장벽물질로 사용하는 ramp-edge 조셉슨 접합이 쓰이기도 한다.(그림6(c))

반도체 공정에서 쓰이는 포토리소그래피와 이온빔 식각 방법을 사용하여 초전도 고리와 조셉슨 접합 등을 제작하여 SQUID가 만들어진다. 고온초전도 SQUID의 디자인은 저온초전도 SQUID와 다소 차이를 나타내는데, 그 이유는 동작 온도가 77K로 높기 때문이다. 높은 온도로 인한 큰 열 요동은 잡음으로 작용하기 때문에 고리의 인덕턴스에 대한 제약조건이 크다. 고온초전도 SQUID의 경우 자기 감도를 높이는 방법으로 감지코일을 SQUID의 몸체에 직접 연결하는 직접결합 방식이 널리

사용되고 있다. 자속변환기를 이용한 다층 구조의 경우 같은 기판 면적에 대해 보다 효율적인 유효 면적을 갖는 SQUID 자력계의 제작이 가능하지만, 다층의 공정 -crossover, via 등-과 정 중에 생기는 결함 등의 이유로 저주파에서 감도가 떨어지는 현상이 관측되고 있기 때문이다. 현재 고온초전도 SQUID의 자기감도는 처음 제작된 1987년과 비교하여 약 1000배 이상 개선되어,  $1 \times 1 \text{cm}^2$  크기의 기판을 기준으로 77K에서 직접결합 방식 자력계의 경우  $28 \text{fT}/\text{Hz}^{1/2}$ , 자속변환기를 사용한 경우 최고  $8.5 \text{fT}/\text{Hz}^{1/2}$ 에 이르고 있다.<sup>[7]</sup> 또한 rf SQUID의 경우도 수 GHz의 주파수를 이용하여 최고  $16 \text{fT}/\text{Hz}^{1/2}$ 의 감도를 나타내고 있다. 이론적으로 열잡음만을 고려하더라도 4.2K에서 작동하는 저온초전도 SQUID의 경우가 77K에서 작동하는 고온초전도 SQUID와 비교하여 4배 이상 우수한 감도를 나타낸다. 그러나, 위에 나타난 고온초전도 SQUID의 감도는 상용의 저온초전도 SQUID와 버금가는 값으로 대부분의 응용에 충분할 정도로 우수하다. 뿐만 아니라 고온초전도 SQUID를 이용하면 액체질소 용기의 벽이 얇기 때문에 생체자기 신호원 등에 더욱 근접하여 측정하는 것이 용이하여 저온초전도 SQUID와 비교하여 낮은 감도를 만회할 수 있다. 또한, 자원탐사나 지진탐사와 같은 원거리 장시간 탐사의 경우 액체질소를 이용하는 고온초전도 SQUID가 편이성 측면에서 훨씬 유리하며, 그 감도도 다른 일반 자력계와 비교하여(그림3) 탁월하여 활용되리라 기대된다. 현재  $100 \text{fT}/\text{Hz}^{1/2}$  이하의 자기감도를 갖는 고온초전도 SQUID는 상용화되어 있다.

고온초전도 SQUID의 장점중의 하나는 그 사용의 편의성에 있으므로 자기차폐가 안된 공간에서의 응용은 대단히 중요하다. 비파괴검사, 자원탐사 등의 응용은 기본이 비차폐 공간을 상정하고 있으며, 심자도 등의 생체자기 응용에 있어서도 고가의 자기 차폐실은 상용화의 걸림돌이 되고 있다. 고온초전도 SQUID의 비차폐 환경에서 응용을 위한 걸림돌은 크게 두 가지로 요약할 수 있다. 첫번째로 일반 환경에서는 수많은 자기신호들이 잡음으로 존재하고 있으며, 그 크기가 SQUID 자체의 잡음

레벨보다 10만배 이상에 이른다는 것이다. 이런 잡음들은 대개 공간적으로 일정하다는 특징을 이용하여 SQUID gradiometer를 사용하여 해결할 수 있다. 저온초전도체의 경우 저잡음의 wire와 bonding 기술이 존재하므로 wire를 이용한 고차의 gradiometer 제작이 용이하고, planar gradiometer의 경우도 큰 크기(직경 5인치)의 기판을 이용하므로 원하는 base line을 얻을 수 있다. 그러나, 고온초전도체의 경우 적당한 wire도 없으며, base line이 긴 SQUID의 제작도 어렵고, 또 낱알 경계형 조셉슨 접합으로는 gradiometer SQUID의 제작이 불가능하므로 저온초전도 방식의 접근이 어렵다. 두번째로 높은 열요동과 이방성으로 인한 독특한 자속에 관한 성질로 인하여 dc 자기장에 노출되거나 자기장하에서 움직일 경우 환경과 무관하게 고온초전도 SQUID의 저주파 잡음이 크게 증가한다는 것이다.

첫번째 문제에 대한 해결 방안으로, 두개의 SQUID 자력계에 독립적인 FLL 회로를 구성하여 동시에 자기 신호를 읽어 들인 후 각각의 신호의 차이를 전기적으로 얻는 동시에, 두 SQUID 사이에 reference SQUID를 두고 자기적으로 위, 아래의 SQUID에 되먹임 신호를 동시에 주어서 dynamic range도 크게 하고, balancing도 우수한 3 SQUID gradiometer 방법이 IBM Watson의 R. H. Koch에 의하여 제안되었다. 두번째 문제에 대해서는 pick-up loop에 flux dam의 설치, 가는 slot 형태의 SQUID를 이용하여 flux trap을 방지하는 방법 등에 대한 연구결과가 발표되고 있다.<sup>[8]</sup> 이 이외에도 긴 base line(수cm)을 갖는 asymmetric gradiometer등이 flip-chip 형태로 발표되기도 하였다. 이외에도 RFI에 대해 우수한 성능을 나타내고, 비차폐환경에서 SQUID의 안정된 동작을 위해서는 넓은 bandwidth와 큰 slew-rate을 갖는 FLL회로도 매우 중요하다.<sup>[9]</sup>

## V. SQUID 응용

현재 SQUID는 여러 분야에서 사용되고 있으며, 또 새로운 활용분야에 대한 연구도 활발히 진행중이다. 저온초전도 SQUID가 가장 많이 쓰이고 있는 분야는 심자도(MCG, Magneto-CardioGraphy), 뇌자도(MEG, Magneto-EncephaloGraphy) 등 생체자기 계측에 의한 의료진단 분야이다. 여러 개의 SQUID를 사용하여 인체에서 발생하는 신호를 위치에 따라 측정함으로써 측정 부위의 동적 특성을 파악 의료 진단에 이용할 수 있다. 이러한 방식은 신체와 비접촉하여 이루어지므로 진단과 관련한 부작용이 없고 실시간 진단이 가능한 장점을 가지고 있다. 뇌자도의 경우 공간 분해능 1mm 수준인 100개 내외의 다채널 저온초전도 SQUID 시스템을 임상적으로 사용하고 있으며, 자기공명장치(MRI)와 같은 해부학적 도구와 함께 이용하여, 간질이나 사고로 인한 뇌 손상 부위를 정확하게 찾거나, 특정 부위 이상과 관련한 뇌 질환 연구를 가능케 하고 있다. 뇌 질환의 경우 수술에 앞서 이상 부위 및 실제 생활에 이용되고 있는 부분을 정확히 찾아내는 것은 환자가 수술 후 정상적인 생활을 하는데 대단히 중요하다.

심자도의 경우 신체 표면에서의 전위차를 측정하는 심전도와 달리 혈액의 흐름의 이상과 관계된 심장의 이상 부위를 정확히 찾아낼 수 있어서 이와 관계된 부정맥 등 여러 질병의 진료에 활용할 수 있다. 특히 태아의 건강상태 측정에 있어서는 특별한 도구로 주목 받고 있다. 태아의 심전도는 모체의 심전도와 섞여서 나타날 뿐 아니라, 임신 7-8개월 이후에는 모태로부터 절연되어 측정이 불가능해진다. 그러나 SQUID를 이용한 심자도는 모체의 심장과 태아의 심장 사이의 충분히 먼 거리 때문에 태아의 심장 신호만 완전히 분리하여 어느 때건 측정가능하기 때문에 이에 대한 연구가 활발하다. 특히 고온초전도 SQUID로도 충분히 임상적 판단이 가능한 신호가 얻어지므로 이 분야의 고온초전도 SQUID의 활용이 기대된다. 현재 의뢰기기

로서 SQUID는 그 가치를 인정 받기 시작하고 있으며, 머지 않은 장래에 널리 활용될 것으로 생각된다.

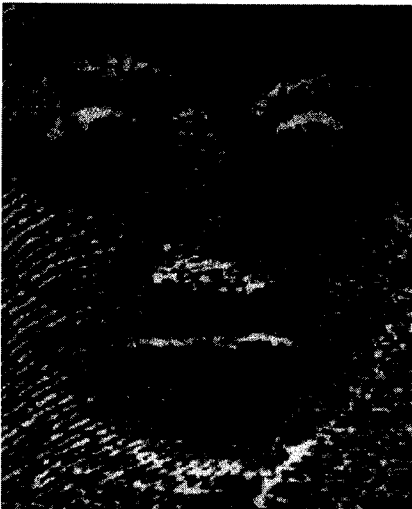
기존의 비파괴 검사(NDE, Non-Destructive Evaluation) 방식으로 검출이 어려운 두꺼운 시편 내부의 결함이나 여러 층으로 된 금속 구조물 내부의 결함 탐지를 위해 SQUID 센서를 이용한 와전류(eddy current) 검사 기술 연구가 활발하며, 특히 고온초전도 SQUID의 활용이 크게 예상되는 분야이다. 아주 낮은 주파수( $<0.1\text{Hz}$ )에서의 자기 잡음이 기존의 코일( $\sim 1/f^3$ )과 비교하여 탁월한 SQUID( $\sim 1/f$ )는 크기 또한 매우 작아서 구조물의 깊은 곳에 위치한 결함의 측정에 훨씬 우월하다.<sup>[9]</sup> SQUID NDE 연구 현황을 살펴보면, 비행기 break drum에서의 결함 검출을 위한 시스템 개발 연구가 독일의 Jülich 그룹에서 Lufthansa와 공동으로 진행 중이며, 미국의 SQM Technology는 미국 공군의 항공기 기체 검사를 위해 10mm 두께까지 존재하는 길이 1mm의 균열을 찾기 위한 휴대용 장치를 개발하고 있다. 독일의 Siemens에서는 기존의 NDE 시스템의 반도체 증폭기를 SQUID로 대체하는 연구를 하고 있으며, 일본의 Sumitomo에서는 고순도 구리선을 생산하는 과정에서 여기에 포함된 철 등의 미세 불순물을 감지하는 시스템에 SQUID를 이용하는 연구를 하고 있다. 또한 NQR을 이용한 폭약 검사 시스템의 감지기로 SQUID의 이용하는 연구도 최근 미국에서 시작되었다.

SQUID를 이용하여 해저의 기뢰나 잠수함을 찾아내는 연구도 미국과 유럽에서 진행 중에 있다. 이러한 연구에서는 넓은 3차원 공간에서 자기 이상이 있는 위치를 찾아내기 위해 SQUID 들을 조합하여 시스템을 구성하고 있다. 이러한 군사적인 연구는 해저의 망간 단괴 등의 자원탐사는 물론 바로 지자기학(magnetotellurics) 분야와 밀접히 연관된다. 지자기학은 지표면 하층의 전기저항을 측정하여 지하층의 구조 및 성분을 탐색하는 학문이다. 전리층에 입사되는 태양풍에 의해 저주파 전자기파가 발생하여 지표면에 입사된 뒤 반사되는데, 이때 반사량을 SQUID로 측정하여 지각의 전



기저향 분포를 조사할 수 있으며, 이를 통하여 지하의 석유, 광맥, 수맥, 공동 등의 탐색이 가능하다.

근래에 폭넓게 쓰이고 있는 STM, AFM 등의 SPM(Scanning Probe Microscope)의 하나로 SSM(Scanning SQUID Microscope)이 개발되어 연구에 활용되고 있다. SSM은 다른 자기 현미경(MFM, Magneto-optic 등)과 비교하여 10만배 이상의 자기감도를 갖고 있으나 공간 분해능이 다소 떨어지는 단점을 가지고 있다. IBM Watson에서 특별한 형태의 감지코일을 갖는 소형의 저온초전도 SQUID를 이용한 SSM을 제작하여 tricrystal에 패터닝된 고온초전도 고리에서 자발적으로 생긴 자속을 관측하여 쿠퍼쌍의 대칭성이 d-wave임을 보인 것은 SSM의 중요한 학문적 이용 사례라 할 수 있다. 고온초전도 SSM은 상온의 시료에 대해 실험이 용이하므로 전자회로에서의 층별 전류분포 측정 등 다양한 응용이 기대된다. 그림 7은 고온초전도 SSM을 이용하여 미화 1\$에 있는 조지 워싱턴의 얼굴을 본 이미지로, 지폐를 인쇄하는데 사용한 잉크에 포함된 자기 성분을 관측한 것이다. 최근에는 자성체 탐침을 이용한 수평 분해능의 개선에 대한 연구 결과도 발표되기도 하였다.



(그림 7) 고온초전도 SSM으로 관찰한 미화 1달러 지폐의 워싱턴 얼굴 부분의 이미지.(Neocera, inc)

SQUID는 매우 작은 물리량을 측정해야 하는 기초과학 분야에서도 널리 사용되고 있다. 초신성의 폭발시 발생하는 중력파를 측정하기 위한 장치의 경우를 예로 들 수 있다. 미국의 스탠포드 대학 등 수 곳에 설치된 이러한 장치는 무게 수 톤의 알루미늄 원기둥 안테나를 수십 mK까지 냉각시키고, 그 끝부분에 미세한 진동을 감지하는 SQUID 센서를 부착한 구조로 되어 있다. 이 센서의 변위에 대한 해상도는 약  $10^{-18}$ m로 이는 원자핵 지름의 1/1000에 해당하는 지극히 작은 값이다. 이외에도  $10^{-15}$ V의 정밀도를 갖는 전압계,  $10^{-18}$ A를 측정하는 전류계 등의 계측기는 오직 SQUID를 이용해서만 가능한 기기이다. 자기적 성질을 정밀하게 측정하는 SQUID susceptometer는 상용으로 널리 보급되어 있으며, 면역학, 생물학 등의 분야에서 SQUID를 이용한 응용 연구도 최근 활발히 진행 중이다.

## VI. 맺는말

초전도체의 고유한 양자역학적 성질을 이용한 SQUID의 전반적 특성에 대하여 간략히 살펴보았다. SQUID는 특유의 고감도 특성으로 새로운 분야에 대한 탐색을 가능케 해 왔으며, 사용의 편의성이 증대될 경우 고도의 정밀성과 복잡성을 띄며 변화해 가는 현대 산업 사회에서 더욱 폭 넓게 사용하게 될 것으로 전망된다. 특히 고온초전도체의 발견 이래 지난 10년간의 수많은 연구와 노력에 기인하여 현재 고온초전도 SQUID 기술은 상용화의 초입에 이르러 있으며, 비차폐 환경에서의 응용 노력과 함께 시스템 차원의 연구가 결실을 맺을 때 SQUID는 우리 생활 주변의 친숙한 도구로 자리매김하여, 미래의 산업 발전에 큰 역할을 할 것으로 기대된다.

## 참고 문헌

- [1] M. Tinkham, "Introduction to Superconductivity", McGraw-Hill, 1996.
- [2] 5개 모두 Nobel 물리학상을 수상한 업적들 임.
- [3] T. Van Duzer and C. W. Turner, "Principles of Superconductive Devices and Circuits", Chap. 5, Elsevier, 1981.
- [4] J. Clarke, "Superconducting Devices"( S. T. Ruggiero and D. A. Rudman Eds.), Chap. 2(pp.51-99), Academic Press, 1990.
- [5] J. Clarke, "SQUIDs", Scientific American, pp. 36-43, Aug. 1994.
- [6] R. H. Koch, J. R. Rozen, P. Woltgens, T. Picunko, W. J. Goss, D. Gambrel, D. Lathrop, R. Wiegert, and D. Overway, "High performance superconducting quantum interference device feedback electronics", Rev. Sci. Instrum. 67, pp. 2968 - 2976, 1996.: D. Drung, "dc SQUID systems overview", Supercond. Sci. Technol. 4, pp. 377-385, 1991.
- [7] L. P. Lee, J. Longo, V. Vinetskiy, and R. Cantor, " Low-noise YBa<sub>2</sub>Cu<sub>3</sub>O<sub>7</sub>-? direct current superconducting quantum interference device magnetometer with direct signal injection", Appl. Phys. Lett. 66, pp. 1539-1541, 1995. : E. Dantsker, F. Ludwig, R. Kleiner, J. Clarke, M. Teepe, L.P. Lee, N. McN. Alford, and T. Button, "Addendum: Low noise YBa<sub>2</sub>Cu<sub>3</sub>O<sub>7-x</sub>-SrTiO<sub>3</sub>-YBa<sub>2</sub>Cu<sub>3</sub>O<sub>7-x</sub> multilayers for improved superconducting magnetometers", Appl. Phys. Lett. 67, pp. 725 - 726, 1995.
- [8] R. H. Koch, J. Z. Sun, V. Foglietta, and W. J. Gallagher, "Flux dam, a method to reduce extra low frequency noise when a superconducting magnetometer is exposed to a magnetic field" Appl. Phys. Lett. 67, pp. 709-711, 1995. : E. Dansker, S. Tanaka, and John Clarke, "High-Tc superconducting quantum interference devices with slots or holes: Low 1/f noise in ambient magnetic fields", Appl. Phys. Lett. 70, pp. 2037-2039, 1997.
- [9] W. J. Jenks, S.S.H. Sadehgi, and J. P. Wikswo Jr, "SQUIDs for nondestructive evaluation", J. Phys. D: Appl. Phys. 30, pp. 293-323, 1997.
- [10] SQUID 전반에 관한 참고도서-H. Weinstock Ed., "SQUID Sensors : Fundamentals, Fabrication and Applications", Nato ASI series E : Applied Science Vol. 329, Kluwer Academic Publishers, 1996.

## 저자 소개



## 文勝鉉

1964년 9월 23일생, 1987년 2월 서울대학교 물리학과 졸(이학사), 1989년 2월 서울대학교 물리학과 졸(이학석사), 1994년 2월 서울대학교 물리학과 졸(이학박사), 1994년 7월~현재 LG 종합기술원, 책임연구원, (주관심 분야: 고온초전도 소자 응용 (SQUIDS, Microwave Filfei, digital 등), 산화물 박막 (고온초전도체, 유전체, CMR 등))