

고온초전도기술개발사업

고온초전도 주사형 SQUID 현미경 개발

Development of Scanning SQUID Microscope with High- T_c
Superconductor

서울대학교

과학기술부

보고서 초록

과제관리번호	M1-0122-00-0001	해당단계 연구기간	2002.11.14 ~2003.11.13	단계 구분	2 / 2
연구사업명	중 사업명	중점국가연구개발사업			
	세부사업명	고온초전도기술개발사업			
연구과제명	중 과제명				
	세부(단위)과제명	고온초전도 주사형 SQUID 현미경 개발			
연구책임자	김정구	해당단계 참여연구원수	총 : 5 명 내부 : 1 명 외부 : 4 명	해당단계 연구비	정부: 62,000 천원 기업: 천원 계: 62,000 천원
연구기관명 및 소속부서명	서울대학교		참여기업명		
국제공동연구	상대국명 :		상대국연구기관명 :		
위탁연구	연구기관명 :		연구책임자 :		
요약(연구결과를 중심으로 개조식 500자이내)					보고서 면수
<p>고감도 자기 센서인 고온초전도 SQUID를 이용한 주사형 자기 현미경 개발. 고온초전도체인 YBCO 박막을 이용하여 SQUID를 제작하고, 진공, 저온 중에서 동작시키면서 상온 시료에 가까이 접근시킬 수 있는 자기 현미경 본체를 설계, 제작함. 스캔을 위한 motorized stage와 이를 제어하고 데이터 처리를 할 수 있는 전자회로, 소프트웨어를 개발하였음. SQUID 현미경의 수평해상도를 극적으로 향상시킬 수 있는 scheme인 자성 팁의 이용에 관한 연구도 진행. 자성 팁을 사용할 때 어떤 효과가 나타나며 신호 왜곡 등의 현상을 feedback mechanism의 개발로 개선할 수 있음을 제시. 자성 팁을 사용한 기초 시스템을 제작.</p>					
색인어 (각 5개 이상)	한 글	주사형 SQUID 현미경, 초전도 소자, 주사형 현미경, 자기 현미경, 초전도양자간섭 소자			
	영 어	scanning SQUID microscope, SQUID, scanning probe microscope, magnetic microscope, superconductor device,			

요 약 문

I. 제 목

고온초전도 주사형 SQUID 현미경 개발

II. 연구개발의 목적 및 필요성

자기 신호에 가장 민감한 센서인 SQUID를 이용한 주사형 현미경을 개발. 축적된 고온초전도 박막 소자 기술과 시스템 제작 기술을 융합하여 실제 응용에 가까운 결과를 내는 것이 목적임.

III. 연구개발의 내용 및 범위

고온초전도 SQUID제작.

Dewar 외 주변 부품 제작.

SQUID 신호 처리 회로 제작.

Scan controller 설계 제작.

Control software 제작.

자성 팁 응용 연구.

IV. 연구개발결과

SQUID 제작 : pulsed laser deposition 방법으로 $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_7$ 박막 증착. 사진 식각 공정을 통해 washer 형태의 SQUID 제작. SQUID 응답 전압의 폭은 $30 \mu\text{V}_{\text{p-p}}$ 이고 Peak-to-peak noise는 0.1~10 Hz 대역폭에서 $50 \text{ nT}_{\text{p-p}}$ 임.

Dewar 외 주변 부품 제작 : 기본적으로 액체 질소를 담은 dewar 구조에 cold finger로 SQUID를 냉각시키도록 함. SQUID와 시료를 분리하는 vacuum window로 두께 $25 \mu\text{m}$ 인 사파이어 칩 사용. Vacuum window의 위치 조정은 나사식 manipulator 구조를 만들어 수행함.

SQUID 신호처리 회로 : modulation 없이 단순 feedback하는 구조의 회로 설계 제작. Preamp의 입력 잡음은 $1 \text{ nV}/\sqrt{\text{Hz}}$ 이고 2단 증폭기까지 증폭률은 10000정도임. 대역폭은 100 kHz이나 2단 증폭기의 IC 교체를 통해 1 MHz 이상 증가시킬 수 있음.

Scan controller : microcontroller 회로를 제작하여 모터와 A/D converter를 제어하여 스캔 동작.

Control software : Labview 프로그램으로 스캔 parameter를 scan controller에 전달하고 스캔한 데이터를 처리하도록 제작.

자성 팁 응용 연구 : 자성 팁을 사용하여 수평해상도를 높일 수 있다는 기존 연구 결과에 착안, 자성 팁이 자기 신호를 전달하는 특성에 대해 연구함. 길이에 따라 지수함수적으로 신호가 약해지고 강자성 물질의 특성인 자기 이력 현상이나 Barkhausen 효과가 전달된 자기 신호에 반영된다는 것을 알아냄.

V. 연구개발결과의 활용계획

비파괴 검사 : IC, 금속재.

생물, 화학 분야 응용 : Magnetic tag, 생물, 화학적 전류 측정.

미세 자성 구조 연구.

S U M M A R Y

I. Title

Development of scanning SQUID microscope with high- T_c superconductor

II. Motivation

This research aims at the development of scanning SQUID microscope as an application of SQUID, the most sensitive detector of magnetic field. We focus on the application-ready results from the technology of high- T_c superconductor thin film device and instrumentation.

III. Research subjects

Fabrication of SQUID with high- T_c superconductor thin film.

Development of the dewar system, cold finger, manipulator, and vacuum window.

Development of SQUID electronics.

Development of scan control electronics.

Development of control software.

Research on the application of magnetic tip.

IV. Results

SQUID fabrication: SQUID was fabricated out of $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_7$ thin film deposited through pulsed laser deposition method. SQUID response voltage range is $30 \mu\text{V}_{\text{p-p}}$ and peak-to-peak noise amounts to $50 \text{ nT}_{\text{p-p}}$ in 0.1~10 Hz-band.

Development of the dewar system: dewar structure houses liquid nitrogen that cools SQUID through cold finger. A vacuum window of $25 \mu\text{m}$ -thick

sapphire chip separates the SQUID and sample. We designed screw manipulators to control the approach of the vacuum window to the SQUID.

SQUID electronics: basic direct-feedback circuit was developed. Preamplifier noise is $1 \text{ nV}/\sqrt{\text{Hz}}$ and the open-loop gain is 10000. The bandwidth is 100 kHz which can be improved over 1 MHz by change of an IC.

Scan controller: microcontroller circuit was developed to control the motors and A/D converter in hardware-timing.

Control software: Labview program delivers scan parameters to scan controller and processes the scanned data.

Research on the application of magnetic tip: we included the research on the application of magnetic tip to enhance the spatial resolution. A magnetic tip can transfer the magnetic signal at one end to the other and two effects were observed: that the signal is weakened exponentially with the length of the tip and that magnetic hysteresis and Barkhausen effect distort the transferred signal.

V. Applications

Nondestructive evaluations: IC, cracks in metal.

Biology, chemistry: magnetic tag, detection of biochemical currents.

Research on minute magnetic structures.

C O N T E N T S

Chapter 1. Outline of the research project	10
Section 1. Background	
1. Technological view	
2. Economic and industrial view	
3. Social and cultural view	
Chapter 2. Current status of the technology development	12
Section 1. Worldwide status	
1. SSM for room-temperature sample	
2. SSM with magnetic tip	
Section 2. Domestic status	
Chapter 3. Details and results of the research	21
Section 1. Development of scanning SQUID microscope for room-temperature sample	
1. SQUID fabrication	
2. Dewar	
3. Readout electronics	
4. Scanning stage and frame	
5. Scan controller	
6. Software	
7. Operation of the SQUID and its characteristics	
8. Scanning	
Section 2. Application of magnetic tip	

1. Research on the effects of magnetic tip
2. Design and construction of the system with magnetic tip

Chapter 4. Contribution to the relevant area	36
Chapter 5. Application plan	37
Chapter 6. Overseas science and technology information acquired in the research development	39
Chapter 7. References	42
Appendix 1. Application plan	43
Appendix 2. Summary of technologies	48

목 차

제 1 장. 연구개발과제의 개요	10
제 1 절. 배경 및 필요성	
1. 기술적 측면	
2. 경제·산업적 측면	
3. 사회문화적 측면	
제 2 장. 국내외 기술개발 현황	12
제 1 절. 국외 현황	
1. 상온시료 SSM	
2. 자성 팁 사용 SSM	
제 2 절. 국내 현황	
제 3 장. 연구개발 수행 내용 및 결과	21
제 1 절. 상온시료용 scanning SQUID microscope 개발	
1. SQUID 제작	
2. Dewar 제작과 테스트	
3. Readout electronics	
4. Scanning stage와 frame	
5. Scan controller	
6. Software	
7. SQUID 구동과 특성 측정	
8. Scanning	
제 2 절. 자성 팁의 응용	
1. 자성 팁의 효과 연구	

2. 자성 팁 응용 시스템 설계 및 제작

제 4 장. 관련분야에의 기여도	36
제 5 장. 연구개발결과의 활용계획	37
제 6 장. 연구개발과정에서 수집한 해외과학기술정보	39
제 7 장. 참고문헌	42
첨부 1. 연구결과 활용계획서	43
첨부 2. 기술 요약서	48

제 1 장. 연구개발과제의 개요

제 1 절. 배경 및 필요성

1. 기술적 측면

자기 현미경은 시료 표면의 자기 분포를 측정해 내는 장비로서 자기 이미지로부터 시료의 자화 분포나 전류의 분포에 대한 정보를 알아내는 데 사용할 수 있음. 대부분의 시료는 자화율(magnetic susceptibility)이 작거나, 반도체 소자와 같은 경우 소량의 전류가 흐르므로 폭넓은 응용을 위해서는 자기 센서가 약한 자기 마당을 검출할 수 있어야 함. 가장 높은 감도가 필요한 측정에는 SQUID를 사용하므로 자기 현미경에서도 SQUID를 이용하는 것이 약한 자기 신호 분포를 연구하기 위한 자연스러운 선택이 됨.

시료나 센서 중 하나를 고정시키고 다른 하나를 평면방향으로 스캔하여 이미지를 얻는 scanning probe microscope의 기술을 이용하되 자기 센서로 SQUID를 사용하여 국소적인 자기장의 분포를 조사할 수 있는 장비를 주사형 SQUID 현미경(scanning SQUID microscope)이라고 함. 시료의 자기적 물성뿐만 아니라 반도체 소자 등에서의 국소 전류의 분포도 조사할 수 있음.

초기에는 SQUID와 시료가 같은 저온 환경에서 동작하는 SQUID 현미경이 연구되었으나 90년대 중반 cold finger를 사용한 SQUID의 냉각과 얇은 vacuum window를 이용하여 상온 시료도 submillimeter 수준의 해상도로 스캔할 수 있는 시스템이 개발되어. 상온 시료의 미세한 자성 연구가 가능하게 되어 생물, 지질 등 타 기초과학분야와 산업 분야 응용의 가능성이 열림.

고온초전도체를 활용한 SQUID 현미경은 액체질소를 냉매로 사용하기 때문에 액체 헬륨을 사용하는 저온초전도체에 비하여 제작과 비용 면에서 이점이 있고, 상온시료에 가까이 접근시킬 때의 열적 부담도 줄어들어 좀더 높은 해상도를 얻을 가능성이 있음.

고온 초전도 SQUID의 크기를 작게 만드는 데에 한계가 있으므로 magnetic

force microscope 등의 자기 현미경과 비교하면 위치 정보를 미세하게 알아내는 수평해상도가 떨어지는 편이지만 감도와 신호대역폭 측면에서 월등히 뛰어나므로 이를 이용해 극미량의 자기신호를 탐지하고, 보다 높은 주파수 영역의 신호도 측정할 수 있으며, 비교적 빠르게 넓은 면적의 스캔을 할 수 있음. 더욱이 앞으로 소형 SQUID의 개발과 자기장 focusing 방법의 개발로 수평해상도를 높일 수 있을 것으로 기대함.

주사형 SQUID 현미경의 개발은 고온초전도 기술의 응용으로서 뿐만 아니라 전체 시스템 제작에 필요한 정밀측정, 저온, 진공, 메카트로닉스, 소프트웨어 기술이 융합해야 한다는 측면에서 종합적인 장비 구축 기술의 발전을 이끌게 됨.

2. 경제·산업적 측면

비파괴검사(NonDestructive Evaluation, NDE) 장비로서의 활용 대상은 비행기 동체의 기계적 파손의 정기검사 등 대규모 활용분야 이외에 자기메모리(MRAM)의 magnetic domain의 변화나 집적회로의 전류흐름 분포 등 소형 소자의 특성 조사에 필요한 기기의 필요성이 증대함.

자기저장장치(Magnetic storage) 개발이 IT산업의 하드웨어적 측면에서 핵심적인 요소로서 관심을 받는 상황에서 SSM과 같은 local magnetic property probing tool의 개발은 산업적으로 중요하며 새로운 수요 창출이 가능.

고온초전도 기술의 상용화는 세계적으로도 크게 발달된 수준이 아니므로 독자적 연구 개발을 통해 충분히 경쟁력을 확보할 수 있음.

NDE tool로서 MRAM 등의 정보저장소자(data storing device)의 동작특성 연구, 집적회로의 전류패턴 조사를 통한 불량검사, 반도체 웨이퍼 등의 local property 검사, 기차나 비행기 등의 metallic part의 crack 탐지 등의 산업적 활용이 가능하며 SQUID 현미경의 산업적 응용으로 해외에서도 가장 관심을 갖는 분야임.

시스템의 제작이 완료되면 근래 점차 관심이 증대되고 있는 미세 자기 구조 연구나 생물 전기·자기 연구의 tool로서 사용할 수 있음.

분야별 대표적 응용 사례를 보면 다음과 같음.

물리학 : 초전도 물성 연구(pairing symmetry, vortex distribution, current mapping), 자성 연구(ferromagnetism, susceptometry).

재료공학 : 금속의 기계적, 미시적 변화, IC의 오작동, 부식 현상 등의 비파괴 검사.

생물학 : 뉴런 전류 이미징, magnetic tag을 이용한 세포관찰 및 항체 검출.

지질학 : 광석, 운석 등에 포함된 자성 물질의 검출.

3. 사회문화적 측면

고온초전도체를 활용한 새로운 기술의 응용으로 고온초전도체의 실용적인 활용을 구체적으로 내보일 수 있는 예가 되며, 최근 나노소자의 개발에 맞추어 미세소자의 특성을 측정할 수 있는 SQUID 현미경 제품 개발에 의한 벤처창업으로 기존 SPM 사업의 영역을 넓힐 수가 있음. 또한 생체자기연구 등에 관한 활용으로 바이오 산업에도 이제까지 주목받지 못하던 새로운 분야를 개척하는 역할을 할 것으로 기대됨.

제 2 장. 국내외 기술개발 현황

제 1 절. 국외 현황

1. 상온시료 SSM

- Berkeley 대학:

1990년대 중반 고온초전도체를 사용한 scanning SQUID microscope를 개발하여 상온 시료의 자기 분포를 미세하게 알아낼 수 있음을 보인 바 있음. 개발된 시스템은 액체질소 용기와 SQUID가 아래에 위치하고 시료가 위에서 스캔되는 형태임.

이후 vacuum window 구조를 그림 1과 같이 변형하여 박테리아 배양액 등

을 대상으로 하여 생물자기 연구에 활용하는 시도를 하고 있음. 진공 중에 위치하고 cold finger에 의해 냉각되는 SQUID가 상온의 vacuum window와는 100 μ m 이하 거리까지 근접 가능함. 자기 마당 크기를 읽는 보통의 SQUID magnetometer 대신 planar gradiometer를 이용하여 시료 이외에서 나오는 eddy current 등의 영향을 줄인 시스템도 최근 연구되어 발표됨. 그 효과로 그림 1의 위쪽 곡선이 보통의 SQUID magnetometer를 자기 센서로 사용했을 때 자기 마당을 가했다가 0으로 리셋한 이후 천천히 신호가 감쇄하는 것을 보이는 반면, gradiometer를 사용한 아래 곡선은 빠르게 0으로 리셋되는 특성을 보이는 것으로 시간분해능의 향상을 얻음. 목표는 magnetic nanoparticle 등을 tag로 하여 생물학 시료에 붙이고 SQUID 현미경으로 관찰하여 생물학적 연구에 활용하는 것임.

재료공학적인 연구에도 최근 활용한 사례가 있음. 금속의 용접 후 재료의 상변화를 자성의 변화로부터 알아내는 연구임. Spot welding으로 부분적으로 microscopic structure가 변한 철강재는 remnant magnetization도 달라져서 SQUID 현미경으로 이미지를 얻으면 상이 달라진 부분의 위치를 알 수 있게 됨. 즉, SQUID 현미경으로 부분적으로 구조가 달라진 철강을 비파괴 검사 방법으로 조사할 수 있음을 보인 연구 결과임.

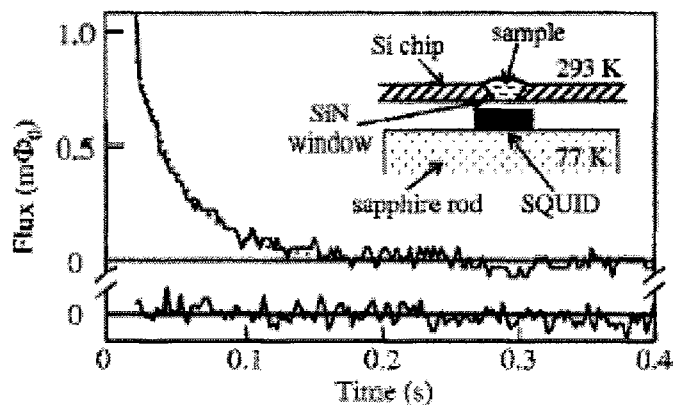


그림 1. Inset은 Berkeley group에서 개발한 시스템의 개략도. 그래프는 외부에서 자기 마당을 가했다가 0으로 리셋한 이후 센서가 읽는 신호의 시간 변화임. gradiometer를 센서로 사용했을 때(아래 곡선) magnetometer를 사용했을 때에 비해(위 곡선) 시간분해능을 떨어지게 하는 요인이 제거되었음을 알 수 있음.

- Maryland 대학:

90년대 중반에 고온초전도 SQUID 현미경 개발. 그림 2와 같이 액체질소 dewar와 SQUID가 위에 있고 시료가 아래에 위치하여 스캔되는 구조임.

최근 연구 동향으로는 냉동기를 장착하여 액체질소 보충의 번거로움을 제거한 시스템의 개발과 전자 회로 위의 자기 이미지를 얻은 후 전류의 분포를 알아내는 계산의 연구가 대표적임. 냉동기 장착 시스템은 기업에서 상용화된 시스템 개발의 prototype으로서 역할을 함.

2차원 자기 분포로부터 전류의 분포를 계산하는 문제는 몇 가지가 이미 연구되어 있음. Maryland group에서는 이중 Fourier transform 방법을 이용한 역계산 방법을 도입하고 구체적으로 적용한 사례를 보여줌으로서 간편하게 IC 등에서 전류 분포를 알아볼 수 있음을 증명. 또한 이 역계산에 신호의 잡음이 수평 분해능을 제한하는 요인임을 구체적으로 밝히고 역계산을 통해 얻은 전류 분포 이미지는 SQUID-시료 사이 거리보다 더 작은 크기의 분해능을 얻을 수 있다는 결과를 얻음. 그림 3은 전류에서 발생한 자기 분포 이미지이고 그림 4는 역계산으로 얻은 전류의 분포임. 자기 분포 이미지에서 전류의 경로가 불분명한 부분도 역계산 후에 뚜렷하게 나타나는 예임.

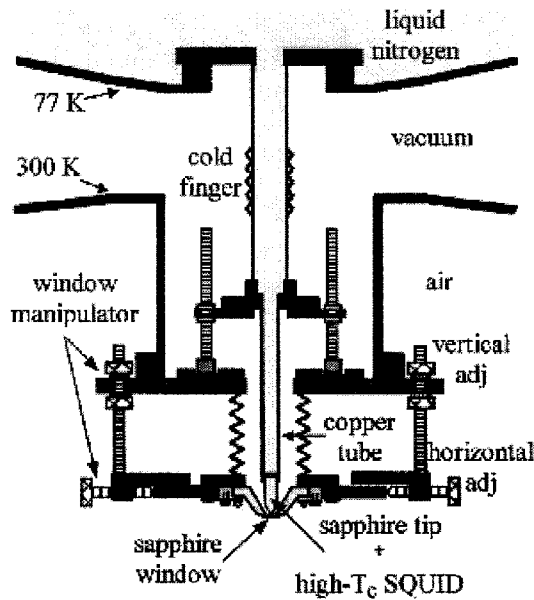


그림 2 Maryland 대학의 SQUID 현미경 구조.

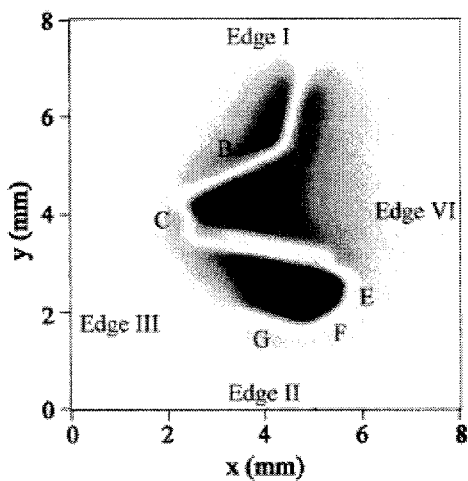


그림 3. MCM(multichip module)에서 전류를 흘리고 얻은 자기 이미지.

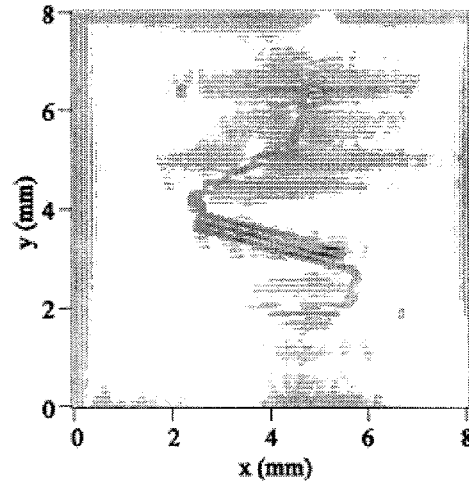


그림 4. 역계산을 통해 자기 이미지에서 전류의 분포를 계산해 낸 결과.

- 그밖에 독일의 Jülich 연구소, Giessen 대학, 일본, 대만의 몇몇 대학에서도 Maryland group과 같이 위쪽에 dewar와 SQUID가 위치한 구조의 시스템을 개발하여 금속에서 발생하는 eddy current의 위치 분포를 조사하여 크랙의 위치를 찾아내는 등 비파괴 검사 위주의 연구가 진행 중임. 이런 응용의 경우 eddy current를 유도하기 위해 자기 마당을 가하는 코일을 double-D coil의 형태로 만들어 크랙이 있는 부분이 스캔 중 코일 근처에 있을 때만 좌우 eddy

current의 차이로 SQUID에 자기 신호가 들어가는 구조가 가장 보편적으로 연구되고 있음(그림 5 참조). 비행기 동체나 날개를 비파괴 검사하는 방법의 유력한 후보 중 하나임.

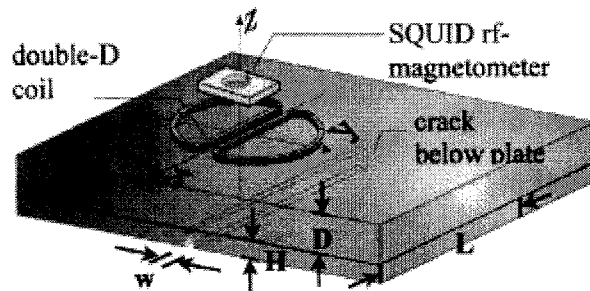


그림 5. Double-D coil을 이용하여 eddy current를 발생시키고 금속 내부의 crack이 있는 부위에서 좌우 eddy current가 달라져 SQUID에 신호가 검출됨을 이용한 비파괴 검사 방법.

- 기업인 Neocera와 Tristan에서는 HTS SSM을 개발, 상용화. Neocera는 Maryland group에서 개발한 시스템을 기초로 하여 microchip 내부 전류 분포를 조사해 오동작을 검사하는 것을 주요 기능으로 하는 시스템을 내놓음(그림 6, 7 참조). 전류 역계산은 소프트웨어에서 약간의 파라미터 입력으로 간편하게 계산되는 등의 편이성이 엿보임.

Tristan에서는 감도 위주, 수평 해상도 위주 등으로 세분화하여 여러 타입의 SQUID 현미경을 제작, 상용화. 상온 시료용 SQUID 현미경의 경우 dewar 재질이 fiberglass epoxy로서 적은 양의 액체질소로도 오랫동안 SQUID의 냉각 상태를 유지할 수 있다는 장점이 있음. 단 SQUID-시료 사이 거리 조정 기능은 제외되어 구조와 사용은 간단하나 submillimeter 급의 수평해상도는 불가능.

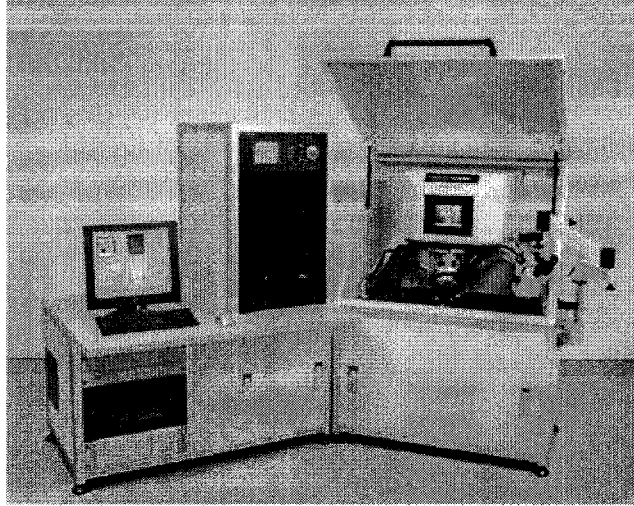
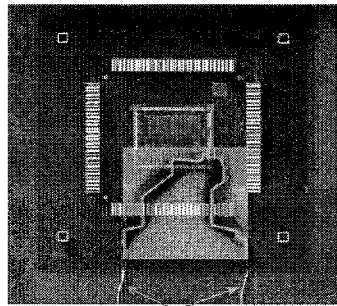


그림 6. Neocera에서 상용화한 주사형 SQUID 현미경.



AC current input wires

그림 7. IC에서 광학 이미지와 자기 이미지를 이용하여 전류 분포를 IC 내부 동작 정보를 얻는 데 이용할 수 있음을 보인 presentation.

2. 자성 팁 사용 SSM

Jülich 연구소에서 처음 개발하여 1997년 발표되었으나 이후 지속적인 연구는 없었음. SQUID loop에 강자성이면서 coercive field가 작은 soft magnetic material을 팁 형태로 붙여서 팁 끝에서 검출되는 자기 신호가 SQUID로 전달되게 함(그림 8). 팁 끝의 크기에 따라 수평해상도가 향상되어 $0.1 \mu\text{m}$ 급의 해상도를 얻음. 그림 9는 magnetic colloidal cluster의 자기 이미지로 submicron

수준의 해상도를 볼 수 있음.

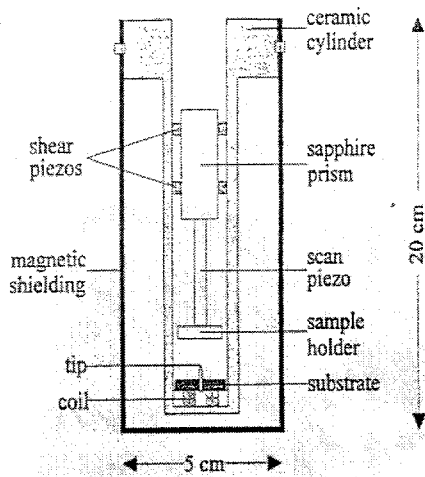


그림 8. Jülich에서 처음 개발된 자성 팁을 사용하여 수평해상도를 크게 향상시킨 SQUID 현미경.

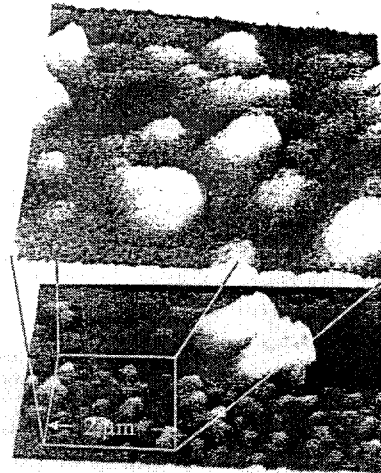


그림 9. Jülich system으로 얻은 magnetic colloidal cluster의 자기 이미지. Submicron 수준의 해상도를 보여줌.

2001년 이후 몇몇 group에서 자성 팁을 사용한 연구결과가 있음.

러시아-독일 공동 연구와 일본 Sumitomo사, Toyohashi 대학 등에서 SQUID와 ferromagnetic needle을 이용하여 magnetic field 분포를 미세하게 알아내고자 하는 연구를 계산과 실험 양면에서 진행. 구조는 공히 상온 시료를 대상으로 하는 시스템을 제작. 그림과 같이 자성 팁이 상온에 있고 SQUID에는 접촉하지 않고 가까이 접근하도록 함(그림 10). 일단 submillimeter급의 성능은 보여주었고, magnetostatics를 simulate하여 효과를 계산한 연구도 있으나 자성 팁이 자화율(magnetic susceptibility)이 고정된 경우를 가정하여 계산하거나 자화율을 무한대로 근사하고 팁 모양도 길쭉한 방향의 차원만으로 단순 계산한 결과로서 팁의 magnetic domain 구조나 hysteresis 등으로 인한 효과는 연구가 미비함.

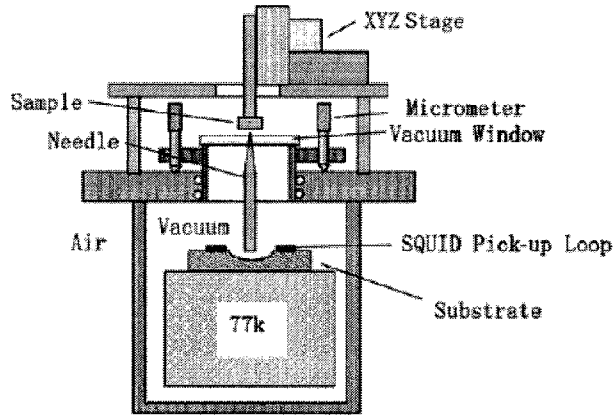


그림 10 일본 Toyohashi 대학에서 개발한 자성 팁 이용 SQUID 현미경. Field를 guide하는 needle이 상온이면서 SQUID에 신호를 전달하는 시스템임.

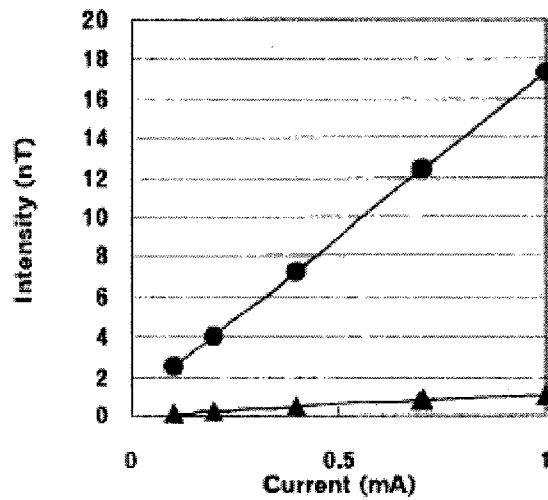


그림 11 Sumitomo사에서 연구된 자성 팁 사용 SQUID 현미경에서 감도의 손실을 연구한 결과. 위 그래프는 SQUID를 직접 시료(전류도선)에 접근시킬 때 얻은 신호 크기이고 아래 그래프는 자성 팁을 사용해 얻은 신호 크기로서 10배 이상의 신호 감쇄가 있음을 보임.

제 2 절. 국내 현황

- LG 전자기술원:

고온 초전도 SQUID에 대한 다년간의 연구 경험을 바탕으로 상온 시료용

SQUID 현미경 개발. 산업적 이용을 위해 액체 질소로 냉각하는 대신 cryocooler를 장착하여 편의성을 높였고 SQUID 4개를 한 기관에 제작하고 동시에 작동시켜 throughput 향상을 시도함. 현재 후속 연구는 진행하지 않음.

- 서울대:

액체 질소에서 SQUID와 시료가 접촉한 상태에서 동작하는 SQUID 현미경을 90년대 후반 개발한 바 있으며 이를 이용해 초전도체의 vortex distribution을 관측한 바 있음(그림 12, 13). 후속 연구개발을 통해 SQUID의 loop 크기를 10 μm 정도까지 줄여 수평해상도를 20 μm 아래로 향상시켰고, 초전도체 위에서 SQUID가 있을 때 feedback flux를 screen하는 초전도체로 인한 신호 왜곡을 분석한 결과를 내었음.

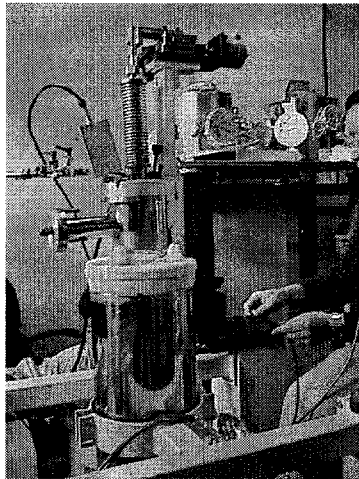


그림 12. 서울대에서 개발한 고온초전도 SQUID 현미경.

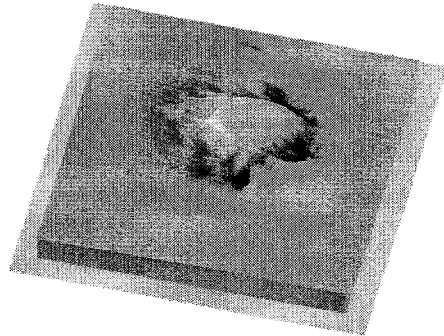


그림 13. 서울대 시스템으로 얻은 고리 모양 초전도 박막 패턴의 vortex 침투 분포를 조사한 자기 이미지.

제 3 장. 연구개발수행 내용 및 결과

제 1 절. 상온시료용 scanning SQUID microscope 제작

1. SQUID 제작

SQUID는 STO bicrystal 기판 위에 pulsed laser deposition 방법으로 증착한 YBCO 박막을 식각하여 제조 (그림 14). Washer type으로 hole의 크기는 $8\ \mu\text{m} \times 8\ \mu\text{m}$, washer의 크기는 $30\ \mu\text{m} \times 30\ \mu\text{m}$ 임. Flux feedback을 가할 수 있는 도선을 기판에 같이 패터닝을 만들어 feedback, modulation이 시료쪽 보다는 SQUID에 coupling되도록 함. 액체질소 온도에서 최대 modulation 전압 V_{pp} 가 $70\ \mu\text{V}$ 정도 임.

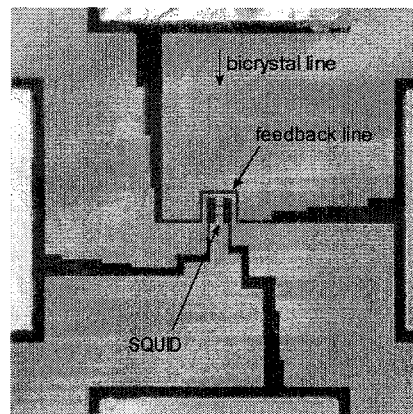


그림 14 제작된 상온 SSM용 SQUID. SQUID chip은 $1.5\text{mm} \times 1.5\text{mm}$ 로 잘라서 cold finger 끝에 붙임.

2. Dewar 제작과 테스트

본 시스템의 핵심이 되는 부분으로 액체질소 dewar에 윈도우 manipulation 기능이 들어간 타입임(그림 15). 몸체의 주재료는 stainless steel을 사용하고 면과 면 사이는 용접으로 접합. 진공상태로 만들고 circle seal valve를 사용하여 pumping

port를 분리해 낼 수 있음. 액체질소가 들어가는 부분의 아랫면에 구리 재료의 cold finger를 장착할 수 있어 cold finger가 냉각되고 이 부분의 온도는 79 K까지 내려감을 관측하였음. 구리 재료의 cold finger 끝에 사파이어 로드를 붙이고 이 로드 끝에는 SQUID가 부착됨.

SQUID의 전기적 연결은 사파이어 로드와 부착시킨 후 이루어짐. Shadow mask를 사용하여 SQUID의 패드에서 사파이어 로드의 옆면으로 전도되는 선을 증착함. 증착 방법은 e-beam 증착이며 금을 증착하였음. 이 gold line은 silver paste로 readout wire와 연결됨.

액체질소 용기의 접합 및 sealing은 indium wire를 접합면에 고리모양으로 끼우고 볼트로 조이는 방법으로 함. 액체질소로 냉각 시 stainless steel인 나사보다 구리 재료의 cold finger의 수축이 더 큰 이유로 indium seal 부분에 leak가 발생하였으나 열팽창률이 구리보다 큰 황동제작 볼트를 사용하여 더 강하게 조여지도록 함으로써 해결됨.

Vacuum window는 fiberglass epoxy로 제작된 approach head 끝에 지름 2 mm의 구멍을 내고 25 μ m 두께의 사파이어 칩을 붙여 제작. 진공과 대기 사이 압력을 견딜 만큼 기계적 강도가 크고 광학적으로는 투명하여 조명을 비추며 내부를 들여다보며 SQUID를 window에 approach시킬 수 있음.

Pfeiffer Vacuum사에서 제작한 turbo pumping system을 잘 휘어지는 금속 bellows와 circle seal valve로 dewar와 연결하여 vacuum pumping을 함. 3 시간 이내에 진공도가 10^{-4} Torr 이하가 되고 24 시간 이상 동작시키면 10^{-6} Torr 수준이 됨. 액체 질소를 용기에 가하면 cold trap과 같은 효과로 진공도가 급속히 내려가며 2 시간 이내에 9×10^{-7} Torr 이하까지 내려감. Cold finger의 SQUID 아래쪽 부분에 Lakeshore에서 제작한 온도 센서인 DT470을 붙여 측정 한 냉각 온도는 액체 질소를 공급한 후 5분 정도 후에 최저 온도인 79.3 K이 되고, 수 시간동안 0.1 K 이하의 drift를 보이므로 SQUID를 안정적으로 동작시키는 데 문제가 없음. 액체질소는 최대 4.3 L를 수용할 수 있고 6시간 정도 지속됨.

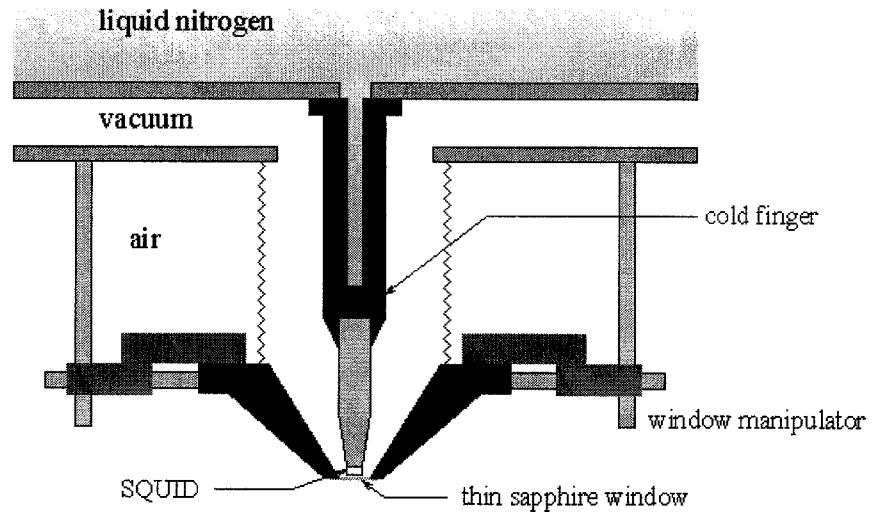


그림 15. SSM의 본체 개략도.

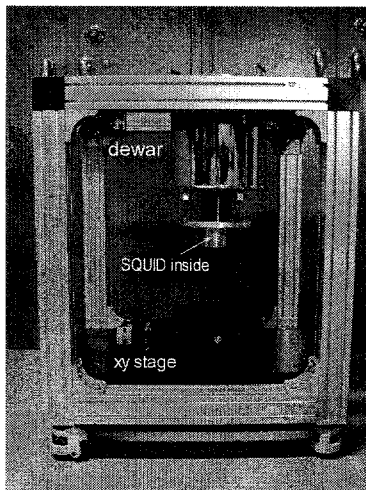


그림 16. SSM dewar와 scanning stage.

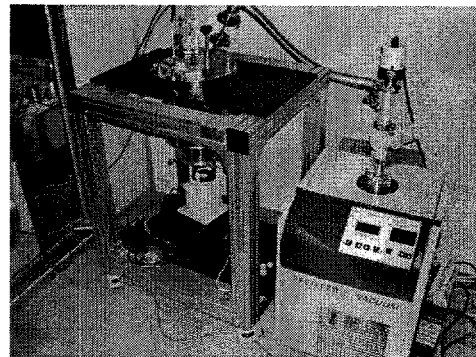


그림 17. 완성되어 작동되는 시스템의 모습. SQUID 주변 재질은 합성 수지 등을 사용하여 잡음과 신호 왜곡을 최대한 줄임.

3. Readout electronics

SQUID를 구동하는 회로로 SQUID의 dc 신호를 feedback하는 회로를 설계, 제작 (그림 18). 저잡음 설계를 해야 하는 preamp는 저잡음 operational amplifier(LT1028)를 이용하여 differential amplifier 형태로 구성.

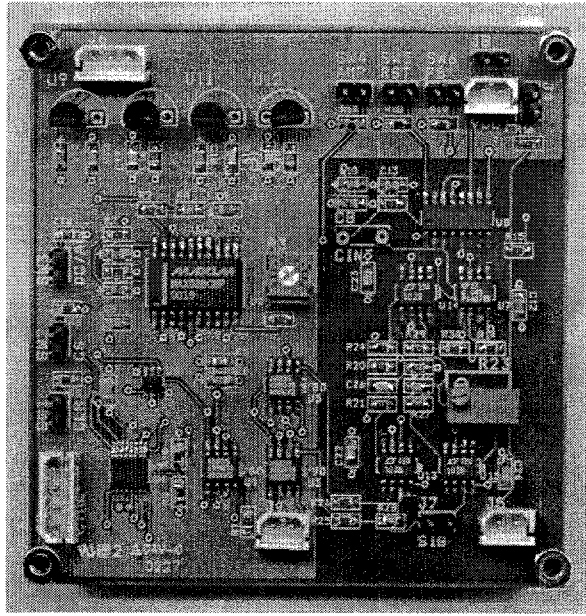


그림 18. Readout electronics board의 사진.

4. Scanning stage와 frame

스테핑 모터로 구동되는 대면적 기계식 xy scanning stage를 제작. Limit sensor를 채용하여 stage의 crash를 방지함. 최대 scan 영역은 15 cm x 15 cm, 모터의 한 step당 이동거리는 5 μm 이고 이는 microstepping으로 더 정밀하게 나눌 수 있음.

5. Scan controller

Data acquisition과 motor control의 동기화를 위해서는 전용 회로를 구성하여 전달시키는 것이 편리함. 내부에 프로그램을 저장할 수 있는 flash memory를 내장한 microcontroller (AT89C51)를 사용하여 구성(그림 19, 20, 21). PC로부터 scan parameter를 받아 motor drive로 pulse train을 내보내고 trigger를 기다리는 상태의 ADC에 data acquisition을 위한 trigger 신호를 보내는 기능을 함. Pulse train의 최대 주파수는 67 kHz임.

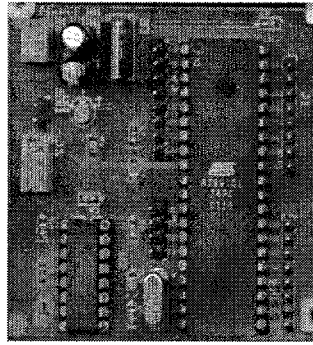


그림 19. Scan control을 담당하는 microcontroller board.

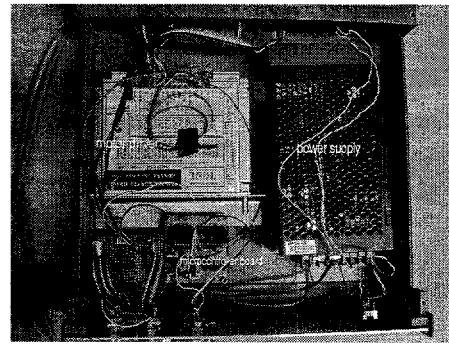


그림 20. Motor-control box.

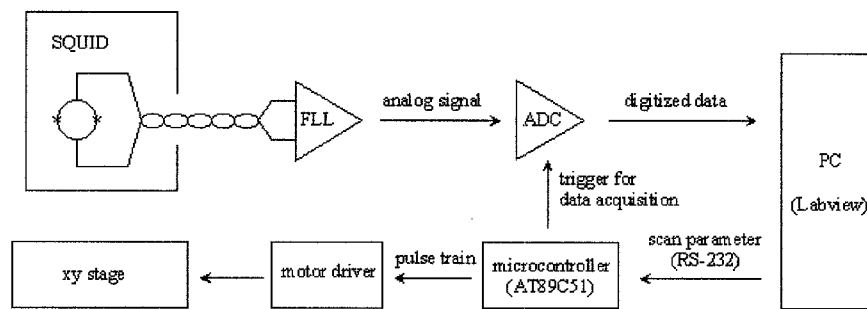


그림 21. 시스템의 구동 메커니즘.

6. Software

Scan parameter의 결정과 data acquisition, visualization, 저장은 PC에서 Labview program으로 하도록 개발(그림 22).

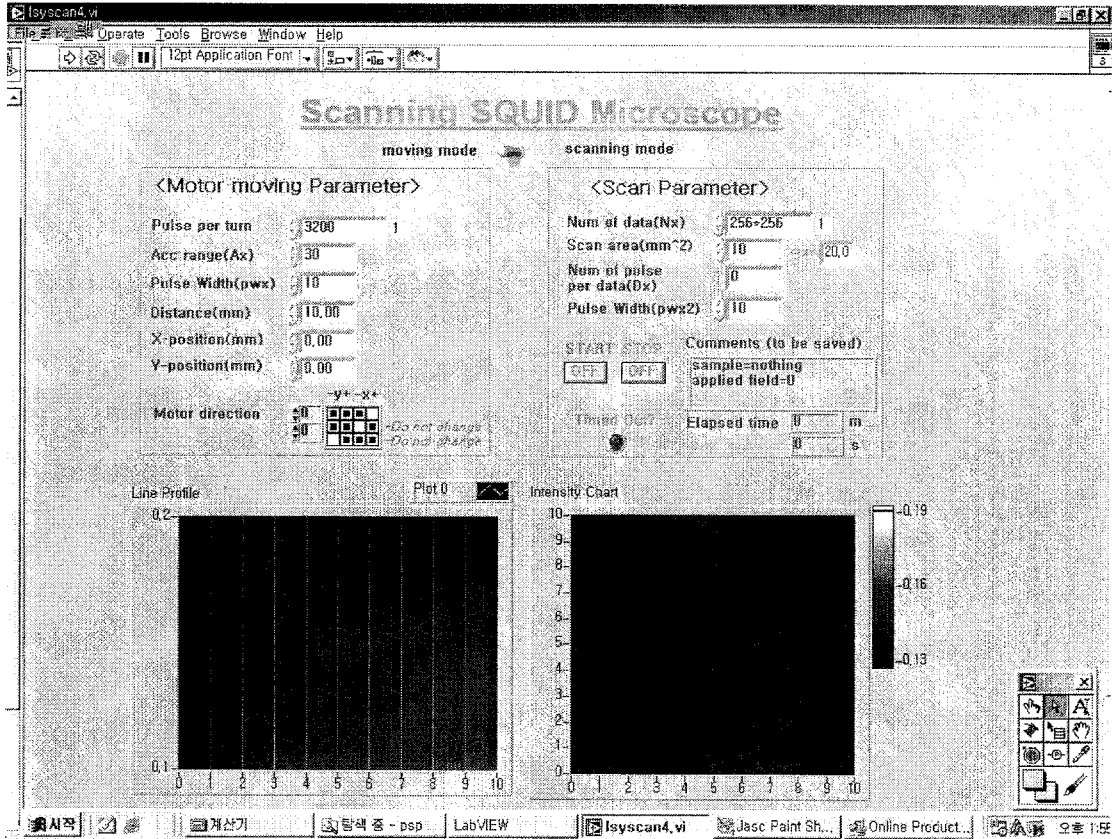


그림 22. Labview로 제작한 구동 프로그램의 모습.

7. SQUID 구동과 특성 측정

SQUID 구동과 시험에는 본 연구실에서 제작한 FLL 회로를 이용. 이 회로는 modulation이 없이 dc 신호를 feedback하는 scheme으로서, SQUID과 feedback coil의 mutual inductance에 따라 modulation의 크기를 조정해야 할 필요가 없어 대부분의 SQUID를 구동할 수 있는 반면 잡음과 thermal drift에 취약한 점이 있음. Preamp의 입력 잡음은 $1 \text{ nV}/\sqrt{\text{Hz}}$ 이고 2단 증폭기까지 증폭률은 10000정도임. 대역폭은 100 kHz이나 2단 증폭기의 IC 교체를 통해 1 MHz 이상 증가시킬 수 있음.

비차폐 환경에서 자기 마당에 대한 SQUID의 응답곡선과 잡음 특성 측정을 하였음. SQUID 응답 전압의 폭은 $30 \mu\text{V}_{\text{pp}}$ 이고 Peak-to-peak noise는 0.1~10 Hz 대역폭에서 $50 \text{ nT}_{\text{pp}}$ 로 측정되었음. 잡음의 주파수 특성은 그림 24 참조. 저주파 잡음이 큰 것은 비차폐 환경이나 자기마당을 가하고 냉각시킨 고온초

전도 SQUID에 보통 나타나는 현상으로 bias reversal 방법을 사용한 readout schemedm로 개선 가능함.

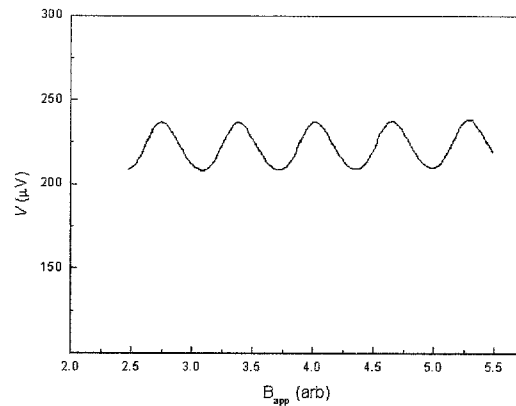


그림 23. 제작된 SQUID의 V-Φ 특성.

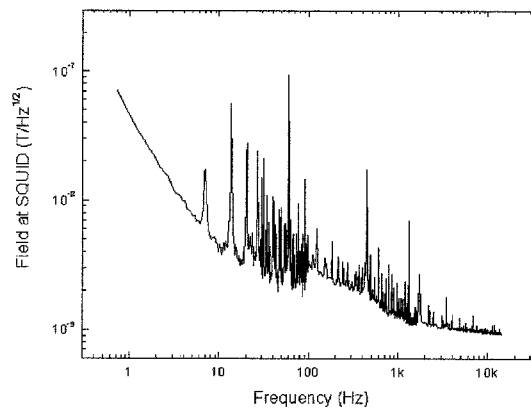


그림 24. System noise spectrum.

8. Scanning

전년도에 연구, 제작된 scanning stage는 dewar 아래에 고정. Sample mount 는 비자성, 전기절연체인 POM을 가공하여 시료의 수직 위치, 기울기 등을 나사 3개를 통해 조절할 수 있도록 제작. Mount 자체의 높이가 20 cm 정도 되어 scanning stage의 eddy current, remnant magnetization 등의 불필요한 신호가 SQUID로 들어오는 것을 최대한 방지함.

테스트 시료로 직경 0.5 mm, 길이 2 cm인 permalloy wire를 mount하고

SQUID를 1 mm 이하의 거리로 접근시켜 시험 스캔을 하고 데이터를 이미지 처리하여 그림 25에 나타내었음. 중간에 두 번 feedback이 풀린 것 이외에는 정상적인 동작을 한 것임. 시스템의 최소 수평해상도 등의 자료를 얻기 위해 printed circuit board 등에서 전류 패턴을 스캔하는 등의 연구가 현재 진행 중 임.

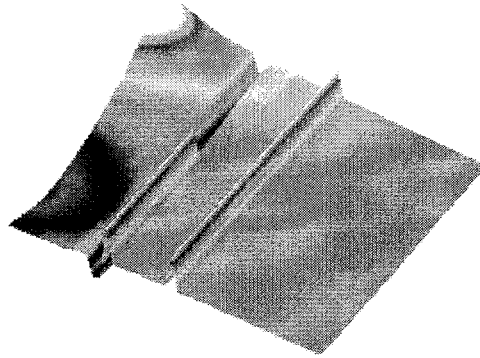


그림 25. Permalloy wire 위에서 자기 분포를 얻어낸 SSM 시험 스캔. Permalloy wire는 왼쪽 위에 위치하고 방향은 1시를 향한 상태. 자화되어 있는 것을 뚜렷하게 알 수 있음. 신호가 커서 saturate되어 전체 스캔은 하지 못함. Area = 25mm × 10mm (Not real aspect ratio).

제 2 절. 자성 팁의 응용

1. 자성 팁의 효과 연구

직경 0.5mm인 $\text{Ni}_{80}\text{Fe}_{15.5}\text{Mo}_{4.5}$ wire를 잘라 본 과제에서 개발된 SSM을 이용해 자성 실험. 위 재료는 coercive field가 매우 작아(0.01 Oe 수준) 신호의 선형성 향상에 유리한 soft magnetic material로서 선택됨.

- 한쪽 팁 끝의 자기 신호가 다른 쪽 끝으로 전달되는, 이른바 Field-guiding effect가 있음을 알아보기 위해 wire 한쪽 끝에 작은 코일로 ac field를 가하고 반대쪽에서 SQUID를 가까이 접근시켜 자기 신호를 검출함. 비교를 위해 coil과 SQUID의 위치는 그대로이고 wire를 제거한 경우도 실험. 그림 26에 peak로 나타난 바와 같이 200 Hz의 자기신호가 field guide(FG)가 없는 경우 검출되지 않는 세기일 때에도 FG가 있으면 검출됨을 frequency spectrum을 통해 관측.

- 팁의 길이가 길어질수록 자기신호는 약해질 것으로 예상하고 팁의 길이를 변화시키며 자기 신호 크기가 어떻게 달라지는지 측정. 팁의 길이를 L, 3L/4, 2L/4, L/4 (L=3cm)로 바꾸어가며 같은 세기의 ac 전류를 coil에 가하고 SQUID에서 검출된 신호를 비교한 결과 길이가 길어질수록 신호가 exponential하게 감소함을 관측함(그림 27 참조). 이는 FG를 사용한 시스템의 최대 단점으로 알려져 있는 sensitivity 손실을 팁의 길이를 짧게 하여 크게 개선할 수 있음을 의미함. 계산상으로는 FG없이 SQUID만 coil에 접근하여 측정하는 경우에 비하여 L=3cm일 때 1%, L=1.5cm일 때 50%의 신호를 얻게 되어 매우 큰 격차가 있음을 알 수 있음.

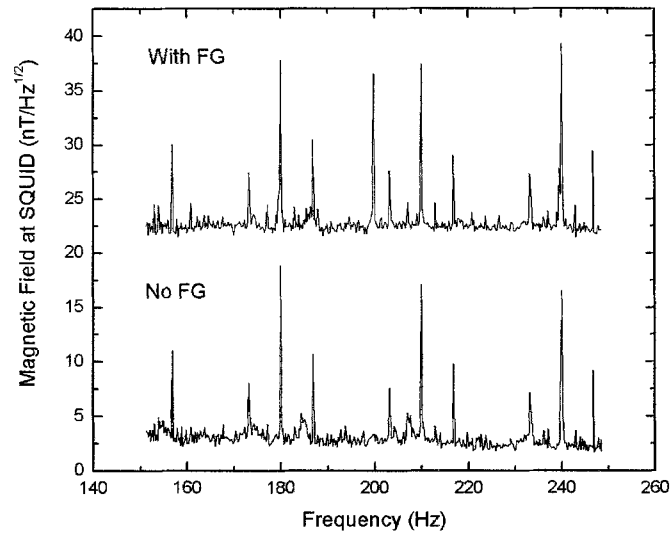


그림 26. 200Hz 자기 신호에 대해 field guide (FG)가 있는 경우와 없는 경우에 대한 비교. FG가 있는 경우 200Hz 신호가 검출됨을 알 수 있음.

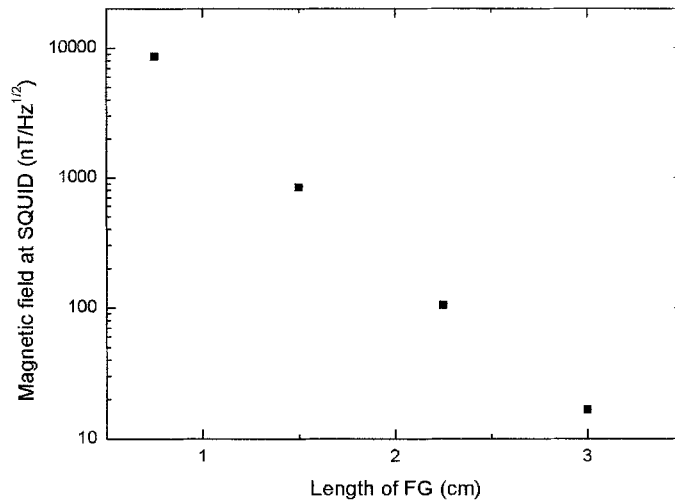


그림 27. FG의 길이에 따른 신호 전달 감소량의 측정. 길이가 길어 질수록 SQUID에서의 신호는 exponential하게 감소함을 관측함. Sensitivity loss를 줄이기 위해서는 FG의 길이를 최대한 짧게 해야 함을 알 수 있음.

Dc field를 coercive field 이상으로 변화시키며 자기 이력 현상이 있는가 측

정하여 자기 이력 현상 관측됨(그림 28 참조). 곡선을 확대해 보면 magnetization이 급하게 변하는 부분이 있음(그림 29). 이는 강자성 물질에서 magnetization 분포의 energy local minima가 있어 급작스러운 magnetization 변화를 가져온다는 Barkhausen effect를 관측한 것으로 추정됨. 이들 강자성 물질에서 보이는 현상들이 자기신호를 왜곡하게 되어 결과적으로는 신뢰할 수 있는 자기 신호 수준이 떨어지게 됨. 이를 해결하는 방법으로 SQUID 구동 시 필수적으로 가하는 feedback flux를 SQUID가 아닌 시료 쪽에 접근하는 자성 팁 끝 부위에 작은 coil을 감아서 이곳에 가하게 하면 자성 팁에 가해지는 총 field의 변화폭이 대폭 줄어들게 되어 자기이력과 Barkhausen effect의 영향을 줄이고 신호의 선형성을 향상시킬 수 있을 것임.

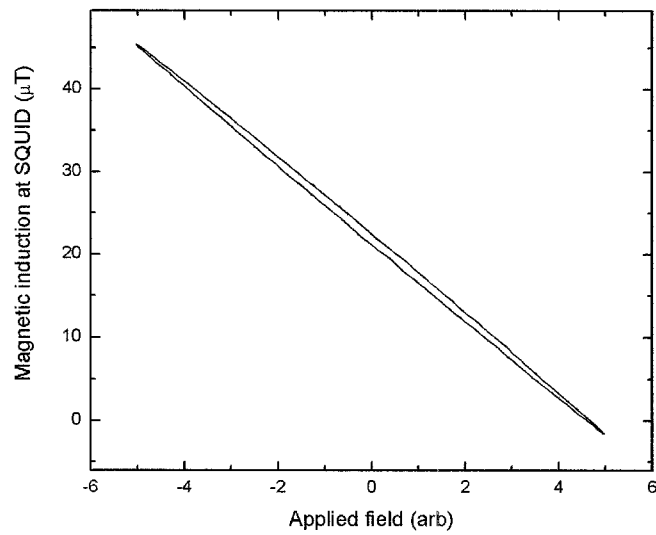


그림 28. Coercive field정도 scale에서 작지만 나타나는 FG의 자기 이력.

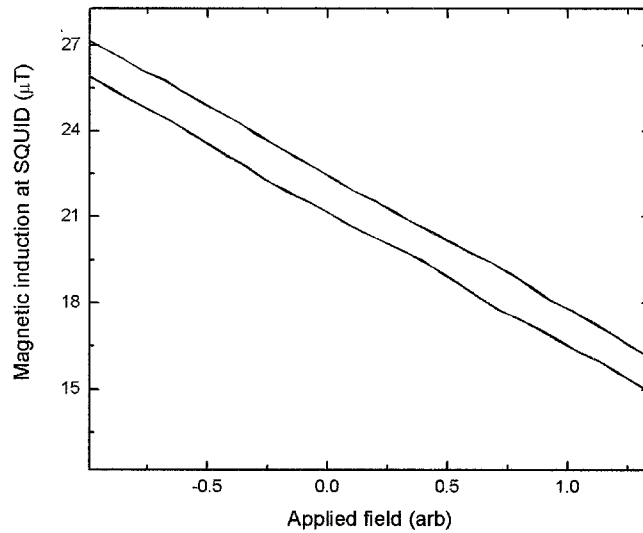


그림 29. 자기 이력 곡선의 부분 확대에서 보이는 Barkhausen effect.

2. 자성 팁 응용 시스템 설계 및 제작

SQUID 현미경에서 수평해상도를 결정하는 것은 SQUID-시료 사이 거리와 SQUID loop의 크기이므로 보통은 pickup loop이 없는 SQUID를 사용하나 자성 팁 끝이 시료의 자기 신호를 검출하는 방식으로 개발할 때에는 SQUID 크기에 대한 제약이 없다고 볼 수 있음. 따라서 field 자체를 검출하는 magnetometer가 아니라 field의 gradient를 측정함으로써 멀리서 발생하는 자기 잡음을 제거할 수 있는 gradiometer를 사용하는 것이 감도상 이점이 있음. 제작된 gradiometer는 YBCO 박막 한 층을 식각하여 만든 planar gradiometer로서 구조는 그림 30와 같이 두 개의 수 mm 수준의 loop에서 field를 검출하면 그 차이에 해당하는 신호만이 중앙에 있는 SQUID에 들어오게 됨. 따라서 그림 32과 같이 자성 팁을 두 개를 준비하되 길이를 다르게 하고 각각의 loop에 수직으로 접근시키면 긴 쪽에서만 시료의 자기 신호를 SQUID로 전달하여 측정이 됨.

또한 flux feedback을 센서 SQUID에 하지 않고 자성 팁의 시료쪽 끝에 작은 코일을 감아 이곳으로 하게 되면 자성 팁의 자기 이력 곡선에서 가하는 자

기 마당의 크기를 거의 일정하게 할 수 있으므로 자기 이력 현상으로 인한 신호 왜곡을 크게 줄일 수 있을 것으로 예상함. 단 본 실험에서는 gradiometer의 감도가 낮아 그러한 scheme으로 lock을 할 수 없었고 gradiometer의 재설계를 통해 가능할 것으로 기대함.

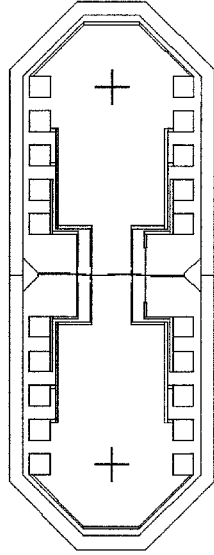


그림 30. Planar gradiometer의 layout. 폭 3 mm, 높이 8 mm임.

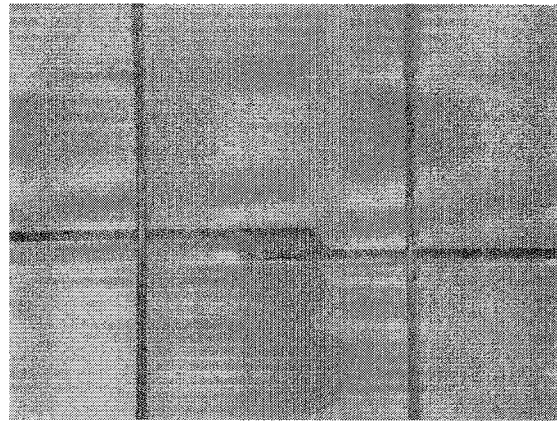


그림 31. 중간 부분에 위치한 SQUID의 현미경 사진. Slit의 길이가 각각 60 μm , 30 μm 이고 4 개의 SQUID 중 제일 우수한 성능을 보이는 하나만 동작시키게 됨.

본 과제에서 개발된 SQUID 현미경 dewar의 기본 시스템을 그대로 이용하되 cold finger와 vacuum window를 자성 팁을 사용하는 구조에 맞게 설계, 제작함(그림 32). Vacuum window는 사파이어 재질로 두께 2 mm에 크기는 10 mm \times 10 mm이고 POM으로 만든 헤드에 에폭시로 접착, sealing 하였음(그림 33). Vacuum window에는 두 개의 구멍을 뚫어 길이가 각각 12 mm, 7 mm인 정도인 자성 팁을 끼우고 에폭시로 접착, sealing 함. 자성 팁과 gradiometer의 align과 approach는 옆과 아래의 window를 통해 보면서 조정 가능함.

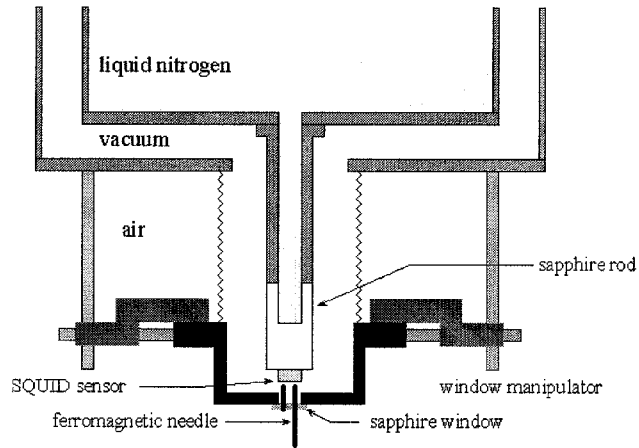


그림 32. FG를 사용한 시스템의 설계. SQUID sensor로는 planar gradiometer를 채택.

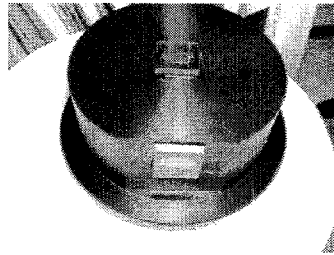


그림 33. Sapphire window에 permalloy tip 두 개를 에폭시로 장착한 모습.

시스템 제작 후 동작시켰을 때 진공도, 냉각 온도 등의 조건은 앞에서 설명한 SQUID 현미경과 같음. 신호 전달 테스트는 230 Hz의 전류를 자성 팁 끝부분에 위치시킨 작은 코일에 가하고 gradiometer는 open-loop readout으로 frequency spectrum을 측정함. 그림 34와 같이 팁 끝의 신호를 검출해 내었음. Gradiometer는 pickup loop과 SQUID 사이의 coupling이 충분하지 않아 자성 팁 끝에 feedback을 했을 때, flux-lock이 되지 않음. 재설계로 Gradiometer 자체의 성능을 끌어올려야 자성 팁 끝에 feedback을 가해 자기 이력 현상을 줄이고 신호의 선형성을 높이는 획기적인 개선이 가능할 것임.

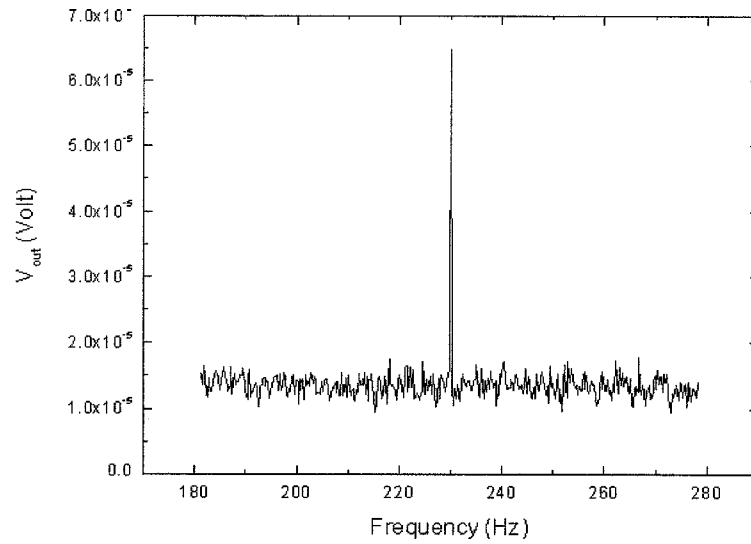


그림 34. 230 Hz의 자기 신호를 자성 텃 끝에 가하고 gradiometer에서 나오는 신호를 그대로 증폭만 하여 얻은 frequency spectrum. 230 Hz 신호가 자성 텃으로 인해 센서까지 잘 전달되었음을 알 수 있음.

제 4 장. 관련분야에의 기여도

상온시료용 SQUID 현미경 제작

상온 시료용 SQUID 현미경의 경우 90년대 중반 이래 여러 연구진의 연구로 설계와 제작의 기술은 잘 확립이 된 상태임. 자기 이미지에서 전류 분포나 자화 분포를 계산하는 것도 방법론은 잘 정립되어 있음. 남은 과제는 여러 분야에 응용가능성이 큰 SQUID 현미경을 실제로 학제간 연구에 활용하는 것이라고 볼 수 있음. 본 과제에서 기본 하드웨어가 개발되었으므로 앞으로 응용 분야 탐색이 가능한 상태임.

자성 팁 사용 SQUID 현미경

자성 팁을 응용한 SSM 분야는 수평해상도의 극적인 향상이라는 기대에도 불구하고 신호 왜곡과 감쇄의 원인이 될 수 있는 팁의 자성에 대한 연구가 미흡함. 본 연구에서 팁의 자기이력, Barkhausen 효과, 길이에 따른 guiding 효율 등에 대한 연구가 이루어졌으므로 자성 팁을 사용한 SQUID 현미경의 특성과 응용 방향을 밝히는 데 기여될 것임.

제 5 장. 연구개발결과의 활용계획

제 1 절. 연구결과 활용계획

1. 당해 연도 활용계획

- 구현된 상온 시료용 SQUID 현미경의 최소 수평해상도를 측정하기 위한 박막 패턴 시료를 제작, 스캔. 자기 이미지에서 전류 분포를 역계산하는 연구도 수행하여 결과적으로는 전류 분포를 비파괴 검사하는 장비로서의 성능 지표를 측정하고 반도체 산업 등에서의 응용 가능성을 연구.
- Magnetic nanoparticle/nanocluster의 자기 신호 검출을 연구. Magnetic nanoparticle은 생체 시료의 연구에 magnetic tag으로 활용 가능성이 제기되고 있음. 검출 센서의 감도와 수평해상도에 대한 요구 수준이 높으면서 시료에의 접근 거리가 한계가 있으므로 이런 경우에 SQUID 현미경이 강력한 도구가 될 수 있음을 보이는 것이 우선 과제임.
- 자성 팁을 활용한 시스템은 기본 동작을 시키는 것을 당면 과제로 함. Gradiometer 설계, 제작을 효율적인 구조로 연구하여 자성 팁 시스템 구동에 적합하도록 제조함. Pickup area가 큰 것만이 바람직하지 않으며 자성 팁에서의 신호를 검출하는 적당한 수준이 있고 pickup loop과 SQUID의 mutual inductance도 적절한 수준을 찾아내어야 함. 시스템 구동시에는 feedback flux를 시료쪽에 접근하는 자성 팁 끝에 가하여 시스템의 선형성 향상을 꾀하고 구체적인 결과를 얻을 예정임.

2. 차년도 이후 활용계획

- 학제간 협력하에 기초 과학 연구에 활용할 수 있으므로 대학 연구소 차원에서 화학, 생물학, 재료과학 등 타 분야와 공통의 관심사가 되는 연구에 활용할 계획임.
- 응용 가능성에 따라 특허 출원 및 기술 이전 등으로 산업적 이용 가능 여부를 탐색. 예를 들어 반도체 검사, 전자 부품 검사, 철강 등 재료 검사, 생체 물질의

반응성 조사, 부식 검사, 비행기 등 기계류 내부의 크랙 탐지, 생물 전류 측정 등에 이용 가능한 장비 개발 가능성이 있음.

3. 기대효과

- 높은 감도를 장점으로 하여 다양한 시료의 자기 신호 연구에 활용 가능하므로 지질학, 생물학 등과의 학제간 연구가 필요한 새로운 응용 창출 가능성이 있음.
- 큰 단점 중 하나인 사용, 유지상의 편이성이 개선되면 반도체, 전자 산업 분야에서 시료의 비파괴 검사에 응용할 수 있는 강력한 도구가 될 수 있고 생물 공학 등에서는 magnetic tag 등의 사용으로 생체 시료를 연구할 때에 감도가 큰 SQUID 현미경을 사용하여 적은 숫자의 생체 분자도 검출할 수 있는 등의 장점을 인식하게 되면 이 분야의 수요 창출과 새로운 연구 결과도 기대할 수 있음.
- 자성 팁을 사용한 SQUID 현미경이 도달할 수 있는 submicron 수준의 수평해상도를 얻으면서 감도와 신호의 선형성 등에서 취약점을 개선하게 된다면 기존의 SQUID 현미경으로 적용하기 어려운 분야에서 응용될 수 있음. 예를 들어 최근 첨단 기술 동향에서는 소자의 크기가 대부분 submicron 크기이며 100 nm 이하의 nano-science/technology가 연구되고 있으므로 이 분야에서 이용될 수 있는 가능성을 탐색해 볼 수 있을 것임.

제 6 장. 연구개발과정에서 수집한 해외과학기술정보

- SQUID 제작과 readout 기술.

Bicrystal substrate에 초전도 박막을 입히고 식각하여 만든 조셉슨 접합을 이용하는 것이 고온 초전도 SQUID 제작 방법 중 가장 신뢰성 있는 결과를 냄. 고온 초전도 SQUID를 상용화하여 응용한 경우도 있으나 다양한 실험을 위해서는 자체 제작을 하는 것이 유리함. SQUID의 구동 회로는 상용화된 제품들 성능도 좋으므로 SQUID 응용 연구를 하는 대학 연구소 등지에서도 많이 구입하는 편임. 본 연구진은 자체 개발한 회로를 사용하고 있으나 어느 정도 성능의 한계를 보이는 수준까지 연구가 진전되면 상용 제품의 사용도 고려할 계획임.

- Single-layer planar gradiometer.

고온 초전도 박막을 사용해 gradiometer를 제작하기 위해 연구되어 검출하는 자기 마당의 order에 따라 몇 개의 pickup loop과 이 loop에 흐르는 screening current에서 발생하는 자기 마당이 couple되는 SQUID로 이루어져 있음. 평면에 수직인 자기 마당의 평면 방향 gradient, 혹은 더 높은 order의 자기 마당을 검출하므로 시료보다 먼 곳에서 발생한 자기 잡음을 제거하는 효과가 있어 자기 차폐가 어려운 응용에 많이 쓰임.

- 자기 이미지에서 전류 분포를 알아내는 역계산.

Inverse problem이라는 응용수학의 한 분야에 속하는 문제로 forward problem은 전류 분포에서 자기 분포를 계산하는 것과 같이 단순 적분으로 풀 수 있는 반면에 그 역계산은 trivial하지 않으므로 해답의 존재 유무부터 따져야 하는 문제임. 보통 구속 조건이 있는 경우를 연구하여 해답의 알고리즘이 개발되어 있음. 자기 현미경의 경우 2차원 평면 위에 전류가 제한되어 흐르고 전류원이 없다는 가정 하에 자기 이미지로부터 전류 분포를 계산하는 알고리즘이 연구되어 있음. Fourier 변환이나 matrix의 regularization을 활용하는 것이 잘 알려져 있으며 실

험과 결부되어 잘 연구된 방법은 Fourier 변환을 이용한 계산임. 대표적으로 Maryland group이 깊이 연구한 바 있음.

- Soft ferromagnetic material의 자기 특성.

가하는 자기 마당이 0일 때도 스스로 자화가 되어 있는 강자성 물질중 coercive field가 작아 작은 자기 마당에 자화가 쉽게 변하는 물질을 soft ferromagnetic material로 구분하는 데 니켈, 철을 주성분으로 하는 permalloy가 대표적인 재료임. 자화율이 크면서 비선형성이 비교적 적어서 SQUID 현미경에서 자성 팁으로 사용하는 경우 permalloy를 대부분 선택하게 됨.

- Microcontroller 등을 이용한 real-time motion controller의 설계와 제작.

Scanning stage를 구동하며 적절한 타이밍에 데이터를 입력받아 디스플레이에 표시하고 저장하기 위해서는 실시간 제어가 가능한 control electronics가 필요함. 프로그램 가능한 모터 구동 컨트롤러가 시판되고 있으나 ADC 제어 등 사용자의 필요에 따라 다양한 mode의 program을 위해서는 microcontroller나 DSP를 이용한 controller의 제작이 근본적인 해결책임. 이중 비교적 적은 비용, 시간, 노력으로 구축할 수 있는 시스템이 microcontroller의 활용으로 하나의 IC 내부에 연산부, 메모리, 입출력 포트 등이 내장되어 있어 주변 회로도 간단하게 제작할 수 있음. Microcontroller의 프로그램은 PC에서 cross assembler나 cross compiler를 사용하여 기계어 코드를 만든 다음, ROM-writer를 이용해 microcontroller 내부의 메모리로 다운로드하면 됨.

- 제어에 활용하는 software 제작 기술

PC를 이용해 데이터를 수집, 처리하는 software를 만드는 tool로서 Labview를 이용. 다이어그램을 그리듯이 각종 component들을 배치해 프로그램을 제작하는 방식으로서 기본적으로 과학기술에 많이 쓰이는 component가 구비되어 있으므로 빠르게 application을 제작할 수 있음. Microcontroller로 제작된 scan controller와

PC가 통신하며 모터 이동, 스캔, 자기 이미지 수집, 처리를 위한 master program
을 만드는 도구로 사용함.

제 7 장. 참고문헌

- J. P. Wikswo, Jr., IEEE Trans. Appl. Supercond. **5**, 74 (1995).
- Thomas S. Lee, Eugene Dantsker, and John Clarke, Rev. Sci. Instrum. **12**, 4208 (1996).
- SeungKyun Lee, W. R. Myers, H. L. Grossman, H.-M. Cho, Y. R. Chemla, and John Clarke, Appl. Phys. Lett. **81**, 3094 (2002).
- Yoshimi Watanabe, S. H. Kang, J. W. Chan, J. W. Morris, Jr. and John Clarke, Appl. Phys. Lett. **83**, 1878 (2003).
- E. F. Fleet, S. Chatrathorn, F. C. Wellstood, L. A. Knauss, and S. M. Green, Rev. Sci. Instrum. **72**, 3281 (2001).
- S. Chatrathorn, E. F. Fleet, and F. C. Wellstood, J. Appl. Phys. **92**, 4731 (2002).
- M. v. Kreutzbruck, A. Theiss, M. Mück, and C. Heiden, Rev. Sci. Instrum. **70**, 3714 (1999).
- A. I. Braginski and H.-J. Krause, Physica. C **335**, 179 (2000).
- B. Baek, Hochul Kim, Z. G. Khim, S.-M. Lee, S. H. Moon, and B. Oh, Prog. Supercond. **1**, 20 (1999).
- B. Baek, Yonuk Chong, Z. G. Khim, J. H. Yun, and S.-M. Lee, Sing. J. Phys. **18**, 23 (2002).
- P. Pitzius, V. Dworak, and U. Hartmann, "Ultrahigh-resolution scanning SQUID microscopy", Ext. Abstr. ISEC '97, Berlin, Germany, 1997, June 25-28, vol. 3, pp. 392-398.
- S. A. Gudoshnikov et al., IEEE Trans. Appl. Supercond. **11**, 219 (2001).
- T. Nagaishi et al., IEEE Trans. Appl. Supercond. **11**, 226 (2001).
- S. Tanaka et al., Supercond. Sci. Technol. **15**, 146 (2002).
- T. Kondo and H. Itozaki, Physica C (2003), in press.
- H. Barkhausen, z. Phys. **20**, 401 (1919).

[첨부1]

연구결과 활용계획서

1. 연구목표 및 내용

소규모 전자 소자나 생명공학 시료 등의 상온샘플의 자기적 특성 또는 전류분포 등을 50 μm 이상의 수평 해상도를 가지고 mapping 할 수 있는 고온 초전도 Scanning SQUID Microscope를 개발함을 최종 목표로 함.

측정영역은 반도체 웨이퍼의 크기를 한번에 다룰 수 있도록 10 cm 이상의 시스템을 제작하는 것이 최종 목표임.

2. 연구수행결과 현황(연구종료시점까지)

가. 특허(실용신안) 등 자료목록

발명명칭	특허공고번호 출원(등록)번호	공고일자 출원(등록)일자	발명자 (출원인)	출원국	비고

나. 프로그램 등록목록

프로그램 명칭	등록번호	등록일자	개발자	비고

다. 노하우 내역

Thin film 제작 및 Photolithography 등 SQUID 제작 기술.

SQUID readout electronics 제작 기술.

Single-layer planar gradiometer의 설계.

Soft ferromagnetic material의 자기 특성에 대한 지식.

Microcontroller 등을 이용한 real-time motion controller의 설계와 제작.

제어에 활용하는 software 제작 기술(labview programming, cross compiler의 사용, data 처리 등).

라. 발생품 및 시작품 내역

상온 시료용 고온 초전도 scanning SQUID microscope

- 고온 초전도 SQUID
- SQUID readout electronics
- 대면적 xy scanning stage
- Scan controller
- Control & data-process software

마. 논문게재 및 발표 실적

○ 논문게재 실적

학술지 명칭: Progress in Superconductivity

제목: Development of small-sized SQUID and direct-coupled electronics for high-Tc scanning SQUID microscope

게재연월일: 2001년 10월 31일

호: vol. 3

발행기관: The Korean Superconductivity Society

국명: 한국

SCI게재 여부:否

학술지 명칭: Singapore Journal of Physics

제목: Development of small-size SQUID for high-Tc scanning SQUID microscope

게재연월일: 2002년 7월

호: vol. 18

발행기관: The Institute of Physics, Singapore

국명: Singapore

SCI게재 여부:否

○ 학술회의 발표 실적

학술회의 명칭: Korea Superconductivity Society

제목: Development of small-sized SQUID and direct-coupled electronics for high-Tc scanning SQUID microscope

발표연월일: 2001년 8월 20일

국명: 한국

학술회의 명칭: First east Asia symposium on superconductive electronics

제목: Development of small-size SQUID for high-Tc scanning SQUID microscope

발표연월일: 2001년 11월 26일

국명: 일본

학술회의 명칭: Second east Asia symposium on superconductive electronics

제목: Development of high-Tc scanning SQUID microscope with magnetic field guide

발표연월일: 2003년 11월 16일

국명: 대만

3. 연구성과

※ 기술이전이나 기업화 완료(추진중 포함) 실적

4. 기술이전 및 연구결과 활용계획

가. 당해연도 활용계획

- 시스템의 수평해상도, 스캔속도 등 정확한 성능 측정.
- 얻은 데이터로부터 전류원 혹은 자화 분포 등을 계산해 내는 연구 추진.
- 자성 팁을 활용한 시스템은 기본 동작을 시키는 것을 목표로 함. 동작된 후 어떤 장점과 단점이 있는지를 구체적으로 연구하고 응용, 개선 방향을 연구.
- 성능상 지표가 확립이 된 연후에 어떤 응용 분야가 적합한지가 뚜렷해 질 것으로 예상.

나. 활용방법

- 기본 기술은 갖추어진 것으로 보고 SQUID와 readout이 좀더 편리하고 robust하게 이용될 수 있도록 연구함. Window manipulator 등의 기계부도 세밀하고 신속한 조정을 할 수 있도록 설계 개선을 하여 쉬운 작동을 통해 다양한 응용 가능성을 테스트할 계획임.

다. 차년도이후 활용계획

- IC, 금속재 등의 전류 분포 조사에 응용하여 산업적 이용가치를 연구.
- SQUID가 상온 시료에 가까이 접근되는 시스템임을 이용하여 화학, 생물전기·자기를 측정하는 응용성 연구.

5. 기대효과

향후 활용에 따른 기술적, 사회·경제적 파급효과(정량적 및 정성적으로 전문가입장에서 구체적으로 작성)

- 예상매출액(단위: 백만원), 수입대체효과((단위: 백만원), 수출증대효과(단위: 백만원), 원가절감(단위: 백만원,기존대비%), 에너지절감효과(단위: 백만원, 기존대비%), 생산성 향상(단위: 백만원,기존대비%) 인력양성 또는 고용창출 효과(단위:명), 투자유치실적((단위: 백만원), 인프라구축 효과 등

6. 문제점 및 건의사항(연구성과의 제고를 위한 제도·규정 및 연구관리 등의 개선점을 기재)

본 과제는 system 구축을 위한 여러 가지의 기술이 효율적으로 융합되어야 하는데 최근 국내의 고온초전도체에 대한 연구비 지원의 감소로 인하여 연구자 수가 급격히 감소함. 이에 따라 외부로부터 필요한 기술의 효율적인 지원을 받지 못하는 상황이 벌어져 연구의 효율성이 낮아짐. (예를 들어 우수한 고온초전도 박막의 제작 및 SQUID 제작 등)

고온초전도 연구기반에 해당하는 과제에 대한 지원이 필요.

[첨부2]

기술 요약서

■ 기술의 명칭

- 고온초전도 SQUID의 제작
- 진공, 저온 기술
- Motion and scanning technology
- 주사형 SQUID 현미경을 이용한 자성 연구 기술

■ 기술을 도출한 과제현황

과제관리번호	M1-0122-00-0001			
과제명	고온초전도 주사형 SQUID 현미경 개발			
사업명	중점국가연구개발사업			
세부사업명	고온초전도기술개발사업			
연구기관	서울대학교	기관유형	대학	
참여기관(기업)				
총연구기간	2001년 11월 14일 ~ 2003년 11월 13일			
총연구비	정부(132,000)천원 민간()천원 합계(132,000)천원			
연구책임자 1	성명	김정구	주민번호	471210-1075510
	근무기관 부서	서울대학교 물리학과	E-mail	jnine@plaza.snu.ac.kr
	직위/직급	교수	전화번호	02-880-6604
연구책임자 2	성명		주민번호	
	근무기관 부서		E-mail	
	직위/직급		전화번호	
실무연락책임자	성명	백범	소속/부서	서울대학교 물리학과
	직위/직급	대학원생	E-mail	bkbm@supercon.snu.ac.kr
	전화번호	02-874-1887	FAX	02-874-3890
	주소	(151-742) 서울 관악구 신림 9동 서울대학교 물리학부		

■ 기술의 주요내용

[기술의 개요]

Scanning SQUID microscope는 독립된 하나의 장비로서 여러 분야의 기술을 아우름. 초전도 박막의 제조 기술과 미세 식각 기술, SQUID 구동을 위한 전자공학, 신호처리 기술은 물론 본체 개발을 위해서는 진공과 중저온을 다루는 기술이 필요함. 스캔과 데이터 처리를 위해서는 microcontroller 등을 활용할 수 있는 디지털 전자 기술과 이를 제어할 수 있는 computer interfacing, software 개발 능력이 갖추어져야 함.

SSM 자체를 이용하여 응용할 수 있는 분야는 자성 분포 측정이나 전류 분포 측정을 통한 비파괴 검사가 유망하며 그밖에 생물학적으로 자성 입자를 이용한 위치 추적 등에 이용 가능함.

<기술적 특징>

(1) 고감도 MAGNETIC FIELD SENSOR: SQUID

인류가 개발한 가장 감도가 높은 MAGNETIC FIELD SENSOR를 고온초전도체인 YBCO를 사용함으로써 냉매를 액체질소를 사용할 수가 있기 때문에 사용상의 편의성 및 경제성이 있음.

(2) 비교적 수평 해상도 가 높음:

SQUID의 washer 크기가 $\sim 30 \mu\text{m}$ 정도로 작기 때문에 수평해상도가 높음. 그러나 현재 소자 제작 분야에서는 $\sim 30 \text{ nm}$ 의 해상도가 요구되기 때문에 해상도를 더 높이는 방도가 있어야함. SQUID에 자기 팁을 추가하여 팁 끝의 크기 수준으로 해상도를 높이는 연구가 국내외에서 진행중이며 이 경우 $0.1 \mu\text{m}$ 수준까지의 결과도 보고되어 있음.

(3) 시료 온도 변화의 자유도:

일반적으로 저온 system의 경우 시료 온도도 액체 helium 온도 또는 액체 질소 온도로 제한 적이나 이 system에서는 시료의 온도라 상온 또는 그 이하가 가능함.

[용도 · 이용분야]

(1) SSM 자체를 이용하여 응용할 수 있는 분야는 자성 분포 측정이나 전류 분포 측정을 통한 비파괴 검사가 유망하며 그밖에 생물학적으로 자성 입자를 이용한 위치 추적 등에 이용 가능함.

(2) 박막 제조, 식각 기술은 박막 소자 개발에서 필수적이고 기본적인 기술로 갖추어 놓는 것이 바람직함.

(3) SQUID 구동을 위한 아날로그 전자 기술과 scan control을 위한 디지털 전자 기술은 어떤 장비를 개발하더라도 반드시 갖추어야 하는 기술임. 다른 장비 개발에도 이용할 수 있는 기술임.

(4) 컴퓨터 인터페이스는 최근 장비 제어를 통합하는 추세에 맞는 기술로서 역시 장비 개발과 활용에 큰 도움이 되는 기술임.

[기술발전 과정상의 기술수준] (1개씩 선택(√호 표시)하여 주십시오)

	① 외국기술의 모방단계 : 이미 외국에서 개발된 기술의 복제, reverse Eng.
	② 외국기술의 소화·흡수단계 : 국내시장구조나 특성에 적합하게 적용시킴
√	③ 외국기술의 개선·개량단계 : 성능이나 기능을 개선시킴
	④ 신기술의 혁신·발명단계 : 국내 최초로 개발

■ 본 기술과 관련하여 추가로 확보되었거나 개발중인 기술

[기술개요]

기술명	
개발단계	<input type="checkbox"/> 연구개발 계획 <input type="checkbox"/> 연구개발 중 <input type="checkbox"/> 연구개발 완료
기술개요	

[기술을 도출한 과제현황]

과제관리번호	M1-0122-00-0001			
과제명	고온초전도 주사형 SQUID 현미경 개발			
사업명	중점국가연구개발사업			
세부사업명	고온초전도기술개발사업			
연구기관	서울대학교	기관유형	대학	
참여기관(기업)				
총연구기간	2001. 11. 14. ~ 2003. 11. 13.			
총연구비	합계 : (132)백만원 - 정부 : (132)백만원 민간 : ()백만원			
연구책임자	소속	서울대학교 물리학과	성명	김정구
	전화번호	02-880-6604	E-mail	jnine@plaza.snu.ac.kr
연구개발 주요내용				
<p>고감도 자기 센서인 고온초전도 SQUID를 이용한 주사형 자기 현미경 개발. 고온초전도체인 YBCO 박막을 이용하여 SQUID를 제작하고, 진공, 저온 중에서 동작시키면서 상온 시료에 가까이 접근시킬 수 있는 자기 현미경 본체를 설계, 제작함. 스캔을 위한 motorized stage와 이를 제어하고 데이터 처리를 할 수 있는 전자회로, 소프트웨어를 개발하였음.</p> <p>SQUID 현미경의 수평해상도를 극적으로 향상시킬 수 있는 scheme인 자성 팁의 이용에 관한 연구도 진행. 자성 팁을 사용할 때 어떤 효과가 나타나며 신호 왜곡 등의 현상을 feedback mechanism의 개발로 개선할 수 있음을 제시. 자성 팁을 사용한 기초 시스템을 제작.</p>				