

KAERI/CM-1314/2009

중성자 조사에 의해 변화하는 초전도 재료의  
전자기적 특성 연구

Study on the improvement of electromagnetic properties of  
superconducting materials by neutron irradiation

*KAERI*  
경북대학교

한국원자력연구원

# 제 출 문

한국원자력연구원장 귀하

본 보고서를 2009년도 “중성자 조사에 의해 변화하는 초전도 재료의 전자기적 특성 연구” 과제의 결과보고서로 제출합니다.

2010 . 6.

과 제 명 : 중성자 조사에 의해 변화하는  
초전도 재료의 전자기적 특성 연구

과제책임자 : 이 형철

참 여 자 : 윤원식

이남미

김종만

이상봉

# 요 약 문

## I. 제 목

“중성자 조사에 의해 변화하는 초전도 재료의 전자기적 특성 연구”

## II. 연구개발의 목적 및 필요성

YBCO와 REBCO 벌크 및 단결정 그리고  $MgB_2$  벌크 및 선재와 같은 초전도 재료의 임계온도, 비저항, 임계전류의 자기장 특성,  $H_{c2}$ , irreversibility line등을 중성자가 조사되기 이전과 이후를 비교 분석 한다. 또한 본 연구팀에서 보유하고 있는 저온 홀소자현미경을 이용하여 한 시료에서 중성자가 조사된 부분과 조사되지 않은 부분의 초전도 특성을 비교 한다. 초전도 재료의 거시적인 전자기적 물성 및 미시적 자기적 특성을 중성자 조사를 전후로 분석함으로써 초전도 재료의 물성을 최적화할 수 있는 중성자 조사방법의 개발하고 근본 메카니즘을 분석하는 것을 최종 연구개발 목표로 설정하고 있다.

## III. 연구개발의 내용 및 범위

- 1차년도에는 YBCO, REBCO 벌크 및 단결정 시료 그리고  $MgB_2$  벌크 및 단결정 시료에 대한 임계온도, 비저항, 임계전류의 자기장 특성,  $H_{c2}$ , irreversibility line 특성을 중성자 조사 전후에 비교 분석하였다.
- 2차년도에는 중성자가 조사된 YBCO, REBCO 벌크 및 단결정 시료 그리고  $MgB_2$  벌크 및 단결정 시료의 전자기적 특성의 각도의존성을 측정하여 이상적인 중성자 조사 방법에 대한 기초 자료를 수집하였다. 또한 중성자 조사에 의한 초전도 재료의 전자기적 특성 변화를 저온홀소자현미경을 이용하여 77 K에서 분석하였다.
- 3차년도에는 초전도 재료의 전자기적 특성들이 중성자 조사에 의해 변화하는

현상을 5 K의 극저온 환경과 외부자기장 환경에서 분석하였다.

- 이를 바탕으로 중성자 조사에 의한 초전도체의 전자기적 특성이 변화하는 현상을 체계적으로 분석함으로써 초전도체의 대용량 전력분야 응용에 적합한 인위적 피닝 센터를 생성할 수 있는 공정 개발에 기여하였다.

#### IV. 연구개발결과

- YBCO와 REBCO 벌크 및 단결정 그리고  $MgB_2$  벌크 및 선재와 같은 초전도 재료의 임계온도, 비저항, 임계전류의 자기장 특성,  $H_{c2}$ , irreversibility line등을 중성자가 조사되기 이전과 이후를 비교 분석하였다.
- LTSLM과 LTSHPM을 이용하여 YBCO 박막선재의 임계온도 및 임계 전류 밀도의 공간적 분포를 분석하였다.

#### V. 연구개발결과의 활용계획 및 건의사항

- 중성자 조사를 통한 고온초전도 재료의 물성을 향상시켜 대용량 전력분야의 응용에 이용되는 고기능성 고온초전도 및  $MgB_2$  초전도 선재와 초전도 재료를 제작할 수 있는 원천기술 확보
- 국내의 초전도 선재 산업체에 당해 기술의 이전을 통한 국제적 수준의 초전도 선재 개발 능력 확립
- 초전도 선재 및 초전도 재료의 특성을 검증하는 기관으로 위치를 확보하게 되고 향후 국내 초전도체의 산업화에 기여하는 물성 연구기관으로 역할 수행
- 본 과제를 통해 확보하게 되는 선재의 특성 평가 기술을 기타 대형 초전도 장치의 개발에 활용

# SUMMARY

## I. Project Title

“Characterization of electromagnetic properties of superconducting materials irradiated by neutron”

## II. Objective and Importance of the Project

- Current research interest in  $\text{MgB}_2$  conductors is focused on the improvement of the basic parameters : the critical temperature, the irreversibility field and critical current density.
- The correlation between the critical temperature, the irreversibility field and critical current density has to be discussed with respect to the conductor performance and applicability.
- In conventional transport measurements of superconducting samples, the measured quantities such as critical current densities and critical temperatures are averaged over the whole sample and do not reflect the local distribution of the quantities.
- The spatially resolved studies of superconductors are needed to determine local values of important parameters of the sample.

## III. Scope and Contents of Project

- The superconducting properties of as-grown and neutron irradiated  $\text{MgB}_2$  were characterized. The analysis is performed by means of SQUID magnetometry.
- Low temperature Scanning Laser Microscopy (LTSLM) and Low

temperature Scanning Hall Probe Microscopy (LTSHPM) were carried out to reveal the spatial distribution of the local resistive transition temperature and the local current density in commercial YBCO coated conductors near the superconducting transition.

#### IV. Result of Project

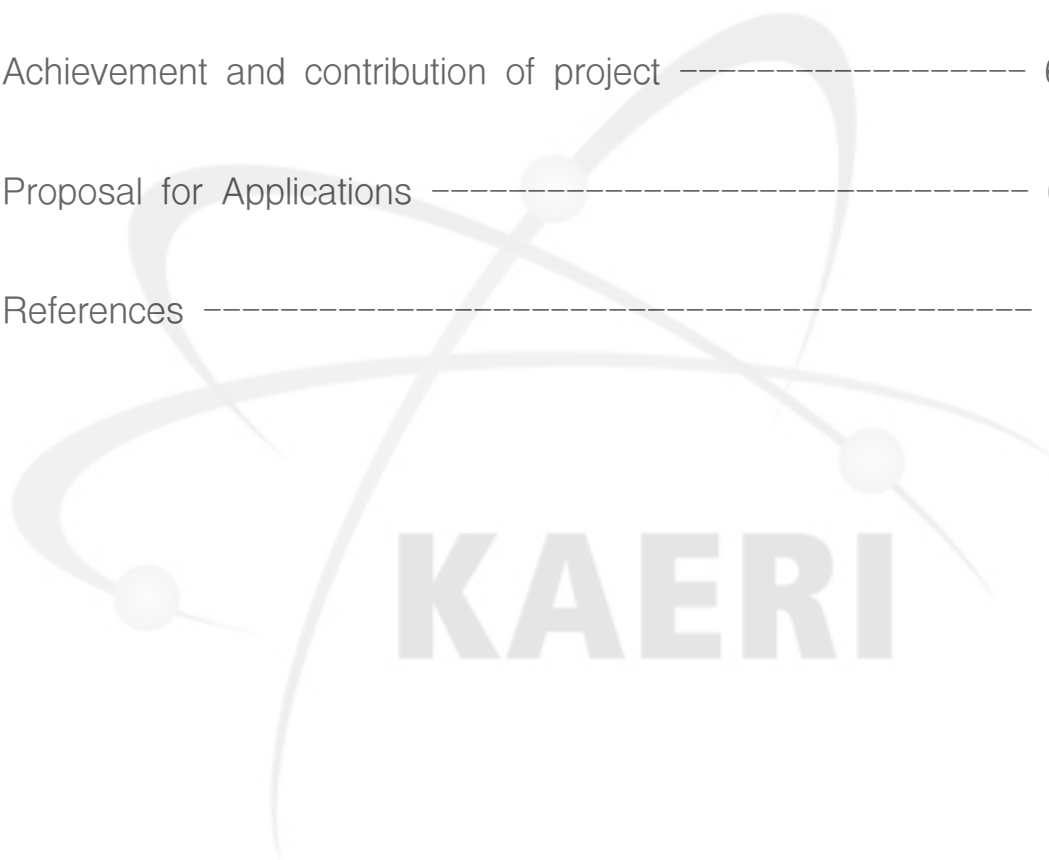
- We have shown that neutron irradiation increase the critical current density of  $MgB_2$  at high magnetic field.
- Using LTSLM and LTSHPM we directly image the current path in YBCO coated conductors of different patterns.

#### V. Proposal for Applications

- Because the introduction of fine defect by neutron irradiation improve pinning properties, the DC applications of  $MgB_2$  conductors can be found.
- We analyzed the spatial distribution of the local resistive transition and current density of YBCO coated conductors.
- The results indicate that the LTSLM is one of the most useful equipment for investigating about the spatial distribution of the superconducting properties such as the local critical temperature and local current density.

# CONTENTS

1 Introduction	8
2 State of the arts	12
3 Experimental results	14
4 Achievement and contribution of project	63
5 Proposal for Applications	65
6 References	66



# 목 차

1 서론	8
2 국내외 기술개발 현황	12
3 연구개발수행 내용 및 결과	14
4 연구개발목표 달성도 및 기여도	63
5 연구개발결과의 활용계획	65
6 참고문헌	66



KAERI



# 제 1 장 서론

## 1.1 연구개발의 과학기술, 사회경제적 중요성

### 1.1.1 기술적 측면

- 중성자 조사 방식으로 생성되는 인위적 피닝 센터가 임계온도, 비저항, 임계전류의 자기장 특성,  $H_{c2}$ , irreversibility line 등의 초전도 물성 향상에 미치는 효과 분석
- 최적화된 인위적 피닝 센터의 발생 기술 개발
- 중성자가 조사된 초전도 벌크 및 초전도 선재 시료의 전자기적 물성이 변화하는 효과를 분석하여 고성능 초전도 소재 개발

구리 산화물 초전도체가 발견된 이후 고온초전도의 상용화를 위하여 특히 전력분야의 대용량 응용을 구현하기 위한 많은 연구가 국내외에서 현재까지 활발하게 수행되고 있다. 그럼에도 불구하고 고온초전도가 가지는 전자기적 특성과 재료공학적 취약성 때문에 현재까지 본격적인 상용화는 실현되지 않고 있는 실정이다. 제1세대 고온초전도 선재는  $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CaCo}_2\text{O}_{8+x}$ 를 사용하여 은을 matrix 모재로 사용하는 PIT 방식으로 제조된다. 구리산화물 초전도체는 CuO면이 적층된 형태를 취하고 있어 매우 큰 이방성을 보인다. 특히 Bi계는 YBCO에 비해 월등히 큰 이방성을 가지고 있어, 초전도체 내부에 존재하는 자기선속(magnetic flux)은 2차원적인 pancake vortex에 의해 형성된다. 따라서  $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CaCo}_2\text{O}_{8+x}$  선재의 경우 생산 단가가 매우 높다. 그리고 77 K의 액체 질소 온도 영역에서 vortex의 운동이 활발하게 일어나기 때문에 임계전류가 급격히 감소하는 등 많은 문제점을 가지고 있다. 이러한 문제점을 해결 할 수 있는 대안으로 제2세대 고온초전도 선재라고 불리는 박막형태의 YBCO 선재(coated conductor) 개발이 활발하게 진행 중이다. 이와 아울러 저온냉동기 기술의 발전에 힘입어 비록 38 K 부근의 임계온도를 가지고 있지만 매우 등방적인 성질을 가지는  $\text{MgB}_2$ 를 이용한 초전도 선재의 개발이 추진되고 있다.

초전도체의 고유한 특성 중의 하나인 완벽한 전도성을 이용하여 경제성 있는 대용량 초전도체 응용기술을 개발하려고 하면 반드시 보텍스의 운동에 의한 에너지 손실을 최소화하면서 대용량 전류를 수송할 수 있는 방법을 찾아내어야 한다. 왜냐하면 초전도 임계온도 이하에서 초전도 내부에서 발생하는 에너지 손실은 보텍스(vortex)라고 불리는 자기플럭스(magnetic flux)의 운동에 의해 발생하기 때문이다.

따라서 구리 산화물 초전도체 또는  $MgB_2$ 를 기반으로 하는 초전도 응용분야를 개척하기 위해서도 반드시 초전도체의 전류특성을 향상시켜야하고, 이를 위해서는 보텍스의 운동을 제어할 수 있는 방법을 개발하여야 한다. 보텍스의 운동을 방해하는 역할을 하는 이상적인 피닝 센터의 크기는 초전도체의 결맞음 길이(coherence length) 정도라고 알려져 있다. 고온초전도체의 결맞음길이는 온도에 따라 변화하지만 액체질소 온도부근에서 수~수십 나노미터 정도에 불과하므로, 중성자를 조사하여 결함구조를 인위적으로 생성할 수 있다면 초전도 재료의 임계전류 특성을 향상시킬 수 있다. 그러나 과도한 중성자 조사는 오히려 임계온도 및 비저항 특성을 악화시키는 효과도 초래한다. 그러므로 적합한 조사량과 조사 방향 등 다양한 중성자 조사 방법을 최적화 할 때에만 초전도체의 전자기적 물성이 종합적으로 향상될 수 있다.

즉 YBCO와 REBCO 그리고  $MgB_2$  초전도 재료를 이용한 대용량 전력분야 응용의 경제성을 실질적으로 제고하기 위해 초전도체가 응용되는 다양한 환경, 즉 수송전류의 크기, 외부자기장의 크기와 방향, 온도 등의 다양한 외부조건에 적합한 피닝 센터를 생성할 수 있는 기술을 확보하여야 한다. 이를 위해서는 우선적으로 중성자 조사방식에 의해 생성되는 인위적 피닝 센터가 초전도재료 자체의 전자기적 특성에 미치는 효과를 체계적이고 정밀하게 측정하고 분석하여야 한다. 중성자 조사효과가 초전도체 자체의 물성에 미치는 영향을 분석한 정보와 기술을 벌크형 초전도 재료나 초전도 선재 제작에 접목시키게 되면 고성능 초전도 재료를 개발할 수 있을 것이다.

현재 국내에서는 중성자 조사 방식을 이용하여 인위적 피닝 센터를 생성하는 연구가 활발히 수행되고 있지 않은 실정이다. 또한 이온 조사를 통한 초전도 재료의 물성 향상을 위한 연구 결과도 미미한 실정이다. 따라서 중성자 조사 방식으로 인위적 피닝 센터가 초전도체의 전자기적 특성에 미치는 효과에 대한 연구·분석도 체계적으로 이루어지고 있지 않다.

중성자 조사를 통해 향상시키고자 하는 초전도 재료의 물성 중에서 가장 중요한 특성들은 임계온도(critical temperature), 비저항(resistivity), 임계전류(critical current)의 자기장 특성,  $H_{c2}$ , irreversibility line과 같은 전자기적 물성을 꼽을 수 있다. 그러므로 인위적 피닝 센터를 이용하여 초전도 물성을 향상시켜 초전도 응용의 경제성을 제고하는 연구를 국내에서 수행하고자하면 반드시 초전도체의 전자기적 특성 변화를 분석하고 연구하는 물성 평가 과제를 병행하여 수행하는 것이 필수적이라 하겠다.

### 1.1.2 경제·산업적 측면

- 중성자 조사 방식을 이용하여 초전도체의 전자기적 물성이 향상되면 초전도체의 전력분야 응용가치를 획기적으로 개선할 수 있게 된다.
- 4.2 K에서 38 K의 온도 영역에서 대용량 초전도 응용에 적합하다고 알려져 있는  $MgB_2$  초전도 선재의 전자기적 특성을 향상시킬 수 있다면, 핵융합 에너지의 상용화에도 크게 기여할 것으로 기대된다.
- 대용량 전력분야의 응용에 이용되는 각종 초전도 선재 및 초전도 재료를 공급할 수 있는 기반기술을 확보하게 된다.

YBCO, REBCO와  $MgB_2$ 의 벌크와 단결정 그리고 초전도 선재의 전자기적 물성을 향상시키게 되면, 국내에서 “21세기 프론티어연구개발사업중 차세대초전도응용기술개발”의 일환으로 추진 중인 고온초전도체의 전력분야 응용가치를 획기적으로 개선할 수 있다. 즉 YBCO와  $MgB_2$  선재의 전자기적 초전도 물성을 중성자 조사방식으로 향상시켜 경제적인 응용 가치를 향상시키게 된다면  $Bi_2Sr_2CaCo_2O_{8+x}$ 를 소재로 하는 제1세대 PIT 초전도 선재가 가지는 문제점들인 외부자기장 환경과 수송전류가 흐르는 상태에서 임계전류가 급격히 감소하고, 높은 제작단가와 같은 한계성을 극복할 수 있게 되어 초전도체의 대용량 응용을 실질적으로 구현할 수 있다. 나아가 대용량 초전도 응용에 적합한 기능성  $MgB_2$  선재를 개발하게 되면  $Nb_3Sn$  초전도 선재를 대체할 수 있기 때문에 ITER 및 ITER 데모 핵융합장치의 건설과 같은 핵융합 에너지의 상용화에도 크게 기여할 것으로 기대된다.

따라서 중성자 조사 방식을 이용하여 초전도 선재 및 벌크재료의 전자기적 특성을 향상시키는 기술을 국내에서 자체 확보하는 것은 원천기술 확보라는 측면에서 매우 중요한 의미를 가진다. 현재 국내에서 태동되고 있는 초전도 선재를 제작하고 공급하는 초전도 산업체가  $Nb_3Sn$  선재에서  $MgB_2$  선재와 YBCO 선재의 제작으로 그 활동 영역을 넓혀 나갈 수 있기 때문에 국내 산업체에 미치는 영향은 지대할 것 예상된다. 즉 대용량 전력분야의 응용에 이용되는 각종 초전도 선재 및 초전도 재료를 공급할 수 있는 기반기술을 확보하게 된다.

따라서 초전도체의 전자기적 특성 연구 분석 기술은 순수과학적 측면에서만이 아니라 과학기술의 산업화 측면에서도 매우 중요한 의미를 가진다. 이러한 맥락에서 본 연구가 가지는 경제적·산업적 가치는 매우 높다고 할 수 있다.

### 1.1.3 사회·문화적 측면

- 21세기의 산업경쟁력은 소재·소자 개발 기술이 좌우 한다고 하여도 과장된 것은 아닐 것이다.
- 초전도 선재 및 벌크재료 개발과 같은 최첨단 소재개발 분야의 기반기술을 국내에서 확보하게 된다면 과학기술분야의 선도국가로서 국가 경쟁력을 향상 시킬 수 있다.

21세기의 산업경쟁력은 소재·소자 개발 기술이 좌우 한다고 하여도 과장된 것은 아닐 것이다. 중성자 조사 방식으로 인위적 피닝 센터를 생성시켜 초전도 재료의 전자기적 특성을 향상 시키게 되면 초전도 선재 및 벌크재료의 경제성을 획기적으로 제고 할 수 있다. 이러한 초전도 물성을 향상시키는 최첨단 소재개발 분야의 기반기술을 국내에서 확보하게 된다면 과학기술분야 선도국가로서 국가 경쟁력을 향상 시킬 수 있다.

초전도체의 전자기적 물성을 분석·연구 할 수 있는 인프라를 구축하고 그 초전도 특성을 국제적 수준의 정밀도로 분석하는 기술을 국내에서 확보하는 것 역시 과학 입국을 위해 필수적인 요소라고 할 수 있다.

KAERI

## 제 2 장 국내외 기술개발 현황

### 2.1 지금까지의 연구개발 실적

- 국내에서는 초전도체에 중성자를 조사하는 방식으로 인위적 피닝 센터를 생성하여 초전도 물성을 향상시킨 연구가 활발하게 진행되지 않았고, 따라서 이들 시료의 전자기적 특성을 체계적으로 연구한 실적도 미미한 상태이다.
- 포항공대, 서울대, 부산대, 표준연, 기초연, 전기연, 핵융합연구센터 등 다수의 연구기관에서 고온초전도체 벌크 및 단결정과 고온초전도 선재 그리고 Nb<sub>3</sub>Sn 초전도 선재의 초전도 물성연구를 수행하고 있다. 그러나 초전도체 시료와 외부자기장 사이의 각도를 변화시키면서 자기적 성질을 연구하는 시도는 기초연에서 일부 수행되었다.
- 또한 저온 홀소자 현미경을 이용한 초전도 특성의 미시적 분석은 본 연구진과 KAIST의 연구진이 일부 수행하고 있다. 자성측정시스템을 이용하여 연구한 거시적 전자기적 특성과, 저온 홀 소자 현미경을 이용하여 측정하는 미시적 특성을 비교 분석하면서 연구를 수행 할 수 있는 연구기관은 국내에서는 본 연구진이 유일하다.

### 2.2 현기술상태의 취약성

- 초전도체의 거시적 전자기적 특성연구 능력 : 국내·외 타 연구기관 대비 100%  
초전도 물성 분석 분야에서는 본 연구진과 국내·외 연구기관의 기술 격차는 없다고 할 수 있다.
- 초전도체의 미시적 자기적 특성 분석 능력 : 국내 대비 100%, 국외 대비 90%  
저온 홀소자 현미경을 이용하여 초전도 물성연구를 본격적으로 수행하고 있는 국내 연구기관으로 KAIST와 본 연구진을 꼽을 수 있다. 본 연구진은 시료와 센서사이의 거리를 0.1 nm의 정확도로 조절하면서 최대 25 mm×25 mm의 면적을 수 nm의 정밀도로 이동하면서 자기모멘트의 공간적 분포를 측정할 수 있다. 국내에서는 본 연구진 비롯하여 KAIST 연구팀은 액체 질소 온도에서 작동하는 저온 홀소자 현미경을 이용하고 있다. 국외에서는 액체 헬륨온도에서 작동하는 저온 홀소자 현미경을 이용하여 MgB<sub>2</sub> 초전도 선재와 저온 초전도 선재의 물성 특성까지 연구할 수 있는 능력을 갖추고 있다.

## 2.3 국내에서 연구개발 현황 및 전망

- 본 연구과제에서 초전도 물성연구는 초전도 재료의 거시적인 전자기적 특성연구 뿐만 아니라 각도의존성 그리고 저온 홀 소자현미경을 이용하여 미시적 특성까지 동시에 연구·분석 하고자 한다. 이와 같이 특성화된 분야의 초전도 물성 연구를 수행하는 기관을 찾는 것은 매우 힘들다. 또한 중성자 조사 방식으로 피닝 센터를 생성한 시료의 특성을 분석하고 이 분석 결과를 토대로 최적화된 중성자 조사 방식을 찾는 연구에 피드백해야 하기 때문에 상호 긴밀한 협조가 이루어져야 한다. 따라서 국외에서 본 연구과제와 같은 연구·분석을 수행하는 것은 현실적으로 어렵다고 할 수 있다.
- 본 연구과제에서는 초전도 재료의 전자기적 물성을 분석하여 중성자 조사가 초전도 재료의 전자기적 물성에 미치는 영향을 분석하고, 이를 바탕으로 최적화된 중성자 조사방법을 개발하면서 근본 메카니즘을 규명하는 것을 최종 연구개발 목표로 설정하고 있다. 따라서 중성자 조사방법기술을 산업체에 이전하는 시기가 본 연구과제의 본격적인 산업체의 참여시기라고 할 것이다.
- 본 연구의 주관 연구기관은 중성자 조사 방식을 이용하여 인위적인 피닝 센터를 발생할 수 있는 유일한 기관이며, 현재까지 선행 연구를 충실히 수행하여왔다. 또한 중성자 조사에 의해 변화하는 초전도 재료의 전자기적 특성 연구를 수행하고자 하는 본 연구진도 초전도 물성연구분야 특히 초전도체의 전자기적 물성연구 분야의 많은 경험을 축적하고 있다.
- 대용량 전력분야의 응용에서 경제성 있는 실질적인 초전도체의 상용화를 이루기 위해서는 반드시 초전도 선재 및 재료의 전자기적 특성을 향상시켜야 하기 때문에 국내에서 뿐만 아니라, 국제적으로도 이 분야의 연구가 활발히 진행되고 있다.
- 본 연구가 성공적으로 수행된다면 고기능성 초전도 재료 및 선재를 확보할 수 있는 원천 기술을 개발하게 되기 때문에 국내의 관련 연구분야의 활성화뿐만 아니라 국내 초전도산업계의 부흥에 크게 이바지 할 것으로 기대된다.

## 제 3 장 연구개발수행 내용 및 결과

### 3.1 중성자 조사에 따른 초전도체 물성변화 메카니즘 규명

#### 3.1.1. 서론

본 연구 과제는 초전도 재료의 거시적인 전자기적 물성 및 미시적 자기적 특성을 중성자 조사를 전후로 분석함으로써 초전도 재료의 물성을 최적화할 수 있는 중성자 조사방법의 개발하고 근본 메카니즘을 분석하는 것을 최종 연구개발 목표로 설정하고 있다. 1차 년도에는 MgB<sub>2</sub> 벌크와 Carbon이 도핑 된 시료에 대한 임계온도, 비저항, 임계전류의 자기장 특성, H<sub>c2</sub>, irreversibility line 특성을 중성자 조사 전후에 비교 분석하였다. 또한 YBCO 박막의 미시적 임계온도 및 임계전류 의존성을 측정하였으며 YBCO 초전도 박막의 미시적 Seebeck 계수분포를 측정하였다. 이를 바탕으로 중성자 조사에 의한 초전도 물성 변화의 기초 DB 구축하였다.

#### 3.1.2 연구 결과

##### 3.1.2.1 MgB<sub>2</sub> 초전도체의 열적, 전기적, 자기적 특성 평가

최대 자기장 7 테슬라의 환경에서 시료의 자기적 특성을 정밀하게 측정할 수 있는 자성측정장치 (MPMS : Magnetic Property Measurement System)를 이용하여 MgB<sub>2</sub> 벌크형 초전도 시료의 자기모멘트의 자기장 및 온도 의존성을 5 K ~ 40 K의 온도구간과 0 테슬라 ~ 7 테슬라의 자기장 영역에서 측정하였다. 외부 자기장이 10 Oe 걸려있는 상태에서 ZFC와 FC 자기모멘트 곡선으로부터 각종 시료의 임계온도를 측정하였으며, Fig. 3.1.1에서 볼 수 있는 것처럼 본 연구에서는 총 12개의 MgB<sub>2</sub> 시료들을 측정하였으며 이들 시료들의 임계온도는 시료에 따라서 36.5 ~ 36.8 K 정도의 값을 가졌다.

10 Oe에서부터 7 테슬라의 외부 자기장이 걸려 있는 상태에서 측정한 ZFC 및 FC 자기 모멘트 곡선으로부터 초전도체 내부에 침투한 자기선속인 vortex가 가역적으로 운동할 수 있는 있는 영역을 구분하는  $H_{irr}(T)$ 를 분석하였다. Fig. 3.1.2에서 볼 수 있는 것처럼 MgB<sub>2</sub> 시료들의  $H_{irr}(T)$ 는 전형적인 power law

$$H_{irr} = H_0 \left( 1 - \frac{T}{T_c} \right)^\alpha$$

을 만족한다. 이때 임계온도  $T_c$ 로 Fig. 3.1.1에 표시된 실험을 통해 얻은 값인 36.8 K을 사용하였다. Power law를 이용한 fitting을 통해  $H_0=14.0$  테슬라와 지수  $\alpha=1.34$ 의 값을 얻었으며 이는 기존의 실험 결과와 잘 부합한다.

MgB<sub>2</sub> 초전도 시료의 자기 이력곡선을 5 K ~ 35 K의 온도 영역에서 측정하였다. Fig. 3.1.3에는 20 K에서 측정한 자기이력곡선이 나타나 있다. 우선 이 곡선에서 현저하게 관찰되는 바와 같이 자기모멘트의 크기 어떤 특정 자기장에서 불연속적으로 변화하고 있다. 이와 같은 자기모멘트가 불연속적으로 변화하는 현상은 flux jump에 의해 기인된다고 알려져 있으며 이미 NbTi과 같은 저온초전도체와 MgB<sub>2</sub> 초전도 시료에서도 관찰되었다. Flux jump 현상은 초전도체의 임계전류 특성을 급속히 나쁘게 하는 효과를 야기 시키므로 초전도체의 응용을 위해서는 반드시 해결해야 하는 문제이다. 본 연구에서는 flux jump 현상을 체계적으로 관찰하였으며, 본 연구에서 관찰한 시료들은 기존에 보고된 실험결과들 보다 높은 35 K까지 flux jump 현상이 발견되는 것을 확인하였다. 또한 자기이력곡선을 측정하는 과정에서 자기장의 변화율을 변화가 flux jump를 유발한다는 사실도 발견하였다.

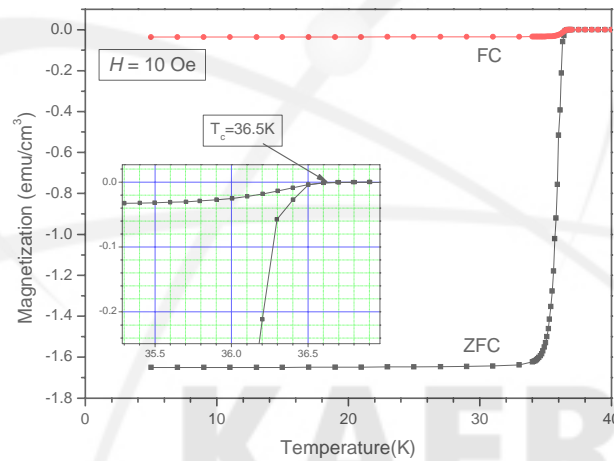


Fig. 3.1.1 외부자기장이 10 Oe 걸려져 있는 상태에서 측정한 MgB<sub>2</sub> 시료의 ZFC 및 FC 자기 모멘트 곡선



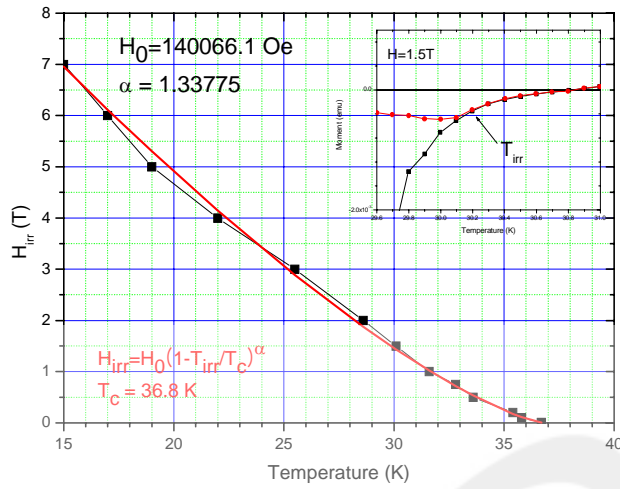


Fig. 3.1.2 MgB<sub>2</sub> 시료의  $H_{irr}$  곡선. 외부자기장이 걸려져 있는 상태에서 측정한 ZFC 및 FC 곡선에서 두 곡선이 일치하는 온도를  $T_{irr}$ 로 설정하여 이를 바탕으로  $H_{irr}(T)$  곡선을 얻었다.

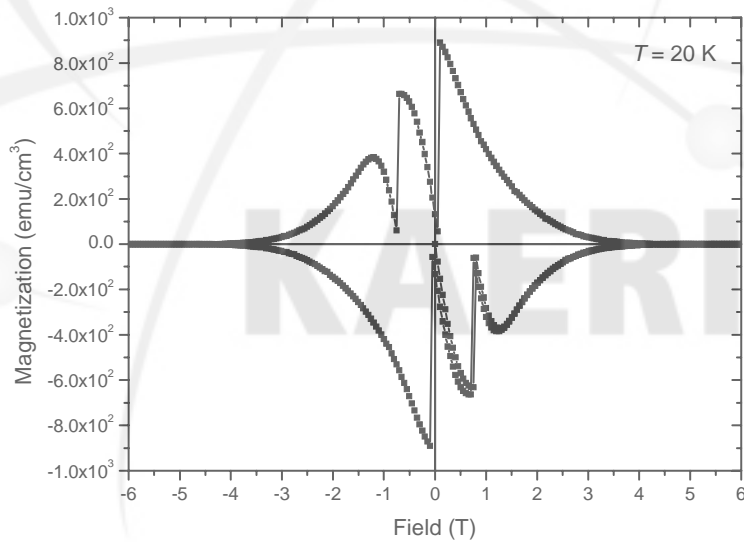


Fig. 3.1.3 20 K에서 측정한 MgB<sub>2</sub> 초전도 시료의 자기이력곡선

자기이력곡선으로부터 벌크형태로 제작된 초전도 시료의 임계전류밀도를 계산할 수 있다. Bean의 critical state model을 이용하면 임계전류밀도는

$$j_c = \frac{20\Delta m}{Va(1-a/3b)}, b > a$$

으로 주어진다. 이때  $V$ 는 각각 시료의 체적이며  $a, b$ 는 시료의 넓이와 길이이다.  $\Delta m$ 은 자기이력곡선을 측정할 때 외부자기장을 올리면서 얻은 자기모멘트의 값  $m_{+H}$ 와 외부자기장을 내리면서 측정한  $m_{-H}$ 의 차이이다. Fig. 3.1.4에는 5 K에서 측정한 자기이력곡선을 이용하여 계산한 임계전류의 자기장의존성이 나타나 있다. 5 K에는 2 테슬라의 외부자기장이 걸려져 있는 상태에서  $j_c = 1.3 \times 10^6 \text{ A/cm}^2$ 의 임계전류밀도를 보였다.

Bulk형  $\text{MgB}_2$  초전도체에서 현저하게 발견되는 flux jump 현상을 보다 심도 있게 분석하기 위해서는 magnetic diffusivity  $D_m^{flux\ flow}$ 와 thermal diffusivity  $D_{th}$ 를 정밀하게 측정할 필요가 있다. Flux jump 현상은  $D_m^{flux\ flow} > D_{th}$ 이 만족되는 단열조건에서 발생한다고 알려져 있다. 따라서 thermal diffusivity  $D_{th}$ 를 계산하기 위해서는  $\text{MgB}_2$ 의 열용량을 측정하여야 한다. Fig. 3.1.5에는  $\text{MgB}_2$ 의 열용량의 온도의존성이 나타나있으며 임계온도인 36.8 K에서 초전도 상전이에 의한 열용량의 점프가 보인다.

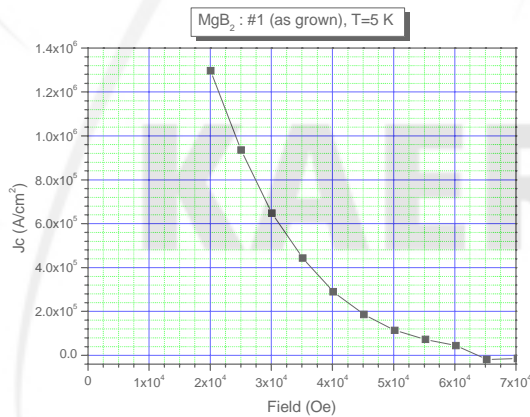


Fig. 3.1.4 5 K에서 측정한  $\text{MgB}_2$  시료의 임계전류밀도의 자기장의존성

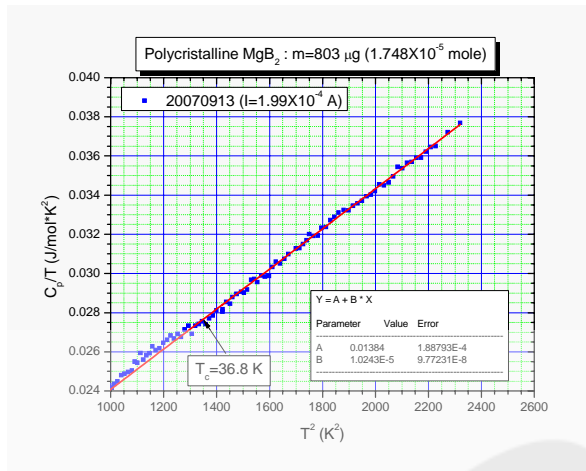


Fig. 3.1.5 MgB<sub>2</sub> 시료의 열용량의 온도의존성.

### 3.1.2.2 Carbon인 도핑된 MgB<sub>2</sub> 초전도체의 자기적 특성 평가

Carbon을 도핑하면 MgB<sub>2</sub>의 임계전류 특성이 변화한다고 알려져 있다. 본 연구에서는 총 5개의 carbon이 도핑된 MgB<sub>2</sub> 시료의 자기적 특성을 분석하였다. 이미 위에서 논의한 동일한 방법으로 carbon이 도핑된 MgB<sub>2</sub> 초전도체의 자기모멘트를 측정하여 초전도체의 자기적 특성을 평가하였다. 10 Oe의 외부자기장에서 측정된 ZFC 곡선으로부터 임계 온도를 측정하였으며 또한 5 K와 20 K에서 실시한 자기이력곡선 측정을 통해 임계전류 밀도를 계산하였다. 그 결과가 Fig. 3.1.6에 나타나 있다.

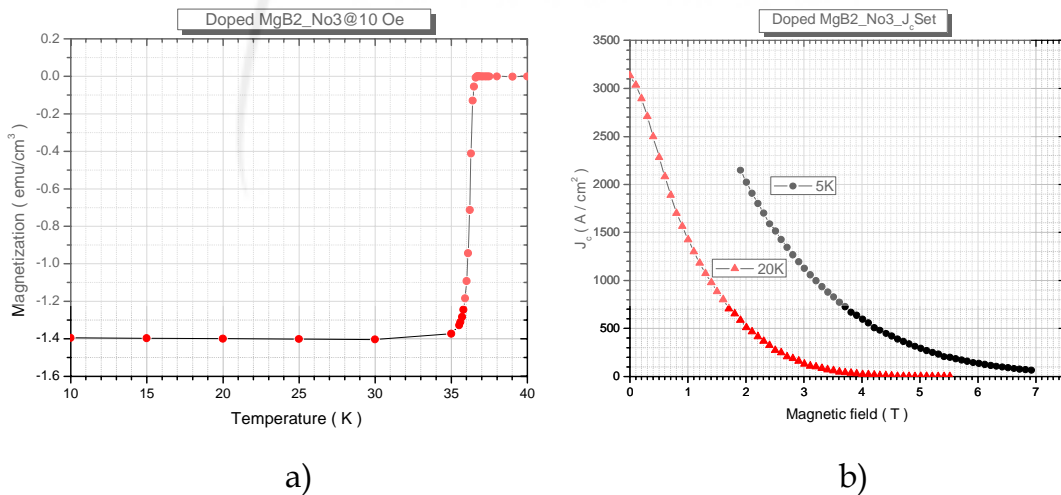


Fig. 3.1.6 Carbon이 도핑된 MgB<sub>2</sub> 시료의 ZFC 곡선 a)와 임계전류의 자기장의존성 b). a)에서 자기모멘트 값이 0이 되는 온도는 36.7 K이며, 이 온도가 이 시료의 임계 온도이다.

### 3.1.2.3 중성자가 조사된 MgB<sub>2</sub> 초전도체의 자기적 특성 평가

다양한 fluence의 중성자가 조사된 MgB<sub>2</sub> 초전도체의 자기모멘트를 측정하여 임계 온도 및 임계전류 분포를 측정하였다. 중성자 fluence가 3.77x10<sup>16</sup>인 시료 1의 임계온도는 36.5 K으로 중성자를 조사하기 전의 임계온도 36.8 K 보다 약 0.3 K 낮아졌다. 본 연구에서 측정한 시료에 조사된 fluence는 표 3.1.1에 나타나 있으며, 중성자가 조사된 시료 1의 임계전류 밀도 변화를 표 3.1.2에 나타내었다. 표 3.1.2에서 볼 수 있는 바와 같이 시료 1과 시료 2 그리고 시료 3에서 공통적으로 중성자 조사에 의해 임계전류밀도가 낮은 자기장에서는 오히려 감소하였으며 4 테슬라 이상의 높은 자기장에서는 다소 증가하는 경향을 보였다.

표 3.1.1 중성자가 조사된 시료의 중성자 fluence

구분	Fluence (n/cm <sup>2</sup> )
시료 1	3.77x10 <sup>16</sup>
시료 2	2.26x10 <sup>17</sup>
시료 3	7.91x10 <sup>17</sup>
시료 4	3.39x10 <sup>18</sup>

표 3.1.2 중성자가 조사된 시료 1의 임계전류 밀도 변화

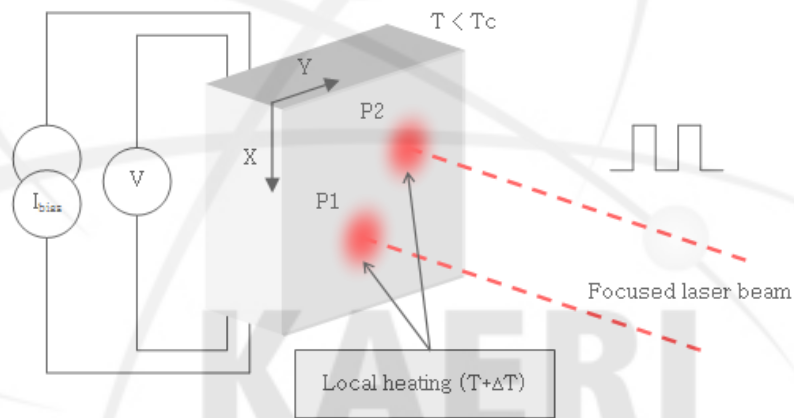
Magnetic field (T)	$J_c$ (A/cm <sup>2</sup> ) : As grown	$J_c$ (A/cm <sup>2</sup> ) : After irradiation
2	1.3x10 <sup>6</sup>	1.11x10 <sup>6</sup>
3	6.5x10 <sup>5</sup>	6.0x10 <sup>5</sup>
4	2.9x10 <sup>5</sup>	3.0x10 <sup>5</sup>
5	1.1x10 <sup>5</sup>	1.4x10 <sup>5</sup>

## 3.2 저온주사레이저현미경을 이용한 $\text{ReBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-8}$ 테이프의 특성 분석

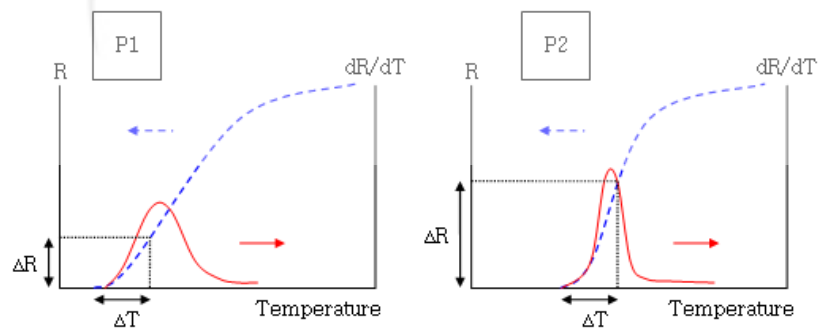
### 3.2.1 저온 주사 레이저 현미경의 원리

저온 주사 레이저 현미경(Low Temperature Scanning Laser Microscopy, LTSLM)의 기본 요소와 원리를 Fig. 3.2.1에서 볼 수 있다.[1-9] 초전도 박막 시료의 온도를 임계 온도보다 조금 낮은 상태로 고정시켜둔 상태에서 시료 표면에 집광된 레이저 빔을 주사하면 주사된 지점에 국소적인 가열(Local heating)이 일어나게 되고 온도 상승에 따른 저항 증가가 생기게 되어 시료에 전류를 흘려줄 경우 전압 신호가 나타나게 된다.

이 때 나타나는 전압 신호는 Fig 3.2.1 (b)와 같이 크게 두 가지 형태의 그래프로 생각할 수 있다. 온도 상승에 따른 저항의 변화 정도의 차이로 인해 P1 지점과 같



(a) Operating principle of the LTSLM



(b) Resistance versus temperature at two point on the sample surface

Fig. 3.2.1 Principle of Low Temperature Scanning Laser Microscopy

이 변이구간 폭(Transition width)이 넓어 미소 온도 상승에 대해 저항의 증가가 작은 경우에는 최대점의 높이가 낮고 넓은 분포를 가지는 그래프가 되지만 P2 지점과 같이 변이구간의 폭이 좁아 미소 온도 상승에 대해 저항의 증가가 큰 경우에는 최대점의 높이가 높고 좁은 분포를 가지는 그래프를 얻게 된다. 또한 같은 형태의 그래프를 가지더라도 최대점이 나타나는 온도의 차이도 생기게 된다.

국소적인 가열을 시료면에 대해서 2차원적으로 스캔을 하면 레이저 빔의 주사로 인한 반응 신호가 시료면의 빔의 위치좌표의 함수로 기록이 되고 이 데이터를 2차원 혹은 3차원으로 형상화할 수 있다. 전체적인 반응 신호의 변화는 레이저 빔이 주사되는 지점의 국소적인 특성과 관련이 있다.

신호 대 노이즈의 비를 향상시키기 위해서 레이저 빔을 Chopper를 이용해서 조정하여 Lock-In Amplifier로 신호를 측정하였다.

### 3.2.2 레이저 빔 주사에 의한 초전도 시료의 반응

#### 3.2.2.1 일반적인 반응 이론

레이저 빔에 의한 초기 효과는 적절한 섭동  $P(x,y,z,t)$ 로 나타낼 수 있다. 여기서  $(x,y)$ 는 시료면에 레이저 빔이 집광된 위치좌표이고  $z$ 는 시료면에 수직인 좌표이며  $t$ 는 시간이다. 집광이 잘 된 레이저 빔의 경우,  $P(x,y,z,t)$ 는 시료면에서  $(x_0(t), y_0(t), z_0(t))$  떨어진 최대 파워의 Deposition이 일어나는 지점에서 최대가 될 것이다. 단위 체적 적분을 가지는 빔 분해능 함수(Beam resolution function)  $\sigma(x,y,z)$ 를 다음과 같이 나타내면

$$\int dx dy dz \sigma(x, y, z) = 1 \quad (1)$$

섭동  $P$ 는 다음과 같이 표현될 수 있다.

$$P(x, y, z, t) = P_0(t) \sigma[(x - x_0(t)), (y - y_0(t)), (z - z_0(t))] \quad (2)$$

여기서  $P_0(t)$ 는 시간  $t$ 에서의 빔 섭동 적분이다. 섭동의 반경은 빔 분해능 함수  $\sigma$ 에 의해 결정되고 가능한 한 작아야 한다.

일반적으로, 시료의 반응은 특정한 반응 함수(Specific response function)  $F(x,y,z,t)$ 로 나타낼 수 있다. 만약 반응  $F$ 가 섭동  $P$ 에 비례한다면, 선형 반응 함수(Linear response function)  $G$ 를 사용해서 계산되어 질 수 있다.

$$F(x, y, z, t) = \int dx' dy' dz' \int dt' G(x, y, z, x', y', z', t-t') P(x', y', z', t') \quad (3)$$

여기서  $t' - t \leq 0$  일 경우 섭동이 야기되지 않으므로  $G = 0$ 가 된다. 만약 시간에 대해서  $P(x,y,z,t)$ 가 천천히 변한다면, 반응  $F$ 는  $P$ 를 준정적으로(Quasistatically) 따를 것이다. 이 경우 정적 선형 반응 함수(Static linear response function)  $G$ 가 사용될 수 있고 식 (3)에서 시간 적분은 생략될 수 있다.

### 3.2.2.2 저온에서의 반응

집광된 레이저 빔 주사에 의한 초전도 박막 시료의 반응은 저온과 고온 두 가지 환경으로 나누어 고려할 수 있다. 여기서 저온과 고온 환경의 구분 기준은 초전도 박막과 Substrate 물질 사이의 열적 경계 저항(Thermal boundary resistance)이 크거나 아니면 무시할 만큼 작은가 하는 것이다. 두 온도 환경은 10 K에서 50 K 범위에서 중첩이 되는데 초전도 박막과 Substrate 물질의 열적 특성에 의존한다.

저온(4.2 K)에서 열흐름을 방해하는 주된 요소는 서로 다른 물질들 사이에서의 Acoustic mismatch에 의해 야기되는 박막과 Substrate 사이에서의 열적 경계 저항(Thermal boundary resistance)이다.[10-11] 따라서 박막 자체에서의 열적 저항에 비해 박막과 Substrate 사이에서의 열적 경계 저항이 훨씬 크게 되고 레이저 빔 주사에 의한 열은 박막면을 따라서만 확산이 된다.

저온 환경에서의 초전도 박막에 레이저 빔 주사로 인한 섭동의 공간적 확산을 Fig. 3.2.2에 나타냈다. 박막에서의 열확산(Heat diffusion)은 막의 열전도도(Thermal conductivity,  $k_F$ )와 열용량(Heat capacity,  $C_F$ )에 의해 결정된다. 그리고 Substrate로의 열전달(Heat transfer)은 열전달계수(Heat transfer coefficient,  $\alpha$ )에 의해 결정된다.

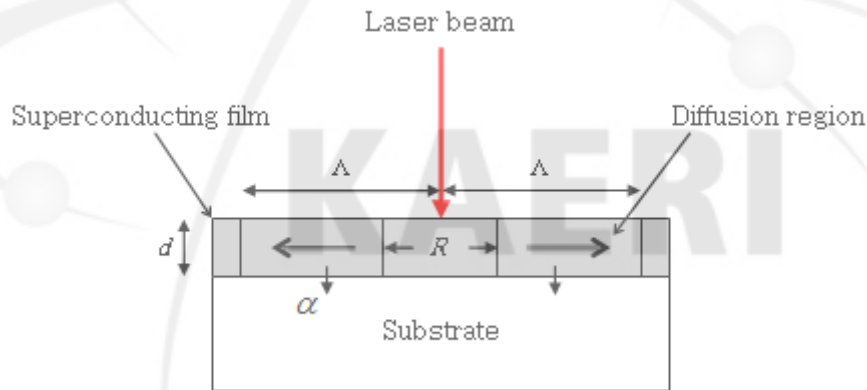


Fig. 3.2.2 Spreading of the laser beam induced perturbation at low temperature

레이저 빔 주사에 의한 초전도 박막의 반응은 열확산 방정식(Heat diffusion equation)을 풀어서 얻을 수 있다. 진동수  $\omega / 2\pi$ 로 동조되는 집광된 레이저 빔에 의한 열적 섭동은 다음과 같은 식으로 표현될 수 있다.

$$P(\rho, t) = \frac{P_0}{2} (1 + e^{i\omega t}) \frac{1}{\rho(t)} \delta(\rho(t)) \quad (4)$$

여기서  $\delta$ 는 디랙 델타 함수(Dirac delta function)이고 박막면에서 빔이 집광된 지점에서의 거리  $\rho(t)$ 는 다음과 같이 표현된다.

$$\rho(t) = \sqrt{(x - x_0(t))^2 + (y - y_0(t))^2} \quad (5)$$

위 (4) 식을 (3) 식에 대입하여 풀면 다음과 같은 초전도 박막 반응식이 주어진다.[12]

$$F(\rho, t) = \frac{W_0}{2} \left[ K_0\left(\frac{\rho}{\Lambda}\right) + \frac{1}{\sqrt{1+i\omega\tau}} K_0\left(\frac{\rho\sqrt{1+i\omega\tau}}{\Lambda_{ac}}\right) e^{i\omega t} \right] \quad (6)$$

여기서,  $K_0$ 는 변종 베셀 함수(the modified Bessel function)의 0차 항이다.

열적인 취급만 고려한다면 반응  $F(\rho, t)$  은 온도 상승  $\delta T(\rho, t)$  과 일치하고 다음과 같은 식들을 얻을 수 있다.

$$W_0 = \frac{P_0}{2\pi\kappa_F d} \quad (7)$$

$$\Lambda = \sqrt{\frac{\kappa_F d}{\alpha}} \quad (8)$$

$$\tau = \frac{C_F d}{\alpha} \quad (9)$$

여기서  $\Lambda$  는 열적 회복 길이(thermal healing length)이고,  $\tau$ 는 열적 반응 시간(thermal response time)이며  $\kappa_F$ ,  $C_F$ , 그리고  $d$  는 각각 초전도 박막의 열전도도, 열용량, 그리고 두께이다.

### 3.2.2.3 고온에서의 반응

고온(77 K)에서는 초전도 박막과 Substrate 사이의 열적 경계 저항이 박막 자체의 열적 저항에 비해 작아진다. 따라서 이후에는 단순화를 위해 박막과 Substrate 사이의 저항은 무시하겠다.

집광된 레이저 빔에 의한 초전도 박막의 반응은 박막의 두께가 두꺼운 경우( $d > R$ )와 얇은 경우( $d < R$ ) 두 가지로 생각할 수 있다. 여기서 빔 파워가 직경  $R$  의 반구에 균등하게 전해진다고 가정하였다. (Fig. 3.2.3)

초전도 박막의 반응은 열 확산 방정식(Heat diffusion equation)을 풀어서 얻을 수 있다.

$$\left( \nabla^2 - \frac{C_{F,S}}{\kappa_{F,S}} \frac{\partial}{\partial t} \right) F(x, y, z, t) = \frac{A(x, y, z, t)}{\kappa_{F,S}} \quad (10)$$

여기서,  $\kappa_{F,S}$ 와  $C_{F,S}$  는 각각 박막과 Substrate의 열전도도와 열용량이며  $A(x, y, z, t)$ 는 단위시간 단위체적당 레이저 빔에 의해 공급되는 에너지이다.



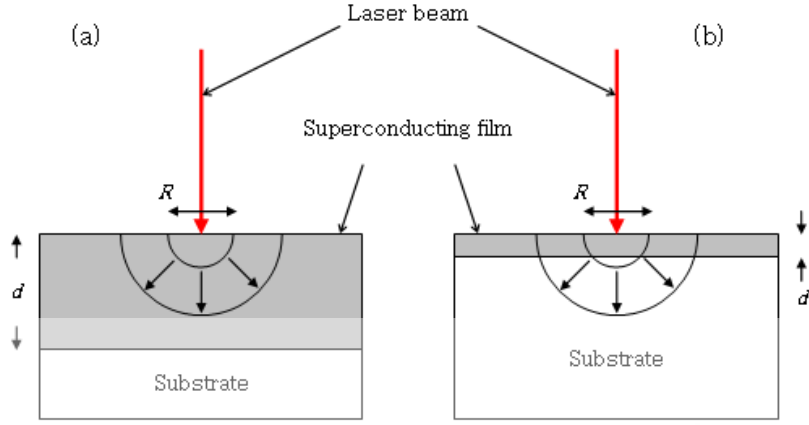


Fig. 3.2.3 Laser beam irradiation of thick (a) and a thin (b) superconducting film

레이저 빔에 의한 열적 섭동은 저온에서와 유사하게 다음과 같은 식으로 표현될 수 있다.

$$P(r,t) = \frac{P_0}{2} (1 + e^{i\omega t}) \frac{1}{r(t)} \delta(r(t)) \quad (11)$$

$$\text{with } r(t) = \sqrt{(x - x_0(t))^2 + (y - y_0(t))^2 + (z - z_0(t))^2} \quad (12)$$

여기서  $r(t)$ 는 박막면에서 빔이 집광된 지점으로부터의 거리이다. 등방(Isotropic)의 열전도도를 가정한다면 온도분포는 다음과 같이 얻어진다.

$$F(r,t) = \frac{P_0}{2\pi\kappa_{F,S}r} \{1 + \exp[-kr + i(\omega t - kr)]\} \quad (13)$$

$$k = \frac{1}{l_\omega} = \sqrt{\frac{\omega}{2D_{F,S}}} \quad (14)$$

$$\text{with } D_{F,S} = \frac{\kappa_{F,S}}{C_{F,S}} \quad (15)$$

여기서  $D_{F,S}$ 는 박막 혹은 Substrate의 열 확산율(Thermal diffusivity)이다. 빔의 에너지가 직경  $R$ 의 반구에 균등하게 전해진다고 가정하면 열확산 방정식의 해는 다음과 같이 얻어진다.

$$F(r,t) = F_0 \left(1 - \frac{4r^2}{3R^2}\right) [1 + e^{i\omega t}] \quad \text{for } |r| \leq R/2 \quad (16)$$

$$F(r,t) = \frac{F_0 R}{3r} [1 + e^{i\omega t}] \quad \text{for } |r| \geq R/2 \quad (17)$$

$$\text{with } F_0 = \frac{3P_0}{2\pi\kappa_{F,S}R} \quad (18)$$

### 3.2.3 신호 측정

레이저 빔이 주사됨으로 인해서 생기는 전류를 흘려준 시료의 전압 신호는 집광된 빔의 위치의 함수로 측정된다. 측정된 시료의 전압 변화( $\delta V$ )는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\delta V(x, y) = \delta R_s(x, y) I_B \quad (19)$$

여기서  $(x, y)$ 는 시료면에 집광된 빔의 좌표이고  $I_B$ 는 시료에 흘린 전류이며  $\delta R_s$ 는 빔 주사로 생긴 시료의 저항 변화이다.

공간적으로 균일한 시료의 신호 크기는 다음과 같이 대략적으로 추정할 수 있다.

$$\frac{\delta V(x, y)}{V_B} \sim \frac{\delta I(x, y)}{I_B} \sim \frac{\delta R_s(x, y)}{R_s} \propto \frac{C_{per}}{W L d} \quad (20)$$

여기서 시료 박막의 폭, 길이, 그리고 두께를 각각  $W$ ,  $L$ ,  $d$ 로 나타냈으며  $C_{per}$ 는 레이저 빔에 의해 교란되는 시료의 체적이고,  $V_B$ 는 시료에 가해진 전압,  $R_s$ 는 시료 전체의 저항이다.

예상되는 신호 크기에 대한 추정은 시료의 크기가 교란되는 시료의 체적보다 많이 크지는 않아야 한다는 것을 사실을 보여준다. 실제로, 전형적으로  $C_{per} / W L d \geq 10^{-5}$ 이 충족되어야 한다.  $C_{per}$ 가 약 1에서  $10 \mu\text{m}^3$  정도이므로 시료의 체적은  $10^{-3} \text{mm}^3$ 보다 작아야 한다. 이러한 이유로, LTSLM을 이용한 분석방법은 필라멘트 구조의 얇은 박막 시료와 같은 작은 체적의 시료에 제한되고, 벌크 시료의 연구는 어렵다.

#### 3.2.3.1 국소적 저항 변화의 측정

시료의 폭과 두께가 매우 작다면 1차원의 경우로 취급될 수 있다. 이 경우 레이저 빔의 주사에 의한 시료 저항의 변화는 다음과 같이 주어진다.

$$\delta R_s(x, t) = \int dt' \frac{1}{W d} \int dx [\rho(x, t-t', T_b + \delta T(x, t'), J_B) - \rho(x, t-t', T_b, J_B)] \quad (21)$$

여기서  $T_b$ 는 레이저 빔이 가해지지 않았을 때의 온도이고  $J_B (= I_B / W d)$ 는 시료에 가해진 전류 밀도이다. 작은 섭동의 경우 식 (21)는 다음과 같이 단순화 될 수 있다.

$$\delta R_s(x, t) = \frac{1}{W d} \int dx \left. \frac{\partial \rho(x, J_B)}{\partial T} \right|_{T=T_b} \delta T(x, t) \quad (22)$$

교란된 시료 영역내의 저항의 온도에 대한 미분이 상수라고 가정하고 온도 Profile에 대한 적분을  $\delta T_0(t) \Lambda$ 라고 근사를 취하면 레이저 빔이 주사된 전류가 흐르는 시료의 전압 신호는 다음과 같이 얻을 수 있다.[13]

$$\delta V(x,t) \cong J_B \left. \frac{\partial \rho(x, J_B)}{\partial T} \right|_{T=T_b} \Lambda \delta T_0(x,t) \quad (23)$$

여기서  $\delta T_0(x,t)$ 는 레이저 빔이 주사되었을 때 최대 온도 상승이다. 보통,  $\delta T_0$ 는 모든 빔의 위치에 대해서 상수이므로  $\delta T_0$ 는  $x$ 에 무관하다.

식 (23)에서 알 수 있듯이  $\delta V(x)$ 는 작은 섭동에 대해서  $\partial \rho(x, J_B)/\partial T$ 에 비례하므로  $\delta V(x)$ 의 온도 의존성을 측정함으로써  $\partial \rho(x, J_B)/\partial T$ 를 얻을 수 있다.

### 3.2.3.2 국소적 임계 전류 밀도의 측정

식 (21)로부터 무시할 수 없는 신호 ( $\delta R_s \geq 0$ )가 감지되는 일반적인 상황은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$J_B \geq J_c(x_i) - \delta J_c(x_i) \quad (24)$$

레이저 빔 주사인 작은 섭동에 의한 시료 저항의 변화는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\delta R_s(x,t) = \frac{1}{Wd} \int dx \left. \frac{\partial \rho(x)}{\partial J_c(x)} \right|_{J=J_B} \left. \frac{\partial J_c(x)}{\partial T} \right|_{T=T_b} \delta T(x,t) \quad (25)$$

여기서, 작은 섭동은 레이저 빔에 의한 임계 전류의 변화인  $\delta J_c(x)$ 가  $J_c(x)$ 에 비해서 작다는 의미이다.

대부분의 경우에 교란된 시료 영역 내에서  $\partial \rho/\partial J_c$ 와  $\partial J_c/\partial T$ 는 상수로 가정한다. 그래서 온도 Profile에 대한 적분을  $\delta T_0(t)\Lambda$ 라고 근사를 취하면 다음 식을 얻을 수 있다.

$$\delta V(x,t) = J_B \left. \frac{\partial \rho(x)}{\partial J_c(x)} \right|_{J=J_B} \left. \frac{\partial J_c(x)}{\partial T} \right|_{T=T_b} \Lambda \delta T_0(t) \quad (26)$$

### 3.2.4 실험 장비

본 연구의 목적은 고온 초전도체인 YBCO 박막 시료 및 SmBCO 박막 선재(Coated conductor)를 필라멘트 구조를 가지는 형태로 만든 후 국소적 공간의 임계 온도 및 임계 전류 분포를 형상화하는 것이다. 이를 위해 YBCO 박막 및 SmBCO 박막 선재 시료가 외부 자기장 및 전류가 인가된 상황에서도 초전도 특성을 안정적으로 유지하고 실제 초전도 응용 기기가 사용될 것으로 예상되는 77 K 부근의 극저온 환경 하에서 실험이 진행되어야 한다. 뿐만 아니라, 시료 외부에서 전류 및 레이저 빔을 시료에 가해줄 수 있는 환경도 조성해야 하므로 이 조건들을 충족할 수 있는 시

스텝 개발이 필요하다.[14]

위 조건을 충족하기 위해 제작한 LTSLM은 시료와 시료를 고정하는 홀더, 온도 센서 그리고 히터가 고정되는 저온을 유지하는 액체 질소 용기와 이들을 진공의 상태에 있도록 하는 외부 진공 용기로 구성된다. 실험 환경의 안정성을 유지하기 위해 실험 중 이 부분의 진공도는  $\sim 10^{-6}$ Torr를 유지하였다. LTSLM은 저온 진공 용기(Cryostat), YBCO 박막 및 SmBCO 박막 선재 시료 표면에 국소적 가열(Local heating)을 하기 위한 레이저와 집광렌즈(Objective lens) 및 필터, 집광된 레이저 빔을 시료표면과 2차원적으로 나란한 방향으로 정밀하게 이동시킬 3축의 이송 장치 그리고 데이터 수집 장치들로 구성되어 있다. 각 장치에 대한 설명은 다음 절에서 자세히 하겠다.

LTSLM의 공간 분해능을 높이고 효율적인 실험을 위해서는 하드웨어의 정밀도 및 안정성이 확보되어야 하며, 이를 제어하는 소프트웨어 또한 효율적으로 작동해야 한다. LTSLM을 PC로 제어하기 위해 상용 제어 계측 소프트웨어를 이용하여 실험용 프로그램을 제작하였다.

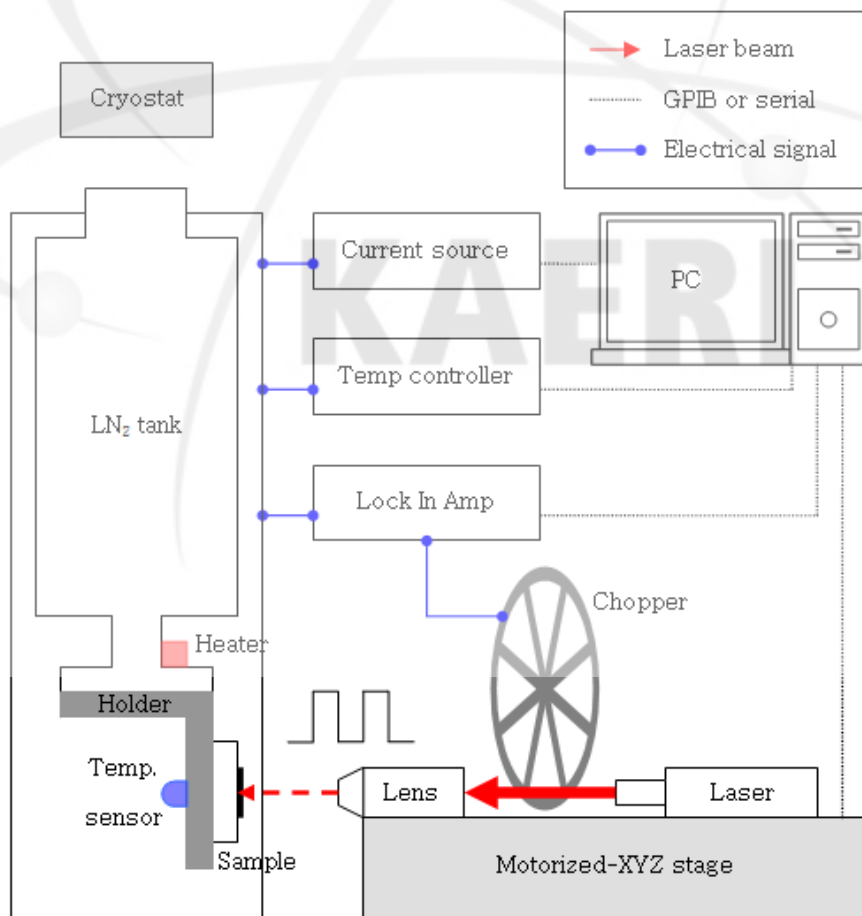


Fig. 3.2.4 Schematic diagram of the LTSLM

### 3.2.5 실험방법

본 연구를 진행해나가기 위해서 우선적으로 두 가지 과정이 선행되어야 한다. 먼저 상용의 YBCO 박막 웨이퍼와 SmBCO 박막 선재를 연구목적에 맞는 형태로 변형해서 원하는 형태의 시료로 제작해야 한다. 또 한 가지는 초전도 박막 시료의 임계온도와 임계 전류 밀도의 공간적 분포를 관찰하기 위한 현미경 역할을 하는 레이저 빔의 직경을 측정해야 한다.

외부 자기장에 의한 자기이력손실을 줄이기 위해서는 초전도 박막의 넓이를 줄여야 한다. 물론 이렇게 제작할 경우 초전도 박막의 부피도 줄어들기 때문에 임계 전류 또한 감소하게 된다. 이러한 이유로 자기이력손실을 최소화하고 임계 전류를 최대화할 수 있는 최선의 초전도 선재 구조에 대한 연구가 진행이 되고 있다. 여러 대안 중 한 가지가 박막 선재를 평행하게 배열된 필라멘트 구조로 제작하는 것이므로 실험에 사용할 시료를 내부에 필라멘트 형태의 브릿지(Bridge)를 가지는 구조로 변형하였다. 이 과정에서 YBCO 박막 시료는 Chemical etching 공정을 통해서 그리고 SmBCO 박막 선재 시료는 Physical etching 공정을 통해서 제작했다. 공정에 대한 자세한 내용은 다음 절에서 설명하겠다.

초전도 박막 시료의 공간적 특성 분포를 관찰하기 위한 저온 주사 레이저현미경(LTSLM)에서 장치의 공간적 분해능(Spatial resolution)을 결정짓는 주된 요인은 시료에 직접적으로 조사되는 집광된 레이저 빔의 직경이다. 집광된 빔의 직경이 작을수록 분해능은 높아지고 좀 더 정밀한 측정이 가능하다. 이런 이유로 본 연구에 사용된 장치로 만들어낼 수 있는 최소의 스팟 직경을 측정하는 것은 매우 중요한 과정이라고 할 수 있다.

#### 3.2.5.1 시료 제작

##### 3.2.5.1.1. YBCO 박막 시료

박막 형태의 고온 초전도체의 불균질성을 연구하기 위해 상용화된 4인치  $Al_2O_3$ 기판 위에 300 nm 두께로 Coevaporation 방식으로 증착된 YBCO 박막을 기판과 함께 절단하여 제작하였다. 대면적 YBCO 박막을 길이 20 mm, 폭 10 mm로 절단한 뒤 연구목적에 맞게 중간에 가는 필라멘트 구조를 가지는 형태로 만들기 위해서 원하는 시료형태의 마스크를 CAD를 이용해서 제작하였다.(Fig. 3.2.5)

실험목적에 맞는 형태의 YBCO 박막 시료는 Fig. 3.2.6에서 보는 것과 같이 Chemical etching 공정을 통해서 제작하였다. 빛에 민감한 물질인 PR(photo resist)를 YBCO 박막 위에 고르게 도포시키고 오븐에서 PR을 건조시킨 후 마스크를 YBCO 박막 위에 밀착시키고 자외선에 노출시켰다. 자외선에 노출된 부분의 PR은 Development 공정을 통해서 제거가 되고 YBCO etchant ( $HCl : H_2O : FeCl_3 = 10:1:10$ )

을 이용해서 PR이 제거된 부분의 YBCO 박막을 식각하였다. 이렇게 식각한 시료를 아세톤, 에탄올, 증류수 순으로 세척해서 잔여 PR을 제거한 후 완성된 시료를 얻을 수 있었다. 이렇게 제작된 시료를 진공 챔버(chamber)에서 신호를 측정하기 위한 단자에 금(Au)박막을 입힌 후 실험에 사용하였다.

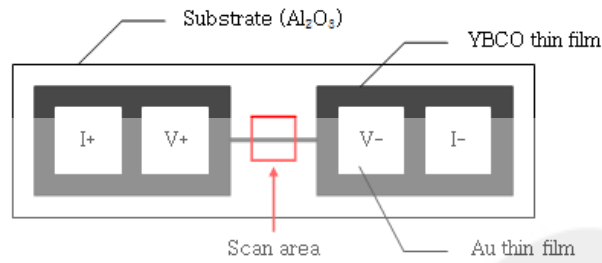


Fig. 3.2.5 YBCO thin film sample

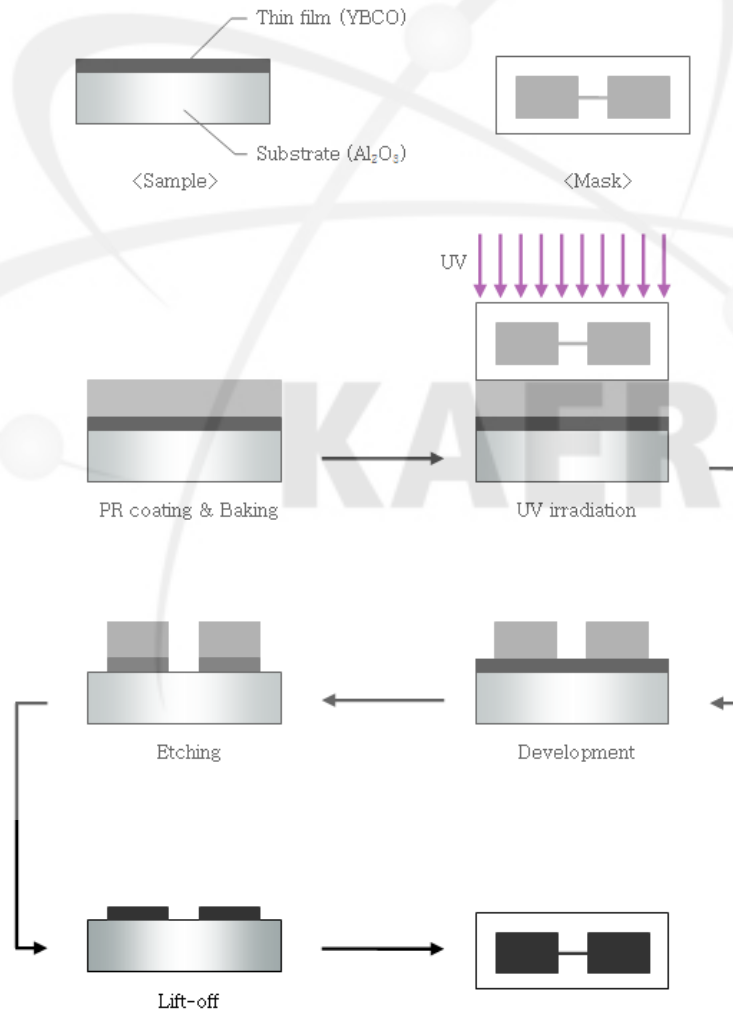


Fig. 3.2.6 Chemical etching process for making the YBCO thin film sample

### 3.2.5.2. SmBCO 박막 선재 시료

YBCO와 유사한 초전도 특성을 보이는 SmBCO가 박막 형태로 입혀진 초전도 선재 시료의 제작은 YBCO 박막 시료제작 방법과는 달리 자외선 파장 영역대의 레이저를 직접 시료면에 주사를 해서 식각해내는 Physical etching 공정을 통해서 제작하였다.

식각을 하기 위한 레이저는 Quantel 社의 Brilliant b 모델로서 레이저의 강도와 발진횟수를 PC를 이용해서 제어할 수 있었다. 355 nm의 자외선 파장영역대의 레이저광을 역시 같은 파장을 반사 및 집광할 수 있는 렌즈들을 이용해서 시료면에 집중시켜 식각을 하였다. 레이저의 강도와 주사횟수 및 주사간격을 바꿔가면서 반복실험을 한 후 현미경을 통해서 최적의 조건을 결정한 후 최종적으로 시료를 제작할 수 있었다. 이 과정에서 레이저의 강도는 레이저 자체에서 제어하였고 주사횟수와 주사간격은 Labview로 프로그램을 제작한 후 PC로 제어하였다.

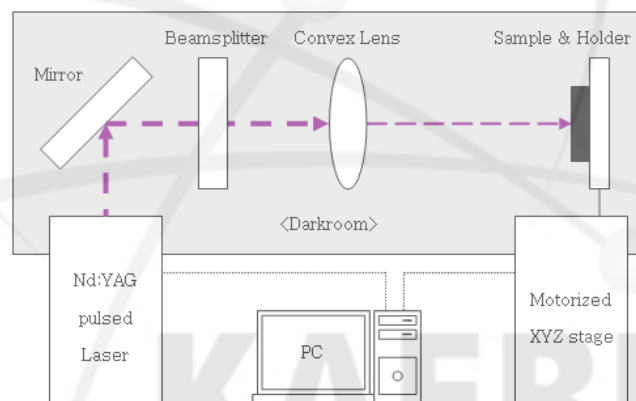


Fig. 3.2.7 Schematic diagram of physical etching process for patterning the SmBCO coated conductor sample

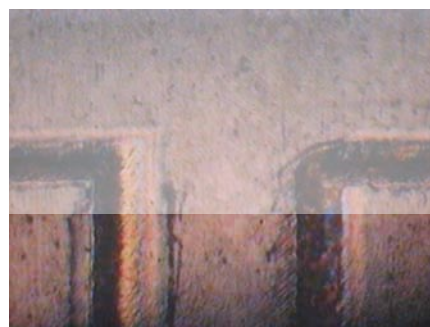


Fig. 3.2.8 Partial image of the patterned SmBCO coated conductor sample

이 방법은 초전도 선재 제작시 응용이 가능하다. 초전도 박막에 외부 자기장이 가해질 때 단위부피당 자기이력 손실은 초전도 박막의 넓이에 비례한다고 알려져 있

고 이를 토대로 자기이력 손실을 최소화할 수 있는 초전도 선재의 구조에 대한 연구가 진행 중이므로 이러한 연구들의 결과로 만들어지는 초전도 선재의 형태를 SmBCO 박막 선재 시료를 제작한 방법으로 만들 수 있을 것이다. Fig. 3.2.7은 Physical etching을 위한 장치들을 구성한 모습이고 Fig. 3.2.8은 이 공정을 통해서 제작된 SmBCO 박막 선재 시료의 일부를 확대한 모습이다.

### 3.2.6 실험 결과 및 분석

#### 3.2.6.1 시료의 특성 측정

##### 3.2.6.1.1 임계 온도

시료 전체의 평균적인 임계 온도를 측정해서 시료의 기본적인 초전도 특성을 파악하고 레이저 빔 주사에 의한 전압 신호 변화의 온도 의존성을 측정할 온도 시점을 결정하였다. 저온 진공 용기 내부를 진공으로 유지한 상태에서 시료에 전류를 흘려주고 액체질소를 주입하여 온도 저하에 따른 시료의 저항 저하를 Nanovoltmeter를 이용해서 전압으로 측정하였다.

Fig. 3.2.9는 YBCO 박막 시료의 온도저하에 따른 전압신호 결과 그래프이며 시료의 임계 온도가 88.8 K임을 확인할 수 있다. 이 때 시료에 가해진 전류는 1 mA 였으며 온도는 분당 4 K의 속도로 저하시켰다.

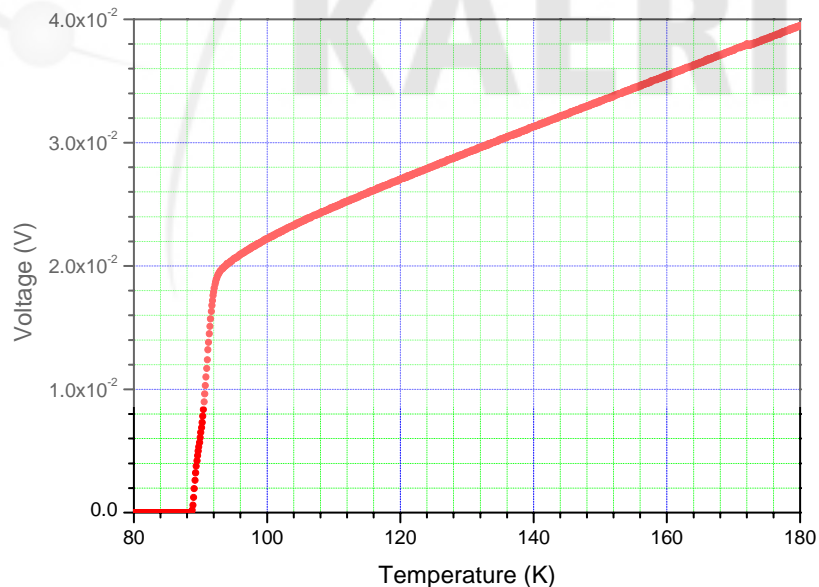


Fig. 3.2.9 Cooldown graph of YBCO thin film



### 3.2.6.1.2. 임계 전류

시료 전체의 평균적인 임계 전류를 측정해서 레이저 빔 주사에 의한 임계 전류 분포 관찰을 위한 온도 범위를 결정하였다. 시료의 온도를 임계 온도 이하로 고정시킨 후 시료에 가해지는 전류를 올려가면서 초전도 상태가 깨지는 시점의 전류를 측정하는 방법으로 온도에 따른 임계 전류분포에 대한 그래프를 아래 Fig. 3.2.10과 같이 얻을 수 있었다. YBCO 박막 시료 중 필라멘트 구조에 해당하는 부분의 길이는  $570\ \mu\text{m}$ , 폭은  $130\ \mu\text{m}$ , 그리고 두께는  $300\ \text{nm}$  이다.

시료의 온도가 내려갈수록 임계 전류가 커지는 것을 확인할 수 있다. 실험에 사용한 전류 공급장치(current source)가 최대  $100\ \text{mA}$ 까지 가능해서 임계 전류 분포를 관찰하기 위한 온도는  $86.0\ \text{K}$ 로 결정했다.  $1\ \text{cm}$  당  $1\ \mu\text{V}$ 의 전압 상승이 있을 때의 전류를 임계 전류의 기준으로 정하였다.

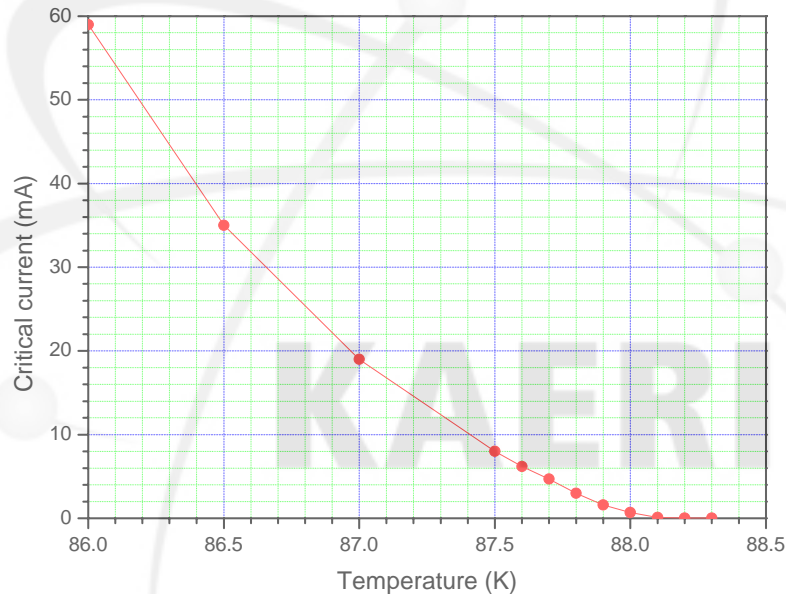


Fig. 3.2.10 Critical current( $I_c$ ) of YBCO thin film at variable temperature

### 3.2.6.1.3. 자기 모멘트 온도 의존성

자성 측정 장치(MPMS-XL7)를 사용하여 SmBCO 박막 선재 시료의 ZFC(Zero-Field-Cooled)와 FC(Field-Cooled) 자기 모멘트의 온도의존성을 측정하였다. Fig. 3.2.11에서 볼 수 있듯이 초전도 박막 선재 시료의 임계 온도가  $91.0\ \text{K}$ 임을 볼 수 있다. 이 결과는 본 실험에 사용하고 있는 SmBCO가 성능이 좋은 초전도 박막임을 확인할 수 있다.

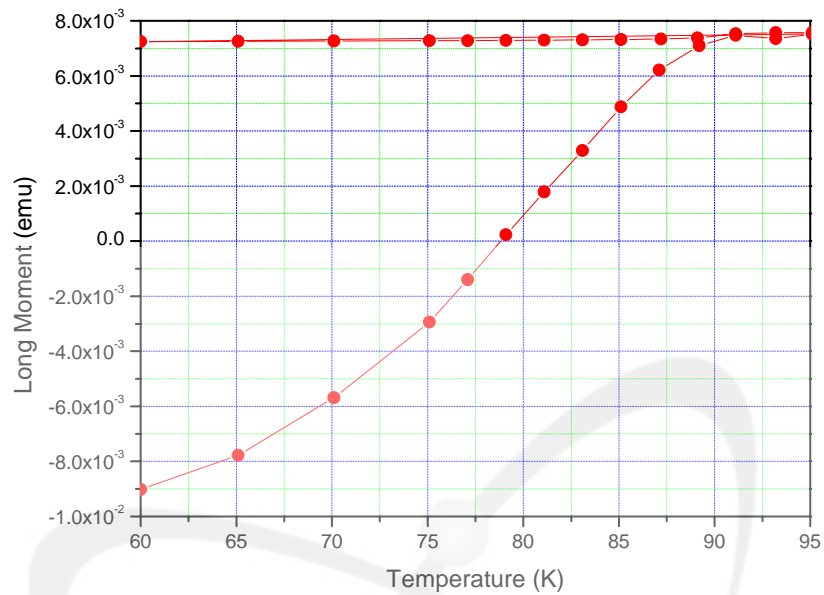


Fig. 3.2.11 ZFC & FC result graph of SmBCO coated conductor sample

### 3.2.6.2 시료의 1차원 구조 분석

초전도 박막 시료의 전압 신호의 온도 의존성을 연구하기 위해 시료와 레이저 빔의 상대적인 위치 확인과 전압 신호의 크기 및 노이즈 수준을 파악하기 위해 1차원적으로 시료의 임의의 지점을 선형으로 스캔하였다.

레이저 빔의 최소 스팟의 위치를 시료면에 맞춘 다음 임계 온도 근처로 시료의 온도를 조정하고 레이저 빔을 위아래 혹은 좌우방향으로 이동시키면서 시료면에 주사하였다.

Fig. 3.2.12는 시료의 임의의 지점을 위에서 아래 방향으로 선형으로 스캔한 결과를 나타낸 것이다. 수평축은 스캔 시작점에서의 위치이고 수직축은 각 위치에서의 전압 신호의 크기를 나타낸다. 전압 신호가 나타나는 z축 방향 290  $\mu\text{m}$  지점부터 420  $\mu\text{m}$  지점까지가 YBCO 박막이 있는 지점임을 알 수 있고 또한 시료의 폭이 130  $\mu\text{m}$ 임을 확인할 수 있다.

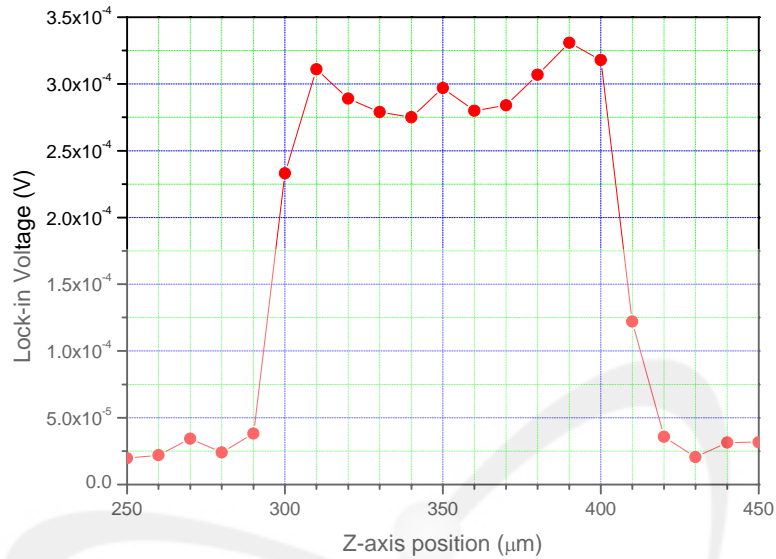


Fig. 3.2.12 Single line scan result graph of YBCO thin film sample

### 3.2.6.3 온도변화에 따른 전압신호 변화의 위치에 따른 불균질성 분석

시료면의 위치에 따른 임계 온도와 임계 전류 밀도의 불균질성을 임의의 두 지점의 온도변화에 따른 전압신호 변화의 차이를 통해 관찰할 수 있다. 집광된 레이저 빔을 시료면의 임의의 지점에 고정시킨 상태에서 임계 온도 이하에서 온도를 올리면서 온도변화에 따른 전압 신호의 변화를 관찰하였다. Fig. 3.2.133333333333 임의의 두 지점의 전압 신호가 나타나는 온도 지점과 전압 신호 최대값의 크기, 최대값이 나타나는 온도 등이 확연히 차이가 난다. 또한 임계 온도 근처에서 최대의 전압 신호가 나타나고 임계 온도에서 멀어질수록 신호가 약해지는 것을 볼 수 있다. 이것은 다음절에서 보게 될 2차원 분석 그래프 결과에서도 확인할 수 있다.

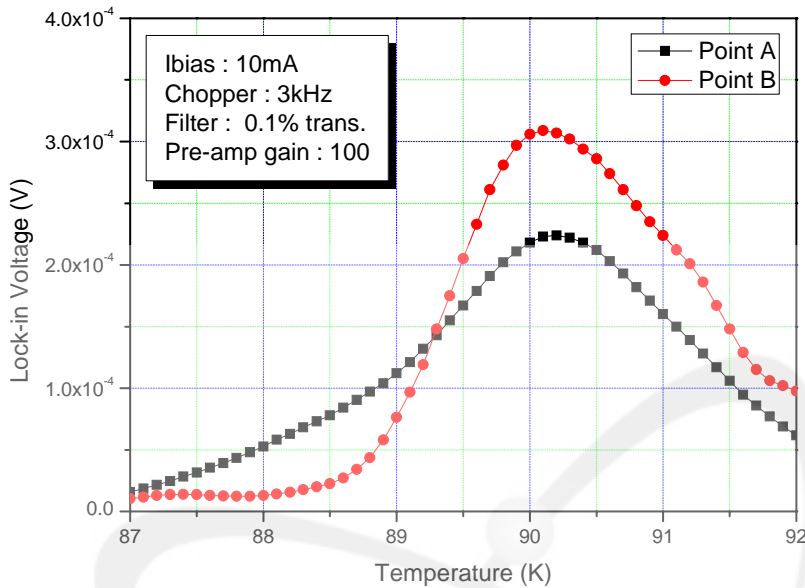


Fig. 3.2.13 Temperature vs Lock-in voltage at arbitrary two point of YBCO thin film sample

### 3.2.6.4. 2차원 구조 분석

#### 3.2.6.4.1 임계 온도 분포

##### 3.2.6.4.1.1 YBCO 박막 시료

YBCO 박막 시료의 온도를 단계적으로 높여가면서 임계 온도의 공간적 분포변화를 관찰하였다. 이를 위해서 시료면에 집광된 레이저 빔을 2차원으로 스캔하였다. 90 K에서 2차원으로 스캔한 결과를 Fig. 3.2.14에 나타내었다. 이 때 시료에 흘려준 전류는 10 mA이고 레이저의 입력 전압은 5 V 였다. 레이저 빔의 세기를 낮추기 위해서 투과율 0.1%의 필터를 레이저와 집광렌즈 사이에 설치하였고 Lock-in의 Reference로 사용할 Chopper의 주파수는 3 kHz였으며 Pre-amplifier를 이용해서 신호를 100배의 크기로 증폭시켰다. 시료면에 주사되는 집광된 레이저 빔의 간격은 상하, 좌우 방향 모두 10  $\mu\text{m}$ 로 스캔을 하였다.

본 논문 내용 중 Fig. 3.2.14와 같은 모든 2차원 스캔 그래프의 수평축 및 수직축의 좌표는 각각 시료의 수평, 수직방향의 위치이며 단위는  $\mu\text{m}$  이고, 우측의 범례는 각 위치에서의 전압 신호의 크기를 나타낸 것으로 단위는 V 이다.

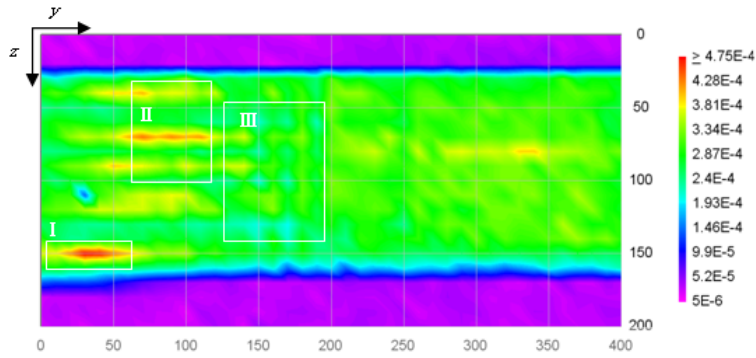


Fig. 3.2.14 2-Dimensional scan of YBCO thin film sample at 90 K

온도에 따른 2차원 스캔 결과를 Fig. 3.2.15에 나타냈다. (시료의 위치에 대한 정보인 수평축 및 수직축 좌표와 각 위치에서의 전압 신호의 크기에 대한 정보인 범례는 Fig. 3.2.14를 참고하기 바란다.) 2차원 그래프의 전반적인 온도 상승에 따른 경향이 Fig. 3.2.13과 같이 90 K 근처에서 최대이고 멀어질수록 전체적인 신호의 크기가 낮아지지만 각 부분마다 조금씩 다른 추이를 나타내는 것을 볼 수 있다.

시료의 임계 온도인 88.8 K보다 낮은 온도인 88.0 K에서 시료의 왼쪽부분에 신호가 나타나는 것을 볼 수 있다. 이는 그 부분이 다른 부분에 비해 임계 온도가 낮음을 나타낸다. 이와 같이 한 온도에서도 임계 온도의 차이를 볼 수 있지만 온도를 올려가면서 분석하면 각 부분의 차이를 더 상세히 분석할 수 있다.

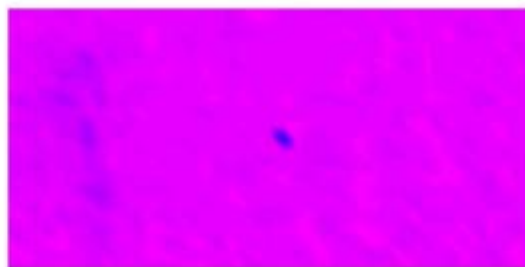
Fig. 3.2.14의 I 번 부분은 반응 신호가 가장 먼저 나타나는 부분이고 90.0 K에서 최대 신호를 나타내는 곳으로서 온도 상승에 따른 신호의 추이가 Fig. 3.2.1의 P2와 유사하다. II 번 부분은 I 번 부분과 유사한 신호 추이를 보이지만 처음 신호가 나타나는 지점과 최대 신호가 나타나는 지점이 I 번 부분에 비해 0.5 K 정도씩 늦어짐을 볼 수 있다. 이것을 통해 II 번 지점이 I 번 지점에 비해 임계 온도가 0.5 K 높다는 것을 알 수 있다.

Fig. 3.2.14의 III 번 부분은 I 번과 II 번 부분에 비해 신호의 최대값이 낮음을 볼 수 있다. 또한 91.5 K부터는 오히려 I 번과 II 번 부분에 비해 신호가 더 높음을 볼 수 있다. 이는 Fig. 3.2.1의 P1과 같이 변이구간 폭이 넓은 그래프를 III 번 부분이 가진다는 것을 알 수 있다.

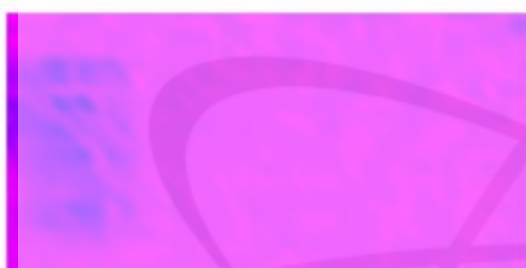
이와 같이 LTSLM 장치를 통해서 초전도 박막의 임계 온도의 공간적 분포를 일련의 그래프를 통해서 분석할 수 있다.



(a) 87.0 K



(b) 87.5 K



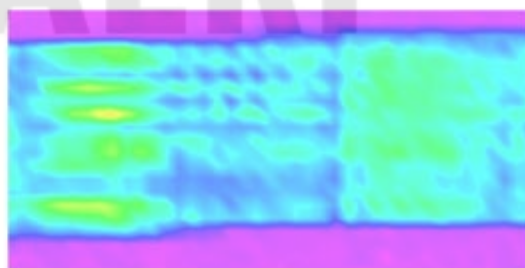
(c) 88.0 K



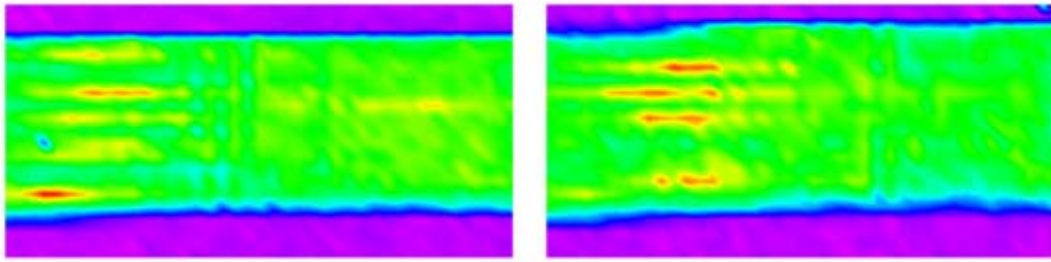
(d) 88.5 K



(e) 89.0 K

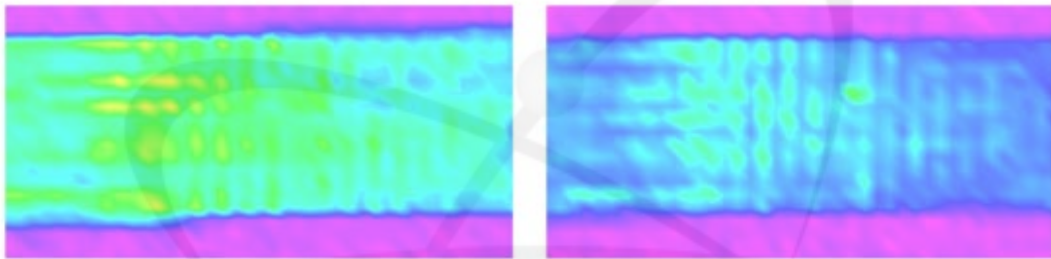


(f) 89.5 K



(g) 90.0 K

(h) 90.5 K



(i) 91.0 K

(j) 91.5 K



(k) 92.0 K

(l) 92.5 K

Fig. 3.2.15 2-Dimensional scan of YBCO thin film sample at variable temperature (87.0  $\rightarrow$  92.5 K)



### 3.2.6.4.1.2 SmBCO 박막 선재 시료

SmBCO 박막 선재 시료의 온도를 단계적으로 높여가면서 임계 온도의 공간적 분포 변화를 관찰하였다. 이를 위해서 시료면에 집광된 레이저 빔을 2차원으로 스캔하였다. 최대 신호가 나타나는 81.5 K에서 2차원으로 스캔한 결과를 Fig. 3.2.16에 나타내었다.

2차원 스캔을 위한 레이저 빔의 세기와 그외 장치 구성들은 YBCO 박막 시료의 실험 환경과 동일하며 좀 더 세밀한 관찰을 위해서 레이저의 상하, 좌우 움직임의 간격은 5  $\mu\text{m}$ 로 하였다. 그래프에서 화살표( $\rightarrow$ )로 표시된 부분이 시료 중 신호가 나타나는 부분이다.

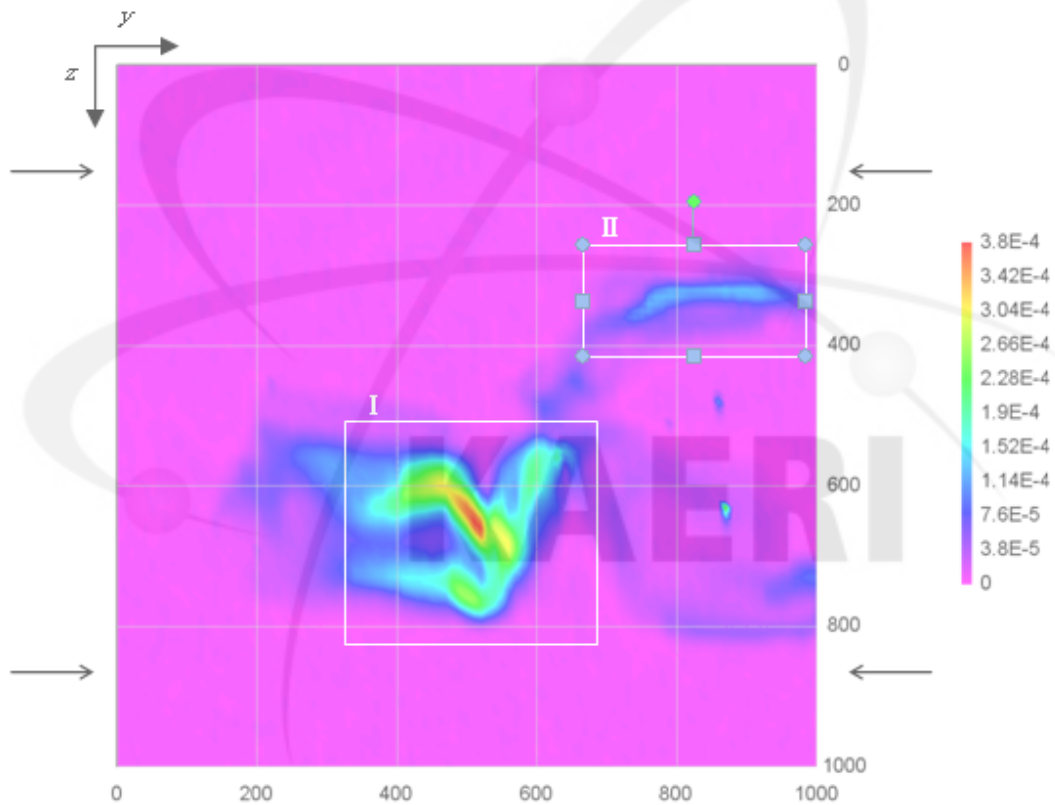


Fig. 3.2.16 2-Dimensional scan of SmBCO coated conductor sample at 81.5 K

온도별 2차원 스캔 결과를 Fig. 3.2.17에 나타냈다. (시료의 위치에 대한 정보인 수평축 및 수직축 좌표와 각 위치에서의 전압 신호의 크기에 대한 정보인 범례는 Fig 5.8을 참고하기 바란다.) I 번 부분은 최초의 신호가 나타나는 임계 온도가 가장 낮은 부분인 동시에 최대의 신호가 나타나는 부분이고, II 번 부분은 신호의 최대값은 I 번 부분에 비해 작지만 84.0 K 이상에서는 I 번 부분과 동일한 신호의 크기를 갖는 상대적으로 넓은 범위의 신호를 갖는 부분으로 분석할 수 있다.



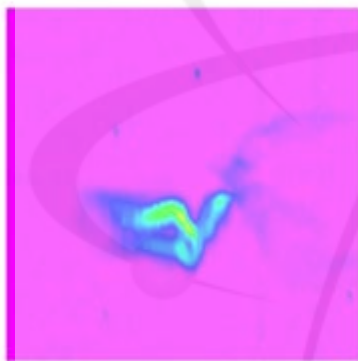
신호의 경향은 81.5 K에서 최대이고 스캔 온도가 81.5 K에서 멀어질수록 낮아지는 YBCO 박막 시료와 동일한 경향을 나타냈지만 YBCO 박막의 최대 신호가 임계 온도 근처에서 나타난 것과 달리 SmBCO 박막 선재 시료는 임계 온도와 차이가 있는 지점에서 최대 신호가 나타났다는 것이다. 이에 대한 분석은 다음 실험 단계에서 하도록 하겠다.



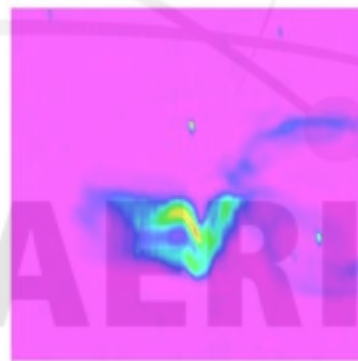
(a) 79.5 K



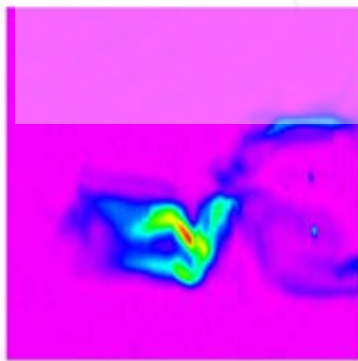
(b) 80.0 K



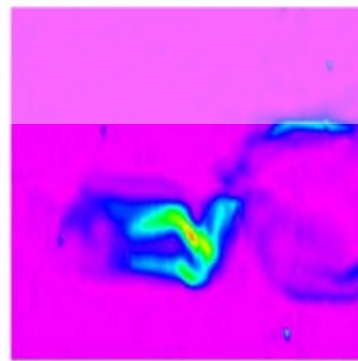
(c) 80.5 K



(d) 81.0 K



(e) 81.5 K



(f) 82.0 K

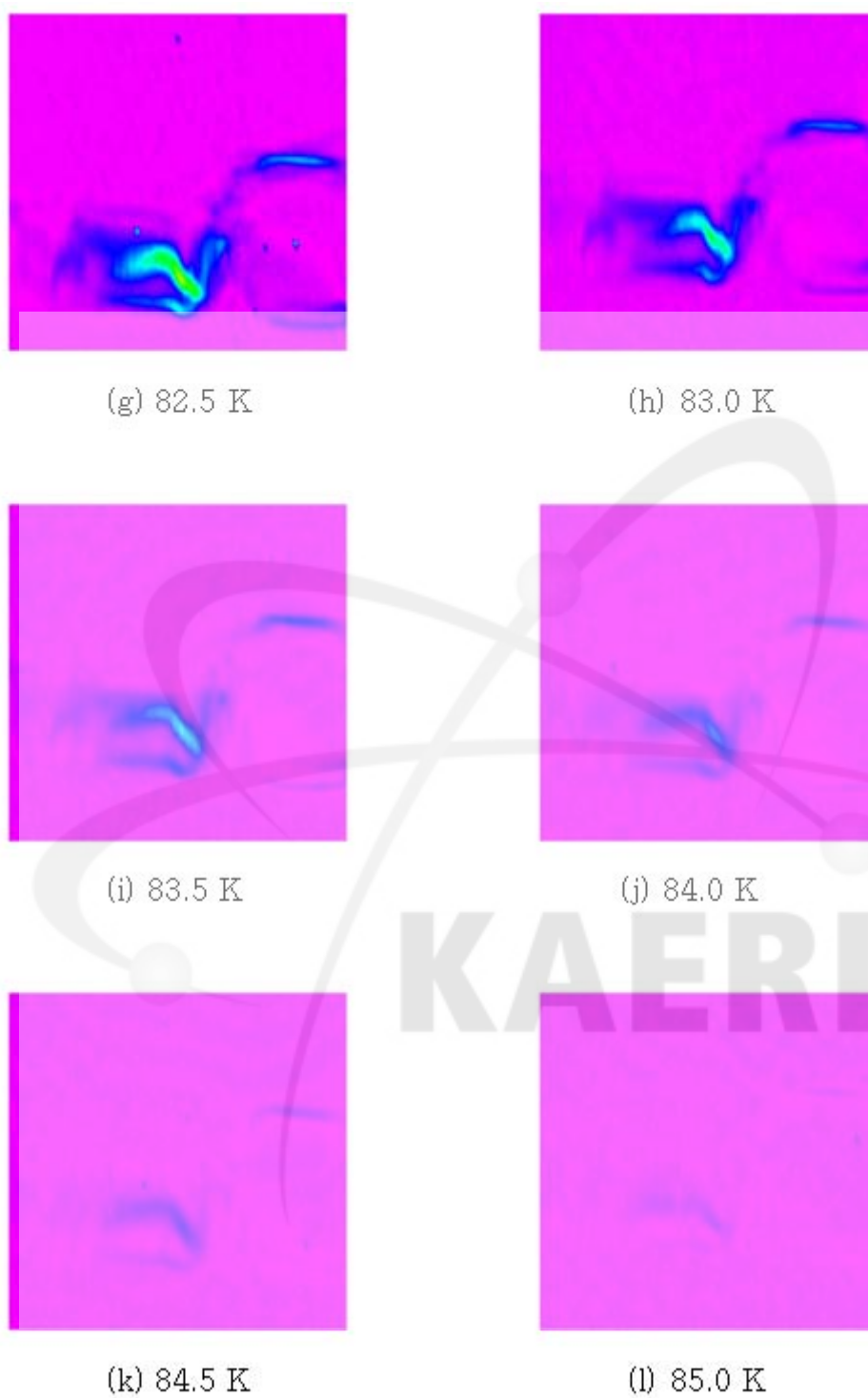


Fig. 3.2.17 2-Dimensional scan of SmBCO coated conductor sample at variable temperature (79.5  $\rightarrow$  85.0 K)

### 3.2.6.4.2 임계 전류 분포

#### 3.2.6.4.2.1 YBCO 박막 시료

YBCO 박막 시료의 온도를 고정시킨 상태에서 시료에 흘리는 전류를 단계적으로 높여가면서 임계 전류의 공간적 분포변화를 관찰하였다. 이를 위해서 시료면에 집광된 레이저 빔을 2차원으로 스캔하였다. 박막의 임계 온도 보다 많이 낮은 86 K에서 시료에 60 mA의 전류를 흘려주었을 때의 2차원으로 스캔한 결과를 Fig. 3.2.18에 나타내었다.

시료의 온도를 86 K에 고정시켜둔 상태에서 시료에 가해지는 전류를 높여가면서 2차원으로 스캔하였다. 2차원 스캔을 위한 레이저 빔의 세기와 그외 장치 구성들은 임계 온도 분포 실험 환경과 동일하며 레이저의 상하, 좌우 움직임의 간격은 10  $\mu\text{m}$ 로 하였다.

임계온도분포실험에서 보았던 가장 낮은 임계온도를 가지는 지점에서 가장 먼저 신호가 나타나므로 임계전류도가 가장 낮음을 볼 수 있다. 또한 시료에 흘려지는 전류의 크기가 커질수록 신호가 나타나는 지점(초전도 상태에서 정상 상태로 바뀌는 지점)의 범위가 넓어지는 것을 Fig. 3.2.19에서 볼 수 있다.

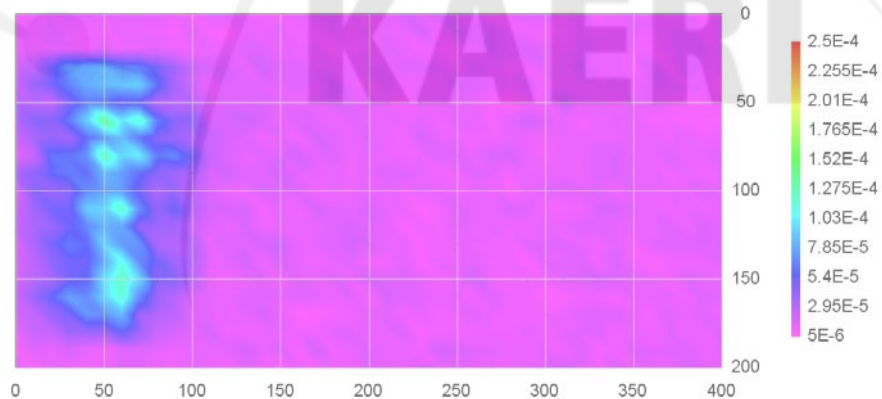
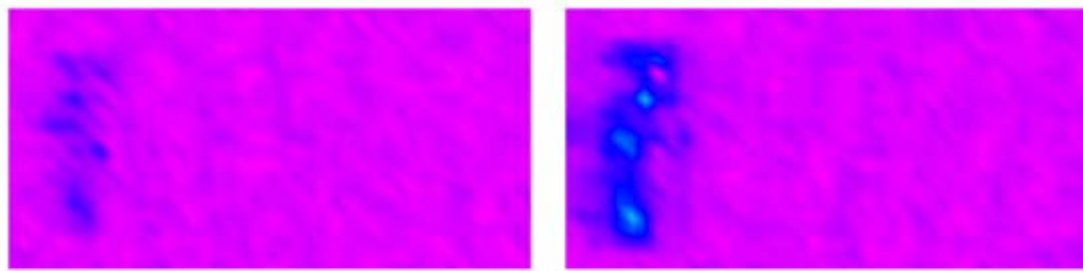
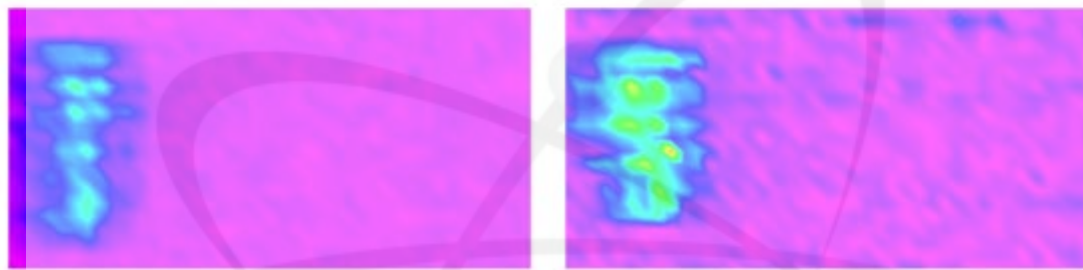


Fig. 3.2.18 2-Dimensional scan of YBCO thin film sample at 86 K  
(Bias current : 60 mA)



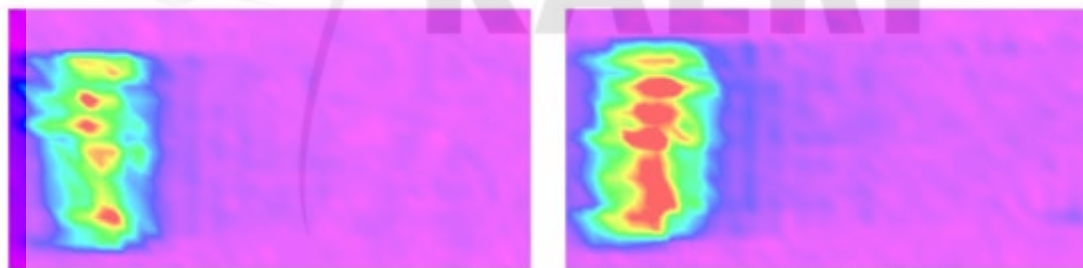
(a) 40 mA

(b) 50 mA



(c) 60 mA

(d) 70 mA



(e) 80 mA

(f) 90 mA

Fig. 3.2.19 2-Dimensional scan of YBCO thin film sample at variable bias current (40 → 90 mA)

### 3.2.6.4.2.2 SmBCO 박막 선재 시료

SmBCO 박막 선재 시료의 온도를 고정시킨 상태에서 시료에 흘리는 전류를 단계적으로 높여가면서 임계 전류의 공간적 분포변화를 관찰하였다. 이를 위해서 시료면에 집광된 레이저 빔을 2차원으로 스캔하였다. 초전도 박막의 온도를 80 K에 고정시킨 상태에서 20 mA의 전류를 흘려주었을 때의 2차원으로 스캔한 결과를 Fig. 3.2.20에 나타내었다.

시료의 온도를 80 K에 고정시켜둔 상태에서 시료에 가해지는 전류를 높여가면서 2차원으로 스캔하였다. 2차원 스캔을 위한 레이저 빔의 세기와 그외 장치 구성들은 YBCO 박막 시료의 실험 환경과 동일하며 좀 더 세밀한 관찰을 위해서 레이저의 상하, 좌우 움직임의 간격은  $5\ \mu\text{m}$ 로 하였다. 신호의 경향이 YBCO 박막 시료와 유사함을 Fig. 3.2.21에서 볼 수 있다.

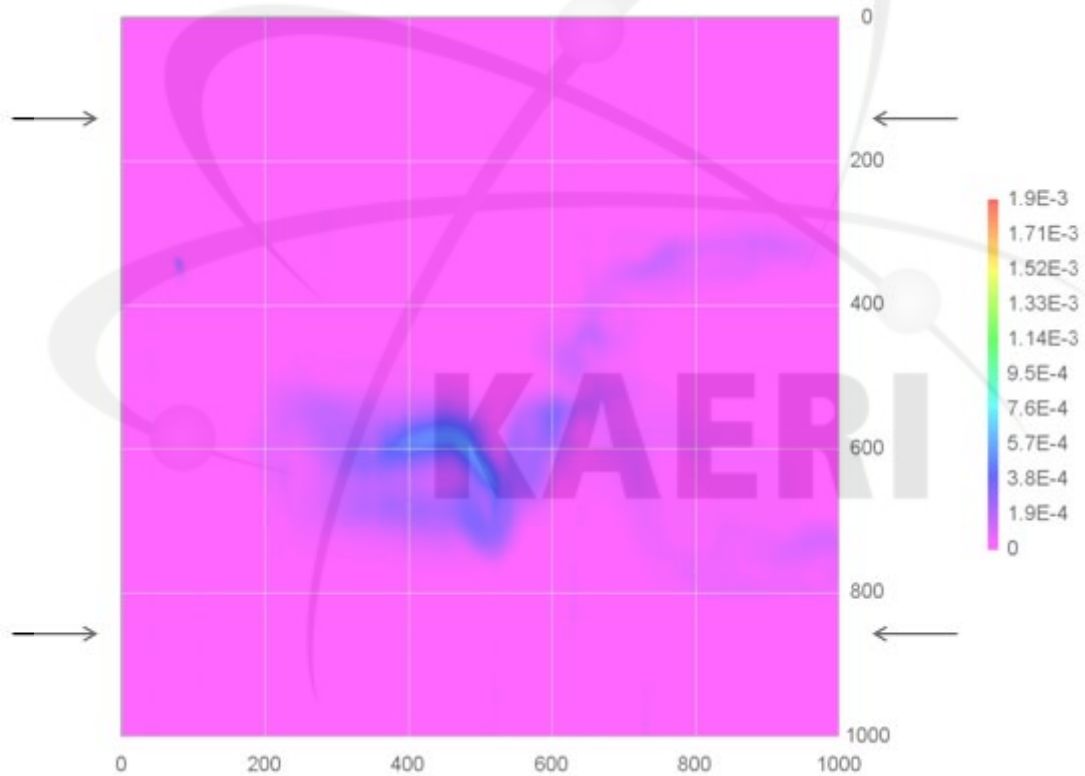


Fig. 3.2.20 2-Dimensional scan of SmBCO coated conductor sample at 80 K  
(Bias current : 20 mA)



Fig. 3.2.21 2-Dimensional scan of SmBCO coated conductor sample at variable bias current (15 → 100 mA)

### 3.2.7 결론

본 연구에서는 YBCO 박막 및 SmBCO 박막 선재의 임계 온도와 임계 전류의 공간적인 불균질성 분포를 분석하기 위하여 저온 주사 레이저 현미경 (LTSLM)을 제작하였다. 또한 자기장 및 전류가 인가되는 환경 하에서 초전도 박막의 에너지 손실을 최소화하는 초전도 선재 구조를 제작하기 위한 Chemical etching 공정(YBCO 박막 시료) 및 Physical etching 공정(SmBCO 박막 선재 시료)을 제시하였다.

본 연구를 위해 제작한 LTSLM은 T=77 K에서 최대 20 mm × 20 mm 크기를 가지는 초전도 박막 시료의 공간적 초전도 특성 불균질성을 집광된 레이저 빔과 정밀 측정 장치들을 이용하여  $10^{-6}$ Torr의 안정된 진공상태와  $\pm 10$  mK의 온도 안정성을 유지하면서 3  $\mu$ m 크기의 집광된 레이저를 통해 측정할 수 있다. LTSLM을 PC로 제어하기 위해 Labview 프로그램을 이용하여 제어용 프로그램을 제작하였고 제작한 제어 프로그램을 이용하여 데이터 획득 및 처리, 시스템 제어 작업을 동시에 수행하였다.

LTSLM을 이용하여 내부에 얇은 필라멘트 구조를 가지는 초전도 박막 시료의 1차원 및 2차원의 임계 온도 분포를 관찰하였으며, 시료에 인가되는 전류의 변화에 따른 임계 전류 분포를 관찰하였다.



KAERI

### 3.3 저온홀소자현미경을 이용한 $\text{ReBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-6}$ 테이프의 특성 분석

#### 3.3.1 이론

##### 3.3.1.1 빈 모델(Bean model)

초전도체 내부에서 일어나는 현상을 설명하는 기본 모델로서 빈 모델을 사용하고자 한다[15]. 이 모델은 마이스너 상태와 혼합 상태를 구분하지 않으며 투자율은 진공과 같다고 가정하며 전류와 자기장의 분포만으로 초전도체 내의 전자기 현상을 설명하려 한다. 마이스너 효과에 따라 초전도체는 초전도체 내부로 자기장의 침투를 허용하지 않으려는 성질 때문에 외부에서 인가되는 자기장이 있는 경우, 차폐 전류  $J$ 가 생기게 되며 인가자기장이  $H_c$  이상이 되면 자속이 표면으로부터 시료의 내부로 침투해 들어가게 되어  $J$ 의 값이 커지게 된다. 이렇게 시료 내부에서 거리에 따라 자속밀도의 변화가 나타나므로 맥스웰 방정식에 따라 다음과 같은 초전도 전류  $J$ 가 초전도체 내부에 흐르게 된다.

$$-\nabla \times B = \mu_0 J \quad (27)$$

이 전류에 의해 자속은 로렌츠 힘을 받음으로써 시료내부로 들어가게 되고 결국 이 힘이 자속의 구속력과 평형을 이루게 되어 변위에 따른 자속 밀도의 기울기가 일정해지는데 이때의 전류 밀도  $J$ 는 임계전류밀도  $J_c$ 가 된다. 이런 상태를 임계 상태라고 한다. 이 모델로부터 전류-전압 측정과는 다르게 비 접촉 방법으로 초전도체의 임계전류를 알아볼 수 있다.

먼저, 외부 자기장에 따른 자기이력곡선을 측정한다. 빈의 임계상태 모델에 따라 자기이력곡선에 대응되는 시료내부의 자속밀도 분포를 나타낼 수 있다. 이 경우 해당하는 인가 자기장을  $H_a$ 라 한다면 임계전류밀도는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$H_a = J_c a \quad (28)$$

여기에서  $a$ 는 시료 폭의 절반 길이이다. 인가 자기장이  $H_a$  인 경우를 나타내었다. 식 (28)은 자속 밀도의 기울기가 임계 전류 밀도와 비례함을 나타내고 있고,  $M$ 은 평균 자기화 이므로 시료 내부에 침투된 평균 자속 밀도는 다음과 같다.

$$B = \frac{1}{2} \mu_0 \frac{H_0^2}{H_a} \quad (29)$$

그러므로 이 경우의 평균 자기화는

$$M = -\frac{H_0}{2} \left( 2 - \frac{H_0}{H_a} \right) \quad (30)$$

로 나타난다.



인가 자기장이 인 경우, 시료 내부의 자속 밀도의 기울기가 변하지 않으므로 임계 전류밀도는 인가 자기장에 대해 일정한 값을 가지며, 자기 이력 곡선에서 자기화가 이 구간에서 일정한 값을 나타낸다. 단지 자속밀도만 커지므로 이 경우에서 평균 자속밀도는 아래와 같이 나타낸다.

$$B = \mu_0 H_0 - \frac{1}{2} \mu_0 H_a \quad (31)$$

따라서 이에 대응하는 자기화는

$$M = -\frac{1}{2} H_a \quad (32)$$

가 된다. 또한 인가 자속밀도가 감소해 갈 때 즉,  $H_{\max} - H_0 \leq 2H_a$  인 자기화는

$$M = H_{\max} - H_0 - \frac{1}{2} H_a - \frac{(H_{\max} - H_0)^2}{4H_a} \quad (33)$$

가 되며  $H_{\max} - H_0 \geq 2H_a$  인 다음과 같은 평균 자기화를 보일 것이다.

$$M = \frac{1}{2} H_a \quad (34)$$

그러므로 가해주는 자속밀도가 증가할 때와 감소할 때 자기화의 차이는 가 되며, 식 (28)와 비교해 보면 임계전류 밀도를 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$J_c = \frac{\Delta M}{a} \quad (35)$$

그러나 이 경우는 무한히 넓은 판상 형태의 시료에서 나타나는 값이며 실제 시료의 모양에 따라 식(35)는 다른 형태를 가진다. 본 연구에서 사용한 얇은 직육면체 초전도체는 다음과 같은 임계전류 밀도를 가진다.

$$J_c = \frac{20\Delta M}{Vb(1-b/3a)} \quad (36)$$

여기서  $V$ 는 부피이며  $a, b$ 는 시료의 길이이다. [16-28]

### 3.3.1.2 자기장 분포의 전류 변환

초전도체의 자기적 특성을 관측하는 방법은 자기력계(magnetometer)를 이용하여 시료의 총 자기모멘트(total magnetic moment)를 측정하는 방식과 자기특성의 공간적 분포를 측정할 수 있는 MO image 방법, 주사홀소자현미경을 및 주사 SQUID 현미경 방식으로 나눌 수 있다. 초전도양자간섭소자인 SQUID를 이용하는 자기력계인 MPMS(magnetic property measurement system)를 이용하면 외부 자기장이 초전도체에 가해질 경우 자기화를 측정함으로써 Bean 임계 상태 모델로부터 초전도체 내부의 현상을 기술할 수 있다. Bean의 임계 상태 모델은 벌크 형태를 가지는 초전도체 시료의 자기적 특성을 설명하기 위해서는 적용할 수 있지만, 필라멘트 구

조를 가지는 초전도 박막인 경우에는 국소적 구조 주변에서 일어나는 자기적 특성을 설명하기는 어렵다. 본 연구의 목적인 초전도 선재에 흐르는 전류 분포를 관측하기 위해서는 필라멘트 구조를 가지는 초전도 선재 시료 표면의 자기장을 공간적 분포를 정확히 측정해야 한다. 초전도 선재 시료의 국소적 표면 자기장을 직접 측정하고, 측정한 표면의 자기장 분포를 전류 분포로 변환하는 방법을 사용하면 초전도 선재 시료 표면 전류의 공간적 분포를 알 수 있다. 이 방법을 ‘역변환 방법’ 이라고 한다.

Fig. 3.3.1은  $x$ - $y$  평면에 놓인 하나의 필라멘트를 가지는 초전도 시료를 나타낸다.  $y$  방향으로 전류가 흐르고 있으며, 이 전류에 의해 생성된 자기장을  $h$  높이에서  $z$  방향 성분을 측정한다.

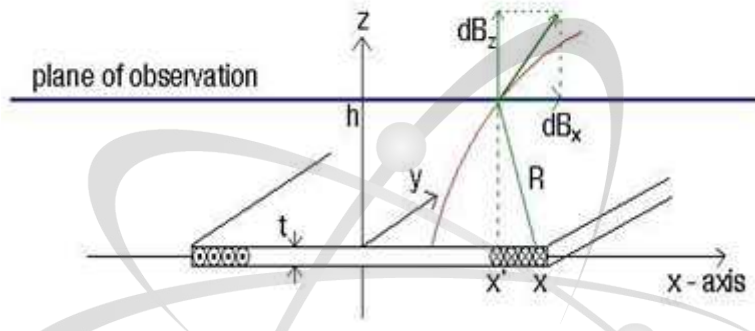


Fig. 3.3.1 The geometry of the inversion problem

문제를 간단히 하기 위해서 몇 가지 가정할 것이 있다. 만약 전류가 흐르는 면이 관측 면까지의 높이에 비해 아주 얇다면 즉  $t \ll h$  인 경우 전류분포를 1차원 문제로 취급할 수 있으며, 흐르는 전류는

$$J(x) = \int_0^t j(x, z) dz \quad (37)$$

와 같이 표현할 수 있으며,  $j(x, z)$ 는 국소 전류 밀도이다.

Biot-Savart 법칙으로부터  $J(x)dx$ 에 의한 전류가  $x'$  지점에 수직한 곳에 만드는 자기장은

$$dB_z = \frac{\mu_0}{2\pi} \frac{J(x)dx}{R} \frac{x-x'}{R} \quad (38)$$

이며,  $R = \sqrt{h^2 + (x-x')^2}$  이다. 시료 표면의 모든 전류 필라멘트에 대해 위의 계산을 적용하여 적분하면, 총 수직 자기장은 다음과 같이 표현된다.

$$B_z(x') = \frac{\mu_0}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{x-x'}{h^2 + (x-x')^2} J(x) dx \quad (39)$$

위의 식 (39)에서 자기장은 시료 영역에서 하나의 주기를 가지므로 Fourier 변환이 가능하다. 따라서 국소 자기장  $B_z(x')$ 는

$$B_z(x') = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} B_z(k) e^{ikx'} dk \quad (40)$$

로 나타낼 수 있다.

그러면 식 (40)는

$$B_z(x') = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} B_z(k) e^{ikx'} dk = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{B_z(k)}{G(k)} e^{ikx'} dk \int_{-\infty}^{\infty} \frac{x-x'}{h^2+(x-x')^2} e^{ik(x-x')} dx \quad (41)$$

와 같으며,  $B_z(k)$ 는 미소자기 분포의 Fourier 변환이고,  $G(k)$ 는  $B_z(k)$ 와 함께 전류 밀도를 만드는 연산자이다

여기서  $G(k)$ 는

$$G(k) = \int_{-\infty}^{\infty} \frac{x-x'}{h^2+(x-x')^2} e^{ik(x-x')} dx = \int_{-\infty}^{\infty} \frac{p}{h^2+p^2} e^{-ikp} dp \quad (42)$$

로 두고 복소적분을 이용하여 계산하면

$$\begin{aligned} \oint_c \frac{z}{h^2+z^2} e^{-ikz} dz &= \lim_{R \rightarrow \infty} \left[ \int_{-R}^R \frac{p e^{-ikp}}{h^2+p^2} dp + \int_{c_1 \text{ or } c_2} \frac{R e^{i\theta} e^{-ikR e^{i\theta}}}{h^2+R^2 e^{2i\theta}} R i e^{i\theta} d\theta \right] \\ &= -\pi i \operatorname{sgn}(k) e^{-h|k|} \end{aligned} \quad (43)$$

이며,  $\operatorname{sgn}(k) = \frac{|k|}{k}$  이다.

따라서 식 (40)로부터

$$\begin{aligned} B_z(x') &= \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} B_z(k) e^{ikx'} dk = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{B_z(k) e^{ikx'}}{G(k)} dk \int_{-\infty}^{\infty} \frac{x-x'}{h^2+(x-x')^2} e^{ik(x-x')} dx \\ &= \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{x-x'}{h^2+(x-x')^2} dx \int_{-\infty}^{\infty} \frac{B_z(k) e^{ikx}}{G(k)} dk \\ &= \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{x-x'}{h^2+(x-x')^2} \mu_0 J(x) dx \end{aligned} \quad (44)$$

의 관계를 얻을 수 있고, 역변환 방법을 통해서 얻고자 하는 전류 밀도는

$$\mu_0 J(x) = \int_{-\infty}^{\infty} \frac{B_z(k)}{G(k)} e^{ikx} dk \quad (45)$$

이다.

여기서 변환 과정 중 생기는 노이즈를 제거하기 위해 두 가지 방법으로 필터링 함수를 도입한다.

첫 번째 필터링 함수는 low pass 필터로 시료 부분에서만 진류 밀도가 형성되고 자기장에 기여하므로

$$w(k) = \begin{cases} 1 & ; |k| \leq K \\ 0 & ; otherwise \end{cases} \quad (46)$$

을 만족하는  $k$ 를 선택한다.

따라서 식 (45)는

$$\int_{-\infty}^{\infty} B_z(x') \int_{-\infty}^{\infty} \frac{e^{ik(x-x')}}{G(k)} dk dx' = \int_{-\infty}^{\infty} B_z(x') A(x-x') dx' \quad (47)$$

이 되고,  $A(x-x') = \int_{-K}^K \frac{e^{ik(x-x')}}{G(k)} dk$  이다.

식 (47)을 계산하면

$$A(\xi) = \int_{-K}^K \frac{e^{ik\xi}}{G(k)} dk = \frac{\xi[1 - e^{Kh} \cos K\xi] + he^{Kh} \sin K\xi}{h^2 + \xi^2} \quad (48)$$

따라서, 역변환 관계식은

$$\mu_0 J(n) = \sum_{n'} \frac{n-n'}{d^2 + (n-n')^2} \frac{1 - (-1)^{n-n'} e^{\pi d}}{\pi} 2B_z(n') \quad (49)$$

두 번째 필터링 함수는  $|k| \leq K$  을 만족하는  $k$ 범위에서 각 구간에 가중치를 부여하는 Hanning window 필터링 함수를 적용하면

$$w(k) = \begin{cases} \frac{1}{2} \left(1 + \cos \frac{\pi k}{K}\right) & ; |k| \leq K \\ 0 & ; otherwise \end{cases} \quad (50)$$

식 (47)과 (48)에서

$$\begin{aligned} A(\xi) &= \int_{-K}^K \frac{e^{ik\xi}}{G(k)} \frac{1}{2} \left(1 + \cos \frac{\pi k}{K}\right) dk \\ &= \frac{1}{2} \left\{ \int_{-K}^K \frac{e^{ik\xi}}{G(k)} dk + \int_{-K}^K \frac{e^{ik\xi}}{G(k)} \cos \frac{\pi k}{K} dk \right\} \end{aligned} \quad (51)$$

이고, 다음과 같은 역변환 관계식을 얻을 수가 있다. [9]

$$\mu_0 J(n) = \sum_{n'} \frac{n-n'}{\pi} \left\{ \frac{1 - (-1)^{n-n'} e^{\pi d}}{d^2 + (n-n')^2} + \frac{[d^2 + (n-n')^2 - 1][1 + (-1)^{n-n'} e^{\pi d}]}{[d^2 + (n-n'+1)^2][d^2 + (n-n'-1)^2]} \right\} B_z(n') \quad (52)$$

식 (52)을 이용하면 시료 표면의 자기장 분포로부터 표면에 흐르는 전류를 구할 수 있다.

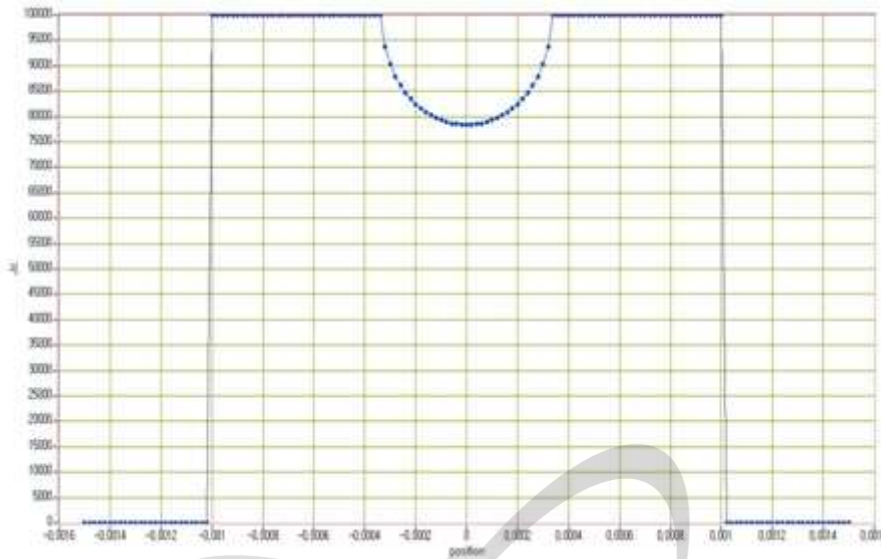


Fig. 3.3.2 Bean model

Fig. 3.3.2의 Bean model로부터 (39)식의 Biot-Savart 법칙을 이용하여 자기장을 구하면 Fig. 3.3.3과 같은 분포를 가지는 것을 알 수 있다.

Fig. 3.3.3의 자기장의 데이터로부터 역변환 관계식인 (52)식을 이용하여 다시 Bean model의 전류를 구해보면 Fig. 3.3.4와 같은 전류 분포를 얻을 수 있다.

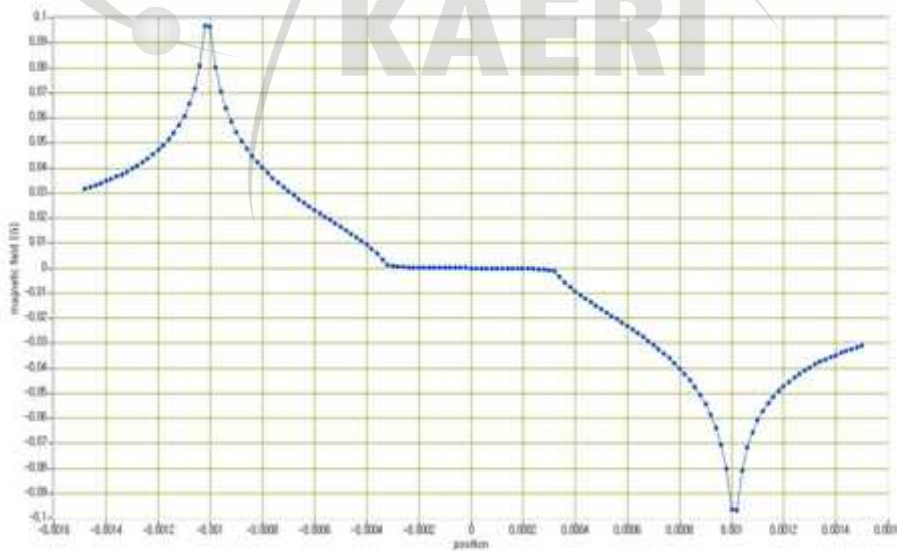


Fig. 3.3.3 Magnetic field distribution from Bean model

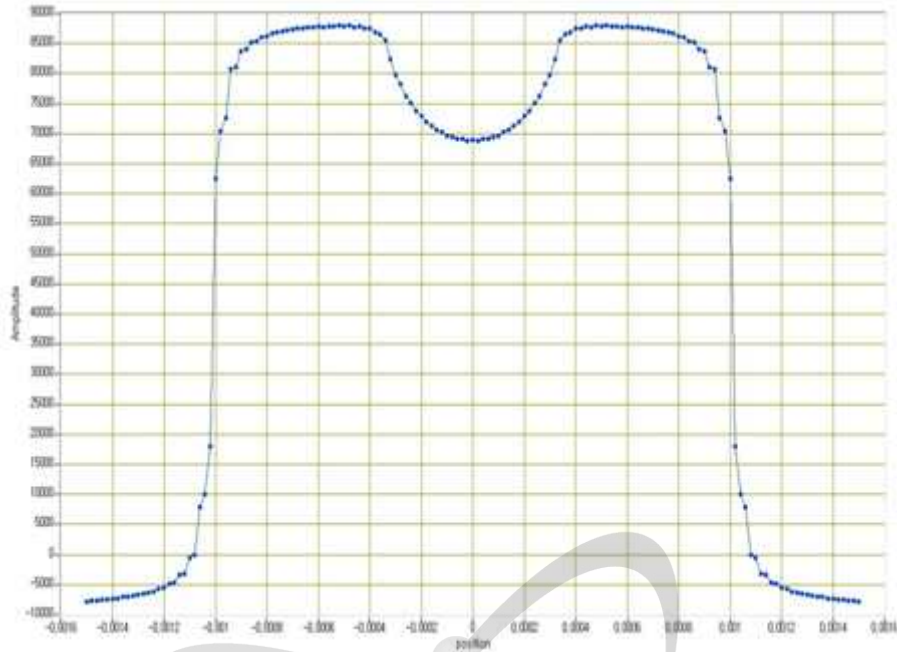


Fig. 3.3.4 Current distribution using inversion problem

### 3.3.1.3 Iteration method

Fig. 3.3.2와 Fig. 3.3.4의 전류 분포를 보면 알 수 있듯이, 처음 Bean model의 전류 분포와 이 전류 분포로부터 얻은 자기 분포를 역변환 방법을 통해 얻은 전류 분포는 약간의 차이를 보인다. 이 차이를 보정해 주기 위해 iteration method 과정을 거친다. [29]

Iteration method의 방법은 Fig. 3.3.5와 같다. 역변환 방법을 통해 얻은 전류 분포

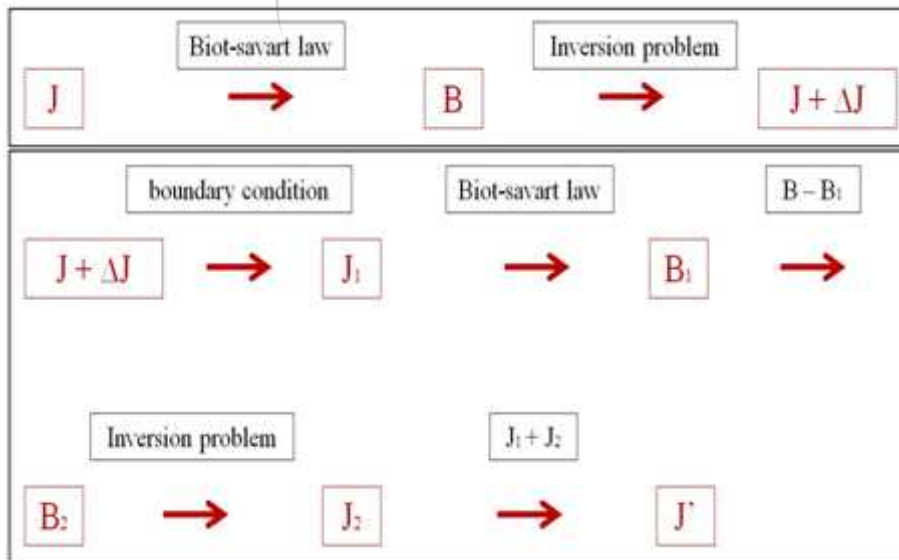


Fig. 3.3.5 Schematic diagram of iteration method

$J+\Delta J$ 에서 경계 조건을 적용하여 시료 외부에 남아 있는 전류를 제거한다. 이렇게 구한  $J_1$ 으로 Biot-Savart 법칙을 통해  $B_1$ 을 구한다. 그리고  $B-B_1=B_2$ 의 값을 역변환 방법을 통하여  $B_2$ 를 생성해내는 전류 분포  $J_2$ 를 구한다. 마지막 단계로 역변환 과정을 거치면서 손실된 전류 분포를 가진  $J_1$ 에  $J_2$ 를 보정해주어 최종적으로 예 근접한 전류 분포  $J'$ 을 얻을 수 가 있다.

### 3.3.2 시료

본 연구는 초전도 선재의 전류 분포를 분석하여 선재의 특성을 파악하고, 효율을 최대화할 수 있는 형태를 제안하는 것이 목적이므로, 하나의 선재에 대해 여러 개의 시료를 제작하여 본 연구에서 사용된 LTSHPM과 함께 연구실에서 보유하고 있는 LTSLM과의 실험을 병행하여, 두 데이터를 비교하여 보다 확실한 초전도 선재의 특성을 파악할 계획이다.[32]

본 연구에서 사용된 선재는 Superpower 社の SCS4050 타입이다.

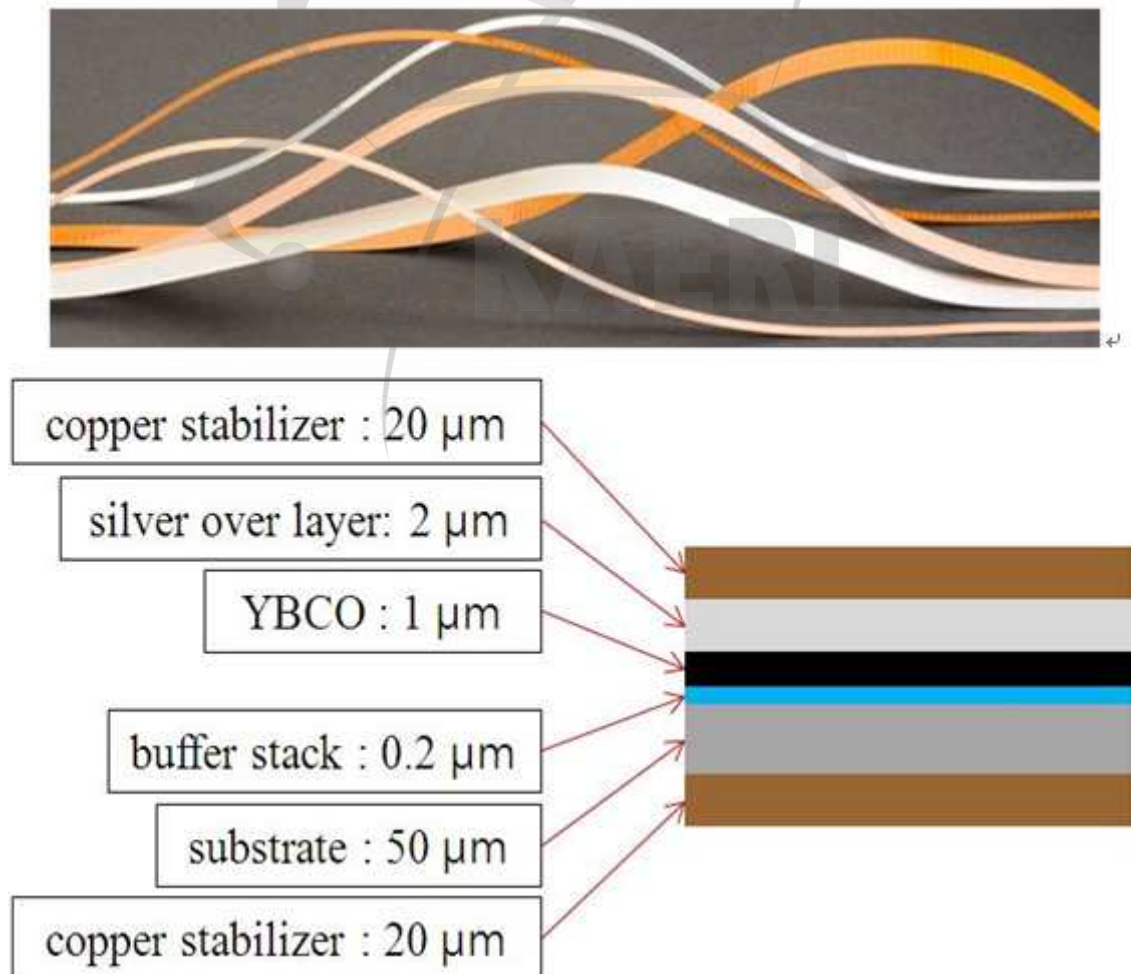


Fig. 3.3.6 Superpower 社の SCS4050 YBCO 초전도 선재

폭 4 mm, 임계 전류 80 A 인 YBCO 초전도 선재를 길이 15 mm 로 자른 후, chemical etching을 통해서 두 개의 strip 형태로 제작하였다.

Fig. 3.3.7의 첫 번째 그림은 chemical etching을 통해서 구리와 은 층을 벗긴 후, 두 개의 필라멘트로 YBCO의 형태를 만든 것이다. 그리고 capacitance sensor를 이용해 시료와 센서와의 거리를 측정하기 위해서 Au 코팅을 하였다.

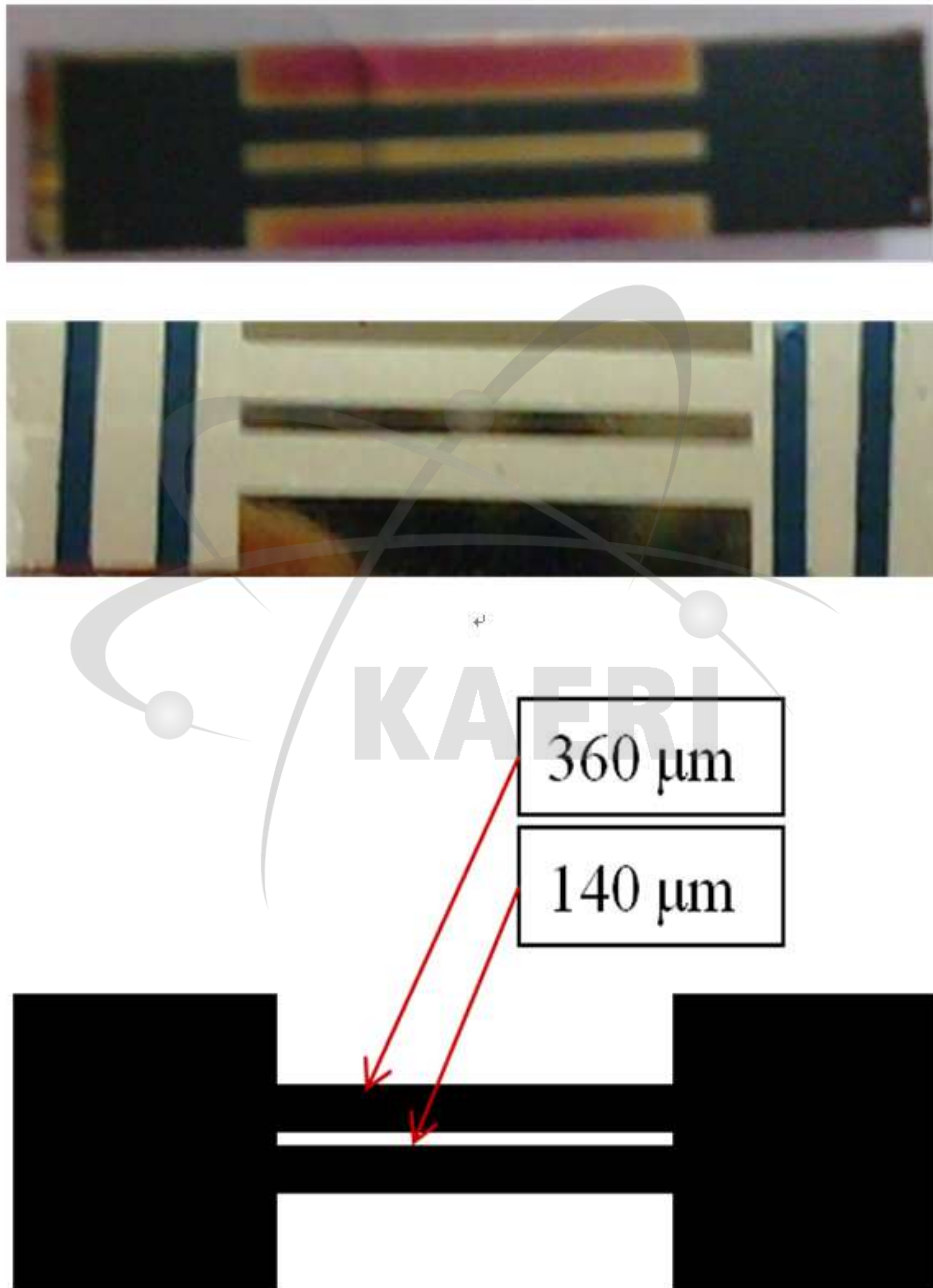


Fig. 3.3.7 Two strip of YBCO coated conductor



### 3.3.3 LTSHPM 제어 및 데이터 획득용 프로그램

본 연구는 80 K 저온에서 실시되며 필라멘트 구조를 가지는 초전도 선재 시료의 국소적 자기 분포를 측정해야 하므로 시스템의 정밀 제어가 중요하다. 하드웨어의 정밀도 및 안정도뿐만 아니라 이를 구동할 소프트웨어의 원활한 작동 또한 중요하다. 본 연구에서는 PC를 이용하여 LTSHPM을 구동시키고, 각종 장치로부터 데이터를 획득 처리하기 위해 Labview 프로그램을 이용하였다.

Fig. 3.3.8은 LTSHPM을 구동하기 위해 제작한 Labview 프로그램 실행창의 일부분을 나타낸 것이다. 제작한 프로그램을 이용하면 전기용량 센서와 초전도 선재 시료의 거리를 제어할 수 있으며 XY 방향의 이동 범위, 측정 간격을 조절할 수 있다. 또한, 획득한 홀 센서의 데이터, 센서와 시료 사이의 거리를 실시간 그래프로 나타내며 모니터링 할 수 있다. 획득한 데이터는 'ASCII' 형태의 파일로 PC에 저장되며, 이 데이터를 이용하여 자기장 분포를 분석할 수 있게 프로그래밍 하였다.

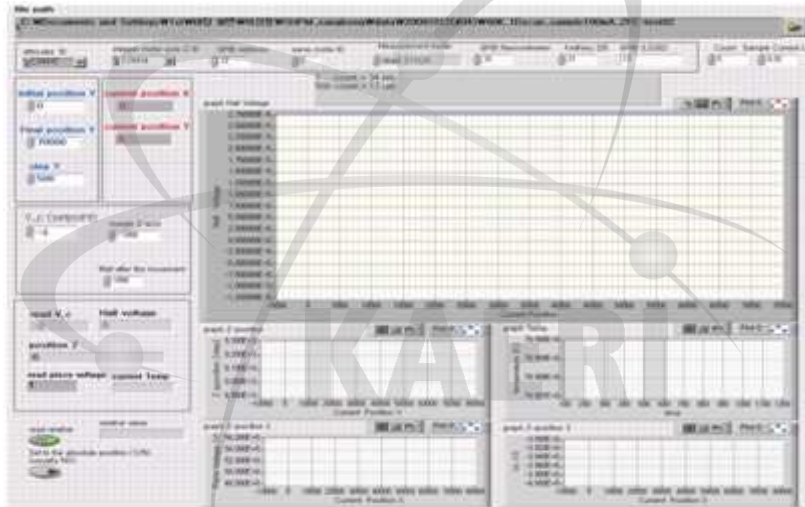


Fig. 3.3.8 LTSHPM operating program using Labview software

### 3.3.4. 실험 결과 및 분석

#### 3.3.4.1 시료의 인가 전류에 따른 임계 온도 분석

본 연구는 초전도 선재의 전류 분포 및 특성을 평가하기 위한 것으로 가장 먼저 인가 전류에 따른 시료의 임계 온도를 측정하여 실험 진행 시 온도 환경을 설정해 준다.

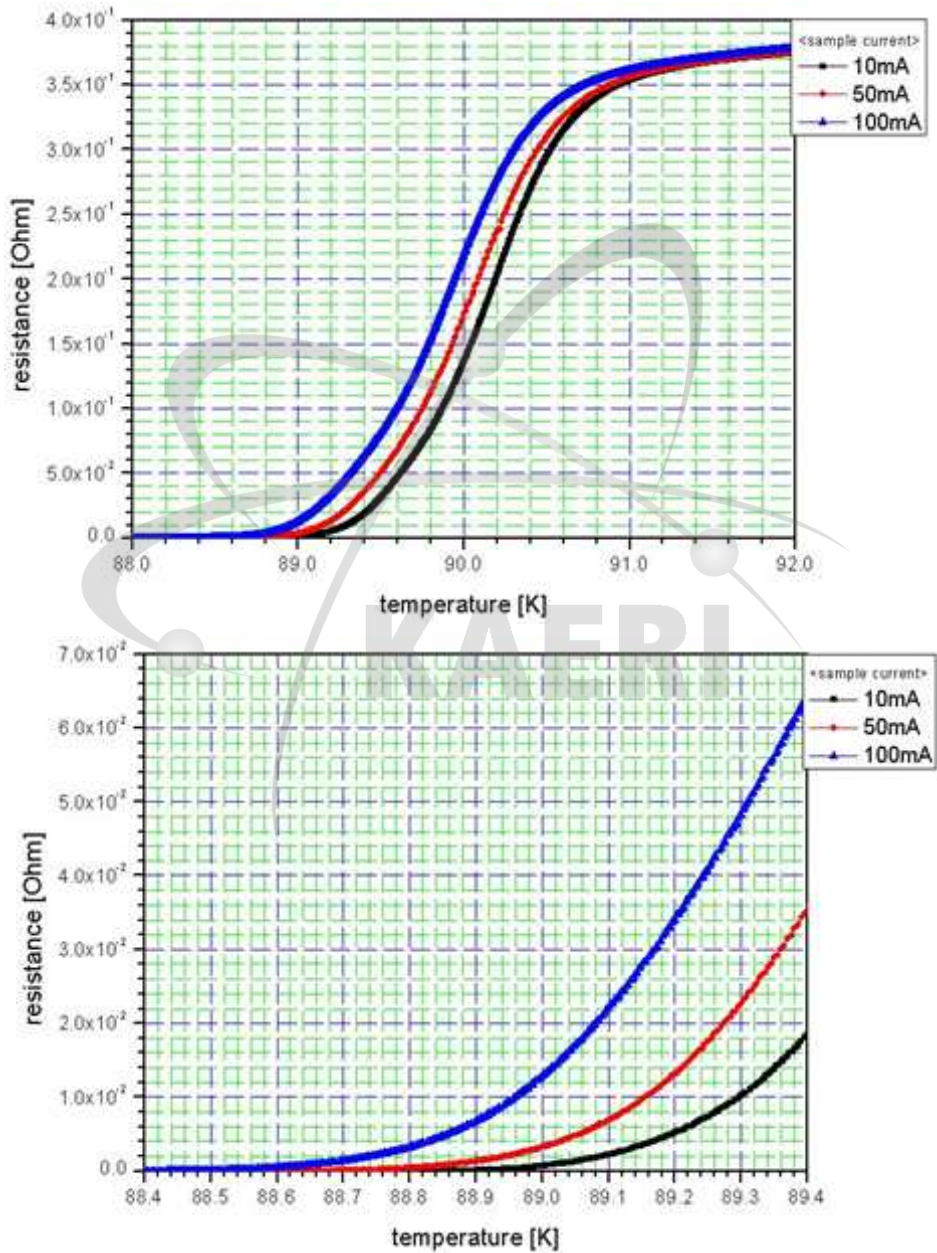


Fig. 3.3.9 인가 전류에 따른 임계 온도

### 3.3.4.2 전류 이력에 따른 자기장 변화

이 실험에서는 시료에 인가한 전류 이력에 따른 표면 자기장의 특성을 알아보았다.

본 연구를 위해 제작한 LTSHPM을 이용하여 전기 용량 센서와 홀 센서를 시료 표면에서 약 40  $\mu\text{m}$  까지 접근시키고, 이후 xyz 이송장치와 piezo scanner를 이용하여 시료의 단축방향으로 'single line scan'을 실시하였다.

우선 임계 온도보다 높은 95 K에서 시료에 전류를 인가하지 않고 표면 자기장을 측정하여 offset 값을 관측 하였다. 그리고 임계 온도보다 낮은 80 K에서 역시 전류를 인가하지 않고 표면 자기장을 측정하였다. 그 후, 시료에 100 mA의 전류를 인가하고 표면 자기장을 측정한 뒤, 전류를 off 시킨 후, 다시 표면 자기장을 측정하고, -100 mA를 인가하여 표면 자기장을 측정하였다. 그 결과는 Fig. 3.3.10에 나타내었다.

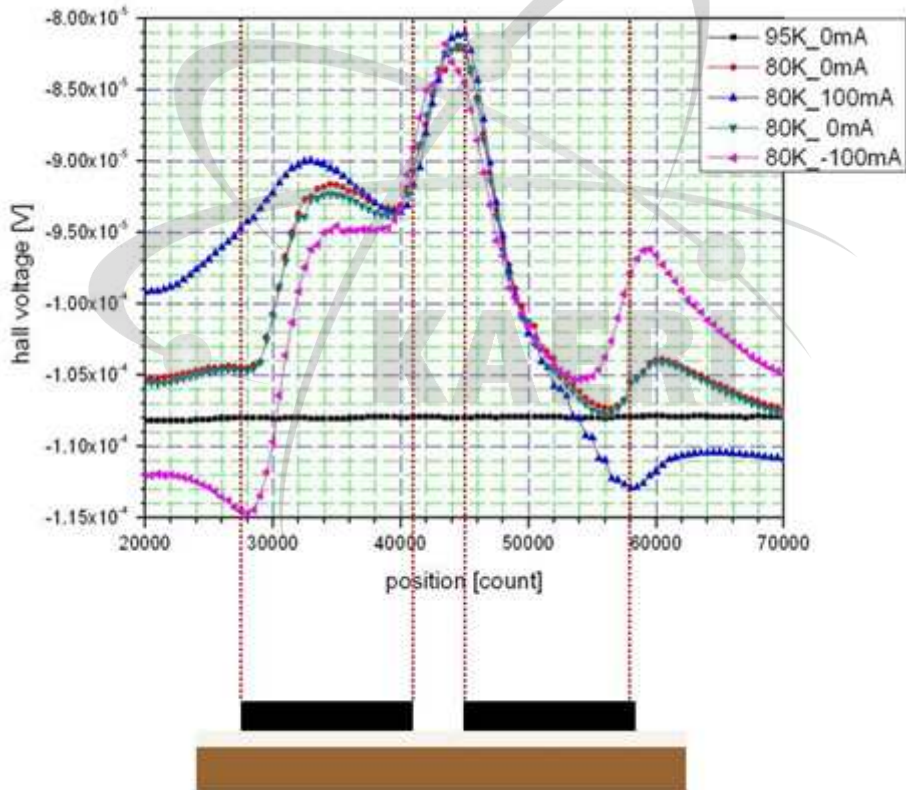


Fig. 3.3.10 전류 이력에 따른 자기장 변화

### 3.3.4.3 인가 전류에 따른 자기장 변화

Fig. 3.3.11은 인가 전류에 따른 표면 자기장 변화를 관측한 결과이다. 실험 순서는 다음과 같다.

우선, 임계 온도 보다 높은 95 K에서 전류를 인가하고, 그 상태에서 80 K로 냉각한 후, 표면 자기장을 측정하였다. 이후, 다시 95 K로 온도를 올린 후, 시료의 인가 전류를 바꾸고 80 K로 냉각해서 실험하는 방식을 따랐다.

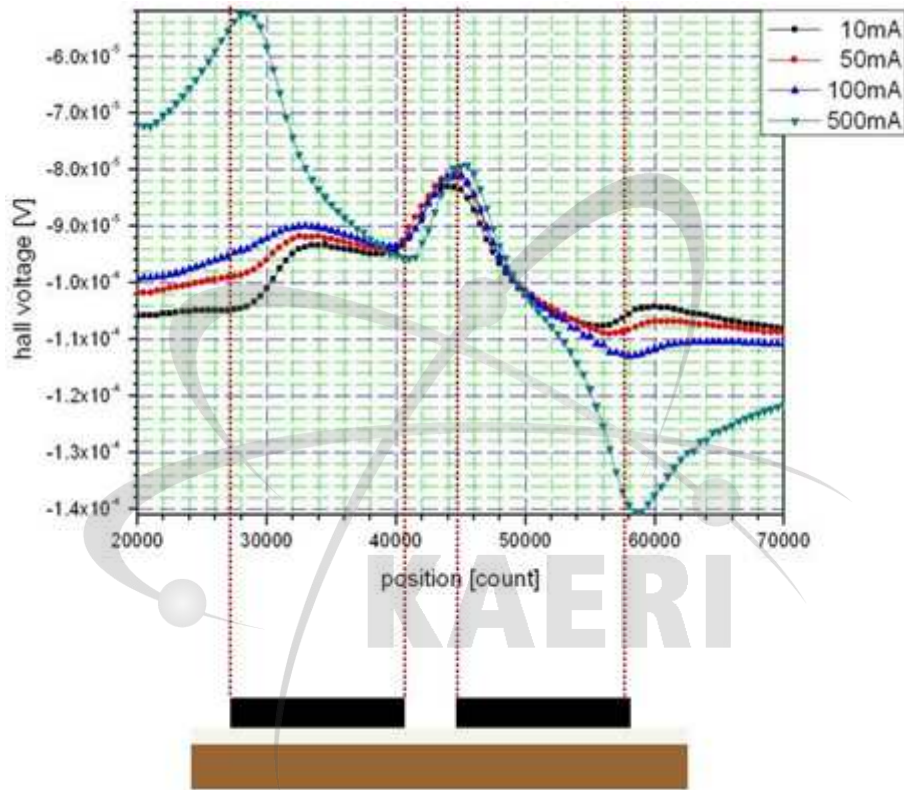


Fig. 3.3.11 인가 전류에 따른 표면 자기장 변화

이 두 실험에서 사용한 초전도 시료는 2개의 필라멘트로 되어 있으며, 각 필라멘트의 가로 폭은 약  $360 \mu\text{m}$  이며 폭과 폭 사이 간격은 약  $140 \mu\text{m}$ 이다.

Fig. 3.3.10과 Fig. 3.3.11의 그래프에서 필라멘트는 28,000 ~ 41,000 count, 45,000 ~ 58,000 count 사이에 위치하며, YBCO가 제거된 필라멘트 사이의 공백 부분은 41,000 ~ 45,000 count 이다.

xy 이송장치의 분해능이  $31 \text{ nm} / 1 \text{ count}$ 이므로, 필라멘트의 폭인 13,000 count는 약  $400 \mu\text{m}$ , 필라멘트 사이의 빈 공간인 4,000 count는 약  $120 \mu\text{m}$ 로 측정되었다.



### 3.3.4.4 역변환을 이용한 자기장 분포의 전류 변환

앞에서 소개한 역변환 관계식인 식 (52)을 이용하여, Fig. 3.3.10과 Fig. 3.3.11의 결과를 토대로 전류 분포를 알아보았다. 그 결과는 각각 Fig. 3.3.12와 Fig. 3.3.13과 같다.

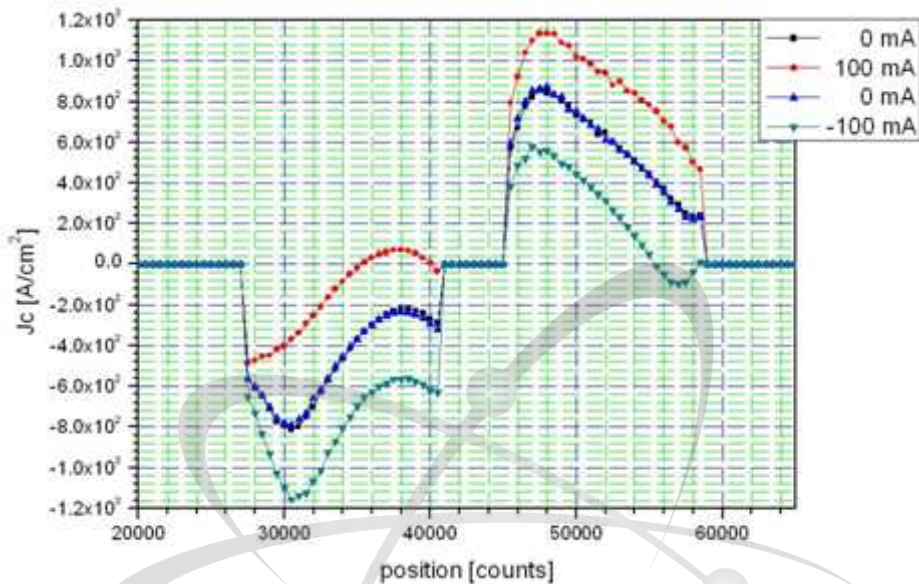


Fig. 3.3.12 인가 전류 이력에 따른 전류 분포

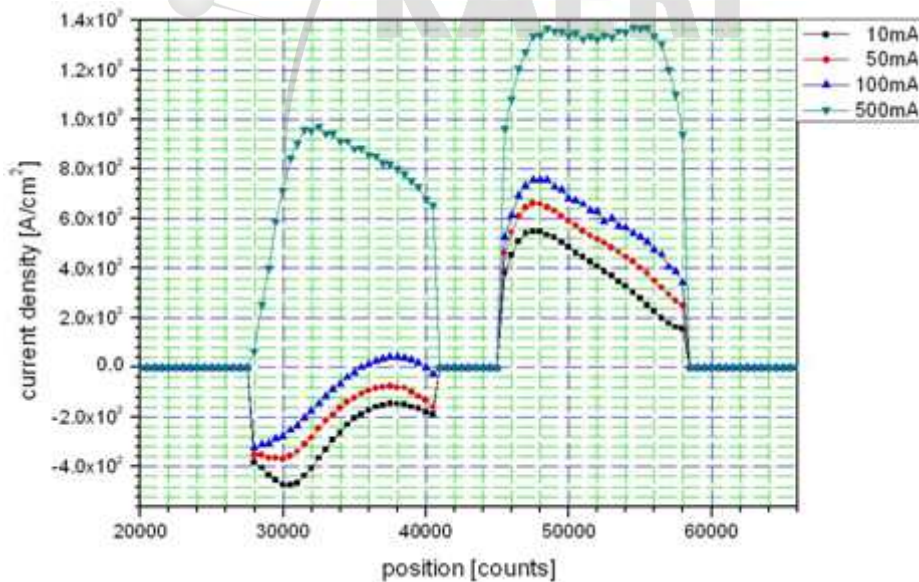


Fig. 3.3.13 분포 인가 전류에 따른 전류 분포

Fig. 3.3.12는 시료에 인가해준 전류 이력에 대한 전류 분포를 나타낸다. 처음 0 mA와 100 mA 이후 0 mA의 전류 분포가 큰 차이가 없는 것으로 보아, 인가 전류의

이력에 대한 시료의 전류 분포는 변화가 없는 것으로 보인다.

Fig. 3.3.12과 Fig. 3.3.13의 그래프에서 0 mA에 대한 두 필라멘트의 전류 분포는 부호가 반대이며, 이것은 차폐 전류(screen current)가 서로 반대 방향으로 흐르는 것을 의미한다.

시료에 인가해준 전류가 증가할수록 '+' 방향으로 전류 분포가 증가하여 최종적으로 인가 전류가 500 mA일 때, 차폐 전류의 영향으로 두 필라멘트의 전류 분포는 비대칭적인 값을 가진다.

### 3.3.4.5 시료의 2차원 구조 분석

이 실험에서는 3.3.4.2와 3.3.4.3에서 실시한 실험에 대해 자기장 분포를 2차원으로 확장하여 관측하였다.

데이터는 Servo motor를 이용하여 15.5  $\mu\text{m}$ 씩 이동하며 측정하였으며, 각 line scan은 30  $\mu\text{m}$  간격으로 이동 후 측정하였다.

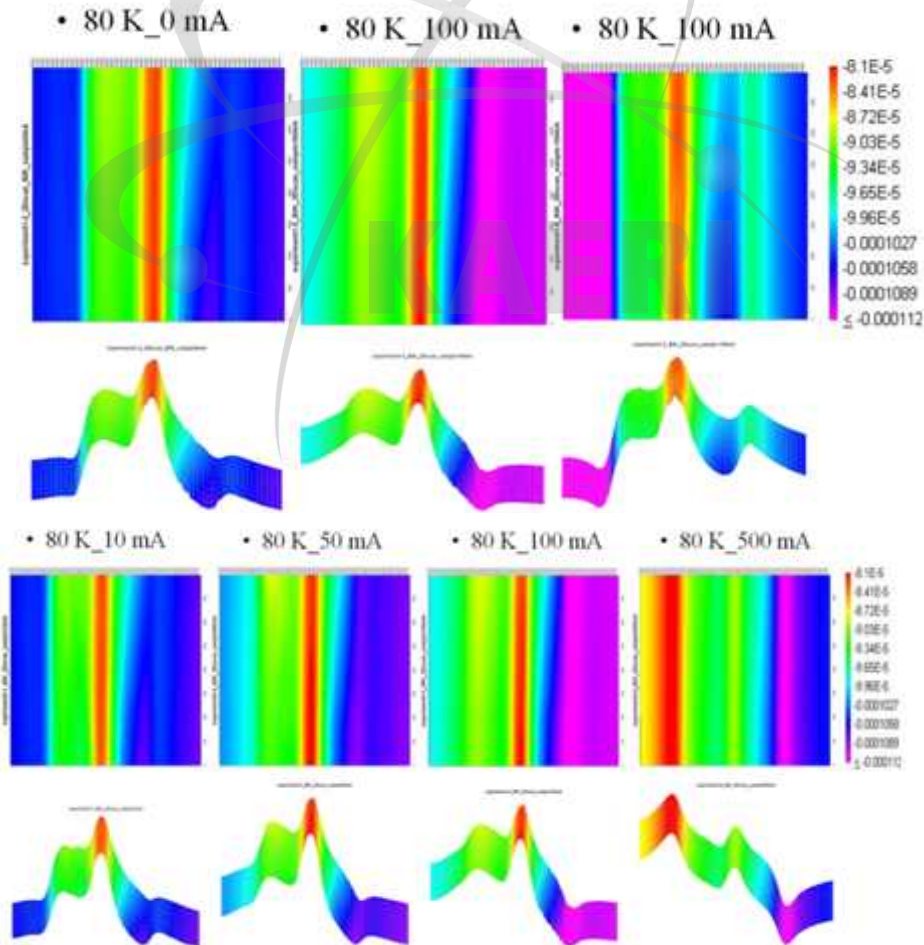


Fig. 3.3.13 2D scan of experiments 3.3.4.2 and 3.3.4.3

### 3.3.5 결론

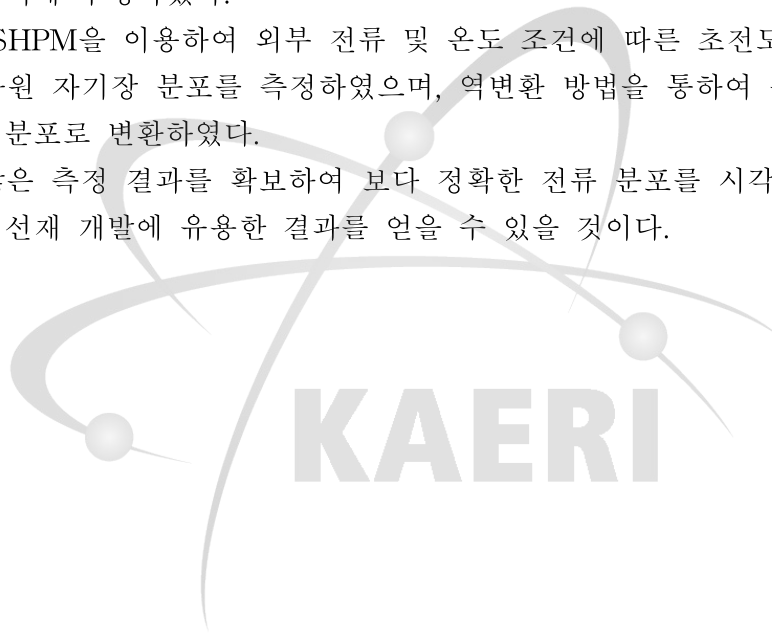
본 연구에서는 극저온에서 YBCO 초전도 선재의 전류 분포를 분석하기 위하여  $T=80$  K, 최대  $40\text{ mm} \times 40\text{ mm}$  크기의 시료를 분석할 수 있는 저온주사홀소자현미경을 제작하였다.

진공 용기는  $10^{-6}$  Torr의 안정된 진공상태와  $\pm 10$  mK의 온도 안정성을 유지한다. 또한 시료와 센서의 거리는  $\pm 80$  nm의 오차범위 내에서  $40\ \mu\text{m}$ 이내의 간격을 유지하면서 데이터 측정이 가능하다. 이러한 장치들로부터 보다 정확한 데이터를 얻기 위해 와전류 감쇠자를 이용하여 외부 진동을 최소화 하였다.

LT-SHPM을 PC로 제어하기 위해 Labview 프로그램을 이용하여 제어용 프로그램을 제작하였고 제작한 제어 프로그램을 이용하여 데이터 획득 및 처리, 시스템 제어 작업을 동시에 수행하였다.

이러한 LT-SHPM을 이용하여 외부 전류 및 온도 조건에 따른 초전도 시료 표면의 1차원 및 2차원 자기장 분포를 측정하였으며, 역변환 방법을 통하여 측정된 데이터 값을 전류의 분포로 변환하였다.

앞으로 더 많은 측정 결과를 확보하여 보다 정확한 전류 분포를 시각화, 수식화 한다면 초전도 선재 개발에 유용한 결과를 얻을 수 있을 것이다.



## 제 4 장 연구개발목표 달성도 및 기여도

### 4.1 연구개발목표 달성도

구분	년도	세부연구목표	달성도연구개발결과	달성도 (%)
1차 년도	2007	중성자 조사가 임계온도 변화에 미치는 효과 분석	각종 초전도 재료의 임계온도 변화를 정밀도 0.1 K까지 분석함	100
		중성자 조사가 비저항 변화에 미치는 효과 분석	초전도 재료의 비저항의 온도의존성을 측정하였고 중성자 조사 이 비저항의 변화를 분석함	100
		중성자 조사가 임계전류의 자기장 의존성에 미치는 효과 분석	각종 온도에서 자기 모멘트의 자기장 의존성을 측정하여 임계전류가 외부 자기장에 따라 변화하는 현상을 분석함	100
		중성자 조사가 $H_{c2}$ 변화에 미치는 효과 분석	자기 모멘트의 자기장 의존성으로부터 $T_c(H)$ 를 측정하여 $H_{c2}$ 를 분석함	100
		중성자 조사가 Irreversibility line의 변화에 미치는 효과 분석	자기 모멘트의 자기장 의존성으로부터 $\Delta M=0$ 이 되는 자기장을 $H_{irr}$ 로 분석함	100
2차 년도	2008	중성자 조사에 의한 벌크, 단결정 및 선재의 초전도 물성 변화 분석	중성자 조사에 의한 $MgB_2$ 벌크, 단결정 및 선재의 초전도 물성 변화를 비교 분석함	100
		초전도 물성의 각도의존성 연구	YBCO 단결정의 임계전류의 각도의존성 측정함	95
		저온홀소자현미경을 이용하여 77 K에서 초전도체의 전·자기적 특성을 연구	77 K에서 YBCO, SmBCO 초전도 재료의 임계전류 및 자기이력손실의 공간적 분포를 분석함	100
3차 년도	2009	중성자 조사에 의한 벌크, 단결정 및 선재의 초전도 물성 변화 분석	77 K에서 YBCO, SmBCO 초전도 재료의 임계전류 및 자기이력손실의 공간적 분포 분석함	100
		저온홀소자현미경을 이용하여 5 K에서 초전도체의 전·자기적 특성을 연구	$MgB_2$ 초전도 선재의 임계전류 및 자기이력손실의 공간적 분포 분석 여부	95
		최적의 피닝센터 발생 방법을 제안하고 메카니즘 분석	중성자 조사방식의 최적화 조건을 분석함	90



## 4.2 연구개발목표의 기여도

### 4.2.1 기술적 측면

- 중성자 조사를 통한 고온초전도 재료의 물성을 향상시킬 수 있는 원천기술을 확보
- NbTi이나 Nb<sub>3</sub>Sn 초전도선재를 대체할 수 있을 것으로 기대되는 MgB<sub>2</sub> 선재의 고자기장 환경에서의 초전도 물성을 향상시킬 수 있는 산업적으로 경제성 있는 최적의 중성자 조사 방식 개발
- 상용화된 저온초전도 선재의 물성 향상을 위한 연구 기반 조성에 기여

고온초전도체의 상용화를 저해하고 있는 중요한 요소로 높은 고온초전도 선재의 제작 단가와 고온초전도의 임계전류 특히 자기장환경과 수송전류가 흐르고 있는 상황에서 임계전류의 급격한 감소와 교류 손실 등을 꼽을 수 있다. 본 연구에서 중성자 조사를 통한 고온초전도 재료의 물성을 향상시킬 수 있는 원천기술을 확보하는데 기여하였다.

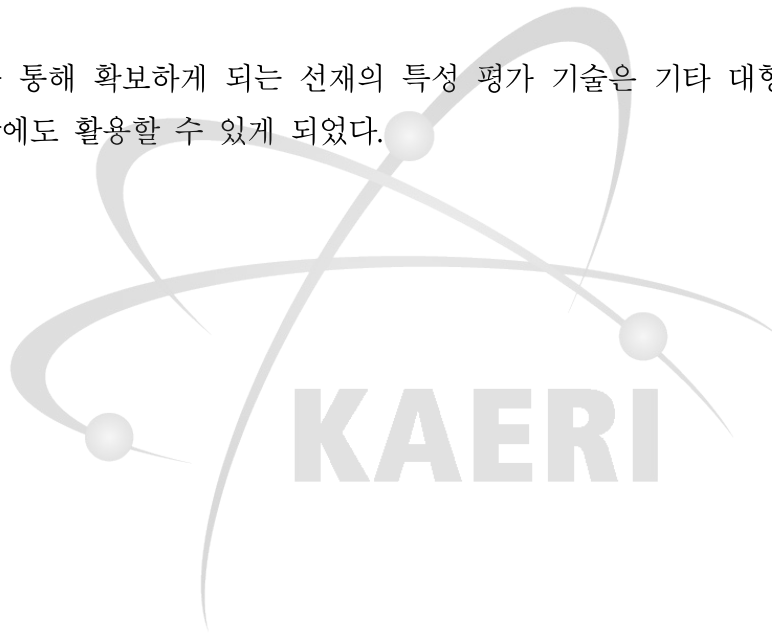
또한 5 K 부근의 헬륨 온도 영역에서 기존의 NbTi이나 Nb<sub>3</sub>Sn 초전도선재를 대체할 수 있을 것으로 기대되는 MgB<sub>2</sub> 선재의 고자기장 환경에서의 초전도 물성을 향상시킬 수 있는 산업적으로 경제성 있는 최적의 중성자조사 방식을 찾아내고자 한다. MgB<sub>2</sub> 선재의 제작기술을 국내 초전도 선재를 제작하는 산업분야에 이전할 수 있을 것이다. 이와 아울러 Nb<sub>3</sub>Sn과 같은 이미 상용화된 저온초전도 선재의 물성 향상을 위한 연구의 기반을 조성하는 데에도 기여하였다.

#### 나. 경제·산업적 측면

- 대용량 전력분야의 응용에 이용되는 고기능성 고온초전도 및 MgB<sub>2</sub> 초전도 선재와 초전도 재료를 제작할 수 있는 원천기술 확보하는데 기여하였다.
- 국내의 초전도 선재 산업체에 당해 기술의 이전을 통한 국제적 수준의 초전도 선재 개발 능력 확립에 기여하였다.

## 제 5 장 연구개발결과의 활용계획

- 국내에서 생산하는 초전도 선재 및 초전도 재료의 특성을 검증하는 기관으로 위치를 확보하게 되고 향후 국내 초전도체의 산업화에 기여하는 물성 연구기관으로 역할을 수행할 수 있게 되었다.
- LTSLM 및 LTSHPM을 이용하여 임계온도와 임계전류의 공간적 변화 및 초전도체 내부에서 전류가 흘러가는 path 등에 대한 미시적 초전도 특성을 정밀하게 분석 하는 시스템을 확보 하였고 이를 이용한 정밀 물성연구 수행에 활용할 것이다.
- 본 과제를 통해 확보하게 되는 선재의 특성 평가 기술은 기타 대형 초전도 장치의 개발에도 활용할 수 있게 되었다.

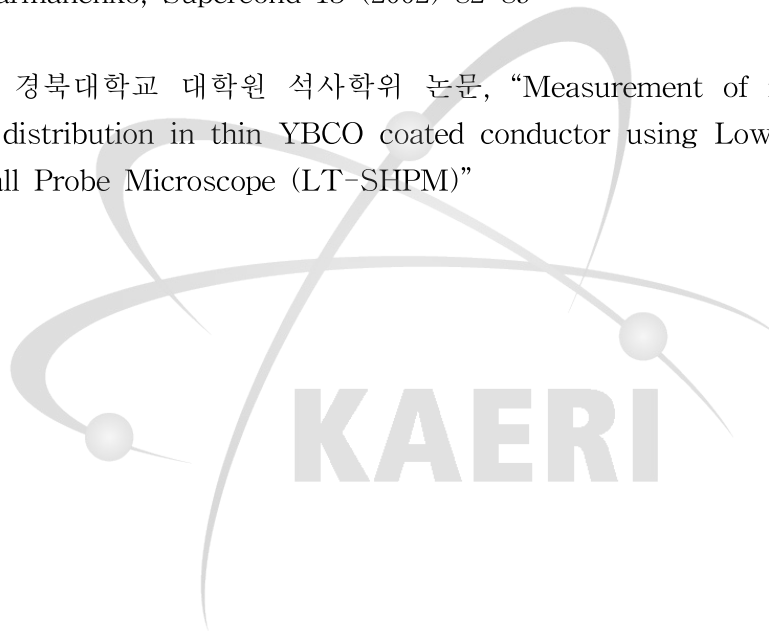


## 제 6 장 참고문헌

- [1] R. Gross, M. Hartmann, K. Hipler, R. P. Huebener, F. Kober, and D. Koelle, IEEE. Trans. on Magnetics, vol. 25, no. 2 2250 (1989)
- [2] N. Dieckmann, A. Bock, and U. Merkt, Appl. Phys. Lett. 68, 3626 (1996)
- [3] D. Abraimov, A. G. Sivakov, A. V. Lukashenko, M. V. Fistul, P. Muller and A. V. Ustinov, IEEE. Trans. on Appl. Supercond. vol. 11, no. 1 3170 (2001)
- [4] T. Takanobu Kiss, Masayoshi Inoue, Minoru Yasunaga, Hideaki Tokutomi, Yasuhiro Iijima, Kazuomi Kakimoto, Takashi Saitoh, Yoshitaka Tokunaga, Teruo Izumi, and Yuh Shiohara, IEEE. Trans. on Appl. Supercond., vol. 15, no. 2 3656 (2005)
- [5] L. B. Wang, M. B. Price, C. Kwon, and Q. X. Jia, IEEE. Trans. on Appl. Supercond., vol. 13, no. 2 2611 (2003)
- [6] C. Kwon, L. B. Wang, S.Seo,B.H.Park,andQ.X.Jia,IEEE.Trans.onAppl.Supercond.,vol.13,no.22894(2003)
- [7] L. B. Wang. M. B. Price, J. L. Young, C. Kwon, Timothy J. Haugen, Paul N. Barnes, Physica C 405, 240 (2004)
- [8] L. B. Wang, P. Selby, C. Khanal, George Levin, Timothy J. Haugen, Paul N. Barnes, and C. Kwon, IEEE. Trans. on Appl. Supercond., vol. 15, no. 2, 2950 (2005)
- [9] L. B. Wang, M. B. Price, J. L. Young, C. Kwon, George A. Levin, Timothy J. Haugen, Paul N. Barnes, Physica C 419, 79 (2005)
- [10] E. T. Swartz and R. O. Pohl Rev. Mod. Phys. 61, 605 (1989)
- [11] Nahum M, Verghese S, Richards P L and Clar K Appl. Phys. Lett. 59, 2034 (1991)
- [12] J. R. Clem and R. P. Huebener J. Appl. Phys. 51, 2764 (1980)

- [13] R. Gross and D. Koelle, Rep. Prog. Phys. 57, 651 (1994)
- [14] 박상국, 경북대학교 대학원 석사학위 논문, “저온 레이저 주사 현미경을 이용한 고온 초전도체의 분극질성 연구”
- [15] M. K Wu, JR. Ashburn, C. J. Torng, P. H. Hor, R. L. Meng, L. Gao, Z. J. Huang, V. Q. Wang and C. W. Chu, Phys. Rev. Lett., 58, 908 (1987)
- [16] C. P. Bean. Phys. Rev. Lett 8, 250 (1962)
- [17] C. P. Bean. Rev. Mod. Phys. 36, 31 (1964)
- [18] E. Zeldov, J. R. Clem, M. McElfresh and M. J. Darwin, Phys. Rev. B49, 9802 (1994)
- [19] J. McDonald and J. R. Clem, Phys. Rev. B53, 8643 (1996)
- [20] E. H. Brandt and M. V. Indenbom, Phys. Rev B 48, 12893 (1993)
- [21] E. H. Brandt, Phys. Rev. B 49, 9024 (1994)
- [22] Th. Schuster, M. V. Indenbom, M. R. Koblishka, H. Kuhn, and H. Kronmüller, Phys. Rev. B 49, 3443 (1994)
- [23] T. H. Johansen, M. Baziljevich, H. Bratsberg, Y. Galperin, P. E. Lindelof, Y. Shen and P. Vase, Phys. Rev. B 54, 16264 (1996)
- [24] Y. Mawatari, Phys. Rev. B 54, 13215 (1996)
- [25] A. V. Bobyl, D. B. Shantsev, Y. M. Galperin and T. H. Johansen. Phys. Rev. B 63, 184510 (2001)
- [26] J. Kvitkovič, M. Polak, Physica C 372-376 (2002) 1012-1015
- [27] J. Kvitkovič, M. Majoros, B. A. glowachi M. Apperley, Physica C 370 (2002) 187-196

- [28] M. Polák, L. Krempaský, S. chromic, D. Wehler, and Moenter, B. Physica C 372-376 (2002) 1830-1834
- [29] S. Stavrev, B. Dutoit, and F. Grilli, IEEE Trans. Appl. Supercond. 13, 3807 2003
- [30] H. P. Wiesinger, F. M. Sauerzopf and H. W. Weber, Physica C 203 (1992) 121-128
- [31] A. V. Bobyl, D. V. Shantser, Y. M. Galperin, T. H. Johansen, M. Baziljerich and S. F. Karmanenko, Supercond 15 (2002) 82-89
- [32] 이상봉, 경북대학교 대학원 석사학위 논문, “Measurement of magnetic flux and current distribution in thin YBCO coated conductor using Low Temperature Scanning Hall Probe Microscope (LT-SHPM)”



서 지 정 보 양 식

수행기관보고서번호	위탁기관보고서번호	표준보고서번호	INIS 주제코드
	KAERI/CM-1314/2009		
제목 / 부제			
중성자 조사에 의해 변화하는 초전도 재료의 전자기적 특성 연구			
연구책임자 및 부서명		이 형 철 / 경북대학교 물리및에너지학부	
연구자 및 부서명		윤원식, 이남미, 김종만, 이상봉 / 경북대학교 물리및에너지학부	
출판지	대전	발행기관	한국원자력연구소
페이지	68p.	도표	있음( o ), 없음( )
발행년	2010년 6월		
크기	Cm.		
참고사항			
공개여부	공개( o ), 비공개( )		보고서종류
비밀여부	대외비( ), — 급비밀		
연구수행기관	계약 번호		
초록 (15-20줄내외)			
<p>YBCO, REBCO 벌크 및 단결정 시료 그리고 MgB<sub>2</sub> 벌크 및 단결정 시료에 대한 초전도도 특성을 중성자 조사 전후에 비교 분석하였다. 또한 중성자 조사에 의한 초전도 재료의 전자기적 특성 변화를 저온홀소자현미경(LTSLM) 및 주사 SQUID 현미경(LTSHPM)을 이용하여 분석하여 초전도 재료의 전자기적 특성들이 중성자 조사에 의해 변화하는 현상을 분석하였다. 이를 바탕으로 중성자 조사에 의한 임계전류밀도 등 초전도체의 전자기적 특성이 변화하는 현상을 체계적으로 분석함으로써 초전도체의 대용량 전력분야 응용에 적합한 인위적 피닝 센터를 생성할 수 있는 공정 개발에 기여하였다.</p>			
주제명키워드 (10단어내외)	초전도 물질, MgB <sub>2</sub> , 중성자 조사, 전자기적 특성, 임계전류밀도		

BIBLIOGRAPHIC INFORMATION SHEET					
Performing Org. Report No.	Sponsoring Org. Report No.		Standard Report No.	INIS Code	Subject
	KAERI/CM-1314/2009				
Title/ Subtitle	Study on the improvement of electromagnetic properties of superconducting materials by neutron irradiation				
Project Manager and Department	Hyeong-Chel Ri / Dept. of Physics Kyungpook National University				
Researcher and Department	W.S. Yoon, N.M. Lee, J.M. Kim. S.B. Lee / Dept. of Physics Kyungpook National University				
Publication Place		Publisher	KAERI	Publication Date	June 2010
Page	68p.	Ill. & Tab.	Yes( o ), No ( )	Size	Cm.
Note					
Open	Open( o ), Closed ( )				
Classified	Restricted( ), Document		—Class	Report Type	
Performing Org.			Contract No.		
Abstract (15-20 Lines)					
<p>The superconducting properties of as-grown and neutron irradiated MgB<sub>2</sub> were characterized. The analysis is performed by means of SQUID magnetometry. Low temperature Scanning Laser Microscopy (LTSLM) and Low temperature Scanning Hall Probe Microscopy (LTSHPM) were carried out to reveal the spatial distribution of the local resistive transition temperature and the local current density in commercial YBCO coated conductors near the superconducting transition.</p> <p>Neutron irradiation increased the critical current density of MgB<sub>2</sub> at high magnetic field. Using LTSLM and LTSHPM the current path in YBCO coated conductors of different patterns could be directly imaged.</p>					
Subject Keywords (About 10 words)	superconducting materials, MgB <sub>2</sub> , neutron irradiation, electromagnetic properties, critical current density				