

최 중  
결과보고서

고온초전도 기술개발  
Development of High  $T_c$   
Superconductivity Technology

고온초전도 디바이스 개발 및 응용  
Development and Application of High  $T_c$   
Superconducting Devices

연구기관  
LG 종합기술원

과학기술처

# 제 출 문

## 과 학 기 술 처 장 관 귀하

본 보고서를 “고온초전도 디바이스 개발 및 응용” 과제의 최종 결과보고서로 제출합니다.

1997년 4월

주관연구기관명 : LG 종합 기술원

총괄연구책임자 : 오 병 두

연구 원 : 최 영 환

문 승 현

김 홍 득

민 병 철

위탁연구기관명 : 서울대학교

위탁연구책임자 : 김 정 구

# 요 약 문

## 1. 제 목

고온초전도 디바이스 개발 및 응용

## 2. 연구개발의 목적 및 중요성

임계온도가 액체질소의 비등점(77 K)이 넘는 산화물 고온초전도체의 출현의 초전도체의 실용화에 커다란 파급효과를 주었다. 액체질소는 냉각능력에 있어 액체 헬륨보다 약 100배 크고 가격은 1/100에 불과하여, 초전도체의 실용 가능성이 아주 많아졌다. 그리고 고온초전도체는 응용에 중요한 변수인 임계전류밀도( $J_c$ )와 임계자기장( $H_{c2}$ )이 내재적으로 매우 큰 값을 갖고 있다. 그러나, 고온초전도체를 응용하기 위하여는 몇가지 물성의 문제를 해결해야 한다. 고온초전도체가 기존의 저온초전도체와는 달리 응용을 하는데 문제점을 야기시키는 원인은 기본적으로 고온초전도체와 저온초전도체의 물질특성 차이에서 찾을 수 있다. 저온초전도체는 3차원 (isotropic한) 구조임에 비하여, 현재까지 발견된 여러가지 구리 산화물 고온초전도체는 변형된  $ABO_3$  perovskite구조로 Cu-O 평면을 기본으로 하는 준 2차원의 평면구조를 가지고 있으며, 이러한 구조적인 특징 때문에 강한 이방성을 나타내게 된다. 그리고, 초전도성을 나타내는 coherence length가 저온초전도체에 비하여 훨씬 짧은 약 10 Å 정도여서 좋은 특성을 갖는 조셉슨 터널 접합(Josephson tunnel junction)의 제작이 어렵다.

선재의 경우와는 대조적으로 박막을 이용한 소규모의 응용은 고온초전도체의 기계적 특성에 거의 영향을 받지 않고, 양질의 박막제작이 가능하므로 비교적 빠른 시일내에 가능하리라 생각된다. 전 세계적으로 뇌파나 심자도와 같은

미약한 자기장을 측정할 수 있는 가장 고감도의 자기센서인 SQUID와, 위성통신과 무선통신에 사용하기 위한 저손실 저잡음 high Q 특성의 microwave device의 연구가 가장 활발히 진행되고 있다.

소규모 소자 응용을 위해서 선결해야할 문제점은 소자제작에 적합한 임계 특성과 표면 특성이 우수한 박막의 제작공정 확립, 다층 박막 제작공정의 확립, 미세 pattern 공정의 확립, 재현성 있는 Josephson 접합 제작 및 양자효과를 이용한 초전도 소자의 이해와 설계기술등을 필요로 한다.

본 연구에서는 고온초전도체의 디바이스 개발 및 응용을 위하여 PLD에 의한 양질의 산화물(고온초전도체 YBCO, NBCO, 절연체 STO 등) 박막의 *in-situ* 다층 증착기술을 확립하였고, 이러한 박막을 이용하여 액체질소온도에서 작동하는 저잡음 dc SQUID의 개발하였다. 또한 손쉽게 SQUID의 유효면적을 늘일 수 있는 directly coupled SQUID를 설계, 제작하여 자기감도를 증가시켰으며, 이러한 SQUID 자속계를 실제 측정에 사용할 수 있는 FLL electronics의 개발에 성공하였다. 이 SQUID 자속계 시스템을 이용하여 심자도 측정 연구를 수행하였으며, 자기차폐가 안된 환경에서의 SQUID 응용에 관한 연구도 병행하였다. 이외에 새로운 barrier 물질을 사용한 ramp-edge 조셉슨 접합의 개발에 성공하였다. 이러한 응용연구를 통하여 고온초전도체의 실용화를 도모하였다.

### 3. 연구 개발의 내용 및 범위

본 연구과제에서 수행한 연구개발의 내용 및 범위는 양질의 산화물 박막 증착 기술과 초전도 소자 설계 기술을 바탕으로 directly coupled SQUID의 개발, FLL electronics를 포함한 SQUID 자속계 개발, SQUID 자속계를 이용한 심자도 측정연구, 자기차폐 안된 공간에서의 응용을 위한 3 SQUID gradiometer의

개발, 새로운 barrier를 이용한 액체질소 온도에서 작동하는 조셉슨 접합의 개발 등의 연구를 행하였다.

지금까지의 주요 연구 내용과 범위는 다음과 같다.

- ▷ Pulsed laser deposition 방법에 의한 양질의 산화물 박막 성장,  
(고온초전도 YBCO, NBCO, 부도체 STO등 포함한 다층박막)
- ▷ 고온초전도체 directly coupled SQUID 자속계의 제작 및 특성조사,
- ▷ SQUID 자속계 시스템 제작 및 이를 이용한 심자도 측정,
- ▷ Active noise compensation 연구와 3 SQUID gradiometer system 개발,
- ▷ 새로운 barrier 물질을 사용한 ramp-edge 조셉슨 접합의 개발.

#### 4. 연구개발 결과 및 활동 방안에 대한 건의

본 연구를 통하여 얻은 연구 결과를 요약하면 다음과 같다.

##### □ PLD 방법에 의한 양질의 산화물 박막 성장

- ▷ 다층 공정이 *in-situ*로 가능한 PLD system 설계 및 제작
- ▷ 소자 제작에 적합한 양질의 산화물 박막의 제작공정 확립
  - 고온초전도 YBCO :  $T_c > 90$  K,  $J_c > 5 \times 10^6$  A/cm<sup>2</sup> @ 77 K
  - NBCO :  $T_c > 93$  K,  $J_c > 2 \times 10^6$  A/cm<sup>2</sup> @ 77 K
  - 절연체 STO, barrier 산화물, YBCO등 5층의 epi 성장 성공.
- ▷ 미세 pattern 공정 : photo-lithography 및 Ar ion milling을 이용한  
1  $\mu$ m 수준의 미세 pattern 공정

##### □ 고온초전도 directly coupled SQUID의 제작 및 특성조사

- ▷ Bi-crystal 기판을 이용한 YBCO directly coupled SQUID 제작



: 1) 액체 질소 온도(77.4 K)에서 작동, 2) 높은 수율(>90%)

▷ Directly coupled SQUID의 전류 전압 특성 측정.

: 1) RSJ model을 따름(no leakage current), 2) Shapiro step 관측

▷ Directly coupled SQUID의 자속-전압 특성의 측정

: 1) 양자자속( $\Phi_0$ ) 주기의 정현파 관측, 2) 최대 진폭 30  $\mu\text{V}$  (@ 77 K)

3) 유효 면적  $A_{\text{eff}} > 0.2 \text{ mm}^2$ .

▷ FLL 구성에 의한 잡음특성 측정 저잡음 SQUID 확인.(@ 77 K)

: 자속잡음  $S_\Phi = 3.8 \times 10^{-11} \Phi_0^2/\text{Hz}$  (@ 10 kHz)

자기감도  $S_B^{1/2} = 0.9 \text{ pT}/\sqrt{\text{Hz}}$ (@ 1 Hz),  $59 \text{ fT}/\sqrt{\text{Hz}}$  (@ 10 kHz)

□ 고온초전도 SQUID 자속계 시스템 제작 및 심자도 측정

▷ Modulation 및 direct 방법에 의한 FLL control electronics 개발

▷ SQUID 저온 packaging 및 probe 시스템 제작

▷ 약하게 자기차폐된 환경에서 고온초전도 SQUID로 심자도 측정  
(국내최초)

▷ 자기차폐실에서 다채널로 심자도 측정 및 mapping

□ 3 SQUID gradiometer 제작 및 특성조사,

▷ Active noise compensation 방법으로 electronic gradiometer 구축

▷ Reference SQUID가 포함된 3 SQUID gradiometer 시스템 제작

: - 60 dB compensation, gradient signal 측정

▷ 비차폐 환경에서의 SQUID 응용연구 탐색

- 고온초전도 ramp edge 조셉슨 접합의 제작 및 특성조사,
  - ▷ NBCO 및 NCCO를 barrier 물질로 사용하는 ramp edge type의 조셉슨 접합 개발 성공
  - ▷ NBCO barrier 조셉슨 접합 : SNS proximity 이론을 따름.
    - : 1) interface resistance  $< 10^{-10} \Omega \text{cm}^2$ , 2) 77 K 이상에서 작동
    - 3) 균일성과 재현성 우수, 4) SQUID 제작 성공.

이러한 연구결과는 고온초전도체 소규모 소자의 응용에 기반이 되는 연구로 추후 고온초전도체 실용화에 토대가 되리라 예상된다.

# Summary

## 1. Project Title

Development and Application of High- $T_c$  Superconducting Devices

## 2. Objectives and Significance of the Project

One of the most important impact of the discovery of the high- $T_c$  superconductors is in applications, since the critical temperatures of high- $T_c$  superconductors are higher than the boiling point of liquid nitrogen which is cheap and easy to handle. The objective of this project is to establish the fabrication capability of some high- $T_c$  superconducting thin film devices such as SQUIDs and microwave filters as well as their applications.

To make the devices in the performance level we want, it is essential to have very high quality thin films. We choose the laser ablation method to grow thin films, which was proven to be the most effective way to produce small size YBCO thin films. We set up our own laser ablation system, and found the optimum conditions for YBCO and STO thin film deposition. We fabricated and characterized SQUIDs and microwave filters, which are expected to be applied at first among many kinds of devices to be made of high- $T_c$  superconducting YBCO thin films.

A dc SQUID is the most sensitive magnetic field detector in the world, and it is essentially a flux-to-voltage transducer. So, we can use SQUID to detect a very small magnetic flux change. Because of this characteristics,



SQUIDs can also be used to measure the various small physical quantities which can be converted to the flux change, for examples, tiny current and voltage, the displacement of the matter, electromagnetic waves of human brains and hearts, gravitational forces, etc. So SQUIDs have a wide range of applications, and they have a large potential to impact many fields of electronics, biomagnetism, geological survey, industry, as well as basic sciences.

The microwave passive devices made of superconducting materials have much superior properties - low loss, low noise, and high-Q value - with respect to normal metals. We expect that the microwave filters made of high- $T_c$  superconducting thin films will be used in the cellular base station as well as the communication satellite.

The discovery of the high- $T_c$  superconductors will enhance the use of these devices, because of the easy handling capability and the large heat capacity of liquid nitrogen boiled at 77 K compared to the liquid helium boiled at 4.2 K.

### **3. Contents and Scope of Research Activity**

On the basis of very high quality YBCO thin film growth technique, we fabricated and characterized some high- $T_c$  superconducting devices such as directly coupled SQUIDs. We developed magnetometers based on FLL electronics, MCG, 3 SQUID gradiometer for the application under unshielded environment. We also performed a study on the Josephson junction using a

new barrier material.

Contents of present research activity are as follows :

- ▷ High quality thin film growth by pulsed laser deposition method,  
(multi-layer thin films including high- $T_c$  YBCO, NBCO and  
insulating SrTiO<sub>3</sub> )
- ▷ Fabrication and characterization of High- $T_c$  directly coupled SQUID,
- ▷ SQUID magnetometer system and magnetocardiogram
- ▷ Study of active noise compensation and development of 3 SQUID  
gradiometer system
- ▷ Fabrication of ramp-edge Josephson junction using new barrier material

#### **4. Results and Suggestions for Application**

Main results obtained in this study may be summarized as follows :

- Thin film growth by PLD method
  - ▷ Design and set-up of multi-target laser ablation system for in-situ  
fabrication of multilayer films.
  - ▷ Optimization of the film deposition process for device fabrication
    - YBCO thin films :  $T_c > 90$  K,  $J_c > 5 \times 10^6$  A/cm<sup>2</sup> @ 77 K
    - NBCO thin films :  $T_c > 93$  K,  $J_c > 2 \times 10^6$  A/cm<sup>2</sup> @ 77 K
    - Epitaxial growth of 5 layers including insulating STO thin  
films, barrier oxide and YBCO.
  - ▷ Micro patterning process : 1  $\mu$ m patterning process by using

photo-lithography and Ar ion milling

□ Fabrication and characterization of YBCO directly coupled SQUID

▷ Fabrication of YBCO directly coupled SQUID on bicrystal substrates

- : 1) working at liquid nitrogen temperature (77.4 K),
- 2) high yield (>90%)

▷ Measurement of I-V characteristics of SQUIDs

- : 1) following RSJ model (no leakage current),
- 2) Shapiro steps

▷ Measurement of V- $\phi$  characteristics of SQUIDs

- : 1) sinusoidal SQUID output voltage with a  $\phi_0$  period,
- 2) maximum amplitude : 30  $\mu$ V (@ 77 K)
- 3) Effective area  $A_{\text{eff}} > 0.2 \text{ mm}^2$

▷ Confirmation of low noise SQUID by measurement in FLL mode at 77 K,

: Flux noise  $S_\phi = 3.8 \times 10^{-11} \phi_0^2 / \text{Hz}$  (@10 kHz)

magnetic field sensitivity  $S_B =$

$$0.9 \text{ pT} / \sqrt{\text{Hz}} (@1 \text{ Hz}), 59 \text{ fT} / \sqrt{\text{Hz}} (@10 \text{ kHz})$$

□ Fabrication of high- $T_c$  SQUID magnetometer system and application to magnetocardiogram

▷ development of FLL control electronics by direct or modulation

method

- ▷ low temperature packaging and probe system
- ▷ nation's first demonstration of MCG measurement under weakly shielded environment
- ▷ Multichannel MCG mapping in the shielded room
  
- Fabrication and characterization of 3 SQUID gradiometer
  - ▷ Electronic gradiometer by active compensation method
  - ▷ Gradiometer using 3 SQUID - 1 SQUID as a reference
    - : gradient signal measured with -60 dB compensation
  - ▷ Exploration of SQUID applications under unshielded environment
  
- Fabrication and characterization of ramp-edge Josephson junction
  - ▷ Successful fabrication of ramp-edge type Josephson junction using NBCO and NCCO
  - ▷ NBCO barrier junction follows SNS proximity theory
    - : 1) interface resistance  $< 10^{-10} \Omega\text{cm}^2$ , 2) operates above 77 K
    - 3) Good homogeneity and reproducibility, 4) usable as SQUID

The above results will provide the basis for the practical application of small sized high- $T_c$  superconducting devices in the future.



# CONTENTS

<b>Chapter 1. Introduction</b> .....	1
Section 1. Research background for HTS .....	1
Section 2. Objectives .....	4
Section 3. Contents and scope of research .....	5
<b>Chapter 2. HTS oxide thin film</b> .....	9
Section 1. HTS YBCO thin film .....	9
Section 2. HTS NBCO thin film .....	16
<b>Chapter 3. HTSC SQUID magnetometer</b> .....	35
Section 1. SQUID magnetometer .....	36
Section 2. Design and fabrication of directly coupled SQUIDs .....	45
Section 3. Measurement results of directly coupled SQUIDs .....	48
<b>Chapter 4. MCG Measurement System using SQUID</b> .....	61
Section 1. Design and construction of MCG system .....	61
Section 2. MCG measurement .....	70
Section 3. Multichannel MCG measurement and mapping .....	79
<b>Chapter 5. 3 SQUID gradiometer</b> .....	95
Section 1. Electronic gradiometer and active noise compensation .....	96



Section 2. 3 SQUID gradiometer system .....	101
<b>Chapter 6. HTS ramp edge Josephson junction .....</b>	<b>111</b>
Section 1. HTS Josephson junction .....	111
Section 2. Fabrication of edge type Josephson junction .....	117
Section 3. Characteristics of edge type Josephson junction .....	127
<b>Appendix .....</b>	<b>141</b>
A I . List of submitted patents .....	143
A II . List of published papers .....	146

# 목 차

<b>제 1 장 서 론</b> .....	1
제 1 절 고온초전도체 연구 현황 .....	1
제 2 절 연구 개발의 목적 .....	4
제 3 절 연구 내용 및 범위 .....	5
<b>제 2 장 산화물 고온초전도 박막</b> .....	9
제 1 절 YBCO 고온초전도 박막 .....	9
제 2 절 NBCO 고온초전도 박막 .....	16
<b>제 3 장 고온초전도 SQUID 자속계</b> .....	35
제 1 절 SQUID 자속계 .....	36
제 2 절 Directly coupled SQUID의 설계 및 제작 .....	45
제 3 절 Directly coupled SQUID 측정 결과 및 토의 .....	48
<b>제 4 장 SQUID 자속계를 이용한 심자도 측정장치</b> .....	61
제 1 절 SQUID 측정 시스템 설계 및 제작 .....	61
제 2 절 심자도 측정 .....	70
제 3 절 다채널 심자도 측정과 mapping .....	79
<b>제 5 장 3 SQUID Gradiometer</b> .....	95
제 1 절 Electronic gradiometer와 active noise compensation .....	96

제 2 절 3 SQUID gradiometer 시스템 제작 및 결과 .....	101
<b>제 6 장 고온초전도 ramp edge 조셉슨 접합 .....</b>	<b>111</b>
제 1 절 고온초전도 조셉슨 접합의 개요 .....	111
제 2 절 Edge type SNS 조셉슨 접합의 제작 .....	117
제 3 절 Edge type SNS 조셉슨 접합의 특성 .....	127
<b>부 록 .....</b>	<b>141</b>
A I. 특허출원 목록 .....	143
A II. 발표논문 목록 .....	146

# 제 1 장 서 론

## 제 1 절 고온초전도체 연구 현황

1986년 Bednorz와 Müller에 의해 절대온도 30 K 이상에서 초전도 상전이를 갖는 La-Ba-Cu-O의 산화물이 발견되면서부터 세계적으로 많은 관심이 집중되기 시작한 초전도 현상은, 일반적으로 금속 내의 전하 운반체인 전자가 이온의 열적운동에 의해 산란되기 때문에 생기는 전기저항이 없어지는 것으로, Kamerlingh Onnes에 의해 수은에서 최초로 발견된 1911년 이후 수십년 간 그 이유가 밝혀지지 않다가 1957년에 와서야 Bardeen, Cooper, Schrieffer 에 의해 제시된 BCS이론으로 비로소 이해가 되기 시작한 중요한 물리현상이다. 초전도 현상은 단지 새로운 물리현상이라는 의미보다 그 실제적인 응용에서도 큰 가치를 갖는데, 실제로 초전도체의 응용은 초전도 현상의 발견시부터 많은 관심을 끌어 왔고 저온 기술의 발전과 더불어 현실화되기도 했다. 80년대 이후 90년대 초반까지 지속되던 높은 임계온도를 갖는 고온초전도체 개발의 열기가 최근에 와서 안정되면서 대신 고온초전도체의 응용 분야는 차츰 정착되어 가고 있다.

미래의 전자산업에 있어 큰 역할을 할 기대되고 있는 초전도 소자는 조셉슨 접합을 기본 구성요소로 하여 SQUID 및 초고속 A/D 변환기를 비롯한 각종 초고속 switching 소자, 초고주파 mixer와 supercomputing을 위한 논리소자 등과 같이 반도체소자로 구현할 수 없는 분야에 이용할 수 있다. 조셉슨 접합은 두 초전도 물질 사이에 얇은 절연층을 끼워 넣은 형태의 구조로, 외부 전압 없이도 초전도 전류가 흐르는 소위 조셉슨 tunneling 현상이 발생하며 이때 접합

양단에 생기는 비선형적인 전류와 전압관계를 이용하는 것이 조셉슨 소자들이다. 저온 초전도체를 이용한 소자들은 이미 많은 연구가 되어 실용화된 것도 있지만 액체 헬륨을 이용한 저온환경에서 동작이 가능하기 때문에 뛰어난 성능에 비해 유지설비비가 많이 들어 널리 상용화되지는 못하고 있다. 77 K이상의 온도에서 동작이 가능한 고온초전도 소자는 이러한 측면에서 많은 주목을 받고 있는 것이다. 값이 싸고 효율이 좋은 액체질소를 사용할 수 있는 고온초전도체의 등장은 분명 앞서 이루어진 저온 초전도소자들의 연구결과를 토대로 실제적인 응용에 더욱 접근할 수 있게 될 것이다.

선재 응용의 경우와 달리 박막을 이용한 소규모의 응용은 고온 초전도체의 기계적 특성에 거의 영향을 받지 않고, 양질의 박막제작이 가능하므로 비교적 빠른 시일내에 실용화 가능할 것이다. 전세계적으로 뇌파나 심자도와 같은 미약한 자기장을 측정할 수 있는 가장 고감도의 자기 센서인 SQUID와 위성통신과 무선통신에 사용하기 위한 저손실 저잡음 high Q 특성의 microwave device의 연구가 가장 활발히 진행되고 있다. 그리고, three terminal device, IR detector, 초고속 컴퓨터와 digital signal process에 응용될 디지털 소자나 기존의 반도체 소자로는 도달할 수 없는 THz( $10^{12}$  Hz)부근 대역의 마이크로파 능동 소자에 대한 연구도 진행되고 있다. 이러한 소자의 장점은 거의 양자한계에 이르는 빠른 switching 시간 (~1 ps)과 작은 소비 전력(~10  $\mu$ W)으로, 현재 나와 있는 가장 빠른 HEMT 보다 10배 이상의 속도와 100배 이하의 소비전력을 나타내고 있다. 슈퍼 컴퓨터 등에서 반도체 소자도 액체질소 온도에서 작동시키는 경우가 있는 것을 생각할 때 고온초전도체의 개발여지에 따라 그 응용가능성은 대단히 크다.

SQUID의 감도를 결정하는 것은 SQUID에서 발생하는 잡음의 수준인데 그



원인은 크게 critical current fluctuation과 flux motion의 효과로 구별되며 고온 초전도체의 조셉슨 접합은 예상 작동온도인 77 K에서의 열적 요동으로 인해 기본적인 잡음 특성이 저온 초전도 접합에 비해 크기 때문에 감도역시 그 이상으로 작게 된다. 실제로 만들어지고 있는 고온의 SQUID 가운데 가장 감도가 좋은 것은 저온 SQUID의 감도에 비해 10배 작은 것으로 보고되어 있다. 현재 전세계적으로 가장 감도가 높은 고온 초전도 SQUID는 버클리 대학과 Conductus사에서 bicrystal 기판을 이용하여 만든 것으로 자기감도는 지구자기장의 10억분의 일에 해당하는 작은 자기장을 측정할 수 있는 정도이며 조금 더 개선하면 미약한 뇌파측정도 가능하다. 또한 이것은 보통의 심전도계로는 측정이 어려운 태아의 심장상태를 측정할 수 있는 생체자기 측정 시스템, 항공기나 정유탱커 내부의 균열을 탐지할 수 있는 비파괴 검사계, 자원 탐사등에 이용되는 계측기의 응용에도 충분한 감도이다. 심자계는 SQUID 자속계를 혈류의 변화에 의한 미세 자기신호 검출에 응용한 장치이다. 이를 이용하면 심전계로는 알아낼 수 없는 심장의 이상 증상을 진단할 수 있고 비접촉 방식의 잇점으로 수술전 단계에서 이상이 있는 위치를 미리 결정할 수 있다.

SQUID를 이용한 측정회로에서는 주로 flux locked loop의 방법을 기본으로 하는데 이는 feedback 코일을 이용해 주변 자기장의 변화와 상쇄되는 자기장을 만들어 SQUID 자체에는 일정한 자기장이 걸리도록 하는 것이다. 이러한 방법에서 feedback 코일에 주어진 전류로부터 SQUID 주변의 자기장의 크기를 알 수 있다. 이 방법은 미세한 자장의 변화를 검출하는데 적합하지만 주변 잡음 속에서 locked feedback loop를 형성하는데 필요한 저잡음의 전자회로 기술이 요구된다. SQUID의 신호는 자기장에 대해 주기적인 양으로 나타나므로 자기장의 급격한 변화에 대해 측정회로가 따라가지 못하면 절대변위 값을 측정할

수 없게 된다. 외부 잡음의 문제점을 회로를 통해 최소화하려는 시도에는 bias reversal방법과 자속변조 방식을 들 수 있다.

일반적인 환경에서 발생하는 잡음신호들은 그 크기가 보통의 심자신호보다 (약 100 pT/Hz<sup>1/2</sup>정도) 훨씬 크기 때문에 현재의 자체 기술로서는 FLL을 형성하려면 고가의 자기차폐된 공간에서 측정을 해야 한다. 이러한 사실은 SQUID의 일반적 상용화에 장애요인으로 반드시 극복해야하는 문제이다. SQUID를 자기차폐가 안된 일반공간에서 사용하기 위해서는 gradiometer의 제작이 필수적이다. 대체로 공간적으로 균일한 잡음원과는 달리 측정하고자 하는 대상으로부터의 자기장은 그 구배(gradient)가 크므로, SQUID gradiometer를 이용하면 크기가 더 큰 잡음원 속에서 원하는 신호만을 분리해 내는 것이 용이하다.

## 제 2 절 연구개발의 목적

소규모의 소자응용을 위해 선결되어야 할 문제점은 소자제작에 적합한 임계 특성과 표면 특성이 우수한 박막제작공정의 확립, 다층박막제작 공정의 확립, 미세 pattern 공정의 확립, 재현성 있는 Josephson 접합 기술의 확립 등으로, 이러한 기술의 바탕위에 SQUID, multi-level flux transformer, microwave filter 등의 제작과 성능 향상을 연구 개발의 목적으로 하였다.

이러한 목표를 정리하면

- ▷ PLD 방법에 의한 양질의 산화물 박막 제작,
- ▷ 고온초전도 directly coupled SQUID의 제작 및 특성조사,
- ▷ 고온초전도 SQUID 자속계 시스템 제작 및 심자도 측정,
- ▷ 3 SQUID gradiometer 제작 및 특성조사,

▷ 고온초전도 ramp edge 조셉슨 접합의 제작 및 특성조사,  
등이다.

## 제 3 절 연구 내용 및 범위

### 3-1. PLD 방법에 의한 산화물 박막의 제작

소규모 초전도 소자 제작을 위해서는 초전도 박막과 도체, 부도체 박막을 *in-situ*로 epi 성장을 시켜야 한다. 이는 1차년도 연구를 통해 이루어졌으며 지속적인 공정의 개발로  $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_7$  박막의 경우 증착율과 증착면적이 대폭 향상되었음에도 불구하고, 임계 전류 밀도가  $5 \times 10^6 \text{ A/cm}^2$  로 향상되었다. 또한 고온초전도 NBCO 박막의 증착조건 조사를 통하여 임계온도 93 K 이상의 박막의 합성에 성공하였으며, barrier 물질로 사용가능한 임계온도 26 K의 박막도 같은 target으로 합성에 성공하였다. 이상의 결과를 요약하면 다음과 같다.

▷ 다층 공정이 *in-situ*로 가능한 PLD system 설계 및 제작

▷ 소자 제작에 적합한 양질의 산화물 박막의 제작공정 확립

→ 고온초전도 YBCO :  $T_c > 90 \text{ K}$ ,  $J_c > 5 \times 10^6 \text{ A/cm}^2 @ 77 \text{ K}$

NBCO :  $T_c > 93 \text{ K}$ ,  $J_c > 2 \times 10^6 \text{ A/cm}^2 @ 77 \text{ K}$

→ 절연체 STO, barrier 산화물, YBCO등 5층의 epi 성장 성공.

▷ 미세 pattern 공정 : photo-lithography 및 Ar ion milling을 이용한

1  $\mu\text{m}$  수준의 미세 pattern 공정

### 3-2. 고온초전도 directly coupled SQUID의 제작 및 특성조사

SQUID(Superconducting QUantum Interference Device)는 주위 자기장의 변



화에 따라 주기함수적 전압을 발생시키는 일종의 transducer 역할을 하는 소자이다. BCS이론적인 해석으로부터 예측된 SQUID는 초전도체의 새로운 응용분야를 열었다. 이러한 SQUID는 모든 소자 가운데 가장 자기감도가 뛰어나기 때문에 실제적인 효용성이 있다. SQUID의 감도로는 지구자기장의 100억분의 1에 해당하는 자기장의 세기인 수 fT의 변화를 감지할 수 있다. 따라서 SQUID는 매우 미세한 자장의 정보를 필요로 하는 연구에서 큰 역할을 할 것이다. 본 연구에서는 손쉽게 유효면적을 증가시킬 수 있는 directly coupled SQUID의 설계, 제작 및 특성 측정을 행하였다. 다음은 그 결과에 대한 요약이다.

- ▷ Bi-crystal 기판을 이용한 YBCO directly coupled SQUID 제작
  - : 1) 액체질소온도(77.4 K)에서 작동, 2) 높은 수율(>90%)
- ▷ Directly coupled SQUID의 전류 전압 특성 측정.
  - : 1) RSJ model을 따름(no leakage current), 2) Shapiro step 관측
- ▷ Directly coupled SQUID의 자속-전압 특성의 측정
  - : 1) 양자자속( $\Phi_0$ ) 주기의 정현파 관측, 2) 최대 진폭 30  $\mu$ V (@ 77 K)
  - 3) 유효 면적  $A_{\text{eff}} > 0.2 \text{ mm}^2$ .
- ▷ FLL 구성에 의한 잡음특성 측정 저잡음 SQUID 확인.(@ 77 K)
  - : 자속잡음  $S_{\Phi} = 3.8 \times 10^{-11} \Phi_0^2/\text{Hz}$  (@ 10 kHz)
  - 자기감도  $S_B^{1/2} = 0.9 \text{ pT}/\sqrt{\text{Hz}}$ (@ 1 Hz),  $59 \text{ fT}/\sqrt{\text{Hz}}$  (@ 10 kHz)

### 3-3. 고온초전도 SQUID 자속계 시스템 제작 및 심자도 측정

고온초전도 SQUID의 실제 응용을 위해서는 자기감도가 높은 SQUID sensor의 개발은 물론 필수적이고, 이외에도 자기장의 변화를 선형화하여 읽고 control 할 수 있는 FLL electronics의 개발은 필수적이다. 따라서 저잡음의

FLL 회로 및 저온의 감지부, SQUID의 packaging등에 대해 자체 연구개발에 성공하여 고온초전도 SQUID 자속계 시스템을 제작하였다. 이러한 시스템을 이용하여 국내 최초로 고온초전도 SQUID를 이용한 심자도 측정에 성공하였다. 심장의 박동에 의한 혈류의 변화로 생기는 심자장은 신경을 통해 전달되는 심전신호에서 얻어지지 않는 심장의 이상현상을 검출하여 이 방면의 발전에 큰 기여를 할 것이다. 이보다 더 작은 자장신호인 뇌자계 역시 SQUID에 의해서만 가능한 분야이다. 이런 응용을 염두에 두고 자기차폐실에서 다채널로 심자도를 측정하고 위치에 따른 isofield contour map을 작성하여 의료기기로의 가능성을 보였다. 이러한 SQUID 응용에 대한 결과를 요약하면 다음과 같다.

- ▷ Modulation 및 direct 방법에 의한 FLL control electronics 개발
- ▷ SQUID 저온 packaging 및 probe 시스템 제작
- ▷ 자기차폐된 환경에서 고온초전도 SQUID로 심자도 측정(국내최초)
- ▷ 자기차폐실에서 다채널로 심자도 측정 및 mapping

### 3-4. 3 SQUID gradiometer 제작 및 특성조사

액체질소를 냉매로 사용할 수 있다는 큰 편의성을 갖는 고온초전도 SQUID의 보다 폭넓은 응용을 위하여서는 고가이고, 많은 공간을 차지하는 자기차폐실에서 비차폐공간에서의 사용으로 범위를 확장시켜야만 한다. 그러나 일반 환경은 비교적 큰 크기의 자기잡음으로 둘러싸여 있으므로 이를 위해서는 다양한 방법을 적용시켜야 한다. 그 방법중 한가지로 electronic gradiometer를 제작하면 대체로 공간적으로 균일한 자기잡음 속에서 원하는 자기원으로부터의 신호를 검출하는 것이 가능하리라 판단된다. 그러나 이 경우 회로에 의해 CMRR 및 balance가 결정되므로, 이 단점을 자기적으로 reference SQUID를 이용하여



해결할 수 있는 방법이 3 SQUID gradiometer 이다. 본 연구에서는 3 SQUID gradiometer 시스템을 설계, 제작하였으며 그 결과를 요약하면 다음과 같다.

- ▷ Active noise compensation 방법으로 electronic gradiometer 구축
- ▷ Reference SQUID가 포함된 3 SQUID gradiometer 시스템 제작  
: - 60 dB compensation, gradient signal 측정
- ▷ 비차폐 환경에서의 SQUID 응용연구 탐색

### 3-5. 고온초전도 ramp edge 조셉슨 접합의 제작 및 특성조사

고온초전도 조셉슨 접합은 SQUID, mixer, 초고속 switching 소자 등 고온초전도체의 소규모 응용에 필수적인 소자이다. 그러나, 고온초전도체는 기존의 tunnel barrier 방식의 접합(SIS) 제작이 아주 힘들어서, 현재 grain boundary (GB) 접합과 절연체 대신 normal layer를 끼워 넣는 SNS 형태의 접합이 주로 제작되고 있다. GB 형태의 고온초전도 조셉슨 접합은 SQUID등 접합의 개수가 적은 소자에는 적당하지만, 집적이 어렵고 접합의 위치가 제한되며 접합특성의 조절이 힘들어서 널리 응용하는데는 단점이 있다. 반면 SNS 접합은 현재까지도 적당한 barrier 물질의 개발이 문제가 되고 있다. 본 연구에서는 새로운 barrier 물질인 NBCO와 NCCO를 이용 우수한 접합의 제작에 성공하였다. 그 결과를 요약하면 다음과 같다.

- ▷ NBCO 및 NCCO를 barrier 물질로 사용하는 ramp edge type의 조셉슨 접합 개발 성공
- ▷ NBCO barrier 조셉슨 접합 : SNS proximity 이론을 따름.  
: 1) interface resistance  $< 10^{-10} \Omega \text{cm}^2$ , 2) 77 K 이상에서 작동  
3) 균일성과 재현성 우수, 4) SQUID 제작 성공.

## 제 2 장 산화물 고온초전도 박막

초전도 소자응용을 위하여 선결되어야할 최우선 조건은 양질의 고온초전도체 박막과 더불어, 소자제작에 필요한 절연막과 상전도막의 안정된 증착조건의 확립이다. 본 연구에서는 PLD (pulsed laser deposition) 방법을 사용하여 6개의 다른 종류의 박막을 in-situ로 성장시킬 수 있는 장치를 자체 제작하여, YBCO ( $Y_1Ba_2Cu_3O_{7-\delta}$ ) 등의 초전도체, STO( $SrTiO_3$ ) 등의 절연층 박막, 그리고, 상전도 박막에 대한 최적 증착조건을 확립시켰다. 제작된 박막의 특성조사는 XRD등을 이용한 구조분석과 주사전자현미경, AFM 등에 의한 표면미세구조 관측, 비저항의 온도의존성과 임계온도( $T_c$ ), 온도에 따른 임계전류밀도( $J_c$ ) 등의 전기적 성질 측정을 통하여 이루어졌다.

### 제 1 절 YBCO 고온초전도 박막

고온초전도체를 소규모 전자공학적인 소자로 이용할 때, 필수적인 것이 고온초전도 박막이다. 여러 고온초전도체 중 YBCO는 비교적 임계온도가 높고, flux 잡음이 적으며, 제작의 안정성이 높아 박막 소자 제작에 있어 가장 선호되고 있다. 소자의 용도에 따라 여러가지 형태로 박막을 제작하여 사용하지만 주로 양질의 박막이란 YBCO의 경우 다음과 같은 특성을 갖아야 한다. 임계온도가 90 K 이상으로 높아야 하고, 전이폭이 1 K 미만으로 좁아야 하며, 임계전류밀도가 77 K 에서  $10^6$  A/cm<sup>2</sup> 이상이어야 하며, 표면저항이 10 GHz 에서 300  $\mu\Omega$  이하로 작아야 하며, 비저항의 온도 의존성이 외삽(extrapolation)해서 0 을 지나는

등의 수송 특성을 나타내야 하며, 표면 거칠기가 10 nm 미만이고, 작은 구멍이나 알갱이가 없는 평탄한 표면, grain boundary 가 없고, 결함수가 적으며, 결정성이 우수한 epitaxial 성장한 박막을 말한다.

이미 1차년도에 YBCO 박막의 최적화를 시도하여 양질의 박막의 제작에 성공하였으나, 보다 증착율이 높고 넓은 면적에 대하여 균일한 박막의 성장을 목적으로 증착 조건의 개선을 추진하였다. 주된 개선점은 KrF excimer laser beam을 좌우로 0.5° scan하며 증착하도록 시스템을 바꾼 것이다. 이를 통하여 균일하게 증착할 수 있는 면적이 넓어지는 것은 물론 laser beam이 타겟에 조사되는 면적이 커져서 타겟을 효율적으로 사용하게 되어 laser의 repetition rate을 기존의 5 Hz에서 10 Hz로 두배 높게 사용할 수 있었다. 따라서 이에 따른 최적조건을 새로 조사하였다. 최적 조건은 앞에 나열한 소자제작에 적합한 박막이 제작되도록 기판온도( $T_{sub}$ ), 산소분압( $P_{O_2}$ ), 타겟과 기판간의 거리( $d_{t-s}$ ), laser energy density등을 변화시키며 박막을 제작한 후, 저항의 온도의존성, XRD, SEM을 통하여 일차적으로 특성을 조사하였고, 어느 정도의 최적화가 이루어진 후에는 AFM, 임계전류밀도( $J_c$ ) 특성을 측정하여 최적 조건을 확립시켰다.

최적화에 사용된 변수를 정리해보면 다음의 표 2-1-1과 같고, 기판은 소자 제작에 사용되는 STO ( $SrTiO_3$ )(100)을 사용하였다. 최적화된 박막의 성질을 살펴보면 XRD  $\theta$ - $2\theta$  scan의 경우 (00 $l$ ) peak만 나타내어 c축이 기판에 수직하게 성장하였음을 확인할 수 있었고(Fig. 2-1-1(a)),  $\phi$  scan을 한 경우 기판과 align된 4-fold symmetry를 나타내어 epitaxial 성장을 하였음을 확인할 수 있었다. 또한, 기판의 영향이 없는 (005) peak에 대하여 X-ray rocking curve를 조사해 본 결과(Fig. 2-1-1(b)) 반치폭(F.W.H.M)이 0.09° 를 나타내어서 결정성이 대단히 우수한 박막이 성장하였음을 확인할 수 있었다.



표 2-1-1. YBCO 박막 최적화를 위한 증착조건

laser energy density	1 ~ 4 J/cm <sup>2</sup>
laser repetition rate	10 Hz
산소압력(P <sub>O<sub>2</sub></sub> )	100 ~ 1000 mTorr
기판온도(T <sub>sub</sub> )	650 ~ 850 °C
타겟, 기관간의 거리(d <sub>t-s</sub> )	4 ~ 7 cm
냉각시 산소 압력	1 ~ 600 torr

한편 이러한 XRD 특성을 나타내는 최적화된 YBCO 박막의 표면구조를 SEM으로 조사해본 결과 일반적으로 PLD 박막의 문제점으로 제기되는 boulder의 경우 아주 낮은 밀도( $<5 \times 10^4$  개/cm<sup>2</sup>)로 나타나 다층박막 제작에도 적합한 우수한 박막으로 나타났으며, boulder 외에는 아무런 표면구조를 관측할 수 없는 매우 평탄한 박막으로 판정되었다.(Fig. 2-1-2) 따라서 이 박막의 표면미세구조를 AFM (atomic force microscope)으로 조사해본 결과 rms 표면거칠기는 2 nm 이하로 대단히 우수한 특성을 보였다.

대체적으로 표면의 morphology와 결정성이 대단히 우수한 박막이 반드시 이상적인 초전도 특성을 나타내는 것은 아니다. 그러나, 본 연구에서 최적화된 YBCO 박막의 경우 그 전기적 특성을 조사해본 결과, 상온 비저항값은 150  $\mu\Omega$ -cm 정도로 단결정의 경우와 유사하게 나타났으며, 저항의 온도의존성에서 저항의 기울기(R(300K)/R(100K))는 3 이상, 온도에 따른 기울기가 선형인 부분을 외삽할(extrapolate) 경우 R축과의 절편이 0, 임계온도 T<sub>c</sub>~91K,  $\Delta T_c$ ~0.5 K의 거

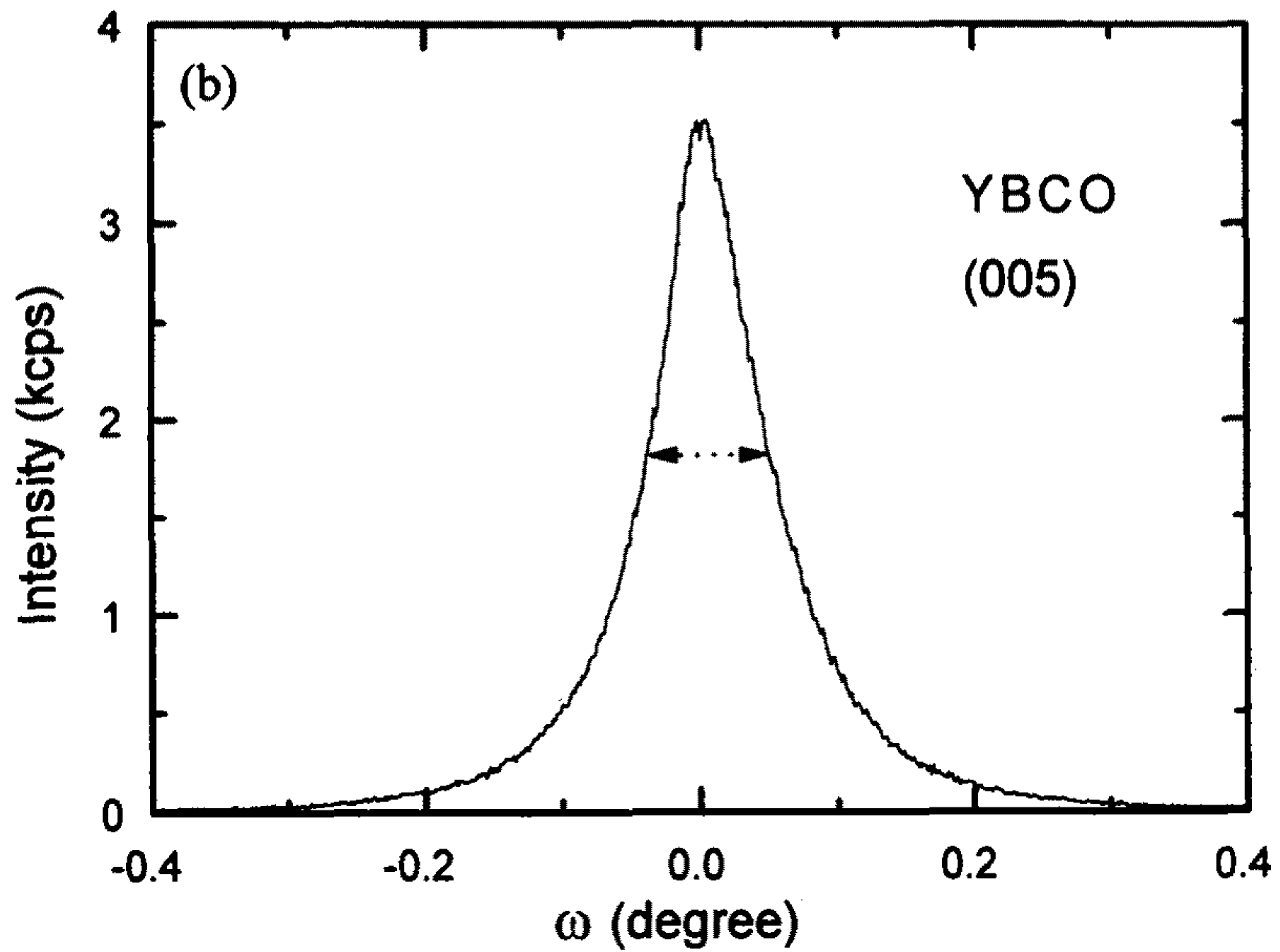
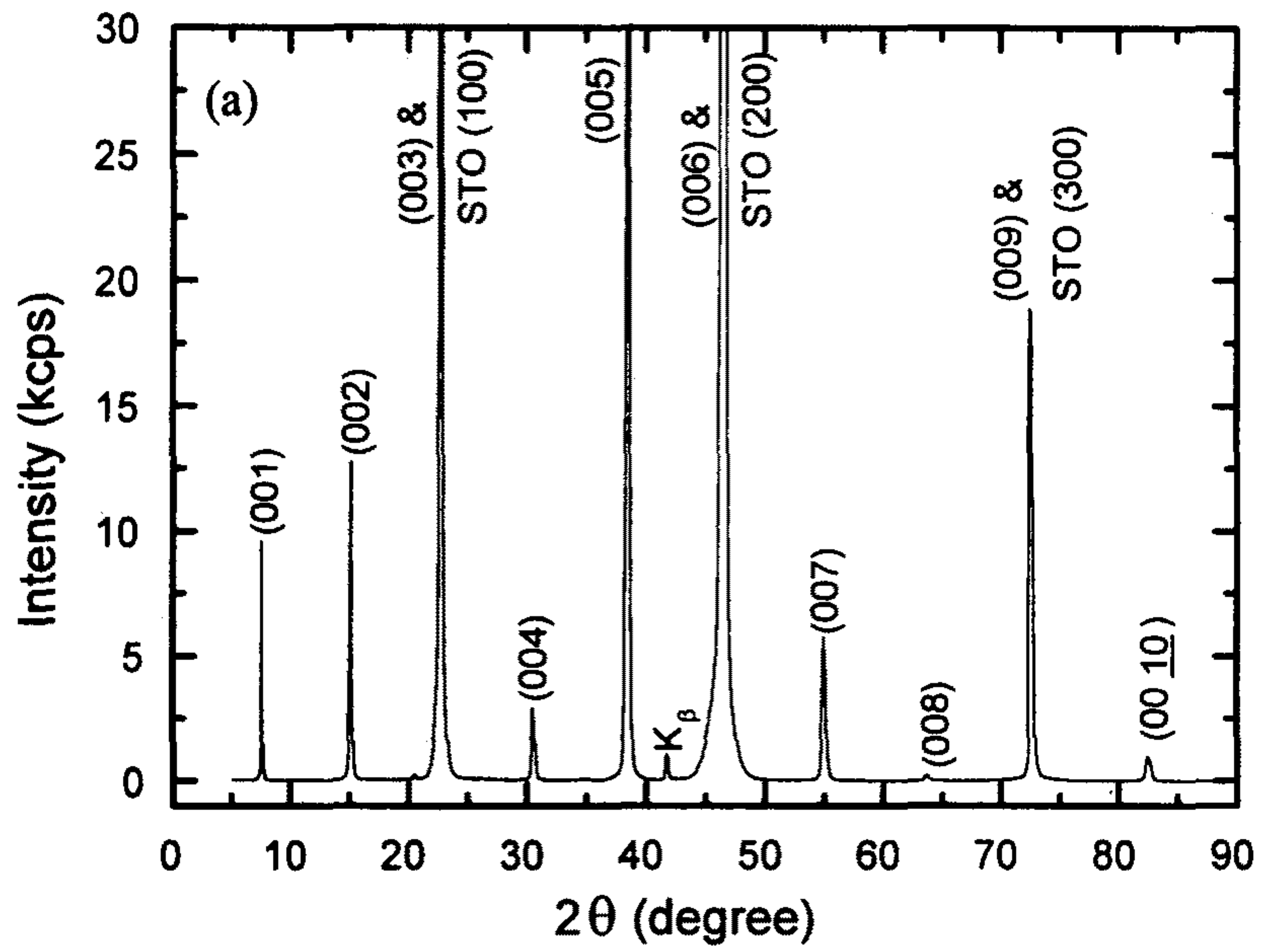
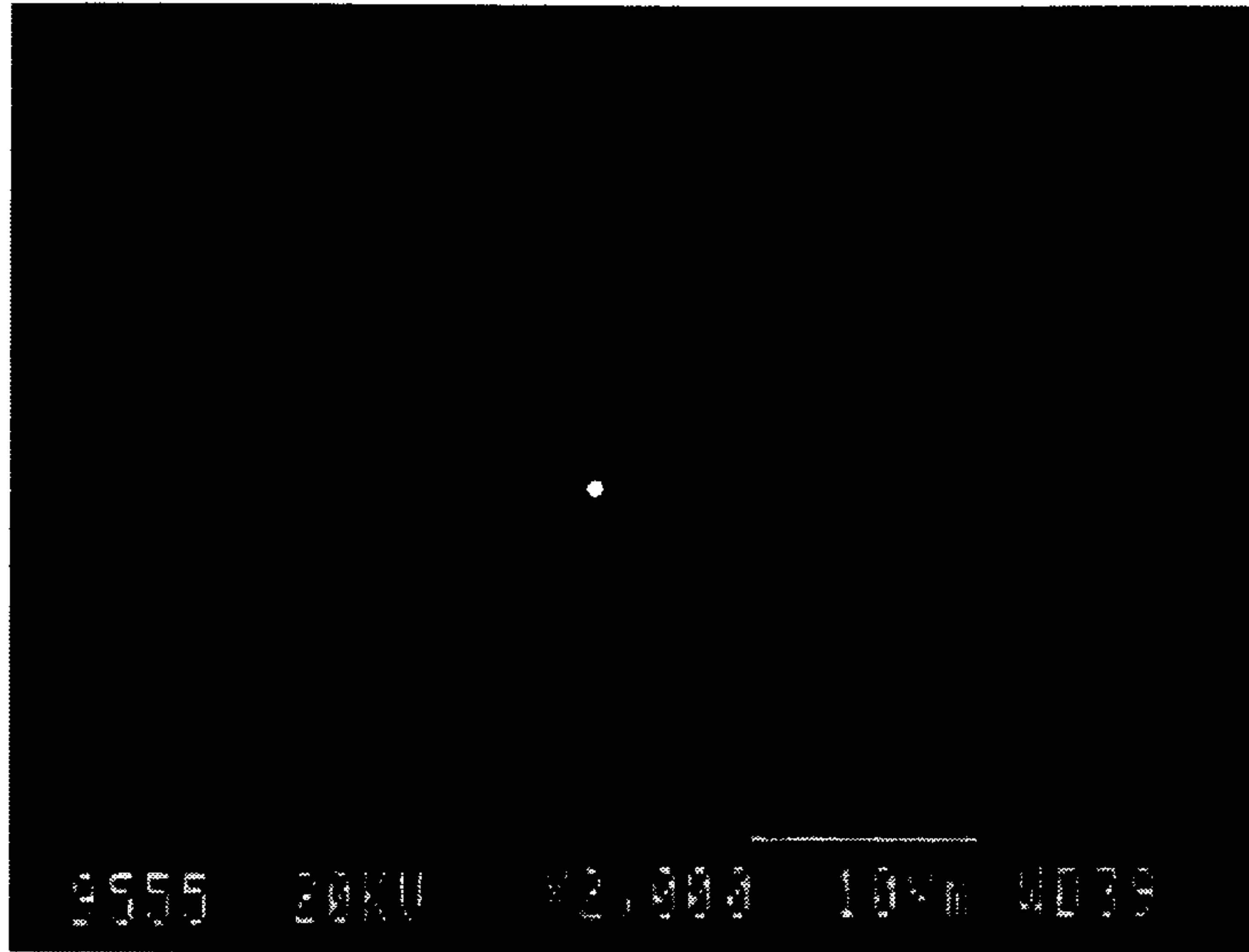
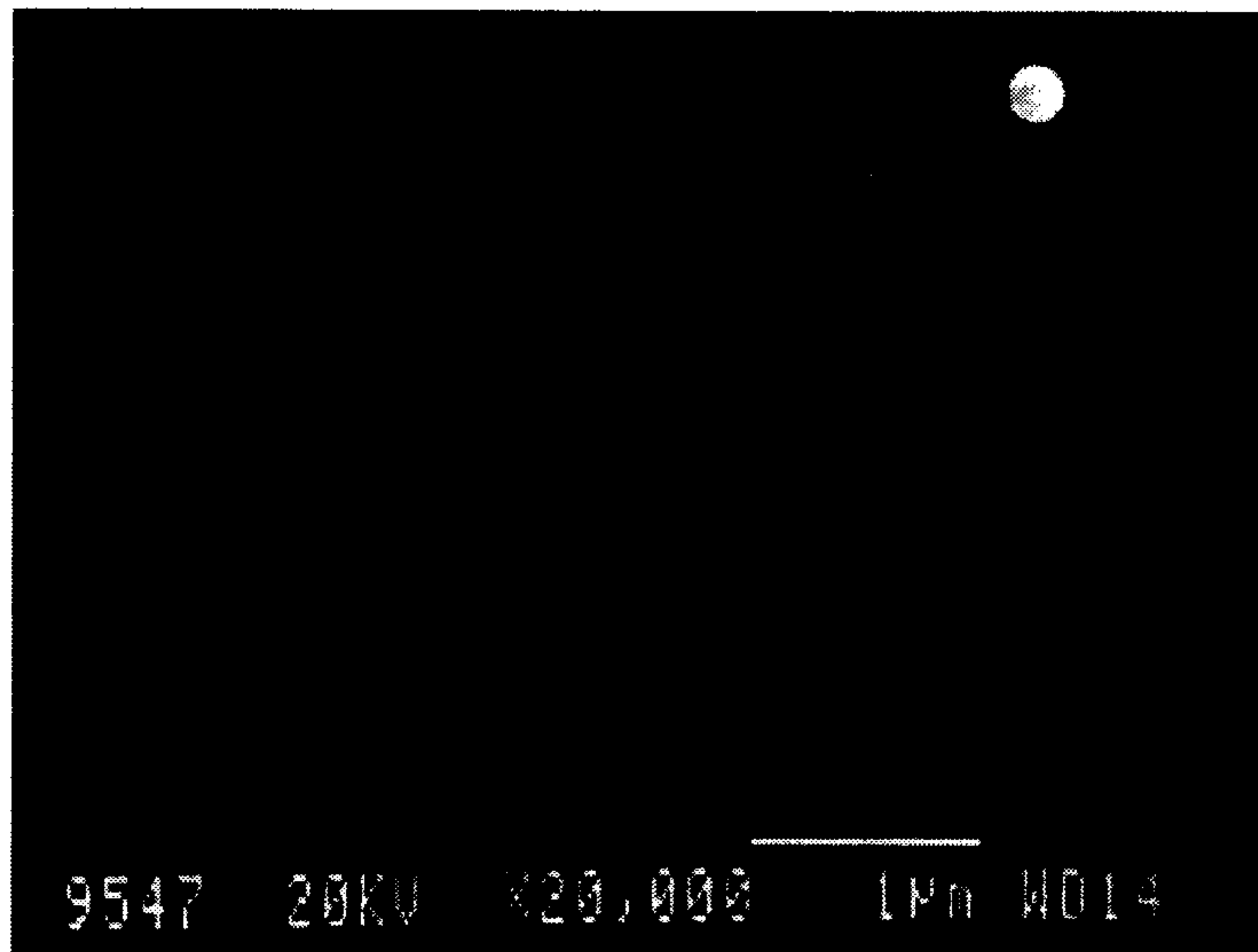


Fig. 2-1-1. 최적화된 YBCO 박막의 XRD 결과. (a)  $\theta$ - $2\theta$  scan 결과로 (00l) peak만 나타남. (b) (005) peak에 대한 rocking curve 결과로 FWHM(full width half maximum)이  $0.09^\circ$  로 결정성이 대단히 우수함.





(a)



(b)

Fig. 2-1-2. 최적화한 YBCO 박막의 SEM 결과((a) 2,000 배, (b) 20,000 배). 초점을 맞추기 위한 boulder 외에는 표면구조를 갖지 않는 우수한 morphology를 나타냄. Boulder density도 대단히 낮음.

의 이상적인 비저항 특성을 보였다.(Fig. 2-1-3) 뿐만 아니라 임계전류밀도( $J_c$ ) 측정결과 자기장이 없는 경우,  $J_c(77K) \sim 5 \times 10^6 \text{ A/cm}^2$ ,  $J_c(10K) \sim 5 \times 10^7 \text{ A/cm}^2$  로 측정되어 이상적인 c축 oriented YBCO 박막이 성장되었음을 확인할 수 있었다.

특히 이번 최적화 조건의 경우, 소자를 제작하는 과정을 통하여 재현성이 매우 우수함을 확인할 수 있었고, 또한 증착율이 약 500 A/min로 이전 조건의 4 배쯤 되어 다층박막 제작이 더욱 용이해졌다. 또한 이번 최적화 실험에서는 냉각시 산소압력과 임계온도( $T_c$ )와의 관계가 존재함을 확인하였으며 이에 대한 조건 변화를 통하여 산소압력을 300 torr로 고정시켰다. 이보다 냉각시 산소압력이 조금 낮을 경우 임계온도는 1 K까지 증가하나, 비저항등의 다른 전기적 특성이 조금 나빠짐을 확인하였다. 이러한 최적화된 YBCO 박막의 전기적 특성이 아래의 표 2-1-2에 정리되어 있다.

**표 2-1-2. 최적화된 YBCO 박막의 증착조건과 초전도 특성**

임계온도( $T_c$ )와 전이폭( $\Delta T_c$ )	91 K, < 0.5 K
상온 비저항 $\rho$ (300 K)	~ 150 $\mu\Omega\text{cm}$
R(300K)/R(100K)	~ 3.1
임계전류밀도( $J_c$ )(A/cm <sup>2</sup> )	$5 \times 10^6$ (@ 77 K) $5 \times 10^7$ (@ 4.2 K)
Boulder density	< $5 \times 10^4$ 개/cm <sup>2</sup>
Surface rms roughness	~ 2 nm

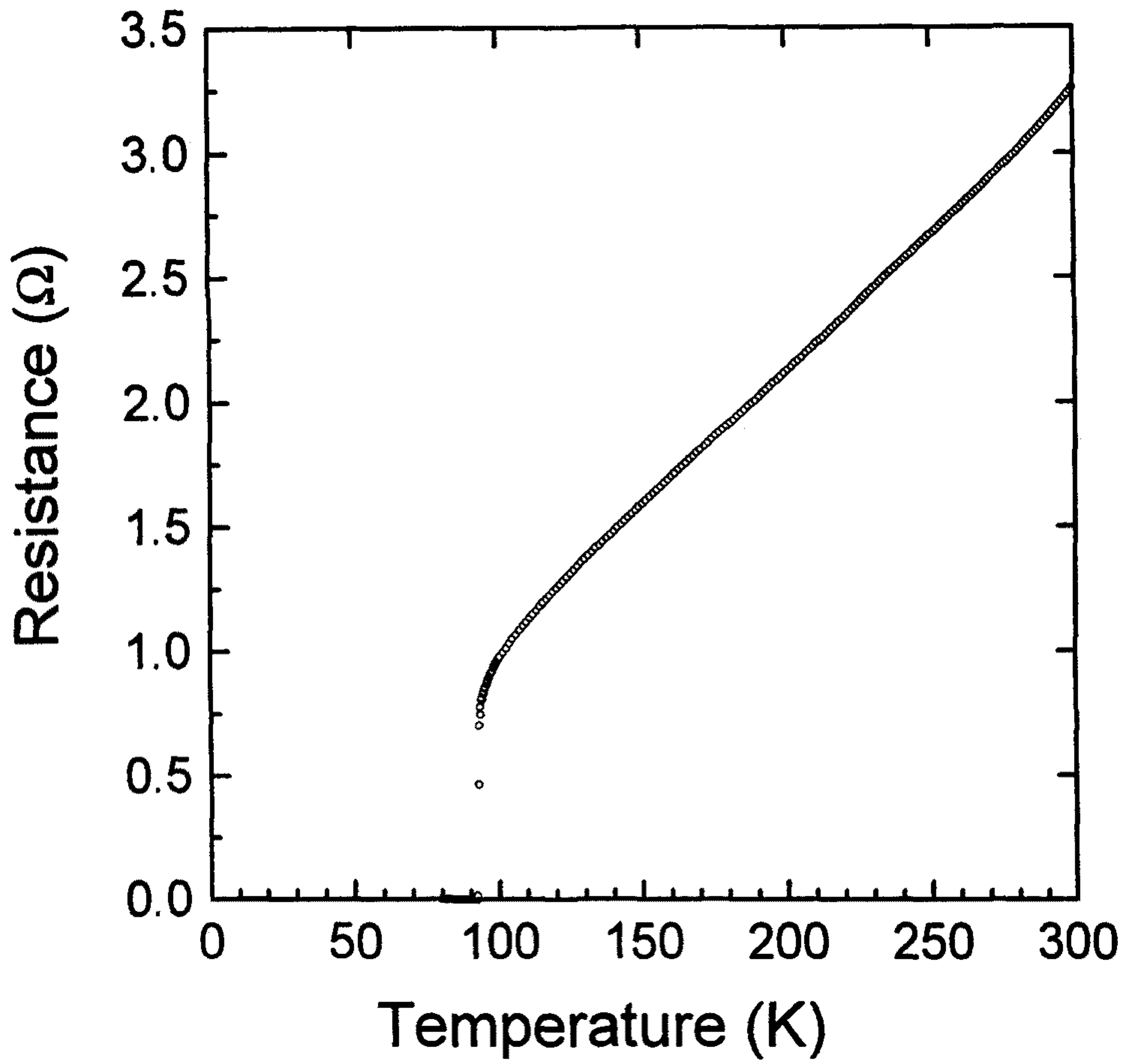


Fig. 2-1-3. 최적화된 YBCO 박막의 저항의 온도의존성 결과. 임계온도( $T_c$ ) 91 K, 전이폭( $\Delta T_c$ ) 0.5 K 이하의 우수한 특성을 나타냄.

위의 Table과 같은 조건의 YBCO 박막을 SQUID, directly coupled SQUID magnetometer, ramp-edge type의 조셉슨 접합 제작등의 프로젝트 수행에 활용하였다. 이외에 *in-situ*로 YBCO 박막 위에 증착한 STO 절연막의 경우, 절연성이 우수하고, pinhole이 없이 epitaxial 성장을 보였고, 그 위에 증착한 초전도 YBCO 박막의 성질도 우수하여 이를 ramp-edge type의 조셉슨 접합의 제작에 활용하였다. STO에 관해서는 boulder density를 줄이는 최적화 연구가 추가로 필요한 상태다. 추후 다층 박막 공정이 일반화될 경우에 대비하여 다양한 절연체 및 상전도체 산화물 박막에 대한 최적화 연구를 수행할 예정이다.

## 제 2 절 NBCO 고온초전도 박막

NBCO( $\text{Nd}_1\text{Ba}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$ ) 고온초전도체는 YBCO와 같은 구조를 가지며 단지 Y자리에 희토류 원소인 Nd가 치환된 형태를 갖는 물질이다. NBCO는 Nd의 이온반경이 커서 Ba site에 solid solution을 가지며, 이 비율이 늘어날 경우 임계온도가 급격히 낮아지는 특성을 나타내어서 발견 초기에는 많은 관심을 끌지 못했다. 그러나, Yoo등이 산소분압을 낮춘 분위기에서 melt-growth 방법(OCMG)을 사용하여 임계온도 96 K의 시료 제작에 성공하였고, 특히 이렇게 합성된 시료의 경우 자기장하에서 임계전류가 특히 높게 나타나 많은 주목을 받기 시작했다.

그러나, 박막시료의 경우 높은 임계온도와 임계전류밀도를 갖는 시료의 제작은 극히 어려워서 연구시작시에는 90 K를 넘는 박막의 합성에 아무도 성공하지 못한 실정이었다. 임계온도( $T_c$ )와 임계전류밀도( $J_c$ )가 YBCO 보다 높은 양질의 NBCO 박막을 합성할 경우, SQUID등 소자의 잡음특성이 개선될 가능성이 크

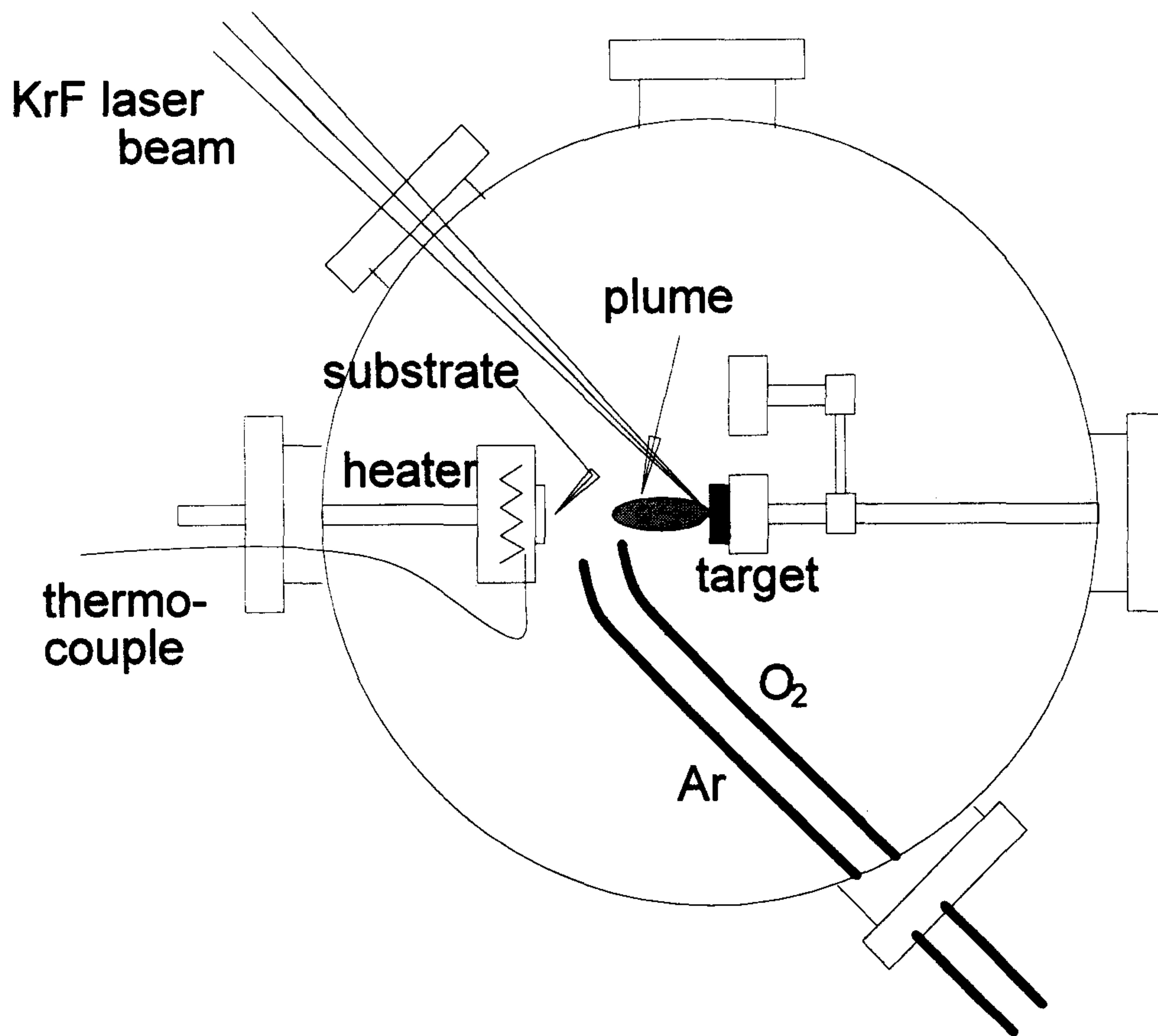


Fig. 2-2-1. Schematic of PLD chamber for NBCO thin film growth.



며, 또한 NBCO 박막에서 Nd와 Ba의 mixing ratio를 control 할 수 있으면 YBCO와 격자상수, chemical stability, anisotropic한 thermal expansion coefficient등에서 잘 일치하므로, YBCO 박막을 전극으로 사용하는 조셉슨 접합의 barrier 물질로 매우 이상적이다. 따라서 본 연구에서는 PLD 방법을 이용하여 NBCO 박막의 합성을 시도하였다.

NBCO 박막의 최적조건은 YBCO의 경우와는 크게 다르게 나타났다. YBCO의 최적조건과 동일한 조건으로 성장시킨 경우 표면의 morphology는 대단히 우수하고, c축이 기판에 수직하게 성장하였으나, 임계온도가 20 K가 조금 넘게 나타났다. 이러한 박막에 대해서는 조셉슨 접합과 관련된 본 보고서 6장에서 자세히 기술할 예정이므로 이 장에서는 생략한다. 따라서 YBCO의 최적화 방법과 마찬가지로 기판온도( $T_{sub}$ ), 산소분압( $P_{O_2}$ ), 타겟 기판간의 거리( $d_{t-s}$ ), laser energy density등을 변화시켰으며, 추가로 argon gas를 산소와 mixing 할 수 있도록 chamber를 개조하여 Ar+O<sub>2</sub> mixture gas하에서 증착을 시도하였다. 제작에 사용한 PLD chamber의 schematic은 위의 Fig. 2-2-1에 나타나 있다.

NBCO 박막의 최적화에는 증착되는 입자의 에너지가 가장 큰 영향을 미치는 것과 같은 결과를 나타내었다. 산소 분위기에서만 증착할 경우 800 mTorr 이상의 높은 압력, 타겟 기판간의 거리( $d_{t-s}$ )가 최소 6 cm 이상에서만 임계온도 90 K 이상의 박막을 제작할 수 있었다. 높은 압력은 증착되는 입자들의 많은 scattering 을 의미하며, 기판과 타겟사이의 거리도 마찬가지이다. 따라서 Ar을 산소에 더할 경우 scattering이 증가하므로 양질의 박막이 형성되리라 판단되었다. 실제로 혼합가스 속에서 Ar의 양이 증가함에 따라, laser plume의 색깔이 밝은 보라색에서 푸르스름한 색으로 변하며, laser plume의 모양도 길쭉한 형태에서 보다 구에 가까운 형태로 변화하는 것을 관측할 수 있었다. 따라서 같은

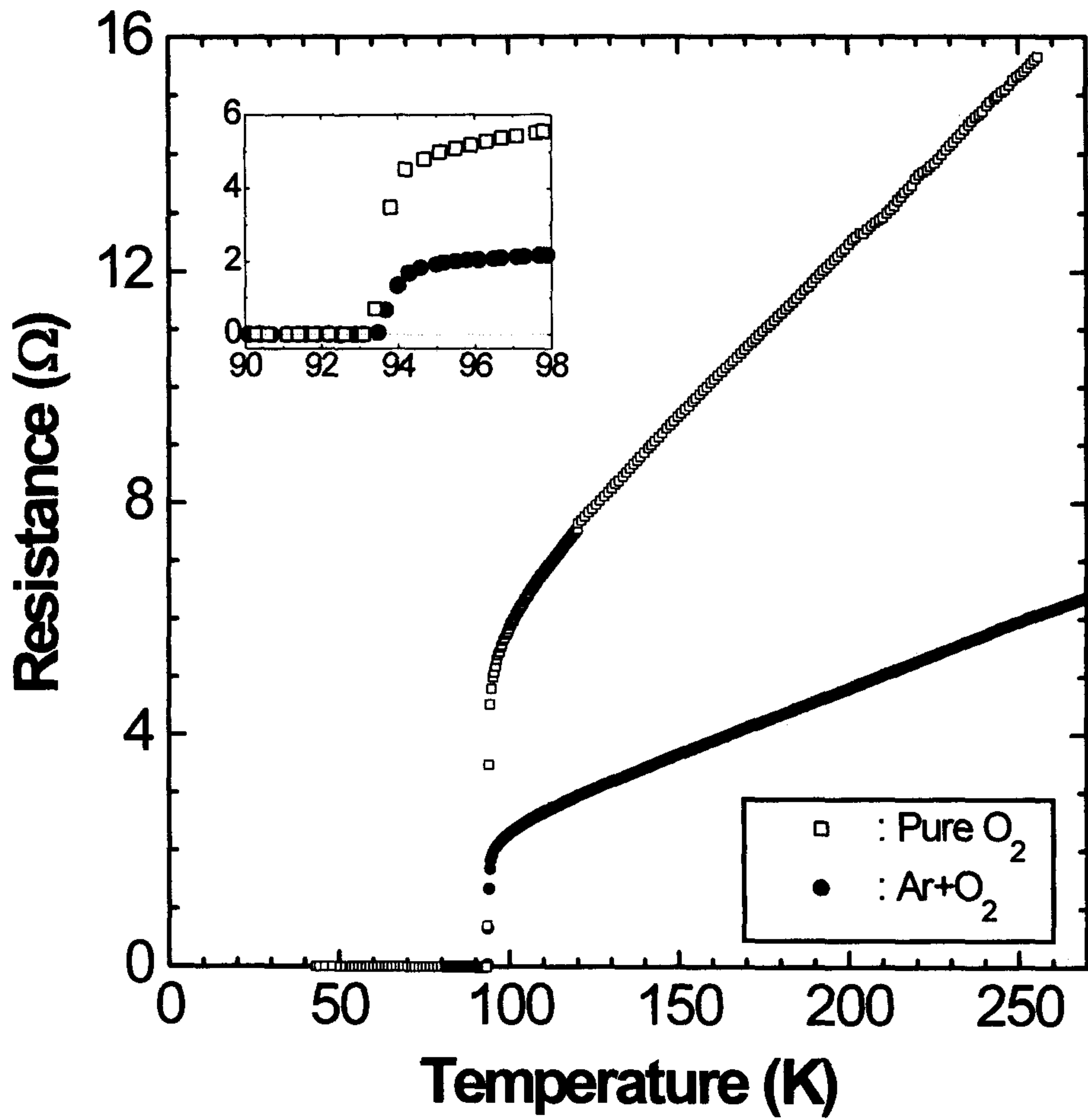


Fig. 2-2-2. NBCO 박막 비저항의 온도의존성. (Inset : transition region). 산소만 사용한 경우 임계온도( $T_0$ )는 93 K, Ar+O<sub>2</sub> 혼합개스의 경우 93.5 K 이다.

조건으로 증착할 경우 증착율은 크게 떨어짐을 확인할 수 있었다. Fig. 2-2-2는 산소만 사용한 경우와 산소, 아르곤 혼합 가스를 사용한 경우 각각에 대하여 최적화된 NBCO 박막 저항의 온도의존성이다. 각각의 경우 증착조건을 살펴보면, 기판과 타겟간의 거리  $d_{t-s}$ 는 6.8 cm로 같고, laser energy density도  $2.5 \text{ J/cm}^2$ 로 동일하다. 산소만 사용한 경우는 기판온도  $T_{\text{sub}} = 770 \text{ }^\circ\text{C}$ , 산소분압  $P_{\text{O}_2} = 800 \text{ mTorr}$ 로 두께 1400 Å이었으며, 임계온도는 93 K로 나타났다. 한편 아르곤과 산소의 혼합가스를 사용한 경우는 기판온도  $T_{\text{sub}} = 760 \text{ }^\circ\text{C}$ , 혼합가스 압력  $P_{\text{tot}} = 400 \text{ mTorr}$  ( $P_{\text{Ar}} = 380 \text{ mTorr}$ ,  $P_{\text{O}_2} = 20 \text{ mTorr}$ )로 두께 2100 Å이었으며, 임계온도는 93.5 K로 나타났다. 이는 YBCO 보다 높은 임계온도로 NBCO 박막이 유용하게 쓰일 수 있는 가능성을 보여준 결과라고 할 수 있다.

이러한 NBCO 박막들의 높은 임계온도를 확인하기 위하여 Fig. 2-2-2의 시료들에 대하여 magnetization의 온도의존성을 조사하였다. 사용한 장치는 Quantum Design사의 SQUID MPMS system으로, 서울대학교에 의뢰하여 측정하였다. Fig. 2-2-3은 10 gauss의 자기장에서 ZFC(zero field cooled) 방법으로 측정한 결과로 92 K 전후에서 sharp 한 transition을 나타내고 있다. Percolative한 path만 형성되면 저항이 없어지는 비저항 측정과 달리 볼륨의 초전도성이 나타나는 magnetization 결과에서 보듯이 높은 임계온도의 단일상이 잘 이루어져 있음을 확인하였다.

이러한 최적의 NBCO 박막의 합성을 위하여 여러 가지 변수에 대해 실험한 결과들을 그림으로 정리하였다. 아래의 Fig. 2-2-4는 산소 가스만을 사용하여 증착하였을 때의 결과들이다. Fig. 2-2-4(a)는  $d_{t-s}$ 를 6.8 cm로 고정시키고,  $P_{\text{O}_2} = 800 \text{ mTorr}$ ,  $1000 \text{ mTorr}$  두 경우에 대하여 기판온도  $T_{\text{sub}}$  변화에 따른 임계온도의 변화를 나타낸 그림이다. 각각의 온도에 대하여 같은 모양의 symbol이 두

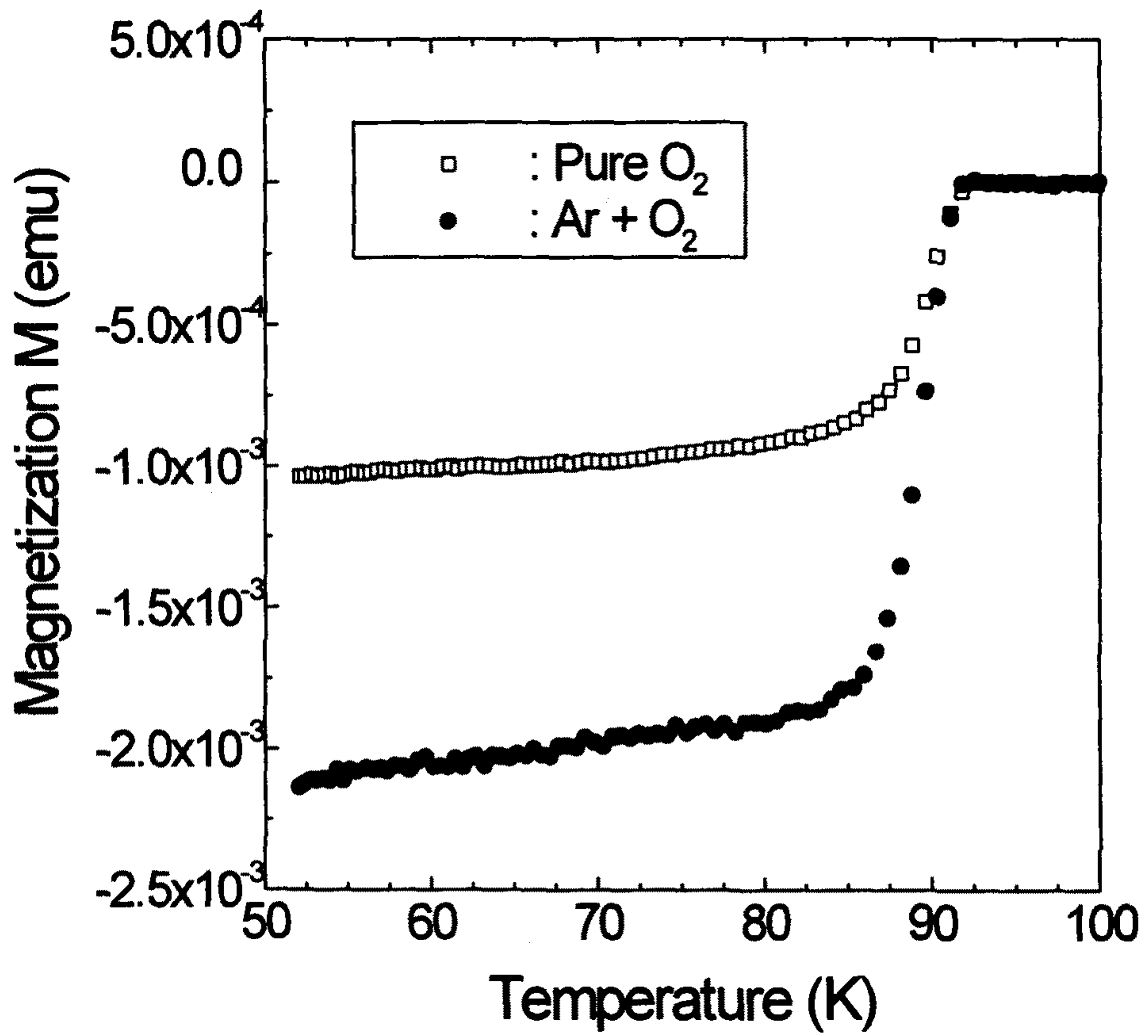


Fig. 2-2-3. 최적화된 NBCO 박막의 zero field cooled(ZFC) magnetization

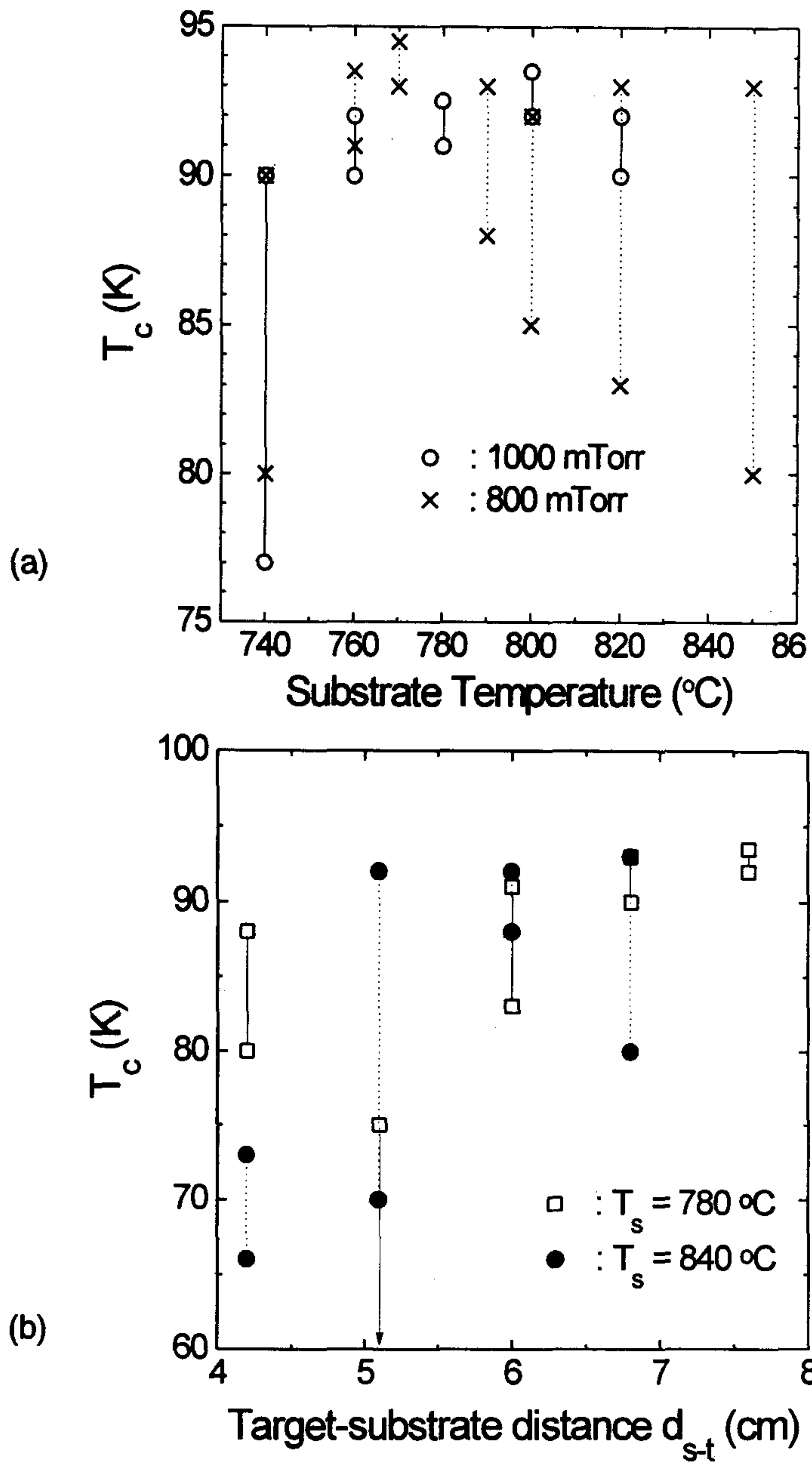


Fig. 2-2-4. 산소분위기에서 성장시킨 NBCO 박막들의 증착조건에 따른 임계온도( $T_c$ )의 변화. 위쪽 symbol은  $T_c$  onset을, 아랫쪽의 symbol은  $T_c$  zero를 나타냄. (a) 기판온도에 따른 변화, (b) 기판과 타겟간의 거리에 따른 변화임.

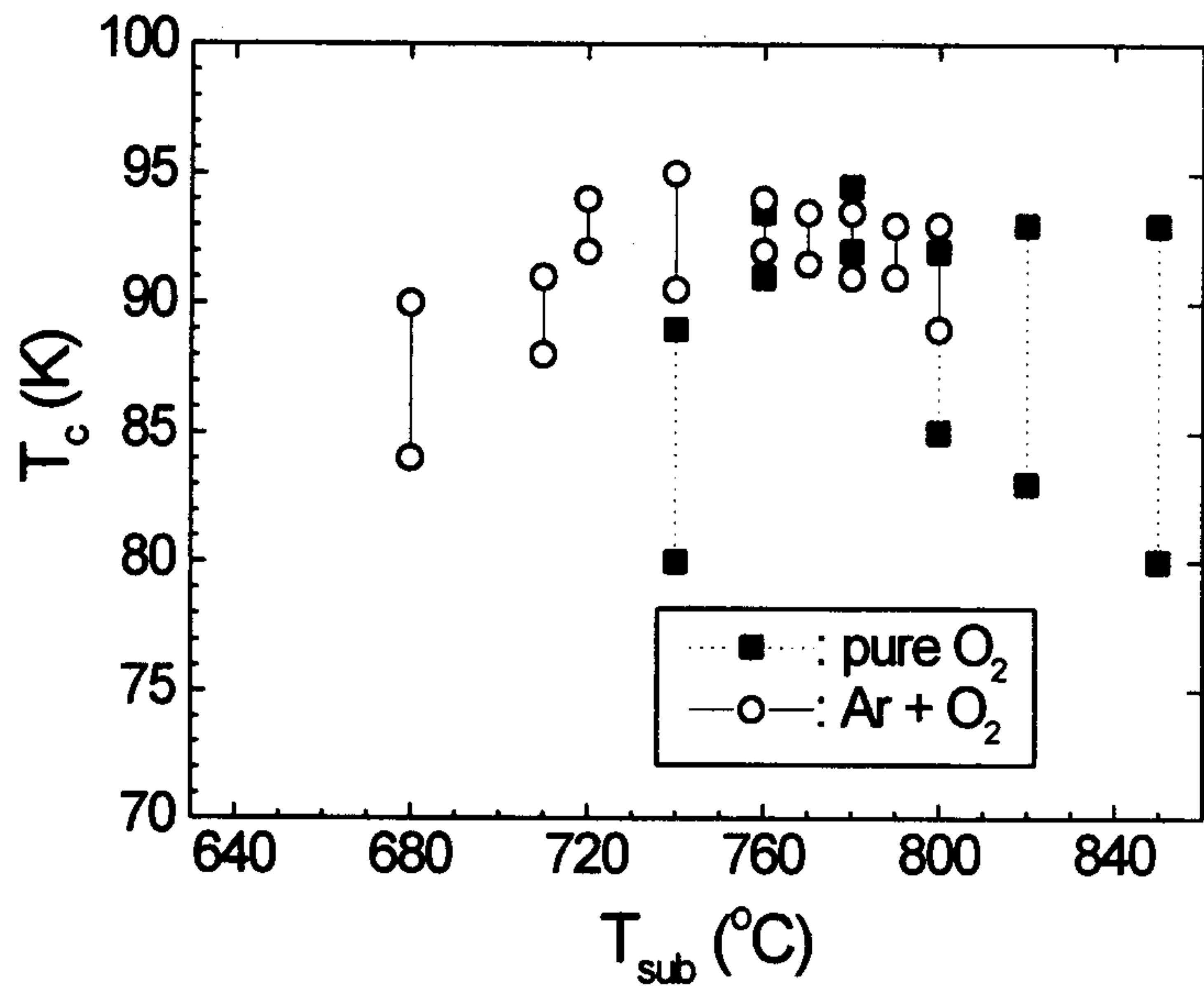


개씩 존재하는데 위쪽의 symbol은  $T_c$  onset을 아랫쪽의 symbol은  $T_c$  zero를 나타낸다.

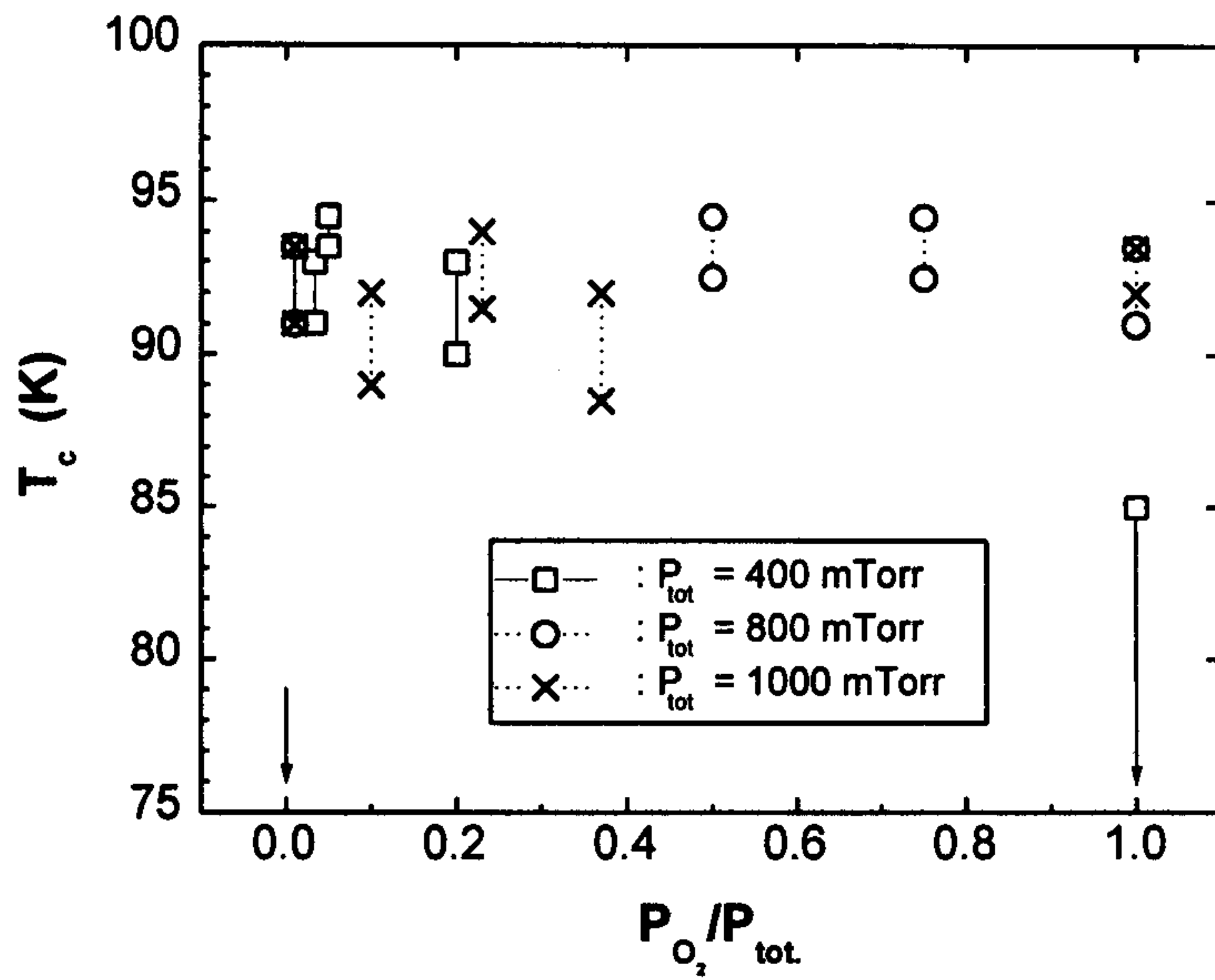
Fig. 2-2-4(a)에서 나타나듯이 최고의 임계온도는 어느 기판온도에서 최고치를 갖으며 그 이상과 이하에서는 임계온도가 낮아지는 경향을 나타내었다. 산소분압이 800 mTorr 일 경우,  $T_{sub} = 770$  °C에서  $T_c = 93$  K를 보였고, 산소분압이 1000 mTorr 일 경우,  $T_{sub} = 800$  °C에서  $T_c = 92$  K를 나타내었다. 산소분압이 1000 mTorr인 경우 보다 넓은 범위에서 임계온도가 높게 나타나는 경향을 나타내었으나, AFM 관측 결과 기판온도가 800 °C를 넘는 경우 morphology가 급격히 나빠지기 시작함을 확인할 수 있었다. 산소분압이 600 mTorr 이하인 경우, 이 그림에는 나타나 있지 않으나, 어떤 기판온도에서도 임계온도가 90 K를 넘는 NBCO 박막을 합성할 수 없었다.

Fig. 2-2-4(b)는 산소분압은 750 mTorr, 기판온도는 780 °C와 840 °C로 고정시키고, 기판과 타겟간의 거리  $d_{t-s}$ 의 변화에 따른 임계온도의 변화를 나타낸 그림이다.  $T_{sub} = 780$  °C인 경우 대체로 거리가 멀어질수록 임계온도가 높아지는 경향을 나타내고 있다. 임계온도는  $d_{t-s} = 7.6$  cm 일 때 92 K로 최대가 되지만, 증착율이 지극히 낮아서 실용적이지 않았고,  $d_{t-s} = 6.8$  cm 일 때 90 K를 나타내었다. 반면  $T_{sub} = 840$  °C인 경우  $d_{t-s} = 6.0$  cm에서 최고 임계온도 80 K를 나타내었다. 기판온도로 주어지는 surface migration energy와 laser plume에서의 입자들의 kinetic energy 사이에 어느 적정 비율이 될 때, 최대의 임계온도를 갖음을 보여주는 간접적인 증거라 하겠다.

아래의 Fig. 2-2-5(a)는  $d_{t-s}$ 를 6.8 cm로 고정시키고, 산소만 사용하거나, 혼합개스의 경우 모두 증착시  $P_{tot} = 800$  mTorr로 한 후, 기판온도  $T_{sub}$  변화에 따른 임계온도의 변화를 나타낸 그림이다. 혼합개스의 경우, 산소의 분압은 대략 3%



(a)



(b)

Fig. 2-2-5. 산소 분위기와 산소, 아르곤 혼합가스에서 성장시킨 NBCO 박막들의 증착조건에 따른 임계온도( $T_c$ )의 변화. (a) 기판온도에 따른 변화, (b) 혼합가스 내에서 산소 가스의 percentage에 따른 변화임.

정도로 고정시키고 실험한 결과로, 산소만 사용했을 때 90 K 이상의 임계온도가 나오는 기판온도범위 760 °C ~ 780 °C와 비교하여 보다 넓은 기판온도범위 720 °C ~ 790 °C에서 90 K 이상의 높은  $T_c$ 를 나타내었다. 뿐만 아니라 최대 임계온도가 나오는 기판온도가 대체적으로 낮아져 다른 물질과의 다층박막 공정시 보다 유리할 것으로 판단되었다.

Fig. 2-2-5(b)는 혼합가스에서 산소의 양을 변화시키며, 그 비율에 따른 임계온도의 변화를 조사한 결과이다. 혼합가스의 압력  $P_{tot}$ 은 각각 400, 800, 1000 mTorr로 고정시키고, 여러 분압비에 대해 그린 그림으로 넓은 기판온도 범위 ( $T_{sub}$  : 700 ~ 800 °C)와 넓은 총압력( $P_{tot}$  : 400 ~ 1000 mTorr)에 대해서 우수한 초전도 특성을 보여줌을 나타내고 있다. 그러나, 단지 산소없이 아르곤 가스만 사용한 경우, 기판온도 500 ~ 800 °C의 넓은 범위에서 냉각시 산소를 넣어주는 것과 관계없이 초전도 특성을 나타내지 않았다. 이상에서 혼합가스의 사용은 우수한 임계특성을 갖는 NBCO 박막의 합성에 크게 도움이 되지만, 최소한의 산소(본 실험장치의 경우 최소 1%)가 NBCO 합성에 필수적임을 확인할 수 있었다.

혼합가스를 사용한 경우와 산소만 사용한 경우, 제작된 박막의 다른 특성들도 조사하여 보았다. 먼저 XRD를 통한 구조적 특성을 조사해 보았다. Fig. 2-2-6은 XRD  $\theta$ - $2\theta$  scan의 결과로 위의 그림이 산소만 사용한 경우, 아래 그림이 산소와 아르곤의 혼합가스를 사용한 경우의 대표적 결과이다. 그림에서 알 수 있듯이 두 경우 모두 c축이 기판에 수직하게 성장하였으며, c축의 격자상수도 모두 11.74 Å으로 Nd와 Ba의 mixing이 거의 없는, bulk 값에 준하는 결과를 나타내었다. 이상의 결과에서 XRD  $\theta$ - $2\theta$  scan으로는 두 박막 사이에 차이가 거의 나타나지 않음을 확인하였다.

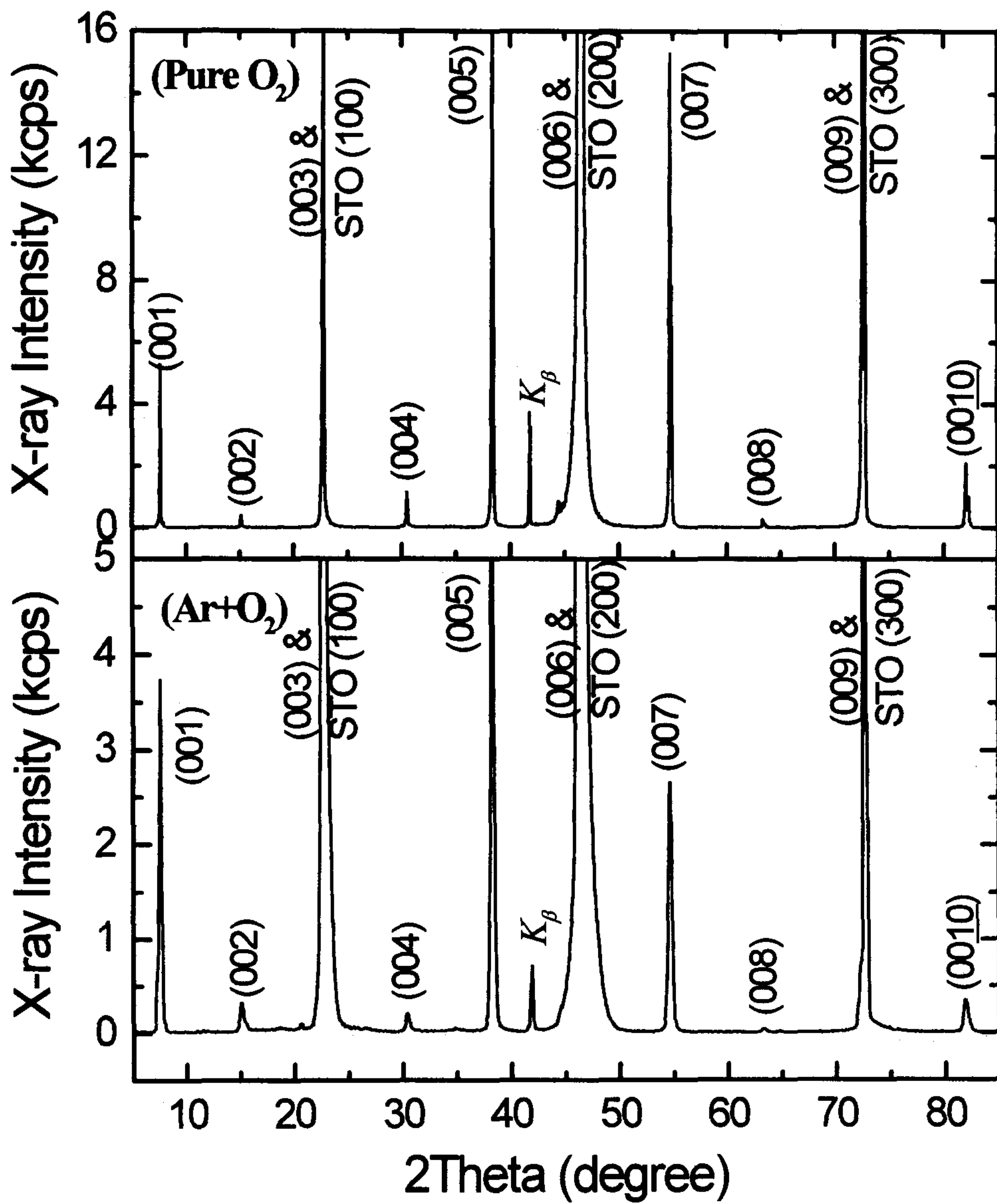


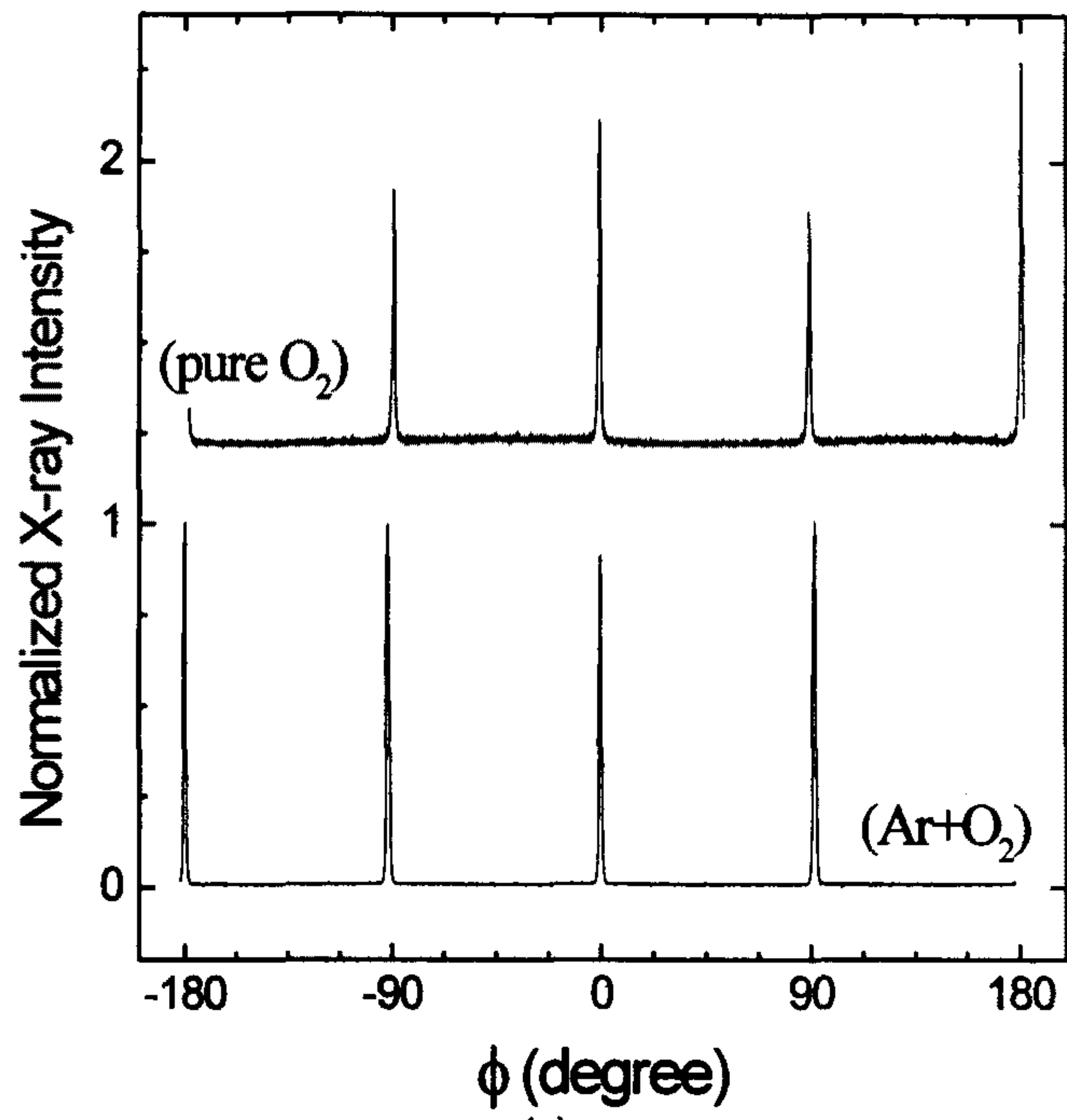
Fig. 2-2-6. 산소와 혼합개스에서 성장한 NBCO 박막들의 XRD 결과.( $\theta$ -2 $\theta$  scan)



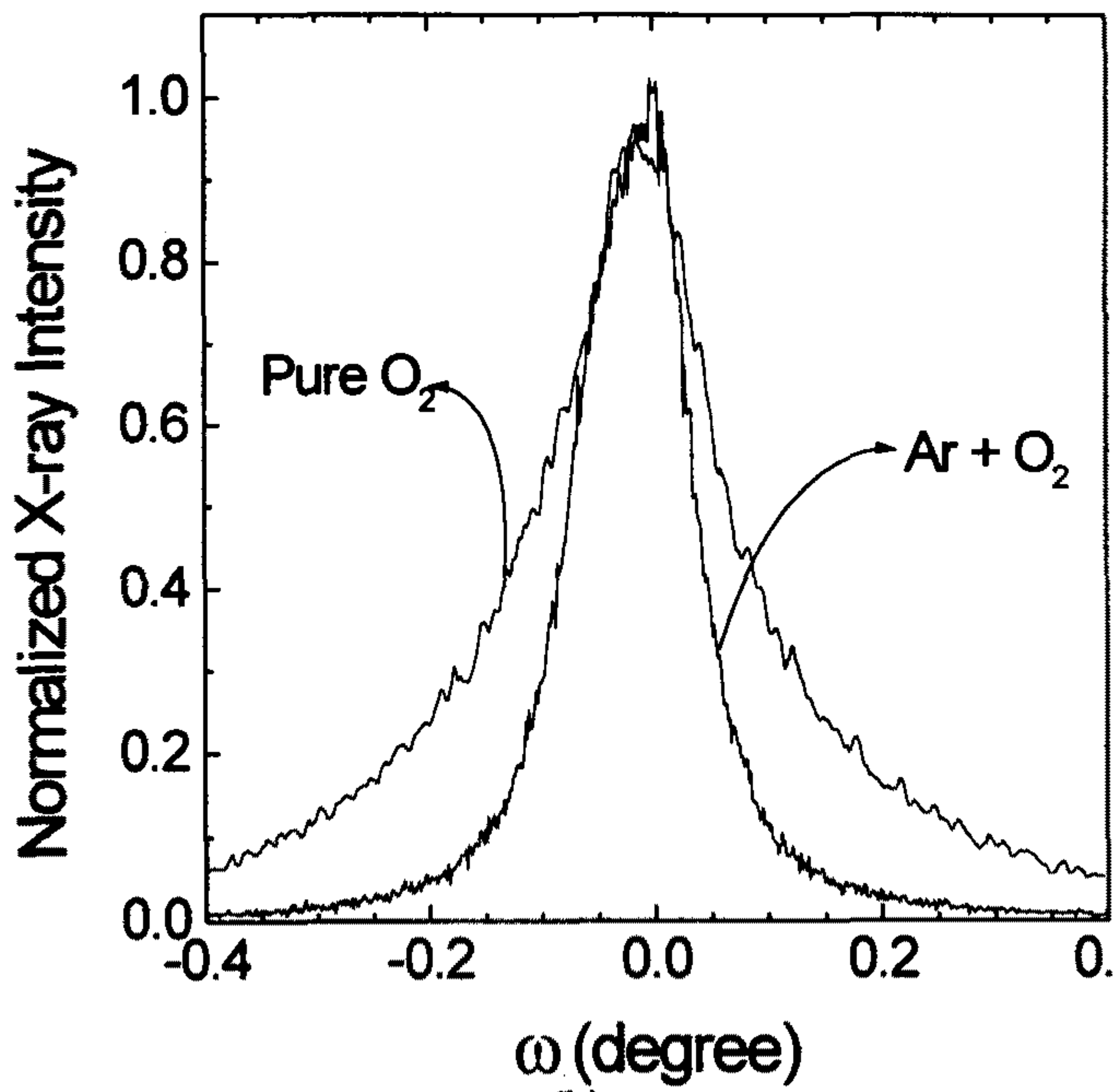
따라서 이들 박막들에 대하여 x-ray  $\varphi$  scan을 통하여, c축으로 성장한 grain들의 in-plane alignment를 조사해 보았다. (108) peak에 대한 결과는 Fig. 2-2-7(a)에 나타나 있으며, 이때  $\chi$  angle은  $20.80^\circ$  였다. 그림에서 보듯이 혼합가스 여부와 관계없이 기판과 잘 align된 4 fold symmetry를 보여주어서 두 경우 모두 epitaxial 성장이 되었음을 볼 수 있었다. 따라서 x-ray  $\varphi$  scan을 통해서 혼합개스와 산소만 사용한 경우의 구별이 거의 없이 나타났다.

X-ray를 이용해서 박막의 결정성을 살펴보는 rocking curve( $\omega$ -scan)을 통하여 두 경우의 특성이 나타나는지 조사해보았다. Fig. 2-2-7(b)는 (005) peak에 대한 결과로 이 측정은 D3 system을 이용하여 double crystal diffraction을 통하여 행하였다. 결과는 그림에서 보듯이 확연한 차이를 나타내었다. 산소, 아르곤의 혼합 개스의 경우 rocking angle의 반치폭(FWHM)이  $0.11^\circ$  이고, 산소 개스만 사용한 경우 반치폭(FWHM)이  $0.14^\circ$  로 그 차이가 확연히 드러났다. 특히 산소만 사용하여 4.2 cm의 거리에서 증착하여 임계온도가 80 K 이하인 시료의 경우, c축이 기판에 수직하게 성장하기는 하였으나, rocking curve의 반치폭(FWHM)이  $0.30^\circ$  로 초전도 임계특성과 결정성이 밀접한 연관성을 갖고 있음을 확인할 수 있었다.

임계온도가 YBCO 보다 높게 나타나는 NBCO 박막들에 대하여 임계전류밀도( $J_c$ )의 온도의존성이 어떻게 나타나는가를 조사해 보았다. Fig. 2-2-8은 extended Bean's model을 사용하여 magnetization hysteresis data에서 얻어진 임계전류밀도 결과로 77 K에서  $10 \mu\text{m}$  선폭의 NBCO 박막에 대한 transport  $J_c$  결과가 한점 나타나 있다. 20 K에서의  $J_c$ 는 YBCO의 경우 약  $5 \times 10^7 \text{ A/cm}^2$ 로 나타난 반면에, NBCO 박막의 경우 산소와 혼합가스 경우 모두 약  $1 \times 10^7 \text{ A/cm}^2$ 로 20 % 이하의 값을 나타내었다. 한편 77 K에서의 경우 YBCO 박막은



(a)



(b)

Fig. 2-2-7. 산소개스와 혼합개스에서 성장시킨 NBCO 박막들의 (a) XRD  $\varphi$  scan 결과와 (b) rocking curve 결과.

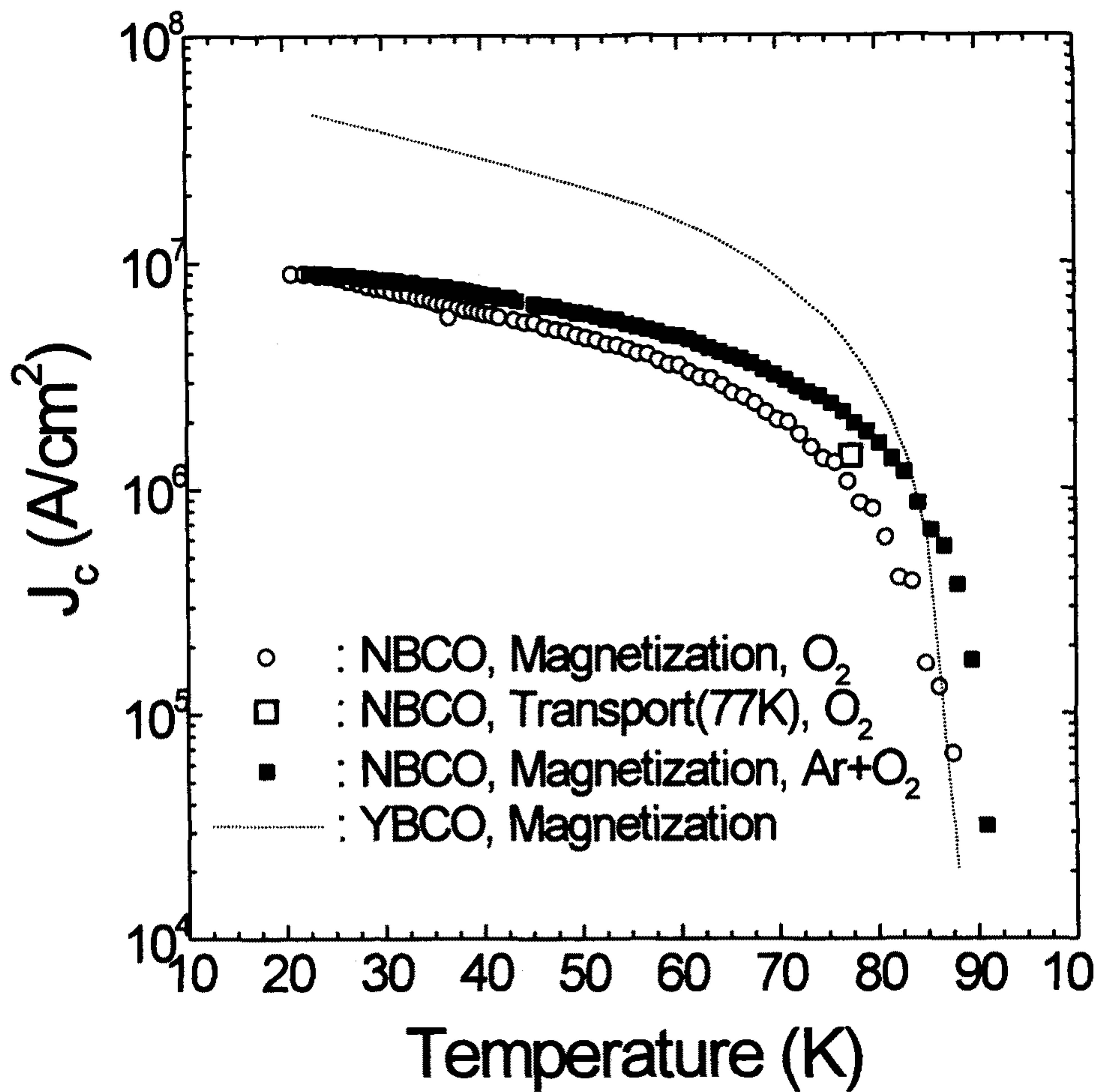


Fig. 2-2-8. 산소와 혼합가스에서 성장시킨 NBCO 박막들의 임계전류밀도( $J_c$ ) 온도 의존성. 최적화된 YBCO 박막의 결과는 비교를 위하여 함께 그림.

약  $5 \times 10^6$  A/cm<sup>2</sup>로, Ar 혼합개스를 사용한 NBCO 박막의 경우  $2 \times 10^6$  A/cm<sup>2</sup>로, 산소만 사용한 NBCO 박막의 경우  $1 \times 10^6$  A/cm<sup>2</sup>로 나타났다. NBCO 박막의 경우 YBCO와 비교하여 여전히 낮은 임계전류밀도를 나타내었지만, 특히 혼합개스에서 증착된 NBCO 박막은 온도가 올라감에 따라 서서히 임계전류밀도가 감소하는 현상을 나타내어 소자용 박막으로의 응용 가능성을 보여주었다.

NBCO 박막의 경우, 임계전류밀도 값이 예상보다 작게 나올 뿐만 아니라, 소자를 만들기 위해 photolithography를 통한 patterning을 할 경우, 임계온도 및 임계전류밀도의 감소가 빈번히 관측되었다. 이는 NBCO 단결정이 YBCO의 경우보다 공기중에서 훨씬 inert하다는 보고와 상반되는 것이다. NBCO 박막의 작은 임계전류밀도와 patterning시의 degradation의 원인을 조사해보기 위하여 AFM을 통한 미세 morphology 조사를 행하였다. Fig. 2-2-9는 산소분위기에 증착한 다른 두 NBCO 박막의 AFM 결과로, (a)는 기판과 타겟의 거리가 가까워 임계온도가 낮은 박막의 경우이고, (b)는 먼 거리로 임계온도가 90 K가 넘는 박막이다. 두 경우 모두 rms roughness는 약 3 nm로 비교적 평탄한 특성을 나타내었으나, GB (grain boundary)에 높이가 높은 구조가 관측됨을 볼 수 있다. 이는 임계온도가 낮은 박막에서 더욱 심하게 나타나지만, 임계온도가 높은 박막의 경우에도 마찬가지로 나타나고 있다. 이러한 GB에서의 outgrowth, 또는 precipitate는 YBCO 박막의 경우 전혀 관측되지 않는 것으로, NBCO 박막의 임계전류밀도가 작고, patterning시 임계온도가 저하되는 원인으로 판단된다.

이상에서 NBCO 박막 성장에 관한 결과를 요약하면, 산소개스와 아르곤, 산소의 혼합개스를 사용하여 PLD 방법으로 각각 임계온도 93 K와 93.5 K의 박막들을 증착하는데 성공하였다. STO (100) 기판에 c축이 기판에 수직하게 epitaxial 성장을 하였으며, c축의 격자상수는 11.74 Å, 결정성을 나타내는



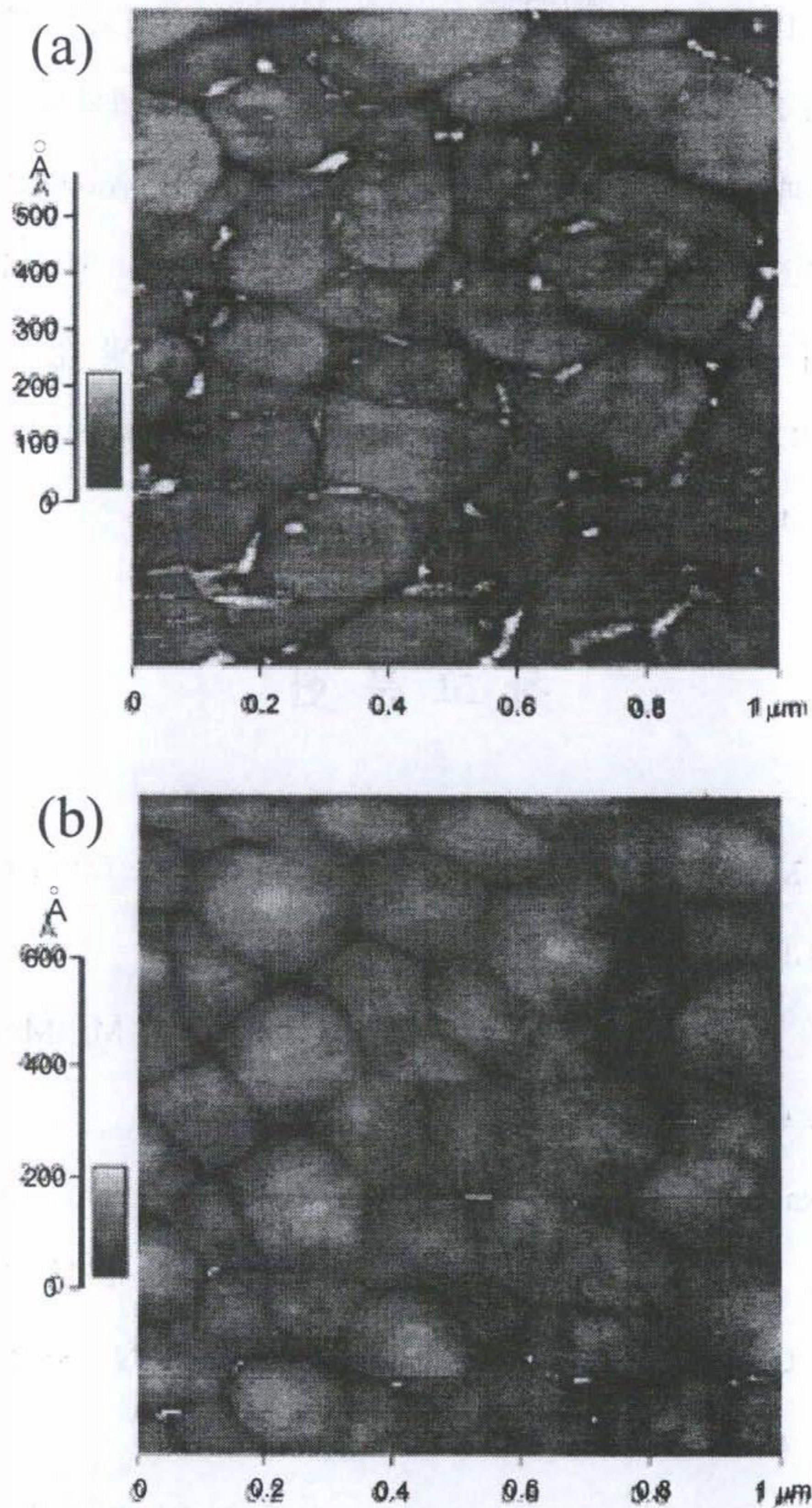


Fig. 2-2-9. AFM images of NBCO thin films deposited at (a)  $T_{\text{sub}} = 820 \text{ }^{\circ}\text{C}$ ,  $P = 800 \text{ mTorr}$ , and  $d_{t-s} = 4.2 \text{ cm}$ , and (b)  $T_{\text{sub}} = 820 \text{ }^{\circ}\text{C}$ ,  $P = 400 \text{ mTorr}$ , and  $d_{t-s} = 6.8 \text{ cm}$ . The  $T_c(R=0)$ 's of these films are 93-77 K and 92.5-90.5 K for samples in (a) and (b) respectively. The rms roughness of both samples are  $\sim 3 \text{ nm}$ .



rocking angle은  $0.11 \sim 0.14^\circ$  를 나타내었다. 임계전류밀도는 77 K에서  $1 \sim 2 \times 10^6$  A/cm<sup>2</sup>로, 20 K에서  $2 \times 10^7$  A/cm<sup>2</sup>로 나타났다. 박막의 rms roughness는 AFM 조사결과 약 30 Å으로 나타났으며, GB의 outgrowth와 precipitate이 임계전류밀도 감소의 원인으로 판단된다. NBCO 박막은 현재 barrier 물질로 활용중이며, 보다 완벽한 성장조건의 확립으로 임계온도 및 임계전류밀도가 증가할 경우 SQUID 등의 소자, ground plane에의 활용, 다른 초전도체 사이의 heterojunction등 다양한 활용이 예상된다.

## 참 고 문 헌

- [1] I. Yoo, M. Murakami, N. Sakai, T. Higuchi, and S. Tanaka, Jpn. J. Appl. Phys. **33**, L1000 (1994)
- [2] I. Yoo, N. Sakai, H. Takaichi, T. Higuchi, and M. Murakami, Appl. Phys. Lett. **65**, 633 (1994).
- [3] M. Murakami, S. I. Yoo, T. Higuchi, N. Sakai, J. Weltz, N. Koshizuka, and S. Tanaka, Jpn. J. Appl. Phys. **33**, L715 (1994).
- [4] T. Egi, J. G. Wen, K. Kuroda, H. Unoki, and N. Koshizuka, Appl. Phys. Lett. **67**, 2406 (1995).
- [5] M. J. Kramer, S. I. Yoo, R. W. MacCallum, W. B. Yelon, H. Xie, and P. Allenspach, Physica **C219**, 145 (1994).
- [6] H. Shaked, B. W. Veal, J. Faber, Jr., R. L. Hitterman, U. Balachandran, G. Tomlins, H. Shi, L. Morss, and A. P. Paulikas, Phy. Rev. **B41**, 4173 (1990).

- [7] B. Oh, Y. H. Choi, S. H. Moon, H. T. Kim, and B. C. Min, *Appl. Phys. Lett.* **69**, 2288 (1996).
- [8] M. Badaye, F. Wang, Y. Kanke, K. Fukushima, and T. Morishita, *Appl. Phys. Lett.* **66**, 2131 (1995).
- [9] M. Badaye, F. Wang, Y. Kanke, K. Fukushima, and T. Morishita, *Supercond. Sci. Technol.* **vol 8** , 638 (1995).
- [10] S. H. Moon and B. Oh, *IEEE. Trans. on. Appl. Superconductivity, the proceeding of Applied Superconductivity Conference, Pittsburgh, 1996* (in print).
- [11] B. David, S. Krey, R. Eckart, V. Doorman, G. Rabe, J. P. Krumme, and O. Dossel, *Applied Superconductivity Conference 1996, Abstract EDC-10* (1996).
- [12] I. S. Kim, K. W. Lee, Y. K. Park, and J. C. Park, *Appl. Phys. Lett.* **68**, 1859 (1996).
- [13] J. Geerk, Y. R. Li, H. Kittel, R. Smithey, G. Ulmer, and G. Linker, *Applied Superconductivity Conference 1996, Abstract MBC-5* (1996).
- [14] E. M. Gyorgy, R. B. van Dover, K. A. Jackson, L. F. Schneemeyer, and J. V. Waszczak, *Appl. Phys. Lett.* **55**, 283 (1989).

여 백



### 제 3 장 고온초전도 SQUID 자속계

Superconducting QUantum Interference Device(SQUID)는 외부 자기장의 변화를 출력 전압으로 변환시킬 수 있는 일종의 flux-to-voltage transducer로서, 초전도체가 갖고 있는 여러가지 특성중 flux quantization과 조셉슨(Josephson) 효과, 두 현상을 이용하여 만든 것이다. SQUID는 그 감도가 매우 뛰어나 현존하는 여러 방식의 자기 측정 장치중 가장 탁월한 감도를 갖는 소자이다.

이중에서 dc SQUID는 두개의 조셉슨 접합을 고리 모양으로 병렬 연결한 것으로, 외부 자기장이 변화함에 따라 SQUID의 출력 전압은 주기가 flux quantum( $\phi_0 = h/2e \sim 2.07 \times 10^{-15}$  Wb)인 정현파 함수로 나타나며, 이에 따라  $\phi_0$  보다 훨씬 작은-십만분의 일 이하-자기장의 변화를 측정할 수 있다. SQUID의 이러한 고감도성을 이용하면, flux로 변환될 수 있는 다양한 물리량들, 예를 들면 전류, 전압, 물질의 displacement, 인간의 두뇌에서 나오는 미세한 뇌파, 심전도, 중력파등을 측정할 수 있다. 따라서, SQUID는 전자공학, 의학, 지하자원 탐사 및 기초연구등 아주 광범위한 분야에 적용할 수 있는 중요성을 갖고 있다.

또한, 고온초전도체로 SQUID를 제작하면, 액체 헬륨에서 작동하는 저온초전도체 SQUID보다 감응력은 약간 떨어지지만, 다루기 쉽고, 값이 저렴한 액체 질소를 냉매로 사용할 수 있는 편리성으로 인하여 다양한 분야에 응용이 기대되어, 고온초전도 SQUID 제작에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다.

본 연구에서는 1차년도에 이어 dc SQUID 제작에 인공적인 GB (grain boundary) 조셉슨 접합의 일종인 bi-crystal 기판을 이용하는 방법을 사용하였다. 또, SQUID의 기본 원리 및 고온초전도 조셉슨 접합에 관해서는 1차년도 결과 보고서에서 자세한 내용을 다루었으므로, 본 보고서에서는 생략한다.

본 장에서는 고온초전도 SQUID의 디자인을 위한 simulation, SQUID의 coupling 방법과 자속계, mask 디자인과 SrTiO<sub>3</sub> bi-crystal 기판위에 PLD 방법으로 증착한 YBCO 박막으로 제작한 directly coupled SQUID 자속계의 액체질소 온도에서의 전자기적 특성과 잡음특성을 측정된 결과를 기술하였다.

## 제 1 절 SQUID 자속계(SQUID Magnetometer)

본 절에서는 고온초전도 SQUID 설계시 높은 동작온도로 인하여 특성에 미치는 영향에 대하여 조사한 결과와 bare SQUID의 자속을 감지하는 유효면적  $A_{\text{eff}}$ 의 증가 방법에 의한 SQUID 자속계의 설계에 대해 논의하도록 한다.

일반적으로 dc SQUID의 디자인에는 SQUID의 inductance  $L_{\text{SQ}}$ , 임계전류  $I_c$ , asymptotic resistance  $R_n$  값을 고려하여 최적화된 값을 simulation을 통해 추출하게 된다. 또한 많은 simulation을 통하여 체계화된 SQUID parameter들 -  $\beta_c$ ,  $\beta$ ,  $\gamma$  -을 통해 analytic 하게 표현되어 있는 식이 저온 초전도체의 경우 매우 잘 일치하는 결과를 주고 있다. 따라서 자신의 공정변수 - 박막두께와 선폭, bi-crystal의 misorientation angle에 따른  $I_c$ ,  $R_n$  -의 값을 파악하고, 공정의 용이성과 소자 특성의 최적화가 맞추어지도록 디자인하면 된다.

그러나, 고온초전도 SQUID의 경우 저온초전도 SQUID에서 잘 맞는 위의 이론들이 다르게 나타나는 것이 실험적으로 여러 그룹에 의해서 밝혀졌다. 그 주요한 이유는 고온초전도 SQUID의 경우 동작온도가 77 K로 기존의 저온초전도 SQUID의 4.2 K 보다 20배 가까이 높으므로, 열적요동에 의한 잡음이 SQUID에 크게 영향을 주기 때문이다. 이러한 열요동은  $R_n$ 에 열잡음을 주는 효과이외에도  $L_{\text{SQ}}$ 에 영향을 주어 thermal flux를 만들어서 modulation 전압의 진폭에 영

향을 주므로 SQUID의 특성에 복합적인 영향을 준다. 따라서 고온초전도 SQUID의 설계시에는 이러한 효과를 충분히 고려하여야만 바르게 작동하는 SQUID를 얻을 수 있다.

SQUID의 변수  $L_c$ 와  $R_n$ 이 같을 때,  $L_{SQ}$ 에 따라 modulation 전압  $\Delta V$ 가 어떻게 변해가는가를 나타내 주는가를 simulation해본 결과가 Fig. 3-1-1에 나타나 있다. 4.2 K에서는 inductance가 큰 극한(>100 pH)에서  $1/L$ 의 기울기로  $\Delta V$ 가 변해가는 반면에 77 K에서는 inductance가 100 pH가 넘는 경우  $1/L^2$ 로 급격히 감소하여  $L_{SQ}$  값이 200 pH를 넘을 경우 제대로 작동하는 SQUID를 얻기 힘든 것을 볼 수 있다. 따라서 통상적으로 150 pH 내외로 디자인하는 저온초전도 SQUID와는 달리 고온초전도 SQUID의 적정 inductance는 80 pH가 넘지 않는 것이 좋다.

또한, 일반적으로  $L_c R_n$  값이 큰 조셉슨 접합을 이용하여 SQUID를 만드는 것이 유리하지만, 어떤 inductance를 갖는 SQUID 인가에 따라 접합의  $L_c$  값 자체가 훨씬 주요함을 Fig. 3-1-2의 simulation 결과에서 볼 수 있다.

이상의 두 simulation 결과에서 SQUID의 inductance를 최소화하며,  $L_c R_n$  값은 크되  $\beta (=2LI_0/\Phi_0)$  값은 1로 맞추어 주는 것이 저온초전도 SQUID의 경우 보다 중요하다는 것을 알 수 있다. 따라서 이런 값을 가지도록 SQUID를 디자인하면 되는데, 고온초전도체의 경우 각각의 parameter 추출에 어려움이 있다.

첫째, low inductance SQUID 설계시 geometric inductance를 정확히 계산해 내는 것 이외에도, kinetic inductance에 의한 효과가 무시 못할 만큼 크다는 것이다. 보다 rigid한 Cooper pair를 갖는 고온초전도체는 coherence length  $\xi$ 가 작고, penetration depth  $\lambda$ 가 커서, Cooper pair의 inertia에 의한 inductance의 kinetic term이 상당히 크다. 또한 단층구조의 접합 구조를 갖는 SQUID에서



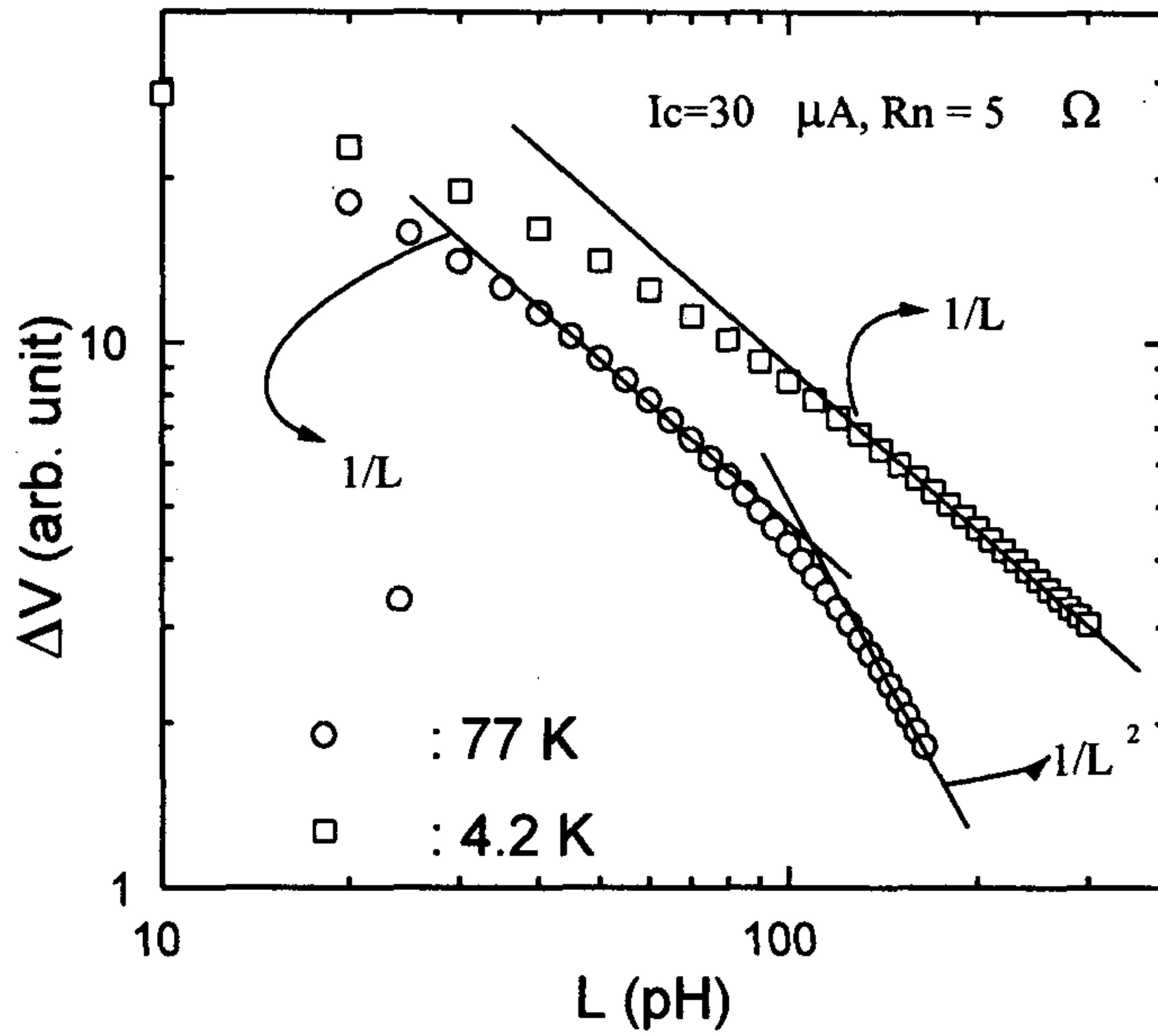


Fig. 3-1-1. 4.2 K와 77 K에서 inductance에 따른 SQUID의 modulation 전압  $\Delta V$  변화의 simulation 결과. 77 K에서 절대값도 작고,  $L_{SQ}$  증가에 따른 감소도 훨씬 빠르다는 것을 볼 수 있다.

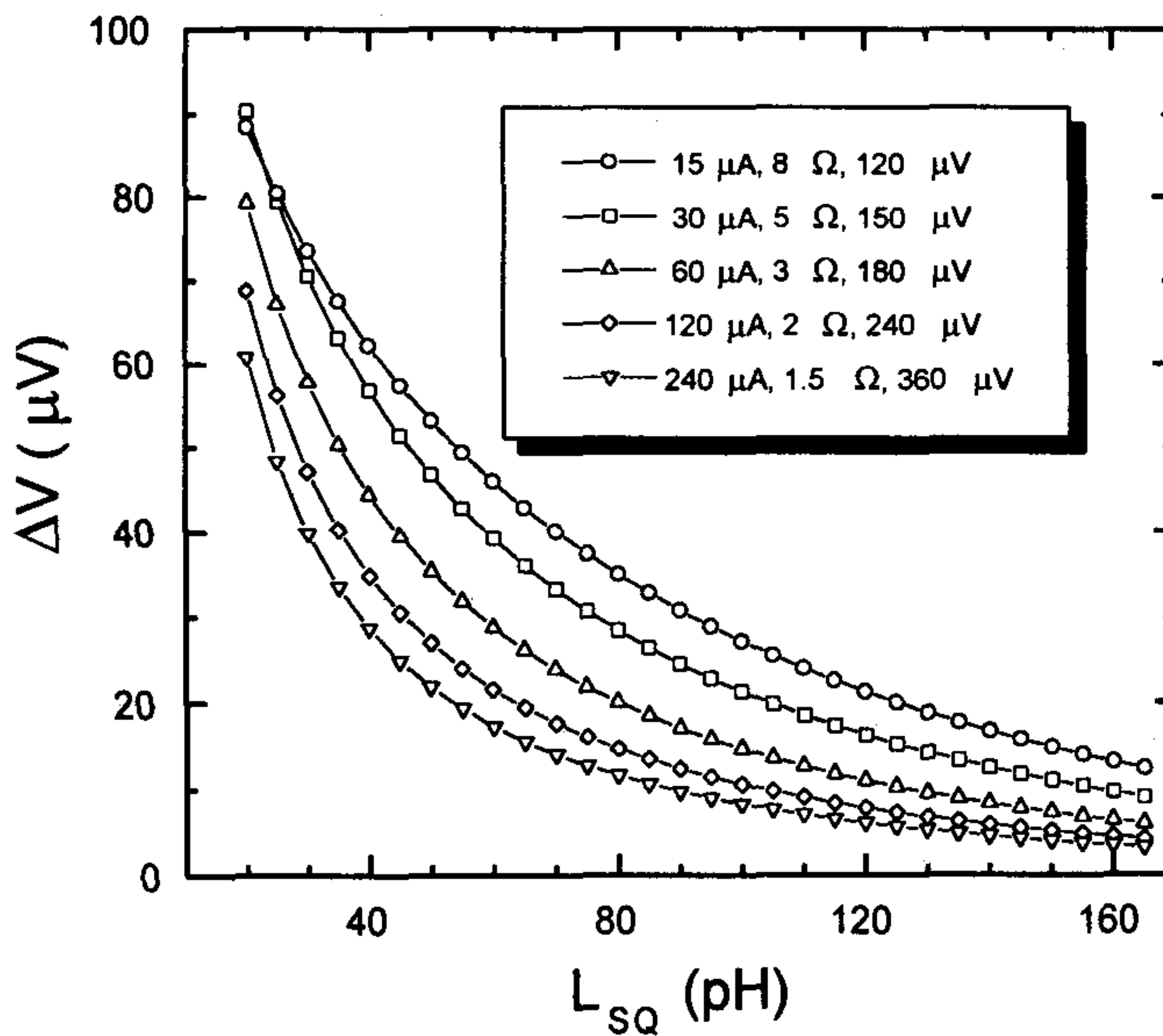


Fig. 3-1-2. 77 K에서 여러 SQUID들의  $L_{SQ}$ 에 따른  $\Delta V$  변화의 simulation 결과.



geometric inductance의 계산도 어떤 수식에 의해 간략화 하기에는 slit의 효과, 접합 부분의 효과 등의 값이 매우 크고, 박막의 두께도  $2\lambda$  보다 얇아서 numerically 계산해야 한다. 본 연구에서는 고주파 회로 연구에 이용되는 software를 개조하여 사용하여 고온초전도 SQUID의 inductance를 계산해 설계 하였으며, 실험 결과 비교적 잘 일치함을 확인할 수 있었다.

둘째, 조셉슨 접합의 제작시 사용하는 bicrystal 기판에서의  $I_c$ ,  $R_n$  값들의 조절이 용이하지 않다는 것이다. Bicrystal의 misorientation angle에 따라 이 값들은 개략적으로 결정이 되는데, submicron patterning 기술 없이 원하는 parameter의 설정을 위하여서는 특별한 증착기술이 요구된다.  $I_c R_n$  값이 큰  $24^\circ$  misorientation angle의 bicrystal에 두께 2000 Å YBCO 박막을 사용 선폭  $2\mu\text{m}$ 로 접합을 제작하는 경우 대체로  $I_c$  값이 크고,  $R_n$  값이 작게 나타난다. 그러나 박막의 두께를 1000 Å 이하로 하는 것은  $\lambda$  값과 비교하여 너무 작아 지고, 선폭  $2\mu\text{m}$  이하의 patterning 기술은 특별한 방법이 요구된다. 따라서 우리는 박막의 초전도 특성을 저하시키지 않으면서, 접합부분의  $I_c$ ,  $R_n$  값을 조절할 수 있는 공정을 개발하여 문제를 해결하였다.

SQUID 자체는 자속에 대하여 매우 민감한( $< 10^{-5} \Phi_0/\text{Hz}^{1/2}$ ) 소자이지만, 자속은 단위(Weber =  $\text{T} \cdot \text{m}^2$ )로 나타나듯이 자기장에 면적을 곱한 값이므로, SQUID의 유효면적  $A_{\text{eff}}$ 가 작은 경우 실제 자기장의 변화에는 그리 민감하지 않은 소자가 된다. 따라서 SQUID를 자속계로 사용하려면 SQUID의  $A_{\text{eff}}$ 를 크게 만드는 것이 대단히 중요하다. 가장 손쉽게 생각되는 방법은 SQUID를 크게 만드는 것이지만, 그럴 경우 SQUID의 inductance도 따라서 커지므로 제대로 작동하는 자속계를 제작할 수 없다. 특히 앞에서 살펴본 바와 같이 고온초전도 SQUID의 경우 inductance의 제한이 특히 심하므로 작은 inductance 하에서 어

평계  $A_{eff}$ 를 늘일 수 있느냐가 관건이라 하겠다.

따라서 실제 SQUID 자속계의 제작에는  $A_{eff}$ 를 늘이는 다양한 방법이 쓰이고 있다. 가장 대표적인 방법들을 소개하면, 1) SQUID washer를 크게 만들어서 flux focusing을 이용하는 방법(Fig. 3-1-3), 2) SQUID의 inductance loop을 병렬로 연결하여 사용하는 fractional turn(또는 multi-loop) SQUID(Fig. 3-1-4), 3) Pick-up coil과 연결된 다층의 multi-turn input coil을 inductively coupled SQUID(Fig. 3-1-5), 4) Pick-up coil을 SQUID 몸체에 직접 연결시키는 directly coupled SQUID(Fig. 3-1-6) 등의 네 가지 방법을 꼽을 수 있다. 각각의 방법의 특징과 장단점을 간략히 논의하면 다음과 같다.

1) Large Washer SQUID : 초전도체는 자속(magnetic flux)을 내부로 통과시키지 않는 기본 성질을 갖는다. 따라서 내부 hole의 크기가 일정하더라도, 외부의 washer를 크게 만들면 washer 부분을 지나갈 자속들의 일부분이 hole로 모이게 되고 이를 flux focusing 효과라 한다. Fig. 3-1-3은 이러한 개념에 대한 개략도 이다. 그림에서 유효면적  $A_{eff}$ 는 약  $\alpha dD$ 가 되고, SQUID hole의 inductance  $L_{SQ}$ 는 약  $1.25 \mu_0 d$ 가 된다. 고온초전도 SQUID 자속계를 이 방법으로 제작할 경우 overlap 형식의 slit 구조를 만들기가 극히 까다롭기 때문에, washer의 크기가 커질 경우 slit 부분의 inductance가 hole의 inductance 보다 더 커져서 실용적이지 않다. 따라서 별도의 박막을 제작하여 적당한 크기의 SQUID에 coupling 시켜 flux focuser 역할을 하도록 하는 방법이 채택되고 있다. 이런 방법을 채택한 경우  $10 \times 10 \text{ mm}^2$  기판에서 약  $0.1 \sim 0.2 \text{ mm}^2$ 의  $A_{eff}$ 를 갖는다. SQUID body에서 flux noise가 발생하기 쉽고, 100 pH이하의  $L_{SQ}$ 를 갖는 SQUID를 제작하기 어려우며, 이론적 유효면적의 최대치도 크지 않기 때문에 제작 방법이 용이함에도 불구하고 이 방법은 널리 쓰이지는 않고 있다.



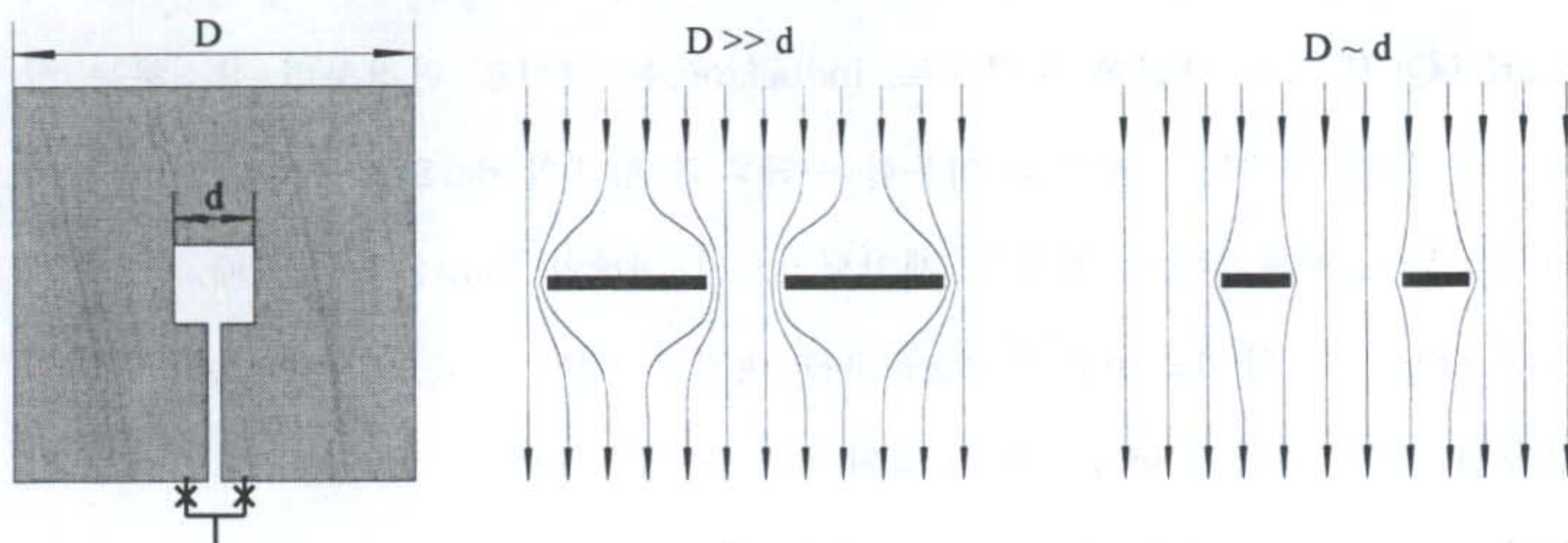


Fig. 3-1-3. SQUID washer에서의 flux focusing 효과.

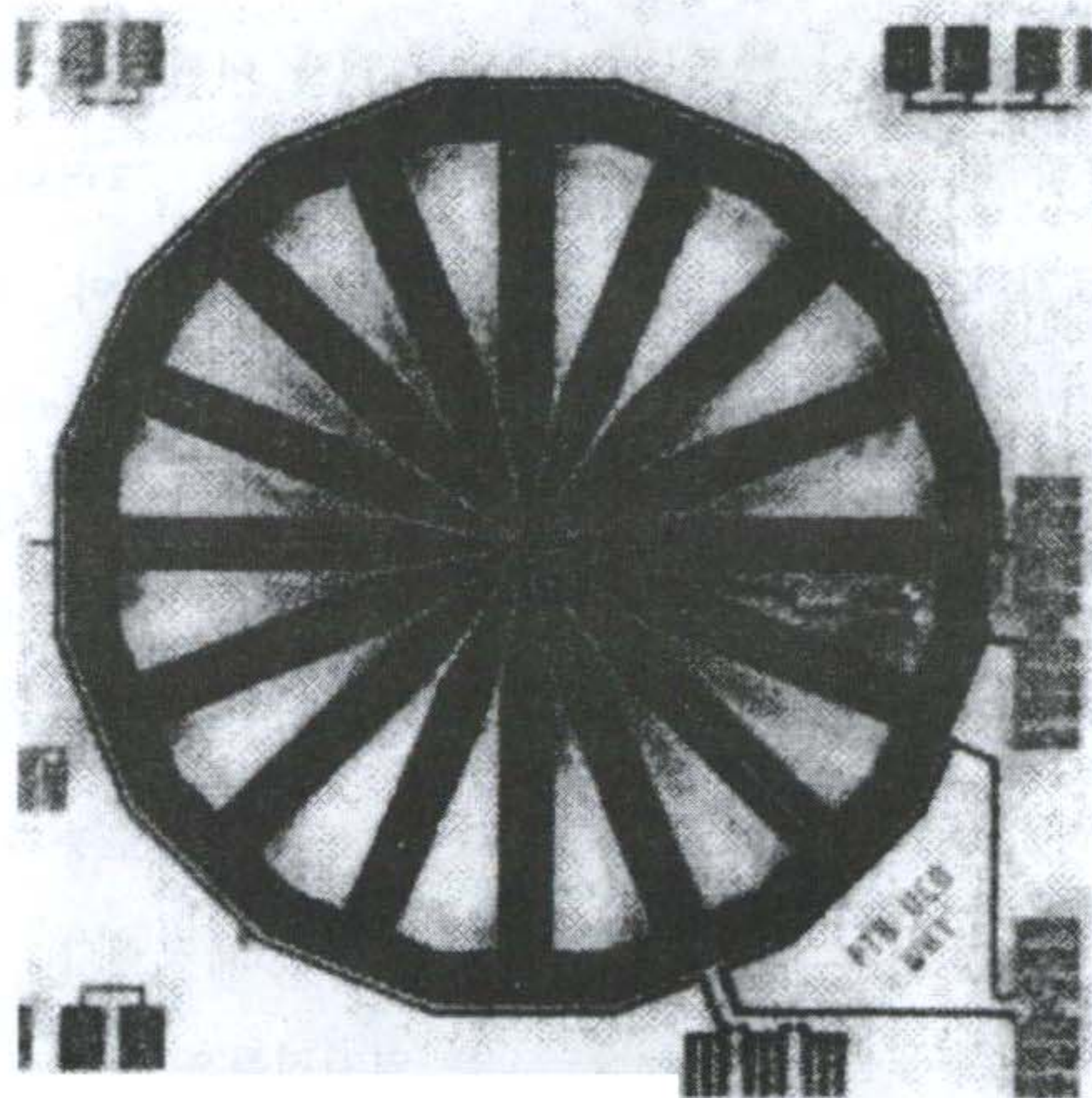


Fig. 3-4. YBCO-STO-YBCO 다층박막과 bicrystal GB 접합을 이용한 16 loop fractional turn SQUID. (U.C. Berkeley, PTB).



2) Multi-loop SQUID : 최초 Zimmerman이 point contact을 갖는 저온초전도 rf SQUID에서 제안한 방법으로, inductance는 병렬로 연결하면 감소하는 성질을 이용한 것이다. 박막을 이용한 수레바퀴 형태의 dc SQUID는 Drung등에 의해 저온초전도체에서 최초로 제안되었으며, 8개의 loop을 가질 때,  $7.2 \times 7.2 \text{ mm}^2$  chip에서 약  $4.2 \text{ mm}^2$ 의  $A_{\text{eff}}$ 를 나타내었고, 이때  $L_{\text{SQ}}$ 는 약 400 pH 내외의 값을 보였다. 하나의 loop으로 구성되어 있을 경우 inductance와 유효면적을 각각  $L_p$ ,  $A_p$ 로 놓을 경우 이런 SQUID의  $L_{\text{eff}}$ 와  $A_{\text{eff}}$ 는 각각

$$L_{\text{eff}} = L_p/N^2 + L_s/N + L_j \quad (\text{단, } L_s \text{는 spoke-line, } L_j \text{는 접합의 inductance})$$

$$A_{\text{eff}} = A_p/N - A_s \quad (\text{단, } A_s \text{는 spoke-line의 유효면적})$$

으로 주어진다. 따라서 수식적으로 살펴보면  $N$ 의 증가에 따라  $L_{\text{eff}}$ 의 감소 속도가  $A_{\text{eff}}$ 의 감소 속도 보다 빠르므로, 적당한  $N$ 에 대해서 원하는 작은  $L_{\text{eff}}$ 를 갖고,  $A_{\text{eff}}$ 가 충분히 큰 SQUID 자속계를 만들 수 있다. 그러나, 고온초전도체의 경우  $L_{\text{eff}}$ 의 크기가 충분히 작아야 하므로  $N$ 을 크게 해야 하고, 그럴 경우  $L_s/N$ 과  $L_j$ 의 값이 무시 못할 크기가 되어서 충분히 작은  $L_{\text{eff}}$ 를 얻기 힘들다. Fig. 3-1-4는 Berkeley와 PTB가 공동으로 개발한 고온초전도 SQUID 자속계로  $L_{\text{eff}} \sim 145 \text{ pH}$ ,  $A_{\text{eff}} \sim 1.5 \text{ mm}^2$ 의 값을 나타내었다. 이는 대단히 큰 유효면적으로, 큰  $L_{\text{eff}}$ 로 인해 자속잡음이 그다지 우수하지는 않지만 대단히 우수한 자기 감도를 나타내었다. 이러한 SQUID 자속계는 2개의 초전도층과 한 개의 절연층을 갖는 다층구조로 bicrystal 접합을 이용하여 제작했다. 이런 형태의 SQUID의 보다 폭넓은 응용을 위해서는 작은 임계전류와 큰 저항을 갖는 접합의 개발이 선행되어야 하며, 추가로  $L_{\text{eff}}$ 를 줄이는 연구가 이루어져야 할 것으로 판단된다.

3) 다층의 FT(flux transformer) coupled SQUID 자속계 : 1), 2)의 경우와는



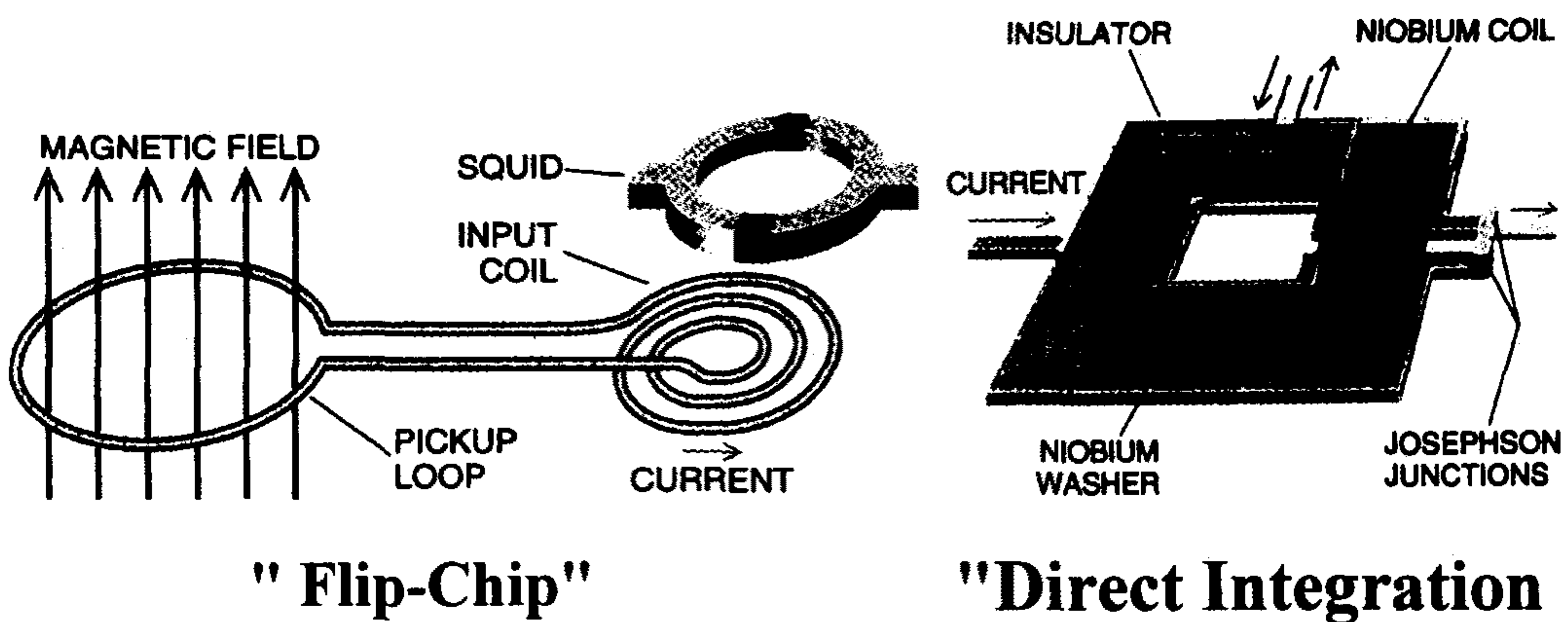


Fig. 3-1-5. Multi-level FT(flux transformer)를 이용한 SQUID 자속계의 schematics. Washer type SQUID를 이용하며, coupling 방법에 따라 flip-chip과 direct integration 방법으로 나뉜다..

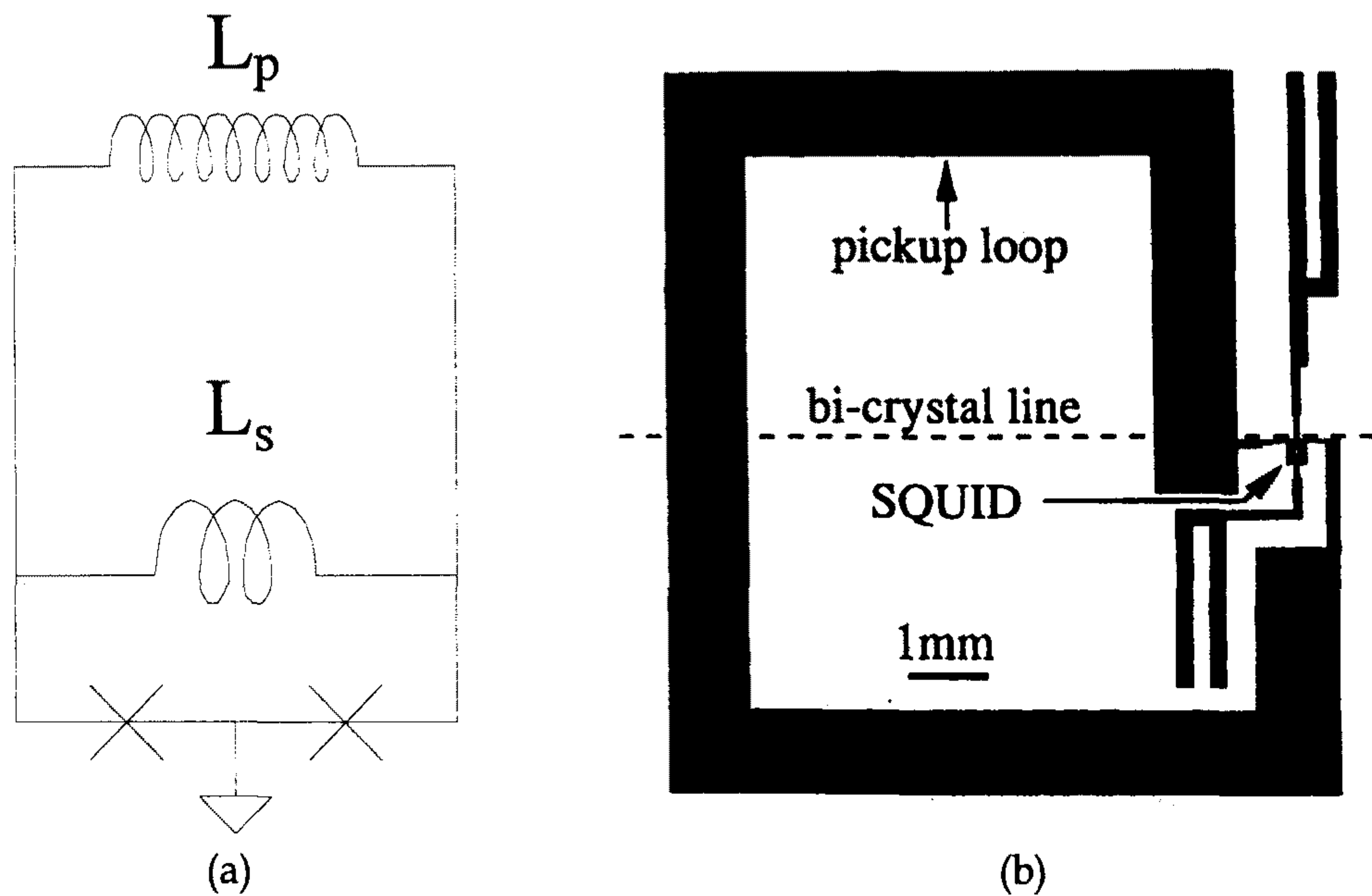


Fig. 3-1-6. Directly coupled SQUID 자속계의 schematic(a)과 bicrystal 조셉슨 접합을 이용해 제작한 실례 ((b) U.C.Berkeley)

달리 pick-up loop과 input coil을 별도로 제작하고 이를 washer type의 SQUID에 inductively couple 시켜 사용하는 자속계의 형태로 저온초전도체에서 Ketchen, Jaycox등에 의하여 최초로 연구되었다. 이는 SQUID의 washer를 ground plane으로 사용하여 그 위에 pick-up coil과 inductance가 matching되는 multi-turn input coil을 couple 시키는 방법으로 제작되었다. 이 방법을 사용할 경우 유효면적은

$$A_{\text{eff}} = A_{\text{SQ}} + A_p M_i / (L_i + L_p)$$

$$\approx \alpha A_p n L_{\text{SQ}} / (L_i + L_p) \quad (\text{단, } n \text{은 input coil의 turn수})$$

로 주어지며, 대개  $L_i = L_p$ 일 경우 최대치를 갖는다. 따라서  $n$ 을 크게 할 경우 충분히 큰  $L_p$ 에 대해서 최적화 시킬 수 있고, 유효면적을 상당히 크게 할 수 있다. 예로  $9 \times 9 \text{ mm}^2$  chip에서  $L_{\text{SQ}} = 80 \text{ pH}$  일 때, 약 15 turn input coil에 대해 최적화 되며, 이때 유효면적  $A_{\text{eff}}$ 은 약  $1.6 \text{ mm}^2$ 이 된다.(coupling 상수  $\alpha = 0.8$  가정) 이런 단순한 계산상으로는 가장 우수한 SQUID 자속계를 만드는 방법으로 보이며, 실제로 저온초전도 SQUID 자속계의 주류는 이러한 형태를 가지고 있다. 그러나 고온초전도 SQUID의 경우 다층박막 공정은 추가의 잡음을 발생시키는 경향을 나타내어서 우수한 자속계의 수율이 낮은 단점을 갖게 된다. Fig. 3-1-5에서 보듯이 flip-chip인 경우 3층, 집적할 경우 4~5층의 박막 공정을 요하므로, 다층박막 기술의 확립이 이 자속계의 중요한 점이다. 이미 본 연구진은 본 과제의 1차년도에 flip-chip FT 개발에 성공하였으나, 추가 잡음을 확인한 바 있다. 또, 고온초전도체의 경우 slit의 inductance가 문제가 되므로 디자인 시에 washer 크기의 제한도 하나의 어려움이라 하겠다. 이런 형태의 자속계에 대한 연구는 다양한 변형이 가능하므로 지속적 연구가 필요하다 하겠다.

4) Directly coupled SQUID 자속계 : Pick-up coil이 SQUID의 몸체와 직접

연결된 형태로  $L_{SQ}$ 는 큰 inductance의 mismatch로  $L_p$ 의 영향을 거의 받지 않으며, 단층 공정이므로 process가 간단하다는 장점이 있다. (Fig. 3-1-6) 이때 유효면적은

$$A_{eff} = A_{SQ} + \alpha A_p L_{SQ}/L_p \approx \alpha A_p L_{SQ}/L_p$$

로 주어진다. 앞의 3)의 경우와 비교하면 약  $2/n$  만큼 작은 유효면적을 갖는다. 따라서 공정이 확립된 저온초전도체에서는 널리 쓰이지 않던 방법이지만, 고온초전도체의 경우 추가잡음 없이 임의의 작은  $L_{SQ}$ 를 갖는 SQUID 자속계의 제작이 가능하여서 실제 응용을 위하여 많이 제작하는 방법이다. 본 과제에서도 이 방법을 이용하여 자속계를 제작, 응용연구를 수행하였다.

## 제 2 절 Directly coupled SQUID 자속계의 설계 및 제작

앞절에서 논의한 바와 같이 directly coupled SQUID 자속계는 이론적인 자기감도는 조금 떨어지지만, 공정이 간단하며 액체질소온도에서 최적으로 동작하도록 설계 제작할 경우, 심장에서 발생하는 생체 자기 신호(MCG, magnetocardiogram)를 측정하는데 충분한  $1 \text{ pT}/\sqrt{\text{Hz}}$  이하의 자기감도를 성취할 수 있을 것으로 기대할 수 있다. 본 절에서는 directly coupled SQUID 자속계를 포함한 다양한 초전도 소자의 설계에 대한 논의, 간략한 제작 과정을 기술한다.

아래의 Fig. 3-2-1은 prototype으로 디자인한 directly coupled SQUID의 개략도이다. 아주 작은 크기의 SQUID가 큰 pick-up loop에 직접 연결된 기본구조는 위의 Fig. 3-1-6과 동일하다. 그러나 pick-up loop의 형태나 모양이 사뭇 차이나는 것을 볼 수 있다. 앞절의 식  $A_{eff} \approx \alpha A_p L_{SQ}/L_p$ 을 살펴보면  $L_{SQ}$ 를 어느 값으로 고정시킬 경우,  $A_p/L_p$ 를 같은 기판 내에서 최대로 하는 것이 중요

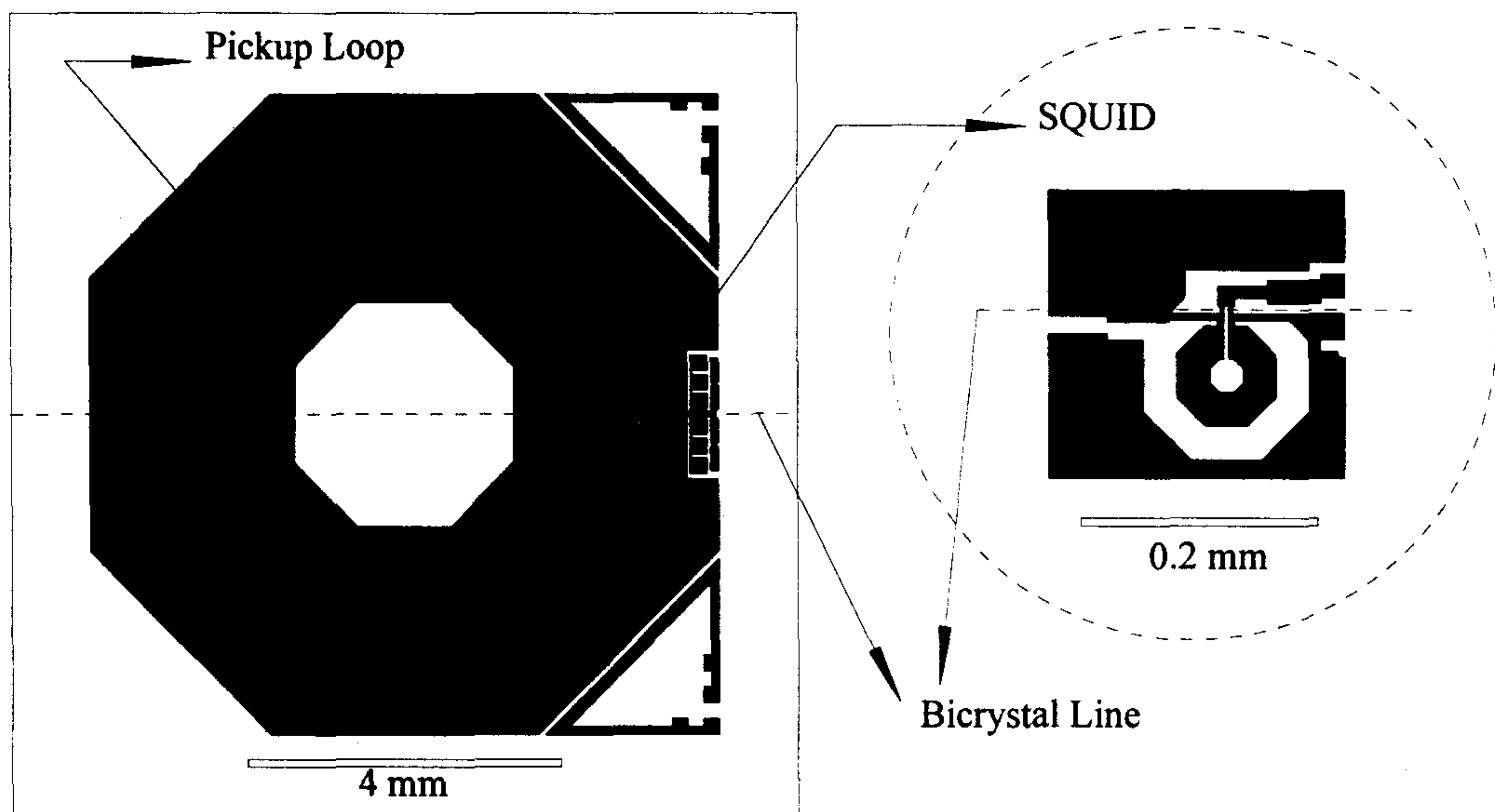


Fig. 3-2-1. Directly coupled magnetometer의 개략도와 bicrystal SQUID와의 coupling 상세도. 점선은 grain boundary를 나타낸다.



함을 알 수 있다.

$A_p$ 는 개략적으로  $Dd$ 에 비례하는 값을 갖고,  $L_p$ 는  $D > 3d$ 의 조건을 만족할 경우  $d$ 의 크기에 관계없이  $1.25\mu_0 d$ 의 값을 가지므로,  $D > 3d$ 가 되도록 하면  $A_p/L_p$ 는  $D/1.25\mu_0$ 의 상수 값을 갖게 된다.  $D < 3d$ 일 경우  $A_p$ 의 증가 속도보다  $L_p$ 의 증가 속도가 훨씬 빠르므로 폭이 넓은 pick-up loop을 갖는 SQUID의 디자인이 바람직하다. 또, 같은 면적일 경우 다각형의 perimeter의 길이에  $L_p$ 는 비례하므로 원형에 가까운 디자인이 유리하다. 또한 SQUID에 couple되는 양은 SQUID 접합부분을 제외한 SQUID inductance에 비례하므로, 공정이 허용하는 범위 이내에서 접합의 길이를 짧게 제작하여야 한다. 이상의 디자인 룰을 고려한 결과가 Fig. 3-2-1에 나타나 있다. 이러한 prototype의 directly coupled SQUID 자속계는 지속적인 실험과 simulation에 의하여 계속 개선시켜 나갔다.

개선된 점은 washer의 형태는 사각형을 기본으로 모서리를 절단하였는데, 이는 공정시 얻을 수 있는 최대 면적을 겨냥한 결과이다. 또한 washer의 폭이 전체의  $\frac{1}{4}$  가량 되도록 디자인하였는데, 앞에서  $L_p$ 의 최적화 조건이  $D > 3d$ 라고 한 것과 달리 slit의 inductance를 고려할 경우  $D \approx 2d$ 에서 최적화되는 것을 발견했기 때문이다. 그러나 그 차이는 아주 작은 값으로 나타났다. 그 외에 contact pad의 위치 및 배선을 단순화 시켰고, 접합의 선폭은 2 또는 3  $\mu\text{m}$ 로 고정시켰다. SQUID 자체에 있어서는 전체적으로  $L_{SQ}$ 를 10 %이상 감소 시켰으며, SQUID 몸체의 선폭을 줄여서 차지하는 면적을 줄이고, 자기장 하에서 응용을 염두에 두었다. 이러한 SQUID 자속계는 다채널 심자도 측정(본 보고서 4장)에 사용하였다.

Bicrystal directly coupled SQUID 자속계의 제작은 본 보고서 2장에서 기술한 PLD 방법으로 박막을 증착하고, photolithography와 Ar ion milling 방법을

사용하였다. 측정을 위한 Au contact은 스퍼터링 방법과 photoresist lift-off 방법으로 제작하였으며, 산소 분위기에서 열처리 후  $100\ \mu\text{m} \times 100\ \mu\text{m}$  pad의 접촉 저항은  $0.1\ \Omega$  이하였다. 제작이 완료된 SQUID는 자체 설계로 제작된 PCB holder에 부착하여, Al wire bonding 후 액체질소에 담구어 77 K에서 측정하였다. 이러한 공정은 본 과제의 1 차년도와 비교하여 크게 변화는 없지만 일부 개선이 있었다.

개선점을 살펴보면 YBCO 증착조건의 변화, 보호층 증착 방법의 안정화, 식각 공정의 안정화 등을 들 수 있다. 이런 과정을 거쳐 수율 관리는 물론 SQUID parameter의 조절이 가능해 졌다. 이러한 공정의 변화는 단계적으로 이루어진 것으로 이 장에서 소개되는 결과는 초기의 결과이고, 이후 장들에서 다루는 SQUID 자속계의 결과에 나타난다. 이외에 process 상의 변화는 시스템 제작 시의 SQUID packaging, 측정 시스템의 개선 등이 이루어졌다. 이에 대한 내용도 이후 단원에서 단계별로 기술하도록 한다.

이상의 과정을 거쳐 제작된 SQUID의 기본적 특성 - 전류-전압(I-V), 전압-자속(V- $\Phi$ ), 잡음 특성 -의 측정 결과에 대해서는 다음절에 논의한다.

### **제 3 절 Directly coupled SQUID 자속계의 측정 결과 및 논의**

본 절에서는 Fig. 3-2-1의 layout으로 제작한 directly coupled SQUID 자속계에 대한 측정결과를 중심으로 기술한다. 이 자속계에서  $L_{SQ} = 67\ \text{pH}$ (SQUID loop과 기타 부분 포함)로 디자인 되었으며, 이때 예상되는 coupling constant  $\alpha$ 는 0.84로 설계되었다. 한편 pick-up coil의 유효면적  $A_p$ 는 flux focusing 효

과를 고려하여  $20 \text{ mm}^2$ 로 계산되었고, 단순히 pick-up loop의 inductance만 고려하면  $L_p = 3.7 \text{ nH}$ 로 계산된다. 따라서 이 경우 directly coupled SQUID 자속계의 유효면적  $A_{\text{eff}}$ 는  $0.3 \text{ mm}^2$ 가 얻어진다.

다음의 Fig. 3-3-1은 이 SQUID 자속계를 permalloy로 자기차폐한 공간에서 액체질소에 담구어 측정된 전류-전압(I-V)과 자속-전압(V- $\Phi$ ) 특성의 측정 결과이다. 먼저 Fig. 3-3-1(a)의 I-V 특성 측정결과를 살펴보면  $2I_c = 340 \mu\text{A}$ ,  $R_n/2 = 0.73 \Omega$ 의 값을 보이며, RSJ(resistively shunted junction) 특성을 잘 나타내고 있다. 또, Fig. 3-3-1(b)의 V- $\Phi$  특성 측정결과를 살펴보면  $I_{\text{bias}} = 370 \mu\text{A}$ 에서의 결과로 규칙적인 정현파 특성을 나타내고 있으며, 진폭(modulation amplitude)  $\Delta V$ 는  $15.5 \mu\text{V}$ , 주기  $9.0 \text{ nT}$ 의 우수한 결과를 보여주었다.

이러한 측정 결과로부터 개선점을 찾아보면 다음과 같다. 첫째, SQUID의 modulation 특성에 가장 큰 영향을 끼치는  $\beta$  값이 약 11로 계산되어 optimum한 값인 1에서 상당히 멀리 벗어나 있음을 알 수 있다. I-V 측정 결과에서  $I_c R_n$  값은  $250 \mu\text{V}$ 로 상당히 큰 값을 나타내어서 우수한 접합이지만, SQUID의  $\Delta V$ 는 그 값의 단지 6% 정도인  $15.5 \mu\text{V}$ 를 나타내었다. Bicrystal 접합의 경우  $I_c$ 가  $1/n$ 로 감소할 경우  $R_n$ 은 단지  $\sqrt{n}$  배 증가한다는 scaling 법칙이 적용된다고 알려져 있다. 따라서  $I_c$ 가  $1/10$ 로 줄도록, 즉  $17 \mu\text{A}$ 가 되도록 공정을 수행한 경우를 상정하면,  $R_n$ 은  $\sqrt{10}$  배인  $4.6 \Omega$ 을 나타낼 것이다. 이 경우  $I_c R_n$  값은  $78 \mu\text{V}$ 로 상당히 감소하지만  $\Delta V$ 는  $28.5 \mu\text{V}$ 로 계산되어서 약 80%의 개선이 예상된다. 참고로  $\Delta V$ 의 계산은 thermal noise rounding을 고려한 simulation의 analytic한 form을 사용하였으며, 원래 측정값을 넣으면  $15.9 \mu\text{V}$ 가 얻어져 측정치와 잘 일치한다. 제작한 SQUID 자속계는 선폭  $3 \mu\text{m}$ 의 접합으로, 박막두께는  $2000 \text{ \AA}$ 이고  $24^\circ$  bicrystal 기판을 사용하였다.

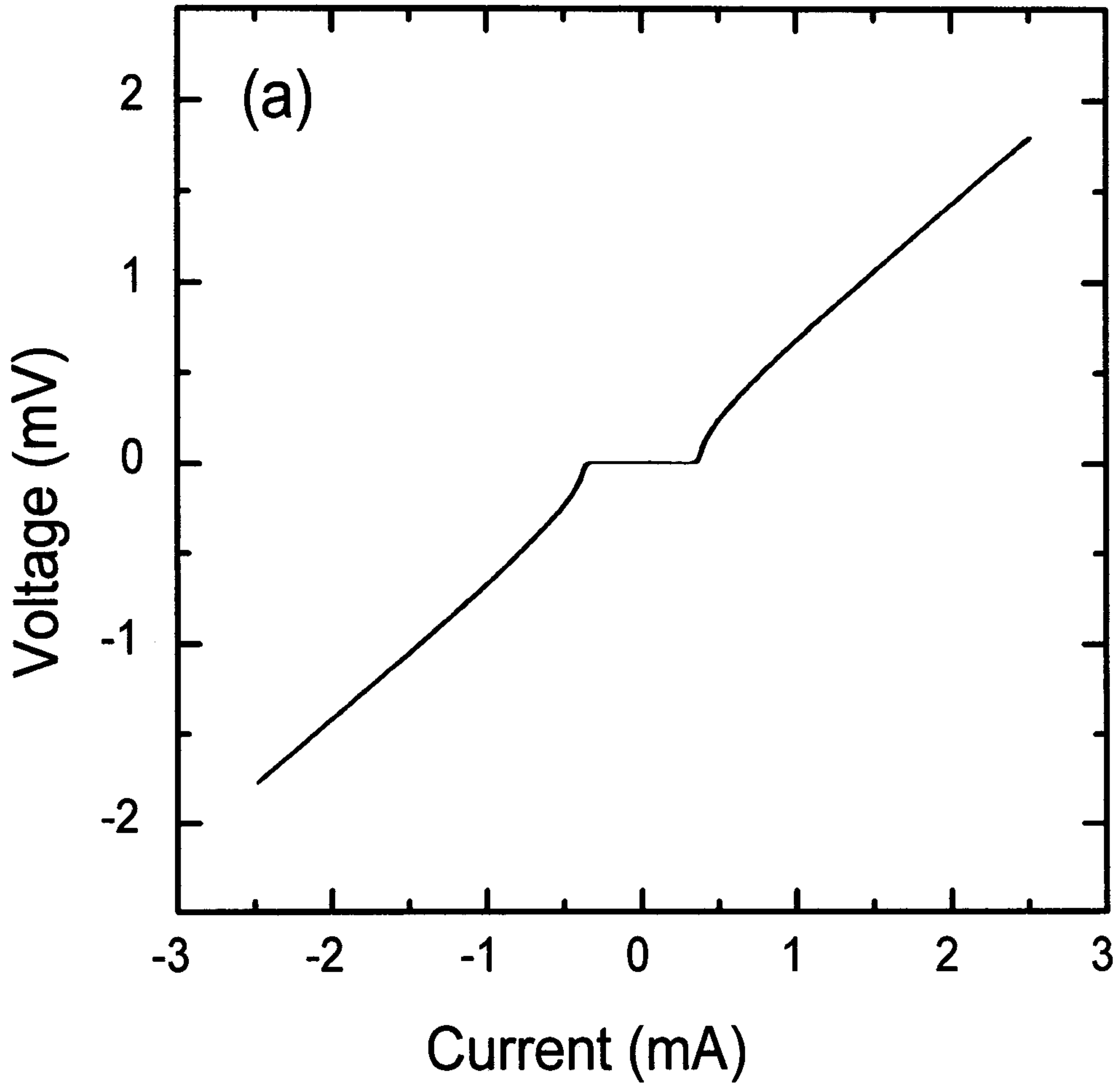


Fig. 3-3-1(a). 77 K 에서 directly coupled SQUID magnetometer의 I-V 특성



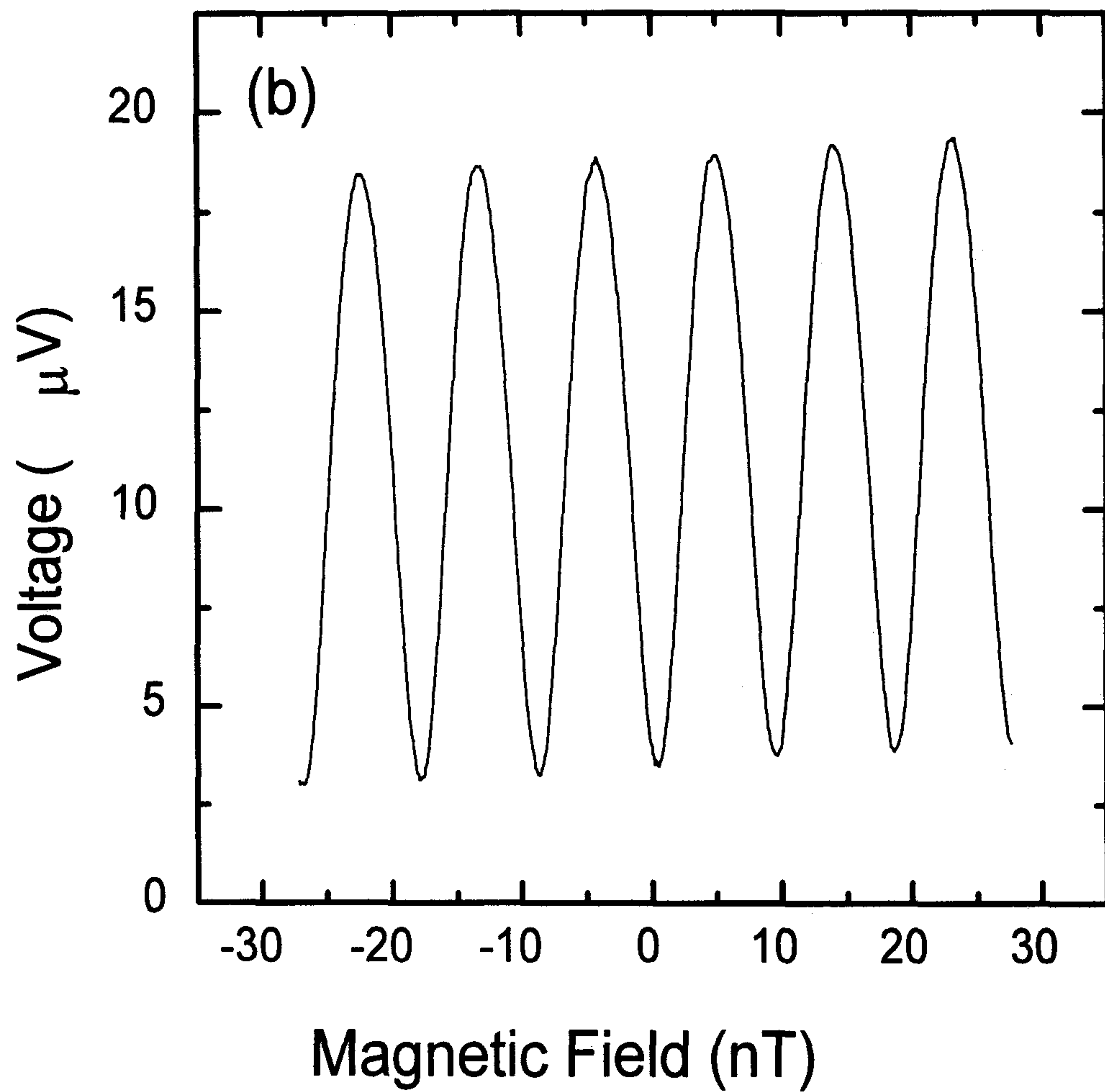


Fig. 3-3-1(b). 77 K 에서 directly coupled SQUID magnetomete의  $V-\phi$  특성.

이 경우도 process의 개선, 접합의 넓이 및 박막의 두께 조절로 개선된 결과를 얻을 수 있는데 이에 대해서는 본 보고서 다음장에서 나누어 기술하도록 한다.

한편 Fig. 3-3-1(b)에서 주기는 9.0 nT로 얻어졌는데 이를 자속계의 유효면적으로 환산하면  $A_{\text{eff}}$ 는  $0.23 \text{ mm}^2$ 가 된다. 이런  $A_{\text{eff}}$  값은 위에서 계산한  $0.30 \text{ mm}^2$ 와는 큰 차이를 보인다. 원인은 SQUID inductance의 계산의 불일치, pick-up loop inductance 계산의 불일치 등을 생각할 수 있다. 그러나, SQUID의 inductance는  $\Delta V$ 의 계산결과에서 잘 일치함을 볼 수 있었으므로, pick-up loop inductance 계산에서 error의 원인으로 살펴보았다. 따라서 software를 사용하여 실제 디자인한 geometry에 대하여  $L_p$  값을 numerically 다시 계산해 보았다. 그 결과  $L_p$  값은 4.6 nH로 나타나서 약 25 %가 증가함을 볼 수 있었다. 새로이 계산한  $L_p$  값을 넣고  $A_{\text{eff}}$  값을 다시 계산해 보면  $0.243 \text{ mm}^2$ 가 되어서, 측정치와 비교적 잘 일치함을 확인할 수 있었다. 작은 값의 차이는 contact pad와 line등의 구조를 고려하지 않은데 에 원인이 있다고 판단된다.

이 SQUID 자속계의 자기 감도를 나타내는 잡음 측정결과가 Fig. 3-10(a)에 나타나 있다. 자속 잡음의 측정은 FLL(flux locked loop)을 구성하여서 자기차폐된 공간에서 수행하였다. 이미 지난 1차년도 결과보고서에서 언급한 바와 같이 FLL을 구성해야 실제 자기장의 변화를 선형화하여 측정하는 null detector로 자속계를 활용할 수 있다. 이 장에서의 측정에는 냉각된 matching transformer와 상용의 pre-amp, lock-in을 사용하였으며, 자체 제작한 SQUID 제어 시스템에 관해서는 다음장에서 기술하도록 한다.

Fig. 3-3-2(a)는 위에 기술한 자속계 1번에 대해 bias reversal technique을 사용하지 않고 dc current bias를 이용 측정한 결과로 자속잡음  $S_\phi$ 는 1 Hz에서  $1 \times 10^{-8} \phi_0^2/\text{Hz}$ , 10 Hz에서  $1.5 \times 10^{-9} \phi_0^2/\text{Hz}$ , 100 Hz에서  $3 \times 10^{-10} \phi_0^2/\text{Hz}$ , 그

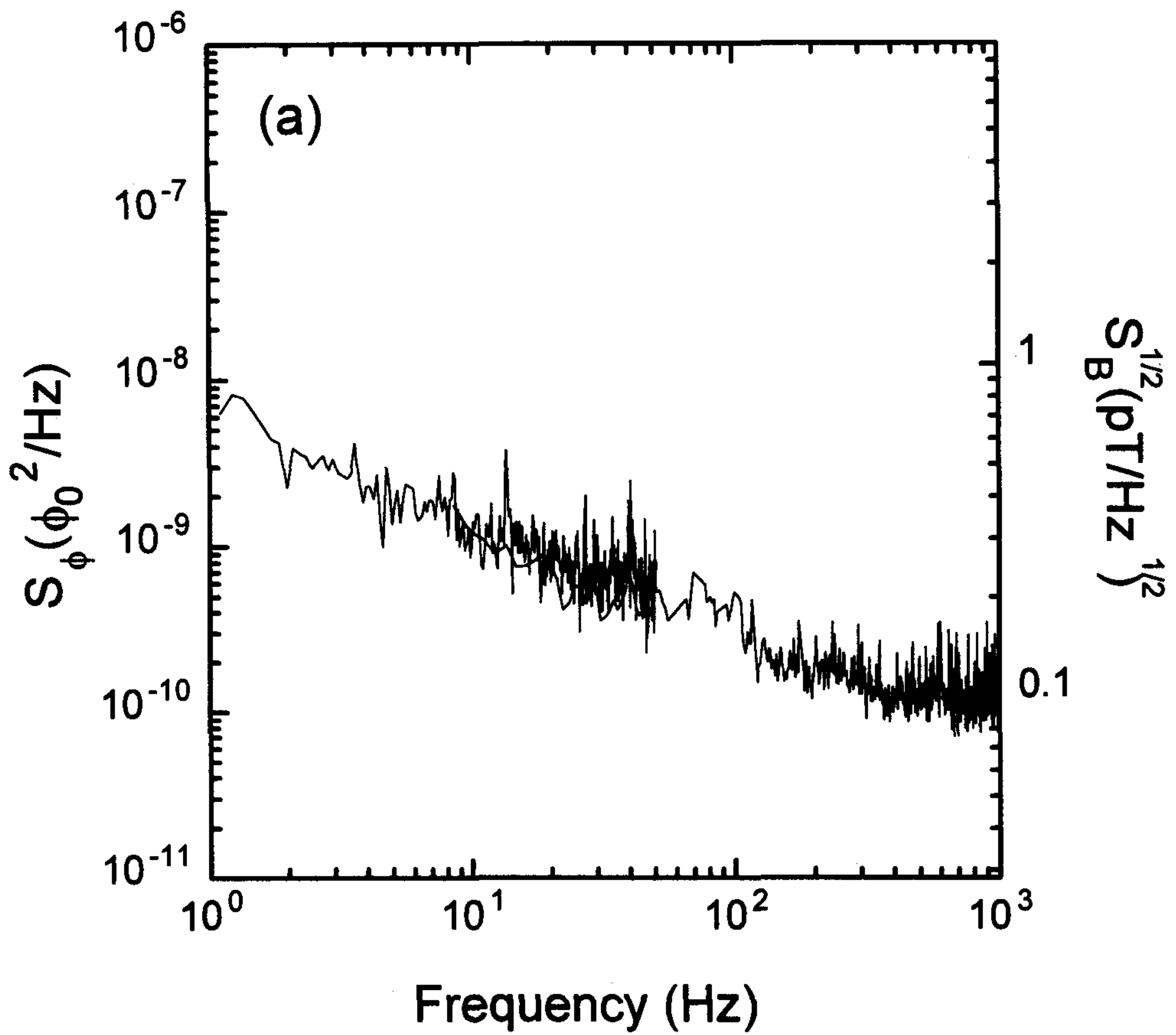


Fig. 3-3-2(a). static current bias로 측정한 directly coupled magnetometer 1의 Flux noise power  $S_{\phi}(f)$  와 rms magnetic field noise  $S_B^{1/2}(f)$ 의 주파수의존성.

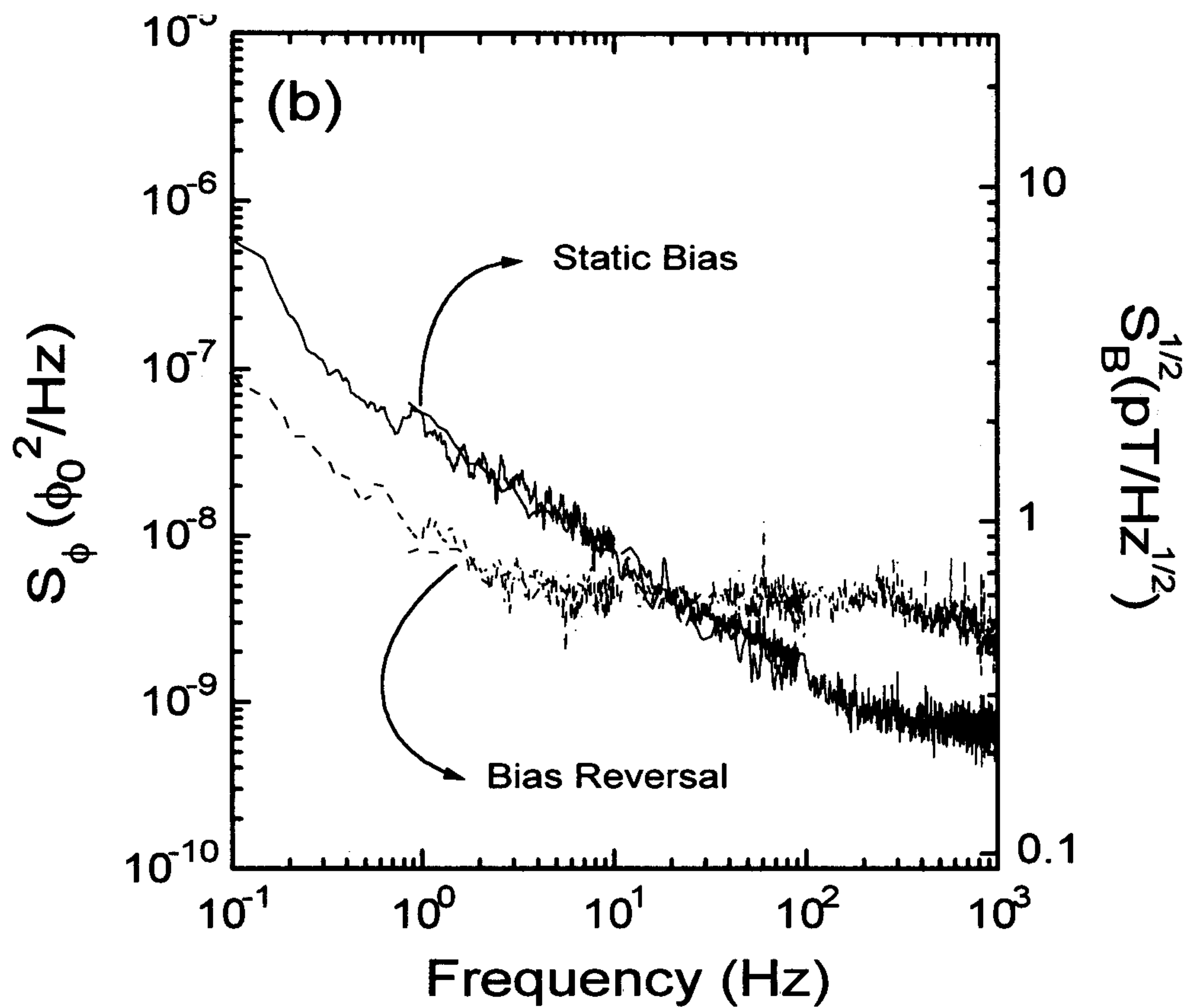


Fig. 3-3-2(b). static current bias와 current bias reversal 방법으로 측정한 directly coupled magnetometer 2의 Flux noise power  $S_\phi(f)$  와 rms magnetic field noise  $S_B^{1/2}(f)$ 의 주파수의존성 결과.



리고 1 kHz에서  $1.2 \times 10^{-10} \Phi_0^2/\text{Hz}$ 의 값을 나타내었다. 이를 자기감도  $S_B^{1/2}$ 로 환산하면, 1 Hz에서  $0.9 \text{ pT}/\sqrt{\text{Hz}}$ , 10 Hz에서  $0.35 \text{ pT}/\sqrt{\text{Hz}}$ , 100 Hz에서  $0.16 \text{ pT}/\sqrt{\text{Hz}}$ , 1 kHz에서  $0.1 \text{ pT}/\sqrt{\text{Hz}}$ 로 나타나서 생체자기 계측등 여러 분야의 응용에 충분한 감도를 지니고 있음을 확인하였다.

그러나, 잡음특성의 frequency spectrum을 살펴보면  $1/f$ 에 가까운 특성을 보이며 corner 주파수가 100 Hz 이상임을 알 수 있다. 특히 저주파의 신호가 중요한 의미를 갖는 생체자기신호 측정등에는 10 Hz 이하의 잡음특성이 중요하므로 이의 개선은 중요한 과제이다. 고온초전도 GB 접합 및 박막의 특성상 접합의 임계전류  $I_c$  fluctuation은 아무리 양질의 박막이라도 존재하는 것으로 알려져있으며, 그 크기는 1 Hz에서  $S_\phi \sim 1 \times 10^{-8} \Phi_0^2/\text{Hz}$  정도로 알려져 있다. 따라서 소자 특성의 개선만으로는 이 값 이하로 자속잡음을 줄이는 것은 대단히 어려운 일이다.

조셉슨 접합에서  $1/f$  잡음의 원인은 flux motion, resistance fluctuation,  $I_c$  fluctuation등 여러 가지 요인이 있을 수 있으나, 유독  $I_c$  fluctuation에 의한  $1/f$  잡음은 특별히 고안된 회로에 의해 크게 개선시킬 수 있는 것으로 알려져 있다. 이는 통상적으로 bias reversal technique이라고 불리는 방법으로, dc 전류를 인가시키는 대신에 modulation 주파수보다는 낮고, 이런 fluctuation을 상쇄시키기에는 충분히 높은 주파수의 사각파로 전류를 인가시키는 방법이다. 따라서 본 연구에서도 bias-reversal 방법을 사용할 수 있도록 회로를 구성하고,  $1/f$  잡음이 심하게 나타나는 SQUID 자속계 2에 대하여 잡음특성을 조사해 보았다. 그 결과는 Fig. 3-3-2(b)에 나타나있다. 그림에서 살펴보면 1 Hz에서 자속잡음  $S_\phi$ 는 bias reversal을 한 경우 static bias경우와 비교하면 각각  $1 \times 10^{-8} \Phi_0^2/\text{Hz}$ 와  $6 \times 10^{-8} \Phi_0^2/\text{Hz}$ 로 나타나 약 6배의 개선이 이루어졌음을 알 수 있다. 그러나

white noise에서의 자속잡음  $S_\Phi$ 는 bias reversal을 한 경우  $4 \times 10^{-9} \Phi_0^2/\text{Hz}$ , static bias를 이용한 경우  $7 \times 10^{-10} \Phi_0^2/\text{Hz}$ 로 나타나 오히려 static bias 경우가 6배 우수한 특성을 보였다. 이는 bias reversal 회로가 아직 완전치 않음을 보여주는 증거이다. Bias reversal의 방법에 따라 white noise가  $\sqrt{2}$ 배까지는 증가할 수 있지만 그 이상의 잡음은 회로적인 문제이기 때문이다. 실제로 측정시에 modulation 주파수와 bias reversal 주파수 사이에 synchronize가 되지 않고 beat와 비슷한 현상을 보이는 것이 발견되었다. Bias reversal 회로에 대한 연구는 현재도 추진 중이다. 불완전하나마 저주파 잡음의 개선은 자체 제작한 SQUID의  $1/f$  잡음이  $I_c$ 의 fluctuation에 기인하는 것으로 1 Hz에서 잡음특성은 수십배 이상의 개선의 여지가 있음을 보여주는 증거라 하겠다.

위에서 측정한 SQUID 자속계의 특성은 심자도(MCG, magneto-cardiogram) 측정에 충분한 감도로 판단된다. 심자도 측정시 예상되는 자기장의 세기는 Q, R, S peak에서 100 pT 내외, P, T structure는 20 pT 내외로 알려져 있으며, 정보를 얻기 위한 bandwidth는 0.1 Hz에서 100 Hz 내외이다. 그러나, 자기차폐 환경이 없을 경우 일반적인 실험실 환경에서 60 Hz 전원의 자기장의 세기는 100 nT이상으로 심자신호 peak의 1000배에 이른다.

SQUID 자속계가 완성되었을 당시 사람이 들어갈 만한 자기차폐 환경이 완성되어 있지 않았으므로, 심장의 신호와 유사한 임의의 자기신호에 대하여 모의 측정을 시도해 보았다. 그 결과가 Fig. 3-11에 나타나 있다. 이 측정에서 bandwidth는 약 300 Hz로 고주파 신호가 포함되어 있다. 그림에서 자기신호는 미리 자기장의 크기를 아는 coil에 function generator로부터 나오는 1.1 Hz의 사각파를 저항을 통해 인가시켜 걸어 주었다. 자기장의 세기의 변화에 따른 측정결과가 Fig. 3-3-3(b) ~ (e) 까지 나타나 있다. 진폭이 1 nT 크기의 신호는

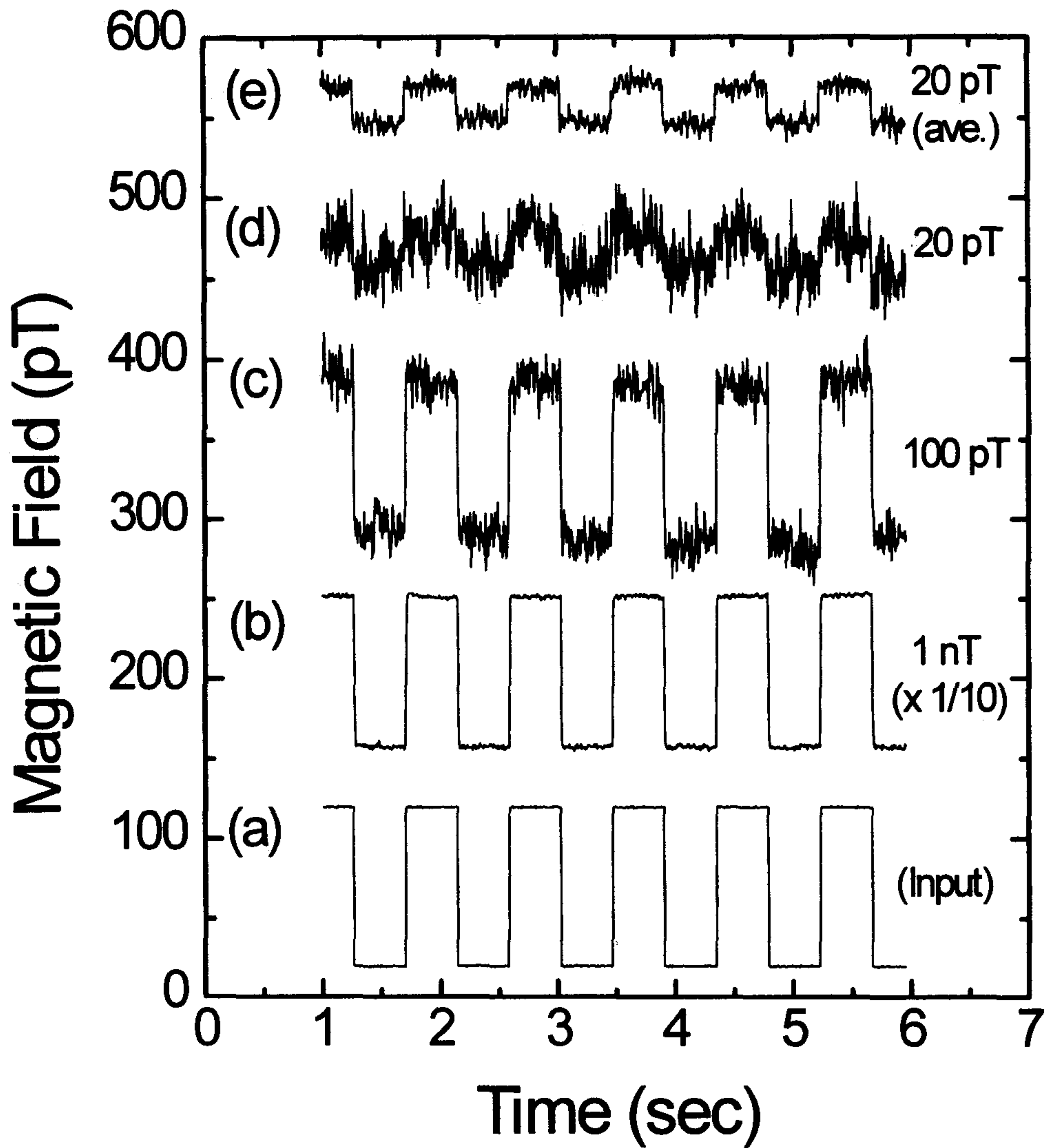


Fig. 3-3-3. flux locked loop된 directly coupled SQUID magnetometer로 측정하  
 미세 자기장신호 ( $f = 1.1$  Hz) (a) input signal(100 pT), (b)~(d) 평균하  
 지 않은 측정신호 (e) 10번 평균된 20 pT의 신호.



time average 없이 real time으로 깨끗한 파형을 나타내었고(Fig. 3-3-3(b)), MCG peak 신호의 크기와 유사한 100 pT 신호의 경우 파형은 일치하게 나타나지만 total noise level이 약 10 pT 임을 볼 수 있었다(Fig. 3-3-3(c)). 진폭이 20 pT인 신호의 경우 겨우 파형을 구별할 수 있는 수준이었으며(Fig. 3-3-3(d)), 이를 digitizing oscilloscope를 이용하여 10회 time average한 결과 사각파의 형태로 파형이 재생되는 것을 볼 수 있었다(Fig. 3-3-3(e)).

이상의 측정결과를 종합하면, 제작한 directly coupled SQUID 자속계를 사용하여 자기차폐된 공간에서 MCG를 real time으로 측정할 경우, peak 신호를 뚜렷하게 관측할 수 있을 것으로 판단되며, MCG의 P, T structure는 time average를 할 경우 관측이 가능한 것으로 판단되었다.

따라서 directly coupled SQUID 자속계의 개선 작업과 MCG 측정을 위한 FLL로 구성된 read-out electronics 설계 및 제작 작업을 수행하였으며, 그 결과에 대해서는 다음 장에서 기술하도록 한다.

## 참 고 문 헌

- [1] M. N. Keene, S. W. Goodyear, N. G. Chew, R. G. Humphreys, J. S. Satchell, J. A. Edwards, and K. Lander, Appl. Phys. Lett. **64**, 366 (1994)  
; B. Oh, R. H. Koch, W. J. Gallagher, R. P. Robertazzi, and W. Eidelloth, Appl. Phys. Lett. **59**, 123 (1991) ; A. H. Miklich, J. J. Kingston, F. C. Wellstood, J. Clarke, M. S. Colclough, K. Char, and G. Zaharchuk, Appl. Phys. Lett. **59**, 988 (1991).



- [2] Y. Zhang, M. Muck, K. Herrmann, J. Schubert, W. Zander, A. I. Braginski, and C. Heiden, *IEEE Trans. Appl. Sup.* **3**, 2465 (1993).
- [3] D. Koelle, A. H. Miklich, F. Ludwig, E. Dantsker, D. T. Nemeth, and J. Clarke, *Appl. Phys. Lett.* **63**, 2271 (1993).
- [4] S. Tanaka, H. Itozaki, H. Toyoda, N. Harada, A. Adachi, K. Okajima, H. Kado, and T. Nagaishi, *Appl. Phys. Lett.* **64**, 514 (1994).
- [5] M. Matsuda, Y. Murayama, S. Kiryu, N. Kasai, S. Kashiwaya, M. Koyanagi, and T. Endo, *IEEE Trans. Magn.* **MAG-27**, 3043 (1991).
- [6] D. Koelle, A. H. Miklich, E. Dantsker, F. Ludwig, D. T. Nemeth, J. Clarke, W. Ruby, and K. Char, *Appl. Phys. Lett.* **63**, 3630 (1993).
- [7] Y. Zhang, U. Kruger, R. Kutzner, R. Wordenweber, J. Schubert, W. Zander, E. Sodtke, A. I. Braginski, and M. Strupp, *Appl. Phys. Lett.* **65**, 3380 (1994).
- [8] J. Clarke, *Nature* **372**, 501 (1994).
- [9] L. P. Lee, J. Longo, V. Vinetskiy, and R. Cantor, *Appl. Phys. Lett.* **66**, 1539 (1995).
- [10] R. H. Koch, W. Eidelloth, B. Oh, R. P. Robertazzi, S. A. Andrek, and W. J. Gallagher, *Appl. Phys. Lett.* **60**, 507 (1992).
- [11] M. B. Ketchen, *IEEE Trans. Magn.* **MAG-27**, 2917 (1991).
- [12] K. Enpuku, Y. Shimomura, and T. Kisu, *J. Appl. Phys.* **73**, 7929 (1993).

여 백

## 제 4 장 SQUID 자속계를 이용한 심자도 측정장치

SQUID의 실제 응용을 위하여서는 우수한 성능의 SQUID sensor 자체도 중요하지만 이를 뒷받침할 수 있는 시스템이 완성되어야 한다. SQUID 자속계를 구성하는 시스템은 SQUID sensor unit, control electronics, 저온 probe등 크게 세 부분으로 나눌 수 있다. SQUID sensor unit은 sensor의 저온 packaging, 저온 matching transformer, coil unit(feedback & modulation)으로 구성되어 있으며, control electronics는 저잡음 pre-amp 및 FLL(flux locked loop)을 구성하는 oscillator, mixer, integrator등의 요소들과 출력의 bandwidth를 결정지어 주는 filter들로 구성되어 있다. 저온 probe는 액체질소와 상온의 electronics를 연결시켜 주는 부분으로 SQUID 주변의 비자성 재료의 선택과 신호가 전달되는 부분의 RFI등을 고려하고, 저온에서 기계적 특성이 우수하고 열전달이 나쁜 재료를 선택하여 구성하여야 한다.

본 연구에서는 위의 구성요소를 자체 제작하여 시스템을 구성하였으며 시스템의 응용의 한 예로 심자도(MCG, magnetocardiogram)를 측정하였다. 또한, 자기차폐가 잘된 환경에서 2 channel SQUID 시스템을 구성하여 36 position에서 MCG를 측정하여 그 결과로 MCG isofield contour map을 작성하여 의료기기에의 응용 가능성을 살펴보았다. 본 장에서는 이상의 내용에 대하여 단계적으로 기술하도록 한다.

### 제 1 절 SQUID 측정 시스템 설계 및 제작

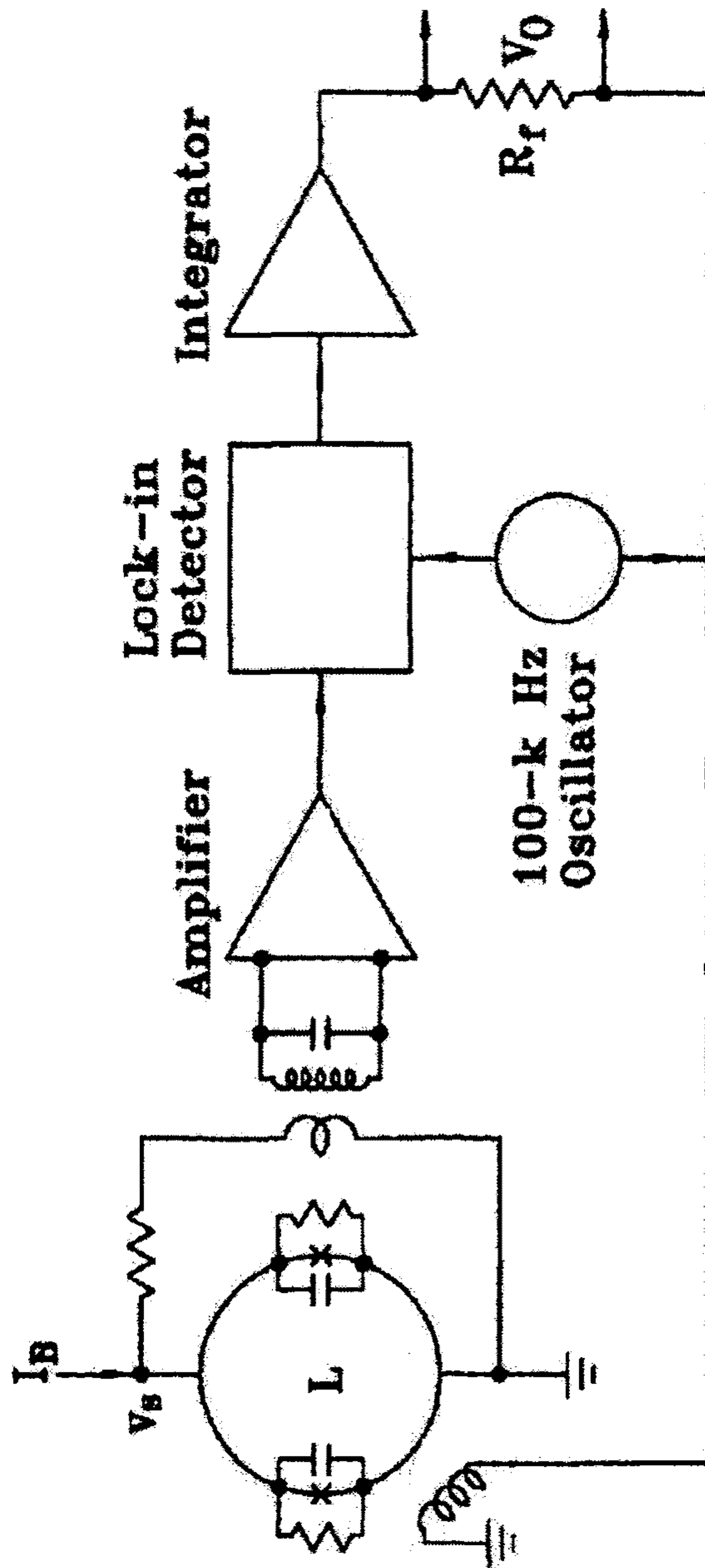


Fig. 4-1-1. SQUID 자속계를 이용한 FLL(flux locked loop) 구성도. dc SQUID, matching transformer, preamp와 VGA로 구성된 증폭기 unit, 믹서, 적분기, 변위기, 오실레이터, 피드백 코일등으로 구성되어진다.



본 절에서는 SQUID 제어회로를 중심으로 SQUID packaging, 저온 probe등에 대하여 설명하도록 한다. 먼저 SQUID 제어회로에 대해 구성과 각 부분의 설계에 대한 자세한 설명은 다음과 같다.

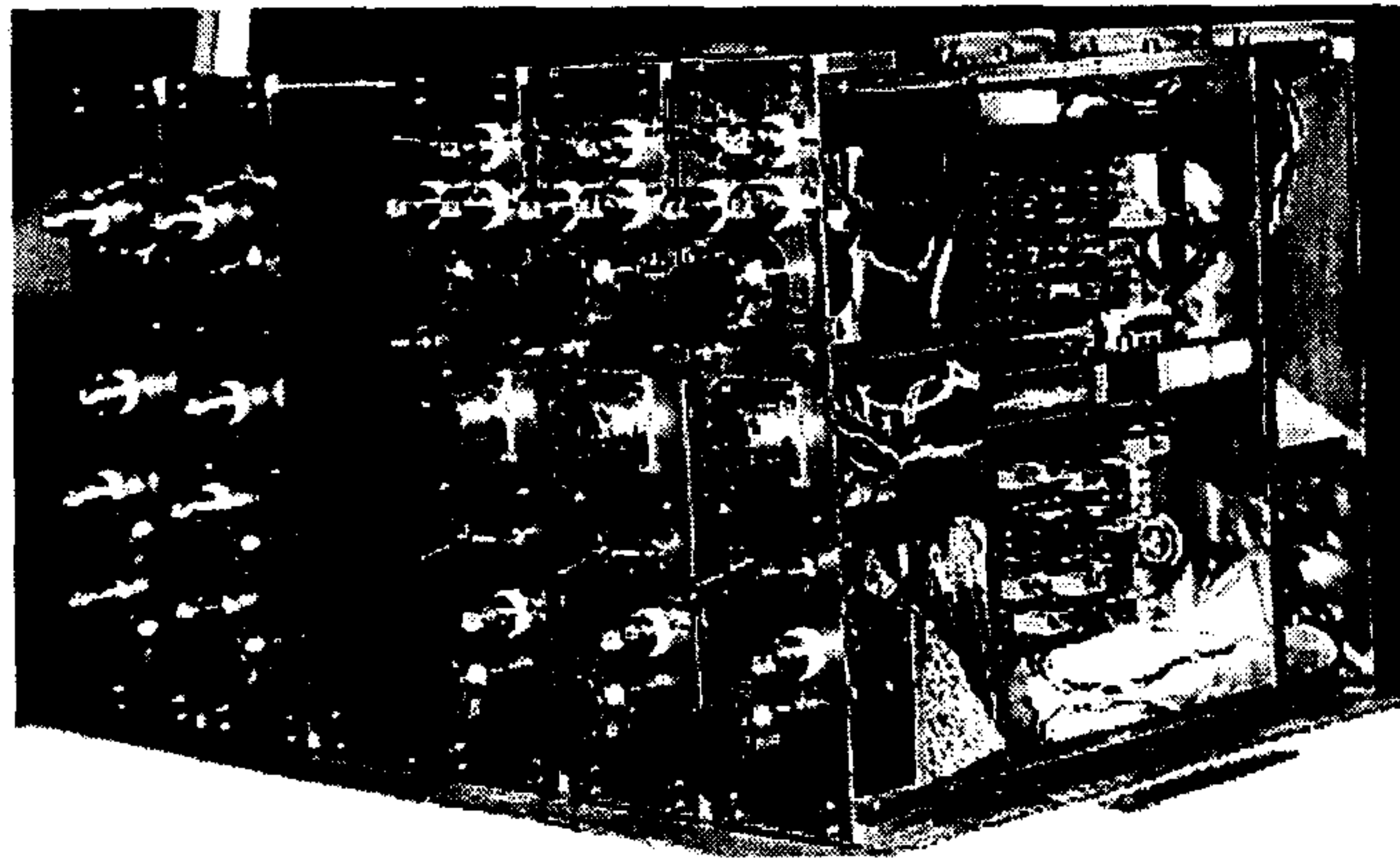
심자도의 세기 및 파형을 정확히 측정하기 위하여 FLL(Flux Locked Loop) 회로를 구현하여 SQUID에 감지되는 외부 자장 신호와 시스템의 출력전압의 변환관계를 선형화하였다. FLL에는 direct 방식과 변조(modulation) 방식이 있는데, 본 제작에서는 SQUID와 preamp 사이의 최적 잡음 임피던스 정합 및 이로 인한 신호처리를 위하여 트랜스포머 공진기 및 진폭 변조 회로를 이용한 자속 변조 FLL을 구현하였다. Fig. 4-1-1은 본 제작에서 구현한 심자계의 회로구성도로서 dc SQUID, matching transformer, preamp, VGA, oscillator, phase shifter, mixer, integrator, feedback coil등으로 형성되었다. SQUID와 preamp 사이의 최적 잡음 임피던스 정합을 위하여 이 두 소자 사이에 matching transformer를 배치하였다. 저온의 matching transformer는 저온에서도  $\mu$  값이 변하지 않는 성질의 toroid 형태의 core에 감은 횟수의 비가 약 1:10 내외가 되도록 Cu coil을 감아서 제작하였으며, 공진 주파수가 500 kHz가 되도록 적당한 값의 capacitor를 병렬로 연결하여 사용하였다. 이러한 matching transformer를 씌으로써 noise를 더하지 않고 신호를 키울 수 있고, FET를 사용하는 preamp의 최적 noise figure를 맞출 수 있는 수 k $\Omega$ 의 input impedance를 갖게 된다. 또한 transformer의 사용할 때 Q 값이 그리 크지 않도록 조절이 용이하므로 LC matching 회로 사용할 때와 비교하여 넓은 bandwidth를 갖게 된다.

Preamp는 저잡음과 광대역 특성을 갖도록 설계하여 저잡음 JFET을 입력단에 사용하는 구조로 제작하였다. Preamp unit에는 뒤에 약 10배의 gain을 갖는 OP가 하나 추가되어 있으며, 최종 특성을 살펴보면 최종 전압이득은 500,

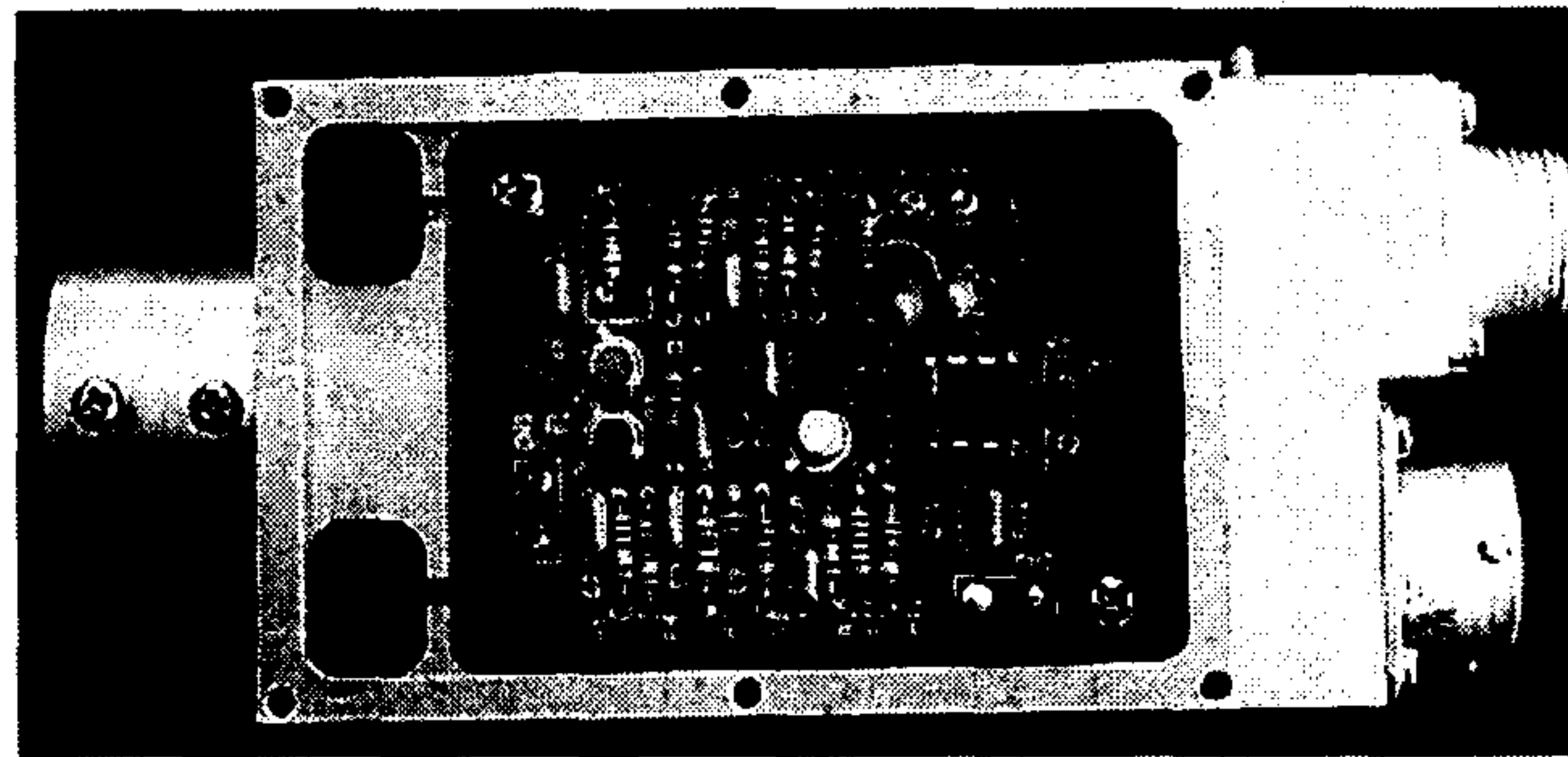
잡음 특성은 100 kHz에서  $0.8 \text{ nV}/\sqrt{\text{Hz}}$  였고, 2 MHz의 bandwidth를 나타내었다. 기타 oscillator, phase shifter, mixer, integrator등은 범용의 IC를 사용하여 자체 설계, 제작하였다. 1차적으로 시스템 제작의 목적은 저주파 대역의 작은 신호인 심자도 측정에 있었으므로, 저잡음 회로의 구현에는 각별한 신경을 썼으나 FLL system의 bandwidth, slew rate등의 값에는 특별한 주의를 기울이지 않았다. 이외에 심자도를 측정하는 환경이 이상적으로 자기차폐된 공간이 아니므로 FLL 회로의 출력 전압을 신호처리하기 위하여 30 Hz cutoff 주파수 특성을 갖는 lowpass filter와 60 Hz notch filter도 자체 설계, 제작하였다.

이렇게 설계된 회로들은 양면 PCB(printed circuit board)로 제작되었으며, 실제 SQUID 측정 시스템의 구성을 위하여 제작된 Al box에 장착하여 사용하였다. Box들은 RFI등의 외부 잡음으로부터 차폐를 위하여 세심하게 설계, 제작하였으며, 회로의 구성요소에 따라 적절하게 칸을 나누어 사용하였다. 또, 기능에 따라 module화 되도록 box를 나누어 다채널 시스템으로의 확장이 용이하도록 하였다. 위의 Fig. 4-1-2는 완성된 SQUID 자속계 control 시스템의 사진들이다. Fig. 4-1-2(a)는 완성된 module 들이 일렬로 정렬된 모습으로 3 channel 시스템의 구성 예이다. Fig. 4-1-2(b)는 pre-amp로 SQUID probe 바로 위에 위치한다. Probe와의 연결을 고려하여 connector를 디자인하였고, power line과 SQUID에서 controller로 직접 전송되는 line들은 box 반대편에 나누어 위치한다. Fig. 4-1-2(c)는 주 controller에 해당하는 회로의 사진이다. 윗칸에 mixer, VGA(variable gain amplifier), integrator등이 위치하고, 아랫쪽이 oscillator가 위치한다. 앞쪽의 공간은 wiring과 current source를 위한 공간이다. Fig. 4-1-2(d)는 filter unit으로 low pass filter와 60 Hz notch filter로 이루어져 있다. Probe system에 대해서는 저온 packaging 부분에서 자세히 설명하도록 한다.

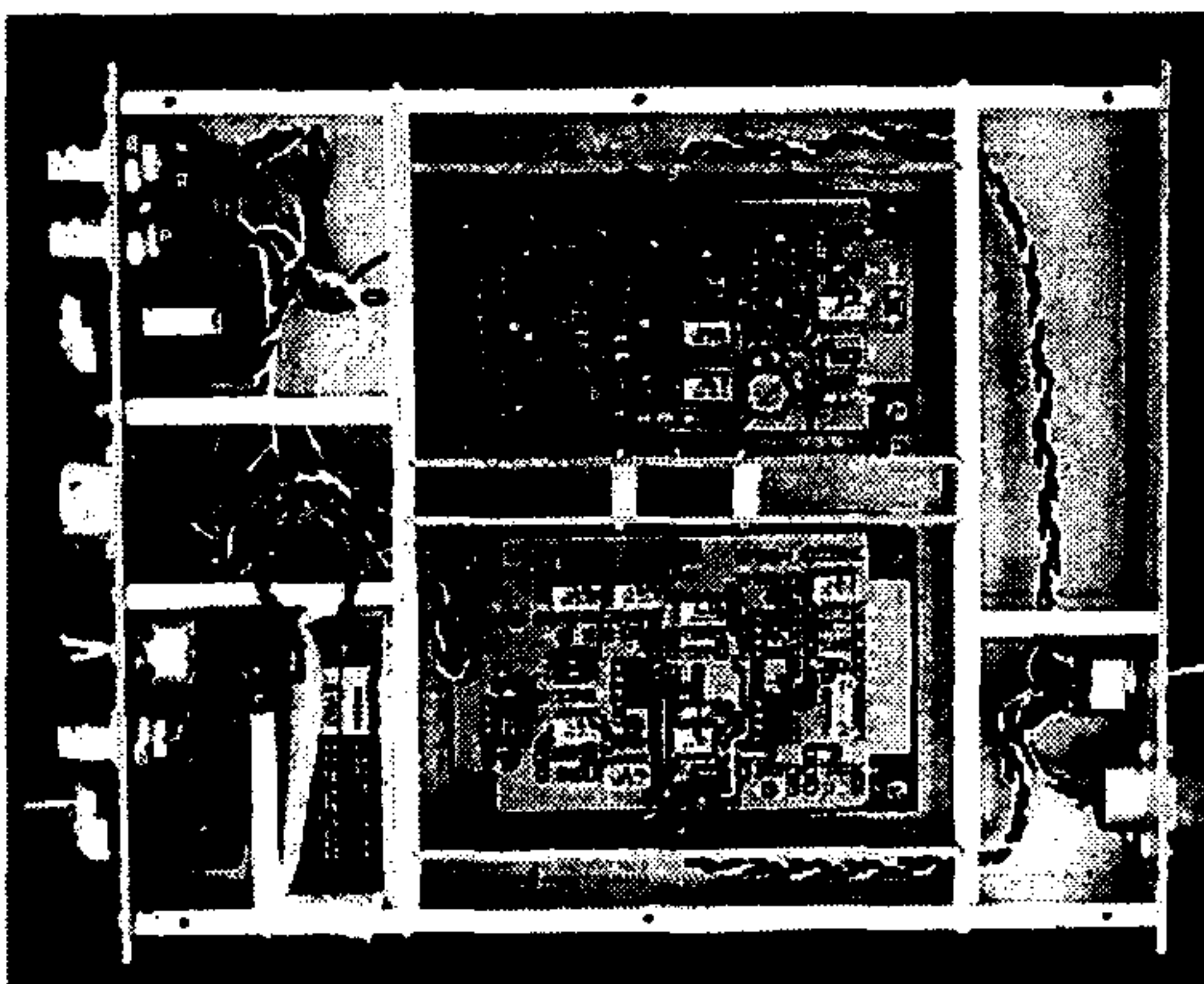




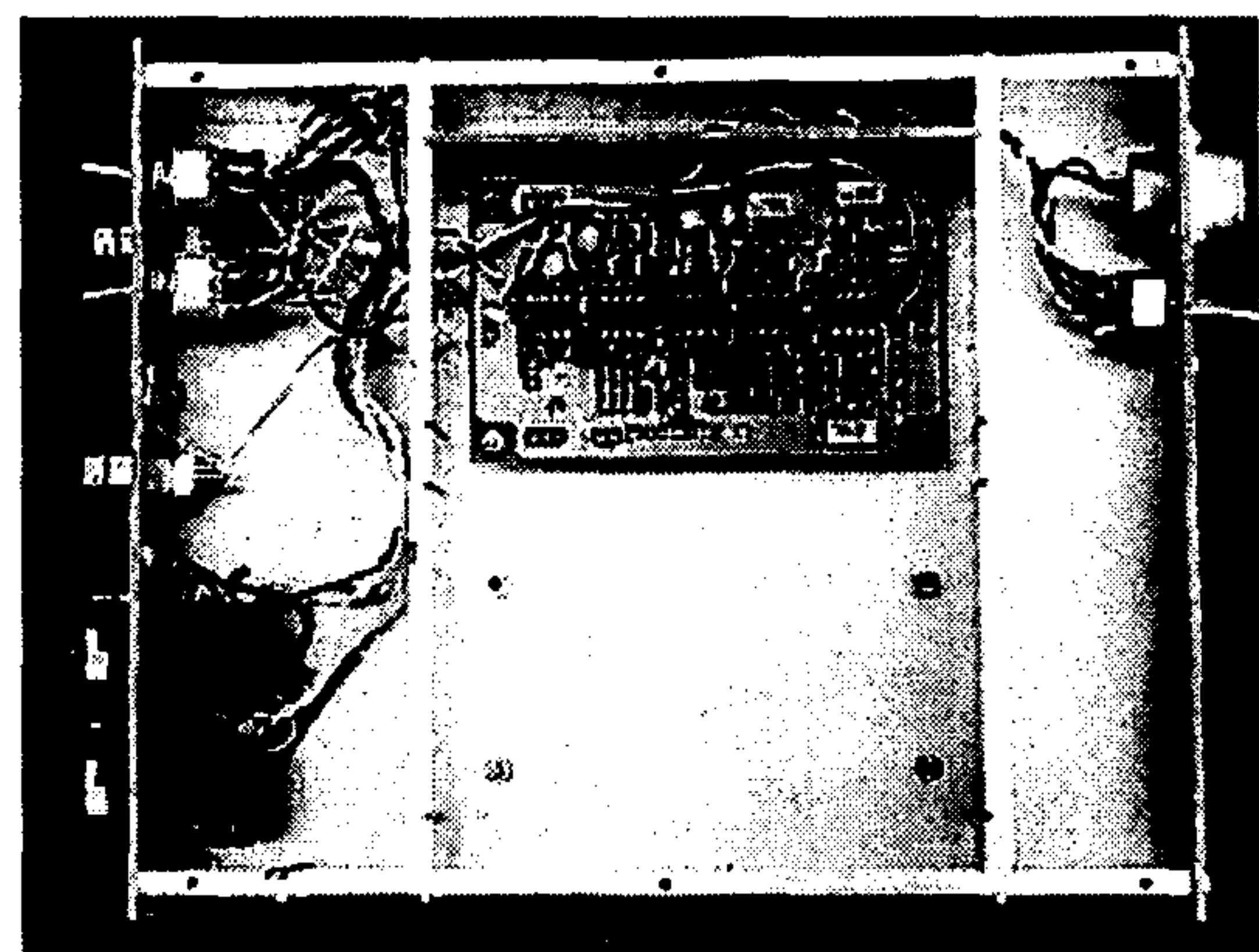
(a)



(b)



(c)



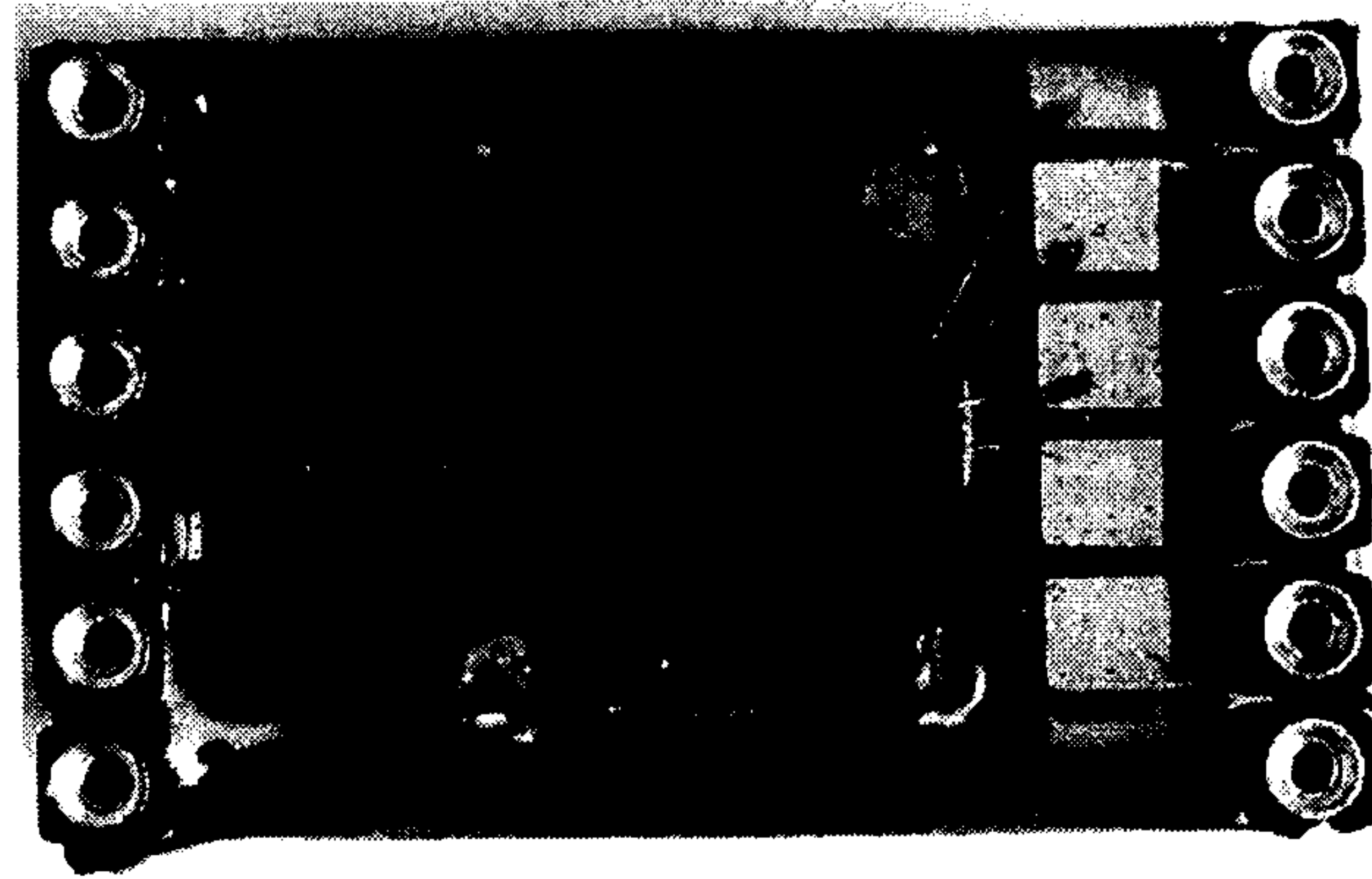
(d)

Fig. 4-1-2. 제작이 완료된 SQUID electronics 사진. (a) control & filter unit들, (b) pre-amp unit, (c) mixer, oscillator, VGA, I-source unit, (d) filter unit. Box는 RFI를 고려 자체 설계 제작함.

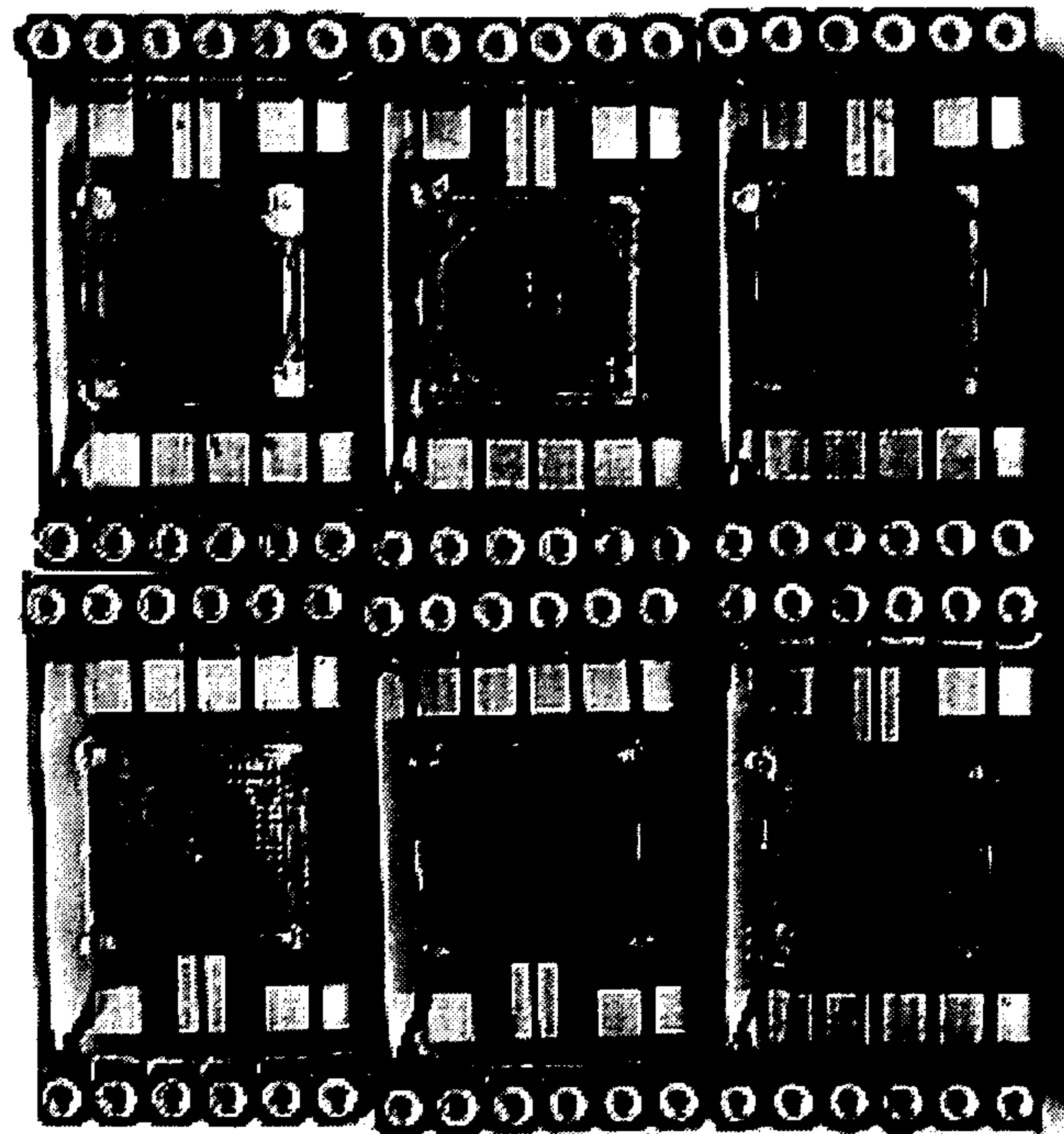
이상으로 SQUID electronics에 대한 기술을 마무리하고 SQUID packaging과 저온 probe에 대해서 설명한다. 고온초전도 SQUID 센서에 사용되는 YBCO등의 산화물들은 대체로 수분에 대해 취약하며, 특히 GB로 이루어진 접합부분의 특성은 센서가 작동하는 낮은 온도에서 상온으로 thermal cycling을 반복하는 환경에서 쉽게 변할 수 있다. 왜냐하면 공기중의 수분이 차가운 물질에 쉽게 응축되므로 특별한 보호없이 SQUID 센서를 대기중으로 꺼낼 경우는 센서를 물에 담구는 것과 같기 때문이다.

따라서 본 프로젝트 수행시 이러한 문제점을 두가지 측면에서 개선하였다. 첫째는 소자 제작시 YBCO 초전도 막위에 얇은 보호층(passivation layer)을 증착한 것이다. 이는 접합의 특성을 균일하게 유지시키는데 크게 도움이 되는 것으로 나타났다. 두 번째로는 SQUID sensor holder에 대한 개선이다. Sensor holder는 epoxy glass 소재의 PCB로 제작하여 저온에서 잡음을 최소화하였고, holder에 IC chip socket을 부착하여 연결과 분리가 쉽게 하였다. SQUID sensor를 PCB 기판에 붙여서 고정한 후 wire bonding 하여 SQUID 자속계 chip이 형성되는데, 수분으로부터 SQUID를 보호하기 위하여 epoxy를 사용 chip을 molding 하였다. 이런 형태의 packaging은 반도체 소자에서 매우 일반적인 것이다. 그러나, 저온에서 깨지지 않고 SQUID의 특성에 영향을 주지 않는 재료를 선택하는 것은 쉽지 않다. 또한 curing 온도가 높을 경우, 산소 함량에 따라 민감하게 특성이 변하는 고온초전도 소자의 특성에 변화를 주게 되므로 더욱 선택의 폭이 좁아진다. 본 연구에서는 다양한 실험을 통하여 이리 다음의 Fig. 4-1-3은 packaging이 된 directly coupled SQUID의 확대 사진과 다양한 SQUID들에 대한 packaging 결과이다. 한 성질을 만족하는 epoxy를 찾아 packaging에 사용하였다.





(a)



(b)

Fig. 4-1-3. Packaging이 완료된 SQUID 자속계 chip의 사진. (a) Directly coupled SQUID chip의 확대 사진. (b) 작고 큰 여러 형태의 SQUID 들에 대한 packaging 사진. 개개의 기관들의 크기는 10 mm ×10 mm 임.

그 외에 Fig. 4-1-3의 SQUID holder의 개선 사항은 modulation & feedback coil을 PCB에 집적시켜, coupling이 항상 일정하게 되도록 하였고 추가의 Cu coil이 없는 단순한 구조를 실현하였다.

이렇게 제작이 완성된 SQUID 자속계 chip은 matching transformer가 부착된 chip holder에 연결하여 사용하였다. Chip holder는 저온에서 잡음특성과 기계적 특성이 우수한 epoxy glass 수지를 machining하여 사용하였고, 여러개의 SQUID를 축방향으로 연결하여 사용이 가능하도록 디자인하였다. Holder와 SQUID chip의 연결을 위하여 IC chip socket을 epoxy로 접착하였고, matching transformer는 PCB를 제작하여 설치하였다. PCB 고정은 plastic 나사를 이용하여 자성체 사용을 회피하였다. 다음의 Fig. 4-1-4는 완성된 chip holder의 사진이다.

저온의 SQUID chip holder는 상온과 probe system을 이용하여 연결된다. 제작한 3 SQUID까지 이용 가능한 probe는 액체질소를 담은 dewar의 크기에 맞는 길이로 제작하였다. 세번째 chip holder 끝에 epoxy glass 소재로 연결을 위한 구조를 제작하였고, 상온과 연결은 SUS(stainless steel) pipe를 사용하였다. 액체질소의 boiling rate와 RFI shielding등을 고려하여 비자성체인 thin wall seamless SUS pipe를 특별히 이용하여 제작하였다. 제작완료된 probe의 사진은 다음절의 Fig. 4-2-2에 잘 나타나 있다.

심자도 측정을 위한 액체질소 dewar는 비금속 재료로 구성되어야 하며, 측정하고자 하는 물체와 gap이 좁은 것이 유리하다. 선진국의 경우 저온 SQUID로 biomagnetism 측정시 FRE(fiberglass reinforced epoxy)재료의 진공이 사이에 있는 이중벽 형태의 dewar를 이용하는 것으로 일반적으로 알려져 있다. 본 연구에서도 이런 형태의 dewar에 대해 자체적으로 설계를 완료하고



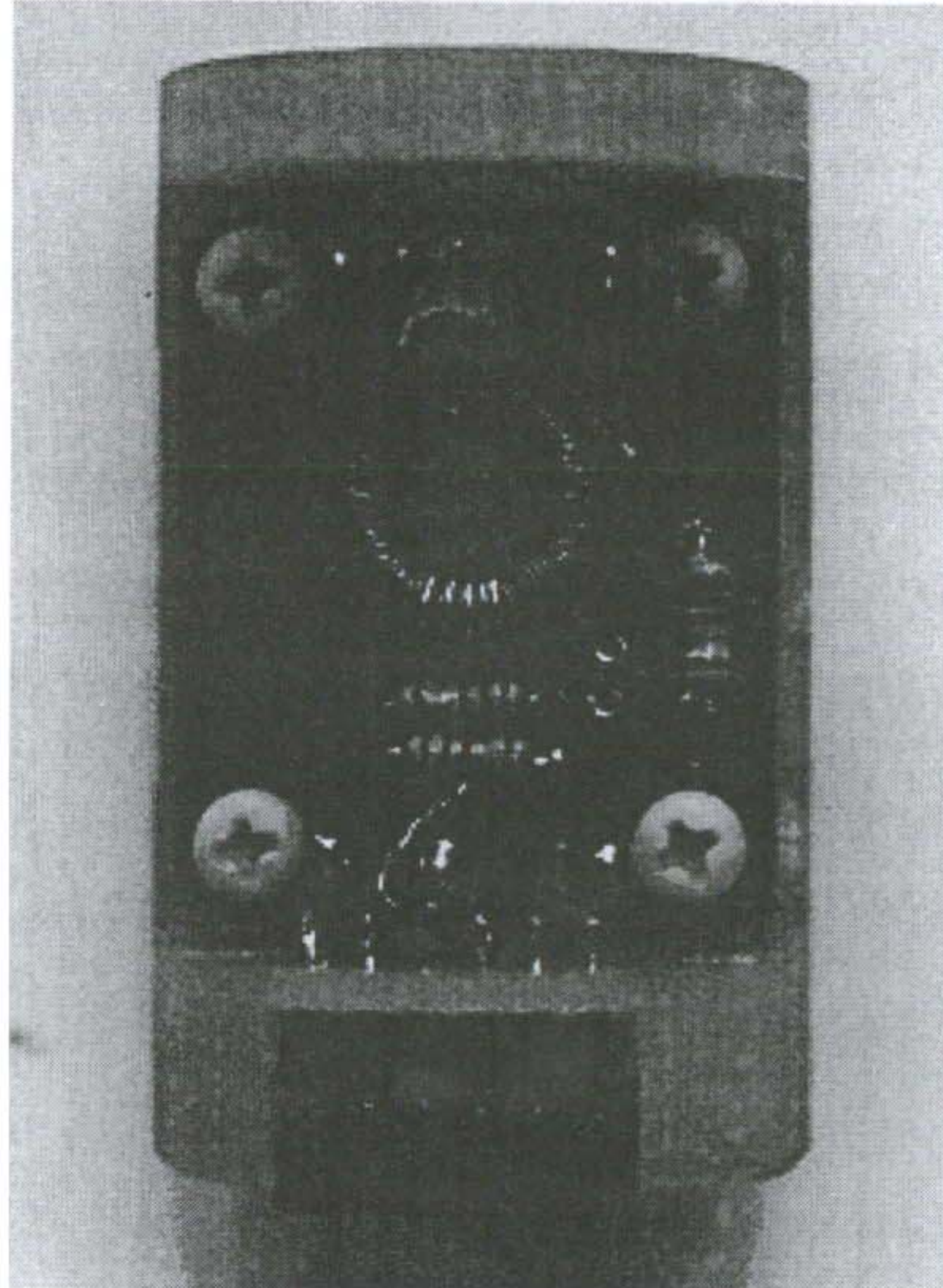


Fig. 4-1-4. Matching transformer가 연결된 SQUID 자속계 chip holder의 사진.  
오른쪽 끝 부분에 SQUID chip이 결속되어 있다. Matching transformer  
의 toroidal coil, capacitor, 저항들이 보인다.



제작하려 했으나, 재료와 접착의 문제로 실제 제작에는 실패하였다. 따라서 심자도 측정에는 특수 유리 소재의 액체질소용 보온병을 구입하여 사용하였다. 이상으로 본 절을 마무리하고 다음절에서는 심자도 측정에 대하여 논의한다.

## 제 2 절 심자도 측정

본 장 1절에서 기술한 시스템을 이용하여 행한 심자도 측정 결과에 대해 논의하도록 한다. 아래의 Fig. 4-2-1에서 보듯이 심장의 peak 신호는 대개 100 pT 미만으로 나타나며, 우리가 제작한 SQUID의 자기감도는  $1 \text{ pT}/\sqrt{\text{Hz}}$  수준이므로 쉽게 측정이 가능하리라 생각하기 쉽다. 그러나, 아래 그림에서 보듯이 실제 실험실 환경은 자기 잡음에 대하여 대단히 열악하다. 직류에 가까운 지구 자기장을 고려하지 않더라도, 60 Hz power line에 의한 신호의 크기는 심장 peak 크기의 10,000배 이상에 이르기 쉬우며, 저주파 대역의 잡음도 1,000배에 이른다.

그러므로 자기 차폐를 하거나 특별히 원하는 신호만을 분리해 내는 방법을 사용하지 않는 경우 일반 환경에서 미세 자기신호의 측정은 불가능하다. 따라서 심자도(MCG) 측정은 자기 차폐 환경에서 행하였다. 원하는 신호의 분리 방법의 하나로 자기장의 gradient를 측정하는 방법에 대한 연구도 부분적으로 행하였으며 그 결과는 본 보고서 5장에서 다루도록 한다.

심자도 측정을 위해서 1절에서 다룬 회로로 FLL을 구성하였으며, SQUID는 3장에서 결과를 나타낸 directly coupled SQUID 자속계를 이용하였다. 다음의 Fig. 4-2-2는 MCG 측정에 사용된 pre-amp와 SQUID 자속계를 포함한 probe이다.



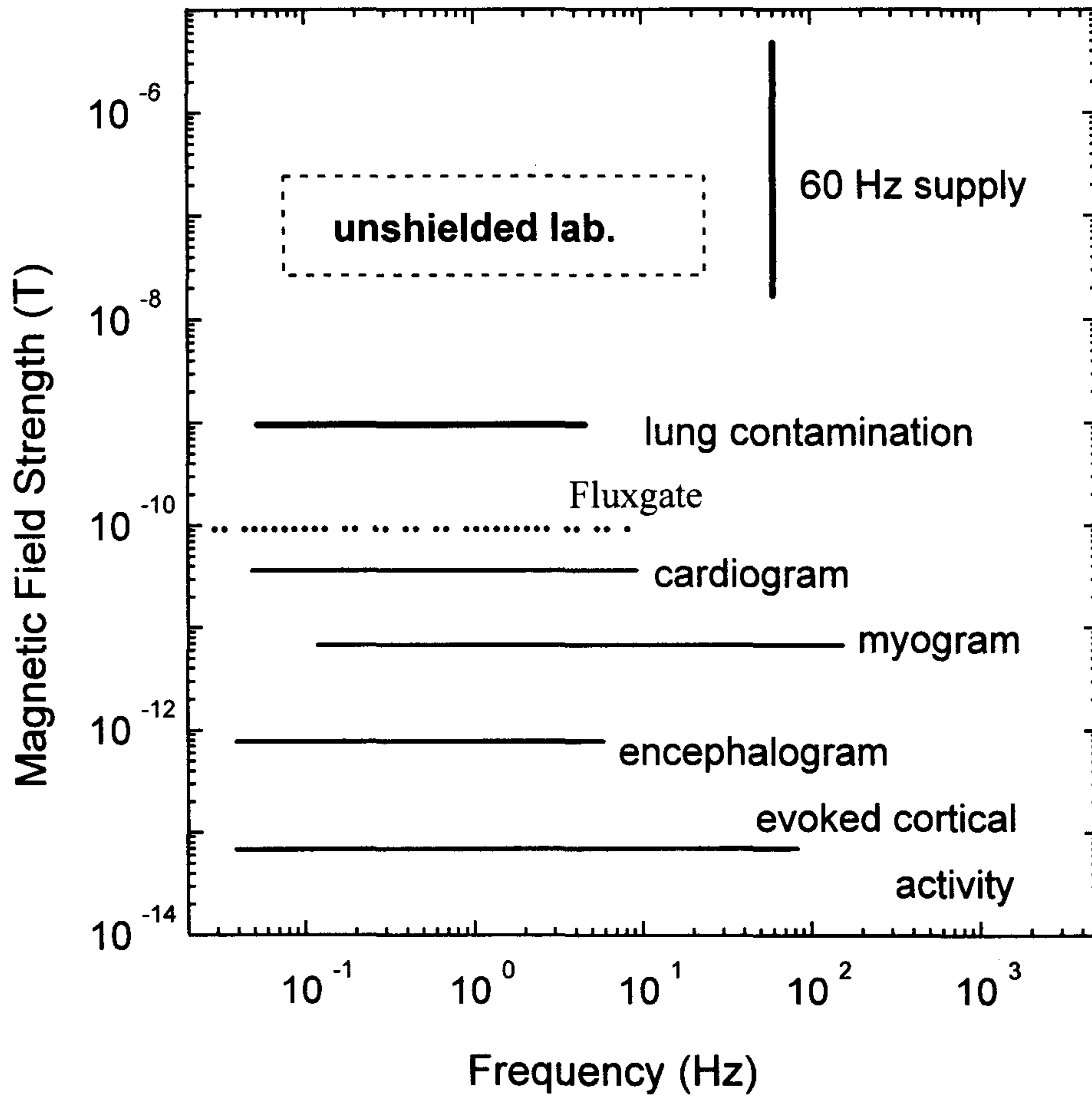


Fig. 4-2-1. 주파수에 따른 biomagnetic signal, 주변 환경에서의 자기장의 크기

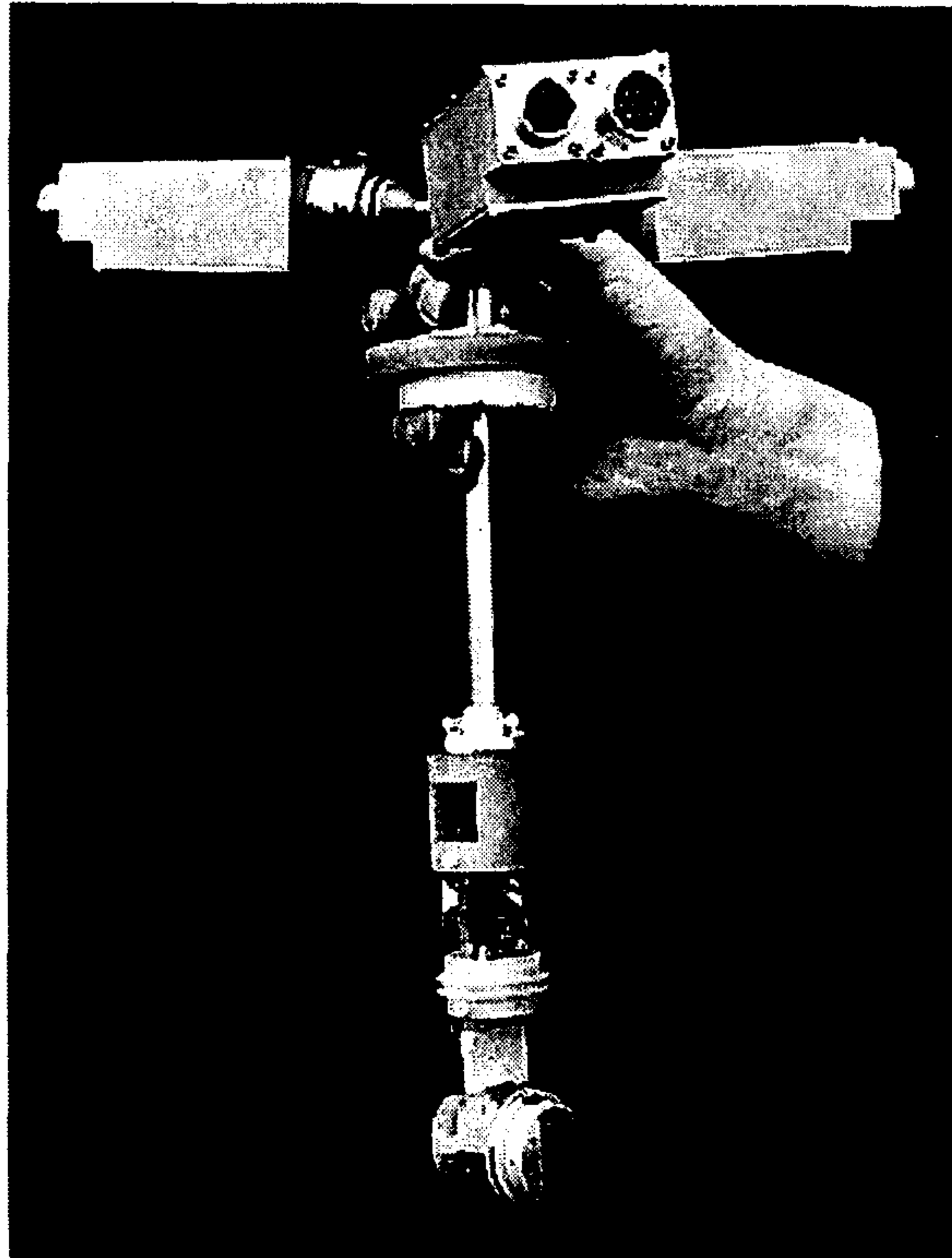


Fig. 4-2-2. MCG 측정에 사용된 SQUID probe system.

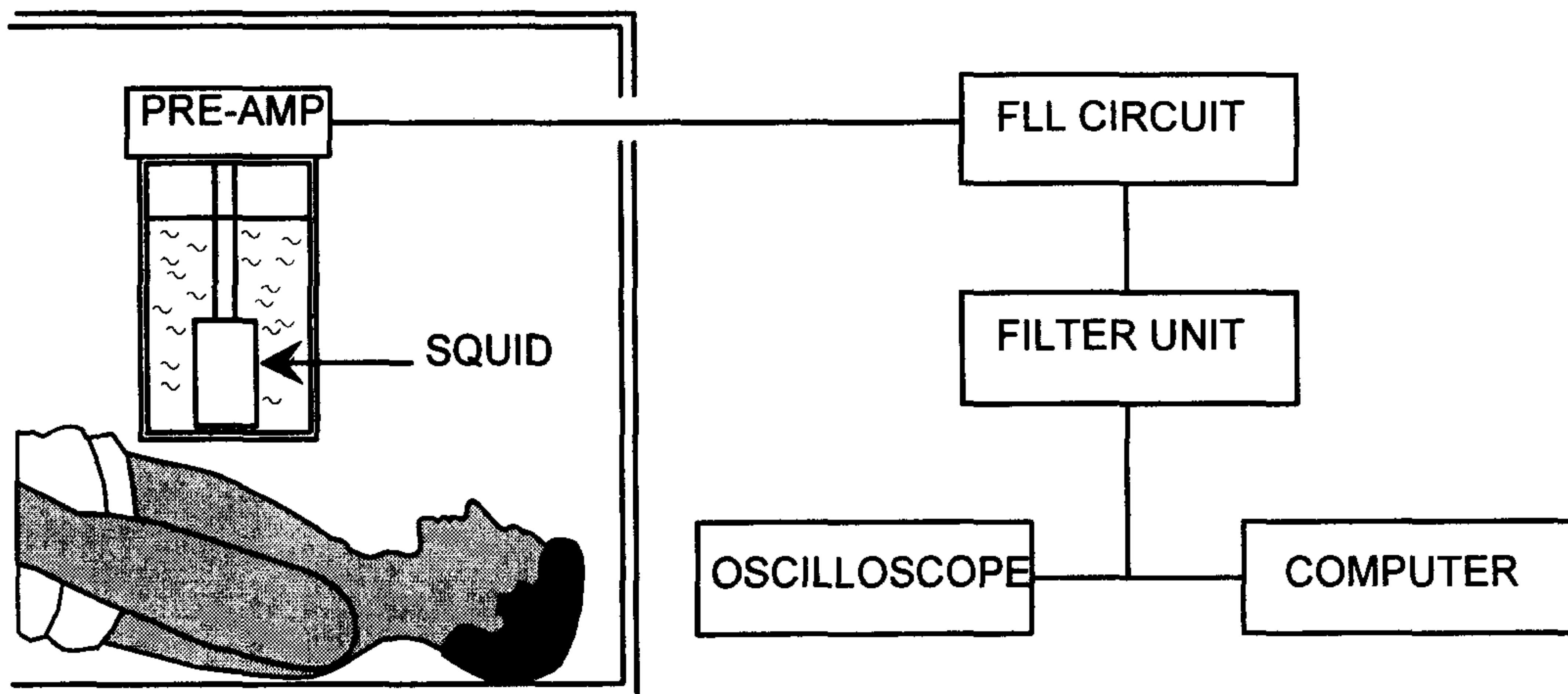


Fig. 4-2-3. MCG 측정 set-up을 보여주는 schematic.

자기차폐된 공간에 사람과 SQUID probe unit을 위치시키고, 기타 control 회로와 computer, oscilloscope는 차폐공간 외부에 설치시켰다. Fig. 4-2-3은 실제 심자도 측정 set-up의 schematic이다. 사람이 들어갈 수 있는 심자도 측정용 자기차폐 상자는 미국에서 제작한 제품으로, 두겹의 magnetic permeability가 큰 permalloy와 형태를 유지시켜 주는 aluminum frame으로 구성되어 있다. 크기는 내부의 box가 74 cm(넓이)×65 cm(높이)×150 cm(길이)이고, 외부의 box가 76 cm(넓이)×67 cm(높이)×151 cm(길이)이다. 이 상자들에 맞는 두겹의 뚜껑이 있고, 뚜껑에는 전선 등이 지날 수 있고, 차폐효과에도 영향이 적도록 직경 5 cm에 길이 20 cm의 pipe가 설치되어 있다. 이 box의 자기차폐 성능은 1 Hz에서 약 50 dB(1/300), 100 Hz에서 ~ 60 dB(1/1000)의 성능으로 평가되었다. 그러나 실제 심자도 측정시의 SQUID 위치에서 자기차폐 성능은 10 Hz에서 50 dB를 조금 넘는 수준으로 판단된다. 따라서 gradiometer를 쓰지 않고 심장의 주 peak 신호는 볼 수 있고, 주 peak 이외의 신호는 거의 잡음 수준보다 작을 것으로 예상된다.

실제 사람이 자기차폐 box에 누워 심자도 측정을 하기 위하여, 비자성체인 나무를 이용하여 자성체인 못 없이 dewar holder와 다리를 올려 놓을 선반을 제작하였다. 자기차폐 box의 가격은 크기가 커짐에 따라 크게 비싸지므로, 성인이 구부려 누울 공간으로 자기차폐 box를 제작하였고, 이에 따라 나무 선반을 사용하게 되었다. 아래의 Fig. 4-2-4는 실제 측정의 예를 사진으로 보여주고 있다. 뚜껑이 열린 자기차폐 box 안에 사람이 누워있으며, 가슴위에 있는 액체 질소 dewar에 preamp 3개가 연결된 저온 SQUID 자속계 probe가 담겨 있다. Preamp를 지난 신호들은 자기차폐 상자 밖의 control electronics에 연결되며, control electronics의 feedback 저항에서 나오는 SQUID 신호가 filter unit을 거



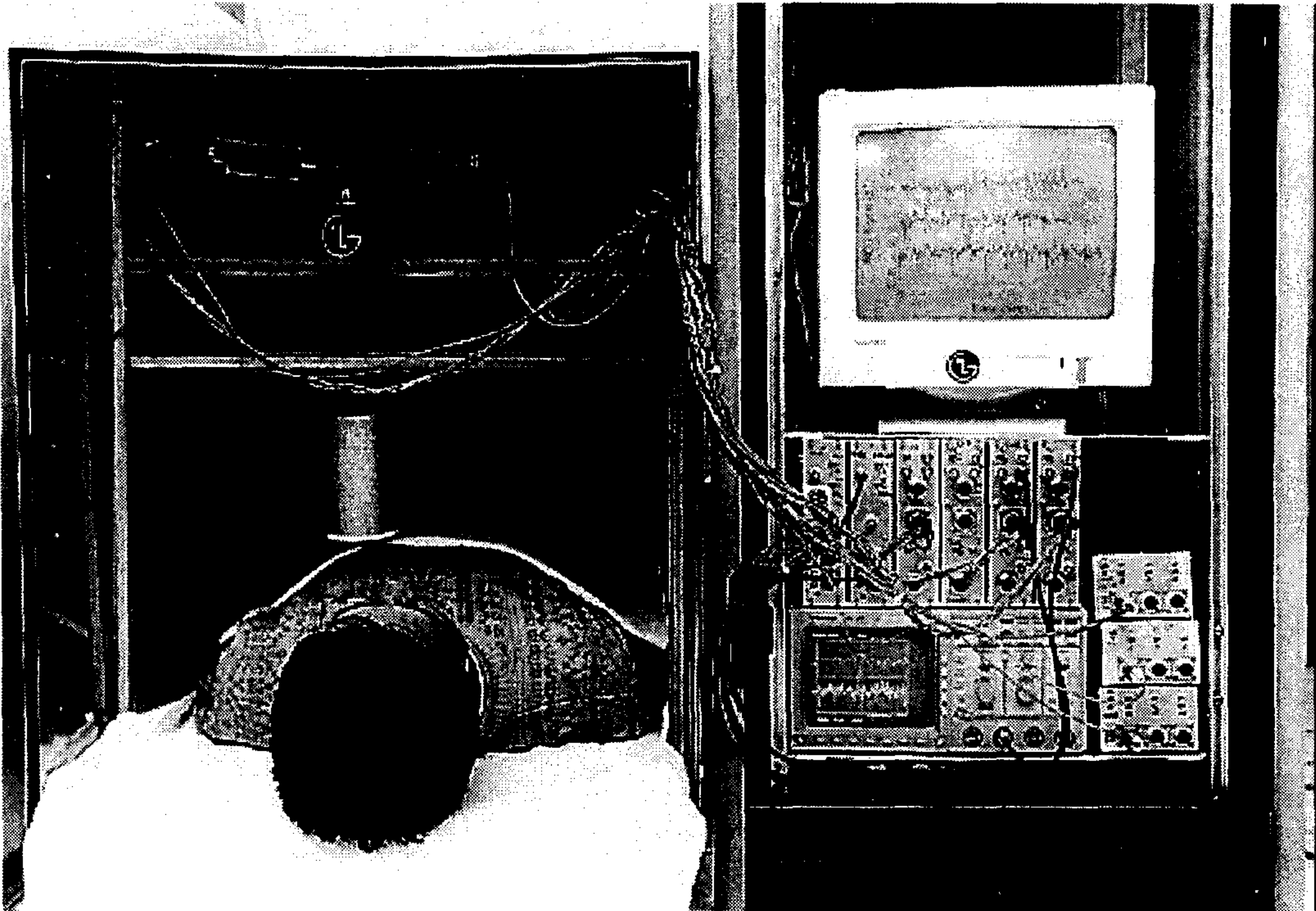


Fig. 4-2-4. 실제 MCG 측정 set-up을 보여주는 사진. 자기차폐 box안에 사람이 누워있고 그 위에 pre-amp가 연결된 SQUID probe가 dewar에 담겨있으며, 오른쪽에 control electronics unit들과 oscilloscope, computer monitor를 볼 수 있다. 실제 측정시에는 뚜껑을 닫고 사용한다.

쳐 oscilloscope 및 computer에 표시되게 된다. 위의 Fig. 4-2-4의 computer monitor와 oscilloscope CRT상에는 심자도 측정 결과가 표시되어 있다.

실제 심자도 측정시에는 Fig. 4-2-4와 차이가 나는 부분이 있다. 첫째로, 두 겹의 뚜껑을 닫아서 자기차폐 상자를 밀폐시키고 측정하였으며, 둘째로, 사람의 누운 방향이 모로 비스듬히 누워서 측정하였다. 왜냐하면 glass dewar는 바닥의 gap이 크고, side wall의 두께는 약 1 cm 정도로 비교적 가깝기 때문이다. 마지막으로 측정대상이 되는 사람은 자기차폐 box에 들어가기 전에 몸에서 자기장 발생의 원인이 될 수 있는 모든 것을 모두 제거하고 들어갔다. 예를 들어 자성체가 아닌 금속도 eddy-current에 의해 자기장의 원인이 될 수 있으며, 일반적인 analog형의 전자시계에서 나오는 자기장의 세기는 측정결과 심장에서 발생하는 자기장의 크기에 100 배에 다다랐다.

위의 Fig. 4-2-5는 고온초전도 SQUID를 이용하여 국내 최초로 측정한 MCG 결과의 oscilloscope CRT 화면의 사진이다. 위쪽의 그림은 real time MCG의 결과로 가로축의 한 칸은 500 msec 이다. 약 0.8초의 주기로 심장에서 발생하는 신호의 peak을 뚜렷하게 관찰할 수 있다. 이 측정시 oscilloscope의 trigger는 MCG의 R-peak을 기준으로 행하였으며, 30 Hz 까지 low-pass filtering과 60 Hz의 notch filter를 사용하였다. Low-pass filtering에도 불구하고 notch filter를 사용하지 않을 경우 주 신호는 60 Hz 잡음이었으며, 그 크기는 자기차폐 환경에도 불구하고 실제 MCG 신호의 10배가 넘게 나타났다. 아래쪽의 그림은 10회 time-average한 MCG 신호로 Q, R, S peak이 뚜렷이 관측되며, T-structure가 희미하게 나타나는 것을 볼 수 있다.

심자도 측정 결과를 computer로 읽어 들인 결과가 아래의 Fig. 4-2-6에 나타나 있다. Fig. 4-2-6(a)는 real time MCG의 결과로 다른 시간에 한 사람에 대해



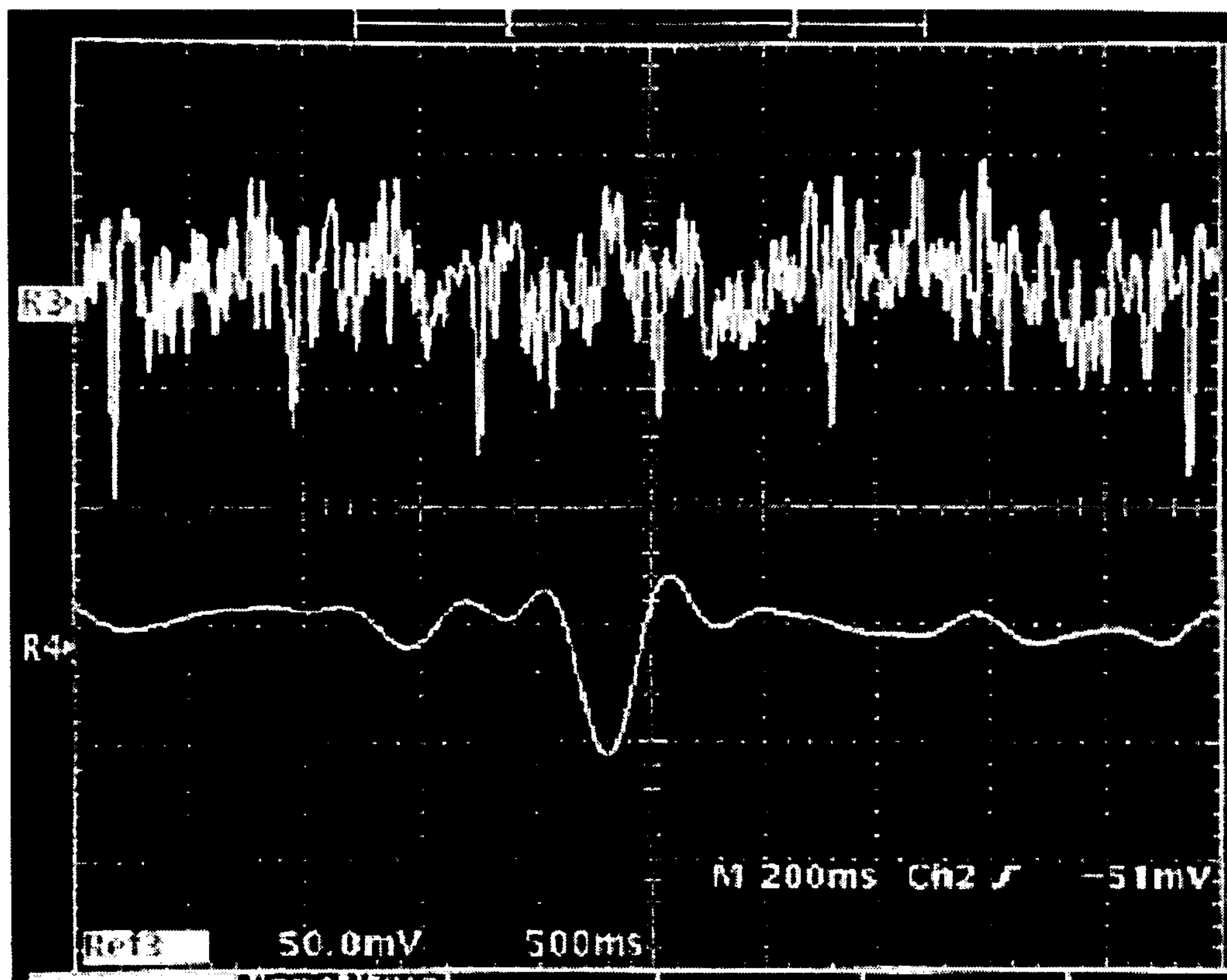


Fig. 4-2-5. 국내 최초의 고온초전도 SQUID로 측정된 MCG 결과의 oscilloscope CRT의 사진. 위는 real-time, 아래는 time average 결과이다.



여 두 번 측정된 결과이다. 결과를 살펴보면 MCG의 R-peak이 주기적으로 나타나고 있으며 박동수는 분당 75회 정도 - 주기가 0.8초 -를 나타내고 있으며, R-peak의 intensity는 약 50 pT 정도로 나타났다. 앞서 논의한 바와 같이 실험실의 자기잡음의 spectrum은 약  $1 \text{ nT}/\sqrt{\text{Hz}}$ 의 크기로 저주파수 대역에 거의 일정하게 존재하므로, 자기차폐상자의 차폐율을 평균 60 dB로 잡아도  $10 \text{ pT}/\sqrt{\text{Hz}}$  크기의 잡음이 존재하게 된다. 따라서 SQUID의 intrinsic한 잡음 level 보다 훨씬 큰 20 pT 내외의 background가 존재하는 Fig. 4-2-6(a)의 결과는 상당히 타당하다.

이러한 높은 잡음 level 하에서 신호를 분리하는 좋은 방법 중의 하나는 여러번 time average를 하는 것이다. Time average를 할 경우 주기적인 신호는 반복되지만 그렇지 않은 잡음은 크게 감소되기 때문이다. 심장에서 발생하는 자기장은 완전히 동일하지는 않지만 비교적 주기성을 가지므로 평균한 신호도 진료에 임상적 가치가 있다고 알려져 있다. 그러나 일반적으로 잡음의 분포도 완전한 gaussian이 아니기 때문에 time average의 횟수를 무한정 늘린다고 해서 S/N 비 (signal to noise ratio)가 무한정 좋아지지 않으며, 대체로 그 횟수는 200회 미만으로 알려져 있다. 따라서 MCG 측정시에도 digitizing oscilloscope (TDS 420, Tektronics)를 이용하여 R-peak에 trigger 시키고 time-average를 시도해 보았다. 그러나, 작은 자기차폐 상자로 인하여 측정 대상이 되는 사람이 긴 시간동안 일정한 자세를 취하기 힘들어서 많은 수의 time-average를 할 수 없었다. 그러므로, oscilloscope에서 10회의 time-average를 취한 후 MCG data를 얻었고, 이를 3회 반복한 후 computer 상에서 세 개의 data set에 대하여 numerically average한 결과가 위의 Fig. 4-2-6(b)에 나타나 있다. 그림에서 보면 R-peak 뿐만 아니라 Q- 및 S-peak도 뚜렷하게 관측할 수 있으며, S-peak 뒤

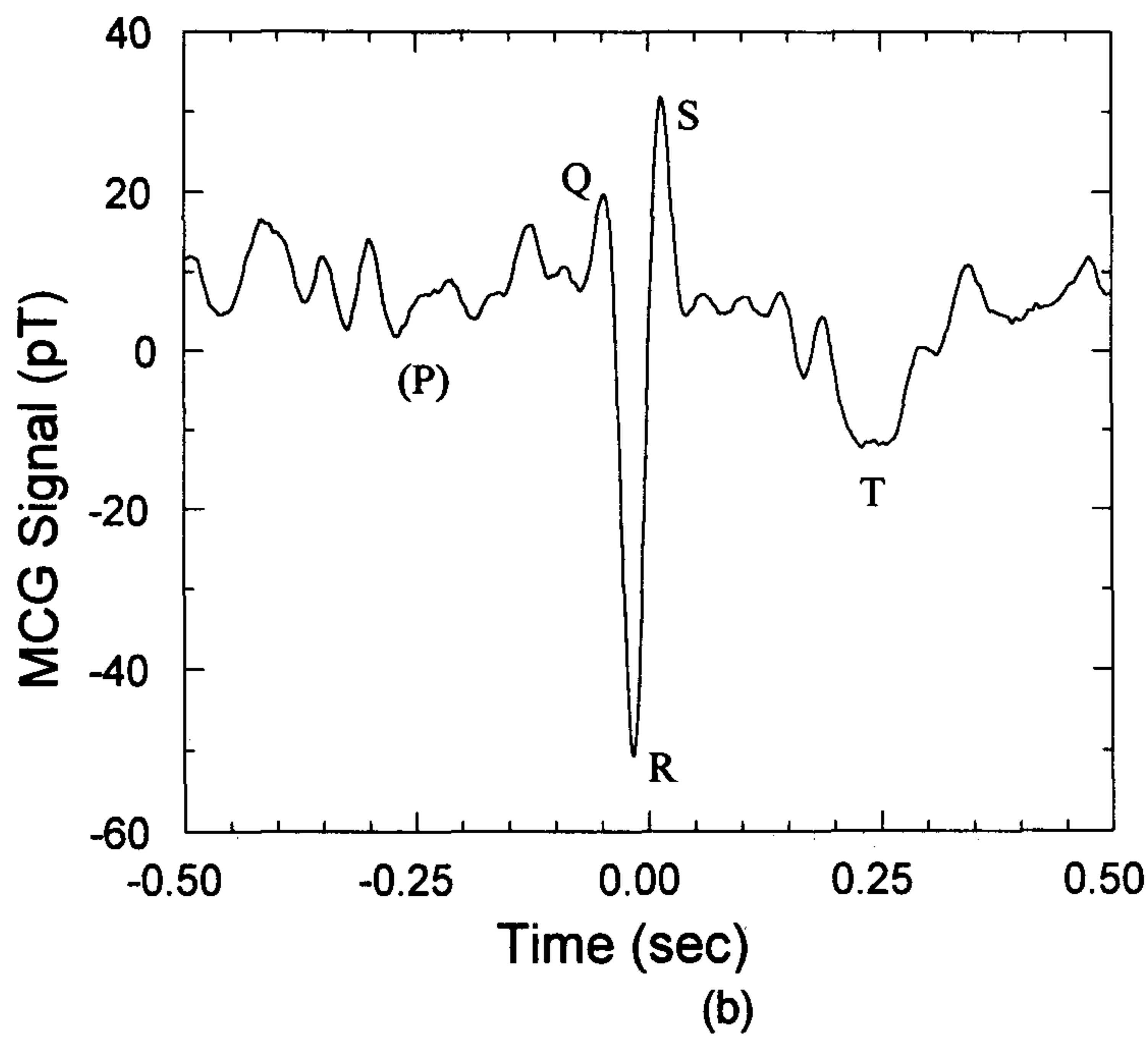
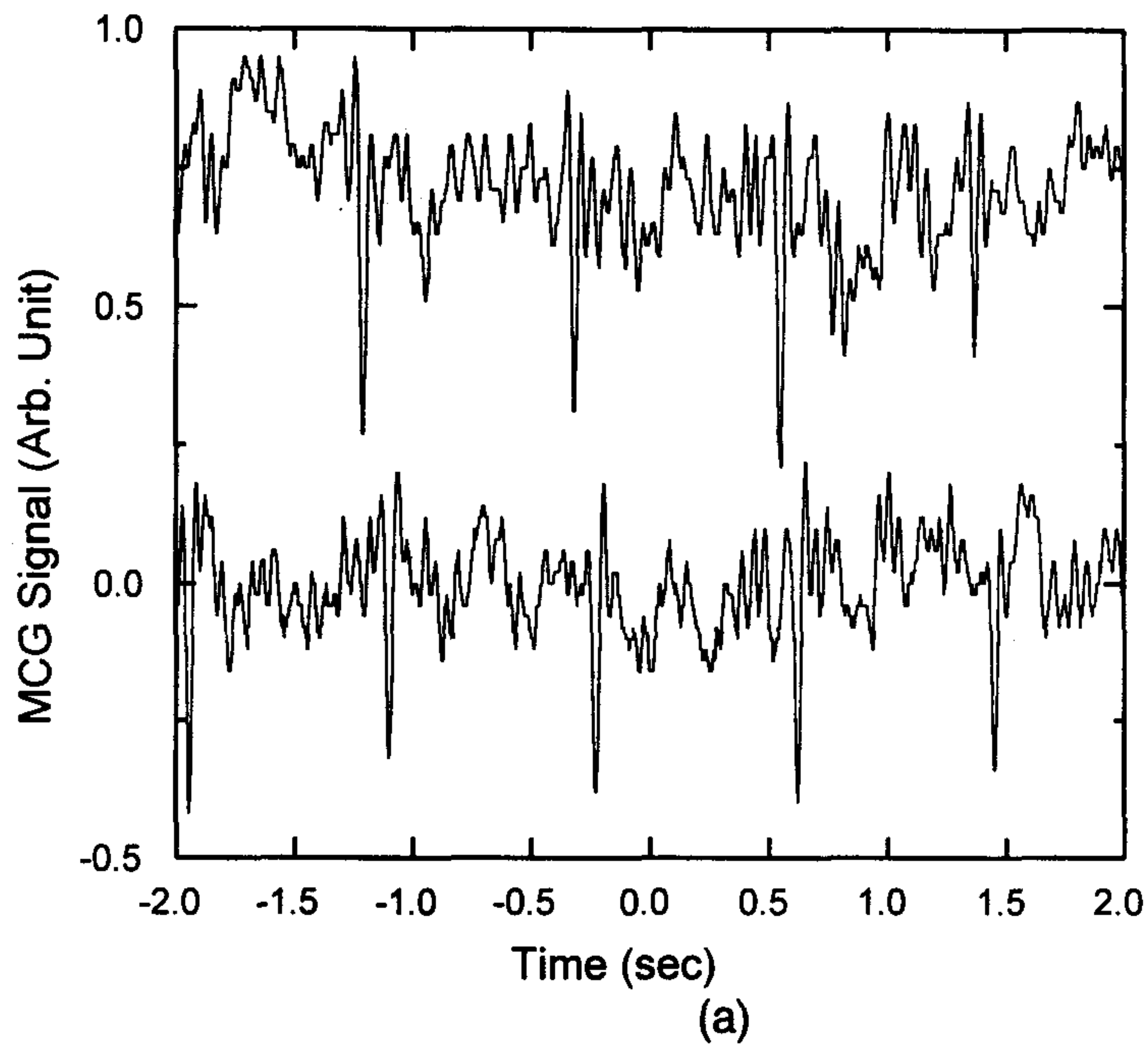


Fig. 4-2-6. 고온초전도 SQUID 자속계로 측정된 MCG 결과. (a) real-time signal, (b) 30 times time-averaged signal.

의 T structure도 확연히 나타나고 있다. 다만, P structure는 아직도 많이 남아 있는 낮은 주파수의 잡음에 묻혀 관측이 어려웠다. 남아있는 저주파의 잡음은 time average 횡수가 작은 이유와 저주파의 주기적인 자기 source의 존재 등으로 생각할 수 있다.

이상에서 directly coupled 고온초전도 SQUID 자속계 시스템을 독자적으로 설계 제작하여 국내 최초로 MCG(심자도) 측정에 성공하였다. 아직 S/N ratio의 개선의 여지가 많이 남아있으며 그 방법은 다양하다. 첫째로 자기차폐가 훨씬 우수한 공간에서의 MCG의 측정이다. 실제로 이 방법으로 행한 다채널 MCG 측정 결과는 본 보고서 다음절에서 기술하고 있다. 이는 가장 손쉬우면서 확실한 방법이지만, 대단히 고가의 자기차폐실이 필요로 하므로 실용적이지는 않다. 두 번째로 여러개의 SQUID를 이용한 electronic gradiometer의 사용이다. MCG의 측정과 같이 어떤 근접한 source로부터 자기장을 측정할 경우 잡음원이 되는 공간적으로 대체로 균일한 자기장과는 달리 큰 gradient 신호를 갖기 때문이다. 이에 대해서는 본 보고서 5장에서 다루기로 한다. 이 이외에도 태아의 MCG 연구등 더 작은 자기신호를 갖는 biomagnetism 연구를 위하여서는 보다 개선된 자기감도를 갖는 SQUID 자속계의 개발이 요구된다. 현재 우리의 directly coupled SQUID의 자기감도는 white noise level에서는 세계적 수준과 대등하지만, 1 Hz에서의 감도는 10배이상 떨어지고 있으며, 낮은 주파수에서 특성이 MCG등의 biomagnetism 측정에는 더욱 중요하다. 이 부분에 대한 개선은 SQUID 자체의 개선없이 bias-reversal 회로의 개발로 가능하리라 판단되며, 이에 대한 연구는 현재 진행중이다.

### 제 3 절 다채널 심자도 측정과 mapping

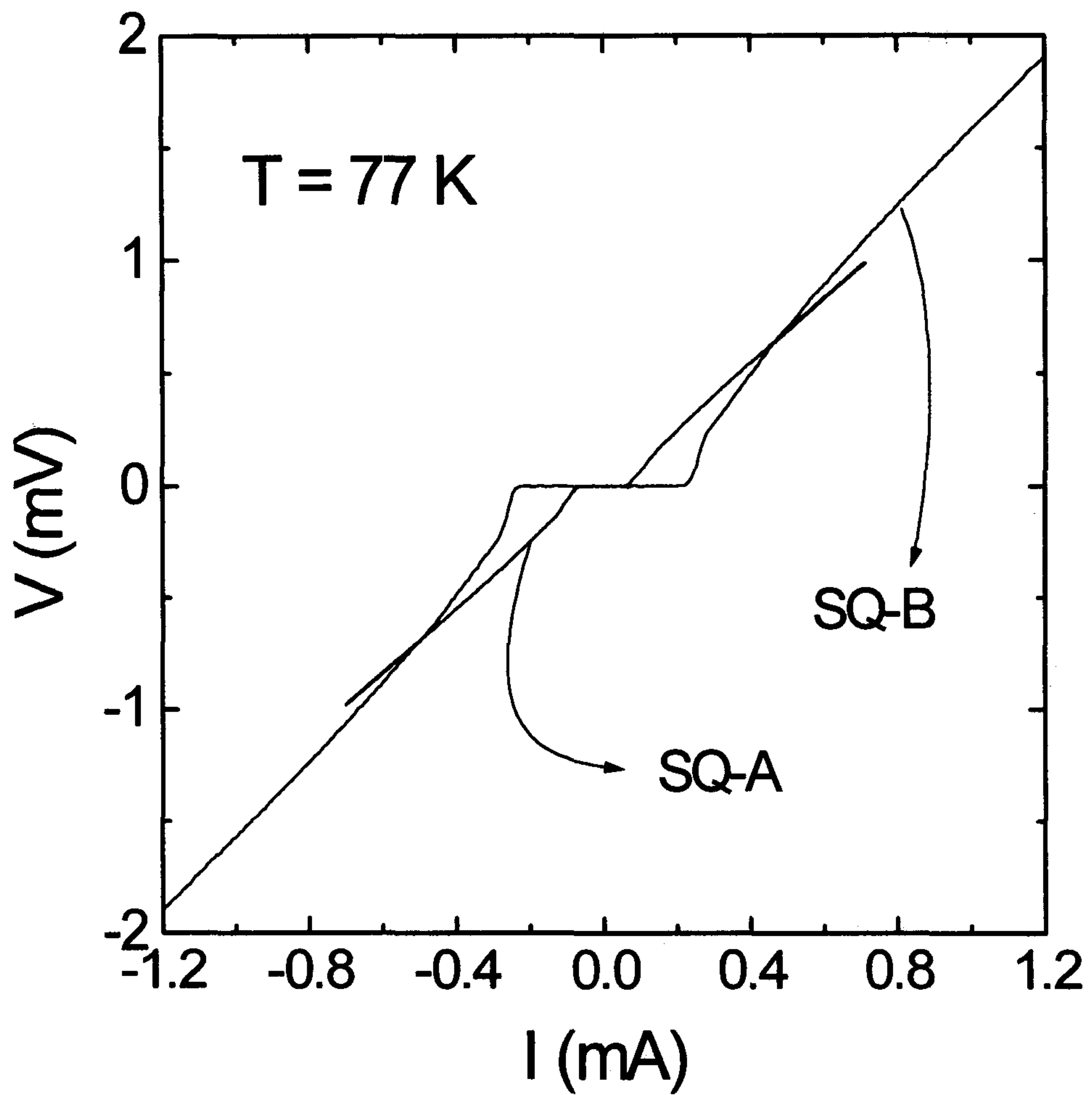


다채널 심자도 측정은 본 원에서 제작한 개선된 directly coupled SQUID 자속계를 사용하여 표준과학연구원의 자기차폐실에서 행하였다. 본 절에서는 새로이 개선된 SQUID 자속계의 parameter 및 성능의 측정 결과, 자기차폐실에서 위치에 따른 심자도 측정 결과 및 그 분석의 순으로 기술하도록 한다.

개선된 directly coupled SQUID는 아주 작은 크기의 SQUID가 큰 pick-up loop에 직접 연결된 기본 구조는 본 보고서 3장의 경우와 동일하나, 공정에 유의한 개선, SQUID 형태의 변화를 통한 ambient field 하에서의 사용 용의 도모 등을 고려하였다. 제작된 SQUID의 inductance는 58 pH, 추정되는 coupling constant  $k$ 는 0.83으로 나타났다. Inductance 값은 이전보다 10 % 감소시켜 modulation 진폭  $\Delta V$ 의 증가와 잡음의 감소를 도모하였다. 또한 pick-up loop의 경우  $L_p = 5.3$  nH,  $A_p = 23.5$  mm<sup>2</sup>로 디자인 되었고,  $A_{eff} = 0.21$  mm<sup>2</sup>의 값이 추정되며 예상되는 주기는 9.8 nT 이다. 이러한 디자인에는 모두 software를 통한 simulation을 이용하였다.

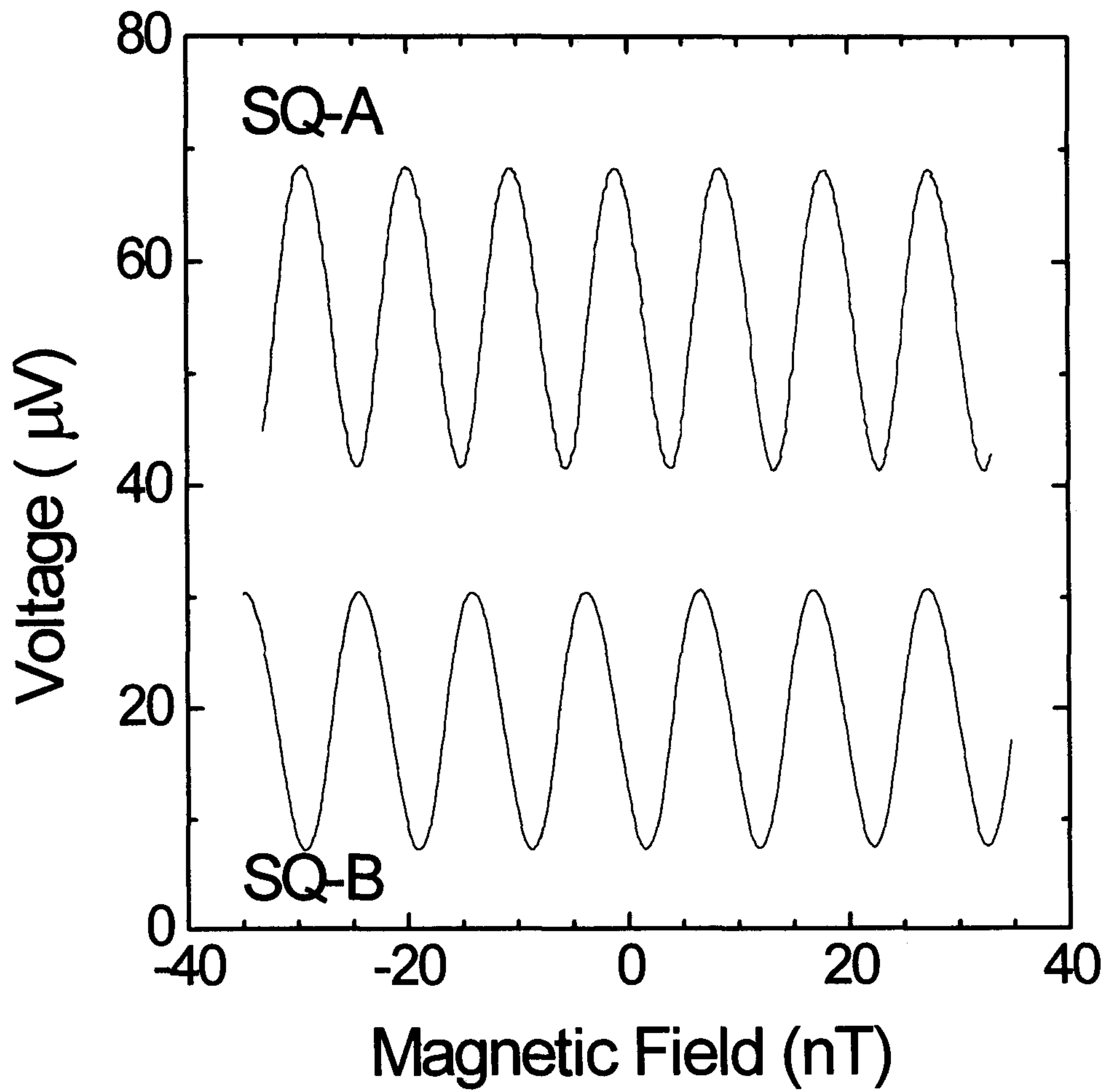
이렇게 디자인된 SQUID layout을 바탕으로 최적화된 SQUID를 얻기 위해서는 이에 따른 공정을 필요로 한다. 즉, SQUID modulation의 최적화를 위해서는 58 pH의 이 SQUID에 대해 약 20  $\mu$ A의  $I_c$ 를 갖는 접합이 바람직하며, 동시에  $I_c R_n$ 을 크게하기 위하여  $R_n$ 이 큰 접합을 만들어야 한다. 그러기 위해서 PLD 방법으로 제작한 YBCO 박막의 두께를 1500 Å내외로 약 500 Å 얇게 제작하였고, 박막 공정의 변화를 도모하였다. 이 장에서 측정에 사용된 SQUID의 경우도 최적화된 상태는 아니지만 3장의 결과와 비교하여 많은 개선이 있었음을 아래의 결과를 통해 확인할 수 있을 것이다.

SQUID 자속계들의 특성의 측정은 모두 자기차폐된 dewar에서 액체 질소에 담구어 행하였다. 다음의 Fig. 4-3-1(a)는 two-channel MCG 측정에 사용한 두



(a)

Fig. 4-3-1(a). Two-channel MCG 측정에 사용된 두 개의 SQUID 자속계 SQ-A, SQ-B - 에 대한 77 K 에서의 I-V 특성.



(b)

Fig. 4-3-1(b). Two-channel MCG 측정에 사용된 두 개의 SQUID 자속계 - SQ-A, SQ-B - 에 대한 77 K 에서의  $V-\phi$  특성.



개의 directly coupled SQUID들 - SQ-A, SQ-B -의 전류-전압(I-V) 특성의 측정 결과이다. 그림에서 보듯이 모두 excess current 없는 훌륭한 RSJ 특성을 나타내었다. 77 K에서 SQ-A의 경우 임계전류  $I_c = 30 \mu A$ ,  $R_n = 3 \Omega$ 의 값을 나타내어  $I_c R_n$  값은  $90 \mu V$  였으며, SQ-B의 경우 임계전류  $I_c = 110 \mu A$ ,  $R_n = 3.2 \Omega$ 의 값을 나타내어  $I_c R_n$  값은  $350 \mu V$  였다. 이는 3장의 경우 나타난 임계전류  $I_c = 170 \mu A$ ,  $R_n = 1.46 \Omega$ 에 비해 대단히 개선된 결과이다.

이 두 SQUID 자속계에 대한 자속-전압(V- $\Phi$ ) 특성이 Fig. 4-3-1(b)에 나타나 있다. 이 두 SQUID의 inductance 58 pH를 가지고, 앞에서 측정한 I-V 측정결과를 이용하면 Enpuku등이 제안한 다음의 식

$$\Delta V = \frac{4}{\pi} \frac{I_c R_n}{1 + \beta} \left\{ 1 - 3.57 \sqrt{k_B T L / \Phi_0} \right\}$$

에서 정현파의 진폭  $\Delta V$ 를 예측할 수 있고, 그 값은 SQ-A의 경우  $24 \mu V$ , SQ-B의 경우  $35 \mu V$ 로 계산되었다. Fig. 4-3-1(b)에서 측정값은 SQ-A의 경우  $26.5 \mu V$ , SQ-B의 경우  $24 \mu V$ 로 나타났다. 계산치와 측정치 사이의 차이를 살펴보면 SQ-A의 경우 계산치보다 약 10 % 큰 값이 관측되었고, SQ-B의 경우 계산치의  $\frac{2}{3}$  정도의 값이 측정되었다. SQ-B의 경우 나타난 30 % 정도의 차이는 많은 group들에 의해서 공통적으로 관측되고 있으며, 특히  $\beta$ 가 큰 SQUID - 이 경우  $\beta \sim 9$  -에 대해 계산식의 오차가 커질 수 있다. 그리고, stripline resonance가 영향을 미쳤을 가능성도 있다. 한편 SQ-A의 경우 오히려 측정치가 더 크게 나타났는데, 이는  $I_c$  값을 열 요동을 고려하지 않고 결정해서  $I_c R_n$  값을 실제보다 작게 처리한데 원인이 있는 듯 하다. SQ-A의 경우  $\beta \sim 1.7$ 로 거의 최적값에 접근하고 있어서, 작은  $I_c R_n$ 에도 불구하고 우수한 특성을 나타내었다.

한편 Fig. 4-3-1(b)에서 두 SQUID 자속계의 주기를 살펴보면 SQ-A의 경우 9.5 nT, SQ-B의 경우 10.3 nT로 나타났으며, 이를 유효면적  $A_{eff}$ 로 나타내면 각

각  $0.22 \text{ mm}^2$ 와  $0.20 \text{ mm}^2$ 가 된다. 이 값은 계산된 유효면적  $0.21 \text{ mm}^2$ 와 비교하여 5 % 미만의 오차로 대단히 유사한 값이다. 작은 차이는 사진식각 process에 일부 기인할 것이며, 자속을 가해주는 coil과 SQUID의 상대 위치의 변화에도 기인한다. 따라서 software를 이용한 inductance simulation의 결과는 단층의 초전도 박막에 대해서도 비교적 잘 일치한다 하겠다.

두 개의 SQUID에 대하여 FLL을 구성하여 77 K에서 측정된 주파수에 따른 자속잡음  $S_\phi^{1/2}$ 를 측정하였고, 측정시 직류 인가전류를 흘려주었다. Fig. 4-3-2는 이러한 자속잡음  $S_\phi^{1/2}$ 를 자기감도(rms field resolution,  $S_B^{1/2}$ )로 환산한 그림이다. 그림에서 두 SQUID 자속계 모두 수 kHz까지  $1/f$  주파수 특성을 보이고 있으며, 10 kHz 정도부터 주파수 의존성이 없는 white noise 특성을 보였다. 주파수 10 kHz에서 자기감도는 SQ-A의 경우  $59 \text{ fT}/\sqrt{\text{Hz}}$ , SQ-B의 경우  $78 \text{ fT}/\sqrt{\text{Hz}}$ 로 나타났으며, 이를 자속잡음으로 환산하면 각각  $6.2 \times 10^6 \Phi_0/\sqrt{\text{Hz}}$ ,  $7.6 \times 10^6 \Phi_0/\sqrt{\text{Hz}}$ 가 된다. 이러한 크기는 같은 면적의 directly coupled SQUID의 세계기록인  $35 \text{ fT}/\sqrt{\text{Hz}}$ 와 비교하여 손색이 없는 우수한 수치이다. 한편 10 Hz에서 자기감도는 큰  $1/f$  특성 때문에 SQ-A의 경우  $0.7 \text{ pT}/\sqrt{\text{Hz}}$ , SQ-B의 경우  $1.4 \text{ pT}/\sqrt{\text{Hz}}$ 로 나타났다. SQUID에서 이러한  $1/f$  잡음의 원인은 크게 critical current fluctuation과 flux motion과 관계된 항, 이렇게 두 가지로 구별된다. 그중 flux motion에 의한  $1/f$  잡음은 bias-reversal 방법으로 쉽게 제거되는 것으로 알려져 있다. 특히 고온초전도체 박막은 critical current fluctuation에 의한 잡음의 크기가 1 Hz에서 약  $1 \times 10^4 \Phi_0/\sqrt{\text{Hz}}$  이상 되는 것으로 알려져 있다. 그리고 flux motion과 관계된  $1/f$  잡음이 심한 고온초전도 SQUID의 경우 white 잡음 또한 대체로 매우 큰 것으로 알려져 있다. 따라서 우리가 제

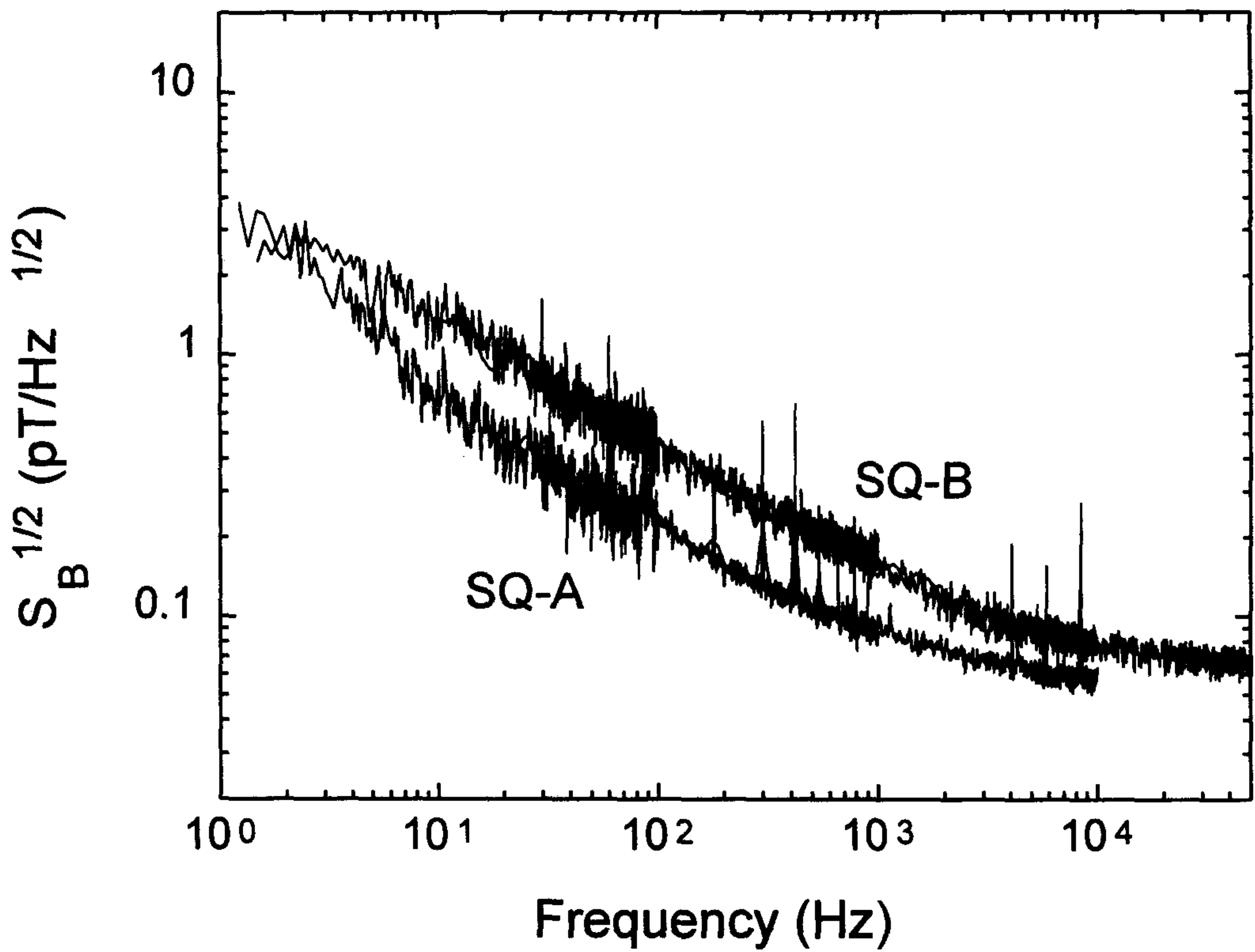


Fig. 4-3-2. Two-channel MCG 측정에 사용된 두 개의 SQUID 자속계 - SQ-A, SQ-B - 의 77 K 에서의 자기감도( $S_B^{1/2}$ )의 frequency spectrum.

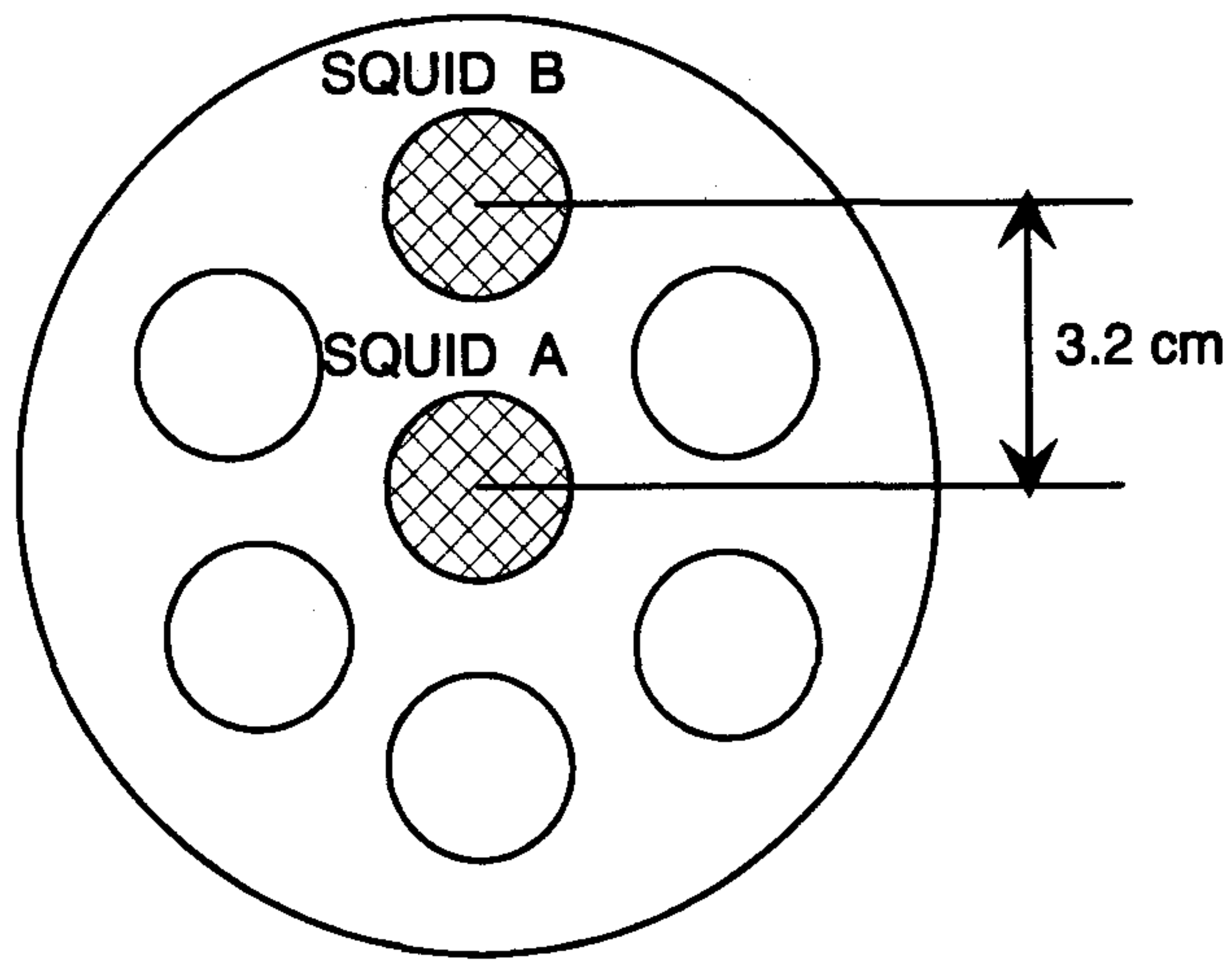
작한 SQUID의 저주파에서의 잡음특성은 bias-reversal 방법을 사용할 경우 크게 개선되리라 기대된다.

이상의 두 개의 directly coupled SQUID 자속계를 이용하여 표준과학연구원의 자기차폐실(magnetically shielded room)에서 심자도를 측정하였다. 표준과학연구원의 자기차폐실은 스위스의 IMEDCO사에서 제작한 것으로 2 m(길이)×2 m(너비)×2.4 m(높이)의 내부공간을 갖추고 있으며, high permeability mu-metal 두겹을 이용한 ferromagnetic shielding과 두꺼운 두겹의 high conductivity Al 판을 이용한 eddy current shielding을 이용하여 자기장을 차폐하고 있다. 자기 차폐율을 살펴보면 dc에서 60 dB이상, 1 Hz에서 60 dB이상, 10 Hz에서 80 dB이상을 나타내고 있다. 벽 두께가 약 60 cm인 이 자기차폐실은 전면에 특수 설계된 문이 있고, 내부 조명과 환기 시설이 되어있으며 wiring을 위한 3개의 pipe가 설치되어 있다. 이 자기차폐실 내부에서의 자장잡음을 살펴보면 1 Hz에서  $500 \text{ fT}/\sqrt{\text{Hz}}$ , 10 Hz에서  $100 \text{ fT}/\sqrt{\text{Hz}}$  가량 되며, 자장 gradient 잡음은 1 Hz에서  $7 \text{ fT}/\sqrt{\text{Hz}} \text{ cm}$  이하로 측정되었다고 한다. 이러한 조건은 SQUID 자속계로 MCG 측정에 적합한 수치이며, SQUID gradiometer로는 거의 모든 biomagnetic 신호를 측정할 만한 수준이다.

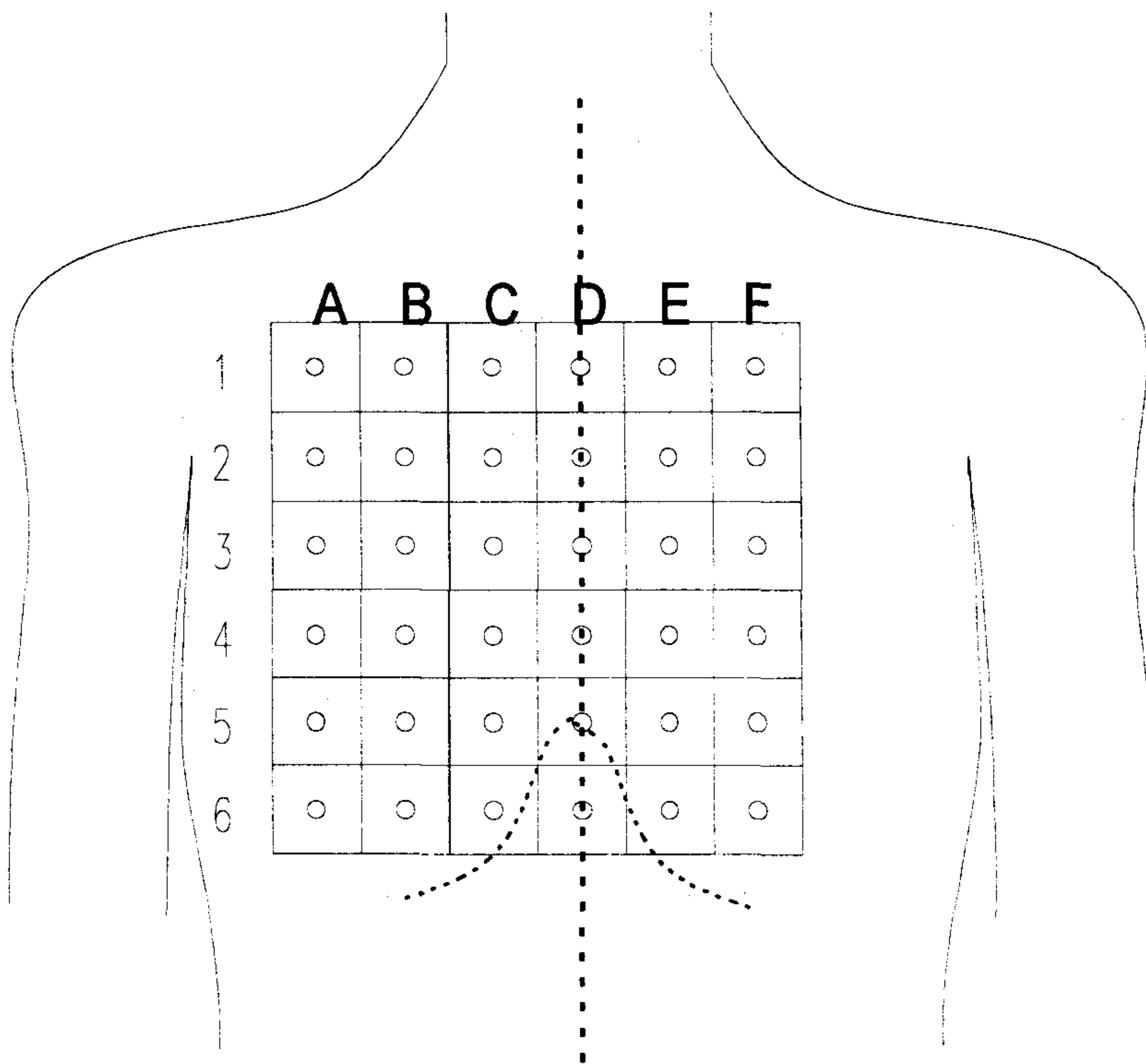
심자도 측정을 위하여 사용한 dewar는 Russia에서 제작한 FRE 소재의 것으로 tail gap은 10 mm 이하이다. 두 개의 SQUID 자속계들 - SQ-A, SQ-B-은 다음의 Fig. 4-3-3(a)와 같이 3.2 cm 간격으로 위치시켰고, LC resonance circuit을 사용한 FLL 회로로 0.1 Hz ~ 50 Hz의 bandwidth에 대하여 동시에 두 위치에서 MCG를 측정하였다. 측정 대상이 되는 사람에게는 다음의 Fig. 4-3-3(b)와 같은 grid가 쳐진 옷을 입혀서 위치에 따른 MCG 정보를 얻고자 하였다.

SQ-A, SQ-B로 동시에 MCG를 측정하였으며, Fig. 4-3-3(b)에서 x축에 해당하





(a)



(b)

Fig. 4-3-3. (a) MCG 측정에 사용된 dewar 위에서 본에서 SQ-A와 SQ-B의 위치 및 간격. (b) MCG를 측정한 위치(open circle)과 positioning grid.

는 alphabet grid를 기준으로 SQ-A는 B, D, F column을, SQ-B는 A, C, E column을 측정하는데 사용하였다. MCG의 결과는 real time으로 측정하여 얻거나, 양쪽 손목에 전극을 연결하여 전위차를 읽는 limb ECG(심전도, electrocardiogram) 신호로 trigger 하여 32번 time average 하여 얻었다.

다음의 Fig. 4-3-4는 grid position F-5에서 SQ-A로 측정한 real time MCG 결과와 32번 time average하여 얻은 MCG 결과이다. Fig. 4-3-4의 결과를 앞절의 Fig. 4-2-6의 결과와 비교해보면 SQUID 특성의 개선이 이루어진 점을 고려하더라도 S/N ratio가 크게 개선이 된 것을 볼 수 있다. Fig. 4-3-4(a)의 real time 측정 data를 보면 Q-, R-, S-peak과 T structure가 구별되고 있음을 알 수 있다. 특히 Fig. 4-3-4(b)의 time average 결과를 보면 noise level이 매우 낮고, MCG의 모든 peak과 substructure들을 잘 관측할 수 있어서 의료 진단용으로의 가능성을 시사하고 있다.

다음의 Fig. 4-3-5는 6×6 grid의 모든 위치에서 측정한 32번 time average한 MCG signal을 나타내고 있다. SQ-A, SQ-B 두 개의 SQUID로 동시에 측정하였으므로, 모두 36 위치를 측정하기 위하여 18회 이동해야 했으며 총 측정시간은 약 30~40분가량 소요되었다. 두 개의 SQUID들로 동시에 측정하며 서로의 cross talk에 의한 추가 잡음의 발생은 감지할 수 없었고, 따라서 7개 이상의 실용적 다채널 시스템 제작에도 문제가 없는 것으로 판단되었다. 단지 two-channel 시스템을 구축한 이유는 SQUID 제어회로가 개발단계에 있어서 2조 만을 가지고 있었기 때문이다.

Fig. 4-3-5의 결과에서 위치에 따른 MCG 신호의 변화를 명백하게 관측할 수 있다. 심장에서 멀리 떨어진 A 열의 1행 쪽으로 갈수록 신호가 미약해지며, 명치 부근에 해당하는 D열 4행에서 R-peak의 크기가 최대가 되는 것을 볼 수

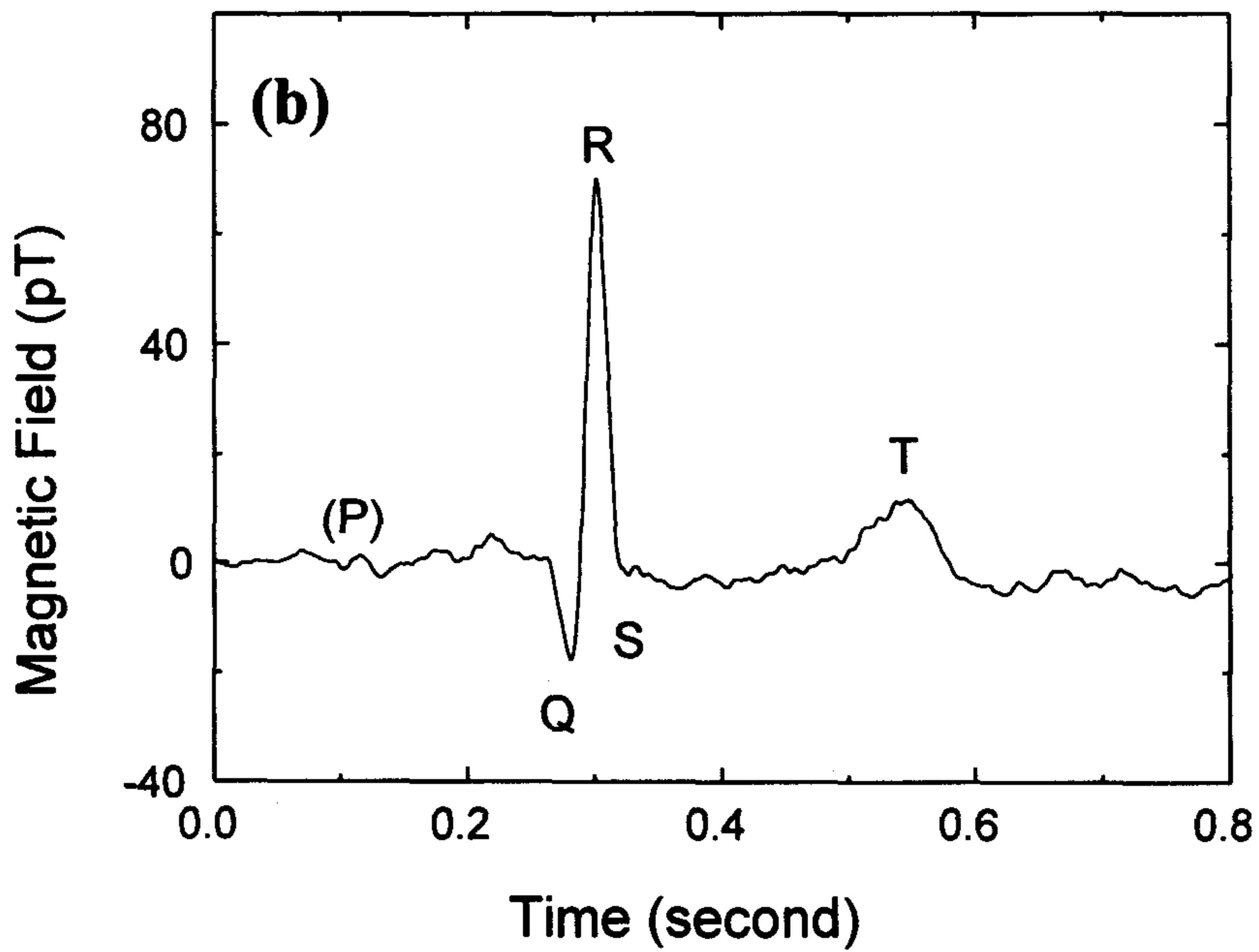
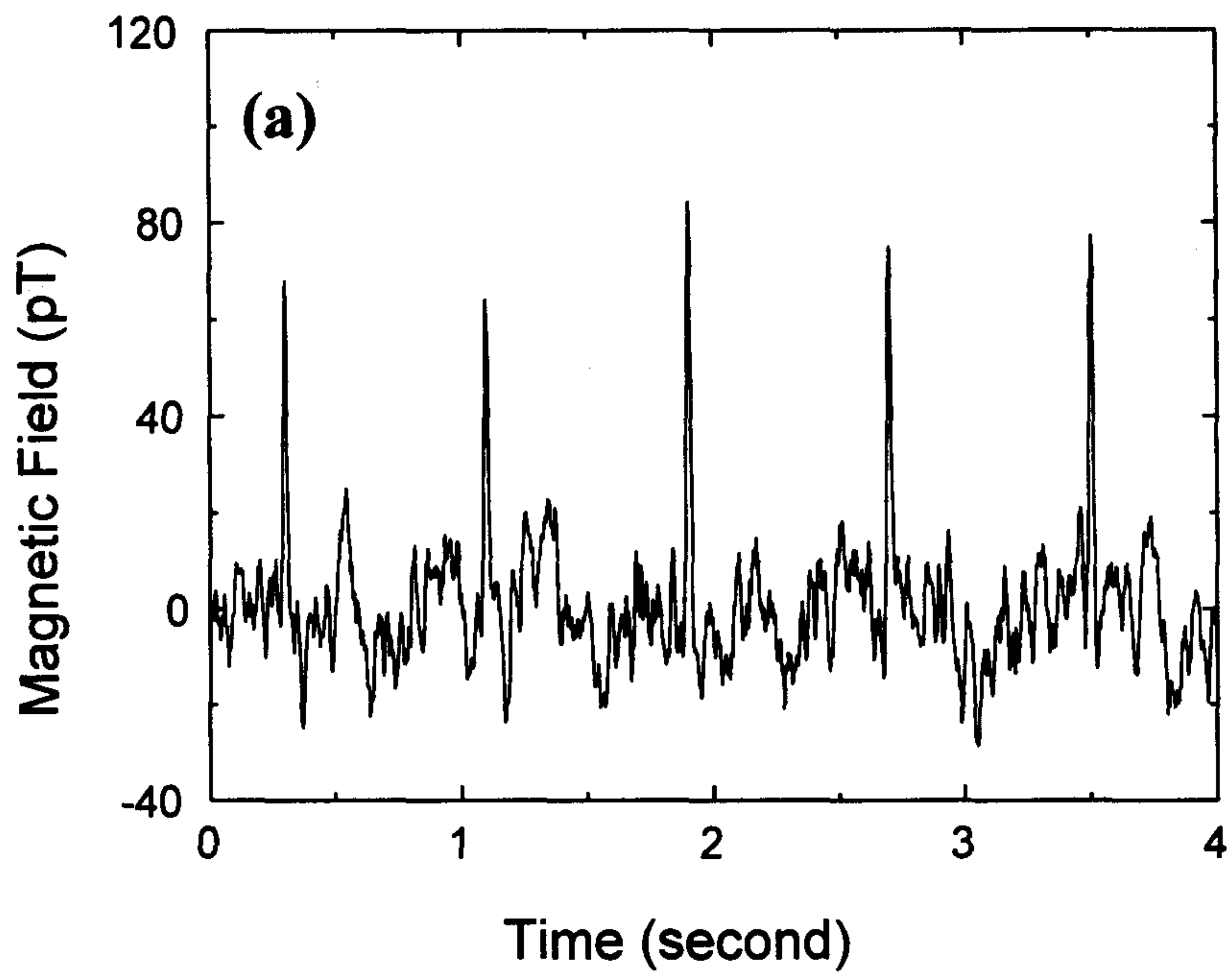


Fig. 4-3-4. MCG for the grid position F-5 in Fig. 4-20(b). (a) real time measurement result, (b) averaged for 32 heart beats.

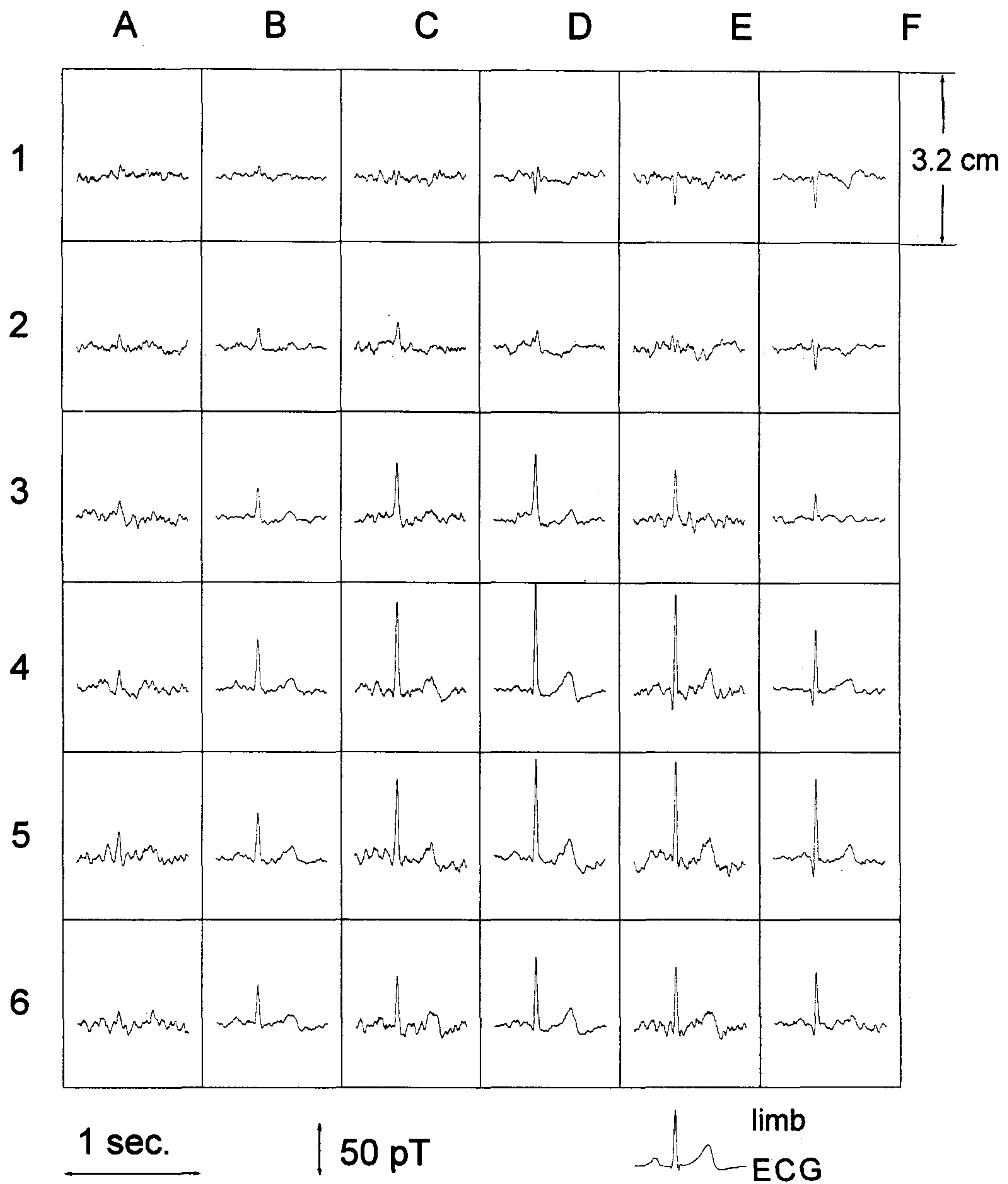


Fig. 4-3-5. MCG signals for each grid position in Fig. 4-3-3(b). Limb ECG signal was used for triggering, and each data was averaged for 32 heart beat signals.



있다. 특히 C열 1행과 F열 3행을 연결하는 선을 기준으로 아랫쪽에서는 R-peak 이 + 방향을 향하다가 그 기준선 윗쪽에서는 - 방향으로 바뀌는 것이 관찰된다. 이는 실제로 심장에서 발생하는 자기장의 방향이 바뀌는 것을 의미하며, 자기장 dipole의 위치와 크기를 결정할 수 있게 된다. 또한 위치에 따라 MCG 신호의 모양이 다르게 관측되는 것을 알 수 있는데, 이는 의료 임상적으로 data가 축적될 경우 가치있는 정보로 알 수 있다.

위의 MCG 결과를 이용하여 R-peak의 8 msec 이전의 각각 36개 data point 들로 magnetocardiogram isofield contour map을 그린 결과가 위의 Fig. 4-3-6에 나타나 있다. 이 contour map은 MATLAB이라는 software를 이용하여 추출한 것으로, 등고선의 간격은 13 pT이고 16 cm×16 cm 면적에 대해서 그려져 있다. 이로부터 위치에 따른 자기장의 세기를 잘 볼 수 있으며, MCG data를 얻은 위치에 따라 다른 모습을 나타내는 것으로 알려져 있다. 따라서 16 channel 이상의 다채널 시스템을 구현하여 real time으로 이러한 data를 얻을 수 있도록 시스템을 발전시킬 경우 의료기기로서의 응용은 크게 기대된다.

이상에서 2 channel SQUID 심자계를 제작하여 자기차폐실에서 MCG를 측정하고, 이로부터 contour map을 작성한 결과에 대하여 기술하였다. 이런 결과는 고온초전도 SQUID가 위치에 따라 민감한 비부착식 의료 진단기기로 응용될 수 있다는 예를 보여준 중요한 결과라 하겠다. 현재의 시스템은 electronic control system의 개선(예로 bias reversal)에 의해 저주파수에서의 잡음 특성은 10배 이상 개선 가능하리라 판단되며, 다채널로의 확장이 하나의 과제라 하겠다. 액체질소를 사용한다는 편리함을 가지고 있는 고온초전도 SQUID의 보다 폭 넓은 응용을 위하여서는 자기차폐 환경을 벗어나는 것이 매우 중요하며, 이를 위하여 SQUID 소자의 개선과 아울러 electronic gradiometer등의 active

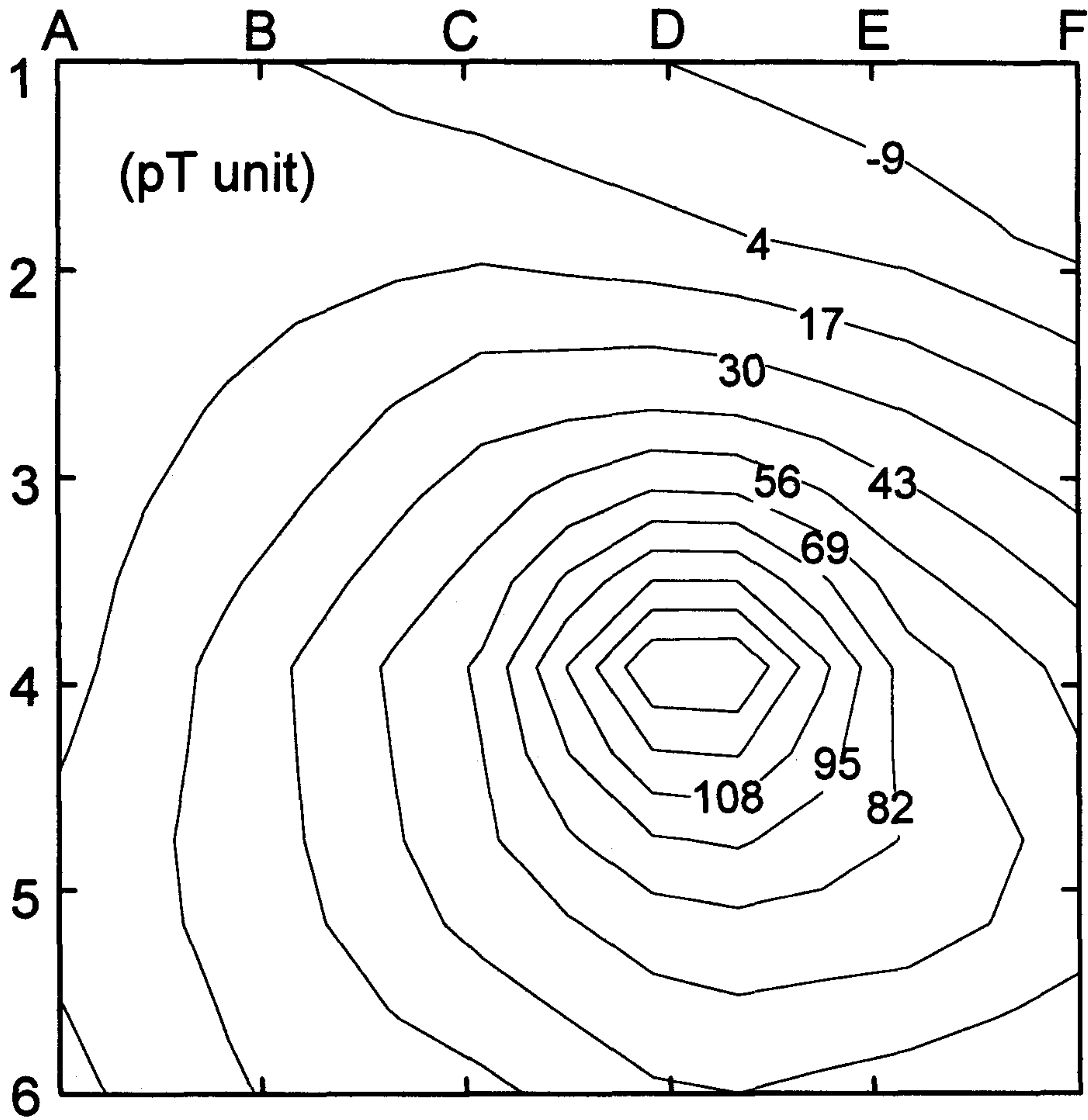


Fig. 4-3-6. Magnetocardiogram isofield contour map (16 cm×16 cm). Interval of the contour line is 13 pT.

noise compensation 기술이 필수적이다. 이러한 방향의 연구에 대해서는 본 보고서 5장에 일부 기술되어 있으며, 꾸준한 연구가 요망된다.

## 참 고 문 헌

- [1] S. Tanaka, H. Itozaki, H. Toyota, N. Harada, A. Adachi, K. Okajima, H. Kado, and T. Magaishi, *Appl. Phys. Lett.* **64**, 514 (1994).
- [2] M. S. DiIorio, K.-Y. Yang, and S. Yoshizumi, *Appl. Phys. Lett.* **67**, 1926 (1995).
- [3] B. Oh, S. H. Moon, H. T. Kim, Y. H. Choi, and Y. J. Jeon (to be published in JKPS).
- [4] L. P. Lee, M. Teepe, V. Vinetskiy, R. Cantor, and M. S. Colclough, *Appl. Phys. Lett.* **66**, 3059 (1995).
- [5] M. Matsuda, Y. Murayama, S. Kiryu, N. Kasai, S. Kashiwaya, M. Koyanagi, and T. Endo, *IEEE Trans. Magn.* **MAG-27**, 3043 (1991).
- [6] D. Koelle, A. H. Miklich, E. Dantsker, F. Ludwig, D. T. Nemeth, J. Clarke, W. Ruby, and K. Char, *Appl. Phys. Lett.* **63**, 3630 (1993).
- [7] Y. Zhang, U. Kruger, R. Kutzner, R. Wordenweber, J. Schubert, W. Zander, E. Sodtke, A. I. Braginski, and M. Strupp, *Appl. Phys. Lett.* **65**, 3380 (1994).
- [8] L. P. Lee, J. Longo, V. Vinetskiy, and R. Cantor, *Appl. Phys. Lett.* **66**, 1539 (1995).
- [9] S. H. Moon, B. Oh, H. T. Kim, Y. J. Jeon, and Y. H. Choi,

Proceedings of the Conference on High  $T_c$  Superconductivity - Yongpyung  
95, 283 (1995).

[10] K. Enpuku, Y. Shimomura, and T. Kisu, *J. Appl. Phys.* **73**, 7929 (1993).

[11] Y. H. Lee, H. C. Kwon, J. M. Kim, C. M. Lim, S. K. Lee, Y. K. Park,  
and J. C. Park, *J. Kor. Mag. Soc.* **6**, 264 (1996).

[12] K. Enpuku, G. Tokita, T. Maruo, and T. Minotani, *J. Appl. Phys.* **78**,  
3498 (1995).



## 제 5 장 3 SQUID Gradiometer

고온초전도 SQUID의 보다 폭 넓은 활용을 위해서는 저온초전도 SQUID와 비교하여 장점이 확보되어야 한다. 고온초전도 SQUID의 경우 높은 동작온도 (77 K)로 인하여 상대적으로 동작온도가 낮은(4.2 K) 저온초전도 SQUID와 비교하여 낮은 자기감도를 가질 수밖에 없다. 그러나, 고온초전도 SQUID의 꾸준한 개선으로 대부분의 응용에 충분한 감도가 확보되고 있다. 거의 유사한 자기감도가 확보될 경우, 사용이 훨씬 편리하고 가격이 1/20에 불과한 액체질소를 사용하는 고온초전도 SQUID의 이용이 증대할 것임은 명백하다. 특히 액체질소 용기는 측정하고자 하는 대상과 SQUID의 간격이 가깝게 제작할 수 있으므로 약간 떨어지는 고온초전도 SQUID의 감도에 대한 보충이 가능하고, 액체질소의 보전기간을 크게 증대시킬 수 있으므로 실험실 외부 공간에서의 응용가능성을 크게 높여 주고 있다.

SQUID를 자기차폐가 안된 일반공간에서 사용하기 위해서는 gradiometer의 제작이 필수적이다. 대체로 공간적으로 균일한 잡음원과는 달리 측정하고자 하는 대상으로부터의 자기장은 그 구배(gradient)가 크므로, SQUID gradiometer를 이용하면 크기가 더 큰 잡음원 속에서 원하는 신호만을 분리해 내는 것이 용이하다.

본 장에서는 고온초전도 SQUID gradiometer의 자기차폐 안된 환경에서의 활용을 위해 필요한 요소들에 대해 검토하고, 그 방향의 하나인 방향성 3 SQUID 자속계(3 SQUID gradiometer)의 설계, 제작에 대하여 논의하도록 한다.

## 제 1 절 Electronic gradiometer와 active noise compensation

일반적으로 저온초전도 SQUID gradiometer의 제작방법은 초전도 can으로 자기차폐된 공간에 SQUID sensor와 input coil을 두고, wire로 만든 pick-up coil을 측정이 필요한 외부공간에 놓고 이를 input coil과 연결하는 방법이다. 저온초전도 SQUID의 경우 양질의 저잡음 wire 생산이 정착되어 있으므로, 같은 형태의 SQUID를 고정시키고 다양한 종류의 wire pick-up coil을 연결하여 여러종류의 gradiometer를 제작할 수 있다(Fig. 5-1-1). 그림에서 보듯이 단순히 coil 형태를 변화시킴으로 인하여 자기장의 1차 또는 2차 미분항(gradient) 성분을 axial, planar, radial등 다양한 방향에 대해 얻어낼 수 있는 장점이 있으므로, coil의 balance를 정확히 일치시키는데 어려움이 있음에도 불구하고 널리 쓰여 왔다.

그러나, 고온초전도체의 경우 저잡음의 양질의 wire의 생산이 현재까지 이루어지지 않고 있기 때문에 이런 wire wound 형태의 gradiometer의 제작은 아직까지 불가능하다. 따라서 박막형태의 gradiometer를 제작하거나, 아니면 새로운 형태의 고안을 통하여 고온초전도 SQUID gradiometer를 제작해야 한다. 저온초전도 SQUID의 경우도 Si 기술에 바탕을 둔 photolithography의 발달로 최근에는 wafer에 integrate 되어있는 박막형의 planar gradiometer의 제작이 활발한데, 이는 pick-up coil간의 balancing이 용이하여 대량생산이 가능하기 때문이다.

그러나, 이미 이전의 1차년도 결과 보고서에 언급한 바와 같이 고온초전도 SQUID의 경우 저온 SQUID와는 달리 박막형의 gradiometer에 몇 가지 문제점

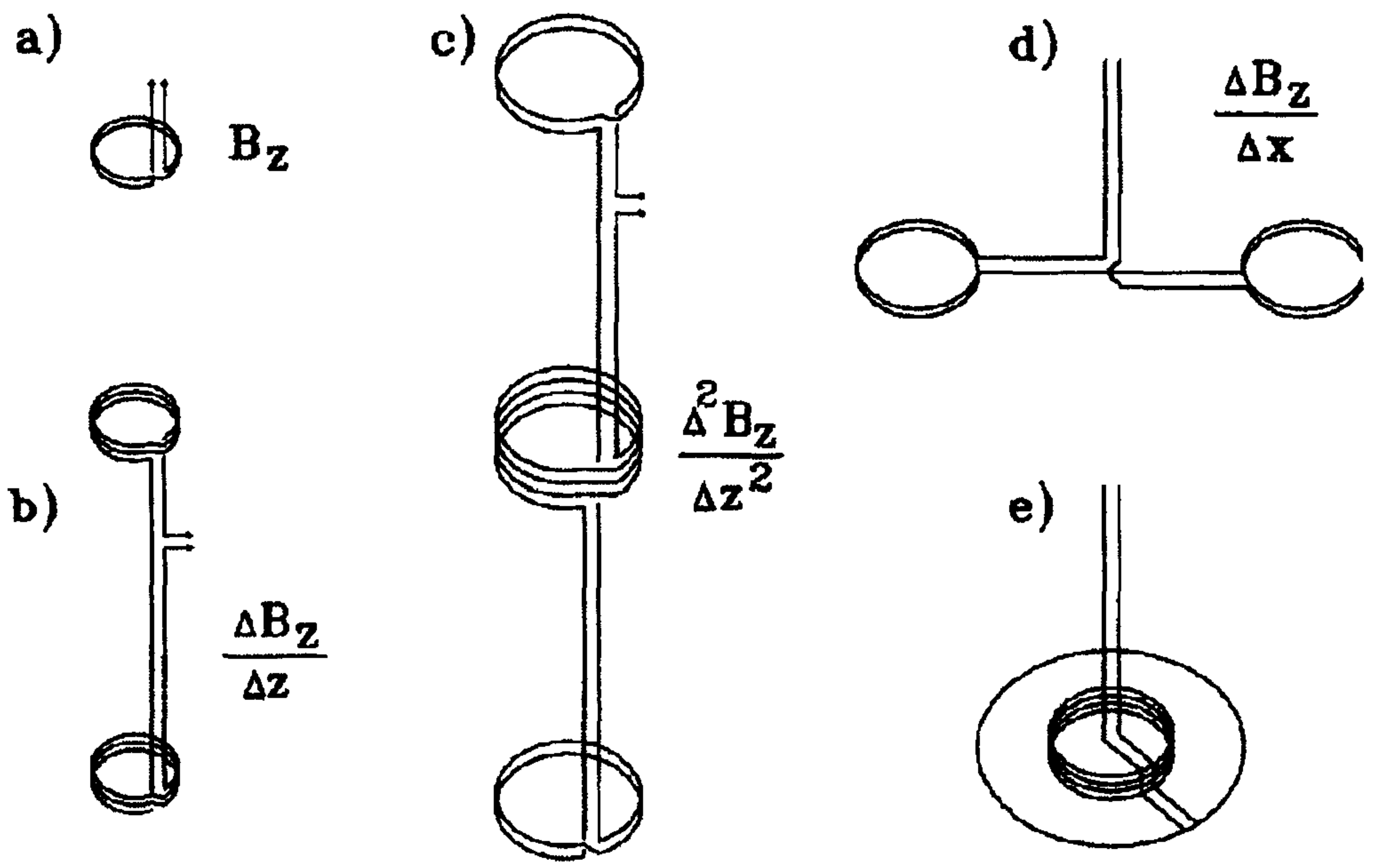


Fig. 5-1-1. A variety of pick-up coil designs and physical quantity they measure : (a) magnetometer ; (b) 1st-order axial gradiometer ; (c) 2nd-order axial gradiometer ; (d) 1st-order planar gradiometer ; and (e) 1st-order radial gradiometer.



을 내포하고 있다. 첫째, 조셉슨 접합 기술의 문제로 8자 형태로 한번 꼬인 washer를 갖는 gradiometer SQUID sensor의 제작이 무척 힘들기 때문에 필연적으로 balance가 나빠서 gradient 신호뿐 아니라 균일한 자장에 대해서도 어느 정도 반응하도록 만들어 질 수밖에 없다는 점이다. 둘째, 조셉슨 접합 기술이 수반되는 대면적 박막 기술이 현재까지 개발되어 있지 않기 때문에 실제 응용에 적합한 약 10 cm 내외의 base line( $\Delta x$ )을 갖는 pick-up loop의 제작이 지극히 어렵다는 점이다. 이외에도 다층공정에 의한 추가잡음의 발생등의 요인이 잠재해 있고, 고가의 기판 가격도 박막형 planar gradiometer의 개발의 장애요인이다.

따라서 고온초전도 SQUID를 위한 새로운 형식의 gradiometer의 개발은 필수적이다. 현재 가능성이 높은 방법으로는 electronic gradiometer를 들 수 있다. Electronic gradiometer는 두 개의 SQUID magnetometer들을 공간상에 일정하게 거리를 두도록 하고, 그 출력의 차이를 차동증폭기(differential amp.)를 이용하여 얻어내는 방식을 취하면 된다. 이 경우 임의의 base line을 가질 수 있으며, SQUID의 위치에 따라 axial, 또는 planar등 임의의 방향에 대한 gradient를 얻을 수 있으며 SQUID를 3개 이용할 경우 2nd order 신호를 잡아낼 수 있는 등, 다양한 장점을 갖는다. 반면 SQUID 하나에 대해 하나씩의 제어회로를 써야 하고, 추가로 차동증폭회로가 추가되므로 control system이 조금 복잡해진다는 단점은 가지고 있다. 또한 coil을 사용하는 경우와 비교하여 선형성(linearity)과 CMRR (common mode rejection ratio)에 있어서 뒤떨어질 가능성이 높으며, 따라서 balance나 balance stability가 뒤떨어지게 된다. 왜냐하면 선형성과 CMRR이 차동증폭기에 사용하는 전자 부품에 의해 결정되고 그 값이 대개  $10^4$  이하이기 때문이다. 그러나, 이 정도의 값이면 gradiometer



type SQUID sensor가 아닌 박막형의 고온초전도 gradiometer 보다 balance가 우수하므로 일단계적 응용에는 사용이 가능하다.

Electronic gradiometer의 이러한 단점을 개선하는 한가지 방법이 최근 IBM의 Koch등에 의하여 제안되었는데, 소위 TSG(three SQUID(or sensor) gradiometer)라 불리는 방법이다. TSG system의 개략도는 Fig. 5-1-2(a)에 나타나 있는데, 일반적인 electronic gradiometer와 비교하여 upper와 lower sensor SQUID들을 이용하여 차동증폭하는 점에서는 동일하지만 reference SQUID를 두고 있는 점이 차이가 난다. 이 reference SQUID는 자신이 느끼는 균일한 자기장에 대하여 triple coil을 이용하여 세 개의 SQUID들에 대해 일정하게 nulling 시켜주는 역할을 한다. 따라서 sensor SQUID들이 느끼는 자기신호의 크기가 작아지게 되므로 회로상에서 갖게되는 CMRR의 문제와 linearity 문제가 대폭 개선되게 된다. 따라서 TSG는 기존의 gradiometer pick-up coil을 갖는 형태와 electronic gradiometer를 부분적으로 합친 형태의 시스템이라고 할 수 있다. 우리는 TSG를 제작, 테스트 하였으며, Fig. 5-1-2(b)는 실제 제작한 시스템의 개략도이다. 자세한 내용은 다음절에 기술하도록 한다.

TSG, 또는 electronic gradiometer의 방법의 채용은 고온초전도 SQUID를 자기차폐 안된 일반 환경에서 사용할 수 있도록 접근시키기는 하였지만, 모든 문제의 해결은 아니다. 실제 SQUID의 일반 환경에서의 응용을 위해서는 충족되어야 할 조건들이 여러 가지 있다. 지구 자기장의 크기는 약  $5 \times 10^{-5}$  T 정도이고, 지구 자기장의 fluctuation도  $10^{-9}$  T를 넘으며,  $10^{-6}$  T가 넘기도 하는 전원의 60 Hz 자기장외에도 주파수에 따라 다양한  $10^{-8}$  T를 넘는 변화하는 자기장들이 일반환경에는 상존한다. 그러나, SQUID를 이용하여 관측하고자 하는 신호들의 크기는 대체로  $10^{-12}$  T 이하의 신호들이 대부분이다. 따라서 CMRR이

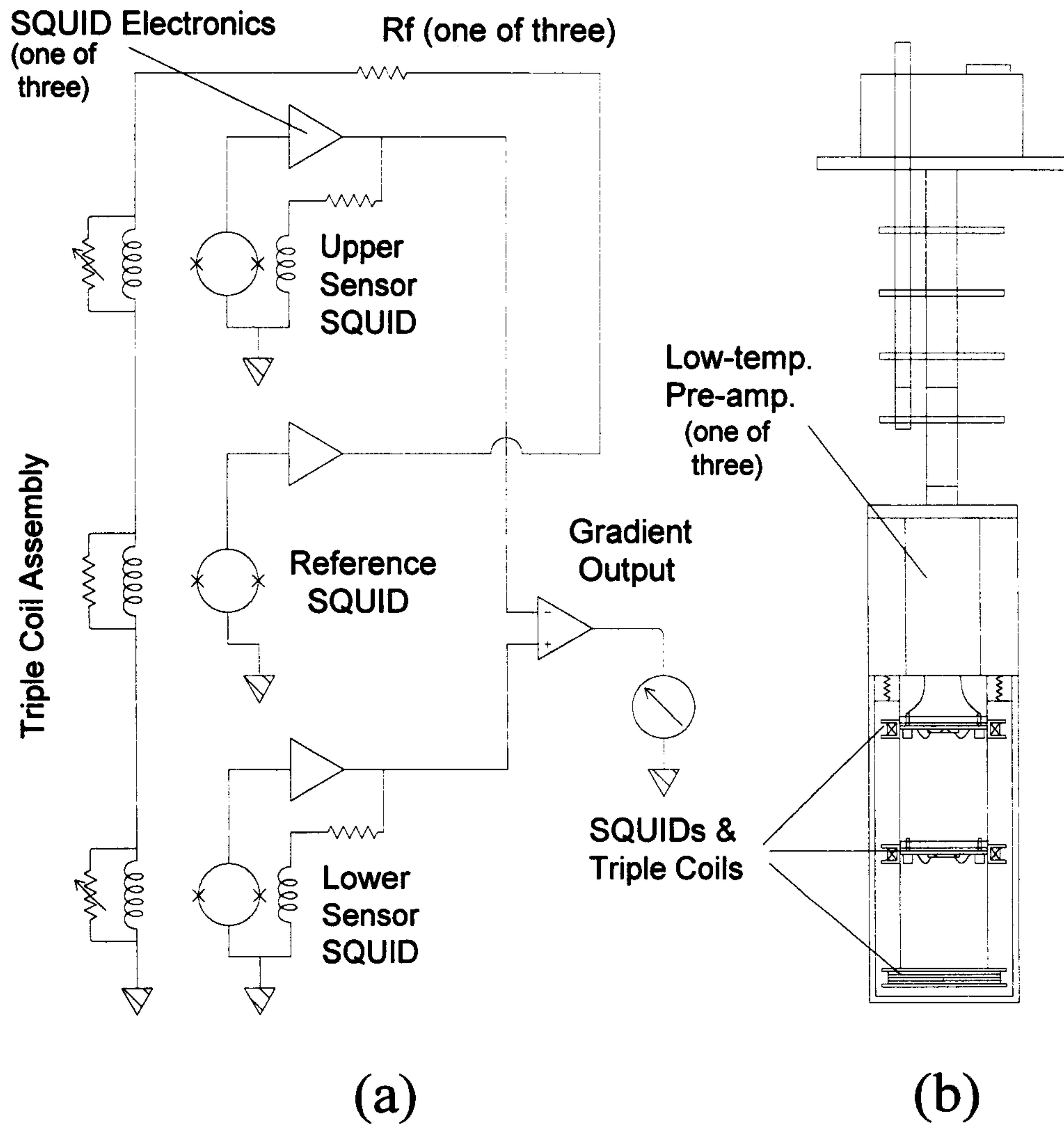


Fig. 5-1-2. (a) TSG(three SQUID gradiometer) 회로의 개략도. Modulation, current bias, impedance matching 회로 등은 생략되어 있음. (b) 우리가 실제 제작한 TSG 시스템의 기구 도면.(not to scale) 저온의 초저잡음 pre-amp.가 matching circuit 대신에 integrate 되어 있음.

최소  $10^{-6}$  이상의 성능을 갖는 1st order, 경우에 따라서는 2nd order gradiometer가 필수적이다. 또한 SQUID를 제어하는 FLL 회로의 slew rate이 낮을 경우 3 SQUID system을 갖추어도 특히 reference SQUID가 unlock되어 system stability가 깨질 것이고, bandwidth가 적은 경우도 고주파의 잡음성분에 의해 FLL 회로의 유지가 힘들 것이다. 따라서 high slew rate, wide bandwidth, low THD이며 low noise인 특성을 갖는 시스템이 특히 비차폐 환경에서 고온초전도 SQUID의 응용을 위해서는 필수적이다.

뿐만 아니라 고온초전도 SQUID sensor 그 자체가 지자기장 크기의 field에 노출될 경우 저주파에서 자기감도가 급격히 나빠지는 경향이 일반적으로 나타나고 있다. 이런 비교적 큰 자기장에서 SQUID 동작을 위한 하나의 제안은 TSG에서 reference SQUID를 이용하듯이 flux gate등의 total field의 절대값을 재서 자기장을 상쇄시켜주는 active noise compensation 방법이 제안되고 있다. 이외에 본질적으로 자기장하에서 SQUID sensor의 성능을 개선하는 방법으로 다양한 연구가 자체적으로, 또는 여러 연구진에 의해 현재 활발히 진행중이다.

## **제 2 절 3 SQUID Gradiometer 시스템 제작 및 결과**

3 SQUID Gradiometer 시스템은 두 개의 감지 SQUID magnetometer 한 개의 기준 SQUID magnetometer 그리고 한 개의 차동 증폭기로 구성되어진다. 본 제작에서는 SQUID와 같이 저항이 작은 신호원을 증폭하기에 적합하고 액체 질소 온도(77 K)에서 동작하는 초저잡음 preamp를 개발하여 SQUID와 preamp를 직접 연결하였다. 그리하여 각각의 SQUID magnetometer는 direct FLL 방식으로 설계되었고, 자속 변조 FLL 방식 때와는 달리 임피던스 정합 공



진기와 변복조 회로를 이용하지 않고, dc SQUID, preamp, 2차 증폭기, 저주파 여파기, 그리고 적분기와 피드백 코일로 간단하게 구현되었다.

초저잡음 preamp는 dual matched bipolar transistor를 이용하여 제작한 차동 증폭기인데 액체 질소 온도(77 K)에서 동작한다. 액체 질소 온도(77 K)에서 preamp의 소신호 차동 입력 저항은 상온의 경우 보다 약 4배 정도 작아져 SQUID와 같은 1 ~ 20  $\Omega$  정도의 작은 동작 저항을 갖는 신호원을 증폭하는 경우 임피던스 트랜스포머를 이용한 임피던스 변환 없이 최적 잡음 정합을 구현할 수 있게 된다. 제작 결과 preamp의 전압이득은 3300, 3 dB 대역폭은 300 kHz 였고, 잡음 측정을 수행한 결과 10 Hz 이하에서  $0.25 \text{ nV}/\sqrt{\text{Hz}}$  였고, 1/f corner frequency는 약 3 Hz로 나타났다.

2차 증폭기는 OP Amp로 제작되었으며, 전압 이득이 20 이다. 그러나, 출력이 전압 분배 형식으로 되어 있어 실제 전압 이득은 0 ~ 20 이다. 이때 전압 이득 조절은 FLL의 이득마진(Gain margin)을 증가시켜 시스템 안정도를 높이기 위한 것으로, 피드백 close loop에 의해 시스템에서 발생하는 불필요한 고주파 신호를 제거하는 효과를 가진다. 적분기도 OP Amp를 이용하여 제작되었는데, 적분시상수가  $2.2 \times 10^{-5}$  sec 이고 전압 폴로우 버퍼를 통해 출력되어진다.

이 시스템의 주요 목적인 대칭형 픽업 코일의 회로는 Fig. 5-1-2에 나타난 바와 같이 6 cm 간격을 두고 일직선상에 놓인 두 개의 감지SQUID1, SQUID3의 중간 지점에 한 개의 기준 SQUID2를 배치하고, 이 기준 SQUID2에 의해 자속 고정된 외부 자속을 triple coil을 통해 3 SQUID에 똑같이 네가티브 피드백함으로 구현하였다. 그리하면 두 개의 감지 SQUID1, SQUID3에서는 기준 SQUID2에서 감지한 외부 자속 만큼 상쇄된 작은 자속을 실제 감지하게 되므로 입력 자속의 dynamic range가 커져 외부 간섭신호가 큰 상황에서도 시스템



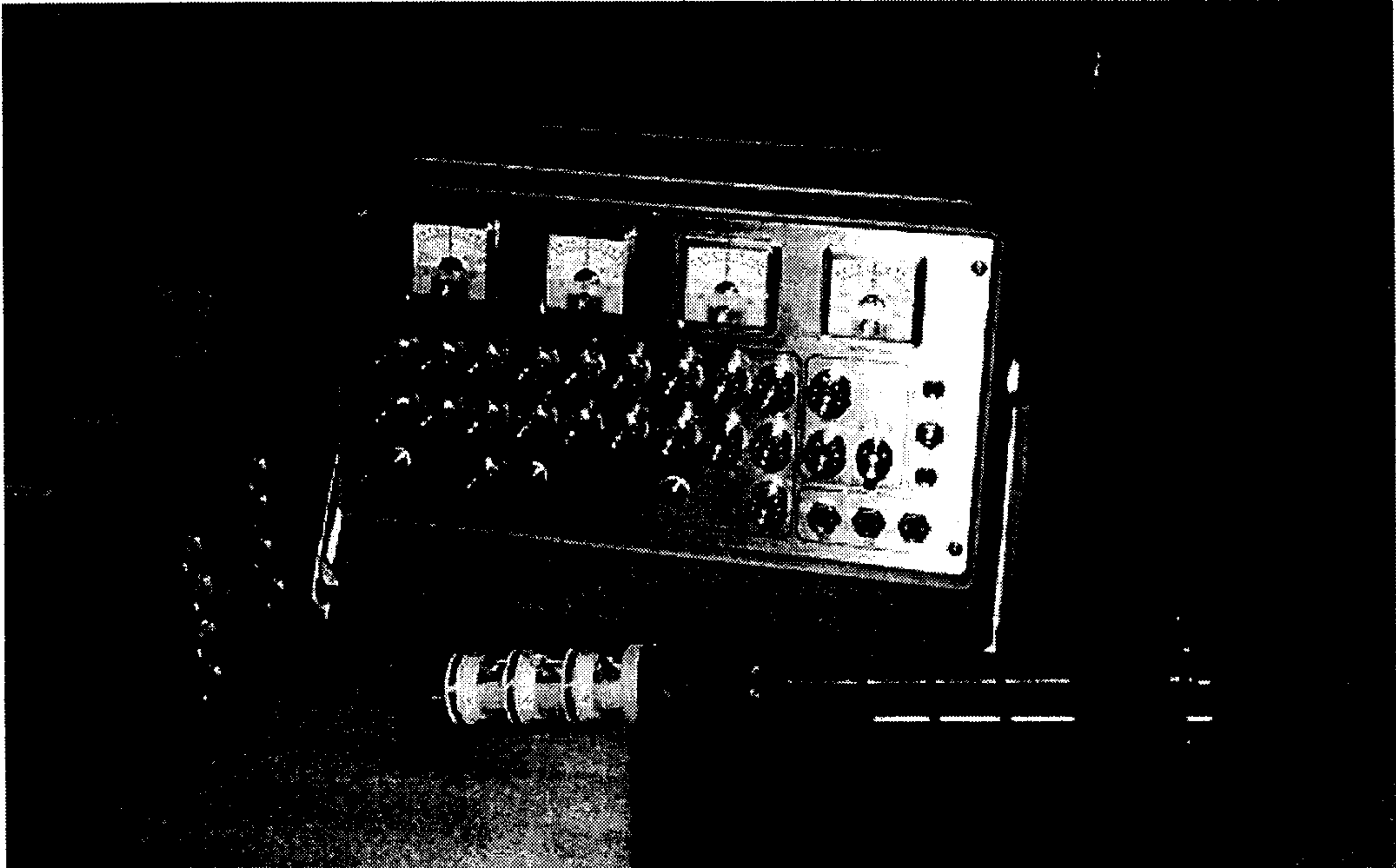


Fig. 5-2-1. 실제 제작된 방향성 3 SQUID 자속계 시스템의 사진, 저온 감지 probe, 신호처리부, dewar, sensor로 구성됨.

자속 고정 안정이 잘 유지된다. 그리고 두 개의 감지 SQUID1, SQUID3 사이의 공간적 미세자장 차이는 두 개 감지 SQUID1, SQUID3 magnetometer의 출력을 차동 증폭하므로 나타난다.

Fig. 5-2-1은 실제 제작된 방향성 3 SQUID 자속계로서 3 SQUID, 피드백 코일이 부착되어 있는 PCB SQUID holder, 초저잡음 BJT preamp, triple coil로 구성되는 저온 감지 probe와 2차 증폭기, 저주파 필터, 적분기, 바이어스 전류원, dc flux 공급원으로 구성되는 신호 처리부와 액체 질소를 담고 있는 dewar로 크게 구성된다. 그리고 신호 처리부의 3 채널 각각의 제어판에는 preamp offset, SQUID 바이어스 전류량, 2차 증폭량, dc flux량, 피드백량을 조절하는 노브들이 부착되어 있으며, 세 개의 shielded cable로 감지 probe와 각각 연결되어지는 cable 코넥터가 있다.

본 시스템 제작에서 기준 SQUID2 magnetometer는 60 Hz와 같은 외부 큰 간섭 자장 신호에 대해 자속 고정을 잘 유지하도록 하기 위해 자속 주기  $1.14 \times 10^{-6} \text{ T}/\phi_0$ 의 감도가 매우 낮은 SQUID를 사용하였고, 두 개의 감지 SQUID1, SQUID3 magnetometer는 자장 감지도를 높이기 위해 자속 주기 10 nT/ $\phi_0$ 의 감도가 높은 SQUID를 사용하였는데, 자속 고정된 세 개의 SQUID magnetometer의 slew rate은 대략  $2.2 \times 10^4 \phi_0/\text{sec}$  였다. 측정에 있어서, 자속 고정의 순서는 먼저 open loop에서 SQUID의 자속 대 전압 변환 특성이 최대가 되도록 SQUID에 바이어스 전류를 흘린다. 그 다음 적분기의 캐패시터를 short 시키고 close loop를 형성한 뒤, 피드백 저항값을 줄여 피드백량이 대략 10  $\phi_0$  정도 되도록 네거티브 피드백을 형성한다. 그리고 마지막으로 출력 dc offset이 영이 되도록 preamp offset을 조절한 후 short시켰던 적분기의 캐패시터를 동작시켜 FLL을 형성하는 것이다. 먼저 약하게 자기 차폐(약 40dB)된 환

경에서 기준 SQUID2 magnetometer와 triple coil를 통한 감지 SQUID1, SQUID3 에서의 입력 자장 보상을 측정하였다. 세 개의 SQUID에 uniform한 test 자장을 공급하기 위해 dewar 바깥에 원통형 코일을 약 20 cm 정도의 길이까지 uniform하게 감고 세 개의 SQUID가 그 중앙에 위치되도록 한 다음, 이 코일을 통해 13 Hz의 삼각파 자속을 세 개의 SQUID에 가하여 각각 자속 고정을 시켰다. 이 때 두 개의 감지 SQUID1, SQUID3 magnetometer는 50  $\phi_0$ 까지 자속 고정이 되도록 거의 최대 피드백량으로 조정하였다. 그 다음, Fig. 5-2-1에 나타난 triple coil에 병렬로 연결된 가변저항을 통하여 기준 SQUID2 magnetometer의 출력에서 두 개의 감지 SQUID1, SQUID3로 피드백되는 보상 자속량을 조절하였다. 그 결과 대략 본 실험에서 가할 수 있었던 최고 자속인 감지 SQUID의 500  $\phi_0$ 까지는 완벽하게 보상이됨을 관측하였다. 그리고, 자속 보상이 된 상황에서 감지 SQUID1와 10 mm 정도 떨어진 dewar 밑바닥에 직경 1 cm의 원형 코일을 부착시켜 110 Hz 정현파를 가했을 때 감지 SQUID1 magnetometer의 출력 전압이 1 V인데 비해, 감지 SQUID1과 수직으로 6 cm 떨어진 감지 SQUID3 magnetometer의 출력전압은 잡음 레벨인 것을 관측하였다. 따라서, 본 제작한 방향성 3 SQUID 자속계가 일차적으로 외부 간섭 신호가 약한 환경에서 uniform 자장을 보상하고 공간적 미세 자장 차이를 감지하는 것을 확인하였다. 이 때 감지 SQUID1, SQUID3 magnetometer의 slew rate은 대략 기준 SQUID2 대 감지 SQUID의 감도비 만큼 증가한  $2.5 \times 10^6 \phi_0$  일 것으로 판단된다. 감지 Fig. 5-2-2(a)와 Fig. 5-2-2(b)는 약하게 자기 차폐(약 40dB)된 환경에서 기준 SQUID2 magnetometer에 의해 입력 자속 보상이 없을 때와 있을 때 각각 자속 고정시켜 측정한 두 개의 감지 SQUID1, SQUID3의 flux noise power spectrum를 나타낸 것으로, 입력 자속 보상이 없을 때는 60

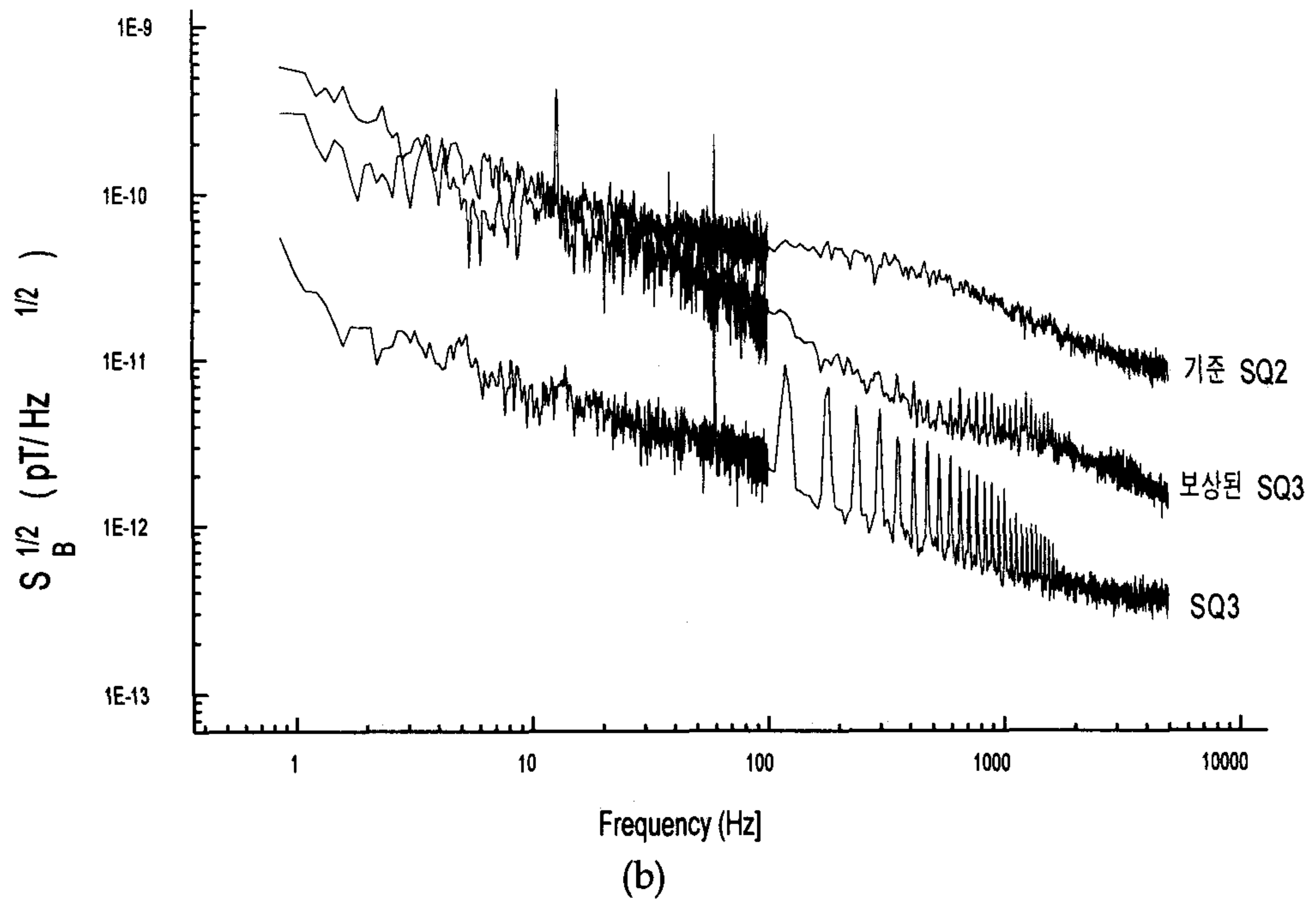
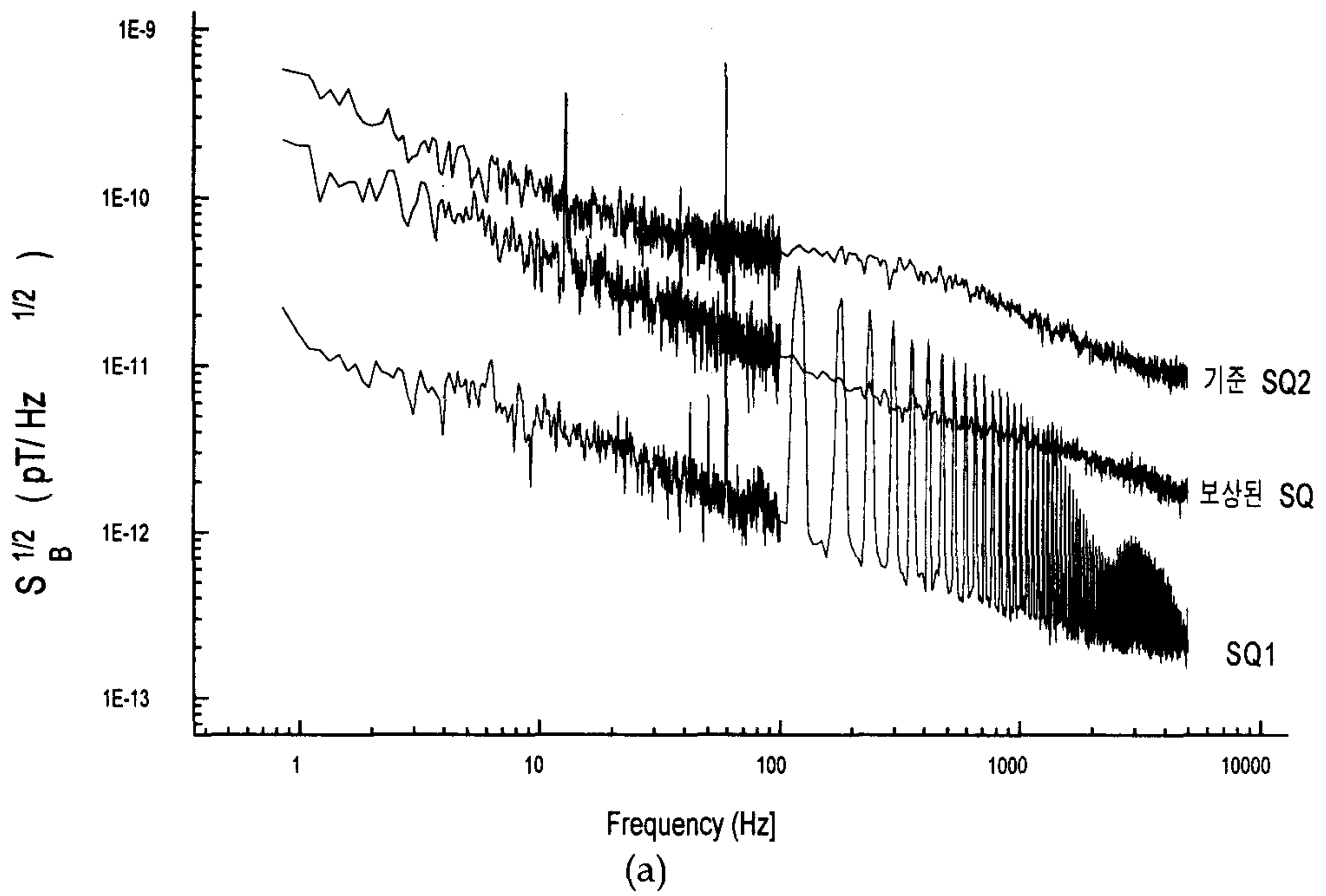


Fig. 5-2-2. 약하게 자기차폐된 환경에서 측정한 감지 SQUID1(a)와 감지 SQUID3(b)의 magnetic field sensitivity의 frequency spectrum.



Hz의 신호가 감지 SQUID1, SQUID3로 여전히 강하게 들어오고 있지만 기준 SQUID2 magnetometer를 통한 입력 자속 보상이 있을 때는 60 Hz의 신호가 상당히 제거되는 것을 알 수 있다. 대신 기준 SQUID2의 큰 flux noise가 감지 SQUID1, SQUID3로 피드백되어 감지 SQUID1, SQUID3 magnetometer의 flux noise와 드리프트가 커졌다. 드리프트의 문제가 해결될 경우 SQUID1과 SQUID3에 추가된 잡음은 SQUID2에 correlate 되어있으므로 완벽한 차동증폭에 의해 감쇄되리라 판단된다.

본 제작한 방향성 3 SQUID gradiometer를 비차폐환경에서 자속 고정을 형성하여 외부 60 Hz 자속 보상을 시도하였다. 먼저 자속 보상이 없을 때, 감지 SQUID2 magnetometer는 외부 60 Hz 입력 자장에 대해 비교적 자속 고정을 잘 형성하였지만, 감지 SQUID1, SQUID3 magnetometer의 경우는 큰 외부 60 Hz 자장에 의해 자속 고정이 이루어지지 않았다. 그 다음 감지 SQUID2 magnetometer를 통한 자속 보상을 형성한 결과, 감지 SQUID1, SQUID3 magnetometer의 출력이 심하게 드리프트 하여 자속 고정이 불안정 하였고, 감지 SQUID2 magnetometer의 low slew rate에 의한 불완전한 자속 보상과 외부 60 Hz 자장의 공간적 불균등 분포에 의해 감지 SQUID1, SQUID3 magnetometer에서 외부 60 Hz 신호가 출력되었다. 그리고 차동 증폭을 통한 최종 출력은 CMRR이 대략 60 dB 이상인 것으로 측정되었지만, 감지 SQUID1, SQUID3 magnetometer 출력 전압의 dc offset 변화와 차이로 말미암아 안정적인 측정이 이루어지지 않았다. 출력 전압의 dc offset과 드리프트 문제는 회로 개선 - 즉, high slew rate과 wide bandwidth의 FLL electronics-을 통하여 해결되리라 판단된다.

결론적으로 요약하면, 제작된 3 SQUID gradiometer의 성능을 약하게 자기

차폐된 환경에서는 측정된 결과, 기존 SQUID에 의한 자속 보상이 잘 이루어져 두 감지 SQUID의 slew rate과 dynamic range가 약 100배 증가하였다. 그리고 비차폐 환경에서는 SQUID magnetometer의 slew rate가 낮고 또 외부 60 Hz 신호의 공간적 불균등 분포로 말미암아 자속 보상을 통한 안정적인 자속 고정이 형성되지 않았다. 향후 이러한 문제점을 개선하기 위한 연구를 지속적으로 수행할 예정이다.

## 참 고 문 헌

- [1] P. F. Michelson, J. C. Price and R. C. Taber, *Science* 237, 150 (1987).
- [2] See, e.g., *SQUID'85* (Eds. H. D. Hahlbohm and H. Lübbig) p.p. 1147-1194, (Walter de Gruyter, 1985).
- [3] V. Foglietti, *Superconducting Devices and their Applications*, (Eds. H. Koch and H. Lübbig), 487 (Springer Verlag, 1992).
- [4] J. Clarke, W. M. Goubau, and M. B. Ketchen, *J. Low Temp. Phys.* 25, 99 (1976).
- [5] M. B. Ketchen, W. M. Goubau, J. Clarke, and G. B. Donaldson, *J. Appl. Phys.* 44, 4111 (1975).
- [6] F. C. Wellstood, C. Heiden, J. Clarke, *Rev. Sci. Inst.* 55, 952 (1984).
- [7] V. Foglietti, W. J. Gallagher, M. B. Ketchen, A. W. Kleinsasser, R. H. Koch, S. I. Raider, and R. L. Sandstrom, *Appl. Phys. Lett.* 49, 1393 (1986).
- [8] D. Drung, *Supercond. Sci. Technol.* 4, 377 (1991).
- [9] J. Luine, J. Bulman, J. Burch, K. Daly, A. Lee, C. Pettiete-Hall, and S.

- Schwarzbek, Appl. Phys. Lett. 61, 1128 (1992).
- [10] G. Friedl, B. Roas, M. Romheld, L. Schultz, and W. Jutzi, Appl. Phys. Lett. 59, 2751 (1991).
- [11] R. E. Lee, VLSI Electronics vol. 8, (Eds. Einspurch and Brown), 341 (Academic Press, 1984).
- [12] J. Z. Sun, W. J. Gallagher, A. C. Callegari, V. Foglietti, and R. H. Koch, Appl. Phys. Lett. 63, 1561 (1993).
- [13] see e.g., A. I. Braginski, Physica C185-189, 391 (1991). and refs. in.
- [14] V. Ambegaokar and A. Baratoff, Phys. Rev. Lett. 10, 486 (1963) and its Errata.
- [15] R. H. Koch, J. R. Rozen, J. Z. Sun, and W. J. Gallagher, Appl. Phys. Lett. 63, 403 (1993); R. H. Koch, U.S. patent # 5,122,744 (June 16, 1992).

여 백



## 제 6 장 고온초전도 ramp edge 조셉슨 접합

### 제 1 절 고온초전도 조셉슨 접합 개요

#### 1. 고온초전도 SNS 조셉슨 접합

고온초전도 조셉슨 접합은 아직까지 밝혀지지 않은 고온초전도체의 근본적인 물성을 연구하는데 매우 중요할 뿐만 아니라 SQUID와 같은 센서나 oscillator, mixer와 같은 마이크로웨이브 능동소자, 초고속 switching 소자 등, 고온초전도체의 소규모 응용에 필수적인 소자이다.

고온초전도체는 coherence length가  $\sim 10 \text{ \AA}$  정도로 아주 짧고 물질의 큰 이방성 때문에 기존의 tunnel barrier 방식의 접합(SIS) 제작이 아주 힘들다. 따라서 여러 가지 다른 방법으로 조셉슨 접합을 제작하고 있는데 이러한 방법을 크게 두 가지로 나누어 보면, 고온초전도체의 입상 성질을 이용한 grain boundary(GB) 접합과 SIS에서 절연체 대신 normal layer를 끼워 넣는 SNS 형태의 접합으로 나누어 볼 수 있다. GB 형태의 고온초전도 조셉슨 접합들을 살펴보면, 결정축이 다른 두 단결정을 접합시켜 만든 기판위에 epitaxial한 박막을 증착하여 제작된 bi-crystal 접합, seed layer를 이용하여 박막의 orientation을 조절하는 bi-epitaxial 접합, 가파른 기판의 step edge를 이용한 접합 등이 있다. 이 중 bi-crystal 접합은 비교적 특성이 우수하여 본 팀을 비롯한 여러 연구 그룹에서 SQUID 등의 소자 제작에 이용하고 있다. 그러나 bi-crystal 접합은 조셉슨 접합을 제작할 수 있는 자리가 제한되며, critical current, normal resistance 등의 접합 특성 변수의 조절이 용이하지 않으며, 기판의 가격이 비싸고 기판의 종류가 제한되어 있는 등

의 단점을 지니고 있다.

SNS 형태의 조셉슨 접합은 초전도체(S)와 normal 물질(N)이 근접했을 때 초전도체의 초전도성(order parameter)이 normal 물질로 스며들게 된다는 종래의 근접 효과(proximity effect) 이론을 이용한 것이다. 이 때 normal 물질로 초전도성이 스며드는 정도를 normal coherence length( $\xi_n$ )라고 하는데 이 값은 경계면 조건이나 normal 물질의 특성에 따라 다르지만 고온초전도체의 경우 초전도체의 coherence length보다 훨씬 크므로 아주 얇은 절연막을 사용해야하는 SIS 형태의 접합보다 제작이 용이하다. SNS 형태의 접합은 대부분 coherence length가 비교적 긴 a-b 면으로 조셉슨 coupling이 이루어 지도록 제작된다.

초기에 SNS 접합 제작에는 주로 금, 은, 또는 금-은 합금 등의 noble metal이 normal layer 물질로 사용되었다. 이러한 물질은 고온 증착시 고온초전도체와 inter-diffusion이 생길 뿐 만 아니라 고온초전도 상부전극 증착시 epitaxial 성장이 안 되므로, normal layer 물질을 상온 증착한 후 패터닝함으로써 접합 제작이 가능한 Fig. 6-1-1 (f), (g), (h), (i), (k), (n) 와 같은 형태로 제작되었다. Noble metal은 normal coherence length가 길어질 가능성은 있으나 고온초전도체와 electronic mismatch 크고, 경계면에 큰 boundary resistance가 생기므로 아주 작은  $I_c R_n$  값을 보이고 있고, 또 이러한 이유로 순수히 근접효과를 적용해 실험 결과를 완벽히 설명하지 못하고 있다.

Noble metal을 layer로 사용했을 때의 문제점을 피하기 위한 방법으로 고안해 낸 것이 perovskite 형태의 metallic oxide를 layer 물질로 사용해, 본 연구에서와 같이 edge형태로 접합을 제작하는 것이다(Fig. 6-1-1 (m) 참조). Perovskite oxide를 layer로 사용한 edge형태의 SNS 접합이 갖고 있는 장점으로서는 첫째, SIS 형태의 터널 접합 제작에서 barrier 두께가 초전도체의 coherence length 정도로 아주

작아야 함에도 불구하고 초전도체 표면의 거칠기나 국소적인 degradation에 의해 접합 형성에 어려움이 있는데 반해, SNS 접합에서는 proximity 효과에 의한 접합이므로 normal layer 두께를 normal coherence length 이상으로 두껍게 할 수 있으므로 이러한 문제를 어느 정도 해결할 수 있다. 둘째, layer 두께나 접합의 선평을 조절함으로써  $I_c$ 나  $R_n$  등의 접합 parameter를 임의로 조절할 수 있다. 셋째, 접합의 위치를 원하는 어느 곳이나 정할 수 있다. 그러나 단점으로는 첫째, 제작 과정이 복잡하고 까다로워 비용과 시간이 많이 들고 이로 인해 재현성이 좋지 않을 가능성이 있다. 둘째, normal layer 물질에 따라 크고 불규칙적인 boundary resistance를 보이므로서 순수한 SNS가 아닌 SINS 또는 SINIS 등의 복잡한 구조를 갖게 되어 접합mechanism의 해석에 어려움이 있을 뿐 아니라 layer 물질의 특성 변화에 민감하다.

셋째, 일반적으로  $I_c R_n$ 이 작아 실용상에 어려움이 있다.

산화물 고온초전도체를 초전도 전극(S)으로 사용한 SNS 접합의 경우 바람직한 normal layer 물질의 조건으로, 열팽창계수가 잘 맞아 경계면에서 stress를 줄여 불필요한 저항을 억제하며, 화학적으로 안정되어 interdiffusion이 없어야 하고 구조적으로 matching이 잘되어 epitaxial growth가 이루어져야 한다. 이와 같은 조건을 비교적 잘 충족시킬 수 있는 물질로는 perovskite 구조의 metallic oxide 나 전이온도가 초전도 전극보다 낮은 산화물 고온초전도체 등을 사용할 수 있으나  $I_c R_n$ 이 낮거나, 불필요한 경계면 저항이 있는 등의 문제점을 갖고 있다. 지금까지 고온초전도 edge-type SNS 접합 제작에 normal layer로 사용된 perovskite oxide로는  $\text{PrBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-y}$ ,  $\text{Y}_x\text{Pr}_{1-x}\text{Ba}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-y}$ , normal YBCO,  $\text{La}_{1.4}\text{Sr}_{0.6}\text{CuO}_4$ ,  $\text{CaRuO}_3$ ,  $\text{SrRuO}_3$ , Co-doped YBCO, Ca-doped YBCO,  $\text{SrTi}_{1-x}\text{Nb}_x\text{O}_3$  등이 있다.



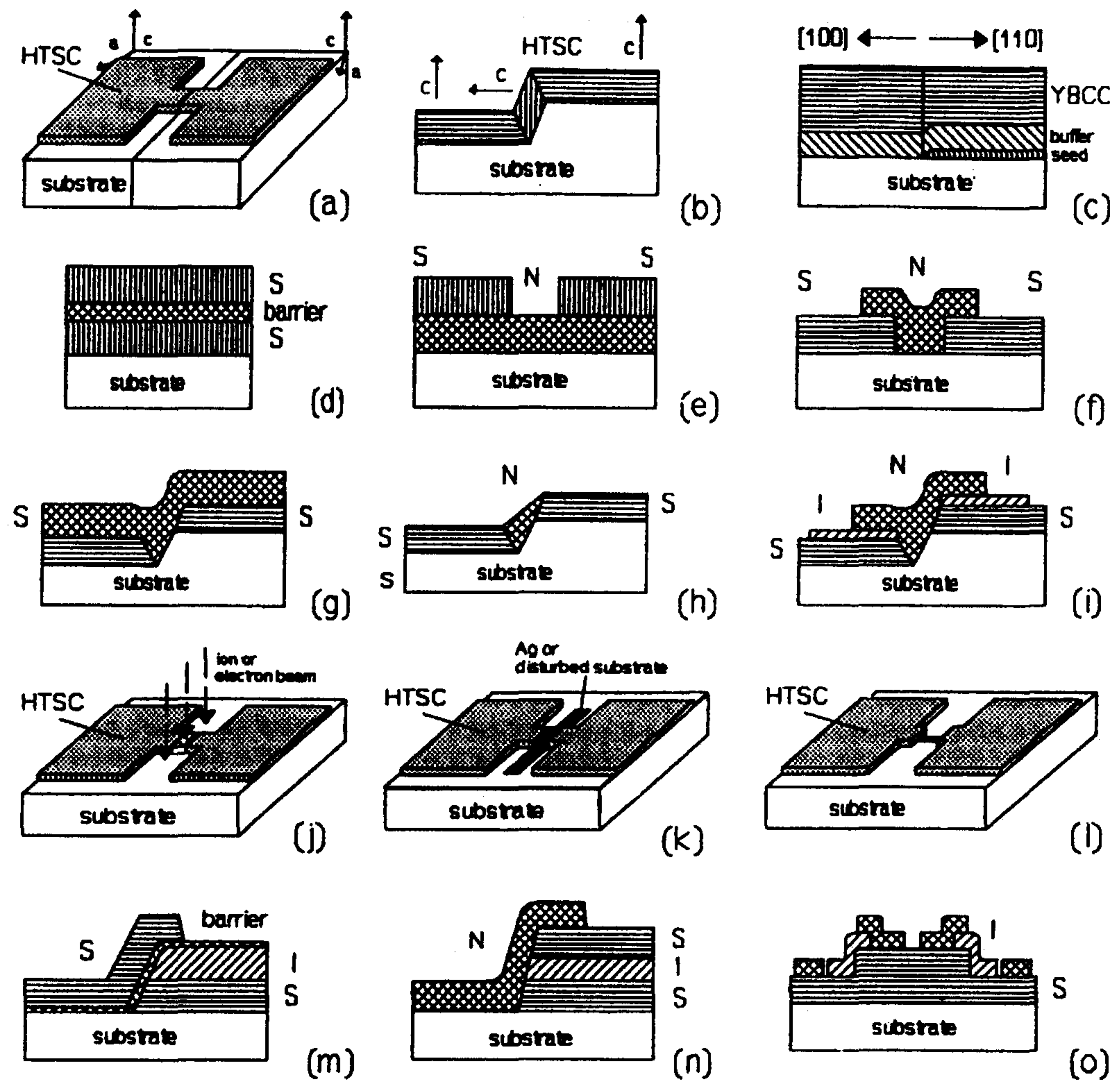


Fig. 6-1-1. 여러 가지 형태의 고온초전도 조셉슨 접합 제작 방법. (a) bi-crystal junction, (b) step-edge junction, (c) bi-epitaxial junction, (d) planar layer sandwich, (e) bilayer trench junction, (f) SNS trench junction, (g) SNS step-edge junction, (h) etched SNS step-edge junction, (i) capacitively shunted SNS step-edge junction, (j) focused beam modified bridge, (k) disturbed or poisoned bridge, (l) nanobridge junction, (m) layer edge or ramp junction, (n) SNS side sandwich junction, and (o) intrinsic stack junction(mesa type).



## 2. 근접효과이론

BCS 이론에서 파동함수는 공간적으로 불변이며, 자기장에 영향을 받지 않는다고 가정하였다. 그러나 이런 가정은 아주 작은 자기장이라든지, 극히 제한된 경우에 대해서는 잘 맞지만, 실제 학문적으로나 기술적으로 관심이 있는 여러 경우에 대해서는 적용하기가 어렵다. BCS 이론에 앞서 발표된 Ginzburg-Landau (GL) 이론은 현상학적인 이론으로서, 초전도성의 공간적 변화에 대해 잘 기술하고 있으며 실험적인 사실과도 잘 일치하고 있다. de Gennes은 이와 같은 GL 이론을 이용하여 초전도성이 공간적으로 변화하는 SNS 형태의 조셉슨 접합 특성을 근접효과(proximity effect)로 잘 설명하였다. Fig. 6-1-2는 SIS 접합과 SNS 접합의 두 가지 형태의 접합에 대해 condensation amplitude(F)의 변화를 나타낸 것이다. Barrier 물질이 insulator인 SIS 접합과는 달리 normal metal인 SNS 형태의 접합에서는 SN 경계면 근처의 초전도체에 초전도성(즉, order parameter)이 normal metal로 스며들게 되며, 이에 따라 초전도체의 초전도성은 억제되고 normal metal에도 초전도성이 나타나게 된다. 이 경우 조셉슨 전류는  $T_c$  근처에서 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$I_c = I_0 (1 - t)^2 \frac{\kappa d}{\sinh(\kappa d)} \quad (6-1)$$

여기서  $I_0 = \pi \Delta_0^2 / 4eR_n k_B T_c$ ,  $d$ 는 layer의 두께,  $\kappa^{-1}$ 은 decay length 이다. BCS 이론을 적용하면,  $2\Delta_0 = 3.52 k_B T_c$ 가 되고, 여기에 YBCO의  $T_c = 90$  K를 대입하면  $I_0 = 18.9 \text{ mV}/R_n$  이 된다. Normal layer가 전이온도  $T_n$  인 초전도체일 때 decay length는

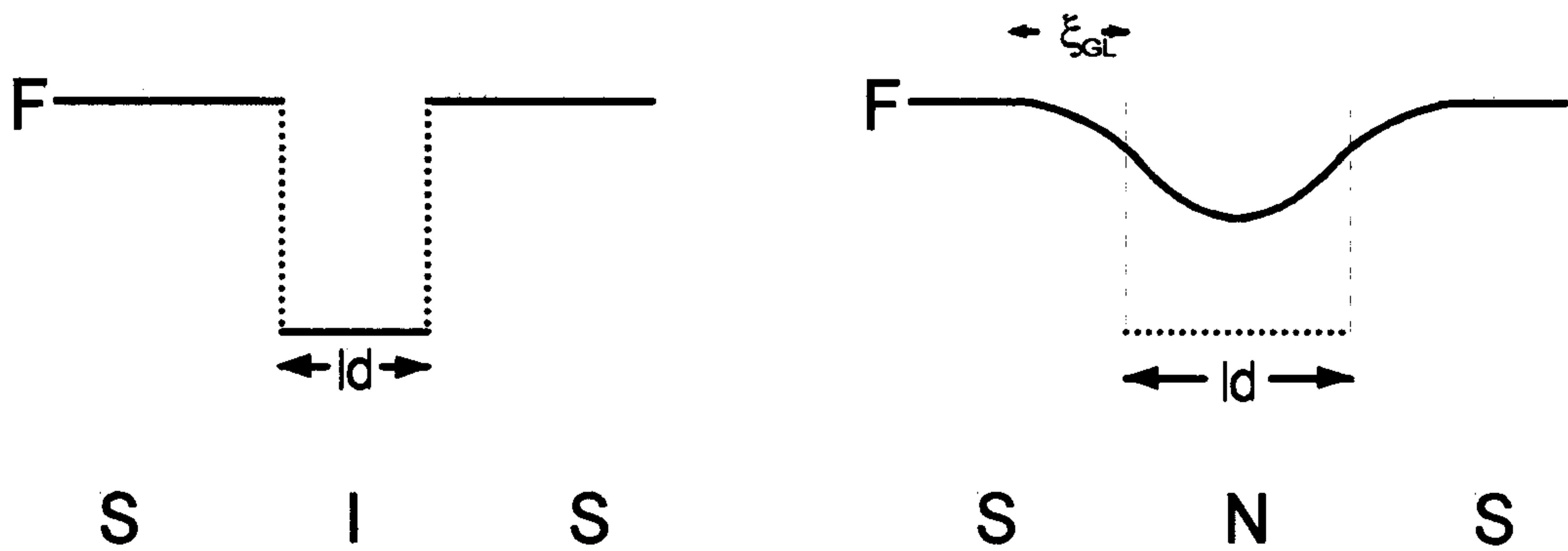


Fig. 6-1-2. SIS 접합과 SNS 접합의 condensation amplitude의 변화.

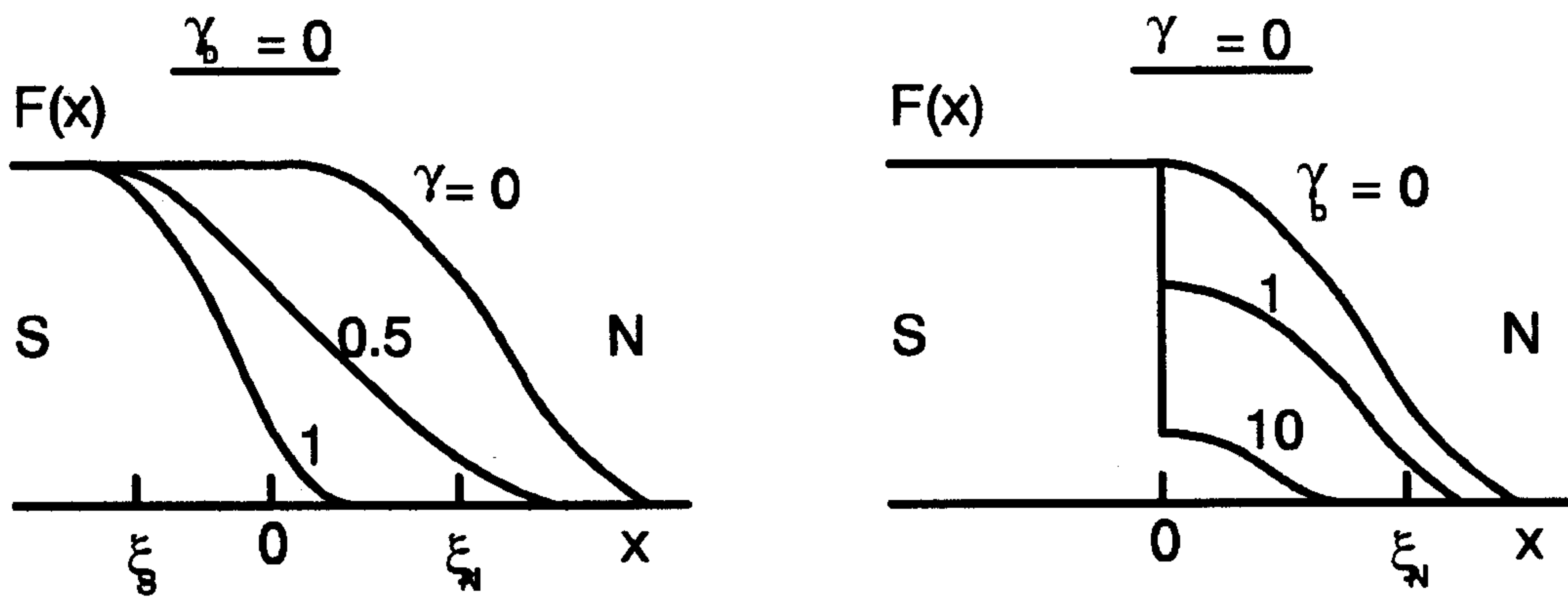


Fig. 6-1-3. SN 경계면에서  $\gamma$ ,  $\gamma_b$ 에 따른 order parameter의 변화.

$$x^{-1} = \left( \frac{D\hbar}{2\pi k_B T} \right)^{1/2} \left[ 1 + \frac{2}{\ln(T/T_n)} \right]^{1/2} \quad (6-2)$$

와 같이 된다. 여기서 D는 diffusion constant이다.

SNS 조셉슨 접합에 경우, SN 경계면에서의 condensation amplitude(F)는 다음과 같은 두 dimensionless parameter로 특성화할 수 있다.

$$\gamma = \frac{\rho_s \xi_s}{\rho_n \xi_n}, \quad \gamma_b = \frac{R_b}{\rho_n \xi_n} \quad (6-3)$$

여기서  $\rho_s, \rho_n$ 은 각각 S와 N의 normal state resistivity이고  $\xi_s, \xi_n$ 은 coherence length이며,  $R_b$ 는 경계면의 단위면적당 boundary resistance를 나타낸다. 이 근접 효과의 경계면 parameter들은 다음과 같은 물리적 의미를 갖고 있다.  $\nu$ 는 S와 N에서의 order parameter의 관계를 말해준다. 즉 SN 경계면에 별도의 layer가 형성되어 있지 않다고 가정했을 때 N으로 부터 S로 diffuse하는 quasiparticle들로부터 기인하는 order parameter의 억제 정도를 나타낸다.  $\nu > 1$ 일 때 SN 경계면에서 quasiparticle들의 diffusion은 order parameter를 강하게 억제하여 그 범위가  $\xi_s$ 까지 미치게 되며,  $\nu < 1$ 일 경우에는 order parameter는 경계면까지 일정한 값을 유지하여 쿠퍼 전자쌍들은 N 영역에서  $\xi_n$ 까지 침투해 들어가게 된다.  $\nu_b$ 는 SN 경계면의 quality를 나타낸 것으로, order parameter의 불연속성 정도를 나타낸다. 이 값은 S 영역으로의 quasiparticle의 확산을 억제하는 정도 뿐만 아니라 경계면을 가로지르는 쿠퍼 전자쌍들의 침투 정도를 표시하는 것이다(Fig. 6-1-3 참조).

## 제 2 절 Edge type SNS 조셉슨 접합의 제작

## 1. Normal layer로 사용된 박막

본 연구에서는  $\text{Nd}_{1.85}\text{Ce}_{0.15}\text{CuO}_4$ 와  $\text{NdBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$ 를 SNS 접합의 normal layer로 사용하였다. 소자 제작에 앞서 이 두가지 물질의 박막을 제작하여 전기 전도 특성 및 구조 특성을 살펴 보았다.

$\text{Nd}_{1.85}\text{Ce}_{0.15}\text{CuO}_4$ (NCCO)는 layered perovskite구조인  $\text{K}_2\text{NiF}_4$  구조를 갖는 물질이며,  $\text{Nd}_2\text{CuO}_4$ 가 절연체인데 비해 NCCO는  $\text{Nd}^{3+}$  자리의 일부에  $\text{Ce}^{4+}$  치환되어 전자가 doping됨으로서 초전도체가 된다. NCCO는 전하운반체가 hole인 대부분의 산화물 고온초전도체와는 달리 전자가 전하운반체이며, 임계온도는 30 K 이고 격자상수는  $a=b=3.94 \text{ \AA}$ ,  $c=12.1 \text{ \AA}$  이다.

Fig. 6-2-1은 STO 기판위에 증착된 두께 3000 Å NCCO 박막의 X-선 회절 패턴과 SEM 사진이다. Fig. 6-2-1에서 볼 수 있듯이 제작된 NCCO 박막은 c-축이 기판에 수직으로 epitaxial 성장되었음을 알 수 있고 박막의 표면 미세 구조는 pore가 없이 아주 평탄하였으며 boulder도 거의 보이지 않았다. Fig. 6-2-2는 같은 박막의 비저항-온도 특성을 나타낸 것이다. 상온에서 70 K까지는 metallic 특성을 보이고 있으며, 측정온도 17 K 까지 초전도 상태로 전이하지 않고 있다.

이것은 NCCO 박막 제작시, NCCO를 layer로 사용한 조셉슨 접합을 제작할 때의 process와 동일하게 하기 위하여 300 Torr 산소압에서 30 분간 annealing하였기 때문으로, 문헌에 따르면 NCCO 박막이 높은 임계온도를 갖기 위해서는 annealing할 때 산소를 reduce해야 한다. 박막의 증착율은  $720 \text{ \AA}/\text{min}$  이었다.

$\text{NdBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$ (NBCO)는 YBCO의 Y 대신 희토류 원소로 치환된  $\text{RBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$  (R:rare earth) 계열의 고온초전도체이다. 구조는 YBCO와 동일하며 격자상수도  $a=3.86 \text{ \AA}$ ,  $b=3.92 \text{ \AA}$ ,  $c=11.77 \text{ \AA}$  로 YBCO와 거의 같다. 그러나 Y와 Ba의 원자



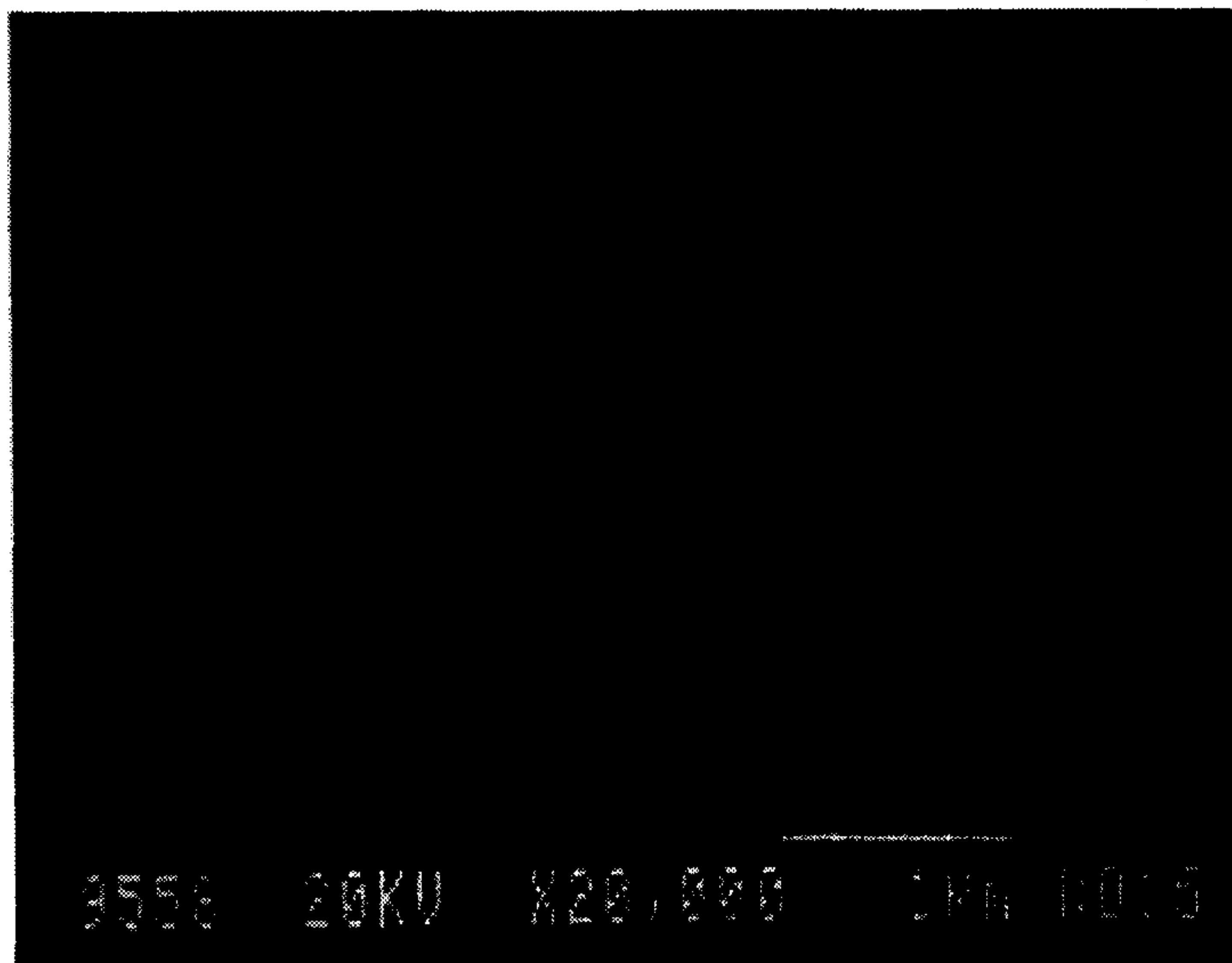
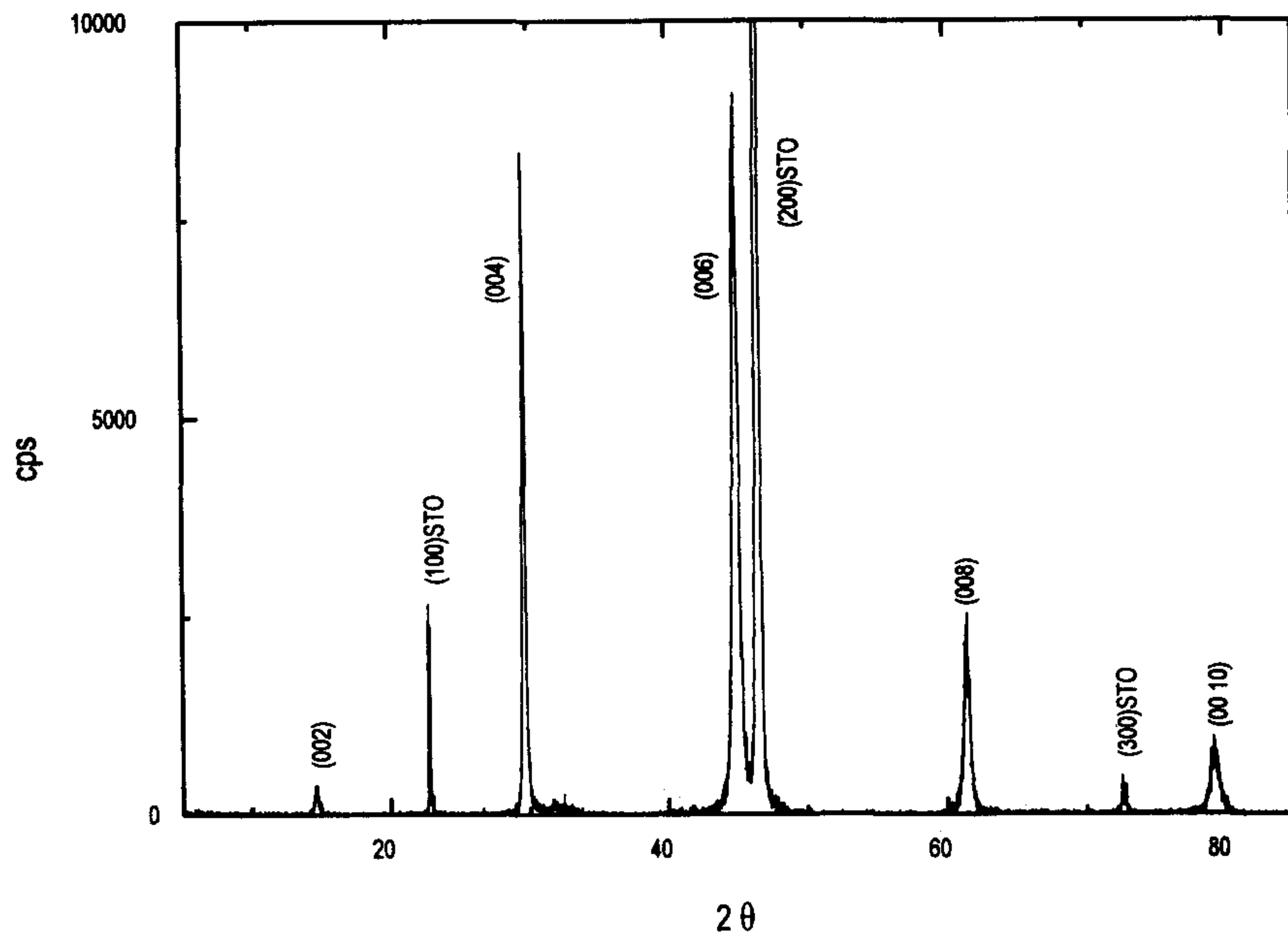


Fig. 6-2-1. STO 기판위에 증착된 두께 3000 Å NCCO 박막의 X-선 회절 패턴과 SEM 사진.

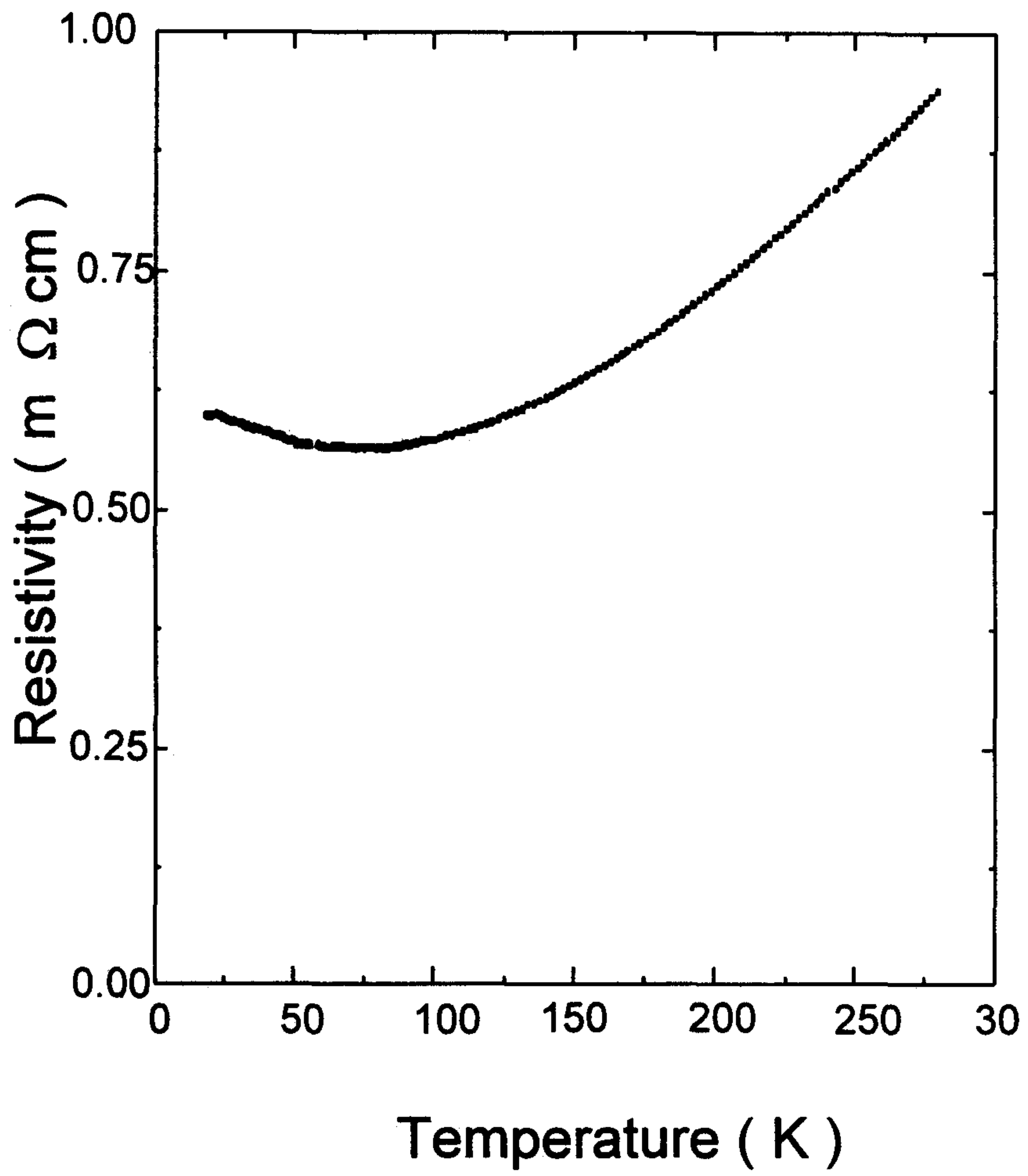


Fig. 6-2-2. STO 기판위에 증착된 두께 3000 Å NCCO 박막의 비저항-온도 특성

크기가 아주 다른 YBCO와는 달리 NBCO는 Nd과 Ba의 원자 크기가 비슷하여, Ba 자리에 Nd이 고용(solid solution) 형태로 치환되기가 쉬우므로 일반적으로  $Nd_{1+y}Ba_{2-y}Cu_3O_{7-x}$  라고 쓰기도 한다. NBCO는 이 y 값에 따라 여러 가지 특성이 달라지게 되며, 또 산소량에 대해서는 YBCO 보다 훨씬 민감하게 그 특성이 변한다. Melt-powder-melt-growth(MPMG) 방법으로 제작된 NBCO bulk에 경우 YBCO보다 큰 임계온도(95 K)와 임계전류밀도를 갖는다는 보고도 있다.

Fig. 6-2-3은 STO 기판위에 증착된 두께 2000 Å NBCO 박막의 X-선 회절 패턴과 SEM 사진이다. NBCO의 격자상수 a, b는 기판으로 사용된 STO와 비슷하므로 NBCO 박막의 a 또는 b-축이 기판에 수직으로 성장한 경우 X-선 회절 패턴에서 peak의 분리가 분명하지 않다. 또 결정의 배향성이 YBCO나 NCCO에 비해 좋지 않으며 일부 미약한 c-축 배향성을 갖고 있으나 peak들의 intensity나 width 등을 고려하여 볼 때 a 또는 b-축 배향이 혼재되어 있는 듯하다. 보다 정확한 결정성을 확인하기 위해서는 resolution이 더 좋은 XRD를 이용하거나  $\Phi$ -scan을 해야 한다. 박막의 표면 미세 구조는 Fig. 6-2-3의 SEM 사진으로 부터 알 수 있듯이 pore나 grain등이 나타나지는 않았으나 약간의 굴곡이 있었으며, AFM으로 측정된 rms roughness는 16 Å 이었다. NBCO 박막은 bulk와 마찬가지로 기판온도, 레이저 에너지, 산소압, 기판과 타겟 사이 거리 등의 제작 조건에 따라 YBCO 보다 특성 변화의 폭이 크다. Fig. 6-2-4는 같은 박막의 비저항-온도 곡선이다. 임계온도는 26 K 였으며 metallic 특성을 보이고 있다. 박막의 증착율은 300 Å/min. 이었다.

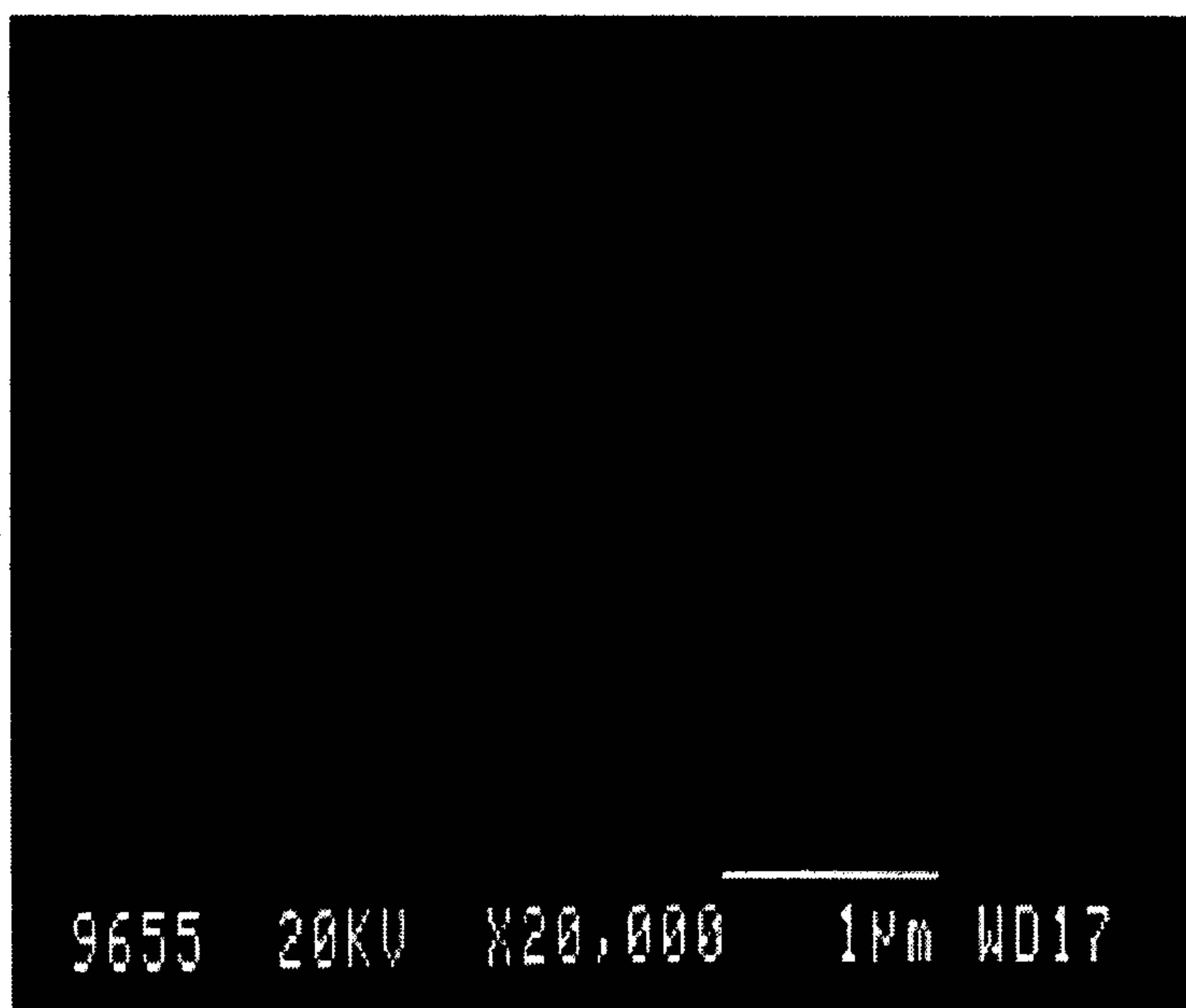
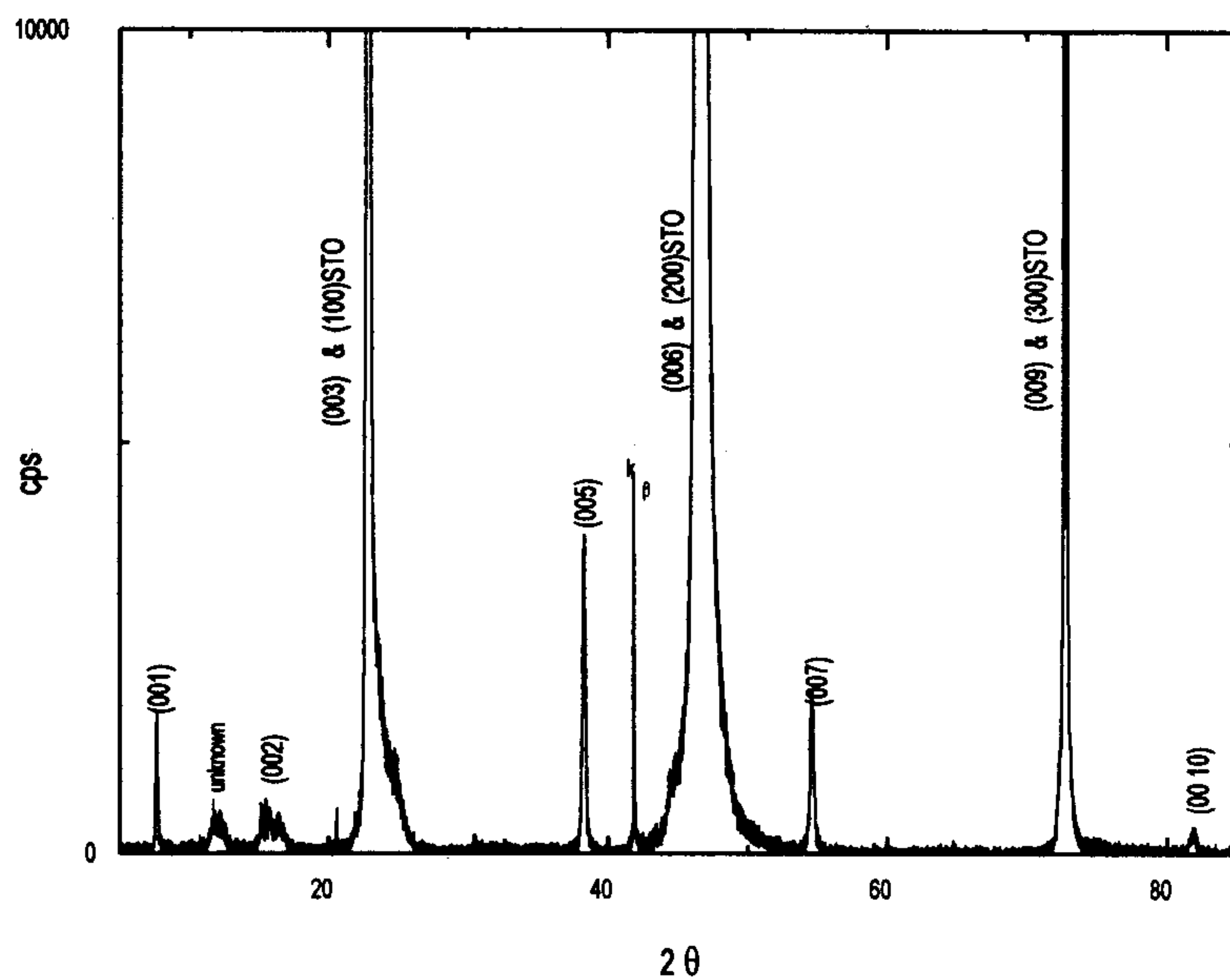


Fig. 6-2-3. STO 기판위에 증착된 두께 2000 Å NBCO 박막의 X-선 회절 패턴  
과 SEM 사진.



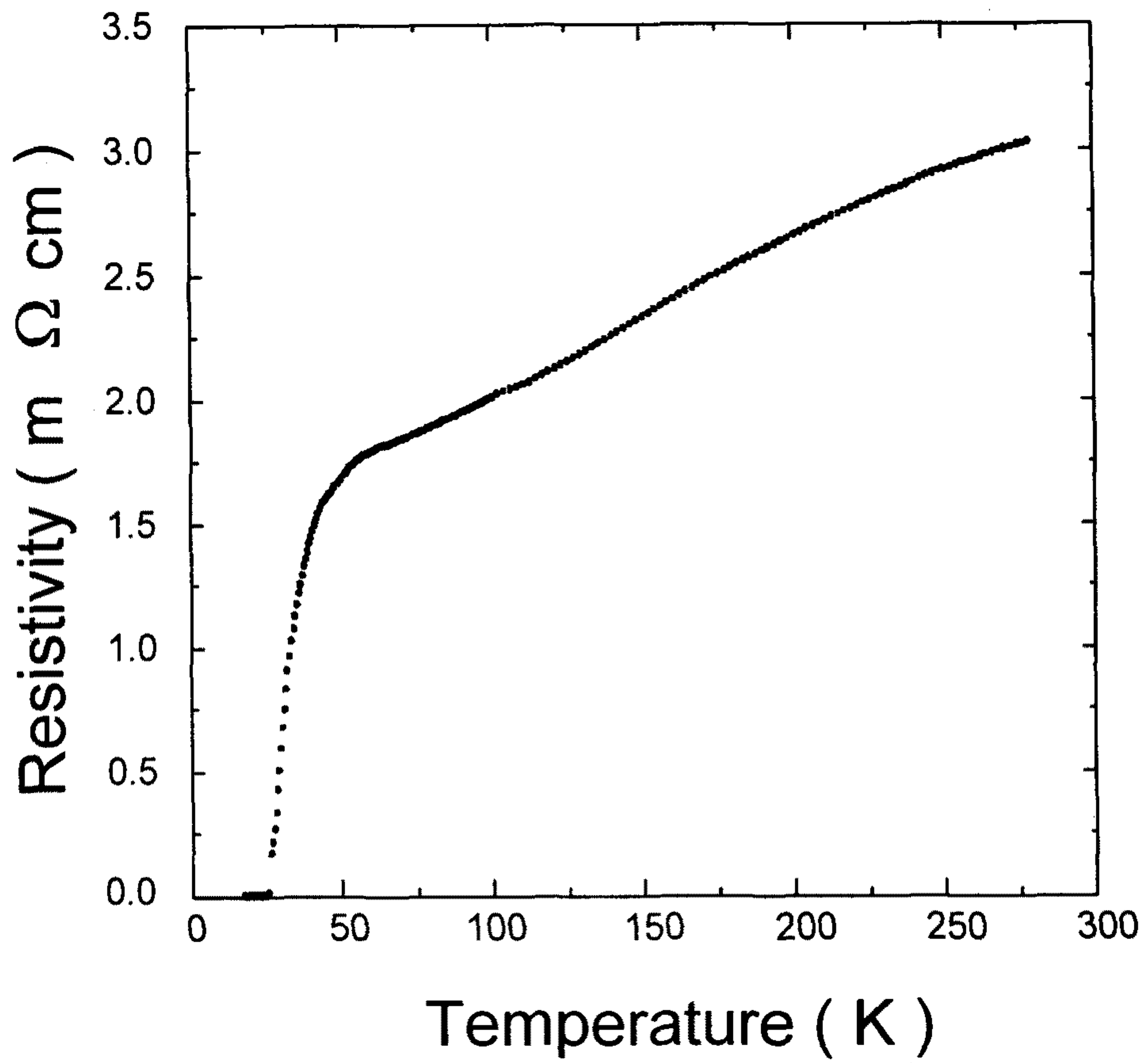


Fig. 6-2-4. STO 기판위에 증착된 두께 2000 Å NBCO 박막의 비저항-온도 특성.

## 2. 접합 제작

소자 제작 전체에 걸쳐 2, 4, 6, 8, 12  $\mu\text{m}$  크기의 선폭을 갖는 접합들의 패턴, SQUID 패턴, 그리고 4  $\mu\text{m}$ , 8  $\mu\text{m}$  크기의 전극 특성 테스트용 strip line 패턴이 들어있는 mask를 이용하였다.

Fig. 6-2-5는 edge type SNS 조셉슨 접합 제작 공정도를 나타낸 것이다. 먼저 각각 2000 Å 두께의 하부전극 YBCO와 절연체 STO를 같은 조건에서 펄스 레이저 증착 방법으로 제작하였다. 증착이 끝난 시료는 photolithography와 ion milling 식각으로 하부전극 패턴을 형성하였다. 패턴 형성 후 시료 상부에 오염 물질을 제거하기 위하여 낮은 에너지로 ion milling cleaning 하였다. 하부전극 제작시 접합이 형성되는 ramp edge의 기울기나 표면미세구조는 접합의 특성을 결정하는 중요한 요소이다. 특히 기울기가 너무 급하게 되면 SNS 접합에서는 불필요한 grain boundary junction이 생기게 된다.

AFM 측정 결과, ramp edge의 기울기는  $20^\circ$  였고, 표면은 아주 평탄하였다. 하부 전극 제작이 끝난 시편은 다시 증착 챔버에 장착한 후 NBCO normal layer, 상부 전극 YBCO, passivation용 STO 박막 순으로 in-situ 증착하였다. 각각의 두께는 Fig. 6-2-5에 명시하였다. 상부 전극 제작이 끝난 시편은 lift-off 공정과 sputtering 증착 방법으로 gold contact pad를 제작하였다. 제작이 끝난 시편은 PCB 기판에 부착 후 wire bonding을 하여 측정 준비를 마쳤다. Fig. 6-2-6은 측정 준비를 마친 시편의 사진과, 시편의 접합 부분을 확대한 SEM 사진이다.

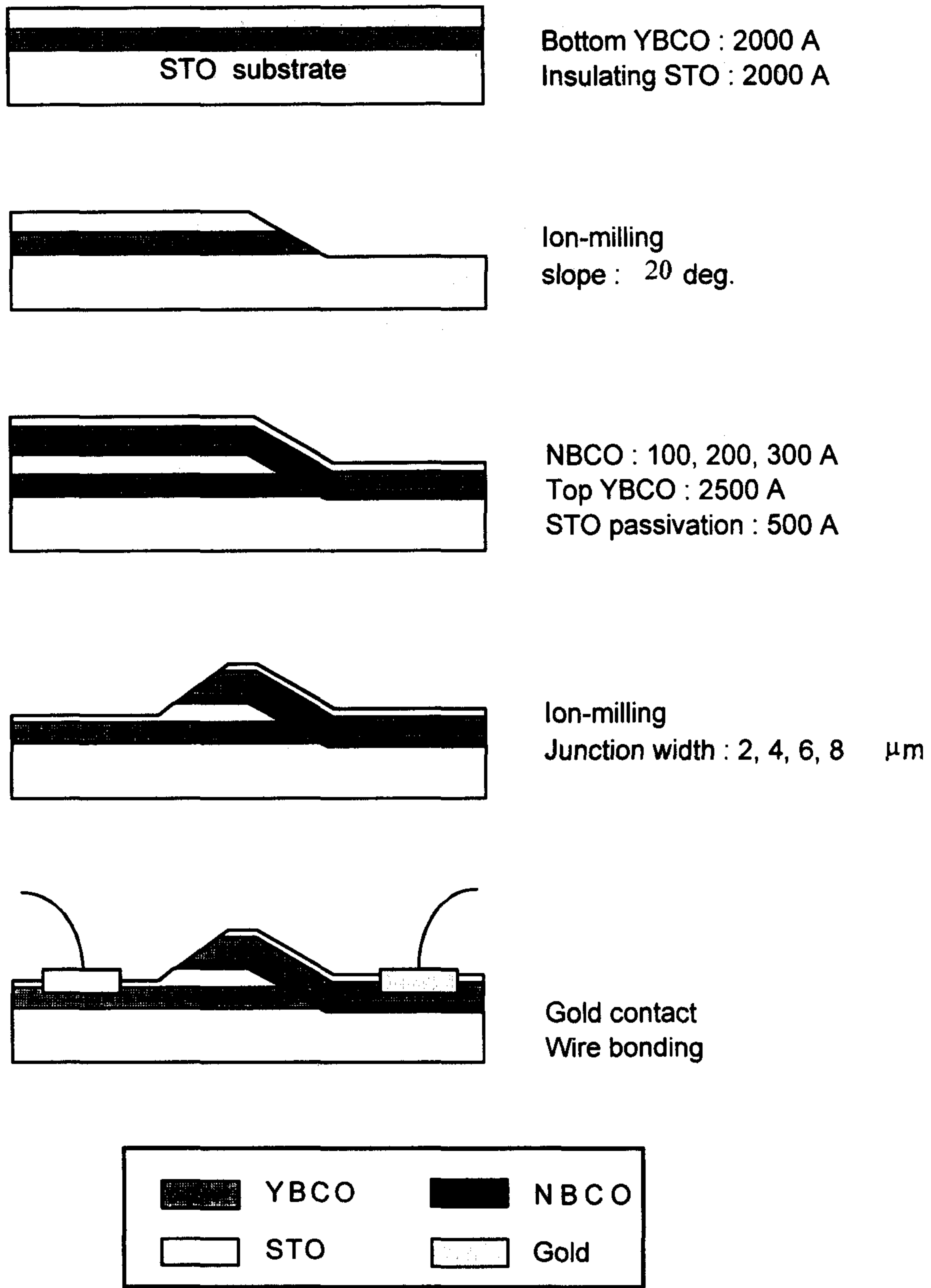


Fig. 6-2-5. SNS 조셉슨 접합의 제작 공정.

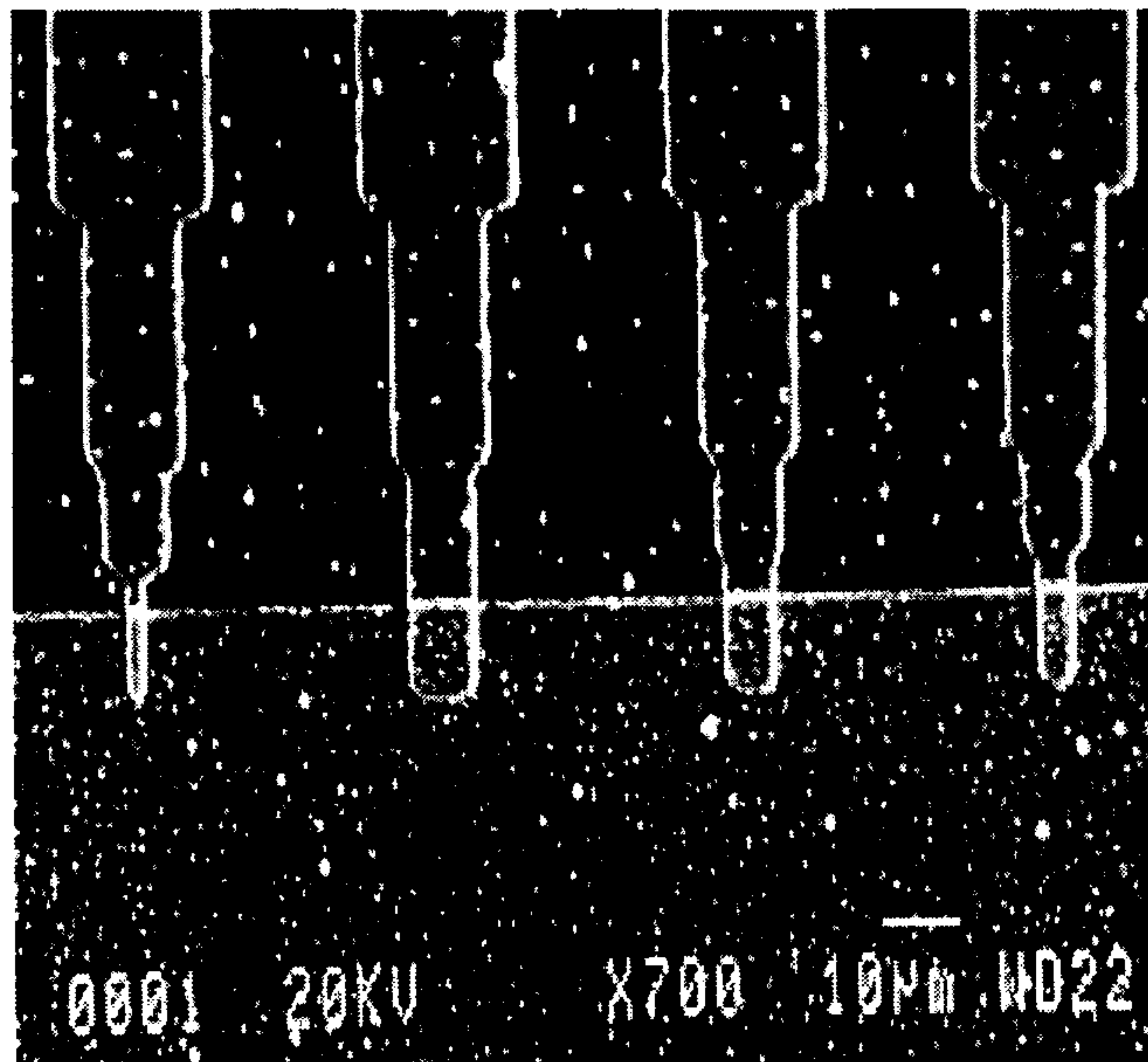
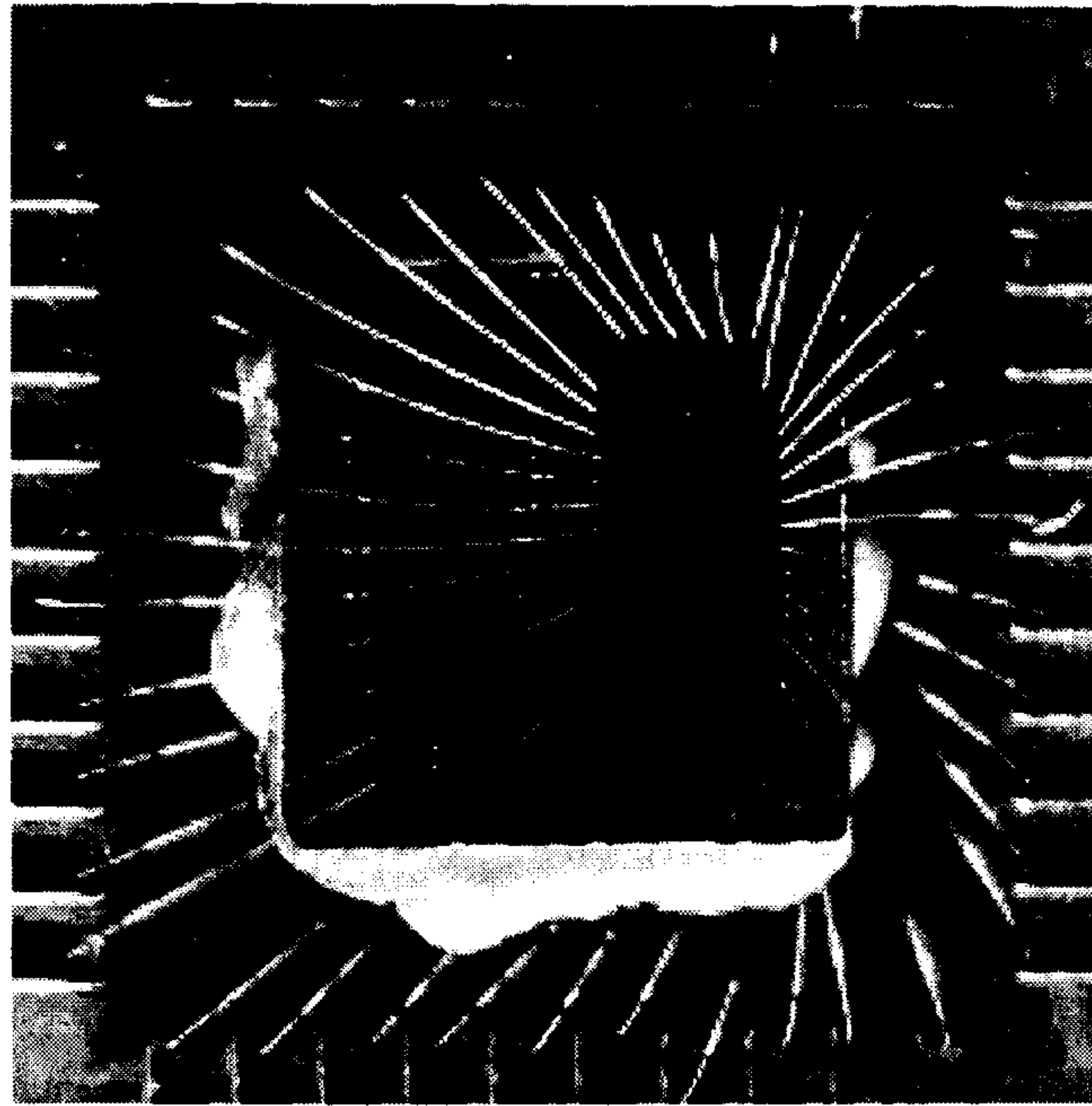


Fig. 6-2-6. 측정 준비를 마친 시편의 사진과 시편의 접합 부분을 확대한 SEM 사진.



## 제 3 절 Edge type 조셉슨 접합의 특성

### 1. 재현성 및 신뢰성

본 연구에서는 NBCO와 NCCO 두 가지 물질을 layer로 사용해 접합을 제작하였다. 접합 특성이 좋았던 NBCO 접합의 I-V 특성 측정 결과에 대해 먼저 설명한 후, NCCO 접합의 특성에 대해서는 별도의 소절에서 설명하겠다. 다음의 접합 특성은 모두 NBCO를 layer로 사용한 접합(NBCO 접합)에 대한 것이다.

접합 제작의 재현성 및 신뢰성을 확인해 보기 위해 normal layer만을 증착하지 않은 같은 구조를 갖는 별도의 YBCO-YBCO direct contact 접합을 제작하였다. 측정 결과, 임계전류밀도가 접합 모두  $2 \times 10^6$  A/cm<sup>2</sup> 이상으로 균일하였으며, I-V 특성도 초전도 strip line과 같은 flux flow 형태를 보여 별도의 layer가 형성되지 않았음을 확인하였다. Fig. 6-3-1은 두께 200 Å 접합들의 normalized  $I_c$ 와 normalized  $R_n$ 의 분포를 나타낸 것이다. 그림에서 볼 수 있듯이  $R_n$ 에 비해  $I_c$ 의 fluctuation이 심한 것을 알 수 있는데, 이것은 de Gennes이 제시한 이론으로부터 유추해 볼 수 있다. 이 이론에 의하면  $I_c \propto \exp(-kd)$  이므로 접합내의 작은 layer 두께 변화에  $R_n$ 은 선형적으로 변하는 반면,  $I_c$ 는 지수함수적인 변화를 보이기 때문이다. 따라서 normal layer 두께 변화에 대한 접합의 특성은,  $R_n$ 에 경우 두께가 증가함에 따라 선형적으로 증가하는 반면,  $I_c$ 는 지수함수적으로 감소하는 특성을 보이게 되며, 측정을 통해 확인할 수 있었다.

SNS 접합에서 접합의 특성을 결정하는 중요한 요소에 하나인 계면저항( $R_b$ )을 구해 보자. 두께 100, 200, 300 Å의 접합들의 평균 normalized  $R_n(R_n \cdot A)$ 은 각각  $2.0 \times 10^{-9}$ ,  $4.7 \times 10^{-9}$ ,  $6.7 \times 10^{-9}$  Ω·cm<sup>2</sup> 이고, Fig. 6-2-4로 부터 구한 NBCO 박

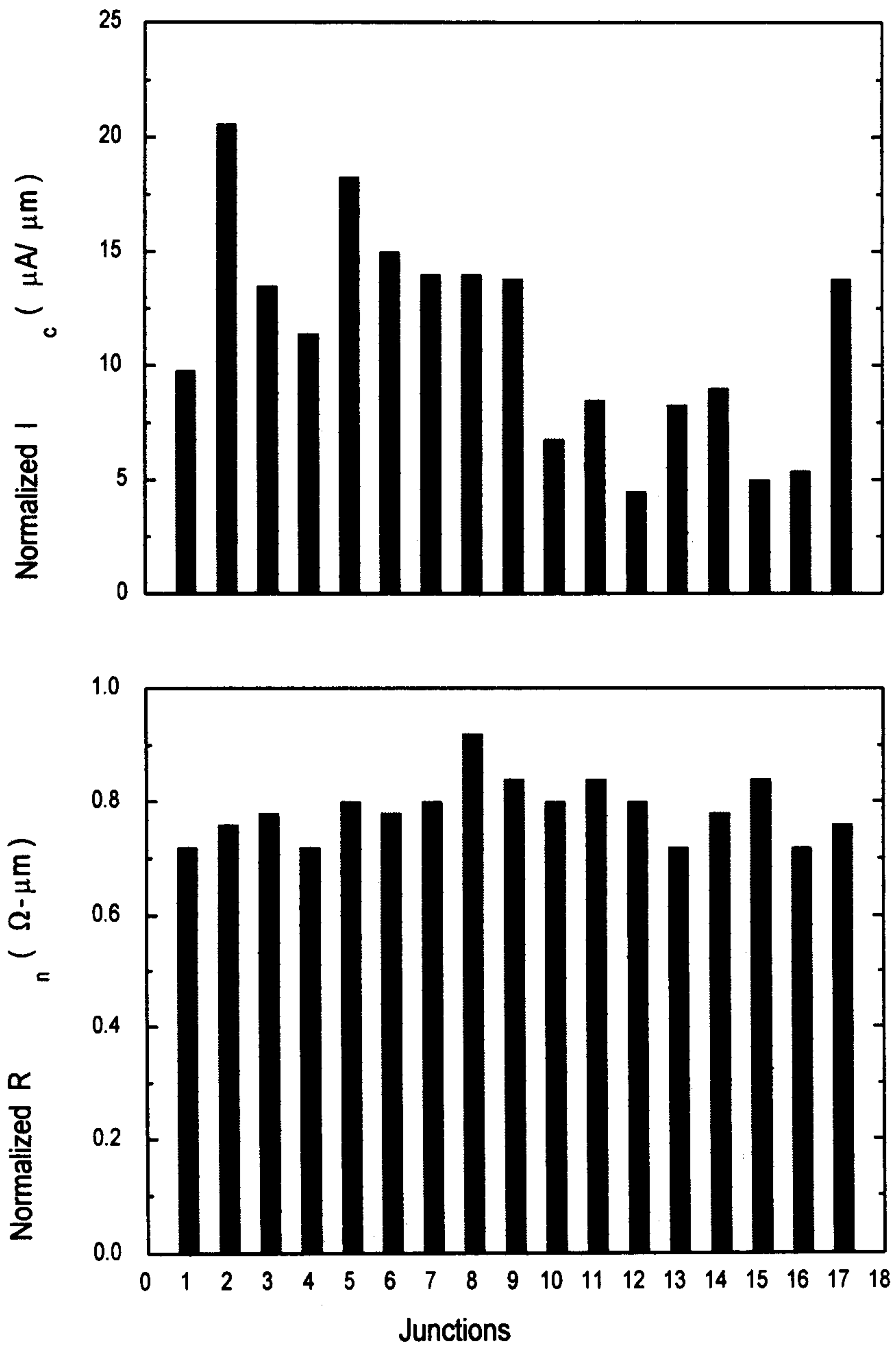


Fig. 6-3-1. 두께 200 Å 접합들의 normalized  $I_c$ 와 normalized  $R_n$ 의 분포

막의 77 K 에서의 비저항  $\rho_n$ 은  $1.9 \text{ m}\Omega \cdot \text{cm}$  이므로, 이 값과 layer 두께를 곱한  $\rho_n \cdot d$ 를 측정값  $R_n \cdot A$ 로부터 빼면  $R_b$ 가 구해진다. 77 K 에서 소자들의 평균 계면저항은  $7 \times 10^{-10} \Omega \cdot \text{cm}^2$  로 다른 물질을 사용한 기존의 SNS 접합들에 비해 상당히 작은 값을 갖고 있어, NBCO가 SNS 접합의 normal layer로서 적당한 물질인 것을 알 수 있었다.

## 2. 조셉슨 접합 특성

접합의 I-V 특성을 normal layer 두께나 선폭에 대해 살펴보면, 100 Å 두께의 접합 특히 선폭이 넓은 접합은 대부분 큰 excess current 갖고 있으며, 300 Å 두께의 접합은 일부 선폭이 넓은 접합을 제외하고 임계전류를 보이지 않았으나, 200 Å 두께의 접합은 선폭에 관계없이 RSJ 모델을 잘 따르는 I-V 특성을 보였다.

Fig. 6-3-2는 두께 100 Å, 선폭 2  $\mu\text{m}$  접합의 온도 변화에 따른 I-V 특성을 측정한 것이다. 그림에서 볼 수 있듯이 70 K 이상에서는 전형적이 RSJ 특성을 보이고 있으나, 온도가 내려감에 따라 excess current가 점점 커지고, 50 K 근처에서는 낮은 bias 전류에서만 조셉슨 coupling을 나타내고 있는데, 이것은 전류밀도가 커짐에 따라 작아지는 조셉슨 penetration depth로 인하여 나타나는 self-field 효과에 의한 것으로 보인다.

Fig. 6-3-3은 접합의 직류 조셉슨 효과를 검증하기 위해 접합에 자기장을 인가했을 때 임계전류의 변화를 77 K에서 측정한 것이다. 그림에서 볼 수 있듯이 임계전류 값은 자기장의 크기가 변화함에 따라 Fraunhofer pattern을 보이고 있다. 여기서 임계전류의 변화 주기는 0.4 Gauss 로 접합의 선폭으로부터 계산된 값보다 훨씬 작는데, 이것은 여러 상부전극에 공동으로 사용되는 큰 하부전극으로 인

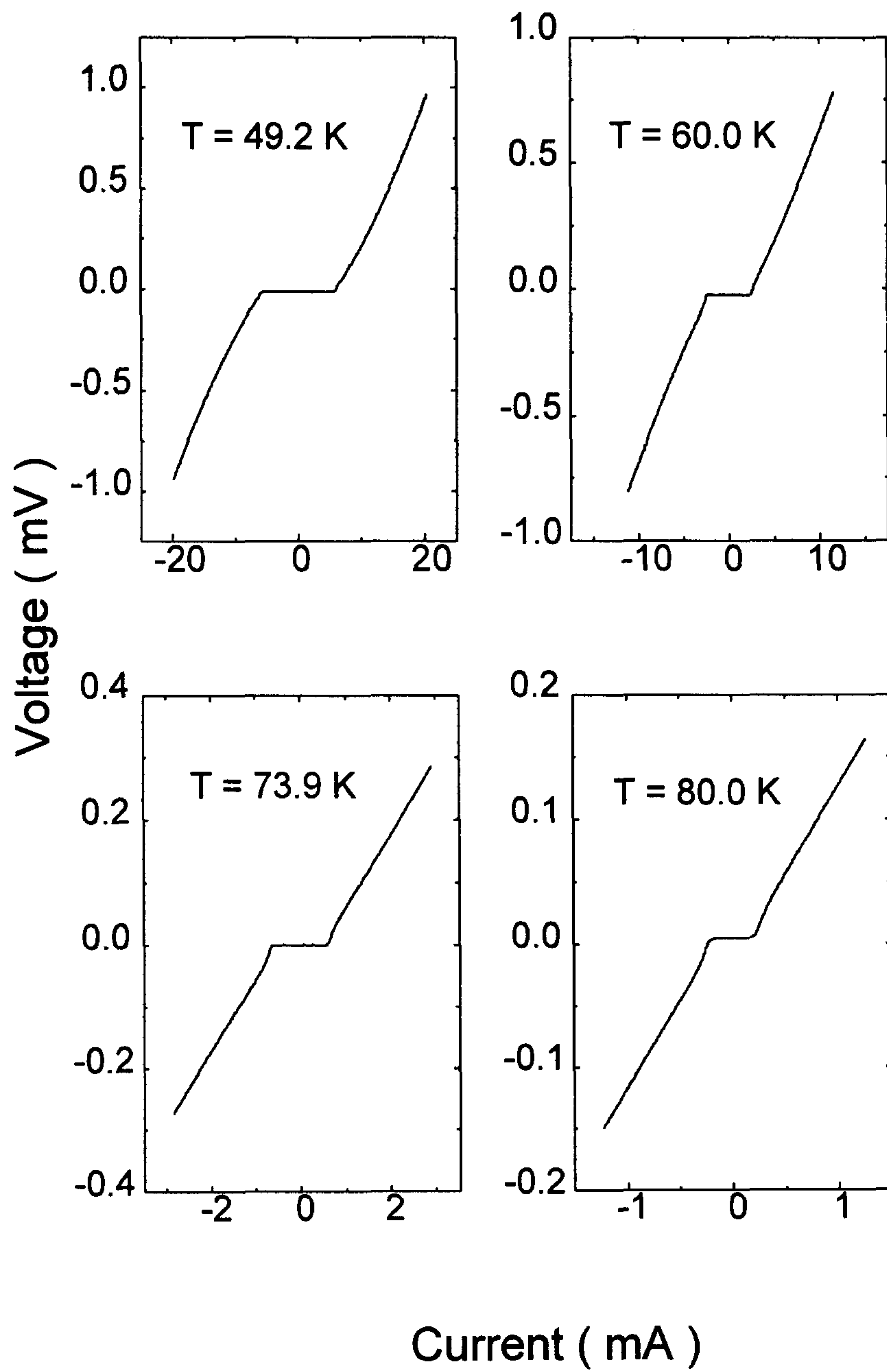


Fig. 6-3-2. 두께 100 Å, 선폭 2 μm 접합의 온도 변화에 따른 I-V 특성



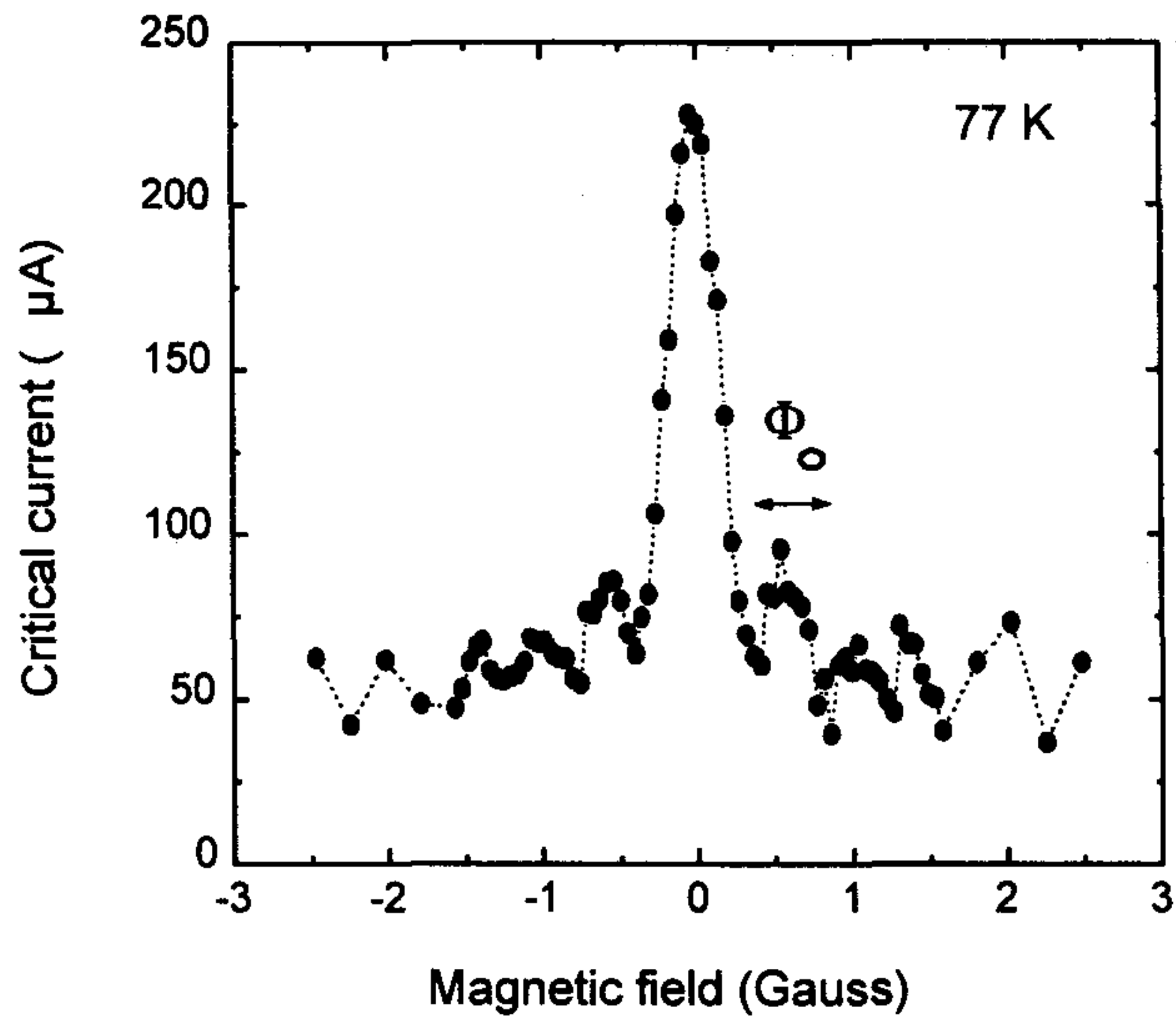


Fig. 6-3-3. 두께 100 Å, 선폭 4 μm 의 접합에 자기장을 가했을 때  $I_c$ 의 변화

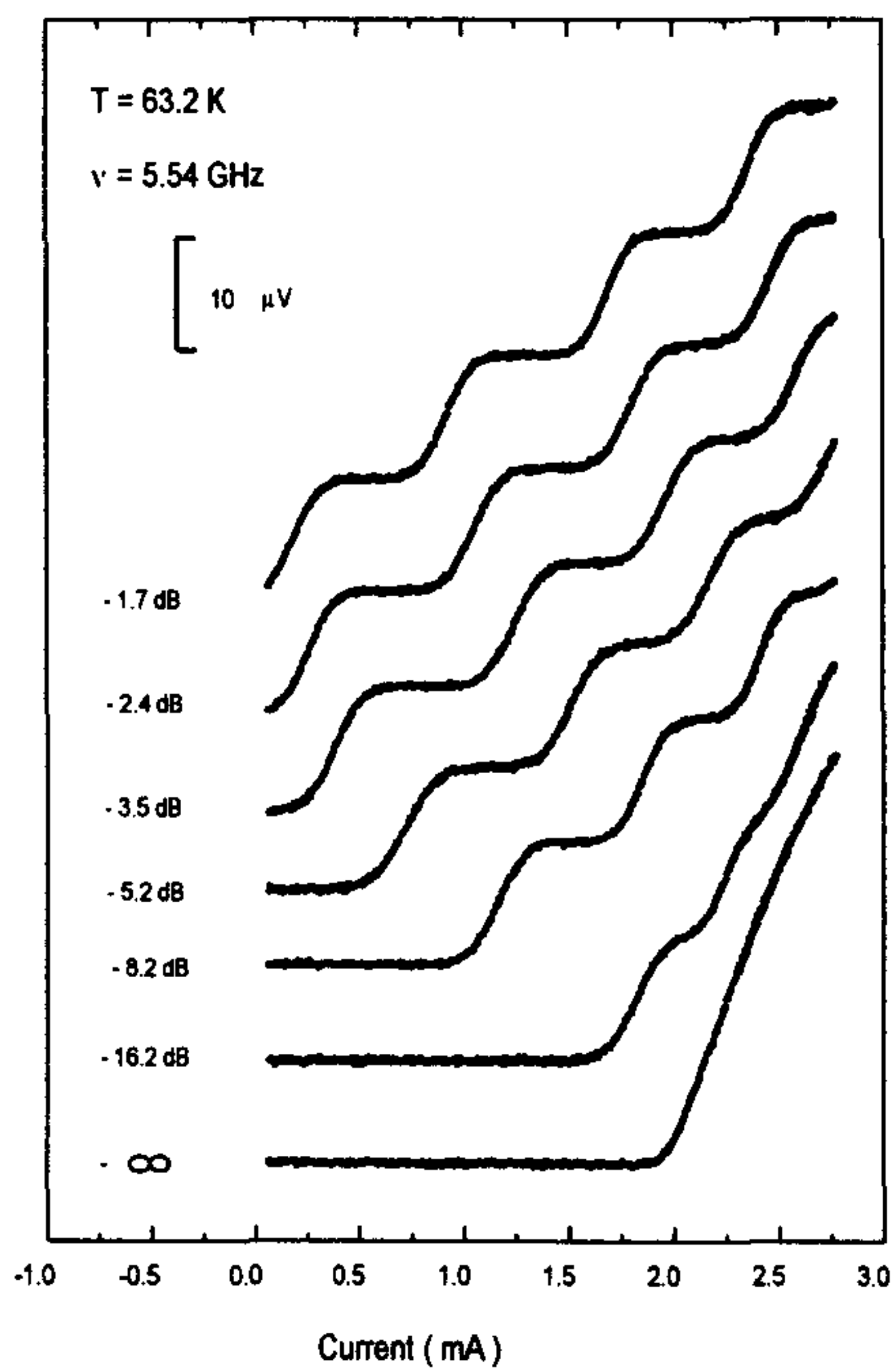


Fig. 6-3-4. 두께 100 Å, 선폭 8 μm 접합에 microwave를 인가했을 때, power 변화에 대한 I-V 특성.

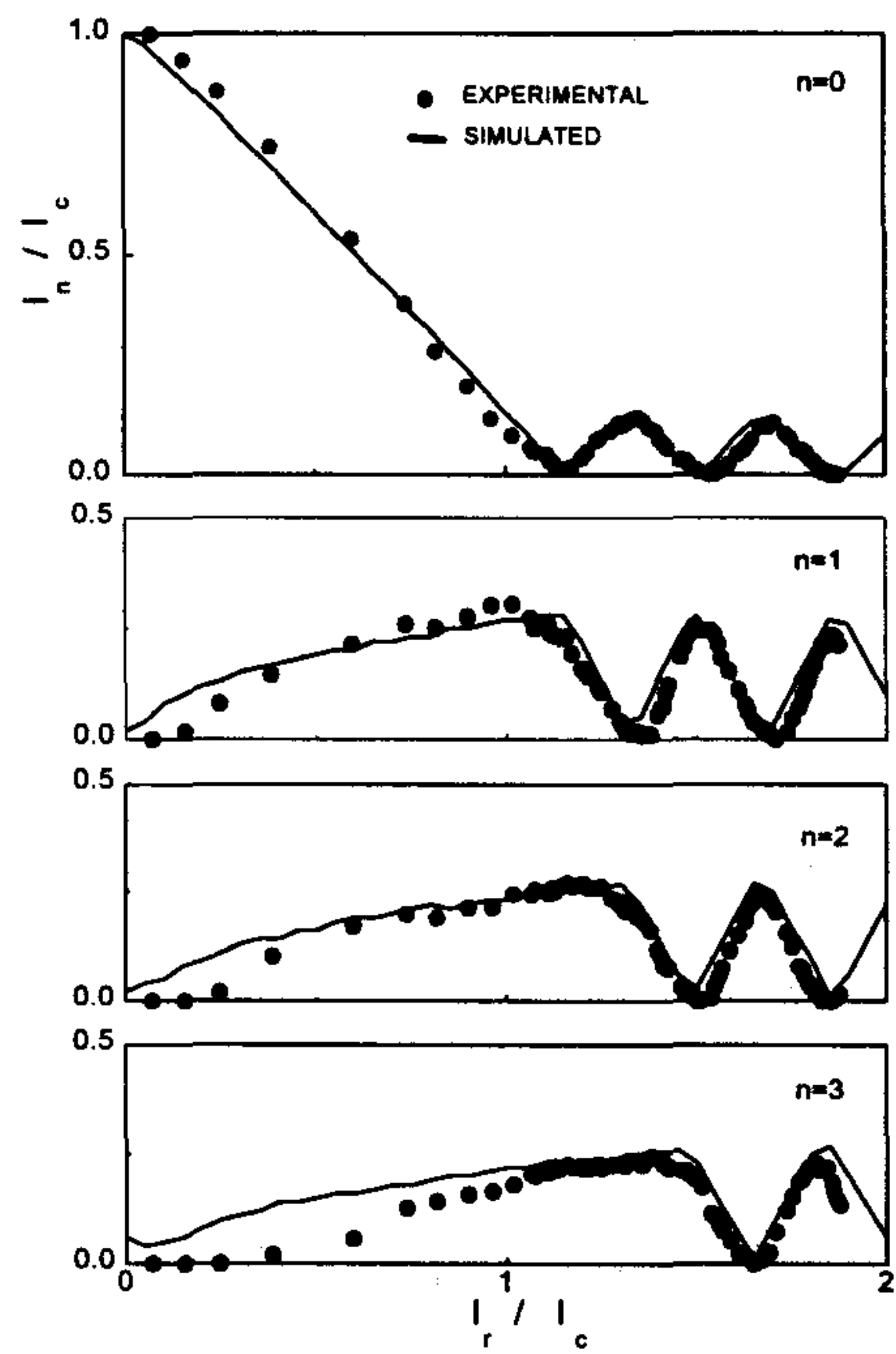


Fig. 6-3-5. Microwave power 변화에 따른 각 스텝의  $I_c$ 와 fitting 결과.

한 flux focusing 효과에 의한 것이다. Fig. 6-3-4는 접합의 교류 조셉슨 효과를 검증하기 위해 접합에 마이크로파를 인가했을 때 임계전류의 변화를 측정한 것이다. 마이크로파의 power가 변화함에 따라 각 step의 폭, 즉 임계전류가 modulation되고 있으며, 각 step의 높이는 모두 일정하게 11.5  $\mu$ V로 인가해준 마이크로웨이브의 주파수 5.54 GHz로 교류 조셉슨 효과로부터 계산된 크기와 정확히 일치하고 있다. Fig. 6-3-5는 Fig. 6-3-4에서 측정된 각 스텝의 평균 임계전류를 스텝별로 plot 한 것이다. 그림에서의 실선은 RSJ 모델에서와 같이 normal channel에 의한  $I_c R_n$  항을 부가하여 미분방정식을 세운 후 standard forth-order Runge-Kutta method를 사용하여 계산한 것을 측정값에 fitting 한 것이다. Fitting을 위해 사용한 parameter  $\varrho$  가 0.15 일 때 측정값과 가장 잘 일치하였는데, 이 값은 접합에서 측정된  $I_c$ 와  $R_n$ 을  $\varrho$ 에 대입하여 얻은 값, 0.12 와 비슷하였다.

### 3. 근접효과 특성

본 연구에서 제작된 접합의 조셉슨 특성이 근접효과에 기인된 것인지를 알아보기 위해 각 두께의 접합에 대해 온도 변화에 따른 임계전류의 변화를 측정하여, 근접효과 이론에 맞추어 보았다. Fig. 6-3-6은 식 (6-1)의 de Gennes에 의해 제시된 이론값을 측정값에 fitting 한 것으로 각 두께의 접합에 대해 전 온도 구간에서 잘 맞고 있다. Fig. 6-3-7(a)는 Fig. 6-3-6에서 나타낸 임계전류의 변화를 특정 온도에서 normal layer 두께 변화에 대해 plot 한 것이다. 근접효과 이론에 의하면, 일정 온도에서 layer 두께 변화에 대해  $I_c \propto \exp(-x d)$  가 되므로 그림에서 나타낸 점선의 기울기의 역수에 음(-)을 취한 값이 바로 decay length  $\kappa^{-1}$ , 즉

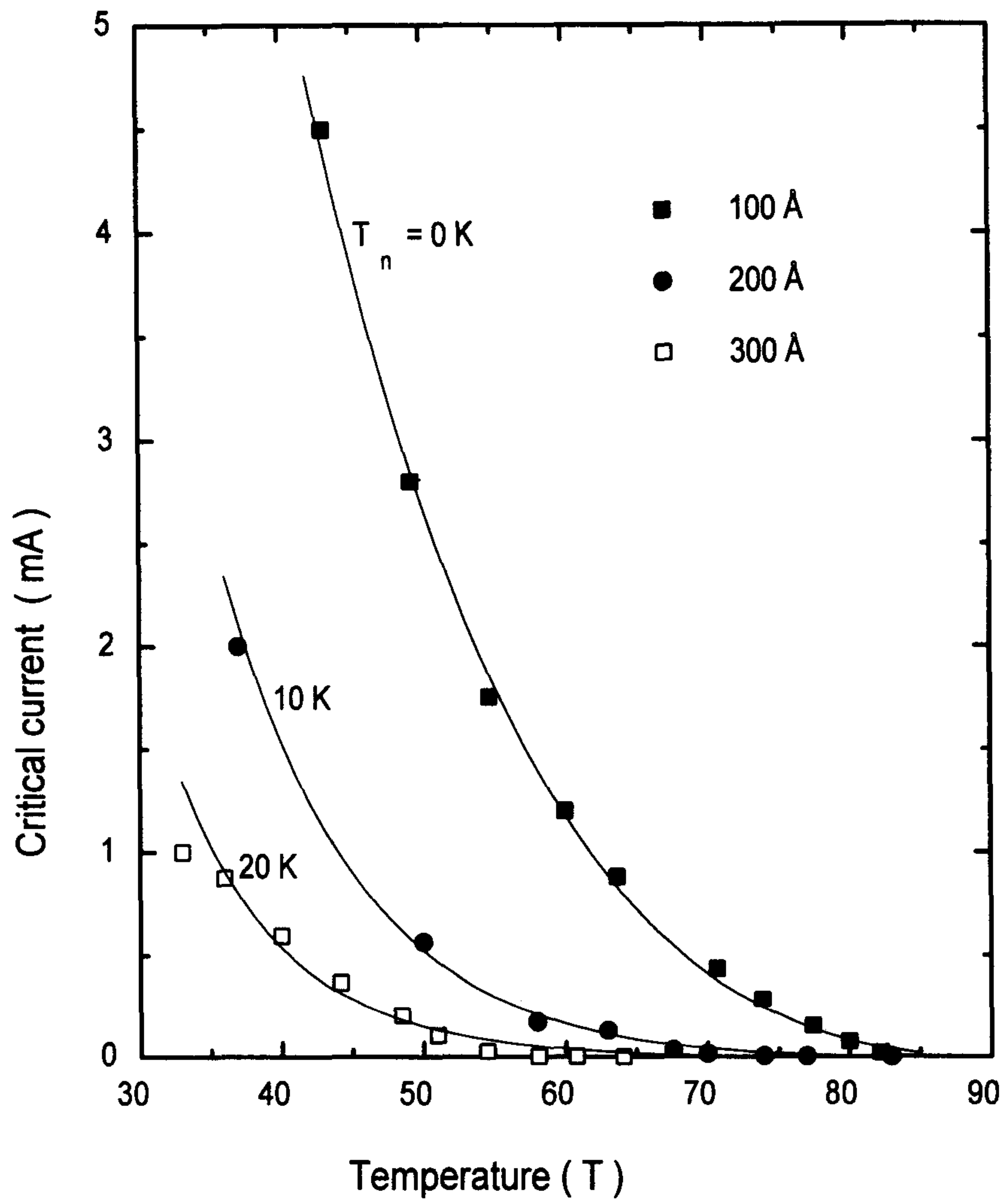


Fig. 6-3-6. 임계전류의 온도 의존성.

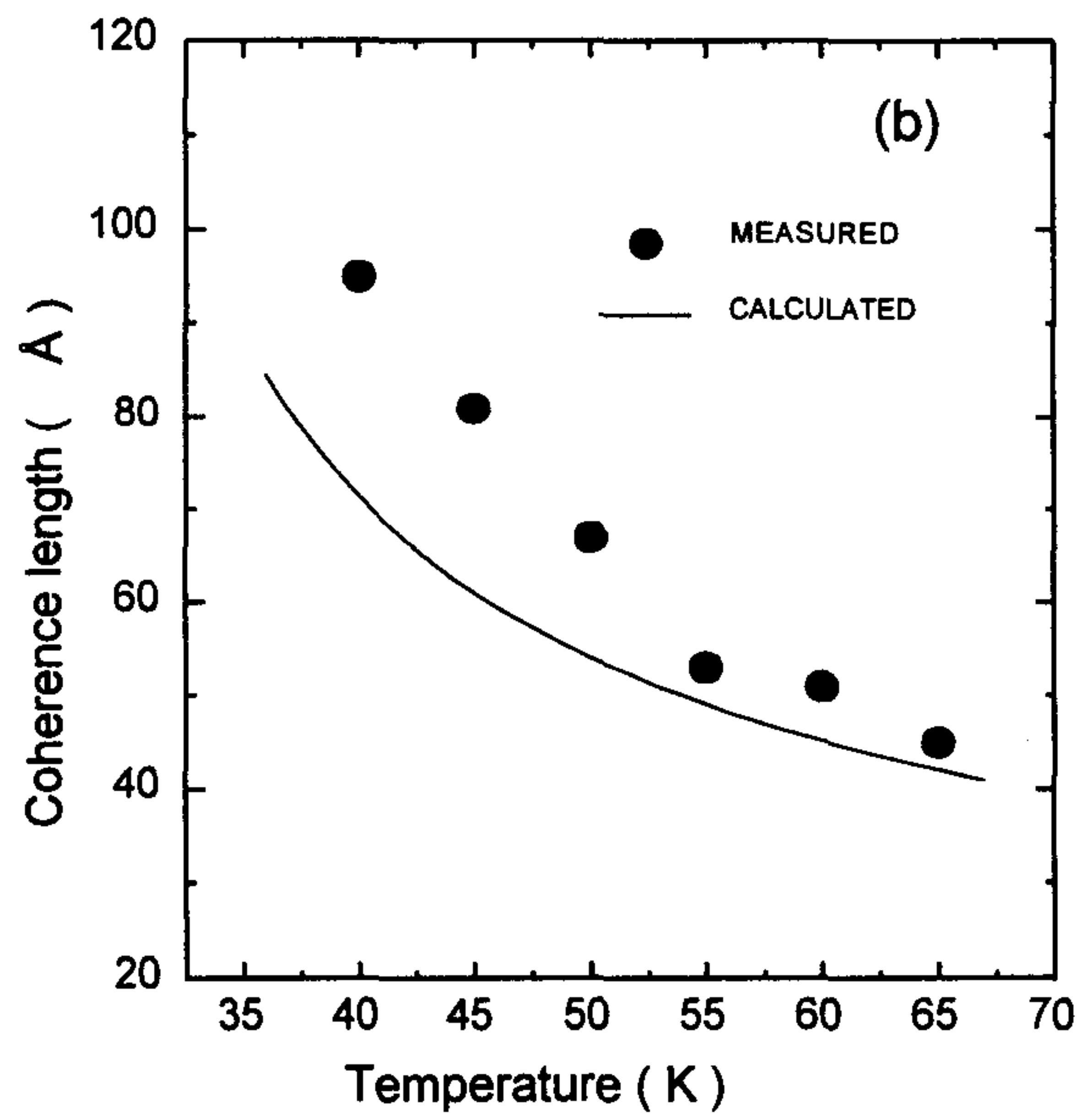
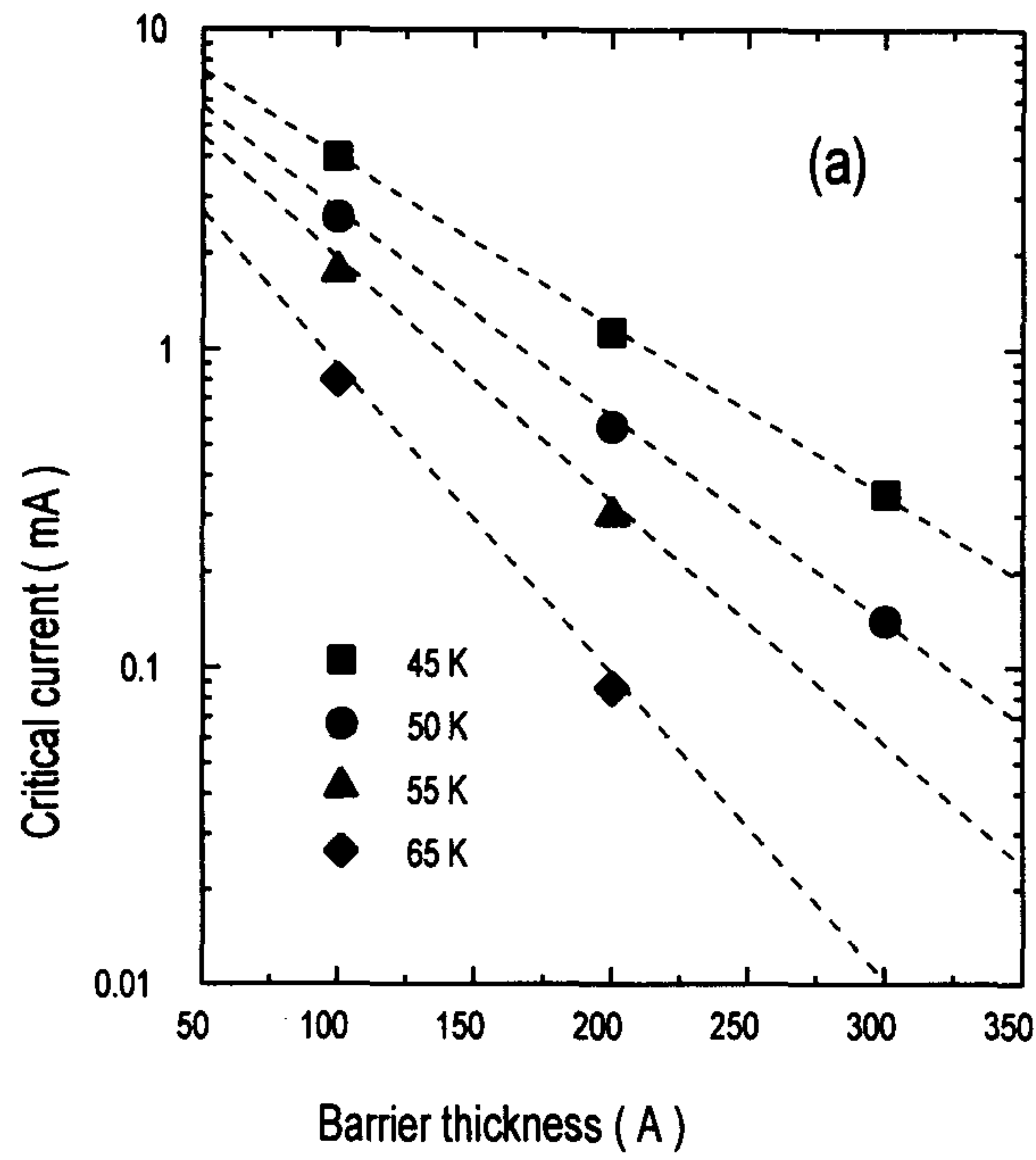


Fig. 6-3-7. (a) layer 두께 변화에 따른 임계전류의 변화. (b) Normal coherence length  $\xi_n$ 의 온도 의존성.



normal coherence length  $\xi_n$ 이 된다. Fig. 6-3-7(b)는 Fig. 6-3-7(a)로부터 구한  $\xi_n$ 을 온도에 대해 나타낸 것으로, 그 크기는 77 K에서 40 Å이었다. 앞에서 구한 normal coherence length  $\xi_n$ 과 계면저항으로부터 77 K에서 식 (6-3)의 경계면 parameter  $\nu$ 와  $\nu_b$ 를 구해보면,  $\nu = 0.0053$ ,  $\nu_b = 0.7$  이 된다. 이와 같은 결과는 SN 경계면에서 order parameter의 억제 정도나 불연속성이 무시할 수 있을 정도로 작아, 본 연구에서 제작된 접합을 근접효과 이론으로 설명하는데 무리가 없음을 보여 주는 것이다.

#### 4. SQUID 특성

고온초전도체로 제작된 조셉슨 접합의 다양한 용도중 응용범위가 넓고, 응용가능성이 높은 소자가 SQUID이다. 제작된 SNS 조셉슨 접합의 응용가능성을 타진해보기 위해 SQUID를 제작하여 개략적인 특성을 측정하였다. Fig. 6-3-8은 두께 200 Å, 선폭 2  $\mu\text{m}$  접합으로 제작된 SQUID의 SEM 사진과 77 K에서 전압-자속 특성을 측정한 결과이다. 이 SQUID의  $I_c$ 와  $R_n$ 은 각각 76  $\mu\text{A}$ , 0.4  $\Omega$  이고, modulation amplitude  $\sim 3 \mu\text{V}$  였다. 또 effective area는  $2.0 \times 10^5 \text{ cm}^2$  으로 SQUID washer 내부의 크기로부터 계산된 값  $3.2 \times 10^6 \text{ cm}^2$  보다 6.3 배 정도 큰 값을 보이는데, 이것은 SQUID washer의 flux focusing 효과로 비롯된 것이다.

#### 5. NCCO 접합

NBCO 접합에 앞서 제작된 NCCO 접합은 그 특성이 NBCO 접합과는 상당히 다른 것이었다. 결론적으로, NCCO는 SNS 형태의 조셉슨 접합의 normal layer

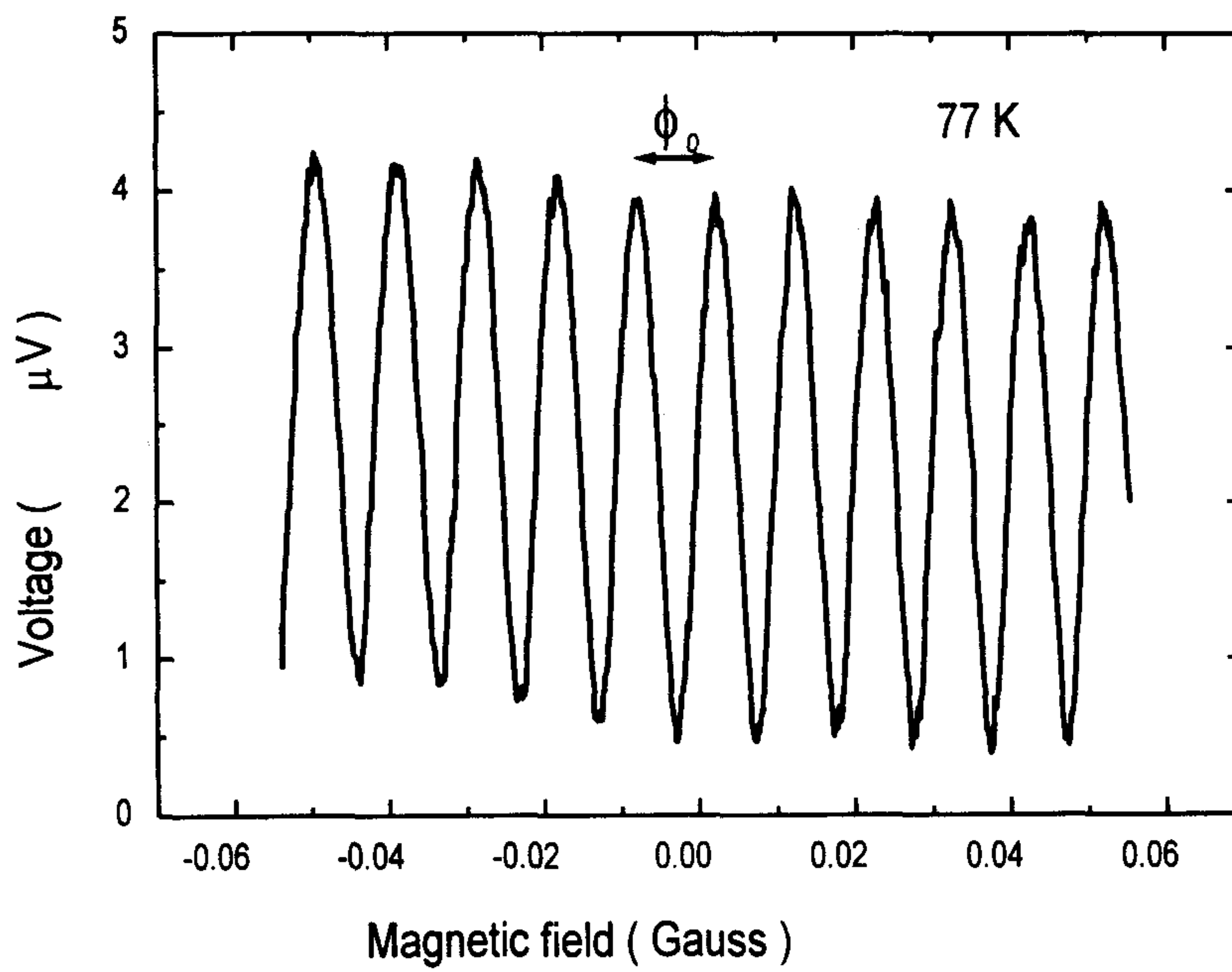
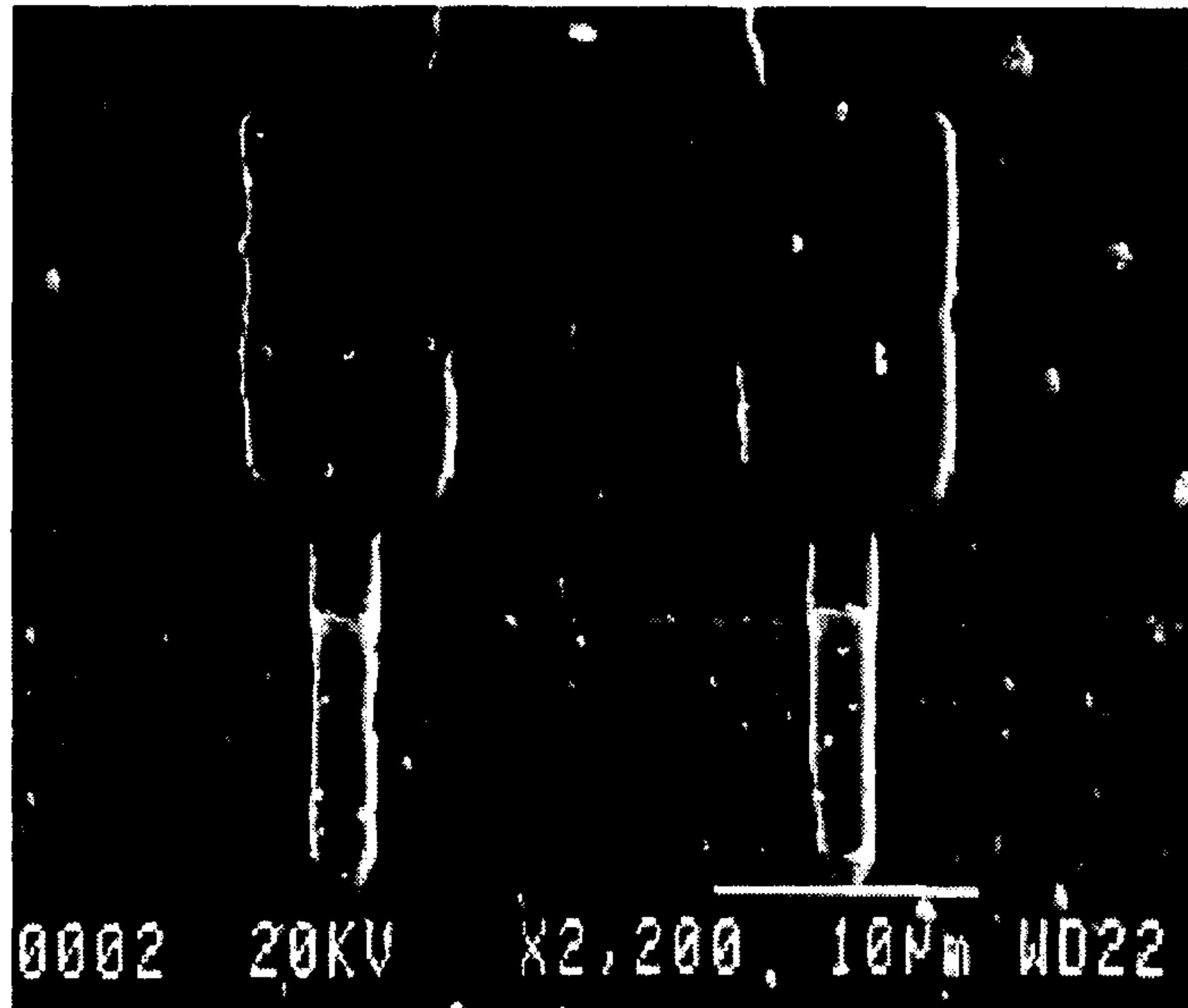


Fig. 6-3-8. 두께 200 Å, 선폭 2  $\mu\text{m}$  NBCO 접합으로 제작된 SQUID의 SEM 사진과 77 K에서 전압-자속 특성을 측정한 결과.

로서 적당한 것은 아니었다. 그러나 NCCO 접합을 제작하면서 또는 그 특성을 측정하면서 나타났던 문제점들을 해결함으로써 얻어졌던 경험과 지식은 NBCO 접합 제작에 많은 도움이 되었다. 그 중 대표적인 것이 layer와 상부전극 증착전 하부전극 표면을 이온 밀링으로 cleaning 해야 한다는 것이다. 이온 밀링 cleaning의 중요성은 YBCO-YBCO direct contact으로 이루어진 접합의 특성을 측정해 봄으로서 검증되었다. 이온 밀링 cleaning을 하지 않은 접합은 임계전류밀도가 작을 뿐만 아니라 그 편차가 아주 심하고, I-V 특성도 접합별로 아주 다양했던 반면, 이온 밀링을 한 접합은 임계전류밀도가 접합 모두  $2 \times 10^6$  A/cm<sup>2</sup> 이상 이었고, I-V 특성도 초전도 strip line과 같은 flux flow 형태를 보였다.

NCCO 제작 초기에는 상부전극 증착전 이온 밀링 cleaning을 하지 않았다. 이런 시편의 접합들은 접합의 선폭이나 layer 두께에 관계없이  $I_c$ 와  $R_n$ 에 일관성 없는 심한 변화를 보였으며 I-V 특성도 일정하지 않았다. 그러나 이런 접합들중에는 RSJ 모델을 잘 따르는 접합과 좋은 SQUID 특성을 나타내는 것들도 있었는데 이것은 바람직한 SNS 형태의 조셉슨 접합의 의한 것이라 하기보다도 MgO와 같은 절연체를 layer로 사용했거나, 초전도 전극 표면의 degradation을 이용한 접합에 경우 처럼 pin-hole에 의한 micro-short이거나 natural grain boundary에 의해 이루어진 것으로 보인다. 그러나 이온 밀링 cleaning의 중요성을 알아낸 후 제작된 NCCO 접합 역시 기대했던 결과를 나타내지는 않았다. Layer 두께가 120 Å 으로 얇은 접합들은 임계전류가 어느 정도 선폭에 따라 비례함을 보이지만  $10^5$  A/cm<sup>2</sup> 이상의 전류밀도를 나타냄과 더불어 flux flow 형태의 I-V 특성을 보였으며, 360 Å 의 두께의 접합들은 모두  $I_c$ 가 0 이고  $R_n$ 은 수십 내지는 수백 Ω을 나타내었다. 또 240 Å 두께의 접합들은 마치 이온 밀링을 하지 않은 시편의 접합에 경우 처럼 상당히 불규칙적인  $I_c$ 와  $R_n$  값을 보여 주었다.

이상의 결과로 부터 NCCO는 6-2 절에서 밝힌 바와 같이 격자상수, 비저항 등의 몇가지 normal layer로서 바람직한 특성을 갖고 있으나 실제 제작을 통해서 살펴본 결과, 두께 uniformity, wettability, electronic match 등에 있어서 YBCO를 전극으로 사용한 SNS 접합의 normal layer로서 적당하지 않음을 확인할 수 있었다.

## 6. 논의

기존의 고온초전도 조셉슨 접합이 지니고 있는 제작과 특성상의 여러 가지 문제점을 해결하기 위해, 펄스 레이저 증착 방법에 의한 박막 제작과 이온 밀링 식각 방법을 이용하여, (100)SrTiO<sub>3</sub> 기판 위에 전극으로 YBa<sub>2</sub>Cu<sub>3</sub>O<sub>7-x</sub>를, normal layer로 NdBa<sub>2</sub>Cu<sub>3</sub>O<sub>7-x</sub>를 사용해, edge 구조의 SNS 조셉슨 접합을 제작하였다. 제작된 접합은 직류, 교류 조셉슨 효과를 비롯한 여러 가지 면에서 우수한 조셉슨 특성을 주었으며, 제작과정에 있어 재현성과 신뢰성을 갖고 있어 실용가능성이 높음을 확인할 수 있었다. 임계전류의 온도 의존성을 측정해 본 결과, 접합의 조셉슨 특성이 기존의 근접효과 이론으로 설명 가능하였는데, 이는 주로 normal layer와 초전도 전극간의 작은 계면저항으로부터 비롯된 것으로, normal layer로서 NBCO의 선정이 적절하였음을 보여 주는 것이다.

그러나 본 연구에서 제작된 접합은 임계전류의 variation이 크고, 실용상에 있어 아주 중요한 값인  $I_c R_n$  값이 작다는 등의 문제점도 아울러 지니고 있다. 임계전류의 variation을 줄이기 위해서는 제작 공정의 일부를 개선하거나 보다 안정시켜야 할 필요가 있으며,  $I_c R_n$  값을 크게 하기 위해서는 NBCO의 증착조건을 변화시키거나, 새로운 normal layer 물질로 접합을 제작해 보면 많은 개선이 있을



것으로 기대된다. 응용가능성을 확인하기 위해 제작된 SQUID의 특성은 아직 기존의 bi-crystal 접합에 비해 좋지는 않으나, 지금까지 제작된 다른 SNS 접합에 비해 상당히 우수한 것이었으며 연구가 좀 더 진행됨에 따라 보다 좋은 특성을 보일 것으로 기대된다.

본 연구중 확보된 multi-layer 제작 기술은 현재 SQUID의 성능 향상에 필요한 multi-level flux transformer 등의 제작에 실질적인 기여를 하게 될 것이며, 또 최근 본격적으로 접어든 고주파 통신시대에 획기적인 역할이 예상되는 고온초전도 마이크로웨이브 통신소자나 hybrid 소자 제작에 적극적으로 활용될 수 있을 것이다.

## 참 고 문 헌

- [1] B. Oh, R. H. Koch, W. J. Gallagher, R. P. Robertazzi, and W. Eidelloth, *Appl. Phys. Lett.* **59**, 123 (1991).
- [2] K. Char, M. S. Colclough, S. M. Garrison, N. Newman, and G. Zaharchuk, *Appl. Phys. Lett.* **59**, 733 (1991).
- [3] K. P. Daly, W. D. Dozier, J. F. Burch, S. B. Coons, R. Hu, C. E. Platt, and R. W. Simon, *Appl. Phys. Lett.* **58**, 543 (1991).
- [4] G. Deutscher and P. G. de Gennes, *Superconductivity* (Ed. R. D. Parks), chap. 17 (Marcel Dekker, 1969).
- [5] M. S. DiIorio, S. Yoshizumi, K.-Y. Yang, J. Zhang, and M. Maung, *Appl. Phys. Lett.* **58**, 2552 (1991).

- [6] R. H. Ono, J. A. Beall, M. W. Cromar, T. E. Harvey, M. E. Johanson, C. D. Reintsema, and D. A. Rudman, *Appl. Phys. Lett.* **59**, 1126 (1991).
- [7] J. Gao, W. A. M. Aarnink, G. J. Gerritsma, D. Veldhuis, and H. Rogalla, *IEEE Trans. Magn.* **27**, 3062 (1991).
- [8] L. Antognazza, S. J. Berkowitz, T. H. Geballe, and K. Char, *Phys. Rev. B* **51**, 8560 (1995).
- [9] L. Antognazza, B. H. Moeckly, T. H. Geballe, and K. Char, *Phys. Rev. B* **52**, 4559 (1995).
- [10] B. D. Josephson, *Phys. Lett.* **1**, 251 (1962).
- [11] W. C. Stewart, *Appl. Phys. Lett.* **12**, 277 (1960); D. E. McCumber *J. Appl. Phys.* **39**, 3113 (1968).
- [12] V. L. Ginzburg and L. G. Landau, *Zh. Eksp. Teor. Fiz.* **20**, 1064 (1950).
- [13] P. G. de Gennes, *Rev. Mod. Phys.* **36**, 225 (1964).
- [14] M. Yu. Kupriyanov and K. K. Likharev, *IEEE Trans.* **27**, 2460 (1991).
- [15] H. Shaked, B. W. Veal, J. Faber, Jr., R. L. Hitterman, U. Balachandran, G. Tomlins, H. Shi, L. Morss, and A. P. Paulikas, *Phys. Rev. B* **41**, 4173 (1990).

# 부 록

A I. 특허 출원 LIST

A II. 발표 논문 LIST

여 백



## A I. 특허 출원 LIST

### 1. 해외 출원

출원번호	출원국가	의뢰번호	발명자	발명의 명칭
676675	U.S.	96FERM014G1	김홍득 오병두	초전도 양자간소자를 이용한 초고주파 하모닉믹서
700279	U.S.	96FERM015G1	김홍득	초전도 양자간섭소자를 이용한 고주파 신호 발생기
	U.S.	97FICK001	김홍득 오병두	대역통과형 마이크로 스트립라인의 대전력전송용 초고주파필터
	U.S.	97FICK004	김홍득 오병두 문승현 최영환	다수개의 초전도 양자간섭소자를 이용한 자장측정장치
	U.S.	97FICK005	김홍득	미세자장측정장치
	U.S.	97FICK006	김홍득 오병두 문승현 최영환	단일신호처리시스템을 갖는 다중채널 자장측정장치

## 2. 국내 출원

출원번호	출원일	의뢰번호	발명자	발명의 명칭
LBL94-211	1995.5.26	LBL94-211	김홍득	임피던스 정합을 위해 입출력단의 금속봉이 코일 인덕턴스로 ~
P95-06203	1995.3.23	LBL95-026	최영환	초전도 양자간섭자를 이용한 미세자장 측정장치
P95-20375	1995.7.11	LBL95-068	김홍득 오병두	초전도 양자 간섭소자를 이용한 초고주파 하모닉 믹서회로
P95-27193	1995.8.29	LBL95-072	문승현	고온 초전도체 조셉슨 접합소자의 제조방법
P95-26598	1995.8.25	LBL95-096	김홍득	초전도 양자간섭 소자를 이용한 고주파 신호 발생기
P95-69300	1995.12.30	LBL95-215	문승현	조셉슨 접합소자 제조방법
P96-15776	1996.5.13	ERM96-018	김홍득 오병두 문승현 최영환	단일 신호처리 시스템을 갖는 다중채널 자장 측정장치

출원번호	출원일	의뢰번호	발명자	발명의 명칭
P96-12930	1996.4.25	ERM96-017	김홍득 오병두 문승현 최영환	자장측정장치
P96-14274	1996.5.2	ERM96-015	김홍득	미세자장 측정장치
P96-14273	1996.5.2	ERM96-016	김홍득 오병두 문승현 최영환	다수개의 초전도 양자 간섭 소자를 이용한 자장측정장치
P96-12929	1996.4.25	ERM96-025	김홍득 오병두	대역통과형 마이크로 스트립 라인의 대전력 전송용 초고주파 필터
P96-54393	1996.11.15	ERM96-125	민병철 김홍득	원통형 표면탄상파 필터

## A II. 1995년 - 1996년 발표논문 LIST

### (해외)

1. "Surface modification of laser ablated YBCO target", Y. S. Jeong, S. Y. Lee, H. K. Jang, I. S. Yang, S. H. Moon and B. Oh, (1996). (accepted, Applied Surface Science 3836)
2. "Superconducting  $\text{NdBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7.6}$  thin films prepared by the laser ablation method", S. H. Moon and B. Oh, (1996). (accepted, IEEE Trans. on Applied Superconductivity)
3. "Use of a dielectric-loaded cylindrical cavity in measurements of the microwave surface resistances of high-Tc superconducting thin films", S. Y. Lee, B. J. Soh, J. W. Ahn, J. Y. Cho, B. H. Park, C. S. Jung, V. B. Fedorov, A. G. Denisov, Y. H. Kim, T. S. Hahn, S. S. Choi, B. Oh, S. H. Moon, (1996). (accept, to be published in IEEE Trans. on Applied Superconductivity)
4. "Microwave properties of high-Tc microstrip resonators with different surface morphologies and finite thicknesses", S. Y. Lee, J. Y. Cho, Y. H. Kim, B. J. Soh, B. H. Park, J. W. Ahn, C. S. Jung, T. S. Hahn, S. S. Choi, B. Oh, S. H. Moon, V. B. Fedorov, and A. G. Denisov, Physica C, (1996) (accepted, to be published in Vol. 273, Nos.1&2, Dec. 15, 1996).



5. "YBa<sub>2</sub>Cu<sub>3</sub>O<sub>7-δ</sub>/NdBa<sub>2</sub>Cu<sub>3</sub>O<sub>7-δ</sub>/YBa<sub>2</sub>Cu<sub>3</sub>O<sub>7-δ</sub> edge junctions and SQUIDs", B. Oh, Y. H. Choi, S. H. Moon, H. T. Kim, and B. C. Min, Appl. Phys. Lett. 69, 2288 (1996).
6. "A compact two-pole high-T<sub>c</sub> superconducting microstrip filter", B. Oh, H. T. Kim, Y. H. Choi, S. H. Moon, P. W. Hur, M. Kim, S. Y. Lee, A. V. Denisov, IEEE Trans. on Applied Superconductivity 5, 2667 (1995).
7. "A comparative study on the microwave penetration depth of various YBCO thin films using a non-contact method", Sang Young Lee, G. B. Kim, S. T. Lim, W. N. Kang, T. S. Hahn, S. S. Choi, B. Oh, Y. H. Choi, S. H. Moon, and A. G. Denisov, Physica C 244, p.63-70, (1995).

## (국내)

1. "Two channel high-T<sub>c</sub> SQUID magnetometer for MCG", S. H. Moon, B. Oh, H. T. Kim, Y. H. Choi, B.C. Min, Y.H. Lee, H.C. Kwon, Y.K. Park, J.C. Park (1996). (submitted to JKPS)
2. "Magneto-Cardiogram measurement using high-T<sub>c</sub> SQUID magnetometer", B. Oh, S. H. Moon, H. T. Kim, Y. J. Jeon, Y. H. Choi, and B. C. Min, (1996). (accepted, ICAMD 96, to be published in JKPS)
3. "Laser ablation에 따른 YBa<sub>2</sub>Cu<sub>3</sub>O<sub>7</sub> target 표면 변화에 대한 라만 스펙트라 연구", 장 혜경, 정 병두, 양 인상, 이 상렬, 정 영식, 오 병두, 문 승현, Ungyong Mulli (응용물리), (1996). (accepted, to be published in Vol. 9, No. 11, Nov. 1996)

4. "Edge junctions of  $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7.8}/\text{NdBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7.8}/\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7.8}$  thin film structures", Y. H. Choi, H. L. Park, S. H. Moon, H. T. Kim, and B. Oh, J. Korean. Phys. Soc. 29, 634 (1996).
5. "Magnetic field behavior of high-Tc superconductor Josephson junction array", Yonuk Chong, H. J. Lee, Z. G. Khim, S. H. Moon, and B. Oh, J. Korean Phys. Soc. 29, 110 (1996).
6. " $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7.8}$  microbridge 안의 변형력에 대한 라만 연구", 박 현정, 양 인 상, 오 병두, 문 승현, 성 건용, Ungyong Mulli (응용물리), 9, 479 (1996).
7. "Thermal Fluctuation Effects in Grain Boundary Junction dc SQUIDs Operating at Liquid Nitrogen Temperature", B. Oh, S. H. Moon, Y. H. Choi, and H. T. Kim, J. Korean. Phys. Soc., 28, 645 (1995).
8. "고온초전도 박막을 이용한 자속변환기(Flux Transformer)의 제작 및 특성", 최 영환, 김 홍득, 허 필화, 문 승현, 오 병두, Ungyong Mulli (응용물리), 8, 543 (1995).

## (해외발표 / 초청강연 LIST)

- "Edge 구조를 갖는  $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7.8}/\text{NdBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7.8}/\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7.8}$  고온초전도 조셉슨 접합의 제작과 특성", 최영환, 박홍이, 문승현, 김홍득, 민병철, 오병두, 한국물리학회, 회보 Da-7(초), 조선대학교, 10월 25-26, (1996). (*invited*)
- "Edge junctions made of YBCO/Nd123/YBCO thin film structures", Y. H. Choi, H. L. Park, S. H. Moon, H. T. Kim, and B. Oh, Applied Superconductivity '96 conference, Pittsburgh, Aug. 25-30, (1996).

- "Superconducting  $\text{NdBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7.5}$  thin films prepared by the laser ablation method", S. H. Moon and B. Oh, Applied Superconductivity '96 conference, Pittsburgh, Aug. 25-30, (1996).
- "Use of a dielectric-loaded cylindrical cavity in measurements of the microwave surface resistances of high- $T_c$  superconducting thin films", S. Y. Lee, B. J. Soh, J. W. Ahn, J. Y. Cho, B. H. Park, C. S. Jung, V. B. Fedorov, A. G. Denisov, Y. H. Kim, T. S. Hahn, S. S. Choi, B. Oh, S. H. Moon, Applied Superconductivity '96 conference, Pittsburgh, Aug. 25-30, (1996).
- "MCG measurement using high  $T_c$  SQUID magnetometers", B. Oh, S. H. Moon, H. T. Kim, Y. H. Choi, B. C. Min, Y. H. Lee, H. C. Kwon, Y. K. Park, J. C. Park, Conference on High- $T_c$  Superconductivity '96, Yongpyung, Korea, Aug. 15-17 (1996). (*invited*)
- "High- $T_c$  SQUID magnetometer and magnetocardiogram measurement", 오병두, 한국물리학회 응집물질물리 심포지움, 전남대, 6월 25-26일, (1996). (*invited*)
- "High- $T_c$  SQUID magnetometer system and Magneto-Cardiogram measurement", B. Oh, S. H. Moon, H. T. Kim, Y. J. Jeon, Y. H. Choi, and B. C. Min, International Conference on Advanced Materials and Devices, Phoenix Park, Kangwon-Do, Korea, June 11-13, (1996). (*invited*)
- "고온초전도 dc SQUID magnetometer 제작 및 심자도 측정에의 응용", 문승현, 김홍득, 최영환, 전용준, 민병철, 오병두, 한국물리학회, 회보 Dc-4(초), 아주대학교, 4월 26-27, (1996). (*invited*)

- "High-Tc thin film SQUIDs and magnetic flux transformers", 오 병두, 고온초전도체 응용 및 물성연구 Workshop, 기초과학지원연구소, 9월 26-27일, (1995). (*invited*)