

비자기 차폐환경에서 미세자기신호 측정을 위한 고온 초전도 SQUID 자력계의 설계 및 제작

유권규[†] · 김인선 · 박용기

Designs and Fabrications of High-TC SQUID Magnetometer for Measuring a Weak Signal without Magnetic Shielding

K. K. Yu[†], I. S. Kim, and Y. K. Park

Abstract

We have designed and fabricated the YBCO single layer directly-coupled SQUID magnetometers for the purpose of magnetocardiography in a magnetically disturbed environment. The SQUID magnetometers were designed three different types of pickup coil such as solid type, PL type I and PL type II for further stable fluxed-locked-loop operation without magnetic shielding. Magnetometer was fabricated with a single layer YBCO thin film deposited on STO(100) bicrystal substrate with misorientation angle of 30°. We have achieved a magnetic field noise BN of 30 fT/Hz^{1/2} at 100 Hz, and less than 70 fT/Hz^{1/2} at 1 Hz. The PL type II SQUIDs have exhibited the most stable fluxed-locked-loop operation in a magnetically unshielded environment.

Key Words : YBCO thin film, SQUID magnetometer, magnetocardiography

1. 서 론

초전도 양자 간섭 소자(Superconducting QUantum Interference Device : SQUID)는 물질의 결함부분의 와전류에 의해 발생하는 미세자기 검출을 통한 비과과 검사^{1,2)} 및 사람의 생명 활동에 의해 발생하는 생체자기 신호 검출을 통한 의료 진단³⁻⁵⁾ 등의 여러 분야에서 계속적인 연구가 진행되어 왔다. 고감도 소자인 SQUID 자력계를 산업 전반에 활용하기 위해서는 50 μ T 이상의 높은 지자장 하에서 안정적인 동작과 성능의 재현성 및 신뢰성을 가져야 한다. 특히 생체자기 측정과 같은 의료진단을 위한 소자 개발의 경우, 소자 성능개선의 필요성은 더욱 강조된다. 현재 이러한 소자 성능 개선을 위한 연구가 높은 주변 자기잡음 환경에서 안정적으로 동작하는 SQUID 자력계의 설계 · 제작 방법⁶⁾, 낮은 잡음 특성을 가지는 측정 시스템 구축^{3,7)}

및 신호처리 분야⁸⁾에 집중되고 있다.

본 연구에서는 검출코일 형태와 검출코일과 접합간의 결합형태를 변화시켜 SQUID 자력계를 제작하고, 그 특성을 알아보았다. 높은 주변자기잡음 환경에서 매우 안정적인 fluxed-locked-loop(FLL)동작을 하는 최적화된 검출코일의 형태 및 결합형태를 설계할 수 있었고, 그 특성을 확인하였다.

2. 실험 방법

SQUID 자력계의 안정적인 FLL 동작을 위한 높은 변조 전압과 ICRN을 가지게 하는 결합각 30°인 SrTiO₃ 복결정 기판 위에 YBa₂Cu₃O₇ 단일층 박막을 증착하여 제작하였다. 직접 결합형 SQUID 자력계를 washer 인덕턴스(LP) 100 pH, 조셉슨 접합의 선폭 1.5 μ m, slit 4 μ m로 설계하였으며, 검출 코일은 선폭이 3 mm인 전형적인 solid type과 선폭 50 μ m인 parallel loop를 등간격 및 비등간격으로 배치한 parallel loop type I(PL type I) 및 parallel loop type II (PL type II) 형태로 배치하였다. 초전도 박막은 높은 자장 환경에서 자속

한국표준과학연구원(Korea Research Institute of Standards and Science, Daejeon, Korea)

[†]Corresponding author: ygg_91@hanmail.net

(Received : January 31, 2004. Accepted : February 21, 2004)

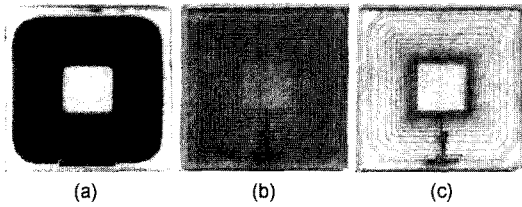


그림 1. 소자의 외형 사진; (a) solid type, (b) PL type I 및 (c) PL type II dc SQUID 자력계
 Fig. 1. Photograph of the devices; (a) solid type, (b) PL type I, and (c) PL type II dc SQUID magnetometers.

trap이 발생하기 쉬운데, 이러한 자속 trap은 SQUID의 저주파 잡음을 크게 증가시키게 된다. 자속 trap이 생기는 threshold field(B_T)는 $B_T = (\pi\Phi_0)/(4w^2)$ 로 주어지므로 검출코일의 선폭을 줄임으로써 자속 유입을 제한할 수 있다^[9]. 여기서 w 와 Φ_0 는 선폭과 자속 양자를 나타낸다. 따라서 선폭을 3 mm와 50 μm 로 설계할 경우 threshold field는 각각 18 nT와 0.65 μT 가 됨을 알 수 있다. 또한 얇은 선들은 복결정 경계면을 지나면서 자속 댐(flux dam) 역할을 함으로써 외부 자기 환경에 의한 자속 유입을 억제하게 된다^[10]. 이러한 flux dam은 순환전류를 제한하게 되며, 큰 순환 전류에 의한 1/f 잡음을 줄이게 된다. 그림 1은 설계·제작된 SQUID 자력계의 형상을 나타낸 것이다. 그림 1(a)는 전형적인 선폭 3 mm 검출코일을 가지는 solid type이고, 그림 1(b)는 선폭을 50 μm 로 하여 12개의 선을 3 mm의 공간에 등간격 병렬 배치한 형태(PL type I)이다. 그림 1(c)는 3 mm의 square washer에서 초전도 순환전류 밀도 분포가 유지되도록 선폭 50 μm 16선을 비등간격으로 병렬로 배치한 형태(PL type II)이다. 설계된 SQUID 소자 제작은 STO 기판에 Pulsed Laser Deposition(PLD) 법으로 160 nm 두께의 $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_7$ 박막을 증착하고, 표준 포토리소그라피와 Ar 이온 식각을 통하여 제작하였다. 제작과정 중에 발생하는 산소 결핍을 보충하고, 박막의 안정화를 위해 산소분위기에서 5시간 동안 열처리 하였다. 완성된 소자는 비자성의 박막형 저항 및 feedback coil이 형성된 PCB 위에 붙이고, wire bonding 한 후 아크릴 뚜껑으로 밀봉하였다. 제작된 SQUID 자력계는 자기차폐실(Magnetically Shielded Room : MSR) 및 일반적인 실험실에서 flux-locked-loop SQUID electronics (NKT model SE105C)를 사용하여, 소자의 변조 전압(ΔV), 임계전류(I_C), 정상저항(R_N) 및 잡음특성(B_N)을 측정하고, 미세 자기 신호를 측정함으로써 소자의 특성을 평가하였다.

표 1. 다양한 형태의 검출코일을 가진 SQUID 자력계의 특성

Table 1. Property of SQUID magnetometers with various pickup coil loop designs

SQUID type	I_C (μA)	R_N (Ω)	ΔV (μV)	B_Φ (nT/ Φ_0)	B_N (fT/Hz ^{1/2})
Solid type	30	8	40	5.1	35
PL type I	50	6.0	70		
PL type II	50	4	405.2	50	

3. 결과 및 토의

3.1. 소자의 특성

제작된 SQUID 자력계의 변조전압, 임계전류, 정상저항 및 잡음 특성을 자기 차폐실에서 측정하였다. Zero field cooling(ZFC)을 한 후, Helmholtz coil을 이용하여 외부에서 균일한 dc 자장을 변화시켜 solid, PL type I 및 PL type II의 외부 자기잡음 환경에서의 안정된 FLL 동작 성능 시험을 하였다. 표 1은 검출 코일의 형태에 따른 SQUID 자력계의 특성을 나타낸 것이다. 세가지 형태의 SQUID 자력계의 기본적인 특성은 결합각 30°인 STO(100) 기판이 전형적으로 가지는 200 μV 정도의 ICRN 값과 40~60 μV 정도의 변조전압 값을 나타내었다. SQUID 자력계의 자장 감도(B_Φ)는 solid type, PL type I 및 PL type II가 각각 5.1 nT/ Φ_0 , 6.0 nT/ Φ_0 , 5.2 nT/ Φ_0 로 나타났다. 자력계의 유효면적(A_{eff})은 $A_{eff} = \Phi_0/B_\Phi$ 를 이용하여 구한 결과 solid type과 PL type II는 각각 0.40 mm² 및 0.39 mm²으로 거의 비슷한 값을 가졌으며, PL type I 보다는 약 13% 증가된 값을 나타내었다. PL type II의 유효면적이 solid type의 유효면적과 거의 같은 값을 가짐으로 16개의 선을 multi loop으로 비등간격 병렬 배치함으로써 최적화된 설계가 이루어졌음을 알 수 있다.

SQUID 자력계의 백색잡음은 solid type, PL type I 및 PL type II가 각각 35 fT/Hz^{1/2}, 70 fT/Hz^{1/2}, 50 fT/Hz^{1/2}로 나타났다. 자장잡음(B_N)은 $B_N = \Phi_0/A_{eff}$ 로 표현됨으로 PL type I의 경우 유효면적(A_{eff})의 감소로 인해 자장잡음이 증가한 것으로 보인다. 그림 2는 ac 및 dc bias mode에 따른 SQUID 자력계의 잡음 특성을 나타낸 것이다. Dc bias mode인 경우 1 Hz에서의 자장잡음이 150~300 fT/Hz^{1/2}였으며, ac bias mode로 측정할 경우에는 70 fT/Hz^{1/2} 이하의 양호한 잡음 특성을 나타내었다. Solid type, PL type I 및 PL type II의 threshold magnetic field(BT)는 각각 6 μT , 12 μT , 20 μT 로 나타났다.

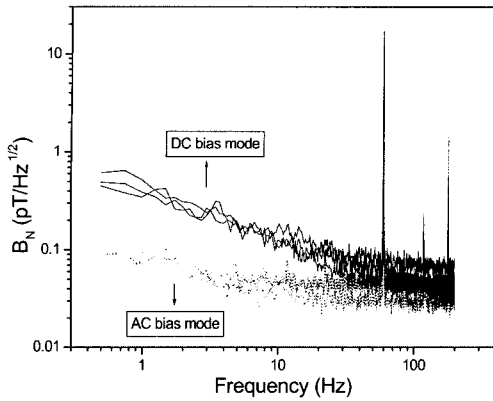


그림 2. 교류 및 직류 바이어스 인가방법에 따라 측정된 SQUID 자력계의 노이즈 스펙트럼
Fig. 2. Noise spectra of SQUID magnetometer measured by ac and dc bias methods.

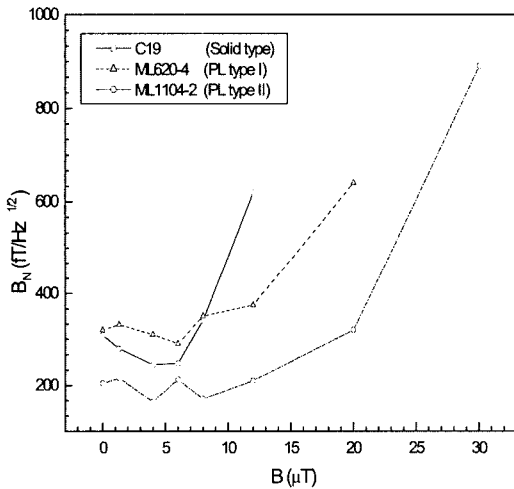


그림 3. 다양한 직류 자장에서 측정된 SQUID 자력계의 임계 자장
Fig. 3. Threshold magnetic field of SQUID magnetometers, measured at various dc magnetic fields.

외부 자기 잡음환경에서 안정적인 FLL 동작 특성을 알아보기 위해, 각각의 SQUID 자력계를 ZFC한 후, Helmholtz coil을 이용하여 공간적으로 균일한 자장을 변화시키며 소자의 동작 특성을 알아보았다. PL type II와 전형적인 형태인 solid type을 비교해 볼 때, PL type II가 약 2.5배 큰 외부 자장하에서 안정적인 FLL 동작을 하였다. 그림 3에서 균일한 dc 자장에 따른 FLL 동작 가능 영역을 나타내었다. 본 실험에서는 PL type II의 경우 30 μT 이상에서는 FLL 동작이 이루어 지지 않았으나, dynamic range가 큰 FLL electronics

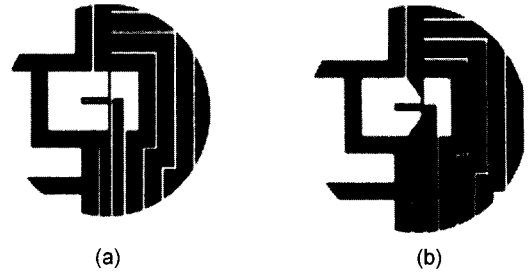


그림 4. 설계된 결합형태의 외형 사진; (a) 일반적인 결합 형태 및 (b) 변형된 결합형태
Fig. 4. Photograph of the coupling scheme designs; (a) conventional coupling scheme and (b) modified coupling scheme.

표 2. 변형된 결합형태를 가진 SQUID 자력계의 향상된 특성

Table 2. The improved property of SQUID magnetometers modified by the coupling scheme design

Coupling scheme	B_{Φ} (nT/ Φ_0)	A_{eff} (mm ²)	B_N (at 100 Hz) (fT/Hz ^{1/2})
Conventional type	5.4	0.39	50
Modified type	4.9	0.46	30

controller를 사용할 경우, 더 큰 외부 자장에도 안정적인 동작을 하였다. 그림 4는 PL type II SQUID 자력계의 검출코일과 접합간의 전형적인 결합형태 및 변형된 결합형태를 나타낸 것이다. 변형된 결합 형태의 경우 결합선의 parasitic inductance를 줄임으로써 소자의 성능을 향상시키고자 하였다. PL type II SQUID 자력계의 검출코일과 접합간의 결합형태에 따른 자력계의 특성을 표 2에 나타내었다. 변형된 결합형태를 가지는 SQUID 자력계가 전형적인 결합 형태보다 높은 유효면적 및 우수한 자장잡음 특성을 나타내었다.

4. 결 론

비자기 차폐 환경에서 장시간 안정적인 FLL 동작을 하며, 생체자기 신호와 같은 미세자기 신호측정을 위해 세가지 형태의 우수한 SQUID 자력계를 설계 · 제작하고, 그 특성을 알아보았다. 16개의 선을 비등간격으로 병렬 배치시킨 PL type II dc SQUID와 solid type을 비교했을 때, 유효면적의 손실이 거의 없었다. 100 Hz에서의 백색 잡음은 50 fT/Hz^{1/2} 이하였으며, 1 Hz에서의 자장잡음은 70 fT/Hz^{1/2}로 우수한 잡음 특성을 나타내었다. PL type II SQUID는 20 μT 이상의 높은 dc 자장하에서도 장시간 안정적인 FLL 동작을 하였다. 검

출코일과 조셉슨 접합간의 변형된 결합형태를 가지는 SQUID 자력계가 전형적인 결합형태보다 큰 유효면적 및 향상된 자장잡음 특성을 나타내었다.

본 실험에서 외부 자기 환경에서 안정적인 FLL 동작 특성을 가지는 PL type II dc SQUID 자력계와 현재 개발중인 전자식 미분계를 이용하고, 외부 환경잡음에 대한 보정기술을 조금 더 향상시킨다면 실시간 심자도(Magneto-cardiography : MCG) 측정도 가능할 것이라 판단된다.

참고 문헌

[1] H.J. Krause, G.I. Panaitov, and Yi Zhang, "Conductivity Tomography for Non-destructive Evaluation Using Pulsed Eddy Current with HTS SQUID Magnetometer", *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, vol. 13, pp. 215-218, 2003.

[2] M. Muck, C. Welzel, A. Farr, F. Schloz, and Waldemar Singer, "Nondestructive Testing of Niobium Sheets for Superconducting Resonators", *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, vol. 13, pp. 239-244, 2003.

[3] D. Koelle, R. Kleiner, F. Ludwig, E. Dantsker, and J. Clarke, "High Transition Temperature Superconducting Quantum Interference Devices", *Rev. Modern Phys.*, vol. 71, no. 3, pp. 631-678, 1999.

[4] H.E. Hong, S.Y. Hung, J.T. Jeng, S.H. Liao, S.C. Hsu, J.C. Hwang, and H.C. Yang, "Biomagnetic Measurements with HTS SQUID Magnetometers in Moderate Shielded Environments", *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, vol. 13, pp. 381-384, 2003.

[5] A.P. Rijpma, Y. Seppenwoolde, H.J.M. ter Brake, and H. Rogalla, "Application of SQUID Magnetometers in Fetal Magnetocardiography", *Inst. Phys. Conf. Ser.*, vol. 1, pp. 771-774, 1997.

[6] F. Ludwig, A.B.M. Jansman, D. Drung, M.O. Lindstroem, S. Bechstein, J. Beyrer, J. Flokstra, and T. Schurig, "Optimization of Direct-coupled High-TC SQUID Magnetometers for Operation in Magnetically Unshielded Environment", *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, vol. 11, pp. 1315-1318, 2001.

[7] S. Kuriki, H. Oyama, A. Hayashi, S. Hirano, and T. Wahio, "Development of a High-TC SQUID Based Magnetometer System for MCG Measurement", *IEICE Trans. Electron.*, vol. E85-C, no. 3, pp. 670-676, 2002.

[8] P.J.M., and R.H. Koch, "Magnetic Background Noise Cancellation in Real-world Environments", *Rev. Sci. Instrum.*, vol. 71, pp. 1529-1533, 2000.

[9] F. Ludwig, and D. Drung, "Low-frequency Noise of Improved Direct-coupled High-TC Superconducting Quantum Interference Device Magnetometers in AC and DC Magnetic Fields", *Appl. Phys. Lett.*, vol. 75, pp. 2821-2823, 1999.

[10] H.M. Cho, Y.T. Andresen, and J. Clarke, "Low Frequency Noise in High Transition Temperature Superconducting Multiplayer Magnetometers in Ambient Magnetic Fields", *Appl. Phys. Lett.*, vol. 79, pp. 2438-2440, 2001.

[11] M. Matsuda, T. Matsuura, K. Kato, H. Oyama, A. Hayashi, and S. Kuriki, "First Derivative High-TC SQUID Gradiometers with Narrow Structure from Single Layer YBCO Thin Film", *IEICE Trans. Electron.*, vol. E85-C, no. 3, pp. 677-680, 2002.



유 권 규

- 현재 : 한국 표준과학 연구원 생체자기 계측그룹 연구원
- 관심분야 : Fabrication of HTS thin film, HTS SQUID Application
- 연락처 : Tel. 042-868-5238
E-mail. ygg_91@hanmail.net



김 인 선

- 1993 : Materials Science, Tokyo Institute of Technology
- 현재 : 한국표준과학연구원 생체자기계측 그룹 책임연구원
- 관심분야 : Fabrication of HTc thin film, HTc SQUID Application, YBCO, SQUID 개발, 생체자기 측정시스템 개발, 심자도 측정
- 연락처 : Tel. 82-42-868-5291
E-mail. inskim@kriss.re.kr



박 용 기

- 최종학위 : 1985년 미국 Northwestern 대학 공학박사
- 현재 : 표준연구원 생체자기계측그룹 책임연구원
- 관심분야 : Bio-magnetic measurement, 의료 측정
- 연락처 : Tel. 042-868-5230
E-mail. super203@kriss.re.kr