

Fabrications and measurements of single layer YBCO dc-SQUID magnetometers designed with parallel-loop pickup coil

K. K. Yu*, I. S. Kim, Y. K. Park

Korea Research Institute of Standards and Science, Daejeon, Korea

Parallel-loop 검출코일을 가지는 단일층 YBCO dc-SQUID 자력계의 제작 및 특성 연구

유권규*, 김인선, 박용기

Abstract

We have designed and fabricated the single-layer high T_C SQUID magnetometer consisting of a directly coupled grain boundary junction SQUID with an inductance of 100 pH and 16 nested parallel pickup coils with the outermost dimension of 8.8 mm \times 8.8 mm. The magnetometer was formed from a YBCO thin film deposited on an STO(100) bicrystal substrate with a misorientation angle of 30°. The SQUID magnetometer was further improved by optimizing the multi-loop pickup coil design for use in unshielded environments. Typical characteristics of the dc SQUID magnetometer had a modulation voltage of 40 μ V and a white noise of 30 fT/Hz^{1/2}. The SQUID magnetometer exhibited a $1/f$ noise level at 10 Hz reduced by a factor of about 3 compared with that of the conventional solid type pickup coil magnetometers and a very stable flux locked loop operation in magnetically disturbed environments.

Keywords : SQUID, High- T_C , YBa₂Cu₃O₇ thin film, multi-loop pickup coil.

I. 서론

Superconducting QUantum Interference Devices (SQUIDs)는 인간이 개발한 가장 감도가 높은 센서로써 인체로부터 발생하는 극미세자기신호인 생체자기신호[1]-[3]를 측정을 할 수 있다. 심장신호 및 뇌신호와 같은 생체자기신호 측정이 가능해짐에 따라, 현재까지 진단이 어려웠던 질병의 진단을 가능하게 함으로써 차세대 첨단 의료장치로 활용할 수 있다. 최근에는 미국, 독일[4] 등에서 저온 초전도 양자간섭소자

를 이용하여 고가의 자기 차폐실이 필요 없는 다중채널 심자도(Magnetocardiography : MCG) 측정 장치가 상용화된 단계에 있다. 하지만 고온 초전도의 경우 여러 가지 장점을 가지고 있으나, 자기 잡음 환경에서의 안정적 동작, 신뢰성 및 성능이 다소 뒤지는 단점이 있다. 이러한 단점을 보완하기 위한 고온 초전도 SQUID 자력계 개발의 연구는 높은 주변 자기장 환경에서 안정적인 동작을 위해 최적화된 소자설계 및 제작방법[5], 측정 시스템 구축[1],[6] 및 신호처리분야[7],[8] 등에 집중되고 있다.

본 논문에서는 검출코일의 형태를 최적화하고, 검출코일과 SQUID washer 간의 결합형태를

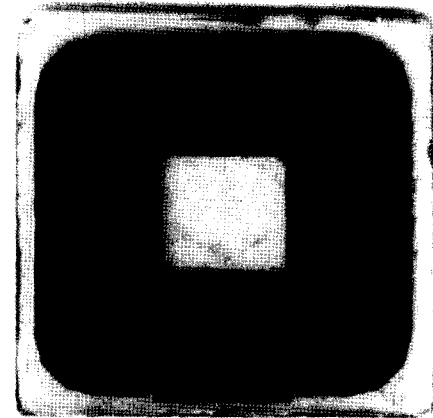
* Corresponding author. e-mail : inskim@kriss.re.kr

변화시킴으로써, 향상된 특성을 가지는 SQUID 자력계를 제작하고자 하였다. 제작된 SQUID 자력계는 자기 차폐실에서 설계에 따른 소자의 일반적인 특성을 측정하고, 자기잡음 환경에서의 미세자기 신호 측정을 통하여 소자의 특성을 평가하였다.

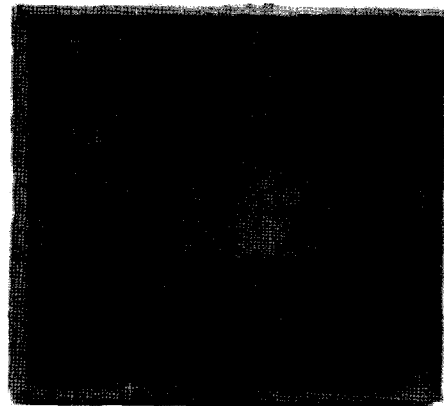
II. 실험방법

고감도 고온초전도 SQUID 자력계를 제작하기 위하여, 일반적인 자기잡음 환경에서 안정적인 Flux Locked Loop (FLL) 동작에 유리한 parallel loop (PL) 검출 코일형 자력계를 설계하고, 결합각 30°인 STO(100) 복결정 (bicrystal) 기판에 단일층 YBCO 박막을 성장하여 제작하였다. 직접결합형 SQUID 자력계를 washer inductance (L_{sh}) 100 pH, 검출코일은 선폭 50 μm 인 16개의 선을 등간격 및 비등간격으로 병렬 배치하였으며, 외부크기가 8.8 mm \times 8.8 mm가 되게 설계하였다. 조셉슨 접합의 선폭은 1.5 μm 이고, SQUID slit은 4 μm 로 하였다. 이렇게 설계된 SQUID에서 최적의 성능을 나타내기 위해서는 검출코일의 폭이 약 3 mm되는 구조가 되어야 한다[9]. 이러한 검출코일의 기하학적인 구성에서 자장환경에 의해 초전도 박막은 자속 trap이 발생하기 쉬운데, 이렇게 되면 SQUID에서 저주파 잡음이 크게 증가하게 된다. 검출코일을 병렬접속된 가는 multi-loop 구조로 하게 되면 자속 trap이 어렵게 된다. 자속 trap이 생기는 threshold field는 $B_T = (\pi\Phi_0)/(4w^2)$ 로 주어지므로 검출코일의 선폭을 줄임으로써 자속유입을 억제할 수 있다. 여기서 w 와 Φ_0 는 각각 초전도 선폭과 자속 양자를 나타낸다. 따라서 설계된 소자의 threshold magnetic field는 검출코일의 선폭이 50 μm 이므로 $B_T = 0.65 \mu\text{T}$ 가 됨을 알 수 있다. 한편 얇은 선들은 복결정 경계면을 지나면서 자속댐(flux dam)[10],[11] 역할을 함으로써 외부 환경 잡음에 의한 자속유입을 제한하게 된다.

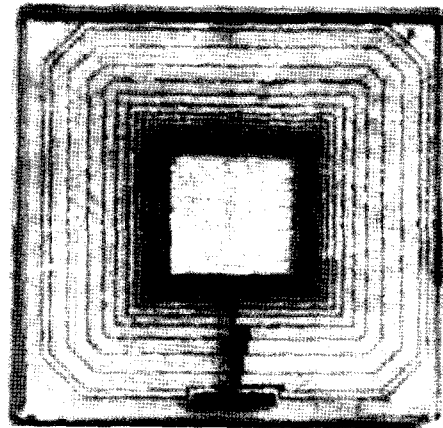
자속 댐은 검출 코일에서의 순환 전류를 제한하는데 이용되며, 이는 큰 순환 전류에서 기인한 1/f 잡음을 방지한다. 설계 제작한 SQUID 자력계의 형상을 Fig. 1에 나타내었다. Fig. 1(a)



(a)



(b)



(c)

Fig. 1. Photo of YBCO SQUIDs, (a) solid type, (b) PL type I, (c) PL type II.

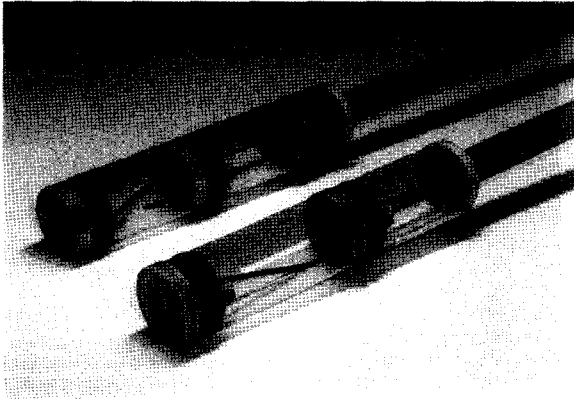


Fig. 2. Photo of SQUID magnetometers mounted on a cryo-insert probe.

의 solid type 검출코일은 선폭 3 mm로 형성되어 있으며, Fig. 1(b)는 선폭 50 μm 의 12개선이 폭 3 mm에 균등하게 병렬로 분포되어 있는 형태이다(PL type I). Fig. 1(c)는 선폭 3 mm의 square washer에서의 초전도 순환전류 밀도 분포[5]가 유지되도록 선폭 50 μm 의 16선이 병렬로 배치되어 있는 형태이다(PL type II). 설계된 SQUID 자력계는 STO기판에 PLD법으로 160 nm의 단일층 YBCO 박막을 증착하고, 표준적인 포토리소크라피와 Ar 이온 식각을 통하여 제작하였다. 제작 공정 중에 발생하는 산소 결핍을 보충하고, 박막의 안정화를 위해 500 $^{\circ}\text{C}$ 의 산소분위기에서 5 시간 동안 열처리하였다. 완성된 자력계는 저항히터 및 feedback coil이 형성된 PCB상에 붙이고, wire bonding 후 아크릴 뚜껑으로 밀봉하였다. Fig. 2는 아크릴 뚜껑으로 밀봉된 SQUID 자력계의 특성평가를 위해 cryo-insert에 부착된 모습을 나타낸 것이다.

제작된 SQUID 자력계는 자기 차폐실 및 일반적인 실험실에서 Flux-locked-loop(FLL) SQUID electronics (NKT model SE105C)를 사용하여, 소자의 특성과 미세 자기 신호를 측정하여 특성을 평가하였다.

III. 결과 및 논의

A. 소자의 특성

Fig. 3은 자력계의 자장잡음을 dc bias 법으로

측정하여 검출코일 형태에 따른 $1/f$ noise 특성을 나타낸 것이다. PL type의 검출코일을 가진 SQUID 자력계가 solid type 보다 10 Hz의 주파수에서 1/3정도의 낮은 잡음 특성을 나타내었다. 고성능 자기 차폐실에서 zero-field-cool 상태에서 측정이 이루어졌으므로 solid type의 넓은 검출코일에서의 flux trap에 의한 저주파 잡음이라기 보다는, $1/f$ 잡음의 상당부분이 복결정 기판에서 검출코일의 YBCO 박막에 형성되는 grain boundary에서 발생하는 것임을 알 수 있다. Table 1은 자기 차폐실에서 측정된 우수한 성능을 가진 SQUID 자력계의 검출코일 형태에 따른 전형적인 특성을 나타낸 것이다.

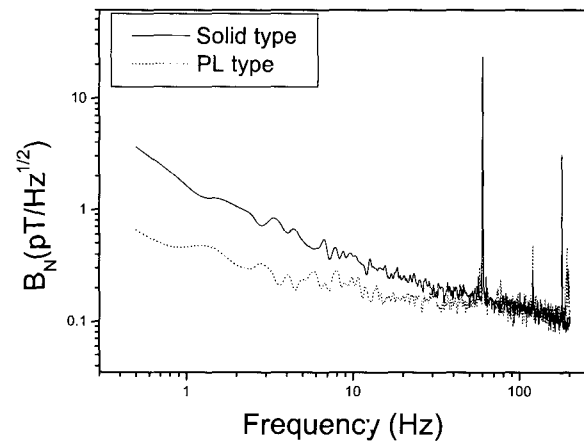


Fig. 3. Noise spectra of SQUID magnetometers with solid and parallel-loop type pickup coil, measured by dc bias method.

Table 1. 검출코일 형태에 따른 SQUID 자력계 특성

SQUID type	I_C (μA)	R_N (Ω)	ΔV (μV)	B (nT)	White noise ($\text{fT}/\text{Hz}^{1/2}$)
Solid type			40	5.1	35
		20	8		
PL type I			60	6.2	70
PL type II	50	4	40	5.2	50

자력계의 자장감도(B/Φ_0)를 직경 40cm의 Helmholtz coil을 이용하여 균일한 자장을 인가하면서 측정하였는데, 검출코일의 형태에 따라 solid type과 비교할 경우 PL type I은 약 20% 정도 높은 값을 보였고, PL type II는 solid 형과 비슷한 값을 나타내었다. $B_N/\Phi_0 = 1/A_{eff}$ 이므로 PL type II에서의 유효면적이 solid type의 유효면적과 거의 같은 값을 가지므로 이 구조의 설계에서 검출코일의 16개 multi-loop의 배치에 대한 최적화 설계가 이루어졌음을 알 수 있다. 200 Hz에서의 백색잡음은 solid, PL type I 및 PL type II에 대해 각각 35 fT/Hz^{1/2}, 70 fT/Hz^{1/2} 및 50 fT/Hz^{1/2}이었다. 자장잡음은 $B_N = \Phi_N/A_{eff}$ 로 표현되므로 얇은 선폭의 병렬형 검출코일을 가진 SQUID의 경우 검출코일의 유효면적이 감소함으로써 인해 PL type I의 자장잡음이 증가한 것으로 보인다. 여기서 Φ_N 은 자력계의 자속 잡음을 나타낸다. SQUID washer와 비등간격 검출코일의 결합형태에 따른 SQUID의 유효면적(A_{eff})은 전형적인 형태와 비교해볼 때 변형된 결합형태를 가지는 경우 약 18% 증가하였으며, 전형적인 solid type SQUID 자력계보다는 약 13% 증가하였다. PL type SQUID 자력계를 ac bias 법으로 측정할 경우 1 Hz에서의 잡음은 70 fT/Hz^{1/2}로 나타났다. Fig. 4에 대표적인 잡음특성의 결과를 나타내었다. 자기 차폐실에서 각각의 SQUID에 zero field cooling(ZFC)을 한 후, Helmholtz coil로 외부에서 인가한 직류자장을 변화시키면서 제어를 하여 10 Hz에서 측정된 자장잡음의 결과를 Fig. 5에 나타내었다. Fig. 5의 결과에서 zero field의 자장잡음이 수백 fT/Hz^{1/2}로 크게 증가되어 있는데, 이는 자기 차폐실 내부에 위치한 Helmholtz coil에 자장을 인가하기 위한 외부의 power supply 및 리드선을 통해 잡음이 차폐실 내부로 유입되었기 때문이다. 세 종류의 SQUID 자력계 모두 자장이 증가함에 따라 어느 임계자장 이상에서 자장 잡음이 급격히 증가하는 양상을 보였는데, solid type, parallel type I 및 II의 형태에 따라 각각 6 μ T, 12 μ T, 20 μ T의 값을 보였다. Fig. 5에서 각 데이터는 FLL 작동이 가능한 영역을 나타내는데 solid type의 경우 약 12 μ T 이상의 자장에서는 본 실험에 사용한 electronics로는 FLL 제어 가 이루어지지 않았다. 그러나 dynamic range가

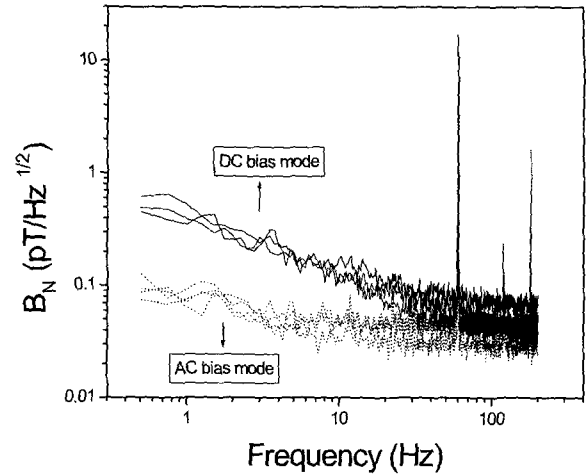


Fig. 4. Noise spectra of SQUID magnetometers, measured by dc and ac bias method.

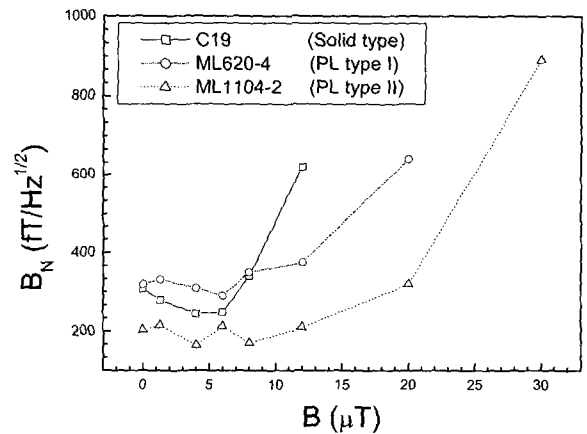


Fig. 5. Threshold magnetic fields of SQUID magnetometer measured at various dc magnetic fields.

큰 FLL SQUID electronics를 사용할 경우 지자장 및 수십 nT의 교류잡음 환경에서도 원활한 작동을 하였다[12]. 본 실험에서 parallel type II의 SQUID 자력계는 solid type보다 약 2.5배 큰 외부 자기장에서도 안정된 FLL 작동이 가능함을 알 수 있다. PL type 검출코일을 가진 SQUID 자력계가 높은 임계자장을 가지는 반면, FLL 작동이 안정화되기 위한 시간은 많이 소요되었다. 이는 자속 댐을 통한 자속 유입은 열적 거동으로 이루어지며, 이러한 자속 유입이 완료되기 위해서는 매우 긴 시간이 소요되는 것으로 해석되고 있다[13],[14].

IV. 결론

자기 차폐가 되지 않는 일반적인 환경에서 장시간 안정적인 동작을 하며, 생체자기 신호와 같은 미세한 자기 신호를 측정할 수 있는 우수한 성능의 고온 초전도 SQUID 자력계를 설계·제작하였다. 검출 코일을 선폭 50 μm 의 16개 스트립라인으로 구성한 SQUID 자력계는 solid type에 비교했을 때 유효면적의 손실이 없었으며 매우 높은 외부자기장에서도 안정적인 FLL 작동이 가능하였다. 이러한 YBCO SQUID 자력계의 백색잡음은 50 $\text{fT}/\text{Hz}^{1/2}$ 이하, 1 Hz에서의 자장잡음은 70 $\text{fT}/\text{Hz}^{1/2}$ 이하였다.

본 연구에서 외부 자기 환경에 안정적이고 우수한 특성을 나타내는 PL type II dc-SQUID와 현재 실험이 진행되고 있는 전자식 미분계를 이용하고, 신호처리 및 잡음 보정기술을 조금 더 향상시킨다면, 자기 차폐실이 없는 환경에서 실시간 심자도 측정이 가능할 것이라 판단된다.

References

- [1] D. Koelle, R. Kleiner, F. Ludwig, E. Dantsker, J. Clarke, "High transition temperature superconducting quantum interference devices", *Rev. modern phys.*, vol. 71, No. 3, pp 631-678, (1999).
- [2] H.E. Horng, S.Y. Hung, J.T. Jeng, S.H. Liao, S.C. Hsu, J. C. Hwang, H.C. Yang, "Biomagnetic measurements with HTS SQUID magnetometers in moderate shielded environments", *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, vol. 13, pp. 381-384, (2003).
- [3] A.P. Rijpma, Y. Seppenwoolde, H.J.M. ter Brake, H. Rogalla, "Application of SQUID magnetometers in fetal magnetocardiography", *Inst. Phys. Conf. Ser.*, Vol. 1, pp 771- 774, (1997).
- [4] <http://www.cardiomag.com>: <http://www.squid.de>: <http://cryoton.webzone.ru>.
- [5] F. Ludwig, A. B. M. Jansman, D. Drung, M. O. Lindstroem, S. Bechstein, J. Beyrer, J. Flokstra, T. Schurig, "Optimization of direct-coupled high- T_C SQUID magnetometers for operation in magnetically unshielded Environment", *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, vol. 11, pp. 1315-1318, (2001).
- [6] S. Kuriki, H. Oyama, A. Hayashi, S. Hirano, T. Wahio, "Development of a high- T_C SQUID based magnetometer system for MCG measurement", *IEICE Trans. Electron.*, vol. E85-C, NO. 3, pp. 670- 676, (2002).
- [7] K. Yokosawa, A. Tsukamoto, T. Miyashita, A. Kandori, D. Suzuki, K. Tsukada and K. Takagi, "A signal-to-noise chart for designing planar high- T_C SQUID gradiometers for magnetocardiographs", *Supercond. Sci. Technol.*, vol. 15, pp. 136-140, (2002).
- [8] P. J. M., R. H. Koch, "Magnetic background noise cancellation in real-world environments", *Rev. Sci. Instrum.*, vol. 71, pp. 1529-1533, (2000).
- [9] I. S. Kim, Y. K. Park, "심자도 측정용 고온 초전도 SQUID magnetometer의 제작", *센서학회지*, vol. 6 pp. 258-264, (1997).
- [10] H. M. Cho, Y. T. Andresen, J. Clarke, "Low frequency noise in high transition temperature superconducting multiplayer manetometers in ambient magnetic fields", *Appl. Phys. Lett.* Vol. 79, pp. 2438-2440, (2001).
- [11] M. Matsuda, T. Matsuura, K. Kato, H. Oyama, A. Hayashi, S. Kuriki, "First derivative high- T_C SQUID gradiometers with marrow structure from single layer YBCO thin film", *IEICE Trans. Electron.*, vol. E85-C, NO. 3, pp. 677- 680, (2002).
- [12] I. S. Kim, J. M. Kim, H. R. Lim, Y. K. Park, "Development of a high- T_C gradiometer system", *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, vol. 11, pp. 1399-1362, (2001).
- [13] K. E. Leslie, L. D. Masks, C. P. Foley, J. C. Macfarlane, K. H. Muller, G. J. Sloggett, "Noise performance of high- T_C rf SQUIDs in ambient magnetic fields with and without a flux dam", *Inst. Phys. Conf.* Vol. 30, pp. 715-718, (1997).
- [14] K. Enpuku, D. Tokimizu, D. Kuroda, S. Hijiya, "Thermally-activated flux entry into a pickup coil through a flux dam in high T_C SQUID magnetometers", *IEICE Trans. Electron.*, vol. E85-C, pp. 681-686, (2002).