

## INVITED PAPER

# Fabrication of HTS SQUID Sensors for the Application to a High S/N Ratio Magnetocardiograph System

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

*Korea Research Institute of Standards and Science, Daejeon, Korea*

## 저잡음 심자도측정시스템 개발을 위한 고온초전도 SQUID 센서의 제작

김인선\*, 유권규, 박용기

### Abstract

YBCO dc superconducting quantum interference device (SQUID) magnetometers based on bicrystal Josephson junctions on 10 mm × 10 mm SrTiO<sub>3</sub> substrates have been fabricated. The pickup coil of the device was designed to have 16 parallel loops with 50- $\mu$ m-wide lines. We could obtain optimised direct coupled YBCO SQUID magnetometer design with field sensitivity  $B_\Phi$  of 4.5 nT/ $\Phi_0$  and magnetic field noise  $B_N$  of about 22 fT/Hz<sup>1/2</sup> with an 1/f corner frequency of 2 Hz measured inside a magnetically shielded room. Preliminary results of magnetocardiograph measurement using the HTS SQUID magnetometers show signal to noise ratio of about 110, which is comparable to the quality of a commercial MCG system based on Nb-SQUIDs.

*Keywords* : SQUID, High-  $T_C$ , YBa<sub>2</sub>Cu<sub>3</sub>O<sub>7</sub> thin film, multi-loop pickup coil.

### I. 서론

초전도 박막소자의 응용 중에 대표적인 것으로 SQUID (Superconducting QUantum Interference Device)를 들 수 있다. SQUID는 현존하는 센서 중에서 가장 감도가 높은 자기센서인데 [1,2], 액체질소 온도에서 작동하는 고온초전도체 SQUID의 경우, 보다 높은 온도에서 작동할 수 있는 Tl<sub>2</sub>Ba<sub>2</sub>CaCu<sub>2</sub>O<sub>x</sub> SQUID 개발 [3] 등 다양한 고온초전도체 박막재료를 이용한 연구가 이루어 지고 있으나 안정성 등 성능면에서 YBa<sub>2</sub>Cu<sub>3</sub>O<sub>7</sub> (YBCO) SQUID가 가장 뛰어난

특성을 가지는 것으로 알려져 있다. 현재 YBCO SQUID의 자장분해능은 액체헬륨 온도에서 작동하는 금속초전도체 SQUID와 거의 비교할 만한 수준까지 이르고 있다 [4]. 최근에는 고감도 소자인 SQUID 자력계를 산업 전반에 활용할 수 있도록 50  $\mu$ T 이상의 높은 직류 지구자기장 또는 높은 주변 자기잡음 환경에서 안정적으로 동작하는 SQUID 자력계의 설계·제작방법 [5,6], 낮은 잡음 특성을 가지는 측정 시스템 구축 [7,8] 및 신호처리분야[9, 10]에 많은 연구가 집중되고 있다.

본 연구에서는 고성능 YBCO SQUID 자력계를 제작하고 특성을 평가하였다. 제작된 SQUID 자력계는 flux-locked-loop 회로로 제어

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

하며 미세자기 신호 측정을 하였으며 심자도 측정시스템에 응용하기 위한 소자의 특성을 평가하였다.

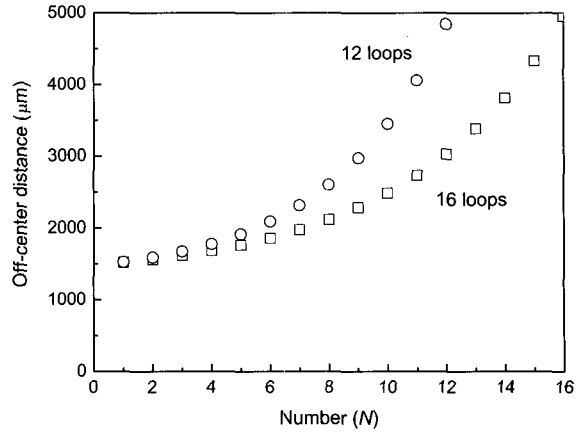
## II. 실험 방법

### 직접결합형 SQUID의 설계

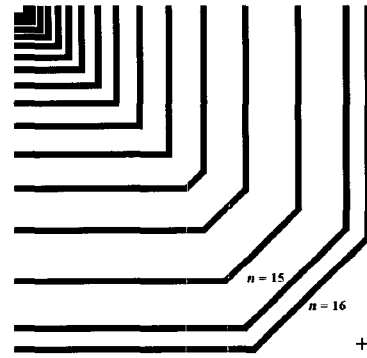
고감도 고온초전도 SQUID 자력계를 제작하기 위하여, 높은 변조 전압과  $I_C R_N$ 을 가지게 하는 결합각  $30^\circ$ 인  $\text{SrTiO}_3$  복결정 기판 [11]을 사용하였으며  $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_7$  단일층 박막을 성장하여 제작하였다. 본 연구에서 직접 결합형 SQUID 자력계는 washer 인덕턴스 ( $L_p$ ) 100 pH, 조셉슨 접합의 선폭  $1.5 \mu\text{m}$ , SQUID slit은  $4 \mu\text{m}$ 로 설계하였다. 기판은 크기  $10 \text{ mm} \times 10 \text{ mm}$ 를 사용하였으며 이때 박막 패턴에 사용 가능한 크기는  $8.8 \text{ mm} \times 8.8 \text{ mm}$ 가 된다, 이것은 검출코일의 최대 크기가 된다. 이렇게 설계된 SQUID에서 최적의 성능을 나타내기 위해서는 검출코일의 폭이 약  $2.9 \text{ mm}$ 되는 구조가 되어야 한다 [12]. 검출코일을 폭이 가는 여러 개의 루프가 병렬 접속된 다중 루프 (multi-loop) 구조로 하게 되면 자속 trap이 어렵게 되어 소자를 냉각할 때 또는 사용상 강한 자장에 노출 되었을 때 저 주파수 자기잡음, 즉  $1/f$  잡음의 증가를 억제하여, 안정적인 동작이 가능하다 [5,13]. 이러한 다중 루프 구조의 검출코일에서는 초전도 전류의 분포를 계산하여 유효 면적의 손실 없이 최적화되도록 각 루프의 분포 즉 간격을 결정한다. 그러나 이 과정에는 복잡한 수식 전개와 함께 엄청난 계산 량을 필요로 하므로 [5] FEM과 같은 전용 프로그램을 필요로 한다. 본 연구에서는 다중 루프의 간격 결정을 위하여 다음과 같은 간단한 실험식을 구하여 이용하였다. 즉 기판 중심에서  $n$ 번째 루프까지의 거리는 다음과 같다.

$$d_n = 4 \times w \times e^{(n-1/2)/p-1} + d_0 \quad (1)$$

여기서  $w$ 는 루프의 선폭,  $d_0$ 는 기판 중심에서 검출코일 안쪽까지의 거리,  $p$ 는 루프의 총 개수  $N$ 을 3으로 나눈 값 즉  $p = N/3$ 이다. 검출 코일의 외부 크기는  $10 \text{ mm}$  크기의 기판에서 활용 가능한 최대 크기 즉  $8.8 \text{ mm} \times 8.8 \text{ mm}$ 가 되



(a)



(b)

Fig. 1. Design of multi-loop pickup coil for the YBCO SQUID magnetometer. (a) simulation of 12 and 16 parallel loops on  $10 \text{ mm} \times 10 \text{ mm}$  substrate size, and (b) details of pickup coil with  $50\text{-}\mu\text{m}$ -wide 16 parallel-loops.

록 하였으며, 선폭  $50 \mu\text{m}$ 인 12개 및 16개의 루프를 병렬 연결하는 구조에 대해 계산한 결과를 Fig. 1(a)에 나타내었다. 본 연구에서는 16개 루프로 구성된 검출코일을 설계하였다. 16번째 루프의 경우  $d_{16} = 4.96 \text{ mm}$ 의 계산값을 나타내지만 박막패턴이 가능한 영역의 크기에 맞추어  $d_{16}$  값을 약  $4.4 \text{ mm}$ 로 조정하였다. 이렇게 설계한 검출코일의 구조에 대해 모서리 부분을 확대하여 Fig. 1(b)에 나타내었다.

### SQUID의 제작 및 특성 평가

STO기판에 펄스레이저 증착법으로  $160 \text{ nm}$ 의 단일층 YBCO 박막을 증착하고, 표준적인 포토

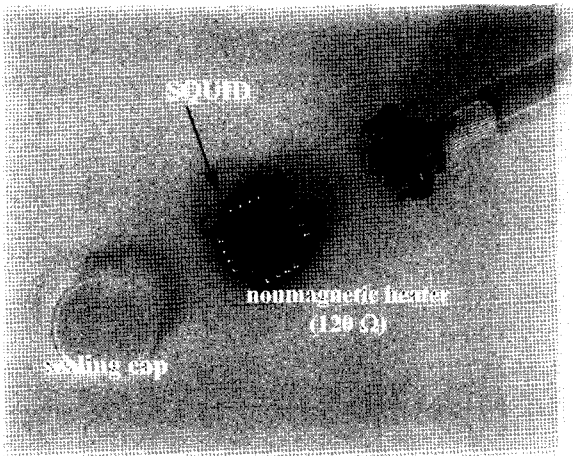


Fig. 2. Photograph of SQUID carrier components of the insert.

리소그래피와 Ar 이온 식각을 하는 공정으로 설계된 SQUID 자력계를 제작하였다. 제작 공정 중에 발생하는 산소 결핍을 보충하고, 박막의 안정화를 위해 500 °C의 산소분위기에서 5 시간 동안 열처리하였다. 완성된 자력계는 저항히터 및 feedback coil이 형성된 PCB상에 붙이고, wire bonding 후 아크릴 뚜껑으로 밀봉하였다. Fig. 2에 아크릴 뚜껑으로 밀봉하여 cryo-insert에 부착하는 SQUID carrier의 모습을 사진으로 나타내었다. 제작된 SQUID 자력계는 자기 차폐실 및 일반적인 실험실에서 flux-locked-loop (FLL) SQUID electronics (Magnicon SEL-CS-1)를 사용하여 소자의 자기잡음 특성과 미세 자기 신호를 측정하여 특성을 평가하였다.

### III. 결과 및 논의

#### 소자의 특성

제작된 직접결합형 YBCO SQUID 자력계의 변조전압, 임계전류, 정상저항 및 잡음 특성을 자기 차폐실에서 측정하였다. 본 연구에서 제작한 소자는 결합각 30°인 STO(100) 기판에 제작한 YBCO SQUID가 전형적으로 가지는 [11] 200  $\mu V$  정도의  $I_c R_N$  값과 40-60  $\mu V$  정도의 변조전압 값을 나타내었다. 자력계의 자장감도 ( $B/\Phi_0$ )는 직경 40 cm의 Helmholtz coil을 이용하여 균일한 자장을 인가하면서 측정하였는데,

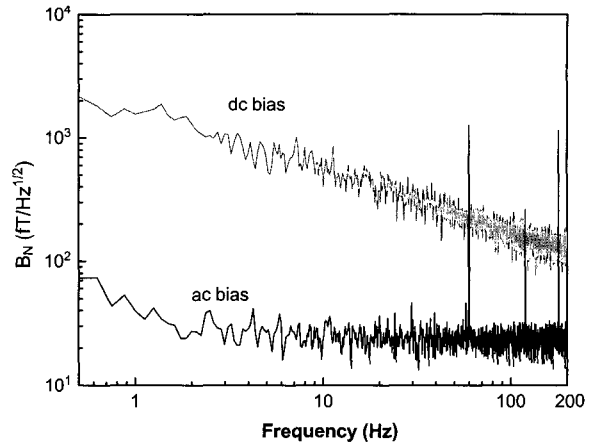


Fig. 3. Magnetic field noise spectra of the YBCO direct coupled SQUID magnetometer with 16 parallel loop pickup coils. Measurements were performed in a magnetically shielded room.

4.9 nT/ $\Phi_0$ 로 나타났다. 자력계의 유효면적 ( $A_{eff}$ )은  $A_{eff} = \Phi_0/B_{\Phi}$ 를 이용하여 구한 결과 0.39 mm<sup>2</sup>이었다. 이전의 연구에서 [13,14] 이루어진 solid-type 검출코일의 자장감도 및 유효면적의 측정값은 각각 5.1 nT/ $\Phi_0$  및 0.40 mm<sup>2</sup>였는데, 이들과 비교하면 다중 루프를 병렬 연결한 검출코일의 SQUID 자력계는 유효면적의 손실이 거의 없이 16개로 구성된 루프 배열의 최적화가 매우 잘 이루어졌음을 알 수 있다. 즉 본 연구에서 다중 루프 배열의 계산에 사용한 식 (1)이 매우 유효함을 알 수 있다.

자기차폐실에서 측정된 YBCO SQUID 자력계의 자장 잡음 스펙트럼을 Fig. 3에 나타내었다. Ac-bias 방법으로 측정된 결과는 수 Hz 이상의 주파수에서 매우 평탄한 잡음 특성을 나타내었으며, 200 Hz에서 약 22 fT/Hz<sup>1/2</sup>의 자장잡음을 나타내었다. 1 Hz에서의 자장 잡음은 35 fT/Hz<sup>1/2</sup>였으며 1/f 코너 주파수는 약 2 Hz임을 알 수 있다. 액체헬륨 온도에서 작동하는 Nb SQUID 자력계의 경우 통상 수 fT/Hz<sup>1/2</sup>의 자장잡음 값을 가지는데, 이와 비교해 보면 액체질소 온도에서 작동하는 본 연구에서의 YBCO SQUID 자력계는 매우 뛰어난 자장 분해능 특성을 가짐을 알 수 있다. PTB의 연구그룹이 20 fT/Hz<sup>1/2</sup>정도 수준의 성능을 보고한 [5,7] 이후 현재까지 크게 향상된 결과 보고는 없으며, 따라서 본 연구에서 얻은 잡음의 크기는 10 mm

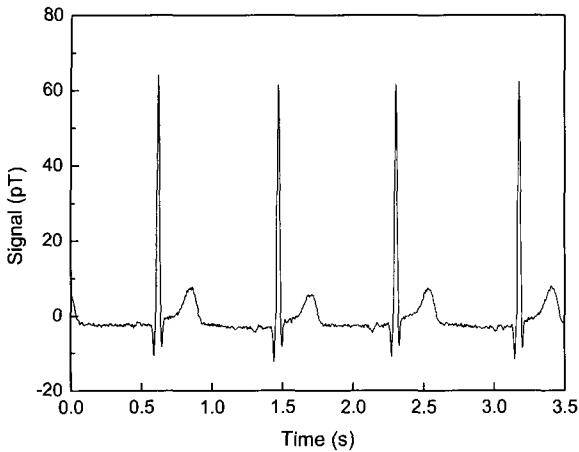


Fig. 4. Real time trace of a magnetocardiogram measured with the YBCO magnetometer in the magnetic-shield-room with power line filters.

기관을 사용한 YBCO SQUID 센서의 한계 수준으로 생각된다.

#### 심자도 신호측정

직접결합형 SQUID 자력계의 성능을 조사하기 위하여 건강한 사람을 대상으로 심장에서 발생하는 자기신호 즉 심자도를 측정하였다. 심자도 차트의 R-peak가 가장 크게 측정되는 곳에서 가슴 표면에 수직인 방향의 자기신호를 측정하였는데, 이때 듀아 밀바닥에 위치한 자력계는 가슴 표면으로부터 약 13 mm의 거리에 놓여졌다. 실시간으로 측정한 결과를 Fig. 4에 나타내었다. R-peak의 크기는 약 60 pT였으며, 측정 신호에서의 peak-to-peak 잡음은 1.1 pT였다. 따라서 심자도 측정 결과에서의 신호 대 잡음비 (SNR)는 약 110의 값을 나타내었다. 액체 헬륨에서 작동하는 Nb SQUID gradiometer [15] 및 Nb SQUID 심자도장치의 고성능 상용품의 경우 SNR이 130 정도임을 감안하면 본 연구에서 개발한 YBCO SQUID의 특성이 매우 우수함을 알 수 있다. 통상 심자도 파형에서 R-peak의 크기는 약 100 pT이므로 고성능 듀아를 이용하여 센서의 거리를 가깝게 하여 신호의 크기를 증가시키면 SNR이 더욱 향상될 것으로 기대된다.

#### IV. 결론

자기잡음 유입 환경에서 안정적인 동작을 하며, 생체자기 신호와 같은 미세한 자기 신호를 측정할 수 있는 고온 초전도 SQUID 자력계를 설계·제작하였다. 검출 코일을 선폭 50  $\mu\text{m}$ 의 16개 다중 루프가 병렬 연결된 구조로 제작하였는데, 다중 루프의 배열에 유용한 실험식을 개발하였다. 이것을 이용하여 16개 다중 루프 형 검출코일 SQUID 자력계를 제작하고 특성을 평가한 결과 solid type과 비교했을 때 유효면적 및 자장감도의 손실이 없이 배열의 최적화가 이루어졌음을 알 수 있었다. 이렇게 제작된 YBCO SQUID 자력계의 200 Hz의 자장 잡음은  $22 \text{ fT/Hz}^{1/2}$ 였으며  $1/f$  corner-frequency는 약 2 Hz로 나타났다. 1 Hz에서의 자장 잡음은  $35 \text{ fT/Hz}^{1/2}$  정도로 매우 우수한 자장분해능 특성을 나타내었다. 심자도장치에의 응용성을 평가하기 위하여 심장의 자기신호를 측정된 결과 매우 깨끗한 심자도 파형을 얻을 수 있었으며 60 pT의 R-peak에 대해 약 110정도의 신호 대 잡음비를 얻을 수 있었다.

#### 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] J. Gallop, "SQUIDS: some limits to measurement", *Supercond. Sci. Technol.*, vol. 16, pp. 1575-1582 (2003).
- [3] J. Wang, B. Han, F. Xu, G. Chen, Q. Yang, R. Lu, M. He and S. Yan, "Epitaxial  $\text{Tl}_2\text{Ba}_2\text{CaCu}_2\text{O}_x$  thin film dc SQUIDS operating at 99 K", *Supercond. Sci. Technol.*, vol. 17, pp. 1165-1168, (2004).
- [4] F. Ludwig and D. Drung, "Low frequency noise of improved direct-coupled high- $T_C$  SQUID magnetometers in ac and dc magnetic fields", *Appl. Phys. Lett.*, vol. 75, pp. 2821-2823, (1999).
- [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] H. M. Cho, Y. T. Andresen, 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).
- [7] D. Drung, "High- $T_c$  and low- $T_c$  dc SQUID electronics", *Supercond. Sci. Technol.*, vol. 16, pp. 1320-1336, (2003).: D. Drung and T. Schurig, "High- $T_c$  SQUID sensors with integrated earth field compensation," *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, vol. 13, pp. 751-754, (2003).
- [8] 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).
- [9] P. J. M., R. H. Koch, "Magnetic background noise cancellation in real-world environments", *Rev. Sci. Instrum.*, vol. 71, pp. 1529-1533, (2000).
- [10] 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).
- [11] T. Monotani, S. Kawakami, T. Kiss, Y. Kuroki, and K. Enpuku, "High performance dc superconducting quantum interference device utilizing a bicrystal junction with a 30° misorientation angle", *Jpn. Appl. Phys.*, vol. 36, pp. L1092-L1095 (1997).
- [12] I. S. Kim, Y. K. Park, "심자도 측정용 고온 초전도 SQUID magnetometer 의 제작", *한국센서학회지*, vol. 6 pp. 258-264, (1997).
- [13] K. K. Yu, I. S. Kim and Y. K. Park, "Fabrications and measurements of single layer YBCO dc-SQUID magnetometers designed with parallel-loop pickup coils", *Progress in superconductivity*, vol.5, pp.45-49 (2003).
- [14] K. K. Yu, I. S. Kim, Y. K. Park, "Designs and Fabrications of high- $T_c$  SQUID magnetometer for measuring a weak signal without magnetic shielding", *한국센서학회지*, vol.13, pp.110-113(2004).
- [15] Y. H. Lee, private communications.