

Development of a HTS SQUID gradiometer system for the measurement of very weak magnetic field in an unshielded environment

비자기차폐환경에서 미세 자기장 측정을 위한 고온초전도 gradiometer 시스템의 개발

In-Seon Kim, Jin-Mok Kim,
and Yong Ki Park

김인선, 김진목, 박용기

*Korea Research Institute of Standards and Science,
P. O. Box 102, YuSong, TaeJen 305-600, Korea.*

대전광역시 유성우체국 사서함 102, 한국표준과학연구원, 초전도그룹.

We have developed a YBCO SQUID gradiometer system for the measurement of a very weak magnetic field in an unshielded environment. The system consists of a SQUID gradiometer sensor, low noise pre-amp, and FLL(flux-locked loop) control electronics. The gradiometer sensors have been fabricated on STO bicrystal substrates, and exhibit a magnetic noise of $300 \text{ fT}/\sqrt{\text{Hz/cm}}$ at 100 Hz. The overall magnetic field noise of the SQUID gradiometer system was about $10 \text{ pT}/\sqrt{\text{Hz/cm}}$ at 10 Hz without any magnetic shield. The system demonstrated a high stability for a long time, and real-time measurement resolution $\leq 100 \text{ pT/cm}$ in the unshielded environments.

1. 서론

초전도 박막소자의 응용 중에 대표적인 것으로 SQUID (Superconducting QUantum Interference Device)를 들 수 있는데 고온초전도체가 발견된 이후 많은 연구 그룹들이 고온초전도 SQUID를 개발하기 위한 연구를 수행해 오고 있다. SQUID magnetometer는 현존하는 센서 중에서 가장 감도가 높은 자기센서인데 지난 수년간 액체질소 온도에서 작동하는 고온초전도체 YBa₂Cu₃O₇(YBCO)로 만든 SQUID 제작 기술이 급속도로 발달하여 왔다. 성능 면에서 현재에는 액체헬륨온도에서 작동하는 금속초전도체 SQUID와 거의 비교할 만한 수준까지 접

근하여 생체자기 측정 등에 충분히 활용할 수 있게 되었다[1].

최근에는 비자기차폐 환경에서 응용할 수 있는 SQUID Gradiometer 기술개발이 활발히 진행되고 있다. 특히 NDE(Non-Destructive Evaluation)에의 응용을 위한 연구가 실용화 수준에 까지 이르고 있으며[2-3], 일반 환경에서 사용하기 위한 연구로서는 자장환경에서 사용할 수 있는 SQUID magnetometer[4], 그리고 2차미분 Gradiometer의 개발 연구가 매우 활발히 진행되고 있다[5,6]. 후자의 경우 일반 환경에서 수십 pT 크기의 심자도까지 측정할 수 있는 결과를 나타내고 있다[6,7].

본 연구에서는 비 자기차폐환경에서 미세자기신호를 측정할 수 있도록 개발한 SQUID gradiometer 자기센서 및 시스템의 특성에 대해 논의한다..

2. 실험방법

Fig. 1 에 나타난 것과 같이 bicrystal line 에서 grain boundary 조셉슨 접합이 형성되는 직접결합형 SQUID magnetometer 를 제작하였는데, bicrystal 은 접합각도가 30° 인 STO(100) bicrystal 기판을 사용하였다. 기판은 클리닝 후 은접착제로 히터에 붙여 펄스 레이저 증착법 (pulsed laser deposition)으로 YBCO 박막을 증착하였다. 엑시머 레이저는 파장 248 nm 인 KrF.

레이저를 사용하였는데 렌즈로 적절히 집속시켜 에너지 밀도를 1.3 J/cm^2 로 하였으며 진공챔버는 10-5 Torr 이하까지 터보펌프로 공기를 뽑은 후 고순도 산소가스를 유입하여 산소분압을 400 mTorr 로 유지하였으며, 이때 기판온도는 780°C 로 유지하였다. 이러한 조건에서 약 3 분간 증착하였을 때 두께 약 1200 Å 의 YBCO 박막을 얻을 수 있었다. YBCO 박막은 photolithography 및 Ar ion milling 을 거쳐 Fig. 1 과 같은 패턴을 만들었다. 최종적으로 전극부분은 금박막을 고주파 스퍼터링으로 증착하고 산소열처리를 하였으며 측정용 리드선으로는 전극부분에 Al 선을 초음파로 본딩하여 사용하였다.

SQUID 센서와 약 30 cm 의 거리를 두고 프루브 상단에 위치한 알미늄박스에 증폭도 200 배

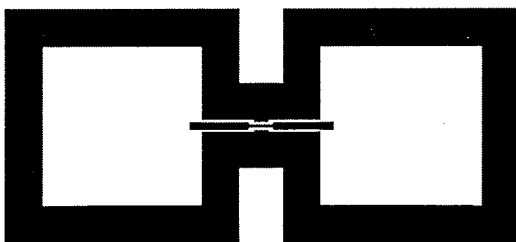


Fig. 1. Schematics of YBCO single layer Gradiometer.

의 head-amp 를 장착하였다. 이 head-amp 를 통해 SQUID 를 제어하는 FLL 전자회로는 60 Hz 전원잡음에 의한 영향을 없애기 위해 리튬이온 2 차전지로서 작동시켰다. Fig. 2 에 head-amp 및 FLL 제어회로의 회로도도를 나타내었다. 전체 전자회로는 SMD 소자로써 제작 되었다. 제작된 pre-amp 는 10 Hz 에서 $1 \text{ nV}/\sqrt{\text{Hz}}$ 이하의 저잡음 특성을 나타 내었다.

3. 결과 및 논의

펄스 레이저 증착법으로 STO 기판 위에 증착된 YBCO 박막의 임계온도와 임계전류밀도는 각각 89 K, $3 \times 10^6 \text{ A/cm}^2$ (77 K) 이상이었다. 이러한 기본적인 제작조건을 바탕으로 1 차미분형 SQUID gradiometer 를 제작하였다. 제작된 gradiometer 는 SQUID washer 에 두 개의 pick-up loop 이 직접 연결된 형태이며, SQUID inductance 는 약 70 pH 로 설계하였다. 이 구조를 Fig. 1 에 나타내었는데, YBCO 박막 단일 층으로 제작되며, 두 개의 pick-up loop 을 지나는 자장은 각각 supercurrent 를 생성시키는데, 이것의 방향은 서로 반대 방향으로 결합되는 구조이므로 각각의 loop 을 지나는 자장의 차이가 SQUID 에 의해 전압으로 변환된다. $B \sim 1/r^2$ 이므로 센서로부터 떨어진 곳에서 발생하는 자기잡음 등은 상쇄되는 효과가 있으므로 자기잡음이 심한 환경에서도 미세자기장을 측정할 수 있는 것이다.

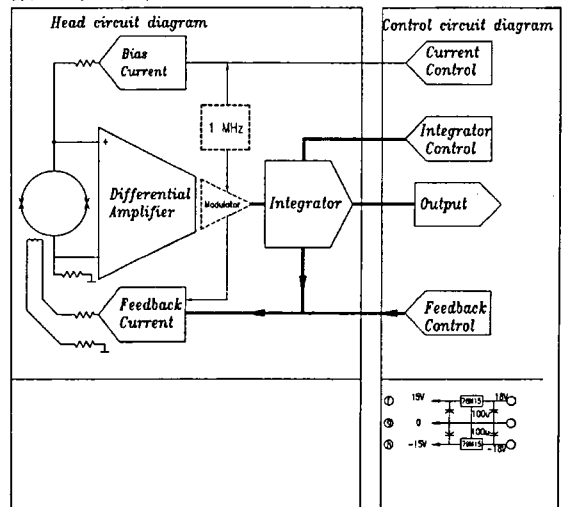


Fig. 2. Schematic diagram of electronic circuit of head-amp and controller

Sample #	I_c μA	R_N Ω	$I_c R_N$ μV	ΔV_{max} μV
# a	25	7.1	178	10
# b	32	5.2	168	10
# c	36	5.2	188	14

Table 1. Characteristics of YBCO single layer SQUID gradiometers.

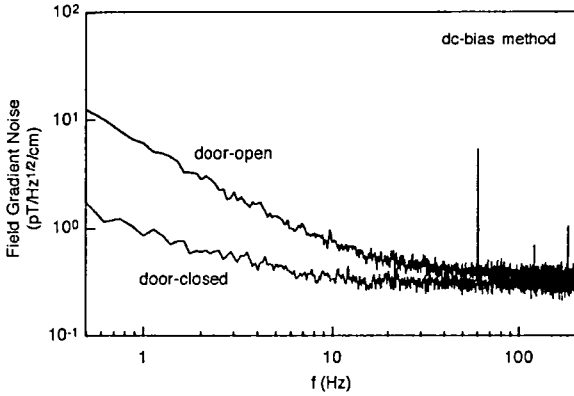


Fig. 3. Noise spectra of the gradiometers.

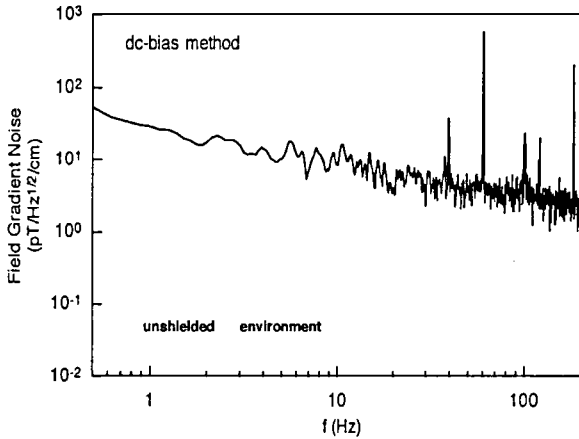


Fig. 4. Noise spectra of the unshielded gradiometer

Table 1.에 제작된 gradiometer 센서의 특성을 나타내었다. R_N 값은 5 Ω 이상으로 결정각 30도의 복결정 기판에서의 전형적인 특징을 나타내었다. Fig. 3에 자기차폐실에서 측정된 자기잡음을 나타내었다. 측정에서는 SQUID controller (NKT model)을 사용하였으며, 100 Hz에서 약 300 fT/ $\sqrt{\text{Hz/cm}}$ 의 gradient 자장 분해

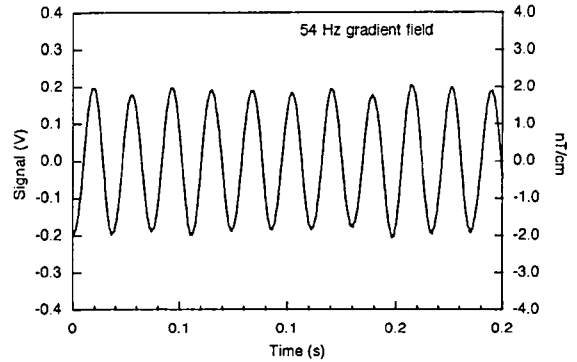


Fig. 5. Voltage output of the SQUID gradiometer system with the applied gradient field induced from a current flowing long line.

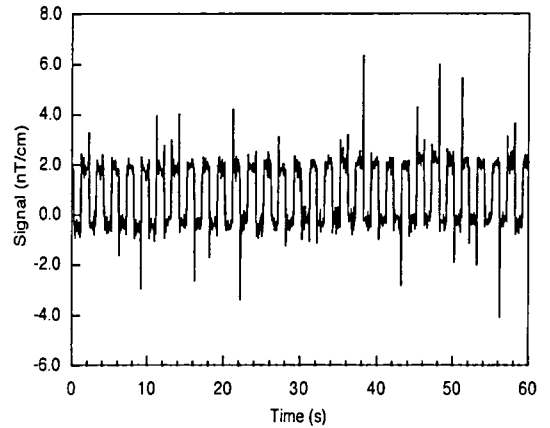


Fig. 6. Trace of the magnetic field signal from the movement of a wrist watch.

능을 나타내었다. 자기차폐실의 문을 열어둔 상태에서 측정된 경우 1 Hz에서 8 pT/ $\sqrt{\text{Hz/cm}}$ 의 자장분해능을 나타내었다. Fig. 4에 자기차폐실이 아닌 일반 실험실에서 측정된 자기잡음을 나타내었다. 이 측정에서는 본 연구에서 개발한 SQUID controller를 이용하였다. Dc-bias 법을 이용하였을 때, 100 Hz에서 약 10 pT/ $\sqrt{\text{Hz/cm}}$ 의 gradient 자장 분해능을 나타내었다.

Fig. 5에 매우 긴 직선 도선에 전류를 흘렸을 때 발생하는 자장을 gradiometer system으로 측정된 결과를 나타내었다. 이때 계산값으로부터 구한 gradient field에 의해 SQUID gradiometer의 전압/자장의 변환값을 구하였는데, 1 V당 10 nT/cm이었다. Noise spectra와는 별도로 이 측정 결과로부터 100 pT/cm 정도의 신호는 충분히

판별해 낼 수 있었다.

Fig. 6에 전자 손목시계의 movement에서 발생하는 자기신호를 일반 환경에서 측정한 결과를 나타내었다. 센서와 시계는 약 8 cm 거리로 떨어져 있는데, 소형 모터에서 발생하는 1 초 주기의 펄스 자장이 2.5 nT/cm의 펄스로 측정되고 있음을 알 수 있다.

4. 결 론

고온초전도 SQUID gradiometer 시스템을 개발하였다. 개발된 시스템은 SQUID 자기센서, 저잡음 pre-amp, FLL 제어회로 및 PC 자동화 측정장치로 구성되어 있다. 센서는 YBCO 단일 층 박막을 이용한 SQUID gradiometer를 제작하였는데, 자기차폐실에서 측정한 자기분해능은 100 Hz에서 약 300 fT/ $\sqrt{\text{Hz/cm}}$ 의 특성을 나타내었다. SQUID 제어회로는 SMD 소자를 이용하여 제작하였는데, pre-amp는 10 Hz에서 nT/ $\sqrt{\text{Hz}}$ 이하의 저잡음 특성을 나타내었다.

완성된 SQUID gradiometer 시스템은 비자기 차폐환경에서 FLL이 매우 안정된 동작을 하였으며, 10 Hz에서의 자장 분해능은 약 10 pT/ $\sqrt{\text{Hz/cm}}$ 이었다. 이 장치는 일반환경에서 100 pT/cm의 신호는 충분히 판별해 낼 수 있음을 나타내었다.

감사의 글

본 연구는 국방부 민군겸용기술개발사업의 일환으로 수행되었습니다.

참고문헌

- [1] J. Beyer, D. Drung, F. Ludwig, T. Minotani, and F. Enpuku, *Jpn. J. Appl. Phys.* 72, 203 (1998)
- [2] A. Eulenburg, E. J. Romans, A. J. Millar, G. B. Donaldson, and C. M. Pegrum, *Appl. Phys. Lett.* 75, 2301 (1999).
- [3] M. Kreulzbruck, A. Thesis, M. Mueck, and C. Heiden, *Rev. of Sci. Instruments* 70, 3714 (1999).
- [4] F. Ludwig and D. Drung, *Appl. Phys. Lett.* 75, 2821 (1999).
- [5] J. Borgmann, P. David, G. Ockenfuss, R. Otto, J. Schubert, W. Zander, and A. I. Braginski, *Rev. Sci. Instruments* 68, 2730 (1997)
- [6] K. A. Kouznetsov, J. Borgmann, and J. Clarke, *Appl. Phys. Lett.* 75, 1979 (1999).
- [7] SCENET Newsletter No. 8, February 2000.