

Integrated 3-Channel Flux-Locked-Loop Electronics for the Readout of High- T_c SQUID

Jin-Mok Kim*, In-Seon Kim, Kwon-Ku Yu and Yong-Ki Park

Biomagnetism Research Center, Korea Research Institute of Standards and Science, Daejeon, Korea

Received 30 August 2003

고온초전도 SQUID 신호 검출을 위한 3채널용 FLL 회로

김진목*, 김인선, 유권규, 박용기

Abstract

We designed and constructed integrated 3-channel flux-locked-loop (FLL) electronic system for the control and readout of high- T_c SQUIDs. This system consists of low noise preamplifiers, integrators, interface circuits, and software. FLL operation was carried out with biased signals of 19 kHz modulated current and 150 kHz modulated flux, which are reconstructed as detected signals by preamplifier and demodulator. Computer controlled interface circuits regulate FLL circuit and adjust SQUID parameters to the optimum operating condition. The software regulates interface circuits to make an auto-tuning for the control of SQUIDs, and displays readout data from FLL circuit. 3-channel SQUID electronic system was assembled with 3 FLL-interface circuit boards and a power supply board in the aluminum case of 56 mm × 53 mm × 150 mm. Overall noise of the system was around 150 fT/ $\sqrt{\text{Hz}}$ when measured in the shielded room, 200 fT/ $\sqrt{\text{Hz}}$ in a weakly shielded room, respectively.

Keywords : SQUID, magnetometer, FLL, modulation, magnetocardiogram, MCG.

I. 서론

초전도양자간섭장치(SQUID)는 미약한 자기 신호를 측정할 수 있으므로 생체자기, 미세전류, 지자기 측정 등 여러 측정 분야에서 응용되고 있으며 최근에는 고온 초전도를 이용한 SQUID 자력계와 미분계를 개발하여 77 K에서 인체에서 발생하는 미세한 자기신호측정과 비파괴 검사 등에 활용되고 있다[1,2]. SQUID를

제어하고 극미세자기신호를 검출하기 위해 낮은 잡음을 갖는 검출 회로가 요구되는데 특히 고온초전도 SQUID는 저주파 대역에서 임계전류요동(critical-current fluctuations)의 영향으로 잡음이 급격히 증가하는 특성을 가지므로 이를 해결하기 위해 역방향인가전류(bias reversal current) 방법을 이용하고, 검출회로의 1/f 잡음 특성을 개선하기 위해 자속변조(flux modulation) 방법을 이용한다[3-5].

본 연구에서는 고온초전도 SQUID를 제어하고 신호를 검출할 수 있는 회로를 구성하여 제작했고, 특히 SQUID 동작에 필요한 최적 상태

*Corresponding author. Fax : +82 42 868 5237
e-mail : jmkim@kriss.re.kr

를 컴퓨터에서 찾고 조정할 수 있도록 인터페이스 회로를 함께 구성하였다. 제작된 3 채널 시스템은 컴퓨터로 조정하며 각각 독립적으로 동작하거나 3개의 자력계를 동시에 동작하여 미분계로도 활용할 수 있도록 했다. 또한 시스템에 고온초전도 SQUID 자력계를 연결하고 심자도 신호를 측정하여 생체자기신호 검출기로 활용 가능성을 확인하였다.

II. 설계와 제작

고온초전도 SQUID 신호 검출 시스템은 SQUID 출력을 검출하기 위한 자속고정계환(flux-locked-loop, FLL)회로와 컴퓨터 통신을 위한 인터페이스 회로 두 부분으로 나누며 각 회로는 하나의 회로 기판에 제작된다.

FLL 회로

FLL 회로의 개략도를 Fig. 1에 나타내었다. SQUID 작동에 필요한 바이어스 전류는 컴퓨터로 조절되며 인터페이스의 D/A 회로에서 직류로 출력되거나 스위치 MAX419에서 사각파의 교류 신호로 바꾸어 SQUID에 흐르게 된다. 발전기에서 나온 300 kHz 신호를 19 kHz로 변환시킨 뒤 이를 MAX419의 스위치 신호로 사용하며 인터페이스에서 나온 직류 신호를 MAX419의 입력으로 연결하여 출력에서 19 kHz 교류 사각파가 되고 피크-피크 크기는 입

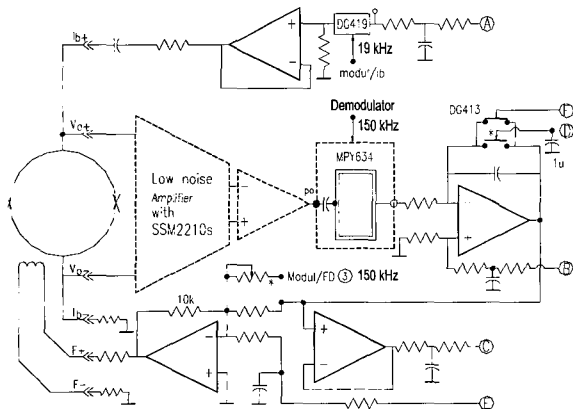


Fig. 1. Schematic diagram of flux-locked loop circuit with bias reversal and flux modulation.

력하는 직류 전압과 같다. MAX419 출력을 증폭기와 캐패시터로 통과시켜 \pm 양방향을 갖는 19 kHz 사각파 전류를 SQUID에 흐르게 한다. 이때 인가되는 전류는 전단증폭기의 + 입력단에 함께 연결되어 SQUID에 흐른다.

자장변화에 따라 발생하는 SQUID 출력 전압을 검출하기 위해 전단증폭기와 2차 증폭기를 구성하며, 매우 낮은 입력전압 잡음을 갖는 바이폴라 트랜지스터 SSM2210을 두 개 병렬로 연결한 전단증폭기는 100배 이득과 입력전압잡음 $1 \text{ nV}/\sqrt{\text{Hz}} @ 100 \text{ Hz}$ 를 갖고, TL072로 만든 2차 증폭기에서 400배 이득을 갖고 교류신호만 통과시킨다. + 입력단은 인가전류단과 연결하여 3-wire 측정법으로 신호를 검출한다. 증폭기를 통과한 신호는 피변조기 MPY634를 사용하여 150 kHz SQUID 출력신호를 피변조시켜 SQUID에서 검출한 외부 신호만 남도록 한다. 피변조기에 필요한 캐리어 신호는 발전기에서 나온 300 kHz 신호를 위상 조절기로 통과시켜 150 kHz, $1 \text{ V}_{\text{p-p}}$ 사각파로 변환시켜 MPY634에 입력된다. 피변조기를 통과한 출력은 증폭기를 써서 오프셋을 조절하며 인터페이스의 직류 전압으로 조정한다.

적분기는 1차 RC 적분기로 시간정수는 10 - 100 μs 이며 출력은 되먹임 회로를 거쳐 되먹임 코일을 통해 SQUID에 자장으로 인가되어 SQUID에 들어온 외부 자장을 상쇄시키는 작용을 한다. FLL 상태에서 외부 자장이 SQUID에 인가될 경우 적분기에서 그에 비례하는 출력을 나타내고 이 출력은 외부 자장에 반대되는 크기의 자속으로 되먹임 되어 SQUID에는 항상 원래의 일정한 자장(lock-in flux)을 갖게 된다. 이 때 적분기의 출력을 측정함으로써 외부의 자장값을 알게 된다.

되먹임 회로는 되먹임 코일에 일정한 전류를 흐르게 하여 SQUID에 자속을 인가한다. 되먹임 회로의 저항 R_b 는 13 k Ω 으로 적분기 출력 전압 또는 자속 조정 전압 V_b 가 되먹임 회로로 입력될 때 되먹임 코일의 자속 Φ_b 는 $V_b M_i / R_b$ 로 나타나며 여기서 M_i 는 되먹임 코일과 SQUID 사이의 상호인덕턴스이다. 자속 변조에 필요한 신호는 발전기에서 나온 300 kHz 신호를 150 kHz로 변환시킨 뒤 증폭기를 거쳐 되먹임 코일을 통해 사각파 150 kHz, 자속

1/4Φ₀가 SQUID에 인가되도록 한다.

FLL을 구성할 때 SQUID가 최적의 상태에서 동작하도록 되먹임 코일에 직류 전류를 흘려 자속을 조절하며 이에 필요한 조절 전압은 인터페이스 회로를 이용하여 컴퓨터로 조정된다.

인터페이스 회로

인터페이스 회로는 FLL 회로에 필요한 전압이나 전류를 조절하거나 적분기의 동작을 바꾸는 역할을 하며 컴퓨터로 조정된다. FLL회로에서 원격 제어가 필요한 부분은 인가전류, 적분기 오프셋, 되먹임 자속, 출력 오프셋 등이며, 스위치는 전원공급기, 적분기, 히터 동작 등이다. 컴퓨터에 장착된 데이터 수집장치에 있는 3개의 디지털 신호를 이용하여 각 채널을 선택하고 4개의 조절부분과 3개의 스위치를 조정한다. Fig. 2에서 인터페이스 회로의 간단한 순서도를 보이고 있다. 디지털 신호는 데이터(Dt), 클럭(Ck), 선택신호(Cs)로 구성되며 Cs가 0일 때 채널을 선택하며 Cs가 1일 때 인터페이스 출력을 조절한다. 분별기, CMOS 스위치, 펄스 발생기로 구성된 채널 선택기는 8 bit 덩 스위치와 결합하여 최대 256 채널을 선택할 수 있으며 선택된 채널만 인터페이스 회로가 활성화되어 FLL 회로에서 필요한 신호를 만들 수 있다.

Cs가 0인 상태에서 Dt와 Ck 신호는 선택기로 보내지고 Cs가 0에서 1로 바뀔 때 선택된 채널의 인터페이스 회로에 2개의 디지털 신호

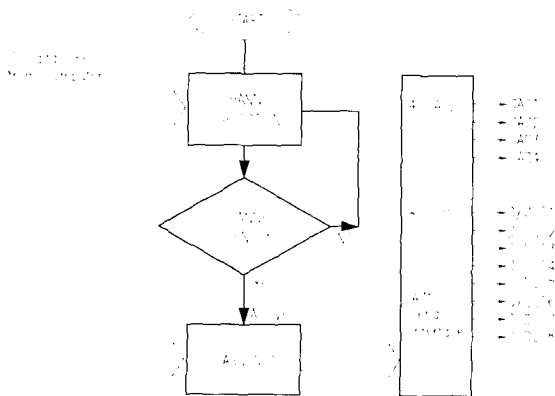


Fig. 2. Flow diagram of interface circuit controlled with 3 digital lines for a channel selection and FLL circuit.

Dt, Ck가 연결된다. Cs가 1일 때 인터페이스 조절에 필요한 Dt, Ck 신호를 선택된 채널에 보내며 Cs가 1에서 0로 바뀔 때 인터페이스 출력이 FLL회로로 전달된다. 인터페이스 회로는 4개의 D/A 출력을 갖고 8개의 스위치를 조절할 수 있다. 인가전류를 조절하기 위한 D/A 출력은 0 ~ 2.5 V 범위에서 분해능 0.6 mV로 조절하며 역방향인가전류로 환산하면 0 ~ 125 μA_{p-p} 범위에서, 0.1 μA_{p-p} 분해능으로 조절 가능하다. 적분기 오프셋과 출력 오프셋 전압은 -2.5 ~ +2.5 V 범위에서 분해능 1.2 mV로 조절한다. 되먹임 회로에 필요한 범위는 -250 ~ +250 mV 이고 0.12 mV로 조절하며 전류로 환산하면 -19 ~ +19 μA 범위에서 분해능 0.01 μA로 조절할 수 있다. 인터페이스의 스위치 신호는 8개를 조절할 수 있으며 이 중 전원공급기의 릴레이 동작, FLL회로의 적분기 동작, 히터 동작을 위해 3개가 사용된다.

Fig. 3에서 보인 것은 한 채널용 FLL-인터페이스 회로이며 100 mm × 50 mm PCB 기판에 FLL회로와 인터페이스 회로가 함께 제작되었다. 3 채널 시스템은 3개의 FLL-인터페이스 회로기판과 전원공급원 회로기판이 하나의 알루미늄 박스에 들어가며 전체 크기는 56 mm × 53 mm × 150 mm 이다. 알루미늄 박스는 외부의 잡음신호가 회로에 유입되는 것을 막기 위해 고주파 차폐 방식으로 가공 제작하였다. 제작되어 조립된 3 채널 시스템의 사진을 Fig. 4에 보였다. SQUID와 연결되는 입력단은 19 pin 커넥터로 연결되며 한 채널에 6개 pin 을 사용하여 3-wire 측정법으로 SQUID 출력을 검출하며 각 채널을 동시에 측정하여 미분계로도 사용할

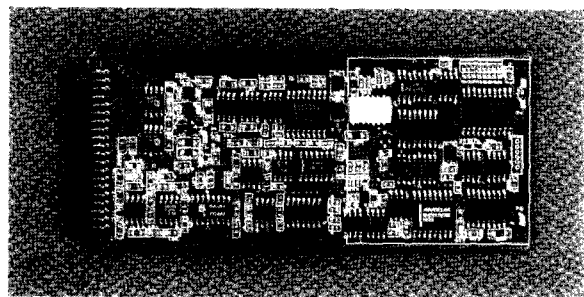


Fig. 3. Photograph of single channel readout electronics with FLL circuit and interface circuit.

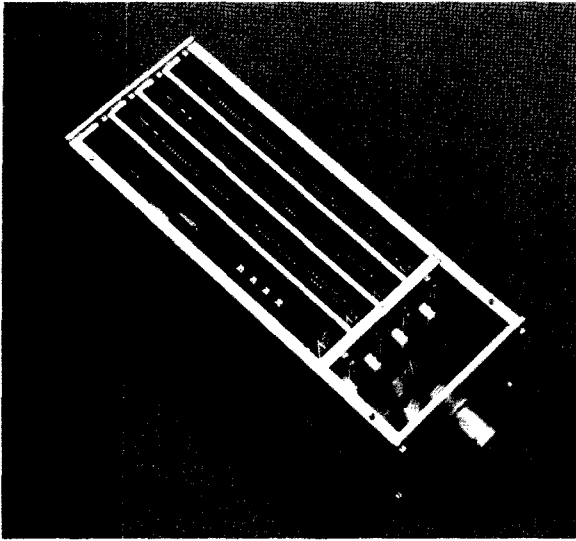


Fig. 4. Photograph of 3-channel readout system assembled with 3 FLL-interface circuit boards and a power supply board.

수 있다. 3 채널 시스템의 출력 단은 10 pin 커넥터로 구성되며 ± 15 V, 5 V 전원, 3개의 디지털 신호, 3개의 출력, 접지선으로 구성된다.

III. 회로 특성과 잡음 특성 평가

SQUID 대신 저항을 연결하여 전단증폭기 회로가 가지는 특성을 조사했다. 되먹임 회로에서 발생하는 150 kHz, 20 μ V_{p-p} 사각파 신호를 5 Ω 저항에 연결하여 인가하고 이들의 출력을 피변조기에서 검출하여 전단증폭기의 특성을 스펙트럼 분석기로 측정하였다. Fig. 5에서 스펙트럼 분석기 HP35670A로 0.5 Hz ~ 200 Hz 범위에서 측정된 전단증폭기의 전압잡음 스펙트럼을 보였다. 전단증폭기의 입력전압잡음은 100 Hz에서 1 nV/ $\sqrt{\text{Hz}}$ 이하이며 1 Hz에서 1.7 nV/ $\sqrt{\text{Hz}}$ 로 측정 되어 SQUID의 출력을 충분히 측정할 수 있다[6].

제작된 시스템에 고온초전도 SQUID 자력계를 연결하여 뮤메탈과 알루미늄으로 제작된 자기차폐실(Magnetically shielded room, MSR)에서 동작 특성을 조사했다. $I_c = 24 \mu\text{A}$, $R_n = 4.7 \Omega$, $\Delta V = 36 \mu\text{V}$, $\partial V/\partial \Phi = 85 \mu\text{V}/\Phi_0$ 으로 갖고 FLL 상태에서 잡음 스펙트럼 분석기로 측정된 결과 Fig.

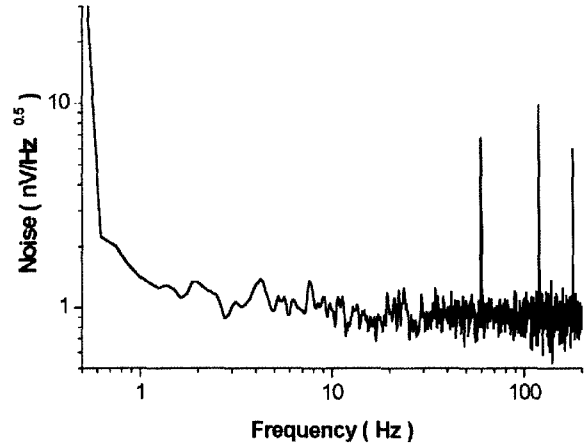


Fig. 5. Noise spectrum of preamplifier in FLL circuit; 1 nV/ $\sqrt{\text{Hz}}$ @ 100 Hz, 1.7 nV/ $\sqrt{\text{Hz}}$ @ 1 Hz.

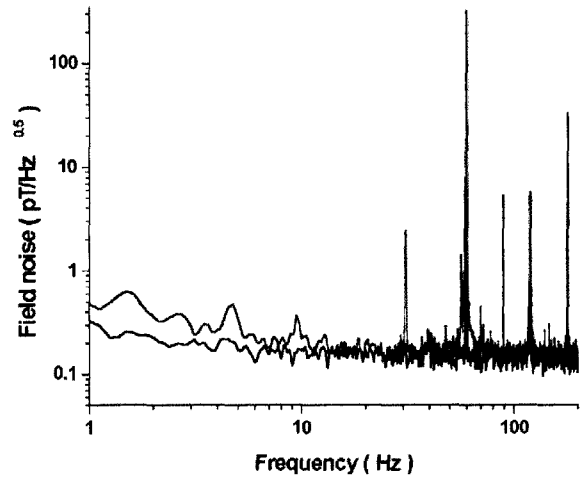


Fig. 6. Noise spectra of 3-channel FLL system with high- T_c SQUID magnetometer; (a) in the MSR (black solid), (b) in a weak MSR (grey solid).

6(a)와 같이 100 Hz에서 150 fT/ $\sqrt{\text{Hz}}$, 1 Hz에서 300 fT/ $\sqrt{\text{Hz}}$ 로 측정되었다. 한편 1 채널용 SQUID 시스템인 DC SQUID Catcher[®](NKT 회사 제품)로 같은 자력계를 4-wire 측정법으로 SQUID를 작동할 경우 자속잡음은 약 65 fT/ $\sqrt{\text{Hz}}$ @100 Hz로 측정되었다. 사용된 DC SQUID Catcher[®] 시스템은 step-up transformer와 결합되어 100 kHz 신호의 입력전압잡음이 0.5 nV/ $\sqrt{\text{Hz}}$ 보다 작은 전단증폭기를 갖고, 100 kHz 자속변조와 1.5 kHz 역방향전류인가 방식을 갖

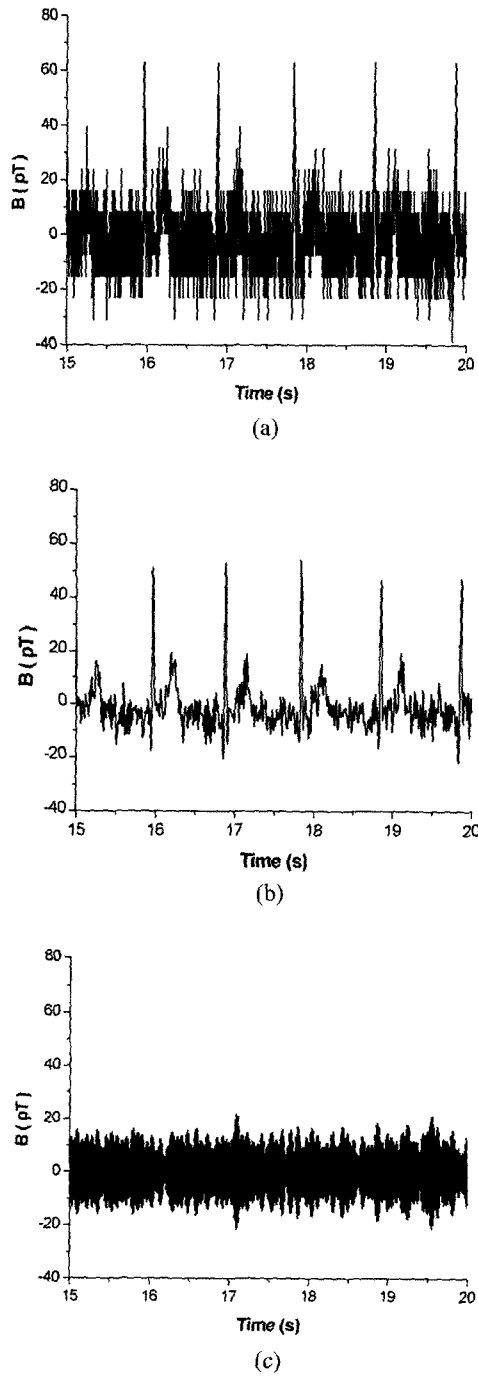


Fig. 7. Real time trace of MCG from the human heart in the MSR; (a) raw signal, (b) MCG signal after filtering with 0.5 Hz high-pass, 100 Hz low-pass, and 60 Hz notch filter, (c) 60 Hz noise signal after filtering with band-pass filter.

고 있다. 한편 제작된 시스템은 3개의 SQUID를 동시에 제어하고 측정하기 위해 step-up transformer 없이 SQUID와 진단증폭기를 직접 연결하여 신호를 증폭하므로 검출 회로에서 발생한 잡음이 SQUID에 직접 영향을 미쳐 측정된 자속 잡음이 증가한 것으로 볼 수 있다.

간이 차폐실 환경에서 시스템을 동작시켜 잡음특성을 조사하였으며 그 결과를 Fig. 6 (b)에서 보였다. 간이 차폐실에서 측정된 시스템의 잡음은 10 Hz 이하에서 MSR에서 측정된 잡음보다 약 2배 증가하고 10 Hz 이상의 주파수 대역에서 잡음 크기는 150 - 200 fT/√Hz로 변화가 거의 없으나 특정 주파수에서 신호가 증가하며 특히 60 Hz 신호는 약 20배 이상 크게 측정된다. 또한 간이 차폐실 주변에 있는 전기 기기에서 발생하는 신호들이 차폐실 안으로 일부 유입되고 이들 신호는 시스템에서 측정되어 함께 나타나고 있다.

슬루율(slew rate)을 측정한 결과 약 $1 \times 10^3 \Phi_0/s$ 를 갖고 3 채널을 동시에 동작할 때 각 채널의 잡음 변화는 거의 나타나지 않고 안정된 작동을 함을 알 수 있었다.

IV. 심자도 측정

제작된 시스템으로 MSR에서 건강한 남자의 심자도를 측정하였다. Fig. 7(a)에서 실시간으로 측정된 신호를 보이고 있으며 20 pT 크기의 60 Hz 신호와 함께 섞여 측정되고 있으나 심자도 파형을 실시간으로 볼 수 있다. (b)는 컴퓨터에서 0.5 Hz 고역 통과 필터, 100 Hz 저역 통과 필터, 60 Hz 제거 필터를 써서 출력을 처리한 신호이고, (c)는 측정된 신호에 포함된 60 Hz 신호만을 나타낸다. 신호 처리된 심자도 파형에서는 비교적 뚜렷한 QRS 피크를 관찰할 수 있다. (c)는 외부에서 들어온 60 Hz 신호를 보이고 있으며 통상적으로 MSR 안에서 나타나는 60 Hz 신호 크기와 같게 측정된다[7,8]. 측정된 데이터는 12 bit, 1.2 mV의 분해능을 가진 신호수집 장치를 써서 측정한 것으로 분해능이 좋지 않아서 잡음신호가 효율적으로 제거되지 않았다고 생각된다. 외부 자장에 반응하는 시스템의 출력 신호 범위를 조절하고 신호수집 장치의

분해능을 10배 이상 높여 데이터 처리 능력을 향상 시키고, 시스템의 검출 회로에서 발생하는 잡음을 낮추는 개선연구가 현재 이루어지고 있다.

V. 결론

고온초전도 SQUID를 작동하고 신호를 검출하기 위해 역방향인가전류와 자속변조 방법을 채용한 FLL 회로와 이를 조정할 인터페이스 회로를 제작하였다. 동시에 3개의 SQUID를 측정할 수 있으며 모든 조정과 신호 처리는 컴퓨터로 원격제어가 가능하도록 했다. 고온초전도 SQUID 자력계를 연결하여 시험 작동을 해본 결과 자기 차폐실에서 측정한 잡음특성은 $150 \text{ fT}/\sqrt{\text{Hz}} @ 100 \text{ Hz}$ 이고 간이 차폐실의 환경에서도 거의 같은 잡음특성을 가지나 10 Hz 이하 대역에서 잡음이 약간 증가함을 보였다. 자기 차폐실 안에서 심자도를 측정하였으며 실시간으로 파형을 볼 수 있고 필터를 쓸 경우 더 선명한 파형을 얻을 수 있었다.

Acknowledgments

This work was supported in part by Ministry of Science and Technology in Korea.

References

- [1] K. A. Kouznetsov, J. Borgmann and J. Clarke, "High- T_c second-order gradiometer for magnetography in an unshielded environment", *App.Phys.Lett.*, vol. 75, pp. 1979-1981, 1999.
- [2] C. Carr, D. McKirdy, E. Romans and G. Donaldson, "Electromagnetic nondestructive evaluation: moving HTS SQUIDs, inducing field nulling and dual frequency measurements", *IEEE Trans. Appl. Supercond.* vol. 7, pp. 3275-3278, 1997.
- [3] D. Koelle, R. Kleiner, F. Ludwig, E. Dantsker and J. Clarke, "High-transition-temperature superconducting quantum interference devices", *Rev. Mod. Phys.* vol. 71, pp. 631-686, 1999.
- [4] S. Kuriki, M. Matsuda, and A. Matachi, "Effects of alternating bias current on the low-frequency noise in dc SQUIDs", *J. Appl. Phys.* vol. 64, pp. 239-241, 1988.
- [5] O. Dossel, B. David, M. Fuchs, W. Kullmann, and K. Ludeke, "A modular low noise 7-channel SQUID-magnetometer", *IEEE Trans. Magn.* vol. 27, pp. 2797-2800, 1991.
- [6] Analog Devices Data Book, "Audio Dual Matched NPN Transistor SSM2210".
- [7] B. David, O. Dossel, V. Doormann, R. Eckart, W. Hoppe, J. Kruger, H. Laudan, G. Rabe, "The development of a high- T_c magnetocardiography system for unshielded environment", *IEEE Trans. Appl. Supercond.* vol. 7, pp. 3267-3270, 1997.
- [8] P. Romans, C. Carr, G. Donaldson, C. PegrumM, "A high- T_c second-order gradiometer for use in an unshielded environment", *IEEE Trans. Appl. Supercond.* vol. 13, pp. 837-840, 2003.