

A Helmet-type MEG System with 1st order SQUID Gradiometer Located in Vacuum

K. K. Yu^{*}, K. Kim, J. M. Kim and Y. H. Lee

Korea Research Institute of Standards and Science, Daejeon, Korea

(Received 31 August 2009; revised or reviewed 1 October 2009; accepted 7 October 2009)

진공조에 위치한 1차 SQUID 미분계를 이용한 헬멧형 뇌자도 장치의 제작

유권규^{*}, 김기웅, 이용호

Abstract

We have fabricated a helmet type magnetoencephalography(MEG) with a 1st order gradiometer in vacuum to improve the signal-to-noise ratio(SNR) and the boil-off rate of liquid helium(LHe). The axial type first-order gradiometer was fabricated with a double relaxation oscillation SQUID(DROS) sensor which was directly connected with a pickup coil. The neck space of LHe dewar was made to be smaller than that of a conventional dewar, but the LHe boil-off ratio appeared to increase. To reduce the temperature of low Tc SQUID sensor and pickup coil to 9 K, a metal shield made of, such as copper, brass or aluminum, have been usually used for thermal transmission. But the metal shield exhibited high thermal noise and eddy current fluctuation. We quantified the thermal noise and the eddy current fluctuation of metal. In this experiment, we used the bobbin which was made of an alumina to wind Nb superconductive wire for pickup coil and the average noise of coil-in-vacuum type MEG system was 3.5 fT/Hz^{1/2}. Finally, we measured the auditory evoked signal to prove the reliability of coil-in-vacuum type MEG system.

Keywords : SQUID, Thermal noise, magnetoencephalography, gradiometer, coil in vacuum

I. 서론

시간 분해능이 우수하고 비침습적인 뇌자도 (MEG : magnetoencephalography)는 인간의 뇌로부터 발생하는 정보를 효과적으로 측정할 수

있는 장치인 것으로 증명되었다 [1-4]. 한편 MRI는 공간 분해능은 우수하지만 시간에 따른 정보를 얻을 수 없다는 단점이 있다. 따라서 시간분해능이 우수한 뇌자도와 공간 분해능이 우수한 MRI를 서로 결합하여 더욱 정확한 뇌 정보 및 위치를 국지화 할 수 있다. 이러한 정확한 정보를 얻기 위한 노력으로 뇌자도 장치에서는 잡음 제거와 신호원과 검출코일간 간격

^{*}Corresponding author. Fax : +82 42 868 5291
e-mail : kkyu@kriss.re.kr

을 줄임으로써 신호 대 잡음 비를 향상시키고자 하는 연구가 이루어지고 있다 [5]. 또한 이미 상업적인 목적으로 사용되고 있는 뇌자도 장치의 제작 경비 및 유지비용을 줄이기 위한 노력도 함께 진행 중이다. 일반적으로 뇌자도나 심자도에 사용되는 SQUID 센서의 직접 냉각 방식은 인서트기가 있어서 액화 헬륨의 증발기포에 의한 자체 진동을 유발하여 진동 노이즈를 발생시킨다. 액화 헬륨의 증발을 방지하기 위해 진공 층과 복사열 방지층이 사용될 경우 검출코일과 신호원간의 거리가 멀어져 신호가 약해지는 단점이 있다. 이러한 단점을 보완하기 위한 방법으로 검출코일을 진공조에 두는 방식이 연구된 바 있다 [6].

본 연구에서는 신호대 잡음비를 향상시킬 수 있는 coil-in-vacuum(CIV)형 뇌자도를 제작하기 위한 방법과 열 전달 물질로 사용된 금속 및 절연물의 잡음 특성을 확인하였다. 액화 헬륨 증발을 감소시키기 위해 뇌자도용 듀아의 neck 입구의 단면적을 1/4이상 줄인 후 헬륨증발을 확인하고 평가하였다. 제작된 헬멧형 뇌자도 시스템으로 청각유발신호를 측정하여 시스템의 유용성을 확인하였다.

II. 실험 방법

A. 센서 제작

SQUID 센서는 큰 자기-전압 변환 계수를 가지는 이중이완발진 초전도 양자간섭소자(double relaxation oscillation SQUID:DROS) 형태로 제작하였다 [7]. 검출 코일은 직경이 20 mm이고 signal coil과 reference coil간의 baseline은 50 mm로 하였다. SQUID 센서와 검출코일은 진공 중에서 약 2400 °C로 열처리된 Nb wire(25 μ m)로 직접 연결하였다. 일반적으로 검출코일과 접합간은 결합은 초전도 나사와 너트를 이용하여 결합하였다. 이러한 결합 방법은 연결구의 영향을 줄이기 위해 검출코일과 SQUID 센서간의 거리를 크게 하고, 센서를 Nb 원통 내에 놓아 shielding하는 등의 조치가 필요하다. 하지만 SQUID 센서와 검출코일을 직접 결합함으로써 생산공정을 간소화하여 시스템 제작에 소요되는 경비와 시간을 대폭적으로 줄일 수 있었다.

이렇게 제작된 센서의 자장-전압 변환 계수는 0.46 nT/ \AA 이고, dV/d \AA 는 평균 1.5 mV/ \AA 이상인 것을 확인하였다. 간접 냉각을 위한 방법으로 G-10 epoxy봉을 이용하여 검출코일용 bobbin을 형성하고, 그 위에 열전달율이 우수한 Cu, brass 및 Al 등의 비자성 금속 물질을 이용하여 검출코일을 둘러싸는 방법이 있다. 하지만 금속 물질의 전자에 의해 발생하는 열잡음 증가와 eddy current에 의한 fluctuation 잡음 발생 등의 문제점이 있다 [8-9]. 이러한 문제를 해결하기 위해 작은 단면적을 가지는 coil을 이용하여 foil을 제작하거나 절연물인 알루미늄 봉을 이용하여 검출코일용 보빈과 SQUID 센서 mount용 PCB를 제작하는 방법이 있다. Fig. 1은 Cu coil-foil과 알루미늄 보빈을 이용하여 제작된 권선형 1차 미분계를 나타낸 것이다.

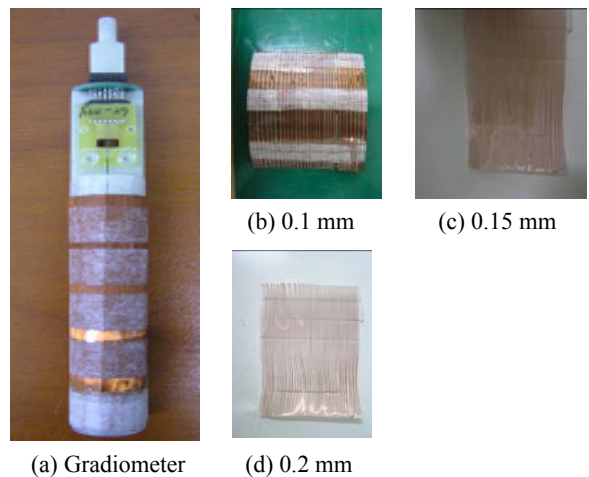
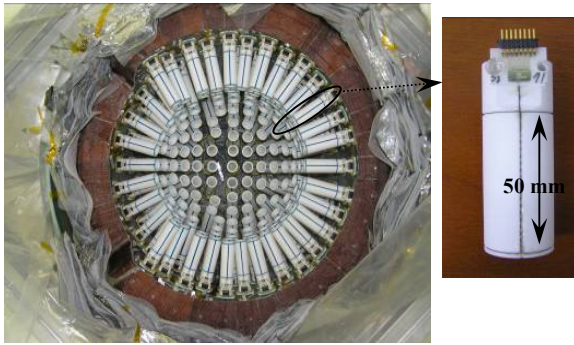


Fig. 1. (a) Axial type first-order gradiometer wound with Cu coil-foil ; Cu coils with diameter of 0.1 mm(b), 0.15 mm(c), and 0.2 mm(d) are also seen.

B. 헬멧형 뇌자도 시스템의 구성

SQUID 센서와 검출코일 냉각용 열전달 물질로는 열잡음과 수축율을 고려하여 알루미늄을 사용하였다. 검출 코일 간 거리는 헬멧 면적과 신호 손실을 최소화할 수 있는 위치에 152개의 센서를 배치하였다. Fig. 2에 152개의 권선형 1차 미분계가 배치된 센서헬멧을 나타내었다. 센서의 검출코일은 진공조 헬멧표면으로부터 15 mm 정도 떨어져 있고, 인접한 검출코일 간 간

격은 약 35 mm이다. 헬륨듀아는 액화 헬륨을 80 L 저장할 수 있게 제작되었으며, 헬륨 증발율을 최소화 하기 위해 dewar의 neck을 기존 듀아보다 약 1/4정도의 작은 단면적을 가지게 설계하였다. 액화 헬륨을 증발시키는 열원으로는 복사열과 전달열이 있으며, 복사열은 주로 helmet의 바닥에서 유입되고, 전달열은 dewar의 neck에서 G-10 tube를 통해 유입된다. 이러한 열 유입을 고려하여 이번에 설계된 듀아는 helmet의 면적은 3배로 증가하여 복사열은 3배 증가하고, neck의 단면적이 1/4로 감소하고 전달열은 4배 감소하여, 액화헬륨 증발율은 약 30 % 향상된 9 L/day일 것이라 예상하였다.



(a) Sensor helmet

(b) Gradiometer

Fig. 2. (a) A helmet type MEG insert connected with a 152 channel axial type first order gradiometers, (b) the axial first-order gradiometer with 50 mm baseline and the pickup coil was wound on alumina bobbin.

Fig. 3은 설계된 듀아의 외관을 나타낸 것이다. 자체 개발된 DRoS 형태의 SQUID 센서는 $dV/d\Phi$ 가 $1.5 \text{ mV}/\Phi_0$ 로 매우 크다. 이는 입력측 노이즈가 약 $1 \text{ nV}/\text{Hz}^{1/2}$ 인 일반적 용도의 상업용 저잡음 OP-Amp.(SSM2210)을 사용하여 flux-locked-loop(FLL) 회로를 구성하여도 무방함을 의미한다. 센서의 $dV/d\Phi$ 가 $1 \text{ mV}/\Phi_0$ 인 경우 $1 \text{ nV}/\text{Hz}^{1/2}$ (@100Hz)의 입력 잡음을 가지는 preamplifier가 시스템에 기여하는 잡음은 자장-전압 변환 계수가 $0.46 \text{ nT}/\Phi_0$ 인 경우 약 $0.7 \text{ fT}/\text{Hz}^{1/2}$ 로 매우 미약하여 무시할 수 있는 수준이다. 측정된 뇌자도 신호로 들어오는 60 Hz 전력선 잡음과 진동 잡음을 제거하기 위해 0.1Hz high pass filter, 100 Hz low pass filter와 60 Hz notch

filter가 포함된 analog signal processor (ASP)가 사용되었다. 16 bit 80채널의 신호를 측정할 수 있는 A/D converter(NI사 PCI-6255)를 사용하였다. data acquisition board(DAQ)의 잡음을 고려하여 ASP에서 입력 신호를 100배 증폭하여 DAQ로 전달하여 일반 컴퓨터로 수집하였다.

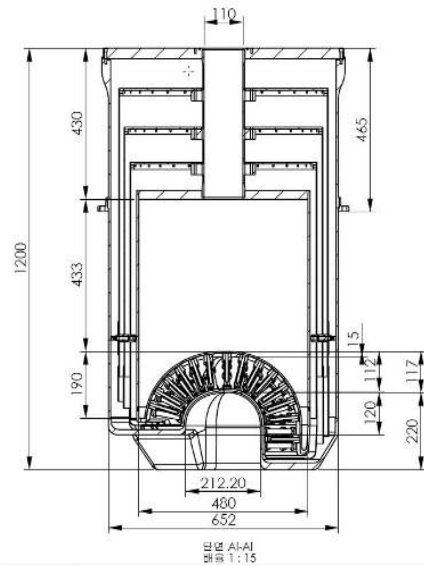
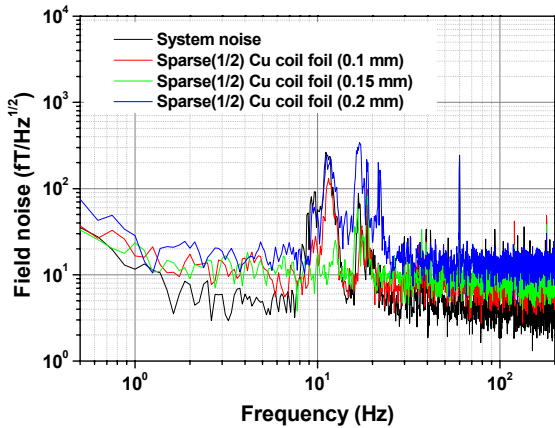


Fig. 3. Overview of the coil-in-vacuum type dewar to contain the 80 L liquid helium.

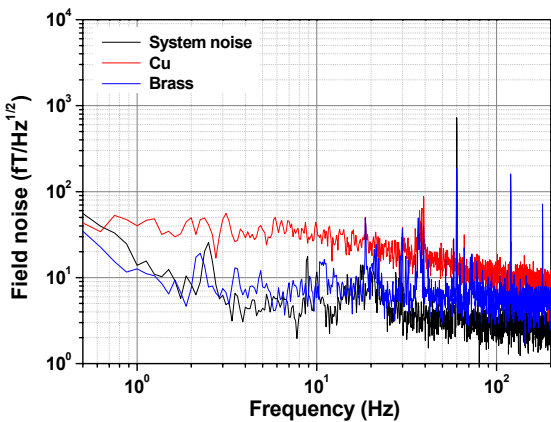
III. 결과 및 토의

잡음 특성이 동일한 센서를 이용하여 CIV형 뇌자도에 사용한 열전달 물질의 열잡음 특성을 알아보았다. Fig. 4는 Cu coil의 두께에 따른 열잡음 특성과 사용된 금속 종류에 따른 열잡음 특성을 나타낸 것이다. 금속의 열잡음 특성은 전체 단면적과 전기 전도도에 비례한다. 따라서 측정된 물질중에서 전기전도도가 가장 높은 Cu의 열잡음이 가장 크고, Cu coil foil인 경우 지름 2 mm인 구리선으로 만든 foil이 가장 큰 열잡음을 나타내었다. 제작된 듀아의 액화 헬륨 증발율은 예상치보다 높은 14 L/day로 나타났다. 설계시 예상했던 증발율 보다 높은 값이 관측된 이유는 helmet 부분에 thermal shielding에 사용된 구리판이 닿아 직접적인 열전달이 많이 일어났고, 예상보다 복사열에 대한 단열이 이

루어지지 않았기 때문에 판단된다. 이러한 점을 감안하여 듀아를 수정하여 보완하고자 한다. Fig. 5는 제작된 CIV형 듀아의 액화헬륨 증발율을 나타낸 것이다.



(a) Noise spectrum of SQUID system with Cu coil-foil



(b) Noise spectrum of SQUID system with metal shield

Fig. 4. SQUID system noise with thermal noise and fluctuation noise ; (a) Cu coil foil with several diameter, and (b) as a kind of metal shield.

금속을 이용하여 검출코일과 SQUID센서를 냉각할 경우 열잡음과 eddy current에 의한 fluctuation에 의한 영향이 매우 크게 나타남을 고려하여 이번 실험에서는 가공의 난이성과 비용은 많이 들지만 열 전달특성은 우수하고, 낮은 열잡음과 수축율을 가지는 알루미늄을 이용하여 1차 미분계를 제작하였다.

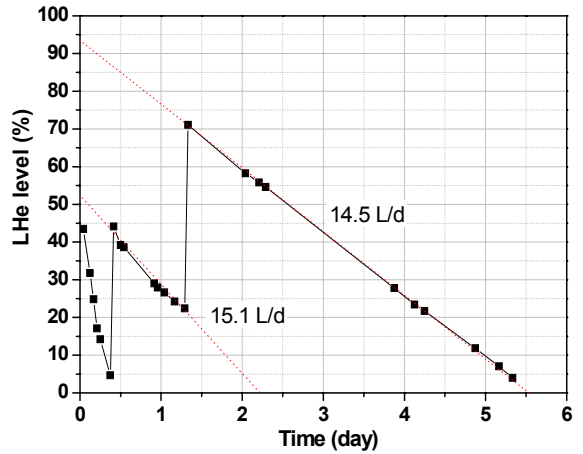


Fig. 5. Boil-off ratio of liquid helium contained in CIV type LHe Dewar.

Fig. 6은 알루미늄을 검출코일용 보빈과 센서 mount용 PCB로 사용하여 권선형 1차 미분계를 제작할 경우의 시스템 노이즈를 나타낸 것이다. 알루미늄은 열전도율이 높으나 비금속 물질이므로 열잡음 영향이나 eddy current에 의한 fluctuation은 나타나지 않았다. 시스템 잡음은 평균적으로 3.5 fT/Hz^{1/2}로 너저도 신호 측정에 충분한 신호감도를 나타내었다.

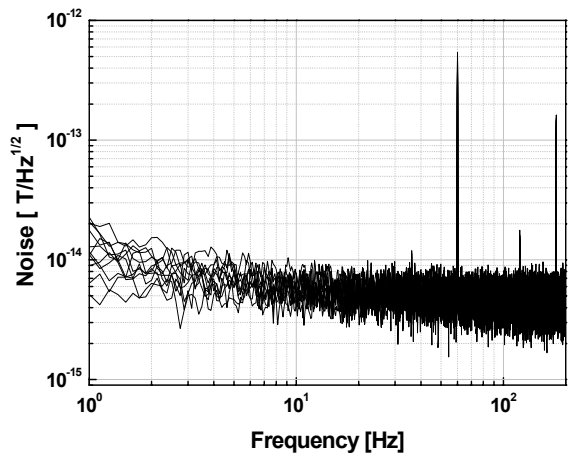


Fig. 6. Noise spectrum of 152 channel CIV type MEG system fabricated with alumina bobbin for thermal conductor.

Fig. 7은 1kHz 주파수 영역의 청각 유발신호를 측정된 것이다. 그림에서와 같이 청각 자극

신호가 주어진 후, primary response로 50 ms(P50)와 100 ms(N100) 뒤에 좌·우 temporal cortex에서 청각 자극 인지 신호가 깨끗하게 측정되었다. 각 채널의 background 잡음이 인서트를 사용할 경우보다 작은 것을 확인함으로써 CIV형 뇌자도의 경우 신호 대 잡음 비를 향상시킬 수 있음을 확인하였다.

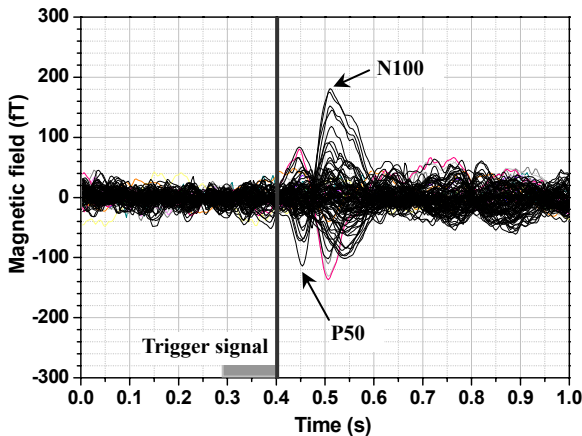


Fig. 7. Auditory evoked signals with P50 and N100 measured for a healthy man. The background noise of signal was about 30 fT.

IV. 결 론

인서트가 있는 전형적인 뇌자도 장치보다 높은 신호 대 잡음비와 낮은 헬륨 증발율을 가지는 152채널 CIV형 뇌자도 장치를 개발하였다. 신호 대 잡음비를 높이기 위해 검출코일과 신호원과의 거리를 줄이고, 인서트를 사용하지 않음으로써 진동 노이즈를 줄일 수 있었다. 액화 헬륨 증발율은 예상과 달리 기존 장치보다 약 30 % 높게 나타났다. 이는 헬륨 부분의 복사열 차단과 국부적인 검출코일의 접촉에 의한 것으로 판단되어 차후 수정을 통해 향상시킬 수 있을 것이라 예상된다. 간접 냉각을 위해 사용된 청동, 황동, 알루미늄과 금속산화물인 알루미늄의 열잡음과 eddy current 잡음을 확인하였다. 금속은 열전달은 탁월하지만 열잡음과 수축율이 높아 극미세 뇌신호를 측정하기에 부적합하여, 절연물인 알루미늄을 사용하였다. 시스템에

사용된 권선형 1차 미분계는 SQUID 센서와 검출코일을 직접 연결함으로써 152채널 장치제작에 소요되는 시간을 1개월 이내로 줄임으로써 생산성을 대폭 향상시킬 수 있었다. 제작된 뇌자도 장치를 이용하여 청각 유발 신호를 측정하였다. 측정된 청각 유발신호로부터 낮은 진동 잡음과 깨끗한 P50 및 N100 신호를 관측하여 CIV형 뇌자도 장치의 유용성을 확인하였다.

References

- [1] J. B. Vieth, H. Kober, O. Ganslandt, M. Moller and K. Kamada, "The clinical use of MEG activity associated with brain lesions", *Annals of Neurology*, Vol. 42, pp. 554-563, 1997.
- [2] Karsen Sternickel and Alex I. Braginski, "Biomagnetism using SQUIDs: status and perspectives", *Supercon. Sci. Technol.* Vol.19, pp. 160-171. 2006.
- [3] Y. Okada et al, "Baby SQUIDs ; a mobile, high resolution multichannel MEG system for neonatal brain assessment.", *Rev. Sci. Instrum*, Vol.77, 2005.
- [4] J.C. Mosher, P.S. Lewis and R.M. Leaby, "Multiple dipole modeling and localization from spatio-temporal MEG data.", *IEEE trans. Biomed. Eng.*, Vol. 39, pp. 541-571. 1992.
- [5] J. Vrba, "SQUID Gradiometers in real Environment", In: *SQUID Sensors: Fundamentals, Fabrication and Applications*, pp. 117-178. 2001.
- [6] S.K. Lee and M.V. Romalis, "Calculation of magnetic field noise fom high permeability magnetic shields and conducting objects with simple geometry." *Journal of applied physics*, Vol. 103, 2008.
- [7] 이용호, 김진목, 권혁찬, "자속-전압 변환계수가 큰 이중이완발전 초전도양자간섭소자의 제작 및 동작 조건에 따른 잡음특성", *Sae Mulli*, Vol. 39, Number 1, pp. 86-93, February, 1999.
- [8] James E. Zimmerman, "SQUID instruments and shielding for low level magnetic measurements." *Journal of applied physics*, Vol. 48, pp. 702-710, 1977.
- [9] S. Uzunbajakau, A.P. Rijpm, J. Dolfma, and H. Rogalla, "Magnetic flux fluctuations due to eddy currents and thermal noise in metallic disks.", *IEEE Trans. on mag.*, Vol. 39, pp. 2018-2023, 2003.