

Characteristics of Superconductive Pb shield for a Whole Head MEG System

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

Korea Research Institute of Standards and Science, Daejeon, Korea

(Received 6 August 2009; revised or reviewed 23 September 2009; accepted 7 October 2009)

헬멧형 뇌자도 장치로의 활용을 위한 Pb 초전도 차폐의 특성

유권규^{*}, 김기웅, 이용호

Abstract

We have investigated the characteristics of a superconductive Pb shield for hemispherical shape and plate to improving signal-to-noise ratio(SNR) of biomagnetism. We measured the shielding factor for the position of helmet shape Pb and for changing the distance from Pb surface. To make a uniform magnetic field, a 1.5 m x 1.5 m set of the helmholtz coils activated at several frequencies. The shielding factor of hemispherical shape Pb was from 20 to 57 dB and of Pb plate was about 6~26 dB as a function of distance from the lead surface. The shielding factor was rapidly reduced as increasing the distance from Pb surface. The white noise of superconductive quantum interference device(SQUID) with a superconductive shield was about $12 \text{ fT/Hz}^{1/2}$ at 1 Hz, $7 \text{ fT/Hz}^{1/2}$ at 100 Hz. The white noise was more increased about two times than conventional SQUID system without Pb shielding. An auditory signal was measured by first order gradiometer and magnetometer with Pb superconductive shield and compared the SNR. The SQUID system with Pb shield had better performance at low frequency noise level.

Keywords : DRQS, magnetic noise, superconductive shield, MEG

I. 서론

사람의 머리로부터 발생하는 뇌자도 신호는 수십에서 수백fT정도의 매우 미약한 신호이다. 이러한 미세 신호를 높은 신호 대 잡음비(SNR:

signal-to-noise ratio)로 검출하기 위해 신호 감도가 우수한 자기 센서의 제작과 지자장 및 환경 잡음을 효과적으로 차폐시킬 수 있는 방법이 선행되어야 한다 [1-2]. 특히 미세한 생체 자기 신호 측정을 위한 중요한 요소로서 효과적인 지자장과 환경잡음제거 기술은 필수적이다. 높은 환경잡음은 주로 SQUID 센서에 연결되는 신호 검출코일을 1차, 2차 미분형태로 만들거나

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

[3-6], 투자율이 높은 μ -metal과 전기전도도가 높은 금속을 이용하여 자기차폐실(MSR: magnetically shielded room)을 제작함으로써 제거할 수 있다. 하지만 검출코일을 미분 형태로 할 경우, 균일하지 않은 잡음은 효과적으로 제거하지 못하거나 참조 채널에 의한 신호 감소에 따른 SNR 향상에 제약이 있다. 그리고 MSR을 이용한 자기 차폐는 공간적으로 균일하게 자장을 효과적으로 차폐할 수 있으나, 많은 제작 시간과 공간이 필요하며, 고투자율과 높은 전기전도도를 가지는 permalloy와 순도가 높은 금속을 사용해야 함으로써 많은 경비가 소요되는 단점이 있다. 이러한 단점을 보완하기 위해 초전도체의 Meissner current를 이용한 자기 차폐에 대한 연구가 이루어지고 있다 [7-9]. 초전도 자기 차폐는 주파수에 독립적이고, 이상적으로는 완전차폐가 가능한 방법이다. 고순도의 초전도체를 한쪽이 막힌 원통형인 경우 초전도 차폐는 자장 방향에 따라 이론적으로 식 (1)과 (2)와 같이 된다.

$$H_{axial} = H^{(0)}_{axial} \exp(-6.76L/D) \quad (1)$$

$$H_{transversal} = H^{(0)}_{transversal} \exp(-3.68L/D) \quad (2)$$

여기서 L은 원통의 깊이, D는 원통의 직경을 나타낸다. 이러한 초전도 차폐특성을 이용하여 Fig. 1과 같이 초전도체를 헬멧형으로 구현할 경우 헬멧 내부는 초전도 차폐효과에 의해 환경잡음을 주파수에 독립적으로 차단할 수 있다. 특히 0.1 Hz이하의 저주파영역에서 자기차폐율은 MSR을 이용하여 효과적으로 달성할 수 없으나, 초전도 차폐일 경우 원하는 차폐율을 쉽게 얻을 수 있다. Fig. 1의 (a) flat 형태에서 거리 (d)만큼 떨어진 곳에 M_{source} 가 있을 경우 초전도 표면에 흐르는 초전류는 M_{source} 의 반대편에 크기는 같으나 방향이 반대인 M_{image} 가 있는 것과 같을 것이다. 따라서 이론적으로 평면형 초전도 차폐를 이용한 자력계는 기준선이 2d인 1차 미분계와 같은 동작을 할 것이다 [8]. 또한 초전도체를 Fig. 1(b)와 같이 헬멧형태로 하면 헬멧 내부는 식 (1), (2)에서와 같은 자기 차폐를 이룰 수 있다. 따라서 측정하고자 하는 신호원의 깊이에 따라 초전도 표면에서 검출코일

의 거리를 조절하여 기준선 길이를 결정할 수 있고, 초전도체를 헬멧형으로 만들어 효과적으로 주파수에 독립적인 차폐를 이룰 수 있다.

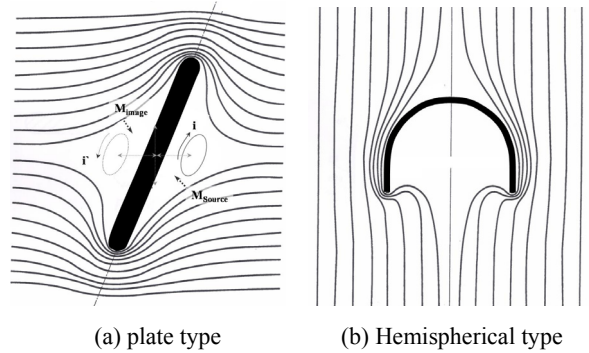


Fig. 1. Concept of the superconductive shield ; (a) plate and (b) hemispherical.

본 연구에서는 초전도체를 flat와 hemi-spherical 형태일 경우의 차폐율 변화를 확인하였다. 검출코일로부터 초전도체 표면까지의 거리변화에 따른 차폐율을 조사하였다. 초전도체 표면에 SQUID 센서가 근접할 경우 근접효과에 의해 센서의 검출 코일 유효면적(A_{eff})변화와 이에 따른 센서의 기본 특성변화를 조사하였다. 준자기차폐 환경에서 헬멧형 Pb(99.95 %) 초전도 차폐를 이용한 뇌자도 장치를 제작하고, 청각 유발 신호를 측정하였다. 측정된 신호의 SNR을 초전도 차폐를 하지 않은 여러 형태의 헬멧형 뇌자도 장치에 의해 측정된 신호의 SNR를 비교하여, 초전도 차폐형 장치의 유용성을 확인하였다.

II. 실험 방법

A. SQUID sensor

사용된 초전도 양자간섭소자(SQUID:superconductivity quantum interference device)는 다층 박막공정과 lithography공정을 통하여 Nb/AlO_x/Nb의 tri-layer 조셉슨 접합 형성하였다. 구동회로에 사용되는 전단 증폭기의 입력잡음의 영향을 최소화하기 위해 큰 자속-전압 변환계수($dV/d\Phi$)를 가지는 이중이완발진 초전도 양자간섭소자(DROS:double relaxation oscillation SQUID) 형

태로 제작하였다 [4]. 제작된 DROS의 자속-전압변환 계수는 $(dV/d\Phi)$ 약 $1.5 \text{ mV}/\Phi_0$ 이고, 자장-자속 변환계수(B/Φ_0)는 $0.86 \text{ nT}/\Phi_0$ 였다. 직경 10 mm인 G-10 epoxy 봉에 검출코일 간격을 10 mm로 하여 5개의 권선형 자력계를 준비함으로써 측정시 발생할 수 있는 시간적, 공간적 오차를 최소화하였다. 헬멧형 뇌자도 장치에는 검출면적이 $9 \text{ mm} \times 9 \text{ mm}$ 인 평면형 자력계를 사용하였다. Fig. 2는 헬멧형 뇌자도 장치에 사용한 평면형 자력계를 나타낸 것이다.

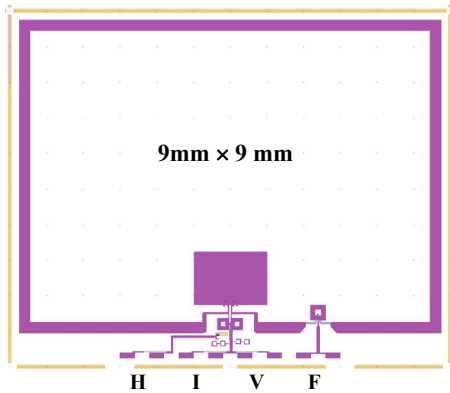


Fig. 2. Photograph of the planar type magnetometer used at a whole head MEG system; (H:heater, I: bias current, V:voltage, F:feedback).

B. Shielding factor and Sensor noise

순도 99.95 %의 납 판을 직경 13 cm인 원형 flat 형태와 같은 직경의 깊이 6 cm인 hemispherical 형태로 만들어 각각의 형태에 따른 자기 차폐율을 측정하였다. 납 표면으로부터 검출코일을 10 mm 간격으로 거리를 변화시켜 차폐율을 확인하였다. 외부 인가 자장(B_{external})은 5개의 SQUID 센서에 균일한 자장이 동시에 인가되도록 길이 $1.5 \text{ m} \times 1.5 \text{ m}$ 의 충분히 큰 helmholtz coil을 사용하였다. 자기 차폐율은 식 (3)과 같이 정의하였다.

$$\text{Shielding factor}(S) = H^{(0)}_{\text{axial}}/H_{\text{axial}} \quad (3)$$

Fig. 3은 차폐율 측정을 위한 초전도체의 형태와 검출코일의 위치 및 인가 자장을 나타낸 것이다. 센서가 초전도체 표면에 가까워지면 lead의 표면상태와 금속 내부의 불순물 함량에 의

해 Meissner current와 flux trap이 센서의 특성에 영향을 주게 된다. 이러한 초전도체와 SQUID 센서의 근접효과에 의한 영향을 센서의 백색잡음과 fluctuation 잡음을 비교하여 확인하고자 하였다. 또한 인가 자장의 주파수를 변화시켜 자기 차폐율을 측정하여 초전도 차폐가 주파수에 독립적임을 확인하였다.

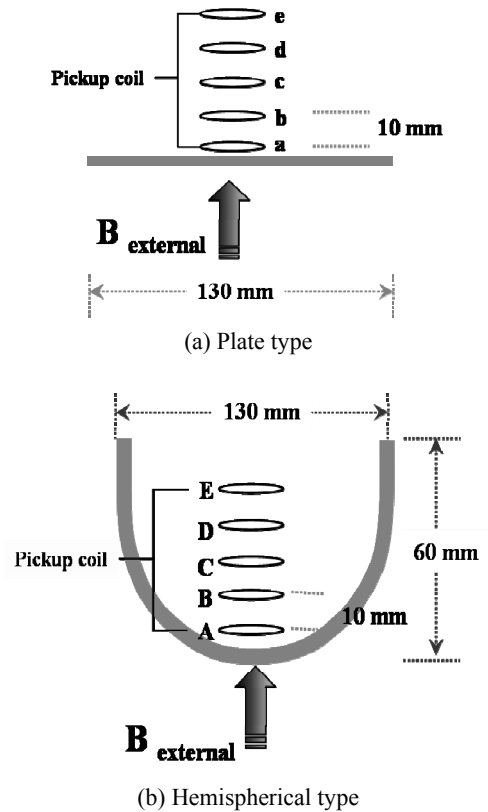
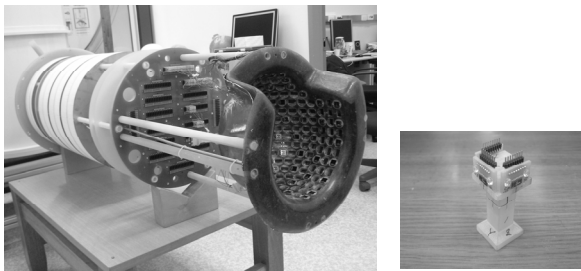


Fig. 3. Arrangement of the circular superconducting (a) flat disk and (b) hemispherical plate with the sensor coil in an applied magnetic field.

C. Superconductive shield MEG system

헬멧형 뇌자도에 초전도 차폐를 활용하기 위해 순도 99.95 %의 1mm lead 판을 hemispherical 형태로 제작하였다. 초전도 헬멧 내부에 신호 검출을 위해 planar형 자력계 49개를 납 표면으로부터 15 mm 이격시켜 설치하였다. Adaptive 필터를 이용하기 위해 기준 채널을 권선형 3D-vector 방식으로 5개 지점에 15개를 설치하였다. Fig. 4는 제작된 초전도 차폐형 인서트를 나타

낸 것이다. 자기 차폐율이 ~140배(@ 0.1 Hz)의 특성을 가지는 MSR에서 가청 주파수 1 kHz에 대해 유발되는 청각유발신호를 측정하였다. 같은 조건에서 초전도 차폐를 하지 않은 기준선이 50 mm인 1차 미분계 MEG 장치를 이용하여 청각유발신호를 측정하였다. 측정된 두 개의 신호에 대한 SNR을 비교하여 간단한 헬멧형 초전도 차폐가 뇌자도에 얼마나 유용한지 평가하였다.



(a) Helmet type insert (b) 3D-Vector

Fig. 4. (a) Helmet type insert with lead superconductive shield and (b) 3D vector magnetometer for reference channel.

III. 결과 및 토의

Flat 형태와 hemispherical 형태의 초전도체에 대한 차폐율은 flat 형태인 경우 납 표면으로부터의 거리가 35 mm 이상 이격되면 차폐효과가 없었고, hemispherical 형태에서는 거리에 따라 차폐율이 10배에서 750배까지 지수함수적으로 급격하게 변화하였다.

Fig. 5는 납 표면으로부터 거리에 따른 차폐율을 나타낸 것이다. Hemispherical 형인 경우 깊이 방향으로 들어갈수록 직경 D가 작아짐으로 인해 차폐율이 식 (1)보다 크게 나온 것으로 판단된다. 각 거리에서 주파수별 차폐율은 동일하게 나타났다. 초전도체 표면과 센서의 검출코일까지의 거리를 0.5 cm~10 cm 변화시킬 경우, 초전도체 표면으로부터 거리가 멀어질수록 white noise는 12 fT/Hz^{1/2}에서 3.5 fT/Hz^{1/2}로 최대 1/4배정도 크게 변화하였다. 이는 두가지 원인에 의해 설명될 수 있다. 첫째는 초전도체 표면에 검출코일이 가까워질수록 검출코일의 유효면적

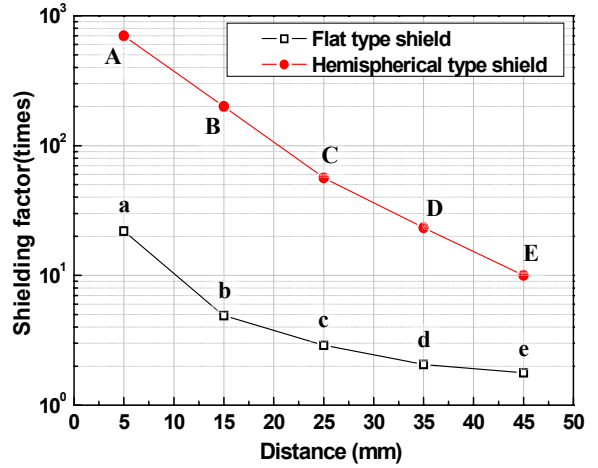


Fig. 5. The shielding factor as a function of distance between pickup coil and lead surface.

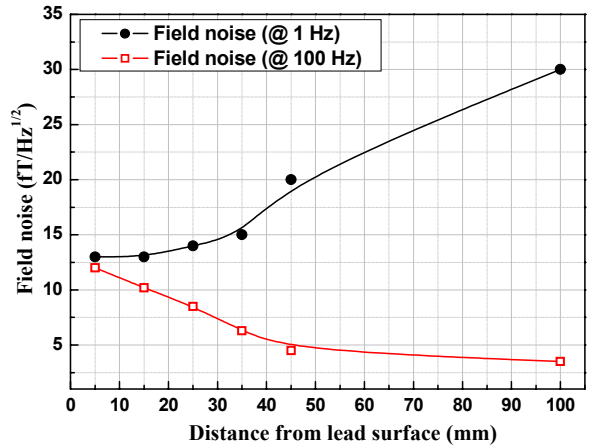


Fig. 6. The field noise of DROS as a function of distance from a lead surface.

(A_{eff})가 줄어들어 자장잡음 ($B_N \sim 1/A_{eff}$)은 증가할 것이다. 둘째는 초전도 차폐를 할 경우, 검출코일과 초전도체 표면까지의 거리(d)의 두 배($2d$)에 해당하는 기준선을 가진 1차 미분계와 같은 동작 특성을 보임으로써 검출 코일의 인덕턴스(L_p)가 두 배 증가하여 자장잡음 ($B_N \sim L_p$)이 증가하는 것으로 설명할 수 있다. 반면에 1 Hz의 저주파 잡음은 거리가 감소할수록 30 fT/Hz^{1/2}에서 13 fT/Hz^{1/2}로 감소하였다. 이는 자기차폐실 내부로 유입되는 저주파 자기잡음을 초전도 차폐가 효과적으로 차폐시킨 것으로 판

단된다. Fig. 6은 거리에 따른 DROS의 잡음 특성을 나타낸 것이다.

센서의 백색잡음 증가와 외부 환경잡음 차폐 그리고 측정 대상인 신호원의 깊이를 고려하여 초전도체와 검출코일의 최적 거리를 결정해야 할 것이다. 또한 정확한 신호원 측정 및 분석을 위해, 초전도 차폐를 할 경우 센서의 기본 특성과 위치 calibration이 반드시 선행되어야 할 것으로 판단된다. Fig. 7은 여러 가지 뇌자도 장치를 이용하여 측정된 청각유발신호를 비교한 것이다. 준 자기차폐환경에서 측정된 청각유발신호(Fig. 7b)가 자기 차폐를 한 상태에서의 결과(Fig. 7c)와 큰 차이를 보이지 않아 자기차폐실의 특성에 무관하게 깨끗한 청각유발신호를 얻을 수 있었다. 특히 준 자기차폐 환경에서 초전도 차폐형 MEG 시스템에 의해 측정된 청각유발신호가 자기차폐환경에서 기준선이 50 mm인 1차 미분계에 의해 측정된 신호와 비

슷한 특성을 보였다. 이는 초전도 차폐형 MEG 시스템에 사용된 SQUID가 자력계임을 감안하면 초전도 차폐가 저주파 잡음 특성 향상에 크게 기여함을 알 수 있다.

IV. 결 론

초전도 차폐를 뇌자도 장치에 활용하기 위해 초전도 차폐 특성을 조사하였다. 초전도체 표면과 센서의 거리 및 초전도체 형태에 따른 자기 차폐 특성 변화를 확인하였다. 초전도 차폐는 주파수에 독립적이며, 특히 고가의 MSR로 달성하기 어려운 저주파 영역에서의 높은 자기차폐율을 얻을 수 있었다. 따라서 저가의 낮은 차폐율을 가지는 MSR에서 제작이 간단한 저비용의 헬멧형 초전도 차폐를 활용함으로써 차폐율 향상에 크게 기여할 것으로 판단된다. 센서의 특성은 초전도체에 근접할수록 시스템 백색잡음이 2배 이상 증가하여 초전도 차폐를 하면 센서의 기본특성이 변함을 알 수 있었다. 따라서 뇌자도 장치 제작 후에는 센서의 특성 및 신호원 위치에 대한 전반적인 calibration이 반드시 선행되어야 할 것이다. 초전도 차폐형 뇌자도 장치를 이용하여 측정된 청각유발신호의 SNR은 저주파 배경잡음 특성이 향상됨을 알 수 있었다. 이러한 차폐 특성을 이용하면 현재 많이 연구되는 DC MEG 측정에 매우 유용한 차폐방식이 될 것이라 생각된다.

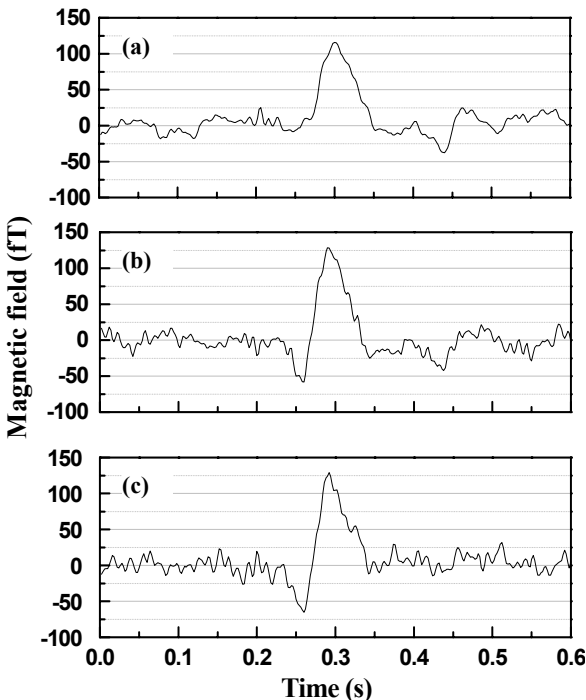


Fig. 7. Comparison with auditory evoked signals measured by several MEG system.:(a) the conventional MEG system(MSR door close), (b) the MEG system with superconductive shield(MSR door open), (c) the MEG system with superconductive shield(MSR door close).

References

- [1] 이용호, 권혁찬, 김진목, “생체자기계측을 위한 자기차폐실의 설치 및 특성”, *Journal of the Korean Mag. Soc.*, Vol. 6, NO. 4, pp. 123-129, August, 1996.
- [2] G. stroink and B. Blackford, “Aluminum shielded room for biomagnetic measurements”, *Rev. Sci. Instrum.*, 52(3), pp. 463-468, Mar. 1981.
- [3] Gen Uehara, Yoshiaki Adachi, Masahiro Shimogawara, and Hisashi Kado, “Multi-Channel SQUID Systems for Biomagnetic Measurement”, *IEICE Trans. Electron.*, Vol. E86-C, pp. 43-53, 2003.
- [4] 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.
- [5] Keiji Iramina, and Shoogo Ueno, “Measurement of Brainstem Auditory Evoked Magnetic Fields Using a Highly Sensitive SQUID Magnetometer with a Variable Baseline”, IEEE Trans. on Mag., Vol. 31, pp. 4271-4273, November 1995.
- [6] Y. H. Lee, K. Kim, J. M. Kim, and Y. K. Park, “A low noise multichannel magnetocardiogram system for the diagnosis of heart electric activity”, Korean society of medical and biological Eng., Vol. 27, pp.154-163, 2006.
- [7] R. H. Kraus, E. R. Flynn, M. A. Espy, A. Matlashov, W. Overton, C. C. Wood, M. V. Perters, and P. Ruminer, “ First Results for a Superconducting Imaging-Surface Sensor Array for Magnetocardiography”, Recent Advances in Biomagnetism Proceeding, pp. 43-46, 1999.
- [8] D. B. Hulsteyn, A. G. Petsch, E. R. Flynn, and W.C. Overton, “Superconducting Imaging Surface Magnetometry”, Rev. Sci. Instrum., Vol. 66, pp. 3777-3784.
- [9] H. Ohta, T. Matsui, M. Aono, and K. Kamiyo, “A 64-channel whole head SQUID system in a superconducting magnetic shield”, Supercon. Sci. Technol., Vol.12, pp. 762-765, 1999.