

Optimum Combination of Pickup Coil Type and Magnetically Shielded Room for Maximum SNR to Measure Biomagnetism

K. K. Yu^a, Y. H. Lee^{*,a}, C. S. Kang^a, J. M. Kim^a, Y. K. Park^a

^a Bio-signal Research Center, Korea Research Institute of Standards and Science, Daejeon, Korea

생체신호 측정을 위한 최대의 신호 대 잡음비를 가지는 검출코일의 형태 와 자기차폐실의 최적 조합

유권규^a, 이용호^{*,a}, 강찬석^a, 김진목^a, 박용기^a

Abstract

We have investigated the optimum combination of the environmental noise condition and type of SQUID pickup coil in order to obtain maximum signal-to-noise ratio (SNR). The measurement probe consists of 1st order gradiometer with pickup coils of 100 mm, 70 mm, and 50 mm baseline length, a 2nd order gradiometer with 50 mm baseline, and a magnetometer. The pickup coils are fabricated by winding Nb wire on a bobbin with 200 mm diameter. Noise and heart signal of a healthy male were measured by various SQUID sensors with different types of pickup coils in various magnetically shielded rooms (MSR), and compared to each other. The shielding factors were found to be 43 dB, 35 dB and 25 dB at 0.1 Hz for MSR-AS, MSR-BS, MSR-CS, respectively. White noises were 3.5 fT/Hz^{1/2}, 4.5 fT/Hz^{1/2} and 3 fT/Hz^{1/2} for the 1st order gradiometers, the 2nd order gradiometers, and magnetometer for all MSRs. SNR of the magnetometer was up to 56 dB in MSR-AS, while the 1st order axial gradiometer with 70 mm baseline length was up to 54 dB in MSR-BS. The 2nd order axial gradiometer with 50 mm baseline length of pickup coil was found to be up to 40 dB in MSR-CS.

Keywords : Magnetocardiogram, SQUID sensor, Magnetically shielded room, Signal to Noise Ratio

I. 서론

생체자기신호는 수백 fT에서 수백 pT로 지구 자기장보다 10억 분의 1보다 작은 신호를 가진다. 이러한 매우 미세한 생체 신호를 측정하기

위해 높은 감도를 가지는 초전도 양자 간섭소자(Superconductivity Quantum Interference Device : SQUID)와 지자장을 효과적으로 차폐시킬 수 있는 우수한 자기 차폐실이 필요하다 [1]. 또한 미세한 생체자기 신호로부터 신체 질환을 판별하기 위해 생체신호는 감소시키지 않고, 효과적으로 외부환경잡음만 제거하여 높은 신호 대 잡음비를 얻어야 한다. 잡음 제거는 SQUID 센

*Corresponding author. Fax : +82 42 868 5291

e-mail : yhlee@kriss.re.kr

+On leave from KRISS

서의 검출코일을 1차 혹은 2차 미분계 형태로 형성하거나, 수백 Hz 이하에서 차폐율이 높은 자기 차폐실을 제작함으로써 이를 수 있다 [2,3]. 최대의 신호 대 잡음비는 SQUID 센서의 형태와 자기차폐실의 적절한 조합으로 얻을 수 있다. 검출코일의 baseline 길이를 너무 짧게 할 경우 높은 잡음제거 효과는 있으나 신호 감소율이 증가하여 신호 대 잡음비는 감소한다 [4]. 또한 높은 차폐율을 가지는 자기차폐실을 제작하기 위해서 많은 경비와 시간 그리고 넓은 공간이 소요되는 단점이 있다. 따라서 최대의 신호 대 잡음비를 가지는 검출코일의 형태와 자기 차폐실의 설계 조건을 찾아야 한다. 본 연구에서 SQUID 센서를 검출코일의 baseline 길이에 따라 자력계, 1차 미분계 및 2차 미분계를 제작하였다. 설계조건과 사용재료에 따라 세가지 형태의 자기 차폐실을 제작하고, 자기 차폐율 특성을 알아보았다. 제작된 센서를 이용하여 각 차폐실에서 건장한 남성을 대상으로 심자도를 측정하였다. 측정된 심자도 신호를 이용하여 최대의 신호 대 잡음비를 가지는 최적의 조합을 조사하였다.

II. 실험 방법

A. SQUID 센서 제작

SQUID 센서는 큰 자기-전압 변환 계수를 가지는 이중이완발진 초전도 양자간섭소자(Double Relaxation Oscillation SQUID:DROS) 형태로 제작하였다 [5]. 조셉슨 접합은 4.2 K에서 동작하는 Nb박막을 Nb/Al/Al₂O₃ /Al/Nb의 다층박막으로 제작하였다 [6]. 검출코일은 구조적으로 변경을 용이하게 할 수 있는 권선 형태로 제작하였다. 권선을 위한 bobbin은 glass fiber를 직경 20 cm 인 원형으로 가공하였고, 직경 125 μm인 NbTi (1%) 도선을 한 바퀴 감아 준비하였다. SQUID 센서는 검출코일의 baseline 길이에 따라 자력계, baseline 길이가 5 cm, 7 cm 및 10 cm 1차 미분계와 5 cm 2차 미분계로 제작하였다. Input 코일과 검출코일은 직경 25 μm의 Nb를 이용하여

sonic bonding 방법으로 보조 연결장치를 사용하지 않고 직접 연결하였다. Bonding용 Nb wire는 연성을 향상시키기 위해 진공에서 2400 °C로 4 분간 열처리 하였다 [7].

B. 자기차폐실 제작

자기 차폐는 자성재료에 의한 ferromagnetic shielding과 전도성이 좋은 금속에 의한 eddy current shielding에 의해 이루어진다. Ferromagnetic shielding은 다음과 같은 식이 적용된다^[1].

$$S_{ferromagnetic} = 0.75 (\mu d / L) + 1 \quad (1)$$

여기서 μ 는 자성재료의 투자율, d 는 두께, L 은 변의 길이를 나타낸다. 또한 Eddy current shielding은 다음과 같은 식이 적용된다^[1].

$$S_{metallic} = [1 + (Ldf\pi\mu_0 / 2\rho)^2]^{1/2} \quad (d < \delta) \quad (2)$$

$$S_{metallic} = [(Ldf\pi\mu_0)/(4 \rightarrow 2\delta)] e^{\delta/\delta} \quad (d > \delta) \quad (3)$$

여기서 ρ 는 비저항, δ 는 skin depth, f 는 주파수, μ_0 는 진공 투자율, d 는 금속의 두께, L 은 변의 길이를 나타낸다.

실험에서 구축된 자기 차폐실은 사용된 재료 및 구조에 따라 MSR-AS, MSR-BS 및 MSR-CS의 세가지 형태로 제작되었다. 내부면적은 가로*세로*높이가 2.4 * 2.4 * 2.4 입방 미터로 모두 동일하게 시공하였다. MSR-AS는 Al-H beam을 중심으로 12 mm Al plate와 0.35 mm * 6 겹의 permalloy(Ni 78%)를 차폐실 내부와 외부에 배치한 이중구조를 하고 있다. MSR-BS는 12 mm Al plate를 중심으로 0.35 mm * 4겹의 permalloy를 양면에 배치하고 30 mm MDF 합판을 이용하여 Al plate와 permalloy 사이를 이격시켰다. MSR-CS는 12 mm Al plate를 기준으로 차폐실 내벽에만 0.35 mm * 4 겹의 permalloy를 부착하는 단층구조로 시공하였다. 식(1)~(3)에 의해 MSR-AS, MSR-BS, MSR-CS의 설계값은 0.1 Hz에서 각각 40 dB, 34 dB, 23 dB로 예상되었다. MSR-CS의 구조는 매우 간단하여 많은 시간과 시공경비를 절감하였으며, 비교적 좁은 공간에

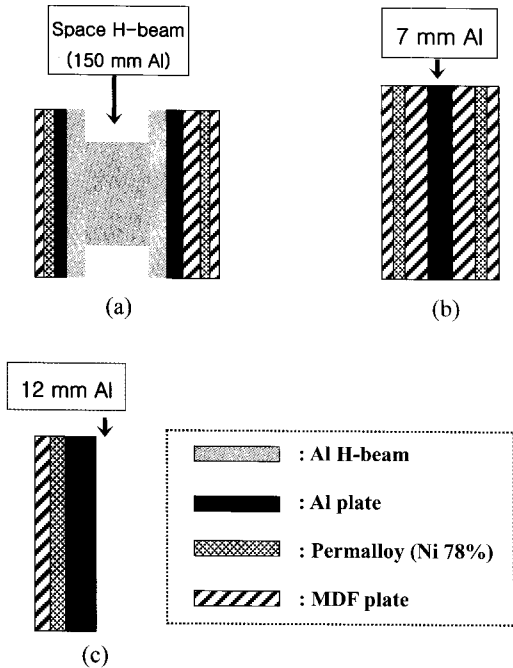


Fig. 1. Schematic of magnetically shielded room's wall; (a) MSR-AS (b) MSR-BS (c) MSR-CS.

서도 설치가 가능하였다. 그림 1은 각 차폐실의 시공 구조를 보인 것이다. 차폐율을 측정하기 위해 차폐실 외벽에 3-축 Helmholtz 코일을 설치하였다. AC field에 대한 차폐율은 Helmholtz 코일에 교류전류를 0.1 Hz에서 1 kHz까지 변화시키며 각각의 주파수에서 자장 감소율을 확인하였다. DC field에 대한 차폐율은 설치장소에서 차폐실 설치 전과 후의 X, Y, Z 방향의 지자장의 크기를 측정하여 벡터합의 절대값 크기를 비교하였다.

C. 심자도 측정 및 SNR 비교

검출코일 형태가 다른 15개의 SQUID 센서를 하나의 인서트에 장착하고 각각의 차폐실에서 센서의 잡음 특성 및 심자도를 측정하였다. 그림 2는 각기 다른 형태의 검출코일을 가진 SQUID 센서가 장착된 인서트를 나타낸 것이다. 신호 대 잡음비는 측정된 심자도 신호의 R_{peak} 와 시스템의 총 잡음의 비를 식(4)로 구하였다.

$$SNR = S_{R_{peak}} / S_{N_{peak}} \quad (4)$$

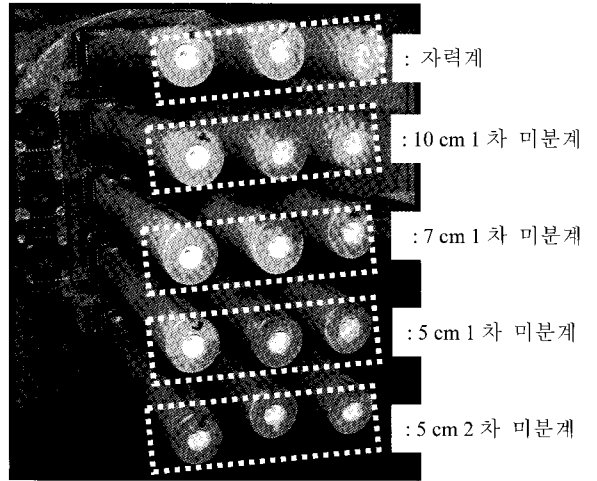


Fig. 2. Photograph of insert with various types of SQUID sensors.

여기서 $S_{R_{peak}}$ 은 심자도의 R 파의 크기, $S_{N_{peak}}$ 는 시스템의 총 노이즈를 나타낸다. 각각의 자기 차폐실에서 최대의 신호 대 잡음비를 가지는 최적의 검출코일 형태를 알아보았다.

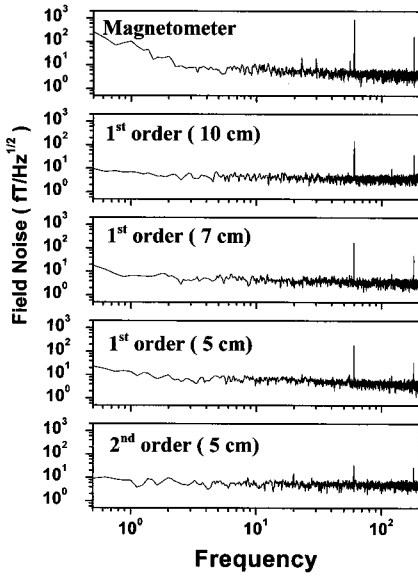
III. 결과 및 토의

권선형 자력계, 1차 미분계 및 2차 미분계의 백색 잡음 특성은 3 fT/√Hz, 3.5 fT/√Hz 및 4.5 fT/√Hz로 차폐실의 종류나 검출코일의 baseline의 길이에 관계없이 동일하게 나왔다.

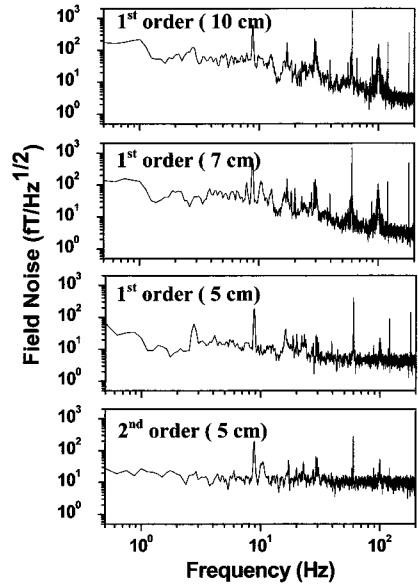
하지만 10 Hz 이하의 건물이나 액화 헬륨 Dewar 자체 진동에 의해 발생하는 잡음은 baseline 길이 및 차폐실의 차폐율에 따라 다르게 측정되었다. 그림 3은 각 차폐실에서 측정된 잡음특성을 나타낸 것이다. MSR-AS, BS, CS의 차폐율은 0.1 Hz에서 43 dB, 35 dB, 25 dB였고, 100 Hz에서는 92 dB, 85 dB, 85 dB로 측정되었다. 수 Hz 이하의 주파수에서 자기차폐는 ferromagnetic shielding에 의해 이루어짐으로 permalloy의 종류나 layer 수와 시공 구조에 따라 영향을 받아 0.1 Hz에서 차폐율이 다소 차이가 났다. 하지만 수백 Hz 이상에서 RF 차폐는 Al plate 표면에 흐르는 eddy current에 의해 이루어짐으로 Al plate 사이의 접합 저항 및 두께에 의

해 결정되어 100 Hz에서의 차폐율이 비슷하게 나온 것으로 판단된다. 그림 4는 차폐실의 shielding factor를 측정하는 것이다. 신호 대 잡음비는 각 차폐실에서 동일한 대상으로 심자도를 측정하는 후 시스템의 총 잡음과 심자도 신호 중에서 가장 큰 R_{peak} 의 크기를 비교하였다.

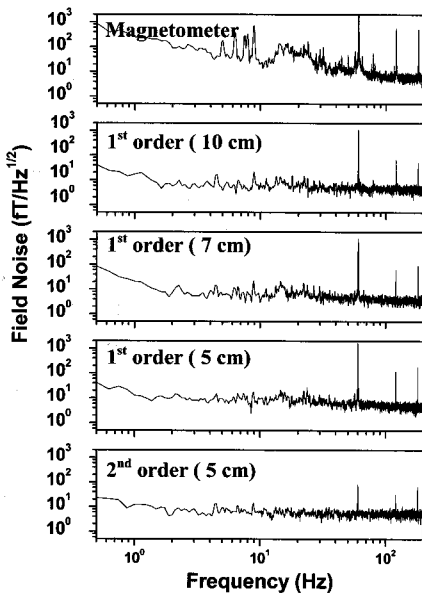
차폐실의 구조 및 사용된 재료에 따라 최대의 신호 대 잡음비를 가지는 SQUID 센서의 형태는 MSR-AS에서 자력계가 56 dB, MSR-BS에서 baseline 길이 7 cm인 1차 미분계가 53 dB, MSR-CS에서 길이 5 cm인 2차 미분계가 40 dB로 나타났다. 완전 비차폐 환경에서의 심자도



(a) MSR-AS



(c) MSR-CS



(b) MSR-BS

Fig. 3. Noise spectrum of magnetometer, 1st and 2nd order gradiometer with 5 cm, 7 cm, 10 cm baseline length ; measured at (a) MSR-AS, (b) MSR-BS and (c) MSR-CS.

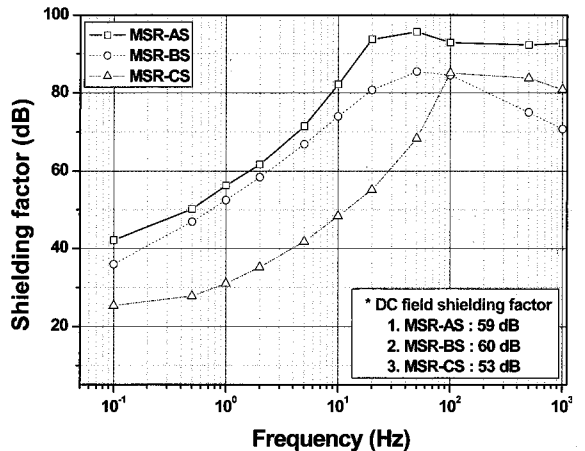


Fig. 4. AC field and DC field Shielding factor of MSR-AS, MSR-BS and MSR-CS.

신호 측정을 위해 검출코일 형태의 결정 및 측정 방법에 대한 예상을 할 수 있었다. 그림 5는 각 차폐실에서 측정된 실시간 심자도 파형을 이용하여 계산된 신호 대 잡음비를 나타낸 것이다.

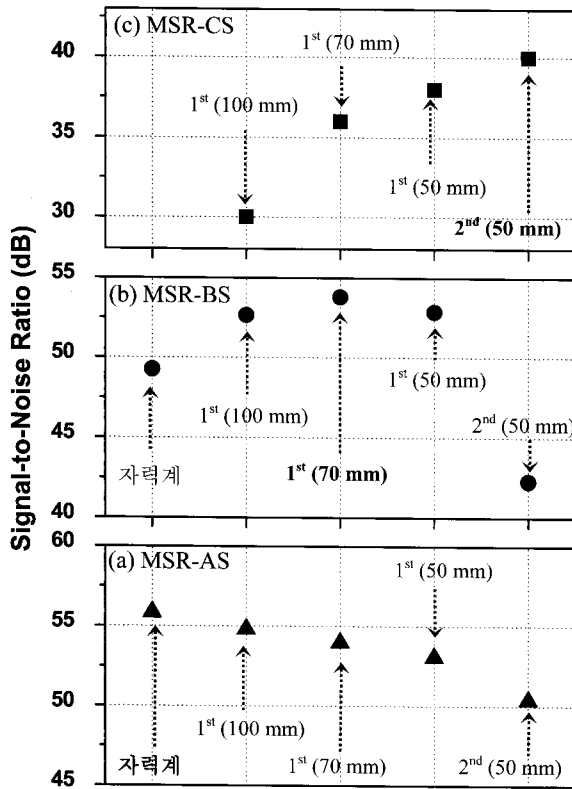


Fig. 5. Signal to Noise Ratio of magnetocardiogram measured by magnetometer, 1st and 2nd order gradiometer; (a)MSR-AS, (b)MSR-BS and (c)MSR-CS.

IV. 결 론

최대의 신호 대 잡음비를 가지기 위한 SQUID 센서의 검출코일 형태와 자기차폐실의 최적 조합을 알아보았다. 권선형 SQUID 센서는 검출코일의 baseline 길이에 따라 자력계, 1차 및 2차 미분계를 제작하였다. 센서의 잡음특성은 차폐실의 종류에 따라 백색 잡음은 자력계, 1차 미분계 및 2차 미분계가 3 fT/√Hz, 3.5 fT/√Hz 및 4.5 fT/√Hz로 우수한 특성을 나타내었다. 하

지만 MSR-BS, -CS에서 자력계 및 baseline인 긴 미분계의 경우 외부 진동 노이즈에 의한 영향을 많이 받아 1/f노이즈가 많이 증가하는 것으로 나타났다. 자기차폐실은 시공 구조와 사용 재료에 따라 MSR-AS, MSR-BS 및 MSR-CS의 세가지 형태로 제작하였다. MSR-AS, -BS, -CS의 차폐율은 0.1 Hz에서 43 dB, 35 dB와 25 dB로 측정되었다. 각 차폐실에서 SQUID 센서를 이용하여 심자도를 측정하고 심자도 신호와 환경잡음의 비를 구하였다. 신호 대 잡음비는 MSR-AS에서 자력계가 56 dB, MSR-BS에서 baseline 길이가 7 cm인 1차 미분계가 53 dB, MSR-CS에서 baseline 길이가 5 cm인 2차 미분계가 40 dB로 최적의 조합을 보였다.

References

- [1] 이용호, “생체자기계측을 위한 자기차폐실의 설치 및 특성”, Journal of the Korean Magnetics Society, 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] Pekka Heinonen, “Properties of a thick walled conducting enclosure in low frequency magnetic shielding”, J. Phys. E; Vol.13, pp. 569-570, 1980.
- [4] J. Vrba, “SQUID Gradiometers in real Environment”, In: *SQUID Sensors: Fundamentals, Fabrication and Applications*, ed by H. Weinstock, NATO ASI Series, Kluwer Academic publisher, Dordrecht/Boston/London, pp. 117-178.
- [5] 이용호, 김진목, 권혁찬, “자속-전압 변환계수가 큰 이중이완발진 초전도양자간섭소자의 제작 및 동작 조건에 따른 잡음특성”, Sae Mulli, Vol. 39, Number 1, pp. 86-93, February, 1999.
- [6] L Fritsch, H Elsner, M Schubert and H-G Meyer, “SNS and SIS Josephson junctions with dimensions down to the submicron region prepared by a unified technology”, Supercond. Sci. Technol., pp. 880-882, November 1999.
- [7] Jaszcsuk W., “Bonding of a niobium wire to a niobium thin film”, Mea. Sci. Technol, Vol. 2, pp. 1121-2, 1991.