

# Noise Characteristics of 64-channel 2nd-order DROS Gradiometer System inside a Poorly Magnetically-shielded Room

J. M. Kim<sup>\*,a</sup>, Y. H. Lee<sup>a</sup>, K. K. Yu<sup>a</sup>, K. Kim<sup>a</sup>, H. Kwon<sup>a</sup>, Y. K. Park<sup>a</sup>, Ichiro Sasada<sup>b</sup>

<sup>a</sup> Bio-signal Research Center, Korea Research Institute of Standards and Science, Daejeon, Korea

<sup>b</sup> Department of Applied Science for Electronics and Materials, Kyushu University, Fukuoka, Japan

Received 16 August 2006

## 저성능 자기차폐실에서 64채널 DROS 2차 미분계 시스템의 잡음 특성

김진목<sup>\*,a</sup>, 이용호<sup>a</sup>, 유권규<sup>a</sup>, 김기웅<sup>a</sup>, 권혁찬<sup>a</sup>, 박용기<sup>a</sup>, Ichiro Sasada<sup>b</sup>

### Abstract

We have developed a second-order double relaxation oscillation SQUID (DROS) gradiometer with a baseline of 35 mm, and constructed a poorly magnetically-shielded room (MSR) with an aluminum layer and permalloy layers for magnetocardiography (MCG). The 2nd-order DROS gradiometer has a noise level of 20 fT/ $\sqrt{\text{Hz}}$  at 1 Hz and 8 fT/ $\sqrt{\text{Hz}}$  at 200 Hz inside the heavily-shielded MSR with a shielding factor of  $10^3$  at 1 Hz and  $10^4 - 10^5$  at 100 Hz. The poorly-shielded MSR built of a 12-mm-thick aluminum layer and 4 - 6 permalloy layers of 0.35 mm thickness, is 2.4 m x 2.4 m x 2.4 m in size, and has a shielding factor of 40 at 1 Hz,  $10^4$  at 100 Hz. Our 64-channel second-order gradiometer MCG system consists of 64 2nd-order DROS gradiometers, flux-locked loop electronics, and analog signal processors. With the 2nd-order DROS gradiometers and flux-locked loop electronics installed inside the poorly-shielded MSR, and with the analog signal processor installed outside it, the noise level was measured to be 20 fT/ $\sqrt{\text{Hz}}$  at 1 Hz and 8 fT/ $\sqrt{\text{Hz}}$  at 200 Hz on the average even though the MSR door is open. This result leads to a low noise level, low enough to obtain a human MCG at the same level as that measured in the heavily-shielded MSR. However, filters or active shielding is needed for clear MCG when there is large low-frequency noise from heavy air conditioning or large ac power consumption near the poorly-shielded MSR.

*Keywords* : SQUID, DROS, gradiometer, magnetocardiography

### I. 서 론

초전도양자간섭장치(Superconducting Quantum

Interference Device, SQUID)로 구성된 심자도와 뇌자도 장치는 인체에서 발생하는 미세한 자장을 측정하여 심장에 관련한 질병을 진단하거나 뇌 질환과 기능을 분석하는 장치로 많이 활용한다 [1-3]. 특히 이중이완발진 SQUID (Double Relaxation Oscillation SQUID, DROS)는 일반 dc

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

SQUID에 비해 자속에 대한 출력 전압이 크고 자속-전압 전달계수가 10배 정도 큰 값을 가져 검출 시스템을 간단하고 외부의 빠른 자장 신호를 쉽게 측정할 수 있는 장점을 갖는다 [4,5]. 2차 미분계 SQUID는 외부 환경 잡음을 감소시키므로 자기 차폐실 없이 심자도를 측정할 수 있으나[6] 심자도 시스템 주변에 저주파 잡음 신호가 발생할 경우 측정에 많은 시간을 필요하고 많은 필터를 거쳐 신호를 검출하여 정확한 심자도 신호를 얻기 쉽지 않다. 자기차폐실을 사용하지 않기 보다 저성능 차폐실을 사용하여 정확하고 빠르게 MCG 신호를 검출하도록 하였다. 2차 미분계 DROS와 저성능 자기차폐실을 개발하여 심자도 시스템 구성한 뒤 잡음을 측정하여 시스템의 성능을 알아보았다.

II. 2차 미분계 시스템

2차 미분계 DROS

외부 환경 잡음을 제거하기 위해 2차 미분계 DROS를 개발하였다. Fig. 1은 제작된 DROS 2차 미분계의 사진이고, Fig. 2는 간단한 등가회로를 보인다. 자속을 검출하는 픽업 코일은 2차 미분 코일로 베이스 라인은 35 mm를 갖고 DROS는 최적 인가전류  $I_b = 20 - 35 \mu A$ , modulation voltage  $V_m = 60 - 100 \mu V$ , transfer coefficient  $\partial V/\partial \Phi = 1 \text{ mV}/\Phi_0$ 를 갖고 자세한 특성은 Table 1에서 나타난다. 1 Hz에서 1000배, 100 Hz에서  $10^4 - 10^5$ 배의 차폐율을 갖는 고성능 자기 차폐실(IMADCO Co.)에서 2차 미분계 DROS의 잡음 특성을 측정하여 Fig. 3에서 보이고 있다. 평균 잡음은 1 Hz에서  $20 \text{ fT}/\sqrt{\text{Hz}}$ , 100 Hz에서  $8 \text{ fT}/\sqrt{\text{Hz}}$ 로 나타난다.

검출 시스템

자속의 변화에 따라 자속양자( $\Phi_0 = 2.07 \times 10^{-15} \text{ Wb}$ )마다 반복적으로 나타나는 SQUID 출력을 선형적으로 검출하기 위하여 FLL 회로를 구성하며 전단증폭기, 적분기, 피드백으로 구성한다 [6].



Fig. 1. Photograph of the 2nd-order DROS gradiometer mounted on a printed circuit board (PCB) of the size of 108 mm x 16 mm..

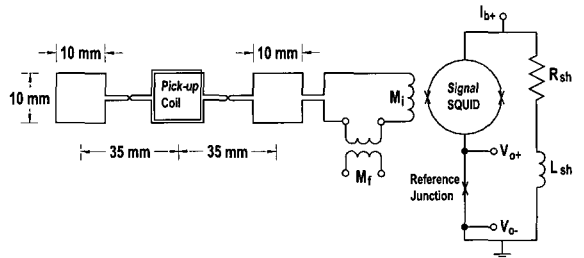


Fig. 2. A simplified equivalent-circuit of the 2nd-order DROS gradiometer with a baseline of 35 mm, where  $M_i$  is an input coil and  $M_f$  a feedback coil, and  $R_{sh}$  is a shunt resistance and  $L_{sh}$  a shunt inductance in a relaxation circuit.

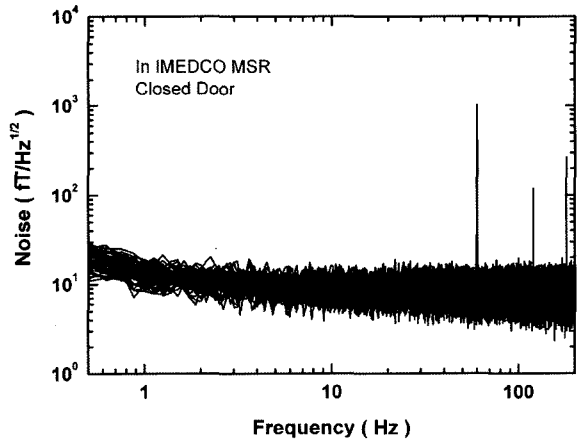


Fig. 3. Noise spectra of 64-channel 2nd-order DROS gradiometers measured inside a heavily-shielded MSR (IMEDCO Co.):  $20 \text{ fT}/\sqrt{\text{Hz}}$  @ 1 Hz,  $8 \text{ fT}/\sqrt{\text{Hz}}$  @ 200 Hz,  $1 \text{ pT}/\sqrt{\text{Hz}}$  @ 60 Hz,  $0.12 \text{ pT}/\sqrt{\text{Hz}}$  @ 120 Hz,  $0.27 \text{ pT}/\sqrt{\text{Hz}}$  @ 180 Hz.

전단증폭기는 SQUID 출력신호를 증폭하며 Linear Technology사의 연산증폭기 LT1128 두개와 OP27 하나로 차동 계장(instrumentation) 증폭기를 구성하고 증폭도 1000, 입력전압잡음  $1.5 \text{ nV}/\sqrt{\text{Hz}}$  @ 1 kHz, 대역폭 100 kHz를 갖는다.

Table 1. Parameters of Planar Second-Order DROS Gradiometer.

Signal SQUID	
Junction size	$2 \times (4 \mu\text{m} \times 4 \mu\text{m})$
Critical current $I_{c1}$	11 $\mu\text{A}$
SQUID hole size	$100 \mu\text{m} \times 100 \mu\text{m}$
SQUID inductance $L_s$	104 pH
$\beta_L (=2I_0L_s/\Phi_0)$	1.4
$\beta_c^* (=2\pi \cdot 2I_0R_{sh}C_{sq}/\Phi_0)$	0.4
Damping resistance $R_w$	3 $\Omega$
Reference junction	
Junction size	$5 \mu\text{m} \times 5 \mu\text{m}$
Critical current $I_{c2}$	8 $\mu\text{A}$
Relaxation Circuit	
Shunt resistance $R_{sh}$	1.5 $\Omega$
Shunt inductance $L_{sh}$	3 nH
Damping resistance $R_d$	50 $\Omega$
Input coil	
Number of turns	20 turns
Line width	5 $\mu\text{m}$
Inductance $L_i$	196 nH
Mutual inductance with SQUID $M_i$	4.8 nH
Damping resistance $R_x$	30 $\Omega$
Damping capacitance $C_x$	30 pF
Pickup coil	
Area	123 mm <sup>2</sup>
Line width	0.3 mm
Inductance $L_p$	189 nH
Baseline	3.5 cm

적분기는 연산증폭기에 저항과 캐패시터를 써서 one pole 적분기를 구성한다. 적분상수  $t_i$ 는  $R_i = 10 \text{ k}\Omega$ ,  $C_i = 1 \text{ nF}$  일 때  $t_i = R_i C_i = 10^{-5} \text{ s}$ 를 갖는다. 되먹임 회로에서 되먹임 저항  $R_f$ , 적분기 출력값이  $V_{FLL}$ 일 때 SQUID에 전달되는 되먹임 자속  $\Phi_f$ 는  $\Phi_f = M_f(V_{FLL}/R_f)$ 로 표시되며, SQUID와 되먹임 코일간의 상호 인덕턴스  $M_f = 21 \text{ pH}$ ,  $R_f = 11 \text{ k}\Omega$ 일 때 적분기 출력 전압 1 V는 약  $0.93\Phi_0$ 를 나타낸다.

FLL 출력을 생체자기신호 측정에 알맞게 처리하기 위해 아날로그 신호처리기(analog signal processor, ASP)를 구성한다. ASP는 고역통과필터, 신호증폭기, 저역통과필터, 60 Hz 제거 필터로 이루고 신호증폭기의 증폭율은 100배를 갖

는다. 고역통과필터는 연산증폭기를 이용한 2차 RC 능동 필터로 0.1 Hz의 cut-off 주파수를 갖고 고역통과필터를 지난 신호는 연산증폭기를 써서 100배 증폭한다. 저역통과필터는 5차 Butterworth 필터인 LTC1062 (Linear Technology)로 구성하며 100 Hz의 cut-off 주파수를 갖고 작동주파수 영역에서 잡음은 100  $\mu\text{V}_{\text{rms}}$ 를 갖는다. 60 Hz 제거 필터는 4차 Elliptic notch 필터 LMF90 (National Semiconductors)으로 구성되고 중심주파수  $f_0 = 60 \text{ Hz}$ 에서 제거율 약 40 dB, 제거 대역폭  $0.127f_0$ 를 갖고 출력 잡음은 약 300  $\mu\text{V}_{\text{rms}}$ 이다.

64 채널 2차 미분계 DROS와 FLL 시스템이 결합한 2차 미분계 시스템을 Fig. 4에서 보이고 있다. DROS는 헬륨 듀어 안에 위치하며 FLL 시스템은 듀어를 지지하고 이동시키는 갠트리 위에 놓여 있다.

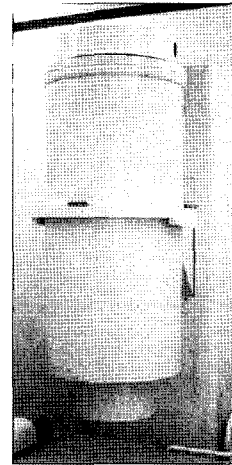


Fig. 4. 64-channel DROS gradiometer system: 64 2nd-order DROS gradiometers inside a liquid helium dewar, and FLL system on the gantry controlling a position of the dewar.

### III. 저성능 자기차폐실

외부 환경에서 발생하는 자기장 잡음과 고주파 전자기파 신호가 SQUID에 영향을 주지 않도록 2.4 m x 2.4 m x 2.4 m의 저성능 자기 차폐

실을 제작하였다. 저성능 차폐실은 낮은 주파수 영역에서 차폐율이 작지만 고성능 차폐실보다 무게는 1/5이고 제작비용과 설치기간은 각각 1/4 정도로 경제적으로 제작할 수 있는 장점이 있다. 제작된 자기차폐실의 모습을 Fig. 5에서 보이고 있다. 12 mm 두께의 알루미늄 판으로 전체 구조물을 지탱하여 벽 두께를 줄이고 고주파 신호가 차폐실로 유입하지 않게 한

다. 자기 차폐 효율을 증가하기 위해 0.35 mm 두께의 퍼멀로이(Permalloy) 판을 차폐실 안쪽에 여러 겹 덧붙인다. 퍼멀로이 판은 차폐실의 방향에 따라 수량을 다르게 부착하였으며 앞면과 문에 5겹, 바닥면 6겹, 좌우면, 뒷면, 그리고 윗면은 4겹으로 부착한다. 최종적으로 문을 제외한 차폐실 안쪽은 9 mm 나무 합판과 벽지로 마감하여 벽의 두께가 30 mm가 넘지 않는다. 제작된 차폐실의 성능을 Fig. 6에 나타내었다.

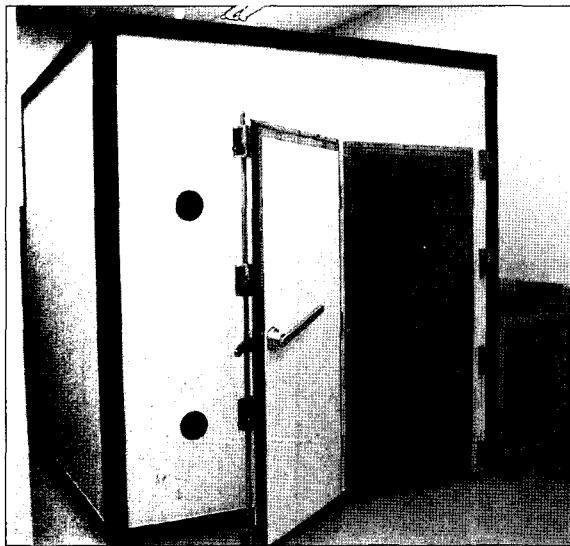


Fig. 5. Front view of the poorly magnetically-shielded room (P-MSR) with a size of 2.4 m x 2.4 m x 2.4 m.

#### IV. 시스템의 잡음 특성

P-MSR 안에 64 채널 2차 미분계 DROS와 FLL 시스템을 설치하고 문밖에서 FLL 출력을 받아 ASP에서 신호를 처리를 한다. 차폐실 문을 닫은 상태와 열었을 때 각 채널의 잡음을 스펙트럼 분석기로 측정하여 심자도 측정의 가능성을 알아보았다. 차폐실 주변의 환경 잡음을 측정하기 위해 자속계 Mag-03MS100 (Bartington)를 써서 잡음을 측정하여 Fig. 7에서 나타내었다. X 축은 차폐실 문에서 뒷면으로 향하고, Y 축은 왼쪽 면에서 오른쪽 면으로 향하며, Z 축은 바닥 면에서 윗면으로 향하는 방향이다. 2.5 Hz와 20 Hz에서 발생하는 잡음 피크는 차폐실 바닥 바로 아래층에 있는 대형 공

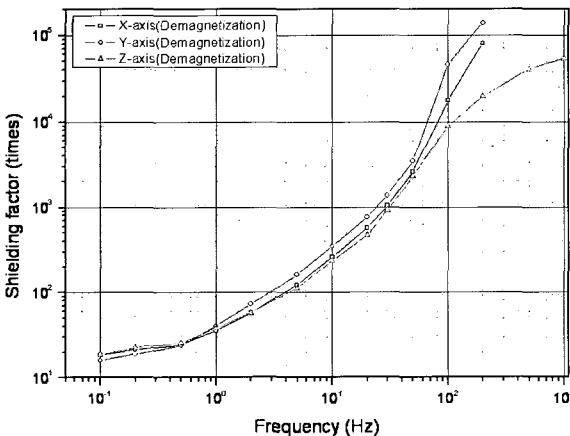


Fig. 6. Shielding factors of P-MSR: 40 at 1 Hz and  $10^4$  at 100 Hz in the center when the door is closed.

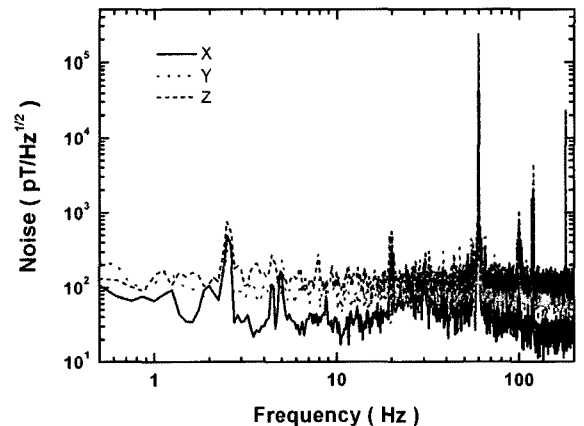


Fig. 7. Environment noise around P-MSR; 0.8 nT at 2.5 Hz 0.25  $\mu$ T at 60 Hz and 23 nT at 180 Hz.

조기의 모터에서 발생하는 신호이다. 60 Hz, 120 Hz, 180 Hz에서 발생하는 잡음 피크는 220 V와 110 V 교류전원에서 발생하는 잡음 신호이고 100 Hz에서 발생하는 신호는 차폐실에서 300 m 떨어진 5 MHz 단파 방송국에서 송출하는 전파 신호에 포함된 변조파의 영향으로 발생하는 잡음 신호이다.

차폐실 문을 닫고 64 채널 시스템을 작동한 뒤 시스템이 갖는 잡음을 측정하여 Fig. 8에서 보이고 있다. 고성능 차폐실에서 측정된 잡음 특성 Fig. 3과 비교할 때 P-MSR의 잡음 레벨은 거의 같으나 1 Hz 아래에서 약간 증가하여 나타난다. P-MSR에서 2.5 Hz 잡음이 검출되지만 고성능 차폐실에서 보이지 않는데 이는 고성능 차폐실의 차폐율이 저주파 영역에서 높고 차폐실의 위치가 대형 공조기로부터 P-MSR 보다 떨어져 있기 때문이다. 60 Hz와 180 Hz의 잡음은 두 차폐실에서 거의 같은 값을 갖지만 120 Hz 잡음은 P-MSR에서 오히려 낮게 측정된다. 출력신호를 ASP에서 60 Hz 제거 필터를 거치게 할 경우 잡음 신호는 10 fT/√Hz 이하로 낮아져 충분히 MCG 신호를 검출할 수 있다.

P-MSR의 문이 열린 상태에서 시스템 잡음을 측정하여 Fig. 9에서 보이고 있다. 잡음 레벨은

그대로 유지 되나 외부 환경 잡음이 증가한다. 60 Hz에서 잡음은 1 pT/√Hz에서 6 pT/√Hz로 증가하고 180 Hz의 잡음도 0.25 pT/√Hz에서 1 pT/√Hz로 증가한다. 문을 닫았을 때 낮게 검출되었던 100 Hz와 120 Hz의 잡음은 증가하여 나타나고 전체적인 형태는 Fig. 6에서 측정된 잡음 분포와 같은 모습을 보이고 있으나 60 Hz에서 잡음 크기는 6 pT/√Hz로 나타난다. 그러므로 60 Hz, 120 Hz, 180 Hz 잡음 제거 필터를 사용할 경우 P-MSR에서 차폐실 문이 열린 채로 MCG를 측정할 수 있다.

64 채널 시스템을 차폐실 바깥에서 작동하여 잡음을 측정하였다. Fig. 10에서 2차 미분계 시스템을 보이고 있으며 잡음은 Fig. 11에서 보이고 있다. 각 채널의 잡음 레벨이 차폐실 안보다 100배 이상 증가하여 1 pT/√Hz @ 100 Hz를 갖고 저주파 영역에서 잡음이 급격히 증가하여 1 Hz에서 30 - 100 pT/√Hz로 나타난다. 1 Hz 잡음은 시각 송출 방송국에서 발생하는 변조신호로 시스템에 직접 영향을 미쳐 1 Hz 하모닉스 주파수에서도 잡음으로 나타난다. 또한 100 Hz에서 발생하는 잡음이 200 pT/√Hz 이상 측정되는데 이 주파수 역시 시각 송출 방송국에 보내는

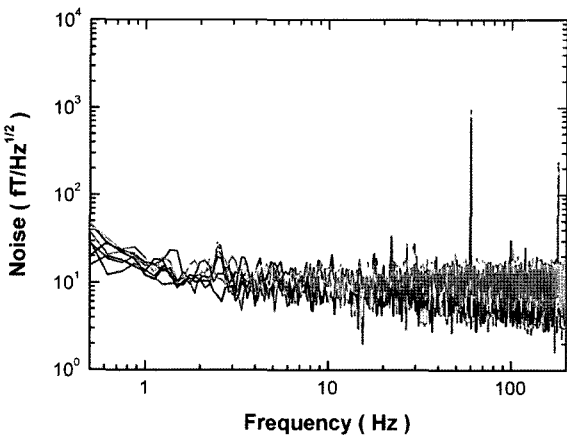


Fig. 8. Noise spectra of 64-channel 2nd-order gradiometer system displayed with 8 channels when the door of P-MSR is closed; 20 fT/√Hz @ 1 Hz, 8 fT/√Hz @ 200 Hz, 1 pT/√Hz @ 60 Hz, 0.25 pT/√Hz @ 180 Hz.

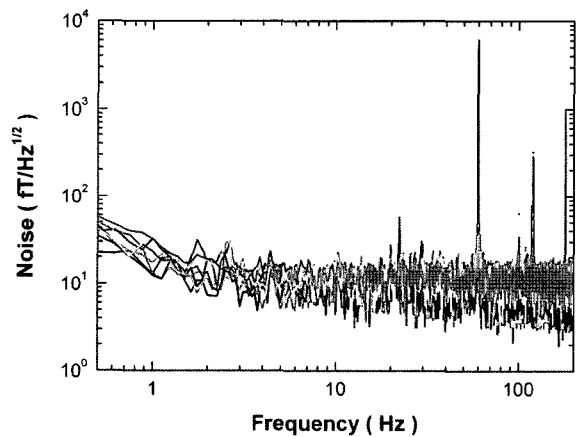


Fig. 9. Noise spectra of the 64-channel 2nd-order gradiometer system displayed with 8 channels when the door of P-MSR is open; 20 fT/√Hz @ 1 Hz, 8 fT/√Hz @ 100 Hz, 6 pT/√Hz @ 60 Hz, 0.3 pT/√Hz @ 120 Hz, 1 pT/√Hz @ 180 Hz.

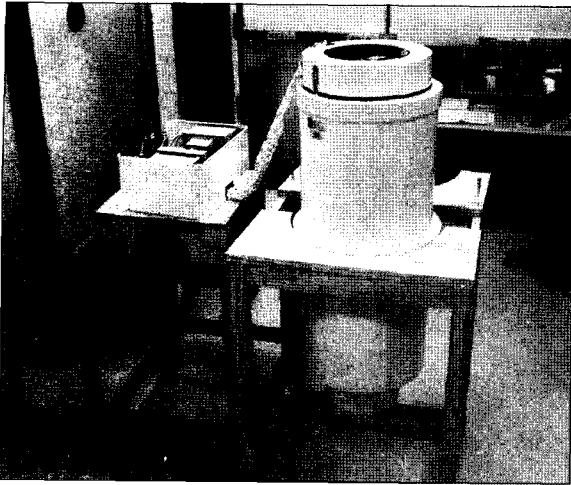


Fig. 10. 64-channel 2nd-order gradiometer system and FLL system for measuring noise of the system outside P-MSR.

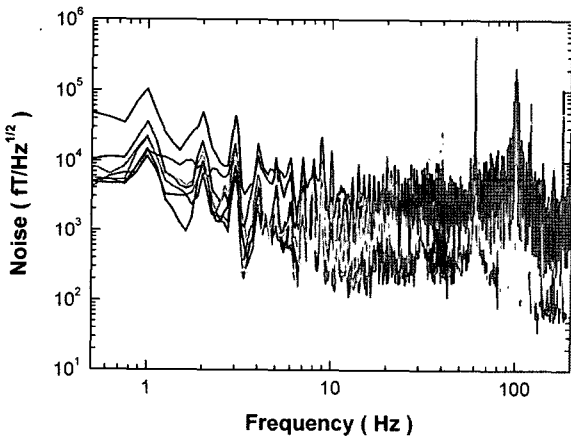


Fig. 11. Noise spectra of the 64-channel 2nd-order gradiometer system displayed with 8 channels outside P-MSR;  $30 - 100 \text{ pT}/\sqrt{\text{Hz}}$  @ 1 Hz,  $700 \text{ pT}/\sqrt{\text{Hz}}$  @ 60 Hz,  $200 \text{ pT}/\sqrt{\text{Hz}}$  @ 100 Hz,  $70 \text{ pT}/\sqrt{\text{Hz}}$  @ 120 Hz,  $100 \text{ pT}/\sqrt{\text{Hz}}$  @ 180 Hz.

100 Hz 변조 전파에 의하여 발생한다. 이때 60 Hz에서 잡음은  $700 \text{ pT}/\sqrt{\text{Hz}}$ 로 나타나며 180 Hz에서  $100 \text{ pT}/\sqrt{\text{Hz}}$ 로 나타난다. 2.5 Hz 잡음은 1 Hz 변조파로 발생하는 잡음보다 작게 나타나서 보이지 않는다. 이러한 잡음 크기는 심자도를 측정하기에 너무 크게 나타나므로 이를 감소시켜야 하며 특히 라디오 주파수 신호는 직

접 시스템에 영향을 미치므로 이를 제거하기 위해 고주파 잡음 차폐 장치가 필요하다.

## V. 결론

35 mm 베이스 라인을 갖는 2차 미분계 DROS시스템을 저성능 차폐실 (P-MSR)에서 작동하여 시스템이 갖는 잡음을 측정하고 심자도 진단에 활용할 수 있는지 알아보았다. 2차 미분계 시스템은 고성능 차폐실에서 갖는 잡음 레벨을 P-MSR에서 그대로 가져  $20 \text{ fT}/\sqrt{\text{Hz}}$  @ 1 Hz,  $8 \text{ fT}/\sqrt{\text{Hz}}$  @ 100 Hz로 측정되었으나 가까운 곳에서 발생하는 2.5 Hz 저주파 잡음 신호는 완전히 감소하지 않고 나타났다. P-MSR 문을 열어놓은 채 시스템을 작동할 때 60 Hz와 60 Hz 하모닉스 주파수에서 잡음이 증가하고 외부 변조 신호 100 Hz에서 잡음이 증가하였다. 그러나 이들의 잡음 증가는 기존의 ASP에서 충분히 감소시켜 심자도 측정에 영향을 미치지 않는다. 한편 시스템을 차폐실 바깥에 설치한 뒤 작동시켰을 때 5 MHz 단파 방송국의 전파 신호가 DROS와 FLL회로에 직접에 영향을 주어 시스템 잡음이 크게 증가하여 심자도를 측정할 수 없다. 외부의 잡음에 유리한 2차 미분계 DROS이지만 외부 고주파 잡음을 차폐할 수 있는 고주파 차폐를 필요로 한다. P-MSR은 무게가 가볍고 설치가 간단하며 가격을 낮출 수 있는 장점이 있으나 가까운 거리에서 큰 자기장이 발생할 경우 이를 제거해 줄 필터나 능동 차폐가 필요하다. 2차 미분계 DROS 시스템과 P-MSR으로 결합된 시스템은 저가격이지만 높은 분해능을 가져 심자도 진단에 충분히 활용할 수 있다.

## References

- [1] H. Nowak, "Biomagnetic Instrumentation," in *Magnetism in Medicine*, eds. W. Andra and H. Nowak, Berlin: Wiley-VCH, pp. 88-135, 1998.

- [2] K. Sternikel and A. I. Braginski, "Biomagnetism using SQUIDs: status and perspectives," *Supercond. Sci. Technol.* Vol. 14, pp. 160-171, 2006.
- [3] R. Fenici, D. Brisinda, and A. M. Meloni, "Clinical application of magnetocardiography," *Expert Rev. Mol. Diagn.*, vol. 5, pp. 291-313, 2005.
- [4] D. J. Adelerhof, H. Nijstad, F. Flokstra, and H. Rogalla, "(Double) relaxation oscillation SQUIDs with high flux-to-voltage transfer: Simulations and experiments," *J. Appl. Phys.*, vol. 76, pp. 3875-3886, 1994.
- [5] Y. H. Lee, H. C. Kwon, J. M. Kim, Y. K. Park, and J. C. Park, "Double relaxation oscillation SQUID with high flux-to-voltage transfer and its application to a biomagnetic multichannel system," *J. Kor. Phys. Soc.*, vol. 32, pp. 600-605, 1998.
- [6] J. M. Kim, K. D. Kim, Y. H. Lee, K. K. Yu, K. W. Kim, H. C. Kwon, and I. Sasada, "Noise characteristics of readout electronics for 64-channel DROS magnetocardiography system," *Progress in Superconductivity*, vol. 7, pp.46-51, 2005..