

# Design and Characterization of Low-noise Dewar for High-sensitivity SQUID Operation

K. K. Yu\*, Y. H. Lee, K. Kim, H. Kwon and J. M. Kim

*Brain and Cognition Measurement Lab, Korea Research Institute of Standards and Science, Daejeon, Korea*

(Received 22 March 2010 revised or reviewed 14 April 2010 accepted 15 April 2010)

## 고감도 SQUID 냉각을 위한 저잡음 듀아의 설계 및 특성 조사

유권규\*, 이용호, 김기웅, 권혁찬, 김진목

### Abstract

We have fabricated the low noise liquid helium(LHe) dewar with a different shape of thermal shield to apply the 64-channel SQUID(Superconducting Quantum Interference Device) gradiometer. The first shape of thermal shield was made of an aluminum plate with a wide width of 100 mm slit and the other shape was modified with a narrow width of 20 mm slit. The two types of dewars were estimated by comparing the thermal noise and the signal-to-noise ratio(SNR) of magnetocardiography(MCG) using the 1<sup>st</sup> order SQUID gradiometer system cooled each dewar. The white noise was different as a point of the dewar. The noise was increased as close as the edge of dewar, and also increased at the thermal shield with the more wide width slit. The white noise of the dewar with thermal shield of 100 mm slit was 6.5 fT/Hz<sup>1/2</sup> at the center of dewar and 25 fT/Hz<sup>1/2</sup> at the edge, and the white noise of the other one was 3.5 - 7 fT/Hz<sup>1/2</sup>. We measured the MCG using 64-channel SQUID gradiometer cooled at each LHe dewar and compared the SNR of MCG signal. The SNR was improved of 10 times at the LHe dewar with a modified thermal shield.

*Keywords* : Thermal noise, LHe dewar, SQUID, DROS, gradiometer, magnetocardiography

### I. 서론

뇌 또는 심장 등에서 발생하는 생체자기 신호를 측정하고 분석함으로써 뇌기능 진단 이나 심장질환의 진단이 가능하다 [1, 2]. 그런데

이런 생체 자기 신호의 세기가 매우 미약 하므로 고감도 자기장 측정기술이 필요하다. 기본적으로 고감도 SQUID 센서가 필요하며, 자기잡음을 제거하기 위한 자기차폐실과 미분계 검출코일을 적절히 조합한 측정 시스템 이 필요하다 [3-6]. SQUID 냉각장치는 비자성 fiberglass reinforced plastic(FRP) 재료를 사용하여 제작되는데, 특히 저온초전도 Nb SQUID의 냉각을 위한 듀아가 가져야 할 조건은 1) 낮은 액체헬륨

\*Corresponding author. Fax : +82 42 868 5291

e-mail : kkyu@kriss.re.kr

+On leave from KRISS

증발열, 2) 낮은 열자기잡음, 3) 장기간의 진공 유지기간 등이다. 헬륨 듀아 의 구조는 액체를 보관하는 내통과 진공을 유지하는 외통 사이에 진공이 형성되며, 외부의 복사열을 막기 위한 열반사막과 반사막을 냉각시키기 위한 vapor-cooled shield로 구성된다. 차폐판은 얇은 알루미늄 박막이 증착된 마일러 막으로서, 반사판 끼리 서로 절연시켜 다수를 중첩시키는데, 알루미늄 박막의 열자기잡음을 줄이기 위해 박막의 면적을 줄인 전기적으로 격리된 격자구조를 하고 있다. 반사판 냉각을 위한 실드는 열전달이 좋은 금속재료를 사용한다. 실드는 반사판을 지지하는 역할도 해야 하므로 구조적으로 가급적 견고한 형태를 가져야 한다. 보통 구리 또는 알루미늄 판을 사용하여 제작하는데, 열전달을 좋게 하여 알루미늄 반사판의 냉각뿐만 아니라 열자기 잡음을 SQUID 센서 잡음레벨 이하로 줄이는 과정이 필요하다.

본 논문에서는 고감도 심자도 측정장치 개발을 위해 헬륨듀아를 제작하였고, 듀아의 실드 재료 및 설치방법에 따른 열자기잡음을 측정하여 최적의 제작조건을 제시하였다.

## II. 액체헬륨 듀아의 단열 구조

액체헬륨 듀아는 기본적으로 Fig. 1과 같은 구조를 하고 있다. 듀아 외벽으로부터 유입되는 열복사를 반사시키는 super-insulation(SI)과 superinsulation(SI) 사이는 보통 폴리 에스테르 네트 절연층으로 분리시켜 열반사 특성을 높이며, super-insulation(SI)의 온도를 낮추기 위해 실드를 이용하여 듀아 목부분의 차가운 벽에 연결시킨다. 보통 헬륨듀아에는 약 50층의 SI가 사용되며, 3개의 실드가 사용된다. Super-insulation(SI)는 두께 25 nm 내외의 알루미늄 박막이 마일러 기관에 한 면 또는 양면에 증착되어 있다. 알루미늄 금속면 표면의 자유전자의 열적 요동에 의해 발생하는 열자기잡음이 박막의 두께와 면적에 비례해서 증가하기 때문에 박막의 면적을 줄여야 한다. 따라서 superinsulation(SI)용 알루미늄 박막은 면적 8 mm x 8 mm의 독립적인 사각형 구조로 하였으며, 사각형끼리는 전기적으로 절연이 되어있다.

실드는 여러 겹의 superinsulation(SI) 층과 폴리에스테르 층을 지지해야 하므로 구조적으로 튼튼해야 하며, 열전달 특성이 좋아야 한다. 이러한 조건에 부합하는 재료로는 알루미늄과 구리 등의 금속과 알루미늄과 탄소 복합체 등의 비금속 물질이 있다. 알루미늄과 탄소 복합체는 비교적 우수한 열전달 특성과 자유전자의 요동에 의한 열잡음도 없다. 하지만 대면적으로 제작하기 어렵고, 가공의 용이성 또한 나쁘며, 재료도 고가인 단점을 가짐으로 인해 특수 목적의 듀아 제작에만 사용된다. 이에 반해 구리와 알루미늄은 가공이 용이하고 매우 좋은 열전달 특성을 가지고 있으나 열잡음과 eddy current에 의한 진동잡음으로 인해 SQUID 센서의 동작에 나쁜 영향을 주는 단점을 가진다[7, 8]. 3개의 실드는 가장 안쪽에서부터 40 K, 80 K, 120 K의 온도 분포를 가지게 설치되었다. 각각의 실드는 듀아의 목에 열접촉시켜, 근접한 super-insulation(SI)에 의해 수집된 열을 액체 헬륨의 증발열을 이용하여 냉각시켜 주는 역할을 하게 된다.

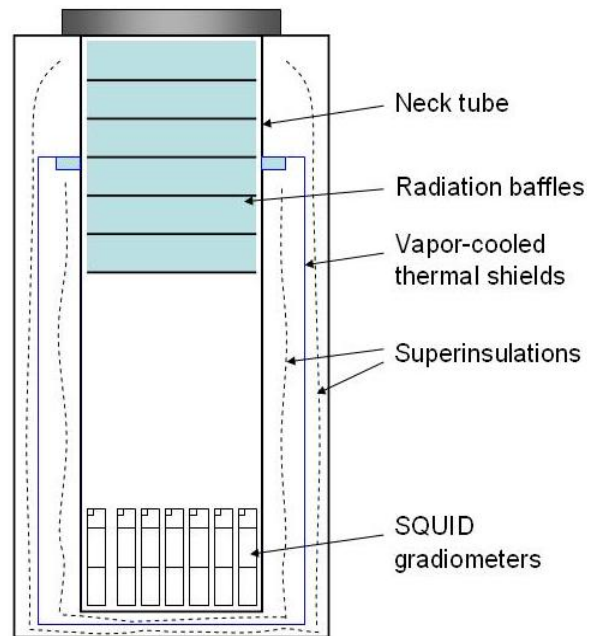


Fig. 1. Schematic structure of a liquid He dewar for cooling multichannel SQUID gradiometers.

### III. 듀아 설계 및 특성 평가

#### A. 1차 제작된 LHe 듀아의 형태 및 특성

1차로 제작한 듀아는 두께 2 mm의 알루미늄판을 둥글게 만들어 듀아 진공층에 형성하였다. 듀아의 바닥은 신호 감소를 줄이기 위해 진공층을 약 10 mm 정도로 얇게 제작하고, 수집된 복사열을 최대한 냉각시키기 위해 40 K 실드 1층을 바닥까지 설치하였다. Fig. 2는 제작된 듀아의 설계도와 알루미늄으로 제작된 120 K 실드의 형태를 나타낸 것이다. 40 K와 80 K 실드는 센서로부터 매우 근접해 있어 실드의 잡음 특성에 매우 민감하게 반응함으로 바닥은 0.1 mm의 직경을 가진 구리선을 서로 붙인 coil-foil 형태로 제작 하였다. 120 K 실드는 센서로부터 200 mm 높이까지 100 mm 폭으로 절개하여 열잡음과 eddy current에 의한 진동잡음을 줄이고자 하였다. 제작된 듀아의 특성을 평가 하기 위해 기준선 길이가 70 mm이고 검출 코일의 직경이 20 mm인 1차 미분계를 64개 장착한 심자도용 권선형 1차 미분형 SQUID 장치를 제작하여 사용하였다. 각 채널에 사용된 SQUID

센서는 개별적으로 특성을 평가하여 선별한 후 사용하였으며, 미분계의 백색잡음 수준은 약 3 fT/Hz<sup>1/2</sup>였다. 듀아의 위치별 열잡음 및 심자도를 측정하기 위해 센서간 간격을 26 mm로 하고, 신호 손실을 최소화 하기 위해 센서를 삼각구조로 배치하였다. 가장 자리 센서로부터 40 K, 80 K, 120 K까지의 이격거리는 각각 50 mm, 40 mm, 30 mm로 하였다. 측정 신뢰성을 위해 각각의 듀아에서 3회이상 측정하고 열잡음 및 심자도 신호를 비교하였다. 듀아의 특성 평가를 위해 사용된 자기 차폐실은 0.1 Hz에서 약 60 배의 자기 차폐특성을 가졌다. Fig. 3은 64 채널 심자도용 SQUID 장치를 이용하여 측정된 시스템 잡음을 나타낸 것이다. 듀아의 중심으로부터 가장 자리로 갈수록 잡음 수준이 증가하는 것을 육안으로 알 수 있었다.

또한 듀아의 가장자리에 위치한 센서의 동작도 eddy current에 의한 잡음 요동에 매우 민감하게 반응하여 시스템의 안정적 동작에 나쁜 영향을 주었다. John R. Clem 등은 SQUID gradiometer 근처에 위치한 금속에서 유기된 johnson noise의 영향에 대해 이론적으로 식(1)

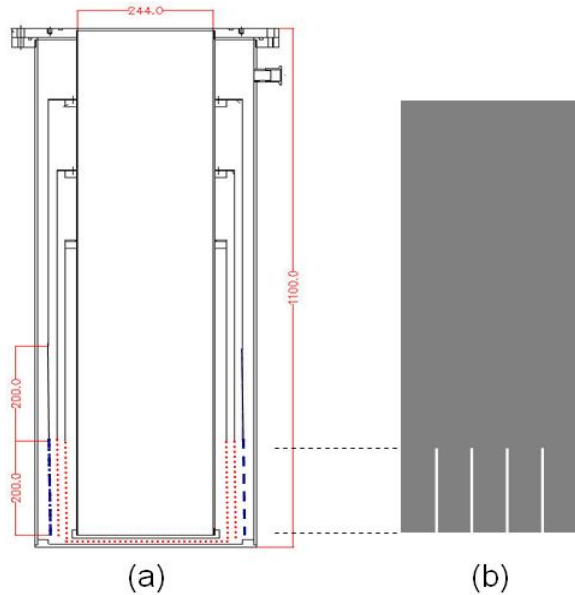


Fig. 2. Structure of the original thermal shield. (a) Structure of the dewar, and (b) details on the thermal shield. Aluminum plate was cut with a width of 100 mm for a length of 200 mm.

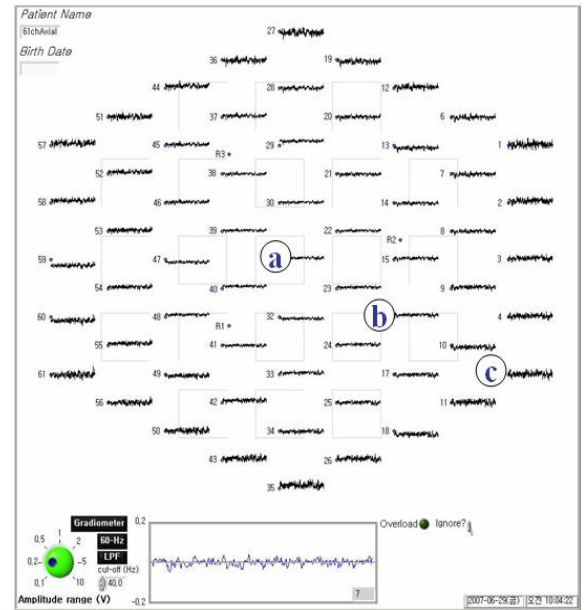


Fig. 3. Noise distribution of the MCG system. Three different points (A, B, C) were compared in the noise spectra.

과 같이 정의 하였다 [9].

$$\Phi_N = (4K_B T u_0^2) / (L_0^2 \rho_n) G \text{ ----- (1)}$$

$$G = \pi d_n a^4 / \{32 z_0^2 (1 + z_0^2 / r_0^2)\}, \text{ if } z_0 \gg a$$

$$G = \pi d_n a^4 / 32 z_0^2, \text{ if } z_0 \ll a$$

여기서  $K_B$ 는 Boltzmann 상수,  $T$ 는 절대온도,  $L_0$ ( $\sim L_p + L_l$ )는 SQUID inductance,  $\rho_n$ 는 금속의 비저항,  $d_n$ 은 금속의 두께,  $a$ 는 SQUID 검출코일의 직경,  $r_0$ 는 금속판의 직경, 그리고  $z_0$ 는 검출코일과 금속면의 거리를 나타낸 것이다. 120 K 실드로부터 유발된 열잡음을 듀아의 위치별로 듀아의 중심(a), 중심과 가장자리의 중간점(b), 가장자리(c)의 3 지점을 선정하여 잡음 스펙트럼을 측정하여 비교 하였다. 각 지점에 위치한 센서의 평균 white noise(@100 Hz)는 듀아의 중심에서  $6.5 \text{ fT/Hz}^{1/2}$ , 중간지점에서  $10 \text{ fT/Hz}^{1/2}$ , 가장자리에서  $25 \text{ fT/Hz}^{1/2}$ 로 나타났다. 120 K 실드로부터 듀아 중심까지의 거리와 가장자리에 위치한 센서의 거리비가 약 4.2 배가 되며, 각 위치에서 측정된 잡음비는 약 3.8배가 되어 식 (1)에서 나타낸 1차 미분형 SQUID로 측정된 금속판에서 유기된 열잡음의 이론적 값과 근사하게 나타났다. 이론값보다 작게 측정된 것은 실드의 방향 및 형태가 판형이 아니라 폭 10

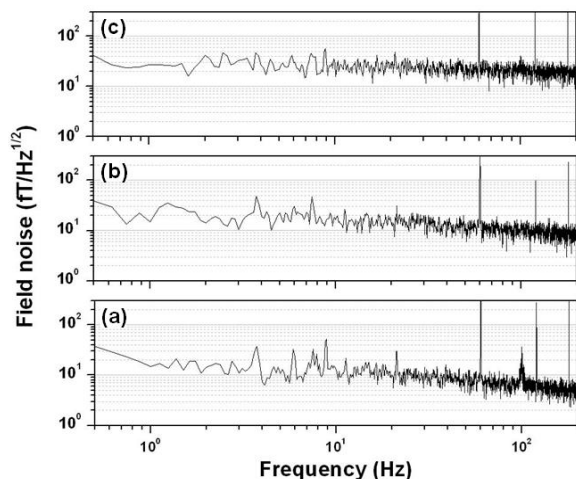


Fig. 4. Magnetic field noise spectra of the SQUID gradiometers inside the original dewar depending on the dewar locations. (a) Central point(A), (b) between center and edge(B), and (c) edge point of the dewar(C).

mm의 slit으로 이루어져 있기 때문인 것으로 판단된다. Fig. 4는 100 mm 폭의 slit을 가진 실드를 사용한 듀아의 위치별 잡음 스펙트럼을 나타낸 것이다.

### B. 2차 제작된 LHe 듀아의 형태 및 특성

선폭 100 mm의 실드를 장착한 듀아를 이용할 경우 SQUID 시스템의 안정성 및 잡음 특성이 나빠져 미세한 생체 자기신호 측정시 신호 대 잡음비가 많이 나빠질 수 있다. 따라서 액체 헬륨의 증발율에 영향을 미치는 실드의 열전달 특성을 저해하지 않으면서 판의 단면적( $r_0$ )을 줄임으로써 열잡음을 감소시키고자 하였다. Fig. 5는 열잡음을 개선하기 위해 제작된 실드가 장착된 듀아의 계략도를 나타낸 것이다. 3개의 실드 중에서 40 K, 80 K 실드는 변경하지 않고, 120 K 실드는 센서 검출코일로부터 높이 200 mm까지는 선폭 20 mm로 slit을 형성하고,

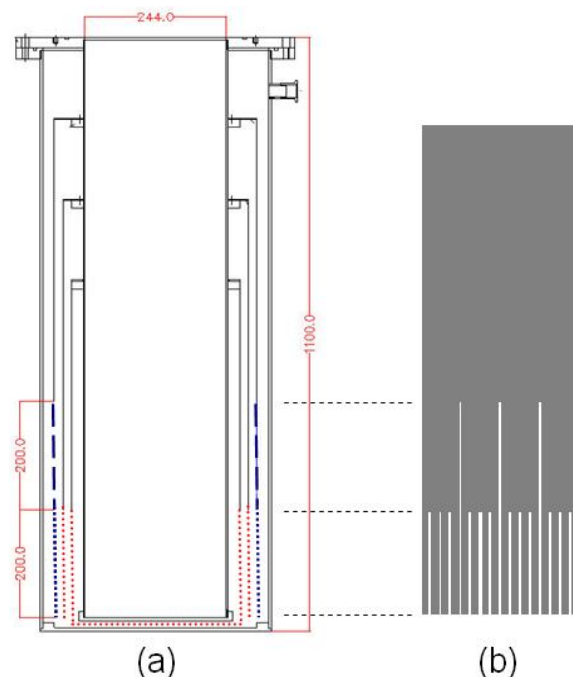


Fig. 5. Structure of the modified thermal shield. (a) Structure of the dewar, and (b) details on the thermal shield. Aluminum plate was cut with a width of 20 mm for a length of 200 mm, and a width of 100 mm for a length of 200 mm.

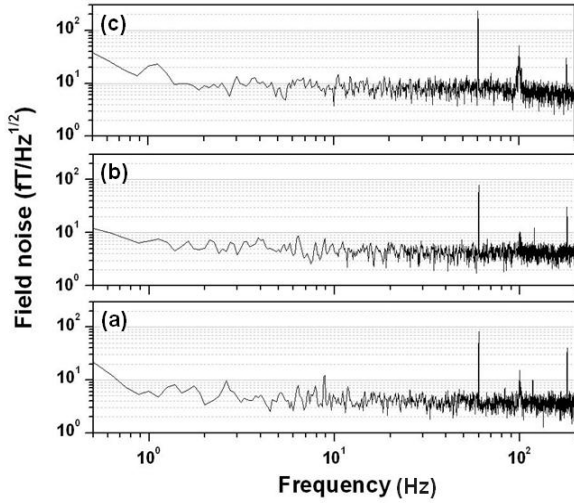


Fig. 6. Magnetic field noise spectra of the SQUID gradiometers inside the modified dewar depending on the dewar locations. (a) Central part, (b) between center and edge(B), and (c) edge point of the dewar(C).

그 위로 200 mm까지는 선평 100 mm의 slit을 형성하였다. 1차 및 2차로 제작된 듀아의 액체 헬륨 증발음에는 변화가 없었다. 듀아의 잡음 특성 비교를 위해 첫번째 제작된 듀아와 동일한 측정 인서트, 회로 및 자기 차폐실을 사용하였고, 환경잡음을 고려하여 같은 시간대에 측정하였다. Fig. 6은 개선된 형태의 thermal shield를 가진 듀아의 잡음 특성을 위치별로 측정한 것이다.

측정 위치는 두 듀아의 잡음 특성 비교를 위해 동일한 지점에 위치한 센서의 잡음 스펙트럼을 측정하였다. 2차 제작된 듀아의 위치에 따른 잡음은  $3.5 \text{ fT/Hz}^{1/2}$ (A),  $4 \text{ fT/Hz}^{1/2}$ (B),  $7 \text{ fT/Hz}^{1/2}$ (C)로 나타났다. 1차로 제작된 듀아의 위치별 잡음 특성보다 듀아의 자장자리에서는 3배 이상, 중심에서는 2배 이상 향상된 특성을 보였다. 또한 외부에서 자기 차폐실로 유입되는 펄스잡음 또는  $1/f$  잡음에 대한 동작 안정성이 많이 향상되었다. 이는 펄스 잡음에 의해 유기된 eddy current가 잡음 요동을 유발하게 되는데 이러한 잡음에 영향을 주는 eddy current는 금속판의 넓이에 비례하여 증가한다. 따라서 넓은 면적의 thermal shield일 경우 SQUID에 크게 영향을 미치지만, shield의 선평을 20 mm로 작게 함으로써 그 영향을 줄일 수 있었던 것으

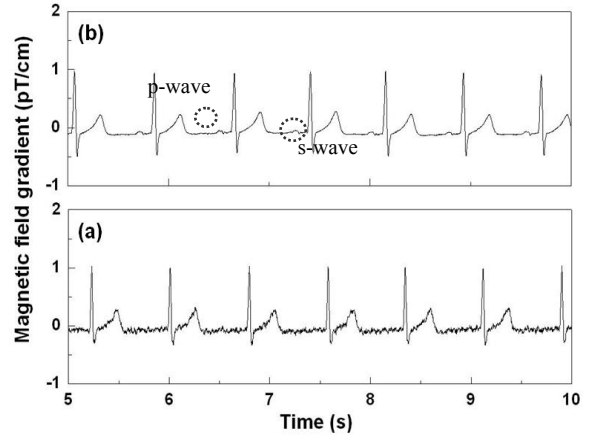


Fig. 7. Comparison of MCG waveforms measured at edge point of the dewar (A): (a) MCG before modification, and (b) MCG after modification of the thermal shield.

로 판단된다.

### C. 심자도 측정 및 SNR 비교

동일한 피측정인을 대상으로 각각의 듀아를 사용하여 특정 위치에서의 심자도를 측정하여 듀아의 특성을 비교하였다. 피측정인의 심장 위치는 두 개의 레이저를 자기 차폐실의 x-축과 y-축에 고정하여 조사함으로써 듀아와 정렬하였다. Fig. 7은 두가지 형태의 실드를 가진 각각의 듀아에서 냉각된 SQUID 장치를 이용하여 측정된 심자도 신호를 나타낸 것이다. 동일한 위치에서의 신호 대 잡음비가 100 mm slit을 가진 것보다 20 mm의 slit을 가진 shield의 경우 약 10배 가량 증가하였다. 또한 개선된 듀아를 사용할 경우 p- 및 s-파를 깨끗하게 측정할 수 있었다.

## VI. 결론

심자도 시스템의 냉각장치로 사용되는 저잡음 액화헬륨 듀아를 설계하고 특성을 평가하였다. 듀아의 실드 형태에 따른 열잡음 특성 및 신호 특성을 평가하여 최적의 설계 조건을 찾고자 하였다. 넓은 선평(100 mm)을 가진 실드로부터 유기된 열잡음 및 잡음 요동은 SQUID gradiometer의 자기 잡음 특성을 나빠지게 할 뿐 아니라 심자도 시스템의 전반적인 안정성을

저해하는 것으로 나타났다. 따라서 미세한 생체자기 신호를 측정하기 위해 고감도 센서, 높은 차폐율의 자기 차폐실, 저잡음 측정 회로뿐만 아니라 냉각 장치의 개발에도 전념해야 할 것으로 판단된다.

## References

- [1] Menendez T, Achenbach S, and Beinder, "Usefulness of magnetocardiography for the investigation of fetal arrhythmias", *Am J cardiol*, Vol. 88, pp. 334-336, 2001.
- [2] Quartero HWP, Stinstra JG, Golbach EGM, Meijboom EJ, and Perters MJ, "Clinical implications of fetal magnetocardiography", *Ultrasound obstet. Gynecol.*, Vol. 2, pp. 142-153, 2002.
- [3] 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.
- [4] Y. H. Lee, J. M. Kim, K. Kim, H. Kwon, K. K. Yu, I. S. Kim and Y. K. Park, "64-channel magnetocardiogram system based on double relaxation oscillation SQUID planar gradiometers", *Supercond. Sci. Technol.*, vol. 19, pp. S284-S288, 2006.
- [5] Y. H. Lee, H. C. Kwon, J. M. Kim, Y. K. Park and J. C. Park, "Double relaxation oscillation SQUID with reference junction for biomagnetic multi-channel applications", *Appl. Supercond.*, vol. 5, pp. 413-418, 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", *Prog. Supercond.*, vol. 7, pp.46-51, 2005.
- [7] S. Uzunbajakau, A.P. Rijpma, 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.
- [8] James E. Zimmerman, "SQUID instruments and shielding for low level magnetic measurements", *Journal of applied physics*, Vol. 48, pp. 702-710, 1977.
- [9] John R. Clem, "Johnson noise from normal metal near a superconducting SQUID gradiometer circuit", *IEEE Trans. Magn.*, MAG-23, pp. 1093-1096, 1987.