

A Low-noise Double Relaxation Oscillation SQUID Magnetometer for Measuring Magnetoencephalogram

C. S. Kang ^{*,a,b}, Y. H. Lee^a, H. C. Kwon^a, J. M. Kim^a, B. W. Yoon^a,
Y. K. Park^a and S. G. Lee^b

^a Superconductivity Group, Korea Research Institute of Standards and Science, Taejeon, Korea

^b Department of Physics, Korea University, Jochiwon, Korea

Received 20 August 2001

뇌자도 측정을 위한 저 잡음 이중이완발진 자력계의 특성.

강 찬석^{*,a,b}, 이 용호^a, 권 혁찬^a, 김 진목^a, 윤 병운^a, 박 용기^a, 이 순걸^b

Abstract

We developed a useful SQUID magnetometer for biomagnetic applications, magnetoencephalogram(MEG) and magnetocardiogram(MCG), etc. The SQUIDs are based on Double Relaxation Oscillation SQUID(DROS). DROS consists of two SQUIDs(signal SQUID and reference SQUID) in series, and a relaxation circuit of an inductor and a resistor. Specially we used single reference junction instead of the reference SQUID. The SQUIDs are based on hysteretic Nb/AlO_x/Nb junctions, fabricated by using a simple four level process. Because DROS magnetometer has large flux-to-voltage transfer coefficient, we can use simple flux-locked loop electronics for SQUID operation. When the DROS magnetometer was operated inside a magnetically shielded room, its average magnetic field noise was about $3 \text{ fT} / \sqrt{\text{Hz}}$ at 100 Hz. This noise level is low enough to measure biomagnetic fields. In this paper, we describe noise characteristics of DROS magnetometer, depending on the operation condition.

Keywords : DROS, MEG, SQUID, Electronic gradiometer

I. 서 론

사람의 뇌는 전기 생리화학적 활동에 의해 약 0.1Hz~ 수백 Hz 대의 저주파 영역에서 수백 fT 이하의 크기를 갖는 매우 미약한 자장 신호를 발생 시키는데 이러한 뇌자도 측정 기술은 기존의 뇌에 관한 해부학적 지식에 더해져 뇌의

기능성 연구에 많은 도움을 줄 수 있을 뿐 아니라 새로운 의료진단 기술로서의 역할도 할 수 있다. SQUID 는 초전도체에서 일어나는 거시적 양자현상을 이용한 자기장감지 센서로서 10⁻¹⁵T 크기의 자기장을 측정할 수 있는 자장 감도를 가질 뿐 아니라 자장의 기울기, 전류, 전압 등 자기장으로 변환 가능한 어떤 물리량도 측정이 가능한 센서이다. 이런 SQUID 를 이용한 뇌자도 측정 기술은 비접촉 비파괴적인

*Corresponding author. Tel : +82 -42-868-5235
e-mail : irem1215@hanmail.net

측정 방법이며 시간, 공간 분해능이 우수하고 인간의 신체가 자기장에 대해 투명하기 때문에 생체 자장발생의 원인이 되는 활동전류의 위치, 방향 및 크기에 대한 정보를 실시간에 비교적 공간적인 왜곡 없이 측정할 수 있다.[1] 또한 다채널 시스템을 형성할 경우 넓은 부위를 짧은 시간에 측정할 수 있게 된다. 그러나 뇌에서 발생하는 자장 신호는 매우 미약할 뿐더러 우리 생활 주변에 존재하는 환경 자기 잡음에 의한 영향을 받기 때문에 뇌자도 신호 측정에 충분한 감도를 갖는 센서라도 이런 주위의 환경잡음을 제거하고 우리가 원하는 신호만을 검출해 내는 제반 기술이 필요하게 되고 이런 조건을 만족시키는 SQUID 센서를 개발하는 기술이 무엇보다 우선시 되어야 한다.

뇌자도 측정을 위한 SQUID 센서의 성능지수는 측정할 수 있는 최소 자장 값, 자속-전압 변환계수, Slew-rate 및 물리적 화학적 안전성을 들 수 있다. 현재 저온초전도 Nb/AIO_x/Nb 조셉슨접합을 이용한 Nb-SQUID 자력계의 경우 자기 차폐 공간에서 약 $2 \text{ fT}/\sqrt{\text{HZ}}$ 수준의 자기장을 측정할 수 있는 감도를 가지며 이는 약 $100 \text{ fT}/\sqrt{\text{HZ}}$ 내외의 뇌자도 신호를 측정하기에 충분한 감도라고 할 수 있다.

자속-전압 변환계수의 경우 DC-SQUID 가 보통 $100 \mu\text{V}/\sqrt{\text{HZ}}$ 내외의 값을 갖는데 이는 입력 전압잡음이 수 $\sim \text{nV}/\sqrt{\text{HZ}}$ 내외인 상온의 전단증폭기로 SQUID 출력전압을 직접 검출할 경우 전단증폭기에 의한 잡음기여는 약 $10 \mu\Phi_0/\sqrt{\text{HZ}}$ 내외가 되어 SQUID 의 잡음 특성은 전단증폭기에 의해 결정되고 만다.[2] 이런 전단증폭기에 의한 SQUID 잡음특성 저하를 막기 위해서는 자속-전압변환 계수가 충분히 큰 SQUID 센서를 필요로 하게 되는데 DROS 의 경우 자속-전압 변환 계수를 증가시키기 위해 도입된 다른 몇 가지 방식들에 비해 그 제작상의 어려움이 덜하고 동작조건이 까다롭지 않을 뿐 더러 기존의 DC-SQUID 에 비해 10~100 배 정도 큰 자속-전압 변환계수를 가지므로 상온의 전단증폭기로도 SQUID 의 출력전압을 직접 검출할 수 있게 된다.[3] 그러므로 간단한 전자회로로 SQUID 의 출력신호를 검출할 수 있게 되어 전체적인 SQUID 구동회로가 간단해 지고 이는 다채널 시스템에 적용하기에도

적합한 조건을 만족시킨다.

DROS 는 일반적으로 직렬로 연결된 두개의 히스테리시스가 있는 SQUID 즉, 기준 SQUID 와 신호 SQUID 가 저항-인덕터로된 이완회로와 병렬 연결된 구조를 가지고 있으나 본 연구에 사용된 DROS 는 기준 SQUID 대신 기준접합을 이용하여 배선수를 2 개 줄였고 기준 SQUID 에 의한 자속 Trapping 을 없앴다.

본 논문에서는 뇌자도 측정용 다채널 SQUID 시스템에 사용하기 위한 기준접합을 이용한 고감도 DROS 자력계의 동작조건에 따른 자속-전압 특성과 자기 차폐실 내에서의 잡음 특성 및 상용의 차동 증폭기를 이용한 1 차 Electronic Gradiometer 를 형성했을 때의 잡음특성에 관하여 조사하였다.

II. DROS 의 동작원리

1. 기준접합을 이용한 DROS 의 동작원리

기준접합을 이용한 DROS 는 히스테리시스가 있는 신호 SQUID 와 기준접합이 직렬 연결되어 있고, 저항과 인덕터로된 이완회로와 병렬 연결 되어 있다. Fig. 1 은 기준접합을 이용한 DROS 의 등가회로도 이다. SQUID 의 임계전류보다 큰 직류 인가전류가 가해지면 SQUID 부분과 이완회로 사이에서 Fig. 2 와 같은 고주파 이완발진이 일어나고, 두 임계전류 값의 상대적인 크기에 따라 $V=0$ 인 초전도상태와 전압상태가 된다. DROS 의 이완동작은 다음 두 식에 의해 설명된다.

$$I_b = I_1(t) + I_2(t)$$

$$V(I_1(t)) = L_{Sh} \frac{dI_2(t)}{dt} + I_2(t)R_{Sh}$$

DROS 의 전압은 기준접합 양단에서 측정하므로 $I_{c1}(\Phi_{sig}) < I_{c2}(\Phi_{ref})$ 이면 $V=0$ 이고, $I_{c2}(\Phi_{sig}) > I_{c2}(\Phi_{ref})$ 이면 $V \neq 0$ 이 된다. 즉 DROS 는 두 SQUID 의 임계전류 비교기 역할을 하고 그 결과 $I_{c1}(\Phi_{sig}) = I_{c2}(\Phi_{ref})$ 일 때 두 상태간의 전이는 매우 급격하게 되며, 이때 자속-전압 변환

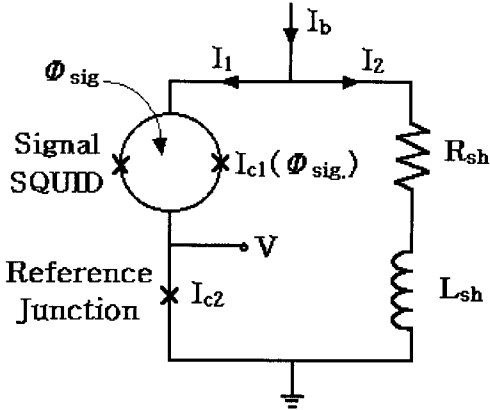


Fig. 1. 기준접합을 이용한 DROS의 등가회로도.

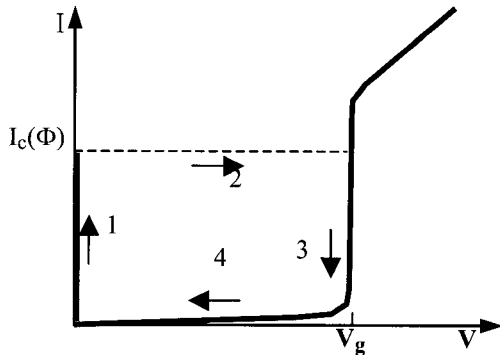


Fig. 2. DROS의 전류-전압곡선과 이완발전 경로

계수 $\delta V / \delta \Phi$ 가 최대가 된다.[4] 기준접합을 이용한 DROS의 경우 기준 SQUID에 비해 배선수가 2개 줄고 기준 SQUID에 의한 자속 trapping이 없는 것이 유리한 반면 임계전류 값을 조절할 수 있는 기준 SQUID와는 달리 기준 임계전류 값이 고정되므로 신호 SQUID의 임계전류 값에 대한 기준임계전류 값의 상대적인 크기가 매우 중요하다. 신호 SQUID의 최대 임계전류 값의 변조 폭이 $I_{c1,max} / (1 + \beta_L)$, ($\beta_L = L_{sq} I_{c1,max} / \Phi_0$)로 주어지기 때문에 기준접합의 최적임계전류 값은 $I_{c1,max}$ 과 $\{I_{c1,max} - I_{c1,max} / (1 + \beta_L)\}$ 의 중앙에 있어야 한다. 여기서 $I_{c1,max} (= 2I_0)$ 는 신호 SQUID의 최대 임계전류 값이다. 따라서 β_L 값이 1일 때 기준접합의 임계전류 값이 신호 SQUID 임계전류 값의 75%일 때 최적조건이 된다.[5]

2. DROS의 동작조건

DROS가 안정하게 동작하기 위해서는 우선 $I_b R_{sh}$ 값이 다음식으로 주어지는 적절한 범위 내에 있어야 한다. 여기서 β_c^* 는 DROS의 effective MaCumber parameter 이고, I_{c2} 는 기준접합의 임계전류 값, C_{ref} 는 기준 접합의 정전용량이다.

$$I_b \cdot R_{sh} < V_g,$$

$$\left(\frac{I_b}{2I_0}\right)^2 \cdot \beta_c^* \leq 1, \quad \beta_c^* = \frac{2\pi \cdot I_{c2} \cdot R_{2sh} \cdot C_{ref}}{\Phi_0}$$

한편 DROS는 회로 내에 인덕턴스와 정전용량들을 가지고 있어서 그에 따른 각종 공명 현상이 발생하는데 이로 인해 SQUID의 전류-전압곡선 및 잡음특성 등을 나쁘게 하므로 이런 부정적인 영향들을 철저히 제거 시켜야만 한다. 우선 신호 SQUID 루프의 인덕턴스 L_{sq} 와 정전용량 C_{sq} 에 의한 공진이 SQUID의 전류-전압곡선 모양을 나쁘게 하므로 SQUID 루프 내에 감쇠저항을 부착하여 공진을 제거 시켜야 한다. L_{sq} 와 C_{sq} 에 의한 SQUID 루프의 특성 임피던스가 $Z_{LC}^{sq} = \sqrt{L_{sq} / C_{sq}}$ 으로 주어지므로 댐핑저항값 R_ω 이 Z_{LC}^{sq} 보다 작아야 공진이 효과적으로 제거된다. 또 이완회로의 인덕턴스 L_{sq} 와 신호 SQUID의 정전용량 C_{sq} 는 이완발전 과정에서 기생발진을 일으키는데 Nb/AIO_x/Nb 조셉슨 접합은 sup-gap 저항이 커서 기생발진이 충분히 제거되지 못한다. 이를 이완회로와 병렬로 감쇠저항을 부착시켜 $L_{sh}-C_{sq}$ 공진을 제거시킬 수 있는데 이때 댐핑상수 D는 다음 식으로 주어진다.

$$D = \frac{L_{sh}}{4C_{sq} R_d^2}$$

여기서 R_d 는 감쇠저항 값으로 기생발진이 완전히 제거되기 위해서는 D 값이 1보다 훨씬 커야 하므로 큰 값을 요구하나 D 값이 커질수록 이완발전의 진폭도 함께 감소되어 DROS의 자속-전압 변환계수가 감소하므로 D

값이 1 내외의 값이 되도록 적절한 R_d 값을 취해야 한다. 또한 감쇠회로의 시상수 $R_d C_{sq}$ 는 이완회로의 시상수 L_{sq}/R_{sh} 보다 훨씬 짧아야 한다.[6]

III. 고감도 DROS 자력계 설계 및 제작

1. DROS 자력계의 설계

자력계는 DROS 부분, 귀환코일, 입력코일, 검출코일로 구성되어 있다. Fig. 3 은 DROS 부분의 자세한 구조와 자력계 전체의 모습, 그리고 등가 회로도이다. 자력계 내의 모든 부분이 서로간의 자기적인 영향을 최소화 하도록 설계되었고 댐핑저항을 이용해 각종 인덕턴스와 정전용량들 사이의 공명 현상들을 제거하였다. Table 1 은 DROS 자력계의 각종 Parameter 들로 설계 값과 실제 측정값이 거의 같은 결과를 나타낸다. DROS 의 고유 자속잡음은 임계전류값의 Fluctuation 에 의해 지배되며 다음 식으로 주어진다.

$$\sqrt{S_{\Phi}} = 2.3 \frac{(1 + \beta_L)}{I_{c2}^{2/3} \sqrt{f_{ro}}}$$

발진주파수는 전체 잡음을 최소화하는 측면에서 1GHz 내외로 하는 것이 적절하다. 또한, 일반적으로 귀환코일에 사용하는 내부귀환 방식대신에 본 자력계에는 다채널 시스템 구성 시 검출코일에 의한 채널간 간섭을 없앨 수 있는 외부귀환 방식을 사용했다. 검출코일, 입력코일, SQUID 로 구성되는 자속 변환기의 전달계수는 다음과 같이 주어진다.

$$\frac{B}{\Phi} = \frac{(L_p + L_i)}{A_{PC} \cdot M_i}$$

Table 1. DROS Magnetometer Parameter.

Signal SQUID		
Critical current	$2I_0$	수십 $\sim \mu A$
SQUID inductance	L	104pH
β_L		~ 1
β_C		< 1
Damping resistor	R_0	3 Ω
Junction area		4 μm x 4 μm
Reference Junction		
Critical current	$I_{c2} (< 2I_0)$	수십 $\sim \mu A$
Junction area		5 μm x 5 μm
Relaxation Circuit		
Shunt resistor	R_{sh}	1.5 Ω
Shunt inductance	L_{sh}	2nH
Damping resistor	R_d	50 Ω
Input coil		
Number of turns		10turns
Linewidth		5 μm
Inductance	L_i	37nH
Mutual inductance		
With SQUID	M_i	1.76nH
Damping resistor	R_x	10.5 Ω
Damping capacitance	C_x	30pF
Peakup coil		
Area		16mm x 10mm
Linewidth		0.5mm
Inductance		40nH

2. DROS 자력계의 제작

SQUID 센서는 광식각과 다층박막제작 공정을 이용하여 제작하였다. 센서의 제작순서는 Nb/ AlOx/Nb 증착, Nb 배선형성 공정으로 이루어진다. 센서는 17mm x 12mm 크기이며 3 인치 실리콘 웨이퍼에 14 개의 센서가 동시에 제작되고, 센서제작은 4-level 공정으로 이루어지며, 모두 5 매의 포토마스크를 사용하였다.

자력계의 제작순서는 Nb/AlOx/Nb trilayer 를

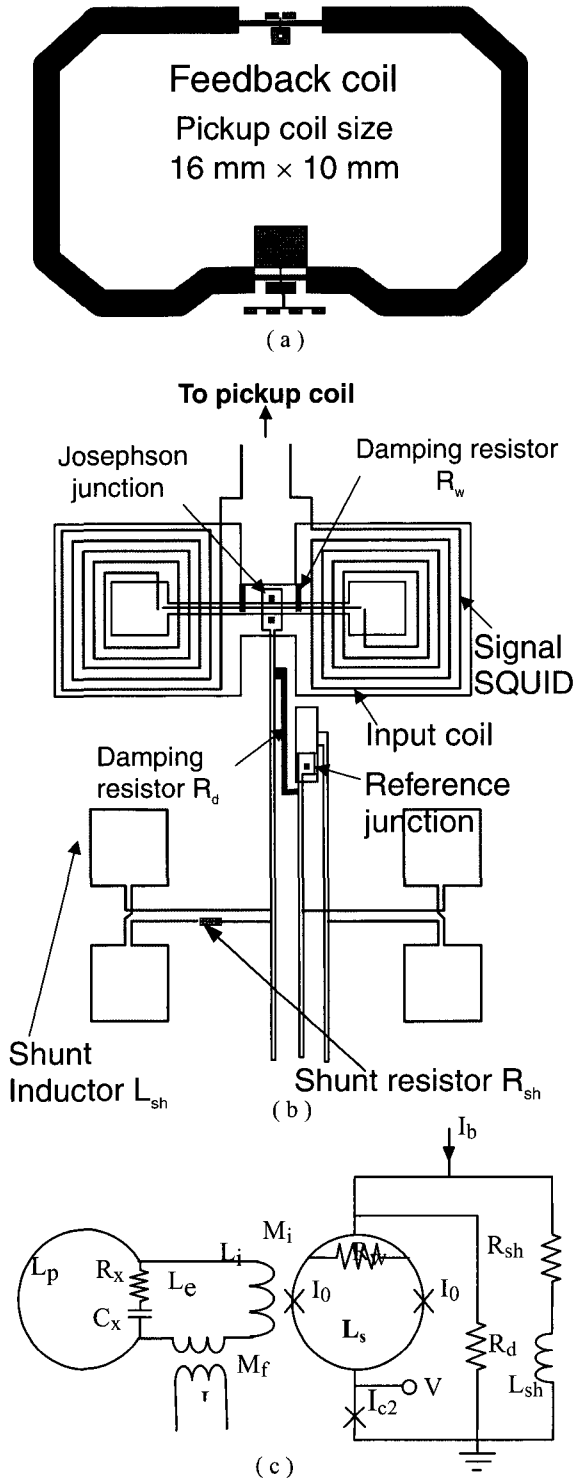


Fig. 3. (a) DROS 자력계의 전체 모양, (b) SQUID 부분, (c) 등가 회로도

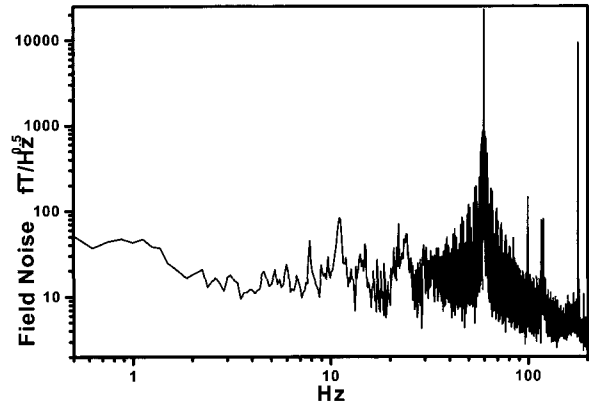


Fig. 4. DROS 자력계의 잡음특성.

DC 마그네트론 스퍼터링으로 증착하고, SF₆ 가스를 이용한 반응성 이온식각으로 조셉슨 접합의 면적을 정의하였다. 금속층간 절연은 P-ECVD 를 이용한 SiO₂ 로 하였는데 절연특성을 보장하기 위해 추가적인 마스크를 이용하여 절연을 한번 더 하였다. 저항은 신뢰성 있는 금속인 Pd 으로 형성하였으며, 최종적으로 배선은 RF 마그네트론 스퍼터링으로 Nb 을 증착한 후 얇은 Pd 으로 Nb 표면을 보호하였다.

IV. 자력계의 잡음특성

제작된 DROS 자력계의 특성조사는 센서를 액체헬륨이 든 비자성 fiber glass 듀아에 넣고 자기차폐실 내부에서 측정하였다. FLL 회로를 구성하여 SQUID 출력을 검출하였을 때 자력계의 자속-전압곡선에서 변조전압의 크기는 평균 100 μV 내외이며 자속-전압 변환계수는 $1mV/\Phi_0$ 내외가 얻어졌다. 자장잡음의 경우 1Hz 영역에서는 주변환경에 따라 변화가 크기는 하나 대부분 $100fT/\sqrt{Hz}$ 정도의 값을 가졌으며 200Hz 근방에서 평균적으로 약 $3\sim 5fT/\sqrt{Hz}$ 의 값을 가졌다.

다수의 피크들은 건물 및 기타 자장잡음들이 충분히 차폐되지 못한 채 자기 차폐실내로 유입되어 생긴 것이고 외부에서 진동을 주었을 때 민감하게 반응하는 것으로 보아 진동에 의한 영향도 많은 것으로 보인다.

V. Electronic Gradiometer

1. 차 미분계에서의 출력

전류원으로부터의 거리 r 이 클 때 자기장과 그 미분의 크기는 다음과 같이 거리 r 의 급수 함수로 근사할 수 있다.

$$B = \frac{M}{r^n} \quad ; B \text{ 는 자기장, } M \text{ 은 비례상수.}$$

$$G_1 \approx -\frac{nM}{r^{n+1}} = -\frac{nB}{r} \quad ; 1 \text{ 차 미분}$$

$$G_2 = -\frac{n(n+1)M}{r^{n+2}} = -\frac{n(n+1)B}{r^2} \quad ; 2 \text{ 차 미분}$$

이상적인 경우 baseline 의 길이가 d 인 미분계에서 잡히는 신호는 1 차 미분계의 경우 $S_1=G_1 \cdot d$ 에, 2 차 미분계는 $S_2=G_2 \cdot d^2$ 에 비례할 것이다. 그러나 실제 미분계는 두개의 자력계 간의 불균형이나 각도오차 등으로 아래와 같이 Gain 과 eddy current , 그리고 common mode 의 기여가 존재한다.

$$S_1 = \alpha(C_0 \cdot \vec{B} + \varepsilon \cdot \vec{B} + \vec{P} \cdot \vec{G}_1 \cdot d)$$

그러나 여기서는 common mode 만을 고려하여 common mode 비례상수를 C_i 라면 i 차 미분계의 어떤 소스의 위치를 원점으로 잡을 때 위치 \vec{r}_s 에 있는 방향 \vec{P} 의 어떤 센서에 잡힌 신호 $\vec{P} \cdot \vec{B}(\vec{r}_s)$ 와 \vec{r}_s 에 위치한 레퍼런스 채널로부터 1 차 소프트웨어 미분계의 신호는 다음 식으로 주어진다.

$$g_1 = [\vec{P} \cdot \vec{B}(\vec{r}_s)] - [\vec{P} \cdot \vec{B}(\vec{r}_r)] \approx \vec{P} \cdot \vec{G}_1 \cdot (\vec{r}_s - \vec{r}_r)$$

식으로부터 이 신호의 크기는 대략 아래와 같이

$$g_1 = \frac{(n+1)|\vec{r}_s - \vec{r}_r|}{r^r} \approx (n+1)B \frac{|\vec{r}_s - \vec{r}_r|}{r_s}$$

주어진다. 따라서 잡음의 경우 $|\vec{r}_s| \gg |\vec{r}_s - \vec{r}_r|$ 이므로 원래잡음 신호보다 크게 줄어든다.[7]

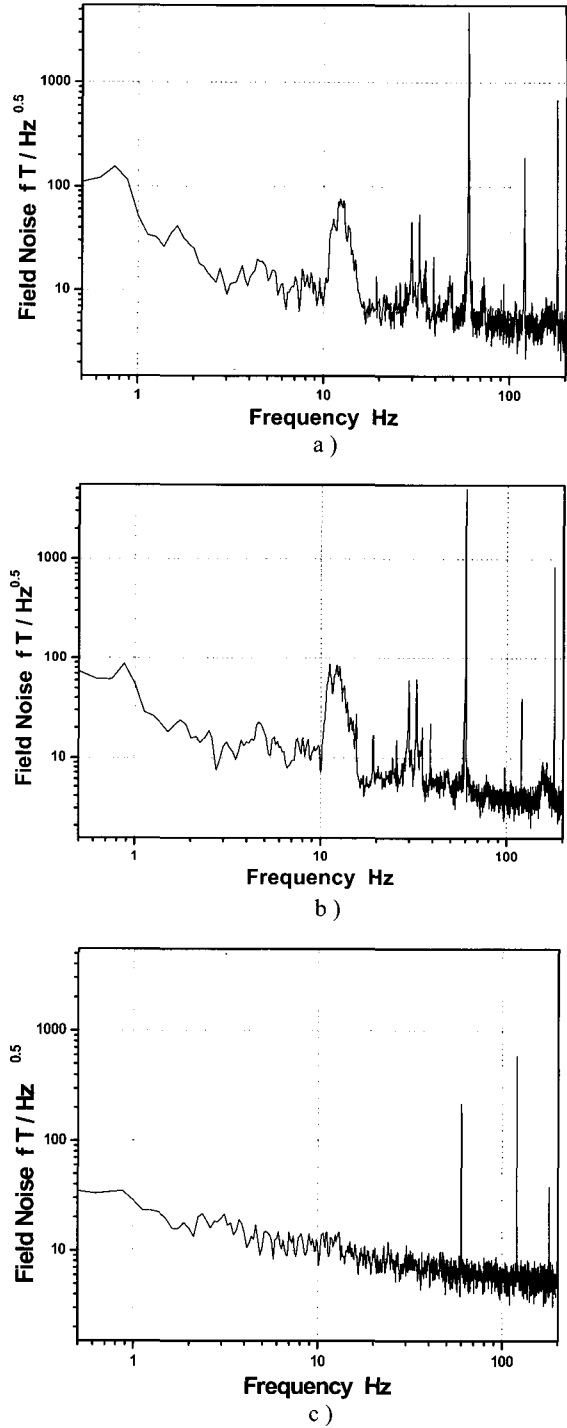


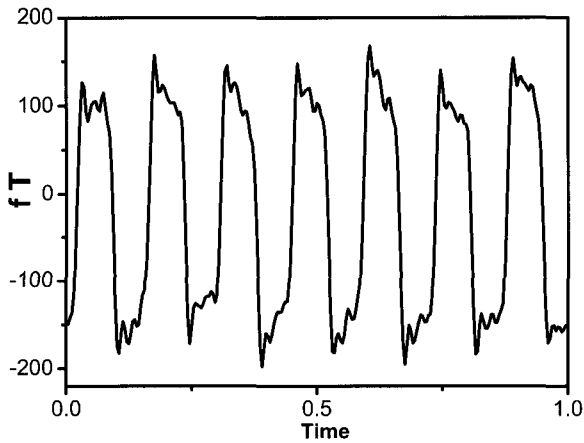
Fig. 5. a) 기준채널의 잡음 스펙트럼, b) 신호채널의 잡음 스펙트럼, c) Electronic gradiometer 의 잡음 스펙트럼

2.1 차 Electronic Gradiometer 를 이용한 잡음 소거.

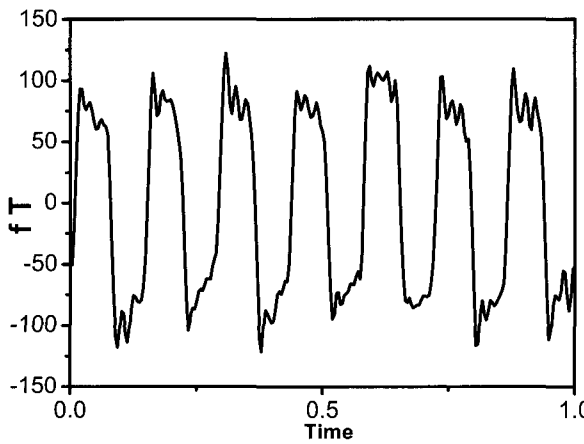
DROS Magnetometer 두개를 신호채널과 기준 채널로 하여 base line 9cm 만큼 떨어뜨려 놓고 신호채널의 출력에서 기준채널의 출력을 상용의 차동 증폭기를 이용하여 차동 증폭하였다 Fig. 5. a), b) 는 미분계를 형성하기 전의 기준채널과 신호채널에서의 잡음 스펙트럼 이고 c)는 미분계를 형성하였을 때의 잡음 스펙트럼이다. 미분계를 형성함으로써 저주파 영역의 잡음 값이 5~10 배 감소 하였고, 60Hz, 120Hz, 180Hz

등의 peak 값들은 10~50 배 까지 감소 하였다. 반면에 10Hz~30Hz 영역에 보이는 잡음 peak 들은 미분계를 형성한 후에도 그다지 감소하지 않는 것을 볼 수 있는데 이는 두 채널이 떨어져 있기 때문에 발생하는 위상차이, 두 센서의 각도차이, 잡음의 공간적인 불 균일 등에서 오는 것인데, 소프트웨어 방법으로 이들을 보정해 줌으로써 잡음제거 효과를 높일 수 있다.[8] 미분계 잡음 값을 적분하여 0.5Hz~100Hz 의 주파수 대역으로 나누었을 때 평균 약 4.5~5.0 fT_{rms} / \sqrt{Hz} 의 자장감도를 가지는 것으로 나타났다. 또한 자력계를 이용한 뇌자도 신호 측정 가능 여부를 알기 위해 뇌자도 신호와 크기가 비슷하고 주파수가 일정한 이상적인 신호를 신호채널과 같은 축상의 5cm 떨어진 거리에서 인가해주고 미분계를 형성한 후에 신호를 측정 한 후에 100 회 Averaging 하였다.

Fig. 6은 주파수 a) 7Hz, 150fT 와 b) 7Hz 100fT 사각파를 코일을 통해 인가해 주었을 때 Electronic- gradiometer 의 출력 신호를 100 회 가산 평균한 그림이다. 소스로 준 사각파의 모양을 충분히 확인할 수 있다.



a)



b)

Fig. 6. a) 150fT, b) 100fT 자장신호에 대한 측정값

VI. 결 론

다채널 뇌자도 측정 시스템에 사용하기 위해 고감도 DROS 자력계를 설계, 제작 하였고 특성평가를 실시 하였으며, 환경자기잡음의 제거를 위하여 1 차 Electronic gradiometer 를 형성 했을 때의 잡음소거 비를 측정하였다. DROS 의 큰 자속-전압 변환계수로 인해 간단한 구동 회로로서 FLL 동작을 시킬 수 있었다. 뇌자도 장치의 공간분해능을 향상시키기 위해 검출코일 및 센서크기를 소형화 했으며 채널간 간섭을 제거하기 위해 외부귀환 방식을 사용하였다 DROS 자력계의 자장잡음은 200Hz 대역에서 약 2~5 fT / \sqrt{Hz} 내외의 잡음특성을 가지며 뇌자도 측정에 충분히 사용될 수 있는 감도를 가짐을 확인하였다. 한편 상용의 차동증폭기를 사용하여 1 차 Electronic gradiometer 를 형성한 결과 저주파영역의 잡음 값이 5~10 배 감소하였고 전체적으로 약 1.5 배 정도의 잡음감소 효과를 얻었다.

감사의 글

본 연구는 과학기술부의 연구비 지원(국가지정 연구실 사업)으로 수행되었습니다.

참고문헌

- [1] R. Hari, *Physics World* (May 2000), p. 33.
- [2] D. Drung, *SQUID Sensors: Fundamentals, Fabrication and Applications* (Kluwer Academic Publishers, The Netherlands 1996), p. 63.
- [3] Y. H. Lee, H. C. Kwon, J. M. Kim, Y. K. Park and J. C. Park, *Inst. Phys. Conf. Ser.* 167, 545(2000).
- [4] D. J. Adelerhof, H. Nijstad, F. Flokstra and H. Rogalla, *J. Appl. Phys.* 76, 3875 (1994).
- [5] Y. H. Lee, H. C. Kwon, J. M. Kim, Y. K. Park and J. C. Park, *J. Korean. Phys. Soc.* 32, 600(1998).
- [6] D. J. Adelerhof, J. Kawai, G. Uehara and H. Kado, *Rev. Sci. Instrum.* 66, 2631 (1995).
- [7] “초전도 현상을 이용한 뇌자도 측정장치 개발”, 이용호 외 27 인, 한국표준과학 연구원 보고서, KRISS/IR—2000-094.
- [8] J. Vrba, *SQUID Sensors: Fundamentals, Fabrication and Applications* (Kluwer Academic Publishers, The Netherlands 1996), p. 117.