

Construction and Operation of a 40-channel SQUID System for Neuromagnetic Measurements

40-채널 SQUID 시스템의 제작 및 뇌자도 측정

Yong-Ho Lee, Jin-Mok Kim, Hyukchan Kwon, Sang-Kil Lee,
Cheong-Moo Lim, Yong-Ki Park and Jong-Chul Park

이용호, 김진목, 권혁찬, 이상길, 임청무, 박용기, 박종철

P.O. Box 102, YuSung, TaeJeon, Korea 305-600,
Korea Research Institute of Standards and Science

대전광역시 유성우체국 사서함 102, 한국표준과학연구원

We developed a 40-channel superconducting quantum interference device (SQUID) system for neuromagnetic measurements. The main features of the system are use of double relaxation oscillation SQUID (DROS), and planar gradiometer for measuring tangential field components. The DROSs with high flux-to-voltage transfers enabled direct readout of the SQUID output by room-temperature electronics and simple flux-locked loop circuits could be used for SQUID operation. The pickup coil is an integrated first-order planar gradiometer with a baseline of 40 mm. The average noise of the 40 channels is around $1.2 \text{ fT/cm}/\sqrt{\text{Hz}}$ at 100 Hz, corresponding to the field noise of $5 \text{ fT}/\sqrt{\text{Hz}}$ at 100 Hz, operated inside a magnetically shielded room. The 40-channel system was applied to measure auditory-evoked neuromagnetic fields.

1. 서론

고감도 SQUID를 이용한 자력계는 저주파 영역의 자기신호 측정에 필수적인 장치로 활용되고 있다. 특히 뇌로부터 발생하는 자기장(뇌자도)을 측정하면 뇌의 기능에 대해 매우 유용한 정보를 제공한다.[1] 그런데 뇌자도 신호는 매우 미약하므로 고감도 SQUID를 이용한 자기장 측정기술이 필요하고, 자장의 공간적인 분포를 가능한 짧은 시간에 측정하기 위해서는 다채널 시스템의 개발이 필요하다. 채널수가 증가할수록 SQUID 및 구동회로를 포함한 전체 시스템의 소형화 및 동작의 안정성이 공학적으로 중요한 성능지수가 된다. 본 연구에서는 저온초전도 SQUID를 이용하여 뇌자도 측정을 위한 40채널 시스템을 설계·제작하고 시스템의 동작특성을 조사하였다.

2. 고감도 SQUID 개발

2-1. DROS의 설계

자속을 전압으로 변환시키는 소자로서 SQUID의 성능은 자속-전압 변환계수에 의해 정해지는데 변환계수가 클수록 SQUID 출력전압 검출을 위한 구동회로가 간단해진다.[2] 본 연구에서는 자속-전압 변환계수를 기존의 DC SQUID에 비해 획기적으로 증가시키기 위하여 새로운 방식의 SQUID인 DROS (double relaxation oscillation SQUID)를 이용하여 센서를 설계하였다.[3,4]

특히 DROS에 필요한 기준 SQUID 대신 기준 접합을 사용함으로써 다채널 시스템에 더욱 적합하도록 하였다.[5,6] 또한 자장검출코일을 SQUID와 동시에 같은 실리콘 웨이퍼에 제작함으로써 신뢰성이 큰 일체형 센서를 실현시켰다.

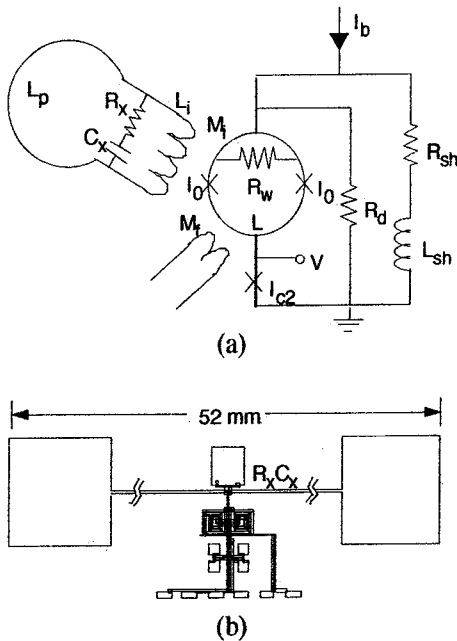


Fig.1. (a) Schematic circuit drawing of DROS and (b) overall structure of the planar gradiometer.

그림 1(a)는 센서의 등가 회로도이고 그림 1(b)는 센서의 전체구조이다. DROS는 히스테리시스를 갖는 DC SQUID와 기준접합이 직렬로 연결되어 있으며, 이와 병렬로 저항과 인덕터로 된 이완회로(relaxation circuit)로 구성되는데 모든 조셉슨 접합은 히스테리시스를 갖는다.

신호 SQUID는 두 개의 SQUID 루우프가 병렬 연결된 구조로서 균일한 자기잡음에 반응하지 않도록 되어 있다. 한쪽 SQUID 루우프의 크기는 $100 \mu\text{m} \times 100 \mu\text{m}$ 이므로 루우프 인덕턴스는 160 pH 이다. 접합에서 루우프 입구까지의 슬릿길이는 $188 \mu\text{m}$ 이므로 슬릿에 의한 인덕턴스 66 pH 를 포함하면 한쪽 SQUID의 인덕턴스는 226 pH 로 계산된다. 따라서 병렬 연결된 두 SQUID 루우프의 전체 인덕턴스는 113 pH 가 된다.

DROS의 자속잡음은 이완발전 주파수의 제곱근에 반비례하기 때문에 이완발전주파수를 1 GHz 내외로 높게 하였다. DROS의 안정된 동작을 위해서 각종 인덕턴스와 정전용량에 의한 공명들을 제거시켜야 한다. SQUID 루우프의 공명

을 없애기 위해 SQUID 양단에 저항 R_w 를 부착시켰고, 이완회로의 인덕턴스와 SQUID의 정전용량에 의한 공명을 제거시키기 위해 이완회로와 병렬로 감쇄저항 R_d 를 부착시켰다. 신호 SQUID에 사용된 조셉슨 접합 크기는 각각 $4 \mu\text{m} \times 4 \mu\text{m}$ 이다. 한편 기준접합의 크기는 $5 \mu\text{m} \times 5 \mu\text{m}$ 인데 접합의 면적비로 볼 때 이는 신호 SQUID의 최대 임계전류값의 78%에 해당한다.

되먹임코일은 1회의 코일이 SQUID 외곽에 형성되어 있다. 입력코일은 선폭 $5 \mu\text{m}$, 감은 횟수 15회인 코일이 각각의 SQUID loop 위에 직렬로 형성되어 있다. 입력코일 인덕턴스는 87 nH 로 계산되고 SQUID와의 결합계수를 0.9로 가정하면 SQUID와의 상호 인덕턴스는 2.8 nH 가 된다. 입력코일의 parasitic capacitance에 의한 공진을 제거하기 위해 $10 \Omega \cdot 150 \text{ pH}$ 로 된 RC 직렬회로를 입력코일 양단에 부착시켰다.

평면형 미분계의 검출코일은 선폭 0.5 mm , 외변의 크기가 $12 \text{ mm} \times 12 \text{ mm}$ 인 두 개의 정사각형 코일이 직렬 연결된 1차 미분계로서 균일한 자기잡음에는 반응하지 않도록 되어 있다. 두 검출코일의 중심에서 중심사이의 거리, 즉, baseline은 40 mm 이고 검출코일의 전체 인덕턴스는 81 nH 로 계산된다. SQUID 루우프에 단위 자속을 전달시키기 위해 검출코일에 필요한 자장의 세기는 0.94 nT 로 계산된다. 센서의 크기는 $12 \text{ mm} \times 52 \text{ mm}$ 이다.[7]

2-2. DROS의 제작

SQUID 센서는 광식각과 다층박막제작 공정을 이용하여 제작하였다. SQUID는 감도와 안정성이 우수한 Nb 접합으로 제작되었는데 제작순서는 Nb/ AlO_x /Nb 증착, 조셉슨접합 면적정의, SiO_2 절연막 증착, Pd 저항 증착, Nb 배선형성 공정으로 이루어진다. Nb/ AlO_x /Nb 접합은 진공도 $1 \times 10^{-5} \text{ Pa}$ 의 진공챔버에서 RF-마그네트론 스퍼터링으로 증착하고, 접합의 면적정의는 SF_6 가스를 이용한 반응성 이온식각으로 실시하였다. 금속층간의 절연층은 플라즈마중장 화학기상 증착법으로 증착된 SiO_2 박막이고, 저항은 기계적·화학적 신뢰성이 우수한 Pd 박막으로 되어 있다. 모든 박막은 lift-off 방법으로 패터닝 되었으며 박막의 step coverage를 좋게 하기 위해 증착용 photoresist mask가 overhang 구조를 갖도록 클로로벤

젠 처리를 하였다. 센서제작공정을 간단히 하기 위해 4-level 공정을 개발했으며 모두 5 개의 포토마스크를 사용하였다. 기판은 3 인치 Si 웨이퍼를 사용하였으며 4개의 평면형 미분계가 동시에 제작되고, 각각의 센서를 절단한 후 fiber glass로 된 회로기판에 부착하고 알루미늄 선을 이용한 초음파 본딩으로 센서와 회로기판의 전극 사이를 연결하였다.

2-3. DROS의 특성조사

제작된 SQUID 센서의 특성은 센서를 액체헬륨이 든 비자성 fiber glass 튜브에 넣고 유메탈과 알루미늄으로 구성된 자기차폐실내에서 측정하였다.[8]

전류-전압 곡선으로부터 DROS의 기준임계전류는 약 $10 \mu A$ 이고, 자속-전압곡선에서 SQUID 출력전압은 신호 SQUID에 가해지는 자속에 대해 거의 square-wave 함수처럼 변한다. 변조진폭의 크기는 최대 $110 \mu V$ 이고, step의 중간 높이 부근에서 최대 기울기가 생기는데 보통 $1-3 mV/\Phi_0$ 의 자속-전압 변환계수가 얻어진다. 이는 현재 사용되고 있는 DC SQUID에 비해 10배 이상 큰 값이다.

자기차폐실내에서 센서를 동작시킨 결과 그림 2와 같은 잡음 스펙트럼을 얻었다. 자기차폐실내의 잔류잡음을 포함하여 FLL 상태에서 SQUID 시스템의 잡음은 1 Hz에서 $8 \mu \Phi_0/\sqrt{Hz}$, 100 Hz에서 $4 \mu \Phi_0/\sqrt{Hz}$ 가 된다. 자속변압기(flux transformer)의 자장기울기-자속 전달계수 ($\approx 0.25 fT/cm/\Phi_0$)로부터 검출코일에서의 자장구배 잡음으로 환산하면 이는 각각 $2 fT/cm\sqrt{Hz}$, $1 fT/cm\sqrt{Hz}$ 에 해당하고, 미분계의 baseline을 곱하면 각각 $8 fT/\sqrt{Hz}$, $4 fT/\sqrt{Hz}$ 이 된다.

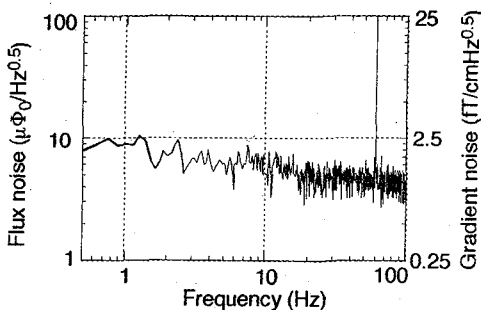
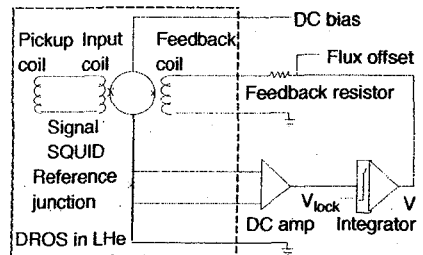


Fig. 2. Noise spectrum of the DROS planar gradiometer measured inside a shielded room.

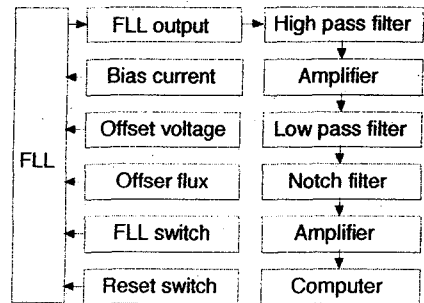
측정주파수 밴드를 1~100 Hz로 하여 너자도 신호를 측정할 경우 자장잡음값에 주파수밴드의 제곱근을 곱하면 시스템 잡음은 약 50 fT가 된다. 즉 50 fT 크기의 너자도 신호를 측정할 때 신호대 잡음비가 1이 된다.

3. SQUID 구동회로

자속-전압 변환계수가 충분히 크게 되면 자속변조 및 저온부의 임피던스 매칭회로 없이 SQUID 출력전압을 직접 검출할 수 있기 때문에 SQUID 동작을 위한 flux-locked loop(FLL)회로가 간단해진다. FLL 회로의 전단증폭기는 입력 전압잡음이 작은 LT1028을 사용하여 구성하였는데 SQUID 및 연결선을 포함한 입력부의 임피던스 영향을 받지 않도록 차동증폭기 형식으로 하였다. 전단증폭기의 전압잡음은 100 Hz에서 약 $1.7 nV/\sqrt{Hz}$ 로서 이 값은 DC SQUID에 사용하기에는 높은 값이지만 DROS의 경우에는 자속-전압 변환계수가 $2 mV/\Phi_0$ 내이므로 전단증폭기에 Fig. 3. (a) 의한 자속잡음 기여는 100 Hz에서 약 $1 \mu \Phi_0/\sqrt{Hz}$ 이다.



(a)



(b)

Fig. 3. (a) Schematic circuit diagram of the FLL circuit and (b) SQUID controller.

그림 3(a)는 FLL 회로의 개략도이고, 3(b)는 조절기의 개략도이다. FLL회로의 주요부는 센서와 가급적 가까이 하기 위해 자기차폐실내에 두고 동작상태의 조절은 자기차폐실 밖에서 하였다. Head box내에는 전단증폭기, 적분기 및 스위치 회로 등 FLL 회로가 설치되어 있다. Head PCB를 모듈화하여 크기도 작고 쉽게 교체할 수 있도록 하였고, 알루미늄 box하나에 8채널의 FLL회로가 장착된다. 모든 조절신호는 head box 내에서 low pass filter회로를 거치게 하여 controller로부터의 고주파 잡음을 차단하였다.

40채널 controller는 모두 3개의 sub-rack으로 구성되며, 각각의 sub-rack에 16채널의 SQUID를 구동시킬 수 있도록 하였고, 각 채널별로 모듈화하여 쉽게 교체 및 증설할 수 있도록 하였다. Control box에서 인가전류 및 자속 lock-in 레벨을 조절할 수 있게 하고 FLL 스위치를 동작하도록 하였다. Head box의 출력신호는 control box 내에서 증폭기를 거친 후 고주파 여파기, 저주파 여파기 및 60 Hz notch 여파기를 선택적으로 통과할 수 있도록 하였다. 컴퓨터에 의한 잡음이 SQUID 구동회로에 유입되지 않도록 하기 위해 구동회로와 A/D 카드 사이에 추가적으로 RF-필터를 부착하였다.[9]

4. SQUID insert

40채널 insert는 모두 16개의 에폭시 블록으로 구성되며, 각각의 블록에는 센서가 x, y 방향으로 2~4개 부착되어 있으며 각각의 블록은 독립적으로 교체가 가능하도록 설계하였다. 머리에 수직인 방향을 z 방향이라고 할 때 x, y방향의 자장 성분의 z방향으로의 미분, 즉, dB_x/dz , dB_y/dz 을 동시에 측정할 수 있도록 센서를 배치하였다.

Adaptive filtering을 이용한 신호대 잡음비 개선을 위하여 40개의 신호채널 외에 기준채널로서 4개의 평면형 미분계를 부착시켰다. 그림 4는 센서의 배치 및 insert의 구조를 보여준다.

Insert 구조의 냉각시 부품의 열 수축에 따른 길이변화를 보상하기 위하여 sliding mechanism을 사용하였는데 insert 자체 무게로 센서가 듀아 바닥에 항상 닿게 할 수 있게 하였다.

액체헬륨의 손실을 최소화하기 위해서는 신호선과 각종 튜브에 의한 열전달을 줄여야 하는데

실온으로부터 액체헬륨온도로 흐르는 열 흐름을 최소화하기 위해 열전도도가 작은 재료의 선택과 가급적 단면적이 적은 튜브 또는 선을 사용하는 것이 바람직하다. 신호선으로 사용할 수 있는 선 가운데 구리는 저항이 작아서 전단증폭기의 입력 전류잡음에 의한 영향이 작으나 열전도도가 인칭동의 12배, 망가닌의 46배로 크기 때문에 사용하기 어렵다. 따라서 망가닌선을 전류와 자속 피드백 선으로 사용하였고, 전압 신호선은 선 저항에 의한 전압잡음 유입을 가능한 줄이기 위해 인칭동선을 사용하였다. 인칭동선에 의한 잡음기여를 계산하면, 길이 1 m의 인칭동선의 저항값은 평균 9Ω 이고, 주파수 100 Hz에서 LT1028의 입력 전류잡음은 $2 \text{ pA}/\sqrt{\text{Hz}}$ 이므로 저항에 의한 전압잡음은 $18 \text{ pV}/\sqrt{\text{Hz}}$ 이 된다. 한편 LT1028의 입력 전압잡음은 100 Hz에서 약 $1.2 \text{ nV}/\sqrt{\text{Hz}}$ 이므로 인칭동선의 저항값에 의한 잡음기여는 무시된다.

SQUID와 실온 사이를 지지할 튜브재료로서 FRP (fiberglass reinforce plastic) 튜브를 사용하였는데 FRP는 매우 낮은 열전도도를 가지면서 기계적 강도도 우수하고 비자성 재료이다.

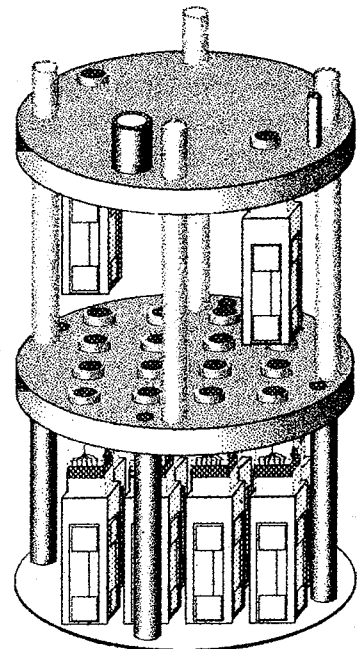


Fig. 4. Assembled structure of SQUID insert. 40 signal channels and 4 reference channels are used.

한편 실온으로부터의 열유입을 막고 액체헬륨 면 윗 부분의 온도구배를 최소화하기 위해서는 insert의 윗 부분을 가능한 낮은 온도로 유지시키는 것이 중요하다. 단열효과가 우수한 스티로폼과 열 반사판으로서 구리판을 교대로 여러 겹 사용하여 radiation baffle을 형성시킴으로서 dewar neck을 통해 외부로부터 유입되는 열을 차단시켰다. 또한 증발되는 차가운 헬륨가스를 이용하여 신호선과 insert 윗 부분을 효과적으로 냉각시키기 위하여 신호선이 지나가는 공간으로 헬륨가스가 흐르도록 하였고, insert 꼭대기 부분에 추가적으로 열교환 공간을 만들어 헬륨가스가 부품을 냉각시킨 후 빠져나가도록 하였다.

Insert를 넣지 않았을 때 듀아 자체의 헬륨 증발율은 약 2.9 L/d 인데 40채널 insert를 넣었을 때에는 증발율이 평균 3 L/d 로서 insert만에 의한 추가적인 헬륨소모는 매우 적음을 확인하였다. 사용한 액체헬륨 듀아는 캐나다 CTF사의 제품으로 tail 부분의 내경이 135 mm 이고, 액체헬륨-실온간 간격이 15 mm, 액체헬륨 용량은 약 35 L이다. 따라서 액체헬륨을 가득 채우면 약 12 일간 SQUID 동작이 가능하다.

5. 40 채널 동작

40 채널 뇌자도 측정시스템은 40 채널 SQUID insert, 듀아, 듀아 지지대, FLL 회로 및 SQUID 조절기, 직류 전원장치, 자기차폐실, 고주파 (RF) 차폐 캐비닛, A/D 카드, 신호수집용 컴퓨터, 자극제시 장치 등으로 구성된다.

40 채널 시스템에 필요한 다수의 센서를 제작하여 센서의 통계적인 동작특성을 조사하였는데,

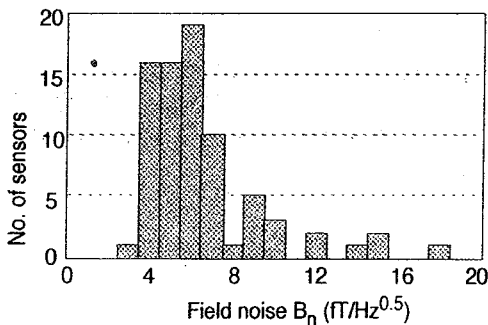


Fig. 5. Distribution of SQUID noise.

80개의 센서잡음을 조사한 결과 100 Hz에서 그림 5와 같은 잡음분포가 얻어졌다. 잡음 값이 대체적으로 4~7 fT_{rms}/√Hz의 범위에 분포하고 있고 평균 5 fT_{rms}/√Hz의 값을 가진다. 1~100 Hz영역에서 잡음 평균값을 7 fT_{rms}/√Hz로 보고, 뇌자도 측정시 측정 주파수 대역을 100 Hz로 하면 잡음의 크기는 70 fT_{rms}, 또는 100 fT_{peak}가 된다. 즉, 신호의 피크가 100 fT인 뇌자도 신호를 신호대 잡음비 1로서 측정이 가능함을 뜻한다.

6. 뇌자도 측정

그림 6은 40 채널 시스템을 이용한 뇌자도 측정 장치도 사진이다. SQUID 출력신호는 자기차폐실 천정의 FLL 회로에서 처리되어 자기차폐실과 접지가 연결된 고주파 차폐 캐비닛에서 조절 및 증폭이 되어 컴퓨터에 수집된다. 한편 자극 실험을 위해 자극신호가 비자성 자극장치를 통해 인체에 전달되며 자극신호를 trigger source로 하여 가산평균을 하도록 하였다.

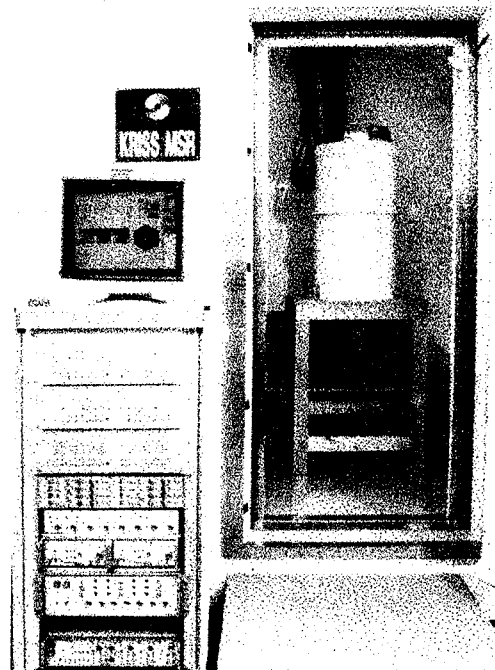


Fig. 6. Photograph of the 40-channel system for measuring neuromagnetic fields.

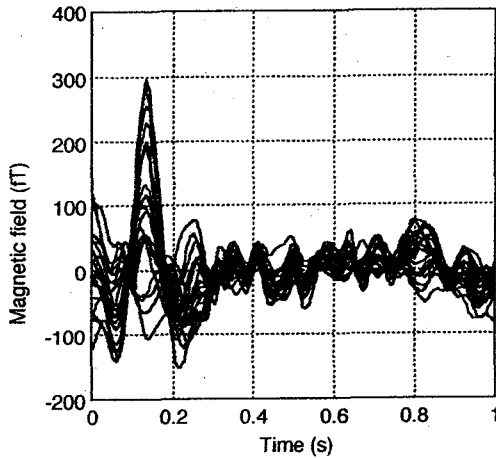


Fig. 7. Auditory-evoked magnetic field signal. The stimulus duration is 0~0.2 s.

그림 7은 정상적인 사람의 왼쪽 귀에 약 80 dB의 세기로 1 kHz의 청각자극을 200 ms 동안 가했을 때 오른쪽 뇌의 측두엽 부위에서 발생하는 자장을 측정된 결과이다. 피측정자의 기대효과를 없애기 위해 자극과 자극사이의 간격은 1~2 초 사이에서 임의로 변하게 했다. 측정시 60 Hz 제거 필터와 0.3~100 Hz의 대역투과 필터를 사용하였고 128회의 가산평균을 하였다. A/D 카드의 sampling rate는 640/s 이다. 그림에서 보듯이 자극 시작시점으로부터 약 100 ms 뒤에 자장 신호의 피크, 즉, N100m 피크가 발생되고 있다. N100m 피크의 크기는 위치에 따라 다르나 양호한 신호대 잡음비를 가짐을 알 수 있다. 신호의 크기와 극성이 다른 것은 센서의 위치와 방향에 따른 것이다.

7. 결론

뇌자도 측정을 위하여 40 채널 SQUID 시스템을 제작하고 동작특성을 분석하였다. 개발된 시스템의 주요 특징은 자속-전압변환계수가 매우 큰 새로운 방식의 SQUID 센서를 채택함으로써 간단한 회로로 SQUID 구동이 가능하도록 하였으며, 외부 환경잡음을 소거하기 위하여 평면형 1차 미분계를 사용하였다.

특히 DROS를 사용한 최초의 다채널 시스템이란 의미를 갖는다. 시스템의 잡음은 100 Hz에서 1.2~1.5 fT/cm $\sqrt{\text{Hz}}$ 인데 이를 자장잡음으로 환산하면 5~6 fT/ $\sqrt{\text{Hz}}$ 가 된다. 이 잡음 값은 뇌자도 측정에 충분히 사용할 수 있는 감도임을 확인하였고, 개발된 시스템을 이용하여 청각자극에 유발된 뇌자도 신호를 측정하였다.

감사의 글

본 연구는 과학기술부의 연구비(스타프로젝트 : 초전도 양자소자 및 뇌자도 측정기술 개발) 지원으로 수행되었습니다.

참고문헌

- [1] M. Hamalainen, R. Hari, R. J. Ilmoniemi, J. Knuutila and O. V. Lounasmaa, *Rev. Mod. Phys.*, **65**, 413(1993).
- [2] D. Drung, *Supercond. Sci. Technol.* **4**, 377 (1991).
- [3] D. J. Adelerhof, H. Nijstad, F. Flokstra and H. Rogalla, *IEEE Trans. Appl. Supercond.* **3**, 1862 (1993).
- [4] Y. H. Lee, J. M. Kim, H. C. Kwon, Y. K. Park, J. C. Park, M. J. van Duuren, D. J. Adelerhof, F. Flokstra and H. Rogalla, *IEEE Trans. Appl. Supercond.* **5**, 2156(1995).
- [5] Y. H. Lee, H. C. Kwon, J. M. Kim, Y. K. Park and J. C. Park, *Supercond. Sci. Technol.* **9**, 34 (1996).
- [6] Y. H. Lee, H. C. Kwon, J. M. Kim, Y. K. Park and J. C. Park, *J. Kor. Phys. Soc.*, **32**, 600 (1998).
- [7] 이용호, 김진목, 권혁찬, 이상길, 임청무, 박용기, 박종철, *새물리*, **39**, 86 (1999).
- [8] 이용호, 권혁찬, 김진목, 임청무, 이상길, 박용기, 박종철, *한국자기학회지*, **6**, 264(1996).
- [9] 초전도 양자소자 및 뇌자도 측정기술 개발 (KRIS-99-093-IR), 한국표준과학연구원, 1999.