

## 생체자기계측을 위한 자기차폐실의 설치 및 특성\*

이용호 · 권혁찬 · 김진목 · 임청무 · 이상길 · 박용기 · 박종철

한국표준과학연구원 초전도연구그룹, 대전 305-600

(1996년 7월 11일 받음, 1996년 8월 30일 최종수정본 받음)

본 연구에서는 SQUID를 이용한 생체자기 계측연구에 사용될 자기차폐실의 설치 및 차폐 특성에 대해 소개한다. 차폐실 내부공간의 크기는 2 m(길이) × 2 m(폭) × 2.5 m(높이)이고 차폐재료는 높은 투자율을 가진 Mumetal과 전기 전도도가 높은 알루미늄으로 구성되어 있다. 직류 지구자장에 대한 차폐율은 차폐실 중심에서 60 dB 이상이며 교류자장에 대한 차폐율은 1 Hz에서는 60 dB, 10 Hz에서는 80 ~ 100 dB의 값을 가진다. 차폐실내에서의 자장 잡음은 1 Hz에서 500 fT/√Hz, 10 Hz에서 100 fT/√Hz의 값을 가지며 자장구배잡음은 1 Hz에서 7 fT/cm√Hz 이하로서 SQUID 자력계에 의한 심자도와 SQUID gradiometer에 의한 뇌자도측정이 가능한 수준이다. 자체 개발된 SQUID 센서를 이용하여 차폐실내에서 심장 및 뇌로부터 발생하는 자기신호를 검출하였다.

### I. 서 론

인체의 신경, 심장 및 두뇌 등으로부터는 미약하지만 자장이 발생한다. 이들 자장을 측정함으로써 의학적인 진단을 하려는 연구가 1967년 미국 매사추세츠 공과대학 자기연구소에서 시작된 이래 선진각국에서 활발히 진행되고 있으며 이미 여러 병원에서 정신질환, 심장질환 등의 질병진단 연구나 뇌기능연구에 활용되기 시작하였다.[1, 2] 생체자기계측을 이용한 진단은 비접촉, 비파괴적이면서 자장을 발생하는 체내전류에 대한 3차원적인 정보를 얻을 수 있다. 현재 널리 사용되고 있는 X-ray CT나 MRI-CT 등의 진단방법은 우수한 공간 분해능을 가지지만 해부학적인 정보만을 제공하며 생체내의 동적인 정보는 제공하지 못하고 있다. 또한 병원에서도 많이 사용되고 있는 심전도나 뇌파는 체내의 활동전류에 의해 체표면에 생긴 전위차를 측정하기 때문에 전류원 및 주변에 발생하는 전기활동의 공간적인 함에 의존하는 반면 SQUID를 이용한 측정은 인체가 자기적으로 투명하기 때문에 자장 발생원으로부터 공간적으로 떨어진 위치에서 측정이 가능하고 발생원의 전류에만 의존하기 때문에 발생원의 위치를 정확하게 추정할 수 있는 장점이 있으며 인체의 구조적인 정보보다는 기능적인 정보를 얻는데 유용하게 사용될 수 있다.[3]

이 분야의 연구가 본격적으로 가능하게 된 기술적인 배경에는 고감도 자장계측소자인 초전도 양자간섭장치(SQUID : Superconducting QUantum Interference Device)의 개발과 주변의 강력한 자기잡음을 제거할 수 있었기 때문이다.

SQUID는 자속양자(flux quantum :  $\Phi_0 = 2.07 \times 10^{-15}$  Wb) 보다도 훨씬 작은  $10^{-21}$  Wb 수준의 자속을

정밀하게 측정할 수 있는데 이는 지자기의 약 100억 분의 1 정도의 작은 자기장( $10^{-14}$  T) 측정이 가능한 것을 뜻한다. 이러한 SQUID의 감도는 양자역학에서 이론적으로 계산된 측정의 한계에 접근하고 있어 다른 어떠한 센서와도 비교할 수 없는 높은 감도를 지니고 있다.[4, 5]

한편 생체자기 신호는 0.1 Hz ~ 1 kHz의 주파수 영역에서 수십 fT ~ 수십 pT의 크기로 발생되는데 일반 실험실에서의 강한 자기잡음에 비해 대단히 미약하기 때문에 외부의 자기잡음을 제거하는 것이 중요한 실험적 과제이다.

주된 자기잡음으로서는 우선 지구자장으로서 30 ~ 50  $\mu$ T의 크기와 약 10 pT/m의 비교적 균일한 자장구배(field gradient)를 갖는데 지구자장 자체는 직류자장이기 때문에 문제가 되지 않으나 건물 또는 주위의 자성체가 지구자장의 분포를 변형시켜 불균일한 자장을 생성시키며 SQUID 센서를 포함한 측정시스템이 직류자장하에서 진동을 하면 교류잡음을 유발한다. 또한 도심중의 실험실에는 전력선, 모터, 공조시스템, 엘리베이터, 자동차, 전차 및 건물의 진동등에 의한 교류자장잡음이 존재하며 방송국 안테나등에서 발생하는 전자파잡음이 SQUID의 동작상태를 악화시킨다.[2]

주위에서 발생하는 자기잡음을 제거하는 방법으로서 SQUID 자력계의 검출코일을 gradiometer 형태로 만들어 균일한 자기잡음에는 반응하지 않도록 하는 방법, 초전도 재료의 Meissner 효과를 이용한 초전도 자기차폐, 헬륨홀츠 코일을 이용하여 자장을 소거시키는 방법이 있으며 가장 확실한 방법으로는 측정하려는 인체와 SQUID 센서를 전기 및 자기적으로 차폐된 자기차폐실내에 두고 측정하는 것이다.

자기차폐의 방법에는 자성체를 이용하는 방법과 전기

전도도가 높은 금속을 이용하는 방법이 있다. 교류자장만을 차폐하고자 할 경우에는 skin depth 보다 두꺼운 알루미늄이나 구리로 된 금속판에서의 eddy current에 의한 차폐효과를 이용하면 되나 직류자장이나 대략 1 Hz 이하의 저주파 자장에 대해서는 차폐효과가 없고 또한 계측시스템이 진동을 하는 경우에는 교류잡음이 발생한다.[6] 한편 직류자장만을 소거하고자 할 경우에는 값싼 순철이나 규소강판등을 사용하면 되는데 이들 재료에 직류자장이 가해지면 자구(magnetic domain)의 재배열이 일어나서 외부자장과 반대방향의 자장을 발생시킴으로써 차장소거가 가능하나 비투자율이 작아서 교류자장에 대한 차폐효과는 미약하다. 따라서 0.1 Hz ~ 1 kHz 주파수 영역에서 높은 차폐율을 얻기 위해서는 대략 1 Hz 이하에서 효과적인 ferromagnetic shielding과 1 Hz 이상에서 효과가 있는 eddy current shielding을 동시에 이용하는 것으로서 비투자율이 큰 자성체와 전기 전도도가 큰 금속을 교대로 사용하여 밀폐된 방을 만드는 방법이다.[7-9]

본 연구에서는 SQUID를 이용한 생체자기 계측기술 개발을 위하여 국내에서는 처음으로 자기차폐실을 설치하고 차폐실내의 직류 잔류자장분포, 주파수에 따른 교류 차폐율, 자장잡음 및 자장구배잡음등 차폐특성을 조사하였으며, 차폐실내에서 자체 개발된 SQUID 센서를 이용하여 심장 및 뇌에서 발생하는 자장을 측정하였다.

## II. 차폐율 계산

설치하고자 하는 차폐실의 모양은 직육면체이나 차폐율 계산을 위한 정확한 공식이 알려져 있지 않으므로 기하학적 구조를 실린더로 근사하고 차폐율을 계산해 보기로 하자. 차폐실은 뮤메탈(Mumetal)에 의한 차폐효과와 알루미늄에 의한 eddy current 차폐효과를 동시에 이용하므로 각각의 경우를 분리해서 계산한다.[7]

### 1. 뮤메탈에 의한 직류 자기차폐율

직경  $D$ , 두께  $d$ , 투자율  $\mu$ 인 한 개의 뮤메탈 실린더가 직류자장에 수직하게 놓여 있을 때 실린더에 의한 차폐율은 다음과 같이 주어진다.

$$S = \left( \frac{\mu d}{D} \right) + 1 \quad (1)$$

여기서 실린더의 두께는 직경에 비해 매우 얇고 투자율은 1 보다 훨씬 커야 윗식이 성립한다.

### 2. 뮤메탈에 의한 교류 자기차폐율

#### 2. 1. 저주파 영역( $d < \delta$ )

교류자장이 가해지면 뮤메탈 내부에도 eddy current 가 유도되며 외부자장과 반대방향의 자장을 형성시킴으로써 차폐효과를 가져오는데 이때 차폐율은 다음과 같이 주어진다.

$$S = \left( \frac{\mu d}{D} + 1 \right) \left( \frac{\delta}{2d} \right) \left[ \cosh \left( \frac{2d}{\delta} \right) - \cos \left( \frac{2d}{\delta} \right) \right]^{1/2} \quad (2)$$

여기서  $\delta$ 는 skin depth로서 뮤메탈의 비저항  $\rho$ , 비투자율  $\mu$ , 진공중에서의 투자율  $\mu_0$ , 주파수  $f$ 에 의해 다음 식으로 주어진다.

$$\delta = \left( \frac{\rho}{\pi \mu \mu_0 f} \right)^{1/2} \quad (3)$$

#### 2. 2. 고주파 영역( $d > \delta$ )

Skin depth가 뮤메탈의 두께보다 얇아지면 차폐율은 다음과 같이 주어진다.

$$S = \left( \frac{1}{2\sqrt{2}} \right) e^{d/\delta} \left\{ \left( \frac{D}{2\mu\delta} + 1 \right)^2 + \left( \frac{\mu\delta}{D} + 1 \right)^2 \right\}^{1/2} \quad (4)$$

윗식에서 주파수가 높아지면 차폐율은 지수함수적으로 증가하여야 하나 실제로는 뮤메탈 환넨사이의 접촉저항이 커서 외부자장을 소거시키기 위한 유도전류가 크게 방해받기 때문에 주파수에 따른 차폐율의 증가는 완만해진다.

차폐율을 증가시키기 위해 두 개의 실린더로 된 차폐구조에서는 직류 또는 교류차폐율은 다음과 같이 주어진다.

$$S = S_i S_0 \left\{ 1 - \left( \frac{D_i}{D_0} \right)^3 \right\} + S_i + S_0 + 1 \quad (5)$$

여기서  $D_i$ 와  $D_0$ 는 각각 안쪽 실린더와 바깥쪽 실린더의 직경이고,  $S_i$ 와  $S_0$ 는 식 (1), (2), (4)의  $D$ 대신에  $D_i$ 와  $D_0$ 를 넣고 각각 계산한 값이다.

### 3. 알루미늄에 의한 eddy current 차폐율

교류자장이 가해지면 알루미늄 내부에는 가해진 자장

을 상쇄시키기 위한 eddy current가 흘러 실린더 내부의 차폐효과를 가져오는데 차폐되는 정도는 알루미늄의 두께와 skin depth와의 상대적인 크기에 따라 결정된다.

3. 1. 저주파 영역( $d < \delta$ )

직경  $D$ , 두께  $d$ 인 알루미늄으로 된 실린더에 길이와 수직인 방향으로 자장이 가해지면 외부자장의 주파수가 낮아 skin depth가 실린더의 두께보다 길 때 차폐율은 다음과 같이 주어진다.

$$S = \left\{ 1 + \left( Ddf\pi\mu_0/2\rho \right)^2 \right\}^{1/2} \quad (6)$$

알루미늄의 skin depth는 0.1 Hz에서 26 cm 이므로 이 주파수에서 알루미늄만에 의한 효과적인 차폐효과를 얻기 위해서는 알루미늄의 두께가 26 cm 보다 두꺼워야 하는데 이 정도 두께의 무거운 판을 이용한 차폐실 건설이 현실적으로 매우 어렵다.

3. 2. 고주파 영역( $d > \delta$ )

주파수가 높아지면 skin depth는 얇아지므로 eddy current에 의한 차폐효과가 우세해지며 이 때 차폐율은 다음과 같이 지수함수적으로 증가한다.

$$S = \left( D/4\sqrt{2}\delta \right) e^{d/\delta} \quad (7)$$

여기서  $\delta$ 는 알루미늄의 skin depth로서 다음과 같이 주어진다.

$$\delta = \left( \rho/\pi\mu_0f \right)^{1/2} \quad (8)$$

두 개의 알루미늄 실린더로 된 차폐구조에서는 각각의 두께 및 직경에 대한 차폐율을 식 (6), (7)로부터 계산한 후 서로 곱한다.

그리고 전체 차폐율은 뮤메탈에 의한 차폐효과와 알루미늄에 의한 차폐효과를 곱한 양으로서 다음과 같이 주어진다.

$$S_{total} = S_{Mumetal} \cdot S_{Aluminum} \quad (9)$$

III. 자기차폐실 구조 및 제작

차폐실은 Fig. 1과 같은 구조로 되어 있다. 내부공간의 크기가 2 m(길이) × 2 m(폭) × 2.5 m(높이)인 직육면

체인데 길이와 폭은 사람이 심리적 부담을 느끼지 않고 누운상태로 측정이 가능하도록 2 m로 했으며, 천정의 높이는 SQUID의 field trap을 줄이기 위해 차폐실내에서 액체헬륨 transfer가 가능하도록 충분히 높게 했다. 차폐실 단면은 3종의 벽으로 구성되어 있는데 바깥벽은 두께 2 mm의 뮤메탈 한 층, 두께 6 mm의 알루미늄판위에 지지되어 있고, 중간벽은 두께 12 mm의 알루미늄 한 층, 안쪽벽은 두께 2 mm의 뮤메탈 한 층으로 되어 있으며 벽과 벽사이에는 면이 서로 접촉하지 않도록 절연되어 있고 한 곳에서만 서로 공통적으로 접지되어 있다. 뮤메탈 관넬의 크기는 300 cm × 75 cm 내외이고 끝부분은 2 cm 정도 서로 포개져 있는데 그 위에 추가적으로 폭 10 cm의 뮤메탈과 알루미늄 strip으로 눌러 접촉상태를 보강하고 비자성 스텐레스 스틸 나사로 고정하였다. 알루미늄 판넬 간의 연결시 접촉부위의 전기전도 특성을 좋게하기 위해 표면 산화막을 제거시킨 후 전도성 그리스를 사용하였다.

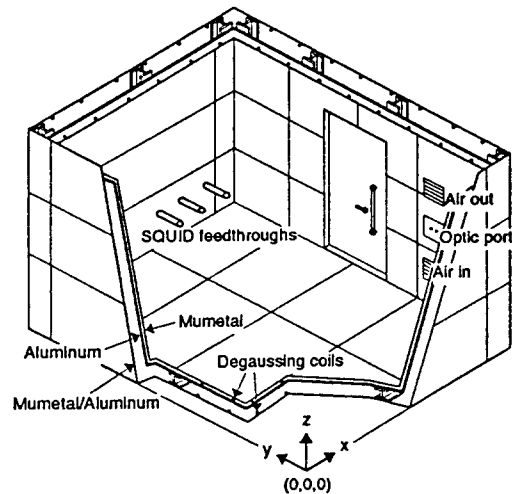


Fig. 1. Schematic view of the magnetically shielded room.

체 차폐실 외부공간의 크기는 2.6 m(길이) × 2.6 m(폭) × 3.1 m(높이)이며 벽 두께는 30 cm 이다. 구조물의 전체적인 지지는 알루미늄 H 빔을 이용하였고 건물의 진동을 흡수하기 위해 차폐실 바닥에 방진시설을 하였다. 차폐실 내부의 조명은 직류전원을 이용하며 내벽은 소음을 흡수할 수 있는 재료로 되어 있으며 흰색 페인트로 마감처리 하였다. 뮤메탈에 인접하여 x, y, z 방향의 코일이 바깥벽과 안쪽벽에 각각 부착되어 있어서 교류 자장을 가함으로써 자화된 자성체의 탈자화를 할 수 있도록 되어

있다. SQUID 출력신호 검출을 위한 cable은 cutoff 주파수가 2.2 GHz인 직경 8 cm, 길이 63 cm의 실린더 feedthrough를 통해 SQUID controller에 연결된다. 차폐실의 전체적인 설계 및 설치는 스위스의 IMEDCO AG사에 의해 실시되었다.[10]

#### IV. 차폐 특성

##### 1. 직류자장

차폐실내의 위치와 방향에 따른 직류 잔류자장분포를 3-axis fluxgate 자력계(Bartington, model MAG-03M)를 이용하여 측정하였다. 사용된 자력계는 자체 offset값을 가지기 때문에 동일한 측정위치에서 0°와 180° 회전시켜 측정한 후 각각의 평균치를 구하였다. 측정좌표의 원점은 차폐실 바닥 모서리이며 x 축은 출입구 방향이고 z 축은 차폐실의 천정방향이며 측정간격은 20 cm이다.

Fig. 2는 차폐실 바닥으로부터 120 cm 높이가 되는 면에서 측정한 자장분포를 나타낸다. 전체적으로 자장방향

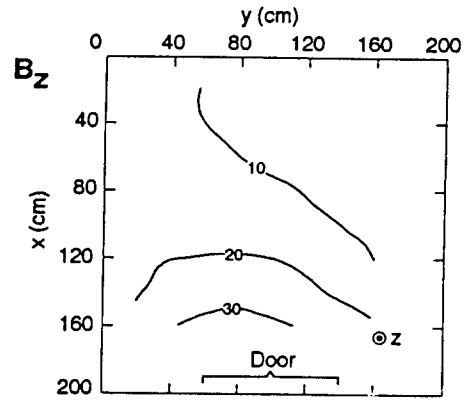
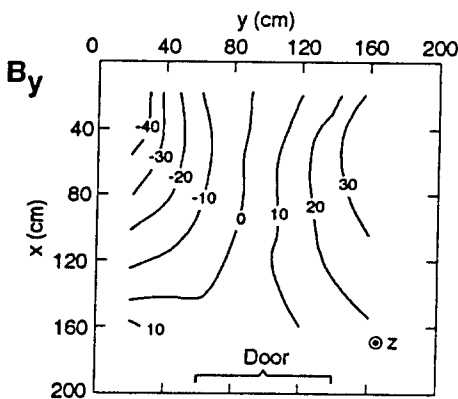
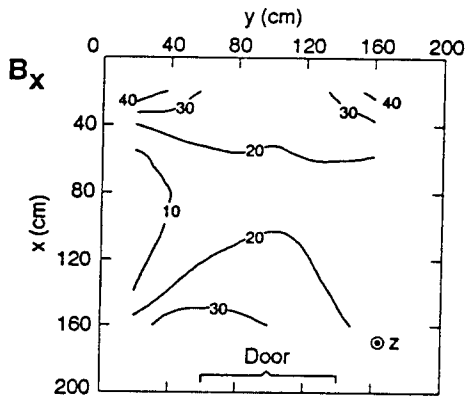


Fig. 2. Mapping of the static field components inside the room measured in the plane of 120 cm from the floor. The magnetic field unit is nT.



에 따라 잔류자장값과 구배특성이 다르게 나타남을 알 수 있다. x와 y 성분의 자장값은 차폐실의 모서리쪽으로 갈수록 자장구배가 증가하며 z 성분은 출입구 부근이 구배가 크게 나타난다. 차폐실 설치전 자장벡터의 x, y, z 방향성분은 (-4.5, 20, -35)  $\mu$ T 인데 차폐실내의 자장벡터는 차폐실 중심에서 (19, 7, 14)nT로서 설치전과 비교할 때 자장의 방향이 변했고 차폐율도 방향에 따라 큰 차이가 나는 것을 알 수 있다. 즉 차폐실 밖의 자장벡터가 뮤메탈에 의해 재분포 되었음을 말한다.[9]

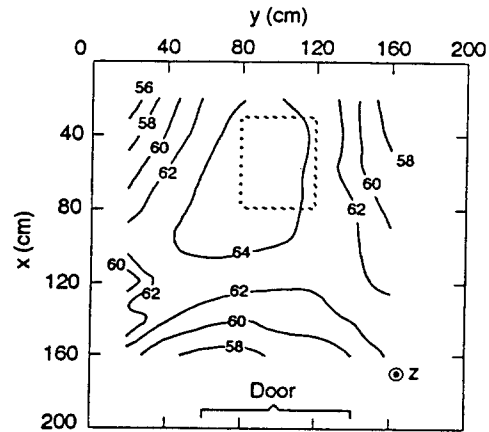


Fig. 3. Distribution of the static shielding factor. The measurement area for the magnetocardiogram and magnetoencephalogram is notated as dotted box. The shielding factor is in dB unit.

Fig. 3은 차폐실의 중간 높이에서 측정된 자장벡터의 크기를 설치전의 크기인  $40 \mu\text{T}$ 로 나눈 값으로서 x-y 면에서의 차폐율분포를 나타낸다. 차폐실중심 부근에서 자장벡터의 절대값은 24 nT 내외로서 차폐실 설치전과 비교하면 중심부분은 약 64 dB, 즉, 1600배 감소 되었다. 출입구 부근에서의 차폐율이 나쁘고 심자도 또는 뇌자도 측정시 SQUID 센서가 놓여지는 위치(점선으로 표시)에서 차폐율 및 공간적인 변화가 상대적으로 양호함을 알 수 있다.

## 2. 교류자장

0.01 Hz에서 1 kHz영역의 교류자장에 대한 차폐율을 측정하기 위하여 차폐실 주위에 x 방향으로 크기가  $4200 \text{ cm} \times 3190 \text{ cm}$ , y 방향으로  $4200 \text{ cm} \times 3190 \text{ cm}$ , z 방향으로  $4200 \text{ cm} \times 4200 \text{ cm}$ 인 대형 헬름홀츠코일을 설치하고 function generator 및 audio amp를 이용하여 코일중심에서의 자장값이  $2 \mu\text{T}_{pp}$ 가 되도록 교류자장을 가하였다. 자장측정을 위해 0.01 Hz ~ 1 Hz 영역에서는 fluxgate 자력계를 사용하였고 1 Hz ~ 1 kHz 영역에서는 자체 개발된 3-axis SQUID 벡터 자력계를 사용하였다.

Fig. 4는 x, y, z 방향의 측정된 차폐율 곡선과 x(또는 y) 방향에 대해 뮤메탈에 의한 차폐효과와 알루미늄에 의한 차폐효과를 따로 계산한 곡선과 두 효과를 곱한 전체

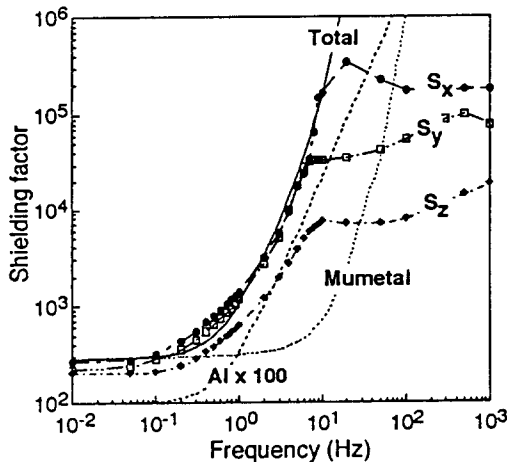


Fig. 4. Measured shielding factors for three orthogonal directions and calculated shielding factors for the y direction. In the calculation of Mumetal shielding factor  $\mu$  value of 20000 is assumed. The aluminum shielding curve is magnified by 100 times.

차폐곡선을 보여준다. 계산에서 뮤메탈의 투자율을 20,000으로 가정했고, 뮤메탈의 비저항은  $6.2 \times 10^{-7} \Omega\text{m}$ , 알루미늄의 비저항은  $2.7 \times 10^{-8} \Omega\text{m}$ 로 했다. 그리고 D는 직육면체의 변의 평균값으로 x(또는 y) 방향의 경우 뮤메탈에 대해서는  $D_i = 2.33 \text{ m}$ ,  $D_0 = 2.85 \text{ m}$ 이고, 알루미늄의 경우 6 mm 및 12 mm 두께에 대해서는 각각 2.33 m, 2.39 m로 하였다.

측정된 차폐율은 0.01 Hz에서 200 ~ 270 인데 주파수를 0 Hz, 즉, 직류자장까지 내려가면 이 차폐율이 유지될 것으로 추측할 수 있다. 그런데 앞에서 측정된 직류전류 자장에 대한 차폐율은 1600 내외로서 이론적인 계산과는 상당히 차이가 있음을 알 수 있다. 1 Hz에서의 차폐율은 1000 내외, 10 Hz에서는 방향에 따라 차이는 있으나 8,000 ~ 200,000의 값을 가진다. 한편 계산에 의한 차폐율을 보면 약 0.1 Hz 이하에서는 뮤메탈에 의한 ferromagnetic 차폐만 효과가 있고 주파수가 증가할수록 알루미늄에 의한 eddy current 차폐효과가 중요하게 작용하며 전체 차폐효과의 주파수에 따른 차폐율의 급격한 증가는 알루미늄에 의해 주로 결정됨을 알 수 있다.

측정된 차폐율은 약 10 Hz까지는 계산값과 잘 일치하고 있다. 계산에 의하면 차폐율은 계속 증가하여야 하나 10 Hz 이상에서의 측정값은 감소하거나 완만하게 증가하는데 이는 계산시 완벽하게 밀폐된 실린더라고 가정했으나 실제로는 구멍이나 불완전한 접촉부위, 출입구등에서 자속이 침투하기 시작함을 의미한다. 이와같이 10 Hz 근방에서 피크를 보이고 더 높은 주파수에서 차폐율이 떨어지는 경향은 다른 자기차폐실에서도 보고되었다.[7-9]

1 Hz이상에서 z방향의 차폐율이 상대적으로 낮은 이유는 z방향의 외부자장에 대한 eddy current가 출입문을 가로질러(y 방향으로) 흘러야 하는데 알루미늄의 높이가 2.64 m 이고 출입문의 높이가 2 m이므로 eddy current의 많은 양이 출입문에 의해 방해를 받기 때문으로 해석된다. 또한 뮤메탈이 포개질 때 직사각형의 짧은 길이가 z 방향으로 향하도록 되어있어 z방향의 저주파(1 Hz 이하) 자장이 상대적으로 많이 침투하는 것으로 생각된다.

## v. 자기잡음 특성

Fig. 5는 각각 차폐실안과 밖에서 저온초전도 Nb SQUID 자력계로 측정된 y방향의 자장잡음을 비교한 것이다. 차폐실내에서의 자장잡음은 1 Hz에서  $500 \text{ fT}/\sqrt{\text{Hz}}$ , 10 Hz에서  $100 \text{ fT}/\sqrt{\text{Hz}}$  내외의 값을 가진다. 6 ~ 7 Hz와 10.5 Hz에서의 피크들은 건물의 진동에 의한 것이고 그외 전원선에 의한 피크들이 나타나 있다. 차폐실 안

과 밖의 잡음의 크기를 직접 비교하면 1 Hz에서는 약 500 배, 10 Hz에서는 700배 정도 자장잡음이 감소했다. 이 결과는 앞에서 차폐실공간에 비교적 균일한 자장을 가해서 측정된 교류차폐율(Fig. 4)과는 차이를 보이는데 실험실 환경에서의 자장잡음은 공간적으로 더 불균일하며 그 결과 차폐율이 떨어지는 것으로 해석된다.[6]

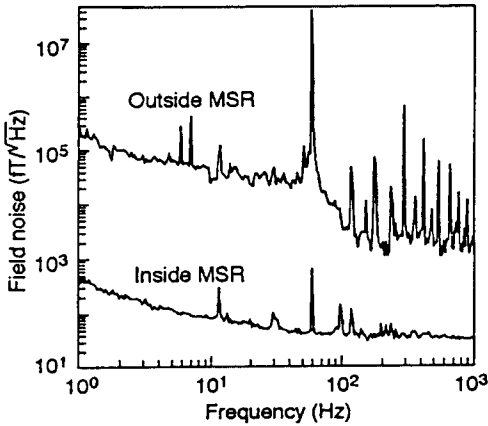


Fig. 5. Magnetic field noises inside and outside of the magnetically shielded room.

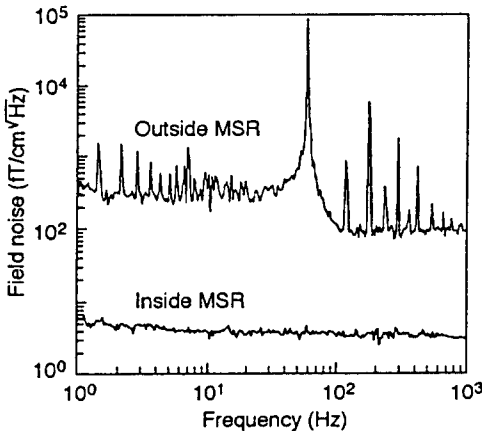


Fig. 6. Magnetic field gradient noises inside and outside of the magnetically shielded room.

한편 SQUID planar gradiometer로 차폐실안과 밖에서 y 방향 자장성분의 z 방향 구배,  $\partial B_y / \partial z$ 를 측정할 결과가 Fig. 6이다. 차폐실내의 자장구배잡음은 Nb tube

내에서 측정된 SQUID gradiometer 자체의 잡음과 거의 같은 수준으로 1 Hz에서 6 ~ 7 fT/cm  $\sqrt{\text{Hz}}$ 의 값을 가진다. 이를 자장잡음으로 환산하면 18 ~ 21 fT/ $\sqrt{\text{Hz}}$ 가 된다.

## VI. 생체자기계측 응용

차폐실내에서의 자기잡음이 생체자기계측이 가능한 수준으로 충분히 낮아졌는지 여부가 차폐실의 중요한 성능 지수가 되는데 자체 개발한 저잡음 SQUID 센서를 이용하여 심장 및 뇌로부터 발생하는 자장을 측정하였다. Fig. 7은 저온초전도 Nb SQUID 자력계로 심자도 신호를 측정된 결과이다. 심자도의 경우에는 신호가 비교적 크기 때문에 자력계를 이용한 측정이 가능하며 averaging 하지 않고 실시간 측정으로도 양호한 신호를 얻었으

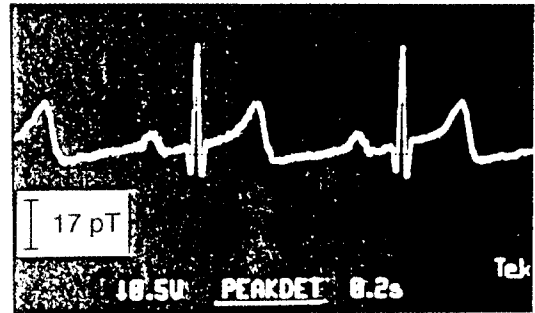


Fig. 7. Magnetocardiogram measured using a SQUID magnetometer.

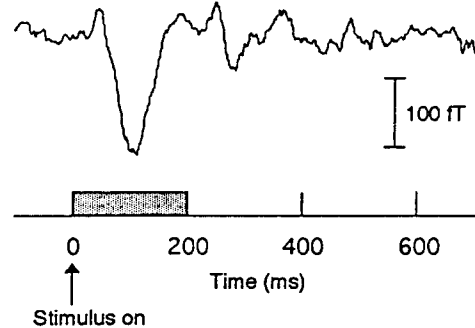


Fig. 8. Auditory evoked neuromagnetic field measured using SQUID planar gradiometer. The stimulus is applied to the left ear and field is measured above the right auditory cortex. The onset of stimulus is  $t = 0$  and the stimulus duration is 200 ms.

며 특히 액체질소에서 동작하는 고온초전도 SQUID 자력계를 이용한 심자도 측정이 가능함을 의미한다.

한편 뇌에서 발생하는 자장신호는 심자도 신호보다 훨씬 약하기 때문에 자력계로 측정할 경우에는 신호에 비해 차폐실내의 잡음이 우세해서 측정이 어려워진다. 따라서 추가적인 잡음소거 방안이 필요한데 본 연구에서는 SQUID의 검출코일을 미분형 구조(gradimeter)로 함으로써 SQUID로부터 수 cm 거리에서 발생하는 자장신호에 비해 공간적인 구배가 완만한 환경잡음을 소거시켰다. [11] Fig. 8는 왼쪽 귀에 1 kHz의 청각자극을 200 ms 동안 가했을 때 오른쪽 뇌의 1차 청각영역(auditory cortex) 부위에서 발생하는 유발자장신호를 측정된 결과이다. 신호대 잡음비를 개선하기 위해 150회의 자극에 대한 유발신호를 평균하였다.

### Ⅶ. 결 론

SQUID를 이용한 생체자기 계측연구를 위해 자기차폐실을 설치하고 차폐특성을 조사하였다. 직류 지구자장에 대한 차폐율은 차폐실 중심에서 60 dB 이상이며 직류자장 및 0.1 Hz 이하의 주파수 영역에서는 무메탈에 의한 ferromagnetic 차폐 효과만 작용하며 1 Hz 이상에서는 알루미늄의 eddy current에 의한 차폐효과가 중요한 역할을 하였다. 교류자장에 대한 차폐율은 1 Hz에서는 60 dB, 10 Hz에서는 80 ~ 100 dB의 값을 가진다. 차폐실내에서의 자장잡음은 1 Hz에서 500 fT/√Hz, 10 Hz에서 100 fT/√Hz의 값을 가지는데 자력계로 심자도를 측정할 수 있는 수준이다. 자장구배잡음은 1 Hz에서 6 ~ 7 fT/cm√Hz의 값으로 SQUID gradimeter의 자체잡음 수준이다. 차폐실내에서 SQUID자력계를 이용한 심자도 및 SQUID gradimeter를 이용한 뇌자도 신호를 검출함으로써 앞으로 생체자기 계측연구를 본격적으로 수

행할 수 있게 되었다.

### 참 고 문 헌

- [1] D. Cohen, E. A. Edelsack and J. E. Jimmnerman, Appl. Phys. Lett. **16**(7), 278(1970)
- [2] G. L. Romani, S. J. Williamson and L. Kaufman, Rev. Sci. Instrum. **53**(12), 1815 (1982)
- [3] C. Baumgartner, L. Deecke, G. Stroink and S. J. Williamson, Biomagnetism : Fundamental research and clinical applications, Elsevier IOS press, Amsterdam, (1995)
- [4] J. Clarke, Proc. IEEE, **77**(8), 1208(1989)
- [5] J. P. Wikso, Jr., IEEE Trans. Appl. Supercond. **5**(2), 74(1995)
- [6] G. Stroink, B. Blackford, B. Brown and M. Horacek, Rev. Sci. Instrum. **52**(3), 463(1981)
- [7] S. N. Erne, H. D. Hahlbohm and H. Lubbig, Biomagnetism, Walter de Gruyter, Berlin, (1981), pp. 33-94
- [8] V. O. Kelha, J. M. Pukki, R. S. Peltonen, A. J. Penttinen, R. J. Illoniemi and J. J. Heino, IEEE Trans. Magn. **18**(1), 260(1982)
- [9] G. W. Sullivan, P. S. Lewis, J. S. George and E. R. Flynn, Rev. Sci. Instrum. **60**(4), 765 (1989)
- [10] IMEDCO AG, CH-4614 Hagedorf, Switzerland
- [11] Y. H. Lee, H. C. Kwon, J. M. Kim, Y. K. Park and J. C. Park, Supercond. Sci. Technol. **9**(4A), 34(1996)

## Construction and Performance of Magnetically Shielded Room for Biomagnetic Applications

Y. H. Lee, H. C. Kwon and J. M. Kim,

C. M. Lim, S. K. Lee, Y. K. Park and J. C. Park

*Korea Research Institute of Standards and Science, Taejon, 305-600, Korea*

(Received 11 July 1996, in final form 30 August 1996)

A magnetically shielded room has been constructed for biomagnetic applications. The room has internal dimensions of 2 m(length)  $\times$  2 m(width)  $\times$  2.5 m(height) and it consists of high permeability Mumetal and high conductivity aluminum, utilizing ferromagnetic shielding and eddy current shielding. The dc shielding factor around the center of the room is above 60 dB, and the ac shielding factors at 1 and 10 Hz are larger than 60 and 80 dB, respectively. The internal magnetic field noise at 1 Hz is 500 fT/ $\sqrt{\text{Hz}}$  and at 10 Hz is 100 fT/ $\sqrt{\text{Hz}}$ , and the field gradient noise at 1 Hz is below 7 fT/cm/ $\sqrt{\text{Hz}}$ . Successful measurements of cardiomagnetic fields using SQUID magnetometer and neuromagnetic fields using SQUID gradiometer have been done.