

고온 초전도체 자기 쉴드와 생체자기

권오홍

관동대학교 정보기술공학부, 강원도 양양군 양양읍 임천리 산7

1. 서론

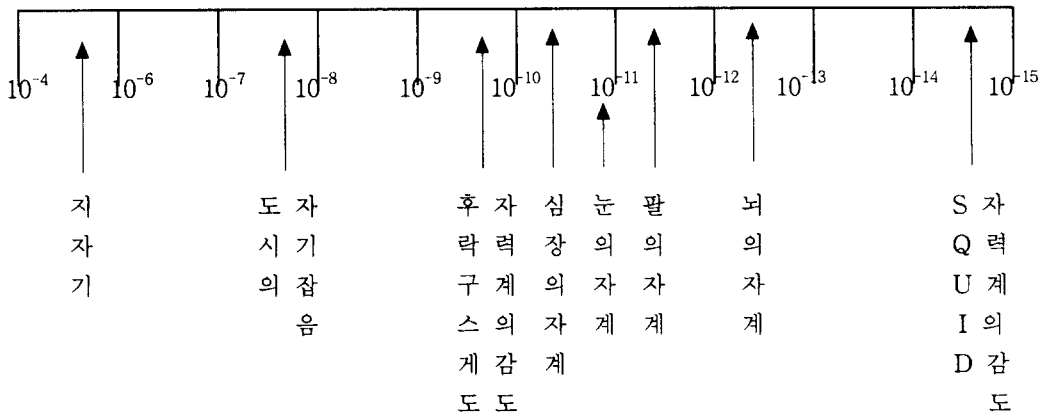
초전도체는 저항이 제로로써 내부에 전장이 존재하지 않는 한편, 마이스너 효과 때문에 외부자장에 대해서 쉴드전류가 흐르는 것에 의해 그 외부에 자장을 침입시키지 않는다. 또 초전도로 둘러진 루프에는 그것을 통하는 자속을 반드시 보호하는 성질이 있다.

따라서 초전도체 내부에는 전자장은 침입할수 없으며 초전도체로 둘러진 공간에서는 직류 혹은 비교적 저주파의 자장에서 마이크로파 영역까지 외부의 전자장이 침입하지 않는다.

이것으로 원리적으로는 초전도체는 완전한 자기쉴드를 얻는 수단으로 보아지며 이 전부터 금속초전도체를 이용하여 각종 연구가 이루어져 왔다.

그림 1에서와 같이 특히 고온 초전도체 자기 쉴드는 종래의 강자성체 쉴드로선 곤란했던 저주파 영역(0.1~10Hz)의 약 자기장 노이즈를 10 만분의 1 이하로 감쇠시킬 수 있는 것으로 생체자기계측에의 응용이 기대된다.

자계의 세기 단위(T)



<그림1. 자계의 세기와 자력계의 감도비교>

2. 생체자기 원리

인간의 뇌, 심장, 폐 등으로부터 극히 미약한 자계가 발생한다. 생체에서 발생하는 자계에는 2 종류가 있다. 하나는 신경이나 근육 등의 흥분으로 일어나는 활동 전류에 의해 발생하는 자계로서 뇌, 심장, 사지 등이 있고 또 하나는 공기나 식물에 침입하여 체내에 들어온 자성물질 지자기나 외부자계에 의해 자화되어 그것이 잔류자기로서 체외에서 검출되는 자계로서 폐, 간장 위장들이다.

심장이나 뇌 안에서 발생하는 전류는 몸이나 머리부분의 각 조직을 그 도전율에 따라 밀도를 바꾸어가면서 체표면이나 두피상의 2점간의 전위차를 발생시킨다. 이것을 측정하는 것이 심전도(Electrocardiogram: ECG) 및 뇌파(Electroencephalogram: EEG)이다.

심장 및 뇌안에서 발생한 전류는 전도율이 달라 표면으로 정해질 때까지 변화하기 때문에 심전도 및 뇌파는 실제의 전기 생리학적 현상이 일그러진 형태로 얻게 된다.

전류는 또 그 주변에 비오사발의 법칙으로 기술된 자계를 가진다. 생체 내에서 발생한 전류를 수리적으로 전류 다이폴(전류쌍극자)라고 불리는 무한소전류 요소라 표현하며 주위에서 발생한 자계를 체표면 및 두피상에 계측한 것을 각각 심자도(magnetocardiogram: MCG) 뇌자도(magnetoencephalogram: MEG)라고 한다. 인체 조직의 투자율은 공기의 경우와 거의 같기 때문에 전류원과 자기 센서 사이의 공간은 자기적으로 균질하다.

이것으로 보아 심자도와 뇌자도는 심장 및 뇌안의 전기 생리학적 현상을 자계를 매체로 일그러지지 않은 형으로 포착되었다고 할 수 있다.

특히 사람의 뇌가 발생하는 극미약 자장을 SQUID(초전도양자간섭소자) 자속계를 이용하여 검출, 뇌기능의 해명 및 뇌치환부의 진단을 행하는 생체의료연구로는, 지자기의 변동 및 도시잡음조차 쉴드해야할 대상이 된다.

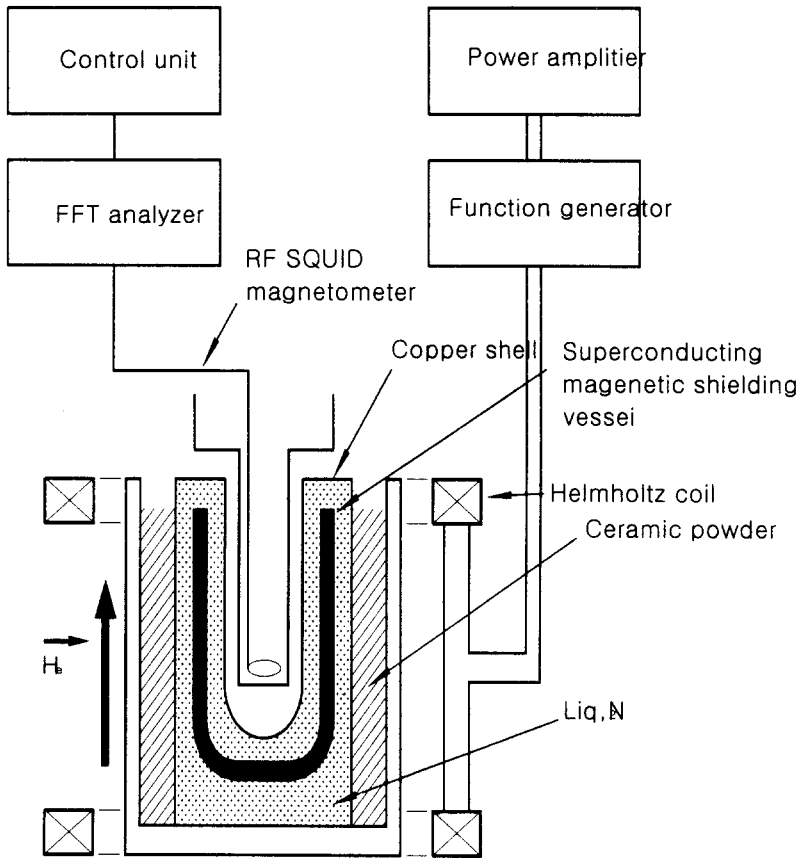
최근의 SQUID 자속계의 고성능화, 다채널화에 대응하여 생체자기계측도 본격화되고 있다. 이 경우 자기쉴드 기술이 필요하나, 초전도 자기쉴드를 이용하면 이상적인 자기쉴드가 가능하다고 생각된다. 뇌가 생리상태에서 발생하는 자기, 또는 청각자극, 시각자극이나 체성감각자극에 관한 자기 반응의 강도는 $10 \sim 500 \text{fT}$ ($1 \text{fT} = 10^{-15} \text{T}$)로 지자기의 100억분의 1인 극미약한 것이다. 이것에 관해 지자기는 약 $3 \times 10^{-5} \text{T}$ 이므로 시그널이 완전히 노이즈 안에 가득 차게 된다. 생체자기와 같은 저주파의 극미약자기를 취급할 경우 저주파영역의 자기노이즈레벨을 가능하면 저감할 필요가 있다. 그러나, 종래의 강자성체 쉴드에서는 예를 들어 10Hz이하의 저주파 영역에서는 자기쉴드 효과가 현저하게 떨어지고 만다. 여기서는 헬멧형 구조의 초전도자기 쉴드 용기와 그것을 냉각시키기 위한 크라이오스타트(cryostat)를 제작하여 SQUID 자속계를 이용 쉴드 효과를 측정하였다.

3. 실험방법

초전도자기 쉴드 용기 및 측정장치

만들어 놓은 초전도자기 쉴드 용기는 Bi-Pb-Sr-Ca-Cu-O계의 고온 초전도체로 직경 15cm, 깊이 32cm, 두께 1cm의 일단 폐구형 소형용기 및 직경 32cm, 깊이 60cm, 두께 2.5cm,의 일단 폐구형 용기의 바닥에 직경 19cm의 구멍을 만든 양단 개구형 대형용기의 2종류이다.

초전도체의 T_c 는 104K, J_c 는 약 $200A/cm^2$ 이었다. 그림 2에 일단 폐구형 용기의 자기 쉴드 효과의 측정계의 개략도를 나타낸다. 초전도용기의 냉각은 용기의 열충격을 줄이기 위하여 초전도 용기를 동제용기 안에 알루미늄계 세라믹 알갱이와 같이 넣어 동제용기를 액체 질소로 냉각하는 방법을 채용하였다. 직경 1m의 헤름홀츠 코일을 사용해 냉각계의 외측보다 내부자장을 투입하여 개구 끝부분에서의 깊이를 서서히 바꾸어 용기내부의 자계를 측정하였다.



<그림2. 폐구형 자기 쉴드효과 측정계>

뇌자계 측정을 위해 만든 헬멧형의 초전도 자기 쉴드 용기와 그것을 냉각하기 위한 크라이오스타트의 경우 상단부에서 SQUID 자속계를 투입하여 하부에서는 사람의 머리부분을 넣는 구조로 하였다. 크라이오스타트는 액체질소 냉각형으로, 이 경우도 초전도용기를 간접 냉각하는 방법을 채용하였다. 냉각 개시후, 약 12시간에 Tc이하까지 냉각되어 용기의 온도분포는 79~90K로, 온도의 변동은 2K 이내로 극히 안전적으로 하였다.

뇌자계 측정을 위한 시스템 구성은 크게 나누어 rfSQUID 자속계, 계측제어용 전자회로, 신호처리 장치, 자극제어 장치, 초전도자기 쉴드 장치로 구성되어 있다.

4. 실험결과 및 고찰

일반적으로 쉴드 계수 S(Shielding Factor)는 외부자기 He에 대해 쉴드체를 막았을 경우 내부자기 Hi와의 비로 나타내면

$$S = H_e/H_i \tag{1}$$

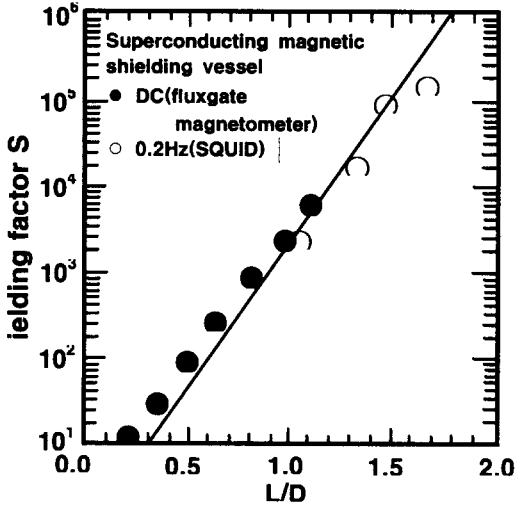
cabrera에 의하면 이상적인 초전도 원통용기가 균일 자기중에서 놓여 있을 경우, 초전도용기의 개구단부에서의 자속의 침입은 이론적으로 다음과 같다.

$$H_{\parallel}(L/D) = H_0 \exp(-7.6L/D) \tag{2}$$

$$H_{\perp}(H/D) = H_0 \exp(-3.6L/D) \tag{3}$$

여기서 H_{\parallel} 및 H_{\perp} 는 각각 자계의 용기축에 평행 및 수직의 경우 용기의 내부자기, H_0 은 외부자기이며 D는 용기의 안지름 L은 용기의 깊이이다. 기구 끝에 있어서 자계의 강도 H_0 은 L/D와 함께 지수관수적으로 감소한다.

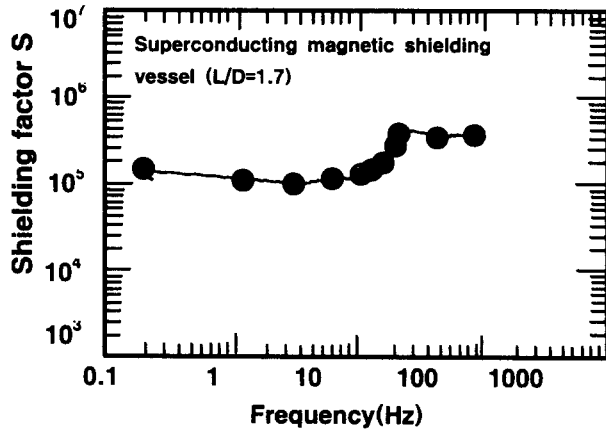
그림 3는 직경 15cm, 깊이 32cm의 일단개구, 일단폐구의 Bi계 발크 소결체 자기쉴드용기의 원통축에 평행방향의 쉴드 효과를 L/D의 관수로 표현한 것이다.



<그림3. 쉴드 효과 L/D 관수 표현>

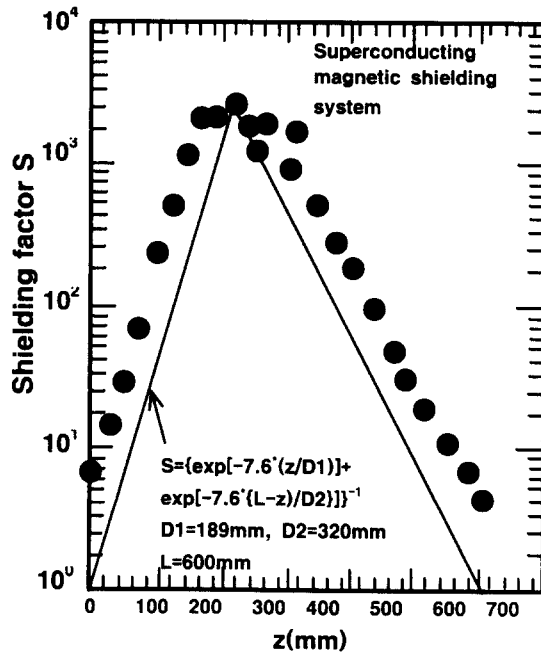
지자기 정도의 강도 ($3 \times 10^{-5}T$)의 균일한 외부자계(주파수: 0.2Hz)를 용기의 원통 축 방향으로 더하였다. 쉴드 계수는 이론적으로 예상했던 값에 잘 일치하여 일단 개구용기로서도 적당한 L/D를 설정하면 커다란 자기쉴드 효과가 기대된다.

그림 4는 L/D=1.7의 위치에서 쉴드 효과의 주파수 의존성이다. 이 그림에서와 같이 0.2Hz라는 저주파에 있어서도 10만분의 1(-100dB)의 감쇠율을 가지고 있다.



<그림4. 쉴드 효과의 주파수 의존성>

그림 5는 뇌자계 계측을 위해 제작한 초전도자기 쉴드 장치의 상단개구부(용기의 구멍은 직경 19cm)에서의 거리 z와 용기의 축방향에 있어 자기 쉴드효과의 관계를 나타낸다.



<그림5. 거리와 용기 축 방향의 자기 쉴드 효과>

이 경우도 위와 같은 방법으로 외부자계를 더한다. 이 자기 쉴드 용기는 L/D가 대부분 1로서 그림 6에 나타낸 것처럼 쉴드 계수 S는 $10^3 \sim 10^4$ 의 범위이다.

초전도자기 쉴드용기를 생각할 때에는 헤름홀츠코일을 이용하여 원통용기의 축방향의 지자기 성분을 보상한 환경아래 생각을 하였다. 이 측정에서는 약 10^{-7} T 레벨의 지자기가 잔류된 상태에서 초전도용기를 생각하였다.

5. 결론

인체의 두부를 덮을 수 있는 헬멧구조의 고온 초전도체의 자기쉴드 장치를 시험 제작하여 SQUID 자속계를 이용하여 그 자기쉴드 장치 내부의 자기노이즈를 측정하였다. 초전도체자기 쉴드에 있어서는 저주파영역에 있어서도 자기쉴드 효과는 떨어지지 않고, 예를 들어 용기의 깊이/직경의 비가 1.7에서는 0.2Hz의 주파수로 10만분의 1의 감쇠율을 얻었다. 또 초전도자기 쉴드 용기를 생각할 때 트럼프한 지자기가 용기 내부에 있어 노이즈의 원인이 된다. SQUID 자속계의 그라디오메타를 이용함에 따라, 이 노이즈를 줄일 수 있었다.

앞으로의 문제점으로는, 트럼프 자계를 어떻게 감소시킬까, 결국, 자기쉴드 용기안의 잔류자계를 어떻게 감소시킬까하는 것으로 이것이 실용화에의 키포인트라 생각된다.

참고문헌

- 1) K. Hoshino, H. Ohta, E. Sudoh, K. Katoh, S.Yamazaki, H.Takayama, H. Takahara and M. Aono:IEEE Trans. Magn, 27, 2202 (1990)
- 2) B. Cabrera: Ph. D. Thesis, Stanford Univ. (1965)
- 3) Alan M Portis: Electrodynamics of High Temperature Superconductors, World Scientific singapore (1992) 159-174
- 4) H.Matsuba, K.Shintomi, A. Yahara, D.Irisawa, K.Imai: International Symposium on Electromagnetic Compatibility (1994) 17P505