

CW-NMR 기법을 이용한 자기장 정밀측정

이정환

삼성종합기술원 의료기기연구팀

이대행 · 김민철 · 이순철

대전시 유성구 구성동 373-1 한국과학기술원 물리학과

홍계원 · 이호준

대전 유성구 사서함 105 한국원자력연구소 초전도연구실

(1995년 2월 4일 받음)

초전도 자석의 공간상 자기장 분포를 균일하게 할 때 사용하기 위한 정밀한 자기장측정 장치를 개발하였다. 개발한 장치는 연속파 핵자기공명(CW-NMR)을 이용하였고 2.8 T에서 5.8 T까지의 자기장 범위에서 공간상 자기장 분포를 0.3 ppm 이상의 분해능으로 측정할 수 있다. NMR 시료로는 직경 4 mm, 높이 4 mm의 체적에 물을 넣어 사용하였으며, 10 T 이상의 강자기장을 측정할 경우를 고려하여 중수를 시료로 이용한 실험도 하였다. 이 장치는 기존의 NMR 자기장측정 장비에 비해 훨씬 저렴한 가격으로 제작 가능하다.

I. 서 론

자석의 품질을 결정하는 가장 중요한 세가지 요인은 최대 자기장, 공간 균일성, 그리고 시간 안정성이라 할 수 있다. 현재 산업용이나 연구용으로 쓰이는 자석에는 영구 자석, 전자석, 초전도자석이 있는데, 최대자기장의 세기나 안정성 면에서는 초전도자석이 단연 뛰어나기 때문에 점점 더 많이 쓰이는 추세이다. 자기장의 공간 균일도는 핵자기공명(NMR) 등의 분야에서 매우 중요한 요소가 된다. 자석의 공간상 자기장 분포를 균일하게 하기 위해서는 자석의 유효공간 내의 자기장 분포를 정밀하게 측정하고, 이 값으로부터 자기장 보정 장치의 보정량을 산출해야한다. 자기장의 측정 정밀도는 고정도 초전도 자석의 경우 1.0 ppm 이상이 요구되고 있다.

자기장 측정에는 여러 원리와 방법들이 쓰이며 각각 측정범위와 정밀도가 다르다[1]. 저자장 측정에는 Josephson 효과를 이용하여 미세한 자기장의 변화를 가장 정밀하게 감지하는 SQUID[2]나 $10^{-6}G$ 의 정자기장을 감지할 수 있는 Flux-gate magnetometer[3] 등이 주로 이용되고, NQR 신호의 자기장에 대한 반응이나[4] 광학적 방법을 이용한 자기장센서[5]도 있다. 1 T 이상의 고자장측정에는 Faraday의 유도원리를 이용한 Search coil magnetometer를 이용할 수 있는데 이 magnetometer는 넓은 범위의 자기장을 측정할 수 있지만 원리상 교류자장의 측정에만 유용하다. Hall 효과를 이용한 Hall

sensor[6]와 Magnetotransistor[1]는 교류자장뿐 아니라 정자기장의 측정에도 사용이 가능하므로 가장 폭넓게 쓰이고 있지만 시간 경과에 따라, 또 온도 등의 주위 환경 변화에 따라 측정값이 불안정해지며 정밀도가 높지 않은 단점이 있다.

초전도 자석의 강한 자기장에서 잘 작동하며 자기장을 가장 정밀하게 측정할 수 있는 장치는 NMR을 이용한 측정장치이다. 일반적으로 실험실에서 측정가능한 물리량 중에서 가장 정밀하게 측정할 수 있는 것은 주파수인데 NMR은 자기장을 주파수로 변환하여 측정하게 해주기 때문이다. 이러한 측정장비는 이미 외국에서 실용화된 제품이 나와있으나 최대 측정가능 자기장이 일반적으로 1-2 T 정도이며 측정대역이 넓은 것은 매우 고가이다. 본 연구에서는 4 T 근처에서 잘 작동하는 NMR 정밀 자기장 측정장치를 개발하였다. 이 장치개발의 주목적은 125 cm^3 의 공간에서 10 ppm의 공간적 균일도를 지닌 초전도 자석의 개발에 사용하기 위한 것으로, 차후의 제품화의 가능성을 생각해서 제작비가 저렴하도록 설계하였다.

개발한 장치는 연속파 핵자기 공명(continuous wave : CW NMR)을 이용하였고 2.8 T에서 5.8 T까지의 자기장 범위에서 공간상 자기장 분포를 0.3 ppm 이상의 분해능으로 측정할 수 있었다. 측정 기준 신호로는 일반적으로 쓰이는 정밀파형발생기를 사용하였고 측정결과를 오실로스코프에서 관측하면서 자기장의 크기를 파형발생기의 주파수로 판독하도록 하였다. 공명관측을 위해서는

자기장변조 방법을 택했는데, 이때 변조자기장의 절대치를 calibration 하는 어려움을 피하기 위해 대칭인 삼각파 형태로 자기장을 변조하고 자기장을 위로 휩쓸 때와 아래로 휩쓸 때의 공명신호가 겹치는 주파수를 찾아 측정하고자 하는 자기장의 절대치를 구하는 방법을 썼다. 탐침(probe)은 직경 20 mm의 테프론을 이용하여 제작하였고 NMR 시료로는 직경 4 mm, 높이 4 mm의 체적에 물(H₂O)을 넣어 사용하였다. 물의 체적이 작을수록 NMR 신호는 작아지지만 해상도를 높일 수 있다. 차후 10 T 이상의 강자기장에서 작동하는 NMR 자기장 측정장치를 개발할 경우, 물을 사용하면 공명주파수가 420 MHz 이상으로 너무 높아서 회로설계에 어려움이 있으므로 중수(D₂O)를 사용하는 것이 바람직할 것으로 판단되어 이번 연구에서는 중수시료를 이용한 탐침도 추가로 제작하였으며 4.0 T에서 얻은 NMR 실험결과를 물로 얻은 결과와 함께 제시하였다.

II. 측정원리

핵스핀이 영이 아닌 물질이 정자기장 안에 있으면 알짜 핵자기 모멘트가 자기장과 같은 방향으로 형성된다. 이 핵자기 모멘트가 정자기장 방향에서 벗어나면 토크를 받아 자기장방향을 축으로 세차운동을 하며, 이 세차운동의 각속도 ω_0 는 정자기장의 크기 H_0 에 비례한다. 이 때 시료 주위에 정자기장과 그 축이 직각을 이루는 솔레노이드 코일이 감겨 있으면 코일 양단에서 핵자기 모멘트의 회전에 의해 자기유도된 전압이 관측된다. 핵자기 모멘트를 정자기장 방향에서 벗어나게 하기 위해서는 ω_0 의 각속도를 갖는 섭동자기장이 필요하다. 이 섭동자기장의 역할은 ω_0 로 회전하는 좌표계에서 볼 때 핵자기 모멘트를 정자기장과 직각인 축을 중심으로 섭동자기장의 크기에 비례하는 각속도 ω_1 으로 회전하게 하는 것이다. 그러나 알짜 핵자기 모멘트는 열적 평형상태인, 정자기장과 평행인 상태로 되돌아가려는 경향(스핀-격자 완화과정)이 있기 때문에 섭동자기장이 연속적으로 걸려있다고 해서 회전좌표계에서 볼 때 계속 각속도 ω_1 로 회전하는 것은 아니며 이 두가지 효과가 절충되는 곳에서 평형상태를 이루게 된다.

정자기장 $H_z = H_0$ 내에 있는 핵자기 모멘트의 섭동자기장 $H_x = 2H_1 \cos \omega t$ 에 대한 반응은 Bloch 방정식의 정상상태 해로 기술될 수 있다. 이 경우 알짜 핵자기 모멘트의 x방향성분 M_x 는 다음과 같이 주어진다[7].

$$M_x = (x' \cos \omega t + x'' \sin \omega t)(2H_1) \quad (1)$$

여기서 핵의 자화율의 실수부와 허수부인 x' 와 x'' 는 각각

$$x'(\omega) = \frac{x_0}{2} \frac{\omega_0(\omega_0 - \omega) T_2^2}{1 + T_2^2(\omega_0 - \omega)^2 + T_1 T_2 \omega_1^2} \quad (2)$$

$$x''(\omega) = \frac{x_0}{2} \frac{\omega_0 T_2}{1 + T_2^2(\omega_0 - \omega)^2 + T_1 T_2 \omega_1^2} \quad (3)$$

이다. 위 식들에서 x_0 는 열평형상태의 핵의 자화율이며, 대상시료 핵의 회전자기비를 γ 라고 할 때 공명주파수인 $\omega_0 = \gamma H_0$ 이며 $\omega_1 = \gamma H_1$ 이다. T_1 와 T_2 는 각각 스핀-격자 완화시간과 스핀-스핀 완화시간을 나타낸다. 이러한 자기모멘트에 의해 시료가 없을 때에 L_0 였던 시료코일의 인덕턴스는

$$\Delta L = 4\pi(x' - ix'')qL_0 \quad (4)$$

만큼 변하게 된다. q 는 filling factor로서 시료의 부피대 코일이 감싸는 부피의 비를 나타낸다. 섭동자기장은 시료 주위에 감긴 솔레노이드 코일에 일정한 rf 전류를 흘려 만드는데 이와 같이 일정한 전류가 흐를 때 코일의 인덕턴스가 식(4)와 같이 변화하면 이에 따라 코일 양단의 전압은 공명근처에서

$$\Delta V = \left(\frac{dV}{dL}\right)_{res} \Delta L = 4\pi q Q(x' + ix'')V_0 \quad (5)$$

만큼 변화한다[7]. 여기서 Q 는 공명 코일의 quality factor이며, V_0 는 시료가 없을 때 코일 양단에 걸리는 rf 전압이다. x' 와 x'' 는 공명근처에서 크게 변하므로 주파수를 변화시키거나 정자기장에 변조자기장을 가하여 주파수의 함수로 ΔV 를 관측하여 NMR spectrum을 얻는다. 이때 power spectrum의 상사점의 주파수가 시료의 위치에서의 자기장 값에 대응한다.

회로를 간단히 하기 위하여 우리는 변조자기장을 가하는 방법을 택했다. 즉, 식 (2)와 (3)에서 ω_0 를 천천히 변화시켜 가면 그에 따라 자화율이 변하게 되고 결과적으로 (5)식에 따라 연속적으로 신호가 관측되는 것이다. 정자기장 H_0 에 미세한 자기장 변화 $h(t)$ 가 같은 방향으로 더해졌을 때 관측되는 신호가 (2), (3)식 또는 그들의 선형 결합으로 표현되게 하기 위해서는 $h(t)$ 가 다음 조건을 만족해야 한다.

$$|\dot{\gamma}h| \ll \frac{1}{T_2} < (\gamma\Delta h)^2 \quad (6)$$

여기서 Δh 는 변조자기장 $h(t)$ 의 최대 변화폭을 나타낸다. 이 식의 좌측 부등식은 자화율이 Bloch방정식의 정상상태 해를 따르도록 자기장이 천천히 변해야 한다는 slow passage 조건이다. 스핀-스핀 완화시간의 역수 $1/T_2$ 는 NMR spectrum의 반선평에 해당하므로 우측 부등식은 정자기장 변조폭이 NMR spectrum 선평보다는 크게 정해져야 된다는 조건을 나타낸다. 자기장 변조가 (6)식을 만족하면 (2)와 (3)식의 자화도 변조자기장과 같은 주기를 가지면서 변하게 되고 (5)식의 신호의 크기 역시 같은 주기로 변화한다.

이 공명신호를 간단히 오실로스코프로 관측하기 위해서는 변조자기장이 주기적으로 변하고 매 주기마다 오실로스코프에 동기신호를 보내 정지된 신호를 관측해야 한다. calibration을 쉽게하기 위해서는 변조자기장이 그림 1(a)에서와 같이 선형적으로 변화하는 톱니형태를 우선 생각할 수 있다. 이 경우 단일 공명주파수 ω_0 가 $\gamma(H_0 \pm \Delta h/2)$ 의 범위에 들면 변조자기장이 변하는 한 주기 안에서 공명신호를 관측할 수 있다. CW-NMR에 의한 자기장 측정에서는 신호의 형태보다는 신호의 공명주파수 측정이 중요하다. 자기장 변조방법에서는 공명신호가 나타나는 시간 t 를 측정하면 그 때의 변조자기장 $h(t)$ 를 알고 따라서 정자기장의 크기를 $H_0 = \omega_0 / \gamma - h(t)$ 로 계산해 낼 수 있다. 이러한 방식에서 측정이 정확하려면 우선 변조자기장의 크기가 정밀하게 calibration 되어야 한다. 정자기장의 크기를 1 ppm 이하의 정밀도로 측정하려면 변조자기장의 크기도 이보다 낮지 않은 정밀도로 측정이 되어야 하는데 이는 쉬운 일이 아니다. 이러한 어려움을 피하기 위한 한 방법으로 우리는 변조자기장을 그림 1(b)과 같이 대칭적인 삼각파형으로 변화시키고 각 삼각파의 꼭지점에서 동기신호를 주었다. 이 경우 오실로스코프의 화면에는 공명점 아래에서 위로 휩쓸때 나타나는 공명신호와 위에서 아래로 휩쓸때 나타나는 신호가 겹쳐 두개로 나타난다. 변조파가 삼각파이므로 두 신호 사이의 거리는 섭동자기장의 주파수와 공명주파수의 차이에 비례하여 나타난다. 섭동자기장의 주파수가 공명주파수에 접근하면 두 신호도 접근하고 멀어지면 신호 사이의 거리도 멀어진다. 따라서 정확히 섭동자기장의 주파수와 공명주파수가 일치하면 신호도 하나로 겹쳐진다. 이 방법에서는 변조파의 파형이 정확히 삼각파형이 아니라도 하더라도 공명주파수의 측정에 주는 오차는 매우 적다.

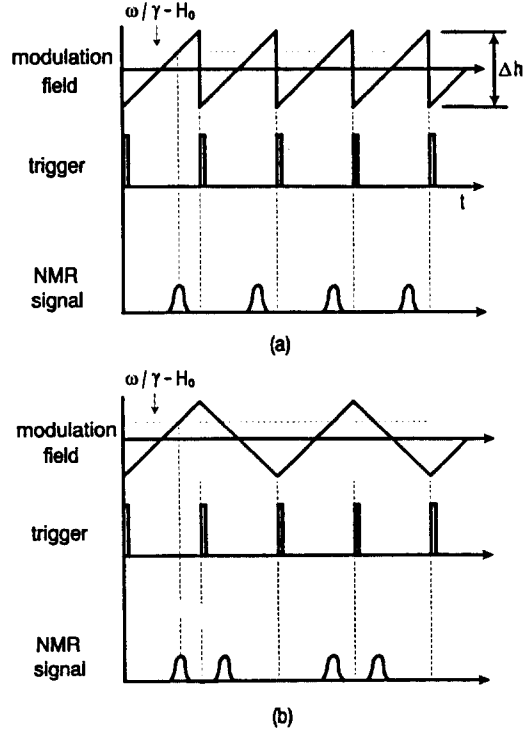


Fig. 1 (a) Timing diagram of sawtooth wave modulation field and NMR signal. (b) Same diagram of symmetric triangular wave modulation.

NMR 신호를 이용한 자기장 측정의 정밀도의 원리적인 한계는 spectrum의 선평이다. 스펙트럼의 선평이 작아야 두 신호를 더 예리하게 구분할 수 있기 때문이다. 스펙트럼의 선평은 식 (2)와 (3)에서 보듯이 $1/T_2$ 정도의 크기를 가지므로 T_2 가 긴 시료를 사용하면 정밀도를 증가시킬 수 있다. 그러나 T_2 가 너무 길면 신호의 크기가 감소하며, 신호대 잡음비가 나빠지면 그 또한 정밀도를 하향시키는 원인이 된다. 식 (2)와 (3)에서 섭동자기장의 주파수가 공명주파수와 같을 때 ($\omega = \omega_0$) 자화율의 실수부는 영이고 흡수스펙트럼을 주는 허수부는

$$x''(\omega) = \frac{x_0}{2} \frac{\omega_0 T_2}{1 + T_1 T_2 \omega_1^2} \quad (7)$$

이 된다. 스핀-격자 완화시간 T_1 는 항상 스핀-스핀 완화시간 T_2 보다 크기 때문에 T_2 가 영에서 증가함에 따라 자

화율은 증가하다가 일정한 T_2 값을 지나서부터는 단조감소하며 이에 따라 공명신호는 미약해진다. 이를 보상하기 위해 섭동자기장의 크기를 줄이면 이에 비례해 ω_1 이 줄어 (7)식의 자화율은 증가하지만 식 (5)에서 보듯이 코일 양단의 전압변화가 줄어들어 효과를 보기 어렵다. 뿐만 아니라, (6)식의 좌측부등식 조건을 만족하기 위해선 변조파의 주기가 T_2 값보다 훨씬 커야하는데 관측주기가 너무 길어지면 측정이 매우 불편하다. 따라서 T_2 값은 신호의 선폭과 크기 그리고 측정의 편의 이 세가지를 고려하여 가장 적절한 값으로 결정되어야 한다.

III. 측정 장치의 구성

초전도자석 내의 자기장분포를 측정할 때 신호처리 회로는 오실로스코프 등과 함께 측정 테이블 위에 놓이고 실제 NMR 코일은 자석 안에 들어가게 되므로 신호처리 회로와 코일간의 거리는 4-5 m 정도는 되어야 측정이 편리하다. 그러나 공진회로나 고주파처리 회로는 되도록 코일에 가까워야 유리하므로 측정장치는 제어부와 탐침회로의 두 부분으로 나누고 코일을 포함한 탐침회로와 제어부를 약 5 m의 동축선으로 연결하였다. Fig. 2에 측정 장치의 개략도를 제시하였다. 제어부는 변조자기장을 만들기 위한 삼각파 발생 변조회로, 동기신호 발생회로, 탐침의 L-C 공진회로의 공진상태 조정을 위한 원격제어회로, 그리고 저주파 증폭을 위한 수신회로로 되어있다. 변조자기장을 구현하기 위한 삼각파는 V-I 변환을 거쳐 정전류원이 되게 하였기 때문에 변조 코일을 다르게 고안하면 휨쓸게 되는 자기장(주파수) 범위를 바꿀 수 있다. 신호

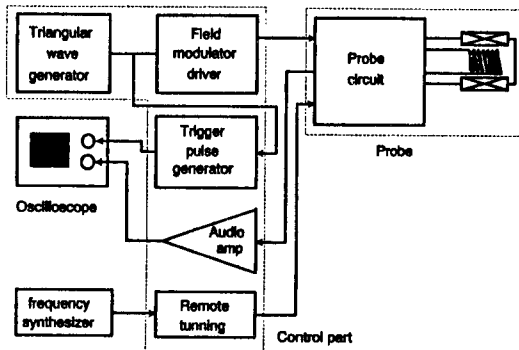


Fig. 2 Block diagram of the designed field probe.

는 오실로스코프에서 관측하도록 되어있고, 섭동자기장의 주파수 안정도가 장치의 측정 정밀도를 결정하므로 대

단히 안정된 파형이 필요하여 rf 신호는 외부에 연결된 안정된 파형발생기에서 공급받도록 하였다. 동기신호는 삼각파의 정점에서 발생하며 저주파 증폭회로는 직류에서 2 배, 10 Hz에서 10 kHz 대역에서 2000배의 증폭률을 갖는다.

원격제어는 Fig. 3(a)의 원격제어회로에서 고주파신호에 중첩되는 직류전압(DC offset)을 변화시켜 이루어진다. 이 신호는 Fig. 3(b)의 탐침회로의 D_1 에 걸리는 직류 전압을 변화시켜 L과 C_3, C_4, D_1 로 구성된 공진회로의 공진 주파수를 바꾸어 준다. 이 회로의 인덕터 L이 시료를 감싸는 NMR 코일로 사용되고 있다. 코일(L) 양단의 rf 신호는 그 뒤의 검파회로를 거쳐게 되는데 이 검파회로는 단순한 AM 검파기로 다이오드에 의한 반파 정류 후 저주파 통과 여파기를 거쳐 최종적으로 그 포락선만 검파되어 나온다. 그러므로 탐침회로의 최종신호는 공명 부근에서의 코일의 인덕턴스의 변화에 의해 야기된 코일 양단의 전압변화이다. 사용한 장비는 신호검출을 AM 검파법으로 수행했으므로 탐침을 제외한 모든 구성소자들이 주파수 독립적이어서 광범위한 자기장 범위를 단지 탐침의 교환만으로 측정할 수 있다. 탐침회로의 FET는 검파회로가 다음단의 증폭회로의 영향을 받지 않도록 하기 위한 완충회로이다.

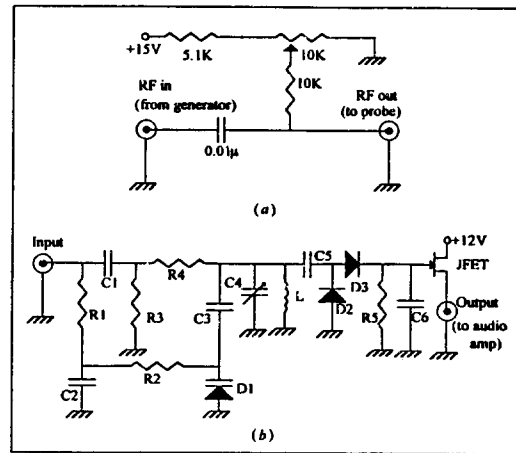


Fig. 3 (a) Remote tuning circuit. (b) Probe circuit.

탐침의 실제 구성은 Fig. 4와 같은데 직경 20 mm의 테프론원통을 이용하여 제작하였다. 변조코일은 각 50회씩 감았고 NMR 코일이 그 중앙에 위치하도록 했다. NMR 코일은 170 MHz 근처에 공진시킬 수 있도록 직경

1 mm인 동선을 직경 5 mm NMR 튜브에 2회 감았다. 변조코일과 NMR코일을 제외한 회로는 시료 위치에서의 자기장에 영향을 주지 않도록 NMR코일과 20 mm 이상 떨어져 있도록 했다.

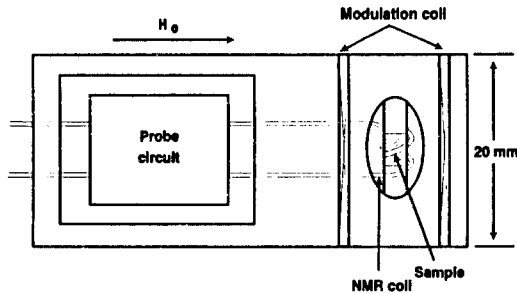


Fig. 4 The schematic diagram of the probe.

IV. 실험

실험조건 중에서 제일 먼저 결정되어야 할 것은 탐침에 사용할 시료의 T_2 인데 이는 우선 변조자기장의 주기에 의해 그 범위가 제한된다. 신호는 삼각파의 반주기로 오실로스코프에 투영되고, 우리가 이 시간 간격을 연속적인 것처럼 인식하기 위해선 변조자기장의 주파수는 최소한 24 Hz 정도(눈의 잔상 효과)는 되어야 한다. 식(6)의 좌측 부등식에서 변조자기장의 주기를 T 라고 하면 \dot{h} 는 $2\Delta h / T$ 이므로 $T_2^2 \ll T / 2\gamma\Delta h$ 가 된다. 이때 주파수 창 크기 $\gamma\Delta h / 2\pi$ 를 반선폭 $1/2\pi T_2$ 의 세배로 두면 $T_2 \ll 7$ ms가 된다. T_2 값이 5 ms 보다 훨씬 작으면 이 조건을 매우 잘 만족하나 선폭이 너무 넓어져 분해능이 떨어지고 동시에 신호 크기도 작아지므로 신호대 잡음비가 나쁘다. 그래서 약간의 신호 왜곡이 있더라도 공명주파수의 측정에는 지장이 없으므로 T_2 가 5 ms 정도인 시료가 바람직하다. 일반적인 수돗물의 T_2 는 상온에서 수 초 정도이므로 상자성염인 황산구리($\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$)를 용해시켜 T_2 를 5 ms 정도가 되도록 하여 사용하였다. 자기장 변조용 삼각파의 주파수는 20 Hz ~ 1 kHz의 범위이며 그 변조폭은 최대 ± 0.5 A로써 헬름홀츠 코일로 100 Hz ~ 30 kHz의 주파수 범위가 되도록 하였다.

우리는 이 장비를 이용하여 초전도 자석의 공간상 자기장 분포와 시간 안정성을 측정하였다. 사용한 탐침은 4.0 T에서의 물의 공명 주파수인 170 MHz로 공진 시켰다. 이 경우 T_2 가 5 ms이면 주파수 선폭이 60 Hz 정도이므로 해상도는 0.2 ppm 정도가 예상된다. NMR 코일의 Q

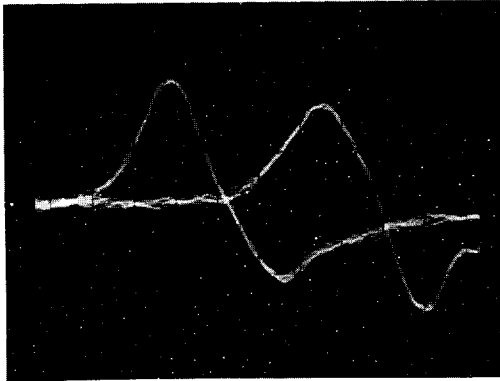
는 30 이상이었으며 관측된 신호의 신호대 잡음비는 10 이상으로 충분히 컸다. 자석의 내부 공간 온도가 내려가 시료가 얼면 T_2 값이 현저히 감소하여 신호가 제대로 관측되지 않아 자석 내부로 압축질소를 가열하여 불어 넣으면서 측정하였다. 탐침은 초전도자석 내에서 상하로 움직일 수 있으며 탐침고정막대를 축으로 회전하여 직경 5 cm의 공간에서 이동할 수 있다. 탐침 고정기구는 청동과 플라스틱으로 제작하여 자기장에 영향을 주지 않도록 했다. 자기장이 너무 불균일하면 스펙트럼의 선폭이 너무 넓어 공명이 제대로 관측되지 않으므로 우선 Hall probe를 이용하여 자석의 유효공간의 자기장을 최대한 균일하게 보정한 후 우리가 만든 NMR 자장측정장치를 사용하였다. 처음에는 정확한 자기장을 모르므로 변조자기장의 진폭을 최대로 하고 천천히 휨쓰게 한 후, 공명선이 관측되면 변조폭을 줄여 신호의 선폭을 확대하였다.

V. 결과 및 토론

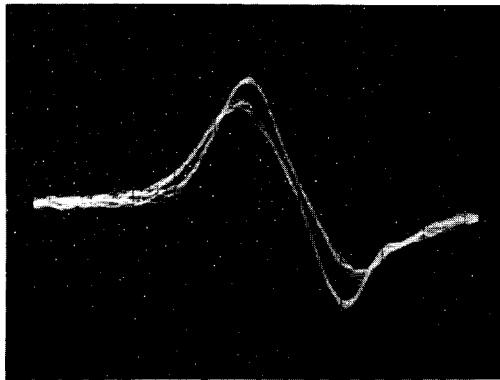
4.0 T에서 관측되는 물의 NMR 신호의 예가 Fig. 5에 나타나 있다. Fig. 5(a)는 170.2524 MHz에서의 신호로 공명조건과 약간 차이가 있는 경우이다. Fig. 5(b)는 170.2547 MHz에서의 신호로 두신호가 거의 일치하고 있어 공명에 매우 가까움을 보여주고 있다. 이때 측정된 자기장의 세기는 3.9994 T가 된다. 이와 같이 두신호가 오실로스코프 화면상에서 일치하도록 하는 방법으로 목표했던 1.0 ppm 정밀도를 넘어서는 0.3 ppm의 정밀도를 얻었다. 개발한 장치로 초전도 자석의 자기장을 정밀하게 보정한 결과 125 cm³에서 5 ppm의 자기장 균일도를 얻었다. 본 측정 전에 Hall probe를 이용한 자기장 측정 및 보정에서는 Hall probe의 정밀도 한계 때문에 1000 ppm 이상의 자기장 균일도를 얻는 것은 불가능하였다.

만일 측정할 자기장이 10 T라면 물의 핵자기 공명 주파수는 400 MHz를 넘기 때문에 탐침제작이 매우 어렵다. 따라서 이 경우 양성자보다 회전자기비가 작은 핵자를 사용하는 것이 유리하다. 중수의 회전자기비는 물의 약 1/6이기 때문에 10 T에서 약 70 MHz가 되므로 탐침설계 제작이 용이해진다. 그러나 동일한 자기장에서 중수의 핵자기 공명 신호의 크기는 물의 9.6%에 불과하므로 측정이 더 어렵다. Fig. 5를 얻은 물의 NMR 실험과 공명주파수 외에는 모든 실험조건이 같게 해서 중수로 얻은 NMR 신호가 Fig. 6에 나타나 있다. 이때 주파수는 26.162 MHz인데 신호대 잡음비는 약 1.5 정도로 4.0 T에서는 사용이 용이하지 않음을 알 수 있다. 그러나 10 T

의 자기장에서는 시료의 체적을 4배 정도 늘리면 신호대 잡음비를 10배 정도까지 향상시킬 수 있어 실용이 가능할 것으로 판단된다.



(a)



(b)

Fig. 5 (a) NMR signal of water in (a)resonance and (b) off-resonance.

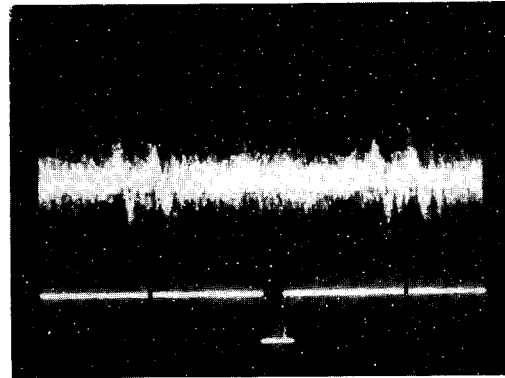


Fig. 6 NMR signal of deuteron at 26. 132MHz(off-resonance).

I. 참고문헌

- [1] J. E. Lenz, Proc. IEEE **78**(6), 973 (1990).
- [2] J. Clarke, Proc. IEEE **70**, 1208 (1889).
- [3] P. Ripka, Sensors and Actuators **A33**, 129 (1992).
- [4] J. K. Jung, K. T. Han, S. H. Choh, and C. S. Kim, Rev. Sci. Instrum. **65**(5), 1663 (1994).
- [5] J. E. Lenz, G. Mitchell, and C. D. Anderson, "Fiber-Optic Magnetometer Design", in SPIE Technical Symposium Proceedings, Arlington, VA, 1984.
- [6] E. D. Sisson, Anal. Chem. **43**, 67A (1971).
- [7] N. Blombergen, Nuclear Magnetic Resonance (W. A. Benjamin, 1961).
- [8] A. Abragam, The Principles of Nuclear Magnetism (Oxford, 1961).

Precise Measurement of Magnetic Field Using CW-NMR Technique

Junghan Yi

Medical Instrument Department, SAIS

Daehang Lee, Mincheol Kim, Soonchil Lee

Dept. of Physics, KAIST, 373-1 Gusongdong, Yusongku, Daejeon

Gyewon Hong, Hojoon Lee

Dept. of Superconductor, KAERI, P. O. Box 105, Yusongku, Daejeon

(Received 4 February 1995)

A precise magnetic field probe was designed to measure the field distribution inside a superconducting magnet. The operation principle of the developed equipment is based on cw-NMR. The range of field is from 2.8 T to 5.8 T, and the resolution is better than 0.3 ppm. NMR samples were water and heavy water contained in a tube of 4 mm diameter and 4mm height. This equipment can be manufactured very inexpensively compared with the currently available commercial ones.