

## Rabi 법 핵자기 공명에 의한 0.1 mT의 저자장 측정

유권상·김철기·우병철·김창석

한국표준과학연구원, 대전, 대덕연구단지, P.O. Box 3, 305-606

(1993년 5월 14일 받음, 1993년 6월 7일 최종수정본 받음)

고자장에서 분극된 흐르는 물을 이용한 Rabi 법 핵자기 공명신호 측정시스템을 구성하여, 이 시스템으로 0.1 mT의 저자장에서도 신호대 잡음비가 우수한 핵자기 공명신호를 얻을 수 있었다. RF 자장이 증가함에 따라 공명전이의 주기적인 변화에 의해 신호의 크기와 위상이 바뀌었으며, 최적화된 RF 조건에서 얻어진 공명신호로써 0.1 mT 자장영역까지 수십 ppm의 불확도내에서 자장을 측정할 수 있었다.

### I. 서 론

핵자기 공명은 기본물리상수인 자기회전비율을 사용하여 자장을 직접 측정할 수 있는 방법일 뿐만 아니라 공명 주파수가 자장변화에 민감하게 이동하기 때문에 자장의 균일도 및 정밀측정에 널리 이용되고 있다[1, 2]. 핵자기 공명으로써 mT이하의 저자장을 측정하는 경우 자기유도법에서는 수 ppm/cm 정도의 균일한 자장공간이 형성되어야 하고, 자유세차법에서는 연속적인 측정이 가능하지 않은 단점이 있다[3, 4]. 그러나 분극된 흐르는 물을 사용한 핵자기 공명법은 수백 ppm/cm의 자장기울기를 갖는 공간에서도 연속적인 측정이 가능하고 자기유도법과 자유세차법에 비해 상대적으로 큰 공명신호를 얻을 수 있는 장점이 있다[5-7].

흐르는 유체 또는 ion에서의 자기공명은 원자 및 원자핵의 자기모우먼트를 측정하기 위한 실험에서 주로 이용되어 왔는데[8], 이와 유사한 방법으로 고자장에서 분극된 흐르는 물에서의 핵자기공명을 이용하여 양성자 자기모우먼트, 양성자 자기회전비율 및 자장측정을 위한 연구가 일부 수행되었다[6, 7, 9, 10]. 흐르는 물속에서의 양성자 핵자기공명 측정법에는 한개의 RF 코일을 사용하는 Rabi 법[5, 11, 14]과 두개의 코일을 사용하는 Ramsey 법[6, 7, 12]이 있는데, Rabi 법은 좁은 공간내 각 지점에서의 자장에 대한 공명신호를 측정할 수 있고,

Ramsey 법은 두 코일사이의 넓은 공간에서의 평균자장에 대한 공명신호를 측정할 수 있기 때문에 원하는 목적에 따라 두 방법중 하나를 선택할 필요가 있다.

본 연구에서는 Rabi 법 핵자기 공명 시스템을 구성하여 신호의 크기와 위상 변화에 대해 RF 자장세기를 최적화하여 0.12 mT의 저자장영역까지 좋은 신호대 잡음비를 가지는 공명신호를 얻었다.

### II. 실험

분극된 흐르는 물에 의한 Rabi 법 핵자기 공명측정장치는 발표된 것처럼[11], DC 펌프에 의해 분사된 물이 0.26 T의 polarizer 자장을 지나 내경이 4 mm인 관을 통하여 측정자장에 놓여있는 직경 30 mm의 구 속으로 흘러들어가게 하였다. 이때, 물의 flow-rate는 약 20 cc/s로, 물이 polarizer를 통과하는 시간은 양성자 자기모우먼트의 종적완화시간(약 3 s) 정도 되게하였다. 정밀한 자장을 발생시키기 위해 그림 1에 나타난 것처럼 대형 3축 헬륨홀츠 코일로써 지자장을 상쇄시키고, 이 중심에 놓여있는 솔레노이드로 자장을 발생시켰는데, 주전류와 3개의 보조전류를 흘려 자장의 균일도가 5 ppm/cm 되게 하였다[2, 13]. 길이 0.33 mm, 권선수 20의 RF 코일로써 솔레노이드자장의 Larmor 주파수에 해당하는 RF 자장을 파형 합성기(HP 3335A)로 인가하였다. 탐

탐지코일은 측정자장과 RF 자장에 수직이 되게 두고, 유도되는 신호는 lock-in 증폭기(EG & Par 5210)로 측정하였다. 1.0, 0.51, 0.12 mT의 자장을 측정하기 위한 탐지코일의 권선수는 각각 800, 1600, 3500으로 측정자장의 Larmor 주파수에 탐지코일을 tuning 하여 신호대 잡음비를 향상시켰다.

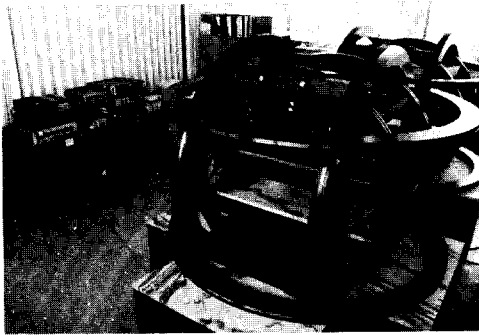


Fig. 1. View of three-axis Helmholtz coil and solenoid systems.

### III. NMR 신호

물이 polarizer를 통과할 때 물속의 양성자 자기모우먼트는 분극자장  $B_p$ 에 의해 Zeeman 효과가 일어난다. 이때, 각 준위의 핵스핀 갭수 차이에 의한 자화는 단위체적당 자기모우먼트로서, polarizer를 통과한 물의 자화  $M_p$ 는 다음과 같다[7].

$$M_p = N\mu_p^2 B_p / k\theta [1 - \exp(-\tau_p/T_p)] \quad (1)$$

여기서  $\mu_p$ 는 양성자의 자기모우먼트,  $N$ 은 단위체적당 양성자의 갭수,  $\theta$ 는 스핀계의 절대온도,  $\tau_p$ 는 물분자가 polarizer를 통과하는데 걸리는 시간,  $T_p$ 은 양성자의 종적완화시간이다. 그림 2(a)에 나타난 것과 같이 polarizing 자장 주위로 세차운동을 하면서 polarizer를 떠난 물의 자화는 정자장  $B_0$  속으로 들어온 후부터는  $B_0$ 의 Larmor 주파수로 자장 주위를 세차운동하게 된다. 자장의 방향을  $z$  방향이라 하면 자화는 그림 2(b)와 같이 배열하게 되는데, 이때 자화의 크기는 양성자 자기모우먼트의 종적완화시간 및 횡적완화시간이 길기때문에 강한 polarizing 자장에 의한 자화 크기와 거의 같게 된다. sine 형으로 진동하는 RF 자장을 정자장 방향과 수직인 방향으로 가하면 전이가 일어나는데, 공명이 일어날 때 전이확률  $P$ 는 RF 자장의 크기  $B_1$ , 물이 RF 자장 속에

서 머무는 시간  $\tau$ 의 함수로 알려져 있다[8].

$$P = \sin^2[(\gamma B_1) \tau/2] \quad (2)$$

여기서  $\gamma$ 는 물속에 있는 양성자의 자기회전비율이다. 흐르는 물에 cw형의 RF 자장을 가하는 것은 정지한 물에 대한 pulse 형태의 RF 자장을 인가하는 것으로 볼 수 있다. RF 영역에서 공명에 의한 전이를 그림 2(c)와 같이 자화가  $z$ -축으로 부터  $\theta_i$  만큼 기울어진 것으로 생각할 수 있다. 종적완화에 의한 감쇠와 횡적완화에 의한 dephasing을 무시하면, detection 영역에서의 자화상태가 RF 영역을 통과한 직후와 같은 상태가 되며,  $z$  축에 투영한 자화의 크기  $M_z$ 는  $z$ -축으로 부터 기울어진 각도  $\theta_i$  과 전이확률  $P$ 로 표현할 수 있다[10].

$$\begin{aligned} M_z &\approx M_p \cos \theta_i \\ &= M_p(1 - 2P) \end{aligned} \quad (3)$$

$x$ - $y$  평면상으로 투영한 자화크기  $M_i$ 는  $z$ -축과 자화사이의 각도  $\theta_i$ 으로 표시할 수 있으며, 이는 식 (3)에서  $\cos \theta_i$ 과  $P$ 와의 관계로부터 아래식과 같이  $P$ 의 함수로 나타낼 수 있다.

$$M_i \approx M_p \sin \theta_i \quad (4)$$

$$= \begin{cases} M_p \sqrt{1 - (1 - 2P)^2} & 0 \leq \theta_i < \pi \\ -M_p \sqrt{1 - (1 - 2P)^2} & \pi \leq \theta_i < 2\pi \end{cases}$$

공명상태에서 전이확률  $P$ 는 식 (2)에서 볼 수 있는 것과 같이  $B_1$ 이 증가할 때 0과 1 사이를 진동하게 되므로,  $M_z$ ,  $M_i$ 는  $M_p$ 와  $-M_p$  사이에서 변하게 되지만  $M_z$ 와  $M_i$ 는  $\pi/2$  만큼 위상차이가 생긴다. 즉  $M_z$ 는  $\theta_i$ 이 0,  $\pi$ 에 해당하는  $P = 0, 1$ 에서 최대, 최소값을 가지지만,  $M_i$ 는  $\theta_i$ 이  $\pi/2, 3\pi/2$ 에 해당하는  $P = 1/2$ 에서 최대 또는 최소값을 가진다.

탐지코일은 그림 2(c)에서와 같이 정자장에 수직으로 두어야 background RF noise를 줄일 수 있다.  $M_i$ 가 측정자장  $B_0$ 의 Larmor 주파수  $\omega_0$ 로 회전할 때 생성되는 지속  $\phi(t)$ 에 의해 탐지코일에 전압  $V(t)$ 가 유도된다[15].

$$\begin{aligned} \phi(t) &= bM_i \cos(\omega_0 t) \\ V(t) &= -d\phi/dt \\ &= bM_i \omega_0 \sin(\omega_0 t) \end{aligned} \quad (5)$$

여기서  $b$ 는 탐지코일의 기하학적 요소에 의해 결정되는 상수이다. 위 식에 (4)식을 대입하고 정리하면 신호의 크기를  $P$ 의 함수로 나타낼 수 있다.

$$V(t) = bM_p \sin \theta_1 \omega_o \sin(\omega_o t) \tag{6}$$

$$= \begin{cases} V_o B_p B_o \sqrt{1-(1-2P)^2} \sin(\omega_o t) dP/dB_1 \geq 0 \\ -V_o B_p B_o \sqrt{1-(1-2P)^2} \sin(\omega_o t) dP/dB_1 < 0 \end{cases}$$

여기서 상수  $V_o$ 는 물이 polarizer에서 탐지코일에 도달할 때 실제 측정에서 야기되는 dephasing과 실험조건에 의해 결정되는 인자이다. 식 (6)의 신호는 분산신호와 흡수신호가 혼합되어 있는데 lock-in 증폭기로 선별하여 관찰할 수 있으며, 신호의 크기가 polarizing 자장  $B_p$ 와 측정자장  $B_o$ 의 곱에 비례하기 때문에  $B_p$ 를 크게하면 작은 영역의  $B_o$ 에서도 상대적으로 큰 NMR 신호를 얻을 수 있음을 알 수 있다. 또한 식 (2)에서 RF 자장  $B$ 에 따라  $P$ 가 변하며, 이에 의해 신호의 크기 뿐만 아니라 부호, 즉 위상이 바뀌게 되기 때문에 저자장에서 NMR 신호 측정시에 RF 자장을 최적화시킬 필요가 있다.

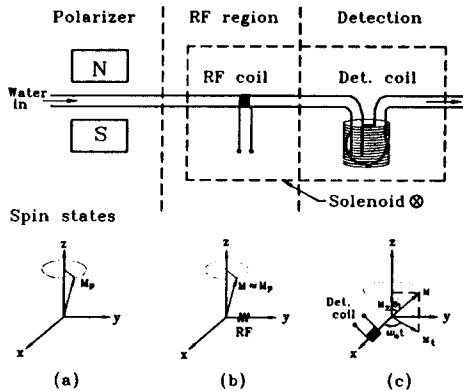


Fig. 2. Precession of magnetization in (a) polarizer (b) RF coil and (c) detection coil.

#### IV. 결과 및 논의

그림 3은 1 mT 정자장하에서 RF 자장의 세기  $B_1 = 0.23, 0.49, 0.88$  및  $1.40 \mu\text{T}$ 에서 측정한 흡수신호이다. RF 자장의 세기는 RF 코일속에 넣은 search 코일로써 측정하였다. 신호의 크기는 RF 자장의 크기에 따라 변할 뿐만아니라 위상도 바뀌게 되는데, RF의 최적조건은 0.5

$\mu\text{T}$ 였다. 식 (2)에서  $B_1$ 이 증가함에 따라  $P$ 의 값이 주기적으로 변하게 되고, 신호의 크기 및 위상 변화가 야기될 수 있음을 알 수 있다.

1 mT에서 측정된 신호의 크기는 약  $60 \mu\text{V}$ 로 정지한 물에서 핵자기유도법으로 측정된 신호보다 100배 이상 크다. 자기유도법의 경우 신호크기는 측정자장  $B_o$ 의 제곱에 비례하기 때문에[16], 자장의 크기가 감소하면 신호대 잡음비가 감소하여 신호를 측정할 수 없지만, 분극된 흐르는 물을 이용하는 경우 식 (6)에서 알 수 있듯이 polarizing 자장  $B_p$ 를 크게하면 신호의 신호대 잡음비를 향상시킬 수 있기 때문에 이 방법이 저자장을 측정하는데 유리함을 알 수 있다.

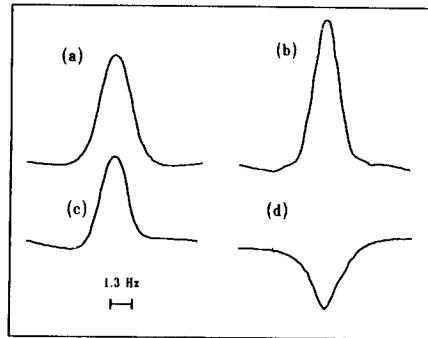


Fig. 3. NMR absorption signals measured for different  $B_1$ , (a) 0.23, (b) 0.49, (c) 0.88 and (d)  $1.40 \mu\text{T}$  at water flow rate of  $20 \text{ cm}^3/\text{s}$ .

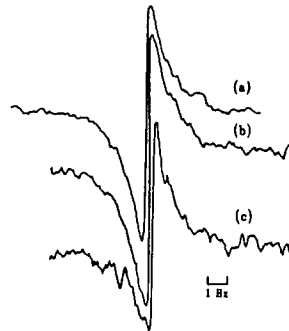


Fig. 4. NMR dispersion signals measured in (a) 1.0, (b) 0.51 and (c) 0.12 mT ranges.

그림 4는 1.0, 0.51, 0.12 mT에서 측정한 분산신호인데, lock-in 증폭기의 감도는 1.0 mT에서 1 mV인데 비

해 0.1 mT에서는 3  $\mu$ V이었다. 신호의 신호대 잡음비는 1.0, 0.51, 0.12 mT에서 각각 75, 45, 25로써 0.1 mT 영역에서도 핵자기 공명중심주파수를 결정하기에 충분한 신호를 얻을 수 있었다. 신호의 반치폭은 1 Hz로써 공명 신호의 중심주파수를 0.1 Hz 내에서 결정할 수 있는데, 이는 측정장치의 정확도를 배제하는 경우 1.0, 0.51, 0.12 mT 자장에 대해서 약 2, 4, 20 ppm의 불확도에 해당한다.

결론적으로 최적화된 RF 조건에서 분극된 흐르는 물을 이용한 Rabi 법 핵자기공명으로 0.1 mT의 저자장영역까지 신호대 잡음비가 좋은 핵자기 공명신호를 얻을 수 있었으며, 이로부터 수십 ppm의 불확도내에서 자장을 측정할 수 있었다.

### 참 고 문 헌

[ 1 ] P.A. Grivet, and L.Malnar, Advan. Electron. Electron phys., **23**, pp.39-75(1967).  
 [ 2 ] 김철기, 유권상, 우병철, 김창석, 한국자기학회지, **2**(3), 268(1992).  
 [ 3 ] E.R. Williams, G.R. Jones, J.S. Song, W.D. Phillips, and P.T. Olsen, IEEE Trans. Instrum. Meas., **IM-38**(2), 233(1980).  
 [ 4 ] K. Weyand, IEEE Trans. Instrum. Meas., **IM-34**(2), 167(1985).  
 [ 5 ] C. Sherman, Rev. Sci. Instrum., **30**(7), 568 (1959).

[ 6 ] G.L. Green, N. F. Ramsey, W. Mampe, J.M. Pendlebury, K. Smith, W.D. Dress, P.D. Miller, and P. Perrin, Phys. Letters., **71B**(2), 297(1977).  
 [ 7 ] J.M. Pendlebury, K. Smith, P. Unsworth, L. Green, and W. Mampe, Rev. Sci. Instrum., **50**(5), 535(1979).  
 [ 8 ] N.F. Ramsey, Molecular Beams, Oxford Press, London, pp.2-10(1965).  
 [ 9 ] G.L. Green Metrologia, **17**, 83(1981).  
 [ 10 ] C.G. Kim, K.S.Ryu, B.C. Woo, and C.S.Kim, Digest of INTERMAG '93, Stockholm, Sweden, 1993.  
 [ 11 ] 유권상, 김철기, 우병철, 임애란, 김창석, 한진우, 새물리, **32**(4), 547(1992).  
 [ 12 ] 유권상, 김철기, 우병철, 김창석, 한국자기학회 춘계 연구발표회, p.42(1992).  
 [ 13 ] 우병철, 박포규, 김철기, 유권상, 김창석, 한국자기학회지, **2**(2) 156(1992).  
 [ 14 ] C.G. Kim, E.R.Williams, H.Sasaki, S.Ye, P. T.Olsen, and W.L.Tew, IEEE Trans. Meas., in press.  
 [ 15 ] I.S.Mackenzie, J.Phys. E : Sci. Instrm., **19**, pp.324-333(1986).  
 [ 16 ] M.L.Martin, G.J.Martin, and J.J.Delpuech, Practical NMR spectroscopy, Heyden, London, pp.411-416(1980).

## Low Field Measurement of 0.1 mT by Rabi's NMR Method

K.S.Ryu, C.G.Kim, B.C.Woo, and C.S.Kim

*Korea Research Institute of Standards and science*

*P.O.Box 3, Taedok science Town, Taejon 305-606*

(Received 14 May 1993, in final form 7 June 1993)

The Rabi's NMR experiment using polarized flowing water was performed in order to measure the low field and the good NMR signal was obtained in the range of 0.1 mT. There was a change in amplitude and phase of signal due to the sinusoidal variation with the increasing RF field. The nominal field could be determined within a few tens ppm uncertainty by the NMR signal under the optimized RF condition.