

# Rabi 핵자기 공명법을 이용한 다전류 솔레노이드의 자장균일도 향상

김철기 · 유권상 · 우병철 · 김창석

한국표준과학연구원, 자기연구소

대덕연구단지 P. O. Box 3

(1992년 7월 29일 받음)

솔레노이드 중심 부근에서 균일자장을 형성하기위해 주전류와 보조전류로 이루어진 다전류 방법을 사용하였으며, 자장의 Legendre 전개로부터 구대칭 균일자장 공간형성을 위한 보조전류의 조건을 구하였다. 분극된 흐르는 물을 이용한 Rabi 핵자기 공명법에 의한 저자장 측정시스템을 구하고 이를 이용하여 솔레노이드 축상의 자장분포를 측정하였으며, 보조전류를 미세조정하여 그 균일도를 향상시켰다.

## I. 서 론

자장을 이용한 측정·실험의 정밀도는 정확한 자장값과 아울러 시료 공간에서의 자장균일도에 의해 좌우되는데, 저자장에서의 양성자 자기회전비율측정은 솔레노이드 중심점부근 2 cm 반경의 구형 공간에 0.2 ppm 정도의 균일 자장을 형성하는 것이 필수적이다[1]. 솔레노이드 중심부에서 균일한 자장을 발생 시키기 위해 솔레노이드 끝부분에 단위 길이당 권선수를 늘리거나[2], 부가적으로 헬름홀쯔형 코일을 한층 더 감는 방법이 있지만[3] 다층 코일 또는 헬름홀쯔 코일축을 솔레노이드 축과 정확히 일치시키기 어렵다. 따라서 근래에는 단층 솔레노이드에서 주전류외에 보조전류를 인가하여 솔레노이드 각 권선에 차등전류분포를 형성하는 다전류 방법이 이용되는데, 다전류 방법을 사용하는 경우 주전류와 보조전류에 의한 자장 축이 거의 일치하는 잇점이 있다[4-6].

다전류 방법에서 보조전류를 결정하기위해 컴퓨터 시뮬레이션으로 주전류와 보조전류비 및 그들 권선수를 변화시키면서 원하는 자장 균일도를 주는 조건을 얻을 수 있지만[4-6], 일반적인 자장균일도가 구대칭이 되지 않는다. 측정시료가 구형인 경우 정밀측정을 위해서 이를 극복하는 것이 필요한데, 자장의 Legendre 전개에서 측

정지점에 의존하는 몇개의 저차항을 "0"이 되도록 보조전류를 선택하면 솔레노이드 중심부근에서 구대칭에 가까운 균일자장 공간을 형성시킬수 있다[7]. 그러나 솔레노이드는 주변 자장환경과 솔레노이드 가공상 오차에 의해 원하는 균일자장을 얻기가 어려우므로 솔레노이드 내부의 자장분포를 측정하고 보조전류를 조정하여 그 균일도를 향상시키는 것이 필요하다.

핵자기공명으로써 1 mT 수준의 저자장을 측정할때 자기유도법과 자유세차법은 균일한 자장공간 (수 ppm/cm) 이 필요할 뿐만아니라 그 신호가 매우 작다[1,8]. 이에비해 분극된 흐르는 물을 이용한 Rabi 핵자기 공명법은 수백 ppm/cm 의 자장 공간에서도 일반적인 고자장에서의 핵자기 공명신호와 같은 크기의 신호를 얻을 수 있고, 좁은 공간 각 지점에서의 자장을 측정할 수 있는 장점이 있다[9-11].

본 연구에서는 다전류 방법에 의한 솔레노이드 중심부근에서 구대칭형의 균일자장 공간을 형성시킬 수 있는 보조전류 해를 구하고, 4 전류 방법으로써 균일 자장을 발생시켰다. 또 저자장을 용이하게 측정할 수 있는 Rabi 핵자기공명 측정장치를 구성하고 이를 이용하여 솔레노이드 축상에서 자장분포를 측정하였으며, 보조전류를 조정하여 그 균일도를 향상시켰다.

## II. 다전류방법에 의한 균일자장 공간형성

### 1. 다전류에 의한 솔레노이드 자장

솔레노이드 전류를 원형의 sheet 전류로 생각할때 생성되는 자장의 계산에는 공간 크기에따라 타원함수 또는 Legendre 함수를 사용하는데, 솔레노이드 중심점부근에서는 Legendre 함수로 표현하는 것이 수렴 속도가 빨라 편리하다. 그림 1에서 주어진 길이 \$L\_0\$, 권선수 \$N\_0\$ 인 솔레노이드에 주 전류 \$I\_0\$ 를 인가할때 원통좌표계로 나타낸 점 \$p(r, \theta)\$ 에서의 자장은 아래식으로 주어진다[3].

$$\vec{B}(r, \theta; \alpha_0) = B_\rho(r, \theta; \alpha_0) \hat{e}_\rho + B_z(r, \theta; \alpha_0) \hat{e}_z \quad (1)$$

$$B_\rho(r, \theta; \alpha_0) = \mu_0 n I_0 \sin^2 \alpha_0 \sin \theta \sum_{m=1}^{\infty} \left[ \frac{r}{c_0} \right]^{2m}$$

$$\frac{P'_{2m}(\cos \theta) P'_{2m}(\cos \alpha_0)}{2m(2m+1)}$$

$$B_z(r, \theta; \alpha_0) = \mu_0 n I_0 \left[ \cos \alpha_0 - \sin^2 \alpha_0 \sum_{m=1}^{\infty} \left[ \frac{r}{c_0} \right]^{2m} \right.$$

$$\left. \frac{P'_{2m}(\cos \theta) P'_{2m}(\cos \alpha_0)}{2m} \right]$$

여기서 \$(\rho, z)\$ 는 원통좌표계 변수를, \$B\_\rho\$ 와 \$B\_z\$ 는 \$\rho\$ 및 \$z\$ 방향의 자장성분을, \$\hat{e}\_\rho\$ 와 \$\hat{e}\_z\$ 는 단위 벡터를 나타내고, \$P\_m(u)\$ 은 Legendre 전개항, \$P'\_m(u)\$ 은 \$dP\_m(u)/du\$ 이다. 또 \$\mu\_0\$ 는 진공 투자율로 그 값은 \$4\pi \times 10^{-7}\$ H/m 이고, \$n\$ 은 단위길이당 권선수인 \$N\_0/L\_0\$, \$c\_0\$ 는 솔레노이드 중심점으로부터 대각선 길이, \$\alpha\_0\$ 는 대각선과 중심축 사이의 각이다. 솔레노이드 dimension에 따라 달라지지만

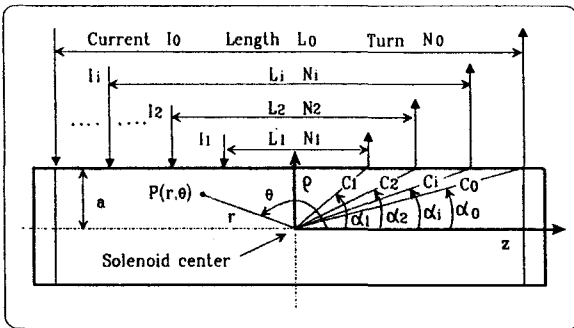


Fig. 1. Geometry of a multicurrent solenoid.

일반적으로 자장성분 \$B\_\rho\$ 는 \$B\_z\$ 에 비해 그 크기가 \$10^{-6}\$ 정도이기 때문에 축방향으로의 자장인 \$B\_z\$ 만을 고려한다.

중심점 부근의 공간에 균일자장을 형성하기 위해서는 솔레노이드 각 권선에 차등전류분포를 형성시키는 것이 필요한데, 그림 1에 나타낸 것처럼 주전류 \$I\_0\$ 외의 가상 솔레노이드 길이 \$L\_i\$, 권선수 \$N\_i\$ 에 보조전류 \$I\_i\$ 를 인가하면 중심에서의 자장은 각 전류에 의한 자장합으로 주어진다[7].

$$B_z^{\text{tot}} = \sum_{i=0}^f B_z^{(i)} \quad (2)$$

$$B_z^{(i)} = \mu_0 n I_i \left[ \cos \alpha_i - \sin^2 \alpha_i \sum_{m=0}^{\infty} (r/c_i)^{2m} \right.$$

$$\left. P_{2m}(\cos \alpha_i) P_{2m}(\cos \theta) / 2m \right]$$

$$(n = N_0/L_0 = N_1/L_1 = \dots = N_f/L_f)$$

위식에서 \$B\_z(0)\$ 는 주전류에 의한 자장이고, \$B\_z(i)\$ (\$1 \le i \le f\$) 는 보조전류에 의한 자장인데, \$f\$ 는 보조전류 개수를 나타낸다. 단위 길이당 권선수 \$n\$ 은 단층 솔레노이드인 경우 가공오차 범위내에서 같으며, \$c\_i\$ 는 각 보조전류에 의한 가상 솔레노이드 대각선길이, \$\alpha\_i\$ 는 각 대각선과 솔레노이드 중심축 사이각이다.

균일자장 형성을 위한 보조전류 결정에는 여러가지 방법이 있으나 자장의 Legendre 전개에서 측정점 변수 \$(r, \theta)\$ 가 포함된 전개항의 계수가 "0"이 되도록 보조전류들을 설정하면 솔레노이드 중심점 부근에서 구대칭형의 자장 공간을 형성시킬 수 있기 때문에 식 (2)의 자장을 아래와 같이 Legendre 전개항의 올림 차순으로 전개하는 것이 보조전류 계산에 편리하다.

$$B_z^{\text{tot}} = \mu_0 n \left\{ \sum_{i=0}^f I_i \cos \alpha_i - \sum_{i=0}^f A_i I_i r^2 / 2 P_2(\cos \theta) \right. \\ \left. - \sum_{i=0}^f B_i I_i r^4 / 4 P_4(\cos \theta) \right. \\ \left. - \sum_{i=0}^f C_i I_i r^6 / 6 P_6(\cos \theta) + \dots \right\} \quad (3)$$

$$A_i \equiv (\sin \alpha_i / c_i)^2 P'_2(\cos \alpha_i)$$

$$B_i \equiv (\sin \alpha_i / c_i^2)^2 P'_4(\cos \alpha_i)$$

$$C_i \equiv (\sin \alpha_i / c_i^3)^2 P'_6(\cos \alpha_i), \dots$$

여기서 계수 \$A\_i, B\_i, C\_i, \dots\$ 등은 각 보조전류에 의한 가상

의 솔레노이드 dimension 에 의해 결정되는데, 식 (3)의 첫번째항은  $r=0$  인 중심에서의 자장이고 두번째항부터 측정점위치  $(r, \theta)$  에 의존하는 자장이다. 주전류  $I_0$  외에 보조전류를  $f$  개 사용하면  $f$  개 항의 계수를 "0"으로 만들 수 있는데, Legendre 전개에서  $(r, \theta)$ 가 포함된 항의 차수가 증가함에 따라 그에 의한 자장의 크기는 감소한다. 따라서 균일자장 형성을 위해 Legendre 전개의 낮은 차수 항부터 "0"가 되도록 보조전류 크기를 결정해야하는데, 이를 만족하는 솔레노이드 권선수 및 보조전류조건과 행렬식에 의한 그 해는 각각 식 (4), (5)로 주어진다.

$$\sum_{i=1}^f A_i I_i = -A_0 I_0, \quad \sum_{i=1}^f B_i I_i = -B_0 I_0, \quad \dots, \quad \sum_{i=1}^f F_i I_i = -F_0 I_0 \quad (4)$$

$$I_i = \begin{vmatrix} A_1 A_2 \cdots A_{i-1} \cdot A_{i+1} \cdots A_f \\ B_1 B_2 \cdots B_{i-1} \cdot B_{i+1} \cdots B_f \\ \vdots \\ F_1 F_2 \cdots F_{i-1} \cdot F_{i+1} \cdots F_f \end{vmatrix} \begin{vmatrix} A_1 A_2 A_3 \cdots A_i \\ B_1 B_2 B_3 \cdots B_i \\ \vdots \\ F_1 F_2 F_3 \cdots F_i \end{vmatrix}^{-1} \quad (5)$$

식(5)에서 주전류  $I_0$  에 대한 보조전류  $I_i$  와 가상의 솔레노이드 권선수에 대한 여러조합의 해를 얻을수 있는데, 어떤경우의 해를 선택하더라도 식(3)에서 두번째항부터  $f$  개항을 "0"로 만들기때문에 중심부근의 자장은 첫번째항과 Legendre 전개의  $(f+1)$  이상 항의 합으로 주어진다.

$$B_z^{tot} = \mu_0 n \left\{ \sum_{i=0}^f I_i \cos \alpha_i - \sum_{i=0}^f G_i I_i r^{2(f+1)} / 2(f+1) P_{2(f+1)}(\cos \theta) - \sum_{i=0}^f H_i I_i r^{2(f+2)} / 2(f+2) P_{2(f+2)}(\cos \theta) + \dots \right\} \quad (6)$$

따라서 솔레노이드 중심점과 중심점으로부터 벗어난 점

$p(r, \theta)$  에서의 자장차이는 식 (6)에서 두번째항부터 주어지는 자장합에 의해 결정되고, 또 그 균일도는 구대칭이 됨을 알 수 있다. 솔레노이드 dimension 에 따라 달라지지만 Legendre 전개에서 유한항에 의한 솔레노이드 자장오차 계산으로부터[12] 대체로 보조전류 개수  $f=1$  이면 반경 100 mm, 길이 1 m 인 솔레노이드의 경우 중심부근 50 mm 공간에서 10 ppm order의 균일도를,  $f=2$  이면  $10^{-1}$ ,  $f=3$  이면  $10^{-2}$ ,  $f=4$  이면  $10^{-4}$  order의 자장 균일도를 얻을 수 있음을 추정할 수 있다.

2. 균일자장 공간형성

본 연구에 사용된 솔레노이드는 반경  $a=311$  mm, 길이  $L_0=1470$  mm, 권선수  $N_0=1172$  였는데, 4 전류방법을 사용하는 경우 식(5)의 컴퓨터 시뮬레이션에 의해 3개의 보조전류와 그들 권선수 해의 여러 조합을 구할 수 있다. 주전류가 1 A 일때, 그 중의 한 조합인  $I_1=-3.89$  mA 와  $N_1=200$ ,  $I_2=-50.44$  mA 와  $N_2=600$  그리고  $I_3=50.44$  mA 와  $N_3=1172$  를 선택하면 그림 2에 나타난 전류분포가 된다. 주전류 1 A 만을 인가하면 중심자장은 1.23223 mT 이고 균일도가 그림 3(a)에 나타난 것처럼 축상 20 mm 공간에 100 ppm 이 되지만 4 전류 방법을 사용하면 식(6)에 의해 중심자장은 0.981127 mT, 그 균일도는 그림 3(b)에 나타난 것처럼 반경 25 mm 공간내에 0.01 ppm 이하로 계산된다. 실제실험에서는 인가한 전류의 정밀측정을 위해서 주전류를 1.018 A 로 하고 그에 따라 보조전류를 조정하였는데, 그때 중심자장은 0.998787 mT 이고 자장 균일도는 0.01 ppm 이 된다.

일반적으로 솔레노이드 길이를 길게하면 중심부근에서 자장 균일도는 향상되는데, 4 전류방법에 의해 형성된 자

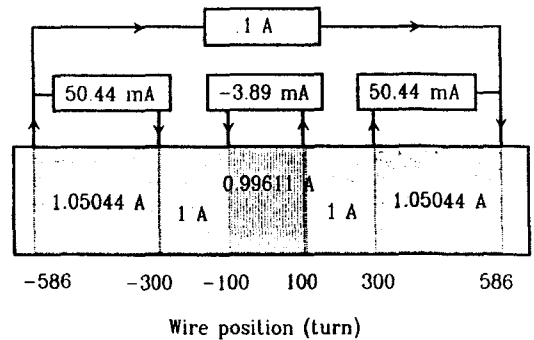


Fig. 2. Configuration of current distributions by 4 current method.

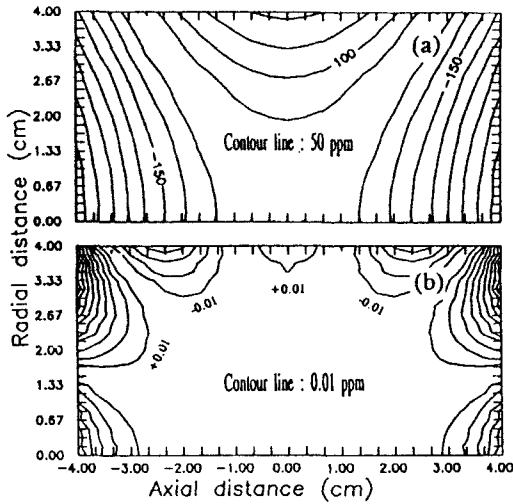


Fig. 3. Field uniformity in the solenoid center for (a) a single and (b) 4 current method by computer simulation.

장균일도는 주전류만을 사용하는 경우와는 1.5 km 길이의 솔레노이드와 같은 효과를 가지며, 양쪽 보조전류 1 mA 변화가 중심에서 10 mm 떨어진 지점에서 약 7 ppm의 자장 기울기를 유발시킨다. 실제 솔레노이드 구성시 주변의 자성환경에 의해 자장균일도가 계산값과 차이가 주어질뿐만 아니라 솔레노이드 각 권선의 반경 및 피치가 가공오차에 의해서도 자장균일도가 나빠지는데, 경우에 따라 각 보조전류를 조정하여 그 균일도를 향상 시키는 것이 필요하다.

### III. 측정방법 및 장치구성

#### 1. Rabi 핵자기 공명신호

핵자기공명법에 의해 자장을 측정할때 고려되어야 할 요소들은 공명주파수, 선폭 그리고 주파수에 따른 전이 확률등인데, 측정장비의 분해능이 신호의 크기와 선폭에 의해 결정되기때문에 이들에 대한 조건들을 살펴볼 필요가 있다. 분극된 흐르는 물속 양성자의 Rabi 핵자기공명법에서의 공명은 자장의 Zeeman 효과에 의해 분리된 에너지준위에서 RF 자장에 대한 원자핵 스핀의 섭동이론으로 설명되는데, 측정자장의 Larmor 주파수에 해당하는 섭동 RF 자장을 인가하면 Zeeman 효과에 의해 분리된 낮은 에너지 상태에서부터 높은 에너지 상태로의 전이확률

은 아래식으로 주어진다[9].

$$P(\omega, t) = \frac{(2b)^2}{(\omega_0 - \omega)^2 + (2b)^2} \left[ \sin^2\{(\omega_0 - \omega)^2 + (2b)^2\}^{1/2} \cdot t / 2\} - 1 \right] \quad (7)$$

여기서  $\omega_0$ 는 측정자장의 Larmor 주파수, 는 RF 자장의 주파수이고,  $2b$ 는 RF 자장의 크기에 해당하는 Larmor 주파수, 그리고  $t$ 는 물이 RF 자장을 지나는 시간을 나타내는데, 공명상태에서의 전이확률이  $2b \cdot t = \pi$ 에서 최대가 됨을 알 수 있다.

RF 섭동에 의해 식 (7)에서 전이확률  $P(\omega, t)$ 가 결정되더라도 핵자기공명 신호의 크기는 구성된 실험장치의 조건에 의해 결정된다. 물의 체적소가 polarizer 를 통과하는 시간이  $\tau_1$ , polarizer 에서 RF 코일까지의 시간이  $\tau_2$ , RF 코일에서 탐지코일까지의 시간이  $\tau_3$ , 그리고 솔레노이드 입구에서 RF 코일까지의 시간이  $\tau_4$  이면, 탐지코일에 단위시간당 흡수되는 에너지  $W$  는 아래식으로 주어진다[13,14].

$$W = A_0 A(v) [ 2P(\omega, t) - 1 ] \quad (8)$$

$$A_0 = 2N\mu_0^2 B_{pol} B_{det} / kT$$

$$A(v) = v [ 1 - \exp(-\tau_1/T_1) ] \exp\{-\tau_2 + \tau_3\} / T_1 \exp\{-\tau_4/T_2\}$$

여기서  $N$ 은 단위체적당 양성자의 갯수,  $\mu_0$ 는 양성자의 자기모우먼트,  $B_{pol}$ 은 polarizer의 자장,  $B_{det}$ 는 측정코일 위치에서의 자장,  $T$ 는 물의 온도 그리고  $A_0$ 는 그와 관련된 계수이다. 또  $v$ 는 물의 flowrate,  $T_1$ ,  $T_2$ 는 각각 물의 스핀-격자, 스핀-스핀 완화시간,  $A(v)$ 는 이들에 의해 결정되는 계수이다. 계수  $A_0$ 에서 polarizer의 자장과 탐지코일이 놓여 있는 곳의 자장을 적절히 선택하면 일반적인 고자장 핵자기공명신호 수준의  $S/N$ 를 가지게 되며, 또 탐지코일에 유도 신호를 크게하기위해 물의 flowrate와 RF 자장 세기에 해당하는  $2b$ 를 최적화시킬 필요가 있다.

#### 2. 측정장치 구성

실험실에서 솔레노이드 자장과 지자장이 함께 존재하기 때문에 정확한 자장을 얻기가 어렵다. 따라서 솔레노이드에서 자장을 정밀하게 얻기 위해서 소형 헬름홀츠코일내의 자장을 fluxgate magnetometer (Thorn Automation LTD, FG 4/3) 로써 관측하여 코일상수가 같은

대형헬륨홀츠코일로써 지자장을 상쇄시키고 그 안에 자장 발생용 솔레노이드를 안착하였다[15].

솔레노이드 자장발생을 위한 전기적 장치 및 자장 균일도 측정을 위한 Rabi 핵자기공명장치의 개략도를 그림 4에 나타내었는데, 전류 및 그 drift 측정을 위해 솔레노이드 코일과 직렬로 연결된 표준저항에서의 전압을 DVM (HP 3458 A) 으로 측정하였다. 주전류 측정용 표준저항은 1 Ω (Tettex 3274), 보조전류용 저항은 10 Ω (Tettex 3274) 을 사용하였는데, 이 표준저항은 25 ° C 에서 저항-온도 계수가 가장 적었고 oil bath (Guildline 9732VT)에 의해 0.001 ° C fluctuation 내에서 온도가 유지되었다. 2 ppm 정도의 fluctuation 을 가지는 주 전류용 전류원은 상용의 전류원 (Fluke 382A) 이 지나는 10 ppm 보다 더 안정화되었으며, 3 개의 보조 전류원은 상용 (Keithley 220) 이었다.

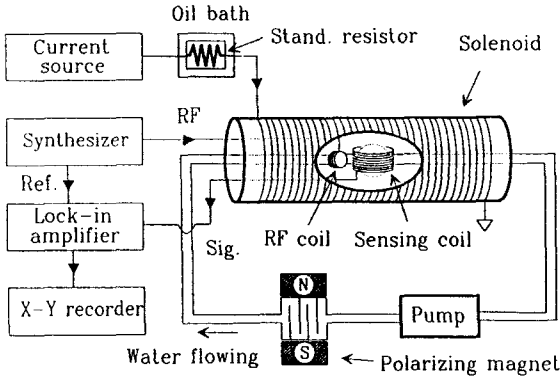


Fig. 4. Schematic diagram for a solenoid field measurement using Rabi's NMR method.

두 개의 영구자석과 순철 요크로 제작된 polarizer의 자장은 0.26 T이며, 그 속에 배플 챔버(baffled chamber)를 만들었다. 배플 챔버내에서 분극된 물(증류수)이 내경 4 mm 인 PET 관을 통하여 솔레노이드 중심에 있는 RF 코일 및 탐지코일 속을 통과하는데, DC 펌프로써 물의 속도를 조절하였다. 탐지코일은 측정하고자하는 자장위치로부터 떨어진 곳에 둘 수 있으나 본 연구에서는 장치를 간소화시키기 위해 솔레노이드 중심에 두었다.

RF 코일은 길이가 0.33 mm, 20회 권선수의 솔레노이드형이었고, 솔레노이드 자장의 Larmor 주파수에 동조된 탐지코일은 길이가 18 mm, 600 권선이었으며, quality factor 가 약 100 이다. 솔레노이드 자장, RF 자장 및 탐지코일 축 방향이 서로 수직이되게 조정하였는데,

RF 자장의 주파수 sweep 에는 파형합성기 (HP 3335A) 를 사용하였다. 탐지코일에 유도되는 공명신호는 lock-in 증폭기 (EG & G PAR 5210) 로 증폭하여 X-Y 레코더(HP 7045B)로써 기록하였다. 솔레노이드 자장균일도는 RF 코일과 구형시료를 이동시키면서 측정 한 공명주파수로써 구하였는데, 측정동안 전류의 drift에 의한 자장변화로 부터 야기된 공명주파수 이동은 보정하였다.

### IV. 실험결과 및 고찰

#### 1. 핵자기공명 신호의 최적화

4 전류방법에 의한 솔레노이드 자장하에서 측정한 핵자기공명의 흡수 및 분산신호를 그림 5에 나타내었는데, 중심주파수는 42,588.5 Hz 이고 흡수신호 반치폭은 1.5 Hz 이었다. 흡수신호는 중심주파수를 중심으로 wiggle 이 있음을 알 수 있는데, 이는 식(7)에서 RF 자장 주파수에 따른 전이확률 변화에 기인하는 Rabi 핵자기공명의 전형적인 신호 형태이다.

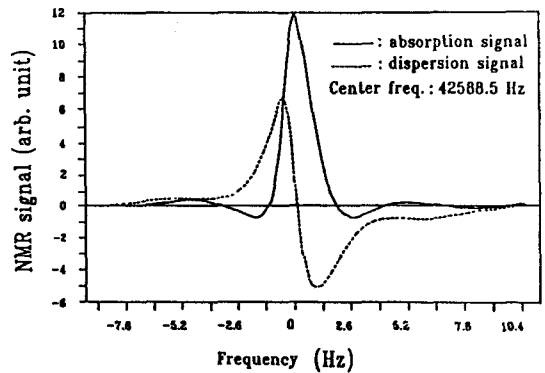


Fig. 5. NMR absorption and dispersion signals.

물의 flowrate 에 따른 공명신호 최대값의 변화를 그림 6(a)에 나타내었는데, flowrate를 4 cc/s 에서부터 증가시킬때 공명신호의 크기가 증가하다가 약 19 cc/s 일 때 최대값 54.5 μV 을 가진후 점차 감소하였다. 식 (8) 에서 flowrate에 의해 결정되는 인자는 A(v) 와 전이확률에 내포된 물이 RF 코일을 통과하는 시간 t 등인데, 수행된 flowrate 범위에서 A(v)는 단조증가하는 것으로 계산되었다. 따라서 flowrate 19 cc/s 에서 최대의 신호가 주어지는 것은 이에 따른 전이확률변화에 기인하는 것이다.

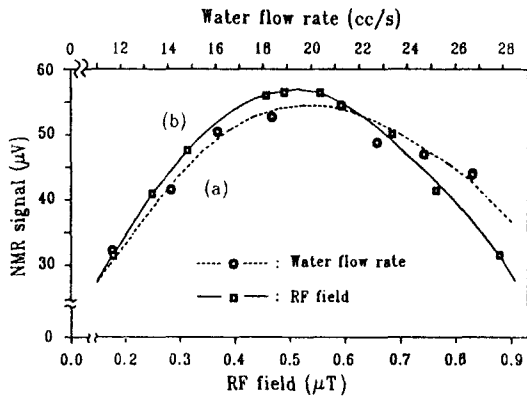


Fig. 6. Peak amplitude of NMR absorption signal according to (a) water flow rate and (b) RF field.

물속도 최적의 조건에서 RF 자장에 따른 신호 최대값을 그림 6(b)에 나타내었는데, 신호의 크기가 RF 자장 0.49  $\mu\text{T}$  에서 최대값 56.5  $\mu\text{V}$  이었다. 공명상태에서 RF 자장 세기에 따른 신호의 변화는 식 (8)의 전이확률을 통해서 나타나는데, 최적화 조건에서 탐지코일에 유도되는 신호의 크기는 약 56.5  $\mu\text{V}$  로 자기유도공명법으로 측정된 신호크기 0.28  $\mu\text{V}$  보다 약 200 배 정도 큰 신호였다. 신호의 선폭도 물의 flowrate 와 RF 자장에 따라 변화하였으며, 최적화 조건에서 그 크기가 최소가 되었으며, 솔레노이드 중심자장과 균일도 측정은 이 조건에서 수행하였다.

### 2. 솔레노이드의 중심 자장

그림 5에 나타난 측정된 핵자기 공명주파수 42,588.5 Hz 로부터 자장을 환산할때 전자의 자장차폐에 의한 화학적 효과와 시료의 형태에 따라 변하는 demagnetizing factor로부터 결정되는 물의 반자성효과에 의한 공명주파수 이동을 고려한 양성자 자기회전비율 값을 사용하여야 한다[16]. CODATA 86에서 구형의 시료에 대해 화학적 및 demagnetizing 효과를 보정하지 않은 양성자 자기회전비율 값은  $2.6751525 \times 10^8 \text{ s}^{-1} \text{ T}^{-1}$ , 보정한 값은  $2.6752212 \times 10^8 \text{ s}^{-1} \text{ T}^{-1}$ 으로 그 차이는 약 25.7 ppm 인데 [17], 증류수에 상자성 이온을 첨가시키는 경우 또는 다른 형태의 시료를 사용하는 경우 해당하는 양성자 자기회전 비율값을 사용하여야 정밀한 자장을 환산할 수 있다. Rabi 핵자기공명법에서 측정된 공명주파수로부터 시료 형태를 고려하여 환산된 솔레노이드의 중심자장은

1.000284 mT 인데, 식 (6)을 이용하여 계산한 자장 0.998787 mT 와 0.15 % 정도의 차이를 보였다.

이러한 차이는 실험에 사용된 솔레노이드가 철근, 엘리베이터, 철물순물이 포함된 일반 콘크리트 건물내에 놓여있는데, 솔레노이드 자장과 지자장이 이들 자성체를 자화시키고, 이 자화된 자성체가 솔레노이드자장을 변화시키는 데 주원인이 있다. 그 예로 엘리베이터의 경우 놓여 있는 층수에 따라 약 35 ppm 정도 자장 차이가 유발되었는데, 정밀 자장발생을 위해서 우선적으로 자성체가 배제된 비자성 실험실이 요구됨을 알 수 있다. 이외에도 솔레노이드 반경과 피치에서의 가공 및 측정 오차, 그리고 지자장 상쇄오차와 인가한 전류의 측정오차에 의해서도 자장의 계산값과 측정값에서 차이가 유발될 수 있는데, 정밀저항 및 표준전압을 교정하고 지자장 변화가 적은 시간에 위의 실험을 수행함으로써 그에 의한 차이는 줄일 수 있을 것이다.

### 3. 자장 균일도 측정

그림 7(a)(b) 는 각각 단전류와 4 전류방법에 의한 솔레노이드 축상에서 측정된 자장균일도를 나타내는데, 단전류 방법에서는 40 ppm/cm 자장균일도가 형성되는데 비해, 4 전류의 경우 약 10 ppm/cm 의 균일도를 가졌다. 이 측정결과는 각 경우의 계산된 자장균일도와 차이가 나는데, 단전류의 경우는 계산된 균일도보다 좋게 나타났지만 4 전류방법의 경우는 계산값보다 나쁘게 나타났다. 이러한 측정값과 계산값과의 차이는 위에서 언급되

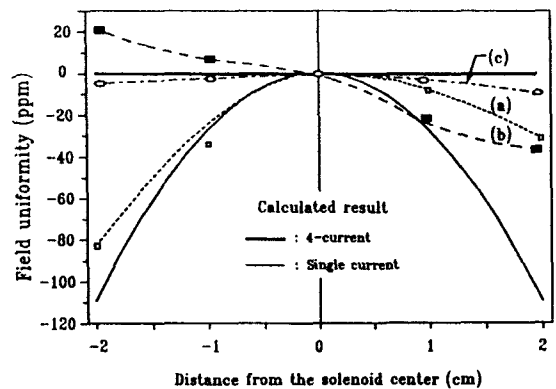


Fig. 7. The field uniformities near the solenoid center measured by Rabi's NMR method for (a) single, and (b) 4 current before adjustment and (c) after adjustment.

있듯이 건물내에 존재하는 자성체 영향과 솔레노이드 반경 및 피치의 가공 및 측정오차에 기인한 것이다.

4 전류방법에서 측정된 자장 기울기로부터 솔레노이드 양 끝 보조전류를 + 4.86, - 1.99 mA 씩 조정후 측정된 자장균일도가 그림 7(c)에 나타나있는데, 3 ppm/cm 정도의 균일자장을 형성할 수 있었다. 주전류 fluctuation 은 같은 정도의 자장 fluctuation 을 유발시키는데, 주전류는 2 ppm 정도의 fluctuation 을 가지는 것으로 측정되었으며, 앞으로 주전류 fluctuation 을 낮추고 또 신속중인 비자성 실험실에서 이의 실험을 수행하여 자장균일도를 향상시킬 수 있을 것으로 기대된다.

### V. 결 론

지자장이 상쇄된 공간에서 주전류와 보조전류를 사용하는 대전류 방법으로써 솔레노이드 중심부근 공간에서 구대칭형의 균일자장을 형성하기위해 Legendre 전개항의 낮은 차순부터 "0"이 되도록 보조전류의 일반 해를 구하고, 4 전류 방법으로 균일 자장을 발생시켰다. 분극된 흐르는 물을 이용한 Rabi 핵자기 공명법에 의한 저자장 측정시스템을 구성하고 이를 이용하여 솔레노이드 측정의 자장균일도를 측정하였다. 측정된 자장균일도는 외부 자장환경과 솔레노이드 가공오차에 의해 계산된 자장값과 차이를 보였으며, 보조전류의 조정에 의하여 그 자장균일도를 향상 시켰다. 앞으로 자성체가 배제된 비자성 실험실에서 Rabi 핵자기공명 측정시스템을 이용하여 양성자 자기회전비율 정밀측정에 필요한 0.1 ppm/cm 미만의 균일자장 공간을 형성할 수 있을 것으로 사료된다.

### 참 고 문 헌

[1] E. R. Williams, G. R. Jones, J. S. Song, W. D. Phillips, and P. T. Olsen, *IEEE Trans. Instrum. Meas.* **IM-34**(2), 163 (1989).

[2] M. E. Gardner, J. A. Jungerman, P. G. Lichtenstein and C. G. Patten, *Rev. Sci. Instrum.* **31**, 929 (1960).

[3] C. Snow and R. L. Driscoll, *J. NBS.* **69C**, 49 (1965).

[4] K. Weyand, *Archive fur Elektrotechnik* **69**, 287 (1986).

[5] H. Nakamura, *Jpn. J. Phys.* **18**, 1883 (1979).

[6] P. G. Park, C. G. Kim, and C. S. Kim, *Kor. Appl. Phys.*, **3**, 572, (1990).

[7] E. R. Williams, Private communications.

[8] K. Weyand, *IEEE Trans. Instrum. Meas.* **IM-34**(2), 167 (1985).

[9] N. F. Ramsey, *Molecular Beams*, Oxford Press, London (1965) pp. 115-124.

[10] C. Sherman, *Rev. Sci. Instrum.* **30**(7), 568 (1959).

[11] K. S. Ryu, C. G. Kim, B. C. Woo, A. R. Lim, C. S. Kim, and J. W. Han, *New Physics.* **32**, 547 (1992).

[12] C. G. Kim, P. G. Park, and C. S. Kim, *Kor. Appl. Phys.* **3**(4), 494 (1990).

[13] 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).

[14] J. M. Pendlebury, K. Smith, P. Unsworth, G. L. Green, and W. Mampe, *Rev. Sci. Instrum.* **50**(5), 535 (1979).

[15] C. G. Kim, B. C. Woo, K. S. Ryu, and C. S. Kim, *Digests of the 1991 Fall Conference, Korean Magnetics Society* (1991).

[16] B. W. Petley, *The Fundamental Physical Constants and the Frontier of Measurement*, Adam Hilger Led, Bristol (1985) p119.

[17] E. R. Cohen and B. N. Taylor, *Rev. Mod. Phys.* **59**, 1121 (1987).

## **Improvement of Field Uniformity in a Multicurrent Solenoid by Rabi's NMR Method**

C.G. Kim, K.S. Ryu, 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 29 July 1992)

The multicurrent method composed of a main and auxiliary currents was used to make the uniform field near the solenoid center. The auxiliary currents were determined to give the spherical symmetry in the field uniformity from the Legendre polynomials. Rabi's NMR system using polarized flowing water has been constructed and the field of a 4-current solenoid has been determined from the resonance frequency. The field uniformity along the solenoid axis has been improved by adjusting the auxiliary currents.