

정밀솔레노이드를 사용한 저자장 표준시스템 제작

박포규 · 손대락 · 우병철 · 김창석

한국표준과학연구원, 자기연구실, 대전 305-606

(1992년 4월 12일 받음)

자장의 범위가 1 mT 이하이고, 분해능이 100 nT인 국가표준을 확립하고 저자장 측정장비의 교정 및 측정능력을 확보하기 위한 저자장 표준시스템을 제작하였다. 자장 발생용으로 석영관을 사용한 정밀 솔레노이드를 가공·제작하였으며, 저자장 상쇄용으로 대형 3-축 헬름홀쯔 코일을 구성하였다. 자장 균일도를 향상시키기 위하여 단층 솔레노이드에서 주전류의 2개의 보조전류를 사용하는 three-current 방법을 사용하였으며, 컴퓨터를 사용하여 축상에서 최대의 균일도를 주는 조건을 계산하였다. Three-current 방법을 사용한 경우 솔레노이드 중심축상에서 ± 5 cm 범위에서 0.01%, single current일 때는 0.1%의 정밀도로 자장을 발생시킬 수 있었으며, 저자장 측정장비의 동특성을 측정할 수 있는 시스템을 구성하여 장비의 성능을 평가할 수 있었다.

I. 서 론

저자장과 관련된 측정기술은 저자장측정, 자기차폐, 항공·우주분야 및 생체자기학등의 다양한 분야에 응용되고 있다. 저자장 측정기술과 이에 관련된 연구를 하기 위해서는 저자장 제거 및 자장을 발생·제어 시키는 기술이 필수적이다. 저자장을 없애는 방법은 고투자율의 자성재료를 이용한 자기차폐방법과 헬름홀쯔 코일을 사용하여 실험에 필요한 공간에서 저자장과 그 크기가 같고 방향이 반대인 자장을 발생시켜서 저자장을 상쇄시키는 방법이 있다. 자기 차폐의 경우 차폐된 공간내에서 정밀 자장을 발생하기가 어렵기 때문에 본연구에서는 3-축 헬름홀쯔 코일을 사용한 저자장 상쇄방법을 사용하였다. 한편 저자장 표준이 되는 자장발생을 헬름홀쯔 코일이나 솔레노이드를 사용할수 있으나 본연구에서는 높은 정밀도가 요구되기 때문에 솔레노이드를 택하였으며, 자장의 균일도를 향상시키기 위하여 three-current 방법을 사용하였다. 솔레노이드의 코일상수는 솔레노이드의 dimension을 측정하여 계산으로 구하였다. 또한 저자장 측정기의 동특성인 교류자장측정범위(bandwidth), 측정기의 응답속도(response)를 나타내는 delay time, settling time, rise time을 측정할수 있는 측정시스템을 구성하였다.

II. 저자장 표준시스템 제작

1. 헬름홀쯔 코일을 이용한 저자장 상쇄시스템 구성

저자장 상쇄시스템은 솔레노이드나 헬름홀쯔코일을 사용하여 발생하는 정밀자장이 저자장과 함께 존재하므로 정확한 표준자장을 얻기가 어렵기 때문에 저자장성분을 제거하기 위하여 사용된다. 저자장 상쇄시스템의 구성은 저자장변화 관측용으로 사용되는 직경이 각각 0.74 m, 0.86 m, 0.98 m인 소형 3축 헬름홀쯔코일과 저자장 상쇄용으로 사용되는 직경이 각각 1.5 m, 1.74 m, 1.96 m인 대형 3축 헬름홀쯔코일로 되어 있다. 저자장변화 관측은 3-축 fluxgate 마그네토미터를 사용하여 소형헬름홀쯔코일의 중심에서 측정하였다. 저자장 성분을 각각 시간에 따라 변하지 않는 main field와 시간에 따라 변하는 미소변화자장으로 나누어서 상쇄시키는 방법을 사용하였다. 관측된 저자장의 main-field는 대형헬름홀쯔코일에 저자장과 크기가 같고, 반대방향으로 자장이 발생하도록 정전류를 인가하여 상쇄시키고 동시에 미소변화자장은 제한 회로를 이용하여 자동적으로 상쇄되어 지도록 저자장 상쇄시스템을 구성하였다. 솔레노이드가 설치될 중심부근에서 그 특성을 측정된 결과 안정도는 2 nT/h, 균일도 분포는 ± 5 cm 범위에서 10 nT로 저자장을 상쇄시킬 수 있었으며, 앞으로 인위적인 자장의 영향을 감소시킬 수 있는 비자성동이 완성되면 더욱 균일한 자장분포를

생성시킬 수 있을 것으로 기대된다.

2. 정밀솔레노이드를 이용한 저자장 발생시스템 제작

솔레노이드 former로 사용되는 석영관(fused silica)은 길이 1000 mm, 외경 204 mm, 내경 182 mm의 원통형이며, 표면에 피치 1 mm의 나선형 나사홈을 선반을 이용하여 가공하였다. 가공방법은 선반에 다이아몬드 wheel

borundum wheel (GC 60J)과 다이아몬드 wheel (SD 320)을 사용하여 외부표면 연마, 나선형 나사홈 가공, 나사홈 연마등의 과정을 거치면서 가공하였다. 나선형 나사홈의 가공이 끝난 후, 반경 및 피치의 가공정도를 높이기 위하여 입도가 1200인 다이아몬드 파우더와 cold cream 혼합물을 형겅에 묻혀 800 rpm으로 회전하고 있는 석영관에 밀착시켜서 3회 polishing 작업을 하였다.

코일을 균일하게 감기위한 방법으로 속도를 가변할수 있는 모터와 일정한 장력을 가하는 장치를 포함한 권선기를 제작하여 사용하였다. 코일 권선방법은 석영관의 속도는 22 rpm으로 일정하게 회전시키면서, 권선기로부터 2 m 떨어진 곳에 20 N의 일정한 장력을 가하는 장치 (Meteor ME 485)를 설치하고, 그 중간에 코일의 산화방지를 위하여 절연유를 형겅으로 묻혀가면서 감았다. 솔레노이드에 사용된 구리선은 국내업체에서 제조한것으로서 순도가 99.99 %인 나선 (bare wire)이고 열처리 (annealing)가 되지 않은 것이다. 구리선의 지름 및 진원도(roundness)를 10회 측정했는데 결과 평균값은 지름이 0.8035 mm이고 진원도는 0.8 μ m이었다. 코일을 감은후 솔레노이드의 치수를 측정한 결과 평균피치가 999.95 μ m, 평균반경이 101.1995 mm으로 측정 되었다. 그림 1은 솔레노이드에 코일을 감은 후 피치 및 반경의 오차를 나타낸 것으로 점선은 1차 최소 자승법에 의하여 계산한 피치와 반경의 변화를 나타낸다. 피치와 반경의 변화는 각각 $\pm 0.3 \mu$ m, $\pm 10 \mu$ m이었으며, 이직선으로부터 계산한 피치와 반경의 표준편차는 각각 0.4 μ m, 3 μ m이었다. 또한 코일을 감은후의 피치와 반경의 변화는 코일을 감기전에 측정값과 일치하였다.

솔레노이드에 three-current를 인가하는 방법으로 주전류가 흐르고 있는 단층 솔레노이드에 보조전류를 주입할 수 있도록 current injector를 제작하였다. 사용된 재질은 자화율이 적은 베이크라이트(1.1×10^{-5}), 인칭동관(-1.1×10^{-7}), 구리선(-1.0×10^{-7}) 등으로 구성되어 있다. 원하는 나선코일 위치에 전류를 주입시키기 위하여 injector를 슬라이드식으로 만들었고, 움직임을 방지하기 위하여 코일과 접촉부분을 솔레노이드의 외경과 동일한 피치를 가진 안나사를 베이크라이트판(1 cm \times 1 cm \times 0.4 cm)에 제작하였다. 또한 코일면과 접촉력을 강하게 하기 위하여, 비자성금속이며 일반적으로 판스프링 재질로 널리 사용되고 있는 인칭동관(0.5 cm \times 6 cm \times 0.01 cm)을 원형으로 만들어 그 끝부분에 나사홈 베이크라이트를 부착하였다. 솔레노이드에 감긴 코일의 나선산과 나사홈 베이크라이트판에 설치된 백금선(지름 0.6 mm)이 접촉하도록 하여 솔레노이드에 전류를 흘려

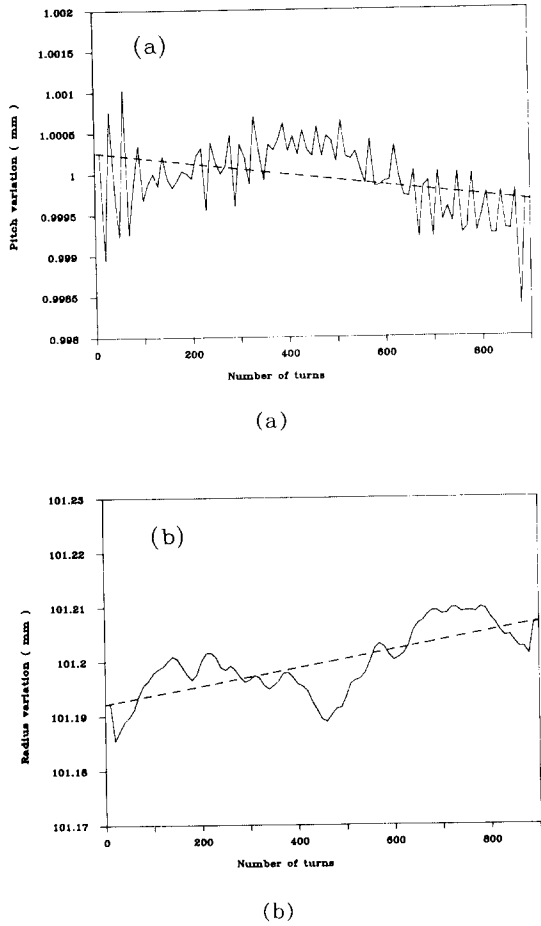


Fig. 1. Dimensional variations of the solenoid ; (a) pitch variation and (b) radius variation along the solenoid length.

을 연결한 고속 정밀모터를 장착하고, 석영관은 선반에 의해 저속으로 회전시키면서, wheel은 고속으로 회전과 동시에 모터가 장착된 공구대가 직선적으로 석영관 축방향으로 이동하면서 가공 하였다. 가공공정은 green car-

주었다.

자장 발생시스템은 간편하게 사용할수 있고, 정확한 전류를 흘려주기 위하여 컴퓨터를 사용하여 자동적으로 제어하도록 제작하였다. 컴퓨터(IBM-PC)에 GPIB card를 설치하고, 주전류원(KEPCO 72-6M)과 보조전류원(Keithley 220)의 출력을 각각 컴퓨터로 조절하였다. 주전류원의 출력단자에 1 ohm 표준저항을 연결하여 그 양단의 전압을 GPIB card가 내장된 DVM(Fluke 8810)을 사용하여 컴퓨터에서 직접 나타나도록 함으로써 솔레노이드에 주입되는 전류를 확인할 수 있도록하였다. 솔레노이드와 전류원을 보호하는 장치로는 1×10^{-3} T 이상의 자장을 입력시는 솔레노이드에 전류를 흐르지 않도록 설계하였으며, 주전류원의 전류와 같은 정방향으로 다이오드를 연결하여 역방향으로 전류가 흐르는것을 방지하였고, 보조전류원에는 애벌린취 다이오드를 장비와 병렬로 2개를 역방향으로 연결하여 과전압으로부터 장비를 보호할 수 있도록 하였다.

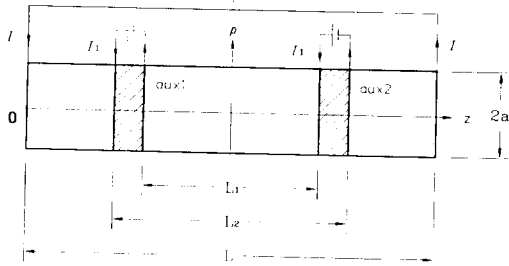


Fig. 2. Schematic diagram of three-current injection.

III. 자장분포의 계산 및 측정

1. 솔레노이드의 자장분포 계산

솔레노이드 중심축상에서 자장계산은 반경 a , 길이 L , 총권선수 N 인 솔레노이드에 전류 I 를 인가하고, 진공 투자율을 μ_0 라 하면 솔레노이드 좌단을 원점으로 해서 z 만큼 떨어진 축상의 점에서 축방향 성분의 자장(B_z)는 다음과 같이 주어진다.

$$B_z(z) = \frac{\mu_0 NI}{2L} \left[\frac{z}{\sqrt{a^2 + z^2}} \right.$$

$$\left. + \frac{L-z}{\sqrt{a^2 + (L-z)^2}} \right] \quad (1)$$

솔레노이드에 코일을 감은후 10 turn 주기로 피치(L/N) 및 반경을 측정된 값으로 각각 솔레노이드에서 발생하는 자장을 식 (1)로 계산한 다음, 축상에서 발생한 자장을 합하여 솔레노이드 중심에서 계산한 코일상수는 1.226×10^{-3} T/A 이었다.

Three-current 방법에서 중심축상의 자장은 그림 2에서와 같이 동일한 축에 3개의 솔레노이드가 각각 독립적으로 있다고 가정하고, 전류방향이 같은 방향에서 각 솔레노이드에 발생하는 자장을 합한 값으로 주어진다.

$$B_{3z}(z) = \frac{\mu_0 N}{2L} \left[I \left(\frac{z}{\sqrt{a^2 + z^2}} + \frac{L-z}{\sqrt{a^2 + (L-z)^2}} \right) + I_1 \left(\frac{z-L_2}{\sqrt{a^2 + (z-L_2)^2}} + \frac{L_w - (z-L_2)}{\sqrt{a^2 + (L_w - (z-L_2))^2}} \right) + I_1 \left(\frac{z - (L_1 + L_2 + L_w)}{\sqrt{a^2 + (z - (L_1 + L_2 + L_w))^2}} + \frac{L_w - (z - (L_1 + L_2 + L_w))}{\sqrt{a^2 + (L_w - (z - (L_1 + L_2 + L_w))^2}} \right) \right] \quad (2)$$

여기서 I 는 주전류, I_1 는 보조전류, L_w 는 $(L_2 - L_1)/2$ 이다.

제작한 솔레노이드는 $L = 0.898950$ m, $a = 0.101200$ m, $N = 899$ 회이므로 식 (2)에 대입하고, 전류비(I_1/I)를 0.001, 보조전류의 위치(L_1, L_2)를 1 mm씩 변화시켰을 때 z -방향성분의 자장이 중심에서 z 축상으로 최대의 균일도를 얻는 조건들 (I_1, L_1, L_2)을 컴퓨터로 계산한 결과 최적조건은 $L_1 = 253$ mm, $L_2 = 285$ mm, 전류비(I_1/I)는 83/1000 이었다. 이러한 결과를 식(2)에 대입하여 솔레노이드의 코일상수를 계산하여 1.2296×10^{-3} T/A 의 값을 얻었다. 그림 3은 솔레노이드 중심점의 자장을 기준으로 하여 균일도를 계산한 결과로 (a)는 single current, (b)는 three-current 인 경우를 나타내며, three-current 방법을 사용하였을 때 중심 축상에서 ± 5 cm 이내에 약 1 ppm 정도의 균일성을 가진다.

2. 자장분포 측정

제작된 솔레노이드의 자장분포는 이론적인 계산값과 측정값이 일치하는지의 확인이 필요하다. 일반 실험실에서 정밀한 자장분포를 측정하기 위하여 하루동안 자장의 변화를 fluxgate 마그네토미터를 사용하여 측정한 결과 새벽 1시부터 5시까지 10 nT 이하의 안정된 상태를 유지했다. 솔레노이드내부의 자장을 측정하기 위하여 진동이 작으면서 마그네토미터의 probe를 쉽게 이동시킬수

있도록 베이크라이트판에 슬라이드를 만들고, 슬라이드의 축방향으로 probe를 고정시켰다. 슬라이드 양쪽 끝에 구리선을 연결한 다음, 한쪽 끝은 선형 정밀모터로 저속(2.5 mm/s)으로 이동시키고, 다른쪽은 probe의 진동을 방지하고, 균일 속도를 유지하기 위하여 황동봉(500 g)을 배달았다.

자장 측정은 fluxgate 마그네토미터(Bartington MAG-01H)의 출력전압을 GPIB interface가 내장된 DVM(Fluke 8810)으로 측정하여 IBM-PC 컴퓨터로 자동으로 기록하게 하였다. 저자장 표준시스템이 설치된 장소에서 자장장의 변화가 적은 시간대인 새벽에 자장장 변화를 측정해 본 결과 기울기는 약 20 nT/cm이었고, fluctuation은 10 nT 이하였다. 그림 4는 솔레노이드 치수로부터 계산된 자장값과 솔레노이드에 전류를 인가하여 측정된 자장값에 자장장을 보정한 상태에서 자장값을 각각 비교한 것이다. 그림 4 (a)는 주전류 0.1 A 일때 single current 방법으로 계산한 자장값이고, 그림 (a')은 fluxgate 마그네토미터로 측정한 자장값이다. 그림 (b)는 주전류 0.1 A, 보조전류 0.0083 A인 three current 방법에 의한 계산값이며, (b')은 측정한 값을 나타낸다. 계산값과 측정값은 솔레노이드 중심으로부터 ±5 cm 이내에서 0.1% 이내로 일치하였다.

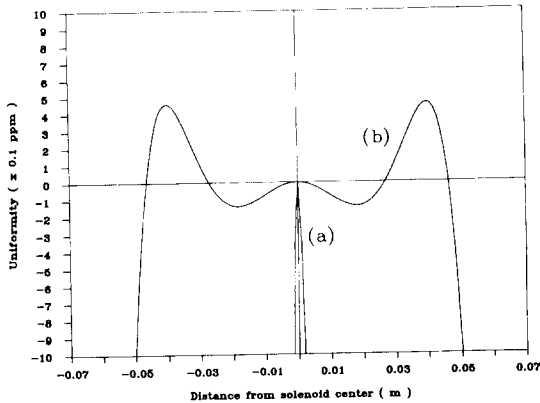


Fig. 3. Uniformity of z-component magnetic field along the axis of solenoid by (a) single current and (b) three-current methods.

IV. 저자장 측정장비의 특성측정

저자장 측정기의 특성을 정특성(DC)과 동특성(AC)으로 구분할 수 있는데 정특성으로는 선형도, 영점의 안정도, 온도의존성 및 remanence 효과 등이 있고 동특성으로는 측정 가능한 교류자장범위 (bandwidth), 측정기의 응답감도를 나타내는 delay time, rise time, settling time, slew rate 및 위상변화 등이 있다. 정특성을 측정하기 위한 저자장 표준시스템의 구성은 저자장이 상쇄된 대형 3-축 헬륨홀츠 코일의 내부에 솔레노이드를 저자장 성분의 크기가 작은 E-W 방향으로 설치하고, 컴퓨터에 의해 제어되는 전류공급장치를 사용하여 솔레노이드에 주전류 및 보조전류를 주입하여 정밀자장을 발생시켰다. 구성된 저자장 표준시스템은 그림 5와 같으며, 이 시스템을 이용하여 상용의 저자장 측정용 Hall 효과 가우스 미터(Mishima HM-101)와 fluxgate 마그네토미터(Bartington MAG-01H)의 특성을 측정하였다. 이들 장비의 선형도는 모두 0.1% 이상으로 사양서의 성능과 유사하였으며, 측정 실험실에서 저자장 표준시스템의 분해능이 100 nT 정도이기 때문에 교정범위가 1×10^{-5} T 이상의 경우 1% 이상의 정확도로 저자장 측정기를 교

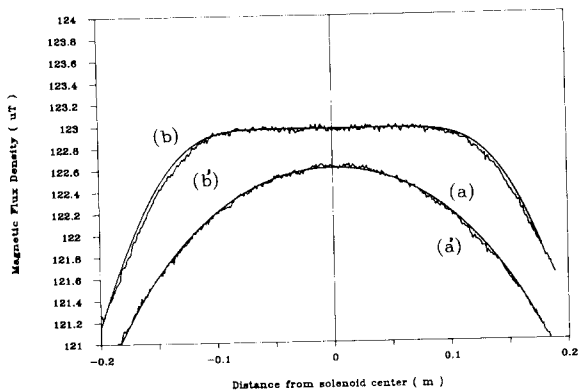


Fig. 4. Comparison between the measured and calculated fields in the solenoid (a) by single current, (b) by three current calculations and (a') by single current, (b') by three current measurements.

정할수 있다.

마그네토미터의 동특성을 측정하기 위한 교류자장발생 장치로는 저자장 표준솔레노이드와 교류전력공급장치를 사용하였다. 저자장 표준솔레노이드는 30 mH의 큰 인덕

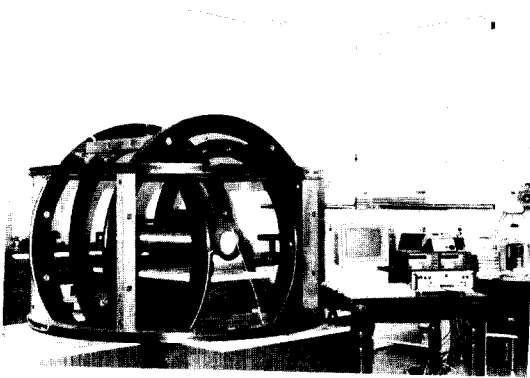


Fig. 5. General view of a low magnetic field standard system.

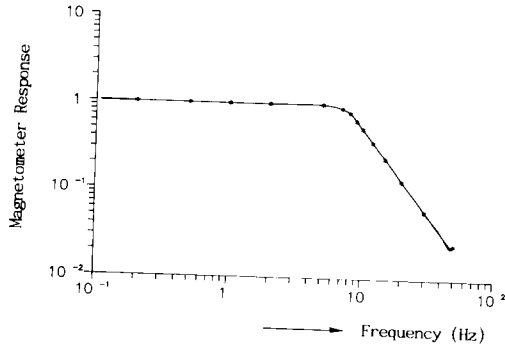


Fig. 6. Frequency response of the fluxgate magnetometer(Bartington MAG-01H).

턴스를 가져 self inductance에 의한 유도전압 때문에 주파수 100 Hz 이상의 정확한 교류자장을 발생시키는 것이 어렵다. 그러나 대부분의 fluxgate 마그네토미터의 경우 교류자장 측정범위가 100 Hz 이하이므로 저자장 표준시스템을 이용하여 마그네토미터의 동특성을 측정할 수 있다. 솔레노이드에서 발생하는 자장은 shunt 저항(1 ohm) 양단의 전압을 transient recorder(Nicolet 4570)의 CH₁에 입력하고, 마그네토미터의 응답은 마그네토미터의 출력전압을 CH₂로 입력한 다음, 컴퓨터(HP 9826)를 사용하여 동특성을 계산하였다.

Bandwidth 측정은 shunt 저항 양단에 발생된 전압의 rms 값 V_H 와 마그네토미터 출력전압의 rms값 V_M 을 측정하고 주파수에 따른 두값의 비(V_M/V_H)를 계산하여 Bode diagram을 그린후 -3 dB되는 주파수를 구하였다. 그림 6은 fluxgate 마그네토미터 (Bartington MAG-01H)의 주파수 특성을 측정한것으로 bandwidth가 10 Hz 이었다.

마그네토미터의 주파수 응답에 대한 위상각의 차이는 power factor를 구하는 방법으로 다음식과 같이 계산하였다.

$$\phi = \cos^{-1} \left[\frac{1}{V_M V_H} \frac{1}{T} \int_0^T V_m V_h dt \right] \quad (3)$$

여기서 V_h 는 솔레노이드에 의해서 발생하는 자장($V_{h0} \sin \omega t$), V_m 은 마그네토미터 출력 ($V_{m0} \sin(\omega t + \phi)$)을 각각 나타낸다.

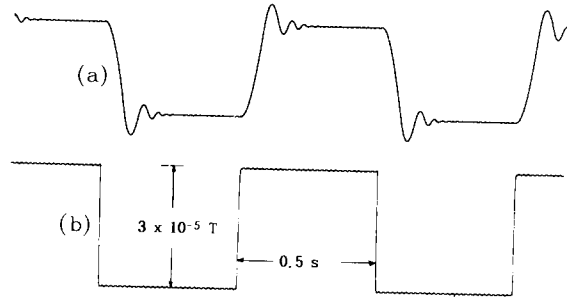


Fig. 7. Magnetometer response for the square wave field to measure the dynamic properties of low field magnetometer.

Delay time, rise time, settling time 및 slew rate는 저자장 표준시스템의 bandwidth 이내에서 사각파의 자장을 발생시키고, 마그네토미터의 응답을 측정하여 계산하였다. 저자장측정기의 동특성 측정장치를 이용하여 fluxgate 마그네토미터 (Bartington MAG-01H)의 응답을 측정한 결과가 그림 7에 나타났다. 그림 7-(a)는 마그네토미터의 응답 파형을 나타내고, 그림 7-(b)는 솔레노이드로 발생시킨 자장파형이다. 이 마그네토미터의 동특성 측정결과는 rise time 50 ms, delay time 54 ms, settling time은 145 ms로 측정되었다.

V. 결 론

저자장 표준시스템을 구성하여 일반적인 측정실험실내에서 특성을 분석한 결과 헬름홀츠코일을 이용한 저자장 상쇄시스템은 안정도가 2 nT/h, ± 5 cm 범위에서 10 nT의 균일도로 저자장을 상쇄시킬 수 있었으며, 솔레노이드를 사용한 저자장 발생시스템은 single current 방법의 경우 코일상수가 1.226×10^{-3} T/A, 자장의 균일도가 ± 5 cm 범위에서 0.1%, three-current 방법은 코일상수가 1.2296×10^{-3} T/A, 균일도가 ± 5 cm 범위에서 100ppm의 표준자장을 생성시킬 수 있었다. 완성된 저자장 표준시스템을 이용하여 1 mT 이하의 자장영역에서 100 nT의 분해능으로 최대 100ppm의 정밀도로 저자장 측정장비를 교정할 수 있다. 또한 마그네토미터의 특성검사를 할 수 있으며, DC-100 Hz 범위에서의 동특성 측정도 가능하도록 하였다.

참 고 문 헌

- [1] Chest Snow and R. L. Driscoll, J. NBS., **69C**, 49 (1965).
- [2] K. Wayand, Archive fur Elektrotechnik, **69**, 287 (1986).
- [3] M. W. Garrett, J. Appl. Phys., **22**, 1091(1951).
- [4] K. Kaminishi and S. Nawata, Rev. Sci. Instrum., **52**, 447(1981).
- [5] M. E. Gardner, J. A. Jungerman, P. G. Lichtenstein, and C. G. Patten, Rev. Sci. Instrum., **31**, 929(1960).
- [6] R. L. Driscoll and P. T. Oslen, Rev. Sci. Instrum., **42**, 1427(1987).
- [7] H. Sasaki, N. Kasai, and H. Nakamura, Trans. I. E. E. of Jpn., **105**, 132(1985).
- [8] P. G. Park, C. G. Kim and C. S. Kim, Appl. Phys. Kor., **3**(4), 572(1990).
- [9] 김창석 등저., 저자장 표준시스템 제작, KRISS-92-010-IR(1992).

Construction of a Low Magnetic Field Standard System Using a Precision Solenoid

P. G. Park, D. Son, B. C. Woo, and C. S. Kim

Magnetics Laboratory, Korea Research Institute of Standards and Science,

P. O. Box 3, Taedok Science Town, Taejeon 305-606

(Received 12 April 1992)

The low magnetic field standard below 1 mT with resolution of 100 nT has been established for the calibration and testing of low field magnetometers. A precision single layered solenoid, which is made of quartz tube and bare copper wire, was constructed in order to generate a precise magnetic field. To improve the field homogeneity in the solenoid, three-current method was employed. The injected current and injection points on the solenoid were optimized by computer simulation. The magnetic field uncertainty in the solenoid was 0.1% and 0.01% in the range of ± 5 cm from the center for a single and three-current methods respectively. We also constructed a testing system for the dynamic properties of low field magnetometers.