

단전류-다층 솔레노이드 방법을 사용한 저자장 표준시스템 제작

박포규 · 김영균

한국표준과학연구원, 대전 유성구 유성우체국 사서함 102, 305-606

V. Ya. Shifrin · V. N. Khorev

D. I. Mendeleev Institute for Metrology(VNIIM), 198005, St. Petersburg, Russia

(2000년 12월 1일 받음, 2000년 12월 28일 최종 수정본 받음)

저자장 영역(1 mT 이하)에서 국가 표준시스템을 분해능 0.26 nT 수준으로 확립하였다. 비자성 재료로 건축하여 자성체에 의한 영향을 배제할 수 있는 비자성동에서 세습 광펌핑 마그네토미터, 3-축 헬름홀츠 코일 등을 이용하여 자동적으로 저자장을 상쇄시키는 장치를 만들었다. 그 특성은 대역폭 10 Hz에서 0.1 nT/10 min이었다. 저자장이 상쇄된 공간에 최적 설계한 단전류-다층 솔레노이드(길이 1.02 m, 평균반경 0.11467 m, 단위길이당 권선수 1000 turns/m)를 설치하고, 솔레노이드에 정밀 전류를 흘려 자장을 발생시키는 방법을 사용하여 저자장 표준시스템의 성능을 향상시켰다. 솔레노이드 중심에서 자장의 안정도는 ± 1 cm 범위에서 1.0×10^{-7} T이었다. 헬름 광펌핑 마그네토미터를 이용하여 측정된 솔레노이드의 코일상수는 1.231 058 9 mT/A이고, 온도계수는 0.38 nT/°C이었다. 저자장 표준시스템은 저자장 측정기의 교정 및 저자장관련 시험검사 등에 사용된다.

I. 서 론

저자장(1 mT 이하)의 정밀 측정 및 발생과 관련된 기술은 지구물리학, 지질학, 항공우주학, 생체·의료공학, 고화질 칼라모니터, 전파방해 예측 등의 첨단산업뿐만 아니라 각종 전자 및 군수산업 등에 널리 이용되고 있다. 예를 들면 저자장이인 지자장(Earth's magnetic field, EMF)의 변화량을 정밀 측정함으로써 다음과 같은 여러 분야에 응용될 수 있다[1].

저자장은 지구 내부와 직접 관련되어 있으므로, 저자장의 시간적, 공간적 변화는, 그것 자체가 지구내부의 시간적, 공간적 변화를 반영하고 있다. 그러므로 저자장 관측 자료는 지질학적(심부 지질 구조 파악), 지구물리학적(지진, 화산 분출의 예측) 연구에 이용될 수 있다. 항공 저자장 측정, 지상에서의 정밀 저자장 측정 등은 저자장이 지하 구조 혹은 광물체의 존재에 의해서 왜곡되는 현상을 측정함으로써 지하자원을 탐사할 수 있다. 태양면의 폭발 등에 의해서 지구를 감싸고 있는 전리층이 교란되면 통신장애가 일어나는데 이것은 저자장의 교란과 밀접한 관계가 있다. 저자장을 연속적으로 관측하여, 이 변화량을 크기를 지수로 발표함으로써, 통신 장애를 예보하기 위한 전파정보에 사용될 수 있다. 저자장 관측 자료는 군사정보로서도 이용될 수 있다. 곡사포 사격시 사격지점에 관한 정확한 저자장의 방향정보가 있으면, 폭탄을 목표물에 가까이 보

낼 수 있고, 좁은 해협에 여러 군데의 저자장 관측점을 융합함으로써 잠수함의 통과 등을 포착할 수 있다. 인공위성이 위치한 우주공간에도 저자장이 미치고 있다. 위성의 자세제어는 그 공간에 존재하는 저자장의 방향을 근거로 하므로, 그 공간에서의 저자장을 정확히 측정할 수 있어야 한다. 인공위성의 3-축에 조그마한 전자석을 설치하고, 이 전자석들과 저자장 사이의 인력, 척력을 계산하여 위성의 자세를 제어할 수 있다.

정밀 저자장 측정 기술은 또한 사람의 심장, 뇌, 척수, 위 등으로부터 발생하는 자기신호인 생체자기장(biomagnetic fields)을 측정하여 질병 등의 진단에 이용될 수 있다. 정밀 저자장 측정기(SQUID 등)를 이용하여 측정된 생체자기장으로부터의 진단은 비접촉, 비파괴적이면서 우수한 시간 및 공간분해능을 바탕으로 뇌 또는 심장의 내부에서 일어나는 활동전류의 미세한 변화를 정밀하게 측정할 수 있기 때문에 뇌(심장) 기능연구 및 기능적 질환진단에 중요하게 사용될 수 있는 차세대 의료진단기술이다[2].

저자장 기술의 산업적 응용은 칼라모니터(CRT 방법)의 화질 조절에 사용된다. 텔레비전 및 컴퓨터에 주로 사용되는 칼라모니터는 수출국의 저자장 크기에 따라 색상이 변할 수 있으므로 깨끗한 화면을 유지하기 위해서는 저자장의 크기에 따라 색상을 보정하는데 정밀 저자장 발생 및 측정 장치를 사용하여 수출대상국의 저자장과 동일한 환

경을 만들어 모니터의 품질검사를 수행하고 있다. 특히 우리나라의 경우 칼라모니터의 생산능력은 세계 2위권 이내이며, 특히 인도, 베트남 등에 설립된 국내투자회사들이 우리나라에서 측정기를 교정하고 있다.

본 연구에서는 국내 유일의 비자성 실험동[3]을 활용하여 국가 저자장 표준 시스템의 성능을 향상시켜 저자장 표준을 국제적인 수준으로 확립하여 국내 관련연구소(인공위성의 자세제어 및 저자장 측정 센서 등) 및 산업체(칼라 모니터, 자석 생산업체 등) 등에 사용되는 정밀 저자장 측정 장비의 교정(연 100여대의 장비를 교정지원) 능력 향상 및 국제적 상호인증 기반기술 확립을 위하여 수행하였다.

II. 저자장 상쇄 시스템

2.1. 저자장 상쇄

저자장의 세기와 방향은 일정한 것이 아니라 지구 내·외적인 원인에 의하여 변한다. 지구상의 한 점에서 저자장을 측정하면 규칙적으로 변화하는 것을 볼 수 있는데 이것을 저자장의 일변화라고 하며, 시간에 따라 편각(declination)과 북각(inclination)이 변화하는 것을 저자장의 영년변화라고 한다. 일변화는 태양풍 등이 없는 정상적인 날의 경우 약 100 nT/day이며, 영년변화는 과거 4세기 동안 편각은 약 30°, 북각은 20° 정도 이동하였다. 저자장의 일변화의 주요 원인은 지구 대기 전리권에서의 유도전류에 의해서 발생하는 자장이 지구자장에 더해짐으로서 일어나는 현상이다. 전리권의 대기는 자유전자를 많이 포함하고 있기 때문에 전기 전도율이 매우 크다. 이러한 대기가 저자장내에서 운동하게 되면 유도전류가 발생한다. 전리권 대기의 전자밀도는 주간에는 태양광선을 받아 증가하고 야간에는 감소한다. 이와 같은 전리권의 변화는 지구 자장의 일변화를 발생시킨다. 그러나 태양풍 등으로 인하여 저자장의 이변이 생겨 혼란이 일어나는 경우에는 일변

화의 세기가 불규칙적이다. 따라서 일변화는 저자장이 조용한 날의 변화를 나타내며, 그 변화량은 야간에는 적고, 정오를 중심으로 주간에는 크다. 또한 위도가 같은 지점에서는 일변화의 형태나 크기가 같고, 측정 장소의 지방시에 따라 변한다.

지구자장은 사람이 직접 느낄 수 없기 때문에 일반인의 관심을 별로 끌지 못한다. 그러나 저자장은 지구의 중요한 특성의 하나로서, 태양으로부터 지구 내부에 이르는 넓은 범위의 환경에 관계되어 있고, 여러 가지 분야에 이용될 수 있으므로 국내에서도 연속적으로 저자장의 변화량을 측정하여 공개하고 있다[4].

지구자장과 같은 외부자장의 변화량을 감소시켜 무자장 공간을 형성하는 방법으로는 고투자율 자성재료를 이용하여 자기차폐(magnetic shielding) 시키는 방법[5, 6]과 외부 자장의 변화량을 측정하여 크기가 같고, 방향이 반대인 자장을 인가하여 자장을 상쇄(magnetic field compensation) 시키는 방법[7, 8] 등이 있다. 자기차폐 방법은 내부공간에 정밀자장을 발생시키는 경우에는 발생자장과 고투자율 자성재료간의 상호작용에 의해 발생자장이 교란되므로 적합하지 않다. 무자장 공간에서 정밀 저자장을 발생하여야 하기 때문에 목적에 적합한 것은 자장상쇄 방법이다.

본 연구에서는 세습원자 자기공명, 위상비교기(phase comparator), 두 쌍의 3-축 헬름홀츠 코일 및 비자성동을 활용한 자장 상쇄방법을 사용하여 저자장을 상쇄시켰다[9].

2.2. 저자장 상쇄용 헬름홀츠 코일

저자장의 성분은 시간에 따라 변하지 않는 직류분과 변화는 일변화 등으로 나눌 수 있다. 따라서 지구자장을 상쇄하기 위해서는 직류성분 및 일변화량을 동시에 상쇄시켜야 한다. 각각의 헬름홀츠 코일은 직류 및 일변화성분을 동시에 상쇄시킬 수 있는 구조 즉 직류와 일변화성분을 상쇄시키는 코일이 같은 헬름홀츠 코일 틀에 감겨있다. 또한

Table I. Characteristics of Helmholtz coils for Earth magnetic field compensation

		Helmholtz coil for dc EMF			Helmholtz coil for time varying EMF	
type	direction	effective diameter (cm)	coil turns (turn)	coil constant (nT/mA)	coil turns (turn)	coil constant (nT/mA)
Large	Vertical	196	180	161.3	-	-
	E-W	174	184	184.2	36	36.53
	N-S	150	180	217.4	-	-
Small	Vertical	98	94	161.3	-	-
	E-W	86	90	184.2	18	36.53
	N-S	74	92	217.4	-	-

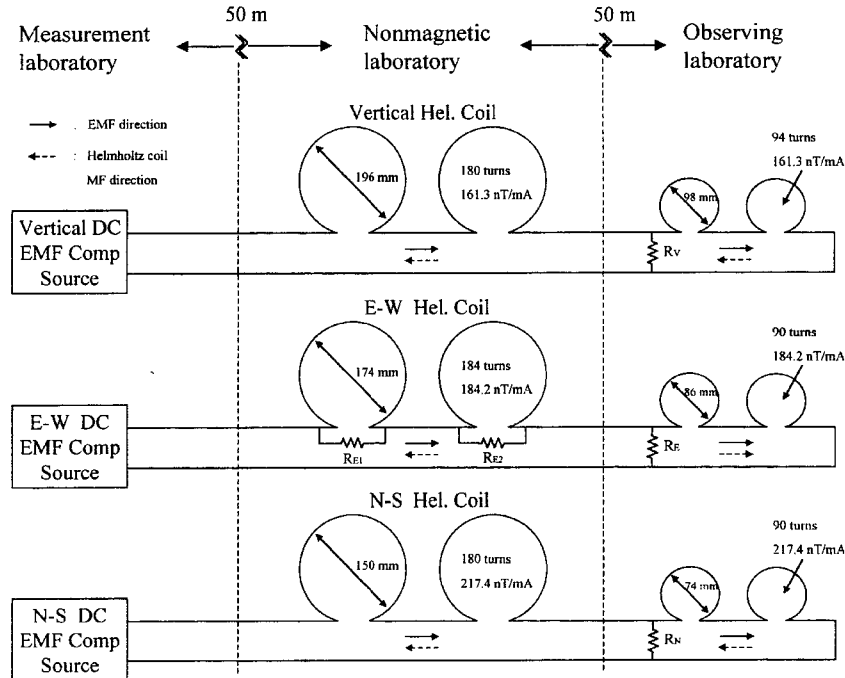


Fig. 1. Schematic diagram of the DC EMF compensation system.

비자성실에 설치된 대형 3-축 헬름홀츠 코일과 관측실의 소형 3-축 헬름홀츠 코일의 크기는 다르지만 코일상수는 동일하고, 서로 직렬로 연결되어 있으므로, 동시에 두 곳의 지자장을 상쇄시킬 수 있는 구조로 되어있다. Table I 는 대, 소형 헬름홀츠 코일의 특성을 나타낸다.

직류성분의 지자장 상쇄방법은 Fig. 1과 같이 측정실에 설치된 3개의 직류전원용을 사용하여 각방향의 헬름홀츠 코일에 지자장과 크기가 같고, 방향이 반대인 자장을 발생 시키면 코일의 내부 중심부에는 지자장이 상쇄된 공간을 만들 수 있다. 비자성동에는 대형 3-축 헬름홀츠 코일 장치 수직(Vertical), 남북(N-S), 동서(E-W) 방향으로 설치하고, 이 건물에서 남쪽으로 50 m 떨어진 지점에 있는 관측실에 설치된 소형 헬름홀츠 코일과 각각의 방향이 일치되게 조정하고, 직렬로 연결한다. 수직성분을 상쇄시키는 두 헬름홀츠 코일간의 코일상수를 일치시키기 위해 분류저항(R_v), E-W 방향에는 분류저항 R_{E1} , N-S 방향에는 R_N 을 사용하였다. 또한 E-W 방향은 정밀 자장발생기인 솔레노이드와 같은 방향이므로 헬름홀츠 코일 중심부 공간에서 균일도를 향상시키고, 대형 헬름홀츠 코일간의 코일상수를 일치시키기 위하여 분류저항 R_{E1} , R_{E2} 를 사용하였다. 비자성동에 설치된 E-W 방향의 대형 헬름홀츠 코일에 의해 발생하는 자장과 지자장이 크기는 같고 반대방향

이므로, 서로 상쇄되지만 관측실에 설치된 소형 헬름홀츠 코일의 E-W 방향은 헬름홀츠 코일에서 발생된 자장과 지자장이 같은 방향으로 발생, 즉 E-W 방향 지자장의 2배에 해당하는 자장이 발생하도록 연결되어 있다. 그 이유는 지자장의 일변화량을 측정하여 상쇄시키기 위해 세습 자기공명 자장측정기의 측정감도를 향상시키기 위함이다.

지자장 일변화의 상쇄방법은 Fig. 2에서와 같이 세습 자기공명 자장측정기를 사용하여 지자장 변화량에 비례하는 주파수를 측정하고, 처음 설정한 기준주파수와 비교하여 그 주파수 차이(자장차이)에 해당하는 전류를 위상비교기(phase comparator)를 이용하여 발생시킨다. 이것을 동서(E-W) 방향의 헬름홀츠 코일에 지자장과 반대로 인가함으로써 상쇄시킨다. 즉 관측실의 소형 3-축 헬름홀츠 코일 내부에 설치된 세습 자기공명 자장측정기를 이용하여 지자장의 직류 및 일변화량을 측정(직류 E-W 지자장성분은 측정감도를 향상시키기 위해 관측실의 E-W 방향의 헬름홀츠 코일에 의해 발생하는 자장과 더해짐, 약 $20.7 \mu T$, 세습공명 주파수로 계산하면 약 72.5 kHz)하여 직류분을 제외한 일변화량(측정주파수- 72.5 kHz , 약 350 Hz/day 이며, 자장크기로 환산하면 100 nT/day 정도)에 비례하는 세습공명주파수(3.5 Hz/nT)를 측정하여, 그 차이를 위상비교기에 입력하여 일변화량에 비례하는 자장을 발생시켜 지

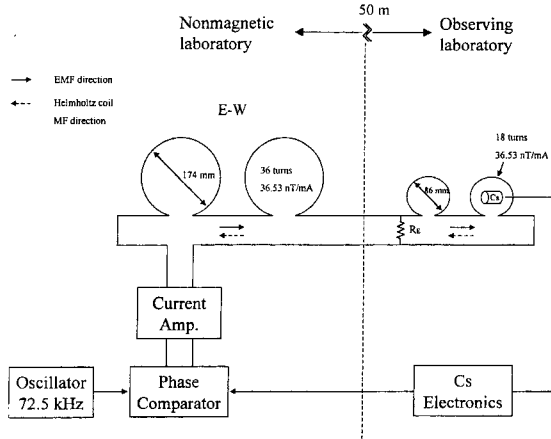


Fig. 2. Schematic diagram of time varying EMF compensation system.

자장 상쇄용 헬름홀츠 코일에 지자장과 역방향으로 되먹임시켜 상쇄시켰다. 분류저항 R_E 는 일변화 상쇄용 대소형 헬름홀츠의 코일상수를 일치시키기 위해 사용하였다. KRISS의 저자장 발생장치인 정밀 솔레노이드는 동서 방향으로 설치되어 있으므로 수직 및 남북 방향의 일변화성분이 솔레노이드에 의해 발생하는 자장에 미치는 영향이 미소하므로 동서 방향의 지자장 성분만을 상쇄하였다[10].

2.3. 지자장의 일변화량 상쇄 결과

Fig. 3은 세슈 마그네토미터, 헬름홀츠 코일, 위상비교기 등을 사용하여 지자장의 일변화량을 상쇄시킨 결과를 나타낸다. 그림에서 1시간 동안 지자장의 일변화량이 약 19 nT인 반면, 지자장 상쇄장치를 사용하여 0.1 nT 이하로 감소시킨 것을 보여준다.

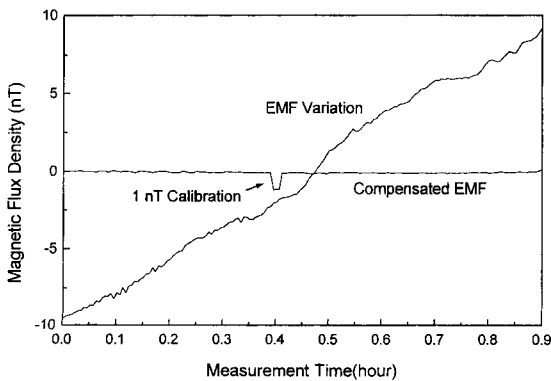


Fig. 3. Time varying EMF variation and compensation for 1 hour.

III. 정밀 자장발생 시스템

3.1. 솔레노이드의 자장계산

솔레노이드는 자기분야에서 다양하게 사용되고 있으며, 사용목적에 따라 여러가지 형태로 만들 수 있다. 즉 자장 균일도, 균일한 자장발생공간 등의 필요에 따라, 적절한 크기의 솔레노이드 치수(길이, 반경, 피치)의 선택과 아울러 기계적인 정밀 가공이 필요하다. 자장균일도는 솔레노이드의 길이를 증가하면 향상되지만, 실제 사용에 있어서는 실험조건이나 경제적인 문제 등의 제약이 따른다. 또한 솔레노이드 중심에서 대칭인 양끝 부분에 단위 길이당 권선수를 늘리거나[11], 다층 코일을 설치하는 방법이 있지만, 피치의 불균일성, 중심축의 불일치 등으로 인하여 높은 균일도를 얻기가 어렵다. 이러한 단점을 보완하는 방법으로 균일하게 감긴 단층 솔레노이드에 여러 개의 보조전류를 인가하여, 그 분포를 계산에 의해 최적화시키면 중심부의 넓은 공간에서 균일한 자장을 발생시킬 수 있다[12-14].

본 연구에서는 다층 단전류 솔레노이드를 이용하여 단층 다전류 효과를 얻을 수 있는 솔레노이드를 Legendre 다항식을 이용하여 계산하였으며, 헬름 마그네토미터를 이용하여 균일도를 측정하여 전류의 크기 및 보조 권선의 위치를 조정하였고, 코일상수 및 온도계수 등을 측정하였다.

솔레노이드는 원통형 보빈위에 나선형으로 코일을 감고, 전류를 흘려서 자장을 발생시키는 것을 일컫는데, 내부의 중심축상에서 자장계산은 쉽지만, 내부의 공간에서 자장 분포를 계산하기는 어렵다. 솔레노이드 코일은 일정한 단면적을 가진 나선형이지만 임의의 점에서 자장을 계산할 때는 일반적으로 전류분포가 균일한 시트로 하여 계산하는 것이 편리하다. Legendre 다항식 또는 타원함수를 사용하여 솔레노이드 내부공간에서 자장을 계산하는데[13-15], Legendre 다항식을 사용하는 것이 수렴속도가 빠른 잇점이 있다. Fig. 4에서 솔레노이드 중심에서 대각선 길이를 c , 그 각도를 α , 전류를 I , 단위면적당 권선수를 n

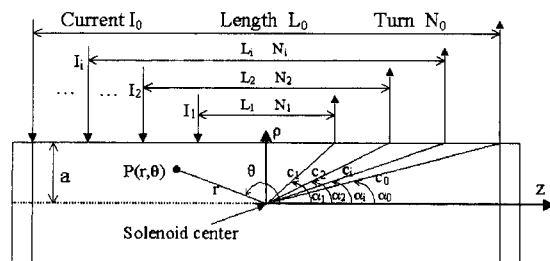


Fig. 4. Schematic diagram of solenoid.

이라고 하면 Legendre 다항식을 사용하여 식 (1)과 같이 솔레노이드의 내부공간의 임의의 점 P(r, θ)에서 발생하는 자장을 계산할 수 있다. 여러개의 솔레노이드에 의한 총

$$B_z^{tot} = \mu_0 n \left[\sum_{i=0}^f I_i \cos \alpha_i - \sum_{i=0}^f A_i I_i \frac{r^2}{2} P_2(\cos \theta) - \sum_{i=0}^f B_i I_i \frac{r^4}{4} P_4(\cos \theta) + \dots \right]$$

where $A_i = \left(\frac{\sin \alpha_i}{c_i} \right)^2 P_2'(\cos \alpha_i)$, $B_i = \left(\frac{\sin \alpha_i}{c_i} \right)^2 P_4'(\cos \alpha_i)$, C_i, \dots (1)

발생 자장은 주솔레노이드와 보조솔레노이드의 위치(L_i)와 권선수(N_i) 및 전류(I_i)에 의한 자장의 합으로 주어진다. 식 (1)의 Legendre 다항식에서 균일자장을 발생시키는 최적조건은 주솔레노이드 위에 덧붙일 솔레노이드의 위치(L_i)와 권선수(N_i) 및 전류(I_i)를 포함한 식 (1)의 A항 및 B항이 "0"이 되는 조건, 즉 불균일도를 만드는 A, B항을 제거하면 된다.

3.2. 솔레노이드 설계제작 및 자장균일도 측정

식 (1)을 사용하여 계산한 조건들을 적용하여 Fig. 5와 같이 주솔레노이드(R_{ms})외에 2개의 보조 솔레노이드(R_{1s} , R_{2s})를 병렬로 연결하고, 보조전류(I_1 , I_2)의 크기는 식(2) 및 (3)을 사용하여 조절한 솔레노이드를 설계하였다. 설계한 솔레노이드를 헬륨 마그네토미터를 사용하여 솔레노이드 중심부에서 최대의 균일도를 얻기 위해 보조전류의 간격 및 보조전류의 크기를 재조정하였다. 식 (1)을 사용한 설계방법은 이상적인 솔레노이드(피치 및 반경이 일정로 가정하고 계산하였으므로 실제와는 약간의 차이가 생길 수 있기 때문이다. Fig. 6은 솔레노이드의 중심공간에서 자장균일도를 헬륨 마그네토미터를 사용하여 측정된 결과를 나타낸다. 헬륨 마그네토미터를 사용하여 솔레노이드 중심에서 저자장 표준시스템의 코일상수를 측정된 결과는 1.231 058 9 mT/A이고, 온도계수는 0.38 nT/°C 이었다.

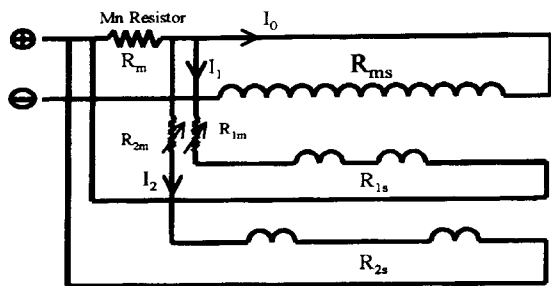


Fig. 5. Block diagram of single-current and multi-layer solenoid.

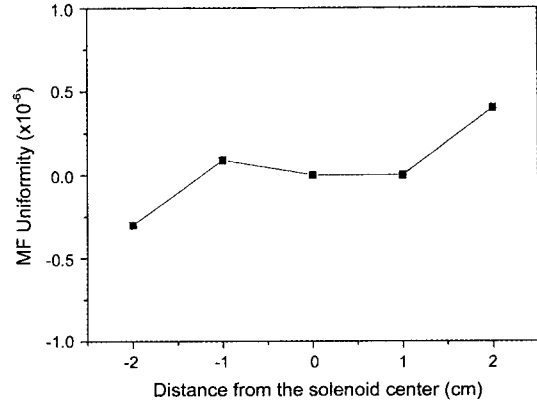


Fig. 6. Uniformity of magnetic field along axis in solenoid.

$$I_1 = \left(\frac{\frac{R_m \cdot (R_{2m} + R_{2s})}{R_m + (R_{2m} + R_{2s})}}{\frac{R_m \cdot (R_{2m} + R_{2s})}{R_m + (R_{2m} + R_{2s})} + (R_{1m} + R_{1s})} \right) \cdot I_0 \quad (2)$$

$$I_2 = \left(\frac{\frac{R_m \cdot (R_{2m} + R_{2s})}{R_m + (R_{1m} + R_{1s})}}{\frac{R_m \cdot (R_{1m} + R_{1s})}{R_m + (R_{1m} + R_{1s})} + (R_{2m} + R_{2s})} \right) \cdot I_0 \quad (3)$$

VI. 저자장 표준시스템

4.1. 구성

Fig. 7은 저자장 표준시스템의 구성을 나타낸 것이며, 측정실에는 직류 저자장을 상쇄하기 위한 3개의 전류원, 일 변화에 따른 저자장을 상쇄하기 위한 위상비교기 등으로

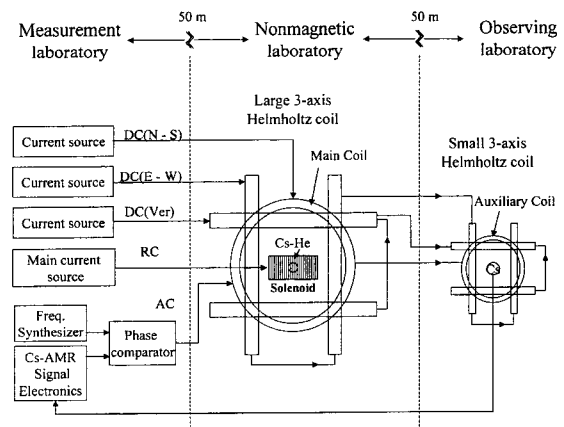


Fig. 7. Schematic diagram of the low magnetic field standard system.

Table II. Uncertainty sources of low magnetic field standard system

순번	불확도 요소	표준불확도
1	EMF compensation	1.0×10^{-7} T
2	Temperature coefficient	1.9×10^{-7} T
3	Nonuniformity of magnetic field	1.0×10^{-7} T
4	Magnetic field stability	1.0×10^{-7} T
5	^4He magnetometer	0.5×10^{-7} T
6	Total (RSS)	2.6×10^{-7} T

구성되어 있다. 비자성실에는 대형 3-축 헬륨홀츠 코일, 관측실에는 소형 3-축 헬륨홀츠 코일과 세습 자기공명 자장 측정기 등으로 구성되어 있다. 지자장이 상쇄된 공간에 정밀 솔레노이드를 설치하고, 전류를 흘려 정밀 저자장을 발생시킬 수 있다. 이러한 장치를 이용하여 정밀 저자장 측정기(Hall effect, Fluxgate 등)의 교정 및 자장센서의 특성 등을 측정할 수 있다.

4.2. 불확도 분석

비자성동에 설치된 저자장 표준시스템의 불확도를 1 mT 범위에서 분석한 결과는 Table II와 같다. 불확도 분석에서 1, 2, 3, 4는 자장발생 능력으로 1, 2는 지구자장 측정실 및 비자성동의 온도 조절이 양호(0.5 °C 이하)할 경우 감소시킬 수 있다(위에서 온도 변화량이 0.5 °C으로 계산). 또한 헬륨 마그네토미터를 이용한 자장측정 능력은 0.05 nT이다.

V. 결 론

안정성과 재현성이 우수한 자기공명 방법을 사용하여 시간에 따른 지자장의 변화량에 비례하는 공명주파수를 측정하였다. 위상 비교기를 제작하여 공명주파수와 기준 주파수의 차이를 검출하고, 그 차이에 해당하는 자장의 크기를 전류로 환산하여 지자장과 반대방향으로 자장이 발생하도록 헬륨홀츠 코일에 흘려주어 실시간으로 지자장을 상쇄시키는 장치를 만들었다. 그 특성은 대역폭 10 Hz에서 0.1 nT/10 min이었다.

단절류 방법을 이용한 다층 정밀자장 발생 솔레노이드를 설계 제작하여 다전류를 인가한 효과[16]를 얻는 정밀 솔레노이드를 제작하였다. 이 방법은 전류원을 1 개만 사용함으로써 여러 개를 사용하는 방법보다 경제적이고, 취급이 용이한 장점이 있다.

지자장이 상쇄된 공간에 자장 발생용 정밀솔레노이드를 설치하고, 솔레노이드에 정밀 전류를 흘려 자장을 발생시키는 방법을 사용하여 저자장 표준시스템의 성능을 향상시켰다. 솔레노이드 중심에서 자장의 안정도는 1 mT 범위에서 1.0×10^{-7} T이었고, 헬륨 마그네토미터를 이용하여 측정한 결과, 솔레노이드의 코일상수는 1.231 058 9 mT/A, 온도계수는 0.38 nT/°C이었다.

1 mT 이하의 저자장 영역에서 국가 표준시스템을 선진국 수준으로 확립하여 국내 관련분야의 기술발전에 기여할 수 있고, 관련산업체 및 연구소 등에서 사용되는 정밀 저자장 측정기(인공위성, 우주항공)의 교정 능력 확보 및 앞으로 있을 저자장분야 국제핵심비교(international key comparison)[17]에 능동적으로 참여할 수 있는 터전을 마련하였다.

참 고 문 헌

- [1] 임무택 외, “지자기와 그의 역할”, 지자기 전국관측망 구축을 위한 연구회 보고서, 과학재단(1996).
- [2] <http://www.kriss.re.kr/biomag>.
- [3] <http://nonmag.kriss.re.kr/>.
- [4] <http://solaradio.rrl.go.kr/>.
- [5] V. O. Kelha, J. M. Pukki, R. S. Peltonen, A. J. Penttinen, R. J. Ilmoniemi, and J. J. Heino, IEEE Trans. Magn., **18**, 260(1970).
- [6] 이용호, 권혁찬, 김진목, 임청무, 이상길, 박용기, 박종철, 한국자기학회지, **6**(4), 264(1996).
- [7] R. L. Driscoll and P. T. Olsen, Rev. Sci. Instrum., **42**(10), 1427(1971).
- [8] H. Sasaki, N. Kasai, and H. Nakamura, Trans. I.E.E. Jpn., **105**, 132(1985).
- [9] 송양섭 등저, “전자기분야 표준유지향상연구”, KRISS/IR-2000-042, pp. 155-168(1999).
- [10] 김창석, 김철기, 우병철, 유권상, 박포규, KSRI-90-59-IR, pp. 15-17(1990).
- [11] M. E. Gadner, J. A. Jungerman, P. G. Lichtenstein and C.G. Patten, Rev. Sci. Instrum. **31**, 929(1960).
- [12] P. G. Park, C. G. Kim, and C. S. Kim, Kor. Appl. Phys., **3**, 572(1990).
- [13] C. G. Kim, K. S. Ryu, B. C. Woo, and C. S. Kim, Kor. Mag. Soc., **2**, 268(1992).
- [14] P. G. Park, C. G. Kim, B. C. Woo, and V. Ya. Shifrin, Ungyong Mulli, **9**(3), 274(1996).
- [15] J. H. Jung, P. G. Park, Y. B. Kim, V. Ya. Shifrin, and V. N. Khorev, J. Kor. Mag. Soc. **9**(5), 227(1999).
- [16] P. G. Park, D. Son, B. C. Woo, and C. S. Kim, J. Kor. Mag. Soc., **2**(2), 150(1992).
- [17] CCEM WGKC Sep00-9 and CCEM WGKC Sep00-12A.

Construction of Low Magnetic Standard System using a Multi-layer Solenoid with Single-current

Po Gyu Park and Young Gyun Kim

Korea reaserch InSTITUTE of Standards and Science(KRISs), P.O.Box 3, Taejon 305-606, Korea

V. Ya. Shifrin and V. N. Khorev

D. I. Mendelejev Institute for Metrology (VNIIM), 198005, St. Petersburg, Russia

(Received 1 December 2000, in final form 28 December 2000)

The magnetic field standard below 1 mT with the resolution of 0.26 nT has been established. Earth magnetic field (EMF) is compensated automatically down to 0.1 nT/10 min. by a closed feedback system with Cs optical pumping magnetometer and 3-axis Helmholtz coils in nonmagnetic facilities. A multi-layer precision solenoid with the optimized single-current method generates the uniform magnetic field better than 1.0×10^{-7} within ± 1 cm region at its center. The coil constant of solenoid determined from Helium optical pumping magnetometer is 1.231 058 9 mT/A, and temperature coefficient is 0.38 nT/°C. This standard system is used for calibration of low field magnetometers and testing relates to low field.