자기 측정표준과 응용

DOI: 10.3938/PhiT.19.030

박 포 규

Magnetic Field Standards and Applications

Po Gyu PARK

A magnetic field standard is constructed from a precisely fabricated single-layer solenoid. Atomic magnetic resonance can be applied to yield a standard method for measuring magnetic fields to high accuracy. Traceability requires knowledge of the values of the gyromagnetic ratio for the proton and ^4He . KRISS maintains low-range and high-range magnetic field standards, which calibrate magnetometers and support tests for sensors and materials in the range from 20 μT to 2.5 T with uncertainties ($k=2$) of 4 to 80 $\mu\text{T}/\text{T}$. KRISS participated in an international key comparison to validate its standards and enable mutual recognition with other metrological institutes.

서 론

자기장은 일상생활에서 널리 사용되고 있음에도 불구하고 사람들의 오감으로 직접 느낄 수 없기 때문에 관심을 별로 끌지 못하고 있다. 우리들이 사용하고 있는 이동전화기, 자동차, 컴퓨터, 모터, 의료기기, 가전제품 등에서 자석이 없으면 정상적으로 동작할 수 없다. 또한 저자기장 영역인 지구자기장(Earth's magnetic field: EMF)은 지구의 중요한 물리적 특성의 하나로서, 태양으로부터 지구 내부에 이르는 넓은 범위의 환경에 관계되어 있고, 방향탐지, 우주환경, 위성 및 국방분야 등에 널리 이용되고 있다.

자기장(magnetic field)은 자속(magnetic flux) 및 자속밀도(magnetic flux density)로 나눌 수 있다. 자속의 단위는

웨버(Wb)인데, 1 Wb는 1 V·s이므로 자속 단위의 측정표준은 전압 및 시간 표준으로부터 유도될 수 있다. 자속밀도의 SI(국제단위계) 단위는 테슬라(T, $\text{T}=\text{Wb}/\text{m}^2$)이고 단위면적당 통과하는 자속의 양을 나타낸다. 일반적으로 자속밀도는 자기장이라고 많이 불리는데, 용어의 혼란을 피하기 위하여 앞으로는 자속밀도를 자기장이라고 표현하기로 한다.

자기장의 표준은 3가지 방법으로 구현할 수 있는데, KRISS에서는 핵자기공명(NMR) 주파수를 측정하여 실현했다.^[1] 즉 자기장(B)은 $\omega_p = \gamma'_p \cdot B$ 에서 핵자기 공명주파수(ω_p) 및 기본물리상수인 차폐 양성자 자기회전비율(γ'_p)의 정확한 값으로부터 재현할 수 있다. 이처럼 물리적 고유현상을 이용하여 SI 및 자기 단위를 정의하고 유지하는 것은 시간과 장소에 구애됨 없이 측정값의 재현이 가능하기 때문이다.

이 글에서는 자기장 발생 및 측정 방법, 한국표준과학연구원에서 유지하고 있는 국가 자기장표준, 국제적 상호인증을 위한 국제비교, 자기장의 응용 등에 대해 살펴보기로 한다.^[2,3]

정밀 자기장 발생 및 측정 방법

자기장 표준을 위해서는 정밀한 자기장을 발생시키는 것이 중요하다. 균일하고 안정된 자기장을 발생시키기 위하여 생성 범위에 따라 솔레노이드, 헬름홀츠 코일, 전자석 등이 사용될 수 있다. 솔레노이드로 자기장을 발생시킬 경우 크기와 권선수에 따라 약간의 차이는 있지만 코일의 열 때문에 솔레노이드의 길이가 변하여 균일한 자기장을 유지하기가 힘들다. 헬름홀츠 코일은 솔레노이드보다 균일도는 떨어지지만 약간 높은 자기장을 발생시킬 수 있고, 넓은 공간을 확보할 수 있으며, 횡(flat), 종(axial)형의 자기장 센서를 교정하는데 유용한 장점이 있다. 전자석의 경우는 자기장을 집속시키는 고투자율

저자약력

박포규 박사는 All-Russian Research Institute of Metrology 박사(2001)로서, 1988년부터 현재까지 한국표준과학연구원 전자기센터에서 자기 표준기, 자기 정밀측정 및 응용과 관련된 연구를 하고 있다.
(pgpark@kriss.re.kr)

REFERENCES

- [1] B. N. Taylor and P. J. Mohr, IEEE. Trans. Instrum. Meas. **50**, 563 (2001).
- [2] Po Gyu Park *et al.*, IEEE Trans. Instrum. Meas. **54**, 734 (2005).
- [3] Po Gyu Park *et al.*, World of Electricity **58**(18), KIEE (2009).

Fig. 1. Structure (a) and uniformity (b) in multi-current solenoid with single layer.

의 코어를 사용하여 폐자로를 구성하고 코일 중심에 물을 흘려 냉각시키면 많은 전류를 흘릴 수 있기 때문에 고자기장으로 사용된다.

솔레노이드는 전기적으로 절연체이고 자기적으로는 비자성인 원통형 관에 동선을 감아서 만든다. 정밀한 자기장을 생성하기 위해서 균일하게 코일을 감는 것과 솔레노이드 보빈의 자화율 및 온도 특성이 중요하다. 따라서 이러한 특성을 가진 석영관을 이용하여 피치 및 지름을 정밀하게 가공 제작하여 사용한다. 솔레노이드 중심부에서 균일한 자기장을 얻기 위해서는 솔레노이드 양 끝부분의 권선수를 늘리는 방법과 단층 솔레노이드에 여러 개의 전류를 흘려주는 multi-current 방법이 있다. Multi-current 방법의 경우, 주 전류원과 보조 전류원의 전류비, 중심에서 보조 전류원까지의 거리, 그리고 보조전류를 흘려주는 폭 등을 최적화하여 균일한 자기장을 발생시킨다.^[4]

그림 1은 단층 솔레노이드에 여러 개의 전류를 인가하는 방법과 그 자기장 균일도를 비교한 것이다. 여기서 전류비와 보조전류의 인가하는 폭 등은 Legendre polynomial을 이용하여 최적화한 다음 계산한 것이다. 그림 1(b)에서 주전류만

Table 1. Magnetic resonance frequency in samples.

	Samples	Ratio of resonance frequency to magnetic field	Methods
1	H ₂ O	0.042 576	NMR, Liquid
2	³ He	0.032 434	NMR, Vapor, Optical pumping
3	¹³³ Cs	3.502 976	AMR, Vapor, Optical pumping
4	⁴ He	28.023 811	AMR, Vapor, Optical pumping

인가한 그림(I₁)과 주전류 외에 4개의 보조전류를 인가한 5-전류 방법(I₁₋₅)과 균일도 차이는 큼을 알 수 있다. 이러한 5-전류 방법을 사용할 경우 같은 치수(예를 들면 길이 1 m, 지름 25 cm인 경우) 솔레노이드에서 단전류를 사용한 솔레노이드의 길이가 약 1 km에서 얻을 수 있는 균일도를 솔레노이드 내부 중심공간에서 얻을 수 있다.

자기장 측정 방법으로 가장 널리 사용되는 것이 홀 효과(Hall effect)이며, 그 외 저자기장 영역에서는 fluxgate, 물리적 고유 현상을 이용한 핵자기공명(Nuclear Magnetic Resonance, NMR), 원자자기공명(Atomic magnetic resonance, AMR) 등이 있다. 대부분 표준측정기로 사용되는 것은 NMR 및 AMR 원리를 이용한다. 광펌핑을 이용한 AMR에 대해 알아보자.

광펌핑(optical pumping)을 이용한 자기장 측정의 원리는 빛을 이용하여 원자들을 원하는 에너지 준위로 모은 다음, 그 에너지 차이에 해당하는 전자기파를 인가하여 자기공명(magnetic resonance)을 만들어 공명주파수를 측정하고, 그에 비례하는 자기장을 계산하는 방법이다. 광펌핑으로 이용되는 물질로는 주로 최외각 전자가 1개인 나트륨(Na²³), 포타슘(K³⁹, K⁴¹), 루비듐(Rb⁸⁵, Rb⁸⁷), 세슘(Cs¹³³) 등의 알칼리금속 및 ³He, ⁴He 등의 원소를 저압 기체상태로 만들어 사용한다. 표 1은 사용된 물질에 따른 공명주파수의 크기를 나타낸다. 세슘보다 헬륨-4의 공명주파수가 8배 높다.^[5]

광펌핑 방법은 liquid NMR 방법보다 공명 효율이 백만 배 정도 높기 때문에 공명신호를 탐지하기가 쉬운 장점이 있다. 그러나 알칼리 금속을 사용한 자기장 측정기는 자기장과 공명주파수가 선형적이지 않기 때문에 표준기로 사용하기는 적합하지 않다.^[6]

세슘의 자기공명을 측정하면 0.3 mT를 기준으로 그 이하에서는 Zeeman 자기 부준위들 간의 에너지가 자기장의 에너지

REFERENCES

- [4] Po Gyu Park *et al.*, MAPAN **24**(1), 9 (2009).
- [5] Po Gyu Park, MS. Theses, Hannam Uni. (2001).
- [6] V. Ya. Shifrin, Private Report at KRISS (1997).

Fig. 2. An unresolved ^{133}Cs resonance signal in 50 μT .

Fig. 3. An isolated ^{133}Cs resonance signal in 1.2 mT.

지보다 작아서 그림 2와 같이 각각의 자기 부준위간의 공명선이 나타나지 않고, 초미세 준위의 $F=3$, $F=4$ 에 대한 공명신호만 측정된다. 세슘 공명신호는 0.3 mT 이상의 자기장에서는 초미세 준위($F=4$, $F=3$)에 겹쳐 있는 각각의 자기 부준위(m_F) 사이의 공명신호를 탐지할 수 있다. 그림 3과 같이 $F=4$ 에는 8개, $F=3$ 에는 6개의 각각 진폭이 다른 2개의 스펙트럼 무리를 볼 수 있으며, 그 간격이 약 3 kHz이다. 시그마(σ^+) 선택규칙을 적용하였으므로 $F=4$ 의 $m_F \rightarrow 3, 4$, $F=3$ 의 $m_F \rightarrow 2, 3$ 에 많은 원자수가 증가하였으므로 가장 큰 진폭을 나타낸다.^[5]

KRISS의 저자기장 측정 표준기로 사용되는 $\text{Cs-}^4\text{He}$ 광펌핑 측정기는 그림 4와 같이 세슘 램프와 세슘과 헬륨-4가 혼합된 샘플, 발진기, 신호탐지부 등으로 구성되어 있다. 발진기 1에 의해 세슘램프가 빔을 만들고, 이 빔은 D1 광필터 및 원편광을 통과하여 샘플의 세슘을 펌핑시킨다. 이때 헬륨-4 원자는 발진기2에 의해 cool discharge(para helium을 ortho helium을 바꿈) 되어 있고, 세슘과 덩달아 펌핑된다(High Frequency Plasma Effect, HFPE). 이 장치는 세슘 및 헬륨

Fig. 4. Block diagram of $\text{Cs-}^4\text{He}$ optical pumping magnetometer.

-4에 대한 공명신호를 동시에 측정할 수 있고, 간접적인 방법으로 헬륨-4를 펌핑하여 공명신호를 탐지하므로 온도 등에 의한 세슘 공명주파수의 시프트 등의 영향이 거의 없다.^[7]

자기장 표준

KRISS는 자기장 표준 소급성을 유지하기 위하여 그림 5와 같이 기본물리상수인 γ'_p 및 γ_{He} 를 이용하고 있다. 여기서 γ'_p 는 전자에 의해 양성자가 차폐된 상태에서 측정한 차폐 양성자 자기회전비율(shielded proton gyromagnetic ratio)을 의미하며 구형의 용기에 순수한 물 시료(25 $^{\circ}\text{C}$)를 채운 조건에서 측정한 값이다(그림 6). 2006년 기본물리상수 CODATA (Committee on Data for Science and Technology)에서 추천한 γ'_p 값은 $2.675\,153\,362(73) \times 10^8 \text{ s}^{-1} \text{ T}^{-1}$ 이며, 상대 불확도는 2.7×10^{-8} 이다.^[8] 일반적으로 CODATA에서 추천한 상수값은 진공 중에서 측정한 값을 의미하므로 실제 대기 중에서 사용할 때는 대기 중에 포함된 질소 및 산소의 자화율을 보정해 주어야 한다. 보정한 값은 $\gamma'_p(\text{air}) = 2.675\,153\,688(73) \times 10^8 \text{ s}^{-1} \text{ T}^{-1}$ 이며, 실제 자기장 표준의 실현을 위해 이 값을 사용해야 한다. KRISS에서도 1998년 러시아 과학자와 협력하여 국내에서 처음으로 기본물리상수인 저자기장에서 γ'_p 를 세계적 수준(불확도: 1.8×10^{-7})으로 측정하였으며, 측정결과는 CODATA에 계속 인용되고 있다.^[9,10]

REFERENCES

- [7] V. Ya. Shifrin, Po Gyu Park *et al.*, IEEE Trans. Instrum. Meas. **46**, 97 (1997).
- [8] P. J. Mohr, B. N. Taylor and D. B. Newell, Rev. Mod. Phys. **80**, 633 (2008).
- [9] V. Ya. Shifrin, Po Gyu Park *et al.*, IEEE Trans. Instrum. Meas. **47**, 638 (1998).
- [10] Po Gyu Park *et al.*, J. Korean Phys. Soc. **34**, 327 (1999).

Fig. 5. Traceability of magnetic field standard at KRISS.

- Ratio of magnetic dipole moment to spin angular momentum

$$M = \gamma \hbar i$$

- Measurement of precession frequency by NMR method

$$\begin{aligned} \omega &= \Delta E / \hbar \\ &= 2M B / \hbar \\ &= \gamma_p B \quad (i = 1/2) \end{aligned}$$

$$\gamma_p' = \frac{2\pi f_p}{B} = \frac{\omega_p}{B} = \frac{M}{i\hbar}$$

Fig. 6. The shielded proton gyromagnetic ratio γ_p' (the prime indicates protons in a spherical sample of pure H₂O at a temperature of 25 °C) of a particle having the spin quantum number i and magnetic moment M . The SI unit of γ_p' is [s⁻¹T⁻¹] = [Askg⁻¹].^[8]

자기장의 국가표준은 자기장 범위 40 mT 이상에서는 γ_p' 및 전자석과 NMR 자기장 측정기를 이용하고, (1~40) mT에서는 γ_{4He} 및 헬륨홀츠 코일을, 1 mT 이하 범위에서는 비자성 특수 실험실과 지구자기장이 상쇄된 공간에 설치된 정밀 솔레노이드를 이용하여 표준을 유지하고 있다. 그 이유는 40 mT 이하에서는 연속적인 NMR 신호를 탐지하기가 어렵고, 1 mT 이하에서는 지구자기장의 영향을 없애는 상쇄장치 등 특수시설이 필요하기 때문이다.^[11]

1. 비자성 실험실을 이용한 저자기장 표준

저자기장(약 1 mT 이하) 범위에서는 인공적인 자기 잡음 및 지구자기장의 영향을 많이 받기 때문에 이를 감소시킬 수 있는 시설 및 장치가 필요하다. 비자성 실험실은 건축에 사용

Fig. 7. Measurement and compensation of Earth's magnetic field for 40 hours.

Fig. 8. Schematic diagram of low-range magnetic field standard.

되는 모든 자재가 비자성인 재료를 사용하였고, 건물, 도로, 전원선 등으로부터 100 m 이상 떨어진 곳에 위치하도록 건설하였다. 또한 지구자기장의 변화량을 상쇄시킬 수 있도록 대형 3축 헬륨홀츠 코일(최대 지름 2 m)을 제작하여 지구자기장을 실시간으로 측정하면서 상쇄시킬 수 있도록 하였다. 그림 7은 약 40시간 동안 지구자기장의 변화량을 측정하고 상쇄시킨 결과를 보여주고 있다. 그림 8 및 9는 1 mT 이하의 자기장표준을 유지하고 보급하는 장치를 보여주고 있으며 비자성 실험실내에 지구자기장 상쇄장치(지구자기장 관측실, 3축 헬륨홀츠 코일 등), 정밀전류 발생장치(AMR 전류안정기 등), 전류 측정장치(표준저항, 표준전압, 항온조 등), 헬륨-4 AMR 자기장 측정기, 정밀 솔레노이드 등으로 구성되어 있다.

REFERENCES

- [11] Po Gyu Park *et al.*, J. Korean Phys. Soc. **42**, 751 (2003).

Fig. 9. Photograph of low-range magnetic field standard.

Fig. 10. Schematic diagram of high magnetic field range standard.

지구자기장이 상쇄된 공간에 자기장 발생기인 솔레노이드를 설치하고, 솔레노이드에 정밀전류를 흘려 표준자기장을 발생시키는 것이다. 솔레노이드는 열적으로 안정한 석영을 사용하여 만들었으며, 중심내부의 자기장 균일도를 향상시키기 위하여 단전류-다층 권선법을 사용하였다.^[4] 솔레노이드의 내부중심에서 ± 2 cm 범위 내에서 자기장 균일도는 3×10^{-7} , 코일 상수는 1.2310596×10^{-3} T/A (20 °C)이었다.^[12]

2. 자기장 표준 (1 mT ~ 2.5 T)

중간 영역의 자기장 표준을 확립하기 위하여서는 동일한 축 상에 2쌍의 코일(헬름홀츠 코일)을 이용한다. 일반적으로 냉각장치가 없는 헬름홀츠 코일은 발열 때문에 20 mT 이상의 정밀자기장을 발생시키기 어렵으므로, 각각 20 mT 자기장을 안정적으로 발생시킬 수 있는 지름이 다른 독립된 헬름홀츠 코일 2쌍 및 지구자기장을 상쇄시킬 수 있는 코일을 바

Fig. 11. Results of international key comparison in DC magnetic field (CCEM.M.-K1).

Fig. 12. Results of international key comparison in AC magnetic field (CCEM.M.-K1).

깎쪽 코일에 덧붙여 설계하여 동일한 받침대 위에 중심축이 일치하도록 고정한다. 각각의 코일에서 발생하는 자기장은 서로 더해져서 약 40 mT의 자기장을 발생시킬 수 있으며, 또한 지구자기장을 상쇄시킬 수 있는 코일을 설치하여 상쇄시킴으로써 표준기의 불확도를 감소시킬 수 있었다.

고자기장 표준은 수냉식 전자석 및 NMR 자기장 측정기로 그림 10과 같이 구성되어 있으며, 전자석에 의해 발생하는 자기장의 안정도는 전자석에 흘려주는 전류의 안정도에 따라 변화하므로 무엇보다도 먼저 전자석에 인가하는 전류를 안정

REFERENCES

- [12] Po Gyu Park *et al.*, Rev. Sci. Instrum. **72**, 3107 (2002).

시키는 것이 필요하다. 전자석과 직렬로 셉트 표준저항을 연결하여 저항의 양단에 유도되는 전압의 변화량을 탐지하여 전자석의 입력 단에 다시 가하여 안정시키는 방법인 전류폐환(current feedback)을 사용하였다. 이 전류폐환 방법은 외란 자기장의 변화는 보상하지 못하고 단지 전자석에 인가되는 전류의 변화분만 보상하는 단점이 있으나, 40 mT 이상의 자기장 범위에서 안정도는 외부자기장(지구자기장, 장비에 의한 자기 잡음 등)의 영향이 거의 미치지 않는다.^[13]

3. 자기장 표준 국제비교

국제무역에서 기술적 장애로 작용하는 측정표준의 불일치를 제거하고, 교역 당사국간에 측정 및 시험결과에 대한 상호인정의 필요성이 날로 증가되고 있다. 따라서 상호인정의 기술적 기반인 핵심측정 국제비교(Key Comparison)가 여러 측정 분야에서 요구되고 있다. 이러한 요구에 부응하기 위해 여러 나라에서 유지 및 보급되고 있는 자기장 표준의 동등성 확보를 목적으로 독일 PTB의 K. Weyand 박사의 제안에 의해 이 분야의 국제비교를 2001년부터 2003년까지 실시되었다. 그림 11, 그림 12와 같이 자기장분야 국제비교 결과를 보면 KRISS의 자기장 측정능력 및 분석 수준은 선진국과 대등함을 알 수 있다. 이러한 국제비교 결과는 그 나라에서 유지하는 자기분야의 표준 및 측정 능력을 가늠할 수 있는 척도로 사용될 수 있다.

결 론

유럽에서 신대륙 발견의 계기가 된 자기 콤팩스는 마르코

폴로가 중국에서 가져간 것이었다. 유럽보다 먼저 자기 콤팩스를 도입했던 우리 조상들이 자기 콤팩스를 항해를 위한 방향 탐지 등 과학적 도구로 사용했다면 우리나라가 먼저 신대륙을 발견하고 초강대국이 되어 있을지도 모른다.

산업이 고도로 발달함에 따라 자기장의 정밀 측정 및 발생 등에 대한 관심이 증대되고 있다. 정밀 자기장 측정기를 이용하여 이동전화기 방향 탐지, 생체, 의료공학, 지하광물 및 매설물 탐사, 지진 및 전파방해 예측, 지구물리탐사 및 우주자기장 분포 측정, 항법장치, 지도제작, 자기장 통신, 물질의 자기적 특성 분석 및 개발, 국방 및 우주항공분야, 송유관 부식 연구 등에 활용되고 있다. 특히 지구자기장은 여러 분야에서 다양하게 사용되므로 지속적인 정밀측정이 필요하다.

KRISS에서는 자기분야의 표준 확립과 정밀측정 지원을 위해 자기장 범위 1 mT 이하에서는 비자성 실험실, 지구자기장 상채장치 등을 이용하여 불확도 (4~21) $\mu\text{T/T}$ 로 측정표준을 유지하고 있다. 또한 자기장 범위 1 mT~2.5 T에서는 헬륨홀츠 코일, 전자석, NMR 자기장 측정기 등을 사용하여 불확도 (10~80) $\mu\text{T/T}$ 의 측정표준을 유지하고 있다. 이러한 자기 표준장치를 이용하여 관련 연구는 물론 가우스미터, 테슬러미터, fluxgate magnetometer, 교류 자기장측정기, 자속계, 선박안전거리 시험 등 연 300여 건의 교정 및 시험을 수행하여 산업체 및 관련기관을 지원하고 있다.

REFERENCES

- [13] Y. G. Kim, Po Gyu Park *et al.*, J. Kor. Mag. Soc. **12**, 137 (2002).