



## Magnetic Field Standards Using Magnetic Resonance

Po Gyu Park\*, Wan-Seop Kim, Sung Jung Joo and Hyung Kew Lee

Center for Electricity and Magnetism, Korea Research Institute of Standards and Science, Daejeon 34113, South Korea

Received Jan 18, 2017; Revised Feb 20, 2017; Accepted Mar 05, 2017

**Abstract** The nuclear magnetic resonance (NMR) and atomic magnetic resonance (AMR) plays a fundamental role in achieving a high accuracy of magnetic field measurements. Magnetic field unit (T) was realized based on the shielded proton gyromagnetic ratio ( $\gamma'_p$ ), helium-4 gyromagnetic ratio ( $\gamma_{4He}$ ) and related techniques. The magnetic field standard system has been disseminated by the NMR magnetometer and electromagnet, a Helmholtz coil system, and AMR magnetometer in the nonmagnetic laboratory. A magnetic field standard below 1 mT has been developed by using Cs and Cs-  $^4He$  AMR with automatic compensation of an external magnetic field noise. The standards serve for the calibration of magnetometers and support the test of sensors and materials in the range from 5  $\mu$ T to 2.0 T with (1 to 50)  $\mu$ T/T uncertainty ( $k=2$ ).

**Keywords** NMR, atomic magnetic resonance, magnetometer, magnetic field standard

### 서문

지구는 하나의 천연자석으로 사람들은 항상 자기장(magnetic field)의 영향을 받으며 생활하고 있지만 직접 느낄 수 없기 때문에 관심을 별로 끌지 못한다. 그러나 자기장은 우리들의 생활과 밀접한 관계가 있다. 예를 들면 지구자기장(geomagnetic field)은 우주

및 태양으로부터의 유해한 방사선이나 우주선(cosmic ray)이 지구로 침입하는 것을 방지하거나 완화시킴으로써 인류를 비롯한 생물을 보호하고, 태양폭발 등에 의해서 지구를 감싸고 있는 전리층 교란으로 인한 통신장애를 발생시켜 생활에 불편을 주기도 한다. 또한 사람들이 많이 사용하는 핸드폰, 자동차, 컴퓨터, 모터, 의료기기, 가전제품 등에서 자기장 없이는 편리한 기능들을 생각할 수 없다. 특히 병원에서 진단용으로 사용되는 MRI 장치에서 자기장의 세기, 균일공간 및 외부 잡음 자기장의 상쇄 등이 영상의 품질을 향상시키는데 중요한 요인으로 작용하고 있다. 한국표준과학연구원(KRIS)에서는 자기장 표준을 확립하여 관련산업체에 기준 잣대를 보급함으로써 자기단위의 통일, 관련제품의 품질 향상 등에 기여하고 있다. 자기장의 SI(International System, 국제단위계) 단위는 테슬라(tesla, T)이며, SI 단위는 시간, 장소 및 측정자에 따른 영향을 받지 않고 표준값을 재현할 수 있는 물리고유현상 등을 주로 이용한다.<sup>1</sup> 자기장 표준 또한 이러한 현상인 핵자기공명(nuclear magnetic resonance, NMR) 및 원자자기공명(atomic magnetic resonance, AMR)을 사용하여 표준을 구현하고 있다. NMR에서 양성자 자기회전 비율은 핵스핀과 핵자기 사이의 비례상수를 나타내며, 이 상수는 물질의 종류 및 환경조건 등에 따라 차이값을 가질 수 있다. 이러한 점

\* Correspondence to: Po Gyu Park, Center for Electricity and Magnetism, Korea Research Institute of Standards and Science, Daejeon 34113, South Korea, Tel: 82-41-868-5163; E-mail: pggpark@kriss.re.kr

을 고려하여 자기표준에 사용되는 양성자 자기 회전비율(이하는  $\gamma'_p$  로 표시)은 prime을 붙여서 사용한다. 그 의미는 온도가 25°C, 시료는 순수한 H<sub>2</sub>O, 시료의 모양은 구형을 사용하여 측정된 값으로 정의되어 있다. 즉 누구나 이와 같은 조건에서 NMR 실험을 할 경우 동일한 측정값을 얻을 수 있다.<sup>2</sup>

AMR은 광펌핑(optical pumping)을 이용하여 자기장을 측정하는 방법으로, 빛을 이용하여 원자들을 원하는 에너지 준위로 모은 다음, 그 에너지 차이에 해당하는 전자기파를 인가하여 자기공명(magnetic resonance)을 만들어 공명주파수를 측정하고, 그에 비례하는 자기장을 구하는 방법이다.<sup>3,4</sup> 광펌핑 방법은 1950년 Alfred Kastler가 제안하였고, 이것으로 1966년 노벨상을 받았다.<sup>5</sup> 이 방법은 핵스핀 및 초미세 갈라짐(hyperfine splitting)의 결정을 위한 자기공명 실험, 원자의 홀짝성 비보존(parity violation)의 정밀측정 및 1997년 노벨상을 받은 레이저 냉각(laser cooling) 기술 등에 사용되었다. 특히 이러한 실험을 바탕으로 원자 주파수 측정기, 정밀자기장 측정기 등에 응용되고 있다. 광펌핑으로 이용되는 물질로는 Na, K, Rb, Cs 등의 알칼리금속 및 <sup>3</sup>He, <sup>4</sup>He 등의 원소를 저압가스 상태로 만들어 사용한다. 일반적으로 사용하는 NMR에 비해 AMR의 장점은 광펌핑의 분극효과(polarization effect)가 열적완화(thermal relaxation)에 의한 핵의 분극 효과보다 수 백만배 크기 때문에 신호의 S/N(signal to noise ratio)비가 매우 커서 쉽게 공명신호를 탐지할 수 있고, 또한 공명신호는 자기장의 크기에 영향을 받지 않는다.<sup>6</sup> 그러므로 저자기장영역에서 광펌핑 AMR을 사용하면 자기공명 신호 탐지가 쉽고, 또한 헬륨-4의 경우 공명주파수와 자기장 비율(28.0238023 Hz/nT)이 크기 때문에 더 정밀하게 자기장을 측정할 수 있다. 이미 40여년전부터 러시아의 표준연구기관인 멘델레예프 계량연구소(VNIIM)에서는 기본물리상수의 측정, 국가 자기장 표준 확립 등에 이 방법을 사용하고 있으며, KRISS 또한 20여년전부터 이 방법을 사용하여

자기표준을 확립 및 유지하고 있다.<sup>7,8</sup>

### 자기장 표준 소급 및 장치

KRISS의 자기장표준 소급도(traceability)는 그림 1과 같이 기본물리상수인  $\gamma'_p$  및 헬륨-4 자기회전비율(Helium-4 gyromagnetic ratio,  $\gamma_{4He}$ )을 사용하여 실현하고 있다. 40 mT 이상의 자기장( $B$ )은  $\omega_p = \gamma'_p \cdot B$ 에서 핵자기 공명 주파수( $\omega_p$ ) 및  $\mathbf{Y}'_p$ 의 정확한 값으로부터 재현할 수 있다. (1 ~ 40) mT 이하의 경우는  $\mathbf{Y}_{4He}$ 를 사용하고 있다.  $\mathbf{Y}'_p$  상수값은 2010년 CODATA(과학기술 데이터 위원회, Committee on Data for Science and Technology)에서 추천한 값인  $2.675\,153\,268 \times 10^8 \text{ s}^{-1} \text{ T}^{-1}$ 을 적용하고 있으며, 이 상수를 이용하여 1 테슬라(T)에서 공명주파수를 계산하면 42.5763866 MHz이다.  $\mathbf{Y}_{4He}$  상수값은 KRISS/VNIIM 공동연구를 통한 결과값인  $1760.78799 \times 10^8 \text{ s}^{-1} \text{ T}^{-1}$  사용하고 있다. 동일한 자기장에서 양성자를 사용한 것보다 헬륨-4를 사용할 경우 공명주파수가 680배 크다, 즉 그 만큼 측정분해능이 좋다는 것을 의미한다.<sup>9,10</sup>

자기장표준은 측정 및 발생장치로 구성되어 있으며, 측정은 NMR 및 AMR 자기장측정기, 발생은 전자석(electromagnet), 헬름홀츠 코일(Helmholtz coil) 및 솔레노이드(solenoid) 등을 사용한다. 자기장 범위 40 mT 이상에서는 전자석과 NMR 자기장측정기, (1 ~ 40) mT에서는 헬름홀츠 코일, 1 mT 이하 범위에서는 비자성 특수 실험실과 외부자기장이 상쇄된 공간에 설치된 코일을 이용하여 유지하고 있다. 전자석은 많은 전류를 흘릴 수 있으므로 고자기장을 발생시킬 수 있으나, 발생하는 열을 줄이기 위해 냉각 장치를 사용하여야 한다. 헬름홀츠 코일은 횡(flat) 및 축(axial) 방향의 공간을 활용할 수 있는 잇점이 있고, 솔레노이드는 정밀한 자기장을 발생할 수 있으나, 축방향의 공간만 활용 가능한 단점이 있다.

### 외부자기장 상쇄 및 저자기장 표준 장치

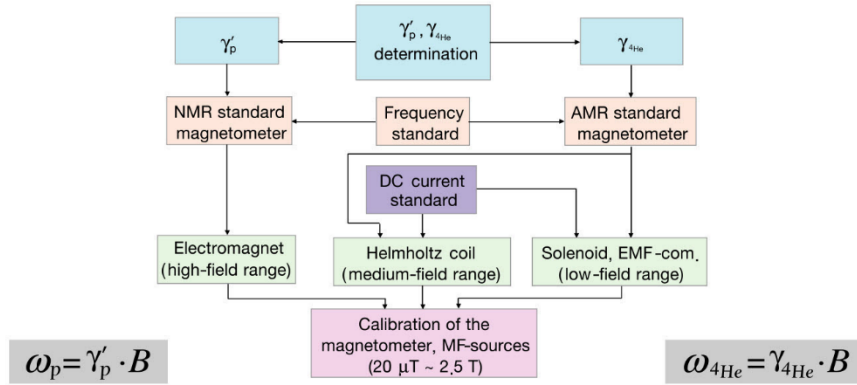


Figure 1. Traceability of magnetic field standard at KRISS.

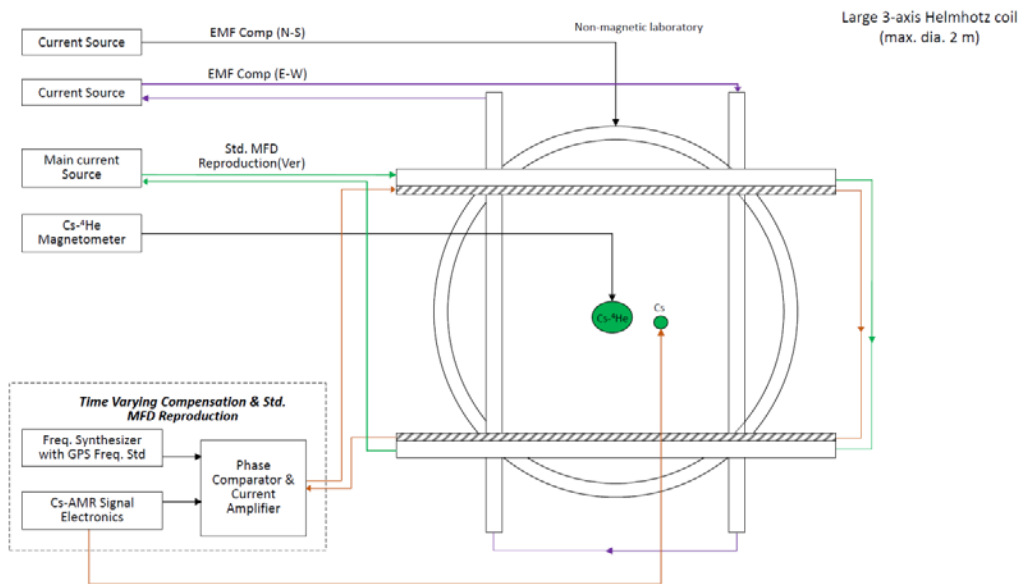


Figure 2. A block-diagram of a low magnetic field standard system in nonmagnetic laboratory.

지구자기장 및 외부 잡음 자기장을 감소시키는 방법으로는 고투자율 자성재료를 이용하여 수동적으로 자기차폐(magnetic shielding) 시키는 방법과 외부자기장의 변화량을 측정하여 크기가 같고, 방향이 반대인 자기장을 인가하여 실시간으로 자기장을 상쇄(magnetic field compensation) 시키는 방법 등이 있다. 자기차폐 방법은 내부공간에 정밀자기장을 발생시키는 경우에는 발생자기장과 고투자율 자성재

료간의 상호작용에 의해 발생자기장이 왜곡될 수 있다. 코일 등을 이용하여 정밀한 자기장을 발생시킬 경우, 차폐재료를 사용하는 방법보다 코일 및 되먹임장치 등을 이용하여 실시간으로 상쇄시키는 방법이 적합하다. 1 mT 이하의 저자기장 표준에서는 지구자기장 및 외부 잡음 자기장으로부터 영향을 많이 받기 때문에 이를 감소시킬 수 있는 시설 및 장치를 필요로 한다. 건축재료 등에 포함된

자기장의 영향을 줄이기 자화율이 낮은 재료를 사용하였고, 건물, 도로, 전원선 등으로부터 100 m 이상 떨어진 곳에 비자성실험실을 건축하였다.<sup>2</sup> 또한 그 내부에 외부 및 지구자기장의 변화량을 상쇄시킬 수 있는 대형 3축 헬름홀츠 코일 및 Cs AMR을 이용한 상쇄장치를 제작하여 외부 및 지구자기장을 측정하여 자동적으로 상쇄시켰다. 시간에 따라 변화는 자기장은 그림 2에서와 같이 Cs AMR controller를 이용하여 자기장 변화량에 따른 공명주파수를 측정하여, 위상비교기(phase comparator)에 입력하여 기준주파수와 의 차이에 해당하는 전류를 발생시켜 자기장을 대형 헬름홀츠 코일에 되먹임시키므로써 실시간으로 잡음 자기장을 상쇄시킬 수 있다. Cs AMR controller의 동작원리는 Cs AMR이 설치된 장소에서 자기장에 비례하는 주파수(3.5 Hz/nT)를 측정하고, 이 주파수 값을 synthesizer로 발생시켜, phase comparator의 기준 입력단에 입력하고, Cs AMR에서 측정되는 주파수는 phase comparator의 신호 입력단에 인가하여 기준과 신호 주파수간의 차이에 해당하는 전류(자기장)를 발생시켜 코일에 인가해줌으로써 실시간으로 외부 잡음 자기장을 상쇄시킬 수 있다. 또한 이 장치를 이용하여 표준자기장을 재현시킬 수 있다. Synthesizer의 기준주파수에서 3.5 Hz 증가시키면 현재의 자기장에서 자기장이 1 nT 증가되고, 3 nT의 자기장을 감소 시킬려면 기준주파수에서 10.5 Hz의 감소하면 된다(그림 4). 그림 2는 비자성동에 설치된 저자기장 표준장치의 block-diagram으로, 자기장을 발생하고 제어하는 대형 3축 헬름홀츠 코일(최대 지름 약 2 m), 외부 자기장을 제어하는 광펌핑 Cs AMR 및 phase comparator, 표준자기장을 측정하는 Cs-<sup>4</sup>He AMR 측정기 등으로 구성되어 있다. 3축 헬름홀츠 코일중에서 수직축은 표준 자기장 발생 및 외부자기장 상쇄장치로 구성되어 있고, 수평 2축은 직류성분의 지구자기장을 상쇄시키는 기능만 있다. 일반적으로 수직방향은 외부 자기잡음으로부터 영향을 덜 받기 때문이다. 그림 3은 비자성실험실에 설치된 저자기장 표준장치의 사진을 보여준다. 그림 4는 Cs AMR 외부 잡음자기장

상쇄장치의 ON/OFF 시 발생하는 자기장의 안정상태, 1 nT 및 3 nT 의 자기장을 인가했을 때 그 변화량을 Cs-<sup>4</sup>He AMR 자기장 측정기로 측정한 결과를 보여준다. 자기상 상쇄장치 동작시 발생자기장의 안정도는 0.3 nT/h 이었다.

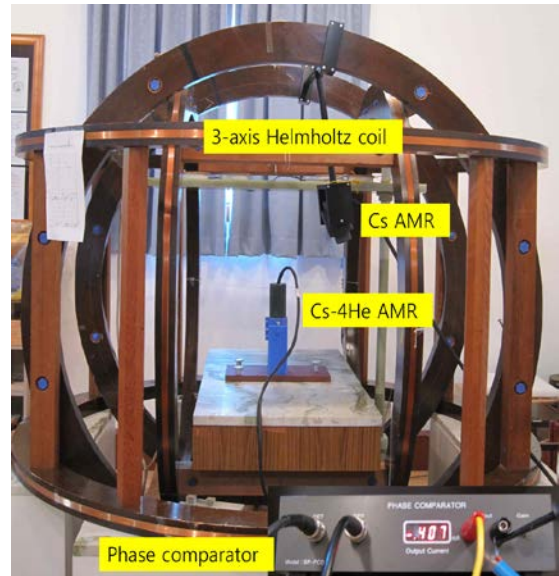


Figure 3. Photograph of a low magnetic field standard system.

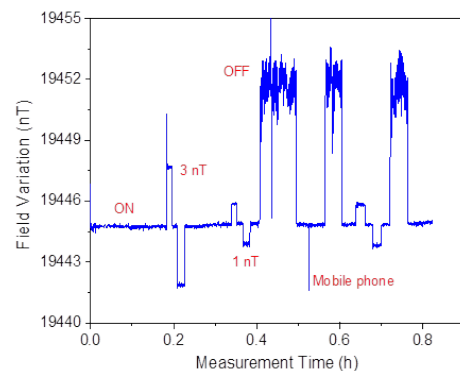


Figure 4. The stability of the generated magnetic field. ON: working Cs AMR controller, OFF: no working, 3 nT: applied 3 nT using Cs controller(3.5 Hz/nT), Mobile phone: instant approach cell phone and remove.

## 고찰

산업이 고도로 발달함에 따라 자기장 관련기술에 대한 수요가 늘어날 것으로 예상된다. 자기장 발생 및 측정관련 기술은 생체·의료공학, 지하광물 및 매설물 탐사, 지진 및 전파방해 예측, 지구물리탐사 및 우주자기장 분포 측정, 항법장치, 국방 및 우주항공분야, 송유관 부식 연구 등에 활용되고 있으며, 앞으로 이러한 분야의 기술을 개발하기 위해서 많은 사람들의 관심과 참여가 필요할 것으로 생각된다.

자기장의 크기를 측정하는 방법으로는 자기공명 현상 및 재료의 자기적 특성을 이용한 센서 등으로 나눌 수 있다. 자기공명 현상은 NMR 및 AMR 등의 물리적 고유현상을 이용한 것으로 시간에 따른 자기장의 변화가 없고, 재현성이 우수하기 때문에 절대자기장 및 정밀 자기장 측정용으로 많이 사용되며, 홀효과 (Hall effect), MR(magnetic resistance), fluxgate 등의 재료의 특성을 이용한 센서는 분해능 및 안정성은 떨어지지만 장치가 간단하기 때문에 널리 사용되고 있다.

KRISS에서는 기본물리상수의 하나인 양성자

자기회전비율 값을 정확하게 측정한 기술과 경험을 토대로 국제적 수준의 자기장 관련 표준을 확립 및 유지하고 있으며<sup>2</sup>, 국내관련기관에 자기장 관련 기술보급, 측정기 교정 및 시험 등을 통해 지원하고 있다. 또한 이러한 측정표준기술은 국제비교(international key comparison), 전문가 검증(peer review) 등을 거쳐 국제적 동등성을 확보하고 있으므로 자기측정기 교정 및 시험결과에 대해서는 국제적 효력을 인정 받을 수 있다.

## 결론

KRISS에서는 자기관련업체 및 기관에 표준/정밀측정기술 보급/지원을 위해 자기장 범위 5  $\mu$ T ~ 1 mT 에서 비자성 실험실, 외부자기장 상쇄장치, Cs-<sup>4</sup>He AMR 표준자기장 측정기 등을 이용하여 불확도 (1 ~ 20) nT, 자기장 범위 1 mT ~ 2.0 T에서는 헬름홀츠 코일, 전자석, NMR 자기장 측정기 등을 사용하여 불확도 (5 ~ 50)  $\mu$ T/T의 표준을 확립하여 유지하고 있다.

## 감사의 글

이 연구는 한국표준과학연구원의 “양자 및 디지털 기술 기반 전기자기표준 선진화” 과제(KRISS-1701115) 연구비에 의해 지원되었다.

## References

1. Barry N. Taylor, and P. J. Mohr, *IEEE Trans. Instrum. Meas.* **50**, 563 (2001)
2. Po Gyu Park, Ph. D. Thesis. VNIIM (2001)
3. A. L. Bloom, *Sci. Am.* **203**, 72 (1960)
4. R. Carver, *Science* **141**, 599 (1963)
5. H. G. Dehmelt, *Phys. Rev.* **105**, 1487 (1957)
6. A. Kasler, *J. Phys. Radium.* **11**, 255 (1950)
7. E. B. Aleksandrov, V. A. Bonch-Bruevich, and N. N. Yakobson, *Sov. J. Opt. Technol.* **60**, 754 (1993)
8. V. Ya. Shifrin, V. N. Khorev, and Po Gyu Park, *Metrologia.* **36**, 171 (1999)
9. P. G. Park, Y. G. Kim, and V. Ya. Shifrin, *IEEE Trans. Instrum. Meas.* **54**, 734 (2005)

10. Peter J. Mohr, Barry N. Taylor, and David B. Newell, *Rev. Mod. Phys.* **84**, 1527 (2012)
11. V. Ya. Shifrin, Po Gyu Park, V. N. Khorev, Chang Ho Choi, and C. S. Kim, *IEEE Trans. Instrum. Meas.* **47**, 638 (1998)