

교류 자기장 표준장치 개발 및 국제비교 결과 분석

박포규, 김영균, 김완섭, 김문석
한국표준과학연구원 전기·자기센터

Development of AC magnetic field standard system and analysis of the international key comparison

Po Gyu Park, Young Gyun Kim, Wan-Seop Kim, Mun-Seok Kim

Center for Electricity and Magnetism, Korea Research Institute of Standards and Science(KRISS) Point, 글췌췌췌 신명

Abstract - 교류 자기장의 정밀측정, 자기장 측정기의 교정 및 관련 시험 등을 지원하기 위해 교류자기장 표준장치를 개발하였다. 주파수에 따른 확장불확도(expanded uncertainty, 2 σ)는 1 kHz 이하에서 0.16 %, 1 kHz ~ 5 kHz 에서 0.26 %, 5 kHz ~ 20 kHz 에서 0.44 % 이었다. 측정결과에 대한 국제적 신뢰성 및 상호인증을 확보하기 위하여 핵심측정표준 국제비교(international key comparison)에 참여하였으며, 또한 측정능력, 교정 및 시험방법 등에 대한 국제적 전문가로부터 평가(peer review)를 수감하였다. 따라서 한국표준과학연구원(KRISS)에서 교정 및 측정된 결과에 대해서는 국제적 상호인증을 받을 수 있다.

1. 서 론

자기장은 직접 느낄 수는 없지만 여러 분야에서 다양하게 응용되고 있다. 예를들면 환경자기장(전원주파수), 생체-의료공학, 지하광물 및 매설물 탐사, 지진 및 전파 방해 예측, 지구물리탐사 및 우주자기장 분포 측정, 항법장치, 국방 및 우주항공분야, 송유관 부식, 자성재료 연구 등에 활용되고 있다[1]. 이러한 목적에 사용되는 자기장 측정장치는 국제적으로 신뢰성을 확보한 기관에서 교정 및 검증을 받아야만 상호 이해관계가 대립하였을 때 합리적으로 해결할 수 있다.

자기장은 자속(magnetic flux) 및 자속밀도(magnetic flux density)로 나누어지며, 자속의 SI 단위는 웨버(Wb)로서, 1 Wb는 1 V·s 이므로, 자기장 표준 소급은 전압 및 시간표준으로부터 유지되고 있다. 자속밀도는 여러 가지 방법으로 표준을 현시할 수 있으나, 일반적으로 자기장하에서 핵자기공명주파수(ω)를 측정하여 재현한다. 즉 자속밀도 B 는 $\omega = \gamma'_p \cdot B$ 의 관계식에서 핵자기공명주파수 및 양성자 자기회전비율(γ'_p)의 정확한 값으로부터 계산할 수 있다 [2-3]. 자속밀도의 SI 단위는 테슬라(T, 1 T = 1 Wb/m²)이다.

국제무역에서 기술적 장애로 작용하는 측정표준의 불일치를 제거하고, 교역당사국간에 측정 및 시험결과에 대한 상호인정의 필요성이 날로 증가되고 있다. 따라서 상호인증의 기술적 기반인 핵심측정표준 국제비교가 여러 측정 분야에서 요구되고 있다[4]. 이러한 요구에 부응하기 위해 여러 나라에서 유지 및 보급되고 있는 자속밀도 단위의 동등성 확보 등을 목적으로 독일 연방물리청(PTB)의 K. Weyand 박사에 의하여 제안된 국제비교에 참여하였다[5]. 또한 국제적 전문가로부터 5년마다 측정능력 및 방법 등이 합리적이고, 국제적 절차에 부합된지에 대하여 평가(peer review)를 받고 있다.

본 연구에서는 교류 자기장 표준장치, 불확도 분석 및 국제비교 결과에 대한 내용을 소개하고자 한다.

2. 본 론 [6]

2.1 교류자기장 표준장치

KRISS의 교류 표준장치는 Fig. 1과 같이 표준 솔레노이드 코일에 정밀한 주파수의 전류를 인가하고, 코일 중심부에 표준 탐지코일을 설치하여 발생하는 자기장의 크기를 읽는 구조로 되어있다. 즉 교류 전류를 표준 솔레노이드에 흘려주어 자기장을 발생시키고, 솔레노이드에 직렬로 연결된 표준저항(R_{STD}) 양단에 유지되는 전압 및 솔레노이드의 중심부에 설치된 표준 탐지코일에 유도되는 전압을 측정하는 장치 등으로 구성되어 있다.

일반적으로 코일의 권선수를 늘릴 경우 코일상수는 증가하지만, 주파수가 증가에 따른 임피던스의 증가로 전류원의 전압한계에 도달하여 일정 전류 이상을 흘려주기가 어렵기 때문에 장치 설계시 전류원의 전압, 전류의 한계를 고려하여야 한다. 또한 솔레노이드 및 표준 탐지코일의 공명주파수는 최대 사용주파수의 2배 이상이 되도록 설계하여야 선형적인 주파수 특성을 얻을 수 있다.

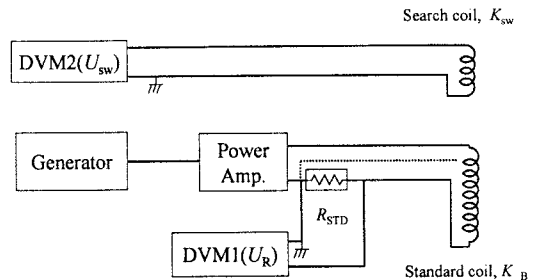


Fig. 1. Block diagram of AC magnetic standard.

국제비교에 사용된 이동용 표준코일의 교류 자기장은 전자기유도 방법을 사용하여 주파수 범위 20 kHz 이하에서 2개의 표준 탐지코일을 사용하여 KRISS의 표준솔레노이드와 비교 측정하였다. 코일의 권선수에 따라 주파수 특성이 다르기 때문에 최적의 특성을 얻기 위해 2개의 표준 탐지코일을 설계하였다. 표준탐지 코일은 주파수 범위 1 kHz 이하에서는 표준 탐지코일(#1)을 사용하였으며, 1 kHz ~ 20 kHz 범위에서는 공명주파수가 커도록 설계된 탐지코일(#5)을 이용하여 비교 측정하였다. 또한 장비로 인한 측정값의 차이를 줄이기 위해 동일한 모델의 DVM을 사용하였다.

전자기유도를 이용한 방법은 1차 코일인 표준코일에 주파수 f 인 전류 I 를 흘리고, 그 중심부에 2차 코일인 표준 탐지코일을 설치하여 유도되는 전압 U_{sw} 을 측정하였다. U_{sw} 는 식(1)과 같이 표시할 수 있다.

$$U_{sw} = 2\pi \cdot f \cdot K_B \cdot K_{sw} \cdot I \quad (1)$$

여기서 K_B 는 표준코일의 코일상수, K_{sw} 는 탐지코일의 코일

유효단면적, $I=U_R/R_{STD}$ 로써 U_R 은 표준저항에 유도되는 전압 및 R_{STD} 는 표준 저항값을 나타낸다.

2.2 교류 자기장 표준 성능 평가

교류 자기장 발생장치로 사용되는 솔레노이드 코일 및 표준 탐지코일의 주파수에 따른 코일상수 및 공명 주파수 등을 측정하고 분석하였다(Table 1). 또한 측정된 결과를 이용하여 불확도 요소를 산출하고 분석하였다.

Table 1. Specifications of the used standard search coils.

| Coil's number | # | R_{STD} |
|---|--------------------------|---|
| Coil constant, Wh ² | 1.450 | 0.1 |
| Uncertainty, % | 0.12(2) | - |
| Resonance frequency (with cable), kHz | 59.6 | 1947 |
| Inductance, mH | 87 | 0.175 |
| Capacitance (with cable), pF | 310 | 152 |
| Resistance, Ohm | 59 | 4.1 |
| Size of winding, mm | 54x842 | 54x6.42 |
| Cable | Cosial 1.4 m | Fastax 1.8 m |
| Calibration | VNIM, Russia | Frequency dependent, calculated to 20 kHz |
| Coil frequency-dependence factor, $k(f)/k_{dc}$ | $1 + \frac{f^2}{1647^2}$ | $1 + \frac{f^2}{1647^2}$ |

2.2.1 교류 코일상수의 측정

교류 코일상수 측정의 경우, 주파수, 인가전류 및 코일의 온도값 등을 측정하여야하며, 특히 입력선의 커패시턴스의 영향에 의한 코일상수 변화를 배제하기 위해 4선 연결법을 사용하였다. 주파수 1.0 kHz 이하의 범위에서는 탐지코일 #1을 사용하여 전자기유도 방법으로 측정하였다. 주파수 범위 1.0 ~ 20 kHz 에서는 탐지코일 #5를 사용하여 상대적인 방법 즉 코일 #1을 사용하여 1 kHz에서 측정 한 값과 코일 #5를 사용하여 1 kHz에서 측정 한 값을 상대 비교하여 20 kHz까지 측정하였다.

2.2.2. 측정 불확도 분석

측정 불확도(uncertainty)는 “측정값을 합리적으로 추정 한 값들의 분산특성을 나타내는 파라미터”이다. 따라서 측정을 수행하여 얻어지는 측정결과에는 측정량의 참값에 대한 최선의 추정값 (best estimate) 뿐만 아니라 추정값의 신뢰정도를 나타낸다[7]. 교류 자기장 측정 불확도 요인은 table 2와 같이 탐지코일의 위치 및 각도 등 19개 이며, 합성 표준불확도(combined uncertainty, 1 σ)는 1 kHz 이하의 범위에서 0.08 %, 1 kHz ~ 5 kHz 에서 0.13 %, 5 kHz ~ 20 kHz 에서 0.22 % 이었다[8].

Table 2. Uncertainty budgets and evaluation of the AC magnetic field measurements.

- X_1 : Calibration of the search coil
- X_2 : Coil position and angle
- X_3 : DVM1 (current)
- X_4 : DVM2 (signal)
- X_5 : Standard resistor
- X_6 : Frequency counter
- X_7 : Parasitic field
- X_8 : Noise
- X_9 : Environmental magnetic noise
- X_{10} : DVM2 frequency-response
- X_{11} : Coil frequency-response
- X_{12} : DVM1 frequency-response
- X_{13} : Cable capacitance of the bypassing resistor
- X_{14} : Solenoid-to-coil capacitance
- X_{15} : Two-search coils difference in 0.1 to 1 kHz
- X_{16} : Repeated measurements($n=10$, 0.1 kHz to 1 kHz)
- X_{17} : Repeated measurements($n=10$, 1 kHz to 5 kHz)

X_{18} : Repeated measurements($n=10$, 5 kHz to 20 kHz)

X_{19} : K_{dc} DC magnetic field uncertainty

| Quantity | Uncertainty $u(x_i)$, % | Probability distribution / method of evaluation(A,B) | Factor | Sensitivity coefficient c_i | Degree of freedom ν_i |
|----------|--------------------------|--|--------------|-------------------------------|---------------------------|
| X_1 | 0.10 | Normal(2 σ)/B | 1/2 | 1 | ∞ |
| X_2 | 0.02 | Rectangular/B | $1/\sqrt{3}$ | 1 | ∞ |
| X_3 | 0.05 | Rectangular/B | $1/\sqrt{3}$ | 1 | ∞ |
| X_4 | 0.05 | Rectangular/B | $1/\sqrt{3}$ | 1 | ∞ |
| X_5 | <0.001 | Rectangular/B | $1/\sqrt{3}$ | -1 | ∞ |
| X_6 | <0.001 | Rectangular/B | $1/\sqrt{3}$ | 1 | ∞ |
| X_7 | 0.02 | Rectangular/B | $1/\sqrt{3}$ | 1 | ∞ |
| X_8 | 0.02 | Rectangular/B | $1/\sqrt{3}$ | 1 | ∞ |
| X_9 | 0.02 | Rectangular/B | $1/\sqrt{3}$ | 1 | ∞ |
| X_{10} | 0.06 | Rectangular/B | $1/\sqrt{3}$ | 1 | ∞ |
| X_{11} | 0.02 | Rectangular/B | $1/\sqrt{3}$ | 1 | ∞ |
| X_{12} | 0.03 | Rectangular/B | $1/\sqrt{3}$ | 1 | ∞ |
| X_{13} | 0.02 | Rectangular/B | $1/\sqrt{3}$ | 1 | ∞ |
| X_{14} | 0.30 | Rectangular/B | $1/\sqrt{3}$ | 1 | ∞ |
| X_{15} | 0.09 | Rectangular/B | $1/\sqrt{3}$ | 1 | ∞ |
| X_{16} | 0.01 | Normal/A | 1 | 1 | 9 |
| X_{17} | 0.01 | Normal/A | 1 | 1 | 9 |
| X_{18} | 0.03 | Normal/A | 1 | 1 | 9 |
| X_{19} | <0.001 | Normal/B | 1 | 1 | 79411 |

2.3 국제비교 결과

일반적으로 솔레노이드 코일의 경우 주파수에 따른 코일 상수는 2 차항수 곡선을 나타내지만, 국제비교용 표준 솔레노이드의 코일상수는 일반적인 특성을 벗어나 약 5 kHz에서 최소가 되고, 다시 증가하는 것을 알 수 있다(Fig. 2). 이는 일반적인 특성을 배제하여 그 나라의 측정능력을 가늠하기 위해 특수하게 솔레노이드를 설계한 것으로 생각된다. Fig. 2.는 국제비교에 참여한 8개 나라들의 교류 및 직류의 $k(f)/k_{dc}$ 코일상수의 비의 측정결과를 나타낸 것으로, KRISS의 측정결과는 참여한 나라들의 측정 평균값과 잘 일치됨을 알 수 있다[9-10].

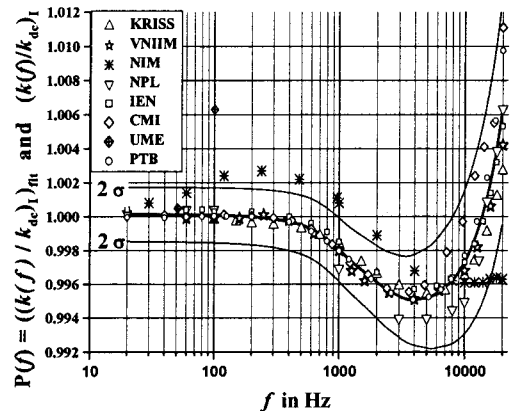


Fig. 2. Frequency dependence of the coil constant measured by all institutes, the 2 σ lines(solid) plotted according to the uncertainty function.

PTB : Physikalisch - Technische Bundesanstalt, Braunschweig, Germany.

KRISS : Korea Research Institute of Standards and Science, Daejeon, Republic of Korea.

VNIM : D. I. Mendeleev Institute for Metrology, St. Petersburg, Russian Federation.

NML CSIRO : National Measurement Laboratory, Lindfield, Australia.

UME : Tubutak Ulusal Metroloji Enstitüsü, Gebze-Kocaeli, Turkey.

NPL : National Physical Laboratory, Teddington, United Kingdom.

IEN : Istituto Elettrotecnico Nazionale "Galileo Ferraris", Torino, Italy.

NIM : National Institute of Metrology, Beijing, China.

CMI : Czech Metrological Institute, Praha, Czech Republic.

CENAM : Centro Nacional de Metrologia, Queretao, Mexico.

3. 결 론

교류 자기장 측정기 교정 및 관련 시험 등을 지원하기 위해 교류 자기장 표준장치를 개발하였고, 측정값의 신뢰성을 향상시키기 위해 불확도 요인을 분석하였다. 또한 교류 자기장 측정값의 국제적 동등성을 확보하기 위하여 국제비교에 참여하여 선진국들과 대등한 측정결과를 얻었다. 이러한 국제비교의 결과는 그 나라에서 유지하는 자기분야의 표준 및 측정 능력을 가늠할 수 있는 척도로 사용되고 있으며, 참여기관들이 발행하는 교정 및 측정성적서의 효력을 국제적으로 상호 인정하는 토대가 된다.

[참 고 문 헌]

- [1] 박포규, 김영균, 김완섭, "지구자기장의 정밀 측정 및 응용 방안", 제1회 지구자기관측 발전 워크샵, 기상청, 2009.
- [2] B. N. Taylor, P. J. Mohr, "The Role of Fundamental Constants in the International System of Units(SI):Present and Future", IEEE. Trans. Instrum. Meas., 50, 563-567 (2001).
- [3] 박포규, 박사학위 논문, 2001.
- [4] 송양섭 외, "핵심측정표준 국제비교", KRIS/IR-2002-017, 17-21(2001).
- [5] K. Weyand, "Technical protokol : Key comparison CCEM.M-K1, Magnetic flux density by means of a transfer standard coil", PTB, May, 2001.
- [6] 박포규, 김영균, "직류-교류 자기장 표준시스템 제작 및 국제비교 결과", 한국자기학회지, 14, 201-206(2004)
- [7] 정낙삼 외, "측정불확도 표현 지침", KRIS-99-070-SP, 27-33(1999).
- [8] 송양섭 외, "핵심측정표준 국제비교", KRIS/IR-2002-017, 154-175(2001).
- [9] P. G. Park, Y. G. Kim, V. Ya. Shifrin, and V. N. Khorev, "Precise standard system for low dc magnetic field reproduction", Rev. Sci. Instrum., 73, 3107-3111 (2002).
- [10] K. Weyand, "Drift B for key comparison CCEM.M-K1, Magnetic flux density by means of a transfer standard coil", PTB, Oct., 2003.