

직류-교류 자기장 표준 시스템 제작 및 국제비교 결과

박포규* · 김영균

한국표준과학연구원, 전자기표준연구부
대전 유성구 유성우체국사서함 102호, 305-600

(2004년 10월 30일 받음, 2004년 11월 25일 최종수정본 받음)

자기장 측정기 교정 및 자기관련 시험 등에 사용되는 직류 및 교류 자기장 표준시스템을 제작하였다. 자기장 1 mT 범위에서, 직류의 경우 확장불확도(expanded uncertainty, 2σ)는 8×10^{-6} , 교류의 경우, 주파수에 따른 확장불확도는 0.1~1 kHz 범위에서 0.16%, 1~5 kHz에서 0.26%, 5~20 kHz 에서 0.44% 이었다. 또한 국가측정표준에 대한 동등성과 수행한 교정 및 측정에 대한 국가간 상호인정을 받기 위하여 이 분야의 핵심측정표준 국제비교(international key comparison)에 참여하였다. 선진국과 대등한 결과를 얻었으며, 자기장 분야의 측정능력이 세계적 수준임을 확인하는 계기가 되었다.

주제어 : 자기장, 지구자기장 상쇄, 코일상수, 국제비교

Ⅱ. 서 론

산업이 발달함에 따라 자기장의 정밀 측정에 대한 관심이 증대되고 있다. 정밀자기장측정기를 이용하여 생체·의료공학, 지하광물 및 매설물 탐사, 지진 및 전파방해 예측, 지구물리 탐사 및 우주자기장 분포 측정, 항법장치, 국방 및 우주항공 분야, 송유관 부식, 자성재료 연구 등에 활용되고 있다[1]. 이러한 목적에 사용되는 자기장 측정장비는 국제적으로 신뢰성을 확보한 기관에서 교정 및 검증을 받아야만 상호 이해관계가 대립하였을 때 합리적으로 해결할 수 있다.

국제무역에서 기술적 장애로 작용하는 측정표준의 불일치를 제거하고, 교역당사국간에 측정 및 시험결과에 대한 상호 인정의 필요성이 날로 증가되고 있다. 따라서 상호인정의 기술적 기반인 핵심측정표준 국제비교(이하 KC로 표현)가 여러 측정 분야에서 요구되고 있다[2]. 이러한 요구에 부응하기 위해 여러 나라에서 유지 및 보급되고 있는 자속밀도 단위(테슬러, T)의 동등성 확보 등을 목적으로 독일 연방물리청(PTB)의 K. Weyand 박사의 제안에 의해 이 분야의 KC가 2001년부터 2003년까지 실시되었다[3].

일반적으로 자기장은 자속(magnetic flux) 및 자속밀도(magnetic flux density)로 나누어지며, 자속의 단위는 웨버(Wb)로써, 1 Wb는 1 V s이므로, 표준소급은 전압 및 시간표준으로부터 유지되고 있다. 자속밀도의 단위인 테슬러(T, $1 T = 1 Wb/m^2$)는 3가지 방법으로 표준을 현시할 수 있으나, 일반적으로 자기장하에서 핵자기공명주파수(ω)를 측정하여 재현한다. 즉 자속밀도는 $\omega = \gamma_p B$ 에서 핵자기공명주파수 및 양성자 자기회전비율(γ_p)의 정확한 값으로부터 계산할 수 있다[4].

지구자기장 상쇄장치, 광펌핑 자기장측정기, 정밀 솔레노이드 등으로 구성된 직류 자기장 및 표준탐지코일, 솔레노이드 등으로 된 교류 자기장 표준장치를 제작하여 자기 관련 산업체 등에서 사용되고 있는 자기장 측정기의 교정 및 시험에 사용되고 있다. 또한 직류-교류 자기장 측정분야에서 국제적 신뢰성을 확보하기 위하여 PTB에서 주관한 KC에 참여 하였다. 본 연구에서는 직류-교류 자기장 표준장치, 불확도 분석 및 국제비교 결과에 대해 소개하고자 한다.

Ⅲ. 자기장 표준 발생 및 측정 장치

2.1. 직류

Fig. 1은 저자기장 표준장치로써, 비자성 시설, 지구자기장 상쇄장치, 정밀 솔레노이드, 정밀 전류원, 전류측정 장치 및 원자 자기공명을 이용한 자기장측정기 등으로 구성되어 있다. 비자성 시설은 자기잡음원(건물, 도로 등)으로부터 100 m 이상 떨어진 곳에 위치하고 있으며, 지구자기장 상쇄용 3-축 헬름홀츠 코일과 시간에 따른 지구자기장 변화 상쇄용 3-축 헬름홀츠 코일이 설치되어 있고, 비자성 실험실과 각각 50 m 떨어진 관측실 및 측정실에는 직렬로 연결된 소형 헬름홀츠 코일, 세습 광펌핑 자기장측정기, 위상비교기, 전류원, 항온조 및 표준저항 등이 설치되어 있다[5,6].

지구자기장이 상쇄된 대형 헬름홀츠 코일(지름 약 2 m)의 중심부에 자기장발생용 표준 솔레노이드 코일을 설치하고, 전류를 흘려 자기장을 발생시킨다. 표준코일 중심부에는 정밀 자기장 측정장치인 헬름 광펌핑 자기장측정기를 설치하여 자기장에 비례하는 Zeeman 공명 주파수를 측정하였다. 또한 전류는 측정실의 항온조 속에 설치된 10Ω 표준저항에 유기되는 전압과 제너표준기의 전압을 비교하여 측정하였다.

*Tel: (042) 868-5163, E-mail: ppgpark@kriss.re.kr.

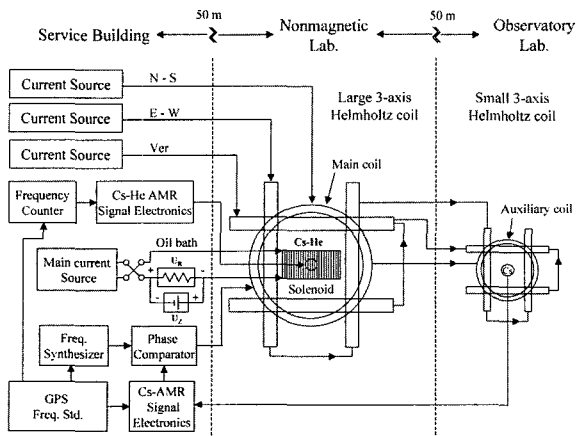


Fig. 1. Schematic diagram of DC magnetic flux density measurement system.

솔레노이드의 코일상수(B/I)는 측정된 자기장(B)을 흘려준 전류(I)로 나누어서 계산할 수 있으므로 그 단위는 T/A가 된다. KRISS의 정밀솔레노이드와 KC용 표준코일에 전류 100 mA, 200 mA, 300 mA를 흘렸을 때 각각 코일상수를 비교 측정하였다. 일정한 전류에서 공명주파수를 측정하기 위하여 전류원에 병렬로 가변저항을 연결하여 항상 일정한 전류가 유지되도록 조정하였다. 코일상수(K_{dc})계산방법은 식 (1)과 같다.

$$K_{dc} = \frac{B}{\frac{U_z - \Delta U_{ZR}}{R_{STD}}} \quad (1)$$

여기서 B 는 헬륨 광펄스 자기장 측정기로 측정한 지속밀도의 크기이며, U_z 는 제너표준기의 전압, ΔU_{ZR} 은 제너전압과 표준저항 양단에 유기되는 전압의 차이, R_{STD} 는 표준 저항값을 나타낸다.

2.2. 교류

교류 자기장 표준 장치는 Fig. 2와 같이, 교류 전류를 표준 솔레노이드에 흘려주어 자기장을 발생시키고, 솔레노이드에 직렬로 연결된 표준저항(R_{STD}) 양단에 유기되는 전압 및 솔레노이드의 중심부에 설치된 표준 탐지코일을 유도되는 전압을

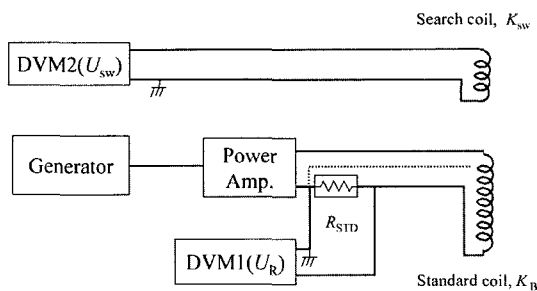


Fig. 2. Schematic diagram of AC magnetic flux density measurement system.

Table 1. Specifications of the used search coils

Coil's number	#1	#5
Coil constant, Wb/T	3.0	0.1
Uncertainty, %	0.1(2σ)	-
Resonance frequency (with cable), kHz	30.6	1047
Inductance, mH	87	0.175
Capacitance (with cable), pF	310	132
Resistance, Ω	59	4.1
Size of winding, mm	φ40 × 42	φ40 × 42
Cable	Coaxial 1.4 m	Twisted 1.8 m
Calibration	VNIM, Russia	Frequency dependence calculated to 20 kHz
Coil frequency-dependence factor, $k(f)k_{dc}$	$1 + \left(\frac{f_{kHz}}{30.6}\right)^2$	$1 + \left(\frac{f_{kHz}}{1047}\right)^2$

측정하는 장치 등으로 구성되어 있다. KC에 사용된 이동용 표준코일의 교류 자기장은 전자기유도 방법을 사용하여 주파수 범위 0.1~20 kHz에서 2개의 표준 탐지코일을 사용하여 KRISS의 표준솔레노이드와 비교 측정하였다. 장비로 인한 측정값의 차이를 줄이기 위해 동일한 모델의 DVM을 사용하였다(Fig. 2에서 U_{sw} , U_R). 주파수 범위 0.1~1 kHz에서는 표준 탐지코일 (#1)을 사용하였으며, 120 kHz 범위에서는 주파수의 영향이 적게 설계된 탐지코일 (#5)을 이용하여 표준탐지코일과 비교 측정하였다. 사용된 탐지코일 #1과 #5의 특성은 Table 1과 같다. 전자기유도를 이용한 방법은 1차 코일인 KC용 표준코일에 주파수 f 인 전류 I 를 흘리고, 그 중심부에 2차 코일인 표준탐지코일을 설치하여 유도되는 전압 U_{sw} 를 측정하였다. 여기서 U_{sw} 는 을 식 (2)와 같이 표시할 수 있다.

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

여기서 K_B 는 표준코일의 코일상수, K_{sw} 는 탐지코일의 코일유효단면적, $I = U_R/R_{STD}$ 로써 U_R 은 표준저항에 유도되는 전압 및 R_{STD} 는 표준 저항값을 나타낸다. 교류 코일상수는 주파수 범위(0.1, 0.15, 0.2, 0.3, 0.4, 0.7, 1, 1.5, 2, 3, 5, 7, 10, 12, 15, 18, 20 kHz)에서 측정하였다. 주파수 0.1~1 kHz 범위에서 표준코일의 코일상수는 탐지코일 #1을 사용하여 직접적인 방법으로 측정하였다. 주파수 120 kHz 범위에서는 탐지코일 #5을 사용하여 측정하였으며, 1 kHz에서 절대 측정된 자기장 값과 상대적인 비율을 측정하여 계산하였다.

III. 측정결과 및 토의

3.1. 표준코일의 자기장균일도 측정

KC용 표준코일을 지구자기장이 상쇄된 공간에 설치하여,

100 mA의 전류를 흘리고, 코일 중심부근에서 정밀자기장측정 장치인 헬륨 광펌핑 자기장측정기를 이용하여 균일도를 측정 한 결과는 Fig. 3과 같다. Protocol에 주어진 균일도와 KRISS 에서 측정한 값이 잘 일치됨을 알 수 있다.

3.2. 직류 코일상수 측정

측정방법은 Fig. 1에서 KRISS 및 KC용 표준솔레노이드를 지구자기장이 상쇄된 공간에 번갈아 설치하여 100 mA, 200 mA, 300 mA를 솔레노이드에 흘려준 다음, 미소한 지구자기 장의 영향 및 사용한 DVM의 offset의 영향을 배제하기 위하 여 정방향 전류를 인가하여 DVM 극성이 +, -, 역방향 전류 에서도 DVM 극성이 +, -일 때 전류 및 자기장을 측정하여 평균값을 계산하였다. 또한 측정시 표준코일의 온도에 따른 저항을 측정하여 온도 영향을 보정하였다. 100 mA에서는 1일 10회씩 80회를 측정하였고, 표준코일의 저항이 109.1Ω 일 때 코일상수 값은 2.024 110 mT/A이었으나, DVM의 저항값 측정 오차(+0.088 Ω)를 보정한 코일상수(2.024 110 mT/A × 0.999 998 468)는 2.024 107 mT/A이었다. 200 mA일 때 30회 측

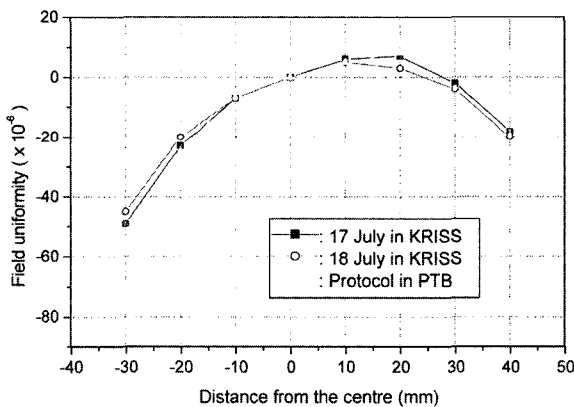


Fig. 3. Uniformity of Garrett coil transfer standard in the center region.

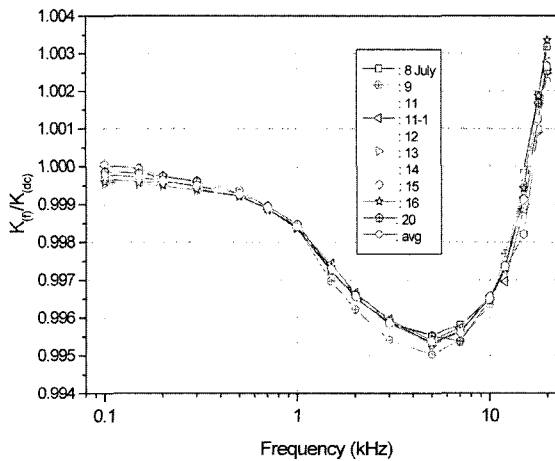


Fig. 4. Frequency dependence of the $K(f)/K_{dc}$ ratio.

정한 코일상수는 2.024 108 mT/A, 300 mA일 때 10회 측정한 코일상수는 2.024 100 mT/A이었다. 표준코일의 DC 코일상수 의 평균값은 2.024 105 mT/A으로 계산되었다.

3.3. 교류 코일상수의 측정

교류 코일상수 측정의 경우, 주파수, 인가전류 및 코일의 온 도값 등을 측정하여야하며, 특히 입력선의 커패시턴스의 영향 에 의한 코일상수 변화를 배제하기 위해 4선 연결법을 사용하

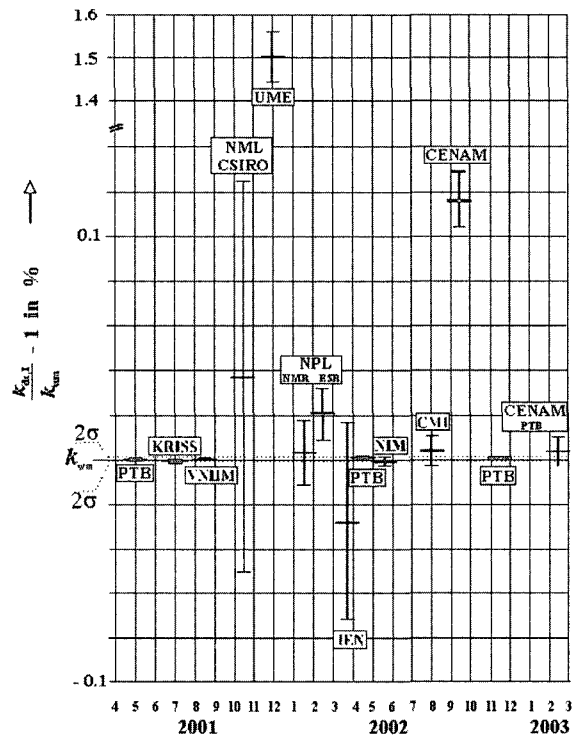


Fig. 5. DC coil constant determination by the various institutes plotted against the period when the measurements were carried out. The 2 lines represent the uncertainty of the weighted mean value k_{wm} [9].

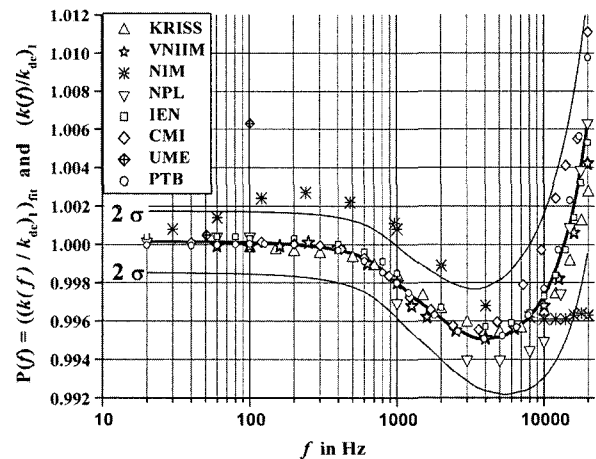


Fig. 6. Frequency dependence of the coil constant as measured by all institutes, the 2 lines are according to the uncertainty function[9].

였다. 주파수 0.1~1.0 kHz 범위에서는 탐지코일 #1을 사용하여 절대측정 방법으로 측정하였다. 주파수 범위 1.0~20 kHz 에서는 탐지코일 #5를 사용하여 상대적인 방법 즉 코일 #1을 사용하여 1 kHz에서 측정한 값과 코일 #5를 사용하여 1 kHz에서 측정한 값을 상대 비교하여 20 kHz까지 측정하였다. Fig. 4에서는 2001년 7월 8일부터 20일까지 10회 측정한 것을 주파수별로 평균값을 구하고, 앞에서 측정한 직류 코일상수(K_{dc})로 나누어 그 비율($K(f)/K_{dc}$)을 주파수별로 계산하여 그린 것을 나타낸다. 일반적으로 솔레노이드 코일의 경우 교류 특성은 2

차 함수 곡선을 나타내지만, KC용 표준솔레노이드의 코일상수는 일반적인 특성을 벗어나 약 5 kHz에서 최소가 되고, 다시 증가하는 것을 알 수 있다. 이는 일반적인 특성을 배제하여 그 나라의 측정능력을 가늠하기 위한 방법으로 생각된다.

3.4. KC 결과

KC에 참여한 나라의 직류 및 교류 자기장 측정 결과는 Fig. 5 및 Fig. 6과 같다[9]. 그 결과를 비교해보면 KRISS의 자기장 측정 및 분석 수준은 직류의 경우, VNIIM, PTB에

Table 2(a). Uncertainty budgets and evaluation in AC Measurement

Quantity X_i	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(2σ)/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	74911

Table 2(b). Uncertainty budgets and evaluation in AC Measurement

Combined standard uncertainty (1σ), %			
i	Measuring value	σ_i %	Calculation
1	$k(f)$, f=0.1 to 1kHz	0.08	$\sigma_1 = \left[u(x_{16})^2 + \left(\frac{1}{2}u(x_1)\right)^2 + \frac{1}{3}\sum_{i=2}^{10} u(x_i)^2 \right]^{1/2}$
2	$k(f)/k(1kHz)$, f=1 to 5 kHz	0.08	$\sigma_2 = \left[u(x_{17})^2 + 2 \times \frac{1}{3}\sum_{i=3}^{10} u(x_i)^2 \right]^{1/2}$
3	$k(f)/k(1kHz)$, f=5 to kHz	0.20	$\sigma_3 = \left[\mu(x_{18})^2 + 2 \times \frac{1}{3}\sum_{i=3}^{10} u(x_i)^2 + \frac{1}{3}\sum_{i=11}^{14} \mu(x_i)^2 \right]^{1/2}$
Total standard uncertainty (1σ) for $k(f)/k_{dc}$, %			
Frequency range		σ_i %	Calculation
0.1 to 1 kHz		0.08	$\sigma = (\sigma_1^2 + \sigma_{dc}^2)^{1/2}$
1 to 5 kHz		0.13	$\sigma = \left(\sigma_1^2 + \sigma_2^2 + \frac{1}{3}u(x_{15})^2 + \sigma_{dc}^2 \right)^{1/2}$
5 to 20 kHz		0.22	$\sigma = \left(\sigma_1^2 + \sigma_3^2 + \frac{1}{3}u(x_{15})^2 + \sigma_{dc}^2 \right)^{1/2}$

이러한 좋은 결과를 얻었으며, 교류자기장의 경우에도 선진국 수준임을 알 수 있다.

IV. 불확도 분석

직류 코일상수의 불확도를 분석한 결과 그 요인은 전류 불안정도 등 7개이며, 합성표준불확도(combined standard uncertainty, 1σ)는 4×10^{-6} 이었다. 교류의 경우 Table 2와 같이 불확도 요인은 탐지코일의 위치 및 각도 등 19개이며, 주파수에 따른 합성표준불확도는 0.1~1 kHz 범위에서 0.08%, 1~5 kHz에서 0.13%, 5~20 kHz에서 0.22%이었다[7,8].

V. 결 론

자기장 측정기 교정 및 자기관련 시험 등에 사용되는 직류 및 교류 자기장 표준시스템을 1 mT 이하 범위에서 제작하여 확립하였다. 이를 이용하여 연 500여건의 교정 및 자기관련 시험을 수행하고 있으며, 자기장 측정값의 국제적 동등성을 확보하기 위하여 KC에 참여하였다. 주어진 KC용 솔레노이드의 직류-교류 특성을 KRISS 표준솔레노이드와 비교 측정하였고, 또한 그 불확도 요인을 분석하였다. 자기장분야 KC 결과를 분석해보면, KRISS의 자기장 측정 및 분석 수준이 선진국과 대등함을 알 수 있다. 이러한 KC 결과는 그 나라에서 유지하는 자기분야의 표준 및 측정 능력을 가늠할 수 있는 척도로 사용될 수 있으며, 참여기관들이 발행하는 교정 및 측정성적서의 효력을 국제적으로 상호 인정하는 토대가 될 것이다.

List of Symbols

PTB : Physikalisch - Technische Bundesanstalt, Braunschweig, Germany
 KRISS : Korea Research Institute of Standards and Science, Daejeon, Republic of Korea
 VNIIM : 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, Queretaro, Mexico

List of Quantity X_i (Table 2(a))

X_1 : Calibration of 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 : Environment
 X_{10} : DVM2 frequency-response
 X_{11} : Coil frequency-response
 X_{12} : DVM1 frequency-response
 X_{13} : Cable capacitance bypassing resistor
 X_{14} : Solenoid-to-coil capacitance
 X_{15} : Two-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} uncertainty

참 고 문 헌

- [1] 임무택 외, "지자기와 그의 역할", 지자기 전국관측망 구축을 위한 연구회 보고서, 과학재단, 1996.
- [2] 송양섭 외, "핵심측정표준 국제비교", KRISS/IR-2002-017, 17-21(2001).
- [3] K. Weyand, "Technical protokol : Key comparison CCEM.M-K1, Magnetic flux density by means of a transfer standard coil", PTB, May, 2001.
- [4] 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).
- [5] 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).
- [6] 박포규, 김영균, V. Ya. Shifrin, and V. N. Khorev, "단전류 다층 솔레노이드 방법을 사용한 저자기장 표준시스템 제작", 한국자기학회지, **11**, 38-43(2001).
- [7] 정낙삼 외, "측정불확도 표현 지침", KRISS-99-070-SP, 27-33(1999).
- [8] 송양섭 외, "핵심측정표준 국제비교", KRISS/IR-2002-017, 154-175(2001).
- [9] K. Weyand, "Drift B for key comparison CCEM.M-K1, Magnetic flux density by means of a transfer standard coil", PTB, Oct., 2003.

Construction of AC-DC Magnetic Field Standard Systems and Results of International Key Comparison

Po Gyu Park* and Young Gyun Kim

Korea Research Institute of Standards and Science(KRISS), P. O. Box 102, Yuseong, Daejeon 305-600, Korea

(Received 30 October 2004, in final form 25 November 2004)

The AC-DC magnetic field standard systems were constructed for the calibration of magnetometers for low magnetic field and the tests for low magnetic field characteristics of sensors and materials. In the range of 1 mT, the expanded uncertainty of dc is 8×10^{-6} , ac uncertainties are 0.16% in 0.1~1 kHz, 0.26% in 1~5 kHz, and 0.44% in 5~20 kHz. We have been participated in international key comparison(KC) to achieve the equality and the mutual agreement between standard institutes for the results of calibrations and tests. KRISS participating in ac-dc magnetic flux density of KC got equal level of uncertainty results compare with the advanced nations. It confirm that measurement ability of magnetic flux density is high level in the world.

Key words : magnetic field, compensation of Earth's magnetic field, coil constant, international key comparison