

열전형 전류 변환기의 교류-직류 전류 변환차이 자동측정시스템 개발

권성원[†] · 정재갑 · 김문석 · 김규태 · 류제천*

Development of an automatic measurement system for the AC-DC current transfer difference of the thermal current converter

Sung-Won Kwon[†], Jae Kap Jung, Mun Seog Kim, Kye-Tae Kim, and Je Cheon Ryu*

Abstract

We have developed a dual-channel type automatic measurement system to evaluate AC-DC current transfer difference of the thermal current converter(TCC) which is primary standard of AC current. The output drift effect of the TCC is minimized by measuring simultaneously the output voltages of two TCCs using voltmeter. Furthermore, the offset voltage of the voltmeter is cancelled nearly out by taking the average values of two outputs of TCCs measured with the forward-reverse directions using dual channel scanner. The uncertainties of the automatic system were 7 to 86 $\mu\text{A}/\text{A}$ for 3 mA to 10 A at 40 Hz to 20 kHz, which were evaluated by the comparisons between adjacent range of TCCs and inter-comparison with national measurement institute of Germany(PTB). The capability for ac-dc transfer difference measurement was improved by one order compared with that for the manual ac-dc measurement system.

Key Words : thermal current converter, ac-dc current transfer difference, automatic ac-dc difference measurement system, uncertainty

1. 서 론

교류전류표준은 직류전류표준으로부터 유도되고, 교류전류표준을 유지하고 이를 산업체나 교정기관에 보급하기 위해서 교류-직류 전류 변환 비교기(AC-DC Current Transfer Comparator, 이하 교직변환기)를 사용한다. 교직변환기가 갖고 있는 교류-직류 전류 변환차이(이하 교직차) (AC-DC Current Transfer Difference)의 정확한 평가는 표준유지 및 보급의 기본이다. 여러 가지 방식의 교직변환기중에서 최근에는 주파수 및 전류의 범위가 넓고, 교직차가 작은 열전형 교직변환기가 세계적으로 널리 사용되고 있다^[1-5].

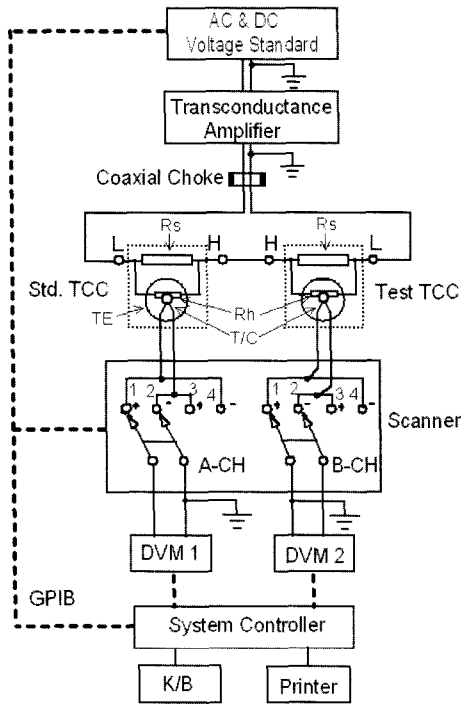
열전형 교직변환기중에서 가장 정확한 것은 5 mA ~50 mA에서 교류전류 표준기로 활용되고 있는 다중접합 열전변환기(multi-junction thermal converter, MJTC)로써, 10 kHz 이하에서 0.5 $\mu\text{A}/\text{A}$ 이하의 교직차를 갖

는다^[6,7]. 또 증폭기를 채용하여 약 1 mV까지의 교류전압을 정확하게 측정하기 위한 상용의 교직변환기와 교류전류분류기를 병렬로 연결하여 전류의 측정범위를 0.1 mA까지 확장한 전류표준기도 활용되고 있으며^[7], 대부분의 표준기관에서 교류전류표준의 주파수 범위는 30 kHz 이하이나, 20 A에서 100 kHz까지 확장한 경우도 있다^[6].

본 연구에서는 열전형 전류 변환기(Thermal Current Converter, TCC)를 교류전류의 1차 표준기로 활용하여 교직차 측정을 자동화하였다. 교직차의 자동 측정 장치는 비교 측정하는 두 TCC의 출력전압을 각각 mV 측정기로 직접 측정하는 이중 채널방식과^[8], 각 TCC의 출력전압과 역방향으로 안정된 mV source를 연결한 후 그 차이전압을 각각 측정하여 측정 분해능을 증가시키는 방식이 있다^[9]. 또한 TCC의 출력전압 단자에 mV 증폭기를 연결하여 약 1 V로 증폭한 후 정확도가 높은 범용 전압측정기를 이용하여 출력전압을 측정하는 방식도 있다^[10]. 본 연구에서는 두 TCC의 출력을 직접 측정하는 이중채널방식을 적용하였으나, 향후 mV 증폭기를 채용할 예정이다.

한국표준과학연구원(Korea Research Institute of Standards and Science)
*(주)케이엘씨 테크놀로지(KMC Technology Co., Ltd.)

[†]Corresponding author: swkwon@kriss.re.kr
(Received : May 30, 2005, Accepted : August 11, 2005)



Rs : 교류전류 분류기 저항
 Rh : 열전소자의 히터 저항
 T/C : 열전소자의 출력 검출용 열전대
 TE : 열전소자(진공유리구속의 Rh와 T/C의 조합을 말하며, 이들은 미소한 유리구슬로 절연됨)

그림 1. 이중채널방식 교류-직류 변환차이 자동측정시스템
 Fig. 1. Block diagram of the Dual Channel automatic AC-DC Difference Measurement System.

TCC는 열전소자(Thermo Element: TE)와 교류전류 분류기(AC Current Shunt: Rs)가 병렬로 연결된 구조를 갖는 실험치 센서로서^[11](그림 1 참조), 열전소자의 히터저항(Rh)에 흐르는 교류전류에 의한 줄(Joule) 열과 동일한 열 효과를 나타내는 직류전류를 측정하여 직류표준에 소급된 교류전류표준을 실현하는 측정기기이다. TCC의 교직차(δ)는 식 (1)과 같이 정의한다^[12].

$$\delta_i = \frac{I_{ac} - I_{dc}}{I_{dc}} \quad (1)$$

여기서 I_{ac} 와 I_{dc} 는 각각 TCC에서 동일한 출력을 얻는데 요구되는 교류전류와 직류전류 입력을 가리키며, 직류전류는 정(+), 부(-)의 두 방향 전류입력의 평균값이다.

본 연구에서는 5 mA~20 A의 측정범위를 갖는 TCC의 교직차를 평가하기 위한 이중채널방식 교류-직류

변환차이 자동측정시스템을 개발하였다. 이로 인하여 수동측정으로 인한 개인오차를 제거할 수 있게 되었으며, 측정시간의 단축과 측정시스템의 활용도를 크게 향상시켰다.

2. 교직차 자동측정시스템 및 측정원리

2.1. 시스템 구성

그림 1은 TCC의 교직차 자동측정시스템으로서, 전류 발생기용 기준전압 발생기(AC & DC Voltage Standard), 전류발생기(Transconductance Amplifier), 스캐너 및 2대의 전압계와 시스템제어기 등으로 구성된다. 입력전압에 비례하여 1 A/V의 컨덕턴스로 전류를 발생시키는 전류발생기의 직류 및 교류 기준전압은 안정도가 우수한 미터교정기(Fluke 5700A)로 공급하였으며, 분해능이 10 nV인 두 대의 전압계(Keithley 182)를 사용하여 TCC의 출력을 동시에 측정함으로써 출력 드리프트의 영향을 효과적으로 최소화할 수 있게 하였다. 또 열기전력이 작은 이중채널 스캐너를 사용하여 TCC의 출력을 순방향과 역방향으로 두 번 측정하고, 그 평균을 하나의 측정값으로 삼아 전압계 자체의 오프셋과 연결회로의 열기전력이 상쇄되도록 측정시스템을 구성하였다^[13].

TCC의 교직차는 표준 TCC와 피측정 TCC를 직렬로 연결하고, 교류 및 직류 입력전류에 대한 피측정 TCC 출력을 동일하게 조정된 후 표준 TCC의 출력을 각각 측정하여 그 차이를 교직차의 계산에 적용한다. 두 대의 TCC를 연결할 때 특히 주의해야 한다. 가능한 짧은 도선으로 두 개의 high(H) 단자끼리 연결하고, 두 개의 low(L) 단자를 전류발생기의 출력단자에 각각 연결하면, TCC의 케이스와 접지사이의 부유용량을 통한 누설전류가 흐르더라도 두 개의 TCC에는 동일한 전류가 흐르기 때문에 측정오차를 최소화 할 수 있다^[11].

TCC의 출력 측정용 도선은 열기전력이 작은 두 가닥의 동선을 꼬아서 차폐시킨 특수선을 사용하여 외부 자계에 의한 루프 결합면적을 줄임으로써 오차를 줄일 수 있도록 하였다. 또 투자율이 큰 토로이달 코어에 동축선을 10회 권선하여 만든 동축 초크(Coaxial choke, 또는 current equaliser)^[14]를 전류 입력용으로 사용함으로써, 동축선의 내부도체와 외부도체에 흐르는 전류의 크기가 동일하도록 하였다. 정밀측정에서 동축선의 내부 및 외부도체에 흐르는 전류의 크기가 다르다면 이 차이전류가 동축선 부근의 회로와 결합하여 측정오차를 유발할 수 있기 때문이다.

한편 TCC의 사용범위는 정격전류의 50%~110% 범위인데, 이 범위보다 큰 전류가 공급되면 TCC의 히

터가 파괴된다. 자동측정과정에서 과전류로 인한 TCC의 파손을 방지하기 위하여 전류발생기의 출력전류가 측정전류의 105%를 넘지 않도록 전류제한기능을 채용하였다.

2.2. 교직차 측정방법

피측정 TCC의 교직차 δ 를 측정하기 위하여 입력전류를 DCF(1)-DCR(2)-DCF(3)-DCR(4)-DCF(5)-AC(6)-DCR(7)-AC(8)-DCF(9)-AC(10)-DCR(11)-AC(12)-DCF(13)-AC(14)-DCR(15)-AC(16)-DCF(17)-AC(18)-DCR(19)-AC(20)-DCF(21)의 순서에 따라 약 60초 간격으로 공급하면서 각 입력전류에 대한 TCC 출력을 측정하되 스캐너로 전압계 입력의 극성을 바꾸어 각각 측정하고 그들의 평균값을 얻는다. 여기서 DCR, DCF 및 AC는 각각 역방향 직류입력, 순방향 직류입력 및 교류입력 전류이다. 입력전류와 스캐너의 접점이 바뀔 후 TCC 출력과 스캐너 접점이 안정되도록 각각 40초 및 20초를 기다린 후, 표준 TCC의 출력 E_s 와 피측정 TCC 출력 E_t 를 동시에 측정한다. 여기서 교직차(δ)는 3개의 측정단계(DCR(7)-AC(8)-DCF(9) 또는 AC(10)-DCR(11)-AC(12))에서 측정된 값을 이용하여 다음 식(2)와 같이 계산한다^[8].

$$\delta_t = \frac{(E_{as} - E_{ds})}{n_s E_{as}} - \frac{(E_{at} - E_{dt})}{n_t E_{at}} + \delta_s \quad (2)$$

여기서 δ_s 는 표준 TCC의 교직차이고, E_{as} 와 E_{ds} 는 각각 교류전류가 공급될 때의 표준 및 피측정 TCC의 출력이며, E_{ds} 와 E_{dt} 는 각각 직류전류가 공급될 때의 표준 및 피측정 TCC의 출력이다. 직류입력인 경우에는 DCF와 DCR 입력전류에 대한 출력전압의 평균값이다. 변수 n_s 와 n_t 는 각각 표준 및 피측정 TCC의 입력-출력 사이의 특성을 나타내는 값으로서($n = \Delta E \cdot I / E \cdot \Delta I$), 측정단계 DCF(1)-DCR(2)-DCF(3)-DCR(4)에서의 측정값을 이용하여 계산된다.

측정전류 근처의 아주 좁은 구간에서는 TCC의 입력-출력 특성의 직선성이 열전형 전압변환기에서와 같이 우수하다^[13]. TCC의 출력으로부터 n_s 및 n_t 를 계산하기 위하여 측정단계 DCF(1) 및 DCR(2)에서는 시험전류의 100.1%의 전류를 공급하고, 측정단계 DCF(3) 및 DCR(4)에서는 시험전류의 99.9%를 공급하며, 측정단계 DCF(1)-DCR(4)에서 입력-출력 특성그래프의 기울기를 계산한다. DCF(5) 및 DCR(7) 단계에서의 피측정 TCC 출력의 평균값이 교류전류에 의한 출력과 20 μ V/V 이하에서 일치하도록 앞에서 구한 기울기를 이용하여 새로운 교류전류 설정값을 계산하고 AC(8) 단계에

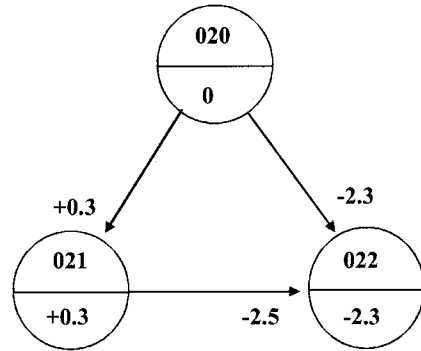


그림 2. 5 mA 열전형 전류 변환기의 상호비교
Fig. 2. Intercomparison of the 5 mA the TCCs.

서 교류전류를 조정한다.

δ_s 는 3개의 측정단계 DCR(7)-AC(8)-DCF(9)의 자료로부터 측정단계 DCF(9)의 다음에 계산되고, 동일한 순서에 따라 각 해당 자료를 이용하여 측정단계 DCR(12), DCF(15), DCR(18), DCF(21)의 다음에 각각 계산되며, 이들 5회의 평균값을 한 개의 교직차 측정값으로 삼는다.

3. 시스템 평가

교직차 자동측정시스템의 측정능력을 분석하기 위하여 정격전류와 구조가 동일한 5대의 5 mA TCC(S/N: 020, 021, 022, 038, 039)를, 3대의 200 mA TCC를 각각 상호 비교 측정하였다. 또 3 A TCC 1대와 5 A TCC 2대를 3 A에서 상호 비교 측정하였다. 그림 2는 5 mA TCC끼리 1 kHz에서 상호 비교 측정된 대표적인 예로서, 원의 아래 값은 해당 TCC의 교직차이고, 화살표 옆의 숫자는 두 TCC의 교직차의 차이($\delta_h - \delta_t$)이며, δ_h 및 δ_t 는 각각 화살표의 머리(head) 및 꼬리(tail)의 TCC가 갖는 교직차 값이다.

측정시스템 자체의 비교측정오차가 없다면 화살표를 따른 교직차의 차이의 합은 영(zero)이 되어야 한다. 위의 예에서 직접 비교측정(020→022)한 결과와 간접 비교측정(020→021→022)사이의 불일치(closure error)는 +0.1 μ A/A이다. 이와 같은 방법으로 주파수 40 Hz, 500 Hz, 1 kHz 및 10 kHz에서 비교 측정된 결과, 그림 3에서와 같이 5 mA TCC들의 경우 closure error의 최대 값은 10 kHz에서 1.1 μ A/A이었다. 200 mA TCC에 대한 비교측정결과 closure error는 3.1 μ A/A 이하로 나타났으며, 3 A 비교측정의 경우는 최대 5.4 μ A/A로 나타났다.

한편 TCC가 갖고 있는 교직차의 정확도를 평가하기 위하여 독일의 표준기관인 독일연방물리기술청(PTB)

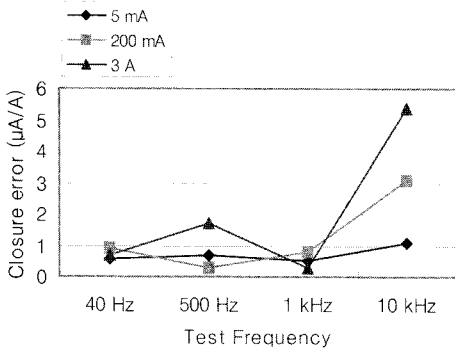


그림 3. 열전형 전류 변환기 상호비교의 불일치 오차
Fig. 3. Closure error of TCC intercomparison.

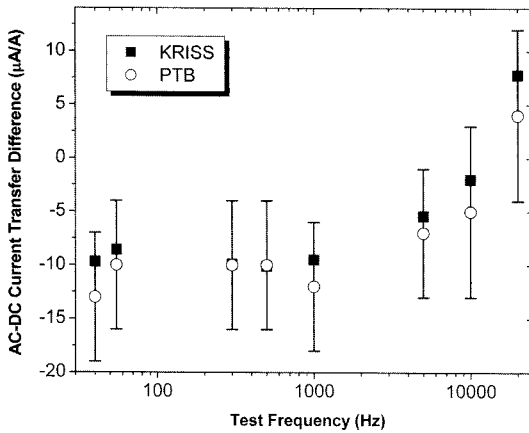


그림 4. 100 mA에서 KRISS와 PTB 사이의 비교측정 결과
Fig. 4. Intercomparison results between KRISS and PTB at 100 mA.

과 비교 측정을 수행하였다. 그림 4는 100 mA에서 측정된 결과로서, 40 Hz~10 kHz에서는 당 연구원과 PTB

결과가 약 3 µA/A 이내에서 일치하며, 20 kHz에서는 불일치도가 약 4 µA/A로 나타났다. 즉, 두 기관의 측정값은 ±2 µA/A 이하에서 서로 일치하며, 이 결과는 PTB의 불확도(그림 4에서 막대)가 6~8 µA/A로서 불확도 이내에서 두 기관의 측정결과가 잘 일치하고 있음을 보여준다.

4. 측정불확도 평가

교류-직류 변환차이는 식 (2)에서 보는 바와 같이 변수들의 선형합성(linear combination)에 의한 비이므로 합성 표준불확도(combined standard uncertainty)는 식 (3)과 같이 표현할 수 있다^[15].

$$u_c(\delta_i) = [\sum c_{\delta_i}^2 u^2(\delta_i)]^{1/2} \quad (3)$$

여기서 $u(\delta_i)$ 는 각 불확도 요인들이며, c_{δ_i} 는 불확도 요인들의 감도계수이다.

표 1은 2대의 5 mA TCC를 6회 비교 측정된 결과의 한 예이고, 표 2는 10 kHz에 대한 불확도 총괄표이다.

4.1. 반복측정에 의한 표준불확도, $u(\delta_A)$

교류-직류변환차이를 6회 반복 측정된 표준편차가

표 1. 5 mA 열전형 전류 변환기의 비교측정결과
Table 1. 5 mA TCC comparison results (µA/A)

	40 Hz	500 Hz	1 kHz	10 kHz	비교
δ_i	-2.4	-2.3	-2.4	-3.5	평균
$\sigma_{\lambda-1}$	0.4	0.4	0.6	1.3	표준편차
$u(\delta_i)$	0.2	0.2	0.1	0.4	표준불확도
자유도					5

표 2. 열전형 전류 변환기의 비교측정 불확도 총괄표 (3 mA, 20 kHz)

Table 2. Uncertainty budget of the TCC comparison at 3 mA and 20 kHz (µA/A)

불확도 요인	기호	표준불확도	확률분포	적용인자	자유도
반복 측정	$u(\delta_A)$	0.53	정규	$\sqrt{6}$	5
TCC 입출력 상관계수(n)	$u(\delta_{in})$	0.04	정규	-	5
표준 TCC	$u(\delta_s)$	3	정규	2	∞
Closure error	$u(C_E)$	0.64	직사각형	$\sqrt{3}$	∞
Comparator	$u(C_P)$	1.73	직사각형	$\sqrt{3}$	∞
주변온도영향	$u(T)$	0.35	직사각형	$\sqrt{3}$	∞
전류발생기 불완전조정	$u(I_{adj})$	0.58	직사각형	$\sqrt{3}$	∞
합성 표준불확도	$u_c(\delta_i)$	3.63	-	-	10947
확장 불확도	$U(\delta_i)$	7.26	-	-	$k=2$

1.3 $\mu\text{A/A}$ 이므로 반복측정에 의한 표준불확도는 $u(\delta_A) = 1.3/\sqrt{6} = 0.53 \mu\text{A/A}$ 이고, 자유도는 5이다.

4.2. 상관계수에 의한 표준불확도, $u(\delta_{n_i})$

TCC의 입력변화에 대한 출력변화의 관계를 나타내는 상관계수(n_i)에 의한 표준불확도 $u(\delta_{n_i})$ 는 식 (4)와 같이 구할 수 있다.

$$u(\delta_{n_i}) = [u(n_i)/n_i] \cdot \delta_i \tag{4}$$

여기서 n_i 는 n_s, n_r 의 평균값으로서 $u(n_i)/n_i$ 는 n_i 의 반복 측정에 의한 상대 표준불확도이며, δ_i 는 피측정 TCC의 교직차이다. 그런데 식 (2)의 제2항은 분자의 출력전압차이가 거의 영이 되도록 입력전류를 조정하므로 n_i 에 의한 영향은 무시할 수 있다. n_s 의 상대 표준편차는 일반적으로 약 0.3~1%이므로, 최대 상대 표준편차는 $u(\delta_{n_i}) = 0.01 \cdot \delta_i$ 이다. 위의 예에서는 δ_i 가 $-3.5 \mu\text{A/A}$ 이므로 $u(\delta_{n_i}) = 0.04 \mu\text{A/A}$ 이며, 자유도는 5이다.

4.3. 표준 TCC 및 측정불일치에 의한 표준불확도, $u(\delta_s), u(C_E)$

표준 TCC의 교정불확도가 $6 \mu\text{A/A}$ ($k=2$)이므로 표준불확도는 $u(\delta_s) = 6/2 = 3 \mu\text{A/A}$ 이며, 자유도는 ∞ 이다. 또한 5 mA TCC사이의 측정 불일치(closure error)가 $1.1 \mu\text{A/A}$ 이므로 표준불확도 $u(C_E)$ 는 $0.64 \mu\text{A/A}$ 이며, 자유도는 ∞ 이다.

4.4. 측정시스템에 의한 표준불확도, $u(C_p)$

교직차 측정시스템에 의한 불확도는 독일 PTB와 당 연구원에서의 측정값 차이를 불확도 요인으로 반영하였다. 10 kHz에서의 차이가 $-3 \mu\text{A/A}$ 이므로 표준불확도 $u(C_p) = 3/\sqrt{3} = 1.73 \mu\text{A/A}$ 이며, 자유도는 ∞ 이다.

4.5. 주변온도 변화에 의한 표준불확도, $u(T)$

주변온도 변화에 따른 불확도를 평가하기 위하여 5 mA TCC를 22.0°C 및 25.0°C에서 교직차를 평가한 결과 교직차의 최대차이는 10 kHz까지 $0.6 \mu\text{A/A}$ 이하였으며, 측정온도차이로 인한 표준불확도는 $u(T) = 0.6/\sqrt{3} = 0.35 \mu\text{A/A}$ 이며, 자유도는 ∞ 이다. TCC의 교직차는 차폐실에서 수행하며, 실험실의 온도를 (23.0 \pm 1)°C로 유지하므로 온도변화로 인한 표준불확도는 $0.35 \mu\text{A/A}$ 이하로 판단된다.

4.6. 전류발생기 불완전한 조정으로 인한 표준불확도, $u(I_{adj})$

DCF(5) 및 DCR(7) 단계에서 직류전류의 양극성 입

력에 의한 피측정 TCC 출력 평균값이 교류전류에 의한 출력과 $20 \mu\text{V/V}$ 이하에서 일치하도록 앞 단계에서 구한 기울기를 이용하여 새로운 교류전류 설정값을 계산한 후 AC(8) 단계에서 교류전류를 조정한다. 기울기를 구하기 위한 입력전류의 변화범위를 시험전류에서 $\pm 0.1\%$ 및 $\pm 0.5\%$ 변화시켜 교직차를 평가하여 차이를 교류전류의 불완전 조정으로 인한 불확도로 추정하였다. 시험결과 그 차이는 약 $1 \mu\text{A/A}$ 이었으며, 이로 인한 표준불확도는 $0.58 \mu\text{A/A}$ 이고, 자유도는 ∞ 이다.

합성 표준불확도는 식 (3)을 이용하여 계산하면 약 $3.63 \mu\text{A/A}$ 이며, 유효자유도는 식 (5)를 이용하여 계산하면 10947이다.

$$v_{eff(\delta_i)} = \frac{u_c^4(\delta_i)}{\frac{u^4(\delta_i)}{v_{\delta_i}}} = \left(\frac{3.63^4}{\frac{0.53^4}{5} + \frac{0.04^4}{5} + \frac{3^4}{\infty} + \frac{0.64^4}{\infty} + \dots} \right) \cong 10947 \tag{5}$$

각 불확도 요인들은 상관관계가 없으므로 감도계수가 모두 1이고, 신뢰수준 95.5%에서 유효 자유도 10947에 따른 포함인자(coverage factor) $k=2$ 를 적용하면 최

표 3. 열전형 전류 변환기의 비교측정 확장 불확도 (신뢰 수준: 95.5%, $k=2$)

Table 3. Expanded uncertainty for the TCC comparison (CL: 95.5%, $k=2$) ($\mu\text{A/A}$)

	40 Hz	500 Hz	1 kHz	10 kHz	20 kHz
3 mA	7	7	7	8	8
5 mA	7	7	7	8	8
10 mA	8	7	7	8	10
20 mA	7	7	7	7	8
30 mA	11	8	9	10	12
50 mA	8	7	7	8	9
100 mA	8	7	7	10	10
200 mA	8	7	7	10	11
300 mA	14	13	13	14	19
500 mA	13	13	13	13	18
1 A	12	11	11	18	26
2 A	24	24	26	66	-
2.5 A	24	23	25	65	-
5 A	22	21	22	71	-
10 A	22	21	22	86	-

종의 확장 불확도(Expanded uncertainty)는 7.26 $\mu\text{A/A}$ 이다^[15].

표 3은 위와 같은 과정을 거쳐서 평가한 3 mA~20 A 범위의 TCC에 대한 확장 불확도이다.

6. 결 론

교류전류의 1차 표준기인 열전형 전류변환기(TCC)의 교류-직류 전류 변환오차를 비교평가하기 위한 이중채널방식 자동측정시스템을 개발하였다. 본 연구에서는 5 mA~20 A에서 15개의 TCC를 교류전류 표준기로 사용하였으며, TCC 상호비교측정 및 국제비교를 통하여 이들에 대한 측정능력을 평가한 결과 주파수 범위 40 Hz~20 kHz에서 측정불확도는 7~86 $\mu\text{A/A}$ 이었다.

TCC의 교적차 자동측정시스템의 개발을 통하여 국가표준유지 및 산업체지원을 위한 측정효율을 크게 향상하였으며, 수동측정으로 인한 오차유발방지와 함께 측정불확도를 한 단계 향상시킬 수 있게 되었다. 앞으로 여러 나라의 국가표준기관이 참여하는 국제비교측정에 참여하기 위해서 동축형 TCC^[10,16]를 개발, 불확도를 개선하여 국제수준의 국가표준을 유지하여야 한다.

참고 문헌

[1] F. L. Hermach, "Thermal converters as AC-DC transfer standards for current and voltage measurements at audio frequencies", *J. Res. of NBS*, vol. 48, no. 2, pp. 121-138, 1952.

[2] E. S. Williams, "Thermal current converters for accurate AC current measurement", *IEEE Trans. Instrum. Meas.*, vol. IM-25, no. 4, pp. 519-523, 1976.

[3] B. D. English, "AC-DC transfer standards-present status and future directions", *IEEE Trans. Instrum. Meas.* vol. IM-34, no. 2, pp. 285-290, 1985.

[4] B. D. English, "Standards for AC-DC transfer", *Metrologia*, vol. 29, pp. 191-199, 1992.

[5] M. Klonz, "Current developments in accurate AC-DC transfer measurements", *IEEE Trans. Instrum.*

Meas., vol. IM-44, no. 2, pp. 363-366, 1995.

[6] J. R. Kinard, T. E. Lipe, and C. B. Childers, "Extension of the NIST AC-DC difference calibration service for current to 100 kHz", *J. Res. Natl. Inst. Stand. Technol.*, vol. 102, pp. 75-83, 1997.

[7] K. E. Rydler and V. Tarasso, "Current AC-DC transfer measurements in the microampere range", *IEEE Trans. Instrum. Meas.* vol. IM-50, no. 2, pp. 342-344, 2001.

[8] E. S. Williams and J. Kinard, "A dual-channel automated comparator for AC-DC difference measurements", *IEEE Trans. Instrum. Meas.*, vol. IM-34, no. 2, pp. 290-294, 1985.

[9] K. R. Rydler, "High precision automated measuring system for AC-DC current transfer standards", *IEEE Trans. Instrum. Meas.*, vol. IM-42, no. 2, pp. 608-611, 1993.

[10] I. Budovsky, "AC-DC difference calibrations on resistors at NML", *Proceedings, Metrology Society of Australia Biennial Conference*, Melbourne, pp. 129-133, 1997.

[11] 권성원, 이래덕, M. Klonz, "교류전류 1차 표준용 열전형 전류변환기의 제작", *센서학회지*, 제1권, 제1호, pp. 77-83, 1992.

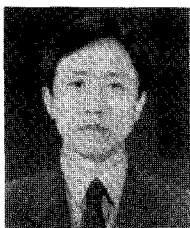
[12] J. R. Kinard, T. E. Lipe, and C. B. Childers, "AC-DC difference relationships for current shunt and thermal converter combinations", *IEEE Trans. Instrum. Meas.*, vol. IM-40, no. 2, pp. 352-355, 1991.

[13] 권성원, 조용명, 김규태, 강진홍, 박영태, "교류-직류 변환오차 자동 측정시스템", *센서학회지*, 제7권, 제6호, pp. 401-408, 1998.

[14] D. N. Homan, "Applications of coaxial chokes to AC bridge circuits", *J. Res. of NBS*, vol. 72c, pp. 161, 1968.

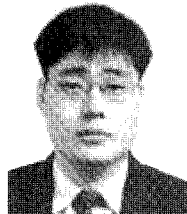
[15] ISO/IEC/OIML/BIPM, "Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement", 1993(E).

[16] M. Klonz, et al., "AC-DC current transfer step-up and step-down calibration and uncertainty calculation", *IEEE Trans. Instrum. Meas.*, vol. IM-51, no. 5, pp. 1027-1034, 2002.



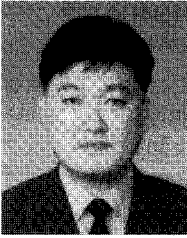
권성원 (權聖遠)

- [센서학회지 제1권, 제1호 논문 92-09, p. 77] 참조
- 1978년 ~ 현재 한국표준과학연구원 근무
- 주관심분야 : 교류전압/전류의 정밀측정 기술개발, 측정자동화, 센서 및 MEMS, 고전압/대전류계측기술



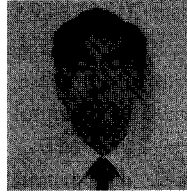
정재갑 (鄭在甲)

- 1965년 7월 4일생
- 1998년 고려대 물리학과 졸업(이학박사)
- 2001년 ~ 현재 한국표준과학연구원 근무
- 주관심분야 : 고전압/대전류 국가표준, 전기장측정기술



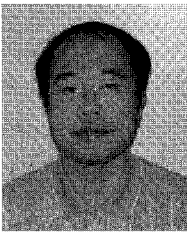
김 문 석 (金紋奭)

- 1966년 7월 16일생
- 1997년 충북대학교 물리학과 졸업 (이학박사)
- 1997 ~ 2001년 포항공대 초전도연구단 선임연구원
- 2001 ~ 2003년 오하이오 주립대 연구원
- 2003년 ~ 현재 한국표준과학연구원 근무
- 주관심분야 : 직류/교류 조셉슨전압표준, 고온초전도체의 열요동 및 에너지갭 특성



김 규 태 (金奎泰)

- 1983 인하대학교 졸업(공학사)
- 1985 한국과학기술원 물리학석사
- 1989 한국과학기술원 물리학박사
- 1993 독일연방물리기술청 박사후 연수
- 1989 ~ 현재 한국표준과학연구원 근무 (현 전기자기그룹장)
- 주관심분야 : 전기정밀측정, 조셉슨전압 표준



류 제 천 (柳濟天)

- 1963년 8월 8일생
- 1986 부산대학교 물리학과 졸업
- 1988 부산대학교 물리학석사
- 1990 ~ 1993 장백기전 공장자동화부
- 1998 부산대학교 물리학박사
- 2001 ~ 현재 KRISS 위축연구원
- 2002 ~ 현재 (주)케이엠씨 테크놀로지 (부설연구소장)
- 현재 산업자원부 부품소재통합연구단 전문과제심사위원
- 주관심분야 : RF부품소재, 측정자동화 및 시스템구현