

교류전류 1차 표준용 열전형 전류변환기의 제작

權聖遠*, 李來德**, Manfred Klonz***

Fabrication of the Thermal Current Converters as the Primary AC Current Standard

Sung Won Kwon, Rae Duk Lee, and Manfred Klonz

요 약

저주파에서의 교류전류 1차표준은 교류-직류 변환기를 이용하여 직류전류표준으로부터 유도된다. 전류측정범위 5 mA~20 A, 주파수범위 10 Hz~100 kHz에서 교류전류의 1차표준기로 사용될 15개의 교류-직류 열전형 전류변환기를 제작 및 평가한 결과, 이를 이용한 교류전류표준의 유지 및 보급의 측정불확도는, 주파수 20 kHz이하에서 측정전류 20 mA까지는 최대 52 ppm, 100 mA까지는 60 ppm으로 확인되었고, 측정전류 및 주파수가 증가함에 따라 200 ppm까지 증가하는 것으로 나타났다.

Abstract

A primary standard of ac current at low frequency is derived from the standard of dc current by ac-dc transfer instrument. A set of 15 thermal current converters(TCCs) have been constructed as the primary current standards from 5 mA to 20 A at the frequency range of 10 Hz to 100 kHz. It is evaluated that the uncertainties for the maintenance and dissemination of ac current standard are less than 52 ppm up to 20 mA and 20 kHz, 60 ppm up to 100 mA and 20 kHz, and rising to 200 ppm at higher currents and frequencies.

I. 서 론

교류전류의 1차표준은 직류전류표준으로부터 유도되며, 교류전류표준을 유지하고 이를 보급하기 위해서, 교류-직류전류 변환기(ac-dc current transfer instrument) (이하 교직변환기)가 사용되며, 이 교직변환기가 갖고 있는 교류-직류전류 변환차이(ac-dc current transfer difference: δ_i) (이하 교직차)를 정확히 평가해야 한다. 여러가지 교직변환기중에서 최근에는 사용 주파수 및 전류의 범위가 넓고, 교직차가 작은

열전형(thermal transfer) 교직변환기가 세계적으로 널리 사용되고 있다.^[1,2,3]

지금까지 당 연구원(KRISS)의 교류전류표준으로서 상용의 열전형 교직변환기가 사용되어 왔다. 이 변환기는 14개의 전류측정범위에 따라 14개의 교류전류분류기(ac current shunt)를 1개의 열전변환기(thermal converter; TC)와 각각 병렬연결하여 사용할 수 있도록 구성되어 있으며, 1차표준기로 사용하기 위해서 이들 전체 장비를 외국의 선진표준기관에 의뢰하여 교직차를 교정하였다. 또한 TC에 대한 과전류 보호회로의 미비로 측정 및 교정작업 중 TC가 소손되기 쉬우며, 1개 뿐인 TC가 소손될 경우 교체된 TC와 함께 14개의 전류분류기 전체를 재평가받아야 하는 문제점을 지니고 있었다.

이러한 문제점을 해결하기 위하여, 교류전류의 1차표준으로 사용될 수 있는 새로운 형태의 열전형 전류변환기(thermal current converter; TCC)를 독일

* 正會員 : 韓國標準科學研究院
(Korea Research Institute of Standard and Science)

** 韓國標準科學研究院
(Korea Research Institute of Standard and Science)

*** 독일연방물리기술청
(Physikalisch-Technische Bundesanstalt, PTB, Germany)
<접수일자 : 1992년 6월 18일>

연방물리기술청(PTB)과의 공동연구로 제작하였다. 이 TCC들은 전류측정범위마다 각각의 독립된 TC에 측정범위별 교류전류분류기를 병렬결합시켰으며, 각 TCC의 전류측정범위는 정격의 50~120%까지 허용되므로, 임의의 TCC가 파손되더라도 그것과 이웃하는 2개의 TCC들과의 상호비교측정을 통하여 수리된 TCC의 교직차를 간편하게 결정할 수 있게 되었다.

II. TCC의 구조 및 제작

TCC는 열량계방법(calorimetric method)에 기초를 두고 있는데, 교류전류에 의한 가열선(heater)의 저항(R_H)에서 발생하는 Joule열과 동일한 열효과를 나타내는 직류전류값을 검출함으로써 교류의 실효치 전류를 직류전류로부터 구해낸다.

이 연구에서 제작된 TCC는 Fig. 1과 같이, 하나의 독립된 TC에 전용의 교류전류 분류기(R_S)를 병렬연결시킨 구조로서, 각각 독립된 측정범위를 갖는다. 기본소자인 TC는 직경 약 0.05 mm, 길이 약 4 mm의 굵은 가열선과, 측정전류에 의해 가열된 가열선의 열을 검출하기 위한 열전대(T/C), 그리고 이들 사이를 전기적으로 절연시키고 동시에 열적인 접촉을 시키기 위한 유리구슬(B)이 가열선의 중앙에 위치한 구조를 이루고 있으며 진공유리구(球) 속에 봉입되었다. 사용된 TC의 입력저항은 45 Ω , 열전대 저항이 약 8 Ω , 정격전류 5 mA일때의 TC출력 EMF가 약 7 mV 정도가 된다. 따라서 이 TC는 전류분류기를 사용치 않더라도 단독으로 5 mA용 TCC로 사용된다. 이 연구에서는 높은 주파수(10~100 kHz)에서의 특성을 우수하게 하기 위하여 진공유리구의 직경이 11 mm, 높이가 12 mm인 UHF용 도토리모양의 TC를 사용하였으며, 이 TC의 가열선과 가열선을 지지하고 있는 입력전류 도선(Cu)이 직선형태를 갖는다. Peltier효과 및 Thomson 효과에 의해, 열선에서의 직류전류 방향에 따라 출력 EMF가 동일하지 않은 직류 역방향차이(dc reversal difference)를 최소화시키기 위하여, 직류 역방향차이의 크기가 비슷하고 극성이 반대인 2개의 TC를 선택하여, 가열선 및 열전대 출력을 직렬연결하여 서로 상쇄시킴으로써 0.01% 이하의 직류 역방향차이를 갖도록 보완하였다. 이렇게 연결된 1쌍의 TC소자를 내경 40 mm, 길이 65 mm, 두께 10 mm의 황동 상자속에 장착함으로써 출력 EMF를 안정화시킬 수 있게 되었고,

황동상자의 외부표면을 광택 Cr 도금함으로 외부 빛에 의한 열기전력 발생이 가능한 억제되도록 하였다.

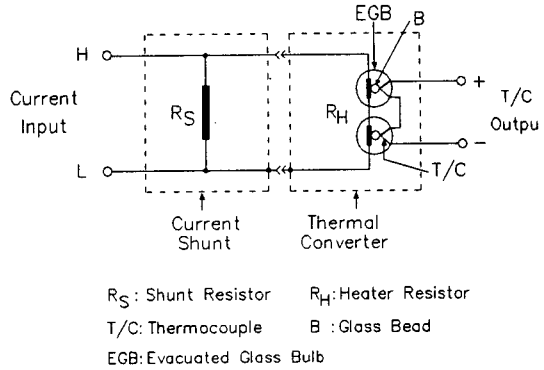


그림 1. 열전형 전류변환기의 구조

Fig. 1. Configuration of a thermal current converter.

TC 자체의 정격전류가 5 mA임을 고려하여 각 TCC의 R_S 값을 결정하였으며, 전체의 측정범위 단계는 각 TCC의 전류측정범위가 정격의 50~120%이므로 이웃하는 TCC 사이에 측정범위의 중복이 이루어지도록 선택하였다. 따라서 어떤 TCC가 소손될 경우 그것과 이웃하는 TCC를 기준으로 하여 해당 TCC에 대한 교직차를 다시 평가할 수 있다. 측정범위별 R_S 는 Table 1에서와 같이 약 0.023~90 Ω 의 상용 교류저항기(Fluke A40 & A40A)를 사용하였으며, 5 Hz~100 kHz에서 저항의 교직차가 0.02~0.05% 이하이다. 이 상과 같이 별개의 몸체로 제작된 TC와 R_S 를 병렬결합시켜 10 mA~20 A 사이의 측정범위를 갖는 TCC를 제작하였다. 이와 같은 형태를 결합형 TCC라고 하자.

표 1. 열전형 전류변환기

Table 1. A set of thermal current converters

Rated Current Range	AC Shunt Resistor(Ω)	Rated Current Range	AC Shunt Resistor(Ω)
5 mA*	—	500 mA	0.910
10 mA	90	1 A	0.450
20 mA	30	2 A	0.226
30 mA	18	3 A	0.150
50 mA	10	5 A	0.090
100 mA	4.737	10 A	0.045
200 mA	2.308	20 A	0.023
300 mA	1.525		

* 교류전류분류기 없이 TC만으로 구성

한편 TC와 R_s 를 동일한 황동 상자속에 병렬연결시킨 單體型 TCC를 제작하여, TC의 가열선의 구조에 따른 TCC 특성을 비교평가 하였다. 단체형 TCC에서도 결합형 TCC에서 사용된 것과 동일규격의 가열선을 갖는 TC를 사용하였으나, 가열선을 지지하고 있는 입력전류도선(Cu)과 가열선이 직각구조를 이루고 있으며, 진공유리구의 직경이 10 mm, 높이가 20mm인 이중구(球)형태(Best Technology; S8)로서, 정격전류 및 입력저항은 각각 5 mA 및 90 Ω 이다. 전류 분류기용 저항은 직경 14 mm, 길이 19 mm인 금속박막저항(Visshay : LT450)을 사용하였다.

III. 교직차 비교측정장치

1. 교직차의 정의 및 측정원리

TCC의 교직차 δ_i 는 다음과 같이 정의한다.^[4~6]

$$\delta_i = \frac{I_a - I_d}{I_d} \quad (1)$$

여기서 I_a , I_d 는 각각 TCC에서 동일한 출력 EMF를 얻는데 요구되는 교류전류 및 직류전류를 가리키며, 직류전류는 +, - 양방향전류의 평균값이다.

Fig. 2와 같이, 비교측정되는 두개의 TCC를 직렬 연결한 후, 두 TCC중에서 정격전류가 작은 값의 교류전류를 공급한 상태에서 예열시킨다. TCC의 출력 EMF중 큰 것을 E_H 단자에, 작은 것을 E_L 단자에 각각 연결하고, 두 TCC의 출력 EMF의 차이를 측정하는 나노볼트 미터(nVm-2)에서 거의 영이 되도록 분압기(Kelvin-Varley divider; R_L)를 가변하여 평형을 잡는다. 피측정 TCC(Fig. 2에서는 TCC-1이 피측정 기기임)의 출력 EMF를 측정하기 위한 나노볼트 미터(nVm-1)을 이용하여 교류입력전류에 의한 출력 EMF(E_a)를 기록하여 둔다. 다음에는 입력전류를 직류로 바꾸어 공급하고, 앞에서 얻은 E_a 와 직류 입력전류에 의한 출력 EMF의 차이가 10 nV 이하가 되도록 교류 입력전류를 조정한다. 이 때 교류 또는 직류전류 중 어느것을 조정해도 무관하지만 교류 입력전류를 조정하는 것이 편하며, 전압표준기 또는 전류발생기의 출력 중 어느 것을 조정해도 무관하다. 여기서 직류전류에 의한 출력 EMF는 Peltier 효과 등에 의한 직류역방향차이를 제거하기 위하여 +, - 양극성의 직류전류에 의한 평균값으로 한다. 입력전류를 DC(+),

AC, DC(-)의 순서로, 일정시간 간격으로 공급하면서, nVm-2에서의 두 개의 TCC의 출력 EMF 차이(N)를 각각 측정하며, 피측정 TCC의 교직차, δ_i 는 다음과 같이 계산된다.^[6]

$$\delta_i = \delta_s + \frac{N_{dr} + N_{dc} - 2 \cdot N_a}{2 \cdot n_s \cdot E_1} \quad (2)$$

여기서

- δ_s : 표준 TCC의 교직차
- N_{dr}, N_{dc} : 각각 +, - 방향의 직류전류 입력에서 측정된 두 TCC의 EMF차이
- N_a : 교류전류 입력에서 측정된 두 TCC의 EMF차이
- E_1 : 두 TCC 출력 중 작은 쪽의 EMF
- n_s : 표준 TCC에서, 입력전류의 미소변화와 출력 EMF사이의 상관계수.
($n_s = \Delta E \cdot I/E \cdot \Delta I$)

를 각각 나타낸다.

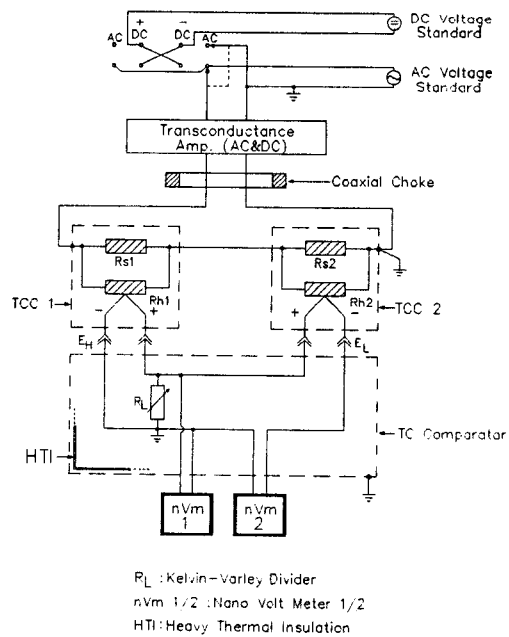


그림 2. 열전형 전류변환기 교직차 비교측정장치의 기본선도

Fig. 2. Basic block diagram of the comparator system for the intercomparison of TCCs.

TCC의 출력 EMF를 직접 측정하는 2-채널 교직차 비교기 등 여러가지 방식의 TCC 비교측정장치가 사용되고 있지만,^[6-8] 이 측정장치는 앞에서 설명한 측정원리와 식 (2)에서 보는 바와 같이, 분압기(R_L)를 이용하여 표준 TCC와 피측정 TCC의 출력 EMF 사이의 불평형된 기전력을 측정하여 교직차를 계산한다. 따라서 직류 및 교류 전류공급기가 드리프트(drift) 또는 흔들림(fluctuation) 등으로 불안정하더라도 두 개의 TCC 출력 EMF에 거의 동일한 효과를 주기 때문에, 두 EMF 차이의 측정결과에 미치는 영향은 아주 작은 장점을 갖는다.

2. 교직차 비교측정장치의 구성

열전형 전압변환기(thermal voltage converter)의 교직차를 비교측정하기 위하여 자체제작 활용중인 열전변환기 교직차 비교측정장치^[9](이하 교직차 비교장치)를 이용하여 TCC의 교직차를 비교측정하였다. 특히 광학적 증폭기와 검출기를 이용하였기 때문에 진동 등의 외부잡음에 민감하고 평형맞추기가 어려운 기존의 교직차 비교장치의 문제점을 보완하기 위하여, 이 연구에서는 분해능 10 nV인 나노볼트 미터(nanovolt meter)로 대체함으로 측정을 용이하게 하였다.

본 교직차 비교장치는 Fig. 2에서와 같이 정확도 10 ppm, 단기안정도(1일) 1 ppm/d인 직류전압표준기, 주파수 30 Hz~100 kHz에서의 안정도가 약 40 ppm/10 min인 교류전압표준기, 2대의 나노볼트 미터, 1 mA~100 A 범위의 정밀전류발생기(transconductance amp.) 등의 장비로 구성하였다.

특히 고투자율을 갖는 토로이달 코어(toroidal core)에 동축선을 8~10회 권선한 코액시얼 초크(coaxial choke)^[10]를 전류발생기와 교직차 비교장치 사이에 삽입함으로써, 전류발생기의 접지와 교직차 비교장치의 접지를 통해 흐를 수 있는 불필요한 전류가 동축선의 외부도체를 거쳐 비교측정되는 TCC에 유입되는 것을 억제하고 순수한 측정전류만이 동축선에 흐르도록 하였다. 순수한 측정전류만이 동축선에 흐를 경우 내부 및 외부도체에서의 동일한 크기의 전류에 의한 자속의 크기는 동일하고 방향이 반대이므로, 코액시얼 초크 동축선의 내부 및 외부도체에서의 인덕턴스는 측정전류의 흐름에 영향을 주지 않는다. 불필요한 전류가 동축선의 외부도체를 통해 흐를 경우에는, 초크 인덕턴스에 의한 임피던스는 도선의

임피던스에 비해 월등히 크기 때문에(일반적으로 10^4 배 이상) 그 만큼 감소된다.

한편 비교측정할 두 개의 TCC를 직렬연결할 때, Fig. 3 (a)와 같이 연결할 경우 TCC의 외부상자(low 단자; L)와 접지 사이의 부유용량(stray capacitance; C_s)을 통하여 누설전류가 흘러 오차가 발생된다. 그러나 Fig. 3 (b)와 같이 TCC 입력단자의 high(H) 단자끼리 연결하고 low(L) 단자는 current source의 출력단자에 각각 연결하면, 부유용량을 통한 누설전류가 흐르더라도 두 개의 TCC에 흐르는 전류는 동일하기 때문에 측정오차를 일으키지 않는다.

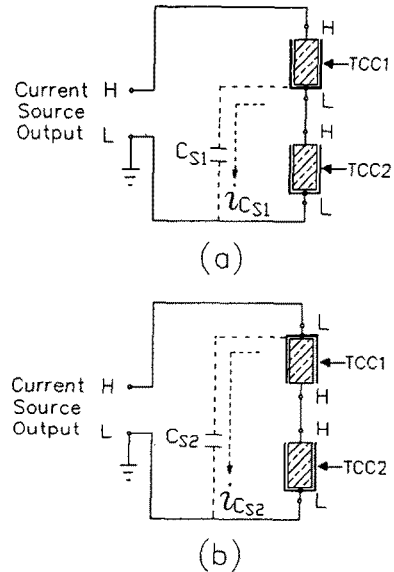


그림 3. 열전형 전류변환기의 직렬연결방법

Fig. 3. Connection methods of the TCCs in series.

IV. TCC 및 교직차 비교측정장치의 성능평가

1. TCC의 교직차 측정

제작된 TCC들의 기본이 되는 3개의 5 mA-TCC에 대한 교직차는 독일 PTB의 전류 1차표준기인 다접합 열전형 변환기(multijunction thermal converter, 이하 MJTC)를 표준기로 삼아 주파수 10 Hz~100 kHz 범위에서 평가하였다. 이 MJTC는 10~40 mA에서 10^{-7} 정도의 교직차를 갖고 있으며, 입력전류의 크기에 따른 교직차변화가 아주 작기 때문에,^[11] 전류분류기와의 결합으로 10 mA~20 A 사이의 TCC들에 대한

교직차평가에도 표준기로 활용되었다. 이 때 사용된 PTB의 교직차 비교장치는 작동원리 상 KRISS의 교직차 비교장치와 동일한 방식이나, KRISS의 교직차 비교장치는 두개의 TCC 출력을 평형시키기 위하여 입력저항 1kΩ의 분압기(R_L)를 사용한 반면, 측정자동화된 PTB의 교직차 비교장치는 저항부하를 가변하여 두개의 TCC 출력을 평형시킨다.

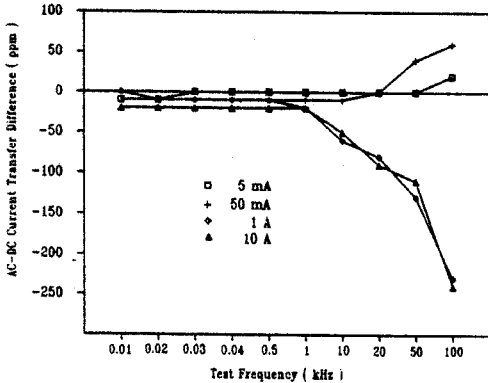


그림 4. 열전형 전류변환기의 교직차
Fig. 4. AC-DC current transfer differences of the TCCs.

Fig. 4는 15개의 TCC 중에서 대표적으로 선택한 4개의 TCC에 대한 측정주파수별 교직차를 보여주고 있다. 주파수 1 kHz까지는 $-20 \sim 0$ ppm의 교직차를 보여주고 있으나, 10 kHz 이상에서는 특히 1 A 이상의 경우 교직차가 급격한 변화를 보이고 있다. 저항의 교직차가 0.02~0.05% 이하인 교류전류분류기(R_S)를 사용하였지만 10 kHz 이상에서는 R_S 의 권선 분포용량과 인덕턴스 등 요인과 TC의 입력전류 도선에서의 표피효과의 증가 등의 복합적인 영향으로 교직차가 급격히 변화하는 것으로 분석된다.

Fig. 5는 서로 다른 구조를 갖는 200 mA-TCC들의 교직차 측정결과로서, 결합형 TCC의 경우 100 kHz 까지 교직차가 ± 20 ppm 이하인데, 單體型 TCC #1 및 #2의 경우에는 10 kHz 이상에서 크게 변화하여 100 kHz에서 각각 -1818 ppm 및 -1491 ppm으로 나타났다. 단체형 TCC는 TC와 분류기용 저항(R_S)의 연결방법 및 TC의 가열선 구조가 각각 결합형 TCC와 상이하여 (II절 참조), TCC의 입력단자에서 측정된 인덕턴스(100 mV, 1 kHz 측정)가 결합형 TCC의 경우 40 nH인 반면, 단체형의 경우 동일조건에서 측정된 인덕턴스가 약 160~170 nH로서, 단체형 TCC의 R_S

및 TC의 연결용 도선과 TC 가열선 자체의 인덕턴스 때문에 큰 교직차를 유발한다. TC 및 저항의 연결도 선을 가능한 짧고 곧게 처리한 단체형 TCC #2는 #1에 비하여 높은 주파수에서의 교직차가 작게 나타났다.

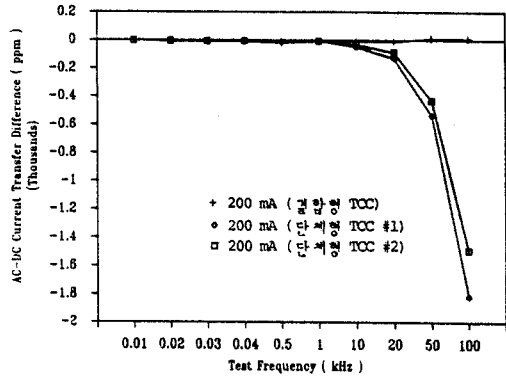


그림 5. 200 mA 열전형 전류변환기의 교직차
Fig. 5. AC-DC current transfer difference of the 200 mA-TCCs.

이상과 같은 TCC 특성을 고려할 때, 교직차가 작은 교류전류 1차표준용의 TCC를 제작하기 위해서는 TC 자체도 교직차가 작은 것을 선택하여야 하며, 인덕턴스가 작은 R_S 를 사용하여 연결도선을 짧고 곧게 처리해야 하는 것으로 나타났다.

2. 상호 비교측정 결과의 검토

KRISS의 교류전류표준의 유지 및 보급에 대한 측정불확도를 결정하고, 교직차 비교장치의 성능 및 신뢰성을 확인하기 위하여, 피측정 TCC와 이웃하는 2개의 TCC를 표준기로 하여, 스텝-업(step-up)방법^[4]에 의하여 주파수 40 Hz~100 kHz에서 상호 비교측정하였다. 즉 5 mA-TCC의 경우 3개의 TCC 상호간의 비교측정이 이루어졌으며, 20 mA-TCC를 피측정 TCC로 삼는 경우 이것과 이웃하는 10 mA-TCC 및 30 mA-TCC를 각각 표준기로 삼고, 50 mA-TCC의 경우 30 mA-TCC 및 100 mA-TCC를 각각 표준기로 삼는 등의 방법으로 비교측정하였다.

Fig. 6은 KRISS와 PTB의 측정결과 사이의 차이를 나타낸 것으로서, 피측정 TCC와 이웃하는 TCC 2개를 표준으로 한 측정결과들의 차이들의 평균값을 표시하였다. 양 기관에서의 측정결과들은 대부분 ± 10 ppm 이내에서 일치하고 있으며, 500 mA, 100 kHz의 경우

약 +30 ppm의 차이를 보이고 있으나 이 차이도 PTB 측정불확도(2σ)가 150 ppm^[12]인 점을 고려하면, 불확도 범위내에서 양호한 일치도를 보이는 것으로 판단된다. 또한 앞절에서 언급한 단체형 200 mA-TCC (#2)의 경우도 100 kHz 미만에서 PTB 측정결과와 KRISS 측정결과가 ± 11 ppm 이내에서 일치하였다. 2 A-TCC 및 10 A-TCC의 경우에는 KRISS에서 보유하고 있는 정밀전류발생기의 사용주파수제약으로 각각 20 kHz 및 1 kHz까지만 비교측정이 가능하였다.

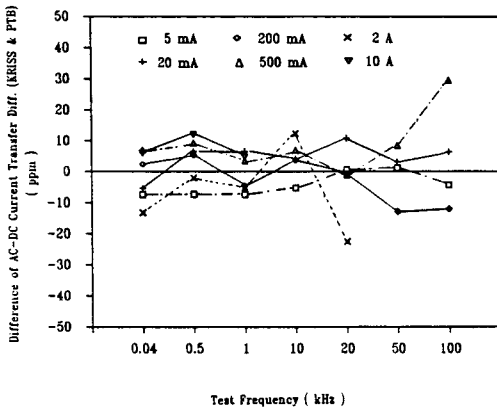


그림 6. KRISS 및 PTB에서 측정한 열전형 전류변환기의 교직차의 차이

Fig. 6. Differences of AC-DC current transfer difference of the TCCs between KRISS and PTB.

상기와 같은 비교측정을 통하여 100 kHz 미만에서의 교류전류표준을 유지, 보급하기 위한 KRISS의 교직차 비교장치의 성능은 만족한 수준임이 확인되었다.

V. 측정불확도 분석

측정전류 5~20 mA, 측정주파수 40 Hz~20 kHz 범위의 TCC에 대한 측정불확도(신뢰도 99.5%)를 분석하면 Table 2와 같다.

상기와 같은 방법으로 분석한 측정불확도는, 주파수 20 kHz까지 20 mA이하에서는 52 ppm이하, 0.03~1 A 범위에서는 60~100 ppm, 2 A에서는 120 ppm으로 나타났으며, 3~20 A, 1kHz이하에서는 140~200 ppm으로 분석되었다. 또 주파수 50 및 100 kHz에서, 5 mA~2 A 범위에 대한 측정불확도는 60~200 ppm으로 나타났다.

표 2. 추정 총 측정불확도의 분석

Table 2. Analysis of the overall estimated uncertainties

Source of Uncertainty	Uncertainty(ppm)
Calibration uncertainty of the TCC(2σ) ^[12]	50
Comparator system & measurement procedures ^[13]	< 5
Short-term(1 day) stability of DC current source	< 1/d
series of measurements(2σ)(max.)	12.7
Overall Uncertainty (RSS)	51.8

이와 같은 측정결과를 종합적으로 분석한 결과 KRISS의 교류전류표준 유지 및 보급의 측정불확도는 PTB의 수준과 거의 대등한 것으로 나타났다.

VI. 결 론

전류측정범위 5 mA~20 A, 주파수범위 10 Hz~100 kHz에서 교류전류의 1차표준기로 사용될 15개 측정범위의 열전형 전류변환기(thermal current converter)를 독일 PTB와의 공동연구로 제작하였다. PTB 및 KRISS에서의 상호 비교측정을 통하여 KRISS의 교류전류표준 유지 및 보급에 대한 측정불확도는 측정범위에 따라 52~200 ppm으로 분석되었으며 이는 PTB와 대등한 수준임이 확인되었다.

또한 열전형 전류변환기를 구성하는 열전변환기(thermal converter)가 과전류로 인하여 소손되더라도 소손된 TCC와 이웃하는 2개의 TCC와의 비교측정을 통하여 교직차의 재평가가 용이해 짐으로써, 기존의 표준기를 선진기관에 교정의뢰함에 따라 발생되던 산업체지원의 장기간 중단을 해결할 수 있게 되었다.

참 고 문 헌

- [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, Feb. 1952.
- [2] F.L. Hermach and E.S. Williams, "Thermal Converters for Audio-Frequency Voltage Measurements

- of High Accuracy," *IEEE Trans. Instrum. Meas.*, vol. IM-15, no. 4, pp. 260-268, Dec. 1966.
- [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, June 1985.
- [4] E.S. Williams, "Thermal Current Converters for Accurate AC Current Measurement," *IEEE Trans. Instrum. Meas.*, vol. IM-254, no. 4, pp. 519-523, Dec. 1976.
- [5] 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, April 1991.
- [6] E.S. Williams, "Thermal Voltage Converters and Comparator for Very Accurate AC Voltage Measurements," *J. Res. of NBS*, vol. 75C, nos. 3 & 4, pp. 145-154, July-Dec. 1971.
- [7] K.J. Lenter and D.R. Flach, "An Automatic System for AC/DC Calibration," *IEEE Trans. Instrum. Meas.*, vol. IM-32, no. 1, pp. 51-56, March 1983.
- [8] E.S. Williams and J.R. Kinard, "A Dual-channel Automated Comparator for AC-DC Difference Measurements," *IEEE Trans. Instrum. Meas.*, vol. IM-34, no. 2, pp. 290-294, June 1985.
- [9] 권성원, 김창석, "열전압변환기에 의한 교류전압 국가표준 확립," *J. of Res. of KSRI*, vol. 3, pp. 123-130, 1986.
- [10] D.N. Homan, "Applications of Coaxial Chokes to A-C Bridge Circuits," *J. Res. of NBS*, vol. 72c, no. 2, pp. 161-165, April-June 1968.
- [11] M. Klönz, "AC-DC Transfer Difference of the PTB Multijunction Thermal Converter in the Frequency Range from 10 Hz to 100 kHz," *IEEE Trans. Instrum. Meas.*, vol. IM-36, no. 2, pp. 320-329, June 1987.
- [12] Calibration Certificate of the KRISS Thermal Current Converters, PTB, May 5, 1988.
- [13] M. Klönz, "Entwicklung von Vielfachthermokonvertern zur genauen Rückführung von Wechselgrößen auf äquivalente Gleichgrößen," *PTB-Bericht*, PTB-E-29, pp. 105-115, 1987.

著 者 紹 介

**權 聖 遠**

1952년 1월 19일생. 1974년 한국항공대학교 전자공학과 졸업(학사). 1978년 2월~현재 한국표준과학연구원 전기연구실 근무.

**李 徠 德**

1945년 9월 29일생. 1969년 숭전대학교 물리학과 졸업(학사). 1980년 동대학원 물리학과 졸업(석사). 1991년 한남대학교 대학원 졸업(이학박사). 1978년~현재 한국표준과학연구원 전기연구실 근무(전기연구실장).



Manfred Klönz was born in Steinersdorf, Germany, on March 15, 1941. He received the Dipl.-Ing. degree in electrical engineering from the Technische Universität, Hannover, Germany, in 1967 and the Dr.-Ing. degree from the Technische Universität, Braunschweig, Germany in 1987.

He joined the Physikalisch-Technische Bundesanstalt, Braunschweig, Germany in 1967. For some years he was concerned with the development of calibration facilities in the field of impedance measurements in the audiofrequency range and designed bridges for the measurement of large capacitances, dissipation factor and inductance. Later he worked in the field of ac-dc transfer for voltage, current and power with multijunction thermal converters which he developed as three-dimensional and planar devices.