

S형 열전대를 이용한 교정검사기관의 소급성 오차측정

감 기술, 김 용 규, 김 선 곤

Measurement of Traceability Error for Calibration Service Center Using Type S Thermocouples

Kee Sool Gam, Yong-Gyoo Kim and Sun Gon Kim

요 약

고온에서 교정용 표준기로 사용되는 S형 열전대를 사용하여, 국내의 9개 고온분야 교정검사기관의 고온측정 능력을 순회교정을 통하여 평가하여 고온의 소급성 오차를 측정하였다. 참여기관중 3개교정검사기관만이 열전대의 교정불확도인 ± 0.5 °C 이내에서 한국표준과학연구원의 측정값과 일치하였으며, 나머지 6개기관의 측정값은 규정된 불확도를 벗어났다. 각 측정값의 차이는 온도가 높아질수록 증가하여 비교측정점중 가장높은 온도인 금점에서 가장 큰 차이가 2 °C로 교정불확도를 크게 벗어났다. 이 연구에서 측정된 국내 고온분야 교정검사기관의 소급성 오차는 2.0 °C 이내였다.

Abstract

We measured the traceability error for nine high temperature calibration service centers including KRISS through the round-robin test. In this test the type S thermocouple, which used as a calibration standard thermometer commonly, was accommodated as a test thermocouple. Intercomparison data of three institutions were coincident with KRISS's data within ± 0.5 °C, which was the calibration uncertainty of the type S thermocouple, but the remaining six institution's data were deviated from the assigned uncertainty level. Deviation of the intercomparison data increased gradually according to the increase of the test temperature, and the maximum difference was so large as about 2.0 °C at the highest test temperature, gold point. In this study we found the traceability error of high temperature calibration service center for a high temperature standard was within 2.0 °C.

1. 서론

국제온도눈금-1990 (ITS-90)^[1]이 발효되어 사용됨에 따라 한국표준과학연구원(KRISS)에서는 그 동안 고온백금저항온도계를 사용하여 0 °C에서 962 °C온도 영역의 국가온도표준을 확립하였고^[2], 962 °C이상의 표

준은 복사온도계에 의하여 확립되어 산업체에 보급되고 있다. 열전대는 산업체에서 가장 많이 사용되고있는 온도계이며 이 열전대들의 교정용 표준기로는 ITS-90에서 정의된 방법으로 일차교정된 고온백금저항온도계 및 복사온도계가 사용될 수 있으나, 사용온도의 제한 및 비교측정의 어려움 때문에 국내교정검사기관에서는 KRISS에서 교정한 S형 열전대를 사용하고 있다. 현재 국내에는 고온표준의 원활한 보급 및 소급성 유지를 위하여 KRISS를 비롯한 11개소의 열전대분야의 교정검사기관이 지정되어있으며^[3], 열전대분야의 소급성을 확보하고 고온표준의 보급에 따른 보급오차를 줄이기

한국표준과학연구원
(Korea Research Institute of Standards and Science.)

<접수일자 : 1994년 7월 1일>

위하여 주기적인 순회교정평가가 필요하다.

온도표준은 각국의 표준연구기관에서 ITS-90에 의거하여 실현, 유지되고 있으며, 국가간의 소급성 유지를 위하여 온도표준의 상호비교, 측정방법의 공동개발, 내삽식 및 기준테이블의 제정이 행해지고 있다. 열전대분야의 소급성을 확립하기위한 국제공동연구로는 국제도량형위원회(Comite International Poids et Measures, CIPM) 산하의 온도자문위원회(The Comite Consultatif de Thermometre, CCT)의 요청에 의하여, 미연방표준기술원(National Institute of Standards and Technology)의 주관하에 CCT회원연구기관이 공동으로 S형 열전대의 기준테이블을 제정하였고,^[4-7] 국내에서도 열전대기준테이블이 발간된 바 있다.^[8] 열전대분야의 국제적인 소급성유지는 각국의 표준기관으로 구성된 CCT와 외국의 국가표준체계 (IEC, ASTM)로부터 KRISS로 연계되며, 국내에서는 일차적으로 KRISS가 온도표준의 공급 및 유지를 담당하게 된다. (그림 1 참조) 국내의 고온준금공급체계는 KRISS에서 산하 10개 고온교정검사기관으로 이전되고 이로부터 산업체, 연구기관 그리고 대학교로 파급되게 된다. 따라서 국내의 고온표준의 보급 및 유지에 미치는 교정검사기관의 역할은 매우 중요하다 하겠다.

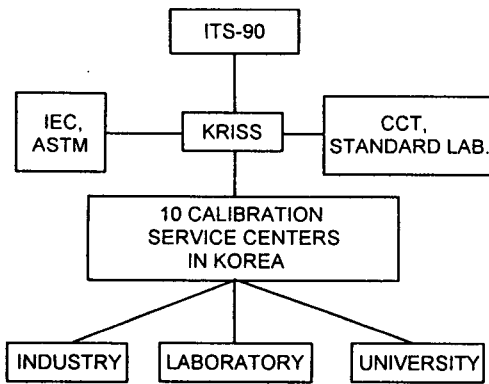


그림 1. 열전대분야 온도표준 공급체계도.

Fig. 1. Traceability diagram of temperature standards in the thermocouple thermometry field.

본 연구에서는 교정검사기관의 교정능력평가(round-robin test, RRT)를 통하여 국내에 지정되어 있는 10개 고온분야 교정검사기관중 8개의 교정검사기관과 KRISS의 비교교정능력을 평가하여 교정정확도의 소급성 오차를 측정하여 열전대준금의 공급정확도 향

상을 도모하고자 한다. 이 연구결과는 열전대를 사용하여 많은 분야의 온도측정이 이루어 지고 있는 국내 반도체, 제철, 중화학 산업에 보다 정확한 고온표준을 공급하는데 기여할 것으로 생각되며, 앞으로 KRISS에서의 열전대 관련연구의 방향설정에 많은 도움이 될 것이다.

II. 열전대 제작 및 비교측정

RRT에 사용된 S형 소선은 Sigmund Cohn사에서 구입한 선경 0.51 mm, 순도 99.9995 % 인 백금과 백금-10% 로듐합금선이다. 각 소선을 1.2 m 길이로 절단한 후 물분해 가스용접기(water welder)를 사용하여 열전대측온접점을 제작하였다. 그후 열전대 제작과정에서 생기는 열전대소선표면의 유기물과 불순물에 의한 오염을 최소화 하기 위하여 에틸렌글리콜과 에틸알콜을 사용하여 세척하였다. 세척한 열전대소선은 1450 °C 에서 1시간 동안 소선에 교류전류를 흘려주어 공기중에서 열처리 하였다. 이때 백금소선부의 온도는 교정된 가시형 광온계(L&N 8631-C)를 사용하여 측정하였다. 교류전류를 흘린 후 후속열처리방법은 실험실마다 약간의 차이가 있으나 본 실험에서는 다음과 같은 절차를 따랐다.^[9-11] 열처리가 끝난 소선은 고순도 알루미늄나 절연관(2 hole, 직경 0.8 mm)에 삽입하여 조립한 후 조립중 소선에 형성된 소성변형을 완화시켜주기 위하여 전기로내에서 1100 °C 에서 1시간 동안 열처리 하였다. 열처리가 끝난 열전대는 공기중으로 꺼내어 냉각시킨다음 450 °C에서 20시간 동안 재열처리하였다. 이와같은 방법으로 같은 열레(spool)에 감겨있던 소선으로 2대의 열전대(일련번호: KSTC-105 및 KSTC-106)를 각각 제작하였다.

열전대에 의한 순회측정은 KRISS에서의 고정점 교정, 순회교정, KRISS에서의 비교교정, 순회교정, KRISS에서의 고정점교정순으로 실시하였다. 열전대 고정점교정은 KRISS에서 ITS-90의 일차교정점인 7개 고정점 (금, 은, 알루미늄, 아연, 주석, 인듐 및 갈륨)온도와 2차교정점인 안티몬용고점에서 열전대의 열기전력을 측정하였다. 각 고정점의 실현방법은 고온백금저항온도계에 의한 ITS-90 확립연구에서 개발된 방법을 사용하였으며^[12-14], 금점의 실현에는 순도 99.9999 %인 금선을 사용하여 소선용융법으로 열전대의 열기전력을 측정하였다.^[15] 갈륨용융점에서의 열전대 교정은 액체항온조(Rosemount 910AC)에서 0~420°C 온도

영역에서 ITS-90방법에 따라 정확도 ± 2 mK이내로 일차교정된 표준백금저항온도계를 사용하여 비교교정하여 얻었다. 열전대의 교정순서는 온도가 가장 높은 금점에서 시작하여 점차 온도가 낮은 고정점순으로 실험하였다. 이와같은 교정순서를 택한 이유는 고온에서의 측정에서 열전대의 열처리 효과에 의한 열전기적 변화를 최소화 하기 위해서이다. 이와같이 각 고정점 온도에서 교정된 열전대를 교정검사기관에 돌려서 교정검사기관들이 보유하고있는 열전대비교교정 시스템을 사용하여 교정검사기관의 교정용 표준기인 S형 열전대와 2대의 순회교정용 열전대를 비교교정하였다. 비교교정순서는 대전이북지방에 위치한 교정검사기관에서 시작하여 대전이남에 위치한 기관순으로 RRT를 실시하였으며, RRT 중간시점에 KRISS에서 보유하고있는 열전대 자동비교교정 장치를 이용하여 타 교정검사기관과 동일한 방법으로 비교교정함으로써 RRT과정에서 열전대의 오염등 문제점을 점검하였다. RRT과정에서의 열전대의 특성변화를 조사하기 위하여 순회교정이 끝난 열전대는 다시 KRISS에서 고정점 교정을 하여 RRT 전후의 기전력 변화를 확인하였다.

표 1. 순회교정검사에 참여한 교정검사기관 및 측정기간.

Table 1. Calibration service centers and measurement time schedules participated in the round-robin test

교정검사기관명	측정기간
한국표준과학연구원*	'93 5/5 - 5/15
(주)우진	5/20 - 5/26
우진계기	5/27 - 6/6
프라임엔지니어링	6/21 - 6/27
한영전자	6/28 - 7/4
한국표준과학연구원	7/5 - 7/15
풍산금속	7/16 - 7/25
포항제철	7/27 - 8/9
포항제철(광양제철소)	8/10 - 8/17
삼성전자(수원공장)	9/13 - 9/19
한국표준과학연구원*	9/20 - 10/5

* : 고정점 교정.

표 2. 교정검사기관의 열전대기전력 측정장비 및 열처리방법

Table 2. Instruments for the measurement of thermocouple emf and annealing methods used by calibration service centers during the period of the round-robin test.

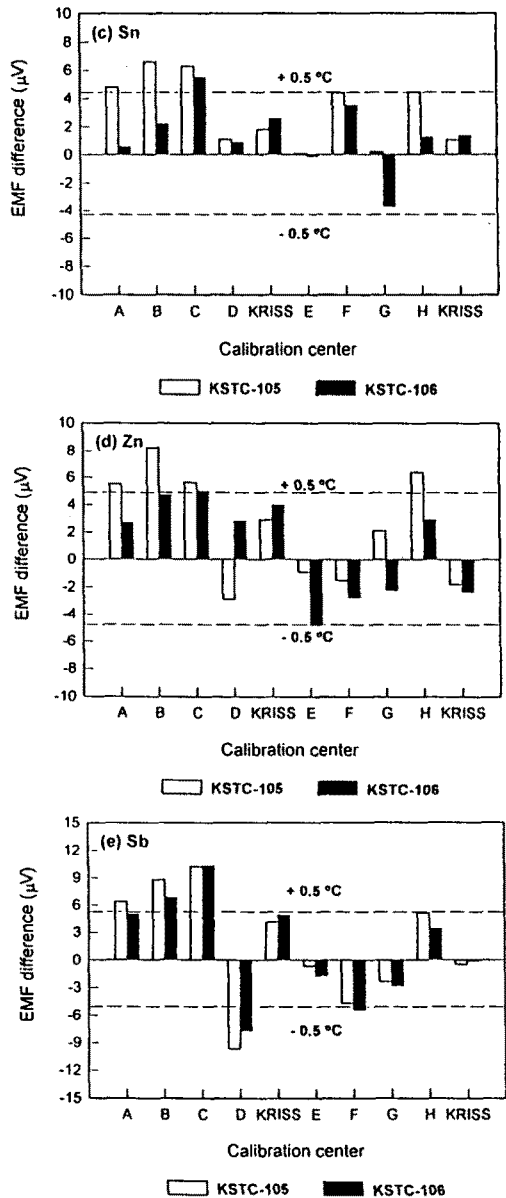
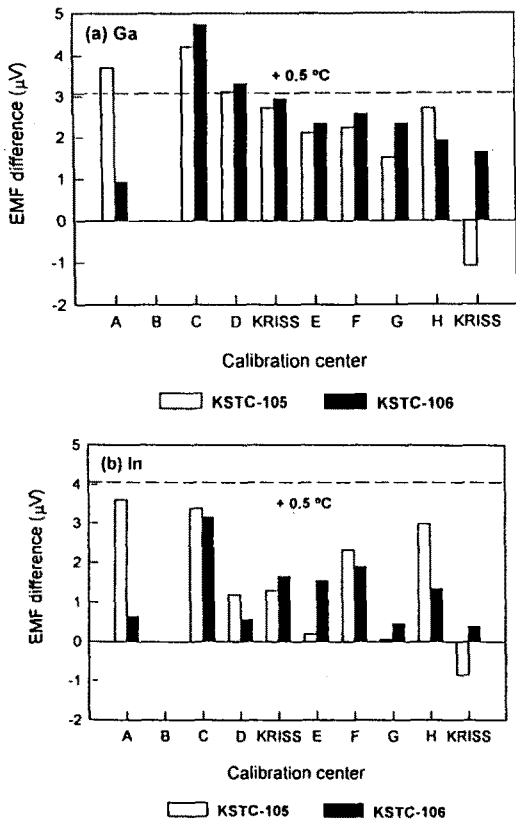
교정검사기관	DVM 모델명	측정방법	교정전열처리	기 준
KRISS	Keithley 182	고정점 측정	1450 °C(1 hr) 700 °C(30 min.) 450 °C(20 hrs)	금속용고점 소선용용법 비교교정
(주)우진	Fluke 8505A	정점비교교정 은용고점측정	Pt-Rh:1550 °C Pt:1450 °C(1 hr)	S형 열전대
우진계기	"	100 °C간격 비교교정	1400 °C(2 hrs)	"
프라임 엔지니어링	HP3458A	"	1450 °C(1 hr) 750 °C(30 min.)	"
한영전자	Yokogawa 2501-A	"	1450 °C(1 hr)	"
KRISS	DANA 5800A	자동비교교정	열처리 생략	S형 열전대 (KSTC-102)
풍산금속	Fluke 8505A	100 °C간격 비교교정	1450 °C(1 hr)	S형 열전대
포항제철(포항)	Fluke 8505A	"	열처리 생략	"
포항제철(광양)	Fluke 8505A	"	열처리 생략	"
삼성전자(수원)	Fluke 8506A	"	1450 °C(1 hr) 750 °C(30 min.)	"

모든 각 교정검사기관이 사용한 측정장비 및 열전대 열처리유무 및 방법을 정리하였다. 교정검사기관중 (주)우진에서는 KRISS의 은점과 (주)우진이 보유하고 있 RRT 측정데이터는 열전대상태가 가장 안정된 시점인 제작 직후에 측정된 고정점에서의 교정결과를 기준으로 하여 분석하였다. 표1은 RRT에 참여한 9개의 교정검사기관 및 시험일자를 나타내고 있으며, 표2에는 각 교정검사기관이 사용한 측정장비, 열전대 열처리유무 및 방법을 정리하였다. 교정검사기관중 (주)우진에서는 KRISS의 은점과 (주)우진이 보유하고 있는 은점과의 비교를 위해 비교교정에 덧붙여서 은 응고점에서의 열전대기전력을 측정하였다.

III. 결과 및 논의

그림 2는 RRT를 시작하기 앞서 KRISS에서 고정점 교정으로 얻은 열기전력과 각 교정기관에서 측정된 열기전력의 차이를 각각의 고정점온도에서 교정검사기관별로 나타낸 것이다. 그림에서 양(+)의 값은 고정점에서 측정된 값보다 교정검사기관에서의 비교측정값이

더 크게 나타났다는 것을 의미한다. 갈륨 용융점의 경우 대부분의 교정검사기관들의 값이 크게 나타났으며, 일부 기관을 제외하고는 측정허용한도인 ± 0.5 °C 내에서 교정결과를 얻었다. 인듐의 경우에는 측정결과를 얻은 전 교정검사기관들이 허용한도내에서 교정을 하였다. 점차 온도가 높아짐에 따라 열기전력의 차이가 커지고 있으며 교정허용한도를 넘는 결과를 보여주는 교정검사기관들의 수가 증가하고 있다. 특히 은과 금 고정점에서는 거의 대부분의 결과가 측정허용한도인 ± 0.5 °C를 초과하고 있다.



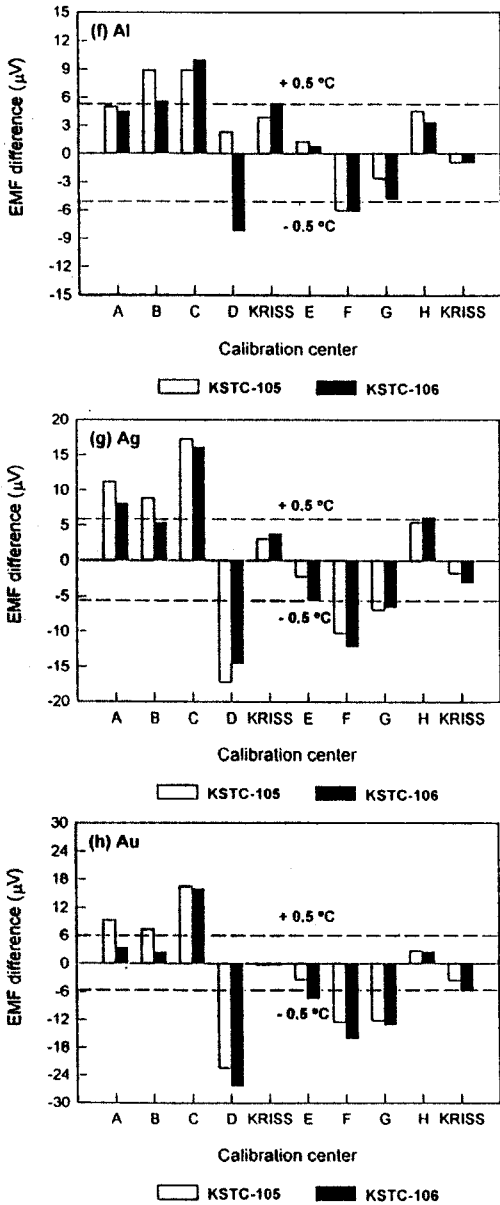


그림 2. 각 고정점온도에서 기준측정값과 고정점사기관에서의 측정값의 차이. (a) 갈륨의 용융점 (b) 인듐의 응고점 (c) 주석의 응고점 (d) 아연의 응고점 (e) 안티몬의 응고점 (f) 알루미늄의 응고점 (g) 은의 응고점 (h) 금의 용융점.

Fig.2. Difference between the reference data and the measurement data of calibration service centers at the fixed points. (a) melting point of gallium (b) freezing point of indium (c) freezing point of tin (d) freezing point of zinc (e) freezing point of antimony (f) freezing point of aluminum (g) freezing point of silver (h) melting point of gold.

그림 3은 KSTC-105 와 KSTC-106 열전대의 기전력 차이를 종합적으로 표시한 것이다. 두 열전대 모두 저온에서는 비교적 고정허용도내에 많은 수의 고정점사기관들이 포함되나 고온으로 증가할 수록 데이터의 산란이 커지고 심한 경우에는 2 °C 정도의 편차를 보이고 있다. 전 온도영역에서 S형 열전대의 비교 고정 측정허용도를 유지하는 기관은 3개 기관으로 나타났다.

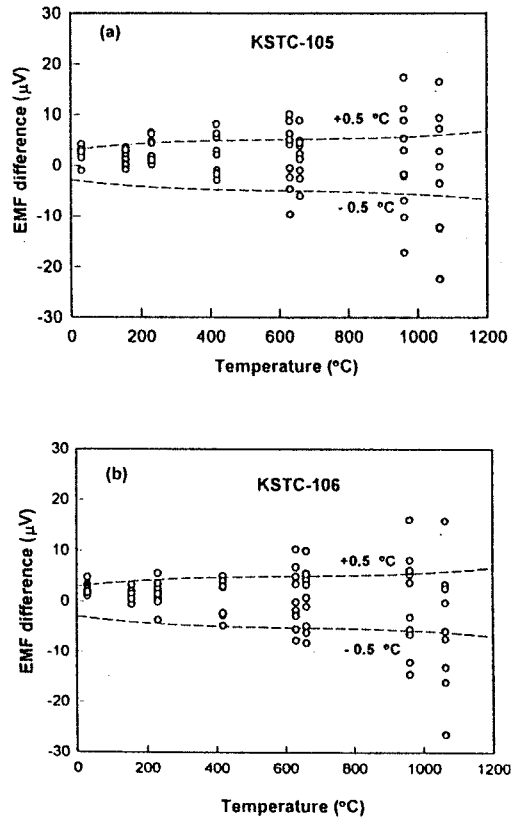


그림 3. 순회고정법으로 측정된 고정점에서의 열전대 기전력 차이분포. (a) KSTC-105 열전대 (b) KSTC-106 열전대.

Fig. 3. Difference distribution of the thermocouple emf at the fixed points measured by the round-robin test. (a) KSTC-105 thermocouple (b) KSTC-106 thermocouple.

표 3은 RRT 전후에 본 연구실에서 측정된 고정점에서의 열기전력 차이를 정리한 것으로, 최소한 2대의 열전대의 열기전력 변화가 열전대 고정불확도인 ± 0.5 °C 이내에 분포하고 있음을 알 수 있다. KSTC-105의

경우 RRT 전 후의 기전력이 금점을 제외하고는 고정점에서의 불확도 ± 0.2 °C 를 만족하는 것으로 보아 열전대의 열전기적 특성이 크게 변하지 않은 것으로 판단되나, KSTC-106은 여러 온도에서 고정점에서의 불확도 범위를 벗어나며 또한 온도차이가 발생하는 경향이 고온부에서는 순회평가후 음의 값으로 나타나고, 저온쪽으로 내려감에 따라 양의 값으로 바뀌는 경향을 보였다. 이 결과로 미루어볼 때 KSTC-106은 RRT과정 중 적으나 열전기적 특성의 변화가 발생한 것으로 생각된다. RRT 후 본 연구실에서 고정점 교정전에 육안으로 KSTC-106 열전대를 검사했을 때 열전대 소선의 많은 부분이 휘어진 상태를 보였다. 이로 미루어 볼 때 이 열전대는 다량의 소성변형을 받은 것으로 판단되며, 이것은 RRT중 열전대의 부주의한 취급에 기인한 것으로 판단된다. 전 교정검사기관의 열전대 비교교정 데이터의 표준편차(표 3참조)는 교정온도가 높아짐에 따라 증가하는 양상을 보이고 있다. 특히 630 °C 이상의 중·고온 영역이상에서 교정의 불확도를 초과하는 심한 편차를 보이고 있으며, 이는 이번 RRT에 참가한 기관들의 고온영역에서의 측정능력이 뒤떨어져 있는 단적인 예시라 볼 수 있다.

열전대의 비교교정에서 나타날 수 있는 오차요인으로서는 크게 계통오차 및 우연오차로 나누어 볼 수 있다. 계통오차로는 열기전력측정기인 DVM(digital voltmeter)의 정확도 및 열전대 연장선과 DVM단자에서 발생하는 polarity에 따른 오차가 가장 큰 오차로 볼 수 있으며, 그 외에 열전대의 기준점인 빙점(ice point)을 실현하고 설치하는 과정에서 발생하는 오차를 들 수 있다. 본 실험에서 사용된 DVM은 6종으로 모든 DVM이 1 μ V이상의 분해능을 가지고 있으며, 교정을 했을 경우 보통 수 μ V의 정확도가 보장된다. 빙점은 증류수를 열린 얼음가루와 증류수를 섞어 만들며, 장시간 사용할 경우 얼음이 점차 녹으면서 빙점조의 아래쪽에 있던 얼음이 위로 이동하면서 열전대 접점 부위에 물만 있게되어 0 °C보다 높은 온도가 되어 열기전력이 작게 측정될 수 있다. 우연오차로는 열전대의 열처리에 따른 오차와 소선의 불균질성(thermoelectric inhomogeneity)에 따른 오차를 들 수 있다. 열전대소선의 불균질성은 불순물오염, 소성변형(plastic deformation), 과잉공공(excess vacancy), 표면산화등으로 부터 발생하는것으로 보고되고 있으며,^[16-18] 본 실험실에서 최근 R형 열전대의 불균질성에

표 3. 순회교정전후의 각 고정점에서의 열전대기전력변화 및 비교교정데이터의 표준편차.

Table 3. Variations of the thermocouple emf at the fixed points before and after the round-robin test and standard deviations of the comparative calibration data.

고정점 온도 (°C)	열전대 기전력							
	KSTC-105				KSTC-106			
	RRT 전 (mV)	RRT 후 (mV)	온도 차이 (°C)	비교교정 표준편차 (°C)	RRT 전 (mV)	RRT 후 (mV)	온도 차이 (°C)	비교교정 표준편차 (°C)
1064.18	10.3174	10.3138	-0.31	1.05	10.3184	10.3126	-0.49	1.08
961.78	9.1332	9.1305	-0.15	0.97	9.1325	9.1295	-0.27	0.89
660.323	5.8507	5.8498	-0.09	0.47	5.8502	5.8492	-0.09	0.60
630.615	5.5426	5.5422	-0.05	0.64	5.5427	5.5427	0.01	0.60
419.527	3.4399	3.4381	-0.18	0.41	3.4408	3.4385	-0.24	0.40
231.928	1.7089	1.7100	+0.12	0.29	1.7101	1.7115	+0.16	0.29
156.5985	1.0778	1.0770	-0.11	0.18	1.0784	1.0788	+0.05	0.14
29.7646	0.1679	0.1668	-0.18	0.14	0.1677	0.1693	+0.26	0.18

의한 오차를 조사해 본 결과 1 ℃이상의 측정오차가 발생할 수 있음을 밝힌 바 있다.^[19] 따라서 열전대를 사용한 온도측정 및 교정의 정확도를 향상시키기 위하여는 위에 설명한 여러 오차요인을 최소화 시킬 수 있는 실험장치의 개발과 실험방법의 개선이 요망된다. 표 4는 KRISS와 (주)우진간의 은의 응고점온도비교결과를 나타내고 있다. 2대의 열전대에 의한 은의 응고점 온도차이는 0.18 ℃로서 은의 응고점의 정확도인 ± 0.2 ℃이내에 들었으므로 (주)우진의 은 응고점셀이 열전대용 정점교정 및 기전력 확인용으로 유효하게 사용될 수 있음을 보여주었다.

표 4. KRISS와 (주)우진간의 은 응고점에서의 열전대기전력측정값 비교.

Table 4. Comparison of the thermocouple emf at silver freezing points between KRISS and Woojin company.

열전대	은의 응고점에서의 기전력(mV)			온도차이 (℃)
	KRISS (e1)	(주)우진 (e2)	e1-e2	
KSTC-105	9.1332	9.1312	+0.0020	+0.18
KSTC-106	9.1295	9.1315	-0.0020	-0.18

IV. 결론

열전대분야 교정검사기관의 순회교정에 참여한 9개 교정검사기관중 소급성 오차가 S형 열전대의 교정 불확도인 ± 0.5 ℃ 이내에서 열기전력이 일치하는 기관은 단지 3개 기관으로 대부분의 교정검사기관이 기대에 미치지 못하였다. 비교측정온도가 높을수록 교정값의 차이가 크게 나타났으며, 특히 금점 근처에서는 2.0 ℃ 정도의 큰 차이를 보였다. KRISS와 (주)우진간의 은의 응고점온도 비교측정결과 ± 0.18 ℃이내에서 일치하여 (주)우진의 은의 응고점셀이 열전대정점교정 및 기전력 확인용으로 유효하게 사용될 수 있음을 보여주었다. 최근 반도체산업 및 신소재공업에서 점점 더 정밀, 정확한 고온측정이 요구되는 이때 국내의 고온보급기관의 측정능력이 기대에 미치지 못하는 결과를 보여 앞으로 관련 기관 및 KRISS에서는 본 연구결과에서 나타난 각 교정검사기관의 불확도에 미치는 요인을

파악하여 개선하고, 교정방법을 지도하여 교정의 정확도를 시급히 향상시켜 산업체의 요구도에 부응하여야 할 것이다.

감사의 글

본 연구는 과학기술처의 일반출연 연구비로 수행된 것으로 이에 감사드리며, 아울러 순회교정검사기간 중 많은 협조를 해주신 교정검사기관의 관계자 여러분에게도 심심한 감사의 뜻을 전합니다.

참고 문헌

- [1] H. Preston-Thomas, *Metrologia*, 27, pp.3-10, 1990.
- [2] 감기술, 이호근, 응용물리, 5, 5, pp.488-493, 1992.
- [3] KASTO, "국가교정검사 수수료표", KASTO-CS-54-89, pp.79-84, 1989.
- [4] G. W. Burns, G. F. Strouse, B. W. Mangum, M. C. Croarkin, W. F. Guthrie, P. Marcarino, M. Battuello, H. K. Lee, J. C. Kim, K. S. Gam, C. Rhee, M. Chattle, M. Arai, H. Sakurai, A. I. Pokhodun, N. P. Moiseeva, S. A. Perevalova, M. J. de Groot, J. Jang, K. Fan, and S. Wu, "New reference function for platinum-10% rhodium versus platinum(type S) thermocouples based on the ITS-90. Part I: Experimental procedures", *Temperature, Its Measurement and Control in Science and Industry*, Vol.6 (Edited by J.F.Schooley), New York, American Institute of Physics, pp.537-540, 1992.
- [5] G. W. Burns, G. F. Strouse, B. W. Mangum, M. C. Croarkin, W. F. Guthrie, P. Marcarino, M. Battuello, H. K. Lee, J. C. Kim, K. S. Gam, C. Rhee, M. Chattle, M. Arai, H. Sakurai, A. I. Pokhodun, N. P. Moiseeva, S. A. Perevalova, M. J. de Groot, J. Jang, K. Fan, and S. Wu, "New reference function for platinum-10% rhodium versus platinum(type S) thermocouples based on the ITS-90. Part II: Experimental procedures", *Temperature, Its Measurement and Control in Science and Industry*, Vol.6 (Edited by J.F.Schooley), New York, American

- Institute of Physics, pp.541-546, 1992.
- [6] W. F. Guthrie, M. C. Croarkin, G. W. Burns, G. F. Strouse, P. Marcarino, M. Battuello, H. K. Lee, J. C. Kim, K. S. Gam, C. Rhee, M. Chattle, M. Arai, H. Sakurai, A. I. Pokhodun, N. P. Moiseeva, S. A. Perevalova, M. J. de Groot, J. Jang, K. Fan, and S. Wu, "Statistical analysis of type S thermocouple measurements on the International Temperature Scale of 1990", *Temperature, Its Measurement and Control in Science and Industry*, Vol.6 (Edited by J.F.Schooley), New York, American Institute of Physics, pp.547-552, 1992.
- [7] G. W. Burns, M. G. Scroger, G. F. Strouse, M. C. Croarkin and W. F. Guthrie, NIST Monograph 175, NIST, 1993.
- [8] 김용규, 감기술, 강기훈, 지대성, "국제온도눈금 (ITS-90)에 준한 규격화된 열전대의 온도-기전력 기준표", KRIS-94-025-MO, KRIS, 1994.
- [9] E. H. McLaren, E. G. Murdock, "The properties of Pt/PtRh Thermocouples for Thermometry in the Range 0 - 1100 °C", Part I, 1979.
- [10] E. H. McLaren, E. G. Murdock, "The Properties of Pt/PtRh Thermocouples for Thermometry in the Range 0 - 1100 °C", Part II, 1979.
- [11] R. E. Bentley and T. L. Morgan, *Metrologia*, 20, pp. 61, 1984.
- [12] K. S. Gam, H. K. Lee and C. Rhee, *JKPS*, 22, 4, pp.483, 1989.
- [13] K. S. Gam, "Platinum Resistance Thermometry", Workshop on National Standards System and Precision Measurement", KSRI, pp.95-120, 1989.
- [14] K. S. Gam and H. K. Lee, "High Temperature Platinum Resistance Thermometry at KRIS", 4th ROK-ROC Metrology Symposium, Taejon, pp.349-353, 1992.
- [15] ASTM, "Manual on the use of thermocouples in temperature measurement", 4th Edition, ASTM, pp.152, 1993.
- [16] T. D. McGee, "Principles and Methods of Temperature Measurements", Wiley-Interscience Pub., 1988.
- [17] R. E. Bentley and T. P. Jones, *High Temp.-High Press.*, 12, pp.33, 1980.
- [18] E. H. McLaren and E. G. Murdock, "Temperature : Its Measurement and Control in Science and Industry", Vol.5, Part 2, ed(s). J.F.Schooley, Am. Inst. Phys., New York, pp.953, 1982.
- [19] 감기술, 김용규, 송창호, 이영희, "접촉방법에 의한 고온의 정밀측정기술개발", KRIS-94-024, KRIS, pp.19, 1994.

著 者 紹 介

卍 基 述

「센서학회지 제3권 제1호」 논문 94-3-1-09, p. 61-67참조.
1986년~현재 한국표준과학연구원 선임연구원

金 容 圭

「센서학회지 제3권 제1호」 논문 94-3-1-09, p. 61-67참조.
1992년~현재 한국표준과학연구원 선임연구원



金 善 坤

1950년 3월 27일생. 1978년 충남대학교 물리학과 졸업(학사). 1978년~현재 한국표준과학연구원 검교정센터 선임기술원 주관심분야 : 교정기관의 측정능력 및 환경실태평가