ISSN: 1226-7244 (Print)
ISSN: 2288-243X (Online)
논문번호 16-04-18

j.inst.Korean.electr.electron.eng.Vol.20,No.4,439~448,December 2016
http://dx.doi.org/10.7471/ikeee.2016.20.4.439

온도교정기 RTD 저항 및 열전대 직류전압 교정기법 연구

A Study on the Calibration Technique of RTD and Thermocouple System

오 광 석*, 이 왕 헌**★

Kwang-suk Oh*, Wangheon Lee**★

Abstract

RTDs and thermocouple sensors are broadly used to measure its temperature in industry and research. The contents of this standard calibration procedure(SCP) describe procedures related to the calculation of Electrical Temperature Calibrator and show different ways to indicate the calibration results like the uncertainty in measurement. As of current, SCP of electrical temperature calibrator has not been established yet and we have some inconveniences and difficulties in the standard calibration work. To solve these problems, we have studied the calibration technique for RTD and thermocouple of temperature calibrator. In this paper, we present the mathematic model of its data and variations of measurement with the results of calibration data.

요 약

온도 측정을 위해 RTD와 열전대 센서가 산업이나 연구 분야에 널리 사용되고 있다. RTD 및 열전대의 온도 교정기에 대한 표준교정절차는 측정에서 포함되는 불확도의 교정 결과를 나타내는 방법을 보여준다. 지금까지 이들에 대한 표준교정절차가 확립되지 않아 다소의 불편함과 표준교정 업무에 어려움이 있었다. 이러한 문제를 해결하기 위해 온도 교정기의 RTD 및 열전대에 대한 교정기법을 연구하게 되었다. 본 논문에서는 이들에 대한 수학적 모델과 교정결과 자료를 제시하였다.

Key words : RTD, thermocouple, calibrator, calibration, uncertainty

---

* Korea Research Center for Measuring Instruments.
** Dept. of IT Convergence and Electronics Engineering,Hansei University.
★ Corresponding author
e-mail : whlee@hansei.ac.kr, tel : 031)450-5146
Manuscript received Dec. 21, 2016; revised Dec. 26, 2016 ; accepted Dec. 28, 2016
This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

I. 서론

온도는 뜨겁거나 차가운 정도를 말한다. 이것은 사람이 물을 마실 때나 샤워할 때 물의 뜨겁고 차가운 정도를 알 수 있는 능력을 나타낸 것으로 계절이 바뀔 때 춥거나 더운 정도를 몸이 감지하여 알아내는 느낌이 온도이다. 우리는 이것을 온도의 정의라고 말하고, 이는 인간의 몸이 온도계를 갖고 있음을 의미하는 것이다. 그런데 인간의 몸은 상대적 온도의 차이는 대략적으로 알아낼 수 있지만 미세한 온도의 차이 또는 숫자로 온도값을 표현하는 것에 한계가 있다. 그리하여 미세한 온도의 차이를 알아내고, 숫자로 그 값들을 표현하기 위해 온도계가 발명되고, 발명된 온도계에 눈금(scale)을 부여하면서 온도단위(temperature unit)가 생기게 되었다.

온도측정에 활용되는 센서는 열전대센서와 저항식(RTD)센서 및 열상을 이용하여 온도를 측정하는 방법이 있다. 이들 중에서 측정용이나 연구개발용으로는 열전센서와 저항식 온도센서가 가장 많이 활용되고 있다. 저항식 온도센서는 온도의 크기에 따라 저항의 차이가 변동하는 원리를 적용하여 온도를 계측하는 것이며 신호 검출용 센서의 저항 값을 측정 후 그 저항 값을 사용하여 저항의 변화에 대한 온도의 변환 표를 사용하여 현재의 온도 값을 구할 수 있다.

열전대 센서는 제벡효과(seebeck dffect)를 이용한 광범위의 온도를 계측하기 위하여 두 가지의 금속(metal)으로 만든 것이며 재료의 성질이 다른 두 금속선을 접합하고 두 접점 사이에 온도차(temperature difference)를 주면, 두 접점 사이에는 열적 기전력
(thermal electromotive force)이 발생한다. 이상과 같이 온도측정에 활용되는 센서시스템이 규정된 정확도를 잘 만족하는지는 일정 간격으로 확인하는 단계를 교정이라고 말한다. 이러한 교정시스템 중 저항식 온도센서와 열전대 온도센서의 출력값을 교정하는 교정기의 표준교정방법을 기술하였으며 본 논문에서는 RTD 저항체 및 열전대의 출력 전압을 교정하는 교정시스템 구성과 교정기법을 연구하였다. 본 논문에서 제시된 교정방법에서 사용되는 표준장비와 교정기의 측정불확도 평가 요소를 알아내고 교정대상기기의 교정 값과 측정오차를 나타내는 수학적 모델 식을 정립 하였으며 이 수학적 모델 식은 표준기의 교정값과, 표준기의 측정값, 표준기의 경시변화, 표준기의 저항값, 교정대상기기의 측정값, 출력표시 분해능 및 저항과 온도 간의 변동계수에 의한 측정불확도 인자들로 구성되고 있음을 확인하였다.

II. 교정방법 및 세부 절차

1. 교정내용

1.1) 측정항목

온도교정기는 기준온도에 해당하는 저항값이나 열기전력을 출력하므로 이를 디지털 멀티메타를 이용하여 측정하는 것이 온도교정기 RTD저항 및 열전대 직류전압의 교정이다.

1.2) 측정방법

저항 규격과 열전대 type에 해당하는
ITS-90 온도눈금의 기준값과 온도교정기의 출력값을 디지털 멀티메타로 측정하여 비교하거나, 기준기급의 온도계를 이용하여 온도 출력값을 기준온도계로 직접 측정한다.

1.3) 사용장비 명세

교정대상기기의 종류와 정밀정확도에 따라 대체 가능한 장비를 사용할 수 있다.

Table 1. Standard equipment specification
표 1. 표준장비명세

Standard Equipment	Maker	Model	Performance (Range)
Reference Multi Meter	Fluke	8508A	DC Voltage : 0 V~1 000 V Resistance : 0 Ω~100 kΩ
Calibrator	Fluke	5500A	-189 ℃ ~ 500 ℃ (R, S, K, N, E, J, T Type)

2. 준비사항

2.1) 교정에 들어가기 전에 교정절차 및 주의사항을 숙지하고, 교정대상기기의 동작상태 등을 확인한다.

2.2) 교정하는 장소의 온도와 습도를 일정하게 유지시킨다.

2.3) 교정대상기기는 전원을 투입하기 전에 표준시험 상태 또는 이에 가까운 상태에 적어도 2시간 이상 두는 것이 좋다.

2.4) 교정대상기기는 전원을 투입하고 매뉴얼의

지정된 시간 만큼 예열한다. 매뉴얼이 없을 경우에는 약 15분간 예열한다.

2.5) 교정실 전원전압과 교정대상기기의 전원전압이 적합한 상태로 되어있는지를 확인한다.

2.6) 교정대상기기의 최대입력전압을 반드시 확인하여 과전압이 인가되는 경우가 없도록 각별히 주의한다.

2.7) 교정대상기기에 표준값을 입력하기 전에 기능과 Lead 선의 연결상태, Range 등 각 스위치가 맞게 설정되었는지 확인한 후 측정을 행하고 다음 순서의 교정 수행 시에도 각 스위치의 선택에 주의한다.

3. 열전대(Thermocouple) Type

기준 온도값을 출력하여 열기전력을 직접 측정한다.

3.1) 교정대상인 열전대 온도교정기를 멀티미터와 동일한 온도 조건, 충분한 시간 동안 예열하여 상온보상에 의해여 생기는 온도 편차를 최소로 한다.

3.2) 교정대상기기를 Fig1의 b)와 같이 연결한다.

a) RTD Calibration

b) Cold Junction Thermocouple Calibration

c) Thermocouple Calibration

Fig1. Measurement wiring diagram of Electrical Temperature Calibrator

그림1. 온도교정기의 측정 결선도

3.3) 열전대 온도 교정기의 교정 하고자 하는 값을 설정하고, 출력을 ON하여 멀티미터의 지시값이 안정되면 측정값을 기록한다.

4. 저항식(RTD) Type

기준 온도 값을 출력하여 저항 값을 직접 측정한다.

4.1) 교정대상 저항식(RTD) 온도교정기를 멀티미터와 동일한 온도 조건에서 충분한 시간을 예열하여 상온보상에 의한 온도 편차를 최소로 한다.

4.2) 교정대상기기를 Fig1의 a)와 같이 연결하되, 저항식(RTD) 온도교정기의 결선방식(2-wire, 3-wire, 4-wire)에 따라서 멀티미터를 연결한다.

4.3) 교정대상기기에서 ITS-90에 정한 저항 type을 설정한다.

4.4) 저항식(RTD) 온도 교정기의 교정 하고자 하는 값을 설정하여 출력을 ON하고 멀티미터의 지시값이 안정되면 측정값을 기록한다.

III. 교정데이터의 처리 (측정불확도 포함)

1. 저항식(RTD) Function의 불확도

여기서는 Pt100(385) 600 ℃(313.708 Ω) 측정 시 불확도 산출을 예로 제시하였다.

Table 2. Resistance measurement values
표 2. 저항 측정값

number	1	2	3	4	5	average
measured value	313.708 Ω	313.708 Ω	313.708 Ω	313.707 Ω	313.708 Ω	313.708 Ω

1) 수학적 모델링

$$R_x = R_m + R_s + \delta T_{ix} + \delta R_{sd}$$

R_x : 교정대상기기의 측정값

R_m : 기준기 측정값

R_s : 기준기 보정값

δT_{ix} : 교정대상기기의 분해능

δR_{sd} : 기준기의 장기안정도

Table 3. Pt100 Uncertainty Budget
표 3. Pt100 불확도 요약표

		1	2	3	4	5	6
	quantity X_i	estimated value x_i	standard uncertainty $u(x_i)$	probability distribution	sensitivity coefficient c_i	uncertainty contribute value $u(y)$	degree of freedom ν_i
A	R_m	313.708 Ω	0.20 mΩ	rectangular	1	0.20 mΩ	4
B	R_s	0.000 Ω	1.5 mΩ	rectangular	1	1.5 mΩ	∞
C	δT_{ix}	0.000 Ω	0.12 mΩ	normal	1	0.12 mΩ	∞
D	δR_{sd}	0.000 Ω	2.8 mΩ	rectangular	1	2.8 mΩ	∞
E	R_x	313.708 Ω				3.2 mΩ	∞

2) 계산근거

A1 : 기준기 지시값
313.708 Ω

A2 : 반복측정에 의한 A형 불확도는
- 표준편차 :

$$\sqrt{\frac{1}{(n-1)}\sum_{i=1}^{n}(x_i-\overline{x_i})^2} = 0.45\ \text{mΩ}$$

- A형불확도 :

$$\frac{\sigma(x_i)}{\sqrt{n}} = 0.45\ \text{mΩ} / \sqrt{5} = 0.20\ \text{mΩ}$$

A3 : 정규 분포

A4 : 감도계수는 R_m을 R_x에 대하여 편미분하면 1이다.

$$\frac{\partial R_x}{\partial R_m} = 1$$

A5 : 불확도 기여량
= |감도계수| × 표준불확도
= | 1 | × 0.20 mΩ = 0.20 mΩ

A6 : 반복측정에 의한 자유도는
측정횟수 - 1 이므로
5 - 1에 의하여 4이다.

B1 : 기준기 보정값
0.000 Ω

B2 : 표준기불확도로서 성적서의 명시된 불확도를 k값으로 나누어 적용한다.
성적서에서의 측정불확도는
3.0 mΩ (신뢰수준 약 95 %, k=2)이다.
표준불확도는 3.0 mΩ ÷ 2 = 1.5 mΩ

B3 : 상위기관에서 받은 교정용표준기의 성적서 불확도(신뢰수준 약 95 %, k=2)를 적용하여, 정규분포를 취한다.

B4 : 감도계수는 R_s를 R_x에 대하여 편미분하면 1 이다.

$$\frac{\partial R_x}{\partial \delta R_s} = 1$$

B5 : 불확도 기여량
= |감도계수| × 표준불확도
= | 1 | × 1.5 mΩ = 1.5 mΩ 이다.

B6 : 정규분포에 의한 자유도는 ∞이다.

$$\frac{1}{2}(\frac{100}{R})^2 = \frac{1}{2}\times(\frac{100}{0})^2 = \infty$$

C1 : 측정량이 아닌 측정값에 영향을 미치는 종속인자 이므로 추정값은 0.000 Ω

C2 : 디지털형 경우에는 최소분해능의 반범위를 적용한다.
0.001 ℃이므로 1/2 크기는
0.000 5 ℃ 저항단위로 환산하면,
pt100 Ω의 감도가 0.39 Ω/℃
이므로 0.000 20 Ω이다.
0.000 20 Ω ÷ $\sqrt{3}$ = 0.000 12
≒ 0.12 mΩ 이다.

C3 : 분해능에 의한 분포도는 상한치와 하한치의 범위 안에 100 % 존재함으로 직사각형 분포를 취한다.

C4 : 감도계수는 δT_{ix}를 R_x에 대하여 편미분하면 1 이다.

$$\frac{\partial R_x}{\partial T_{ix}} = 1$$

C5 : 불확도 기여량

= |감도계수| × 표준불확도

= | 1 | × 0.12 mΩ = 0.12 mΩ

C6 : 분해능에 의한 자유도는 ∞ 이다.

$$\frac{1}{2}(\frac{100}{R})^2 = \frac{1}{2}\times(\frac{100}{0})^2 = \infty$$

D1 : 기준기의 장기안정도에 대한 추정값.

0.000 Ω

D2 : 기준기의 제작사 매뉴얼 상의

안정도로서 다음과 같다.

2 kΩ Range에서

±(14 μΩ/Ω of Reading + 0.25 μΩ/Ω of Range)

이므로, 안정도는 4.89 mΩ 이다.

4.89 mΩ ÷ $\sqrt{3}$ = 2.8 mΩ

D3 : 기준기 제작사의 안정도에 의한 분포는

직사각형 분포를 취한다.

D4 : 감도계수는 δR_{sd}를 R_x에 대하여

편미분하면 1 이다.

$$\frac{\partial R_x}{\partial \delta R_{sd}} = 1$$

D5 : 불확도 기여량

= |감도계수| × 표준불확도

= | 1 | × 2.8 mΩ = 2.8 mΩ 이다.

D6 : 안정도에 의한 자유도는 ∞ 이다.

$$\frac{1}{2}(\frac{100}{R})^2 = \frac{1}{2}\times(\frac{100}{0})^2 \fallingdotseq \infty$$

E1 : 313.708 Ω

$R_x = R_m + R_s + \delta T_{ix} + \delta R_{sd}$

=313.708 Ω + 0.000 Ω + 0.000 Ω

+ 0.000 Ω = 313.708 Ω

E5 : 3.2 mΩ

각 표준불확도들을 합성한 값

$$u_c(R_x) = \sqrt{\sum_{i=1}^{n} c_i^2 \cdot \ u^2(x_i)}$$

$$= \sqrt{(0.20)^2 + (1.5)^2 + (0.12)^2 + (2.8)^2}$$

= 3.21 mΩ ≒ 3.2 mΩ

E6 : 유효자유도는

$$v_{eff} = \frac{u_c(R_x)^4}{\sum_{i=1}^{n} \frac{[c_i \cdot \ u(x_i)]^4}{v_i}}$$

$$= \frac{(4.6)^4}{\frac{(0.20)^4}{4} + \frac{(1.5)^4}{\infty} + \frac{(0.12)^4}{\infty} + \frac{(2.8)^4}{\infty}}$$

= 262 144 ≒ ∞

3) 저항식(RTD) 온도교정기 저항측정 불확도 (U)

측정불확도는 합성표준불확도에 포함인자 k를 곱하여 표기하며, 이때 k값은 측정불확도 표현지침 (KOLAS-G-002)에 의거하여 유효자유도가 10 이상이면 신뢰 수준 약 95 %, 포함인자 k = 2로 결정한다.

따라서

U = k · uc 식에 의하여

= 3.2 mΩ × 2 = 6.4 mΩ ≒ 7 mΩ

4) 결과보고

Digital Multimeter를 기준기로 하여 교정된 전기식 온도교정기의 측정값은 313.708 Ω 이고 측정불확도는 9 mΩ (신뢰수준 약 95 %, k = 2) 이다.

2. 열전대 전압 Function의 불확도

여기서는 B-Type 1 820 ℃를 측정 시 불확도 산출을 예로 제시하였다.

Table 4. Resistance measurement values
표4. 저항 측정값

number	1	2	3	4	5	average
measured value	13.820 mV	13.820 mV	13.820 mV	13.820 mV	13.821 mV	13.820 mV

1) 수학적 모델링

$V_x = V_m + V_s + \delta T_{ix} + \delta V_{sd}$

V_x : 교정대상기기의 측정값

V_m : 기준기 측정값

V_s : 기준기 보정값

δT_{ix} : 교정대상기기의 분해능

δV_{sd} : 기준기의 장기안정도

Table 5. Thermomcouple uncertainty budget
표5. 열전대 불확도 요약표

		1	2	3	4	5	6
	guantity X_i	estimated value x_i	standard uncertainty $u(x_i)$	probability distribution	sensitivity coefficient c_i	uncertainty contribute value $u(y)$	degree of freedom v_i
A	V_m	13.820 ㎷	0.20 μV	normal	1	0.20 μV	4
B	V_s	0.000 ㎷	0.40 μV	normal	1	0.40 μV	∞
C	δT_{ix}	0.000 ㎷	0.033 μV	rectangular	1	0.033 μV	∞
D	δV_{sd}	0.000 ㎷	0.09 μV	rectangular	1	0.09 μV	∞
E	V_x	13.820 ㎷				0.46 μV	∞

2) 계산근거

A1 : 기준기 지시값
13.820 mV

A2 : 반복측정에 의한 A형 불확도는
- 표준편차 :

$$\sqrt{\frac{1}{(n-1)}\sum_{i=1}^{n}(x_i-\overline{x_i})^2} = 0.45\ \mu V$$

- A형불확도 :

$$\frac{\sigma(x_i)}{\sqrt{n}} = 0.45\ \mu V / \sqrt{5} = 0.20\ \mu V$$

A3 : 정규 분포

A4 : 감도계수는 V_m를 V_x에 대하여 편미분하면 1이다.

$$\frac{\partial V_x}{\partial V_m} = 1$$

A5 : 불확도 기여량
= |감도계수| × 표준불확도
= | 1 | × 0.20 μV = 0.20 μV

A6 : 반복측정에 의한 자유도는
= 측정횟수 - 1 이므로
5 - 1에 의하여 4이다.

B1 : 기준기의 보정된 값
0.000 ㎷

B2 : 표준기불확도로부터 성적서의 표기된 불확도를 k값으로 나누어 적용한다.
성적서에서의 측정불확도는
0.80 μV
(신뢰수준 약 95 %, k=2)이다.
표준불확도는
0.80 μV ÷ 2 = 0.40 μV

B3 : 상위기관에서 받은 교정용표준기의 성적서 불확도(신뢰수준 약 95 %, k=2)를 적용하여, 정규분포를 취한다.

B4 : 감도계수는 V_m을 V_x에 대하여 편미분하면 1 이다.

$$\frac{\partial V_x}{\partial V_m} = 1$$

B5 : 불확도 기여량
= |감도계수| × 표준불확도
= | 1 | × 0.40 μV = 0.40 μV 이다.

B6 : 정규분포에 의한 자유도는 ∞이다.

$$\frac{1}{2}(\frac{100}{R})^2 = \frac{1}{2}\times(\frac{100}{0})^2 = \infty$$

C1 : 측정량이 아닌 측정값에 영향을 미치는 종속인자 이므로 추정값은 0.000 mV

C2 : 디지털형 경우에는
최소분해능의 반범위를 적용한다.
0.01 ℃이므로 1/2 크기는
0.005 ℃ 저항단위로 환산하면,
열전식 B-Type의 감도가
11.42 μV/℃ 이므로 0.057 μV,
0.057 μV ÷ $\sqrt{3}$ = 0.033 μV

C3 : 분해능에 의한 분포도는 상한치와 하한치의 범위 안에 100 % 존재함으로 직사각형 분포를 취한다.

C4 : 감도계수는 δT_{ix}를 V_x에 대하여 편미분하면 1 이다.

$$\frac{\partial V_x}{\partial \delta T_{ix}} = 1$$

C5 : 불확도 기여량
= |감도계수| × 표준불확도
= | 1 | × 0.033 μV = 0.033 μV

C6 : 분해능에 의한 자유도는 ∞ 이다.

$$\frac{1}{2}(\frac{100}{R})^2 = \frac{1}{2}\times(\frac{100}{0})^2 = \infty$$

D1 : 기준기의 장기안정도에 대한 추정값.
0.000 ㎷

D2 : 기준기의 제작사 매뉴얼 상의 안정도로서 다음과 같다.
200 ㎷ Range에서
±(4.5 μV/V of Reading + 0.5 μV/V of Range)
이므로, 안정도는 0.16 μV 이다.

0.16 μV ÷ $\sqrt{3}$ = 0.09 μV

D3 : 기준기 제작사의 안정도에 의한 분포는 직사각형 분포를 취한다.

D4 : 감도계수는 δV_{sd}를 V_x에 대하여 편미분하면 1 이다.

$$\frac{\partial V_x}{\partial \delta V_{sd}} = 1$$

D5 : 불확도 기여량

= |감도계수| × 표준불확도

= | 1 | × 0.09 μV = 0.09 μV 이다.

D6 : 안정도에 의한 자유도는 ∞ 이다.

$$\frac{1}{2}(\frac{100}{R})^2 = \frac{1}{2}\times(\frac{100}{0})^2 \fallingdotseq \infty$$

E1 : 13.820 mV

$V_x = V_m + V_s + \delta T_{ix} + \delta V_{sd}$

= 13.820 mV + 0.000 mV + 0.000 mV + 0.000 mV = 13.820 mV

E5 : 0.46 μV

각 표준불확도들을 합성한 값

$$u_c(V_x) = \sqrt{\sum_{i=1}^{n} c_i^2 \cdot \ u^2(x_i)}$$

$$= \sqrt{(0.20)^2 + (0.40)^2 + (0.033)^2 + (0.09)^2}$$

= 0.46 μV

E6 : 유효자유도는

$$v_{eff} = \frac{u_c(V_x)^4}{\sum_{i=1}^{n} \frac{[c_i \cdot \ u(x_i)]^4}{v_i}}$$

$$= \frac{(0.55)^4}{\frac{(0.20)^4}{\infty} + \frac{(0.40)^4}{4} + \frac{(0.033)^4}{\infty} + \frac{(0.09)^4}{\infty}}$$

= 111 ≒ ∞

2) 열전대 온도교정기 전압측정 불확도 (U)

측정불확도는 합성표준불확도에 포함인자 k를 곱하여 표기하며, 이때 k 값은 측정불확도 표현지침 (KOLAS-G-002)에 의거하여 유효자유도가 10 이상이면 신뢰 수준 약 95 %, 포함인자 k = 2로 결정한다.

따라서

U = k · uc 식에 의하여

= 0.46 μV × 2 = 0.92 μV ≒ 1 μV

3) 결과보고

Digital Multimeter를 기준기로 하여 교정된 열전대 온도교정기의 측정값은 13.820 mV 이고 측정불확도는 1 μV

(신뢰수준 약 95 %, k = 2)이다.

4. 열전대 온도Function의 측정 불확도

여기서는 K-Type 300℃를 측정시 불확도 산출을 예로 제시하였다.

Table 6. Thermomcouple temp measurement values
표6. 열전대 온도 측정값

number	1	2	3	average
measured value	300.00 ℃	300.00 ℃	300.00 ℃	300.00 ℃

Table 7. Temp calibrator measurement values
표7. 온도교정기 온도 측정값

number	1	2	3	average
measured value	300.00 ℃	300.00 ℃	300.00 ℃	300.00 ℃

1) 수학적 모델링

$$E_t \ = \ t_x - t_s + \delta t_{spt} + \delta t_{xr} + \delta t_{ls}$$

여기서,

E_t : 교정대상 온도교정기의 편차

t_x : 교정대상 온도교정기의 지시값

t_s : 기준장비의 표준값

δt_{spt} : 기준장비의 불확도

δt_{xr} : 교정대상 온도교정기의 분해능 불확도

δt_{ls} : 기준장비의 장기안정도에 의한 불확도

Table 8. Thermomcouple temp uncertainty budget
표8. 열전대 온도 불확도 요약표

		1	2	3	4	5	6
	guantity (X_i)	estimated value (x_i)	standard uncertainty $u(x_i)$	probability distribution	sensitivity coefficient (c_i)	uncertainty contribute value $u(y)$	degree of freedom (v_i)
A	t_x	300.1 ℃	0.000 ℃	nomal	1	0.000 ℃	2
B	t_s	300.00 ℃	0.000 ℃	rectanqular	-1	0.000 ℃	3
C	δt_{spt}	0.0 ℃	0.06 ℃	rectanqular	1	0.06 ℃	∞
D	δt_{xr}	0.0 ℃	0.029 ℃	nomal	1	0.029 ℃	∞
E	δt_{ls}	0.0 ℃	0.052 ℃	nomal	1	0.052 ℃	∞
F	E_t	0.1 ℃				0.084 ℃	∞

A1 : 교정대상 온도교정기의 지시값의 평균

$$\frac{(300.1+300.1+300.1)}{3} = 300.1 \ ℃$$

A2 : 교정대상 온도교정기의 표준불확도

$$s(\overline{x}) = \left(\frac{\sum_{i=1}^{n}(x_i-\overline{x})^2}{(n-1)n}\right)^{\frac{1}{2}}$$

$$= \left[\begin{matrix}\{(300.1-300.1)^2+(300.1-300.1)^2+(300.1-300.1)^2\}\\ \div(2\times3)\end{matrix}\right]^{\frac{1}{2}}$$

$$= 0.000℃$$

A3 : 중심극한정리에 따른다.
측정횟수는 3번이지만 실질적으로 10번 이상 측정한 값으로 볼 수 있다.

A4 : 감도계수는 δE_t를 t_x에 대하여 편미분하면 1 이다.

$$\frac{\partial E_t}{\partial t_x} = 1$$

A5 : 불확도 기여량
= |감도계수| × 표준불확도
= | 1 | × 0.000℃ = 0.000℃

A6 : A형 표준불확도의 자유도
n -1 = 3 - 1 = 2

B1 : 기준장비의 표준값의 평균

$$\frac{(300.00+300.00+300.00+300.00)}{4} = 300.00 \ ℃$$

B2 : 기준장비의 표준값의 불확도

$$s(\overline{x}) = \left(\frac{\sum_{i=1}^{n}(x_i-\overline{x})^2}{(n-1)n}\right)^{\frac{1}{2}}$$

$$= \left[\left\{\begin{matrix}(300.00-300.00)^2+(300.00-300.00)^2\\ +(300.00-300.00)^2+(300.00-300.00)^2\end{matrix}\right\}\div(3\times4)\right]^{\frac{1}{2}}$$

$$= 0.000℃$$

B3 : 중심극한정리에 따른다. 측정횟수는 4번이지만 실질적으로 10번이상 측정한 값으로 볼 수 있다.

B4 : 감도계수를 E_t에 대하여 t_S로 편미분하면

$$\frac{\partial E_t}{\partial t_s} = -1$$

B5 : 불확도 기여량
= |감도계수| × 표준불확도
= | 1 | × 0.000℃ = 0.000℃ 이다.

B6 : A형 표준불확도의 자유도
n -1 = 4-1 = 3

C1 : 0.0 ℃
기준장비의 확장불확도는 ± 0.12 ℃이고 오차의 추정값은 0.0 ℃이다.

C2 : 표준기인 CALIBRATOR의 불확도

$$\frac{0.12℃}{2} = 0.06 \ ℃$$

C3 : 표준기인 CALIBRATOR의 교정 성적서의 확률분포

C4 : 감도계수를 δt_{spt} 로 편미분 하면

$$\frac{\partial E_t}{\partial \delta t_{spt}} = 1$$

C5 : 불확도 기여량
= |감도계수| × 표준불확도
= | 1 | × 0.06℃ = 0.06℃

C6 : B형 표준불확도의 자유도
성적서에 신뢰수준 약 95 %, k = 2라 되어 있으므로 정규분포라 볼 수 있다.
따라서 자유도는 무한대(∞)이다.

D1 : 0.0 ℃
피교정기기의 분해능 불확도에서 분해능이 0.1 ℃이고, 분해능 오차의 추정값은 0.0 ℃이다.

D2 : 최소 분해능이 0.1 ℃일 때 직사각형분포의 반 범위는 0.1℃/2 = 0.05 ℃ 이므로

$$\frac{0.05}{\sqrt{3}} = 0.028\ 9℃ \fallingdotseq 0.029 \ ℃$$

D3: 분해능 불확도는 불확도 범위내에서 온도가 나타나는 확률이 동일하다고 보고, 직사각형분포로 가정하여 표준불확도를 구한다.

D4 : 감도계수를 δt_{xr} 로 편미분 하면

$$\frac{\partial E_t}{\partial \delta t_{xr}} = 1$$

D5 : 불확도 기여량

= |감도계수| × 표준불확도

= | 1 | × 0.029℃ = 0.029℃ 이다.

D6 : B형 표준불확도의 자유도

$\nu_i = \frac{1}{2}(\frac{100}{R})^2$ 에서 R = 0 %이므로,

$\nu_i = \frac{1}{2}\times(\frac{100}{0})^2 = \infty$

E1 : 0.0 ℃

기준장비의 장기안정도는 ± 0.09 ℃이고 오차의 추정값은 0.0 ℃이다.

E2 : 기준장비의 장기안정도에 의한 불확도는

$\frac{0.09}{\sqrt{3}}$ ≒ 0.052 ℃ 이다.

E3: 기준장비의 장기안정도에 의한 불확도는 불확도 범위내에서 온도가 나타나는 확률이 동일하다고 보고, 직사각형분포로 가정하여 표준불확도를 구한다.

E4 : 감도계수를 δt_{ls} 로 편미분 하면

$$\frac{\partial E_t}{\partial \delta t_{ls}} = 1$$

E5 : 불확도 기여량

= |감도계수| × 표준불확도

= | 1 | × 0.052℃ = 0.052℃

E6 : B형 표준불확도의 자유도

$\nu_i = \frac{1}{2}(\frac{100}{R})^2$ 에서 R = 0%이므로,

$\nu_i = \frac{1}{2}\times(\frac{100}{0})^2 = \infty$

F1 : 피교정 온도교정기의 오차

$$E_t = t_x - t_s + \delta t_{spt} + \delta t_{xr+} \delta t_{ls}$$

$$= 300.1℃ - 300.00℃ + 0.0℃ + 0.0℃ + 0.0℃$$

$$= 0.1℃$$

F5 : 합성표준불확도

$$u(y) = [\sum_{i=1}^{5} u_i^2(y)]^{\frac{1}{2}}$$

$$= [0.000^2 + 0.000^2 + 0.06^2 + 0.029^2 + 0.052^2]^{\frac{1}{2}}$$

≒ 0.085 ℃

F6 : 유효자유도

$$\nu_{eff} = \frac{u^4(y)}{\sum_{i=1}^{5} \frac{u_i^4(y)}{\nu_i}}$$

$$= \frac{(0.085)^4}{\frac{(0.000)^4}{2} + \frac{(0.000)^4}{3} + \frac{(0.06)^4}{\infty} + \frac{(0.029)^4}{\infty} + \frac{(0.052)^4}{\infty}}$$

$= \infty$

2) 열전대 온도교정기 온도 측정불확도(U)

측정불확도는 합성표준불확도에 포함인자 k를 곱하여 표기하며, 이때 k 값은 측정불확도 표현지침 (KOLAS-G-002)에 의거하여 유효자유도가 10 이상이면 신뢰 수준 약 95 %, 포함인자 k = 2로 결정한다.

따라서

U = k · uc 식에 의하여

= 0.085℃ × 2 = 0.17 ℃ ≒ 0.2℃

3) 결과보고

Temp Calibrator의 측정기능을 기준기로 하여 교정된 열전대 온도교정기의 측정값은 300.1℃ 이고 측정불확도는 0.2℃

(신뢰수준 약 95 %, k = 2)이다.

V. 결론

본 연구에서는 온도교정기의 RTD저항체의 저항출력, 열전대센서의 직류전압출력과 K-Type센서를 이용한 온도교정기 교정에 대한 불확도 평가결과에 대한 수학적 모델식과 모든 평가과정을 나타내었다.

① 저항식 Pt100(385)의 600℃ 의 온도에 따른 저항 출력값은 313.708 Ω 이며 측정결과에 따른 불확도는 9 mΩ (신뢰수준 약 95 %, k = 2) 이다.

② 열전대 센서 B-Type 1 820℃ 의 직류전압 출력값은 13.820 mV 이며 불확도는 1.1 μV (신뢰수준 약 95 %, k = 2) 이다.

③ 열전대 출력에 따른 기준온도계의 측정 불확도는 K-Type 300℃에서의 측정값은 300.1℃ 이며 측정결과에 따른 불확도는 0.2℃ (신뢰수준 약 95 %, k = 2) 이다.

Reference

[1] "KS Q ISO/IEC 17025 a Handbook of the KOLAS-G 009" 2012.
[2] KRCMI Ltd. "Calibration guidance of a temperature calibrator," KRCMI-I-501-05 2015.
[3] Joon Lyou & Ju Ho Choi "Uncertainty in Meaurement Engineering," Chungnam National University Proofreading & Publication Culture Aug, 2013.
[4] Ju Ho Choi & Gu Il Kim "A study on the Temperature Measurement Equipment," DSTC-514-940261 ADD Apr, 1994.

BIOGRAPHY

Kwang-suk Oh (Member)

2005 : BS degree in Electronic Dep, Korea Polytechnic University.
2007 : MS degree in Electronic Dep, Korea Polytechnic University.

2017.2 :PH.D in IT convergence Eng., Graduate School of Hansei University
From 2010 to Now, G-TEC, Adjunct Professor. From 2016 to Now, Hansei University, Adjunct Professor. 2005, received Awarded National Order of Bronze Tower Industry. From 2001 to now, Nationally Accredited Institution, Korea Research Center for Measuring Instruments

Wang-Heon Lee (Member)

1985 : BS degree in Control and Instrumentation Engineering from Seoul National University.
1992 : MS degree in Automation and Design Engineering from Korea Advanced Institute of Science and Technology.
2001 : PhD degree in Automation and Design Engineering from Korea Advanced Institute of Science and Technology.
He worked for Samsung Electronics, Kyonggi Institute of technology and Pohang intelligent robotics, now Associate professor Professor of Dept. of Information Technology, Hansei University of Korea and became a chairman of technical committee of Machine Vision, ICROS from 2011. His research interest includes Machine Visison and its Applications including an embedded high speed vision system and flight control system of Drone.