Journal of Institute of Control, Robotics and Systems (2016) 22(11):944-951
http://dx.doi.org/10.5302/J.ICROS.2016.16.0151 ISSN:1976-5622 eISSN:2233-4335

전기식 온도 교정기 교정기법 연구

A Study on the Calibration Technique of an Electrical Temperature Calibrator

오 광 석, 이 왕 헌*
(Kwang-Suk Oh[1] and Wang-Heon Lee[2,*])
[1]Korea Research Center for Measuring Instruments
[2]IT-Convergence Engineering Han-sei University

Abstract: Resistance temperature detectors (RTDs) and thermocouple sensors are broadly used to measure temperatures in the engineering and research fields. The contents of this standard calibration procedure (SCP) describe procedures related to the calculation of an electrical temperature calibrator and show different ways to indicate the calibration results, such as measurement uncertainty. As an SCP for the electrical temperature calibrator has not been developed yet, we studied the SCP and found a solution to this problem. In this paper, we present a mathematical model of the data and measurement variations with the calibration data results.

Keywords: RTD, thermocouple, calibrator calibration

I. 서론

온도측정 방법에는 열전대센서(thermocouple, thermister), 측온저항(RTD)센서 및 열상을 이용한 온도 측정 방법 등이 있다. 이 중에서 산업용이나 연구용으로 열전대센서와 RTD 온도센서가 널리 이용되고 있다.

RTD 온도센서는 온도에 따라 저항차가 변화하는 점을 이용하여 온도를 측정하는 것으로 센서의 저항값을 구한 후 그 저항값을 이용해 온도 대 저항의 변환 표를 이용하여 현재의 온도 값을 알 수 있다. 그런데 센서의 저항값을 측정하기란 쉽지 않아 저항체에 일정한 정전류를 흘려보낸 후 그 전압을 측정하면 그 저항값을 통해 알아낼 수 있다. 대부분 RTD 센서는 백금(Pt100)을 많이 이용하고 있다. RTD 센서는 고 정확도(0.01 ~ 0.1℃), 고 안정도 (< 0.1 % drift), 선형성의 특성을 가지고 있는 반면 높은 가격, 느린 응답속도 자체 발열, 좁은 온도측정 범위와 같은 단점을 가지고 있다.

열전대는 제벡효과를 이용하여 넓은 범위의 온도를 측정하기 위해 두 종류의 금속으로 만든 장치이며 재질이 다른 두 금속선을 연결하고 양 접점 간에 온도차를 주면, 그사이에 열기전력이 발생한다.

이와 같이 온도측정에 이용되는 센서시스템이 요구 정확도를 잘 유지하는지를 주기적으로 확인하는 과정을 교정이라고 말 한다. 이러한 교정시스템 중 RTD 온도센서와 열전대 온도센서의 출력을 교정하는 교정기의 표준교정방법을 연구하였으며 본 논문에서 측온저항체의 출력 및 열전대의 출력을 교정하는 교정시스템 구성과 교정방법을 제안하였다. 각각의 교정방법에서 사용되는 측정기와 교정기의 불확도 요소를 찾아내고 교정대상기기의 교정값과 측정편차를 나타내는 수학적 모델식을 세웠으며 이 수학적 모델식은 표준기의 측정값과, 표준기의 교정값, 표준기의 경년변화, 교정대상기기의 측정값, 표준기의 저항값, 저항과 온도간의 변화계수 및 출력표시 분해능에 의한 불확도 요소들로 구성되고 있음이 확인되었다.

* Corresponding Author
Manuscript received August 8, 2016 / revised September 5, 2016 / accepted September 12, 2016
오광석: (주)한국계측기기연구센터(krcmi@krcmi.co.kr)
이왕헌: 한세대학교 IT융합학부(whlee@hansei.ac.kr)

Copyright© ICROS 2016

II. 교정방법 및 세부절차

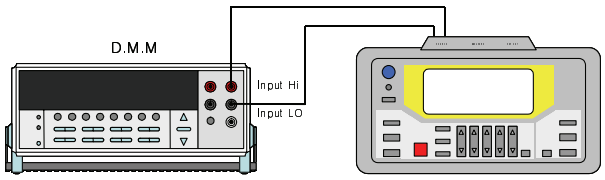
1. 장비점검

Digital multimeter 또는 기준 온도계와 교정대상기기(전기식 온도교정기)의 정상 작동 여부를 확인하고, 기타 교정에 사용되는 모든 장비의 전원을 올려준 후 정상 작동 여부를 확인하고 data sheet에 직접 기록한다.

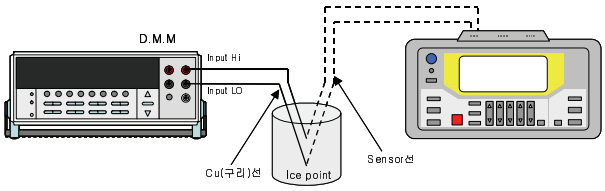
2. 열전대(thermocouple) type

기준 온도값을 출력하여 열기전력을 직접 측정한다.

1) 교정대상 전기식 온도교정기를 멀티미터와 동일한 온도 조건에서 충분한 시간을 예열하여 상온보상에 의한 온도 편차를 최소로 한다.
2) 교정대상기기를 그림 1과 같이 연결한다.
3) 전기식 온도교정기가 external R.J.와 Internal R.J.의 기능이 있을 경우는 external R.J.로 선택하고, a)와 같이 결선하고, 위 기능이 없을 경우는 b)와 같이 결선한다.
4) Sensor선은 각 type에 맞는 line을 사용한다.
5) Internal R.J.의 경우는 구리선과 sensor선의 접합부위를 0℃로 만들어서 상온 보상에 의한 열기전력을 제거한다.



(a) External reference junction.



(b) Internal reference junction.

그림 1. 전기식 온도교정기의 측정 결선도.

Fig. 1. Measurement wiring diagram of electrical temperature calibrator.

6) 전기식 온도 교정기의 교정하고자 하는 값을 설정하고, 출력을 on 하여 멀티미터의 지시값이 안정되면 측정값을 기록한다.
7) range별 위와 같은 방법으로 교정한다.
8) 교정이 완료되면 모든 cable을 제거하고 교정대상기기와 기준기의 전원을 off한다.

3. 저항식(RTD) type

기준 온도값을 출력하여 저항값을 직접 측정한다.

1) 교정대상 전기식 온도교정기를 멀티미터와 동일한 온도 조건에서 충분한 시간을 예열하여 상온보상에 의한 온도 편차를 최소로 한다.
2) 교정대상기기를 그림 1(a)와 같이 연결하되, 전기식 온도교정기의 결선방식(4-wire, 3-wire, 2-wire)에 따라서 멀티미터를 연결한다.
3) 교정대상기기에서 ITS-90에 정한 저항 type을 설정한다.
4) 전기식 온도 교정기의 교정하고자 하는 값을 설정하고, 출력을 on하여 멀티미터의 지시값이 안정되면 측정값을 기록한다.
5) Range별 위와 같은 방법으로 교정한다.
6) 교정이 완료되면 모든 cable을 제거하고 교정대상기기와 기준기의 전원을 off한다.

III. 측정 불확도 평가

측정에서 불확도(uncertainty)의 의미는 측정대상의 기대값이 특정 신뢰수준에 실제적으로 놓여 질 구간을 추정하게 되며, 측정된 대표값이 달라질 수도 있는 범위와 정확도를 나타낸다. 최근까지만 해도 측정불확도라는 표현보다 측정 오차란 용어를 널리 사용하여 왔다. 그러나 오차란 참값과 측정값의 차로 표현되는 것으로 측정대상의 참값은 현실적으로 정확히 알 수 없는 불확실한 부분이 항상 존재하게 된다. 그러므로 불확실한 것을 완전히 극복할 수는 없지만, 불확실한 정도의 크기를 적절한 기법을 사용하여 추정할 수 있으면 측정결과를 이용한 의사 결정에 많은 영향을 미칠 것으로 판단된다.

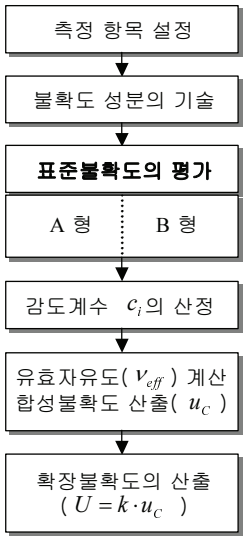


그림 2. 측정불확도 평가절차.

Fig. 2. An appraisal procedure of measurent uncertainty.

우리나라는 1980년대 말부터 ISO 9000 품질 인증제도가 국제적으로 보편화되면서 측정불확도에 대한 관심이 급속히 확산되었고, 유럽공동체의 규격요건에 따라 운영되는 교정 및 시험검사기관 인증제도에서 공인기관은 반드시 교정이나 시험결과를 표현할 때 측정불확도를 함께 기술하도록 의무화하고 있다. 그리고 1993년 ISO가 발간한 “측정불확도 표현지침”은 서유럽 교정검사 협력기구(WECC), 유럽 교정시험기관 공인협력기구(EAL), 영국 공인기관(UKAS) 및 미국 국립표준기술원(NIST) 등에서 실무 지침을 만드는데 기초자료로 활용하고 있다.

1. 불확도 평가 방법

측정시스템의 불확도 평가는 정량적으로 표시되어야 한다. 불확도 평가절차는 그림 2와 같이 먼저 측정 항목을 설정하고 측정 항목에 대한 불확도 성분을 기술한다. 그리고 A형 및 B형 표준불확도의 평가를 하고 측정 오차 모델링 식에서 감도계수, 유효 자유도 및 합성표준불확도 성분을 구한다. 마지막으로 유효 자유도를 고려한 측정불확도를 산출하여 보고한다.

2. 불확도 요소

측정시스템은 센서부, 신호조절부 및 자료처리부로 나눌 수 있다. 측정시스템의 측정 오차 원은 정적 오차, 동적 오차 및 부하 오차로 분류하며 이들의 차이는 다음과 같다. 정적 오차는 측정시스템 구성품의 물리적 본성으로부터 기인되는데 시 불변 요소이다. 정적 오차는 읽음 오차와 환경 오차 및 특성 오차로 구분된다. 읽음 오차는 시차와 내삽 오차 및 광학적 분해능(分解能)을 포함하며, 환경 오차는 측정시스템의 외부 환경적 영향이 원인으로 대부분 온도, 압력, 습도 및 물기, 핵 방사, 자기나 전장, 진동 및 충격 등이고, 이들 각 성분의 환경 영향은 독립적이다. 특성 오차는 이론적으로 예상되는 성능으로부터 혹은, 공칭 성능의 규격으로부터 일정한 환경 조건하에서 측정시스템의 출력 편차로 표현되며, 선형성 오차와 히스테리시스 오차, 반복

성 오차 및 교정 오차 등이 있다.

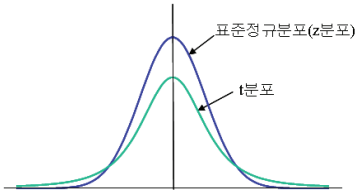
동적 오차는 측정시스템이 시변(時變) 측정값에 충분히 응답을 못하는 것에서 기인된다. 전기 기계적 측정시스템의 동적 응답은 관성, 제동 및 감지소자의 다른 물리적 제한 요소나 필터의 차단 주파수 또는 대역 통과 주파수가 신호 조절기 또는 이득 대역폭 제한 사항과 부 정합이 되는 경우 등에 의해 제한된다.

부하 오차는 측정시스템이나 계기가 연결된 후 측정하고자 하는 대상의 물리량이 달라지는 것을 말하는데 정적 및 동적 성분을 갖는다. 전기 기계적 측정시스템에서 부하 오차는 대부분 감지소자의 물리적 특성이 원인이 된다.

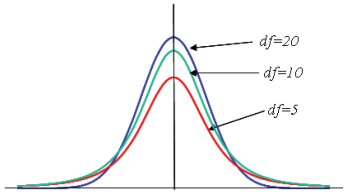
3. A 및 B형(B type) 표준불확도(standard uncertainty)

표준불확도를 평가하기 위하여 먼저 불확도 평가에 영향을 주는 요소들의 모집단 확률밀도함수의 특성을 파악해야 한다. 표본의 크기가 충분히 클 때는 중심극한정리(central limit theorem)에 의해 표본의 표준편차를 이용할 수 있으며 표본의 개수가 10개 미만이면 표본의 표준편차를 모집단의 표준편차 추정 값으로 사용할 수 없다. 이 경우 모집단의 표준편차를 알 수는 없지만 모집단이 μ라는 평균을 가진 정규 분포인 경우에는 이 모집단으로부터 추출한 10개 미만의 소 표본이라 하더라도 이들의 표본화 값의 분포는 정규 분포와 닮은 분포를 한다.

A형 표준불확도 평가는 측정시스템으로부터 반복 측정된 결과를 통계적으로 분석하여 구한다. 측정대상의 참값에 가장 근접하는 기대치를 구하기 위하여 최대한 정확하게 무한히 많은 반복측정을 실시하여야 하지만 무한 측정이 불가능하므로 유한 횟수의 측정을 실시하고 유한 표본의 표준편차를 구한 후 모집단의 표준편차를 추정한다. A형 표준불확도 평가 시 모집단의 분포가 알려져 있지 않거나, 표본의 수가 10개 미만이면 *t*-분포가 사용된다. 표준 정규 분포는 평균이 0이고 표준편차가 1인 반면, t 분포는 평균이 0이고 표준편차는 식 (1)의 관계를 가지므로 그림 3의 (a)와 같은 모양이며 표본의 자유도(DF: Degree of Freedom)가 10 이상이면 표준편차가 1에 근접하여 표준 정규 분포로 본다. 이 관계를 그림 3(b)에서 볼 수 있다.



(a) Standard normal and t-distribution.



(b) The relation of t-distribution and degree of freedom.

그림 3. 표준 정규 분포와 t분포.

Fig. 3. Standard normal and t-distribution.

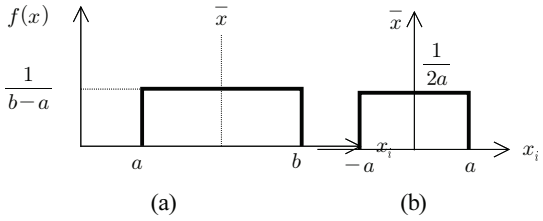


그림 4. 균등 분포와 확률밀도 함수.

Fig. 4. Uniform distribution and PDF. (a) Prohability density function (PDF), (b) Range and a half function.

$$\sigma = \sqrt{df/(df-2)}, \quad (df < 10) \tag{1}$$

n개의 개별 측정량 (X_i)의 산술평균 $(\overline{X_i})$는 식 (2)와 같다.

$$\overline{X_i} = \frac{1}{n}\sum_{k=1}^{n} X_{i,k} \tag{2}$$

그리고 추정값 x_i와 관련되는 표준불확도 $u(x_i)$는 평균의 추정 표준편차로 식 (4)와 같이 표현된다.

$$\sigma_{est} = \left[\frac{1}{n-1}\sum_{k=1}^{n}(X_{i,k} - \overline{X_i})^2\right]^{\frac{1}{2}} \tag{3}$$

$$u_A = \frac{\sigma_{est}}{\sqrt{n}} \tag{4}$$

B형 표준불확도 평가는 측정대상의 변화에 대한 활용 가능한 모든 정보를 근거로 하여 과학적인 판단 하에 산출되어야 한다. 활용가능한 정보로는 과거의 측정 데이터, 생산자가 제공하는 규격, 교정검사 성적서 등에 기록된 데이터, 핸드북에서 인용된 참고 자료의 불확도 등을 들 수 있다. 이러한 정보들은 대부분 ±양으로 표시되며, B형 표준불확도의 평가는 대부분 기댓값이 일정구간 이내에서 똑같은 확률로 존재한다는 균등분포(uniform distribution)에 근거하여 기댓값을 추정할 수 있다. B형 평가에 이용되는 확률밀도함수는 그림 4와 같다.

균등분포의 평균값 $E(x)$과 분산 $Var(x)$는 식 (5), 식 (6)이며, 표준불확도 u_B는 식 (7)과 같다.

$$E(x) = \int_{-\infty}^{\infty} x \cdot f(x)dx = \frac{b+a}{2} \tag{5}$$

$$Var(x) = \sigma_{est}^2 = E(x^2) - (E(x))^2 = \frac{1}{12}(b-a)^2 \tag{6}$$

$$u_B = (Var(x))^{\frac{1}{2}} = \frac{a}{\sqrt{3}}, \quad (b=+a, a=-a) \tag{7}$$

4. 합성 및 측정불확도

측정결과의 합성표준불확도는 u_c로 표기하며, 측정대상의 추정 표준편차를 나타낸다. 출력 추정값 y의 합성표준불확도는 $u_c(y)$로 표시하고 모든 입력량이 상관관계가 없는 경우 합성표준불확도는 불확도 전파법칙에 의해 합성분산의 제곱으로 식 (8)와 같이 표현된다.

$$u_c^2(y) = \sum_{i=1}^{n}\left(\frac{\partial f}{\partial x_i}\right)^2 u^2(x_i) = \sum_{i=1}^{n}[c_i u(x_i)]^2 = \sum_{i=1}^{n} u_i^2(y) \quad (8)$$

$f(x)$: 측정 항목의 확률밀도함수

$u(x_i)$: A형 및 B형 표준불확도

$\frac{\partial f}{\partial x_i}$: 감도계수(c_i)

입력 추정값 $x_1, x_2, ...x_n$들이 서로 상관관계를 갖는다면 측정결과에 관계된 합성분산 $u_c^2(y)$에 대한 표현은 추정공분산을 포함하여 식 (9)와 같이 표현된다.

$$u_c^2(y) = \sum_{i=1}^{n} c_i^2 u^2(x_i) + 2\sum_{i=1}^{n-1}\sum_{j=i+1}^{n} c_i c_j u(x_i) u(x_j) r(x_i, x_j) \quad (9)$$

여기서, $-1 \le r(x_i, x_j) \le 1$, $\frac{\partial f}{\partial x_i} = c_i$, $\frac{\partial f}{\partial x_j} = c_j$

$r(x_i, x_j) = x_i x_j \sigma_{x_i} \sigma_{x_j}$: 상관계수

국제 도량형 위원회(CIPM)는 측정과학의 발전을 주된 목적으로 하고 있기 때문에 합성표준불확도 만으로 측정불확도를 표현하기를 원하지만 ISO, IEC와 같은 국제기구들은 국제 교역을 원활히 하고 보건, 안전 등 공공 목적의 문제들을 취급하여야 하기 때문에 합성표준불확도에 포함인자를 곱하여 신뢰도를 높이고 분쟁의 소지를 제거하기 위해 측정불확도(U)를 도입하여 사용한다. 식 (10)의 U는 합성표준불확도 u_c에 포함인자(coverage factor) k를 곱하여 구한다.

$$U = k \cdot uc \quad (10)$$

포함 인자 k 는 신뢰수준과 유효자유도(effective degree of freedom)의 결정에 따라 t분포에 의해 주어지는 상수이다. k 를 찾기 위한 유효자유도는 Welch Satterthwaite 공식 식 (11)로부터 구한다.

$$\nu_{eff} = \frac{u_c^4(y)}{\sum_{i=1}^{n}\frac{c_i^4 u^4(x_i)}{\nu_i}} \quad (11)$$

A형 표준불확도의 자유도는 측정횟수가 n개 일 때 $\nu_i = n-1$이 되고, B형 표준불확도의 자유도는 식 (12)로 표시할 수 있다.

$$\nu_i = \frac{1}{2}\left(\frac{\triangle u(x_i)}{u(x_i)}\right)^{-2} \quad (12)$$

IV. 교정데이터의 처리

1. 저항식 Function의 불확도

여기서는 Pt100(385) 100 ℃(138.506 Ω)를 측정시 불확도 산출을 예로 제시하였다.

표 1. 저항 측정값.

Table 1. Resistance measurement values.

횟수	1회	2회	3회	4회	5회	평균
측정값	138.506 Ω	138.506 Ω	138.505 Ω	138.506 Ω	138.506 Ω	138.505 8 Ω

표 2. Pt100 불확도 요약표.

Table 2. Pt100 uncertainty budget.

		1	2	3	4	5	6
	양 (X_i)	추정값 (x_i)	표준불확도 $u(x_i)$	확률분포	감도계수 c_i	불확도 기여량 $u(y)$	자유도 ν_i
A	R_m	138.506 Ω	0.20 mΩ	t	1	0.20 mΩ	4
B	R_s	0.000 Ω	1.5 mΩ	정규	1	1.5 mΩ	∞
C	δT_{ix}	0.000 Ω	0.0029 ℃	직사각형	0.391 Ω/℃	1.1 mΩ	∞
D	δR_{sd}	0.000 Ω	5.2 mΩ	직사각형	1	5.2 mΩ	∞
F	R_x	138.506 Ω				5.53 mΩ	∞

1.1 수학적 모델링

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

R_x : 교정대상기기의 측정량

R_m : 기준기 측정값

R_s : 기준기 보정값

δT_{ix} : 교정대상기기의 분해능

δR_{sd} : 기준기의 장기안정도

1.2 계산근거

A1 : 측정값의 평균값.

138.505 8 Ω ≒ 138.506 Ω

A2 : 반복측정에 의한 A형 불확도는

- 표준편차 : $\sqrt{\frac{1}{(n-1)}\sum_{i=1}^{n}(x_i - \overline{x_i})^2}$ = 0.447 mΩ

- A형 불확도 : $\frac{\sigma(\overline{x_i})}{\sqrt{n}}$ = 0.447 mΩ / $\sqrt{5}$ = 0.20 mΩ

A3 : t 분포

A4 : 감도계수는 R_m을 R_x에 대하여 편미분하여 1이다.

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

A5 : 불확도 기여량 = 표준불확도 × 감도계수

= | 0.20 mΩ × 1 | = 0.20 mΩ

A6 : 반복측정에 의한 자유도는 (측정횟수 - 1)이므로 5 - 1 은 4이다.

B1 : 기준기의 보정값.

0.000 Ω

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

B3 : 교정용 표준기를 상위기관으로부터 받은 성적서의 불확도 (신뢰수준 약 95 %, k = 2)를 적용함으로, 정규분포를 취한다.

B4 : 감도계수는 R_s를 R_x에 대하여 편미분하여 1이다.

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

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

B6 : 정규분포에 의한 자유도는 ∞이다.

C1 : 분해능에 대한 추정값.
0.000 Ω

C2 : 교정대상기기 분해능의 반 범위를 직사각형 분포를 처리함으로, 0.01 ℃ / $2\sqrt{3}$ = 0.002 9 ℃이다.

C3 : 직사각형 분포

C4 : 감도계수는 δT_{ix}를 R_x에 대하여 편미분하여 0.391 Ω/℃이다.

$$\frac{\partial R_x}{\partial \delta T_{ix}} = 0.391\ \Omega/℃$$

C5 : 불확도 기여량 = 표준불확도 × 감도계수
= | 0.002 9 ℃ × 0.391 Ω/℃ | = 1.1 mΩ

C6 : 분해능에 의한 자유도는 ∞ 이다.

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

D1 : 기준기의 장기안정도에 대한 추정값.
0.000 Ω

D2 : 기준기의 매뉴얼 상의 안정도로서 다음과 같다. 1.2 kΩ range에서 ± (8 × 10^{-6} of reading + 0.8 × 10^{-6} of range)이므로, 안정도는 9.0 mΩ 이다. 9.0 mΩ / $\sqrt{3}$ = 5.2 mΩ

D3 : 장비제작사의 안정도에 의한 분포는 직사각형 분포를 취한다.

D4 : 감도계수는 δR_{sd}을 R_x에 대하여 편미분하여 1이다.

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

D5 : 불확도 기여량 = 표준불확도 × 감도계수
= | 5.2 mΩ × 1 | = 5.2 mΩ 이다.

D6 : 안정도에 의한 자유도는 ∞ 이다.

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

E1 : 138.506 Ω

$$R_x = R_m + R_s + \delta T_{ix} + \delta R_{sd}$$
$$= 138.506\ \Omega + 0.000\ \Omega + 0.000\ \Omega + 0.000\ \Omega = 138.506\ \Omega$$

E5 : 5.53 mΩ
각 표준불확도들을 합성한 값

$$u_c(R_x) = \sqrt{\sum_{i=1}^{n} c_i^2 \cdot u^2(x_i)}$$
$$= \sqrt{(0.20)^2 + (1.5)^2 + (1.1)^2 + (5.2)^2}\ \text{mΩ}$$
$$= 5.53\ \text{mΩ}$$

E6 : 유효자유도는

$$v_{eff} = \frac{u_c(R_x)^4}{\sum_{i=1}^{n} \frac{[c_i \cdot u(x_i)]^4}{v_i}}$$
$$= \frac{(5.53)^4}{\frac{(0.20)^4}{4} + \frac{(1.5)^4}{\infty} + \frac{(1.1)^4}{\infty} + \frac{(5.2)^4}{\infty}}$$
$$= 2\ 337\ 979 \fallingdotseq \infty$$

1.3 전기식 온도교정기 저항측정 불확도 (U)

측정불확도는 합성표준불확도에 포함인자 k를 곱하여 표기하며, 이때 k값은 측정불확도 표현지침 (KRISS-99-070-SP)에 의거하여 유효자유도가 10 이상이면 신뢰 수준 약 95 %, 포함인자 k = 2로 결정한다. 따라서

$U = k \cdot u_c$ 식에 의하여
= 5.53 mΩ × 2 = 11.06 mΩ ≒ 11 mΩ

1.4 결과보고

Digital multimeter를 기준기로 하여 교정된 전기식 온도교정기의 측정값은 138.506 Ω이고 측정불확도는 11 mΩ (신뢰수준 약 95 %, k = 2)이다.

2. 열전식 Function의 불확도

여기서는 B-type 600 ℃를 측정 시 불확도 산출을 예로 제시하였다.

2.1 수학적 모델링

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

V_x : 교정대상기기의 측정량
V_m : 기준기 측정값
V_s : 기준기 보정값
δT_{ix} : 교정대상기기의 분해능
δV_{sd} : 기준기의 장기안정도

표 3. 전압 측정값.

Table 3. Voltage measurement values.

횟수	1회	2회	3회	4회	5회	평균
측정값	1.792 mV	1.792 mV	1.793 mV	1.792 mV	1.793 mV	1.792 4 mV

표 4. 열전대 불확도 요약표.

Table 4. Thermomcouple uncertainty budget.

		1	2	3	4	5	6
	양 (X_i)	추정값 (x_i)	표준불확도 $u(x_i)$	확률분포	감도계수 c_i	불확도 기여량 $u(y)$	자유도 ν_i
A	V_m	1.792 mV	0.245 μV	t	1	0.245 μV	4
B	V_s	0.000 mV	0.40 μV	정규	1	0.40 μV	∞
C	δT_{ix}	0.000 mV	0.002 9 ℃	직사각형	6 μV/℃	0.017 μV	∞
D	δV_{sd}	0.000 mV	0.39 μV	직사각형	1	0.39 μV	∞
E	V_x	1.792 mV				0.61 μV	∞

2.2 계산근거

A1 : 측정값의 평균값.
1.792 4 mV ≒ 1.792 mV

A2 : 반복측정에 의한 A형 불확도는

- 표준편차 : $\sqrt{\frac{1}{(n-1)}\sum_{i=1}^{n}(x_i-\overline{x_i})^2}$ = 0.548 μV

- A형불확도 : $\frac{\sigma(\overline{x_i})}{\sqrt{n}}$ = 0.548 μV / $\sqrt{5}$ = 0.245 μV

A3 : t 분포

A4 : 감도계수는 V_m을 V_x에 대하여 편미분하여 1이다.

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

A5 : 불확도 기여량 = 표준불확도 × 감도계수
= | 0.245 μV × 1 | = 0.245 μV

A6 : 반복측정에 의한 자유도는 (측정횟수 - 1)이므로 5 - 1 은 4이다.

B1 : 기준기의 보정값.
0.000 mV

B2 : 표준기불확도로서 성적서의 명시된 불확도를 k 값으로 나누어 적용한다. 성적서에서의 측정불확도는 0.8 μV (신뢰수준 약 95 %, k = 2)이다. 표준불확도는 0.8 μV / 2 = 0.40 μV

B3 : 교정용 표준기를 상위기관으로부터 받은 성적서의 불확도 (신뢰수준 약 95 %, k = 2)를 적용함으로, 정규분포를 취한다.

B4 : 감도계수는 V_s를 V_x에 대하여 편미분하여 1이다.

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

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

B6 : 정규분포에 의한 자유도는 ∞이다.

C1 : 분해능에 대한 추정값.
0.000 mV

C2 : 교정대상기기 분해능의 반 범위를 직사각형 분포를 처리함으로, 0.01 ℃ ÷ 2$\sqrt{3}$ = 0.002 9 ℃이다.

C3 : 직사각형 분포

C4 : 감도계수는 δT_{ix}을 ∂V_x에 대하여 편미분하여 6 μV/℃이다.

$$\frac{\partial V_x}{\partial \delta T_{ix}}=6\ \mu\text{V/℃}$$

C5 : 불확도 기여량 = 표준불확도 × 감도계수
= | 0.002 9 ℃ × 6 μV/℃ | = 0.017 4 μV
≒ 0.017 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 mV

D2 : 기준기의 매뉴얼 상의 안정도로서 다음과 같다. 120 mV range에서 ± (4.8 × 10^{-6} of reading + 1.7 × 10^{-6} of range)이므로, 안정도는 0.68 μV 이다. 0.68 μV ÷ $\sqrt{3}$ = 0.39 μV

D3 : 장비제작사의 안정도에 의한 분포는 직사각형 분포를 취한다.

D4 : 감도계수는 δV_{sd}을 V_x에 대하여 편미분하여 1이다.

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

D5 : 불확도 기여량 = 표준불확도 × 감도계수
= | 0.39 μV × 1 | = 0.39 μV 이다.

D6 : 안정도에 의한 자유도는 ∞ 이다.

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

E1 : 1.792 mV

$$V_x = V_m + V_s + \delta T_{ix} + \delta V_{sd}$$
= 1.792 mV + 0.000 mV + 0.000 mV
+ 0.000 mV = 1.792 mV

E5 : 0.61 μV
각 표준불확도들을 합성한 값

$$u_c(V_x)=\sqrt{\sum_{i=1}^{n}c_i^2 \cdot u^2(x_i)}$$
$$=\sqrt{(0.245)^2+(0.40)^2+(0.017)^2+(0.39)^2}\ \mu\text{V}$$
= 0.610 3 μV ≒ 0.61 μV

F6 : 유효자유도는

$$v_{eff} = \frac{u_c(V_x)^4}{\sum_{i=1}^{n}\frac{[c_i \cdot u(x_i)]^4}{v_i}}$$
$$= \frac{(0.61)^4}{\frac{(0.245)^4}{4}+\frac{(0.40)^4}{\infty}+\frac{(0.017)^4}{\infty}+\frac{(0.39)^4}{\infty}}$$
$$= 153 \fallingdotseq \infty$$

2.3 전기식 온도교정기 전압측정불확도 (U)

측정불확도는 합성표준불확도에 포함인자 k를 곱하여 표기하며, 이때 k 값은 측정불확도 표현지침 (KRISS-99-070-SP)에 의거하여 유효자유도가 10 이상이면 신뢰 수준 약 95 %, 포함인자 k = 2로 결정한다. 따라서

$U = k \cdot u_c$ 식에 의하여
$= 2 \times 0.61\,\mu V = 1.22\,\mu V \fallingdotseq 1.2\,\mu V$

2.4 결과보고

Digital multimeter를 기준기로 하여 교정된 전기식 온도교정기의 측정값은 1.792 mV이고 측정불확도는 1.2 μV (신뢰수준 약 95 %, k = 2)이다.

V. 결론

본 연구에서는 전기식 온도교정기의 측온저항체의 저항출력과 열전대센서의 직류전압출력의 교정에 대한 불확도 평가결과에 대한 수학적 모델식과 모든 평가과정을 나타내었다.

(1) 저항식 Pt100(385)의 100 ℃의 온도에 따른 저항 출력값은 138.506 Ω이며 측정결과에 따른 불확도는 11 mΩ (신뢰수준 약 95 %, k = 2)이다.
(2) 열전대 센서 B-type 600 ℃의 직류전압 출력값은 1.792 mV이며 불확도는 1.2 μV (신뢰수준 약 95 %, k = 2)이다.

REFERENCES

[1] "KS Q ISO/IEC 17025 a Handbook of the KOLAS-G 009," 2012.
[2] KRCMI Ltd. "Calibration guidance of a temperature calibrator," Korea Research Center for Measuring Instruments (in Korea), KRCMI-I-501-05
[3] J. Lyou and J. H. Choi "Engineering of a measurement uncertainty," *Chungnam National University Publishing Department*, Aug. 2013.
[4] G. Kim and J. H. Choi "A study on the equipment of measurement temperature," Agency for Defense Development (in Korea) DSTC-514-940261, Apr. 1994.
[5] KASTO "A training of the measurement manage," KASTO-00-04 2000.
[6] J. H. Choi, G. Kim, and Y. G. Kim, "A study on the measurement temperature," Agency for Defense Development (in Korea) DSTC, Dec. 1989.
[7] B. N. Taylor and C. E. Kuyatt, "Guidelines for evaluation and expressing the uncertainty of NIST measurement results," NIST (in USA) Technical Note 1297, 1992.

기호 설명

측정불확도(Uncertainty: U): 불확도란 "불확실성", "믿을 수 없음" 등의 뜻을 가지고 있다. 그러므로 불확도를 명확히 정량화할 수 있다고 말하는 것은 모순이다. 측정불확도(measurement uncertainty)는 측정되어진 물리량으로부터 합리적으로 일정 범위의 값으로 정의되어 지며, 특정한 방법으로 평가와 보고되는 불확도는 측정 대상의 기대값이 특정 신뢰수준에서 실제적으로 놓여 질 구간을 추정하게 되며, 역으로 해석하면 측정된 대표값이 틀려질 수도 있는 범위를 나타내게 된다. 따라서 측정불확도(U)는 측정 자료에 대한 정확도와 신뢰수준을 동시에 나타낸 것이다.

A type uncertainty(u_A): A형 불확도는 정규분포와 t-분포를 통계적 추정을 근거로 하며 표본집단의 자료로부터 평균과 표준편차 및 분산을 구하여 모집단의 표준편차를 추정한다. 이 때 추정표준편차 값을 사례수의 평방근으로 나눈 것이 A type 불확도라 한다.

B type uncertainty(u_B): B형 불확도는 대부분의 기댓값이 일정구간 이내에서 동일 확률로 존재한다는 균등분포에 근거하여 기댓값을 추정하며 추정표준편차 값은 균등구간의 반 범위를 3의 제곱근으로 나누어 구한다.

감도계수(c_i): 감도계수는 어떤 독립함수가 종속함수에 미치는 영향정도를 나타내는 수치로 $c_i = \frac{\partial f}{\partial x_i}$로 표현한다. 여기서 f는 종속함수이고 x_i는 독립함수이다.

자유도(ν): 본 논문에서 자유도는 통계적 자유도를 의미하며 통계적 자유도는 통계량을 추정할 때 사용되는 데이터의 정보량을 의미한다. 다른 표현으로는 한 계의 모든 다양한 성질에 대한 값을 표현하는데 필요한 독립항의 수를 자유도라 한다.

포함인자(k): 유효자유도와 신뢰범위에 따라 결정되는 수치로 합성불확도에 곱하여 측정불확도를 구할 때 사용되는 적용인자를 말한다.

오 광 석

1980년 경기과학기술대학교 전자계측과 졸업. 2005년 한국산업기술대학교 전자공학과 학사. 2007년 동 대학원 석사. 2016년 현재 한세대학교 IT융합 박사과정. 2010년~현재 경기과학기술대학교 겸임교수. 2016년~현재 한세대학교 겸임교수. 2005년 국가석탑산업훈장 수여. 2001년~현재 국가공인기관 (주)한국계측기기연구센터 대표이사.

이 왕 헌

1985년 2월 서울대학교 공과대학 제어계측공학과(공학사). 1995년 2월 한국과학기술원 자동화 설계공학과(로보틱스 및 컴퓨터비전 전공 공학석사). 2001년 8월 한국과학기술원 자동화 설계공학과(로보틱스 및 컴퓨터비전 전공 공학박사). 포항지능로봇 연구소 연구부장. 제어로봇시스템학회 머신비전연구회 회장. 2006년 3월~현재 한세대학교 IT학부 교수 재직 중.