

질소의 끓는점에서의 산업용 온도계 비교 교정과 불확도 평가

양인석[†] · 감기술 · 정욱철 · 김용규

Calibration by Comparison and Uncertainty Assessment of Industrial Thermometers at the Boiling Point of Nitrogen

Inseok Yang[†], Kee Sool Gam, Wukchul Joung, and Yong-Gyoo Kim

Abstract

We devised calibration procedure for industrial thermometers by a comparison method at the boiling point of nitrogen (~-196°C). The uncertainty of the calibration was 4 mK ($k = 2$). As experimentally demonstrated in this work, the effect of the atmospheric pressure on the boiling point of nitrogen can be easily detected by the thermometer. Therefore, when the boiling point of nitrogen is used for calibration of thermometer by comparison, either a reference thermometer must be used to provide the reference temperature or the effect of atmospheric pressure should be carefully considered. The use of a copper block with a large thermal mass soaked into the liquid nitrogen was proven to be more reliable, and the stability of the temperature immersed into the copper block was 1.4 mK. The temperatures at the thermometer wells, evaluated by the crossed-measurement method to compensate for the inaccuracy of the thermometers and the linear drift of the temperature of the copper block, were equivalent within 0.23 mK of standard uncertainty.

Keywords : Calibration by comparison, Industrial thermometer, Liquid nitrogen, Uncertainty

1. 서 론

온도 눈금의 표준인 국제온도눈금-1990에서는 상온 이하의 온도 범위에서 온도 눈금을 정의하기 위하여 물의 삼중점(0.01°C), 수은의 삼중점(-38.8344°C), 아르곤의 삼중점(-189.3442°C) 그리고 산소의 삼중점(-218.7916°C) 등의 고정점(fixed point)을 이용한다 [1]. 즉 -39°C 보다 낮은 온도에서 소급성(traceability)을 갖는 온도 측정을 위해서는 아르곤 삼중점 - 물의 삼중점 구간의 고정점 교정을 해야 하며, -189°C 보다 더 낮은 온도에서는 산소의 삼중점에서 교정하는 것이 추가로 필요하다. 이 중 아르곤 삼중점 혹은 산소 삼중점은 순수한 아르곤 혹은 산소가 고체, 액체, 기체의 세가지 상태로 존재할 때의 안정된 온도를 이용하여 온도계를 교정하는 것이다. 그러나 실현에 많은 기술과 비용이 소모되므로 일반적인 실험실

에서 구비하는 것이 어렵다[1, 2]. 또, 산업체에서 많이 사용하는 긴 막대 형태의 온도계(long-stem thermometer)는 보통 그 온도범위의 하한이 -200°C이므로 산소의 삼중점에서 교정하는 것은 불가능하다.

산업용 온도계의 경우에 위에서 언급한 고정점 교정이 아니라 등온 환경(isothermal environment)에 교정 대상 온도계를 이미 교정된 온도계와 나란히 놓고 비교하는 비교 교정이 많이 이용되고 있다. 저온 영역에서 연속된 온도 구간에서 온도계를 비교 교정할 수 있는 장치의 개발과 달성 가능한 불확도에 관한 연구가 최근에 많이 이루어졌다[3-6]. 이러한 장치들은 저온 영역의 일정한 온도 범위 내에서 온도계의 교정이 가능하다는 장점이 있지만, -200°C에서 상온영역까지 정밀한 온도 제어를 위해서 장치의 구성이 복잡하여 제작과 사용이 어려운 단점이 있다. 또한, 비교교정의 핵심이라고 할 수 있는 등온 환경의 안정도가 제어 장치의 성능과 열선을 장착한 방법에 의해서 크게 좌우된다.

반면에, 저온에서 냉각용 액체로 저렴한 가격에 쉽게 사용할 수 있어 많이 사용하는 액체 질소를 이용하여 별도의 온도 제어장치를 구성하지 않고 비교 교정 시스템을 만들 수도 있다. 이 경우 질소의 끓는점에 해당하는 -196°C 부근의 한 점에서만 온도 교정이 가능하지만, 액체 질소를 냉각용 액체로 사용하는 실제의 많은 실험실 환경에서는 이 온도 부근에서의 정밀측정만 필요한 경우가 많으므로,

한국표준과학연구원 기술표준본부 온도센터(Center for Thermometry, Div. of Physical Metrology, Korea Research Institute of Standards and Science)

[†]Corresponding author : iyang@kriss.re.kr

(Received : Jul. 8, 2013, Revised : Jun. 29, 2013, Accepted : Jun. 30, 2013)

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.

큰 효용성을 갖고 있다. 이러한 장치의 핵심은 온도계 우물을 여러 개 만든 구리 블록을 액체 질소에 담근 것으로서 장치가 비교적 간단하여 최근에는 상업용 제품으로 구하는 것도 가능하다[7, 8]. 그러나 간단한 제작과 사용 방법에 비하여 대기압의 변화에 따른 압력 효과나, 액체 질소에 담근 구리 블록의 안정도, 온도계 우물간 온도 편차에 의한 교정의 불확도 등에 대한 연구는 그 동안 이루어지지 않은 것이 사실이다.

이 논문에서는 질소의 끓는점을 이용한 교정용 구리 블록을 이용하여 높은 정밀도로 산업용 온도계를 비교 교정할 수 있는 방법과 불확도 평가에 관한 연구를 하였다. 먼저 액체 질소 끓는점의 대기압의 변화에 대한 의존성을 실험을 통하여 확인한 후, 구리 블록의 안정도, 우물간 온도 편차 측정을 통하여 구리 블록을 이용한 비교 교정의 경우에 정밀한 교정이 어느 정도의 불확도를 달성할 수 있는지를 제시하였다.

2. 이론

대기압에 따른 질소의 끓는점은 질소의 증기압 곡선을 이용하여 계산할 수 있다. 참고문헌 [9]에 의하면 온도단위 K 를 사용했을 때의 온도가 T 라면 질소의 증기압 p 는 다음과 같이 표현된다:

$$\ln(p/p_0) = A + B/T + CT + DT^2 \tag{1}$$

식 (1)에서 p_0 은 표준대기압인 101.325 kPa이며, $A=15.260\ 171$, $B=-880.842\ 412\ 2$, $C=-0.070\ 838\ 754$, $D=0.000\ 268\ 557\ 5$ 이다.

질소의 증기압 p 가 대기압과 같을 때의 온도가 해당 대기압에서의 질소의 끓는점이므로, 위 식에서 p 에 현재 대기압을 대입하였을 때의 T 가 질소의 끓는점이다. 표준대기압에서 질소의 끓는점은 77.352 K로 계산된다.

식 (1)을 이용하여 대기압의 변화에 따른 끓는점의 변화를 대기압 부근에서 계산하면 85 mK/kPa을 얻는다. 하루 중 대기압은 대략 0.4 kPa 정도 변할 수 있으므로, 대기압에 노출된 액체 질소의 끓는점은 대략 30 mK 정도는 변할 수 있다는 것을 알 수 있다. 또, 액체 질소의 밀도를 이용하여 계산하면, 액체질소의 무게로 인한 압력 변화 때문에 액면으로부터 깊이 1 cm당 온도가 7 mK 정도 상승하는 것을 알 수 있다.

3. 실험 및 결과

3.1 온도 측정 장치

Fig. 1은 본 실험의 측정 방법과 장치간 연결을 보인 블록 다이어그램이다. 본 실험에서는 아르곤의 삼중점 - 물의 삼중점 영역에

서 고정점 교정된 두 개의 표준백금저항온도계(standard platinum resistance thermometer, SPRT)를 사용하였다. SPRT의 저항 측정을 위해서 저항비의 분해능이 1×10^{-6} 인 교류 저항비 브리지와 명칭저항 10 Ω 의 표준저항(standard resistor)을 사용하였다. SPRT의 물의 삼중점에서의 명칭저항(nominal resistance)이 25.5 Ω 이며, SPRT는 명칭 저항을 기준으로 약 0.4 %/°C의 감도를 가지므로, 이렇게 측정장비를 구성하였을 때 온도 측정의 분해능은 0.1 mK이 된다. 이것은 통상 100 Ω 의 표준저항을 사용하여 동일한 저항비 브리지로 1 mK의 분해능을 얻는 사실과 비교했을 때, 저온에서 SPRT 저항이 낮다는 점을 이용하여 온도 측정의 분해능을 높인 것이다. 또, 두 개의 온도계를 번갈아가며 측정하는 것을 자동화하기 위하여 컴퓨터로 제어할 수 있는 다채널 스위치 박스를 사용하였다.

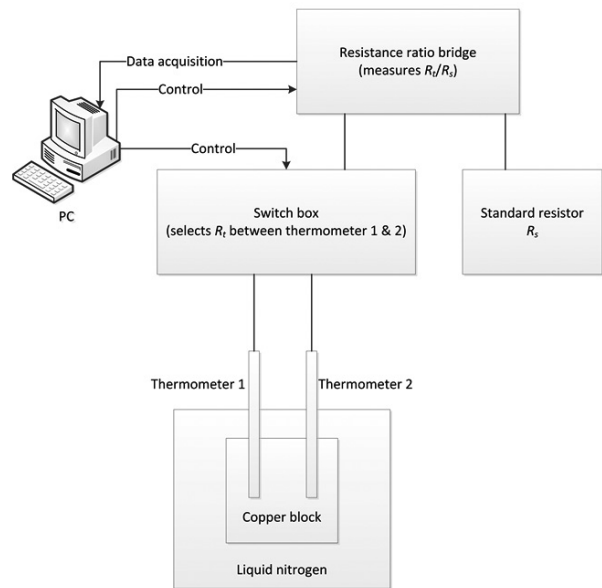


Fig. 1. Block diagram describing the experimental instruments and their connections in this experiment.

3.2 기압 효과 측정

Fig. 2의 가는 실선은 액체 질소에 SPRT를 58시간 동안 담가 온도를 측정된 결과이다. 그림에서 보는 바와 같이 58시간에 걸쳐서 0.13 K의 온도 편차를 보였다. 측정이 이루어지는 동안 실험실 내부의 대기압의 변화는 Fig. 2의 파선(dashed line)으로 나타낸 바와 같이 최저 100.53 kPa에서 최고 102.12 kPa까지의 변동을 보였다. Fig. 2에서 볼 수 있듯이 대기압의 변화 양상은 관찰한 온도 변화와 거의 동일하였다. 즉, 기압 변화에 의한 질소의 끓는점의 온도 변화는 실험실에서 충분히 확인할 수 있을 정도로 확연하며, 그 효과를 앞에서 계산한 의존 계수 85 mK/kPa를 이용하여 보정해줄 수 있다. Fig. 2에서 굵은 실선으로 나타낸 것이 기압 효과를 보정

하여 표준 대기압인 101.325 kPa일 때의 값으로 환산한 결과이다. 그림에서 볼 수 있는 것과 같이 기압 효과 보정 후에는 아주 천천히 온도가 하강하는 것 이외에는 뚜렷한 표류(drift)가 없고, 최대 편차는 0.019 K로 줄었다. Fig. 2에서 기압 효과를 보정한 결과를 선형 맞춤(linear fitting)하면 점선으로 나타낸 아주 천천히 일어나는 온도의 하강(평균 0.18 mK/h)을 얻는다. 이것은 액체 질소의 증발에 따르는 액위 변화로 인한 압력 효과인 것으로 보인다. 전체 액위가 30 cm인 냉동 용기 내부의 액체 질소가 모두 증발하는데 40일 이상이 소모되었으므로, 위의 온도하강은 액위 속도는 액위 변화에 의한 온도 하강(7 mK/cm)과 대체로 일치한다. 또한 보정 후의 끓는점 온도가 표준대기압에서의 문헌상의 온도 77.352 K보다 약 50 mK 높은 것도 측정 당시의 액위가 수 cm 였던 사실과 일관된다.

Fig. 2에서 기압 효과에 의한 온도 보정은 세시간 단위로 한번 측정된 기압 데이터를 이용하여 내삽 후 보정하였다. 내삽에 사용한 기압 데이터 개수가 한정되어 있는 것을 감안하면, 측정된 온도변화의 대부분이 기압변화로 인한 것이라고 결론 지을 수 있다. 또한, 기압변화에 의한 보정이나 기준 온도계를 이용한 비교 없이 문헌상의 질소 끓는점 값을 이용하여 온도계를 교정한다면 Fig. 2의 가는 선이 보이는 온도 변화에서 알 수 있듯이 0.1 K 이상의 오차가 발생할 수 있음을 알 수 있다. 이는 기압 효과에 의한 특별한 보정 없이 0.005 K 보다 더 정밀한 기준 온도를 일상적으로 제공하는 물의 빙

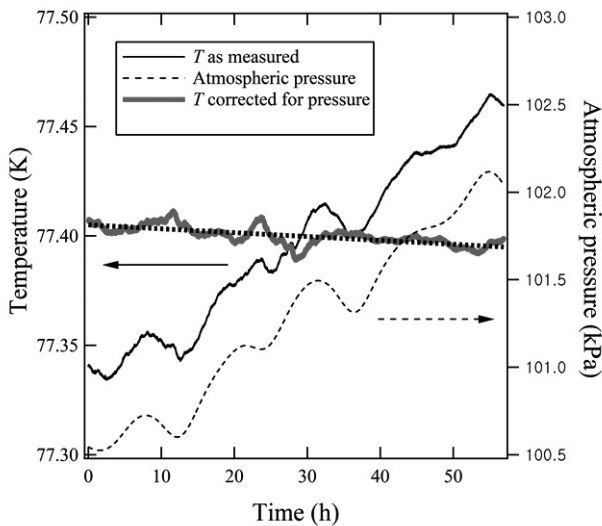


Fig. 2. Thin line: temperature as measured by the SPRT soaked in liquid nitrogen for 58 hours (left axis). Dashed line: atmospheric pressure at the laboratory (right axis). Thick line: temperature corrected to the value at the standard atmosphere 101.325 kPa (left axis). Dotted line: linear fit of the corrected temperatures (left axis).

점(ice point)과 대조적인 것이다. 열전대의 기준온도로 흔히 이용되는 빙점의 경우, 압력에 따른 온도의 변화가 -0.075 mK/kPa 로서 [10] 질소의 끓는점이 갖는 의존성과 비교하면 그 크기가 1/1000에

도 미치지 못하는 수준이다. 따라서, 액체 질소의 경우 빙점과는 달리 온도계의 교정에 이용할 때는 기준 온도계를 이용하여 기준 온도를 동시에 측정하거나, 압력 효과를 고려하여 보정을 해줘야 한다는 것을 알 수 있다.

3.3 액체 질소 비교교정 구리 블록

Fig. 2에서 보인 액체질소 담금시의 압력효과와 담금 깊이로 인한 온도 변화의 결점을 보완하기 위하여 Fig. 3와 같은 비교교정용 구리 블록을 사용하였다. 이 장치는 전체 구리블록을 액체질소 용기에 담금으로써 구리블록의 큰 열질량을 이용하여 온도 안정도를 높이도록 한 것이다. 이 구리 블록의 7개의 온도계 우물(thermometer well)은 여러 개의 온도계를 장착하여 등온 환경 내에서 비교할 수 있게 한 것이다.

온도계 우물 중 하나는 가운데에 위치해 있으며, 6개는 그 둘레에 위치해 있다. 그림에서 가운데의 온도계 우물을 WO라고 명명하였으며, 그림의 12시 방향부터 6개의 우물을 각각 WA, WB, WC, WD, WE, WF라고 명명하여, 비교교정의 불확도를 산출하는데 필요한 온도계 우물간의 온도의 차이를 측정하였다.

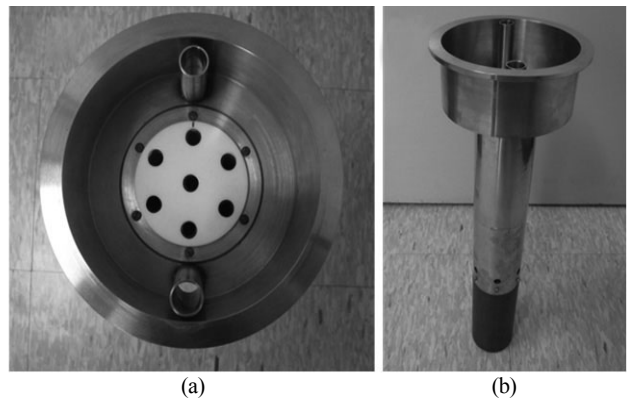


Fig. 3. Photograph of the copper block for the calibration of thermometers by comparison at the boiling point of nitrogen taken (a) from the top and (b) from the front.

3.4 구리 블록의 온도 안정도 평가

Fig. 4은 온도계 우물 WO에 SPRT를 설치하고 30분 이상 경과하여 온도계와 구리블록이 열적평형을 이룬 후 230분 동안의 온도를 측정하여 안정도를 조사한 것이다. 먼저, 온도 측정값 자체의 경우 문헌상의 77.352 K[9]이나, 앞의 절에서 액체 질소의 완전히 담가 측정된 것에 비하여 높게 나타났다. 이는 구리 블록을 지지하는 액체 질소 용기 자체를 통하여 상온의 열이 전달되기 때문인 것으로 보인다. 그러나, 실제 비교교정 과정에서는 기준 온도계인 SPRT를

사용하므로, 안정도와 온도계 우물간 차이가 충분히 작으면 온도의 절대값과는 관계없이 높은 정밀도의 비교교정을 할 수 있다.

Fig. 4에서 보는 바와 같이 구리 블록에서 230분간 측정된 최고 온도와 최소온도의 편차는 4.7 mK으로서 산업용 온도계를 교정하기에는 충분한 안정도를 갖고 있는 것으로 평가되었다. 이는 구리 블록의 큰 열질량(thermal mass) 때문에 외부 요인으로 인한 온도 변화가 매우 천천히 일어나기 때문이다. 온도의 최대편차를 전폭(full width)으로 하는 직사각형 분포(rectangular distribution)를 가정하면, 온도 안정도에 의한 비교교정의 불확도는 1.4 mK으로 평가되었다. 실제로는 온도계의 비교교정이 10~30분 정도의 짧은 시간안에 완료되므로 실제 적용할 불확도는 더 낮은 것으로 생각된다.

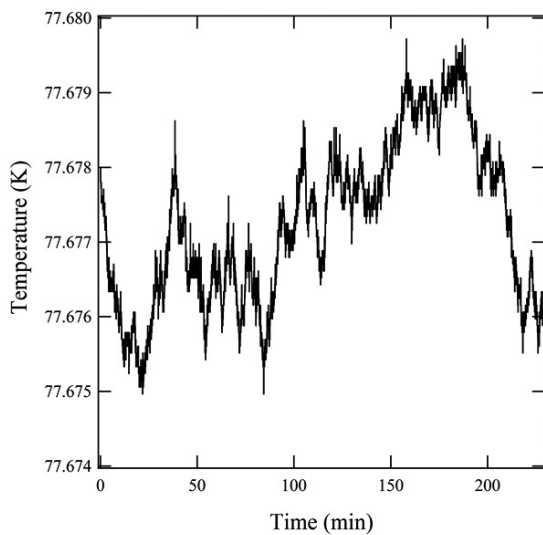


Fig. 4. Temperature stability of the copper block immersed into the liquid nitrogen measured at the thermometer well WO at the center.

3.5 온도계 우물간 온도 편차 평가

온도계 우물간 온도 편차를 평가하기 위하여 두 개의 교정된 SPRT를 사용하였다. 두 온도계는 아르곤의 삼중점 - 물의 삼중점 구간에서 표준불확도 1 mK으로 교정되었다. 그러나, 질소의 끓는 점은 아르곤의 삼중점에 비하여 6 K 정도 낮아서 이 구간을 외삽해야 하므로 절대온도의 측정불확도는 증가한다. 또한, 교정 후 SPRT의 장기적 변화에 의한 불확도도 고려해야 한다. 그러나 두 개의 온도계를 각각의 우물에서 측정 후 그 위치를 교차하여 측정된 후 두 측정값을 평균하면 이들 효과를 상쇄할 수 있다. 즉, 질소의 끓는점 부근에서 첫번째 SPRT (SPRT1)에 의한 온도 측정의 미지의 보정값을 Δt_1 , 두번째 SPRT (SPRT2)에 의한 온도 측정의 미지의 보정값을 Δt_2 라고 두고, SPRT1으로 WO의 온도 $t_{1,O}$ 를, SPRT2로 WX (X=A, B, ..., F)의 온도 t_X 를 측정하였다면,

$$t_O = t_{1,O} + \Delta t_1 \quad (2)$$

$$t_X = t_{2,X} + \Delta t_2$$

그리고 두 온도계의 위치를 교차하여 동일하게 측정된 경우에

$$t_O = t_{2,O} + \Delta t_2 \quad (3)$$

$$t_X = t_{1,X} + \Delta t_1$$

여기서 $t_{i,O}$ 와 $t_{i,X}$ 는 SPRT i ($i=1, 2$)를 이용하여 온도계 우물 WO와 WX를 측정한 결과이다. 식 (2)와 (3)으로부터,

$$t_O - t_X = (t_{1,O} + t_{2,O})/2 - (t_{1,X} + t_{2,X})/2 \quad (4)$$

를 얻어서 미지의 Δt_1 과 Δt_2 는 상쇄된다. 아울러, (2)의 측정과 (3)의 측정 사이에 구리 블록의 온도가 전체적으로 상승하여 Δt_{block} 만큼의 온도변화가 있었다고 하더라도 교차 측정에 의하여 마찬가지로 (4)에서는 상쇄된다. Table 1은 교차 측정으로 온도계 우물을 평가한 결과를 나열한 것이다. Table 1에 표시한 각각의 온도 $t_{i,O}$ 와 $t_{i,X}$ 는 다음과 같은 과정으로 구하였다. 먼저, SPRT1으로 3초 간격으로 $t_{1,O}$ 를 10번 측정한다. 한 온도계에 대한 측정이 끝나면 스위치 박스를 이용하여 온도계 SPRT2 채널로 바꾸어 $t_{2,X}$ 를 10번 측정한다. 스위치 박스의 채널을 바꾸는 경우에는 언제나 15초 동안 대기하여 저항비 브리지가 균형(balance)을 잡도록 기다린다. 이 과정을 10번 반복하여 $t_{1,O}$ 와 $t_{2,X}$ 를 번갈아가며 10회씩 측정된 후 마지막에 $t_{1,O}$ 에 대한 10회 측정을 반복한다. 이렇게 하여, $t_{1,O}$ 를 110번 측정된 값과, $t_{2,X}$ 를 100번 측정된 값을 평균하며 $t_{1,O}$ 와 $t_{2,X}$ 를 각각 구한다. 이러한 방법으로 혹시 존재할지 모를 구리 블록의 선형적 온도 변화에 의한 오차를 상쇄시킬 수 있다. 그 이후에 두 온도계의 위치를 교차하여 $t_{1,X}$ 와 $t_{2,X}$ 를 같은 방법으로 측정한다. 네 개의 온도 측정값을 모두 얻으면 식(4)에 의해 중심 우물과 둘레의 각 우물 사이의 온도 편차 $t_O - t_X$ 를 계산한다. Table 1에서는 이러한 절차로 각 온도계 우물 WX에 대하여 $t_O - t_X$ 를 3번 측정된 결과를 나타내었다

Fig. 5에서는 온도계 우물의 기하학적인 배치와 Table 1에서 나타난 온도 편차 $t_O - t_X$ 를 그래프로 나타내었다. Fig. 5와 Table 1에서 보인 바와 같이 중심 우물과 둘레의 어느 한 우물의 온도 차이는 최대 0.4 mK을 넘지 않는다. 임의의 두 온도계 우물의 온도차이는 전폭을 0.7 mK으로 하는 직사각형 분포로 간주할 수 있으며, 이로 인한 표준불확도는 0.2 mK으로 평가된다.

Table 1. Temperature difference between the thermometer well WO at the center and the thermometer well WX with the crossed-measurement method

Well	$t_{1,O}$ (K)	$t_{2,O}$ (K)	$t_{2,X}$ (K)	$t_{1,X}$ (K)	$t_O - t_X$ (mK)
WA	77.6910	77.6704	77.6899	77.6722	-0.3
	77.5671	77.5216	77.5656	77.5232	0.0
	77.6342	77.5701	77.6326	77.5715	0.1
WB	77.6521	77.6526	77.6505	77.6540	0.1
	77.4997	77.4880	77.4982	77.4896	-0.1
	77.5682	77.5715	77.5667	77.5730	0.0
WC	77.4833	77.4918	77.4818	77.4918	0.0
	77.6445	77.6527	77.6437	77.6543	-0.4
	77.6269	77.6422	77.6250	77.6439	0.1
WD	77.6993	77.6083	77.6979	77.6098	-0.1
	77.6460	77.6561	77.6443	77.6576	0.1
	77.6172	77.6278	77.6152	77.6295	0.1
WE	77.6252	77.6231	77.6232	77.6245	0.3
	77.6221	77.6248	77.6204	77.6267	-0.1
	77.6345	77.6398	77.6327	77.6416	0.0
WF	77.6084	77.6410	77.6070	77.6426	-0.1
	77.6020	77.5855	77.6005	77.5870	0.0
	77.6281	77.6369	77.6262	77.6386	0.1

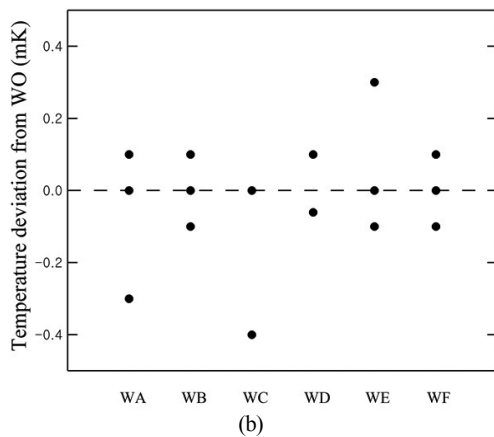
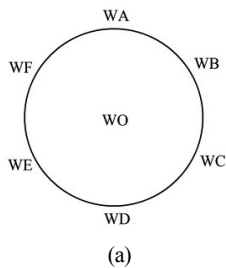


Fig. 5. (a) Geometric arrangement and nomenclature of the thermometer wells in the copper block and (b) temperature deviation at the six thermometer wells from the center well WO with the locations of the wells.

3.6 교정 불확도 평가

이 실험에서 평가한 방법에 의거하여 실험의 두 SPRT 중 하나를 기준 온도계로, 하나를 교정대상온도계로 치환하면 산업용 온도계의 질소의 끓는점 부근의 비교교정의 절차를 가정하고 그 불확도를 평가할 수 있다. 질소 끓는점 부근의 비교교정의 불확도는 크게 기준 온도계의 교정 불확도, 기준 온도계의 분해능으로 인한 불확도, 교정대상온도계의 반복 측정과 분해능으로 인한 불확도, 구리 블록의 안정도와 온도계 우물간 온도 편차에 의한 불확도가 존재한다. Table 2에 질소 끓는점 부근의 비교교정의 불확도 예시를 나타내었다. 이 중 기준 온도계의 교정 불확도는 질소의 끓는점을 포함한 구간에서 1 mK의 표준 불확도를 가정하였다. 산소의 삼중점 - 물의 삼중점 구간에서 고정점 교정된 캡슐형 SPRT를 이용하면 일반적으로 달성할 수 있는 불확도이다. 그러나, 더 일반적으로 많이 사용되고 있는 룡스텀형 SPRT[11]의 경우에는 산소의 삼중점에서 교정되지 않으므로, 아르곤의 삼중점 - 물의 삼중점 영역에서 교정한 경우라면 외삽하여 쓰는 것이 불가피하다. 외삽에 의한 불확도는 국제온도논금의 비유일성과 관련되어 있으며[12], 국제도량형국의 온도자문위원회 Working Group 3에서 이와 관련된 작업을 진행 중에 있다[13]. 기준 온도계의 분해능은 본 실험에서와 같이 25.5 Ω SPRT를 10 Ω 표준저항과 1×10⁻⁶ 분해능의 저항비 브리지를 이용하여 측정하는 것을 가정하여 0.1 mK으로 하였다. 교정대상온도계의 반복 측정에 의한 불확도는 1 mK으로 가정하였으며, 그 분해능은 1 mK으로 가정하여 직사각형 분포로 평가하였다. 구리 블록의 온도 안정도와 온도계 우물간 온도 편차는 앞의 절에서 구한 1.4 mK과 0.23 mK으로 각각 평가하였다.

이상의 불확도 인자들을 모두 합성한 결과 Table 2에서 보는 바와 같이 확장 불확도 4 mK ($k=2$)으로 액체 질소 온도 부근에서 산업용 온도계를 교정할 수 있는 것으로 나타났다.

Table 2. Uncertainty assessment of the calibration by comparison of industrial thermometer at nitrogen boiling point

Uncertainty factor	Uncertainty (mK)
Calibration of reference thermometer	1
Resolution of reference thermometer	0.1
Repeatability of device under test	1
Resolution of device under test	0.29
Stability of the copper block	1.4
Well-to-well uniformity	0.23
Standard uncertainty ($k=1$)	2.03
Expanded uncertainty ($k=2$)	4

4. 결론

이 논문에서 제시한 교차측정 방법을 이용하여 온도계 우물간의 온도차이나, 다른 존재할지 모르는 계통 오차를 제거하여 정밀한 온도 교정을 하는 것이 가능하다. 교정대상온도계가 온도 이외의 물리량인 저항이나 기전력을 읽는 경우라고 하더라도 여전히 교차 측정 방법을 이용하여 평균값을 이용할 수 있다. 교차 측정을 포함하여 전체 교정에는 30분 정도 소요되며, 온도계의 위치를 교차하는 것 이외의 다른 과정은 스위치 박스를 이용하여 자동화하는 것이 가능하다. 전 과정에서 온도계 우물 중 하나에 모니터 온도계를 설치하여 온도변화를 감시하면서 교정을 수행하면 갑작스런 온도변화로 인한 측정 오류를 방지할 수 있다.

Table 2에서 보는 바와 같이 질소의 끓는점 부근에서 4 mK의 불확도로 온도계를 비교교정하는 것이 가능하다. 이는 대부분의 산업용 온도계의 이 온도 영역에서의 사양보다 월등한 것이며, 실제 교정의 불확도는 교정대상온도계의 성능, 즉 단기 안정도나 분해능에 의해서 결정될 가능성이 크다. 이러한 불확도는 액체 질소가 냉동용 액체로 사용되는 화학, 바이오, 식품, 철강, 전자 분야 등 대부분의 분야에서 사용자의 수요를 만족하기에 충분한 것으로 평가된다. 또한, 교정 시간이 30 분 정도로 매우 짧고, 진공 장비 등의 추가 설비 없이 간단하게 교정할 수 있어서, 산업용 센서를 저온에서 교정하는데 편리하게 이용될 것으로 보인다.

감사의 글

이 논문은 2013년 한국표준과학연구원 주요사업 재원으로 지원을 받아 수행된 연구임 (한국표준과학연구원 - 13011001)

REFERENCES

- [1] H. Preston-Thomas, "The international temperature scale of 1990 (ITS-90)", *Metrologia*, Vol. 27, No. 1, pp. 3-10, 1990.
- [2] I. Yang, C. H. Song, K. H. Kang, and Y. -G. Kim, "Development of the calibration system for very accurate thermometers at low temperatures", *J. Sensor Sci. & Tech.*, Vol. 17, No. 3, pp. 188-194, 2008.
- [3] I. Yang, C. H. Song, K. H. Kang, and Y. -G. Kim, "Development of the automatic calibration system

for industrial resistance thermometers at low temperatures", *J. Sensor Sci. & Tech.*, Vol. 17, No. 6, pp. 429-436, 2008.

- [4] T. Nakano, O. Tamura, and H. Sakurai, "Comparison system for the calibration of capsule-type standard platinum resistance thermometers at NMIJ/AIST", *Int. J. Thermophys.* Vol. 29, No. 3, pp. 881-889, 2008.
- [5] G. M. Chen, X. Gao, S. Z. Zhang, Q. Chen, L. M. Tang, and Y. Q. Lan, "Development of an automatic calibration device for high-accuracy low temperature thermometers", *Science China Technological Sciences*, Vol. 53, No. 9, pp 2404-2407, 2010.
- [6] M. Ballico and C. Freund, "A cryostat for automated mK-level thermometer calibrations from -202°C to 250°C", *Int. J. Thermophys.*, Vol. 32, No. 11, pp. 2360-2369, 2011.
- [7] http://content.fluke.com/comx/pages/hrt_ln2comp_en.htm (retrieved on Jul. 29, 2013)
- [8] <http://www.isotech.co.uk/products/secondary-laboratory/low-temperature-calibration/simple-nitrogen-boiling-point-apparatus-model-461.php> (retrieved on Jul. 29, 2013)
- [9] R. E. Bedford, G. Bonnier, H. Maas, and F. Pavese, "Recommended values of temperature on the international temperature scale of 1990 for a selected set of secondary reference points", *Metrologia*, Vol. 33, No. 2, pp. 133-154, 1996.
- [10] ASTM Standard E 563 - 02, "Standard practice for preparation and use of an ice-point bath as a reference temperature", *ASTM International*, West Conshohocken, PA, www.astm.org, 2002.
- [11] J. V. Nicholas and D. R. White, *Traceable Temperatures*, 2nd edition, John Wiley & Sons, Chichester, pp. 203-253, 2001.
- [12] C. W. Meyer and W. L. Tew, "ITS-90 non-uniqueness from PRT subrange inconsistencies over the range 24.56 K to 273.16 K", *Metrologia*, Vol. 43, No. 5, pp. 341-352, 2006.
- [13] "Working group 3 report to CCT : May 2012", http://www.bipm.org/cc/CCT/Allowed/26/WORKING_GROUP_3_REPORT_TO_CCT_2012.pdf (retrieved on Jun. 28, 2013)