

Establishment of Comparison Calibration Equipment for Infrared-radiation Thermometers Below 0°C

Yong Shim Yoo[†] and Bong-Hak Kim

Division of Physical Metrology, KRISS, 267, Gajeong-ro, Yuseong-gu, Daejeon 34113, Korea

(Received January 7, 2018; Revised March 4, 2018; Accepted March 12, 2018)

Comparison calibration equipment for infrared-radiation thermometers below 0°C has been established, using a TRT2 (transfer radiation thermometer 2, HEITRONICS) as a transfer standard and an ME30 (Model: ME30, HEITRONICS) as a variable-temperature blackbody. The TRT2 was calibrated using three fixed points (Ice (0.01°C), In (156.5985°C), and Sn (231.928°C)) and the Planckian Sakuma-Hattori equation, and including the interpolation and extrapolation errors at -50°C in the uncertainty. The pneumatic lid is installed upon opening of the ME30 and is opened for only 30 seconds for measuring the radiation temperature, which prevents formation of ice in the ME30 and also reduces the calibration time to half. The farther away from the 0~232°C region, the larger the uncertainty of the comparison calibration equipment becomes. The expanded uncertainty of the comparison calibration equipment was estimated as 0.26 K at -20°C.

Keywords: Infrared, Radiation thermometer, Radiance temperature, Blackbody, SSE
OCIS codes: (040.3060) Infrared; (120.1880) Detection; (120.6780) Temperature

0°C 이하 적외선 복사온도계 비교 교정장치 구축

유용심[†] · 김봉학

한국표준과학연구원 물리표준본부
☎ 34113 대전광역시 유성구 가정로 267

(2018년 1월 7일 받음, 2018년 3월 4일 수정본 받음, 2018년 3월 12일 게재 확정)

0°C 이하 적외선 복사온도계의 복사온도눈금 교정을 위해 기준 복사온도계 TRT2 (Transfer Radiation Thermometer 2, HEITRONICS)와 온도가변 흑체 ME30 (Model: ME30, HEITRONICS)을 사용하여 비교 교정장치를 구축하였다. 3개의 고정점(Ice (0.01°C), In (156.5985°C), Sn (231.928°C))과 플랑크형 사쿠마-하토리식을 사용하고, -50°C에서 TRT2의 내외삽 오차를 불확도에 포함시켜 TRT2의 복사온도 눈금을 교정하였다. ME30 흑체 개구에 공압으로 동작되는 뚜껑을 설치한 후 30초 동안만 뚜껑을 열고 복사온도를 측정함으로써 ME30 내에서 생기는 성예를 방지할 수 있었으며 비교 교정에 소요되는 시간도 반으로 줄일 수 있었다. 0~232°C 영역 밖으로 벗어날수록 비교 교정장치의 불확도는 증가하며 -20°C에서 확장 불확도는 0.26 K였다.

Keywords: 적외선, 복사온도계, 복사온도, 흑체, 복사원크기효과
OCIS codes: (040.3060) Infrared; (120.1880) Detection; (120.6780) Temperature

I. 서 론

실온 근처 또는 실온 이하의 온도 영역에서 적외선 복사온도계는 많은 응용분야, 특히 열관리, 체열관리, 원격관측, 비파괴 검사 등에 사용되고 있다. 적외선 복사온도계를 교정하는 방법에는 크게 다중 고정점법과 비교 교정법이 사용되고 있다. 고정점법은 3개 이상의 고정점과 플랑크형 사쿠마-하토리식을 사용하여 교정하는 방법으로 기증기로 사용되는

적외선 복사온도계를 교정할 때 주로 사용된다. 비교 교정법은 기준 적외선 복사온도계와 흑체를 사용하여 교정대상 적외선 복사온도계를 교정하는 방법으로 기준 복사온도계로 흑체의 온도를 정의하고 이 눈금을 기준으로 교정대상 복사온도계의 눈금을 교정하는 방법이다.

한국표준과학연구원에서는 8~14 μm 파장대역으로 -50°C에서 300°C 영역의 복사온도를 측정할 수 있는 적외선 복사온도계(모델: TRT2, HEITRONICS)를 다중 고정점과 플랑크

[†]E-mail: ysyoo@kriss.re.kr, ORCID: 0000-0002-8061-4058

Color versions of one or more of the figures in this paper are available online.

형 사쿠마-하토리식을 사용하여 내삽 영역인 0~232°C 영역에서 교정한 결과를 보고한 바 있다^[1]. 최근에는 0°C 이하 온도 영역에서 적외선 복사온도계에 대한 교정 요구가 계속되고 있다. 0°C 이하 온도 영역에서 교정대상 적외선 복사온도계를 비교 교정하기 위해서는 0°C 이하 온도 영역에서 교정된 기준 적외선 복사온도계와 0°C 이하 온도 영역에서 동작하는 온도가변 흑체가 필요하다. 0°C 이하 온도 영역에서 사용되는 고정점으로는 수은 고정점(Hg, -38.8344°C)이 있으나 복사온도계 교정용 고정점셀의 공동부분은 복사온도 측정을 위해 대기에 노출되어야 한다. 그러므로 이런 조건에서는 이슬점 이하의 온도에서 생성되는 성애를 방지하기가 어렵고 수은을 다루는 것은 위험하다고 판단된다. 그러므로 본 연구에서는 0°C 이하 온도 영역에서 수은 고정점(Hg, -38.8344°C)을 도입하지 않고 Ice (0.01°C), In (156.5985°C) 그리고 Sn (231.928°C) 3개의 고정점과 플랑크형 사쿠마-하토리식을 사용하여 기준 복사온도계인 TRT2의 복사온도 눈금을 확립하였다. 이를 위해 0°C 이하 영역에서 플랑크형 사쿠마-하토리식을 사용할 때 발생하는 내외삽 오차를 계산하여 TRT2의 복사온도 불확도에 포함시켰다. 또한, 온도측정 자문위원회(CCT)에서 발간한 논문의 용어 및 불확도 산정법과 불확도 전파식^[2]을 사용하여 -50~300°C 영역에서 TRT2의 복사온도 불확도를 구하였다. 그러나 참고문헌 [2]에는 내삽 영역과 외삽 영역을 구분하지 않고 불확도 성분을 내삽 오차(interpolation error)로 표기하고 있어 이 논문에서는 독자의 혼동을 막기 위해 내외삽 오차(inter-and extra-polation error)로 표기하기로 한다.

상용화된 온도가변 흑체의 크기는 다양하지만 적외선 복사온도계는 복사원 크기효과(Size-of-Source Effect, SSE)가 크기 때문에 개구 지름이 큰 흑체를 사용하는 것이 좋다^[3]. 그러나 개구 지름이 클수록 외부 공기의 유입으로 공간 온도분포는 더 불균일하게 된다. 액체 항온조를 사용하거나 히트파이프를 사용하는 온도가변 흑체의 경우 외부 공기의 유입을 차단하기 위해 퍼지가스를 사용하거나^[4,5] 흑체 개구의 위치를 흑체 밑면 쪽으로 가깝게 놓는 방법^[4]을 사용하기도 한다. 이 연구에서는 퍼지가스를 사용할 수 있는 액체 항온조형 온도가변 흑체인 HEITRONICS사의 제품 ME30을 사용하였다. 그런데 이 흑체도 외부 공기의 유입을 완전히 차단하지 못해 0°C 이하에서는 흑체의 개구에서부터 안쪽으로 1/3 되는 지점까지 성애가 끼며 설정온도로 도달하는데 긴 시간이 소요되었다. 이를 개선하기 위해 흑체 개구에 공압으로 동작되는 뚜껑을 설치하였다. 우선 뚜껑을 닫아 외부 공기의 유입을 차단하여 흑체의 온도가 짧은 시간 내에 설정온도로 도달하게 한 후 뚜껑을 열어 기준 복사온도계로 흑체의 온도를 측정하면 된다. 본 연구에서는 기준 복사온도계 신호의 특성과 흑체의 공간 온도 불균일도, 모니터링 접촉식 온도계로 측정된 온도 눈금과 복사온도 눈금을 비교하였으며 비교 교정 장치의 불확도를 평가하였다.

II. 기준 복사온도계

2.1. 교정식

온도 T 인 흑체를 측정하는 복사온도계의 신호는 다음과 같다.

$$S(T) = \int_0^{\infty} s(\lambda)L_b(\lambda, T)d\lambda \quad (1)$$

여기서 $L_b(\lambda, T)$ 는 파장 λ 와 온도 T 에서의 플랑크 함수이고, $s(\lambda)$ 는 복사온도계의 분광감응도이다. 분광감응도를 정확하게 측정해야 하는 어려움을 피하기 위해 다중 고정점을 사용하여 교정하는데 이때 주로 플랑크형 사쿠마-하토리식으로 알려진 아래 근사식을 사용한다^[6].

$$S(T) = \frac{C}{\exp\left(\frac{c_2}{AT+B}\right)-1} \quad (2)$$

여기서 A, B와 C는 3개 이상의 고정점에서 측정한 온도와 신호로 결정되는 매개변수들이며 $c_2(=0.014388 \text{ m} \cdot \text{K})$ 는 제 2 복사상수이다.

2.2. 내외삽 오차의 계산

플랑크형 사쿠마-하토리식의 사용으로 분광감응도를 정확히 측정해야 하는 어려움을 피할 수 있으나 광간섭필터의 밴드폭이 넓은 경우 내외삽 오차가 커지는 단점이 있다. 그러므로 6 μm 의 넓은 밴드폭을 가진 8~14 μm 복사온도계 TRT2를 0°C 이하의 영역에서 사용할 때 발생하는 내외삽 오차를 이론적인 계산을 통해 알아보았다. 우선 그림 1의 삽입 그림 안에 실선으로 표시된 TRT2의 상대 분광감응도(매뉴얼 참조)와 식 (1)을 사용하여 3개의 고정점(Ice, In, Sn)에서의 신호들을 구한 후 식 (2)로 내외삽하여 매개변수 A, B와 C를 구하였다. 그리고 식 (1)을 사용하여 -50°C에서 300°C까지 1°C 간격으로 계산한 신호들과 위에서 구한 매개변수 A, B와 C 값들을 식 (2)에 대입하여 온도를 계산한 후 그 차이를 그림 1에 실선으로 표시하였다. 또한, 광간섭 필터의 밴드폭 효과를 보이기 위해 1 μm (일점쇄선)와 6 μm (점선) 직사각형 밴드폭을 가정하고 내외삽 오차들을 구하였다.

1 μm 밴드폭의 경우 -50~300°C 영역 전체에서 10^{-5} K 이하의 내외삽 오차를 가지는 반면 6 μm 밴드폭의 경우 내삽 영역에서는 80°C 근처에서 최대 오차 -0.005 K를 가지고 외삽 영역에서는 오차가 급격히 증가함을 보인다. TRT2의 경우는 6 μm 밴드폭의 경우와 유사하게 80°C 근처에서 최대 오차 -0.018 K를 가지나 0°C 이하 영역에서는 + 방향으로 오차가 급격히 증가함을 보이고 있다. 내삽 영역에서만 교정 결과를 사용하는 경우 내외삽 오차의 최대값을 내외삽 불확도로 사용하며 3개 고정점에 동일하게 적용한다. 그러므로 외삽 영역에서 교정결과를 사용하는 경우에 외삽 영역의 내외삽 오차가 내삽 영역의 값보다 크면 그 값을 내외삽 불확

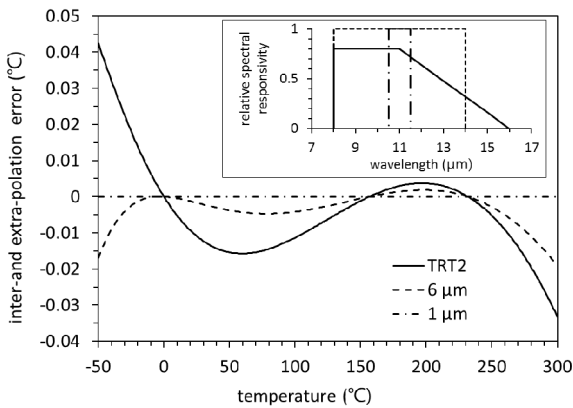


Fig. 1. Inter- and extra-polation errors for three relative spectral responsivities using the Planckian Sakuma-Hattori equation and three fixed points (Ice, In and Sn). Inset: the relative spectral responsivities of TRT2 and an assumed radiation thermometer with 6 μm or 1 μm bandwidth.

도로 사용하기로 한다. 이 연구에서는 -50°C에서 최대값 0.043 K를 가지므로 이 값을 내외삽 불확도로 사용하였다 (표 1 참조).

2.3. TRT2 복사온도 눈금 교정

TRT2 온도 눈금의 교정 절차는 다음과 같다. 우선 3개의 고정점을 각각 실현하여 신호들을 측정한다. 둘째, 측정된 신호에 대해 복사원 크기효과^{1,3,4)}를 보정한 후 고정점 흑체의 복사율 보정을 수행한다. 셋째, 식 (2)로 내외삽하여 매개변수 A, B와 C를 구한다. 넷째, 각 고정점에서 불확도를 산

출한 후 불확도 전파식을 사용하여 -50~300°C 영역에서 불확도를 산출한다.

2.3.1. 고정점 실현

TRT2로 고정점을 실현하기 위해 사용되는 고정점셀들의 외경은 33 mm이고 길이는 69 mm인 원통형이다. 흑체는 개구 지름이 10 mm이며 깊이가 50 mm이고 밑면은 120도의 각을 가진 원뿔 형태이다. Ice 셀은 테프론으로 제작되었고 ISOTECH사의 전기로인 Hyperion-R에 장착된다. In과 Sn 셀들은 흑연으로 제작되었고 ISOTECH사의 Pegasus R에 장착된다. 고정점을 실현할 때 금속의 산화를 방지하기 위해 알곤 가스를 500 ml/min로 흘려준다. 지름이 30 mm인 개구를 가진 구경관은 전기로의 복잡한 공간 온도 분포를 균일하게 만들기 위해 전기로 앞에 설치되었다. 이 구경관은 복사율이 높은 페인트인 3M사의 Nextel Velvet 811-21로 칠해져 있으며 내장된 냉각용 구리관에 물을 흘려 24°C로 조절된다. 실온 변화와 흑체 복사에 의해 TRT2 몸체의 온도가 변하는 것을 막기 위해 TRT2 전체에 설치된 냉각용 구리관에 물을 흘리면서 몸체의 온도는 24°C로 조절된다. Ice, In과 Sn 고정점들을 실현하여 신호들을 측정하고 복사원 크기효과와 복사율을 보정한 후 구한 신호들은 각각 59609, 401467와 678289이며 식 (2)로 구한 매개변수 A, B와 C는 각각 $9.1815 \times 10^{-6} \text{ m}$, $1.6615 \times 10^{-4} \text{ m} \cdot \text{K}$ 와 1.2881×10^7 이다.

표 1은 TRT2의 온도 눈금 불확도 표로 고정점 흑체(Fixed-point blackbody)의 불확도와 TRT2의 불확도로 구성되어 있다. 불확도 산정에 대한 자세한 내용은 참고문헌 [1]에 있으므로 여기에서는 성분들의 의미에 대해서만 간략히 설명하고자 한

Table 1. Uncertainty budget for radiance temperature of the TRT2 at three fixed points

Source of uncertainty	Component	Temperature (°C)		
		0.01	156.5985	231.928
		(Ice)	(In)	(Sn)
Uncertainty (K)				
Fixed-point Blackbody	Impurities	0.003	0.002	0.002
	Plateau identification	0.019	0.009	0.007
	Plateau repeatability	0.023	0.010	0.014
	Emissivity	0.015	0.055	0.075
	Temperature drop	0.008	0.000	0.001
	Reflected ambient radiation	0.025	0.011	0.008
TRT2	SSE	0.024	0.055	0.075
	Nonlinearity	0.011	0.025	0.033
	Body temperature	0.009	0.003	0.002
	Atmospheric absorption	0.008	0.021	0.029
	Alignment	0.001	0.003	0.003
	Aperture plate	0.001	0.000	0.000
	Inter- and extra-polation	0.043	0.043	0.043
Combined uncertainty ($k = 1$)		0.067	0.096	0.13
Expanded uncertainty ($k = 2$)		0.14	0.19	0.26

다. 고정점 흑체의 불확도 성분은 고정점으로 사용되는 금속의 불순도(impurities) 불확도, 금속의 녹는점 또는 어는점의 편평도(plateau identification)와 반복도(plateau repeatability) 불확도, 흑체의 복사율(emissivity) 불확도, 흑체 복사에 의한 흑체 밑면의 온도 하강(temperature drop)에 기인한 불확도와 흑체의 복사율이 1보다 작은 경우 실험실 벽을 포함한 장비들에서의 복사가 흑체에서 반사되어 발생하는 반사된 주변 복사(reflected ambient radiation) 불확도 등으로 이루어져 있다. TRT2의 불확도 성분은 복사원 크기효과에 의한 불확도, 입력 광세기에 대한 검출기 자체의 비선형성(nonlinearity) 또는 신호 증폭단의 비선형성에 기인한 불확도, TRT2 몸체의 온도(body temperature) 변화에 기인한 불확도, 실험실 내의 온습도 변화에 따른 흑체 복사의 대기 흡수(atmospheric absorption) 정도에 기인한 불확도, TRT2를 고정점의 중심축에 광축 정렬(alignment)할 때 발생하는 정렬 불확도, 고정점 전기로의 복잡한 공간 온도분포를 균일하게 만들기 위해 설치한 구경관의 온도변화에 기인한 불확도, 플랑크형 사쿠마-하토리식으로 고정점들의 신호를 내외삽한 결과를 사용할 때 이론적으로 발생하는 불확도 등으로 이루어져 있다. 본 연구에서는 장기안정도에 대한 불확도를 고려하지 않았다.

2.3.2. 불확도 전파

측정 불확도의 표현에 관한 지침에서 불확도 성분끼리 서로 상관관계가 없는 경우 온도 T 에서 합성불확도는 식 (3)과 같다^[2].

$$u_c^2(T) = \sum_{i=1}^3 [L_i(T)u(T_i)]^2 + \sum_{i=1}^3 \left[L_i(T) \frac{\lambda_{T_i} T_i^2}{c_2} \left[1 - \exp\left(\frac{-c_2}{\lambda_{T_i} T_i}\right) \right] \frac{u(S_i)}{S_i} \right]^2 \quad (3)$$

여기서 S_i 는 온도 T_i 에서의 신호세기이고 $u(S_i)$ 와 $u(T_i)$ 는 각각의 표준불확도이다. λ_{T_i} 는 극한유효파장(limiting effective wavelength)으로 $\lambda_{T_i} = A(1+B/AT)^2$ 이고 $L_i(T)$ 는 Lagrange polynomials로 $i=1$ 인 경우 식 (4)와 같다.

$$L_1(T) = \frac{T^2(T_3 - T_2)[A^2 - \lambda_x^2(T)P(T)] + T_2^2(T - T_3)[A^2 - \lambda_x^2(T_2)P(T_2)] + T_3^2(T_2 - T)[A^2 - \lambda_x^2(T_3)P(T_3)]}{T_1^2(T_3 - T_2)[A^2 - \lambda_x^2(T_1)P(T_1)] + T_2^2(T_1 - T_3)[A^2 - \lambda_x^2(T_2)P(T_2)] + T_3^2(T_2 - T_1)[A^2 - \lambda_x^2(T_3)P(T_3)]} \quad (4)$$

여기서 $\lambda_x(T) = A + B/T$ 이고 $P(T) = \exp[-c_2/\lambda_x(T)T]$ 이다.

그림 2는 Ice, In와 Sn 고정점들에서의 확장불확도($k=2$)의 값인 0.14 K, 0.19 K와 0.26 K들을 식 (3)에 적용하여 구한 확장불확도이다.

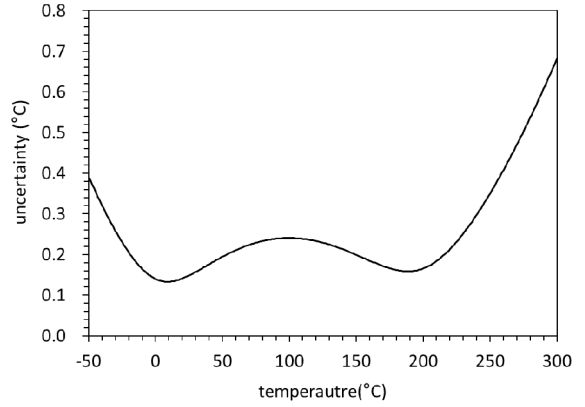


Fig. 2. Expanded uncertainty for the TRT2 calculated by applying expanded uncertainties for three fixed points (Ice, In and Sn) to the Eq. (3).

III. 온도가변 흑체

그림 3은 0°C 이하용 복사온도계 교정장치의 개략도로 TRT2의 초점을 ME30의 개구에 두고 ME30의 중심축에 광축 정렬하였다. ME30은 -20°C에서 350°C까지 동작하며 40°C 이하의 온도에서 사용할 때에는 2차 냉각 장치가 필요한데 본 연구에서는 국내 CPT사의 액체 항온조형 냉각기를 사용하였다. 흑체는 원통형이고 밑면은 30° 기울어져 있으며 재질은 구리이다. 흑체 개구의 지름은 60 mm이고 길이는 300 mm이다. 흑체 내부는 Senotherm사의 1666 페인트로 칠해져 있으며 복사율은 0.9994 ± 0.0002 ^[7]로 추정된다. 흑체의 온도는 흑체 바깥쪽 원통에 용접된 지름이 6 mm이고 길이가 400 mm인 원통내에 Fluke사의 SPRT 5699를 삽입하고 F250 온도계로 측정한다. 원통내에서 SPRT의 위치를 정하기 위해 흑체의 온도를 -20°C 근처로 안정시킨 후 SPRT의 끝을 흑체의 개구에서 40 mm 떨어진 위치에서부터 뒤쪽으로 이동하면서 온도분포를 측정하였다. 40 mm 위치에서 200 mm 내에서는 10 mK 정도의 편차를 가지나 200 mm 이후에는 온도가 급격히 증가하였다. 그러므로 SPRT의 끝을 흑체 개구에서 100 mm 떨어진 위치에 두었다. 이슬과 성에는 흑체 표면의 열전도도를 변화시켜 흑체내의 공간온도 불균일도를 만들기 때문에 이슬점 이하에서 사용할 때는 흑체 밑면을 통해 알곤 가스를 주입하였다. 그러나 0°C 이하에서 알곤 가스를 10 L/min 이상 주입하더라도 흑체의 개구에서부터 안쪽으로 1/3 되는 지점까지 성애가 끼며 시간이 지날수록 성애는 더 심해졌다. 그리고 흑체의 온도가 24°C에서 -20°C로 떨어지는데 4시간이 걸려 이를 개선하기 위해 본 연구에서는 흑체 개구에 공압으로 동작하는 뚜껑을 설치하고 1초 이내에 개폐가 가능하도록 하였다. 뚜껑을 닫더라도 완전 밀폐가 되지는 않아 뚜껑을 닫았을 때도 3 L/min로 알곤가스를 흘러 주었으며 이런 조건에서 흑체가 24°C에서 -20°C로 안정되는데 2시간 이하로 걸렸다.

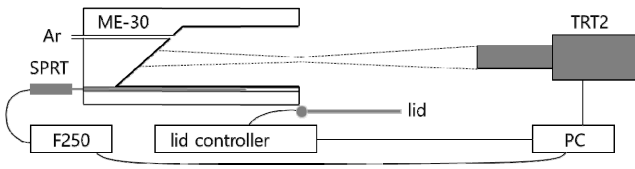


Fig. 3. Schematic diagram of the comparison calibration equipment for infrared radiation thermometers below 0°C.

그림 4는 뚜껑을 닫고 F250의 온도를 -20.3°C로 안정시킨 후 뚜껑을 열고 50분간 5초 간격으로 측정된 흑체의 온도 변화이다. 점선은 F250으로 측정된 온도이고 실선은 TRT2로 측정된 흑체 밀면의 복사온도이며 TRT2로 측정된 모든 복사온도는 복사원 크기 효과가 보정된 값들이다. 뚜껑을 열자마자 공기가 흑체 내에 유입되면서 흑체의 온도는 계속 상승하다가 48분 이후에 상승세가 거의 둔화되었으며 뚜껑을 열기 전보다 2.5°C 정도 상승했다. 뚜껑을 열고 10초 후에 TRT2로 측정된 복사온도가 F250으로 측정된 온도보다 0.2°C 높았으나 8분 정도에 F250의 온도가 상승을 멈추었다가 다시 상승하면서 온도차는 더 커졌고 안정되었을 때는 0.3°C 정도로 벌어졌다. 뚜껑을 열고 나서 10초 후에 측정된 온도차는 공기의 유입으로 0.2°C 만큼 상승한 것이 아니고 F250은 TRT2가 측정하는 흑체 밀면의 온도를 측정하지 않기 때문에 생긴 온도차이다. 시간이 지나면서 온도차가 커지는 것은 외부공기의 유입으로 흑체 개구의 표면 온도가 흑체 밀면의 온도보다 높아져 흑체의 유효 복사율이 높아지기 때문이다. 본 연구에서는 뚜껑을 사용하는 경우 최대한 짧은 시간 동안 외부 공기에 노출시키면서 충분한 데이터를 얻기 위해 뚜껑을 열은 후 10초부터 40초까지의 데이터를 평균하여 사용하였다.

그림 5는 그림 4의 데이터를 얻은 후 흑체의 뚜껑을 열어 놓은 상태에서 F250으로 측정된 온도가 -20°C가 되도록 흑체의 온도를 내려 안정시킨 후 TRT2를 좌에서 우로 이동하면서 측정된 공간 온도 분포이다. TRT2는 복사원 크기 효과가 커서 공간 온도 분포 측정에도 영향을 미치기 때문에 균일한 공간 온도 분포를 가졌더라도 r 이 증가할수록 온도가 높게 측정되므로 25 mm 이후 지점에서 측정된 복사온도는 고려하지 않았다. -25 mm에서 25 mm까지의 분포만 고려하면 최소값과 최대값의 차이는 0.13 K이다.

그림 6은 흑체의 온도를 변화시키면서 F250로 측정된 온도 T_{F250} 과 TRT2로 측정된 복사온도 T_{TRT2} 값들의 차를 구한 것이다. -10°C 이하의 온도에서부터 흑체내에 성예의 생성이 빠르게 진행되므로 -10°C 이하의 온도에서는 뚜껑을 사용하였다. 그림 6에서 표시된 오차는 TRT2로 측정된 복사온도의 표준편차이다. 실온 24.4°C에서 측정된 온도차는 10 mK 이 내이지만 흑체의 온도가 실온 이상인 경우 TRT2로 측정된 복사온도가 F250로 측정된 온도보다 낮으며 흑체의 온도가 실온보다 낮은 경우 반대의 경향을 보인다. 이 것은 위에서 언급한 바와 같이 흑체의 온도가 실온 이상인 경우 외부 공기는 흑체 개구 쪽의 온도를 낮추고 실온 이하인 경우는 반

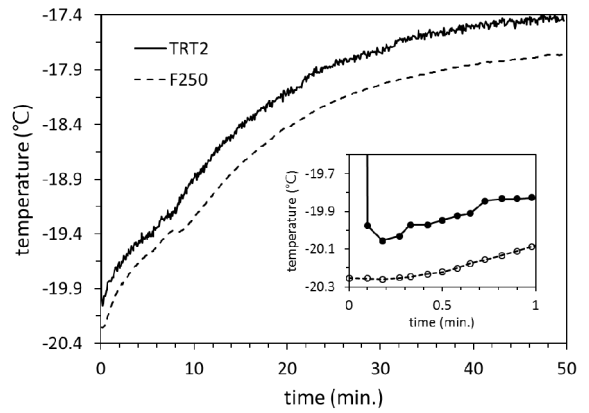


Fig. 4. Temperature change of the ME30 measured with the TRT2 and the F250 just after removal of the lid.

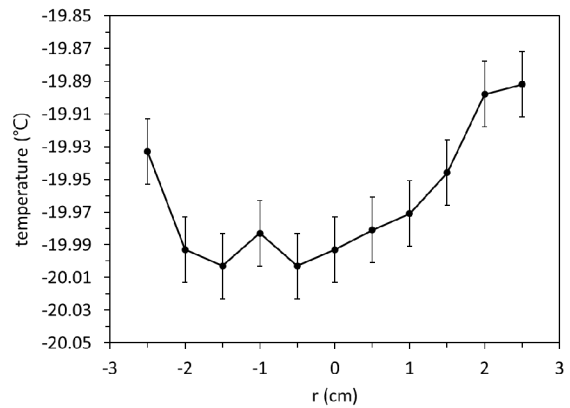


Fig. 5. Temperature distribution of the ME30 scanned with the TRT2. The error bars correspond to standard deviations.

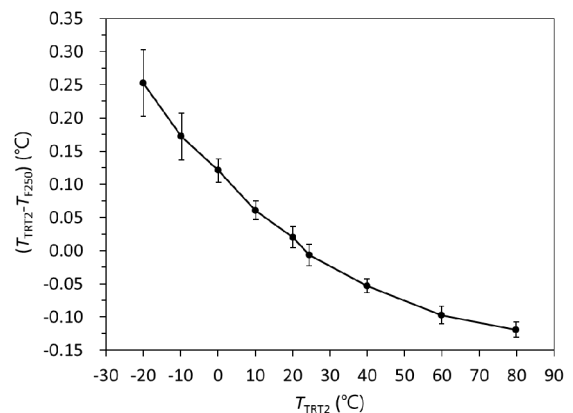


Fig. 6. The differences ($T_{TRT2} - T_{F250}$) between temperatures measured with The TRT2 and the F250. The error bars correspond to standard deviations of T_{TRT2} .

대로 흑체 개구 쪽의 온도를 높이기 때문이다. 그러므로 외부 공기의 유입을 완전히 차단하지 못하는 흑체를 사용하는 경우 흑체의 외부에 꽂혀있는 접촉식 온도계를 기준 온도계로 사용하려면 그림 6과 같은 온도차를 보정해야 한다.

IV. 복사온도계 비교 교정장치의 불확도

복사온도계 교정장치의 불확도는 표 1에 제시된 기준 복사온도계 TRT2의 불확도와 온도가변 흑체ME30의 복사온도를 측정할 때 발생하는 불확도로 구성되어 있다. ME30에 기인한 불확도로는 복사원 크기 효과에 의한 불확도(SSE), 공간 온도 불균일도에 의한 불확도(Non-uniformity), 뚜껑사용에 의한 불확도(Lid), 반사된 주변복사 효과에 의한 불확도(Reflected ambient radiation)가 있다. 본 연구에서는 표 2와 같이 -20°C에서 불확도를 평가하였다.

4.1. TRT2의 복사온도 눈금 표준불확도, $u_{TRT2}(T)$

TRT2의 복사온도 눈금 불확도를 표시한 그림 2에서 볼 때 -20°C에서의 확장불확도는 0.21 K이다. 그러므로 표준불확도는 확장불확도를 포함인자(k)인 2로 나눈 값이므로 0.11 K이다.

4.2. 복사원 크기 효과(SSE)에 의한 표준불확도, $u_{SSE}(T)$

TRT2의 복사온도 눈금을 교정할 때 사용한 고정점 흑체의 지름은 10 mm인데 ME30의 지름은 60 mm이기 때문에 복사원 크기 효과를 보정해야 한다. 그림 5에서 ME30의 공간 불균일도인 0.13 K는 복사온도 253.15 K (-20°C)에 비해 상대적으로 작아 균일한 흑체로 가정할 수 있다. 그러므로 균일한 흑체에 대한 복사원 크기 효과식인 식 (5a)로 보정할 수 있으며 이 때 표준불확도는 식 (5b)와 같다.

$$\Delta T_{SSE}(d) = \frac{\lambda_T T^2}{c_2} \left[1 - \exp\left(\frac{-c_2}{\lambda_T T}\right) \right] \frac{(\sigma(d_{fix}) - \sigma(d))}{\sigma(d_{fix})} \quad (5a)$$

$$u_{SSE}(T) = (\lambda_T T^2) \frac{1}{c_2} \left[1 - \exp\left(\frac{-c_2}{\lambda_T T}\right) \right] \frac{u(\sigma(d))}{\sigma} \quad (5b)$$

여기서 $\sigma(d)$ 와 $\sigma(d_{fix})$ 는 온도가변 흑체의 지름 d 와 고정점 흑체의 지름 d_{fix} 에서의 복사원 크기 효과 값들이고 T 는 기준 복사온도계로 측정된 온도가변 흑체의 복사 온도이다. c_2 는 0.014388 m·K의 값을 가진 복사상수이고 $\lambda_T (= A(1+B/AT)^2)$

Table 2. Uncertainty budget of the comparison calibration equipment for radiation thermometers at -20°C

Source of uncertainty	Component	Uncertainty (K)
TRT2	Scale, $u_{TRT2}(T)$	0.11
ME30	SSE, $u_{SSE}(T)$	0.02
	Non-uniformity, $u_{nonunif}(T)$	0.04
	Lid, $u_{lid}(T)$	0.05
Combined uncertainty ($k=1$)		0.13
Expanded uncertainty ($k=2$)		0.26

는 적외선 복사온도계의 극한유효파장이다. TRT2의 경우 -20°C에서 극한 유효파장은 10.5 μm 이다. 참고문헌 [1]에서 복사원 크기 효과 측정시 상대오차인 0.04%를 사용하면 -20°C에서의 복사원 크기 효과에 따른 표준불확도는 0.02 K이다.

4.3. ME30의 공간 온도 불균일도에 의한 표준불확도, $u_{nonunif}(T)$

흑체의 공간 온도 불균일도는 흑체 개구 면적의 60% 이내의 면적(또는 흑체 개구 지름의 78% 이내의 면적)에 해당되는 부분의 공간 온도분포에 대해 평가해야 한다. ME30의 지름이 60 mm이므로 지름 50 mm 내의 공간 온도분포를 사용하면 된다. 그림 4에서 측정된 상한과 하한의 반 너비인 0.07 K를 공간 온도 불균일도의 편차인 $\Delta T_{nonunif}$ 로 사용하면 공간 온도 불균일도에 의한 표준불확도 $u_{nonunif}(T) (= \Delta T_{nonunif} / \sqrt{3} = 0.07 \text{ K} / \sqrt{3})$ 는 0.04 K이다.

4.4. ME30의 뚜껑 사용에 의한 표준불확도, $u_{lid}(T)$

ME30의 뚜껑이 닫혀 있을 때는 적외선 복사온도계를 사용할 수 없으므로 F250로 측정된 온도를 기준으로 뚜껑을 개폐한다. 정해진 온도 T_{F250} 에서 뚜껑을 열고 측정하더라도 TRT2로 측정된 복사온도는 측정할 때마다 달라질 수 있다. 이 것은 교정대상 복사온도계를 교정할 때 TRT2로 측정할 때 ME30의 온도와 교정대상 복사온도계로 측정할 때 ME30의 온도가 다를 수 있다는 것을 의미한다. 그러므로 뚜껑 사용에 의한 표준불확도를 구하기 위해 정해진 T_{F250} 에서 뚜껑을 열고 TRT2로 30초간 측정 후 뚜껑을 닫고 3~5분간 기다렸다가 정해진 T_{F250} 에 도달하면 다시 뚜껑을 열고 TRT2로 측정하기를 10회 반복하였다. 이렇게 구한 ME30의 뚜껑 사용에 의한 표준불확도 $u_{lid}(T)$ 는 0.05 K였다.

4.5. 반사된 주변 복사(Reflected ambient radiation)에 의한 표준불확도, $u_{reflected}(T)$

복사온도계의 신호가 실험실 벽과 실험실내 장비들의 복사에 영향을 받는 것을 반사된 주변 복사 효과라 한다. 반사된 주변복사 효과의 표준불확도는 흑체의 복사율 불확도와 실온의 불확도로 구성된다.

$$u_{reflected}(T) = \sqrt{[(1-\epsilon)u(T_{amb})]^2 + [\Delta T_{amb}u(\epsilon)]^2} \times \frac{T^2}{T_{amb}^2} \frac{S(T_{amb})}{S(T)} \left[1 - \exp\left(\frac{-c_2}{\lambda_T T}\right) \right] / \left[1 - \exp\left(\frac{-c_2}{\lambda_T T_{amb}}\right) \right] \quad (6)$$

여기서 ϵ 는 흑체의 복사율이며 $u(\epsilon)$ 는 복사율 표준불확도이다. $S(T_{amb})$ 와 $S(T)$ 는 실험실 온도 T_{amb} 와 흑체의 복사 온도 T 에서의 복사온도계 신호이다. $u(T_{amb})$ 는 실험실 온도의 표준불확도이고 ΔT_{amb} 는 실험실 온도의 편차이다. c_2 는 0.014388 m·K 값을 가진 복사상수이고 $\lambda_T (= A(1+B/AT)^2)$

는 적외선 복사온도계의 극한유효파장이다. TRT2의 경우 -20°C 에서 극한유효파장은 $10.5\ \mu\text{m}$ 이다. 위에서 언급한 바와 같이 ME30의 복사율은 0.9994이며 불확도 $u(\epsilon)$ 는 0.0002^[7]이다. 실험실 온도는 $(23 \pm 2)^{\circ}\text{C}$ 내에서 유지되므로 ΔT_{amb} 를 2 K로 하면 $u_{amb}(T) = \Delta T_{amb} / \sqrt{3} = 2\ \text{K} / \sqrt{3}$ 는 1.2 K이다. 이 값들을 식 (6)에 대입하여 구한 반사된 주변복사효과의 표준불확도는 2 mK 정도로 작아 본 연구에서는 무시하기로 한다.

V. 결 론

기준 적외선 복사온도계로 HEITRONICS사의 TRT2와 비교 교정용 흑체로 HEITRONICS사의 액체 향온조형 온도가 변 흑체인 ME30을 사용하여 0°C 이하 측정용 적외선 복사온도계의 비교 교정장치를 구축하였다.

본 연구에서는 3개의 고정점(Ice (0.01°C), In (156.5985°C), Sn (231.928°C))들과 플랑크형 사쿠마-하토리식을 사용하고, -50°C 에서 TRT2의 내외삽 오차 0.043 K를 TRT2의 복사온도 불확도에 포함시켜 0°C 이하 영역에서의 복사온도 눈금을 확립하였다. $0\sim 232^{\circ}\text{C}$ 영역 밖으로 벗어날수록 복사온도 불확도는 증가하는 경향을 보이는데 0°C 에서 0.16 K였던 확장불확도가 -20°C 에서는 0.21 K로 증가하였다.

ME30 흑체 개구에 공압으로 동작되는 뚜껑을 설치한 후 30초 동안만 뚜껑을 열고 복사온도를 측정함으로써 ME30 내에서 생기는 성예를 방지할 수 있었으며 비교 교정에 소요되는 시간도 반으로 줄일 수 있었다. -20°C 에서 뚜껑 사용에 의한 표준불확도는 0.05 K였으며 복사온도계 비교 교정 장치의 확장 불확도는 0.26 K였다.

ME30 흑체의 옆면에 삽입된 모니터링용 접촉식 온도계 (F250)로 측정한 온도와 TRT2로 측정한 복사 온도와의 차이는 실온에서 멀어질수록 증가하는 경향을 보이는데 -20°C 에서 0.25°C 의 차이가 생겼다. 그러므로 흑체의 외부에 꽂혀있는 접촉식 온도계를 기준 온도계로 사용하려면 기준 복사온도계로 접촉식 온도계의 온도 눈금을 교정해야 한다.

감사의 글

이 연구는 한국표준과학연구원 “기반측정표준확립 및 교정 측정능력 선진화” 과제(17011011)의 지원으로 수행되었습니다.

References

1. Y. S. Yoo, B.-H. Kim, S. D. Lim, S.-N. Park, and S. Park, “Realization of a radiation temperature scale from 0°C to 232°C by a thermal infrared thermometer based on a multiple-fixed-point technique,” *Metrologia* **50**, 409-416 (2013).
2. P. Saunders, J. Fischer, M. Sadli, M. Battuello, C. W. Park, Z. Yuan, H. Yoon, W. Li, E. van der Ham, F. Sakuma, J. Ishii, M. Ballico, G. Machin, N. Fox, J. Hollandt, M. Matveyev, P. Bloembergen, and S. Ugur, “Uncertainty budgets for calibration of radiation thermometers below the silver point,” *Int. J. Thermophys.* **29**, 1066-1083 (2008).
3. Y. S. Yoo, B.-H. Kim, C.-W. Park, and S.-N. Park, “Size-of-source Effect and Self-radiation Effect of an Infrared Radiation Thermometer,” *Korean J. Opt. Photon.* **21**, 133-139 (2010).
4. J. Fischer, “Developments in infrared radiation thermometry,” in *Proc. TEMPMEKO* (Delft, Netherlands, 1999), Vol. 2, pp. 27-34.
5. J. Ishii and A. Ono, “Low-temperature infrared radiation thermometry at NMIJ,” in *Proc. Temperature* (New York, USA, 2003), Vol. 7, pp. 657-662.
6. F. Sakuma and S. Hattori, “Establishing a practical temperature standard by using a narrow-band radiation thermometer with a silicon detector,” in *Proc. Temperature* (New York, USA, 1982), Vol. 5, pp. 421-427.
7. A. V. Prokhorov and L. M. Hanssen, “Effective emissivity of a cylindrical cavity with an inclined bottom: II. Non-isothermal cavity,” *Metrologia* **47**, 33-46 (2010).