

## 적외선 복사온도계의 복사원 크기효과 및 자기복사효과

유용심<sup>†</sup> · 김봉학 · 박철웅 · 박승남

한국표준과학연구원 기술표준본부  
Ⓞ 305-340 대전광역시 유성구 도룡동 1

(2010년 4월 27일 받음, 2010년 6월 21일 수정본 받음, 2010년 6월 23일 게재 확정)

모든 복사온도계는 복사원 크기효과(Size-of-Source Effect, SSE)와 자기복사효과를 가지고 있다. 복사원의 직경에 따른 복사온도계의 검출기 신호세기로 정의된 SSE의 주원인은 회절이기 때문에 파장에 크게 좌우된다. 본 논문에서는 중저온영역에서 복사온도의 전달표준기로 많이 사용되고 있는 TRT2(Transfer Radiation Thermometer 2, HEITRONICS)의 SSE와 자기복사 특성을 측정하였다. 측정된 TRT2의 SSE 값을 사용하여 계산한 결과 흑체의 온도가 300°C 일 때, 개구 직경이 60 mm인 흑체와 10 mm인 흑체의 복사온도 차이가 저온모드(8-14 μm) 에서 3.5°C, 중온모드(3.9 μm)에서 0.5°C인 것을 알 수 있었다. 또한, 복사온도계 몸체 온도가 2.6°C 변화했을 때 자기복사효과 때문에 흑체의 복사온도는 110 mK 다르게 측정되었다.

## Size-of-source Effect and Self-radiation Effect of an Infrared Radiation Thermometer

Yong Shim Yoo<sup>†</sup>, Bong-Hwak Kim, Chul-Woung Park, and Seung-Nam Park

*Division of Physical Metrology, KRISS, Daejeon 305-340, Korea*

(Received April 27, 2010; Revised manuscript June 21, 2010; Accepted June 23, 2010)

All radiation thermometers have a size-of-source effect (SSE) and a self-radiation effect (SRE). The SSE, defined as dependence of the detector signal of a radiation thermometer on the diameter of a source, is critically dependent on the wavelength since diffraction is the main cause. In this paper, we have measured the SSE and the SRE of TRT2 (Transfer Radiation Thermometer 2, HEITRONICS) widely used as a transfer standard in low and middle temperature range. At 300°C, The radiation temperature difference between the 60 mm diameter blackbody and 10 mm diameter blackbody due to the SSE was estimated to be 3.5°C in low temperature mode (8-14 μm) and 0.5°C in middle temperature mode (3.9 μm). In addition, the measured radiation temperature difference of the blackbody due to the SRE was found to be 110 mK when the body temperature change of TRT2 was set at 2.6°C.

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

### I. 서 론

온도가 0 K 이상이면 모든 물체는 온도와 복사율에 의해 결정되는 복사에너지를 방출한다. 이 복사에너지를 이용하면 물체에 접촉하지 않고 온도를 측정할 수 있다. 복사온도측정에는 0.4-25 μm 영역의 가시광선 및 적외선 대역을 이용한다. 복사원의 분광복사휘도(spectral radiance)는 온도에 의해 결정되며, 온도가 높으면 가시광선 영역에 많은 에너지가 분포하며 온도가 낮아지면 적외선 영역으로 분포가 이동한다.

기상관측을 위해 지표면이나 수면의 온도를 측정하기 위해서는 대기 흡수가 없는 8~12 μm 파장대역이 사용되며, 대기를 측정할 때는 대기의 주성분인 탄산가스의 흡수영역인 15~16 μm 파장대역을 사용한다. 우리는 5~8 μm 영역을 사용하며, 유기필름은 고분자 CH기 흡수대인 3.4 또는 6.7 μm 파장대를, 화염의 온도 측정에는 탄산가스의 흡수대인 4.3 μm를 사용한다.

적외선 복사온도계는 적외선 렌즈나 반사경으로 구성된 광학계를 통해 검출기로 입사하는 복사선속과 복사원의 복사

<sup>†</sup>E-mail: ysyoo@kriss.re.kr

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

휘도의 관계를 사용하여 복사온도를 측정한다. 저온의 표적에서 방출된 복사선속은 주위 배경에서 발생한 복사와 적외선 복사온도계 자신이 방출하는 자기복사에 비해 무시할 수 없을 정도로 작을 수 있기 때문에 이들의 영향을 고려해야 한다. 자기복사를 무시하기 위해서는 복사온도계의 온도를 표적의 온도보다 아주 낮은 상태로 만들어 측정하는 것이 가장효과적이기 때문에 미국표준연구소(NIST)에서는 액체질소로 냉각하는 복사온도계를 제작하여 사용하고있다<sup>[1]</sup>. 그러나 이러한 복사온도계는 취급에 어려운 점이 있어 보급형복사온도계는 비냉각방식을 주로 사용하고 있다. 비냉각방식은 주변의 온도변화가 자체복사의 변화를 만들기 때문에 광초퍼를 사용하여 자체복사를 보상하기는 하나 100 mK 오차내의 측정을 위해서는 계통오차의 보정이 필요하다<sup>[2, 3]</sup>.

일반적으로 복사온도계는 복사원의 영상을 대물렌즈의 초점평면에 맺게 하고, 초점평면에 존재하는 미소개구를 통과하는 복사선이 신호에 기여한다. 이 때 미소개구에 대응하는 복사원의 직경이나 반경을 최소표적크기(Minimum Target Size, MTS)라 부른다. 광학계의 시야각(Field-of-View, FOV)에 의해 결정되는 전체 신호 중 이 MTS의 기여는 보통 90~98% 정도이다. 복사원은 그 크기가 MTS보다 작으면 큰 측정오차가 발생함으로 MTS보다 커야 한다. 그러나 복사원의 크기가 MTS보다 크더라도 광학계의 수차, 광로 상에서 산란, 굽은면에서의 다중반사, 회절 등의 현상에 의해 MTS 이상의 위치에서도 신호에 기여하게 된다<sup>[4, 5]</sup>. 수차에 의한 기여는 렌즈의 최적 디자인으로 최소화 할 수 있으며, 산란광은 차광막(baffle)을 사용하거나 2차 결상광학계로 줄일 수 있다. 렌즈를 비롯한 투과성 부품은 무반사 코팅으로 표면 반사율을 1% 이하로 줄일 수 있다. 그러나 대물렌즈의 구경에서 발생하는 회절에 의한 SSE는 피할 수 없다. 물론 1 μm 이하의 파장을 사용하는 고온복사온도계에서는 회절효과는 무시할 수 있으나 측정하는 표적의 온도가 낮을수록 사용하는 파장대역이 길어짐에 따라 회절에 의한 SSE가 커진다. 그러므로 적외선 복사온도계의 SSE는 반드시 보정해 주어야 하기 때문에 최근 복사온도 분야에서 SSE 관련 연구가 활발하다<sup>[4-12]</sup>.

전달형 적외선복사온도계로 널리 사용되고 있는 TRT2의 성능이 우수하여 한국표준과학연구원에서는 기준복사온도계로 사용하고 있다. TRT2는 -50℃에서 1000℃까지 측정할 수 있으며 -50℃에서 300℃까지의 저온모드는 8~14 μm 파장대

역으로 측정하며 150℃에서 1000℃의 중온모드는 3.9 μm 근방의 파장대역으로 측정한다. 3.9 μm 파장에서의 최소표적크기는 5.8 mm 이고, 8~14 μm 영역에서는 7.4 mm 로 알려져 있다. 이 논문에서는 TRT2로 측정한 복사온도의 계통오차를 100 mK 이내로 보정하기 위해서 TRT2의 몸체온도에 대한 자기복사효과와 MTS보다 큰 복사원 직경 10 mm 이상에서 SSE를 측정한 결과를 보고한다.

## II. 적외선 복사온도계의 온도측정 이론

그 영향이 크든 작던 모든 복사 측정은 주위와 상호작용을 동반한다. 특히 낮은 온도의 흑체를 측정할 때 적외선 복사온도계의 검출기 신호에 기여하는 주변의 영향을 같이 고려해야 한다. 그림 1과 같이 복사원인 흑체의 복사온도를 측정하기 위한 장치 구성도를 살펴보면 알 수 있듯이 복사온도계의 검출기는 일차적으로 광학계를 통하여 정해진 시야각 내에서는 흑체와 시야각 바깥에서는 온도계 몸체와 복사열전달이 이루어진다. 시야각 내의 광학부품도 반사율이나 투과율이 100%가 아니기 때문에 자체복사를 통해서 검출기의 신호에 기여하며, 시야각 바깥에서 방출된 복사도 산란이나 회절을 통하여 시야각 내부로 들어가서 검출기에 도달할 수 있다. 검출기 신호에 기여하는 개체들을 다시 세분화하면 흑체는 개구판을 포함한 흑체 자체와 실험실 벽들로 나누어지며, 복사온도계는 검출기 자체와 검출기를 제외한 온도계 몸체 부분으로 나눠 생각할 수 있다. 이들의 영향을 모두 고려하면 복사온도계의 검출기신호는 일반적으로 아래와 같다.

$$S = [S_{BB} + S_{ambient}] + [S_{detector} + S_{body}] \\ = [R\epsilon_{BB}L(T_{BB}) + R(1 - \epsilon_{BB})\epsilon_a L(T_a)] + [-R\epsilon_d L(T_d) + \eta\epsilon_{bd} L(T_{bd})] \quad (1)$$

여기서  $R$ 은 복사휘도감응도로 광학계의 투과율, 광학계 시야각, 증폭기의 이득을 포함한 검출기 시스템의 감응도에 의해 결정된다. 광학계 시야각은 기하학적으로 정의되는 양으로 회절, 산란, 다중반사와 같은 SSE에 영향을 주는 요소를 고려하지 않은 양이다.  $\epsilon$ 은 복사율이며,  $L$ 은 열역학적온도  $T$ 에서의 분광복사휘도이다. 따라서  $R\epsilon_{BB}L(T_{BB})$ 는 흑체 자체의 신호기여분이고,  $R(1 - \epsilon_{BB})\epsilon_a L(T_a)$ 는 실험실 벽들의 복사가 흑체에서 반사되어 검출기에 입사하는 신호기여분이다. 여기서

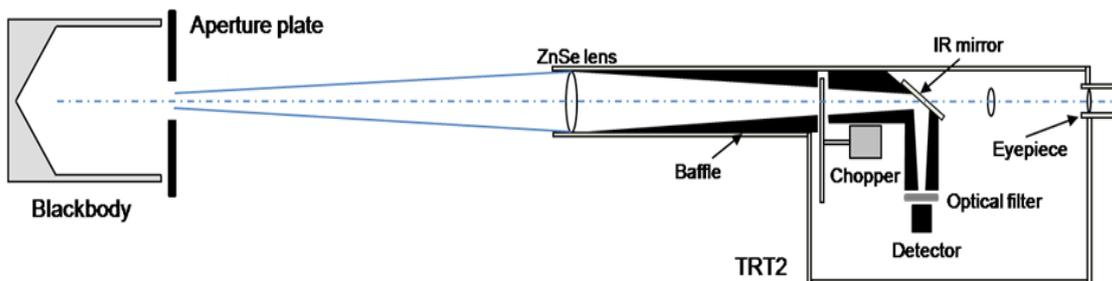


FIG. 1. Schematic diagram of TRT2 with a blackbody and an aperture plate.

$\epsilon_a$ 는 실험실 벽의 복사율로 실험실이 복사온도계보다 충분히 넓고 실험실이 온도평형상태에 있다는 것은 각각의 실험실 벽에서 발생한 복사 또한 다른 벽들과 다중반사와 흡수를 통해서 평형상태에 있게 되는 것이므로 벽표면 물질의 복사율에 관계없이 1로 근사할 수 있다.  $-R\epsilon_d L(T_d)$ 는 검출기의 신호 손실분이고,  $\eta\epsilon_{bd} L(T_{bd})$ 는 검출기를 제외한 복사온도계 내부의 광학계, 차광막 등 복사온도계를 구성하는 몸체에 의한 신호기여분이다.

### 2.1. 자기복사효과

적외선 복사온도계에 사용되는 검출기의 종류는 측정하려는 온도영역에 따라 다르지만, 보통 열전형 볼로미터, 초전검출기 혹은 광도전형의 반도체 검출기가 이용되고 있다. 볼로미터에는 백금이나 써미스터가 사용되지만 저항 변화율이 큰 써미스터가 더 많이 이용되고 있다. 초전 검출기는 TGS(triglycine sulphate)나 티탄산염(PbTiO3)등의 유전체 결정이 사용되며 동작원리는 유전체의 표면을 국부적으로 가열하면 자발분극에 의해 결정체 표면의 온도변화에 비례한 전하가 유도되면 높은 임피던스를 갖는 FET등으로 전류를 측정할 수 있다. 구동전압은 필요없고 실온에서 동작하며, 감도는 써미스터와 같은 정도이다. 반도체 검출기로서는 InSb, HgCdTe 등이 있고 적외선 영역에서 감도가 높다. 실온에서 감도는 앞에 기술한 열전형과 같으나 액체질소(77 K)로 냉각하면 비저항과 전하이동도가 증대하여 S/N비가 100배 이상 증가하며 응답속도도 열전형보다 빠르다는 장점이 있다. 검출기를 냉각시키는 경우나 상온에서 사용하는 경우 모두 저온 측정에서는 복사선속이 미약하기 때문에 검출기 자신과 온도계 몸체의 온도를 측정하여 자기복사 방출을 보상해야 한다.

본 연구에 사용하고 있는 TRT2는 초전 검출기를 사용하고 실온의 변화에 대응하여 자기자신의 복사효과를 최소화하기 위하여 그림 1과 같이 복사율이 낮은 (반사율은 높은) 물질로 도금한 광초퍼(optical chopper)를 사용한다. 이 방법은 광초퍼가 닫혔을 때 즉 흑체의 복사선속을 차단하는 위치에 있을 때 검출기에서 측정되는 신호는 광초퍼가 열렸을 때 복사온도계 자체에서 발생한 신호기여분과 같다는 가정을 바탕으로 하고 있다. 그런데 광학계를 통해 일부 손실되던 복사온도계 자기복사선속들이 광초퍼에 의해서 반사되어 검출기로 입사되기 때문에 광초퍼가 닫혔을 때 검출기가 측정하는 신호는 다음과 같다.

$$S_c = (\xi_c - 1)R\epsilon_d L(T_d) + (\eta_c + \eta)\epsilon_{bd} L(T_{bd}) \quad (2)$$

여기서  $\xi_c R\epsilon_d L(T_d)$ 는 검출기의 복사손실 중 일부가 광초퍼에서 검출기로 반사되어 신호에 기여하는 값이고,  $\eta_c \epsilon_{bd} L(T_{bd})$ 는 몸체의 복사선속 중 일부가 광초퍼에서 반사되어 기여하는 값이다. 그러므로 광초퍼를 사용하더라도 자기복사효과는  $\xi_c$ 와  $\eta_c$ 의 값에 의존한다. 실제로 자기복사효과를 보상하기 위해서는 검출기와 몸체의 온도를 측정하여 이들 간의 상호관계를 표로 만들어 보상하거나 보상회로를 내장하는 방법

을 사용한다<sup>21</sup>. TRT2도 몸체의 온도와 검출기의 온도를 동시에 측정하여 보상하고 있으며, 중온모드(3.9  $\mu\text{m}$ )로 약 800°C의 온도를 측정했을 때, 몸체의 온도가 23°C에서 25°C까지 일 때는 보상이 잘 이루어지지만 25°C 이상에서는 보정된 측정값이 선형적으로 감소하다가 33°C에서 0.1°C 감소하는 경향이 있는 것으로 보고되었다<sup>13</sup>.

### 2.2. 복사원 크기효과 (SSE)

SSE에 대해서는 다수의 논문들이 이론적인 계산과 측정결과를 발표한바 있다. 최근 이들의 결과를 종합한 논문에서 알 수 있듯이 SSE는 다양한 경향을 가지고 있다<sup>6, 7</sup>. SSE를 측정하는 방법으로는 직접측정법<sup>8-11</sup>과 간접측정법이 사용되어 왔으며, 최근에는 적분방법으로도 측정하고 있다<sup>12</sup>. 직접측정법으로 SSE 값을 구하기 위해서는 그림 1과 같이 장치를 구성하고 복사원인 흑체 앞에 구경이 다른 구경판들을 교환하면서 복사신호를 측정하면 된다. 이 방법에 대한 관련식의 유도과정은 참고문헌<sup>8, 11</sup>에 자세히 나와 있으므로 이 논문에서는 간략하게만 언급하기로 한다. 식 (1)에서 복사온도계의 자기복사효과들은 모두 보상되었다고 가정하면 검출기 신호는 분광복사휘도만의 함수로 단순화된다.

$$S(L) = R\epsilon_{BB} L(T_{BB}) \quad (3)$$

지금까지는 흑체의 크기를 고려하지 않고 기술해왔는데 편의를 위하여 식 (3)이 무한대 직경의 흑체를 대상으로 기술한 것이라고 가정하자. 흑체의 크기에 대해서 신호값의 변화를 기술하는 SSE  $\sigma(d)$ 는 분광복사휘도  $L_{BB}$ 는 같으나 직경이 다른 두 흑체의 신호값의 비로 나타내는데 보통 직경이  $d$ 인 흑체의 신호  $S(d, L_{BB})$ 를 무한대 직경 흑체의 신호  $S(\infty, L_{BB})$ 로 나눈 값으로 다음과 같이 정의 된다<sup>8, 11</sup>.

$$\sigma(d) = \frac{S(d, L_{BB})}{S(\infty, L_{BB})} \quad (4)$$

실제 측정에 있어서 무한대 직경의 흑체를 만드는 것은 불가능하며, 또한 유한직경을 가진 흑체 개구 바깥 부분을 절대온도 0 K로 유지하는 것도 불가능하다. 일반적으로 흑체는 유한한 직경을 가진 개구와 구경판이 결합된 형태로 되어 있다. 그러므로 SSE를 직접측정법으로 측정할 때는 흑체 앞에 복사율이 높은 페인트를 칠한 다양한 직경을 가진 구경판을 설치한다.

분광복사휘도가  $L_{BB}$ 이고 직경이  $d$ 인 흑체와 분광복사휘도  $L_{aperture}$ 이고 직경  $d$ 의 개구를 가진 무한대 직경의 구경판으로 이루어진 흑체의 신호  $S(d, L_{BB}, L_{aperture})$ 는 다음과 같이 쓸 수 있다<sup>11</sup>.

$$S(d, L_{BB}, L_{aperture}) = \sigma(d) \cdot S(\infty, L_{BB}) + (1 - \sigma(d)) \cdot S(\infty, L_{aperture}) \quad (5)$$

윗 식의 오른쪽 첫 번째 항은 식(4)로부터 구한 것이며, 두 번째 항은 참고문헌<sup>8</sup>의 식 (7)로부터 구한 항으로  $S(\infty, L_{aperture})$

는 개구가 없는 무한 직경의 평판의 신호값이다. 식 (5)에서 모르는 값이  $\alpha(d)$ 와  $S(\infty, L_{BB})$  두 개이기 때문에 신호를 결정할 수가 없다. 그러므로 참고문헌<sup>[8]</sup>에서는 흑체의 최대직경에 대한 상대적인 SSE값을 구하는 식을 발표했다. 그러나 만약 복사온도계의 신호가 어떤 직경  $d_{sat}$  이상에서부터 포화되거나 또는 신호값의 변화가 무시할 정도로 작다면  $S(\infty, L_{BB})$ 를  $S(d_{sat}, L_{BB})$ 로 대체하여 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$S(d, L_{BB}, L_{aperture}) = \sigma(d) \cdot S(d_{sat}, L_{BB}) + (1 - \sigma(d)) \cdot S(d_{sat}, L_{aperture}) \quad (6)$$

그리고 보유하고 있는 흑체의 최대직경보다  $d_{sat}$ 가 작다면  $S(d_{sat}, L_{BB})$ 는 측정이 가능하므로 식 (6)을 사용하여  $\alpha(d)$  값을 얻을 수 있다.

$$\sigma(d) = \frac{S(d, L_{BB}, L_{aperture}) - S(d_{sat}, L_{aperture})}{S(d_{sat}, L_{BB}) - S(d_{sat}, L_{aperture})} \quad (7)$$

$\alpha(d)$ 은  $S(d_{sat}, L_{aperture})$ 의 함수이므로 어떤 측정된  $S(d_{sat}, L_{aperture})$  값에서만 유효하며, 구경관에서 발생하는 신호가 무시할 정도로 작은 경우  $\alpha(d)$ 는 식 (4)와 같아진다. 60°C의 흑체에서 SSE를 측정할 때 구경관의 온도가 23°C인 경우와 25°C인 경우의  $\alpha(d)$  값의 상대오차는 0.004% 정도여서 무시할 수 있다. 결과적으로 식 (4)와 식 (3)으로부터  $S(d, L_{BB})$ 는 다음과 같이 기술할 수 있다.

$$S(d, L_{BB}) = \sigma(d)S(d_{sat}, L_{BB}) = \sigma(d)R\epsilon_{BB}L(T_{BB}) \quad (8)$$

그러므로 비록 같은 온도의 흑체라도 직경이 다르면 신호세기가 달라지며, 측정되는 복사온도도 달라진다. 흑체의 분광복사휘도 분포를 기술하는 플랑크(Planck) 법칙에 빈(Wein)의 근사를 적용하면 SSE의 편차에 의한 온도오차는 다음과 같다.

$$\Delta T = \frac{\lambda T^2}{c_2} \frac{\Delta \sigma(d)}{\sigma(d)} \quad (9)$$

### III. 복사온도계의 특성 측정

#### 3.1. 자기복사효과 보상특성측정

자기복사효과는 11 μm 영역의 저온모드에서 큰 영향을 받으므로 이 모드에서 측정할 결과만 보고한다. 자기복사보상의 정도를 알기 위해서는 흑체의 온도를 고정하고 실험실의 온도를 변화시켰을 때 TRT2로 측정된 흑체의 복사온도 또는 신호값의 변화를 측정하면 된다. 그러나 실험실 온도를 변화시키는 경우 식 (1)의 두 번째 항이 흑체의 복사율에 따라 측정되는 신호가 변화하기 때문에 실험실의 온도변화로 야기되는 복사휘도의 변화를 무시할 수 있는 만큼 복사율이 높은 흑체를 사용해야 한다. 그러므로 본 연구에서는 복사율이 높은 Mikron사에서 판매하는 M385X 흑체를 사용하였다. 이 흑체는 직경 100 mm 개구를 가지고 -30°C에서 110°C

에서 복사율 0.9997를 가진다. 열전도도가 높은 원추형태의 구리 공동이 탈이온 유체의 항온조에 담겨 있는 구조를 하고 있다. 항온조는 온도센서(RTD)에 의해 안정도는 2 mK로 제어되며 균일도는 5 mK이다. 3 μm 이상에서 평평한 분광복사 특성을 가지도록 내부는 Testor's black paint를 칠하였다<sup>[13]</sup>. Testor's 페인트의 복사율은 4 μm에서 0.9625, 11 μm에서 0.9525였다. 0.9997의 복사율을 가진 흑체를 사용하므로 실온이 2°C 변하는 경우 식 (1)의 주변효과인 두번째 항을 계산해 보면 2 mK의 영향을 주므로 무시할 수는 있으나 실험을 하는 동안 실험실 온도변화는 23°C에서 0.3°C 변화폭을 유지하도록 하였다.

본 연구에서는 실험실의 온도를 변화시키는 대신 복사온도계 전체에 냉각용 구리관을 설치하고 물을 흘리면서 복사온도계 몸체의 온도를 변화시키는 방법을 사용하였다. 냉각수 순환기(JEIOtech)의 온도분해능은 0.1°C이며 몸체의 온도는 몸체에 부착한 두 개의 저항온도계(Pt100) 중 하나를 사용하여 제어하였다. 나머지 한 개의 저항 온도계를 사용하여 몸체의 온도를 측정하였다.

그림 2는 Mikron 흑체의 온도를 40°C로 고정하고 TRT2의 몸체온도가 23°C로 안정화 된후 25.6°C로 상승시켜 안정시킨 후 23°C로 하강 시킬 때 몸체온도와 TRT2로 측정된 복사온도의 값을 보여준다. 몸체온도를 제어하지 않고 실온상태 23°C에 두었을 때 TRT2내의 검출기온도는 30°C 정도, 몸체의 온도는 25°C 정도이나 몸체온도를 23°C로 설정한 경우 검출기온도는 27°C 정도로 떨어진다.

그림 2에 의하면 몸체온도를 높이거나 낮출 때 설정온도로 안정되는데 약 100분이 소요되며 아울러 복사온도도 안정된다. 그러나 몸체온도와 복사온도의 변화 경향은 다르다. 몸체온도가 증가할 때 10분 동안은 복사온도도 따라서 증가하다가 10분 이후에는 반대로 천천히 감소하면서 안정화되고 몸체온도를 증가시킬 때는 반대의 경향을 보인다. 더 자세히 살펴보면 1.5°C/10분 이내의 온도변화에 대해서는 온도보상회로가 제대로 보상하지 못하고 1°C/60분 변화에 대해서는 보상이 이루어지지만 보상속도가 느렸다. 몸체온

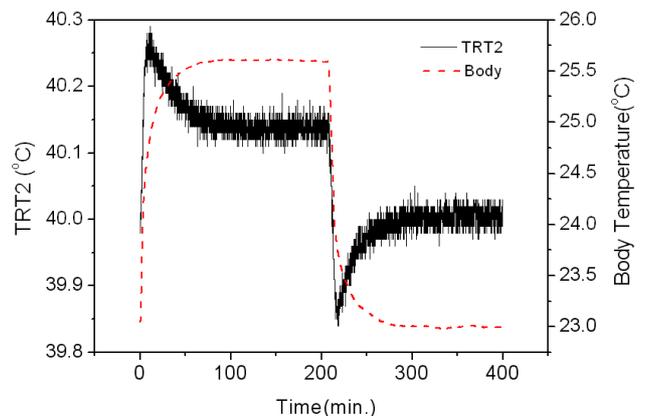


FIG. 2. Radiance temperature of TRT2 affected by its body temperature.

도가 안정된 후의 결과를 비교해보면 몸체온도가 25.6°C 일 때의 복사온도와 23°C 일 때의 복사온도를 보면 110 mK의 차이가 남을 알 수 있다. 복사온도계를 냉각하지 않고 측정하는 경우에도 위의 결과와 유사하게 실온이 23°C에서 0.3°C 변할 때 25 mK의 변화가 측정되었다.

### 3.2. SSE 측정

직접측정법으로 SSE를 측정하려면 공간균일도와 온도안정도가 높은 흑체가 필요하다. 위에서 기술한 M385X 흑체의 최대온도는 90°C 이기 때문에 더 높은 온도에서 SSE를 측정할 때는 ISOTECH사의 Pegasus 모델을 사용하였다. Pegasus는 직경 65 mm 개구를 가지고 30°C에서 550°C까지의 온도 영역에서 안정도와 공간균일도가 ±0.1 K이고 복사율은 0.995 이상이다.

SSE의 측정을 위한 장치구성도는 그림 1과 같으며 참고문헌<sup>[11]</sup>에 나와 있는 방식대로 구경이 다른 구경판들을 교환하면서 복사신호를 측정하면 된다. 측정과정을 간단히 언급하면 실험실의 온도는 23°C를 중심으로 0.3°C 폭을 가지고 제어하고 구경판 홀더에 접촉식온도계를 붙여 놓고 흑체 복사에 의해 온도가 상승하지 않도록 실험하는 동안 23°C를 유지하였다. 모든 데이터는 3초 응답속도로 설정한 상태에서 수집하였다. 각 직경에 대한 데이터는 구경판을 흑체의 중심에 놓은 다음 5초 후부터 10개의 데이터를 취하여 평균하였으며, 15개의 구경판을 직경 크기 순으로 데이터를 수집하였다. 데이터의 신뢰성을 높이기 위해 모든 구경판에 대해서 10 세트를 측정하였다.

저온모드 (8-14 μm)의 측정결과는 참고문헌<sup>[11]</sup>에서 이미 발표하였다. 10°C에서 300°C까지 여러 온도에서 TRT2의 SSE를 측정한 결과를 보면 흑체의 온도가 60°C 이상이면 SSE값은 온도에 상관없이 있음을 알 수 있었다. 여러 온도에서 측정한 결과를 평균한 값은 그림 3과 같다.

그림 3은 중온모드(3.9 μm)에서 4 점의 흑체의 온도, 30°C, 350°C, 400°C, 450°C에서 측정한 TRT2의 SSE값이다. 10 mm에서 60 mm까지 측정한 결과 저온모드와 마찬가지로

로 30 mm까지는 회절효과에 의해 SSE값이 증가하는 경향을 보이다가 30 mm 이상에서 또 다른 증가의 경향이 관찰되었다. 이것은 복사온도계 광학계의 다중반사에 의한 것으로 사료된다. 저온모드에서 SSE를 측정할 때와 마찬가지로 온도가 낮은 경우 즉, 350°C 이하에서는 TRT2 신호에 잡음이 보이나 350°C 이상의 온도에서는 측정한 SSE 값들에 거의 차이가 없으며 중온모드에서 23°C 인 구경판에 의한 신호는 350°C 흑체 신호의 1/1000 정도로 작아 식 (6)은 식 (2)로 근사가 가능하다. 저온모드에 비해 SSE의 값이 작은 것은 파장이 짧아질수록 회절효과가 작아지기 때문이다.

TRT2는 직경 60 mm에서 포화 현상이 보이며 SSE의 값이 포화되고 있는지 또는 흑체의 직경 이상에서는 어떤 영향을 미치는지를 보기 위해 흑체의 온도를 30°C로 고정하고 SSE를 측정하기 위해 사용했던 구경판 홀더의 온도를 20°C에서 30°C로 변화시켜보았을 때 그 변화는 10 mK 이하로 매우 작았다. 이 값은 홀더의 온도변화가 대류에 의해 흑체 입구의 온도 변화를 야기시켜 생긴 변화일 가능성이 높다.

SSE를 측정하기 위해 사용한 구경판 홀더의 구경은 120 mm로 흑체의 구경인 107 mm보다 크며 MIKRON 흑체 전면에서 20 mm 떨어진 위치에 설치되었고 홀더 자체의 온도는 23°C로 제어되고 있어 SSE를 측정하는 동안 흑체의 온도변화에 주는 영향은 무시할 정도였다. TRT2가 포화되는 직경이 60 mm라는 것은 저온모드에서 측정한 참고문헌<sup>[11]</sup>의 SSE 값으로부터 알 수 있다. 그러므로 비록 중온모드에서 측정한 결과에서는 흑체의 직경이 60 mm 이상은 측정할 수 없었지만 측정된 영역에서 같은 경향을 보이고 있으므로 60 mm에서 포화된다고 가정하였다. 즉 60 mm를  $d_{sat}$ 로 놓고 규격화하였으며 그 결과가 그림 3과 같다. 그림 3에서처럼 SSE값이 직경에 따라 변한다는 것은 같은 온도의 흑체라도 직경에 따라 측정되는 신호값에 차이가 발생한다는 것이다. 그러므로 60 mm 직경의 흑체로 교정한 복사온도계가 다른 직경의 흑체를 측정하는 경우 실제온도와 다른 온도로 측정할 것이다. 이때 발생하는 온도오차는 식 (9)에서  $\alpha(d_{sat})=1$ 로 놓고 다음과 같이 계산할 수 있다.

$$\Delta T(d) = \frac{\lambda T^2}{C_2} (\sigma(d) - 1) \tag{10}$$

그림 4는 저온모드에서 참고문헌<sup>[11]</sup>의 SSE값을 사용하여 식 (10)으로 SSE에 의해 발생하는 온도 측정오차를 계산한 값이며, 그림 5는 중온모드에 대하여 측정한 그림 3의 SSE 값을 가지고 계산한 결과이다. 이들 결과는 저온모드의 SSE와 비슷한 경향을 보이고 있으며 흑체온도가 증가할수록 오차는 점점 더 커진다. 저온모드의 경우 60 mm 직경의 흑체와 10 mm 직경의 흑체를 비교해 보면 10°C에서도 0.9°C 차이를 보이며 300°C에서 3.5°C의 차이를 보인다. 그러나 중온모드로 측정하는 경우는 300°C에서는 0.5°C로 그 차이가 1/7로 줄어들었으며 1100°C에서 3.2°C의 차이를 보인다.

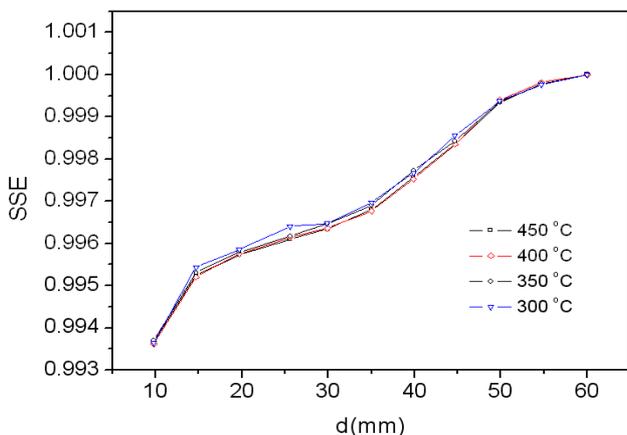


FIG. 3. Measured SSE of the TRT2 in the middle temperature mode.

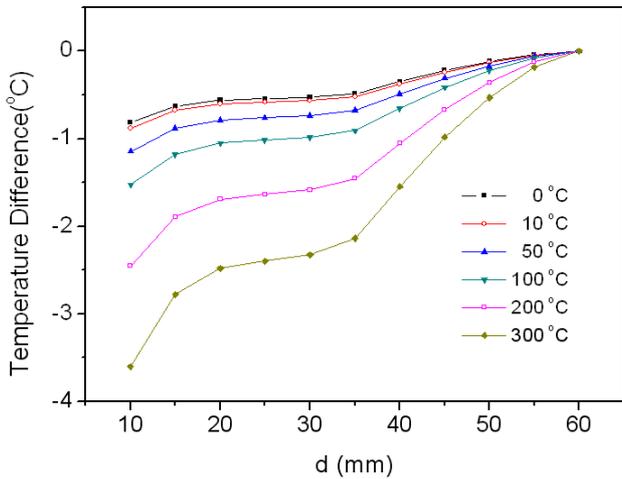


FIG. 4. Radiance temperature difference due to the SSE of the TRT2 in the low temperature mode.

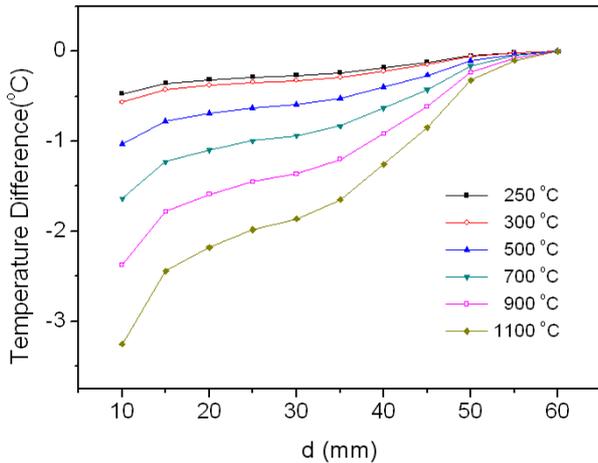


FIG. 5. Radiance temperature difference due to the SSE of the TRT2 in the middle temperature mode.

#### IV. 결 론

적외선 복사온도계로 측정대상의 복사온도를 정확히 측정하기 위해서는 측정대상에서 발생하는 복사 이외에 복사 온도계 자체의 복사에 의한 효과와 회절에 의한 복사원 크기효과는 그 영향의 정도를 측정해서 보정해 주어야 한다.

전달형 적외선 복사온도계로 성능이 우수하여 널리 사용되는 TRT2의 경우에는 복사온도계 몸체의 온도변화에 의한 복사온도의 변화를 광초퍼를 사용하여 보정하고 있으나, 몸체온도가 25.6°C 일 때와 23°C 일 때, 복사온도는 110 mK의 차이를 보인다. 따라서, TRT2를 사용하여 110 mK 이하로 온도를 정확히 측정하기 위해서는 몸체온도를 실온 근처인 23°C로 제어해야 함을 알았다.

적외선 복사온도계로 저온의 복사원을 측정할 때 가장 큰 오차를 발생하는 SSE를 측정해 본 결과 3.9 μm을 사용하는 TRT2의 중온모드보다 저온모드(8-14 μm)에서 더 큰 SSE값

이 측정되는 것으로 보아 알려진 바와 같이 회절효과가 큰 원인임을 알 수 있었다. 또한, 300°C이며 직경이 10 mm인 흑체는 직경이 60 mm인 흑체에 비해 저온모드에서 복사온도가 3.5°C 낮게 측정되며, 중온모드에서는 0.5°C 낮게 측정됨을 알 수 있었다.

본 논문에서 사용한 방법으로 적외선 복사온도계의 자기복사효과와 복사원 크기효과를 측정한다면 100 mK 이하로 복사온도의 계통오차를 보상할 수 있을 것이다.

#### References

1. J. P. Rice and B. C. Johnson, "The NIST EOS thermal-infrared transfer radiometer," *Metrologia* **35**, 505-509 (1998).
2. F. Girard and T. Ricolfi, "Simple approach for temperature compensation in a transfer standard radiation thermometer," in *Proc. TEMPMEKO* (Berlin, Germany, Jun. 2001), vol. 2, pp. 807-810.
3. O. Struband and C. Staniewicz, "Transfer radiation thermometer covering the temperature range of -50°C to 1000°C," in *Proc. TEMPMEKO* (Berlin, Germany, Jun. 2001), vol. 2, pp. 811-816.
4. H. W. Yoon, D. W. Allen, and R. D. Saunders, "Methods to reduce the size-of-source effect in radiometers," *Metrologia* **42**, 89-96 (2005).
5. B. Gutschwager, J. Hollandt, T. Jankowski, and R. Gartner, "A vacuum infrared standard radiation thermometer at the PTB," *Int. J. Thermophys* **29**, 330-340 (2008).
6. P. Blombergen, "On the uncertainty in the correction for the size-of-source effect," *Metrologia* **46**, 544-553 (2009).
7. P. Blombergen, "Analytical representations of the size-of-source effect," *Metrologia* **46**, 534-543 (2009).
8. P. Bloembergen, "On the correction for the size-of-source effect corrupted by background radiation," in *Proc. TEMPMEKO* (Delft, Netherlands, Jun. 1999), vol. 2, pp. 607-612.
9. G. Machin and M. Ibrahim, "A size of source effect and temperature uncertainty: II Low temperature systems," in *Proc. TEMPMEKO* (Delft, Netherlands, Jun. 1999), vol. 2, pp. 687-692.
10. I. Pusnik, G. Grgic, and J. Drnovsek, "System for the determination of the size-of-source effect of radiation thermometers with the direct reading of temperature," *Meas. Sci. Technol.* **17**, 1330-1336 (2006).
11. Y. S. Yoo, B.-H. Kim, C.-W. Park, D.-H. Lee, and S.-N. Park, "Size of source effect of a transfer reference thermometer suitable for the artefact of international comparisons near the room temperature," in *Proc. IMEKO* (Lisbon, Portugal, 2009), pp. 1493-1496.
12. P. Saunders and H. Edgar, "On the characterization and correction of the size-of-source effect in radiation thermometers," *Metrologia* **46**, 62-74 (2009).
13. J. B. Fowler, "A third generation water bath based blackbody source," *J. Res. Natl. Stand. Technol.* **100**, 591-599 (1995).