

## 적외선 열화상에서의 측정에 따른 시스템 오차 개요

### Reviews in Systematic Errors According to the Measurement Method in Infrared Thermography

김원태 (적외선열화상분과 위원장, 공주대학교)

E-mail: kwt@kongju.ac.kr

#### 1. 서 론

‘측정 오차’의 개념은 측정방법 정확성을 평가함에 있어 기본이 되는 중요한 것이다. 특히 측정온도의 최종값이 적외선 카메라 측정경로의 (수학적 측정방법에 근거한) 복잡한 프로세싱 알고리즘의 출력값으로 얻어지므로, 오차의 평가는 적외선 열화상 측정에서 필요하다. 올바른 정확도의 평가사정을 위해, 적용된 모델에 의해 도입되는 방법에서 오차들을 평가하는 것이 필요하다.

본고에서 고려하는 적외선 시스템 측정 오차를 정의하면 다음과 같다. 첫째, 적외선 열화상에서의 측정 모델의 절대 오차이다. 이는 어레이 디텍터의 단일요소(픽셀)에 대한 카메라 측정경로 알고리즘에 의해 계산되는  $T_C$ 값과 이 요소에 의해 사상되는(대표되는) 표면적의 실제온도  $T_R$ 간의 차이이다[1].

$$\Delta T_{ab} = T_C - T_R \quad (1)$$

여기에서,  $T_C$ 는 한 열상(thermogram)의 단일 픽셀에 대해 계산된 온도값이고  $T_R$ 은 실제의 온도값이다. 단일 픽셀에 의해 사상되는 표면적의 온도는 일정한 것으로 가정한다. 두번째는 적외선 열화상에서 측정모델의 상대 오차이다. 이는 실제온도  $T_R$ 에 대한 절대오차  $\Delta T_{ab}$ 의 비이다

$$\delta T_{ab} = \frac{\Delta T_{ab}}{T_R} \quad (2)$$

아쉽게도 상기 정의에서 실제값인  $T_R$ 은 미지의 값이다. 따라서, 본고에서는 카메라 프로세싱 알고리즘의 시뮬레이션 동안에 앞서 할당되는 참값으로 대체하도록 한다. 반복적인 실험에서 발생하는 측정 오차의 분석에서 시스템 및 랜덤 오차가 생기게 된다. 시스템 오차(또는 편향; bias)는 동일한 조건하에서 수행된 일정 수량의 무한 측정치들에 대해 계산된 평균값이다. 랜덤 오차는 개개의 측정 결과와 앞서 평균값간의 차이로서 정의된다. 시스템 오차와 랜덤 오차로 대별되는 측정 오차에 있어서, 적외선 열화상에서의 측정인 경우에는 시스템 상호작용이 온도평가의 정확도에 매우 영향을 미친다. 그러므로 본고에서는 적외선 열화상 측정에서 시스템 상호작용의 요인을 살펴보도록 한다.

#### 2. 적외선 열화상 측정에서의 시스템 오차

적외선 카메라로의 온도측정 오차는 다음과 같이 분류될 수 있다[2].

- 방법의 오차
- 보정(calibration) 오차
- 전자경로 오차

실제 조건하에서, 방법에서의 오차는 아래 이유들 또는 측정 동안에 생기는 상호작용으로부터 일어난다.

- 물체 방사율,  $\epsilon_{ob}$ 의 부정확한 평가 그리고/또는  $T_{atm}$ ,  $T_o$ ,  $\omega$ ,  $d$ 의 부정확한 평가
- 카메라 디텍터에 다다른 주변 - 물체로부터 직접 그리고/또는 반사되어지는 - 복사의 영향
- 대기 투과율 및 대기 방사의 부정확한 평가
- 디텍터 노이즈

2.1. 방사율 측정 오차

하나의 적외선 열상 내에서 영상화 되는 물체들의 방사율의 수가 많아질수록 방사율 평가 오차는 매우 영향을 크게 받는다. 그럼에도 불구하고 현대 적외선 시스템에서는 오프라인 분석에서만 열상의 정의된 면적에 대해 방사율을 분리하여 규정하는 것이 가능하다. 이로부터 관찰 표면의 이질성 영향을 축소한다. 물체 방사율은 파장( $\lambda$ ), 온도( $T$ ), 재료, 표면의 상태, 관찰의 방향, 편광 및 - 초고속 열과장에서의 - 정시(on time)에 의존한다. 따라서 부정확한 방사 평가의 영향에 대한 완전한 제거는 불가능해 보인다. 그러나 이러한 영향은 표면을 검정으로 칠하고 축축하게 하거나 가능하다면 균일한 가열에 의해 방사율 지도를 그림으로서 상당히 줄일 수 있다. 이러한 해법의 적용은 실험실 조건하에서는 용이하지만 산업 조건하에서는 일반적으로 불가능하다. 그러므로 부정확한 방사율에 기인한 측정 오차 요소의 올바른 평가는 매우 중요하다. 이는 물체 방사율이 카메라 측정경로 알고리즘에서 입력량 중의 하나이기 때문에 더욱 그러하다.

대기에 의해 방사되어지는 복사의 영향은  $\epsilon_{ob}$ 가 줄어들 때 커진다. 이 영향은  $T_o \geq T_{ob}$ 일 때 보다 심각하다. 태양의 복사에 기인한 추가 오차가 외부에서 시행되는 적외선 열화상 측정에서 나타난다. 태양은 고온에서 흑체로 인식되며 물체에 입사하는 태양의 복사는 대기에 의해 필터되고 하루, 시간 및 대기조건에 따라 다르다. 적외선 열화상에서 정확도 측면에서 태양의 복사에 대한 영향을 연구하는 것은 쉽지가 않다. 보통 이러한 복사는  $\epsilon_{ob} \approx 1$ 인 고온 물체의 정성적인 연구를 제외하고는 측정이 불가능하다. 관찰 물체가 하늘의 복사, 건물 복사 및 지상 복사에너지로 반사할 때 이러한 상황은 훨씬 더욱 복잡해진다.

대기 복사의 영향을 한정짓는 것은 주변 온도를 카메라의 마이크로컨트롤러에 입력함으로써 얻어질 수 있다. 아쉽게도 문제는 이 온도를 신뢰할 만한 방법으로 결정하는 것이다. 관찰되는 물체의 이웃이 물체에 근접하거나 좀 더 떨어져서 놓여있는 여러 방사율 값들의 성분들을 망라하기 때문에 어렵다. 따라서 외부 복사의 영향을 줄이는 개방형 측정 챔버내에 물체를 놓아 검사를 함으로써 대기 복사의 영향을 줄이는 방법들이 연구되고 있다. 여기에서 챔버의 내부 벽은 방사율이 1에 근접하도록 코팅을 하였고 외부 방사의 영향을 줄이도록 고안되어 있다. 하지만 이러한 방법은 실험실 조건하에서 연구되도록 고안되어 있어서 물체의 크기가 작은 경우에만 가능하다. 일반적으로, 주변 온도는 미지의 값이기 때문에 실제적인 측정에서는 이 값은 대기의 온도와 같은 것으로 가정한다.

대기 자체의 복사의 영향은 카메라와 물체간의 거리( $d$ )가 수 미터를 벗어나지 않을 때 무시할 만하다. 일정 거리에 있는 물체들의 온도를 측정할 때, 대기 자체의 복사는 고려되어야만 한다. 이는 특히 입력값  $\epsilon_{ob}$ ,  $T_o$ ,  $T_{atm}$ ,  $\omega$ 와  $d$  값이 서로 다를 때 그리고 추가로 관찰 물체가 낮은 방사율일 때 매우 중요하다.

2.2. 적외선 카메라 보정 오차

두 번째 오차 원인은 적외선 카메라를 보정하는데서 일어난다. 보정 과정에 기인한 온도 측정 오차는 대개 다음으로부터 생긴다.

- 온도가 있는 자체 복사의 보정, 측정 및 변이 동안 카메라 광학 요소들의 자체 복사와 필터들에서의 차이
- 보정 및 측정 동안 카메라와 대상체간의 서로 다른 거리
- 흑체와 카메라의 한정된 온도 분해능으로부터 반영되는 대기 복사의 영향을 무시하는, 보정 동안 대상체 방사율의 애매한 결정들
- 참조 표준의 한정된 정확도, 보정 점들과 보간 오차의 한정된 수

보정 과정은 체계적인 상호작용들의 필수적인 근원이므로 이에 대한 단계와 이론적 토대를 기

술해보도록 한다. 디텍터의 자동보정을 제외하고는 최종 제품으로서 카메라 전체가 제조자에 의해 보정 실험실로 보내지고 여기에서 여러 보정 단계를 거친다. 보정 인증서는 이러한 과정을 통과하는 각 부품에 부착된다. 이 인증서에 다음의 것들을 포함한다.

- 실험실의 이름
- 카메라 시리얼 번호
- 보정 동안에 사용된 카메라 요소(예: 광학기, 필터들)
- 보정 과정을 정의하는 표준
- 인증서 유효 기간
- (인증시험을 수행하고 승인한 사람) 관련자의 날자 및 서명

각 측정 카메라에 대한 기술적인 자료는  $\pm 2\text{ }^\circ\text{C}$  또는  $\pm 2\%$  범위와 같은 각기의 측정 정확도를 명시한다. 이러한 매개변수는 보정 동안 엄격히 명시된 실험실 조건하의 정확도로서 해석되어야 한다. 실외에서와 같은 실제적인 측정상태에서 정확도는 상당히 악화된다. 적외선 시스템의 보정은 기술적으로 흑체를 사용하여 실행된다. 여기서, 보정되는 장치의 동작범위 전체에 걸쳐 흑체의 방사율( $\epsilon_{ob} \approx 1$ )이 적용되어진다. 카메라와 흑체간의 거리가 짧은 경우에는 대기투과율 및 대상체 방사율을 모두 1로 가정한다. 실험실 보정은 흑체에 의거해 셋팅된 온도  $T_i$ 에 상응하는 신호인 적외선 복사 모델의 다음 식(3)으로부터 디텍터 신호( $s_i$ )를 측정하는 것으로 시행된다.

$$s_i = \frac{R}{\exp(B/T_i) - F} \tag{3}$$

$$T_i = \frac{B}{\ln\left(\frac{R}{s_i + F}\right)}, K \tag{4}$$

여기서  $R, B, F$ 는 보정점들에 대한 최적함수를 얻기 위해 결정되는 상수들이다.

식(4)에 근거해서, 적외선 카메라는 디텍터 신호( $s_i$ )를 명시된 복사광장 범위  $[\lambda_1, \lambda_2]$ 에 대한 온도( $T_i$ )로 변환한다. 이론적인 관점으로부터, 식(3)의 특성은 Planck법칙에 따라 디텍터에 입사하는 흑체 복사량  $M(\lambda, T)$ 와 카메라의 상대 분광 민감

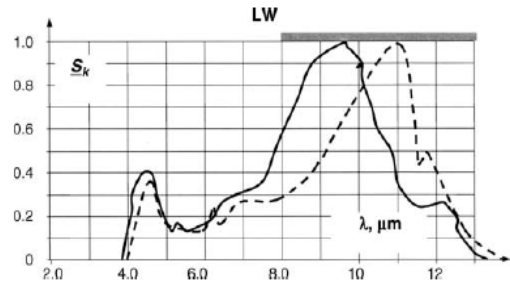


Fig. 1 Characteristics of relative spectral sensitivity of LW infrared camera

도를 기술하는 함수인  $S_k(\lambda)$ 의 곱을 적분한 근사값에 따른다. Fig. 1은 적외선 장파 카메라의 상대 분광 민감도의 특성을 나타낸 것이다[3,4]. 이 곱은 카메라 동작 간격인  $\lambda_1$ - $\lambda_2$ 에 걸쳐 흑체의 명시된 온도  $T_i$ 에 대해 적분된다.

$$s(T_i) = C \cdot \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} S_k(\lambda) \frac{c_1}{\lambda^5 \left[ \exp\left(\frac{c_2}{\lambda T_i}\right) - 1 \right]} d\lambda, K \tag{5}$$

$$C_1 = 2\pi hc_0^2 = 3.742 \times 10^8 W \cdot \mu m^4 / m^2$$

$$C_2 = hc_0 / K = 1.439 \times 10^4 \mu m \times K \text{이다.}$$

여기서  $T$ 는 표면의 절대온도이다.  $\lambda$ 는 방사된 복사의 파장이며  $K$ 는  $1.3805 \times 10^{-23} J/K$ 로서 Boltzmann의 상수이다.

$S_k(\lambda)$ 는 디텍터의 정규화된 검출능(분광 민감도)의 함수  $D^*(\lambda)$ 와 카메라 광학 투과율의 분광 특성에 의해 주로 결정된다. 일반적으로,  $R, B, F$ 의 값들은 각 카메라 단위별로, 각 측정 범위별로 다르다.

3 ~ 5  $\mu m$  단파(short wave; SW) 카메라 및 8 ~ 14  $\mu m$  장파 카메라의 측정경로에 대한 전형적인 정적특성,  $s=f(T)$ ,가 Fig. 2에 도시되어 있다. 상수  $R, B, F$ 는 카메라의 마이크로컨트롤러의 저장장치에 저장되어 디지털화된 디텍터 신호( $s$ ), 식 (6)의 측정 모델( $T_{ob}$ )과 일련의 값들인 방사율( $\epsilon_{ob}$ ), 대기온도( $T_{atm}$ ), 주변온도( $T_o$ ), 카메라와 대상체간 거리( $d$ ), 대기 상대습도( $\omega\%$ )에 근거하여 측정 온도( $T_i$ )를 매번 계산한다. 식(6)은 다섯개의 주요 변수들의 함수로서 정의된 적외선 카메라 측정모델을 정의한 식이다.

$$T_{ob} = f(\epsilon_{ob}, T_{atm}, T_o, \omega, d) \quad (6)$$

보정 과정은 Machine et al. [5] 등의 문헌에 상세히 기술되어 있다.

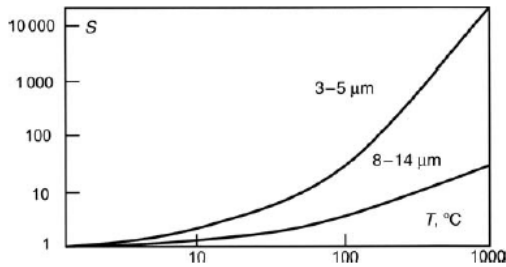


Fig. 2 Static characteristics of measured path of SW and LW in infrared camera

### 2.3. 적외선 장치의 계통 오차

세번째 시스템 오차의 원인은 카메라의 전기적 경로이다. 이 오차는 다음의 비관적인 현상으로부터 야기된다.

- 디텍터 잡음
- (냉각식 어레이를 가지고 있는 경우) 냉각시스템의 불안정성
- pre-amplifier와 (또는) 타 전자시스템의 게인 요동값
- 디텍터와 또는 타 전자 구성요소의 제한된 대역폭(bandwidth)
- 제한된 해상도와 A/D 컨버터의 비선형성

전자 경로에서의 오차는 -15 ~ 40 °C의 주변온도에서 ±1% 이내이다. 보통인 상황에서, 방법상의 오차는 십미어 수 %에 이르기기도 한다. 이 오차들이 적외선 카메라로 온도장을 비접촉으로 측정할 때 생기는 주요 오차들이 된다.

따라서 적외선 측정 방법은 균등질의 대상체 즉 거의 같은 방사율을 갖는 대상체에 대해 온도 분포를 원격으로 계측하는데 유리하다[6]. 최근에는 대부분의 적외선 카메라의 해상도가 0.05 ~ 0.1 K에 이르지만, 영상화된 온도는 여러 요소들에 의해 편향되어 있다. 그러므로, 각각의 측정결과를 조심스럽게 분석되어야 하고 측정자는 적

외선 열화상에서의 측정해석 분야에 많은 경험이 있어야 한다.

### 3. 결론 및 제언

적외선 열화상에서 온도 측정은 정확하지는 않으며 잘 알려진 흔히 사용되는 광학 고온계(pyrometer)와 유사하게 부정확성을 나타내고 있다. 열전기, 저항, 온도계를 사용하는 접촉 방법 때로는 보다 더 좋은 정확성을 제공하기도 한다. 그러나 접촉방식에 의한 온도측정을 적용할 수 없는 경우가 있다. 적외선 열화상 방법의 부정확성은 눈에 두드러지게 드러날 수 있다. 특히 재료들의 서로 다른 방사율로 구성된 비동질의 대상체의 온도장을 측정하는 동안에 더욱 그러하다.

이론 및 실험을 포함한 방법상에서의 오차를 고려하는 것은 적외선 열화상에서 측정의 정확도를 평가하는 주요 요소이므로, 서로 다른 측정 조건하에서 이러한 오차들을 광범위하게 연구하는 것이 중요할 것으로 사료된다.

### 후 기

이 원고는 2011년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임 (No. 2011-0015969).

### 참고문헌

- [1] W. Minkina and S. Dudzik, "Simulation analysis of uncertainty of infrared camera measurement and processing path," *Measurement*, Vol. 39, No. 8, pp. 758-763 (2006)
- [2] D. P. DeWitt, "Inferring temperature from optical radiation measurements," *Proceedings of the SPIE*, Vol. 446, pp. 226-233 (1983)
- [3] H. Kaplan, "Infrared spectral bands - the importance of color in the infrared," *Proceedings of InfraMation Conference*, Vol. 1, Ed. G. Orlove, 24-27 September, Orlando, FL, (2000)
- [4] F. Kreith, "The CRC Handbook of Thermal Engineering," CRC Press, Boca Raton, FL., pp. 126-246, (2000)

- [5] G. Machin, R. Simpson and M. Brousely. "Calibration and validation of thermal imagers," *Proceedings of Quantitative Infrared Thermography (QIRT'2008)*, Ed. B. Wiecek, 2-5 July, Krakow, pp. 555-562 (2008)
- [6] 김원태, "적외선열화상의 원리 및 기기 구성", *비파괴검사학회지*, Vol. 31, No. 2, pp. 181-188 (2011)