

## 적외선열화상카메라의 응답 및 노이즈 특성 평가

### Responsivity and Noise Evaluation of Infrared Thermal Imaging Camera

김동익\*, 김기석\*, 김건희\*, 장기수\*†

Dong-Ik Kim\*, Ghiseok Kim\*, Geon-Hee Kim\* and Ki Soo Chang\*†

**초 록** 본 논문에서는 비접촉 비파괴검사에 사용되는 적외선열화상카메라의 응답 및 노이즈 특성을 평가할 수 있는 방법을 제시하고 있으며 차동모드흑체의 적외선 표적과 그 주변의 온도차  $\Delta T$ 를 이용하여 상용 적외선열화상카메라의 신호전달함수 및 온도분해능을 구하고 그 결과를 카메라 사양과 비교함으로써 본 평가 방법의 적합성을 검증하였다. 또한 비균일성 보정의 적용 유무로부터 나타나는 온도분해능의 차이 0.01 K을 통하여 적외선열화상카메라의 성능평가에 있어서 비균일성 보정이 필수적인 과정임을 확인하였다.

**주요용어:** 적외선열화상카메라, 차동모드흑체, 신호전달함수, 온도분해능, 비균일성 보정

**Abstract** In this paper, the evaluation method for the responsivity and noise characteristics of an infrared thermal imaging camera was presented. Signal transfer function and noise equivalent temperature difference of the infrared thermal imaging camera were obtained by using a differential mode blackbody that is able to control the temperature difference  $\Delta T$  between an infrared target and its background. And we verified the suitability of our evaluation method through comparison between the found noise equivalent temperature difference and the specification of the camera. In addition, the difference of 0.01 K of the two noise equivalent temperature differences calculated from with and without nonuniformity correction suggests that the nonuniformity correction is essential process for the evaluation of the infrared thermal imaging camera.

**Keywords:** Infrared Thermal Imaging Camera, Differential Mode Blackbody, Signal Transfer Function, Noise Equivalent Temperature Difference, Nonuniformity Correction

#### 1. 서 론

적외선열화상카메라는 군사적 목적[1], 산불 감시[2] 및 비접촉 비파괴검사[3] 등 여러 분야에 걸쳐 광범위하게 사용되고 있다. 그중에서 비접촉 비파괴검사는 태양전지[4], 반도체 집적회로[5] 등 위상잠금 적외선열화상기술(lock-in thermography)을 이용한 작은 크기의 내부 결함검사에 서부터 항공기[6]를 비롯한 핵연료 용기 제작[7] 등 큰 크기의 결함검사에 적용되는 예를 찾아볼 수 있다. 이렇게 다양한 분야에 사용되고 있는 적외선열화상카메라의 성능 및 특성을 정량적으

로 평가할 수 있는 방법으로는 카메라의 응답 및 노이즈 특성을 평가하는 신호전달함수(signal transfer function, SiTF) 및 온도분해능(noise equivalent temperature difference, NETD) 방법, 광학적 특성을 평가하기 위해 변조전달함수(modulation transfer function, MTF)를 구하는 방법과 열화상 특성을 평가할 수 있는 최소온도분해능(minimum resolvable temperature difference, MRTD) [8]로 나눌 수 있다.

본 연구에서는 적외선열화상카메라의 특성평가 방법 중에서 이미지 센서의 응답 및 노이즈 특성을 평가할 수 있는 신호전달함수와 온도분해능에 관해 논의하고자 한다.

[접수일: 2013. 6. 24, 수정일: 2013. 8. 19, 게재확정일: 2013. 8. 21] 한국기초과학지원연구원 첨단장비개발사업단, †Corresponding Author: Center for Analytical Instrumentation Development, Korea Basic Science Institute, Daejeon 305-806, Korea (E-mail: ksc@kbsi.re.kr)

2. 실험

적외선열화상카메라의 응답 및 노이즈 특성을 평가하기 위해 다음과 같은 실험을 구성하였다.

2.1. 시험대상

평가할 적외선열화상카메라는 InfraTec사의 VarioCam<sup>®</sup>hr 모델로서 microbolometer 타입의 비냉각 방식의 적외선열화상카메라로 주요 사양은 Table 1에서 보여주고 있다. 우리가 주의 깊게 살펴보아야 할 수치는 0.03 K부터 0.05 K 인데 이것이 우리가 평가해야할 온도분해능을 나타낸다. 현재 시판되는 상용 적외선열화상카메라를 선택한 이유는 카메라가 제공하고 있는 온도분해능을 본 연구를 통하여 구한 온도분해능과 비교해 봄으로써 연구 방법의 적합성을 검증해보기 위함이며 만일 적합하다면 현재 국내에서 개발 중인 비냉각 방식의 초소형 열화상이미지센서 모듈의 정량적인 특성평가에 본 방법을 적용할 예정이다.

2.2. 차동모드흑체

차동모드흑체(differential mode blackbody)는 일반적인 흑체와는 다르게 적외선 표적과 그 주변의 온도차를 제어할 수 있어 신호전달함수를 구하는데 사용된다. 본 연구에 사용된 차동온도 제어범위는 -20℃에서 100℃까지이고 0.001℃까지 제어가 가능하며, 온도정확도는 ±0.006℃이다. 흑체 전면에 부착할 표적은 그 용도에 따라 여러

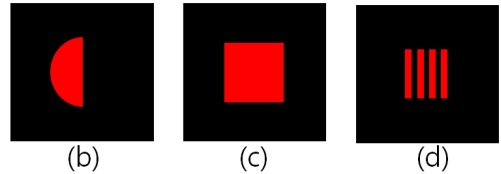
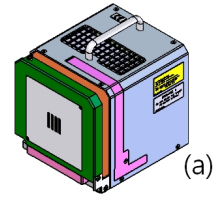


Fig. 1 Differential mode blackbody and infrared target (a) differential mode blackbody, (b) half-moon target, (c) square target, (d) 4-bar target

가지 크기와 모양을 가지는데 이것은 Fig. 1에서 (a) 차동모드흑체와 함께 보여주고 있다. Fig. 1의 (b) 반달 모양과 (c) 정사각형 모양을 가진 표적은 신호전달함수와 온도분해능을 구하는데 사용되고 (d)의 긴 막대기 모양의 배열은 최소온도분해능을 구하는데 사용된다. 이밖에도 변조전달함수를 측정하기 위해서 슬릿 모양의 표적이 사용되기도 한다. 우리는 신호전달함수와 온도분해능을 구해야하므로 ⊙ 모양의 표적을 사용하였다.

2.3. 실험구성 및 방법

Fig. 2는 측정하고자 하는 적외선열화상카메라의 신호전달함수와 온도분해능을 구하기 위한 개략적인 실험 구성을 보여주고 있다.

Table 1 Technical data for InfraTec VarioCAM<sup>®</sup>hr

Parameter	Specification
FPA type	Uncooled microbolometer
Image format	640×480 pixel, 25 μm
Spectral range	7.5 - 14 μm
Temperature resolution @ 30℃	0.03 - 0.05 K
IR frame rate	50/60 Hz
Optics	1.0/30 mm standard lens
FOV	30×23° at 640×480
IFOV	0.8 mrad

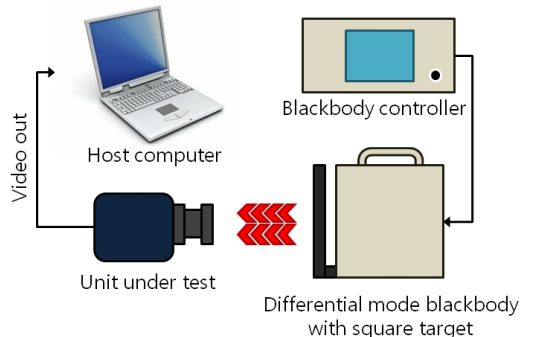


Fig. 2 Experimental setup for SiTF and NETD

기본적인 구성으로는 정사각형 모양의 표적이 부착된 차동모드흑체와 이것의 온도를 제어하는 제어기, 평가할 적외선열화상카메라, 마지막으로 카메라로부터 나오는 영상신호를 받아 이미지로 보여주고 이 이미지의 디지털레벨 값을 저장하여 신호전달함수와 온도분해능을 계산하는데 사용되는 컴퓨터로 각각 구성된다. 적외선열화상카메라 렌즈 끝에서부터 적외선 표적까지의 거리는 256 mm이며 이 거리는 렌즈의 초점심도(depth of focus) 내에서 표적의 수직축 길이가 640×480 픽셀 중 480 픽셀의 1/3 정도의 길이로 결상되도록 하기 위함이다. 이미지로 보여 지는 표적의 크기는 렌즈가 허용하는 초점심도 내에서 가능한 한 크게 하는 것이 보다 정확한 센서의 평가를 위해서 바람직하다. 적외선열화상카메라의 성능을 평가하기 위한 실험은 실험실 온도를 23℃, 습도는 36%로 제어하는 환경에서 수행되었다. 먼저 신호전달함수를 구하기 위하여 차동모드흑체의 온도차  $\Delta T$ 를 -10 K(적외선 표적온도 287.855 K과 그 주변온도 297.856 K의 차)부터 10 K까지 2 K 씩 올려가며 카메라가 감지하는 적외선 영상데이터를 각 온도에 따라 10 프레임씩 저장하였다.

특히,  $\Delta T$ 가 0 K일 때는 온도분해능을 구하기 위하여 100 프레임을 저장하였다. 적외선이미지 센서는 각 픽셀의 균일한 응답성을 유지하기 위해 반드시 비균일성 보정을 거치게 된다[9]. 이 과정이 적외선열화상카메라의 성능평가에 미치는 영향을 구하기 위해 비선형 보정을 거친 영상신호와 그렇지 않은 영상신호로 나누어 저장하였다. 참고로 시험 중인 카메라는 60 Hz의 빠르기로 영상을 화면에 보여주며, 최대 9 Hz의 빠르기로 데이터를 저장할 수 있다. 이렇게 저장한 데이터를 가지고 신호전달함수를 구하고 다시 이것을 이용하여 적외선열화상카메라의 온도분해능을 구할 수 있다.

### 3. 실험결과 및 고찰

앞 절의 실험을 통하여 획득한 영상데이터는 InfraTec사가 제공하는 소프트웨어를 통하여 변환한 온도데이터가 아니라 전혀 가공하지 않은 디지털레벨 값이다.

#### 3.1. 신호전달함수

Fig. 3은 비균일성 보정을 적용하여 차동모드흑체와 표적의 온도차  $\Delta T$ 에 따른 적외선열화상카메라의 응답성  $\Delta DV$ 를 보여주는 그래프이다. 그림에서 정사각형 표적과 그것을 제외한 주변의 픽셀 중 (a)의 선택 영역 1, 2와 (b)의 3, 4를 각각 지정하여 선택 영역의 각 픽셀에서 받아들인 온도차  $\Delta T(T_1 - T_2, T_3 - T_4)$ 에 해당하는 디지털레벨 값을 평균한 다음 그 차이  $\Delta DV$ 를 각 온도별로 계산하였다. 이렇게  $\Delta T$ 의 변화 -10 K부터 10 K까지 2 K 간격에 대한  $\Delta DV$ 의 그래프는 Fig. 4에서 보여준다. 총 11개의 점들을 최소자승법(least square method)을 이용하여 선형 근사했을 때  $y = ax+b$  형태의 식을 구할 수 있는데 a에 해당하는 기울기가 바로 신호전달함수가 된다. Fig. 4의 (a)와 (b)는 각각 1924개의 픽셀과 9999개의 픽셀 크기에 따른 신호전달함수  $91.78 K^{-1}$ 과  $92.07 K^{-1}$ 을 각각 보여주고 있다.

이 두 값은 픽셀의 차이가 크에도 불구하고 그리 큰 차이를 보여주지 않는데 이 정도의 차이는

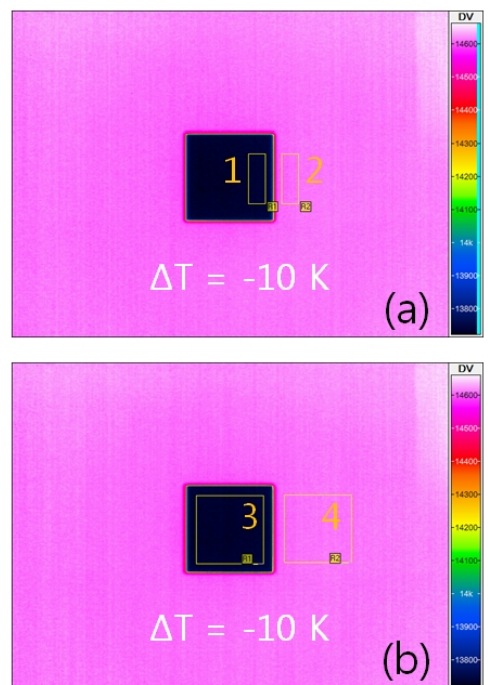


Fig. 3 Infrared thermogram at differential temperature  $\Delta T = -10 K$  (a) region of interest 1924 pixels and (b) 9999 pixels

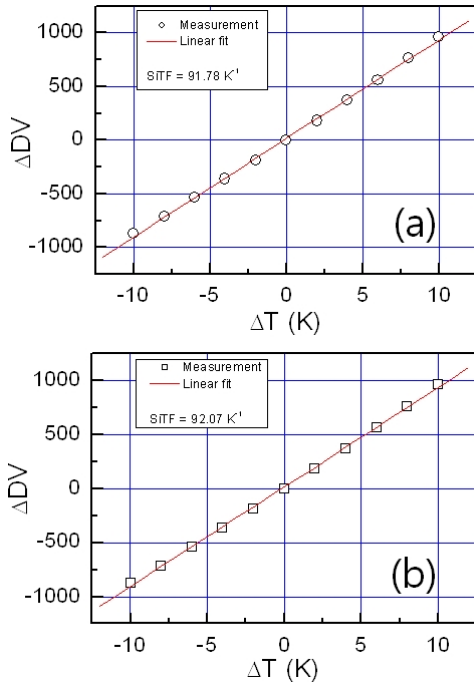


Fig. 4 Signal transfer functions for (a) 1924 pixels and (b) 9999 pixels

나중에 구할 온도분해능에 거의 영향을 미치지 않기 때문에 본 연구에서는 온도분해능을 구할 때 (a)의 신호전달함수 값 91.78 K<sup>-1</sup>을 사용하였다. 또한, 비균일성 보정을 적용하지 않을 경우에도 위와 동일한 크기의 픽셀에 대해서 신호전달함수를 구했는데 각각 91.67 K<sup>-1</sup>과 92.05 K<sup>-1</sup>을 보여주었다. 이는 비균일성 보정을 했을 때와 큰 차이를 보여주지 않았으며 다만, 상대적으로 비선형 보정을 적용했을 때보다 값이 약간 작아진 것을 알 수 있다. 참고로 온도분해능은 신호전달함수의 크기에 반비례하므로 신호전달함수가 커질수록 나중에 구할 온도분해능이 작아진다.

3.2. 온도분해능

시험 중인 적외선열화상카메라의 온도분해능을 구하기 위해서는 Fig. 5에서 보여주고 있는 방법을 고려해야 한다.

첫째, Fig. 5(a)와 같이 F<sub>1</sub>, F<sub>2</sub>, ..., F<sub>100</sub>까지 전체 100 프레임에 대하여 선택한 영역의 각 픽셀 #<sub>1</sub>, #<sub>2</sub>, ..., #<sub>n</sub>의 시간에 따른 디지털레벨 값의 변화 (temporal signal variation, TSV)에 대한 표준편차

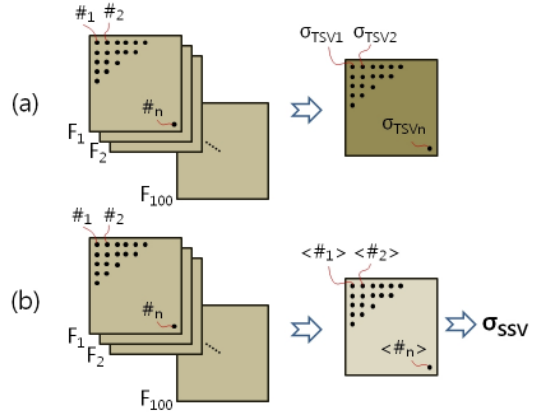


Fig. 5 Scheme for finding standard deviation of (a) temporal signal variation and (b) spatial signal variation

σ<sub>TSV1</sub>, σ<sub>TSV2</sub>, ..., σ<sub>TSVn</sub>을 구한다. 둘째, (b)와 같이 공간적 디지털레벨 값의 변화(spatial signal variation, SSV)에 대해서는 #<sub>1</sub>, #<sub>2</sub>, ..., #<sub>n</sub>의 100 프레임에 대한 각각의 픽셀들에 대한 디지털레벨 값의 평균값 <#<sub>1</sub>>, <#<sub>2</sub>>, ..., <#<sub>n</sub>>을 구하고 이 평균값들의 공간적 분포변화에 대한 표준편차 σ<sub>SSV</sub>를 구한다. 이렇게 구한 표준편차 σ<sub>TSV1</sub>, σ<sub>TSV2</sub>, ..., σ<sub>TSVn</sub>와 σ<sub>SSV</sub>를 이용하여 각각 시간적 온도분해능(NETD<sub>temp</sub>)과 공간적 온도분해능(NETD<sub>spat</sub>)을 구한다. Fig. 6은 적외선열화상카메라의 온도분해능을 구하기 위해 차동모드후체의 온도차 ΔT를 0 K으로 놓은 다음 구한 열화상이미지(thermogram)이다.

Fig. 6의 (a)와 (b)는 각각 비균일성 보정을 적용했을 때와 적용하지 않았을 때 획득한 열화상 이미지이다. Fig. 6에서 볼 수 있듯이 비균일성 보정을 적용했을 때는 640×480 픽셀 전 영역에서 비교적 고른 분포를 보이는 반면 비균일성 보정을 적용하지 않았을 때는 중심에서 바깥으로 갈수록 원형의 띠 모양의 분포를 보여준다. 또한 중심부에서도 균일하지 않은 픽셀들 때문에 디지털레벨 값의 편차가 크게 나타남을 볼 수 있다. 그리고 표적과 그 주변의 온도차이가 0 K이므로 Fig. 6에서는 정사각형 형태의 표적을 볼 수가 없는데 표적은 정가운데에 있으므로 표적보다 작은 붉은색으로 표시된 영역의 49×51 픽셀을 선택하였다. 그리고 Fig. 5에서 제시하는 방법을 이용하여 다음의 식으로부터 시간적 온도분해능과 공간적 온도분해능을 구하였다.

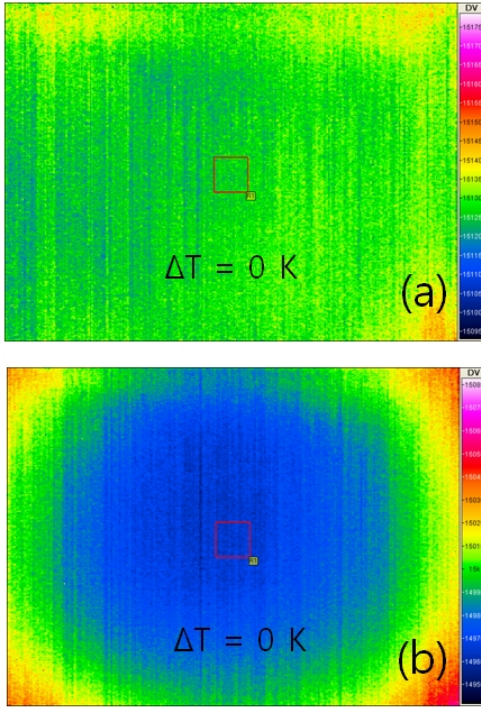


Fig. 6 Thermograms at  $\Delta T = 0$  K. (a) with NUC, (b) without NUC

$$NETD_{temp} = \frac{1}{SiTF} \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (DV_i - \langle DV \rangle)^2}{n}} = \frac{\sigma_{TSV}}{SiTF}, \quad (1)$$

$$NETD_{spat} = \frac{1}{SiTF} \sqrt{\frac{\sum_{j=1}^m (\langle DV \rangle_j - \langle \langle DV \rangle \rangle)^2}{m}} = \frac{\sigma_{SSV}}{SiTF}$$

여기에서 DV는 디지털레벨 값을 의미한다. 먼저, 시간적 온도분해능에 대해서는 비균일성 보정의 적용 유무에 따라 전체 2499 (49×51) 픽셀에 대한  $\sigma_{TSV1}$ ,  $\sigma_{TSV2}$ , ...,  $\sigma_{TSV2499}$ 를 구한 다음 3.1절에서 구한 신호전달함수,  $91.78 \text{ K}^{-1}$ (비선형 보정을 적용한 경우)과  $91.67 \text{ K}^{-1}$ (비선형 보정을 적용하지 않은 경우)으로 각각 나누어주었다. 그 결과, Fig. 7과 같이 각 픽셀별 시간적 온도분해능의 분포를 히스토그램으로 나타낼 수 있다.

Fig. 7의 (a)는 비균일성 보정을 적용했을 때 계산한 시간적 온도분해능의 히스토그램을 보여주는데 시간적 온도분해능의 평균값은 0.024 K이다. (b)는 비균일성 보정을 적용하지 않았을 경우의 히스토그램인데 시간적 온도분해능의 평균값이 0.033 K으로 (a)에 비해 다소 높게 나온 것을

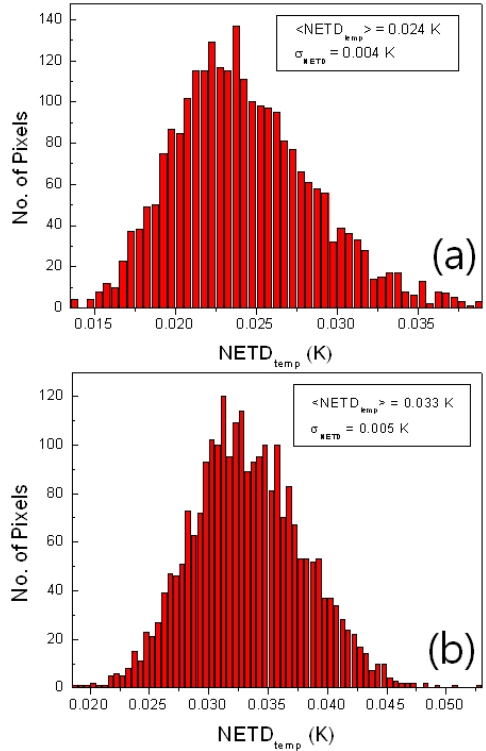


Fig. 7 Histogram for temporal NETD (a) with NUC, (b) without NUC

알 수 있다. 또한, 시간적 온도분해능의 표준편차  $\sigma_{NETD}$ 도 각각 0.004 K과 0.005 K을 나타내고 있는데 비균일성 보정을 적용했을 때보다 적용하지 않았을 때의 표준편차가 약간 크게 나타남을 알 수 있다. 따라서 적외선열화상카메라의 응답 및 노이즈 특성을 평가할 때에는 반드시 비균일성 보정을 적용해야 함을 알 수 있다.

공간적 온도분해능은 일반적으로 전체 프레임을 평균한 데이터 집합으로부터 구할 수 있는데 여기서는 100 프레임을 평균하여 한 개의 프레임으로 만든 다음 각 픽셀의 평균 디지털레벨 값의 공간적 변화로부터 표준편차  $\sigma_{SSV}$ 를 구한다. 시간적 온도분해능을 구할 때와 마찬가지로 비균일성 보정의 적용 유무에 따라 각각에 해당하는 신호전달함수로  $\sigma_{SSV}$ 를 나누어 주면 공간적 온도분해능을 구할 수 있다. 그 결과는 각각 0.016 K과 0.020 K을 보여준다. Fig. 8은 선택영역 내의 임의의 한 픽셀에 대하여 시간적으로 변하는 신호의 디지털레벨 값을 나타낸 그래프이다. 공간적 온도분해능의 경우 시간적 온도분해능의 평균값

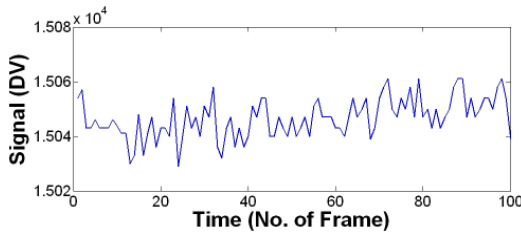


Fig. 8 Temporal signal variation of an arbitrary pixel within a specified region of interest collected for 100 frames

에 비해서 상대적으로 작은 값이 나왔다. 그 이유는 전체 프레임의 평균값이기 때문에 Fig. 8과 같은 시간에 따른 차동흑체의 온도변화가 공간적 온도분해능에 미치는 영향을 줄이기 때문이다. 또한, 시간적 온도분해능은 각 픽셀에 대한 것이기 때문에 여러 개인 것과는 달리 공간적 온도분해능은 전체 픽셀에 대한 것이므로 오직 하나의 값만을 보여준다.

지금까지 우리는 시간적 온도분해능과 공간적 온도분해능을 구했다. 이것으로부터 평가하고자 하는 적외선열화상카메라의 전체 온도분해능( $NETD_{tot}$ )은 다음의 식을 이용하여 계산할 수 있다.

$$NETD_{tot} = \sqrt{(NETD_{temp})^2 + (NETD_{spat})^2} \quad (2)$$

(2)식을 이용하여 구한 전체 온도분해능은 비선형 보정을 적용했을 때 0.031 K을, 적용하지 않았을 경우 0.041 K을 각각 얻었다. 이 결과로부터 비균일성 보정을 적용했을 경우 구한 적외선열화상카메라의 전체 온도분해능은 Table 1에서 보여주는 온도분해능의 최소값 0.03 K과 거의 같은 0.031 K을 나타내므로 본 연구가 제시하는 방법이 타당함을 검증해준다.

#### 4. 결론

지금까지 우리는 비파괴검사에 사용되는 적외선열화상카메라의 응답 및 노이즈 특성평가를 위해 먼저 신호전달함수를 구하였고 이를 이용하여 온도분해능을 구하였다. 이렇게 구한 온도분해능은 그 카메라가 제시하고 있는 온도분해능과 거의 같은 값을 나타내었다. 이러한 사실은 본 연구에서 제시하는 평가방법이 적합함을 검증해준

다. 아울러 본 평가방법은 비교적 단순한 실험구성에 비해 측정하고자 하는 열화상카메라의 온도분해능을 정확하게 정량적으로 평가할 수 있다.

추후에는 열화상카메라의 응답 및 노이즈 특성뿐 아니라 공간주파수에 따른 열화상 특성인 최소온도분해능과 광학적 특성인 변조전달함수까지 다루어 현재 국내에서 개발 중인 초소형 적외선 열화상 이미지 센서 모듈의 정량적인 성능평가에 적용할 계획이다.

#### 후 기

본 연구는 연구개발특구진흥재단의 특구기술사업화 사업의 지원을 받아 수행되었습니다.

#### 참고문헌

- [1] L. Becker, "Influence of IR sensor technology on the military and civil defense," *Proc. of SPIE*, Vol. 6127, pp. 61270S-1-61270S-15 (2006)
- [2] B. C. Arrue, A. Ollero and J. R. Martinez, "An intelligent system for false alarm reduction in infrared forest-fire detection," *IEEE Intelligent Systems*, pp. 64-73 (2000)
- [3] C. Meola, G. M. Carlomagno, A. Squillace and G. Giorleo, "The use of infrared thermography for nondestructive evaluation of joints," *Infrared Physics & Technology*, Vol. 46, pp. 93-99 (2004)
- [4] O. Breitenstein, J. P. Rakotoniaina and M. H. Al Rifai, "Quantitative evaluation of shunts in solar cells by lock-in thermography," *Prog. Photovolt: Res. Appl.* Vol. 11, pp. 515-526 (2003)
- [5] O. Breitenstein and M. Langenkamp, "Microscopic lock-in thermography investigation of leakage sites in integrated circuits," *Rev. Sci. Instrum.*, Vol. 71, pp. 4155-4160 (2000)
- [6] N. P. Avdelidis, B. C. Hawtin, and D. P. Almond, "Transient thermography in the assessment of defects of aircraft composites," *NDT&E International*, Vol. 36, pp. 433-439 (2003)

- [7] F. J. Madruga, D. A. Gonzalez, J. M. Mirapeix and J. M. Lopez Higuera, "Application of infrared thermography to the fabrication process of nuclear fuel containers," *NDT&E International*, Vol. 38, pp. 397-401 (2005)
- [8] P. A. Bell and C. W. Hoover, "Standard NETD test procedure for FLIR systems with video outputs," *Proc. of SPIE*, Vol. 1969, pp. 194-205 (1993)
- [9] J. G. Harris and Y. Chiang, "Nonuniformity correction of infrared image sequence using the constant-statistics constraint," *IEEE Transactions on Image Processing*, Vol. 8, pp. 1148-1151 (1999)