한국화재소방학회 논문지, 제26권 제2호, 2012년
[논 문]

J. of Korean Institute of Fire Sci. & Eng.
Vol. 26, No. 2, 2012

화재용 열화상 카메라의 영상포화특성 평가

Performance Evaluation of Image Saturation of Thermal Imaging Camera for the Fire Service

김성찬

Sung-Chan Kim

경일대학교

(2012. 1. 10. 접수/2012. 2. 21. 수정/2012. 4. 13. 채택)

요 약

적외선 파장영역의 높은 연기투과율에 기초한 열화상기술은 화재안전분야에서 효과적인 첨단기술 중의 하나로 인식되고 있다. 본 연구는 주변열적조건에 따른 열영상 포화특성을 파악하고 대조비변환함수(CTF)를 이용하여 영상의 수준을 평가하고자 한다. 본 실험에서 수행된 조건에 대해 BST 센서를 적용한 열화상 카메라의 경우 영상포화가 발생하지 않았으며 영상수준이 배경과 목표물의 온도차에 비례하는 것으로 나타났다. 본 연구는 열화상기술의 신뢰성을 확보하고 기술개발을 위한 기초자료로 활용될 수 있다.

ABSTRACT

Thermal imaging technology based on IR sensor with high transmittance through the fire smoke is considered as one of the advanced technology for the fire service. The present study has been performed to investigate the image saturation characteristics with thermal condition of target and background and evaluate the performance of image quality based on the contrast transfer function (CTF). For the present testing conditions, TIC using BST sensor did not show the image saturation and the image quality based on the CTF was proportional to the temperature difference between target and background. This study can be utilized as preliminary study to improve reliability and technical development of TIC.

Key words : Thermal imaging camera, TIC, Fire fighting, Contrast transfer function

1. 서 론

적외선 센서를 이용한 열화상기술(thermal imaging technology)은 표면온도의 측정하는 계측분야 뿐만 아니라 건축물의 안전진단, 군사용 열추적 장치, 의학, 응력측정, 신호분석 등 다양한 분야에 널리 활용되고 있다. 특히 화재안전분야의 경우 적외선 파장대의 높은 연기투과성을 이용하여 화재에서 발생된 연기와 정전 등으로 인해 급격히 감소된 가시거리를 확보하고 화재진압경로 및 피난경로를 제공함과 동시에 화재의 위치를 파악하여 사상자를 탐색하는데 유용한 휴대용 개인장비로 인식되고 있으며 최근에는 야간의 우수한 시야확보와 화재탐지 목적의 고정식 감시 장비로도 활용성이 증대되고 있다.[1)]

그러나 열화상 기술이 소방분야에서 매우 유용한 도구로써 활용이 증대되고 있음에도 불구하고 이러한 장치의 성능을 평가하기 위한 표준화된 시험방법이나 정량적인 평가방법이 부족한 실정이며 이로 인해 소방용으로 충분한 성능을 검증받지 못한 열화상장치가 일부 공급됨에 따라 열화상 기술의 소방분야 적용에 대한 신뢰성이 도전을 받게 되고 소방현장의 첨단기술적용의 장애요소로 작용하고 있다. 따라서 화재용으로 적용 가능한 열화상 카메라의 최소 성능을 설정하고 정량적인 성능 평가기준을 마련하는 것이 무엇보다 중요하다.

기존의 열화상 영상장치에 대한 성능평가 기준들을 살펴보면, 응급상황이 아닌 진단용이나 감시용 카메라에 대한 성능평가 기준이 존재했으며 ANSI/ISA-12.1201

E-mail: sungkim@kiu.ac.kr

등과 같은 기준은 작동조건에 따른 장치의 기능이나 영상 수준을 평가하기 위한 것이며 일부 ASTM 기준은 염수저항성능, 광학렌즈의 투과율, 방염성능, 방수성능등과 함께 일부 영상수준을 평가하기 위한 기준이 포함되어 있다.[2-7] 그러나 화재분야에 적용하기 위한 열화상 장치는 진단용이나 감시용에 비해 사용되는 주변 온도나 습도 및 연기등의 입자의 침투 우려가 높고 영상장치의 시야범위(Field of View, FOV) 내에 넓은 범위의 온도차가 존재하는 가혹조건이기 때문에 기존의 성능평가 기준만으로 화재용 열화상 장치의 성능을 평가하는데 무리가 있다. 최근 NFPA에서는 응급상황에 적용되는 화재용 열화상 장치의 성능시험 및 인증요구 조건을 제공하여 신규로 생산되는 열화상 장치에 대한 최소한의 성능평가 기준을 제시하고 있다.[8] NFPA 1801의 주요 성능기준은 크게 내구성 및 내식성 시험, 진동시험, 내열시험, 시야각 측정시험, 충격시험, 열/화염시험, 열민감도 시험, 영상인식시험, 유효온도범위시험 등이 포함되어 있으나 열영상의 화질을 평가하거나 작동조건/주변환경에 따른 내부 전자장치의 성능을 평가하기에는 상대적으로 미흡한 부분이 있다.

열화상 장치는 공간상의 참여매체를 투과한 물체의 온도차나 대상물의 방사율 혹은 방사되는 복사에너지를 감지한다. Figure 1에서 보는 바와 같이 열화상 카메라의 일반적인 구조는 적외선 파장영역을 투과시키는 렌즈와 필터 등으로 이루어진 광학부, 투과된 열에너지를 감지하는 센서부, 감지된 신호를 증폭하고 영상인식을 위한 알고리즘을 적용하여 영상신호를 생성하는 신호처리부, 그리고 사용자가 영상을 인식하기 위한 화면출력부로 이루어져 있다.

열화상 카메라의 영상성능은 열에너지를 신호화하고 원시신호로부터 사용자가 목표를 구분할 수 있도록 영상을 구현하는 알고리즘을 포함하는 감지 및 신호처리부에 크게 의존한다. 그러나 열화상 장치에 적용되는 감지 및 신호처리부의 특성에 따라 목표물들의 온도차가 존재함에도 불구하고 주변의 열적환경에 따라 목표물의 온도차를 영상으로 구현하지 못하는 열영상포화(thermal image saturation) 상태가 나타날 수 있으며 응급한 상황에서의 영상포화는 요구조자뿐만 아니라 사용자의 안전에 큰 영향을 미칠 수 있다.

본 연구는 열화상카메라의 열영상포화 특성을 파악하기 위한 기초연구로써 상대적으로 낮은 주변열적조건에 대해 화재용 열화상 장치의 영상포화 발생여부와 영상특성을 파악함으로써 화재용 열화상카메라의 신뢰성을 높이기 위한 실증적 자료를 제공하고 성능평가 기준의 개선을 도모하고자 한다.

2. 실 험

2.1 실험장치

Figure 2는 주변의 열적조건에 따른 영상포화시험을 위해 적용된 실험장치의 개략도를 나타낸다. 실험 장치는 크게 배경과 목표물의 온도차를 유발하기 위한 막대 목표(bar target)와 흑체표면(blackbody), 그리고 초점거리(focal length)를 증가시키고 영상을 확대하기 위한 광학거울, 그리고 열화상카메라로 구성된다.

배경표면은 한 변의 길이가 17 cm인 평면 흑체를 사용하였으며 흑체 표면의 방사율(emissivity)은 0.97 ± 0.02, 설정 가능한 온도범위는 0~175 ℃이며 제원상의

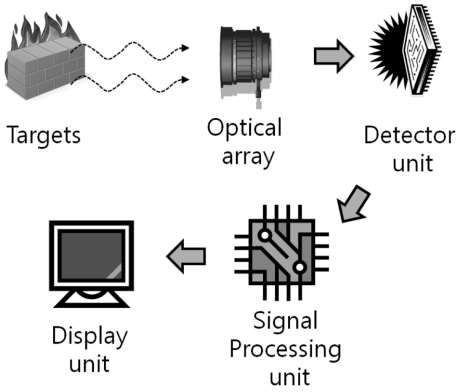

Figure 1. Schematic overview of thermal imaging equipment.

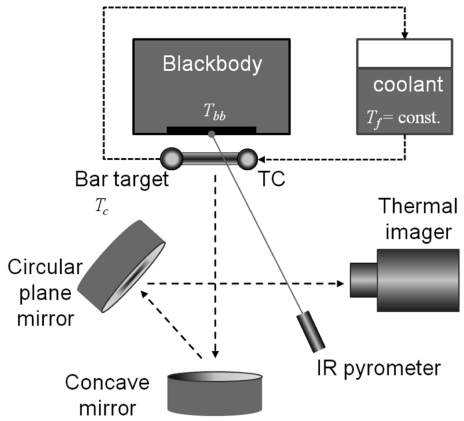

Figure 2. Schematic of experimental setup for saturation test.

표면 온도 균일도(uniformity)는 ± 0.008 ºC이다. 배경 흑체표면온도를 측정하기 위하여 시야각(Field of view)이 6º, 측정온도범위가 –18~250 ºC인 비접촉식 적외선 온도측정장치(IR pyrometer)를 흑체표면에서 20 cm 떨어진 위치에 설치하여 실시간으로 표면온도데이터를 기록하였다.

막대 목표는 외경이 2.5 cm인 동관을 반복 배열하여 제작하였으며 동관의 간격은 2.5 cm이다. 동관의 표면은 0.3~15 μm 파장범위에 대해 평균 흡수율이 0.94인 흑체페인트로 도포되었으며 동관의 내부에 냉각수를 순환시켜 목표물의 표면온도가 일정하게 유지되도록 하였다. 냉각수가 유입되는 입구에는 T형 열전대를 설치하여 막대 목표입구로 유입되는 냉각수의 온도를 측정하였다.

대부분의 화재용 열화상 카메라는 1 m 이상의 초점거리를 가지고 있기 때문에 배경/막대 목표로부터 일직선 상에 열화상 장치를 두고 시험할 경우 전체 실험설비가 길어지고 시야각이 증가하여 화면에서 막대목표가 차지하는 영상크기가 작아지기 때문에 영상의 수준을 평가하는데 어려움을 갖게 된다. 본 연구에서는 배경/막대목표에서 열화상 장치까지의 경로거리를 확보하고 영상을 확대하기 위해 원형의 평면거울과 오목거울(concave mirror)을 이용하였다. 실험에 사용된 거울은 0.8~20 μm 파장대에 대해 반사율(reflectance)이 0.96 이상인 표면 금도금거울(gold coated mirror)을 이용하였다.

2.2 열화상 카메라

본 연구에서는 센서종류에 따라 3가지 종류의 열화상 카메라(TIC, Thermal Imaging Camera)가 사용되었으며 Table 1은 실험에 사용된 카메라의 상세 사양을 나타낸다. 대부분의 화재용 열화상 카메라는 1 m 이상의 초점거리를 가지고 있으며 연기투과율이 우수한 것으로 알려진 8~14 μm의 파장대를 이용한다. 일반적으로 열화상 장치의 센서는 적외선 파장대의 복사열을 전기적 저항으로 변환하는 마이크로볼로메터(microbolometer) 타입과 유전분극(dielectric polarization)을 이용한 BST (Barium Strontium Titanate) 타입이 있다.[9] 본 실험에서 적용된 TIC A와 B는 마이크로볼로메터 타입의 ASi와 VOx 센서를 적용하고 있으며 TIC C는 BST 타입의 센서를 적용하고 있다.

Table 1. Specification of the Tested Thermal Imaging Cameras

	TIC A	TIC B	TIC C
Sensor Type	Microbolometer, ASi	Microbolometer, VOx	BST
Array Size	160 × 120	160 × 120	320 × 240
Weight	1.14 kg	1.27 kg	1.86 kg
Spectral Response	7.5~14 μm	7.5~13.5 μm	8~14 μm
Field of View	50º × 37º	55º × 41º	59º

2.3 영상수준평가

대조비(명암비, contrast)는 영상의 밝고 어두운 정도를 나타내는 지표로 배경과 목표의 선명한 정도를 평가할 때 널리 이용된다. Figure 3은 배경과 목표간의 영상에 따른 대조비를 나타낸다. 변환된 gray image는 8 bit이며 영상의 밝고 어두운 정도에 따라 대조비는 0~255(2^8) 사이의 값을 가지게 되고 밝을수록 큰 대조비를 가지게 된다. 이러한 대조비의 영상선명도는 CTF (대조비 변환함수, Contrast Transfer Function)으로 나타내며 다음과 같이 정의된다.[10]

$$CTF = \frac{I_{max} - I_{min}}{I_{max} + I_{min}} \quad (1)$$

여기서, I_{max}와 I_{min}은 선택된 영상영역에서 대조비의 최대값, 최소값을 각각 나타낸다. Figure 3의 왼쪽과 같이 이상적인 영상의 경우 CTF값은 1을 가지며 실제영상의 경우 CTF는 1보다 작은 값을 가진다. 영상 획득

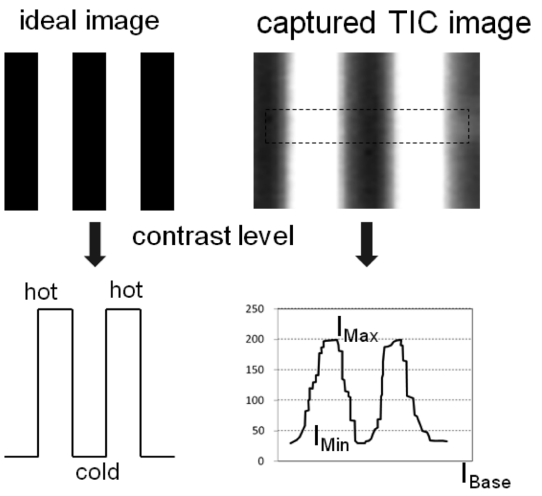

Figure 3. Comparison of contrast level between ideal target and captured TIC image.

위치는 막대목표 의 중앙부이며 측면에 표식을 설치하여 동일한 위치 영상 획득 및 CTF 평가가 이루어지도록 하였다.

선택된 영상에 대해 실시간으로 CTF값을 평가하기 위하여 영상입력보드(image grabber)를 통해 열화상장치와 PC를 연결하였으며 입력된 영상신호는 Labview 사의 영상처리모듈인 IMAQ Vision 소프트웨어를 이용하여 영상의 기록과 CTF값의 산정이 동시에 이루어지도록 하였다.

실험은 초기 목표물의 온도가 배경보다 높은 경우(T_c = 30 ºC)와 낮은 경우(T_c = 10 ºC)로 나누어 실시하였으며 막대 목표로 유입되는 유체의 온도를 조절하여 초기 목표물의 준정상상태 온도를 설정하였다. 배경의 온도를 0.5 ºC/s로 설정한 후 온도 범위를 20~75 ºC까지 변경하여 목표와 배경의 온도차를 유도하면서 열화상 장치의 영상수준을 평가하였다.

3. 결 과

Figure 4는 막대 목표의 온도가 10 ºC인 경우, 시간에 따른 배경의 온도변화와 CTF값을 비교하여 나타내며 전체 실험을 통한 배경의 온도 표준편차는 최대 2.5 ºC 이내의 반복성을 나타냈다. 배경의 온도가 20~75 ºC까지 변화하기 때문에 전체 실험동안 배경의 온도가 목표물의 온도보다 높게 되며 이로 인해 열영상 화면에서 배경은 상대적으로 밝은색으로, 막대목표물은 어두운색으로 나타나게 된다. TIC A와 B는 초기온도차에 민감하게 반응하였고 일정 온도차 이상에서는 거의 일정한 CTF값을 나타냈다. 그러나 TIC C는 온도차가 증가함에 따라 CTF값이 지속적으로 증가하는 경향을 보여주었다.

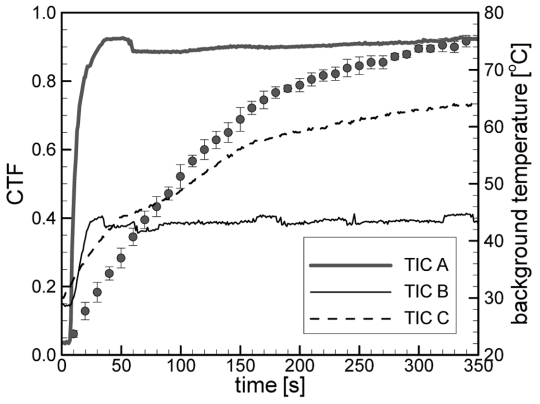

Figure 4. Comparison of CTF of TICs with temperature difference between target and background (T_c = 10 ºC).

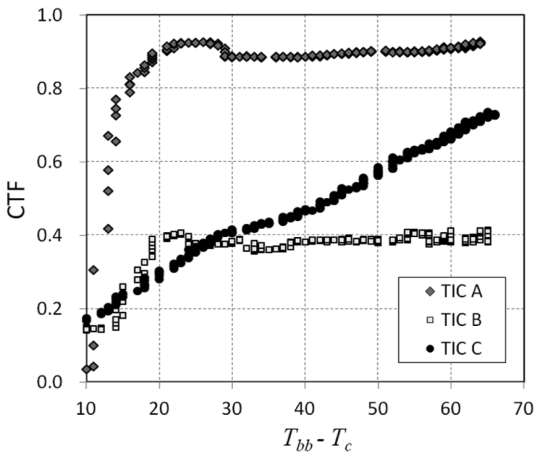

Figure 5. Relationship between temperature difference and CTF of TICs (T_c = 10 ºC).

Figure 5는 배경과 막대목표와의 온도차에 따른 각 열화상장치의 CTF의 관계를 나타낸다. 마이크로볼로메터 타입인 TIC A, B는 배경의 온도차가 약 10~20 ºC인 구간에서 CTF값의 증가가 가장 크고 이후 온도차가 30 ºC 이상인 경우 온도차에 따른 CTF의 변화는 없는 것으로 나타났다. 그러나 BST 타입의 센서를 적용하고 있는 TIC C의 경우 전체적으로 온도증가에 따라 CTF값이 선형적으로 비례하는 경향을 보였다.

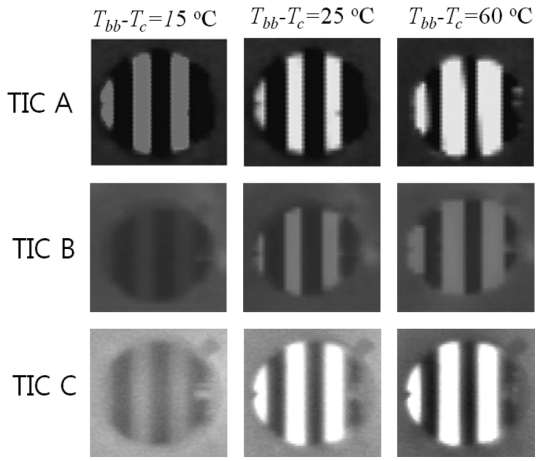

Figure 6. Comparison of the captured image of TIC with temperature difference between bar target and background (T_c = 10 ºC).

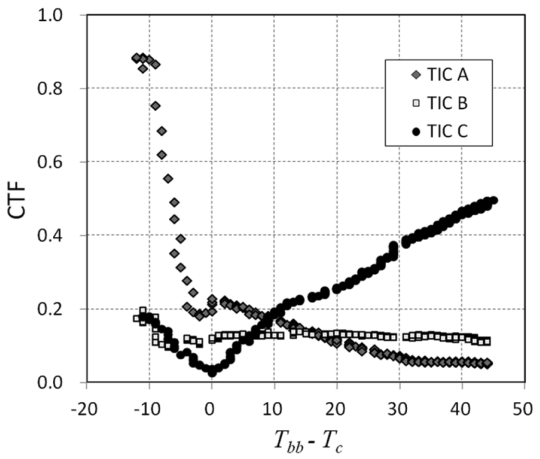

Figure 7. Comparison of CTF of TICs with temperature difference between target and background (T_c = 30 ºC).

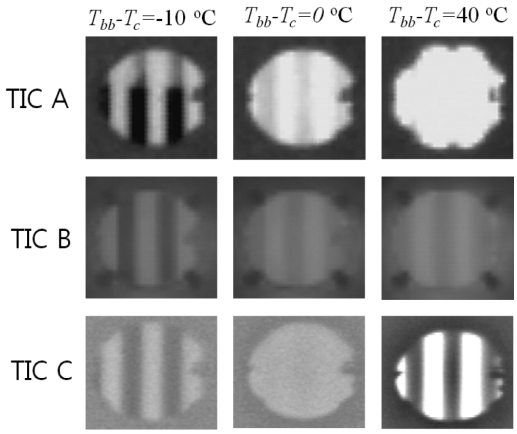

Figure 8. Comparison of the captured image of TIC with temperature difference between bar target and background (T_c = 30 ºC).

Figure 6은 배경과 막대 목표의 온도차가 15, 25, 60 ºC인 경우 각 열화상장치에서 포착된 영상을 비교하여 나타낸다. TIC A, B의 15, 25 ºC 영상의 대조비는 배경부분에서 다소 차이를 보이지만 25 ºC 이상에서는 대조비의 변화가 거의 없는 것을 알 수 있다. 다만 ASi을 적용한 경우(TIC A) 대조비의 변화 범위가 넓어 보다 선명한 영상을 제공하고 있으나 배경의 온도차가 60 ºC인 경우 막대 목표의 폭이 상대적으로 작게 보이고 배경의 영향이 증가하는 경향을 보였다. 실험결과 전체 실험동안 배경의 온도가 목표의 온도보다 높은 경우, 영상에서 목표물을 구분할 수 없는 영상포화는 나타나지 않았으며 배경과 목표를 구분하는데 무리가 없는 것으로 나타났다.

Figure 7은 막대 목표의 온도가 30 ºC인 경우 배경과 막대 목표와의 온도차에 따른 각 열화상장치의 CTF의 관계를 나타낸다. 배경의 온도가 20~75 ºC까지 변화하기 때문에 실험초기에는 막대 목표의 온도가 상대적으로 더 높고 배경의 온도가 30 ºC가 되면 배경과 막대 목표와의 온도차는 동일하고 배경의 온도가 30 ºC 이상에서는 배경의 온도가 더 높은 상태가 된다.

TIC A의 경우 배경과 막대 목표의 온도차가 −10 ºC 정도인 경우 CTF값은 0.9 정도로 높게 나타났으나 배경의 온도가 증가하여 온도차가 0에 가까워짐에 따라 CTF는 급격히 감소한다. 그러나 배경의 온도가 증가하여 배경과 막대 목표의 온도차가 양의 온도차로 증가하게 되면 온도차로 인한 CTF의 값이 증가해야 하지만 오히려 온도차의 증가에 따라 CTF값은 감소하는 경향을 보이고 있다. 이러한 경향은 열화상장치에서 포착된 영상을 통해 명확히 파악할 수 있다.

Figure 8은 배경과 막대 목표의 온도차가 −10, 0, 40 ºC인 경우 각 열화상장치에서 인식된 영상을 비교하여 나타낸다. TIC A의 영상에서 보는바와 같이 배경과 막대 목표의 온도차가 −10 ºC인 경우 목표물이 밝게 나타나고 배경은 어둡게 나타나 막대 목표의 구분이 명확하지만 배경과 목표의 온도차 없는 경우 막대목표의 구분이 어렵다. 그러나 배경의 온도가 상승하여 배경과 막대 목표의 온도차가 40 ºC임에도 불구하고 화면상에서 막대목표는 거의 구분할 수 없게 되는 영상포화에 도달하였으며 이때의 CTF값은 0.1 이하로 나타났다. TIC B의 경우 배경과 막대목표의 온도차가 −10 ºC인 경우 CTF값은 약 0.2 정도로 나타났으며 배경의 온도가 증가함에 따라 CTF값은 감소하였다. 그러나 배경의 온도가 증가하여도 CTF값은 0.12 정도로 거의 일정하게 나타났으며 획득된 영상에서도 온도차에 따라 막대목표를 겨우 구분할 수 있는 정도로 거의 일정하게 나타났다. 반면에 TIC C의 경우 배경과 목표의 온도차가 −10 ºC인 경우 CTF값은 약 0.2로 나타났으며 배경온도가 증가하여 온도차가 거의 없는 경우 CTF값도 거의 0으로 나타났다. 이후 배경의 온도가 증가하여 배경과 목표의 온도차가 10 ºC인 경우 CTF값은 0.2 정도로 나타났으며 이후 온도차에 비례하여 CTF값의 증가를 보였다.

실험결과 화재용 열화상장치의 열상포화특성은 목표와 배경간의 절대적인 온도차뿐만 아니라 열적변화조건에 의존하며 적용된 센서에 따라 영향을 받는다는 사실을 파악하였다.

4. 결 론

본 연구는 열화상카메라의 성능을 평가하기 위한 장치를 개발하여 배경 및 목표물의 열적특성에 따른 열화상 장치의 영상성능을 CTF(대조비 변환함수)를 통해 정량화하고 열영상 포화 현상의 발생 여부를 실험을 통해 파악하였다. 본 연구를 통해 얻은 결론은 다음과 같이 요약될 수 있다.

1) 본 실험에 사용된 마이크로볼로메터 타입의 열화상 장치(Type A, B)는 20 ℃ 미만의 온도차에서 민감한 반응을 보였으며 온도차가 30 ℃ 이상에서는 CTF 값의 변화 없이 거의 일정한 값을 보였다. 반면에 BST 타입의 열화상 장치는 온도변화에 따라 CTF값이 비례하는 경향을 보였다.

2) 전체 실험동안 배경 온도가 목표물의 온도보다 높은 경우 실험에 사용된 열화상 장치 모두 배경온도 변화에 따라 영상포화 현상이 발생하지 않았으나 초기 배경의 온도가 목표물의 온도보다 낮은 상태에서 배경의 온도가 증가하는 경우 마이크로볼로메터 타입의 열화상장치의 CTF값은 배경과 목표의 온도차에도 불구하고 현저하게 낮은 값을 보였으며 TIC A에서 영상포화현상이 발생하였다. 그러나 TIC C의 경우 주변 열적조건에 상관없이 온도차에 기초하여 CTF값이 비례하는 경향을 보였으며 영상포화현상도 발생하지 않았다.

3) 열화상 장치의 영상성능은 온도차 뿐만 아니라 열적조건의 변화 상태에도 영향을 받는다는 사실을 파악하였으며 영상성능 평가에 대한 보다 세밀한 성능평가 기준을 필요로 한다. 또한 실제 대부분의 열화상 장치는 본 연구에서 적용된 실험조건에 비해 가혹조건이기 때문에 화재상황을 모사하는 기계적, 화학적 상태에서 영상성능을 평가하여 실제 열화상 장치가 작동하는 환경에서의 성능을 평가하는 기준을 마련할 필요가 있다.

적외선 열화상 기술은 화재조건하에서 연기를 투과하여 시야를 확보하는 차원에서 현재의 소방기술을 첨단화 하는 기술로 인식되고 있으나 이러한 장치의 신뢰성을 확보하고 기술의 발전을 유도하기 위해서는 보다 합리적이고 실질적인 성능평가 기준의 마련이 병행되어야 한다. 본 연구는 화재용 열화상카메라의 영상성능평가를 위한 실증적 자료를 제공하는 기초연구로서 향후 다양한 열화상 장치와 열적조건에 대한 추가적인 연구를 필요로 한다.

후 기

The author is grateful to Dr. Francine Amon (SP) and Dr. Anthony Hamins (NIST) for helpful discussions and technical supports.

이 논문의 일부는 2012년 경일대학교 교내학술연구비 및 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 기초연구사업 지원을 받아 수행되었음(2011-0004171).

참고문헌

1. F. Amon, N. Bryner, and A. Haminis, “Thermal Imaging Research Needs for First Responders: Workshop Proceeding”, NIST Special Publication 1040(2005).
2. ASTM E 143-00, “Standard Test Method for Noise Equivalent Temperature Difference of Thermal Imaging System”, ASTM International, West Conshohoken, PA(2006).
3. ANSI/ISA 12.12.01-2000, “Nonincendive Electrical Equipment for Use in Class I and II, Division 2 and Class II, Division 1 and 2 Hazardous (Classified) Locations”, ANSI Publication, New York, NY (2000).
4. ASTM B 117-03, “Standard Test Method for Salt Spray (Fog) Testing”, ASTM International, West Conshohoken, PA(2003).
5. ASTM D 6413-99, “Standard Test Method for Flame Resistance of Textiles (Vertical Test)”, ASTM International, West Conshohoken, PA(1999).
6. ASTM F 1359-99a, “Standard Test Method for Liquid Penetration Resistance of Protective Clothing or Protective Ensembles Under a Shower Spray While on a Mannequin, ASTM International”, West Conshohoken, PA(2004).
7. ASTM E 1311-89, “Standard Test Method for Minimum Detectable Temperature Difference for Thermal Imaging System”, ASTM International, West Conshohoken, PA(2004).
8. NFPA 1801, “Standard on Thermal Imagers for the Fire Service”, National Fire Protection Association, Quincy, MA(2010).
9. FLIR Technical Note, “Uncool Detectors for Thermal Imaging Cameras”.
10. S.C. Kim, F. Amon and A. Hamins, “Performance Evaluation of Fire Fighter Thermal Imagers: Characteriszation of an Optical Smoke Cell”, NIST Annual Fire Conference(2007).