

열상장비의 포화 현상에 대한 시스템 모델링

한승오^{*,1)} · 박승만²⁾

¹⁾ 호서대학교 기계공학부 로봇자동화공학전공

²⁾ 호서대학교 국방과학기술학과

System-Level Saturation Modeling of Thermal Imager

Seungoh Han^{*,1)} · Seung-Man Park²⁾

¹⁾ Department of Robotics Engineering, Hoseo University, Korea

²⁾ Department of Defense Science & Technology, Hoseo University, Korea

(Received 5 April 2016 / Revised 17 August 2016 / Accepted 4 November 2016)

ABSTRACT

Thermal imager is now regarded as one of the key observation devices for ISR activities and getting important more and more. As other detectors, however, the thermal detectors also have maximum input and therefore they will be saturated if the input IR energy exceeds the allowed range. The saturation in the thermal detector makes it impossible to distinguish the target from background, as a result, the thermal imager does not perform its own mission anymore. In order to get an insight related with the image saturation, this paper develops a saturation model for a thermal imaging system, not a thermal detector. The proposed modeling starts from analyzing the specification of a thermal imager. Coupled with the characteristic parameters of the object, the saturation model can be used to predict the distance on which the detector is saturated. The proposed saturation model prove its validity by applying it for the case of observing a flash-bang.

Key Words : Saturation Model(포화모델), Thermal Imager(열상장비), IR(적외선), IR Detector(적외선 검출기)

기 호 설 명

A_{FPA} : 검출기 전체면적

A_{lens} : 광학계 입사동의 면적

A_s : 광원면적

c : 빛의 속도

E_{max} : 최대 복사조도(Irradiance)

F : 초점거리

h : Plank 상수

k : Boltzmann 상수

I : 광도(Luminous intensity)

I_r : 복사세기(Radiant intensity)

r_0 : 포화 시작거리

r_s : 검출기 전체가 포화되는 전 포화거리

T : 온도(Temperature)

* Corresponding author, E-mail: sohan@hoseo.edu

Copyright © The Korea Institute of Military Science and Technology

- $L(T)$: 복사 휘도(Radiance)
- $M(\lambda, T)$: 분광 방출도(Spectral emittance)
- $V(\lambda)$: 암소 시감도(Scotopic response)
- λ : 파장(wavelength)
- IR : 적외선(Infra-Red)
- ISR : Intelligence, Surveillance & Reconnaissance
- F/# : F-수(F-number)
- LWIR : 장파장 적외선(Long Wavelength IR)
- QVGA : Quarter Video Graphics Array
- TOD : Thermal Observation Device

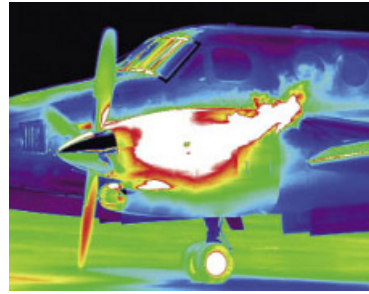


Fig. 1. Saturation example of TOD^[1]

1. 서론

TOD(Thermal Observation Device)로 대표되는 열상장비는 주변광이 없는 야간이나 안개 또는 먼지와 같은 장애환경에서도 대상을 관측할 수 있는 장비로써 핵심 감시·정찰 장비의 하나이다. 절대온도 0 K 이상의 온도를 갖는 모든 물체는 흑체복사 이론에 의해 온도에 따라 서로 다른 파장에서 최대 전자기파를 방출하는데, 4,000 K 이하의 온도를 갖는 일상적인 물체의 경우 적외선 파장영역에서 최대 강도가 방출된다. 때문에 열상장비로 입사되는 적외선 파장 영역의 에너지를 검출함으로써 서로 다른 온도를 갖는 대상물체들을 구분하여 영상으로 표현할 수 있다.

이러한 영상 구현을 위해 열상장비는 적외선 광학계, 입사 에너지를 정량화하기 위한 적외선 검출기, 적외선 검출기로부터 영상신호를 만들어내는 신호처리기, 그리고 디스플레이로 구성된다. 이때, 사용되는 적외선 광학계의 특성, 적외선 검출기의 종류, 그리고 신호처리기의 알고리즘 등에 의해 열상장비는 동작 가능한 온도범위가 정해지며 이 범위 내에서만 정상적 관측 및 운용이 가능하여, 서로 구분할 수 있는 대상물체들을 영상으로 표현하게 된다. 만일 허용되는 동작 온도범위를 벗어나는 고온의 대상물체를 관측하게 될 경우 Fig. 1과 같이 신호가 포화되어 그 내부의 상세 정보의 구분이 불가능해져 영상정보로서의 가치를 상실하게 되고 관측장비로써의 정상적인 운용이 불가능해진다.

이에 본 논문에서는 이처럼 고온 대상물 관측 한계를 보다 명확히 이해하고자 열상장비의 포화현상을 열상장비 구성요소 전체를 고려한 시스템 차원의 정량적 모델^[2]을 통해 분석하고자 한다.

2. 열상장비 포화의 시스템 모델링

열상장비의 포화 모델링은 Fig. 2와 같이 열상장비의 규격 분석으로부터 시작한다. 이를 통해, 열상장비가 정상적으로 동작할 수 있는 입사 적외선 광량의 한계 즉, 포화광량을 도출한다. 포화광량 이상의 에너지를 입사시키는 대상물 즉, 고선풀원의 특성 및 위치에 따라 열상장비에 입사되는 광량을 계산함으로써 열상장비가 포화되기 시작하는 포화 시작거리와 적외선 검출기 전체가 포화되는 전 포화거리를 도출한다. 마지막으로 이렇게 얻어진 결과를 일반적으로 관측되는 결과와 비교함으로써 제시된 열상장비 포화모델의 타당성을 검증하도록 하였다.

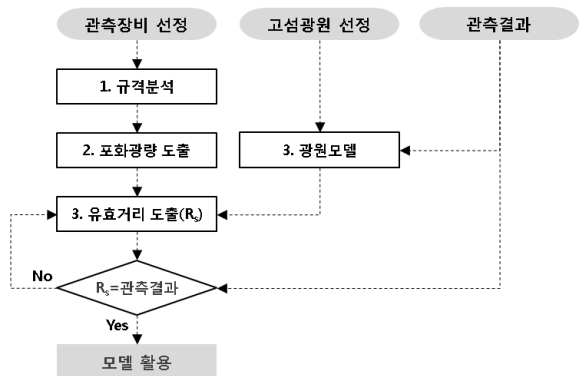


Fig. 2. Proposed saturation modeling procedure

2.1 모델링 대상 열상장비의 규격분석

본 논문에서는 모델링을 적용할 열상장비로 비냉각식 적외선 검출기를 장착하고 있는 일반적인 상용 열상장비^[3]를 대상으로 하였다. 대량생산되어 일반적으로 사용되고 있는 QVGA급 비냉각식 적외선 검출기^[4]를

가정하고, 이에 덧붙여 F-수가 1인 적외선 광학계와 화면 내 동적 범위(intra-scene dynamic range) 100 K를 갖는 기본 신호처리를 가정^[5]하였다. 이는 배경온도 300 K 조건에서 최대 400 K 온도를 갖는 관측대상을 측정할 수 있음을 의미한다. 이러한 열상장비 규격을 정리하면 Table 1과 같다.

Table 1. Specification of a typical thermal imager

| | |
|---------------------------------|--------------|
| Pixel pitch | 25 μ m |
| Objective lens | F/1.0 |
| Wavelength | 8~14 μ m |
| Array size | 320×240 |
| Intra-scene dynamic range @ F/1 | > 100 K |

2.2 적외선 검출기에서의 포화광량 결정

흑체복사 이론에 따라 열상장비의 동작 파장범위인 8~14 μ m 범위에 대한 분광 방출도 $M(\lambda, T)$ 을 파장 λ 와 관측대상의 온도 T 의 함수로 주어지는 식 (1)에 의해 구할 수 있다^[6]. 여기서, h 는 Plank 상수으로써 그 값은 6.626×10^{-34} [J·sec]이고, c 는 자유공간에서의 빛의 속도로써 3×10^8 [m/sec]의 값을 가지며, k 는 Boltzmann 상수으로써 1.381×10^{-23} [J/K]의 값을 갖는다.

$$M(\lambda, T) = \frac{2\pi hc^2}{\lambda^5 \left[\exp\left(\frac{hc}{\lambda kT}\right) - 1 \right]} \quad (1)$$

식 (1)의 분광 방출도로부터 대상물체의 온도에 따른 복사휘도 $L(T)$ 를 식 (2)에 의해 구할 수 있으며, 계산결과 그 값은 300 K 조건에서 38.49 [W/m²·sr], 그리고 400 K 조건에서 133.7 [W/m²·sr]로 얻어졌다.

적외선 검출기로 입사되는 최대 복사조도 E_{max} 는 식 (3)에 의해 구할 수 있으며 이러한 과정을 통해 400 K 물체로부터의 복사휘도는 133.7 [W/m²sr]이며 이로부터 환산된 최대 복사조도는 84.02 [W/m²]이다. 즉, 단위면적당 84.02 [W] 이상의 에너지가 입사될 경우 적외선 검출기는 화면 내 동적 범위를 벗어나 포화되면서 정상적인 열영상 구현이 불가능하게 될 것이다.

$$L(T) = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \frac{M(\lambda, T)}{\pi} d\lambda \quad (2)$$

$$\Delta E_{max} = \frac{\pi \Delta L}{4(F/\#)^2 + 1} \quad (3)$$

이때, 광원으로부터 검출기에 도달하는 동안 대기 투과도에 의한 감쇠가 발생한다. 하지만, 식 (3)을 통해 도출되는 최대 복사조도는 화면 내 동적 범위를 고려한 상대적인 값으로써 기준이 되는 300 K의 배경 또한 대기 투과도에 의한 감쇠를 겪게 되므로 대기 투과도에 의한 영향은 상쇄된다.

2.3 고온 대상물체 적용을 통한 모델 검증

전술한 포화모델이 타당한지 확인하기 위해 Fig. 3에서와 같이 고온광원인 40 mm flashbang에 대하여 도출된 모델을 토대로 포화거리 분석을 수행하였다.

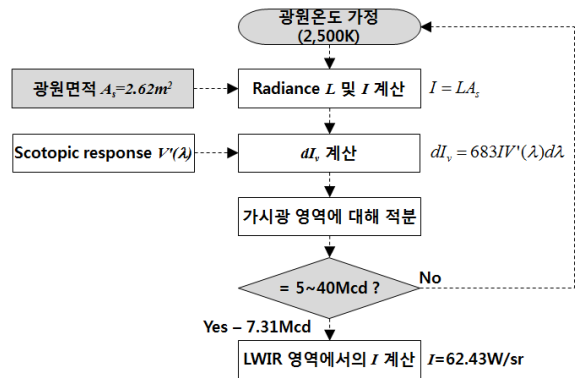


Fig. 3. Light source modeling procedure

이때 사용된 광원의 면적과 온도, 그리고 광도특성은 문헌자료를 참고하였다. 광원으로부터의 복사휘도 계산을 위한 광원 단면적은 최소 화염구(fireball) 크기인 6ft 직경^[7] 즉, 2.62 m²을 기준으로 결정하였으며, flashbang 조성에 따라 2,000 K~3,000 K의 온도범위^[8]를 갖기 때문에 5~40 Mcd 수준의 암소시 반응(scotopic response) 광 특성^[9]을 만족시키도록 광원온도를 2,500 K로 가정한 결과 7.31 Mcd의 광 특성이 얻어졌다.

Fig. 4(a)와 같이 점 광원으로 가정하는 경우, 적외선 검출기에 도달하는 복사조도는 식 (4)^[6]와 같다.

$$E = \frac{flux}{area} = \frac{I A_{lens}}{r^2} \times \frac{1}{area} \quad (4)$$

여기서, 광도 I 는 식 (2)로 계산되는 복사휘도 L 에 광

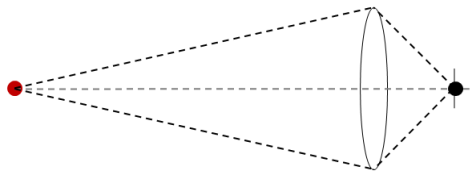
원면적 A_s 를 곱해줌으로써 62.43[W/sr]로 계산되었다. 이러한 점 광원이 적외선 검출기 표면에 입사되어 검출기 화소 하나를 포화시키기 시작하는 거리를 포화 시작거리 r_0 라고 한다면, 식 (4)에서의 검출기 면적(area)은 회절한계 점 직경(diffraction-limited spot diameter)인 $2.44\lambda F/\#$ 와 동일하다고 가정할 수 있다. 이때, 동심원으로 주어지는 회절 패턴의 첫 번째 영역 내에는 총 선속(flux)의 84 %가 포함되며 검출기가 포화되기 위해서는 식 (4)의 복사조도가 최대 복사조도 E_{max} 이상이어야 하므로 포화 시작거리는 식 (5)와 같이 정리된다.

$$r_0 = \sqrt{\frac{0.84IA_{lens}}{E_{max} \frac{\pi}{4} (2.44\lambda F/\#)^2}} \quad (5)$$

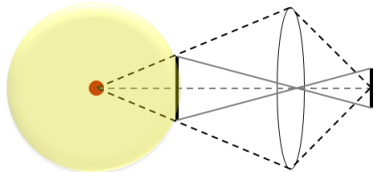
광원이 근접하여 Fig. 4(b)와 같이 면 광원으로 가정할 경우, 검출기 전체가 포화되는 거리는 식 (6)과 같다.

$$r_s = F \sqrt{\frac{A_s}{A_{FPA}}} \quad (6)$$

여기서, I , A_{lens} , λ , F , A_s , A_{FPA} 는 각각 광도, 렌즈의 면적, 기준과장, 초점거리, 광원면적, 그리고 검출기 전체 면적을 나타낸다.



(a) Single detector pixel saturation due to point light source



(b) Whole detector saturation due to surface light source

Fig. 4. Two conditions of detector saturation

검출기의 동작 과장범위 가운데 10 um를 기준 과장으로 가정할 때, 포화 시작거리는 23,713 m가 얻어졌으며 전 포화거리는 7.88 m로 계산되었다. 이는 일반적인 flashbang 동작 특성과 부합되는 결과로써 제시된 열상장비 포화모델의 타당성을 입증한다.

3. 결론

열상장비가 고온의 대상물체를 관측할 경우 발생할 수 있는 적외선 검출기의 포화현상을 모델링하였다. 제시된 모델은 검출기의 허용 온도범위 이상의 고온물체를 관측할 경우 열상장비 광학계에 의해 포화거리가 결정됨을 설명한다. 고온광원의 하나인 flashbang에 적용하였을 때, 통상적인 성능범위인 7.88 m에서 열상장비가 완전히 포화되는 결과가 얻어졌다. 이는 통상적인 flashbang 작동거리에 해당되며 결국 제한된 열상장비 포화모델이 논리적으로 타당함을 입증한다.

후 기

본 연구는 (주)한화를 통한 방위사업청과 국방과학연구소의 연구비 지원으로 수행되었습니다.

References

- [1] www.flir.co.uk
- [2] S. Han, S.-M. Park, H. W. Yang, and K.-H. Chang, "Saturation Modeling of Thermal Imaging Device," KIMST Annual Conference Proceedings, 2014.
- [3] IR518 Thermal Night Vision Camera Datasheet from www.made-in-china.com
- [4] Bird384 datasheet, SemiConductor Devices.
- [5] A. Fraenkel, U. Mizrahi, L. Bykov, A. Adin, E. Malkinson, Y. Zabar, D. Seter, Y. Gebil, and Z. Kopolovich, "Advanced Features of SCD's Uncooled Detectors," Opto-Electr. Rev., Vol. 14, No. 1, pp. 47-54, 2006.
- [6] E. L. Dereniak and G. D. Boreman, "Infrared Detectors and Systems," NY: John Wiley & Sons, Inc., 1996.

- [7] N. Carroll, et al., "Non-Lethal Flash Bang Devices with Fuel-Rich Flash Powders," Proc. Int. Pyrotechnics Seminars, p. 177, 2005.
- [8] R. Blau, L. Liu, R. Hanse, and R. Ames, "Non-Lethal Payloads," US Patent 8,172,966B2, 2012.
- [9] G. Chen, et al., "Perchlorate Free Pyrotechnic Composition and its Application in M115A2 Ground Burst Simulator and M116A1 Hand Grenade Simulator," Proc. Int. Pyrotechnics Seminars, p. 269, 2012.