



Received: 2023/07/18
Revised: 2023/07/31
Accepted: 2023/08/21
Published: 2023/09/30

***Corresponding Author:**

Jin-Ho Park

PGM RF & IIR Seeker R&D Lab, LIG Nex1
207, Mabuk-ro, Giheung-gu, Yongin-si,
Gyeonggi-do, Republic of Korea
Tel: +82-31-326-9208
Fax: +82-31-326-9007
E-mail: jhpark80@lignex1.com

동·하절기 해상 환경에서의 적외선 카메라 탐지거리 예측에 관한 연구

A Study on the Prediction of Detection Ranges for Infrared Cameras in Summer and Winter Maritime Environment

박진호^{1*}, 박성현², 유연덕³, 김홍락¹

¹LIG넥스원 PGM 탐색기연구소 수석연구원

²LIG넥스원 PGM 탐색기연구소 선임연구원

³LIG넥스원 PGM 탐색기연구소 연구원

Jin-Ho Park^{1*}, Sunghyun Park², Yeondeok Yoo³, Hong-Rak Kim¹

¹Chief research engineer, LIG Nex1, PGM RF & IIR Seeker R&D Lab

²Research engineer, LIG Nex1, PGM RF & IIR Seeker R&D Lab

³Research engineer, LIG Nex1, PGM RF & IIR Seeker R&D Lab

Abstract

적외선 신호는 대기에 의해 흡수, 산란 및 투과가 이루어지며 특정 파장대역에서 대기투과율이 높은 대기 창이 존재한다. 따라서 대기투과율이 높은 파장대역에 따라 적외선 카메라들이 개발되고 있으며, 주변 온도, 상대 습도, 표적 특성, 표적과 배경의 온도차, 표적과의 거리에 따라 표적을 탐지할 수 있는 성능이 다르다. 본 논문에서는 대기투과 특성의 영향을 크게 받을 수 있는 하절기 및 동절기 해상환경에서의 중적외선 대역과 원적외선 대역의 적외선 카메라 탐지거리에 대해 분석을 진행하였다.

Infrared signals are absorbed, scattered and transmitted by the atmosphere, there are wavelength regions where transmission is high. These regions are referred to as "atmospheric windows". Infrared cameras are being developed depending on the atmospheric windows. The performance of infrared cameras differ under prevailing atmospheric conditions such as ambient temperature, relative humidity, target signature, target to background temperature difference and distance from target. In this paper, we analysis the detection ranges of the MWIR and LWIR bands in Summer and Winter Maritime Environments, which are greatly affected by atmospheric conditions.

Keywords

적외선 카메라(Infrared Camera),
대기투과도(Atmosphere Transmittance),
탐지 거리(Detection Range), 중적외선(MWIR),
원적외선(LWIR)

Acknowledgement

이 논문은 2023년도 한국해군과학기술학회
하계학술대회 발표 논문임.

1. 서론

물체에서 방사되는 복사에너지를 감지하여 영상으로 획득하는 적외선 카메라는 사람의 눈으로 식별하기 힘든 것들을 탐지할 수 있는 특성 때문에 군사적인 목적뿐만 아니라 다양한 분야에서 활용되고 있다. 적외선 신호는 대기에 의해 흡수, 산란 및 투과가 이루어지며 특정 파장대역에서 대기투과율이 높은 대기 창이 존재한다[1]. 따라서 대기투과율이 높은 파장대역에 따라 적외선 검출기들이 개발되고 있으며, 그 사용 목적에 따라 파장 대역이 결정된다.

감시 장비의 경우 대기에 의한 흡수를 고려하여 주로 중적외선 중 적외선 대역(MWIR, 3 μm - 5 μm)이나 원적외선 대역(LWIR, 8 μm - 12 μm)의 적외선 검출기를 적용한 적외선 카메라를 탑재하고 있다. 중적외선 대역과 원적외선 대역에서 동작하는 적외선 카메라는 주변 온도, 상대 습도, 표적 특성, 표적과 배경의 온도차, 표적과의 거리에 따라 표적을 탐지할 수 있는 성능이 다르다.

Sudhir Khare et al.[2]은 주변 온도와 상대 습도에 기반하여 열화상 시스템의 탐지거리를 예측하였다. VGA급 화소수, 화소 크기 15 μm 인 중적외선 냉각형 검출기와 원적외선 냉각형 검출기를 적용한 동일한 IFOV를 가진 적외선 카메라를 비교 분석하였다. 원적외선 냉각형 검출기는 최근 기술 발전에 따라 적외선 카메라에 적용되는 사례

가 늘고는 있으나 아직까지는 고가이고 시스템 구성이 어렵기 때문에 적용 사례가 많지 않다.

본 논문에서는 대기투과 특성의 영향을 크게 받을 수 있는 하절기 및 동절기 해상환경에서의 중적외선 대역과 원적외선 대역의 적외선 카메라 탐지거리에 대해 분석을 진행하였다. 분석 과정에서 중적외선 대역은 냉각형 적외선 검출기를 적용하고, 원적외선 대역은 비냉각형 적외선 검출기를 적용하였다.

냉각형 적외선 검출기는 일반적으로 HgCdTe 혹은 InSb 재질을 이용하여 만들어지며, 적외선 방사에 대해 감도가 매우 좋고 열잡음이 적어 온도 분해능이 뛰어난 장점이 있지만, 가격이 비싸고 별도의 냉각장치가 필요하기 때문에 카메라가 커진다는 단점이 있다. 비냉각형 적외선 검출기는 주로 a-Si 혹은 VOx 재질을 이용하여 제작되며 냉각형 검출기에 비해 온도 분해능은 떨어지지만, 가격이 저렴하고 전력 소비가 적으며 별도의 냉각장치가 필요하지 않기 때문에 소형화가 가능하다는 장점이 있다.

따라서 본 연구에서는 시스템에서 요구하는 탐지거리뿐만 아니라 다른 요구사항(배치 공간, 가격 등)까지 고려하여 최적 대역의 카메라 선정이 가능하도록 중적외선 냉각형 적외선 카메라와 원적외선 비냉각형 적외선 카메라의 탐지거리를 분석하였다. 탐지거리 분석을 위하여 MODTRAN4[3]을 이용해 두 대역에 대해 1 km, 5 km, 10 km에 대한 대기투과율을 계산하였으며, 이를 바탕으로 탐지거리를 예측하였다.

2. 대기투과율 및 탐지거리 계산

2.1 대기투과율 계산

적외선 카메라의 탐지거리를 정확히 예측하기 위해서는 대기투과에 의한 적외선 신호의 손실을 고려해야 한다. 대기투과율은 대기 구성 분자(H₂O나 CO₂)에 의한 흡수와 공기 구성 분자, 부유 입자 등에 의한 산란으로부터 영향을 받으며, 적외선 파장별로 특성이 상이하다. Fig. 1은 지상에서 표적을 수평방향으로 관측할 때의 대기투과율이며, 1 μm - 3 μm, 3 μm - 5 μm, 8 μm - 12 μm 대역의 투과율이 높게 나타나는 것을 확인할 수 있다. 적외선 카메라용으로 사용되는 적외선 검출기는 대기투과율이 높은 파장대역을 중심으로 발전하고 있다.

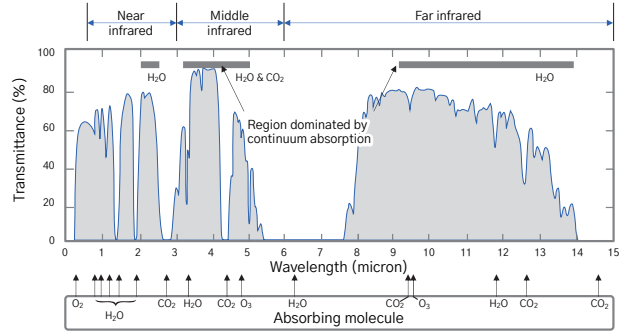


Fig. 1. 파장별 대기 투과율

해상 환경에서의 동·하절기 대기투과율 계산을 위해 미 공군연구소에서 개발된 SW인 MODTRAN4[3]을 사용하였다. Table 1은 MODTRAN4에서의 고도 0도에 대한 중위도 여름(북위 45도, 7월)과 겨울(북위 45도, 1월)의 대기조건이며, Figs. 2-3는 거리별 대기투과율을 계산한 것이다. Aerosol 모델은 Navy Maritime을 적용하였다.

Table 2는 표적과 적외선 카메라 간의 거리에 따른 중위도 여름과 겨울의 대기투과율을 중적외선 대역(MWIR, 3 μm - 5 μm)과 원적외선 대역(LWIR, 8 μm - 12 μm)으로 구분하여 계산한 결과이다.

Table 1. 대기 조건(중위도)

구분	압력 (mbar)	온도 (K)	상대습도 (%)	절대습도 (g/m ³)	풍속 (m/s)
중위도 여름	1,013	21	76	13.9	4.1
중위도 겨울	1,018	0	77	3.5	10.3

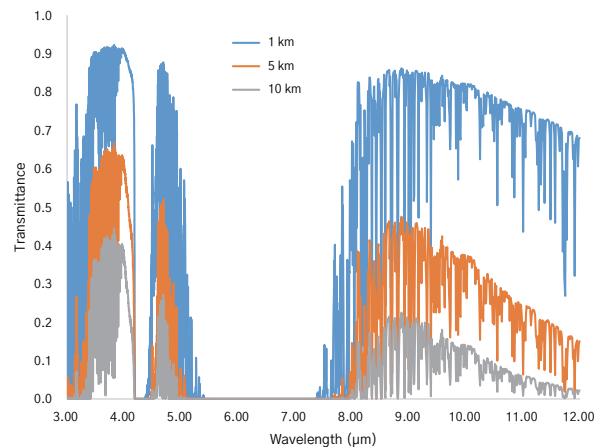


Fig. 2. 파장별 대기투과율 (중위도 여름)

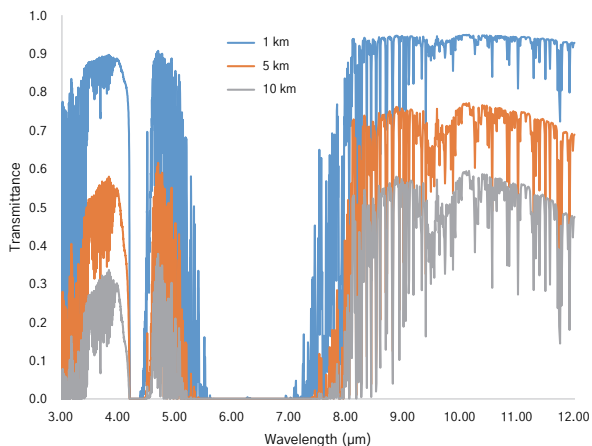


Fig. 3. 파장별 대기투과율(중위도 겨울)

Figs. 2-3 그래프와 Table 2에서 중적외선 대역은 여름과 겨울의 거리별 대기투과율 변화가 유사하지만, 원적외선의 경우 여름과 겨울의 거리별 대기투과율에서 많은 차이가 나타나고 있다. 특히 원적외선의 경우 여름에 거리에 따른 대기투과율 차이가 크게 나타나고 온다습 환경에서 원적외선 대역의 대기감쇄계수가 큼을 알 수 있다. 계절 특성상 여름의 평균습도가 겨울에 비해 높아 대기 중의 H₂O 성분이 겨울보다는 상대적으로 많아 대기투과율이 더 낮게 나타나는 것으로 예상된다.

Table 2. 파장별 대기투과율

거리 (km)	대기투과율(여름)		대기투과율(겨울)	
	중적외선 (3 μm - 5 μm)	원적외선 (8 μm - 12 μm)	중적외선 (3 μm - 5 μm)	원적외선 (8 μm - 12 μm)
1	0.52	0.71	0.61	0.90
5	0.23	0.26	0.27	0.65
10	0.11	0.09	0.12	0.45

2.2 탐지거리 계산

적외선 카메라의 성능은 표적의 공간주파수(cy/mrad)에 대해 분해가 가능한 온도를 나타내는 최소분해가능 온도차(MRTD: minimum resolvable temperature difference)로 주로 대표된다. 적외선 카메라에서 획득되는 결보기 온도차 ΔT_C 는 Beer-Lamber law(혹은 Beer's law)[1]에 의해 식 (1)과 같이 정의된다.

$$\Delta T_C = \tau_a(R) \times \Delta T \tag{1}$$

여기서, ΔT 는 표적과 배경의 온도차이고 $\tau_a(R)$ 은 표적과 적외선 카메라 간 거리 R 에 대한 대기투과율이다. $\tau_a(R)$ [4]은 식 (2)와 같이 정의된다.

$$\tau_a(R) = e^{-ab \cdot R} \times e^{-sc \cdot R} \tag{2}$$

여기서, ab 는 대기 흡수 계수이고 sc 는 산란 계수이다.

최소분해가능온도차 커브는 결보기 온도차 ΔT_C 에 대한 최대 분해 가능한 공간 주파수 f_c 에 의해 정의되며, 거리는 식 (3)과 같다[3].

$$\frac{H}{R} \cdot f_c = N \tag{3}$$

여기서, H 는 표적의 높이이고, R 은 획득 거리, N 은 분해가능한 사이클의 수이다. Johnson's criteria[1]에 따라 확률 50%에 대해 탐지는 $N = 1$, 인지는 $N = 4$, 식별은 $N = 8$ 이 적용되어 탐지/인지/식별 거리를 예측할 수 있다. 여기서 탐지는 표적의 존재유무를 확인할 수 있는 것이고, 인지는 표적 형태를 확인할 수 있는 것, 식별은 표적의 기종 및 모델을 확인할 수 있는 것을 의미한다.

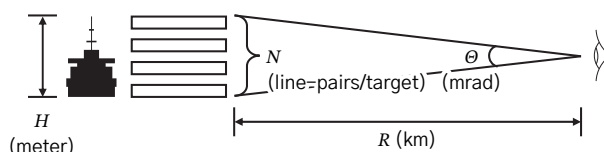


Fig. 4. 표적의 공간 주파수

적외선 카메라의 탐지거리를 예측하기 위해 미 육군 NVESD(Night Vision and Electronic Sensors Directorate's)에서 개발한 NVTherm IP[5]를 이용하였다.

탐지거리 예측을 위해 NVTherm IP에 적용한 적외선 카메라의 상세 규격은 Table 3와 같다. 화소수는 현재 가장 많이 사용되는 VGA급을 적용하였으며, 검출기 종류는 중적외선 대역은 냉각형 검출기를, 원적외선 대역은 비냉각형 검출기를 적용하였다. 원적외선 대역의 경우 최근 냉각형 검출기가 출시되고 있으나 아직까지는 고가이고 시스템 구성이 어려워 적용 사례가 많지 않아 현재 널리 사용되는 비냉각형 검출기를 적용하여 탐지거리를 예측하였다. 비냉각형 검출기는 냉각형 검출기에 비해 온도 분해능은 떨어지지만 가격이 저렴하고, 전력 소비가 적으며 별도의 냉각장치가 필요하지 않기 때문에 소형화가 가능하다는 장점이 있다.

Table 3. 적외선 카메라 상세 규격

구분	중적외선 (3 μm - 5 μm)	원적외선 (8 μm - 12 μm)
시계	20° × 15°	
화소 수	640 × 480	
검출기	냉각형 검출기	비냉각형 검출기 (bolometer)
화소 피치	15 μm	17 μm
F/#	2.0	1.2
광학계 투과율	0.7	

탐지거리 예측을 위한 환경 조건은 Table 4와 같이 적용하였다. 정확한 탐지거리 계산을 위해 앞에서 계산한 MODTRAN4으로 대기투과율을 NVTherm IP의 대기투과 입력 파라미터로 적용하였다.

Table 4. 환경 조건

구분	환경 조건
표적 크기	○○ m × ○○ m
표적 온도차	○ °C
대기 모델	중위도 여름 중위도 겨울
Aerosol 모델	Navy Maritime
시정	15 km

Figs. 5-6는 중위도 여름과 겨울에 대한 탐지거리 예측 결과이다. Johnson's criteria에 따라 탐지확률 50 % 기준으로 중적외선 대역은 여름 7.9 km, 겨울 7.8 km이고, 원적외선 대역은 여름 2.3 km, 겨울 3.8 km로 탐지거리가 예측된다.

여름과 겨울의 대기투과율 차이가 크지 않은 중적외선 대역은 탐지거리도 유사하게 계산되었고, 여름과 겨울의 대기투과율 차이가 큰 원적외선 대역은 탐지거리에서도 그 차이가 나타난다.

Fig. 7의 플랑크 흑체 복사 법칙에 따르면 중적외선 신호는 500 K에서 원적외선 신호는 300 K에서 가장 높은 신호를 방사하며[1], 300 K 기준으로 중적외선 신호와 원적외선 신호의 크기를 비교하면 원적외선 신호가 약 8배 크다.

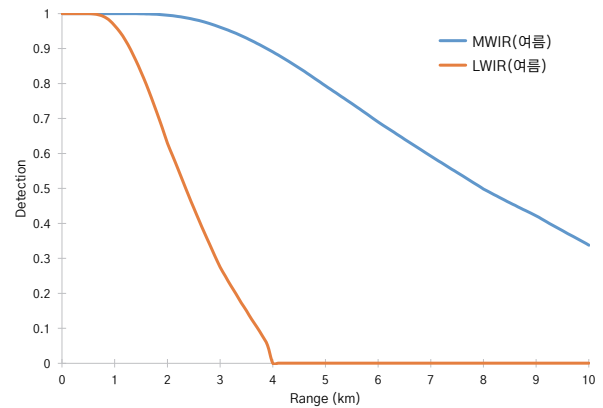


Fig. 5. 탐지거리(중위도 여름)

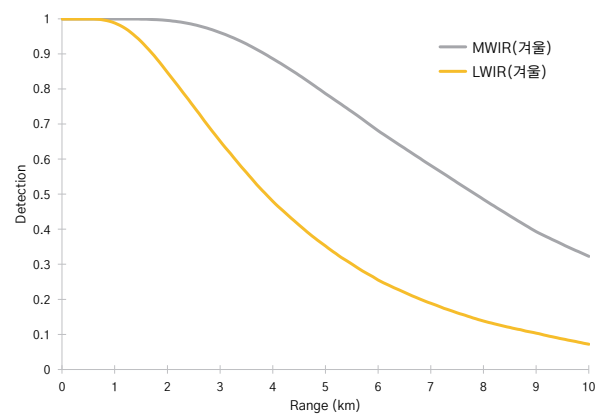


Fig. 6. 탐지거리(중위도 겨울)

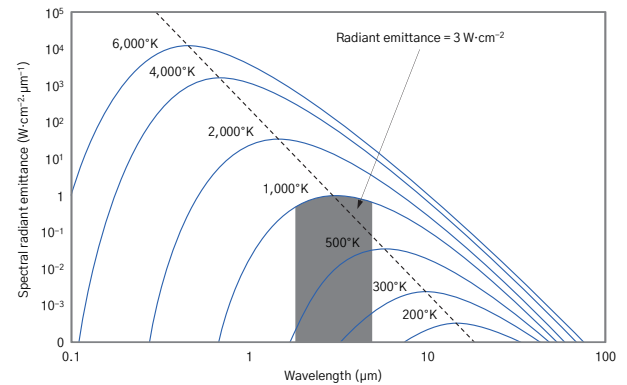


Fig. 7. 플랑크 흑체 복사

표적에서 방사되는 적외선 신호가 원적외선 대역이 중적외선 대역에 비해 크기도 불구하고 탐지거리가 중적외선 대역에 비해 낮게 계산되는 것은 냉각형 검출기에 비해 낮은 비냉각형 검출기의 D^* 가 크게 영향을 주기 때문으로 예측된다. D^* 는 검출기의 성능 척도로 자주 사용되는 값으로, 1 W의 적외선을 입사시킬 때 측정되는 SNR을 단위 면적과 측정 주파수에 대해 정규화한 값이다[1].

$$D^* = \frac{\sqrt{A_d \cdot \Delta f}}{NEP} \left[\frac{cm\sqrt{Hz}}{W} \right] \quad (4)$$

여기서, A_d 는 검출기 한 픽셀의 면적, Δf 는 측정 주파수, NEP(noise equivalent power)는 잡음에 해당하는 전력으로 검출기가 측정할 수 있는 최소 광량으로 잡음을 반응도로 나눈 값이다. 일반적으로 비냉각형 원적외선대역 검출기의 D^* 값은 4×10^9 , 냉각형 원적외선대역 검출기의 D^* 값은 1×10^{10} , 냉각형 중적외선대역 검출기의 D^* 값은 5×10^{10} 의 수준으로[1], 냉각형 중적외선 대역의 검출기의 D^* 값이 비냉각형 원적외선 대역의 검출기에 비해 약 12.5배 크다.

해상 환경에서 표적의 원적외선 신호가 크에도 불구하고 원적외선 신호의 고온 다습 환경에서의 큰 대기투과 손실과 비냉각 검출기의 상대적으로 낮은 D^* 로 인해 중적외선 대역의 적외선 카메라가 탐지거리 측면에서는 유리함을 확인할 수 있다.

3. 결론

본 논문에서는 대기투과 특성의 영향을 크게 받을 수 있는 하절기 및 동절기 해상환경에서의 중적외선 대역과 원적외선 대역의 적외선 카메라 탐지거리에 대해 분석을 진행하였다. 시스템에서 요구하는 탐지거리뿐만 아니라 타 요구사항(배치 공간, 가격 등)까지 고려하여 최적 대역의 카메라 선정이 가능하도록 중적외선 냉각형 적외선 카메라와 원적외선 비냉각 적외선 카메라의 탐지거리를 분석하였으며, 중적외선 대역의 카메라는 계절에 크게 영향을 받지 않고 일정한 수준의 탐지거리(여름 7.9 km, 겨울 7.8 km)를 유지하였고, 원

적외선 대역의 카메라는 전체적으로 중적외선 대역에 비해 탐지거리가(여름 2.3 km, 겨울 3.8 km)로 떨어짐을 확인할 수 있었다.

이는 고온 다습 환경에서의 원적외선의 큰 대기투과 손실과 비냉각형 원적외선 검출기의 낮은 D^* 값에 의한 결과로 예측된다. 비냉각형 원적외선 적외선 카메라는 짧은 탐지거리를 보이지만 저렴한 가격으로 소형으로 구성할 수 있는 장점을 가지고 있으므로 시스템에서 필요로 하는 탐지거리와 그 외 요구사항(소형, 저가화 등)에 따라 적용할 수 있는 시스템이 있을 것으로 판단된다.

참고문헌

- [1] Holst, G.C. Electro-optical imaging system performance, In JCD Publishing, Third Edition, Florida, SPIE Optical Engineering Press, Bellingham, Washington, 2003, pp. 355-384.
- [2] Sudhir, K., Manvendra, S., and Brajesh K. K., Range Performance Modelling of Thermal Imaging System Based on Single Parameter Characterised by Ambient Temperature and Relative Humidity, Defence Science Journal, Vol. 68, No. 5, 2018, pp. 480-486.
- [3] Berk, A. Bernsten, L.S. & Robertson, D.C, MODTRAN: A Moderate Resolution Model for LOWTRAN7, Air Force Geophysics Laboratory, Hanscom AFB, MA, GL-TR-89-0122, 1989.
- [4] Preece, B, Hodgkin, V.A., Thompson, R, Leonard, K. & Krapels, K. Predicted NETD performance of polarised infrared imaging sensor, In Proceedings of SPIE 9071, 2014, pp. 90710C-1 - C-10.
- [5] Night Vision Thermal and Image Processing Performance Model, User's Manual, Document: Rev 10, U.S. Army RDECOM CERDEC, Night Vision and Electronic Sensors Directorate, Modeling and Simulation Division, Fort Belvoir, Aug. 2009.