

적외선 점광원 탐지장비의 최소탐지조도 측정 및 활용

김현숙[†] · 양유경 · 박용찬

국방과학연구소

☎ 305-600 대전광역시 유성구 조치원길 462번지

(2010년 11월 26일 받음, 2011년 1월 6일 수정본 받음, 2011년 1월 10일 게재 확정)

적외선 점광원 탐지장비의 탐지성능 예측을 위한 최소탐지조도(MDI)를 측정하고 실험결과를 제시하였다. 최소탐지조도 측정은 시준기를 이용하여 실험실 환경에서 수행할 수 있는 방법으로 구현하였으며 측정에 따르는 시험조건 및 절차를 상세히 기술하였다. 또한 최소탐지조도 측정 결과를 이용하여 분석한 적외선 탐지장비의 최대탐지거리 예측결과를 제시하였다.

The Measurement and Application of the Minimum Detectable Irradiance for the Infrared Point Source Detection System

Hyunsook Kim[†], Yukyung Yang, and Yongchan Park

Agency for Defense Development, 462 Jochiwongil, Yuseong, Daejeon 305-600, Korea

(Received November 26, 2010; Revised manuscript January 6, 2011; Accepted January 10, 2011)

A procedure and method for the MDI(Minimum Detectable Irradiance) measurement of an infrared point source detection system is described in detail and its experimental result is analyzed. The proposed measurement method for MDI can be realized with a collimator in the laboratory environment. In addition, an estimation method of the maximum detection range of the infrared point source detection system is introduced and its performed result is shown.

Keywords: Infrared detection, Point source, MDI, NEI, SNR

OCIS codes: (280.0280) Remote sensing and sensors; (280.4788) Optical sensing and sensors; (280.4991) Passive remote sensing

I. 서 론

현대의 전장 상황은 미사일이나 화포 등 장거리 타격수단에 의한 공격이 주를 이룬다. 이러한 이유로 전자광학센서 분야에서는 위협 표적에 대한 장비의 탐지능력을 향상시키기 위한 개발 노력을 꾸준히 진행하여왔다.

적외선 탐색 및 추적장비(Infrared search & tracking system), 적외선 및 자외선 미사일 경고장치(missile warning system), 포사격 탐지장비(muzzle flash detection system) 등 장거리 위협표적 탐지장비는 적외선 점광원 신호뿐 아니라 탐지율에 근거한 탐지거리 성능이 장비의 활용성을 판단하는 중요한 기준이 되며, 이러한 탐지성능 예측은 최소탐지조도(MDI, Minimum Detectable Irradiance)라는 성능변수를 이용한다. 최소탐지조도는 탐지장비에 의존하는 시스템 성능변수로 특정 탐지율(detection probability)을 만족하는 입사동(entrance

pupil)에서의 복사조도이다. 따라서 최소탐지조도는 점표적 탐지와 관련된 탐지 알고리즘의 문턱(threshold) 설정값, 시스템의 광학적 결상능력, 잡음수준 등 모든 시스템 요소들을 반영하는 종합적인 성능지표이며, 특정 복사세기(radiant intensity)를 갖는 점광원 표적에 대한 탐지장비의 최대탐지거리 성능 예측을 가능케 한다.

본 논문에서는 점광원 표적 탐지를 목적으로 하는 적외선 탐지장비의 최소탐지조도를 실험실 환경에서 측정할 수 있는 방안을 제시하고 측정을 수행하였으며 그 결과를 이용하여 시스템의 최대 탐지거리를 예측하였다. 또한 최소탐지조도 측정 결과를 이용한 시스템 trade-off 설계연구 활용 방안을 제안하였다.

최소탐지조도 측정 및 분석에는 자체 개발하고 있는 적외선 탐지장비를 사용하였다. 이용된 적외선 탐지장비는 3.7 μm -4.8 μm 파장대역의 640×512 배열(SCORPIO MW, Sofradir

[†]E-mail: khsryu@add.re.kr

Color versions of one or more of the figures in this paper are available online.

TABLE 1. Specifications of the InfraRed detection system

구 분		제 원
파장대역 [μm]		3.7 ~ 4.8
유효초점거리 [mm]	수평	4.1
	수직	12.2
F-number		1.53
시야각 [°] (640×512 픽셀 기준)	수평	133.4
	수직	35.7
시야각 [°] (640×100 픽셀 기준)	수평	133.3
	수직	6.9
시스템 투과율		0.73

사, 프랑스) 검출기를 사용하는 중적외선대역 전자광학센서로서, F/1.53, 유효초점거리 4.1mm(수평)×12.2mm(수직), 시야각 133.4°×35.7°(640×512 영상 포맷)의 anamorphic 광학계를 탑재하고 있다.(표 1 참조)

본 연구에서는 이와 같은 시스템 제원을 갖는 적외선 탐지장비를 이용하여 실험실 환경에서 최소탐지조도를 측정하기 위한 점광원 표적크기 결정, 복사에너지 제공 및 표적모사, 점광원 표적과 장비의 정렬, 투과율 보정 및 측정절차 등에 대하여 상세히 기술하였다. 이후 측정을 통하여 획득된 데이터로부터 최소탐지조도를 구하고 이로부터 예측된 시스템 최대탐지거리 분석 결과 및 활용방안을 제시하였다.

II. 최소탐지조도(MDI) 측정

2.1. 최소탐지조도의 이론적 배경

등가잡음 온도차(NEID, Noise Equivalent Temperature Difference)와 등가잡음 조도(NEI, Noise Equivalent Irradiance)는 적외선 영상 시스템의 민감도(sensitivity) 성능을 나타내는 유용한 지표이다. 등가잡음 온도차는 확장광원(extended source) 표적에 대한 시스템의 최소반응 신호크기를 나타내며 등가잡음 조도는 점광원(point source) 표적에 대한 탐지 성능을 나타낸다.^[1-4]

등가잡음 조도는 적외선 탐지장비가 점광원을 바라볼 때 잡음과 같은 크기의 신호세기를 발생시키는 입사동에서의 복사조도(irradiance)를 말하며 다음과 같이 표현한다.(식 1)^[3, 4]

$$NEI = \left(\frac{V_n}{\Delta V_s} \right) \times \Delta E \quad (1)$$

여기서 NEI는 등가잡음 조도, V_n 은 센서출력 전압의 rms 잡음 크기, ΔV_s 는 점광원 표적의 배경대비 신호세기 차, ΔE 는 표적과 배경의 복사조도 차를 나타낸다.

그림 1과 같이 복사세기(radiant intensity) ΔI 를 갖는 점광원 표적으로부터 탐지장비에 도달하는 복사조도는 식 (2)와 같다. 여기서 R은 탐지장비까지 거리이며 $\tau_{atm}(R)$ 은 대기투

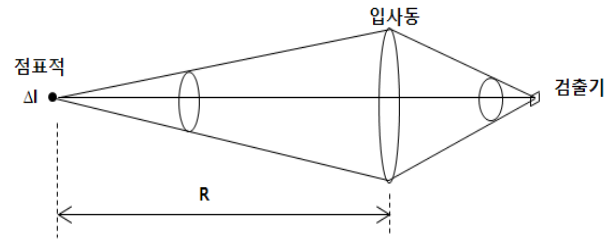


FIG. 1. An InfraRed detection system viewing a point source target.

과율이다.

$$\Delta E = \frac{\Delta I \times \tau_{atm}(R)}{R^2} \quad (2)$$

식 (1)에서 ($\Delta V_s/V_n$)는 점광원 표적의 신호대 잡음비(SNR : Signal to Noise Ratio) SNR_{target} 을 나타낸다. 따라서 입사동에서의 복사조도를 등가잡음 조도와 점광원 표적의 복사세기로 표현하면 식 (3)과 같은 결과를 얻는다.

$$\Delta E = \frac{\Delta I \times \tau_{atm}(R)}{R^2} = SNR_{target} \times NEI \quad (3)$$

최소탐지조도는 탐지장비에 의존하는 성능변수로 특정 탐지율(detection probability)을 만족하는 입사동에서의 복사조도이다. 따라서 최소탐지조도는 점표적 탐지와 관련된 모든 시스템 요소들을 반영하는 종합적인 성능지표이며, 특정 복사세기를 갖는 점광원 표적에 대한 탐지장비의 최대탐지거리(R_{max}) 성능을 예측 가능케 한다. 따라서 최소탐지조도(MDI)는 식 (3)으로부터 식 (4)와 같이 표현할 수 있다.

$$MDI = \frac{\Delta I \times \tau_{atm}(R_{max})}{R_{max}^2} \quad (4)$$

최소탐지조도는 식 (5)와 같이 등가잡음조도와 신호대 잡음비를 이용하여 표현할 수 있다. 이때, 최소탐지조도에서의 표적에 대한 신호대 잡음비는 특별히 문턱(threshold) 신호대 잡음비라 부르며 SNR_{th} 로 표기한다.^[5]

$$MDI = \frac{\Delta I \times \tau_{atm}(R_{max})}{R_{max}^2} = (SNR)_{th} \times NEI \quad (5)$$

2.2. 최소탐지조도(MDI) 측정

점광원 표적 탐지장비의 최소탐지조도를 측정하기 위해서는 시스템 운용조건을 반영한 시험조건을 정확히 수립하고 적절한 시험절차를 마련하여야 한다. 이를 위해 본 연구에서는 실험실 환경에서 시준기를 이용하여 구현할 수 있는 측정

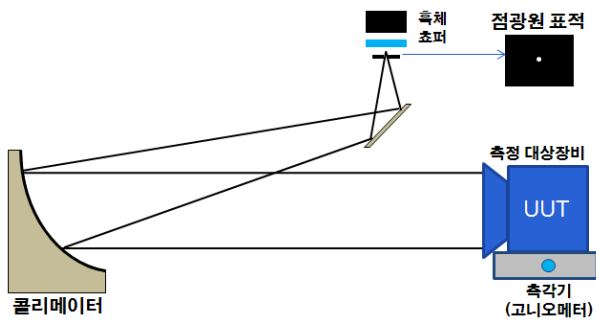


FIG. 2. Schematic diagram for measuring the Minimum Detectable Irradiance(MDI).

방법을 제안하고 결과를 획득하였다. 최소탐지조도를 측정하기 위한 기본형상은 그림 2와 같다.

2.2.1 점광원 표적 크기

최소탐지조도 측정은 점광원 표적을 대상으로 한다. 따라서 시험을 위해서는 표적 크기에 대한 정량적 기준이 필요하며 현재는 이에 대한 표준화된 정의가 없는 것으로 파악된다. 본 연구에서는 문헌연구를 통해 기존 시스템들에서 유사 측정에 적용하였던 점광원 표적에 대한 크기를 조사하였으며 다음과 같은 결론을 얻었다.^{[5]-[9]}

시스템 운용환경에서 주된 관심이 있는 표적 크기와 거리가 정해져 있다면 이를 모사하는 표적 크기를 설정하는 것이 가장 적절하다고 판단된다. 다만 관심 표적의 크기가 검출기 한개 픽셀이 바라보는 물체 공간상 크기인 A_{DAS}^1) 보다 작지만 특정 크기로 국한되어있지 않다면, 표적 크기를 A_{DAS} 의 1/10 크기로 설정하는 것이 점광원 표적의 대표성을 갖는 것으로 파악된다. 이는 시스템의 PVF(Point Visibility Factor) 성능 측정시 점광원 표적의 기준이 되는 크기이며, 적외선 탐지장비인 프랑스 SAGEM사의 적외선 탐색 및 추적장비 (VMB : Bispectral Monocephalous VAMPIRE)의 최소탐지조도(MDI) 측정에도 적용되었던 사례가 있다. 따라서 본 연구에서는 점광원 표적에 대한 기준 크기를 검출기 A_{DAS} 의 1/10로 제작하였다.

2.2.2 점광원 표적 복사에너지

점광원 표적의 복사에너지 제공은 대상 표적에 따라 적절한 온도 범위를 제공하는 흑체를 이용한다. 최소탐지조도를 정확히 측정하기 위해서는 대상장비(UUT : Unit Under Test)에 입사되는 복사조도를 정확히 알아야 한다. 즉, 표적에서 방출되는 복사에너지를 정확히 알아야 한다. 따라서 표적과 배경을 모사하는 광원의 표면 방사율(emisvity) 및 온도를 정확히 알 수 있는 흑체를 사용하는 것이 측정의 정확도를 높일 수 있다. 또한, 최소탐지조도 측정에 사용하는 표적은 매우 작은 점광원이기 때문에 시스템 요구 탐지율이 높거나 문턱값 설정이 높은 경우에는 필요한 표적과 배경 온도차가 커

지게 된다. 따라서 시스템에 따라서는 충분한 온도차를 제공할 수 있는 고온 흑체가 필요하게 된다.

2.2.3 점광원 표적 모사

최소탐지조도는 통계적 성능변수로 많은 표적에 대해 반복적인 탐지율 측정을 수행하게 된다. 따라서 신뢰성과 재현성 있는 결과를 얻기 위해서는 독립된 표적을 주기적으로 장비에 제공할 수 있어야 한다. 따라서 본 연구에서는 이를 효과적으로 구현하기 위해 초퍼(chopper)를 사용하였다.

시스템의 관심 표적이 시간에 따라 복사세기 분포가 변하는 표적이라면 초퍼를 이용하여 점광원 표적을 모사할 때 이를 반영한 표적 프로파일(profile)을 제공한다면 보다 정확한 최소탐지조도 측정결과를 얻을 수 있다. 표적 프로파일을 구현하는 방안은 다양하게 접근할 수 있으며 본 연구에서는 초퍼 판에 표적을 모사하기 위한 맞춤형 모양을 삽입하여 시간에 따른 점광원 표적의 복사세기 프로파일을 모사할 수 있는 방안을 구상하였다.

2.2.4 점광원 표적과 측정 대상장비(UUT) 정렬

최소탐지조도 측정에서 점광원 표적 영상을 검출기 픽셀 중앙에 정확히 놓이도록 정렬하는 일은 매우 까다로운 작업이며 유사 측정에서도 이를 구현하기 위한 제안들이 있어왔다.^{[9],[10]} 그러나 이러한 제안들은 정렬을 위한 전용 장비를 구축하거나 특별한 주변 장치를 동원해야 하는 번거로움이 있다. 따라서 본 연구에서는 다음과 같은 방법으로 광축 정렬을 수행하였으며 최소탐지조도 측정 결과 재현성이 있음을 확인하였다.

먼저 측정 대상장비를 정밀 측각기 위에 장착한다. 이때 요구되는 측각기의 분해능은 검출기 순간시계(IFOV : Instantaneous Field Of View)의 1/6 이하가 되도록 한다. 이는 대략적인 표적 크기를 A_{DAS} 의 1/10 크기로 가정할 때 표적 영상을 픽셀 중앙 근처에 위치시키기 위해 요구되는 최소이동 요구량이다. 다음으로 레이저 광원을 이용하여 표적 판의 수직방향과 대상장비의 광축을 정렬한다. 마지막으로 탐지장비를 통해 획득된 점광원 표적의 신호크기를 확인한다. 이때 신호크기는 표적 크기가 1/10 A_{DAS} 인 점광원에 의한 영상이라 하여도 검출기 한개 픽셀에만 영상이 맺히는 것이 아니라 광학적 수차와 회절효과에 의해 주변 픽셀에도 표적 신호가 영향을 미친다. 따라서 표적 신호를 중심으로 주변 픽셀의 출력값이 상하좌우 대칭성이 유지되며 점광원 표적 신호세기가 가장 크게 나오도록 탐지장비의 초점조정과 측각기의 미세조정을 수행한다.

2.2.5 측정형상 투과율 보정

점광원 표적으로부터 방사된 복사에너지가 대상장비에 도달하는 과정에는 크게 두 가지의 투과율 감쇄요인이 있을 수 있다. 첫 번째는 시준기의 광학적 투과율이며 두 번째는 광경로에 의한 대기투과율이다. 따라서 이 두 가지 요소는 복사조도를 계산할 때 반드시 포함시켜야 한다. 특히, 중적외

1) DAS(Detector Angular Subtense)

선 파장대역을 사용하는 장비의 경우 이산화탄소(CO₂)의 흡수 밴드에 의한 강한 감쇄는^[11] 광경로가 짧더라도 큰 영향을 미치므로 이에 대한 고려가 반드시 있어야 한다. 본 연구에서는 이들에 의한 영향을 분석하여 측정 결과에 보정인자로 반영하였으며, 광경로에 의한 대기투과율 분석을 위한 도구로는 ONTAR Coporation(미국)사의 MODTRAN 4.0을 이용하였다.

2.2.6 최소탐지조도 측정절차

앞서 기술한 측정조건으로 세팅된 시험형상에서 최소탐지조도를 측정하는 절차는 다음과 같다. 대상장비의 탐지 알고리즘을 동작시켜 각 온도차에 대한 탐지율을 산출한다. 이때 온도차는 높은 값에서 낮춰가며 탐지율을 측정하는 것이 시험의 특성상 효과적이다. 시스템 요구 탐지율에 해당하는 온도차를 정확히 측정하는 것은 어려우므로 찾고자 하는 탐지율 근처에서 목표 탐지율 이상에 해당하는 온도차와 이하인 온도차를 측정하여 curve fitting을 통해 목표 탐지율에 해당하는 온도차를 추정한다. 마지막으로 추정한 온도차에 해당하는 최소탐지조도를 아래의 식 (6)과 같이 계산한다.

$$MDI = \Delta L_{MDI} \times A_{target} \times \tau_{col} \times \tau_{path} \times \frac{1}{f_{col}^2} \quad (6)$$

여기서 ΔL_{MDI} 는 탐지율 90%에 해당하는 온도차로부터 구한 흑체의 복사휘도(radiance), A_{target} 은 점광원 표적의 면적, τ_{col} 은 시준기 광투과율, τ_{path} 는 표적과 장비 사이의 광경로에 대한 대기투과율, f_{col} 은 시준기 초점거리이다.

이와 같은 일련의 측정과정을 수행할 때 장비 내부의 온도 상승으로 인한 습셋 변화는 표적과 배경의 전기적 신호세기에 영향을 미친다. 따라서 이에 대한 고려가 필요하며 본 연구에서는 실험실 환경조건에서 장비가 열평형상태에 이르는 시간을 측정하여 시험 측정절차에 반영하였다.

III. 최소탐지조도 측정 결과

실험실 환경에서 적외선 탐지장비의 최소탐지조도를 측정하였다. 측정은 흑체 점광원 표적과 시준기를 이용하여 복사조도에 따른 탐지율을 구함으로써 수행하였다.

3.1. 측정형상 및 측정조건

그림 3은 실험실 환경에서 수행한 최소탐지조도 측정형상을 보여준다. 측정에 사용한 점광원 표적은 검출기 순간시계의 1/3 크기를 사용하였으며 이는 A_{DAS} 의 1/10 크기수준이다. 시준기는 이스라엘 CI SYSTEMS사의 METS10-1.0을 이용하였다. 표 1은 최소탐지조도 측정에 사용한 측정지원장비 및 표적조건을 보여준다.

점광원 표적과 장비의 정렬은 2.2.6에서 기술한 방법으로 수행하였다. 그림 3과 같이 정밀 측각기에 장비를 장착한 후 점광원 표적으로부터 나오는 출력 신호세기를 확인하여 표



FIG. 3. Configuration of the Minimum Detectable Irradiance(MDI) measurement.

적 신호세기가 최대가 되며 주변 픽셀에서 대칭되도록 정렬하였다. 정렬에 사용된 측각기의 정밀도는 0.02°로 제안되었던 시스템 요구조건을 만족한다.

3.2. 측정절차

최소탐지조도 측정은 장비를 2시간 이상 작동시킨 후 수행하였다. 이는 실험실 환경조건에서 시스템이 열평형상태에 도달하기 위해 필요로 하는 최소 요구시간으로 최소탐지조도 측정 동안 신호세기에 영향을 줄 수 있는 습셋 변화를 최소화하기 위해서이다.

표적은 초퍼를 이용하여 각 온도차 마다 200회 이상을 제공하도록 하였다. 탐지율 계산은 시스템에서 요구하는 특정 문턱 값으로 세팅된 탐지 알고리즘을 동작시켜 각 온도차에서 제공된 총 표적수에 대한 탐지율로 선언된 표적수의 비로 구하였다. 이때 온도차는 높은 값에서 낮춰가며 시스템 요구 탐지율 값을 찾는 방향으로 진행하였다. 시험의 특성상 시스템에서 요구하는 탐지율에 해당하는 온도차를 정확히 측정하는 것은 어렵다. 따라서 본 연구에서는 목표 탐지율의 ±5% 범위에 드는 온도차를 구하여 curve fitting을 통해 목표 탐지율에 해당하는 온도차를 구하였다.

3.3. 측정결과 및 분석

적외선 탐지장비의 요구 탐지율은 90% 이며 최소탐지조도 측정 결과 이를 만족하는 점광원 표적과 배경의 온도차는 48°C로 측정되었다. 표 2는 표적과 배경 온도차에 따른 탐지율 측정 결과를 보여주며 그림 4는 그래프로 표현한 결과이다. 그림에서 보듯이 탐지율이 표적과 배경 온도차 45°C에서 12.6% 정도이다가 48°C에서 90.2%로 급격히 상승함을 볼 수 있다.

최소탐지조도 측정조건으로부터 표적과 배경 온도차에 해당하는 복사조도 ΔE 는 식 (7)과 같이 구할 수 있다. 여기서 ΔL 은 흑체의 복사휘도(radiance) 차, A_{target} 은 점광원 표적의 면적, τ_{col} 은 시준기 광투과율, τ_{path} 는 표적과 장비 사이의 광

TABLE 2. Specifications of the measurement support equipment and target conditions used for Minimum Detectable Irradiance(MDI) measurement

측정 지원장비 및 표적	사 양
시준기(collimator)	•구경 : 14" •유효초점거리 : 120"
흑체	•가변 온도범위 : -20℃~90℃ @ 상온 •표면 방사율 : 0.97
측각기	•정밀도 : 0.02° •이동범위 : 360°(방위각), -15/+30°(고각)
점표적 크기	•순간시계의 1/3
초퍼	•외경 φ 80mm

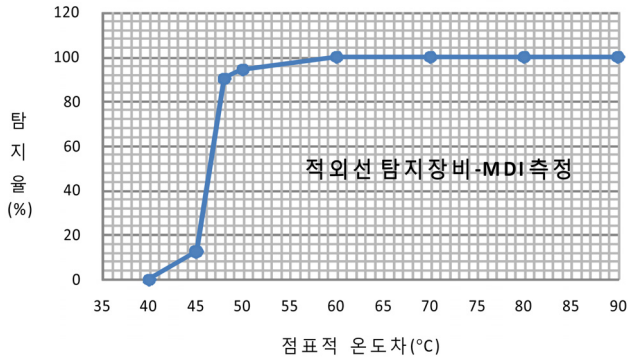


FIG. 4. Detection rate versus the temperature difference between point source target and background at average background temperature 23℃.

경로에 대한 대기투과율, f_{col} 은 시준기 초점거리이다.

$$\Delta E = \Delta L \times A_{target} \times \tau_{col} \times \tau_{path} \times \frac{1}{f_{col}^2} \quad (7)$$

식 (7)에서 복사휘도차 ΔL 은 표 3의 측정 데이터를 이용하여 Plank's blackbody law를 적용하여 구한다. 본 측정에 이용한 시준기의 광투과율 τ_{col} 은 0.94이며, 광경로 보상을 위한 대기투과율 τ_{path} 는 0.875이며 MODTRAN 4.0의 “New Model Atmosphere” 대기모델을 적용하여 산출하였다. 시준기의 초점거리 f_{col} 은 120“(표2 참조)이며 점광원 표적의 면적 A_{target} 은 0.0285 cm^2 이다. 이와 같은 측정 파라미터를 적용하여 식 (7)의 계산 결과를 복사조도에 따른 탐지율을 그래프로 표현하면 그림 5와 같다.

최소탐지조도는 시스템 목표 탐지율을 만족하는 복사조도이다. 따라서 본 적외선 탐지장비의 요구 탐지율 90%에 해당하는 복사조도는 $1.0 \times 10^{-10} [\text{W}/\text{cm}^2]$ 이 되며 장비의 최소탐지조도가 된다. 이를 정리하면 표 3과 같다.

TABLE 3. Measured detection rate according to the temperature difference between point source target and background

주변온도 [℃]	표적 온도 [℃]	배경 온도 [℃]	온도차 [℃]	탐지율 [%]
21	114.3	24.3	90	100.0
22	102.9	22.9	80	100.0
22	92.9	22.9	70	100.0
22	82.9	22.9	60	100.0
22	73.1	23.1	50	94.6
22	71.3	23.3	48	90.2
22.3	68.2	23.2	45	12.6
22.3	63.1	23.1	40	0.0

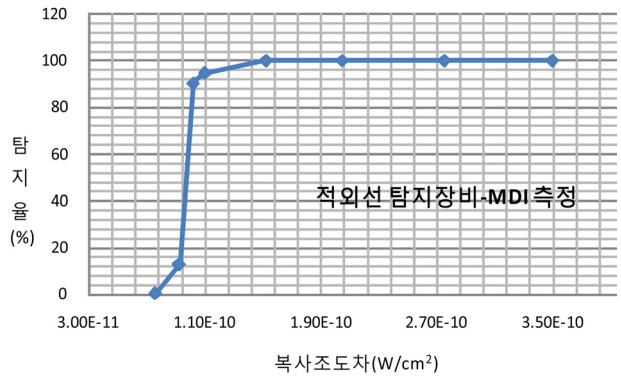


FIG. 5. Detection rate versus the Irradiance difference between point source target and background at average background temperature 23℃.

TABLE 4. Calculated Minimum Detectable Irradiance(MDI) of the InfraRed detection system

온도차[℃]	48	탐지율 90%를 만족하는 표적과 배경 온도차
표적 온도[℃]	71.3	점광원 표적 온도 = 온도차 + 배경 온도
배경 온도[℃]	23.3	배경온도
최소탐지조도(MDI) [W/cm²]	1.0E-10	표적과 배경의 표면 방사율 = 0.97

$$MDI = \Delta E \quad @ \text{탐지율} = 90\% \quad (8)$$

IV. 최소탐지조도 응용

4.1. 시스템 최대 탐지거리 예측

적외선 탐지장비에 대한 최소탐지조도 측정은 특정 복사세기를 갖는 점광원 표적에 대한 시스템의 최대 탐지거리 예측

을 가능케 한다. 즉, 2.1절의 식 (4)를 이용하면 최소탐지조도와 최대탐지거리에 대한 관계를 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$R_{\max}^2 = \frac{\Delta I \times \tau_{atm}(R_{\max})}{MDI} \quad (9)$$

이때 대기투과율 $\tau_{atm}(R_{\max})$ 는 MODTRAN(2.2.5절 참조)을 이용하여 구할 수 있다. 이때 대기투과율은 특성상 근거리에서는 강한 흡수 밴드 때문에 지수 함수보다 급속히 감소하지만 수 km가 넘어가면 흡수가 강한 밴드는 모두 사라지고 지수 함수에 가까운 감쇄 특성을 보인다. 따라서 원거리에 대한 대기투과율을 예측할 때에는 거리에 따라 지수 함수적으로 투과율이 떨어지는 Beer's-Lambert law^[12]를 사용하는 것이 계산상 편리하다. Beer-Lambert law를 적용하여 대기투과율 $\tau_{atm}(R_{\max})$ 를 표현하면 다음과 같다.

$$\tau_{atm}(R_{\max}) = \exp(-\gamma \times R_{\max}) \quad (10)$$

여기서 γ 는 대기 흡수에 의한 감쇄계수(attenuation coefficient)로 1 km당 감쇄율을 나타낸다. 따라서 최대 탐지거리에 대한 관계식 식 (9)는 다음과 같이 정리된다.

$$R_{\max}^2 = \frac{\Delta I \times \exp(-\gamma \times R_{\max})}{MDI} \quad (11)$$

따라서 식 (11)를 이용하면 시스템에 대한 최대 탐지거리를 계산할 수 있다. 예를 들어 최소탐지조도가 1.0×10^{-10} [W/cm²]이고 감쇄계수 γ 가 km당 0.14 라면, 표적의 복사세기 ΔI 가 100[W/sr] 일 때 시스템의 최대 탐지거리 R_{\max} 는 6.2 km가 된다. 이와 같이 최소탐지조도를 측정하면 각 표적의 복사세기 마다 탐지율에 따른 시스템의 최대 탐지거리를 예측할 수 있다.

4.2. 시스템 파라미터 trade-off 연구

최소탐지조도는 시스템의 문턱 신호대 잡음비(SNR_{th})와 등가잡음조도로 표현될 수 있다. 따라서 이와 같은 관계식을 이용하면 시스템 설계 초기에 장비를 설계하고 분석하는 trade-off 연구시 시스템 성능과 설계 파라미터를 연결하는 중요한 연결고리로 활용될 수 있다.

$$MDI = \frac{\Delta I \times \tau_{atm}(R_{\max})}{R_{\max}^2} = (SNR)_{th} \times NEI \quad (12)$$

V. 결 론

점광원 표적 탐지를 목적으로 하는 적외선 탐지장비의 최소탐지조도를 실험실 환경에서 측정하고 결과를 분석하였다. 최소탐지조도 측정에 사용한 적외선 탐지장비는 3.7 μm-4.8 μm

파장대역의 증적외선 전자광학센서로 640×512 영상 포맷에서 133.4°×35.7°의 시야각을 갖는 anamorphic 광학계를 탑재하고 있다.

본 연구에서 최소탐지조도 측정에 사용한 점광원 표적의 크기는 A_{DAS}의 1/10 이었으며 고온 흑체를 사용하여 복사 에너지를 제공하였다. 신뢰성 있는 탐지율 산출을 위해 초퍼를 사용하여 표적을 모사하였으며 정밀 측각기와 점표적 신호 세기의 대칭성을 이용하여 표적과 탐지장비를 정렬하였다. 최소탐지조도 산출은 표적과 배경의 온도차를 가변하며 시스템의 요구 탐지율을 만족하는 온도차를 구하고 이를 복사조도로 환산하여 구하였다. 이때 복사조도 계산은 측정조건으로부터 광학 투과율과 대기투과율을 반영하여 보정하였다. 이와 같은 시험조건에서 자체 개발한 적외선 탐지장비의 최소탐지조도를 측정한 결과 1.0×10^{-10} [W/cm²] 이었으며 이를 복사세기가 100[W/sr]인 표적에 적용한 결과 최대 탐지거리는 6.2 km로 예측되었다.

References

1. R. D. Hudson, *Infrared System Engineering* (John Wiley & Sons, USA, 1969), pp. 417-437.
2. R. G. Drigger, P. Cox, and T. Edwards, *Introduction to Infrared and Electro-optical Systems* (Artech House Inc., USA, 1999), p. 109.
3. G. C. Holst, *Testing and Evaluation of Infrared Imaging Systems* (SPIE Optical Engineering Press, USA, 2008), p. 211.
4. C. L. Wyatt, *Radiometric System Design* (Macmillan Publishing Company, USA, 1987), pp. 81-85.
5. G. C. Holst, *Testing and Evaluation of Infrared Imaging Systems* (SPIE Optical Engineering Press, USA, 2008), p. 142.
6. G. Poropat, "Effect of system point spread function, apparent size, and detector instantaneous field of view on the infrared image contrast of small objects," *Opt. Eng.* **32**, 2598-2607 (1993).
7. V. Samson, F. Champagnat, and J. Giovannelli, "Point target detection and subpixel position estimation in optical imagery," *Appl. Opt.* **43**, 257-263 (2004).
8. L. M. Beyer, S. H. Cobb, and L. C. Clune, "Ensquared power for obscured circular pupils with off-center imaging," *Appl. Opt.* **30**, 3569-3574 (1991).
9. P. R. Minarik, F. R. Seiter, D. L. Bohlin, S. S. Yoo, and J. J. Kramer, Efficient Calculation of Ensquared Energy in an Imaging System, USPC Class 382103 (2008).
10. G. Tidhar, S. Nadav, and M. Danino, "IRST tests standarization for panoramic IR sensors," *Proc. SPIE* **4030**, 86-95 (2000).
11. G. C. Holst, *Electro-optical Imaging System Performance* (SPIE Optical Engineering Press, USA, 2003), p. 251.
12. G. C. Holst, *Electro-optical Imaging System Performance* (SPIE Optical Engineering Press, USA, 2003), p. 249.