

EO/IR 피탐지 저감을 위한 표면 특성 분석 및 국방 적용 방안 연구

Study on Surface Characteristics and Defense Applications for EO/IR Signature Reduction

김동건¹⁾ . 현 철^{*,1)} . 김현승¹⁾ . 김 정¹⁾

Donggeon Kim¹⁾ . Chul Hyun^{*,1)} . Hyunseung Kim¹⁾ . Jung Kim¹⁾

[초 록]

전자광학/적외선(EO/IR) 센서는 군사 작전에서 표적 탐지 및 식별에 핵심적인 역할을 수행하며, 적외선 대역에서의 피탐지 저감 기술은 무기체계의 생존성을 결정하는 중요한 요소 중 하나이다. 본 연구에서는 표면 반사율과 방사율이 EO/IR 센서의 탐지 성능에 미치는 영향을 실험적으로 분석하였다. 방사율이 높은 무광 표면과 반사율이 높은 금도금 표면을 비교하여, 낮은 방사율(높은 반사율) 표적이 열적외선 대역(LWIR)에서 적외선 신호를 현저히 감소시켜 탐지를 회피할 수 있음을 확인하였다. 실험 결과를 바탕으로 EO/IR 탐지 회피를 위한 무기체계 설계 방향을 제시하고, 표면 코팅 기술 및 열 신호 저감 기법의 적용 가능성을 논의하였다. 또한, 국방 기술 발전을 위한 EO/IR 탐지 저감 소재 및 모델링 기술의 필요성을 강조하며, 향후 연구 방향을 제안하였다.

[ABSTRACT]

Electro-Optical/Infrared (EO/IR) sensors play a crucial role in military operations for target detection and identification. Reducing infrared detectability is a key factor in enhancing the survivability of weapon systems. In this study, we experimentally analyzed the impact of surface reflectivity and emissivity on EO/IR sensor detection performance. A comparative study was conducted between a high-emissivity matte surface and a high-reflectivity gold-coated surface. The results demonstrated that low-emissivity (high-reflectivity) targets significantly reduced infrared signals in the long-wave infrared (LWIR) spectrum, effectively decreasing detectability. Based on these findings, we propose design strategies for weapon systems to enhance EO/IR stealth capabilities, discussing the applicability of surface coating technologies and infrared signal reduction techniques. Additionally, we highlight the necessity of developing EO/IR signature reduction materials and modeling technologies for future defense applications.

Key Words : EO/IR Sensor(EO/IR 센서), Detection Reduction(피탐지 저감), Surface Reflectivity(표면 반사율), Emissivity(방사율)

1. 서 론

현대 전장에서 전자광학/적외선(EO/IR) 센서는 주야간을 불문하고 표적을 탐지하고 식별하는 데 핵심적인 역할을 하고 있다. 이러한 EO/IR 센서는 전자기 스펙트럼의 광학 영역(가

시광선부터 적외선)에 기반하여 주변을 “보는” 기술로서, 능동적인 탐지 형태를 갖는 레이더와는 다르게 EO/IR 은 수동적인 탐지 형태를 가지므로 표적 입장에서 탐지 여부를 인지하기 어렵다는 특징이 있다[1].

이로 인해 EO/IR 센서는 아군, 적군을 불문하고 정찰·타격 체계에서 매우 효과적인 감시 수단으로 활용되며, 이에 대응하여 아군 무기체계의 피탐지성을 저감시키는 기술은 생존성 확보를 위한 필수 요건으로 간주된다. 특히 적외선(IR) 대역에서 표면의 방사 특성과 온도를 제어함으로써 EO/IR 탐지를 회피하는 기술은 스텔스 설계에서 핵심 개념 중 하나이며, 다양한

1) LIG넥스원 해양연구소.2팀

(Maritime R&D Center, LIG Nex1, Korea)

* Corresponding author, E-mail: chul.hyun@gmail.com

Copyright © The Korean Institute of Defense Technology

Received : March 6, 2025 Revised : March 29, 2025

Accepted : March 30, 2025

무기체계에 적용 가능한 주요 설계 기준으로 여겨진다.

EO/IR 피탐지 저감을 위한 대표적 기술은 은폐막, 적외선 흡수 코팅, 열원 차폐, 그리고 능동 냉각 등을 포함한다. 이 중에서도 표면의 방사율 및 반사율을 조절하여 적외선 방사 에너지를 제어하는 수동적 방식은 구조적 변화 없이도 스텔스 효과를 구현할 수 있는 실용적인 방법으로 주목받고 있다 [2-4]. 나아가 최근에는 표면온도를 능동적으로 조절하여 배경과의 적외선 신호 차이를 줄이는 기술이 연구되고 있으며, 이는 적응형 은폐 기술로서의 가능성도 함께 평가받고 있다[5]. 이러한 능동 스텔스 기법 또한 다양한 표면 재질의 방사 특성에 대한 정확한 이해를 전제로 하며, 따라서 재질에 따른 적외선 방사 특성 분석은 수동·능동 기법을 불문하고 EO/IR 피탐지 저감 연구의 기반을 형성한다.

우리 주변의 많은 물체들의 표면은 대체로 고방사율을 가지고 있고 실제 군사 장비에는 주로 고방사율의 페인트가 적용되어 있는 탓에 관련 연구도 이러한 고방사율 재질 중심의 분석에 집중되어 있는 경향이 있다. 그러나 이론적으로는 동일한 표면온도 조건에서 저방사율 재질이 더 적은 적외선 에너지를 방사하게 되므로, 이를 표면 설계에 반영하면 주변 배경과의 대비를 줄일 수 있고, 결과적으로 EO/IR 탐지 가능성을 저감시킬 수 있다[6]. 그럼에도 불구하고, 다양한 방사를 특성을 갖는 재료를 활용한 실험 기반 연구는 재료 확보, 열적 환경 설정 등의 어려움으로 인해 상대적으로 부족하며, 관련 기술의 발전 속도 또한 제한적인 상황이다.

특히 기존 선행 연구들은 고방사율 재질을 중심으로 한 탐지 성능 분석에 집중되어 있으며, 저방사율 재질이 갖는 열적·광학적 특성을 정량적으로 파악하고 그 특성이 탐지 신호에 미치는 영향을 규명하는 연구는 충분히 축적되지 않은 실정이다. 다양한 방사율 조건 하에서의 실험적 데이터는 표적과 배경 간의 신호 대비, 관측 조건, 복사 환경 등 실제 작전 환경에 대응할 수 있는 스텔스 설계의 기초 자료가 될 수 있다.

이에 본 연구에서는 상이한 방사율을 갖는 표면 재질에 대해 EO/IR 센서가 수신하는 적외선 신호의 변화를 실험적으로 분석하고, 이를 기반으로 무기체계 설계 시 적용 가능한 EO/IR 탐지 회피 방안을 제시하고자 한다. 특히 저방사율 기반의 스텔스 설계 가능성을 실증적으로 제시함으로써, EO/IR 피탐지 저감 기술의 초기 설계 지침 마련에 기여하는 것을 본 논문의 목표로 한다.

2. EO/IR 센서와 피탐지 성능 개요

EO/IR 센서는 크게 전자광학(Electro-Optical) 센서와 적외선(Infrared) 센서로 구분되며, 전자는 주로 가시광선이나 근적외선 영역에서 빛의 반사를 이용해 영상을 얻고 후자는 중적외선(MWIR)이나 원적외선(LWIR) 등 열적외선 대역에서 물체의 자체 복사열을 감지한다.

물체를 EO/IR 센서로 탐지할 수 있는지는 표적과 배경 간 대비에 달려 있으며, 물체로부터 오는 신호는 자체 방사 성분과 반사 성분의 혼합으로 이루어진다. 가시광선이나 근적외선

영역에서는 주로 태양광 등의 반사된 에너지가 지배적이지만, 열적외선 영역에서는 물체 자체의 열복사(온도 및 방사율에 의해 결정)가 주된 신호원이 된다. 이때 배경과 표적의 온도 차이가 클수록 열적 대비가 뚜렷해져 탐지가 용이해진다. 센서의 원리상 일정 거리에서의 표적 대비는 목표물과 배경의 복사휘도 차이로 나타나며, 이는 목표물-배경 온도차에 비례한다. 따라서 군용 열상장비의 탐지 성능은 주어진 환경에서 표적이 배경에 비해 얼마나 뚜렷한 열 신호 대비를 보이느냐에 좌우된다.

표적의 방사율(emissivity)과 반사율(reflectivity)은 그 열적 신호(signature)를 좌우하는 핵심 물성이다. 키르히호프의 법칙에 따르면 불투명한 표면의 방사율과 반사율의 합은 1이므로, 반사율이 높을수록 방사율은 낮아진다. 방사율이 높다는 것은 물체 표면이 스스로 복사를 잘 한다는 의미이며, 반사율이 높다는 것은 외부 에너지를 많이 반사하고 자체 복사는 적다는 의미이다. 이는 방사율 변화가 탐지 거리나 대비도에 영향을 줄 수 있음을 뜻한다. 결국 피탐지 여부는 대상 물체의 온도와 방사율(자체 방사 성분) 그리고 주변 배경 및 태양/하늘 복사 등 환경 반사 성분의 상호작용 결과로 결정된다. 센서는 이러한 총합 복사에너지의 대비를 포착하며, 표적이 배경에 비해 충분한 대비값을 보일 때 탐지가 이루어진다. 이를 염두에 두고, 본 연구에서는 특히 표면 반사 특성이 적외선 탐지에 미치는 영향을 분석한다[3].

3. 실험 및 계측 방법

3.1 실험 개요

표면 반사율 차이에 따른 EO/IR 탐지 특성을 분석하기 위해, 기존 연구를 바탕으로 반사율이 크게 다른 두 종류의 표적을 비교하였다.

시험 표적은 5mm두께의 알루미늄 평판으로 하나는 군용 무광 검정색 페인트로 도장하여 방사율 약 0.95의 표적을 구현하고, 다른 하나는 금도금 처리된 상용 평판(미국 Labsphere사의 Infragold)으로 반사율 약 0.94에 달하는 표적을 준비하였다[4]. 전자는 높은 방사율/낮은 반사율 특성을 가지며, 후자는 낮은 방사율/높은 반사율 특성을 갖도록 제작된 것이다.

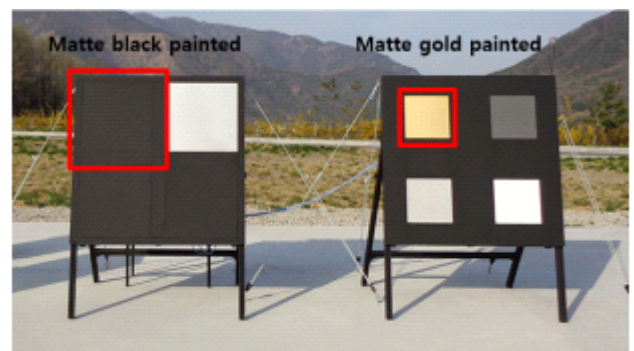


그림 1. 시험장에서의 평판 표적

Fig. 1. The plate targets on the test site

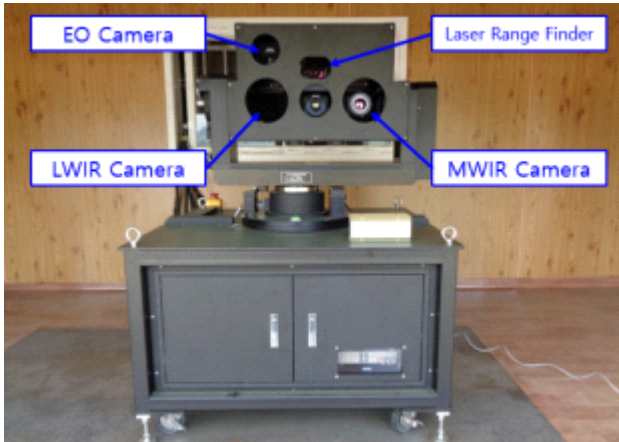


그림 2. 카메라 시스템 구성
Fig. 2. The camera assembly

본 연구에서는 두 평판을 야외 환경에 나란히 배치하여 동일한 환경 조건에 노출시켰다. 평판의 후면에는 표면온도를 계측하기 위한 센서 삽입용 홀을 가공하고 그 안에 열전대(Thermocouple K-type)를 열전도 레진을 이용해 부착하였다. 열전대는 평판 중심을 기준으로 십자(+) 형태로 5개를 배치하고 각각은 데이터로거에 연결하여 표면온도 측정 결과를 저장하였다.

3.2 측정 장비 및 계측 방법

적외선 신호 계측은 FLIR 사의 열화상 카메라를 이용하였다. 중적외선 대역(MWIR, 3-5 μm)의 A6750sc 모델과 원적외선 대역(LWIR, 7.5-9.5 μm)의 A6750sc SLS 모델을 각각 활용하여 실시간으로 표적의 적외선 방사 신호를 측정하였다. 카메라는 표적에서 방출되거나 반사된 적외선 에너지를 겔보기 온도(apparent temperature)로 환산하여 기록하며, 이는 실제 표면온도와 방사에너지를 종합적으로 반영한 값이다.

실험은 주간과 야간 조건에서 모두 수행되었다. 주간 실험 동안에는 강한 태양 복사 에너지가 표적에 입사되므로 두 표적의 온도 및 적외선 신호 변화에 미치는 태양의 영향을 관찰할 수 있었다. 야간에는 태양광이 없고 대기 복사(밤하늘로부터 오는 장파 복사)만 존재하므로, 외부 열원이 없는 상황에서 표적 자체 특성에 따른 신호 차이를 비교하였다. 또한 주변 기상 조건(기온, 풍속, 습도 등)과 태양 일사량도 별도로 계측하여 표적 신호와의 상관성을 분석하였다.

기상 조건 계측에는 두 가지 장비를 이용하였다. 먼저 풍향, 풍속, 대기온도, 상대습도, 기압, 총 일사량 계측에는 Lufft 사의 WS501 종합 기상 환경 측정 장치(weather station)를 이용하였고, 태양 복사에너지(직사 성분, 확산 성분), 대기 복사에너지의 계측에는 Kipp&Zonen 사의 SOLYS2라는 태양 추적 장치(solar tracker)에 장착된 각 에너지 성분을 계측하는 센서를 이용하였다.

이러한 실험 구성을 통해 계측된 자료는 표적의 방사율/반사율 차이에 따른 적외선 신호 특성을 정량적으로 파악하는 한편, 향후 IR 신호 예측 모델을 검증하기 위한 기초 데이터로 활용할 수 있다.

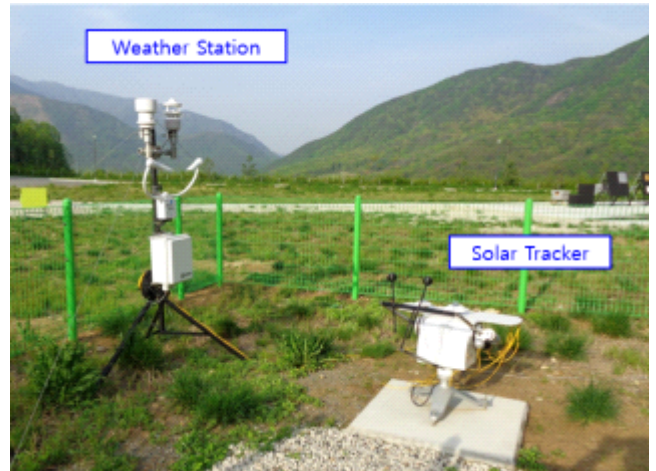


그림 3. 시험장에 설치된 기상 관측 장비 및 태양 추적 장치
Fig. 3. The weather station and the solar tracker installed in the test site

4. 피탐지 성능 분석 결과

실험 결과, 표면 반사율이 높은 표적과 낮은 표적은 적외선 신호에서 뚜렷한 차이를 보였다. 우선 야간의 경우, 두 표적 모두 주변 대기 온도와 유사한 온도 변화 양상을 보여 배경과의 대비가 전반적으로 크지 않았다. 특히 방사율이 낮은 금도금 표적의 경우 스스로 방출하는 복사에너지가 적기 때문에, 밤하늘 등 주변 환경의 복사에너지를 주로 반사하여 겔보기온도가 주변 온도와 비슷하게 나타났다. 그 결과 야간에는 저방사율(고반사율) 표적이 EO/IR 센서에 탐지될 가능성이 상대적으로 낮아지는 것이 확인되었다. 이는 금도금 표적이 야간에 주변보다 눈에 띄는 열 신호 대비를 거의 생성하지 않기 때문이며, IR 센서 영상에서는 탐지 난이도가 증가하는 효과를 주었다.

주간에는 태양 복사에 의해 두 표적의 거동에 큰 차이가 나타났다. 태양빛을 잘 흡수하는 검정색 무광 표적은 표면 온도가 크게 상승하여 주변보다 뜨겁게 관측되었고, 방사율이 높아 자신의 높은 온도가 고스란히 적외선 신호로 나타났다. 한편 반사율이 높은 금도금 표적은 많은 태양 에너지를 표면에서 반사하므로 자체적으로 흡수하는 열이 적어 표면 온도가 상대적으로 낮게 유지되었다. 더욱이 MWIR 대역에서는 금도금 표적이 태양광을 일부 산란 반사함에 따라 검정색 표적에 비해 겔보기온도 차이가 표면 온도 차이보다 작게 나타났다. 이는 금도금 표적이 태양열을 흡수하지 않음으로써 온도 상승을 억제할 뿐 아니라, 카메라 방향으로 산란되는 일부 태양 반사 성분이 겔보기 밝기를 보정하는 효과를 낳았기 때문으로 풀이된다. 그 결과 중적외선(MWIR) 영상에서 두 표적의 명암 차이는 예상보다 줄어들었다.

반면 원적외선(LWIR) 대역에서는 금도금 표적의 열 신호 감소 효과가 두드러졌다. 낮 동안 태양열에 의해 가열된 경우에도 LWIR 영역에서 금도금 표적의 겔보기온도와 복사휘도는 현저히 낮게 관측되었는데, 이는 이 표적의 방사율이 매우 낮아 자체 열복사가 거의 방출되지 않기 때문이다. 앞서 언급한

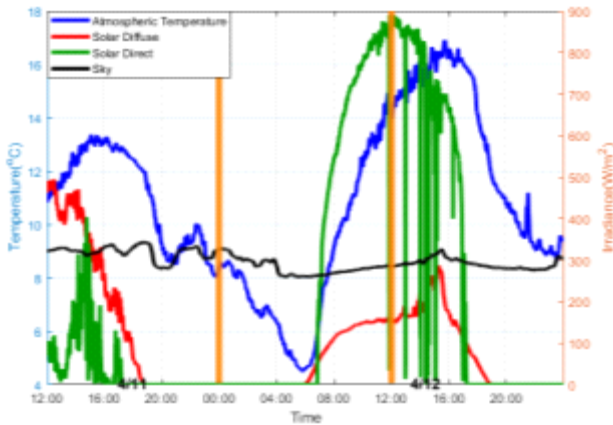


그림 4. 환경 조건 측정 결과

Fig. 4. Environmental condition measurement results

표 1. 주요 기상 조건 측정 결과

Table 1. Measured essential weather conditions

기상 요소	4/12 00:00	4/12 12:00
대기온도	8.38℃	14.1℃
풍속	0.45m/s	1.44m/s
태양 직사 에너지	0 W/m²sr	871.558 W/m²sr
태양 확산 에너지	0 W/m²	152.5 W/m²
대기 복사 에너지	325.9 W/m²	284.9 W/m²

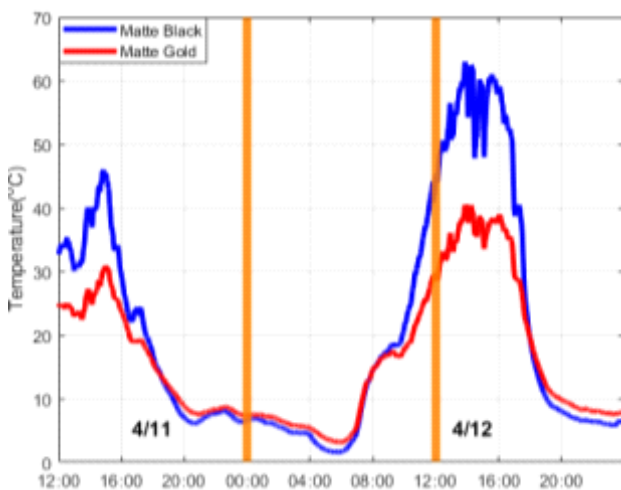


그림 5. 표면 온도 측정 결과

Fig. 5. Surface temperature measurement results

표 2. 표면 온도 및 겉보기 온도 측정 결과

Table 2. Measured results of the surface and the apparent temperature

표면온도	무광검정 표면	금도금 표면
4/12 00:00	6.65℃	7.36℃
4/12 12:00	44.87℃	29.67℃
겉보기온도 중적외선(MWIR)	무광검정 표면	금도금 표면
4/12 00:00	6.6℃ (0.90 W/m²sr)	3.9℃ (0.80 W/m²sr)
4/12 12:00	42.1℃ (3.10 W/m²sr)	38.8℃ (2.79 W/m²sr)
겉보기온도 원적외선(LWIR)	무광검정 표면	금도금 표면
4/12 00:00	5.5℃ (15.04 W/m²sr)	0.5℃ (13.57 W/m²sr)
4/12 12:00	40.1℃ (28.20 W/m²sr)	-4.7℃ (12.13 W/m²sr)

키르히호프 법칙에 따라, 금도금 표적처럼 반사율이 높으면 방사율이 낮아져 같은 온도에서도 복사 에너지 방출량이 줄어든다. 게다가 LWIR 대역은 태양 복사에너지가 거의 없고 주로 물체 자신의 열적 복사가 관여하는 영역이므로, 방사율이 낮은 표적은 해당 파장에서 사실상 “차갑게” 보인다. 실험에서는 금도금 표적의 LWIR 신호가 동일 조건에서 무광 검정 표적보다 훨씬 미약하게 나타났으며, 주어진 표면온도나 일사량에 비해 예상보다 현저히 낮은 수준임이 확인되었다. 이는 곧 LWIR 대역에서 고반사율 표적의 탐지 확률이 크게 떨어짐을 의미한다. 요약하면, 반사율이 높은 표적은 적외선 특히 LWIR 대역에서 배경과의 대비를 크게 줄여 EO/IR 탐지를 회피하는 효과가 있음을 본 연구의 계측을 통해 검증하였다[5].

한편, 환경 요소의 영향도 함께 분석되었다. 태양 복사는 주간에 표적의 온도 상승을 유발하여 열적 대비를 증폭시키는 한편, 반사율이 높은 표적의 경우 오히려 태양 에너지를 반사하여 온도 상승을 억제함으로써 탐지 위험을 낮추는 양면성이 있었다. 또한 금도금 표적처럼 확산 반사형 표면은 태양 에너지를 특정 방향으로 거울반사하지 않고 산란시키므로, 운용 측면에서 적외선 스텔스를 구현할 때 광학적 눈부심(glint) 없이 태양열 흡수를 줄일 수 있다는 장점이 있다. 대기 복사(주로 밤하늘로부터 오는 장파복사)의 경우 주야간 모두 표적에 지속적으로 입사하지만, 그 에너지는 태양에 비해 미미하여 표적 온도에 큰 영향을 주지는 않는다. 다만 밤에는 주변 환경이 어둡고 차가워지므로, 방사율이 높은 표적일수록 자신의 열복사로 인해 배경 대비도가 높아져 탐지될 가능성이 커지고, 방사율이 낮은 표적일수록 주변 냉각된 배경을 반사하여 상대적으로 은폐 효과를 얻는 것이 관찰되었다.

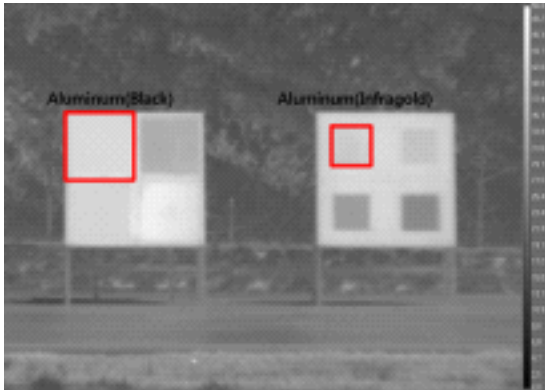


그림 6. 표적의 MWIR 영상
Fig. 6. An MWIR Image of the targets

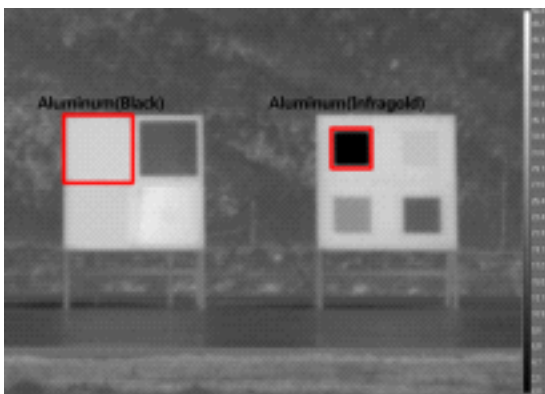


그림 7. 표적의 LWIR 영상
Fig. 7. An LWIR Image of the targets

이처럼 환경 요소(태양, 대기)와 표면 재질 특성(방사율/반사율)의 상호작용을 종합적으로 고려해야 EO/IR 센서에 대한 피탐지 성능을 정확히 평가할 수 있다.

5. 국방 적용성 및 향후 발전 방향

5.1 EO/IR 스텔스 설계 적용

본 연구 결과는 군사 무기체계의 스텔스 설계에 직접적인 시사점을 제공한다. 표적의 열적 신호를 줄이기 위해서는 표면의 방사율을 낮추고 반사율을 높이는 재질이나 코팅을 적용하는 것이 효과적임을 알 수 있다. 예를 들어 본 실험에서 사용된 금도금 확산반사 코팅과 유사하게, 저방사율 특성을 갖는 특수 페인트나 메탈 코팅을 무기 플랫폼의 외장에 도포하면 열적위장(Thermal Camouflage) 효과를 얻을 수 있다. 이러한 코팅은 물체가 주변 환경과 열 평형을 이루도록 돕거나, 적어도 적 IR 센서에 탐지될 만큼의 온도 대비를 줄여준다. 실제로 IR 스텔스 도료나 차폐재가 일부 군용 장비에 적용되고 있으며, 이를 통해 전차나 차량이 열상 탐지기에 드러나는 고온 부위를 감춤으로써 생존성을 높이고 있다.

또한 표면 색상 및 질감도 고려해야 하는데, 다중스펙트럼 스텔스를 달성하려면 가시광 위장색과 적외선 저방사율을 동

시에 만족해야 한다. 예를 들어 밝은 색 도장은 태양열 흡수를 줄여 온도 상승을 막을 수 있으나 방사율이 높다면 소용이 없고, 금속성 코팅은 방사율은 낮지만 가시광 반사가 커서 육안에 노출될 수 있다. 따라서 확산 반사형이면서 저방사율을 지닌 코팅 소재 개발이 중요하다. 이는 레이더 흡수체 개발과 유사하게, 적외선 대역에서도 표적 신호를 흡수 또는 반사하여 외부로 덜 방출하게 하는 소재 기술로 볼 수 있다.

표면 코팅 기술과 관련하여 저방사율 스텔스 페인트, 적외선 차폐 코팅 등의 도입을 고려할 수 있다. 이러한 코팅을 적용하면 장비의 IR 열신호를 획기적으로 낮출 수 있어 적의 열상 감지에 대응할 수 있다. 우리 군도 향후 이와 같은 스텔스 코팅 기술을 차량, 함정, 항공기 등에 적용함으로써 EO/IR 탐지 회피 능력을 제고할 수 있다. 특히 엔진 배기가스나 열원 부위를 단열재로 감싸 열 발산을 줄이고, 표면은 냉각 효과가 있는 코팅으로 처리하여 적외선 신호 대비를 최소화하는 방안을 생각해볼 수 있다.

코팅 외에도, 능동적으로 표적의 온도를 낮추거나 열을 분산시키는 적외선 신호 저감 장치들을 고려할 수 있다. 예를 들어 공랭/수랭 시스템을 차량 외피에 적용하여 열을 식히거나, 열전소자를 이용한 능동 냉각으로 표면 온도를 주변과 비슷하게 유지하는 기술도 연구되고 있다. 다만 이러한 장치는 에너지 소모와 복잡성 증가로 실제 적용에는 한계가 있으므로, 기본적으로 피탐지 저감 설계는 수동형 재질 특성에 의존하는 것이 우선시 되고 있다.

5.2 국내 기술 개발 필요성과 미래 방향

현재 EO/IR 탐지 및 스텔스 관련 기술은 일부 선진국에서 활발히 개발되어 왔으나, 국내 독자 기술 확보도 필요하다. 우리나라의 경우 한때 적외선 신호 예측 소프트웨어로 해외 상용 코드(OKTAL-SE, MuSES 등)를 도입하여 운용해왔으나, 최근 들어 자체 개발이 꾸준히 이루어지고 있다. 이처럼 국산 IR 모델링/시뮬레이션 도구를 개발하면, 무기체계 개발 단계에서 서부터 EO/IR 서명(signature)을 예측하고 저감하는 설계를 반영할 수 있게 된다. 또한 외국 기술 의존도를 낮춰 보안성과 지속성을 담보할 수 있다.

향후에는 인공지능(AI) 기술을 접목한 EO/IR 탐지 회피 기술도 고려할 수 있다. 예를 들어 AI를 활용하여 실시간으로 주변 배경과 표적의 열 패턴을 분석하고, 이에 맞춰 능동 위장 패널의 온도나 색상을 변화시키는 개념을 생각해볼 수 있다. 일부 연구에서는 열전소자 어레이를 이용해 배경과 동일한 열 영상을 표적 표면에 구현하는 적응형 열위장을 선보이기도 했는데, 여기에 AI가 추가되면 변화하는 환경에도 자동으로 최적의 위장 패턴을 유지할 수 있을 것이다. 또한 AI 기반 EO/IR 센서 모델을 활용하면 적 센서의 탐지 알고리즘을 역으로 분석하여, 우리 측 플랫폼이 특정 센서에 탐지될 확률을 예측하고 최소화하는 설계 피드백을 제공할 수 있다. 이런 지능형 스텔스 설계는 미래 전장에서 점차 중요해질 것으로 전망된다.

끝으로, 다중 스펙트럼 스텔스 측면에서 EO/IR뿐 아니라 레이더, 음향, 가시광 위장 등을 통합적으로 고려하는 방향으로 발전이 필요하다. 적외선 저피탐지 기술은 레이더 스텔스와 상

충하거나 새로운 제약을 낳을 수 있으므로, 전반적인 플랫폼 설계 최적화가 요구된다. 예컨대 적외선 신호를 줄이기 위해 금속성 코팅을 하면 레이더 반사면적(RCS)이 늘어날 수 있고, 반대로 레이더 흡수 재질은 태양열 흡수가 커서 적외선 신호가 증가할 수 있다. 이러한 트레이드오프를 해결하기 위해 소재공학적인 연구와 시뮬레이션을 통한 균형 잡힌 설계가 중요하다. 결국 국방 과학기술 정책 차원에서 EO/IR 스텔스 분야에 대한 지속적인 투자와 연구개발이 필요하며, 산학연 협력을 통해 차세대 위장 기술을 선도해 나가야 할 것이다.

6. 결 론

본 연구에서는 EO/IR 센서 탐지 성능에 영향을 미치는 표적 반사율 및 방사율의 효과를 실험적으로 분석하였다. 방사율이 높은 무광 검정 표면과 반사율이 높은 금도금 표면을 비교한 결과, 낮은 방사율(높은 반사율) 표적은 열적외선 대역(LWIR)에서 현저히 낮은 적외선 신호를 보여 주변 배경에 융화됨으로써 탐지되기 어렵다는 것을 확인하였다. 이는 반사율/방사율 제어를 통해 무기체계의 IR 피탐지성을 줄일 수 있음을 시사한다.

이러한 분석을 바탕으로, 무기체계 설계 시 EO/IR 탐지 회피 기술을 적용할 수 있는 방안을 모색하였다. 예를 들어 표면 코팅을 통해 적외선 방사특성을 조절하거나, 열원 차폐 및 냉각 기법을 동원하여 열 신호를 감소시키는 등의 스텔스 설계를 제안하였다. 아울러 국내에서도 관련 모델링 및 소재 기술을 적극 개발하여 EO/IR 스텔스 분야에서 자립도를 높여야 함을 강조하였다.

마지막으로, 본 연구는 평판 표적에 대한 실험으로 기본적인 특성을 규명하였으나, 향후에는 다양한 환경 조건(계절, 기상)과 다양한 재질/형상의 표적에 대해서도 추가 검증이 필요하다. 예를 들어 입체형 표적이나 복합 재질로 이루어진 실제 장비에 대해서도 방사율/반사율 변화가 비슷한 효과를 나타내는 지 장기적으로 관찰해야 한다. 또한 센서 관측 각도나 배경 복잡성에 따른 탐지 확률 변화 등 현실적인 변수들을 고려한 연구가 이어져야 할 것이다. 이러한 지속적인 연구개발 노력을 통해, 궁극적으로 우리 군은 적의 EO/IR 감시망을 뚫고 임무를 수행할 수 있는 한층 향상된 스텔스 능력을 갖추게 될 것으로 기대한다.

References

- [1] J. Ratches, R. Vollmerhausen and R. Driggers, "Target acquisition performance modeling of infrared imaging systems: Past, present, and future," IEEE Sensors J. 1, pp. 31-40, 2001.
- [2] Z. Liu, H. Ukida, P. Ramuhalli, and K. Niel, "Integrated Imaging and Vision Techniques for Industrial Inspection - Infrared Vision : Visual Inspection Beyond the Visible Spectrum", Springer

- Press, pp. 41-58, 2015.
- [3] M. Bae, T. Kim, T. Kim, D. Jung and H. Cho, "Analysis on Infrared Stealth Performance with Emissivity Controlled Aircraft Surface Structure at Various Background," J. Computational Structural Engineering Institute of Korea, Vol. 29, No. 5, pp. 455-461, 2016.
- [4] H. Cho, I. Chang, J. Nam and K. Park, "Infrared stealth technology via surface emissivity control," SASE 2023 Fall Conference, pp. 404-405, 2023.
- [5] D. Kim, K. Han, J. Choi and T. Kim, "Experimental verification of active IR stealth technology by controlling the surface temperature using a thermoelectric element," J. of Mechanical Science and Technology, Vol. 30, No. 10, pp. 1-6, 2016.
- [6] D. Kim, K. Han, J. Choi and T. Kim, "Comparison of Measured and Simulated IR Signals from a Scaled Model Ship," Proc. of SPIE, Vol. 8857, pp. 88570M-1-10, 2013.
- [7] R. Siegel and J. R. Howell, "Thermal Radiation Heat Transfer", McGraw-Hill, 1992.
- [8] "Technical Guide : Reflectance Materials and Coatings," Labsphere.
- [9] Y. Cengel and A. Ghajar, "Heat and Mass Transfer," 5th Ed., McGraw-Hill, 2015.