

## 재돌입 잔해물의 적외선 신호 특성 분석과 본체 식별 가능성 평가

### Infrared Signature Characteristics of Reentry Debris and Evaluation of Main-Body Discrimination Feasibility

김동건<sup>\*1)</sup> . 노태원<sup>1)</sup> . 손현구<sup>1)</sup> . 박지환<sup>2)</sup> . 김기웅<sup>2)</sup> . 류성훈<sup>1)</sup>

Donggeon Kim<sup>\*1)</sup> . Taewon Noh<sup>1)</sup> . Hyeongu Son<sup>1)</sup> . Jihwan Park<sup>1)</sup> . Keewoong Kim<sup>1)</sup> . Sunghun Ryu<sup>\*1)</sup>

#### [ 초 록 ]

본 연구에서는 대기 재돌입 환경에서 재돌입 본체와 함께 발생하는 잔해물의 적외선 신호 특성을 분석하고, 두 대상 간의 구분 가능성을 평가하였다. 재돌입 본체는 비교적 큰 크기와 높은 열용량으로 인해 고도 변화에 따른 표면 온도 및 복사 강도의 변화가 완만한 반면, 잔해물은 크기와 열용량이 작아 고도 변화에 따라 표면 온도와 적외선 복사 강도가 민감하게 변동한다. 이러한 잔해물의 불규칙적인 적외선 신호는 EO/IR 기반 탐지·추적 체계에서 오경보를 유발하는 주요 원인이 된다. 본 연구에서는 전산유체해석을 통해 잔해물 주변의 고온 유동장과 표면 열응답을 산출하고, 이를 기반으로 MuSES를 이용하여 MWIR 대역 적외선 신호를 계산하였다. 해석 결과, 잔해물은 고도 저하에 따라 열유속과 복사 강도가 급격히 증가하며, 본체 대비 시간·고도 민감도가 큰 것으로 나타났다. 이러한 특성은 잔해물이 생성하는 불규칙 신호를 판별하는 데 활용될 수 있으며, 본체 중심의 탐지·추적 과정에서 발생할 수 있는 오경보 감소에 기여한다. 본 연구의 결과는 재돌입 표적의 IR 기반 구분·식별 알고리즘 개발 및 장거리 탐지 체계 성능 향상에 활용될 수 있다.

#### [ ABSTRACT ]

This study investigates the infrared signature characteristics of debris generated during atmospheric reentry and evaluates the feasibility of discriminating such debris from the main body. Due to their small size and low thermal inertia, debris fragments exhibit rapid variations in surface temperature and radiative intensity with changing altitude, which often act as major sources of false alarms in EO/IR-based tracking systems. High-temperature flow fields and surface thermal responses were obtained through CFD analysis, and MWIR signatures were computed using MuSES. The results show that debris experiences a steep increase in heat flux and infrared intensity as altitude decreases, displaying significantly higher sensitivity to trajectory variations compared to the main body. These behaviors provide useful discriminative features for filtering debris-induced irregular signals and reducing false alarms in long-range detection and tracking. The findings can support the development of IR-based discrimination algorithms and enhance the effectiveness of reentry target surveillance systems.

**Key Words** : Infrared Signature(적외선 신호), Reentry Debris(재돌입 잔해물), CFD Analysis(전산유체해석), Target Discrimination(표적 식별)

#### 1. 서론

대기 재돌입(atmospheric reentry)은 비행체가 수 km/s 이상의 고속으로 대기권에 진입하는 과정으로, 이때 강한 충격과

가 형성되고 공기 성분의 해리 및 이온화가 동반된 고온 유동장이 발생한다<sup>1-4)</sup>. 이러한 환경에서 표면 열유속은 급격히 증가하며, 이에 따라 적외선(infrared, IR) 복사도 크게 증대된다. 재돌입 표적은 중적외선(Mid-Wave Infrared, MWIR) 대역(3-5 $\mu$ m)에서도 높은 복사 신호를 형성하므로, 전자광학/적외선(Electro-Optical/Infrared, EO/IR) 감시체계에서 중요한 탐지 대상이 된다<sup>5,6)</sup>.

그러나 실제 재돌입 과정에서는 본체(main body) 외에도 다수의 잔해물이 함께 발생할 수 있으며, 이들 잔해물은 크기와 열용량이 작아 고도 변화에 따라 표면 온도와 복사 세기가

1) LIG넥스원 해외사업연구소·유도무기개발단·체계종합2팀  
(Global PGM System Integration, LIG Nex1 Co. Ltd., Korea)  
2) 주식회사 써모(Thermo Co. Ltd.,)

\* Corresponding author, E-mail: donggeon.kim@lignex1.com  
Copyright © The Korean Institute of Defense Technology  
Received : December 17, 2025 Revised : December 30, 2025  
Accepted : December 30, 2025

빠르게 변동하는 특징을 가진다. 이렇게 불규칙적인 적외선 신호는 관측 영상에서 점광원 형태로 나타나 본체와 혼재되며, 결과적으로 오경보(false alarm)나 잘못된 추적 궤적(false track)을 유발하는 요인이 된다<sup>17, 8)</sup>.

기존 연구는 주로 재돌입 본체의 열·복사 특성에 집중하고 있으며, 잔해물의 신호 특성은 상대적으로 다루어진 사례가 적다. 특히 잔해물의 고도 변화 민감도, 표면 온도 분포, 복사 강도 변동성 등을 본체와 비교하여 체계적으로 분석한 연구는 제한적이다. 또한 재돌입 환경의 적외선 신호 예측을 위해 사용되는 시뮬레이션 도구의 활용 사례는 증가하고 있으나, 잔해물에 대한 정량적 평가를 통해 식별 가능성을 검토한 사례는 충분하지 않다<sup>9-11)</sup>. 잔해물이 생성하는 불규칙 복사 신호는 탐지·추적 체계의 성능을 저하시킬 수 있으므로, 잔해물의 적외선 신호 특성을 파악하고 본체와의 차이를 규명하는 연구는 실제 감시체계에서 오경보 감소와 표적 식별 안정성 확보를 위해 필수적이다.

본 연구에서는 전산유체해석(CFD)을 통해 잔해물 주변에서 형성되는 고온 유동장과 표면 열응답을 계산하고, 이를 기반으로 미국의 ThermoAnalytics 사에서 개발된 MuSES를 이용하여 MWIR 대역에서의 적외선 신호를 예측하였다. 또한 선행 연구에서 제시된 본체 재돌입 특성 자료를 활용하여 동일 조건에서 두 대상의 신호 변화를 비교하였다<sup>12)</sup>. 이를 통해 재돌입 환경에서 잔해물이 본체와 구분되는 물리적 특징을 도출하고, EO/IR 탐지·추적 과정에서 발생할 수 있는 오경보 요인을 분석하였다. 본 연구의 결과는 재돌입 표적의 적외선 신호 기반 식별 알고리즘 개발과 장거리 감시체계의 신뢰성 향상에 기여할 것으로 기대된다.

## 2. 재돌입 환경 개요 및 해석 절차

대기 재돌입 환경에서는 비행체가 수 km/s 이상의 속도로 대기권에 진입함에 따라 강한 충격파가 형성되고, 그 내부에서는 공기 성분의 해리와 이온화가 동시에 발생한다. 이러한 고온 비평형 유동은 공력 가열 현상을 지배하는 핵심 요소로, 표면 열유속과 적외선 신호의 공간적·시간적 변화를 결정한다. 특히 재돌입 구간 60~30 km에서는 대기 밀도가 급격하게 증가하고, 충격층 두께가 감소하여 열유속이 비선형적으로 상승하는 특성이 나타난다. 이 구간의 열·유동 특성을 정확하게 예측하는 것은 본체와 잔해물 모두의 적외선 신호 변화를 물리적으로 해석하기 위한 핵심 요소이며, 이를 위해 본 연구에서는 고온 공기 모델과 표준 대기 조건을 반영한 해석 환경을 적용하였다<sup>1-4)</sup>.

본 연구에 적용된 해석 절차는 고온 유동장 계산(Computational Fluid Dynamics, CFD), 고체 열전달 해석(Conjugate Heat Transfer, CHT), 그리고 중적외선 신호 해석의 세 단계로 구성된 다중 물리 연계 해석 체계이다. 첫 번째 단계인 유동 해석에서는 압축성 Navier-Stokes 방정식을 기반으로 재돌입 잔해물 주변에서 형성되는 충격파, 경계층 두께 변화, 정체점 열유속을 계산하였다. 고온 공기 조성 변화는

Arrhenius 기반의 반응률 모델을 통해 반영하였고, 난류는 충격파-경계층 상호작용을 안정적으로 포착할 수 있는 SST  $k-\omega$  모델을 사용하였다<sup>3, 4, 13)</sup>. 이러한 구성은 전형적인 재돌입 공력 환경을 수치적으로 재현하는 데 적합하며, 정체점 주위 열유속의 고도별 변화량을 비교적 정확하게 산출할 수 있다.

두 번째 단계인 열전달 해석은 CFD 결과로 얻어진 표면 열유속을 고체 내부 열전도 모델과 연계하는 방식으로 구성하였다. 잔해물은 본체와 달리 크기가 작고 열용량이 낮기 때문에, 동일한 열유속을 받더라도 표면 온도가 매우 빠르게 상승하는 경향을 보인다. 이러한 열적 민감도는 적외선 신호에 직접적인 영향을 주며, 고도 변화에 따른 신호 변동 폭을 결정하는 주요 요인이 된다. 본 연구에서는 항공우주 구조물에 널리 사용되는 알루미늄 합금을 잔해물 재질로 가정하고, 열용량, 열전도도, 비열을 온도에 무관한 고정값으로 가정하였다. 고온에서 발생할 수 있는 산화나 삭마는 본 연구 범위에서 제외하였으나, 기본적인 열적 응답 특성은 변하지 않기 때문에 잔해물의 신호 경향을 분석하는 데 충분하다.

세 번째 단계는 계산된 표면 온도 분포를 기반으로 한 적외선 신호 해석이다. 본 연구에서는 MuSES를 이용하여 MWIR 대역 복사량을 계산하였으며, 표면 복사뿐 아니라 충격층 내부의 기체 복사도 함께 고려하였다. 고온 충격층에서는 CO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>O, NO가 주요 방사 기여종으로 작용하며, 이는 다수의 연구에서 검증된 바 있다<sup>5, 6, 14)</sup>. 본 연구에서는 문헌 기반 대역 모델 및 고온 대기 복사 데이터베이스를 적용하여 각 화학종의 파장대역별 방사율을 반영하였다. 이러한 구성은 단순 흑체 가정보다 물리적으로 타당하며, 실제 재돌입 신호와 유사한 MWIR 분포를 제공할 수 있다.

본 연구의 해석 절차는 잔해물뿐 아니라 본체와의 비교 분석을 포함하도록 설계되었다는 점에서도 의의가 있다. 본체는 동일한 고도 조건에서 열용량이 크고 형상이 복잡하여 온도·복사 특성이 완만한 변화를 보이며, 기존 연구를 통해 그 경향이 비교적 잘 알려져 있다<sup>12)</sup>. 잔해물은 본체와 달리 고도 변화에 민감하게 반응하여 신호 변화율이 크고 불규칙성이 높기 때문에, 두 대상의 차이를 정량적으로 비교하는 과정은 EO/IR 센서 기반 탐지·추적 체계에서 오경보 발생 원인을 규명하는 데 직접적인 근거가 된다.

본 장에서 제시한 해석 절차는 재돌입 환경을 구성하는 고온 유동-열전달-복사 과정을 통합적으로 다룬 것으로, 3장에서는 잔해물 및 본체의 해석 모델과 조건을 상세히 설명하고, 4장에서는 이러한 절차를 기반으로 도출된 고도별 열·복사 응답을 분석한다.

## 3. 잔해물 및 본체 모델링과 해석 조건

재돌입 상황에서 발생하는 잔해물은 형상과 질량, 재질이 본체와 크게 다르기 때문에 열적·복사적 응답 특성도 상당한 차이를 보인다. 그러나 실제 재돌입에서 발생하는 잔해물은 종류와 형태가 매우 다양하며, 그 복잡성이 커서 일률적인 열·복사 모델을 구성하기 어렵다. 본 연구에서는 잔해물의 기본적인 열

적 민감도와 신호 변화를 분석하기 위해, 잔해물을 직경 0.3 m의 구형으로 단순화하였다. 구형 모델은 형상 복잡도에 따른 불확실성을 최소화하는 동시에, 정체점 가열과 극각별 온도 분포를 명확히 비교할 수 있는 장점이 있다. 또한 장거리 EO/IR 관측 시 잔해물은 대부분 점광원 형태로 나타나기 때문에, 구형은 IR 기반 탐지 연구에서 널리 적용되는 합리적인 단순화로 평가된다.

구형 잔해물의 재질은 항공우주 구조물에 널리 사용되는 알루미늄 합금으로 설정하였다. 알루미늄은 밀도와 열용량이 낮아 고도 변화에 따른 열적 응답이 빠르게 나타나는 특징이 있으며, 이는 본 연구에서 분석되는 고도 민감도와 복사 강도 변화의 주요 요인으로 작용한다. 재질 물성은 일정 상수로 가정하여 열전달 지배 요인(열전도율, 비열, 밀도)이 고도 변화에 따라 단순한 형태로 반응하도록 설정하였다. 이는 삭마, 산화, 재료 변형 등 실제 재돌입에서 발생 가능한 복잡한 열화 현상을 배제한 가정이지만, 잔해물의 기본적인 열·복사 특성을 규명하기 위한 1차 연구로는 충분한 정확도를 제공한다.

본체 모델링은 잔해물과 동일한 재돌입 조건에서 본체와 잔해물 간의 신호 특성을 비교하는 것을 목표로 하되, 직접 CFD를 수행하는 방식이 아니라 문헌 기반의 대표적 열·복사 특성을 참조하는 방식으로 구성하였다. 기존 연구에 따르면, 본체는 잔해물보다 크기가 크고 열용량이 높아 고도 하강에 따른 표면 온도 변화가 상대적으로 완만하고, 복사 강도 또한 급격한 변동을 보이지 않는다<sup>[12]</sup>. 본 연구에서는 동일 고도 조건에서 표면 온도, 정체점 온도 상승률, MWIR 대역 복사 강도의 전형적 경향을 문헌에서 확보하여 잔해물과 비교하였다. 이 비교는 절대적인 수치 비교가 아니라, 변화율(gradient), 민감도(sensitivity), 공간 분포의 안정성(stability)을 중심으로 수행되며, 이는 EO/IR 기반 탐지·추적 체계에서 본체와 잔해물을 구분하는 데 핵심적인 기준이 된다.

해석 조건은 재돌입 환경에서 열·유동 변화가 뚜렷하게 나타나는 고도 60~30 km 구간을 중심으로 설정하였다. 이 영역은 대기 밀도가 수십 배 이상 증가하는 구간으로, 충격파-경계층 두께 감소와 정체점 가열 증대가 동시에 발생한다. 외부 대기 조건은 U.S. Standard Atmosphere 1976을 기반으로 고도별 온도, 밀도, 압력을 보간하여 적용하였다<sup>[2]</sup>. 속도 조건은 재돌입 궤적 특성을 반영하여 고도 하강에 따라 점진적으로 감소하도록 구성하였다. 이 조건 설정은 절대 정확한 실제 궤적을 재현하는 것보다, 잔해물과 본체의 열적 응답 차이를 규명하는 데 필요한 상대적 경향성을 확보하는 데 목적이 있다.

관측 조건은 장거리 EO/IR 감시체계에서 재돌입체가 점광원 형태로 관측된다는 점을 고려하여 설정하였다. MWIR 대역을 기준으로 관측거리를 수백 km 규모로 가정하였으며, 관측각은 본체-잔해물 상대 위치에 따라 변화할 수 있음을 고려해 정면 관측뿐 아니라 측면 방위 조건에서도 복사 강도를 평가하였다. 이러한 관측 조건은 복사 에너지의 절대값보다, 신호 변화 속도와 방향에 따른 편차를 분석하는 데 더 큰 의미를 가진다.

표 1은 본 연구에서 사용한 고도별 외기 조건과 속도, 주요 물성치 등을 요약한 것으로, 4장에서 제시되는 열유속 분포 및

적외선 신호 해석의 기반 데이터로 사용된다. 본 장에서 구현한 잔해물-본체 비교 모델은 이후 적외선 신호 분석 결과의 물리적 해석과 탐지·식별 가능성 평가를 위한 기본 틀로 기능한다.

표 1. 재돌입 해석에 적용된 고도별 대기 조건

Table 1. Reentry analysis conditions as a function of altitude

Altitude [km]	Freestream Velocity [km/s]	Freestream Temp. [K]	Freestream Air Density [ $\text{kg/m}^3$ ]
60	6.0	247.0	$3.10 \times 10^{-4}$
50	5.5	270.7	$1.03 \times 10^{-3}$
40	4.5	250.4	$3.99 \times 10^{-3}$
30	3.5	226.5	$1.84 \times 10^{-2}$

#### 4. 적외선 신호 특성 분석

재돌입 잔해물의 적외선 신호는 고도 변화에 의해 크게 영향을 받으며, 표면 열유속과 온도 분포의 변화를 통해 복사 강도가 비선형적으로 증가한다. 본 장에서는 고도별 열유동 특성과 표면 온도, 복사 강도 결과를 기반으로 잔해물의 적외선 신호 특성을 정량적으로 분석하고, 본체와 비교하여 구분 가능성을 평가하였다.

##### 4.1 고도별 열유동 특성

재돌입 구간에서 고도가 낮아질수록 대기 밀도 증가로 인해 충격층이 점차 두꺼워지며, 정체점 부근의 열유속이 크게 상승하는 경향을 보였다. 그림 1에 나타난 바와 같이, 60 km 고도에서는 충격파에 의한 압축 효과가 상대적으로 완만하여 표면 열유속이 낮게 형성되었으나, 40 km 이하에서는 압축가열 효과가 지배적으로 작용하면서 열유속이 비선형적으로 증가하였다. 이러한 경향은 잔해물과 본체 모두에서 공통적으로 관찰되었으나, 열적 반응의 민감도에서는 두 대상 간에 뚜렷한 차이가 나타났다.

본체는 큰 열용량과 표면적을 가지므로 고도 변화에 따른 표면 온도 상승률이 상대적으로 완만하게 나타났다. 반면 직경 0.3 m 구형으로 단순화된 잔해물은 체적이 작고 열관성이 낮아 동일한 재돌입 조건에서도 훨씬 빠른 열응답을 보였다. 특히 정체점 부근에서는 열유속 증가가 거의 즉각적으로 표면 온도 상승으로 이어졌으며, 고도가 낮아질수록 전방부와 후방부 간의 온도 차이가 점차 확대되는 경향이 확인되었다. 이러한 차이는 재돌입체가 EO/IR 장비에 의해 관측될 때 나타나는 신호의 공간적 특성에 직접적인 영향을 미치며, 이후 적외선 신호 변화율의 차이를 설명하는 중요한 물리적 근거가 된다.

또한 선행연구에서 제시된 본체 해석 결과와 비교하면, 본 연구에서 고려한 잔해물 모델은 전방부에서 상대적으로 더 빠른 온도 변화와 큰 변화 기울기를 나타내는 것이 확인되었다

[12]. 이는 형상 단순화와 열용량 차이에 기인한 물리적 결과로 해석할 수 있으며, 잔해물 특유의 불안정한 열응답 특성이 향후 적외선 신호 분석에서 중요한 구분 요소로 작용할 수 있음을 의미한다.

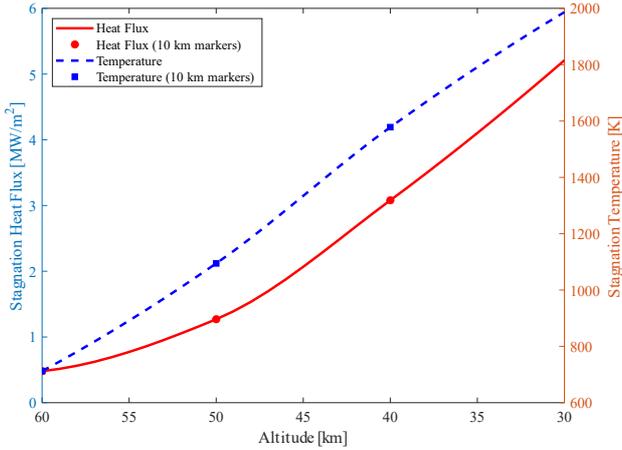


그림 1. 고도 변화에 따른 정체점 열유속 및 온도 변화  
Fig. 1. Variation of stagnation point heat flux and surface temperature with altitude

#### 4.2 표면 온도 및 복사 특성

고도별 유동장 변화는 잔해물 표면의 온도 분포와 복사 특성에도 직접적인 영향을 미쳤다. 그림 2에 나타난 표면 온도 분포를 보면, 60 km 고도에서는 전방부와 측방부 간의 온도 차이가 비교적 작고 등온선이 완만하게 형성되었다. 그러나 40 km 이하로 고도가 낮아지면서 전방부 정체점 온도의 상승률이 크게 증가하였고, 이에 따라 등온선 밀도도 급격히 높아졌다. 이는 정체점으로 유입되는 열수송량이 고도 감소에 따라 비선형적으로 증가한 결과로 해석할 수 있다. 이러한 경향은 잔해물과 본체 모두에서 관찰되었으나, 그 민감도는 잔해물에서 더욱 두드러지게 나타났다.

표면 온도 분포는 곧 적외선 복사 강도 분포로 이어지므로, 온도 구배가 커질수록 관측 영상에서 나타나는 복사 패턴 또한 뚜렷한 차이를 보이게 된다. MWIR 대역에서 잔해물의 복사 신호는 정체점을 중심으로 한 고회도 영역이 고도 감소와 함께 점차 집중되는 형태로 나타났으며, 이는 신호의 방향성 강화와 국소적인 밝기 변동을 유발하였다. 반면 본체의 경우 표면 온도 분포가 상대적으로 균일하게 유지되어, 복사 강도 또한 넓고 안정적인 공간 분포를 보였다.

이와 같은 차이는 EO/IR 관측체계에서 두 대상이 시간에 따라 어떻게 다르게 인지되는지를 설명해준다. 잔해물은 작은 형상과 민감한 열응답 특성으로 인해 고도 변화나 미세한 자세 요동에도 신호의 중심 위치, 밝기, 공간 분포가 단시간 내에 변동할 가능성이 크다. 반면 본체는 상대적으로 변화율이 작아 안정적인 시계열 신호를 형성하므로, 이러한 대비는 이후 신호 구분 과정에서 중요한 물리적 판단 기준으로 활용될 수 있다.

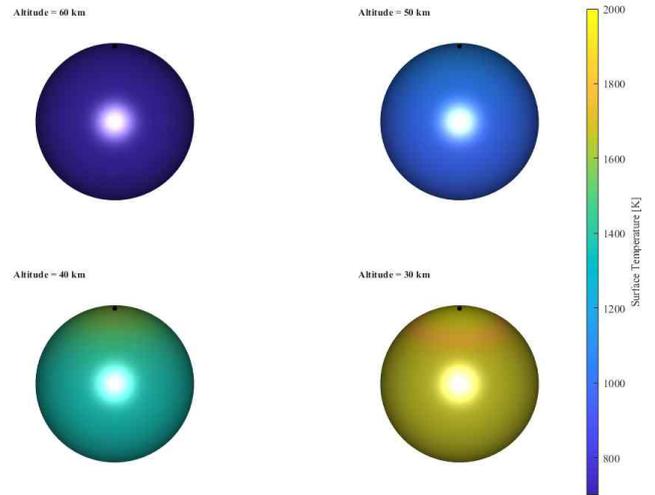


그림 2. 고도별 잔해물 표면 온도 분포  
Fig. 2. Surface temperature distribution of debris at different altitudes

#### 4.3 본체-잔해물 IR 신호 비교 및 구분 가능성

그림 3은 고도 변화에 따른 MWIR 적외선 복사 강도의 변화를 본체와 잔해물에 대해 비교한 결과를 나타낸다. 두 대상 모두 고도 감소에 따라 복사 강도가 증가하는 공통적인 경향을 보였으나, 증가 양상과 변화 기울기에서는 명확한 차이가 확인되었다. 본체는 기존 연구에서 보고된 결과와 유사하게 고도 변화에 대해 비교적 안정적인 증가 패턴을 유지하였으며, 복사 강도의 변화율 또한 일정한 범위 내에서 유지되었다. 반면 잔해물은 열용량이 작아 고도 변화가 즉각적으로 복사 신호 증가로 이어졌고, 특히 40 km 이하 구간에서 복사 강도의 기울기가 본체 대비 현저히 크게 나타났다<sup>[12]</sup>.

신호의 공간적 안정성과 시간적 변동성 측면에서도 두 대상은 뚜렷하게 구분되었다. 본체는 넓은 표면적에서 발생하는 비교적 균일한 열방출로 인해 관측 영상에서 밝기 중심의 위치가 크게 이동하지 않고 안정적인 패턴을 유지한다. 반면 잔해물은 고회도 영역이 전방부에 집중되며, 고도 변화나 미세한 자세 변동에 따라 밝기 중심이 이동하거나 신호 진폭이 비선형적으로 변화하는 경향을 보였다. 이러한 특성은 EO/IR 기반 자동 탐지·추적 과정에서 오경보나 잘못된 궤적 형성의 원인이 될 수 있다.

동시에 이러한 변동성은 본체와 잔해물을 구분할 수 있는 유효한 단서로도 활용될 수 있다. 본체는 신호가 지속적으로 증가하되 변화율은 비교적 안정적인 반면, 잔해물은 특정 고도 구간에서 급격한 신호 상승이나 불규칙한 변화를 나타낼 가능성이 크다. 따라서 적외선 신호의 절대 크기뿐만 아니라 고도 또는 시간에 따른 변화율, 전방부 대비 평균 복사 강도의 상대적 차이, 그리고 신호의 공간적 안정성을 함께 고려한다면 잔해물을 효과적으로 배제하고 본체를 식별할 수 있는 가능성이 높아진다.

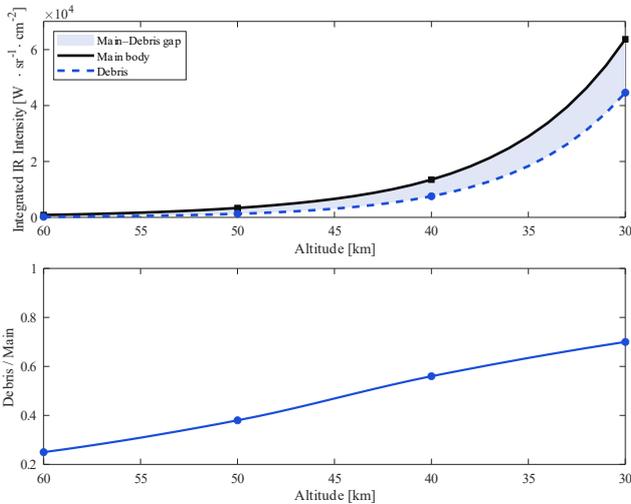


그림 3. 고도에 따른 본체와 잔해물의 MWIR 복사강도 비교  
 Fig. 3. Comparison of MWIR intensity between main body and debris as a function of altitude

이와 같은 분석 결과는 실제 장거리 감시체계에서 잔해물로 인해 유발되는 오경보를 줄이고, 본체 중심의 추적 안정성을 확보하는 데 필요한 물리적 근거를 제공한다. 또한 향후 적외선 신호 기반 식별 알고리즘 개발 과정에서 본 연구에서 도출된 특성들이 물리 기반 분류 기준으로 통합될 수 있음을 보여준다.

본 연구에서 확인된 본체와 잔해물 간의 적외선 신호 차이는 단순한 물리적 비교를 넘어, 실제 EO/IR 기반 감시체계의 운용 관점에서도 중요한 의미를 가진다. 장거리 관측 환경에서는 재돌입 표적과 잔해물이 모두 점광원 형태로 관측되는 경우가 많으며, 이때 절대적인 복사 강도만을 기준으로 탐지 여부를 판단할 경우 잔해물에 의해 오경보가 발생할 가능성이 높다.

그러나 본 연구 결과에 따르면 본체는 고도 변화에 따라 신호가 증가하더라도 변화율이 비교적 안정적으로 유지되는 반면, 잔해물은 고도 또는 시간 변화에 대해 훨씬 민감하게 반응하며 신호 기울기가 급격히 변하는 특성을 보인다. 이러한 차이는 단일 시점의 신호 크기보다는 시계열 신호의 변화 양상과 공간 분포 안정성을 함께 분석할 경우, 본체와 잔해물을 구분할 수 있는 물리적 근거로 활용될 수 있음을 의미한다.

즉, 잔해물에 의해 발생하는 불규칙 신호는 탐지 단계에서는 불리한 요소로 작용할 수 있으나, 동시에 본체와의 식별 가능성을 높이는 특성으로 전환될 수 있다. 이러한 관점은 기존의 본체 중심 탐지 논리에서 벗어나, 재돌입 환경에서 발생하는 복합 신호를 보다 안정적으로 해석하기 위한 접근으로 확장될 수 있다.

### 5. 결론

본 연구에서는 고온 유동-열-복사 해석을 연계한 수치적 접근을 통해 재돌입 잔해물의 적외선 신호 특성을 정량적으로

분석하였다. 전산유체해석을 기반으로 충격층 구조와 표면 열 유속을 계산하고, 이를 통해 산출된 표면 온도를 MWIR 복사 해석과 연계하여 고도 변화에 따른 적외선 신호 변화를 평가하였다. 그 결과, 잔해물은 본체에 비해 열용량이 작아 재돌입 고도 변화에 더욱 민감하게 반응하며, 정체점 부근의 국소적 고온영역이 고도가 낮아질수록 빠르게 강화되는 양상이 확인되었다. 이러한 열적 특성은 복사 신호에도 직접적으로 반영되어, 잔해물의 IR 강도는 본체 대비 변화율이 크고 공간적 분포 또한 상대적으로 불안정한 형태를 보였다.

본체와 잔해물을 비교한 결과에서도 두 대상의 신호 변화 특성이 명확히 구분되었다. 본체는 고도 감소에 따른 적외선 신호 강도 증가가 꾸준하고 안정적이며, 표면 온도 분포도 비교적 균일해 관측 영상에서 신호의 중심이 크게 변하지 않는다. 반면 잔해물은 작은 형상과 높은 열응답 민감도로 인해 고도 변화나 미세한 자세 변동만으로도 복사 강도의 기울기, 밝기 분포, 신호 중심 위치가 비선형적으로 변할 수 있다. 이러한 차이는 EO/IR 기반 추적 과정에서 잔해물이 오탐지를 유발하는 원인이 되는 동시에, 본체와 잔해물을 구분할 수 있는 유효한 분류 기준이 될 수 있음을 보여준다.

본 연구의 의의는 단순한 열모델이 아닌 고온 유동장과 표면 열응답을 기반으로 한 복사 해석을 적용하여, 잔해물 신호의 물리적 특성과 본체 대비 차이를 정량적으로 제시했다는 점에 있다. 이는 실제 장거리 감시체계에서 관측되는 재돌입 표적의 적외선 신호 특성을 이해하고, 추적 안정성을 향상시키기 위한 물리 기반 식별 알고리즘의 개발에 활용될 수 있다.

향후 연구에서는 보다 복잡한 재돌입 환경을 반영하기 위해 열적 비평형 효과, 재료 삭마, 형상 불규칙성, 회전 운동 등을 포함한 확장 해석이 필요하다. 또한 본 연구에서 도출된 신호 변화율, 공간 분포 안정성 등의 지표를 탐지 확률 모델 및 신호 대 잡음비 분석과 결합한다면, 실제 운용 환경에서 적용 가능한 재돌입체 식별 기준으로 발전시킬 수 있을 것으로 기대된다.

### References

- [1] J. A. Fay and F. R. Riddell, "Theory of stagnation point heat transfer in dissociated air," *Journal of the Aeronautical Sciences*, Vol. 25, No. 2, pp. 73-85, 1958.
- [2] NOAA/NASA, U.S. Standard Atmosphere 1976, National Geophysical Data Center (NGDC), 1976.
- [3] C. Park, "A review of reaction rates in high temperature air," AIAA Paper 1989-1740, American Institute of Aeronautics and Astronautics, 1989.
- [4] R. N. Gupta, J. M. Yos, R. A. Thompson, and K.-P. Lee, "A review of reaction rates and thermodynamic and transport properties for an 11-species air model for chemical and thermal nonequilibrium calculations to 30000 K," NASA Reference Publication 1232, NASA, 1990.

- [5] M. J. Alvarado, V. H. Payne, E. J. Mlawer, J. S. Delamere, K. E. Cady-Pereira, and J.-L. Moncet, "Performance of the line-by-line radiative transfer model (LBLRTM) for temperature, water vapor, and trace gas retrievals," *Atmospheric Chemistry and Physics*, Vol. 13, No. 14, pp. 6687-6711, 2013.
- [6] M. W. Shephard, K. E. Cady-Pereira, S. A. Clough, V. H. Payne, E. J. Mlawer, and J.-L. Moncet, "Performance of LBLRTM for forward modeling IASI radiances: Case studies from JAIVEx," *Atmospheric Chemistry and Physics*, Vol. 9, No. 19, pp. 7397-7412, 2009.
- [7] J. Xi, X. Hu, H. Tang, H. Zhou, and Y. Ji, "Space debris detection in optical image sequences," *Applied Optics*, Vol. 55, No. 28, pp. 7924-7934, 2016.
- [8] R. Zhu, X. Li, Y. Zhang, and J. Wang, "Improved target detection method for space-based small targets," *Sensors*, Vol. 24, No. 3, Article No. 945, 2024.
- [9] C. D. Demars, "High-fidelity simulation of dynamic thermal satellite signatures using MuSES™," *Proceedings of the AMOS Technical Conference*, Maui, HI, USA, 2023.
- [10] MuSES – EO/IR Signature Simulation Software, ThermoAnalytics Inc., Calumet, MI, USA, 2023.
- [11] J. Yu, F. Weng, Y. Han, and F. Sun, "A comparison of synthetic thermal imagery created using MuSES with satellite infrared observations," *Proceedings of SPIE*, Vol. 12270, 122700B, 2022.
- [12] J. Park, J. Kwak, K. Kim, S. Park, C. Kim, and S. Oh, "A study on the generation of IR images for the hypersonic boost-glide vehicle," *Proceedings of the Korea Institute of Military Science and Technology, Sensor and Signal Processing Session*, pp. 633-634, 2022.
- [13] F. R. Menter, "Two-equation eddy-viscosity turbulence models for engineering applications," *AIAA Journal*, Vol. 32, No. 8, pp. 1598-1605, 1994.
- [14] F. R. Coelho, J. P. Martins, and S. C. Cardoso, "A new line-by-line methodology for modeling infrared atmospheric transmission: Comparison with narrow-band and correlated-k models," *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer*, Vol. 270, Article No. 107705, 2021.