

A Dual-Band Radiometric Framework for Passive Infrared Ranging

Jeong-Hyeon Moon*, Seungha Kim*, BongJun Choi*, Heeduk Park*

*Researcher, Hanwha System, Pangyo, Korea

[Abstract]

In this paper, we propose a passive infrared ranging algorithm using dual-band radiometric sensing, which estimates the distance to flame sources by analyzing band-ratio variations caused by differential atmospheric transmittance. A time-differential approach is first applied to extract flame-only radiance, effectively removing background and path radiance components. The resulting spectral radiance from each band is then used to construct a regression feature based on their logarithmic ratio. Theoretical modeling is grounded in Planck's law and MODTRAN-based transmittance simulation, establishing a physical relationship between distance and observed radiance. Experimental results under real-world conditions demonstrate that the proposed method achieves superior ranging accuracy compared to existing techniques across various flame and environmental conditions. This research provides a physics-informed framework for infrared-based passive ranging and contributes to the advancement of long-range flame detection and tracking systems.

▶ **Key words:** Passive ranging, Dual-band IR, Atmospheric transmittance, Planck radiation, Distance estimation

[요 약]

본 논문에서는 이중대역 적외선 방사량을 활용한 수동 거리 추정 알고리즘을 제안한다. 이 알고리즘은 대기 감쇠 특성이 서로 다른 두 파장대의 비율 분석을 통해 화염까지의 거리를 정략적으로 예측하며, 물리 기반 복사 모델과 회귀 모델을 결합하였다. 먼저, 시간 차분을 통해 순수한 화염 복사 성분만을 추출하는 개념을 도입하고, 이를 기반으로 두 대역의 수신 복사량을 회귀 입력으로 사용하였다. 이론적으로는 Planck 복사 모델과 MODTRAN 기반 대기 감쇠율을 활용하여 거리-복사량 간 물리적 관계를 정립하였다. 실환경 실험 결과, 제안된 방법은 다양한 조건에서 기존 방식 대비 우수한 거리 예측 정확도를 기록하였다. 본 연구는 적외선 거리 추정을 위한 프레임워크를 제시하며, 화염 탐지 및 장거리 추적 시스템의 성능 향상에 기여할 수 있다.

▶ **주제어:** 수동 거리 측정, 이중가역 대역 적외선, 대기 투과율, 플랑크 복사, 거리 추정

- First Author: Jeong-Hyeon Moon, Corresponding Author: Jeong-Hyeon Moon
- Jeong-Hyeon Moon (mjh319@hanwha.com), Hanwha System
- Seungha Kim (shkim76@hanwha.com), Hanwha System
- BongJun Choi (bj19.choi@hanwha.com), Hanwha System
- Heeduk Park (heeduk.park@hanwha.com), Hanwha System
- Received: 2025. 06. 13, Revised: 2025. 06. 30, Accepted: 2025. 07. 03.

I. Introduction

원거리 화염 탐지에 대한 거리 추정은 감시 정찰, 탐지 및 추적, 상황 인식 등 다양한 군사 영역에서 중요한 문제로 간주된다. 특히 화염, 엔진 플룸(flame plume)과 같이 고온 복사체가 적외선(IR) 센서에 의해 관측되는 상황에서는, 레이저 거리계나 능동형 센서 없이도 거리 정보를 추정하는 passive ranging 기술이 요구된다. 영상만으로 표적의 위협성을 정량적으로 판단하기 어렵기 때문에, 이러한 거리 추정 알고리즘은 필수적인 요소로 작용한다 [1-3]. 민간 영역에서는 산불 발생 초기의 미세한 화염을 빠르게 감지하기 위해 유인 또는 무인 항공기를 활용한 적외선 탐지 기술이 사용되며, 이러한 기술은 대규모 피해를 사전에 방지하는 데 기여한다 [4, 5].

기존의 passive ranging 접근법은 대부분 스테레오 시차나 영상 기하 정보를 기반으로 하지만, 이는 화염이 작거나 배경과의 윤곽이 명확하지 않은 경우 적용이 어렵다 [6]. 특히 단일 프레임 혹은 단일 센서 조건에서는 깊이 단서를 확보하는 데 구조적인 제약이 존재하며, 실제 적용 가능한 알고리즘은 제한적이다.

그동안 화염 거리 추정을 위한 다양한 연구가 이루어졌으나, 대부분은 단일대역 적외선 센서 기반이거나 일정 면적 이상의 열원을 가정하는 방식에 머물러 있다 [7-11]. 이러한 접근은 센서 해상도가 낮거나 열원이 단일 픽셀 이하로 표현되는 서브픽셀 환경에서 정확도가 급격히 저하되는 문제를 안고 있다 [12]. 최근에는 인공위성 데이터를 활용하여 이중대역 정보를 이용한 원격 감지가 시도되고 있으나, 대기 보정의 어려움과 공간 해상도의 한계로 인해 실제 적용에는 제약이 존재한다. 특히 원거리 화염을 탐지하는 시나리오에서는 열원의 면적 정보가 명확하지 않거나 아예 제공되지 않는 경우가 많다.

본 연구는 이러한 한계를 극복하고, 열원에 대한 영상 기반의 passive ranging 기법을 제안한다. 특히, 이중 대역 적외선 센서를 활용하여 각 밴드의 스펙트럼 감쇠 특성 차이를 기반으로, 거리 추정을 위한 회귀 피처를 구성하고, 열원의 순수 복사량만을 추출하는 방법을 결합함으로써, 환경 변화나 배경 영향에 강건한 거리 추정이 가능함을 보인다.

이를 위해 먼저, Planck 법칙에 기반한 열원의 복사 특성과 대기를 경유하며 발생하는 흡수 및 산란에 의한 감쇠 모델을 이론적으로 정립하였다.

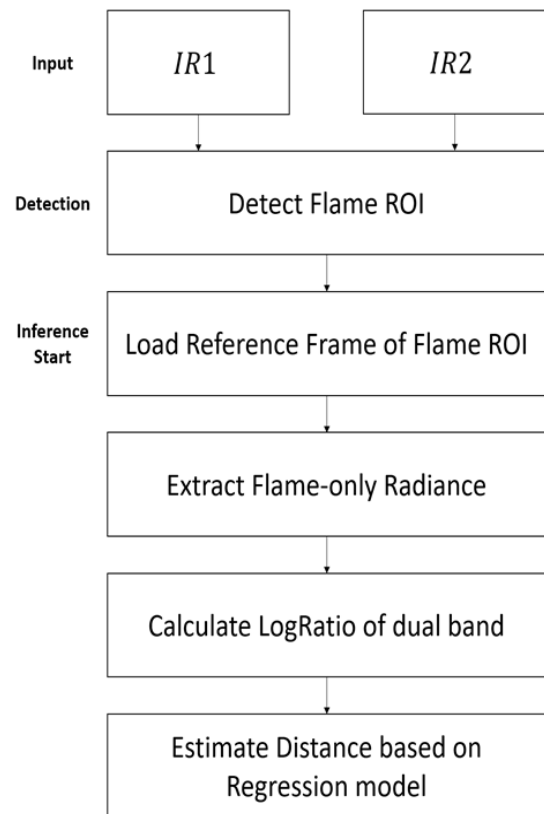


Fig. 1. Overview of proposed method

대기 감쇠율은 MODTRAN [13, 14] 기반 시뮬레이션을 통해 정량적으로 추정되었으며, 이를 바탕으로 두 파장 대역 간의 감쇠율 차이가 거리 추정 피처로서 활용될 수 있음을 보였다. 또한, 시간 차분 기반으로 경로 복사 및 배경 복사를 제거하는 방법을 도입함으로써, 순수한 화염 복사량을 정량화하는 방법론을 제시하였다.

이러한 이론 기반을 바탕으로 설계된 거리 추정 알고리즘은 실험적으로도 높은 정확도를 보였다. 실제 야외 환경에서 다양한 거리와 화염 조건에 대해 실험을 수행한 결과, 본 논문에서 제안한 방법은 근거리 및 중장거리 모두에서 가장 낮은 예측 오차를 기록하였다. 이때 회귀 모델의 계수는 감쇠율 차이의 역수와 물리적으로 해석 가능한 수치를 보였다.

따라서 본 논문은 단순 영상 처리 기법이 아닌 물리 기반 모델링과 실험적 검증을 통해 적외선 기반 거리 추정의 새로운 가능성을 제시하며, 향후 화염 추적 및 장거리 감시 기술의 고도화에 기여할 수 있을 것으로 기대된다.

II. Preliminaries

1. Related works

화염에 대한 거리 추정 알고리즘은 장거리 탐지 및 위협 평가 시스템의 핵심 요소로서 다양한 방식이 연구되어 왔다. 본 절에서는 기존의 단일 대역 기반 거리 추정 방법, 이중 대역 기반 화염 거리 측정 접근법, 그리고 복사 물리 기반 분석 연구로 나누어 살펴본다.

기존의 적외선 기반 거리 추정 연구들은 대부분 단일 대역 영상 내에서의 영상 피쳐(intensity, area, contrast 등)와 거리간의 비례 관계를 활용하는 방식으로 이루어졌다. 예를 들어, Raju [9]는 영상 내에서 관측된 항공기의 크기를 기반으로 거리 추정을 수행하였으며, 이를 보완하기 위해 센서가 장착된 플랫폼의 bearing angle 정보를 결합하는 방법을 제안하였다. 반면, Barbaric [1]는 열원의 밝기(intensity)와 주변 배경과의 대비(contrast)를 조합하여 거리와의 관계를 모델링하였다. 하지만 이러한 단일 대역 기반 거리 추정 알고리즘들은 거리 증가에 따라 발생하는 대기 감쇠, 복사량의 비선형 변화, 배경 복사에 의한 잡음 등 다양한 외란에 취약하다. 이를 보완하기 위해 고차원의 칼만 필터 기반 보정 기법이 도입되기도 하나, 이는 복잡한 상태 공간 정의와 정확한 시스템 모델링을 전제로 하며, 열원의 동적 거동이나 배경 변화가 급격한 상황에서는 오히려 오차가 누적되는 한계를 갖는다.

최근에는 서로 다른 파장 대역에서의 대기 감쇠율 차이를 활용하여 거리 정보를 추출하는 이중 대역(Dual-band) 기반 접근이 제안되고 있다. Meir [5]는 민간에서 화염탐지를 위한 방법으로 이중대역의 적외선센서를 활용하여 거리 탐지하는 것에 대한 장점을 제안하는 연구이나 핵심적인 아이디어는 태양 반사와 같은 것들을 산불과 같은 화염과 구분하는 법을 주로 다룬다. [15]에서는 이중 대역을 이용한 탐지 민감도 향상 가능성을 논의하였지만, 거리 추정 알고리즘보다는 탐지 임계값이나 경보 민감도에 초점이 맞춰져 있다. 따라서 이중 대역 기반 거리 추정의 가능성은 제시되었지만, 열원의 물리적 복사 특성과 감쇠 구조를 결합한 모델링은 여전히 미비하다. Degui [16]는 두 밴드의 방사량 차이를 거리 추정 피쳐로 사용하였으나, 열원의 면적이나 시야 채움 효과와 같은 실질적 방사 정보의 구조적 고려는 부족하였다.

열원의 면적, 온도, 방사율 등 복사 물리량을 기반으로 라디언스를 추정하고 이를 정량화하려는 연구도 활발히 진행되었다. [17]에서는 경험적 접근을 통해 화염 면적과 방사량의 관계를 분석하였다. 그러나 해당 연구는 정적 조

건에서의 방사량 예측에 중점을 두고 있으며, 대기 감쇠나 경로 복사 등 전파 경로상의 영향은 포함되지 않는다. 반면 본 연구는 Planck 기반 열원 복사 모델과 MODTRAN 기반 대기 감쇠 시뮬레이션을 연계하고, 시간 차분 기반으로 순수 복사 성분만을 추출함으로써 실제 관측 조건 하에서의 거리 추정 알고리즘으로 확장하였다.

2. Theory

적외선 센서 기반 거리 추정 문제를 해결하기 위해서는, 열원에서 방출된 복사 에너지가 대기 중을 전파하며 감쇠되고, 센서에 도달하기까지의 전체 물리적 전달 과정을 정량적으로 이해할 필요가 있다. 본 절에서는 열원의 복사 특성부터 대기 감쇠(transmittance), 경로 복사(path radiance), 그리고 센서 수신 에너지 구성까지 각 단계별 물리적 매커니즘을 정리하고, 이를 바탕으로 이후 거리 추정을 위한 기반을 마련한다.

2.1 Source radiation: Spectral radiation based on Planck's law

열원은 온도 T 에 따라 특정 파장 λ 에서 Planck의 법칙에 따라 복사 에너지를 방출한다. 이상적인 흑체의 단위 파장 당 복사 발산도(Radiant exitance)는 다음과 같은 수식으로 표현된다 [14]:

$$M_e \lambda(T) = \frac{2hc^2}{\lambda^5} \cdot \frac{1}{\exp\left(\frac{hc}{\lambda k T} - 1\right)} \quad (1)$$

여기서 $M_e \lambda$ 는 복사체의 절대 온도 T 에서 파장 λ 에 대해 방출되는 단위면적 당, 단위 파장당 에너지를 의미하며, 그 단위는 $[W/(m^2 \cdot \mu m)]$ 이다. 이때 h 는 Planck 상수로 $6.626 \times 10^{-34} J/K$, c 는 진공 중 광속으로 $2.998 \times 10^8 m/s$ 이며, k 는 $1.381 \times 10^{-23} J/K$ 이며 볼츠만 상수이다. λ 는 방사 에너지가 계산되는 파장을 의미하고 단위는 미터 [m]이며, T 는 복사체의 절대 온도 [K]이다. 이 수식은 열역학적 평형 상태에서 흑체가 복사하는 에너지의 파장 분포를 기술하며, 온도가 높아질수록 전체 복사 에너지가 증가하고, 방사 에너지의 중심 파장은 짧아지는 특성을 보인다.

하지만 실제 물체는 완전한 흑체가 아니며, 표면 상태나 재질 특성에 따라 방사율(emissivity) $\epsilon(\lambda)$ 이 1보다 작은 값을 가진다. 이 방사율은 파장에 따라 달라지며, 물체가 특정 파장에서 흑체 대비 얼마나 효율적으로 복사하는지

를 나타낸다. 이에 따라 실제 물체에서의 스펙트럼 복사휘도(radiance)는 다음과 같이 수정된다:

$$L_{\lambda}^{actual}(T) = \epsilon(\lambda) \cdot L_{\lambda}(T) \quad (2)$$

또한, 열원이 특정 면적 A를 통해 복사 에너지를 방출한다면, 해당 파장에서의 총 복사량 Φ_{λ} 는 아래와 같이 정의된다:

$$\Phi_{\lambda} = \epsilon(\lambda) \cdot L_{\lambda}(T) \cdot A \quad (3)$$

여기서 $\epsilon(\lambda)$ 는 $0 < \epsilon(\lambda) \leq 1$ 의 범위를 가지며, A는 열원의 면적이다. 이러한 열원의 복사 특성은 대기를 통과하면서 감쇠되며, 이후 센서에 도달하는 복사량의 기반이 된다. 본 연구에서는 이러한 스펙트럼 복사 모델을 기반으로, 이후 절에서 다룰 대기 감쇠(attenuation) 모델과 결합하여 이중 대역 기반의 거리 추정 알고리즘을 구성한다.

2.2 Atmospheric Attenuation model: Energy loss on radiation path

일반적으로 방사 에너지는 대기를 통과하며 산란(scattering) 및 흡수(absorption) 과정에 의해 감쇠되며, 이러한 감쇠는 매질의 선 감쇠 계수 $\kappa(\lambda)$ 에 따라 다음과 같이 기술된다.

a) 일반 지수 감쇠 모델, Bouguer's Law: 대기를 통과하는 복사 에너지는 거리에 따라 점진적으로 감쇠된다. 이러한 현상을 수식적으로 설명하기 위해 일반적으로 사용하는 모델은 Bouguer's Law이다. 이 법칙은 매질을 통과하는 동안의 흡수 및 산란을 고려하여, 복사 에너지가 지수적으로 감소함을 설명한다.

매질의 선 감쇠 계수를 $\kappa(\lambda)$ 라 정의하고, $L_{\lambda}(0)$ 을 복사원이 방출한 초기 스펙트럼 복사휘도, $L_{\lambda}(d)$ 를 거리 d를 통과한 후 센서에 도달하는 복사휘도라고 할 때, 다음과 같은 지수 감쇠 모델이 성립한다:

$$\frac{L_{\lambda}(d)}{L_{\lambda}(0)} = \tau(\lambda, d) = \exp(-\kappa(\lambda) \cdot d) \quad (4)$$

여기서 $\tau(\lambda, d)$ 는 파장 λ 에 대한 거리 d에서의 대기 투과도(transmittance)를 의미하며, $\kappa(\lambda)$ 는 [m^{-1}] 단위의 선 감쇠 계수로서, 해당 파장에서의 흡수 및 산란 효과를 통합적으로 반영한다.

b) MODTRAN 기반 대기 투과도 모델: 앞서 소개한 Bouguer's Law는 대기 감쇠를 단순한 지수 함수로 모델링 하여 해석적이며 계산이 간단하다는 장점이 있다. 그러나 이 모델은 실제 대기의 복잡한 성분 변화나 분자별 흡수선, 에어로졸 산란, 수증기 흡수 등 다양한 영향을 반영하지 못하므로 정밀도가 제한적이다.

이에 반해 MODTRAN은 이러한 한계를 보완하기 위한 고정밀 대기 전파 시뮬레이션 코드로, 실제 대기 조건을 기반으로 복잡한 물리 모델을 수치적으로 해석한다 [13]. MODTRAN은 약 0.2 μm 에서 50 μm 에 이르는 넓은 스펙트럼 범위(파수 기준 0-50,000 cm^{-1})를 대상으로, 분자 흡수, Rayleigh 산란, 에어로졸 산란, 열 복사, 그리고 태양 및 달의 광원 효과까지 포함한 전파 모델링을 수행한다. 특히 내장된 고도별 대기 모델 및 에어로졸 모델을 선택하거나 사용자의 입력을 받아 각 층의 온도, 압력, 수증기, 에어로졸 농도를 바탕으로 경로를 따라 감쇠되는 복사 에너지를 정밀하게 계산한다.

MODTRAN을 통해 획득할 수 있는 주요 항목은 다음과 같다. 첫째, 파장 및 거리 기반의 정량적인 투과도 $\tau_{MOD}(\lambda, d)$ 를 제공하며, 이는 단순 지수 모델보다 훨씬 더 현실적인 감쇠율을 반영한다. 둘째, 열원 자체에서 발생하는 복사량과 무관한 경로 복사(path radiance) $L_{path\lambda}(d)$ 를 분리하여 계산 할 수 있어, 배경 방사와 혼입되는 신호를 정확히 평가할 수 있다. 마지막으로, 선택한 센서 대역에 따라 거리 변화에 따른 총 복사량의 변화를 분석함으로써, 다양한 파장 대역 간 감쇠 특성 차이를 거리 추정 등에 활용할 수 있다.

2.3 Components of radiance reaching IR sensor

센서가 수신하는 복사 신호는 단순히 열원에서 방출된 에너지만을 포함하지 않는다. 대기를 경유하는 동안 다양한 경로 복사 및 배경 복사 성분이 중첩되어 복잡한 신호를 구성한다. 특히, 장거리 관측이나 서브픽셀 크기의 열원을 대상으로 하는 경우, 이러한 비화염성 요소들이 열원의 신호를 왜곡시키는 주요 원인이 된다.

이를 수식적으로 나타내면, 센서 수신 스펙트럼 복사휘도 L_s 는 다음과 같은 성분으로 구성된다 [14]:

$$\begin{aligned}
L_S = & \underbrace{\Delta\epsilon \int_0^\infty \epsilon_{o\lambda}(\theta_v) L_\lambda(T_o) \tau_{a\lambda} \mathcal{S}_\lambda d\lambda}_{\text{열원 복사 성분 } L_{self}} \\
& + \underbrace{\int_0^\infty L_{path\lambda} \mathcal{S}_\lambda d\lambda}_{\text{대기 경로 복사 성분 } L_{path}} \\
& + \underbrace{\int_0^\infty \tau_{o\lambda} \epsilon_{b\lambda} L_\lambda(T_b) \tau_{abo\lambda} \tau_{a\lambda} \mathcal{S}_\lambda d\lambda}_{\text{배경 복사 성분 } L_{bg}} \\
& + \dots
\end{aligned} \quad (5)$$

식 (5)는 크게 세 가지 주요 항으로 구성된다. 첫째, 열원 자체에서 방출된 복사 성분 L_{self} 는 대상의 온도 T_o , 방사율(emissivity) $\epsilon_{o\lambda}$, 대기 투과도 $\tau_{o\lambda}$ 등에 의해 결정되며, 관측의 주요 대상이다. 둘째, L_{path} 는 대기 분자 및 에어로졸 입자가 산란 혹은 방출하는 복사량으로 구성되며, 열원과 무관하게 센서에 도달한다. 셋째, L_{bg} 는 배경 물체의 복사량이 대기를 통해 감쇠된 뒤 센서에 도달하는 성분으로, 시야 내 배경의 온도 T_b 와 복사 특성에 따라 달라진다.

이러한 복합적인 요소들은 실제 센서 영상에서 화염의 신호를 분리하고 정량화하는 데 큰 난점을 유발한다. 특히 화염이 작고 배경과 구분되는 특성이 약한 경우, L_{self} 성분은 미미하게 나타나며, 오히려 L_{path} 와 L_{bg} 가 우세해진다. 이로 인해 관측자는 실제보다 낮은 복사량을 추정하거나, 때로는 존재하지 않는 열원 신호를 잘못 해석할 위험이 존재한다.

III. Proposed Scheme

본 장에서는 이중 대역 적외선 센서를 활용하여 화염과 센서 간의 거리를 추정하는 알고리즘 구조를 절차적으로 설명한다. 이 알고리즘은 (1) 센서 수신 신호에서 순수한 열원 복사량을 분리하고, (2) 이중 대역 간의 대기 감쇠 특성 차이를 기반으로 거리 추정 피처를 구성하며, 최종적으로 회귀 모델을 통해 거리를 예측하는 두 단계로 구성된다.

본 연구에서는 화염 관측에 있어 순수한 열원 복사 성분을 지칭하기 위해 **FLR (Flame-Only Radiance)**라는 용어를 도입한다. 이는 화염이 존재하는 영역만을 기반으로 시간 차분을 적용해 추출한 복사 성분으로, 비화염성 배경 및 경로 복사를 제거한 열원 고유의 방사 특성을 반영한다. 이후 IR_1 과 IR_2 대역 각각에 대해 FLR 성분을 정의하며, $IR_{1,FLR}$, $IR_{2,FLR}$ 로 표기한다.

1. FLR extraction by Time-differential method

센서가 수신하는 복사 신호에는 열원 복사 외에도 경로 복사휘도, 배경 복사, 외부 광원 반사 등 다양한 비화염성 성분이 포함된다. 이를 제거하기 위해, 본 연구는 시간 차분 방식을 적용하여 화염 발생 이전 시점 t_{ref} 와 현재 시점 t 사이의 복사량 차이를 추출한다.

화염의 중앙 위치는 외부 알고리즘(예: 탐지 모듈) 또는 마스크 처리 등을 통해 사전에 식별된다고 가정한다. 이렇게 탐지된 위치에서의 화염면적 ROI(Region of Interest)는 다음과 같은 두 가지 상황에 따라 정의된다:

a) **다중 픽셀 면적 보정**: 기준 프레임 대비 증가량이 임계값 θ 를 초과하는 픽셀들의 집합을 화염 영역으로 간주하고, 면적 A 를 계산하여 복사량 정규화에 사용한다.

b) **서브픽셀 대상**: 화염이 하나의 픽셀 내에 존재할 경우, 별도 면적 보정 없이 해당 픽셀의 복사량만을 사용한다.

각각의 IR 영상에서 다음과 같이 차분하여 실제 복사량 증가분 $\Delta IR(i, j)$ 을 구한다:

$$\Delta IR(i, j) = IR_t(i, j) - IR_{t_{ref}}(i, j) \quad (6)$$

최종적으로 ROI 내 픽셀의 복사량 증가분을 합산하여 FLR 성분을 정의하며 이 절차는 IR_1 , IR_2 영상에 각각 독립적으로 적용된다:

$$\begin{aligned}
IR_{1,FLR} &= \sum_{(i,j) \in ROI} \Delta IR_1(i, j) \\
IR_{2,FLR} &= \sum_{(i,j) \in ROI} \Delta IR_2(i, j)
\end{aligned} \quad (7)$$

2. LogRatio of Dual-band radiance

IR_1 과 IR_2 는 서로 다른 파장 대역(예: $3.5 - 4.0\mu\text{m}$, $4.0 - 4.5\mu\text{m}$)에 해당하며, 각 대역은 고유의 대기 감쇠 계수 κ 를 가진다. 대기 감쇠를 포함한 수신 복사량은 다음과 같이 모델링된다:

$$IR_{i,FLR}(d) = L_i \cdot \exp(-\kappa_i \cdot d) \quad (8)$$

여기서 $i = 1, 2$ 는 각 대역, L_i 는 대역별 열원 복사량이다. 두 대역 간 수신 복사량 비율은 다음과 같다:

$$\frac{IR_{2,FLR}(d)}{IR_{1,FLR}(d)} = \frac{L_2}{L_1} \cdot \exp(-(\kappa_2 - \kappa_1)d) \quad (9)$$

이제 양변에 자연로그를 취하면 다음과 같이 정리된다:

$$\begin{aligned} \ln\left(\frac{IR_{2,FLR}(d)}{IR_{1,FLR}(d)}\right) &= \ln\left(\frac{L_2}{L_1}\right) + \ln(\exp(-(\Delta\kappa)d)) \\ (10) \qquad \qquad \qquad &= \ln\left(\frac{L_2}{L_1}\right) - (\Delta\kappa)d \end{aligned} \quad (11)$$

이 식은 다음과 같이 선형 회귀 형태로 나타낼 수 있다:

$$\hat{d} = \alpha x + \beta \quad (12)$$

여기서 $x = \ln\left(\frac{IR_{2,FLR}(d)}{IR_{1,FLR}(d)}\right)$ 는 로그 비율 피쳐이며, $\Delta\kappa = \kappa_2 - \kappa_1$ 이다.

IV. Simulation-based analysis

본 절에서는 이중대역 적외선 센서를 활용한 거리 추정 알고리즘의 이론적 타당성을 검증하고, 주요 설계 변수들이 수신 복사 에너지에 미치는 영향을 정량적으로 분석하고자 시뮬레이션을 수행하였다. 특히, 센서 단일 픽셀에 도달하는 물리적 irradiance를 기준으로 하여, 거리, 온도, 대기 투과 조건, 시야 채움 정도 등의 요소가 어떻게 작용하는지를 단계적으로 검토하였다.

시뮬레이션은 두 부분으로 구성된다. 첫 번째는 Planck 기반의 복사모델과 MODTRAN으로부터 얻은 스펙트럼 대기투과도 및 경로 복사도를 이용해, 단일 픽셀 수준에서 수신되는 irradiance를 직접 계산하는 모델이다. 이는 전자적 증폭계나 센서 응답 특성 없이 순수 복사물리량만으로 거리 민감도를 파악하기 위함이다. 두 번째는 이러한 모델을 바탕으로, 지수 감쇠 모델과의 비교, 대역 비율 변화, 그리고 온도조건에 따른 영향을 분석함으로써, 실제 알고리즘 설계에 필요한 물리 기반 설계 근거를 제공한다.

본 시뮬레이션의 전 과정은 이론적으로 정의된 복사 전달 수식을 바탕으로 하고 있으며, 실험 결과와 독립적으로 수행되어 물리 기반 알고리즘 검증의 기준선 역할을 수행할 수 있다.

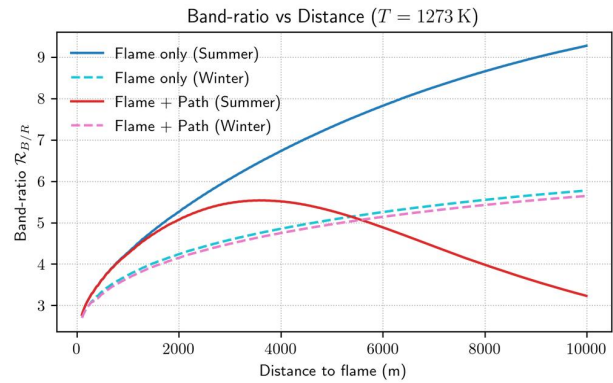


Fig. 2. Comparison of Band Ratio Between Flame-Only Condition and Path Radiance Addition

1. Theoretical irradiance for single pixel

센서 단일 픽셀에 도달하는 복사 에너지 밀도 (irradiance)는 화염의 복사 특성과 대기 전파 조건을 고려하여 계산된다. 본 연구에서는 센서의 응답 특성이나 전자 증폭기의 이득과 같은 전기적 요소는 고려하지 않고, 오직 물리적으로 센서 픽셀에 도달하는 irradiance [W/m^2]만을 정량화한다.

화염에서 방출된 라디언스는 방사율 $\epsilon = 0.7$ 을 곱하여 실제 복사량을 보정하며, 대기 중 파장별 감쇠는 MODTRAN으로부터 얻은 투과도 $\tau_{MOD}(\lambda, d)$ 를 통해 반영하였다. 센서 단일 픽셀에 수신되는 irradiance는 다음과 같이 표현된다.

$$E_{\pi_{xel}} = f \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \epsilon L_{\lambda}(T) \tau_{MOD}(\lambda, d) d\lambda + (1-f) \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} L_{path, \lambda}(d) d\lambda \quad (13)$$

시야 채움 계수 f 는 화염이 센서 시야를 어느 정도 채우는지를 나타내며, 화염 면적 A 와 거리 d , 픽셀 시야각 Ω 에 따라 다음과 같이 정의된다.

$$f = \min\left(1, \frac{A}{R^2 \cdot \Omega}\right) \quad (14)$$

이 모델은 화염이 시야를 전부 채울 경우 $f = 1$, 그렇지 않을 경우에는 $f < 1$ 로 설정되어 path radiance가 수신 신호에 포함되는 구조이다.

시뮬레이션에 사용된 두 대역은 각각 블루 밴드(Blue Band, $3.5 - 4.2\mu m$)와 레드 밴드(Red Band, $4.4 - 5.5\mu m$)로 정의된다.

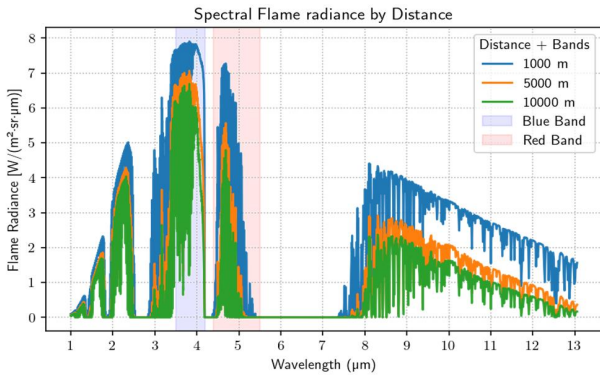


Fig. 3. Spectral Flame radiance by distance

두 밴드에 대해 수식 (14)를 적용하여 irradiance를 계산 하여 다음과 같은 밴드 비율 Band-ratio E_{Red}/E_{Blue} 를 도출한다.

본 연구에서는 총 두 가지 조건에서 Band-Ratio를 계산하였다. 첫 번째는 오직 열원 복사 성분만 고려하여 화염의 순수 복사량만 고려한 경우이며(Flame only), 두 번째는 실제 관측 조건처럼 path radiance 항이 포함된 경우이다.

2. Analysis of path radiance effect

앞서 정의한 수식에 거리 변화에 따른 센서 수신 irradiance를 계산하였다. 시뮬레이션 설정은 다음과 같다. 화염은 $10m^2$ 의 면적과 $1000^\circ C$ 의 온도를 가지며, 천정각(zenith angle)은 105° 로 고정되었다. 센서의 시야각은 픽셀 기준으로 $10^{-4}sr$ 이며, 이때 시야 채움 계수 f 는 화염 면적과 거리의 제곱에 반비례하여 계산된다.

거리 조건은 관측선 상에서 화염과 센서 사이의 경사 거리(range)를 의미하며, $100m$ 간격으로 $0m$ 부터 $10km$ 까지 설정되었다. 천정각이 고정된 상태에서 거리가 증가함에 따라, 화염의 고도 역시 삼각함수 관계에 따라 증가하게 되며, 이러한 설정은 거리와 고도가 동시에 증가하는 경사선 상의 전파 시나리오를 고려한 것이다.

이러한 조건에서 계산된 Band-Ratio는 두 모델에서 상이한 양상을 나타낸다. Fig. 2는 해당 결과를 보여준다. 순수 flame-only 조건에서는 Band-Ratio가 거리 증가에 따라 증가한다. 하지만 실제 관측을 반영한 조건에서는 시야 채움이 급격히 줄어드는 $2km$ 이상부터 감소하는 형태를 보인다. 이는 path radiance가 전체 수신 에너지에 미치는 비중이 커지는 결과이며, 거리 추정 피쳐로서 Band-Ratio를 사용할 때 반드시 감쇠 구간에 따른 어려움이 존재함을 시사한다. 특히 대기투과도만을 고려한 결과와는 달리 path radiance의 경우 계절에 따른 영향이 큰 것으로 나타났다.

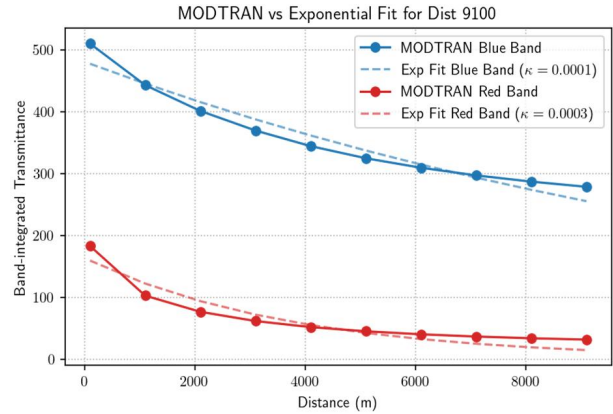


Fig. 4. Atmospheric Transmission: MODTRAN vs. Exponential Attenuation Model

이러한 전체 밴드 적분 기반 비교만으로는 각 파장에서 세부 거동을 확인하기 어렵기 때문에, 거리별 flame radiance 및 path radiance의 스펙트럼을 분해하여 분석하였다. Fig. 3은 거리 변화에 따른 flame radiance의 파장별 변화를 나타내며, 레드 밴드 대역에서의 방사량 감소가 확인된다.

3. Comparison of simple exponential attenuation model and MODTRAN

MODTRAN으로부터 추출한 거리-투과도 관계를 단순 지수 감쇠 모델 $\tau(d) = \exp(-\kappa d)$ 로 근사함으로써, 각 밴드에 대한 감쇠 계수 κ 를 추정하였다. 이 근사는 실제 거리 추정 모델을 설계하기 위한 감쇠 계수 초기값으로 활용될 수 있다.

본 연구에서는 파이썬의 scipy 라이브러리의 curve fit 함수를 이용하여 MODTRAN 기반 투과도 데이터를 해당 지수 모델에 피팅하였다. Fig. 4에 나타난 것처럼, 블루 밴드 대역은 $\kappa_1 \approx 0.0001$, 레드 밴드는 $\kappa_2 \approx 0.0003$ 수준으로 추정되었다. 또한 $7km$ 이상의 장거리 영역에서는 실제 투과도가 지수 모델보다 급격하게 감소하는 경향을 보였다.

따라서 단일 지수 모델로 전체 거리 구간을 완벽히 근사하는 것은 한계가 있으며, 실제 거리 추정 모델에서의 적용을 위해서는 설계 조건에 따라 감쇠 계수를 조정할 필요가 있음을 시사한다.

4. Analysis of flame temperature effect

Planck 분포에 따라 화염 온도가 상승할수록 전체 방사량은 증가하며, 이중대역 센서에서 수신하는 irradiance 비율에도 영향을 미친다. 본 실험에서는 $100^\circ C$ 부터

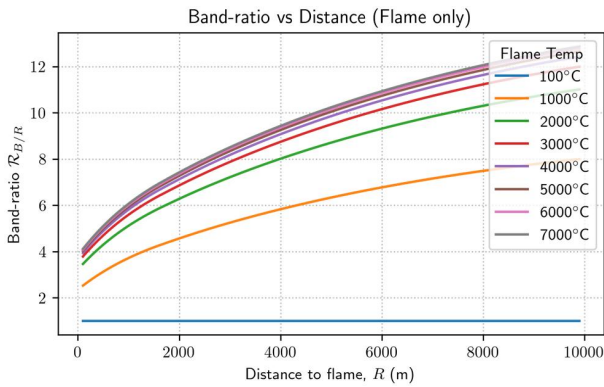


Fig. 5. Band ratio according to temperature changes under flame-only conditions

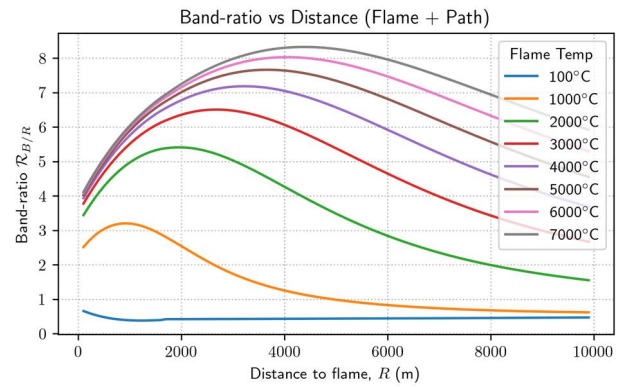


Fig. 6. Band ratio according to temperature changes under flame & path radiance conditions

7000°C 까지 다양한 온도에 대해 flame-only 및 path radiance 포함 조건에서 각각의 Band-ratio 변화를 분석하였다.

Fig.5 는 순수 복사량 조건의 온도에 따른 Band-ratio 변화를 나타낸다. 100°C 에서는 거의 비율 변화가 나타나지 않았으나, 1000°C 부터 3000°C 구간에서는 레드 밴드의 상대적 감소폭이 커지며 Band-ratio가 급격히 상승하였다. 그러나 3000°C 를 초과하는 고온 영역에서는 비율 변화가 정체되며, 거리 증가에 따른 Band-ratio 변화도 더 이상 뚜렷하게 나타나지 않았다.

반면, path radiance를 포함한 Fig. 6 조건에서는 전체 irradiance는 Flame-only 조건과 유사하게 온도 상승에 따라 증가한다. 또한 고온일수록 화염의 방사량이 path radiance 대비 상대적으로 커지기 때문에 path radiance의 영향력은 줄어들었다. 그러나 해당 시뮬레이션의 Band ratio는 path radiance의 영향에 의해 거리가 증가함에 따라 감소하는 양상을 보였다.

이러한 결과는 실제 거리 추정 알고리즘 설계 시, 저온 환경에서는 path radiance가 미치는 영향이 크고 비율 변화가 작기 때문에 오차가 클 수 있으나, 일정 온도 이상에서는 Band-ratio 기반 추정이 보다 안정적으로 동작할 수 있음을 시사한다.

V. Experiments

1. Environments and procedures

실험은 주간 야외 환경에서 수행되었으며, 기상청 측정 기준으로 대기 온도는 약 23°C, 상대 습도는 50% 내외로 유지되었다. 배경 복사 온도는 대기 온도로 간주하였으며, 실험 환경에는 인공 광원이나 ND 필터는 사용되지 않았

Table 1. Specifications of Dual-Band IR Camera Used in Experiment

Item	Band 1	Band 2
Pixel Size($\mu m \times \mu m$)	15 x 15	15 x 15
Exposure Time(msec)	1.2	1.2
Focal Length(mm)	3.72	3.72
F number	2.0	2.0
Spatial Resolution	512 x 512	512 x 512
Field of View(° x °)	100 x 100	100 x 100

다. 센서는 삼각대에 고정하여 촬영 중 흔들림이나 미세 진동이 없도록 하였다.

실험에 사용된 거리는 레이저 거리측정기(Laser Range Finder, LRF)를 통해 측정되었으며, 각 거리 구간마다 5 초간 촬영하여 그 중 2에서 3초 구간에서 5장의 연속 프레임은 평균 처리하여 단일 복사량 값으로 사용하였다. 이를 통해 순간적 노이즈나 바람에 의한 화염 변동성을 최소화 하였다. 화염 영역의 추출은 본 논문의 방법론에서 제안한 절차인 기준 프레임(t_0) 대비 변화량이 일정 임계값을 초과한 영역을 화염으로 지정하는 방법을 사용하였다.

실험에 사용된 열원은 부탄가스를 사용하는 두 종류의 가스토치로, 각각 DUA 모델과 RZ 모델이다. 두 모델 모두 동일한 연료를 사용하지만 노즐 구조 및 압력 조건이 달라 생성되는 화염의 길이와 온도, 면적 특성이 상이하다. 해당 가스토치는 실제 원거리 환경에서의 화염 검출 시나리오를 모사하기 위해 사용되었으며, 상대적으로 화력이 약한 화염(DUA)과 강한 화염(RZ)을 비교하는 데 활용되었다. Fig. 7는 두 가스토치의 외형이며, Fig. 8은 FLIR 카메라로 촬영한 DUA 및 RZ 가스토치의 10m 거리에서의 영상을 보여준다. 해당 영상을 통해 같은 연료를 사용하지만 화력의 차이를 확인 할 수 있다.

본 연구에 사용된 MWIR 이중대역 카메라는 하나의 입구 창(window)을 지난 뒤 두 대역을 분리한다. 스펙트럼



Fig. 7. DUA, RZ Gastoch

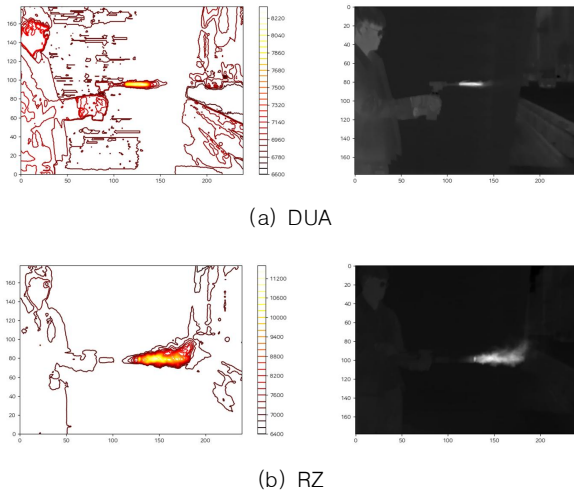


Fig. 8. Infrared Imaging Results Captured Using a FLIR Camera and Contour Representation

선택은 중적외선 영역 중 두 밴드를 선택하여 대응하도록 하였다. Table 1은 본 연구에서 사용된 이중대역 카메라의 스펙을 보여준다.

두 밴드는 공통 광축을 공유하며 빔 스플리터 이후에만 분리되므로 기본적인 광학 왜곡·시차가 동일하다. 따라서 후처리에서 추가적인 기하학적 워핑 없이 픽셀 단위로 밴드 간 대응이 가능하며, 벤치마크 패턴 촬영 결과 서브픽셀 오차는 2픽셀 이하로 확인되었다. 태양광이 직접 센서에 들어온 경우, 센터 영역은 포화되어 측정이 불가하였으며, 수면에 반사된 태양광의 경우 적외선 방사량 비율은 본 연구에서 측정된 화염의 비율과는 명확히 구분됨을 확인하였다.

2. Measurements

실험은 두 가지 화염에 대해 별도로 수행되었으며, 화력이 약한 DUA 모델은 50m에서 150m까지의 3개 거리 구간에서, 화력이 강한 RZ 모델은 50m에서 400m까지 50m 간격으로 총 8개 거리 구간에서 촬영이 이루어졌다. 각 거리에서 화염이 포함된 영역을 관심영역(ROI)으로 설정하고 해당 영역의 복사량을 계산하였다. 수집된 데이터는 센서의 두 밴드에서 각각의 화염 복사량(IR_1 , IR_2)으로 구성된다.

Table 2. Number of flame pixels by distance

Distance (m)	DUA		RZ	
	Band 1	Band 2	Band 1	Band 2
50	3	27	14	123
100	2	10	5	28
150	1	5	2	21
200	-	-	1	9
250	-	-	1	8
300	-	-	1	2
350	-	-	1	1
400	-	-	1	1

3. Results

본 절에서는 다양한 복사량 추출 방식과 회귀 피쳐 조합에 따른 거리 추정 성능을 비교하고, 본 연구에서 제안한 알고리즘의 유효성을 실험적으로 검증한다. 실험은 복사량 추출 방식과 회귀 피쳐의 두 가지 관점에서 구성된다.

복사량 추출 방식으로는 첫째, 관심 영역(ROI) 내 모든 복사값의 단순 합을 사용하는 Sum 방식, 둘째, ROI 내 평균값을 사용하는 Mean 방식, 셋째, 가장 강한 복사값을 사용하는 Max 방식, 넷째, 화염의 활성 픽셀 수나 면적 정보를 활용한 Area 방식, 그리고 마지막으로 본 연구에서 제안한 시간 차분 기반의 순수 화염 복사량인 IR FLR 방식이 사용된다.

회귀 피쳐로는 두 대역 간 단순 차이를 사용하는 Diff, 복사량 비율을 사용하는 Ratio, 그리고 본 연구에서 제안한 로그 비율 기반의 LogRatio 외에도, 두 밴드의 차이를 총합으로 정규화한 NormDiff 피쳐를 함께 평가하였다. 이 피쳐는 다음과 같은 수식으로 정의된다:

$$x_{norm} = \frac{IR_2 - IR_1}{IR_2 + IR_1} \quad (15)$$

NormDiff는 상대적인 대역 간 에너지 분포를 나타내며, 두 대역 간 강도 차이가 전체 에너지 대비 얼마나 비율적으로 차이 나는지를 정규화된 값으로 표현한다. 이를 통해 LogRatio와 유사하게 대역 간 감쇠율 차이에 민감하게 반응하면서도, 스케일 변화에 상대적으로 강건한 추정이 가능하다.

각 조합은 선형 회귀 모델 $\hat{d} = \alpha x + \beta$ 의 형태로 학습되며, 평균 절대 오차(MAE)와 평균 제곱근 오차(RMSE)를 통해 정량적으로 성능을 평가하였다. 실험은 근거리(50 – 150m, DUA 토치)와 중장거리(50 – 400m, RZ 토치)로 구분하여 진행하였다.

화염 면적 정보를 기반으로 복사량 정규화가 가능한 경우, 전체 복사량(Sum)이나 평균값(Mean)을 회귀 피쳐로 활용하는 것이 가능하다. 그러나 실제 영상에서 ROI 면적이 작고 서브픽셀 수준에 해당하는 경우, 면적 기반 정규

Table 3. Distance Estimation Results in DUA

Stat	Transform	MAE	RMSE
Max	Ratio	19.02	22.54
	Diff	0.25	0.26
	NormDiff	17.99	21.62
	LogRatio	18.35	21.94
FLR (ours)	Ratio	1.46	1.55
	Diff	0.23	0.24
	NormDiff	4.99	5.33
	LogRatio	4.10	4.37

화는 오히려 오차를 유발할 수 있다.

Table 2는 각 거리에서 측정된 RZ 및 DUA 화염의 ROI 픽셀 면적을 나타낸 것이다. RZ의 경우 적외선 센서의 두 밴드에서 면적이 수십~백 픽셀 단위로 측정되어 신뢰 가능한 정규화가 가능하지만, DUA는 거리 증가에 따라 화염이 1~3 픽셀 수준으로 작게 나타난다. 특히 Blue에서는 대부분 1~3 픽셀에 불과하며, 이는 화염이 센서의 해상도 기준으로 명확하게 분리되지 않거나, 배경의 노이즈에 의해 면적 추정이 불안정해지는 상황을 유발한다.

이러한 이유로 DUA 실험에서는 면적 기반 정규화 방법(Sum, Mean, Area 등)의 적용이 신뢰성을 확보하기 어려우며, 가장 강한 신호만을 사용하는 Max 방식만을 회귀 피쳐와 결합하여 분석하였다. 이 방식은 최소한의 공간 정보에 기반하면서도 복사 신호가 분명하게 식별되는 조건에서만 회귀가 수행되므로, 소면적 열원에 대한 비교적 안정적인 거리 추정이 가능하다.

Fig. 9와 10은 RZ 가스토치를 이용하여 다양한 복사량 추출 방식과 회귀 피쳐를 조합한 경우의 거리 예측 결과를 시각화한 것이다. 전체적으로 실제 성능 지표와 일치하게, 본 연구에서 제안한 방법이 가장 우수한 예측 정확도를 보였음을 확인할 수 있다.

특히 복사량 추출 방식 측면에서, 평균값(Mean)이나 최대값(Max)을 활용한 경우에는 예측 성능의 저하가 두드러졌는데, 이는 해당 방식들이 화염의 면적 정보를 반영하지 못한다는 구조적 한계에서 기인하는 것으로 해석된다. 반면, 시간 차분 기반의 FLR 방식은 화염 중심의 국소적 복사 증가만을 정량화함으로써, 면적 변화와 배경 영향을 효과적으로 제거할 수 있었다.

또한 회귀 피쳐 측면에서는 단순 차이를 사용하는 Diff 방식이 복잡한 환경에서 민감하게 반응하며, 성능 저하를 유발하는 경향이 관찰되었다. 이는 거리 증가에 따른 신호 감쇠 및 배경 혼합 등 비선형성이 강한 조건에서는 절대적 차이보다 상대적 비율(LogRatio, NormDiff)을 사용하는 방식이 더욱 안정적인 예측을 가능하게 함을 시사한다.

Table 4. Distance Estimation Results in RZ

Stat	Transform	MAE	RMSE
Sum	Ratio	94.09	106.87
	Diff	96.42	108.60
	NormDiff	85.64	99.06
	LogRatio	87.63	100.70
Mean	Ratio	99.57	114.40
	Diff	83.08	99.23
	NormDiff	99.89	114.54
	LogRatio	99.82	114.51
Area	Ratio	99.26	114.39
	Diff	41.56	51.25
	NormDiff	100.04	114.56
	LogRatio	99.76	114.53
Max	Ratio	97.30	112.21
	Diff	99.65	114.52
	NormDiff	94.98	109.10
	LogRatio	95.77	109.87
FLR (ours)	Ratio	63.02	72.37
	Diff	75.11	88.33
	NormDiff	43.96	55.04
	LogRatio	11.65	15.04

Table 3과 4는 두 가지 화염에 대한 RMSE 및 MAE의 실험 결과이다. 본 연구에서 제안한 FLR 기반의 로그 비율 회귀(LogRatio)는 중장거리(RZ) 구간에서 가장 낮은 RMSE(15.04m)를 기록하며, 전체 조합 중 가장 우수한 성능을 보였다. DUA의 경우 본 논문이 제안하는 회귀 방법이 아닌 Diff 방법이 상대적으로 높은 성능을 발휘 하였다. 이는 매우 짧은 거리에서의 회귀 방법은 비선형적인 피쳐 추출 방법 보다 단순한 차를 이용하는 것이 더 적합한 것으로 사료된다. 그러나, 화염복사량 추출 방법에 있어서는 기존의 최대값을 취하는 것보다 전체적으로 향상된 성능을 보였으며 이는 본 연구가 제안하는 방법의 강건성을 보여준다.

이러한 결과는 LogRatio와 같은 물리 기반 회귀 피쳐가 대기 감쇠 모델의 구조와 정합되며, 스케일 변화나 외란 요소에 강건한 특성을 보임을 의미한다. 따라서 본 연구에서는 FLR 추출과 LogRatio 회귀 피쳐의 조합을 최종 거리 추정 알고리즘으로 제안하며, 실험 결과를 통해 그 유효성을 입증하였다.

4. Physical analysis of regression parameters

각 피쳐에 대해 학습된 회귀 모델의 계수 α , β 는 단순한 수치적 피팅 계수에 그치지 않고, 물리 기반 해석을 통해 거리-복사량 관계의 특성을 드러낼 수 있다. 특히 로그 비율 피쳐(LogRatio)는 감쇠 계수의 선형화 구조를 그대로 반영하기 때문에, 회귀 계수 α 는 대기 감쇠율 차이 $\Delta\kappa = \kappa_2 - \kappa_1$ 의 역수의 물리적 의미를 갖는다.

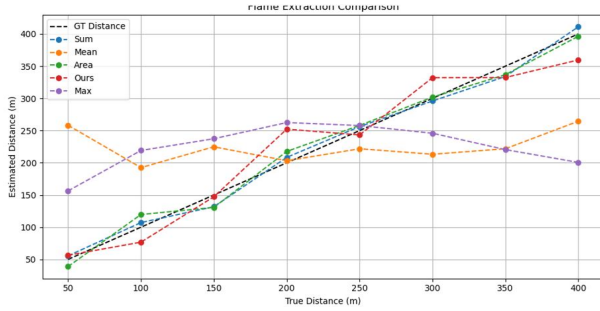


Fig. 9. Performance Comparison of Different Radiance Extraction Methods in RZ

이 관계는 다음 수식을 통해 명확히 설명할 수 있다. 이 상적인 대기 감쇠 모델에서 두 밴드의 순수 화염 복사량은 각각 $IR_{1,FLR} \sim e^{-\kappa_1 d}$, $IR_{2,FLR} \sim e^{-\kappa_2 d}$ 로 표현된다. 이를 비율로 나타내면 $IR_{2,FLR}/IR_{1,FLR} = e^{-\Delta\kappa d}$ 이며, 로그를 취하면 $\log(IR_{2,FLR}/IR_{1,FLR}) = -\Delta\kappa \cdot d$ 이 되는데, 여기서 거리 d 는 다음과 같은 선형 방정식으로 표현된다.

$$d = -\frac{1}{\Delta\kappa} \log\left(\frac{IR_{2,FLR}}{IR_{1,FLR}}\right) \quad (16)$$

이는 회귀 모델의 구조인 $\hat{d} = \alpha x + \beta$ 와 직접적으로 일치하며, $x = \log(IR_{2,FLR}/IR_{1,FLR})$ 일 때 $\alpha = -1/\Delta\kappa$ 로 해석될 수 있다. 실제 실험에서 얻은 α 값은 이론적인 감쇠율 차이에 대한 근사값으로 해석 가능하며, 실험적으로 도출된 α 를 통해 감쇠율 차이를 추정할 수도 있다.

반면, 단순 비율(Ratio)이나 차이(Diff) 기반 피쳐는 감쇠의 지수 형태를 그대로 반영하고 있으나, 거리와의 관계가 비선형적이므로 선형 회귀에서 물리량으로 직접 해석하기 어렵다. 이들 피쳐에서 학습된 α , β 는 모델 내에서는 유효한 예측 인자를 제공하지만, 감쇠율이나 절대 복사량 변화와의 직접적인 연결성은 떨어지는 한계가 있다. 정규화 차이(NormDiff)는 수치적 안정성을 확보하는 측면에서는 효과적이거나, 감쇠 모델의 해석적 변환으로 이어지지 않는다.

DUA 실험에서 LogRatio 회귀 피쳐를 적용한 결과, 선형 회귀식의 계수는 $\alpha = -199.25$, $\beta = 246.26$ 으로 추정되었다(Table 5). 본 회귀 결과는 $\Delta\kappa \approx 0.005$ 수준의 차이를 내포하고 있으며, 이는 감쇠율 차이에 따른 로그 스케일 민감도를 정량적으로 반영한 수치이다.

다만, MODTRAN 기반 시뮬레이션을 통해 동일한 거리 구간(100–500m)에서 추정된 감쇠 계수는 $\Delta\kappa \approx 0.0002$ 로, 이론적인 $\Delta\kappa \approx 0.0008$ 수준과는 다소 차이를 보인다. 이러한 불일치는 실측 데이터가 포함된

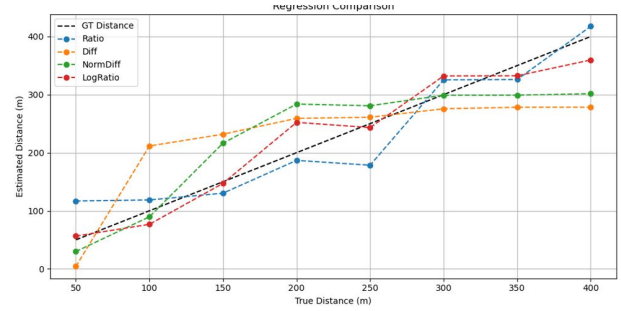


Fig. 10. Performance Comparison of Different Regression Features in RZ

Table 5. Regression Coefficients in DUA

Transform	α	β	RMSE [m]
Ratio	-97.10	306.47	1.55
Diff	-0.0181	200.58	0.24
NormDiff	-451.12	257.11	5.33
LogRatio	-199.25	246.26	4.37

회귀 계수 추정에서 발생할 수 있는 환경적 영향, 특히 습도 및 에어로졸 분포와 같은 실제 대기 조건의 차이에서 기인하는 것으로 해석된다.

MODTRAN은 이상 기상 조건뿐만 아니라 수증기량, 에어로졸 모델, 시정 거리 등의 입력 조건에 따라 민감하게 감쇠 곡선이 변화하며, 본 실험이 수행된 날의 상대 습도나 대기상태는 이러한 모델과 차이가 존재할 수 있다. 그럼에도 불구하고, 회귀 결과에서 도출된 α 값이 수식적으로 감쇠율 차이에 기반한 모델 구조와 일치한다는 점은 본 알고리즘이 단순한 통계적 회귀가 아닌 물리 기반 감쇠 모델과 정합성을 갖고 설계되었음을 보여주는 중요한 결과이다.

VI. Conclusions

본 연구에서는 이중 대역 적외선 센서를 기반으로, 열원의 거리 정보를 추정할 수 있는 물리 기반 알고리즘을 제안하였다. 이 알고리즘은 열원의 Planck 복사 특성, 대기 감쇠 구조, 그리고 센서 수신 신호의 구성에 대한 이론적 모델링을 바탕으로 하여, 거리-복사량 간의 정량적 관계를 정의하고 이를 활용한 회귀 기반 거리 추정을 수행한다.

특히 본 연구는 화염이 포함된 영역에 대해 시간 차분 방식으로 순수 복사량을 추출하는 FLR (Flame-Only Radiance) 개념을 도입함으로써, 배경 방사나 경로 복사 성분으로 인한 오차를 효과적으로 제거하였다. 또한 이중 대역 간 감쇠율 차이를 거리 예측에 활용하기 위해, 물리

모델에 기반한 LogRatio 피처를 설계하였으며, 이는 감쇠율 차이를 선형 회귀 계수로 직접 해석 가능하다는 점에서 이론적 및 실용적 장점을 동시에 제공한다.

시뮬레이션 분석을 통해, 거리, 온도, 시야 채움 등 다양한 물리 변수에 따른 센서 수신 복사량의 민감도를 평가하였고, 실제 MODTRAN 기반 투과도 모델과 비교하여 감쇠율의 정량적 적합성을 확인하였다. 나아가 실환경 야외 실험에서는 다양한 복사량 추출 방식과 회귀 피처 조합을 비교하였으며, 제안된 FLR + LogRatio 조합이 근거리 (DUA) 및 중장거리(RZ) 조건 모두에서 가장 낮은 RMSE와 높은 예측 안정성을 기록하였다.

또한, 회귀 모델로부터 도출된 계수 α 는 감쇠율 차이 $\Delta\kappa$ 의 역수와 구조적으로 일치하며, 이는 본 모델이 단순 통계적 접근이 아닌 물리 기반 감쇠 모델과 적합성을 유지하고 있다는 실증적 근거를 제공한다. 특히 실험에서 추정된 $\alpha = -199.25$ 는 현실적 대기 조건을 반영한 결과로 해석할 수 있다.

종합적으로 본 연구는 적외선 센서를 이용한 거리 추정 문제에 대해, 향후 열원 탐지 및 표적 추적 분야에서 실질적인 거리 추정 정확도 향상을 위한 기반 기술로 활용될 수 있다. 추후에는 다양한 환경 조건(예: 해무, 사막, 고지대 등)에 대한 일반화 연구와, 비선형 회귀 또는 학습 기반 모델과의 융합을 통해 알고리즘의 확장성을 확보할 수 있을 것으로 기대된다.

ACKNOWLEDGEMENT

This research was supported by the government of the Republic of Korea through the Defense Acquisition Program Administration (DAPA) and was conducted under the supervision of the Korea Research Institute for Defense Technology Planning and Advancement (KRIT) (Grant No. KRIT-CT-23-058, Project Title: Dual-band Infrared Sensor-based Missile Detection Technology).

REFERENCES

- [1] Z. P. Barbaric, B. P. Bondzulich, and S. T. Mitrovic, "Passive ranging using image intensity and contrast measurements," *Electronics Letters*, Vol. 48, No. 18, pp. 1122-1123, August 2012. DOI: 10.1049/el.2012.0632
- [2] D. L. Mikluc, M. S. Andric, S. T. Mitrovic, and B. P. Bondzulich, "Improved method for passive ranging based on surface estimation of an airborne object using an infrared image sensor," *Optica Applicata*, Vol. 47, No. 3, pp. 383-394, 2017. DOI: 10.5277/oa170305
- [3] G. Tidhar and R. Schlisselberg, "Evolution path of MWS technologies: RF, IR, and UV," *SPIE, Infrared Technology and Applications XXXI*, vol. 5783, pp. 662-673, May 2005. DOI: 10.1117/12.607226
- [4] D. Lobb, R. Bird, M. Wooster, and A. Regan, "Fire detection from LEO: trade-offs for selection of spectral bands and a wide-swath optical design using MWIR and visible bands," *SPIE, International Conference on Space Optics-ICSO 2018*, Vol. 11180, pp. 1461-1479, July 2019. DOI: 10.1117/12.2536062
- [5] M. S. Meir Danino, Yossef Danan, "Single vs. dual color fire detection systems: operational tradeoffs," *SPIE, Electro-Optical Remote Sensing XI*, Vol. 10434, pp. 60-70, 2017. DOI: 10.1117/12.2272406
- [6] M. De Visser, P. B. Schwing, J. F. De Groot, and E. A. Hendriks, "Passive ranging using an infrared search and track sensor," *SPIE, Optical Engineering*, Vol. 45, No. 2, 026402-026402, February 2006. DOI: 10.1117/1.2173948
- [7] B. P. Bondzulich, S. T. Mitrovic, Z. P. Barbaric, and M. S. Andric, "A comparative analysis of three monocular passive ranging methods on real infrared sequences," *Journal of Electrical Engineering*, Vol. 64, No. 5, p. 305, September 2013. DOI: 10.2478/jee-2013-0044
- [8] N. Yang, W. Tian, and Z. Jin, "An interacting multiple model particle filter for manoeuvring target location," *Measurement Science and Technology*, Vol. 17, No. 6, p. 1307, May 2006. DOI: 10.1088/0957-0233/17/6/003
- [9] C. Raju, S. Zabuawala, S. Krishna, and J. Yadegar, "A Hybrid System for Information Fusion with Application to Passive Ranging." *IPCV*, pp. 402-406. June 2007.
- [10] M. C. Şahingil, "Time-to-impact estimation in passive missile warning systems," *SPIE, Pattern Recognition and Tracking XXVIII*, Vol. 10203, pp. 86-99, May 2017. DOI: 10.1117/12.2267989
- [11] F. Xiaoning and X. Shiwen, "Passive Ranging Based on Accurate Prediction of Target Radiation Temperature," *IOP Publishing, Journal of Physics: Conference Series*, Vol. 1894, No. 1, p. 012028, April 2021. DOI: 10.1088/1742-6596/1894/1/012028
- [12] F. Alvarez-Rios, J. Diaz-Caro, F. Nombela, I. Barba, J. Expósito, C. Tapia, I. Sal, and I. Barbero, "Optical modeling and simulation of subpixel target infrared detection," *SPIE, Target and Background Signatures VII*, Vol. 11865, pp. 49-68, September 2021. DOI: 10.1117/12.2600077
- [13] F. X. Kneizys, "Users guide to LOWTRAN 7," *Air Force Geophysics Laboratory*, Vol. 88, No. 177, 1988.

- [14] C. J. Willers, "Electro-optical system analysis and design: a radiometry perspective." Society of Photo-Optical Instrumentation Engineers, 2013.
- [15] F. Neele, "Two-color infrared missile warning sensors," SPIE, Airborne Intelligence, Surveillance, Reconnaissance (ISR) Systems and Applications II, Vol. 5787, pp. 134-145, May 2005. DOI: 10.1117/12.603391
- [16] B. Ekstrand, "Approach to estimation of infrared point-target range," Applied Optics, Vol. 39, No. 20, pp. 3495-3503, July 2000. DOI: 10.1364/AO.39.003495
- [17] G. W. Park and S. H. Kim, "Analysis of Plume Radiant Intensity Using Image Output Values of Infrared Cameras," Journal of the Korean Institute of Illuminating and Electrical Installation Engineers, Vol. 36, No. 8, pp. 1-7, August 2022. DOI: 10.5207/JIEIE.2022.36.8.001

Authors



Jeong-Hyeon Moon received his B.S. degrees in Mathematics and Computer Engineering from Ajou University, Suwon, Korea, in 2018, and his Ph.D. degree in Artificial Intelligence from the same university in 2024.

He is currently working at Hanwha Systems in the Electro Optics System, where he is involved in the development of various algorithms required for defense systems. His recent research interests include the application of deep learning in defense technologies and laser dazzling countermeasure systems.



Seungha Kim received the B.S. degree in Computer Science from DGIST, Korea, in 2024. His research interests include computer vision, image processing, and system engineering.



BongJun Choi received the B.S. degree in Electronics Engineering from Kyunghee University, Korea in 2007. His research interests include analog/digital mixed signal processing, and system engineering.



Heeduk Park received the B.S. degree in Electronics Engineering from Kyunghee University, Korea in 2003 and the M.S. degree in Electrical, Electronics and Computer Engineering from Sungkyunkwan University.

Park has been working for Hanwha Systems Co., Ltd. from 2002. He is interested in researching and developing Electro-Optics for defense and security.