

M&S기법을 활용한 고정형 레이저 대공무기 성능 분석

Performance Analysis for Fixed Laser Air Defense Weapon by Using M&S Methodologies

이성균^{*1)} . 김창환¹⁾ . 김동건¹⁾ . 현철¹⁾

Sungkyun Lee¹⁾ . Changhwan Kim¹⁾ . Donggeon Kim¹⁾ . Chul Hyun¹⁾

[초 록]

최근 무인 항공기 및 드론의 군사적 활용이 급증함에 따라 이를 무력화시키기 위한 신속하고 정밀한 대응 능력 또한 중요해지고 있다. 이에 따라 고에너지 레이저 기반 대공무기가 차세대 요격 수단으로 주목받고 있다. 본 논문에서는 M&S (Modeling & Simulation) 기법을 활용하여 레이저 대공무기의 성능 분석 모델을 개발하였다. 레이저 대공무기의 추적 및 조준성능을 반영하기 위해 레이저 발사장치가 탑재되는 김벌 및 표적 조준에 활용되는 고속조종거울의 특성을 모의하였다. 레이저 대공무기의 특성과 대상 표적을 반영하여 작전 시나리오에 따른 명중 여부를 판단하였다. 개발된 분석 모델을 통해, 임의의 작전 상황에서 대상 표적에 대한 레이저 대공무기의 성능 추정이 가능함을 확인하였다.

[ABSTRACT]

In recent years, there has been a substantial increase in the deployment of unmanned aerial vehicles (UAVs) and drones. Accordingly, the need for countermeasures to neutralize these targets has become increasingly important. Under these circumstances, high energy laser air defense weapons are gaining attention as effective interception solutions. In this paper, accuracy assessment model for laser air defense weapon is developed by using Modeling and Simulation (M&S) technique. To reflect the tracking and pointing performance of laser air defense weapon, the characteristics of gimbal on which laser system is mounted and fast steering mirror (FSM) are modeled. The assessment of hit validity of laser weapon is calculated based on operational scenario by reflecting the characteristics of laser air defense weapon and target. Through the developed M&S model, it was confirmed that the performance of the laser air defense weapon could be estimated.

Key Words : Laser(레이저), Tracking(추적), Pointing(조준), UAV(무인항공기), Drone(드론)

1. 서 론

최근 무인 항공기(UAV) 및 소형 드론의 기술 발전과 확산으로 인해, 이들의 군사적 활용 빈도가 급격히 증가하고 있다. 특히, 군사 작전에서의 정찰, 타격, 교란 등의 임무 수행 능력을 갖춘 소형 비행체는 기존 방공체계로는 실시간 대응이 어려운 위협 요소로 부상하고 있다. 이에 따라 대상 표적에 대해 신속하고 정밀한 대응이 가능한 새로운 방공 무기 체계의 개

발 필요성이 대두되고 있다. 여러 선진국은 이미 드론 킬러 레이저 무기들을 개발했거나 개발중이다. 미국, 이스라엘, 그리고 독일 등은 저고도로 침투하는 무인기를 요격할 수 있는 고에너지 레이저 무기들을 보유하고 있다[1].

고에너지 레이저(High Energy Laser, HEL)를 기반으로 한 대공무기는 전통적인 요격 수단과 비교하여 높은 명중 정밀도, 짧은 반응 시간, 그리고 반복 운용이 가능하다는 이점으로 인해 차세대 요격 무기로 주목받고 있다. 최근 국내·외 레이저 무기체계에 대한 연구가 활발히 진행되고 있으며 미국을 중심으로 무인 표적 무력화를 위한 플랫폼 탑재형 레이저 무기체계 개발에 초점이 맞추어져 있다[2]. 이러한 무기 체계의 효과를 정량적으로 평가하기 위해서는, 레이저 대공무기의 구동 성능과 표적 특성을 통합적으로 반영할 수 있는 정교한 분석 모델이 필요하다.

1) LIG넥스원 해양연구소

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

* Corresponding author, E-mail: sungkyun.lee2@lignex1.com

Copyright © The Korean Institute of Defense Technology

Received : July 21, 2025 Revised : September 29, 2025

Accepted : September 30, 2025

본 논문에서는 M&S 기법을 활용하여 레이저 대공무기의 명중률을 예측할 수 있는 분석 모델을 개발하였다. 특히, 무기의 추적 및 조준 성능을 반영하기 위해 레이저 발사장치가 탑재되는 김벌(Gimbal)과 표적 조준에 사용되는 고속조종거울(Fast Steering Mirror, FSM)의 구동 특성을 모의하였다. 표적을 추적 및 조준하여 레이저빔으로 무력화시키기 위해서, 빔집속장치가 탑재된 김벌을 제어하는 광시계 제어루프와 집속장치 내부에 장착된 고속조종거울(FSM)을 활용한 정밀한 협시계 제어루프를 모의하였다. 또한 레이저 대공무기의 운용절차를 준수하여 작전 시나리오에 따른 실제 상황에서의 레이저 대공무기 명중 여부를 판단하였다.

본 논문은 레이저 대공무기 시스템의 성능 분석을 위한 시뮬레이션 기반 접근법을 제시하고, 비전통적 공중 위협에 대응 가능한 정밀 요격 체계인 레이저 대공무기의 효과도를 평가하였다.

2. 본 론

레이저 대공무기의 운용 순서는 다음과 같다. 우선, 아군 방공체계의 탐색레이이다를 통해 획득한 무인기 표적의概적인 위치가 레이저 대공무기 체계에 전달된다. 이후, 전달된 표적 초기 위치를 기반으로 레이저 대공무기의 광시계 추적(Wide Field-Of-View tracking, 이하 WFOV tracking)이 시작된다. 광시계 추적은 레이저 발사장치가 탑재된 김벌 구동 장치를 활용하여, 광시계 카메라로 표적을 포착하고 지속적으로 추적하는 단계이다[3]~[5]. 광시계 추적 단계가 성공하면 협시계 추적(Narrow Field-Of-View tracking, 이하 NFOV tracking)을 시작한다. 협시계 추적은 레이저 발사장치 내부의 고속조종거울(FSM)을 활용하여 조준점을 선정하는 정밀 추적 단계이다[5]. 협시계 추적을 통해 레이저 발사장치가 표적 조준에 성공하면 고에너지 레이저가 발사되어 표적에 명중하고, 그로 인해 표적은 무력화된다[6]~[7]. 레이저 대공무기의 전체적인 운용절차는 Fig. 1과 같다.

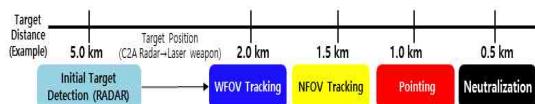


그림 1. 레이저 대공무기 운용절차

Fig. 1. The Operational Procedures for Laser System

본 논문에서는 상기 운용절차 중 광시계 추적부터 협시계 추적을 거쳐 표적이 조준되고 명중하는 절차까지를 집중적으로 모의하였다. 표적의 명중단계 이후, 고에너지 레이저로 인한 표적의 무력화 및 교전종료 판단의 단계는 본 연구에서 제외하였다.

개발된 분석 모델의 흐름도는 Fig. 2와 같다. 표적의 기동은 직진 기동으로 가정하고, 표적의 속력 및 진행방향, 표적 면적을 정의한다. 아군 탐색레이이다가 레이저 대공체계로 전달해주는 표적 위치에 대한 오차를 추정하고, 표적의 초기 위치값을 설정한다. 레이저 발사장치의 김벌을 이용하여 표적을 지향하고, 발사장치의 광시계 화각(WFOV) 내에 표적이 위치하면 광

시계 카메라를 활용한 표적의 식별 여부를 판단한다. 표적의 식별되면 광시계 카메라와 김벌을 이용한 광시계 추적단계가 시작된다. 광시계 추적 단계에서 표적을 향한 김벌 지향각의 오차가 기준값 이내이면 광시계 추적이 성공한 것으로 판단된다. 광시계 추적이 성공하고 협시계 화각(NFOV) 내에 표적이 위치하면 고속조종거울(FSM)을 활용한 협시계 추적 단계가 시작된다. 고속조종거울을 이용하여 광시계 추적 단계에서 발생한 표적을 향한 김벌의 지향각 오차를 보상하게 된다. 협시계 추적 단계에서 발생하는 표적위치와 지향각의 오차는 결국 레이저가 표적에 조사되는 지점과 목표 조준점 간의 오차로 반영된다.

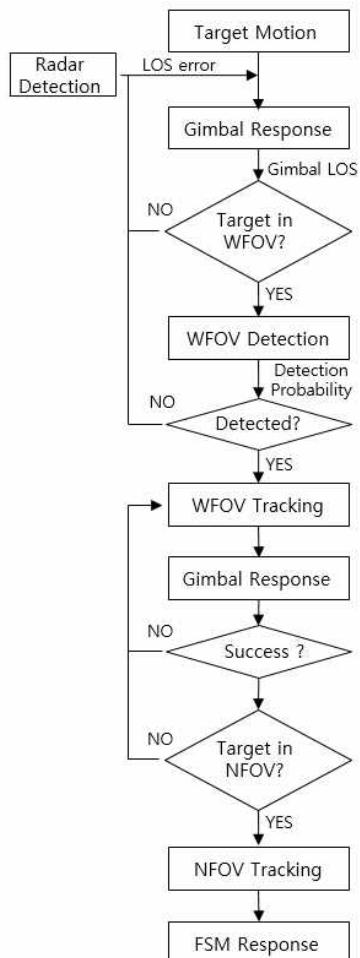


그림 2. 시뮬레이션 흐름도

Fig. 2. Flow Diagram of Simulation

2.1 광시계 추적 모의

탐색레이이다로부터 레이다 대공무기에 전달되는 표적의 초기 위치는 레이다 오차를 포함하는 값으로 설정하였다. 탐색레이이다에서 표적의 위치가 전달되면 광시계 카메라를 활용하여 표적을 식별한다. 광시계 카메라는 EO(Electro-Optical) 센서로 구성되며 탐지확률 계산 개념도는 Fig. 3과 같다. 탐지확률 계산을 위해서는 상용도구를 활용하였다. 대기투과 특성 계산에는 대기복사전달 해석분야에서 국제적으로 검증된 MODTRAN

상용도구를 활용했으며, 카메라 특성 계산은 영상 센서 성능 분석에 특화된 SSCAM-IP 상용도구를 활용하였다. 본 논문에서 활용한 EO 센서의 광학계 특성은 Table 1과 같다

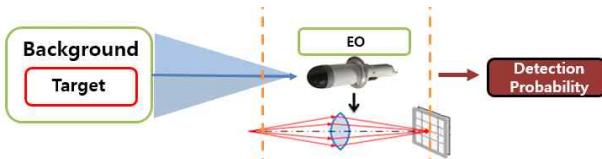


그림 3. 광시계 탐지 개념도

Fig. 3. Concept View of WFOV Detection

표 1. EO 센서 사양

Table 1. Specification of EO Sensor

Parameters	Value
Horizontal Field of View	2.9°
Vertical Field of View	2.3°
Focal Length	37 cm
F-Number	4
Average Optical Transmission	90 %

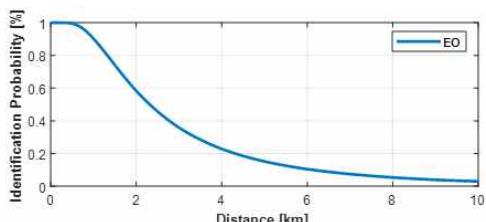


그림 4. EO 센서의 식별 확률

Fig. 4. Identification Probability of EO Sensor

Fig. 4는 광시계 카메라를 활용하여 표적 단면적 $0.3m^2$ 인 대상에 대해 계산된 식별 확률을 나타낸다. 본 논문에서는 식별 확률 50% 이상이면 표적이 식별된 것으로 설정하였으며, 그 때의 레이저 발사장치와 표적간의 거리는 약 2.5km이다. 아군 탐색레이이다가 전달해 준 표적의 초기 위치를 레이저 발사장치가 지향했을 때, 표적이 Table 1에 명시된 WFOV 내에 존재하고 식별 가능 거리(약 2.5km) 이내에 위치할 경우 광시계 카메라와 김벌을 이용한 광시계 추적이 시작된다.

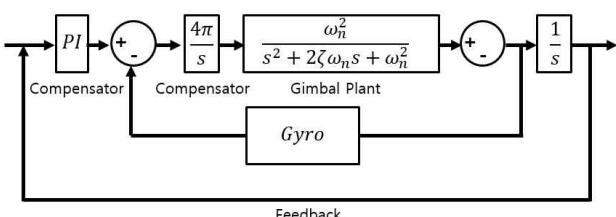


그림 5. 광시계 추적 시스템 블록선도

Fig. 5. Block Diagram of WFOV Tracking System

Fig. 5는 광시계 추적 단계를 블록선도로 표현한 것이다. 김벌의 지향각은 비례-적분 제어(PI 제어)를 적용하였고, 추적 시스템의 동적 응답을 빠르게 개선하기 위해 속도 보상기(rate compensator)를 추가하였다. 김벌 구동 모델은 2차 모델로 가정하였으며 김벌 구동 장치의 감쇄계수 ζ 와 고유 주파수 ω_n 는 미 해군 대학원(Naval Postgraduate School)에서 적용한 실험값을 적용하였다[5]. PI 제어기와 김벌 시스템 관련 수치들은 Table 2와 같다.

표 2. 광시계 추적 시스템 사양

Table 2. Specification of WFOV Tracking System

Parameters	Value
P (Proportional Coefficient)	250
I (Integral Coefficient)	80
ζ (Damping of Gimbal)	0.707
ω (Natural Frequency of Gimbal)	300π [rad/s]

본 논문에서는 김벌의 응답을 현실적으로 모의하기 위하여, 실제 김벌의 각속도를 측정하는 자이로 센서에서 나타나는 주요 오차 요소들을 고려하였다. 스케일 팩터 오차, 바이어스 불안정성, 그리고 각도 랜덤 워크를 포함하여 김벌의 각속도 출력을 모의하였다. 스케일 팩터 오차는 자이로 센서가 실제 김벌의 각속도를 선형적으로 측정하지 못하는 오차를 나타내며 바이어스 불안정성은 시간에 따라 특정 방향으로 편향되는 오차 의미한다. 각도 랜덤 워크는 자이로 센서에서 발생하는 짧은 시간 스케일의 무작위적인 오차를 의미한다. 본 논문에서 반영한 김벌 자이로 센서의 오차는 Table 3과 같다.

표 3. 자이로 성능 사양

Table 3. Performance Specification of Gyro

Parameters	Value
Scale Factor Non-linearity	50 ppm
Bias Instability	$0.1^\circ/\text{hr}$
Angle Random Walk	$0.012^\circ/(\text{hr})^{0.5}$

김벌을 이용한 광시계 추적이 성공하여 표적 지향 오차가 기준값 이내인 경우 협시계 추적 모의 단계가 시작된다.

2.2 협시계 추적 모의

레이저 대공무기 시스템의 협시계 추적 단계에서는 표적의 정밀한 위치 주정을 위해 협시계 카메라로 TILL(Tracking Illuminator Laser) 카메라는 표적

에 레이저 조명을 직접 조사하고 표면에서 반사되는 레이저 복사 휘도를 측정하기 때문에 표적이 NFOV 내에 존재하여 레이저 조명이 조사된 경우에는 식별 확률을 계산하지 않고 표적 식별이 성공한 것으로 간주하였다.

협시계 추적 단계의 표적 지향을 위해서는 고속조종거울(FSM)이 지향 정밀도를 높이기 위한 구동 장치로 활용된다. FSM은 미세한 각도 제어를 통해 레이저 조명 및 고에너지 레이저 빔의 조사 방향을 빠르고 정밀하게 조절함으로써, 표적의 위치 변화에 실시간으로 대응할 수 있도록 한다. FSM은 일반적으로 피에조(Piezoelectric) 장치로 구동되며, 마이크로초 단위의 응답 속도와 아크초 단위의 제어 정확도를 제공한다. FSM의 구동 형태 및 원리는 Fig. 6과 같다. 협시계 추적 단계에서는 FSM의 신속하고 정밀한 운동 응답을 통해 표적 운동에 따른 레이저 발사장치의 미세한 지향각 변화를 가능하게 하여 지속적이고 안정적인 표적의 추적과 조준을 달성할 수 있다.

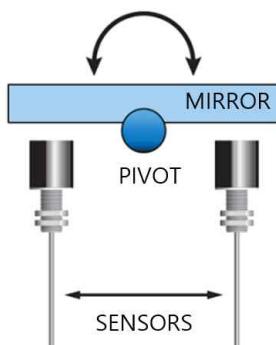


그림 6. FSM 운용 개념도

Fig. 6. Operating Concept of FSM

Fig. 7은 협시계 추적 단계를 블록선도로 표현한 것이다. 협시계 추적 단계에서는 레이저 발사장치의 김벌 지향각 오차를 FSM을 통해 지속적으로 보상한다. 협시계 추적시스템의 동적 응답을 빠르게 개선하기 위해 적분제어기 형태의 오차 보상기(position compensator)를 추가하였다. FSM 역시 김벌 구동 모델과 마찬가지로 2차 모델로 가정하였다. FSM 구동 장치의 감쇄계수 ζ 와 고유 주파수 ω_n 는 Table 4과 같으며, 김벌과 마찬가지로 미 해군 대학원(Naval Postgraduate School)에서 적용한 실험값을 적용하였다[5].

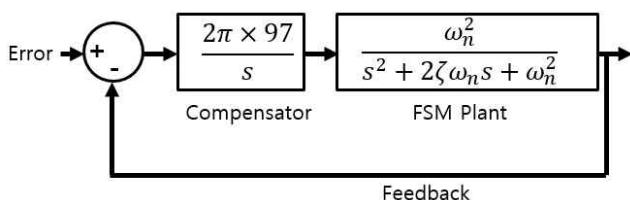


그림 7. 협시계 추적 시스템 블록선도

Fig. 7. Block Diagram of NFOV Tracking System

표 4. 협시계 추적 시스템 사양

Table 4. Specification of NFOV Tracking System

Parameters	Value
ζ (Damping of Gimbal)	0.707
ω (Natural Frequency of Gimbal)	300π [rad/s]

협시계 추적 단계를 거친 FSM의 표적 지향 오차는 광시계 추적 오차를 보상한 최종적인 표적 조준 오차이다.

고에너지 레이저 발사장치는 대기 중에서의 에너지 손실 및 빔 확산을 최소화하기 위해 일반적으로 짧은 사거리 내에서 운용된다. 이와 같은 운용 조건에서 고에너지 레이저는 대기를 거의 직선으로 통과하며 다른 외란 요소는 미미하게 작용한다. 특히, 표적이 수 km 이내에 위치하는 경우에는 레이저빔의 전파가 광학적으로 선형에 가까운 경향을 보인다[8]. 즉, 협시계 추적 단계를 통해 표적에 조준된 조준점은 레이저빔이 표적에 도달하는 명중점과 거의 일치한다. 이러한 이유로 조준 오차를 명중 오차로 간주하여 표적 명중 여부를 판별하였다.

3. 시뮬레이션 결과

개발된 분석 도구를 활용한 레이저 대공무기의 명중 여부 판단을 위해 Table 5와 같은 시뮬레이션 조건을 설정하였다. 시뮬레이션 조건은 크게 표적 기동, 표적 측정 및 구동 장치 관련 변수로 구분된다.

우선, 표적은 레이저 대공무기를 기준으로 약 3km 떨어진 거리에서 공격을 위해 하강하며, 아군 구역에 접근하는 상황을 가정하였다. 또한 레이저 발사장치의 명중률에 대한 보수적인 성능 분석을 수행하기 위해 표적의 속도를 고정의 소형무인기의 최대 속도로 설정하였다.

광시계 카메라의 영상 획득 주기는 100Hz로 설정하였다. 새로운 영상이 획득 될 때마다 제어 루프가 수행되므로 카메라의 영상 획득 주기는 곧 광시계 추적 단계에서 김벌에 전달되는 제어 명령 주기를 의미한다. 또한, 김벌 및 FSM 같은 구동 장치의 각각속도와 각속도에 제한값을 설정하였다. 이러한 제한값은 구동 장치의 안정적인 동작과 하드웨어 보호를 위해 필수적인 설정이며, 제어 알고리즘 내부에서 출력 제한(saturation) 함수 형태로 적용되었다. 광시계 추적 단계에서 김벌의 표적 지향 오차가 200μrad인 경우, 광시계 추적 성공으로 판단하고 협시계 추적을 시작하였다.

표 5. 시뮬레이션 분석 조건

Table 5. Simulation Condition

Parameters	Value	
Initial target position (ENU) [m]	(500, 3000, 650)	
Target velocity [m/s]	32	
Target maneuver pattern	straight line	
EO update period [Hz]	100	
Gimbal/FSM limit	Acc. [deg/s ²]	360
	Vel. [deg/s]	90
Criteria of tracking error [μ rad]	200	

레이저 발사장치를 원점으로 하는 표적의 궤적과 상대 거리 및 각도는 Fig. 8과 같다. 표적이 남쪽 방향으로 하강하면서 직선 기동을 하고 있다. 약 95초 이후 레이저 발사장치와 표적 간의 거리가 약 0.5km로 최소가 되고 이내 멀어진다. 표적이 레이저 발사장치를 향해 직선으로 접근할 때, 상대방위각과 상대고각은 표적의 위치에 따라 점진적으로 변화하다가 최단거리에 도달하는 순간 급격히 변하는 양상을 보인다. 최근접점에서는 표적이 발사장치 바로 앞을 지나치기 때문에, 발사장치에서 표적을 바라보는 시선각의 변화율이 극대화 되는 물리적으로 타당한 현상이 시뮬레이션을 통해서도 재현되었다.

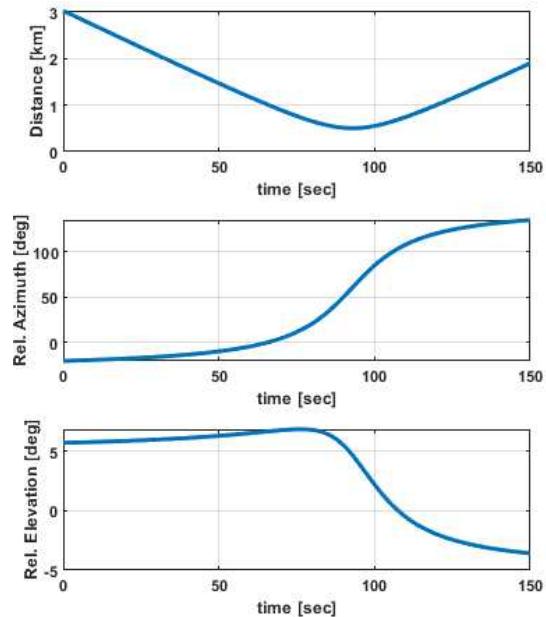
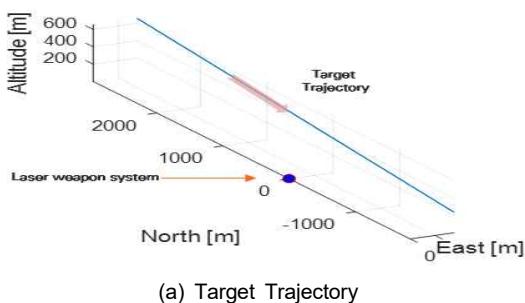


그림 8. 표적 궤적 및 상대 운동

Fig. 8. Target Trajectory and Relative Motion

표적이 무력화되어 소실되는 단계는 본 분석에서 제외하였으며, 이에 따라 표적이 레이저 발사장치에 접근한 후 이탈하기 까지의 전 구간에 대해 추적 오차와 조준 오차를 각각 산출하였다.

Fig. 9는 광시계 및 협시계 추적 단계에서의 추적 오차와 조준 오차를 나타낸다. 광시계 추적 단계에서는 김별의 지향 오차에 해당하는 추적 오차가 전 구간에서 200 μ rad 이내로 유지되었으며, 특히 지향각이 급격히 변화하여 김별 구동 속도가 증가하는 95~105초 구간에서 일시적으로 오차가 증가하였다. 반면, 협시계 추적 단계에서 FSM의 지향 오차에 해당하는 조준 오차는 전 구간에서 40 μ rad 이내로, 뚜렷한 변화 없이 안정적인 수준을 유지하였다. 이는 표적의 직선 기동에 따라 추적 오차의 일시적 변동이 있었음에도 불구하고, 협시계 추적 단계에서 이를 효과적으로 보상하여 전제적으로 일정 수준의 조준 정밀도를 확보했음을 의미한다.

산출된 조준 오차를 바탕으로 고에너지 레이저 빔이 표적에 명중했는지를 평가하였다. 레이저 빔이 가지는 선형 직진 특성에 따라 조준 오차는 명중 오차와 동일하게 간주하였다. 표적 유형은 고정익 소형 무인기와 멀티콥터를 각각 고려하였으며, 이에 대한 제원은 Table 6에 제시하였다.

일정한 조준 오차 각도를 가정할 때, 요격 거리가 증가함에 따라 레이저 빔의 접속 범위는 확장되고, 이로 인해 목표 조준 점과 실제 명중점 간 거리 오차 역시 커진다. 본 논문에서는 요격 거리 1.5km를 기준으로, 대상 표적의 크기와 레이저 빔의 접속 범위를 고려하여 명중 여부를 판단하였다.

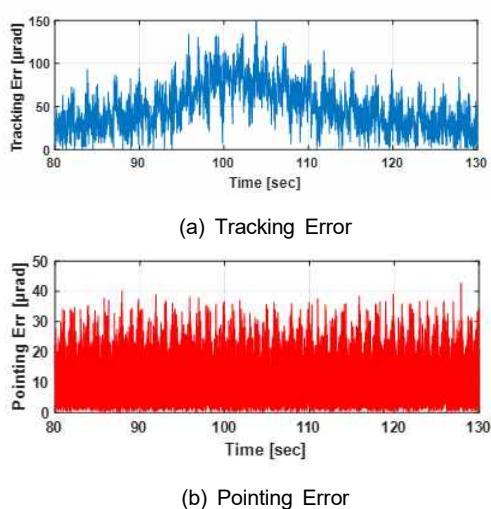


그림 9. 추적 및 조준오차 시계열 결과

Fig. 9. Time Histories of Tracking and Pointing Errors

표 6. 표적 주요 제원

Table 6. Principal Dimensions of Targets

	Fixed-wing UAV	Multi-copter
Length [m]	1.44	0.3
Breadth [m]	1.8	0.3
Height [m]	0.9	0.2

기준 요격 거리에서의 표적 위치에 대해 레이저 빔의 집속 직경은 식 1과 같다. 요격 거리 1.5km, 명중 오차 40μrad로 설정할 경우, 산출된 빔의 집속 직경은 12cm이다.

$$R = 2 \times D \times \tan(\theta_{PE}) \quad (1)$$

R : 빔 집속 직경 [m]

D : 요격 거리 [m]

θ_{PE} : 명중 오차 [rad]

Fig. 10은 표적에 집속된 레이저 빔의 형상을 나타낸다. 고정익 소형 무인기의 경우 목표 타격점을 날개로, 멀티콥터의 경우에는 동체 중심으로 각각 설정하였다. 분석 결과, 레이저 빔의 집속 범위가 표적을 벗어나지 않고 명중함을 확인하였다.



그림 10. 표적 상 레이저 집속 범위 (거리: 1.5 km)

Fig. 10. Range of Laser Beam on Targets

(Distance: 1.5 km)

6. 결 론

본 연구에서는 최근 군사적 위협으로 부상하고 있는 무인 항공기 및 드론을 효과적으로 무력화할 수 있는 차세대 대응 수단으로서 고에너지 레이저 기반 대공무기의 성능 분석 모델을 개발하였다. M&S 기법을 활용하여 김벌 및 FSM 등 핵심 추적·조준 장치의 특성을 모의하였고 운용 시나리오를 바탕으로 추적 및 조준 오차와 표적 명중 여부를 분석하였다.

분석 결과, 김벌의 추적 오차는 전 구간에서 200μrad 이내로 유지되었으며, 지향각의 급격한 변화 구간에서도 기준 이내의 성능을 확보함을 확인하였다. FSM을 활용한 조준 오차는 전반적으로 40μrad 이내로 안정적인 값을 유지하였으며, 이는 추적 오차를 효과적으로 보상하여 명중을 가능케 하였다.

특히, 요격 거리 1.5km를 기준으로 표적의 크기와 레이저 빔의 집속 특성을 반영하여 명중 여부를 확인하였다. 고정익 무인기와 멀티콥터를 대상으로 한 분석 결과, 설정한 명중 오차 내에서 레이저 빔의 집속 범위가 표적을 벗어나지 않아 명중이 성공했음을 확인하였다.

본 논문에서는 운용 상황에서의 레이저 대공무기 성능을 보다 현실적이고 보수적인 관점에서 평가하고자 하였다. 레이저 대공무기의 광시계 추적과 협시계 추적 단계의 모의에 집중하여 추적 오차와 명중 오차를 산출하였다. 본 논문에서 제안한 분석 모델의 활용으로 레이저 대공무기 사양 및 다양한 작전 환경을 반영하고 레이저 대공무기의 추적·조준 오차를 산출하여, 레이저의 명중 여부를 신뢰성 있게 평가할 수 있을 것으로 기대된다.

단, 향후 연구에서는 차량형 레이저 대공무기와 같이 플랫폼 자체의 진동이 레이저 대공무기에 미치는 영향, 그리고 대기 중에서의 레이저 전파 특성을 반영하여 분석의 정밀도를 향상 시킬 필요가 있다.

References

- [1] S. Kang, "The Development Trend and Future Direction of Laser-Based Individual Combat Firearm Weapon Systems," Journal of the Korea Academia-Industrial, vol. 25, no. 6, pp. 544–552, 2024. DOI: 10.5762/KAIS.2024.25.6.544
- [2] S. Kim, "The Evolution of Drone and Air Defense Technologies: Implications for the Future Battlefield," International Journal of Advanced Culture Technology, vol. 12, no. 2, pp. 286–298, 2024. DOI: 10.17703/IJACT.2024.12.2.286
- [3] H. Park, and Y. Kim, "A Study on a Robust Target Tracking Control Design for a 2-Axis Gimbal System with Time Delay," Journal of Power System Engineering, vol. 25, no. 2, pp. 57–65, 2021. DOI: 10.9726/kspse.2021.25.2.057
- [4] H. S. Ko, and J. H. Kim, "Review for performance improvement of Line of Sight Stabilization control of

- three axis gimbal system," in Proceeding of Power Electronics Annual Conference, pp. 534-535, 2024.
- [5] D. Kim, D. Frist, J. J. Kim, and B. Agrawal, "A HEL Testbed for High Accuracy Beam Pointing and Control," Naval Postgraduate School, Monterey: CA, Technical Report NPS-MAE-09-001, 2009.
- [6] J. Baek, Y. Tak, K. Yang, and K. Cho, "Theoretical Research on the Laser Atmospheric Attenuation Properties and the Laser Target Characteristics," in Proceeding of the Korea Institute of Military Science and Technology, pp. 795-796, 2018.
- [7] M. Bae, H. Park, and S. Yoon, "Laser Irradiation Characteristics of the Laser Designator for Semi-Active Laser Missile," in Proceeding of the Korea Institute of Military Science and Technology, pp. 2231-2232, 2018.
- [8] P. Sprangle, A. Ting, J. Penano, R. Fischer and B. Hafizi, "Incoherent Combining and Atmospheric Propagation of High-Power Fiber Lasers for Directed-Energy Applications," Journal of Quantum Electronics, vol. 45, no. 2, pp. 138-148, 2009. DOI: 10.1109/JQE.2008.2002501