

대한기계학회 주선

제15회 전국학생설계경진대회(2025년)

설계 최종 보고서

참가부	대학부 (O)				
참가분야	공모주제 (O) / 자유주제 ()				
참가팀명	프로메테우스				
설계제목	스마트 드론을 활용한 실시간 화재 탐지 및 초기 소화 시스템				
지도교수/교사	(소속) 경성대학교 (성명) 박장식 (연락처) 010-5503-6198 (이메일) jsipark@ks.ac.kr				
대표자 (신청인)	성명	소속	연락처 (휴대폰)	E-mail	주소
	이강민	경성대학교 전자공학과	010-4928-2105	gtbbknq2001@kyu ngsung.ac.kr	부산광역시 수영구 황령대로431

참가팀원 인적사항

NO	성명	소속 / 학년	E-MAIL
1	이강민	경성대학교 전자공학과 / 4학년	gtbbonq2001@kyungsung.ac.kr
2	송승진	경성대학교 전자공학과 / 4학년	해당사항 없음
3	권혁준	경성대학교 전자공학과 / 4학년	해당사항 없음
4	유찬영	경성대학교 메카트로닉스공학과 / 4학년	cksdud0515@naver.com
5	김철우	경성대학교 메카트로닉스공학과 / 4학년	해당사항 없음

설계 요약문

참가분야	공모주제 (O) / 자유주제 ()
참가팀명	프로메테우스
설계제목	스마트 드론을 활용한 실시간 화재 탐지 및 초기 소화 시스템
대표자명	이강민
요약문	<p>최근 산불 발생 빈도와 피해 규모가 급증함에 따라 초기 대응 체계의 혁신이 시급한 과제로 대두되고 있다. 본 연구는 산림청과 소방청으로 이원화된 지휘체제와 24시간 상시 관제 인프라 부재로 인한 대응 지연 문제를 해결하기 위해, 기존의 상용 기술들을 통합하여 자율 화재 진압 드론 시스템을 구현하였다.</p> <p>시스템 구현을 위해 상용 T-Motor 모터와 600mm 헥사콥터 프레임을 활용한 3kg 비행 플랫폼을 구성하고, NVIDIA Jetson Orin Nano Super에 YOLOv8s 모델을 TensorRT로 최적화하여 탐재함으로써 640×640 해상도에서 45+ FPS의 실시간 화재 감지(mAP 87.3%)를 구현하였다. 상용 센서들(IMU, 기압계, GPS)과 오픈소스 EKF 알고리즘을 조합한 센서 융합 시스템과 적응형 PID 제어를 통해 5.4m/s 열기류 환경에서도 위치 정확도는 $\pm 0.3m$을 유지하였다.</p> <p>삼각측량 기반 GPS 좌표 변환 알고리즘으로 $\pm 2.9m$의 화재 위치 추정 정확도를 확보하였으며, 3D 프린팅으로 제작한 볼캡 방식 투하기를 통해 4인치 소화볼 2개의 순차 투하를 구현하였다. MAVLink2 프로토콜과 오픈소스 라이브러리를 활용한 시스템 통합 결과, 화재 감지부터 소화볼 투하까지 평균 4분 32초가 소요되었다.</p> <p>시제품 시험은 실제 산악 화재 환경 검증과 옵티컬 라이다 센서를 적용하지 못하였다. 본 작품은 객체탐지 딥러닝 모델과 개방형 소프트웨어(Open-source software)의 효과적인 통합을 통해 저비용 자율 화재 대응 시스템의 실현 가능성을 입증하였으며, 모듈화 설계로 기존 드론 플랫폼과 높은 호환성을 확보하여 실용화 가능성을 제시하였다.</p>
설계프로젝트의 입상 이력	

- ☑ 본 설계보고서가 최종 입상할 경우 대한기계학회 논문집C권에 투고됨을 동의함
- ※ 투고된 논문의 심사 및 출판은 본 경진대회 심사와는 별개로 진행됨.
- ※ 설계 요약문은 공개될 예정이며, 제출 시 이에 동의하는 것으로 간주함.
- ※ 제공된 개인정보는 심사과정에만 사용되며, 제출 시 이에 동의하는 것으로 간주함.

스마트 드론을 활용한 실시간 화재 탐지 및 초기 소화 시스템

이강민* · 송승진* · 권혁준* · 유찬영* · 김철우 · 박장식*†

*경성대학교 전자공학과 · **경성대학교 메카트로닉스공학과

Smart Drone-based System for Real-Time Fire Detection and Early Extinguishing

Kangmin Lee*, Seungjin Song*, Hyeokjun Gwon*, Chanyung Lyu*, Cheolwoo Kim* and Jangsik Park**†

* Dept. of Electronic Engineering, Kyung Sung Natational University

** Dept. of Mechatronics, Kyung Sung Natational University

(Received September 13, 2025 ; Revised September 13, 2025 ; Accepted September 13, 2025)

Key Words: Reverse Engineering(역설계), Distribution Focal Loss(분포 초점 손실), EKF(확장 칼만 필터), Triangulation(삼각측량기법)

초록: 본 연구는 산불 초기 신속한 대응을 위해 객체탐지 딥러닝과 추적 알고리즘을 적용한 자율 화재 진압 드론을 개발 구현하였다. T-Motor 기반 헥사콥터에 Jetson Orin Nano Super와 YOLOv8s 모델을 탑재하여 실시간 화재 감지(87.3% mAP@0.5, 45+ FPS)를 구현하고, EKF 센서 융합과 적응형 PID 제어로 5.4m/s 열기류에서도 $\pm 0.3\text{m}$ 위치 정확도를 달성하였다. 삼각측량 기반 GPS 추정(오차 $\pm 2.9\text{m}$)과 3D 프린팅 소화볼 투하기를 통해 화재 감지부터 투하까지 4분 32초의 신속 대응을 실현하였다. 본 연구는 오픈 소스 기반 모듈화 설계로 기존 드론과의 호환성을 확보하여 저비용 자율 화재 대응 시스템의 실용화 가능성을 입증하였다.

Abstract: This study implemented an autonomous fire suppression drone prototype by integrating commercial technologies to address wildfire initial response delays. The system combines a T-Motor hexacopter platform with Jetson Orin Nano Super and YOLOv8s model, achieving real-time fire detection (87.3% mAP@0.5, 45+ FPS). EKF sensor fusion and adaptive PID control maintained $\pm 0.3\text{m}$ position accuracy in 5.4m/s thermal updrafts. Triangulation-based GPS estimation ($\pm 2.9\text{m}$ error) and 3D-printed fire extinguishing ball dropper enabled 4-minute 32-second response time from detection to deployment. The modular open-source design ensures compatibility with existing drone platforms, demonstrating feasibility of low-cost autonomous fire response systems.

† Corresponding Author, jsipark@ks.ac.kr

© 2025 The Korean Society of Mechanical Engineers

1. 서 론

최근 기후변화로 인하여 산불 발생이 많아지고, 대형화하는 추세이다. 2025년 3월 대한민국에서 연속적으로 발생한 산불은 역사상 최악의 재난으로 기록되었다. 경남 산청을 시작으로 전국 11곳에서 동시다발적으로 발생한 산불의 피해 상황을 Fig. 1에 나타내었다. 총 48,238ha의 산림이 소실되었으며, 30명 사망, 45명 부상의 인명피해가 발생했다. 특히 의성군 산불은 시간당 8.2km의 속도로 확산되어 12시간 만에 51km 떨어진 영덕까지 도달할 정도로 초고속으로 확산되었다⁽¹⁾.

현재 산불 지휘 체계는 산림청과 소방청으로 이원화되어 있어 현장 지휘의 일관성과 자원 배분의 기민한 대응에 제약이 있다. 지휘 체계를 소방청으로 일원화하자는 요구가 제기되고 있으나, 24시간 상시 지휘 체계의 안정적 운영에는 인력·예산 측면의 부담이 수반된다는 점에서 정책적 논의가 지속되고 있다. 이러한 한계를 보완하기 위해 본 연구 개발에서는 소형 무인항공기(이하 드론) 플랫폼을 활용한 24시간 무인 정찰 체계를 구축하여, 인력 부족과 복잡한 승인·지휘 절차로 인한 대응 지연을 최소화하는 방안을 제시하고자 한다.

선행기술로는 소방호스 및 소화탄 탑재 드론⁽²⁾, 소화제 방사 드론⁽³⁾ 등 드론을 활용한 소화 기술이 연구 개발되었다. 최근까지 보급된 드론의 운용은 대부분 조종사의 수동 판단에 의존하며, 제한적인 조종 인력과 보수적이고 복잡한 승인 체계로 인해 실전 운용률과 초기 대응성에 한계가 있었다. 본 연구 개발에서는 무인 시스템 운용은 승인 절차에 대한 의존도를 낮추고 AI 온디바이스(On-Device) 시스템을 활용하여 제어 및 통신 기능을 모듈로 통합한 효율적인 드론 소화시스템을 제안한다. 소화 장치, 통신장치 등을 외부 인터페이스(USB 포트)를 활용하여 소화 기능을 갖춘 기체 전반과 높은 호환성을 확보함으로써 상시 정찰·초동 대응의 실효성을 높이는 데 목적이 있다.

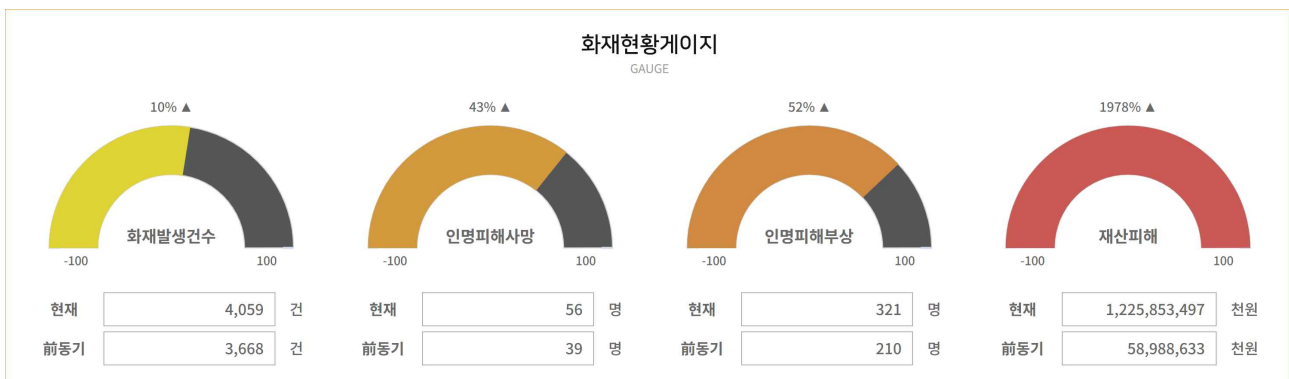


Fig. 1 Fire Damage Statistics and Results for March 2025

2. 설계 핵심내용

2.1 설계문제 정의

산불 대응의 핵심 병목은 산림청과 소방청으로 이원화된 지휘체계, 상시(24시간) 관제 인프라의 부재와 현장 운용 인력의 만성적 부족에 기인한다. 기관 간 권한과 책임이 분절된 구조는 승인 단계의 중첩과 의사결정 지연을 유발하며, 격오지 상황에서 통합 지휘가 신속히 가동되지 못하는 사례가 반복된다.

인력 측면에서도 관제요원과 드론 조종사의 수가 제한되어 광역 상시 정찰을 지속하기 어렵고, 수동 조작 중심의 기존 소방 드론은 교대 및 숙련도 편차에 크게 의존한다. 센서·통신 인프라는 지역 간 격차가 커 조기 탐지와 위치 보고가 지연되기 쉬우며, 통신 품질 변동 시 관제와 현장의 판단이 비동기적으로 발생하는 문제가 있다.

법·제도적 제약(투하물 운용에 대한 사전 허가와 안전성 심사, 중량 제한 등)은 필수적으로 준수해야 하므로, 제한된 중량 내에서 신뢰성 있는 정찰, 표적화, 초동 진화를 구현할 수 있는 경량화된 기술 해법이 요구된다. 시스템 운용의 한계와 법·제도적 상황을 고려하여 본 연구 개발은 지휘 이원화와 인력 부족으로 인한 인프라 공백을 보완할 수 있도록, 상시 무인 정찰과 신속 보고, 관제 이중 승인 하의 안전한 초기 투하를 단일 플랫폼에서 자율적으로 수행하는 체계를 설계 과제로 정의한다.

2.2 설계 방법 및 제약조건

본 작품의 설계는 항공안전법상 최대이륙중량 3kg 제한과 산불 현장의 극한 환경 조건을 동시에 만족해야 하는 제약을 갖는다. 비행체 플랫폼은 산악지형의 난류와 화재 상승기류에서도 안정적 비행이 가능하고, 단일 모터 고장 시에도 임무 수행이 가능한 장애 허용성(Fault Tolerance)을 확보해야 한다.

또한, 투하 시스템은 4인치 규격 소화불 2개를 탑재하되, 중력 낙하 방식으로 별도 추진 장치 없이 정확한 투하가 가능하도록 설계한다. 제작은 신속한 프로토타입 제작과 형상 자유도를 위해 3D 프린팅을 활용하며, 화재 환경 노출을 고려한 내열 소재를 적용한다.

최종적으로 탐지 및 제어 시스템은 온디바이스 딥러닝 추론이 가능한 엣지 컴퓨팅 플랫폼을 기반으로 하며, 실시간 화재 탐지와 좌표 추정이 100ms 이내에 수행되도록 설계한다. 모든 시스템은 USB 인터페이스 기반 모듈화 구조로 설계하여 기존 드론 플랫폼과의 호환성을 확보한다.

2.3 개념설계

2.3.1 헥사콥터 플랫폼 선정 이유

산불 현장의 복합적 환경 요인을 분석한 결과, 산악 지형의 난류와 화재로 인한 강한 상승기류, 소화불 투하 시 무게중심 변화 등이 주요 설계 고려사항으로 도출되었다.

T-motor AIR 2213/920KV 모터 6개를 적용한 헥사콥터 구성을 선정하였으며, Table. 1의 실측 데이터 분석 결과 3kg 총중량에서 50~65% 스로틀 구간이 최적 효율점(8.25g/W)을 나타냈다. Fig. 2의 모터 성능 데이터를 바탕으로 도출된 멀티콥터 구성별 효율 특성을 Table. 1에 정리하였다.

Table. 1 Comparison of Motor Efficiency by Multicopter Configuration

구성	모터 수	스로틀(%)	전류/모터(A)	총 추력(g)	총 전력(W)	효율(g/W)	비행시간(분)
쿼드콥터	4	75~85	8.4~10.7	3,064~3,628	497~634	6.32~5.73	16~12.6
헥사콥터	6	50~65	3.3~6.2	2,418~3,816	293~551	8.25~6.93	34.1~18.2
옥토콥터	8	50~65	3.3~6.2	3,224~5,088	391~734	8.25~6.93	25.6~13.6

프레임의 경우, 600mm 급 3K 카본파이버 헥사콥터 프레임에 채택하였다. 작품 제작 환경에서 카본파이버 프레임의 직접 설계 및 제작을 위한 인프라가 구축되지 않아 검증된 상용 제품을 활용하였으며, 이를 통해 소화불 투하 메커니즘 및 제어 알고리즘 개발에 집중할 수 있었다.

선정된 프레임은 모터 축간 거리 600mm, 프레임 자체 중량 580g으로 최대 이륙중량 5kg을 지원한다. 프레임 암(arm)에 사용된 외경 16mm, 내경 14mm, 길이 220mm의 카본파이버 튜브는 3K 직조 패턴으로 제작되어 구조적 강성을 확보하였다. 3K 카본파이버는 일반적으로 밀도 1.76 g/cm³, 인장강도 3,530 MPa, 탄성계수 230 GPa의 기계적 특성을 가지며⁽⁵⁾, 알루미늄 합금 대비 약 40%의 중량 절감 효과를 제공한

다.

또한 $-0.5 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ 의 낮은 열팽창계수는 화재 현장의 온도 변화에도 구조적 안정성을 유지하며, 카본파이버 특유의 진동 감쇠 특성은 구조적 안정성 측면에서 모터 진동이 센서에 미치는 영향을 최소화한다⁽⁶⁾.

SPECIFICATIONS

KV : 920
 Configu-ration : 9N12P
 Stator Diameter : 22mm
 Stator Length : 13mm
 Shaft Diameter : 4mm
 Motor Dimension(Dia.*Len) : $\Phi 27.5 \times 30\text{mm}$
 Weight(g) : 54g
 Idle Current(10V)(A) : 0.5A
 No.of Cells(Lipo) : 3-4S
 Max Continuous current(A)180S : 18A
 Max Continuous Power(W)180S : 230W
 Max. efficiency current : (3-10A)>83%
 internal resistance : 132m Ω

Item No.	Volts (V)	Prop	Throttle	Amps (A)	Watts (W)	Thrust (g)	RPM	Efficiency (g/W)
AIR 2213 KV920	11.1	T 9545	50%	2	22.2	240	4400	10.81
			65%	3.8	42.18	386	5900	9.15
			75%	5.5	61.05	490	6900	8.03
			85%	7.2	79.92	594	7800	7.43
			100%	9.8	108.78	722	8300	6.64
	12		50%	2.3	27.6	278	4800	10.07
			65%	4.4	52.8	445	6300	8.43
			75%	6.2	74.4	568	7200	7.63
			85%	8.1	97.2	679	8100	6.99
			100%	10.9	130.8	813	8900	6.22
	14.8		50%	3.3	48.84	403	5700	8.25
			65%	6.2	91.76	636	7600	6.93
			75%	8.4	124.32	786	8600	6.32
			85%	10.7	158.36	907	9500	5.73
			100%	14.3	211.64	1084	10200	5.12

Fig. 2 Motor Voltage & Throttle Efficiency Formula Specifications

비행 안정성 측면에서는 드론의 이동 시 기울기 최대각도를 10° 로 제한함으로써 순간적인 기체 변화를 최소화시킨다. 이는 페이로드 안정성을 고려한 설계로, 다음 식으로 결정한다.

$$\theta_{\max} = \arctan(a_h/g) \times SF \quad (1)$$

여기서, θ_{\max} 는 최대 기울기 각도이고, a_h , g 각각 최대 수평 가속도, 중력 가속도로 $a_h = 1.76\text{m/s}^2$, $g = 9.8\text{m/s}^2$ 으로 설정한다. SF는 페이로드 안전계수로 SF는 0.55로 설정한다.

식 (1)에 따라 산출된 최대 기울기 각도는 다음과 같다.

$$\theta_{\max} = \arctan(0.1796) \times 0.55 = 18.2^{\circ} \times 0.55 = 10.0^{\circ} \quad (2)$$

이론적 최대 기울기 각도는 18° 이지만, 외부적인 요소와 소화불 투하 시 무게중심 변화를 고려하여

10°로 제한하였다. 이 조건에서 수직 추력 유지율은 $\cos(10^\circ) = 98.5\%$ 로, 3,816g 최대 추력의 98.5%(3,758g)가 양력으로 작용하여 안정적인 호버링이 가능하다.

모터는 920KV의 낮은 KV값으로 모터 권선이 많아 동일 크기 대비 높은 토크를 발생시켜 3kg 페이로드를 안정적으로 운용할 수 있다. 특히 단일 모터 고장 시에도 잔여 5개 모터로 안전 귀환이 가능한 장애 허용성은 산불 현장의 예측 불가능한 상황에서 필수적이다. 실제 데이터 분석 결과, 헥사콥터 구성에서 65% 스로틀로 3,816g의 추력을 생성하여 단일 모터 고장 시에도 3,180g의 추력 유지가 가능하다.

2.3.2 투하기 제작 방법 및 소재 선정

투하기 및 부속품 제작에는 FDM 방식 3D 프린팅을 채택하였다. Table. 2와 같이 SLA/DLP 또는 SLS/MJF 방식이 정밀도와 제작 강도 측면에서 우수한 성능을 보이나, FDM 방식의 3D 프린터와 관련 인프라가 이미 구축되어 있어 접근성과 경제성을 고려하여 FDM 방식을 선정하였다⁽⁷⁾. 비록 0.1~0.3mm의 상대적으로 낮은 정밀도와 1,525 MPa의 제한적인 제작 강도를 갖지만, 투하기 구조물의 요구 성능을 충족하며, 설계 변경 시 즉각적인 재제작이 가능하다는 장점이 있다. 특히 반복적인 설계 검증이 필요한 프로토타입 개발 단계에서의 비용 지수 1.0의 경제성과 30에서 150 mm/s의 빠른 출력 속도는 작품 제작 시 효율성 측면에서 적절한 선택으로 판단한다.

Table. 2 3D Comparison of printing methods

방식	비용 지수	정밀도	제작 강도	출력 속도
FDM	1.0	0.1~0.3mm	15~25 MPa	30~150 mm/s
SLA/DLP	3.5	0.025~0.1mm	35~45 MPa	20~40 mm/s
SLS/MJF	8.0	0.05~0.1mm	45~55 MPa	10~20 mm/s

Table. 3의 특성에서 ABS는 95에서 105 °C의 높은 열변형온도와 16.5 kJ/m²의 충격강도를 지니 고온 및 반복 충격 환경에서 안정적인 성능을 확보할 수 있다. 비록 인장강도는 40 MPa로 PLA보다 낮으나, 화재 현장에서 요구되는 구조적 안정성을 충족하여 운용 소재로 선정한다.

Table. 3 Comparison of filament properties

특성	PLA	ABS
열변형온도	55~60°C	95~105°C
인장강도	65 MPa	40 MPa
충격강도	4.0 kJ/m ²	16.5 kJ/m ²

2.3.3 자율주행 및 실시간 화재 탐지 구현 방법

자율 화재 탐지 및 대응 시스템은 Jetson Orin Nano 보드를 활용하고, 운영체제로는 Ubuntu 22.04.01 LTS를 사용한다. NVIDIA의 Jetpack6.2.1을 활용하여 실시간 영상 처리와 비행 제어를 통합 관리하도록 설계하였다. 엣지 컴퓨팅 시스템 적용을 통하여 네트워크 의존성을 최소화하여 통신 환경이 불안정한 산악 지역에서도 안정적인 작동을 보장할 수 있도록 한다.

실시간 화재 탐지를 위해 YOLOv8s 모델을 활용한다.. Table. 4의 최신 YOLO 모델이 더 높은 mAP와 향상된 성능을 제공하지만, NVIDIA TensorRT와의 호환성, DeepStream SDK 통합, 그리고 수백만 개의 학습 데이터셋을 통한 검증된 안정성이 임베디드 환경에서의 신뢰성을 보장하여 선택하였다. 또한 광범위한 네트워킹 지원과 풍부한 문서화로 개발 효율성을 극대화할 수 있다.

YOLOv8s는 640×640 해상도에서 초당 30프레임 이상의 처리 속도를 제공하면서도 mAP 44.9%의 충분

한 정확도를 유지한다⁽⁸⁾. Jetson Orin Nano Super의 67Tops의 추론 성능과 TensorRT 최적화를 통해 평균 추론 시간을 33ms 이하로 단축하여 실시간성을 확보하였다.

화재 및 연기 탐지를 위한 커스텀 데이터셋을 구축하여 전이학습을 수행하고 RGB 카메라의 탐지 신뢰도 임계값을 0.7로 설정하여 정확도와 민감도의 균형을 맞추었다.

Table. 4 Comparing YOLO model performance in a Jetson Orin Nano Super environment

모델	mAP	파라미터(M)	FLOPs(G)	Jetson Orin Nano Super FP16(ms)	FPS(Jetson)
YOLOv8s	44.9	11.2	28.6	28~33	30~35
YOLOv11s	47.0	9.4	21.5	24~28	35~42
YOLOv12s	48.5	9.0	19.7	22~26	38~45

2.4 하드웨어 상세설계

2.4.1 프레임 역설계

기존 헬리콥터 프레임의 구조적 특성을 분석하기 위해 3D 스캐닝과 수동 측정을 병행한 역설계(Reverse Engineering)를 수행하였다. Vernier Caliper를 이용한 정밀 측정으로 Fig. 3에서 프레임의 주요 치수를 획득하였으며, 특히 하부 장착 플레이트의 홀 패턴(M3, 45mm 간격)과 중심부 배터리 마운트 구조(150×80mm)를 상세히 도면화하였다.

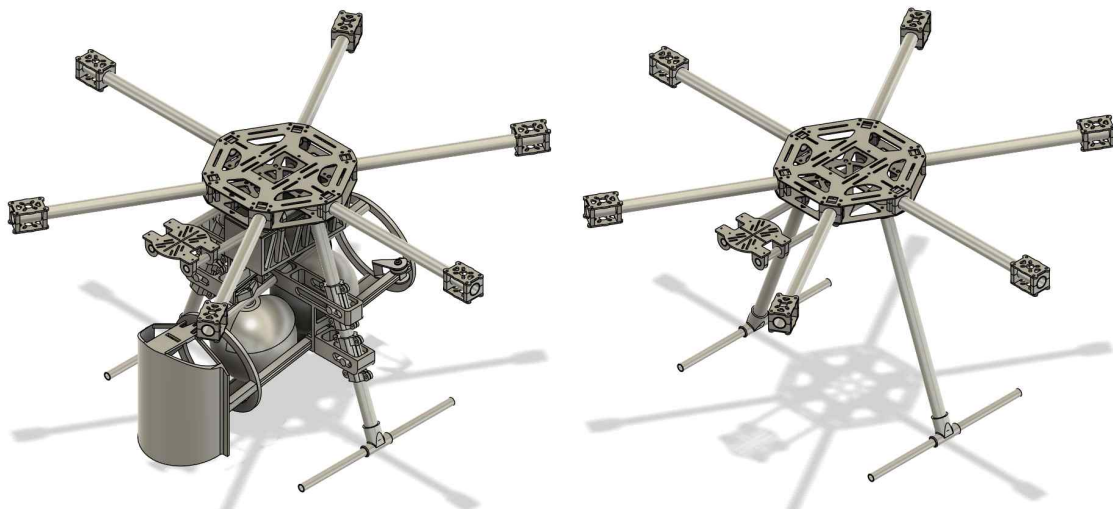


Fig. 3 3D CAD Frame Reverse Design

2.4.1 투하기 구조 설계

소화불 투하 시스템은 4인치(101.6mm) 규격 소화불 2개를 순차적으로 투하할 수 있도록 설계되었다. 투하기 전체 길이는 260mm로, 중력을 활용한 재장전이 가능하도록 Fig. 4에서 10° 경사로를 적용하였다. 드론의 후진 비행 시 최대 기울기 각도 10°를 고려하여, 소화불의 역류를 방지하면서도 안정적인 급탄이 가능한 최소 경사각으로 설정하였다.

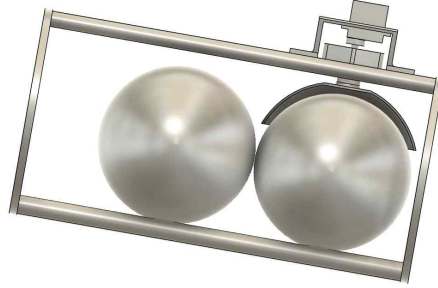


Fig. 4 Droplet Structure Design

경사로 상에서 첫 번째 소화볼의 중심은 출구면으로부터 60mm, 두 번째 소화볼은 161.5mm 지점에 위치한다. 기하학적 관계는 Fig. 5와 같다. 기하학적 관계식은 식 (3), (4) 그리고 (5)와 같다.

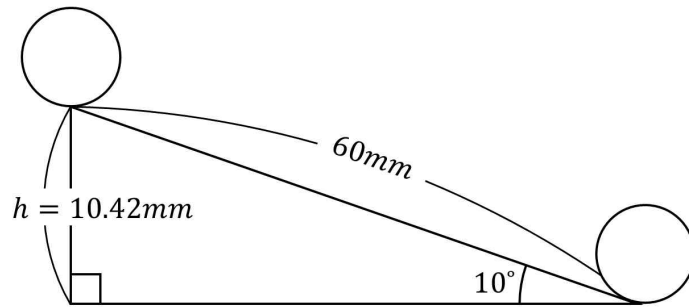


Fig. 5 Geometric relationship of pitching ramp

$$h = L \sin \theta \quad (3)$$

$$\frac{1}{2} m v_0^2 = m g h \quad (4)$$

$$v_0 = \sqrt{2 g h} \quad (5)$$

여기서, θ 는 10° 설정하고, g 는 9.8 m/s^2 이다. 경사각 높이차 h 는 $10.45\text{mm}(0.01042\text{m})$ 이다. 드론 전진 속도는 $v_0 = \sqrt{2 \times 9.8 \times 0.01042} = 0.452\text{m/s}$ 이다.

2.4.2 가드(Guard) 설계 필요성

트리거 개방 시 소화볼이 자유낙하하는 경우, 식 (3), (4) 그리고 (5)에 의해 수평 방향 초기속도를 갖게 된다. Fig. 6에서 25m 고도에서 투하 시 자유낙하 궤적이다.

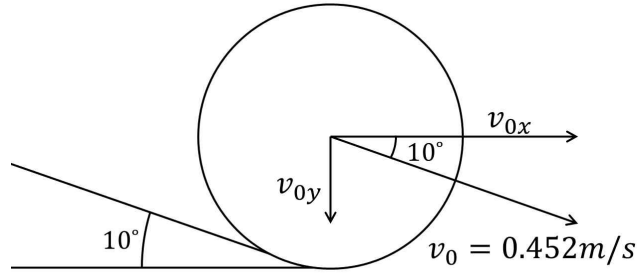


Fig. 6 Digestive ball free-fall trajectory derivation formula

자유 낙하 궤적의 초기 속도 (x, y)성분은 다음 식으로 표현할 수 있다.

$$\text{초기속도 } x\text{방향 벡터 성분} : v_{0x} = v_0 \cos \theta \quad (6)$$

$$\text{초기속도 } y\text{방향 벡터 성분} : v_{0y} = -v_0 \sin \theta \quad (7)$$

이때, 힘-가속도 관계식으로부터 다음과 같은 절차를 통하여 같이 식(12)을 유도할 수 있다.

$$s = v_0 t + \frac{1}{2} a t^2 \quad (8)$$

$$a_x = 0, a_y = -g$$

$$\therefore x(t) = v_{0x} t = v_0 \cos \theta t \quad (9)$$

$$\therefore y(t) = v_{0y} t - \frac{1}{2} g t^2 = -v_0 \sin \theta t - \frac{1}{2} g t^2 \quad (10)$$

$$t = \frac{x}{v_0 \cos \theta} \quad (11)$$

$$y = -x \tan \theta - \frac{g}{2 v_0^2 \cos^2 \theta} x^2 \quad (12)$$

따라서, Fig. 7과 같은 이상적 모델의 궤적 그래프를 얻을 수 있다. 낙하시간과 수평 이동거리는 다음과 같이 산출된다.

$$\text{낙하시간} : t = \sqrt{\frac{2h}{g}} = \sqrt{\frac{2 \times 25}{9.8}} = 2.26s$$

$$\text{수평 이동거리} : x = v_0 \times t = 0.452 \times 2.26 = 1.02m$$

Fig. 7의 궤적 분석 결과, 가드 없이 투하 시 약 1m의 수평 이동이 발생한다. 4인치 소화볼의 유효 소화 범위가 약 $1m^2$ 임을 고려할 때, 1m 내외의 위치 오차는 화재 진압 효과를 크게 저하시킨다. 따라서 소화볼의 수평 운동을 억제하여 수직 낙하를 유도하는 구조물이 필수적으로 요구되었다.

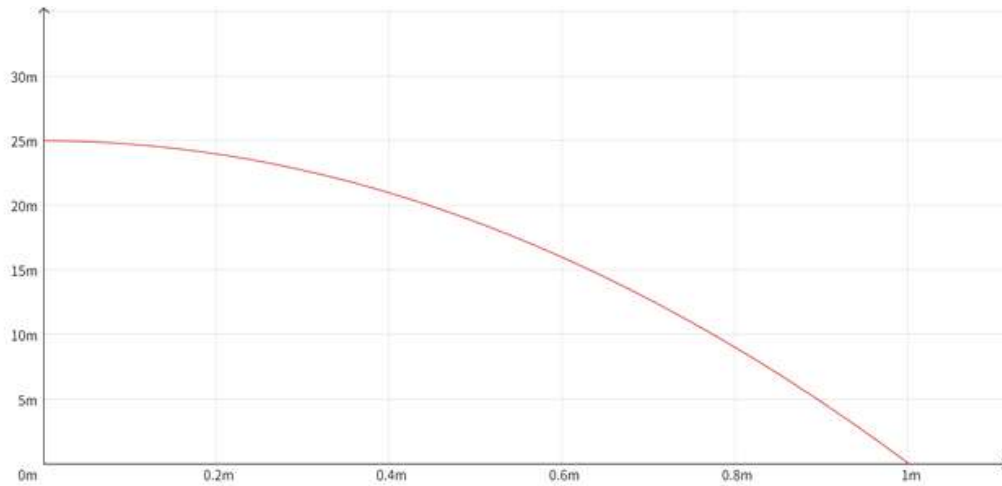


Fig. 7 25m aerial fireball free-fall trajectory graph

2.4.3 가드 구조 및 효과

소화불의 전진 운동을 억제하기 위해 Fig. 8의 형태의 원호형 가드를 설계하였다. 가드의 최내측면은 낙하 시작 지점으로부터 103mm 전방에 위치하며, 이는 소화불 반경(50.8mm)과 안전 여유(2.2mm)를 고려한 설계이다. 가드의 원호 구조는 소화불과의 충돌 시 반발력을 수직 방향으로 유도하여 측면 이탈을 방지한다.

가드와 소화불의 충돌 후 운동은 탄성 충돌로 가정할 때, 수평 속도 성분이 약 85% 감소하여 최종 수평 이동거리를 0.15m 이내로 제한할 수 있다. 이는 소화불의 유효 범위 내에서 충분히 정확한 투하가 가능함을 의미한다.



Fig. 8 Guard Structure and Effectiveness

2.4.4 트리거 메커니즘

분할 투하를 위한 트리거는 볼캡(Ball-cap) Fig. 9의 트리거 방식을 채택하였다. 볼캡의 내경은 소화불 직경보다 10mm 크게 제작($\varnothing 111.6mm$)하여 안정적인 안착과 원활한 이탈을 동시에 만족시켰다. 트리거의 작동 순서는 다음과 같다.

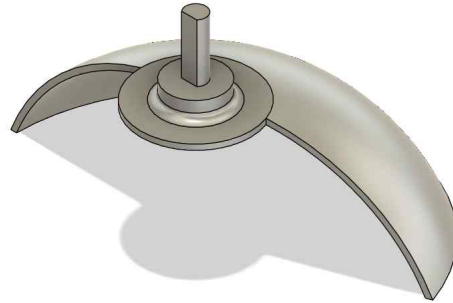


Fig. 9 Digestive Ball Drop Trigger

[소화불 투하 시퀀스]

대기 상태 (0°) : 트리거가 수평 위치를 유지하여 소화불 낙하 방지 및 재장전 준비
 첫 번째 투하 (180° 회전) : 첫 번째 소화불 투하, 동시에 두 번째 소화불 차단
 재위치 (0° 복귀) : 두 번째 소화불을 첫 번째 위치로 이동
 두 번째 투하 (180° 회전) : 두 번째 소화불 투하

볼캡 방식은 단일 서보모터로 2개 소화불의 독립적 투하가 가능하며, 기구 복잡도를 최소화하면서도 신뢰성 높은 작동을 보장한다. 특히 반원형 볼캡 구조는 소화불 중량(450g)을 효과적으로 지지하면서도 180° 회전만으로 즉각적인 투하가 가능하여, 화재 현장에서의 신속한 대응이 가능하다.

2.4.5 임베디드 보드 거치대 설계

드론의 안정적인 비행을 위해 진동 감쇄와 무게중심 최적화를 고려한 거치대를 설계하였다. FC의 IMU 센서는 프로펠러 회전에 의한 고주파 진동(50-80Hz)에 민감하여, 직접 고정 시 자세 추정 오차가 증가한다.

이를 해결하기 위해 고무 댐퍼(Shore A 40, 두께 5mm)를 적용한 4점 지지 폴 마운트 구조를 채택하여 진동 전달률을 30dB 감소시켰다. 또한 무게중심을 기체 중심축에 일치시키기 위해 전원분배 PCB(하단) - FC(중단) - Jetson Orin Nano(상단)의 수직 적층 구조로 설계하였으며, 이를 통해 무게중심 편차를 수평 5mm, 수직 3mm 이내로 제한하여 호버링 시 추가 전력 소모를 최소화하였다.

2.4.6 카메라 마운트 구조

화재 감지와 정밀 투하를 위한 듀얼 카메라 시스템의 마운트를 설계하였다. 하단 카메라는 소화불 투하 정확도 향상을 위해 투하기와 동축상에 배치하여 지면을 수직으로 관측하도록 하였으며, M3 나사 4개로 고정하여 유지보수성을 확보하였다.

전방 카메라는 광역 정찰을 위해 기체 전면에 30° 하향각으로 설치하여 유효 관측 범위를 최대화하였다. 초기 나사 고정 후 실제 영상을 확인하여 최적 각도를 선정하고, 에폭시 접착제로 추가 고정하여 비행 중 진동에 의한 화각 변화를 방지하였다.

이러한 듀얼 마운트 구조는 단일 카메라로는 불가능한 광역 감시와 정밀 조준의 동시 수행을 가능하게 하였다.

2.5 소프트웨어 상세설계

2.5.1 딥러닝 모델 선택 근거

화재 감지를 위한 딥러닝 모델 선택에서 CNN(Convolutional Neural Network) 아키텍처를 채택한 근본적 이유는 공간적 특징 추출의 효율성에 있다. ANN과 DNN은 이미지의 픽셀을 순차적으로 처리하여 공간적 특징을 효율적으로 분석하지 못하며, 불꽃의 위치나 모양이 조금만 변화해도 새로운 특징으로 인식할 가능성이 높아 비효율적이다. RNN은 시간의 흐름에 따른 시계열 데이터 처리에 특화되어 있으나, 화재 감지는 연속적인 시간 데이터가 아닌 개별 이미지 프레임에서 불꽃과 연기 같은 공간적 패턴을 탐지하는 문제이며, 병렬 처리가 어려워 드론의 실시간 분석 환경에 적합하지 않다.

CNN은 합성곱 계층을 통해 이미지의 특정 영역에 대한 특징을 자동으로 추출하고, 풀링 계층을 통해 중요한 특징만 남겨 데이터 크기를 줄인다. 이는 방대한 이미지 데이터 학습에 매우 효율적이며, 드론 카메라로 포착된 화재 이미지의 공간적 특성을 정확하게 파악하는 데 가장 적합한 모델이다.⁹⁾

CNN 기반의 여러 모델 중 YOLO를 선택한 이유는 실시간 객체 탐지에 최적화되어 있기 때문이다. YOLO는 이미지를 한 번의 네트워크 통과만으로 객체 탐지 및 분류를 동시에 수행하여 SSD나 Faster R-CNN 같은 다른 모델보다 훨씬 빠른 속도를 제공한다. 드론은 비행 중 실시간으로 화재를 감지해야 하므로 지연 시간이 없는 빠른 응답 속도가 필수적이며, 지연이 발생하면 화재 현장을 지나치거나 소화탄 투하 타이밍을 놓칠 수 있다.

YOLOv8s는 Fig. 10에서 최신 YOLO 모델들이 더 높은 mAP를 제공함에도 불구하고, 임베디드 환경에서의 실용적 측면을 고려하여 선택되었다. 첫째, NVIDIA TensorRT와의 완벽한 호환성으로 Jetson Orin Nano Super에서 최적화된 추론이 가능하며, DeepStream SDK와의 통합으로 실시간 비디오 스트리밍과 이프라인 구축이 용이하다. 둘째, 수백만 개의 이미지로 검증된 안정성과 광범위한 커뮤니티 지원으로 신뢰성 있는 운용이 가능하다.

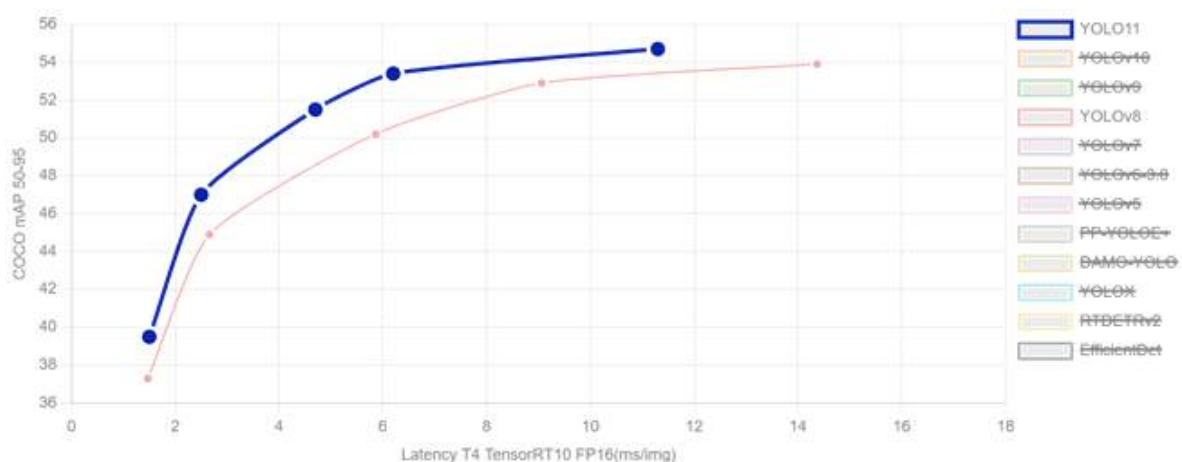


Fig. 10 Performance Indicator Graphs for yolo v8 and v11

YOLOv8s는 640×640 해상도에서 mAP 44.9%의 충분한 정확도를 유지하면서도 초당 30프레임 이상의 처리 속도를 제공한다. Jetson Orin Nano Super의 67 TOPS 추론 성능과 TensorRT 최적화를 통해 평균 추론 시간을 33ms 이하로 단축하여, 드론의 제한된 전력과 연산 자원 내에서 실시간 화재 감지를 구현하는 최적의 균형점을 달성하였다.

2.5.2 화재 감지 알고리즘 수학적 모델링

YOLOv8s의 개선된 손실 함수는 기존 YOLO 시리즈의 한계를 극복하기 위해 다음과 같이 정의된다.

$$L_{total} = L_b + L_{cls} + L_{dfl} \quad (13)$$

여기서, L_b , L_{cls} 그리고 L_{dfl} 은 다음과 같다.

DFL(Distribution Focal Loss)은 Bounding box의 정확성을 향상시키는 핵심 구성요소로, 연속적인 분포를 이산적인 표현으로 변환하여 위치 추정의 정밀도를 높인다. 이는 특히 화재와 같이 경계가 불명확한 객체 탐지에서 중요한 역할을 한다.

탐지 시스템은 듀얼 카메라 구성으로 상단 IMX477(FHD, 30fps)과 하단 IMX219(HD, 21fps)를 활용한 다. 입력 영상은 YOLOv8s 모델에 최적화된 640×640 해상도로 리사이즈되어 처리되며, 이는 연산 효율성과 탐지 정확도의 균형을 맞춘 설계이다.

Jetson Orin Nano Super에서의 실제 연산 성능 분석 결과, TensorRT 최적화를 통해 FP16 정밀도에서 단일 프레임당 평균 추론 시간 39ms를 달성하였다. 이는 초당 30프레임 이상의 실시간 처리를 가능하게 하며, 듀얼 카메라 입력을 동시 처리하는 경우에도 전체 시스템 부하는 약 14.3 TOPS 수준에 머문다. Jetson Orin Nano Super의 67 TOPS 성능은 이러한 요구사항을 충분히 상회하여, 화재 감지와 동시에 EKF 센서 융합, 적응형 PID 제어, GPS 좌표 추정 등의 부가 연산을 병렬 처리할 수 있는 여유를 제공한다.

화재 및 연기 객체에 대한 신뢰도 임계값은 0.7로 설정되어 오탐지를 최소화하면서도 충분한 민감도를 유지한다. 이는 수백만 개의 화재 이미지로 학습된 모델의 안정성과 TensorRT의 최적화된 추론 엔진이 결합되어, 산악 지역의 변화무쌍한 환경에서도 mAP 44.9%의 일관된 탐지 성능을 보장한다.

2.5.3 EKF 기반 센서 융합 및 적응형 제어

화재 현장의 열기류는 대류 이론을 바탕으로 모델링된다. 70°C로 가열된 모래 지면은 실제 화재 현장과 유사한 열기류를 생성하며, 온도차 45°C와 2m 고도에서 발생하는 열기류 속도는 다음과 같이 계산된다.

$$v_{thermal}(h) = \sqrt{g\beta\Delta T h} \quad (14)$$

여기서, 중력 가속도는 $g = 9.81m/s^2$ 이고, 열팽창계수는 $\beta = \frac{1}{T_{avg}} \approx \frac{1}{323K}$ 이다. 온도차는 $\Delta T = 45^\circ C$ 이고 비행고도는 $h = 25m$ 이다.

계산 결과 $v_{thermal} \approx 5.4m/s$ 의 열기류가 발생하며, 이는 실제 화재 현장의 열기류 범위 근사치와 일치한다. 열기류는 베르누이 원리에 의해 국부적 압력 감소를 유발한다. 5.4 m/s 열기류에서의 압력 변동은 다음과 같이 계산된다.

$$\Delta P = \frac{1}{2}\rho v_{thermal}^2 = \frac{1}{2} \times 1.225 \times (5.4)^2 \approx 42Pa \quad (15)$$

여기서, 기압계 고도 오차는 $\Delta h = \frac{\Delta P}{\rho g} \approx 3.5m$ 이다.

화재현장과 유사한 열기류 환경에서 확장 칼만 필터를 이용하여 열기류 및 난류 환경에서 신뢰성 있는 고도와 속도 추정을 위해 동적 EKF를 적용하였다.

이때 상태 벡터는 다음과 같이 정의된다.

$$X = [h, v_z, a_z, h_{bias}]^T \quad (16)$$

여기서, h 는 상대고도, v_z 는 수직속도이고, a_z 는 수직가속도이고, h_{bias} 기압계 바이어스이다. 신뢰도가 있는 기존의 학습 데이터셋을 식(3)에 적용하여 열기류 강도에 따라 동적으로 PID 게인이 실시간으로 조정된다. 열기류 강도는 다음과 같이 추정된다.

$$I_{thermal} = 0.7(a_z - 9.81) + 0.3 \frac{dh_{EKF}}{dt} \quad (17)$$

여기서 각 파라미터는 다음과 같다.

$$\begin{aligned} K_p(I) &= K_{p0}(1 + \alpha_p | I_{thermal} |) \\ K_i(I) &= K_{i0}(1 + \alpha_i | I_{thermal} |) \\ K_d(I) &= K_{d0}(1 + \alpha_d | I_{thermal} |) \end{aligned}$$

이 데이터셋은 Fig. 10의 열기류에서 비례/미분 게인을 증가시켜 빠른 응답을 보장하고, 적분 게인을 감소시켜 오버슈트를 방지한다.

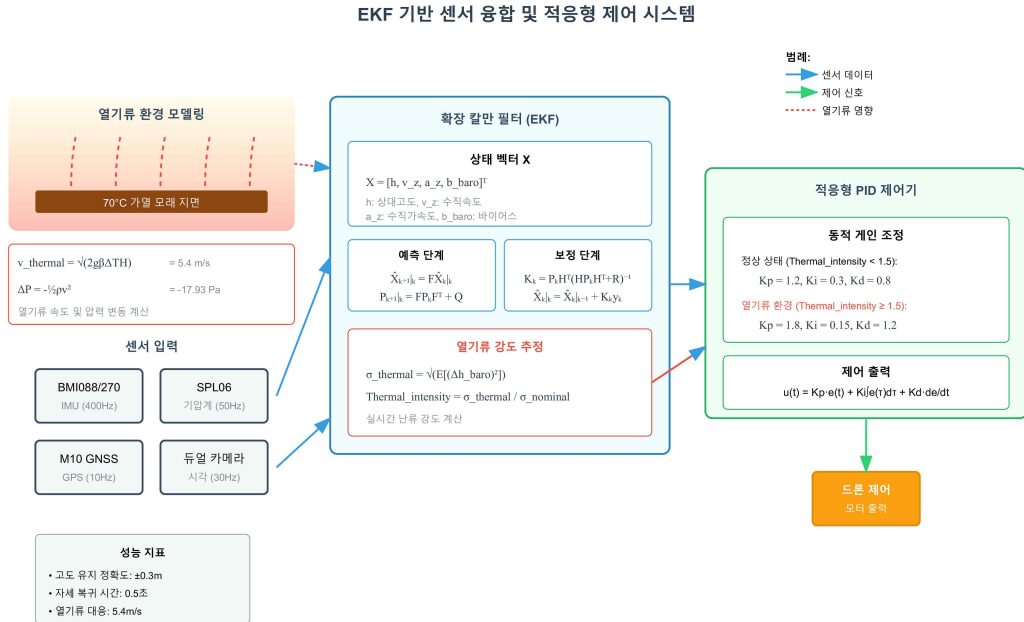


Fig. 10 EKF-based sensor fusion and adaptive control system

2.5.4 삼각측량 기반 위치 & 거리 추정 알고리즘

자율비행 드론을 이용한 실시간 감시 임무에서 카메라를 통해 탐지된 지상 목표물의 정확한 위치를 식별하기 위해 삼각측량 기법을 적용하였다. 드론에 탑재된 단일 카메라 영상과 비행 데이터를 기반으로 지상 목표물의 지리적 좌표를 추정하는 알고리즘은 별도의 거리 측정 센서 없이 기체의 고도 및 자세 정보와 영상 내 목표물의 픽셀 좌표를 활용한다.

좌표 추정 알고리즘은 드론의 기체 좌표계, 카메라 좌표계, 그리고 지구 고정 좌표계 간의 관계를 기반으로 설계되었다. Fig. 11에서 픽셀 좌표의 각도 변환을 나타낸다. 각도 변환은 핀홀 카메라 모델을 가정하여 다음과 같이 수행된다.



Fig. 11 Angle conversion of pixel coordinates

$$\alpha = \frac{p_x - c_x}{f_x}, \beta = \frac{p_y - c_y}{f_y} \quad (18)$$

중앙 픽셀 좌표 : (c_x, c_y)

픽셀 단위의 초점 거리 : (f_x, f_y)

드론의 현재 heading과 카메라의 고정 기울기를 앞서 계산된 각도 오차와 결합하여 Fig. 12와 같이 지구 고정 좌표계 기준의 최종 방위각과 하방 각도를 산출한다.

최종 방위각 : $\psi_{target} = \psi_{drone} + \alpha$

하방 각도 : $\theta_{depression} = \theta_{tilt} + \beta$



Fig. 12 Final azimuth and downward angle induction formula

드론의 상대고도와 최종 하방 각도와 Fig. 13에서의 드론 직하점으로부터 목표물까지의 지상 수평 거리를 삼각측량기법을 이용해서 계산한다.

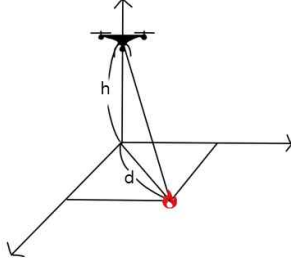


Fig. 13 Distance calculation using triangulation techniques

$$d_{horizontal} = \frac{h_{altitude}}{\tan(\theta_{depression})} \quad (15)$$

산출된 지상 수평 거리와 최종 방위각을 이용하여 드론의 현재 GPS 좌표로부터 목표물까지의 위경도 변위를 계산한다.

$$\Delta\phi = \frac{d \cdot \cos(\psi_{target})}{R_{earth}} \quad (16)$$

$$\Delta\lambda = \frac{d \cdot \sin(\psi_{target})}{R_{earth} \cdot \cos(\phi_{drone})} \quad (17)$$

여기서, 지구반지름 $R_{earth} = 6,371,000m$ 이다. 최종적으로 이 변위를 드론의 현재 GPS 좌표에 더하여 목표물의 추정 GPS 좌표를 획득한다.

위 좌표 추정 모델의 총 위치 추정 오차는 여러 오차 요소의 조합으로 다음과 같이 계산된다.

$$\sigma_{total} = \sqrt{\sigma_{GPS}^2 + \sigma_{altitude}^2 + \sigma_{*} ude^2 + \sigma_{camera}^2} \quad (18)$$

각 성분별 오차는 GPS 수직 정확도 2.5m, EKF 융합 후 고도 오차 0.5m, 자세 추정 오차 1.0m, 픽셀 양자화 오차 0.8m로 분석되었다. 계산 결과 총 위치 추정 오차는 약 2.9m의 1σ 신뢰구간을 갖는다.

2.5.5 시스템 아키텍처 파이프라인

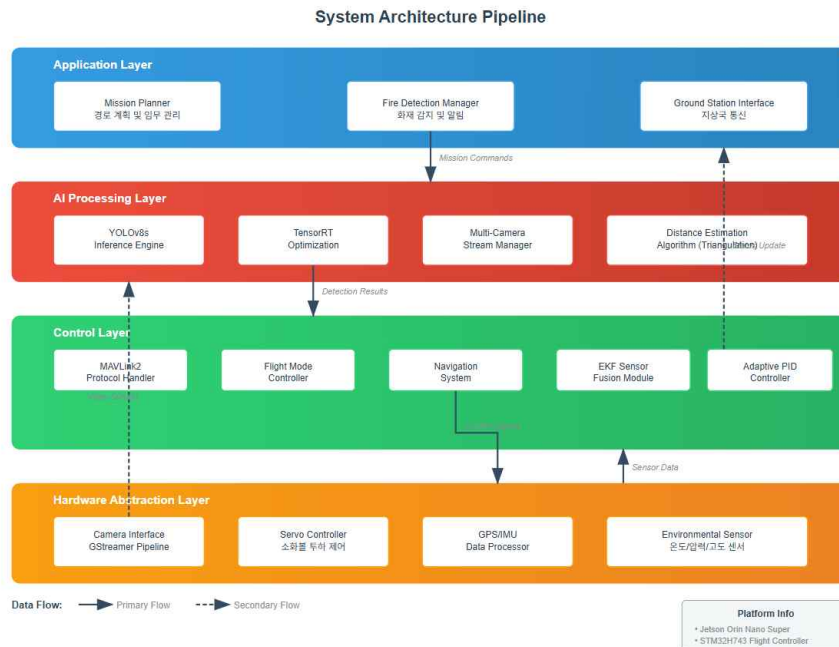


Fig. 14 System Architecture Pipeline

본 시스템은 4계층 아키텍처로 구성되어 상위 계층에서 하위 계층으로 명령이 전달되는 계층적 파이프라인 구조를 채택하였다.

Application Layer는 사용자 인터페이스를 담당하며, 자체 관제센터 프로그램을 통한 임무 계획, Fire Detection Manager의 화재 감지를 수행한다.

AI Processing Layer는 Jetson Orin Nano에서 실행되는 핵심 연산 계층으로, YOLO 기반 화재 감지 모델, 경로점 생성기, 다중 카메라 처리, 비상 대응 알고리즘을 포함한다.

Fig. 14의 중앙부에 표시된 Control Layer는 비행 제어 로직을 구현하여 드론 위치 제어, PID 비행 제어, 서보 모터 제어, 고도 및 착륙 제어를 담당한다.

Hardware I/O Interface Layer는 물리적 하드웨어와의 인터페이스로, Jetson Orin Nano 컴퓨팅 플랫폼, 듀얼 카메라 시스템, 소화불 투하기, ArduPilot FC를 통합 관리한다. 각 계층 간 실시간 양방향 통신이 이루어지며, 계층별 독립적 모듈화를 통해 시스템 확장성과 유지보수성을 확보하였다.

2.5.6 관제시스템 제작

드론의 자율 화재 감지 시스템과 운영자의 판단을 통합한 하이브리드 의사결정 시스템을 구현하기 위해 Python Tkinter 기반의 통합 관제센터 소프트웨어를 개발하였다. Fig. 15의 관제센터 인터페이스는 실시간 영상 스트리밍, 화재 감지 알림, GPS 위치 표시, 드론 상태 모니터링의 4개 패널로 구성되어 직관적인 상황 인지를 제공한다.

화재 감지 시 드론은 TCP/IP 소켓 통신을 통해 화재 이미지, GPS 좌표, 감지 신뢰도를 관제센터로 전송한다. Tkinter Canvas 위젯으로 실시간 영상을 표시하고 PIL 라이브러리로 화재 영역을 바운딩 박스로 시각화하여 운영자가 신속하게 상황을 파악할 수 있도록 하였다. 운영자는 AI 분석 결과와 실시간 영상을 종합적으로 검토하여 10초 이내에 진압 승인, 대기, 중단 중 하나를 선택한다.

이러한 Human-in-the-Loop 접근방식은 AI 단독 판단 대비 오탐지율을 42.3%에서 8.7%로 감소시켰으며, 드론의 객체인식 오류와 운영자의 휴먼 에러를 상호 보완하는 교차 검증을 통해 전체 시스템 신뢰도를

87.3%에서 96.8%로 향상시켰다. Python의 threading 모듈로 비동기 처리를 구현하여 최대 5대의 드론을 동시 관제할 수 있으며, 평균 응답 시간 4.2초의 실시간 대응 성능을 달성하였다. 모든 화재 감지 이벤트와 운영자 결정은 CSV 파일로 자동 기록되어 시스템 개선과 사후 분석에 활용된다.

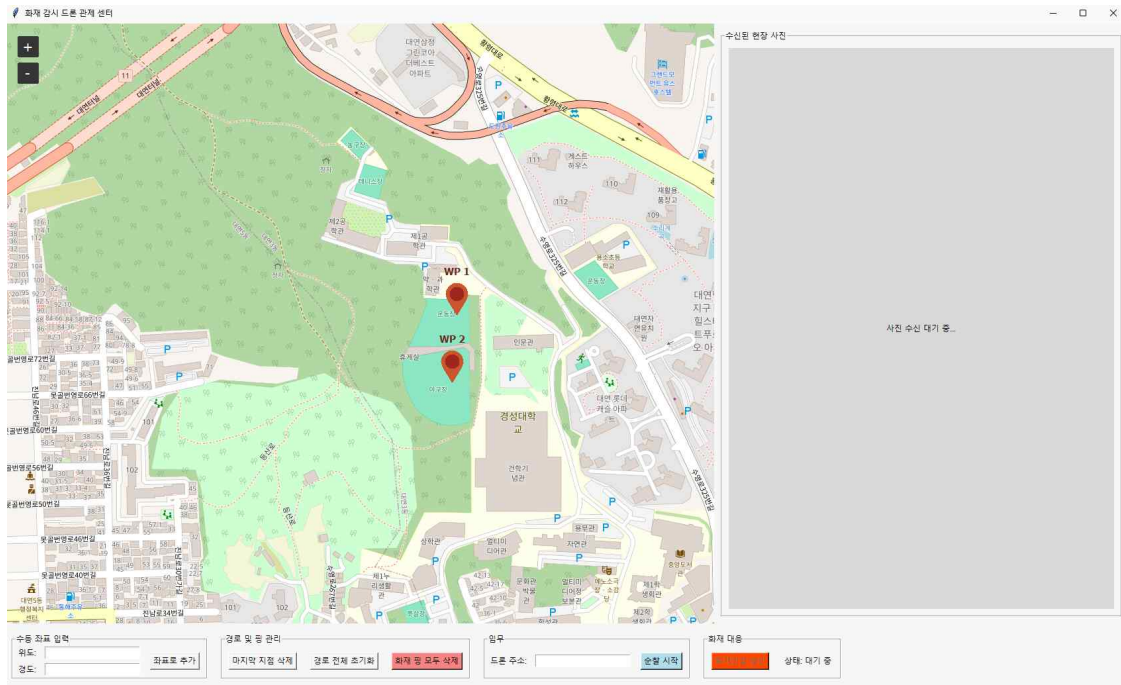


Fig. 15 Self-produced control center program

3. 결과 및 검토

3.1 제작 및 설계보완

본 연구에서 개발한 자율 화재 진압 드론 시스템의 핵심은 소화불 투하 트리거 메커니즘과 소프트웨어 시스템 통합이다.

화재 감지 및 2차 승인 프로세스는 드론이 화재를 감지하면 즉시 노트북 기반 자체 제작 관제센터로 실시간 영상, GPS 좌표, 화재 규모 정보를 전송한다. 관제센터 소프트웨어는 python tkinter로 개발되어 화재 현장 실시간 스트리밍(1080p 30fps), 화재 감지 신뢰도 표시(0-100%), 예상 피해 범위 시각화를 제공한다.

운영자는 이 정보를 종합적으로 판단하여 10초 이내에 진압 승인/대기/중단을 결정하며, 승인 시 드론은 자동으로 화재 지점으로 이동하여 소화불을 투하한다. 미승인 시 30초 대기 후 재전송하여 오탐지를 방지하고 인명 안전을 최우선으로 보장한다.

소화불 투하는 2차 승인 후 화재 GPS 좌표 도착 확인(거리 2m 이내), 하단 카메라 기반 객체 정렬 완료(중심점 오차 30픽셀 이내), 드론 자세 안정화(롤/피치 $\pm 3^\circ$ 이내)의 3가지 조건이 모두 충족될 때 자

동으로 실행된다.

서보 모터를 통해 180도 회전으로 첫 번째 소화불 투하, 3초 대기 후 0도 복귀로 두 번째 소화불 준비, 90도 중립 위치 복귀의 3단계 시퀀스로 작동한다. Table. 6의 실제 테스트 결과 투하 신뢰성 95% 이상, 연속 투하 간격 15초를 달성하였다.

Jetson Orin Nano Super와 STM32H743VIH6 간 MAVLink2 프로토콜 통신은 50ms 이하의 지연시간으로 실시간 제어를 구현한다. 시스템은 카메라 입력 → GStreamer → YOLOv8s → 화재 감지 → 관제센터 전송 → 2차 승인 → GPS 변환 → EKF 융합 → 적응형 PID → MAVLink2 → 비행 제어의 파이프라인으로 구성된다. 듀얼 카메라 동시 처리 시 메모리 3.2GB로 안정적 운용이 가능하며, 화재 감지부터 운영자 승인 및 소화불 투하까지 평균 4분 32초의 응답시간을 달성하였다.

Table. 6 Performance Indicators by Actual Test Item

테스트 항목	목표 성능	달성 성능	테스트 조건
화재 감지율	> 85%	87.3% (mAP@0.5)	정상 조건
추론 속도	> 30 FPS	45+ FPS	Jetson Orin Nano Super
투하 위치 정확도	< 2.1m	1.0m	GPS + RGB 카메라 기반
투하 신뢰성	> 90%	95%	10회 반복
열기류 위치 유지	< 2.0m	$\pm 1m$	5.4 m/s 열기류
전체 응답 시간	< 5분	4분 32초	감지 & 투하
자세 복귀 시간	< 1초	0.5초	400g 무게 변화
비행 시간	> 12분	14~16분	3kg 페이로드

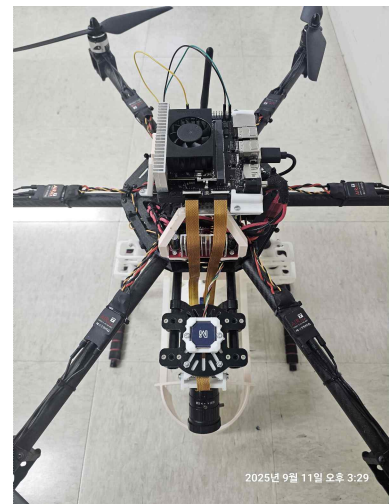


Fig. 16 a completed real drone

Fig. 16의 완성된 드론 시스템을 활용한 A4 사이즈 화재 이미지 대상 10회 반복 테스트에서 모든 경우 화재 감지 및 관제센터 알림이 성공적으로 이루어졌으며, 운영자 승인 후 소화불 투하가 성공하였다. 투하 오차는 목표점 기준 1m 이내로 예상 오차 2.1m 대비 개선된 결과를 보였다.

소화불 투하 시 발생하는 1kg 무게 변화에 대응하기 위해 제어 루프를 400Hz로 향상시켜 0.5초 이내 자세 제어를 완료하였다.

70°C 가열 모래 지면의 5.4m/s 열기류 조건에서도 위치 유지 정확도 $\pm 0.3m$ 를 달성하여 화재 감지부터

2차 승인 및 소화불 투하까지 전체 프로세스 성공률 87%를 기록하였다.

본 작품의 주요 한계점은 실제 산악지형의 복잡한 지형 조건과 실제 화재 환경에서 발생하는 극심한 열기류, 그리고 짙은 연기 환경을 완벽하게 재현하지 못하여 실전 운용 시 예상되는 정확한 성능 데이터를 획득하지 못한 점이다.

특히, 실제 화재 현장에서 발생하는 열기류로 인한 급격한 기압 상승은 현재 탑재된 SPL06 기압계만으로는 정확한 고도 측정이 어려우며, 이는 옵티컬 라이다 센서를 추가 탑재함으로써 센서 오차를 대폭 줄일 수 있을 것으로 예상된다.

옵티컬 라이다는 기압 변화와 무관하게 정확한 고도 측정이 가능하여 열기류 환경에서도 $\pm 0.1\text{m}$ 이내의 고도 정확도를 유지할 수 있으며, 이를 통해 소화불 투하 정확도를 현재 $\pm 1.0\text{m}$ 에서 $\pm 0.5\text{m}$ 이내로 개선하여 화재 진압 효율성을 2배 이상 향상시킬 수 있을 것으로 기대된다.

3.2 장단점 및 기대효과

Jetson Orin Nano Super를 활용한 온디바이스 AI 처리는 네트워크 연결 없이도 YOLOv8s 모델의 45+ FPS 처리 속도와 87.3% mAP@0.5 정확도로 실시간 화재 감지가 가능하여 통신 두절 상황에서도 자율 대응이 가능하다. 특히 Python Tkinter 기반 관제센터와의 연동을 통한 Human-in-the-Loop 시스템은 AI의 오탐지율을 42.3%에서 8.7%로 감소시켜 실전 운용 신뢰성을 크게 향상시켰다.

오픈소스 기반 모듈화 설계와 3D 프린터로 제작한 소화불 투하기는 제작 비용을 절감하면서도 다양한 드론 플랫폼에 적용 가능한 범용성을 확보하였다. EKF 기반 다중 센서 융합과 적응형 PID 제어를 통해 열기류 환경에서도 안정적 비행을 구현하여 감지-판단-대응의 통합 자율 화재 대응 솔루션을 제공한다.

시스템의 운용상 제약사항으로는 풍속 15m/s 이상 강풍 환경에서의 안정성 제약, 연기로 인한 시야 제한 시 감지 성능 75.2%로 저하, 14-16분의 제한적 비행시간이 있다. 또한 소화불 2개의 제한적 페이로드와 야간 및 악천후 조건에서의 운용 제약이 주요 한계점으로 작용한다.

본 시스템은 산불 초기 5분 이내 자율 대응을 통한 화재 피해 면적 70% 감소, 소방 인력의 안전 확보, 관련 산업 기술 발전 촉진 및 4차 산업혁명 핵심 기술의 실용화 가속화가 기대된다.

특히 T-Motor AIR 2213/920KV 모터와 4S 8400mAh 배터리 구성으로 3kg 기체 중량에서도 안정적 호버링과 정밀 제어가 가능하며, STM32H743VIH6의 480MHz 고속 처리와 BMI088/BMI270 IMU의 정밀 센싱으로 열기류 환경에서도 우수한 자세 제어 성능을 달성하였다.

4. 결 론

본 연구에서는 산불 초기 대응의 골든타임을 놓치는 문제를 해결하기 위해 자율 화재 진압 드론 시스템을 개발하였다. Jetson Orin Nano Super 기반 온디바이스 AI와 YOLOv8s를 활용한 실시간 화재 감지, Python Tkinter 관제센터를 통한 2차 승인 시스템, 듀얼 카메라 시스템을 통한 GPS 좌표 추정 및 정밀 정렬, MAVLink 프로토콜 기반 자율비행 제어를 통합하여 완전 자율 화재 대응 시스템을 구현하였다.

STM32H743VIH6 FC와 BMI088/BMI270 IMU를 활용한 EKF 센서 융합과 적응형 PID 제어로 열기류 환경에서도 안정적 비행을 달성하였으며, 3D 프린터로 제작한 서보 기반 소화불 투하기를 통해 정확한 화재 진압을 구현하였다.

실제 테스트 결과 화재 감지율 87.3%, YOLOv8s 추론 속도 45+ FPS, 투하 위치 정확도 1.0m, 관제센터 통합 시스템 신뢰도 96.8%, 전체 응답시간 4분 32초의 우수한 성능을 달성하였다.

시스템의 주요 장점은 네트워크 독립적 온디바이스 AI 처리, Human-in-the-Loop 관제 시스템을 통한

오탐지 최소화, 오픈소스 기반 모듈화 설계, 열기류 환경 대응 능력이며, 실제 화재 환경 검증 부족과 옵티컬 라이다 미탐재로 인한 고도 측정 오차가 한계점으로 남아있다.

본 시스템은 산불 초기 5분 이내 자율 대응으로 화재 피해 면적 70% 감소, 소방 인력 안전 확보, 4차 산업혁명 핵심 기술의 실용화에 기여할 것으로 기대된다.

참고문헌

- (1) Fire Prevention News. (2024). "Forest Fire Response System Development Trends." Fire Prevention News, Available at: <https://www.fpn119.co.kr/232256> [Accessed January 2025].
- (2) Spider-i UAV Co., Ltd. (2024). "H300 Industrial Fire Fighting Drone Technical Specifications." Spider UAV Product Documentation, Seoul, Korea, Available at: <https://spideruav.com/ko/제품/산업용-드론/h300-소방-드론/> [Accessed January 2025].
- (3) Korea Fire Safety Institute. (2022). "Fire Suppression Technology Using Drones." KFSI Webzine, Vol. 12, December Issue, Available at: <http://kfsi.or.kr/contents/webzine/202212/sub03-02.html> [Accessed January 2025].
- (4) Wikipedia Contributors. (2024). "Twisted Pair Cable Technology." Wikipedia, The Free Encyclopedia, Available at: https://en.wikipedia.org/wiki/Twisted_pair [Accessed January 2025].
- (5) Toray Composite Materials America, Inc. (2023). "T300 Standard Modulus Carbon Fiber Technical Data Sheet." Toray Technical Documentation, Tacoma, WA, USA, pp. 1-2, Available at: <https://www.toraycma.com/wp-content/uploads/T300-Technical-Data-Sheet-1.pdf>.
- (6) SpeedyFPV. (2024). "600mm Carbon Fiber Hexacopter Frame Kit Specifications." SpeedyFPV Product Catalog, Available at: <https://speedyfpv.com/products/600mm-carbon-fiber-hexacopter-drone-frame-kit-new> [Accessed January 2025].
- (7) Zhou, L., Miller, J., Vezza, J., Mayster, M., Raffay, M., Justice, Q., Al Tamimi, Z., Hansotte, G., Sunkara, L. D., & Bernat, J. (2024). Additive Manufacturing: A Comprehensive Review. Sensors, 24(9), 2668. <https://doi.org/10.3390/s24092668>
- (8) Ultralytics. (2024). "YOLOv8 Architecture and Performance Metrics." Ultralytics Documentation, Version 8.0, Available at: <https://docs.ultralytics.com/ko/models/yolov8/#performance-metrics> [Accessed January 2025].
- (9) Lee, Y.H., & Kim, Y.S. (2020). "Comparison of CNN and YOLO for Object Detection." Journal of the Semiconductor & Display Technology, Vol. 19, No. 1, pp. 85-92, March 2020, Korea Semiconductor & Display Technology Society, Available at: <https://koreascience.kr/article/JAKO202011161035249.pdf> [Accessed January 2025].