

시험성적서

한국정보통신기술협회

주소: 경기도 성남시 분당구 분당로 47
전화: 1551-1774, Fax: 031-724-0161

성적서번호: TTA-26-00136



1. 의뢰자

- 회사(기관)명 : 언맨드시스템
- 주 소 : 광주광역시 동구 필문대로 309, 항공우주공관 3102호(서석동, 조선대학교)

2. 시험성적서의 용도 : 과제 산출물 검증용

3. 제품명 : '복합센서 기반 성층권 관측용 복합추진 로켓 기반 무인기의 제어 성능 고도화' 과제 결과물

4. 버전 : '4. 시험환경' 참조

5. 시험장소 : 고정시험실, 현장시험

- 시험수행주소 : 전라남도 나주시 영산동 717-6

6. 시험기간 : 2026. 02. 23. ~ 2026. 02. 26.

7. 시험방법 : '3. 시험항목' 및 '5. 시험방법' 참조

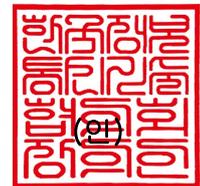
8. 시험결과 : '6. 시험결과' 및 '7. 시험기록' 참조

- 비 고 :
1. 이 성적서의 시험결과는 의뢰자에 의해 제공된 시험품에 한하며 용도 이외의 사용을 금합니다.
 2. 이 성적서는 'KS Q ISO/IEC17025와 KOLAS 인정' 과 관련 없습니다.
 3. 이 성적서의 진위여부는 성적서에 표시된 2D바코드 또는 QR코드, 기업지원플러스(www.g4b.go.kr)의 진위확인코드로 확인 가능합니다.

확 인	작성자	승인자
	성 명 : 노 문 환 	직 책 : 기 술 책 임 자  성 명 : 이 종 민 (서명)

2026년 2월 27일

한국정보통신기술협회 회장



성적서번호 : TTA-26-00136

시험명 :

‘복합센서 기반 성층권 관측용 복합추진 로켓 기반 무인기의 제어
성능 고도화’ 과제 결과물
R&D 결과검증 시험

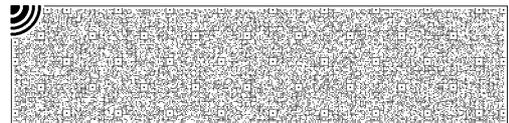
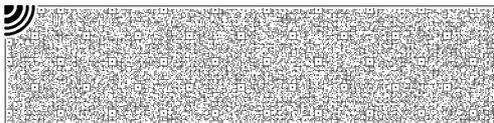
2026년 2월 27일

승 인 자 : 기술책임자 이 종 민 

작 성 자 : 노 문 환 

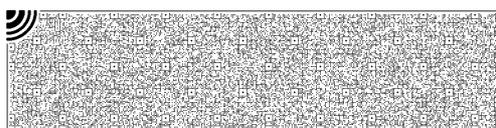
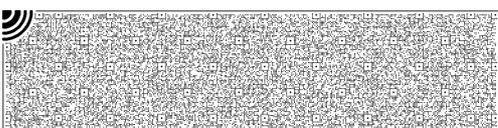
한국정보통신기술협회
Telecommunications Technology Association

본 문서는 한국정보통신기술협회(TTA)의 시험결과로 한국정보통신기술협회(TTA) 승인 없이 문서의 전부 또는 일부를 발췌하여 배포, 복제 및 이용할 수 없습니다.



목 차

1. 개 요	4
1.1 회사개요	4
1.2 시험성적서 용도	4
1.3 제약사항	4
2. 시험목적 및 절차	5
2.1 시험목적	5
2.2 시험절차	5
2.3 수행내용 및 시험기간	5
3. 시험항목	6
4. 시험환경	10
5. 시험방법	14
6. 시험결과	17
7. 시험기록	21



1. 개요

본 시험결과는 한국정보통신기술협회(이하 “TTA”)가 언맨드시스템(이하 “시험의뢰기업”)의 ‘복합센서 기반 성층권 관측용 복합추진 로켓 기반 무인기의 제어 성능 고도화’ 과제 결과물(이하 “시험대상제품”)을 대상으로 시험한 결과를 기술한 문서이다. 본 문서에 명시된 시험결과는 ‘3. 시험항목’, ‘4. 시험환경’, ‘5. 시험방법’을 통해 확인한 결과에 국한된다.

1.1 회사개요

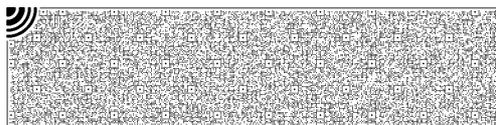
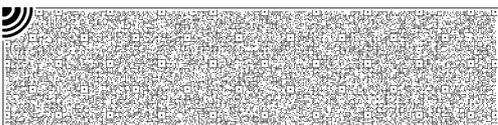
회사(기관)명	언맨드시스템	대표자	정성훈
사업자등록번호	561-29-01150	홈페이지	www.unmansys.com
전화번호	062-230-7188	FAX번호	-
주소	광주광역시 동구 필문대로 309, 항공우주공학관 3102호(서석동, 조선대학교)		

1.2 시험결과서 용도

용도	과제 산출물 검증용
개요	<ul style="list-style-type: none"> ○수행과제명: 복합센서 기반 성층권 관측용 복합추진 로켓 기반 무인기의 제어 성능 고도화 ○과제전담기관: 광주정보문화산업진흥원

1.3 제약사항

본 시험결과서에서 기술한 내용은 시험의뢰기업에서 의뢰한 시험 항목에 대한 시험 결과로만 한정되며, 과제의 정상 이행 여부와는 관련 없음



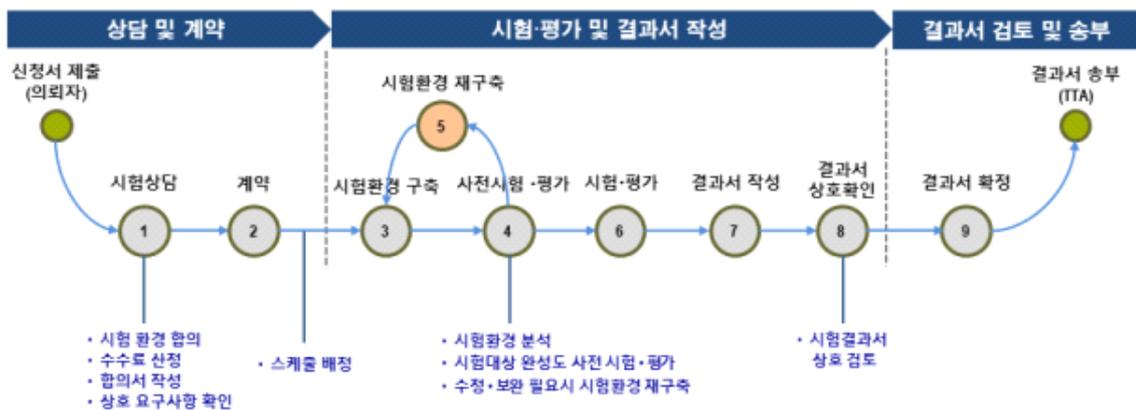
2. 시험목적 및 절차

2.1 시험목적

본 시험의 목적은 시험의뢰기업이 요청한 시험항목에 대해 제3자 전문시험기관인 TTA가 제품의 기능 또는 성능을 객관적으로 검증하는데 있다.

2.2 시험절차

시험절차는 다음과 같다.



2.3 수행내용 및 시험기간

수행내용 및 시험기간은 다음과 같다.

시험절차	수행내용	시험기간
시험·평가 및 결과서 작성	<ul style="list-style-type: none"> · 시험환경 구축 · 제품 분석 및 사전 시험·평가 	4일
	<ul style="list-style-type: none"> · 시험항목에 대한 시험 및 평가 수행 	
	<ul style="list-style-type: none"> · 시험결과서 작성 · 시험결과서 상호 확인 	

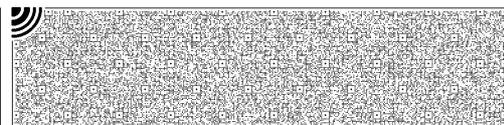
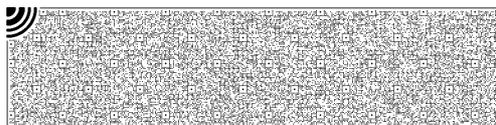
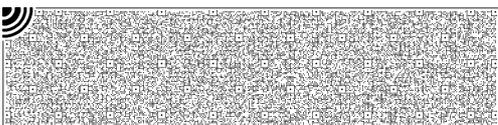
3. 시험항목

시험의뢰기업에서 요청한 시험항목과 시험목표 및 측정지표는 아래와 같다.

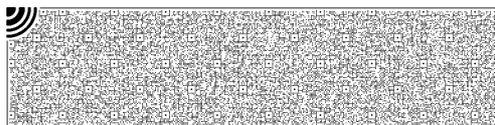
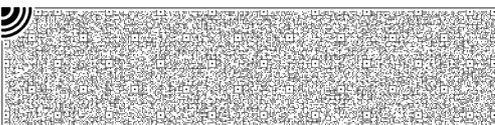
ID	시험항목	시험목표 및 측정지표
TC1	무인기 도달 고도	<p><시험목표></p> <p>무인기의 비행 고도가 150 m 이상인지 확인</p> <p>※ 본 시험을 위한 무인기는 동력 발생이 가능한 하단부만을 대상으로 시험을 진행하며 제트엔진 및 등유 사용에 따른 화재 위험을 방지하고자 이륙 순간의 최대 추력에서의 가속도 a_{max}를 실측하여 무인기 도달 고도를 계산함</p> <p><측정지표></p> <p>○ 산정식</p> $- \text{무인기 도달 고도}(h_{max}) = \left(\frac{m_f - m \ln(r)}{TSFC^2 F_{max}} - \frac{g}{2} t_b^2 \right) + \frac{1}{2g} (TSFC^{-1} \ln(r) - g t_b)^2$ <p>- g(중력가속도): 9.8 m/s²</p> <p>- $TSFC$(로켓의 추력 당 연료 소모율): 7.7e-5 (kg/s)/N</p> <p>- r(중량 대비 연료 비율) = $1 + \left(\frac{m_f}{m} \right)$</p> <p>- t_b(최대 추력에서 연소 가능 시간) = $\left(\frac{m_f}{TSFC \times F_{max}} \right)$</p> <p>- F_{max}(계산된 최대 추력) = $(m + m_f) a_{max}$</p> <p>- a_{max}: 계측된 최대 추력에서의 가속도</p> <p>- m(로켓 중량): 4 kg</p> <p>- m_f(연료 중량): 0.1 kg</p> <p>○ 산정 방법: FC의 SD 카드에 저장된 로그(.ulg)의 이륙 순간 가속도를 확인하여 평균 무인기 도달 고도 산출</p> <p>- 측정 횟수: 3회</p>
TC2	임무 고도 도달 후 무인기 사출 성공률	<p><시험목표></p> <p>임무 고도(150 m 이상) 도달 후 무인기 사출 성공률이 66 % 이상인지 확인</p> <p>※ 본 시험을 위한 무인기는 별도로 제작된 상단부 대응 장치로 구성</p> <p>※ 무인기 사출 성공 기준: 사출 시험 모드 3초 동안 무인기 상단부 대응 장치의 자세 유지 확인을 위한 기체의 최대 피치 각속도가 1.0 rad/s 이내인 경우임</p> <p><측정지표></p> <p>○ 산정식: 무인기 사출 성공률 = (사출 성공 횟수 / 사출 시도 횟수) x 100</p> <p>- 사출 시도 횟수: 3회</p> <p>○ 산정 방법: 무인기 상단부 대응 장치에 탑재된 FC의 SD 카드에 저장된 로그(.ulg)의 최대 피치 각속도에 따라 무인기 사출 성공 횟수를 확인하여 무인기 사출 성공률을 산출</p>



ID	시험항목	시험목표 및 측정지표
TC3	사출 후 무인기 비행 성공률	<p><시험목표></p> <p>임무 고도(150 m 이상) 도달 후 사출된 무인기(상단부 대응 장치)의 비행 성공률이 66 % 이상인지 확인</p> <p>※ 무인기 비행 성공 기준: 무인기 상단부 대응 장치의 이륙 지점을 기준으로 반경 80 m 이내에서 선회 비행한 경우임</p> <p><측정지표></p> <p>○ 산정식: 무인기 비행 성공률 = (비행 성공 횟수 / 비행 시도 횟수) x 100 - 비행 시도 횟수: 3회</p> <p>○ 산정 방법: 무인기 상단부 대응 장치에 탑재된 FC의 SD 카드에 저장된 로그(.ulg)의 비행 반경에 따라 사출 후 무인기 비행 성공 횟수를 확인하여 무인기 비행 성공률 산출</p>
TC4	무인기 착륙 지점 회수 성공률	<p><시험목표></p> <p>임무 고도(150 m 이상) 도달 후 사출된 무인기(상단부 대응 장치)의 회수 성공률이 66 % 이상인지 확인</p> <p>※ 무인기 회수 성공 기준: FC 로그에서 측정된 최대 가속도가 10 G 미만인 경우임</p> <p><측정지표></p> <p>○ 산정식: 무인기 회수 성공률 = (회수 성공 횟수 / 회수 시도 횟수) x 100 - 회수 시도 횟수: 3회</p> <p>○ 산정 방법: 무인기 상단부 대응 장치의 FC의 SD 카드에 저장된 로그(.ulg)의 최대 가속도에 따라 회수 성공 횟수를 확인하여 평균 무인기 회수 성공률 산출</p> <p>- 최대 가속도(3축 벡터의 합) = $\frac{\sqrt{a_x^2 + a_y^2 + a_z^2}}{9.81}$</p> <p>- a_x: X 방향 가속도</p> <p>- a_y: Y 방향 가속도</p> <p>- a_z: Z 방향 가속도</p>
TC5	로켓 착륙 지점 시뮬레이션 회수 성공률	<p><시험목표></p> <p>실제 현장 데이터를 적용한 시뮬레이션 환경에서 로켓(무인기 하단부) 회수 성공률이 66 % 이상인지 확인</p> <p>※ 현장 데이터: 필드 테스트 시험장소의 기상 예보(측풍)</p> <p>※ 무인기 회수 성공 기준: FC 로그에서 측정된 최대 가속도가 30 G 미만인 경우임</p> <p><측정지표></p> <p>○ 산정식: 시뮬레이션 무인기 회수 성공률 = (회수 성공 횟수 / 회수 시도 횟수) x 100</p>

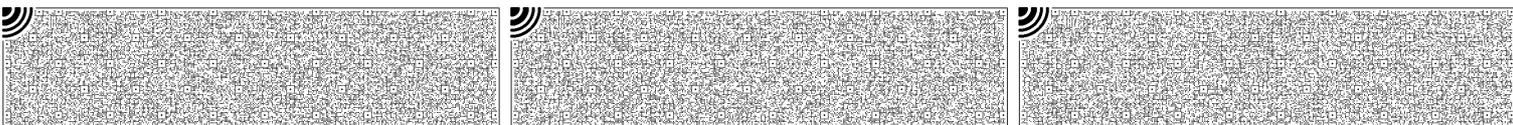


ID	시험항목	시험목표 및 측정지표
		<ul style="list-style-type: none"> - 회수 시도 횟수: 10회 o 산정 방법: 시뮬레이션 FC 저장된 로그(.ulg)의 최대 가속도에 따라 회수 성공 횟수를 확인하여 평균 시뮬레이션 무인기 회수 성공률 산출 - 최대 가속도(3축 벡터의 합) = $\frac{\sqrt{a_x^2 + a_y^2 + a_z^2}}{9.81}$ - a_x: X 방향 가속도 - a_y: Y 방향 가속도 - a_z: Z 방향 가속도
TC6	무인기 착륙 지점 회수 시 위치 정확도	<p><시험목표> 임무 고도 도달 후 사출된 무인기(상단부 대응 장치)의 회수 시 목표 착륙 좌표와 실제 착륙 좌표 간의 이격 거리가 10 m 이내인지 확인</p> <p><측정지표></p> <ul style="list-style-type: none"> o 산정식: 이격 거리 = $\sqrt{(x_{target} - x_{real})^2 + (y_{target} - y_{real})^2}$ - x_{target}: 목표 착륙 X 좌표 - y_{target}: 목표 착륙 Y 좌표 - x_{real}: 실제 착륙 X 좌표 - y_{real}: 실제 착륙 Y 좌표 o 산정 방법: 무인기 상단부 대응 장치에 탑재된 FC의 SD 카드에 저장된 로그(.ulg)를 추출하여 평균 이격 거리 산출 - 시험 횟수: 3회
TC7	로켓 착륙 지점 시뮬레이션 회수 시 위치 정확도	<p><시험목표> 실제 현장 데이터를 적용한 시뮬레이션 환경에서 로켓(무인기 하단부) 회수 시 목표 착륙 좌표와 시뮬레이션 착륙 좌표 간의 이격 거리가 10 m 이내인지 확인</p> <p>※ 현장 데이터: 필드 테스트 시험장소의 기상 예보(측풍)</p> <p><측정지표></p> <ul style="list-style-type: none"> o 산정식: 시뮬레이션 이격 거리 = $\sqrt{(x_{target} - x_{sim})^2 + (y_{target} - y_{sim})^2}$ - x_{target}: 목표 착륙 X 좌표 - y_{target}: 목표 착륙 Y 좌표 - x_{sim}: 시뮬레이션 착륙 X 좌표 - y_{sim}: 시뮬레이션 착륙 Y 좌표 o 산정 방법: 시뮬레이션 FC의 SD 카드에 저장된 로그(.ulg)의 착륙 좌표를 확인하여 평균 시뮬레이션 이격 거리 산출 - 시험 횟수: 10회



ID	시험항목	시험목표 및 측정지표
TC8	컨벡스 최적화 제어기 궤적 추종 정확도 개선율	<p><시험목표></p> <p>시뮬레이션 환경에서 무인기의 기존 PID 기반 제어기 대비 컨벡스(Convex) 최적화 제어기 적용에 대한 궤적 추종(Trajectory Following) 정확도 개선율이 5% 이상인지 확인</p> <p>※ 컨벡스(Convex) 최적화 제어기: SQP(Sequential Quadratic Programming) 기반 MPC(Model Predictive Control)</p> <p><측정지표></p> <p>○ 산정식: 개선율 = $((RMSE_{base} - RMSE_{convex}) / RMSE_{base}) \times 100$</p> <ul style="list-style-type: none"> - $RMSE_{base}$: PID 기반의 기존 제어기에 대한 평균 제곱근 오차 - $RMSE_{convex}$: 컨벡스 최적화 제어기에 대한 평균 제곱근 오차 $RMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (x_{target,i} - x_{real,i})^2 + (y_{target,i} - y_{real,i})^2 + (z_{target,i} - z_{real,i})^2}$ <ul style="list-style-type: none"> - x_{target}: 목표 비행 X 좌표 - y_{target}: 목표 비행 Y 좌표 - z_{target}: 목표 비행 Z 좌표 - x_{real}: 실제 비행 X 좌표 - y_{real}: 실제 비행 Y 좌표 - z_{real}: 실제 비행 Z 좌표 - N: 데이터 수 <p>○ 산정 방법: 동일한 환경으로 기존 PID 기반 제어기와 컨벡스(Convex) 최적화 제어기에 대한 시뮬레이션을 각각 수행하여 계산된 RMSE를 통해 평균 개선율 산출</p> <ul style="list-style-type: none"> - 시험 횟수: 10회

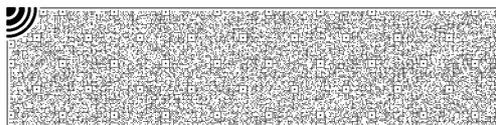
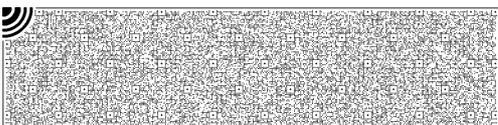
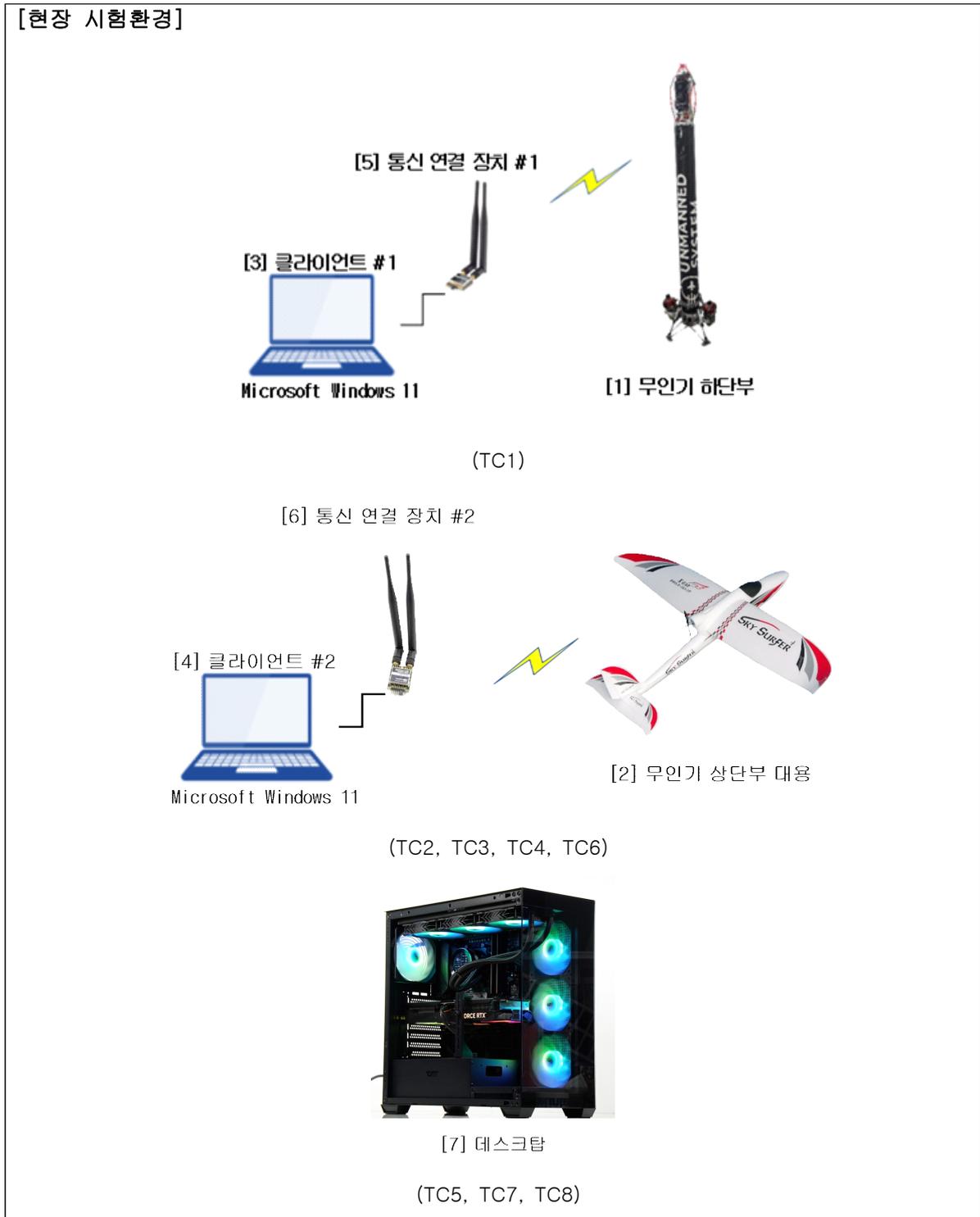
※ 각 TC의 시험 기준은 시험의뢰기업에서 제공



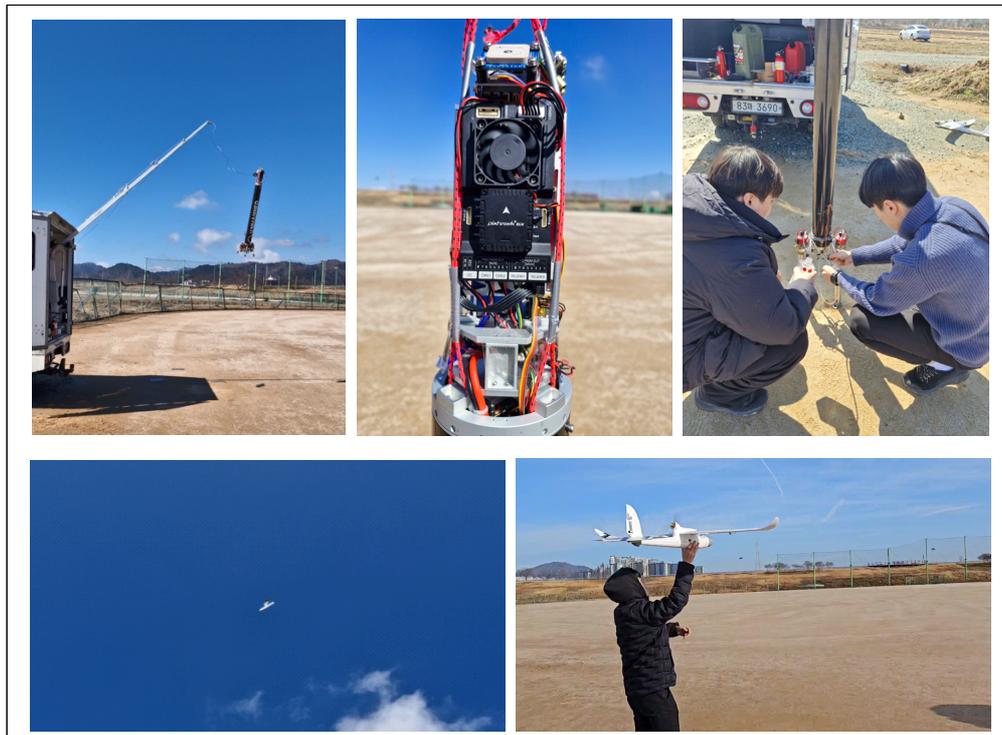
4. 시험환경

시험환경은 현장 시험환경을 구축하였고, 시험환경구성 및 세부사항은 아래와 같다.

<시험환경구성>



<시험 현장>

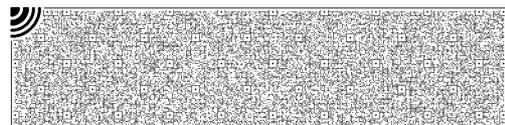
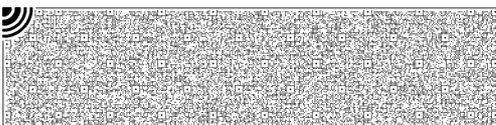


<기상정보>

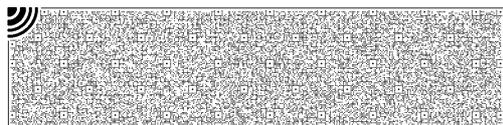
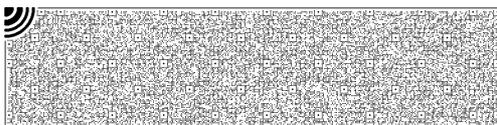
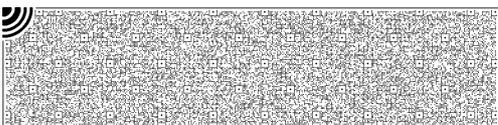
일자	장소	날씨	온도	습도	바람
2026. 02. 25.	전라남도 나주시 영산동 717-6	맑음	11 °C	67 %	1 m/s
2026. 02. 26.		맑음	12 °C	53 %	2 m/s

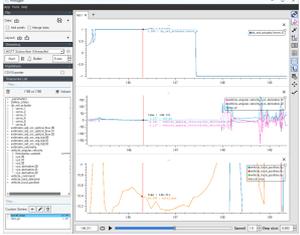
<세부사양>

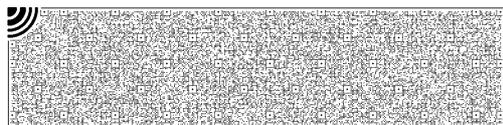
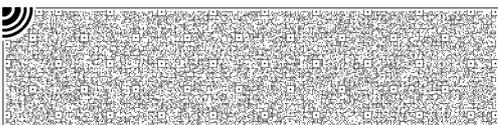
No	구분	내용	사진
1	무인기 하단부	<ul style="list-style-type: none"> - 제조사: 언맨드시스템 - 모델명: UMSYS-RBUAV2 - FC: Pixhawk 6X(개발된 제어 알고리즘 적용) - 주요 구성: STM32H7, STM32F4 듀얼 프로세서 기반 PX4 비행컴퓨터, Cortex-A Quadcore 프로세서 기반 임무컴퓨터 - 엔진 효율(TSFC): 7.7e-5 (kg/s)/N - 도달고도: 1~30 km - 건조 중량(Dry Mass): 1.5 kg, 습윤 질량(Wet Mass): 4~20 kg - 크기(WDH): 1500 x 300 x 300 mm - 용도: TC1 시험 및 환경정보 수집 	



2	무인기 상단부 대용 장치	<ul style="list-style-type: none"> - 제조사: X-UAV - 모델명: 스카이스퍼 - 중량: 0.55 kg - 크기: (W)1400 x (D) 925 x (H)200 mm - 용도: 무인기 제어알고리즘 평가를 위한 낙하용 시험 비행체 	
3	클라이언트 #1	<ul style="list-style-type: none"> - 제조사: 삼성전자주 - 모델명: NT950XDZ-G58AW - CPU/RAM/Graphic: i5-1135G7/8 GB/MX450 - 용도: 무인기 하단부 제어 	
4	클라이언트 #2	<ul style="list-style-type: none"> - 제조사: 삼성전자주 - 모델명: NT750XGL-XD72S - CPU/RAM/Graphic: i7-150U/32 GB/MX570 A - 용도: 무인기 상단부 대용 장치 제어 	
5	통신 연결 장치 #1	<ul style="list-style-type: none"> - 제조사: Mayatech - 모델명: RFD 900x - 사양 <ul style="list-style-type: none"> . 작동 주파수 범위: 902 - 928 MHz, ISM 밴드 . 조정 가능한 전송 전력, 최대 1W . 듀얼 안테나 인터페이스, 안테나 다양성 및 차동 안테나 구성 지원 . 작동 온도 -40 ~ +85 °C - 용도: 무인기 하단부와 클라이언트#1 통신 	
6	통신 연결 장치 #2	<ul style="list-style-type: none"> - 제조사: Mayatech - 모델명: RFD 900+ - 사양 <ul style="list-style-type: none"> . 작동 주파수 범위: 902 - 928 MHz, ISM 밴드 . 조정 가능한 전송 전력, 최대 1W - 용도: 무인기 상단부 대용 장치와 클라이언트#2 통신 	



7	데스크탑	<ul style="list-style-type: none"> - 제조사: (주)엔피씨코리아 - CPU/RAM/Graphic: i9-14900KF/32GB/RTX4070TI SUPER - 용도: 시뮬레이션 수행 	
8	GCS 프로그램	<ul style="list-style-type: none"> - 제조사: Dronecode - 모델명: QGroundControl - 용도: 임무 설정 및 로그 다운로드 	
9	로그 뷰어	<ul style="list-style-type: none"> - 제조사: PlotJuggler.io - 모델명: PlotJuggler - 용도: 로그 확인 	
10	로그 분석 소프트웨어	<ul style="list-style-type: none"> - 제조사: 언맨드시스템 - 모델명: UNMANSYS-TE-LOGVIEW - 용도: 로그 분석 및 확인 	



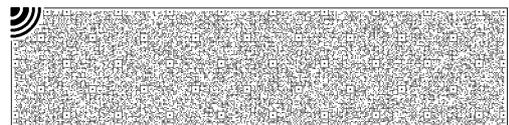
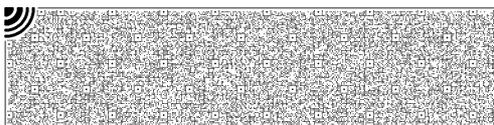
5. 시험방법

시험항목별 시험방법은 아래와 같다.

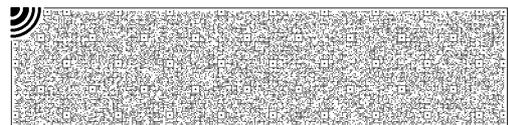
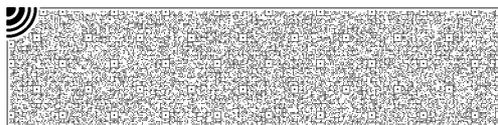
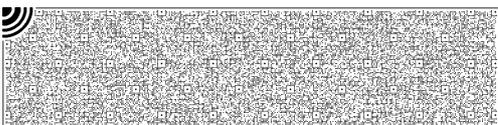
ID	시험방법
TC1	<p><사전 조건></p> <ul style="list-style-type: none"> - 무인기 하단부 연료탱크에 연료(등유) 주입 후 시험을 진행함. - 연료 주입 중량(m_f): 100 g <p><시험 방법></p> <ol style="list-style-type: none"> (1) 무인기 하단부와 배터리를 연결한다. (2) 클라이언트#1에서 시리얼 콘솔을 통해 통신 연결 장치 #1을 연결한다. (3) 미션 실행을 위한 명령어를 입력한다. <ul style="list-style-type: none"> - 명령어: mission test (4) 커서키로 'order' 변수를 '1'로 변경 후 엔진 가동을 확인한다. (5) 'E'키를 눌러 임무 프로파일(최대 추력 이륙)을 실행시킨다. (6) 임무 프로파일의 재생이 끝난 후 커서키로 'order' 변수를 '0'로 변경하여 엔진을 종료시키고 FC의 SD 카드에 저장된 로그를 회수한다. (7) 로그를 분석하여 상승 구간 내 임의 지점의 가속도를 측정하고 계산된 최대 무인기 도달 고도를 확인한다. (8) 상기 7번 절차를 총 3회 반복 수행하여 평균 도달 고도를 산출한다.
TC2	<p><사전 조건></p> <ul style="list-style-type: none"> - 무인기 상단부 대응 장치 미션 비행 설정 완료(클라이언트#2의 GCS 프로그램에서 이착륙 및 사출 시험 모드 설정) <p><시험 방법></p> <ol style="list-style-type: none"> (1) 무인기 상단부 대응 장치에 배터리를 연결한다. (2) GCS 프로그램을 실행시켜 무인기 상단부 대응 장치에 접속하여 정상 상태(통신 연결 및 GPS 안정화)가 될 때까지 대기한다. (3) GCS 프로그램을 통해 미션 모드에서 시동을 켜 후 핸드 런칭 방식으로 이륙시킨다. (4) 무인기 상단부 대응 장치가 설정된 목표 고도에 도달한 후 사출 시험 모드에 진입할 때까지 대기한다. (5) 시험 모드에 자동 진입 후 제어 알고리즘에 따라 복귀하여 착륙하면 FC의 SD 카드를 회수하여 저장된 로그를 추출한다. (7) 추출된 로그를 자체 개발한 로그 분석 소프트웨어에 입력하여 무인기 상단부 대응 장치가 임무 고도(150m 이상)에 도달하고 사출 시험 모드 진입한 뒤 3초 동안의 최대 피치 각속도에 따라 사출 성공 여부를 확인한다. (8) 상기 절차를 총 3회 반복 수행하여 무인기 사출 성공률을 산출한다.



ID	시험방법
TC3	<p><사전 조건> - 해당없음</p> <p><시험 방법> (1) TC2 시험 수행 후 로그 분석 소프트웨어를 통해 확인된 무인기 비행 성공 횟수에 따라 통해 무인기 비행 성공률을 산출한다.</p>
TC4	<p><사전 조건> - 해당없음</p> <p><시험 방법> (1) TC2 시험 수행 후 로그 분석 소프트웨어를 통해 확인된 무인기 회수 성공 횟수에 따라 무인기 회수 성공률을 산출한다.</p>
TC5	<p><사전 조건> - 시뮬레이터(S/W): MATLAB 2024b (복합추진 로켓기반 무인기의 동역학 모델 및 추력 반동 모델링)</p> <p><시험 방법> (1) 데스크탑에서 시뮬레이터를 실행시킨다. (2) 현장 데이터를 시뮬레이터 편집 모드에서 'Wind Model'에 입력한다. (3) 시뮬레이터 실행 모드와 시뮬레이터 FC를 동시에 실행시킨다. (4) 시뮬레이션을 수행 후 GCS 프로그램을 통해 FC 로그(.ulg)를 다운로드한다. (5) 다운로드 된 로그를 로그 분석 소프트웨어를 통해 계산된 결과(최대 가속도)를 확인하여 회수 성공 여부를 확인한다. (6) 상기 절차를 총 10회 반복 수행하여 평균 시뮬레이션 무인기 회수 성공률을 산출한다.</p>
TC6	<p><사전 조건> - 해당 없음</p> <p><시험 방법> (1) TC2 시험 수행 후 GCS 프로그램을 통해 총 3회 계산된 이격 거리의 평균을 산출한다.</p>
TC7	<p><사전 조건> - 시뮬레이터(S/W): MATLAB 2024b (복합추진 로켓기반 무인기의 동역학 모델 및 추력 반동 모델링)</p> <p><시험 방법> (1) TC5 시험 수행 후 로그 분석 소프트웨어를 통해 총 10회 계산된 시뮬레이션 이격 거리의 평균을 산출한다.</p>



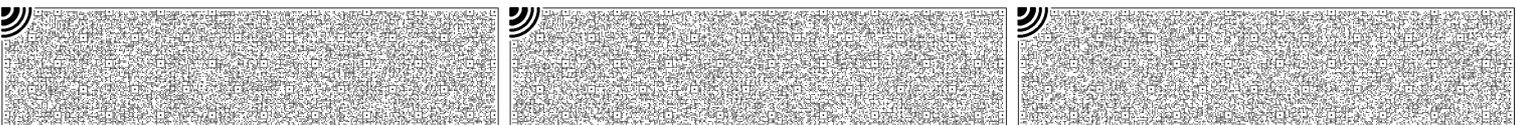
ID	시험방법
TC8	<p><사전 조건> - 기존 PID 제어기 모델(.slx)과 컨백스 최적화 제어기 모델(.slx) 준비</p> <p><시험 방법> (1) TC5 시험 수행 후 시뮬레이터의 컨백스 최적화 제어기 모델을 기존 PID 제어기 모델로 변경한다. (2) 총 10회 시뮬레이션을 수행하여 계산된 RMSE에 따라 평균 개선율을 산출한다.</p>



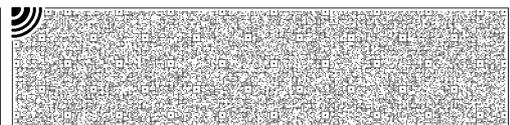
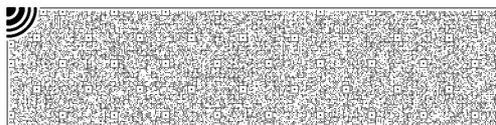
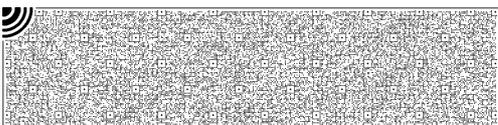
6. 시험결과

시험 항목별 시험 결과는 아래와 같다. (상세 시험 결과는 “7. 시험기록” 참고)

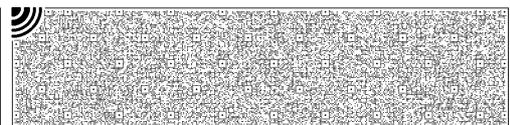
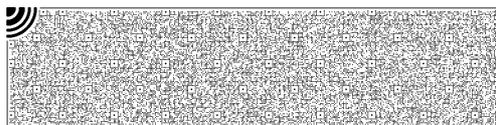
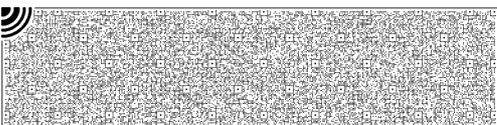
ID	시험항목	시험목표 및 측정지표	결과
TC1	무인기 도달 고도	<p><시험목표></p> <p>무인기의 비행 고도가 150 m 이상인지 확인</p> <p>※ 본 시험을 위한 무인기는 동력 발생이 가능한 하단부만을 대상으로 시험을 진행하며 제트엔진 및 등유 사용에 따른 화재 위험을 방지하고자 이륙 순간의 최대 추력에서의 가속도 a_{max}를 실측하여 무인기 도달 고도를 계산함</p> <p><측정지표></p> <p>○ 산정식</p> <p>- 무인기 도달 고도(h_{max}) = $\left(\frac{m_f - m \ln(r)}{TSFC^2 F_{max}} - \frac{g}{2} t_b^2\right) + \frac{1}{2g} (TSFC^{-1} \ln(r) - g t_b)^2$</p> <p>- g(중력가속도): 9.8 m/s²</p> <p>- $TSFC$(로켓의 추력 당 연료 소모율): 7.7e-5 (kg/s)/N</p> <p>- r(중량 대비 연료 비율) = $1 + \left(\frac{m_f}{m}\right)$</p> <p>- t_b(최대 추력에서 연소 가능 시간) = $\left(\frac{m_f}{TSFC \times F_{max}}\right)$</p> <p>- F_{max}(계산된 최대 추력) = $(m + m_f)a_{max}$</p> <p>- a_{max}: 계측된 최대 추력에서의 가속도</p> <p>- m(로켓 중량): 4 kg</p> <p>- m_f(연료 중량): 0.1 kg</p> <p>○ 산정 방법: FC의 SD 카드에 저장된 로그(.ulg)의 이륙 순간 가속도를 확인하여 평균 무인기 도달 고도 산출</p> <p>- 측정 횟수: 3회</p>	평균 293.28 m
TC2	임무 고도 도달 후 무인기 사출 성공률	<p><시험목표></p> <p>임무 고도(150 m 이상) 도달 후 무인기 사출 성공률이 66 % 이상인지 확인</p> <p>※ 본 시험을 위한 무인기는 별도로 제작된 상단부 대응 장치로 구성</p> <p>※ 무인기 사출 성공 기준: 사출 시험 모드 3초 동안 무인기 상단부 대응 장치의 자세 유지 확인을 위한 기체의 최대 피치 각속도가 1.0 rad/s 이내인 경우임</p> <p><측정지표></p> <p>○ 산정식: 무인기 사출 성공률 = (사출 성공 횟수 / 사출 시도 횟수) × 100</p> <p>- 사출 시도 횟수: 3회</p> <p>○ 산정 방법: 무인기 상단부 대응 장치에 탑재된 FC의 SD 카드에</p>	66.66 %



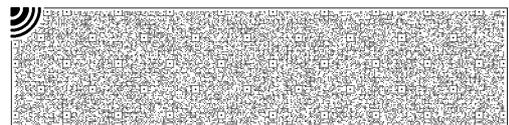
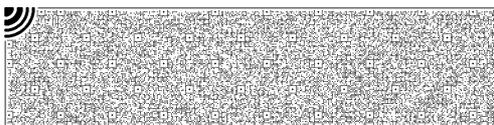
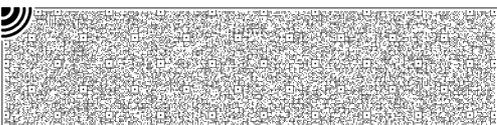
ID	시험항목	시험목표 및 측정지표	결과
		저장된 로그(.ulg)의 최대 피치 각속도에 따라 무인기 사출 성공 횟수를 확인하여 무인기 사출 성공률 산출	
TC3	사출 후 무인기 비행 성공률	<p><시험목표> 임무 고도(150 m 이상) 도달 후 사출된 무인기(상단부 대응 장치)의 비행 성공률이 66 % 이상인지 확인 ※ 무인기 비행 성공 기준: 무인기 상단부 대응 장치의 이륙 지점을 기준으로 반경 80 m 이내에서 선회 비행한 경우임</p> <p><측정지표> ○ 산정식: 무인기 비행 성공률 = (비행 성공 횟수 / 비행 시도 횟수) x 100 - 비행 시도 횟수: 3회 ○ 산정 방법: 무인기 상단부 대응 장치에 탑재된 FC의 SD 카드에 저장된 로그(.ulg)의 비행 반경에 따라 사출 후 무인기 비행 성공 횟수를 확인하여 무인기 비행 성공률 산출</p>	100 %
TC4	무인기 착륙 지점 회수 성공률	<p><시험목표> 임무 고도(150 m 이상) 도달 후 사출된 무인기(상단부 대응 장치)의 회수 성공률이 66 % 이상인지 확인 ※ 무인기 회수 성공 기준: FC 로그에서 측정된 최대 가속도가 10 G 미만인 경우임</p> <p><측정지표> ○ 산정식: 무인기 회수 성공률 = (회수 성공 횟수 / 회수 시도 횟수) x 100 - 회수 시도 횟수: 3회 ○ 산정 방법: 무인기 상단부 대응 장치의 FC의 SD 카드에 저장된 로그(.ulg)의 최대 가속도에 따라 회수 성공 횟수를 확인하여 평균 무인기 회수 성공률 산출</p> <p>- 최대 가속도(3축 벡터의 합) = $\frac{\sqrt{a_x^2 + a_y^2 + a_z^2}}{9.81}$ - a_x: X 방향 가속도 - a_y: Y 방향 가속도 - a_z: Z 방향 가속도</p>	100 %
TC5	로켓 착륙 지점 시뮬레이션 회수 성공률	<p><시험목표> 실제 현장 데이터를 적용한 시뮬레이션 환경에서 로켓(무인기 하단부) 회수 성공률이 66 % 이상인지 확인 ※ 현장 데이터: 필드 테스트 시험장소의 기상 예보(측풍) ※ 무인기 회수 성공 기준: FC 로그에서 측정된 최대 가속도가 30 G 미만인 경우임</p>	70 %



ID	시험항목	시험목표 및 측정지표	결과
		<p><측정지표></p> <ul style="list-style-type: none"> ○ 산정식: 시뮬레이션 무인기 회수 성공률 = (회수 성공 횟수 / 회수 시도 횟수) × 100 <ul style="list-style-type: none"> - 회수 시도 횟수: 10회 ○ 산정 방법: 시뮬레이션 FC 저장된 로그(.ulg)의 최대 가속도에 따라 회수 성공 횟수를 확인하여 평균 시뮬레이션 무인기 회수 성공률 산출 <ul style="list-style-type: none"> - 최대 가속도(3축 벡터의 합) = $\frac{\sqrt{a_x^2 + a_y^2 + a_z^2}}{9.81}$ - a_x: X 방향 가속도 - a_y: Y 방향 가속도 - a_z: Z 방향 가속도 	
TC6	무인기 착륙 지점 회수 시 위치 정확도	<p><시험목표></p> <p>임무 고도 도달 후 사출된 무인기(상단부 대응 장치)의 회수 시 목표 착륙 좌표와 실제 착륙 좌표 간의 이격 거리가 10 m 이내인지 확인</p> <p><측정지표></p> <ul style="list-style-type: none"> ○ 산정식: 이격 거리 = $\sqrt{(x_{target} - x_{real})^2 + (y_{target} - y_{real})^2}$ <ul style="list-style-type: none"> - x_{target}: 목표 착륙 X 좌표 - y_{target}: 목표 착륙 Y 좌표 - x_{real}: 실제 착륙 X 좌표 - y_{real}: 실제 착륙 Y 좌표 ○ 산정 방법: 무인기 상단부 대응 장치에 탑재된 FC의 SD 카드에 저장된 로그(.ulg)를 추출하여 평균 이격 거리 산출 <ul style="list-style-type: none"> - 시험 횟수: 3회 	평균 9.9 m
TC7	로켓 착륙 지점 시뮬레이션 회수 시 위치 정확도	<p><시험목표></p> <p>실제 현장 데이터를 적용한 시뮬레이션 환경에서 로켓(무인기 하단부) 회수 시 목표 착륙 좌표와 시뮬레이션 착륙 좌표 간의 이격 거리가 10 m 이내인지 확인</p> <p>※ 현장 데이터: 필드 테스트 시험장소의 기상 예보(측풍)</p> <p><측정지표></p> <ul style="list-style-type: none"> ○ 산정식: 시뮬레이션 이격 거리 = $\sqrt{(x_{target} - x_{sim})^2 + (y_{target} - y_{sim})^2}$ <ul style="list-style-type: none"> - x_{target}: 목표 착륙 X 좌표 - y_{target}: 목표 착륙 Y 좌표 - x_{sim}: 시뮬레이션 착륙 X 좌표 - y_{sim}: 시뮬레이션 착륙 Y 좌표 ○ 산정 방법: 시뮬레이션 FC의 SD 카드에 저장된 로그(.ulg)의 착륙 좌표를 확인하여 평균 시뮬레이션 이격 거리 산출 <ul style="list-style-type: none"> - 시험 횟수: 10회 	평균 4.1 m



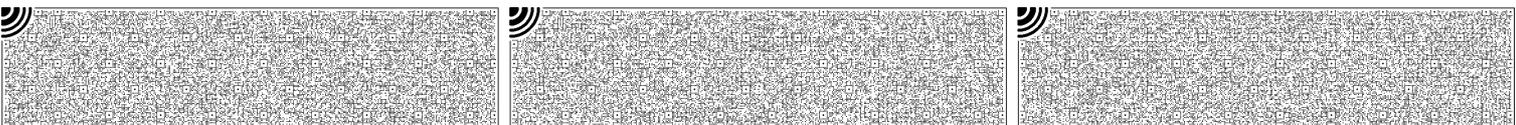
ID	시험항목	시험목표 및 측정지표	결과
TC8	컨벡스 최적화 제어기 궤적 추종 정확도 개선율	<p><시험목표></p> <p>시뮬레이션 환경에서 무인기의 기존 PID 기반 제어기 대비 컨벡스(Convex) 최적화 제어기 적용에 대한 궤적 추종(Trajectory Following) 정확도 개선율이 5% 이상인지 확인</p> <p>※ 컨벡스(Convex) 최적화 제어기: SQP(Sequential Quadratic Programming) 기반 MPC(Model Predictive Control)</p> <p><측정지표></p> <p>○ 산정식: 개선율 = $((RMSE_{base} - RMSE_{convex}) / RMSE_{base}) \times 100$</p> <ul style="list-style-type: none"> - $RMSE_{base}$: PID 기반의 기존 제어기에 대한 평균 제곱근 오차 - $RMSE_{convex}$: 컨벡스 최적화 제어기에 대한 평균 제곱근 오차 - $RMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (x_{target,i} - x_{real,i})^2 + (y_{target,i} - y_{real,i})^2 + (z_{target,i} - z_{real,i})^2}$ - x_{target}: 목표 비행 X 좌표 - y_{target}: 목표 비행 Y 좌표 - z_{target}: 목표 비행 Z 좌표 - x_{real}: 실제 비행 X 좌표 - y_{real}: 실제 비행 Y 좌표 - z_{real}: 실제 비행 Z 좌표 - N: 데이터 수 <p>○ 산정 방법: 동일한 환경으로 기존 PID 기반 제어기와 컨벡스(Convex) 최적화 제어기에 대한 시뮬레이션을 각각 수행하여 계산된 RMSE를 통해 평균 개선율 산출</p> <ul style="list-style-type: none"> - 시험 횟수: 10회 	<p>평균 13.14%</p>



7. 시험기록

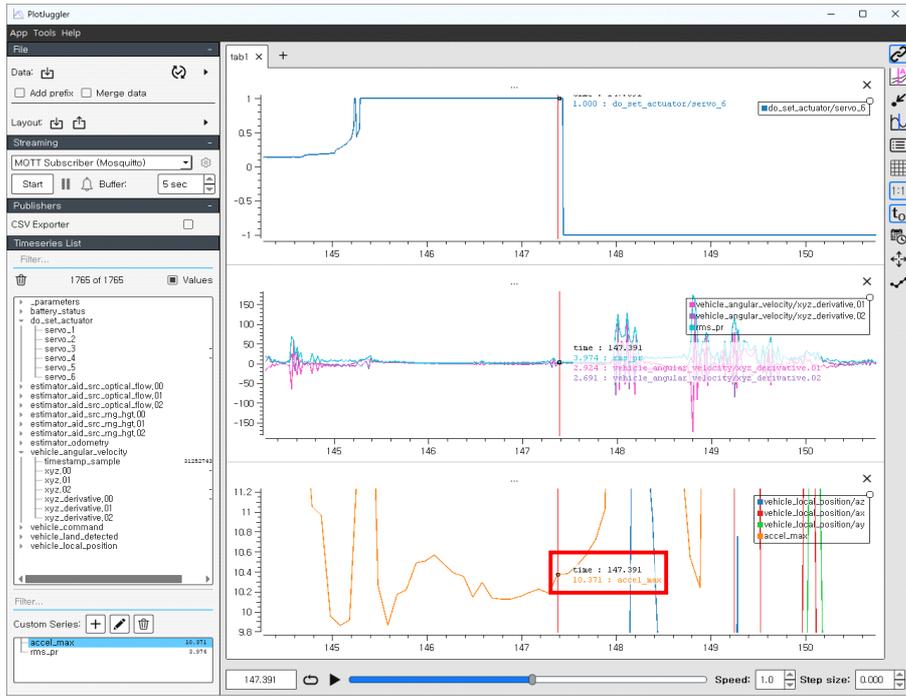
ID	상세 시험결과																					
TC1	- 무인기 도달 고도: 평균 293.28 m ([표 7.1.1], [그림 7.1.1] 참조)																					
	[표 7.1.1] 시험결과																					
	<table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <thead> <tr> <th style="width: 15%;">구분</th> <th style="width: 15%;">목표</th> <th style="width: 10%;">측정 횟수</th> <th style="width: 20%;">가속도(a_{max}) (m/s²)</th> <th style="width: 35%;">도달 고도(m)</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td rowspan="3" style="text-align: center;">무인기 도달 고도</td> <td rowspan="3" style="text-align: center;">150 m 이상</td> <td style="text-align: center;">1회</td> <td style="text-align: center;">10.126</td> <td style="text-align: center;">212.45</td> </tr> <tr> <td style="text-align: center;">2회</td> <td style="text-align: center;">10.371</td> <td style="text-align: center;">325.9</td> </tr> <tr> <td style="text-align: center;">3회</td> <td style="text-align: center;">10.388</td> <td style="text-align: center;">338.4</td> </tr> <tr> <td colspan="3" style="text-align: center;">평균</td> <td style="text-align: center;">293.28</td> <td></td> </tr> </tbody> </table>	구분	목표	측정 횟수	가속도(a_{max}) (m/s ²)	도달 고도(m)	무인기 도달 고도	150 m 이상	1회	10.126	212.45	2회	10.371	325.9	3회	10.388	338.4	평균			293.28	
	구분	목표	측정 횟수	가속도(a_{max}) (m/s ²)	도달 고도(m)																	
무인기 도달 고도	150 m 이상	1회	10.126	212.45																		
		2회	10.371	325.9																		
		3회	10.388	338.4																		
평균			293.28																			

[로그 뷰어: 가속도]
(1회)

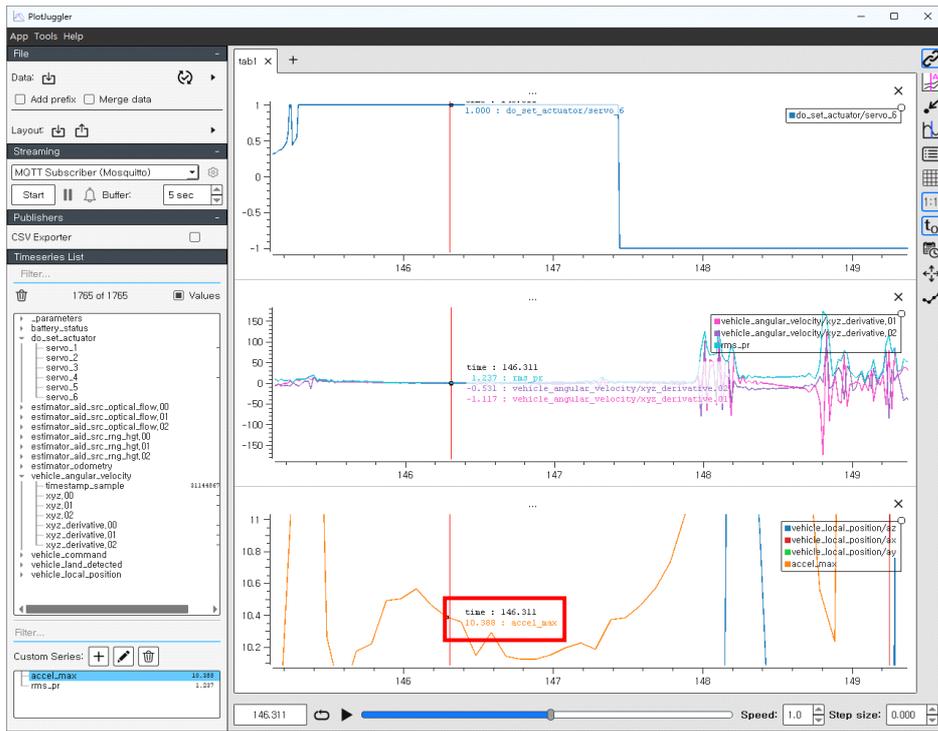


ID

상세 시험결과



[로그 뷰어: 가속도]
(2회)



[로그 뷰어: 가속도]
(3회)

[그림 7.1.1] 무인기 도달 고도 시험 세부 증빙 결과

ID

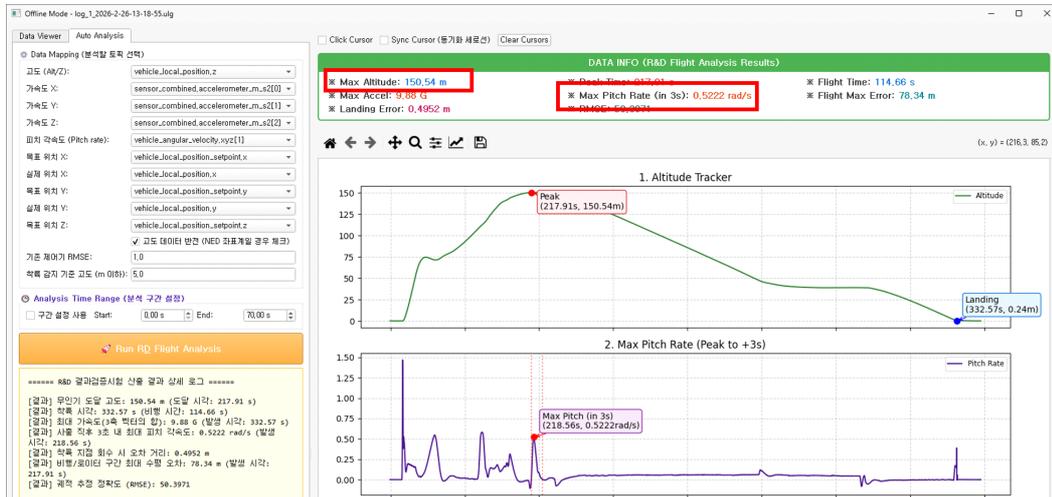
상세 시험결과

- 임무 고도 도달 후 무인기 사출 성공률: **66.66%** ([표 7.1.2], [그림 7.1.2] 참조)

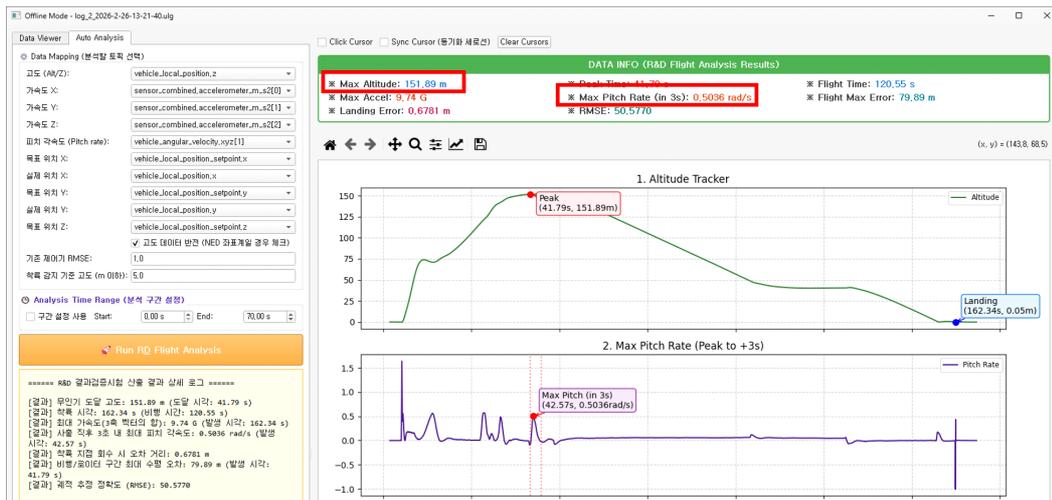
[표 7.1.2] 시험 결과

구분	목표	시험 횟수	임무 도달 고도(m)	최대 피치 각속도 (rad/s)	사출 성공 여부(O, X)	무인기 사출 성공률(%)
임무 고도 도달 후 무인기 사출 성공률	66% 이상	1회	150.54	0.52	O	66.66
		2회	151.89	0.5	O	
		3회	57.69	0.36	X	

TC2



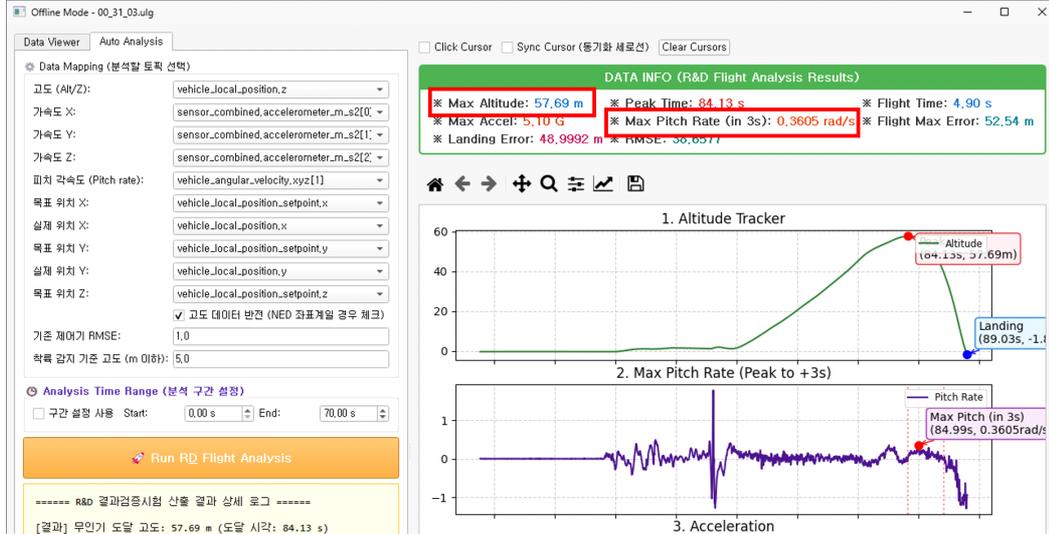
[로그 분석 소프트웨어: 임무 도달 고도 및 최대 피치 각속도] (1회)



[로그 분석 소프트웨어: 임무 도달 고도 및 최대 피치 각속도] (2회)

ID

상세 시험결과



[로그 분석 소프트웨어: 임무 도달 고도 및 최대 피치 각속도]

(3회)

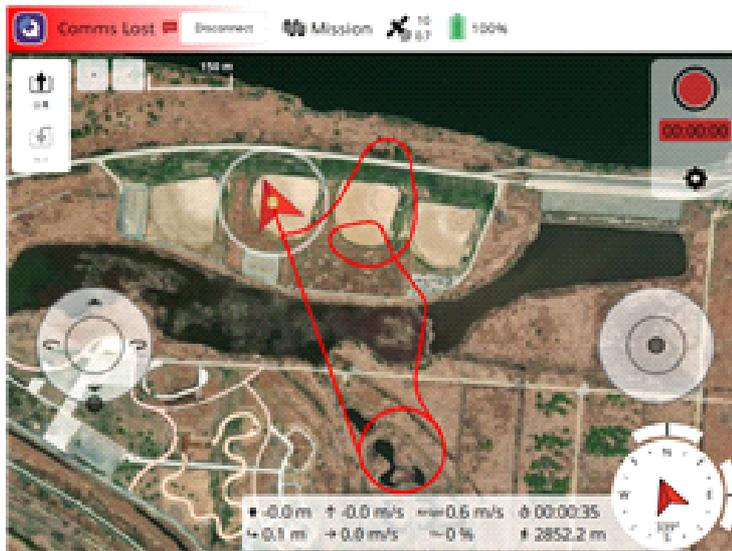
[그림 7.1.2] 임무 고도 도달 후 무인기 사출 성공률 시험 세부 증빙 결과

- 사출 후 무인기 비행 성공률: **100%** ([표 7.1.3], [그림 7.1.3] 참조)

[표 7.1.3] 시험 결과

구분	목표	시험 횟수	이격거리	비행 성공 여부 (O, X)	무인기 비행 성공률(%)
사출 후 무인기 비행 성공률	66% 이상	1회	78.34	O	100
		2회	79.89	O	
		3회	52.54	O	

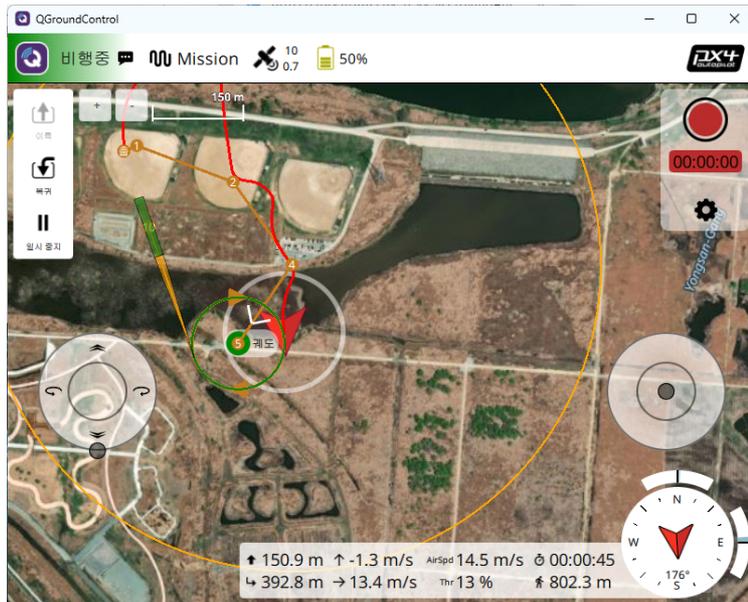
TC3



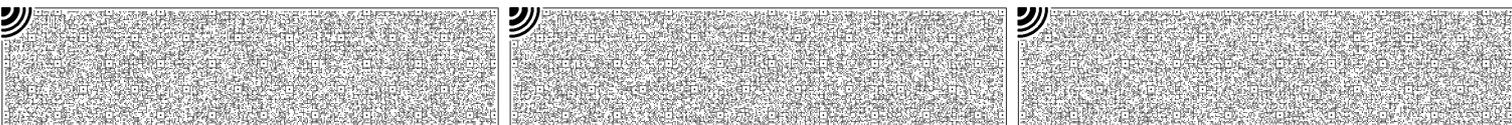
[GCS 프로그램: 2D 비행 궤적]



[로그 분석 소프트웨어: 이격거리] (1회)

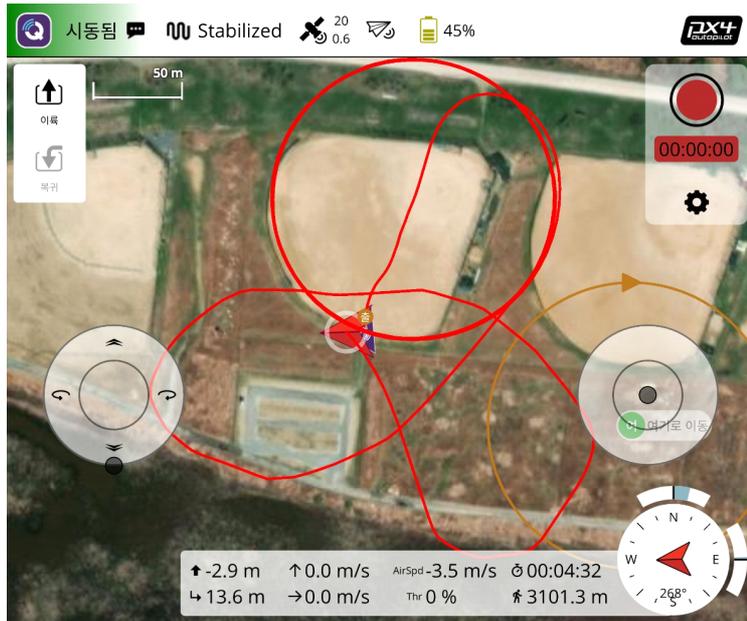


[GCS 프로그램: 2D 비행 계획]





[로그 분석 소프트웨어: 이격거리] (2회)



[GCS 프로그램: 2D 비행 궤적]



ID

상세 시험결과



[로그 분석 소프트웨어: 이격거리]

(3회)

[그림 7.1.3] 사출 후 무인기 비행 성공률 시험 세부 증빙 결과

- 무인기 착륙 지정 회수 성공률: 100% ([표 7.1.4], [그림 7.1.4] 참조)

[표 7.1.4] 시험 결과

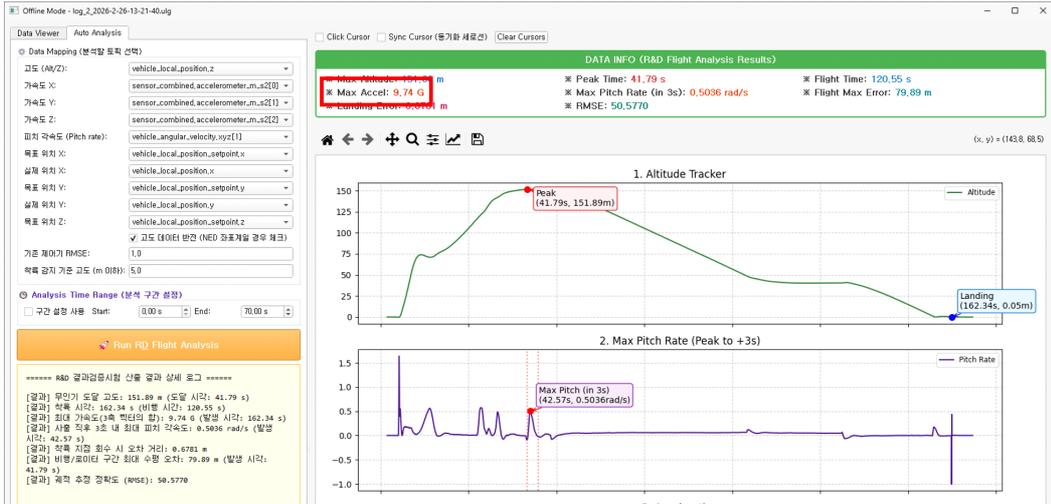
구분	목표	시험 횟수	가속도 (G)	회수 성공 여부 (O, X)	무인기 회수 성공률 (%)
무인기 착륙 지정 회수 성공률	66% 이상	1회	9.88	O	100
		2회	9.74	O	
		3회	5.1	O	

TC4

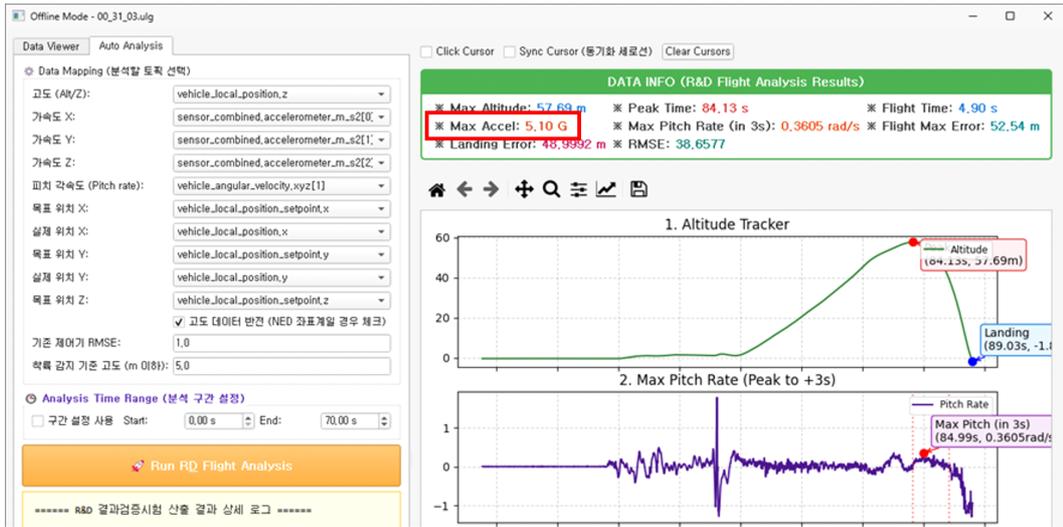


[로그 분석 소프트웨어: 가속도]

(1회)



[로그 분석 소프트웨어: 가속도] (2회)



[로그 분석 소프트웨어: 가속도] (3회)

[그림 7.1.4] 무인기 착륙 지정 회수 성공률 시험 세부 증빙 결과

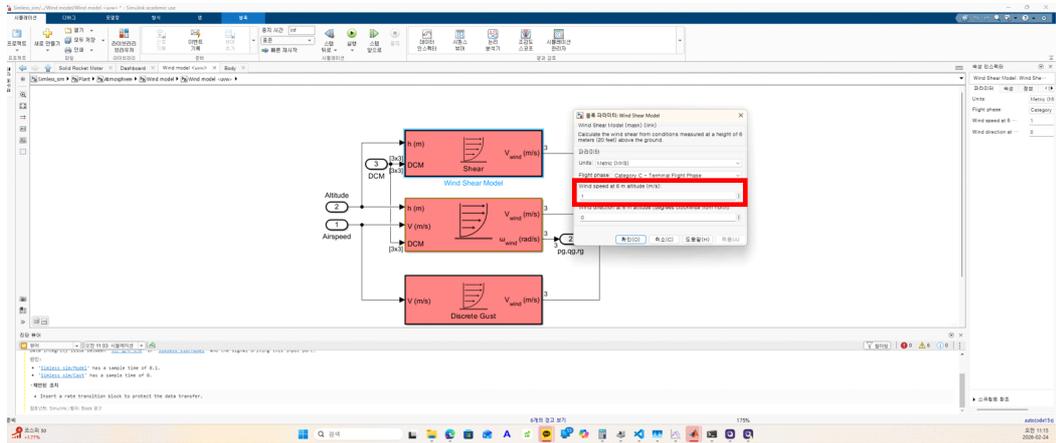
상세 시험결과

- 로켓 착륙 지점 시뮬레이션 회수 성공률: **70%** ([표 7.1.5], [그림 7.1.5] 참조)

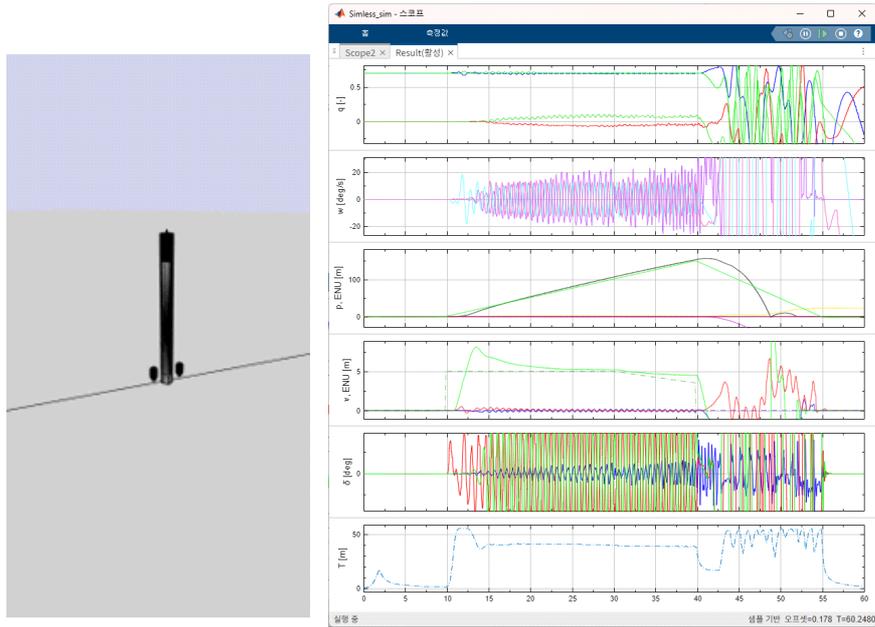
[표 7.1.5] 시험 결과

구분	목표	시험 횟수	가속도 (G)	회수 성공 여부 (O, X)	시뮬레이션 무인기 회수 성공률(%)
로켓 착륙 지점 시뮬레이션 회수 성공률	66% 이상	1회	9.07	X	70
		2회	9.69	X	
		3회	4.68	O	
		4회	9.73	X	
		5회	6.15	O	
		6회	1.18	O	
		7회	1.20	O	
		8회	4.16	O	
		9회	6.15	O	
		10회	1.25	O	

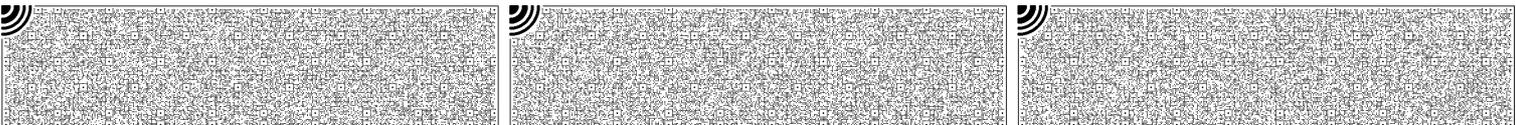
TC5

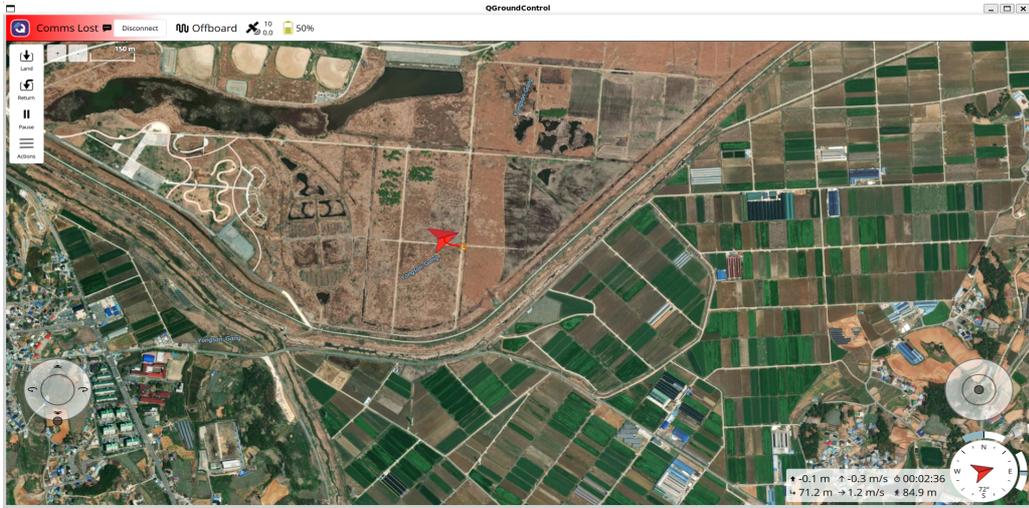


[시뮬레이터: 현장 데이터 입력]



[시뮬레이터 FC: 시뮬레이션 및 분석 결과]





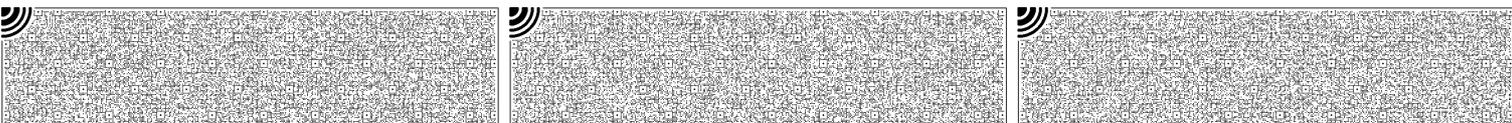
[GCS 프로그램: 시뮬레이터 수행]



[로그 분석 소프트웨어: 가속도 (1회)]

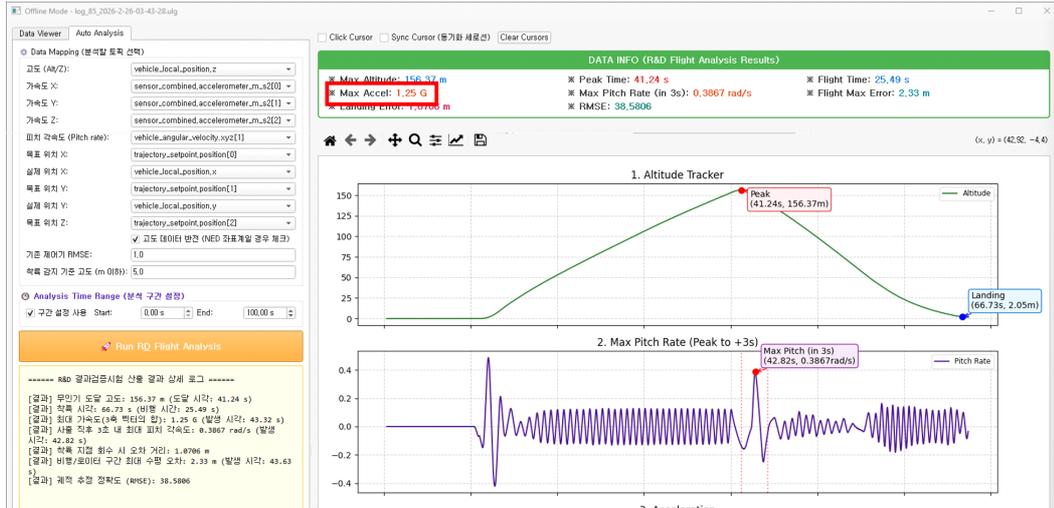


[로그 분석 소프트웨어: 가속도 (5회)]



ID

상세 시험결과



[로그 분석 소프트웨어: 가속도]

(10회)

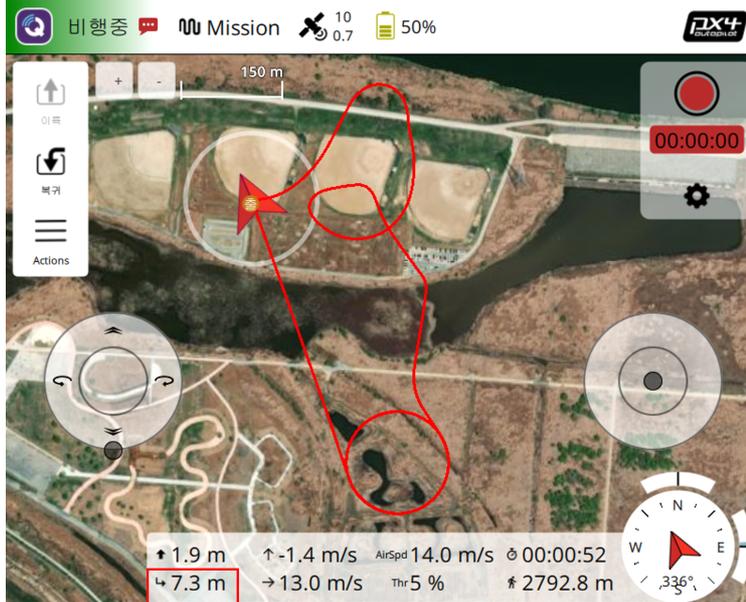
[그림 7.1.5] 로켓 착륙 지점 시뮬레이션 회수 성공을 시험 세부 증빙 결과 일부

- 무인기 착륙 지점 회수 시 위치 정확도: **평균 9.9 m** ([표 7.1.6], [그림 7.1.6] 참조)

[표 7.1.6] 시험 결과

구분	목표	시험 횟수	이격 거리(m)
무인기 착륙 지점 회수 시 위치 정확도	10 m 이내	1회	7.3
		2회	8.8
		3회	13.6
		평균	9.9

TC6



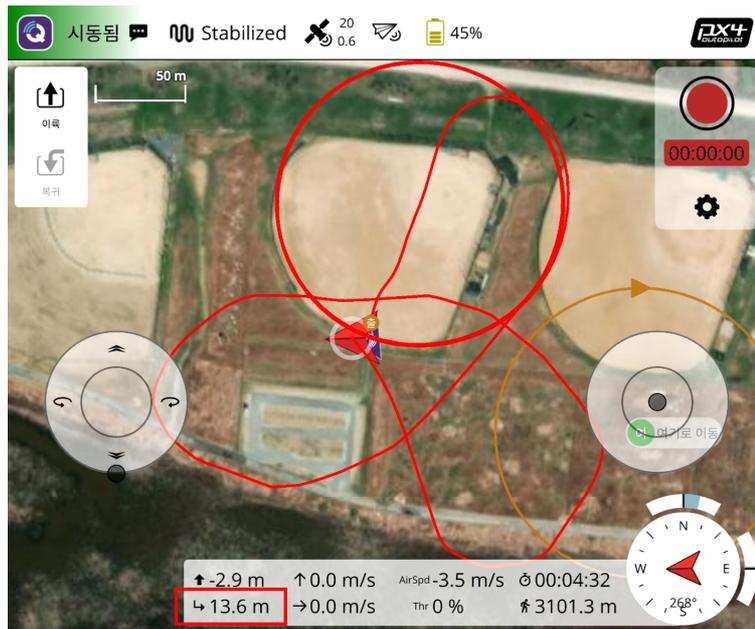
[GCS 프로그램: 이격 거리]

(1회)

ID 상세 시험결과

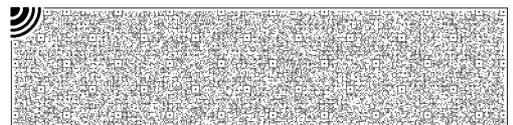
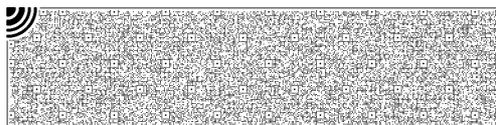


[GCS 프로그램: 이격 거리]
(2회)



[GCS 프로그램: 이격 거리]
(3회)

[그림 7.1.6] 무인기 착륙 지점 회수 시 위치 정확도 시험 세부 증빙 결과



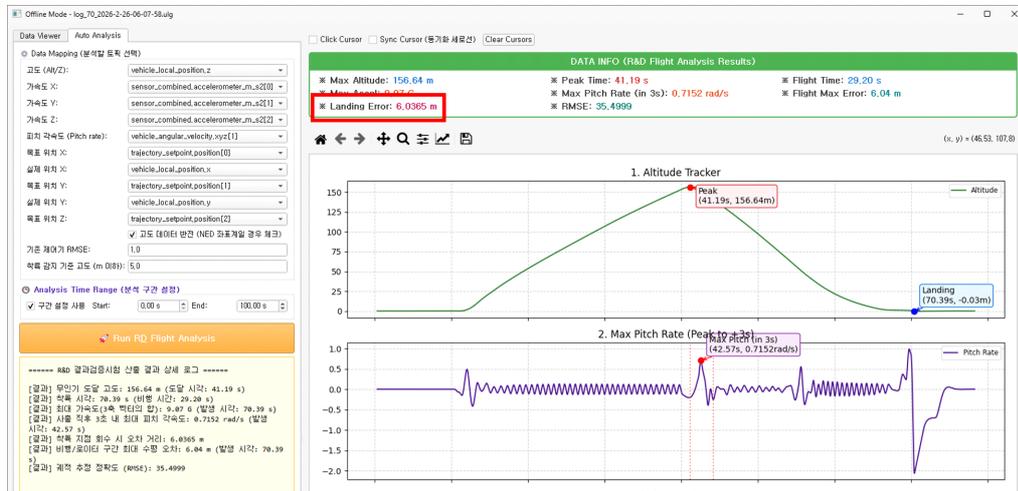
상세 시험결과

- 로켓 착륙 지점 시뮬레이션 회수 시 위치 정확도: **평균 4.06 m** ([표 7.1.7], [그림 7.1.7] 참조)

[표 7.1.7] 시험 결과

구분	목표	시험 횟수	이격 거리(m)
로켓 착륙 지점 시뮬레이션 회수 시 위치 정확도	10 m 이내	1회	6.03
		2회	5.19
		3회	5.5
		4회	5.30
		5회	5.18
		6회	0.91
		7회	1.03
		8회	5.22
		9회	5.18
		10회	1.07
		평균	4.06

TC7



[로그 분석 소프트웨어: 이격 거리] (1회)



[로그 분석 소프트웨어: 이격 거리] (5회)

상세 시험결과



[로그 분석 소프트웨어: 이격 거리]
(10회)

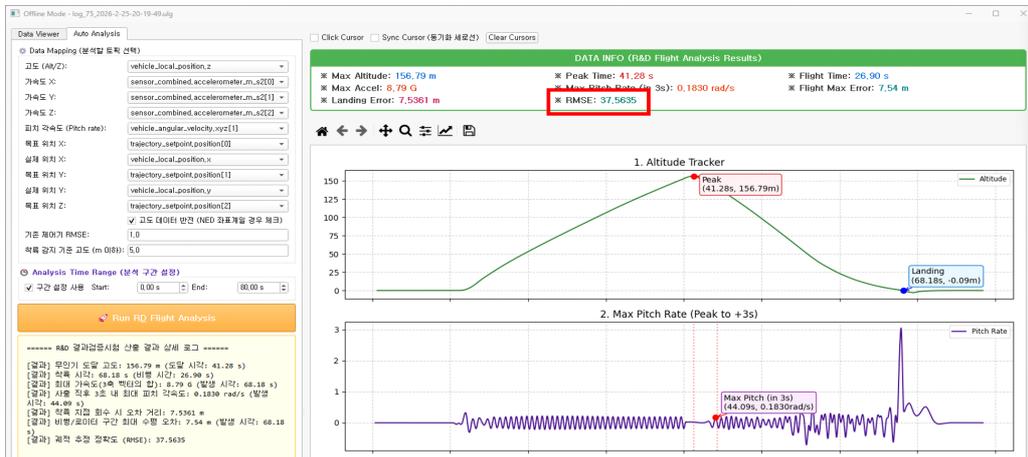
[그림 7.1.7] 로켓 착륙 지정 시뮬레이션 회수 시 위치 정확도 시험 세부 증빙 결과 일부

– 컨벡스 최적화 제어기 궤적 추종 정확도 개선율: **평균 13.14%** ([표 7.1.8], [그림 7.1.8] 참조)

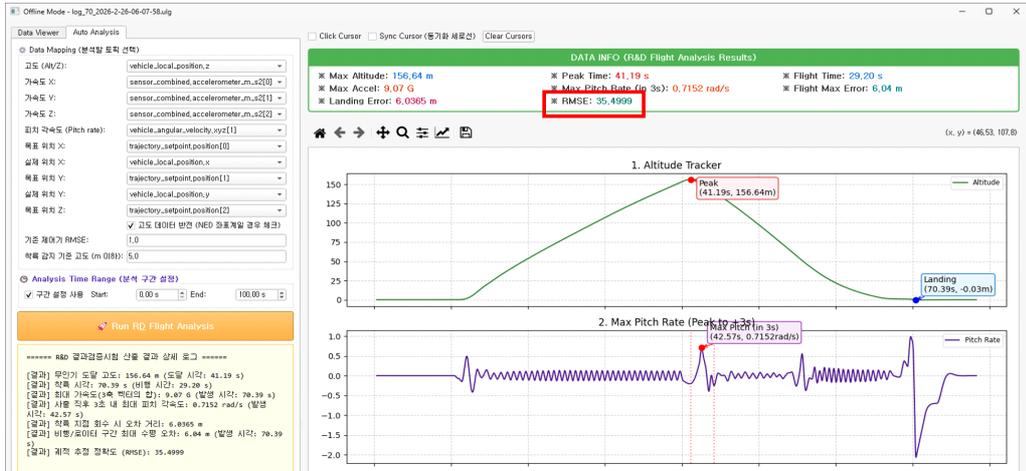
[표 7.1.8] 시험 결과

구분	목표	시험 횟수	RMSE		개선율(%)
			기존 PID 제어기	컨벡스 최적화 제어기	
컨벡스 최적화 제어기 궤적 추종 정확도 개선율	5% 이상	1회	37.56	35.49	5.51
		2회	43.27	34.08	21.23
		3회	43.54	36.01	17.29
		4회	40.97	35.67	12.93
		5회	39.85	35.56	10.76
		6회	40.99	38.42	6.26
		7회	42.95	38.61	10.10
		8회	43.31	35.68	17.61
		9회	43.30	35.35	18.36
		10회	43.54	38.58	11.39
평균					13.14

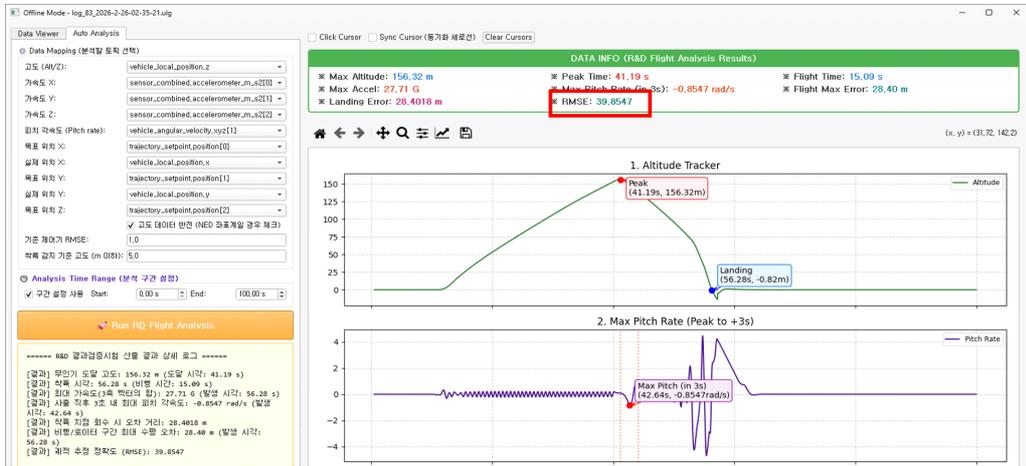
TC8



(기존 PID 제어기)



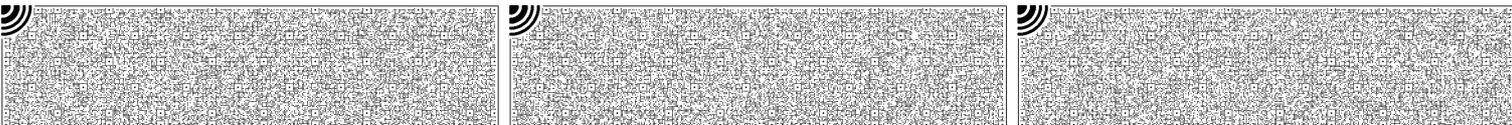
(컨벡스 최적화 제어기)
[로그 분석 소프트웨어: RMSE]
(1회)



(기존 PID 제어기)

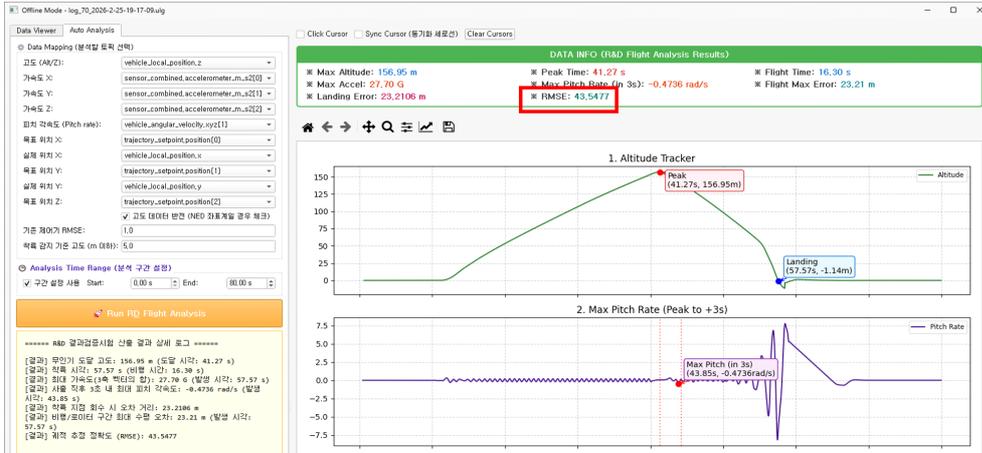


(컨벡스 최적화 제어기)
[로그 분석 소프트웨어: RMSE]
(5회)



ID

상세 시험결과



(기존 PID 제어기)



(컨벡스 최적화 제어기)

[로그 분석 소프트웨어: RMSE]

(10회)

[그림 7.1.8] 컨벡스 최적화 제어기 궤적 추종 정확도 개선을 시험 세부 증빙 결과 일부