

Original Article

<https://doi.org/10.12985/ksaa.2022.30.3.109>
ISSN 1225-9705(print) ISSN 2466-1791(online)

모듈형 플랫폼을 적용한 자율비행 무인표적기 시스템 개발

김태욱*

Development of Autonomous Aerial Target System Applying the Modular Platform

Taewook Kim*

ABSTRACT

A modular platform development technique was proposed to minimize development cost and development period by utilizing the already developed unmanned Aerial target AVT, which has been operated and verified for many years. New Mission Profile was designed and structural analysis was performed through finite element analysis (FEA) by analyzing mission requirements for visual short-range, non-visible mid-range, and long-range targets. The targets are used for guided missile anti-aircraft training. In addition, avionics systems including flight control computers for autonomous flights were developed to verify their conformance by performing launcher take-off tests with rapid acceleration changes and autonomous flight tests at a maximum speed of 300km per hour.

Key Words : Unmanned Aerial Target(무인표적기), Anti-aircraft Training(대공사격 훈련), Modular Platform(모듈형 플랫폼), Finite Element Analysis(유한요소해석), Flight Control Computer(비행제어 컴퓨터)

1. 서 론

무인대공표적기(이하 무인표적기)는 지대공(ground to air missile), 함대공(ship to air missile), 공대공(air to air missile) 등의 유도탄의 개발과정에서 유도탄의 성능을 확인 검증하는 데 사용되고, 특히 훈련 시에는 실전과 같은 효과를 얻기 위해서 필수적인 장비이다. 이러한 이유에서 선진국에서는 유도탄 개발착수 단계에서부터 무인표적기를 동시에 개발하거나 개발된 무인표적기를 선정한다[1].

현재 우리나라에서는 300km/h 이하 수동 조종 표적기(RPV: remote pilot vehicle)를 국산화 개발하여 대공사격 훈련용으로 운용 중이며, 300km/h 이상의 속도에서 자율 비행이 가능한 비가시권 근거리 무인표적기도 국내에서 개발되어 운용 중이나 기체를 제외한 비행제어컴퓨터 및 주요 항전 시스템은 수입에 의존하고 있다.

500km/h 이상의 속도로 운용 가능한 고속무인표적기는 기체를 포함한 주요 항전 시스템을 전량 수입에 의존하고 있다[2]. 국내의 무인표적기 시장은 중소기업에서 용역사업으로 진행하고 있기에 다양한 무인표적기 개발에 필요한 자동비행제어장치 및 비행체 개발비용 부담과 10km 이상의 운영반경을 고려한 비행 시험장 협조 또한 개발의 어려움으로 작용한다.

무인표적기 국산화 개발의 어려운 환경조건에도 불

Received: 22. Jun. 2022, Revised: 18. Jul. 2022,
Accepted: 26. Jul. 2022

* 정석항공과학고등학교 항공정비과 교사

연락처 E-mail : ktw-32@hanmail.net

연락처 주소 : 인천광역시 미추홀구 인화로 100

구하고 기존의 수동 조종 무인표적기는 다년간의 사격 훈련용역사업을 통해 기체의 성능이 안정화되었으며 많은 비행 용역 시험을 통하여 운용 중에 발생할 수 있는 문제점들을 개선해 왔다. 이러한 장점을 활용하면 다년간 검증된 국내 개발 무인표적기인 AVT를 플랫폼 비행체로 선정하여 개발비용과 개발기간을 최소화하면서 고속무인표적기를 개발할 수 있다.

Fig. 1은 Target Technology Ltd.에서 개발한 Banshee BTT-3와 jet80 비행체가 동일 플랫폼을 적용하고 있다는 것을 나타내며, 본 연구에서 진행하고자 하는 모듈형 플랫폼¹⁾ 개발 방법의 개념을 제시한다. 본 논문에서는 이러한 모듈형 플랫폼 개발 방법을 적용하여 비가시권 근거리 및 중거리 유도탄 대공사격 훈련용 비행체를 설계하고, 수입에 의존하고 있는 고속 무인표적기용 비행제어컴퓨터 및 주요 항전 시스템의 개발하여 Modular platform을 적용한 자율비행 무인 표적기 시스템을 개발하고자 한다.

II. 본 론

2.1 임무 형상 설계

Modular platform 개발방식을 적용하여 가시권

근거리 지대공 사격훈련, 비가시권 근거리 및 중거리 유도탄 대공사격 훈련에 운용될 수 있는 무인표적기를 개발하고자 임무 형상(mission profiles)을 정의하였다. 대공사격 훈련에 관련된 세부적인 작전운용성능(ROC)은 군 관련 자료로 문서화된 내용을 확인할 수 없었기에 국내에서 개발된 아주실업(주)의 GTT, FB, AVT 비행체와 경안전선(주)의 RAT-1, 개발 시제기[1] 비행체의 성능 및 개발목표를 바탕으로 임무 형상을 설계하였다.

설계된 임무 형상을 바탕으로 가시권 근거리 지대공 사격훈련과 비가시권 근거리 및 중거리 유도탄 대공사격 훈련을 위한 주요 분석 항목을 도출하였다. Fig. 2는 설계된 임무 형상과 주요 분석 항목을 나타낸다.

- ① 가시권 근거리 지대공 사격훈련용 비행체는 기존의 사격 구간 왕복 비행이 주된 임무이나 향후 비행 중 급기동 비행이 임무로 추가될 가능성을 고려하면 300km/h를 유지하면서 회전 반경 300m 이내의 Skid Turn 기동이 가능해야 하므로 비교적 큰 하중계수를 견딜 수 있어야 한다.
- ② 비가시권 근거리 사격훈련용 비행체는 운용 반경이 30km 이상 소요되며, 순항 복귀 시 300km/h 이상의 속도 유지와 AOB(angle of bank) 60° 이내의 정상선회가 요구되어 이 경우에도 큰 하중계수를 견딜 수 있어야 한다.

Banshee Aerial Targets platform



Banshee BTT-3 Vmax : 370km/h 90min

Wingspan 2.49m (8ft 2in)
Length 2.85-2.95m (9ft 5in-9ft 8in)



Banshee jet80 Vmax : 648km/h 45min

Wingspan 2.49m (8ft 2in)
Length 2.85-2.95m (9ft 5in-9ft 8in)

Modular Aerial Target platform



AVT Vmax : 300km/h 50min

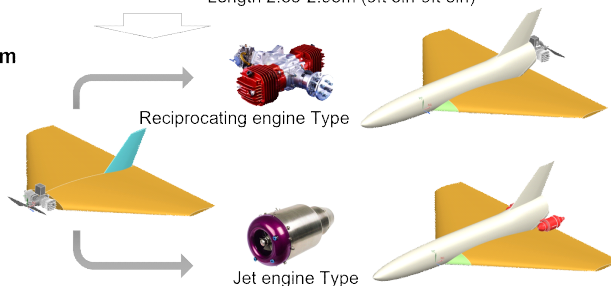


Fig. 1. Development concept of aerial target applying the modular platform

1) 모듈형 플랫폼: 스케이트보드 플랫폼이라고도 하며 자동차 산업 분야에서 활발히 적용되고 있다.

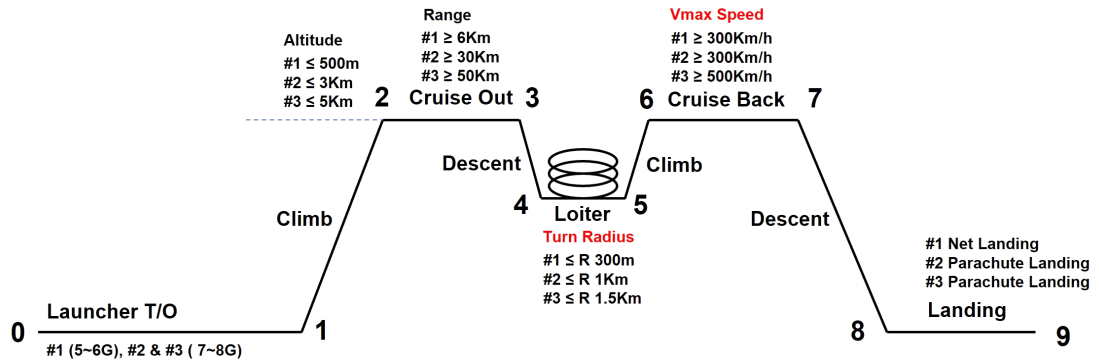


Fig. 2. Mission profile

- ③ 비가시권 증거리 사격훈련용 비행체는 운용 반경이 50km 이상 소요되고, 다양한 공대공 사격훈련을 진행하기 위해 500km/h 이상의 속도에서 반경 1km 이내의 skid turn 기동이 요구되므로 이 경우에도 큰 하중계수를 견딜 수 있어야 한다.

$$CF = m \frac{V^2}{TR} \quad (2)$$

이때 선회반경을 고려한 날개에 작용하는 하중계수는 식 (3)과 같이 계산된다.

2.2 Base Platform 하중계수

임무 형상 설계를 통해 가혹한 기동이 요구되는 조건을 추출하여 해당 비행 속도, 선회반경 및 AOB 조건에 따른 하중계수를 계산하였다.

계산에 사용된 비행체 제원은 Table 1과 같으며 수평비행 조건에서 정상선회 반경은 식 (1)과 같이 계산된다.

$$TR = \frac{V^2}{g \cdot \tan(AOB)} \quad (1)$$

기체에 작용하는 원심력은 식 (2)와 같으며,

$$\eta = \frac{L}{W} = \frac{\sqrt{\left(m \frac{V^2}{TR}\right)^2 + (mg)^2}}{mg} \quad (3)$$

위의 계산 공식으로 가시권 근거리 지대공 사격훈련용 비행체를 300km/h를 유지하면서 선회반경 300m 이내의 Skid Turn 기동이 이루어질 때 AOB 65°이상으로 비행하며 익면하중은 100kgf, 하중계수는 2.86G로 계산된다. Fig. 3은 가시권 근거리 지대공 사격훈련용 비행체(AVT)의 회전 반경과 하중계수를 나타낸다.

비가시권 근거리 사격훈련용 비행체는 300km/h를 유지하면서 AOB 60° 정상선회 비행의 경우 익면하중은 70kgf, 하중계수는 2G로 계산되며, 선회반경은 409m가 된다. Fig. 4는 비가시권 근거리 사격훈련용 비행체(AVT-300R)의 회전 반경과 하중계수를 나타낸다.

Table 1. Aerial target specification

MTOW (kg)	35
Payload (kg)	5
$W_{payload}/W_{MTOW}$	0.14
Max. Speed	300 Km/h
Length	1,790 mm
Span	2,500 mm
Height	450 mm
Airfoil	Modified MH60
Power	27.5HP engine (tractor type)

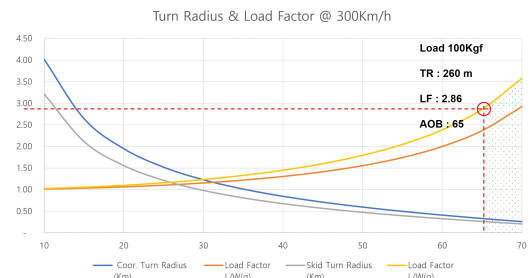


Fig. 3. AVT turn radius & load factor

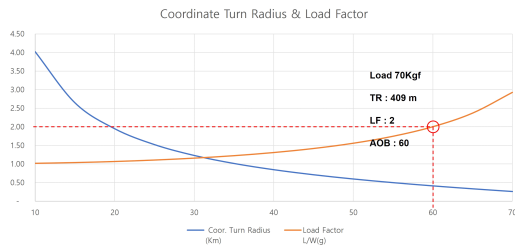


Fig. 4. AVT-300R turn radius & load factor

비가시권 중거리 사격훈련용 비행체는 500km/h를 유지하면서 선회반경 1km 이내의 skid turn 기동이 이루어질 때 AOB 55° 이상으로 비행해야 하며 익면하중은 72kgf, 하중계수는 2.1G로 계산된다. Fig. 5는 비가시권 중거리 사격훈련용 비행체(AVT-500T)의 회전 반경과 하중계수를 나타낸다.

2.3 Base Platform 유한요소해석

임무 형상의 요구 조건에 따른 Base platform의 하중계수를 분석해보면, 무풍상태에서 최대 하중계수는 2.86G이며, 외란을 고려한 항공기 설계 안전계수 1.5를 적용하면[3], AVT Base 표적기가 하중계수 4.5G를 허용할 수 있는지 구조해석을 통해 분석해야 한다. 이를 위해 AVT 비행체의 3D 도면화를 진행하였고, 구조해석프로그램을 사용하여 유한요소해석(FEA)을 진행하였다. Table 2는 유한요소해석을 진행하기 위한 조

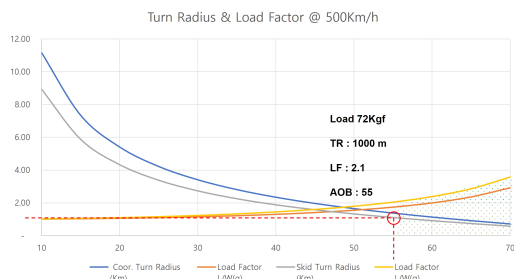


Fig. 5. AVT-500T turn radius & load factor

Table 2. FEA conditions

Fwd spar	0.25C	Plywood, Yellow Birch, 10.0T
Aft spar	0.75C	
Skin	GFRP, 7781/E181, PWX0.25T, [45]2	
Core	Urethane Foam Block, etc	
Wing loading	Total load = 1,569.6N (160kg*9.81)	

건을 나타낸다.

AVT 비행체의 Spar는 10T의 Yellow Birch Plywood를 0.25C와 0.75C에 각각 위치시키고 날개는 폼 성형 후 upper skin과 lower skin에 GFRP (7781/E181, PWX0.25T)를 도포한 형태로 구조 설계 조건을 설정하였다. 또한 최대이륙중량(MTOW)은 35kg으로 4.5G의 하중계수 작용 시 약 160kg의 Wing Loading이 작용하게 된다.

Fig. 6은 유한요소해석의 결과를 가시화한 결과이고, Table 3은 4.5G의 하중계수 작용 시 날개의 최대 변형량은 5mm이며, 이때 날개의 상하면에는 0.02MPa의 주응력이 적용되며 Margin of Safety는 0.4/0.022-1로 높게 나온다. 이를 통해 AVT 비행체는 하중계수

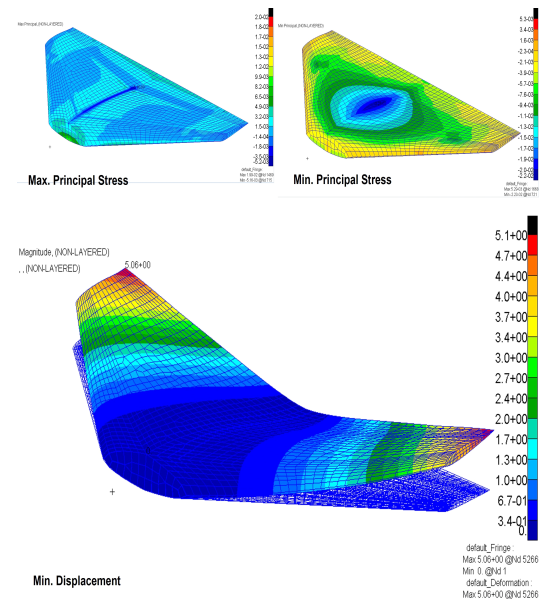


Fig. 6. Structure analysis using FEA

Table 3. FEA result

Result (Max./Min. Principal Stress)	
Max. Principal Stress (MPa)	0.02
Min. Principal Stress (MPa)	-0.02
Min MS (Margin of Safety)	
FoamCore Compressive Strength (MPa)	0.4
CoreCompressive Stress (MPa)	0.0223
MinMS	High (0.4/0.022-1)
Displacement	
Maximum Displacement	5.0 mm

4.5G에 대하여 구조건전성이 충분히 확보됨을 확인할 수 있다.

2.4 Modular Platform 표적기 구성

Modular platform의 base platform 비행체로 선정한 AVT는 비가시권 근거리 및 중거리 사격훈련용 무인표적기 개발을 위해서 탑재 장비를 고려하여 설계하였다. 가시권 근거리 무인표적기는 열추적 발생장치(heat tracing generator)의 효과를 높이기 위해 전방에 엔진을 설치하는 tractor type의 비행체를 사용하고 있지만, 비가시권 근거리 및 중거리 무인표적기는 luneberg reflector의 효과를 높이기 위해 엔진을 후방으로 배치하는 pusher type으로 비행체를 사용한다. Fig. 7은 열추적 발생장치와 luneberg reflector의 효율적인 장착 위치를 나타내고 있다.

Pusher type의 비가시권 근거리 운용을 위한 왕복 엔진 비행체와 비가시권 중거리 운용을 위한 가스터빈 엔진 비행체의 경우 luneberg reflector, 전자장비, 낙하산을 공통으로 탑재하기에 base platform에 부착되는 동체의 형태는 동일하게 설계하였으며, 엔진 마운트 부분에 설계변화를 주어 제작되는 단품 수를 최소화하도록 설계하였다. Modular platform 무인표적기의 동체 형상 설계는 해외 유사 기종의 표적기 데이터 분석을 통하여 기본설계를 진행하였다. 항속 시간 및 임무 요구 조건을 바탕으로 연료 탱크의 부피 및 전자 장비와 낙하산 사출장치 등을 고려하여 동체의 최종 Sizing을 결정하였다. Table 4는 설계된 무인표적기의 세부 사양을 나타낸다.

Fig. 8은 가시권 근거리 지대공 사격훈련용 비행체인 AVT의 최종 설계 형상을 나타낸다.

Fig. 9는 비시권 근거리 지대공 사격훈련용 비행체인 AVT-300R의 최종 설계 형상을 나타내고 있으며, Fig. 10은 비시권 중거리 지대공 사격훈련용 비행체인 AVT-500T의 최종 설계 형상을 나타낸다.

AVT-300R의 경우 엔진의 프로펠러 효율을 80% 정도로 가정하고 최대속도 300km/h에 도달하기 위한

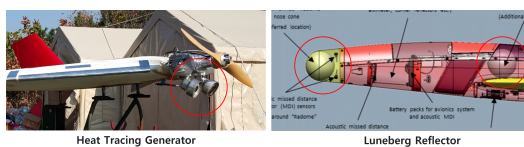





Fig. 7. Heat tracing generator and luneberg reflector system

Table 4. AVT platform sizing

	 AVT	 AVT300R	 AVT500T
Length	1,790mm	2,855mm	2,720mm
Wingspan	2,500mm		
Height	450mm	738mm	738mm
Wing area	2.5m ²		
MTOW	35kg	-	-
Aspect ratio	2.5		
Mean chord	1.12		

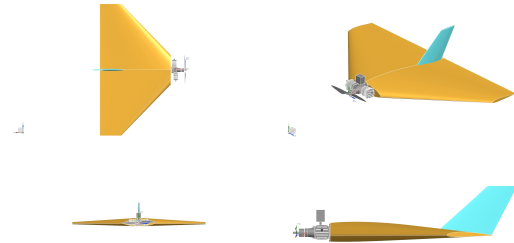


Fig. 8. AVT aerial target design

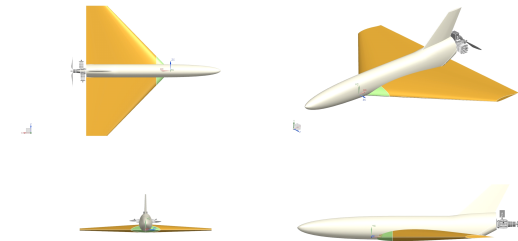


Fig. 9. AVT-300R aerial target design

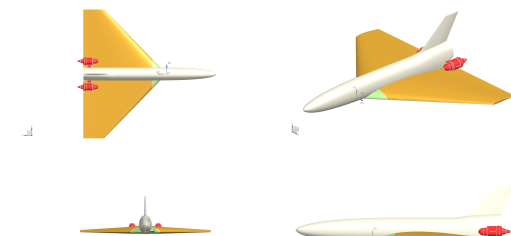


Fig. 10. AVT-500T aerial target design

필요마력을 계산하여 27.5HP의 3W-275Xi 왕복엔진을 선정하였다. 또한 AVT-500T는 최대속도 500km/h에 도달하기 위해서는 정적추력이 50kgf 이상이 요구되어 2개의 가스터빈을 병렬 장착하는 구조로 설계하였다. 최종적으로 P300-PRO 제트엔진을 선정하였다. Fig. 11은 설계에 반영된 왕복엔진과 가스터빈 엔진의 형상을 나타낸다.

2.5 항전 시스템 설계 제작

대공사격 훈련에 사용되는 유도탄의 운용환경을 고려해 볼 때 10km 이내의 가시거리를 목표로 하는 근거리 유도탄의 경우 조종사의 능력에 따라서 일부 차이는 있지만 2km 이상의 거리에서 원격 수동 조종방식으로 적 항공기나 적 유도탄을 묘사하기가 어려워, 근거리 유도탄 시험평가나 사격훈련의 효과를 기대할 수 없다. 더욱이 수십 km 사정거리가 목표인 중거리 유도탄 시험평가에는 적용 자체가 불가능해진다. 그러므로 모든 유도탄의 시험평가나 사격훈련을 위해서는 자세 센서를 이용한 반자동 비행이나 사전 임무 계획에 따라 자동 비행이 가능한 시스템을 탑재하여 적 항공기와 유도탄 등의 위협을 묘사할 수 있는 무인표적기 개발이 필요하다. AVT-300R과 AVT-300T의 경우 운용시험평가를 거쳐야 실제적인 비행 시험을 진행할 수 있기에 base platform 기체인 AVT에 개발된 항전 시스템을 장착하여 자율비행 가능 여부를 판단하였다.

2.5.1 비행제어컴퓨터 설계 제작

비행제어컴퓨터는 AHRS, GPS, RF modem, air data sensor를 포함하고 있으며 Fig. 12, Fig. 13과 같이 일체형으로 설계하였다. Fig. 14는 제작된 비행제어컴퓨터의 형상이며, 외부 인터페이스 보드를 별도로 장착하여 서보모터 및 추가적인 센서를 쉽게 연결할 수 있도록 구성하였다. 비행제어컴퓨터에 사용된 구성품 사양은 Table 5와 같다.

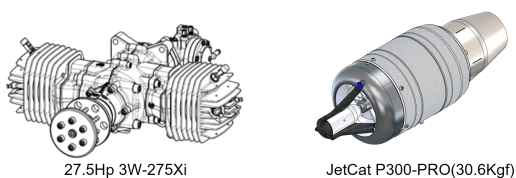


Fig. 11. Power source selection

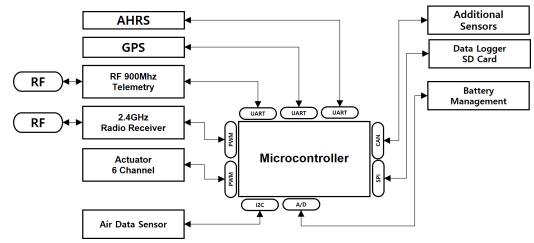


Fig. 12. FCC block diagram



Fig. 13. Flight control computer



Fig 14. Ground control system

Table 5. Specification of avionics system

MCU	ARM Cortex-M7	<ul style="list-style-type: none"> - UART 5ch - A/D 12bitX2 - 6 PWM In/out - SBUS In/Out - CAN X 1 ch - I2C X 2 ch - Buzzer
AHRS	VN100	<ul style="list-style-type: none"> - Update 50Hz
GPS	UBlox	<ul style="list-style-type: none"> - Update 5Hz
RF Modem	902~928Mhz	<ul style="list-style-type: none"> - Range 30km
Differential pressure	4525DO	<ul style="list-style-type: none"> - Range 20psi - 24bit ADC
Static pressure	MS5803	<ul style="list-style-type: none"> - Range 6bar

2.5.2 지상통제장치 설계 제작

지상통제장치에는 산업용 소형 PC, RF modem, Joystick, GPS 등을 탑재하고 5시간 운용할 수 있도록 전원 시스템을 설계하였다. 지상 통제 소프트웨어와 데이터 링크는 자체 규약을 정하고 개발되었으며, Fig. 14는 제작된 지상 통제장치의 형상을 나타낸다.

2.6 비행시험 및 항전시스템 검증

Launcher 이륙 시 시스템에는 6~8G 범위의 급격한 가속도 변화가 작용하기에 AHRS를 포함한 항전 시스템은 큰 가속도 변화를 견딜 수 있는 성능을 갖추어야 한다. 본 연구에서 제작된 비행제어컴퓨터를 AVT에 탑재하고 launcher 이륙 및 비행 시험을 통하여 급격한 가속도 변화에 항전시스템에 문제가 없음을 확인하였다. Fig. 15는 launcher 이륙을 통하여 제작된 항전시스템의 정상 작동 여부를 확인하는 모습이다.

Launcher 이륙 후 수동비행을 통하여 항전시스템의 이상 여부를 확인하였으며, 자동 비행 인가 후 사전 임무 계획에 따라 자동 비행을 성공적으로 수행하였다. Fig. 16은 자동 비행계획과 고도제어 결과를 나타낸다.

III. 결 론

본 논문에서는 다년간 검증된 국내 개발 무인표적기에 modular platform 개발 방법을 적용하여 비가시권 근거리 및 중거리 유도탄 대공사격 훈련용 비행체를 설계하고, 무인표적기용 비행제어컴퓨터 및 주요 항전 시스템의 개발을 통해 자율비행 무인표적기 시스템 개발을 진행하였다. 국내에서 개발된 아주실업(주)의 GTT, FB, AVT 비행체와 경안전선(주)의 RAT-1, 개발시제기[1] 비행체의 성능 및 개발목표를 바탕으로 임



Fig. 15. Verification of system reliability during launcher take-off

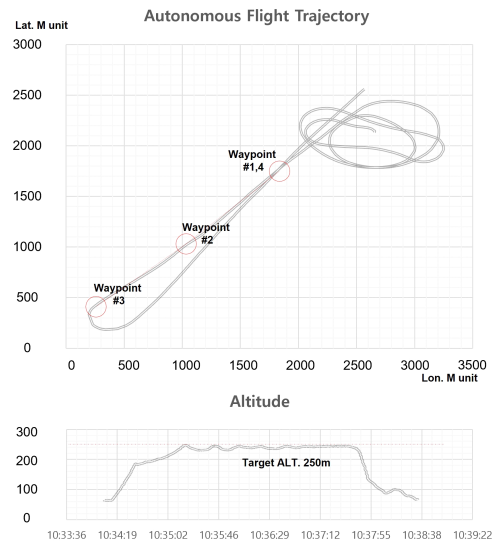


Fig. 16. Autonomous flight trajectory

무 형상을 설계하고, 요구 조건에 따른 Base platform의 하중계수를 분석하였다.

무풍상태에서의 최대 하중계수 2.86G가 요구되었으며, 외란을 고려한 설계 안전계수 1.5를 적용하여, AVT Base 표적기가 하중계수 4.5G의 구조건전성을 가졌는지를 판단하였다. 이를 위해 유한요소해석(FEA)을 진행하였으며, 해석 결과 구조건전성이 충분히 확보됨을 확인하였다. 이러한 결과를 바탕으로 Modular platform의 base platform 비행체로 AVT를 선정하고, pusher type의 비가시권 근거리 운용을 위한 왕복엔진 비행체와 비가시권 중거리 운용을 위한 가스터빈 엔진 비행체를 modular platform 개발 방법을 적용하여 설계하였다. 또한 비가시권 근거리 및 중거리 유도탄 대공사격 훈련 시 필요한 무인표적기용 비행제어컴퓨터를 포함한 항전 시스템을 개발하여, 6~8G 범위의 급격한 가속도 변화가 작용하는 launcher 이륙 시험을 진행하였으며 시스템의 신뢰성을 확인하였다. 또한 최대 300km/h의 비행 속도로 자동 비행을 성공적으로 수행하였다. 본 연구를 통하여 비가시권 근거리 및 중거리 유도탄 대공사격 훈련용 비행체 개발 시 개발비용과 개발기간을 최소화하고, 무인표적기 시스템 개발의 성공률을 높일 수 있을 것으로 기대한다.

References

1. Kim, J. S., Shin, S. C., and Kim, J. G., "A

- proposal for target system for ROKN", Journal of the KNST, 3(2), 2020, pp.88-92.
2. Kim, M. S., "Aerodynamic Analysis and Proto-Type Development of Unmanned Aircraft by Finite Element Analysis", Ministry of SMEs and Startups, 2009, pp.6-36.
 3. Kim, S. J., Lee, S. K., and Kim, T. W., "Structural safety factor for small unmanned aircraft", Journal of the Korean Society for Aviation and Aeronautics, 25(2), 2017, pp.12-17.
 4. Lee, J. H., Ryu, H., Kim J. E., and Ahn, I. K., "Development of low-cost automatic flight control system for an unmanned target drone", Journal of Advanced Navigation Technology, 8(1), 2004, pp.19-25.