

기본체계모델 기반 해상도 별 유도 무기체계 컴포넌트 설계

문규진 · 안유영 · 정의택 · 유창경[†]

Components Design for Guided Weapon System according to Resolution based on Base System Model

Kyujin Moon · Yu-Young An · Ui-Taek Jeong · Chang-Kyung Ryoo[†]

ABSTRACT

An AddSIM(Adaptive distributed and parallel Simulation environment for Interoperable and reusable Models) is developed to construct a composite environment that can be used in the overall stage from military demand analysis to test and evaluation. In addition, a base system model(BSM), which is a component model of the weapon system with standardized hierarchies, has been developed. This paper describes the critical design of BSM for the guided weapon system that can be operated in AddSIM. The guided weapon system BSM is designed for reusability and interoperability, and to have the same interface for assembly, even if the subcomponents have different resolution. Then, each subcomponent is defined and implemented according to the component resolution classification scheme. Finally, Combinations of subcomponents have been used to construct the guided weapon system of various resolution and the performance is compared and analyzed through simulation.

Key words : AddSIM, BSM, Guided weapon system, Component Resolution

요약

군 요구분석부터 시험평가까지 전반적인 단계에 활용 가능한 합성 전장 환경을 구성하기 위해 컴포넌트 기반 체계모의환경(AddSIM)이 개발되었다. 또한 AddSIM을 효과적으로 활용하기 위해 표준화된 계층구조를 가지는 무기체계 컴포넌트 모델인 기본체계모델(BSM)이 개발되었다. 본 논문에서는 AddSIM에서 운용 가능한 유도 무기체계의 BSM 상세 설계에 관해 기술한다. 유도 무기체계 BSM은 재사용성과 상호 운용성을 고려해 설계되었으며 조립성을 고려해 상이한 해상도의 하위 컴포넌트에 대해서도 동일한 인터페이스를 갖도록 설계되었다. 그리고 컴포넌트 해상도 분류 체계에 따라 각 하위 컴포넌트의 해상도 별 컴포넌트를 정의 및 구현했다. 최종적으로 하위 컴포넌트 조합을 통해 다양한 해상도의 유도 무기체계 모델을 구성하였으며 시뮬레이션을 통해 성능을 비교 분석했다.

주요어 : 컴포넌트 기반 체계 모의 환경, 기본체계모델, 유도 무기체계, 컴포넌트 해상도

1. 서론

현재 한국은 변화된 안보환경과 미래전장 등 새로운

전장 상황의 변화에 따라 무기체계에 대한 기능 요구가 다양화·복잡화 되고 있다. 이러한 요구를 만족하는 무기체계를 획득하기 위해서는 연구개발, 시험평가, 획득 등 일련의 과정이 장기간에 걸쳐 큰 비용이 소모된다. 제한된 자원 하에 신속하고 저렴하게 무기체계를 획득하기 위해 국방 M&S(Modeling & Simulation) 기법·도구를 이용한 모의기반 획득(SBA, Simulation Based Acquisition) 개념이 도입되었다(Kim, 2011).

국방 M&S는 가상의 현실적인 상황에서 둘 또는 그 이상의 적대세력 간의 군사적 상황을 규칙이나 제원 및 절차를 사용하여 가상적으로 모의하는 모의군사작전인

* 본 연구는 국방과학연구소의 지원(계약번호: UD160072BD)으로 수행된 위탁과제 결과의 일부이며, 지원에 깊이 감사드립니다.

Received: 27 December 2018, Revised: 3 September 2019, Accepted: 5 September 2019

[†] Corresponding Author: Chang-Kyung Ryoo

E-mail: ckryoo@inha.ac.kr

Aerospace engineering Dept., Inha University, Incheon, Korea

위게임 영역에서 출발하여 현재에는 국방 기획관리 체계상의 소요제기, 무기획득 및 전력평가 업무, 군의 교육훈련 업무까지 과학적으로 지원하는 도구 및 수단을 총칭하는 개념으로 확대 적용되었다(Park, 2015). 이렇게 다양한 목적을 가지고 넓은 범위에 적용되고 있는 국방 M&S는 적용분야, 작전형태, 모의 수준에 따라 Fig. 1과 같이 분류되며 국내·외 다양한 국방 M&S 프로그램이 개발·운영 중이다.

COBRA(COMmercial BRAwler)는 미 공군이 사용하는 교전급 모델로 무기체계의 효과지수(MOE, Measure Of Effectiveness), 손실률(Loss Rate), 손실교환비(LER, Loss Exchange Ratio) 등을 산출할 수 있으며 필요에 따라서는 세부적인 분석이 가능하다(Jeon et al, 2007). 하지만 시물레이션을 구성하기 위해서는 다른 분석모델과는 다른 세부적인 입력 자료를 필요로 하기 때문에 조립성 및 재사용성이 떨어진다. SADM(Ship Air Defense Model)과 EADSIM(Extended Air Defense Simulation)은 외부 연동을 위한 인터페이스를 제공하고 제공되는 모델에 대해 다양한 시물레이션이 가능하지만, 단일 모델은 여전히 특정 무기체계에 국한되어 사용이 제한적이다(Lee et al, 2015; Jang et al, 2013). OneSAF(One Semi-Automated Forces)는 미 육군의 조립형, 개체 기반 시물레이션 체계로 훈련·연습 및 군사작전(TEMO, Training, Exercises, and Military Operations), 첨단개념연구(ACR, Advanced Concepts and Requirements), 연구개발 및 획득(RDA, Research, Development, and Acquisition)과 같은 다양한 M&S 영역에 대한 통합 시물레이션 서비스를 제공한다. 공통적으로 사용하는 모델을 컴포넌트로 제공하여 재사용이 가능하도록 지원한다(Han et al, 2014). 그러나 보안상의 이유로 내부 중요 데이터 및 알고리즘에 관한 정보를 확인할 수 없어 재사용 여부를 판단하는데 어려움이 따른다. JMSS(Joint Modeling and Simulation System) 또한 객체 단위 모델의 표준화와 연동을 통해 체계 통합 수준의 모의 분석을 지원하며 공학급 및 교전급 분석을 위한 도구를 제공하여 무기체계 획득단계에서 활용 가능하며 시물레이터 내의 컴포넌트에 대한 재사용성 및 확장성, 상호 운용성을 제공한다(Kim et al, 2011). 하지만 공학급/교전급 혼합 시물레이션(Hybrid Simulation)에 특화된 서비스를 지원하고 있지 않다.

국내에서는 화랑 21, 전투 21, 청해, 창공 등의 전구급 국방 M&S 도구가 훈련용으로 사용 중이다. 물론 각 기관별로 필요에 따라 공학급의 M&S 모델을 개발하고 있지만, 일관성이 없어 재사용성이 불가능하고 효과/취약성

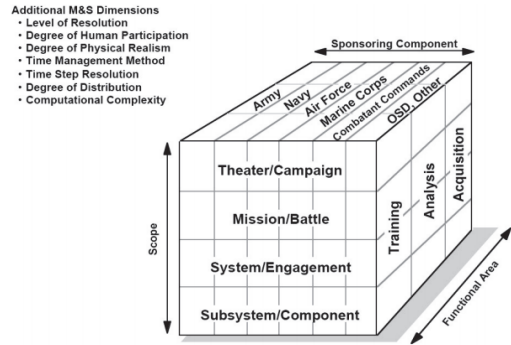


Fig. 1. Defense M&S classification(Kim et al., 2007)

과 관련된 합리적 표준화 자료체계 부재로 서로 상이한 데이터 체계 사용으로 분석 결과의 신뢰도가 떨어진다.

이와 같은 문제를 해결하고자 국방과학연구소에서는 분산·병렬 환경에서 개별 무기체계 및 하위 구성품 모델을 조립·재구성하여 교전 시물레이션을 수행할 수 있는 국방 M&S AddSIM(ADaptive Distributed parallel Simulation environment based on Interoperable and reusable Models)을 개발했다. AddSIM은 해외의 국방 M&S 도구를 참조모델로 분석하여 개발한 기본체계모델(BSM, Base System Model)을 이용한 플러그 앤 플레이 방식을 통해 조립성과 재사용성을 제공한다(Kim et al, 2015; Lee et al, 2011). BSM은 AddSIM 내에서 무기체계별로 공통으로 요구되는 공통 데이터에 관한 공유 데이터(Shared Data), 무기체계의 물리적 특성을 다루는 물리 모델(Physics Model), 무기체계가 운용 중에 전락·전술에 대한 인적요소의 논리적 특성을 다루는 논리 모델(Logics Model)로 구성된다. 최근에는 각 무기체계 별로 BSM 구조를 갖는 하위 컴포넌트를 구성하는 연구가 수행 중에 있으며 유도 무기체계 역시 BSM 구조를 기반으로 조립성 및 재사용성을 제공하기 위한 유도 무기체계 BSM 구조 설계와 하위 컴포넌트 구성 및 컴포넌트 해상도 설계에 관한 연구가 수행되었다(Park et al, 2017, An et al, 2018).

본 논문에서는 유도 무기체계 BSM을 구성하는 하위 컴포넌트 상세 설계를 소개한다. 선행 연구에서 설계된 유도 무기체계 BSM 구조와 컴포넌트 해상도 분류 기준을 기반으로 하였으며 조립성 및 재사용성을 높이기 위해 일부 수정했다. 상세 설계가 완료된 하위 컴포넌트를 조합하여 최종적으로 BSM 기반의 유도 무기체계 모델을 구성하였으며 시물레이션을 통해 해상도 별 BSM의 성능을 검증하였다. 본 논문의 구성은 다음과 같다. 2장

에서 유도 무기체계 BSM에 대해 기술하고, 3장에서는 유도 무기체계 BSM의 물리 모델 상세 설계 내용을 설명한다. 4장에서는 해상도 별로 완성된 유도 무기체계 BSM을 이용한 시뮬레이션을 수행하여 결과를 비교 분석 하였으며 5장에서는 최종 결론에 관해 서술한다.

2. 유도 무기체계 BSM

유도 무기체계 BSM은 기본적으로 국방과학연구소에서 개발한 BSM의 구조와 데이터 분류 체계를 따른다. BSM은 공유 데이터, 논리 모델, 물리 모델로 구성되어 있으며 공유 데이터는 세부적으로 정보(Information), 속성(Attribute), 파라미터(Parameter)로 구성되어 있다. 정보는 유도 무기체계 시뮬레이션 중 표적이 되는 타 무기체계의 속성 또는 파라미터에서 필요한 데이터를 받는다. 속성은 정보와는 반대로 타 무기체계에서 유도 무기체계 시뮬레이션 수행 결과를 받아갈 수 있도록 데이터를 제공한다. 파라미터는 유도 무기체계가 갖는 고유 특성 데이터를 의미하며 시뮬레이션 설정 단계에서 입력이 필요

하다. 논리 모델은 전략·전술에 대한 인적 요소의 논리적 행위에 따른 무기체계의 운용을 나타내는데 유도 무기체계의 경우 발사 후 일반적으로 인적요소의 개입 없이 정해진 알고리즘에 의해 작동된다. 따라서 유도 무기체계 BSM의 논리 모델은 타 무기체계로부터 발사 명령인가 시 초기화를 거쳐 발사를 수행하는 발사(Launch) 컴포넌트와 비행 중 타 무기체계와의 통신을 모의하는 통신(Communication) 컴포넌트로 구성한다. 물리 모델은 일반적인 유도 무기체계 분석을 통해 9개의 하위 컴포넌트로 구성하였다. BSM의 데이터 분류 체계는 Fig. 3과 같다. 여기서 공유 데이터는 앞서 설명한 바와 같으며 유도 무기체계의 모든 컴포넌트에서 자유롭게 읽고 쓸 수 있다. 데이터는 하위 컴포넌트 내부에서 공유 데이터와 같은 역할을 수행한다. 인터페이스는 컴포넌트 사이에서 직접적으로 데이터를 주고받기 위한 연결 관계를 나타내며 해상도와 상관없이 동일 컴포넌트의 경우 동일한 데이터를 인터페이스로 출력하도록 설계했다. 대신 입력 인터페이스와 출력 인터페이스를 연결시키는 과정에서 해상도 별 필요한 데이터만 파싱해 사용하도록 설계해 조

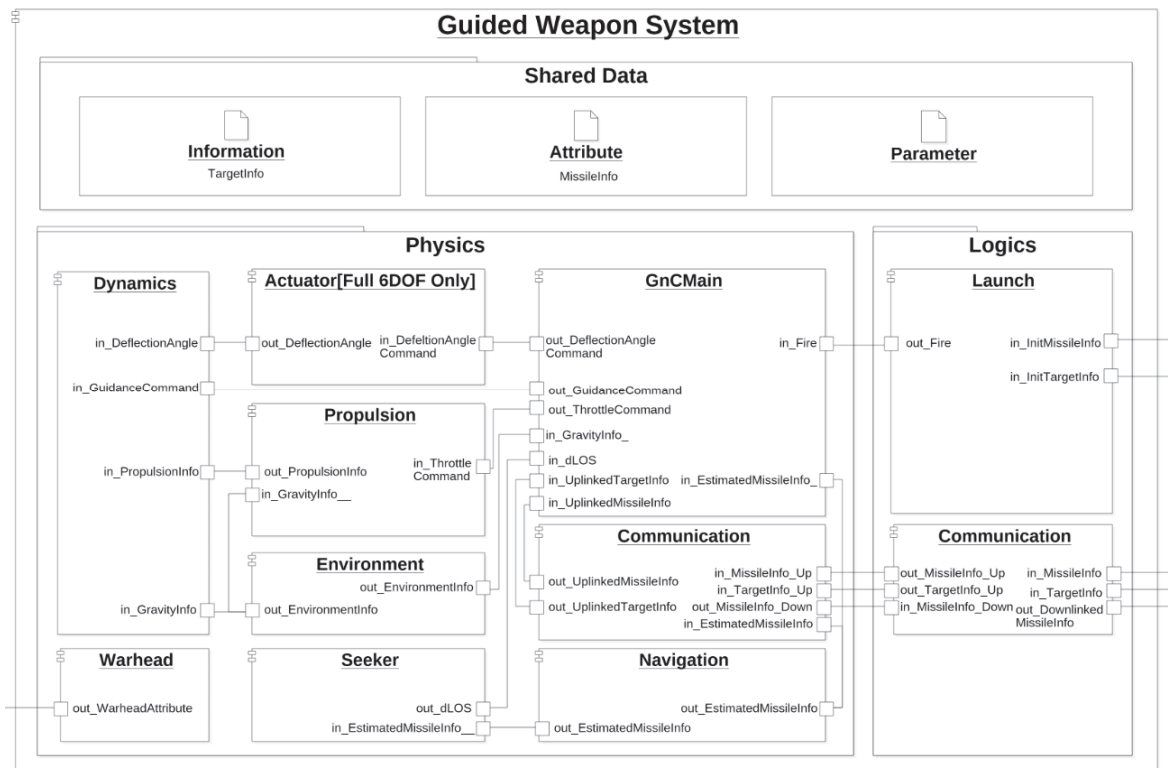


Fig. 2. Guided weapon system BSM architecture

립성을 높였다. 해상도 별 인터페이스를 통한 전달이 요구되는 하위 컴포넌트 입력 데이터에 대한 자세한 정보는 부록의 Table 11과 같다. 최종적으로 설계된 유도 무기체계 BSM은 Fig. 2와 같다.

국방 M&S는 사용 용도에 따라 요구되는 무기체계의 최소 해상도가 상이하다. 훈련용으로 사용할 때는 연합 무기체계 정도의 낮은 해상도를 갖는 전구급 시뮬레이션부터 활용 가능하지만 무기체계 연구개발·획득을 위해서는 공학급의 고해상도 시뮬레이션이 요구된다. 유도 무기체계 BSM의 경우 물리 모델의 하위 컴포넌트 해상도를 조절하여 전체 무기체계의 해상도를 결정할 수 있다. 유도 무기체계 하위 컴포넌트의 해상도는 Fig. 4와 같이 모델링 충실도(Fidelity)에 따라 4단계로 분류 가능하며 그 기준은 Table 1과 같다. 해상도가 높을수록 모델은 실제 시스템의 특성을 잘 반영하는 반면 시스템의 복잡도 증가로 인한 연산량 증가로 시뮬레이션 속도가 느려

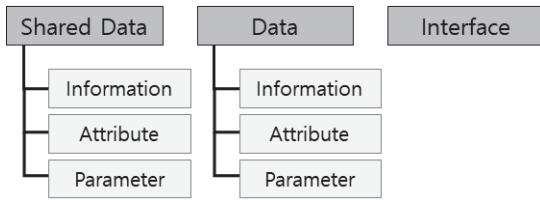


Fig. 3. Data classification of BSM(Kim et al., 2007)

Resolution	Low	Medium	High	Specific
Fidelity				High
Simulation Speed	Fast			

Fig. 4. Components resolution classification

Table 1. Components resolution classification criteria

Low	- The simplest model to implement functionality of component - Ideal state assumption
Medium	- Simple error factor reflected such as delay, bias and random walk.
High	- Major characteristics of system reflected - Major parameters that have a large impact on system performance reflected
Specific	- System detail model reflected - Various parameters throughout system reflected

진다. 이때 해상도가 다르더라도 동일 컴포넌트의 입·출력 인터페이스는 같아야 한다. 유도조종(Guidance & Control) 컴포넌트와 같이 물리적 요소를 포함하지 않는 소프트웨어적인 요소의 하위 컴포넌트는 분류 기준에 따라 저해상도(Low Resolution) 모델로 간주한다.

본 논문에서는 고해상도(High Resolution)의 모델까지의 상세 설계에 관해 기술하였으며 그 이상의 해상도를 갖는 상세(Specific Resolution) 모델의 경우는 사용자가 컴포넌트의 인터페이스를 고려해 설계하여 추가로 사용할 수 있다.

3. 물리 모델 컴포넌트 상세 설계

3.1 동역학 모델 컴포넌트

동역학 모델 컴포넌트는 유도 무기체계에 작용하는 힘을 계산하고 이에 따른 운동을 모의하는 기능을 하며 해상도 별 컴포넌트 정의 및 특징은 Table 2와 같다. 공통으로 항공우주공학 분야에서 널리 사용되는 지구 중심 지구 고정(ECEF, Earth-Centered Earth-Fixed) 좌표계, 항법(NED, North-East-Down) 좌표계 등과 좌표계 간의 변환관계를 사용하였고 유도 무기의 위치와 자세 등의 상태변수를 계산해 공유데이터 속성에 전달한다.

Low, Medium 해상도의 동역학 모델은 식 (1)과 같은 항법 방정식을 계산해 유도 무기의 위치를 산출한다.

$$\begin{aligned}
 \dot{v}_N &= -v_E(\dot{l} + 2\Omega_E)\sin\lambda - \dot{\lambda}v_D - \zeta g + \Sigma f_N \\
 \dot{v}_E &= v_N(\dot{l} + 2\Omega_E)\sin\lambda + v_D(\dot{l} + 2\Omega_E)\cos\lambda - \eta g + \Sigma f_E \\
 \dot{v}_N &= -v_E(\dot{l} + 2\Omega_E)\cos\lambda - \dot{\lambda}v_N + g + \Sigma f_D \\
 \dot{\lambda} &= \frac{v_N}{r_\lambda + h} \\
 \dot{\lambda} &= \frac{v_E}{(r_l + h)\cos\lambda} \\
 \dot{h} &= -v_D
 \end{aligned} \tag{1}$$

여기서 $v_N, v_E, v_D, \Sigma f_N, \Sigma f_E, \Sigma f_D$ 는 항법 좌표계에 서의 유도 무기 속도와 외력에 의한 가속도, λ, l, h 는 유도 무기의 위도, 경도, 고도, r_λ, r_l 은 자오선 곡률반경(Radius of Curvature of the Meridian)과 횡 곡률반경(Radius of Curvature of the Prime Vertical), Ω_E 는 지구 자전 각속도, g 는 중력 가속도, ζ, η 는 중력의 섭동 요소를 나타낸다. 본래 유도 무기의 자세는 모멘트 방정식 연산을 통해 계산할 수 있는데 Low, Medium 해상도의 경

Table 2. Definition and characteristics of dynamics components by resolution

Low	<ul style="list-style-type: none"> - 3-DOF - Considering coincidence between velocity and attitude - Considering drag coefficient and acceleration limit
Medium	<ul style="list-style-type: none"> - Pseudo 6-DOF - Considering well designed autopilot - Considering lift & drag coefficient and angle of attack limit
High	<ul style="list-style-type: none"> - Full 6-DOF - Considering physical quantity - Considering major aerodynamic coefficients

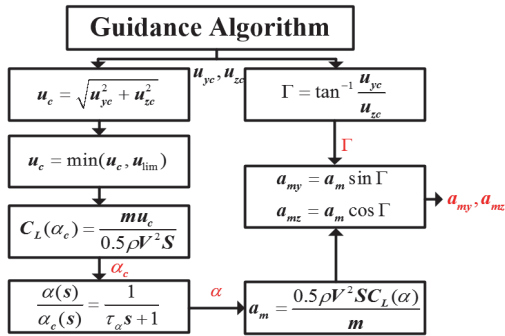


Fig. 5. Flow diagram for the acceleration calculation

우 가정을 통해 가상의 자세를 산출한다. Low 해상도는 자세와 속도 벡터가 일치한다고 가정하고 항법 방정식에서 계산된 속도를 이용한다. Medium 해상도는 유도 무기의 조종 시스템이 잘 설계되었다는 가정하에 Fig. 5와 같이 유도 명령으로부터 산출된 요구 받음각에 지연을 적용하여 자세를 산출한다.

High 해상도는 식 (1)의 힘 방정식을 식 (2)로 대체하여 유도 무기의 위치를 산출한다. 또한 식 (3)과 같이 표현되는 회전 방정식을 계산해 자세를 산출한다. 여기서 C_E^B , C_B^N 는 ECEF 좌표계에서 동체 좌표계, 동체 좌표계에서 항법 좌표계로의 좌표변환 행렬, u , v , w , Σf^B 는 동체 좌표계에서의 유도 무기 속도와 외력에 의한 가속도, p_E , q_E , r_E 는 ECEF 좌표계에 대한 동체 좌표계의 각속도, x_E , y_E 는 ECEF 좌표계에서 유도 무기 위치, w_{IB}^B 는 관성 좌표계서 바라본 유도 무기의 동체 각속도, M , I 는 유도 무기의 모멘트와 관성량을 나타낸다. Table 3은 동역학 모델 컴포넌트 해상도 별 속성의 특징을 나타낸다.

$$\begin{bmatrix} \dot{v}_N \\ \dot{v}_E \\ \dot{v}_D \end{bmatrix} = C_B^N \begin{bmatrix} \dot{u} \\ \dot{v} \\ \dot{w} \end{bmatrix} \quad (2)$$

$$= \begin{bmatrix} \Sigma f_x^B + r_E v - q_E w \\ \Sigma f_y^B + p_E w - r_E u \\ \Sigma f_z^B + q_E u - p_E v \end{bmatrix} + C_E^B \begin{bmatrix} (2\dot{y}_E + \Omega_E^x \dot{x}_E) \Omega_E \\ -(2\dot{y}_E + \Omega_E^x \dot{x}_E) \Omega_E \\ 0 \end{bmatrix}$$

$$w_{IB}^B = I^{-1}(M - w_{IB}^B \times I w_{IB}^B) \quad (3)$$

Table 3. Attribute characteristics according to the resolution of the dynamics components

(○ : Calculated, △ : Assumed, × : Not available)

	Low	Medium	High
Position	○	○	○
Velocity	○	○	○
Attitude	△	△	○
Angular velocity	△	△	○
Angle of attack	×	△	○

3.2 탐색기 모델 컴포넌트

탐색기 모델 컴포넌트는 설정된 탐색기 작동 시점에 전원이 켜져 표적이 Lock-on 가능한 거리 내에서 시야각 (FOV, Field Of View) 내부에 있을 때 Lock-on을 수행하며 이후 표적에 대한 유도 무기의 시선 각 변화율을 산출한다. RF(Radio Frequency) 탐색기 모델의 해상도 별 컴포넌트 정의 및 특징은 Table 4와 같다. Low 해상도의 탐색기 모델은 유도 무기와 표적의 상대 거리와 상대 속도를 이용해 식 (4)와 같이 이상적인 시선 각을 산출한다. 여기서 $\vec{\sigma}_{LOS}$ 는 시선 각, \vec{R}_M , \vec{R}_T , \vec{V}_M , \vec{V}_T 는 각각 유도 무기와 표적의 위치/속도 벡터를 나타낸다.

$$\vec{\sigma}_{LOS} = \frac{\vec{R}_{TM} \times \vec{V}_{TM}}{|\vec{R}_{TM}|^2} \quad (4)$$

$$\begin{cases} \vec{R}_{TM} = \vec{R}_T - \vec{R}_M \\ \vec{V}_{TM} = \vec{V}_T - \vec{V}_M \end{cases}$$

Medium 해상도의 탐색기 모델은 Fig. 6과 같이 gimbal stabilization dynamics가 고려된 탐색기 루프를 이용해 시선 각을 산출한다. 여기서 잡음 n 과 signal processor

Table 4. Definition and characteristics of RF seeker components by resolution

Low	- Ideal LOS rate - Using relative state between guided weapon and target
Medium	- Considering delay due to gimbal dynamics
High	- Considering delay due to gimbal dynamics - Considering delay due to signal processing - Considering noise reflected with RF signal characteristics

Table 5. Definition and characteristics of propulsion components by resolution

Low	- Ideal thrust - One or two constant mass flow rate
Medium	- Considering combustion efficiency - Time variant mass flow rate
High	- Considering combustion environment - Considering grain shape

을 조절하여 연소하는 엔진 컴포넌트로 구성된다. 본 논문에서는 모터 컴포넌트의 모델링에 대해 기술하였으며 해상도 별 컴포넌트의 정의 및 특징은 Table 5와 같다. Low, Medium 해상도의 추진 모델은 동일한 식 (6)을 이용해 추력과 질량을 계산하며 질량 변화에 따라 무게중심과 관성량을 선형 보간하여 계산한다.

$$T = I_{sp} \dot{m} g \eta$$

$$m = m_0 - \int_0^t \dot{m} dt \tag{6}$$

여기서 I_{sp} 는 비추력, m_0 는 유도 무기의 초기 질량, \dot{m} 은 추진제의 질유량, η 는 연소 효율을 나타낸다. 유도 무기의 질량은 추진제의 질유량에 따라 계산된다. Low 해상도의 경우 1개 또는 2개의 일정한 질유량을 파라미터로 설정하여 단일 또는 이중 추력이 적용 가능하도록 했고 연료 효율을 1로 고정했다. Medium 해상도의 경우 추진제 grain 형상에 따른 연소 면적 변화로 인한 추력 변화를 모사하기 위해 질유량을 시간의 함수로 입력하도록 설계했고 연료 효율을 설정할 수 있도록 했다.

High 해상도의 추진 모델은 연소실 압력에 영향을 받는 모터의 특성을 반영하도록 설계했다. 연소실 압력에 따라 연소 단계를 3단계로 나눴으며 추진제 grain 형상에 따른 연소 면적 변화를 직접 시간에 대한 함수로 설정하도록 했다. High 해상도의 추력과 추진제 질유량은 부록의 식 (7)을 이용해 계산한다.

3.4 항법 모델 컴포넌트

항법 모델은 항법 방정식과 회전 방정식을 계산하여 유도 무기의 상태정보 추정 값을 산출해 유도조종 및 탐색기 모델에 제공한다. 물리 모델과는 다르게 항법 방정식과 회전 방정식을 계산하는데 필요한 외력에 의한 가속도와 각속도 성분을 IMU(Inertial Measurement Unit)에 의한 측정값으로 대신한다. 항법 모델의 해상도 별 컴

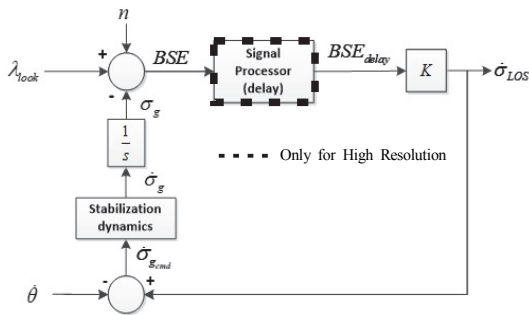


Fig. 6. Seeker loop architecture

에서 발생하는 지연요소를 반영할 경우 High 해상도의 탐색기 모델이 된다. 잡음은 신호 대 잡음비를 의미하는 SNR로 표현되는 표준편차에 대해 정규분포 형태로 나타내며 다음의 수식 (5)와 같다(Martino, 2012).

$$n = N(0, \frac{K^2}{SNR})$$

$$where SNR = \frac{P_t G^2 \lambda^2 \sigma}{(4\pi)^3 R^4 k T B_r F_r} \tag{5}$$

여기서 K 는 게인, σ 는 표적의 RCS(Radar Cross Section), k 는 볼츠만 상수, T 는 주변 온도, R 은 유도 무기와 표적의 상대거리, P_t 는 송신기 피크 전력, G 는 안테나 게인, λ 는 탐색기 파장, B_r 는 대역폭, F_r 는 RF 수신기 체인의 잡음 계수이다. 또한 위에 나타난 레이더에 대한 SNR 식을 적외선에 대한 식으로 대체하여 IR 탐색기 모델링이 가능하다.

3.3 추진 모델 컴포넌트

추진 모델은 추진제 연소로 발생하는 추력 및 물리량의 변화를 산출하며 정해진 그레인 형상에 따라 고체 추진제를 연소하는 모터와 요구 추력에 맞춰 연료 분사량

포넌트 정의 및 특징은 Table 6과 같다. Low, Medium, High 해상도의 IMU 측정값은 식 (8)과 같이 표현된다. 여기서 n 은 오차 요소를 나타내며 오차 요소가 없을 경우 Low 해상도, 바이어스와 random walk에 의한 오차 요소만 고려된 경우 Medium 해상도, 모두 고려된 경우 High 해상도의 모델이 된다. 여기서 K 는 스케일 팩터 오차, A 는 정렬 오차, B 는 바이어스, ν 는 random walk 잡음을 나타낸다(Lawrence, 1993).

$$\begin{aligned} \vec{x}_{meas} &= \vec{x}_{true} + n \\ n &= [K+A]\vec{x}_{true} + B + \nu \end{aligned} \quad (8)$$

where

$$K+A = \begin{bmatrix} S_x & -a_{xz} & a_{xy} \\ a_{yz} & S_y & -a_{yz} \\ -a_{zy} & a_{zx} & S_z \end{bmatrix}$$

$$B+\nu = [B_x + \nu_x \quad B_y + \nu_y \quad B_z + \nu_z]^T$$

Table 6. Definition and characteristics of navigation components by resolution

Low	- Ideal measurement
Medium	- Considering measurement reflected with bias and random walk
High	- Considering measurement reflected with bias, random walk, scale factor error and misalignment

Table 7. Definition and characteristics of actuator components by resolution

Low	- Ideal deflection - Considering slew rate and limiter
Medium	- Considering delay due to actuator dynamics - Considering slew rate and limiter
High	- Considering delay due to motor dynamics - Considering physical characteristic such as fin load torque, gear ratio, etc

3.5 구동 모델 컴포넌트

구동 모델은 유도조종모델에서 계산된 핀 구동 명령에 대해 구동된 변위각을 출력한다. 본 논문에서 고려한 구동기는 전기식 구동기이며 해상도 별 컴포넌트 정의 및 특징은 Table 7과 같다. Low, Medium 해상도의 구동기 모델은 모두 슬루레이트(Slew rate)와 구동 제한을 고려

해 핀 구동 명령에 대한 구동된 변위각을 출력한다. Low 해상도의 경우 구동 명령이 슬루레이트 제한과 구동 제한에 걸리지 않는 범위 내에서는 입력이 바로 출력되며 Medium 해상도는 2차 지연의 형태로 입력이 지연되어 출력된다. High 해상도의 경우 전기 모터의 특성과 핀에 적용되는 힘에 의한 부하 등 물리적인 특성이 반영 되도록 Fig. 7과 같은 블록선도를 갖도록 모델링 하였다. 여기서 J 는 모터 관성량, B 는 모터 점성 마찰계수, K_b 는 역기전력 상수, K_T 는 모터 토크 상수, L_α 는 유도계수, R_α 는 내부 저항, P 는 기어비, T_L 은 핀의 부하 토크를 나타낸다. 핀의 부하 토크는 식 (9)와 같이 표현되며 δ_{max} , $T_{\delta_{max}}$ 는 최대 핀 변위각과 그에 따른 최대 공기역학적 토크, l 은 롤러 너트(Roller nut)와 출력축(Output shaft axes)의 수직거리, h 는 나사 축 피치(screw shaft pitch)를 나타낸다(Jang, 2010; Gurav, 2017).

$$T_L = \frac{T_\delta}{P} \delta_m, \quad T_\delta = \frac{T_{\delta_{max}}}{\delta_{max}}, \quad P = \frac{2\pi}{\cos\delta_m} \frac{l}{h} \quad (9)$$

3.6 통신 모델 컴포넌트

통신 모델 컴포넌트는 유도 무기와 타 무기체계와의 통신을 모의한다. 주로 외부에서 측정된 유도 무기 또는 표적의 상태정보를 논리 모델의 통신 모델 컴포넌트로 통해 전달받고 경우에 따라 유도 무기의 항법 정보를 타 무기체제로 전달한다. 통신 모델의 해상도 별 정의 및 특징은 Table 8과 같으며 식 (10)과 같이 나타낼 수 있다. 여기서 \vec{R}_{com} , \vec{V}_{com} 은 통신을 통해 전달되는 위치와 속도 벡터, t_d 는 통신 지연 시간을 나타낸다. Low 해상도는 t_d 가 0, Medium 해상도는 상수일 때이다. High 해상도는 통신 지연 시간은 신호가 송신기에서 수신기까지 도달하는데 걸리는 시간과 패킷의 비트들을 링크로 전송하는데 걸리는 시간에 대해 고려해 식 (11)과 같이 t_d 를 계산하며 여기서 d 는 송수신 거리, c 는 전파속도, L 은 패킷 크기, R 은 링크 전송율을 나타낸다(Ju, 2014).

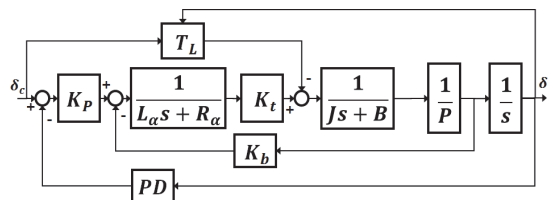


Fig. 7. Electric actuator system architecture

Table 8. Definition and characteristics of communication components by resolution

Low	- Ideal communication
Medium	- Considering constant delay
High	- Considering delay due to propagation and transmission

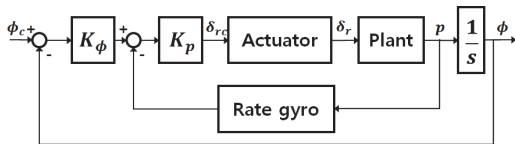
$$\begin{aligned} \overrightarrow{R_{com}}(t) &= \overrightarrow{R_{com}}(t-t_d) \\ \overrightarrow{V_{com}}(t) &= \overrightarrow{V_{com}}(t-t_d) \end{aligned} \quad (10)$$

$$\begin{aligned} t_d &= D_{propagation} + D_{transmission} \\ D_{propagation} &= d/c \\ D_{transmission} &= L/R \end{aligned} \quad (11)$$

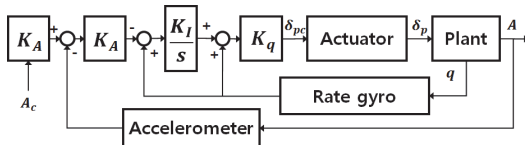
3.7 유도조종 모델 컴포넌트

유도조종 모델은 유도 무기가 표적에 도달하거나, 주어진 경로를 추종하기 위해 필요한 유도 명령을 산출하는 유도 컴포넌트와 주어진 유도 명령을 추종하기 위해 요구되는 핀 구동 명령을 산출하는 조종 컴포넌트로 구성되어 있다. 단, 조종 컴포넌트의 경우 동역학 모델 컴포넌트가 High 해상도일 경우에만 필요하기 때문에 Low, Medium 해상도일 경우에는 유도 컴포넌트만으로 유도조종 모델 컴포넌트를 구성한다. 유도조종 모델은 소프트웨어적인 요소로 해상도를 분류하지 않는다. 본 논문에서는 유도 무기에서 가장 널리 사용되고 있는 비례항법유도(PNG, Proportional Navigation Guidance), 롤 각도 제어기와 3루프 가속도 제어를 적용하였다. 식 (12)는 PNG, Fig. 8은 롤 각도제어기(a), 3루프 가속도 제어기 (b) 구조를 나타낸다(Zarchan, 2012).

$$a_{cmd} = NV_m \dot{\sigma} \quad (12)$$



(a) Roll attitude control loop



(b) 3-Loop autopilot loop

Fig. 8. Control loop architecture

3.8 탄두 모델 컴포넌트

본래 탄두 모델은 유도 무기에 의한 표적의 피해도를 산출하는데 가장 중요한 영향을 미친다. 하지만 AddSIM에서는 별도의 피해평가 모델을 제공하기 때문에 본 연구에서는 표적과의 조우관계를 통해 신관의 작동 여부를 판단하는 것으로 탄두 모델을 대체한다. 유도조종 모델과 마찬가지로 소프트웨어적인 요소이기 때문에 해상도는 분류하지 않는다. 다음의 식 (13)은 충격신관, 지연신관, 근접신관의 작동조건을 나타낸다. 여기서 ϵ 은 충격 오차 범위, t_{impact} , t_{delay} 는 충격 및 지연 시간, d_{detect} 는 근접신관 작동 기준 거리를 나타내며 warhead index는 1일 경우 작동, 0일 경우 미작동을 나타낸다.

$$R = |\overrightarrow{R_{TM}}| \quad (\overrightarrow{R_{TM}} = \overrightarrow{R_T} - \overrightarrow{R_M}) \quad (13)$$

$$\begin{cases} \text{충격신관} \\ \text{if } R \leq \epsilon, \text{ warhead index} = 1 \\ \text{else, warhead index} = 0 \end{cases}$$

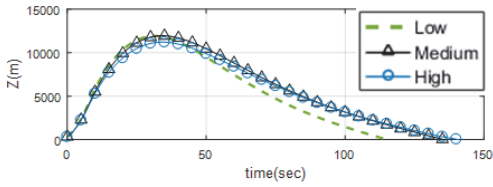
$$\begin{cases} \text{지연신관} \\ \text{if } t > t_{impact} + t_{delay}, \text{ warhead index} = 1 \\ \text{else, warhead index} = 0 \end{cases}$$

$$\begin{cases} \text{근접신관} \\ \text{if } R < d_{detect}, \text{ warhead index} = 1 \\ \text{else, warhead index} = 0 \end{cases}$$

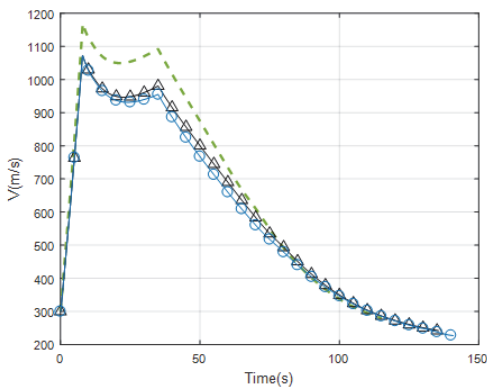
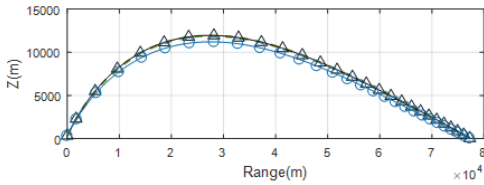
4. 시뮬레이션

앞서 설계한 유도 무기체계 물리 컴포넌트를 조합하여 Low, Medium, High 해상도의 유도 무기체계 BSM을 구성했다. 해상도 별 유도 무기체계 BSM은 동일한 해상도의 하위 컴포넌트로 구성했으며 SM-2급 유도탄의 형상, 공력, 추진 파라미터를 입력했다. Fig. 9, Table 9는 SM-2급 유도 무기체계 BSM의 시뮬레이션 수행 결과를 나타낸다.

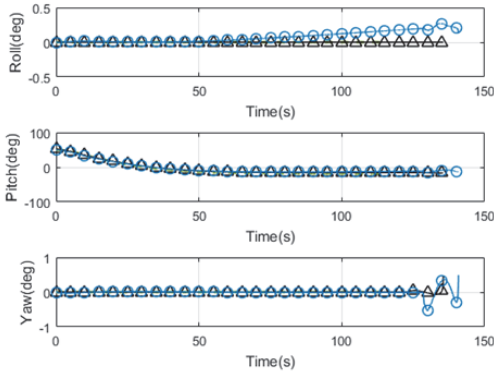
시뮬레이션 결과를 살펴보면 우선 해상도가 높은 유도 무기체계 BSM일수록 연산 시간이 오래 걸리는 것을 확인할 수 있다. 이는 앞서 Table 1과, Fig. 3에 나타난 바와 같이 고해상도의 컴포넌트일수록 모델링 충실도가 높은 대신 연산량 또한 증가하기 때문이다. 또한 Low, Medium, High 해상도 유도 무기체계 BSM의 궤적이 전체적으로 유사하게 나타난 것을 보았을 때 각 하위 컴포넌트들이 해상도에 따라 적절하게 설계된 것을 확인할 수 있다. 다만 시간에 따른 궤적을 살펴보면 Low 해상도 BSM이 Medium, High 모델에 비해 빠르게 표적



(a) Time-Trajectory/Range-Trajectory profile



(b) Time-Velocity profile



(c) Time-Attitude profile

Fig. 9. Simulation results

Table 9. Operation time according to the resolution of the BSM

	Low	Medium	High
Operation time[sec]	1.335	1.118	0.77

을 요약하는 것을 확인 할 수 있다. 이는 Low 해상도 동역학 모델의 경우 속도 벡터와 자세각이 같다고 가정하여 Medium, High 해상도의 모델보다 항력이 작게 적용되었고 추진모델에서도 연소 효율이 반영된 Medium, High 해상도 모델과 다르게 Low 해상도 모델은 Ideal 추력을 적용하였기 때문으로 분석된다. 이에 대한 영향은 속도 프로파일에서도 확인이 가능하다.

5. 결론

본 논문에서는 AddSIM에서 운용 가능한 유도 무기체계의 BSM 상세설계에 대해 설명하였다. 유도 무기체계 BSM은 조립성 및 재사용성을 고려해 BSM의 기본 구조와 데이터 체계를 따르도록 설계하였으며 동일 컴포넌트의 경우 해상도가 상이하더라도 출력 인터페이스의 데이터가 동일하도록 설계하였다. 또한 다양한 해상도의 하위 컴포넌트 조합을 통해 모델의 해상도를 결정할 수 있도록 했다. 최종적으로 시뮬레이션을 통해 해상도 별 유도 무기체계 BSM의 성능을 확인하였다. 설계된 유도 무기체계 BSM은 라이브러리 형태로 제공되어 사용자의 목적에 따라 적합한 해상도를 설정하도록 하여 다양한 시뮬레이션에 활용될 것으로 기대된다.

References

Archer, R. D. and Saarlal, M. (1996) *An Introduction to Aerospace Propulsion*, Prentice-Hall, Upper Saddle River.

Chang-Bok J. (2014) *Communication Theory & Systems 2nd Edition*, Hanteemedia.

Dohyung Kim, Hyunshik Oh, Juhye Park, Samjoon Park. (2015). "A Converting Method to Simulate DEVS Models on AddSIM. KIISE Transactions on Computing Practices", 21(7), 488-493.

(김도형, 오현식, 박주혜, 박삼준. (2015). "컴포넌트 기반 체계모의환경(AddSIM)에서 실행하기 위한 DEVS 모델 변환 방법", 정보과학회 컴퓨팅의 실제 논문지, 21(7), 488-493).

D. M. Andrea (2012) *Introduction to modern EW systems*, Attech House, Boston.

Gurav, B., Economou, J, Saddington, A., and Knowles, K (2017) "Multi-Mode Electric Actuator Dynamic Modelling for Missile Fin Control", Aerospace,

- 4(2), 30.
- Jehwan C., Cheolgyu J., Namsu H. (2007) “The Air-to-Air Combat Analysis Using COBRA model”, The Korean Society for Aeronautical & Space Sciences Conference Abstract, 428-431.
(전제환, 지철규, 한남수. (2007) “공대공 전투효과도 분석(COBRA)”, 한국항공우주학회 학술발표회 초록집, 428-431)
- Jongjin J., Daeyeong O., Jun Y. (2010) “A Time Delay controller Design for Missile Pin Actuator”, Institute of Control, Robotics and Systems Domestic Conference, 645-648.
- Kim, D.-H., Shin, J.-H., and Kim, C.-K. (2007) “On the Development of the Authoritative Representations of Submarine for Engagement Level Simulation”, Journal of the Korea Society for Simulation, 16(4), 1-12.
(김동훈, 신지환, 김찬기 (2007) “교전수준 잠수함 표준모델 개발 방안 연구”, 한국시뮬레이션학회 논문지, 16(4), 1-12).
- Kim, S.-C. (2011) “Modeling & Simulation Resources Classification Model for Advanced SBA(Simulation Based Acquisition)”, Journal of Korean Institute of Information Technology, 9(12), 197-206.
(김성철 (2011) “모의실험기반획득 활성화를 위한 국방 M&S 자원 분류 모델”, 한국정보기술학회지 논문지, 9(12), 197-206).
- Lee, Sang Jin, Kim, Seog Bong, Lee, Tae Ho. (2011) “The Construction of a Simulation Environment to Enhance the Interoperability and Reusability of Models”, Journal of the Korean Association of Defense Industry Studies, 18(2), 41-61.
(이상진, 김석봉, 이태호. (2011) “모델의 상호운용성과 재사용성 향상을 위한 컴포넌트기반 체계모의환경 구축에 관한 연구”, 한국방위산업학회지, 18(2), 41-61).
- Park, S.-J. (2015) “‘Modeling and Simulation Technology’, How Is It Used in Defence”, *SCIENCE & TECHNOLOGY POLICY*, 25(10), 18-21.
(박삼준 (2015). “‘Modeling and Simulation Technology’, 국방 분야에 어떻게 쓰이고 있나?’, 과학기술정책, 25(10), 18-21).
- Y Ann, M Kim, K Moon, CK Ryoo, Y Lee, DH Kim (2018) “Components Design for Standard Guided Weapon Simulation Model”, Industrial Engineering & Management Systems Spring Conference, 442-445.
(안유영, 박민수, 문규진, 유창경, 이예림, 김도형 (2018). 표준화된 유도 무기 시뮬레이션 모델의 컴포넌트 설계. 한국경영과학회 학술대회논문집, 442-445).
- Yeongchan J., Cheonyeong K., Seongho K., Hyeonsam M., Cheolgyu J. and Yeongseok H. (2013) “The System Development of the Interoperability EADSIM and Virtual Combat Simulation Model”, The Korean Society for Aeronautical & Space Sciences Conference Abstract, 1055-1058.
(장영찬, 김천영, 김성호, 명현삼, 지철규, 홍영석. (2013) “EADSIM과 가상공중교전모델 연동 시스템 개발”, 한국항공우주학회 학술발표회 초록집, 1055-1058).
- M Park, K Moon, CK Ryoo, DH Kim. (2017) “An Architectural Design of Guided Weapon System Model for Engagement Simulation”, Korean Management Science Review Conference, 76-679.
(박민수, 문규진, 유창경, 김도형. (2017). 교전 시뮬레이션을 위한 유도 무기체계 모델의 구조설계. 대한산업공학회 춘계공동학술대회 논문집, 676-679).

〈부 록〉

Table 10. Equations of high resolution propulsion model component

$$T = A^* P_{cham} \sqrt{\frac{2\gamma^2}{\gamma-1} \left(\frac{2}{\gamma+1}\right)^{\frac{\gamma+1}{\gamma-1}} \left[1 - \left(\frac{P_e}{P_{cham}}\right)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}}\right] + (P_e - P_a) A_e}$$

$$m = m_0 - \int_0^t \dot{m} dt, \quad \dot{m} = P_{cham} A^* \sqrt{\frac{\gamma}{RT_{cham}} (\gamma+1)^{\frac{\gamma+1}{2(\gamma-1)}}}$$

if ($phase = phase_{start-up}$)

$$\frac{v_{cham}}{RT_{cham}} \frac{dP_{cham}}{dt} = A_b r (\rho_p - \rho_{cham}) - P_{cham} A^* \sqrt{\frac{\gamma}{RT_{cham}} \left(\frac{2}{\gamma+1}\right)^{\frac{\gamma+1}{2(\gamma-1)}}}$$

if ($phase = phase_{steady-state}$)

$$P_{cham} = K_n \rho_p r c^*$$

if ($phase = phase_{tail-off}$)

$$P_{cham} = P_{t0} \exp\left(\frac{-RT_{cham} A^*}{v_{cham} c^*} (t - t_{t0})\right)$$

where

$$P_e = P_{cham} \left(1 + \frac{\gamma-1}{2} M_e^2\right)^{-\frac{\gamma}{\gamma-1}}$$

$$K_n = \frac{A_b}{A^*}$$

$$c^* = \sqrt{\frac{RT_{cham}}{\gamma \left(\frac{2}{\gamma+1}\right)^{\frac{\gamma+1}{\gamma-1}}}}$$

T : thrust [N]

γ : Specific heat ratio

m : Mass of guided weapon [kg]

m_0 : Initial mass of guided weapon [kg]

m_{out} : Propellant mass consumed [kg]

\dot{m} : Mass flow of propellant [kg/s]

A^* : Area of nozzle neck [m^2]

A_e : Area of nozzle exit [m^2]

A_b : Area of propellant combustion [m^2]

R : Gas constant [$J \times mol^{-1} \times K^{-1}$]

P_{cham} : Pressure of chamber [Pa]

P_e : Pressure of nozzle exit [Pa]

P_a : Atmospheric pressure [Pa]

P_{t0} : Pressure of chamber at burnout [Pa]

T_{cham} : Temperature of chamber [K]

v_{cham} : Volume of chamber [m^3]

K_n : Area ratio

r : Combustion rate of propellant grain [m/s]

ρ_p : Density of propellant [kg/m^3]

ρ_{cham} : Density of chamber [kg/m^3]

c^* : Characteristic velocity [m/s^2]

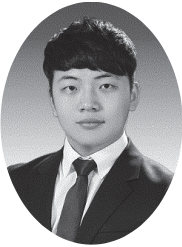
t : Current time [sec]

t_{t0} : Burnout time [sec]

M_e : Mach number at exit

Table 11. Required input data through interface according to the resolution

Component	Interface source	Input variable	Resolution		
Dynamics	Environment	· Gravitational acceleration	L	M	H
	Propulsion	· Thrust	L	M	H
		· Mass of guided weapon	L	M	H
		· Moment of inertia of guided weapon			H
		· Position of C.G of guided weapon			H
	GnC Main	· Guidance acceleration command	L	M	
Actuator	· Actuator displacement angle			H	
Propulsion	Environment	· Gravitational acceleration	L	M	
Actuator	GnC Main	· Actuator displacement angle command	L	M	H
Communication (Physics)	Communication (Logics)	· Position of guided weapon measured by external	L	M	H
		· Velocity of weapon measured by external	L	M	H
		· Position of target measured by external	L	M	H
GnC Main	Launch(Logics)	· Initial position of target	Singular		
	Communication (Physics)	· Position of guided weapon measured by external	Singular		
		· Velocity of weapon measured by external	Singular		
		· Position of target measured by external	Singular		
	Seeker	· Angular velocity of Line-Of-Sight	Singular		
	Navigation	· Estimated position of guided weapon	Singular		
		· Estimated velocity of guided weapon	Singular		
		· Estimated attitude of guided weapon	Singular		
· Measured acceleration of guided weapon		Singular			
· Measured angular velocity of guided weapon		Singular			



문 규 진 (joralmkj@gmail.com)

2014 인하대학교 항공우주공학과 학사
2014~ 현재 인하대학교 항공우주공학과 통합과정

관심분야 : 유도, 항법 및 제어, 국방 M&S



안 유 영 (ayy0907@hanwha.com)

2017 인하대학교 항공우주공학과 학사
2019 인하대학교 항공우주공학과 석사
2019~ 현재 (주)한화 화약/방산 연구원

관심분야 : 유도, 항법 및 제어, 국방 M&S



정 의 택 (wetech92@naver.com)

2018 인하대학교 항공우주공학과 학사
2018~ 현재 인하대학교 항공우주공학과 석사과정

관심분야 : 유도, 항법 및 제어, 국방 M&S



유 창 경 (ckryoo@inha.ac.kr)

1989 인하대학교 항공공학과 학사
1991 KAIST 항공우주공학과 석사
2006 KAIST 항공우주공학과 박사
2006~ 현재 인하대학교 항공우주공학과 교수

관심분야 : 유도, 항법 및 제어, 국방 M&S