

함정의 대탄도탄전 효과도 분석을 위한 모델링 및 시물레이션

배장원[†] · 이근호 · 나형호 · 문일철

Modeling and Simulation for Effectiveness Analysis of Anti-Ballistic Warfare in Naval Vessels

Jang Won Bae[†] · GuenHo Lee · Hyungho Na · Il-Chul Moon

ABSTRACT

In recent years, naval vessels have been developed to fulfill a variety of missions by being equipped with various cutting-edge equipment and ICT technologies. One of the main missions of Korean naval vessels is anti-ballistic missile warfare to defend key units and areas against the growing threat of ballistic missiles. Because the process of detection and interception is too complex and the cost of failure is much high, a lot of preparation is required to effectively conduct anti-ballistic missile warfare. This paper describes the development of a simulation model of anti-ballistic missile warfare with combat systems and equipment to be installed on future naval vessels. In particular, the DEVS formalism providing a modular and hierarchical modeling manner was applied to the simulation model, which can be utilized to efficiently represent various anti-ballistic missile warfare situations. In the simulation results presented, experiments were conducted to analyze the effectiveness of the model for effective detection resource management in anti-ballistic missile warfare. This study is expected to be utilized as a variety of analysis tools necessary to determine the optimal deployment and configuration of combat resources and operational tactics required for effective anti-ballistic missile warfare of ships in the future.

Key words : simulation, DEVS, anti-ballistic warfare, effectiveness analysis

요 약

최근 해군 함정은 다양한 최첨단 장비와 ICT 기술이 탑재되어 다종의 임무를 수행할 수 있도록 개발되고 있다. 우리나라 해군 함정의 주요 임무 중 하나는 급증하고 있는 탄도탄의 위협으로부터 아군의 주요 유닛과 지역을 방어하는 대탄도탄전이다. 대탄도탄전의 경우 탐지에서 요격까지 이루어지는 과정이 복잡한 반면 실패에 대한 피해가 크기 때문에, 대탄도탄전을 효과적으로 수행하기 위한 많은 준비가 필요하다. 본 논문에서는 미래 해군 함정에 탑재될 전투체계 및 장비를 활용한 대탄도탄전 시물레이션 모델을 제안한다. 특히, 대탄도탄전에 필요한 특성을 반영하여 향후 효과도 분석에 활용될 수 있는 시물레이션 모델을 제안하고자 한다. 이를 위하여, 시물레이션 모델 개발에 DEVS 형식론을 적용하여 모듈러하고 계층적인 모델을 개발하였으며, 다양한 대탄도탄전 상황을 효율적으로 표현할 수 있게 하였다. 제시된 사례 연구 결과에서는 함정의 탐지 체계의 성능 및 의사 결정으로 발생할 수 있는 대탄도탄전의 문제 상황을 시물레이션 내용과 그 의미를 설명하였다. 향후 본 연구의 결과가 함정의 대탄도탄전 효과도 분석은 물론 함정의 대탄도탄전의 효과적인 수행을 위한 최적의 전투자원 배치 및 제원 그리고 운용 전술 등을 개발하는데 활용되기를 기대한다.

주요어 : 시물레이션, DEVS, 대탄도탄전, 효과도 분석

* 이 논문은 2023년 정부(방위사업청)의 재원으로 국방과학연구소의 지원을 받아 수행된 연구임.
(계약번호: UD210008DD)

Received: 11 August 2023, **Revised:** 2 September 2023,
Accepted: 13 September 2023

† Corresponding Author: Jang Won Bae
E-mail: jangwon_bae@koreatech.ac.kr
Korea University of Technology and Education
School of Industrial Management

1. 서론

최근 대한민국 주변에 적 탄도탄 위협이 점점 증가하고 있다. 탄도탄은 로켓을 동력으로 대기권 밖에서 비행하다가 목표 지점 근처에서 자유낙하로 목표에 떨어지는 미사일이다(Choi, 2020). 따라서 탄도탄의 위치 및

궤도 추적이 어려워 방어 요격은 어렵지만, 탄두에 생화학 혹은 핵무기와 같은 대량살상무기(Weapons of Mass Destruction)를 탑재하여 큰 피해를 줄 수 있는 무기이다. 따라서, 대한민국과 같은 방어 측 관점에서는 탄도미사일을 효과적인 대응 방법에 대한 연구개발이 필요하다.

탄도탄 방어를 가장 효과적으로 수행하고 있는 미국의 경우 MD(Missile Defence) 체계를 구축하여 운용 중이다. MD 체계에서는 지상, 해상, 우주에서의 다중 복합체계를 구축하여 탄도미사일을 방어하고 있고, 이중 해상 탄도미사일은 이지스(Aegis)함을 중심으로 방어하고 있다. 이지스함은 자체 탐지 체계인 SPY-1D 레이더와 SM-3, SM-6와 같은 요격 미사일 그리고 지휘통제 체계인 Link-16 기반의 JDN(Joint Data Network)으로 구성되어 있다(Lee 등, 2013). 특히, 이지스함의 탐지 체계는 다수의 표적을 동시에 탐지, 포착, 추적하는 다기능 레이더를 탑재하여 복합적인 상황에 대비하고 있다.

대한민국도 탄도미사일에 대응하기 위한 공격작전 Kill Chain과 방어 작전 KAMD(Korea Air and Missile Defense) 체계를 구축하였다. 특히 KAMD에서는 다가오는 탄도탄을 빠르게 탐지하기 위해서 해상의 전함을 체계 안에 포함했다. 이런 흐름에 따라 최근 개발되는 해군 함정의 경우 탄도탄 방어를 고려한 최신의 전투체계 및 장비를 탑재하는 추세이다. 그러나 최신 전함의 전투 체계 구성과 운용 방안에 대해서는 아직도 많은 연구가 필요하다.

본 논문은 함정 수준의 대탄도탄전의 특성을 반영한 시뮬레이션 모델을 개발하고, 개발된 모델이 대탄도탄전 효과도 분석에 활용 가능한지를 사례 연구를 통해 확인하고자 한다. 개발한 대탄도탄전 시뮬레이션 모델은 함정의 대탄도탄전의 탐지, 의사 결정, 그리고 요격에 이르는 전체 주기를 모델링하였다. 또한, 대탄도탄전에 대한 충실도(fidelity)를 높이기 위해 탄도탄의 상세한 궤적을 모델링하고, 함정의 탐지 자원의 오차를 추상화하고, 요격 할당 과정에서 자원 할당 스케줄링을 모델링하고, 요격탄의 업링크(uplink)를 활용한 유도 과정을 모델링하였다.

개발한 시뮬레이션 모델을 활용하여 사례 연구를 수행하였다. 사례 연구에서는 함정의 대탄도탄전 수행 과정에서 함정의 탐지 체계의 오차 수준에 따른 다양한 문제점을 확인해볼 수 있었다. 특히, 이런 탐지 오차가 결국 작전의 비효율적 운영에 직결되는 것을 확인할 수 있었다. 또한, 함정 탐지 체계의 자원 운용에 대한 의사 결정 역시 대탄도탄전의 성공 여부에 큰 영향을 주는 것을 확인할 수 있었다. 제시된 사례 연구 결과를 통해, 개발된 시

뮬레이터가 향후 더욱 전문적인 대탄도탄전 효과도 분석에 활용 가능하다는 것을 확인할 수 있었다. 본 연구에서 제안하는 함정의 대탄도탄전 시뮬레이터가 대탄도탄전의 효과도 분석은 물론 작전 수행을 위한 최적의 전투 자원 구성과 운용 전술 개발에도 활용될 수 있기를 기대한다.

2. 관련 연구

이번 장에서는 본 논문과 관련 있는 연구사례를 살펴보고자 한다. 특히, 관련 연구를 시뮬레이션 기반 효과도 분석과 대탄도탄전 효과도 분석 연구로 구분하여 정리하였다.

2.1 시뮬레이션 기반 효과도 분석

군 도메인에서 전투 효과도 분석은 대부분 미래의 무기체계와 관련된 분석이기 때문에 모델링 및 시뮬레이션(Modeling and Simulation, M&S) 방법을 활용했다(Jang 등, 2014). 특히, 시뮬레이션 방법은 미래의 전투체계에 대한 모의를 가능하게 하여 효과도를 정량적으로 측정할 수 있게 해줄 뿐만 아니라, 전투체계에 필요한 자원의 성능을 획득하거나(Acquisition), 군인들의 전투체계 및 장비에 대한 훈련(Training)의 용도로 자주 활용되었다.

대표적인 연구사례를 소개하면, 대공 비행기와 미사일 공격의 방어를 시뮬레이션하는 SADM(Ship-Air Defence Model)이 있다(Boinepalli 등, 2010). SADM은 시뮬레이션을 통해 아함의 생존율을 측정할 뿐만 아니라 생존율을 높이는 방법 연구에도 활용되었다(Na 등, 2014). (Bae 등, 2012)의 연구에서는 통신 네트워크와 전투 효과도의 관계를 측정하기 위하여 전투 부대는 이산 사건 시스템(Discrete Event System) 모델로 개발하고, 실시간이 중요하게 고려되는 통신 체계는 연속 시스템 모델로 개발한 뒤 이를 하이브리드 연동 시뮬레이션으로 분석하였다. 이외에도 많은 연구가 전투체계 및 효과도 분석에 시뮬레이션 기술을 활용하였다(Park 등, 2017; Seo 등, 2014; Choi 등, 2012). 또한, 대탄도탄전의 다층 방어체계에서 협동 교전 능력의 효과도를 측정하기 위해 시뮬레이션을 활용한 사례(Yoo 등, 2023)나 곡사화기의 해상 피해효과 분석에 시뮬레이션 기술을 활용한 사례 등도 확인할 수 있었다(Kim 등, 2023).

한편으로는 전투 효과도 분석 시뮬레이션 플랫폼을 개발하는 연구도 진행되었다. 대한민국 국방과학연구소는 해양 무기체계 통합 시뮬레이션 시스템(QUEST)을 개발하였다(Han 등, 2013). 이는 해상/수중 무기체계의 전투

실험 공학분석체계 구축 기술 연구 결과로 개발된 모델 기반 통합개발환경으로 해군 무기체계 전투실험 수행을 위한 해양 무기체계 모델링, 시뮬레이션, 분석 핵심기술을 연구하고 모의실험 및 분석을 위한 M&S 도구로 개발되었다.

2.2 대탄도탄전 효과도 분석

대탄도탄전은 탄도탄이라는 특수한 미사일을 방어하는 작전이다. 최근 북한의 위협이 증가함에 따라, 대탄도탄전의 중요성이 점차 강조되고 있다. 특히, 한국형 탄도탄 방어체계인 KAMD 체계 안에서 함정의 대탄도탄전 방어 작전의 역할이 주어지게 되었고, 따라서 작전 운용에 대한 효과도 분석 필요성이 높아지고 있다.

이에 따라 대탄도탄전 관련해 많은 연구개발이 수행되었다. 그중 한 분야는 날아오는 탄도탄의 위치 및 궤적을 예측하고 분석하는 것이다. 공력이 있는 구간에서 탄도탄의 움직임은 예측하기 어렵기 때문에, 요격탄의 중기유도를 위한 예측 알고리즘이 연구되었다(Jeong 등, 2023). 또한, 초고속으로 움직이는 탄도탄 예측 및 추적을 위해 GPU 기반 입자 군집 최적화(accelerated particle filter)나 딥러닝 기법을 적용한 사례도 있었다(Han 등, 2022; Oh 등, 2022).

대탄도탄전에서 레이더를 이용한 탄도탄의 탐지에 관한 연구도 있었다. 탄도탄의 탐지를 위해서 RCS(Radar Cross Section)를 이용하는데, 이는 탄도탄의 재질과 형상에 따라 큰 차이가 있다(Jeong 등, 2023). 이러한 특성을 고려하여 탄도탄의 탐지 및 추적을 다기능 레이더에서 효과적인 수행 방법의 연구가 있었다(Park 등, 2021).

또한, 탄도탄을 요격하는 미사일의 유도 방식에 관한 연구도 존재한다. (Park 등, 2021)의 연구는 탄도탄 요격 유도 무기체계의 운용성 확인을 위한 방안을 분석했고, (Jung 등, 1998)의 연구는 탄도탄 방어 미사일의 중기유도 알고리즘을 예상 비행 궤적을 통해 산출하는 방법에 관한 분석을 진행하였다. 또한, (Ryee 등, 2017)은 개발의 유연성 확보를 위해 탄도탄 방어 유도 무기 체계의 개발을 위한 체계를 연구하였다.

이처럼 많은 대탄도탄전 관련 연구가 있었지만, 함정의 대탄도탄전 수행의 부 체계(sub-system)인 탐지, 타격, 지휘통제 등의 단위 체계에 대한 연구가 대부분이다. 그러나 위의 부 체계들은 단독 운용되는 것이 아니라 함정의 전투체계에서 연동되어 운용되므로, 함정의 대탄도탄전의 효과도 분석은 모든 부 체계의 연동이 반드시 고려되어야 한다. 따라서, 본 논문에서는 함정의 탐지, 타격,

지휘통제 체계 등이 모두 포함된 시뮬레이션 모델을 개발하고, 이를 활용하여 대탄도탄전의 총체적인 효과도 분석의 가능성을 사례 연구를 통해 제시하고자 한다.

3. 함정의 대탄도탄전 시뮬레이션 모델 개발

이번 장에서는 함정의 대탄도탄전 시뮬레이션 모델에 대해서 상세히 설명한다. 모델링에 대한 이해를 돕기 위해, 시뮬레이션 모델 개발에 활용한 DEVS(Discrete Event System Specification) 형식론에 대해서 간략히 설명한다.

3.1 DEVS 형식론

DEVS 형식론은 이산 사건 시스템을 모델링하고 시뮬레이션할 수 있는 도구이다(Zeigler 등, 2000). 특히, DEVS 형식론은 모듈러한 컴포넌트를 개발하고, 이를 이용한 계층적 모델 구조를 지원하여, 복잡한 시스템을 구조적으로 모델링(structured modeling) 할 수 있게 한다. 또한, DEVS 형식론의 모듈러한 특성은 시뮬레이션 모델의 수정 및 확장을 쉽게 하여, 미래형 시스템에 대한 다양한 구조적 실험을 가능하게 한다는 장점이 있다. 따라서 본 논문의 시뮬레이션 모델은 DEVS 형식론을 따라서 개발하였다.

DEVS 형식론은 시스템 컴포넌트의 세부적인 행동을 모델링하는 원자 모델(atomic model, AM)과 시스템 동특성을 표현하기 위해 컴포넌트를 구조화하는 결합 모델(coupled model, CM)로 구성되어 있다.

원자 모델(AM)은 입력(X), 출력(Y), 상태(S)의 집합과 모델 내부 상태 변경을 위한 내부 천이(δ_{int}), 외부 천이 함수(δ_{ext}); 모델의 출력을 결정하는 출력 함수(λ); 외부의 입력이 없을 때, 특정 상태에 머무르는 시간을 정의하는 시간 전진 함수(ta)로 이루어져 있다.

$$AM = \langle X, Y, S, \delta_{int}, \delta_{ext}, \lambda, ta \rangle$$

X is a set of input events

Y is a set of output events

S is a set of model states

$\delta_{int}: S \rightarrow S$, internal transition function

$\delta_{ext}: Q \times X \rightarrow S$, external transition function,

where $Q = \{(s, e) | s \in S, 0 \leq e \leq ta(s)$

(e is the elapsed time in s)

$\lambda: S \rightarrow Y$, output function

$ta: S \rightarrow R^+$, time advance function

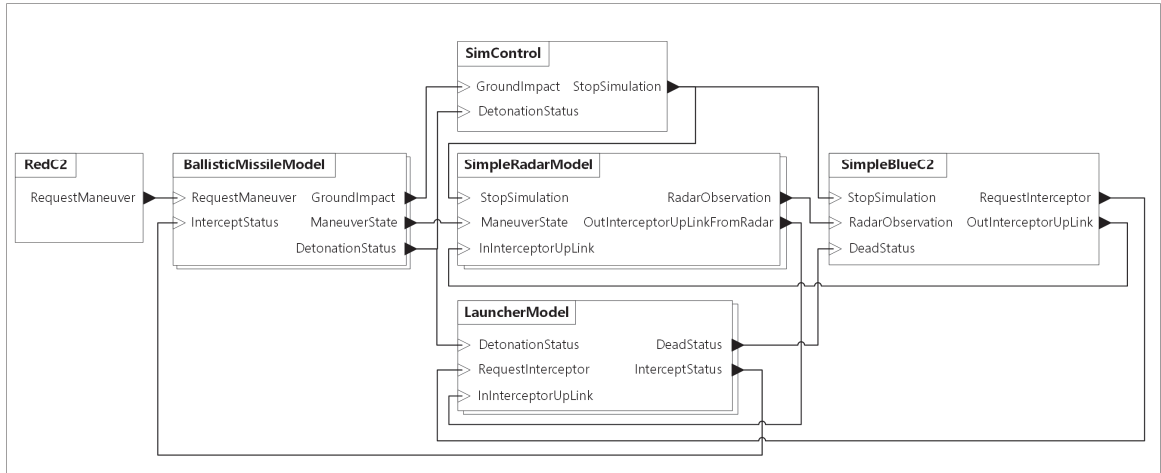


Fig. 1. Overall structure of anti-ballistic warfare simulation model

결합 모델 (CM)은 입력 (X), 출력 (Y), 내부 컴포넌트 (M)의 집합과 결합모델과 내부 컴포넌트 간의 연결 관계 (coupling relations)와 동시 실행 처리를 위한 select 함수로 표현한다.

$$CM = \langle X, Y, M, EIC, EOC, IC, select \rangle$$

X is a set of input events

Y is a set of output events

M is a set of components

EIC, EOC, IC: a set of relations about external input, external output, and internal coupling

select: $2^M - \emptyset \rightarrow m \in M$, Select function

DEVS 형식론의 원자, 결합 모델 명세는 각각을 일대일로 대응하는 다이어그램이 있고(Song, 2010), 다음 절에서 이를 표현하여 개발한 시뮬레이션 모델을 설명한다.

3.2 함정의 대탄도탄전 시뮬레이션 모델링

함정의 대탄도탄전 시뮬레이션 모델의 전체 구조를 DEVS 결합모델의 다이어그램을 활용하여 Fig. 1과 같이 표현하였다. 대탄도탄전 시뮬레이션 모델을 구성하는 컴포넌트의 설명은 아래와 같다. RedC2는 적군 지휘체계 모델로 적 탄도탄 발사에 대한 의사 결정을 수행하는 컴포넌트이다. BallisticMissileModel은 발사된 적 탄도탄을 나타내는 컴포넌트로 목표 지점을 향해 비행하는 과정을 표현한다. SimpleRadarModel은 해상의 전함에서

적 탄도탄을 탐지하고 추적하는 탐지 체계를 모의하고, SimpleBlueC2는 탐지된 탄도탄에 대한 요격 작전 의사 결정을 모의하는 컴포넌트이다. LauncherModel은 요격 의사 결정의 결과로 발사된 요격탄을 모의하는 컴포넌트이다. 그리고, SimControl은 시뮬레이션의 시작과 끝을 제어하며, 대탄도탄전 방어 작전에 대한 성패 여부를 기록하는 역할을 한다. SimControl을 제외한 각 컴포넌트의 상세 모델링과 컴포넌트 간의 연동에 대해서는 아래에서 더욱 자세히 설명한다.

RedC2는 적 위협 발사에 대한 지휘체계 모델로, 시나리오상 다수의 탄도탄을 아군 유닛 혹은 주요 시설로 발사하는 의사 결정(RequestManeuver)을 전달한다. 발사된 탄도탄은 BallisticMissileModel로 표현되며 시뮬레이션 상에서 목표를 향해 비행한다. 탄도탄은 이후 요격탄에 의해서 요격이 되거나 목표 지점을 타격하거나 하게 되고, 어느 경우든 시뮬레이션은 종료된다.

특히, 탄도탄의 경우 비행 속도나 궤적의 변화가 많아서 의미 있는 대탄도탄전 효과도 분석을 수행하기 위해서는 탄도탄의 궤적을 상세하게 시뮬레이션하는 것이 중요하다. 이러한 이유로, 제안하는 BallisticMissileModel은 탄도탄의 비행 궤적 정보를 상세하게 표현하기 위해서 노력했다. 구체적으로, 탄도탄의 발사부터 타격까지의 과정을 추진(Boost), 중간비행(Midcourse), 그리고 재진입(Reentry) 단계로 구분하고, 각 단계에서의 탄도탄의 속도에 영향을 줄 수 있는 힘 (추력, 공기 저항력, 그리고 중력)을 구분하고 각각을 물리적인 수식에 기반하여 표현하였다(Fig 2. 참고). 또한, 이러한 힘들의 복합적인 영

향에 의한 속도 변화를 BallisiticMissileModel에 반영하였다.

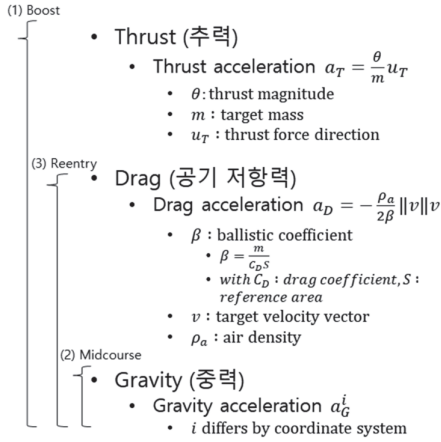


Fig. 2. Step-wise applied force in ballistic trajectory

또한, 탄도탄의 각 단계에서의 속도 변화는 탄도탄의 외형이나 특성에 대한 영향이 크다. 다시 말하면, 탄도탄의 종류에 따라 속도 변화의 추이가 상이하다고 할 수 있다. 따라서, BallisiticMissileModel에 이러한 탄도탄의 특성을 반영한 속도 변화를 반영하기 위해서, 미사일의 물리적 정보가 표현된 missile DATCOM(MISSILE DATCOM, 2014)을 적용하였다. DATCOM에는 다양한 미사일의 외형 및 물리적 정보(탄의 길이, 무게 등)를 포함하고 있다. 제안한 모델에서는 이를 활용하여 탄도탄에 작용하는 여러 힘을 수치화하여 고려할 수 있었고, 이를 통해서 탄도탄의 궤적을 보다 현실적으로 시뮬레이션할 수 있다. Fig. 3과 4는 이러한 노력으로 만들어진 탄도탄 비행 단계의 속도 프로파일과 실제 발사 궤적을 보여준다.

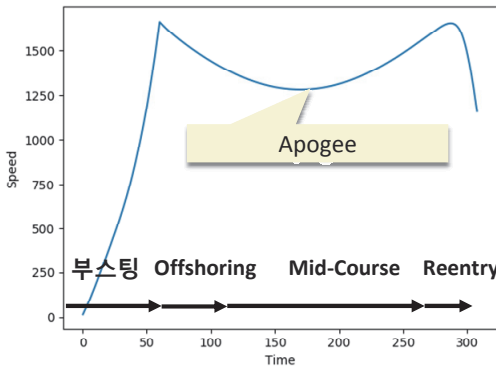


Fig. 3. Simulated velocity profile for a ballistic missile

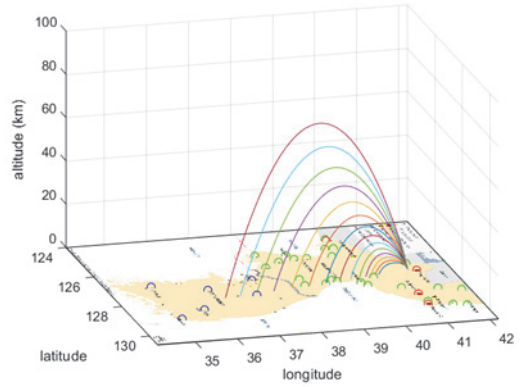


Fig. 4. Trajectory generated from ballistic missile simulation

SimpleRadarModel은 전함의 탐지 체계를 모델링한 것으로 다가오는 탄도탄의 위치를 파악(ManeuverState)하여 위협에 대한 탐지/추적 정보를 아군의 지휘체계에 전달(RadarObservation)하는 역할을 하며, 지휘체계로부터 요청받은 경우(InInterceptorUpLink)에 따라서 비행 중인 요격탄에 적 위협의 위치정보를 업로드(OutInterceptorUpLinkFromRadar)하는 역할을 한다. 탄도탄과 같은 고고도의 초고속 비행체를 탐지, 추적하는 것은 현실적으로도 어려운 것이며, 추상화된 모델로 나타낸다고 하여도 적절한 오차가 표현되어야 한다. 따라서, SimpleRadarModel에서는 AESA Radar의 센서 오차 모델을 적용하였다. 이론적으로는 AESA Radar의 탐지 신호는 레이더와 위협의 거리의 4승의 역수에 비례하여 커지는 것을 고려하여 오차를 계산할 수 있다. 그러나, 이를 계산하기 위한 많은 레이더 관련 세부적인 파라미터가 필요하여 모델링이 복잡해지고 어려워진다. 따라서, SimpleRadarModel에서는 AESA Radar의 탐지 오차 모델의 특성을 반영하되, 계산을 위한 많은 세부적인 파라미터는 noise_level로 추상화하였다. 이렇게 구성한 SimpleRadar의 오차 모델은 거리(R), Elevation(Θ), 그리고 Azimuth(Φ)의 관측 오차를 나타낸다. Fig. 5는 noise_level 파라미터를 통한 관측 오차 모델을 나타내고, Fig. 6은 이러한 관측 오차를 반영하여 SimpleRadarModel의 실제 여러 추세를 보여준다.

$$y = \begin{bmatrix} y_R + \sigma_R \epsilon_R \\ y_\theta + \sigma_{\phi_m, \theta_m} \epsilon_\theta \\ y_\phi + \sigma_{\phi_m, \theta_m} \epsilon_\phi \end{bmatrix}, \epsilon_R, \epsilon_\theta, \epsilon_\phi \sim \mathcal{N}(0, 1)$$

Where

$$\begin{cases} \sigma_R = \text{noise_level} \times 10^{-10} \times R^2 \\ \sigma_{\phi_m, \theta_m} = \text{noise_level} \times 10^{-13} \times R^2 \end{cases}$$

Fig. 5. Error modeling in SimpleRadarModel

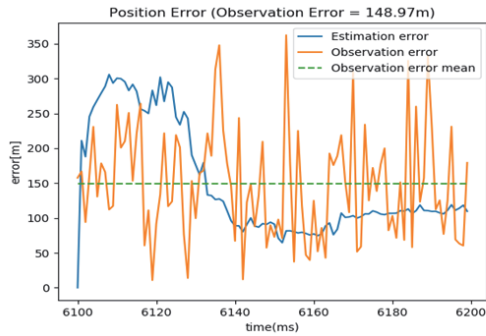


Fig. 6. Estimated error from SimpleRadarModel

대탄도탄전 수행에서 전함 탐지 체계의 역할은 크게 위협에 대한 탐지, 추적, 그리고 비행하는 유도탄에 적 탄도탄의 위치를 전송하는 업링크(uplink)의 세 가지로 구분할 수 있다. 탐지 체계의 자원은 제한적이기 때문에, 효과적인 작전의 수행을 위해서는 위의 기능에 대한 중요도를 변경하여 운용하는 것이 필요하다. SimpleRadarModel은 이러한 필요를 반영하여 탐지 체계 자원 분산 스케줄링을 지원하도록 설계하였다. 구체적으로, SimpleRadarModel 내부의 변수로 각 기능의 중요도를 설정하여 기능의 빈도를 조절할 수 있도록 구성하였다.

SimpleBlueC2는 함정의 전투지휘 체계를 모델링한 것으로 대탄도탄전에서 행해지는 많은 의사 결정을 수행한다. 구체적으로, SimpleRadarModel의 위협에 대한 탐지/추적 정보(RadarObservation)를 입력으로 받아 요격탄의 발사 여부를 판단한다. SimpleBlueC2에서 발사 필요를 판단할 시에는 요격 발사 요청(RequestIntercept)을 LauncherModel에게 전송한다. 또한, SimpleRadarModel의 자원 관리에 대한 의사 결정 결과, 요격 비행 중인 요격탄에 현재 적 위협의 위치정보를 전송하도록 요청(OutInterceptorUplink)한다.

LauncherModel은 함정의 무장 통제 및 발사 체계를 모델링한 것이다. 대탄도탄전에서 탄도탄을 요격할 수 있는 대공 미사일을 발사하는 전함의 발사대와 업링크(UpLink)를 통해 요격탄의 유도를 지원하는 기능을 표현한다. LauncherModel은 SimpleBlueC2로부터 요격 요청(RequestInterceptor)을 받으면 요격 미사일을 발사한다. 이때 발사되는 요격 미사일 모델은 앞에 설명한 Ballistic MissileModel과 유사한 방식으로 모델링 되었다. 발사된 요격 미사일은 적 위협을 향해 날아가고, 중간에 업링크 정보(InInterceptorUpLink)를 활용하여 요격 성공률을 높인다. 요격탄이 위협까지 유도되는 과정은 PNG(Proportional

Navigation Guidance) 유도 방식을 활용하였다(Murtaugh 등, 1966). 이는 표적과의 시야(Line-of-sight) 각도를 유지하는 형태로 비행하는 유도이며, 현재 다양한 유도탄에 적용되고 있는 유도 방식이다.

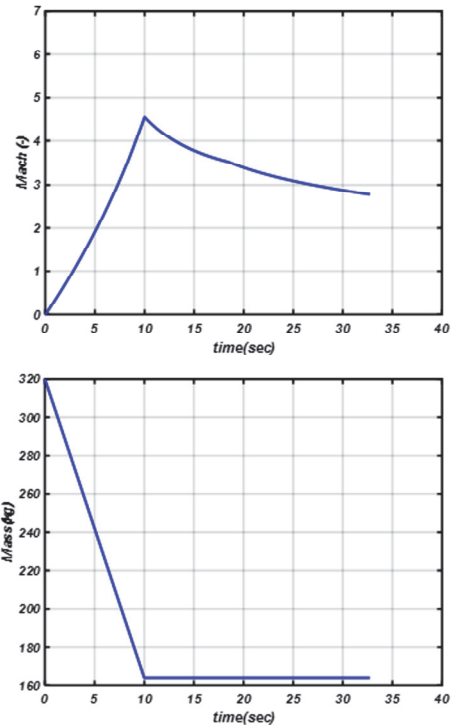


Fig. 7. Speed and mass changes of interceptor mode

Fig. 7은 위에서 요격탄 모델의 유도 과정에서 요격탄의 속도(위)와 질량(아래) 변화를 나타낸 것이다. 요격탄 역시 앞에서 설명한 탄도탄의 속도 변화 방식을 동일하게 적용하였다. 요격탄의 속도 변화(Fig. 7(위))를 확인해 보면 시뮬레이션이 진행되면서 요격탄의 속력이 마하 5까지 추진되는 것을 확인할 수 있고, 동시에 요격탄 질량 변화(Fig. 7(아래))에서는 이러한 추진 연소 과정에 의한 연료 소모로 전체 질량이 줄어드는 것을 확인할 수 있다. 요격탄의 이러한 상태 변화를 통해 요격탄의 유도 과정이 정상적으로 진행된다는 점을 확인할 수 있었다.

4. 사례 연구

개발된 함정의 대탄도탄전 시뮬레이션 모델의 적정성과 유용성을 확인해보기 위한 사례 연구(case study)를 수행하였다. 사례 연구에서는 함정의 대탄도탄전 수행을

모의하며, 그 과정에서 체계 성능(탐지 체계 오차)과 의사 결정(자원 할당 우선순위)이 미치는 영향을 대탄도탄전 수행 과정에서 총체적으로 살펴본다.

시뮬레이션 모델로 탄도탄 궤도를 시뮬레이션하기 위해서는 미사일의 외형 및 물리적 정보를 특정해야 한다. 따라서, 사례 연구에서는 적 위협 탄도탄 미사일은 스커드 B형 미사일로, 아군의 요격 미사일은 SM6 미사일로 설정하였다. 해당 미사일에 대한 데이터를 missile DATCOM 으로부터 확보하여, 전 장의 설명과 같이 미사일의 상세한 움직임을 시뮬레이션했다.

Fig. 8은 효과도 분석에 적용한 시나리오를 보여준다. 상세한 시나리오의 진행 과정은 다음과 같다: 1) 아군 전함의 탐지 거리 밖에서 탄도탄 위협이 발사되어 접근한다. 2) 전함의 탐지 체계를 통해 다가오는 위협을 확인하고 식별한다. 3) 전함의 지휘체계는 식별된 적 위협에 대한 표적-무장 할당(weapon target assignment) 수행하여 요격탄을 발사한다. 4) 요격탄의 비행 중, 전함의 탐지 체계에서 수집된 표적의 추적 정보를 업링크 하여 요격 성공률을 높인다. 5) 요격의 성공 여부를 파악하여, 요격 실패 시 요격탄 재발사 실행한다.

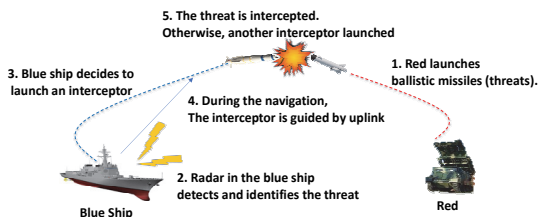


Fig. 8. Schematic description of anti-ballistic warfare simulation

위의 시나리오를 토대로 대탄도탄전 상황에서 탄도탄 탐지 오차 분석, 위협에 대한 요격 할당 분석, 그리고 탐지 체계의 자원 스케줄링 분석 결과를 다음에 설명한다.

4.1 탄도탄 탐지 오차 분석

대탄도탄전에서 다가오는 탄도탄에 대한 탐지 및 추적은 작전의 성공에 매우 중요한 역할을 한다. 그러나, 탄도탄의 특성상 정확한 위치를 추적하는 것인 매우 어려워 항상 오차를 수반하게 된다. 이번 실험에서는 함정의 탐지 체계 오차 변화에 따른 적 탄도탄 탐지의 오차 분포의 변화를 분석한다.

Fig. 9는 noise_level의 변화에 따른 함정 탐지 체계의 오차 분포 변화를 나타낸다. 파란색 점의 경우는 noise_

level을 0.01로 설정하여 오차의 정도를 줄였고, 녹색 점의 경우는 noise_level을 0.075로 설정하여 오차의 정도를 높여서 측정하였다. 그 결과 녹색 점의 경우 오차의 분포가 거리에 지수적으로 비례하여 더욱 커지고, 파란 점의 경우 오차의 분포가 거리에 대해 큰 변화가 없는 것을 확인할 수 있었다. 이런 결과를 통해 noise_level로 추상화한 모델이 함정 탐지 체계의 오차 변화 특성을 잘 표현해주고 있는 것을 확인할 수 있었다.

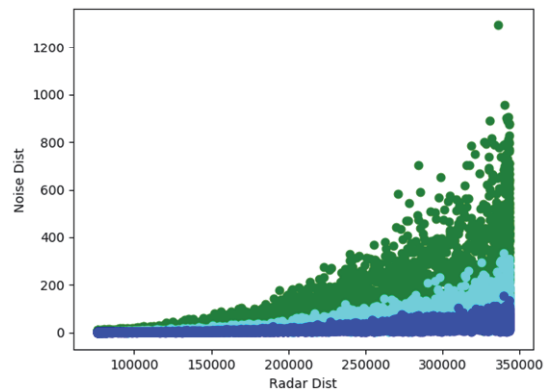


Fig. 9. Noise distribution according to the radar distance: green (noise_level = 0.075), blue (noise_level = 0.01)

탐지 오차의 적정성을 확인한 후, 이러한 효과가 대탄도탄전 수행 과정에 어떤 영향을 미칠 수 있는지 실험을 통해 확인하였다. 실험을 위해 적 세력의 탄도탄은 총 5기가 발사되었고, 이를 전함의 탐지, 지휘통제, 타격 체계를 통해 방어하는 대탄도탄전을 수행하였다.

Fig. 10은 noise_level을 다르게 한 상황에서 전함의 탐지 체계를 통해 식별되는 탄도탄의 수를 시뮬레이션 시점별로 나타낸 것이다. 시뮬레이션 상에서 발사된 적 탄도탄의 수는 5기로 정해져 있으나, noise_level이 높은 경우 (녹색 점, 0.075)의 경우 탐지 오차가 커서 접근하는 탄도탄의 수를 6기로 잘못 식별하는 경우까지 발생하였다. 이는 탐지 체계의 track management gate를 증가하는 탐지 오차가 발생하여 그 결과 적 탄도탄에 대한 과추정(over-estimation)이 발생한 것으로 탐지 오차의 적절한 관리가 필요한 것을 보여준다. 만일, 이러한 결과가 지휘 통제 계통에 전달된다면, 실제로 존재하지 않는 위협을 향해 요격탄 발사를 명령하는 등의 잘못된 의사 결정으로 이어질 수 있다. 다음 절에서 이에 대한 구체적인 실험 결과를 설명한다.

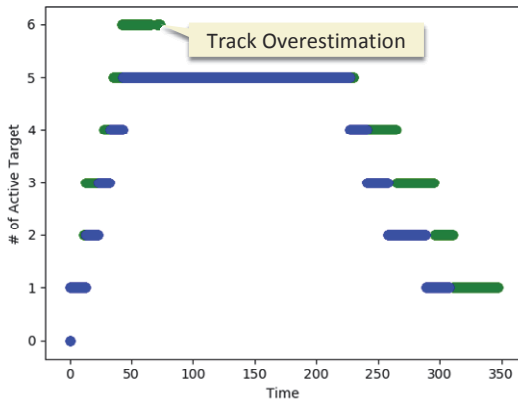


Fig. 10. Track overestimation due to the detecting error: green (noise_level = 0.075), blue (noise_level = 0.01)

4.2 위협에 대한 요격 할당 분석

이번 실험에서는 탐지 오차로 인해서 위협 과추정(threat over-estimation)이 발생했을 때의 무장 할당(weapon assignment)의 영향에 대해서 분석하고자 한다. 즉, 탐지 체계의 오차 수준에 따라 의사 결정을 통한 요격 할당에는 어느 정도 차이가 발생하는지 비교한다.

Fig. 11은 탐지 오차의 차이로 인한 적 위협 탐지부터 요격까지 이루어지는 과정을 보여준다. 시뮬레이션 시간 측면에서 살펴보면 적 위협의 탐지는 50~100 시간에서 발생하였고, 위협에 대한 무장 할당은 140 시간 이후에 발생한 것을 알 수 있다. 그러나 높은 센서 오차가 있는 경우에 결과적으로 사용한 요격탄의 수가 더 많은 것을 확인할 수 있다. 이는 탐지 과정에서의 과추정이 결국 지휘 통제 체계까지 영향을 주어 잘못된 요격 명령을 수행

한 것으로 분석된다.

4.1절과 4.2절의 결과를 종합해 보면, 탐지 체계의 오차가 적 위협에 대한 과추정을 초래할 수 있고, 이로 인해 잘못된 의사 결정으로 상대적으로 더 많은 요격탄을 소모한 것을 확인할 수 있었다. 상황이 더 안 좋은 경우에는, 존재하지 않는 위협을 향해 요격탄 발사를 명령하여 요격탄 재원 및 위협에 효과적으로 대응하기 위한 시간을 낭비하는 결과를 초래하여 결국 더 큰 피해를 초래하는 것 역시 생각해 볼 수 있다. 이를 통해, 대탄도탄전에서 탐지 체계의 정확도에 대한 중요성을 다시 한번 확인할 수 있었다. 특히, 이는 개발한 시뮬레이션 모델의 탄도탄 상세한 움직임을 표현할 수 있었기에, 이를 통해 대탄도탄전에서 탐지 체계의 정확도가 낮은 경우 발생할 수 있는 문제를 구체적으로 상황에 맞게 볼 수 있었다.

한편 실험을 통해 대탄도탄전에서 정밀한 탐지 체계를 구축하는 것이 중요하다는 것을 확인하였으나, 어느 정도 수준의 오차까지 용인할 수 있는지 파악하는 것은 많은 추가 연구가 필요하다. 예를 들어, 다양한 탄도탄의 속도와 궤적을 고려하고 다양한 탐지 체계의 오차를 적용한 시뮬레이션 결과를 체계적으로 분석하는 등의 많은 노력이 필요하다. 이런 관점에서 볼 때, 개발한 시뮬레이터에 대한 추후 연구의 활용성은 충분히 확인할 수 있었다.

4.3 탐지 체계 자원 스케줄링 분석

함정의 탐지 체계는 다기능 레이더로(Multi-Functional Radar, MFR) 진화하고 있다. 다기능 레이더는 탐지, 추적, 미사일 유도, 피아 식별, 영역 탐지, 요격 확인 등의

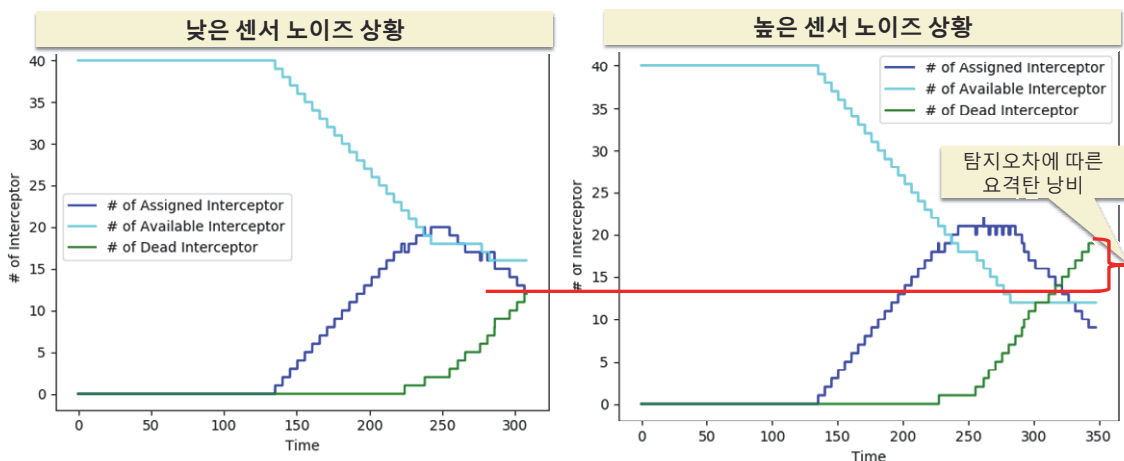


Fig. 11. Target assignment differences due to the detecting error level

레이더 기능을 동시에 수행할 수 있는 장비이다(Yang 등, 2018). 그러나 자원의 한계가 있기 때문에, 어떤 때 어떤 기능을 우선적으로 사용할 것인가에 대한 지휘관의 적절한 의사 결정이 필요하다(Joo 등, 2023; Jang 등, 2015). 시뮬레이션은 다양한 상황에 대한 의사 결정과 이에 따른 효과도를 확인할 수 있기에, 이러한 연구를 수행하는데 적절한 방법이 될 수 있다. 따라서, 본 절에서는 개발한 시뮬레이터의 지휘 통제 모듈(SimpleBlueC2)의 탐지 체계 자원 스케줄링 파라미터를 활용하여, 탐지 체계 기능 우선순위에 의한 전투 효과도(요격률)의 차이를 설명하고자 한다.

개발한 시뮬레이션 모델에서는 탐지 체계의 스케줄링 효과를 분석하기 위해 관련 파라미터를 도입하였다. 구체적으로는 탐지(search), 추적(track), 업링크(uplink)의 과업에 따른 중요도를 나타내는 파라미터로, 다기능 레이더의 주요 기능 중 대탄도탄전에서 가장 중요한 탐지, 추적, 그리고 업링크 기능에 대한 스케줄링을 고려하고 있다. 시험의 시나리오에서는 총 5개의 적 탄도탄이 연속 발사되면 아군 전함은 총 24개의 요격탄을 활용하여 탄도탄 요격 작전을 수행한다. 다가오는 5개의 위협에 대해서 아군 전함 탐지 체계는 탐지, 추적, 그리고 업링크 기능을 분할하여 수행하게 된다. 이런 경우, 적에 대한 정확한 위치를 파악하기 위해서는 탐지 및 추적 기능 강화가 필요하고, 발사된 요격탄의 정확한 유도를 위해서는 업링크 기능 강화가 필요하다. 따라서, 이번 실험에서는 두 가지 경우에 대한 효과를 요격률(전체 5개의 적 탄도탄 중 요격된 탄도탄의 비율)로 비교해보고자 한다.

Fig. 12는 탐지 체계의 기능 중, 탐지와 추적 기능을 중요시 했을 때의 요격률에 대한 결과이다. 구체적으로 탐지 체계의 자원 스케줄링 시 탐지, 추적, 업링크의 중요도를 (10000, 10000, 1)로 할당된 상황의 결과이다. 결과 그림의 X축은 시뮬레이션 시간의 흐름을 나타내며, Y축은 탐지

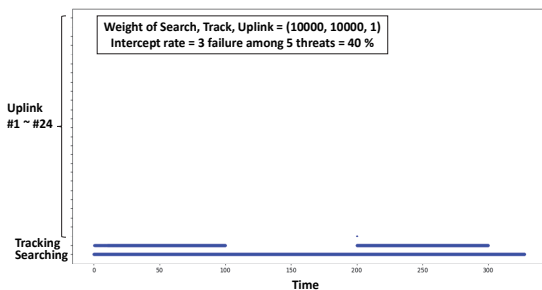


Fig. 12. Radar functions profiles when search and track functions are weighted.

체계 기능의 수행 여부를 나타내며, 탐지(searching), 추적(tracking), 그리고 24개 요격탄에 대한 업링크(uplink #1~24) 기능 활성화를 나타낸다.

결과를 시뮬레이션 시점별로 확인해보면, 탐지와 추적은 시뮬레이션 전반적으로 수행하고 있는 반면에 업링크 기능은 거의 수행되지 않은 것을 확인할 수 있다. 이로 인해 요격탄에 적 탄도탄에 대한 최신 위치 정보가 원활하게 전달되지 않아 결국 유도 기능이 효과적으로 수행되지 않은 상황이다. 결국 효과도 측면에서 보면 3기 위협의 요격에 실패하는 결과로 나타났다(요격률 40%).

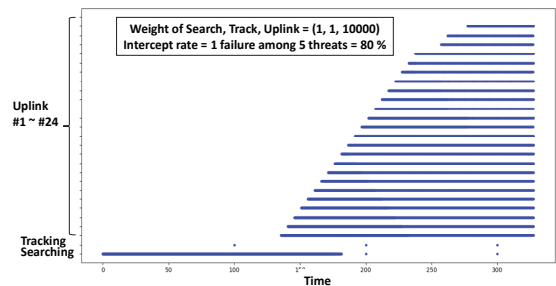


Fig. 13. Radar functions profiles when uplink function is weighted.

반대의 경우에 대한 실험 역시 수행해 보았다. 즉, 탐지, 추적, 그리고 업링크의 중요도를 (1, 1, 10000)로 할당하여 시뮬레이션을 진행하였다. Fig. 13의 시뮬레이션 시점별 결과를 살펴보면, 적 위협이 요격 사정거리에 들어오기 전까지(150 이전)는 요격탄이 발사되지 않아 높은 업링크의 우선순위에도 불구하고 탐지와 추적 기능이 주로 활성화 되었다. 요격탄이 발사된 이후에는 요격탄 유도를 위한 업링크 기능이 대폭 활성화되어 기존의 탐지 및 추적 기능은 잘 수행되지 못한 것을 확인할 수 있다. 그 결과, 1기의 위협에 대한 실패가 발생하였고, 요격률은 따라서 80%의 결과가 나왔다.

위의 실험 결과들을 토대로 어떤 방식이 더 유효한지를 단언할 수는 없다. 실험에서 고려한 두 방식은 모두 과정에서 장, 단점을 파악할 수 있었다. 탐지 및 추적 강화의 경우 지속적인 적 유도탄을 탐지할 수 있지만, 유도 기능의 약화를 확인할 수 있었다. 반면에, 업링크 기능 강화의 경우 효과적인 유도를 기대할 수 있었으나 지속적인 탐지 및 추적 기능은 불가능했다. 비록 실험의 효과도 측면에서는 업링크 기능 강화의 경우가 더 좋게 나왔지만, 이는 시나리오에 기인한 바가 크다. 다시 말해서, 시나리오 상에서 5발의 탄도탄을 한번에 모두 발사하는 것

이 아닌 다른 방식으로 발사되었다면 지금과 다른 결과가 나왔을 것이다.

그러므로 이번 사례 연구를 통해 최적의 탐지 기능 스케줄링 방안을 확립하는 것은 불가능하고 앞으로 보다 다양한 상황에서 많은 시뮬레이션 결과 분석이 필요할 것이다. 다만 이번 연구 결과를 통해, 개발한 시뮬레이터가 향후 최적 스케줄링 방안을 찾는 과정에 충분히 활용될 수 있음을 확인했음을 확인했고, 향후 연구에 적극적으로 활용되기를 바란다.

5. 결론

본 논문은 함정의 대탄도탄전의 효과도 분석을 위해 탄도탄전의 특성을 반영한 시뮬레이션 모델을 제안했다. 제안한 모델은 탄도탄전의 탐지, 지휘통제, 타격 부체계를 각각 모델링 하고 이를 연동 운용할 수 있도록 DEVS 형식론을 통해 개발하였다. 또한 사례 연구를 통해 개발한 시뮬레이션 모델의 적정성을 확인하는 동시에 향후 효과도 분석에 활용될 수 있음을 보여주었다. 특히, 사례 연구에서는 개발한 시뮬레이션 모델에서 반영한 탄도탄의 상세 궤도 모델링과 탐지 자원 스케줄링 파라미터가 적절하게 활용되어 전체 대탄도탄전 수행 과정에서 다양한 발생 상황들을 모의할 수 있었음을 밝힌다.

제시된 사례 연구 결과는 대탄도탄전 효과도 분석의 주요점 등을 시사할 수는 있었으나, 구체적인 효과도 분석 계획을 위한 초석을 제시한 정도로 보는 것이 적절하다. 따라서, 추후 연구로는 현재 개발한 대탄도탄전 시뮬레이션 모델을 기반으로 전문적이고 상세한 효과도 분석을 수행하는 것을 고려하고 있다. 또한, 개발된 시뮬레이션 모델에 다양한 최적화 기법을 적용하여 특정 상황에서 최적의 운용 방안(course of action)을 발견하는 것을 고려하고 있다.

References

- Choi, Inoh(2020). Discrimination of Ballistic Targets with Macro and Micro Motions. Doctoral Dissertation, Department of Electrical Engineering, Pohang University of Science and Technology.
- Kyoung Haing Lee, Jeong Hwan Choi(2016). A Study on the Mission Effect of a Sea-based BMD system. Journal of Aerospace System Engineering, 10(1), 118-126.
- Jun-Soo Kim, Keon-Young Park, Jae-Yeong Lee, Sung- Min Bae, Jai-Jeong Pyun, Chong-Man Kim (2014). A Survey Study of the Combat Effectiveness Analysis Models and Future Research Areas. Korean Journal of Computational Design and Engineering, 19(4), 305-315.
- Jaeho Na, Seinghun Ok, Kwanseob Yoon(2014). Verification of survival probability of a ship equipped with Ship-RCS using SADM. 대한전자공학 학회 학술대회, 1148-1150.
- Boinepalli, S., and Brown, G.A.(2010). Simulation Studies of Naval Warships using the Ship Air Defence Model (SADM).
- Han, seungjin, Lee, minkyu, and Sungyoung Park (2013). Development of Underwater Warfare Models on the Naval Weapon Systems, Journal of the Korea Society for Simulation, 22(4), 1-9.
- Bae, J.-W. et al., 2012, "Methodology of Analyzing the Measure of Combat Effectiveness Reflecting Communication Effects in Network Centric Warfare", Journal of the Korea society for Simulation, 21(3), pp.57-69.
- Sunjun Park, Seungsik Min, Yonghoon Ha(2022). Analysis of the Combat Effectiveness of the Unmanned Surface Vehicle. Journal of the KNST, 5(2),134-142.
- Seo, Kyung-Min, Kim, Tag Gon, Song, Hae-Sang, Kim, Jung Hoon, Chung, Suk Moon(2014).Combat Entity Based Modeling Methodology to Enable Joint Analysis of Performance/Engagement Effectiveness - Part 1 : Conceptual Model Design, Journal of the Korea Institute of Military Science and Technology, 17(2), 223-234.
- Choi, Kwan Seon, junhyoung Kim, taewon Lee(2012). A Case Study of Effectiveness Analysis of Naval Combat System Design. Journal of the Korea Association of Defense Industry Studies, 19(2), 38-51.
- Yeontaek Jung, Hanna Lee, Youngjun Lee, Youdan Kim(2023). Time-to-go Prediction for Low Stage Mid-course Guidance of Multi-stage Anti-ballistic Missile. Proceedings in conference of The Korea Society of Aeronautical and Space Sciences, 2023,

- 266-267.
- HanYoonho, Lee Heoncheol, Hyeokhoon Gwon, Wonseok Choi, Bora Jeong(2022). Parallelized Particle Swarm Optimization with GPU for Real-Time Ballistic Target Tracking. IEMEKK J. Embed. Sys. Appl, 17(6), 355-365.
- Juho Oh, Dongsu Kang(2022). Predicting the Ballistic Missile Range using Long Short Term Memory. KIISE Transactions on Computing Practices, 28(8), 405-412.
- Yong-Soo Park, Chan-Won Jeon, Syng-Man Rhee, Jin-Hong Kim, Sung-Woo Lee, Mun-Ja Jo(2018). A Study of Operational Assessment Test for Ballistic Missile Intercept. Proceedings in conference of The Korea Society of Aeronautical and Space Sciences, 2018, 618-619.
- Syng Man Rhee, Dong Ok Hong, Hyo Chang Kim, Keun Ho Lee, 손동협, Jin Hong Kim(2017). A Study of System Design Acquisition for Anti Ballistic Missile Intercept. Proceedings in conference of The Korea Society of Aeronautical and Space Sciences, 2017, 805-806.
- Zeigler, Bernard P., Tag Gon Kim, and Herbert Praehofer (2000), Theory of Modeling and Simulation.
- Song, H.S., & Kim, T.G.(2010). DEVS Diagram Revised: A Structred Approach For DEVS Modling.
- MISSILE DATA COMPENDIUM (DATCOM) User Manual - 2014 Revision" (PDF). Archived (PDF) from the original on 2022-01-12. Retrieved 2022-10-21.
- Murtaugh, S. A., & Criel, H. E. (1966). Fundamentals of proportional navigation. IEEE spectrum, 3(12), 75-85.
- Pryluk, R., Shima, T., & Golan, O. M. (2014). Shoot - shoot - look for an air defense system. IEEE Systems Journal, 10(1), 151-161.
- Jaechang Yang(2018). Development Trends of Multifunctional Radars for Ships around the World (I). Defense & Technology, (469), 96-111.
- Kwangmin Joo(2023). Task Scheduling Method with Reinforcement Learning using Double Deep Q-Network based for Multi-function Radar.Journal of the Korea Academia-Industrial cooperation Society, 24(7), 458-465.
- Daesung Jang, Sunseo Park, Doohyun Cho, Hanlim Choi, Donggil Yoo, Jonghyun Lee, and Woong Sun(2015). Estimation of Target Tracking Performance for Efficient Resource Allocation in Multi-function Radars. Proceedings in conference of The Korea Society of Aeronautical and Space Sciences, 2015, 676-679.
- Sang Eun Yoo, Dae-Sung Jang(2023). Analysis of Defense Effectiveness in Cooperative Engagement for Multi-layered Missile Defense System With Differing Ballistic Missile Trajectories.Journal of Institute of Control, Robotics and Systems, 29(8), 671-678.
- JeongHoon Kim, HuiSu Kim, YeongHwi Kwon, GiJeong Son, DuHyeong Lee, EunYeong Cho(2023). A Simulation Function Development of the Mission Level Model to Analyze an Maritime Damage Effectiveness of the Howitzer. Journal of the KNST, 6(2), 118-126.



배 장 원 (ORCID : <https://orcid.org/0000-0002-4681-5059/> jangwon_bae@koreatech.ac.kr)

2007 고려대학교 전기전자전파공학부 학사
2009 한국과학기술원 전자공학과 석사
2015 한국과학기술원 산업및시스템공학과 박사
2015~ 2020 한국전자통신연구원 인공지능연구소 선임연구원
2020~ 2023 한국기술교육대학교 산업경영학부 조교수
2023~ 한국기술교육대학교 산업경영학부 부교수

관심분야 : 시스템 분석 및 최적화, 모델링 및 시뮬레이션, 인공지능



이 근 호 (ORCID : <https://orcid.org/0009-0005-3890-9986/> geunho@kaist.ac.kr)

2010 연세대학교 정보산업공학과 학사
2013 KAIST 산업및시스템공학과 석사
2013~ 현재 국방과학연구소 선임연구원
2018~ 현재KAIST 산업및시스템공학과 박사과정

관심분야 : Agent-based M&S, Machine Learning, Optimization



나 형 호 (ORCID : <https://orcid.org/0000-0002-7687-2513/> gudgh723@gmail.com)

2011 한국과학기술원 항공우주공학 학사
2013 한국과학기술원 항공우주공학 석사
2013~ 2018 국방과학연구소 연구원
2019~ 2021 국방과학연구소 선임연구원
2021~ 현재 한국과학기술원 항공우주공학 박사과정

관심분야 : 다중에이전트 강화학습, 유도 및 제어, 시스템 최적화



문 일 철 (ORCID : <https://orcid.org/0000-0002-1798-1306/> icmoon@kaist.ac.kr)

2004 서울대학교 컴퓨터공학사, BS
2008 카네기멜론대학교 전산학박사, Ph.D
2011~ 현재 KAIST 산업및시스템공학과 조교수, 부교수

관심분야 : 시뮬레이션, 국방 M&S, 인공지능