

# Tier 기반 경량 교전 시뮬레이션 구조 제안 및 정량적 평가

A Tier-Based Lightweight Engagement Simulation Framework and Its Quantitative Evaluation

현 철<sup>\*1)</sup> . 김현승<sup>1)</sup> . 김동건<sup>1)</sup> . 장재덕<sup>1)</sup>

Chul Hyun<sup>1)</sup> . Hyunseung Kim<sup>1)</sup> . Donggeon Kim<sup>1)</sup> . Jae Deok Jang<sup>1)</sup>

## [ 초 록 ]

교전 시뮬레이션에서는 모델 구성 요소별 특성이 서로 달라 동일한 시간 해상도를 적용하기 어려운 경우가 많다. 본 연구에서는 객체별로 상이한 해상도를 설정할 수 있는 경량 시뮬레이션 구조를 제시하고, 단일 교전 시나리오를 통해 연산 효율과 정확도 측면에서의 특성을 평가하였다. 표적은 주기적 기동을 수행하고, 미사일은 종말유도 기반으로 추적하도록 설정하여 해상도 차이에 따른 영향을 비교하였다. 제안 구조는 주기적 갱신과 이벤트 기반 처리를 결합하여, 물리 모델을 단순화하지 않은 상태에서 해상도 조정이 가능하도록 구성하였다. 실험 결과, 제안된 구조는 연산량을 감소시키면서 기준 모델과 유사한 수준의 명중 정확도를 유지하였다. 반면, 해상도를 일괄적으로 낮춘 단순 모델은 명중거리 오차 증가가 확인되었다. 본 연구는 해상도 조정이 가능한 교전 시뮬레이션 구조의 기본 동작 특성을 제시한다.

## [ ABSTRACT ]

In engagement-level simulations, it is often difficult to apply a uniform time resolution due to differing characteristics of individual entities. This study presents a lightweight simulation structure that allows each entity to operate with its own time resolution, and evaluates its computational and accuracy characteristics using a representative engagement scenario. The target performs periodic evasive maneuvers, and the missile follows terminal proportional navigation to examine the effects of resolution differences. The proposed structure combines periodic updates with event-based processing, enabling resolution adjustment without simplifying the physical models. Results show that the structure reduces computational load while maintaining accuracy comparable to a high-resolution reference model. In contrast, a uniformly low-resolution model exhibited increased miss-distance errors. The study provides baseline characteristics of an engagement simulation structure with adjustable resolution.

**Key Words** : Multi-resolution simulation (다중 해상도 시뮬레이션), Tier-based architecture (Tier 기반 구조), Engagement simulation (교전 시뮬레이션), Computational load reduction (연산량 절감), Proportional Navigation (PN) guidance (PN 종말유도)

## 1. 서론

교전 시뮬레이션은 무기체계 성능 분석과 운용개념 평가에 널리 활용되며, 센서, 표적, 유도탄, 교전관리 등 서로 다른 시간적 특성을 가진 구성요소들이 결합된 형태로 구성된다

[1]. 이러한 구성요소들은 고유한 갱신 주기와 계산 요구도를 지니지만, 실제 구현에서는 단일한 고정 시간해상도를 전체 모델에 일괄 적용하는 방식이 일반적으로 사용된다. 이 방식은 구현이 단순하다는 장점이 있으나, 일부 요소에서는 과도한 연산량을 유발하고, 다른 요소에서는 필요한 정밀도를 확보하지 못하는 비효율을 초래할 수 있다.

이러한 문제의식은 모델 충실도(fidelity)를 조절하여 연산량과 정확도의 균형을 맞추려는 다중충실도(Multi-fidelity) 연구에서도 반복적으로 제기되어 왔다. 국방 분야에서도 구성요소별 특성을 반영하여 모델의 해상도 또는 충실도를 차등 적용함으로써 시뮬레이션 성능을 개선하려는 접근이 제안된 바

1) LIG넥스원 해양연구소  
(Maritime R&D Center, LIG Nex1, Korea)  
\* Corresponding author, E-mail: chul.hyun@gmail.com  
Copyright © The Korean Institute of Defense Technology  
Received : November 26, 2025 Revised : December 30, 2025  
Accepted : December 30, 2025

있다 [2], 또한 비즈니스·산업용 DES 분야에서도 동일한 정확도-연산비용 트레이드오프를 최소화하기 위한 최적화 기반의 다중충실도 기법이 연구되고 있다 [3]. 해군 플랫폼 영역에서도 복합 생존성 평가와 같이 다양한 시간적 스케일을 포함하는 문제에서 통합 시뮬레이션 구조가 요구되며, 이를 지원하기 위한 프레임워크 연구가 이루어지고 있다 [4]. 그러나 이러한 기존 연구들은 개념적 구조 정의나 충실도 조절 기법 중심으로 이루어져 있으며, 실제 교전 수준의 시나리오에서 시간해상도 설정이 결과와 연산효율에 미치는 영향을 정량적으로 비교한 사례는 제한적이다.

저자들은 앞선 연구에서 교전 단위에서 구성요소별 시간해상도를 구분하여 동작할 수 있는 다중해상도 통합 구조를 제안한 바 있으며, 객체 간의 연동과 확장성을 중심으로 구조적 타당성을 확인하였다 [5]. 다만 당시 연구는 개념적 구조 설계에 중점을 두었으며, 실제 교전 시나리오에서 해상도 차이가 정량적으로 어떤 영향을 발생시키는지는 다루지 않았다. 또한 다중해상도 시뮬레이션 관점에서는 구성요소 간 해상도 차이로 인해 발생하는 상태 불일치(consistency) 문제가 오래전부터 지적되어 왔으며 [6], 이러한 이슈는 교전 시뮬레이션에서도 동일하게 적용된다.

본 연구는 이러한 배경을 바탕으로, 단일 교전 시나리오를 구성하여 시간해상도 설정 방식이 교전 결과와 연산 효율에 미치는 영향을 정량적으로 분석하는 것을 목적으로 한다. 표적의 주기적 기동과 PN(Proportional Navigation) 기반 종말유도 과정을 포함하는 교전 구성에서, 고정 고해상도 모델, 혼합 해상도 모델, 단순 저해상도 모델을 비교함으로써 해상도 조정이 정확도·거동·연산량에 미치는 영향을 도출한다. 본 연구는 특정 무기체계의 성능 모사보다는, 가볍게 구성된 교전 시뮬레이션에서 시간해상도 조정이 갖는 기본적 특성을 검토하기 위한 기초 분석을 제공하며, 향후 다중해상도 기반 시뮬레이션 구조의 활용 가능성을 확인하는 기반 자료로 활용될 수 있다.

## 2. 시뮬레이션 구조 및 모델링

### 2.1 교전 시나리오 개요

본 연구에서는 단순화된 교전 상황을 구성하여 시간해상도 설정이 시뮬레이션 결과에 미치는 영향을 정량적으로 분석하였다. 표적은 일정 고도에서 선형 운동을 수행하면서 주기적인 횡기동을 포함하며, 유도탄은 발사 후 비행을 통해 표적을 요격하는 종말단계로 구성된다. 모든 모델은 2차원 평면에서 동작하도록 단순화하였으며, 공력·중력·고도 요소 등은 본 연구의 목적과 무관하므로 생략하였다. 시나리오의 목적은 특정 무기체계의 성능 재현이 아니라, 해상도 차이가 계산 결과에 어떠한 형태로 반영되는지를 확인하는 데 있다.

### 2.2 표적 운동 모델

표적은 초기 속도로 직선 비행하며 동시에 횡방향으로 작은 진폭의 sinusoidal 기동을 수행한다. 표적의 위치 갱신식은 다음 식(1)과 같다.

$$\begin{aligned} x_T(t+\Delta t) &= x_T(t) + v_T \cos \psi_T(t) \Delta t \\ y_T(t+\Delta t) &= y_T(t) + v_T \sin \psi_T(t) \Delta t \\ \psi_T(t) &= A_\psi \sin(\omega t) \end{aligned} \quad (1)$$

여기서  $v_T$ 는 표적 속도,  $\psi_T$ 는 순간적 운동방향,  $A_\psi$ 와  $\omega$ 는 횡기동의 진폭과 주기이다. 이 기동은 모델 해상도 차이가 종말단계에서 누적 오차 형태로 나타날 수 있도록 의도적으로 포함된 요소이다.

### 2.3 유도탄 모델 및 비례항법 유도

유도탄은 초기 위치에서 정해진 속력  $v_M$ 을 유지하며 비행하는 것으로 가정한다. 자세·추력·공력 모델은 단순화를 위해 포함하지 않았고, 조향은 비례항법(Proportional Navigation, PN) 유도 법칙을 따른다.

PN의 조향 각속도는 식(2)와 같이 정의된다.

$$\dot{\lambda}_M = N \dot{\lambda} \quad (2)$$

여기에서  $N$ 은 항법상수,  $\lambda$ 는 시선각(Line of Sight, LOS),  $\dot{\lambda}$ 는 LOS 각속도이다.

유도탄 운동은 식(3)과 같이 계산된다.

$$\begin{aligned} x_M(t+\Delta t) &= x_M(t) + v_M \cos \psi_M(t) \Delta t \\ y_M(t+\Delta t) &= y_M(t) + v_M \sin \psi_M(t) \Delta t \\ \theta_M(t+\Delta t) &= \theta_M(t) + \dot{\lambda}_M \Delta t \end{aligned} \quad (3)$$

본 모델은 단순하지만 PN유도의 충실한 특성을 반영하므로 해상도 민감도 비교에는 충분하다.

### 2.4 시간해상도 적용 방식

본 연구에서는 시간해상도 조합에 따른 영향을 비교하기 위해 세 가지 Case를 구성하였다. 여기서 시간해상도는 각 구성요소의 상태가 갱신되는 고정 시간 간격(time step, dt)을 의미하며, 본 연구에서는 미사일과 표적에 대해 각각 독립적인 time step을 적용하였다. 각 Case는 표적과 미사일의 갱신 간격(time step)만을 다르게 적용하였고, 나머지 모델 구조와 초기조건은 동일하게 유지하였다. 표 1은 각 Case에서 적용된 시간해상도 구성을 정리한 것이다.

표 1. 시간해상도 조합

Table 1. Time-step configurations

Case	Missile time step( $dt_M$ )	Target time step( $dt_T$ )	Description
Baseline	1ms	1ms	High resolution
Tier	1ms	20ms	Tiered resolution
Simplified	20ms	20ms	Simplified resolution

Baseline 모델은 미사일과 표적 모두 1 ms의 time step을 적용한 구조로, 가장 높은 시간해상도를 가지며 비교 기준(reference)으로 사용하였다. Tier 모델은 미사일은 동일한 1 ms time step을 유지하면서 표적의 time step만 20 ms로 확장하여, 구성요소 간 해상도 비대칭이 발생하는 상황을 표현하였다. Simplified 모델은 미사일과 표적 모두 20 ms의 time step을 적용한 구조로, 전체 모델의 시간해상도를 일괄적으로 낮춘 경우를 의미한다. 이 세 가지 구성은 교전 시뮬레이션에서 실제로 선택될 수 있는 대표적인 시간해상도 조합을 반영하며, 모델의 정밀도와 계산량 사이의 특성을 비교하는 데 적합하다.

본 연구에서 Tier 모델은 해상도를 고정적으로 분리하는 단순한 형태이지만, 교전 과정에서 특정 이벤트 구간(예: 종말유도 진입)에서 해상도 차이가 어떻게 반영되는지를 확인한다는 점에서 다중 해상도(Tier-based) 시뮬레이션 구조의 핵심 개념을 간접적으로 포함하고 있다. 이는 교전 단계별 요구 정밀도에 따라 해상도를 차등 적용하는 Tier 구조의 특징을 단순화된 방식으로 평가하는 데 유용한 기반을 제공한다.

### 2.5 연산 및 상태 갱신 구조

각 Case는 동일한 수치적 구조를 갖추며, 단지 갱신 주기만 다르게 적용된다. 시뮬레이션은 전체 시간을 가장 작은 시간 간격(1 ms) 기준으로 진행하고, 각 구성요소는 자신의 갱신 주기가 도달할 때마다 상태를 갱신한다. 예를 들어 Tier 모델에서 표적은 20 ms가 경과한 순간에만 새로운 상태를 계산하며, 그 외의 시간 동안에는 이전 상태를 유지한다. 이러한 방식은 실제 다중해상도 시뮬레이션에서 구성요소 간 비동기 업데이트가 발생하는 상황을 간단하게 모사하는 것이다.

모든 모델에서 미사일과 표적의 상대 위치는 매 tick마다 계산되며, 거리가 사전에 설정한 기준거리 이하로 감소하면 명중으로 판정한다. 명중 조건은 식(4)와 같이 정의된다.

$$R(t) = \sqrt{(x_T - x_M)^2 + (y_T - y_M)^2} \leq R_{hit} \quad (4)$$

본 연구에서는  $R_{hit} = 5m$ 를 사용하였다. 또한 최대 시뮬레이션 시간인 60초 이내에 이 조건이 충족되지 않는 경우에는 요격 실패로 처리하였다.

연산량 분석을 위해 각 구성요소의 갱신 횟수와 전체 시뮬레이션의 CPU 시간을 함께 기록하였다. 동일한 상황에서 시간해상도 조합만을 변경하였으므로, 갱신 주기의 차이가 연산량과 결과 정확도에 어떤 방식으로 반영되는지 직접 비교할 수 있다.

## 3. 시뮬레이션 결과 및 분석

본 장에서는 세 가지 시간해상도 조합(Baseline, Tier, Simplified)에 대해 동일한 교전 환경을 적용하여 시뮬레이션을 수행하고, 각 모델의 교전 거동과 연산 효율 및 정확도를 비교하였다.

### 3.1 교전 시나리오 개요

그림 1은 본 연구에서 사용한 교전 시나리오의 전반적 구조를 나타낸다. 미사일은 (-20 km, -5 km) 부근에서 발사되어 PN 유도법칙을 기반으로 표적을 추적하며 비행한다. 표적은 일정한 전진 속도와 소규모 횡방향 기동을 반복하는 패턴으로 이동한다. 해당 그림은 교전 시나리오의 기본 구성과 전반적인 기하적 배치를 설명하기 위한 것으로, 비교 대상인 세 Case 중 Baseline의 궤적을 예시로 제시하였다. 전체 비행 과정에서 세 모델의 시간해상도 차이가 궤적의 전반적 형태를 변형시키는 현상은 관찰되지 않았다.

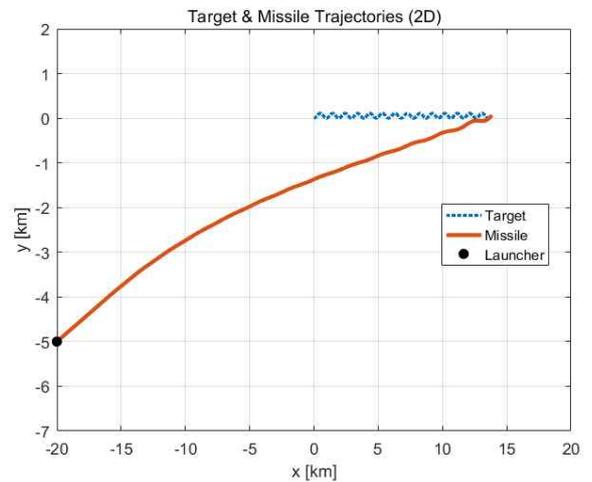


그림 1. 교전 시나리오에서의 표적 및 미사일 2차원 궤적.

Fig. 1. Target & Missile Trajectories (2D)

### 3.2 종말단계 거리 변화 비교

그림 2는 약 57.08~57.16초 구간에서 표적과 미사일 간의 거리를 시간에 따라 비교한 결과이다.

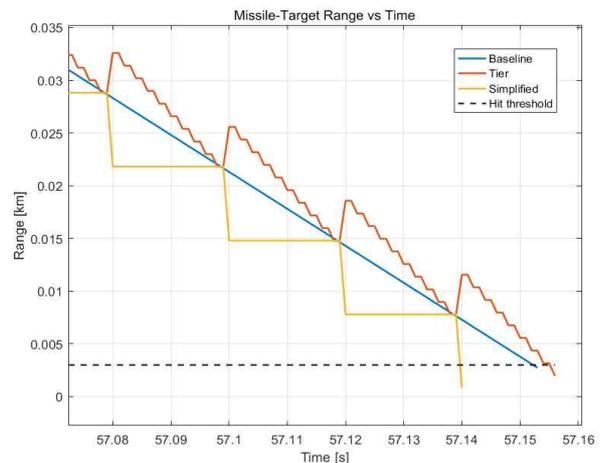


그림 2. 세 가지 시간해상도 모델의 종말 단계 미사일-표적 거리 변화.

Fig. 2. Missile-Target Range vs Time (Zoomed Terminal Phase)

Baseline 모델은 1 ms 해상도로 연속적인 업데이트가 이루어지므로 종말단계에서 거리 감소가 부드럽고 연속적으로 나타난다. Tier 모델은 표적의 업데이트 주기가 20 ms로 증가하면서 거리 변화가 계단형으로 나타나지만, 종말 구간에서의 평균적인 거리 감소 추세와 충돌 시점은 Baseline과 큰 차이를 보이지 않는다. 이러한 계단형 특성은 종말 단계가 하나의 독립적 이벤트 구간으로 간주될 수 있음을 보여주며, 구성요소별로 해상도를 다르게 적용하는 Tier 기반 구조에서 전형적으로 관찰되는 현상이다. 즉, 종말구간에서는 미사일이 높은 주기로 갱신되는 반면 표적은 저해상도로 유지되기 때문에, 이벤트 기반 해상도 전환의 개념이 단순한 형태로 반영된 것으로 볼 수 있다.

Simplified 모델 역시 충돌 시점 자체는 유사하게 나타나지만, 낮은 시간해상도로 인해 종말단계에서 거리 오차가 증가하며 최소거리 성능에서는 차이가 발생한다. Baseline 모델의 최소거리는 3.336 m, Tier 모델은 3.167 m로 두 모델 모두 설정된 명중 기준(5 m)을 충족하였다. 반면 Simplified 모델은 최소거리가 7.798 m까지 증가하여 명중 조건을 만족하지 못하였으며, 이는 낮은 시간해상도가 표적의 횡기동을 충분히 반영하지 못해 종말단계에서 오차가 누적된 결과로 해석할 수 있다.

### 3.3 연산량 비교

그림 3은 세 가지 시간해상도 모델의 CPU 연산시간을 비교한 결과이다. Baseline 모델은 미사일과 표적 모두 1 ms 간격으로 갱신되며, 전체 시뮬레이션 동안 약 57,000회 이상의 연산이 수행되어 CPU 시간은 0.326 s로 측정되었다. Tier 모델은 표적의 시간해상도만 20 ms로 확장함으로써 표적 업데이트 부담이 크게 감소하였고, 그 결과 CPU 시간은 0.066 s로 줄어 Baseline 대비 약 80% 이상의 연산량 절감 효과를 보였다. 미사일은 여전히 1 ms로 갱신되므로 정확도는 유지되지만, 전체 계산량은 표적 측의 단순화만으로도 크게 감소하는 특징을 보인다.

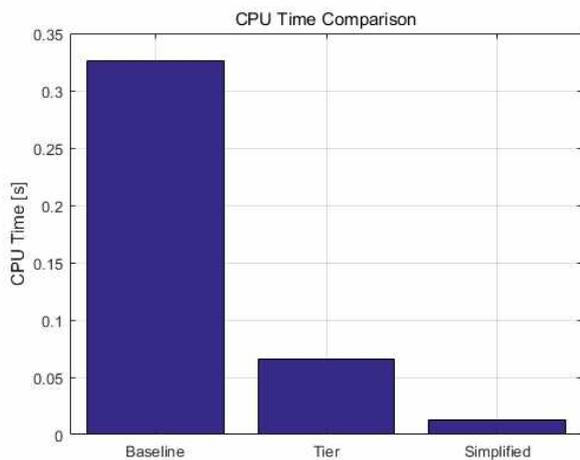


그림 3. 세 시간해상도 모델의 CPU 시간 비교.  
Fig. 3. CPU Time Comparison

Simplified 모델은 미사일과 표적 모두 20 ms 해상도를 적용하여 연산량이 가장 적으며, CPU 시간은 0.013 s로 측정되었다. 이는 Baseline 대비 약 96% 이상의 연산량 감소에 해당하며, Tier 대비로도 추가적인 절감 효과가 확인된다. 특히 Simplified 모델은 전체 업데이트 횟수가 크게 줄어드는 만큼 CPU 시간 또한 가장 짧게 나타났으며, 해상도 조정이 연산 효율에 직접적으로 반영된다는 점을 명확히 확인할 수 있다.

종합적으로, 시간해상도를 부분적으로만 조정된 Tier 모델도 Baseline 대비 상당한 연산량 감소 효과를 보였으며, 전체를 단순화한 Simplified 모델은 가장 큰 폭의 감소를 기록하였다. 이는 교전 시뮬레이션에서 구성요소별 시간 민감도를 고려하여 해상도를 선택할 경우, 계산 효율과 모델 정밀도 간 균형을 조정할 수 있음을 보여준다.

연산량 비교는 단일 시나리오 실행에 대한 결과이지만, 동일한 조건에서 시간해상도 조합에 따른 상대적인 계산 부담 차이를 정량적으로 비교하는 데 목적이 있다. 이러한 관점에서 Tier 모델은 Baseline 대비 계산 비용을 크게 줄이면서도 결과 정확도를 유지하였으며, 해상도 조정에 따른 계산 효율 개선 가능성을 구조적으로 확인할 수 있었다.

### 3.4 정확도 비교

그림 4는 Baseline 모델을 기준으로 세 모델의 최소거리 오차를 나타낸 것이다. Tier 모델의 최소거리 편차는 -0.17 m로 Baseline과 거의 동일한 수준의 정확도를 유지하였다. 반면 Simplified 모델은 +4.46 m의 편차를 보였으며, 이는 낮은 시간해상도로 인해 표적의 주기적 기동 변화가 충분히 반영되지 못한 결과로 해석된다. 모든 모델에서 종말단계까지의 접근은 이루어졌으나, Simplified 모델의 경우 사전에 정의한 명중 기준을 만족하지 못하는 수준의 최소거리 오차가 확인되었다. 정리하면, Tier 모델은 연산량을 크게 줄이면서도 Baseline과 동등한 수준의 정확도를 유지하였으며, Simplified 모델은 연산 효율은 가장 높지만 정확도 손실이 명확하게 발생하였다.

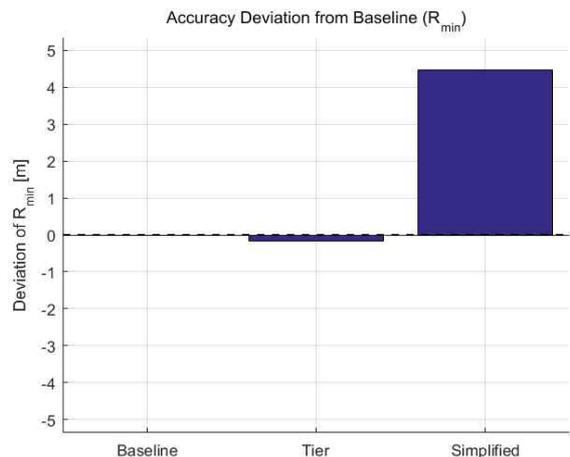


그림 4. Baseline 대비 최소거리(R<sub>min</sub>) 편차 비교.  
Fig. 4. Accuracy Deviation from Baseline (R<sub>min</sub>)

### 3.5 종합 분석

본 연구에서 수행된 세 가지 시간해상도 모델(Baseline, Tier, Simplified)에 대한 비교 결과는 모델의 연산 효율과 정확도 사이의 상관관계를 명확하게 보여준다. 특히 Tier 모델은 표적의 갱신 주기만을 20 ms로 확장한 구조임에도 불구하고 Baseline과 거의 동일한 수준의 종말 오차를 유지하였다. 이는 표적의 짧은 구간 횡방향 기동이 PN 유도 과정에서 상대적으로 낮은 민감도로 반영되기 때문이며, 미사일의 높은 업데이트 빈도(1 ms)가 이러한 장점을 유지하는 데 기여한 결과로 해석된다. 또한 Tier 모델은 종말단계를 하나의 이벤트 구간으로 간주할 수 있으며, 이 구간에서 미사일과 표적의 해상도가 서로 다르게 적용되면서 계단형 거리 변화가 나타났다. 이러한 현상은 다중 해상도(Tier-based) 구조의 핵심인 ‘구간별 해상도 차등 적용’이 단순화된 형태로 반영된 결과로, 해상도 전환 개념의 유효성을 실험적으로 확인한 사례라 할 수 있다.

Lock-on 시점에서 해상도 차이에 따른 Tier 구조의 특성이 드러났다. Baseline 모델의 Lock-on 시점은 7.204 s로 가장 빠르게 검출되었으며, Tier 모델은 표적 업데이트 주기(20 ms)의 영향으로 7.209 s에서 이벤트가 인식되어 약 0.005 s 늦게 나타났다. 이와 같이 Lock-on 검출이 표적 측 시간해상도에 종속되는 현상은 다중 해상도 구조에서 전형적인 이벤트 인식 지연(event-detection delay)으로 해석될 수 있다. 비록 본 시나리오에서는 차이가 미세하였으나, 탐색 구간이 길거나 표적 기동이 큰 상황에서는 더욱 명확한 성능 차이로 이어질 수 있다.

Simplified 모델에서는 미사일과 표적의 시간해상도가 모두 20 ms로 설정되면서 거리 변화의 불연속성이 크게 나타났으며, 이로 인해 최소거리(R\_min)의 편차가 Baseline 대비 약 4.46 m 증가하였다. 이는 낮은 해상도에서 발생하는 수치적 근사 오차가 표적의 기동 패턴을 충분히 반영하지 못하며, 종말단계에서의 정렬 과정에 누적 오차가 반영된 결과로 풀이된다. 그럼에도 불구하고 충돌 시점은 세 모델 간 거의 동일하며, 전체적인 교전 결과(명중 여부)에는 영향을 미치지 않았다.

연산량 측면에서는 세 모델 간 차이가 극명하게 나타났다. Baseline은 미사일·표적 모두 1 ms로 업데이트되면서 연산 횟수가 가장 높고 CPU 시간도 가장 긴 반면, Simplified 모델은 Baseline 대비 약 96% 이상의 연산량을 절감하였다. Tier 모델은 두 모델 사이에 위치하며 연산량은 크게 줄이면서도 결과 정확도에서는 Baseline과 거의 동일한 성능을 보였다. 이는 교전 모델에서 구성요소별 시간 민감도에 차이가 있다는 점을 활용할 경우, 실질적으로 연산 효율을 확보하면서도 필요한 정밀도를 유지할 수 있음을 시사한다. 특히 Tier 모델에서 나타난 성능은, 특정 교전 단계(예: 종말유도 구간)를 이벤트로 간주하고 해당 구간에서만 높은 정밀도를 유지하는 방식이 충분히 효과적일 수 있음을 보여주며, 이는 Tier 기반 시뮬레이션 구조의 실용적 가능성을 뒷받침한다.

전반적으로 본 연구의 결과는 다중 해상도 접근이 교전 시뮬레이션의 효율성을 향상시키는 유효한 수단이 될 수 있음

을 보여주며, 특히 Tier 방식과 같이 부분적 해상도 조정만으로도 상당한 연산 절감 효과를 얻을 수 있음을 확인하였다. 이는 대규모 교전 분석이나 실시간 시뮬레이션 환경에서 더욱 높은 활용 가능성을 제공한다.

## 4. 결론

본 연구에서는 동일한 교전 환경에서 시간해상도 조합을 달리하여 세 가지 모델을 구성하고, 해상도 조정이 교전 결과와 연산 효율에 미치는 영향을 분석하였다. Baseline은 가장 높은 정밀도를 제공하는 기준 모델로 사용되었으며, Tier 모델은 표적의 해상도만을 부분적으로 낮춘 구조, Simplified 모델은 전체 구성요소의 해상도를 일괄적으로 낮춘 형태로 구성하였다. 본 연구는 해상도를 고정적으로 나누어 적용하였지만, 이러한 구성은 종말단계와 같이 특정 교전 이벤트에서 해상도 차이가 어떻게 결과에 반영되는지를 확인할 수 있는 Tier 기반 시뮬레이션 구조의 단순화된 형태로 볼 수 있다.

비교 결과, Tier 모델은 연산량을 크게 줄이면서도 Baseline과 거의 동일한 종말 정확도를 유지하는 것으로 나타났다. 반면 Simplified 모델은 연산 효율이 가장 높았으나 종말단계에서 거리 오차가 증가하여 정확도 저하가 확인되었다. 이러한 경향은 PN 기반 교전 시뮬레이션에서 구성요소별 시간 민감도가 상이하며, 모든 구성요소에 동일한 고해상도를 요구하지 않는다는 점을 보여준다.

이러한 결과는 다중 해상도 기반의 경량 교전 시뮬레이션 구조가 계산 효율과 정밀도 간의 균형을 확보하는 유효한 접근임을 시사한다. 특히 부분적 해상도 조정만으로도 충분한 정확도를 유지할 수 있어, 대규모 반복 시뮬레이션이나 실시간 운용 분석과 같은 연산 제약 환경에서 실용적인 대안이 될 수 있다.

향후 연구에서는 보다 다양한 교전 양상, 센서 지연, 비선형 기동 등을 반영한 조건에서 다중 해상도 접근의 안정성과 적용 범위를 확장하는 연구가 가능할 것으로 판단된다.

## References

- [1] S. Lee, S. Lee, K.-C. Hwang, and S. Kim, "Design and Implementation of the Multi-resolution Interoperation Simulation Using HLA/RTI," *Journal of the Korea Society for Simulation*, vol. 24, no. 1, pp. 9 - 16, 2015. DOI: 10.9709/JKSS.2015.24.1.009.
- [2] S. H. Choi, K.-M. Seo, S. J. Kwon, and T. G. Kim, "Multi-fidelity Modeling and Simulation Methodology to Enhance Simulation Performance of Engineering-level Defense Model," *Journal of the Korea Society for Simulation*, vol. 22, no. 4, pp. 67 - 82, 2013. DOI: 10.9709/JKSS.2013.22.4.067.
- [3] W. Chen, W. Hong, H. Zhang, P. Yang, and K. Tang, "Multi-Fidelity Simulation Modeling for Discrete Event Simulation: An Optimization Perspective," *IEEE Transactions on Automation Science and Engineering*, vol. 20, no. 2, pp. 1 - 14, 2022. DOI:

10.1109/TASE.2022.3173296.

- [4] A. Woolley and T. Whitehouse, "A modelling and simulation framework to assess integrated survivability of naval platforms in high threat environments," *Ocean Engineering*, vol. 257, 111479, 2022. DOI: 10.1016/j.oceaneng.2022.111479.
- [5] C. Hyun, D. Kim, H. Kim, and J. D. Jang, "Design of a Multi-resolution Integration Structure for Engagement-level Naval Simulations," *Journal of the KNST*, vol. 8, no. 2, pp. 300 - 307, 2025. DOI: 10.31818/JKNST.2025.6.8.2.300.
- [6] P. F. Reynolds Jr., A. Natrajan, and S. Srinivasan, "Consistency maintenance in multiresolution simulation," *ACM Transactions on Modeling and Computer Simulation*, vol. 7, no. 3, pp. 368 - 392, 1997. DOI: 10.1145/259207.259235.