

# 고속 비유도 교전의 정확도-연산 비용 트레이드오프 개선: 이중 해상도 명중 판정 프레임워크

Improving the Accuracy-Compute Trade-off in High-Speed Unguided Engagements: A Dual-Resolution Hit Determination Framework

현 철<sup>\*,1)</sup> · 김현승<sup>1)</sup> · 김동건<sup>1)</sup> · 이성균<sup>1)</sup>

Chul Hyun<sup>1)</sup> · Hyunseung Kim<sup>1)</sup> · Donggeon Kim<sup>1)</sup> · Sungkyun Lee<sup>1)</sup>

## [ 초 록 ]

고속 비유도 교전 시뮬레이션에서 시간 해상도는 명중 판정의 신뢰도와 연산 비용을 좌우한다. 본 논문은 발사 시점 정렬과 조우 구간 정밀화를 결합한 이중 해상도 프레임워크를 제안한다. 핵심은 전 구간을 촘촘히 계산하지 않고, 발사 이벤트와 탄-표적이 근접하는 구간에만 해상도를 집중해 샘플링 누락으로 발생하는 미탐을 줄이는 것이다. 단순화된 2차원 모델과 몬테카를로 실험을 통해, 제안 방식이 고정 시간 스텝 대비 동일한 판정 신뢰도를 더 적은 계산으로 달성함을 보였다. 아울러 종말단만 세분화하는 접근은 충분하지 않으며, 발사 시점 정렬이 함께 고려되어야 함을 확인했다. 제안 기법은 대형 교전 시뮬레이터에 멀티레이트 방식으로 통합할 수 있는 가능성도 논의한다.

## [ ABSTRACT ]

In high-speed unguided engagement simulations, time-step resolution governs both the reliability of hit determination and computational cost. We propose a dual-resolution framework that combines firing-time alignment with encounter-region refinement. The key idea is to allocate fine resolution only around the firing event and the near-encounter window, thereby reducing missed hits caused by sampling gaps without refining the entire timeline. Using a simplified 2-D model with Monte Carlo experiments, we show that the proposed method achieves comparable hit determination with less computation than a fixed-step baseline. We also verify that end-phase refinement alone is not sufficient unless firing-time alignment is considered. Finally, we discuss the potential for multi-rate integration within larger engagement-level simulators.

**Key Words** : high-speed unguided engagement (고속 비유도 교전), hit determination (명중 판정), time-step resolution (시간 해상도), firing-time alignment (발사 시점 정렬), encounter-region refinement (조우 구간 정밀화)

## 1. 서 론

고속 비유도 교전에서는 탄과 표적의 상대 운동이 짧은 시간 안에 크게 변하므로, 시뮬레이션의 시간 해상도가 명중 판정의 신뢰도와 연산 비용을 좌우한다. 설계와 평가 단계에서는 전 구간을 고정 시간 스텝으로 적분하는 방법이 흔히 쓰이고, 계산량을 줄이기 위해 근접 구간만 촘촘히 보는 방

식도 널리 사용된다. 그러나 전 구간을 세밀하게 적분하면 비용이 과도해지고, 근접 구간만 세분화하는 접근은 발사 시점이 거친 해상도 격자에 묶이는 순간 생기는 구조적 오류를 막지 못한다. 발사 시점이 시뮬레이션 그리드의 위상과 어긋나면, 연속시간에서는 명중 가능한 사건이 이산 샘플링에서는 놓칠 수 있다. 본 논문은 이러한 실패를 두 가지 축으로 구분해 다룬다. 첫째, 전역 발사 스텝이 거칠어 이상적 발사 시각을 구현하지 못해 명중 기회 자체가 사라지는 발사 기회 상실이다. 둘째, 발사는 가능했지만 조우 구간을 충분히 샘플링하지 못해 실제 명중을 불명중으로 처리하는 종말 미탐이다. 이러한 실패 양상은 발사 원도우와 최적 발사 시점이 성능을 좌우한다는 기존 보고와도 맥을 같이 한다 [1].

관련 연구는 크게 세 갈래로 요약된다. 첫째, 확률과 분산

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 : August 29, 2025 Revised : September 29, 2025

Accepted : September 30, 2025

에 기반한 명중 모델과 학습 기반 발사 의사결정 연구는 교전 효과도를 빠르게 추정하거나 발사 타이밍 전략을 고도화하는 데 유용하지만, 개별 사건의 시간 정렬 문제, 즉 발사 위상과 근접 순간에서 발생하는 미세한 샘플링 문제를 직접 해소하지는 않는다 [2-4]. 둘째, 고충실도 궤적 시뮬레이션 분야에서는 시간 스텝 설정과 수치 적분이 충돌·명중 판정과 시스템 평가에 민감하게 작용함이 반복적으로 보고되었으나, 대형 교전급 시뮬레이터에 그대로 적용하기에는 비용과 복잡도의 제약이 크다 [5]. 셋째, 몬테카를로 기반 교전·피해확률 분석은 확률적 요소를 구조화해 정량 검증하는 절차를 제시하지만, 샘플링 해상도를 어디에 어떻게 배치할지에 대한 설계 원칙은 별도로 다뤄질 필요가 있다 [6]. 또한 표적 상태 예측과 관측기 기반의 타이밍 정렬 기법은 조우 시점 판정의 정확도와 연관되어 논의된다 [7].

이러한 배경 위에서 본 논문은 발사 시점 정렬과 조우 구간 정밀화를 결합한 이중 해상도 프레임워크를 제안한다. 전 구간을 미세화하지 않고 발사 직후의 짧은 구간과 탄과 표적이 가까워지는 짧은 시간창에만 해상도를 집중함으로써, 발사 기회상실과 종말 미탐을 동시에 줄이고 연산량을 관리하는 것이 목표다. 단순화된 2차원 등속 모델과 몬테카를로 실험을 통해, 근접 구간만 세분화하는 접근은 충분조건이 아니며 발사 시점 정렬이 함께 고려되어야 함을 보이고, 제안 방식이 고정 시간 스텝 대비 동일한 판정 신뢰도를 더 적은 계산으로 달성함을 확인한다. 본 연구에서는 시간 해상도 효과를 분명히 관찰하기 위해 2차원, 직선 등속, 무외력 조건을 채택한다. 이 설정을 기본으로 삼아, 3차원 운동과 외력, 비대칭 조우각, 비선형 기동 등은 동일 원리를 유지한 채 이후에 단계적으로 확장할 수 있다. 또한 대형 교전급 시뮬레이터에서는 발사와 조우 구간만 세분화하고 중간 구간은 상위 모델의 동기화 주기에 맞춰 거칠게 적분하는 멀티레이트 통합 방식을 권장한다. 이는 교전 레벨의 의사결정·확률 모델과도 자연스럽게 결합될 수 있다 [2-4].

논문 구성은 다음과 같다. 2장은 문제 정의와 시뮬레이션 구조, 명중 판정 기준과 지표를 제시한다. 3장은 실험 설정과 시나리오를 설명하고 주요 수치 결과를 제시하면서 해석과 실무적 시사점을 논의한다. 5장은 결론과 한계, 향후 확장을 제시한다.

## 2. 문제 정의 및 시뮬레이션 구조

### 2.1 모델링 가정과 좌표계

본 연구는 시간 해상도의 영향을 분리해 관찰하기 위해 2차원, 직선 등속, 무외력 조건을 채택한다. 발사체는 원점에서  $x$ 축 양의 방향으로 발사되고, 표적은 일정 속력으로 일정 각도(비대칭 접근각)로 직선 이동한다. 조우는  $x$ 축 근방에서 발생하며, 명중 판정은 유효 반경  $R$  이내로 접근했는지로 결정한다. 좌표계와 초기 조건은 모든 실험에서 일관되게 적용한다.

### 2.2 연속시간 기준 정의

연속시간에서의 두 물체 상대운동은 상수 상대속도를 갖는 직선 이동으로 표현된다. 이때 두 물체 간 최소거리는 한 시점에서 발생하며, 그 최소거리가  $R$  이하이면 연속시간 기준으로 명중으로 본다. 본 논문에서의 기준(ground truth)은 이 연속시간 최소거리 판정에 따른다. 실험 설계 단계에서 임의의 조우점과 조우시각을 먼저 정하고, 그에 맞추어 표적 초기 위치를 역산함으로써 연속시간 기준으로 반드시 명중하는 사례를 구성한다. 이렇게 하면 이후의 미탐은 순수하게 시간 샘플링 해상도와 발사 시점 정렬의 문제로 해석될 수 있다.

### 2.3 발사 기회상실과 시간격자 모델

발사 이벤트는 전역 시간 격자에 맞춰 실행된다고 가정한다. 전역 발사 스텝을  $\Delta t_{fire}$ 라 하고, 현실적인 운용에서는 발사 구간을 정한 뒤 그 구간 내부의 격자 시각들에서 연속적으로 사격한다. 연속시간 기준으로 이상적 발사 시각  $t$ 가 주어졌을 때, 실제 격자 발사 시각이  $t$ 와 충분히 가까우면 물리적으로는 명중이 가능하다. 이때 허용되는 시간 여유는 유효 판정 반경  $R$ 과 조우 구간의 상대속도  $v_{rel}$ 에 의해 결정되며, 허용창의 폭은 대략  $R$ 을  $v_{rel}$ 로 나눈 값으로 해석할 수 있다. 발사 시각이 전역 격자와 위상 차이를 가지면, 격자만으로 이상적 시각을 구현하지 못해 명중 기회 자체가 사라질 수 있다. 본 논문에서는 이를 발사 기회상실로 정의한다.

발사 기회상실을 정량화하기 위해, 하나의 발사 구간 길이를  $L_{burst}$ 로 두고 해당 구간에서 여러 발을 사격했을 때 최소한 발이라도 연속시간 기준으로 명중 가능한지의 비율을 사용한다. 이는 발사 구간 내 명중 성공률로 표기하며, 전역 발사 스텝이 거칠수록 격자와 이상적 시각의 위상 불일치가 커져 이 비율이 낮아진다. 반대로 전역 발사 스텝을 충분히 줄이면, 발사 구간 내에서 적어도 한 발은 허용창에 들어갈 확률이 빠르게 1로 수렴한다. 직관적으로는 허용창의 폭과 발사 간격의 비, 그리고 구간 내 발사 횟수에 의해 결정되며, 발사 횟수가 적고 간격이 큰 경우에는 명중 기회를 얻기 어렵다.

이 지표는 뒤에서 다루는 판정 단계의 미탐과는 역할이 다르다. 발사 구간 내 명중 성공률은 이상적 시각을 구현할 수 있으나, 즉 명중 시도를 할 기회가 있었느냐를 따지는 발사 단계의 지표이고, 미탐은 발사 시도 자체는 가능했다고 가정 한 뒤 조우 구간의 샘플링 해상도 때문에 실제 명중을 시뮬레이션이 놓치는 현상을 말한다. 따라서 발사 단계와 판정 단계의 실패를 분리해 보면, 전자는 전역 발사 스텝 설계의 문제이고 후자는 판정 해상도 배치의 문제임을 명확히 할 수 있다. 3장에서는 먼저 전역 발사 스텝을 변화시키며 발사 구간 내 명중 성공률이 어떻게 달라지는지 시뮬레이션으로 보이고, 이어 발사 기회가 확보된 사례만을 따로 모아 판정 단계의 미탐을 분석한다.

## 2.4 시나리오 생성

조우점은 발사체 진행축상 수 km 범위 내에서 선택한다. 발사체 속도와 표적 속도는 대표 범위에서 정하고, 표적 접근각은 비대칭 영역(예:120~160도)에서 설정한다. 조우시각은 발사체가 조우점에 도달하는 시간으로 정하며, 표적 초기 위치는 조우시각에 동일 지점에 도달하도록 역산한다. 몬테카를로 실험에서는 조우점, 접근각, 표적 속도 등을 소폭 분산시켜 반복한다. 모든 반복에서 연속시간 기준은 명중이므로, 불일치가 발생할 경우 이를 미탐으로 기록한다.

## 2.5 시뮬레이션 모델

### 2.5.1. 기준 모델

연속시간 최소거리 기준을 그대로 적용한다. 필요한 경우 매우 작은 고정 시간 스텝을 사용해 수치적으로 확인하되, 판정 자체는 연속시간 정의에 따른다.

### 2.5.2. Baseline 모델(고정 시간 스텝)

전 구간을 단일  $\Delta t$  간격으로 샘플링하며, 발사 시점은 0~ $\Delta t$  범위의 위상 오프셋을 허용한다. 이 구성은  $\Delta t$ 가 조우 근접창보다 클 때 샘플링 누락으로 인한 미탐이 구조적으로 발생한다는 점을 확인하기 위한 기준선이다.

### 2.5.3. 제안 모델(이중 해상도)

제안 모델은 전 구간을 coarse step으로 전개하면서, 발사 직후와 조우 구간의 두 핵심 구간만 fine step으로 세분화하는 이중 해상도 구조다. 발사 직후 구간은 발사 시점 정렬(Firing-Time Alignment, FTA)을 통해 fine step으로 유지하여 위상 오프셋으로 인한 발사 기회 상실을 방지하고, 조우 구간은 조우 구간 정밀화(Encounter-Region Refinement, ERR)를 통해 최소거리 예측값이 임계치(상대속도와 coarse step에 비례하는 거리 기준) 이하로 내려갈 때 fine step으로 재탐색한다. 그 외 구간은 coarse step을 유지해 연산량을 최소화한다.

## 2.6 명중 판정 로직과 지표

명중 판정은 식(1)과 같이 표현되는 두 물체의 순간 거리의 최소값이 유효 반경  $R$ 이하인지에 따라 결정한다.

$$d(t) = \| \mathbf{x}_{target}(t) - \mathbf{x}_{bullet}(t) \| \quad (1)$$

연속시간 기준에서는  $t \in [0, T]$ 에서의 최소거리  $\min_t d(t)$ 로 판정하고, Baseline과 제안 모델은 이 구간을 시간 격자  $t_k$ 로 샘플링하여 어떤  $k$ 에서라도  $d(t_k) \leq R$ 이면 명중으로 간주한다. 본 실험은 조우점과 조우시각을 역산하여 연속시간 기준으로는 항상 명중하도록 구성했으므로, 이후의 불일치는 시간 해상도와 발사 시점 정렬의 영향으로 해석된다.

평가 지표는 다음과 같이 정의한다. 각 사례  $n=1, \dots, N$ 에 대해 연속시간 기준의 판정 결과를  $y_n \in \{0,1\}$ 이라 하고(명중

=1, 불명중=0), 시뮬레이션의 판정을  $\hat{y}_n \in \{0,1\}$ 로 둔다. 본 실험군은 설계상 모든 사례가 연속시간 기준 명중이 되도록 구성하였으므로  $y_n = 1$ 이다. 미탐(false negative, FN)은 기준상 명중임에도 시뮬레이션이 불명중으로 판정한 경우이며,  $N$ 개의 사례에 대한 미탐율은 식(2)와 같이 정의한다.

$$FNrate = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N y_n (1 - \hat{y}_n) \quad (2)$$

이번 실험군에서는  $y_n = 1$ 이므로 식(2)는  $y_n$ 을 빼고 단순화할 수 있다. 명중 판정 정확도(hit determination accuracy, HDA)는 기준 대비 일치율로 정의하며, 이번 설정에서는 식(3)으로 표현할 수 있다.

$$HDA = 1 - FNrate = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N \hat{y}_n \quad (3)$$

## 2.7 구현 개요

시뮬레이션은 MATLAB 환경에서 구현한다. 기준, Baseline, 제안 모델 모두 동일한 초기 조건 생성기와 명중 반경을 공유하며, 난수 시드는 재현성을 위해 고정한다. Baseline은 다양한  $\Delta t$ 를 스위프(sweep)해 전이 구간을 확인하고, 제안 모델은 coarse 스텝, fine 스텝, 임계 거리 계수를 소수의 값으로만 조정해 연산 효율 대비 정확도를 비교한다. 실험에 사용된 수치 범위와 조합은 다음 장에서 상세히 기술한다.

## 3. 실험 설정 및 시나리오

### 3.1 실험 환경과 공통 조건

모든 실험은 MATLAB의 기본 정밀도로 수행하였다. 시간 해상도의 영향을 고립하기 위해 2차원, 직선 등속, 무외력 조건을 적용한다. 발사체는 원점에서 x축 양의 방향으로 발사되며, 표적은 일정 속력으로 비대칭 각도로 접근한다. 몬테카를로 반복에서 난수 시드는 고정하여 재현성을 확보했다.

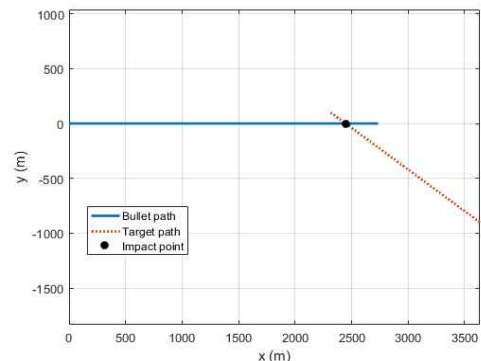


그림 1. 단일 케이스 2차원 기하

Fig. 1. Single case 2D geometry

그림 1은 단일 사례의 기하를 보여준다. 탄 궤적은 x축을 따라 진행하고, 표적은 멀리서 비대칭 각도로 접근하여 x축 근방의 조우점(Impact point)에서 만난다. 유효 반경  $R$ 를 점선 원으로 표시하여 명중 판정 기준을 시각화하였다.

### 3.2 기하와 기본 파라미터

조우점은 발사체 진행축 상 2.0~2.6 km 범위에서 균일 분포로 선택한다. 기본 속도는 발사체 1150 m/s, 표적 700 m/s를 사용하고, 민감도 확인을 위해 표적 300 m/s대도 일부 실험에 포함한다. 접근각은 발사축 기준 120~160도 범위를 사용하며, 실증 그림과 표본 수집에는 150도를 중심으로 한다. 유효 반경  $R$ 은 기본 0.10 m이며, 0.05 m와 0.20 m로의 스위치를 통해 전이 구간 이동을 확인한다. 발사 스케줄 관련 파라미터로, 전역 발사 스텝( $\Delta t_{fire}$ )과 발사 구간 길이( $L_{burst}$ )를 함께 관리한다. 기본적으로  $L_{burst} = 0.20\text{sec}$ 를 사용하며,  $\Delta t_{fire}$ 는 로그 스위치로 변화시킨다.

### 3.3 연속시간 기준과 모델별 설정

연속시간 기준은 두 물체의 상대운동을 선형으로 두고 최소거리 기준으로 판정한다. 실험 설계 단계에서 조우점과 조우시각을 먼저 정한 뒤, 그 시각에 동일 지점에서 만나도록 표적 초기 위치를 역산해 연속시간 기준으로는 반드시 명중이 되게 구성한다.

Baseline 모델은 전 구간을 단일 시간 간격  $\Delta t$ 로 샘플링해 판정하며, 발사 시점은 시간 격자와의 위상 오프셋  $t_0 \in [0, \Delta t)$ 을 허용한다.  $\Delta t$ 는  $5 \times 10^{-2}\text{sec}$ 부터  $5 \times 10^{-5}\text{sec}$ 까지 로그 스위치한다.

제안 모델은 이중 해상도를 적용한다. 전개는 coarse 스텝으로 진행하되, 발사 직후 짧은 구간은 항상 fine 스텝으로 세분화하고, 구간 최소거리의 예측값이 임계치 아래로 내려가는 구간에서만 fine 스텝으로 재탐색한다.

대표 설정은 coarse  $5 \times 10^{-2}\text{sec}$ , fine  $5 \times 10^{-5}\text{sec}$ 이다. coarse와 fine step의 크기는 발사 속도 자체에 직접적으로 종속되기보다는 발사체-표적 상대속도와 유효 판정 반경으로 정의되는 ‘근접 시간창’과의 상대적 크기를 기준으로 정한다. 본 연구에서는 coarse step을 근접 시간창보다 충분히 크게 두어 계산 효율을 확보하고, fine step은 근접 시간창보다 충분히 작게 두어 판정 누락을 방지하도록 설정하였다. 따라서 속도가 빨라질수록 근접 시간창이 짧아지므로 동일 신뢰도를 유지하려면 fine step 역시 더 짧게 설정되어야 한다. 본 논문에서 제시한 값은 이러한 관계를 고려한 대표적 예시이다.

이러한 step 설정과 함께, fine step 전환 조건을 정의하는 임계 거리  $\delta$ 는 식 (4)와 같이 정의하였다.

$$\delta = k \|v_{rel}\| \Delta t_{coarse}, \quad (k = 0.8) \quad (4)$$

여기서  $k$ 는 상대속도와 coarse 스텝을 곱해 얻은 거친 이동

거리 대비 실제 세분화가 필요한 구간을 얼마나 보수적으로 잡을지를 조절하는 계수이다.  $k$ 를 1보다 작게 두면 다소 이른 시점부터 fine step으로 전환해 안전 여유를 확보할 수 있고,  $k \approx 1$ 이면 최소한의 필요 조건만 충족하는 방식이 된다. 본 연구에서는 보수적·실용적 절충을 위해  $k=0.8$ 을 사용하였다.

발사 기회상실(launch opportunity loss)은 본 연구에서 발사 단계의 실패로 정의한다. 전역 발사 스텝  $\Delta t_{fire}$ 에 의해 발사 시점이 시간 격자에 양자화되면, 연속시간 기준의 이상적 발사 시각  $t^*$ 을 구현하지 못해, 발사 구간( $L_{burst}$ ) 동안 여러 발을 사격하더라도 최소 한 발도 명중 허용창에 들어가지 못할 수 있다. 허용창의 폭은 유효 반경  $R$ 과 조우 구간 상대속도  $v_{rel}$ 에 의해 결정되며, 대략  $\tau = R/v_{rel}$ 로 해석할 수 있다. 본 논문에서는 발사 구간 동안 ‘최소 한 발이라도 연속시간 기준 명중 조건( $|t - t^*| \leq \tau$ )을 만족하는지’의 비율을 발사 구간 내 명중 성공률로 정의하고, 이를 기회상실의 정량 지표로 사용한다. 이 지표는 뒤에서 다룰 판정 단계의 미탐과는 구분되며, 전자는 발사 스케줄 설계의 문제, 후자는 판정 해상도 배치의 문제다.

### 3.4 시나리오와 구성요소 기여 분석

먼저, 발사 단계의 기회상실을 독립적으로 평가하였다. 전역 발사 스텝  $\Delta t_{fire}$ 를 로그 스위치하면서, 발사 구간  $L_{burst} = 0.20\text{sec}$  내에서 여러 발을 사격했을 때 최소 한 발이라도 연속시간 기준 명중 조건을 만족하는 사례의 비율을 추정하였다. 난수 위상(격자 대비 발사 구간 시작 위상)은 균일 분포로 부여하였다. 결과는 그림 2에 제시하였다.  $\Delta t_{fire}$ 가 허용창( $\tau$ )보다 충분히 작아질수록 발사 구간 내 명중 성공률이 1에 근접하고, 거친 스텝에서는 빠르게 저하된다. 마커는 몬테카를로 결과, 실선은 근사식  $\min(1, 2\tau/\Delta t_{fire})$ 으로, 두 곡선은 전 구간에서 잘 일치한다.

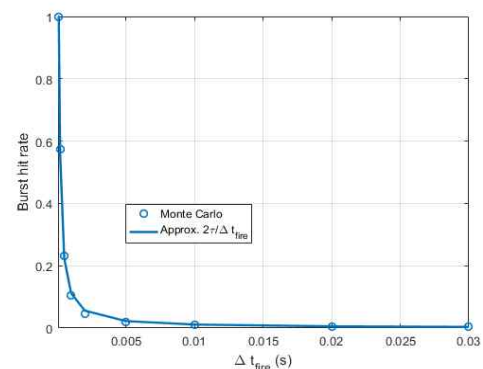


그림 2. 전역 발사 스텝에 따른 발사 구간 내 명중 성공률  
Fig. 2. Burst hit rate vs. global firing step

다음으로 고정 시간 간격 모델과 제안 모델을 같은 조건에서 비교하였다. 고정 시간 간격 모델은 전 구간을 하나의

$\Delta t$ 로 샘플링하고, 발사 시점은  $\Delta t$  범위 내에서 위상 오프셋을 임의로 부여하였다. 제안 모델은 전개 구간은 큰 간격으로 진행하되, 발사 직후 짧은 구간과 두 물체가 근접하는 구간에서만 작은 간격으로 세분화하였다. 그 결과는 그림 3에 정리되어 있다.

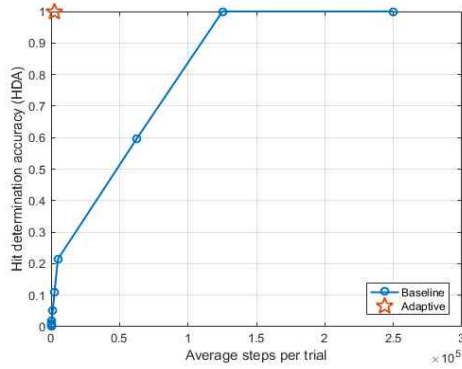


그림 3. 연산량 대비 명중 판정 정확도

Fig. 3. Accuracy vs Computational Cost

고정 간격 모델은  $\Delta t$ 를 줄일수록 명중 판정 정확도가 올라가지만 평균 단계 수가 기하급수적으로 증가한다. 같은 신뢰도를 목표로 할 때 제안 모델은 훨씬 적은 단계 수로 도달한다. 본 시나리오에서는 고정 간격이 HDA 1에 도달하려면  $\Delta t$ 를  $10^{-4}$  s까지 줄여 평균 약  $1.25 \times 10^5$  단계를 사용해야 했고, 제안 모델은 평균 약  $2.32 \times 10^3$  단계에서 동일한 정확도에 도달했다. 이 비교만으로도 해상도를 필요한 구간에만 배치하는 전략의 효율 이득이 분명해진다.

다음으로  $\Delta t$  축의 전이를 단독 분석했다. 그림 4는  $\Delta t$ 를 로그 스윙해 얻은 정확도 곡선이다. 전이는 근접 시간창 규모와 정성적으로 일치하며, 그 문턱을 지나면 정확도가 급격히 1로 수렴한다. 이 곡선은 ‘조우 창보다 촘촘하게만 샘플링하면 미탐이 사라진다’는 직관을 수치로 확인해 준다.

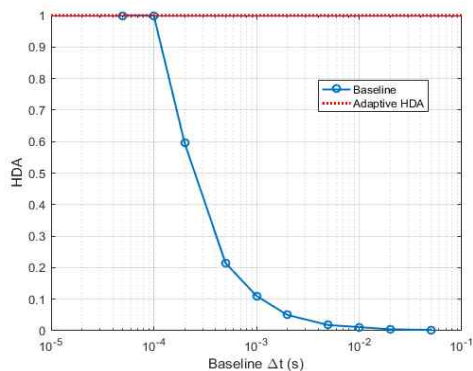


그림 4. 시간 간격에 따른 명중 판정 정확도 전이 곡선

Fig. 4. Transition curve of hit determination accuracy

시간 간격 외의 변수들이 어떤 역할을 하는지도 히트맵으로 점검했다. 먼저  $\Delta t$ 와 접근각의 결합 효과를 보기 위해 접

근각 범위를 등분하고 각 구간마다 동일한 생성 규칙으로 여러 번의 시뮬레이션을 수행해 미탐율을 평균하였다. 히트맵의 세로축은  $\Delta t$ , 가로축은 접근각이며 색은 미탐율이다. 결과는 그림 5에 제시되어 있다. 작은  $\Delta t$  영역에서는 미탐율이 0으로 내려가고 큰  $\Delta t$ 에서는 1에 가까워지는 수평 띠가 명확히 나타난다. 접근각 변화에 따라 띠의 높이 이동 현상은 있지만, 지배적인 요인은 여전히  $\Delta t$ 임을 알 수 있다.

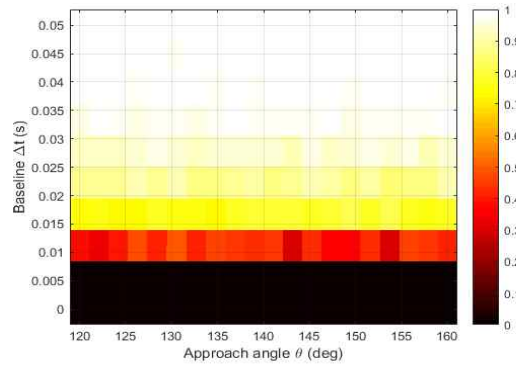


그림 5.  $\Delta t$  - 접근각 미탐율 히트맵

Fig. 5. False-negative Rate Heatmap vs  $\Delta t$  and Approach Angle

상대속도의 영향은  $\Delta t$ 와 상대속도의 평면에서 확인하였다. 상대속도 구간을 등분하고 각 셀마다 동일한 방식으로 표본을 누적해 미탐율을 색으로 표현하였다. 그림 6에서 밴드는 전반적으로 수평에 가깝게 형성되며, 지배 요인은  $\Delta t$ 임을 확인할 수 있다. 상대속도가 커질수록 전이 대역이 아래 쪽으로 약간 내려가는 경향이 관찰되지만, 그 변화량은 미세해 난수 위상 오프셋에 따른 요동과 비슷한 수준이다. 상대속도가 커지면 근접 시간창이 짧아지므로 같은 미탐율을 달성하기 위해 더 작은  $\Delta t$ 가 필요하다는 해석과 경향은 일치한다. 중간 구간의 미세한 요철은 표본 수와 위상 오프셋 난수의 영향으로 보이며 전체 추세에는 영향을 주지 않는다.

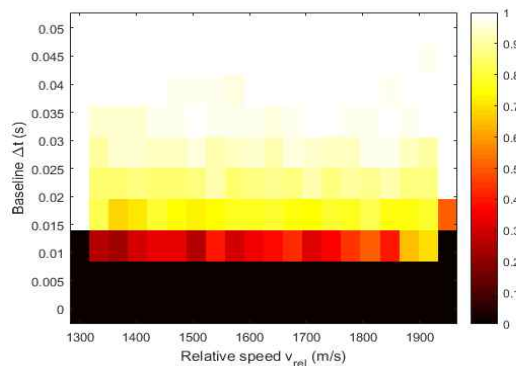


그림 6.  $\Delta t$  - 상대속도 미탐율 히트맵

Fig. 6. False-negative Rate Heatmap vs  $\Delta t$  and Relative Speed



조우 위치에 따른 변동성은  $\Delta t$ 와 조우점 위치의 평면에서 살펴보았다. 가로축에 조우점을 두고 동일한 집계 과정을 수행한 결과가 그림 7이다. 조우점이 멀수록 총 비행 시간은 길어지지만, 명중 판정은 결국 조우점 근방의 짧은 시간창에서 갈리기 때문에  $\Delta t$ 의 영향이 여전히 우세하게 나타난다. 이 히트맵에서도 수평 방향의 전이 띠가 주된 패턴을 이룬다.

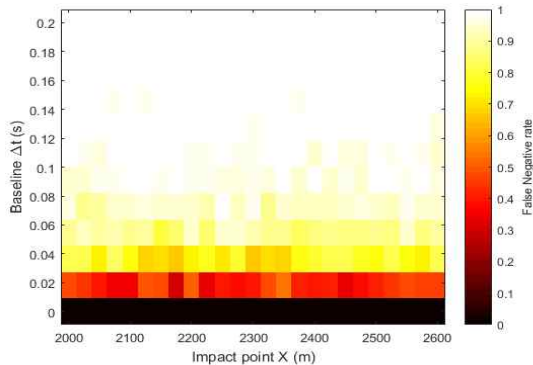


그림 7.  $\Delta t$  - 조우점 미탐율 히트맵

Fig. 7. False-negative Rate Heatmap vs  $\Delta t$  and Impact Point

마지막으로 유효 반경  $R$ 의 민감도를 확인하였다.  $R$  값을 0.05 m, 0.10 m, 0.20 m로 변경하며 Baseline에서 동일 절차를 반복해 미탐율- $\Delta t$  곡선을 얻었고, 그림 8에 도시하였다. 세 곡선 모두 작은  $\Delta t$  구간에서는 미탐율이 0에 가깝고,  $\Delta t$ 가 커질수록 1에 수렴하는 전이 형태를 보인다.

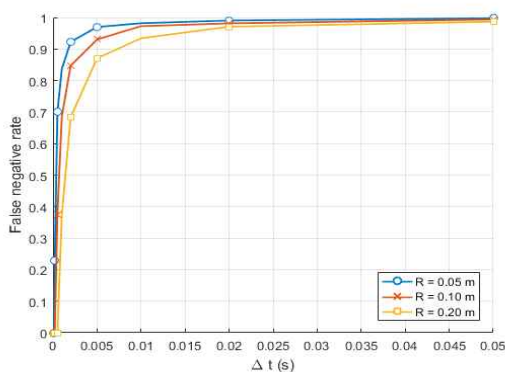


그림 8. 유효 반경  $R$  스위치에 따른 미탐율 -  $\Delta t$  곡선

Fig. 8. False-negative rate vs  $\Delta t$  under hit-radius sweep

$R$ 이 작아질수록(예: 0.05m) 같은  $\Delta t$ 에서 미탐율이 더 크므로 곡선이 다른 곡선 대비 위쪽에 위치하며, 낮은  $\Delta t$ 까지 내려가야 미탐율이 0에 근접한다. 반대로  $R$ 이 커지면 상대적으로 거친  $\Delta t$ 에서도 미탐율이 낮게 유지된다. 이는 근접 시간창이 대략  $\tau \propto R$ 에 비례한다는 직관과 일치하는 결과이다. 실무적으로는 장비/파편 효과에 맞춘 보수적  $R$ 을 먼저 정하고, 그 시간창보다 충분히 작은  $\Delta t$ 를 목표로 삼는 것이

타당할 것이다.

### 3.5 시뮬레이션 결과 요약

본 장의 분석은 두 축에서 진행되었다. 첫째, 전역 발사 스텝이 거칠어 이상적 발사시각을 구현하지 못해 명중 기회가 사라지는 발사 단계의 기회상실을 점검했다. 둘째, 발사 기회가 확보된 사례를 전제로 조우 구간의 시간 해상도 부족으로 발생하는 미탐 특성을 살폈다.

우선 발사 단계의 기회상실을 분리해 확인하였다. 그림 2는 전역 발사 스텝( $\Delta t_{fire}$ )을 변화시키며 발사 구간( $L_{burst}$ ) 동안 여러 발을 사격했을 때 최소 한 발이라도 연속시간 기준 명중 창에 들어가는 비율을 나타낸다.  $\Delta t_{fire}$ 가  $\tau$ 보다 크면 격자 위상 불일치로 이상적 발사시각을 구현하기 어려워 성공률이 급격히 낮아지고, 반대로  $\Delta t_{fire}$ 를  $\tau$  이하로 줄이면 성공률이 빠르게 1에 근접하였다. 기본 설정에서는  $\tau \approx 5.6 \times 10^{-5} \text{sec}$  수준이며,  $\Delta t_{fire} \approx 10^{-4} \text{sec}$ 면 기회상실이 사실상 제거되고  $10^{-2} \text{sec}$ 에서는 거의 0에 수렴했다. 이로써 발사 스케줄 해상도 확보가 조우 구간 판정 해상도와는 독립된 선행조건임을 확인했고, 이후 미탐 분석은 발사 기회가 확보된 사례를 기준으로 진행하였다.

그림 3와 그림 4에 도시된 바와 같이, Baseline은  $\Delta t$ 를 줄일수록 명중 판정 정확도가 단조 증가하지만 평균 단계 수가 급격히 증가한다. 본 시나리오에서 HDA가 1에 수렴하려면  $\Delta t$ 가 약  $1 \times 10^{-4} \text{sec}$  수준까지 내려가야 하며, 이때 평균 단계 수는 약  $1.25 \times 10^5$ 에 달한다. 제안 모델은 coarse  $5 \times 10^{-2} \text{sec}$ , fine  $5 \times 10^{-5} \text{sec}$ , 임계 계수 0.8 설정에서 평균 약  $2.32 \times 10^3$  단계로 HDA 1을 달성하였다. 동일 신뢰도 기준으로 수십 배의 연산 효율 이득이 확인되었다.

$\Delta t$ 와 각 변수의 결합 효과를 본 히트맵에서는 공통적으로 수평 방향의 전이 띠가 나타났다. 접근각의 경우 띠 높이 변화가 미미하여  $\Delta t$ 가 지배적 요인임을 재확인했다(그림 5). 상대속도에 대해서는  $v_{rel}$ 이 커질수록 전이 띠가 아래쪽, 즉 더 작은  $\Delta t$ 로 소폭 이동하는 경향이 관찰되었으나 변화량은 작아 본 실험 범위에서는 2차적 요인으로 해석된다(그림 6). 조우점 위치에 대해서도 전반적인 패턴은 변하지 않고 수평 띠가 유지되어, 명중 판정이 결국 조우 구간의 짧은 시간창에서 갈린다는 해석과 일치하는 결과를 확인하였다(그림 7).

유효 반경  $R$  민감도에서는  $R=0.05, 0.10, 0.20 \text{ m}$  비교 시 같은  $\Delta t$ 에서  $R$ 이 작을수록 미탐율 곡선이 더 위쪽에 위치하고 더 작은  $\Delta t$ 까지 내려가야 0에 근접했다. 반대로  $R$ 이 커지면 상대적으로 거친  $\Delta t$ 에서도 미탐이 낮게 유지되었다(그림 7). 이는 근접 시간창이 대략  $R$ 에 비례한다는 직관과 부합한다.

## 4. 결 론

본 연구는 고속 비유도 교전 시뮬레이션에서 발사 시점 정렬과 조우 구간 정밀화라는 두 지점을 중심으로 시간 해상도

를 배치하는 이중 해상도 프레임워크를 제안하고, 단순 2차원 모델과 몬테카를로 실험으로 그 효과를 정량 검증하였다. 결과적으로, 명중 판정 정확도는 전 구간을 미세화하지 않아도 발사 직후와 근접 구간만 세분화하면 연속시간 기준과 동등한 수준에 도달함을 보였다.  $\Delta t$ -각 변수 히트맵에서는 공통적으로 수평 방향의 전이 띠가 나타나  $\Delta t$ 가 지배적 요인임을 확인했고, 상대속도·접근각·조우점 위치의 영향은 본 범위에서 2차적이었다. 유효 반경  $R$ 을 바꾸면 전이 임계가 함께 이동하며,  $R$ 이 작을수록 같은  $\Delta t$ 에서 미탐율이 커지는 경향이 확인되었다.

실무적으로는 다음과 같은 시사점을 제안할 수 있다. 첫째, 발사 위상 오프셋이 존재하는 환경에서는 종말 구간만 세분화할 경우에도 미탐이 남을 여지가 있으므로, 발사 직후의 짧은 구간에 한해 미세 해상도를 보장하는 구성이 바람직해 보인다. 둘째,  $\Delta t$  목표는 조우 시간창보다 충분히 작게 잡되, 전 구간 미세화보다는 발사·근접 구간에 해상도를 집중하는 편이 연산 비용 대비 효과적일 가능성이 크다. 셋째, 시스템의 유효 반경  $R$ 을 보수적으로 설정한 뒤 그에 대응하는 시간창 규모를 근거로  $\Delta t$  기준선을 정하고, 운용 조건 변화에 따라 필요 시 보정하는 접근이 합리적일 것이다.

본 연구의 한계는 시간 해상도의 효과를 고립해 보기 위해 2차원, 직선 등속, 무외력 조건으로 단순화했다는 점이다. 따라서 3차원 운동, 중력·항력 등 외력, 비대칭 조우각의 다양한 분포, 비선형 기동이 포함되는 실제 환경에서의 적용성은 추가 검증이 필요하다. 또한 본 프레임워크는 모델 수준의 명중 판정 정확도에 초점을 두었으므로, 대규모 교전급 시뮬레이션에 통합할 때는 멀티레이트 통합과 글로벌 시뮬레이터의 시간 그리드 동기화 전략이 병행되어야 한다.

이러한 한계를 고려하더라도, 제안된 이중 해상도 배치는 연산 비용을 크게 절감하면서도 명중 판정 신뢰도를 유지할 수 있는 실용적 방법임을 보여주었으며, 향후 대규모 시뮬레이션의 계산 예산 관리와 효율적 교전 모델 설계에 기여할 수 있을 것이다.

## References

- [1] A. J. Pue, R. J. Hildebrand, D. E. Clemens, J. R. Gottlieb, J. M. Bielefeld, and T. C. Miller, "Missile Concept Optimization for Ballistic Missile Defense," Johns Hopkins APL Technical Digest, vol. 32, no. 5, pp. 774-786, 2014.
- [2] C. Chen, L. Mo, M. Lv, D. Lin, T. Song, and J. Cao, "Enhanced missile hit probability actor-critic algorithm for aerial confrontations," Aerospace Science and Technology, vol. 146, 109468, 2024.
- [3] J. P. A. Dantas, T. Yoneyama, et al., "PoKER: a probability of kill estimation rate model for air-to-air missiles using machine learning on stochastic targets," Journal of Defense Modeling and Simulation, OnlineFirst, 2024. DOI: 10.1177/15485129241309675.
- [4] İ. Yüksel, "Single Shot Hit Probability Computation for Air Defense Based on Error Analysis," M.S. thesis, Middle East Technical University, Ankara, Turkey, 2007.
- [5] J. Needhi, D. K. K., V. G., and V. B., "Modeling Missile Trajectory and Impact Dynamics with 6 Degree of Freedom Equations of Motion in Virtual Reality Simulation," Biomedical Journal of Scientific & Technical Research, vol. 57, Article 008992, 2024. DOI: 10.26717/BJSTR.2024.57.008992.
- [6] Y. Liu, Z. Xiong, J. Wang, and D. Wang, "Monte Carlo-Based Analysis and Experimental Validation of the Interception-Damage Probability of the New Active Interception Net," Mathematical Problems in Engineering, 2022, Article ID 5438023.
- [7] W. K. Smithson, "Future state prediction based on observer for missile system," arXiv:2411.08576, 2024.