



Received: 2025/08/11
Revised: 2025/08/26
Accepted: 2025/09/17
Published: 2025/09/30

***Corresponding Author:**

Yonghoon Ha

Tel: +82-41-831-5385

E-mail: yonghoonha@korea.kr

ABM 시뮬레이션을 활용한 함포의 무인수상정 대응 효과 분석

Comparative Analysis of Naval Gun Effectiveness against Unmanned Surface Vehicles (USVs) Using ABM Simulation

김영재¹, 하용훈^{2*}

¹해군 소령/국방대학교 국방과학학부 무기체계학과 석사과정

²국방대학교 국방과학학부 무기체계학과 부교수

Yongjae Kim¹, Yonghoon Ha^{2*}

¹LCDR, ROK Navy/Graduate candidate, Dept. of Defense Science,
Korea National Defense University

²Associate professor, Dept. of Defense Science, Korea National
Defense University

Abstract

본 연구는 ABM 시뮬레이션을 통해 자폭형 USV 위협에 대한 5인치 및 76 mm 함포의 전투 효과를 비교 분석하였다. 분석 결과, 5인치 함포 대비 76 mm 함포는 높은 연사력을 바탕으로 특히 다수의 USV가 고속으로 회피 기동하는 복잡한 위협 상황에서도 통계적으로 유의미하게 높은 방어 성공률을 유지하여 신뢰도 높은 대응 능력을 보여주었다. 본 연구는 향후 다수의 자폭형 USV 위협에 대응하기 위한 함포체계 운용 전략 수립의 기초자료로 활용될 수 있을 것이다.

This study used agent-based modeling (ABM) simulations to compare the defensive effectiveness of 5-inch and 76-mm naval guns against suicide unmanned surface vessel (USV) threats. The results showed that, compared with the 5-inch gun, the 76-mm system—owing to its higher rate of fire—maintained a higher defensive success rate that was both consistent and statistically significant, even in complex scenarios involving multiple high-speed, evasive USVs, thereby demonstrating a reliable response capability. These findings provide reference data to support the development of future operational concepts and employment strategies for naval gun systems against swarming suicide-USV threats.

Keywords

무인수상정(Unmanned Surface Vehicle),
에이전트 기반 모델링(Agent-based Modeling),
군집 위협(Swarming Threats),
해군 함포 (Naval Gunfire),
대응 효과 (Response Effectiveness)

1. 서론

현대 해상전투의 양상은 다층적이고 복잡한 방향으로 변화하고 있다. 특히 최근 러시아-우크라이나 전쟁에서 전쟁 초기 흑해의 제해권을 장악한 러시아 해군에 대응하기 위해 우크라이나군은 무인체계를 적극 활용하였다. 우크라이나가 실전에서 운용한 자폭형 무인수상정(unmanned surface vehicle, USV) Magura는 높은 기동성과 낮은 레이더 반사단면적을 기반으로 러시아 흑해함대 호위함, 상륙함 등 고가치 표적을 타격하며 무인체계의 전술적 가치를 명확히 입증하였다. 이는 무인 무기체계의 실전활용이 기존 전투 개념을 근본적으로 변화시키고 있음을 보여준다[1].

이처럼 자폭형 USV는 은밀성·기동성을 바탕으로 기존 대함 무기체계가 효과적으로 대응하기 어려운 새로운 비대칭 위협으로 부상하고 있다. 작전환경을 고려했을 때 한반도는 이러한 위협에 직면할 가능성이 높다. 하지만 현재 우리 해군은 항공기, 미사일, 적 수상함과 같은 전통적인 위협에 초점을 맞추고 있어 소형이면서 고속으로 접근하는 표적에 대한 대응에 제약이 존재한다. 따라서 주력으로 운용 중인 5인치 및 76 mm 함포가 이러한 자폭형 USV에 효과적으로 대응할 수 있는지에 대한 정량적 검증이 필요한 상황이다. 도성호 등[2]은 델파이 및 AHP 분석을 통해 미래 신조함정

탐재 함포 선정에 중요 요소로 장비의 신뢰성과 대(對)드론 대응 능력을 제시한 바 있으나, 함포의 제원을 바탕으로 정량적인 전투 효과를 직접 비교한 연구는 부족한 실정이다.

이에 따라 본 연구의 목적은 자폭형 USV 위협에 대한 함포의 대응능력을 평가하는 것이며, 5인치 함포와 76 mm 함포의 대응 효과를 비교 분석하였다. 이를 위해 에이전트 기반 모델링(agent-based modeling, ABM)을 이용하였으며, Magura-V5를 모사한 USV를 대상으로 다양한 교전 시나리오를 구성하였다. USV의 수량(1~8척)과 기동 방식(직선 및 지그재그 회피 기동)을 변수로 설정하였고 탐지 단계부터 포탄 명중 판정까지의 전 과정을 포함하는 시뮬레이션 모델을 구축하였다.

시나리오는 AnyLogic 8.9 PLE 버전을 활용한 반복 시뮬레이션을 통해 수치화했으며 분석은 평균 방어율, 평균 교전 시간, 평균 소모탄 수의 세 가지 효과 척도(measures of effectiveness, MOE)를 중심으로 수행하였다. 본 연구 결과는 향후 해군 함포체계의 정량적 성능 평가 및 무기체계 선정의 기초자료에 활용될 수 있을 것이다.

2. 관련 연구

AnyLogic은 전투 환경의 복잡한 상호작용을 모델링할 수 있는 플랫폼으로 이산 사건, 시스템 다이내믹스, ABM 기법을 하나의 환경에서 통합함으로써 다양한 해상전투 시나리오 구현 및 전투효과 분석을 지원할 수 있다. 또한, 그래픽 인터페이스와 자바(Java) 기반의 유연한 확장성을 제공하여 정밀한 교전 상황과 효과 분석을 현실적으로 구현할 수 있는 장점이 있다.

권재현 등은 AnyLogic 기반의 ABM 시뮬레이션을 통해 상륙작전 시 공격드론의 조합과 공격 우선순위가 아군 전투부대 생존율에 미치는 영향을 분석하였다. 연구 결과 적 보병, 자주포, 대공포 등을 표적으로 설정하고 드론의 동시 공격 또는 우선순위 공격 방식을 사용하여 공격드론의 생존성을 먼저 확보한 후 다른 전투 세력을 공격하는 전략이 가장 효과적임을 확인하였다[3]. 서현실 등은 에이전트 기반 모델링을 활용, 적 대함유도탄 방어 확률인 임무 성공률을 효과 척도로 선정하여 다수의 대함유도탄 위협 대응을 위

한 함정 대공방어 유도탄의 운용 효과를 분석함으로써 호위함급 이상의 함정에 원거리 탐지능력 및 장거리 유도무기의 탐재 필요성을 제시하였다[4]. 김태양 등은 해상에서 적 침투 세력을 저지하기 위한 공격형 자폭 드론의 전투 효과를 AnyLogic 시뮬레이션을 통해 분석하였으며, 북한 공기부양정 및 연안경비정(WPB)의 합동 침투 시 세 가지 공격 방식의 전투 효과를 비교하였다[5].

김수민 등은 ABM 시뮬레이션을 통해 군집형 USV의 운용 효과를 분석하였는데, 군집 운용 시 표적의 접근 방식, 기동 패턴, 무장 사거리 등에 따른 대응 효과를 분석하여 군집형 USV의 전술적 효용성을 평가하였다[6]. 조용연 등은 5인치 함포에 지향성 파편탄을 적용하여 소형·고속 표적 대응 능력이 기존 고폭탄 대비 인원 살상 효과는 2.4배, 장비 손상 효과는 3.0배 이상으로 향상된 것을 확인하였으며 향후 함포체계 발전 방향으로 지향성 파편탄의 중요성을 강조하였다[7]. 민승식 등은 다수의 무인수상정 운용 시나리오를 확률적 모의전으로 분석하여 소형·고속 무인수상정이 기존 함포 및 방어체계로는 효과적 대응이 어려운 위협임을 확인하였다[8].

3. 연구 방법

본 연구에서는 ABM을 활용하여 해상 전투 시뮬레이션을 설계하였으며, 이는 표적 탐지부터 사격, 그리고 피해 판정으로 이어지는 일련의 교전 과정을 포함한다. 본 장에서는 모델을 구성하는 주요 에이전트와 교전 시나리오를 정의하고, 시뮬레이션 분석을 위해 적용된 탄도 구현, 탐지 확률 및 포탄 폭파반경 등 핵심 물리 모델에 대해 기술한다.

3.1 시뮬레이션 구성 및 가정사항

AnyLogic을 이용한 시뮬레이션 환경은 Fig. 1과 같다. 군함(레이다 및 5인치/76 mm 함포 포함), 자폭형 USV, 포탄으로 구성된 다중 에이전트 구조를 통해 교전 상황을 가상 해역에 재현하였다. 시뮬레이션 내에서 USV는 길이 5.5 m, 폭 1.5 m에 최대속력 42 kts (21 m/s), 항속거리 833 km인 Magura-V5로 가정하였으며[9], 정지해 있는 군함을 목표로 고속 기동하고 다층 방어 개념에 따라 군함 반경 2 km(CIWS 골

키퍼 유효 사거리 고려[10]) 내에 진입했을 경우 함포의 전술적 임무의 한계를 초과한 것으로 판단, 공격에 성공한 것으로 간주하여 시뮬레이션을 종료한다. 군함은 주기적으로 탐지 연산을 수행하며, 탐지 성공 시 USV와의 교전 거리(5인치 함포 10 km, 76 mm 함포 9 km[7]) 진입 여부에 따라 가장 가까운 USV를 우선하여 사격한다. 사격 시 USV 1척 당 3발-4발-4발-4발-5발 순으로 단계적으로 포탄을 발사하고 각 단계 간 명중 평가를 통해 교전 지속 여부를 결정하도록 가정하였다. 적용된 함포의 제원은 Table 1[11,12]에 나타냈다.

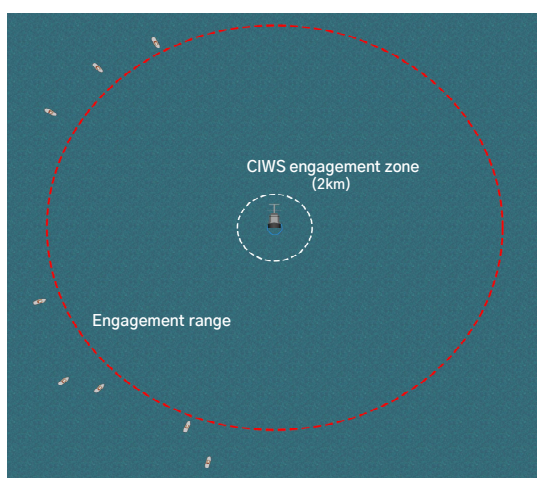


Fig. 1. Simulation environment

Table 1. 5 in. gun vs 76mm gun

Naval gun	Effective range (km)	Rate of fire (rounds/min)	Rounds in gun (round)
5 inch gun	10	20	20
76 mm gun	9	100	80

각 포탄은 탄도 특성이 반영되어 포물선 궤적으로 비행한다. 포탄의 비행시간, USV의 이동 속도 등을 고려하여 계산된 예상 위치를 향해 발사되며, 명중률은 5인치 함포는 70 %, 76 mm 함포는 60 %로 가정하였다. USV 무력화 판정은 탄착점을 중심으로 포탄의 폭파 반경 내에 USV가 존재할 경우 완파(direct hit) 또는 반파(grazing hit)로 구분되며 누적 피해 조건(완파 1회, 반파 2회 피격)을 만족하면 완전히 무력화된 것으로 평가하여 모든 USV 무력화 시 시뮬레이션을 종료한다.

3.2 교전 시나리오 설정

전투 시나리오의 모의 논리는 Fig. 2와 같으며, 위협 수준(수량)과 예측 불가능성(기동 방식)을 주요 변수로 설정하여 5인치 함포와 76 mm 함포의 대응 능력을 다각적으로 평가하고자 두 가지 핵심 교전 시나리오를 구성하였다. 각 시나리오에서 USV의 수량을 1~8척까지 독립 변수로 설정하고, 동일한 전장 환경 및 탐지 조건 하에 시뮬레이션을 각 500회 반복 수행하여 정량적 데이터를 확보하였다.

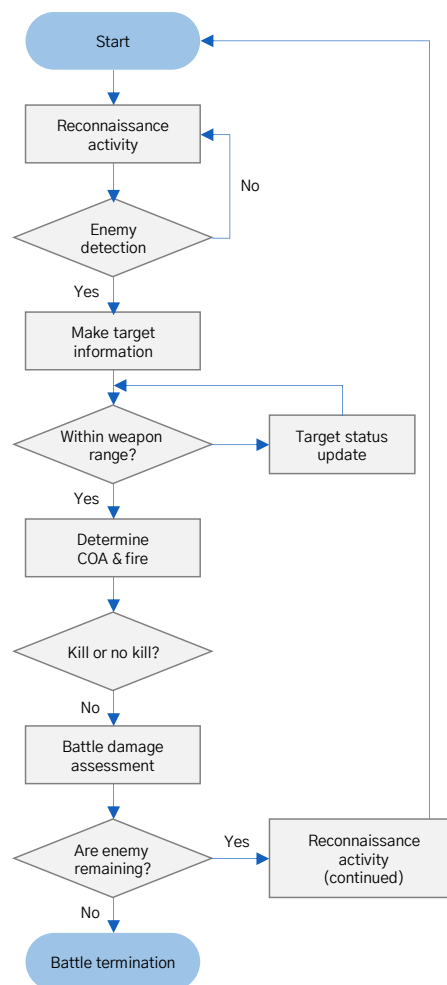


Fig. 2. Combat scenario

3.2.1 실험 I: 직선 기동 USV 함포별 대응 효과

USV가 군함까지 최단 경로를 따라 고속으로 접근하는 이상적인 상황을 가정한다. 교전 거리 진입 전까지는 35 kts(18 m/s)로 순항 후 진입 시 최대속력인 42 kts(21 m/s)로 증속하여 군함까지 최단 경로로 접

근한다. 각 함포의 기본적인 교전 성능 측정을 목표로 하고 평균 방어율, 평균 교전 시간, 평균 소모탄 수를 주요 효과 척도로 설정하여 각 함포를 비교한다.

3.2.2 실험 II: 회피 기동 USV에 대한 함포 사격

USV가 불규칙하게 회피 기동을 수행하며 접근하는 실전적인 상황을 가정한다. 이때 USV는 39 kts (20 m/s)로 고속 기동하며 교전 거리 진입 시점부터 20초 간격으로 방향 전환을 확률적으로 수행한다. 이 시나리오는 표적의 기동성이 함포의 추적 및 명중률에 미치는 영향을 평가하고, 실험 I의 결과와 비교를 통해 표적의 회피 기동이 각 함포에 미치는 영향을 정량적으로 평가한다.

3.3 물리 모델 및 적용

본 연구는 시뮬레이션의 현실성과 신뢰도를 높이기 위해 발사된 포탄의 물리 기반 탄도 계산, 거리에 따라 변화하는 확률적 탐지 모델, 그리고 폭발 과압을 고려한 피해 판정 모델을 적용하였다. 시뮬레이션의 복잡도를 관리하고 핵심 변수인 함포 성능과 USV 기동 방식의 영향을 명확히 분석하기 위해 풍향·풍속, 공기저항, 파고와 같은 외부 환경 요인은 변수에서 배제하고 중력만이 작용하는 이상적인 교전 환경을 가정하였다.

3.3.1 포탄의 탄도 구현

포탄은 일정 고각으로 발사되어 포물선 궤적을 따라 비행하며, 탐지 시점 기준 USV의 위치, 속도, 침로(heading)를 기반으로 고각 계산을 통해 비행시간을 산출한 후, 비행시간 동안 USV는 등속 이동한다고 가정, 예측 위치를 산출한다. 해당 예측 위치를 목표로 발사 고각(θ)을 재계산하여 사격을 수행한다. 고각 계산은 이상기체 상태에서 식 (1)을 통해 산출한다.

- 고각 계산:

$$\theta = \frac{1}{2} \sin^{-1} \left(\frac{gR}{v_0^2} \right) \quad (1)$$

여기서, θ 는 발사 고각(rad), R 은 포탄 비행거리, g 는 중력 가속도, v_0 는 포탄 초기 속도이다.

3.3.2 탐지모델 적용

현재 해군에서 운용 중인 MW-08 레이다는 RCS 0.1 m² 표적을 17 km 거리에서 약 80 % 확률로 탐지할 수 있다[13]. 본 연구에서는 USV의 특성을 반영해 RCS를 0.1로 가정하고 식 (2)에 따라 해당 성능을 만족하는 탐지확률 모델을 구현하였다. 이 모델에 따르면 10 km 이내의 탐지확률은 98 % 이상으로 증가하며, 25 km를 초과하면 20 % 이하로 급감하게 된다.

- 탐지 확률:

$$P_b(R) = 1 - \exp \left(-\frac{\beta}{R^4} \right) \quad (2)$$

여기서, R 은 거리(km), β 는 기준 탐지 조건을 만족하는 상수이다.

이와 같이 탐지확률이 거리에 따라 실시간으로 변화하는 탐지 모델을 각 함포에 동일하게 적용하였다. 시뮬레이션 내에서 해당 확률값에 따라 탐지 성공 여부가 결정되도록 하였다.

3.3.3 폭발 반경에 따른 피해 판정

포탄의 폭발 효과를 기반으로 USV에 대한 피해 판정 모델을 구현했다. 폭발 피해 반경은 Hopkinson-Cranz scaling law를 나타내는 식 (3)과 식 (4)를 이용하였다.

- Hopkinson-Cranz scaling law:

$$Z = \frac{R}{W^{1/3}} \quad (3)$$

여기서, Z 는 스케일 거리(m/kg^{1/3}), R 은 거리(km), W 는 TNT 등가량(kg)이다.

- TNT 등가량:

$$W_{TNT} = M_{explosive} \times f_{TNT} \quad (4)$$

여기서, $M_{explosive}$ 는 실제 폭약량, f_{TNT} 는 TNT 등가 계수이다.

폭약의 실제 위력을 좌우하는 TNT 기준 환산계수는 폭약 종류에 따라 다르다. Table 2[14]를 보면 2개의 탄종 모두 COMP-A3를 사용하며 이들의 등가 계수는 1.08로 추산할 수 있다. 폭약량은 탄두의 10 %에 해당하는 무게를 가정했다. 등가 계수와 폭약량을

식 (4)에 적용한 등가량은 각각 3.5 kg, 0.6 kg이다.

Table 2. Naval gun ammunition(127 mm and 76 mm)

Ammunition	Weight (kg)	Explosive filler	Muzzle velocity (m/s)
K300 (127 mm)	31.75	COMP-A3	827
K243 (76 mm)	12.4 (including charge)	COMP-A3	910

식 (3)의 스케일 거리 Z 는 표적과의 거리 R 에 1 m 부터 15 m까지 1 m 단위로 늘려가며 대입하여 계산하고, 이 결과를 Kingery-Bulmash(K-B) 방정식[15]에 대입하여 해당 거리에서의 예상 과압을 산출하였다. 거리 R 에 따른 예상 과압을 J. Clancey(1972)의 피해 기준[16]과 포탄의 파편 효과를 함께 고려하여 폭파 반경을 Table 3와 같이 가정하였다.

Table 3. Damage criteria by naval gun type

Naval gun	Direct hit (m)	Grazing hit (m)
5 inch gun	9.5	13.5
76 mm gun	6.5	9.6

3.4 효과 척도(MOE) 설정

본 연구에서는 다수의 자폭형 USV에 대한 함포의 대응 효과를 정량적으로 비교하기 위해 다음과 같이 효과 척도를 설정하였다. 각 지표는 반복(500회) 시뮬레이션 결과를 기반으로 정의된 수식에 따라 도출되었다.

평균 방어율은 각 실험 종료 시점까지 격파된 USV 수를 산술평균한 후 이를 해당 조건의 총 USV 수로 나누어 비율(%)로 환산한 값으로, 식 (5)와 같이 계산하였다.

- 평균 방어율:

$$\frac{1}{m} \sum_{i=1}^m \left(\frac{K_i}{N} \right) \times 100 \quad (5)$$

여기서, m 은 시뮬레이션 시행 횟수, K_i 는 i 번째 실험에서 격파된 USV 수, N 은 총 USV 수이다.

평균 총 소모탄 수는 각 실험에서 교전이 종료될 때까지 평균적으로 소모된 총 포탄 수로, 식 (6)과 같다.

- 평균 소모탄 수:

$$\frac{1}{m} \sum_{i=1}^m A_i \quad (6)$$

여기서, A_i 는 i 번째 실험에서 발사된 포탄 수, m 은 시뮬레이션 시행 횟수이다.

평균 교전 시간은 첫 번째 USV가 교전 거리 내에 진입한 시점부터 모든 USV가 격파되거나 생존 USV가 균함 반경 2 km를 돌파하여 시뮬레이션이 종료되는 시점까지의 평균 소요 시간을 의미하며, 식 (7)과 같다.

- 평균 교전 시간:

$$\frac{1}{m} \sum_{i=1}^m t_i \quad (7)$$

여기서, t_i 는 i 번째 실험에 기록된 총 교전 시간(초), m 은 시뮬레이션 시행 횟수이다.

3.5 통계적 유의성 검정

시뮬레이션을 통해 산출된 효과 척도의 차이가 통계적으로 유의한 차이인지 여부를 분석하기 위해 독립표본 t -검정을 수행하였다. 검정 대상은 4장에서 제시될 5인치 함포와 76 mm 함포의 효과 척도별 결과이며, 검정 통계량은 식 (8)과 같이 계산하였다.

$$t = \frac{\bar{X}_1 - \bar{X}_2}{\sqrt{s_1^2/n_1 + s_2^2/n_2}} \quad (8)$$

여기서, X_1 과 X_2 는 두 집단의 표본 평균, s_1^2 과 s_2^2 는 두 집단의 분산, n_1 과 n_2 는 각 집단의 표본의 수를 의미한다. 유의수준은 일반적으로 사용하는 $\alpha = 0.05$ 로 설정하였다. p 값이 0.05 미만일 경우 대립가설을 채택하고 두 체계 간 차이를 통계적으로 유의한 것으로 판단하였다.

4. 결과분석

4.1 실험 I: 직선 기동 USV 대응 함포별 효과 분석

실험 I은 기본적인 교전 성능을 평가하기 위해 수

행되었다. 실험 결과는 Table 4와 같으며 세 가지 효과 척도에서 두 함포의 운용 특성이 명확하게 구분되었다. 평균 방어율의 경우 76 mm 함포가 81.0 %로 5인치 함포의 63.1 %보다 높았으며 평균 교전 시간 역시 76 mm 함포가 321.0초로 5인치 함포보다 짧아 대응의 효과성과 신속성 측면에서 모두 우위를 보였다. 이는 76 mm 함포의 높은 연사력이 다수의 표적에 대해 더 많은 교전 기회를 제공했기 때문으로 분석된다. 평균 총 소모탄 수의 경우 5인치 함포가 15.1발, 76 mm 함포가 50.8발로 5인치 함포가 상대적으로 매우 높은 탄약 효율성을 보였다.

Table 4. Comparison of effectiveness metrics for straight-moving USVs

Naval gun	Average defense rate (%)	Average engagement time (sec)	Average ammunition used
5 inch gun	63.1	477.5	15.1
76 mm gun	81.0	321.0	50.8

4.2 실험II: 회피기동 USV 대응 함포별 효과 분석

실험 결과 Table 5에서 알 수 있듯이 예측 불가능한 표적의 움직임은 두 함포 시스템의 전반적인 전투 효율을 저하시켰으며 함포 간 성능 차이를 더욱 극명하게 만들었다.

평균 방어율은 두 함포 모두 실험 I에 비해 감소했으나 특히 5인치 함포의 방어율은 38.0 %까지 급락하여 평균 방어율 저하 폭이 훨씬 컸다. 하지만 실제 전투 상황에서는 표적의 기동이 복잡할수록 탐지 및 대응 시간이 짧고 높은 연사력의 중요성이 중요하다는 것을 확인할 수 있었다. 이는 76 mm 함포가 높은 사격 빈도를 통해 불규칙한 기동에 더 효과적으로 대응했음을 의미한다. 평균 교전 시간은 두 함포 모두 증가하였으나 76 mm 함포(450.2초)는 여전히 5인치 함포(493.3초)보다 빠른 대응 시간을 기록했다.

탄약 소모량의 경우 5인치 함포가 17.1발, 76mm 함포가 44.1발로 5인치 함포의 효율 우위는 유지되었으나 두 함포 모두 실험 I보다 더 많은 탄을 소모해야 했다. 이러한 결과는 USV의 회피 기동이 연사력이 낮은 5인치 함포의 대응능력을 약화시킨다는 것을 보여준다. 따라서 복잡한 실전 상황에서는 표적의 불확

실성에 대응할 수 있는 신속하고 지속적인 화력 투사 능력의 중요성을 확인할 수 있었다.

Table 5. Comparison of effectiveness metrics for zig-zag-moving USVs

Naval gun	Average defense rate (%)	Average engagement time (sec)	Average ammunition used
5 inch gun	38.0	493.3	17.1
76 mm gun	67.5	450.2	44.1

4.3 통계 검정 및 종합 분석

실험 I·실험 II의 정량적 결과를 바탕으로 5인치 및 76 mm 함포 간의 통계적 유의성 여부를 평가하고 이를 종합적으로 분석한 결과는 다음과 같다.

가장 핵심적인 효과 척도인 평균 방어율에서는 모든 조건에서 76 mm 함포가 5인치 함포 대비 통계적으로 유의미한 우위를 보였다($t = -2.11, p < 0.047$). Fig. 3에 나타난 바와 같이 76 mm 함포의 높은 평균 방어율은 분당 100발의 빠른 연사력과 80발의 즉응탄을 바탕으로 다수 표적에 대해 신속하고 지속적인 대응이 가능했기 때문으로 해석된다.

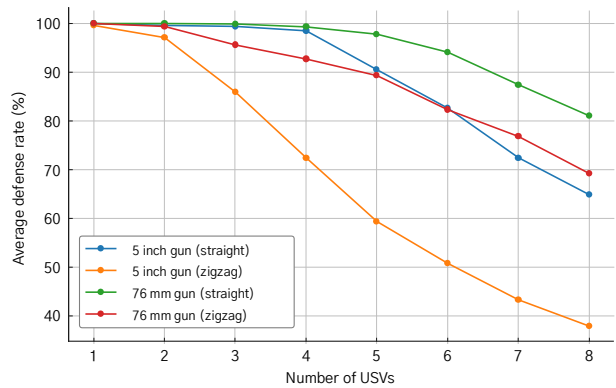


Fig. 3. Average defense rate

반면, 평균 총 소모탄 수에서는 76 mm 함포가 5인치 함포보다 많은 탄약을 사용했으며, 이 차이는 통계적으로도 매우 유의하였다($t = -7.78, p < 0.001$). Fig. 4는 76 mm 함포의 높은 방어율이 다량의 탄약 소모를 수반하였음을 명확히 보여준다. 특히 지그재그 회피 기동에서 USV가 5척을 초과하는 구간부터 소모탄이 감소·정체하는데, 근접한 USV에 대한 명중

이 지속적으로 실패하면서 해당 USV가 군함의 2 km 안쪽으로 들어오는 데 성공하여 시뮬레이션이 조기에 종료되기 때문에 해석된다. 5인치 함포에서도 USV 5척 이상 구간에서 총 소모탄 수 증가가 멈추는데, 이는 20발 즉응탄 한계에 따른 구조적 제약으로 해석된다.

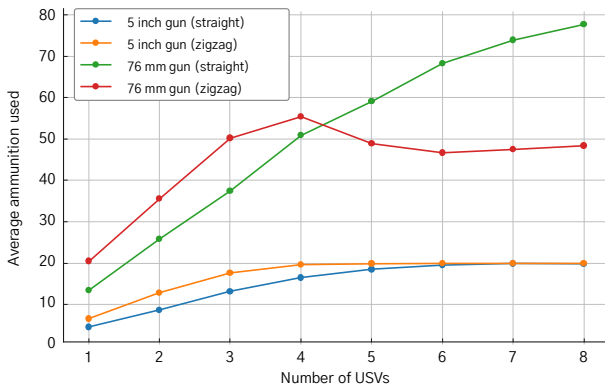


Fig. 4. Average ammunition used

평균 교전 시간의 경우 통계적으로 유의미한 차이는 없었으나($t = 1.06$, $p = 0.2966$), 앞선 두 지표와 함께 해석할 때 운용상 한계가 뚜렷하게 드러났다. 76 mm 함포는 높은 방어율을 유지하면서도 Fig. 5와 같이 표적 수 증가에 따라 교전 시간이 안정적으로 늘어났으나, 회피 기동에서 USV가 5척을 초과하면 총 소모탄 수 정체와 함께 교전 시간 증가 폭도 완만해졌다. 반면 5인치 함포는 낮은 연사 속도와 제한된 즉응탄 한계로 인해 다중 위협 상황에서 탄약 소진 후 방어가 중단되는 경우가 빈번하였다.

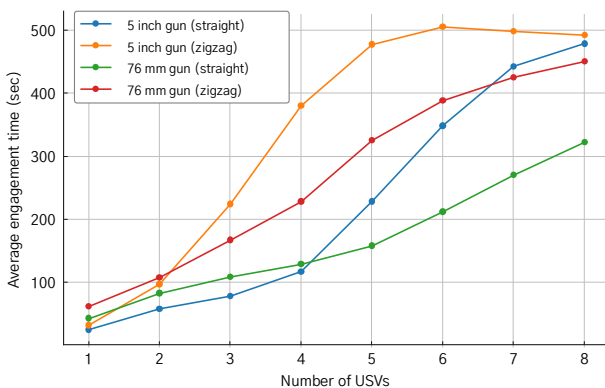


Fig. 5. Average engagement time

앞서 설명한 시뮬레이션의 조기 종료로 회피 기동 시 3척을 초과하는 시점부터 방어율이 급격히 저하되

고 Fig. 5와 같이 5척부터는 평균 교전 시간이 늘지 않거나 오히려 감소하는 양상이 나타났다. 따라서 평균 교전 시간은 방어율 및 소모탄 수와 연계하여 무기체계의 지속 교전 능력과 대응 한계점을 시간적 관점에서 판단하는 보조 지표임을 보여준다.

5. 결론

본 연구는 ABM 기반 시뮬레이션을 활용하여 자폭형 USV의 군집 위협에 대응하는 5인치 및 76 mm 함포의 전투 효과를 정량적으로 비교 분석하였다. 실험은 교전 거리, 탐지 조건, 사격 방식 등을 동일하게 설정한 상태에서 USV의 수량과 기동 형태를 변수로 적용하였으며, 각 실험군에 대해 평균 방어율, 평균 총 소모탄 수, 평균 교전 시간을 주요 효과 척도로 측정하였다.

실험 결과, 76 mm 함포는 빠른 연사력과 즉응탄 수량을 바탕으로 모든 조건에서 5인치 함포 대비 유의하게 높은 방어율을 유지하였으며, 표적 수 증가에 따라 교전 시간도 안정적으로 늘어났다. 반면 5인치 함포는 낮은 연사 속도와 제한된 즉응탄 수량으로 인해 다중 위협 상황에서 탄약을 조기에 소진하는 경우가 많았고, 그 결과 가까운 표적이 먼저 군함에 도달해 시뮬레이션이 조기 종료되는 경우가 많아 평균 총 소모탄 수가 낮게 나타났다. 평균 교전 시간의 경우, 5인치 함포는 표적이 6척 이상일 때 증가세가 둔화되거나 오히려 감소하는 경향을 보여 지속 교전 능력의 한계를 시사했다. 이러한 결과는 다수의 표적 대응에서 방어율, 탄약 소모, 교전 지속성 간의 상호 관계를 확인시켜 주며 복합 위협 상황을 고려한 함포체계 운용 전략 수립에 실질적인 근거를 제공한다.

본 연구는 다음과 같은 한계점이 있다. 첫째, 시뮬레이션 환경의 단순화이다. 군함의 회피 기동이나 파고로 인한 해면 반사파로 인한 클러터, 풍향·풍속 등 실제 전장의 복잡한 각종 변수들을 충분히 반영하지 못했다. 둘째, 함포의 명중률 및 유효 사거리, 포탄의 정확한 폭약량 및 폭파 반경 등의 제원은 공개된 자료를 기반으로 가정했기에 실제 제원과는 차이가 있을 수 있다. 향후 본 연구의 한계점을 보완하여 함정 기동과 실제 해상 환경을 반영하고 CIWS 등 다층 방어 체계와의 통합 운용 효과를 분석하는 후속 연구가 필요할 것으로 보인다.

참고문헌

- [1] Tae-Yang Kim, Yonghoon Ha, "Employment and Countermeasures of Unmanned Surface Vessels for the Republic of Korea Navy: An Analysis of Recent Maritime Combat Cases," *Journal of National Defense Studies*, Vol. 68, No. 2, pp. 57-82, 2025.
- [2] Seongho Do, Yonghoon Ha, "Development Direction for Naval Gun Systems on New Warships Using Delphi and AHP Methods," *Journal of the Korea Academia-Industrial cooperation Society*, Vol. 26, No. 3, pp. 79-87, 2025.
- [3] Jaehyun Kwon, Yonghoon Ha, "Analysis of the Effectiveness of Attack Drones During Landing Operations Based on ABM," *Journal of the KNST*, Vol. 7, No. 4, pp. 413-420, 2024.
- [4] Hyeon-Sil Seo, Yonghoon Ha, "Analysis of the Operational Effectiveness of Naval Air Defense Missiles Using ABM Simulation," *Journal of the Korea Academia-Industrial cooperation Society*, Vol. 26, No. 2, pp. 158-168, 2025.
- [5] Tae-Yang Kim, Yonghoon Ha, "Analysis of the Combat Effectiveness of Maritime Suicide Drones," *Journal of the Korea Academia-Industrial cooperation Society*, Vol. 25, No. 11, pp. 720-729, 2024.
- [6] Soo-Min Kim, Yong-Hoon Ha, "Analysis of Combat and Operational Effectiveness of Swarm Unmanned Surface Vehicles Using ABM Simulation," *Journal of the Korea Academia-Industrial cooperation Society*, Vol. 24, No. 12, pp. 224-233, 2023.
- [7] Yong Yeon Cho, Gyung Uk Choi, Chi Hon Oh, Sung Hoon Yang, Chang Ki Kim, "Applications of Directional Fragmentation Warheads to Enhance Capability to Counter Small, High-speed Targets for Medium/large Surface Ships," *Journal of the KNST*, Vol. 6, No. 1, pp. 78-83, 2023.
- [8] Seungsik Min, Kyungwon Oh, Jaekwan Ryu, "Analysis of the Combat Effectiveness of FFG with Guided-Rocket on the Threats of Multiple USV," *Journal of Aerospace System Engineering*, Vol. 14, No. 5, pp. 58-65, 2020.
- [9] 김민석(2025. 5. 9), "LIG넥스원, '북한 구축함 킬러' 자폭형 무인수상정 개발," *비즈니스한국*. <https://www.bizhankook.com/bk/article/29565> [검색일: 2025. 8. 3.]
- [10] 이현호(2025. 1. 25), "육군 최후 방어선...자상용 개발되는 근접방어무기 '골키퍼'," *서울경제*. <https://www.sedaily.com/NewsView/2GNTX017Q6> [검색일: 2025. 8. 3.]
- [11] 현대위아, 해상사업, https://www.hyundai-wia.com/business/defense_maritime_01.asp
- [12] BAE Systems, Weapon systems, <https://www.baesystems.com/en/product/mk-45-mod-4-naval-gun-system>
- [13] Office of Naval Research Europe, "MW 08 - Multi-Beam Air and Surface Surveillance Radar," *Military Applications Summary Bulletin 44-89, AD-A233492*, Sep. 1989.
- [14] 풍산, 방위사업, https://www.poongsan.co.kr/include/images/cs/defence_support.pdf
- [15] U.S. Department of Defense. 2014. Unified Facilities Criteria, Structures to Resist the Effects of Accidental Explosions, UFC 3-340-02. Washington D.C.: U.S. Department of Defense.
- [16] Clancey, J., *Damage Estimates for Common Structures Based on Overpressure*, U.S. Defense Civil Preparedness Agency, 1972.