



Received: 2025/12/29
Revised: 2026/01/09
Accepted: 2026/02/20
Published: 2026/03/31

***Corresponding Author:**

Wonkyun Yim
Korea University Graduate School of MOT, 145,
Anam-ro, Seongbuk-gu, Seoul, 02841, Republic of
Korea
E-mail: yimwk88@korea.ac.kr

전술 기뢰원 시뮬레이션 기반 해군 작전 위험도 분석

Risk Analysis of Naval Operations Based on a Tactical Naval Minefield Simulation

임원균^{1*}, 이윤섭²

¹해군 소령/고려대학교 국방기술경영학 박사과정

²해군 소령/서울대학교 데이터사이언스학 석사

Wonkyun Yim^{1*}, YoonSeop Lee²

¹LCDR, ROK Navy/Ph.D. student in Management of Defense Technology,
Korea University

²LCDR, ROK Navy/M.S. in Data Science, Seoul National University

1. 서론

해군작전에서 기뢰는 상대적으로 낮은 비용으로 높은 작전 효과를 발휘할 수 있는 대표적인 비대칭 전력으로 평가된다[1,2]. 실제로 한국전쟁 당시 유엔군 및 남한 해군이 입은 해상 피해의 상당 부분이 기뢰에 의해 발생한 것으로 알려져 있으며, 이는 기뢰가 해군 작전에 미치는 위협 수준을 단적으로 보여준다[3]. 현대전에서도 기뢰는 적 해역 접근 거부, 항로 봉쇄, 작전 자유도 제한 등의 수단으로 활용되며, 특히 협소한 한반도 작전 환경에서는 함정의 생존성에 중대한 영향을 미칠 수 있다.

그러나 실제 기뢰를 부설하여 함정의 피격 위험을 검증하는 실험은 비용, 안전, 국제법적 제약 등의 이유로 현실적으로 수행이 어렵다. 또한 기상 및 해양 환경의 불확실성과 기뢰 배치의 비가시성으로 인해 단순한 정성적 판단이나 제한된 사례 분석만으로는 작전 성공 가능성을 신뢰성 있게 평가하기 어렵다. 이러한 한계로 인해 기뢰 위협 하에서의 작전 위험도를 정량적으로 분석할 수 있는 방법론에 대한 요구가 지속적으로 제기되어 왔다.

이에 본 연구는 확률적 모델링에 기반한 시뮬레이션 기법을 활용하여, 기뢰 배치 밀도와 함정의 기동 경로에 따른 작전 위험도를 정량적으로 분석하고자 한다. 구체적으로는 Python 기반으로 개발한 전술 기뢰원 시뮬레이터를 활용하여 다양한 위협 시나리오를

Abstract

본 연구는 기뢰 위협 하에서 해군 함정의 작전 위험도를 정량적으로 분석하기 위해 전술 기뢰원 시뮬레이션 모델을 설계·구현하고, 시나리오 기반 분석 결과를 제시한다. 기뢰전은 비대칭 전력으로서 높은 위험성을 지니지만, 실제 해역에서의 실험적 검증이 어렵고 기뢰 배치의 불확실성으로 인해 정량적 위험 평가에 한계가 존재한다. 이에 본 연구는 Python 기반 전술 기뢰원 시뮬레이터를 구축하고, 기뢰 유형, 배치 밀도, 함정 기동 경로를 변수로 설정하여 몬테카를로 시뮬레이션을 수행하였다. 분석 결과, 동일한 기뢰 밀도 조건에서도 경로 선택에 따라 피격 확률과 생존율이 비선형적으로 변화함을 확인하였다. 특히 위험도 히트맵을 반영한 경로 선택은 이동 거리 증가에도 불구하고 예상 피해를 유의미하게 감소시켰다. 본 연구는 기뢰전 상황에서 전술적 의사결정을 지원하기 위한 정량적 분석 틀을 제시한다는 점에서 의의를 가진다.

This study developed a tactical minefield simulation model to quantitatively assess operational risk to naval vessels in mine-threatened waters. Although naval mines pose a significant asymmetric threat, experimental validation is impractical, and uncertainty in mine deployment limits quantitative evaluation. A Python-based tactical minefield simulator was developed, and Monte Carlo simulations were conducted by varying mine types, deployment densities, and vessel routes. The results showed that, even under identical mine density conditions, survivability and engagement probability vary nonlinearly with route selection. Risk-based routing using heatmaps significantly reduced expected damage despite moderate increases in transit distance. This paper provides a quantitative, scenario-based framework to support tactical decision-making in naval mine warfare.

Keywords

기뢰(Mine), 전술 기뢰원(Tactical Minefield),
해군 작전(Naval Operations),
위험 평가(Risk Quantification),
시뮬레이션(Simulation),
몬테카를로 기법(Monte Carlo Method),
항로 분석(Route Analysis)

모의하고, 몬테카를로 시뮬레이션을 통해 함정의 생존 확률과 위험도 변화를 분석한다. 본 연구의 목적은 기뢰전 상황에서의 작전 위험을 예측·비교할 수 있는 분석 틀을 제시함으로써, 작전 계획 수립 시 의사결정을 지원할 수 있는 기초 자료를 제공하는 데 있다.

2. 시스템 설계 및 구현

2.1 시스템 아키텍처

본 연구에서 사용한 전술 기뢰원 시뮬레이터는 확장성과 유지보수성을 고려하여 객체 지향 프로그래밍(OOP) 구조로 설계되었다[5]. 전체 시스템은 기뢰 객체의 속성을 정의하는 모듈, 시뮬레이션 환경 및 위협 수준을 설정하는 모듈, 기뢰 부설과 함정 이동에 따른 위험도를 계산하는 시뮬레이션 엔진, 그리고 결과를 시각화하는 모듈로 구성된다. 각 모듈은 독립적

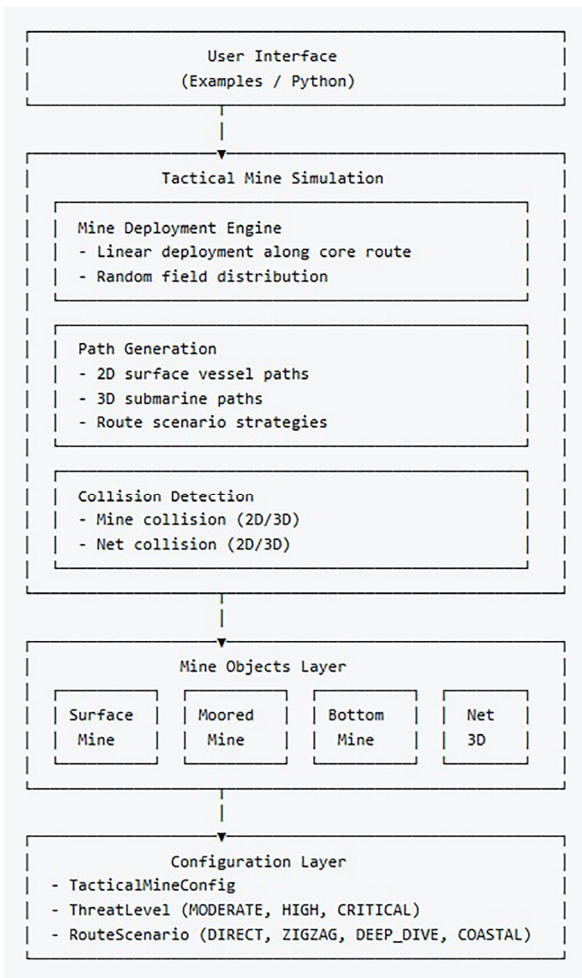


Fig. 1. System architecture diagram

으로 기능을 수행하면서도 공통 데이터 구조를 통해 상호 연동되며, 전체적인 데이터 흐름은 Fig. 1에 제시된 구조를 따른다.)

2.2 기뢰 객체 모델링

현실적인 기뢰전 환경을 모사하기 위해 모든 기뢰는 NavalMine 클래스를 상위 객체로 정의하고, 위치 좌표(x, y, depth), 탐지 확률, 파괴 반경 등의 공통 속성을 포함하도록 설계하였다. 이를 상속받는 하위 클래스는 전술적 특성에 따라 구분된다. 부유 기뢰는 해수면에 위치하며 표류 가능성을 갖는 기뢰로 모델링되었고, 계류 기뢰는 해저에 고정된 상태에서 설정된 수심을 유지하도록 구현되었다. 침저 기뢰는 해저면에 착저된 형태로, 함정의 접근 시 신호를 감지하여 작동하는 감응형 기뢰의 특성을 반영하였다. 또한 닻자망은 물리적 차단 수단으로서 특정 해역의 통과를 제한하는 장애물로 모델링하였다. 각 기뢰 유형의 클래스 구조는 Table 1에 제시하였다.

Table 1. Class diagram of mine object

Mine Types	Depth	Spacing	Target	Detection
Surface mines	3-50m	70-150m	Surface vessels	2D+ draft check
Moored mines	30-55m	30-55m	Submarines at depth	Full 3D collision
Bottom mines	On seabed	30-55m	Submarines near bottom	Full 3D collision

2.3 시뮬레이션 로직 및 위협 시나리오

시뮬레이션은 위협 수준을 Moderate, High, Critical의 세 단계로 구분하여 초기화되며, 각 단계에 따라 기뢰의 총 개수와 유형별 분포 비율이 설정된다. 기뢰 부설은 전술적 요충지에 대한 집중 배치와 무작위 배치를 혼합하여 적용함으로써, 현실적인 불확실성을 반영하였다. 함정은 사전에 정의된 항로를

1) 본 연구와 관련된 데이터, 코드, 모델의 아키텍처, 실험 결과를 포함한 모든 리소스는 다음 GitHub 저장소에서 확인할 수 있다:
https://github.com/Navy10021/naval_simulator

따라 이동하며, 시뮬레이션 엔진은 몬테카를로 기법을 활용하여 이동 경로 상에서의 기뢰 조우 확률과 피격 가능성을 반복 계산한다. 이를 통해 각 시나리오별로 정량적인 작전 위험도를 산출한다. 시뮬레이션 흐름은 Table 2에 제시하였다.

Table 2. Simulation logic flowchart

Route Scenarios	Key Features
DIRECT (Straight)	<ul style="list-style-type: none"> • Shortest path • Highest risk • Minimal fuel consumption • Use: When minefield is sparse or unavoidable
Zig-zag	<ul style="list-style-type: none"> • 5 waypoints with ±800m lateral offset • Moderate risk reduction • Increased transit time • Use: Evading linear mine barriers
Deep Dive	<ul style="list-style-type: none"> • Dive to 250m at midpoint • Avoids surface/moored mines • Vulnerability to bottom mines • Use: Dense surface mine fields
Coastal Route	<ul style="list-style-type: none"> • Follows area perimeter • Longest path • Avoids central dense zones • Use: Peripheral mine concentration

3. 시뮬레이션 결과

3.1 환경 및 시나리오 설정

개발된 시뮬레이터의 적용 가능성을 검증하기 위해 동해안 일대를 가정한 100×100 격자의 가상 작전 구역을 설정하였다. 위험 수준은 High와 Critical 두 가지 시나리오로 구분하였다. High 시나리오에서는 부유 기뢰와 계류 기뢰를 중심으로 총 50발의 기뢰를 무작위로 배치하였다. 반면 Critical 시나리오에서는 계류 기뢰, 침저 기뢰, 닻자망을 혼합하여 총 80발을 전술적 요충지에 집중적으로 부설함으로써 고위험 환경을 조성하였다.

3.2 위험도 시각화 및 전술 지도 분석

기뢰 위치와 파괴 반경 정보를 바탕으로 가우시안 커널 밀도 추정을 적용하여 위험도 히트맵을 생성하

였다[4]. Fig. 2는 생성된 전술 지도와 위험도 분포를 나타낸다. 히트맵 상에서 고위험 구역은 피격 확률이 상대적으로 높은 영역을 의미하며, 이를 통해 작전 계획 단계에서 위험 구역과 상대적으로 안전한 통과 구역을 시각적으로 식별할 수 있음을 확인하였다.

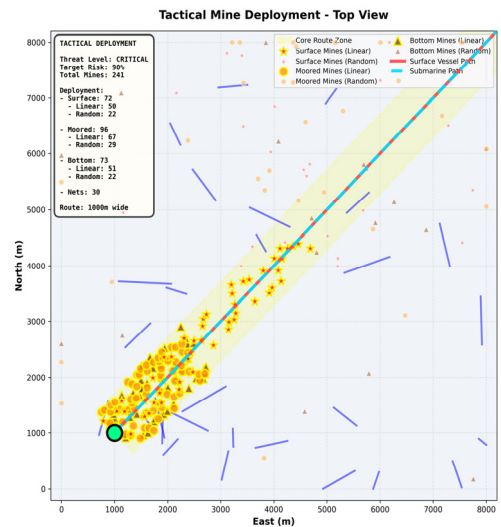
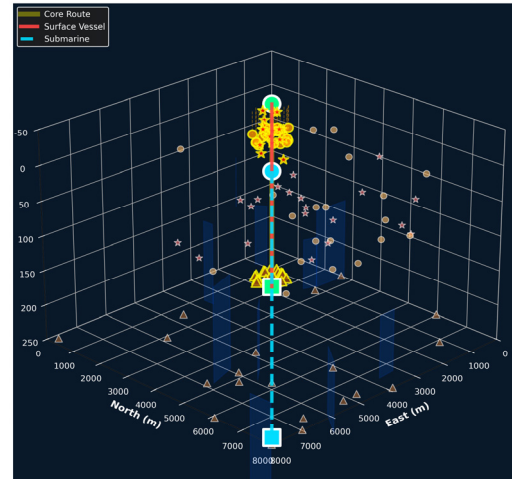


Fig. 2. Risk visualization and tactical map

3.3 경로 탐색 결과 비교

경로 선택에 따른 위험도 변화를 분석하기 위해 최단 거리를 기준으로 이동하는 직선 경로와 위험도 히트맵을 반영하여 고위험 구역을 회피하는 안전 경로를 비교하였다. Fig. 3에서 확인할 수 있듯이, 안전 경로는 이동 거리가 약 15% 증가하였으나, 고위험 구역을 회피함으로써 예상 피해량이 직선 경로 대비 평균

60% 이상 감소하였다. 이는 경로 선택이 함정 생존성에 미치는 영향이 비선형적임을 시사한다.

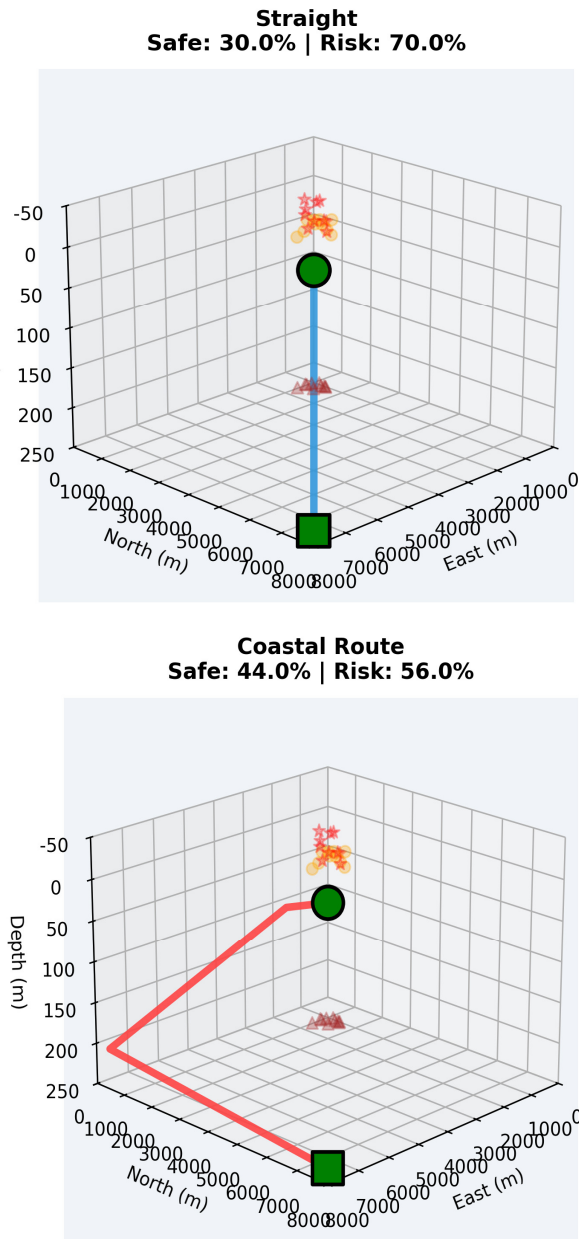


Fig. 3. Route scenario comparison

3.4 시뮬레이션 결과 분석

각 시나리오별로 500회의 몬테카를로 시뮬레이션을 수행하여 결과의 신뢰성을 확보하였다. Table 3는 평균 피격 횟수와 작전 성공률을 요약한 것이다. High 위험 수준에서는 평균 생존율이 약 68.6%로 나타난 반면, Critical 수준에서는 약 51.2%로 감소하였다.

Table 3. Simulation statistics

Scenario	Mines	Hit Probability	Survival rate
High	145	31.2%	68.8%
Critical	241	48.8%	51.2%

이어, Fig. 4는 몬테카를로 시뮬레이션을 통해 산출된 개별 시행 결과와 생존확률 추정치를 함께 제시하여, 기뢰 위협 수준에 따른 함정 생존성의 차이를 직관적으로 비교할 수 있도록 한다.

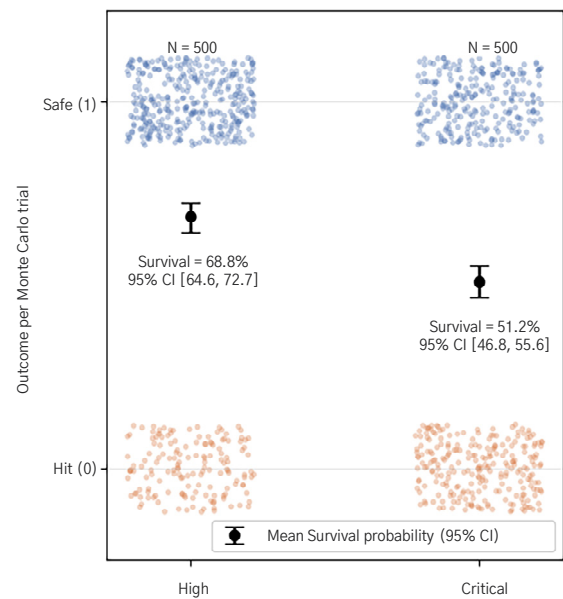


Fig. 4. Simulation output results

4. 결론

본 연구는 기뢰전 상황에서의 작전 위험도를 정량적으로 분석하기 위해 Python 기반 전술 기뢰원 시뮬레이터를 설계하고 구현하였다. 다양한 기뢰 유형을 객체 지향적으로 모델링하고, 몬테카를로 시뮬레이션을 적용함으로써 불확실한 기뢰 배치 환경에서 함정의 생존 확률과 위험도를 확률적으로 산출할 수 있는 분석 환경을 구축하였다. 특히 위험도 시각화를 통해 기존의 경험적 판단에 의존하던 항로 선택 문제를 데이터 기반으로 비교·분석할 수 있는 가능성을 확인하였다.

다만 본 연구에서 제시한 시뮬레이션은 평면 기반

분석에 중점을 두고 있어, 수심 변화와 해저 지형 등 복잡한 수중 환경을 충분히 반영하지 못하는 한계를 가진다. 향후 연구에서는 3차원 공간으로의 확장과 해양 환경 요소의 추가 반영을 통해 분석의 정밀도를 제고할 필요가 있다. 그럼에도 불구하고 본 연구는 기뢰 위협 하에서의 전술적 의사결정을 지원할 수 있는 정량적 분석 틀을 제시하였다는 점에서 의의를 가진다.

참고문헌

[1] Milan N. Vego, *Operational Warfare*, Naval Institute Press,

2009.

[2] Chris Martin & Ben Tamsett (Eds.), *Maritime Warfare: Naval Operations and Technology*, Routledge, 2013.

[3] Huiseong Park, 'Mine Warfare of the North Korean People's Navy and UN Navy During the Early State of the Korean War,' *The Yeoksa and Silhak*, NO. 72, 2020, pp. 393-432.

[4] Trevor Hastie, Robert Tibshirani, & Jerome H. Friedman, *The Elements of Statistical Learning: Data Mining, Inference, and Prediction* (2nd ed.), Springer, 2009.

[5] Jerry Banks, John S. Carson II, Barry L. Nelson, & David M. Nicol, *Discrete-Event System Simulation* (5th ed.), Pearson, 2010.