



Received: 2026/08/20
Revised: 2026/09/02
Accepted: 2026/09/17
Published: 2026/09/30

***Corresponding Author:**

Bong Wan Choi

70 Hannam-ro, Daedeok-gu, Daejeon, 34430,
Republic of Korea

Tel: +82-42-629-7989, +82-42-629-8530

Fax: +82-42-629-8533

E-mail: bwchoi721@hnu.kr

PI-DeepONet 궤적예측 및 피해평가 기반 무장할당

Threat Evaluation and Weapon Assignment Based on PI-DeepONet Trajectory Prediction

이혁주¹, 장재덕², 경지훈³, 최봉완^{3*}

¹한남대학교 산업공학과 연구원

²LIG D&A 미래전장연구개발 본부 M&S팀장

³한남대학교 산업공학과 교수

Hyuk Joo Lee¹, Jae Deok Jang², Ji Hoon Kyung³, Bong Wan Choi^{3*}

¹Researcher, Dept. of Industrial & Management Engineering, Hannam University

²Head of M&S Team, R&D(Future World), LIG D&A

³Professor, Dept. of Industrial & Management Engineering, Hannam University

Abstract

본 연구는 PI-DeepONet을 활용한 궤적예측 및 요격 실패 시 피해율을 위협값으로 사용하고, 요격무기체계 대응시간을 반영한 예측요격점(PIP) 기반 교전 가능성을 고려하여, 피해율 최소화 정수계획법을 적용한 위협평가 및 무장할당(TEWA) 방법론을 제안한다. 탄도미사일 60발과 5개 요격체계 시뮬레이션 결과 육해상 통합 방어율이 61.7%로 가장 높았고, 육상 단독은 외기권 요격 수단 부재로 17.9%에 그쳤다.

This study proposes an integer-programming-based threat evaluation and weapon assignment methodology that uses the damage rate upon interception failure, derived from PI-DeepONet trajectory prediction, as the threat value. It also introduces a predicted intercept point reflecting reaction time and interceptor flight time as an engagement feasibility constraint. In simulations featuring 60 ballistic missiles against 5 interceptor systems, the integrated land-sea configuration achieves the highest defense rate of 61.7%, while the land-only configuration reaches 17.9% due to the absence of exo-atmospheric interception.

Keywords

위협평가(Threat Evaluation),
물리정보 심층 연산자 네트워크(PI-DeepONet),
궤적예측(Trajectory Prediction),
피해율(Damage Rate),
무장할당(Weapon Assignment),
다층 방어(Multi-Layered Defense),
탄도미사일 방어(Ballistic Missile Defense)

Acknowledgement

이 연구는 방위사업청 재원으로 LIGD&A의 지원을 받아
한남대학교에서 수행된 결과임
(LIGNEX1-2025-2315(00) 참조번호-YD25-5316)

1. 서론

최근 북한은 스커드 계열의 단거리 탄도미사일부터 노동, 무수단 등 중거리 탄도미사일에 이르기까지 다양한 탄도미사일을 개발하여 시험 발사하고 있으며, 다수 탄도미사일을 시간차를 두고 동시다발적으로 발사하는 포화공격 능력을 강화하고 있다[1,2]. 이러한 포화공격은 반응시간이 제한된 상황에서 방어체계의 처리 용량을 압도하므로, 한정된 요격자산을 위협가치가 큰 탄에 우선 배분하는 의사결정이 방어 성패를 좌우한다. 본 연구의 목적은 궤적예측 결과를 위협평가와 무장할당으로 일관되게 연결하고, 요격체의 도달시간을 반영한 예측요격점(predicted intercept point, PIP)을 도입하여 육해상 다층 방어의 무장할당을 모델링 및 검증하는 것이다.

대한민국은 L-SAM, 천궁-II, 패트리엇 등으로 구성된 다층 방어체계를 구축하고 있으며, 외기권 중간단계 요격을 위한 해상 기반 SM-3의 도입도 결정되었다. 그러나 요격자산은 항상 위협의 수보다 적고 배치와 사거리에 제약이 있으므로, 자산의 최적 운용과 무장할당 전략의 고도화가 요구된다. 특히 요격은 요격체가 표적에 실제로 도달해야 성립하므로, 탐지 후 반응시간과 요격체 비행시간을 고려하지 않은 무장할당은 실현 불가능한 배정을 산출할

수 있다.

무기표적할당(WTA) 문제는 Manne[3]이 체계화하고 Lloyd와 Witsenhausen[4]이 NP-complete임을 증명한 이래, 정확해법과 휴리스틱이 폭넓게 연구되어 왔다[5,6]. 국내에서도 요격미사일 소요 산정[7], 방어영역 산출[8], 방어체계 구축 고려사항[1], 강화학습 기반 무기표적할당[9] 등이 연구되었고, 최근에는 함정 전투체계의 위협평가 및 무장할당과 다층 방어체계의 체계통합 자동 할당이 제안되었다[10-13]. 그러나 대부분의 연구는 요격 성공 확률과 자산배치에만 초점이 맞춰져, 요격에 실패했을 때 아군 자산이 입는 피해를 위협값으로 반영하지 못하고, 요격체가 표적에 실제로 도달할 수 있는지를 배정 단계에서 검증하지 않는 제한사항이 있다. 따라서 요격 실패 시 부수 피해까지 고려한 피해를 기반 위협평가와 요격체 도달시간을 결합한 무장할당 개념으로 통합하여 보완, 발전될 필요가 있다.

2. 기존 연구 개관

표준 무기표적할당은 표적의 잔존 위협가치를 최소화하는 표적기반 모델과 방어 자산의 기대 피해를 최소화하는 자산기반 모델로 구분되며, 배정 시점에 따라 정적, 동적으로 나뉜다[6]. 위협평가는 표적의 방위, 거리, 속도, 고도 등을 종합하여 위협치를 산출하는 단계로 무장의 방어 가능 범위를 이용해 무장 대표적 교전을 대응시키는 방식이 제안되었다. 특히 이 세준 외[10]는 교전가능시간을 위협평가에 반영하였고, 홍인섭 외[11]는 다층방어체계에서 포대별 개별 대응과 중앙집권적 통제를 비교하며 체계통합 자동 할당 모델을 제시하였다. 요격체계의 시간성능 측면에서는 요격명령 전달 이후 발사 소요시간과 비행시간이 확보되어야 요격이 성립함이 지적되었다[12]. 이러한 흐름은 무장할당이 단순히 표적 무기 대응을 넘어, 요격체의 물리적 도달 가능성과 시간 제약을 반영해야 함을 보여준다.

특히, 본 연구는 선행연구[13]에서 제안한 PI-DeepONet 궤적예측을 기반으로 한다. 선행연구의 핵심은 다음과 같다. 분기망(branch network)과 몸통망(trunk network)으로 이루어진 물리정보 심층 연산자 네트워크(PI-DeepONet)는 기존의 모든 제원을 입력해야 되는 시뮬레이션 방식과 달리 중요

한 몇 가지 제원만을 이용하여 AI가 학습한 전체 탄도미사일 궤적 중 가장 유사한 탄도미사일 정보를 신속히 도출할 수 있다는 것이 차별화된 특성이다. 이는 탄도미사일 발사 제원을 분기망에 입력하면 사전에 학습시킨 탄도미사일별 궤적예측 함수를 몸통망에서 AI가 자율적으로 연산하여 사용자가 원하는 임의 시간의 위치와 전체 탄도미사일 궤적 정보를 수 밀리초 내에 산출할 수 있는 방식이다[13]. DeepONet은 함수를 함수로 대응시키는 연산자(operator)를 학습하는 신경망 구조로, 입력 함수의 특성을 추출하는 분기망과 출력의 좌표(여기서는 시간)를 입력받는 몸통망의 병렬 구조로 구성된다[14]. 두 망의 출력을 결합함으로써 임의의 입력 조건에 대해 연속적인 해를 근사할 수 있으며, 이는 특정 이산 시점에서만 값을 산출하는 기존 신경망과 달리 시간 도메인 전체에 걸친 연속적 궤적 예측을 가능하게 한다. 물리정보 심층 연산자 네트워크는 이러한 DeepONet 구조에 지배방정식을 손실 함수로 부과하여, 학습 데이터가 물리법칙을 따르도록 제약한 것이다. 또한, 물리 손실 함수로 중력, 공기항력의 역학 구축을 강제함으로써 스커드-B 시나리오에서 3차원 평균제곱근오차 약 0.99 km, 단일 궤적 추론시간 0.95 ms의 우수한 성능을 보였고, 시계열 모델에서 나타나는 오차 누적이 해소됨을 확인하였다.

결과적으로 이 연구는 칼만 필터나 시계열 예측과 같은 기존 방식들이 요구하던 연속적인 레이더 관측 정보의 축적 없이 PI-DeepONet에 입력할 몇 가지 초기 제원만으로 전체 궤적, 탄착점, 탄착시간을 밀리초 단위로 산출한다는 점에서 실시간 의사결정 지원에 유리하다. 다만 궤적예측만으로는 방어가 완성되지 않으므로, 예측 결과를 어떤 요격자산에 배정할지에 대한 후속 의사결정이 필요하다. 본 연구는 이 공백을 메우기 위해, 궤적예측과 무장할당 최적화를 결합한 하이브리드 프레임워크를 제안한다.

한편 무장할당의 선행연구들은 위협평가와 최적화 기법을 중심으로 발전해 왔다. 전투용 무인수상정 군집의 통합 지휘통제에서는 표적 도달시간을 고려한 무장 재할당 개념이 제시되었으며[15], 탄도미사일 요격을 위한 예상명중점 산출 기법이 연구되었다[16]. 또한 다표적-다무장 환경에서 신속 대응을 위한 무장 할당 알고리즘[17]과 탄도미사일의 비행궤적예측 방법[18]이 제안되었다. 무기 표적 할당의 해법 측

면에서는 메타휴리스틱 기법의 성능이 비교되었고 [19], 위협평가 단계에서는 퍼지 규칙 기반 방법 [20]이 연구되었다. 이처럼 위협평가와 무장할당은 표적 속성의 정량화와 최적 배정을 결합하는 방향으로 발전해 왔다.

3. 알고리즘 및 방법론

3.1 하이브리드 LP-DeepONet 아키텍처

본 연구는 DeepONet 기반의 초고속 궤적 생성 모델과 선형계획(LP) 기반의 무장할당 최적화를 결합한 하이브리드 프레임워크를 제안한다. 적 발사체 탐지 직후, 선행연구의 PI-DeepONet이 소수의 초기 제원만으로 전체 비행궤적과 종말 탄착점을 단일 순방향 연산으로 생성하면, 이 시공간 데이터가 위협평가 모듈의 입력이 되고, 피해율 개념을 반영한 위협평가 결과가 다시 무장할당 최적화의 계수로 전달되며, 선형계획(LP)이 적용된 효율적인 무장할당으로 귀결된다. 즉 예측 엔진의 출력이 곧 의사결정의 입력이 되는 단일 처리 흐름을 구성한다.

기존 연구에서 위협평가와 무장할당은 궤적예측과 분리된 단계로 다루어져, 위협값이 별도의 지표나 가정으로 주어지는 경우가 많았다. 본 아키텍처는 이 단계를 해결한다. 궤적예측이 산출하는 예상 탄착점을 이용해 각 탄이 위협하는 보호자산을 식별하고, 자산의 가치와 탄종의 위력으로부터 요격 실패 시 피해율을 결정하며, 예측된 비행시간 정보로부터 요격체의 교전 가능 여부를 판정한다. 세 단계가 모두 동일한 예측 출력에 근거하므로 입력의 일관성이 확보된다.

전체 처리는 다음 세 단계로 구성된다.

첫째, PI-DeepONet에 기반한 궤적 추론 단계이다. 분기망은 적 탄도미사일 탐지 직후 획득되는 전술 제원을 입력받아 궤적의 전체 형태를 결정하는 잠재 계수를 추출하고, 몸통망은 발사 시점부터 탄착 예상 시점까지의 연속시간 도메인을 입력받아 궤도의 기하학적 기저를 생성한다. 두 망의 출력을 결합하여 임의 시간의 3차원 위치를 산출하므로, 수치 적분의 반복 없이 임의 시점의 표적 위치를 즉시 조회할 수 있다.

둘째, 위협평가 단계이다. 산출된 궤적으로부터 예상 탄착점을 확정하고, 이를 기준으로 대상 자산을 식별하여 요격 실패 시 피해율을 산정한다. 궤적 정보만

으로 요격 우선순위를 정하는 대신 보호자산의 가치를 함께 고려함으로써, 포화공격 환경에서 아군에게 치명적인 피해를 유발하는 고가치 표적을 선별한다.

셋째, 선형계획(LP)을 적용한 무장할당 단계이다. 위협평가에서 산출된 피해율을 목적함수의 계수로, 궤적으로부터 계산된 요격체 도달 가능성을 제약으로 사용하여 0-1 정수계획을 구성하고 최적 배정을 도출한다.

이 구조의 이점은 두 가지이다. 하나는 연산 시간이다. 궤적 산출이 밀리초 단위로 완료되므로 다수 표적이 동시에 탐지되어도 무장할당 최적화에 필요한 입력을 지연 없이 확보할 수 있다. 다른 하나는 판단 근거의 일관성이다. 피해평가와 교전 가능성 판정이 동일한 예측 궤적에 근거하므로, 예측과 배정 사이에 가정의 불일치가 발생하지 않는다.

3.2 위협 유형 분류와 피해평가

본 절부터는 앞서 제시한 아키텍처의 각 단계를 구체적으로 모델링한다. 궤적 분석을 통해 각 위협의 유형 $\tau_i \in \{\text{BM, LRA, UAV}\}$ 를 판별하고, 탄도미사일 여부를 나타내는 변수 δ_i 를 정의한다. 탄도미사일이면 $\delta_i = 1$, 아니면 $\delta_i = 0$ 이다. 탄 i 가 요격되지 않고 자산에 도달했을 때의 피해율을 위협값 β_i 로 삼는다. 먼저 예측 탄착점에 가장 가까운 자산을 대상으로 지정한다.

$$k(i) = \underset{k \in A}{\operatorname{argmin}} \| r_i^{\text{imp}} - a_k \|$$

여기서 r_i^{imp} 는 예측 탄착점, a_k 는 k 번 자산의 위치이다. 대상 자산과 탄종을 키로 피해율 데이터베이스에서 실패 피해율 $\beta_i = DB(\text{탄종}, k(i))$ 를 조회한다. 데이터베이스는 자산가치 v , 탄종 위력 l , 자산 취약도 p 를 반영하여 $\beta_i = v \cdot l \cdot p$ 로 산정한다.

3.3 목적함수

전체 위협이 모두 도달할 때의 피해에서 요격으로 막아내는 기대 피해를 뺀 값, 즉 요격되지 않고 도달하는 기대 피해를 최소화한다.

$$\min Z = \sum_{i \in I} - \sum_{i \in I} \sum_{t \in T} x_{it} p_{it} \beta_i$$

여기서 x_{iT} 는 탄 i 를 요격체계 T 에 배정하면 1, 아니면 0인 할당변수, p_{iT} 는 격추확률이다. 첫째 항은 상수이므로 이 목적함수는 막아내는 기대 피해의 최대화와 동일하며, 피해율 β_i 가 큰 탄을 요격할수록 크게 개선된다. 따라서 요격 자원이 부족한 상황에서 고평해율 탄이 우선 배정된다.

3.4 예측요격점(PIP)

요격체계 T 의 발사시간은 탐지시간에 반응시간 Δ 를 더한 값이며, 궤적상 지점까지의 거리 d 와 요격체 속도 v_T 로 도달시간이 정해진다.

$$t_{iT}^{fire} = t_i^{det} + \Delta, \quad t_{iT}^{int} = t_{iT}^{fire} + \frac{d}{v_T}$$

요격체가 표적의 해당 지점 통과 시간보다 먼저 도달하는 궤적상 점이 존재할 때만 요격이 성립한다. 이는 교전창 $w_{iT} = TTI_i - \tau_{iT}$ 가 비음이어야 한다는 조건과 같으며, τ_{iT} 는 요격체 도달시간이다. 예측요격점이 존재하지 않으면 해당 배정은 금지된다.

3.5 제약조건

무장할당은 다음 제약을 갖는 0-1 정수계획이다.

(1) 탄도미사일에만 배정, (2) 중복 배정 금지, (3) 체계별 동시교전 용량, (4) 예측요격점 존재, (5) 고평해율 우선, (6) 이진 변수.

$$x_{iT} \leq \delta_i \quad \forall i, T \quad (1)$$

$$\sum_T x_{iT} \leq 1 \quad \forall i \quad (2)$$

$$\sum_i x_{iT} \leq C_T \quad \forall T \quad (3)$$

$$x_{iT} = 0 \quad (\text{pip 없음}) \quad (4)$$

$$X_i \leq X_j \quad \forall i, j \in F, j > i \quad (5)$$

$$x_{iT} \in \{0, 1\} \quad (6)$$

여기서 C_T 는 동시교전 용량, $X_i = \sum_T x_{iT}$, F 는 요격 가능한 탄의 집합이다. 우선순위 관계 $j > i$ 는 $\beta_j > \beta_i$ 이거나 동일 피해율에서 $TTI_j > TTI_i$ 인 경우이며, 제약식 (5)는 요격가능 집합 안에서만 적용한다.

3.6 기존 연구와의 차별성 및 기대효과

첫째, 위협값을 별도의 관측이나 가정 없이 궤적 예측 출력만으로 산출한다. 종래 연구가 위협순위를 난수로 부여하거나 별도 위협평가 모듈을 단순화한 것과 달리, 본 연구는 예측 탄착점을 통해 대상 자산을 식별하고 피해율을 결정한다. 둘째, 요격 성공 확률 뿐 아니라 요격 실패 시 도달 피해를 목적함수의 유일한 피해 지표로 삼아 고가치 표적 우선 요격을 직접 구현한다. 셋째, 사거리 조건에 더해 반응시간과 요격체 비행시간을 반영한 예측요격점을 교전 가능성 제약으로 도입하여, 사거리 안에 들어오더라도 시간상 요격이 불가능한 탄을 식별한다. 이는 요격체 시간 성능의 중요성을 지정한 선행연구[12]와 도달시간 제약을 제시한 최근 연구를 무장할당 최적화에 통합한 것이다.

4. 시뮬레이션 검증 및 결과분석

4.1 실험 설정

북한 4개 지역에서 발사되는 탄도미사일 60발을 대상으로 하였다. 적 탄도미사일 현황은 Table 1과 같다. 보호자산은 서울, 대전, 대구, 포항, 부산, 강릉의 6개 지점이며, 요격자산 현황은 Table 2와 같다. 탐지 후 반응시간은 10초로 설정하고, 각 체계는 요격층과 예측요격점 조건을 만족하는 경우에만 배정 후보가 된다.

4.2 결과 분석

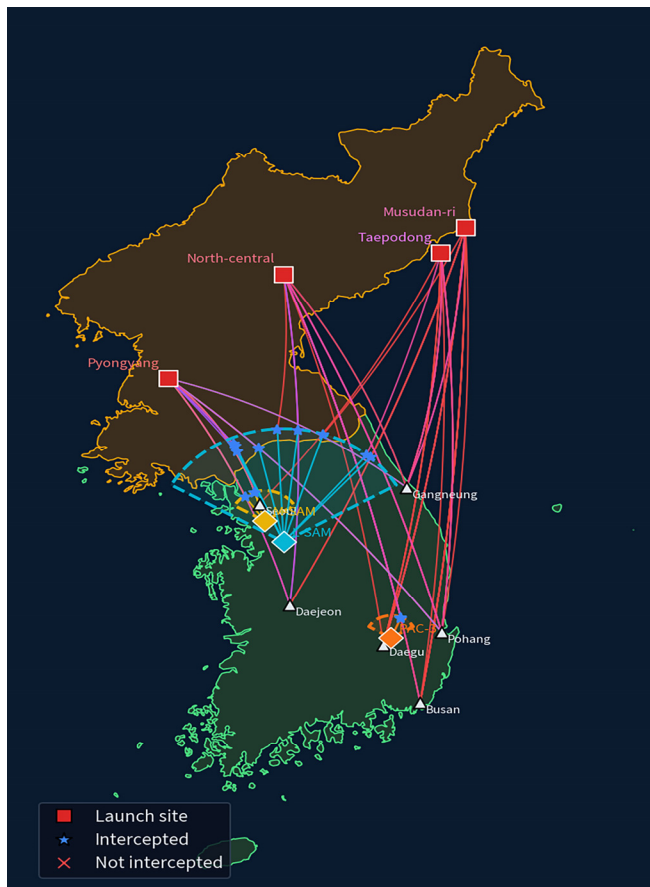
해상 단독(SM-3, SM-6), 육상 단독(L-SAM, M-SAM, PAC-3), 육해상 통합의 세 구성을 동일 시나리오에 적용하였다. 육상 단독 구성의 교전 상황은 Fig. 1과 같으며, 발사원점에서 각 자산으로 향하는 궤적과 요격범위, 요격체의 예측요격점 교전이 표시된다. 구성별 아군 피해현황은 Table 3과 같다.

Table 1. Enemy ballistic missile status

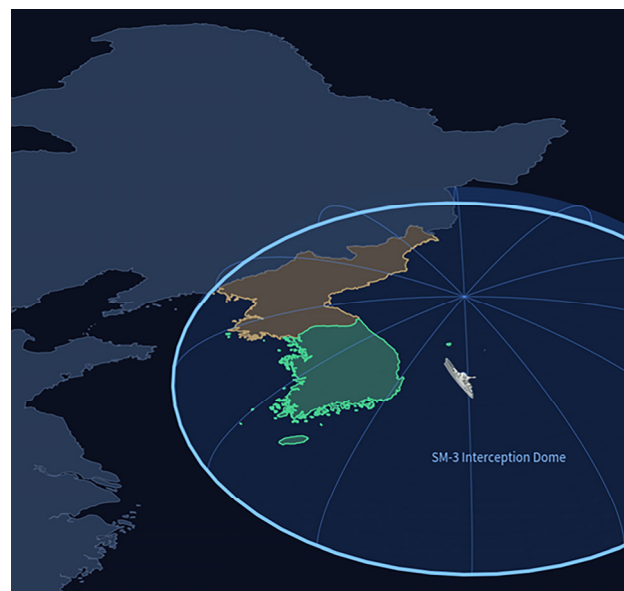
Launch region	Target region	Range (km)	Speed (km/s)	Altitude (km)	Missile type	Count
Musudan-ri	Daegu, Busan, Gangneung	350–631	3.0–3.4	250–600	Nodong, Musudan	15
Taepodong	Pohang, Busan, Daejeon	313–597	3.0–4.0	250–600	Nodong, Musudan	15
North-central NK	Seoul, Pohang, Daegu	306–589	2.2–4.0	150–600	Scud-ER, Nodong, Musudan	15
Pyongyang	Daejeon, Daegu, Busan	196–518	1.8–3.0	110–400	Scud-C/ER, Nodong	15

Table 2. Interceptor asset status

Category	Asset	Deployment	Max Range (km)	Interceptor speed (km/s)	Kill prob.	Round
Land	L-SAM	Icheon	150	1.5	0.75	35
Land	M-SAM (Cheongung-II)	Suwon	40	1.0	0.72	40
Land	PAC-3	Daegu	30	1.5	0.70	35
Sea	SM-3 (DDG)	East Sea, off Pohang	700	3.0	0.85	00
Sea	SM-6 (DDG)	East Sea, off Gangneung	240	1.2	0.80	25

**Fig. 1.** Engagement result of the land-based interceptor configuration (L-SAM, M-SAM, PAC-3) against ballistic missiles launched from four regions in North Korea**Table 3.** Friendly damage status by configuration

Configuration	Intercepted	Reached (undefended)	Defended damage	Defense rate
Land only	14	46	639	17.9%
Sea only	37	23	2,007	56.1%
Integrated	42	18	2,210	61.7%

**Fig. 2.** 3D interception coverage of the sea-based Aegis (SM-3) system over the Korean Peninsula

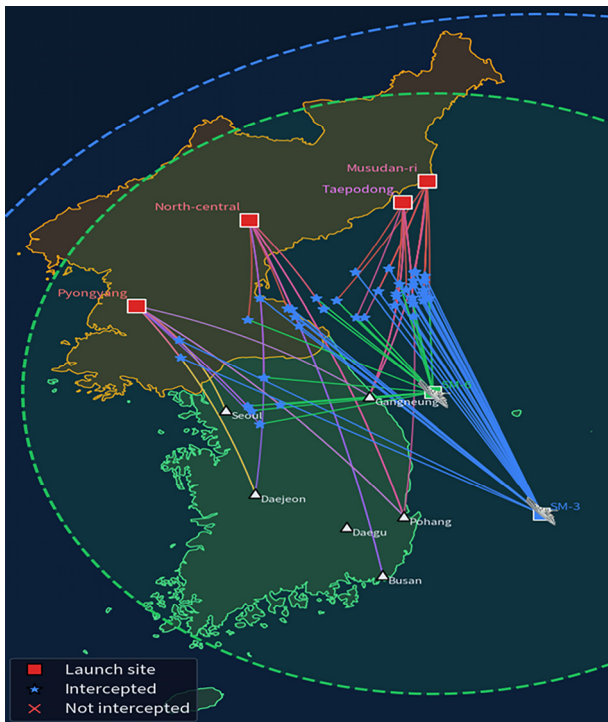


Fig. 3. Engagement result of the sea-based interceptor configuration (SM-3, SM-6) against ballistic missiles launched from four regions in North Korea

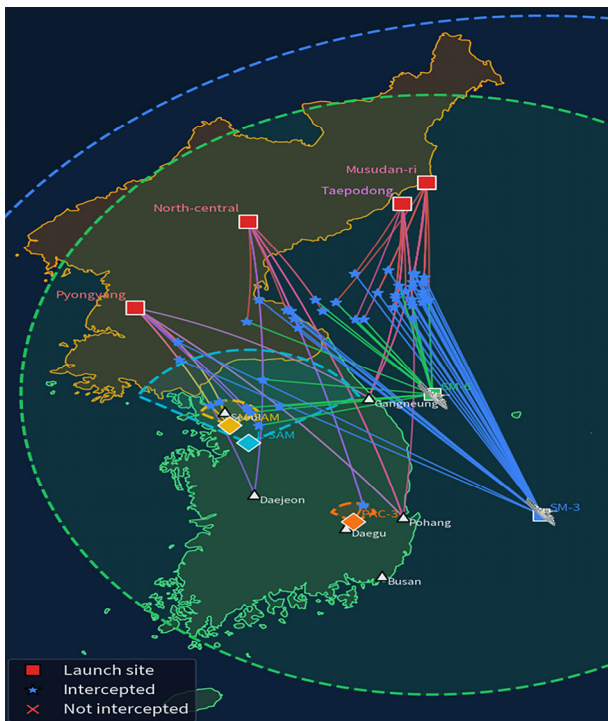


Fig. 4. Engagement result of the integrated land-sea interceptor configuration (SM-3, SM-6, L-SAM, M-SAM, PAC-3) against ballistic missiles launched from four regions in North Korea

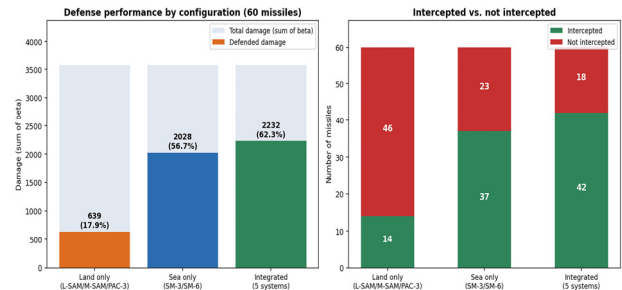


Fig. 5. Defense performance and interception outcome by configuration (land-only, sea-only, integrated) against 60 ballistic missiles

Fig. 2는 해상 기반 이지스(SM-3) 요격체계의 3차원 방어 범위를 나타낸다. 이지스함은 동해상에 배치되어 외기권 단계에서 광역 요격을 수행하며, 그 방어 범위가 한반도 전역과 북한 북부 지역까지 포함함을 확인할 수 있다. 이는 육상 체계가 담당하지 못하는 외기권 위협에 대해 해상 자산이 폭넓은 방어를 제공할 수 있음을 보여준다. Fig. 3는 해상 단독 구성(SM-3, SM-6)의 교전 상황을, Fig. 4는 육·해상 통합 구성의 교전 상황을 나타낸다. 북한 4개 지역에서 발사된 탄도미사일이 각 표적 자산으로 향하며, 각 요격체계는 자신의 요격범위 내 예측요격점에서 표적과 교전한다. 요격에 성공한 표적에는 담당 요격체계로부터 교전선이 연결되어 어떤 체계가 어떤 탄을 요격하였는지를 확인할 수 있다. 그림에서 해상 SM-3와 SM-6의 요격범위가 북한 지역까지 광범위하게 형성되어 외기권 및 상층 위협을 담당하고, 육상 체계가 남부 지역의 하층을 보완하는 계층적 방어 구조가 나타난다. 이때 육상 체계는 북쪽을 향한 부채꼴 형태의 요격범위를 가지며, 발사원점에서 진입하는 탄에 대응한다.

Fig. 5는 세 구성의 방어 성능을 정량적으로 비교한 것이다. 좌측 그래프는 전체 피해($\Sigma\beta$) 대비 방어된 기대피해와 방어율을, 우측 그래프는 요격 및 미요격 발수를 나타낸다. 방어율은 육해상 통합이 62.3%로 가장 높고, 해상 단독(56.7%), 육상 단독(17.9%) 순으로 나타났다. 육상 단독의 방어율이 현저히 낮은 것은 육상 체계에 외기권 요격 수단이 없어 무수단리·대포동 등 북부 지역에서 발사된 외기권 탄을 요격하지 못하기 때문이며, 해상 SM-3의 외기권 요격 능력이 결합될 때 방어율이 크게 향상되었다. 이는 해상 기반 외기권 요격자산의 필요성을 정량적으로 뒷받침한다. 우측 그래프에서도 통합 구성의 요격 발수가 가장

많고 미요격 발수가 가장 적어, 다층 자산의 통합 운용이 방어 효과를 극대화함을 확인할 수 있다.

통합 구성의 방어율이 61.7%로 가장 높았고, 육상 단독은 17.9%로 가장 낮았다. 육상 단독의 방어율이 낮은 것은 육상 체계에 외기권 요격 수단이 없어, 무수단리·대포동에서 발사된 외기권 탄을 요격할 수 없기 때문이다. 해상 SM-3의 외기권 요격 능력이 결합될 때 방어율이 크게 향상되었으며, 이는 해상 기반 외기권 요격자산의 필요성을 정량적으로 뒷받침한다.

통합 구성에서도 18발이 요격되지 않았다. 이 중 상당수는 하층 단계로 포항·강릉을 향하는 탄이며, 하층을 담당하는 M-SAM(40 km)과 PAC-3(30 km)의 사거리가 해당 지역에 도달하지 못하는 배치 공백에 놓여 있다. 별도의 용량 증강 실험에서는 요격 자원을 늘리자 자원 부족으로 놓치던 탄이 방어되었으나, 배치 공백에 놓인 탄은 자원과 무관하게 남았다. 이는 방어율 개선의 해법이 요격탄 증강이 아니라 포대 재배치 또는 장사거리 체계 도입임을 시사한다. 한편 동일 요격층에서는 격추확률이 높은 SM-6에 배정이 집중되어 L-SAM의 활용이 감소하는 현상이 관찰되었으며, 이는 다층 방어에서 체계 간 역할 분담을 함께 고려할 필요가 있음을 보여준다.

Table 4. Comparison of assignment methods

Method	Intercepted	Defense rate	High-value rate
First-come greedy	27	35.5%	34.4%
Damage-rate greedy	27	40.1%	75.4%
Proposed (β + LP)	30	42.9%	75.4%

제안하는 정수계획 배정의 효과를 검증하기 위해, 동일한 시나리오에서 배정 방식만을 달리하여 선착순 그리디, 피해율 그리디, 제안 방법(피해율+정수계획)의 세 가지를 비교하였다. 선착순 그리디는 탐지순서대로 배정하는 단순 방식이고, 피해율 그리디는 피해율이 큰 탄부터 순차적으로 배정하며, 제안 방법은 전역 최적화를 수행한다.

요격 자원이 제한된 포화 상황에서의 결과는 Table 4와 같다. 위협평가를 도입한 피해율 그리디는 선착순 대비 고가치 표적 방어율을 34.4%에서 75.4%로

크게 높였으며, 이는 피해율 기반 위협평가가 위험도가 큰 탄을 우선 요격하도록 유도함을 보여준다. 제안하는 정수계획 배정은 피해율 그리디와 동일하게 고가치 표적을 우선하면서도, 자원 경합이 발생하는 표적을 격추확률이 낮은 대체 체계로 우회 배정함으로써 요격 수를 27발에서 30발로 늘려 전체 방어율을 42.9%로 향상시켰다. 다만 요격 자원이 충분한 경우에는 피해율 그리디와 제안 방법의 성능이 동일하게 나타났으며, 이는 정수계획 최적화의 이점이 자원이 제한된 포화 상황에서 두드러짐을 의미한다.

종합하면, 순차적으로 배정하는 그리디 방식 대비 제안 방법은 위협평가를 통해 고가치 표적 방어율을 크게 높이고, 정수계획 최적화를 통해 자원 경합 상황에서 요격 수와 전체 방어율을 추가로 향상시킨다. 이는 포화공격과 같이 요격 자원이 제한된 환경에서 제안 방법의 우수함을 보여준다.

5. 결론

본 연구는 궤적예측 결과를 피해평가, 무장할당, 예측요격점 산출로 일관되게 연결하는 방법론을 제안하고, 육·해상 다층 방어 시뮬레이션으로 검증하였다. 요격 실패 시 피해율을 위험값으로 사용하는 정수계획은 요격 자원이 부족한 상황에서 고평해율 탄을 우선 요격하며, 예측요격점 제약은 요격체 도달시간을 반영하여 물리적으로 요격 불가능한 탄을 식별한다. 시뮬레이션에서는 외기권 요격자산의 필요성과 하층 배치 공백이 정량적으로 드러났으며, 요격 용량 증강이 자원 부족은 해소하지만 기하학적 한계는 해소하지 못함을 확인하였다. 이러한 결과는 요격자산의 양적 확충과 함께 배치 최적화가 병행되어야 함을 시사하며, 방어 계획 수립과 전력 소요 판단에 정량적 근거를 제공한다.

본 모델은 모든 위협 정보를 한 시점에 알고 배정을 한 번에 최적화하는 정적 알고리즘이다. 선행 궤적예측이 발사 순간 전체 궤적을 확정하므로 궤적 불확실성에 따른 동적 모델의 필요성은 상당 부분 해소되나, 신규 발사의 파상 도래와 요격 실패에 따른 재교전은 여전히 시간 축의 사건이다. 따라서 향후 연구에서는 이 두 사건을 계기로 정적 최적화를 재수행하는 롤링 호라이즌 방식으로 확장하고자 한다. 또한 요격체계 배치 최적화, 다수 시나리오에 대한 통계적 검증, 실제

요격체 대리모델을 통한 격추확률, 도달시간의 물리적 산출을 후속 과제로 둔다. 본 연구의 수치와 제원 일부는 방법론 검증에 위한 가정치이며, 실제 운용 적용 시에는 검증된 데이터로 대체되어야 한다.

참고문헌

- [1] Jiwon Kim, Yongsoo Kwon, & Kyoung-Haing Lee, 'Analysis of Considerations of the BMD System Construction Depending on the Characteristics of Ballistic Missiles Threat,' *Korean Journal of Military Art and Science*, VOL. 72, NO. 1, 2016, pp. 1-30.
- [2] Yongsoo Kwon, 'Technical Analysis and Assessment of North Korean Ballistic Missiles,' *JNDS*, VOL. 56, NO. 1, 2013, pp. 1-27.
- [3] Alan S. Manne, 'A Target-Assignment Problem,' *Operations Research*, VOL. 6, NO. 3, 1958, pp. 346-351.
- [4] S. P. Lloyd & H. S. Witsenhausen, 'Weapons Allocation Is NP-Complete,' in *proceedings of Summer Computer Simulation Conference*, 1986, pp. 1054-1058.
- [5] Ravindra K. Ahuja, Arvind Kumar, Krishna C. Jha, & James B. Orlin, 'Exact and Heuristic Algorithms for the Weapon-Target Assignment Problem,' *Operations Research*, VOL. 55, NO. 6, 2007, pp. 1136-1146.
- [6] Alexander Kline, Darryl Ahner, & Raymond Hill, 'The Weapon-Target Assignment Problem,' *Computers & Operations Research*, VOL. 105, 2019, pp. 226-236.
- [7] Heung Seob Kim, Ki Tae Kim, & Geonwook Jeon, 'A Requirement Assessment Algorithm for Anti-Ballistic Missile Considering Ballistic Missile's Flight Characteristics,' *Journal of the KIMST*, VOL. 14, NO. 6, 2011, pp. 1009-1017.
- [8] Dongwg Hong, Dongsoon Yim, & Bongwhan Choi, 'Application and Determination of Defended Footprint Using a Simulation Model for Ballistic Missile Trajectory,' *Journal of the KIMST*, VOL. 21, NO. 4, 2018, pp. 551-561.
- [9] Muhyun Byun & Il-Chul Moon, 'A Study on AI-Based Weapon-Target Assignment of Ballistic Missile Defense System using Reinforcement Learning Methodologies,' *Journal of the Military Operations Research Society of Korea*, VOL. 48, NO. 2, 2022, pp. 99-108.
- [10] Sejun Lee, Ilseob Shin, Changhyun Han, & Beomcheol Na, 'Proposal of the Threat Assessment and Weapon-Target Allocation for Multiple High Speed Target in Naval Combat Management System,' *Journal of the KNST*, VOL. 7, NO. 1, 2024, pp. 66-71.
- [11] Inseob Hong, Kwangjin Yang, Kihoon Kwak, Jeongtaek Oh, Donghyouk Shim, & Hwajong Jin, 'A Study on the Development of an Integrated Automatic Allocation Algorithms for Multilayer Defense System Intercept Missiles,' *Journal of the KIMST*, VOL. 27, NO. 5, 2024, pp. 628-641.
- [12] Seong-Wan Hong, Jin-Young Song, & YoungKeun Chang, 'Analysis on Time Performance of Intercept System for Engagement Plan of Missile Defense System,' *Journal of the KIMST*, VOL. 22, NO. 1, 2019, pp. 93-102.
- [13] 이혁주 외, 'PI-DeepONet을 이용한 탄도미사일 궤적예측,' *한국시스템엔지니어링학회지*, 발간예정, 2026.
- [14] Lu Lu, Pengzhan Jin, Guofei Pang, Zhongqiang Zhang, & George Em Karniadakis, 'Learning Nonlinear Operators via DeepONet Based on the Universal Approximation Theorem of Operators,' *Nature Machine Intelligence*, VOL. 3, NO. 3, 2021, pp. 218-229.
- [15] Woo Seok Lee, Jae-Kwan Ryu, JooYoung Lee, & Bongwan Choi, 'A Study on Integrated Command and Control Methods for Combat Unmanned Surface Vehicle Swarm Operations,' *Journal of the KNST*, VOL. 8, NO. 4, 2025, pp. 816-832.
- [16] 김태훈·이창훈·전병을, '탄도미사일 요격용 예상명중점 산출 기법 연구,' *한국군사과학기술학회 종합학술대회*, 2015.
- [17] Moonhyung Yoon, 'A Weapon Assignment Algorithm for Rapid Reaction in Multi-Target and Multi-Weapon Environments,' *The Journal of the Korea Contents Association*, VOL. 18, NO. 8, 2018, pp. 118-126.
- [18] Byeong Chun Yoo, Juhyun Kim, Yong Soo Kwon, & Bongwan Choi, 'A Study on the Flight Trajectory Prediction Method of Ballistic Missiles - BM Type by Adjusting the Angle of a Flight Path and a Range -, ' *Journal of the Korea Society of Systems Engineering*, VOL. 16, NO. 2, 2020, pp. 131-140.
- [19] Yong Ho Choi, Young Hoon Lee, & Ji Eun Kim, 'Comparative Study on Performance of Metaheuristics for Weapon-Target Assignment Problem,' *Journal of the KIMST*, VOL. 20, NO. 3, 2017, pp. 441-453.
- [20] Byeong Ju Choi, Ji Eun Kim, Jin Soo Kim, & Chang Ouk Kim, 'Fuzzy Rule-Based Method for Air Threat Evaluation,' *Journal of the KIMST*, VOL. 19, NO. 1, 2016, pp. 57-65.