

해병대 상륙 직전 작전에서의 자폭 드론을 활용한 전투 효과 시뮬레이션 분석

강효원*, 하용훈**

Simulation based Analysis of Suicide Drone Combat Effectiveness in Marine Corps Pre-Landing Operations

Hyowon Kang*, Yonghoon Ha**

요 약

드론은 현대전에서 고위험 지역에 병력 투입 없이 원격 작전이 가능한 핵심 전력자산으로 부상하고 있으며 감시·정찰, 원거리 정밀타격, 전자전, 통신 중계 등 임무 범위의 확장성이 뛰어난 무기체계이다. 본 연구는 에이전트 기반 모델링 시뮬레이션을 통해 상륙작전 이전 단계에서 상륙 직전 작전부대가 적 해안방어부대의 전투력을 약화시키기 위해 운용하는 자폭 드론과 상륙목표를 확보하는 KAAV의 전투 효과를 분석하였다. 효과 척도(MOE)로는 자폭 드론의 임무성공률 및 생존율, KAAV의 생존율을 설정하여 비교·분석하였으며, 자폭 드론의 군집 비행 및 네 가지 공격방책별 전투 효과와 자폭 드론 운용 유·무에 따른 KAAV의 전투 효과를 비교하였다. 이를 통해 최적의 KAAV 및 자폭 드론 수량을 도출함으로써 상륙작전에서 유·무인 복합작전 운용 효과를 보여주었다.

Abstract

Drones have emerged as key assets in modern warfare, enabling remote operations in high-risk areas without deploying personnel. With roles in surveillance, precision strikes, electronic warfare, and communication relay, they offer broad operational flexibility. This study uses agent-based modeling to assess the combat effectiveness of suicide drones and KAAVs in the pre-landing phase of amphibious operations. Measures of Effectiveness (MOE) include the mission success rate and survivability of suicide drones, and the survivability of KAAVs. The simulation compares swarm tactics, four distinct attack strategies, and the difference in KAAV effectiveness with and without drone deployment. Findings suggest the optimal force composition, highlighting the value of manned-unmanned combined operations.

Keywords

suicide drone, KAAV, combat effectiveness, simulation, agent-based modeling, measure of effectiveness

* 국방대학교 국방과학학부 무기체계과 석사과정

- ORCID: <https://orcid.org/0009-0000-2556-6850>

** 국방대학교 국방과학학부 무기체계과 교수(교신저자)

- ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2516-9510>

· Received: Jul. 21, 2025, Revised: Aug. 05, 2025, Accepted: Aug. 08, 2025

· Corresponding Author: Yonghoon Ha

Dept. of Defence Science, Korea National Defence University, Chungnam, Korea

Tel.: +82-41-831-5323, Email: yonghoonha@korea.kr

1. 서 론

최근 무인 체계 기술의 급속한 발전은 군사작전의 패러다임을 유인 전력 중심에서 드론과 같은 무인 전력 중심으로 전환하고 있다. 드론은 감시·정찰, 통신 중계, 전자전, 정밀타격까지 단일 플랫폼으로 수행할 수 있는 전장 통합 능력을 보유하며, 낮은 비용 대비 높은 전술효과로 인해 현대전의 핵심 자산으로 부상하고 있다. 러시아-우크라이나, 이스라엘-하마스, 이란-이스라엘 전쟁 등의 사례는 드론이 고정밀 타격과 공세 지원, 방공망 무력화 등에서 결정적 역할을 수행할 수 있음을 입증하였다.

이러한 배경 속에서 한국 해병대는 국방혁신 4.0 기본계획 수립에 따라 ‘아이언 마린’과 같은 첨단 실험부대를 중심으로 드론의 정찰 및 타격 능력을 상륙작전 전력에 통합하고자 시도하고 있다[1]. 상륙작전은 본질적으로 고위험 환경에서 다차원 전력을 투사하는 복합작전으로서, 주력부대 투입 이전에 적의 고가치 표적을 무력화하는 선제작전이 필수적이다. 특히, 미 해병대의 교리에 기반한 상륙 직전 작전(Pre-landing operation)은 소규모 부대가 은밀히 적 해안에 침투하여, 직접타격을 포함한 다양한 임무를 수행함으로써 상륙부대의 생존성과 임무 성공률을 제고 하는 데 중점을 둔다[2].

이에 본 연구는 공격형 자폭 드론과 한국형 상륙돌격 장갑차(KAAV, Korean Amphibious Assault Vehicle)의 운용 조합에 따른 전술적 효과와 생존성 변화 양상을 정량적으로 분석하는데 목적이 있다. 이를 위해, 드론만을 운용하는 상황에서 표적 우선 순위와 투입 수량에 따른 작전 효과를 비교하고, KAAV 단독 운용 시의 생존율과 드론 병행 운용에 따른 생존율 향상 정도를 분석하였으며, 마지막으로 동일한 생존전력을 유지하면서 KAAV 수량을 점진적으로 감소시키는 조건에서 유·무인 복합 운용의 최적 조합을 도출하고자 하였다. 시뮬레이션은 한국형 상륙작전 시나리오를 기반으로 에이전트 기반 모델링(ABM, Agent-Based Modeling)을 통해 구현하였으며, 각 작전조건 하에서 500회의 반복 실험을 수행하였다. 시나리오는 여단급 규모의 상륙부대가 가상의 해안에 상륙하는 작전을 모의하였으며, 상륙 직전 작전부대는 1개 중대 규모가 고속침투가 가능

한 소형고무보트(IBS, Inflatable Boat Small)를 이용해 적 해안에 침투시키며 그림 1과 같다. 시뮬레이션의 범위는 IBS가 해안 침투를 완료한 시점부터 KAAV가 함안이동과 육상작전을 수행하는 결정적 행동 단계까지로 한정하였다. 본 논문의 구성은 2장에서 관련 연구를 다루고, 3장에서 시뮬레이션 방법 및 효과 척도를 제시하였으며, 4장에서 실험 결과를 분석, 5장에서 결론과 향후 발전 방향을 제시한다.

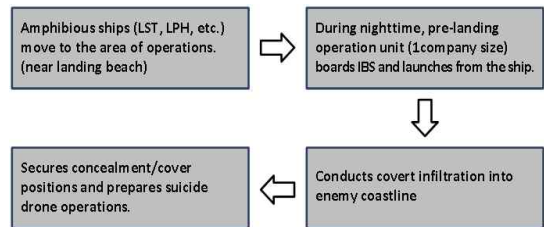


그림 1. 상륙 직전 작전부대의 행동 단계
Fig. 1. Actions stages of the pre-landing operation unit

II. 관련 연구

2.1 ABM 기반 전투 시뮬레이션 연구

최근 군사 분야에서는 행위자 기반 모델링을 활용한 전투 효과 분석이 활발히 이루어지고 있다. 김별 등은 중대급 상륙작전 시뮬레이션을 통해 유·무인 복합체계의 구성 방식에 따른 KAAV, UAV(Unmanned Aerial Vehicle), UGV(Unmanned Ground Vehicle) 등의 조합이 전투 효율성에 미치는 영향을 비교하였으며, 단순 동종 무기체계의 증강보다 유인 체계와 이종 및 다중 무인 체계 간의 팀 구성이 더 높은 전투 효과를 도출함을 보였다[3]. T. Y. Kim et al.[4]은 북한의 LCPA가 백령도에 침투하는 시나리오를 가정하고, 해상 자폭 드론을 활용한 방어 전략의 효과를 평가하였으며, 자폭 드론이 LCPA(Landing Craft, Personnel, Air-Cushioned)의 1.3배 이상일 경우 임무 성공률이 유의미하게 증가하고, PKMR(Patrol-boat Killer Medium Rocket) 편대와의 병행 운용이 비용 효율성 측면에서도 유리함을 제시하였다. J. H. Kwon et al.[5]은 상륙작전 시 공격 드론의 운용 조합과 타격 우선순위가 아군 생존율에 미치는 영향을 분석하였고, 대공화기를 우선 제

압하는 전략이 보병 생존율 향상에 가장 효과적임을 밝혔다. 그러나 본 연구와 달리 상기 연구들은 탐지자산의 탐지확률을 일률적으로 적용하여 전투 효과를 평가하였다는 점에서 차이점이 존재한다.

2.2 군집 무기체계 운용 연구

군집 기반의 무기체계는 비대칭 전력을 구현할 수 있는 핵심 기술로 주목받고 있다. S. M. Kim et al.[6]은 군집 무인 수상정을 활용한 해양 위협 대응 시나리오를 ABM으로 시뮬레이션한 결과, 군집 운용이 기존 PKMR 대비 높은 살상률을 나타냈으며, 생존율 향상을 위해 장거리 무장 확보가 필요함을 제안하였다. M. W. Choi et al.[7]은 군집 드론의 작전 효율성을 ABM 기반으로 모사하였고, 개별 운용 대비 군집 운용의 효과가 더 높으며, 최적의 편성 군집 수량 도출을 통해 전략 설계의 실효성을 강조하였다. 그러나 본 연구와 달리 상기 연구들은 군집형 무기체계 단독 운용에 따른 전투 효과를 분석한 것으로, 유인 전력과의 복합 운용 조건에서의 전술적 효과나 최적 운용 조합 분석이 수행되지 않는 점에서 차별성이 있다.

2.3 광학장비 탐지에 관한 연구

자폭 드론의 주요 표적탐지 수단은 광학장비이다. 자폭 드론의 공격 양상을 시뮬레이션하기 위해서는 광학장비의 탐지에 대한 모델링이 중요하다. J. H. Park et al.[8]은 해상 환경에서 대기 투과 특성의 영향을 고려하여 중적외선과 원적외선의 탐지거리 차이를 분석하였다. 그 결과, 중적외선 카메라는 계절의 영향을 받지 않고 일정한 탐지성능을 유지하는 반면, 원적외선은 탐지거리가 상대적으로 짧은 것으로 나타났다. W. B. Park et al.[9]은 ABM을 활용한 시뮬레이션을 통해 대대급 UAV의 고정 및 이동 표적 탐지율을 분석하였는데, 고정표적은 속도 18m/s, 고도 150~175m, 이동표적은 속도 14m/s, 고도 175~200m에서 가장 높은 탐지율을 보여주었고, 이를 바탕으로 효율적인 UAV 운용 전략을 연구하였다. 상기 연구들과 본 연구의 차이점은 광학장비의 물리적 탐지성능 자체에 대한 분석에 초점을 두었으며, 탐지결과가 전술적 전투 효과에 어떻게 반영되는지

에 대한 시뮬레이션 기반 분석은 수행하지 않았다.

III. 시뮬레이션 구현

3.1 시뮬레이션 환경

시뮬레이션은 NetLogo 6.0.4로 구현되었으며, 작전환경은 40km(가로) × 29km(세로)의 공간으로 설정하였다. 상륙작전 단계 구조화를 위해 그림 2와 같이 상륙 직전 작전 단계와 본대 상륙작전 단계로 구분하여 시뮬레이션을 이원화하였다. 상륙 직전 작전은 자폭 드론(하얀색)을 활용하여 적 전차(주황색), 자주포(초록색), 고사총(파란색)을 사전에 타격함으로써 본대의 상륙을 지원하는 여건 조성 작전에 초점을 두었고, 본대 상륙작전은 여건 조성 이후에도 KAAV(회색)가 잔존한 적 전력을 타격하고 목표지역을 확보하는 결정적 작전에 초점을 두었다.

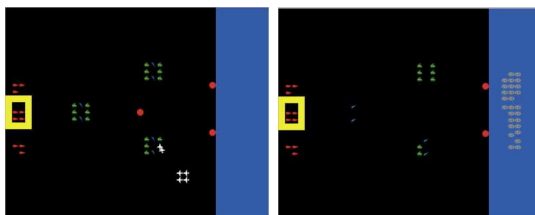


그림 2. 시뮬레이션 환경
(왼쪽 : 상륙 직전 작전, 오른쪽 : 상륙작전)

Fig. 2. Simulation environment

(L : Pre-landing operation, R : Amphibious Operations)

시뮬레이션 상의 작전지역은 해상(파란색 구간)과 육상(검정색 구간)으로 구분된 가상의 상륙지역으로 설정되었다. 청군은 야간을 틈타 1개 보병중대가 IBS 20척을 이용해 은밀히 해안에 침투한 후 60기의 자폭 드론을 투입하여 선제 타격을 시행한다. 상륙작전이 종료되면, 본대인 2개 보병대대가 KAAV에 탑승하여 동일 해안에 상륙하며, 목표지역(노란색 박스)을 모두 확보할 경우 시뮬레이션은 종료된다. 홍군은 해안선과 중심을 따라 방어진지를 구축한 상태로, 해안에서의 접근을 저지하는 역할을 수행한다. 전차는 연대급 해안방어부대 소속이 아닌 사단급 예비전력으로 해안방어선 돌파 시 신속히 투입되어 반격을 수행하도록 모델링되었다.

3.2 무기체계 제원

본 연구에서 다루는 무기체계 제원은 Jane's 무기연감 등 공신력 있는 출처를 기반으로 설정된 선행 연구들의 제원을 종합적으로 검토하여 적용하였다. KAAV 및 북한군의 폭풍호 전차는 탐지반경 2.2km, 유효사거리 1.5km로 설정하였다[3]. KAAV는 K-4 고속유탄발사기에 이중목적 성형작약탄(KM433)을 장착 시 장갑차를 파괴할 관통력을 가지며[10], 원격사격통제장치 장착에 따라 명중률은 40%로 가정하였다. 자폭 드론은 폴란드 WB 일렉트로닉스(사)의 WARMATE로 현재 한국 드론 작전사령부에서 운용 중인 기종이다. 해당 드론은 150km/h의 최고속도, 500m 운용 고도, 5.7kg 최대 이륙중량, EO/IR 기반 종말 유도방식, 120mm에서 최대 300mm 두께의 균질 압연 장갑을 관통할 수 있는 능력을 갖추며, 명중률은 유도무기 평균값인 80%로 설정하였다[5].

표 1. 시뮬레이션에 적용된 무기체계 제원
Table 1. Weapon system specifications used in the simulation

Platform	specifications		
KAAV	Speed (km/h)	Weapon	Load
	13(sea) 72(land)	K-4	32 / 64 reload(10s)
	Range (km)	Accuracy (%)	
	1.5	40	
Drone	Speed (km/h)	Weapon	
	120(Detection) 150(attack)	Explosive Warhead	1
	Range (km)	Accuracy (%)	
	ACQUIRE	80	
Tank	Speed (km/h)	Weapon	
	60	125mm	1 / 41 reload(7~10s)
	Range (km)	Accuracy (%)	
	1.5	65	
SPG	Speed (km/h)	Weapon	
	-	122mm	1 / 39 reload(7~10s)
	Range (km)	Accuracy (%)	
	15.3(detection 8)	1.5	
AAG	Speed (km/h)	Weapon	
	-	14.5mm	4,800
	Range (km)	Accuracy (%)	
	0.01	10	

폭풍호 전차는 소련 T-72 전차를 개량한 것으로

60km/h의 최고속도와 125mm 활강포를 사용하고, 적외선 탐조등과 레이저 거리 측정기를 탑재해 사격 통제 장비를 갖춘 것을 고려하여 명중률을 65%로 가정하였다[11][12]. 연대급 해안방어 편제인 122mm 자주포(SP, Self-Propelled Gun)는 유효사거리 15.3km이나 전방관측자의 관측 활동에 의해 사격이 이루어지는 점을 고려하여 자주포 기준 8km 전방에 배치하고 관측장비로는 한국군 TAS-1K의 10km보다 낮은 8km 탐지거리로 가정하였으며, 명중률은 1.5%를 적용하였다[5]. 대공화기로는 4열 14.5mm 고사총(AAG, Anti-Aircraft Gun)을 적용하였는데, 분당 600발의 발사속도와 4,800발의 탄을 갖추고 있으며, SPG 방호를 위한 인접 배치가 전제된다. 탐지능력은 Jan 등의 연구에 따라 고사총 부대가 야간 적외선 장비가 없는 점을 고려하여 드론에 대한 육안 탐지거리는 100m 이내에서 50% 확률로 탐지 및 사격하도록 가정하고, 명중률을 10%로 적용하였다[5][13]. 세부 제원은 표 1과 같다.

3.3 ACQUIRE 탐지확률 모델

광학 기반 표적탐지 성능을 정량화하기 위한 초기 기준은 1958년 John Johnson이 제안한 존슨 기준(Johnson Criteria)으로 목표의 탐지(Detection), 인지(Recognition), 식별(Identification)에 필요한 최소 해상도(사이클 수, N50)를 설정하였다. 해당 기준은 특정 해상도에서 성공 확률이 50% 이상임을 전제로 하며, 각각의 수준별 요구 사이클 수는 표 2에서 제시하였다.

표 2. 존슨 기준[14]
Table 2. Johnson Criteria[14]

Category	Cycles on target (N50)	Description
Detection	1.0 ± 0.25	Presence or absence of a target
Recognition	4.0 ± 0.8	Class of object
Identification	6.4 ± 1.5	Member of class

다만, 이 기준은 실험적 경험치에 기반하여 수립되었기에 대비(Contrast), 신호 대 잡음비(SNR), 배경 복잡도(Clutter) 등 실제 영상 조건을 충분히 반영하

지 못하는 한계가 존재한다.

이를 보완하기 위해 미 육군 야간투시연구소(NVESD)는 1990년 ACQUIRE 모델을 개발하였다. 이 모델은 관측 거리, 표적 특성, 센서 해상도, 클러터 수준 등을 고려하여 표적 탐지확률을 다음 식 (1) ~ (3)과 같이 수학적으로 정량화하였으며, 표 3과 같이 성공 확률이 50% 이상이 되는 최소 요구 해상도(사이클 수, N50)를 정의한다[15].

$$N = \frac{C_d}{R} \cdot f_r \tag{1}$$

$$E = 2.7 + 0.7 \left(\frac{N}{N50} \right) \tag{2}$$

$$P = \frac{(N/N50)^E}{1 + (N/N50)^E} \tag{3}$$

표 3. ACQUIRE 기준[14]
Table 3. ACQUIRE Criteria[14]

Category	Cycles on target (N50)	Description
Detection	0.75	Presence or absence of a target
Recognition	3	Categorize within a class of similar objects
Identification	6	Member of class

여기서, N 은 센서의 분해 가능 사이클 수, C_d 는 표적의 특성 크기(m), R 은 표적까지의 거리(km), f_r 은 탐지 센서 주파수 해상도, E 는 경사 계수로 탐지 확률 곡선의 기울기를 결정, P 는 탐지확률이다. 또한, 탐지(Detection)를 기준으로 최소 요구 해상도(사이클 수, N50)는 클러터 환경에 따라 정규화된 값이 적용된다.(낮음 : 0.75, 중간 : 1.5, 높음 : 2)

본 연구에서는 전차 수준의 표적 크기(C_d)와 공개된 자폭 드론의 능력을 고려해 주파수(f_r)를 산출하였으며[16], 보통 수준의 클러터 환경(N50 = 1.5)을 적용하였다. 분석 결과, 그림 3과 같이 탐지확률 50%에 해당하는 탐지거리는 약 800m이며, 해당 값을 시뮬레이션에 반영하였다.

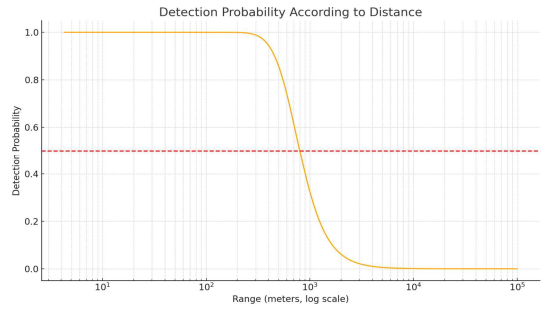


그림 3. ACQUIRE 모델을 기반한 거리에 따른 탐지확률
Fig. 3. Detection probability by range based on the ACQUIRE model

3.4 통계적 검정 방법(t-검정)

본 연구에서는 시뮬레이션을 통해 도출된 임무 성공률 및 생존율에 대해 드론 및 KAAV 운용 수량에 따른 두 집단 간 평균 차이의 통계적 유의성을 검정하고자 독립표본 t-검정을 적용하였다. 해당 검정은 두 독립 집단의 평균값 차이가 단순한 우연에 의한 값인지, 통계적으로 유의미한지를 판단하기 위해 사용되며, 검정 통계량은 식 (4)와 같다.

$$t = \frac{\overline{X}_1 - \overline{X}_2}{\sqrt{\frac{s_1^2}{n_1} + \frac{s_2^2}{n_2}}} \tag{4}$$

여기서, \overline{X}_1 , \overline{X}_2 는 두 집단의 표본 평균, s_1^2 과 s_2^2 는 각 집단의 표본 분산, n_1 과 n_2 는 표본의 크기를 의미한다. 본 연구에서는 유의수준을 $\alpha = 0.05$ 으로 설정하였으며, p-value가 유의수준보다 작을 경우 귀무가설을 기각하고 두 집단 간 차이가 통계적으로 유의미한 것으로 해석하였다.

3.5 전투모의 논리 및 실험방법

3.5.1 전투모의 논리

이원화된 시뮬레이션의 전투모의 논리는 그림 4에서 보는 바와 같이 자폭 드론은 상륙 해안에서 정찰 활동하여 표적을 탐지하면 공격 모드로 돌입하고 속도를 증가시켜 추적한다. 타격 범위 내 접근

하면 교전 및 공격 활동이 이루어지고 파괴 실패 시 인근에 위치한 다른 드론이 동일한 타격 절차를 수행하며, 파괴가 성공되면 전투 피해평가(BDA, Battle Damage Assessment) 단계로 전환되어 적 잔존 유·무 및 아군의 드론 잔존 유·무 등을 확인하여 전투 지속 가능 여부를 확인하는데, 드론이 모두 소멸하거나 적군이 전멸하면 시뮬레이션은 종료되며, 적군이 잔존할 경우 정찰 단계로 재진입한다.

KAAV는 시뮬레이션 시작 시 해상에서 해안으로 이동하고, 해안 접안 시 탐지 활동을 통해 표적이 탐지되면 타격 범위로 접근한다. 이후 교전 및 공격 활동이 이루어지고 적을 파괴하면 전투 피해평가 단계로 전환된다. 아군의 KAAV 잔존 유·무 및 목표지역 확보 여부 등을 확인하여 전투 지속 가능 여부를 확인하는데, KAAV가 완전히 소멸하거나 목표지역을 확보하면 시뮬레이션이 종료된다.

본 연구에서 제시한 그림 4는 ABM 시뮬레이션에서 각 에이전트의 상태 전이와 행동 흐름을 명확히 시각화한 것으로 자폭 드론과 KAAV가 기동-탐지-타격-피해평가-재탐지 등 일련의 전투 사이클을 기반으로 작동함을 보여준다. 이러한 전투 시나리오 로직은 실제 작전환경에서의 교전 절차를 기반으로 한 전장 모델이며, 시뮬레이션 내에서 각 에이전트의 행위 조건과 상태 변화를 구조화하는데 목적이 있다.

본 실험은 상륙 이전에 자폭 드론의 공격 방책(COA, Course of action)에 따른 전투 효과측정과 최선의 방책을 도출하고 육상작전 시 자폭 드론 운용 유·무에 따른 KAAV의 생존을 비교를 측정한다.

실험 I : 적 해안방어 자산에 대응하기 위한 드론 공격방책별 전투 효과 분석

상륙작전 개시 이전, 자폭 드론이 적 해안방어선을 은밀히 침투하여 선제 타격을 수행하는 상황을 가정하였다. 본 실험은 임무 성공률과 드론 생존율을 비교 분석하여 가장 효과적인 표적 우선순위 기반 공격 방책(COA)을 도출하고자 한다. 방책은 다음과 같이 분류된다.

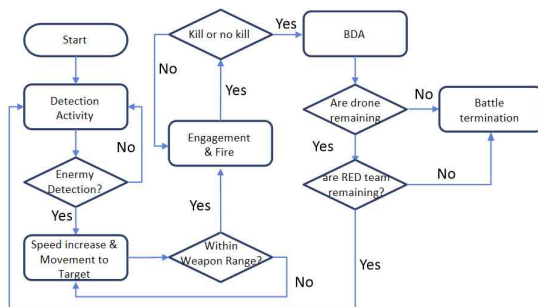
COA #1은 SPG/AAG 우선공격으로 SPG와 AAG가 상호 방호 관계를 갖고 근접 배치된다는 전제하에 설정되었으며, 이를 기반으로 다음과 같이 세분화한다.

- COA #1-1, AAG → SPG → Tank 순 공격
- COA #1-2, SPG → AAG → Tank 순 공격

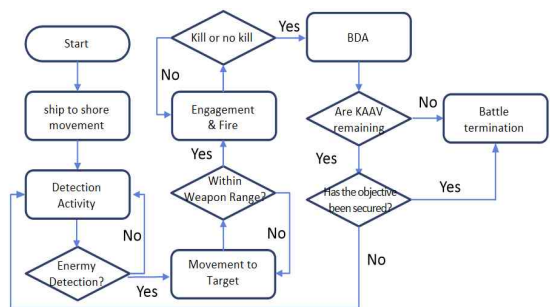
COA #2은 전차 우선공격으로 전차는 사단급 예비전력으로 후방 중심에 배치되며, 해안방어선의 공백 보완을 위한 증원 전력이다. 이에 따라 다음과 같이 세분화한다.

- COA #2-1, Tank → SPG → AAG 순 공격
- COA #2-2, Tank → AAG → SPG 순 공격

3.5.2 실험방법



(a) 자폭 드론의 전투 시뮬레이션 로직
(a) Combat simulation logic of the suicide drone



(b) KAAV의 전투 시뮬레이션 로직
(b) Combat simulation logic of the KAAV

그림 4. 전투 시나리오
Fig. 4. Combat scenario

실험 II : 드론 공격이 KAAV 생존에 미치는 효과 분석

실험 II는 자폭 드론을 운용하지 않는 상륙작전 단독 수행 시나리오를 가정하여, KAAV 수량에 따른 생존율 변화를 분석하였다. 이를 통해 목표 생존율 달성을 위한 최소 KAAV 투입 규모를 도출하고, 이후 전차 또는 자주포를 선제 파괴했을 경우의 KAAV 생존율 향상 효과를 비교 분석하였다.

실험 III : 동일 생존전력 확보를 위한 KAAV-자폭 드론 보완 운용 최적화 분석

실험 II의 분석 결과를 바탕으로, KAAV 생존율 향상에 가장 기여도가 높은 적 전력을 선제 타격 대상으로 설정하였다. 이를 기반으로 KAAV의 투입 수량을 점진적으로 감소시키는 동시에, 자폭 드론을 병행 운용하는 복합전력 구성 시나리오를 설계하였다. 각 시나리오별로 기준 생존율(KAAV 70대일 때 생존율 66.3%)을 유지하기 위해 필요한 자폭 드론의 최소 운용 수량을 산출하였으며, 동일 전투 효과 확보를 전제로 KAAV와 자폭 드론 간의 제조단가를 반영한 비용 대비 효과성을 비교 분석하였다.

본 실험은 유·무인 복합전력 운용이 자산 투입의 경제성과 작전 효과성 측면 모두에서 균형 가능한 전략임을 분석하는 데 목적이 있다.

3.6 MOE

T. Y. Kim et al.[4]에서 연구한 효과 척도(MOE, Measure Of Effectiveness)를 참고하여 드론의 임무 성공률 및 생존율과 KAAV의 생존율로 설정하였다. 임무 성공률은 전체(N) 실험 중 임무 성공(S)의 비율로 모든 자주포, 고사총, 전차가 파괴되었을 때 임무성공으로 가정하며 식 (5)와 같다.

$$Mission\ Success\ Rate = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N S_i \quad (5)$$

여기서, S_i 은 이진 변수로서 임무에 성공하면 "1", 임무에 실패하면 "0"의 값을 얻는다.

생존율은 이원화된 시뮬레이션에서 전투 종료 시

생존해있는 드론 및 KAAV 수량으로 전체(N) 실험 중 투입된 수량(k)과 생존한 수량(S)의 비율로 식 (6)과 같다.

$$Survival\ Rate = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \left(\frac{S_i}{k_i} \right) \quad (6)$$

IV. 실험결과 / 분석

4.1 실험 I : 적 해안방어 자산에 대응하기 위한 드론 공격방책별 전투 효과 분석

본 실험에서는 홍군의 해안방어 자산이 배치된 상황에서 전체 전력에 대응하기 위한 드론의 네 가지 세부 공격방책을 제시하고 이에 대한 임무 성공률과 드론의 생존율을 분석하였다. 첫 번째로 그림 5에서 보는 바와 같이 드론을 4대씩 출격시키는 조건 하에 COA #1(SPG/AAG 우선공격)과 COA #2(Tank 우선공격) 방책을 비교하였다.

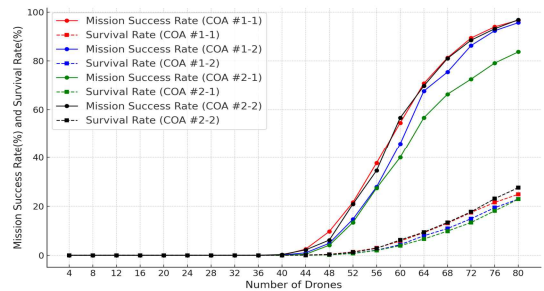


그림 5. COA별 임무 성공률 및 생존율
Fig. 5. Mission success rate and survival rate by COAs

본 연구에서는 IBS 탑재능력을 고려하여 드론 60대 휴대를 기준으로 가정하고 비교분석 하였다. COA #1-1의 임무 성공률은 54.5%, 생존율은 5.8%, COA #1-2의 임무 성공률은 45.5%, 생존율은 4.3%, COA #2-1의 임무 성공률은 40%, 생존율은 3.9%, COA #2-2의 임무 성공률은 56.6%, 생존율은 6.2%이다. COA #2-2가 가장 높은 성과를 보였고, COA #2-1은 가장 낮은 성과를 보였다. 이는 방책 간 전술적 효과에 차이가 존재함을 시사한다. 통계적 검증을 시행한 결과 COA #1과 COA #2 집단 간에는

$p < 0.05$ 수준에서 유의미한 차이가 나타났다. 이는 드론 운용 방식의 차이가 임무 수행 성과에 실질적인 영향을 미칠 수 있음을 입증했다. 반면, 상위 방책인 COA #2-2와 COA #1-1간의 검정 결과 $t = -0.9$, $p = 0.3$ 로 해당 차이는 통계적으로 유의하지 않은 수준이었다. 그러나, 전장에서는 우연적 성과 또한 작전 효용성 판단의 요소가 될 수 있기에 COA #2-2가 최선의 방책으로 평가될 수 있다.

두 번째로 군집(Swarm) 운용 시 실험을 진행하였고 결과는 그림 6 ~ 그림 9에서 보는 바와 같다.

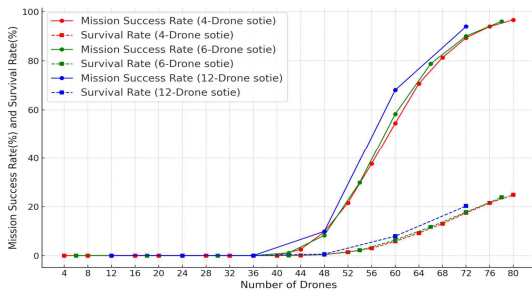


그림 6. 군집 드론 : 출격 수량 비교(COA #1-1)
Fig. 6. Swarm drone : Sortie size comparison (COA #1-1)

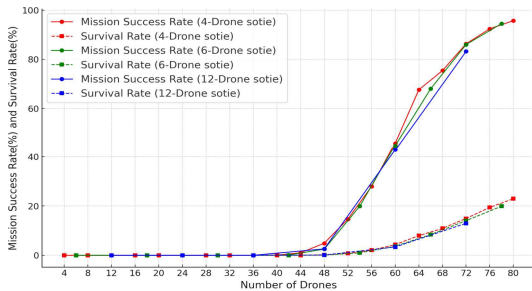


그림 7. 군집 드론 : 출격 수량 비교(COA #1-2)
Fig. 7. Swarm drone : Sortie size comparison (COA #1-2)

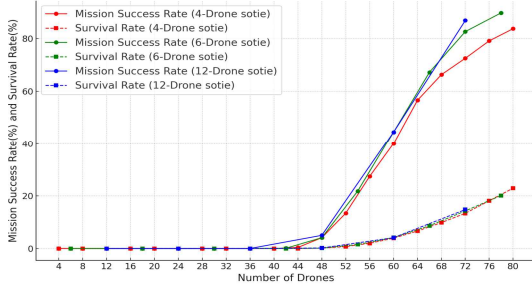


그림 8. 군집 드론 : 출격 수량 비교(COA #2-1)
Fig. 8. Swarm drone : Sortie size comparison (COA #2-1)

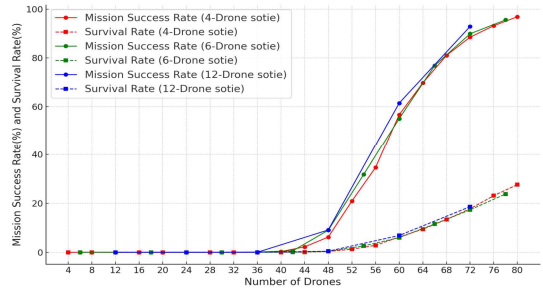


그림 9. 군집 드론 : 출격 수량 비교(COA #2-2)
Fig. 9. Swarm drone : Sortie size comparison (COA #2-2)

4대, 6대, 12대씩 군집 운용을 적용한 결과 군집 효과가 가장 좋은 방책은 COA #1-1로 분석되었다. 임무성공률은 4군집(54.5%), 6군집(58.3%), 12군집(68.1%)로 최대 13.6%가 향상되었고, 생존율은 4군집(5.8%), 6군집(6.4%), 12군집(7.9%)로 최대 2.1%가 향상되었다. 또한 t-검정 결과 $p < 0.05$ 수준에서 유의미한 차이가 나타났다.

반면, COA #1-2과 COA #2-1은 군집 운용의 효과가 없는 것을 알 수 있는데 이는 드론이 고사총을 제압하기 이전에 자주포를 우선 타격하는 전술 구조로 인해 드론이 고사총의 탐지·사격 범위에 무방비 상태로 진입하여 조기 손실이 되는 경향이 반복되고 특히, 자주포는 전장에 넓게 분산되어 있어 드론의 타격 집중도를 약화시키며, 군집 비행 형성이 붕괴되고 회피 기동이 이루어지지 않음에 따라 다수 드론이 효과적으로 운용되지 못한 채 소진되는 문제가 발생함을 알 수 있다.

4.2 실험 II : 드론 공격이 KAAV 생존에 미치는 효과 분석

적 해안방어부대가 배치된 상태에서 KAAV가 상륙하는 상황을 가정하였을 때 KAAV 수량별 평균 생존율은 그림 10과 같으며, KAAV 70대에서 평균 생존율 66.3%를 달성한 것을 확인할 수 있다.

본 실험은 공격형 자폭 드론의 표적 제거 우선순위가 KAAV 생존율에 미치는 영향을 정량적으로 분석하였다. 실험결과, 전차 10대를 제거하기 위해서는 드론 12기, 자주포 18문을 제거하기 위해서는 드론 28기가 소요되었으며, 이는 자주포 제거 시 고

사충 방어 범위에 대한 회피 기동 없이 진입함에 따른 손실률 증가에 기인하는 것으로 분석된다.

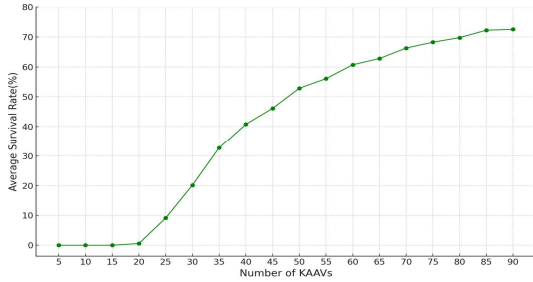


그림 10. KAAV 대수별 평균 생존율
Fig. 10. Average survival rate by number of KAAVs

그림 11에서 보는 바와 같이 KAAV 생존율 기준 점인 70대(66.3%)에서 비교했을 때 전차 완전제거 시 생존율은 84.8%로 18.5% 증가하였고, 자주포 완전 제거 시 생존율은 85.2%로 18.9% 증가하였다. 그러나 드론 수량을 고려하면, 전차 제거의 생존율 기여도는 드론 1기당 1.5%, 자주포 제거의 생존율 기여도는 0.7%로 전차 제거의 효율성이 약 2.1배 높은 것으로 나타났다.

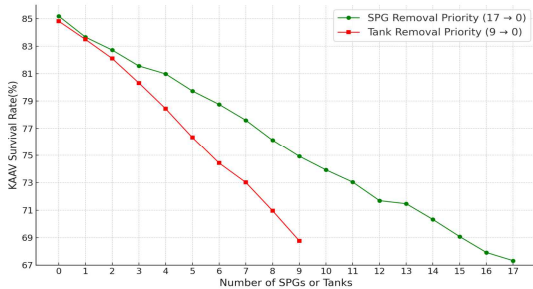


그림 11. 목표 제거 우선순위에 따른 KAAV 생존율
Fig. 11. KAAV survival rate by target elimination priority

이러한 분석은 두 가지 전략적 판단을 시사한다. 첫째, 드론 자산이 제한되거나 단기 생존율 확보가 중시되는 상황에서는 전차 제거가 자산 효율성 측면에서 유리하며, 둘째, 장기적인 화력 통제 무력화와 전장 지배를 목표로 할 경우 자주포 제거가 더 효과적인 전략이 될 수 있다.

4.3 실험Ⅲ : 동일 생존전력 확보를 위한 KAAV-자폭 드론 보완 운용 최적화 분석

실험Ⅱ를 통해 KAAV 70대가 66.3%의 생존율(46 대)을 달성한 상태로 목표지역을 확보하였고, 드론 1대당 기여도가 높았던 전차를 우선 타격하는 전략을 적용하여 본 실험에서는 표 4에서 보는 바와 같이 KAAV를 1개 소대 단위로 감소시키면서 동일 생존 수량인 46대를 확보하기 위한 KAAV 및 자폭 드론 보완 운용 최적화 분석을 진행하였다.

표 4. 동일한 KAAV 생존성 유지를 위해 필요한 드론 수
Table. 4 Required suicide drone numbers for equivalent KAAV survivability

Case	①	②	③	④	⑤	⑥	⑦
KAAV number	70	66	62	58	54	50	46
Drone number	0	3	7	10	18	28	40
Tank number	10	7	4	1	0	0	0
SPG number	18	18	18	18	13	6	0

↓

KAAV survival	66.3 (46)	69.7 (46)	75.1 (46)	79.4 (46)	85.4 (46)	92.8 (46)	100 (46)
---------------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	----------

무기체계 비용 측면에서 KAAV 한 대의 도입비용은 약 28억 원으로 RCWS 1대당 약 5억 원을 고려하면 총비용 33억 원이며[17][18], WARMATE 한 대의 도입비용은 3,630만 원이다[19]. 이를 바탕으로 무기체계 조합별 총비용과 비용 절감율에 대한 비용 비교분석 결과는 표 5와 같다.

표 5. KAAV-드론 구성에 따른 총 획득 비용 및 비용 절감율
Table. 5 Total acquisition cost and cost reduction rate by KAAV - drone force composition

Case	No. of KAAV	No. of drone	Total cost (KRW 100 M)	Cost reduction rate (%)
①	70	0	2,310.0	-
②	66	3	2,179.1	5.7
③	62	7	2,048.5	11.3
④	58	10	1,917.6	17
⑤	54	18	1,788.5	22.6
⑥	50	28	1,660.2	28.1
⑦	46	40	1,532.5	33.7

분석 결과, KAAV 46대와 자폭 드론 40기 조합이 총 1,532.5억 원으로 가장 낮은 비용을 기록하며, 기존 전력(KAAV 생존 46대) 달성에 있어 비용 측면에서 가장 효율적인 조합임이 확인되었다. 이는 KAAV 70대를 단독 운용했을 때와 비교해 약 33.7%의 비용 절감 효과를 보인다. KAAV 24대와 드론 40대가 동일 전력 수준을 의미하며, KAAV 1대당 드론 대체율이 1.67으로 높은 수준이다. KAAV 46대는 보병 전력 2개 대대를 해상에서 수송하는 데 충분한 수송력을 확보하고 있으며, 해당 조합은 실제 작전 운용에 부합하는 실효적 전력 구성으로 판단된다.

이러한 결과는, KAAV 24대를 감축하고 자폭 드론 40기를 보완 투입함으로써 동일한 생존전력을 확보할 수 있었던 실험 결과(표 4)와, 그에 따른 총 33.7%의 비용 절감 효과(표 5)를 통해, 자폭 드론이 단순한 보조 화력에서 벗어나 KAAV를 부분적으로 대체할 수 있는 전략 자산으로 활용할 수 있음을 보여준다. 특히, KAAV 1기당 1.67대의 드론 대체 효과는 유인 전력을 감축하고 무인 전력을 보완적으로 활용했을 때에도 동일한 작전 생존력을 유지할 수 있음을 입증하며, 이는 유·무인 복합 운용 체계의 정당성과 실효성을 뒷받침하는 결과라 할 수 있다. 또한, 해당 조합은 기준선 대비 총 777억 원의 비용을 절감하였으며, 이와 같은 절감 효과는 동일한 임무 성과를 유지하면서도, 전력 획득·운용 예산의 유연한 재배분, 타 무기체계와의 통합적 자산 운용, 지속 가능성 기반 작전 설계 등 다양한 전략적 이점을 제공한다.

따라서 본 실험은 단순히 비용 최적화 측면을 넘어서, 작전 전략, 전력 재구성, 예산 효율화까지 포괄하는 유의미한 전력구조 전환의 가능성을 시사한다.

V. 결 론

본 연구는 상륙작전 직전 단계에서 자폭 드론의 운용방책 및 군집 전략이 전투 성과에 미치는 영향을 시뮬레이션 기반으로 분석하였다. 실험결과, 전술 방책 간 임무 성공률 및 생존율에 유의미한 차이가 나타났으며, 특히 드론을 4대씩 출격시킬 때

COA #2-2(Tank - AAG - SPG 타격 순)가 임무 성공률 56.6%, 생존율 6.2%으로 가장 높은 성과를 기록하였다. 또한, 군집 운용 시 COA #1-1(AAG - SPG - Tank 타격 순)이 4군집 대비 12군집 운용에서 최대 13.6%의 임무 성공률 향상과 2.1%의 생존율 향상이 관측되었으며, 이는 정량적 효과뿐만 아니라 드론 운용 전술의 구조적 차이가 결과에 실질적인 영향을 미친다는 점을 통계적으로 입증하였다. 또한, KAAV의 생존전력을 기준으로 드론 병행 운용 시 필요한 최소 전력 조합을 도출한 결과, KAAV 46대와 드론 40기의 조합이 동일한 생존 성과를 유지하면서도 약 33.7%의 비용 절감 효과를 나타냈다.

본 연구를 수행하는 데 있어 제한사항은 다음과 같다. 첫째, 특정 시나리오를 기반으로 전투 상황을 모델링하였다. 이로 인해 지형, 기상, 통신 전파 등 실제 전장 상황에서 발생할 수 있는 다양한 변수를 완전히 반영하지 못하였다. 둘째, KAAV 및 WARMATE 자폭 드론의 단순 가격 비교를 통해서만 비용분석을 적용하여 장비 개조 비용, 운용자 교육, 유지보수, 인건비 등은 포함하지 않았다. 드론은 현대전에서 필수 요소가 되었고, 향후 한국군은 앞서 언급한 제한사항 등을 반영하여 유·무인 복합 전력의 효과적인 운용방법에 관한 연구가 선행되어야 할 것이다.

References

- [1] Kookbang Ilbo, "ROK Marine Corps launches smart combat experimental unit Iron Marine", https://kookbang.dema.mil.kr/newsWeb/20240130/2/ATCE_CTGR_0010040000/view.do. [accessed: Jul. 08, 2025]
- [2] Joint Chiefs of Staff, "JP 3-02 Joint Amphibious Operations", U.S. Department of Defense, pp. 166-167, Jan. 2019.
- [3] B. Kim and C. Lee, "Combat Effectiveness Analysis of Manned-Unmanned Weapon System Teaming using Agents Based Modeling", J. Korean Inst. Def. Technol., Vol. 4, No. 4, pp.

- 10-18, Dec. 2022. <https://doi.org/10.52682/jkidd.2022.4.4.10>.
- [4] T. Y. Kim and Y. H. 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, Nov. 2024. <https://doi.org/10.5762/KAIS.2024.25.11.720>.
- [5] J. H. Kwon and Y. H. 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, Dec. 2024. <https://doi.org/10.31818/JKNST.2024.12.7.4.413>.
- [6] S. M. Kim and Y. H. 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, Dec. 2023. <https://doi.org/10.5762/KAIS.2023.24.12.224>.
- [7] M. W. Choi, H. S. Moon, S. W. Han, and N. S. Cho, "An ABM Simulation Study on Operational Effectiveness and Mission Organization for Swarm Drones", *Journal of the Military Operations Research Society of Korea (MORS-K)*, Vol. 47, No. 2, pp. 75-90, Dec. 2021. <http://doi.org/10.23263/morsk.0470207>.
- [8] J. H. Park, S. H. Park, Y. D. Yoo, and H. R. Kim, "A Study on the Prediction of Detection Ranges for Infrared Cameras in Summer and Winter Maritime Environment", *Journal of the KNST*, Vol. 6, No. 3, pp. 267-271, Sep. 2023. <https://doi.org/10.31818/JKNST.2023.09.6.3.267>.
- [9] W. B. Park and M. G. Lee, "A Study on Effectiveness Analysis of Battalion UAVs Detection Model Using Simulation Method", *Journal of the Military Operations Research Society of Korea (MORS-K)*, Vol. 49, No. 1, pp. 45-59, Apr. 2023. <http://doi.org/10.23263/morsk.0490104>.
- [10] MediaPen, "K-Defense Industry Continues to Succeed... Poland Introduces K-4 Automatic Grenade Launcher and Ammunition", <https://www.mediapen.com/news/view/758589>. [accessed: Jul. 09, 2025]
- [11] J. Tvarozek and S. Prochazka, "Modernization of the Turning Mechanism of the T-72 Turret", *American International Journal of Contemporary Research*, Vol. 3 No. 3, pp. 162-176, Mar. 2013.
- [12] J. Tvarozek and M. Gullerova, "Increasing firing accuracy of 2A46 tank cannon built-in T-72 MBT", *American International Journal of Contemporary Research*, Vol. 2 No. 9, pp. 140-156, Sep. 2012.
- [13] J. Farlik, T. Dvorak, P. Prochazka, J. Cernohorsky, and J. Sedivy, "Multispectral Detection of Commercial Unmanned Aerial Vehicles", *Proc. of SPIE - The International Society for Optical Engineering*, Vol. 11746, pp. 117460B-1-117460B-11, Mar. 2021.
- [14] T. A. Sjaardema, C. S. Smith, and G. C. Birch, History and Evolution of the Johnson Criteria, SAND2015-6368, Sandia National Laboratories, Albuquerque, NM, USA, Jul. 2015. <https://www.sandia.gov/research/publications/details/history-and-evolution-of-the-johnson-criteria-2015-07-01/>.
- [15] T. Maurer, D. L. Wilson, and R. G. Driggers, "Search and detection modeling of military imaging systems", *Optical Engineering*, Vol. 52, No. 4, pp. 041108-1-041108-17, Apr. 2013. <https://doi.org/10.1117/1.OE.52.4.041108>.
- [16] WB Electronics, "WARMATE Loitering Munition System - Technical Specification", Poland, 2023. <https://docs.tuyap.online/FDOCS/23351.pdf>. [accessed: Jul. 17, 2025]
- [17] Newsen, "MBC's 'Real Men' reveals KAAV armored vehicle costs KRW 3.5 billion, showcasing amphibious power", Nov. 2015. https://www.newsen.com/news_view.php?uid=201511291857579610. [accessed: Jul. 17, 2025]
- [18] Defense Today, "ROK Marine Corps fields remote-controlled weapon station (RCWS) on amphibious assault vehicle for the first time", Dec.

2021. <http://www.defensetoday.kr/news/articleView.html?idxno=3441>. [accessed: Jul. 17, 2025]

[19] Seoul Shinmun, "KRW 10.4 billion Russian radar destroyed by KRW 36 million drone: WARMATE's cost-effectiveness proven again", Apr. 2024. <https://nownews.seoul.co.kr/news/newsView.php?id=20240429601008>. [accessed: Jul. 17, 2025]

저자소개

강 효 원 (Hyowon Kang)



2014년 2월 : 한국교통대학교
기계공학과(학사)
2024년 3월 ~ 현재 : 국방대학교
국방과학학부 무기체계과
석사과정
관심분야 : 무기체계, 시뮬레이션,
유무인 복합체계

하 용 훈 (Yonghoon Ha)



1994년 2월 : 해군사관학교
해양학과(이학사)
1997년 2월 : 서울대학교
해양학과(이학사)
2000년 12월 : 미국 해군대학원
공학음향학(공학석사)
2009년 2월 : 서울대학교

조선해양공학(공학박사)

2019년 3월 ~ 현재 : 국방대학교 국방과학학부
무기체계과 부교수

관심분야 : ISR 무기체계, 표적탐지 및 추적, 수중음향
및 대잠전 관련 M&S, 해군 무기체계