

# 군용 드론 간 스웜 전술 교전 개념 연구

Conceptual Study on Swarm Tactical Engagement between Military Drones

김현승\*<sup>1)</sup> . 장재덕<sup>1)</sup> . 현 철<sup>1)</sup> . 정동민<sup>1)</sup>

Hyunseung Kim\*<sup>1)</sup>. Jaedeok Jang<sup>1)</sup>. Chul Hyun<sup>1)</sup>. Dongmin Jeong<sup>1)</sup>

## [ 초 록 ]

현대 전장에서 군집 드론은 저비용으로 대량 운용이 가능하다는 점에서 비대칭 전력으로 부상하고 있다. 기존 연구는 주로 공격 드론의 스웜 운용 개념이나 전통적 방어체계의 대응에 집중되어 왔으나, 공격 드론과 방어 드론 스웜 간의 전술적 교전을 다룬 연구는 거의 전무하다. 이에 따라 본 논문은 드론 대 드론 전술 교전의 개념을 정립하고, 대표적 공격 전술과 방어 전술에 대한 시나리오 기반 분석을 통해 전술 간 상호작용을 개념적으로 비교하였다. 분석 결과, 방어 드론 스웜은 단순 개별 요격보다 집단 전술을 결합할 때 방어 효율이 크게 향상됨을 확인하였다. 본 연구를 통해 드론 대 드론 전술 교전의 기초 개념을 제시하고, 향후 시뮬레이션 확장 연구의 기반을 제공함으로써 미래 전장에서 억제력과 비용 대비 효율성을 확보하는 핵심 수단이 될 수 있음을 시사한다.

## [ ABSTRACT ]

In modern battlefields, swarm drones are emerging as an asymmetric force due to their low cost and potential for mass deployment. While previous research has primarily focused on swarm operation concepts for offensive drones or the responses of traditional defense systems such as electronic warfare, lasers and CIWS, there is a noticeable lack of studies addressing tactical engagements between offensive and defensive drone swarms. This paper aims to establish a conceptual framework for drone-on-drone tactical engagements and compares key offensive and defensive tactics through scenario-based analysis. The result of analysis reveals that defensive drone swarms significantly improve their effectiveness when employing collective tactics rather than simple individual interceptions. This study presents foundational concepts for drone-on-drone tactical engagements and suggests that such tactics could become a key means of achieving deterrence and cost-effectiveness on future battlefields, providing a basis for further simulation-based research.

**Key Words** : Drone Swarm(드론 스웜), Tactical Engagement(전술 교전), Offensive Drone(공격 드론), Defensive Drone(방어 드론), Autonomous Defense(자율 방어)

## 1. 서론

무인기의 발전은 최근 수십 년간 군사적 환경을 크게 변화시켜 왔다. 특히 상대적으로 저비용·고효율 특성을 지닌 소형 무인기는 다수 운용을 통해 집단 효과를 가능케 하였으며, 이는 곧 군집 드론 개념으로 발전하였다.

군집 드론은 개별 드론을 네트워크로 연결하여 자율적으로 협력 기동을 수행하게 함으로써 기존 전통적 무기체계와는 다른 새로운 전장 환경을 창출하였다. 다수의 드론이 동시에 접근할 경우 나타나는 포화 효과는 기존 방공체계에 과부하를 발생시키고, 다축 동시 침투나 분산-집결 전술은 기존 단일 지향적 방어체계가 대응하기 어려운 복잡한 전술적 상황을 형성한다. 이로 인해 군집 드론은 현대전에서 대표적인 비대칭 전력으로 자리매김하고 있다.

이에 비해 현대의 방공체계는 주로 전자전, 근접방어무기체계, 고출력 레이저, 요격 미사일 등 전통적인 대드론 수단에 의존하기 때문에 몇 가지 구조적 한계를 가지고 있다. 첫째, 다수

1) LIG넥스원 해양연구소.2팀

(Maritime R&D Center, LIG Nex1, Korea)

\* Corresponding author, E-mail: hyunseung.kim2@lignex1.com

Copyright © The Korean Institute of Defense Technology

Received : September 16, 2025 Revised : December 30, 2025

Accepted : December 30, 2025

의 드론이 동시 돌입할 경우 제한된 요격 탄약이나 에너지가 급격히 소모되어 포화 상황에 효과적으로 대응하기 어렵다. 둘째, 다양한 축에서 동시에 침투가 이루어질 경우 단일 포대 기반의 기존 방공체계는 전 방위적으로 신속 대응하기 어렵다. 셋째, 고가의 요격 수단을 사용하여 저가의 소형 드론을 제거하는 것은 비용 대비 효율성이 낮다. 이러한 한계는 전장에서 드론이 지닌 비대칭적 가치를 더욱 부각시키는 동시에, 새로운 방어 개념의 필요성을 제기한다. 이에 따라 최근에는 방어 드론 스웜 개념이 주목받고 있다. 방어 드론 스웜은 공격 드론을 직접 요격하거나, 방어선을 형성하여 침투를 지연시키며, 일부 드론은 교란 및 기만 임무를 수행할 수 있다. 이는 기존의 단일 대공무기 대비 유연하고 재편성이 가능하며, 다수 운용이 용이하다는 점에서 비용 대비 효율성이 높다. 나아가 방어 드론 스웜은 기존 무기체계와 상호보완적으로 결합되어 다층 방어의 일부로 기능할 수 있다.

그러나 현재까지의 연구는 공격 드론 스웜의 운용 전술이나 기존 방공체계의 기술적 대응에 집중되어 있으며, 공격 드론 스웜과 방어 드론 스웜 간의 전술적 교전을 통합적으로 다룬 연구는 매우 부족하다. 군집 제어, 추격-회피 알고리즘, 분산 자율 의사결정 등 개별 분야 연구는 활발하지만, 다대다 교전 상황을 전술적 시나리오로 정의하고 개념적으로 분석한 연구는 거의 없는 실정이다.

이에 따라 본 논문은 다양한 시나리오를 기반으로 공격과 방어 전술 간의 상호작용을 개념적으로 분석하고자 한다. 이를 위해 공격 드론 스웜이 수행할 수 있는 대표 전술(포화 공격, 다축 침투, 분산-집결)을 정의하고, 방어 드론 스웜의 대응 전술(차단 요격, 방어망 형성, 교란 전술)을 정립하였다. 이를 통해 드론 대 드론 교전의 기초 틀을 제시하고, 향후 실증적 연구 및 시뮬레이션 확장에 활용할 수 있는 기반을 마련하고자 한다.

## 2. 관련 연구

드론 스웜은 최근 수년간 학계와 군사 연구기관에서 활발히 연구되고 있으며, 그 논의는 크게 공격 드론의 스웜 운용 연구, 대드론 방어 연구, 스웜 제어 및 협조 기동 연구, 그리고 전술적 교전 분석 연구로 구분할 수 있다.

먼저, 공격 드론의 스웜 운용 연구는 공격 효율성을 극대화하기 위한 공격 드론의 전술 설계에 초점이 맞추어져 있다. 대표적으로 포화 공격, 다축 침투, 분산-집결 패턴과 같은 기법이 제안되어 왔으며, 이러한 전술은 기존 방공망의 취약성을 체계적으로 드러내는 데 기여하였다[1]. 일부 연구에서는 최적화 알고리즘을 활용하여 군집 드론이 목표 지역에 도달하는 시간을 최소화하거나 방어망의 대응 가능성을 줄이는 전략을 연구하였다[2]. 하지만 이러한 연구들은 대부분 공격자의 시각에서 방어체계를 어떻게 무력화할 수 있는가에 집중되어 있으며, 방어 측 드론 스웜의 역할은 고려하지 않았다. 두 번째로 대드론 방어 연구는 기존 방공체계의 연장선에서 이루어졌다. 전자전을 통한 드론의 통신과 위치를 교란하고, 레이저 등의 고에너지 무기를 이용한 물리적 무력화, 요격 미사일이나 근접방어

무기체계(CIWS, Closed-In Weapon System)를 이용한 직접 요격 방식이 대표적이다[3]. 이러한 접근법은 개별 또는 소규모의 공격 드론과의 교전에서는 효과적일 수 있으나, 다수 드론이 동시 침투하는 스웜 상황에서는 대응 효율이 급격히 저하되는 한계를 드러낸다. 최근 일부 연구에서는 다층 방어 개념을 도입하여 여러 수단을 결합하려는 시도가 있었으나[4], 여전히 스웜 대 스웜 전술적 대응에 대한 구체적 논의는 부족하다는 한계가 있다. 다음으로 스웜 제어 및 협조 기동 연구는 군사 응용뿐 아니라 로봇공학 및 인공지능 분야에서도 활발히 진행되어 왔다. 특히 군집 드론의 대형 유지, 충돌 회피, 분산 탐색 및 영역 커버리지는 다양한 제어 이론과 알고리즘을 통해 모의되어 왔다[5]. 또한 추격-회피 문제를 다중 드론 환경으로 확장하여, 개별 드론이 협력하거나 경쟁하는 상황을 분석하는 연구도 이루어졌다[6]. 그러나 이들 연구는 대부분 제한된 환경에서의 실험 환경에 초점을 맞추었기 때문에 실제 교전 상황에서의 전술적 의미까지는 다루지 않았다. 마지막으로, 전술적 교전 분석 연구로 군집 드론이 제공하는 비대칭 효과와 전술적 파급력을 평가한 사례가 있으며, 이를 기반으로 방어 개념의 필요성을 언급하였다[7]. 하지만 정성적 분석 수준에 머물러 있으며, 시나리오 기반의 세부 전술 비교나 구체적 운용 모델은 제시되지 않았다.

드론 스웜과 관련된 기존 연구는 공격 스웜의 전술적 잠재력, 전통적 대드론 방어 수단, 군집 제어 기법 등 개별 요소에 집중되어 왔으며, 공격 드론과 방어 드론 스웜 간의 상호작용을 전술적 시나리오로 모델링하고 개념적으로 분석한 연구는 부족하다. 따라서 본 연구는 기존 연구의 단편적 접근을 넘어, 공격과 방어 스웜을 동시에 고려하는 전술적 틀을 제시함으로써 연구 공백을 보완하고자 한다.

## 3. 공격 드론 전술

공격 드론의 스웜 전술 목적은 우선적으로 목표 자산을 무력화하거나 특정 지역에 대한 제압 효과를 확보하는 것으로 한다. 다수의 저비용 드론이 동시에 운용될 경우, 개별 드론의 취약성에도 불구하고 집단적 효과를 통해 전술적 우위를 창출할 수 있다. 본 연구에서는 공격 드론 스웜이 적용할 수 있는 대표적 전술을 포화 공격, 다축 침투, 분산-집결 전술로 구분하여 정의하였다.

본 논문에서 이후 제시되는 그림들은 실제 유도 알고리즘이나 명령 생성-보정 절차를 상세히 표현한 흐름도가 아니라, 공격 및 방어 드론 스웜의 전술적 배치와 기동 양상을 개념적으로 도식화한 설명도이다. 각 그림은 드론 스웜 간 상호작용(접근, 분산, 집결, 차단, 유인 등)을 직관적으로 이해하기 위한 시각적 표현이며, 구체적인 센서 처리 과정이나 제어기 내부 동작을 의미하지 않는다. 따라서 다음에 제시되는 전술 및 시나리오 그림들은 전술 간 상대적 특성과 상호작용을 비교·설명하기 위한 개념 자료로 해석한다.

### 3.1 포화 공격(Saturation Attack)

포화 공격 전술은 Fig. 1과 같이 대규모 드론이 동일한 축을

따라 동시 돌입함으로써 방어 체계를 과부하시켜 침투 성공률을 높이는 방식이다. 즉, 포화 공격은 방어 체계의 단일 방어 자산이 감당할 수 있는 교전 처리 용량을 초과시킴으로써 제한된 시간 내에 모든 표적을 처리하지 못하도록 유도한다. 이 전술은 단순하면서도 가장 직접적인 공격 방법으로, 다수의 저가 드론을 활용할 경우 비용 대비 효율성이 극대화된다.

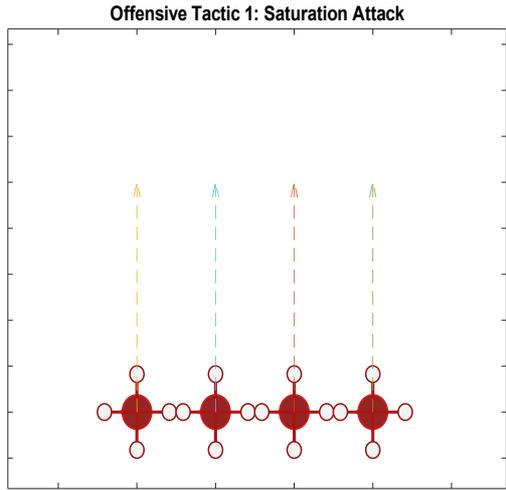


그림 1. 공격 드론 스웜의 포화 공격 전술 개념도  
Fig. 1. Conceptual Illustration of Saturation Attack by Offensive Drone Swarm

3.2 다축 침투(Multi-axis Penetration)

다축 침투 전술은 Fig. 2와 같이 드론 스웜을 여러 그룹으로 분할하여 서로 다른 축에서 동시에 목표를 향해 진입시킴으로써 방어 세력을 분산시켜 대응력을 약화시키며, 방어망의 특정 축에서 취약점을 유도하는 방식이다. 다축 침투는 포화 공격보다 더 높은 수준의 지휘통제가 요구되지만, 방어 자산이 한정된 상황에서는 효과적인 결과를 가져올 수 있다.

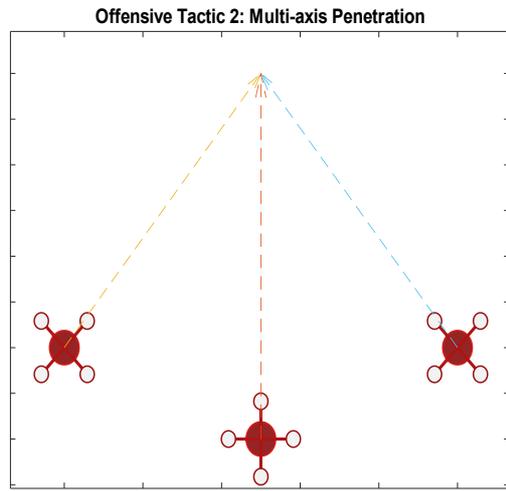


그림 2. 공격 드론 스웜의 다축 침투 전술 개념도  
Fig. 2. Conceptual Illustration of Multi-axis Penetration Tactic by Offensive Drone Swarm

3.3 분산-집결(Disperse-Converge)

분산-집결 전술은 Fig. 3과 같이 드론을 초기 단계에서는 넓게 분산시켜 탐지 가능성을 낮추고, 목표 방어 지역 인근에서 빠르게 집결하여 공격을 수행하는 방식이다. 이 전술은 초기 접근 단계에서 방어망의 주의를 분산시키고, 최종 단계에서 돌발적인 기습 효과를 노릴 수 있다. 특히 공격 드론의 운용 환경이 저고도이면서 고속 기동을 할 수 있는 경우, 방어 드론 스웜이 재편성하기 전에 목표를 타격할 수 있다.

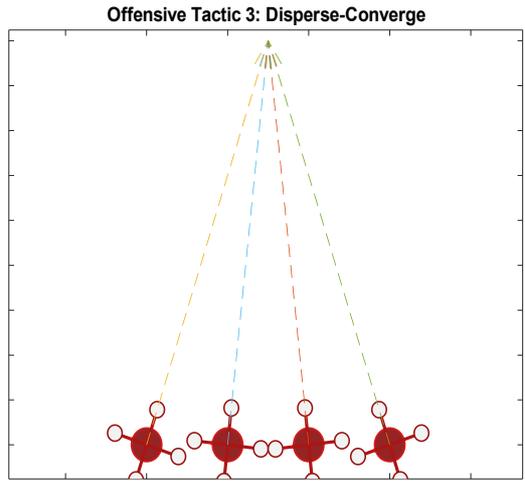


그림 3. 공격 드론 스웜의 분산-집결 전술 개념도  
Fig. 3. Conceptual Illustration of Disperse-Converge Attack Tactic by Offensive Drone Swarm

이와 같이 공격 드론 스웜은 양적 우세를 기반으로 하면서도, 기동 전술 방식의 다양성을 통해 방어망에 균열을 발생시키는 전략을 취한다.

4. 방어 드론 전술

3장에서 기술한 공격 드론 전술에 대비하기 위한 방어 드론 스웜은 공격 드론 스웜의 침투를 차단하거나 지연시키는 것을 주 임무로 한다. 기존 방공체계가 가진 한계를 보완하기 위해 방어 드론은 신속한 기동성과 집단적 대응 능력을 기반으로 운용해야 한다. 본 연구에서는 방어 드론 스웜의 대표적 전술을 차단 요격, 방어망 형성, 교란 전술로 구분하여 정의하였다.

4.1 차단 요격(Interception)

차단 요격 전술은 Fig. 4와 같이 방어 드론이 공격 드론을 직접 추격하여 무력화하는 전술이다. 이 방식은 단일 표적에 대해 즉각적인 대응이 가능하지만, 다수의 드론이 동시에 침투할 경우 전체 방어 효율이 떨어질 수 있다. 따라서 차단 요격은 제한적 상황에서 효과적이며, 다른 전술과 병행하여 운용될 때 방어 효율이 극대화된다.

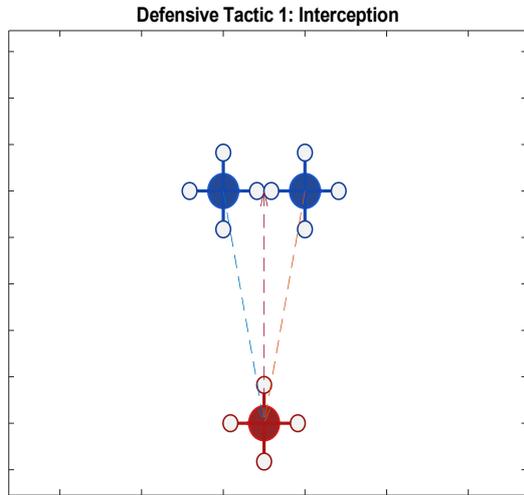


그림 4. 방어 드론 스웜의 차단 요격 전술 개념도  
 Fig. 4. Conceptual Illustration of Interception Tactic by Defensive Drone Swarm

4.2 방어망 형성(Barrier Formation)

방어망 형성 전술은 Fig. 5와 같이 방어 드론이 일정 구역에서 선이나 원형 형태의 집단 방어선을 형성하는 방식이다. 이는 공격 드론의 비행을 물리적으로 차단하거나, 방어 구역으로의 경로를 우회하도록 함으로써 진입 시간을 지연시켜 다른 방어 자산의 개입을 가능하게 한다. 방어망은 개별 드론의 전투력보다 집단적 협력 효과를 강조하는 전술로, 공격 드론의 포화 공격 전술과 같은 대규모 침투에 특히 효과적이다.

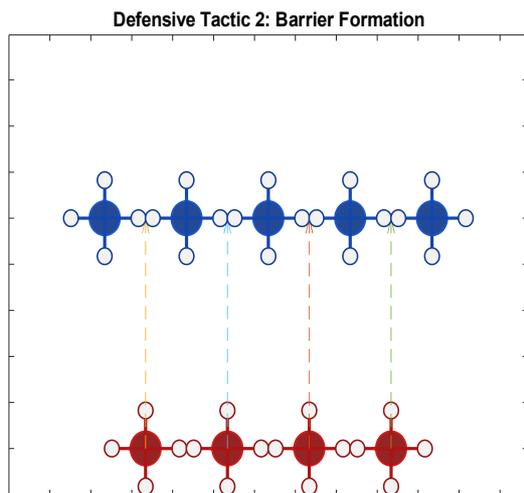


그림 5. 방어 드론 스웜의 방어망 형성 전술 개념도  
 Fig. 5. Conceptual Illustration of Barrier Formation Tactic by Defensive Drone Swarm

4.3 교란-기만(Disruption-Deception)

교란-기만 전술은 Fig. 6과 같이 일부 방어 드론이 공격 드론을 유인하거나 분산시켜 공격의 결집 효과를 약화시키는 전술이다. 이 방식은 공격 드론이 효율적으로 집결하지 못하도록 만들고, 방어 드론이 시간을 벌며 다른 자산의 대응을 가능하

게 한다. 교란 전술은 반드시 직접적인 물리적 요격이 필요하지 않으며, 공격 전술의 지연과 혼란을 발생시키는 데 목적이 있다.

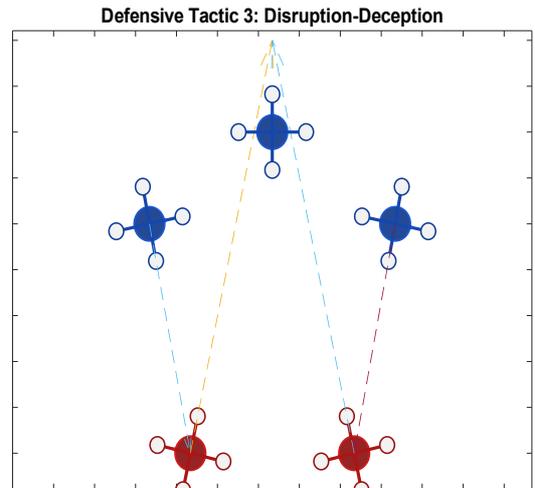


그림 6. 방어 드론 스웜의 교란-기만 전술 개념도  
 Fig. 6. Conceptual Illustration of Disruption-Deception Tactic by Defensive Drone Swarm

이와 같이 방어 드론 스웜의 전술은 단순 요격에 의존하는 기존 방공체계와 달리 집단적 대응, 지연 전략, 기만 효과를 통해 공격 스웜의 침투율을 낮추는 전략을 취한다.

5. 시나리오 정의 및 분석 결과

본 연구에서는 공격 드론과 방어 드론의 전술적 개념을 바탕으로 교전 효과도를 분석하기 위해 공격 및 방어 전술의 조합을 바탕으로 Table 1과 같이 대표적인 4가지 교전 시나리오를 설정하여 분석하였다. 이 때, 각 시나리오는 드론 스웜 간 상호작용의 특성을 반영하며, 실제 전장 환경에서 발생할 수 있는 전술적 상황을 단순화한 개념 모델로 구성하였다. Table 2는 시나리오 변수 설정이다.

표 1. 공격 드론과 방어 드론 전술 교전 시나리오  
 Table 1. The Condition for Maintaining the Prediction Algorithm

시나리오	
A	포화 공격 vs 방어망 형성
B	다축 침투 vs 분산 배치 방어
C	분산-집결 공격 vs 교란 전술
D	비대칭 교전 상황

표 2. 시나리오 입력 변수 정의

Table 2. Scenario Input Parameter Definition

항목	값	단위
시뮬레이션 시간	120	sec
시간 간격	0.1	sec
공격 드론 속도	120	m/s
방어 드론 속도	170	m/s
공격 침투 성공 라인	11.5	m
탐지/추적 개시 거리	2	km
요격 반경	0.2	km

분석 지표는 침투율, 요격률, 공격 드론의 침투 성공 라인까지의 최초 침투 시간, 방어 드론의 최초 요격 시간으로 설정하였고, 침투율과 요격률은 수식 1과 같이 정의하였다.

$$Penetration\ Rate = \frac{\text{목표선 도달 공격 드론 수}}{\text{전체 공격 드론 수}} [\%] \quad (1)$$

$$Intercept\ Rate = \frac{\text{요격된 공격 드론 수}}{\text{전체 공격 드론 수}} [\%]$$

시나리오 A는 Fig. 7과 같이 공격 드론이 동일 축을 따라 동시에 침투하는 포화 공격 상황에서 방어 드론이 집단적인 방어선을 구축하여 차단하는 시나리오를 보여준다. 이 시나리오는 집단 대 집단의 정면 충돌을 대표하며, 공격 스웸의 물량 우세와 방어 스웸의 집단 배치 효과를 비교할 수 있는 기초 사례로 설정된다.

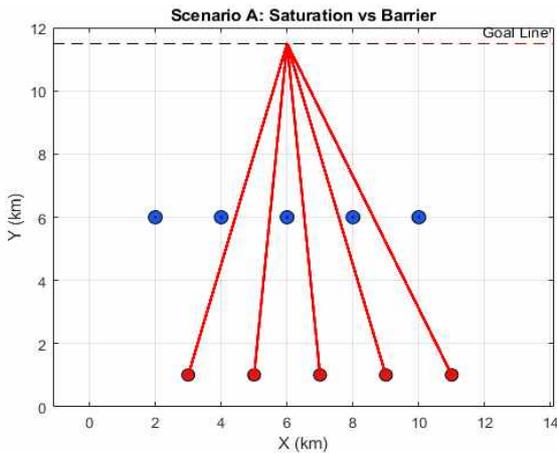


그림 7. 시나리오 A: 포화 공격과 방어망 형성 간 교전 개념도  
Fig. 7. Scenario A: Conceptual Engagement between Saturation Attack and Barrier Formation

시나리오 B는 Fig. 8과 같이 공격 드론을 다수의 축으로 분산시켜 동시에 침투하는 다축 침투 상황에서 방어 드론이 분산 배치되어 각 축에서 최소한의 차단 능력을 발휘하는 시나리오를 보여준다. 이 시나리오는 방어 세력 분산에 따른 취약성을 평가하는 사례이며, 공격 스웸의 동시성 효과와 방어 스웸의

대응 분산 능력을 분석할 수 있다.

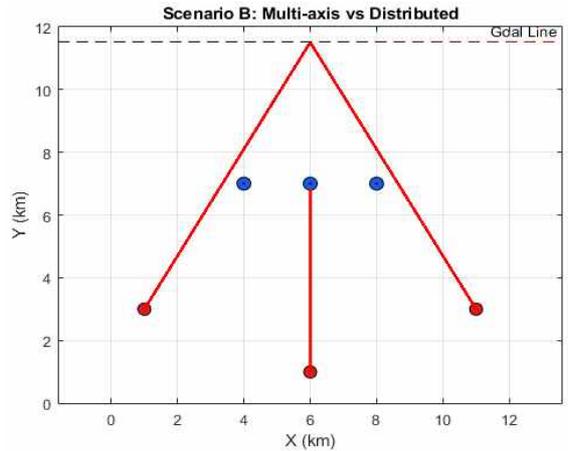


그림 8. 시나리오 B: 다축 침투와 분산 방어 간 교전 개념도  
Fig. 8. Scenario B: Conceptual Engagement between Multi-axis Penetration and Distributed Defense

시나리오 C는 Fig. 9와 같이 공격 드론이 초기 단계에서 탐지 회피를 위해 드론을 넓게 분산시킨 후 목표 지역으로 빠르게 집결하는 상황에서 방어 드론이 공격 드론을 유인하거나 결집을 지연시켜 공격 효율을 떨어뜨리는 방식을 보여준다. 본 시나리오는 공격의 기습 효과와 방어의 교란 능력 간 상호작용을 검증하는 개념 사례다.

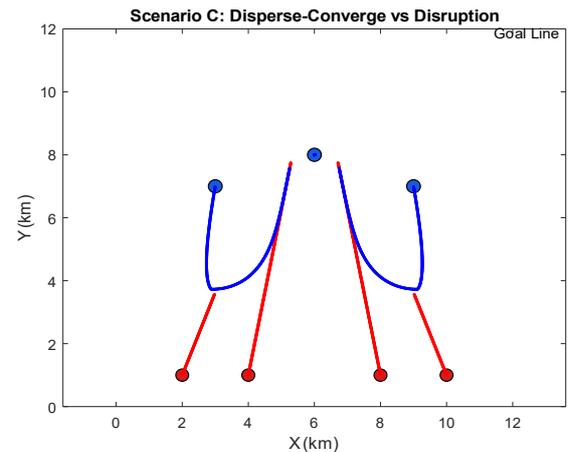


그림 9. 시나리오 C: 분산-집결 공격과 교란 전술 간 교전 개념도  
Fig. 9. Scenario C: Conceptual Engagement between Disperse-Converge Attack and Disruption Tactic

시나리오 D는 Fig. 10과 같이 공격 스웸이 방어 스웸보다 수적으로 우세한 현실적인 전장 상황을 반영한 것으로 방어 드론이 제한된 전력으로 최대한 침투율을 줄이고 시간을 지연시키는 전략을 수행한다. 이 시나리오는 비대칭 전력 구도에서 방어 드론 스웸이 어떤 전술적 선택을 할 수 있는가를 분석하는 데 목적이 있다.

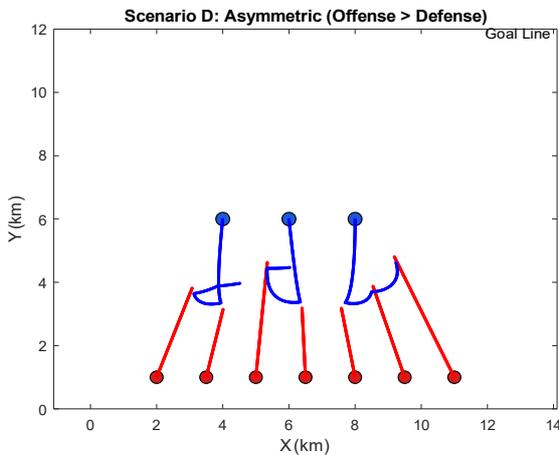


그림 10. 시나리오 D: 비대칭 전력 조건에서의 드론 스웜 교전 개념도

Fig. 10. Scenario D: Conceptual Drone Swarm Engagement under Asymmetric Force Conditions

Table. 3은 4가지 시나리오에 대한 결과를 기술한 것이다. 시나리오 A에서는 방어 드론이 2km의 넓은 간격을 유지하며 방어망을 형성하였을 때는 공격 드론이 모두 침투에 성공한 것을 확인할 수 있다. 방어 드론을 500m 간격으로 공격 드론의 비행 경로를 예측하여 10대를 배치한 경우 공격 드론이 침투 성공 라인에 도달하기 전에 모두 요격함을 확인하였다. 이는 포화 공격이 물량 우세에 의존하기 때문에 포화 공격에 대비하여 방어 드론이 선형 방어망을 형성할 때는 드론 간 배치 간격을 최소화하여 집단 차단하는 것이 필요함을 의미한다. 시나리오 B에서는 다축 침투하는 공격 드론에 대해 동일 비행경로 상에 방어 드론을 배치하여 1대를 요격함을 확인하였다. 방어 드론 스웜이 충분히 기민하게 재배치 한다면 공격 드론의 침투율을 줄일 수 있지만 방어 드론이 여러 축에 분산될 경우, 각 축에서의 요격 능력은 제한적일 수밖에 없고, 전체 전선을 얇게 만들 수밖에 없는 한계가 있음을 보여준다.

표 3. 시나리오1 강화학습 적용 여부에 따른 심도 추종 오차 분석

Table 3. Depth Tracking Error Analysis for Scenario 1 with and without Reinforcement Learning Method

시나리오	침투율 [%]	요격률 [%]	최초 침투 시간 [sec]	평균 요격 시간 [sec]
A	100	0	70.4	-
B	66.67	33.33	65.8	38.7
C	0	100	-	32.15
D	0	100	-	19.64

시나리오 C, D에서는 방어 드론이 공격 드론을 교란함으로써 적은 방어량으로도 요격률 100%를 달성함을 확인할 수 있

다. 공격 드론의 분산-집결 전술은 탐지 회피와 기습 효과를 동시에 노릴 수 있는 전술로 방어망이 특정 구역에 집중되어 있을 때 효과적이지만, 방어 스웜이 교란 전술을 구사하면 공격 드론의 집결을 지연시키거나 분산된 상태에서 개별적으로 대응하기 때문에 공격 효율은 크게 떨어진다. 또한 공격 스웜이 방어 스웜보다 수적으로 두 배 이상 우세한 경우, 방어 드론이 방어망 형성이나 교란 전술을 통해 시간을 지연시키면, 목표 자산 보호율을 일정 수준 이상 유지할 수 있다. 이는 방어 스웜이 완전 차단보다는 지연 전략을 선택함으로써 고비용 방어체제와 연계될 경우 효율성 측면에서 큰 가치를 가짐을 의미한다.

본 연구는 공격 드론과 방어 드론 스웜 간 전술적 상호작용을 시나리오 기반으로 개념적으로 분석하고, 전술 간 상대적 특성을 비교하는 데 초점을 두었다. 실제 교전 환경에서는 통신 지연, 센서 탐지 오차, 요격 실패 확률, 기체 성능 편차 등 다양한 현실적 요인이 교전 결과에 영향을 미칠 수 있으며, 이러한 요소를 반영한 물리 기반 시뮬레이션 또는 제한적 실증 실험을 통해 본 연구에서 도출된 전술적 경향성을 보다 정량적으로 검증할 수 있을 것으로 판단된다.

또한 본 논문에서 설정한 4가지 교전 시나리오 외에도, 방어 드론 스웜이 기존 방공 자산과 연계되어 단계적으로 투입되는 시나리오, 일부 방어 드론을 희생 전력으로 활용하여 공격 스웜의 밀집도를 조절하는 시나리오, 또는 시간 지연을 목적으로 한 지연 중심 방어 시나리오 등 다양한 확장 가능성이 존재한다. 이러한 시나리오는 본 연구에서 제시한 전술 분류와 시나리오 구성 틀을 기반으로 추가 분석이 가능하다.

## 6. 결론

본 연구에서는 현대 전장에서 새롭게 대두되고 있는 드론 대 드론 스웜 전술 교전을 개념적으로 분석하였다. 기존 연구가 공격 드론 스웜의 전술 기법이나 전통적 대드론 체계에 집중된 반면, 본 논문은 공격 스웜과 방어 스웜 간의 상호작용을 중심으로 전술 개념을 정립하고 시나리오 기반 분석을 수행하였다. 이를 위해 우선 공격 스웜의 대표적인 전술로 포화 공격, 다축 침투, 분산-집결을 정의하였다. 이러한 전술은 모두 기존 방공 체계의 한계를 노리는 방식이며, 물량과 기동의 다양성을 통해 방어망에 균열을 발생시킨다. 이에 대응하는 방어 스웜 전술로는 차단 요격, 방어망 형성, 교란-기만 전술을 제시하였다. 이는 개별 드론의 성능보다는 집단적 협력과 전술적 기민성을 통해 공격 스웜을 저지하거나 지연시키는 전략이다.

4가지 대표 시나리오를 설정하고 공격 드론과 방어 드론 간 전술을 분석하였다. 먼저 방어 드론은 단순 개별 요격보다 집단 전술을 적용할 때 효율성이 현저히 향상되는 것을 확인하였다. 두 번째로 공격 드론은 포화-다축-분산-집결 전술을 상황에 맞게 선택하여 방어망을 교란할 수 있으며, 이에 따라 방어 측의 대응 복잡성은 증가한다. 마지막으로 현실적인 전장 상황에서 공격 스웜이 방어 스웜보다 수적으로 우세한 경우가 일반적이므로, 방어 스웜은 완전 차단보다는 지연 전략을 중심으로 운용될 필요가 있음을 확인하였다.

본 연구의 의의는 드론 대 드론 전술 교전을 개념적으로 체계화하고, 향후 연구가 나아갈 방향을 제시한 데 있다. 향후 연구에서는 실제 시뮬레이션 및 실험 환경을 구축하여 전술별 효과를 정량적으로 검증할 필요가 있으며, 에너지 제약이나 통신 지연 등의 다양한 환경 요인을 반영한 모델 확장이 요구된다. 특히, 다중 에이전트 강화학습(Multi-Agent Reinforcement Learning, MARL) 기법을 적용하면 방어 드론 스웜이 분산 환경에서도 자율적으로 최적의 전술을 선택하고 적응할 수 있는 가능성이 있다. PPO(Proximal Policy Optimization)와 같은 알고리즘을 접목한다면, 단순 규칙 기반 대응보다 훨씬 정교한 전술 전개가 가능해질 것이다. 또한, 적대적 학습을 통해 공격-방어 스웜 간 전술적 진화 과정을 모의하는 것도 중요한 연구 과제로 남아 있다.

결론적으로, 드론 대 드론 스웜 교전은 미래 전장에서 저비용으로도 공격 드론을 지연시키는 고효율의 핵심 수단이 될 수 있으며, 본 논문은 이를 위한 기초적 개념 틀을 제공하였다.

## References

- [1] L. Giacomossi, J. A. Ricardo, J. F. B. Brancalion and M. Maximo, "Cooperative Threat Engagement with Heterogeneous Drone Swarms," Conference: Congress of the International Council of the Aeronautical Sciences, pp. 1-15, Sep 2022.
- [2] M. Kouzeghar, Y. Song, M. Meghjani and R. Bouffanais, "Multi-Target Pursuit by a Decentralized Heterogeneous UAV Swarm using Deep Multi-Agent Reinforcement Learning," 2023 IEEE International Conference on Robotics and Automation, pp. 3289-3295, June 2023.
- [3] S. Khemiri and M. Kishk, "Tethered UAV Deployment Strategies: The Coverage and Energy Efficiency Trade-Off," IEEE Open Journal of the Communications Society, Vol. 4, pp. 1-17, Jan 2023.
- [4] Y. Li, J. Chen, F. Xue, J. Qiu, W. Li, Q. Zhang, Y. Wen and W. Pan, "Adaptive Teaming in Multi-Drone Pursuit: Simulation, Training, and Deployment," arXiv Computer Science Robotics, pp. 1-17, Feb 2025.
- [5] J. Chen, C. Yu, G. Li, W. Tang, S. Ji, X. Yang, B. Xu, H. Yang and Y. Wang, "Online Planning for Multi-UAV Pursuit-Evasion in Unknown Environments Using Deep Reinforcement Learning," IEEE ROBOTICS AND AUTOMATION LETTERS, Vol. 10, No. 8, pp. 8196-8203, Aug 2025.
- [6] J. A. Ricardo, L. Giacomossi, F. S. Trentin, F. V. Vrancalion, R. O. A. Maximo and A. Santos, "Cooperative Threat Engagement using Drone Swarms," IEEE Access, Vol. 4, pp. 1-19, Jan 2023.
- [7] J. Chen, G. Li, C. Yu, X. Yang, B. Xu, H. Yang and Y. Wang, "A Dual Curriculum Learning Framework for Multi-UAV Pursuit-Evasion in Diverse Environments," arXiv Computer Science Machine Learning, pp. 1-8, Apl 2024.