

# 에이전트 기반 규칙 시뮬레이션을 활용한 군집드론 효과도 분석 방법론: 정찰/공격 드론 구성비에 따른 사례 연구

백승원\*, 김현준\*, 김상수\*\*, 성호용\*\*\*, 조성식\*

\*육군사관학교 기계·시스템공학

\*\*육군사관학교 국어·철학과 \*\*\*육군사관학교 체육학처

e-mail: sbaik@kma.ac.kr

## Agent-Based Rule Simulation Methodology for Swarm Drone Effectiveness Analysis: A Case Study on Recon/Strike Drone Composition Ratio

Seungwon Baik\*, Hyeonjun Kim\*, Sangsu Kim\*\*, Hoyong Sung\*\*\*, Seongsik Jo\*

\*Dept. of Mechanical and Systems Engineering, Korea Military Academy

\*\*Dept. of Korean Language and Philosophy, Korea Military Academy

\*\*\*Dept. of Military Kinesiology, Korea Military Academy

### 요약

현대 전장은 유무인 복합체계(MUM-T)와 무인체계 중심으로 빠르게 전환되고 있으며, 군집드론봇을 비롯한 다양한 무인 혹은 유무인 복합체계의 운용개념이 제안되고 있다. 그러나 이러한 운용개념을 검증하기 위한 체계의 효과도를 정량적으로 비교·평가할 수 있는 일반화된 방법론은 아직 충분히 정립되지 않았으며, 군 내부에서 활용되는 개체 단위 효과도 분석 도구 역시 접근성의 한계로 인해 학술 및 개발 단계에서의 활용이 제한적이다. 본 연구는 에이전트 기반 규칙 시뮬레이션(Agent-Based Rule Simulation)을 활용한 유무인 복합체계 효과도 분석 방법론을 제안한다. 제안된 방법은 에이전트 모델, 규칙 엔진, 환경 모델, 효과도 집계 모듈로 구성되며, 운용개념 변화 시 규칙 모듈만 교체하여 재분석이 가능한 모듈화 구조를 특징으로 한다. 제안 방법론의 유효성을 검증하기 위해 군집드론봇의 정찰·공격 드론 구성비 최적화 문제를 사례로 적용하였다. 총 50기 편제를 기준으로 정찰:공격 비율을 10:40부터 35:15까지 6개 수준으로 설정하고, 각 조합에 대해 100회의 몬테카를로 반복 실험을 수행하였다. 이를 통해 임무완수 확률, 수준, 아 드론 생존율 등 다중 효과도 지표를 산출하였다. 분석 결과, 중간 수준의 구성비 구간에서 최적 성능이 도출되었으며, 제안된 방법론이 다양한 무인체계 및 유무인 복합체계의 정량적 효과도 분석에 효과적으로 활용될 수 있음을 확인하였다.

## 1. 서론

현대 전장은 무인화·자율화 중심으로 급속히 재편되고 있다. 미국의 Replicator Initiative[1,2]와 우크라이나 전쟁에서 입증된 소형 무인기의 전술적 활용 사례[3]는 이러한 변화를 가속화하고 있으며, 한국군 또한 Army TIGER 4.0을 통해 유무인 복합전투체계(Manned-Unmanned Teaming, MUM-T)로의 전환을 추진하고 있다[5]. 특히 군집드론(Swarm Drone)은 정찰, 타격, 점령 등 다양한 임무를 수행할 수 있는 핵심 전력으로 부상하고 있다. 그러나 다양한 MUM-T 운용개념과 편제안이 제시되고 있음에도 불구하고, 이들 간 효과도를 정량적으로 비교·평가할 수 있는 일반화된 방법론은 아직 충분히 정립되지 않았다. 또한 군 내부에서 활용되는 친구급 위게임 모델 및 개체단위 효과도 분석 도구는 보안성과 접근성의 제약으로 인해 학술 및 산업 연구 단계에서 활용이 제한적이다. 이에 따라 운용개념 수립 단계에서 연구자와 개발자가 신속하고 반복적으로 효과를 평가할 수 있는

접근성 높은 분석 방법론의 필요성이 제기된다. 본 연구는 이러한 문제의식에 기반하여 에이전트 기반 규칙 시뮬레이션(Agent-Based Rule Simulation)을 활용한 MUM-T 효과도 분석 방법론을 제안한다. 제안된 방법론은 에이전트 모델, 규칙 엔진, 환경 모델, 효과도 집계 모듈로 구성된 모듈화 구조를 가지며, 운용개념이 변경될 경우 규칙 모듈의 교체만으로 다양한 시나리오에 대한 재분석이 가능하도록 설계되었다. 이를 통해 기존 고충실도 위게임 모델 대비 높은 접근성과 유연성을 확보하면서도, 군집 및 이질적 전력 간 상호작용을 반영할 수 있는 분석 환경을 제공한다. 또한 군집드론봇의 정찰 및 공격 드론 구성비 최적화 문제를 사례로 적용하여 제안 방법론의 유효성을 검증한다. 이를 통해 본 연구는 MUM-T 운용개념의 정량적 비교·평가를 위한 실용적 분석 도구를 제시하는 것을 목적으로 한다.

## 2. 관련 연구 및 방법론 배경

### 2.1 MUM-T 및 군집드론 운용개념 동향

MUM-T는 유인 플랫폼과 무인 플랫폼 간 협업을 통해 전투 효과를 극대화하는 개념으로[6,7], 최근 다양한 작전 환경에서 핵심 운용 패러다임으로 발전하고 있다. 군집드론은 ISR(Intelligence, Surveillance, Reconnaissance), Strike, Electronic Warfare, Decoy 등 기능별 역할로 분화되고 있으며, 특히 정찰-타격 연계를 통한 Sensor-to-Shooter 구조가 중요한 운용개념으로 자리잡고 있다[8].

### 2.2 국방 효과도 분석 방법론

전통적인 효과도 분석은 Lanchester 방정식[9]과 같은 해석적 모델에 기반하나, 군집 및 이질적 전력 간 상호작용을 반영하는 데에는 한계가 존재한다[10,11]. 한편 JWARS, AWAM, 창조21과 같은 위게임 시뮬레이션은 높은 충실도를 제공하지만 접근성과 범용성 측면에서 제약이 있다. 이러한 한계를 보완하기 위해 확률적 불확실성을 반영한 몬테카를로 기반 시뮬레이션 접근이 요구된다[12].

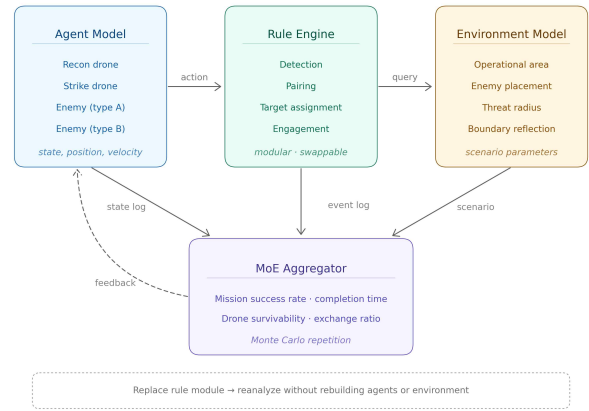
### 2.3 Agent-Based Simulation의 군사 응용

Agent-Based Simulation은 개별 에이전트의 단순한 규칙을 기반으로 전체 시스템의 창발적 거동을 분석하는 방법론으로, 복잡한 모델링에 적합하다. 군사 분야에서는 Ilachinski의 EINStein[13,14], 뉴질랜드 DTA가 개발한 MANA 모델[15,16] 등 다양한 연구가 수행되어 왔다. 국내에서도 전투체계 생존성 분석[17], 무기체계 가용도 예측[18], 군집드론 운용효과 분석[8], 다중 에이전트 기반 드론 군집 기술[19] 등 에이전트 기반 접근이 다양하게 적용되고 있다. 본 연구는 ABS 구조에 규칙 모듈화를 결합하여 운용개념 변경 시 재사용성과 확장성을 확보한다는 점에서 기존 연구와 차별성을 갖는다.

## 3. ABS 기반 효과도 분석 방법론 제안

### 3.1 분석방법론 구조

본 연구에서는 MUM-T 운용개념의 정량적 효과도 분석을 위해 에이전트 기반 규칙 시뮬레이션(ABS, Agent-Based Simulation) 분석방법론을 제안한다. 전체 구조는 그림 1과 같으며, 에이전트 모델, 규칙 엔진, 환경 모델, 효과도 집계 모듈의 네 가지 구성요소로 이루어진다. 각 모듈은 독립적으로 설계되어 운용개념 변화 시 규칙 모듈만 교체함으로써 다양한 시나리오에 대한 반복 분석이 가능하다. 이러한 모듈화 구조는 분석의 유연성과 재사용성을 동시에 확보한다.



[그림 1] ABS 기반 효과도 분석방법론

### 3.2 에이전트 모델링

에이전트는 아군 드론과 적 개체로 구성된다. 아군은 정찰드론과 공격드론으로 구분되며, 정찰드론은 위치, 속도벡터, 탐지반경, 생존상태를 상태 변수로 가진다. 공격드론은 이에 더해 할당된 표적과 연계된 정찰드론 정보를 포함하며, 타격 임무를 수행한다. 적 에이전트는 이질적 위협 환경을 반영하기 위해 두 유형으로 모델링된다. A형은 넓은 위협반경과 낮은 격추확률을 가지며, B형은 좁은 위협반경과 높은 격추확률을 갖도록 설정하였다. 이를 통해 단일 위협 모델 대비 현실적인 전장 환경을 모사한다.

### 3.3 행동 규칙

행동 규칙은 규칙 엔진 내에서 정의되며, 탐색, 탐지, 페어링, 타겟 할당, 교전, 위협 판정으로 구성된다. 정찰드론은 작전지역 내에서 반사 기반 자유 기동을 수행하며, 탐지 정보는 아군 간 공유된다고 가정한다. 공격드론은 정찰드론과 1:1로 연계되어 표적에 접근하며, 표적은 위협도 기반 우선순위에 따라 할당된다. 교전은 일정 거리 이하에서 동반 소멸 방식으로 모델링되며, 적의 위협은 시간 단계별 확률적으로 적용된다. 이러한 규칙 구조는 운용개념 변경 시 선택적으로 수정 가능하다.

### 3.4 효과도 지표

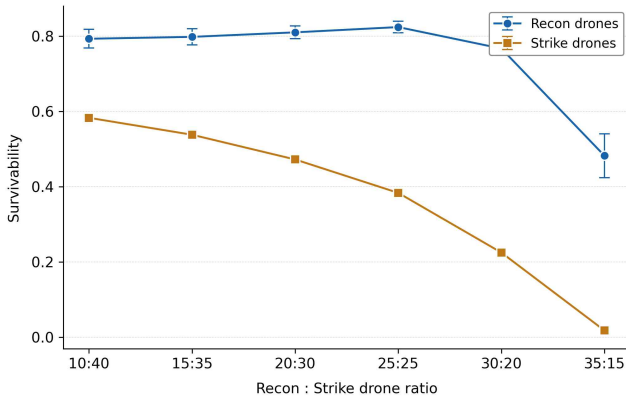
효과도 평가는 임무완수 확률, 작전소요시간, 아군 드론 생존율의 세 가지 지표를 통해 수행된다. 임무 완료율은 적 전멸 달성 비율을 의미하며, 임무 소요시간은 소탕까지의 평균 시간으로 정의된다. 드론 생존율은 전투 종료 시 잔존 비율을 나타낸다. 이러한 다중 지표를 통해 작전의 효율성, 신속성, 생존성 간의 trade-off를 종합적으로 분석할 수 있다.

## 4. 사례 연구: 군집드론 구성비 효과 분석

### 4.1 시나리오 구성



는 공격드론 수가 적을수록 각 드론이 더 많은 교전에 투입되어 손실이 증가하기 때문이다. 반면 정찰드론의 생존율은 10:40부터 25:25 구간에서 79~82% 수준으로 비교적 안정적으로 유지되다가, 공격 전력이 부족해지는 30:20 이후 구간에서 급격히 감소하는 양상을 보였다. 이는 타격전력 부족으로 적 제거가 지연될 경우 정찰드론의 노출 시간 또한 증가하여 연쇄적 손실이 발생함을 의미한다.



[그림 5] 정찰/공격드론 구성비에 따른 아 드론생존률

#### 4.4 결과 분석

실험 결과는 단일 효과도 지표만으로는 최적 구성비를 판별하기 어려우며, 복수의 지표를 종합적으로 고려해야 함을 보여준다. 임무완수 확률(그림 3)만을 기준으로 하면 10:40부터 30:20까지의 다섯 구성비가 모두 100%로 동등하게 평가되나, 작전소요시간(그림 4)을 함께 고려하면 25:25 구성비에서 최소 소요시간(82 step)이 관찰되어 명확한 최적점이 도출된다. 생존율 분석(그림 5)은 이러한 결과를 보장하는데, 25:25 구성비에서 정찰드론이 82.4%의 최고 생존율을 보이면서 동시에 공격드론 또한 38.4%의 합리적 생존율을 유지하는 균형 상태가 확인된다. 주목할 점은 정찰-공격 간 관계가 단순한 trade-off가 아니라 상호보완적(complementary)이라는 사실이다. 공격 전력이 임계 수준 이하로 떨어지는 30:20 이후 구간에서는 정찰드론의 생존율까지 동반 하락하는데, 이는 정찰 능력이 아무리 충분하더라도 타격 자산 부족 시 전체 전력이 동시에 붕괴될 수 있음을 시사한다. 반대로 공격 전력이 충분한 10:40 구성에서도 25:25 대비 소요시간이 증가하는 것은, 정찰 자산 부족으로 인한 탐지 지연이 교전 효율을 저하시키기 때문이다. 이러한 결과는 실제 운용개념 수립 시 임무 유형과 효과도 우선순위에 따라 최적 구성비가 달라질 수 있음을 보여준다. 임무완수만이 중요한 상황에서는 공격드론 중심 편제(10:40~30:20)가 모두 유효하나, 작전 속도와 병력 보존이 함께 요구되는 상황에서는 정찰 25 : 공격 25의 균형 편제가 최적으로 판단된다. 제안된 분석방법론은 이와 같이 다중 효과도 지표를 정량적으로 비교함으로써 운용개념 의사결정을 지

원하는 도구로 활용될 수 있음을 보여준다.

#### 5. 결론 및 향후 연구방향

본 연구에서는 에이전트 기반 규칙 시뮬레이션을 활용한 MUM-T 효과도 분석방법론을 제안하고, 군집드론봇의 정찰 및 공격 드론 구성비 최적화 사례를 통해 그 적용 가능성을 검증하였다. 분석 결과, 정찰 능력과 타격 능력 간의 불균형이 존재할 경우 작전 성과가 저하되며, 특정 중간 구성비 구간에서 최적 성능이 도출되는 경향을 확인하였다. 이는 탐지와 타격 간 기능적 균형이 군집드론 운용 효과에 핵심적인 영향을 미침을 시사한다. 제안된 분석방법론은 모듈화 구조를 기반으로 다양한 운용개념 변화에 유연하게 대응할 수 있으며, 접근성과 확장성을 동시에 확보함으로써 향후 전력 설계 및 운용개념 발전 과정에서 유용한 분석 도구로 활용될 수 있다. 다만 본 연구는 적의 행동을 정적으로 가정하고 통신 제약 및 전장 불확실성을 반영하지 못한 한계를 가지며, 지형 및 기상과 같은 환경 요소 또한 단순화하여 모델링하였다. 향후 연구에서는 적의 기동 및 대응 행동을 포함한 동적 모델을 도입하고, 통신 제약 및 분산 의사결정 구조를 반영함으로써 보다 현실적인 시뮬레이션 환경으로 확장할 필요가 있다. 또한 다양한 무인체계 간 협업 구조로의 확장고 실제 교리 기반 규칙 검증을 통해 방법론의 신뢰성과 실용성을 더욱 강화할 필요가 있다.

#### 후 기

이 논문은 2023년 정부(방위사업청)의 재원으로 국방과학기술진흥연구소의 지원을 받아 수행된 연구임(KRIT-CT- 23-020).

#### 참고문헌

- [1] U.S. Department of Defense, "Deputy Secretary of Defense Kathleen Hicks Keynote Address: 'The Urgency to Innovate,'" NDIA Emerging Technologies for Defense Conference, August 28, 2023.
- [2] Congressional Research Service, DOD Replicator Initiative: Background and Issues for Congress, CRS Report IF12611, 2025.
- [3] S. Pettyjohn, Evolution Not Revolution: Drone Warfare in Russia's 2022 Invasion of Ukraine, Center for a New American Security, 2024
- [4] 채희, 이경석, 엄정호, "지능화 전장에서 인공지능 기반 공격용 군집드론 운용 방안," 융합보안 논문지, 제23권, 제3호, pp. 65-71, 2023.
- [5] 이강경, 김금률, "국방혁신 4.0과 연계된 육군의 혁신전략," 국방정책연구, 제39권, 제4호, pp. 65-99, 2024.
- [6] U.S. Army Aviation Center of Excellence,

- Manned–Unmanned Teaming Strategy, Fort Rucker, AL, 2013.
- [7] Department of the Army, FM 3–04 Army Aviation, Washington, DC: Headquarters, Department of the Army, 2020.
- [8] 최민우, 문호석, 한상우, 조남석, "군집드론의 운용효과와 임무편성에 대한 ABM 시뮬레이션 연구," 한국국방경영분석학회지, 제47권, 제2호, pp. 75–90, 2021.
- [9] F. W. Lanchester, Aircraft in Warfare: The Dawn of the Fourth Arm, London: Constable and Company, 1916.
- [10] A. Washburn and M. Kress, Combat Modeling, New York: Springer, 2009.
- [11] M. Kress, "Modeling Armed Conflicts," Science, vol. 336, pp. 865–869, 2012.
- [12] J. G. Taylor, Lanchester Models of Warfare, Operations Research Society of America, 1983.
- [13] A. Ilachinski, Artificial War: Multiagent–Based Simulation of Combat, Singapore: World Scientific, 2004.
- [14] A. Ilachinski, "EINSTEIN: A Multiagent–Based Model of Combat," in Artificial Life Models in Software, A. Adamatzky and M. Komosinski, Eds., London: Springer, 2005, pp. 143–185.
- [15] M. K. Lauren and R. T. Stephen, "Map–Aware Non–Uniform Automata (MANA) – A New Zealand Approach to Scenario Modelling," Journal of Battlefield Technology, vol. 5, no. 1, pp. 27–31, 2002.
- [16] G. C. McIntosh, D. P. Galligan, M. A. Anderson, and M. K. Lauren, MANA (Map Aware Non–uniform Automata) Version 4 User Manual, DTA Technical Note NR–1465, New Zealand Defence Technology Agency, 2007.
- [17] 황훈규, 김현기, 이장세, "전투 시스템 생존성 분석을 위한 에이전트 기반 모델링 및 시뮬레이션," 한국정보통신학회논문지, 제16권, 제12호, pp. 2581–2588, 2012.
- [18] 이세훈, 최명진, "에이전트 기반 모델링 및 시뮬레이션을 이용한 무기체계 가용도 예측에 관한 연구," 디지털산업정보학회 논문지, 제17권, 제1호, pp. 25–34, 2021.
- [19] 김은수, 장연주, 방정호, "드론 군집 비행을 위한 다중 에이전트 최신 기술 분석 및 통신 최적화 기술 연구," 디지털산업정보학회 논문지, 제20권, 제3호, pp. 71–84, 2024.