

# 포병작전에서 드론의 특성을 고려한 소요량 산정에 관한 연구

임현준, 최경환  
국방대학교

## A Study on Estimating Drone Requirements in Artillery Operations Considering Drone Characteristics

**요약** 최근 러시아-우크라이나 전쟁 등 현대전에서 드론은 포병작전의 핵심 정찰 및 타격 자산으로 부각되고 있다. 그러나 기존 무기체계 소요 산정 연구는 드론 고유의 배터리 제약과 전장 손실률을 복합적으로 고려하지 못하는 한계가 있었다. 본 연구는 포병 관측반(FO)이 단일 기체를 운용하는 작전 환경을 가정하여, 기동성과 생존성 제약을 동시에 고려한 최적의 드론 휴대 소요량 산정 모형을 제안한다. 이를 위해 기존 DFDO(Drone Force Deployment Optimization) 알고리즘을 확장하고, 포아송 기반의 확률적 손실 모형과 다목적 최적화(MOO)를 결합하였다. 수치실험 결과, 드론 교대 소요량을 결정하는 Binding Constraint는 배터리 제약임이 확인되었으며, 특정 전장 손실률(임계 손실률) 이상에서는 관측반의 군장 한계를 초과하여 전술적 파단점이 발생함을 입증하였다. 본 연구는 포병작전 맞춤형 드론 소요 산정의 수학적 기준을 제시했다는 점에서 학문적, 실무적 의의를 가진다.

**Abstract** In modern warfare, such as the Russo-Ukrainian War, drones have emerged as essential reconnaissance and strike assets in artillery operations. However, existing research on weapon system requirements has limitations in not comprehensively considering the unique battery constraints and battlefield loss rates of drones. This study proposes an optimal drone requirement estimation model considering both mobility and survivability constraints, assuming an operational environment where an artillery forward observer (FO) operates a single drone. To this end, the existing Drone Force Deployment Optimization (DFDO) algorithm is extended and combined with a Poisson-based probabilistic loss model and Multi-Objective Optimization (MOO). Numerical experiments confirmed that the battery constraint acts as the binding constraint determining drone replacement requirements. Furthermore, it was proven that exceeding a specific battlefield loss rate (critical loss rate) causes a tactical break-point by exceeding the FO's carrying capacity. This study holds academic and practical significance by providing a mathematical standard for estimating drone requirements tailored to artillery operations.

**Keywords** : Drone, DFDO, Multi-Objective Optimization, Tactical Break-point, Artillery Observation

### 1. 서론

#### 1.1 연구의 배경 및 필요성

현대 포병작전에서 드론은 표적 획득부터 화력 유도, 전투피해평가(BDA)에 이르기까지 킬체인(Kill-chain)의 핵심 자산으로 자리 잡았다. 러시아-우크라이나 전쟁의 사례는 전체 표적의 대부분이 드론에 의해 획득됨을 보여주며, 포병부대 내 드론 운용의 당위성을 입증하고 있다 [1-2].

이에 따라 우리 군 역시 포병부대에 드론을 도입하는 방안을 추진 중이다. 그러나 관측반은 차량 지원 없이 도보 기동과 은밀성을 유지해야 하는 소규모 부대이다. 따라서 "작전 간 1대의 드론이 상시 비행을 유지하기 위해, 관측반은 총 몇 대의 예비 및 교대용 드론을 배낭에 휴대해야 하는가?"라는 현실적인 문제에 직면하게 된다.

기존의 군사 드론 연구들은 주로 군집 비행 제어나 대규

모 부대 단위의 운용 최적화에 집중되어 있어 [3], 배터리 한계와 적의 방공망에 의한 높은 손실률을 동시에 감당해야 하는 관측반의 소요량 산정 문제에는 해답을 주지 못하고 있다.

따라서 본 연구는 드론 고유의 기계적·화학적 특성과 전장의 불확실성을 반영한 최적 소요량 산정 모형을 제안하고자 하며, 이를 위해 다음과 같은 세 가지 핵심 연구질문(RQ : Research Question)을 설정하였다.

- RQ 1 : DFDO(Drone Force Deployment Optimization) 알고리즘 기반 드론의 교대 소요량 산정 시, 에너지-시간-배터리 세 제약 중 어떤 조건이 결합 제약(binding constraint)으로 작용하는가?

- RQ 2 : 적의 대 드론(Anti-Drone) 체계로 인한 손실이 증가할 때, 포병 관측반의 임무 수행이 불가능해지는 전술적 파단점(break-point)은 어느 수준인가?

· RQ 3 : 관측반의 기동성(군장 무게 한계)과 드론의 생존성(예비 기체 확보) 제약이 충돌하는 상충관계(trade-off) 구조에서 파레토 최적해(Pareto-optimal solution)는 존재하는가?

본 연구는 위 질문들에 대한 정량적 해답을 도출함으로써, 향후 포병부대 드론 전력화 및 교리 발전을 위한 과학적 기준을 제공하고자 한다.

## 2. 이론적 배경

### 2.1 포병 작전

기존의 포병 작전 연구는 주로 화력망 구성, 레이더를 이용한 대화력전 등 전통적 수단에 집중되어 왔다[4]. 최근 우크라이나 전쟁의 교훈을 바탕으로 포병부대에 표적 처리용 드론이 반드시 필요하다는 주장이 제기되고 있으나[1], 이는 필요성과 거시적 운용 개념을 제시하는 데 그치고 있다. 즉, 소규모 관측반이 전장 환경에서 어떻게 드론을 지속 운용할 것인지에 대한 정량적 연구는 부재한 실정이다. 본 연구는 포병 관측반이 기존 편제 하에서 드론을 단일 기체로 교대 운용하는 미래 작전 개념을 최초로 수학적으로 모델링한다는 점에서 차별성을 갖는다.

### 2.2 드론 군사 운용 최적화

군사 목적의 드론 운용 최적화에 관한 연구는 활발히 진행 중이다. 대표적으로 송주영 등(2020)은 사물인터넷(IoT) 기술을 접목하여 목표 지역에 최소한의 드론을 투입하는 DFDO 알고리즘을 제안하였다[3]. 이 알고리즘은 드론의 에너지 소비량, 작전 시간, 배터리 용량 등을 고려하여 매우 효율적인 해를 제공한다. 그러나 이는 후방 지역에서의 다수 드론 투입을 가정할 뿐, 전방에서 직접 배낭에 드론을 메고 운용해야 하는 포병 관측반의 '무게 한계(기동성)'를 고려하지 못했다는 한계가 있다.

## 3. 시나리오 및 모형 설계

### 3.1 작전 운용 개념 및 시나리오 설정

포병 관측반(FO)이 도보 기동을 통해 적진 깊숙이 전개하여,  $T_{op}$  시간 동안 표적 획득 및 화력 유도를 위해 1대의 드론을 상시 비행시키는 상황을 가정한다. 관측반은 차량 지원 없이 배낭에 드론을 휴대해야 하며, 적의 방공망 및 전자전 위협이 존재하는 고강도 분쟁 환경에 노출되어 있다.

### 3.2 DFDO 기반 소요량 산출 모형

적의 공격이 없는 이상적인 상황에서, 드론의 배터리 한계 및 물리적 특성을 고려한 기본 교대 소요량( $Z_{dn}$ )을 산

출한다. 본 연구는 송주영 등(2020)의 DFDO 알고리즘을 활용하여, 요구 에너지 기반 대수( $Z_E$ ), 작전 시간 기반 대수( $Z_T$ ), 배터리 한계 기반 대수( $Z_B$ )를 각각 계산한다. 이 세 가지 제약 중 가장 큰 값이 작전 유지를 위해 필수적인 Binding Constraint로 작용하며, 이는 식 (1)과 같이 표현된다.

$$Z_{dn} = \max(Z_E, Z_T, Z_B) \quad (1)$$

$Z_E$  : Energy-constrained requirement

$Z_T$  : Mission duration-constrained requirement

$Z_B$  : Battery capacity-constrained requirement

### 3.3 손실률을 고려한 포아송 확률 기반 손실 모형

실제 전장에서는 적의 대드론(Anti-drone) 체계에 의해 기체 손실이 필연적으로 발생한다. 본 연구는 전장 내 드론 손실이 불규칙하고 독립적으로 발생한다고 가정하여, 시간당 손실률( $\lambda$ )을 모수( $\mu = \lambda T_{op}$ )로 하는 포아송 분포(Poisson distribution)를 적용하였다.

작전의 궁극적인 성공 조건은 전장 마찰에 의해 발생하는 실제 드론 손실량이 관측반이 보유하고 출동한 예비 드론 수량  $N_{spare}$ 의 범위를 초과하지 않는 것이다. 작전 성공 확률을  $\alpha$ 라고 할 때, 최적 예비 대수를 누적 분포함수(CDF)를 활용하여 나타내면 식 (2)과 같이 표현된다.

$$P(X \leq N_{spare} - 1) = \sum_{i=0}^{N_{spare}-1} \frac{\mu^i \cdot e^{-\mu}}{i!} \geq \alpha \quad (2)$$

Where,  $N_{spare}$  denotes number of spare parts, and  $\alpha$  denotes the target probability threshold

### 3.4 생존성 및 기동성 제약을 고려한 다목적 최적화(MOO) 설계

최종적으로 관측반은 드론의 '생존성(안전한 예비 기체 확보)'을 높이기 위해 휴대 대수를 늘려야 하지만, 도보 기동을 위한 '기동성(군장 무게 최소화)'의 제약과 충돌하는 딜레마에 직면한다. 이를 해결하기 위해 앞서 도출한 수식들을 결합하여, 관측반의 총 군장 무게( $Z$ )를 최소화하는 다목적 최적화(MOO : Multi-Objective Optimization) 모형을 설계하였다.

#### 3.4.1 목적함수

총 군장 무게 최소화 식 (3)은 관측반이 운반해야 하는 드론의 총 무게( $Z$ )를 최소화하는 목적함수이다.

$$\text{Minimize } Z = W_{drone} \cdot N^* \quad (3)$$

Where,  $Z$  denotes total drone weight,  $W_{drone}$  denotes the weight per drone, and  $N^*$  denotes the total number

of drones to be deployed and carried by the observation unit

3.4.2 제약조건

· S.t. 1(생존성 및 신뢰성 제약)

포아송 확률에 기반한 작전 성공률이 요구 기준인  $\alpha$ 를 보장해야 한다. 이는 식(4)와 같이 정의된다.

$$P(X < N^*) = P(X \leq N_{spare} - 1) \geq \alpha \quad (4)$$

· S.t. 2(기동성 및 중량 제약)

목적함수 결과인 총 중량( $Z$ )은 관측반 최대 허용 중량을 초과할 수 없다. 이는 식 (5)와 같이 정의한다.

$$N^* \cdot W_{drone} \leq W_{max} \quad (5)$$

Where,  $W_{max}$  denotes maximum allowable carried load

이러한 단계별 최적화 모형을 통해 관측반의 최대 중량 한계( $W_{max}$ )를 초과하지 않으면서도 전장의 손실 위험( $\lambda$ )을 극복할 수 있는 최적의 드론 투입 대수( $N^*$ )를 과학적으로 도출할 수 있다.

4. 수치실험 및 결과

4.1 DFDO Binding Constraint 분석

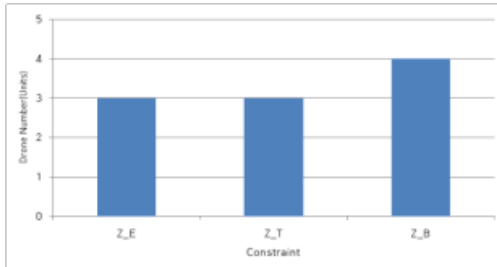


Fig. 1. Number of drones for each constraint

Fig. 1에서 보는 바와 같이 수치실험 결과, 시간( $Z_T$ )이나 요구 에너지( $Z_E$ ) 조건보다 1회 배터리 용량의 한계( $Z_B$ )가 항상 가장 큰 값으로 산출되었다. 즉, 드론 운용의 Binding Constraint는 ‘배터리 물리적 한계’임이 수학적으로 증명되었다.

4.2 임계 손실률과 전술적 파단점 분석

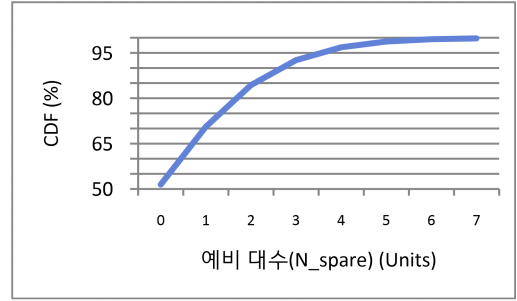


Fig. 2. Change in cumulative survival guarantee probability as the number of spare drones increases

Fig. 2는 전장 손실 확률( $\lambda = 0.05$ )을 반영한 결과이며, 예비 대수가 늘어남에 따라 누적 확률분포(CDF), 즉, 작전 성공 확률이 증가하는 모습을 보여주며, 요구 기준인 ( $\alpha = 95\%$ )을 달성하기 위해서는 4대 이상이 필요한 것으로 나타난다.

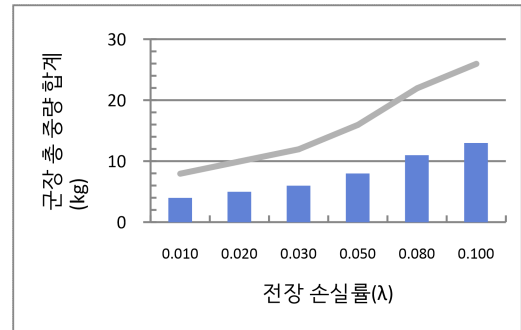


Fig. 3. Sensitivity analysis of drone requirements and carried load weight under varying battlefield loss rates

Fig. 3에서는 전장의 위험 수준이 높아질수록 관측반의 물리적 부담이 어떻게 기하급수적으로 폭증하는지를 보여주며, 군장 총 중량 곡선이 ( $W_{max} = 12.0kg$ )을 돌파하는 교차점인  $\lambda = 0.03$ 일 때가 바로 ‘전술적 파단점’이 됨을 보여준다.

4.3 생존성-기동성 Trade-off 및 최적해 도출

드론의 생존성을 높이기 위해 기능을 추가하면 드론 1대의 무게가 증가한다. 반면 가벼운 상용 드론을 다수 가져가려 하면 예비 대수가 늘어나 결국 총 군장 무게 제약을 위반하는 딜레마가 발생한다. 실험 결과, 이 두 제약이 교차하는 파레토 최적해는 제한적이라는 것을 확인할 수 있었다.

5. 결론

본 연구는 포병작전에서 관측반이 드론을 운용할 때 직면하는 현실적 제약을 수학적 모형으로 구현하고 최적 소요량을 산정하였다. 연구결과, 드론의 작전 지속능력을 결정짓는 최우선 제약은 배터리 한계였으며, 적의 대드론 체계로 인해 손실률이 증가할 경우 관측반의 군장 한계를 초

과하는 기술적 과단점이 발생함을 확인하였다. 또한, 기동성과 생존성 간의 Trade-off 딜레마를 극복하기 위한 다목적 최적화(MOO) 분석을 수행하였다.

본 연구는 기존 거시적 무기체계 소요 산정 방식에서 벗어나, DFDO 알고리즘과 확률적 손실 모형, 그리고 다목적 최적화를 융합하여 '소부대 맞춤형 드론 소요 산정론'이라는 새로운 수리적 프레임워크를 제시하였다는 학문적 의의와, 향후 군이 포병용 드론을 전력화할 때 단순히 '성능 좋은 기체'를 도입하는 것을 넘어, 관측반의 '휴대 무게 한계'와 야전 '충전 제약'을 동시에 평가할 수 있는 명확한 정량적 기준을 제공하였다는 실무적 의의가 있다.

향후 연구에서는 지형(산악, 도심) 및 기상(온도, 풍속) 등 변수를 고려, 더 현실적인 전장 상황을 반영하여 본 모형을 더욱 고도화할 필요가 있다.

#### References

- [1] J. H. Park, E. S. Lim, Y. W. Kim, and B. C. Namgung, "Artillery units absolutely need target processing drones", *Weapon Systems*, pp. 96–101, 2024.
- [2] D. K. Koo, "The Adaptive Evolution of Drones and Counter-drones: Focusing on the Four Phases of Drone Warfare in the Russo-Ukrainian War", *Korean Journal of Military Affairs*, 81, 2, pp. 1–35, 2025, DOI:<https://doi.org/10.31066/kjmas.2025.81.2.001>
- [3] J. Y. Song, H. D. Jang, and J. M. Chung, "Drone Force Deployment Optimization Algorithm For Efficient Military Drone Operations", *Journal of Internet Computing and Services*, 21, 1, pp. 211–219, 2020, DOI:<https://doi.org/10.7472/jksii.2020.21.1.211>
- [4] Y. S. Ha, "The Study on analysis methodology of optimal performance and quantity for Mission-Based drones", *Journal of Internet Computing and Services*, 21, 2, pp. 229–237, 2020, DOI:<https://doi.org/10.7472/jksii.2020.21.2.229>
- [5] J. T. Oh and J. M. Ma, "A Study on the Combat Model of Suicide Swarm Drone", *Journal of the Korea Academia-Industrial cooperation Society*, 23, 5, pp. 419–427, 2022, DOI:<https://doi.org/10.5762/KAIS.2022.23.5.419>