

# 틸트로터 VTOL 드론의 임무별 운용 고도 결정에 관한 연구

송제호\*, 전은미\*\*

\*전북대학교 융합기술공학부(IT응용시스템공학)

\*\*전북대학교 IT응용시스템공학과

e-mail:songjh@jbnu.ac.kr

## A Study on Mission-Based Operational Altitude Determination for Tilt-rotor VTOL Drones

Je-Ho Song\*, Eun-Mi Jeon\*\*

\*Dept. of Convergence Technology Engineering(IT Applied System Engineering), Jeonbuk National University

\*\*Dept. of IT Applied System Engineering, Jeonbuk National University

### 요약

틸트로터 기반 VTOL 드론은 수직 이착륙과 고속 순항이 모두 가능하여 도심 물류, 재난 감시, 광역 데이터 수집 등 다양한 임무 환경에서 활용될 수 있다. 그러나 실제 운용에서는 제한된 배터리 자원과 안정적인 통신 링크를 동시에 고려해야 하며, 운용 고도는 에너지 소모와 통신 신뢰성에 함께 영향을 미치는 핵심 변수이다. 본 논문에서는 틸트로터 VTOL 드론의 비행 단계별 특성과 임무 환경을 고려하여 에너지 효율과 통신 안정성을 함께 반영한 운용 고도 결정 전략을 제안한다. 또한 임무 목표, 환경 장애물, 에너지 가용성 등을 종합적으로 고려한 고도 결정 절차와 임무 유형별 권장 운용 방향을 제시한다. 제안한 내용은 복잡한 수치 계산 없이 현장 운용자가 임무 목적에 적합한 운용 고도를 판단하는 데 활용될 수 있다.

### 1. 서론

최근 무인항공기(UAV) 기술은 수직 이착륙의 편의성과 고속 순항 성능을 결합한 틸트로터 기반 VTOL 드론을 중심으로 빠르게 발전하고 있다. 틸트로터 VTOL 드론은 멀티로터와 고정익의 장점을 동시에 활용할 수 있어 재난 감시, 도심 물류, 광역 데이터 수집 등 다양한 분야에서 활용될 수 있다. 특히 제한된 공간에서의 이착륙과 장거리 임무 수행이 동시에 가능하다는 점에서 기존 멀티로터 또는 고정익 단독 플랫폼과 차별화된 운용 가치를 가진다.[1]

실제 임무 수행에 있어 배터리 자원 관리와 안정적인 통신 링크 확보는 기체의 생존성과 임무 성공을 결정짓는 핵심 요소이다. 일반적으로 고도가 높아질수록 통신 가시선(LoS) 확보에는 유리하지만, 상승에 필요한 에너지 소모가 증가하여 비행 지속시간이 감소할 수 있다. 반대로 저고도 운용은 에너지 측면에서 유리할 수 있으나, 건물, 수목, 지형 등의 장애물로 인해 통신 품질이 저하될 가능성이 높다.[2]

기존 연구는 비행 제어, 경로 최적화, 통신 품질 분석 등 개별 요소에 초점을 맞춘 경우가 많았다. 그러나 실제 현장 운용에서는 임무 목적과 환경 조건을 함께 고려한 실용적인 고도 결정 기준이 필요하다. 특히 틸트로터 VTOL 드론은 수직 상승, 천이, 순항이 결합된 복합 비행 구조를 가지므로, 동일한 기체라 하더라도 임무 환경에 따라 적절한 운용 고도가 달라질 수 있다.

이에 본 논문에서는 틸트로터 VTOL 드론의 임무 환경을 고려한 운용 고도 결정 전략을 제안하고, 임무 유형별 권장 운용 방향을 제시하고자 한다. 이를 통해 복잡한 수치 최적화 없이도 현장 운용자가 임무 목적에 적합한 운용 고도 방향을 판단할 수 있는 실용적 기준을 마련하고자 한다.

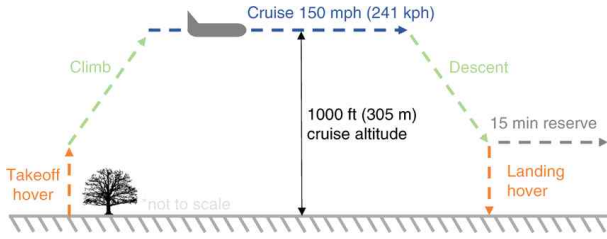
### 2. 본론

#### 2.1 비행 단계별 운용 특성

틸트로터 VTOL 드론의 운용 고도는 비행 단계별 특성과 밀접하게 관련된다. 특히 틸트로터 드론은 이륙 호버링, 상승, 순항, 하강, 착륙 호버링으로 다섯 단계로 구성되고 각 단계에서 비행 시간, 속도 및 전력 소비량이 다르다. 따라서 운용 고도를 결정할 때는 단순히 목표 고도만 고려할 것이 아니라 각 비행 단계가 임무 전체에 미치는 영향을 함께 검토할 필요가 있다.[3]

본 논문에서는 일반적인 소형 무인기 비행 규정을 바탕으로 운용 고도를 저고도(50m 미만), 중고도(50m 이상 100m 미만), 고고도(100m 이상 150m 이하)의 세 단계로 구분하여 정의한다.

[그림 1]은 시간에 따른 VTOL의 비행 궤적 도식이다.



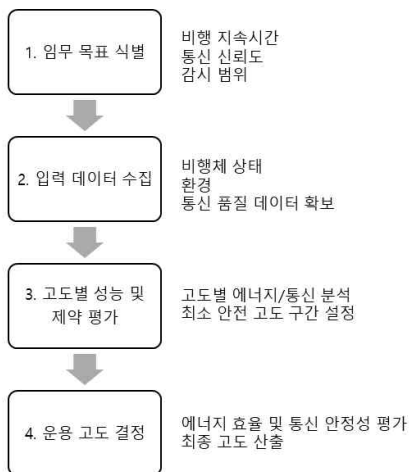
[그림 1] VTOL의 비행 궤적

먼저 에너지 측면에서 수직 상승 구간은 중력을 직접 극복해야 하므로 가장 큰 전력 소모가 발생하는 구간이다. 목표 고도가 높아질수록 상승 시간과 추력 유지 시간이 길어져 배터리 소모가 증가하여 순항 비행에 사용할 수 있는 에너지 여유가 감소할 가능성이 있다. 따라서 에너지 효율 측면에서는 천이와 순항에 필요한 조건을 만족하면서도 상승 부담을 줄일 수 있는 고도 설정이 중요하다.[4]

다음으로 통신 측면에서 저고도 운용은 건물, 수목, 지형 등의 장애물에 의해 통신 차폐와 신호 감쇠가 발생할 가능성이 크다. 이는 제어 신호 지연, 데이터 전송 품질 저하, 통신 단절 가능성으로 이어질 수 있으며, 특히 실시간 영상 전송이나 원격 제어가 필요한 임무에서는 중요한 제약 요소가 된다. 반대로 일정 수준 이상의 고도에서는 장애물 영향이 감소하여 통신 가시선 확보에 유리해질 수 있으므로, 실제 운용에서는 통신 안정성과 에너지 부담 사이의 균형을 고려할 필요가 있다.[5]

2.2 임무별 운용 고도 결정 절차

[그림 2]는 임무별 운용 고도를 결정하는 절차를 도식화한 것이다.



[그림 2] 임무별 운용 고도 결정 절차

첫째, 임무 목표를 식별한다. 해당 임무에서 비행 지속시간, 통신 신뢰도, 감시 범위 중 어떤 요소가 우선되는지를 결정한다. 둘

째, 입력 데이터를 수집한다. 비행체 상태 데이터에는 배터리 전압, 전류 잔여 용량 등이 포함되고, 환경 데이터에는 지형 고도, 장애물 분포, 풍속 등이 포함되고, 통신 데이터로는 수신 신호 강도(RSSI), 신호 대 잡음비(SNR) 등을 종합적으로 취득한다. 셋째, 고도별 성능 및 제약을 평가한다. 수집된 데이터를 바탕으로 고도별 에너지 소모량과 통신 가능성을 정량적으로 산출하고, 환경 장애물을 기준으로 통신 음영 지역과 물리적 충돌을 회피할 수 있는 최소 안전 고도를 파악하여 실제 비행이 가능한 운용 고도 구간을 검토한다.

넷째, 운용 고도를 결정한다. 앞 단계에서 도출된 우선순위와 운용 고도 구간, 제약 조건 등을 종합하여 최종적으로 적합한 운용 고도를 결정한다.

2.3 에너지와 통신의 정의

틸트로터 VTOL 드론의 운용 고도 결정은 에너지 효율과 통신 안정성 간의 상충 관계를 고려해야 한다. 따라서 본 논문에서는 총 에너지 소비와 LoS 확보 가능성을 함께 고려한다.

먼저, 운용 고도  $h$ 에서의 총 에너지 소비는 상승, 천이, 순항 단계의 합으로 다음과 같이 표현할 수 있다.[6]

$$E$$

다음으로 통신 측면에서 지상 제어국과 드론 간의 통신 품질은 가시선 확보 여부에 크게 의존한다. 고도  $h$ 와 수평 거리  $d$ 에서의 3차원 직선거리에 따른 자유 공간 경로 손실(FSPL)은 다음과 같이 표현할 수 있다.[7]

$$PL(h) = 20\log_{10}(d_{3D}) + 20\log_{10}(f) + 20\log_{10}\left(\frac{4\pi}{c}\right)$$

2.4 임무 유형별 운용 전략

임무에 따라 2.3절에서 정의한 총 에너지 소비와 통신의 상대적 중요도는 달라진다. 이를 반영하기 위하여 본 논문에서는 임무 유형별 운용 전략을 [표 1]과 같이 제안한다.

[표 1] 임무 유형별 운용 고도 전략

임무 유형	주요 우선순위	권장 고도 전략	기대 효과
도심 물류 배송	$E_{climb}(h)$ 최소화	천이 가능한 최소 안전 고도	배터리 보존 및 항속 거리 확보
실시간 재난 감시	$PL(h)$ 최소화	장애물 상단 최소 가시선 확보	영상 전송 및 실시간 제어
광역 데이터 수집	$E$ 및 $PL$ 최적화	에너지 및 통신 절충 구간	임무 완료 시간 단축

도심 물류 배송은 반복 운항과 항속 거리 확보가 중요하므로 상승 구간의 에너지 소모를 최소화하는 전략이 적합하다. 따라서 천이 가능한 최소 안전 고도를 유지하여 제한된 배터리 자원을

순항 에너지에 집중할 수 있다.

실시간 재난 감시는 영상 및 제어 링크의 안정성이 핵심이므로 통신 품질 확보가 우선되어야 한다. 지형 및 구조물 높이에 데이터를 반영하여 산출된 최소 가시선 고도 이상으로 비행하므로써 경로 손실을 줄이고 VLoS를 확보해야 한다.

광역 데이터 수집은 넓은 커버리지와 비행 지속시간을 동시에 고려해야 하므로 절충적 운용 고도가 요구된다. 지나치게 저고도일 경우 관측 범위가 제한될 수 있고, 반대로 지나치게 고고도일 경우 상승 에너지 부담이 증가한다. 따라서 중고도 영역에서 에너지 효율과 가시 범위의 균형을 확보하는 것이 효과적인 운용 전략이 될 수 있다.

### 3. 결론

본 논문에서는 틸트로터 VTOL 드론의 임무 환경을 고려하여 에너지 효율과 통신 안정성을 함께 반영한 운용 고도 결정 전략을 제안하였다. 틸트로터 VTOL 드론은 수직 상승, 천이, 순항이 결합된 복합 비행 구조를 가지므로, 운용 고도는 비행 성능과 통신 신뢰성에 동시에 영향을 미치는 핵심 변수로 작용한다. 따라서 실제 운용에서는 단일 성능 요소만을 기준으로 고도를 설정하기보다 임무 목적과 환경 조건을 함께 고려한 차별화된 운용 전략이 필요하다.

제안한 방법은 복잡한 수치 계산 없이도 현장 운용자가 임무 특성에 적합한 운용 고도 방향을 판단할 수 있도록 지원하며, 통신 취약 구간과 과도한 에너지 소모 구간을 사전에 회피할 수 있는 가이드라인을 제공하고자 한다.

향후 연구에서는 파이썬을 활용하여 다양한 임무 환경과 지형 조건에 따른 비행 시나리오를 우선적으로 도출할 계획이다. 이후 도출된 데이터를 바탕으로 실제 야외 비행 테스트를 수행하여 정량적인 비행 데이터를 수집하고자 한다. 고도별 전력 소모, 배터리 소모량, RSSI 등을 수집하여 에너지 효율과 통신 신뢰도를 동시에 반영하는 정량적 고도 추천 모델로 확장할 것이다.

### 참고문헌

[1] 장병희, 윤도형 외 2명, “배송용 틸트로터 드론에 대한 공력 특성 연구”, 한국항공우주학회, pp.551-552, 11월, 2020년.  
 [2] 이재열, 김태윤 외 3명, “성층권 드론의 개발 및 연구 동향”, 한국통신학회, pp.904-905, 6월, 2023년.  
 [3] Akshat Kasliwal, “Role of flying cars in sustainable mobility”, nature communications, pp.1-9, 4월, 2019년.  
 [4] 김민지, 백돈규 “딥러닝을 활용한 도심용 무인항공기의 수평 및 수직비행 전력소모 모델링”, 대한전기학회, pp.1497-1498, 7월, 2022년.  
 [5] 홍유경 외 4명, “무인 비행체의 환경 인지 및 경로 계획 연구

동향”, 전자통신동향분석 34권 제3호, pp.43-54, 6월, 2019년.

[6] Yong Zeng, “Energy Minimization for Wireless Communication With Rotary-Wing UAV”, IEEE Transactions on Wireless Communications, pp.2329-2345, 4월, 2019년.  
 [7] Akram AL-Hourani, “Optimal LAP Altitude for Maximum Coverage”, IEEE Wireless Communications, pp.569-572, 12월, 2014년.  
 [8] 문수영, “지면 높낮이차를 고려한 에너지 효율적 드론 경로 계획 방법”, 한국컴퓨터정보학회논문지, pp.1-9, 10월, 2025년  
 [9] 산업통상자원부, “1시간 이상 비행이 가능한 다목적 수직 이착륙 비행로봇 시스템 개발”, 11월, 2017년  
 [10] 강창구, 신정호, “드론학개론”, 복두출판사, 2023년

이 성과는 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 한국산업기술진흥협회가 지원하는 "계약정원제 활용 사업"의 수행 결과임.