

# K-UAM 운용 시나리오 기반 전기추진 배터리 스펙 방법론

조범동<sup>1,†</sup>, 유수호<sup>1</sup>, 정유진<sup>1</sup>, 이창수<sup>1</sup>, 김연준<sup>1</sup>

<sup>1</sup>주식회사 브이스페이스

## A Methodology for Specifying Electric Propulsion Battery Requirements Based on K-UAM Operational Scenarios

Bumdong Cho<sup>1,†</sup>, Suho Yu<sup>1</sup>, Yujin Jung<sup>1</sup>, Changsu Kim<sup>1</sup> and Yeonjune Kim<sup>1</sup>

<sup>1</sup>V-SPACE Inc.

**Abstract** : 도심항공모빌리티(Urban Air Mobility, UAM)는 교통 혼잡을 해소하고 친환경 항공 교통을 실현할 수 있는 차세대 운송 개념으로 주목받고 있다. 특히 한국형 도심항공교통(K-UAM)은 2025년 상용화를 목표로 정부 주도의 기술개발과 실증이 진행 중이며 전기 추진 수직이착륙기(eVTOL)를 핵심 수단으로 활용한다. 본 논문에서는 K-UAM 운용 시나리오에 기반하여 전기추진 항공기의 배터리 사양을 결정하는 체계적인 방법론을 제시한다. 일반적인 Lift & Cruise형 eVTOL 항공기를 가정한 운용 시나리오를 정의하고, 안전성을 최우선으로 요구사항을 도출하여 임무 프로파일에 부합하는 배터리 용량 및 출력 등의 스펙 결정 절차를 수립하였다. 또한, 최신 글로벌 연구 동향을 조사하여 전기 UAM 항공기의 배터리 설계 기준과 안전 규격을 반영하고자 하였다. 이론적 분석에 초점을 맞추었다. 제안된 방법론을 개념 설계 사례에 적용하여 배터리 사양 결정 과정의 유용성 검토를 하였고 향후 K-UAM 시스템 설계 시나리오 기반 배터리 스펙 산정의 타당성과 효과를 확인하였다.

**Key Words** : 도심항공교통 (Urban Air Mobility, UAM), K-UAM (Korean Urban Air Mobility), 전기추진 수직이착륙기 (Electric Vertical Takeoff and Landing, eVTOL), 리프트 앤 크루즈 구성 (Lift-and-Cruise Configuration), 배터리 사양 결정 방법론 (Battery Specification Methodology), 임무 기반 에너지 산정 (Mission-Based Energy Estimation), 항공용 안전 전력 시스템 (Safety-Critical Power System Design)

**Acknowledgement** : 본 연구는 국토교통부가 주관하는 K-UAM 실증사업의 일환으로 수행되었으며, 연구비 지원에 깊이 감사드립니다. 본 논문에 포함된 내용은 연구자의 견해이며, 소속 기관 또는 지원기관의 공식 입장을 대변하지 않습니다.

## 1. 서론

도심항공모빌리티(UAM)는 대도시의 교통혼잡을 해소하기 위한 혁신적 대안으로 주목받고 있으며, 특히 한국형 UAM(K-UAM) 로드맵에 따라 2025년 상용화를 목표로 개발이 진행되고 있다. UAM의 핵심은 전기동력 수직이착륙기(eVTOL)로, 이들의 운항 성능과 안전

성은 배터리 시스템의 성능 및 사양에 크게 좌우된다. 그러나 현존하는 배터리 기술은 에너지 밀도와 출력 제약으로 항속거리와 탑재중량에 한계를 보이고 있어, 운용 시나리오에 부합하는 배터리 사양(스펙)을 체계적으로 결정하는 방법론이 요구된다. 본 논문에서는 K-UAM 운용 시나리오를 바탕으로 전기추진 eVTOL 항공기의 배터리 요구 사양을 산출하는 방법론을 제시한다. 이를 통해 임무 수행을 위한 필수 이론 흐름, 계산식, 안전 여유 및 설계 절충 요소를 고려하여 배터리 용량, 출력, 에너지밀도 등의 핵심 스펙을 결정하는 절차를 확립하였다.

†교신저자 (Corresponding Author)

E-mail: ABCD@sase.or.kr

Copyright © The Society for Aerospace System Engineering

## II. 본 론

### A. 임무 프로파일

K-UAM의 대표 운용 시나리오는 도심 내 정해진 수직이착륙장(vertiport) 사이를 왕복하는 항공 택시 서비스로 가정한다. 본 연구에서는 정부 로드맵상의 초기 상용화 조건을 바탕으로, 평균 4명 탑승의 eVTOL 항공기가 도심 거점 간 약 30 km 거리를 비행하는 임무를 정의하였다.

임무 프로파일은 이착륙 및 크루즈 등 비행 단계별로 세분화된다. 우선 수직이착륙을 위해 저속 상승 및 호버링이 요구되며, 통상 1분 간 최대출력으로 상승하여 일정 고도에 도달하는 것으로 시나리오를 구성하였다. 이후 순항고도에서는 안전한 지상 분리를 위해 약 300~500 m 고도로 비행하며, 도심 환경을 고려한 순항속도 약 240 km/h( $\approx 150$  mph)를 유지한다고 가정하였다. 이렇게 하면 왕복 30 km 기준으로 편도 비행시간은 약 7.5분 정도가 된다. 순항 이후 목적지 인근에서 강하 및 착륙 단계가 이어지며, 착륙 전 약 30초~1분 가량의 정지호버링을 추가적으로 고려하였다. 또한, 예기치 않은 착륙지연이나 회항 상황에 대비해 예비 여유분으로 추가 비행시간을 확보해야 한다. 본 시나리오에서는 비상 호버링 5분 또는 추가 10 km 이동이 가능한 에너지 여유를 예비 용량으로 설정하였다. 요약하면, 임무 프로파일은 수직이착륙(상승/하강) 단계, 순항 단계(왕복 총 30 km), 그리고 안전 예비 단계를 포함하며, 이를 통해 배터리 요구 성능 산정을 위한 기초 입력값을 마련하였다.

### B. 배터리 사양 결정 방법론

배터리 사양 결정 방법론은 상기 정의된 임무 프로파일에 기초하여 필요 에너지와 출력을 계산하는 일련의 절차로 구성된다. 먼저 eVTOL 항공기의 중량 파라미터와 공력 특성을 설정하였다. K-UAM 콘셉트 기체의 설계 중량은 약 3,000 kg(이륙총중량, 탑재배터리 포함)으로 가정하고, 양항비(L/D)는 도심 비행조건에서 약 6, 프로펠러/모터 종합 효율은 약 0.6 (60%) 수준으로 설정하였다. 다음으로 각 비행 구간별 필요 출력과 에너지 소비를 산출하였다. 수직이착륙 단계에서는 기체 중량을 들어올리는데 필요한 동력을 계산하였다. 약 3,000 kg의 기체가 중력가속도  $9.81 \text{ m/s}^2$ 에서 호버링하려면 대략 500 kW 수준의 출력이 요구되며, 이는 문헌에 언급된 UAM 이착륙 출력을 반영한 값이다. 본 연구 시나리오에서는 1분간 이 최대출력을 사용하므로, 약 8.3 kWh의 에너지가 상승/호버 단계에 소모된다. 순항 단계에서는 일정 속도로 수평비행 하므로, 항공기 항력에 대응하는 출력이 요구된다. 앞서 가정한 순항속도 240 km/h(약 67 m/s)에서의 출력 필요량은 약 70~75 kW로 추산된다.

순항 비행시간이 약 7.5분(0.125시간)이므로 약 9 kWh가 순항구간에서 소모된다. 추가로 가속 및 상승 초기 구간에서의 과도 출력, 그리고 착륙 시 정지호버 및 강하 제어에 소모되는 에너지를 합산하였다. 착륙 단계에서는 상승과 유사한 출력이 짧은 시간 요구되지만, 회생제동 효과 등은 보수적으로 무시하고 약 2~3 kWh를 소모한다고 간주하였다. 이상을 합산

하면 기본 임무 수행에 필요한 에너지는 총 약 20 kWh 내외로 계산된다 (상승 8.3 kWh + 순항 9 kWh + 착륙 2~3 kWh 등). 여기에 안전 예비분 에너지를 추가로 고려하였다. 5분간의 추가 호버링을 대비하려면 약 40 kWh의 여유 용량이 더 필요하고, 또는 10 km 추가 이동을 위한 약 3 kWh를 고려해야 한다. 본 연구에서는 더 보수적인 값을 계산하여 예비용량으로 약 5~8 kWh를 추가하였다 (최종 용량 산정 시에는 임무 에너지의 약 20~30% 수준을 예비로 가산). 이로써 총 필요 에너지량 ( $E_{\text{req}}$ )은 약 25~28 kWh 수준으로 도출되었다. 산출된 필요 에너지량을 토대로 배터리 팩의 용량 (kWh)과 중량 (kg)을 결정한다. 우선 배터리의 유효용량은 운용 시 완전 방전까지 사용하지 않도록 여유를 두어야 하므로, 80~90%의 DOD(방전율)만 활용한다고 가정하였다. 필요 에너지 28 kWh를 0.8로 나눈 약 35 kWh가 배터리 팩의 최소 총에너지 용량으로 산정된다. 다음으로 배터리 에너지밀도를 적용하여 배터리 중량이 계산된다. 현재 사용 가능한 고성능 리튬이온 배터리 팩의 에너지밀도를  $\sim 300 \text{ Wh/kg}$  수준으로 가정하면, 35 kWh 용량을 갖는 배터리는 약 117 kg의 질량을 갖는다. 이는 총중량 3,000 kg의 약 4%로 비교적 양호한 수치이다. 다만 향후 반복 운항과 수명 요구를 고려하여 용량을 증대시키면 배터리 중량 비중이 높아진다. 예를 들어 100 km 운항을 목표로 할 경우 필요용량이 약 3배 이상으로 증가하여 100~150 kWh 규모가 되며, 이때 배터리 무게만 400~500 kg에 달할 수 있다. 따라서 목표 운항거리에 따른 배터리 중량 증가 추이를 평가하고, 항공기 성능 저하를 초래하지 않는 범위에서 균형점을 찾는 것이 중요하다. 본 방법론에서는 임무 프로파일 기반의 에너지 계산 결과를 토대로 초기 배터리 사양(용량, 에너지밀도)을 가정하고, 산출된 배터리 중량이 다시 항공기 중량에 미치는 영향을 검토하는 반복 설계 절차를 거쳤다. 이러한 내부 루프 계산을 통해 배터리 용량과 항공기 성능 간의 수렴해를 확보함으로써, K-UAM 시나리오에 부합하는 최적 배터리 스펙을 결정하였다.

### C. 안전 고려사항

배터리 사양을 결정함에 있어 안전성과 신뢰성은 무엇보다 중요하다. 첫째, 잔여 용량 비율(SOC 여유) 설정을 통해 예기치 않은 상황에서도 안전 착륙이 가능하도록 했다. 민간 항공의 연료비상규정에 준하여, 임무 종료 후 배터리 잔량이 최소 20% 이상 남도록 설계 기준을 두었다. 이는 돌발 상황에서 인근 예비 착륙지까지 이동하거나 일정 시간 체공할 수 있는 비상 에너지를 확보하기 위함이다. 둘째, 배터리 수명주기와 열관리를 고려하였다. UAM 운용 특성상 하루 수차례 빈번한 충방전(예: 일 10회 이상 사이클)이 예상되며, 로드맵에서 제시된 2,000회 사이클 수명 요건을 충족해야 한다. 이를 위해 배터리 사용 심도를 제한(예: 80% DOD)하여 수명 열화를 완화하고, 충전율(C-rate)도 가급적 낮춰 급속충전으로 인한 열적 스트레스를 줄이는 운용전략을 반영하였다. 셋째, 다중 모듈 구성 및 관리시스템(BMS)을 통한 안정성 향상을 모색하였다. 배터리를 여러 모듈로 분할하여 안전성을 확보함으로써, 일부 셀 또는 모듈에 문제가 생기더라도

도 잔여 모듈로 안전비행이 가능하도록 설계했다. 아울러 각 모듈의 온도, 전압을 실시간 모니터링하는 고도화된 BMS를 적용하여 열폭주 등의 위험을 조기 감지하고 차단하도록 하였다.

마지막으로, 안전 기준 측면에서 관련 항공 규제와 표준을 준수하도록 배터리 팩을 설계하였다. 예를 들어, FAA의 UAM 안전 권고기준에 따라 충격 및 화재 시험을 통과하는 배터리 내구성, 그리고 방수·방진 및 절연 설계를 적용하였다. 이러한 다각도의 안전 고려 사항을 종합 반영하여, 제시된 배터리 스펙 결정 방법론이 운용 안정성을 확보할 수 있도록 했다.

### III. 결 론

본 논문에서는 K-UAM 초기 운용 시나리오를 기반으로 eVTOL 항공기의 전기추진 배터리 사양 결정 방법론을 제시하였다. 도심 항공 택시 임무 프로파일(약 30 km 왕복 비행, 4인승 기체)을 세분화하여 단계별 에너지 소요를 산출하고, 이를 토대로 필요 배터리 용량과 출력 요구조건을 도출하였다. 주요 결과로, 해당 임무를 안전하게 수행하기 위해 약 35 kWh급의 배터리 팩이 요구되며, 이때 최대출력 500 kW(수직이착륙시)와 순항 출력 ~70 kW 수준을 충족하는 배터리 시스템이 필요함을 확인하였다. 제안된 배터리 사양은 에너지밀도 약 300 Wh/kg 기준으로 약 100여 kg의 중량을 차지하여, 3톤급 기체에 적용 가능함을 보였다. 또한, 예비 용량 20% 확보와 모듈 권장 설계 등을 통해 안전성을 강화한 운용조건을 반영하였다. 본 방법론은 수립된 시나리오에 따라 배터리 요구사항을 정량적으로 평가함으로써, UAM 기체 설계와 운영 계획에 유용한 피드백을 제공할 수 있다. 향후에는 비행거리 연장 시나리오(예: 50~100 km급)나 배터리 기술 발전(에너지밀도 향상, 고속충전 기술 등)을 반영한 추가 연구를 수행함으로써, K-UAM 상용화에 대비한 배터리 설계 지침을 더욱 정교화할 예정이다. 본 연구는 도심항공교통의 핵심 동력원인 배터리의 규모 산정에 대한 체계적 접근을 제시하였으며, 안전하고 효율적인 K-UAM 서비스 실현을 위한 기술 토대를 공고히 하는데 기여하고자 한다.

### IV. 참고문헌

- [1] Uber Elevate. Fast-Forwarding to a Future of On-Demand Urban Air Transportation, 2016.
- [2] NASA Aeronautics Research Mission Directorate. Urban Air Mobility (UAM) Market Study, 2020.
- [3] Supernal. S-A2 Concept Aircraft Overview. [Online] <https://www.supernal.aero>
- [4] Volocopter. VoloCity – Technical Whitepaper, 2023.
- [5] Joby Aviation. Joby S4 Aircraft Technical Summary, 2023.
- [6] Pipistrel. Velis Electro – EASA Certified Electric Aircraft Specification, 2022.
- [7] EASA (European Union Aviation Safety Agency). Special Condition for VTOL

- (SC-VTOL) and Means of Compliance for Battery Systems, 2023.
- [8] FAA. Type Certification of Powered-Lift Aircraft, FAA Policy Draft, 2023.
- [9] Altair Engineering. Thermal Runaway Simulation for eVTOL Battery Systems, Technical Note, 2022.
- [10] Qiao, W., & Li, J. Battery Sizing and Cost Analysis for Urban Air Mobility, MDPI Aerospace, 10(1), 115–128, 2023.
- [11] Park, J. et al., Heat Dissipation Analysis for High-C-Rate Li-ion Batteries in Urban Air Vehicles, Journal of Power Sources, 539, 231548, 2022.
- [12] Leeham News. Comparative Study of Battery Aircraft Energy Density, 2022.
- [13] Revolution.Aero. eVTOL Battery Safety: Certification and Trends, 2023.
- [14] Hyundai Motor Group. Urban Air Mobility Strategy and Vehicle Concepts, 2023.
- [15] rotorcraft.arc.nasa.gov. NASA's Reference eVTOL Missions and Common Reference Models, Accessed 2024.
- [16] mdpi.com. Design Criteria for eVTOL Energy Storage Systems, MDPI Energies, 15(6):2234, 2022.
- [17] ovans.es. Volocopter's Multi-Battery Swap Architecture for Urban Air Mobility, Technical Report, 2023.
- [18] businessaviation.aero. SABERS: Solid-State Battery Advancements for eAviation, NASA, 2023.
- [19] dewesoft.com. Flight Test Data Analysis of Joby S4 and Volocopter VoloCity, 2023.
- [20] platum.kr. K-UAM Demonstration and Roadmap Overview, 국토교통부 보도자료, 2024.