

Original Article

<https://doi.org/10.12985/ksaa.2026.34.3.213>
ISSN 1225-9705(print) ISSN 2466-1791(online)

다중 버티포트 UAM 운항 스케줄 생성 프레임워크

강동성*, 김은지*, 이주환*, 백호종**

A Framework for UAM Flight Schedule Generation in Multi-Vertiport Networks

Dongsung Kang*, Eunji Kim*, Juhwan Lee*, Hojong Baik**

ABSTRACT

This study develops a flight schedule generation framework for UAM operations in a multi-vertiport network, considering TLOF and gate capacity, aircraft continuity, and temporal constraints. The framework first generates an initial schedule by sequentially assigning flights based on their preferred departure times and then performs an additional search for unassigned flights by adjusting departure times and aircraft assignments. In the baseline scenario, the median assignment rate was 75.8%, with a median of 45.5 assigned flights. Compared with the initial sequential assignment, the additional search increased the median assignment rate from 64.2% to 75.8%. Sensitivity analysis showed that the assignment rate varied with the number of flights, the maximum number of available aircraft, gate capacity, and departure time windows. All final schedules generated in the baseline experiments satisfied the predefined resource, temporal, and aircraft continuity constraints.

Key Words : Urban Air Mobility(도심 항공 모빌리티), Vertiport(버티포트), Schedule Generation(스케줄 생성), Resource Constraints(자원 제약), Aircraft Continuity(기체 연속성)

1. 서 론

1.1 연구 배경 및 목적

도심 항공 모빌리티(urban air mobility, UAM)는 전기 수직이착륙기(electric vertical take-off and landing aircraft, eVTOL)를 활용하여 도심 및 광역권의 이동성을 제공하는 차세대 항공교통체계이다. 국내에서도 K-UAM 그랜드챌린지 등을 통해 UAM 상용화를

위한 운항체계와 관련 기술에 대한 실증이 추진되고 있으며, 다양한 운영방식과 절차가 논의되고 있다.

UAM의 운항방식은 이용자의 수요에 대응하여 운항하는 수요응답형(on-demand) 방식과 사전에 수립된 운항계획에 따라 운항하는 스케줄 기반 방식으로 구분할 수 있다. 스케줄 기반 운항에서는 각 운항편의 운항구간, 출발 및 도착시각, 투입 기체 등을 사전에 결정한다. 특히 복수의 버티포트가 연결된 네트워크에서는 이러한 결정이 각 운항편별로 독립적으로 이루어지기 어렵다.

복수의 버티포트가 연결된 UAM 네트워크에서는 동일한 기체가 여러 버티포트 간 운항을 연속적으로 수행하며, 이 과정에서 출발지와 도착지의 touchdown and lift-off area(TLOF)와 게이트 자원을 이용한다. 운항편의 배정 가능 여부는 출·도착지의 자원 가용성

Received: 10. Jun. 2026, Revised: 31. Aug. 2026,

Accepted: 11. Sep. 2026

* 한국항공대학교 항공교통물류학부 박사과정

** 한국항공대학교 항공교통물류학부 교수

연락처 E-mail : hbaik@kau.ac.kr

연락처 주소 : 경기도 고양시 덕양구 항공대학로 76

뿐만 아니라 선행 운항편의 종료시각과 기체 위치에 의해 결정된다. 따라서 운항 스케줄은 개별 버티포트가 아닌 네트워크 전체의 자원 이용과 기체 운항 연속성을 고려하여 구성할 필요가 있다.

기존 UAM 운항 스케줄 관련 연구에서는 버티포트 내 출·도착 순서 결정, 기체 배정 및 운용, 다중 버티포트 네트워크의 기체 스케줄링 등 다양한 문제가 다루어져 왔다. 다만 기존 연구는 개별 버티포트의 자원 스케줄링이나 수요응답형 기체 운용에 초점을 둔 경우가 많다. 반면, 사전에 구성된 운항편을 대상으로 다중 버티포트의 TLOF 및 게이트 자원과 개별 기체의 운항 연속성을 함께 고려한 운항편 배정 연구는 상대적으로 제한적이다.

따라서 본 연구에서는 다중 버티포트 UAM 네트워크를 대상으로 버티포트 자원과 기체 운항 연속성을 고려한 운항 스케줄 생성 절차를 구축하였다. 이를 통해 운항편 배정 결과와 주요 운영 조건에 따른 결과 변화를 분석하고, 생성된 스케줄의 제약조건 충족 여부를 검증하였다.

1.2 연구 범위

본 연구의 공간적 범위는 수도권 UAM 실증노선을 참고하여 구성한 7개의 가상 운영 거점으로 설정하였다. 네트워크는 버티스탑, 버티포트 및 버티허브로 구성하며, 모든 거점 간 운항이 가능한 것으로 설정하였다.

시간적 범위는 4시간으로 설정하였다. 설정된 운항 수요를 바탕으로 개별 운항편을 구성하고, 제약조건을 만족하도록 각 운항편의 출발·도착시각과 투입 기체를 결정하였다.

내용적 범위는 다중 버티포트 네트워크의 운항 스케줄 생성으로 한정하였다. 스케줄 생성 시 거점별 TLOF 및 게이트 용량, 운용 가능한 기체 수, 기체의 위치와 가용시간, 기체의 운항 연속성 및 턴어라운드 시간을 고려하였으며, 이러한 제약조건을 충족하는 운항편만 스케줄에 배정하였다. 실제 운항 중 발생하는 동적 재스케줄링, 배터리 충전, 기상, 공역 및 항로 제약은 연구 범위에서 제외하였다.

II. 기존 문헌 고찰

기존 항공 스케줄링 연구에서는 효율적인 운항계획

수립을 위해 서로 연계된 다양한 계획 문제가 다루어져 왔다. Xu et al.(2024)은 항공사 스케줄링 문제를 운항 스케줄 설계, 기체 배정 및 기체 운항 경로 등의 주요 문제로 구분하고, 이들 문제의 통합적 접근과 관련된 연구를 정리하였다. Khanmirza et al.(2020)은 운항 스케줄 설계와 기체 배정을 통합한 대규모 문제에 휴리스틱 기반 방법을 적용하여 계산 효율성을 분석하였다.

UAM 분야에서는 제한된 버티포트 자원을 고려한 운항 스케줄링 연구가 수행되어왔다. Guerreiro et al.(2020)은 FCFS(first-come, first-served) 방식으로 버티포트의 TLOF와 게이트를 예약하는 스케줄링 알고리즘을 적용하고, 버티포트 구성에 따른 용량과 처리량을 분석하였다. Espejo-Díaz et al.(2023)은 게이트, 지상 이동경로 및 TLOF의 이용 제약을 고려하여 출발 및 도착 항공기의 배정과 순서를 결정하는 최적화 모형과 휴리스틱 방법을 제시하였다. Saxena et al.(2026)은 게이트, 지상 이동 및 TLOF를 포함한 버티포트 운영 과정을 통합적으로 고려한 스케줄링 모형을 제시하고, FCFS 방식과 비교하여 운항 지연과 처리 성능을 분석하였다.

다중 버티포트 UAM 네트워크를 대상으로 한 연구에서는 운항수요와 운영조건을 고려한 기체 운용 및 스케줄링 문제가 다루어져 왔다. Swaid et al.(2023)은 주어진 운항수요를 기체에 배정하고 운항 순서를 구성하여 필요한 기체 규모와 버티포트의 주기 자원 규모를 분석하였다. Paul et al.(2024)은 시간대별 수요와 운항 불확실성, 버티포트 및 기체 제약을 고려한 그래프 학습 기반 기체 스케줄링 방법을 제시하였다. Ko & Ahn(2025)은 배터리 상태, 주기 공간 및 충전 시설, 버티포트 처리용량과 기체 특성을 고려한 수요응답형 UAM 스케줄링 프레임워크를 제시하였다. Kang & Kim(2024)은 허브-앤-스포크 네트워크에서 노선별 운항 간격과 기체 배정을 설정하고, 예약 및 비예약 방식에 따른 스케줄 기반 UAM 서비스의 운영 성능을 비교하였다.

기존 연구를 종합하면, 항공 스케줄링 분야에서는 운항 스케줄 설계, 기체 배정 및 기체 운항 경로 간의 연계가 중요하게 다루어져 왔다. UAM 분야에서는 버티포트 자원을 고려한 운항 스케줄링과 수요 변화에 대응한 기체 운용 및 스케줄 기반 운항에 관한 연구가 수행되어왔다. 그러나 스케줄 기반 다중 버티포트

UAM 네트워크에서 사전에 생성된 운항편을 대상으로 TLOF와 게이트의 자원 가용성, 기체의 위치와 가용시간, 동일 기체의 연속 운항을 함께 고려하여 네트워크 전체의 운항 스케줄을 구성하는 연구는 상대적으로 제한적이다.

이에 본 연구는 이러한 제약을 함께 고려한 다중 버티포트 UAM 운항 스케줄 생성 절차를 구축하고, 운영 조건 변화에 따른 스케줄 생성 특성을 분석하였다.

III. 연구 방법

3.1 운항 스케줄 생성 개요

본 연구에서는 다중 버티포트 UAM 네트워크의 운항편 배정을 위해 순차 배정과 미배정 운항편에 대한 추가 탐색으로 구성된 휴리스틱 기반 운항 스케줄 생성 절차를 제시한다. 전체 과정은 Fig. 1과 같이 입력 조건 설정, 운항수요 생성 및 배분, 초기 스케줄 생성, 미배정 운항편 추가 탐색, 최종 운항 스케줄 생성의 단계로 구성된다.

먼저 네트워크의 거점 구성, TLOF 및 게이트 수, 최대 운용 가능 기체 수, 스케줄 생성 시간 범위, 운항 시간 및 턴어라운드 시간 등 필요한 입력조건을 설정한다. 이후 총 운항수요를 출발지 - 도착지별로 배분하고, 각 운항편에 희망 출발시각을 부여한다.

생성된 운항편은 희망 출발시각이 빠른 순으로 검토한다. 기체의 위치와 가용시간, TLOF 및 게이트의 가용성, 턴어라운드 시간, 희망 출발시각을 기준으로 설정한 출발 가능 시간구간을 만족하는 경우 초기 스케줄에 순차적으로 배정한다. 실행 가능한 배정을 찾지

못한 운항편은 미배정 상태로 유지한다.

초기 스케줄에 미배정 운항편이 존재하면 출발시각과 기체 배정을 조정하여 추가 배정 가능성을 탐색한다. 이후 전체 스케줄에 대해 자원 이용, 운항시간 및 기체 운항 연속성 관련 제약조건 충족 여부를 확인하고 최종 운항 스케줄을 생성한다.

3.2 입력조건 설정

본 연구에서는 총 7개의 거점으로 구성된 가상 UAM 네트워크를 적용한다. 네트워크는 버티스탑 1개소, 버티포트 4개소 및 버티허브 2개소로 구성하며, 각 거점의 유형과 TLOF 및 게이트 수는 Table 1과 같다. 네트워크의 거점 위치와 유형은 Fig. 2에 제시한다. 모든 거점 간에는 양방향 운항이 가능하며, 거점 간 거리는 3 - 43 km 범위로 구성된다.

스케줄 생성에 적용하는 주요 입력값은 Table 2와 같다. 기준 시나리오의 운영시간은 4시간이며, 총 운항편 수는 60편으로 한다. 운항 시작 전 모든 기체는 네트워크 내 거점의 게이트에 주기된 것으로 가정한다.

Table 1. UAM network node configurations

거점	유형	TLOF 수	게이트 수
드론시험인증센터	버티스탑	1	1
여의도	버티포트	1	3
잠실		1	3
킨텍스		1	3
계양신도시		1	3
김포공항	버티허브	2	5
수서		2	5

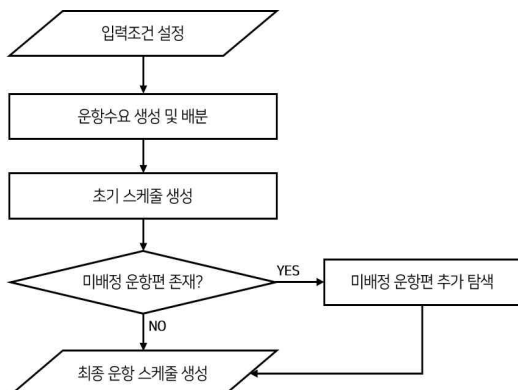


Fig. 1. UAM flight schedule generation process

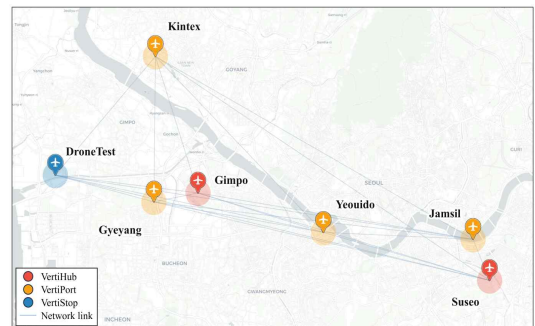


Fig. 2. UAM network configuration

Table 2. Baseline input parameters

파라미터	설정값
총 운항편 수	60편
운영시간	4시간
최대 운용 가능 기체 수	23대
순항속도	100 km/h
턴어라운드 시간(버티스탑)	8분
턴어라운드 시간(버티포트)	10분
턴어라운드 시간(버티허브)	12분

이에 따라 최대 운용 가능 기체 수는 전체 게이트 수와 동일한 23대로 제한한다.

기체 운용과 관련하여 UAM 기체의 순항속도는 100 km/h로 가정하며, 턴어라운드 시간은 버티스탑 8분, 버티포트 10분, 버티허브 12분으로 구분하여 적용한다. 이들 값은 특정 운영환경의 최적값이나 설계기준을 의미하지 않으며, 스케줄 생성 절차를 분석하기 위한 기준값으로 사용한다.

3.3 운항수요 생성 및 배분

본 연구에서는 총 운항수요를 네트워크의 각 출발지 - 도착지에 배분한다. 총 운항편 수를 Q , 출발지 i 에서 도착지 j 로 배분되는 운항편 수를 q_{ij} , 해당 출발지 - 도착지가 전체 운항수요에서 차지하는 비율을 p_{ij} 라 하면, 출발지 - 도착지별 운항편 수는 다음과 같다.

$$q_{ij} = Q \cdot p_{ij} \quad (1)$$

운항수요 비율 p_{ij} 는 각 거점의 TLOF와 게이트 수를 바탕으로 산정한다. 각 거점의 상대적 규모를 나타내는 가중치 w_i 는 해당 거점의 TLOF 수 T_i 와 게이트 수 G_i 의 합으로 설정한다. 구간 거리는 수요 배분에 반영하지 않는다.

$$w_i = T_i + G_i \quad (2)$$

산정된 거점별 가중치를 이용하여 초기 수요행렬을 구성한다. 초기 수요행렬 $T_{ij}^{(0)}$ 는 출발지 i 와 도착지 j 의 가중치 곱에 비례하도록 다음과 같이 설정한다.

$$T_{ij}^{(0)} \propto w_i \cdot w_j, \quad i \neq j \quad (3)$$

다만 식 (3)만으로는 거점별 출발 합과 도착 합이 해당 거점의 상대적 규모와 일치하지 않을 수 있으므로 Fratar 방법을 적용하여 이를 보정한다.

거점 i 의 목표 출발량 O_i 와 거점 j 의 목표 도착량 D_j 는 각 거점의 가중치가 전체 가중치에서 차지하는 비율에 따라 다음과 같이 설정한다.

$$O_i = \frac{w_i}{\sum_{k \in N} w_k} R, \quad \forall i \in N \quad (4)$$

$$D_j = \frac{w_j}{\sum_{k \in N} w_k} R, \quad \forall j \in N \quad (5)$$

여기서 N 은 전체 거점의 집합이며, R 은 Fratar 보정을 위한 기준 총량으로 본 연구에서는 $R = 10,000$ 을 적용한다.

초기 수요행렬에 Fratar 보정을 적용하여 행과 열의 합이 각각 목표 출발량과 목표 도착량에 수렴할 때까지 반복 계산을 수행한다. 이후 보정된 수요행렬은 출발지 - 도착지 간 양방향 수요가 동일하도록 대칭화한다.

보정 및 대칭화가 완료된 수요행렬을 T_{ij}^{ref} 라 할 때, 전체 운항수요에서 출발지 i 와 도착지 j 간 운항수요가 차지하는 비율 p_{ij} 는 다음과 같이 산정한다.

$$p_{ij} = \frac{T_{ij}^{ref}}{\sum_{k \in N} \sum_{l \in N, l \neq k} T_{kl}^{ref}}, \quad i \neq j \quad (6)$$

산정된 p_{ij} 와 식 (1)을 이용하여 총 운항편 수를 각 출발지 - 도착지에 배분한다. 이때 최대잔여법(largest remainder method)을 적용하여 배분된 운항편 수의 합이 설정된 총 운항편 수와 일치하도록 정수화한다. 따라서 총 운항편 수가 달라지더라도 출발지 - 도착지 간 상대적 수요 비율은 동일하게 유지된다.

출발지 - 도착지별 운항편 수가 결정되면 각 운항편의 스케줄 생성을 위한 기준 시각으로 희망 출발시각을 설정한다. 희망 출발시각은 실제 출발시각과 구분되는 기준 시각이며, 본 연구에서는 특정 시간대의 수요 집중을 별도로 가정하지 않고 운영시간 범위 내에서 균등하게 생성한다.

3.4 초기 스케줄 생성

희망 출발시각이 부여된 운항편을 희망 출발시각이 빠른 순으로 정렬한 뒤, 각 운항편에 대해 기체와 출발 시각을 순차적으로 배정하여 초기 스케줄을 생성한다.

각 운항편은 희망 출발시각을 기준으로 일정 범위 내에서 출발시각을 조정할 수 있다. 운항편 r 의 희망 출발시각을 t_r^{pref} , 출발시각 조정범위를 Δt , 운영시간을 H 라 하면, 출발 가능 시간구간의 하한 t_r^L 과 상한 t_r^U 는 다음과 같이 설정한다. 본 연구에서는 $\Delta t = 20$ 분의 조정범위를 적용한다.

$$t_r^L = \max(0, t_r^{pref} - \Delta t) \quad (7)$$

$$t_r^U = \min(H, t_r^{pref} + \Delta t) \quad (8)$$

각 운항편에 대해 먼저 배정 가능한 기체를 탐색한다. 기체는 현재 위치와 가용시각을 기준으로 배정하며, 연속 운항의 경우 선행 운항의 도착지와 후속 운항의 출발지가 일치하고 다음 운항을 위한 턴어라운드 시간이 확보되어야 한다. 초기 스케줄 생성 단계에서는 출발지가 다른 기체를 별도로 재배치하여 배정하지 않는다.

배정 가능한 기체가 존재하면 식 (7)~식 (8)의 출발 가능 시간구간 내에서 출발시각을 탐색한다. 이때 출발지와 도착지의 TLOF 및 게이트를 해당 시각에 이용할 수 있는지를 확인한다. 도착 예정시각에 도착지 자원을 이용할 수 없는 경우에는 도착 후 대기나 공중 대기를 허용하지 않고, 출발 가능 시간구간 내에서 출발시각을 조정한다. 해당 시간구간 내에서 기체 운항 연속성과 자원 이용 조건을 모두 만족하는 시각을 찾지 못하면 운항편을 배정하지 않는다.

위 조건을 모두 만족하면 해당 운항편을 초기 스케줄에 배정하고 다음 운항편으로 진행한다. 실행 가능한 배정을 찾지 못한 운항편은 미배정 상태로 유지하며, 이후 미배정 운항편 추가 탐색 과정에서 다시 배정 가능성을 확인한다.

3.5 미배정 운항편 추가 탐색

초기 스케줄 생성 이후 일부 운항편은 출발 가능 시간구간, 기체의 위치와 가용시각, 운항 연속성, TLOF 및 게이트의 자원 제약으로 인해 미배정 상태로 남을

수 있다. 순차 배정에서는 앞서 배정된 운항편의 결과가 이후 운항편의 배정 가능성에 영향을 미치므로, 초기 단계에서 배정되지 않은 운항편도 출발시각이나 기체 배정을 조정하면 추가로 배정될 수 있다. 이에 초기 스케줄에서 미배정된 운항편을 대상으로 추가 배정 가능성을 탐색한다. 이 과정에서도 각 운항편에 설정된 출발 가능 시간구간은 유지한다.

먼저 각 미배정 운항편에 대해 출발 가능 시간구간 내에서 이용 가능한 기체와 출발시각을 다시 탐색한다. 이때 TLOF 및 게이트 가용성, 기체 운항 연속성, 턴어라운드 시간 등 초기 스케줄 생성과 동일한 제약조건을 적용한다. 출발지에 가용 기체가 없는 경우에는 다른 거점에 위치한 기체의 재배치 가능성도 함께 검토한다.

미배정 운항편을 직접 추가하기 어려운 경우에는 해당 운항편과 관련된 일부 기존 운항편을 함께 재검토한다. 출발 가능 시간구간 내에서 출발시각과 기체 배정을 조정하고, 변경된 스케줄이 앞서 정의한 제약조건을 모두 만족하는지 확인한다.

최종적으로는 배정 가능한 운항편 수가 증가하는 결과를 우선적으로 선택하며, 동일한 배정 수준에서는 지연이 작은 결과를 선택한다. 이후에도 실행 가능한 배정을 찾지 못한 운항편은 미배정 상태로 유지한다.

3.6 최종 스케줄 생성

미배정 운항편에 대한 추가 탐색이 끝나면 생성된 스케줄이 앞서 설정한 제약조건을 모두 만족하는지 최종적으로 확인한다.

자원 이용 측면에서는 동일 시각에 점유되는 게이트 수와 TLOF 수가 해당 거점의 용량을 초과하지 않는지 확인한다. 이때 출발과 도착 운항은 동일한 TLOF 자원을 공유하는 것으로 가정한다. 시간 조건에서는 실제 출발시각이 출발 가능 시간구간 내에 있는지와 출발시각 및 운항시간에 따른 도착시각의 일관성을 확인한다.

기체 운항 연속성 측면에서는 동일 기체에 배정된 연속 운항 간 시간 중복과 위치 연결 여부를 확인한다. 선행 운항의 도착지와 후속 운항의 출발지가 동일한 경우에는 필요한 턴어라운드 시간이 확보되어야 하며, 기체 재배치가 필요한 경우에는 후속 운항 이전까지 해당 구간의 이동시간이 확보되어야 한다.

최종 확인을 통과한 배정을 운항 스케줄로 구성하고, 추가 탐색 이후에도 실행 가능한 배정을 찾지 못한 운항편은 미배정 상태로 구분한다.

IV. 스케줄 생성 결과 분석

4.1 기준 시나리오 결과

기준 시나리오는 4시간의 운영시간, 총 60편의 운항편, 최대 23대의 운용 가능 기체로 설정하였다. 동일한 운영조건에서도 운항편 생성 결과에 따라 희망 출발시각과 출발지 - 도착지 조합이 달라질 수 있으므로 10회의 반복실험을 수행하였다. 반복실험 결과의 대표 수준과 변동 범위를 함께 제시하기 위해 중앙값과 사분위범위(interquartile range, IQR)를 사용하였다.

스케줄 생성 결과, 기준 시나리오의 배정률 중앙값은 75.8%로 나타났으며 IQR은 71.7 - 76.7%였다. 배정 편수의 중앙값은 45.5편(IQR 43 - 46편)이었으며, 실제 운항에 사용된 기체 수의 중앙값은 12대였다. 또한 모든 반복에서 생성된 최종 스케줄은 설정된 제약 조건을 만족하였다. 주요 결과는 Table 3과 같다.

생성된 스케줄의 제약조건 충족 여부를 구체적으로 확인하기 위해 반복실험 결과 중 배정률과 사용 기체 수가 전체 중앙값에 가까운 사례를 대표 사례로 선정하였다. 해당 사례에서는 총 60편 중 46편이 배정되어 배정률은 76.7%였으며, 사용 기체 수는 12대였다.

Fig. 3은 대표 사례에서 거점별 게이트 및 TLOF의 최대 동시 점유와 각 자원의 용량을 비교한 결과를 나타

Table 3. Baseline scenario results

항목	결과
배정 편수	45.5편 (IQR 43 - 46편)
배정률	75.8% (IQR 71.7 - 76.7%)
사용 기체 수	12대

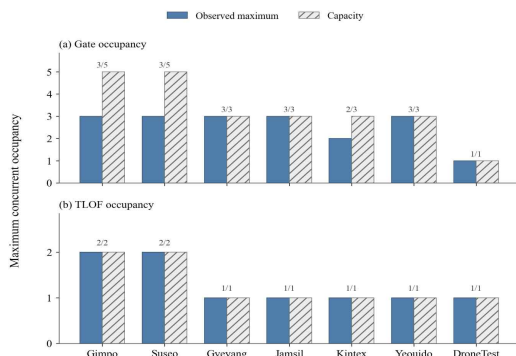


Fig. 3. Constraint validation

낸다. 모든 거점에서 게이트와 TLOF의 최대 동시 점유는 설정된 용량을 초과하지 않았다. 일부 거점에서는 최대 점유가 자원 용량에 도달하였으나 초과 발생하지 않았다. 또한 동일 기체의 연속 운항에서 시간 중복, 위치 연결성 및 턴어라운드 시간 위반은 발생하지 않았다.

4.2 추가 탐색 효과 분석

추가 탐색의 효과를 확인하기 위해 4.1과 동일한 10회 반복실험에서 초기 순차 배정 결과와 추가 탐색 이후의 결과를 비교하였다. 초기 배정의 배정률 중앙값은 64.2%(IQR 58.3 - 72.5%)였으며, 추가 탐색 이후에는 75.8%(IQR 71.7 - 76.7%)로 11.6%p 증가하였다. 배정 편수의 중앙값도 38.5편에서 45.5편으로 증가하였다.

추가 탐색에 따른 배정률 개선과 함께 출발시각 조정의 영향을 확인하기 위해 도착지연을 함께 산정하였다. 도착지연은 희망 출발시각에 해당 구간의 운항시간을 더한 기준 도착시각과 실제 도착시각의 차이로 산정하였다. 스케줄별 평균 도착지연의 중앙값은 초기 배정에서 1.00분, 추가 탐색 이후에는 1.26분이었다. 배정률은 11.6%p 증가하였으며, 평균 도착지연은 0.26분 증가하였다. 이는 추가 탐색을 통해 더 많은 운항편이 배정되는 과정에서 일부 운항편의 출발시각 조정이 수반되었음을 보여준다. 주요 결과는 Table 4와 같다.

Fig. 4는 동일한 10개 반복에서 초기 배정과 추가 탐색 이후의 배정률을 대응하여 나타낸 것이다. 모든 반복에서 추가 탐색 이후의 배정률이 증가하였으며, 배정률 개선이 특정 반복에 국한되지 않음을 확인할 수 있다. 또한 배정률의 IQR은 초기 배정에서 14.2%p, 추가 탐색 이후에는 5.0%p로 감소하여 반복 간 배정률의 변동 폭도 감소하였다.

4.3 주요 입력조건 민감도 분석

기준 시나리오를 바탕으로 운항편 수, 최대 운용 가능 기체 수, 게이트 수 및 출발 가능 시간구간을 변화

Table 4. Effect of additional search

항목	초기 배정	추가 탐색 후
배정 편수	38.5편	45.5편
배정률	64.2% (IQR 58.3 - 72.5%)	75.8% (IQR 71.7 - 76.7%)
평균 도착지연	1.00분	1.26분

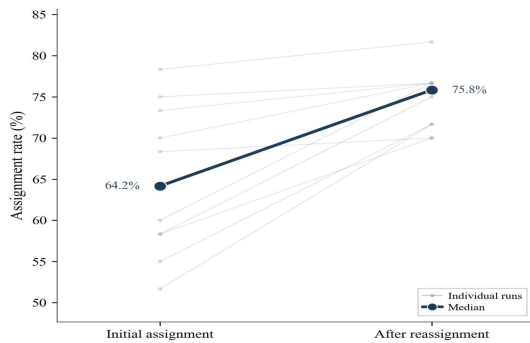


Fig. 4. Effect of additional search on assignment rate

시켜 운항편 배정 결과의 변화를 분석하였다. 각 분석에서는 분석 대상 조건을 제외한 나머지 조건을 기준값으로 고정하였다. 다만 게이트 수 분석에서는 게이트 규모에 따른 영향을 비교하기 위해 최대 운용 가능 기체 수를 모든 조건에서 17대로 동일하게 적용하였다.

4.3.1 운항편 수

총 운항편 수를 10편에서 100편까지 10편 간격으로 변화시킨 결과는 Fig. 5(a)와 같다. 배정률의 중앙값은 10편에서 100%였으며, 20편과 30편에서는 각각

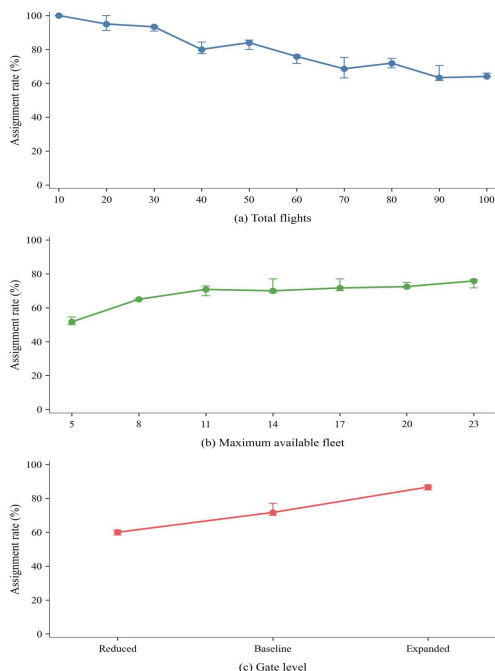


Fig. 5. Sensitivity to input conditions

95.0%와 93.3%로 나타났다. 이후 운항편 수가 증가하면서 배정률은 전반적으로 감소하여 기준조건인 60편에서는 75.8%, 100편에서는 64.0%로 나타났다.

일부 운항편 수에서는 배정률이 일시적으로 증가하였으나, 전체적으로는 운항편 수가 증가할수록 배정률이 낮아지는 경향을 보였다. 이는 동일한 운영시간과 자원조건에서 운항편 수가 증가함에 따라 기체와 버티포트 자원의 이용이 집중되고, 출발 가능 시간구간과 기체 운항 연속성 조건을 동시에 만족하기 어려워진 결과로 볼 수 있다.

4.3.2 최대 운용 가능 기체 수

총 운항편 수를 60편으로 고정하고 최대 운용 가능 기체 수를 5대에서 23대까지 변화시킨 결과는 Fig. 5(b)와 같다. 배정률의 중앙값은 5대에서 51.7%였으며, 8대에서 65.0%, 11대에서 70.8%로 증가하였다. 이후 14대, 17대 및 20대에서는 각각 70.0%, 71.7% 및 72.5%로 나타났으며, 기준조건인 23대에서는 75.8%였다.

기체 수가 적은 구간에서는 최대 운용 가능 기체 수가 증가하면서 배정률이 비교적 크게 향상되었으나, 일정 수준 이후에는 증가 폭이 완만해졌다. 이는 최대 운용 가능 기체 수가 증가하더라도 일정 수준 이후에는 버티포트 자원과 기체 운항 연속성 등 다른 제약으로 인해 추가적인 배정률 개선이 제한되기 때문으로 해석할 수 있다.

4.3.3 게이트 수

게이트 수에 따른 배정 결과를 확인하기 위해 TLOF 수는 기준조건으로 고정하고, 거점별 게이트 수를 세 수준으로 설정하였다. 기준 게이트 수준은 버티스탑, 버티포트 및 버티허브에 각각 1개, 3개 및 5개를 적용하였으며, 감소 조건은 각각 1개, 2개 및 4개, 확대 조건은 2개, 4개 및 6개로 설정하였다. 이에 따른 네트워크 전체 게이트 수는 각각 17개, 23개 및 30개이다. 게이트 수의 영향을 동일한 기체 조건에서 비교하기 위해 최대 운용 가능 기체 수는 모든 조건에서 17대로 고정하였다. 분석 결과는 Fig. 5(c)와 같다.

배정률의 중앙값은 게이트 감소 조건에서 60.0%, 기준 게이트 수준에서 71.7%, 확대 조건에서 86.7%로 나타났다. 게이트 수가 증가할수록 배정률도 높아졌으

며, 본 실험조건에서는 게이트 가용성이 운항편 배정에 큰 영향을 미치는 것으로 나타났다. 이는 게이트 수가 부족할 경우 도착 기체의 주기 공간이 제한되고, 그에 따라 후속 운항 연결이 어려워진 결과로 볼 수 있다.

4.3.4 출발 가능 시간구간

출발 가능 시간구간을 희망 출발시각 기준 ± 10 분, ± 20 분 및 ± 30 분으로 변화시킨 결과는 Fig. 6과 같다. 배정률의 증감률은 각각 65.0%, 75.8% 및 76.7%로 증가하였으며, 스케줄별 평균 도착지연의 증감률은 각각 0.60분, 1.26분 및 1.47분으로 증가하였다.

출발 가능 시간구간이 확대될수록 출발시각을 조정할 수 있는 범위가 넓어져 추가 운항편의 배정 가능성이 높아졌다. 다만 ± 20 분에서 ± 30 분으로 확대했을 때 배정률은 0.9%p 증가하는 데 그친 반면 평균 도착지연은 증가하였다. 이에 따라 본 실험조건에서는 출발 가능 시간구간을 ± 20 분 이상으로 확대하더라도 추가적인 배정률 개선 폭은 제한적인 것으로 나타났다.

V. 결 론

본 연구에서는 다중 버티포트 UAM 네트워크를 대상으로 버티포트 자원과 기체 운항 연속성을 함께 고려한 운항 스케줄 생성 절차를 구축하고, 기준 시나리오와 주요 입력조건 변화에 따른 배정 결과를 분석하였다.

기준 시나리오에서 최종 배정률의 증감률은 75.8%였으며, 생성된 스케줄은 TLOF와 게이트 용량, 시간조건 및 기체 운항 연속성 등 설정된 제약조건을 모두 만족하였다. 초기 순차 배정 이후 미배정 운항편을 대상

으로 추가 탐색을 수행한 결과, 배정률 증감률은 64.2%에서 75.8%로 11.6%p 증가하였다.

민감도 분석에서는 운항편 수가 증가할수록 배정률이 전반적으로 감소하였다. 최대 운용 가능 기체 수가 증가하면 배정률은 향상되었으나, 일정 수준 이후에는 증가 폭이 완만해졌다. 게이트 수가 증가할수록 배정률은 높아졌으며, 출발 가능 시간구간을 확대하면 배정률과 평균 도착지연이 함께 증가하였다.

본 연구는 다중 버티포트 네트워크에서 자원 제약과 동일 기체의 연속 운항을 함께 고려한 운항 스케줄 생성 절차를 제시하고, 주요 운영조건에 따른 스케줄 생성 특성을 확인하였다는 데 의의가 있다. 다만 가상의 네트워크와 설정된 운항조건을 적용하였으며, 기상, 공역 및 항로 제약, 배터리 충전과 같은 실제 운영요소는 고려하지 않았다. 향후 연구에서는 이러한 요소를 반영하여 보다 현실적인 운영환경에서 스케줄 생성 절차의 적용성을 검토할 필요가 있다.

감사의 글

본 연구는 국토교통부/국토교통과학기술진흥원의 지원으로 수행됨 (과제번호 RS-2024-00422995).

References

1. Xu, Y., Wandelt, S., and Sun, X., "Airline scheduling optimization: Literature review and a discussion of modelling methodologies", *Intelligent Transportation Infrastructure*, 3, 2024, Article liad026.
2. Khanmirza, E., Nazarahari, M., and Haghbeigi, M., "A heuristic approach for optimal integrated airline schedule design and fleet assignment with demand recapture", *Applied Soft Computing*, 96, 2020, Article 106681.
3. Guerreiro, N. M., Hagen, G. E., Maddalon, J. M., and Butler, R. W., "Capacity and throughput of urban air mobility vertiports with a first-come, first-served vertiport scheduling algorithm", *AIAA Aviation 2020 Forum*, 2020, AIAA Paper 2020-2903.

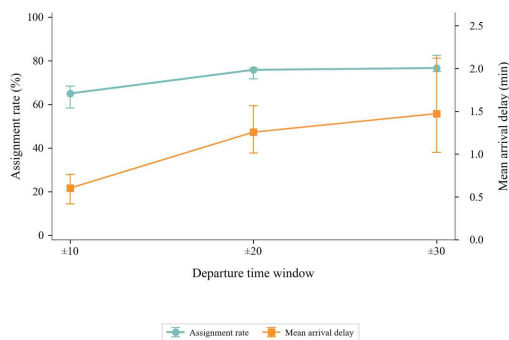


Fig. 6. Sensitivity to departure time window

4. Espejo-Díaz, J. A., Alfonso-Lizarazo, E., and Montoya-Torres, J. R., "A heuristic approach for scheduling advanced air mobility aircraft at vertiports", *Applied Mathematical Modelling*, 123, 2023, pp.871-890.
5. Saxena, R. R., Kuri, J., Prabhakar, T. V., and Yadav, M., "Vertiport terminal scheduling and throughput analysis for multiple surface directions", *The Aeronautical Journal*, 130 (1350), 2026, pp.2434-2460.
6. Swaid, M., Pertz, J., Niklaß, M., and Linke, F., "Optimized capacity allocation in a UAM vertiport network utilizing efficient ride matching", *AIAA AVIATION 2023 Forum*, 2023, AIAA Paper 2023-3577.
7. Paul, S., Witter, J., and Chowdhury, S., "Graph learning-based fleet scheduling for urban air mobility under operational constraints, varying demand & uncertainties", *Proceedings of the 39th ACM/SIGAPP Symposium on Applied Computing*, 2024, pp. 638-645.
8. Ko, J., and Ahn, J., "On-demand urban air mobility scheduling with operational considerations", *Journal of Aerospace Information Systems*, 22(5), 2025, pp.401-411.
9. Kang, J., and Kim, S. H., "Reserved or not? - scheduled urban air mobility services in a hub-and-spoke network", *AIAA AVIATION FORUM AND ASCEND 2024*, 2024, AIAA Paper 2024-4078.