

## Original Article

<https://doi.org/10.12985/ksaa.2023.31.2.055>  
ISSN 1225-9705(print) ISSN 2466-1791(online)

## 최적화 기법을 활용한 UAM 버티포트 수용량 산정방법 연구

이승준\*, 백호종\*\*, 박장훈\*\*\*

## A Study on the UAM Vertiport Capacity Calculation Method Using Optimization Technique

Seungjun Lee\*, Hojong Baik\*\*, Janghoon Park\*\*\*

### ABSTRACT

Due to extreme urbanization, ground transportation in the city center is saturated, and problems such as the lack of expansion infrastructure and traffic congestion increase social costs. To solve this problem, a 3D mobility platform, Urban Air Mobility (UAM), has emerged as a new alternative. A vertiport is a physical space that conducts a similar role to an airport terminal. Vertiport consists of take-off and landing facilities (TLOF, Touchdown and Lift-Off area), space for boarding and disembarking from UAM aircraft (gates), taxiways, and passenger terminals. The type of vertiport (structure, number of facilities) and concept of operations are key variables that determine the number of UAM aircraft that can be accommodated per hour. In this study, a capacity calculation method was presented using an optimization technique (Deterministic Integer Linear Programming). The absolute capacity of the vertiport was calculated using an optimization technique, and a sensitivity analysis was also performed.

**Key Words** : Vertiport Capacity(버티포트 수용량), Optimization(최적화), Deterministic Integer Programming(결정론적 정수계획법), Absolute Capacity(절대 용량), Vertiport Design(버티포트 설계)

## 1. 서 론

### 1.1 연구 배경 및 목적

2018년 UN(United Nations) 보고서에 따르면, 2050년 기준 전 세계 인구가 약 90억 명으로 증가할 것으로 예상하며, 전 세계 인구의 67%인 약 65억 명이 도시에 거주할 것으로 예상하고 있다. 극심한 도시

화로 인한 도심 내 육상교통이 포화는, 결과적으로 인프라 부족과 교통혼잡에 따른 교통수단의 신뢰성 저하, 교통수단 이용자의 스트레스 증가 등 여러 사회적 문제를 계속해서 초래하고 있다.

그러나 도심 내 육로 신설, 인프라 확장과 같은 기존의 해결방식에는 시간적 공간적 한계가 존재한다. 이러한 배경에서 근래 등장한 3차원 모빌리티 플랫폼인 도심항공교통(UAM, Urban Air Mobility)은 기존의 해결방식이 가진 한계점을 일부 극복할 수 있는 대안으로 주목받고 있다. 도심항공교통(UAM)이라 함은 수직이착륙항공기(VTOL Aircraft, Vertical Take-Off and Landing Aircraft)와 같은 수단을 이용하여 도심 내에서 사람이나 화물을 운송하기 위한 교통체계를 통칭한다. UAM 서비스를 제공하기 위한 물리적 요소로

Received: 26. Apr. 2023, Revised: 08. May. 2023,  
Accepted: 19. Jun. 2023

\* 한서대학교 항공교통물류학과 조교수

\*\* 한국항공대학교 항공교통물류학부 교수

\*\*\* 한국항공대학교 연구교수

연락처자 E-mail : ajgaqwsuvnh@gmail.com

연락처자 주소 : 경기도 고양시 덕양구 항공대학로 76

는 UAM 항공기(electric VTOL Aircraft 등), 버티포트(Vertiport), 항공로(이동 경로) 등이 있다. 이 중 버티포트는 공항의 터미널과 유사한 역할을 하는 물리적 공간으로 UAM 항공기가 이륙 및 착륙할 수 있는 시설(TLOF, Touchdown and Lift-Off)과 승객의 탑승 및 하기, UAM 항공기 정비(안전점검, 배터리 충전 또는 교체 등)를 위한 주기장(Gate), 이착륙시설(TLOF)과 주기장을 연결하는 유도로(Taxiway), 승객 대기 장소(터미널) 등으로 구성된다. 버티포트의 형태(구조 또는 시설의 수)와 운영방식은 시간당 수용 가능한 UAM 기체의 수를 결정하는 핵심 변수로서, 버티포트 수용량 산정과 그 결과는 버티포트 운영과 관련하여 반드시 고려되어야 하는 요소 중 하나이다.

버티포트의 효율적인 운영을 위해서는 수용량이 면밀히 고려되어야 한다. 예상된 수요를 처리할 수 없을 정도의 소규모 버티포트를 설계하는 경우 과도한 지연 발생으로 혼잡이 발생하게 되며, 이는 버티포트 운영 서비스 수준에 악영향을 미치게 된다. 반면, 예상된 수요보다 과도하게 버티포트가 설계된다면 혼잡이 발생하지는 않으나, 버티포트 구축 초기에 과도한 예산이 투입되고, 운영 중 미사용 시설이 증가하여 불필요한 낭비를 초래할 수도 있다.

따라서, 앞으로 도입하게 될 버티포트의 수용량을 산정하고 적정 규모를 제시하기 위한 방법론을 본 연구에서 제안하고자 한다. 수용량 산정방법은 최적화 기법을 적용한 수리적 모형을 활용하였고, 가상의 버티포트를 설정하여 사례분석을 수행하였다.

## 1.2 연구의 범위

UAM 분야는 미래 교통의 하나로 연구가 진행 중인 만큼, 아직 시장이 활성화되지 않은 분야로 관련 자료의 수집이 제한적이다. 특히, 버티포트 건설은 UAM 항공기 기체 개발과 함께 여러 방향으로 논의 중이므로, 자료수집 가능 여부를 고려하여 연구의 공간적, 시간적, 내용적 범위를 다음과 같이 정의하였다.

### 1.2.1 공간적 범위

최적화 기법을 활용한 UAM 버티포트 수용량 산정을 위한 공간적 범위로 2개의 가상 버티포트를 설정하였으며, 각 형태는 Fig. 1과 같이 설계하였다.

Fig. 1의 왼쪽은 1개의 이착륙시설(TLOF)과 2개의 터미널로 구성된 1TLOF 2Gates 형태의 버티포트이며, 오른쪽은 1TLOF 2Gates의 형태에 TLOF 시설 1개가

추가된 2TLOFs 2Gates로 구성된 버티포트를 나타낸다. Fig. 1 왼쪽의 그림은 하나의 TLOF에서 출발과 도착이 함께 이루어지는 반면, 우측 그림에서는 게이트 왼쪽에 위치한 TLOF 1을 도착 전용으로, 게이트 오른쪽에 위치한 TLOF 2는 출발 전용으로 설정함으로써 버티포트 내에서 물리적으로 출·도착이 분리되어 운영되는 경우도 고려하였다.

또한, 버티포트의 이·착륙 구역인 TLOF에 대한 구체적인 제원을 결정하기 위하여, FAA(2022)에서 발간한 Vertiport Design 지침에서 정의하는 UAM Controlling Dimension(D)을 참고하였다.

Fig. 2에서 보이는 바와 같이, UAM Controlling Dimension(D)은 UAM 항공기를 감싸는 가장 작은 원의 직경 중 가장 긴 것을 의미하며, TLOF(Touchdown and Lift-Off area), FATO(Final Approach and Take-Off area), 및 안전 구역(Safety Area)의 크기를 결정하기 위해 사용되었다.

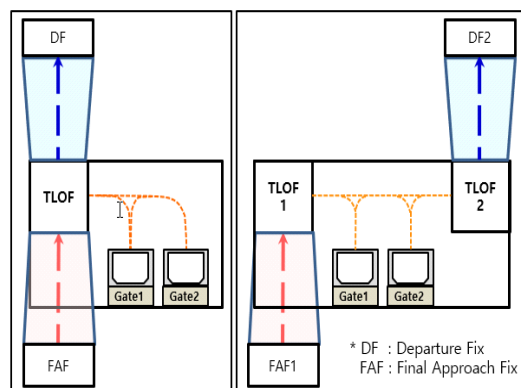


Fig. 1. Vertiport layout

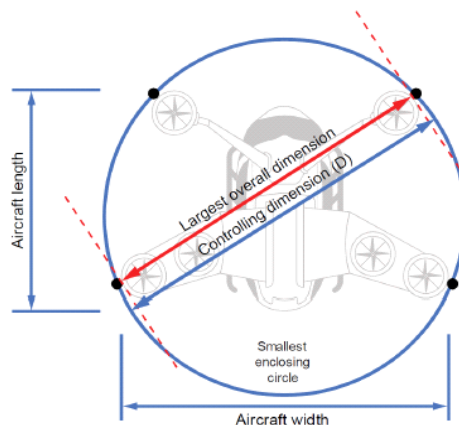


Fig. 2. Controlling dimension

그 외 유도로, 계류장 등의 시설에 관한 내용은 FAA Vertiport Design(2022)에 명시되어 있지 않아, FAA AC150/5390 Heliport Design(2012) 지침에서 정의하는 준용하여 가상의 버티포트를 설계하였다.

### 1.2.2 시간적 범위

보통 공항 및 공역의 수용량 산정 시 고려되는 시간적 범위는 교통량이 많고 혼잡이 예상되는 시간대로서, 가장 대표적인 시간적 범위로는 단위 시간당 교통량이 가장 많은 시간대인 첨두시간(Peak-hour)이 있다. 많은 UAM 수용량 연구에서도 교통량이 많고 혼잡이 발생하는 시간대를 수용량 산정의 대상 시간 범위로 가정하기 때문에, 본 연구의 시간적 범위도 공항 및 공역의 수용량 산정처럼 가상의 첨두시간을 고려하여 운항 수요가 단위시간 동안 끊임 없이 발생하는 것으로 가정하였다.

### 1.2.3 내용적 범위

본 연구의 내용적 범위로는 UAM 항공기가 이·착륙, 접근/출발, 지상 이동, 승객의 탑승·하기 등 운항 전·후 버티포트에 머무르는 수용량 산정을 최적화 기법을 활용하는 것이다.

## 1.3 연구의 구성

본 연구의 전체적인 구성은 다음과 같다. 버티포트 수용량 산정을 위한 문헌연구를 2장에서 수행하였고, 3장에서는 연구방법을 제시하였다. 4장에서는 제시한 연구 방법론을 적용하여, Fig. 1의 1TLOF 2Gates, 2TLOFs 2Gates 형태의 버티포트 수용량을 산정하였으며, 5장에서 결론 및 추후연구를 제시하였다.

## II. 선행연구 고찰

본 장에서는 최적화 기법을 활용하여 버티포트 수용량을 산정하기 위해 필요한 관련 지점, 정의 등을 조사하였다. 도심항공교통의 버티포트는 일반 항공에서 공항 역할을 하는 물리적 공간이다. 따라서 공항에 적용되는 수용량의 기본정의를 분석하여 버티포트 수용량 정의로서 준용하였다. 아울러, 공항 및 버티포트를 대상으로 산정식에 의한 수용량 산정관련 선행연구도 함께 분석하였다.

## 2.1 공항 수용량의 정의

우리나라에서는, 공항을 구성하는 시설(즉, 활주로, 유도로, 주기장, 여객 터미널 등)의 개별 수용량을 산정하고, 그 가운데 가장 작은 수용량을 공항 전체의 수용량으로 결정하고 있다.

미 Congress(1984)는 공항 수용량을 운항수요와 지연의 함수로 정의하고, 처리량(Throughput)과 실용용량(Practical Capacity)으로 구분하여 산정하고 있다.

Fig. 3은 운항수요(X축)와 지연(Y축)의 관계를 나타내는 그래프로, 해당 그래프에서 처리량(Throughput)은 지연을 고려하지 않고 단위시간 동안 공항이 수용할 수 있는 최대 항공기 수로 정의되며, 실용용량(Practical Capacity)은 적정수준의 지연을 고려하여 공항이 수용할 수 있는 단위 시간당 항공기 수로 정의된다.

Hockey and Kanafani(1974)는 공항 수용량을 절대용량(Ultimate Capacity)과 실용용량(Practical Capacity)으로 구분하였는데, 절대용량은 지속적인 운항수요가 존재할 때 공항이 처리할 수 있는 최대 항공기 대수로 정의하고 있으며, 실용용량은 평균적으로 동일한 지연을 모든 항공기에 적용했을 때 공항이 처리할 수 있는 항공기 대수로 정의하고 있다.

De Neufville and Odoni(2003)는 공항 수용량을 보다 세분화하여, (1) Maximum Throughput Capacity: 1시간 동안 ATM 규칙을 위반하지 않고 운항이 가능한 최대 항공기 대수, (2) Practical Hourly Capacity: 항공기 당 4분의 지연을 가정했을 때 1시간 동안 운항이 가능한 항공기 대수, (3) Sustained Capacity: 관제사의 업무량을 고려했을 때 합리적으로 운항을 유지할 수 있는 항공기 대수, (4) Declared

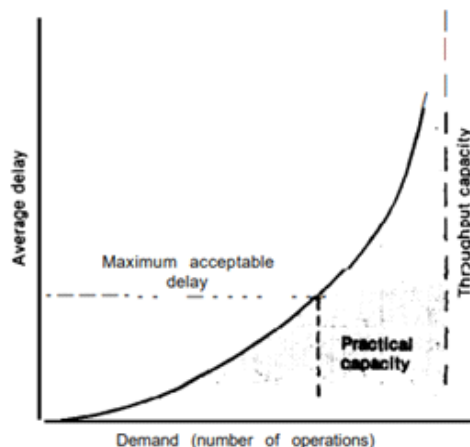


Fig. 3. Capacity graph

Capacity: Level of Service를 유지하면서 1시간 동안 운항이 가능한 항공기 대수로 정의한 바 있다.

이효주와 김도현(2020)은 공항 수용량을 크게 절대용량(Absolute Capacity)과 실용용량(Practical Capacity)으로 구분하였고, 절대용량은 동시 최대 수용량을 의미하며, 공항 운영 환경에서 산술적으로 도출할 수 있는 최대 수용량으로 정의하였다.

기존 연구에서 밝히는 공항 수용량의 정의를 요약해보면, 공항 수용량은, 1) 단위 시간당 처리 가능한 항공기 대수로 지연을 고려하지 않고 단위 시간당 처리할 수 있는 최대 항공기 대수인 절대용량, 2) 지연, 관제사 업무량 등을 고려하여 공항이 처리할 수 있는 단위 시간당 항공기 대수인 실용용량으로 구분할 수 있다. 본 연구에서는 가상의 버티포트에 대하여 가상의 UAM을 가정함에 따라, 지연이 고려되지 않은 절대용량을 산출하고자 하였다.

## 2.2 수리적 모형을 이용한 수용량 산정 동향

Glibo(1993)는 공항의 항공교통 출도착 항공기에 대한 관리를 위해 최적화 방식을 적용한 수리적 모형을 활용하여 단위 시간(15분)당 적정 수용량을 Fig. 4와 같이 제시하였다. Fig. 4에서 X축은 도착 항공기 대수를, Y축은 출발 항공기 대수를 의미하며, 두 항공기 대수의 조합에 의해 수용량 그래프(Envelope<sup>1)</sup>)를 산출할 수 있다.

Ashford et al.(2011)은 항공기 운영의 최대 지속 가능한 처리량 산출을 위해 대기열 모형(Queueing models), 해석적 접근법>Analytical approach)으로 구분하여 제시하였다. FAA(2010)는 해석적 방법>Analytical Method)을 이용하여 활주로, 유도로 및 계류장을 고

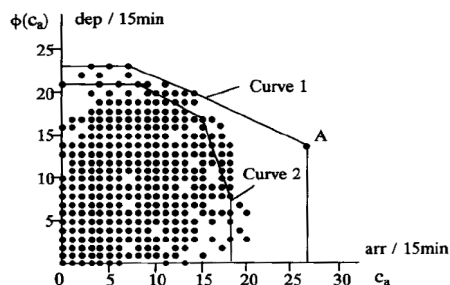


Fig. 4. Capacity curve example

려한 Archerfield 공항 마스터플랜의 수용량을 제시하였다. Tien et al.(2015)은 미국 내 35개 주요 공항의 수용량을 산정하였고, 관측치와 실측치를 비교하기 위해 Bias, MAE(Mean Absolute Error)를 확인한 바 있다.

Vascik and Hansman(2019)은 버티포트 수용량 산정을 위해 수리적 모형인 Integer Programming(정수 계획법)을 제시하였다. 버티포트와 유사한 헬리포트 운영에 대한 선행연구 조사를 통해 버티포트 운영개념을 정의하였으며, 버티포트 시설(TLOF, Gate) 변화, 운영 시간(출도착 시간, 지상조업 시간) 조정, 운영방식(시설간 독립운영 등)에 따른 수용량 산정 분석을 수행하였다.

## III. 연구방법

전통적으로 공항 수용량을 산정하는 방법은, 수리적 모형에 의한 방법과 시뮬레이션에 의한 방법으로 구분할 수 있다. 수리적 모형에 의한 방법은 산식을 활용하여 현상을 표현하고 수용량을 산정하는 방법이다. 수식을 모형화하기 위한 고려요소로는 물리적 요소<sup>2)</sup>, UAM 항공기 성능요소<sup>3)</sup>, 운영적 요소<sup>4)</sup> 등이 있다. 수리적 모형은 분석하려는 현상을 수식화하여 표현하므로 모형의 구조에 대한 이해가 상대적으로 쉬우며, 수리적으로 정확한 계산이 가능하다는 장점이 존재한다. 하지만, 분석 대상의 규모가 커지고, 복잡해짐에 따라 다양한 상황을 현실적으로 수식화하는 데 제한이 있다는 단점이 있다. 반면, 시뮬레이션에 의한 방법은 개별 항공기의 운항성능 등을 구체적으로 구현함으로써, 현실에 가까운 현상을 분석할 수 있다는 장점이 있지만, 모형의 구축, 분석, 검증, 결과 도출에 많은 시간과 비용, 전문적 지식이 요구된다는 단점이 있어, 일반적으로 연구의 목적과 환경을 고려하여 두 가지 방법 중 하나를 활용하게 된다.

본 장에서는 제2장 선행연구 고찰을 토대로 버티포트 수용량 산정을 위해 버티포트 운영 절차와 수리적 모형을 정의하였다.

### 3.1 버티포트 운영절차

UAM 항공기가 버티포트 이용하는 과정, 즉 운영절차는 일반 항공기 또는 헬리콥터가 공항에서 운영되는 과정과 유사하다. 한 대의 UAM 항공기가 도착부터 시

1) 수용량 그래프를 표현할 때 범위(Boundary)의 개념으로 정의가 되므로 영문표기 시 Envelope으로 표기.

2) 물리적 요소의 예: TLOF Pad, 게이트, 유도로, 출·도착 절차 등의 버티포트 디자인 등.

3) UAM 항공기 성능요소의 예: UAM 항공기 속도, UAM 항공기 사이즈 등.

4) UAM 항공기 운영요소의 예: 승객 탑승 및 하기 시간, 정비/안전점검 시간, 지상 이동시간 등.

작해서 게이트에 들렀다 다시 출발까지 이어지는 과정을 간단하게 소개하면 다음과 같다. 도착하는 UAM 항공기는 최종접근지점인 FAF(Final Approach Fix)를 통과하여 버티포트의 이·착륙시설인 TLOF에 착륙한다. TLOF에 착륙한 UAM 항공기는 유도로를 따라 게이트로 이동하여 승객의 하기와 탑승 및 지상조업을 병행한다. 출발 준비가 완료된 UAM 항공기는 게이트에서 TLOF까지 이동후, TLOF에 진입하여 출발 준비가 완료된 UAM 항공기는 출발 절차를 따라 이륙한다. 이상의 절차는 Fig. 5와 같다.

버티포트의 주요 시설인 TLOF와 게이트에서는 반드시 한 대의 UAM 항공기만 점유 또는 이용 가능하며, 만일 다른 UAM 항공기가 이용(점유) 중인 경우에는 사전 정의된 장소에서 차례가 될 때까지 대기하여야 한다. 이때, UAM 항공기 간 분리는 운영 당국에서 정의하는 기준에 따라 최소한의 안전기준을 준수한 상태에서 시간 또는 거리적으로 분리되어야 한다.

### 3.2 수리적 모형소개

#### 3.2.1 모형 흐름도

Vascik and Hansman(2019)은 지리적/운영적인 요소 차이에 따른 수용량 변화를 분석하기 위해 정수계획법(IP, Integer Programming)을 활용한 최적화 기법을 개발하였으며, 본 연구에서는 해당 최적화 기법을

확장하여 앞서 가정한 버티포트 운영절차(Fig. 5 참조)에 적용해보았다.

Fig. 6은 최적화 기법의 설명을 돕기 위해서, 예시로 삼은 1TLOF 1Gate 버티포트의 형태이다. 그리고 Fig. 6의 1TLOF 1Gate 버티포트에 대한 운영절차를 수리적 모형으로 설명하기 위한 네트워크 플로우를 정의하면 Fig. 7과 같이 나타낼 수 있다.

Fig. 7의 네트워크 플로우는 노드(Node)와 링크(Link)로 구성되어 있다. 노드는 원으로 표시되어 버티포트 내 주요 지점(TLOF, 게이트, 유도로 픽스, 최종 접근 픽스, 출발 픽스)을 정의하고 있으며, 링크는 노드 간 이동 경로로 노드와 노드를 연결해주는 단일 방향의 선으로 표현된다. 비록 TLOF와 게이트는 물리적으로는 1개씩일 지라도 네트워크 플로우에서는 출발과 도착 운영을 모두 표현하기 위해 2개의 노드로 구분하여 표현하였다.

도착부터 출발에 이르는 전체 흐름을 요약하면 (1) 도착 UAM 항공기가 최종접근픽스(FAF)에 생성이 되어 TLOF로 착륙을 위해 접근을 시작하고, 접근에 앞서 TLOF가 다른 UAM 항공기에 의해 점유 중인 경우(선행 도착 항공기가 도착 절차를 수행 중이거나, 출발 항공기가 이륙 절차를 수행 중)에는 FAF에서 TLOF로 접근하지 않고 대기(Hold)를 한다. (2) TLOF로 착륙한 UAM 항공기는 유도로를 따라 게이트로 이동한다. (3) 게이트에 접현을 완료한 UAM 항공기는 지상조업

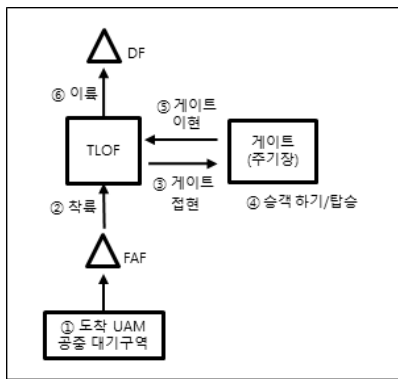


Fig. 5. Vertiport operation process

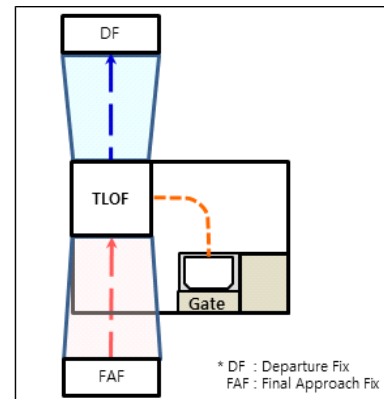


Fig. 6. 1TLOF 1Gate layout

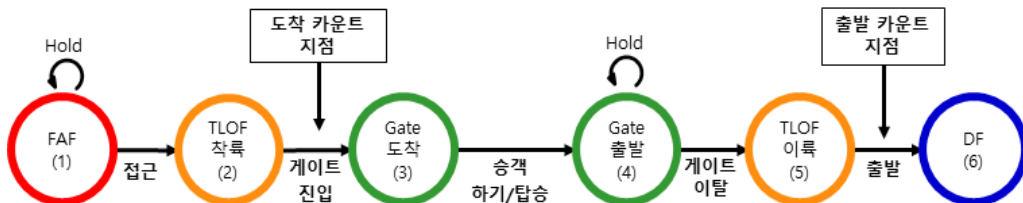


Fig. 7. Network flow

서비스(출·도착 승객 하기 및 탑승, 배터리 교체 또는 충전, UAM 항공기 기체 안전점검 등)를 수행한다. (4) 게이트에서 출발 준비가 완료된 UAM 항공기는 TLOF 및 유도로 가용 여부를 확인하여 TLOF로 지상 이동을 하거나 적절한 지점에서 대기한다. (5) TLOF에서 이륙 준비가 완료된 UAM 항공기는 정의된 절차에 따라 이륙을 하여, (6) 출발 픽스(DP, Departure Fix)에 도달함으로써 일련의 과정이 종료된다.

네트워크 플로우 상에서 UAM 항공기는 대기(Hold)가 가능한 노드를 제외하고는 절대 한곳의 노드에서 머무를 수 없으며, 노드에 연결된 링크를 통해 다음 노드로 이동하여야만 한다.

버티포트 수용량을 산정하는 지점으로서, 도착의 경우 UAM 항공기가 FAF에서 TLOF로 접근하여 TLOF에 착륙한 시각에 카운트되고 Fig. 7의 네트워크 플로우에서 (2)번 노드에 UAM 항공기가 도착할 때를 의미한다. 출발의 경우 (5)번 노드에 UAM 항공기가 위치하여 이륙준비를 완료한 시각에 출발 수용량이 산정된다.

### 3.2.2 최적화를 위한 수리적 모형

수리적 모형에 사용되는 파라미터와 변수는 노드와 이동시간을 포함한, 경로의 구성, 결정변수 등으로 Table 1과 같다.

최적화 대상이 되는 문제의 크기는 사전 정의된 네트워크의 링크 수와 분석시간의 곱으로 정의될 수 있다. 예를 들어 링크의 수가 6개이고, 시간적 분석범위를 900초(15분)로 정의한 경우 해당 문제에서는 5,400개의 결과를 계산해야 한다.

버티포트 수용량 산정을 위해 설계된 수리적 모형은 Deterministic Integer Program Optimization 기반 모형으로, 목적함수 1개와 제약 조건식 6개로 구성되어 있으며, UAM 항공기의 출발 및 도착 수를 최대화하는 목적함수는 수식 (1)과 같다.

$$\max \left( \sum_{t \in T} \sum_{i_{arr} \in I_{arr}} \sum_{j \in FS(i_{arr})} C^a x_{ij}(t) + \sum_{t \in T} \sum_{i_{dep} \in I_{dep}} \sum_{j \in FS(i_{dep})} C^d x_{ij}(t) \right) \quad (1)$$

\* 여기서,

$t$  = 시각,  $T$  = 전체 시각 집합

$i_{arr}$  = 도착 TLOF 노드,  $I_{arr}$  = 도착 TLOF 노드 집합

$i_{dep}$  = 출발 TLOF 노드,  $I_{dep}$  = 출발 TLOF 노드 집합

$FS$  : Forward Star,  $C^a$  : 도착 계수,  $C^d$  : 출발 계수

Table 1. Parameter and variable

구분	정의
T	시간 정보 $T = \{1, 2, 3, \dots, t\}$ (단위 시간)
N	(노드 정보) - TLOF: $i_{arr}$ (arrival), $i_{dep}$ (departure) - Fix: F(FAF), D(DF), A, B(유도로 노드) - Gate: $G1_{in}$ , $G1_{out}$ , $G2_{in}$ , $G2_{out}$
L	경로 정보 (노드 간 경로)
$C_i(t)$	$t$ 시각에 대한 노드 $i$ 의 수용량
$t_{ij}$	경로( $i, j$ ) 이동 시각
$C^d$	출발 계수 (목적함수에서 출발 수용량을 조정)
$C^a$	도착 계수 (목적함수에서 도착 수용량을 조정)
변수	$X_{ij}(t)$ (결정변수) $t$ 시각에 경로( $i, j$ )를 통과하는 UAM 항공기 대수

수식 (1)에서 첫 번째 부분은 단위시간( $T$ ) 동안 도착 항공기가 TLOF에 착륙하는 횟수를 모두 합한 값이고, 두 번째 부분은 출발 항공기가 TLOF에서 이륙한 횟수를 모두 합한 값을 의미한다.  $FS$ 는 Forward Star의 약어로 TLOF( $i_{dep}$ ) 노드에서 출발하는 링크의 집합을 의미한다. 각 부분의 계수인  $C^a$ ,  $C^d$ 는 도착 및 출발 UAM 항공기 중에서 한쪽으로 비중을 주기 위한 계수이다. 예를 들어  $C^a$ 가 +5이고,  $C^d$ 가 -1로 정의된 경우 도착 항공기 대수에 가중치가 적용되어 도착 비율이 높은 결과가 산출된다.

버티포트 운영에 있어서 안전상의 목적 등과 관련해서 반드시 지켜져야 할 규칙은 다음의 6개 제약 조건식으로 정의하였다.

#### ① 네트워크 흐름 준수

Fig. 7의 네트워크 플로우에서 UAM 항공기는 반드시 정해진 방향으로만 기동하여야 하며, 노드 간 정의된 이동시간을 반드시 준수하여야 하는 제약식으로 수식 (2)와 같다.

수식 (2)에서 좌변은  $t$  시각 직전에  $i$  노드에서  $j$  노드로 이동하는 UAM 항공기 대수의 합을 의미한다. 여기서,  $j$  이전 노드의 집합( $BS$ )  $i$ 에서 노드  $j$ 까지 이동시간( $t_{ij}$ )을 해당 시각  $t$ 에서 차감하여 직전 노드에 위치한 시각을 산출한다. 우변은  $t$  시각에서 노드  $j$ 에서  $j$ 에서 연결되는 모든 노드  $k$ 의 집합으로 이동하는 UAM 항공기의 합을 의미하며 양변의 합은 항상 같아야 한다.

$$\sum_{i \in BS(j)} x_{ij}(t - t_{ij}) = \sum_{k \in FS(j)} x_{jk}(t) \quad (2)$$

$$\forall t \in T, i \in (N - D), j \in (N - (F \cup D)), k \in (N - F)$$

\* 여기서,

$t$  = 시간,  $T$  = 전체 시간 집합,

$N$  = 전체 노드 집합,  $F$  = FAF,  $D$  = DF,

$FS$  : Forward Star,  $BS$  : Backward Star

## ② 링크 수용량 준수

버티포트 내 네트워크에서 각 구간에 해당하는 링크는 반드시 정의된 수용량을 초과하지 않도록 제한되어야 하며 수식 (3)과 같다.

$$\sum_{t': t-t_{ij} < t' \leq t} x_{ij}(t') \leq C_{ij}(t) \quad (3)$$

## ③ TLOF 충돌방지

UAM 항공기가 버티포트의 TLOF에서 이륙 및 착륙을 수행하는 경우에는 반드시 1대의 UAM 항공기만 운영되어야 하며 이에 대한 조건식은 수식 (4)와 같다.

수식 (4)는 총 4가지 과정의 합으로 구성되어 있다. 처음 두 개의 조합은 도착항공기에 대한 제약식으로 첫 번째 부분은 FAF-TLOF 구간, 두 번째 부분은 TLOF-유도로 시작점 구간에서의 UAM 항공기 점유 여부를 의미하고, 마지막 두 개의 조합은 출발 UAM 항공기 점유 여부를 의미하며 구간은 도착과 동일하다.

$$\sum_{t': t-t_{ij} \leq t' \leq t} \left( \begin{aligned} & \sum_{m \in BS(i_{arr})} \sum_{i_{arr} \in I_{arr}} x_{m,i_{arr}}(t') \\ & + \sum_{i_{arr} \in I_{arr}} \sum_{n \in FS(i_{arr})} x_{i_{arr},n}(t') \\ & + \sum_{g \in BS(i_{dep})} \sum_{i_{dep} \in I_{dep}} x_{g,i_{dep}}(t') \\ & + \sum_{i_{dep} \in I_{dep}} \sum_{k \in FS(i_{dep})} x_{i_{dep},k}(t') \end{aligned} \right) \leq 1 \quad (4)$$

## ④ Gate 충돌방지

Gate 1개소에서 1대의 UAM 항공기만이 점유하고 이 용할 수 있도록 제한하기 위한 조건으로 수식 (5)와 같다.

$$\sum_{t': t-t_{ij} \leq t' \leq t} \left( \begin{aligned} & \sum_{m \in BS(i_{Gin})} \sum_{i_{Gin} \in I_{Gin}} x_{m,i_{Gin}}(t') \\ & + \sum_{i_{Gin} \in I_{Gin}} \sum_{n \in FS(i_{Gin})} x_{i_{Gin},n}(t') \\ & + \sum_{g \in BS(i_{Gout})} \sum_{i_{Gout} \in I_{Gout}} x_{g,i_{Gout}}(t') \\ & + \sum_{i_{Gout} \in I_{Gout}} \sum_{k \in FS(i_{Gout})} x_{i_{Gout},k}(t') \end{aligned} \right) \leq 1 \quad (5)$$

Gate 충돌방지 제약식(수식 (5))은 앞의 TLOF 충돌방지 제약식(수식 (4))과 구조적으로 동일하며, 게이트를 기준으로 진입과 진출, 지상조업시간 동안 1대의 UAM 항공기만 점유할 수 있도록 제한하기 위한 수식이다.

## ⑤ 유도로 충돌방지

버티포트의 구조가 복잡해짐에 따라 UAM 항공기는 지상 이동 중에도 주변의 교통흐름을 항상 확인하고 고려하여야 한다. 즉, 유도로 상의 특정 구간(예를 들면, 양방향 소통이 발생하는 유도로 구간)에서 충돌하지 않고 분리운영이 되어야 하는데, 이를 고려하기 위한 조건이 수식 (6)에 해당한다.

## ⑥ 결정변수 2진수

마지막 제약 조건식으로 모든 결정변수는 2진수로서 0 또는 1로 제한하기 위해 수식 (7)과 같이 정의하였다.

$$\sum_{t': t-t_{ij} \leq t' \leq t} (x_{i,j}(t') + x_{j,i}(t')) \leq 1 \quad (6)$$

$$\forall t \in T, \\ i \in (N - (FAF \cup DF \cup PAD))$$

$$x_{ij}(t) = 0 \text{ 또는 } 1 \quad \forall i, j, t \quad (7)$$

이상 6개의 제약식을 모두 만족하는 목적함수를 산출함으로써 최적화 기법을 활용한 버티포트 수용량을 산정할 수가 있으며, 목적함수의 계수를 조정함으로써 수용량 그래프(Capacity envelope)를 얻기 위한 값들을 산출할 수 있다. 예를 들어, 계수 (Ca, Cd)를 {(5, -1), (5, 0), (5, 1), (1, 1) 등과 같이 다양한 조합을 적용함으로써 수용량 그래프를 얻기 위한 각 포인트 값을 얻을 수 있다. 이렇게 얻어진 결과를 선으로 연결하여 Fig. 8과 같이 수용량 그래프를 구할 수 있다.

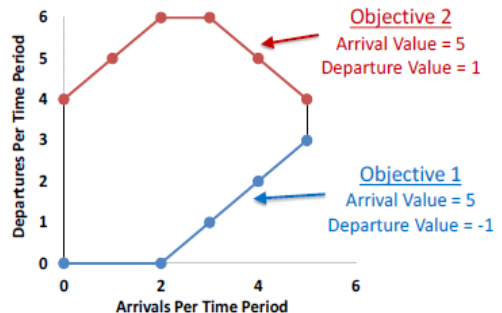


Fig. 8. Capacity envelope example



## IV. 모형 구축 및 분석 결과

### 4.1 분석 개요

본 장에서는 제3장에서 제시한 연구 방법론을 적용하여 가상의 버티포트에 대한 수용량을 산출하였다. 가상의 버티포트 형태는 1TLOF 2Gates, 2TLOFs 2Gates 2가지로, 첫 번째 형태는 승객의 탑승/하기 및 정비 등을 위한 주기장(게이트)을 2개소로 둔 경우이고, 두 번째 형태는 첫 번째 형태에서 이·착륙 시설인 TLOF가 증가되는 경우를 고려한 것이다.

버티포트 수용량 산정에 사용된 시스템은 2.10GHz 12th Intel Core i7 CPU, 32GB RAM 환경에서 수리적 모형 분석 도구는 AMPL(CPLEX)를 이용하였다.

수리적 모형에 의한 버티포트 수용량 산정방법은 3장에서 제시한 최적화 수리모형을 적용하였다. 버티포트 수용량 산정 결과는 출발 n대, 도착 n대로 산출되어지며, Fig. 9와 같이 다양한 구간을 갖는 결과를 도출할 수 있다.

Vascik and Hansman(2019)은 Fig. 9의 각 구간에 대해 다음과 같이 정의하였다.

① Feasible Operating Region은 그래프의 안쪽 영역으로 버티포트 운영에 있어 적용 가능한 수용량 범위를 나타낸다.

② Unbalanced Operations 구간은 도착 또는 출발 중 하나의 운영만 독립적으로 고려한 경우로 도착 수용량은 X 절편, 출발 수용량은 Y 절편의 값을 의미한다. Unbalanced Operations의 최댓값은 버티포트 게이트(주기장) 수의 영향을 받는다.

③ Free Operations 구간은 X 절편 또는 Y 절편

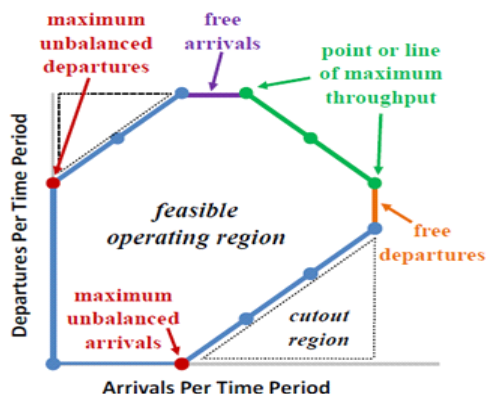


Fig. 9. Representative vertiport capacity envelope

과 평행한 구간으로 출발(도착) 수용량을 고려하지 않아도 도착(출발) 수용량 증가가 가능한 구간이다. Free arrival 구간은 출발 수용량 증감에 상관없이 자유롭게 도착 수용량 증감이 가능한 구간이고, 반대로 Free departure 구간은 도착 수용량 증감에 상관없이 자유롭게 출발 수용량 증감이 가능한 구간이다.

④ Maximum Throughput(최대 수용량)은 수용량 그래프의 원점에서 가장 멀리 위치한 지점(또는 구간)으로 해당 버티포트의 출·도착 조합에 따라 도출가능한 최대 수용량 값이 해당한다.

⑤ Cutout Region은 버티포트의 제한된 게이트(주기장)의 수에 영향을 받아 삭제되는 구역으로, 단위 시간당 전체 수용량에 여유는 있으나, 단위 시간당 출발(도착) 수용량을 증가시키기 위해 도착(출발) 수용량을 함께 증가시켜야 하는 구간으로 인해 잘려지는 구역을 의미한다. 예컨대, 일반적으로 공항에서의 산출되는 수용량의 일반적인 형태는 Fig. 10과 같다.

그러나 버티포트 수용량 그래프는 Cutout Region이 발생하는데, 이는 UAM 항공기를 수용할 수 있는 게이트 수에 영향을 받기 때문이다. 공항은 상당한 수의 주기장(게이트)을 보유하고 있는 반면, 버티포트는 설치장소가 건물 옥상 등 도심 내 협소한 공간에 위치할 것으로 예상되기 때문에 주기장(게이트)의 수가 제한된다. 따라서, 버티포트 주기장이 모두 점유 중인 경우, 추가적인 도착 서비스를 제공하기 위해서는 버티포트에 서비스 업무가 종료된 지상 계류 UAM 항공기를 이동시켜야 한다.

### 4.2 분석 결과

연구의 범위에서 정의한 2가지 형태(사례1: 1TLOF 2Gates, 사례2 2TLOFs 2Gates)의 버티포트에 대해 최적화 기법을 적용하여 수용량을 산정한 결과는 다음과 같다. 사례1에서는 수용량 산정의 기준을 단위시간에 따라 15분, 30분, 45분, 60분으로 구분하여 최적화

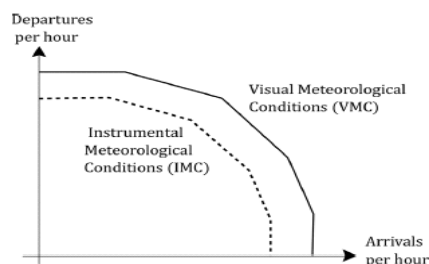


Fig. 10. Airport capacity example



분석을 수행하였고, 사례2에서는 수용량 산정의 기준(1시간)을 기본 분석으로 하여 출발, 도착, 지상조업시간의 차이에 따른 민감도 분석을 적용하였다.

#### 4.2.1 사례1(1TLOF 2Gates)

1TLOF 2Gates 버티포트 수용량 산정은 단위시간을 15분 단위로 1시간까지 산출하였으며, 60분(1시간) 기준 수용량은 수용량 산정에 사용된 시스템의 계산능력(Computation power) 한계로 산출할 수 없었다. 최적화 모형에 의해 산출된 수용량은 Table 2의 내용처럼, 버티포트 수용량 산정 단위시간이 15분인 경우 도착 3대, 출발 2대, 30분인 경우 도착 5대, 출발 4대, 45분인 경우 도착 8대, 출발 6대로 산출되었다.

해당 수용량은 지연이 고려되지 않은 최대 수용량, 즉 절대 용량을 의미한다.

Table 2의 결과를 도식화한 수용량 그래프(Capacity envelope)는 Fig. 11과 같다.

X축은 단위 시간당 도착 UAM 항공기 대수를, Y축은 단위 시간당 출발 UAM 항공기 대수를 의미한다.

게이트(주기장)가 2개이기 때문에 출발 및 도착에 대한 단독운영(X 또는 Y 절편)은 2대까지 수용 가능하며, 이후 수용량 증가를 위해서는 출발과 도착이 함께 고려되어야 한다. UAM 항공기가 게이트에 머무르는 기간인 지상조업 시간(Turnaround time)은 600초로 도착과 출발이 항상 쌍(pair)으로 구성되어 있는데, 이는 다양한 운항수요의 변화를 반영하는데 제한이 있으며, 만일 도착 또는 출발 중 하나의 서비스만 일방적으로 제공하는

경우 지상조업 시간을 600초에서 300초로 변경하여 수용량을 산출할 수 있으나 비현실적이라 할 수 있겠다.

#### 4.2.2 사례2(2TLOFs 2Gates)

사례 1(1TLOF 2Gates)에서 버티포트 수용량 산정의 단위시간을 15분 단위로 1시간까지 산출하였다면, 2TLOFs 2Gates 버티포트 수용량 산정의 단위시간을 1시간으로 정의하여 분석을 실시하였고, 도착시간(Arrival time), 출발시간(Departure time), 지상조업시간(Turnaround time) 변화에 따른 수용량 변화를 알아보기 위해 민감도 분석을 추가로 수행하였다. 2TLOFs 2Gates 버티포트에 대한 기본분석 및 민감도 분석 결과는 Table 3과 같다.

Table 3의 구분에서 A는 Arrival time을 의미하며, D는 Departure time을, T는 Turnaround time을 의미한다.

2TLOFs 2Gates 버티포트에 대한 기본 분석결과, 시간당 수용량은 도착 14대, 출발 10대로 산출되었다.

민감도 분석결과, (1) 도착시간을 90초에서 60초로 줄인 후의 수용량을 산출한 결과 수용량 변화는 없었으며, (2) 출발시간도 60초에서 40초로 함께 감소시켜도 수용량에 변화가 없었다. (3) 도착시간을 90초에서 120초로 30초 증가시켜 수용량을 산출한 결과도 변화가 없었다. (4) 지상조업시간을 600초(10분)에서 540초(9분)로 60초 감소시켜 수용량을 산출한 결과 시간당 수용량은 도착 15대, 출발 12대로 증가하였으며, (5) 420초(7분)까지 감소시켜 수용량을 산출한 결과 시간당 수용량은 도착 18대, 출발 15대까지 증가하였음을 확인할 수 있었다.

이를 통해 출·도착 시간보다는 지상조업시간 조정이 버티포트 수용량 증가에 더 영향을 미친다는 결론을 도출할 수 있었다. 지상조업 시간 변화에 따른 수용량 산출결과 그래프는 Fig. 12와 같다.

Table 2. 1TLOF 2Gates optimization results

구분	도착	출발	계산 시간
15분	3	2	3.6
30분	5	4	2,887.8
45분	8	6	3,549.7
60분	산출시간 초과		

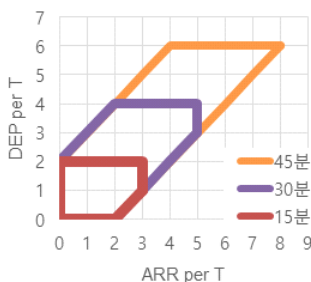


Fig. 11. Capacity envelope (1TLOF 2Gates)

Table 3. 2TLOFs 2Gates optimization results

구분		도착	출발	계산 시간
기본	A90/D60/T600	14	10	51.5
민감도 분석	A60/D60/T600	14	10	16.6
	A60/D40/T600	14	10	30.7
	A120/D60/T600	14	10	47.2
	A90/D60/T540	15	12	1,673.9
	A90/D60/T480	16	13	69.4
	A90/D60/T420	18	15	4,071.3

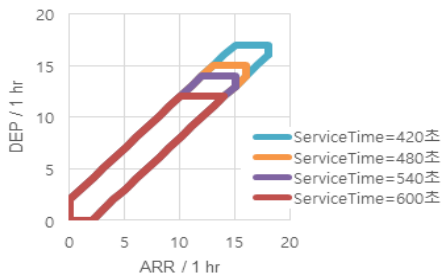


Fig. 12. Capacity envelope (2TLOFs 2Gates)

## V. 결론

### 5.1 결론

대도시 지역의 인구 과밀화가 심각해지고 육상 교통 체계의 혼잡이 가중됨에 따라 3차원 교통수단인 도심 항공교통(UAM)이 등장하였다. UAM 운영에 있어서 중요한 물리적 요소 중 하나인 버티포트는 공항과 같은 역할을 하는 장소로서 이용승객의 UAM 항공기 탑승/하기, 기체 점검 및 이·착륙을 위해 핵심 구성요소 중 하나이다.

버티포트는 공항의 역할을 하는 물리적 공간으로 정의됨에 따라, 공항 수용량의 정의와 수리적 모형을 이용한 수용량 산정 동향에 대해 선행연구를 분석하였다. 공항 수용량은 단위 시간당 처리 가능한 항공기 대수로 정의되었고, 이때 지연의 고려 여부에 따라 절대용량과 실용용량으로 구분할 수 있었다. 따라서, 버티포트 수용량을 단위 시간당 운용 가능한 UAM 항공기 출·도착 대수로 정의하였으며, 수리적 모형에 의한 버티포트 수용량 산정 방법론으로는 Vascik and Hansman(2019)이 제시한 모형을 확장하여 적용하였다.

본 연구에서는 버티포트 수용량 산정을 위해 최적화 기법인 Deterministic Integer Linear Program을 통해 단위 시간당 출·도착 UAM 항공기 대수를 산출하였다. 목적함수로는 이륙 및 착륙 UAM 항공기 대수를 최소화하는 것으로 정의하고, 제약조건으로는 (1) 교통흐름 유지, (2) TLOF 충돌방지, (3) 게이트 충돌방지, (4) 유도로 충돌방지, (5) 결정변수 이진수의 5개 제약식을 설정하였다. 산출된 출·도착 조합을 활용하여 수용량 그래프(Capacity Envelope)를 도출함으로써, 출·도착 수용량 가용 범위를 제시하였다. 가상의 버티포트 1TLOF 2Gates, 2TLOFs 2Gates 두 가지 형태로 정의하여 단위시간에 따른 수용량 산정과 함께,

출발 및 도착시간, 지상조업 소요시간 등을 고려해서 민감도 분석을 수행하였다.

수리적 모형에 의한 최적화 기법은 그 방법이 단순하고 명료하여 직관적으로 설계할 수 있다는 장점이 있다. 또한, 모형 구축 및 수정이 용이하고 산정시간이 비교적 빠르다는 장점이 있다. 그러나 지연 등 현실에서 발생할 수 있는 다양한 현상을 수식에 반영하는 데 한계가 있으며, 출발 및 도착에 대한 운항수요를 반영하기 어렵다는 단점이 있다. 마지막으로 파라미터, 변수 등이 단일 값이 적용되어 불확실성(Randomness) 반영이 불가하다는 단점도 존재한다.

이러한 장·단점을 고려해볼 때, 본 연구에서 제시하는 방법론은 초기 버티포트 설계, 시설 확장을 위한 기초 분석 등에 유용하게 활용할 수 있을 것이다.

### 5.2 향후 연구과제

본 연구는 수리적 모형을 적용하여 버티포트 수용량(절대용량)을 산정할 수 있다. 수리적 모형에 의한 수용량 산정방법은 그 모형이 직관적이고, 고려되는 입력변수가 비교적 적기 때문에 버티포트 계획 및 마스터플랜 설계 등 거시적 관점에서 버티포트의 규모를 결정할 때 유용하게 적용할 수 있는 방법이다. 현재 UAM 산업은 태동기에 있고, 세계적으로 상용화를 위해 분주하게 준비 중이다. 이러한 시점에서 본 연구는 향후 신규 버티포트의 적정 규모를 산정하고 결정하는 지표를 제안할 수 있을 것이다.

다만, 본 연구에서 적용된 값은 실제 수집자료의 제한으로 선행연구에서 적용된 값을 준용하였다. 현재 UAM 항공기 기체가 개발 단계에 있으며, 관제절차 등 운영개념 및 지침이 초안이 발간되고 있는 단계이기 때문에 실제 값을 파라미터로 활용하지 못했다는 한계가 있다. 향후, UAM 항공기 기체가 개발되어 상용화 인증을 받은 후 관련 정보의 수집이 되면, 본 연구에서 제시한 방법론에 변수로 활용함으로써 더욱 구체적인 분석이 가능할 것이다.

아울러, 본 연구에서는 최적화 기법을 활용하여 UAM 버티포트의 수용량을 산정방법을 제시하였으며, 산정 결과는 지연이 반영되지 않은 절대용량을 제시하였다. 그러나 스케줄 관리, Slot 조정, UAM 교통흐름관리 등이 복합적으로 고려된 분석 결과를 도출하기 위해서는 실용용량이라는 개념에서의 접근과 함께 시뮬레이션과 같은 분석 방법론의 다각화가 요구될 것이다.

## References

1. United Nations, "The World's Cities in 2018", UN Department of Economic and Social Affairs, 2018.
2. Federal Aviation Administration, "Engineering Brief No.105, Vertiport Design", U.S. Department of Transportation, 2022.
3. Federal Aviation Administration, "Advisory Circular 150/5390-2C Heliport Design", U.S. Department of Transportation, 2012.
4. Ministry of Land, Infrastructure and Transport, "Directive No.1188, Guidelines for Establishing Airport Capacity", MOLIT, 2019.
5. United States Congress, "Airport System Development", U.S. Congress, 1984.
6. Hockaday, S. L. M., and Kanafani, A. K., "Developments in Airport Capacity Analysis", Transportation Research, 1974, pp.171-180.
7. De Neufville, R., and Odoni, A., "Airport Systems Planning, Design and Management", McGraw Hill Companies Inc., 2003.
8. Lee, H. J., and Kim, D. H., "A comparative study on delay calculation method of airport capacity", Journal of the Korean Society for Aviation and Aeronautics, 28(2), 2020, pp.47-52.
9. Gilbo, E. P., "Airport capacity: Representation, estimation, optimization", IEEE, 1993, pp.144-154.
10. Ashford, N. J., Mumayiz, S., and Wright, P. H., "Airport Engineering: Planning, Design, and Development of 21st Century Airports, 4th Edition", Wiley, 2011.
11. Federal Aviation Administration, "Archerfield Airport Master Plan", U.S. Department of Transportation, 2010.
12. Tien, S., Roy, S., Taylor, C., Wanke, C., and Dhal, R., "Evaluation of an Airport Capacity Prediction Model for Strategizing Air Traffic Management", American Meteorological Society, 2015.
13. Vascik, P. D., and Hansman, R. J., "Development of Vertiport Capacity Envelopes and Analysis of Their Sensitivity to Topological and Operational Factors", AIAA SciTech Forum, 2019.
14. Shone, R., Glazebrook, K., and Zografos, K. G., "Applications of stochastic modeling in air traffic management: Methods, challenges and opportunities for solving air traffic problems under uncertainty", European Journal of Operational Research, 2021, pp.1-26.