



J. Korean Soc. Aeronaut. Space Sci. 50(8), 583-590(2022)

DOI: <https://doi.org/10.5139/JKSAS.2022.50.8.583>

ISSN 1225-1348(print), 2287-6871(online)

도심 항공 모빌리티의 다학제 설계 프레임워크 개발

김현수¹, 김형석², 임대진³, 이관중⁴

Development of a Multidisciplinary Design Framework for Urban Air Mobility

Hyunsoo Kim¹, Hyeongseok Kim², Daejin Lim³ and Kwanjung Yee⁴

Dept. of Mechanical and Aerospace Engineering, Seoul National University, Seoul, Republic of Korea

ABSTRACT

This paper presents a framework, MADAM(Multidisciplinary Analysis and Design for Advanced Mobility). For the actual UAM operation, not only aircraft performances but also demand, cost and flight scenarios are in connection; the overall framework is essential for the multidisciplinary design. In this study, the framework is developed and introduced. Demand and cost analysis of Gimpo-Samseong line in the Seoul area using the framework is conducted as an example result. Also, future ticket prices are estimated by applying changes in the aspects of major cost components and the price, ₩76,000, is calculated with the target for maximizing the total profit in the year 2035.

초 록

본 논문에서는 UAM의 다학제 설계 프레임워크 MADAM (Multidisciplinary Analysis Design for Advanced Mobility)을 소개한다. UAM의 실제 운영에서는 항공기 성능뿐 아니라 서비스의 수요와 비용 그리고 운항 시나리오까지 서로 상관관계가 있다. 따라서 다학제를 종합적으로 고려하는 프레임워크는 필수적이다. 본 연구에서는 다학제 설계 프레임워크 MADAM을 개발하였고 이를 소개한다. 프레임워크를 이용한 서울 지역에서 김포-삼성 UAM 노선의 수요 및 비용분석을 예시 결과로 제시하였다. 높은 비용을 요구하는 주요 요소들의 연도별 양상 변화를 적용하여 35년에는 7만 6천원 가장 높은 총이익을 도출하는 티켓 가격으로 계산이 되었다.

Key Words : eVTOL(전기 동력 수직이착륙기), UAM(도심항공교통), UAM Operation(도심항공교통 운용), Air taxi(에어 택시), Operating Cost(운용 비용), Demand Estimation(수요 예측), Ticket Price(티켓 가격)

1. 서 론

도심 항공 모빌리티(UAM)는 도로의 극심한 교통체증을 우회할 수 있는 새로운 항공 교통 및 운송 수단으로 대두되고 있다. 다른 교통수단에 비해 이동시간이 단축되고 무공해 전기추진 시스템을 채택하는 등의 장점이 있어 Joby, Boeing, Uber와 같은 세계 기업들을 중심으로

활발히 개발이 진행되었다[1-3]. 한국에서도 UAM의 향후 운용에 대한 청사진으로 국토교통부와 UAM Team Korea에서 한국형 도심 항공(K-UAM) 교통 운용개념서를 제시하였다[4].

UAM이 새로운 항공교통수단으로서 역할을 하기 위해서는 항공기의 개발뿐만 아니라 비용, 운항, 수요 예측을 종합적으로 고려한 분석이 필요하다. UAM은 기존 헬리

† Received : March 16, 2022 Revised : May 10, 2022 Accepted : May 23, 2022

¹⁻³ Graduate Student, ⁴ Professor

⁴ Corresponding author, E-mail : kjyee@snu.ac.kr, ORCID 0000-0001-9384-7566

© 2022 The Korean Society for Aeronautical and Space Sciences

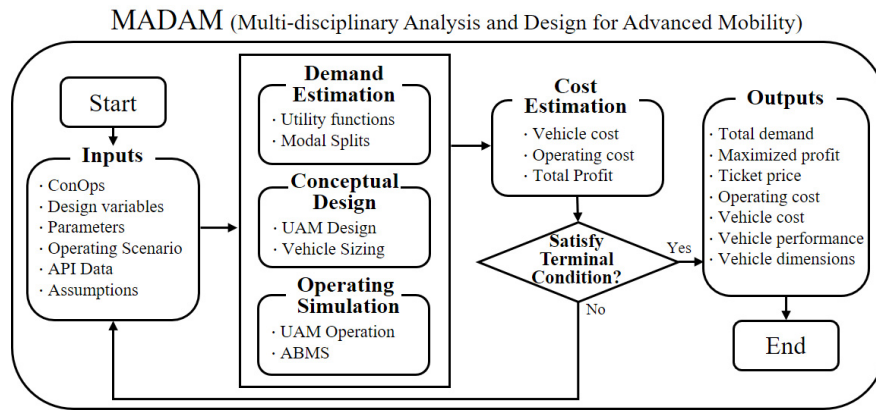


Fig. 1. MADAM Framework

콥터에 비해 상대적으로 운용비용이 낮은 교통수단이 될 것으로 예측이 되지만, 모범택시보다 높은 티켓 가격이 예상된다[5]. 높은 티켓 가격은 낮은 탑승 수요와 적은 운항 수를 초래하므로 한 번의 비행에 감당해야 할 운용 비용이 늘어난다. 또한 노선의 수가 늘어날 경우 Dead-head flight와 버티포트의 레이아웃 등 다양한 영향을 추가로 고려해야 한다. 따라서 UAM의 운영 및 설계는 항공기 성능, 운항 시뮬레이션, 수요 예측, 비용 예측과 같은 다학제간의 관계를 고려해야 한다.

Satadru 등[6]은 우버에서 제시한 UAM의 단위 시간당 운용비용을 이용하여 탑승 요금 수준을 제시하고 민감도 분석을 진행하였다. 그러나 운용비를 고정할 경우 타 지역에서도 적용 가능한 일반적인 방법이 될 수 없으며, 수요에 따른 비용의 변화를 고려할 수 없다. Sirirojvisuth 등[7,8]은 수요가 대상 고객의 소득 수준과 이동 목적에 대한 함수라고 제안하고, UAM 운용비용 분석 모듈을 도입하여 소득과 비용을 종합적으로 고려했다. 그러나 비교 교통수단을 자가용 한 가지만 고려하기 때문에 대중교통이 발달한 도시를 대상으로는 일반적인 분석방법일 수 없다. 최종해 등[9]은 인천공항과 서울역의 노선에서 UAM 서비스 탑승객이 발생하는 요금 수준의 전환점을 제시하였다. MNL(Multinomial logit model) 모형을 통해 교통수단으로써 UAM의 효용 함수를 도출했다. 그러나 운영사의 입장에서 적합한 티켓 가격을 제시한 것이 아닌 UAM으로 수단을 전환하기 위한 티켓 가격 수준을 제시하였으며 운용비용과 경제성을 고려한 티켓 가격의 도출에는 한계가 있다. 따라서 UAM의 운영을 종합적으로 고려하는 프레임워크 개발은 필수적이다.

본 연구에서는 UAM의 다학제 설계 프레임워크 MADAM를 개발하였다. 각 학제가 UAM 운영에 미치는 영향과 학제간 상관관계를 보이고, 다양한 환경에도 고려가능한 일반적인 프레임워크의 구축을 목표로 한다. 프레임워크 활용 예시로 서울에서의 UAM 서비스 예측 결과를 보였다. 미래 기술발전과 운영 최적화를 통해 2030년, 2035년에 주요 비용 항목들의 변화 양상을 추정하고 최대 이익을 창출하는 티켓 가격을 도출하였다.

II. 본 론

2.1 MADAM 프레임워크의 구성

2.1.1 프레임워크의 구성 흐름도

본 연구에서는 UAM의 다학제 설계 프레임워크 MADAM을 개발하였다. 항공기 형상 설계뿐만 아니라 실제 도심 항공 교통으로 운영이 될 때, 수요와 비용 그리고 운항 시나리오를 고려한 설계를 목표로 하였으며, 각 학제의 결과와 영향성에 대해 설명한다. 본 프레임워크에서는 다학제 해석을 위해 기본적으로 항공기 개념설계 도구, 운항 시뮬레이션 도구, 수요 분석 도구, 비용분석 도구가 필요하다. 도구들의 흐름도는 Fig. 1에 도시하였다.

먼저, 운영환경의 설정이 요구된다. 노선과 지역을 설정해야 하며 ConOps(Concept of Operations)와 같은 구체적인 환경을 구축해야 한다. 항공기의 임무 형상, 요구도, 버티포트 위치, 노선 등을 예시로 들 수 있다. 설정된 문제와 환경을 기반으로 수요 예측과 항공기 개념설계를 진행한다. 요구 조건에 의해 도출된 기체의 성능과 제한은 항공기의 순기비용(Life cycle cost)과 운항 시나리오에 영향을 미친다. 운항 시뮬레이션에서는 지역별 수요와 항공기의 기본 성능을 이용해 UAM의 운항 시나리오를 예측한다. 운항 시나리오를 통해 요구되는 총 비행 수, 항공기 대수를 예측해 비용분석에 사용된다. 비용분석에서는 티켓 가격의 원가, 이윤을 고려해 해당 환경에서의 총이익을 계산한다.

2.1.2 수요 예측 단계

설정된 노선과 지역을 기반으로 UAM의 수요를 예측하는 단계이다. UAM 탑승객의 수요를 파악해 적절한 항공기의 대수, 인프라의 크기를 결정하는 것은 운영사에 입장에서 중요하다. 또한 UAM이 새로운 교통수단으로서 상업성을 갖기 위해서는 적합한 수요 예측의 방법이 필요하다.

탑승객은 기존 교통수단을 이용하던 인구통행량 중 UAM으로 교통수단으로 변경하는 수 일 것이므로 기존 인구이동의 통행량 데이터가 필요하다. 또한 높은 티켓

가격을 지불해야 하는 UAM 이동수단은 상대적으로 소득 분포가 높은 이동객일 확률이 높으므로 지역의 임금 수준을 고려해야 한다.

목적지에 따른 탑승의 수요도 분류해야 한다. 탑승객은 지역이동객뿐만 아니라 공항도 목적지 중 하나이기 때문에 공항이용객도 고려해야 한다. 두 경우 모두 동일한 노선을 이용한다는 공통점이 있지만, 이동 목적과 이용 교통수단이 다르므로 탑승객의 분류에 따라 단축된 시간의 크기와 가치가 다를 것이다. 계산된 수요는 시뮬레이션 단계에서 탑승객으로 모사된다.

2.1.3 항공기 개념설계 단계

운영에 사용될 UAM을 개념설계하는 단계로 주어진 임무 형상과 요구도를 만족해야 한다. eVTOL의 대표적인 3가지 타입인 Vectored Thrust, Lift + cruise, Wingless의 특성을 고려한 성능해석방법을 통해 배터리의 용량, 총 중량과 같은 항공기의 제원 및 성능이 결정되어야 한다.

도출된 항공기의 제원과 성능을 통해 항공기의 구매가격을 예측할 수 있으며, 이는 항공기 감가상각비용으로 들어가 비용분석에 영향을 끼친다. 또한 노선의 길이, 탑승객의 수에 따라 소모되는 배터리의 용량을 계산해 각 비행에 지출되는 비용예측이 가능하다. 이를 노선별 시뮬레이션의 단계에 적용한다.

2.1.4 운항 시뮬레이션 단계

설계된 항공기가 운영될 때 수요나 비용에 영향을 미치는 요소들을 고려하면서 실제 운용을 구현하는 단계이다. 실제 운항 시나리오에서 발생하는 상황들은 간단하게 예측하기 난해하고, 비용에도 영향을 미친다. 따라서 실제 운항을 모사하여 예측하기 어려운 현상들을 미리 파악하는 것은 중요하다. 버티포트의 병목현상, Dead-head flight 등이 상황들의 대표적인 예시이다.

설정된 환경과 항공기의 성능, 수요를 바탕으로 시뮬레이션을 구축한다. 수요를 감당할 수 있는 항공기 수, 총 운항 수 등이 시뮬레이션을 통해 도출해 비용분석에 사용하게 된다.

2.1.5 비용예측 단계

수요와 항공기 성능 및 제원, 시뮬레이션 결과를 종합해 최종적으로 지출되고 들어온 비용을 계산하는 단계이다. 설정된 환경에서 상업성을 고려하기 위해서 이익 발생 여부를 판단한다. UAM 서비스의 높은 수요를 통해 운항 횟수가 증가한다면 운용비가 낮아져 승객당 지불해야 하는 티켓 가격이 낮아지고, 낮아진 티켓 가격은 더 높은 수요를 불러올 수 있는 선순환적인 특징이 있다. 그러나 반대로 수요가 낮아진다면 역순환이 존재하므로 적합한 비용예측 모듈은 필수적이다.

티켓 가격은 항공기 운용비용과 이익을 포함한 가격이다. 항공기의 운용비용은 직접비(DOC, Direct Operating Cost)와 간접비(IOC, Indirect Operating Cost)로 나뉘게 된다. 직접비는 비행마다 지출되는 비용으로 감가상각

비, 충전료, 착륙료 등을 예를 들 수 있다. 간접비는 비행이 없더라도 지속적으로 지출되는 비용으로 시스템 운영비, 관측비 등이 있다. 계산된 운용비용과 이익 마진의 합을 탑승 수로 나눈 것이 티켓 가격이고, 이익 마진과 수요의 곱은 총이익이다.

2.1.6 프레임워크 결과

항공기 설계, 수요와 비용 예측, 운항 시뮬레이션을 종합해 구축한 MADAM 프레임워크에서는 운영환경과 요구도를 만족시키는 항공기 성능, 총수요, 총이익 등의 결과를 도출할 수 있다. 민감도 분석을 진행해 사용자의 운용 환경을 검토, 참고할 수 있으며, 분석결과를 바탕으로 UAM 운영 조건에 대한 직관을 넓힐 수 있다. 뿐만 아니라 소음, 버티포트 레이아웃과 같은 모듈을 추가한다면 소음방사지도, 버티포트 운영 컨셉과 같은 더 다양한 결과를 낼 수 있는 확장성을 갖고 있다.

2.2 MADAM을 이용한 서울 지역의 UAM 수요 및 비용예측 예시

본 절에서는 MADAM 프레임워크를 사용하여 서울의 UAM 서비스 수요 및 비용예측 과정을 소개한다. 본 논문의 예시는 연구 초기 단계로 기체의 요구성능은 개념설계를 대신해 K-UAM에서 사용된 기체의 성능 값을 사용하였으며 수요와 비용을 중점으로 다루었다. 하나의 노선만을 고려해 시뮬레이션 단계는 간단한 수식과 가정으로 대체하였다. 비용 단계에서는 UAM 비용 분석 코드인 AC²(Aircraft Cost Analysis Code)를 사용해 운용 비용을 예측하였다[10].

예시에서는 이익 최대화하는 최적의 티켓 가격을 제시하는 것을 목적으로 하였으며, 주요 비용 요소들의 연도별 변화에 따라 변동하는 티켓 가격의 값을 도출했다. 기본적인 가정들은 K-UAM Roadmap의 데이터를 이용하였다[11].

2.2.1 운영환경 정의

버티포트 위치를 선정하기 위해 인구 유동이 높은 지역과 기존 시설 이용 가능성, 지역의 소득 수준을 검토해 김포공항과 서울시 강남구 삼성역을 버티포트 위치로 설정하였다. 버티포트 위치 선정에 있어서 비행 가능 여부, 통제 가능성, 법규 관련에 대해서는 고려하지 않았다.

본 연구에서는 서울의 강서구, 서초구, 강남구, 송파구, 강동구, 성북구, 광진구, 중랑구 내에 있는 약 150개의 행정동을 기준으로 목표 탑승객을 고려하였으며, 이는 Fig. 2에 나타내었다.

지역이동객은 자가용과 대중교통 두 가지 이용수단을 사용하고, 서울 동남권의 지역에서 출발한 탑승객은 도착지가 강서구 내에, 강서구에서 출발한 탑승객은 도착지가 서울 동남권에 있는 이동객을 고려하였다. 공항이용객은 대중교통만을 이용해 이동하고, 돌아올 때 또한 같은 교통수단을 이용하는 것으로 가정하였다. 기존 인구통행량은 국가교통데이터베이스(KTDB, Korea Transport

Table 1. Assumptions and categories of cost estimation, unit = [cost/FH]

Assumptions, Categories	DOC	Aircraft	<ul style="list-style-type: none"> - 10 years operational life for a fleet - No resale value - 3% of vehicle cost for insurance - \$200/kWh for a battery price - Depth Of Discharge 80%
			<p><i>Total Number of flights = Operating years × Operating days × flights per day</i></p> <p><i>Total Flight time = Total Number of flight × Flight time</i></p> <p><i>Aircraft depreciation = Aircraft cost / Total Flight time</i></p> <p><i>Finance cost = Finance rate × Aircraft cost / Flight time per year</i></p> <p><i>Insurance cost = Insurance rate × Aircraft cost / Flight time per year</i></p>
		Infrastructure usage	<ul style="list-style-type: none"> - \$0.32/kWh for charging fee [7] - Half of the TAT(Turnaround time, assumed 15 min) is for charging - \$0.86/FH for navigation [17] - \$1.4/FH for weather service [17] - \$1.5/FH for parking fee [17]
			<p><i>Charging cost = Charger power × Charging time × Charges × Number of Flight / Flight time</i></p>
		Pilot	<ul style="list-style-type: none"> - Three pilots are assigned for a fleet - Labor fee \$114/hr [17]
	Maintenance	<ul style="list-style-type: none"> - Using rotorcraft operating cost [17] except for engine maintenance 	
	IOC	Management, etc	<ul style="list-style-type: none"> - 20% of the total cost [18]

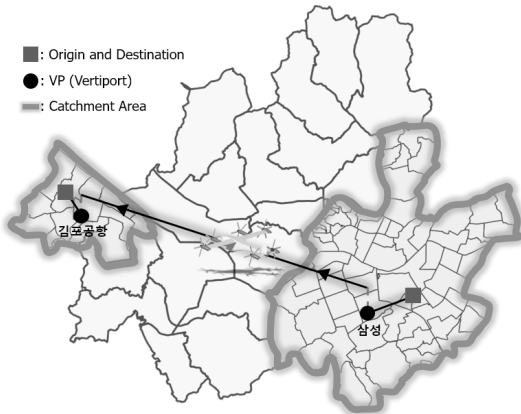


Fig. 2. Catchment area and location of vertiports

DataBase)와 김포공항 이용객 통계를 이용하였다[12,13]. 서울은 주거 지역에 따라 가구 소득 차이가 있기 때문에 소득 분포 데이터는 서울의 행정구를 기준으로 나누었다 [14].

2.2.2 수요 예측 방법

탑승자는 단축된 시간의 가치가 지불하는 티켓 가격의 가치보다 높다 판단될 경우 UAM을 이용할 것이고, 그렇지 않다면 기존 이동 수단을 이용할 것이다. 따라서 적합한 수요를 예측하기 위해서는 탑승 비용과 단축된 시간의 가치를 비교해야 한다. 예시에서는 단축된 시간의 가치의 기준을 제시하기 위해 Income Threshold의 개념을 도입했다[7]. Income Threshold는 각 출·도착지

에서 탑승객이 수단을 UAM으로 변경하는 소득의 수준을 나타내며 이는 식 (1)에 나타내었다.

$$Income\ Threshold = \frac{Cost_{UAM} - Cost_{ride}}{VTT \times (Time_{ride} - Time_{UAM})} \quad (1)$$

VTT(Value of Travel Time)는 시간의 가치를 나타내는 수치로 본 연구에서는 업무시간이 1.0의 가치를 갖고 있으면, 여가시간은 0.6의 가치를 갖는다고 가정하였다[7]. Cost_{UAM}은 UAM의 탑승 가격과 버티포트를 오가는 교통비용을 포함한다. 시간도 마찬가지로 Time_{UAM}은 UAM의 비행시간과 버티포트를 오가는 시간을 포함한다. Time_{ride}와 Cost_{ride}는 각각 기존 교통수단을 이용했을 때의 출·도착지 이동시간과 비용이다. 따라서 Income Threshold를 계산하기 위해 버티포트를 오가는 교통수단별 비용과 시간을 추정해야 한다. 동 시간대 O/D pair에 대해서 교통 시간, 거리 및 비용을 도출하기 위해 Naver와 Google의 API 길찾기 기능을 이용했다[15,16]. 교통수단은 자가용과 대중교통(지하철, 버스)을 고려하였다. 출·도착지와 교통수단별 Income Threshold가 정해지면 기존 인구통행량에 최소 임금 수준을 넘는 비율을 적용해 지역 탑승 수요를 결정하고, 이 방식을 모든 O/D pair에 적용하여 총수요를 계산할 수 있다.

2.2.3 비용예측 방법

예시에서는 비용분석 코드인 AC²를 이용해 비행시간당 운용비용을 예측했다. 직접비를 기체(Aircraft) 인프라 사용료(Infrastructure usage), 조종사 인건비(Pilot)

그리고 정비비(Maintenance)로 나누었다. 비용의 구성 및 가정사항은 Table 1에 정리하였다. 계산된 운용비용과 이익 마진의 합이 티켓 가격이고, 이익 마진은 설계 변수로 최적화를 통해 최대 총이익을 갖는 값을 구했다.

2.2.4 가정사항

서울 지역의 수요와 비용을 예측하는 과정에서 사용된 기본적인 가정들은 아래와 같다. 대부분 가정은 K-UAM 로드맵의 데이터를 이용하였다[11].

- 1) 기체 제원 및 성능
 - 순항 속도 150 km/h
 - 순항 거리 28 km
 - 2025년 기준 5인승 기체 가격 대당 15억
 - 5인승 중 조종사 제외 4자리 탑승 가능
 - 배터리 용량 130 kWh
 - 공허 중량 1,814 kg (4,000 lb)
 - 배터리 평균 방전 깊이 (DOD) = 0.80
- 2) 운영 서비스 시나리오
 - TAT (Turn Around Time) 15분
 - 비행 당 평균 3명 탑승
 - 1년 동안 347일 운영
 - 운영시간 15시간 (06시~21시)
 - 탑승/하차 시 소요되는 시간은 TAT의 절반
- 3) 수요 및 비용예측
 - 출·도착지를 통행하는 인구의 소득은 출발지의 소득 분포 수준과 동일함
 - 자가용 이용 시 차량 운용비용 889원/km[19]
 - Income Threshold를 넘는 소득을 갖고 있다면 UAM 서비스 이용
 - \$1 = 1,190원
 - 소비자 물가 지수를 이용하여 전체 현가 기준으로 전환 (2021년)
 - 정비비의 경우 엔진 정비에 요구되는 인건비, 부품비를 제외하기 위해 기존 엔진 정비비의 비율을 예측. 제외했을 때, 인건비와 부품비 각각 78%, 49% 비용 수준으로 저감[17].

2.2.5 최적화 및 제약조건

수요가 존재할 때 항공기 대수는 해당하는 탑승객에게 UAM 서비스를 제공할 수 있는 최소 항공기 대수를 운용하는 것이 가장 적은 비용이 지출될 것이다. 본 연구에서는 시간당 평균 탑승객을 수송할 수 있는 최소 항공기 수를 제약조건으로 하였다. 또한 초기 설정한 티켓의 이익률을 오차 범위 내로 만족할 때까지 티켓 가격 계산을 반복 수행한다. 제약조건을 만족하는 결과로 수렴했을 때 총수요, 티켓 가격, 운용비가 도출된다. 총수요에서 이익의 마진을 곱하면 총이익이 계산되며, 최적화를 통해 총이익이 최대화가 되는 항공기 대수, 이율을 찾게 된다. Table 2는 최적화 목표, 설계 변수, 제약조건, 사용 알고리즘을 정리한 표이다.

Table 2. Optimization algorithm and constraint

Optimization	
Objective	Maximize total profit
Design variables	Profit factor, Number of aircraft
Constraints	$N_{min-aircraft} \leq N_{aircraft}$ $N_{min-aircraft} = \frac{Total\ demand / Available\ seats}{Operating\ hours}$
Algorithm	Evolutionary optimization algorithm

2.3 MADAM을 이용한 서울 지역의 UAM 수요 및 비용예측 결과

2.3.1 수요 예측 결과

Figure 3은 티켓 가격과 교통량별(Rush hour(평일 출퇴근 시간), Non-Rush hour(일요일 오전)) 수요 예측 결과를 히트맵으로 그린 결과이다. 버티포트의 위치는 삼성역과 김포공항 두 지역만을 설정해 한 노선을 고려했다. 교통량이 많아 단축되는 시간이 클수록, 티켓 가격이 낮을수록 수요가 높은 결과를 볼 수 있다. 소득 수준이 높고 삼성역 버티포트가 가까운 강남구에서 가장 높은 수요가 보인다. 본 연구에서는 아직 시간에 따른 교통량을 고려하지 못하기 때문에 Rush-hour의 교통량 기준으로 분석을 진행하였다.

2.3.2 티켓 가격 예측 결과

수요와 운용비용 예측 방법을 종합해 총이익 최대화를 목표로 하는 티켓 가격을 도출하였다. Fig. 4는 2025년

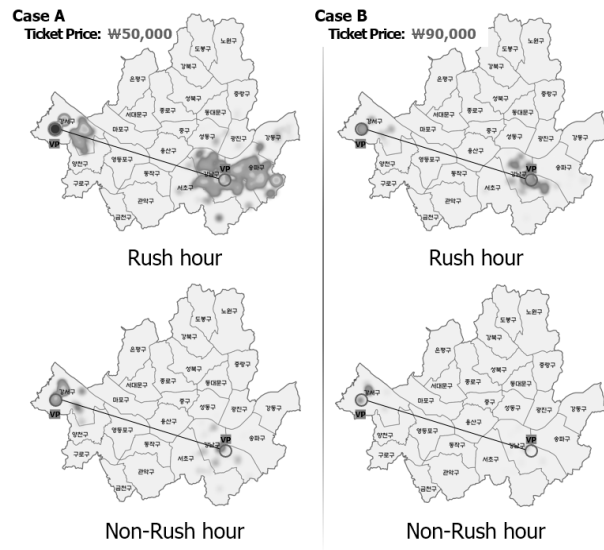


Fig. 3. Demand distribution heat map in accordance with ticket price and traffic volume

기준 최적화된 티켓 가격의 항목별 비용을 나타낸다. 총 세 명의 탑승객이 내야 하는 비용은 한 번의 운항 당 약 40만 원으로, 인당 티켓 가격은 약 13만 3천 원이다. 높은 티켓 가격으로 수요와 이익 모두 낮기 때문에 25년에서는 이익을 내기에 어려운 구조이다. 티켓 가격이 높은 이유는 기체 비용과 착륙비, 그리고 조종사 인건비 3가지 주요 항목이 운용비용에서 각각 17%, 18%, 22%로 높은 비율을 차지하기 때문이다. 기체 비용은 기체 구매뿐만 아닌, 기체 감가상각과 금융 및 보험료 그리고 배터리 감가상각도 고려해야 한다. 또한 버티포트를 운영하는 업체에서도 건설비를 회수하기 위한 이윤을 창출해야 하며, 운영시간 조종사의 근무를 고려해 기체당 3명의 조종사를 할당해야 한다.

위 3가지 주요 비용 항목들의 미래 변화 양상을 추정해 2030년, 2035년의 최대 총이익을 창출하는 티켓 가격을 도출하였다. 각 항목의 가정사항들은 K-UAM Roadmap을 참고하여 Table 3에 정리하였다. 자율 비행 비율은 조종사 없이 운항하는 비행 수의 비율로 그에 비례하여 조종사의 고용이 줄어든다 가정하였다.

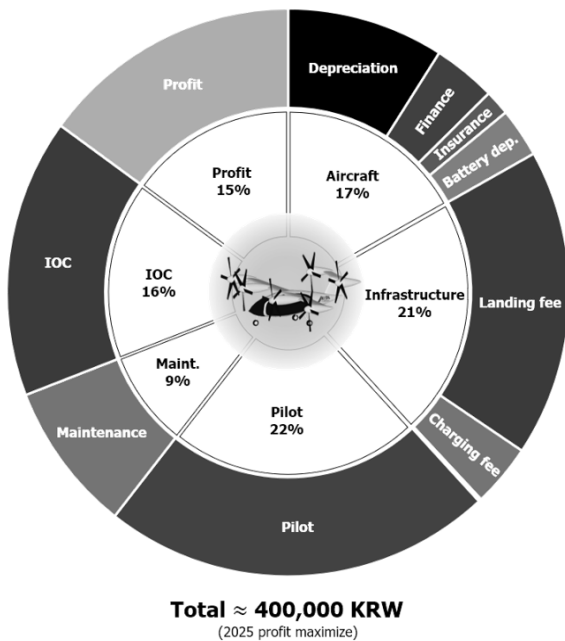


Fig. 4. Categorization of the profit maximizing ticket price in 2025

Table 3. Assumptions for major cost items by year

Assumptions	2025	2030	2035
Landing fee	₩70,000	₩50,000	₩30,000
Autonomous flight	0%	50%	70%
Vehicle cost	₩1.5 bil.	₩1.25 bil.	₩0.75 bil.

2.3.3 연도별 이익 최대화 티켓 가격 예측 결과

Figures 5, 6은 Table 2의 가정사항을 고려해 2030년, 2035년의 이익을 최대화하는 티켓 가격의 계산 결과이다. 이익 마진의 비율이 증가할수록 한 티켓당 얻는 이익은 증가하지만, 동시에 티켓 가격이 증가하기 때문에 서비스를 이용하는 총수요는 줄어든다. 총이익은 이익 마진의 비율과 수요의 곱으로 마진이 증가할수록 한 티켓당 얻는 이윤은 늘어나지만, 수요는 감소하기 때문에 특정 구간에서 총이익이 최대값을 갖는다. 2030년에는 탑승객당 티켓 가격이 약 11만 3천 원일 때, 티켓 가격에서 이익 비율이 34.6%일 때 가장 높은 이익을 갖는 결과가 나왔다. 2035년에는 티켓 가격이 약 7만 6천 원일 때, 티켓 가격에서 이익 비율이 31.4%일 때 가장 높은 이익을 갖는 결과가 나왔다. 2030년에는 높은 티켓 가격으로 수요가 상대적으로 적게 잡히고, 낮은 수요에서 높은 이익가를 붙여 이익을 최대화를 하는 반면 2035년에는 상대적으로 낮은 티켓 가격으로 수요가 2030년에 비해 약 4배가 계산되어 1.6배 낮은 이익가에도 불구하고 약 2.5배의 총이익이 발생했다. 더 높은 이익이 발생한 이유는 주요 비용 요소들인 항공기 비용, 착륙료, 조종사 인건비가 각각 티켓 가격의 10.3%, 13.2%, 11.8%로, 2025년에 비해 각 부분 평균으로 약 37% 감소한 것과 티켓 가격을 낮추어 2030년에 비해 박리다매 형식의 판매가 더 높은 이익을 창출했기 때문이다.

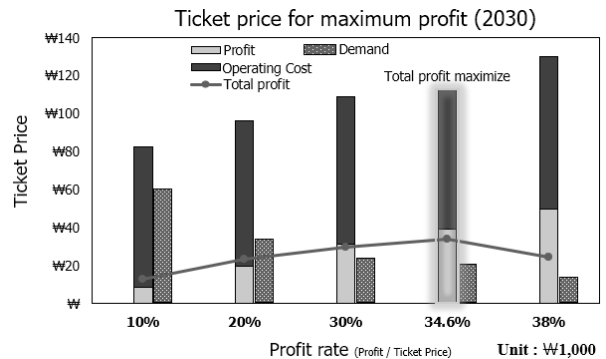


Fig. 5. Profit maximized results in 2030

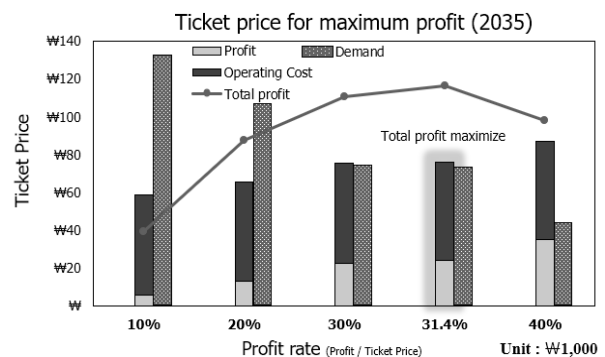


Fig. 6. Profit maximized results in 2035

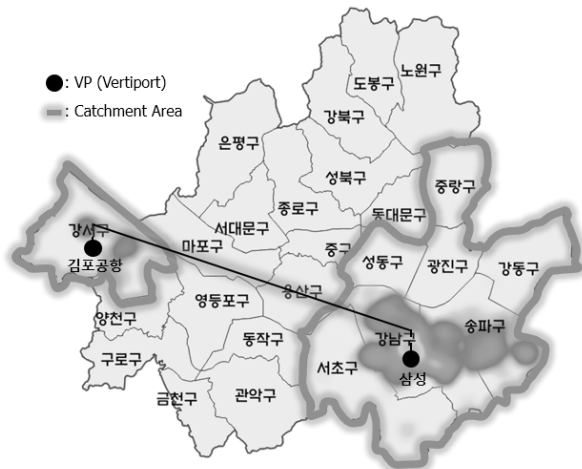


Fig. 7. Demand distribution heat map in 2035

Table 4. Normalized demand distribution in 2035

지역	강서구	성동구	광진구	중랑구
수요	0.215	0.015	0.0	0.0
지역	서초구	강남구	송파구	강동구
수요	0.087	1.0	0.516	0.0

현재 삼성역에서 김포공항까지 택시 기준으로 비용이 약 2만 5천 원~3만 2천 원 정도 수준인 것을 보아 2035년 기준으로 택시비의 약 2.5~3배의 티켓 가격이 계산되었다. 이 예측 결과는 km당 2,700원의 수준으로 같은 5인승 기체인 독일 Skycab와 Joby 사에서 예측한 km 당 티켓 가격(각각 약 2,000원~6,600원, 약 2,200원)과 유사한 수준으로 확인되었다[2,18].

Figure 7과 Table 4는 2035년 이익이 최대가 되는 티켓 가격에서 수요 분포를 나타낸다. 본 연구는 아직 초기 단계로 수요에 대한 수를 공개하기보다는 강남구의 수요 기준 정규화 값으로 제시하였다. 강남구의 수요가 가장 많이 잡히는 이유는 버티포트가 가깝다는 지리적 이점과 높은 소득으로 Income Threshold를 만족하는 비율이 다른 지역에 비해 높기 때문이다. 서초구와 송파구도 서울의 동남권 지역으로 소득이 높은 편이지만 서초구가 거리상 김포공항에 더 가깝기 때문에 단축되는 시간이 송파구보다 더 적어 수요가 보다 작게 예측이 된다. 반면 그 외의 지역들은 상대적으로 낮은 소득 및 버티포트와의 거리가 멀기 때문에 낮은 수요의 결과가 도출되었다.

III. 결 론

본 연구에서는 UAM의 개념설계, 수요와 비용추정, 운항 시나리오를 종합적으로 고려할 수 있는 다학제 UAM 설계 프레임워크 MADAM을 개발하였다. 설계 변수의 변화는 한 학제뿐만 아니라 시스템 전체 결과에 영향을

미치기 때문에 다학제간 상관관계를 고려하는 프레임워크 개발은 필수적이다. 본 프레임워크는 각 모듈의 자유도, 일반성, 확장성을 고려해 구축하였으며, 예시로 비용 예측도구는 AC², 수요예측도구로는 시간, 비용 효율 기반 수요 예측 모델을 활용하여 서울 지역의 최적 티켓 가격 분석을 보였다.

본 연구의 의의는 UAM 운영 서비스에 대해 수요 및 비용을 종합한 다학제 설계 프레임워크를 개발한 것에 있다. MADAM은 일반적인 해석 프레임워크이고, 그 예시로 서울 지역의 UAM 운영에 대해 분석하였다. 35년에는 운용비용이 낮아져 티켓 가격을 7만 6천 원까지 낮출 수 있고 30년 결과와 비교해 1.6배 낮은 티켓당 이익률에도 불구하고 높은 수요로 2.5배 더 높은 이익을 도출하는 결과를 도출하였다. 또한, MADAM을 사용한 서울의 UAM 서비스 분석결과는 서울의 지역별 UAM 수요 분포와 이익 최대화의 티켓 가격을 예측한 연구가 아직 전무하다는 것에서 의미가 있다.

본 연구는 초기 단계의 연구 결과로, 향후 항공기 개념설계도구, 운항 시뮬레이션을 같이 연다면 더 흥미로운 결과를 낼 수 있을 것으로 판단된다. 뿐만 아니라 소음, 버티포트 레이아웃과 같은 요소들을 포함하면 다양한 결과 도출이 가능하다. 향후 계획으로는 두 버티포트 뿐만 아니라 더 많은 수의 버티포트와 노선이 있는 운항 시나리오도 고려할 예정이다. 또한 항공기 개념설계 도구인 RISPECT+ [20]와 ABMS(Agent-Based Modeling & Simulation) [21]를 이용한 운항 컨셉을 개발해 적합한 운항 항공기 수 및 Dead-head flight 수를 예측한 분석을 진행할 예정이다.

후 기

본 연구는 한국항공우주연구원의 자율지능 무인이동체 통합설계 소프트웨어 개발(2020M3C1C1A01086211)의 지원으로 수행되었습니다.

References

- 1) Uber elevate, "Fast-Forwarding to a Future of On-Demand Urban Air Transportation," 2016.
- 2) Joby Aviation, "Commercializing Aerial Ride-sharing," 2021.
- 3) Husemann, M., Stumpf, E., Dirks, N. and Walther, G., "Towards the Design of Cost-Efficient Urban Air Taxi Systems," *AIAA SciTech Forum*, 2021.
- 4) UAM Team Korea, K-UAM Concept of Operation 1.0, 2021.
- 5) http://www.molit.go.kr/USR/NEWS/m_71/dtl.jsp?lcmspage=10&id=95083976
- 6) Roy, A., HERNICZEK, M. T. K., German, B. J. and

- Garrow, L. A., "User Base Estimation Methodology for an eVTOL Business Airport Shuttle Air Taxi Service," *AIAA AVIATION Forum*, 2020.
- 7) Sirirojvisuth, N., Briceno, S. and Justin, C. Y., "Life-Cycle Economic Analysis and Optimization for Urban Air Mobility (UAM)," *VFS Aeromechanics for Advanced Vertical Flight Technical Meeting*, SanJose, CA, 2020.
- 8) Sirirojvisuth, N., Briceno, S. and Justin, C. Y., "A Life-Cycle Economic Study of eVTOL Air Taxi Service in the U.S. North-East Region," *Vertical Flight Society's 76th Annual Forum & Technology Display*, Virginia, 2020.
- 9) Choi, J. H., Park, Y. H. and Jeon, I. S., "A study on the Cost of fare for UAM (Urban Air Mobility) airport shuttle service," *Journal of Korean Society of Transportation*, Vol. 39, No. 5, 2021, pp. 593~605.
- 10) Kim, H. S. and Yee, K. J., "A Novel Cost Estimation Method for UAM eVTOLs," *Journal of The Korean Society for Aeronautical and Space Sciences*, Vol. 49, No. 3, 2021, pp. 231~241.
- 11) MOLIT, K-UAM Technology Roadmap, 2021.
- 12) <https://www.ktdb.go.kr/www/index.do>
- 13) www.airport.co.kr/www/cms/frCon/index.do?MENU_ID=1250
- 14) Seoul, 2020 Seoul Survey, 2020, p. 130.
- 15) <https://www.ncloud.com/product/applicationService/maps>
- 16) <https://developers.google.com/maps/documentation?hl=ko>
- 17) Harris, F. D., Introduction to Autogyros, Helicopters, and Other V/STOL Aircraft, Volume II: Helicopters, NASA/SP-2012-215959, 2012, pp. 602~659.
- 18) Fischer, M., Heckmann, D. and Nate, A., "Assessment of the operational costs and the passengers' willingness-to-pay to evaluate the financial viability of an air taxi service," *Vertical Flight Society's 77th Annual Forum & Technology Display*, 2021.
- 19) http://www.kriti.re.kr/research/research02.php?mode=view&number=245&page=1&b_name=policy_report
- 20) Lee, D. U., Lim, D. J. and Yee, K. J., "Generic Design Methodology for Vertical Takeoff and Landing Aircraft with Hybrid-Electric Propulsion," *Journal of Aircraft*, 2021.
- 21) Jeon, C. Y. and Yee, K. J., "Analysis of operational characteristics of UAM using Agent-Based Modeling & Simulation (ABMS)," *Proceedings of The Korean Society for Aeronautical and Space Sciences Fall Conference*, November 2021, pp. 380~381.