

기상 제약조건을 고려한 계절별 UAM 경로 선정 연구: 대한민국 제주 관광노선을 중심으로

김은지¹ · 성진규² · 이강민³ · 김휘양^{4*}

¹한국항공대학교 항공교통물류학과 박사과정, ²한국교통안전공단 항공자격처 책임연구원, ³진에어 운항관리사, ⁴한국항공대학교 항공교통물류학부 부교수

A Study on Seasonal UAM Route Selection Considering Weather Constraints: Focusing on Tourism Routes in Jeju, South Korea

KIM, Eunji¹ · SEONG, Jinkyu² · LEE, Kangmin³ · KIM, Huiyang^{4*}

¹Ph.D Candidate, Department of Air Transportation and Logistics, Korea Aerospace University, Gyeonggi 10540, Korea

²Chief Researcher, Airmen Licensing Department, Korea Transportation Safety Authority, Seoul 03918, Korea

³Flight Dispatcher, Jin Air, Seoul 07802, Korea

⁴Associate Professor, Department of Air Transportation and Logistics, Korea Aerospace University, Gyeonggi 10540, Korea

*Corresponding author: igreenbee@kau.ac.kr

Abstract

Urban Air Mobility (UAM) is emerging as an alternative transportation method to solve urban ground traffic jams, but due to constraints such as infrastructure expansion and safety, Jeju Island is being considered as an early commercialization region. However, considering the regional characteristics of Jeju Island and the characteristics of UAM aircraft, the operation of UAMs in Jeju Island is expected to be highly constrained by weather requirements, especially wind. Therefore, it is necessary to consider the weather constraints in the operation planning, and this study tried to design a route for seasonal tourism UAM with wind speed as the main factor. The routes were set as Jeju International Airport - Seongsan and Jeju International Airport - Jungmun Tourist Complex, and the vertiport locations were assumed as departure and arrival points based on several key requirements such as obstacle separation and site availability. For route design, we analyzed the seasonal and spatial wind speed impact on Jeju Island based on meteorological data at the expected flight altitude of the UAM, converted the constraints such as ground obstacles and tourist attractions into a total cost, and derived seasonal routes with the minimum cost by also considering the distance. As a result, it was found that the flight paths for each route were selected differently by season. This study is expected to contribute to the initial demonstration and actual operation of UAMs by presenting a route planning method and results considering weather, which is a major constraint in UAM operations.

Keywords: geographic information system, route selection, urban air mobility, weather, wind speed impact

J. Korean Soc. Transp.
Vol.42, No.2, pp.125-138, April 2024
<https://doi.org/10.7470/jkst.2024.42.2.125>

pISSN : 1229-1366
eISSN : 2234-4217

ARTICLE HISTORY

Received: 10 November 2023

Revised: 6 December 2023

Accepted: 29 March 2024

Copyright ©
Korean Society of Transportation

This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

초록

도심항공교통(Urban Air Mobility, 이하 UAM)은 도심 지상교통혼잡 해결을 위한 대체 교통수단으로 대두되고 있으나, 인프라 확충 및 안전성과 같은 제약사항으로 인해 초기상용화 지역으로 제주도가 검토되고 있다. 그러나, 제주도의 지역적 특징과 UAM 기체의 특성을 고려할 때, 제주도에서의 UAM 운용은 기상요건, 특히 바람에 많은 제약을 받을 것으로 생각된다. 따라서 운항 검토에 있어 기상 제약조건에 대한 고려가 필요하며, 본 연구는 그중 풍속을 주요인으로 하여 계절별 관광 UAM의 경로를 선정해보고자 하였다. 노선은 제주국제공항-성산 및 제주국제공항-중문관광단지로 설정하고, 장애물 분리, 부지확보 가능 여부 등 몇 가지 핵심 요건을 토대로 버티포트 위치를 선정, 출, 도착지로 가정하였다. 경로 선정은 UAM 예상 운항 고도에서의 기상자료를 토대로 제주도 전역에 대한 계절별, 공간별 풍속 영향도를 분석한 결과에 지상 장애물과 관광지까지 세 가지 제약조건을 종합 비용으로 환산, 거리까지 고려하여 최소비용을 가지는 노선별, 계절별 경로를 도출하였다. 그 결과 노선별 비행경로가 계절별로 상이하게 선정된 것을 확인할 수 있었다. 본 연구는 UAM 운항에서의 주요 제약조건인 기상을 고려한 경로 선정 방법과 그 결과를 제시함으로써, UAM 초기 실증 및 실제 운영에 기여할 수 있을 것으로 기대된다.

주요어: 공간정보시스템, 경로 선정, 도심항공교통, 기상, 풍속 영향도

연구의 배경 및 목적

UAM은 도심 내 활용이 가능한 전기동력 수직이착륙기(eVTOL) 등을 이용, 승객이나 화물 운송 등을 목적으로 타 교통수단과 연계되어 운용되는 새로운 항공교통체제로 도심 내의 승객 및 화물 운송을 비롯하여 공공목적과 관광사업 등을 위해 운용될 수 있다(UAM Team Korea, 2021). UAM은 도심 지상교통혼잡을 해결할 수 있는 새로운 패러다임의 교통수단으로 전 세계적인 주목을 받고 있으며, 대한민국 정부는 2025년 상용화를 목표로 2023년 4월 국토교통부의 UAM 안전운용체계 기술을 국가전략으로 선정한 바 있다.

UAM은 항공교통 수단을 이용한 3차원 교통체계로써 기존의 지상 교통과는 전혀 다른 특성을 가지며, 도심에서 UAM을 운용하기 위해서는 많은 제약조건을 극복해야만 한다. 그중 하나로는 버티포트 인프라 확충 문제가 있다. UAM의 지상 인프라인 버티포트는 기존 공항 및 터미널과 다른 새로운 설계 및 운용기준이 필요하며, 상용화 초기 소형 버티포트 기준 설계안을 적용할 경우 약 14,000m²의 면적 확보가 요구된다(UAM Team Korea, 2022). 또 다른 운용 제약조건으로는 안전성을 꼽을 수 있다. UAM 운항의 주요한 위해 요인 중 하나는 지상의 사람 또는 건물과 충돌하는 것인데(Washington et al., 2017), 이는 인구밀도가 높은 도심지에서 발생할 확률이 높기 때문이다(Oh et al., 2022). 위와 같은 도심 운용에서의 제약을 반영하듯, SK텔레콤, 한국공항공사, 한화시스템 등이 참여하고 있는 UAM 컨소시엄은 UAM 상용화 실증사업 시행을 위한 첫 지역으로 제주도를 선정하였다(Money today, 2023). 제주도에서의 UAM 상용화 방안은 특별히 제주도의 지역적 특징이라고 할 수 있는 관광 수요를 중심으로 검토되고 있다(Ihalla, 2023).

제주도에서의 관광 UAM 운용은 상용화 초기 단계에서의 적절한 전략이라고 할 수 있다. 그 첫 번째 이유는 제주도가 UAM 인프라 구축에 적절한 지역으로 보이기 때문이다. UAM 인프라 구축에 적절한 입지의 조건으로는 낮은 인구 밀집도, 많은 유휴지, 호수나 강 등과의 인접성, 취약한 대중교통망, 인근 대형공항의 존재가 있는데(Robinson et al., 2018), 제주도는 이와 같은 조건을 대부분 충족하는 곳으로 볼 수 있다. 특히, UAM 운용 제약사항인 인프라 확충과 안전성 문제해결을 위해서는 다수의 유휴지가 존재하고 인구밀집도가 낮은 지역이 적절하듯 제주도의 경우 전체 면적의 27.9%가 목야지나 유휴지이며, 인구밀집도는 서울 대비 약 2.3% 수준이다(Statistics Korea, 2023).

둘째, UAM 상용화 초기에는 통근 혹은 통학보다 관광 목적의 이용에 대한 수용성이 더 높을 수 있기 때문이다. 국내 20세 이상 성인 남녀 300명 대상의 설문 조사 결과에 따르면 통근, 통학 목적보다는 쇼핑, 문화생활과 같은 여가활동 목적의 UAM 이용 의사가 더 높게 나타났으며, 이는 대중들이 UAM을 일상적 교통수단보다 여가 목적으로

더 선호한다는 것을 보여주는 것이다(Lee et al., 2022a).

그러나, 제주도에서의 UAM 운용에는 필수적으로 고려해야 할 주요 제약요인이 있다. Figure 1은 맞바람이 비행체 크기 및 속도에 따라 운항시간에 미치는 영향을 나타내고 있는데, 순항속도가 낮은 소형 비행체는 비행시간 오차가 증가하는 등 맞바람이 미치는 영향이 급격히 커지는 것을 볼 수 있다(Campbell et al., 2017). UAM 기체는 소형 비행체로 개발이 진행 중이므로 기상 조건에 대한 민감도가 일반 항공기보다 더 클 수 있으며, 특히 저고도로 비행하게 되는 UAM의 운항 특성상 바람은 안전에 영향을 미칠 수 있는 상당히 중요한 요인으로 작용할 것이다. 이는 기상 변화가 잦으며, 특히 내륙과 비교하여 강한 바람이 자주 부는 특징이 있는 제주도에 특히 고려해야 할 제약조건이 될 수 있다.

따라서, 본 연구는 기상 요인을 고려한 UAM 경로 선정 방법을 제시하고자 하며, 특히 구체적인 사례로 제주지역을 선정, 바람을 고려한 계절별 관광노선을 제안함으로써 UAM 초기 실증 및 운영에 기여하고자 한다.

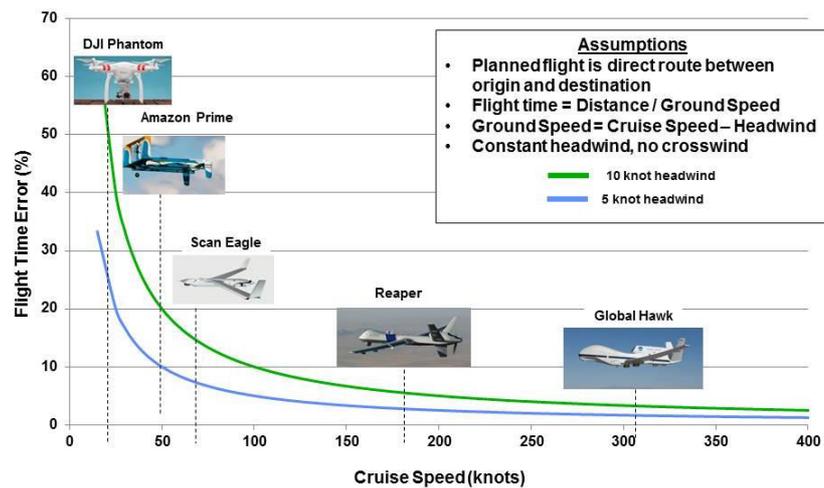


Figure 1. Effect of a headwind on flight time for various UAM (Campbell et al., 2017)

선행연구

1. UAM 기상 영향도

Reiche et al.(2018)은 법률 및 규제, 기상, 기체 인증, 대중적 인식, 인프라 등을 UAM 운항 제약조건으로 검토하여 다양한 비즈니스 모델에 대한 시장 규모를 측정하는 연구를 수행하였다. 이때 UAM 시장 성숙도에 따른 과제들을 규명하였는데, 기상의 경우 단기와 장기 시장 모두에서 UAM의 운항을 제한할 수 있는 주요 요인으로 꼽혔다.

발굴한 제약사항들을 토대로 UAM 운항 가능성을 구체적으로 평가하기 위해 Reiche et al.(2021)은 기상으로 인한 운항 영향도 분석에 관한 연구를 진행, 미국 도심지 10곳(델러스, 덴버, 로스엔젤레스 등)을 선정하여 UAM 고도에 대한 계절별 및 일별 기상분석을 수행하였다. 기상분석 수행기준을 정립하기 위하여 METAR¹⁾ 자료에 포함된 기상 현상을 대상으로 1부터 10 사이의 값으로 영향점수를 정의하고, 이를 활용하여 10개 도심지에 대해 계절별, 운영 시간대별 평균 영향 점수(impact score)를 산정하였다. 이때, 영향점수 3을 초과하는 경우를 UAM 운항이 기상에 영향을 받을 수 있는 '영향 시간대'로 정의, 계절별 '영향 시간대'의 평균 빈도를 산정하여 지역별 기상 영향도 분석을 수행하였다. 정의한 영향점수표가 Table 1에 나타나 있다.

1) METeoro logical Aerodrome Report, 공항지역의 기상정보가 포함된 경시관측보고

Table 1. Impact scores for each weather condition from METAR (Reiche et al., 2021)

Weather condition	Score	Weather condition	Score
Drizzle	1	Wind 20-25kts	7
Rain	1	Smoke (<3sm)	7
MVFR ceiling	1	LIFR ceiling	7
Haze	1	Non-VFR visibility	7
Ice crystals	1	Wind ≥ 25kts	8
Sand whirls	1	Sleet	8
Sand	2	Squalls	8
Snow grains	2	Fog	8.5
Temp ≤ 32°F	3	Freezing fog	8.5
Temp ≥ 100°F	3	Freezing drizzle	9
Non-VFR ceiling	4	Thunderstorms	9
Dust	5	Dust storm	10
Snow	5	Funnel cloud/Tornado	10
Sandstorm	5	Freezing rain	10
Wind 15-20kts	5	Hail	10
Mist (vis >= 5/8sm)	6	Volcanic ash	10
Snow pellets	6		

Chao et al.(2021)은 Reiche et al.(2021)이 정의한 영향점수표(Table 1)를 활용하여 도심 2개 지역 기상 영향도 분석연구를 수행하였다. 이때, 평균 영향점수를 산정하여 위험도를 평가한다면 점수가 높은, 즉 운항에 대한 영향이 매우 큰 기상 현상의 영향도가 줄어들 수 있어 실제 위험성을 온전히 반영하지 못한다는 문제를 제기하였다. 이에 동일 시간대에서 가장 높은 점수를 해당 시간대의 영향점수로 간주하고, UAM 운항의 목적인 통근을 반영하기 위해 시간대별 통근 통행량을 별도의 가중치로 부여하여 기상 영향도를 분석하였다.

2. UAM 경로 선정

Lee et al.(2020)은 UAM 운용체계 개념을 기반으로 사례 지역 서울시에 대한 운항 경로를 구축하였다. 운용체계 개념을 비행체, 환경, 규정, 교통, 인프라 총 5가지로 나누어서 검토한 후 주요 고려 대상으로 공역 운용상 제한, 각 공항의 관제권 구성, 이착륙장 시설 선정 관련 규정, 인프라 요소를 선정하였고, 이를 기준으로 경로를 구축하였다. 이때, 주요 고려 대상에 저촉하지 않는 조건에서 기존 항공기 회랑(Corridor)²⁾, 시계비행경로, 시각참조점 등 기존 인프라를 최대한 활용한 경로를 제시하였다.

Lee et al.(2021)은 UAM이 승객 수요를 즉각적으로 파악하여 수송 경로를 결정한다는 가정에 따라 VRPP (Vehicle Routing Problem with Profit) 기반의 경로 계획 방법을 제시하였다. 다수의 승객이 존재하나 자원은 한정된 상황에서 이익을 최대화하는 방향으로 승객의 수송 순서를 결정하여 경로를 선정하는 방법이며, 해당 연구에서는 한정된 자원을 UAM의 운송 시간으로 두어 최대의 이익을 얻을 수 있는 경로를 선정하는 방법을 제시하였다.

Lee et al.(2022b)는 UAM 상용화를 위해서는 도심 내 다양한 환경과 장애물을 고려한 안전성이 확보되어야 한다는 필요성에 따라 경로상 존재하는 위해요소와 도움 요소를 식별하고, 이를 기반으로 최적 경로를 산출하였다. 위해요소와 도움 요소로 국가 공역, 항로, 제한구역, 고속도로 및 하천 현황, 비상 착륙지, 고층빌딩 등의 요소를 식별하였으며 각 요소를 중요도에 따라 점수화하여 격자화한 공간에 점수를 책정하였다. 그 후, 책정된 최종점수를 지도에 히트맵으로 시각화하고 격자 색상 및 지형지물 환경에 따라 항공로의 웨이포인트를 지정하는 방법으로 경로를 선정하였다.

Sung et al.(2023)은 서울시를 대상으로 버티포트의 최적 입지를 선정하고 해당 버티포트 간의 최적 경로를 선정하였다. 버티포트의 최적 입지는 대중교통 수요량, 생활인구 밀도, 연평균 소득, 개별공시지가, 대중교통과의 거리,

2) 특정 고도로만 비행이 가능한 구역

주거 건물 밀집도를 기준으로 선정하였으며, 최종적으로 12개의 버티포트 입지를 결정하였다. 버티포트 간 최적 경로는 산지 고도와 비행금지구역 등 공역 상 장애물이 있는 공간을 제외하고 고속도로 및 하천에 대해서는 가산요인을, 주거 건물 밀집 지역에 대해서는 감산요인을 적용하여 Dijkstra 알고리즘에 따라 선정하였다.

3. 본 연구의 차별성

UAM에 대한 기상 영향도를 평가한 기존 연구의 경우, 선정지역의 기상요건이 UAM 운항에 미치게 될 영향도를 평가하는 것을 목적으로 하였으며 시간대, 통근 통행량 등의 요인을 반영하여 공간별로 기상 영향도를 계량화된 점수로 책정하고 운항 영향도 평가에 활용하였다. 그러나, 두 연구 모두 UAM의 운항 고도에서 수집되거나 관측된 자료가 아닌 지상 관측 자료를 분석에 사용하였다는 한계가 있었다. UAM 경로 선정과 관련된 기존 연구의 경우, 제한구역 등의 공역 환경, 기존 인프라, 승객 수요 및 한정된 자원 등 각 연구 별로 주요하게 고려하는 요인을 반영하여 UAM 운항에 적절한 경로를 선정하였으나, 기상 요인을 경로 선정에 반영한 연구는 찾기 어려웠다.

이에 본 연구에서는 공간적 범위인 제주도에 대하여 UAM 운항 고도 범위에 준하는 기상자료를 활용해 공간별 기상 영향도를 계량화된 점수로 책정하고, 이 기상 영향점수를 경로 선정에 활용하여 기상을 고려한 UAM 경로를 선정해보고자 하였다.

연구의 방법

본 연구에서는 기상요건, 그중에서도 바람을 고려하여 계절별 UAM 관광노선을 선정해보고자 하였으며 이를 위해 다음과 같은 과정으로 연구를 수행하였다.

첫째, 장애물 분리조건 및 설치부지 확보 가능 여부 등 주요 요건을 고려하여 경로의 출, 도착지로 기능하는 버티포트의 위치를 가정하였다. 둘째, 가정한 버티포트를 UAM 출발 및 도착지로 적용하고, 주요 경로 선정 요인과 실제 거리를 통합적으로 반영하여 최소비용 기반의 계절별 단일 경로를 선정하였다. 최소비용 기반 경로 선정 방법으로는 전문적인 공간정보 분석 및 시각화를 제공하는 프로그램인 'ArcGIS' 내의 '래스터 형식 최적 경로' 기능을 사용하였다. '래스터 형식 최적 경로' 기능은 공간을 격자화하여 각 격자에 사용자가 자율적으로 할당된 비용과 측지거리³⁾를 기반으로 출발지에서 도착지까지의 비용과 거리를 모두 고려한 최적 경로를 선정할 수 있다.

주요 경로 선정 요인을 통합 반영하여 최적 경로를 산출하기 위해 본 연구에서는 경로 선정 요인을 각각 비용으로 환산하고, 합산한 총비용을 산출하여 대상 공간에 대한 통합 비용 지도를 구축하였다. 이때 주요 경로 선정 요인으로는 장애물, 풍속 및 관광지를 고려하였으며, 각 선정 요인을 고려한 이유는 다음과 같다.

우선, 항공교통은 3차원 공간인 공중을 이용하는 특성상 장애물과의 분리 기준을 필수적으로 고려해야 할 필요가 있다. 본 연구의 공간적 범위인 제주도는 비행금지구역 등 공역 구분으로 인한 제한은 적으나, 산지 등 지형지물이 공역 사용의 방해 요인이 될 수 있다. 따라서 국내 항공법에서 제시하는 시계비행(Virtual Flight Route) 시의 수직, 수평 장애물 분리 기준을 적용하여 장애물 요인을 반영하였다.

두 번째로, 본 연구에서는 풍속을 검토할 주요 기상요건으로 채택하였다. 그 이유는 우선 연구의 공간적 범위인 제주도가 내륙에 비하여 강한 바람이 자주 부는 특징을 지니고 있어 이를 반영하고자 한 것이다. 또한, UAM의 주요 기체인 eVTOL 항공기는 보편적으로 회전익 항공기로 설계되는데 회전익 항공기는 일반적으로 바람의 방향에 상관없이 어느 방향으로나 기동할 수 있다. 따라서 바람의 속성 중 풍향보다는 풍속이 UAM 운항의 기동성과 안정성에 영향을 미칠 수 있는 주요 요인이라고 볼 수 있으며, 실제로 eVTOL 항공기의 풍속 저항성을 중요하다고 여겨 이를 측정하는 방법에 관한 연구 또한 이루어진 바가 있다(Hou et al., 2019). 이에 본 연구에서는 풍속을 중심으로 경로를 선정해보고자 하였으며, 계절별 단일 경로를 선정하는 만큼 평균적인 경향성을 반영할 필요가 있어 제주도 전

3) 지구가 구 혹은 타원체라는 점을 반영, 3D 구의 곡면으로 산정한 거리

역 공간에 대한 최근 5년의 평균 풍속 영향도를 산정하여 경로 선정에 활용하였다. 기상자료로는 초단기 기상분석 및 예측시스템(Korea Analysis and Prediction System, 이하 KLAPS) 재분석 자료를 사용하여 UAM 예상 운항 고도에서의 풍속을 반영하였으며, UAM 기상 영향점수표(Reiche et al., 2021, Table 1 참조)를 적용해 계절별, 공간별 평균 풍속 영향도를 산정하였다.

마지막 선정 요인인 관광지의 경우 본 연구에서 다루는 대상 사례가 제주도에서 운용되는 ‘관광용’ UAM이므로 이를 반영하고자 한 것이다. 본 연구에서 정의하는 ‘관광용’ UAM이란, UAM 교통 자체가 하나의 관광 상품으로 기능하는 서비스를 의미한다. 즉, 출-도착지 간 이동보다는 UAM을 이용하는 행위 자체가 목적이 될 수 있다. 따라서 선정하는 경로가 관광 상품으로서의 가치를 갖도록 제주도 내의 유명 관광지 및 계절별로 특색을 가지는 관광지를 공중에서 경유할 수 있게끔 경로 선정을 유도하고자 하였다.

계절별 관광 UAM 경로 선정

1. 출/도착지(버티포트) 위치 선정

본 연구에서는 ‘제주형 UAM 시범사업’ 등의 실증사업에서 추진을 계획 중인(Invest, 2023) 버티포트 위치(제주 국제공항, 중문관광단지, 성산 일출봉)를 경로 출발 및 도착지 위치로 준용하였다.

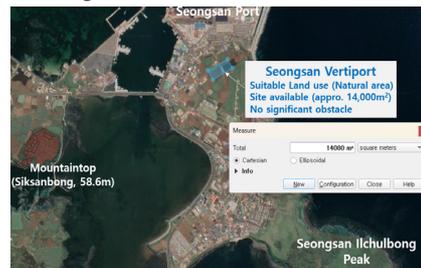
이때, 한국형 버티포트 구축 및 운용 안내서에서 제시한 버티포트 입지요건 체크리스트를 기반으로 구체적인 버티포트 위치를 선정하였다. ① 버티포트 접근 및 출발 경로상 장애물과 분리, ② 관광지 인근(여객수요 및 접근성), ③ 버티포트(이착륙패드 1개, 계류장소 2개 및 터미널 1개소 설계기준) 설치부지(약 14,000m²) 확보 가능 여부 및 ④ 용도지역에 따른 토지이용행위 적합성(제주도의 경우 공항시설은 도시계획조례에 따라 상업, 공업, 자연녹지지역 내 설치 가능)과 ⑤ 공항지역 버티포트의 경우 기존 항공기 비행경로와 최대한 분리된 UAM 운항 가능 여부(할주로로부터 최소 2,500피트 이격) 이상 총 5가지 조건을 핵심 요건으로 판단, 이를 바탕으로 위치를 검토하였다. 그 결과 Figure 2와 같이 제주공항은 여객터미널 주차장 서편지역, 중문관광단지는 중문골프장 인근, 성산 일출봉 지역의 경우 성산항 인근 부지가 적합한 곳으로 평가되어 해당 위치를 버티포트의 위치로 가정, 출/도착지로 경로를 선정하였다.



Jeju Airport : West side of Airport Parking lot



Jungmun Tourist Complex : Around Jungmun CC



Seongsan Ilchulbong peak : Around Seongsan Port

Figure 2. Selection of vertiport location

2. 경로 선정 조건 환산

버티포트 위치로 가정한 제주국제공항, 성산 일출봉, 중문관광단지를 기준으로 제주공항-성산 및 제주공항-중문관광단지 2개 노선에 대해 계절별 경로를 선정하였다.

적절한 비용 입력이 경로 선정에 있어 중요한 요인으로 본 연구에서는 다음과 같은 경로 선정 제약조건을 설정, 비용으로 환산하였다. 첫째, 경로 내에 장애물 제한사항을 충족한다. 둘째, 풍속 영향점수가 낮은 공간으로 최대한 운항한다. 셋째, 본 연구에서 검토하는 UAM의 목적은 통행이 아닌 관광으로, 제주도 내 주요 관광지 및 계절별 특화 관광지를 최대한 경유하도록 한다. 각 제약조건을 기준에 따라 음 혹은 양의 비용으로 환산, 통합 비용으로 합산한 후 최소비용 기반의 경로를 선정하였다.

1) 장애물

UAM 비행경로의 예상 고도는 일반 항공기보다 낮은 300-600m 사이로, 비행고도 내에 건물이나 산지 등의 장애물이 존재할 수 있다. 시계비행⁴⁾에 대한 장애물 회피 수직 분리 기준으로 항공안전법 시행규칙 제199조(최저비행고도)에서 일반지역은 150m(500ft), 인구 밀집 지역 상공의 경우에는 300m(1000ft)의 수직 분리를 규정하고 있다.

본 연구에서는 UAM 운항에 영향을 줄 수 있는 장애물의 범위를 건물 및 지형으로 정의하고 국가정보포털에서 건물의 위치 및 높이 정보, ArcGIS 내장 데이터로부터 제주도 지형 고도 정보를 수집, 반영하였다. 건물에는 인구 밀집 지역의 분리규정을(300m), 지형에는 일반지역 규정을(150m) 수직 분리 기준으로 적용하였다. 그 결과, 300m 이상인 건물이 제주도 전역에 총 8개 존재하여 영향이 거의 없는 것으로 분석되었다. 기타 제주도 대부분 지역은 일반지역에 해당하며, UAM 비행 고도 300-600m에 분리 기준을 적용하면 장애물의 최대 허용 가능 고도는 450m 이하라고 할 수 있다. 따라서 450m를 초과하는 고도의 지형에서는 UAM 운항이 불가하다. 또한, 지형 장애물의 고도가 150m 이하인 경우는 장애물이 존재하지 않는 것으로 판단할 수 있다. 종합하여 지형 고도에 따른 비용을 Table 2와 같이 설정하였다. 150m 이하는 장애물에 따른 영향이 없어 비용이 없으며, 150-450m 사이는 약간 제한되어 100의 비용으로 책정하였으며, 450m를 초과하는 경우는 운항이 불가하여 분석범위에서 제외하였다. 이를 바탕으로 도출된 지형 고도 래스터는 Figure 3과 같다.

Table 2. Cost and color code for terrain elevation

Terrain elevation range	Color code	Cost
Less than 150m		0
150 to 450m		100
450m or more	Null	Null



Figure 3. Analysis results for terrain elevation

4) Visual Flight, 항공기 조종사가 외부의 상황을 보며 육안으로 지형지물을 참조하며 하는 비행

2) 풍속

본 연구에서는 분석 자료로 초단기 기상분석 및 예측시스템(Korea Analysis and Prediction System, 이하 KLAPS) 재분석 자료를 사용하였다. KLAPS는 기상분석 및 예측시스템을 기반으로 관측자료를 추가, 한반도 중심의 공간영역에 대한 기상자료를 재생산한 것으로 초단기 AWS⁵⁾, AMeDAS⁶⁾, METAR, 수직측풍장비, 레이더, 위성 자료, 낙뢰자료, 항공기 기상관측자료인 AMDAR⁷⁾ 등 사후에 가용한 모든 관측자료를 활용하여 기상 현상을 보다 현실에 가깝게 모의한다고 알려져 있다(Kim, 2011). 또한, 1시간 간격, 수평 해상도 5km, 1100hPa부터 50hPa까지 50hPa 간격의 공간적 범위에 대해 연직 격자로 이루어진 3차원 고해상도의 범위를 가지고 있다. 즉, KLAPS는 예측 자료이나 관측 데이터가 일부 반영되어 있으며, 수집 범위에 따라 UAM 비행고도에 해당하는 기상 현상의 반영이 가능한 자료이다.

이에 2018년부터 2022년까지의 제주 내륙지역 KLAPS 자료를 수집, 지면 고도와 UAM 운항 고도에서의 평균 풍속을 분석하였다. 계절의 평균적인 경향성을 반영하기 위해 태풍 발생 시기의 자료를 제외하고 이상치를 제거하여 분석하였으며, 그 결과는 Figure 4와 같다.

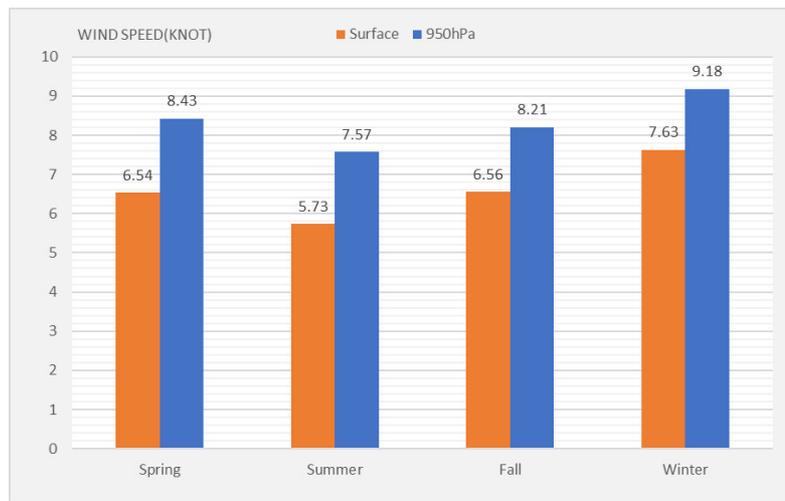


Figure 4. 5-year seasonal average wind speed at surface and 950hPa altitude of Jeju Island

모든 계절에서 지상보다 약 500m(950hPa) 고도에서의 평균 풍속이 약 2knots 정도 강하며, 계절별로 풍속 차이가 존재하는 것으로 나타나고 있다. 이는 기상이 UAM 운항에 미치는 영향도를 분석할 때 UAM 비행경로 고도에서 수집된 자료를 사용할 필요가 있으며, 계절별 분석 또한 유의미할 수 있음을 시사한다.

위 분석결과를 기반으로 최근 5년(2018-2022) 기준 자료에서 가용한 최소범위인 수평 5km 격자 단위에 연직으로는 UAM 경로 고도 범위인 300-600m에 준하는 기압 고도 950hPa에서의 측정자료로 제주도의 공간별 풍속을 분석하고 비용으로 환산하였다.

공간별 풍속을 비용으로 환산하기 위해 Reiche et al.(2021)이 제시한 영향점수표(Table 1)를 준용하였으나, 해당 영향점수표는 공항지역을 중심으로 관측된 기상자료에 대한 영향점수를 산정한 것으로 기존 일반 항공기가 영향을 받는 기상 현상을 중심으로 책정된 점수라고 할 수 있다. 따라서 UAM에 영향을 미칠 수 있는 풍속 수준을 설명하기에 다소 제한적이라고 판단되어 추가 기준을 적용하였다.

개발 중인 UAM 비행체 속도(예. Joby S4 322km/h, Lilium Jet 280km/h 등)는 헬리콥터와 유사(UH-60

5) Automatic Weather Station, 자동기상관측시스템에서 수집되는 기상 관측자료

6) Automated Meteorological Data Acquisition System, 일본 기상청에서 개발한 지상 기반 관측 시스템

7) Aircraft Meteorological Data Relay, 민간 항공기를 이용한 대기 고층부의 기상 관측 수집 자료

280km/h)한 수준으로 볼 수 있다. 이에 FAA(미국 연방항공청, 2022) 헬리콥터 운항참고서에 10knots 이상 바람에 대한 주의가 필요하다고 제시된 점을 참고, 10-15knots 사이의 기준을 추가하였다. 기존 영향점수의 구간 편차를 감안해 4점으로 책정하였으며, 결과적으로 본 연구에서 정의한 풍속 영향점수는 Table 3과 같다.

Table 3. UAM Impact scores for wind speed

Wind speed	Impact score
≤ 10knots	0
10-15knots	4
15-20knots	5
20-25knots	7
≥ 25knots	8

위 점수를 사용하여 풍속을 비용으로 책정하되, 장애물 및 관광지 비용 수준과의 일관성을 위해 100을 곱한 값으로 환산하여 비용으로 적용하였다. Table 4는 풍속 영향점수, 환산 비용과 해당하는 색상이다. Reiche et al.(2021)이 기상 영향점수표와 함께 해당 점수가 3.0 이상일 경우 UAM 운항에 영향을 미칠 수 있다고 제시한 점을 참조, 3.0 이상의 점수를 강조하여 색상을 지정하였다. Figure 5는 풍속 영향점수를 계절별, 공간별로 시각화한 결과로, 계절 및 공간에 따른 풍속 분포가 상이함을 볼 수 있다. 결과를 통해 계절별로 공간에 대한 풍속의 영향도를 고려하여 경로를 설정해야 할 필요가 있음을 다시 한번 확인할 수 있다.

Table 4. Color code of impact scores and cost for wind speed

Impact scores for wind speed	Color code	Cost
≤ 0.5		≤ 50
0.5-1.0		50-100
1.0-1.5		100-150
1.5-2.0		150-200
2.0-2.5		200-250
2.5-3.0		250-300
≥ 3.0		≥ 300

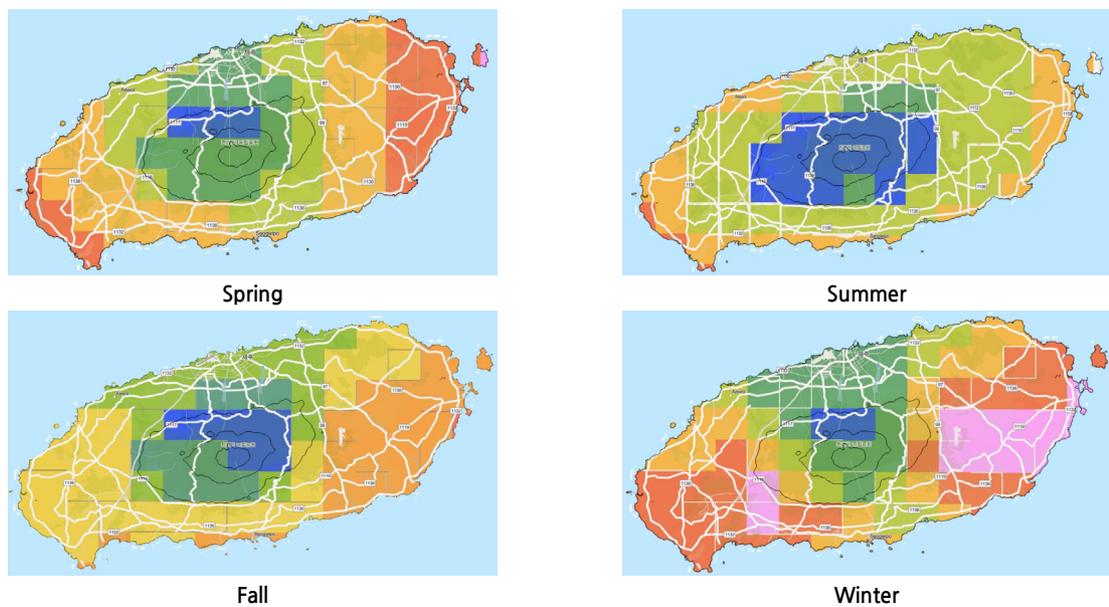


Figure 5. Distribution of wind speed impact scores for each season

3) 관광지

관광지는 제주관광공사에서 제공하는 제주도의 30대 인기 관광지를 수집하였으며, 그 위치는 Figure 6에 나타나 있다. 또한, 계절별 관광 경로의 특색을 위하여 계절에 따른 차이를 가지는 식물(꽃)을 중심으로 Table 5와 같이 계절별 특화 관광지를 추가 반영하였다.

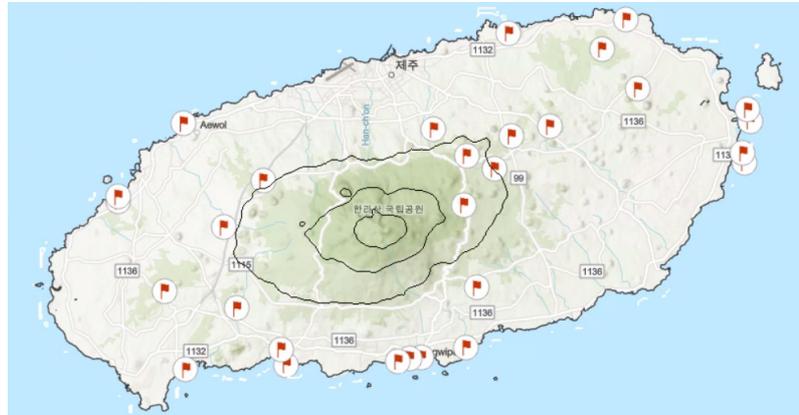


Figure 6. Major tourism location

Table 5. Seasonal flowers and tourism locations in Jeju Island

Season	Flower	Blooming month	Tourism location
Spring	Rape flower	Mar to May	Sanbongsan, Seopjikoji, Noksan-ro
	Hydrangea	Apr to Aug	Camellia hill botanical garden, Hueree nature life park, Boromwat, Jongdal-ri flower road, Wimi-ri flower road
Summer	Cherry blossoms	Mar to Apr	Noksan-ro, Jeju national university, Samseonghyeol, Jeonnong-ro
	Sunflower	Jun to Jul	Hamdeok seoubong peak trail, Let's run park
	Lavender	Jun to Jul	Boromwat, Jeju herb garden
Fall	Pink Mully	Sep to Nov	Hueree nature life park
	Buckwheat flower	Sep to Oct	Boromwat, Ora-Dong green barley - buckwheat field
	Flame grass	Oct to Nov	Sangumburi , Saebyeol oreum
Winter	Camellia	Dec to Apr	Camellia hill botanical garden, Camellia forest, Jeju camellia arboretum
	Apricot blossom	Feb	Geolmae eco park, Hueree nature life park, Seogwipo chilsipnisi park

관광지의 경우 경로 선정에 있어 비용이 아닌 편의 조건이므로 음의 비용을 적용해야 한다. 계절별로 차별화된 관광 UAM 경로를 도출하고자 계절 특화 관광지를 경유하는 경우 -200의 비용을, 기타 주요 관광지에는 -100의 비용을 책정하였다. 책정의 기준은 주요 관광지와 계절 특화 관광지 간에 비용적 차별성을 두면서도, 주요 관광지이면서 계절 특화 관광지일 경우 풍속의 영향이 다소 있더라도 해당 지점을 경유할 수 있도록 유도할 수 있는 수준으로 하였다.

4) 통합 비용

위 과정을 통해 산정된 장애물, 풍속 및 관광지 요인별 비용을 합산, 통합 비용 래스터를 산출하였으며, 그 예시(겨울)는 Figure 7과 같다. 적색에 가까울수록 높은 비용을 의미하는데, 풍속 영향도가 높으며 지상 장애물이 존재하는 공간에 가장 높은 통합 비용이 책정된 것을 확인할 수 있다.

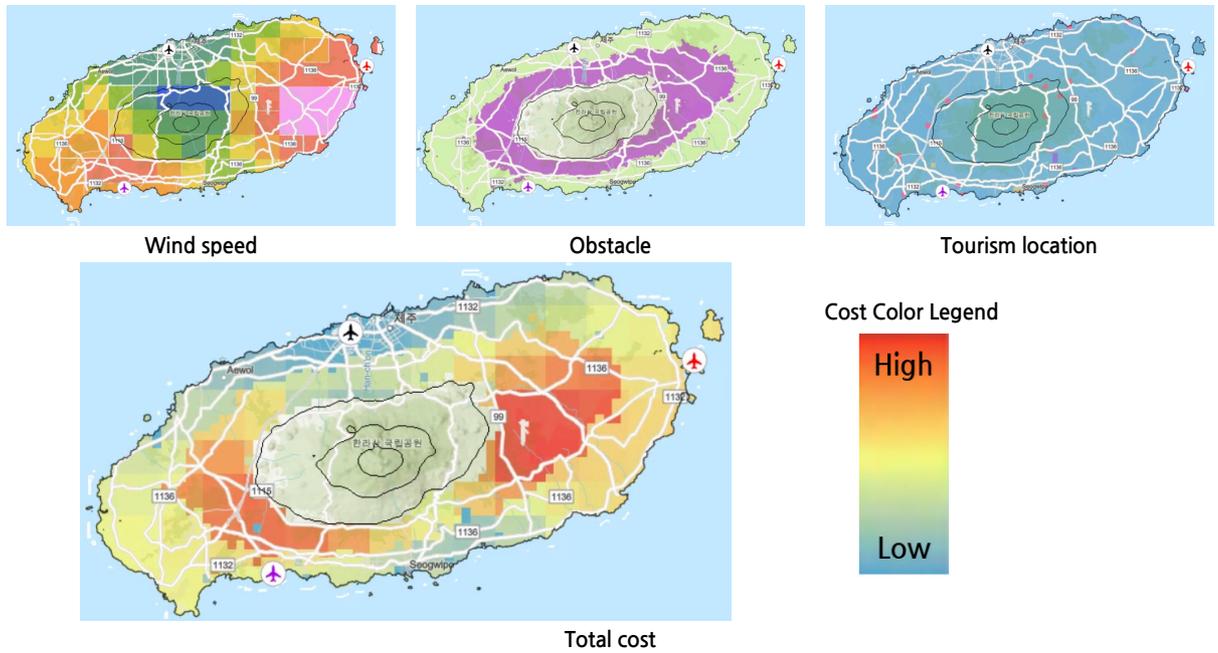


Figure 7. Raster of Wind speed, obstacle, tourism location, and total cost (winter)

3. 경로 선정 결과

계절별 통합 비용 지도와 경로 선정 방법에 따라 산출된 관광 UAM 경로는 Figure 8과 같다. 최소비용 원칙에 따라 통합 비용이 낮은 공간을 중심으로, 공간 간 통합 비용의 차이가 크지 않을 경우 거리를 고려하여 경로가 선정되었다. 또한, Table 6과 같이 계절별 경로에서 주요 관광지를 경유하는 것으로 나타나 본 연구의 목적인 관광 UAM에 적절한 경로가 도출되었다.

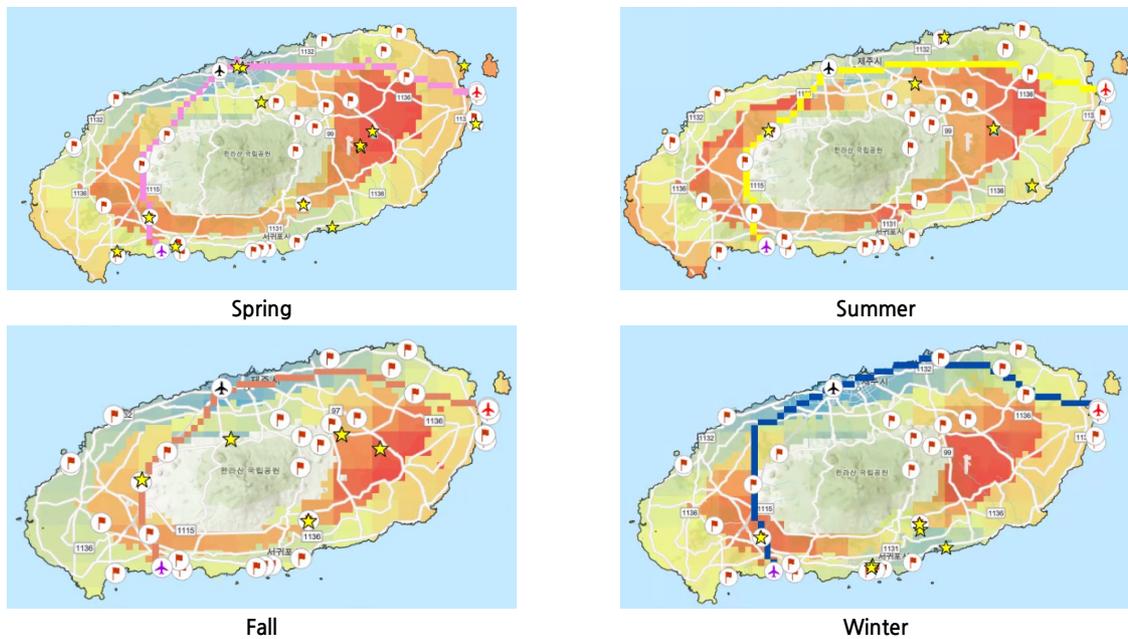


Figure 8. Seasonal UAM route with total cost

Table 6. Tour spot for each seasonal UAM route

Season	Jeju Airport - Jungmun	Jeju Airport - Sungsan
Spring	Let's run park Jeju, Saebyeol oreum, Camellia hill*	Samseonghyeol*, Bijarim forest
Summer	Let's run park Jeju*, Saebyeol oreum, Camellia hill	Bijarim forest
Fall	Let's run park Jeju, Saebyeol oreum*, Camellia hill	Bijarim forest
Winter	Saebyeol oreum, Camellia hill*	Hamdeok seoubong beach, Manjanggul, Bijarim forest

*: Seasonal Tourism locations

계절별, 노선별 UAM의 경로를 비교하면 Figure 9와 같으며, 계절별로 차이가 존재함을 볼 수 있다.



Figure 9. Seasonal UAM route

본 연구에서 도출한 계절별 관광 UAM 경로와 기타 항공정보(제주공항 시계비행로, 각종 공역, 헬기장 위치 등)를 종합 반영한 제주 관광 UAM 특화지도를 Figure 10과 같이 구축하였다.

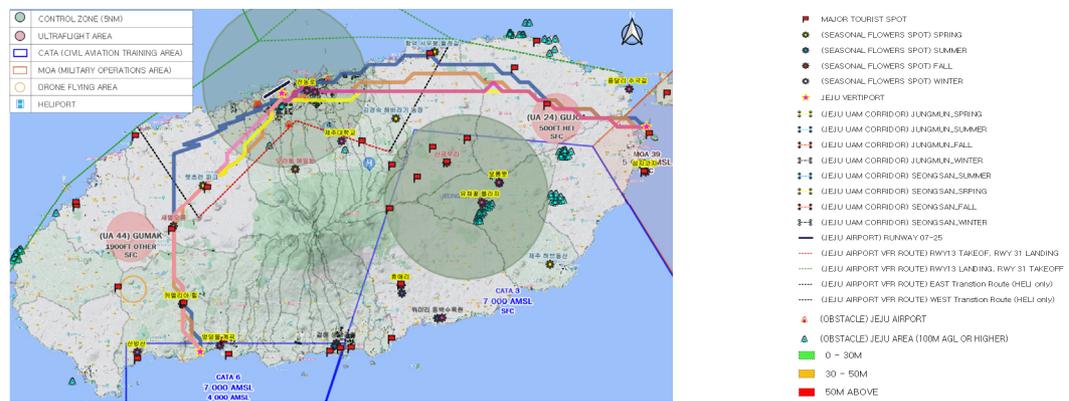


Figure 10. Jeju tourism UAM chart

결론

1. 연구의 의의

초기 UAM 실증단계에서는 인명 및 재산의 피해를 최소화할 수 있는 지역에서의 실증이 필요하며, 운항 경로 선정 시 저고도 비행의 특징을 고려해야 할 필요가 있다. 그중 특히 기상 요인이 UAM의 운항에 영향을 미칠 수 있다

는 인식은 여러 연구에서 제시된 바이나, 대부분 기상 영향도 수준을 평가하고 분석한 연구였다. 이에 본 연구에서는 제주를 대상 지역으로 선정하고 UAM을 관광용으로 도입, 운영하고자 하는 산업계의 추진 방향을 반영하여 기상 요인을 고려한 계절별 관광 UAM의 경로를 도출하고자 하였다. 기상 요인으로는 UAM 운항에 주요한 영향을 미칠 것으로 예상되는 풍속을 고려하였으며, 항공기 운항의 주요 제약사항인 지상 장애물, 운항의 목적성을 반영한 관광 지 총 3가지 요인을 경로 선정에 종합 반영하였다.

특히 이전 연구들에서는 지상에서 관측한 기상자료를 사용했으나, 본 연구에서는 지상과 상공에서의 기상 상황이 상이할 수 있다는 점을 확인하고 UAM의 예상 운항 고도에서의 기상자료를 활용하였다. 기상자료를 활용, UAM 비행경로 고도에서의 풍속 영향도를 계절별로 제주도 전역에 대해 분석하였으며 이를 비유으로써 반영하여 경로를 선정하였다. 이러한 접근은 본 연구에서 처음 시도한 것으로, 추후 기상 요인 분석 기반의 UAM 실증노선 검토 시 활용 가능한 방법론을 제시하였다고 할 수 있다.

풍속, 지상 장애물, 관광지, 그리고 거리를 종합 반영하여 최적 거리를 산정할 수 있도록 공간정보 분석 프로그램인 'ArcGIS'의 '래스터 형식 최적 경로' 기능을 활용하였으며, 그 결과 계절별로 상이한 경로가 도출되었음을 확인할 수 있었다. 이처럼 상당히 실용적인 관점에서 수행된 본 연구의 분석 방법과 결과가 UAM의 초기 실증 및 실제 운영에 기여할 수 있을 것으로 기대된다.

2. 연구의 한계 및 추후 연구 과제

본 연구는 UAM 운항에 영향을 미칠 수 있는 기상 요인 중 풍속 영향성만을 고려하였다. 이는 연구의 공간적 범위인 제주도의 지역적 특징 때문이었으나, 실제 UAM 운항에서는 바람 외의 기상 요인, 특히 시정⁸⁾과 운고⁹⁾로 인한 제약이 발생할 수 있다. 특히 UAM이 저고도에서 시계비행으로 운항하게 될 것을 고려할 때 시정 및 운고 등 조종사의 시계 확보와 관련된 기상 요인은 상당히 중요한 제약요건이 될 것으로 예상된다. 따라서 보다 다양한 기상 요인을 반영한 비행경로 선정 연구로 발전시킬 필요가 있다.

한편, 기상은 시간에 따라 변동성이 존재하는 요인으로 실제 운항 시 단일 경로가 아닌 실시간 기상 변동에 따른 경로 선정 가능성이 있어, 이를 반영할 수 있는 방법론도 추가 연구할 필요가 있다.

또한, 본 연구에서 고려한 기상, 장애물, 관광지 외에도 다른 조건을 경로 선정에 반영할 수 있다. 예를 들어, 저고도로 비행하는 UAM 특성상 우발상황 발생 시(기계 고장, 위험 기상 등) 신속한 비상착륙 및 재이륙 등이 가능해야 운항 지속성이 보장될 수 있다. 이러한 다양한 조건들을 발굴하고 추가 반영한다면 더욱 정밀하고 실용적인 경로 선정 연구로 발전할 수 있을 것이다.

Funding

This work is supported by the Korea Agency for Infrastructure Technology Advancement(KAIA) grant funded by the Ministry of Land, Infrastructure and Transport(RS-2022-00143625, RS-2022-00156364).

ORCID

KIM, Eunji  <http://orcid.org/0009-0009-2004-7272>

SEONG, Jinkyu  <http://orcid.org/0009-0002-4418-7586>

LEE, Kangmin  <http://orcid.org/0009-0001-2660-4190>

KIM, Huiyang  <http://orcid.org/0009-0001-6060-0855>

8) 지표면에서 정상적인 시력을 가진 사람이 특정 물체를 보고 식별할 수 있는 최대 거리

9) 가장 낮은 구름의 높이

REFERENCES

- Campbell S.E., Clark D.A., Evans J.E. (2017), Preliminary Weather Information Gap Analysis for UAS Operations, MIT Lincoln Laboratory, Massachusetts Institute of Technology.
- FAA (2022), Helicopter Flying Handbook Chapter 11: Helicopter Emergencies and Hazards, 11.
- Hou Y., Huang W., Zhou H., Gu F., Chang Y., He Y. (2019), Analysis on Wind Resistance Index of Multi-rotor UAV, '2019 Chinese Control And Decision Conference (CCDC), Nanchang, China, 3693-3696.
- Hsun Chao, Apoorv Maheshwari, Dan DeLaurentis and William Crossley (2021), Weather Impact Assessment for Urban Aerial Trips in Metropolitan Areas, AIAA AVIATION 2021 FORUM
- Ihalla, <http://www.ihalla.com/article.php?aid=1672844400736775073>, 2023.09.10
- Invest KOREA, https://www.investkorea.org/jj-kr/bbs/i-1154/detail.do?ntt_sn=31, 2023.10.10
- Kim Jina (2011), Meteorological Features for the July 9, 2009 Severe Downpour Case using KLAPS Reanalysis Data (Master's Degree), Chosun University
- Lee Jaeryoung, Moon Chaehwan, Ahn Jaemyung (2021), Vehicle Routing Problem with Profits based UAV Path Planning in Urban Air Mobility, Proceeding of Korean Society for Aviation and Aeronautics 2021 Conference, 654-655.
- Lee Jongwook, Choi Hyunjung, Hong Sungjo (2022a), Factors Influencing the Intention to Use UAM(Urban Air Mobility) and Acceptance of Ground Infrastructure (Vertiport), Journal of Korea Planning Association, 57(4), 25-36.
- Lee Jooho, Lee Jinyoung, Yoon Donghyun (2022b), Development of UAM Route Design Methodology Using Transportation Bigdata, Proceeding of Korean Society for Aviation and Aeronautics 2022 Fall Conference, 630-631.
- Lee Youngjae, Kwag Taeho, Jeong Gumoon, Ahn Jaehyun, Chung Bong Cheul, Lee Jae-Woo (2020), Flight Routes Establishment Through the Operational Concept Analysis of Urban Air Mobility System, Journal of the Korean Society for Aeronautical & Space Sciences, 48(12), 1021-1031.
- Money today, <https://news.mt.co.kr/mtview.php?no=2022091409341775959>, 2023.09.08
- Oh Soohwan, Yoon Yoonjin, Kim Seyun (2022), Risk Analysis of Unmanned Aerial System Operations in Urban Airspace Considering Spatiotemporal Population Dynamics , IEEE 25th.
- Reiche C., Cohen A., Fernando C. (2021), An Initial Assessment of the Potential Weather Barriers of Urban Air Mobility, in IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 22(9), 6018-6027.
- Reiche C., Goyal R., Cohen A., Serrao J., Kimmel S., Fernando C., Shaheen S. (2018), Urban Air Mobility Market Study, National Aeronautics and Space Administration (NASA).
- Robinson J.N., Sokollek M.D.R., Justin C.Y., Mavris D.N. (2018), Development of a Methodology for Parametric Analysis of STOL Airpark Geo-Density, 2018 Aviation Technology, Integration, and Operations Conference.
- Statistics Korea, Population and housing census, kosis.kr, 2023.11.04
- Sung Yujin, Kim Saebyeok, Choi Yunsu, Cho Seongkil (2023), Selection of the Optimal Urban Air Mobility Vertiport Location and Analysis of Travel Time Effectiveness Through Route Setting, Proceedings of Korean Society for Geospatial Information Science 2023 Spring Conference, 95-98.
- UAM Team Korea (2021), K-UAM Concept of Operations 1.0, 10.
- UAM Team Korea (2022), Guidance for K-UAM Vertiport Design and Operation, 4.
- Washington A., Clothier R.A., Silva J. (2017), A Review of Unmanned Aircraft System Ground Risk Models, Prog. Aerosp. Sci., 95, 22-44.