

UAM 활성화를 위한 삼성역 부근의 버티포트 입지 분석 : 수도권 실증노선을 중심으로

김진식¹⁾, 구병수¹⁾, 남문주¹⁾, 장국진¹⁾, 이해영¹⁾, 이주연^{1)*}, 정명석^{1)**}

1) 아주대학교 일반대학원 과학기술정책학과

Analyzing Vertiport locations near Samsung Station for UAM activation : Focusing on the Metropolitan Area Demonstration Route

Jin Sick Kim¹⁾, Byung Soo Gu¹⁾, Moon Ju Nam¹⁾, Kook Jin Jang¹⁾, Hye Yeong Lee¹⁾

Joo Yeoun Lee^{1)*}, Myoung Sug Chung^{1)**}

1) Ajou University, Department of Science and Technology Policy

Abstract : This paper introduces urban air mobility (UAM) and the definition and types of vertiports required for UAM operations. It also examines domestic policy trends related to UAM and identifies UAM routes in Seoul currently planned by the government. To do so, we reviewed prior research on vertiports, analyzed new regulations from the European Aviation Safety Agency, and studied domestic vertiport specifications and deployment plans for UAM operations based on the size of the S-A1 airframe being developed by Hyundai, and applied them to Samsung Station, the core area of the demonstration routes. Next, using the 'Travel Time Savings Ratio', a method for evaluating transportation economics, we compared and analyzed the time taken by passenger vehicles and the time saved by using UAMs to derive a highly economical demonstration route. As a result, the Samsung Station↔Cheongnyangri Station section was found to be the most efficient. These findings are expected to be utilized for adjusting the distribution of UAMs when operating the demonstration

Received: April 21, 2023 / **Revised:** June 12, 2023 / **Accepted:** June 15, 2023

* 교신저자: Joo Yeoun Lee / jooyeoun325@ajou.ac.kr

** 교신저자: Myoung Sug Jung / mschung333@gmail.com

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

route in the future.

Key Words : UAM, Vertiport, Feasibility, Travel Time Savings Ratio, Demonstration Route

1. 서론

최근 도심항공교통(Urban Air Mobility, UAM)은 지상의 교통 혼잡문제에 대한 해결수단으로 주목받고 있다. 이러한 UAM은 앞으로 수십 년 동안 증가하는 도시의 혼잡 및 교통 밀도로 발생하는 긴 운전 시간을 단축하는데 중요한 역할을 할 것으로 기대된다.[1] 하지만 UAM의 운용 인프라가 충분하게 갖춰진 경우에만 도시 교통의 수요 점유율을 대체할 수 있을 것이다. 특히 UAM이 활성화되기 위해서는 관련 규정을 정립하고 관련 인프라를 조성하는 것이 필요하다.[1]

2020년 6월 국토교통부는 “도심 항공 교통 로드맵”을 발표하며 그림 1과 같은 UAM 실증노선을 공개하였다.[2] 이후 2021년 10월에 발간한 “한국형 도심 항공 교통(K-UAM) 운용개념서 1.0”에서는 UAM의 기본개념 정의, 운영절차, 각 주체별 역할 그리고 단계별 운용에 필요한 내용 등을 다루며 2025년까지의 K-UAM 상용화를 위한 기본개념을 정의하였다.[3] 그리고 2022년 9월에는 “모빌리티 혁신 로드맵”을 발표하며 2022년 8월 국회에서 발의된 UAM 법 제정안 설명과 더불어 2023년에 도심지 실증노선을 확정할 것이라고 발표하였고



[Figure 1] 수도권 지역 도심 항공 교통(UAM) 실증노선(안)

2025년부터 본격적으로 UAM 실증 사업을 추진할 계획임을 밝혔다.[4]

이 외에도, 최근 들어 여러 공공기관과 현대자동차 등의 모빌리티 관련 기업들은 컨소시엄을 구성하며 UAM 산업의 확장과 상용화를 위해 노력하고 있다.[3] 여러 컨소시엄 중 UAM의 이착륙장으로 사용되는 버티포트(Vertiport)와 관련하여 현대건설, 한국공항공사, 롯데건설 등이 인프라 구축을 담당하고 있다. 또한, 서울, 부산, 인천, 제주 등의 지방자치단체들도 버티포트를 비롯한 UAM 시설 인프라 구축을 위해서 주변 환경과 교통 수요를 고려한 부지 선정을 고려하고 있다.[1]

또한, UAM의 핵심인프라인 버티포트의 위치선정, 버티포트의 유형 분석 및 설치기준 검토, UAM 경로 분석 등의 다양한 연구가 진행되고 있는 추세이다. 하지만 UAM을 운용하는 도시별로 교통환경 등이 서로 다르므로 UAM을 운용하는 데 있어 도시별 특징을 고려하고 버티포트 설치 전 타당성 검토가 선행되어야 할 필요가 있다.[1]

따라서 본 연구에서는 국토교통부에서 발표한 3가지의 UAM 실증노선 중 가장 핵심지역인 삼성역에 대하여 유럽연합 항공안전청(European Aviation Safety Agency, EASA)에서 최근 발표한 표준에 맞춘 버티포트 설계안을 제시하고자 한다. 나아가 교통의 경제성을 평가하는 방식인 'Travel Time Savings Ratio'를 활용하여 승용차 소요시간과 UAM 이용 시 절약되는 시간을 비교·분석함으로써 경제성이 높은 실증노선을 도출하고자 한다. 이러한 연구결과는 추후 실증노선 운영 시 UAM 배차 조정 등에 활용 가능할 것으로 기대된다.

2. UAM과 버티포트의 개념

2.1 UAM의 개념

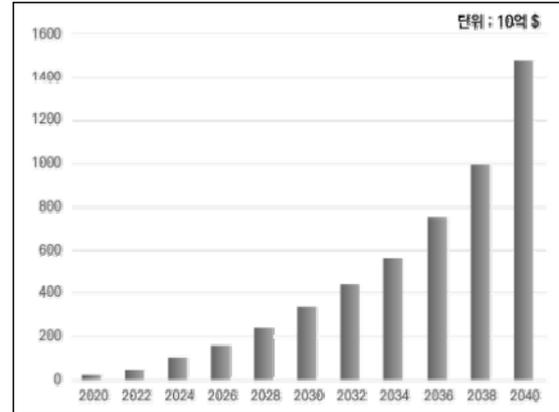
UAM은 Urban Air Mobility의 약어로 직역할 경우 도심 항공 교통 수단으로써 수직 이착륙기체를 뜻한다. 하지만 일반적으로 수직 이착륙기체만을 의미하지 않으며 포괄적으로 수직이 착륙기체를 활용한 신개념 교통수단 및 이를 이용한 서비스를 총칭하는 말로 사용된다.[5] UAM 관련 민간협의체인 ‘UAM Team Korea’에서 2021년에 발간한 「한국형 도심 항공 교통(K-UAM) 운용개념서 1.0」에 따르면 UAM을 “도심 항공 교통은 도심 내 활용이 가능한 친환경 전기동력 수직이착륙기 등을 이용하여 승객이나 화물 운송 등을 목적으로 타 교통수단과 연계되어 운용되는 새로운 항공교통체계이다. UAM은 도심 안팎에서 승객·화물 운송을 비롯하여 공공목적(긴급의료 등)과 관광사업 등을 위해 운용될 수 있다”라고 정의하였다.[3]

해외의 경우 미국항공우주국(National Aeronautics and Space Administration, NASA)에서는 UAM에 대해서 “소형패키지의 배송을 위한 드론에서부터 여객을 운송하는 항공 택시에 이르기까지 인구 밀집 지역에서 운용되는 안전하고 효율적인 항공운송시스템”이라고 포괄적으로 정의하였다.[5] 그리고 미국의 연방항공청(Federal Aviation Administration, FAA)도 UAM을 “고도로 자동화된 항공기를 사용하여 도시 및 교외 지역의 낮은 고도에서 승객이나 화물을 운송하는 안전하고 효율적인 항공 운송 시스템”이라고 포괄적으로 정의하였다.[5] 이 외에 EU의 항공안전청(EASA)은 UAM에 대해서 “도시 환경에서 화물과 승객을 위한 새로운 운송수단으로써 안전하며 지속 가능한 항공 운송 시스템”이라고 소개하며, 앞으로 3~5년 안에 유럽에서 상용화될 것이라고 전망하였다.[6]

2.2 UAM의 시장현황 및 개발현황

Morgan Stanley(2019)의 연구보고서에 따르면

UAM의 잠재적 시장규모는 그림 2와 같이 2020년 70억 달러에서 연평균 성장률(CAGR)이 30.7%로 성장하여 2040년에는 1조 4,740억 달러에 달할 것으로 전망된다.[8]

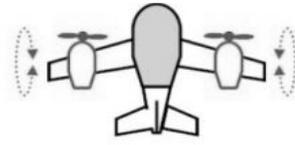


[Figure 2] 전 세계 UAM 시장규모 전망

그리고 현재 UAM의 운영 경쟁력이 있을 것으로 기대되는 대도시는 뉴욕, 로스엔젤레스, 델리, 도쿄, 베이징, 서울 등이 거론되고 있다. 현재 도입을 위한 사전 준비단계인 도시는 싱가포르, 로스엔젤레스, 서울 등이 있다. 나아가 2050년 전 세계의 UAM 서비스 이용 승객수는 총 4억 400만 명에 달할 것으로 전망된다.[9]

현재 200여 개 이상의 UAM 모델이 개발되고 있는 가운데 대부분 모델은 전기동력 수직 이착륙항공인 eVTOL형이다. 드물게 기존의 경비행기의 이착륙 거리를 축소한 형태의 ‘단거리이착륙기(Short Take-Off And Landing, STOL)’형이 개발되고 있다. 2016년을 기준으로 개발 중인 eVTOL 기종은 6개에 불과했지만 2021년 기준으로 500여 개 이상의 모델이 개발 중에 있다. 특히 미국 소재의 스타트업이 eVTOL 개발을 주도하고 있으며 포 1과 같이 여러 기업들은 ‘멀티로더’, ‘르프트&크루즈’, ‘틸트’ 등 다양한 크기와 비행방식의 모델을 개발 중에 있다.[10]

<Table 1> eVTOL 추진기술 비교

구분	멀티로터 (Multi Rotor)	리프트&크루즈형 (Lift&Cruise)	틸트형 (Tilt)
형태			
기술개념	다수 로터를 가진 형태이며 로터의 수직-수평 회전이 가능하지 않음	로터와 날개를 함께 가진 형태로 이착륙 시 수직 방향 로터가 회전익 형태로 작동하고, 비행 시 수평 방향의 로터가 고정익 형태로 작동	틸트로터, 틸트덕트, 틸트윙을 총칭하고 회전(이착륙 시 수직 방향, 비행 시 수평 회전) 형태에 따라 구분
운항 속도	70~120km/h	150~200km/h	150~300km/h
기술 수준	상대적으로 낮음	중간 수준	가장 높음
운항 거리	50km 내 운항 적합	인접 도시 운항 가능	인접 도시 운항 가능
탑재 중량	1~2인승 적합	멀티로터와 유사(1~2인승)	탑재 중량 가장 높음
기종 (기업)	Ehang 216(Ehang, 중국) Volocity (Volocopter, 독일)	Cora(Cora Aero, 미국) S-A1(현대자동차, 한국)	S4(Jovy Avigation, 미국) Lilium Jet(Lilium, 독일)

해외의 주요 UAM 개발회사의 개발현황을 살펴 보면 다음과 같다. 첫 번째로 Joby Aviation은 미국에서 최초의 eVTOL을 개발한 기업으로 자체적인 시험 비행 시설을 갖추고 있다. 현재 개발 중인 모델은 S-4로 조종사 1명과 승객 4명이 탑승할 수 있으며 2025년 상용화를 목표로 하고 있다. 또한 Joby Aviation은 미 공군, NASA와 협력 관계를 맺고 있으며 2024년에는 Uber Elevate의 인수가 예정되어 있다.[9] 독일에 기반을 둔 Lilium은 2019년에 5인승의 eVTOL 모델인 'Lilium Jet'의 첫 비행에 성공하였으며 현재는 조종사 1명과 승객 5인이 탑승하고 수화물을 실을 수 있는 7인승 비행 차량을 개발하고 있다. 2024년 첫 상업화를 목표로 'Lilium Jet'에 대한 미국의 FAA와 EU의 EASA 승인 절차를 진행 중에 있다.[11] 또한 독일 기반의 스타트업 기업인 Volocopter가 2022년에 제작한 4인승 eVTOL인 'VoloConnet'가 첫 시험 비행을 마쳤다. 현재는 EASA의 승인 절차를 진행 중이며 2026년부터 출퇴근 운항서비스를 개시할 계획이다.[12]

국내에서는 한국항공우주연구원이 유인과 무인

검용의 eVTOL형태의 PAV인 'OPPAV'를 개발하고 있으며 2022년 기준 시제품 제작단계이다. 또한 한화시스템은 2019년부터 미국의 Overair와 협업하여 eVTOL 'Butterfly'를 공동개발하고 있으며 2025년 상용화를 목표로 하고 있다. 마지막으로 현대자동차 그룹은 Uber Elevate와 협력하여 'S-A1'이라는 5인승 eVTOL을 개발하고 있으며 2028년 운항서비스를 목표로 하고 있다. 나아가 현대자동차그룹은 PAV와 수소연료전지 및 배터리를 동시에 사용하는 장거리용 UAM 개발도 추진하고 있다. 또한 UAM 이착륙장 건설을 위해 2020년 영국의 Urban-Air Port와 MOU를 체결하였다.[9]

2.3 버티포트의 정의

앞으로 UAM 서비스의 활성화를 위해서는 UAM 이착륙장인 버티포트가 기반시설로서 필수적으로 준비되어 있어야 한다. 「한국형 도심 항공 교통(K-UAM) 운용개념서 1.0」에서는 버티포트(Vertiport)에 대해서 "UAM 항공기가 이착륙하기 위한 기반시설(교통시설)로 육상, 수상 또는 건물

육상 등에 위치 할 수 있으며 필요에 따라서 정비지원이나 승객탑승·환승 및 화물 적재·적하 등을 위한 시설 등을 포함할 수 있다.”라고 정의하였다.[3] 국제표준화기구(International organization for Standardization, ISO)에서는 “유인 또는 무인 수직 이착륙(VTOL) 항공기의 착륙, 지상 취급 및 이륙을 위한 지원 서비스 및 장비가 있는 기반 시설 또는 시스템”이라고 버티포트에 대해 정의하였다.[13] 이와 같이 UAM 서비스는 여객운송 이외에도 화물의 수송 등에도 활용될 수 있는 만큼 그 입지선정이 중요하며, 유동인구가 많은 교통 요지에 위치한다면 새로운 부가가치를 창출할 수 있다. 이러한 버티포트는 크기에 따라서 버티스탑(소규모 크기), 버티포트(중규모 크기), 버티허브(대규모 크기) 등 3가지로 분류할 수 있으며 크게 및 입지와 기능에 따라 다르게 이용될 것으로 전망된다.[5] UAM의 국제표준을 선도하고 있는 EU의 EASA는 2022년 3월 UAM의 UAM 기체모델에 맞춘 헬기장 규정에 대해 상당 부분을 수정하며 버티포트 설치 시에 요구되는 자세한 규정을 제시하였다.[15] 이와 같이 전 세계적으로 UAM 산업의 기반시설이 될 버티포트에 대한 상세한 지침 및 표준화 작업 등이 이루어지고 있는 상황이다.

2.4 버티포트 입지선정의 중요성

UAM은 수직이착륙이 가능한 항공기를 이용하여 도심의 교통체증을 해결할 수 있는 첨단기술의 집약체이다.[21] 하지만 첨단기술의 집약체인 만큼 고비용을 수반할 수밖에 없으며 도심 내의 운항을 전제로 하기 때문에 이미 포화한 도심의 제한적인 공간 속에 버티포트를 마련해야 한다. 버티포트 설치 시 이용부지에 대한 부동산 가격 등을 고려해보면 비용부담은 증가할 수밖에 없다. 이와 같이 고비용의 설치비용이 발생하는 버티포트를 효과적으로 운영하기 위해서는 경제성과 시간 효율성을 확보해야 한다. 이러한 UAM을 가장 효율적으로 작동하게 하고 경제성을 확보할 수 있는 확실한 방법은 항공, 철도, 버스, 택시 등 기존의 대중교통과 연계 가능

성을 높이는 것이다.[5] 따라서 UAM의 정류장 또는 환승센터가 될 버티포트의 입지선정은 중요하며 버티포트의 규모를 합리적으로 결정하고 적절한 위치에 배치함으로써 철도 및 항공 등의 주요거점을 광역으로 연결하는 연계교통체계로의 구성이 필요하다.[5]

2.5 삼성역 부근의 버티포트 설치 계획

국토교통부에서 발표한 UAM 시범노선에는 모두 삼성역이 포함되어 있다. 삼성역은 2022년 기준으로 하루 평균 이용객이 92,440명이며 영동대로와 테헤란로가 교차하는 곳이다. 또한 삼성역에는 코엑스, 한국종합무역센터, ASEM 타워 등에 입주한 수많은 기업체가 밀집되어 있어 출퇴근 시간에 수많은 유동인구가 밀집되는 지역으로 출퇴근 시간대의 이용률이 평시와의 수요 차이가 심한 곳으로 꼽힌다.[16] 이러한 점에서 출퇴근 시간에 UAM을 이용할 잠재적 수요층이 많을 것으로 전망된다. 또한 2028년 수도권 광역급행철도(GTX) A노선과 C노선, 영동대로 복합환승센터와 연계될 예정으로 추후 UAM을 이용할 수요층은 더욱 증가할 것으로 전망된다. 이러한 가운데 삼성역 부근에 지상 110층, 높이 540m의 글로벌비즈니스센터를 설립 중인 현대자동차 그룹은 지난 2022년 2월 수정 개념도 및 계획을 공개하였다. 260m의 50층대 높이의 3개 동으로 글로벌비즈니스센터의 설계를 변경한다는 것이 주된 내용이다. 특히 메인타워 3개 동의 옥상에 버티포트를 설치한다는 내용을 포함함에 따라서 추후 삼성역 부근의 버티포트는 글로벌비즈니스센터에 구축될 가능성이 커졌다.[17]

3. 버티포트의 설계 요구조건

3.1 버티포트의 유형별 역할 및 기능

도심 내에서 운영되는 UAM의 특성상 버티포트는 기존의 대형 헬기장이나 공항과 같이 넓은 공간을 할당할 수 없어 제한적인 구성요소를 갖게 된다.

또한 버티포트는 도시의 중심부에 설치되어 승객 및 화물의 승하차와 이착륙을 위한 주요 역할을 한다. 주어진 시간 안에 여러 대의 eVTOL 항공기를 수용해야 하지만 좁은 설치 공간을 고려했을 경우 이미 구축된 헬기 착륙장을 사용할 수도 있을 것이다. 이처럼 기존 도심 내 헬기장을 활용하는 방안에 대해서 긍정적인 평가도 있는 반면에 헬리콥터와는 다른 UAM의 크기와 다양한 운용 목적 등을 고려할 경우 UAM 전용 버티포트는 반드시 필요하다.[5]

수직이착륙장인 버티포트는 표 2와 같이 크기 및 역할에 따라서 버티허브, 버티포트, 버티스탑의 세 가지 범주로 구분할 수 있다. 버티허브는 eVTOL을 위한 작은 공항의 개념으로 교외나 도심 지역에서 가장 큰 규모의 UAM 지상 인프라 역할을 한다. 화물과 사람을 위한 픽업 서비스를 제공하며 승하차의 장소로 활용할 뿐만 아니라 도심 UAM 운용의 중앙 관리 역할을 한다. 예를 들어서 eVTOL 비행체의 수리 및 점검, 운영 제어 시스템을 갖추으로써 서비스 요구 사항을 충족할 수 있다.[18] 이러한 측면에서 김포공항 및 인천공항의 UAM 이착륙장은 기존의 공항 인프라를 활용할 수 있는 버티허브가 적합할 것으로 판단된다. 다음으로 버티포트는 중간규모의 인프라로 도심의 중심부에 건설되어 승객 및 화물의 승하차 등의 주요한 역할을 한다. 비즈니스 중심지나 교통 플랫폼, 쇼핑몰 등 유동인구가 많은 장소와 연계할 수 있도록 설치하는 것이 유용하다.[18] 따라서 삼성역의 UAM 이착륙장은 버티포트 형식이 가장 적합할 것으로 판단된다. 마지막으로 지상 인프라 중에 규모가 가장 작은 버티스탑의 경우 하나 이상의 착륙 패드를 포함한다. 대부분 헬기 이착륙장을 활용하기 때문에 공간과 비용적인 측면에서 상대적으로 설치가 쉽다. 또한 기본 충전 또는 주기장이 필요 없지만, 모니터링 시스템 등과 같은 기본적인 고객 서비스 기능은 포함되어야 한다. 버티스탑은 설치비용이 상대적으로 저렴하여 운영 지역을 교외까지 확장 가능하며 화물 배송 서비스를 기존의 인프라와 원활하게 연계할 수 있다.[18] 이러한 측면에서 다른 지역대비 고층 빌딩

이 많으며 기존의 헬리패드를 활용할 수 있는 청량리역은 버티패드 형식이 가장 적합할 것으로 판단된다.

<Table 2> UAM 이착륙장 유형별 역할 및 기능

지상 인프라	역할
버티허브 (Vertihub)	UAM 기체 모기지 역할, 2개소 이상의 착륙대(FATO), 많은 기체 주기장소, 기체 점검, 정비, 충전 서비스를 제공 → 인천공항, 김포공항에 적합
버티포트 (Vertiport)	도심지 이착륙, 1개 이상의 착륙대(FATO), 2~3대의 기체 주기장 → 삼성역에 적합
버티패드 (Vertipad)	도심지 이착륙, 1개의 착륙대(FATO), 착륙대에서 기체 주기 → 청량리역에 적합

3.2 버티포트 입지선정 관련 문헌 검토

UAM 이착륙장 관련 선행연구는 도시 내 이착륙장 수량 결정과 관련한 연구 위주로 진행되고 있다. 해외의 경우 Trani et al.,(2017)는 K-means 클러스터링 알고리즘을 활용해 캘리포니아와 워싱턴 지역, 볼티모어의 UAM 이착륙장 입지 및 수량을 분석하는 연구를 진행하였다.[23] Fadhil(2018)은 뮌헨과 로스앤젤레스를 대상으로 GIS(Geographic Information System) 기반의 다기준 의사결정 분석 방법을 활용하며 최적의 UAM 이착륙장의 입지를 도출하는 연구를 수행하였다.[28] Frank et al.,(2020)은 독일의 바이에른 지역을 대상으로 전문가 의견수렴 방법을 활용해 출퇴근, 비즈니스, 레저, 관광 등 여러 가지 이동 목적에 적합한 130여 개소의 UAM 이착륙장 입지를 분석하였다.[25] Hinze et al.,(2019)는 미국 캘리포니아 지역의 사례분석을 실시하여 UAM의 이착륙장 입지 조건에 대해 이용요금과 UAM 수요를 기반으로 분석하였다.[26] Balac et al.,(2021)은 파리, 뮌헨, 샌프란시스코를 대상으로 시뮬레이션을 실시해 UAM 이착륙장의 수가 여행 시간 절감 및 도로교통 분담률

에 미치는 영향에 대해 분석하는 방법으로 UAM 이착륙장의 접근시간에 대한 중요성을 강조하였다.[20] 국내의 경우 Lim and Hwang(2019)은 수요와 거리를 기반으로 하여 K-means 클러스터링 알고리즘을 통해 서울 시내에 필요한 UAM 이착륙장의 적정한 개수와 입지에 관한 연구를 진행하며 UAM 이착륙장의 수량보다 입지가 더욱 중요하다는 결과를 제시하였다.[27] 안병선 외(2022)는 도심 항공 교통(UAM)을 위한 EASA, FAA의 새로운 버티포트 규정을 분석하였다. 이후, 현대자동차에서 개발 중인 항공기 S-A1의 크기를 기준으로 하여 UAM 운용을 위한 국내 버티포트의 배치 및 규격에 관한 연구를 진행하고, 이를 인천광역시에 적용하였다. 나아가, UAM 이용 시 효율을 평가를 위해, 서울과 인천지역의 주요거점에 대해 UAM 이용 시 소요되는 시간과 승용차 이용 시에 소요되는 시간을 비교하였다.[1]

UAM 이착륙장을 분석한 선행연구 대부분은 인구·거리·교통량 등 수요요인을 기반으로 하는 입지 분석에 관한 연구, 효율적인 수요 처리를 위한 이착륙장 용량 및 수량 결정 연구, 수요 산출을 위

해 운임효과를 분석하는 등에 관한 연구가 주를 이었다. 또한 특정 도심지에 버티포트를 신규로 선정하기 위해 진행된 연구가 대부분이었다. 반면에 본 연구의 경우 버티포트 입지가 확정된 삼성역을 중심으로 ‘Travel Time Savings Ratio’방식을 통해 타당성을 분석하고자 한다. 이는 국내에서 운영예정인 실증노선에 대한 최초의 타당성 분석이라는 점에서 의의가 있다.

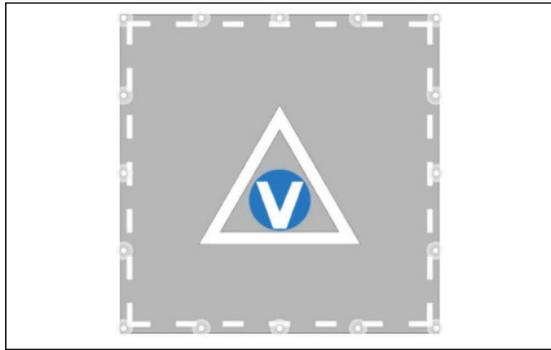
3.3 버티포트 관련 국제표준 현황

EU의 항공안전청(EASA)는 UAM 버티포트와 관련하여 2022년 3월 새로운 규정을 공표하였다. 따라서 본 연구에서는 새로운 버티포트 규정을 검토하여 국내 UAM 실증노선 운용을 위한 버티포트 표준화 방안을 제시하고 이를 삼성역에 적용하였다. EASA의 새 문서는 버티포트 설계를 위해 최초로 세부적인 프로토타입 기술 사양에 대한 지침 형식으로 작성되었으며, 필요한 주변 제약 조건, 물리적 특성, 조명과 표시, 시각 보조 장치, 지속적인 안전한 비행 및 이·착륙을 위한 항로 등 버티포트에 관

<Table 3> UAM 버티포트 관련 선행연구 조사

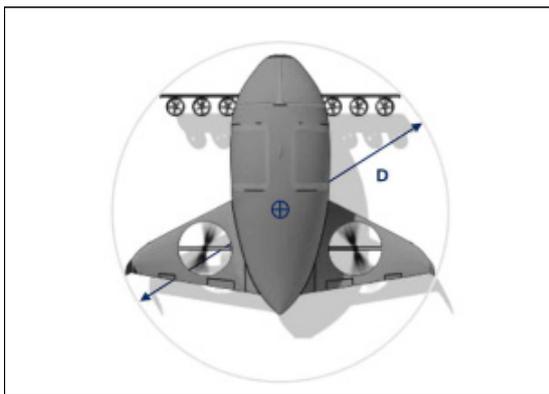
구분	연구자	분석 방법	연구 내용
해외	Trani et al.(2017)	K-Means 클러스터링 알고리즘 활용	캘리포니아와 워싱턴 지역, 볼티모어의 UAM 이착륙장 입지 및 수량을 분석
	Fadhil (2018)	GIS 기반의 다기준 의사결정 분석 방법을 활용	뮌헨과 로스앤젤레스를 대상으로 최적의 UAM 이착륙장의 입지를 도출
	Frank et al.(2020)	AHP 평가 활용 (전문가 의견 수렴)	뮌헨 지역에서의 출퇴근, 비즈니스, 레저, 관광 등 여러 가지 이동 목적에 적합한 130여 개소의 UAM 이착륙장 입지를 분석
	Hinze et al.(2019)	UAM 요금의 경제성 분석 활용	UAM의 이착륙장 입지 조건에 대해 이용요금과 UAM 수요를 기반으로 분석
	Balac et al.(2021)	Travel Time Savings Ratio 활용	샌프란시스코를 대상으로 UAM 이착륙장의 수가 여행 시간 절감 및 도로교통 분담률에 미치는 영향에 대해 분석
국내	Lim and Hwang(2019)	K-Means 클러스터링 알고리즘 활용	서울 시내에 필요한 UAM 이착륙장의 적정한 개수와 입지 제시
	안병선 외 (2022)	Travel Time Savings Ratio 활용	UAM 이용 시 효율을 평가를 위해, 서울과 인천지역의 주요거점에 대해 UAM 이용 시 소요되는 시간과 승용차 이용 시에 소요되는 시간을 비교

한 개념을 자세히 설명하고 있다.[19] 또한 EASA는 기존 헬리콥터 이착륙장의 표식과 다르게 인식할 수 있도록 “V” 자의 표식을 새롭게 도입하였다. 이착륙 방향이나 운용 목적에 따라 모양과 색상에 차이가 있을 수도 있지만, 기본적인 형태는 그림 3과 같다.



[Figure 3] FATO 표시와 조명 배치[19]

EASA에서 규정하는 UAM 비행체의 크기는 그림 4처럼 UAM을 포함하는 최소의 지름을 ‘D’로 표시하였다. 그리고 버티포트는 단일 이착륙 패드로 구성되어도 기능을 충분히 수행할 수 있지만, 효율성 높은 UAM 운용을 위해 UAM 이착륙장을 구성하기 위한 주요 물리적 공간 이외에도 각각의 크기를 상세히 규정하고 있으며 이는 표 4와 같다.



[Figure 4] 가장 작은 원의 중심과 지름 ‘D’[19]

<Table 4> EASA 규정에서 버티포트 구성요소의 크기

Category	Size
TLOF	min 0.83 D
FATO	1.5 D
Safety Area	FATO + max(3 m, 0.25 D)
Stands	1.2 D
Taxiway (Taxi-route)	1.5 D

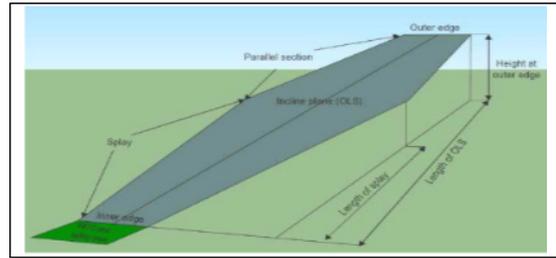
여러 카테고리 중 ‘Safety Area’의 경우 Downwash protection의 조건에 따라서 그 범위가 달라질 수 있다. Downwash protection은 바람이 불지 않는 1m 상공에서 VTOL 항공기가 hovering 하고 있을 때, 2D의 원 안에서 VTOL 항공기 로터에 의해서 생성되는 세류(downwash)의 최대 속도에 따라서 주변 지역의 유형을 적합하게 분류한 지표이다. UAM은 도심에서 운용되기 때문에 기존 인프라와 유연하게 융합되어야 하므로 해당 조건을 반영할 때 최소 크기가 아닌 이착륙 패드의 크기로 고려하는 것이 필요하다. 항공기의 세류가 영향을 미치는 주변 지역의 유형에는 인간에게 직접적인 영향을 주는 지역도 포함되므로 승객이나 승무원, 그리고 많은 사람이 모일 가능성이 큰 버티포트 경계 근처나 외부 공공장소의 경우 세류 속도가 60km/h 이하인 카테고리에 속한다. 세류의 영향에 따라서 보호가 필요한 공간에 대한 분류는 표 5와 같다.

<Table 5> 영역에 따른 최대 세류 속도에 대한 초기 지침

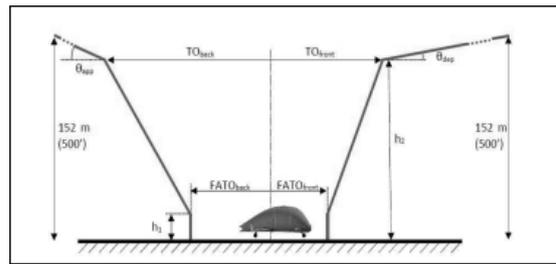
Maximum downwash velocity	Type of area
60 km/h	for areas of a vertiport traversed by flight crew, or passengers, boarding or leaving an aircraft
60 km/h	for public areas, within or outside the vertiport boundary, where passengers or members of the public are likely to walk or congregate

Maximum downwash velocity	Type of area
80 km/h	for public areas where passengers or others are not likely to congregate
50 km/h	for public roads where the vehicle speed is likely to be 80 km/h or more
60 km/h	for public roads where the vehicle speed is likely to be less than 80 km/h
80 km/h	for any personnel working near an aircraft
80 km/h	for equipment on an apron
100 km/h	for buildings and other structures

다음으로 EASA 새 규정에서 제시하는 접근·이륙 상승면은 그림 5와 같으며, 한쪽 방향의 이착륙만을 지원하는 경우의 경사면의 크기와 분류는 표 6과 같다. 표 6에 설명된 경사 설계 카테고리에는 운영 경사가 아니라 최소로 필요한 설계 경사 각도이며 운용 항공기 및 버티포트 주변 환경에 따라서 적절한 경사 범위를 결정할 수 있다. 해당 표 6의 'Category C'에 해당하는 접근 및 이륙 상승면에서 가상의 표면이 시작되는 기준을 FATO의 외곽선이 아닌, Safety Area의 외곽선으로 규정하였다. 또한, EASA는 VTOL 항공기의 특성을 고려하며 도심에서의 안전하고 효율적인 운용을 위해 버티포트의 이착륙 패드와 이륙 및 접근 상승면 사이에 OFV (Obstacle-Free Volume)라는 개념을 추가하였다. 사각형의 OFV는 그림 6과 같이 'D'를 중심 기준으로 하여 수평면을 따라서 항공기의 후면 방향과 정면 방향, 그리고 좌우 방향의 변수로 구분되고, 수직 방향으로 h_1 까지의 고도와 h_2 지의 고도 변수로 구분된다. 각각의 변수의 경우 이착륙 시 심한 돌풍 등의 지형적 특성과 운용 항공기의 성능을 고려하여 설정해야 하며, 규정에서는 도심 지역의 참고 수치를 3m의 h_1 과 30.5m의 h_2 로 제시하고 있다.



[Figure 5] 일반적인 접근/이륙 상승 면[19]



[Figure 6] 일반적인 수직 이착륙 절차 변수[19]

<Table 6> 접근/상승 표면의 종류와 크기

Components	Size		
	A	B	C
Length of inner edge	3,386 m	245 m	1,220 m
Slope	4.5% (1:22.2)	8% (1:12.5)	12.5% (1:8)
Transitional surface slope	50% (1:2)	50% (1:2)	50% (1:2)
Transitional surface height	45 m	45 m	45 m

4. 삼성역 버티포트 설치(안) 및 타당성 분석

4.1 국내 버티포트 표준화 적용 방안

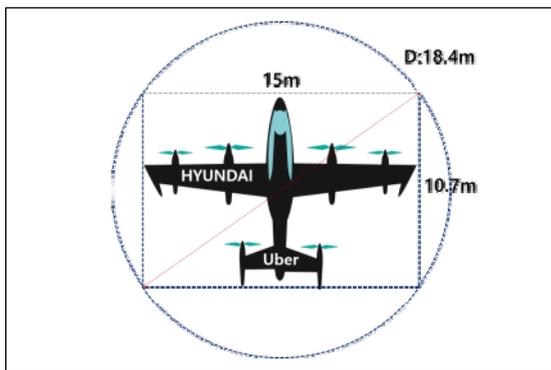
4.1.1. 기준 운용 항공기 설정

버티포트를 구성하는 각 공간의 물리적 크기는 운용되는 항공기의 크기에 따라 결정된다. 도심에서

운용될 UAM을 넘어서 주요 도시 간 장거리 운항, 화물 운송수단 등의 여러 목적성을 가지고 계속해서 지역 항공 교통(Regional Air Mobility, RAM)을 포함하는 미래 항공 모빌리티(Advanced Air Mobility, AAM)로 발전할 경우 항공기 자체의 크기가 커질 가능성이 매우 크다. 따라서 여러 기종의 항공기를 운용할 수 있도록 충분한 여유 공간을 두고 버티포트를 설계하는 것은 장기적인 운용 측면과 예상치 못한 위험 요소가 많은 초기 시장을 고려했을 때 바람직한 설계이다.[1] 본 연구에서는 국내에서 개발 중인 UAM 중 대각선 길이가 가장 긴 현대자동차의 S-A1 항공기를 기준으로 버티포트 표준화 방안을 수립하였다. S-A1의 길이는 18.4m이며 이를 기준으로 EASA의 새 규정에 따른 국내 버티포트 표준화 방안을 제시하였다.

4.1.2. EASA 규정에 따른 표준화 예시

현대자동차 S-A1의 대각선 길이를 기준으로 EASA 새 규정에 따라 이착륙 패드 및 계류장(Gate)의 크기를 규정하였으며 각각 그림 7에 나타내었다. 공개된 S-A1의 체원으로 D값에 18.4M를 대입하여 계산하였다.

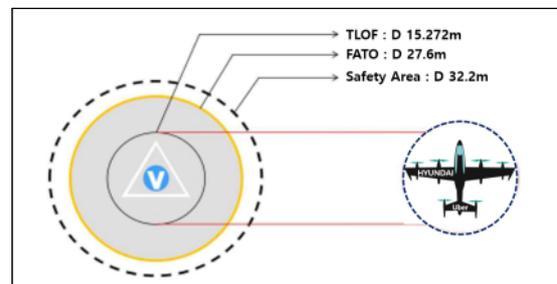


[Figure 7] 현대자동차 S-A1 대각길이 측정

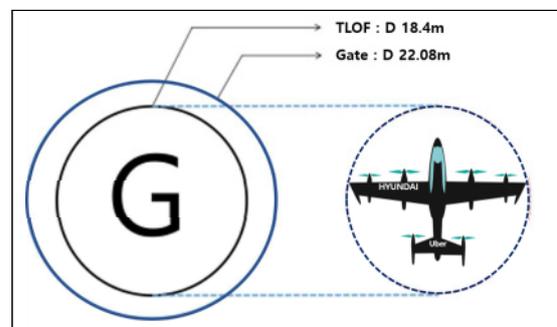
4.2 삼성역 부근 버티포트 설치(안)

UAM 운용에 사용되는 VTOL 항공기는 헬리콥터와 유사한 특성을 가지므로, 많은 항공기 대수를 운영하지 않는 상용화 초기 버티포트는 헬기장의

운영 방식을 참고하여 사용하는 것이 효율적이다.[1] 헬기장의 배치 방식은 크게 선형 배치(Linear), 위성 배치(Satellite), 부두 배치(Pier), 독립 계류 배치(Remote Apron) 등, 네 가지로 분류할 수 있으며, 독립 계류 배치는 상당히 체계적인 배치이지만 비교적 많은 면적이 요구되기 때문에 도심 지역에 배치되는 UAM의 특성을 고려하여 본 연구에서는 다루지 않았다. 선형 배치는 여러 이착륙 패드가 일렬로 배치되어 있는 형태로 해변이나 강가와 같이 길고 얇은 공간에서 효율적으로 배치될 수 있다. 이 배치는 이착륙 패드에서 승하차와 항공기 턴어라운드 등 버티포트의 모든 기능이 지원되므로 다른 배치들에 비해 설치가 용이하지만, 이착륙 방향에 대한 제한과 항공기 처리 효율 측면에서 불리하다는 단점이 있다. EASA의 규정에 따르며 세 개의 이착륙 패드를 보유한 버티포트 선형 배치를 그림 8과 그림 9에 나타내었다.

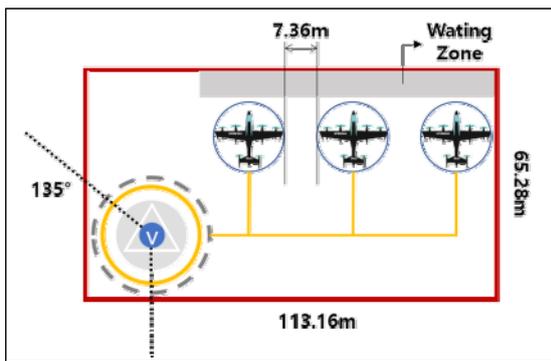


[Figure 8] S-A1에 대해 EASA 규정에 따른 이착륙 패드 표준화



[Figure 9] S-A1에 대해 EASA 규정에 따른 계류장 표준화

위성 배치는 하나 이상의 이착륙 패드를 여러 계류장이 부채꼴 모양을 둘러싸고 있는 형태로, 원이나 정사각형에 가까운 형태의 공간에 설치되기에 적합하다[1]. 이 배치는 이착륙 패드와 계류장을 연결하는 유도로의 배치가 용이하기 때문에 계류장의 활용도가 높은 반면 계류장 위로 이착륙을 지원할 수 없는 경우, 이착륙 방향 규정을 충족시키기 어려울 수 있다. 또한, 일정 크기 이상의 가로 및 세로 폭이 요구되기 때문에 기존 인프라와의 연계가 까다롭다. 따라서 EASA의 규정에 따르며, 선형 배치와 같은 면적에 대한 위성 배치를 그림 10에 나타내었다. 부두 배치는 위성 배치와 선형 배치의 중간 형태로 직사각형 배치 구조를 갖는다. 이 배치는 이착륙 구역과 계류 구역을 간접적으로 분리하여 이착륙 패드에서 보다 넓은 범위의 이착륙을 지원할 수 있으며, 많은 수의 계류장을 기존 자동차 주차장과 같이 사용하여 보유할 수 있다. 그러나 작은 규모의 버티포트에서 부두 배치를 사용할 경우, 하나의 유도로를 공유하기 때문에 계류장 구역이 혼잡해질 가능성이 있다. 이를 해결하기 위해서는 2개 이상의 유도로 또는 높은 레벨의 비행 관제 시스템을 확보할 수 있는 공간이 요구된다.



[Figure 10] EASA 규정에 따른 부두 배치

삼성역 부근에 설립 중인 현대그룹 글로벌비즈니스센터(GBC)는 초기 105층(569m)의 메인타워와 35층(컨벤션 호텔)로 계획되었으나 260m 건물 3채로 축소할 예정이다. 현대자동차는 GBC 사옥에

UAM 이동수단이 뜨고 내리도록 하는 방안을 염두에 두고 설계를 진행 중이라고 밝혔다.[17] 이에 따라 그림 11, 12와 같이 삼성역 부근 현대 글로벌비즈니스센터 옥상에 EASA 규정에 따른 버티포트를 배치하는 안을 제시할 수 있다.



[Figure 11] EASA 규정에 따른 삼성역 버티포트 배치 개념도(안)



[Figure 12] EASA 규정에 따른 삼성역 버티포트 배치(안)

4.3 타당성 분석 방법

UAM 소요시간은 현대자동차 S-A1 항공기의 임무형상을 기준으로 계산하였으며, 승용차 소요시간은 'T맵 어플리케이션'에서 제공하는 미래 예상 소요시간 기능을 사용하여 출퇴근 시간대의 승용차 소요시간과 UAM 소요시간을 비교하였다. T맵은 국내 내비게이션 점유율 1위를 차지하고 있기 때문에 실사용자들의 GPS 데이터에 기반한 예측이 가능하다.[22] 또한 최근 미래시간 길 찾기 서비스에 CCH기반의 Thor 엔진을 도입하여 비교적 정확한 예측을 하는 것으로 알려져 있다. 다음으로, UAM

노선 선정에 중요한 사안 중 하나인 경제성을 평가하는 기준으로 그림 13의 Travel Time Savings Ratio를 통해 기존의 교통수단에 비해 UAM 이용시 절약되는 시간 비율을 계산하였다.[20] t_{uam} 은 UAM 이용시 소요되는 시간을 의미하고 t_{gb} 는 기존 승용차를 이용했을 때의 소요시간을 의미한다. 이때 t_s 값이 1에 가까울수록 경제성이 높은 노선이며, t_{gb} 는 출퇴근 시간대와 기타 시간대 모두를 고려할 필요가 있다.[20]

$$t_s = 1 - \frac{t_{uam}}{t_{gb}}$$

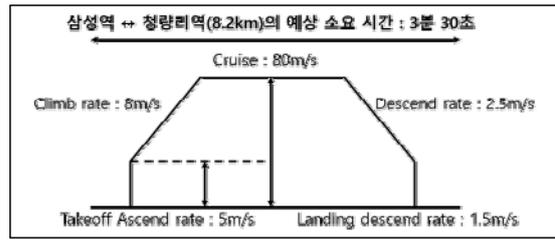
[Figure 13] Travel Time Savings Ratio

4.4 타당성 분석결과

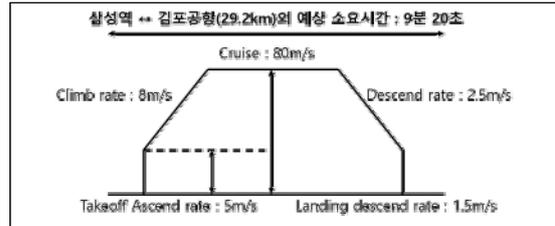
국토교통부는 2022년 5월 10일부터 P73 구역 지정을 일시적으로 해제하고 새 비행 금지구역을 설정하는 항공고시보(NOTAM; notice to airman)를 발령하였다. 또한 용산 전쟁기념관 반경 2해리(3.704 km)와 대통령 자택 반경 1해리(1.852 km)가 새로운 비행금지구역으로 추가되었다. 따라서 그림 14와 같이 삼성역과 김포공항을 오가는 UAM 경로는 한강을 이용하는 경로로 설정하였으며 ‘삼성역~인천공항’의 경로는 경기도 산악지역을 지나는 경로로 설정하였다. UAM 이용시 소요되는 시간은 SA-1의 속력을 근거로 비행시간을 산출하였으며 그림 15, 16, 17과 같다.



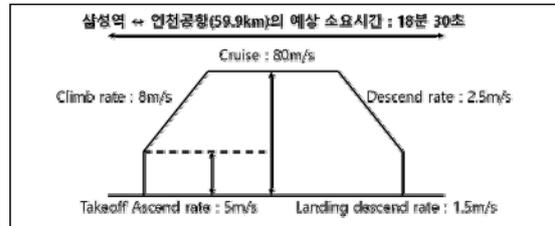
[Figure 14] 수도권 UAM 비행 경로(안)



[Figure 15] UAM 임무형상(삼성역↔청량리역)



[Figure 16] UAM 임무형상(삼성역↔김포공항)



[Figure 17] UAM 임무형상(삼성역↔인천공항)

수직이착륙 고도는 EASA 문헌에서 언급한 고도(100ft)를 참고하였으며 SA-1의 제원을 고려하여 순항고도를 350m로 설정하였다.

임무 형상에 표시된 고도와 속도를 바탕으로 수평 거리에 대한 UAM 소요시간을 계산한 결과를 표 7에 나타내었다. 분석결과, 평일 출근 시간에는 청량리역→삼성역 노선이 t_s 가 0.925로 가장 경제적인 노선으로 나타났으며 퇴근 시간에는 삼성역→청량리역 노선이 t_s 가 0.912로 가장 높게 나타났다. 또한, 주말의 경우에도 청량리역→삼성역의 t_s 가 0.8541로 가장 높게 나타났다. 따라서 삼성역↔청량리역은 직선거리는 짧지만 평일·주말 상관없이 교통체증이 지속적으로 발생하는 구간이므로 승용차를 대신하여 UAM을 이용하는 수요가 많을 것으로 전망된다. 따라서 실증노선 운영 시 해당 노선에 UAM 배차를 집중할 필요가 있다.

<Table 7> 승용차와 UAM 소요시간 비교

		Peak time	Time required	Peak time	Time required by car	Time required by UAM	Travel Time Saving Ratio ($t_s = 1 - \frac{t_{uam}}{t_{gb}}$)		
		Weekday		Weekend			Weekday	Weekend	
삼성역 → 청량리역	A	08:00	24 min	-	21 min	3 min 30 sec	0.854	0.8333	
	M		40 min				0.912		
청량리역 → 삼성역	A	08:00	47 min	-	24 min		0.925	0.8541	
	M		29 min				0.879		
삼성역 → 김포공항	A	08:00	1h 1min	-	30 min		9 min 20 sec	0.848	0.6916
	M		1h 1min					0.848	
김포공항 → 삼성역	A	08:00	1h 13min	-	50 min	0.873		0.815	
	M		1h 1min			0.848			
삼성역 → 인천공항	A	08:00	1h 4min	-	50 min	18 min 30 sec	0.711	0.63	
	M		1h 34min				0.8031		
인천공항 → 삼성역	A	08:00	1h 42min	-	60 min		0.8186	0.69	
	M		1h 36min			0.8072			

5. 결론

5.1 연구결과

본 논문에서는 버티포트의 개념을 설명하고 설계 요구조건에 대해 살펴보았다. 특히 EU의 항공안전청(EASA)에서 2022년 3월에 새롭게 공표한 UAM 버티포트와 관련 규정에 대하여 검토하였다. 다음으로 현대자동차 S-A1 모델의 크기를 사용하여 버티포트 표준화 방안을 제시하였으며, 초기 UAM의 중심지인 삼성역의 주변 환경을 고려하여 버티포트 설치(안)를 제시하였다. 이후, 수도권 실증노선인 ①삼성역↔청량리역, ②삼성역↔김포공항, ③삼성역↔인천공항 노선에 대하여 자동차와 UAM의 이동 소요시간을 비교하였다. 기존의 승용차 이동시간에 비하여 UAM 이용 시 절약되는 시간인 t_s 의 비율이 가장 높은 구간을 분석한 결과 출근 시간대의 경우 청량리역에서 삼성역으로 이동하는 노선

이었다. 퇴근 시간대에도 마찬가지로 삼성역에서 청량리역으로 이동하는 노선이었다. 인천공항과 삼성역에 이동하는 노선은 평일에 비해 주말에 낮은 t_s 값을 보였다. 따라서 삼성역↔청량리 노선은 평일 출퇴근 시간에 집중 배차가 필요하며 삼성역↔인천공항의 노선은 주말에 단축 운영을 한다면 합리적인 UAM 운영을 할 수 있을 것으로 판단된다.

5.2 연구의 한계점 및 향후 연구방안

본 연구는 UAM 도입 실증노선 중 하나인 삼성역을 중심으로 승용차와 UAM의 소요시간을 분석한 연구이기 때문에 다음과 같은 한계점을 지닌다. 우선 K-UAM 로드맵에서 제시한 것처럼 초창기 UAM은 중장거리 택시·승용차 이용자가 주요 전환 대상으로 예상된다. 이에 따라 본 연구에서는 여러 교통수단 중 승용차의 소요시간만 비교하였다. 추후 버스, 지하철 등의 대중교통과도 소요시간을 비교·

분석할 필요가 있다. 또한 UAM 이용이 성숙기에 들어서면 버티포트의 추가적인 설치가 필요해질 것이다. 이와 같은 성숙기에는 인구, 거리, 교통량 등 다양한 요인들을 고려하여 버티포트 입지선정이 이루어져야 할 것이다. 다만, 현재 국내 버티포트 관련 규정이 제정되어 있지 않은 상황에서 본 논문이 제시한 표준화 방안과 타당성 분석 방법은 향후 버티포트 입지를 연구하는데 기초자료로 활용될 수 있을 것이다.

사 사

이번 연구는 과학기술정보통신부의 지원을 받아 수행되었다. 과학기술정책 전문인력 양성 및 지원사업 (N2020-0295).

References

1. 안병선, 최성창, 황호연, FAA와 EASA의 새 규정에 따른 UAM Vertiport 설계 기준 및 국내 적용 연구, 한국항공학회논문지, Vol.26 No.6, 2022
2. 관계부처 합동, 한국형 도심항공교통 로드맵, 2020
3. UAM Team Korea, 한국형 도심항공교통 (K-UAM)운용개념서 1.0, 2021
4. 국토교통부, 모빌리티 혁신 로드맵, 2022
5. 황예슬 · 최봉석, 도심항공교통(UAM) 활성화를 위한 지방자치단체의 역할에 관한 소고, 지방자치법학회, Vol.22 No.4, 2022
6. 유럽연합 항공 안전청(EASA) 홈페이지 <https://www.easa.europa.eu/en/domains/urban-air-mobility-uam>(최종 검색일 : 2023.04.10.)
7. Colleen Reiche · Rohit Goyal · Adam Cohen · Jacqueline Serrao · Shawn Kimmel · Chris Fernando · Susan Shaheen, Urban Air Mobility Market Study, National Aeronautics and Space, 2018
8. Morgan Stanley, eVTOL/Urban Air Mobility TAM Update: A Slow Take-Off, But Sky's the Limit, 2021
9. 류병운, UAM의 도입 및 산업화를 위한 법·제도의 설계, 홍익법학 Vol.23, 2022
10. KISTEP, UAM 산업동향과 시사점, 이슈분석 203호, 2021
11. Lilium Air Mobility-Lilium at. <https://lilium.com> 참조.
12. J. Fingas, Volocopter's longer-range drone taxi completes its first test flights, Engadget, 2022
13. ISO/FIS 5491
14. Michael, A.P. Meyers, P.E. , Vertiport Design Memorandum, Airport Engineering Division, AAS100, Federal Aviation Administration, 2022
15. European Union Safety Agency, Prototype Technical Specifications for the Design of VFR Vertiports for Operation with Manned VTOL-Capable Aircraft Certified in the Enhanced Category, Vertiports, PTS-VPT-DSN, Cologne Germany, 2022.
16. 시사위클리, 2021년 주요부동산이슈 (21) 유동 인구 많은 삼성동 상권, 소폭하락, 2021
17. 이투데이, 부동산 개발 영역 넓힌 현대차...UAM 허브 구축 나서나, 2023
18. 안병선, 황호연, 도심항공 모빌리티(UAM)의 국내 적용을 위한 수직이착륙장 설계 요구조건 분석 및 형상 제안, 한국항공학회Vol.25, 2021
19. EASA, Prototype Technical Design Specifications for Vertiports, 2022
20. Rothfeld, R.;Fu · M. Balać, M. Antoniou, C, Potential Urban Air Mobility Travel Time Savings: An Exploratory Analysis of Munich, Paris, and San Francisco,

- Sustainability, 2021
21. 김진식, UAM 활성화를 위한 서울시내 버티포트 최적입지 선정에 관한 연구, 2022년 한국시스템엔지니어링학회 추계학술대회, 2022
 22. 컨슈머인사이트, 순정 내비는 장식용? 수입차 절반 이상 ‘스마트폰 보며 운전’, 2022
 23. Rimjha. · Trani, Urban Air Mobility: Factors Affecting Vertiport Capacity, In 2021 Integrated Communications Navigation and Surveillance Conference (IEEE), Dulles, USA, 2021
 24. A. P. Cohen · S. A. Shaheen and E. M. Farrar, Urban Air Mobility: History, Ecosystem, Market Potential, and Challenges, in IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, vol. 22, no. 9, 2021
 25. F.Frank · Ploetner K.O. · Al Haddad C. · Antoniou, Long-term application potential of urban air mobility complementing public transport: an upper Bavaria example, CEAS Aeronaut J 11, 2020
 26. Nida Syed · Maria Rye · Maninder Ade · Antonio Trani · Nick Hinze · Howard Swingle · Jeremy C. Smith · Sam Dollyhigh · Ty Marien, ODM commuter aircraft demand estimation, 17th AIAA Aviation Technology, Integration, and Operations Conference, Denver, 2017
 27. Lim E. and Hwang, H, The Selection of Vertiport Location for On-Demand Mobility and Its Application to Seoul Metro Area, International Journal of Aeronautical and Space Sciences, Vol.20, 2019
 28. Fadhil, A GIS-based Analysis for Selecting Ground Infrastructure Locations for Urban Air Mobility, Ph. D. Dissertation, Technical University of Munich, 2018