최종보고서(일반과제용)

보안등급: 일반[✔], 보안[ ]

중앙행정기관명	국토교통부		사업명	사업명	국토교통기술촉진연구사업		
전문기관명	국토교통과학기술진흥원			내역사업명			
공고번호	공고-제00호			연구개발과제번호	21CTAP-C157731		
국가과학기술 표준분류	EA1199	40%	EA1101	20%	EA1105	20%	
연구주제	(대분류) 무인 이동체 자율주행 기술개발		(중분류) 자율무인비행		(소분류) 자율비행 지원 인프라		
연구개발과제명	국문	도심 항공 모빌리티(UAM) 적용을 위한 수직이착륙장 위치 선정, 구축방안, 운영 소음 분석 등 공유기반 모빌리티(ODM) 기술 개발					
	영문	On-Demand Mobility (ODM) technology development for the application of Urban Air Mobility (UAM) such as vertiport location selection, construction plan, operational noise analysis, etc					
주관연구개발기관	기관명	세종대학교 산학협력단		사업자등록번호	206-82-07591		
	주소	(우) 05006 서울시 광진구 능동로 209 세종대학교 집현관 216호		법인등록번호			
연구책임자	성명	황 호 연		직위	교수		
	연락처	직장전화	02-3408-3773	휴대전화	010-6575-2282		
		전자우편	hyhwang@sejong.edu	국가연구자번호	1005 5420		
연구개발기간	전체	2020. 04. 13 - 2021. 12. 31(1년 9개월)					
	1년차	2020. 04. 13 - 2020. 12. 31(9개월)					
	2년차	2021. 01. 01 - 2021. 12. 31(1년)					

연구개발비 (단위 : 천원)	정부지원 연구개발비	기관부담 연구개발비		그 외 기관 등의 지원금				합계			연구개발비 외 지원금
				지방자치단체		기타( )					
	현금	현금	현물	현금	현물	현금	현물	현금	현물	합계	
총계	370,000			-	-	-	-	370,000		370,000	-
1년차	160,000			-	-	-	-	160,000		160,000	-
2년차	210,000			-	-	-	-	210,000		210,000	-

공동연구개발기관 등	기관명	책임자	직위	휴대전화	전자우편	비고	
						역할	기관유형
공동연구개발기관							
위탁연구개발기관							
연구개발기관 외 기관							

연구개발담당자 실무담당자	성명	정준영		직위	석사과정
	연락처	직장전화		휴대전화	010-8747-1278
		전자우편	wjdwns0808@gmail.com	국가연구자번호	1249 9413

이 최종보고서에 기재된 내용이 사실임을 확인하며, 만약 사실이 아닌 경우 관련 법령 및 규정에 따라 제재 처분 등의 불이익도 감수하겠습니다.

2022 년 03 월 28 일

연구책임자 : 황 호 연 (직인)

주관연구개발기관의 장 : 세종대학교 산학협력단 송 진 우 (직인)

공동연구개발기관의 장 : (기관명) (성명) (직인)

위탁연구개발기관의 장 : (기관명) (성명) (직인)

국토교통과학기술진흥원장 귀하

본 서식은 「국가연구개발혁신법」 시행('21.01.01) 이전에 최종 협약하여 '21.01.01 이후에 최종평가를 시행하는 일반과제용 입니다.

< 요 약 문 >

※ 요약문은 5쪽 이내로 작성

<table>
<tr><td colspan="2">사업명</td><td colspan="3">국토교통기술촉진연구사업</td><td rowspan="2">연구개발과제번호</td><td colspan="2" rowspan="2">21CTAP-C157731</td></tr>
<tr><td colspan="2">내역사업명</td><td colspan="3">국토교통기술혁신연구</td></tr>
<tr><td colspan="2">국가과학기술표준분류</td><td>EA1199</td><td>40%</td><td>EA1101</td><td>20%</td><td>EA1105</td><td>20%</td></tr>
<tr><td colspan="2">연구주제</td><td colspan="2">(대분류) 무인 이동체 자율주행 기술개발</td><td colspan="2">(중분류) 자율무인비행</td><td colspan="2">(소분류) 자율비행 지원 인프라</td></tr>
<tr><td colspan="2">연구개발과제명</td><td colspan="6">도심 항공 모빌리티(UAM) 적용을 위한 수직이착륙장 위치 선정, 구축방안, 운영 소음 분석 등 공유기반 모빌리티(ODM) 기술 개발</td></tr>
<tr><td colspan="2">전체 연구개발기간</td><td colspan="6">2020. 04. 13 - 2021. 12. 31(1년 9개월)</td></tr>
<tr><td colspan="2">총 연구개발비</td><td colspan="6">총 370,000 천원
(정부지원연구개발비 : 370,000 천원, 기관부담연구개발비 : 천원,
지방자치단체 : 천원, 그 외 지원금 : 천원)</td></tr>
<tr><td colspan="2">연구개발단계</td><td colspan="2">기초[✔] 응용[ ] 개발[ ]
기타(위 3가지에 해당되지 않는 경우)[ ]</td><td>기술성숙도</td><td colspan="3">착수시점 기준( )
종료시점 목표( )</td></tr>
<tr><td colspan="2">연구개발과제 유형</td><td colspan="6">지정공모 [ ] 자유공모 [✔]</td></tr>
<tr><td colspan="2">연구개발과제 특성</td><td colspan="6">비실용화</td></tr>
<tr><td rowspan="2">연구개발목표 및 내용</td><td>최종 목표</td><td colspan="6">○ UAM 국내외 연구 동향
○ 도심 항공 공유기반 모빌리티(ODM: On-Demand Mobility)의 수도권 적용 연구
○ 도심 항공 모빌리티(UAM) 수도권 운영에 따른 소음 분석
○ 도심 항공 모빌리티(UAM) 적용을 위한 수직이착륙장 개념 정립 및 구축 방안 마련</td></tr>
<tr><td>전체 내용</td><td colspan="6">○ UAM 국내외 연구 동향
■ UAM 요구도 분석
■ 비행체, 기술개발, 규제 적용, 인프라, 시장 기준 설정
■ UAM 운송 수요 모델링
■ 인프라 최적화 계획 생성
■ 인프라 최적화 비교분석 연구
■ 모델 적용 및 다양한 시나리오 평가
■ 도심 항공 모빌리티 소음: 진행중인 연구, 차이점 및 권고 사항
■ UAM 수직이착륙장 구축 개요 및 개발 사업자 측면에서의 주요 관심사항 분석
■ 기반시설을 가정한 시뮬레이션: 수직이착륙장 (Vertiport/Vertistop) 수용 능력 및 배치 분석
■ 바람 등 기상환경을 고려한 수직이착륙장 선정 국외 연구
■ UAM 운영과 관련된 ICAO 인증, 운항, 운용 관련 정보 수집
■ 도심 항공 모빌리티 시스템 체계종합 모델링
■ UAM 네트워크와 비행체의 모델링 및 평가 개요
■ 비행체 사이징
■ 네트워크 모델
■ 비용 및 이산화탄소 배기가스 연구
○ 도심 항공 공유기반 모빌리티(ODM: On-Demand Mobility)의 수도권 적용 연구
■ 데이터 수집 및 표현
■ 교통상황 데이터 수집 및 시나리오 설정
■ K 평균 알고리즘 연구
■ 실루엣 기법 연구
■ 국내 실정을 고려한 수직이착륙장 위치 선정 방법 및 권고 사항
■ 공유기반 모빌리티의 이동시간 계산
○ 도심 항공 모빌리티(UAM) 수도권 운영에 따른 소음 분석
■ UAM 소음 목표 분석</td></tr>
</table>

			■ UAM 국내외 소음 평가 단위 선정 ■ 소음 평가 도구 및 시나리오 선정 ■ 소음평가를 위한 UAM 운용 모델 선정 ■ 수도권 운영 소음 분석: AEDT를 이용한 소음 분석 내용 설정 ■ 수도권 소음 분석 결과 ■ 보완된 소음 분석 방법: 소음 면적을 이용한 소음 분석 ■ 수도권 소음 분석 결론 ○ 도심 항공 모빌리티(UAM) 적용을 위한 수직이착륙장 개념 정립 및 구축 방안 마련 ■ UAM 수직이착륙장 적용을 위한 수직이착륙장 개념 정립 ■ 수직이착륙장(Vertiport/Vertistop) 개념 설계 및 구축 방안 마련 ■ 국내 UAM 수직이착륙장 적용에의 적용 예
	1년차	목표	○ UAM 국내외 연구 동향 ○ 도심 항공 공유기반 모빌리티(ODM: On-Demand Mobility)의 수도권 적용 연구
		내용	○ UAM 국내외 연구 동향 ■ UAM 요구도 분석 ■ 비행체, 기술개발, 규제 적용, 인프라, 시장 기준 설정 ■ UAM 운송 수요 모델링 ■ 인프라 최적화 계획 생성 ■ 인프라 최적화 비교분석 연구 ■ 모델 적용 및 다양한 시나리오 평가 ■ 도심 항공 모빌리티 소음: 진행중인 연구, 차이점 및 권고 사항 ■ UAM 수직이착륙장 구축 개요 및 개발 사업자 측면에서의 주요 관심사항 분석 ■ 기반시설을 가정한 시뮬레이션: 수직이착륙장 (Vertiport/Vertistop) 수용 능력 및 배치 분석 ■ 바람 등 기상환경을 고려한 수직이착륙장 선정 국외 연구 ■ UAM 운영과 관련된 ICAO 인증, 운항, 운용 관련 정보 수집 ■ 도심 항공 모빌리티 시스템 체계종합 모델링 ■ UAM 네트워크와 비행체의 모델링 및 평가 개요 ■ 비행체 사이징 ■ 네트워크 모델 ■ 비용 및 이산화탄소 배기가스 연구 ○ 도심 항공 공유기반 모빌리티(ODM: On-Demand Mobility)의 수도권 적용 연구 ■ 데이터 수집 및 표현 ■ 교통상황 데이터 수집 및 시나리오 설정 ■ K 평균 알고리즘 연구 ■ 실루엣 기법 연구 ■ 국내 실정을 고려한 수직이착륙장 위치 선정 방법 및 권고 사항 ■ 공유기반 모빌리티의 이동시간 계산
	2년차	목표	○ 도심 항공 모빌리티(UAM) 수도권 운영에 따른 소음 분석 ○ 도심 항공 모빌리티(UAM) 적용을 위한 수직이착륙장 개념 정립 및 구축 방안 마련
		내용	○ 도심 항공 모빌리티(UAM) 수도권 운영에 따른 소음 분석 ■ UAM 소음 목표 분석 ■ UAM 국내외 소음 평가 단위 선정 ■ 소음 평가 도구 및 시나리오 선정 ■ 소음평가를 위한 UAM 운용 모델 선정 ■ 수도권 운영 소음 분석: AEDT를 이용한 소음 분석 내용 설정 ■ 수도권 소음 분석 결과 ■ 보완된 소음 분석 방법: 소음 면적을 이용한 소음 분석 ■ 수도권 소음 분석 결론

	○ 도심 항공 모빌리티(UAM) 적용을 위한 수직이착륙장 개념 정립 및 구축 방안 마련 ■ UAM 수직이착륙장 적용을 위한 수직이착륙장 개념 정립 ■ 수직이착륙장(Vertiport/Vertistop) 개념 설계 및 구축 방안 마련 ■ 국내 UAM 수직이착륙장 적용에의 적용 예
연구개발성과	
연구개발성과 활용방안 및 기대효과	○ 새로운 단거리 운송수단의 확대로 교통 문제 해결 ○ 혁신적인 도심 항공 모빌리티 인프라 구축에 기여 ○ 출퇴근/통학 거리 제약 해결되어 수도권 인구 집중/교통/주택 문제 해결 ○ 배기가스 배출의 감소를 통한 지구 환경 보전에 기여 ○ 미래원천기술시장 선도를 통한 항공우주산업의 고부가 가치화 ○ 향후 대규모 인력 소요가 예상되는 친환경 전기동력 항공기 분야 인력 양성
연구개발성과의 비공개여부 및 사유	해당없음

연구개발성과의 등록·기탁 건수	논문	특허	보고서 원문	연구시설·장비	기술요약정보	소프트웨어	표준	생명자원		화합물	신품종	
								생명정보	생물자원		정보	실물
	16	2	1									

연구시설·장비 종합정보시스템 등록 현황	구입기관	연구시설·장비명	규격 (모델명)	수량	구입 연월일	구입가격 (천원)	구입처 (전화)	비고 (설치장소)	ZEUS 등록번호

국문핵심어 (5개 이내)	도심 항공 모빌리티	개인용 항공기	수직이착륙장	공유기반 모빌리티	소음 해석
영문핵심어 (5개 이내)	Urban Air Mobility	Noise Analysis	Vertiport	On-Demand Mobility	Noise Analysis

〈 목 차 〉

1. 연구개발과제의 개요 ····· 1

2. 연구개발과제의 수행 과정 및 수행내용 ····· 17

2-1. UAM 연구 동향 ····· 17

2-2. 도심 항공 공유기반 모빌리티(ODM: On-Demand Mobility)의 수도권 적용 연구 ·· 200

2-3. 항공 모빌리티(UAM) 수도권 운영에 따른 소음 분석 ····· 241

2-4. 도심 항공 모빌리티(UAM) 적용을 위한 수직이착륙장 개념 정립 및 구축 방안 마련 · 255

3. 연구개발과제의 수행 결과 및 목표 달성 정도 ····· 281

4. 목표 미달 시 원인분석(해당 시 작성) ····· 293

5. 연구개발성과 및 관련 분야에 대한 기여 정도 ····· 294

6. 연구개발성과의 관리 및 활용 계획 ····· 295

7. 참고 문헌 ····· 298

별첨자료(성과 증빙자료 등)

1. 연구개발과제의 개요

1) 연구개발과제의 최종 목표

○ UAM 국내외 연구 동향

■ UAM 요구도 분석

■ 비행체, 기술개발, 규제 적용, 인프라, 시장 기준 설정

■ UAM 운송 수요 모델링

■ 인프라 최적화 계획 생성

■ 인프라 최적화 비교분석 연구

■ 모델 적용 및 다양한 시나리오 평가

■ 도심 항공 모빌리티 소음: 진행중인 연구, 차이점 및 권고 사항

■ UAM 수직이착륙장 구축 개요 및 개발 사업자 측면에서의 주요 관심사항 분석

■ 기반시설을 가정한 시뮬레이션: 수직이착륙장 (Vertiport/Vertistop) 수용 능력 및 배치 분석

■ 바람 등 기상환경을 고려한 수직이착륙장 선정 국외 연구

■ UAM 운영과 관련된 ICAO 인증, 운항, 운용 관련 정보 수집

■ 도심 항공 모빌리티 시스템 체계종합 모델링

■ UAM 네트워크와 비행체의 모델링 및 평가 개요

■ 비행체 사이징

■ 네트워크 모델

■ 비용 및 이산화탄소 배기가스 연구

○ 도심 항공 공유기반 모빌리티(ODM: On-Demand Mobility)의 수도권 적용 연구

■ 데이터 수집 및 표현

■ 교통상황 데이터 수집 및 시나리오 설정

■ K 평균 알고리즘 연구

■ 실루엣 기법 연구

■ 국내 실정을 고려한 수직이착륙장 위치 선정 방법 및 권고 사항

■ 공유기반 모빌리티의 이동시간 계산

○ 도심 항공 모빌리티(UAM) 수도권 운영에 따른 소음 분석

■ UAM 소음 목표 분석

■ UAM 국내외 소음 평가 단위 선정

■ 소음 평가 도구 및 시나리오 선정

■ 소음평가를 위한 UAM 운용 모델 선정

■ 수도권 운영 소음 분석: AEDT를 이용한 소음 분석 내용 설정

■ 수도권 소음 분석 결과

■ 보완된 소음 분석 방법: 소음 면적을 이용한 소음 분석

■ 수도권 소음 분석 결론

○ 도심 항공 모빌리티(UAM) 적용을 위한 수직이착륙장 개념 정립 및 구축 방안 마련

■ UAM 수직이착륙장 적용을 위한 수직이착륙장 개념 정립

■ 수직이착륙장(Vertiport/Vertistop) 개념 설계 및 구축 방안 마련

■ 국내 UAM 수직이착륙장 적용에의 적용 예

2) 연구개발과제의 연차별 목표

■ 수직이착륙장 위치 선정 및 특징 분석

- 수직이착륙장은 공항, 고속도로 나들목, 한강 둔치, 고층 건물 옥상 등 다양한 곳에 설치될 수 있으나 각 지역의 특성에 맞는 설계가 필요함
- 나들목은 차량 접근성 좋고 공간 활용성이 높아 수직이착륙장으로 활용하기에 용이하며 주변에 비행체가 이착륙하기에 방해될 여지가 적고 건축물을 높게 하여 휴게시설, 졸음쉼터 등으로도 활용 가능하다는 장점이 있음.
- 한강 둔치는 주로 공원 및 여가생활 공간으로 사용되고 있으며, 한강은 서울의 중심을 지나고 있기 때문에 전반적으로 접근성이 좋음.
- 공항의 경우, 기존의 공역 관리 시스템과 관제 등을 쉽게 이용할 수 있으며 이미 확보되어 있는 부지를 활용할 수 있음.
- 정부에서는 K-UAM 로드맵에서[1] 비행체의 소음과 장애물, 비행 가능 구역 등을 고려하여 한강을 통과하는 노선을 포함한 수도권 지역 실증노선을 제시함.



그림 2 국토교통부에서 제시한 수도권 지역 실증노선(안)[1]

■ 국내 실정을 고려한 수직이착륙장 위치 선정 기준

- 데이터 수집
  - ✓ UAM이 우리 삶에 보편화된다면 가장 수요가 높을 것으로 예상되는 용도는 출퇴근용임. 출퇴근을 위한 PAV의 수요를 알아보기 위해 통계청에서 2015년도에 실시한 현 거주지/통근통학지별 통근 통학 인구수 조사를 토대로 데이터를 수집하였음[2]
  - ✓ 데이터들을 시각화하기 위해 MATLAB을 이용해 아래 그림과 같이 지도상에 표시하였음[3]. 각 행정구역에 할당된 데이터를 반올림하여 5,000명당 하나의 점으로 지도에 표시하였음. 이때 각 행정구역의 모양이 불규칙하여 단순하게 표현하고자 각 구역의 면적과 같은 크기의 정사각형으로 가정하여 나타내었음.

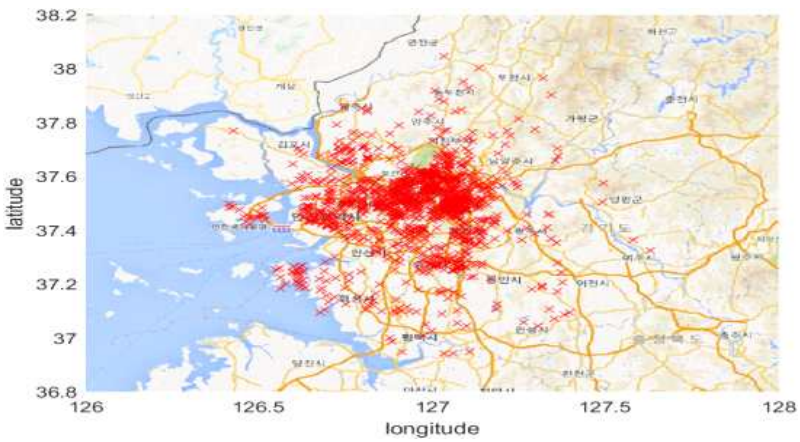


그림 3 MATLAB으로 표현한 각 행정구역별 통근 및 통학자 데이터

■ K 평균 알고리즘 연구

- 앞에서 수집한 데이터들은 각 행정구역별 통근자들의 수이지만 이는 UAM이 상용화됐을 때 PAV의 수요와 밀접하게 관련이 있음. 따라서 그들의 수요에 충족하는 적절한 위치에 수직이착륙장이 위치해야 함. 이를 위해 군집화(clustering)를 하여 MATLAB으로 표현하였고[3], 이때 사용된 기법은 K 평균 알고리즘임. K 평균 알고리즘은 데이터들을 k개의 군집으로 군집화하는 것으로 가장 일반적으로 사용됨. 군집화 과정을 통해 주어진 데이터들과 각 데이터들이 할당된 군집 중심 사이의 평균 제곱 유클리드 거리를 최소화함. 여기에서 군집 중심은 아래 식과 같이 cluster ω에서 데이터들의 mean or centroid μ로 정의됨[4]

$$\mu\ \omega)=\ \frac{1}{|\omega|}\ \sum_{x\in\omega}\ \vec{x} \tag{1}$$

- Centroid가 군집들의 데이터들을 얼마나 잘 나타내는지에 대한 척도는 아래 식과 같이 모든 벡터와 각 벡터의 군집 중심 사이 거리 차의 제곱 거리인 잔차제곱합(RSS; residual sum of squares)이고, 이 값을 줄이는 것이 K 평균 알고리즘의 목적임[4]

$$SS=\sum_{k=1}\sum_{x\in\omega}\ \vec{x}-\vec{\mu}\ \omega_k)\Big|^2 \tag{2}$$

- K 평균 알고리즘을 통해 데이터들을 k 값이 5, 40, 100일 때로 나뉘어 군집이 어떻게 형성되는지 아래 세 그림과 같이 나타내었음. 각 군집 내 데이터들은 같은 색의 점으로 지정되고, k로 지정된 수직이착륙장은 검정색 별로 나타냈음

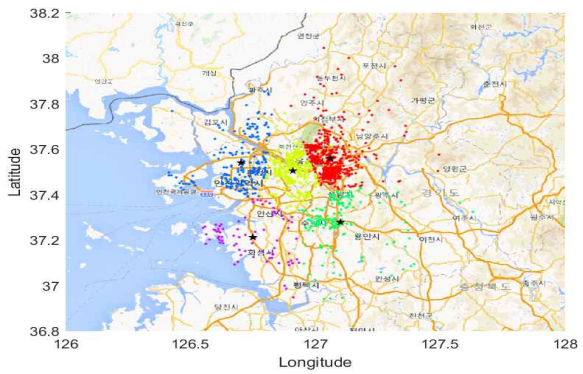


그림 4 수직이착륙장의 개수가 5개일 때 군집화 결과

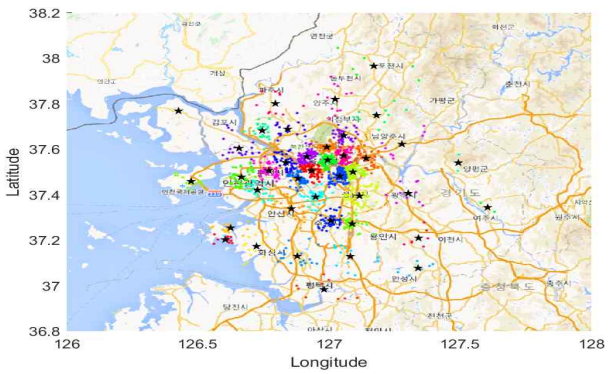


그림 5 수직이착륙장의 개수가 40개일 때 군집화 결과

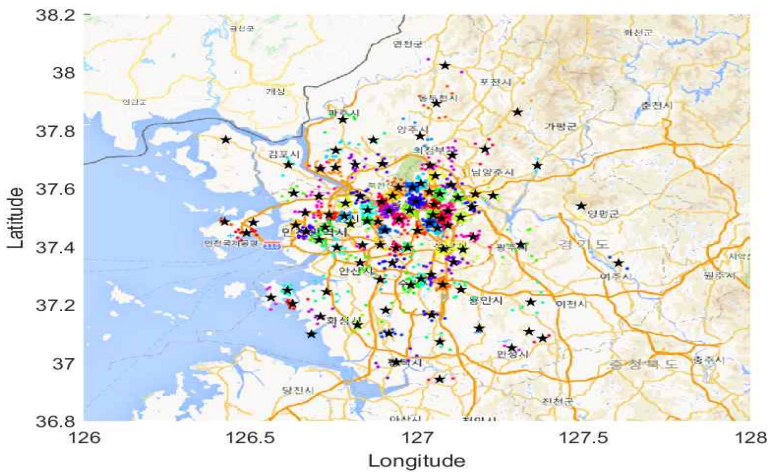


그림 6 수직이착륙장의 개수가 100개일 때 군집화 결과

- 수도권에 수직이착륙장 인프라를 구축하기 위한 다양한 방법이 있지만, 대부분의 경우 도심지여서 막대한 비용이 요구될 것임. 따라서 정확한 수직이착륙장의 개수, 즉 k라는 매개 변수를 잘 지정하는 것이 매우 중요함

■ 실루엣 기법

- K 평균 알고리즘은 k 매개 변수가 정해져야 반복 과정을 통해 최종적으로 그 위치를 결정하기 때문에 이는 치명적인 한계점으로 작용함. 따라서 정해진 k 값으로 군집화가 얼마나 잘 되었는지 평가해야 함. 평가 방법은 여러 가지가 있는데 그중 간단한 방법으로 평가를 할 수 있는 실루엣 기법을 이용하였음. 실루

엣 기법은 1986년 Peter J. Rousseeuw에 의해 처음 서술되었고, 다음과 같이 계산됨. 각 데이터i와 i가 할당된 군집 내의 다른 데이터들과의 거리 평균을 a(i)라 하고, 다시 데이터i 와 i가 할당된 군집이 아닌 군집 내의 데이터들과의 거리 평균들 중 가장 가까운 것을 b(i)라 할 때, s(i)는 아래 식과 같음[5]

$$i) = \frac{b(i) - a(i)}{\max\{a(i), b(i)\}} \quad (3)$$

$$-1 \quad s(i) \quad 1 \quad (4)$$

- 위 식과 같이 s(i) 값은 −1과 1 사이의 값으로 정의됨. 여기에서 1에 가까울수록 클러스터링이 잘 되었다는 뜻이고, −1에 가까울수록 클러스터링이 잘못되었다는 뜻임. 이 과정은 MATLAB의 silhouette 함수를 이용하여 수행하였음
- 앞에서 나타낸 3개의 군집화 결과에 대한 실루엣 기법을 수행하였고, 그 결과는 아래 세 그림과 같음. 1,388개 데이터들의 각 실루엣 값을 일정 범위로 묶어 막대그래프로 나타내었음
- 이 그래프를 통해 5개, 40개, 100개로 군집화된 결과 모두 실루엣값이 −1보다 1에 가깝다는 것을 확인할 수 있고, 이를 더 구체화하기 위해 실루엣값을 평균으로 나타냈을 때, 각각의 결과는 0.4500, 0.5670, 0.5291로 나타났음. 이를 통해 군집화가 잘 되었다는 것을 알 수 있음

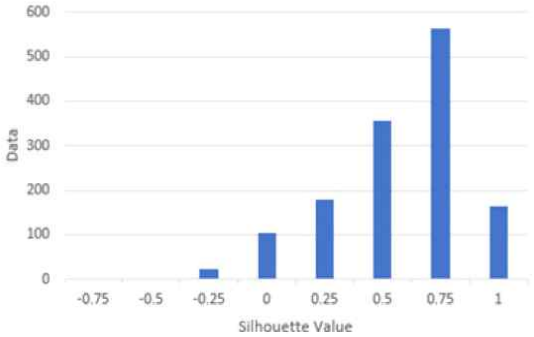


그림 7 수직이착륙장의 개수가 5개일 때 실루엣 평가 결과

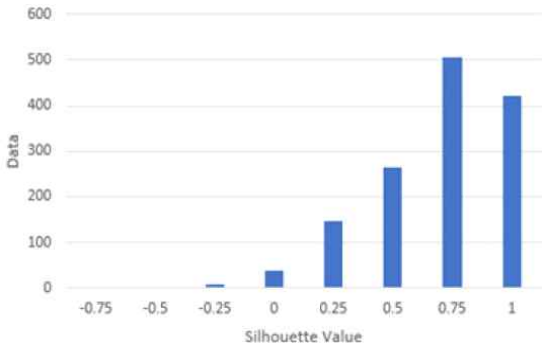


그림 8 수직이착륙장의 개수가 40개일 때 실루엣 평가 결과

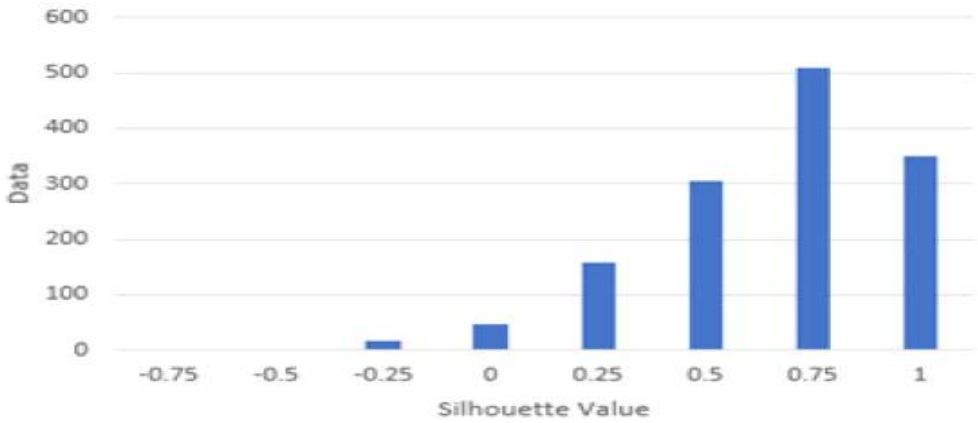


그림 9 수직이착륙장의 개수가 100개일 때 실루엣 평가 결과

■ 국내 실정을 고려한 수직이착륙장 위치 선정 방법

- 군집화를 통해 분석한 수직이착륙장의 위치는 MATLAB을 통해 위도, 경도 값으로 그 위치를 확인할 수 있으며, 그 위치들을 연결하여 eVTOL이 운영될 수 있는 경로를 설정할 수 있음. 하지만 단순히 K 평균 알고리즘을 사용하여 수직이착륙장의 위치를 선정했기 때문에 실제 지리적인 조건이 반영되지 않았다는 점에서 최종 위치의 조정이 요구됨
- 우리나라의 경우 아래 그림과 같이 수도권 내 개발제한구역으로 지정된 그린벨트가 있기 때문에 그 위치에는 수직이착륙장을 설계할 수 없으며[6], 군사적인 이유로 비행이 금지된 비행금지 구역도 피해야 함. 또한 우리나라 인구의 대부분이 거주하고 있는 서울의 경우 거주 구역이 밀집되어 있는 곳에 수직이착륙장이 설계된다면 PAV의 소음으로 인한 문제가 발생할 가능성이 높기 때문에 고속도로나 강, 천 주변이 유력한 수직이착륙장 후보지가 될 것이라 판단됨



그림 10 수도권 그린벨트

- 위치조정 방법
  - ✓ K 평균 알고리즘을 이용하여 군집화한 수직이착륙장의 실제 위치를 파악한 뒤, 그 위치에 수직이착륙장을 실제로 구축이 불가능하다고 판단되면 군집화 과정을 재시도할 수 있음. K 평균 알고리즘은 군집화를 수행하면서 반복 작업을 시작할 초기 위치를 제시해주어야 하는데 MATLAB에 내장되어 있는 kmeans 함수는 그 시작점을 임의로 정한 뒤에 군집화를 수행함. 따라서 군집화 과정을 재시도하는 것만으로도 변경된 위치의 수직이착륙장을 선정할 수 있음. 하지만 이 과정은 임의의 수단일 뿐 최종 설계를 위해서는 MATLAB에서 제시한 군집의 중심을 기점으로 주변에 적절한 부지를 찾아 수직이착륙장의 최종 위치로 선정해야 함. 앞에서 수행한 3번의 군집화 결과들은 군집화 재시도를 통해 최적의 위치를 나타낸 것이기 때문에 주변의 수직이착륙장 설치가 가능한 적절한 위치로 재조정하여 최종 수직이착륙장의 위치를 선정하였음

■ 소요시간 분석

- UAM 운행 소요시간을 계산하기 위해서 아래 그림에서와 같이 5 가지의 경로에 대해서 각각 승용차를 이용한 경우, 대중교통을 이용한 경우, eVTOL을 이용하였을 경우 소요시간을 계산함

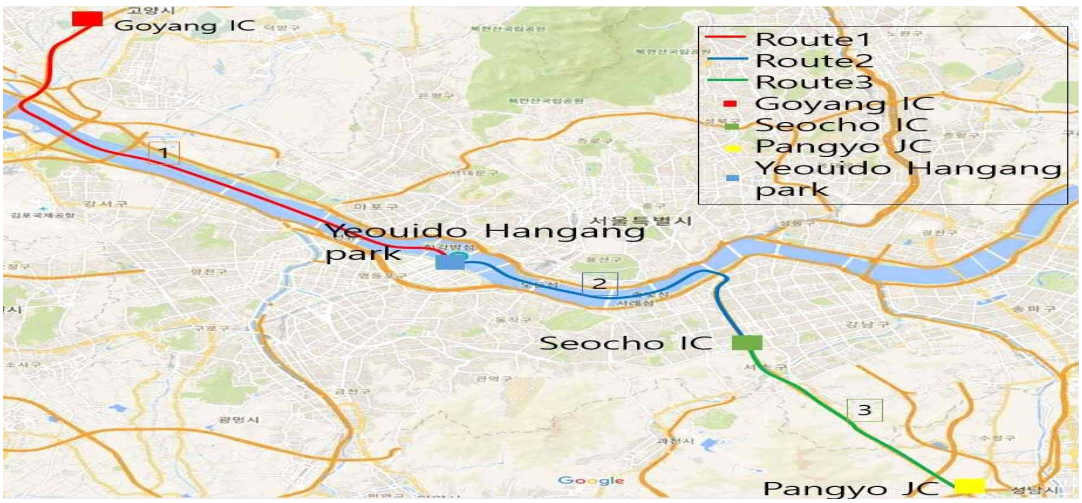


그림 11 경로 1(고양 IC-여의도 한강공원), 2(여의도 한강공원-서초 IC), 3(서초 IC-판교 JC)

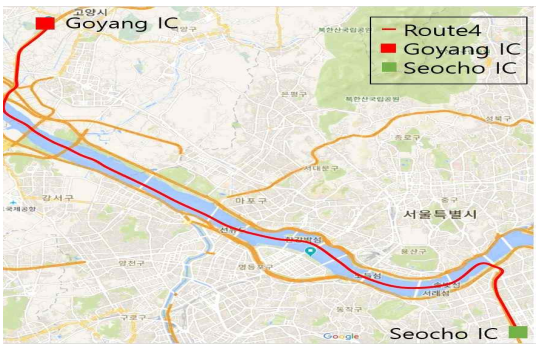


그림 12 경로 4(고양 IC-서초 IC)

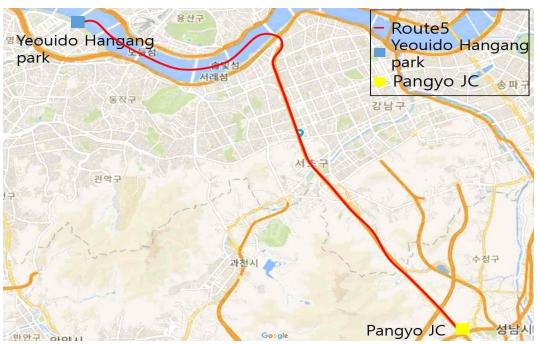


그림 13 경로 5(여의도 한강공원-판교 JC)

- 승용차를 이용하였을 경우 출퇴근 소요시간은 각각 경로 1은 43분, 34분, 경로 2는 28분, 34분, 경로 3은 32분, 15분, 경로 4는 71분,77분, 경로 5는 60분, 49분이 소요됨

- 대중교통을 이용하였을 때 소요시간은 각각 경로 1은 71분, 63분 경로 2는 51분, 53분 경로 3은 61분, 63분 경로 4는 95분 90분, 경로 5는 80분, 75분임
- eVTOL을 이용하여 5 가지 경로에 대하여 수직 이착륙장 간의 직선거리를 이동하는데 소요시간은 추력편향 형태의 평균속도를 가지는 가상의 eVTOL1과 멀티로터 형태의 평균속도를 가지는 가상의 eVTOL2를 가정하여 계산함. 가상의 eVTOL1의 상세 제원은 아래 두 번째 표와 같이 순항속도 254.4.km/h, 가속도 2m/s , 이륙시간 20초, 착륙시간 20초로 가정하였음. 가상의 eVTOL2의 상세 제원은 아래 표와 같이 순항속도 106km/h, 가속도 2m/s^2, 이륙시간 20초, 착륙시간 20초로 가정함

표 1 승용차 구간별 평균속도[7]

구간	출근(7~9)시간 평균 속도(km/h)	퇴근(17~19)시간 평균 속도(km/h)	거리(km)
고양IC-일산IC	95.4	93.7	3
일산IC-자유로JC	64.8	48.1	1.8
자유로JC-행주IC	38.5	25.5	2.3
행주IC-가양대교북단	17.6	46.7	5.6
가양대교북단-원효대교남단	30.7	26.4	8.5
원효대교남단-여의도한강공원	30	30	0.5
원효대교남단-원효대교북단	51.1	51.2	1.2
원효대교북단-한남대교북단	26.5	25.7	7.2
한남대교북단-한남IC	49.6	46.4	1.4
한남IC-서초IC	32.9	25.9	4.4
판고JC-양재IC	17.2	47.4	7.7
양재IC-서초IC	32.6	45.3	3.1

표 2 추력편향을 이용한 가상의 eVTOL1, 멀티로터를 이용한 가상의 eVTOL2 제원

구성	Virtual eVTOL1	Virtual eVTOL 2
유형	추력편향	멀티로터
순항속도 (km/h)	254.4	106
가/감속도 (m/s^2)	2	2
이륙시간 (s)	20	20
착륙시간 (s)	20	20
상승/하강 시간 (s)	35.3	14.7
상승/하강 거리(km)	1.25	0.78
PAX	4	4

- eVTOL을 5 가지 직선 경로에 대한 거리는 Haversine 공식을 이용하여 계산하였음. 경로별 직선거리를 계산한 결과 아래 첫 번째 표와 같이 경로 1은 17.12km, 경로 2는 10.09km, 경로 3은 10.55km, 경로 4는 26.65km, 경로 5는 20.21km로 계산됨
- UAM의 임무형상은 아래 그림과 같이 300m고도까지 수직상승, 500m 고도까지 천이비행, 그 후 순항으로 나타냄
- 추력편향 형태인 가상의 eVTOL1을 이용하여 5 가지 직선경로에 대해서 임무형상을 적용시키면 소요시간은 아래 두 번째 표와 같이 경로 1은 5.25분, 경로 2는 3.62분, 경로 3은 3.73분, 경로 4는 7.53분, 경로 5는 6.01분이 소요됨. 멀티로터 형태를 적용한 가상의 eVTOL2를 이용하여 마찬가지로 적용하면 소요시간은 아래 두 번째 표와 같이 경로 1은 9.97분, 경로 2는 5.99분, 경로 3은 6.25분, 경로 4는 15.36분, 경로 5는 11.72분이 소요됨
- eVTOL을 이용하여 앞서 설정한 경로를 운행한 소요시간은 직선거리 소요시간 계산과 같은 방법으로 계산함. 먼저 위 식을 이용해 5 가지 곡선 경로들을 여러 개 직선으로 쪼개어 각각 계산하여 합한 결과 아래 첫 번째 표와 같이 경로 1은 19.64km, 경로 2는 12.95km, 경로 3은 10.55m, 경로 4는 32.58km, 경로 5는 23.5km로 계산됨. 가상의 eVTOL1을 이용하여 5 가지 경로에 대해서 임무형상을 적용시키면 소요시간은 아래 세 번째 표와 같이 경로 1은 5.87분, 경로 2는 4.79분, 경로 3은 3.73분, 경로 4는 8.93분, 경로 5는 6.79분이 소요됨. 가상의 eVTOL2를 이용하여 마찬가지로 적용시키면 아래 네 번째 표와 같이 경로 1은 11.39분, 경로 2는 7.61분, 경로 3은 6.25분, 경로 4는 18.71분, 경로 5는 13.58분이 소요됨
- 5 가지 경로에 대해서 승용차, 대중교통, eVTOL1을 이용하였을 때 소요시간을 아래 두 번째 그림 에 나타내었고, 승용차, 대중교통, 가상의 eVTOL2를 이용하였을 때 소요시간을 아래 세 번째 그림에 나타냄. 각 교통

수단별로 5 가지 경로에 대한 소요시간의 평균을 내면 승용차 46.8분, 대중교통 71.6분, 직선거리를 가상의 eVTOL1을 이용하였을 경우 5.3분, 가상의 eVTOL2를 이용하였을 경우 9.86분, 우회거리를 가상의 eVTOL1을 이용하였을 경우 5.9분, 가상의 eVTOL2를 이용하였을 경우 11.51분이 소요됨

- 추력편향 형태인 eVTOL1과 멀티로터 형태인 eVTOL2를 비교해보면 아래 다섯 번째 표와 같이 eVTOL 1과 eVTOL 2의 소요시간 비율이 경로 1은 1.94, 경로 2는 1.77, 경로 3은 1.68, 경로 4는 2.10, 경로 5는 2로 표현할 수 있음. 즉 멀티로터 형태는 추력편향 형태와 비교하여 순항속도가 느려서 소요시간이 2배 가까이 차이가 나고 거리가 더 긴 경로에 대해서는 소요시간의 차이가 점점 더 커짐

표 3 경로별 직선, 우회 거리

	직선거리(km)	우회거리(km)
경로1	17.12	19.64
경로2	10.09	12.95
경로3	10.55	10.55
경로4	26.65	32.58
경로5	20.21	23.5

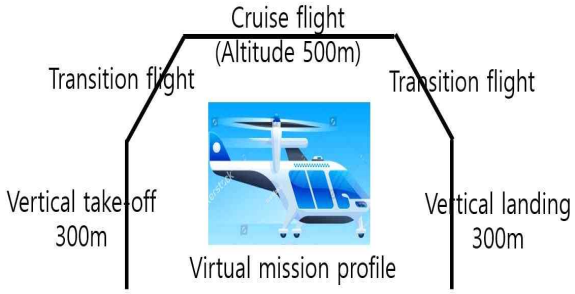


그림 14 가상의 임무형상

표 4 가상의 eVTOL1을 이용한 직선거리 소요시간

eVTOL1(직선거리)	이착륙시간 (s)	가/감속 시간 (s)	순항 시간 (min)	총 소요 시간 (min)
경로1	40	70.6	3.42	5.25
경로2	40	70.6	1.79	3.62
경로3	40	70.6	1.90	3.73
경로4	40	70.6	5.70	7.53
경로5	40	70.6	4.18	6.01

표 5 가상의 eVTOL2를 이용한 직선거리 소요시간

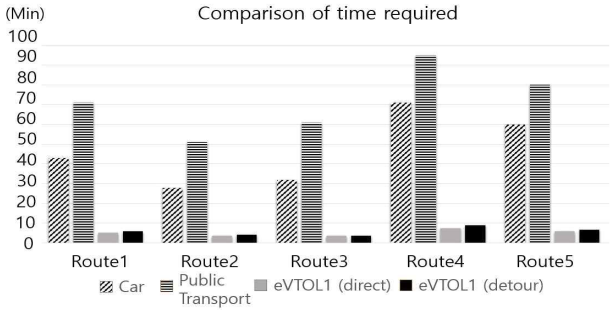
eVTOL2(직선거리)	이착륙시간 (s)	가/감속 시간 (s)	순항시간 (min)	총 소요 시간 (min)
경로1	40	29.4	8.81	9.97
경로2	40	29.4	4.83	5.99
경로3	40	29.4	5.09	6.25
경로4	40	29.4	14.20	15.36
경로5	40	29.4	10.56	11.72

표 6 가상의 eVTOL1을 이용한 우회거리 소요시간

eVTOL1(우회거리)	이착륙시간(s)	가/감속 시간(s)	순항시간 (min)	총 소요 시간 (min)
경로1	40	70.6	4.04	5.87
경로2	40	70.6	2.46	4.29
경로3	40	70.6	1.90	3.73
경로4	40	70.6	7.10	8.93
경로5	40	70.6	4.95	6.79

표 7 가상의 eVTOL2를 이용한 우회거리 소요시간

eVTOL2(우회거리)	이착륙시간(s)	가/감속 시간(s)	순항시간 (min)	총 소요 시간 (min)
경로1	40	29.4	10.23	11.39
경로2	40	29.4	6.45	7.61
경로3	40	29.4	5.09	6.25
경로4	40	29.4	17.56	18.71
경로5	40	29.4	12.42	13.58



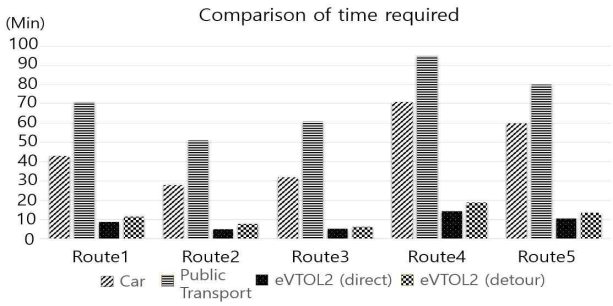


그림 15 승용차, 대중교통, eVT0L1 소요시간 비교 그림 16 승용차, 대중교통, eVT0L2 소요시간 비교

- 가상 eVTOL1을 사용한 UAM을 이용하여 최단거리 즉 직선거리를 운항하면 평균적으로 승용차에 비해서 소요시간이 1/9 수준으로 감소하고, 대중교통과 비교하면 1/13로 감소되며, 소음이나 사생활 침해와 같은 다양한 문제가 상대적으로 적은 한강과 고속도로 상공을 이용한 우회경로를 운항하는 경우 소요시간이 승용차와 비교하여 1/8, 대중교통과 비교하여 1/12수준으로 감소함
- 마찬가지로 가상의 eVOTL2를 사용한 UAM을 이용하면 소요시간이 직선거리는 승용차와 비교하여 3/14, 대중교통과 비교하여 1/7 수준으로 감소하고 우회거리는 승용차와 비교하여 1/4, 대중교통과 비교하여 1/6수준으로 감소됨
- 거주지와 직장에서 수직 이착륙장까지의 소요시간이 포함되지 않은 시간임을 감안해도 UAM을 이용하였을 때의 소요시간은 기존 교통수단 대비 소요시간이 매우 짧으므로 단순 소요시간만을 비교하였을 때 UAM은 새로운 교통수단으로서 적절하고, 교통 혼잡도를 해결해주며, 출퇴근 직장인들이 도로 위에서 낭비하는 시간을 줄여줄 것임

■ UAM 소음 목표 분석

- UAM 스테이션에서 운용 시 소음은 거주지 도로에서 운행하는 트럭 소음(고도 50 ft에서 75-80dB)의 절반에 근접해야 하며, 이는 현재 운용 중인 헬리콥터의 4분의 1 수준임(고도 500 ft에서 약 62 dB)
- 도심 내에서의 UAM 운용이 동시다발적으로 일어날 것으로 예상되는바, 소음 목표를 고도 250 ft에서 67dB로 설정하는 것이 합리적이라고 판단됨

■ UAM 국내외 소음 평가 단위 선정

- WECPNL은 국제민간항공기구 (ICAO)에서 1971년에 공표한 항공기 소음 평가 단위이며 항공기의 운항 대수, 운항 시 소음도, 소음 지속시간, 소음 발생 시간 등을 감안하여 연속적인 소음 피해 정도와 같은 단위로 환산한 것임
- $_{en}$ (day-evening-night average sound level)은 저녁에는 5 dB, 야간에는 10 dB의 가중치를 부여한 평균 소음 레벨이며, 유럽 일부 국가에서 적용하려는 연구가 진행되고 있음

$$L_{den} \quad 10\log[\frac{1}{24}(12\cdot 10^{10}+3\cdot 10^{\frac{L_e+5}{10}}+9\cdot 10^{\frac{L_n+10}{10}})] \tag{5}$$

- 2017년 우리나라 환경부는 국제적으로 통용되는 단위로 통일하기 위해 항공기 소음 단위를 현행 최고소음도 방식인 WECPNL에서 등가소음도 방식인 L_{den}으로 변경하고, 2023년부터 본격 시행한다고 밝혔으며 본 연구도 이에 맞춰 L_{den}을 소음 평가 단위로 선정

■ 소음 평가를 위한 운용 모델 생성: UAM 기체 모델 및 운용 횟수 선정

- PAV 개발사에서 NPD 데이터는 공개하고 있지 않아 정확한 소음 분석이 어려워 본 연구에서는 eVTOL PAV 운항을 헬리콥터로 모델링을 수행
- 미국 내에서 운용 중인 헬리콥터에 관한 2015 FAA Civil aircraft registry database를 사용 헬리콥터 fleet data의 좌석의 수와 엔진 유형에 따라 분류
- 2010년 통계청 인구주택총조사 데이터를 사용 시나리오를 선정하고 5%, 10%의 인구를 하루 동안 PAV를 이용하는 통근인구로 가정하여 PAV 운용 횟수 산정, 출퇴근 시간대별로 적용하여 소음 분석 수행

표 8 헬리콥터 fleet composition[8]

Category	Representative helicopter	Count	Percentage(%)
1-2 seat piston	Robinson R22	1,165	19.95
3-5 seat piston	Robinson R44	1,160	23.29
6-8 seat piston	Bell 206B	3,001	51.39
9-12 seat piston	Sikorsky S-76C	314	5.38
Total		5,840	100

표 9 시나리오별 출퇴근 인구수

Departure region	Arrival region	Count
Bupyeong	Seocho	2,528
	Gangnam	5,155
Total		7,683
Suwon	Seocho	7,528
	Gangnam	11,348
Total		18,876

표 10 부평에서 서초 시나리오 운용 횟수

Departure region	Helicopter	5% Commuter	10% Commuter
Bupyeong	R 22	77	153
	R 44	89	179
	Bell 206B	197	395
	S-76C	21	41

표 11 수원에서 서초 시나리오 운용 횟수

Departure region	Helicopter	5% Commuter	10% Commuter
Suwon	R 22	188	377
	R 44	220	440
	Bell 206B	485	970
	S-76C	51	102

■ 소음 평가를 위한 운용 모델 생성: 수직이착륙장 및 비행경로 선정

- NASA에서는 도시 고속도로의 입체 교차로를 수직이착륙장으로 활용하는 방안을 제시
- 시나리오는 입체 교차로를 활용하여 부평 IC와 수원 IC로 선정
- 비행경로는 각 시나리오에 대해 출발, 도착지점 사이의 최단 거리인 직선 경로로 설정함

■ 수도권 운영 소음 분석: AEDT 사용자 설정 및 소음 분석 결과

- Receptor Sets는 grid 유형을 사용하고 X count와 Y count를 설정하여 receptors를 각각의 시나리오 경로 내에서 모델링하고 receptor 사이의 간격을 설정함
- PAV 운용 시간을 특정하고 (7:00 p.m. to 10:00 p.m.) 하루 동안의 헬리콥터 기종별 PAV 운항 count를 특정 시간대에 따라 적용하고, 적용한 모든 PAV 운항들에 대해 annualization을 수행함

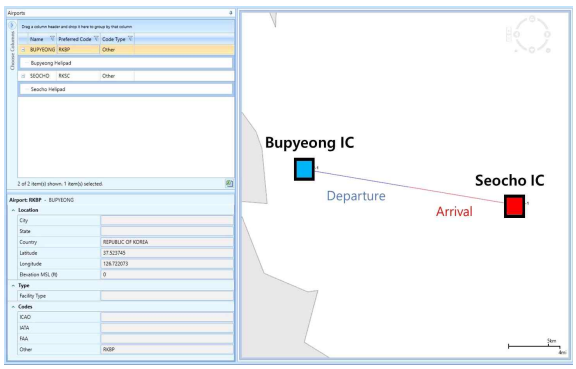


그림 17 부평에서 서초 시나리오 AEDT 설정

표 12 65 dB 이상인 receptor 개수

Scenario	Reduction technology	5% Commuter	10% Commuter
Bupyeong to Seocho	Baseline	134	887
	-10 dB	20	32
	-5 dB	4	8
Suwon to Seoch	Baseline	845	1939
	-10 dB	35	67
	-5 dB	6	10

- 미국 FAA는 65 dB 을 주거 적합성에 대한 임계 소음 노출 수준으로 권장함 [9]. 이 값을 초과하는 소음은 규제 대상이며 추가적인 소음 감소 절차가 필요함.

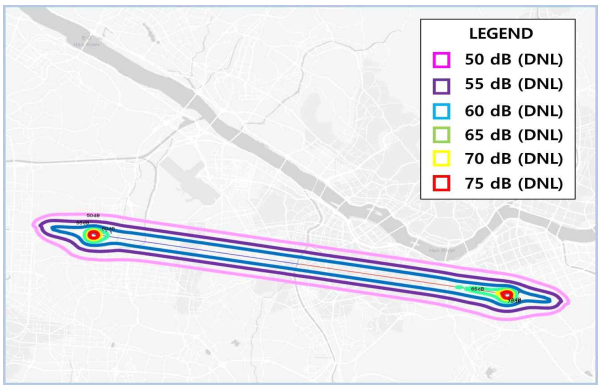


그림 18 부평-서초 소음 분석(5% commuter)

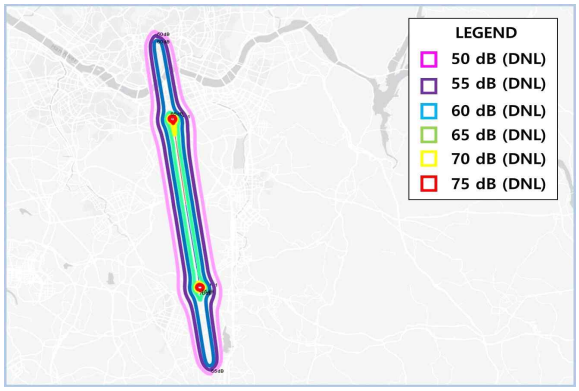


그림 19 수원-서초 소음 분석(5% commuter)

■ 수도권 운영 소음 분석: 소음 감소 기술 적용

- UAM 기체 개발사에서는 정확한 NPD 데이터는 공개하지 않고 있음. 이러한 문제를 해결하기 위해 본 연구에서는 NPD 데이터를 수정하는 대신 운항 수 조정을 통하여 소음 감소 기술을 적용할 예정임
- Uber사에서는 종래의 헬리콥터 소음보다 15 dB 감소를 목표로 하고, Lilium jet사에서는 20 dB 감소한 항공기를 개발하여 상용화를 앞두고 있음. 따라서 본 연구에서는 운항 수 조정에 따른 전기 추진 등 소음 감소 기술의 영향을 분석하기 위해 UAM 소음이 헬리콥터의 소음보다 약 10~20 dB 감소한다고 가정함. 데시벨은 로그 스케일이므로 실제 소음 총량은 약 1/10~1/100 감소함. 따라서 출퇴근 인구 데이터를 기반으로 도출한 운항 수를 기준 운항 수로 설정하고 이를 소음 감소 기술을 적용한 운항 수로 변환함. 새롭게 도출한 운항 수를 AEDT 내에 적용하여 소음 분석을 수행함(아래 그림)

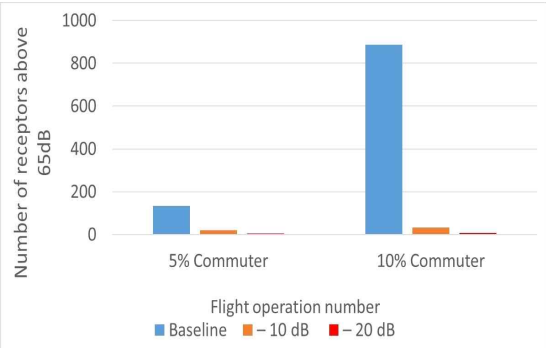


그림 20 부평-서초 소음 감소 기술 적용 결과

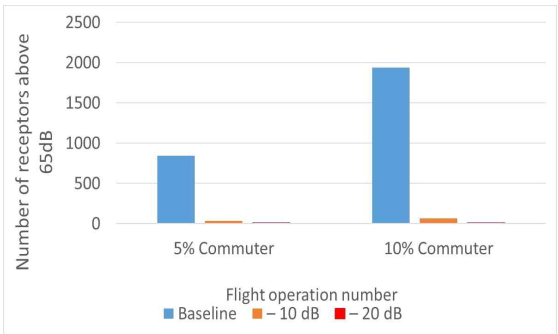


그림 21 수원-서초 소음 감소 기술 적용 결과

■ 수도권 운영 소음 분석: 소음에 영향을 받는 인구수 추정 방법

- Shultz curve을 이용하여 소음에 의해 높은 수준의 부정적인 영향을 받는 인구수를 계산할 수 있음

$$ghly\,annoyed,\% = \frac{100}{1+e^{\,11.13-0.141\;\;_n)}} \tag{6}$$

- 이를 활용하여 교통수단 사이의 특징을 구별하여 소음에 대해 높은 수준의 부정적 영향을 밝힌 것이 아래 그림의 Miedema curve임
- 한편 행정구역의 형태는 이상적인 도형의 형태가 아니며 거주민이 지역구의 단위 면적당 균등하게 분포되어 있지도 않음. 이를 해결하기 위해 정육각형 셀을 다수개 배치함으로써 셀 면적의 합과 실제 면적이 동일하거나 근사하도록 모델링하였음
- 정육각형 셀에 행정구역에 거주 중인 인구를 동등하게 분포시킨 후 receptor가 포함된 셀의 개수를 계산하여 소음에 영향을 받는 인구수를 예측할 수 있음

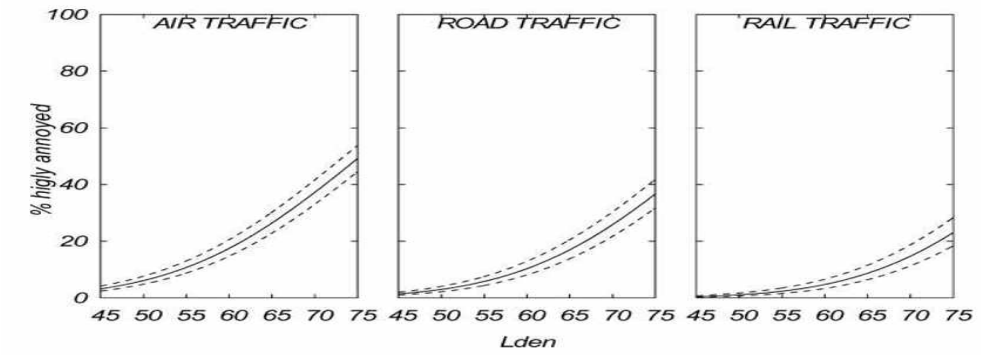


그림 22 Miedema curve[10]

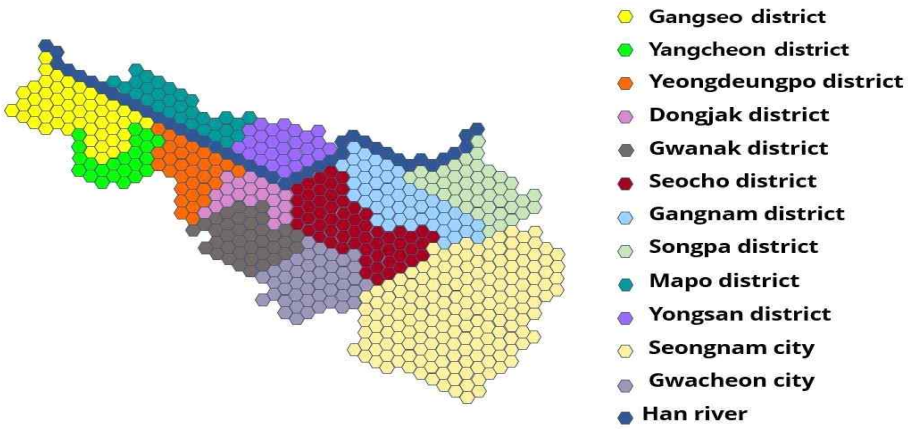


그림 23 정육각형 셀로 모델링된 서울시 일부

■ UAM 운용 시나리오 선정: 소음 우선 시나리오와 비즈니스 우선 시나리오

- 본 연구에서는 비즈니스 우선 시나리오와 소음 우선 시나리오 두 가지 경로 설정 방법을 이용하였음
- 비즈니스 우선 시나리오는 소음에 대한 영향을 무시한 채 최단거리로 목적지에 도착하는 경우이며, 소음 우선 시나리오는 소음에 대한 영향을 최대한 줄이기 위해 경로의 대부분을 인구가 최소로 거주하는 지역을 따라 비행하도록 설정된 시나리오임
- 두 가지 경로 작성 방법을 이용하여 K-UAM 로드맵 수도권 지역 실증노선(안)에 제시된 김포공항에서 코엑스까지의 노선이 줄일 수 있는 소음의 영향을 평가해보았음[1]

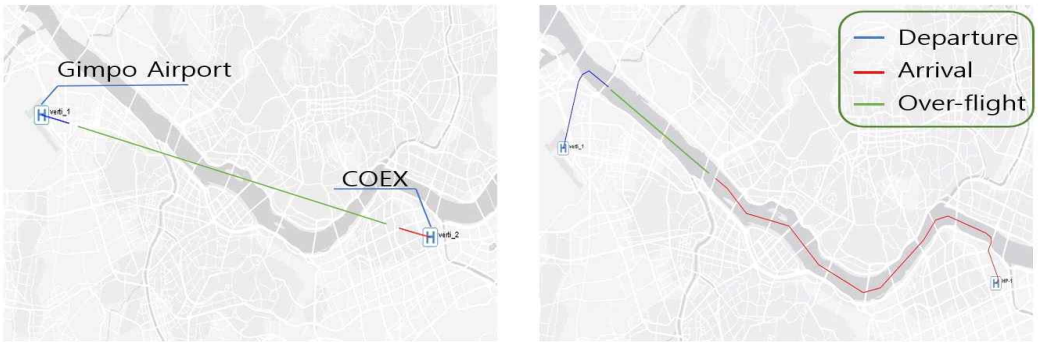


그림 24 두 가지 경로 작성 방법을 통해 나타낸 김포공항-COEX 경로

■ 수도권 소음 분석 결과: 효율적인 운용 시나리오 분석

- 행정구역을 지나가는 소음 리셉터가 포함된 셀 개수와 위에서 제시한 셀 당 인구수 데이터를 이용하여 소음 영향권에 있는 인구수를 추정할 수 있음. 그 결과 소음 우선 경로에서의 소음에 영향을 받는 인구수가 비즈니스 우선 경로보다 약 60% 감소 되었으므로 더 효과적인 경로라고 할 수 있음
- 뿐만 아니라, Miedema curve를 이용하면 높은 수준의 영향을 받는 인구수는 비즈니스 우선 경로가 소음 우선 경로에 비해 약 70% 높으므로 소음 측면에서 더 효율적이라는 것을 알 수 있음

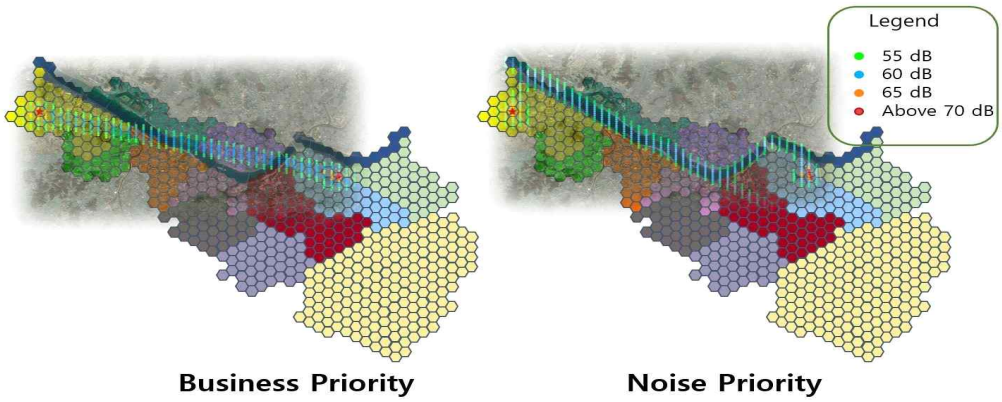


그림 25 모델링된 행정구역에 표시한 서로 다른 두 경로의 소음지도

■ 소음 면적을 이용한 소음 분석

- 리셉터가 포함된 셀의 개수를 구하는 방법으로는 정확도 문제, 장거리 경로 또는 다수의 경로를 분석하기에는 많은 시간이 소요된다는 문제 등의 한계가 있음
- 이러한 문제를 해결하기 위해 AEDT 소프트웨어에서 도출된 소음지도의 면적을 구해 행정구역의 넓이에 얼마큼의 비율을 차지하고 있는지를 계산할 수 있는 방법을 개발
- GIS 데이터 및 AEDT에서 추출한 소음지도를 Pyhton으로 처리하면 아래 그림과 같음

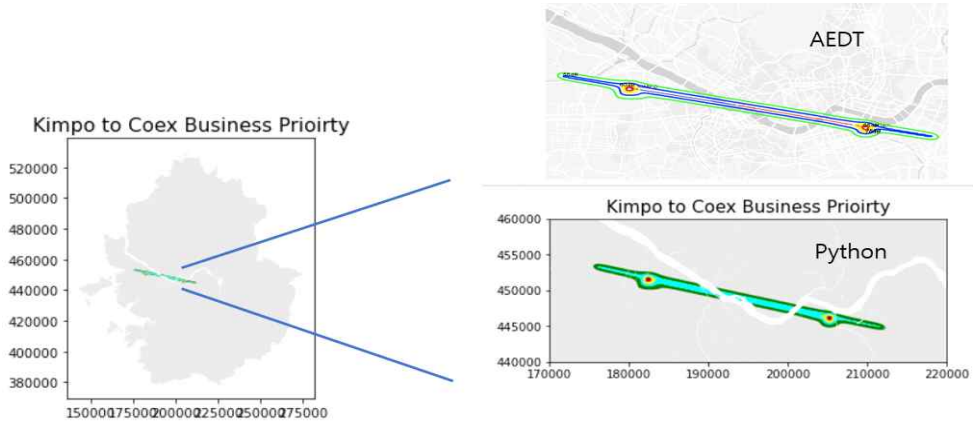


그림 26 Python으로 구현한 UAM 경로에 대한 소음 지도

- 본 연구에서 개발한 코드를 이용하여 소음 면적을 셀의 개수로 환산하여 결과적으로 셀당 인구수와 소음수준별 셀의 개수를 곱하여 행정구역별 및 소음수준별 소음에 영향을 받는 인구수를 예측할 수 있음

■ 연구 현황 검토

- 아래 표와 같이 각 기업에서 제시하고 있는 eVTOL 항공기 및 수직이착륙장의 성능을 운영 변수로 활용하고, 수직이착륙장의 설계요구조건과 설치될 공간의 특징에 따라 각 수직이착륙장의 형상 제안 및 수용성을 분석함

표 13 우버 기반 시설 시뮬레이션 가정[11]

이착륙	• 모든 VTOL은 1회의 이착륙만 가능
최대거리	• 120mile
순항 속도	• 170mph
이착륙시간	• 이륙 60초, 착륙 75초
탑승, 하차 시간	• 탑승 3분, 하차 2분
계산 방식	• Haversine공식을 이용해 거리를 추정 경로 거리로 변환 후 이용
여행 시간	• 지상 여행 시간보다 적어도 40%더 빠름
승차 일정	• ODM 방식

■ Vertiport 구성요소 크기 검토

- Vertiport의 구성요소는 크게 TLOF 패드, 게이트, 유도로 등으로 구성되며, 추가 요소로써 스테이징 스탠드를 고려하고 그에 따른 배치를 고려할 수 있지만 현대자동차 등은 공간 활용을 위해 하나의 구성 요소에서

다양한 서비스를 제공할 수 있는 축소된 형상을 제안하고 있음. 따라서 본 연구에서는 주어진 공간에 대해 기존 헬기장 규정을 참고하여 여러 가지 구성 요소의 배치를 검토함

- S-A1의 규격이 15 m x 10.7 m인 것을 고려하여 직사각형의 대각 길이인 18.4 m를 aircraft dimension(AD)로 지정하고, 문헌을 참고하기 위해 이 AD를 RD와 같다고 가정함. 이에 따라 vertiport 수용성 분석에 사용되는 components의 크기와 규정은 아래 표와 같음

표 14 S-A1의 크기로 결정된 주요 vertiport 구성요소의 규정과 크기

Components	Regulation	Dimension
TLOF pad	AD	18.4 m
FATO	2 AD	36.8 m
Safety Area	FATO + max(1/2 AD, 30 ft)	46.0 m
Gate	AD + 10 ft	21.4 m
Taxiway Width	AD + 1/2 AD	27.6 m

■ 수직이착륙장(Vertiport/Vertistop) 개념 설계

현대자동차의 UAM은 한강시민공원 부근을 수직이착륙장으로 제시하고 있으나 본 연구에서는 그 이외에 가능한 우리나라 수직이착륙장 위치와 형태를 제시하는 연구를 수행함. 국토교통부에서 제시한 실증노선을 참고하여 초기 국내 수도권 지역의 적용 가능한 위치에 따른 수직이착륙장 성능을 검토함

- 한강둔치 수직이착륙장 형상설계
  - ✓ 한강둔치의 부지중에서 충분한 면적은 보유하고 있으며 접근성이 좋은 위치를 선정함

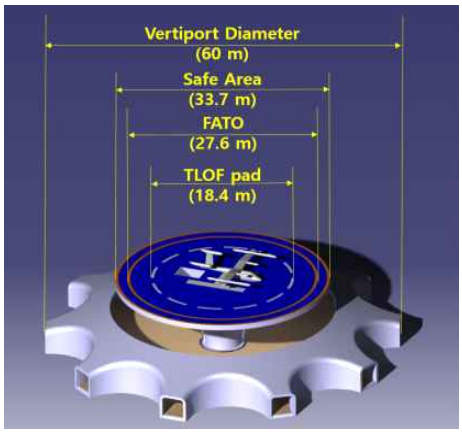


그림 27 한강둔치 수직이착륙장 형상설계

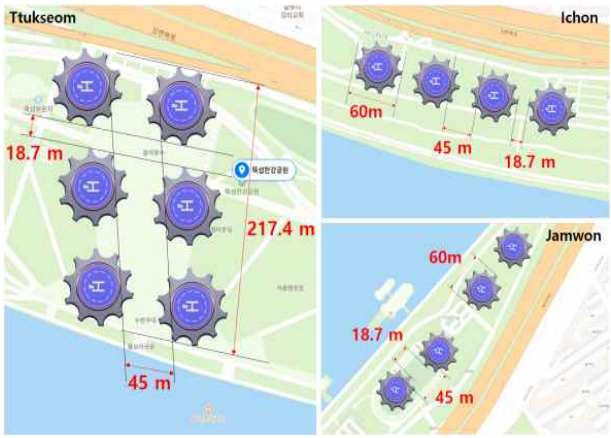


그림 28 3개 한강공원에 대한 공간 측정 및 배치

표 15 한강둔치 수직이착륙장들의 성능 검토

Specification	Location		
	Ttukseom	Ichon	Jamwon
Vertiport size (diameter)	60 m		
Measured space ( )	159 240	138×330	160×206 and 84 ×171
Applied efficient method	simultaneous operation and skip recharging time		
Number of buildable vertiport	6	4	4
Number of passengers transportable per hour	360	240	240
Number of passengers transportable per day	4,680	3,120	3,120
Number of passengers transportable per day	140,400	93,600	93,600

- 나들목 수직이착륙장 형상설계
  - ✓ 서초 나들목에서 폭이 100 m이상인 클로버 잎을 대상으로 설계한 나들목 수직이착륙장은 차량을 30 대 가량 수용할 수 있으며, UAM 운용뿐만 아니라 부가적인 편의시설까지 포함할 수 있는 등 많은 이점을 가

지고 있음. 이 수직이착륙장은 기존의 고가도로보다 높은 높이로 설치되어 이착륙 방향, 주변 지형물 등의 문제로부터 비교적 자유로움



그림 29 서초 IC 공간 측정

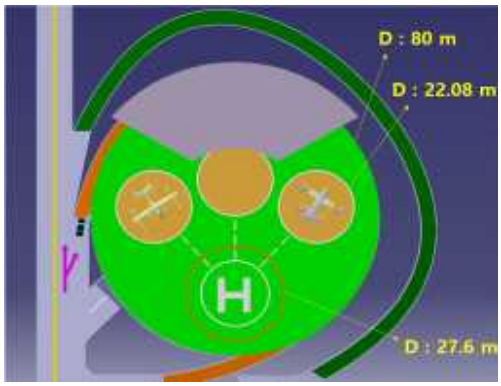


그림 30 나들목 수직이착륙장 규격

표 16 서초 IC 수직이착륙장의 성능 검토

Specification	Seocho IC
Measured space (diameter)	85 m
Vertiport size (Diameter)	80 m
Applied efficient method	Skip recharging time
Number of buildable vertiport	1
Number of passengers transportable per hour	40
Number of passengers transportable per day	531
Number of passengers transportable per month	15,945

- 김포공항 부지 검토 및 배치 제안
  - ✓ UAM의 초기 시장은 항공 엠뷸런스와 공항 셔틀이므로 본 연구에서는 서울의 국내선 공항로 사용되고 있는 김포공항 주차장에 3개의 배치를 적용하여 분석함



그림 31 현재 주차장 공간



그림 32 확장된 주차장 공간

■ 수용 능력 판단 알고리즘 적용

- 김포공항 부지에 세 가지 배치를 적용하고, 결과 중 TLOF pad 활용도를 우선으로 하여 현재 김포공항 주차장 공간과 확장된 김포공항 주차장 공간에 대해 효율적인 배치를 선정함
- MATLAB 프로그램을 사용하여 수용 능력 분석 알고리즘을 구현하였으며, MIT에서 개발한 정수계획법(IP)의 개념을 참고함
  - ✓ 현재 주차장 공간
    - ◆ 세 가지 배치의 수용 능력을 비교해보면 TLOF pad utilization이 95.83 %로 2개의 TLOF pad와 9개의 게이트를 보유한 부두 배치가 가장 좋은 효율을 보여줌

◆ 세 가지 배치에 대한 분석 결과를 아래 표에 나타내었으며, 가장 효율적인 부두 배치와 결과 그래프는 아래 두 그림과 같음

표 17 현재 주차장 공간에 대한 세 가지 배치의 수용 능력 분석 결과

	Linear	Satellite	Pier
Number of TLOF pads	2	4	2
Number of gates	6	10	9
TLOF pad Utilization	89.33 %	70.83 %	95.83 %
Gate Utilization	69.44 %	70.67 %	59.35 %
Gate holding	8.33 %	6.67 %	3.95 %

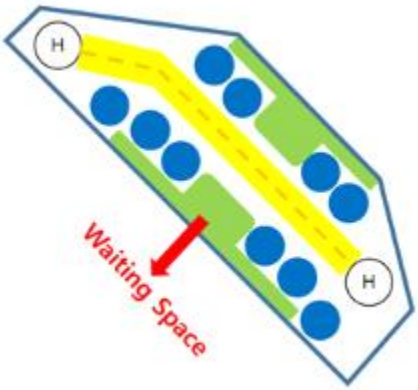


그림 33 현재 주차장 공간

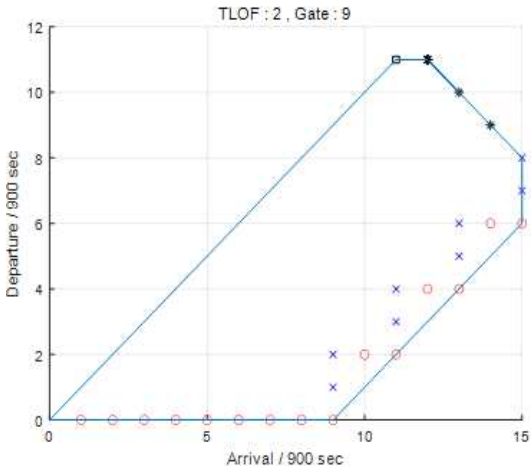


그림 34 현재 김포공항 주차장에 대한 부두 배치의 수용성

✓ 확장된 주차장 공간

◆ 세 가지 배치의 수용 능력을 비교해보면 TLOF pad utilization이 91.67 %로 2개의 TLOF pad와 8개의 게이트를 보유한 부두 배치가 가장 좋은 효율을 보여줌

◆ 세 가지 배치에 대한 분석 결과를 아래 표에 나타내었으며, 가장 효율적인 위성 배치와 결과 그래프는 아래 두 그림과 같음

표 18 확장된 주차장 공간에 대한 세 가지 배치의 수용 능력 분석 결과

	Linear	Satellite	Pier
Number of TLOF pads	3	2	3
Number of gates	8	8	8
TLOF pad Utilization	75.00 %	91.67 %	75.00 %
Gate Utilization	70.21 %	61.88 %	70.21 %
Gate holding	7.29 %	4.38 %	7.29 %

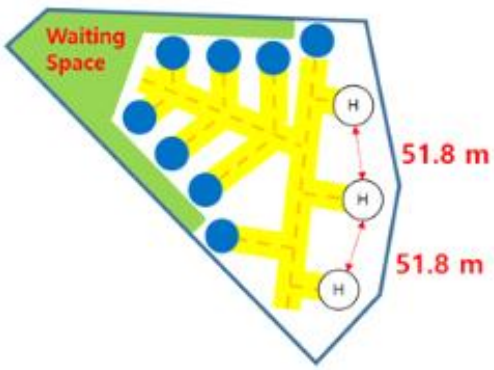


그림 35 확장된 주차장 공간

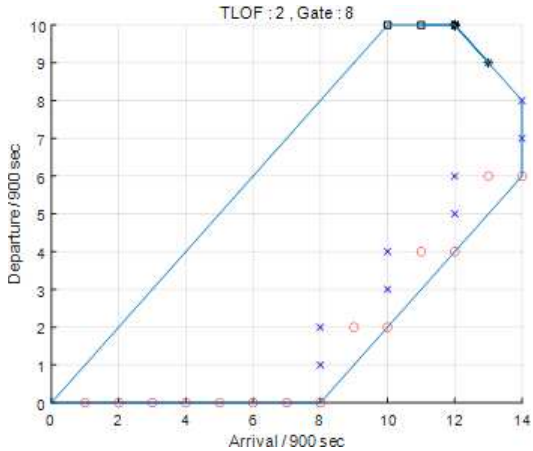


그림 36 확장된 김포공항 주차장에 대한 위성 배치의 수용성

구분	연구개발목표	핵심 연구개발성과 (연구개발성과물)	현재 국내・외 기술수준	연구개발 목표치	목표치 설정 근거	가중치 (%)
1년차 (2020)	UAM 국내외 연구 동향	• UAM 요구도 분석 • 비행체, 기술개발, 규제 적용, 인프라, 시장 기준 설정 • UAM 운송 수요 모델링 • 인프라 최적화 계획 생성 • 인프라 최적화 비교분석 연구 • 모델 적용 및 다양한 시나리오 평가 • 도심 항공 모빌리티 소음: 진행중인 연구, 차이점 및 권고 사항 • UAM 수직이착륙장 구축 개요 및 개발 사업자 측면에서의 주요 관심사항 분석	• 국내는 범부처 합동으로 한국형 도심항공교통(K-UAM) 기술로드맵을 제시하고 있음(총 599페이지, . 2021.06.) • 다부처 한국형 도심항공교통 [K-UAM] 핵심기술개발사업을 기획 중임(사업기간은 '23년 ~ '32년이며, 총사업비는 1조 6,938억원 규모)	선진국 대비 70%	요구도 도출 여부. 교통 모델링, 데이터 수집, 경로 시나리오 설정 여부	15
		• 기반시설을 가정한 시뮬레이션: 수직이착륙장(Vertiport/Vertistop) 수용 능력 및 배치 분석 • 바람 등 기상환경을 고려한 수직이착륙장 선정 국외 연구 • UAM 운영과 관련된 ICAO 인증, 운항, 운용 관련 정보 수집 • 도심 항공 모빌리티 시스템 체계종합 모델링 • UAM 네트워크와 비행체의 모델링 및 평가 개요 • 비행체 사이징 • 네트워크 모델 • 비용 및 이산화탄소 배기가스 연구		선진국 대비 70%	인프라 최적화, 비교분석 여부	15
	도심 항공 공유기반 모빌리티(ODM: On-Demand Mobility)의 수도권 적용 연구	• 데이터 수집 및 표현 • 교통상황 데이터 수집 및 시나리오 설정 • K 평균 알고리즘 연구 • 실루엣 기법 연구 • 국내 실정을 고려한 수직이착륙장 위치 선정 방법 및 권고 사항 • 공유기반 모빌리티의 이동시간 계산	• 미국 FAA, NASA, 유럽 EASA 등 정부기관과 500개가 넘는 기업들이 UAM 연구에 집중하고 있음	선진국 대비 70%	인구 데이터 표현 방법의 적절성 여부	10
				선진국 대비 70%	수직이착륙장 선정 여부, 이동시간 계산 여부	10
2년차 (2021)	도심 항공 모빌리티(UAM) 수도권 운영에 따른 소음 분석	• UAM 소음 목표 분석 • UAM 국내외 소음 평가 단위 선정 • 소음 평가 도구 및 시나리오 선정 • 소음평가를 위한 UAM 운용 모델 선정	상동	선진국 대비 70%		25
		• 수도권 운영 소음 분석: AEDT를 이용한 소음 분석 내용 설정 • 수도권 소음 분석 결과 • 보완된 소음 분석 방법: 소음 면적을 이용한 소음 분석 • 수도권 소음 분석 결론		선진국 대비 70%		10
	도심 항공 모빌리티(UAM) 적용을 위한 수직이착륙장 개념 정립 및 구축 방안 마련	• UAM 수직이착륙장 적용을 위한 수직이착륙장 개념 정립 • 수직이착륙장(Vertiport/Vertistop) 개념 설계 및 구축 방안 마련 • 국내 UAM 수직이착륙장 적용에의 적용 예	상동	선진국 대비 70%		15

2. 연구개발과제의 수행 과정 및 수행 내용

2-1. UAM 국내외 연구 동향

2-1-①. UAM 요구도 분석

○ 교통수단으로서 도심항공 모빌리티(UAM)의 효율

- eVTOL 개념

• eVTOL (Electric Vertical Take-Off and Landing)이란 기존의 내연 기관 대신 전기로 추진되는 수직이착륙 비행체를 지칭함. 아래 그림에 주요 특징을 설명함



그림 37 eVTOL을 사용한 도심항공 모빌리티(UAM) 개념

- 도심항공 모빌리티(UAM) 혜택

• "항로"는 거의 비용이 들지 않고 교차로와 같은 전통적인 제한 요소들이 적기 때문에 적은 기반 시설 투자를 필요로 하는 혁신적이고 빠른 교통 시스템

• 도시에서 도시로의 연결이 쉽기 때문에 높은 유연성 제공

• 수직이착륙장(Vertiport)간 환승에 시간이 필요함에도 전체 이동 시간에서 최소 20% 절약

• Point To Point 이동



그림 38 OPPAV 혜택[12]

- 도심항공 모빌리티(UAM) 주요 요구도

• 새로운 기술개발 및 구현 속도

✓ 도심항공 모빌리티가 상업적으로 성공하기 위해서는 처음 몇 개 도시의 성공적인 시험비행에 달려있음. 하지만 승객용 도심항공 모빌리티가 출범한 이후에는 새로운 기술을 개발하고 구현할 수 있는 속도에 초점이 맞추어질 것임

• 소음

✓ 소음 문제는 한 도시에서 운항하는 eVTOL의 수와 이륙 및 착륙 빈도에 따라 달라짐. 따라서 eVTOL 항공기의 소음 배출에 대한 면밀한 조사가 필요함

- 안전

✓ 안전을 위한 eVTOL의 인증 표준은 DEP(분산 전기 추진 장치)기술이 기반이 될 수 있도록 규정을 강화하고 새롭게 정의될 것임

✓ 비상시 원격 조종사가 조종사의 통제권을 가져올 수 있어야 함과 동시에 테러에 사용되지 않도록 네트워크보안에 적합한 안전장치 개발이 필요함

- 소비자 인식

✓ 소비자에게 긍정적인 인식을 심어주기 위해 더 좋은 이동 서비스를 제공하면서 이익이 비용보다 크다는 것을 입증해야 함

✓ 사생활과 사유재산 피해를 방지하기 위해 어느 정도 허가를 규제해야 함

- 네트워크 시스템

✓ 여객용 eVTOL이 활성화된 후 자동 비행 타워를 포함한 항공기 시스템 교통 관리(UTM 그리고 ATM) 가능

- 배터리

✓ 2035년까지의 목표는 400-500Wh/kg 이상의 에너지 밀도를 달성하는 것임. 이는 현재의 대략 두 배의 용량임. 따라서 리튬-실리콘. 리튬-황 등 보다 진보된 배터리 기술이 필요함

- 여객용 UAM 기반 시설

✓ 도시에 수직이착륙장(Vertiport)과 기타 필요한 기반 구조의 기본 구성요소를 구축하여 수직이착륙장 채택을 촉진해야 함

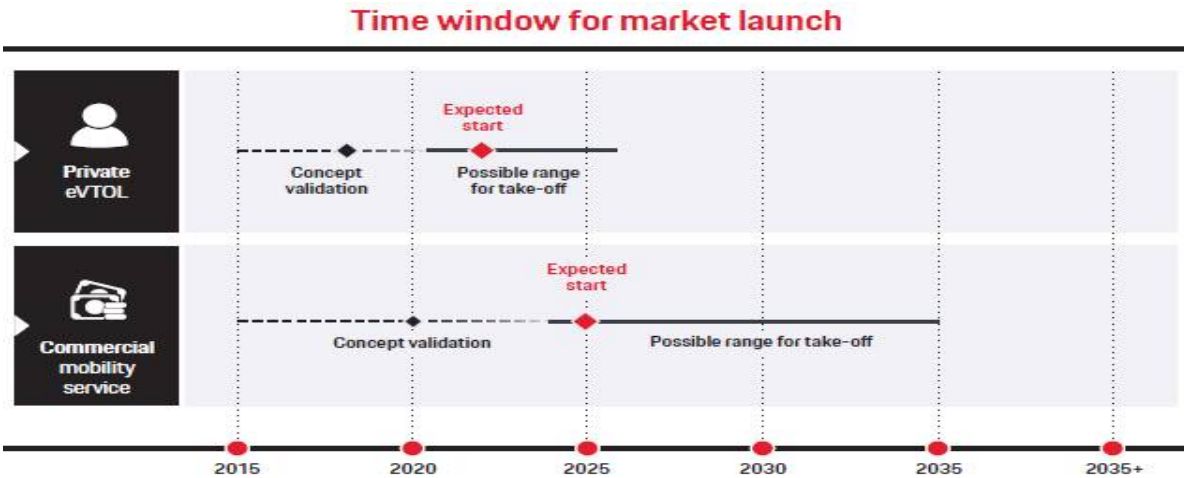


그림 39 2035년까지의 eVTOL 타임라인[12]

- UAM을 에어 택시로 활용 시 효율

- 에어 택시가 급부상하는 이유에는 교통체증 완화가 있음. 독일 전문 연구기관인 Porsche Consulting이 지상 운송 수단인 자동차와 eVTOL의 이동 시간 및 거리를 실험해 본 결과 독일 뮌헨국제공항에서 뮌헨시 중앙 광장인 Marienplatz까지 일반자동차는 40km 거리를 45분 걸려 이동한 반면 eVTOL을 이용하면 30km 거리를 10분에 이동할 수 있음

- 지하철, 버스, 택시와 통합되어 에어 택시는 도심 교통망에 중요한 기여를 함

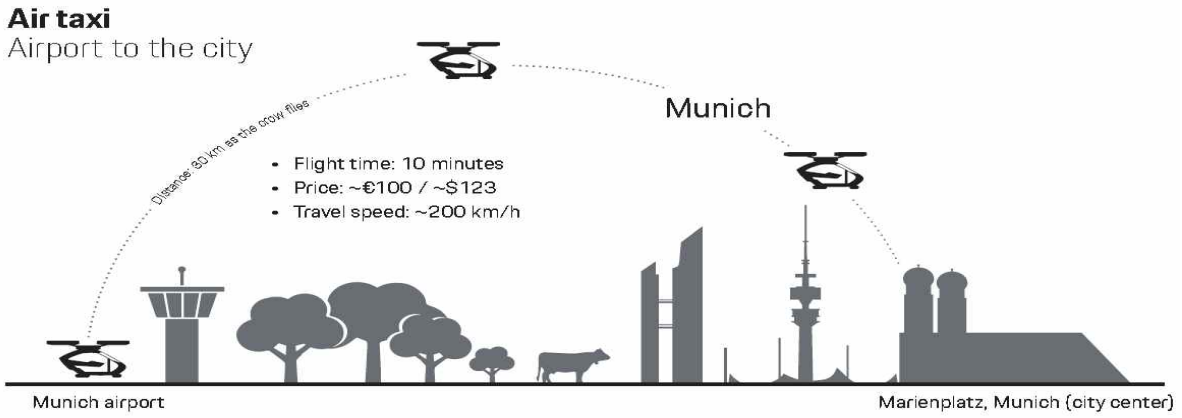


그림 40 뮌헨의 공항과 도심을 연결하는 에어 택시[12]

○ 도심항공 모빌리티(UAM) 신뢰성 및 안전성 요구도 분석

- 도심항공 모빌리티(UAM)를 위한 안전성을 확보하기 위해 역사적 충돌사례와 근본 원인을 파악함. FAR PART 135에 따르면 대부분 조종사의 실수로 인한 제어력 상실이 원인이며, 이러한 사고 유형은 개선된 항법 및 기상 정보와 연동하여 단순한 형태의 자율 비행체를 통해 예방 가능함

- UAM은 디지털 fly-by-wire 시스템을 사용하며, 이 시스템은 조종사의 실수로 인한 사고를 줄이는데 핵심임. 조종사의 보조 기구는 시간이 지남에 따라 완전한 자율성을 가질 것으로 예상하여 비행 안전에 긍정적인 영향을 미칠 것으로 판단됨

- 분산 전기 추진(DEP : Distributed Electric Propulsion) 기술을 사용한 안전성 증대

  • 조종사 실수 다음으로 높은 사고 원인은 엔진 고장과 관련 있으며, 연료 관리 오류를 포함하면 일반 항공 사고의 18%를 차지함

  • 다중 전기 모터, 제어기 및 예비 배터리 시스템을 사용하면 추진 시스템 이중화를 통해 엔진 고장 문제를 방지할 수 있음. 엔진 고장으로 인한 속도나 상승 성능이 저하될 수 있지만, 항공기 운항 범위 내에서 제어 가능함

  • DEP를 포함한 OPPAV는 더 빠른 하강이 가능하며, 복수의 프로펠러 로터들과 함께 사용할 경우 재순환 유동 조건과 같은 상태를 피하는 데 도움을 주어 기존 헬리콥터보다 안전성을 확보함

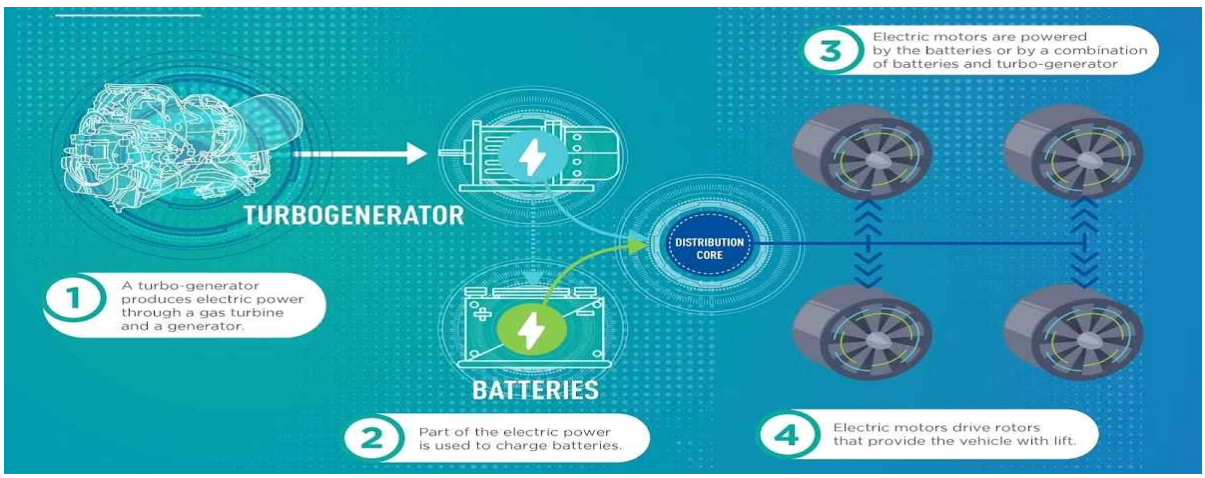


그림 41 DEP: Distributed Electric Propulsion[13]

○ 도심항공 모빌리티(UAM) 소음 요구도 분석

- 도심항공 모빌리티(UAM)는 인구 밀도가 높은 도심 지역에서 운용되기 때문에 안전성 다음으로 소음이 중요한 고려 요소임

- UAM을 수도권에서 운영 시 발생하는 소음에 대한 소음에 노출되는 인구수, 지역 등을 AEDT (Aviation Environmental Design Tool) 소프트웨어를 사용하여 2차년도에 분석할 예정임

- UAM 소음 목표

  • UAM 수직이착륙장에서 운용 시 소음은 거주지 도로에서 운행하는 트럭 소음(고도 50 ft에서 75-80dB)의 절반에 근접해야 하며, 이는 현재 운용 중인 헬리콥터의 4분의 1 수준임(고도 500 ft에서 약 62 dB)

  • 도심 내에서의 UAM 운용이 동시다발적으로 일어날 것으로 예상되는 바, 소음 목표를 고도 250 ft에서 67dB로 설정하는 것이 합리적이라고 판단됨

- 장기간의 소음 노출

  • 단순히 소음을 정량적인 수준만으로 나타낼 수 없음. 높은 소음뿐만 아니라 지속시간, 반복성에 대한 생리적 인식과 관련된 현상들이 불쾌감을 줄 수 있다는 것을 인식해야함

  • FAA는 도시의 장기적인 소음 문제를 연구하고, 불쾌감을 측정할 수 있는 DNL (Day-Night-Level) 개념을 정의함. DNL은 시간대별로 노출되는 소음에 각각의 다른 가중치를 부여하여 계산하는 방법임

  • UAM의 운용 시 이착륙지점의 주변 소음을 개별적으로 특성화하는 것이 중요함. 운용될 수직이착륙장에서 운영자가 일정 수준 이상의 소음을 발생시키지 않을 최대 운행 횟수를 계산할 수 있는 시스템이 필요함

- 단기간의 소음 노출

  • 단기간의 소음 노출은 일반적으로 SEL (Sound Exposure Level) 또는 SENEL (Single Event Noise Exposure Level)로 측정하며, 이는 이착륙이 수면과 같은 일상적인 활동을 방해할 가능성을 나타냄

  • UAM 운용 시 소음의 최댓값보다 일정 수준 낮은 순간부터 그 이하로 떨어질 때까지의 시간이 얼마나 지속되는지 측정하여 위에서 언급한 절대 소음 목표를 달성할 수 있다면 단기간의 소음 노출에 있어서 긍정적 결과를 얻을 수 있음

○ 도심항공 모빌리티(UAM) 배기가스 요구도 분석

- 교통은 전체 온실가스 배출량의 상당한 부분을 차지하고 있으며, 도심항공 모빌리티(UAM) 운용 시 발생하는 배출가스로 인한 오염을 고려해야 하나 대부분의 UAM에 사용하는 PAV는 전기 추진이므로 배기가스 배출이 없음

- 배기가스 해결책으로 eVTOL PAV가 대두되었으며 이는 비행 중 탄소 배출을 제로화하고 풍력, 태양과 같은 재생 에너지를 채택함에 따라 탄소 배출을 현저히 낮추는 방향으로 나아가고 있음

- 운송에 있어서 수명주기 배출에 영향을 주는 요인은 에너지원의 배출뿐만 아니라 비행체 무게도 포함됨. 전기 모터의 경우 종래의 내연 기관이나 터보샤프트 엔진보다 약 3~4배 효율이 높기 때문에 비행체 무게가 크게 감소함. 이와 같은 이유로 eVTOL의 적용은 합리적이고 지속 가능한 운송 방식을 달성하는 데 필수임

○ 도심항공 모빌리티(UAM) 성능 요구도 분석

- 순항과 호버링 효율

  • UAM에 사용되는 eVTOL PAV 임무는 순항고도에 도달하기 위해 가파른 활공 경로 각에서 빠르게 상승하여 이륙한 다음 수직 착륙까지 감속하는 기능을 포함함

  • 현재 운용 중인 헬리콥터는 장시간 비행을 필요로 하는 군사 및 다용도 역할에 적합하

도록 설계 되어 공기역학적 효율에 최적화되어있음

- 그러나 UAM에 사용되는 eVTOL PAV는 수직이착륙 시 필요한 큰 추력을 위해 순간적인 공기역학적 출력과 장기적 순항 에너지 사이의 최적화를 수행해야 함

- 속도와 운행 거리

- UAM에는 오늘날의 자동차 공유 네트워크가 제공하는 것처럼 다양한 유형의 eVTOL이 필요할 것으로 예상됨. 고객의 소유에 맞게 다양한 속도와 운행 거리를 가진 VTOL이 개발될 것임
- 미래의 서비스에 영향을 미치는 매개 변수를 고려할 때, 다른 교통수단과 경쟁하기 위해 지상 교통 시간을 고려하여 목표 속도를 책정해야 함. 서비스가 적용될 지역의 조건에 따라 특정 속도를 책정하는 것이 어렵지만, 선행연구에 따르면 150-200 mph가 가장 효율적이라고 함
- 배터리의 효율이 eVTOL의 운행 거리를 제한할 것이므로 효과적인 배터리 셀과 이에 따른 배터리 팩이 중요할 것으로 예상됨. 현재 배터리 셀 1개가 고장이 나더라도 다른 배터리 셀에 영향을 끼치지 않도록 하는 연구가 진행 중임. Pipistrel Alpha Electro 사의 항공기는 배터리 팩 무게를 30% 미만으로 달성하는 등 진전을 보이고 있음
- 미국 에너지부(Department of Energy(DOE)) 배터리 500 프로젝트는 향후 5년 동안 500 Wh/kg 배터리를 350 kW의 대용량 충전기와 함께 개발 중임
- 10분 이내에 재충전할 수 있는 고에너지 충전기인 펄스 충전기에 관한 추가 연구는 향상된 사이클 수명을 보여주고 있으며 시간이 지남에 따라 개선된 최대 충전 용량을 유지함. 큰 용량의 배터리 팩에 대한 급속 충전 또한 중요한 과제임

- 유상하중(Payload)

- 유상하중이 클수록 이착륙에 더 큰 출력이 필요하고 소음도 증가함. 대형 비행체는 구조적으로 효율적이며 조종사 1인당 승객 비율이 높아 운항비용이 개선됨
- 현재 도심 내에서 소음 규제를 충족할 수 있는 가장 합리적인 것은 소형 eVTOL임
- 로터와 날개에 의해 발생하는 양력의 양은 상승과 기동을 하는데 충분한 여유를 가지고 전체 중량을 초과하여야 하고, 모든 비행 상황에서 안전한 제어를 하기 위해서는 무게중심을 양력중심과 정렬시키는 것이 중요함. 소형 VTOL의 경우 승객 한 명당 전체 무게의 상당한 비율을 차지하므로 이러한 한계점을 면밀히 분석하는 것이 요구됨

- 자동 비행(Autonomy)

- 현재 자율주행 자동차가 자동차 사고로 인한 사망자 수를 줄일 수 있는 잠재력을 가지고 있고, 그에 따라 자율형 UAM eVTOL 역시 운행의 안전성을 높일 수 있을 것으로 전망됨
- eVTOL의 자율성은 인간 조종사보다 더 큰 안전성을 제공한다는 통계적 데이터를 보이기 때문에 구현될 가능성이 높음
- 비행체 부품의 고장 또는 조작자 오류에도 불구하고 안전한 운행을 입증하기 위해 안전성의 등가 수준 또는 개선된 수준을 보여주는 직접적인 방법이 있음
- 자율형 eVTOL에서 조종사가 제어 장치에 대한 권한을 역으로 갖게 하는 것 또한 안전성에 큰 영향을 줌. 자율성 구성요소 및 소프트웨어와 함께하는 조종사의 조합은 잠재적으로 인증 규제를 줄이고 동시에 도심 내에서 조종사의 작업부하를 감소시킴

○ 도심항공 모빌리티(UAM) 인증 요구도 분석

- 도심항공 모빌리티(UAM)가 상용화 되어 운행하기 전에, 항공 안전을 보장할 수 있는 규정이 필요할 것임. 이 규정은 설계, 생산, 조종사 면허 및 유지 보수, 운영 요구 사항에 대한 표준을 규정하여 시행함
- 인증 단계는 우선 규제 당국과 eVTOL 제작사가 인증기준에 동의해야 하며, 인증기준에 따라 비행체의 설계, 제작, 운영 시 준수 여부를 결정하는 방법에 동의해야 함. 그다음으로 eVTOL 제작사는 형식 인증을 취득하기 위해 인증기관이 승인한 표준에 대한 비행체의 적합성을 입증함
- 종래의 일반 항공기의 신형 모델과 같이 단순한 케이스의 형식 인증은 약 2~3년, 새로운 생산인증은 약 1년이 더 걸림. 그러나 UAM에 사용할 eVTOL과 같은 신형 항공기의 도입에는 형식 인증과 병행하여 새로운 인증 기준이 필요하면 약 4~8년까지 소요될 수 있음

표 19 시장 성숙도와 기술 분류에 따른 핵심 요소 개요

	단기간-미성숙 시장	장기간-안정된 시장
기술적인 도전	**경제성**: 높은 서비스 비용 (부분적으로는 자본 및 배터리 비용에 의해 주도됨) **날씨**: 악천후가 항공기 운영 및 성능에 상당한 영향을 미칠 수 있음 **항공 교통 관리**: 고밀도 운영은 현재의 ATM 시스템에 부담을 줄 것임 **배터리 기술**: 배터리 중량 및 재충전 시간, 에어 앰뷸런스 시장용 eVTOL 사용 방해 **영향**: 에너지 및 환경적인 부정적 영향(특히 소음)은 지역사회 수용에 영향을 미칠 수 있음	**영향**: 대규모 사업장의 에너지 및 환경적 영향 차량 및 UTM을 포함한 자율 시스템의 **사이버 보안** **날씨**: 심각한 악천후 조건에서 운영 중단 **신규 진입자**: UAS, 상업 공간 운영, UAM 차량의 개인 소유와 같은 신규 진입자의 대규모 운영은 공역 관리와 안전의 복잡성을 증가시킬 수 있음
비기술적인 도전	**인프라**: 기존 인프라 부족 및 낮은 처리량 **경쟁업체**: 기존 교통수단 **날씨**: 기후조건이 운영의 비기술적 측면에 영향을 미칠 수 있음 **대중 인식**: 안전을 염려하는 승객들 그리고 장거리 여행에 대해서만 보안 심사와 UAM을 선호하는 승객들 사람, BVLOS, 승객운송을 위한 비행에 대한 **법과 규정**이 필요함 **인증**: UAM이 문제를 겪을 기존 인증 프레임워크와의 격차, 특히 시스템 이중화 및 장애 관리	**경쟁업체**: 공유 전기 자동차와 자율주행 자동차, 고속 열차와 같은 새로운 기술 및 개념 **날씨**: 기후 변화로 인한 일부 불리한 조건의 증가는 운영을 제한할 수 있음 **사회적 유동성**: 이동 시간의 새로운 중요성, 재택근무의 증가, 도시화 및 혼잡 완화 시나리오는 시장의 생존 가능성을 감소시킬 수 있음 **대중 인식**: 승객들은 자동화와 조종사 없는 UAM에 대해 신뢰하고 염려하며, 자율 UAM 기술에서 알고 있는 다른 사람들과 함께 비행하는 것을 선호함

- 2016 FAR PART 23 개정은 자체의 규범적 표준이 아닌 업계 합의 기준을 중시함. 이는 eVTOL PAV의 인증에 대한 새로운 표준 개발을 획기적으로 가속화할 수 있는 가능성 제공함

표 20 법 및 규제 요약

핵심 결론	UAM을 시장에 출시하기 위해 법, 규제 및 인증 문제와 기회가 존재함. UAM에 대한 분석은 많은 UAM 영역이 UAS 운영의 출현으로 어느 정도 해결되고 있기 때문에 UAS 법 및 규제 성과와 비교됨. 이와 유사하게 격차를 줄이는 UAS 연구는 UAM 활성화에 도움이 되었음. 해결해야 할 과제 중 일부는 미해결 문제, 특히 연방, 주 및 지방 당국이 주도하는 법적 환경과 관련이 있음. 또한 UAM은 특히 항공 교통 관제 및 관리, 비행 표준 뿐만 아니라 환경 정책, 공공 사용, 토지 사용 및 지역 제한과 같은 항공의 대부분 측면을 다루는 법적 문제를 제기함. 그러나 현재의 법

	률 프레임은 특히 2018년 개정된 FAA 인증법에 맞추어 기술과 일치하도록 발전하기 시작했음. 물론, 보장된 자율성은 여전히 어려운 기술적, 법적 문제임 또한, 주정부와 실무부서가 UAS 구현장소에서 지방정부를 초월하는데 이르기까지 다양한 접근 방식을 통해 법적인 실험을 수행하는 다양한 접근식이 존재함. 또한 주 및 지방 정부 법률은 드론 금지법부터 UAS 운영을 보호하는 법률까지 다양함. 마찬가지로 국제적으로도 다양한 규정이 적용되었음 인증과 관련하여, FAA, ASTM, RTCA, SAE 등 UAM을 위한 항공기 인증 방법을 제공하기 위한 많은 노력이 진행되고 있지만 여전히 명확한 인증 경로는 없으며 규정 준수 측면에서 몇 가지 차이가 있음. 그러나 다음과 같은 기회가 있을 수 있음 • 잠재적 UAM 항공기의 범위와 인증 경로를 고려한 감항성 로드맵을 개발함 • 국제적인 노력을 연구하고 활용해야 함 (예 : ICAO, EASA, NATO) • 자율주행차 (예 : SAE 검증 및 검증 태스크 포스)와 같은 유사한 영역의 노력을 연구하고 활용해야 함 • 운영자 및 운영 인증에 대한 다른 인증 문제를 탐색해야 함 그러나 더 중요한 것은 UAM 기술 발전을 돕기 위해 현재 존재하는 전략임. 다음과 같은 UAM 법적 프레임 워크의 개발을 가속화하기 위해 전략을 활성화 할 수 있음 • NASA - 연구 전환 팀과 같은 FAA 협력 • FAA 항공 규칙 결정 위원회 • FAA UAS 통합 파일럿 프로그램 • 자동차 자동화 전략을 활용하는 등 전략을 활성화하면 UAM 구축에 도움이 될 수 있음 • 2018 년 FAA 개정 인증법은 산업 및 경제에 필요한 지원을 많이 제공함

○ 도심항공 모빌리티(UAM) 잠재적 사용자 요구도

- 도심항공 모빌리티(UAM) 잠재적 사용자 요구도 개요[12]

• 대중이 도심항공 모빌리티(UAM)를 수용하고 이용하도록 하기 위해서는 보안, 안전, 소음 및 주요 문제 해결이 필요함

• 부유한 사람들뿐만 아니라 대중교통으로 통합되어 모든 사람들이 이용할 수 있고 이익이 될 것임을 증명해야함

✓ 전문가들의 UAM 목표 소음 수치는 300ft 고도에서 약 65dBA임. 이는 헬리콥터 소음의 4분의1 수치임

✓ UAM을 이용함으로써 소비자들이 여행과 교통의 편안함 증대와 시간이 절약됨을 증명해야 함

○ 도심항공 모빌리티(UAM) 잠재적 사용자에 대한 선호의식 설문조사

- 의식선택 실험(Stated Choice Experiment) 설계

• 대안, 속성, 레벨을 설정하기 위해 운수항공기술 분야 전문가 및 관계자를 대상으로 설문조사를 통한 차량, 모드 선택에 영향을 미치는 중요한 요소로 작용할 수 있는 새로운 자율 모드 및 서비스 측면을 분석하고, 잠재선호의식(SP: Stated Preference) 조사에서 사용될 수 있는 자율 운송 모드를 특징짓는 속성을 설계함

• 시나리오 설정

✓ 가상의 편견을 어느 정도 줄이기 위해 참고문헌[14]는 응답자들에게 현실적인 시나리오를 제공하기 위해 선택적인 질문을 추가하도록 제안함. 이 연구는 뮌헨 대도시 지역의 자율

비행 택시(Autonomous Flying Taxi)의 운용 가능성을 파악하기 위해 독일의 자율 비행 택시 서비스 특징과 일반적인 주행 패턴에 대한 검토를 실시함. 주행 범위를 15km로 설정하고 두 개의 주행 목적을 가정함

- ◆ 일일 출퇴근 주행 : 교통 수단을 이용하여 거주지 인근, 근무지 인근 위치로 사람을 수송[15]
- ◆ 비출퇴근 주행 : 사회활동을 할 목적으로 개인 수송을 위한 교통모드로 활용[15]

✓ 유사한 유형의 다른 연구는 SP 실험 부분에 응답자별 기준 대안을 포함하지만, 이 연구에서는 지상 운송 모드와 비교한 자율 비행 택시의 특징과 서비스 속성으로 인해 15km의 가상 이동 거리가 미리 설정됨

- 대안, 속성, 레벨 선택

✓ 대안

- ◆ 세계적으로 효용성을 최대화하기 위해서는 기존의 모든 대안들의 보편적이지만 유한한 목록이 작성되어야 함[16]. 뮌헨 대소도시 지역의 교통모드 목록에는 많은 대안이 있기 때문에 가장 중요한 대안을 선택함. SC(Stated Choice) 실험에서 비교적 비교 가능한 4가지 교통 모드 대안인 자가용과 버스, 전차, U-Bhan, S-Bahn을 포함하는 대중교통(PT: Public Transportation), 자율주행 택시(AT: Autonomous Taxi), 그리고 자율비행택시(AFT: Autonomous Flying Taxi)를 포함함
- ◆ 선택 실험에 포함될 대안이 결정 되면, 각각의 대안을 기술하는 속성 및 레벨을 선택해야 함. 실험 설계를 보다 관리 용이하고 효율적으로 만들기 위해 다음과 같은 속성과 레벨을 포함함
  - ▪ 총 이동 시간, 총 비용, 총 보행시간 및 대기시간 등은 대안에 기초한 세 가지 레벨로 기술됨. 모든 수준은 편도 시나리오 기준으로 설정함
  - ▪ 하나의 대안적 특성인 안전 수준은 대안 AT (Autonomous Taxi)와 AFT (Autonomous Flying Taxi)에 대해 3단계로 설정되고, 세 단계 중 한 단계만이 현재 존재하는 모드와 겹치는 비율을 나타내는데 사용됨
  - ▪ 하나의 일정한 대안인 멀티태스킹 가능성은 운송모드의 속성을 기술하는 일정한 레벨에 의해 결정되고, 선택에 따라 달라지지 않음

✓ 속성과 레벨

- ◆ 속성 1 : 총 이동 시간
  - ▪ 총 이동 시간은 비행체내 이동 시간, 보행시간 또는 대기시간으로 구성됨. 비행체내 이동 시간은 독립적 속성으로 실험에 포함되지 않고, 총 이동 시간의 구성 요소로 포함됨
  - ▪ 비행체내 이동 시간에 관해서는 구글 맵을 이용해 기준 속성 수준을 추정하고, 피벗 수준은 참고문헌[16]에서 채택함
  - ▪ 비행체내 이동 시간에 대한 피벗 수준은 -40%, 0%(기준), 40%임. 대기시간은 이러한 비행체 옵션에 적합하지 않기 때문에 피벗 수준은 비행체내 총 이동 시간으로 간주됨
  - ▪ PT(Public Transportation)에 있어서 MVV APP[17]가 제공하는 여행 플래너를 사용하여 비행체내 이동 시간의 기준 값을 추정하며, PT에 대한 비행체내 이동 시간의 피벗 수준은 -20%, 0%(기준), 20%로 설정함[16]. AT(Autonomous Taxi)에 대해서는 뮌헨의 택시 서비스[18]의 이동 시간을 기초로 레벨을 설정함. AFT(Autonomous Flying Taxi)는 기준값이 없기 때문에 1~2분 이착륙시간을 고려하여 차량 내 이동시간(15km/h~150km/h)과 운행속도범위(100km/h~150km/h)를 기준으로 3단계로 정의함[11]

◆ 속성 2 : 총 보행시간 및 대기시간으로 인한 불편

▪ 총 이동 시간의 다른 구성 요소로서, 보행시간 및 대기시간은 공유 교통 모드를 사용할 때 불편함을 야기함. 매우 중요한 요소는 아니지만, 설계 균형을 위해 0분, 2분, 4분 수준이 포함됨

▪ 이와 대조적으로, 대중교통(PT: Public Transportation)의 보행시간은 교통 모드 선택과 PT 사용에 중요한 영향을 미치는 것으로 밝혀짐[16,19]. PT의 보행시간 수준은 뮌헨 지역의 보행거리를 계산한 참고문헌[20]의 조사 결과에 따라 기준값을 -50%, 0%, 50%로 설정함. 평균 대기시간 5분을 추가하여 합산한 값이 PT의 불편도를 나타냄

▪ 자율주행 택시(AT: Autonomous Taxi)에 대해서는, 대기시간이 중요한 서비스 속성으로 판단됨. 대기시간은 차량 운용 대수를 결정하는 데 매우 중요하며, 이는 서비스 운영 비용에 영향을 미침[21]. AT의 대기시간 수준은 5분, 10분, 15분으로 규정됨. 공유기반 모빌리티(ODM: On-Demand Mobility) 서비스가 제공하는 서비스를 고려하여, 여행자가 AT의 예상 도착 시간을 알고 있다는 가정 하에 AT의 보행시간을 대기시간으로 통합함. 따라서, 대기시간이 AT의 불편도를 나타내는데 이용됨

▪ 자동운항 에어택시(AFT: Autonomous Flying Taxi)에 대해서는 Uber의 운용개념을 고려한 대기시간의 수준을 규정함. 또한, 이착륙 및 충전에 대해 광범위하고 분산된 네트워크를 이용할 수 있다는 시나리오도 감안함[11]. AT의 개념과 유사하게 보행시간을 대기시간으로 통합하여 AFT의 불편도를 나타냄

▪ 총 여행시간에 대한 일반적인 개념을 제공하기 위해 PT, AT, AFT에 대한 비행체내 시간, 보행시간 및 대기시간을 합산하여 응답자에게 주어진 설문지 선택사항에 표시함

◆ 속성 3 : 총 비용

▪ 여행 시간과 유사하게, 비용은 많은 모드 선택(PT, AT, AFT 중 선택) 연구에서 선행되었고, 모드 선택에 중요한 영향을 미치는 일반적인 특성임. 자동차 이용에 관한 비용에는 연료비, 보험, 세금, 정비비 등을 포함함[22]. 기준 수준 0.5€/km는 참고문헌[22]의 연구를 참조하여 ADAC[23]가 제공한 보고서에 주어진 중간값임. 참고문헌[16]에서 채택된 수준은 -30%, 0%, 30%임

▪ PT 요금은 모드 선택에 가장 큰 영향을 미치는 요인으로 조사됨[22]. PT 총 비용의 수준은 사전에 정의된 이동거리를 감안하여 계산됨

▪ AT 총 비용은 참고문헌[21]에서 사용된 SAV(Shared Autonomous Vehicle) 비용 수준을 참조하여 설정함. AFT 대안을 고려하여 AT 속성 수준을 설정하는 것은 AFT가 비대칭적으로 지배적인 대안이 되는 것을 피하기 위함임

▪ AFT 총 비용은 참고문헌[11]이 추정하는 VTOL 비용에서 채택함. 예상 가격은 초기, 단기, 장기 시나리오를 바탕으로 Uber의 가격 수준과 비교함

◆ 속성 4 : 안전 수준

▪ 안전이나 위험이 항상 포함되는 것은 수량화하는 것이 어려움. 따라서, 안전 수준을 명시하기 위해 1억명의 승객이 마일당 충돌/사망하는 비율을 채택함

▪ AT와 AFT의 안전성에 대한 인식을 조사하기 위해 최악의 시나리오와 최선의 시나리오를 바탕으로 최저 및 최고 수준을 설정함. 현재 AT의 경우, 2014년 자율주행차량 충돌보고서와 미국 내 모든 기존 차량의 안전기록과 비교하면 100마일당 충돌률은 기존 차량 비율의 두 배 이상임

▪ 더욱이 AFT의 안전하고 효율적인 운행을 보장할 수 있는 규제나 항공교통관리시스

템이 없기 때문에 안전 수준을 알 수 없음. 참고문헌[11]에 따르면, 우버는 기존의 헬리콥터 안전 수준보다 2배 이상 열악한 것으로 나타남. 따라서, 마일 당 사망자의 수에 관해서 UAM에 사용하는 eVTOL의 안전 수준을 2배 더 안전하게 향상시키는 것을 목표로 함

- 속성 5 : 멀티태스킹 가능성
  - 자율 차량이 실험에서 고려한 기존의 운송모드와 미래의 운송모드를 구별함에 따라, 멀티태스킹 가능성을 채택함. 선택 사항에 따라 변경되지 않고 모드 특성을 나타내는 상수 속성으로 설정함. 자동차, PT, AT, AFT의 멀티태스킹 가능성 수준은 차량 자동화의 수준을 반영하여 No, In-Part, Yes로 정의함
- 위에서 설명한 속성과 레벨을 아래 그림과 같이 나타냄
- 각 가상의 시나리오에 대해 최소 중첩원리를 적용하여 의식선택(Stated Choice)에 대한 조합을 설정함

Alternative	Attribute	Attribute levels	Source
Car	Total travel time	18 Minutes, 30 Minutes, 42 Minutes (-40%, 0%, +40%)	Vrtic et al. (2009) Google map
	Total travel cost	5.25 €, 7.50 €, 9.75 € (-30%, 0%, +30%)	Vrtic et al. (2009) Twaddle (2011); ADAC report
	Inconvenience indicated by total walking time	0 Minutes, 2 Minutes, 4 Minutes	Created for this experiment
	Safety level	Driving-level safety	Created for this experiment
	Multitasking possibility	No	Created for this experiment
PT	Total travel time	38 Minutes, 49 Minutes, 61 Minutes	Vrtic et al. (2009) Twaddle (2011); Google map
	Total travel cost	1.00 €, 2.90 €, 5.80 €	MVV
	Inconvenience indicated by total walking and waiting time	15 Minutes, 17 Minutes, 19 Minutes	Sarker (2015); Moovit PT index
	Safety level	At least two times safer than driving	Savage (2013)
	Multitasking possibility	In-part	Created for this experiment
AT	Total travel time	28 Minutes, 40 Minutes, 52 Minutes	Created for this experiment
	Total travel cost	9 €, 11 €, 13 €	Krueger et al. (2016); Fagnant & Kockelman, (2016)
	Inconvenience indicated by total waiting time	5 Minutes, 10 Minutes, 15 Minutes	Fagnant & Kockelman, (2016); Munich taxi services
	Safety level	At least two times safer than driving Driving-level safety Two times riskier than driving	Patel (2017) LeBeau (2015)
	Multitasking possibility	Yes	Created for this experiment
AFT	Total travel time	12 Minutes, 17 Minutes, 21 Minutes	Created for this experiment
	Total travel cost	15 €, 25 €, 75 €	Holden & Goel (2016)
	Inconvenience indicated by total walking and waiting time	5 Minutes, 7.5 Minutes, 10 Minutes	Created for this experiment
	Safety level	At least two times safer than driving Driving-level safety Two times riskier than driving	Holden & Goel (2016)
	Multitasking possibility	Yes	Created for this experiment
None of the above	NA	NA	NA

그림 42 대안, 속성, 속성 레벨 요약표[24]

PT: Public Transportation, AT: Autonomous Taxi, AFT: Autonomous Flying Taxi

- 선호의식 데이터 수집

- 설문조사 구조와 실험적인 설계의 타당성을 테스트하기 위해 실증 실험을 실시함. 테스트 이후, 질문의 표현뿐만 아니라 조사 설계, 속성 수준의 설정에 관한 피드백과 의견을 바탕으로 설문조사를 개선함. 설문조사 결과에 따라 선택과제와 시나리오의 수는 변경될 수 있음
- 응답자들의 적극적인 답변을 위해 sns를 활용하여 디지털 전단지를 배포하여 데이터를 수집함. 또한 설문조사 대행사의 web site를 통해도 설문조사를 수행함. 또한 조종사의 경우 헬리콥터 조종사를 위주로 워크숍 등을 통해 설문조사를 수행함. 설문조사지에는 연구 범위와 설문에 대한 일반적인 설명과 함께 선택 사항에 대한 지침이 포함됨
- 설문조사를 실시하여 데이터를 수집하고 완성된 답변만을 유효 답변으로 설정함

- 모델링 프레임워크: 서비스 모델 탐색 분석

- 서비스 모델 탐색 분석은 병렬 좌표를 이용한 데이터를 시각화하여 많은 변수 간의 관계를 관찰함으로써 수행함. 병렬 좌표가 범주 데이터를 시각화하는데 적합하지 않지만 다변량 및 수치 데이터를 시각화하는데 적합함
- 인구 특성에 대해 분석하기 위해 몇 가지 기법에 근거하여 시장 세분화를 실시할 예정임. 선택 데이터에 기초한 잠재적 계층 분할을 실시함. 분석은 각각의 효용성과 응답자가 속할 확률을 동시에 추정함[25]
- 개인의 모드 선택과 인구학적 특성(사회 경제적 지위, 가족 상태, 현재 이동 패턴) 사이의 관계를 분석하고, 잠재적인 계층을 결정할 특성들을 이해하기 위해 varimax rotation 기법을 이용하여 요인인자를 분석함[26]

- 모델링 프레임워크: 서비스 모델 생성 및 평가

- 효용 함수를 만들기 위해 하나의 파라미터로 시작해 나머지를 추가하는 절차를 따름. 이동 시간과 교통 비용과 관련된 속성을 선형 매개변수로 포함시키고, 안전성을 포함한 모든 속성과 사회인구학적 변수의 수준에 따라 설정함. 운송 서비스 속성과 관련된 계수 또한 일반 매개변수로 추정하고, 결과를 산출 후 서비스 모델의 적합성을 개선시키는 파라미터만 포함하고 추정함
- 앞에서 언급된 절차에 따라 수행하였을 때, 모든 경우에 유의미한 계수를 추정할 수 없을 것으로 판단되며, 최종 서비스 모델에 통계적으로 유의미한 변수만 포함함[27]
- 모델 추정치는 최적화 알고리즘 BIO와 CFSQP[28]를 이용함. 모델은 아래와 같은 방정식을 이용하여 각 대안 를 선택할 확률을 구함

$$_{q} = \frac{e^{Viq}}{\sum_{j=1} e^{Viq}} \quad (7)$$

  - ✓ MNL(Multinomial Logit)의 추정 결과에 따라 OPPAV에 대한 응답자의 잠재적 관심을 분석하고, 잠재적 사용자 그룹을 더 자세히 설명하기 위해 다른 방식으로 MNL을 개선함. 새로운 MNL 확률(L_{iq})은 평균과 표준편차에 대한 정규 누적 분포를 역전시켜 계산한 매개변수를 통해 계산하며, 선택확률(P_{iq})는 아래 식에 따라 결과를 평균화하여 계산함

$$SP_{iq} = \frac{1}{R}\sum L_{iq}(\beta) \quad (8)$$

  - ✓ 여기서, SP_{iq} : 개인 q가 대안 i를 선택할 확률, R : β의 무작위 수

- 선호의식 조사분석 결과 데이터 분석: 연구 샘플 설명

- 표본이 모집단을 정확히 반영하는 사회-인구학적 특성과 이를 개선할 수 있는 측면을 설명하기 위해 연구 표본과 인구조사 자료를 비교해야 함

- 응답자 모집에 있어서, 65세 이상 인구는 인터넷 접속이 적은 점을 감안할 때 젊은 층이 연구주제에 더 관심을 갖고 조사에 열정적으로 임할 것으로 판단됨. 하지만 교육 수준과 같은 다른 사회 경제적 요소들이 어떤 면에서 편향된 조사 결과를 초래할 수 있는지를 파악해야 함
- [29]의 조사 결과에 따라 더 나은 결과를 얻기 위해서 무응답도 고려함. 응답자들이 무응답으로 선택할 수 있는 사항은 성별, 교육, 고용상태, 자녀, 수입 등이 있음

N = 248		Survey	2011 Census
			(ages 18-74)
Gender	Male	48.8%	48.6%
	Female	51.2%	51.4%
Age	18 - 25	18.1%	9.2%
	26 - 35	32.3%	21.7%
	36 - 45	20.2%	22.4%
	46 - 55	17.3%	22.2%
	56 - 65	10.9%	16.8%
	> 65	1.2%	7.7%
Employment	Employed – full time	61.3%	87.1%
	Employed – part time	9.3%	
	Student (university or college)	20.2%	2.9%[14]
	Unemployed	1.2%	2.2%
	Housemakers	0.8%	4.6%
	Others	6.5%	3.2%
Education	High school	8.9%	34.1%
	Apprenticeship with graduation	3.6%	40.7%
	Bachelor's degree	18.5%	22.7%[15]
	Master's degree/Diplom	60.1%	
	Ph.D	8.9%	2.5%
Presence of children	Households with children (0-17 years old)	21.4%	41.4%[16]
	Households without children (0-17 years old)	78.6%	58.6%[17]
			Average monthly disposable income in Munich (2016)
Income	< 500 €	3.2%	
	500 € - 1000 €	7.3%	
	1000 € - 2000 €	8.5%	
	2000 € - 3000 €	20.2%	
	3000 € - 4000 €	12.5%	
	4000 € - 5000 €	10.9%	5060 USD (4220 Euro) per household[18]
	5000 € - 6000 €	8.5%	
	6000 € - 7000 €	2.8%	
	> 7000 €	8.5%	
	Prefer not to answer	17.7%	
Car availability	Households with no car available	40.3%	**Car availability in Munich** 409 private cars per 1000 adult inhabitants (40.9%)
	Households with at least one car	59.7%	
			Munich: percent all trips (MVG 2011)
Main transport mode	Private car (driver)	29.4%	31.0%
	Public transportation	59.3%	28.8%
	Bicycle	9.3%	14.7%
	Walk	2.0%	25.5%

그림 43 샘플 특성 요약 예[24]

- 선호의식 조사분석 결과 데이터 분석: 설문조사 결과 통찰

- 설문조사 결과에 있어서 응답자의 이동 패턴, 인구통계학적 특성에 영향을 받는 선택 결정, 다른 인구통계학적 특징에 의한 태도, 다른 이동 목적을 위한 도심항공 모빌리티(UAM) 선택 가능성과 관련된 결과를 분석하고 통찰함
- 아래 그림은 현재 가장 자주 사용되는 운송 수단(도보, 자전거, 대중교통, 자가용)과 그에 상응하는 만족도임
- 선택 결정
  - ✓ 아래 두 번째 그림은 각 운송모드에 따른 사회경제적 특성(나이, 성별, 소득)의 영향에 대해 분석한 결과임

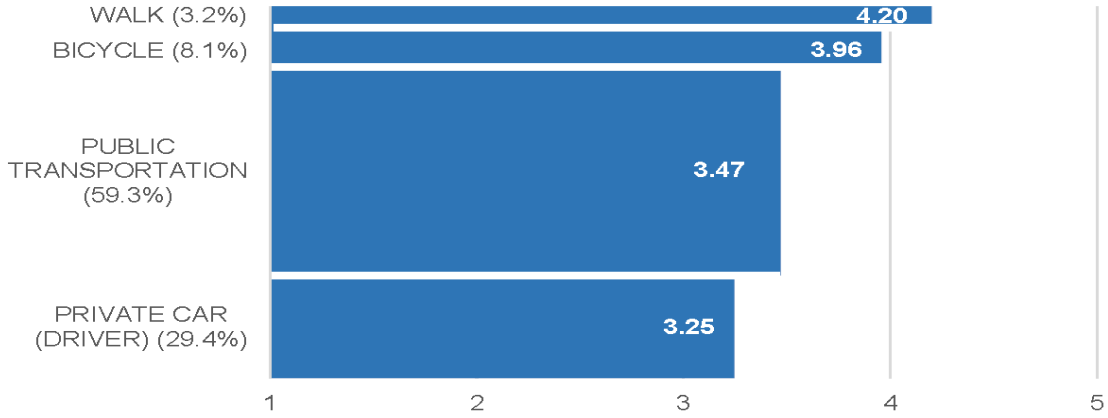
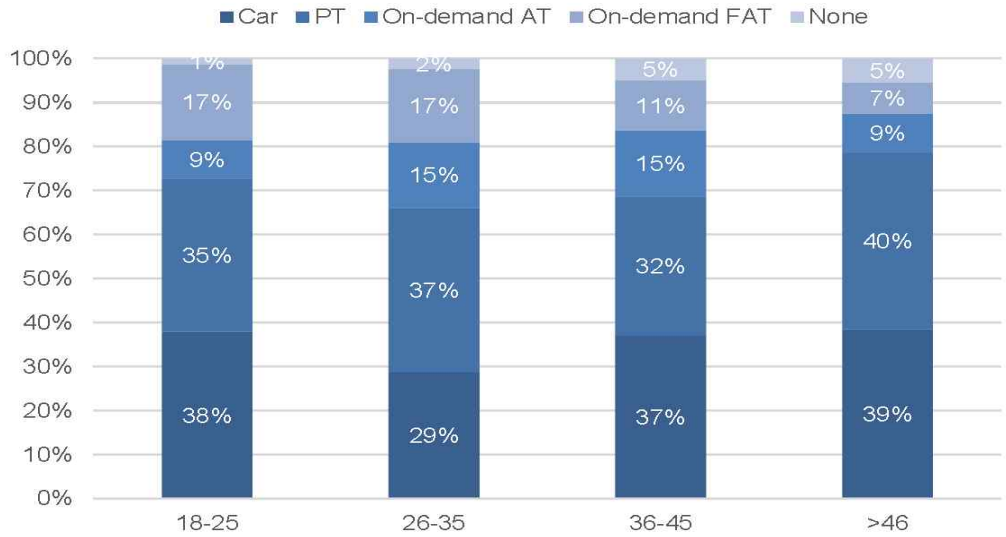


그림 44 기존의 교통수단에 대한 평균 만족도[24]



*p < 0.01 regarding within Attribute Chi-Square and between group Chi-Square

그림 45 나이에 영향을 받는 교통 모드 선택 결정[24]
PT: Public Transportation, AT: Autonomous Taxi, FAT: Flying Autonomous Taxi

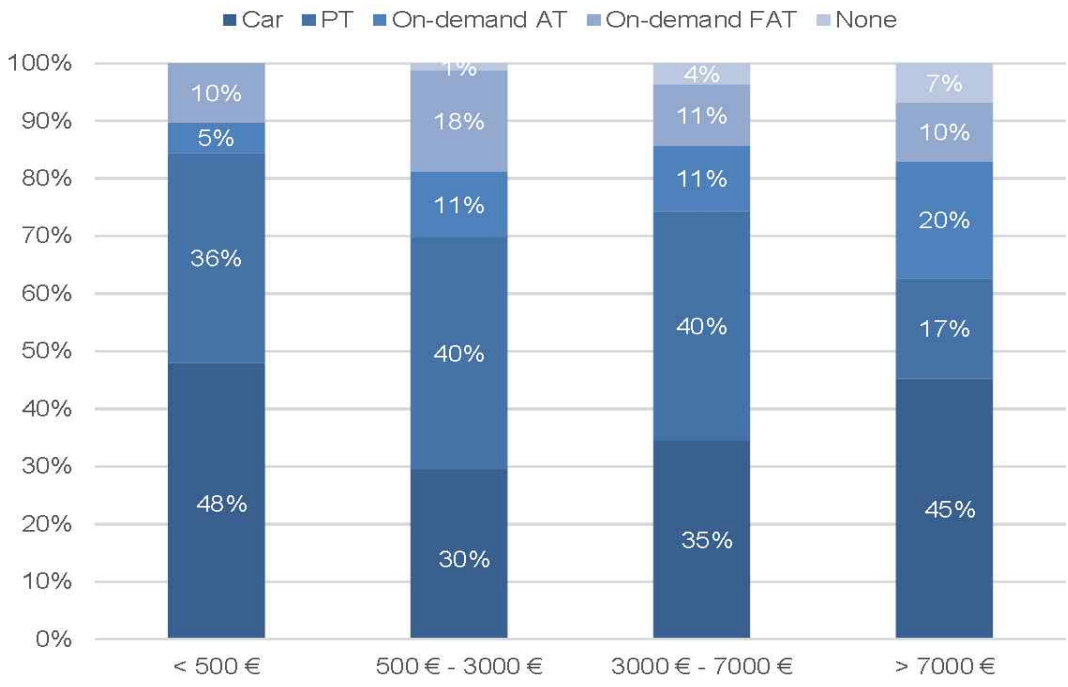


그림 46 수입에 영향을 받는 교통 모드 선택 결정[24]
PT: Public Transportation, AT: Autonomous Taxi, FAT: Flying Autonomous Taxi

- 다른 인구통계학적 특징에 의한 태도
  - ✓ 태도 변수가 모델에 직접 관련되지는 않지만 응답자들의 선택 결정을 이해하는데 도움을 줄 것으로 판단되어 응답자들의 태도 역시 아래 그림과 같이 나이, 교육, 수입에 따라 분석함

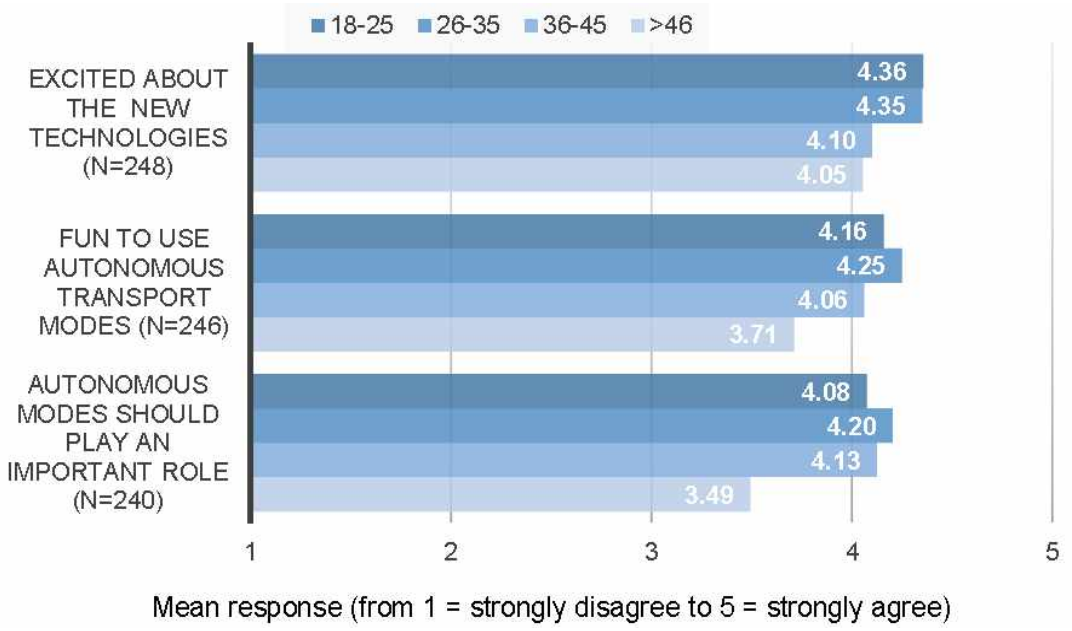


그림 47 나이에 따른 신기술, 자율주행(비행) 교통수단에 대한 태도[24]

- 다른 이동 목적을 위한 도심항공 모빌리티(UAM) 선택 가능성
  - ✓ UAM의 잠재적 용도로 다양한 이동 목적과 관련하여 UAM 선택 가능성은 아래 그림과 같음

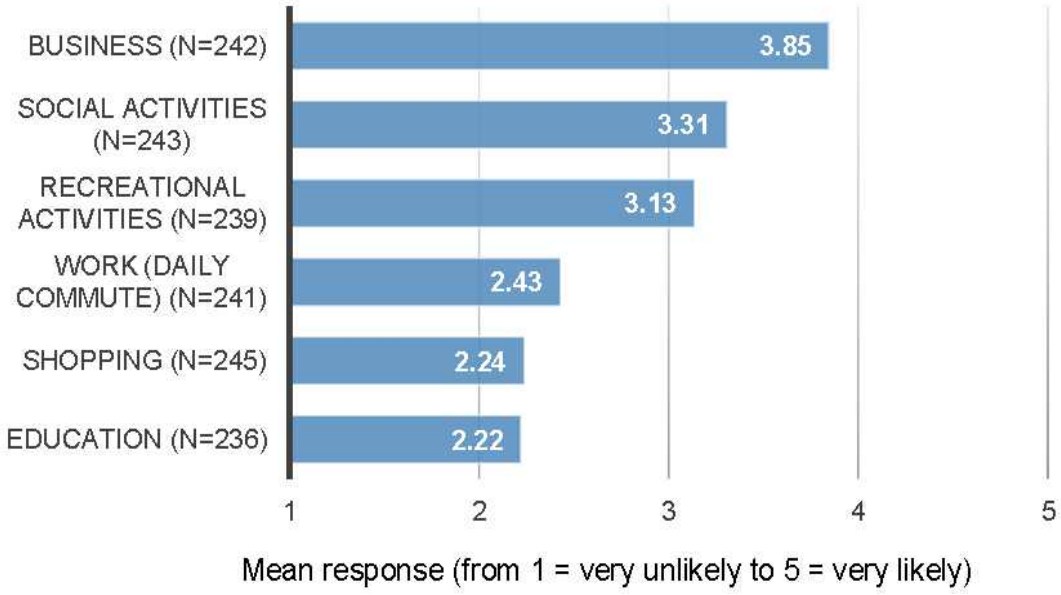


그림 48 다른 이동 목적으로 UAM 자율비행 택시 선택 가능성[24]

- 선호의식 조사분석에 근거한 서비스 모델식 개발
  - MNL (Multinomial Logit) 모델을 사용한 각 교통모드(자동차:CAR, 대중교통:PT, 자율주행 택시:AT, 자율주행 비행 택시:AFT)에 대한 유용함수는 아래 식과 같음[24]

$$_{AR}\quad \beta_{TT_{AR}} * TT_{CAR} + \beta_{COST_{CAR}} * COST_{CAR} \tag{9}$$

$$V_{PT} = ASC_{PT} + \beta_{TT_{PT}} * TT_{PT} + \beta_{COST_{PT}} * COST_{PT} \tag{10}$$

$$V_{AT} = ASC_{AT} + \beta_{TT_{AT}} * TT_{AT} + \beta_{COST_{AT}} * COST_{AT} \tag{11}$$

$$_{FT} \quad ASC_{AFT} + \beta_{TT\ _{FT}} * TT_{AFT} + \beta_{COST_{AFT}} * COST_{AFT} \qquad (12)$$

$$V_{NONE} = \beta_{NONE} * NONE$$

V : 교통 모드 m의 유틸리티

ASC_m : 교통 모드 m의 대안-특정 변수

β_{TT} : 교통 모드 m의 전체 이동 시간 계수

β_{COST_m} : 교통 모드 m의 비용 계수

β_{NONE} : none 대안의 상수

- 선호의식 조사분석 결과 데이터 분석에 근거한 서비스 모델인 MNL 모델의 계수들은 아래의 그림과 같음

	MNL (*none* alternative excluded)			
Coefficient	**Car**	**PT**	**AT**	**AFT**
ASC	-	Base case	1.19*[2.02]	-2.76**[-6.51]
Travel cost	-1.91**[-8.14]	-1.61**[-6.59]	-2.03**[-5.08]	-0.48**[-9.42]
Total travel time	-0.923**[-19.00]	-0.74**[-15.59]	-1.13**[-13.10]	-0.36*[-2.18]
Safety (reference = driving level safety)				
At least two times safer than driving	-	-	0.291*[2.01]	-
Two times riskier than driving	-	-	-0.350*[-2.16]	-0.298*[-2.21]
Inconvenience indicated by walking and waiting time	-	-0.87**[-4.86]	-	-
Age (reference = 18-45)				
46-55	-	Base case	-1.10**[-8.71]	-1.10**[-8.71]
56-65	-0.612**[-3.81]	Base case	-1.10**[-8.71]	-1.10**[-8.71]
> 65	-1.80**[-5.11]	Base case	-	-1.80**[-5.11]
Gender (reference = female)				
Male	-	-	-	-
Employment (reference = working people)				
Student	0.627**[4.29]	Base case	-	0.809**[4.34]
Others	0.468*[2.66]	Base case	-	-
Presence of children (0-17 years old) in the household (reference = no)				
Yes	-	-	-	-
Car availability (reference = yes)				
No	-0.84**[-6.51]	Base case	-0.49**[-2.88]	-1.10**[-6.22]
Current means of transport (reference = car as driver)				
PT	-1.63**[-10.62]	Base case	-1.44**[-8.92]	-1.44**[-8.92]
Soft modes inc. cycling and walking	-1.47**[-7.58]	Base case	-1.27**[-4.91]	-1.74**[-6.43]
Trip purpose (reference = non-commuting private trip)				
Commuting trip	-0.35**[-3.34]	Base case	-0.40**[-2.91]	-0.71**[-5.14]
Monthly household income (reference = 3000€ - 6000€)				
<500€	0.57*[2.06]	Base case	-	-
500€ - 1000€	-	Base case	0.60*[2.46]	0.84**[3.12]
1000€ - 2000€	-	Base case	-	0.64*[2.68]
2000€ - 3000€	-	Base case	-	0.58**[3.74]
6000€ - 7000€	-	Base case	-	-1.10*[-2.14]
>7000€	0.81**[3.51]	Base case	1.32**[4.99]	0.69*[2.28]
Model information				
Sample size	2867			
Number of estimated parameters	40			
Initial log-likelihood	-3974.506			
Final log-likelihood	-2634.530			
Adjusted rho square	0.327			

그림 49 이동 시간 및 비용을 포함하는 MNL (Multinomial Logit) 모델에 대한 계수들과 정보[24]

- 서비스 모델 계수들의 분석

• MNL (Multinomial Logit) 모델식의 계수들을 프로필 기반 MNL에 대해 수정하여 계산함

• 프로필은 고소득 프로필, 저소득 프로필 등으로 구성됨

	High-income profile MNL (*none* alternative excluded)			
Coefficient	**Car**	**PT**	**AT**	**AFT**
ASC	3.20**[2.91]	Base case	4.76**[3.69]	-
Travel cost	-2.50*[-2.65]	-	-	-0.99**[-4.87]
Total travel time	-1.17**[-7.05]	-0.92**[-6.02]	-2.25**[-5.87]	-
Safety (reference = driving level safety)				
At least two times safer than driving	-	-	-	-
Two times riskier than driving	-	-	-	-
Age (reference = 18-45)				
46-55	1.11*[2.80]	Base case	-	-
56-65	2.42*[2.62]	Base case	2.51**[3.08]	2.51**[3.08]
> 65	-	-	-	-
Gender (reference = female)				
Male	-	-	-	-
Education level (reference = Bachelor)				
Lower than Bachelor	-	-	-	-
Master	-	-	-	-
PhD	-	-	-	-
Presence of children (0-17 years old) in the household (reference = no)				
Yes	-	Base case	-	-1.99**[-3.35]
Car availability (reference = yes)				
No	-	Base case	5.16**[4.24]	-
Current means of transport (reference = car as driver)				
PT	-2.56**[-4.77]	Base case	-2.18**[-4.16]	-2.18**[-4.16]
Soft modes inc. cycling and walking	-2.28**[-2.91]	Base case	-	-
Interaction between monthly household income and commuting trip purpose (reference = Interaction between *more than 7000€* and *non-commuting trip purpose*)				
>7000€ x commuting trip	-1.33**[-2.99]	Base case	-1.33**[-2.99]	-1.33**[-2.99]
Model information				
Number of draws			-	
Random coefficient			-	
Sample size			235	
Number of estimated parameters			16	
Initial log-likelihood			-325.779	
Final log-likelihood			-160.078	
Adjusted rho square			0.460	

그림 50 고소득 프로필 MNL 모델에 대한 계수 및 정보[24]

○ 도심항공 모빌리티(UAM) 잠재적 사용자의 수용성

- Airbus 사의 도심항공 모빌리티 수용성 연구[30]

• Airbus 사에서 수행한 이 연구의 목표는 수직이착륙 수송 패러다임인 도심항공 모빌리티(UAM: Urban Air Mobility)의 운용에 대한 대중의 인식에 영향을 미치는 요인을 이해하는 것임. 문헌검토, 시 관계자, 항공기 제조업자, 학계, 정책 입안자와 인터뷰를 실

시하고 서비스에 대한 초기 인식 변수, 편리성, 비용 등을 분석하는 조사를 만듦. 그 후에 데이터를 분석하여 패턴을 연구함

- 이와 같은 조사와 데이터 분석은 향후 도심항공 모빌리티 수용에 대한 연구 방향성을 제시해 줄 것으로 판단됨
- 데이터 분석을 위한 가상 UAM 운영 시나리오는 다음과 같음

✓ 낮은 고도
✓ 오전 시간대
✓ 육안으로 확인 가능
✓ 항공기 소리가 벌 윙윙거리는 소리와 같음
✓ 항공기 소리가 5초 동안 지속
✓ 항공기는 매시간 운행
✓ 가까운 헬리패드에 착륙

- 전체적인 우려수준

✓ 아래 그림과 같이 모든 매개변수에 걸쳐서 개인의 안전성에 대한 우려수준(56%)이 가장 높은 것으로 나타남. 그 다음으로 나타난 것이 소음 유형(49.3%)와 소음 크기(48.8%)임

✓ 모든 응답자들의 44.5%가 초기 반응에 긍정적이고, 41.4%가 안전하다고 믿고 있음

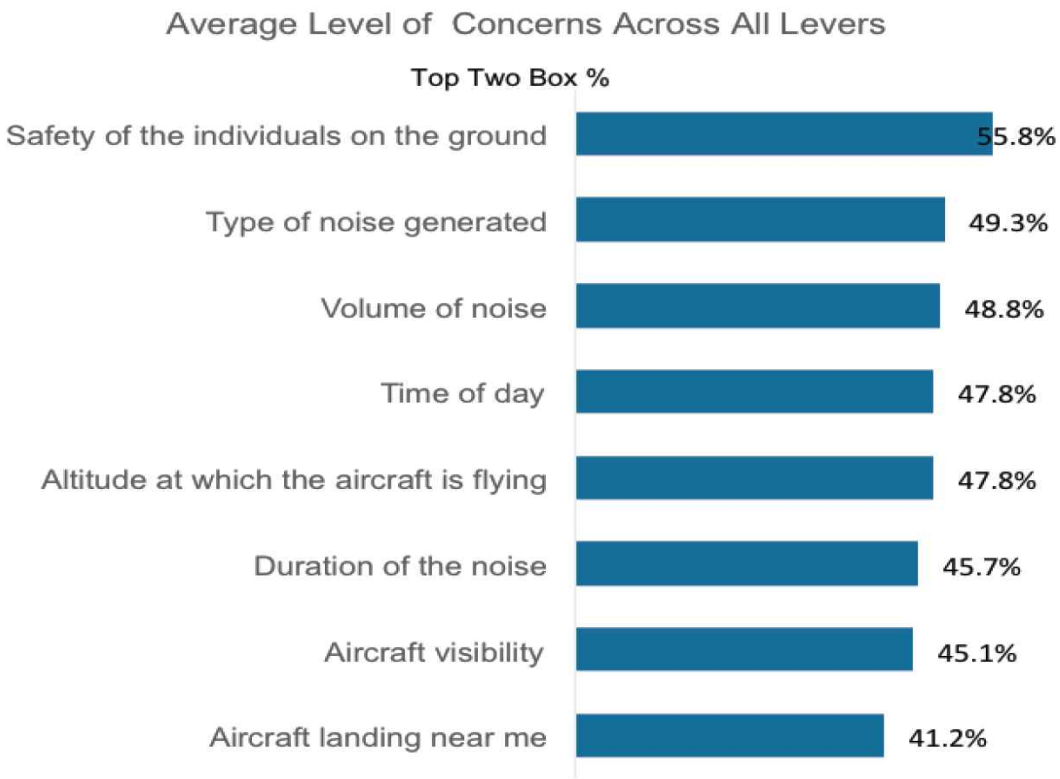
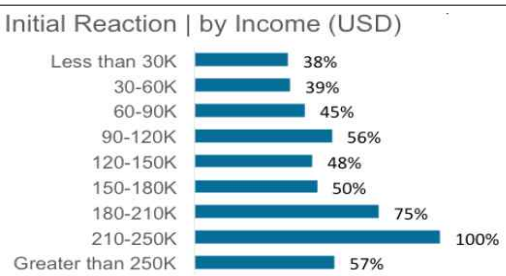


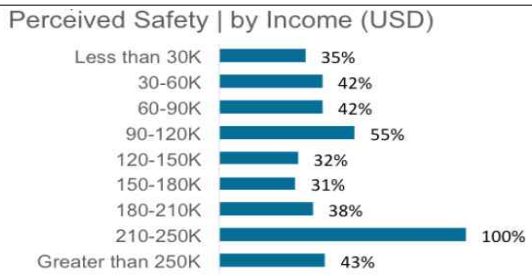
그림 51 우려사항 평균[30]

- 소득과 연령에 따른 결과

✓ 초기 반응과 안전에 대한 인식은 아래 그림과 같이 소득과 연령에 크게 좌우됨

✓ 연간 $60K 미만의 소득 응답자 중 39%, 연간 $150K 이상의 소득 응답자 중 50% 이상이 긍정적인 반응을 보임. 이는 UAM을 고가의 운송 수단으로 인식함으로서 나타난 결과일 것으로 판단됨





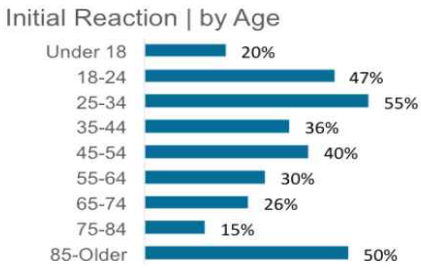


그림 52 소득과 연령에 따른 결과 1[30]

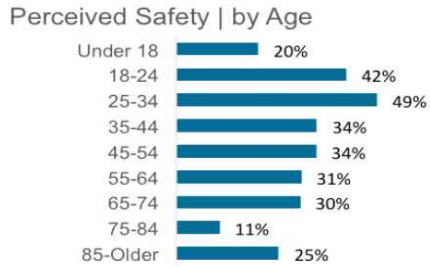


그림 53 소득과 연령에 따른 결과 2[30]

- 사용 가능성
  - ✓ UAM의 사용 가능성은 아래 그림과 같이 인구학적 구분에 따라 매우 다르게 나타남
  - ✓ 이와 같이 수도권에서의 운용뿐만 아니라 다른 시군구에서 운용 하는 것도 UAM 수용성 연구에 포함되어야 합리적인 데이터 분석을 수행할 수 있다고 판단됨
  - ✓ 미국 로스앤젤레스, 멕시코 멕시코시티, 뉴질랜드, 스위스의 인구학적 데이터 구분에 따른 설문조사 수행

표 21 인구통계학적 개요

국가: (US / NZ / MX / CH)	**가계 소득:** 평균 $ (USD)	**연령:** 평균 연령
성별: (Male / Female)	**자녀 수:** 평균	**지역 유형:** (도심 / 교외 / 시골)
심리적 진술: (기술의 사생활 침해 / 새 것을 받아들이지 않음 / 활동적임 / 얼리어답터)		
교육: (고등교육 이하 / 고등교육 / 대학 중퇴 / 2년제 대학 / 4년제 대학 / 전문 학위 / 박사 학위)		
주된 교통수단: (공유 / 대중교통 / 운전 / 걷기 / 자전거)		**통근 시간:** 평균(분 단위)

	Very likely	Very unlikely
Country	23% / 12% / 33% / 15%	21% / 28% / 8% / 29%
Household Income	89.7K	74.2K
Age	38.4	48.1
Gender	26% / 17%	17% / 25%
Number of Children	1.1	0.7
Type of Area	25% / 15% / 16%	16% / 27% / 32%
Psychographic Statement	20% / 22% / 25% / 31%	22% / 26% / 19% / 12%

그림 54 인구학적 구분에 따른 도심항공 모빌리티 사용 가능성 설문조사 1[30]

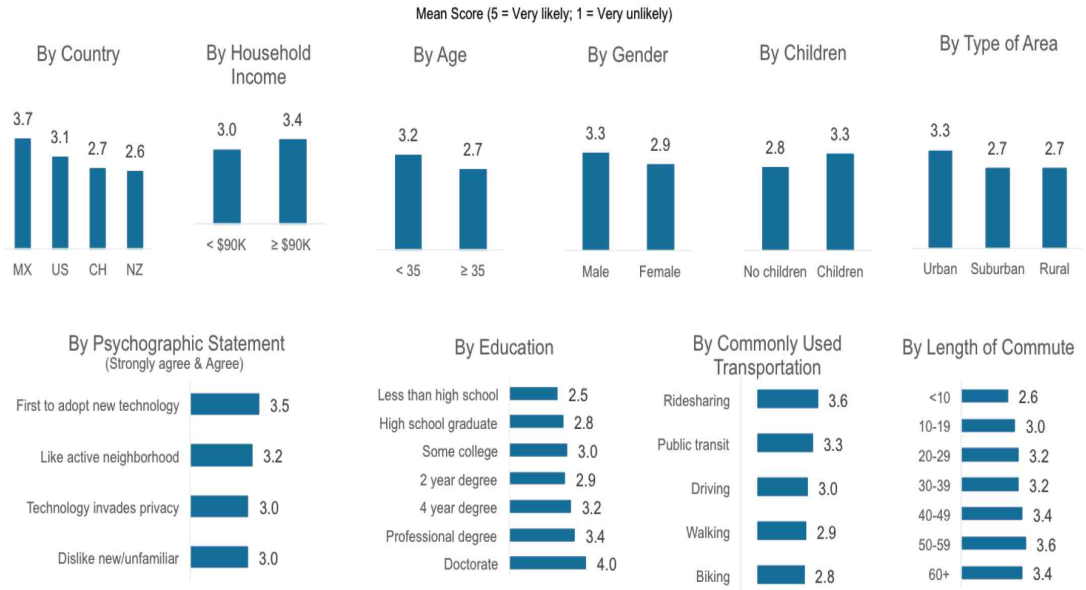


그림 55 인구학적 구분에 따른 도심항공 모빌리티 사용 가능성 설문조사 2[30]

- 편리성과 비용

✓ 편리성과 비용 역시 앞서 분석한 방법대로 수행함. 편리성 측면에서는 다양한 인식들이 나타나지만 비용 면에서는 아래 그림과 같이 비싸다는 인식이 보편적임

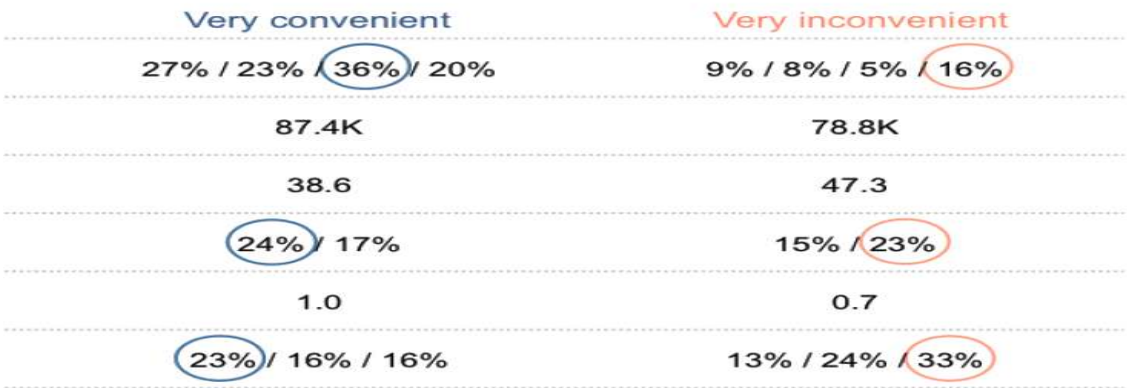


그림 56 인구학적 구분에 따른 편리성 설문조사[30]

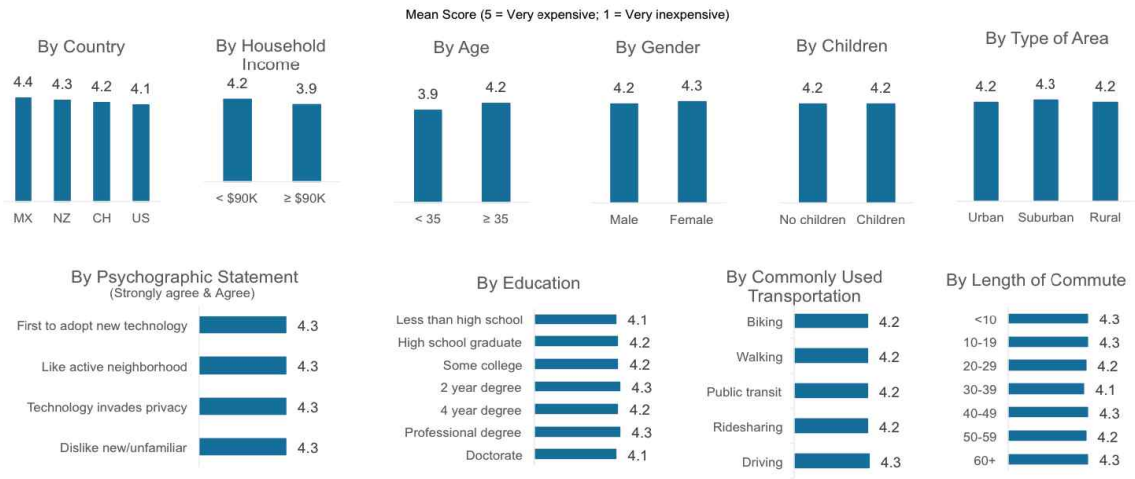


그림 57 인구학적 구분에 따른 가격 설문조사[30]

- 거주 지역 유형에 따른 결과

✓ 거주 지역별로는 아래 그림과 같이 낮은 고도를 운행하는 시나리오에 대해 도시 지역 사람들이 가장 높은 우려수준(53%), UAM에 대한 긍정적인 초기반응(50%), 그리고 안전성에 대한 긍정적 인식(44%)을 보임. 이는 도시 거주자들이 그 지역의 높은 인구 밀도

로 인해 더 많은 걱정은 하는 것으로 보임

✓ 도시 근교 지역의 사람들은 우려수준(43%)이 낮지만, 아래 그림과 같이 훨씬 낮은 초기 긍정반응(26%)와 안전에 대한 인식(31%)을 보임. 이는 근교 지역의 사람들은 개방된 공간이 있고 안전은 문제가 되지 않을 것이라고 믿는 것으로 판단됨

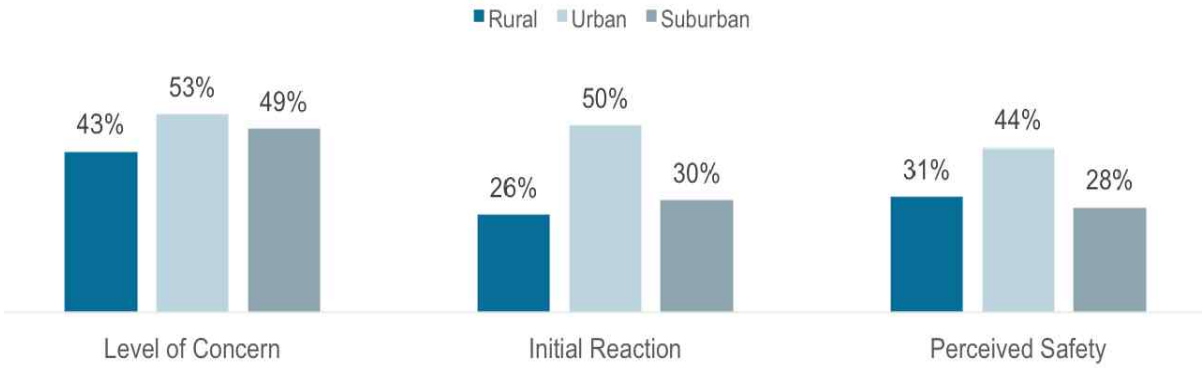


그림 58 거주 지역 유형에 따른 설문조사 결과[30]

- 운송 유형에 따른 결과

✓ 현재의 이동 패턴과 행동은 도심항공 모빌리티 수용에 대한 통찰력을 줄 것으로 판단됨. 공유 서비스 이용자는 가장 낮은 우려수준(38%)를 보이며, 초기 반응(61%)과 안전에 대한 인식(50%)이 가장 높음

✓ 대중교통을 이용하는 사람들도 아래 그림과 같이 초기 반응이 긍정적임. 하지만 걷는 사람들은 가장 덜 긍정적인 초기 반응을 보이며, 안전하지 않다고 생각함

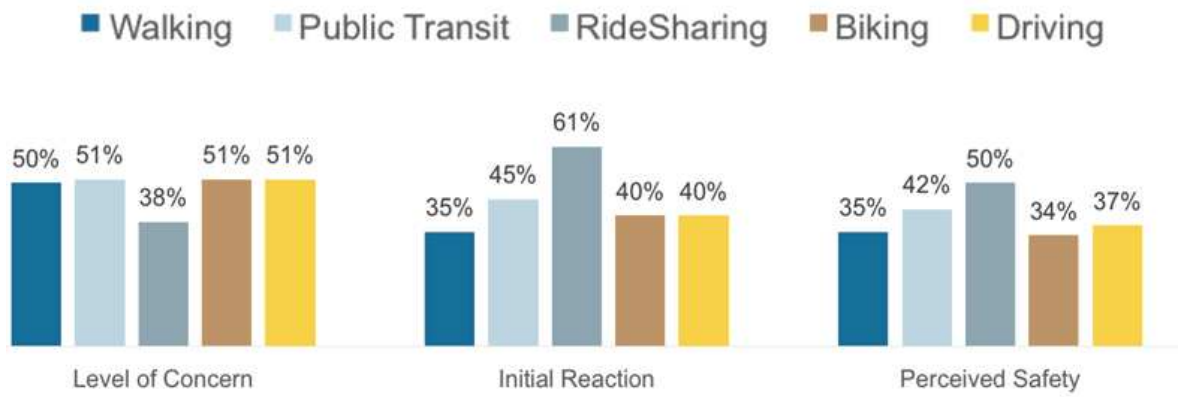


그림 59 교통수단 유형에 따른 설문조사 결과[30]

- 통근 시간에 따른 결과

✓ 통근 시간에 따른 초기 반응은 뚜렷한 패턴을 보이지 않음. 10분 미만의 통근자는 56%의 초기 반응을 보였고 1시간 이상의 통근자 역시 56%의 초기 반응을 보임. 아래 그림과 같이 10-19분의 통근자가 39%로 가장 낮은 초기 반응을 보임

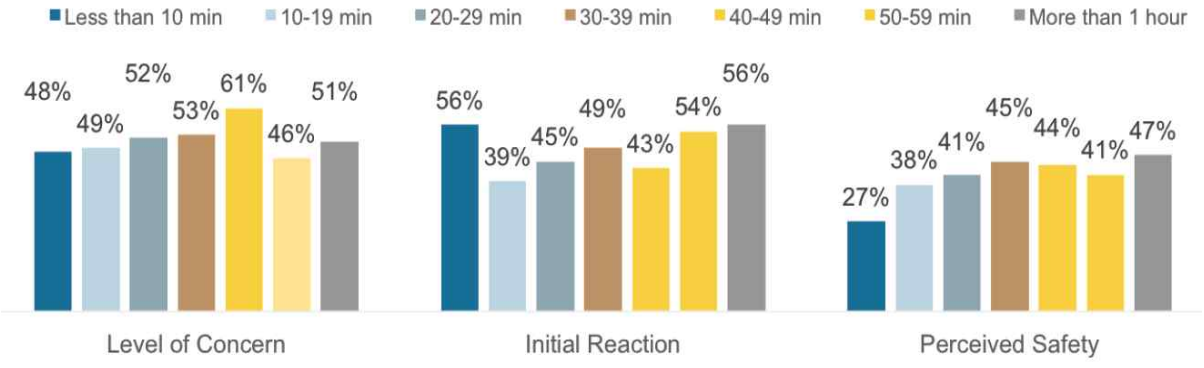


그림 60 통근 시간에 따른 설문조사 결과[30]

- 이 연구는 도심항공 모빌리티에 대한 공공의 인식을 분석하여 도시 계획, 정책 수립 및 엔지니어링 분야에서 eVTOL 산업을 발전시키는 데 도움이 될 수 있는 몇 가지 통찰력을 제공함
- 사람들의 안전에 대한 우려수준을 볼 때, 대중들은 수로나 개방된 야외와 같이 가장 인구 밀도가 적은 지역 위로 비행하는 것이 더 긍정적일 수 있음. 또한 안전성에 있어서 검증된 제조사가 신규 시장 진입 업체보다 선호될 것으로 판단됨
- 앞서 전체적인 우려수준에서 볼 수 있듯이 소음의 유형과 크기 모두 도심항공 모빌리티 인식에 큰 영향을 미치기 때문에 소음 완화 기술은 지속적으로 발전해야하는 영역임
- 이 연구를 통해 도심항공 모빌리티에 대한 대중의 인식 패턴과 규칙성을 찾고, 동시에 규제 기관, 항공기 설계 기관, 지역 사회 및 학계에도 알리는 것이 중요함. 이러한 협력은 미래 연구, 전략 및 정책을 촉진하여 도심항공 모빌리티를 전 세계에 걸쳐 실용화하는데 도움이 될 것으로 판단됨

○ 도심항공 모빌리티(UAM) 사회적 장벽(Societal Barriers) 연구[31]

- 이동 특성(Travel Behavior)

- 미국의 경우 아래 그림과 같이 학교/직장 이외의 이동특성은 레저 목적이 많음(휴스턴, 샌프란시스코, 로스엔젤스, 수도 워싱턴, 뉴욕, 종합평균)

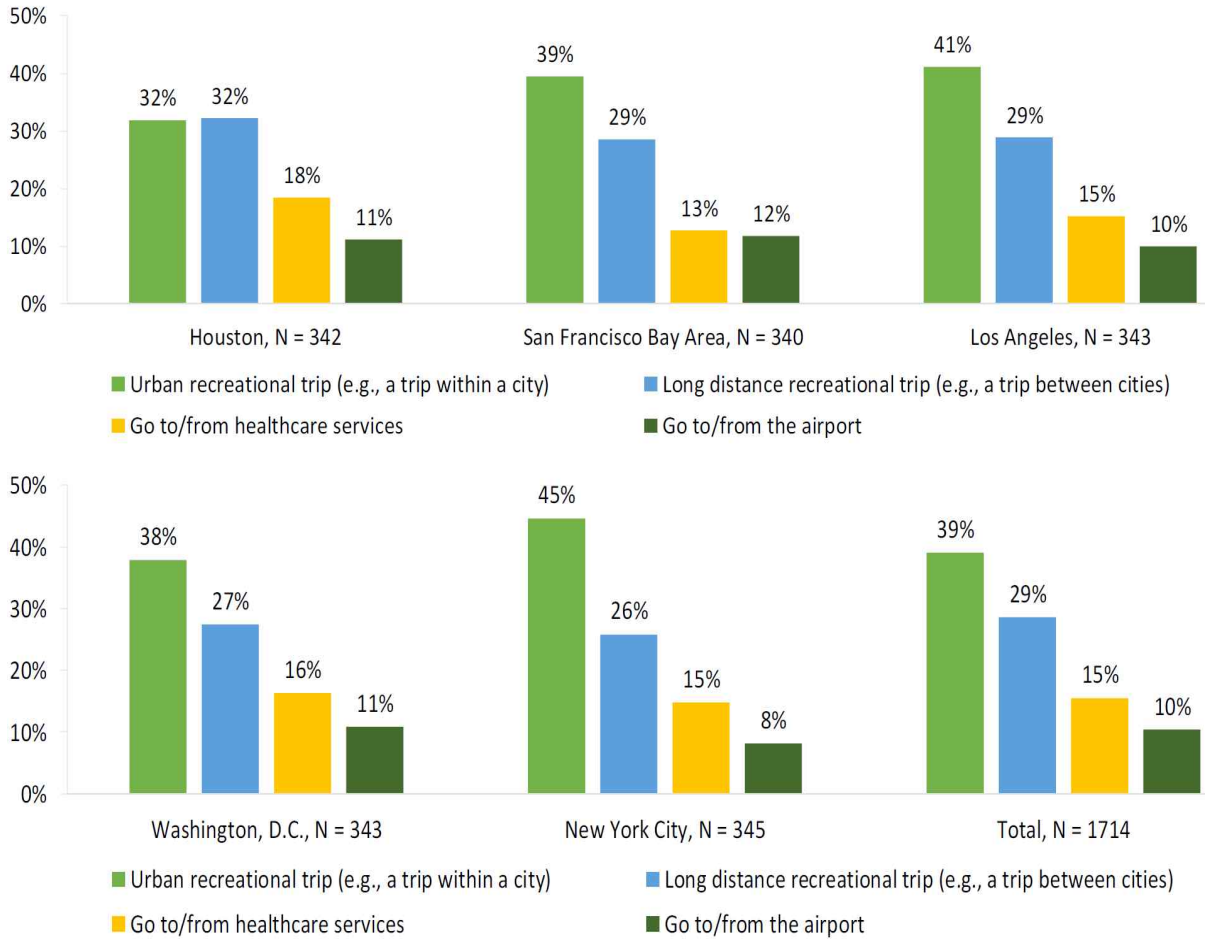


그림 61 미국의 학교나 직장 이외의 이동 목적 조사[31]

- 이동 목적(도심 레저 이동, 장거리 레저 이동, 병원, 공항)을 이동거리와 연결하면 아래 그림과 같음

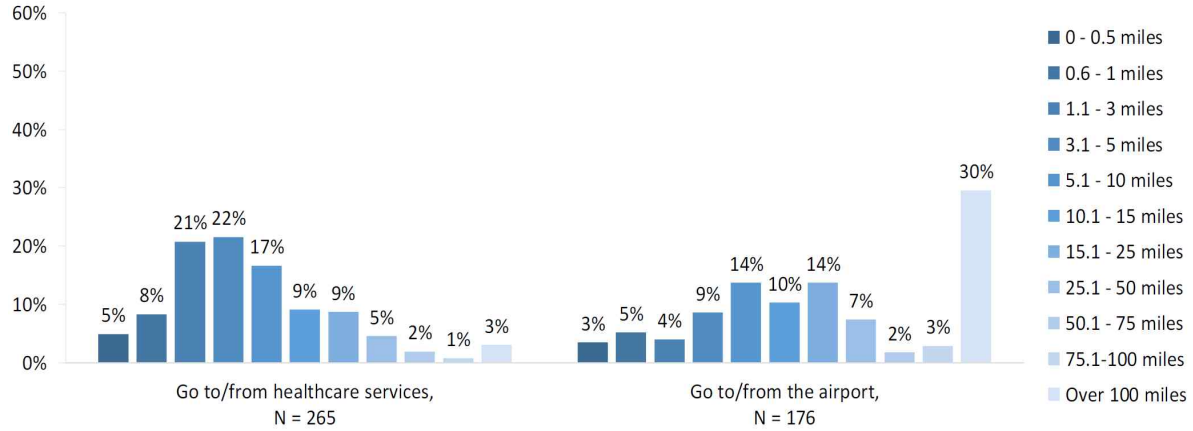


그림 62 가장 최근 이동 거리[31]

- 가장 최근 목적지로 이동하는데 사용한 교통 수단은 아래 그림과 같음. 가장 많이 사용한 교통수단은 자가 운전임(60%). 그 다음이 대중교통임(31%). 뉴욕의 경우 대중교통이 54%이고 자가운전은 33%임

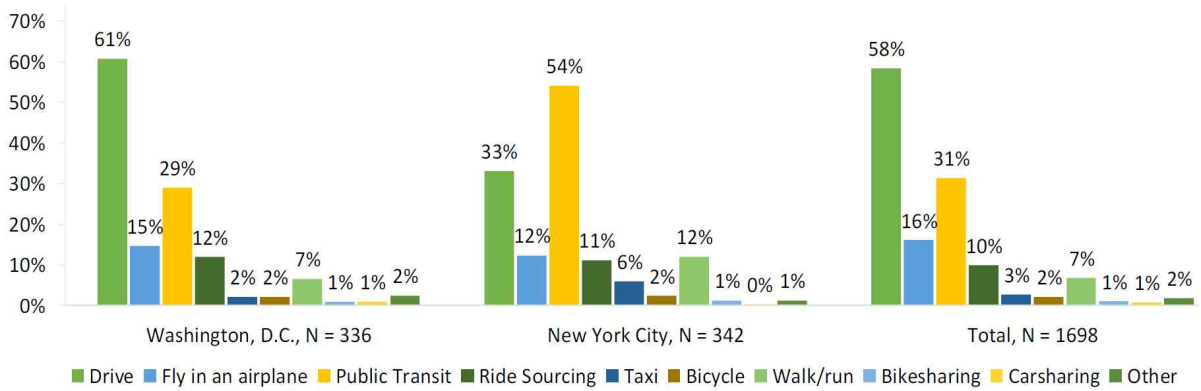


그림 63 가장 최근 이동 시 사용한 교통수단[31]

- 통학/출퇴근 시 사용하는 교통수단과 거리에 대한 조사는 아래 그림과 같음. 자가용 62%, 대중교통 56%, 재택근무 54%, 도보 26% 임. 더하면 100%가 넘는 이유는 통학/출퇴근 시 1개 이상의 교통수단을 사용하기 때문임. 예를 들어 자전거를 타고 가서 대중교통을 이용하는 경우도 있기 때문임

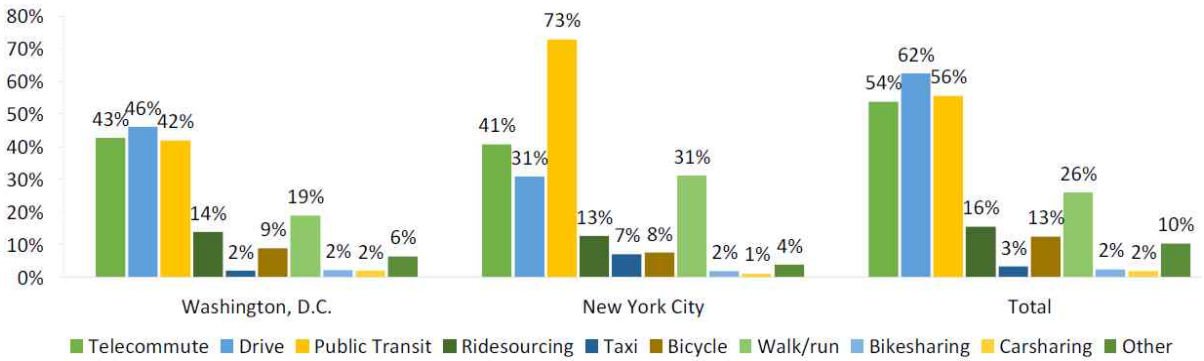


그림 64 통학/출퇴근 이동 수단[31]

- 항공 교통 수단에 대한 친숙도 및 선호도
- 도심항공 모빌리티 인식(Perceptions)

	Excited	Happy	Neutral	Confused	Concerned	Surprised	Skeptical	Amused
GEOGRAPHIC LOCATION				Survey Results				
Houston, N = 344	32%	24%	27%	8%	9%	11%	19%	3%
San Francisco Bay Area, N = 337	33%	25%	27%	8%	9%	11%	20%	3%
Los Angeles, N = 345	32%	24%	27%	8%	9%	11%	19%	3%
Washington, D.C., N = 341	32%	24%	27%	8%	9%	11%	20%	3%
New York City, N = 344	32%	24%	27%	8%	9%	11%	19%	3%
GENDER				Survey Results				
Female, N = 976	26%	22%	26%	10%	11%	11%	20%	4%
Male, N = 734	37%	23%	23%	6%	10%	8%	18%	4%
RACE/ETHNICITY				Survey Results				
African American, N = 291	22%	17%	26%	4%	2%	3%	7%	2%
American Indian or Alaskan	12%	19%	42%	8%	8%	0%	0%	0%
Asian, N = 206	25%	13%	23%	5%	4%	3%	8%	1%
Caucasian/White, N = 982	20%	14%	17%	6%	5%	2%	10%	1%
Hispanic or Latino, N = 166	26%	19%	19%	2%	2%	5%	2%	2%
Middle-Eastern, N = 15	33%	13%	13%	0%	7%	7%	7%	0%
Native Hawaiian or Pacific	0%	13%	19%	6%	0%	13%	0%	0%
Pakistani, etc.), N = 5	0%	20%	20%	20%	0%	0%	0%	0%
Southeast Asian, N = 9	33%	11%	22%	11%	0%	0%	0%	0%
Other, N = 25	32%	4%	16%	16%	0%	0%	4%	0%
INCOME				Survey Results				
Less than $10,000, N = 78	14%	17%	40%	8%	3%	4%	10%	3%
$10,000 - $14,999, N = 53	19%	23%	30%	6%	6%	6%	6%	6%
$15,000 - $24,999, N = 101	25%	12%	36%	7%	3%	6%	7%	3%
$25,000 - $49,999, N = 212	28%	15%	27%	8%	5%	3%	11%	2%
$50,000 - $74,999, N = 210	28%	22%	25%	7%	4%	5%	8%	0%

그림 65 도심항공 모빌리티에 대한 초기 반응[31]

	Willing				
EDUCATION	Strongly agree	Agree	Neutral	Disagree	Strongly disagree
Less than high school, N = 19	37%	21%	37%	0%	5%
Currently in high school, N = 15	20%	40%	40%	0%	0%
High school GED, N = 242	20%	30%	36%	9%	6%
Currently in 2-year college, N = 51	29%	24%	37%	8%	2%
2-year college degree, N = 163	18%	35%	32%	10%	6%
Currently in 4-year college, N = 82	17%	41%	29%	10%	2%
4-year college degree, N = 568	25%	33%	29%	8%	5%
Currently in post-graduate degree, N = 37	27%	27%	35%	8%	3%
Post-graduate degree (MA, MS, PhD, MD, JD, etc.), N = 468	24%	32%	28%	13%	3%
INCOME	Strongly agree	Agree	Neutral	Disagree	Strongly disagree
Less than $10,000, N = 94	23%	23%	34%	14%	5%
$10,000 - $14,999, N = 64	13%	42%	36%	6%	3%
$15,000 - $24,999, N = 128	21%	30%	40%	6%	3%
$25,000 - $49,999, N = 269	21%	30%	32%	9%	7%
$50,000 - $74,999, N = 267	22%	37%	28%	11%	2%
$75,000 - $99,999, N = 241	32%	30%	27%	7%	4%
$100,000 - $149,999, N = 229	24%	38%	27%	7%	4%
$150,000 - $199,999, N = 119	28%	27%	31%	13%	2%
$200,000 or more, N = 146	25%	36%	21%	15%	3%
AGE	Strongly agree	Agree	Neutral	Disagree	Strongly disagree
18 - 24 years, N = 131	28%	35%	32%	2%	3%
25 - 34 years, N = 348	32%	32%	28%	5%	3%
35 - 44 years, N = 234	29%	31%	21%	15%	5%
45 - 54 years, N = 168	22%	30%	30%	13%	4%
55 - 64 years, N = 215	18%	32%	35%	12%	4%
65 - 74 years, N = 219	11%	38%	32%	12%	7%
75+ years, N = 59	14%	24%	37%	20%	5%

그림 66 사회인구학적 분석표[31]

- 날씨 고려사항

• **비가 오는데** 도심항공 모빌리티 항공기로 비행한다면, 이용자는 각 항목에 대해 아래

그림과 같은 비율로 느낄 것임. 항목: 기꺼이 타겠다(Willing), 신뢰한다(Confident), 행복하다(Happy), 안전하다(Safe), 무섭다(Afraid), 걱정된다(Concerned)

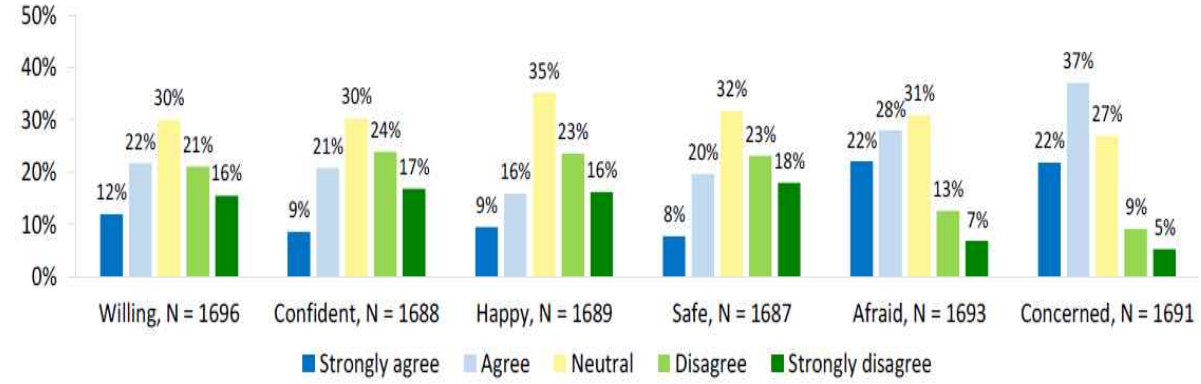


그림 67 날씨에 대한 인식[31]

- **안개가 끼고 시정거리가 낮은데** 도심항공 모빌리티 항공기로 비행한다면, 이용자는 각 항목에 대해 아래 그림과 같은 비율로 느낄 것임. 항목: 기꺼이 타겠다(Willing), 신뢰한다(Confident), 행복하다(Happy), 안전하다(Safe), 무섭다(Afraid), 걱정된다(Concerned)

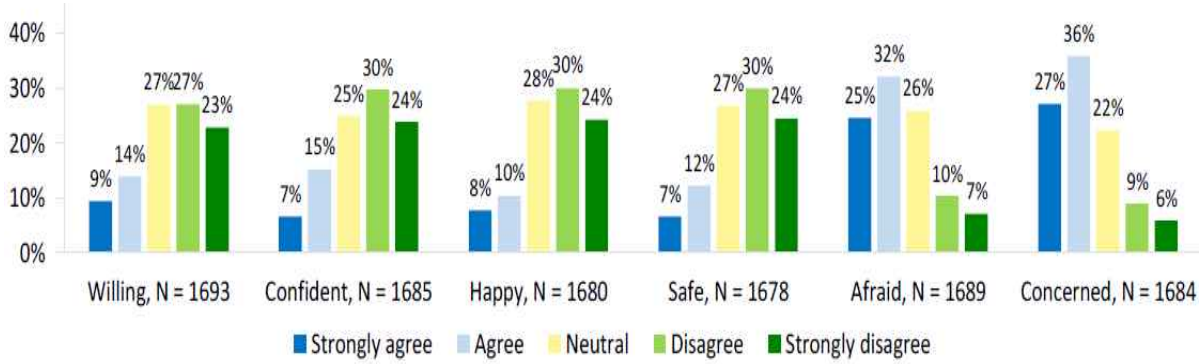


그림 68 날씨에 대한 인식[31]

- **눈이 오는데** 도심항공 모빌리티 항공기로 비행한다면, 이용자는 각 항목에 대해 아래 그림과 같은 비율로 느낄 것임. 항목: 기꺼이 타겠다(Willing), 신뢰한다(Confident), 행복하다(Happy), 안전하다(Safe), 무섭다(Afraid), 걱정된다(Concerned)

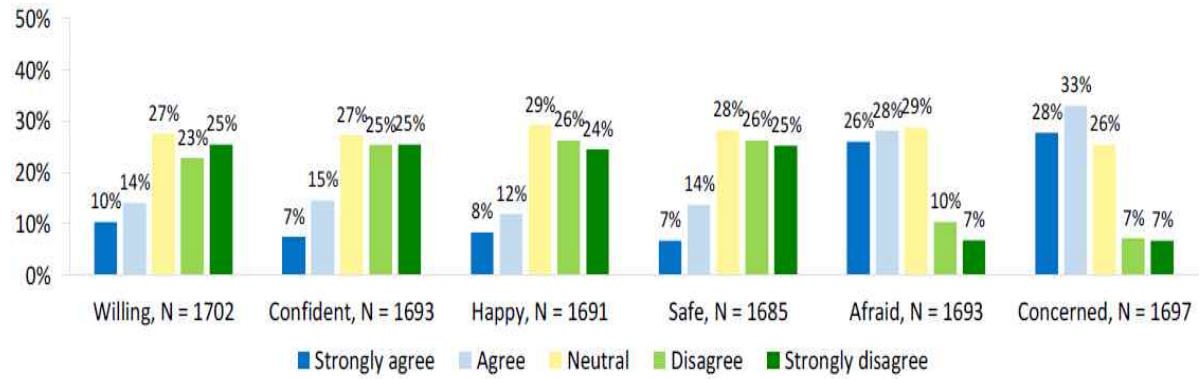


그림 69 날씨에 대한 인식[31]

- **경미한 돌풍을 동반한 바람이 부는데** 도심항공 모빌리티 항공기로 비행한다면, 이용자는 각 항목에 대해 아래 그림과 같은 비율로 느낄 것임. 항목: 기꺼이 타겠다(Willing), 신뢰한다(Confident), 행복하다(Happy), 안전하다(Safe), 무섭다(Afraid), 걱정된다(Concerned)

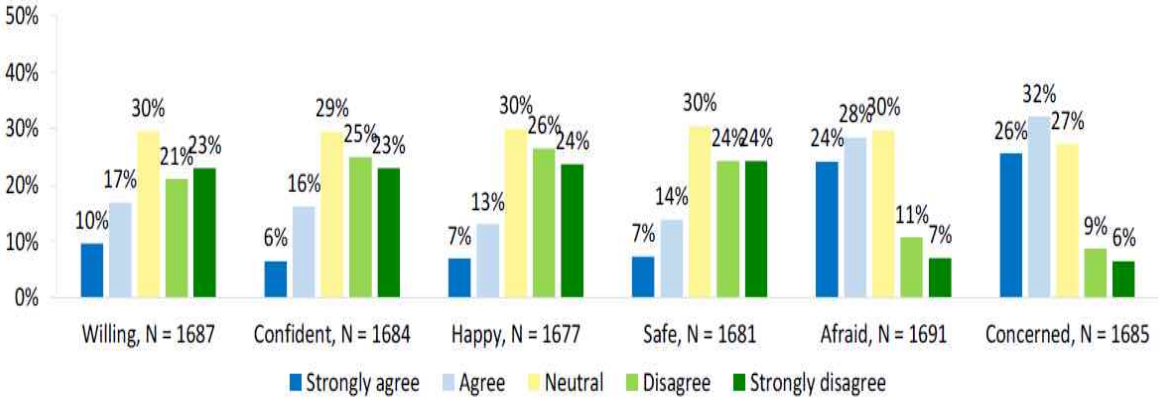


그림 70 날씨에 대한 인식[31]

- <u>대기의 온도가 높거나 낮을 때(90°F 이상이거나 32°F 이하)</u> 도심항공 모빌리티 항공기로 비행한다면, 이용자는 각 항목에 대해 아래 그림과 같은 비율로 느낄 것임. 항목: 기꺼이 타겠다(Willing), 신뢰한다(Confident), 행복하다(Happy), 안전하다(Safe), 무섭다(Afraid), 걱정된다(Concerned)

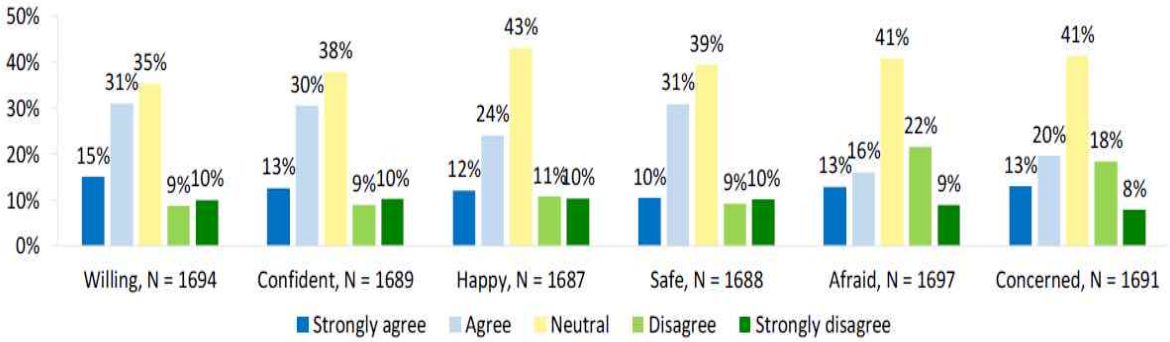


그림 71 날씨에 대한 인식[31]

- 우버 자동차, 타다 공유 서비스에서 보듯이 우리나라의 경우 기존 택시 사업자의 반발로 UAM 서비스 확산이 제한될 가능성이 높음. 따라서 차량공유 서비스, 자율주행자동차의 서비스 확산방안을 참조하여 추후 우리나라의 실정에 맞게 요구도가 upgrade되어야 함

○ 서비스 제공자 요구도 분석

- 서비스 제공자 요구도 개요

- 싱가포르, 두바이와 같이 UAM이 먼저 상용화되는 도시에서 얻어진 데이터를 통해 소비자의 안전과 보안에 대한 문제해결 아이디어 획득이 가능함
- 이동 신뢰성 확보 필요
  - ✓ 이동 신뢰성에서의 주요한 인자는 교통수단 예약에서부터 도착지점까지의 시간임. 따라서 시간을 절약하기 위해서는 네트워크의 상태, 서비스되는 비행체의 숫자와 분포가 중요함. 이를 통해 수요에 비례하여 운행 중인 차량의 도착시간 측정 가능함
- 날씨 예측 고려 필요
  - ✓ 악조건에서의 비행에서 가시성을 높이고, 돌풍조건에서 효과적으로 조종하고 결빙문제를 해결하여 차량제어와 합리적인 안전 여유를 확보해야함. 또한, 운항 시간을 극대화하기 위해 날씨 정보와 일기예보을 활용하기 위한 기술이 필요함
- 운영 고도 연구 필요
  - ✓ 고고도에서는 공기 밀도가 낮아지기 때문에 필요한 양력을 발생시키기 어려워짐. eVTOL 항공기는 3000피트 상공에서 운용이 되지만, 더운 여름날 고지대인 콜로라도주의 댄버와

같은 곳에서 운용이 된다면 10000피트 상공에서 운용이 되는 것과 같은 조건임

- 결빙 문제 해결 필요
  - ✓ 항공기 기체에 생성되는 눈과 얼음은 무게를 늘리고 익형을 바꿀 수 있는 여지가 있음. 환경제어장치(Environmental Control System)로의 제빙시스템은 비용이 많이 들기 때문에 NASA 등 여러 기관에서 시험개발중인 얼음 형성을 억제하는 아이스포빅코팅 기술을 사용해야함. 또한 짧은 시간 많은 전력을 발생시켜 모터를 구동하는 기능을 탑재하여 비상시 비행성능을 상승시켜 결빙지역을 빠르게 벗어날 수 있도록 해야 함. 아이스포빅코팅과 짧은 시간 많은 전력을 발생시키는 기능은 맨해튼이나 런던과 같은 추운 시장에 운용이 될 수 있게 할 것임
- 보안 검사의 불편함 축소 필요
  - ✓ eVTOL의 원활하고 안전한 운용을 위해서는 보안검사가 필수적임. 피츠버그시의 자율주행차는 시간 소모적인 단계를 배제하여 불편함을 최소화하도록 자율주행차 뒷자석에 장착된 태블릿으로 탑승자의 신원을 확인할 수 있도록 함. 또한 공항 보안 검색 시 사용되고 있는 FAA TSA PreCheck와 같이 저위험군 승객에 한해서 보안검사 시간을 감소하는 방안도 고려해야 함
- 지역사회의 동의 및 합의 필요
  - ✓ eVTOL항공기의 Vertiport/Vertistop은 지역사회에 지대한 영향을 미칠 것임. 따라서 지역사회는 항공기 및 기반 인프라 설계와 운영에 영향을 미치는 피드백을 제공할 것임. 따라서 잠재적 수요자 및 지역 사회와 협의하여 운영, 법제정, 항공기 제조 및 지역사회 영향 등을 고려하는 운송 솔루션을 개발해야 함. 반면에 이들의 합의를 얻지 못하게 되면 eVTOL운영에 대한 지원이 제한되거나 금지될 가능성도 있음
- 도심항공 모빌리티(UAM)의 새로운 경험에 따른 서비스 개선 필요
  - ✓ 지금까지 많은 이동 수단들이 나왔음에도 대부분 소비자들은 비효율적인 보안 및 사전탑승 시스템 등 복잡한 시스템 때문에 힘들어 함. 이 측면에서 수요에 의한 도시 교통을 극대화시키기 위해서는 서비스되는 eVTOL항공기가 도시 내, 도시 간, 외곽 지역까지 교통서비스가 통합이 되어야함. 뿐만 아니라 eVTOL항공기의 인프라 및 운영이 어떻게 결합되어 소비자들에게 어떤 경험을 줄 것인지 서비스의 개선과 발전의 관점에서 깊은 관심을 가져야함

- 도심항공 모빌리티(UAM) 서비스 제공자 측면에서의 주요 관심 사항 분석

- 티켓 비용
  - ✓ 현재 헬리콥터는 매년 전세계 생산량 1,000대 임. 생산량이 낮아 가격이 낮아지지 않음. 현재 민간 헬리콥터로 캐나다 빅토리아에서 밴쿠버는 비행으로 35분, 65마일, 비행가격이 275$임[29]
  - ✓ 2024년에 서비스 예정인 TRANSCENDAIR는 아래 표와 같은 가격을 제시하고 있음[32]
  - ✓ Porsche Consulting의 조사에 의하면 초기 조종사와 함께 운용이 되는 UAM이 하루 평균 12.5시간 낮 시간에 운영될 경우 km당 $1.8 로 예상함. 후에 자율 시스템이 탑재된다면 이 가격은 더욱 낮아질 것임[12]

표 22 TRANSCENDAIR 티켓비용[32]

항로	가격($)	시간(min)
뉴욕 - 보스턴	283	36
LA - 샌프란시스코	315	55
몬트리얼 - 토론토	325	60



그림 72 TRANSCENDAIR 항공기[32]

- 고객 수
  - ✓ Porsche Consulting의 조사에 의하면 브라질 상파울루에 거주하는 약 2천1백만 명의 인구가 출퇴근, 출장, 쇼핑, 레저와 같은 여러 교통수단을 대체하는 수단으로 약 1,050대의 여객용 드론을 수용할 것이라 예측함[12]

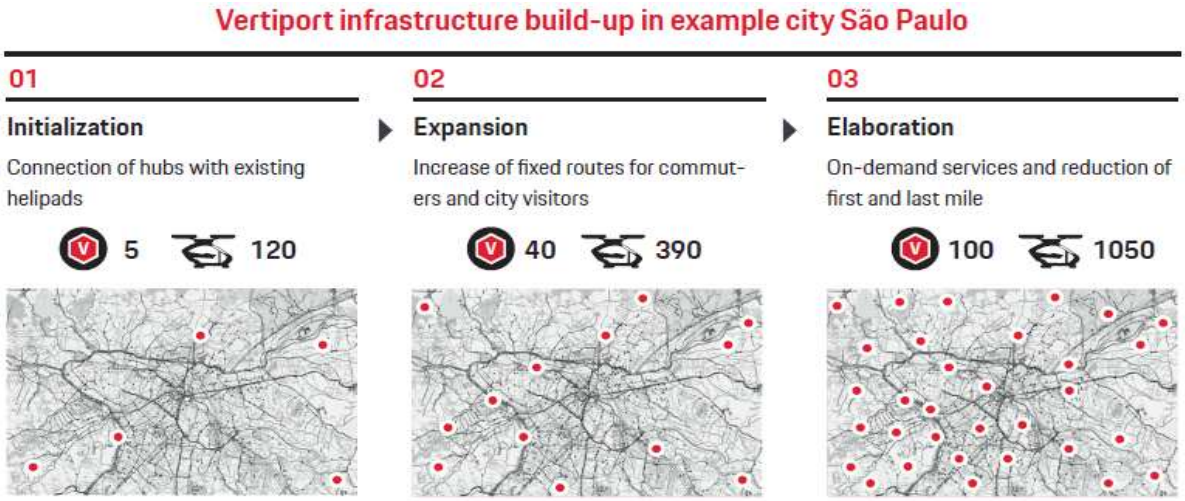


그림 73 상파울루 Vertiport와 eVTOL 증가[12]

- 운행 거리
  - ✓ UAM은 도심내 이동에서는 약 20km의 운용거리가 확보된다면 기존 교통수단을 대체할 가능성이 매우 높은 교통수단이 될 것임[12]

- 2035년 도심항공 모빌리티(UAM) 시장성

- 취미, 여객, 산업용 그리고 의료 지원 및 서비스 시장을 합치면 2035년에 약 740억 달러가 될 것으로 예상됨. 산업용 eVTOL시장은 340억 달러이며, UAM 등 여객용 eVTOL시장은 320억 달러, 취미용 드론시장은 40억 달러, 서비스용 드론시장은 40억 달러임[12]
- UAM 용 eVTOL은 2025년에 10억 달러 시장과 500곳의 이착륙장, 2030년에는 40억 달러와 2,000곳의 이착륙장, 2035년에는 210억 달러와 15,000곳의 이착륙장 까지 증가할 것임. 이는 17억대의 자동차와 100석 이상의 승객 또는 10톤 이상의 화물을 옮길 수 있는 4만2천대의 항공기와 상응할 것으로 예상됨[12]
- 아시아 태평양 지역은 2035년까지 95억 달러와 6,750곳의 이착륙장을 갖추어 약 45%의 시장을 점유할 것이고, 뒤를 이어 아메리카 대륙은 63억 달러 4,500곳의 이착륙장을 갖추어 약 30%의 시장을 점유할 것이며, 유럽과 나머지 국가들은 53억 달러와 3,750곳의 이착륙장을 갖추어 약 25%의 시장을 점유할 것으로 예상됨[12]

- 2035년 eVTOL 시장은 크게 3가지로 나눌 수 있음. 제품, 인증, 충전 인프라를 포함한 하드웨어와 보험, 유지보수, 인증, 기타서비스가 총 50%를 차지할 것임. 나머지 50%는 UAM 항공기 이용 및 렌탈, 개인 소유, 기타 이동형 서비스가 점유할 것으로 예상됨[12]

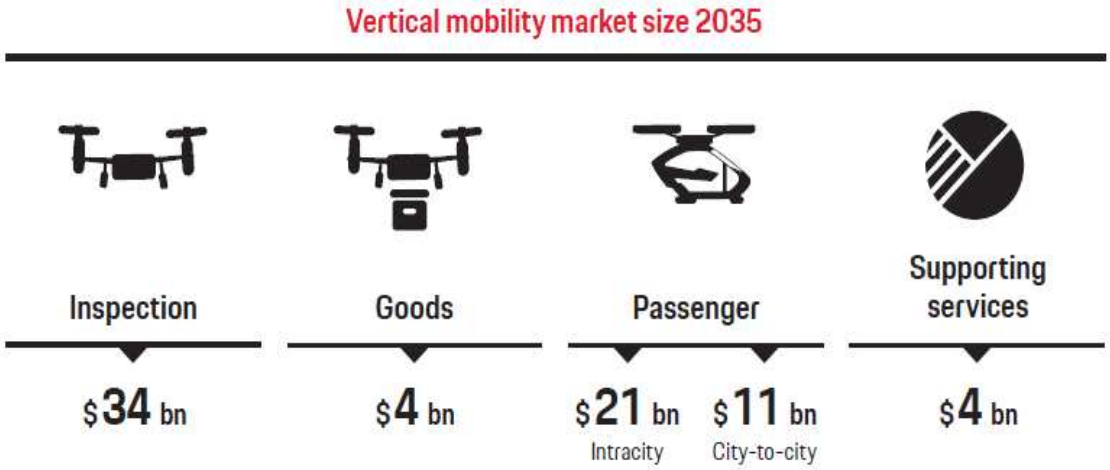


그림 74 2035년 eVTOL 시장규모[12]

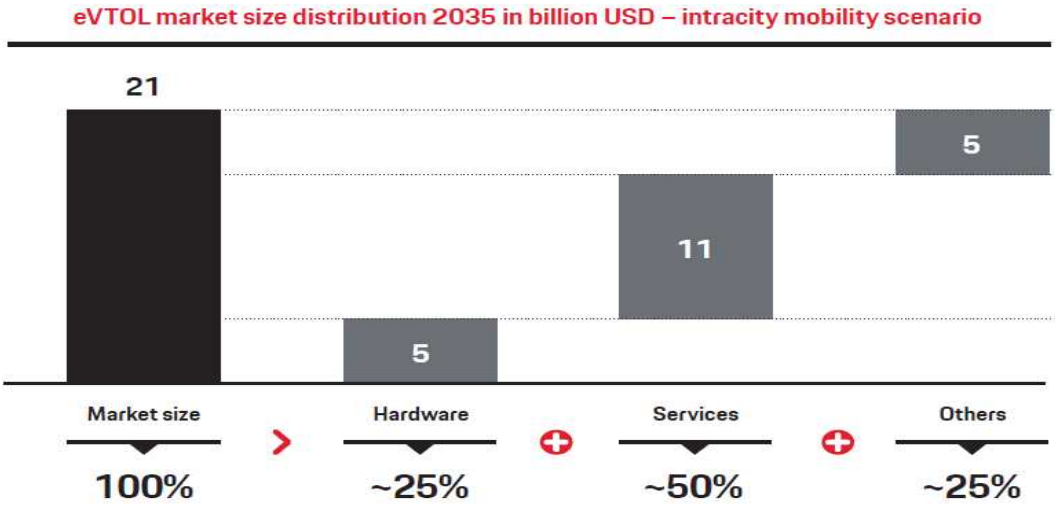


그림 75 2035 eVTOL 시장 점유율[12]

- eVTOL항공기와 도심항공 모빌리티 서비스가 추가될 수 있는지 분석하기 위해 크기와 인구 밀도가 다른 여러 도시를 살펴볼 필요가 있음. 전 세계 도시는 인구 500만 명 이상의 50~60개 대도시와, 300만 명 이상의 대도시 100여 개, 인구 100만 명 이상의 중형 도시 400여 개, 마지막으로 중소도시 3500여 개로 구성된다. 브라질 상파울루는 수도권에 약 2,100만 명의 인구가 살고 있는 거대 도시임. 상파울루는 출퇴근, 출장, 쇼핑, 레저와 같은 여러 가지 교통수단을 대체할 가능성이 높기 때문에 약 1,050대의 도심항공 모빌리티 eVTOL을 수용할 수 있을 것임. 130대의 eVTOL항공기는 시내에서 운용 중인 400대 이상의 헬기의 3분의 1을 대체할 것이라 예상됨[12]
- UAM은 낮 시간(하루 평균 12.5시간)에 km당 1.8달러 비용으로 운항될 것으로 예상됨. 이 중 20%는 제품 관련 비용으로 감가상각, 배터리, eVTOL 인증 등의 비용임. 42%는 이착륙 비용, 충전료 등으로 서비스 제공 업체 등의 비용임. 조종사, 운항, 항공 교통 관리 및 유지보수에 대한 서비스 제공업체 비용은 36%를 구성하며 보험과 같은 기타 비용은 나머지 2%를 차지하게 될 것임. 이 비용은 자율 시스템이 정착되면 절감될 것임[12]

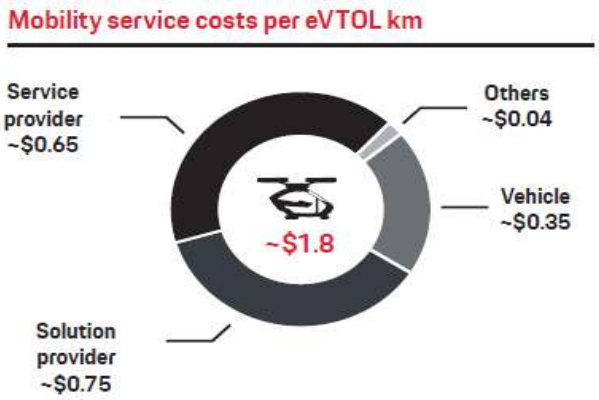


그림 76 eVTOL km당 서비스 비용[12]

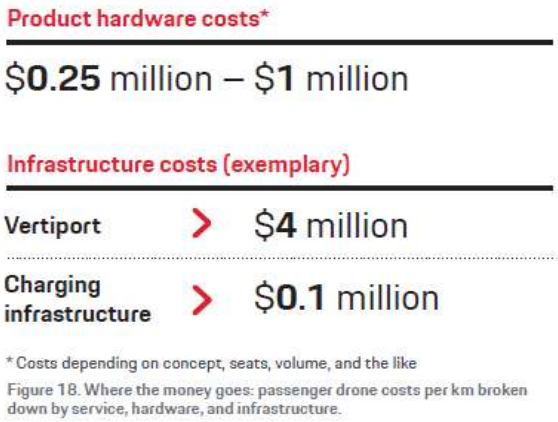


그림 77 eVTOL km당 서비스 비용[12]

- 도심항공 모빌리티 시장을 넘어서 도시 간 교통수단의 시장은 2035년에 210억 달러의 교통 시장에서 약 110억 달러의 추가적 가치를 가져올 것으로 예상됨. 도시 간 항공편과 새로운 이동 서비스의 수요 증가는 추정하기 어렵지만, 여객용 eVTOL이 도시 간 교통수단으로 확장이 되었을 때 확실한 추가적인 수익과 사업기회를 창출할 것으로 기대됨[12]
- 비행체 기술, 운영, 경제성 및 시장 크기에 따라 도심 항공 모빌리티는 다양한 형태로 나타나며 16개의 시장 범주와 36개의 예상 시장으로 분류하면 예상되는 UAM 시장은 아래 표와 같다.

표 23 잠재적 UAM 중점 시장

시장 분류	잠재적 UAM 시장	정의
항공 교통	공항 셔틀	고정 노선을 통해 공항으로, 또는 공항으로부터 또는 공항간에 승객을 운송
	에어택시	승차장 간 승객 수송을 제공하고, 정기적인 노선에 운영되지 않음
	기차	네트워크 인프라(예: 열차/지하철)를 따라 집중적인 지점간 이동 제공
	버스	고속버스나 전세버스와 같은 대중교통 노선 대체
응급 상황 (공공 서비스)	공중 구급차	응급 상황을 위한 병원으로의 이동 및 병원 방문
	경찰관 - 지역, 주 및 연방	일상 업무 및 사건 관리에 대한 항공 지원을 통해 가능해진 법 집행
	소방관 - 민간, 시 및 연방	에어 모빌리티 이동을 통한 신속한 소방 지원
	자연 재해 및 무력 충돌 대응 - 지역, 주 및 연방	자연재해 및 무력충돌을 겪고 있는 경찰, 구급차, 소방 전문요원 외에 인도적 지원 및 대피 노력에 대한 항공 지원
기업	회사 셔틀	회사 본사에서 다른 사무실 또는 직원 서비스까지 왕복 운행
	사무실 간 이동	인접 초고층 빌딩의 특정 사무소를 오가며 여행
	지점 간/고객 수송	사내 메일 및 기존 택배 서비스를 대체하여 법률/업무 문서 전달
행사	주요 행사	25,000명 이상 모이는 행사에 대한 인력 수송
	작은 행사	100명 이상 25,000명 미만 행사의 경우 인력 수송
엔터테인먼트 및 미디어	놀이공원 / 익스트림 스포츠	스릴 라이드(즉, 트랙이 없는 롤러코스터), 공중 곡예 플랫폼, 번지 점프/낙하산 플랫폼
	사진	항공 사진
	영화 / TV / 라디오	영화 작업, 교통 및 뉴스 보도
	여행	항공 관광
물류 및 물품 배송	항공 배송	우편물, 식량, 인도적 지원, 쇼핑 물품 등을 배달하는 UAM 항공기와 드론
	항공 물류	항공기를 이용하여 물품 배송, 입고, 물류 관리 용이

부동산 및 건설	항공 전시장, 검사 및 조사 - 재산 검사 및 부동산 전시	건축, 주택 또는 토지 검사, 수리 및 유지보수를 위한 공인 검사관, 조사관 또는 개인 소유자의 조사 잠재 고객 거주지, 소포, 심지어 오픈 하우스나 중개인의 오픈 하우스에 다니는 것을 보여주는 부동산 중계업자들
안전	항공 안전	다양한 이벤트의 보안 취약점을 파악하기 위한 하늘에서 찍은 영상 또는 사진
대여	차 대여 - 기업과 프랜차이즈	렌터카 대체
재산/건물 보수	건물 보수	도장 및 창문 세척과 같은 건물 외벽 수리 작업으로 간혹 부상/사망 발생이 발생하는 도르래 플랫폼과 같은 기존 접근 방식을 대체
	공익사업 자산 유지	때때로 부상/사망하는 폴 클라이밍과 같은 현재 접근 관행을 대체하기 위해 전선, 스마트 폴 및 특정 미터기 유형 서비스
건강관리 업체	외딴 지역 방문	외딴 지역에 거주하는 환자를 위한 제공자 또는 환자의 픽업 및 하차
	의료 장비 운송	긴급하게 필요한 의료 물품 인도, 값비싼 진단 도구의 경우 첫 번째 장소에서 사용 후 즉시 다음 사용자에게 인도할 수 있는 공유 프로그램 구축
과학적 연구	우주 관광/ 식민지 사전 연구	잠재적으로 저렴하고 안전한 UAM을 사용하는 장기적 우주 여행, 지형 위의 삶, 새로운 유형의 항공 기술/프로세스 등의 연구 효과
	그 밖의 응용	다른 응용 프로그램을 사용하여 과학 연구 수행(삼림, 이주 패턴 등)
도시 계획	소규모 주택/긴급 대피소	UAM을 개조하여 복잡한 지역이나 범죄가 일어나기 쉬운 지역의 개인 주택에 연결된 공중에 영구적인 대피소
안전	저장소	영구적인 공간 추가가 불가능한 건물에 임시 저장 공간을 만들기 위한 UAM 개조
공공 서비스 (응급 상황 제외)	제설 트럭	겨울 제설기 및 제설 트럭 교체
	쓰레기 수집	쓰레기차 교체, 유해폐기물 처리 등
	스쿨 버스	공립학교 버스 교체
농업	유목	몰이와 의료 관리를 위한 멀리 떨어진 양떼에게 도달
	수확	식재, 수확, 음용수를 위한 접근성이 낮은 농지에 도달
	조경	나무 가지치기를 위한 사다리나 나무 오르기 대체

○ 도시 인프라 개요

- 도심항공 모빌리티(UAM) 운영을 위한 도시 인프라 구축 개요

- UAM 성공의 중요한 요소는 eVTOL을 이륙, 착륙, 충전하는 기능과 승객을 대기시키는 서비스 기반 시설임
- 영공은 부족하지 않지만 현존하는 공역 및 교통수단과 결합이 되는 것이 관건임
- eVTOL 착륙장 또는 Vertiport의 위치와 개수부터 크기까지 수직 모빌리티 생태계를 결정짓는 중요 요인이기 때문에 항공 교통 통제를 운용하는데 필요한 자원 외에 이착륙을 위한 충분한 부지가 있어야함
- 많은 도시에는 이미 헬기장을 갖추고 있기 때문에 착륙장에 필요한 기반시설을 갖추고 있음
- 초기 단계는 5개의 헬기장만으로도 루트를 만들기에 충분함. 다음 단계는 Vertiport부지로 선정된 지형에 여객용 eVTOL을 위한 비교적 작은 이착륙장으로 최대 40개의 Vertiport가 필요함. 마지막 단계는 인구 500만에서 1,000만 명 이상의 대도시들이 Vertiport를 지

원하는 이착륙장을 100개까지 보유하게 될 것임

- 도심항공 모빌리티(UAM) 인프라 구축 개발 사업자 측면에서의 주요 관심 사항 분석

• 인프라 구축 시간

✓ 이미 많은 도시들은 헬기장을 갖추고 있으나 헬기장을 용도 변경시키고 eVTOL을 운용하기 위한 급속충전소 및 항공교통관리(ATC)통신시스템 통제소 건설에 시간이 필요할 것임

• 인프라 구축 비용

✓ 위에서 기술한 바와 같이 많은 도시들은 헬기장을 갖추고 있기 때문에 갖추어야 할 인프라 시설은 급속충전소 및 항공교통관리(ATC)통신시스템과 같이 표준화되고 효율적인 교통관리 시스템임

✓ UAM 시장이 확대될수록 수요가 급증할 것으로 예상됨. 따라서 늘어난 수요를 수용할 수 있는 효과적인 교통시스템이 필요함. NextGen, UTM 등과 같은 교통관리 시스템이 적용되어야함

• 수직이착륙장 개수

✓ 위에서 기술한 바와 같이 많은 도시들은 헬기장을 갖추고 있기 때문에 이착륙장에 필요한 기반시설을 갖추고 있음. 초기 단계에서는 5개의 헬기장으로도 충분함. 도심항공 모빌리티(UAM)가 활성화 되었을 때 500만에서 1천만 인구인 대도시들에는 전용 이착륙장 100개면 충분함[12]

• 수직이착륙장 위치

✓ eVTOL은 지역 규제와 공간 제약에 따라 거주 지역에 이착륙할 수 있음. 수직이착륙장의 위치는 접근 및 출발경로를 위해 사전에 조사되고 등록되어야 함. 예를 들어, 미국 캘리포니아주에서는 개인이 공항을 사용하는 것이 합법임

✓ 도심 내에서 eVTOL을 운용하는 데 있어서 가장 큰 장벽은 수직이착륙장을 배치할 충분한 장소가 없다는 것임. 물론, 소수의 도시들은 이미 여러 개의 헬리포트를 보유하고 있으며 운행 수가 많지 않을 것으로 예상되는 초기 eVTOL 서비스를 충분히 수용할 것으로 판단됨

• Vertiport/Vertistop 디자인

✓ 부유식 바지선

◆ 기존 밀집된 건물들 사이에 인프라를 구축할 필요가 없으므로 지역사회의 소음 문제와 위험 문제를 어느 정도 해결할 수 있음

◆ 도심에서 떨어져 있을 경우 외곽지역 또는 이착륙장 설치지역으로 이동해야하는 단점이 존재함



그림 78 부유식 바지선 Vertiport[11]

✓ 고속도로 IC 클로버

◆ 일반적인 고속도로 IC 클로버의 직경은 약225피트임. 헬리콥터 갑판의 패드 50피트, 최종접근 및 터치다운(FATO)영역 115피트, 그리고 200피트의 직경이 필요하므로 클로버를 이착륙장으로 이용이 가능함[11]

- 수직이착륙장(Vertiport/Vertistop)은 주변 교통보다 높은 위치에 있어야하고, 지상 교통에 영향을 주지 않기 위해서 고가도로와 같은 높이에 있어야함
- 지상에서 고가도로까지 높은 플랫폼을 구성하기 때문에 승객 픽업 및 대기 구역과 같은 추가적인 기반시설을 하단 영역에 설치할 수 있음
- 기존 국토교통부 토지를 사용하기 때문에 비행 및 운영상 많은 이점이 있음. 기존 고속도로기준 소음수준에 대부분의 eVTOL이 잘 부합함. 기존 교통망과의 연결로 접근성도 좋음


그림 79 고속도로 클로버 잎 Vertiport[33]


그림 80 고속도로 클로버 잎 Vertiport 내부[33]

✓ 주차장

- 사용되지 않는 주차장을 수직이착륙장(Vertiport)로 용도를 변경함. 주차장의 주차 구조는 안전한 운행을 위한 FAA지침을 만족하는 글라이드 경로 각도를 달성할 수 있기 때문에 운영상의 이점을 제공함[11]
- 주변이 사유지일 가능성이 크기 때문에 VTOL방식 이외의 항공기는 운용하기 어려움
- 기존의 교통망과 연결이 되어있으므로 접근성이 좋음



그림 81 주차장 Vertiport[11]

- 새로운 차원의 도시 계획 수립[34]

- 인프라는 도시에서 도심 항공 모빌리티 운영을 확장하는 데 필요한 필수 요소임. Airbus Urban Mobility는 어떻게 추가 인프라가 필요한지를 포함하여 도시에 인프라가 시민의 이익을 위해 도시의 인프라 네트워크에 추가 모빌리티 솔루션을 도입 할 수 있는지에 대해 적극적으로 연구하고 있음

- 지속 가능하고 효율적인 도시 개발 지원

- 도심 모빌리티에 기여하려면 도시 상황에 대한 전체적인 이해가 필요함. 여기에는 세계적으로 지속 가능하고 효율적인 도시 개발을 가능하게 하는 영토 개발 및 계획 준수가 포함됨. Airbus Urban Mobility는 다음과 같은 원칙을 준수함. 도시 설계 및 계획 팀은 세계 최고의 전문가와 협력하여 새로운 이동성 시스템을 기존 도시 운송 네트워크에 완벽하게 통합하는 인프라 솔루션을 개발함. 이 공동 접근 방식은 도시 항공 모빌리티 솔루션이 더 많은 인구의 더 큰 요구를 충족시킬 수 있도록 함

- 2017년부터 MVRDV는 Airbus Urban Mobility가 이끄는 연구의 일환으로 자율비행하는 무공해 전기 항공기를 사용하여 도심 항공 모빌리티의 미래를 계획함. 이 연구는 이 기술을 도시 수준에서 구현하고 도시에 미치는 영향과 잠재적 이점에 중점을 둠

- 기존 운송 인프라의 가치 향상

- 도심 항공 모빌리티 솔루션을 완벽하게 통합하는 도시 환경에 대한 비전을 달성하기 위해 다음과 같은 노력이 필요함
  - ✓ 기존 도시 인프라와 긍정적으로 통합되는 차량 이륙 및 착륙에 필요한 수직이착륙장 설계 및 인증
  - ✓ 공공 기관이 스마트 도시를 개발하고 관리하는데 디지털 기술을 활용할 수 있도록 돕는 디지털 인프라 솔루션 개발
  - ✓ 기존의 전송 인프라의 가치를 높이고 미래의 모빌리티 발전에 맞게 사용을 목표로 하는 원칙을 준수하는 솔루션
  - ✓ 도시 환경에서 구축하고 생활하는 지역 생태계와의 광범위한 협력에 의존하는 더 광범위한 도시 계획 기능을 지원
  - ✓ 기존 도시 인프라의 효과적인 사용을 모니터링하고 보호하여 도시 교통 개발에 더 나은 서비스를 제공

- 도시의 항공 운송에 필요한 인프라 준비

- 실행 가능한 전기수직이착륙(eVTOL) 항공기만으로도 새로운 모빌리티 생태계가 향상되지는 않음. 도시와 교외에는 지상과 공중(착륙장, 항공기 교통 관리 시스템 등) 인프라가 필요함

- 비행체

- 제조업체는 항공기 자체를 발전시켜 왔지만 도시 및 교외 지역에서 규모의 사람들과 화물 운송을 지원하고 활성화하는 데 필요한 인프라는 아직 구축되지 않았음. UAM의 미래가 현실화되기 위해서는 플레이어는 지상 인프라, 강력한 통신 및 무인 항공 교통 관리(UTM) 시스템 및 원활한 이동성 서비스(MaaS) 플랫폼을 구축해야 함

- UAM은 도시 안팎의 사람들과 화물 이동 시간과 비용을 줄여 일상생활을 개선하고자 함. 정부와 산업계가 효과적인 솔루션을 제공하기 위해서는 특정 위치(예: 도시 대 교외)에 맞게 특정 지역 구현을 통해 합의된 운영 개념(ConOps)을 개발해야만 사람과 운송 업체를 위한 효과적인 운송 경험을 효율적이고 안전하게 배포할 수 있음. 효과적인 UAM 시스템에 필요한 여러 인프라 요소가 있지만 지상 인프라, UTM 및 통신 및 MaaS 플랫폼의 세 가지에 중점을 두었음

- 필요한 지상 인프라 설계 및 구현

- 오늘날 선진 기업들은 주거용 건물, 고속도로 광장, 주차장 및 고층 빌딩의 옥상에 적합한 지상 인프라 설계를 개념화하고 있음. Uber 및 기타 회사는 미국 연방항공국과 유럽 연합 항공안전국의 헬기장 설계 표준에 따라 다양한 eVTOL 항공기 크기와 운영량을 지원하도록 수직이착륙장을 설계함

- 지상 인프라는 특정 도시의 조건과 통합된 종합적인 평가 및 설계가 필요함. 회사는 통합 UAM 운영개념(ConOps)의 요구 사항을 충족하고 계획, 설계 및 운영 단계에서 규정을 준수해야 함. 수직이착륙장(Vertiport)를 건설하기 전에 운영자는 안전하고 강력하며 확장 가능한 운영에 대한 모든 요구 사항을 충족시켜야 함. 또한 UAM을 구현하려면 인증(수직이착륙장 및 승무원), 감시 및 보안과 관련된 문제를 해결하는 것이 필수적임

- 제한된 도시 공간과 높은 부동산 가격을 감안할 때 여러 이착륙 지역을 건설하기에 충분한 공간을 확보하는 것은 대부분 불가능하다고 판단됨. 따라서 기존 가용성, 공간 활용도, 기능 요구 사항 및 위치에 따라 다른 착륙 패드 구성을 고려해야함. Vertihub, 수직이착륙장 및 Vertex의 세 가지 범주로 사람과 화물 모두를 위한 지상 인프라 또는 “Vertiplace” 를 배치 할 수 있음(아래 그림 참조)



그림 82 지상 인프라[34]

✓ 수직이착륙장(Vertiport)

- 이륙 및 착륙 패드는 도시의 중심부에 건설 및 배치되어 화물 및 승객 탑승 및 하차, 이륙 및 착륙 모두를 위한 주요한 장소 역할을 함
- 승객은 여행 및 화물 운송의 첫 부분과 마지막 부분이 다른 부분과 통합되어야하므로 운영자는 중앙 비즈니스 지구, 쇼핑센터, 기차 및 지하철과 같은 다른 교통수단과 같은 주요 목적지와 그 주변에 배치해야함
- 수직이착륙장은 주어진 시간에 여러 eVTOL 비행체를 수용해야하지만 Vertihub보다 훨씬 적은 공간을 요구할 수 있음
- 수직이착륙장은 고속 충전/급유 시스템을 갖추고 기본 보안 점검 사항을 제공하며 소규모 MRO (Maintenance, Repair and Overhaul)작업을 수행 할 수 있지만, 장거리 eVTOL 또는 본격적인 MRO 스테이션을 위한 주차 공간은 없을 것임. 그러나 수직이착륙장은 비교적 많은 수의 승객을 이상적으로 처리 할 수 있기 때문에 지상 직원이 고객 대기 라운지, 원활한 탑승과 화재 안전, 출입 통제 및 실시간 감시 시스템을 조정해야 할 필요가 있음

✓ Vertistations

- 이들은 일반적으로 하나 또는 두 개의 랜딩 패드를 포함하는 Vertiplace 네트워크의 가장 작은 요소임
- 더 작은 설치 공간을 고려할 때 운영자는 이미 사용 중인 헬기 착륙장을 사용하여 비교적 쉽게 설치할 수 있음
- 정류는 주변 장치 인프라이므로 현장에서는 기본 충전 또는 주차 지점이 필요하지 않지만 모니터링 시스템, 대기 영역, 보안 점검 점, 헬프 데스크 등의 기본 고객 서비스 기능을 고려해야함
- 설치비용이 비교적 낮기 때문에 이러한 시설은 운영자의 교외 지역으로의 사업 범위를 확대 할 수 있음. 또한 이러한 각 착륙 지역의 위치와 이용 가능한 시설을 고려하여 화물 픽업 및 배송 서비스를 기존 인프라와 원활하게 통합할 수 있음
- 인프라의 구축은 공간 가용성과 비용으로 인해 중대한 문제를 야기하지만 잠재적으로 새로운 시장 기회를 의미함. 비용-공유 및 수익-공유 모델의 활용과 함께 공공-민간 파트너쉽은 비용 장벽을 극복하는 데 도움이 될 것임

✓ 지상 인프라

- 접근 및 출발, 착륙 및 이륙, 승객 적재 및 하역, 보안 및 충전/급유와 같은 운영

고려 사항을 고려해야 함. UAM 운영 개념의 개발은 전체 인프라의 설계 및 개발을 조화시키는데 있어 핵심 요소임

- Vertiplaces는 안전하고 효과적이며 탄력적인 비행 작업뿐만 아니라 일반적인 운영 개념(ConOps)을 지원하도록 구성해야 함
- 최대의 사회적 이익을 달성하기 위해 운영자는 혼잡을 줄이는 데 도움이 되는 지점에 수직이착륙장을 배치하고 다른 유형의 승객과 화물에 동등하게 접근해야 함
- eVTOL 항공기의 운영은 비행체 설계 외에도 소음 공해를 고려하고 수직이착륙장 설계 및 배치의 소음과 새로운 건물 건설을 고려해야 함
- 실시간 날씨 모니터링이 중요하며, 바람, 비, 번개, 눈 등에 대한 미세한 날씨 정보가 포함된 날씨 정보를 eVTOL 항공기 운영에 알릴 수 있어야 함. 모니터링과 결합된 예측 기능은 동적이고 안전한 경로 계획을 가능하게 함
- 예기치 않은 기술 문제는 불가피하므로 eVTOL에는 계획되지 않은 착륙을 위해 사전 정의된 전용 백업 사이트가 필요함
- 작동하는 시스템에는 고속 통신 네트워크가 필요함

- 안전하고 효율적인 eVTOL 운영을 위한 강력한 통신 및 UTM 시스템

- 공역 관리는 UTM을 미래 UAM의 핵심 요소로 규정함. 높은 모빌리티 생태계가 조종사 조종에서 완전 자율 비행으로 이동함에 따라 eVTOL은 제어된 공역 및 기타 무인 공중 시스템과 상호 운용이 가능해야 함
- 결과적으로 UTM은 매우 안정적이고 사용 가능한 통신, 예측 가능하고 일관된 탐색 및 액세스 가능하고 신뢰할 수 있는 감시가 필요함
- 원활한 항공기 간 통신을 위해서는 기존의 항공 우주 관리 시스템과 UTM의 효과적인 통합이 필요하므로 운영자는 동시에 비행하는 여러 eVTOL 항공기와 상호 작용할 수 있음
- 낮은 고도에서 특정 시간에 이동량이 증가하는 미래는 어느 한 공역에서 항공기의 수가 급격히 증가할 수 있기 때문에 UTM 시스템은 비행 규칙에 적용되는 여러 시스템을 준수하면서 모든 공역에서 일반적인 상황 인식 및 장애물 회피 기능을 제공해야함
- UTM 시스템은 현재 시스템과 통합되어야 하며, 특히 공역이 통제된 공역과의 교차로에서, 즉 더 큰 항공기가 착륙하는 공항 근처 공역 사용에서 겹치는 부분을 우선해서 고려해야함

✓ 싱가포르의 UTM 시스템

- 싱가포르 민간 항공국과 교통부는 Garuda Robotics가 이끄는 미래 비행 컨소시엄을 설립했으며 싱가포르 민방위대, 글래스고 싱가포르 대학교 및 여러 항공 및 기술 회사를 포함함(목표 : 무인 항공기를 위한 싱가포르의 도시 영공 관리 시스템 개발)
- 2018 년 7월에 시작된 2년 동안 컨소시엄은 보완 기술을 통합하고 시스템의 안전성을 입증하기 위해 엄격한 테스트를 수행하는 것을 목표로 하고 있음. 컨소시엄은 승객 eVTOL 외에도 eVTOL을 사용하는 강력한 서비스 모델을 개발하기 위해 항공 공급망 및 배송 방법을 모색할 것임. Garuda Robotics의 CTO인 Ong Jiin Joo는 “우리의 목표는 싱가포르의 가시선을 넘어 드론을 비행해야하는 모든 기업이 안전하고 효과적인 방식으로 쉽게 비행 할 수 있도록 하는 것입니다.” 라고 언급함

- UTM 시스템은 상호 운용이 가능해야하며 기존의 상업용 항공 교통 관리시스템과 통신할 수 있어야함
- 모든 기능을 갖춘 UTM을 개발하고 구현하려면 모든 eVTOL 시스템의 이해 당사자는 충돌 책임, 충돌 비전 공유, 전략, 상호 운용성 및 표준에 대한 합의를 위해 충돌 방지와 같

은 보안 문제를 처리해야함

- 도시는 교통 모니터링, 인프라 관리, 안전한 교통 흐름 보장, 충돌 방지, eVTOL 운영자 및 조종사에게 정보 및 지원을 제공하는 통합 항공 기관을 만들거나 지정해야함
- 통신 및 트래픽 관리 시스템을 설계할 때 개방형 건축 방식을 갖추는 것이 UAM 성공의 초석이 될 수 있음. 기술 채택이 중요한 지원 요소이기 때문에 기능이 새로운 기술을 활용할 수 있는 개방형 건축 접근 방식을 활용하는 것이 중요함

✓ eVTOL 비행제어 및 조종을 위한 UTM 시스템의 필요성

- ◆ 전반적인 운영을 중앙 집중식으로 제어하려면 UTM 시스템은 eVTOL을 모니터링하고 조절할 수 있어야 함. 또한 이러한 항공기가 제한된 지역을 피할 수 있도록 도와줌
- ◆ UTM 시스템은 스케줄 및 순서, 이륙 및 착륙 지시, 대기 중 eVTOL 간의 적절한 거리 관리를 담당해야함
- ◆ UTM은 동적 공간 할당 및 공간 분리 기능을 관리하는 데 핵심적인 역할을 수행하여 eVTOL이 경로를 변경하여 혼잡을 최소화하도록 함
- ◆ eVTOL이 가시거리(BVLOS)를 넘어서서 추가 항공 교통량을 발생시키면 UTM 시스템은 디지털 통신 및 내비게이션 솔루션을 최대한 활용해야 함

- 원활한 도심항공 모빌리티를 위한 잘 개발된 MaaS(Mobility as a Service)의 필요성

- UAM이 광범위하게 수용되도록 하려면 운영자는 통근자가 시간을 절약할 수 있는 방법을 생각해야 함. 대부분의 사용자는 지상과 공중에서 비교적 원활한 모빌리티를 기대함. 이러한 경험을 제공하기 위해 제공 업체와 정부 기관은 스쿠터, 자동차 및 지하철에서 기차, 도보, 자전거 및 eVTOL에 이르기까지 사용 가능한 모든 운송 모드를 통합 할 수 있는 효율적인 MaaS(Mobility as a Service)를 설계하고 구현해야 함
- 모빌리티 제공자들은 완전한 모빌리티를 위해 도시와 교외 교통의 여러 모드를 연결할 수 있는 기존의 공공 영역 및 독점 애플리케이션을 기반으로 시작할 수 있음
- 고객에게 UAM 옵션을 제공하면 eVTOL을 사용하는 것이 여정을 단축하여 서비스 수요를 촉진할 수 있음
- 요금과 도착 시간을 예측하고, 여행자가 수직이착륙장을 오갈 수 있도록 돕고, 수직이착륙장 운영에 들어오는 정보를 제공하는 기능(예: 승객의 도착 장소를 통지하고, 보안을 통해 사용자의 안면 인식을 사용할 준비)은 경험을 개선할 수 있을 것임

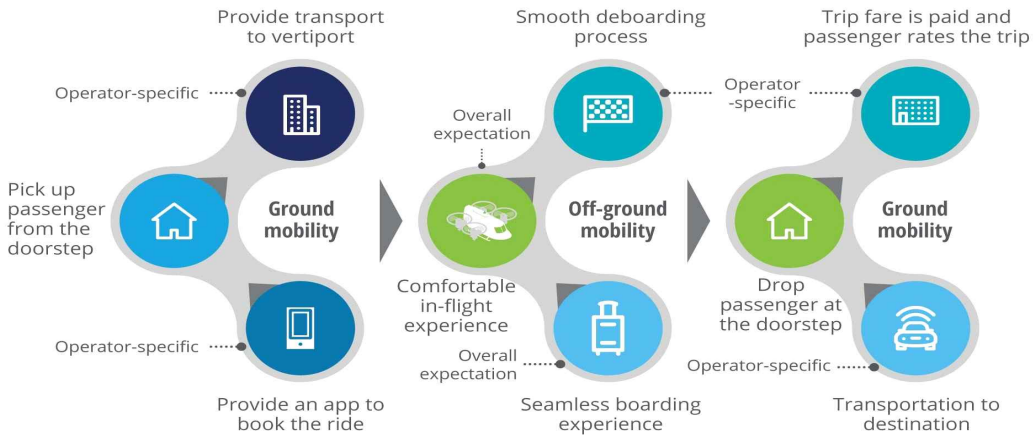


그림 83 UAM 운용 계획도[34]

- 모든 교통편과 마찬가지로 탑승 경험도 중요함. 즉, 운영자는 시각적 신호 및 간판을 제공하여 eVTOL을 승객의 전체 여행의 즐거운 부분으로 만들어야함. 많은 수직이착륙장이 여러 개의 상륙 플랫폼을 갖춘 옥상에 있을 가능성이 높다는 점을 고려할 때, 올바른 이륙 위치

와 차량으로 통근자를 안내하는 것은 어려운 일임



그림 84 통합 화물 운송 과정[34]

- 승객에게 통합 운송 경험을 제공하는 동시에 eVTOL 인프라는 원활한 화물 운송 서비스를 제공해야 함. MaaS는 이러한 화물 운송 서비스 요구 사항을 통합해야 함

- UAM을 현실화하고 성공시키는 도시의 중추적 역할

- UAM은 잘 개발된 지상 기반 시설, 효율적인 항공 교통 관리 및 강력한 통신 시스템과 함께 eVTOL이 전체 도시 교통 네트워크와 통합될 때만 실용적이고 널리 사용되는 도시 및 교외 모빌리티의 구성 요소가 될 수 있음
- 초기 운영에는 수직이착륙장 구축이 필요함. 즉, 기존 헬기 착륙장과 쉽게 전환 가능한 고층 빌딩의 옥상을 활용하므로 UAM 운영에 필요한 인프라를 만드는데 핵심적인 역할을 할 것임. 중요한 것은, 도시 행정기관이 공통적인 운영 개념의 현지화 및 거주자를 원하는 목적지와 연결시키는 것을 목적으로 하는 맞춤형 지상 인프라 계획의 개발을 촉진할 수 있다는 것임



그림 85 도시 인프라 구상도[34]

- 누가 지상 인프라를 설정하고 소유 및 관리 할 것인지에 대한 질문이 있을 수 있음. 기능적으로 통합된 Vertiport를 구축하는 것은 어려운 일이며, 자금 조달, 소유 비용, 유지 관리 및 규제의 주요 측면을 고려하여 다양한 비즈니스 모델이 나타날 수 있음

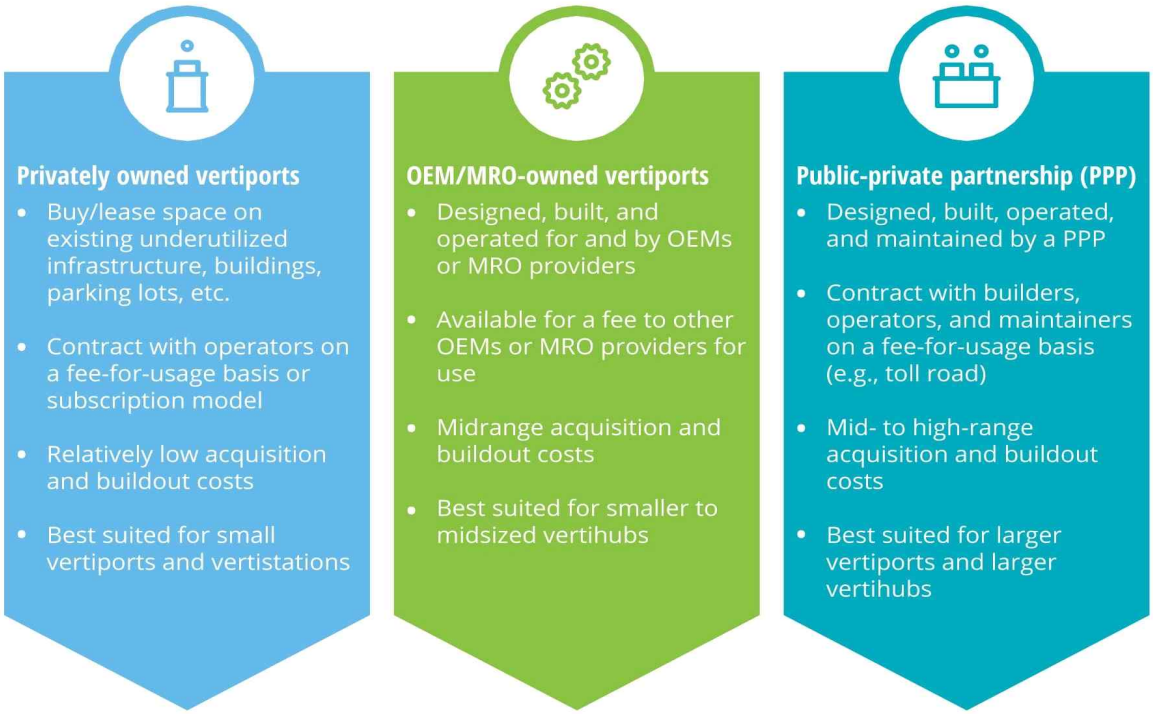


그림 86 Vertiport 소유 관련 계획[34]

- UAM 인프라 구축은 상당한 자본이 필요한 장기 투자임. 또한 정부 및 지방자치단체가 민간 기업과 협력하여 UAM의 미래에 대한 명확한 비전을 수립하여 효과적으로 계획하고 잠재적 투자자가 투자에 대한 신뢰를 얻도록 도와야함
- 도시들이 가장 필요한 사람들에게 교통수단을 제공하기 위해 승객 당 비용이 전통적인 대중교통의 비용에 접근 할 수 있도록 UAM에 광범위하게 접근할 수 있도록 해야 함. 대중교통 수단이 되려면 높아진 모빌리티 생태계가 부유한 통근자를 위한 헬리콥터 서비스보다 훨씬 더 광범위하게 이용 가능해야함

✓ 런던의 지붕

◆ 영국의 스타트 업 Skyport는 런던의 옥상 공간을 확보하여 궁극적으로 수직이착륙장으로 전환 할 계획임. 이 회사는 이미 런던에서 15 개의 옥상 권리를 구매했음. Duncan Walker 상무이사는 2018 년 8 월 Skyport의 확장 계획에 대해 다음 18 개월 동안 최대 80에서 100까지 확장할 계획임. Skyport는 런던에 기반을 둔 건축가 Barr Gazetas와 함께 이 수직이착륙장(Vertiport) 디자인을 작업하고 있음. 포트에는 탑승 및 하차와 함께 재충전 기능이 포함됨. 런던 이외에도 스카이 포트는 로스앤젤레스와 싱가포르에서 사업을 시작하고 있음

- 인프라 설계 및 구축의 중요성

- 도심항공 모빌리티는 도시와 교외 지역에서 사람과 화물의 운송을 개선할 것임. eVTOL 항공기는 강력한 UAM 인프라가 없으면 운송 시간과 배출량을 줄이고 생산성과 공공 안전을 향상시킬 수 없음. 실제로, eVTOL 비행체의 화려한 기술이 아닌 인프라는 이 새로운 형태의 UAM을 확장 배치하는데 있어 극복해야 할 가장 큰 장애물일 것임
- 토지/공간 확보 및 구축과 관련된 비용은 긴밀한 공공-민간 협업을 필요로 함. 이러한 노력과 함께 정부와 산업계는 UAM과 개발과 규제 환경에 대한 공통 운영개념(ConOps)을 구축해야 함. 중요한 것은 복잡해지는 공역을 관리하기 위해 새로운 항공 교통 관리 시스템을 배치해야한다는 것임

○ 수직이착륙 장소(Vertiplaces) 및 도심항공 모빌리티 인프라의 세계 탐색

- 이 부분은 UAM 인프라의 세계, 즉 수직이착륙 장소(Vertiplaces) 또는 Skyports에 중점을 둠. 수직이착륙 장소는 각각 크기와 전체적인 목적이 다양한 세 가지 유형의 UAM 허브를 나타냄
  - ✓ Vertihub, Vertiports 및 Vertistations
- 이러한 공간의 대부분은 처음부터 개발해야하지만 UAM 산업을 수용하기 위해 개조할 수 있는 무수한 기존 헬기 착륙장 및 기타 항공 인프라가 있음
- Vertihubs는 공항과 유사하게 작동하며 도시 또는 교외 지역과 가까이 있지만 직접적으로는 위치하지 않음
- 지상 인프라 중 가장 크며 지리적 지역에서 도시 비행을 위한 주요 공간으로 사용됨
- Vertihubs는 주요 유지 보수 및 수리 장소, 장거리 운송 차량 보관 공간, 지역 및 운영 센터 역할을 하며 사람과 화물의 픽업 및 하역 공간 역할을 함
- UAM의 목표는 도심 지역에 강력한 대중교통 시스템을 제공하는 것이므로 Vertihubs는 다른 Vertiplace가 공간 효율적이도록 보장하면서 주요 도시 중심지의 주변에 지원을 제공함
- Vertiports는 도시 중심에서 이륙 및 착륙장 역할을 함. 그들은 도시 항공 운송 시장을 위해 버스 또는 지하철역의 역할을 맡음. 이를 달성하기 위해 Vertiport는 교통량이 많은 도심 공간에 전략적으로 위치해야함
- 한 번에 여러 eVTOL을 수용해야하지만 Vertihub보다 규모가 훨씬 작으며, 장거리 차량을 수용할 공간이 필요하지 않음. 그러나 승객 관리 공간과 보안 검색대을 위한 인프라가 필요함
- Vertiports의 목표는 지하철, 기차 및 버스 노선과 같은 기존 운송 수단과 완벽하게 통합하는 것임. Vertihubs는 일반 대중이 가장 자주 사용하는 것이기 때문에 승객을 도심 항공 모빌리티와 원격으로 연결하는 모든 공유 네트워크의 운영 센터가 되기 때문에 대부분의 사람들이 UAM과 연결되는 것임
- Vertistation은 Vertiplace 네트워크 중 가장 작은 것임. 이 스테이션에는 일반적으로 1 ~ 2 개의 랜딩 패드만 있음. 교외 지역에 위치한 중간 공간으로 도시 지역으로 쉽게 통근 할 수 있음. Vertistations 생성은 주변 지역을 더 큰 대중교통 네트워크와 연결하는데 중점을 둠
- Vertistation은 UAM의 광범위한 채택에 중추적인 역할을 함
- 오늘날 교통체증의 대부분은 하루 종일 다양한 지점에서 통근자가 도심으로 이동하기 때문에 발생함. Vertistation은 자동차 운송의 대안을 제공할 것임
- 업계 리더인 Uber는 2019년 Uber Elevate Summit에서 전 세계 도시에 대한 여러 Skyport 설계 계획을 발표함. 이 회의에서 8개의 회사가 Los Angles에서 Dallas, Melbourne에 이르는 도시의 총 16 개의 디자인을 전시하였음. 이러한 디자인은 크기와 기능이 다름. SHoP의 "Arc"개념, Mithun의 "Skypark"또는 Pickard Chilton & Arup의 "Sky Loft"와 같은 일부는 전기 자전거와 스쿠터를 충전하기 위한 공간과 eVTOL 공간을 할당함. Corgan의 "CONNECT"와 같은 다른 디자인은 식당, 식료품 점 및 기타 시설을 Skyport 디자인에 통합함



그림 87 우버사와 SHoP사의 “Arc.”[35]



그림 88 우버사와 Corgan사의 “CONNECT.”[35]



그림 89 가상 Vertihub 모델[36]



그림 90 Gannett Flemming사의 Skyport Concept[37]

- UAM 항공기에 대해 많은 의견이 있었지만, 이를 가능하게 하는 인프라에 주목하는 것이 중요함. Vertiplaces와 Skyports는 UAM의 광범위한 채택에 중추적인 역할을 함. 업계가 2020년대 중반까지 UAM 서비스를 시작함에 따라 이 인프라의 중요성은 점점 더 분명해질 것임

○ UAM에 대한 FAA의 관점

- 다른 모든 운송 수단과 마찬가지로 안전이 최우선이며, UAM 항공기와 이러한 새로운 운영을 지원하는 인프라에는 여객 운송에 관여하는 모든 운영의 복잡성에 상응하는 수준의 안전이 필요함
- 미국에서 UAM 기술의 상업적 사용 가능성은 적용 가능한 감항성 및 안전 규정을 준수하는 것으로 입증된 강력하고 신뢰할 수 있으며, 기술적으로 뛰어난 설계와 개발을 하는 회사에 달려 있음
- Urban Air Mobility 비행체는 헬리콥터 또는 규모가 커진 드론이 아닌 인프라, 새로운 시스템 및 새로운 항공기와 관련된 복잡한 시스템임
- 공역 통합에 대한 분리된 접근 방식은 대도시 지역의 기존 헬리콥터 회랑과 유사한 초기 소량 운영에 효과적일 수 있으나 도시 환경에서 동시에 작동하는 수백 대 또는 수천 대의 항공기를 수용 할 수 있는 장기 솔루션은 복잡한 과제임. 항공교통 관리시스템 및 궤적 기반 운영의 고급 개념이 포함됨
- FAA는 향후 2년간 주정부, 지방정부, 이해 관계자와 협력하여 이러한 고유 한 유형의 운영에 대한 요구 사항을 정의할 것임. FAA는 새로운 기술에 대한 이 행정부의 접근 방식에 따라 규범적인 규칙에서 성과 기반의 규정으로 옮겨감. 이 접근 방식은 UAM 기술과 운영이 발전함에 따라 연방 규정이 안전을 강화하지만 기술과 함께 성장할 수 있을 정도로 민첩성을 보장함. 이 부서는 업계 이해 관계자와 지속적으로 협력하여 UAM과 관련된 과제, 격차 및 기회를 식별함

○ 도심 항공 모빌리티 생태계

- Voloport

- UAM (Urban Air Mobility)의 성공과 에어택시 운영을 위해서는 거대 도시에서 유연한 이륙 및 착륙 인프라를 통합하는 것이 중요함
- 인프라의 개발을 발전시키기 위해서 2019년부터 영국은 Vertiport 개발사이자 운영사인

Skyports와 협력하고 있음

- VoloPort의 투명한 디자인과 고품질 인테리어는 앱 별 간단한 예약 옵션과 함께 미래 승객에게 원활하고 편안한 여행 경험을 제공할 것임



그림 91 Voloport 디자인 예[38]

- 싱가포르의 VoloPort 프로토타입

- 승객 경험을 완벽하게하기 위해 전체 고객 여정에 대한 실제 테스트 가능
- 비행 전 점검, 승객 라운지 및 탑승 절차를 포함한 계획된 고객 서비스 제공
- 배터리 교체 및 충전, 유지 보수, 안전 및 보안을 포함한 지상 운영 및 서비스에 대한 실질적인 테스트 허용
- 당국과 업계, 규제 기관이 최종 설계 승인을 요청하기 전에 피드백을 제공할 수 있는 기회 제공

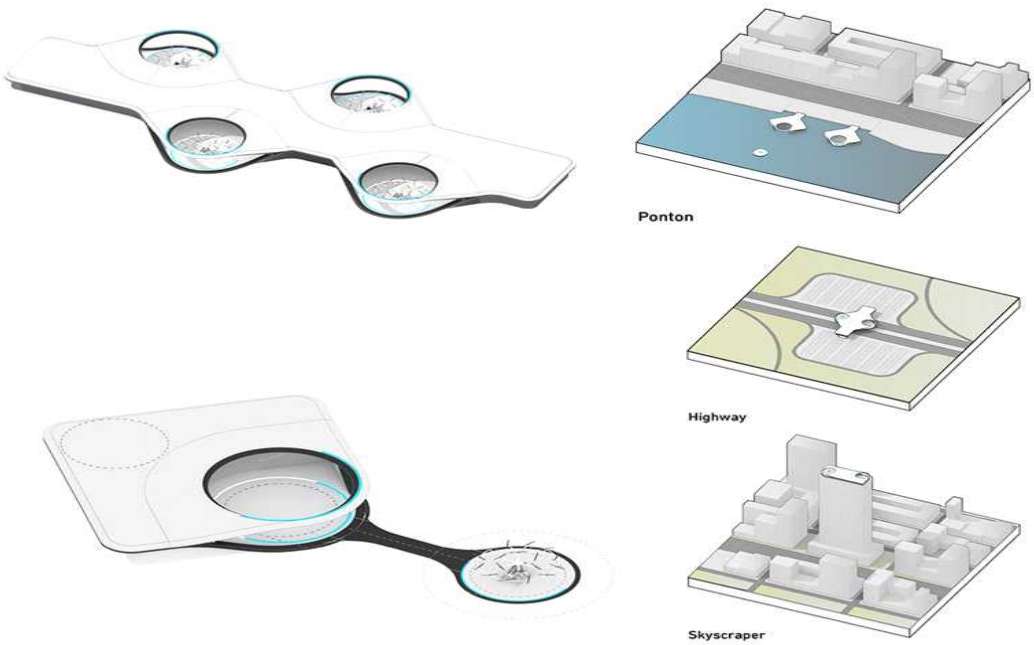


그림 92 모듈식 Voloport 디자인[38]

○ 이동성의 미래에 대한 기술적 장벽

- 지상에서의 도시 교통

- 에어 택시가 하늘로 향하기 전에 몇 가지 주요 기술 장벽을 극복해야함

- 주요 과제 중 하나는 에너지 관리에서 탐지 및 사고 방지 기능에 이르기까지 복잡한 기술 문제를 해결하는 방법임
- 규제에 대한 논의는 초기 단계이지만, 투자자들은 이미 eVTOL 항공기의 R&D에 수억 달러를 투자했으며 10년 이내에 운영 될 것으로 기대하고 있음
- 진보의 예

✓ 지난 10년 동안 항공 산업은 헬리콥터처럼 이착륙하여 전통적인 비행기처럼 비행하는 eVTOL 항공기를 개발해왔음

- 문제점 : 추진, 충돌 방지 및 감지, 원활한 통신

- 수백 개의 회사가 개념 비행체를 연구하고 있는데, 대부분은 수직으로 이륙하고 하이브리드 또는 전기식 추진 장치를 사용하여 비행함
- 이 항공기는 대중을 위한 안전하고 저렴하며 효율적인 운송 수단이 되려면 현재 여행 시간을 크게 단축시키는 속도로 한 번의 충전으로 많은 승객과 화물 탑재량을 의미있는 거리로 운반할 수 있어야 함

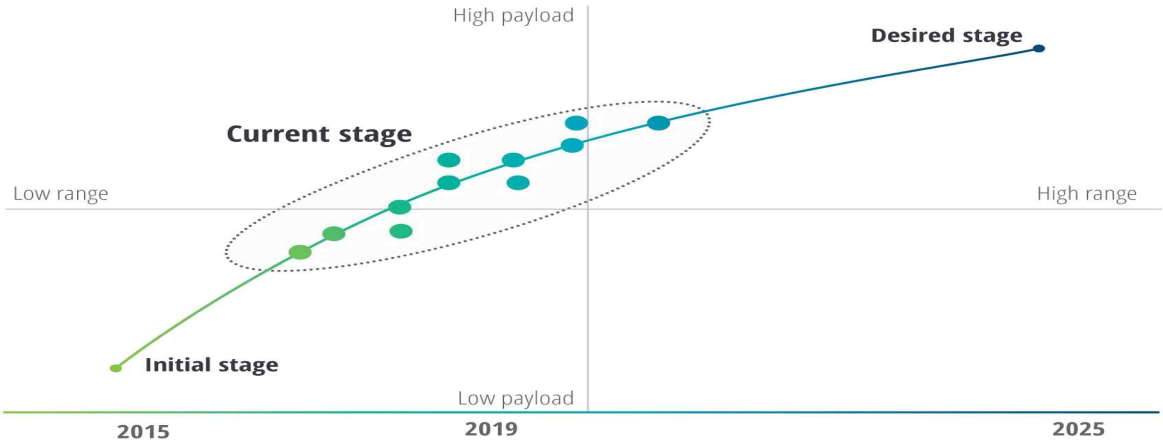


그림 93 공유형 도심항공 모빌리티 현황[39]

- eVTOL 항공기의 기술적 진보에도 불구하고, 주로 추진, 상황 인식 시스템, 탐지 및 충돌 방지 시스템과 관련된 몇 가지 주요 문제가 지속되며, 비행체 자체는 전반적인 기술 과제 중 일부에 지나지 않음
- 항공 교통 관리는 주요 상업용 도전 과제이며, 기존 비행체 및 민간 항공기, 헬리콥터, 상업 및 레크리에이션 드론과 함께 공역에서 이러한 비행체가 작동하는 방식임
- 기술은 모빌리티 미래의 세 가지 주요 요소, 즉 제작자, 운영자 및 규제자 모두에게 영향을 미침. 항공 산업은 도시 거리 위로 사람과 제품을 들어 올리는데 5가지 주요 기술 장벽이 있음

✓ 효율적인 에너지 관리

◆ eVTOL 추진 기술이 점점 더 완전 전기 개념으로 변하는 추세를 보이고 있지만 배터리 전력 및 수명은 설계를 제한함. 현재의 배터리가 생성하는 에너지는 장거리 통근에 적합하지 않으며 충전 속도가 너무 느려서 빈번한 운항을 지원할 수 없음

◆ 킬로와트시 당 비용은 줄어들지 않아 eVTOL 항공기의 경제적 실행 계획을 지연시키고 있음. 전기 및 내연 기관의 하이브리드화 기술인 하이브리드 전기 추진 기술은 적절한 솔루션을 제공할 수 있음

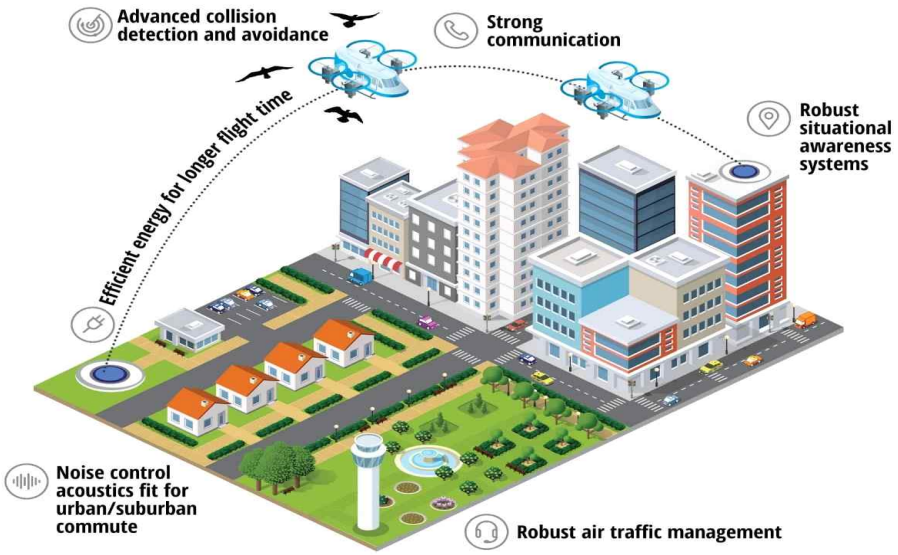


그림 94 도시 내에서 사람과 제품 운송을 위한 eVTOL 운영에 필요한 사항[39]

✓ 강력한 상황 인식 시스템

- 효율성과 안전을 위해 자율 eVTOL은 주변 환경을 인식하고 기존지도를 사용하여 탐색하며 정지해 있거나 움직이는 객체를 추적 할 수 있어야함. 이를 위해서는 건물, 전력선 및 전화 타워와 같은 물체를 식별하고 비행 중에 최적의 비행경로를 차트화 할 수 있는 Deep Learning Neural Network과 같은 인지 시스템 및 AI의 고급 기능이 필요함
- 고급 AI 기능을 통해 eVTOL은 승객과 중요한 지정 착륙 지점을 식별할 수 있음. eVTOL이 안전하고 신뢰할 수 있는 방식으로 자율적으로 작동하도록 하려면 고급 감지 기능이 필요함
- 효과적인 추적 기능을 위해서는 항공기에 레이더 센서와 LiDAR (광 감지 및 거리 측정), 비행시간센서 및 초음파 센서와 같은 고급 기술에 마이크로 및 밀리미터의 전파가 필요함

✓ 고급 탐지 및 충돌 방지 시스템

- 항공기가 통신 할 수 있는 기존 인프라가 확장되고 있으며, 현재 ADS-B (자동 종속 감시-방송)와 같은 시스템이 있음
- 즉각적인 결정을 내리고 승객과 화물의 안전을 보장하기 위해 자율적인 eVTOL 항공기는 훨씬 더 멀리 볼 수 있어야함. 마이크로 또는 밀리미터파 기술을 사용하는 향상된 탐지 및 방지 기술은 (a) 특히 험한 지형 및 안전하지 않은 운영 환경에서 더 먼 거리에 있는 물체를 정확하게 식별 및 측정하고 (b) 악천후 시 안전한 내비게이션을 구축하기 위한 실시간 의사 결정 지원

✓ 강력한 통신 및 항공 교통 관리 시스템

- 항공기 간 원활한 통신을 위해서 기존의 항공우주 관리시스템과 무인항공기 시스템 교통 관리의 효과적인 통합이 필요하므로 운영자는 동시에 비행하는 여러 비행체와 교신할 수 있음
- 발전하는 공역 관리, 항공 항법 서비스 제공 업체는 오랫동안 안전한 항공여행을 감독하는 주요 원천이었지만 VTOL의 대규모 상업 배치를 달성하려면 항공 우주 설계, 동적 지리적 안내를 감독하는 교통 관리 시스템이 필요함
- 악천후 및 바람 회피, 정체 관리, 노선 계획 및 경로 변경, 순차적 배치 및 간격, 비상 관리. 높은 데이터 속도, 더 많은 시스템 용량 및 대규모 장치 연결을 목표로 하는 5G 연결과 같은 고급 통신 기술은 공중에서 비행하는 여러 eVTOL 간의 원활한

통신에 필수적임

✓ 소음 제어

◆ 승객이 에어 택시에 탑승하는 것을 상상할 때, 헬리콥터 스타일의 귀마개를 사용하는 사람은 거의 없지만 현재의 eVTOL 항공기의 소음 수준은 그러한 단계를 필요로 할 수 있음

◆ 비행체의 소음 프로파일을 줄이는 것이 개발 단계에서 업계가 현재 해결해야 할 우선 과제임. eVTOL 항공기 제조업체는 덕트 및 로터의 소음을 다루어야하며, 주로 헬리콥터와 관련된 소음 수준을 줄이기 위해 로터 팁 속도를 줄임

- 한계 극복

• 새로운 모빌리티 업계의 eVTOL 항공기 현실화

✓ 자율비행의 발전을 활용하여 전체 생태계 내에서 협업을 강화하고 기계 학습, 인공 지능 및 고성능 컴퓨팅과 같은 고급 기술에 투자함

• 상업용 및 군사용 헬리콥터 제조업체인 벨은 항공기 엔진 회사인 Safran과 eVTOL 주문형 항공 모빌리티 개념의 하이브리드 전기 추진 시스템 개발에 협력하고 있음. 이 멀티로터 항공기의 추진 시스템은 600kW 이상의 전력을 생산할 수 있음

• 도시의 공유기반 항공 모빌리티를 제공하려면 업계 종사자들은 현장 자율성의 기술 발전을 활용하고, 파트너십을 확장하고, 머신 러닝 기능에 투자함으로써 제조, 운영 및 인증 전반에 걸쳐 통합 프레임 워크를 개발해야함

• 항공 회사는 현재 지상 자율 주행 차량을 위해 개발 중인 일부 기술을 적용할 수 있음

• eVTOL의 성장 잠재력을 실현하기 위해서는 회사, 자동차 및 에너지와 같은 산업, 그리고 다양한 기술 분야의 협업 및 파트너십이 중요할 수 있음

• 연구를 바탕으로 주요 기술 한계 중 일부를 해결하기 위해 아래의 전략을 권장함

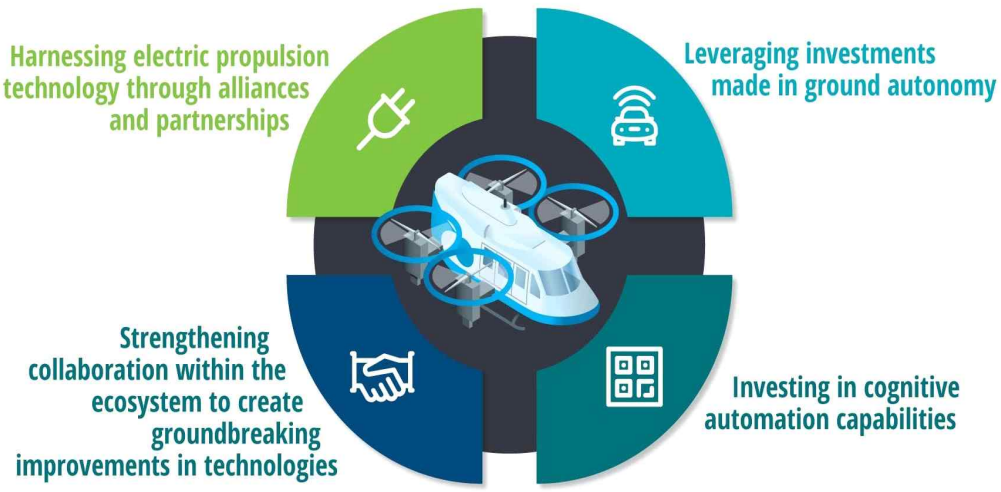


그림 95 eVTOL 항공기와 관련된 기술을 발전시키기 위한 프레임 워크[39]

• 제휴 및 파트너십을 통한 전기 추진 기술 활용

✓ eVTOL의 미래는 효율적이고 고성능의 추진 시스템을 갖추는데 달려 있기 때문에 업계 종사자들은 분산전기추진(DEP) 기술을 활용하는 데 주력해야함

✓ 상업적으로 성공하기 위해 eVTOL에는 가볍고 강력하며 오래 지속되며 싸고 빠른 충전이 가능한 배터리가 필요하며, DEP 기술은 잠재력을 제공함

✓ 항공기 전체에 분산된 여러 개의 소형 전기 모터를 사용하여 기존 헬리콥터가 사용하는

에너지를 크게 줄이면서 사람과 더 많은 화물 적재량을 운반하기에 충분한 에너지를 공급할 수 있음. 그러나 이를 달성하려면 발전 및 연료 전지와 같은 전력 생산 장치와 배터리 및 에너지 저장 장치의 조합인 고급 전원 개발이 필요하기 때문에 전체 산업이 함께 협력해야함

- 지면 자율성에 대한 투자 활용
  - ✓ 업계는 자율 주행 자동차에 대한 투자로 인한 강력한 혜택을 누릴 수 있음
  - ✓ 컴퓨팅 측면에서 반도체 제조업체는 강력한 칩을 제조하여 제조업체가 몇 년 전까지도 예측할 수 없었던 고급 계산을 수행할 수 있도록 함
    - ◆ 레이더 센서에 마이크로파 및 밀리미터파 기술을 적용하면 충돌 감지 및 회피 기능을 향상시키고 안전한 내비게이션 기능을 구축할 수 있음
- 에코 시스템 내에서 협업을 강화하여 기술을 획기적으로 개선함
  - ✓ 완전 전기추진 시스템에 전념하는 VTOL 제조업체는 대학, 연구소 및 배터리 기술 분야의 주요 업체와 협력하여 고전력 및 에너지 효율적인 배터리를 개발하기 위한 파트너십 및 제휴 관계를 형성해야함
  - ✓ 안전한 교통 관리 시스템을 개발하려면 파일럿 프로그램, 규정 및 표준을 개발하고 필요한 하드웨어, 소프트웨어 및 플랫폼을 결정하기 위해 eVTOL 제조업체, UAS 서비스 공급업체, 통신 제공 업체 및 규제 당국 간의 강력한 협력이 필요함
- Uber는 항공 택시 네트워크에 eVTOL을 구축하는 70 개 회사와 협력하고 있으며, Uber Elevate 프로그램 개발을 위해 항공기 제조업체 및 기술 회사, NASA 및 FAA와 협력하고 있음
- 인지 자동화 기능에 투자
  - ✓ 고층 건물 사이에서 자신의 비행체을 조종하는 통근자들의 공상 과학 비전에도 불구하고, 분명한 추세는 자가 조종 비행 차량임
  - ✓ 자율성은 파일럿 비용을 낮추고, 승객이 좌석을 이용할 수 있게 하는 등 경제적 이점을 제공할 뿐만 아니라 보다 광범위한 모빌리티 생태계로의 통합을 잠재적으로 용이하게 함. 그러나 완전한 자율비행을 달성하려면 시간이 걸릴 것으로 예상됨
  - ✓ eVTOL 항공기는 초기 단계에서 조종사를 필요로 할 것이며, 머신 러닝을 사용하여 수천 시간 동안 조종사의 행동과 결과를 분석함으로써 완전한 자율비행을 가속화 할 수 있음
  - ✓ 업계 종사자들은 Deep Learning을 통해 Machine Learning을 활용하여 eVTOL이 비행경로에서 개체를 식별, 레이블 지정 및 Mapping할 수 있을 뿐만 아니라 다른 개체를 구별 할 수 있음
- 향후 10년간 eVTOL 항공기가 현실화되려면 기업들이 필요한 기술을 개발하고 회의적인 소비자들의 신뢰를 얻기 위해 상당한 진전을 이루어야함
- 기존의 항공 제조업체, 신규 시장 진입업체 및 혁신적인 개념을 연구하는 소규모 회사들은 모두 이러한 노력에 기여할 수 있을 것임
- 개발된 항공기를 대중적으로 시연하여 이 차량들이 안전하고, 조용하며, 저렴할 수 있다는 것을 보여줄 수 있는 지점에 도달하기를 열망하고 있음. 그리고 그 시점부터 산업 참여자들은 상용 서비스가 가능한 차량을 출시하기 위해 인증에 힘쓸 수 있음

○ 운항 요구도 분석 및 도출

- 운항 수익모델[11]
  - 수익모델의 조종사, 차량 가격 및 배터리 비용 등 전제조건은 아래 표와 같음

표 24 수익모델 전제조건 표

수용력(Capacity)	• 조종사 포함 4인
하중 계수(Load Factor)	• 유료좌석일 경우 67%
총 중량(Gross Vehicle Weight)	• 4,000lb
배터리(Battery)	• 2,000사이클의 수명, 400Wh/kg 에너지
파워(Power)	• 이착륙 시 최대 1분 500KW 동력
성능(Utilization)	• 매년 2,080시간
전기세(Electricity Cost)	• kWh당 $0.12

- 도심항공 모빌리티(UAM) 수익모델의 필수적 문제는 eVTOL항공기가 상용 헬기의 현재 가격보다 낮은 판매가격에 판매될 수 있느냐 임. eVTOL항공기가 비싸지면 소비자 가치 저하로 시장 규모가 제한되어 생산이 제한됨. 실제 2016년 전세계 비군사용 회전익 항공기 생산대수는 1,050대에 불과함
- 수직 이착륙 시스템과 전기 추진과 관련되는 많은 eVTOL구성 부품들은 추가 비용 불확실성이 존재함. 따라서 초기비용의 경우 1.2백만 달러, 단기간의 경우 60만 달러, 장기간의 경우 20만 달러의 항공기 가격이 매겨질 것이라 예상됨[12]
- 초기와 단기간에서 조종사 가격은 항공기당 1.5명 연간 5만 달러의 조종사 비용이 가정됨. 장기간의 경우 자율비행으로 전환이 되어 대당 6만 달러의 비용이 들것으로 예상됨[12]
- eVTOL항공기의 경우 비행시간당 유지보수 비용이 기존 경 헬리콥터의 비용보다 상대적으로 저렴할 것임. 주기적으로 모든 로터 구성품을 정비함은 물론, 전기 모터는 단 하나의 움직이는 부품(베어링)만 있기 때문에 1만 시간의 창정비간평균시간(MTBO: Mean Time Between Overhaul)을 달성할 수 있음. 유지보수 인건비용은 기존 헬리콥터와 유사하게 일일 육안검사와 100시간 간격 간단한 정비 점검으로 가정함. 유지보수 및 인건비는 기본 eVTOL 직접 운영비의 약 22%를 차지할 것으로 예상됨[12]
- 간접운영비는 신용카드 처리 수수료, 등록 및 허가 수수료, 보험료, 기타 소액 수수료 등 비차량 특정 비용임. 항공업계에서의 간접비용은 상당히 높을 수 있으며 직접운영비용에 50% 추가될 수 있음. 민간 기반 시설이용으로 인해 간접비용은 낮은 것으로 가정

표 25 예측비용

VTOL 예측	조종사 가격	항공기 가격 (4인승, 배터리 제외)	배터리 비용 (140kWh, 2000cycles)
초기비용	$75k/yr = (전문 헬기 조종사 $50k/year) * (항공기당 1.5 조종사)	$1.2M	$56K, $400/kWh 현 고성능 배터리 비용
단기간	$75k/yr = (전문 헬기 조종사 $50k/year) * (항공기당 1.5 조종사)	$600K 헬리콥터 생산 비율 (500/year)	$28K, $200/kWh 미국 에너지부 단기 고성능 배터리 비용
장기간	$60k/vehicle = 자동화 항법장치	$200K 자동화 차량 생산 (5000/year)	$14K, $100/kWh 미국 에너지부 장기 고성능 배터리 비용

함. 간접비용은 많은 불확실성이 존재하므로 이해당사자에 대한 추가 연구가 필요함

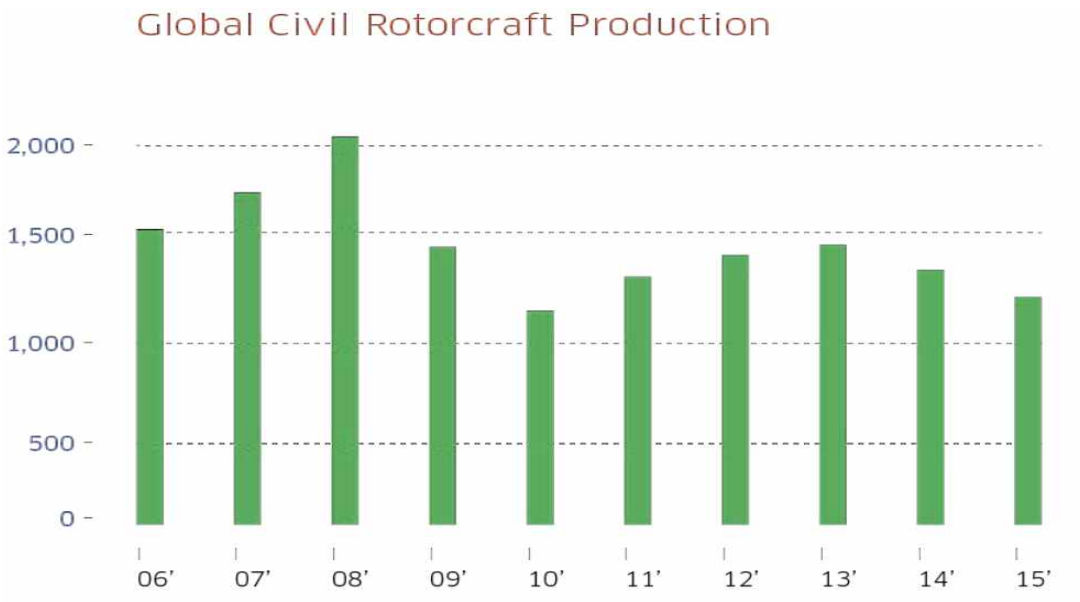


그림 96 세계 민간용 회전익항공기 생산대수[11]

2-1-②. 비행체, 기술개발, 규제 적용, 인프라, 시장 기준 설정

○ 비행체, 기술개발 기준 설정

- https://evtol.news/aircraft 에 아래 그림과 같이 전세계에서 개발 중인 UAM 유형/컨셉을 Vectored Thrust, Lift+Cruise, Wingless (Multicopter) 로 분류하여 상세한 정보를 제공

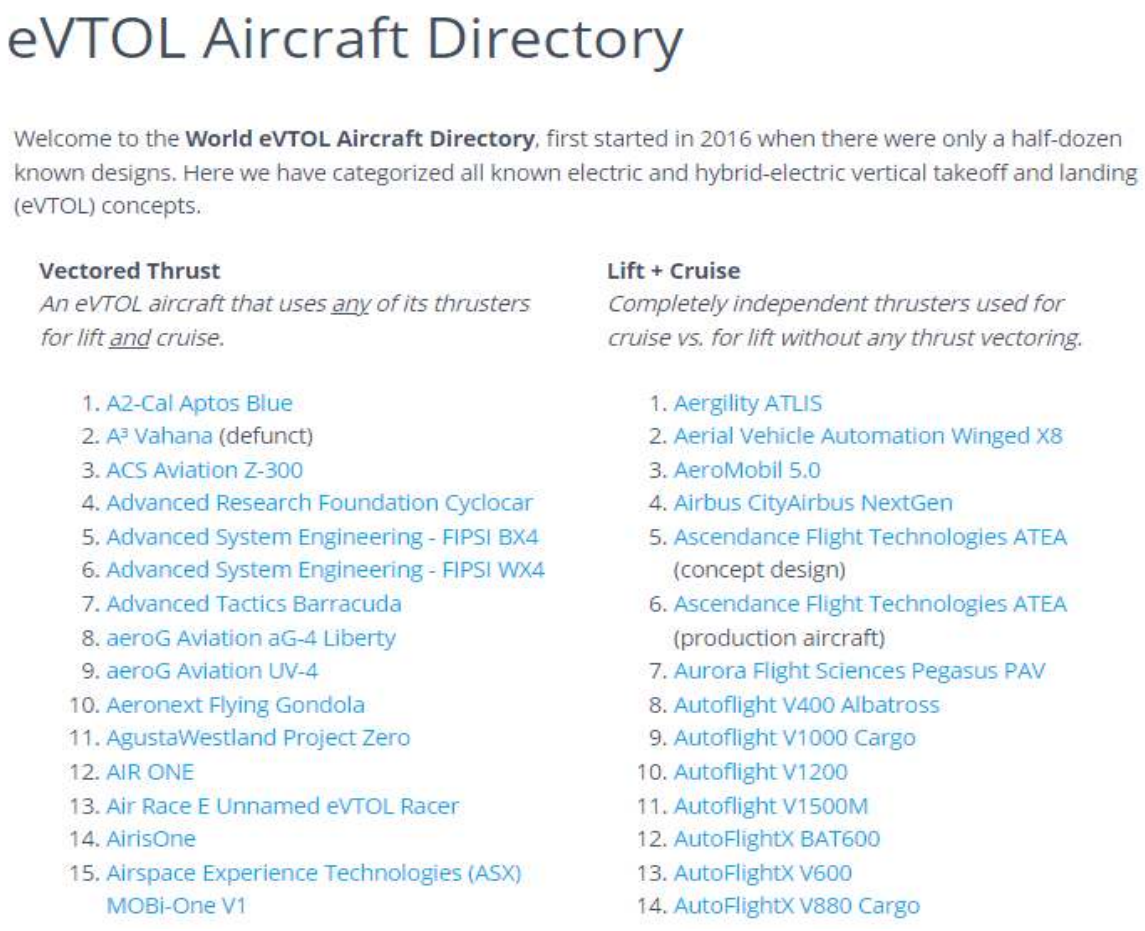


그림 97 eVTOL Aircraft Directory 1

100. KARI Optionally Piloted PAV
101. Kelekona Unnamed eVTOL
102. KineticCo Aerospace and Advanced Technologies
103. Kitty Hawk Heaviside
104. Korea Aerospace Industries Night Intruder
105. Kronstadt Air Taxi
106. Lilium Dragon (defunct)
107. Lilium Eagle (defunct)
108. Lilium Falcon (defunct)
109. Lilium Jet
110. LuftCar
111. Macchina Volontis Flying Car
112. Manta Aircraft ANN1
113. Manta Aircraft ANN2
114. Micor Technologies Advanced Individual VTOL Aircraft (AIVA)
115. Micor Technologies Advanced Multi-passenger VTOL Aircraft (AMVA)
116. Micor Technologies Variable Geometry VTOL aircraft (VAGEV)
117. Moller Skycar M200
118. Moller Skycar M400
119. Moscow Team AI Kamchatka

Wingless (Multicopter)

No thruster for cruise – only for lift.

1. Advanced Tactics AFRL Transformer
2. Advanced Tactics Black Knight Transformer
3. Advanced Tactics Transporter
4. Aerial Vehicle Automation X8
5. Aerodyne Vector
6. Airbus Helicopters CityAirbus
7. AirCar (production model)
8. AirCar (concept design)
9. Airflight
10. Alaka'i Technologies Skai
11. Alauda Airspeeder Mk1
12. Alauda Airspeeder Mk2
13. Alauda Airspeeder Mk3
14. Alauda Airspeeder Mk4
15. Ambular Drone
16. Ambular Pod
17. Ambular 2.0
18. Ambular 3.0
19. Applied VTOL Concepts Epiphany™
FLYING CARpet

그림 98 eVTOL Aircraft Directory 2

- eVTOL 항공기는 크게 멀티콥터형, 틸트날개형, 틸트로터형, 복합형 등으로 구별할 수 있으며 각 항공기 유형별 항속거리, 비행속도, 유상하중, 연료소모율, 가용한 시점 등을 분석하여 도심항공 모빌리티에 적용하기 위한 VTOL/STOL 항공기 유형별 장단점을 아래에 제시함

표 26 복합형(Lift and Cruise) eVTOL 항공기 개요[31]

Vehicle	Technical Specifications		Manufacturer
	Passengers	4	Napoleon Aero
	Range	62 mile	
	MTOW	3300 lbs	
	Cruise speed	150 mph	
	Cost	NA	
	Passengers	2	Aurora
	Range	NA	
	MTOW	1760 lbs	
	Cruise speed	150 mph	
	Cost	NA	
	Passengers	2	Carivator
	Range	NA mile	
	MTOW	880 lbs	
	Cruise speed	150 mph	
	Cost	NA	

	Passengers	2	Skypod
	Range	NA	
	MTOW	1600 lbs	
	Cruise speed	150 mph	
	Cost	NA	

표 27 틸트로터형 eVTOL 항공기 개요[31]

Vehicle	Technical Specifications		Manufacturer
	Passengers	4	Bartini
	Range	93 mile	
	MTOW	2425 lbs	
	Cruise speed	150 mph	
	Cost	$120,000	
	Passengers	2	Joby Aviation
	Range	200 mile	
	MTOW	2000 lbs	
	Cruise speed	150 mph	
	Cost	$200,000	
	Passengers	2	EVA
	Range	156.25 mile	
	MTOW	2000 lbs	
	Cruise speed	150 mph	
	Cost	$297,619	
	Passengers	6	XTI
	Range	1377 mile	
	MTOW	5300 lbs	
	Cruise speed	150 mph	
	Cost	$6.5M	

표 28 틸트덕드팬형 VTOL 항공기 개요[31]

Vehicle	Technical Specifications		Manufacturer
	Passengers	2	Lilium
	Range	186 mile	
	MTOW	1410 lbs	
	Cruise speed	150 mph	
	Cost	NA	
	Passengers	2	Skylys
	Range	93 mile	
	MTOW	2400 lbs	
	Cruise speed	150 mph	
	Cost	NA	

	Passengers	4	Bell Helicopter
	Range	NA	
	MTOW	3200 lbs	
	Cruise speed	150 mph	
	Cost	NA	
	Passengers	0	Aurora
	Range	NA	
	MTOW	NA	
	Cruise speed	150 mph	
	Cost	NA	

표 29 틸트날개형 eVTOL 항공기 개요[31]

Vehicle	Technical Specifications		Manufacturer
	Passengers	4	Vimana
	Range	550 mile	
	MTOW	2300 lbs	
	Cruise speed	150 mph	
	Cost	NA	
	Passengers	2	Air Bus A3
	Range	62 mile	
	MTOW	1600 lbs	
	Cruise speed	150 mph	
	Cost	NA	
	Passengers	4	ASX
	Range	65 mile	
	MTOW	2800 lbs	
	Cruise speed	150 mph	
	Cost	NA	
	Passengers	2	VerdeGo Aero
	Range	40 mile	
	MTOW	NA	
	Cruise speed	150 mph	
	Cost	NA	

표 30 복합형 및 일반형 헬리콥터 개요[31]

Vehicle	Technical Specifications		Manufacturer
	Passengers	2	Robinson
	Range	287.5 mile	
	MTOW	1370 lbs	
	Cruise speed	100 mph	
	Cost	$300,000	

	Passengers	4	Robinson
	Range	343.75 mile	
	MTOW	2500 lbs	
	Cruise speed	100 mph	
	Cost	$450,000	
	Passengers	6	Carter
	Range	690 mile	
	MTOW	2500 lbs	
	Cruise speed	100 mph	
	Cost	NA	

- 전세계 70개 이상의 제조업체(에어버스, 벨, 보잉, 엠브리어, 롤스로이스, 도요타, 볼보 등)가 eVTOL 개발에 관여하고 있음. 2018년 9월, 전 세계 투자 규모는 10억 달러를 넘어섰으며, The Electric VTOL NewsTM에 의하면 2011년부터 4개의 기본 구성을 기본으로 한 140여 개의 eVTOL 프로젝트가 발표되었음. UAM (Urban Air Mobility)이 성공하기 위한 대두된 3가지 문제는 규제, 소음, 대중 수용성임
- 여론 조사에 따르면, 일반 대중은 신생 기업보다 잘 알려진 제조업체의 eVTOL 제품을 선호하는 경향이 있음. 따라서 항공, 자동차 산업 대기업들의 제품을 면밀히 관찰할 필요가 있음

• **Airbus:** A³ Vahana and CityAirbus

✓ 2015년에 에어버스는 상업용 eVTOL시장에 진출할 계획을 발표한 항공 회사들 중 최초였음. "A-큐브 바하나"는 실리콘 밸리의 에어버스 자회사가 다루고 있는 틸트윙(즉, 과속 추진) 항공기 프로젝트임. 반면에, 시티에어버스는 에어버스 헬리콥터들에 의해 운영되는 네 명의 승객, 즉 날개가 없는 멀티콥터 프로그램임



그림 99 에어버스 Vahana



그림 100 에어버스 CityAirbus

• **Bell** : Nexus and APT

✓ 넥서스는 2017년 우버 승강장 정상회의에서 발표된 6인승 전용 추력기임. 반면 APT(Autonomous Pod Transport)는 20~32kg의 유상하중 테일-시터(payload tail-sit-sitter)로 벡터추진 비행체로 분류됨



그림 101 벨 Nexus



그림 102 벨 APT

- **Boeing/ Aurora**: PAV and CAV
  - ✓ Boeing사가 인수한 Aurora Flight Sciences와 함께 개발한 여객기로 2019년 1월에 첫 비행을 한 2인승 리프트+푸쉬 디자인임. 또한 Boing NeXt 프로젝트의 일부인 CAV(Cargo Air Vehicle)는 225kg의 유상하중으로 날개 없는 멀티콥터임



그림 103 보잉/오로라 PAV



그림 104 보잉/오로라 CAV

- **Embrarer**: DreamMaker
  - ✓ 2017년 Uber Elevate 회의에서 발표된 드림메이커로 4명의 승객이 이용 가능한 리프트와 푸쉬 로터가 결합된 항공기임



그림 105 엠브레어 DreamMaker



그림 106 롤스로이스 EVTOL

- **Rolls-Royce**: EVTOL
  - ✓ 2018년 판버러 에어쇼에서 롤스로이스가 발표한 EVTOL항공기임. 4-5명의 승객이 이용 가능한 하이브리드 틸트윙(vectored thrust) 항공기임
- **Lockheed Martin/ Sikorsky**: VERT and ARES
  - ✓ 록히드 마틴이 인수한 시코스키는 군사용과 상업용 VTOL 개념 모두 연구하고 있음. 록히드 마틴은 AVX, 피에세키와 함께 군사용으로 사용할 수 있는 추력 구성 개발에 몰두하고 있으며, 시코스키는 VERT 프로젝트를 진행하고 있음
- **Volvo/ Lotus**: Terrafugia TF-2
  - ✓ TF-2는 항공 비행체라기 보다는 일종의 운송 시스템임. 항공기의 비행 구성요소는 리프트와 푸쉬 타입이 결합된 항공기임



그림 107 시코스키사의 VERT



그림 108 볼보/테라퓨지아의 TF-2

- **Toyota**: Cartivator SkyDrive and Joby S4 (co-investor)

✓ SkyDrive는 1인승 날개가 없는 멀티콥터임. 도요타는 자비 항공의 S4프로그램에 투자를 하고 있으며 S4는 4인승 항공기임

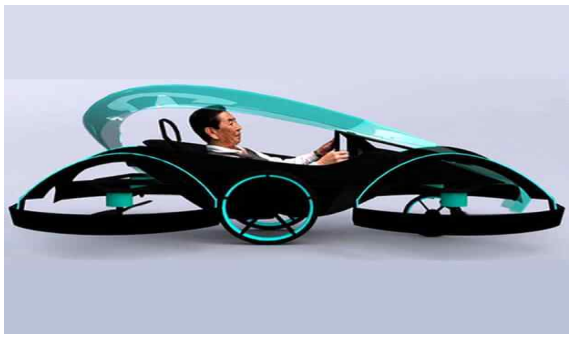


그림 109 Toyota사의 SkyDrive



그림 110 Joby사의 S4

- **현대자동차**: SA-1

✓ 현대자동차는 미국의 우버사와 전략적 파트너쉽을 체결함

✓ 5인승 eVTOL PAV인 S-A1을 2020년 1월에 열린 CES 2020에서 선보임

✓ 2028년 해외 및 국내에서 상용화를 목표로 개발을 진행

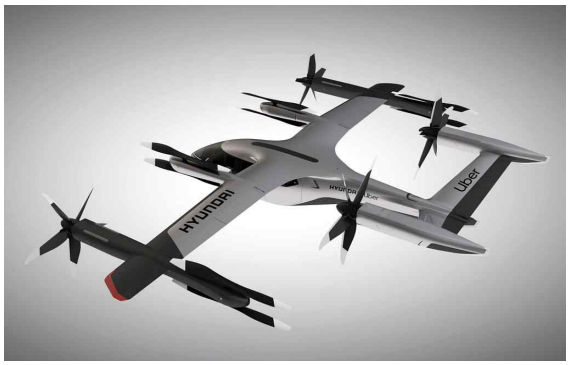


그림 111 현대자동차 S-A1



그림 112 현대자동차 S-A1

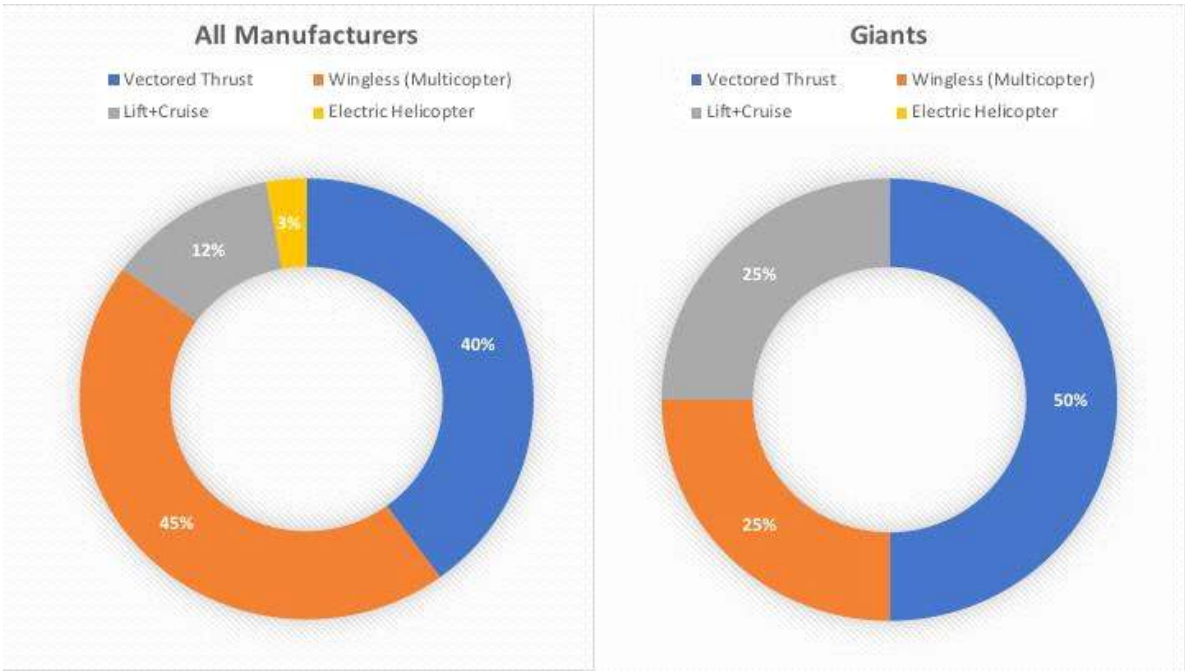


그림 113 항공기 제조사와 대중들의 선호 항공기 차이

- 위의 제시된 항공기중 50%는 벡터 추력 방식이고, 25%는 리프트와 푸쉬 타입이 결합된 방식임. 대기업들의 제시한 항공기 형태는 대중이 선호하는 형태와 맞지 않음

- **날개 없는 멀티콥터 디자인**은 매우 인기 있고 "드론 혁명"을 가능하게 만들었지만, 느린 속도가 심각한 문제임. 상용 eVTOL의 경우, 비행체의 경제성은 주어진 시간에 가능한 한 많은

임무를 수행하는 것임. 더욱이, 보호되지 않은 대형 프로펠러는 승객과 승무원 모두에게 중요한 안전 우려사항임(예: EHang 184/ 216)

- **리프트+푸쉬 설계**의 단순성과 중량 장점에도 불구하고(전체의 12%, 항공우주 및 자동차 업계의 25% 선호) 보호되지 않은(즉, 미납) 수평 프로펠러는, 지면에 매우 가깝게 동작하는(일반적으로 소형 차량의 크기 제한 때문에)멀티콥터와 마찬가지로 안전 위험요소를 갖고 있음. 따라서 지면에 가까운 보호되지 않은 로터를 활용하는 설계는 적합하지 않음.(예: 보잉/오로라 PAV)
- **벡터 추력 설계**(전체 커뮤니티의 40%, 항공우주 및 자동차 대기업의 50%)는 다기능성과 속도 사이에서 가장 이상적인 방식임. 그러나 보호되지 않은 프로펠러를 이용할 경우(틸트윙은 대부분), 리프트+푸쉬 디자인의 단점과 동일함(예: 에어버스 A3 바하나). 반면, 로터와 관련된 위험을 제거하기 위해 사용되는 덕트를 사용하면 순항 시 약간의 추가 항력이 발생함(예: 벨 넥서스)
- 최적의 설계는 소형 모터와 프로펠러 유닛을 통한 분산전기추진(DEP: Distributed Electric Propulsion) 개념을 채용하는 설계가 최적의 솔루션에 가까울 것임. UAM에 사용하는 eVTOL도 DEP 개념을 사용하는 틸트날개형이 가장 이상적임. 이러한 구성은 항력을 줄이기 위해 다른 구성요소(예: 날개)에서 순항 중 불필요한 프로펠러를 접는 방법을 사용함. Joby S4가 OPPAV와 가장 유사한 방식을 사용함. 또한 추진 시스템의 다량의 중복성은 안전성을 제공함. Aurora Flight Science의 VTOL X-플레인 프로그램 XV-24A 라이트닝스트라이크와 릴리움 전기 제트 모두 이 개념의 실현 가능성을 성공적으로 입증한 최고의 예들임



그림 114 Aurora사의 LightningStrike

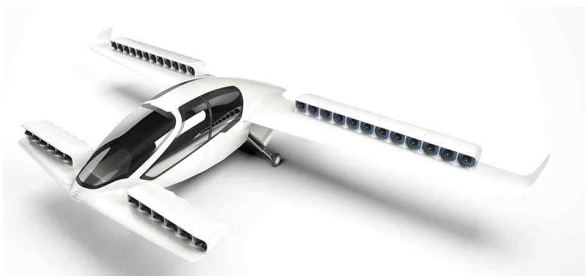


그림 115 Lilium Jet

- 라이트닝스트라이크 프로그램은 300-400kt(555-740km/h)의 최고 비행 속도를 낼 수 있는 날개 모터 18개와 카나드 모터 6개를 탑재한 1만2000lb(5.4t)의 수직이착륙기를 개발하는 것을 목표로 하였음. 2016년 3월 325파운드(147kg)급 20% 규모의 시범기가 비행 시험을 하였음. 2018년 4월, 프로그램의 주요 목표를 달성하였지만 , DARPA는 이 계획을 취소하였음
- 릴리움의 2인승 시제품인 '이글'은 2017년 4월 무인 시험 비행을 완료하였음. 이글은 각 날개 윗면에 12개의 팬, 6개의 팬이 커나드 양쪽에 설계되었음

표 31 VTOL/STOL 항공기 유형별 장단점 비교표

항공기 시스템 유형	장점	단점
추력편향 (Vectored thrust)	• 단순함 • 양력과 순항 시 같은 엔진 사용 • 추력방향노즐을 비행과 STOL에 사용가능	• 고압/고온에 취약 • VTOL을 위한 엔진 사이즈 증가
틸트로터(Tilt rotor)	• 착륙 시 낮은 에너지 소모 • STOL 운용 가능	• 크로스축 필요 • 헬리콥터와 항공기의 조종 장치 복합되어 있음 • 큰 직경의 블레이드 필요 • VTOL 운용 중 날개가 프로펠러에 90도 될 수 있음 • CTOL 운용 불가

틸트윙(Tilt wing)	• 날개와 함께 회전하는 엔진으로 받음각 조절 가능 • 날개와 추력이 결합되어 빠른 이착륙을 위한 양력제공 • CTOL로 운용 가능	• 크로스축 필요 • 국소 유동장에 따라 틸트 꼬리날개 필요 • 터보팬 틸트윙은 아직 시연되지 않음
테일시터 (Tail Sitters)		• 높은 추력대중량비를 위해 큰 엔진 필요 • 이착륙 시 파일럿의 시야확보 어려움 • 제트기의 경우 고압/고온 배기
Fan-in-wing	• 추력편향을 가진 시스템보다 온도가 더 낮은 배기가스	• 팁 터빈 및 덕트 흐름 설계 중요 • VTOL 추진 구성요소는 대부분의 임무에 기여하지 않음 • STOL 운용 불가
양력+양력/순항 엔진	• 높은 추력대중량비를 가진 엔진 사용 가능 • VTOL을 위해 순항엔진이 커질필요 없음	• VTOL 추진 구성요소는 대부분의 임무에 기여하지 않음 • STOL 운용 불가
추진 보조장치 (시위 방향)	• 테이퍼비가 없고 90도 코너가 효율적 • VTOL을 위한 엔진 사이즈가 엄격하지 않음 • 기류속 VTOL 성능에 도움을 줌 • 세심한 설계 시 STOL 운용가능	• 복잡한 덕트 • 충분한 생산 허용오차에 대한 의문점 • 높은 압력비일 경우 코어유동에 대해 고온금속 필요 • 엔진이 사용됨 • 다른 시스템이나 연료에 사용할 수 없는 날개공간
추진보조장치 (스팬 방향)	• 기류속 VTOL과 STOL의 효율을 감소시킴 • 항공기 몰드 라인에 맞춰 VTOL 시스템 적용 가능 • 배기량 감소	• 추진보조장치 베이의 테이버와 후퇴각은 효율을 감소 • 모든 비행 단계에서 광범위한 덕트 역할 수행 • 광범위한 덕트 역할 인한 작동상의 위험이나 위협
틸트팬(Tilt-fan)	• 배기량 감소 • pointable 동체 사용 시 단일 팬 설치 가능	• 다중 팬 설치에 필요한 크로스 축

- eVTOL 항공기는 헬리콥터와 비교하여 소음이 1/4이고 2배 더 안전하며 비용은 1/10로 추정됨

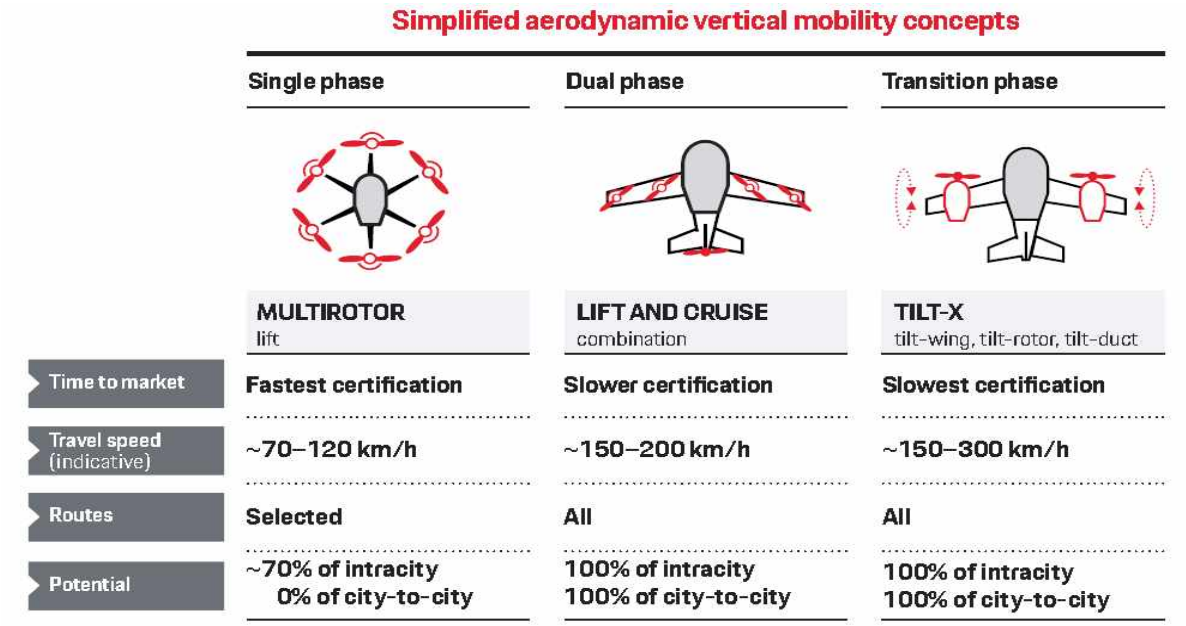


그림 116 3가지 형태의 eVTOL 공력특성[12]

○ 규제 적용 기준 설정

- UAM에 사용할 eVTOL 항공기도 기존의 미국 FAA와 유럽의 EASA의 두 세계적인 인증기관의 규제하에 남아있을 것으로 예상됨. 따라서 두 기관의 인증규정 등 법적 요건을 보면 eVTOL의 개발 인증을 파악할 수 있음. 소형 항공기에 대한 유럽 표준들로 로터크래프트나 경 스포츠 비행기(CS-23, CS-27 또는 CS-LSA)는 시험용 eVTOL을 인증하는 데 사용될 것으로 예상됨. 동등한 표준은 Part21J&G, 145, M, Part OPS 등이 있지만 상용 eVTOL 인증에는 직접적으로 적용될 수 없음[12]
- 현재 사용되는 항공 기술기준만이 아니라 검사 및 화물용 eVTOL에 대한 기존 인증기준이 여객용 eVTOL을 인증하는 근거가 될 수 있기 때문에 이러한 서로 다른 인증 기준이 eVTOL에 대한 다양한 인증 표준을 개발하고 인증하는 출발점이 될 것임. 따라서 당국은 새로운 인증 표준을 개발하고 이를 시험할 수 있는 영역을 제공하기 위한 준비가 되어있어야 함
- eVTOL항공기의 인증 조건들은 다양한 기상 조건 처리방안, 타 항공기 감지/회피, 중앙집중식 또는 분산형 통신 채널 사용 여부, 상업용 항공기와 eVTOL을 수용할 영공 분배 등을 고려해야 하고 화물용 eVTOL의 수가 수백만 대에 이를 것이기 때문에 전통적인 항공기 안전검사와 유사할 것임. 오늘날, 드론 충돌에 대한 기사가 수시로 보도 되듯이 항공기 안전은 중요한 주제임. 이러한 인증 기준은 범죄나 테러 목적으로 시스템의 안전 위험과 잠재적인 오용에 대한 고려가 동반되어야함

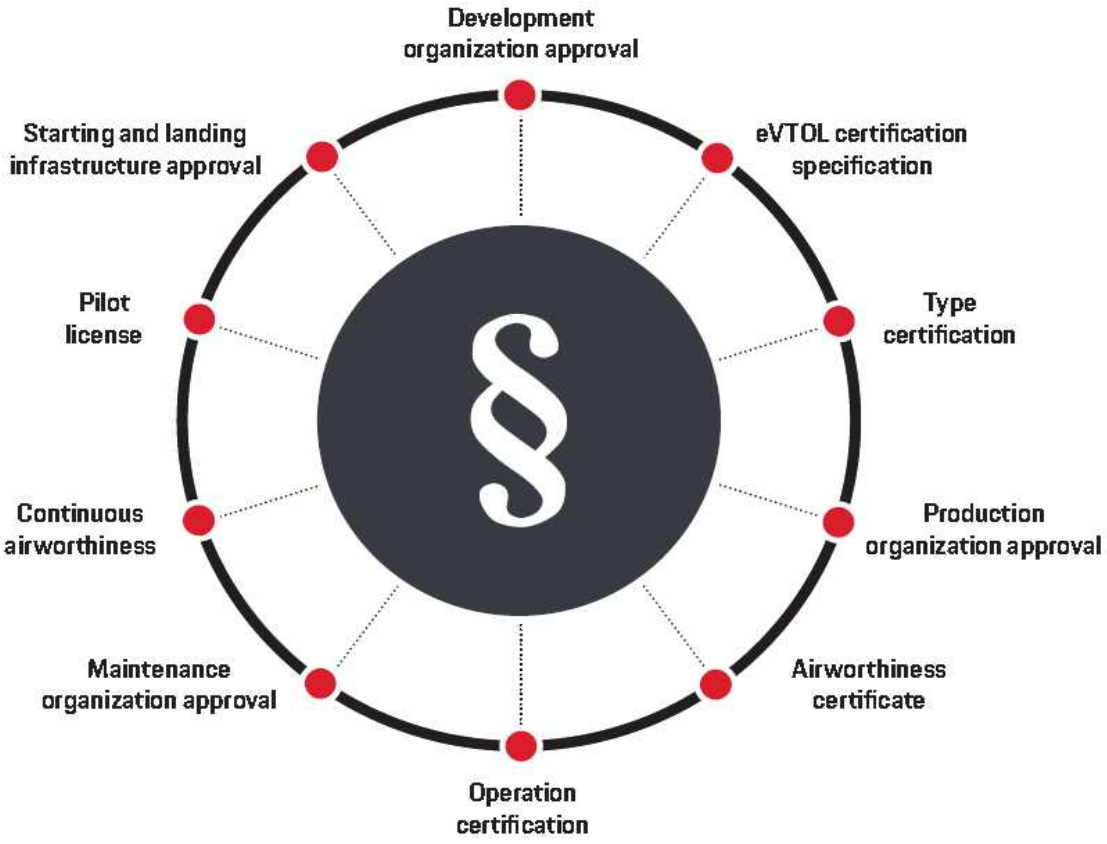


그림 117 UAM에 사용할 eVTOL 비행체 인증 시 고려사항[12]

○ 인프라 기준 설정

- 기존에 사용가능한 공유기반 시설을 확인
  - 서울과 수도권 내에 많은 수의 헬기장이 있지만 대부분 부동산 소유자가 점유하고, 사용되지 않는 곳이 대다수임. 이들 중, 다수는 도시 지역에 빠르게 접근할 수 있는 도심지에 위치해 있음
  - 이와 같이 기존에 사용 가능한 도심 내의 헬기장과 고층 빌딩의 헬리패드에 대한 규정

및 안전관리체계가 구축된다면 새로운 도심 공유기반 시설을 설치하는 비용을 감소시킬 것임

- 또한, 주차장의 옥상을 vertiport로 용도 변경하여 eVTOL을 주차 및 보관하는 곳으로 사용하는 방안도 제안됨

- 고속도로 IC의 클로버에 수직이착륙장 설치 방안

- NASA에서는 고속도로의 Inter change인 cloverleaf를 수직이착륙장으로 사용하는 방안을 선보임. 직경이 200 미터인 공공 안전 구역을 설정하며, 지상 교통에 대한 주의를 분산시키기 위해 고가도로와 같은 높이에 있도록 플랫폼을 제안함
- 이러한 유형의 수직이착륙장은 현재 공유기반형 모빌리티 상용화에 매우 큰 효과를 가지도록 기획되었으며, eVTOL이나 지상 자동차의 주차나 보관을 하는 곳이 아님
- NASA에서 제안한 고속도로 클로버리프의 경우 고가도로와 같은 높이에 있도록 상향식 플랫폼을 제안했으며, 하단 영역은 승객들이 대기하거나 픽업할 수 있는 추가적인 기능을 위해 사용되도록 함

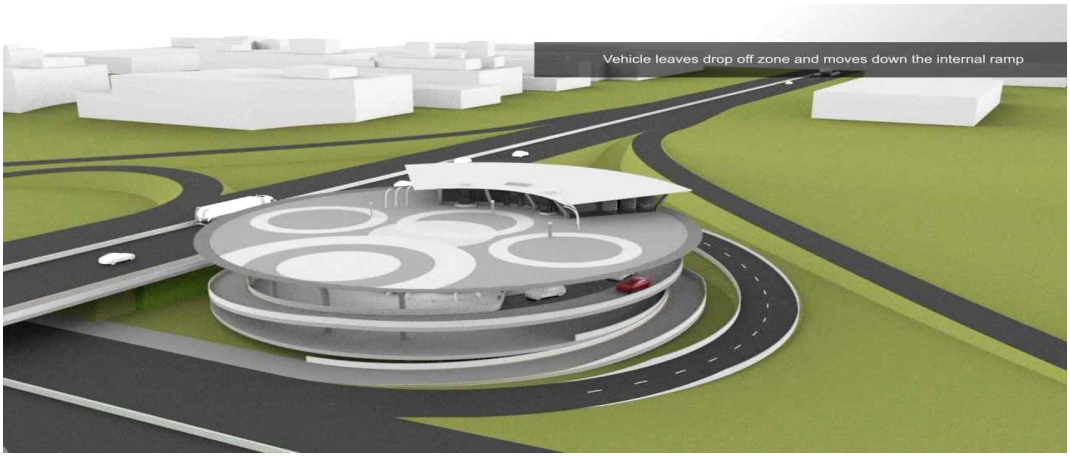


그림 118 Uber Elevate cloverleaf vertiport[33]

- eVTOL 허브 및 스테이션 설계

- eVTOL 허브 및 스테이션은 현지 규정과 공간 제약에 따라 민간인 거주지에 이착륙할 수 있는 곳이며, 현지 고객들이 접근하고 출발할 수 있는 경로를 조사하여 선정되어야 함
- 또한, VTOL 출발 및 도착 경로에서 방해받지 않는 활공 경사에 대한 기준이 충족 되어야 하며, 모든 면이 높은 건물로 둘러싸인 위치의 사용은 금지되어야 함

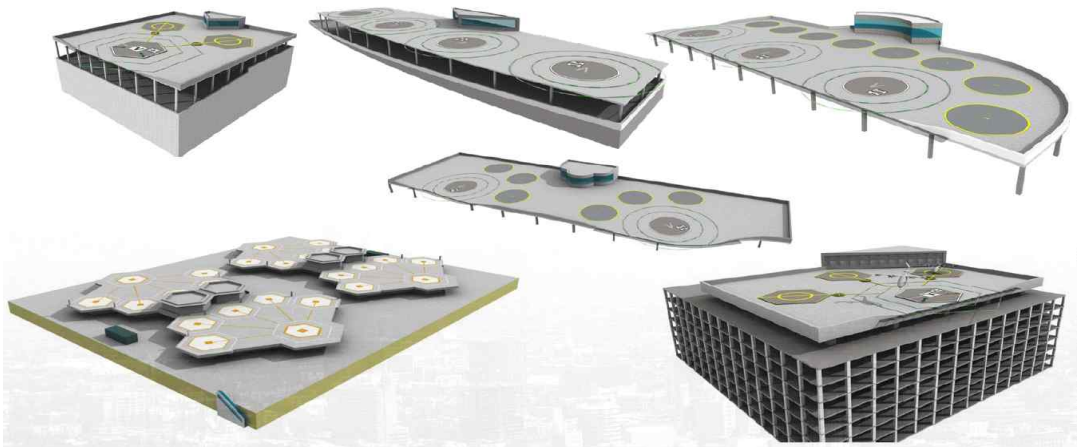


그림 119 Uber Elevate 수직이착륙장 개념설계[40]

✓ 수직이착륙장의 패드는 FAA에 의해 Touchdown and Lift Off (TLOF)지역으로 분류되며, 또 다른 큰 영역은 Final Approach and Takeoff (FATO) 영역으로 분류됨. FATO는 지름

이 약 100인치이며, 비행 안전을 보장하기 위해 구역에 구조물, 조명 또는 기타 장애물이 없어야 한다고 규정함

- Touchdown and Lift OFF (TLOF) : 직경 = 45′ 45′
- Final Approach and Takeoff (FATO) : 직경 = 70′ ×70′
- Safety Area : 직경 = 100′ ×100′

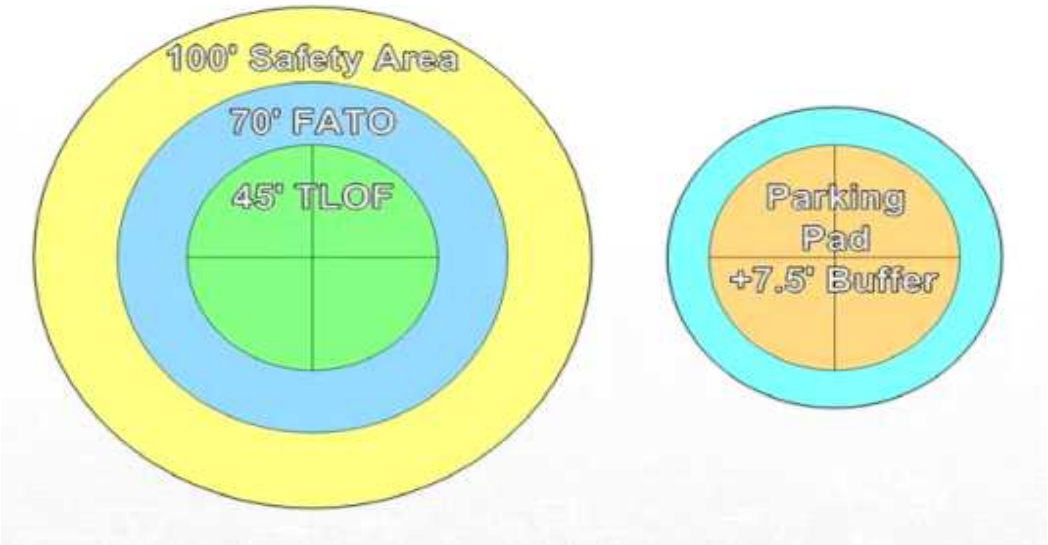


그림 120 Vertiport 개요[40]

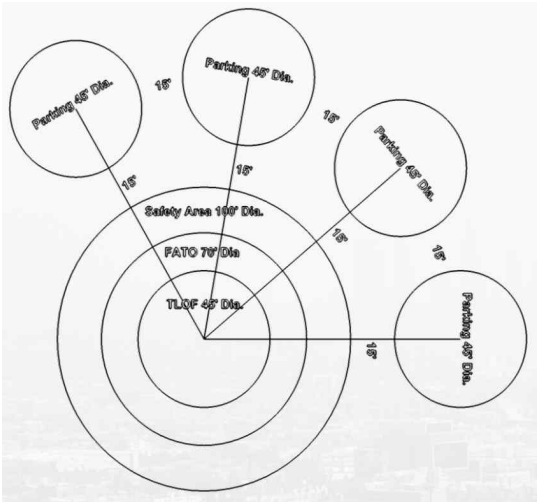


그림 121 헬리패드 개념도[40]



그림 122 포틀랜드 헬리패드[40]

○ 시장 기준 설정

- 도심항공 모빌리티는 도시 간 여행을 가능하게 하고 이동성을 확장시키고 통합함으로써 기존 자원을 더욱 효율적으로 사용할 수 있도록 해주기 때문에 이러한 변화는 관련된 모든 사람들에게 큰 변화를 가져올 것임
- 도심항공 모빌리티가 확산되기 위해서는 공공 기관과 민간 단체들 간의 파트너십을 구축해야 함. 더 많은 인구를 위한 사회적 이익을 증명해야 하고, 도시와 국회의원, 하드웨어와 서비스업 종사자, 투자자들 등 모든 부분에서 협력적이고 많은 노력이 필요함
- 도심항공 모빌리티는 처음에는 사업가나 부유층을 위한 Point to point 교통수단을 제공할 것임. 그러나 머지않아 여객용 수직 모빌리티가 상용화 될 것임. 따라서 수직 모빌리티가 상업적으로 성공하고, 교통수단으로서 받아들여지기 위해서는 안전이 가장 중요한 요소임. eVTOL 항공기가 모든 사람이 받아들일 수 있는 가격과 소음 수준에서 접근할 수 있도록 보장

하는 규칙과 규정이 조정되어야함

- 도심항공 모빌리티를 위한 Vertiport가 구축되는 즉시 Vertiport는 교통의 중심 역할을 하는 대중교통에 적용이 되어야함. 따라서 도시계획자, 시의원, 규제당국은 각 도시의 대중교통에 맞추어 eVTOL 기반 구조를 적용해야할 필요성이 있음. Vertiport는 많은 수의 Vertiport와 연결이 가능하기 때문에 도시는 적은 Vertiport로 높은 교통유연성을 얻을 수 있음. 예를 들어 10개의 Vertiport네트워크는 45개의 연결 가능성을 갖고 있음



그림 123 비행체, 기술개발, 규제 적용, 인프라, 시장 기준 설정

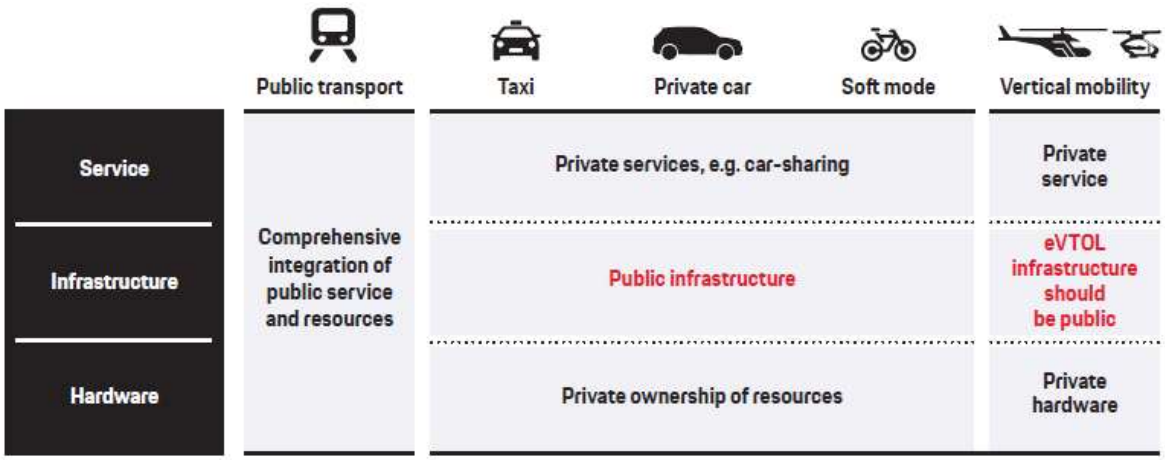


그림 124 도심항공 모빌리티 네트워크[12]



그림 125 대중 교통과 연결된 Vertiport[41]

- 도심항공 모빌리티는 다른 교통수단보다 자본 투자가 적다는 장점이 있음. 35㎞ 구간의 고속도로나 전철 또는 지하철 노선의 건설비용은 선로가 지상에 있는지, 고가도로 인지, 터널 안에 있는지에 따라 수십억원 차이가날 수 있음. 그에 비해 수직 모빌리티는 Vertiport나 충전소 등 몇 가지 시설만 있으면 운용이 가능함

- 도심항공 모빌리티를 안전하고 확실하게 관리하기 위한 조치도 요구됨. 통합형 ATM/UTM 체계는 사이버 보안을 포함해야 함
- eVTOL 비행체 개발사와 도심항공 모빌리티(UAM) 서비스 공급자는 기존 항공기 제조사, 자동차 OEM, 신생기업, 인텔 등 기술기업과 우버와 같은 모빌리티 서비스 제공업체로 구성됨. eVTOL eVTOL 항공기 그 자체와, 충전장비, 배터리 및 DEP 등 하드웨어는 전반적인 부분에 영향을 미치기 때문에 핵심 요소로서 기반시설, 법률, 인증에 중요한 영향을 미침
- 도심항공 모빌리티는 이제 막 형성되기 시작하였고 상용화가 완전히 이루어질 때까지 2025년에서 2035년 사이에 주요한 변곡점을 겪을 것으로 예상됨. 이 분야에서 두각을 나타내기 위해서는 기술개발, 인증, 규제에서부터 상업적 생존 가능성, 공공 수용에 이르기까지 eVTOL 시장과 관련된 다양한 위험인자를 고려할 필요가 있음

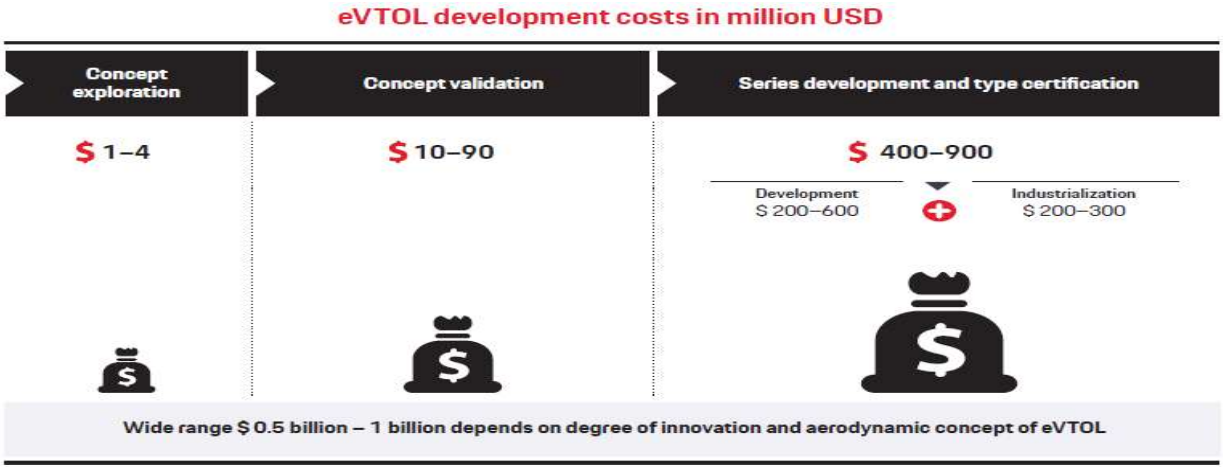


그림 126 eVTOL 개발 비용[12]

- Porsche Consulting이 발표한 The Future of Vertical Mobility 보고서에 따르면 eVTOL의 전 세계 시장 규모는 2035년 320억 달러에 달할 것으로 전망됨. 전세계 주요 도시에 eVTOL 시장이 형성되면서 2035년 총 23,000대의 eVTOL이 운행될 것으로 예측됨

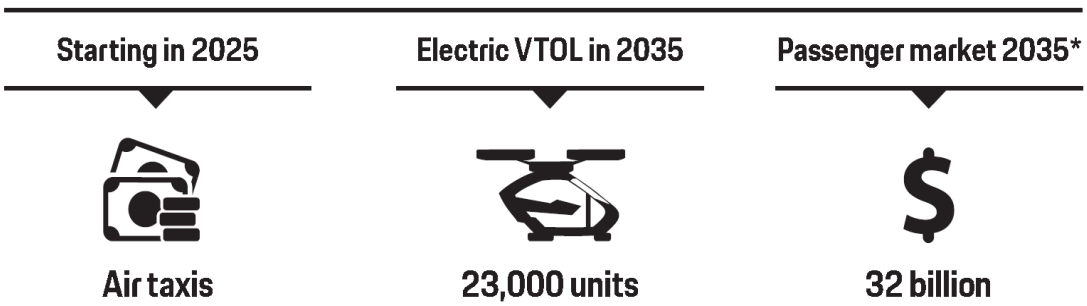


그림 127 2035년 eVTOL PAV 시장[12]

- 삼정KPMG, 2050년 '하늘 나는 자동차' 4.5억 명 이용 도심항공모빌리티(Urban Air Mobility · UAM)의 시장규모가 오는 2040년 1조5,000억 달러(약 1,830조 원)에 달할 것으로 전망되는 가운데 향후 항공택시의 성장가능성이 높은 도시로 서울과 도쿄, 베이징, 상하이, 델리가 선정됨
- 삼정KPMG가 2020년 4월 13일 발간한 보고서 '하늘 위에 펼쳐지는 모빌리티 혁명, 도심 항공 모빌리티'에 따르면 도심항공모빌리티 서비스가 2030년 도심과 공항 간 셔틀을 시작으로 2040년 도심 내 항공택시, 2050년 광역도시 간 이동으로 확장되며, 2050년엔 전 세계 이용객수가 4억4,500만 명에 이를 것으로 전망함. '하늘을 나는 자동차'로 불리는 UAM은 저고도의 공중을 활용한 도시의 항공 운송 생태계를 의미하며, 도시의 교통체증과 환경문제를 해결하는 혁신 신사업으로 부상하고 있음. KPMG 글로벌은 인구밀집과 경제성장, 도로

혼잡도를 고려할 때 2050년까지 UAM 서비스의 성장가능성이 가장 높은 도시로 서울과 도쿄, 베이징, 상하이, 델리 등 아시아의 메가시티를 꼽음. 보고서는 인구 1,000만 명 이상이 거주하는 메가 시티가 2030년 43개에 이를 것으로 예상되는 가운데 자동차로 인한 교통 체증과 환경오염으로 사회적 · 경제적 비용이 지속적으로 발생하고 있다고 지적함

- 삼정KPMG는 "서울 등 대도시에서는 시장 지배력을 높이기 위한 전 세계 기업들의 경쟁이 치열할 것으로 전망된다"며, "지금부터 UAM 관련 신산업에 대한 세부적인 마스터플랜을 수립하고, 핵심역량을 확보하는 등 다각적인 검토가 필요하다"고 조언함. UAM 생태계의 이동수단인 개인용 비행체(PAV)는 대부분 배터리를 통해 전기동력을 얻는 수직이착륙(eVTOL) 방식이다. 보고서에 따르면 2019년 12월 기준으로 전 세계 114개 업체에서 133개의 eVTOL 모델을 개발 중이고, 이 중 35개 모델은 이미 시험비행 단계에 접어든 것으로 파악됨. 보잉, 에어버스, 엠브라에르 등과 같은 글로벌 항공기 주문자위탁생산(OEM) 기업 뿐만 아니라 최근에는 현대자동차, 아우디, 토요타 등 글로벌 완성차 OEM도 UAM 사업에 뛰어들고 있음. 보고서는 UAM 생태계가 정착되기 위해선 기술의 개선과 융합, 제도와 법률의 정립, 새로운 인프라 구축, 그리고 사회적 수용성 증대가 전제되어야 한다고 설명함. 또 기업들은 배터리를 포함한 복합소재 산업뿐만 아니라, IT · 소프트웨어, 건설, 인프라에 이르기까지 밸류체인 분석이 필요하며, 서로 다른 경쟁우위를 가진 기업과 도시, 정부기관들 간의 전략적 파트너십이 필요하다고 제언함. 마지막으로, UAM 생태계 조성 단계에서부터 도시 데이터 활용 등 스마트시티와 연계해 비즈니스를 설계해야 한다고 제시함
- 모건스탠리는 도심항공 시장이 2030년 3321억달러(약 385조원), 2040년 1조4739억달러(약 1709조원) 규모로 성장할 것으로 예상함. 현대자동차의 도심항공 사업을 총괄하는 신재원 부사장은 자율주행 및 배터리 기술의 발전 속도와 관련 제도 정비 시점 등을 감안하면 2035년께 사업 수요가 폭발할 것으로 예상함

- 도심항공 모빌리티의 중점시장은 아래 그림과 설명된 것과 같은 기준에 의해 선정됨

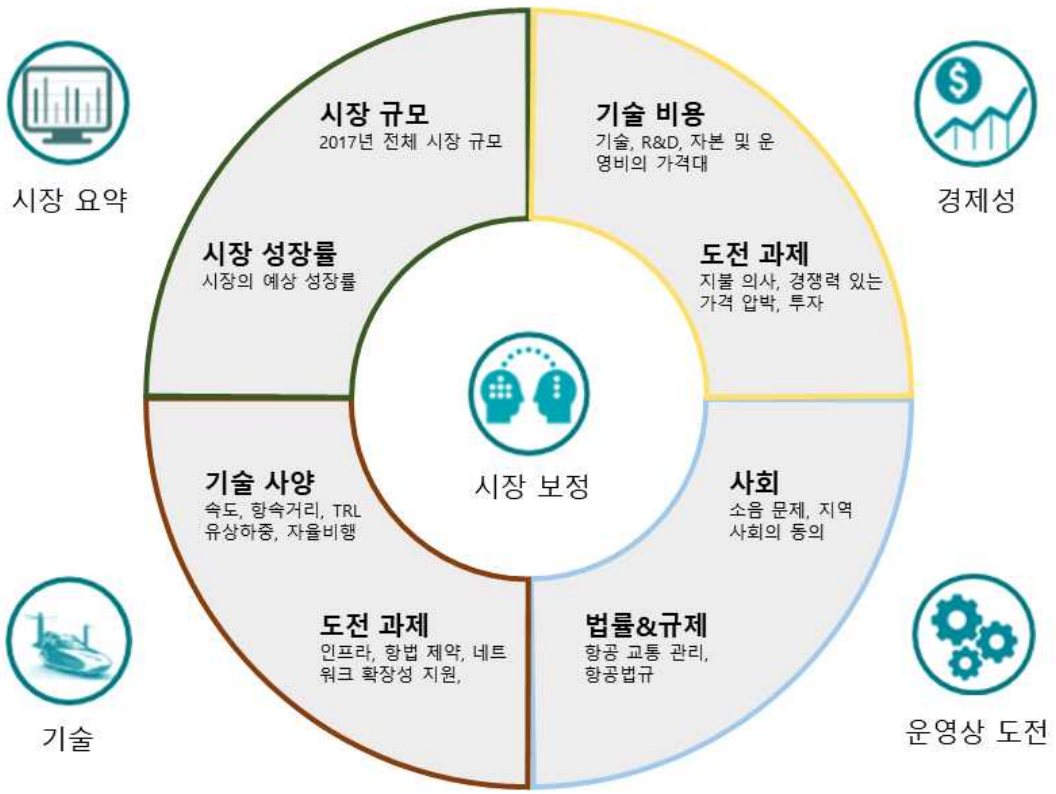


그림 128 시장 선택 기준[31]

- 중점시장은 아래 테이블처럼 공항 셔틀, 에어 택시, 에어 엠뷸런스임

표 32 집중할 UAM 시장(Focus Markets)

시장	정의	선정 이유
공항 셔틀	공항으로 또는 공항으로부터 또는 공항 간에 승객을 운송하는 초기 시장 이 시장은 항공사의 고부가가치 승객들에게 프리미엄 서비스로 제공될 수 있고, 향후 여행객들을 위한 주 교통수단으로 성장할 수 있을 것임. 이 시장은 결국 공격적인 에어 택시 시장으로 성장할 수 있음	이 시장은 다음과 같은 이유로 초기 적용 시장으로 선정됨. • 운영 효율성: 수요를 비행의 도착지에 집중시키면 공급/수요 일치의 복잡성을 줄이고 운영 효율성을 높일 수 있음. • 인프라: 이륙/착륙지에 대한 기초적인 인프라가 최소 비행의 한 지점 이상에 존재함 • 조력자: 일부 대형 항공사들은 공항을 오가는 효율적인 운행 수단을 만들어 고부가가치 고객에게 프리미엄 서비스를 차별화하는 방법을 찾고 있을 수도 있음
에어 택시	두 지점 간의 승객 수송을 제공할 규모 있는 UAM 시장으로, 정기적인 일정이나 노선으로 운영되지 않음. 에어 택시는 도시 전역에서 운행할 수 있으며 다양한 교통 서비스를 제공할 수 있음	이 시장은 다음과 같은 이유로 선정됨 • 대형 시장: 서비스 대상자의 규모와 관련된 장벽을 극복할 수 있는 규모 있는 UAM 시장임. 이 시장은 지상 서비스와 유사하지만 교통망과 시간 절약에 추가적인 탄력성을 제공할 수 있음 참고: 이 시장은 비행 규모와 서비스 지역 범위 증가로 인해 UAM에 대한 수요 밀도가 증가함에 따라 공항 셔틀 시장의 자연스러운 확장이 될 수 있음
구급 항공기	응급 상황 및 잠재적으로 병원 방문을 위해 병원을 오가는 복잡한 시장 구급 항공기 시장은 집중되어 있지만, 그 서비스는 높은 가치를 제공함. 이 시장은 인구통계학적 경향, 의료법제 및 보험정책의 변화에 의해 주도됨	이 시장은 다음과 같은 이유로 선정되었음 • 시장 복잡성: 이 시장은 다른 법률 및 규제 장벽에 추가하여 항공기 탑승에 필요한 기술 역량의 측면에서 기술 장벽을 극복하였음

2-1-③. UAM 운송 수요 모델링

○ 개요[42]

- 운송 시스템은 지난 수십 년간 지속 가능한 성장을 보여 옴
- 인류는 이미 열차의 발명으로 “제 1 교통 혁명”과 자동차로 인해 “제 2 교통 혁명”을 경험함
- 자율적이고 공유 된 이동성을 보장하는 “제 3 교통 혁명”은 완전히 변화 중에 있으며 새로운 기술이 빠르게 가속화되고 있음
- “제 3 교통 혁명”이 가능해진 이유는 역사상 처음으로 인류가 완벽하게 효율적인 교통 네트워크를 구축하기에 충분한 기술 지식을 얻었기 때문임
- 항공 운송은 특히, 장거리에 걸쳐 합리적인 비용으로 다른 운송 형태에 비해 빠른 운송을 제공함으로써 높은 수요를 달성함

- 그러나 다른 운송 수단과의 경쟁으로 인해 수익을 높이고 비용을 최소화하기 위해 항공 운송 시스템은 지속적으로 개선 방법을 모색 중임
- 따라서 모든 이해 당사자들에게 혜택을 줄 수 있는 여러 가지 개념이 개발되었지만 기술 수준, 안전 문제 및 사회의 당시 수용 부족으로 인해 구현될 수 없었음. 그 개념 중 하나가 UAM임
- UAM은 다른 요소들 중에서 특히, 통근 시간을 줄여 도시 이동성을 향상시킬 수 있음
- 최신 기술이 UAM 시스템을 실현하기 위해 특정 수준에 도달했기 때문에 Lilium 사, Vahana 사, Volocopter 사 등에 의해 일부는 이미 테스트되었으며, 또한 Uber Elevate 사가 설립되었음
- 그러나 도시 지역에서 항공 운송을 시행하는 것은 공해, 특히 소음 및 지역 대기 질에 의한 장벽에 직면해 있음
- 따라서 소음 및 지역 대기 질 오염은 AVP(Average VertiPort) 주변에서 더 큰 영향을 미치므로 수직이착륙장의 지리적 위치는 신중하게 선택되어야 함
- 한편, 수직이착륙장은 승객이 쉽게 접근 할 수 있어야하므로 인구가 많은 지역에 위치해야 함
- 이러한 이유로 각 옵션 간의 상충관계를 파악하고 모든 이해 관계자가 상호 이익이 되는 조건에서 지속 가능한 시스템을 만드는 것이 중요함
- “항공의 기후 영향을 내재화하기 위한 시스템 분석 접근법"[43]이라는 논문의 방식을 따르면 UAM의 구조는 아래 그림과 같이 정의되어짐

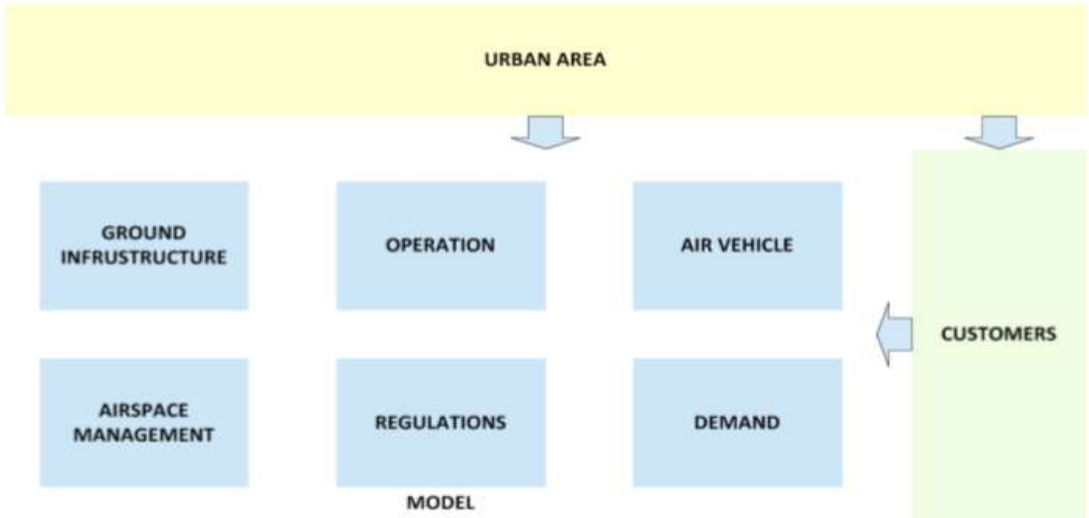


그림 129 UAM Modeling Structure[42]

- 통합 환경의 전체 모델링 절차는 UAM이 현재 도시 교통 용량을 어떻게 향상시킬 수 있는지, 그 위치에 대한 수용성 문제에 대해 답하는 것을 목표로 함
- 따라서 도시 지역과 이용객은 heliport와 같은 기존 UAM 인프라의 가용성, 비행 금지 구역, 이용객 공간 분포 등과 같은 정보를 포함하는 모델의 입력값이 됨
- 모든 모델링 블록은 서로 연결되어 있으며 그 중 하나를 변경하게 되면 다른 블록 역시 변경되어짐
- UAM 모델링 구조의 확장 버전을 분석 후, 확인된 격차 중 하나는 수직이착륙장 공간 분포 및 그 수에 대한 소음 영향 평가와 관련이 있었음
- 따라서, 도시 지역 내의 다수의 수직이착륙장 공간 구성을 연구하도록 함

- 위의 구성을 모델링하고 소음 수준에 미치는 영향과 이러한 영향에 부정적인 영향을 받는 사람들의 수를 평가하는 것임
- 모델링은 인구, 부(Wealth) 및 배경 소음 수준이 시뮬레이션 됨. 그 후 세 가지 시나리오와 도입된 지표를 기반으로 공간 구성을 평가함
- 시나리오 항목
  - 시나리오1(비즈니스 우선) : 도시 지역에서 가장 높은 승객 수요에 따라 수직이착륙장을 배치함
  - 시나리오2(소음 우선) : 수직이착륙장은 최소한의 부정적 소음 영향을 받는 주민들에 의해 도시 지역에 분배됨
  - 시나리오3(결합된) : 포트는 승객 수요와 소음에 부정적인 영향을 받는 주민 수 사이의 비율이 가장 높은 지역에 배치됨
- 시나리오에서 최적의 공간 구성을 선택하기 위한 3가지의 지표
  - passenger-kilometers (pax-km)
  - 평균 수직이착륙장(AVP: Average VertiPort)의 수에 따라 가중된 pax-km (pax-km-avp)
  - AVP의 수의 제곱에 따라 가중된 pax-km (pax-km-avp^2)
- 이러한 지표를 통해 다양한 시나리오에 대한 최적의 AVP 구성을 정의 할 수 있으므로 잠재적 이점과 단점을 알 수 있음. 따라서 이러한 접근 방식은 최적의 인프라 솔루션을 제공하고 도시 지역에 UAM 시스템을 도입하기 위한 다양한 전략을 평가해 볼 수 있음

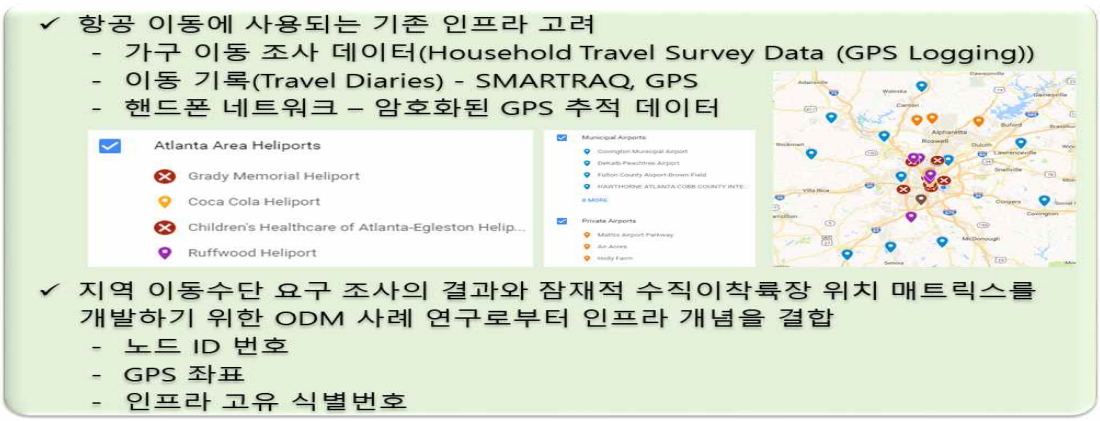


그림 130 노드 후보 매트릭스 축적

○ 운송 수요 모델링

- 효과적인 교통 인프라 네트워크를 구축하기 위해서는 특정 지역에서 사람들이 어떻게 움직이는지 이해할 필요가 있음
- 도시 수준에서는 공항, 이벤트 센터 및 지역 명소와 같은 인기 있는 목적지 식별이 포함될 수 있고, 지역 차원에서는 공항 허브, 정치 활동의 중심지(수도, 도청 등) 또는 주요 관광지가 될 수 있음
- 다양한 수준의 정확도와 필요한 데이터를 수집하기 위한 이러한 운송 수요를 평가하는 몇 가지 방법이 있음
- 이러한 수집 방법에는 암호화된 휴대 전화 네트워크 데이터를 사용하여 네트워크 타워에 대한 통신 상태를 기반으로 개인의 경로를 추적하거나, 여행 연구에서 자원봉사자 차량의 GPS 기록을 사용하거나, 일정 기간 동안 참가자가 자신의 여행 행동을 기록하는 가계 여행 조사와 일기를 작성하는 것이 포함됨[44]

- 여행조사방법은 비용 효과적인 방법으로 많은 인구에 접근할 수 있는 능력 때문에 가장 일반적인 수집 형태이지만 GPS에 비해 정확한 위치 데이터를 확보하고 충분히 다양한 응답 집단을 달성할 수 있는 능력에는 분명한 한계가 있음
- 사례 연구 분석을 목적으로, 2011년 애틀랜타 지역 위원회의 가구 여행 조사로부터 데이터를 수집했음. 애틀랜타 지역 위원회(ARC)는 애틀랜타 메트로폴리탄 지역의 일부와 주변 10개 카운티 지역을 위한 "계획 및 정부간 조정 기관"임[45]
- 2011년 연구는 20개 카운티에서 온 1만 가구가 하루 동안의 여행 행태를 조사했음. 조사의 응답은 2만5천명, 9만3천 건의 여행 및 2만1천대의 차량이었음. 이 조사는 여행 데이터 수집 외에도 참가자와 관련된 "사람" 및 "가구" 데이터를 수집함. 여기에는 개인의 연령, 장애, 고용 및 혼인 상태와 같은 인구통계학적 데이터가 포함됨. 가구 데이터는 근로자 수, 자녀 수, 주거 유형 및 가구당 평균 소득에 대한 정보를 포함함[46]
- 이러한 특징들은 미래의 Urban VTOL 사용자의 프로필로 간주되는 인구통계학적 특성에 맞게 데이터 세트를 필터링하는 데 사용될 수 있기 때문에 Urban VTOL 운송을 위한 교통수요 모델 개발에 중요함
- 매사추세츠 공과대학교의 한 연구에서는 Urban VTOL의 대표적인 탑승객의 인구통계학적 특성 중 몇 가지를 논의하였음[47]. 그러나 본 연구에서는 의미 있는 분석을 하기에는 너무 제한적이라고 여겨지는 원래 세트의 3,000가구 미만으로 축소되는 결과를 가져왔기 때문에, 인구통계학적 특징으로 필터링하지 않기로 결정했음. 대신, 여행 목적과 여행이 이루어진 시간과 관련된 데이터를 이용하여 ARC 가계 여행 조사를 필터링하기로 결정함
- Urban VTOL의 주요 용도가 대체 통근 선택권[47]에 있다는 가정 하에, 여행 목적은 일일 통근 및 업무 관련 여행과 관련된 것으로 제한되었음. 이러한 가정은 또한 오전 7~9시와 오후 3~7시 사이의 일반적인 러시아워 기간 동안의 주행 데이터를 필터링하는 결과를 초래함. 필터링 전에 검색된 공공 데이터 집합에는 93,692번의 여행이 포함되었음. 필터를 적용한 결과 7,311회의 여행이 남아 있었음. 이러한 여행은 최적화 및 후보 선택 섹션에 기술된 최적화 계획에 사용된 교통 수요 모델을 생성하는 데 사용됨
- 새로운 헬기 착륙장 및 vertiport 개발 비용이 높기 때문에[48]는 폭 500ft 이상의 기존 클로버 잎 IC에 대한 적용을 다음 그림의 개념도[48]에서 볼 수 있는 수직 비행 간격 표준 운영 규정 내에 포함하도록 정의함



그림 131 고속도로 입체 교차로 개발 지도[45]

- 클로버 잎 IC와 함께, 우버사는 또 다른 잠재적 vertiport 및 충전소를 대규모 주차 구조로 정의함
- 이용 가능한 공공 헬기 착륙장 및 공항과 함께 이것을 추가하면, 이는 대상 시장의 가장 큰 범위에 해당하는 최소 개발을 위해 최적화를 통해 인프라가 운영될 수 있는 도시의 넓은 지점을 정의함

2-1-④. 인프라 최적화 계획 생성

○ Input 데이터 및 가정

- 실제 도시에 대한 데이터의 부족으로 본 연구는 가상의 도시 지역으로 이루어졌으며, 그 공간은 면적 7,626 ㎢ 와 인구 수 16,587,000명으로 구성함
- 또한 인구 밀도와 소득 수준이 다른 주거지역으로 둘러싸인 두 개의 공항과 비즈니스 센터가 위치되어 있음. 이 지역에는 수직이착륙장이 포함되어 있지 않으며 지리적 지형은 고려되지 않음(아래 그림)

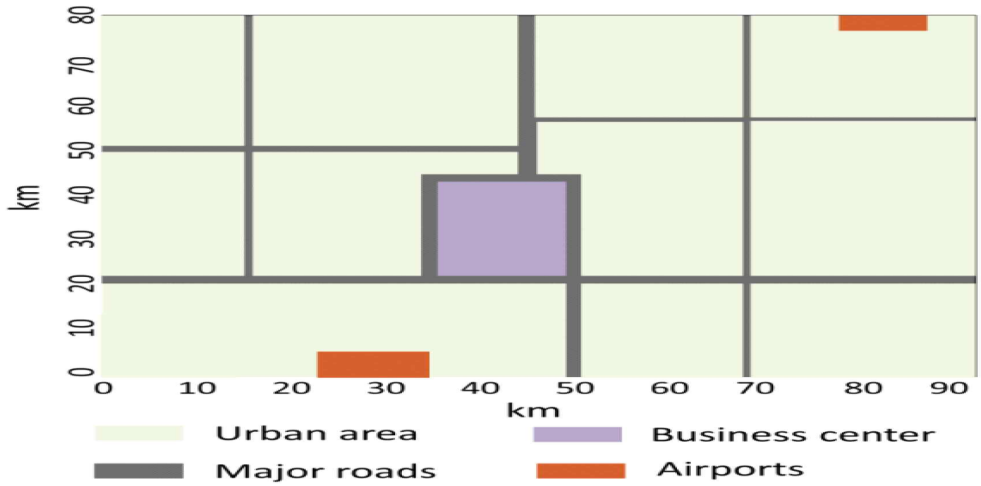


그림 132 가상 도심 지역[42]

- 가상 도시 지역은 1㎞ x 1㎞의 셀을 가진 격자로 변형시킴. 하나의 셀 내에서는 하나의 수직이착륙장 만을 그 중심에 배치할 수 있음
- 격자를 기반으로 수입(아래 첫 번째 그림), 인구(아래 두 번째 그림) 및 평균 낮-밤 소음 수준(아래 세 번째 그림)의 세 가지 주요 레이어가 시뮬레이션 됨
- 아래 그림은 지역에 번잡한 고소득 센터, 2개의 공항 및 다수의 주요 도로를 포함하며, 가장 소음이 많은 부분을 보여줌(아래 세 번째 그림)

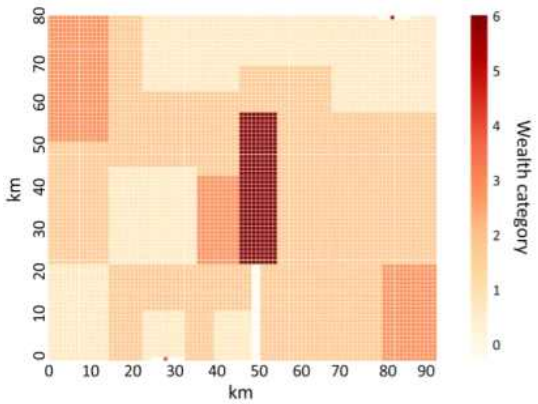


그림 133 가상도시 내 재산분배 열지도[42]

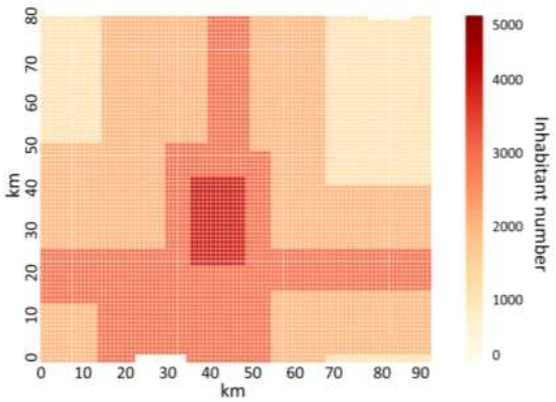


그림 134 가상도시 내 인구분포 열지도[42]

- 인구는 저밀도에서 교외 평방킬로미터 당 1,000명과 비즈니스 센터 지역에서 5,000명까지의 주민 수에 따라 다른 범주로 나눔
- 소득 수준을 고려해 해당 지역의 인구에 할당하며, 여섯 가지 범주로 지정함; 항목: ①저소득 ②중간 소득 ③고소득 ④공항1의 여객 수입 ⑤공항2의 여객 수입 ⑥비즈니스 영역 수익
- 도시 지역 격자의 모든 셀에 대한 부와 인구 분포의 모의 시뮬레이션된 데이터는 모델링을 위한 입력값임

- 주민이 거주하는 지역의 수직이착륙장 선호도를 모델링하기 위해 추가적인 시나리오를 포함할 것임. 해당 시나리오에는 다음과 같은 매개 변수가 포함됨; ①하루 동안 UAM 시스템에 대한 승객 수요 ②수직이착륙장 간 평균 이용객의 이동 시간 및 승객의 이동 속도(아래 표)

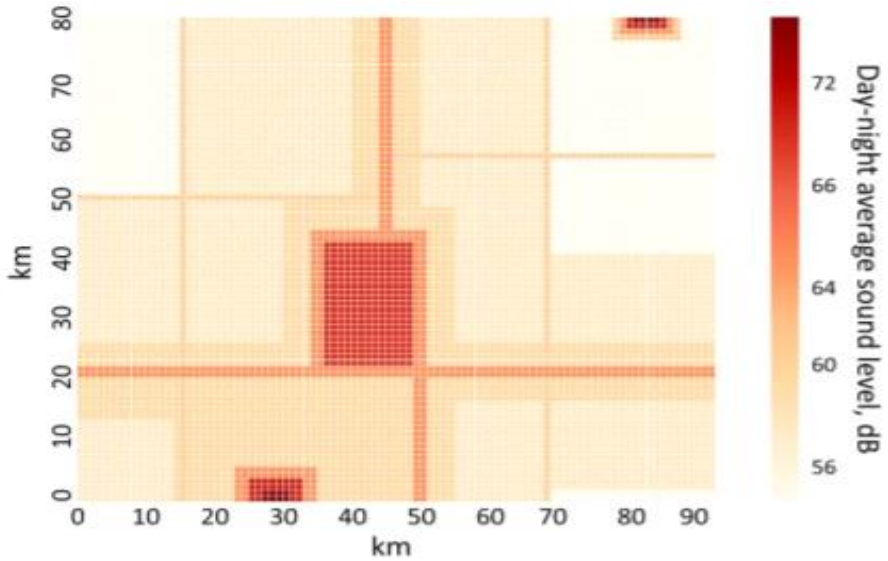


그림 135 가상도시 내 주간 평균 음향분포 열지도[42]
표 33 수입 범주에 따른 UAM 이용 고객 시나리오[42]

	Average time to a AVP, hours	Average speed, km/h	AVP catchment area (CA), km	Passenger demand, % of the population
Low income	0.4	15	6	0.000001
Middle income	0.25	8	2	0.000002
High income	0.17	30	5.1	0.000050
Business area income	0.17	15	2.55	0.001000

- 저소득 지역에서 승객 수요가 가장 낮을 것으로 예상되었음. 또한 수직이착륙장에 도달하는데 걸리는 평균 이동 시간은 저소득 지역의 주민의 경우 더 길고 고소득층의 경우 더 짧을 것으로 가정함
- 따라서 수직이착륙장에 대한 평균 이동 시간의 가정은 저소득층 거주자의 경우 0.4시간 중간 소득층의 경우 0.25시간, 고소득층과 비즈니스 지역의 경우는 0.17시간임
- 또한 공항을 제외한 각 소득 범주에서의 평균 이동 속도가 고려됨. 저소득 지역의 인구는 대중교통 서비스와 도보로의 이동이 결합된 평균 속도가 15 km/h인 것으로 예상하였음
- 반면 고소득 지역의 인구는 자가용과 같은 개인 교통수단을 사용하여 수직이착륙장에 도달하는 평균 속도가 30 km/h인 것으로 예상하였음
- 중간소득 지역의 인구는 도보로의 이동이 주요 선택수단이기 때문에 평균 속도가 8 km/h인 것으로 예상하였음
- 비즈니스 지역에서 거주중인 인구는 높은 건물 밀도와 그 지역의 인프라 혼잡으로 인해 고소득 인구보다 평균 속도가 느리다고 가정함
- 이 연구에서 항공 승객 수요는 도시 지역 격자에서 수직이착륙장 주변의 집수지역(CA: Collection Area)에 대해서만 고려됨. 즉, 수직이착륙장 간 승객의 출발지와 목적지를 알 수 없음
- 수직이착륙장까지의 평균 이동시간과 속도를 이용하여 각 소득 범주에 대한 CA를 결정함

- 위 표에서 보여주듯이 저소득 지역이 가장 큰 CA를 가지고 있음. 즉, 해당 지역의 인구가 수직이착륙장을 사용하기 위해 더 많은 시간을 소비하며 장거리를 이동할 수 있지만 그 수요는 가장 낮음
- 집수 면적이 가장 작은 중간소득층의 평균 속도는 가장 느리기 때문에 저소득 인구의 반대 효과가 발생함
- 비즈니스 지역은 2.55 km라는 낮은 집수 지역까지의 접근 속도를 보이지만 승객 수요는 가장 높음. 또한 도시 지역의 공항은 공항 이용객 수의 0.0012% 내지 0.0015%와 같이 가장 높은 승객 수요를 보임
- 공항 이용객이 다른 지역의 승객보다 UAM 서비스를 이용할 가능성이 더 높다고 가정함. 따라서 이러한 매개 변수를 고려하여 모델링 접근법을 개발하였음

○ 최적화 및 후보 선택

- 교통 데이터를 프로젝트와 관련된 인구 통계 자료로 좁힘. 그 아이디어는 두 개의 서로 다른 교통망을 모델링한 다음 그들이 교통량을 처리하는 데 얼마나 효과적인지를 비교하는 것임
- 첫 번째 네트워크는 모든 여행이 자동차로 이루어지는 기존의 도로 인프라임. 이를 기준으로 적용하며, 도심항공 eVTOL 네트워크에 대한 모든 비교는 이 기준에 대해 이루어질 것임
- 두 번째 네트워크는 기존 도로 연결에서 비행 연결로 "업그레이드"되는 특정 노드 쌍으로 구성된 도심항공 eVTOL 네트워크임. 첫 번째와 마지막 마일 이동 거리를 나타내는 나머지 노드 쌍은 여전히 자동차 연결에 의해 제공됨
- 네트워크의 수학적 모델 생성, 노드 간 이동 시간 계산, 네트워크의 교통 흐름 할당을 포함한 네트워크 분석. 이 작업은 EXCEL 스프레드시트에 저장된 여러 행렬을 사용하여 MATLAB에서 수행됨

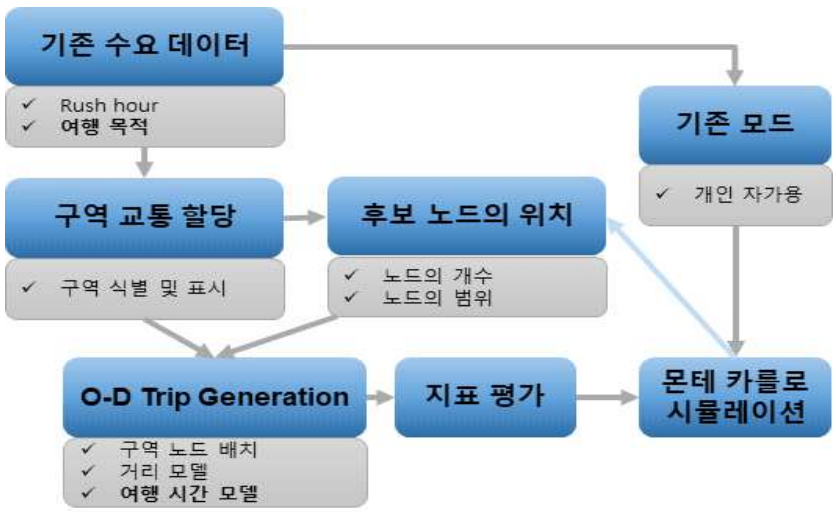


그림 136 최적화 계획 Flow Chart

- 1단계: 여행 구역의 대표 점 찾기

- 도심 여행 조사는 우리에게 다른 지역에 걸친 여행 데이터를 제공함
- 구역은 점(위도 및 경도)으로 정의됨. 이 점들은 구역의 경계를 나타냄
- 개인사생활 우려에서 실제 출발지 및 목적지 좌표는 제공되지 않음. 그러나 이는 문제가 되고 있음. 어떤 분석을 실시하기 위해서는 특정 지점에 트래픽을 할당해야 거리를 계산할 수 있기 때문임. 따라서 각 구역 내의 모든 교통의 싱크와 소스 역할을 하는 대표적인 지점을 계산해야 함. 이러한 기준점을 계산하는 것은 구역들이 불규칙하게 형성되어 있고 종종 볼록하지 않기 때문에 쉬운 일이 아님

- 초기에는 위도와 경도의 단순한 산술 평균을 수행하여 대표적인 점을 얻었음. 이 방법은 문제의 관심 영역인 도심 지역에 경도 면에서 교차하는 지점이 없기 때문에 효과가 있음. 그러나 이 방법은 표현을 위해 선택된 지점이 실제로 구역 경계 바깥이나 경계 중 하나에 가까워질 수 있는 문제를 야기함. 특히 구역의 형태가 비볼록인 경우에는 더욱 그러함. 또한 경계를 따라 점의 집중은 균일하지 않음. 예를 들어 호수를 따라 들쭉날쭉한 부분이 평균점을 향하게 하는 반면 일부 평탄한 직선 구간은 점들이 훨씬 적을 것임. 이를 바르게 잡기 위해 다른 알고리즘을 사용하여 평균점을 계산함. 각 구역에 대해 구역의 범위를 제한하는 경계 칸이 생성됨. 이 경계 칸은 $_{orth}, \Phi_{south}, \Phi_{east}, \Phi_{west}$로 표현됨. 그 대표적인 점은 이 경계 칸의 중간점임. 여기에는 정확한 지점이 없다는 점을 유념해야 함



그림 137 미국 아틀란타 여행 조사 구역[45]



그림 138 미국 아틀란타 수직이착륙장 후보 표시[45]

- 각각의 주의사항으로 중간점을 계산하는 다른 기법이 존재함. 상황에 따라 사용할 수 있는 기법이 달라짐. 가장 정확한 모델링 기법은 각 구역을 요소 영역으로 구분하는 것일 것임. 그러면 이러한 요소 영역은 전체 영역을 구성하고 중간점에 대한 면적 가중 평균은 "진정한" 중간점을 드러낼 것임. 이 방법은 제한된 시간과 원하는 정확도를 고려할 때 채택되지 않았음

- 2단계: 도로망 생성

- 첫 번째 단계는 기존 도로 인프라에 대한 네트워크를 만드는 것이었음. 이것은 Google Maps API를 사용하여 Python으로 작성된 스크립트를 통해 이루어짐. Google Maps API는 트래픽 모델링과 시뮬레이션을 위한 많은 기능에 사용될 수 있는 여러 도구를 가지고 있음. 연구를 위해, Distance Matrix API가 사용되었음
- API 쿼리의 표준 키 사용과 관련된 사용 제한으로 인해, 네트워크 크기는 실행 가능한 숫자로 줄어들어야 했음. 이를 위해 각 노드가 출발지 또는 목적지로 발생하는 횟수에 따라 노드의 순위 순서가 작성되었음. 여기서 상위 100개 노드가 선택되었으며, 이는 총 9,900개의 API 호출에 해당함. API에 대한 각 호출에 대해, 관련 이동 시간은 시간 매트릭스에 저장되었음. 일단 시간 매트릭스가 생성되면 네트워크 표현을 생성하기 위해 MATLAB을 사용하였음. O-D 쌍 간의 이동과 관련된 "비용"은 그들 쌍 간의 주행에 필요한 시간임

- 3단계: 도심항공 eVTOL 네트워크 구축

- 도심항공 eVTOL 네트워크는 도로망의 사본으로 시작함. 그런 다음 일부 노드는 도로와 eVTOL 서비스 둘 다에서 서비스할 수 있는 수직이착륙장으로 개발되는 것으로 간주됨

• 노드의 하위 집합 중 하나를 선택한 경우, 이러한 각 수직이착륙장 사이의 거리는 Haversine 공식을 사용하여 위도와 경도로부터 계산됨. 여기서, GCD는 원 거리, $_{rth}$는 지구의 평균 반지름, $_{1}, \phi_{2}$는 각각 지점 1과 지점 2의 위도, λ_1, λ_2는 지점 1과 지점 2의 경도임. 모든 각도 측정은 라디안 단위로 함

$$CD \quad 2R_{rth} \quad \sin^{-1} \quad \sin^2\left(\frac{\varphi_2 - \varphi_1}{2}\right) + \cos(\varphi_1)\cos(\varphi_2)\sin^2\left(\frac{\lambda_2 - \lambda_1}{2}\right) \Bigg) \tag{13}$$

• 그런 다음 거리 매트릭스는 eVTOL 항공기의 평균 속도와 출발지 노드의 평균 대기시간을 사용하여 시간 매트릭스로 변환됨. 따라서 각 수직이착륙장 출발지 및 목적지 쌍에 대한 시간 행렬의 값은 비행시간으로 대체될 수 있음. 이 작업은 서로 연결되어 있는 서로 다른 수직이착륙장을 나타냄. 그러나 지리적으로 서로 가까운 곳에 위치한 노드가 연결되지 않도록 주의해야 함

• 어떤 상황에서는 eVTOL 경로와 관련된 대기 시간이 있기 때문에 실제로 연결 속도가 느려질 수 있음. 따라서 시간 매트릭스의 연결은 노드 쌍 연결이 실제 시간 절약을 나타내는 경우에만 생성됨. 이러한 연결이 이루어진 후, 매트릭스를 MATLAB으로 가져오고 네트워크가 생성됨

• 이번에는 두 노드 간 이동과 관련된 비용이 첫 번째 구간 주행 시간, 수직이착륙장에서의 대기 시간, 비행시간 및 마지막 구간 주행 시간의 총 시간임

- 4단계: 두 네트워크 비교

• 일단 두 개의 교통망이 만들어지면 교통량 흐름을 할당하여 비교할 수 있음

• 여행 설문 조사에서 생성된 교통 매트릭스에는 각 O-D 쌍 간의 여행 횟수가 수록되어 있음

• distance() 함수는 MATLAB에서 각 O-D 쌍에 트래픽을 할당하는 데 사용됨. 함수는 가능한 모든 경로를 통과하는 각 여행에 관련된 최저 비용을 찾아냄. 이 시간은 도로망과 Urban VTOL망 양쪽 모두에 대해 계산됨. 결과는 EXCEL 스프레드시트에서 표로 내보내짐

- 5단계: 몬테카를로 시뮬레이션 실행

• 2, 3, 4단계에서 설명한 과정은 기존의 기본 도로망을 특정 도심항공 eVTOL 설계와 비교하는 방법을 제공함

• 이상적으로, 우리는 도심항공 eVTOL 네트워크의 다양한 정의 매개변수를 변경하여 미치는 영향을 확인하고자 함. 이는 몬테카를로 시뮬레이션을 수행하여 다음과 같은 파라미터를 변경함으로써 구하게 됨

• 1. 비행체 속도

✓ 이는 비행체 설계의 특징이며 이륙, 착륙 및 크루즈 시 비행체가 비행할 평균 속도를 나타냄. 더 높은 충실도 모델은 섹션 각각에서 다른 시간을 나타낼 것임

✓ 이 매개변수는 수직이착륙장 사이의 긴 거리를 비행시간으로 변환하는데 사용됨. 이 비행시간은 수직이착륙장 사이의 이동 시간의 한 부분을 차지함

✓ 이것은 95에서 185mph까지 20mph의 증분으로 다양함

• 2. 대기 시간

✓ 이것은 여행 시간의 두 번째 부분임. 대기시간은 사업자의 운영효율에 대한 대용치로 간주됨. 탄탄한 실시간 계획과 함께 더 큰 비행체 크기는 통근자들의 대기 시간을 더 짧게 할 것임. 비행체 크기가 작을수록 대기 시간이 길어질 수 있음. 또한 대기 시간은 차량에 연료를 주입/충전하는데 소요되는 모든 시간을 나타냄

✓ 이것은 2분 단위로 0분에서 20분까지 다양함

• 3. 노드 수

✓ 이것은 수직이착륙장으로 개발된 노드의 수가 네트워크 전체에 어떤 영향을 미치는지 분석할 수 있는 인프라 측정 기준임

✓ 비록 수직이착륙장의 수의 증가는 특정 경로 사이의 이동 시간에 직접적으로 영향을 미치지는 않을 것이지만, 경로 측면에서 더 많은 옵션을 가능하게 할 것이고 따라서 전체 규모의 네트워크 교통 속도를 높이는 데 도움이 될 수 있음

✓ 이것은 2개부터 17개까지 다양함

• 노드 수와는 별개로, 어느 노드가 개발 대상으로 선정되는지도 중요함. 네트워크의 큰 규모를 감안할 때 이것을 분석적으로 해결하기는 어려움. 따라서 무작위로 수직이착륙장 노드의 한 세트를 선택하는 몬테카를로 시뮬레이션이 수행됨

• 위에서 지정한 세 가지 매개변수의 조합 값은 특정 도심항공 eVTOL 네트워크 설계를 나타냄. 그러한 각 설계에 대해 수직이착륙장으로 개발된 무작위 서브셋을 선택하는 몬테카를로 기법이 수행됨. 가장 좋은 개선을 제공하는 서브셋은 별도로 기록하고 변환됨

- 6단계: 후처리

• 모든 노선에 대해 교통 할당이 완료되고 비교연구가 수행되면 추적할 최종 메트릭이 계산됨. 이러한 메트릭은 eVTOL 연결이 추가된 경로에 대해 절약된 시간의 백분율과 전체 네트워크의 시간 절약 비율임. 이러한 계산은 MATLAB에서도 수행됨. 이후 MATLAB에서 내보낸 분석 데이터를 JMP로 가져옴. JMP는 강력한 비주얼을 만드는 메커니즘을 제공함으로써 신속한 트레이드오프 분석이 가능함

• 사용되는 시각자료 중 하나는 그림 행렬로 구성된 산점도 행렬임. 서로 다른 각 입력 파라미터는 산점도 행렬의 고유 행으로 표시됨. 추적 중인 각 메트릭은 서로 다른 행으로 표시됨

• 시각화 외에도 JMP는 한 그래프에서 점의 하위 집합을 선택하고 다른 그래프에서 점의 위치를 관찰할 수 있도록 해줌

○ 모델링 환경

- 최적화 체계를 제어 입력과 결합하기 위해, 사용자 인터페이스는 미래 모델링 및 시뮬레이션 환경의 개념 증명을 위해 생성됨. 이 인터페이스는 사용자가 비행체 속도와 좌석 용량을 정의하는 도심항공 eVTOL 비행체 데이터베이스에서 비행체 및 기준선 특성을 선택할 수 있도록 함. 사용자가 우선순위 요건을 입력하는 것은 물론 데이터 필터, 시장 도달 특성, 비행체 특성을 조작해 인프라 배치에 미치는 영향을 시각화할 수 있도록 함

- 아래 그림의 왼쪽에 보이는 초기 VTOL 비행체 데이터베이스는 해당 특성을 가진 세 대의 비행체에 대한 개념 데이터베이스를 보여줌

Current Vehicle Configurations	Metric Value
Seat Capacity (w/Pilot)	4 Persons
Battery Capacity	140 kWh
Recharge Time	MIN 30 minutes
Vehicle Speed	150 mph
Fully Autonomous	Yes
Baggage Area	1 Bag/Passenger
Metric 7	TBD
Metric 8	TBD



Requirement	Relative Weight
Trip Cost	34.7%
Trip Coverage	9.9%
Time Savings	14.9%
Cost Savings	24.0%
Cruise Speed	8.0%
Seat Capacity	6.6%
Fleet Depth	1.93%
Total	100.0%

그림 139 비행체 데이터베이스 및 요구조건[45]

- 사용자가 비행체를 선택한 후에는 사용자의 선호도에 따라 다른 설정을 나열하는 우선순위

매트릭스에 요구 사항을 입력할 수 있음. 이 경우 상대 가중치는 설정에서 주어진 선호도에 대한 경로 최적화를 처리하는 방법의 결과에 영향을 미칠 것임. 이러한 설정에서, 사용자는 구현할 도시나 지역의 인구 규모를 설정하여 시장을 거쳐야 함

- 총 인구에서 교통조사의 데이터를 가져와 아래 그림과 같이 소득, 연령, 여행 목적과 같은 인구 통계학적 정보를 위한 엑셀 필터링을 통해 실행될 것임. 필터를 설정하면 해당 인구 통계와 관련된 각 여행 지역에 대한 Google API - Google Earth가 강조 표시됨
- 인구통계학적 필터링은 최종 최적화에 중요함. 왜냐하면 그것은 그 지역에서 이 시장에 도달하기 위해 이용 가능한 많은 수의 수직이착륙장을 보여주기 때문임

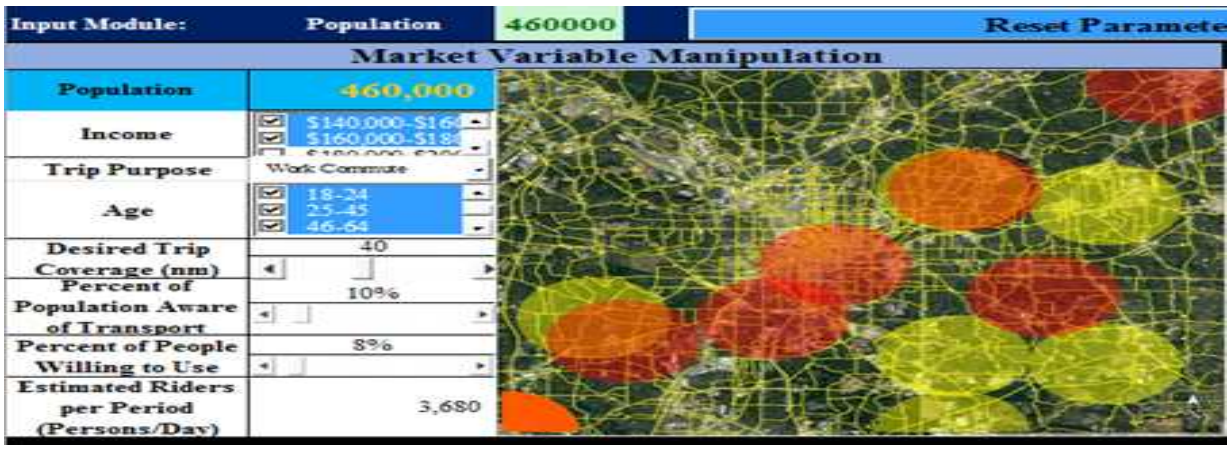


그림 140 Filter-Google AP 인터페이스[45]

- 여기서부터 시장규모는 하루 예상 운행횟수를 산출하는 데 사용할 수 있는 교통수단에 대한 실제 이용자의 수를 예측함. 하루 총 여행 횟수, 운행 시간, 수직이착륙장 수 등은 비행체 특성을 통해 조작할 수 있음
- 인터페이스의 이 부분은 사용자, 서비스 제공자 또는 개발자에게 비행체가 아래 그림에 나타난 운영 효율성에 어떻게 영향을 미치는지 보여주는 것임

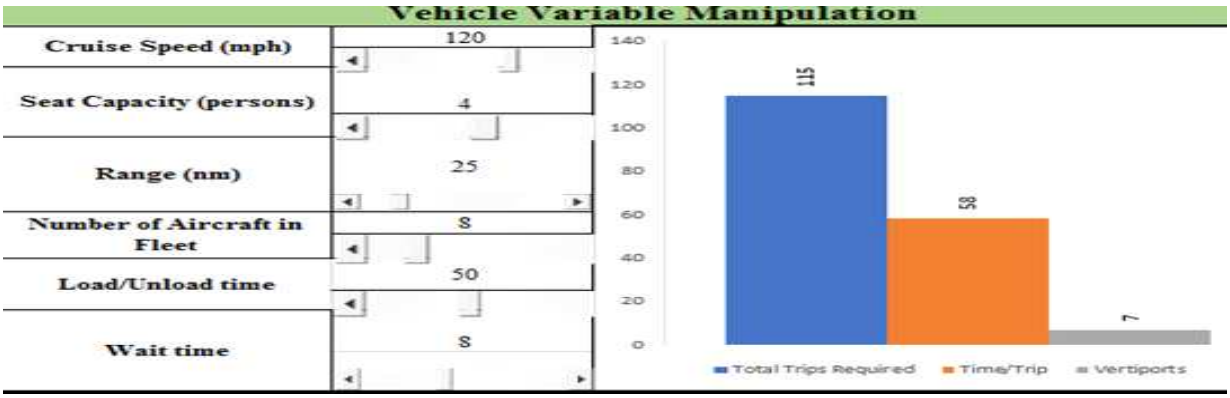


그림 141 인터페이스 결과[45]

- 이 경우 순항속도와 범위는 작은 규모의 출력에만 영향을 미치는데 이는 범위가 작기 때문임. 작동 범위를 늘리면 속도가 작동 범위를 변경하기 시작하고, 속도가 출력 메트릭스를 개선할 수 있음
- 좌석 용량과 항공기 수는 운영의 효율성을 나타내기 때문에 총 운행에 주로 영향을 미침
- 짐을 싣고 내리는 시간과 대기 시간은 블록 시간과 비행체 이용 효율을 나타내는 여행 시간에 영향을 미침. 최종 M&S 환경은 Google Earth, Google API, MATLAB 최적화, JMP 몬테카를로 시뮬레이션에 이상적으로 연결될 것임

○ 도시 계획

- 본 프로젝트의 설명에 따라, 전체 Urban VTOL 개념을 개발하는 주요 동인으로 확인된 3개 기

관은 비행체 제조자, 서비스 제공자, 인프라 개발자임. 이 중 마지막인 인프라 개발자들은 도심항공 eVTOL 네트워크의 기초를 다지는 일을 담당함. 그들은 새로운 건설의 승인을 방해할 수 있는 위험을 식별하고 완화하는 것부터 시작하여 운영을 가능하게 하는 기반시설을 만들기 위한 계획을 효과적으로 수립해야 함. 이 승인은 지방, 주 및 연방 규제 기관과 일반 지역사회 수용의 두 가지 모두를 다룸

- 이 절에서는 지역사회의 수용을 얻는 방법과 건축법 및 구역 규정과 같은 도시개발규정을 준수하는 방법에 대해 논의함

- 지역사회 수용

  - 지역적 차원에서 계획을 다루기 위해서는 지역사회의 필요성과 지지를 얻어야 함
  - 지역 사회 내에서 동의함에 동기를 부여하는 도시 계획에는 다양한 측면이 있으며, NASA는 공공 민간 파트너십을 시작으로 지원을 늘리는 데 필요한 관련 단계를 개략적으로 설명한 ODM을 위한 전략적 프레임워크를 작성했음[49]
  - 공공 민간 파트너십에서 수행되는 작업은 후원 및 기반 개발을 통해 지역사회에 초래되는 경제적 영향을 초기에 계량화하는 것임
  - 경기부양 측면은 이행의 이익이 되겠지만 ODM 커뮤니티는 민간 자산 기부나 헤지펀드, 벤처캐피털 또는 지역사회를 위한 자생적 소득뿐만 아니라 창업 자금을 창출할 인센티브 크레딧을 통한 투자를 통해 금융자립의 시작을 제안함[49]
  - ODM 중심 계획의 개요를 설명하기 위해 NASA, FAA 및 NIA의 연방 및 국가 협력으로부터 시작하도록 제안된 대규모 지원[49], 이러한 계획으로부터 비행체 및 기술개발과 병행하여 꾸준한 규제개선이 가능하도록 정책 및 규제변경이 명확하게 설정되어야 함
  - 전반적으로, 신뢰할 수 있는 기업의 계획을 통해, 자금과 지원은 도심항공 eVTOL 개발 및 공유기반 모빌리티(ODM: On-Demand Mobility) 전체의 구현을 위해 주 및 지방 단체(아래 그림 참조)로 갈 수 있음



그림 142 미국 아틀란타 시 ODM 주체[45]

- 개발 및 구역 설정

  - 미국 전역의 모든 도시와 자치단체는 토지 개발을 규제하고 재산의 사용을 제한하는 구역으로 나뉨. 이러한 구역을 일반적으로 구역(zone)이라고 하며, 해당 규제는 구역제 규칙으로 알려져 있음
  - 구역 지정 규칙은 범위가 다양하지만 일반적으로 새로운 건물의 전체 크기, 배치, 밀도 및 목적과 같은 재산의 특징을 규제하며, 규격은 다양한 구역 유형에 따라 다름[50]
  - 지역계획 및 지역사회 개발 당국은 도시 내에서 이러한 구역 유형의 규격을 담당하지만, 상업, 주거, 역사 및 문화 지구와 특별 공익 지구(법령, 2017)가 일반적인 유형임
  - 기본 구역 외에도, 도시는 다른 유형의 구역과 경계를 겹칠 수 있는 구역 지정 규제의 추가 층인 오버레이를 만들 수 있음. 또한 구역제 설정 또는 허가 요청은 완료하는 데 몇 주에서 몇 년이 걸릴 수 있는 긴 과정임
  - 도시 구역제 절차는 복잡하고 법률 용어와 혼동되는 경우가 많아 도심항공 eVTOL 개념에 미치는 영향에 대한 광범위하고 정량적인 평가가 어려움. 그러나 도시의 구역제와

건축 법규는 기반시설 개발에 투자할 곳을 선정하는 데 있어 최종 결정 요인이 될 수 있음

- 도심항공 eVTOL 개념의 사례 연구로서 애틀랜타에 대한 평가를 위해, 도시의 구역제 코드를 조사하여 인프라 건설을 위해 선택된 위치에 어떤 규제가 적용되는지 판단하였음. 이 분석을 통해, 헬리포트, 수직이착륙장 등의 기반시설이 그 지역의 경제적, 지역사회 요구를 충족시키기 위해 보다 맞춤화된 건축 솔루션이 가능한 특별 공익에 할당된 구역에 위치해야 한다고 결정했음
- 최적화 및 후보 선정에서 실시한 연구로부터, 사용 승인을 얻기 위해 어떤 구역제와 허가가 필요한지를 결정하기 위해 아틀란타 시내 지역의 헬리패드 위치를 더 자세히 조사하였음. 구체적으로 2009년 문을 연 애틀랜타 시내의 W호텔 꼭대기에 위치한 헬기장은 이상적인 위치와 정기적인 이용 가능성을 추가 조사하였음. 애틀랜타 시 구역 개발청으로부터 접근한 문서들은 그 헬리패드가 시내의 특별 공익 구역에 있다고 결정했음. 그 후, 호텔 개발업자들이 특별 사용 허가를 요청하고 취득한 사실이 밝혀졌음
- Accela Civilize Access라는 공용 데이터베이스를 사용하여 특별 사용 허가의 세부 정보를 찾았으며, 다음 그림의 항목 스크린 샷에서 확인할 수 있음



그림 143 W 호텔 헬리패드에 대한 특별 사용 허가[45]

- 호텔 개발자들이 허가를 요청한 날로부터 승인까지 8개월이었음. 개발자들은 헬리패드 건설이 FAA 규정을 준수하여 필요한 승인을 더 추가할 것임을 입증해야 했음. 단, 개발자들이 향후 5년 이내에 도심항공 VTOL 인프라 구축을 시작하기를 원한다면 이 경로(특별공익구역의 특별사용허가)를 선택하는 것이 좋음
- 도심항공 VTOL 운영과 관련된 인프라 구축을 위해 보다 명확하게 정의된 일련의 규정을 개발해야 한다는 것이 MOVE Grand Challenge 팀의 권고 사항임. 이는 애틀랜타 지역에 대해 본 섹션의 시작 부분에서 논의한 바와 같이 새로운 오버레이를 생성함으로써 달성할 수 있음. 이는 합리적인 규제 경로로 애틀랜타 벨트라인 개발자들이 활용했음. 벨트라인 개발자들은 길을 따라 건설하는 기업들이 그들의 공간을 어떻게 계획해야 하는지를 명시하는 45마일 길이의 오버레이를 제안하고 만들었음. 일부 특징에는 넓은 통로, 녹지 요구 사항 및 출입구 위치 사양이 포함됨
- 인프라 개발자들이 운영 지역 내에서 연합을 형성하여 도심항공 VTOL 오버레이의 정책과 내용을 정의할 수 있다면, 규제와 구역이 목적에 적합하여 효율성이 크게 향상되고 인프라 네트워크 구축에 드는 전반적인 비용이 절감될 수 있음



그림 144 최적화 계획 데이터 분석

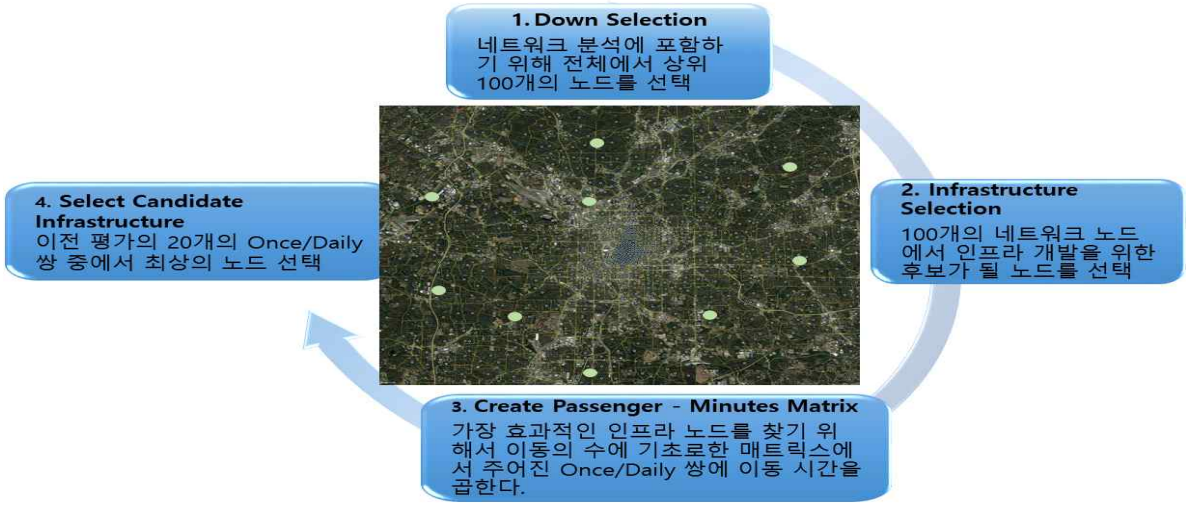


그림 145 도심 항공 모빌리티(UAM) 인프라 최적화 후보 선택 과정

- 도심항공 모빌리티 인프라 개발 매트릭스 절차

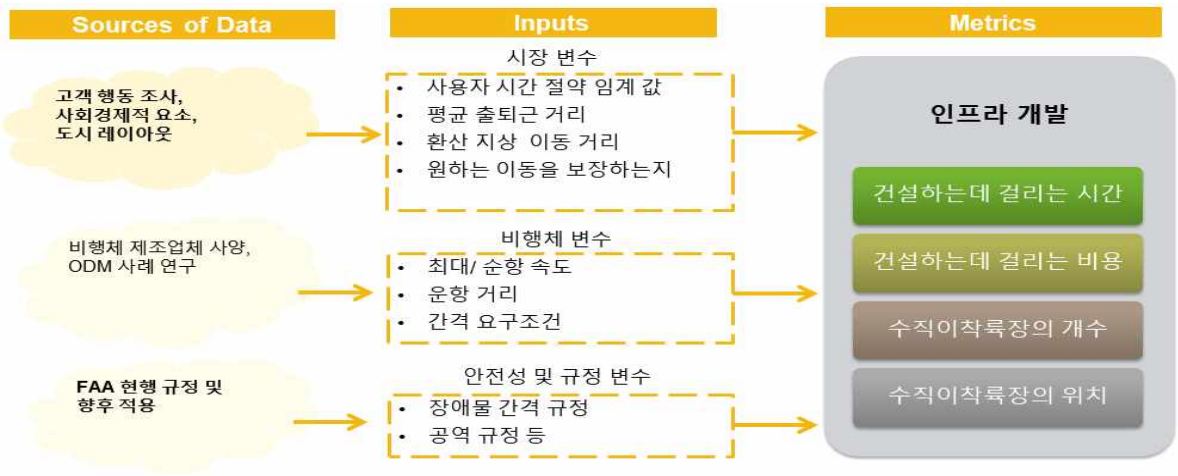


그림 146 도심 공유기반 모빌리티 인프라 개발 매트릭스 절차

○ 모델링 접근법[42]

- 아래 그림은 모델링 접근법을 블록들로 표현한 것임. 첫 번째 모델링 블록인 “Calculations for the urban area” 는 가상 도시 지역 매개 변수를 기반으로 데이터를 처리한 것임
- 여기서, 다수의 추가 층이 얻어 질 수 있음. 예를 들어, 계산된 CA범위, 인구 및 각 소득 범주의 승객 수요를 적용함으로써 승객의 수는 도시 지역 격자의 모든 셀에 대해 계산될 수 있음

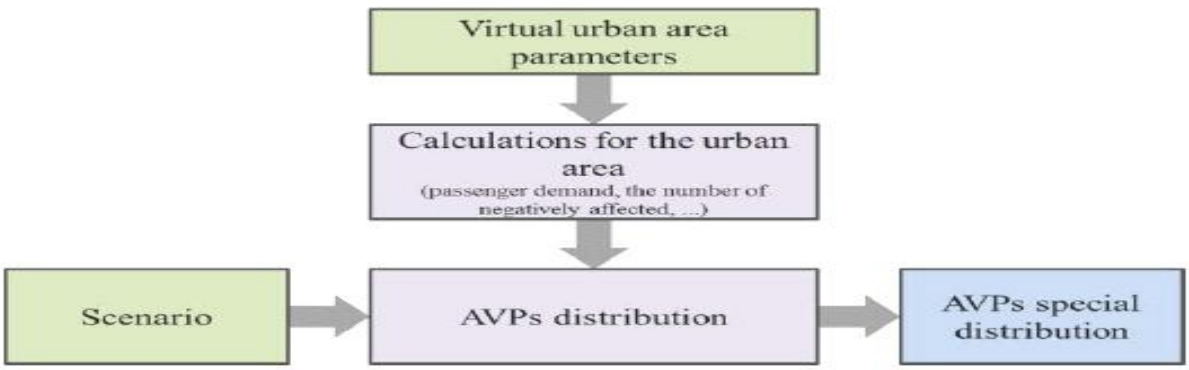


그림 147 Modeling Approach[42]

- 이 단계에서, 각 셀에 부정적인 영향을 받는 인구의 수를 얻을 수 있음. 아래 식은 소음에 의해 부정적인 영향을 받는 주민의 수를 계산하는데 사용된 fitting function임

$$ghly\ annoyed,\ \% = \frac{100}{1+e^{11.3-0.141\ \ _n)}} \quad (14)$$

- Ldn은 주 · 야 평균 소음 수준을 나타냄. 거리에 따라 주 · 야간 평균 소음 수준을 dB단위로 계산하기 위해 아래 식를 사용함

$$L_2 = L_1 - \ 20 * \log(r_1/r_2)\big| \quad (15)$$

- 위 식에서 r1은 소음원으로부터의 기준 거리, r2는 소음원으로부터의 다른 거리, L1은 기준 거리 r1에서의 음량, L2는 r2에서 발생되는 음량이며 Ldn을 뜻함
- "Calculation for Urban Area" 및 "Scenario"에서 계산된 레이어는 "AVP Distribution" 모델링 블록의 입력값임. "Scenario"는 수직이착륙장 배치에 대한 기준을 정의함
- 예를 들어, 도시 지역이 환경 친화적인 시스템을 우선시하는 경우 수직이착륙장 배치 기준은 거주자가 받는 영향을 최소화하는 방향이 될 것임. 이러한 방식으로 수직이착륙장은 하나의 수직이착륙장부터 해당 지역의 최대의 수직이착륙장 수까지 기준에 따라 도시 지역에 배치될 것임
- 모델링 방식은 수직이착륙장 CA가 교차하지 않음을 가정함. 즉, 격자에 지정된 셀에는 하나의 수직이착륙장만 할당될 수 있음
- 결과적으로, 상이한 수의 수직이착륙장에 대한 일련의 다양한 공간 구성이 얻어질 수 있음
- 그 결과를 분석하면 UAT 시스템의 다양한 구성을 채택할 수 있음. 예를 들어, 소음이 미치는 영향을 최소화 하는 대신 승객의 수와 수직이착륙장의 수를 최소한으로 구성하거나, 반대로 소음을 줄이는데 미치는 영향은 크지만 승객의 수와 수직이착륙장의 수를 최대한으로 구성하는 방식임
- 따라서 제안된 모델링 방식은 여러 가지 솔루션을 제공함. 주어진 시나리오에 대한 최적의 솔루션을 정의하려면 특수한 지표(pax-km 등 3개)를 사용해야하는데, 이 지표는 예를 들어 우선순위 및 도시 지역의 전략적 계획을 정의하고 최적의 솔루션을 식별하고자 함

2-1-⑤. 인프라 최적화 비교분석 연구

○ 최종 결과

- 몬테카를로 시뮬레이션에서 얻은 결과는 다음과 같음

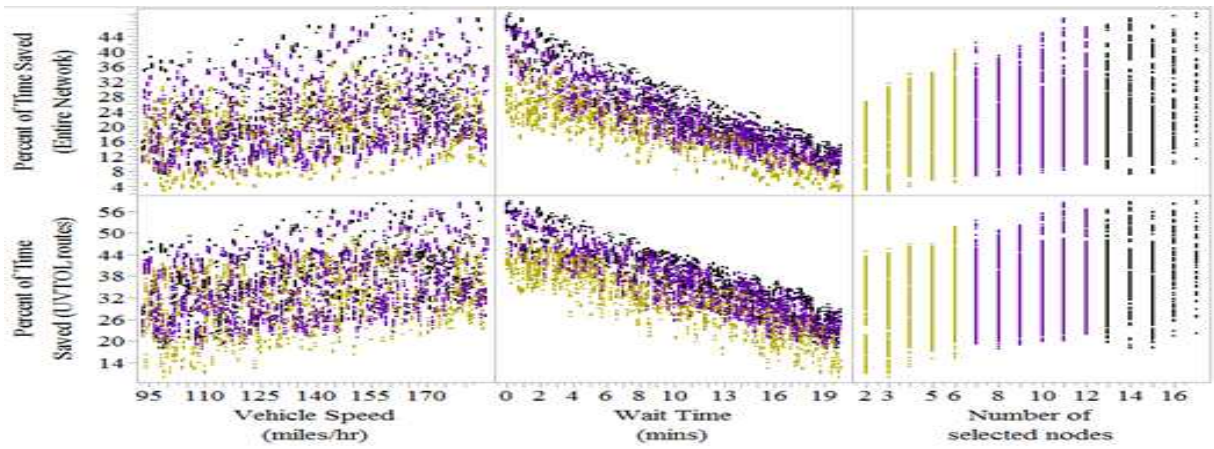


그림 148 노드 수 효과[45]

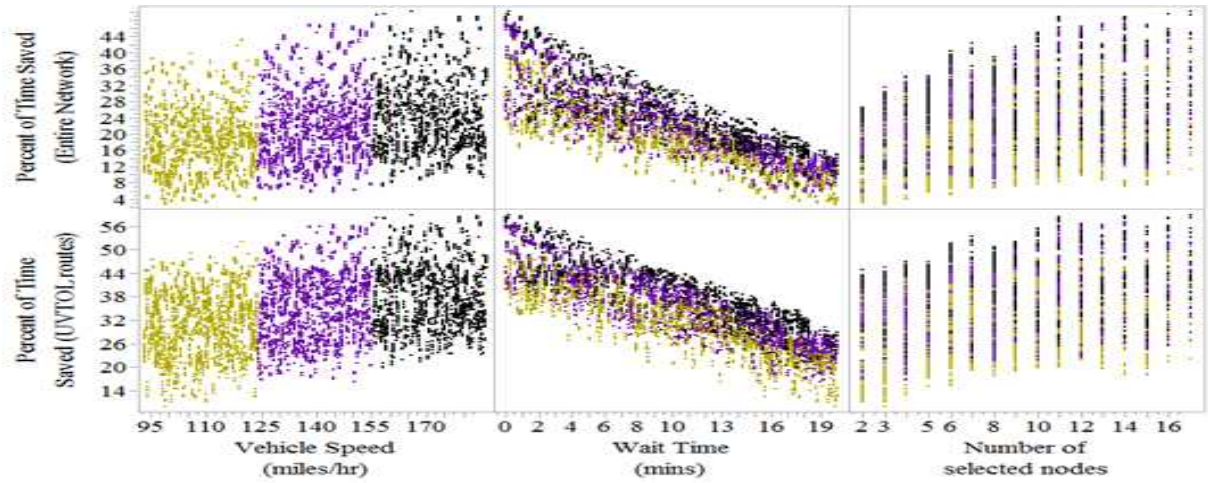


그림 149 비행체 속도 효과[45]

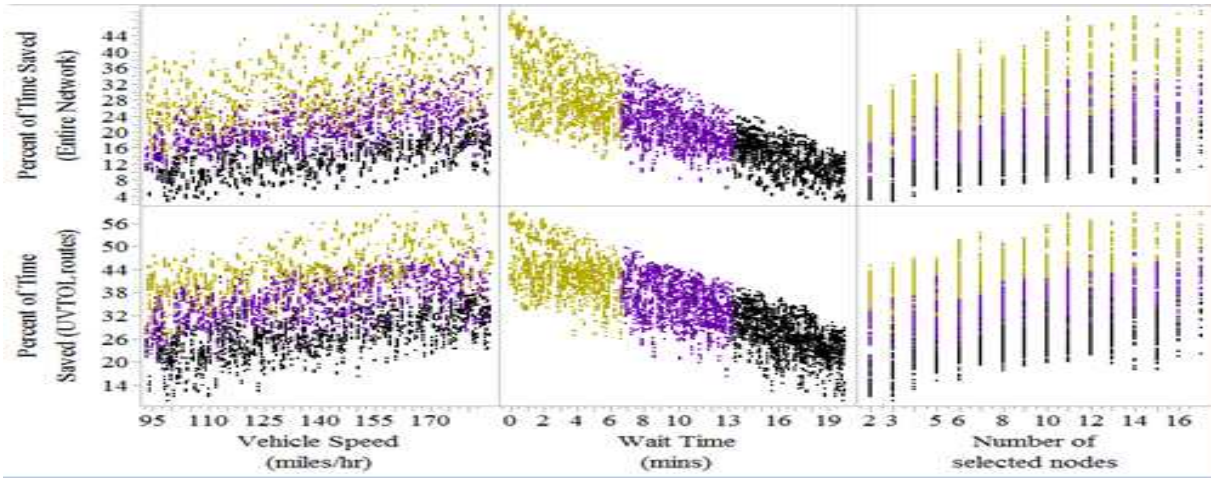


그림 150 대기시간 효과[45]

- 산점도 행렬을 사용하면 서로 다른 매개변수의 특정 값이 주어진 비교분석연구를 신속하게 분석할 수 있음

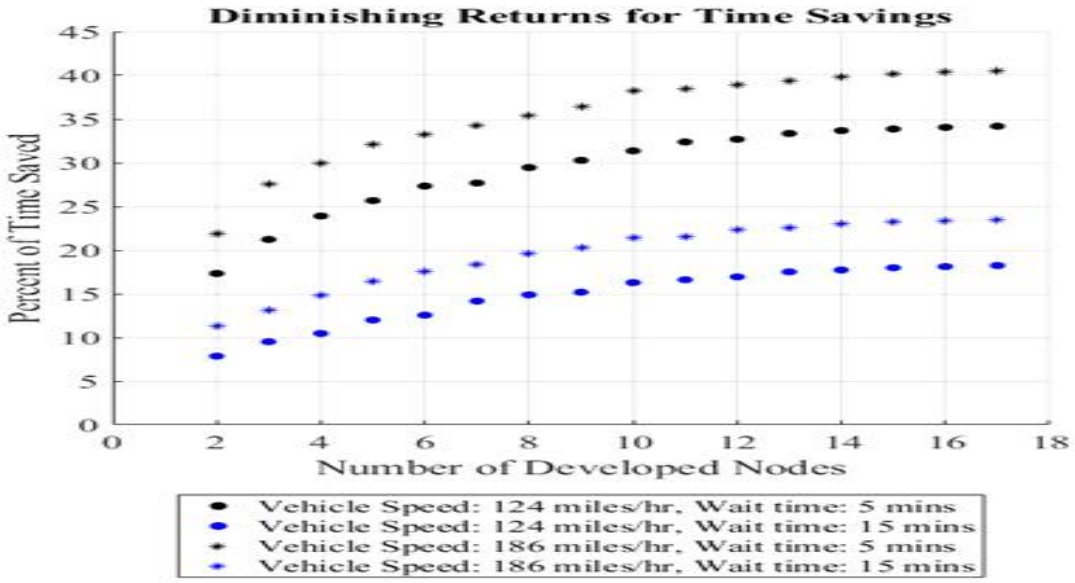


그림 151 수직이착륙장(vertiport)의 개수에 따른 감소 효과 분석[45]

- 위에 표시된 각 산점도 행렬에서 우리는 한 매개변수를 상수로 유지하고 다른 매개변수를 변화시키는 효과를 관찰함. 이를 살펴보는 더 유용한 방법은 주어진 시스템 메트릭을 달성하기 위해 네트워크가 설계되어야 할 매개변수를 다시 계산할 수 있다는 것임

- 위의 산점도를 보면, 노드 수에 따라 시스템 메트릭에 미치는 영향의 추세가 있다는 것도 명백함. 상식적으로 더 많은 노드가 더 나은 시간 절약으로 이어질 것이라는 것을 암시하는 반면, 위의 산점도에서 분명히 정체 상태를 유지하고 있음. 이를 더 자세히 조사하기 위해, 이번에는 다른 두 파라미터의 설정 조합 4개에서 더 많은 시도를 수행하여 또 다른 몬테카를로 시뮬레이션을 수행함

2-1-⑥. 모델 적용 및 다양한 시나리오 평가

○ 모델 적용 및 다양한 시나리오에 따른 결과 분석

- 앞에서 설명한 가상 도시 지역 매개변수를 사용하여 격자의 각 셀에 대한 UAM 승객 수요를 계산함(아래 그림). 가장 높은 승객 수를 보이는 곳은 비즈니스 구역과 공항임을 알 수 있음
- 가정에 따르면, 한 셀의 최대 승객 수는 75명임. 또한 고소득 지역은 눈에 띄는 승객 수를 보임(아래 그림의 오른쪽 하단과 비즈니스 센터에서 왼쪽 구역). 이 결과는 가장 높은 승객 수가 소득 및 인구 밀도가 높은 지역에 있다는 일반적인 논리를 따름

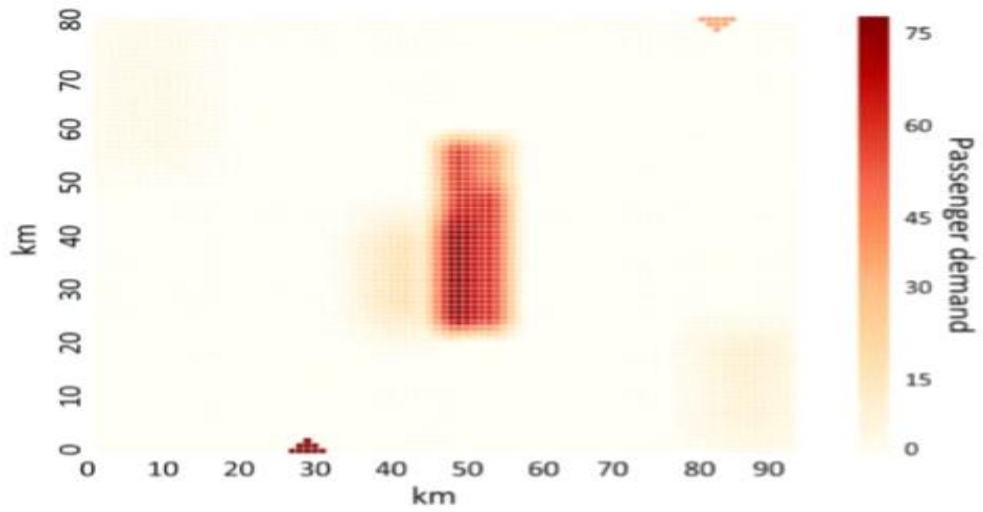


그림 152 가상 도시지역에서 모든 셀에 대한 승객 수[42]

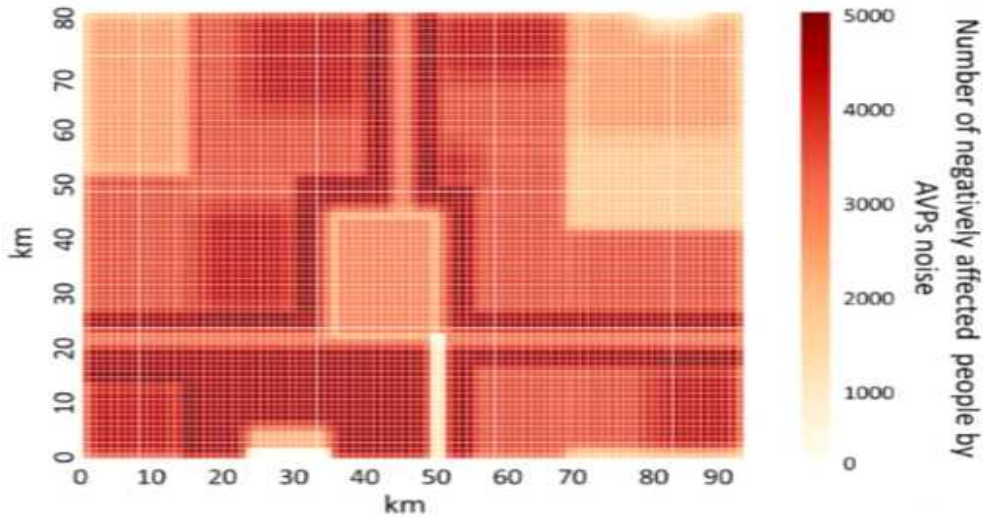


그림 153 가상 도시지역에서 모든 셀에 대해 소음 피해를 입는 인구수[42]

- 소음에 의해 부정적인 영향을 받는 사람들의 수를 추정하기 위해, 낮-밤의 평균 소음 수준을 수직이착륙장에 의해 생성된 소음 수준과 비교함. 수직이착륙장 소음 수준이 배경 도시 소음 수준보다 높다면 해당 지역에 수직이착륙장이 부정적인 영향을 미치는 것으로 가정함
- 위 그림에서 소음에 부정적인 영향을 받는 많은 거주자들이 인구 밀도가 높으며 조용한 지역에 있음을 알 수 있음

- 따라서 도시지역에는 새롭게 두 가지의 레이어가 생성됨
  - 승객 수
  - 각 셀에서 계산된 수직이착륙장 소음으로부터 부정적 영향을 받는 인구의 수
- 위 두 개의 레이어와 시나리오는 다음 모델링 블록인 “AVP Distribution"에 대한 입력값임
- 모델링의 목표는 인구, 소득 수준 및 배경 소음에 따라 도시 지역 내 수직이착륙장 세트를 계산 하는것임
- 모델링 과정은 총 세 가지 시나리오에 대해 수행되었음
  - 비즈니스 우선 - 수직이착륙장은 승객의 수가 가장 높은 곳에 위치함
  - 소음 우선 - 수직이착륙장은 인구에게 소음 영향이 가장 최소화되는 곳에 분배됨
  - 결합- 수직이착륙장은 최대의 승객과 최소의 소음 영향을 미치는 곳에 분배되도록 고려함
- 아래 그림은 도시지역 내의 수직이착륙장의 수와 승객 수를 나타냄. 또한 세 가지 시나리오에 대해 계산이 수행되었으며, 공통적으로 수직이착륙장이 많을수록 탑승자의 수가 많다는 것을 알 수 있음
- “비즈니스 우선” 은 다른 시나리오와 비교했을 때 지정된 수의 수직이착륙장에 대해
- 가장 높은 승객수를 보임. “소음 우선” 시나리오에서는 수직이착륙장이 많음에도 불구하고 다른 두 시나리오에 비해 승객 수가 많지 않다는 것도 주목해야 함
- 그러나 아래 그림만으로는 UAM 시스템 소음의 영향을 받는 거주자 수 측면에서 어떤 수직이착륙장의 구성이 가장 좋은지 정의할 수 없음

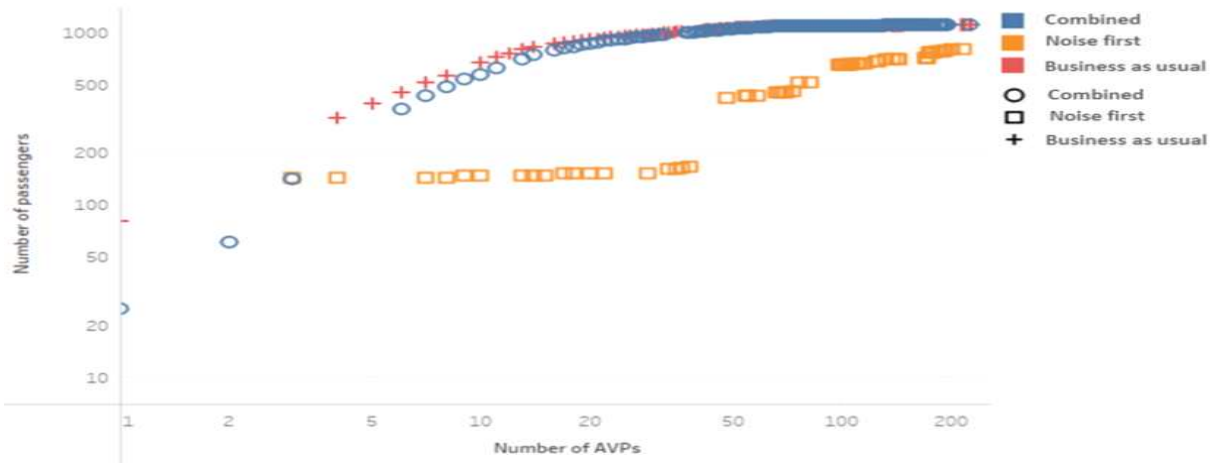


그림 154 가상 도시지역의 수직이착륙장 수에 따른 승객 수[42]

- 아래 그림은 소음에 의해 부정적인 영향을 받는 인구의 수와 수직이착륙장 수를 보여줌. 수직이착륙장이 많을수록 더 많은 사람들이 소음의 영향을 받음을 알 수 있음. UAT 시스템의 소음의 영향을 받는 최대 인구수는 200개 이상의 수직이착륙장에서 약 5%임
- 계산에 의하면 소음 친화적 시나리오(소음 우선)은 다른 시나리오에서 동일한 수직이착륙장 수에 대해 부정적인 영향을 받는 사람들의 수가 적음
- “비즈니스 우선” 시나리오에서는 수직이착륙장이 최대 승객 수요를 고려하여 배치되는 반면, “소음 우선” 시나리오에서는 인구에 대한 최소 소음 영향에 따라 분배됨
- 따라서 “비즈니스 우선” 시나리오의 구성에는 결과적으로 "결합” 및 “소음 우선” 시나리오보다 동일한 수의 영향을 받는 사람들에 대해 더 적은 수직이착륙장이 필요함

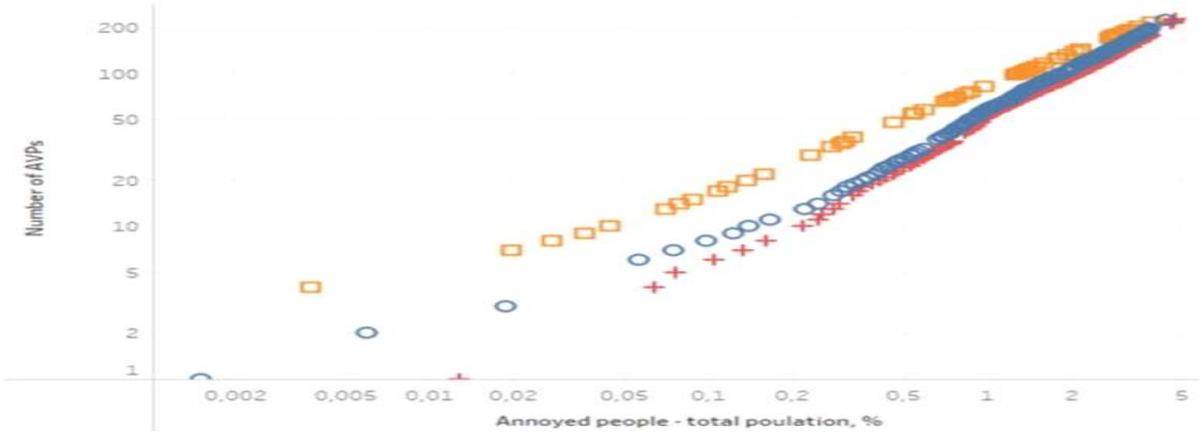


그림 155 가상 도시지역의 소음에 의해 부정적인 영향을 받는 인구수에 따른 수직이착륙장 수[42]

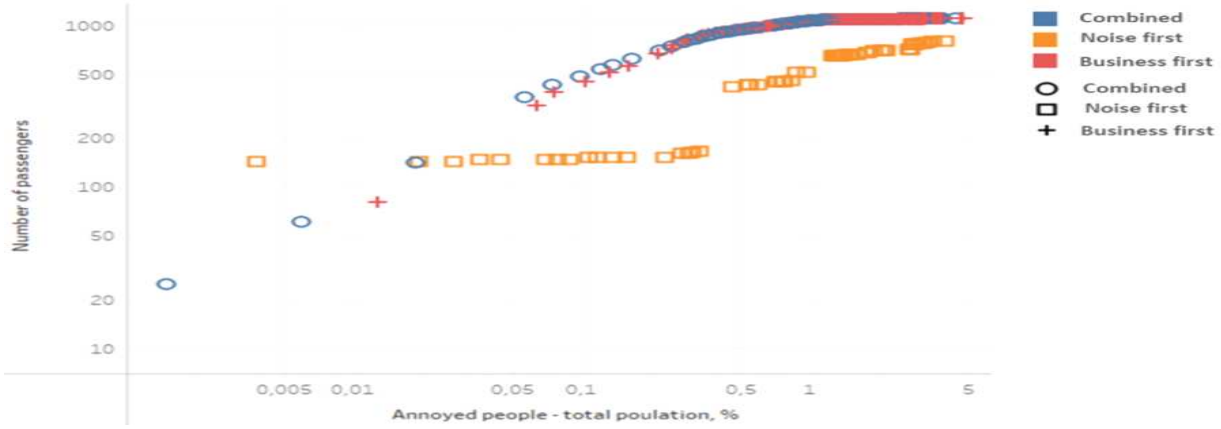


그림 156 가상 도시지역의 소음에 의해 부정적인 영향을 받는 인구수에 따른 승객 수[42]

- 위 그림은 소음에 의해 부정적인 영향을 받는 사람들의 수와 승객 수요를 보여줌
- “소음 우선” 시나리오의 예외적인 구성 중 하나는 4개의 수직이착륙장과 144명의 승객임(위 두 개 그림). 이 경우 0.005%보다 낮게 거주자에게 영향을 미침
- 이 경우 수직이착륙장은 사람이 거주하지 않기 때문에 소음의 영향을 받지 않는 공항과 소음 수준이 이미 높아 수직이착륙장 영향을 무시할 수 있는 비즈니스 센터 옆 번잡한 도로 영역에 배치될 수 있음
- 수직이착륙장을 추가함으로써 소음에 크게 영향을 받는 사람들의 수가 증가함(위 두 번째 그림). 그러나 소음 최소화 항목은 “소음 우선” 시나리오에서의 유일한 평가 기준이므로 승객 수는 비례적으로 증가하지 않음(위 그림)
- 따라서 소음이 적은 시나리오는 동일한 승객 수요에 대해 거주자에게 더 많은 부정적인 영향을 미침
- 또한, 도시 지역에서 부정적인 영향을 받는 인구의 수가 0.5%를 초과하고 수직이착륙장 수가 38개 일 때 “소음 우선” 시나리오의 승객 수는 166명에서 414명으로 크게 증가함(위 그림)
- 시나리오에 대한 최적의 공간 구성과 수직이착륙장 수를 정의하기 위해 승객 수, 수직이착륙장 사이의 총 거리(km), 수직이착륙장의 수 및 부정적인 영향을 받는 사람들의 수, 즉, 4가지 주요 매개 변수를 사용하여 5가지의 지표를 도입함
  - 승객*거리(pax-km) - UAM 시스템의 수입; 이 지표는 주어진 수직이착륙장 구성에서 많은 이익을 얻을 수 있음을 보여줌
  - 승객*거리/수직이착륙장의 수(pax-km-avp) - 수직이착륙장의 가중 수익; 시스템에서 한

개의 수직이착륙장 당 얼마나 많은 수익이 발생하는지 보여줌. 이 지표는 낮은 수직이착륙장 수와 높은 수익을 권장함

- 승객*거리/AVP의 수^2(pax-km-avp2) - AVP의 가중 수익; 이전 지표와 달리 수익이 높은 수직이착륙장이 더 많도록 권장함
- 승객*거리/(AVP의 수*부정적인 영향을 받는 인구 수)(pax-km-avp-ap) - 수직이착륙장에 의한 가중 수익과 부정적인 영향을 받는 인구의 수
- 승객*거리/(AVP의 수*부정적인 영향을 받는 인구 수)^2(pax-km-avp-ap^2) - 수직이착륙장에 의한 가중 수익 및 부정적인 영향을 받는 인구의 수

- 제시된 지표들을 이용하면 시나리오에서 다양한 목표에 대한 다양한 구성의 성능을 정의 할 수 있음
- 아래 그림은 부정적인 영향을 받는 인구 수와 pax-km를 나타냄

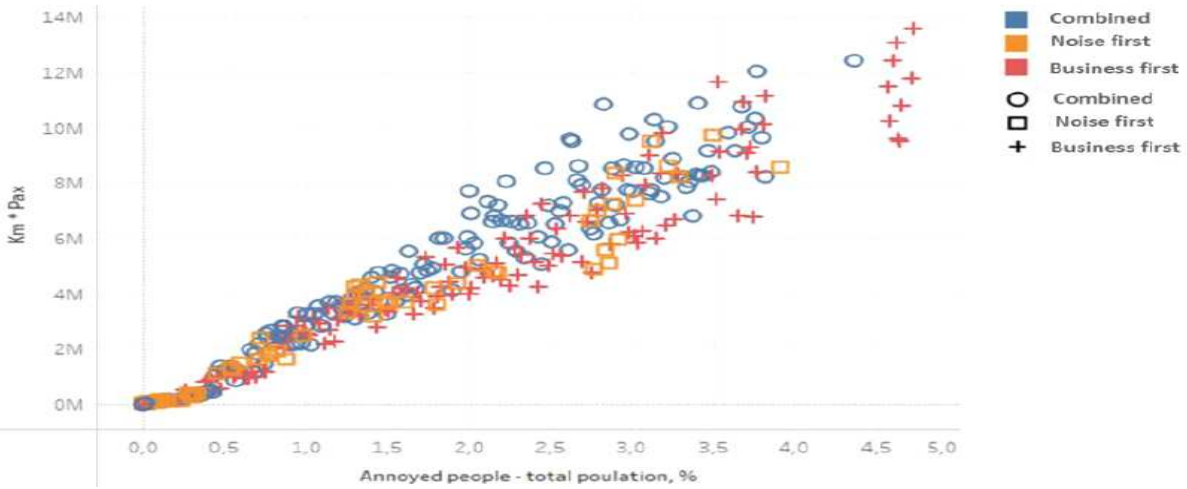


그림 157 소음에 의해 부정적인 영향을 받는 인구수와 pax*km에 대한 3개의 시나리오의 공간적 수직이착륙장 배열[42]

2-1-⑦. 도심 항공 모빌리티 소음: 진행중인 연구, 차이점 및 권고 사항

○ 연구목적

- NASA는 “Advanced Air Mobility (AAM)” 라는 용어를 사용함으로써 지역 간 및 지역 내 임무를 위한 안전하고 지속 가능하며 저렴하고 접근성이 좋은 항공 서비스를 설명하고자 하였음[51]
- AAM은 화물 및 여객 운송 임무와 인프라 점검과 같은 기타 항공 임무를 포함한 교외 및 도심 지역 임무를 내포하고 있음
- 이러한 임무가 수행 가능한 항공기 유형에는 중소형 무인 항공기 시스템(UAS), 기존의 전기 구동 이착륙 항공기(eCTOL), 전기동력 수직 이착륙 항공기(eVTOL)이 있음
- UAM을 기존의 운송 시스템에 통합하는 것은 세계적으로 많은 연구가 이루어지고 있음
- 일반적으로 UAM은 항공기 소음에 노출되어있지 않던 인구 밀집 지역에서 비교적 낮은 고도로 수많은 임무가 수행되어질 것임[11,49,51]
- 소음 감소 기술개발 및 기술적 타당성 입증은 매우 중요하며 소음 제한, 테스트 방법 및 절차를 포함한 소음 규제 표준의 개발과 잘 맞물려야함
- 기존 항공기를 위해 개발된 많은 소음 예측 도구와 측정 소음 데이터베이스가 있음. 이는 규제 기관과 업계에서 소음의 영향을 평가하는 데 도움이 될 것임
- 그러나 소음의 특성은 기존 헬리콥터 및 일반 항공기와는 다를 것으로 예상되며, 소음 예측

및 감소에 대해 유사한 수준의 신뢰도에 도달하기 위해 새로운 도구와 기술이 개발되어야함

- 이 NASA의 백서는 소음 예측, 검증, 소음 감소, 저소음 운영 절차, 대중들의 인식에 대한 지표, 지상 및 비행 테스트 측정방법에 대한 UAM 도구 및 기술의 차이점/요구를 식별하는 것임

○ 기체의 종류

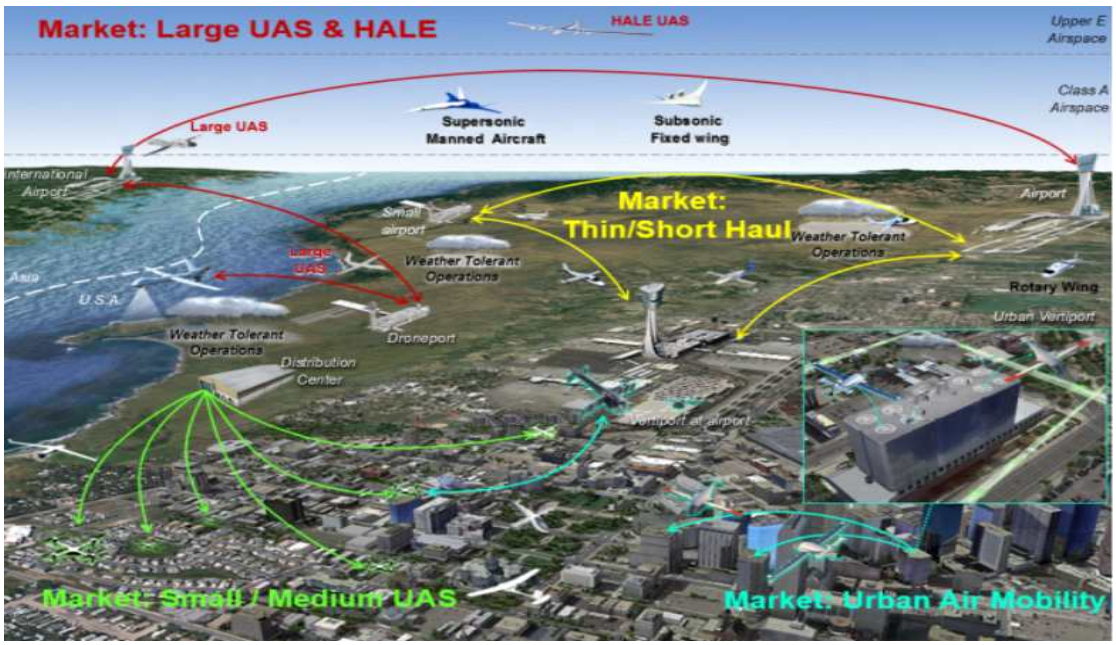


그림 158 기존 공역으로의 UAM 통합[49]

- NASA는 중소형 UAS, UAM 및 단거리 시장을 포함하는 다양한 임무를 표현할 개념적 공역을 개발하였음
- 위 그림은 개념적 공역을 보여주며 오른쪽 하단에 잠재적 UAM 시장이 포함되어 있음
- 아래 그림은 NASA Aeronautics Emerging Aviation Markets (EAM) Tiger Team이 2017년에 정의한대로 각 시장에 대한 정의를 제공함.

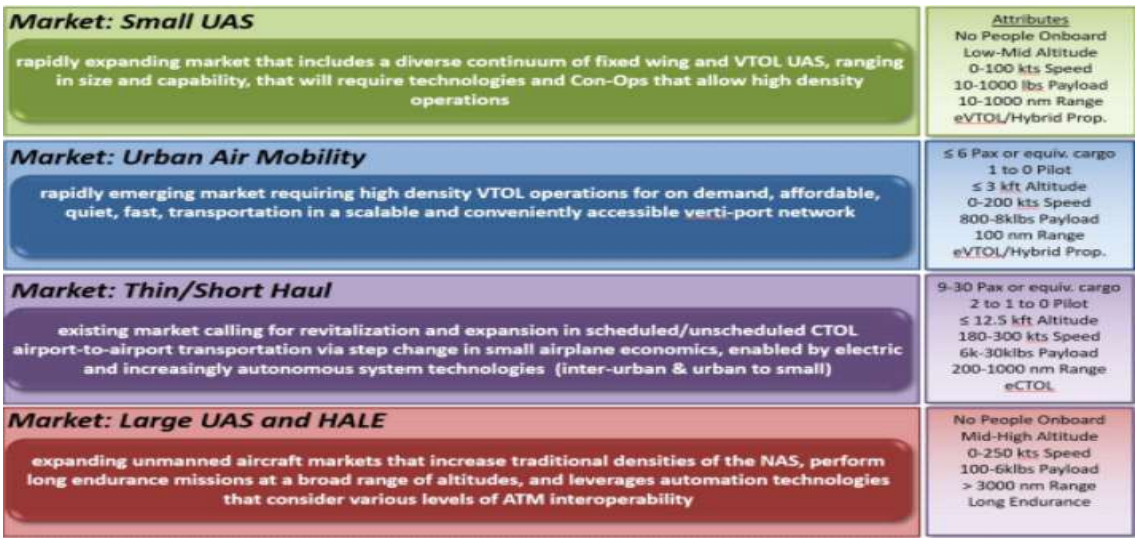


그림 159. NASA의 TIGER TEAM이 정의한 기체 속성[49]

- UAM은 vertiport 근처와 소음에 민감한 지역을 비행하기 때문에 소음 저감이 필요한 빠르게 떠오르는 시장으로 인식되고 있음
- 기체의 속성은 아래와 같음
  - 최대 6명의 승객 혹은 승객 무게에 상응하는 화물을 수용
  - 유인 조종 혹은 자율비행으로 914m (3,000ft) 이하의 고도에서 185km (100nm) 거리의

임무를 수행

- 최대 370km/h (200kt)의 비행 속도와 363kg-3,629kg (800lb-8,000lb)의 탑재 하중을 가짐
- 배터리만을 이용하거나 하이브리드 전기 추진을 이용
- 틸트 로터를 이용하는 기체
- 수직 이착륙에 사용되는 로터의 수를 줄이며 순항 중에 하나 이상의 프로펠러를 사용하는 기체

- 기체의 종류에는 이착륙과 순항에 모두 스러스터를 사용하는 “백터 추진”, 이착륙과 순항에 독립적인 스러스터를 사용하는 “리프트+크루즈”, 또는 벡터링 없이 이착륙 전용 스러스터만을 사용하는 멀티콥터가 있음
- NASA의 RVLT (Revolutionary Vertical Lift Technology) 프로젝트는 기술과 기술이 임무 요건에 미치는 영향을 평가하기 위한 몇 가지 기준 기체를 정의하였으며, 일부가 아래 그림에 포함되어 있음



그림 160. NASA의 RVLT에서 정의한 기준 기체 중 일부 유형[52]

- 헬리콥터 소음

- 현재 운용 중인 항공기 중 헬리콥터(틸트로터 포함)는 운용 측면에서 UAM 기체와 가장 유사함
- 헬리콥터는 주거 지역과 가까운 헬기장에서 운영됨. 비행은 고정익 항공기에 비해 낮은 고도에서 이루어짐
- National Academy of Sciences에서 발표한 연구에서는 헬리콥터 소음으로 인한 지역사회 피해에 대해 현재 알려진 내용을 다룬 바 있음[53]
- 이 연구에는 음향 및 비음향 요인, 고정익 항공기가 제공하는 소음 성가심과의 차이점이 포함되어 있음. 주요 목표는 헬리콥터 소음이 고정익 항공기 소음보다 더 성가신지 조사하는 것이었음
- 상업용 헬리콥터와 고정익 항공기에 노출된 공항 인근 3개 도시 지역 주민들을 대상으로 설문조사를 실시한 결과 비슷한 소음 노출 수준에 대해 경량 민간 헬리콥터 소음과 고정익 항공기 소음 사이의 성가심의 차이를 결정적으로 찾지 못하였음
- 그럼에도 불구하고 헬리콥터에 대한 소음 불만은 계속해서 문제가 되고 있음. 불만 사항은 뉴욕시, 로스앤젤레스, 하와이와 같은 지역에서 FAA에 등록되었으며 그랜드 캐니언과 같은 국립 공원에서 항공 여행 산업에 의한 비행도 수년간 문제로 제시되어 일부 비행이 제한되었음[54]
- 위와 같이 UAM에 도움이 되는 헬리콥터의 소음 문제의 교훈과 모범 사례가 있음

- UAM 소음

  • UAM의 경우 헬리콥터보다 더 많은 수가 비행할 것으로 예상되기 때문에 추가적인 인구가 일상적으로 항공기 소음에 노출될 가능성이 있음

  • 지금까지 인구 밀집 지역의 소음 변화는 소음 불만의 형태로 나타났으며, 잠재적으로 버티포트 부지를 제한할 수 있는 엄격한 지역 소음 조례를 요구할 수 있음

  • 버티포트는 저고도 비행 및 이착륙으로 인해 UAM 소음이 가장 높은 인구 밀집 지역에 위치할 가능성이 높음. 이러한 모든 고려 사항은 오늘날 헬리콥터 소음과 관련된 문제와 유사함. 또한, 지역사회에 UAM 운용에 관한 정보를 제공하고 소음 불만을 완화하는 활동은 중요할 것임

  • UAM 소음 평가의 고유한 과제는 기존의 항공기 설계와 스펙트럼 및 시간 특성 측면에서 완전히 다른 음향 신호를 가질 수 있다는 것임

○ 도구 및 기술

- 이 섹션은 주로 소음 감소 기술의 연구 및 개발, 소음 인증 요구 사항 준수를 위한 UAM 기체 설계 및 UAM 운영으로 인한 지역사회 소음 영향 평가를 지원하는 소음 예측 도구에 관한 것임

- 주요 소음원

  • UAM 기체 소음은 기존 회전익기의 소음과 다름. 수직 방향 이동의 경우 기존 헬리콥터 및 틸트로터는 하나 또는 두 개의 로터를 이용하지만 UAM 기체를 들어 올리는 데에는 더 많은 로터가 사용될 것으로 예상됨

  • 기존 회전익 항공기와 달리 일부 UAM 기체의 로터는 다양한 회전 속도로 작동할 수 있고 팁 마하수가 더 낮고 기능에 따라서는 추진 시스템이 다를 수 있음(예: 수직 이착륙용 로터와 결합된 전진 비행용 푸셔 프로펠러)

  • 위와 같은 UAM 기체 로터의 기능은 기존 회전익 항공기에 비해 로터 소음의 주파수 특성과 시간적 특성을 변경시킴

  • 로터와 기체 구성 요소 사이의 상호 작용은 기존 회전익 항공기에 비해 소음의 특성을 변화시킬 것으로 예상됨

  • 그림에는 블레이드-와류 상호 작용(BVI), 블레이드-기체 상호 작용(BAI), 동체-후류 상호 작용(FWI) 및 안정적인 로터 로딩이 포함된 일부 상호 작용에 대해 설명하고 있음

  • 아래 그림에 설명되지 않은 다른 많은 소음 발생 조건들도 있음. 예를 들어, 동축 구성의 로터 쌍에는 로터 간 간섭이 있을 수 있으며 덕트팬은 지지 구조(고정자, 베인 등)를 간섭함

  • 기존 회전익기에서 평행 블레이드-와류 상호 작용으로 인한 BVI 소음은 수평 비행에서 상당한 영향을 미칠 수 있으며 일반적으로 하강비행에서 지배적임

  • UAM 기체의 경우 수직 이착륙 또는 전진 비행 전환 시에 대해 BVI 소음이 발생할 수 있으나 로터 팁 속도가 더 낮으면 기존 회전익 보다 덜 지배적이게 됨

  • 이 상호 작용은 예상되는 로터 배치로 인한 interrotor 효과(기존의 탠덤 회전익기와 유사)일 수 있음

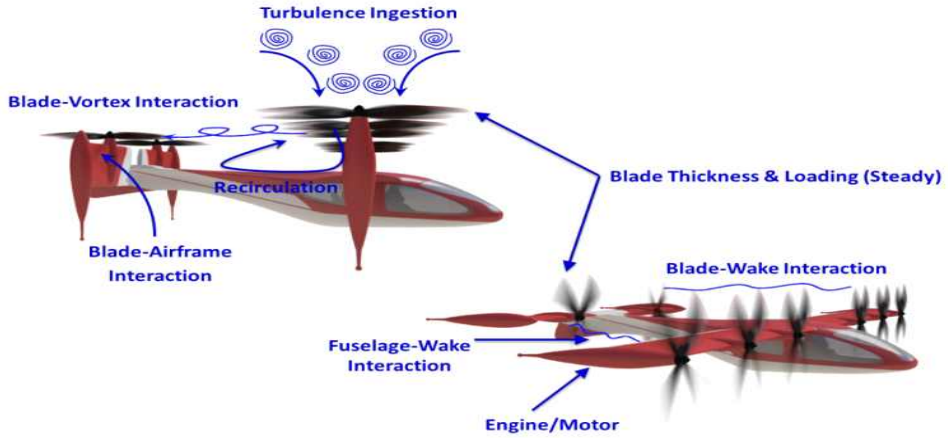


그림 161 일부 UAM 기체의 잠재적 소음원

- 순항 비행에서 BVI 소음이 존재할 수 있지만 로터가 프로펠러가 되면 덜 지배적이게 됨. 그러나 일부 구성에는 전방에 있는 프로펠러의 후류에 영향을 받는 후방 프로펠러가 있을 수 있음
- 기존 회전익 항공기에서 BAI는 일반적으로 로터가 가깝지 않기 때문에 소음원이 적고 기체의 트림 상태에 더 많은 영향을 미침
- 많은 UAM 기체에서 로터와 프로펠러는 앞전이든 뒷전이든 날개에 가까움. 이 근접성은 날개의 유동장에 영향을 미치고 날개 통과 주파수(BPF)에서 불안정한 하중을 일으켜 날개 자체를 추가 소음원으로 만듦
- 날개가 생성하는 잠재적인 유동장은 로터의 비정상 부하 구성 요소를 증가시키는 로터에 대한 주기적인 충격으로 구성되어짐
- 로터가 동체 근처를 통과하는 경우에도 BAI와 유사한 효과가 발생할 수 있음. 로터가 날개나 동체 뒤에 있으면 로터가 날개나 동체의 후류를 흡수하여 로터의 불안정한 하중 소음을 증가시켜 FWI 소음을 발생시킴
- 제안된 많은 UAM 기체에 대한 로터 배치 및 수로 인해 BAI와 FWI는 기준 회전익 보다 더 중요한 소음원이 될 것으로 예상됨
- 낮은 로터 팁 속도와 서로 근접한 여러 로터의 BWI (Blade-Wake Interaction)으로 인해 광대역 소음이 기존 회전익보다 UAM 기체에서 더 중요할 것으로 예상됨
- 광대역 소음원에는 각 로터에서의 개별적인 자체 소음, 로터 간 및 로터 내 상호작용으로 인한 BWI 소음, 대기 난류 흡수 소음(TIN)이 포함됨
- 로터는 전기 모터로 구동되고 배터리 또는 하이브리드 전기 시스템으로 구동될 것임. 로터를 구동하는 전기 모터는 일반적으로 기존 회전익 항공기에 존재하지 않는 UAM에 대한 추가 소음원이 될 수 있음
- 하이브리드 전기 시스템에는 보조 동력 장치 또는 터빈 발전기가 포함될 수 있으며 이 장치 역시 고유한 소음 특성을 가짐

- 소음 전파

- UAM 기체 소음의 소리 전파는 다른 소음과 다르지 않음. 그러나 UAM 항공기의 운영 환경은 버티포트, 건물 밀도 및 인구 밀도가 높은 지역을 포함할 가능성이 높기 때문에 공항 근처에서의 항공기 운영보다 회전익 항공기 운영과 공통점이 더 많음
- 도시 환경의 국지적 바람과 대기 조건은 UAM 비행 성능뿐만 아니라 소리 전파에도 영향을 미침

- 단기 진입 항공기는 주차장이나 옥상과 같이 용도가 변경된 환경에서 이착륙할 수 있다고 제안된 바 있음
- 그러나 미래의 버티포트는 단기 진입 항공기 및 현재 헬기장이 사용하는 환경과 매우 다를 수 있음. 이러한 버티포트는 다양한 구성을 가질 것이며 건물과 같은 반사 구조물을 포함하게 될 것임

- 지표에 따라 소음이 미치는 영향
- 소음 인증 및 지역사회 소음 평가에 일반적으로 사용되는 지표 외에 가청도 예측에 사용되는 시변 음량과 같은 대체 지표를 계산하려면 대체 또는 증강된 분석 도구가 필요할 수 있음
- 실외 및 실내에서의 소음의 영향은 사람들이 다른 설정의 소음에 대해 다르게 반응하기 때문에 연구가 필요함

○ 현재 연구

- 소음 감소 기술의 연구 및 개발을 지원하는 소음 예측 도구와 소음 인증 요구 사항을 준수하기 위한 UAM 기체 설계에는 공통점이 존재함
- 지역사회 소음 영향 평가에 대해선 상당한 차이점이 존재함
- 연구 및 설계 도구
- 시스템 소음 예측
  - ✓ NASA의 2세대 항공기 소음 예측 프로그램(ANOPP2)과 같은 시스템 소음 예측 도구는 연구 및 설계를 지원하는 데 자주 사용됨[55]
  - ✓ 아래 그림은 일반적으로 소음원 정의, 소음 전파 및 규정된 소음의 영향을 받는자의 지점 및 소음 발생 조건에서의 소음 인증 지표 계산을 포함하여 소음원-경로-소음의 영향을 받는자 패러다임의 모든 요소를 통합한 것임
  - ✓ 패러다임의 대부분은 비행 시 소음의 영향을 받는자를 중점으로 하며 시간에 따른 시뮬레이션 형태로, 이 시뮬레이션에서는 지연된 시간과 위치에서 소음의 영향을 받는자에 대한 소음 정의에 기초하여 소음의 전파가 계산됨

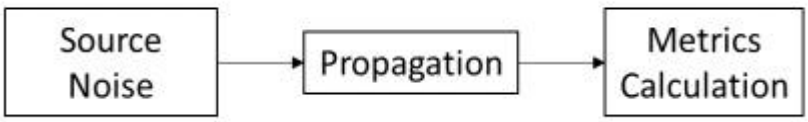


그림 162 시스템 소음 예측 요소

  - ✓ 소음 인증 규정에는 비행, 이륙 및 착륙 중 소음 한계를 충족하도록 기체 설계를 요구하는 특정 측정 기준(EPNL), 소음 노출 수준(SEL 등)의 소음 수준이 규정되어 있음
  - ✓ 또한 이러한 지표는 지역사회 소음 평가에 사용하기 위한 지표 생성에도 사용될 수 있음
  - ✓ 소음원
    - ◆ 기체 외부에서의 소음원
      - ▪ 하이브리드 접근법은 일반적으로 아래 그림에서와 같이 회전 소음을 예측하는 데 사용됨
      - ▪ 하이브리드 접근법은 플로우 솔버, 블레이드 모션(CSD) 솔버, 그리고 소음 솔버 등 한 가지 방법을 사용하여 블레이드 하중을 결정함
      - ▪ 블레이드 하중은 격자 볼츠만 방법(LBM)을 포함한 계산 유체 역학(CFD) 분석 또는 포괄 분석(CA) 방법을 통해 결정할 수 있음. 두 경우 모두 정확한 블레이드 지오메

트리 정의가 필요함

- 블레이드 모션은 CSD 방법에 공기역학적 하중을 적용하여 결정되며, 대부분 포괄적인 분석을 통해 결정됨
- 블레이드 하중, 블레이드 모션 및 트림 상태가 수렴될 때까지 블레이드 하중과 블레이드 모션 솔버 사이에 반복 조정이 있음
- 소음 예측은 후속적으로 시스템 소음 예측을 할 수 있는 소음 솔버를 사용하여 수행됨
- 소음 솔버는 일반적으로 Ffowcs Williams-Hawkings(FWH) 방정식의 하위 집합에 대한 해결책을 가지고 있음[56]. 이 하위 집합에는 일반적으로 소음으로부터 근거리 및 원거리에서 모두 유효한 소음원만 포함됨. 그 후에 원거리에서의 소음 영향 솔루션은 소음에 영향을 받는 사람들에게 전파될 수 있으며 종종 compact한 소음원을 가정함

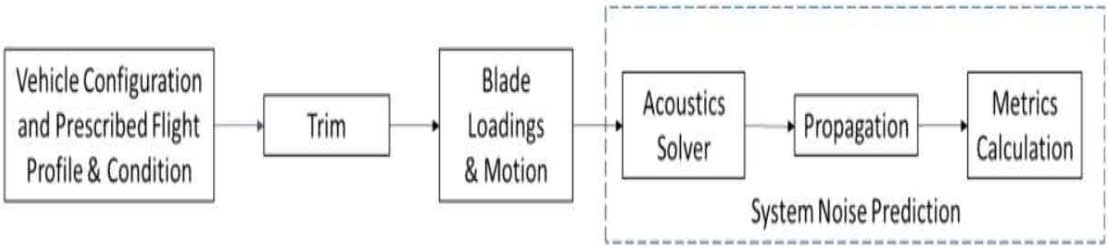


그림 163 회전 소음 예측을 위한 하이브리드 접근 방식

- 반경험적 모델은 블레이드 자체 노이즈와 같은 일부 비결정적(광대역) 소음원에 자주 사용됨. 격자 볼츠만 방법을 사용하는 다른 모델도 광대역 소음의 일부 구성 요소를 계산할 수 있음

◆ 기체에서의 소음원

- 기체의 추진 시스템 구성요소에서 발생하는 추진 기체 공기 음향(PAA) 효과에는 공기역학적 효과와 음향 효과가 모두 포함됨
- 공기역학적 효과는 다중 로터 구성에서 로터-로터 상호작용과 같은 소음원 생성을 변화시킴
- 음향 효과는 또한 동체에서의 소음 반사와 같이 소음 전파 형태를 변화시킴
- 기체에서의 소음원은 기체 밖에서의 소음보다 소음을 증가시키는 요인에 해로운 영향을 미치나 일부 소음원은 소음 감소 기술의 개발에 통합될 때 유익할 수 있음

◆ 검증 데이터

- 소음 예측을 위해 기존 방법이 UAM 기체를 평가하고 설계하는 데 중요한 영향을 포착할 수 있도록 데이터가 필요함
- 최근 몇 년 동안 이 새로운 기체 설계와 관련된 문제를 요약하는 것을 목표로 실험적인 측정이 이루어짐. 이러한 실험에는 단순 구성과 복잡한 구성이 모두 포함됨
- 이러한 실험은 문제의 특정 측면을 연구하지만 일반적으로 소형 기체 구성 요소에 대한 것임
- 규모와 블레이드 종횡비 차이가 지식 기반을 훨씬 벗어난 실험의 결과가 실제 UAM 기체의 결과를 나타내는지 여부는 명확하지 않음[57,58]

◆ 전파

- 소리 전파 도구는 지상 또는 근처 소음의 영향을 받는자에게 공기 중 소음원을 전파하는 데 사용됨
- 밀집된 소음원이 가정되고 소음에 영향을 받는자의 위치는 일반적으로 고정되어있

음

- 소음 전파에는 소음원을 기준으로 하는 시간 영역 접근과 소음에 영향을 받는자를 기준으로 하는 주파수 영역 접근 방식이 있음
- 두 가지 접근 방식은 소음의 영향을 받는자로부터 비교 가능한 소음 지표를 생성함
- 소음 전파는 확산 손실, 시간 지연 및 대기 흡수의 세 가지 효과를 고려해야함 또한 지형으로부터의 소음 반사를 고려해야함
- 저공비행의 경우 구면파(평면파)를 설명할 수 있는 정교한 지형 반사 모델이 필요함
- 일부 연구는 UAM 기체 소음 예측을 도시 소음 전파와 통합하기 시작하였음[59]

• 소음원 감소 기술

✓ 소음원 감소 기술은 구성에 따라 크게 다름. 일반적으로 소음으로부터 원거리에서 두께 소음 및 하중 소음 등 아음속 회전 소음원에 대한 몇 가지 주요 관계가 있음

✓ 두께 소음에 큰 영향을 미치는 요소에는 블레이드 형상(두께가 2배가 될 때마다 두께 소음이 6dB씩 증가함)과 블레이드 표면 가속도 및 표면 마하수가 있음

✓ 두께 소음은 기체의 방향이 지상을 향할수록 증가함

✓ 하중 소음에 큰 영향을 미치는 요소는 표면 압력

✓ Trim

- 주어진 기체 구성, 임무 형상 및 비행 조건의 경우 먼저 기체의 트림 상태가 결정됨. 규정된 정상 상태 비행 조건을 달성하려면 기체에 작용하는 평균 힘과 모멘트가 상쇄되어야 하며 이를 기체가 트림 상태라고함
- 기체의 트림은 구성에 따라 다르기 때문에 완전히 다른 구성을 가진 두 대의 기체(예: 기존의 메인 로터-테일 로터 헬리콥터와 쿼드로터 UAM 기체)는 동일한 비행 조건에서 운용될 수 있지만 완전히 다른 방식으로 비행할 수 있음
- 다중 로터의 도입과 로터 회전 속도와 같은 매개변수 변경 기능이 예상되는 UAM 기체는 동일한 기체에 대해 동일한 비행 조건을 비행할 수 있는 여러 중복성을 도입함
- Trim 상태 달성을 위해 기체를 제어하는 방법은 소음 발생에 큰 영향을 미칠 수 있음
- 현재의 Trim 방법은 지정된 제어 방식으로 여러 로터를 처리할 수 있도록 잘 갖추어져 있음
- 이러한 방법은 기본적인 잠재적 공기역학 상호작용을 포함하면서 각 로터에 주기적인 제어 솔루션을 부과하거나 시도하게됨

○ 지상 및 비행 테스트

- 소음 감소는 전 세계적으로의 항공기 운영 확산과 수용을 가능하게 하는 중요한 단계임
- 지상 및 비행 테스트는 항공기의 소음 전파에 대한 이해와 소음 감소 방법을 구현하는데 필수적이었음
- Advanced Air Mobility (AAM)의 새로운 시대가 열리면서 현대식 고정익 및 회전익 항공기를 테스트하기 위해 개발된 기존 방법과 기술 중 많은 부분을 UAM 기체에 적용하기 위해 수정해야 할 수도 있음
- 이 섹션에서는 소음 테스트에 대한 이유와 항공산업 전반에 걸쳐 이미 보편적인 관행에 대한 높은 수준의 평가에 대해 논의함
- 항공산업 전반에 걸친 관행을 새로운 UAM 플랫폼에 적용할 때의 문제점과 잠재적인 격차를 식별하고 향후 측정 표준을 개발하는 프로세스에 대한 개요를 제시할 것임

- 소음 테스트를 수행하는 이유

  - 제조업체, 정부 또는 연구기관이 소음 테스트 캠페인을 시작하는 데에는 여러 가지 이유가 있음
  - 새로운 항공기 개념을 개발하는 동안 항공기 설계에 사용되는 모델링 도구의 유효성은 종종 알려지지 않았음
  - 테스트는 새로운 모델이 모델링 도구를 사용하여 설계를 안내하기에 충분한 정확도로 소음원을 포착하는지에 대한 통찰력을 제공하기 위해 수행됨. 또는 구성요소 테스트 데이터를 사용하여 물리학 기반 모델보다 계산적으로 더 효율적일 수 있는 경험적 또는 반 경험적 모델을 개발할 수 있음
  - 테스트는 종종 풍동 또는 무향실 시설에서 모델 규모로 먼저 수행되지만, 인증을 받게 될 보다 성숙한 설계는 일반적으로 전체 규모의 비행 테스트가 필요함
  - 전체 규모 테스트 중에 예상치 못하거나 원하지 않는 소음원이 식별됨. 이러한 문제를 진단하고 완화하는데 필요한 위상 배열 측정과 같은 테스트 요구사항은 인증에 필요한 요구사항보다 훨씬 더 복잡함
  - 이러한 대규모 연구를 수행하는데 드는 비용으로 인해 많은 항공기가 인증 요구사항을 충족하지 못할것으로 예상되지 않는 한 이러한 수준의 테스트를 거치지 않음
  - 항공기에서 소음이 어떻게, 언제, 어디서 발생하는지 이해하는 것은 항공기가 지역사회에 어떤 영향을 미치는지 이해하는 데 중요함
  - 최근 사용되는 소음 인증 비행 테스트 절차는 민간 공항에서 개별 항공기에 의해 발생하는 소음을 평가하기 위해 개발되었음
  - UAM 소음 감소 기술 및 측정 기술의 시연은 새로운 소음 규정의 개발을 지원할 것임
  - 공항 소음 모니터링 시스템과 다른 교통수단에 사용되는 소음 모니터 및 측정 기술이 UAM 기체에도 유용하고 적절할 수 있다는 점에 유의하는 것 또한 중요함
  - 방법의 적절성을 평가하려면 UAM 기체의 데이터가 필요함. 또한 실체 기체 소음의 주관적인 평가를 위한 데이터 확보가 필요함
  - 이는 테스트에 참여한 배심원단을 통해 평가하거나 후처리 데이터를 사용한 청각화(auralization) 방법을 통해 평가할 수 있음
  - 다음 섹션에서 연구 및 인증 비행 테스트에 대해 사용되는 일반적인 방법 중 일부를 소개함. 이러한 방법 중 일부는 인구 밀도가 높은 도시 환경에서의 UAM 운영에 부적절할 수 있음. 현재 방법의 한계는 이 섹션 뒷부분에서 논의될 것임

- 현재 사용 방법

  - FAA와 ICAO에서는 항공기 소음 인증 표준 및 별도의 항공기 범주에 대한 측정 절차를 정의함. 절차의 세부 사항은 항공기 유형마다 다르지만 일반적인 접근 방식은 동일함

표 34 UAM 기체에 적용될 소음 인증 절차

Annex 16 † / Part 36 ‡	Aircraft Type / Noise Certification Metric	Procedure
Chap. 8 / App. H	Helicopters / Noise certification metric: EPNL	Noise is measured with 4 ft. (1.2 m) microphones at three positions (center and ± 150 m) oriented perpendicular to the flight path for three prescribed flight conditions, "approach", "takeoff" and "flyover".
Chap. 10 / App. G	Propeller-driven airplanes not exceeding 8,618 kg. / Noise certification metric: L_{Amax}	Noise is measured with a single inverted ground microphone for a prescribed takeoff condition.
Chap. 11 / App. J	Helicopters not exceeding 3,175 kg maximum certificated takeoff mass. / Noise certification metric: L_{AE}	Noise is measured with a single 4 ft. (1.2 m) microphone for a prescribed flyover condition.
Chap. 13 / App. K	Tiltrotors / Noise certification metric: EPNL	Noise is measured with 4 ft. (1.2 m) microphones at the same locations as in App. H. See below for additional details.

- 항공기는 아래 명시된 경우를 제외하고 지면에서 1.2 m에 위치한 하나 이상의 마이크를 통해 통제된 비행 조건으로 비행함
- 소음 신호는 지정된 범주의 소음 한계와 비교하여 특정한 소음 메트릭으로 변환되고 항공기의 소음 준수 여부가 결정됨
- UAM 항공기에 적용될 수 있는 기준 소음 인증 및 절차는 위의 표와 같음
- 틸트로터 항공기에 대한 소음 인증 절차는 틸트로터 항공기의 자유도와 UAM 항공기에 존재하게 될 자유도 사이에 몇 가지 유사점이 있기 때문에 UAM 항공기와 관련하여 가장 적절할 것임
- 인증은 헬리콥터 인증에 사용되는 것과 매우 유사한 접근, 이륙 및 비행 절차를 통해 수행됨. 틸트로터 항공기는 VTOL/Conversion 모드에서 작동하도록 제한되며, 나셀 각도는 zero airspeed에 인증된 나셀 각도에 가장 가까운 위치에서 유지됨
- 이로 인해 항공기가 비행기 모드로 작동된 경우와 매우 다른 소음 결과가 나타남
- 위에서 설명한 것과 유사한 비행 소음 측정은 SAE AIR 1845 standard, AEDT 기술 매뉴얼 및 기타 참조에 따라 기체별 NPD 데이터를 구성하기 위한 기초로 가장 자주 사용됨[60-62]. NPD 데이터는 시스템 소음 분석에서 직접 생성될 수도 있음[63]
- 연구 기반의 방법은 일반적으로 대형 접지 어레이를 사용함
- 고정익 항공기 테스트에는 빔포밍 기술을 사용한 소스 노이즈를 식별하고 분리하기 위해 마이크 위상 배열이 포함되는 경우가 많으며, 회전익 측정에서는 종종 수천 평방피트에 걸쳐 배열을 전개함
- 회전익기 소음 처리 방법에는 기체 주변 반구의 소음원을 매핑하기 위해 정상 비행 조건에서 수집된 접지 소음을 포함함[64]
- 비행 조건당 소음원 반구는 경험적 또는 반경험적 소음 모델에 대한 데이터베이스로 사용될 수 있음
- 비정상 테스트 조건(기동 또는 가속과 관련된 비행)은 종종 적절한 메트릭을 사용하여 소음 발자국을 통해 특성화됨
- 기내 측정은 체이스 항공기, 헬리콥터 탑재 어레이 또는 열기구를 사용하여 수행되었음

- 지상 또는 소음 처리된 풍동에서 구성요소 또는 모델 테스트가 수행되는 많은 연구에 대한 정보는 널리 이용 가능함
- 인증 또는 연구를 위한 비행 테스트 소음 측정은 환경 조건에 관한 사례와 제약 조건을 준수해야 함
- 테스트 장소는 비교적 평평한 지형이어야 하며 과도한 흡읍재(울창한 잎사귀 또는 키 큰 풀과 같은) 또는 큰 장애물이 없어야 함. 주변 소음 수준은 상대적으로 낮아야 하며 프로펠러와 회전익기의 경우 특히 낮아야 함
- 허용 가능한 대기 조건은 표준 조건에 특정되어 있지 않으며 항공기 범주 간에 약간의 차이가 있음. 음압 레벨은 환경 조건의 편차에 대해 수정되어야 함
- 항공기 위치는 가장 일반적으로 사용되는 GPS를 사용하여 측정됨. 항공기 상태 및 제어 위치의 온보드 측정은 종종 이루어 지지만 항상 필요한 것은 아님. 항공기 위치, 상태 및 소음 측정의 동기화는 일반적으로 GPS 및 공통 시간 신호를 사용함

○ 차이점

- UAM의 출현으로 기존 인증 및 연구 기반 방법론을 채택하거나 수정해야 할 수도 있음. 이 섹션에서는 UAM의 지상 및 비행 소음 테스트에 현재 기술을 적용하는 것과 관련된 여러 문제에 대해 자세히 설명함

- 소음원 우선순위

- 최근 많은 UAM 항공기 형태들이 고려되고 있음. 이러한 각 항공기는 기존의 고정익 또는 회전익 항공기와 관련된 소음원의 우선순위가 다를 수 있음
- BVI, thickness noise, loading noise 및 gear box noise와 같은 일반적인 소음원은 많은 VTOL 타입의 형태에 나타나고 기체와 관련된 소음, 팬소음 및 jet noise는 고정익 항공기와 같은 형태에서 나타날 것이라고 예상되지만 비전통적인 항공기의 소음원은 전기 및 하이브리드 추진시스템, 멀티로터 또는 다중 추진 시스템 구성, 천이비행 상태 그리고 버티포트 환경과 관련될 것이라고 예상됨
- 로터간 상호작용 및 멀티로터 기체의 상호작용은 기존 항공기의 상호작용과는 다를 것임
- 여러개의 독립적인 로터는 구조 기반 소음에 영향을 줄 수 있는 다중 샤프트 고조파 및 다중 소음 상호작용을 초래하고 시간적으로 변화하는 진폭 또는 “beating”을 초래할 수도 있음
- 기체 근처 표면이 있는 버티포트 환경에서 작동하는 항공기로 인한 흐름 재순환으로 인해 새로운 소음원이 발생하거나 기존 항공기에서 이해되고 모델링된 소음원이 수정될 수 있음
- 소음원을 식별, 분리 및 측정하기 위한 기술은 기존 및 비전통적인 항공기 소음원을 이해할 필요가 있음
- 이러한 소음원은 비행 중 변경되는 우선순위와 함께 동시에 발생할 수 있음
- 소음원을 측정하는 기술은 기존 회전익 및 고정익 항공기에서 사용되던 소음원 우선순위 가정에 따라 사용될 수 없음

- 복잡한 운영 환경

- 섹션 2.1.2에 표시된 보다 복잡한 운영 환경을 고려할 때 기존 항공기에서 종종 무시되는 근, 중거리 측정은 소음 환경을 정량화하는 데 필요할 수 있으며 산란 및 차폐의 영

향과 인근 구조물에 대한 유체역학적 영향을 고려해야 함

- 이러한 근, 중거리 측정은 흐름 재순환이 소음 측정 센서에 부정적인 영향을 미치는 지역에서 사용됨
- 표준화된 측정은 버티포트 크기와 구성의 다양성으로 어려울 수 있음. Urban canyon은 길이 척도에 큰 변화가 있으며 기하학적 특징은 반사, 잔향 및 회절을 초래하고 도파관으로서 작용할 수 있음
- 이러한 측정은 다중 경로 전파 툴과 환경에 대한 소음 예측을 개발하고 검증하는 데 중요함
- 표준 도시 형상을 정의하고 테스트하면 개발이 빨라질 수 있음. 하지만 항공기가 운영될 다양한 urban canyon에서 측정 환경 요구사항을 표준화하는데 어려움이 있음
- 비행의 모든 단계 중에 평균 및 배경 소음 수준의 큰 변동의 발생할 수 있으며 이러한 변화는 측정 절차 개발에서 정량화되고 고려되어야 함
- ANSI/ASA S12.9 Part1 및 Part2 와 같은 소음 환경의 특성화를 위한 표준 절차는 이와 관련하여 도움이 될 수 있음

○ 소음에 대한 사람들의 반응 및 측정 기준 개요

- UAM 소음에 대한 사람들의 반응에 대한 이해는 UAM 비행체 설계자가 이러한 비행체가 일반 대중이 수용할 수 있는 가능성을 극대화하는 설계 선택, 기술 및 운영 절차에 초점을 맞추도록 하는 데 매우 중요함. 특정 반응을 설명하는 지표 형태의 소음 측정은 예측 모델을 개발하기 위해 필요하며, 이를 통해 비행체 제조자와 규제 당국의 의사결정에 정보를 제공할 수 있음

○ 현행 관행

- 소음 인증 및 지역사회 소음 평가에 사용되는 소음 지표는 소음에 대한 인간의 대응, 측정 및 데이터 처리 능력, 측정지표 사용 및 해석, 새로운 소음 발생원의 도입에 대한 지식의 결과로 시간이 지남에 따라 발전해 왔음. 모든 측정지표가 모든 목적에 적용되는 것은 아님을 분명히 해야함. 또한, 측정지표의 진화는 앞으로도 계속될 것이라고 예상할 수 있음
- 다음에서 UAM 비행체에 적용되는 현행 관행과 적용 방법은 비행체 설계에 적용할 수 있는 지표와 지역사회 소음 영향을 정량화하는 데 사용되는 지표 측면에서 논의될 것임
- 비행체 설계와 관련된 측정 기준

  - 현재 비행체 설계에 사용되는 지표는 주로 소음 인증과 관련된 지표임. 소음 인증 요건[65,66]은 이용 가능한 기술과 비용 간의 절충을 반영하기 때문에 사람들의 반응과 관련된 음향 요소를 완전히 반영하지 못할 수 있음. 또한, 현재의 인증 지표는 수년 전에 개발되었는데, 이는 초기 음향 심리학에 대한 이해와 데이터 획득 및 처리 기능이 더 제한적이었던 때를 기반으로 함. 규제 기관이 UAM 비행체에 적용할 수 있는 소음 인증에 현재 사용하는 측정 지표(위의 표 참조)는 다음과 같음
    - ✓ $_{ax}$(dBA) 지정된 20μPa에 상대적인 최대 A-가중 음압 수준, 저속 응답. L_A의 주파수 가중치는 단일 동일 음도 등고선에 따라 실제 데시벨 수준을 인간의 귀에 의해 인식되는 수준과 일치하는 척도로 조정함. 이벤트 기간은 L_{Amax}에 영향을 미치지 않음
    - ✓ L_{AE}(dBA)로 지정된 A-가중 소음 노출 수준. L_{AE}는 A-가중치를 통한 진폭, 지속시간 및 스펙트럼 함량을 고려함. 다른 모든 것은 동일하지만 지속 시간이 두 배로 늘어나면 L_{AE}는 3dBA 증가함

✓ 실효 감각 소음 수준 (EPNL). EPNL 지표는 진폭, 지속시간 및 스펙트럼 함량을 고려하며 톤에 대한 패널티도 포함함

• 위와 기타 항공기 소음 지표에 대한 자세한 정보는 참조 자료에서 확인할 수 있음[67]

- 지역사회 소음 관련 측정 기준

• 통합 소음 노출 및 부정적인 영향

✓ 지역사회 소음 영향의 가장 일반적인 척도는 장기(매일, 연간) 통합 소음 노출임. 통합 소음 노출 지표는 일반적으로 $_q$로 지정된 A-가중 등가 소음 수준에 기초함. 이러한 측정에는 L_{dn}으로 지정된 주야간 평균 소음 수준(DNL), L_{den}으로 지정된 커뮤니티 등가 소음 수준(CNEL), L_{Aeq}으로 지정된, T 만큼의 기간의 등가 소음 수준이 포함됨. 통합 소음 노출의 계산은 총 에너지가 일정하게 유지되는 한 소음 사건의 수, 수준 및 지속 시간이 통합 수준에 대한 상호 교환 가능한 기여 자라고 가정하는 동등 에너지 가설을 기반으로 함. 예를 들어, 65dB의 DNL은 SEL이 114dBA인 단일 이벤트 또는 각각 SEL이 94dBA인 100개 이벤트에 의해 특정 위치에서 생성될 수 있음

✓ 항공기 소음을 경험하는 지역사회를 위한 항공기 운영의 통합 장기 소음 노출 추정에 AEDT 및 이와 유사한 도구를 사용함. 또한 일부 공항은 소음 노출을 측정하기 위해 인접 지역사회에 소음 감시기를 설치하였음. 특정 소음 등고선의 경계 내에 거주하는 인구수는 지역사회 항공기 소음 노출을 정량화하기 위한 수단으로 보고되기도 함. 미국에서는 CFR Part 150[68]에 따라 토지 이용 양립가능성을 판단하고 NEPA 준수를 위해 DNL과 CNEL(California)이 사용됨. 장기 항공기 소음 노출 계산에서는 일반적으로 기존 자연 소음원 및/또는 인공 소음원의 배경 소음 수준을 고려하지 않음

✓ 운송 소음원에 대한 소음 노출(소음발생)과 부정적인 영향(반응)의 평균의 관계는 원래 슐츠[69]("슐츠 곡선")에 의해 설립되었으며, Fidell[70] 등이 추가 데이터를 분석한 후 “업데이트 슐츠 곡선" 또는 "FICON 곡선"로 업데이트되었음[71]. 이러한 관계는 원래 항공기와 기타 운송 소음 발생원을 구별하지 않았음. 그 결과 항공기 소음이 도로 및 철도 소음보다 더 성가신 것으로 밝혀졌음[72]. 이러한 발견에 기초하여 항공기 소음별 소음발생-반응 관계는 [73]에서 표준화되었음. FICON 소음발생-반응 관계는 20개 미국 공항에서 수행된 FAA 후원 연구에서 재검토되었음[74]

• 기타 고려사항

✓ 소음 노출에 대한 대체 방안

◆ 장기 소음 노출에 대한 부정적인 영향의 주요 예측 변수로서의 L_{Aeq} 기반 지표는 A-가중치가 조성이나 시간적 영향을 고려하지 않는다는 사실에 의해 제한될 수 있음. 이는 예를 들어 EPNL 계산에 사용된 톤 보정 감각 소음 수준에 포함된 UAM 애플리케이션의 통합 에너지에 데시벨 패널티를 적용해야 할 수 있음을 시사함. 또한 음향 심리학에 기초한 대체 지표는 예를 들어 제품 음질 영역에서 사용되는 지표와 같은 L_{Aeq} 기반 지표에 대한 부정적인 영향의 예측 변수가 더 정확하다는 것을 보여줌[75]

✓ 반응에 대한 대체 방안

◆ 미국은 토지 이용 계획 및 NEPA 준수 이외의 목적으로 정책의 기초로 부정적인 영향 이외의 대응 조치를 사용해 왔음. 특히, 국립공원관리공단(NPS)은 그랜드캐니언 국립공원의 "자연적 고요"를 실질적으로 복원하기 위한 법률에 따라 소음 분석을 해왔음[76]. NPS에 따르면 공원의 절반 이상이 하루 중 75-100% 동안 청각적 항공기를

경험하지 못했을 때 상당한 복구가 이루어짐

✓ 실내 및 실외 반응 비교

- [68]과 같이 기존의 지역사회 소음 규제는 건물 전송 손실에 의해 강한 영향을 받는 최대 평균 실내 소음 노출의 목표 기준을 기반으로 하는 경우가 많음. 65 $_n$의 공항 소음이 주거용 토지 이용과 양립할 수 있다는 가정은 거주지의 목표 45 L_{dn}, 즉 20 dB의 전송 손실에 기초함. 많은 경우에, 예를 들어 주택이 덜 견고하거나 일반적으로 창문을 열어 두는 지역사회에서 전송 손실은 그것보다 적음. 미국 환경보호국(EPA)은 열린 창문과 닫힌 창문에 대한 소음 수준 감소(NLR)의 10-12dB 차이와 따뜻하고 추운 기후에서 전형적인 주거 구조물의 건설에 기초한 3-5dB NLR 차이를 예측함[77]. 항공기 저공비행으로 인해 공항 인근 주택의 실내 소음 수준을 결정하는 모범 사례에는 사용 중인 항공기 스펙트럼이 공항의 비행대 혼합을 대표하는 것이어야 한다는 권장사항이 포함됨[78]. 이 권장사항은 공항과 떨어진 환경에서 운영되는 UAM 소음에도 적용될 것임
- 항공기 소음으로 인한 건물 구조물의 진동과 덜컹거림은 실내에서 사람들의 반응에 잠재적으로 기여할 수 있는 것으로 알려져 있음. 진동은 구조적 전송(예: 건물 지붕의 버티포트에 비행체가 착륙) 또는 공중 하중(예: 높은 수준의 소음에 노출되는 건물 전면)에 의해 발생할 수 있음. 덜컹거리는 소리는 느슨한 물건(예: 접시)과 창문과 관련된 비선형 현상임. 진동 및 덜컹거림에 대한 고려사항은 버티포트를 포함한 주거 및 상업용 건축물에 적용할 수 있음. 이는 일반적으로 저주파 에너지에서 발생하며 종종 소닉 붐, 대형 회전익기 메인 로터 소리 및 때로는 고도의 제트 소음과 관련이 있음[79,80]. 적용 가능한 측정지표에 대한 보정은 단기[81]와 장기[82] 노출을 설명하는데 적용되기도 함. 회전익기의 경우, 가정 내 진동 및 덜컹거림에 의한 부정적인 영향과 소음 수준만으로 인한 부정적인 영향 사이에 통계적으로 유의미한 관계가 발견되지 않았음[53]
- 실외 환경에서, 건물 구조물에 의한 전송 손실의 편익은 손실됨. 이는 UAM 항공기 소음에만 국한되지 않으며, 그러한 소음을 관리하기 위해 균형잡힌 접근법을 취함. 이러한 접근법의 한 요소는 토지 이용 계획 및 관리이며, 다른 하나는 버티포트 위치 선정임. 소음이 심한 도로 근처의 버티포트(예: 고속도로 클로버 리프)의 도입은 주택 지역에 도입되는 것보다 덜 거슬릴 수 있음. 침범의 정도는 부분적으로 소음 발생원의 특성이 하루 중 특정 시간에 주변과 어떻게 다른지에 따라 달라짐

✓ 비음향 요소

- 음향 측정 기준에만 기초한 모든 부정적인 영향 모델과 마찬가지로 비음향 요소는 고려하지 않음. 비음향적 요소에는 일반적으로 항공기 충돌에 대한 두려움, 소음원에 대한 태도, "소음 민감도" 등이 포함됨[83]. 이 모든 것들이 수많은 연구에서 부정적인 영향의 중요한 원인이라는 것이 입증되었음. "가상 소음"[84]은 부정적인 영향이 "측정된" 소음 수준을 나타내는 것보다 높다는 개념을 말함. 또한 노이즈가 추가 부정 응답의 계기가 될 것으로 추측됨

✓ 항공 소음의 기타 부작용

- 항공기 소음이 수면에 미치는 악영향, 아동의 학업성취도, 공항 인근에 거주하는 사람들의 심혈관 질환 발생률도 참조문헌에 요약되어 있음[85]. UAM 소음에 대해 이러한 영향이 다를 것이라는 징후는 현재 없음

✓ 소음 영향 전달

- 음향 시연(예를 들어, 실제 경험을 제공하는 "가청화" 방법을 사용)은 단순히 소리

노출 수준을 보고하는 것보다 더 의미 있는 방식으로 지역사회에 소음 영향을 전달하기 위한 효과적인 도구인 것으로 나타났음. 합성된 실제 비행체 녹음과 가공된 실제 비행체 녹음을 지역사회의 기존 또는 미래의 "사운드스케이프"를 나타내는 몰입감 있는 사운드스케이프에 배치하는 작업이 현재 진행 중임. 이는 음향 수용성을 최적화하고자 하는 비행체 설계자와 지역사회에서 음향 노출의 잠재적 변화를 시연하고자 하는 잠재적 운영자에게 모두 관심사임

○ 격차

- 비행체 설계 관련 측정 기준

• UAM 비행체의 소음을 최소화하려는 설계 전략이 측정 데이터 부족으로 인해 방해를 받고 있음. 제안된 비행체의 대다수는 아직 개발 중이며, 이 단계에서 소음 특성은 종종 독점적임. 공개적으로 이용 가능한 매우 제한적인 소음 데이터는 UAM 소음이 기존 비행체와는 시간적, 스펙트럼적으로 상당히 다를 것임을 보여줌. UAM 소음에 대한 사람들의 반응의 검증된 예측 모델을 개발하려면 그러한 데이터가 필요함. 개념적인 UAM 비행체 소음 예측 및 가청화의 충실도가 향상됨에 따라 예측 모델을 개발할 수 있는 출발점이 마련되며, 동시에 다양한 항공기 설계 전략에서 발생하는 소음을 시뮬레이션할 수 있는 수단을 제공할 수 있음

• 현재 UAM 비행체 소음에 대한 사람들의 반응을 이해하기 위해 실시된 정신 음향 심리학 테스트에 대한 보고서는 발표되지 않았음. sUAS[86]와 제안된 단거리 분산 전기 추진 항공기[87]를 포함한 다른 AAM 비행체에 대한 부정적인 영향도 연구의 UAM에 대한 적용 가능성은 불분명함. UAM 소음과 헬리콥터 및 기타 고정익 항공기 소음에 대한 반응(있는 경우)의 차이는 확인되지 않았음. 따라서 UAM 비행체에 예상되는 광범위한 운용 조건에 걸쳐 차이의 규모와 결과적으로 측정 지표 및 예측 모델의 적용가능성을 판단하기 위한 추가적인 음향 심리학 연구가 필요함

• 단기적으로 UAM 소음 인증은 기존 요건을 채택할 것으로 예상됨. 장기적으로 소음 인증 과정은 위 유형의 음향 심리학 테스트에서 얻은 지식을 반영하여 변경될 수 있음

• 인식에 영향을 미치는 소음 설계

✓ 현행 소음 인증 규정이 사람들 반응의 모든 측면을 반영하지 않는 것처럼(그 의도도 아니었음), 향후 규제도 그렇게 될 것이라고 믿을 이유가 없음. 따라서 저소음 설계 과정에는 소음 인증 요건을 충족하는 것 외에도 다른 형태의 사람들 반응을 최소화하는 조치(예: 청각)가 포함될 수 있음

✓ 인식에 영향을 미치는 설계(PID)는 엔지니어링 설계가 사람들의 인식을 설명하는 과정임. 이 정의에 따르면 $_{ax}$, L_{AE} 및 EPNL은 사람들의 인식에 기초하기 때문에 소음 인증 요건을 충족하기 위한 비행체 설계는 이미 PID의 한 형태를 구성함. 소음의 특성이 측정기준에 반영되지 않을 때(예: 헬리콥터의 충격 소음은 SEL 또는 EPNL에 명시적으로 반영되지 않을 때) 소음인증 측정기준만을 고려하는 음향설계가 부적절해짐. 이 경우 소음 인증 요건을 충족하고 사람들의 인식에 바람직한 효과를 주는 비행체를 설계하기 위해 소음 인증 기준과 함께 대체 측정 기준 또는 사람들 반응 모델을 사용할 수 있음. 참고문헌[88]는 이러한 접근법의 몇 가지 예를 제공함

✓ 대상의 반응을 가장 잘 설명하는 대체 척도를 결정하기 위해, 특히 새로운 소리에 대해, 음향 심리학 테스트가 필요함. 측정 지표 팔레트에는 인증 측정 지표(예: 1/3 옥타브 밴드 데이터를 기반으로 한 EPNL의 톤 패널티를 협대역 데이터를 기반으로 한 패널티로 대체), 음질 측정 지표[89](예: 음량, 선명도, 조성, 거칠기, 변동 강도 및 충

동성) 및 청각 측정 지표(예: 신호 감지 이론[90]에서 비롯된 청각에 대한 민감도 지수인 d-prime)가 포함됨. 대상의 반응과 여러 측정 지표 사이에 의존성이 발견되는 경우가 종종 있으며, 이 경우 구성 측정지표를 모델 매개변수로 사용하여 대응 모델을 개발할 수 있음. 예를 들어, 음향 심리학적으로 부정적인 모델[89]은 음질 측정 지표의 함수로, 음량, 선명도, 거칠기, 변동 강도 및 선택적[91]으로 조성을 나타냄

✓ PID가 UAM 비행체 음향설계에 성공적으로 적용되려면 디자인 제약조건으로 쉽게 통합되는 측정지표와 모델 개발이 필요함. 또한 이해관계자 누구나 적용할 수 있는 측정지표와 모델에 대한 검증과 표준화가 필요함

- 지역사회 소음 관련 측정 기준

• 통합 소음 노출 및 부정적인 영향

✓ 장기 UAM 비행체 소음 노출에 대한 부정적인 영향의 예측 변수로서 $_q$ 기반 지표의 효과는 알려져 있지 않음. 이 질문은 실제 UAM 비행체 소음의 대상이 되는 실제 지역사회에서 부정적인 영향 데이터를 획득할 때까지 완전히 답변할 수 없음. 여기에는 지역사회 간 편차의 평가도 포함됨. 단기(실험실) 노출과 장기(공동체) 노출에 대한 부정적인 영향 사이의 관계를 알 수 없기 때문에 실험실 테스트는 지역사회 연구를 대체하는 역할을 할 수 없음. 그러나 실험실 연구는 UAM 비행체 소음의 단기 노출에 대한 부정적인 영향이 다른 항공기 소음 발생원과 얼마나 다른지를 알려주는 데 도움이 될 수 있음. 식별된 차이는 예를 들어 EPNL에 기초한 지표나 UAM 비행체 소음에 대한 DNL에 대한 패널티와 같은 다른 수준의 메트릭의 필요성을 나타낼 수 있음. 그 사이에 소음 노출 추정치가 측정기준의 변화나 측정기준의 수준에 미치는 민감도를 판단하기 위해 평가가 이루어질 수 있음

✓ UAM 비행체 운용 발생 빈도(일부 시나리오에서는 분당 최대 2회)는 고정익 항공기 및 기존 회전익기 운용보다 훨씬 클 것으로 예측되지만 도로 교통량보다는 지속성이 낮음(L_{Aeq} 기반 지표가 상당히 잘 작동함). 이러한 조건에서 에너지 균등 가설이 얼마나 잘 유지될지는 알려져 있지 않음. 다른 음향 요인(예: 기존 음경의 특성 변화)도 부정적인 영향을 미칠 수 있음

• 기타 고려사항

✓ 소음 노출에 대한 대체 방안

◆ UAM 비행체 소음에 대한 부정적인 영향이 노출의 대체 방안(즉, L_{Aeq}에 기초하지 않은 측정)에 얼마나 의존할 수 있는지는 알려져 있지 않음. 이러한 측정에는 소음 수준 가중치 노출 수준(LLSEL), 임계 소음 수준 초과 사건 수(NANL), 임계값 수준 초과 시간(TAL), 주변 대비 청각 시간, 민감도 지수(d-prime) 및 다양한 시간 변동 비행체과 배경 소음에 대한 부분 특정 소음이 포함됨

✓ 반응에 대한 대체 방안

◆ 인식, 주목, 부정적인 영향에 이르기까지 사람들의 반응 수준의 연속체가 존재함. 자연 및 인공 배경(주변) 소음은 모두 위치, 시간, 요일 및 계절 변동에 따라 달라짐. 인식은 신호(UAM 비행체 소음)가 주변 소음이 있는 상태에서 개인 또는 인구의 일정 비율이 처음으로 들을 수 있는 수준을 나타냄. UAM 비행체 소음이 들리지 않으면 (음향적 요소만으로) 부정적인 영향을 주지 않다는 것이 핵심임. 몇 가지 청각 모델이 수년에 걸쳐 개발되고[92,93] 항공기 소음에 적용되었지만, 이러한 모델은 아직 UAM 비행체 소음과 대표적인 주변 소음으로 검증되지 않았음. 그렇게 하지 않으면 UAM 소음이 변화하는 신호와 주변 조건(진폭, 시간 및 스펙트럼 특성 측면)에

따라 어떻게 변화하는지 이해하지 못할 것임

- 높은 진폭에서는 신호가 눈에 띄게 됨. 즉, 가청음이 침입음으로 인식되는 수준임. UAM 운영의 일부 지지자들은 주목성의 임계값이 허용 가능성의 대용물로 작용할 수 있다고 제안함. 인식과 마찬가지로, 주목성은 신호와 주변 소음의 진폭, 시간적, 스펙트럼적 특성의 함수임. 그러나, 주목성은 또한 소리가 거슬리는 것으로 인식되는 시점에 그 사람이 하고 있는 일의 함수이기 때문에 절대적인 의미로 정의하기가 더 어려울 수 있음. 간혹 눈에 띄는 정도를 지정하기 위해 간단한 조치를 사용하기도 함. 그랜드 캐니언 국립공원의 항공기 소음의 주목성은 주변보다 몇 dB 높음과 같은 예가 있음. 일별, 주별, 계절별 지역사회에 따라 주목성 기준이 다르기 때문에 국가 정책 수립이 가능하지 않을 것임

✓ 실내 및 실외 반응 비교

- UAM 비행체는 사람들 근처에서 운행하기 때문에 다른 항공기 소음에 비해 실외 소음이 크거나, 도시 환경 내 건물이나 기타 특징에 반사되어 더욱 두드러질 수 있음. 이러한 상호작용의 중요성은 현재 알려져 있지 않음
- 건물 진동과 덜컹거림은 일반적으로 저주파 소음에 의해 발생하며 실내에서 사람들의 반응에 영향을 미치는 것으로 알려져 있음. UAM 비행체 소음에 문제가 될 만큼 저주파 에너지가 충분히 포함되어 있을지는 알 수 없음

✓ 비음향 요소

- UAM 작동에 대한 사람들의 반응에서 비음향 요소의 역할은 알려지지 않았음. 이러한 요소는 회전익기를 포함한 기존 항공기에 중요한 것으로 확인된 요소와 다를 수 있음

○ 권고 사항

- UAM 비행체 제조업체 및 규제 기관의 의사결정을 알리기 위해 측정 지표의 추가 개발과 사람들의 반응의 검증된 예측 모델의 개발이 필요함. 구체적으로는 다음과 같음

- 측정 지표 및 예측 모델 개발을 위한 주관적 반응 연구를 지원하기 위해 측정 및 시뮬레이션 비행체 음향 데이터가 필요함. 그러한 데이터(예: 수신기에 대한 비행체 위치 등 메타데이터 포함)를 획득/생성하고 연구 목적으로 그러한 데이터를 사용할 수 있도록 노력할 것을 권장함
- 주변 소음의 측정 및 분류를 위한 표준화된 프로세스가 인간 대상 테스트에서 사용 편의성을 높이기 위해 필요함. 메타데이터 문서화 위치, 시간, 측정 장비 등을 포함하여 이러한 프로세스를 개발하는 것이 좋음
- 초기 진입자에 대한 지역사회 소음 연구는 장기 UAM 비행체 소음에 대한 부정적인 영향의 예측 변수로서 q 기반 지표의 효과를 평가하기 위해 필요함. 하지만 그것은 언젠가 불가능할지도 모름. 그 사이에 UAM 비행체 소음의 단기 노출에 대한 부정적인 영향과 기존 항공기 소음 발생원의 부정적인 영향은 얼마나 다른지 알리기 위해 실험실 연구를 수행할 것을 권장함. 그런 다음 평가하여 측정 기준의 변화 또는 그 수준에 대한 소음 노출 추정치의 민감도를 결정할 수 있음
- 지역사회 소음 영향 평가를 위한 UAM 항공기 소음의 효용성을 평가하기 위해 UAM 항공기 소음의 인식, 주목 및 부정적인 영향에 대한 검증된 모델이 필요함. 그러한 모델은 대표적인 주변/배경 조건을 고려하여 광범위한 작동 조건 및 수요 시나리오에 걸쳐 개발 및 검증할 것을 권장함
- 공항 소음 65Ldn이 거주지 토지 이용과 양립가능하다는 가정은 거주지 내 45Ldn의 목표

에 기초함. 현행 토지 이용 양립가능성 지침에 의해 가정된 20dB 손실을 평가하기 위해 주거용(및 상업용 구조물)을 통한 UAM 소음 전달을 정량화할 것을 권장함

- 인식에 영향을 미치는 설계의 제약조건으로 사람들의 반응의 측정이 개발되고 사용될 것을 권장함. 이상적으로는 그러한 측정이 쉽게 계산되고 민감도를 포함할 수 있음
- 통합 측정 기준, 특히 $_n$을 사용하여 지역사회 소음 영향을 전달하는 것은 종종 어려움. 측정 지표는 개인이 소음을 경험하는 방식과 거의 관련이 없기 때문임. 최근 FICAN의 항공 소음 문제 연구 검토[94]에 따르면, 보완 지표는 "영향 분석의 맥락에서 유의성 평가에 L_{dn}을 보완하는 것과 반대로 전달 효과에서 L_{dn}을 보완하는 지표"임. UAM 비행체 소음의 영향을 전달하기 위한 효과와 준비 상태 측면에서 보완 지표의 종합적인 평가를 수행할 것을 권장함
- 예를 들어 항공기 소음에 정기적으로 노출되는 지역 사회와 그렇지 않은 지역 사회가 UAM 비행체 소음의 도입에 대해 다르게 반응할 수 있음. 향후 정책 결정이 광범위한 환경을 대표하는 데이터에 기초할 수 있도록 실험실 테스트 캠페인을 사용해 지역사회 간 UAM 비행체 소음 인식 차이를 탐구할 것을 권장함

2-1-⑧. UAM 수직이착륙장 구축 개요 및 개발 사업자 측면에서의 주요 관심사항 분석

○ UAM 수직이착륙장 구축 개요

- 수직 모빌리티 성공의 중요한 요소는 eVTOL을 이륙, 착륙, 충전하는 기능과 승객을 대기시키는 서비스 기반 시설임
- 영공은 부족하지 않지만 현존하는 공역 및 교통수단과 결합이 되는 것이 관건임
- eVTOL 착륙장 또는 Vertiport의 위치와 개수부터 크기까지 수직 모빌리티 생태계를 결정짓는 중요 요인이기 때문에 항공 교통 통제를 운용하는데 필요한 자원 외에 이착륙을 위한 충분한 부지가 있어야함
- 많은 도시에는 이미 수직착륙장에 필요한 기반시설을 갖추고 있음
- 초기 단계는 vertiport부지로 선정된 지형에 여객용 eVTOL을 위한 비교적 작은 이착륙장으로 최대 40개의 vertiport가 필요함. 마지막 단계는 인구 500만에서 1,000만 명 이상의 대도시들이 vertiport를 지원하는 이착륙장을 100개까지 보유하게 될 것임



그림 164 가상 UAM 모델[36]



그림 165 가상 UAM 모델[36]



그림 166 가상 UAM 모델[36]



그림 167 가상 UAM 모델[36]

○ 수직이착륙장 구축 시간

- 이미 많은 도시들은 헬기장을 갖추고 있으나 헬기장을 용도 변경시키고 UAM를 운용하기 위한 급속충전소 및 항공교통관리(ATC)통신시스템 통제소 건설에 시간이 필요할 것임

○ 수직이착륙장 구축 비용

- 위에서 기술한 바와 같이 많은 도시들은 헬기장을 갖추고 있기 때문에 갖추어야 할 수직이착륙장 시설은 급속충전소 및 항공교통관리(ATC)통신시스템과 같이 표준화되고 효율적인 교통관리 시스템임
- UAM시장이 확대될수록 수요가 급증할 것으로 예상됨. 따라서 늘어난 수요를 수용할 수 있는 효과적인 교통시스템이 필요함. NextGen, UTM 등과 같은 교통관리 시스템이 적용되어야함

○ 수직이착륙장 개수

- 위에서 기술한 바와 같이 많은 도시들은 헬기장을 갖추고 있기 때문에 이착륙장에 필요한 기반시설을 갖추고 있음. 초기 단계에서는 5개의 헬기장으로도 충분함. UAM가 활성화 되었을 때 500만에서 1천만 인구인 대도시들에는 전용 이착륙장 100개면 충분함[12]

○ 수직이착륙장 위치

- VTOL은 지역 규제와 공간 제약에 따라 거주 지역에 이착륙할 수 있음. 수직이착륙장의 위치는 접근 및 출발경로를 위해 사전에 조사되고 등록되어야 함. 예를 들어, 캘리포니아에서는 개인이 공항을 사용하는 것이 합법임
- 도심 내에서 VTOL을 운용하는 데 있어서 가장 큰 장벽은 수직이착륙장을 배치할 충분한 장소가 없다는 것임. 물론, 소수의 도시들은 이미 여러 개의 헬리포트를 보유하고 있으며 운행 수가 많지 않을 것으로 예상되는 초기 VTOL 서비스를 충분히 수용할 것으로 판단됨

2-1-⑨. 기반시설을 가정한 시뮬레이션: 수직이착륙장 (Vertiport/Vertistop) 수용 능력 및 배치 분석[95,96]

- MIT는 Vertiport 수용 범위를 분석적으로 추정하기 위한 IP(Integer Programming) 접근 방식을 개발함. 이 접근 방식은 TLOF(Touchdown and Liftoff) 패드, 유도로, 게이트 및 주차 패드(즉, Vertiport 배치)의 수와 배치에 대한 Vertiport 수용량의 민감도를 결정하는데 사용됨
- 택싱 시간, 항공기 처리 시간, 사전 준비된 항공기, 접근/출발 절차 독립성을 포함한 운영 매개 변수에 대한 Vertiport 용량의 민감도를 평가함. 연구 결과는 vertiport 공간 당 최대 항공기 처리량을 달성하기 위해 TLOF 패드 수와 게이트 수의 균형을 맞추는 것이 중요하며, 동시 쌍으로 된 도착 또는 출발은 완전히 독립적인 접근/출발 절차 없이도 상당한 처리량 향상을 제공함

- 방법론과 결과는 주어진 vertiport 공간 및 수요 시나리오에 대한 처리량을 최대화하기 위한 운영 개념의 개발을 지원함. 고정익 운영에 대한 처리량은 광범위하게 연구되었지만 수직 이착륙(VTOL) 항공기 인프라 운영에 대한 연구는 거의 없음. 잠재적으로 많은 수의 도심 항공 모빌리티 작업을 수행하기 위한 새로운 VTOL 항공기의 출현으로 특히 공간이 제한된 도심 위치에서 vertiport의 운영 및 처리 능력을 더 잘 이해할 필요가 있음
- 기존의 수많은 헬기장 설계를 검토하여 Vertiport 배치를 도출함. Vertiport 운영의 IP 공식은 이러한 배치의 인프라 및 운영을 쉽게 나타내도록 조정함
- UAM 시스템 서비스 규모를 확장하기 위해서 고객이 편리하게 접근할 수 있고, 충분한 승객 및 항공기 처리량을 제공하는 새로운 TOLA (Takeoff and Landing Area)가 필요함. UAM 확장을 가능하게 하는 기능으로써 면적은 작지만 처리량은 큰 TOLA 인프라의 개발을 조사함

○ 개요

- Urban Air Mobility (UAM)는 VTOL (Vertical Takeoff and Landing) 또는 STOL (Short Takeoff and Landing) 항공기를 사용하여 대도시 지역에서 단거리 운송 시스템을 개발하는 개념임. UAM 지지자들은 무인 항공기 및 자동차 애플리케이션에 구동되는 전기 항공기, 자동화 및 통신 기술의 발전이 2020년대에 프로토 타입 시스템 및 서비스 네트워크의 도입이 있을 것으로 예상함. 그러나 잠재적 UAM 운영에 대한 시스템 수준의 분석은 다음과 같은 8가지 제약 조건을 확인하였으며, 이러한 시스템의 구현 또는 확장을 방해할 수 있음[97]
- 2016 Uber 백서[11]에서 "도시에서 UAM을 구축하는 데 가장 큰 운영 장벽"으로 제시된 “Takeoff and Landing Area (TOLA) 가용성” 제약 조건에 중점을 둠[11]. 실행 가능한 UAM 시스템을 지원하려면 공항, 헬기장 또는 vertiport와 같은 TOLA가 전략적으로 사용자 요구 영역에 근접해야하며 대규모 UAM 운영을 지원하기에 충분한 항공기 및 승객 처리가 가능해야 함[98]
- Vertiport의 부지 문제를 해결하기 위해 상당한 연구가 수행됨. 1980년대 후반과 1990년대 초반에 CTR (Civil Tiltrotor) 프로그램의 일환으로 미국과 캐나다에서 17개의 연구에 자금을 지원하여 도시가 가용 공간, 경제 및 공공 수용의 함수로 vertiport를 찾는 능력에 큰 차이가 있음을 발견함[99]. Georgia Tech는 고객의 요구에 따라 최적의 vertiport 배치를 결정하기 위해 정수계획법 방식을 개발했으며[100] 마이애미 메트로폴리탄 지역에서 활주로가 300 ft 이하인 STOL 인프라에 대한 실질적인 부지 문제도 확인됨[101]. MIT는 300 ft 미만의 설치 공간을 확보할 수 있다면 옥상 시설에서의 UAM 인프라에 대한 상당한 가능성을 입증함[102]. 마지막으로 MIT와 NASA는 각각 로스앤젤레스와 샌프란시스코에 vertiport를 배치할 수 있는 기회를 모색함[103,104]
- Vertiport는 위치뿐만 아니라, 기존 헬기장 기능을 훨씬 능가하는 대규모 UAM 시스템의 운영 속도를 지원할 수 있는 충분한 항공기 및 승객 처리량을 갖추어야함. Uber는 2025 년까지 자사의 네트워크가 댈러스의 10 개 vertiport 사이에서 하루에 최대 27,000 번의 비행을 수행하는 300-500 대의 항공기를 보유할 수 있다고 제안함[105]. 이는 16 시간 동안 시간당 Vertiport 당 평균 338개의 비행에 해당하지만 최대 부하는 더 클 것임. NASA의 연구원들은 하루 24시간 동안 시간 당 vertiport 당 평균 1,250 대의 운용과 동일한 하루에 vertiport 당 15,000 편의 비행으로 훨씬 더 조밀한 UAM 네트워크를 시뮬레이션 함[106]. 덴버 국제공항은 현재 시간당 최고 298 회를 기록하고 있으며[107], 실버스톤 헬리포트는 시간당 약 600 회로 17 시간 동안 4,200 대의 헬리콥터 비행을 달성한 세계 기록을 보유하고 있음
- 공항 또는 Vertiport 처리량에 대한 신뢰할 수 있는 예측을 제공하는 것은 비행 예약 및 항공 계획의 중요한 구성 요소임. 설계상 활주로 처리량은 항공 운송 시스템의 처리량 제한 요

소임. 터미널, 항공 교통 관제 및 비행 예약은 이 용량 제한 조치를 기준으로 설계되었음[108]. 공항 용량 프로파일은 분석적으로나 경험적으로 개발된 루틴이지만[109], 헬기장 또는 기타 VTOL 전문 시설을 위해 개발된 것은 아님. CTR 프로그램은 Vertiport용량을 정의하기 위한 방법론의 필요성을 확인했으며[110], FAA는 1997년에 Vertiport 용량을 추정하고 최대화하는 문제를 충분히 다루는 통고 사항(Advisory Circular)이나 자료가 없다고 언급함[111]

- 제안된 UAM 운영과 관련하여 이러한 연구 격차와 새로운 관련성을 고려하여 Vertiport 용량을 분석적으로 평가하는 접근법을 개발함. 이 접근법은 최대 처리량과 최적의 운영 체계를 결정하여 전체에 걸쳐 이를 달성함. 이 접근 방식은 거의 모든 vertiport 구성에 일반화할 수 있으며, 수용량 추정 방식은 다양한 Vertiport 인프라 설계 속성(착륙 및 이륙 패드 수, 게이트 및 스테이징 스탠드 포함), 달성할 수 있는 특정 처리량 및 필요한 실제 공간간의 관계를 특성화하는데 사용됨

○ 연구 범위

- 인프라 변수는 TLOF 패드 수, 항공기 게이트 수 및 항공기 스테이징 스탠드 수 (예: 주기 공간)를 포함하여 vertiport 디자인의 물리적 특성임. 매개 변수는 택싱, 항공기 승하차 또는 도착 및 출발과 같은 특정 작업을 완료하는 데 필요한 시간을 나타내며, 독립적이고 종속적인 절차에 관한 다양한 ConOps(Concept of Operations) 정책도 운영 매개 변수로 간주됨
- "Vertiport 처리량"은 주어진 기간 동안 vertiport에서 수행될 수 있는 항공기 이동(도착 또는 출발)의 수를 의미함. 아래 그림은 항공기 또는 승객 처리량을 제한하여 Vertiport 처리량을 제한할 수 있는 네 가지의 시스템 수준 프로세스를 표시함
- 본 연구는 vertiport의 비행장 용량 프로세스에만 초점을 맞추고 있음. 비행장 용량은 역사적으로 상업 항공 운영의 주요 용량 병목 현상이었으며 UAM도 이와 유사하게 제한될 것으로 예상됨. 또한 비행장 인프라는 도시의 vertiport 위치에 영향을 미치는 vertiport 공간 크기를 주도할 것으로 예상됨. 마지막으로 비행장 혼잡을 완화하기 위해 TLOF 패드, 유도로, 출입구, 접근 및 출발 절차를 어떻게 구성하고 관리할 수 있는지는 확실하지 않음

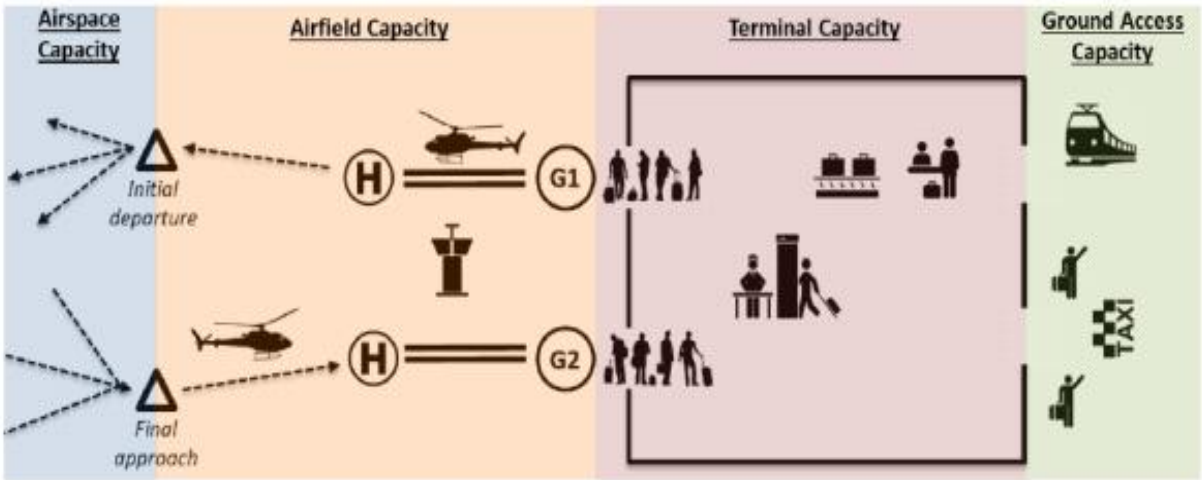


그림 168 Vertiport(또는 공항) 운영의 4 가지 용량 제한 과정 도표[95]

- 이 연구의 나머지 부분은 승객이 항상 항공기에 탑승할 수 있고 무제한 승객이 터미널로 하차 할 수 있다고 가정할 때 vertiport의 달성 가능한 비행장 용량을 평가함 (예: 제한되지 않은 터미널 및 지상 액세스 용량). 또한 항공기는 항상 최종 착륙으로 진입할 준비가 되었거나 초기 출발에서 주변 공역(즉, 제한되지 않은 공역 용량)으로 수용될 수 있다고 가정함

○ 연구 방법

- 아래 그림은 Vertiport 운영을 표현하고, 결정론적 수용 범위를 분석적으로 계산하며, 다양한 설계 및 운영 변수에 대한 처리량과 차지하는 공간의 민감도를 평가하기 위해 이 논문에서 취한 접근법을 보여줌
- 먼저, 운영 개념과 배치의 변화를 평가하기 위해 기존 헬기장을 검토함. 또한 헬기장 물리적 구성 요소의 권장 설계, 크기 및 간격을 결정하기 위해 헬기장 설계 문헌을 검토함. 이 정보는 UAM Vertiport에 대한 대표적인 기본 ConOps를 개발하는 데 사용됨. ConOps는 vertiport의 물리적 구성 요소(예: 인프라 변수)의 수 및 배치와 항공기가 vertiport에서 수행할 수 있는 다양한 활동(예: 운영 매개 변수)을 기반으로 정의됨
- 두 번째 단계는 일반 Vertiport ConOps를 노드 링크 네트워크 모델로 변환함. 3 개의 vertiport 인프라 변수는 네트워크의 노드로 지정됨. 6개의 운영 매개 변수는 노드 간 링크, 초기 조건 또는 모델 제약 조건으로 지정됨. 네트워크 모델은 수학적으로 처리할 수 있는 vertiport 작업의 간단한 표현을 구성함
- 세 번째 단계는 Vertiport 네트워크 모델의 정수계획법(IP)을 개발함. IP(Integer Programming)는 항공기 처리량을 최대화하기 위해 각 시간 단계에서 네트워크의 각 링크에 최적의 항공기를 할당함. IP는 고려된 각 vertiport의 용량 범위를 개발하기 위해 반복적으로 사용됨. 각 vertiport의 수용 범위 외에도 각 vertiport 구성 및 링크의 활용도를 결정함. IP는 인프라 변수 및 운영 매개 변수의 변화에 대한 Vertiport 처리량의 민감도 분석을 수행하는데 사용됨
- 마지막 단계는 1 단계에서 식별된 각 vertiport 배치 종류에 대한 민감도 분석 결과의 영향을 검토함



그림 169 Vertiport 수용 범위의 정의와 민감도 연구 방법

○ Vertiport 운영 검토 및 일반 ConOps 개발

- 주요 인프라 요소와 Vertiport 운영을 포함하는 대표적인 ConOps가 정의됨. 이 일반 ConOps는 vertiport 물리적 레이아웃 및 운영 절차의 일반적인 변화를 고려할 수 있을 만큼 유연해야함. ConOps에 포함될 인프라 변수와 운영 매개 변수를 식별하기 위해 기존 헬기장 운영을 검토하고 관련 헬기장 설계 문헌을 평가하고 헬리콥터 조종사를 인터뷰해야 함

○ 기존 헬기장 운영 검토

- UAM을 위해 제안된 전기 수직 이착륙(eVTOL) 항공기는 현재 상업적으로 운영되고 있지 않지만 헬리콥터는 일상적으로 UAM 임무를 수행하며 향후 UAM 서비스를 위한 효과적인 대체물임. 이 가정을 채택하여 27개의 고 처리량 용량 헬기장을 검토하여 vertiport의 다양한 물리적 배치, 다양한 인프라 구성 요소 간의 항공기 이동 및 시설에 필요한 공간을 평가함. 이 분석을 통해 고유한 속성을 가진 4 가지 배치 종류가 식별됨. 본 연구에서는 관련 배치 개념을 설명하기 위해 참고 문헌[112]에 제시된 유사한 이름을 사용하여 vertiport 배치 종류를 공항 배치 문헌과 관련시키려고 했음. 이것은 TLOF 패드를 공항 활주로와 유사하고 게이트는 게이트와 유사하며 스테이징 스탠드은 계류장, 격납고 또는 경사로와 유사함
- 아래 표는 이 분석에서 검토된 헬기장을 나타내며, 각 시설의 주요 인프라 변수 및 배치 분류를 나열함. 이 연구를 위해 선정된 27개의 고용량 헬기장은 정보를 쉽게 얻을 수 있으며 다양한 배치를 보여 주거나 UAM 시스템을 지원할 수 있는 인프라의 예로 제안됨. 아래 표에 있는 헬기장의 물리적 인프라 배치도는 시설마다 다름. 헬기장은 표의 마지막 열에 표시된 대로 4개의 배치로 분류할 수 있음

표 35 헬기장 배치 검토

헬기장	TLOF 패드 수	게이트 수	스테이징 스탠스 수	배치 종류
댈러스 다운타운 공공 헬기장, 텍사스	2	5	0	위성
모나코 헬기장	8	0	14+	선형
로스엔젤리스 헬기장, 캘리포니아	2	16	0	부두
항저우 공군기지, 중국	44	40	80+	원격 계류장
로스엔젤리스 공항 헬기장(2015), 캘리포니아	2	8	0	부두
포틀랜드 다운타운 헬기장, 오리건	1	4	0	위성
실버스톤 헬기장(2018), 영국	10	0	0+	선형
다운타운 맨해튼, 뉴욕	1	13+	0	부두
맨해튼 East 34번길 헬기장, 뉴욕	4	0	0	선형
맨해튼 West 30번길 헬기장, 뉴욕	10	0	2+	선형
뉴욕 경찰국 헬기장, 뉴욕	1	4+	9+	부두
HHI 헬기장, 뉴저지	2	6	22+	부두
뎀시군 헬기장(1997), 텍사스	12	500	50+	부두
레드먼드 테일러 육군헬기장, 텍사스	8	19	12+	원격 계류장
댈러스 카오보이스 헬기장, 텍사스	1	2	0	위성
런던 헬기장	1	3	0+	부두
가지타운 헬기장, 뉴브런즈윅	1	14	5+	부두
Helicidade 헬기장, 상파울루	2	11	80+	위성
헬리파크사 헬기장, 상파울루	1	10	200+	부두
캄포 디 마르테 공항, 상파울루	1	82+	250+	원격 계류장
오클랜드 헬기장, 뉴질랜드	4	0	7+	선형
발릭파판 공항, 인도네시아	2	15	20+	부두
시모쓰마시 헬기장, 일본	1	2	20+	부두
노스웨스트 헬리콥터 헬기장, 웨스턴 오스트레일리아	1	16	30+	부두
아이르 잠반 헬기장, 인도네시아	7	4	15+	선형
로히니 헬기장, 인도	3	12	16+	부두
피카초 스티치필드 헬기장, 애리조나	4	16	0+	부두

- 이 검토를 통해 아래 네 가지 종류의 TOLA 배치 방식을 구분함

- TOLA 공간 추정
  - ✓ 임의의 수의 게이트, 활주로, 이착륙 패드 및 스테이징 스탠드가 있는 TOLA를 수용하는데 필요한 물리적 공간에 대한 추정치 개발
  - ✓ 고용량 헬기장을 평가하여 TOLA 구성 요소를 배치하고 이들 간의 항공기 운영을 관리하기 위한 다양한 전략을 확인함. 이로 인해 고유한 배열 특성과 공간과 관련이 있는 4 개의 TOLA 배치, 즉 선형 배치, 위성 배치, 부두 배치 및 원격 에이프런 배치가 정의됨
  - ✓ Vertiport 및 헬기장 설계 표준을 검토하여 각 배치의 TOLA에 필요한 설치 공간을 추정함. 필요한 공간에 대한 하한을 결정하기 위해 VTOL 인프라에 대한 공간 추정치가 개발됨(STOL 인프라의 지면롤 증가로 인해 더 커질 것이라고 가정)
- 선형 배치(Linear Topology)
  - ✓ 아래 그림의 모나코 헬기장은 8개의 TLOF 패드, 전용 게이트가 없고 격납고 및 활주로에 수많은 스테이징 구역이 있는 선형 방식으로 배치됨. TLOF 패드는 75 ft 떨어져 있음. 운영 영상에서 헬리콥터는 6개의 상단 TLOF 패드와 물 위로 확장된 2개의 TLOF 패드에서 동시에 한 번에 하나씩 이륙하거나 착륙하는 것으로 보임. 선형 배치는 많은 수의 TLOF 패드로 인해 높은 처리량을 달성할 수 있지만 독립적인 접근 및 출발이 불가능한 경우 처리량이 감소함. 또한, 게이트가 각 TLOF 패드와 연관되지 않은 경우, 항공기 승하차 운영도 TLOF 패드에서 수행하여 처리량 잠재력을 감소시킴. 선형 배치는 항공기 승하차 시간이 짧고 고속도로나 철도와 같이 가용한 공간이 길 때 가장 유용함

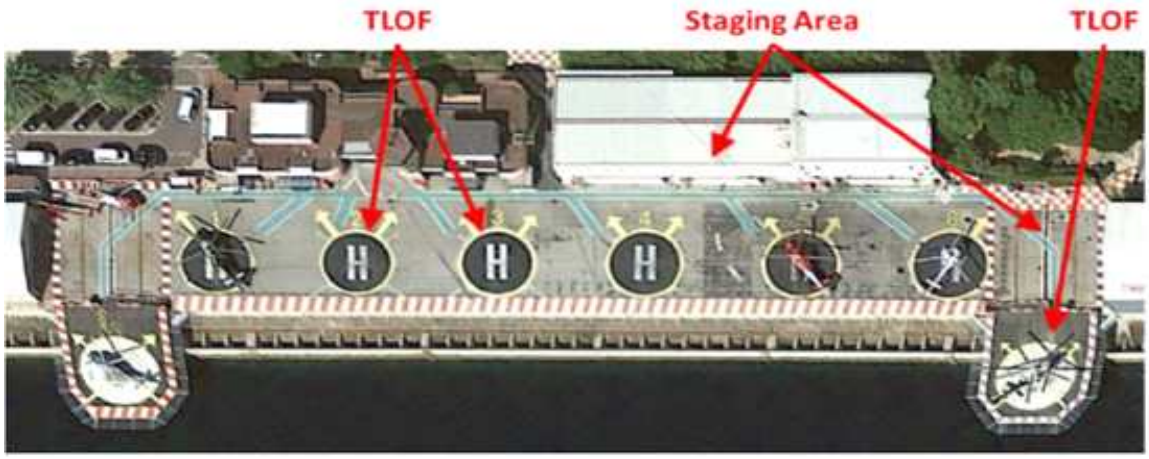


그림 170 '선형' 배치 방식의 Monaco 헬기장[95]

- 위성 배치(Satellite Topology)
  - ✓ 아래 그림의 댈러스 다운타운 공공 헬기장과 같이 하나 이상의 TLOF 패드는 그 주위에 원주로 분포된 게이트와 연관됨. 여러 개의 TLOF 패드가 있는 경우 독립적인 접근 및 출발 절차가 있을 수 있으며, 접근 방향과 출발 방향에 따라 비행경로 아래의 일부 게이트를 사용하지 못할 수 있음. 위성 배치는 가장 촘촘한 배치 중 하나임. Form factor(대략 정사각형)는 상파울루의 Helicidade 헬기장의 경우와 같이 도시 및 교외의 격자형 지역에서 옥상 및 토지 구획에 구현하기에 적합함



그림 171 '위성' 배치 방식의 Dallas 다운타운 공공 헬기장[95]

- 부두 배치(Pier Topology)

✓ 부두 배치에서 하나 이상의 TLOF 패드는 항공기를 긴 게이트 통로로 공급할 수 있음. 부두 배치는 위성 배치보다 더 많은 게이트와 항공기를 물리적으로 수용할 수 있기 때문에 항공기 승하차 시간이 더 길거나 여러 항공기를 현장에 배치하고자하는 시설에 유리할 수 있음. 아래 그림의 로스앤젤레스 Hooper 헬기장은 주차 시설 위에 있으며, 세계에서 가장 큰 옥상 헬기장임



그림 172 '부두' 배치 방식의 Los Angeles Hooper 헬기장[95]

- 원격 계류장 배치(Remote Apron Topology)

✓ 식별된 최종 vertiport 레이아웃은 "원격 계류장" 배치임. 이 배치의 특징은 TLOF 패드가 게이트와 별도로 위치하며 둘 사이에 상당한 지상이동 또는 호버 택싱이 필요할 수 있다는 것임. 이 배치는 잠재적으로 TLOF 패드 절차 사이를 더 크게 분리하여 동시 이륙 및 착륙을 지원함. 원격 계류장 개념을 구현하기 위해 상당한 공간이 필요하지만 항공기가 정비되지 않은 지역 위로 호버 택싱 할 수 있기 때문에 이 공간을 개선할 필요는 없음. 또한 지역 사회에 대한 소음 노출을 줄일 수 있는 기회를 제공할 수 있음. 원격 계류장 배치는 또한 VTOL 항공기가 활주로를 위한 분리 최소값 이상으로 착륙하거나 출발한 후 호버 택싱을 통해 터미널에 접근할 수 있게 하여 공항에서의 vertiport 통합을 유리하게 지원할 수 있음(분리 제한이 덜 적용됨)

✓ 아래 그림은 상파울루의 Aeroporto Campo de Marte와 원격 계류장 배치의 기능을 보여줌. 시설의 왼쪽 상단에 있는 단일 TLOF 패드가 어떻게 수십 개의 게이트와 스테이징 스탠드에 조명과 잔디밭의 포장된 선으로 표시되는 단일 호버 택시 길을 통과하는지 확인할 수 있음

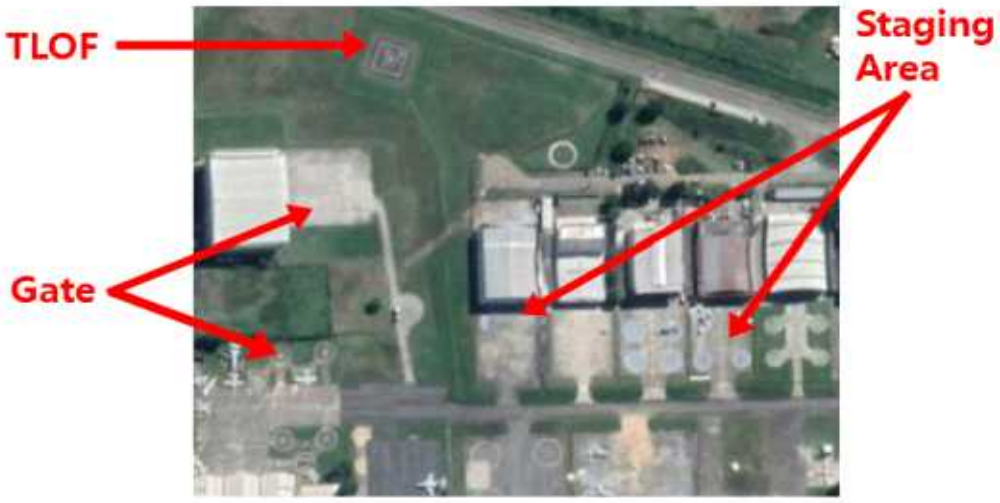


그림 173 '원격 계류장' 배치 방식의 상파울루 Heliponto-Campo de Marte[95]

✓ 아래 네 개의 그림은 각 TOLA 배치에 대한 추가 정보를 제공함. 각각의 배치는 공간 효율성, 처리 용량 및 커뮤니티에 대한 소음 노출에 대해 서로 다른 결과가 예상됨. 배치 명칭은 [111]에 제시된 것과 같은 배치명을 사용함

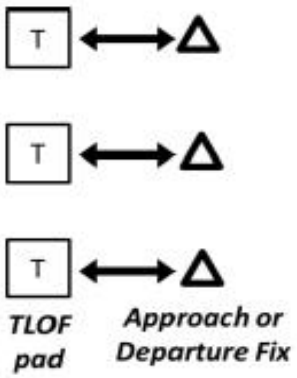


그림 174 선형 배치

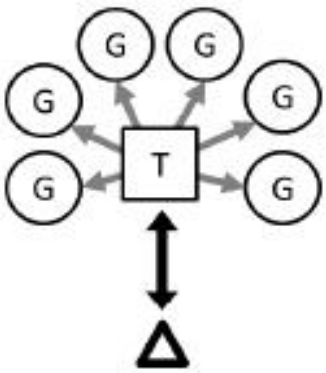


그림 175 위성 배치

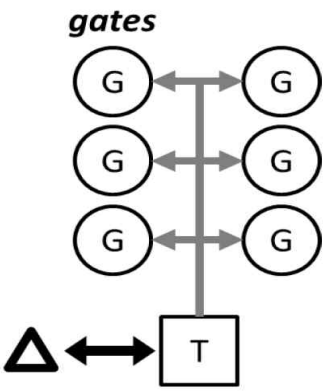


그림 176 부두 배치

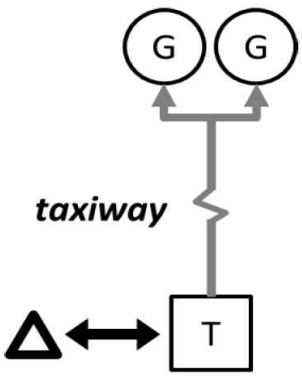


그림 177 원격 계류장 배치

○ 헬기장 설계 문헌 검토

- TLOF 패드, 게이트 및 스테이징 스탠드(Staging Stand)의 설계 품질을 평가하기 위해 향후 UAM Vertiport는 일반 항공, AC 150 / 5390-2C의 VFR 헬리포트에 대해 규정된 설계 요구 사항과 유사한 설계 요구 사항이 있다고 가정함
- UAM 항공기는 대부분의 제안된 항공기의 최대 이륙 중량이 7001 lbs 미만이므로 "작은 헬리콥터"로 분류됨

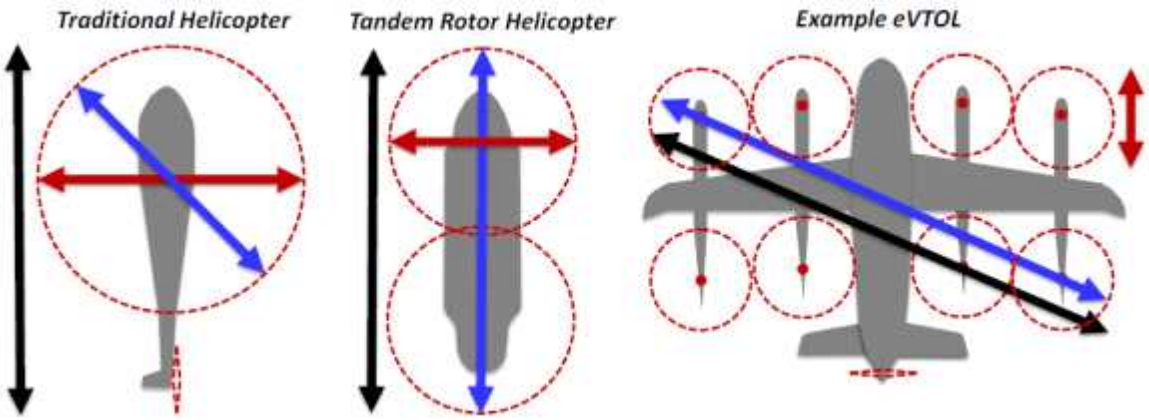


그림 178 eVTOL 항공기를 위한 수직이착륙장 설계 치수

- 이착륙(TLOF) 패드

✓ 이 분석을 위해 참조 설계 항공기용 TLOF 패드에는 108 ft x 108 ft의 설치 공간과 하나 이상의 실행 가능한 접근/출발 경로, 최종 접근 및 이착륙 영역 및 AC 150/5390-2C의 권장 사항을 기반으로 아래에 정의된 안전 구역으로 구성되며[113], TLOF 패드 특성을 아래 첫 번째 그림에 표시함

• 터치 다운 및 이륙 구역(TLOF)

✓ 중앙 45 ft x 45 ft에는 항공기가 이착륙 시 물리적인 하중을 감당, 일반적으로 포장된 지역으로 한 번에 한 대의 항공기가 안전 구역 내에 주기할 수 있음. 동시 VFR 도착 및 출발을 지원하려면 TLOF 패드 중심선을 200ft[113,114]만큼 분리해야 함. 동시 IFR 도착은 일반적으로 3,000 ft 미만 간격의 TLOF 패드에는 허용되지 않을 수 있음

✓ 이 영역은 일반적으로 헬리콥터의 경우 하나의 로터 직경의 최소 길이와 너비를 가지고 있지만 새로운 멀티 로터 항공기의 경우 로터 직경은 매우 작을 수 있음. 따라서, TLOF의 최소 길이와 너비는 하나의 "양끝 길이(TTS; Tip-to-Tip Span)"(이전에는 FAA AC에서 vertiport의 로터 스팬이라고 함)로 가정되었으며, 이는 “회전하는 로터 또는 프롭로터에 의해 생성된 평면의 가장자리 끝단 사이의 스팬 (거리)[115]”로 정의됨. 양끝 길이는 수직 상승을 제공하지 않는 프로펠러를 포함하지 않으며 그 예시를 아래 그림에 나타냄

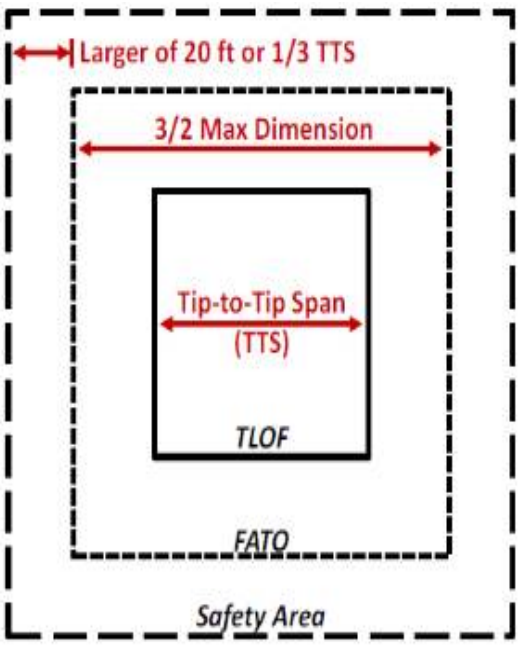


그림 179 TLOF 패드 디자인 요소와 규격

- 게이트 (Gate)
  - ✓ 게이트의 최소 직경은 기준 설계 항공기의 최대 치수와 동일하며 지상 유도의 경우 20 ft (총 65 ft) 또는 호버 택싱(총 75 ft)의 경우 최대 항공기 치수의 1/3 임(15 ft). 이 분석에서는 지상 택시 게이트를 가정함. 게이트는 유도로에서 항공기 최대 치수(45 ft)의 최소 1/3에 위치해야함
  - ✓ 게이트 외부 10 ft는 다른 게이트의 안전 영역과 겹칠 수 있는 안전 영역임. 이 분석의 모든 게이트는 게이트에서 후퇴하거나 게이트를 통과하는 것과는 반대로 게이트에서 회전하는 UAM을 지원한다고 가정함. 이에 대한 특성을 아래 그림에 표시함

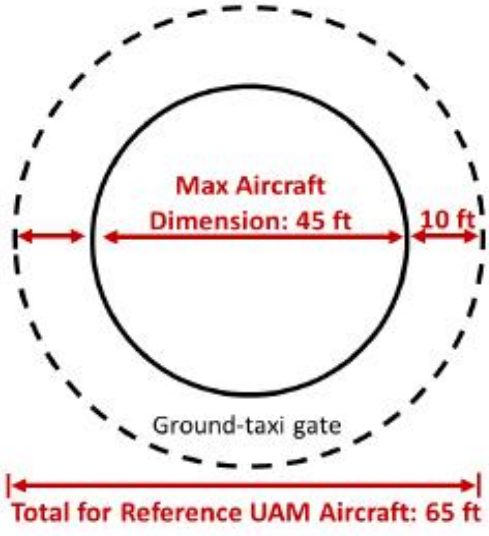


그림 180 게이트 디자인 요소와 규격

- 최종 접근 및 이륙 구역(FATO: Final Approach and Takeoff Area)
  - ✓ 조종사가 호버링 또는 착륙에 대한 접근의 최종 단계를 완료하고 조종사가 이륙을 시작하는 영역
  - ✓ 모든 이착륙 영역 위에는 하나의 FATO가 있음. 새로운 eVTOL 항공기는 전체 길이보다 큰 로터 스팬을 가질 수 있기 때문에 FATO 너비와 길이는 항공기의 최대 크기의 1.5 배로 가정함
- 안전 구역
  - ✓ 실수로 FATO에서 벗어나 헬리콥터가 손상되는 위험을 줄이기 위한 FATO 주변 헬리포트의 정의된 영역
  - ✓ TLOF 패드 당 하나의 안전 구역이 있으며 20 ft 또는 로터 스팬의 1/3 (전체 표시 패드) 중 큰 길이만큼 FATO의 가장자리를 넘어 확장됨
- 접근/출발 경로
  - ✓ 접근/출발 경로는 직선이거나 곡선일 수 있음
  - ✓ 단일 TLOF 패드에 대한 다중 접근/출발 경로는 항상 종속적이며 동일한 vertiport에서 다른 TLOF 패드에 대한 경로는 종속적이지 않을 수 있으며, 접근/출발 경로는 FATO의 가장자리에서 4000 ft 고도까지 8:1의 경사에서 위로 경사지는 장애물이 없어야 함
  - ✓ 접근/출발 표면의 폭은 FATO의 폭에서 500 ft 까지 선형으로 확장됨. 전이(transition) 표면은 FATO의 가장자리에서 2:1의 경사로 바깥쪽으로 연장되고 접근/출발 표면의 가장자리는 경로 중심선에서 250 ft까지 연장됨
- 지상 유도로(Taxiways)
  - ✓ 지상 유도로는 폭이 항공기 양끝길이(TTS: Tip to Tip Span) 스팬 (68 ft)의 1.5 배여

야 하며 호버 유도로는 TTS (90 ft)의 2 배여야 함. 유도로의 경화된 표면은 착륙장치 너비의 2 배여야 하며 보호 영역에는 장애물과 기타 TOLA 구성 요소가 없어야함. 이에 대한 특성을 아래 그림에 표시함

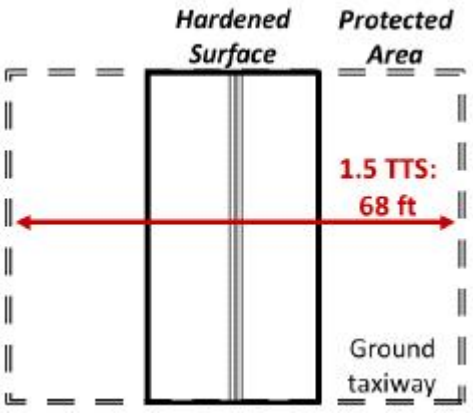


그림 181 지상 유도로 디자인 요소와 규격

- FAA Joint Order 7110.65W, 섹션 3-11-5에 따르면, 항공기는 200 ft 이상 분리된 중심선이 있는 TLOF 패드에 대해 동시 착륙 또는 이륙이 가능함[114]
- 미 해병대와 미 육군의 헬리콥터 조종사 두 명과의 인터뷰에서 군대는 150 ft 떨어진 TLOF 패드에서 작전을 수행하며, 최소 75 ft 떨어진 TLOF 패드 간격까지 작전을 수행할 수 있다고 함
- 아래 표의 2-6인승 eVTOL 항공기 7대를 검토한 결과, 항공기의 최대 치수는 45 ft이며 우버사의 ConOps에서 제안한 허용 가능한 최대 치수 또한 45 ft임. 이 사이징 가정을 채택하면 **TLOF, FATO, 안전 구역의 직경은 각각 45 ft, 68 ft, 88 ft이며 향후 UAM 수직이착륙장 구성 요소의 적절한 크기 추정치**임

표 36 7개의 제안된 2-6인승 eVTOL 항공기의 검토

항공기	승객 수	형태	양끝 길이 (ft)	기체 치수 (ft)	최대 치수 (ft)
바하나 베타 (Vahana Beta)	2	틸트 윙	28.5 est.	20.6 (wingspan)	28.5
에어스페이스엑스 모비 (AirSpaceX MOBi)	4	틸트 윙	40	40 (wingspan)	40
카터 에어 택시 (Carter Air Taxi)	6	복합형 헬기	45	42 (wingspan)	45
조비 S4 (Joby S4)	4	틸트 로터	43 est.	35 (wingspan)	43
오로라(Aurora, June 2017)	2	상승 + 순항	29.2 est.	26.2 (length, wingspan)	29.2
키티호크 코라 (Kitty Hawk Cora)	2	상승 + 순항	33.5 est.	35 (wingspan)	35
볼로콥터 2X (Volocopter 2X)	2	Multirotor	32 est.	30 (superstructure)	32

- 게이트 및 유도로
  - 이 분석에서 고려된 두 번째 인프라 변수는 게이트 수(및 레이아웃)임. 게이트 작업에 필요한 물리적 공간 외에도 vertiport에서의 게이트 배치는 유도로 설계 요구 사항과 TLOF 패드 및 기타 게이트와의 최소 분리 거리의 영향을 받음
  - FAA에 의해 정의된 두 가지 유형의 유도로
    - ✓ 바퀴가 달린 항공기가 자체 추진되거나 단단한 표면을 따라 잡아 당겨지는 "지상" 유도로

✓ 호버링이 가능한 항공기가 권장되는 "바퀴 / 스키드 높이 1 ~ 5 ft 및 지상 속도 20 knots 미만으로 지면 위로 이동할 수 있는 "호버" 유도로 ("공중" 유도로)

- "택시 경로"에는 유도로와 유도로 양쪽에 필요한 여유 공간이 포함됨. 호버 택시 및 지상 택시 노선의 최소 크기는 각각 설계 항공기의 2 및 1.5 로터 직경임(양끝 길이). 이전 연구에 따르면 호버 택싱으로 인해 승객이 더 큰 로터의 아래흐름 바람에 노출되고 더 많은 에너지 소비가 필요함(특히 전기 항공기에 문제를 야기함). 높은 처리량, 공공 Vertiport 운영에는 지상 택싱이 권장됨[116,117]. 우버 또한 지상 택시 요건을 채택함
- Vertiport 게이트(FAA 헬기장 문헌에서 "주기 위치"라고 함)는 항공기 조종 및 주기를 위한 최소 장애물이 없는 영역을 제공하도록 크기를 조정해야함. 현재 표준에서는 게이트에 접근하는 방법(예: "전환", "택시 스루"또는 "백 아웃" 게이트)에 따라 게이트 크기에 약간의 변화가 있지만, 이 연구에서는 게이트의 직경이 항공기 치수의 최댓값과 **지상 택시 운행의 경우 10 ft, 호버 택시 운행의 경우 10 ft 또는 로터 스팬의 1/3 중 큰 값을 더한 값과** 같다고 가정함
- 어떤 물체, 건물, 안전 구역 또는 기타 주기 위치도 게이트의 보호 직경 내에 있을 수 없으며, 택시 경로(게이트로 통하는 노선 제외)는 “회전” 또는 “택시 통과” 게이트의 1/3 양끝 길이, 또는 "백 아웃" 게이트에 대한 1/2 양끝 길이 내에 올 수 없음. 항공기는 능동적인 접근/출발 표면 아래에 있는 게이트를 사용할 수 없음. 또한, 통근용 항공기의 경사로 운영에 대한 이전의 연구에 따르면 200 ft 이내에 항공기가 프로펠러를 작동시켰을 때 승객이 활주로에서 탑승하거나 비행기를 타는 것이 허용되지 않음[118]. 현재까지 이 제한은 헬기장 운영에 적용되지 않았지만, 향후 상업적 vertiport는 그러한 제한을 가할 수도 있고 가하지 않을 수도 있음
- 아래 그림은 호버 및 지상 택시 운영 ConOps의 vertiport 게이트 및 유도로에 대한 분석에 사용된 주요 크기 및 간격 속성을 표시함. 그림에서 제안된 치수와 AC150/5390-2C에서 헬기장에 현재 적용된 치수 사이에는 약간의 차이가 있음. 이러한 차이는 헬리콥터와 새로운 eVTOL 항공기의 차이점을 수용하고 단순성을 위해 만들어짐

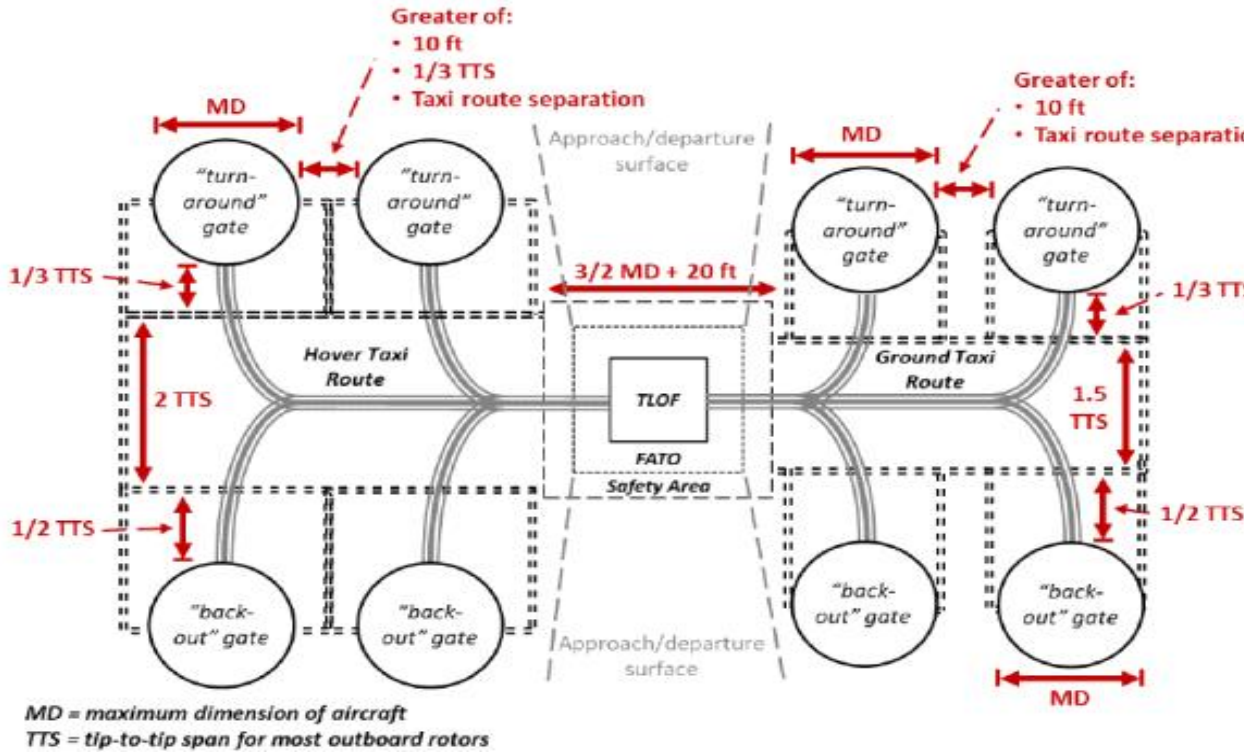


그림 182 Vertiport 게이트와 유도로를 위해 가정된 크기와 공간

- 스테이징 스탠드

• 스테이징 스탠드는 게이트와 달리 항공기가 주기 및 서비스(충전, 연료 공급, 유지 보수 등)를 제공하지만 승객 활동이 없는 영역임. 스테이징 스탠드는 격납고, 계류장, 들판 또는 항공기가 주기 될 수 있는 다른 가능한 공간의 형태를 취할 수 있음. 로터 구동식 택싱을 통해 항공기가 직접 접근하는 스테이징 스탠드는 게이트와 동일한 설치 공간 요구 사항을 가짐. 항공기가 예인 또는 휠 구동 택싱을 통해 출입하는 스테이징 스탠드는 항공기 배치 순서에 따라 공간 요구 사항을 크게 줄임

- 헬기장 설계 문헌 요약

• 헬기장 설계 표준을 검토한 결과는 다음과 같음

✓ 현재 UAM 항공기를 기반으로 하는 TLOF 패드에는 약 90 ft x 90 ft의 물리적 공간과 하나 이상의 장애물이 없는 접근/출발 경로가 필요함. TLOF 패드의 중앙 45 ft x 45 ft 섹션만 우선 방향(lead bearing)(또는 물리적 표면)이어야함

✓ 지상 유도로는 작은 공간이 필요하며 호버 유도로에 비해 로터 바람으로부터의 위험을 줄임

✓ "회전"(Turn-around) 게이트는 "택시 스루"(taxi through) 또는 "백 아웃"(back out) 게이트보다 총 공간이 작음(간격 및 포장 요구 사항 고려)

✓ 호버 택싱 비행체를 수용하는 게이트는 TLOF 패드와 유사한 배치를 필요로 함. 지상 택싱을 하는 항공기만 허용하는 게이트는 더 적은 공간을 필요로 함

✓ 스테이징 스탠드는 주기 항공기의 게이트보다 공간 효율성이 좋음

○ 일반 Vertiport (TOLA) ConOps

- 위 그림은 인터뷰, 현재 작업에 대한 경험적 분석 및 위에 제시된 헬기 표준의 검토를 기반으로 일반 UAM Vertiport에 대해 정의된 대표적인 TLOA ConOps를 나타내며, ConOps는 VTOL 또는 STOL 항공기에 대한 작업을 나타내며 여러 인프라 구성 요소(예 : 게이트, 스테이징 스탠드 또는 활주로 / 패드)가있는 TOLA에 적용할 수 있음. 구성(즉, 배치)에서 이러한 구성 요소의 배열을 나타낼 수 있음

- 항공기는 최종 접근이 허용될 때까지 도착 대기열에서 대기함. 그런 다음 항공기는 하나 이상의 접근 절차를 사용하여 하나 이상의 TLOF 패드에 도착함. Vertiport에 게이트가 장착된 경우 기체는 TLOF 패드에서 사용 가능한 게이트로 택싱할 수 있음

- 게이트가 없거나 사용이 가능하지 않은 경우 TLOF 패드에서 항공기 하차와 탑승을 수행할 수 있음. 승객 및 수하물 하역, 항공기 연료 공급 (충전), 객실 청소 및 소모품 보충, 새로운 승객 및 수하물 적재 등 다양한 활동을 완료하려면 최소한의 처리 시간이 필요함. 하차와 재탑승이 완료되면 기체는 동일하거나 다른 TLOF 패드로 택싱을 해서 출발할 수 있음. 게이트 외에 스테이징 스탠드를 사용할 수 있는 경우 항공기를 배치하거나 서비스에서 스테이징 영역으로 항공기를 이동할 수 있음

- 스테이징 용량은 단방향 고객 수요와 시간적 수요 변동을 관리하기 위해 UAM 운영에 특히 중요할 수 있음. 위 그림에 제시된 ConOps는 또한 게이트에서 항공기의 스테이징을 가능하게 함

- 이 상위 수준의 ConOps에서는 나타내지 않았지만, 착륙 및 출발 절차, TLOF 작업 및 게이트 운영은 서로 독립적일 수도 있고 아닐 수도 있음. 유도로의 독립성은 시설 설계 및 운영 절차에 따라 달라짐

○ 세 가지 TOLA 배치의 공간적 의미

- 공간 추정치는 세 가지 다른 배치를 나타내는 TOLA에 대해 개발됨. 원격 계류장 배치는 TLOF 패드

와 게이트 또는 스테이징 스탠드 사이에 유도로가 확장된 다른 배치의 특별한 경우이므로 이 분석에서는 고려하지 않음. TOLA는 아래에 제시된 배치들의 혼합 배치로 개발될 수도 있고, 그에 따라 면적을 고려해야함. 공간 추정치는 특정한 수의 TLOF 패드 및 게이트에 대해 개발되지만 각 배치에 게이트 또는 TLOF 패드를 추가하는데 필요한 추가 설치 공간이 명시되어 있음

- 선형 배치를 사용하는 TOLA의 점유 공간

  - 아래 그림은 두 개의 TLOF 패드가 있는 개념적 선형 배치 TOLA의 차지 공간을 보여줌. 각 TLOF 패드는 각 패드의 중심선이 200ft[113,114]만큼 떨어져 있기 때문에 동시에 독립적인 VFR 도착 및 출발을 지원할 수 있음. 일반 항공, AC 150/5390-2C의 VFR 헬기장 권장 사항을 기반으로 설계된 TLOF 패드에는 접근/출발 경로가 하나만 필요하지만 운송 카테고리 시설에는 두 경로가 권장되고 필요함. 선형 배치의 장점은 TLOF 패드 행에 수직인 두 개의 접근/출발 경로를 쉽게 지원한다는 것임
  - 빨간색 파선 내부는 물리적인 하중지지 표면이어야 하는 TOLA 부분을 나타냄. 따라서 빨간색 내부는 이 TOLA를 개발하는데 필요한 최소 물리적 공간을 나타내며 245 ft x 45 ft임. 빨간색 상자 외부에 있는 TOLA의 구성 요소는 장애물이 없어야하지만 개발되지 않은 표면이거나 심지어 공중일 수 있음(예를 들어 옥상 시설의 경우). 장애물이 없는 최소 공간 크기는 자주색 점선 상자로 표시되며 308 ft x 108 ft임. 추가 독립 VFR TLOF 패드를 TOLA의 양쪽에 추가할 수 있으며 각각 물리적인 공간과 장애물이 없는 공간의 너비에 200 ft를 추가함

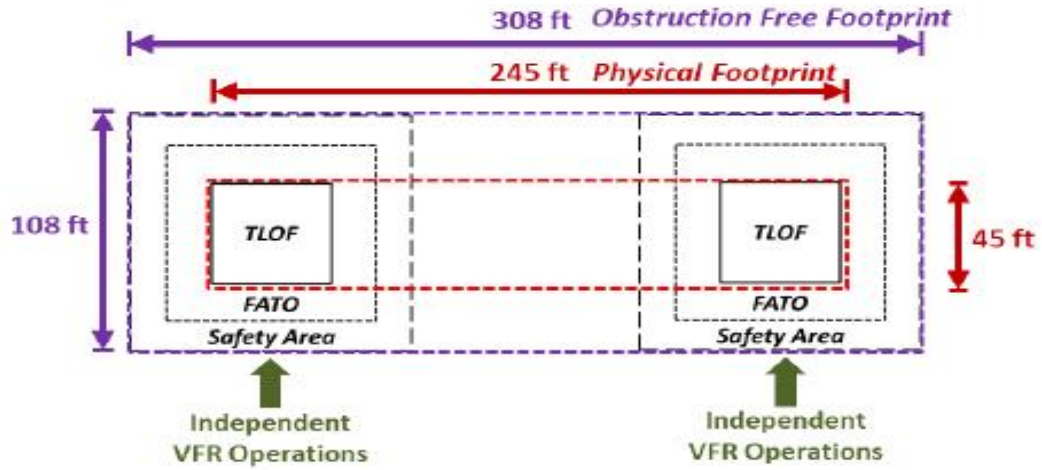


그림 183 두 개의 독립적인 TLOF 패드에 대한 선형 배치 공간 요구 사항의 예

- 부두 배치가 있는 TOLA의 점유 공간

  - 아래 그림은 TOLA 구성 요소 차지 공간 요구사항에 언급된 구성 요소 치수를 기반으로 한 TLOF 패드와 4개의 게이트가 있는 부두 배치 개념의 TOLA 공간을 보여줌. 게이트는 안전 영역이 겹칠 수 있지만 게이트와 다른 게이트 사이에 10 ft가 있어야함. 유도로는 게이트에서 최소 15 ft (게이트의 안전 구역 제외)에 위치해야함. 유도로는 너비가 68 ft이며 단방향 지상 유도(즉, 추월 금지)를 지원함. TOLA의 추가 너비 55 ft 당 2개의 게이트 비율로 TLOF의 오른쪽 또는 왼쪽에 원하는 수의 추가 게이트를 추가할 수 있음. 또한 게이트를 지나치지 않고 두 개의 접근/출발 경로를 지원할 수도 있음

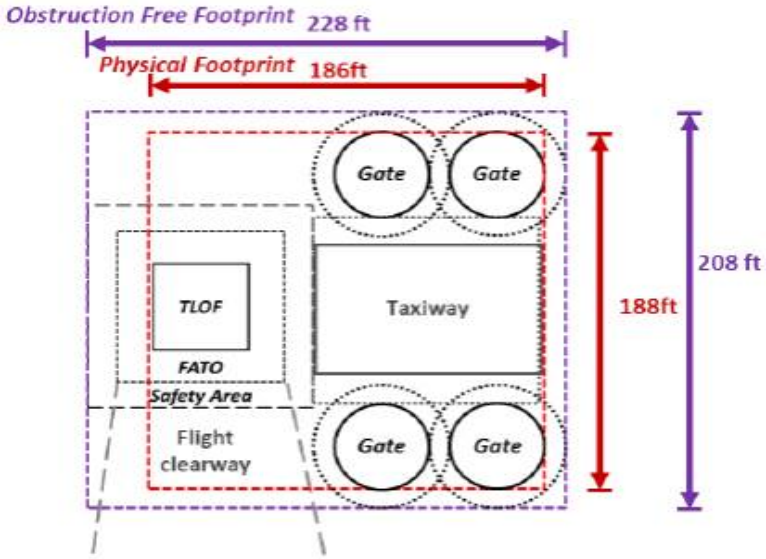


그림 184 부두 배치 공간 요구사항의 예시

- 위성 배치가 있는 TOLA의 점유 공간

  - 아래 그림은 위성 배치의 변형이 있는 두 개의 TOLA의 공간 개념을 보여줌. 첫 번째 예는 TLOF 패드 1개와 게이트 4개가 있는 소형 배치임. 이 배치는 fly-through 구성에서 두 가지 접근/출발 경로를 지원할 수 있음
  - 두 번째 예는 하나의 TLOF 패드와 쌍을 이룰 수 있는 게이트 수를 증가시킴. 위성 배치는 유도로가 필요하지 않기 때문에 부두 배치보다 TLOF 패드와 게이트가 더 조밀하게 배치된 형태임. 그러나 하나의 접근/출발 경로만 지원될 수 있으므로 역 흐름 절차가 필요함. 바람이 급변하면 도착 또는 출발이 게이트 위에서 이루어 질 수 있지만, 어떤 항공기도 이착륙 게이트 상공을 적극적으로 이용할 수 없음

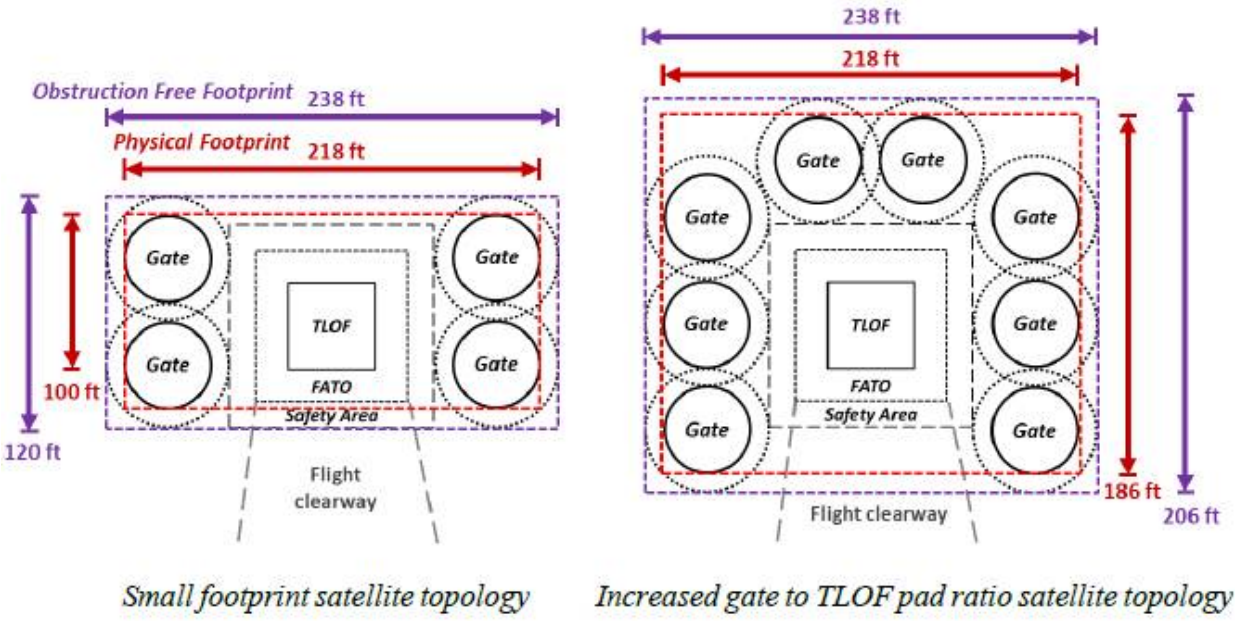


그림 185 위성 배치 공간 요구 사항의 예시

○ TOLA 처리량의 절충영역(tradespace) 분석

- 주어진 TOLA에 대한 최대 항공기 처리량을 추정하기 위해 절충영역 분석에서 TOLA 운영 분석 모델이 개발됨. 또한 TOLA의 설계 속성에 대한 최대 항공기 처리량의 민감도와 운영에 있어 변화량을 평가함

- TOLA는 네 가지 인프라 변수를 통한 모델에서 특정됨. 인프라 변수 중 3개는 각각 TOLA에서 TLOF

패드, 게이트 및 스테이징 스탠드의 수임. 네 번째 인프라 변수는 다른 세 인프라 구성 요소 간의 유도로 링크임

- TOLA의 운영은 TOLA 위 또는 근처의 항공기 활동을 나타내는 7개의 운영 변수를 통해 모델에서 정의되며 운영 변수는 다음과 같음
  - 항공기 처리(turnaround) 시간: 각 게이트에서 항공기 주기, 로터 회전(필요한 경우), 다양한 작업 수행(예 : 승객/수하물 하역/또는 적재, 연료 공급/충전 등)에 필요한 최소 시간, 이후 게이트에서 나옴
  - 도착시간 간격(Inter-Arrival Time): 하나의 TLOF 패드에서 후속 도착 사이의 최소 시간. 도착 간 시간은 예를 들어 경로에서 항공기 간의 분리 최소값, 접근 속도 및 TLOF 패드 점유 시간에 따라 달라짐
  - 출발시간 간격(Inter-Departure Time): 하나의 TLOF 패드에서 다음 출발 사이의 최소 시간
  - 게이트 택시 시간 : TLOF 패드의 안전 구역 가장자리에서 게이트까지 또는 그 반대로 택시로 이동하는 데 필요한 최소 시간
  - Staging stand 택시 시간 : 게이트에서 대기 장소로 또는 그 반대로 이동하는 데 필요한 최소 시간
  - TLOF Pad 운영 제약: 항공기가 인접한 TLOF 패드에서 독립적으로, 동시에 또는 서로 종속적으로 운영할 수 있는지 여부를 설정하는 제약
  - 유도로 운영 제약 : 유도로가 단방향 흐름(즉, 추월 금지) 또는 양방향 흐름을 지원하는지 여부를 설정하는 제약
- 아래 그림은 TOLA의 처리 용량, 점유 공간, 인프라 변수 및 운영 변수 간의 관계를 보여줌. 이를 통해 인프라 및 운영 변수를 기반으로 최대 처리량을 추정할 수 있음. TOLA 공간 추정 결과를 통해 인프라 변수를 기반으로 TOLA에 필요한 물리적 공간 및 장애물 없는 공간을 추정할 수 있음

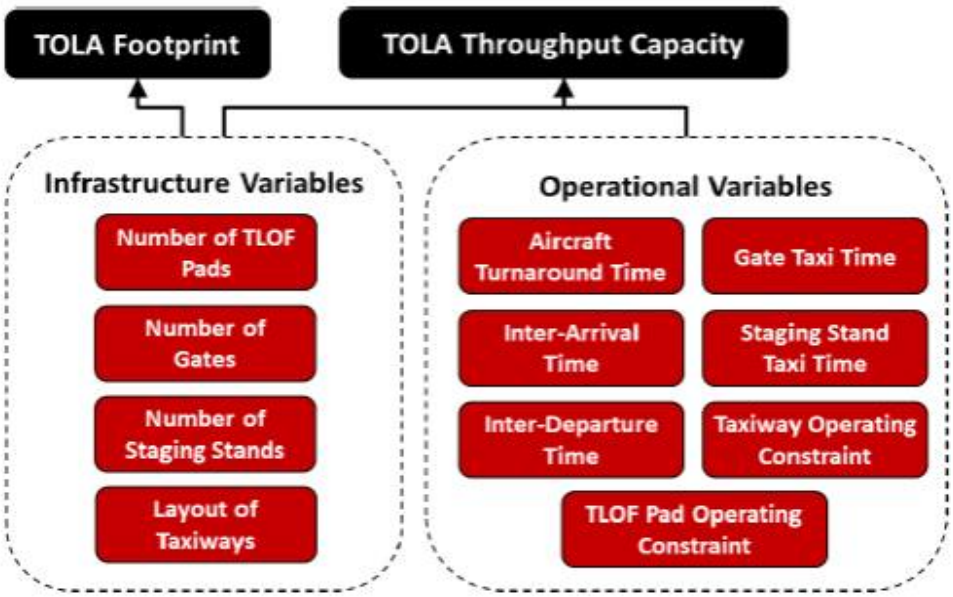


그림 186 인프라와 운영 변수의 TOLA 처리량과 위치 타당성의 관계

○ Vertiport 운영의 결정적 정수계획법(Deterministic Integer Program)

- IP 공식은 작업에 대한 가장 큰 통찰력을 제공하고, 가장 적은 가정을 요구하며, 주어진 조건에 대한 최적의 솔루션을 찾도록 보장함

- 세 가지 주요 인프라 변수

- TLOF 패드

  • "터치다운 및 리프트오프 "패드는 항공기가 접근하거나 출발하는 표시 위치임

  • 1-3개의 TLOF 패드가 있는 vertiport를 고려함

- 게이트

  • 항공기가 승객/수하물 하역, 충전, 소모품 보충과 같은 다양한 작업을 수행하고 택싱할 수 있는 TLOF 패드와 구별되는 위치

  • 0-12개인 게이트를 본 연구에서 vertiport 배치에 고려함

- 스테이징 스탠드

  • 승객이 없는 항공기가 택싱되거나 주기할 수 있는 TLOF 패드 및 게이트와 다른 위치

  • 스테이징 스탠드는 예를 들어 유지 보수 격납고를 나타낼 수 있지만 항공기 (승객 서비스, 급유 등)를 "회전"시키는 관련 서비스를 제공하지 않음

  • 0-9개의 스테이징 스탠드를 본 연구에서 vertiport 배치에 고려함

- 운영 매개 변수는 vertiport 위 또는 근처의 항공기 활동을 나타냄

- 일부 운영 매개 변수는 특정 작업을 완료하는데 필요한 시간을 정의하는 반면, 다른 작업 매개 변수는 작업을 동시에 수행할 수 있는 규칙을 정의하고 다른 작업은 vertiport의 초기 상태(예: 사전 준비된 항공기 수)를 정의함

- 위 그림에 제시된 일반 Vertiport ConOps를 기반으로 이 분석을 위해 7개의 운영 매개 변수를 정의함. 민감도 분석을 위해 각 매개 변수의 상한 및 하한을 설정함

  • 도착 시간

    ✓ 항공기가 최종 접근 결정에서 TLOF 패드 위로 또는 호버링하고 TLOF 패드 안전 구역의 가장자리까지 택싱 하는데 필요한 시간

    ✓ 15초에서 90초 사이의 도착 시간을 고려함

  • 출발 시간

    ✓ 항공기가 안전 구역 바로 외부에서 TLOF 패드 위로 활주하고 이륙하여 "초기 출발 지점"(다른 항공기가 다음 출발을 위해 TLOF 패드 안전 구역에 들어가거나 도착 시 최종 접근 지점을 통과하는 지점)에 도달하는 데 필요한 시간

    ✓ 15초에서 90초 사이의 출발 시간을 고려함

  • 게이트 택시 시간

    ✓ TLOF 패드 안전 구역의 가장자리에서 게이트 가장자리로 또는 그 반대로 택싱하는데 소요되는 시간

    ✓ 5초에서 90초 사이의 게이트 택시 시간을 고려함

  • 스테이징 스탠드 택시 시간

    ✓ 게이트 가장자리에서 스테이징 영역으로 또는 그 반대로 택싱 하는데 소요되는 시간

    ✓ 게이트에서 스테이징 스탠드까지의 스테이징 스탠드 택시 시간은 이 분석에서 최소 90초 또는 항공기의 승하차 시간의 절반(스테이지 영역으로 진행하기 전에 게이트에서 승객을 내리기 위한 요구 사항을 나타냄) 중 짧은 시간과 게이트 택시 시간을 합한 것임. 스테이징 스탠드에서 게이트까지의 택시 시간은 TLOF 패드에서 게이트까지의 택시 시간과 동일한 것으로 가정함

  • 승하차 시간

✓ 각 게이트에서 항공기를 주기하고,(필요한 경우) 로터를 돌리고, 승객/수하물 내리기 및 적재, 충전 등과 같은 다양한 작업을 수행한 다음 게이트 영역을 나가는 데 필요한 시간

✓ 30초에서 600초 사이의 승하차 시간을 고려함

- 사전 준비된 항공기 수

✓ 수직이착륙장(게이트 또는 스테이징 영역)에 위치한 항공기의 수. 게이트의 모든 사전 준비된 항공기는 즉시 TLOF 패드로 출발할 준비가 되어 있다고 가정함

✓ Vertiport에 위치시킬 0에서 최대 대수 항공기를 고려함

- 동시 운영 정책

✓ Vertiport에서 동시 항공기 이동할 수 있는 위치와 시간을 결정하는 정책

✓ 인근 TLOF 패드에 대한 의존성과 유도로의 동시 사용을 통제하는 7가지 정책이 고려됨

- Vertiport 운영의 네트워크 흐름 모델

- IP는 교통 흐름 관리를 위해 제안된 Bertsimas-Stock 다중 항목(multi-commodity) 흐름 공식을 기반으로 vertiport 운영을 위해 개발됨[119]. 이 공식은 vertiport 운영의 일반화된 네트워크 흐름 모델 개발로 시작됨. 대표적인 예로서, 아래 그림은 하나의 TLOF 패드, 두 개의 게이트, 한 세트의 접근 및 출발 절차, 적어도 하나의 스테이징 스탠드가 있는 vertiport의 네트워크 흐름을 나타냄
- 이 흐름도는 vertiport와 그 영공의 물리적 구성 요소를 나타내는 7 가지 유형의 노드가 특징임. 이러한 노드는 항공기가 노드 간 전환을 위해 완료해야 하는 조치를 나타내는 호(arc)로 연결됨. "원점" 및 "싱크" 노드는 각각 도착 대기열에서 vertiport 시스템에 들어가고 vertiport를 출발하여 주변 공역 시스템으로 이동하는 항공기를 나타냄. 다른 디자인과 매우 다르거나 복잡한 vertiport는 각 노드 유형의 수를 변경하고 vertiport의 배치 및 운영을 나타내는 연결 호(arc)를 이 네트워크 흐름 모델 표기법을 통해 나타낼 수 있음. 또한, 일시적인 운영 조건은 스테이징 스탠드 또는 게이트 노드의 "스테이징" 항공기로 표시 될 수 있음
- 대표적인 예로서, 아래 그림은 TLOF 패드 1개, 게이트 2개, 접근 및 출발 절차 세트 1개, 임의 개수 (즉, "N")의 스테이징 스탠드가 있는 TOLA 인 Dallas Cowboys Heliport의 네트워크 흐름 표현을 보여줌



그림 187 1개의 TLOF 패드와 2개의 게이트, “N” 개의 스테이징 스탠드의 예시

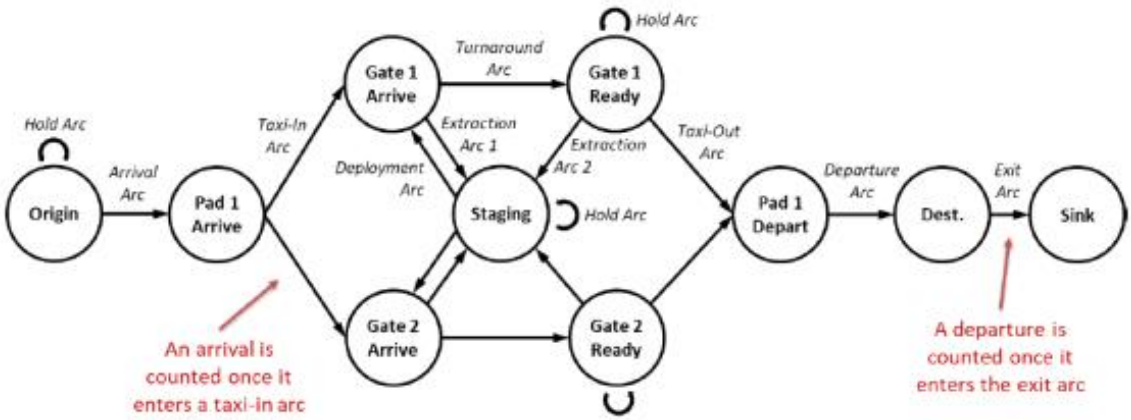


그림 188 Vertiport (TOLA) 운영의 네트워크 흐름도

- IP 네트워크 흐름 모델의 몇 가지 속성과 가정은 위 그림에서 확인할 수 있음. 첫째, 고려된 vertiport에는 단일 TLOF 패드만 있는 반면, 두 개의 서로 다른 노드는 패드에 도착하고 패드에서 출발하는 항공기를 나타내는데 사용됨. 모델은 공통 TLOF 패드와 관련된 노드에서 동시에 도착 또는 출발을 수행할 수 있는 항공기 수를 하나로 제한함. 이러한 노드가 단일 Vertiport 요소를 나타내더라도 각 게이트는 네트워크 모델에서 유사하게 두 개의 노드로 분할됨. 첫 번째 게이트 노드는 빈 게이트에 도착한 항공기를 나타내고, 두 번째 노드는 로드되어 게이트에서 출발할 준비된 항공기를 나타냄
- 네트워크 흐름 모델의 각 호(arc)는 항공기가 이를 가로지르는데 필요한 이동 시간과 연관됨. 이러한 이동 시간은 앞의 절에서 제시한 운영 매개 변수에 해당함. 항공기는 노드에 머무르지 않고 노드를 통해 노드의 한 호에서 다른 연결 호로 동시에 이동함. 모든 호는 단방향이며 일반적으로 항공기 한 대의 용량으로 제한됨. 원점과 스테이징 노드의 "hold" 호는 각각 도착 줄 또는 준비 단계에서 대기 중인 여러 항공기를 나타내기 위해 1 보다 큰 용량을 가질 수 있음

- 다중 항목 흐름 공식 (Multi-Commodity Flow Formulation)

- 각 항공기가 Vertiport Network 를 통과하는 정확한 경로를 설명하는 다중 항목 흐름 공식이 선택되었고, 공식화는 다른 유형의 항공기가 상이한 승하차 시간 및 다른 운영 파라미터를 갖는 다른 항목으로 모델링 될 수 있게 함
- IP의 결정 변수들은 각 시간 단계에서 각 항목의 항공기가 각 호에 들어가는 수이며, 주어진 네트워크에서 호(arc)의 수에 고려되는 항공기 항목의 수와 고려하는 시간 단계의 수를 곱한 값임
- 본 연구에서 IP 공식화는 1,500에서 8,000개의 결정 변수들에 대해 형성됨
- IP의 목적은 도착 및 출발이 완료될 때마다 보상 가치가 지정되는 가치를 극대화하는 것이며, 위 그림은 항공기가 도착 호를 완료하고 택싱 호로 전환하는 순간 도착이 보상이 됨을 보여줌. 항공기에 할당된 지상에서 대기 시간의 최소화와 같은 추가 보조 목표가 적용될 수 있음
- IP의 제약 조건은 물리적 현실성이 충족되도록 보장함(예: 두 항공기가 동시에 게이트에 주차하는 것을 금지). 또한, 제약 조건은 항공기가 모델 항공기의 어느 호를 동시에 점유할 수 있는지를 제어함으로써 동시 운영 정책을 시행하며, 이 연구에서 전형적인 IP 공식은 결정 변수보다 약 1.5 배에서 2 배 많은 제약을 가짐
- 이 IP는 다음의 변수들을 사용하여 공식화됨

✓ = "sink" 노드를 제외한 vertiport (TOLA) 요소 집합

✓ (f) = 항공기 유형 f (즉, 항목 유형)

✓ (k) = k 유형 항공기가 사용할 수 있는 호(arc) 세트

✓ $C(t)$ = 시간 t에서의 vertiport (TOLA) 요소 i의 용량

✓ $t_{i,j}$ = 호(arc)의 이동 시간 (i, j)

✓ $arr(k)$= 항공기 유형 k에 대한 도착 노드(즉, TLOF 패드)

✓ $dest(k)$ = 항공기 유형 k의 목적지 노드

✓ $I_j^k(t)$ = 시간 t에서 노드 j로 유형 k 항공기의 외부 유입

✓ $c^d(k)$ = 단위 시간당 출발하는 k 유형 항공기의 이점

✓ $c^a(k)$ = 단위 시간당 도착하는 k 유형 항공기의 이점

✓ $x_{i,j}^k(t)$ = (결정 변수) 시간 t에 Vertiport (TOLA) 노드 i에서 출발하여 시간 $+t_{,j}$에 노드 j에 도착하는 k 유형의 항공편 수

• 아래 식들은 이 분석에 사용된 Vertiport (TOLA) 운영에 대한 일반적인 IP 공식을 설명함

✓ 목표 함수: 항공기 도착 및 출발에 대해 제공되는 총 가치를 극대화

$$aximize \quad _{,t,i\in dest(k)} c^d x_{i,j}^k(t) + \sum_{k,t,i\in arr(k)} c^a x_{i,j}^k(t)\Big) \tag{16}$$

✓ 흐름 보존 제약 조건: 각 항목에 대해 각 노드로의 흐름과 외부 유입의 합은 유출과 같음

$$\sum_{j:(i,j)\in \ (k)} x_{i,j}^k(t) - \sum_{j:(i,j)\in N(k)} x_{j,i}^k(t-t_{j,i}) + \ _j^k(t) = 0 \qquad S,k,t \tag{17}$$

✓ TLOF 충돌 제약 조건: 한 번에 한 대의 항공기만 TLOF 노드와 연결된 접근, 택싱 진출입(taxi-in/taxi-out)/ 또는 출발 호(arc)에 있을 수 있음(이 제약은 유효한 동시 운영 정책에 따라 달라지며 제시된 제약은 TLOF 패드에 완전히 종속된 운영에 대한 것임). 이 구속 조건은 모델의 각 TLOF 패드에 대해 반복됨

$$\sum_{k \ \ t':t-t_{,j}<t' \ \ t} \Big(\sum_{i:(i,pad1arr)\in \ (k)} x_{i,pad1arr}^k(t') + \sum_{j,(pad1arr,j\in N(k)} x_{pad1arr,j}^k(t')\Big) + \Big(\sum_{i:(i,pad1dep)\in N(k)} x_{i,pad1dep}^k(t') + \sum_{j:(pad1dep,j)\in N(k)} x_{pad1dep,j}^k(t')\Big)\Big) \quad 1 \qquad t,i \tag{18}$$

✓ 게이트 충돌 제약 조건: 한 번에 한 대의 항공기만 택싱 진입(taxi-in), 택싱 진출(taxi-out), 스테이징 택싱 진출입(staging taxi-in/out), 승하차(turnaround), 또는 아크 계류(hold arcs)를 할 수 있음(이 제약 조건은 동시 운영 정책에 따라 달라짐) - 제시된 제약은 게이트에 완전히 종속된 작업에 대한 것이며, 모델의 각 게이트에 대해 반복됨

$$\sum_{k \ \ t':t-\sum_{i,j}<t' \ \ t} \Big(\Big(\sum_{i:(i,gate1arr)\in N(k)} x_{i,gate1arr}^k(t') + \sum_{j,(gate1arr,j\in N(k)} x_{pad1arr,j}^k(t')\Big) + \Big(\sum_{i:(i,gate1dep)\in N(k)} x_{i,gate1rdy}^k(t') + \sum_{j:(gate1dep,j)\in N(k)} x_{gate1rdy,j}^k(t')\Big)\Big) \quad 1 \qquad t,i \tag{19}$$

✓ 호 용량 제약 조건: 각 아크에 있는 모든 항공기 항목의 흐름의 합은 해당 호의 용량보다 작거나 같아야함

$$\sum_k \sum_{j:(i,j)\in N(k)t':t-\sum_{,j}<t' \ \ t} x_{i,j}^k(t') \qquad C_i(t) \qquad t,i \tag{20}$$

✓ 양의 정수 제약 조건: 결정 변수는 양의 정수여야 함

$$x_{i,j}^k(t) \quad 0, \quad eger \quad i,j,k,t \tag{21}$$

- Vertiport 수용 범위 개발

• 주어진 vertiport 및 매개 변수 설정의 수용 범위를 개발하기 위해 IP는 가능한 도착

및 출발 성능을 결정하기 위해 여러 번 결정되며, 복잡한 요인은 출발 횟수가 항상 도착 횟수의 일정한 감소가 아니라는 점에서 Vertiport 수용 범위가 기존 공항의 범위와 다르다는 사실을 알 수 있음. 다시 말해, 수용 범위는 출발과 도착의 고유하지 않은 관계를 생성하는 뚜렷한 상위 및 하위 표면을 가짐

- Vertiport 수용 범위의 이 속성을 고려하여, 전체 수용 범위를 정의하기 위해 이 분석에서 취해진 접근법은 주어진 시간 동안 0에서 최대 Vertiport 수용률까지의 예정된 도착 전체에 대해 IP를 반복적으로 해결함. 예정된 도착에 대한 이러한 전체 분석은 IP에 대한 두 가지 목적 함수로 반복됨. 첫 번째 목적 함수는 아래 그림에서 파란색으로 표시된 대로 수용 범위의 하위 표면을 찾기 위해 출발을 막고 도착을 허용함. 두 번째 목적 함수는 수용 범위의 상위 표면을 찾기 위해 도착 및 출발을 모두 허용함. 도착과 출발이 거래될 수 있는 불확실한 솔루션을 방지하기 위해 도착은 항상 출발보다 중요시함

- 모델 분석

- 위의 IP 공식들은 Python 3.6.6에서 구현되었고, Gurobi 8.0.1을 solver로 사용함. 고려된 각각의 vertiport에 대해 모델의 상이한 공식이 개발됨. Vertiport는 지정된 수의 게이트, TLOF 패드 및 스테이징 스탠드로 구성됨. 또한 각 Vertiport 디자인은 이동 시간과 각 호에 대한 동시 운영 제한 조건을 변경한 여러 운영 매개 변수 세트에 대해 해를 구함
- 전체적으로, IP는 156개의 서로 다른 vertiport를 위해 공식화되었으며, 각각 최대 146개의 서로 다른 운영 매개 변수 설정으로 해를 구함. Vertiport 처리량의 전체 민감도 분석은 약 213,000 번의 IP 솔루션을 나타내는 8,866 수용 범위를 구함
- TOLA 형상은 지정된 수의 게이트, TLOF 패드 및 스테이징 스탠드로 구성됨. 또한 각 TOLA 형상은 각 호에 대한 이동 시간과 TLOF 패드 / 유도로 운영 제약을 조작하는 여러 운영 변수 세트에 대해 해결됨. 이러한 방식으로 TOLA의 잠재적 설계 공간은 아래 표의 값 범위에서 샘플링 됨. 절충영역 공간 분석을 위해 각 TLOF 패드가 유도로를 통해 모든 게이트에 연결되어 있다고 가정함. 따라서 유도로 배치 인프라 변수는 아래 표의 샘플 값 범위에 나타나지 않음

표 37 TOLA 처리 용량 분석을 위한 독립 변수

	독립 변수	계산된 값
인프라 변수	TLOF 패드 수	1 - 3
	게이트 수	1 - 12
	스테이징 스탠드 수	0 - 9
운영 변수	항공기 처리 시간 (s)	30 - 600
	도착 시간 (s)	15 - 90
	출발 시간 (s)	15 - 90
	게이트 택시 시간 (s)	5 - 90
	스테이징 스탠드 택시 시간 (s)	5 - 90
	독립 TLOF 패드	유무 또는 쌍
	독립 유도로	유무

- 전체적으로 IP는 절충영역 분석에서 160개의 서로 다른 TOLA 형상에 대해 공식화됨. 각각은 최대 146개의 서로 다른 운영 변수 조합으로 해결됨. 절충영역 분석은 처리 용량을 목표로 사용했으며 IP 220,000 회 솔루션을 나타내는 약 9000개의 수용 범위 개발로 구성됨. 최대 처리 용량 솔루션은 15분 운영 기간 동안 계산됨

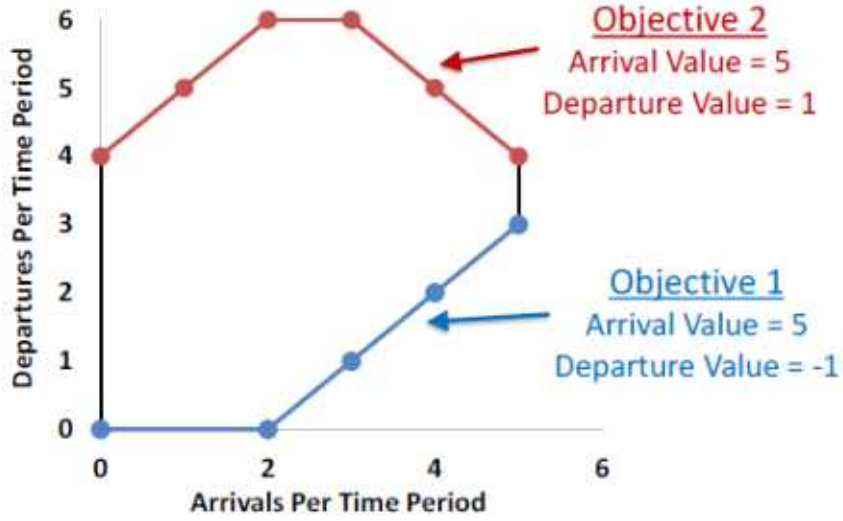


그림 189 서로 다른 IP 목표를 통해 결정된 상위 및 하위의 수용 범위

○ Vertiport (TOLA) 수용 범위 민감도 연구

- Vertiport의 결정적 처리량 용량은 세 가지 인프라 변수와 민감도 연구에서 테스트된 7가지 운영 매개 변수 각각에 비선형적으로 반응함. 비선형은 항공기 도착 및 출발의 불연속적 특성뿐만 아니라 많은 변수 및 매개 변수와 관련된 영향으로 인해 나타남

- Vertiport 수용 범위

• 수용 범위는 vertiport가 가정된 조건(예: 날씨, 교통 혼잡, 시퀀싱 등)에서 잠재적으로 운영할 수 있는 도착 및 출발 수락 비율을 의미함. 아래 그림은 이 연구에서 개발된 수용 범위의 모양과 속성을 나타내는 대표적인 수용 범위를 나타냄. 범위의 주요 특성 및 이를 유발하는 기본 요소는 아래에 설명함

✓ 실행 가능한 운영 지역: 실행 가능한 Vertiport 운영 시나리오는 범위 경계 선상 또는 범위 내에서 정수 순서쌍으로 표시됨. 범위는 다른 인프라 중에서도 추가 인프라 용량(게이트, 스테이징, TLOF 패드), 운영 매개 변수 시간 단축 또는 사전 단계적 항공기 추가로 볼륨이 확장됨

✓ 불균형 운영: “불균형” 도착은 vertiport가 해당 출발이 없는 도착만 수락할 때 발생함. 불균형 한 도착은 범위의 원점이 아닌 x축과 만나는 점에서 최대화됨. 불균형 출발은 y 축에서 유사하게 최대화됨. 불균형 출발의 최대 수는 vertiport에서 사전 준비될 수 있는 항공기 수에 선형적으로 의존함. 불균형 도착의 최대 수는 vertiport가 착륙 후 유지할 수 있는 항공기 수에 선형적으로 의존함

✓ 자유 운영: “자유” 도착은 출발 횟수를 줄이지 않고 도착을 수용할 수 있을 때 발생함(자유 출발의 경우도 마찬가지). 자유 도착 및 출발 수는 사전 준비된 항공기 수, vertiport에서 수용할 수 있는 항공기 수(게이트 또는 스테이징) 및 도착 시간, 승하차 시간 및 출발 시간에 따라 다름

✓ 최대 처리량: 도착과 출발의 합으로 vertiport의 최대 처리량을 나타내는 순서 쌍(또는 선형 일련의 점). 사전 준비된 항공기가 거의 없고 출발 또는 소요 시간이 긴 경우 최대 처리량은 출발보다 도착에 의해 결정됨. 반대 상황에서는 도착보다 출발에 의해 결정됨. 도착 및 출발 시간이 대략 동일하면 도착과 출발이 서로 상쇄되어 동일한 최대 처리량을 가진 많은 점들이 있을 수 있음

✓ 컷아웃 지역: 전통적인 공항 수용 범위의 특징은 출발 횟수가 항상 일정하게 감소하는 도착의 함수임. 아래 그림에 도시된 바와 같이, 결과는 많은 출발 및 적은 도착 또는

그 반대로 운영을 "절단(cut out)"하는 수용 범위의 양의 기울기 영역임. 공항과는 달리 중소형 UAM Vertiport는 TLOF 패드가 지원할 수 있는 도착 또는 출발을 수용하기에 충분한 게이트 또는 스테이징 영역이 없을 가능성이 있기 때문에 발생함

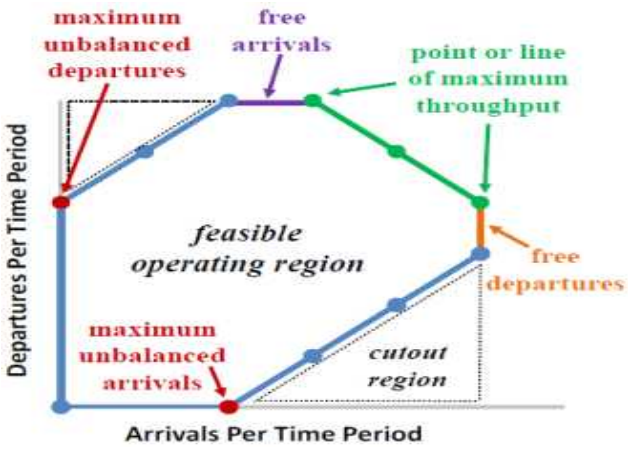
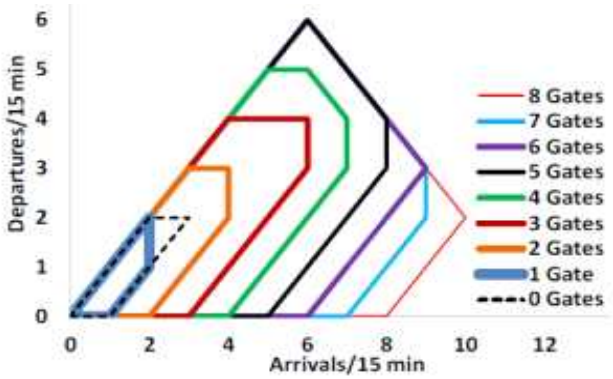


그림 190 대표적인 vertiport 수용 범위

- 게이트 대 TLOF 패드 비율의 영향

- vertiport 처리량 및 전체 성능은 게이트 대 TLOF 패드의 비율에 매우 민감함. 처리량 측면에서 가장 "효율적인" 비율은 게이트를 충분히 제공하여 TLOF 패드가 이착륙을 지속적으로 지원하는 것임(즉, vertiport의 병목 요소). 이 효율적인 비율과 비효율적인 디자인의 결과에 영향을 미치는 운영 매개 변수는 아래와 같음
  - ✓ TLOF 패드당 너무 적은 게이트는 처리량을 크게 줄임
    - 게이트가 vertiport의 병목이 되고 활용도가 높음
    - TLOF 패드가 항공기를 받아들이지 못해 활용도가 낮음
    - TLOF 패드 정체로 인해 게이트에서 평균 항공기 지상 대기 시간이 짧음
  - ✓ TLOF 패드당 너무 많은 게이트는 처리량에 미미한 영향을 주지만 vertiport 사용 공간 및 항공기 사용 효율성에 큰 영향을 줌
    - TLOF 패드가 완전히 활용되어 vertiport 처리량이 극대화됨
    - 각 추가 게이트는 다른 불균형 도착을 지원함(또는 항공기가 사전 준비된 경우 출발)
    - 게이트가 충분히 활용되지 않아 게이트에서 광범위한 항공기 지상 대기가 발생할 수 있음
- 아래 그림은 vertiport에서의 게이트 대 TLOF 패드 비율에 관한 일반적인 경향을 보여줌. 제시된 9개의 수용 범위는 하나의 TLOF 패드와 0개에서 8개의 게이트가 있는 vertiport를 나타냄. 각 vertiport 인프라 구성 요소의 활용도는 오른쪽 표에 표시됨. 이때 운영 매개 변수는 **60초의 도착 및 출발, 15초의 택싱, 300초의 승하차 시간**과 TLOF 패드에서 접근, 출발 또는 택싱이 동시에 승인된 한 대의 항공기만 설정됨
- 첫 번째 게이트를 추가하면 세 번째 도착이 발생하는 것을 방지하여 게이트가 없는 TOLA에 비해, 즉, TLOF 패드에서 기체를 직접 돌리는 것과 비교하여 게이트에 접근하는 데 필요한 추가 택싱 시간으로 인해 최대 처리량이 줄어듦. 게이트가 5개까지 추가될 때마다(운영 매개 변수 세트에 대해) vertiport의 처리량이 증가함. 각 게이트를 추가할 때마다 TLOF 패드가 더 효율적으로 사용되면서 활용도가 증가함. 그러나 여섯 번째 게이트를 추가해도 최대 처리량 또는 TLOF 패드 활용도가 더 이상 증가하지 않음. 이 시점에서 TLOF 패드는 완전히 활용되거나 포화되며 여섯 번째 게이트가 추가되어도 더 이상 도착하거나 출발할 수 없음

- 이 효율적인 게이트 대 TLOF 패드 비율을 초과하는 추가 게이트의 수는 최대 처리량을 증가시키지 않지만 추가적인 불균형 운영을 처리할 수 있는 기능을 제공함(이 수용 범위에 추가 도착으로 표시됨). 또한 항공기가 이륙을 위해 TLOF 패드에 접근하기를 기다리는 동안 게이트에서 항공기의 평균 대기 시간이 크게 증가함. 평균적으로 게이트 활용도는 효율적인 게이트 대 TLOF 패드 비율 이상인 경우 감소하는 것으로 나타남
- 효율적인 게이트 대 TLOF 패드 비율은 다음과 같이 vertiport의 운영 매개 변수의 영향을 받음
- 도착 또는 출발 시간을 늘리면 효율적인 처리량을 위해 TLOF 패드당 필요한 게이트 수가 줄어듦

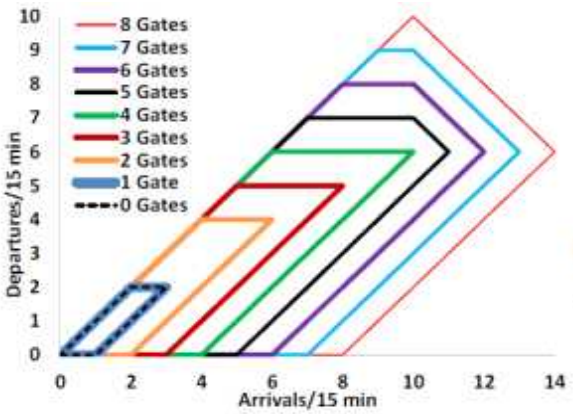


Vertiport Topology	TLOF Pad Utilization	Avg. Gate Utilization	Avg. Gate Holding
0 Gates	33%	67%	0%
1 Gate	33%	73%	0%
2 Gates	58%	61%	0%
3 Gates	83%	64%	6%
4 Gates	90%	43%	0%
5 Gates	98%	46%	5%
6 Gates	98%	46%	11%
7 Gates	98%	50%	16%
8 Gates	98%	38%	12%

Gate constr.
Potentially "efficient" topology
TLOF pad constrained

그림 191 게이트와 TLOF 패드 비율에 따른 Vertiport 수용 범위와 활용도

- 아래 그림은 도착 및 출발 시간이 모두 60초에서 30초로 단축된 것을 제외하고는 위 그림과 동일한 인프라 및 매개 변수 설정이 된 수용 범위를 나타냄. 아래 그림에서 볼 수 있듯이 게이트 대 TLOF 패드 비율이 높은 vertiport가 TLOF 패드의 포화에 의해 더 이상 제약을 받지 않기 때문에 최대 처리량이 크게 증가함
- 중요한 것은 두 번째 및 세 번째 게이트를 추가하면 네 번째 또는 다섯 번째 게이트를 추가하는 것보다 최대 처리 용량이 더 크게 증가함. 이는 보다 빽빽하게 예정된 작업을 위해 도착 및 출발 시 순서가 비효율적이기 때문에 발생함. TLOF 패드 사용률이 낮을 때 유도로와 TLOF 패드는 일반적으로 항공기가 게이트에서 출발할 준비가 되는 즉시 출발을 수용할 수 있음. 그러나 TOLA가 균형 잡힌 게이트 비율에 가까워짐에 따라 운영의 느슨함이 줄어들었고 항공기는 도착하기 전에 게이트에서 지상 유지 또는 공중 대기가 더 자주 발생함. 따라서 어떤 경우에는 균형 잡힌 게이트 대 TLOF 패드 비율보다 낮은 경우에도 추가 게이트 대신 추가 독립 TLOF 패드를 추가하는 것이 처리량 지상 측면에서 더 효율적일 수 있음



Vertiport Topology	TLOF Pad Utilization	Avg. Gate Utilization	Avg. Gate Holding
0 Gates	17%	67%	3%
1 Gate	23%	73%	0%
2 Gates	48%	81%	2%
3 Gates	63%	69%	4%
4 Gates	78%	64%	1%
5 Gates	83%	61%	4%
6 Gates	88%	49%	1%
7 Gates	93%	55%	10%
8 Gates	100%	61%	15%

Gate constrained
Potentially "efficient" topology

그림 192 도착 및 출발 시간 감소에 따른 Vertiport 수용 범위와 활용도(처리량이 증가하고 TLOF 패드 당 더 많은 게이트를 요구함)

- 아래 세 그림은 게이트 대 TLOF 패드 비율이 다른 6개의 vertiport의 최대 처리량이 항공기 도착 시간(30초의 출발 및 사전 준비된 항공기 없음)의 변화에 따라 어떻게 반응하는지 보여줌. 게이트가 많은 vertiport는 TLOF 패드가 빠르게 제한되며 추가 게이트가 항공기를 기다리게 되면서 처리량이 감소함. 게이트가 적은 vertiport는 게이트가 제한된 상태로 유지되며 도착 시간이 증가함에 따라 처리량이 감소하지 않음
- 항공기 승하차 시간을 늘리면 효율적인 처리량을 위해 TLOF 패드당 필요한 게이트 수가 증가함. 이는 각 항공기가 각 게이트에서 더 많은 시간을 필요로 하여 해당 게이트에 다른 작업을 할 수 없게 만들고 TLOF 패드를 기다리게 하기 때문임. 아래 두 번째 그림은 항공기 승하차 시간의 변화에 따른 다양한 vertiport의 최대 처리량에 미치는 영향을 보여줌. 여기에서 중요한 점은 게이트 대 TLOF 패드 비율이 더 높은 vertiport, 심지어 표준 운용의 효율적인 비율을 벗어난 vertiport는 항공기 승하차 시간의 잠재적 증가에 대해 영향이 크지 않다는 것임. 이는 노인 승객, 연장된 기내 안전 브리핑 또는 예상보다 긴 재충전 시간 같은 요인이 설계 조건에 비해 항공기 승하차 시간을 모두 증가시킬 수 있으므로 UAM vertiport에 중요할 수 있음
- TLOF와 게이트 사이의 택싱 시간을 늘리면 동시 운영 정책에 따라 효율적인 처리량을 위해 TLOF 패드당 필요한 게이트 수를 줄일 수 있음. TLOF 패드로의 동시 도착, 출발 또는 택싱을 금지하는 운영 정책의 경우 택싱 시간을 늘리면 도착 및 출발 시간이 늘어남. 이를 통해 TLOF 패드의 활용도를 인위적으로 향상시켜 실제 처리량을 줄임. 동시 택싱이 허용되는 경우 택싱 시간을 늘리면 게이트 대 TLOF 패드의 최적 게이트 비율에 미미한 영향을 미침

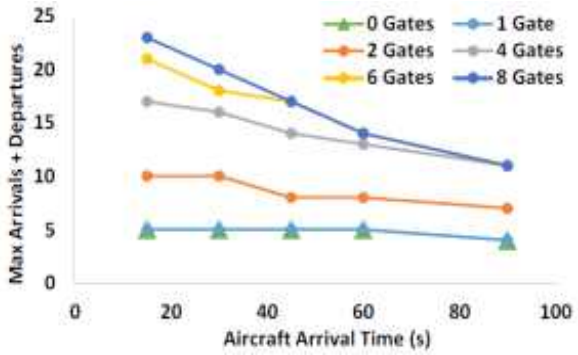


그림 193 6개의 다른 게이트/TLOF 패드 비율에 대한 도착 시간 증가에 대한 최대 처리량의 변화

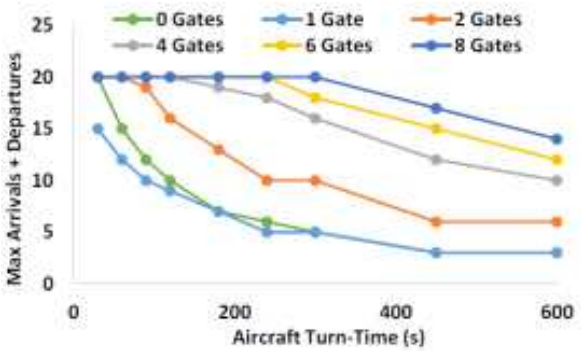
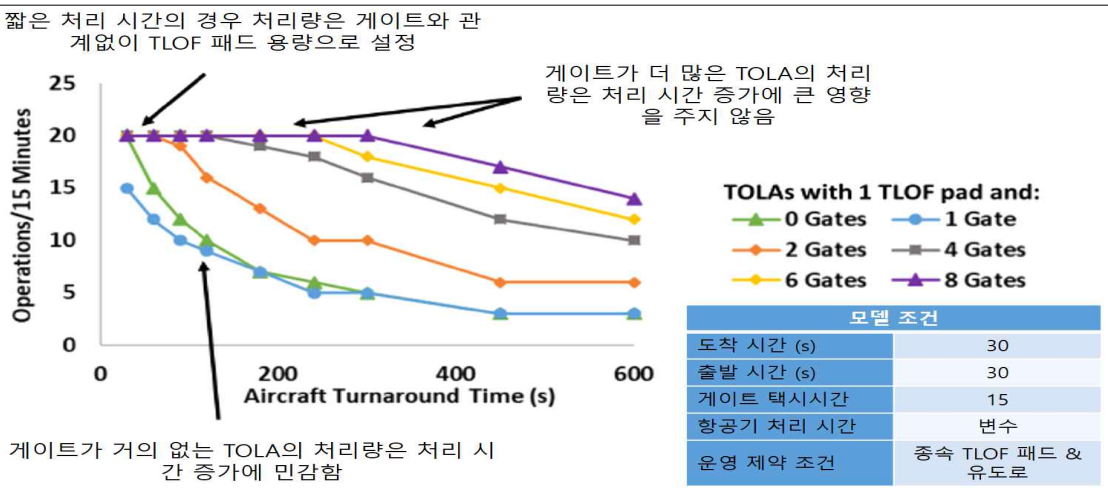


그림 194 6개의 다른 게이트/TLOF 패드 비율에 대한 승하차 시간 증가에 대한 최대 처리량의 변화

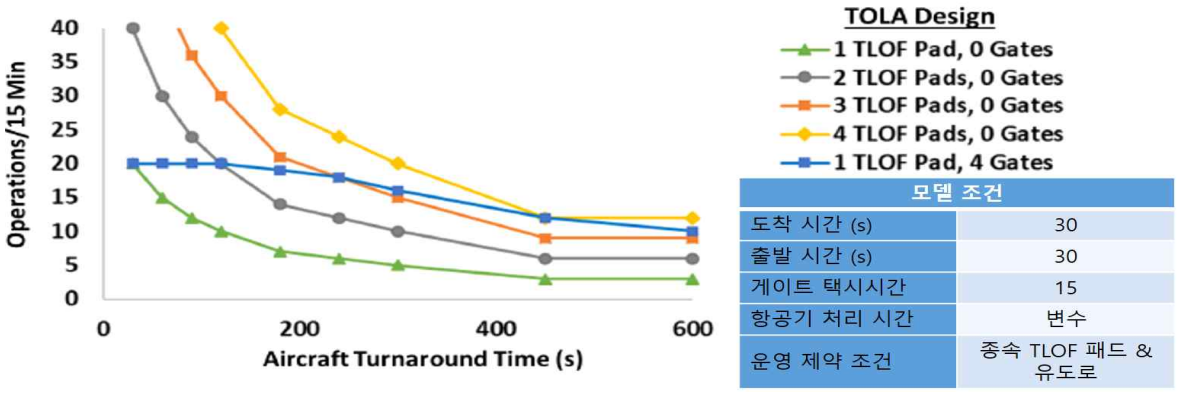
- TOLA 처리 용량은 TOLA에서 게이트 대 TLOF 패드 비율의 함수로 항공기 소요 시간에 따라 달라지는 것으로 나타남
- 아래 그림은 항공기 턴어라운드 시간의 함수로서 6개의 TOLA의 최대 처리량을 보여줌. 각 TOLA에는 하나의 TLOF 패드와 0 ~ 8개의 게이트가 있고, 아래 그림에 제시된 데이터는 단방향(즉, 종속) 유도로 운영 시 30 초의 도착 시간, 30 초의 출발 시간 및 15 초의 택싱 시간에 대한 것임. 30 인승 헬리콥터에 대해 연료 보급이 필요하지 않은 경우 [120] 헬리콥터 항공사에 의해 60 초에서 180 초의 시간이 소요되었으며, 완전 전기 항공기가 충전을 허용하기 위해 대략 600 초의 소요 시간이 예상됨[11]



모델 조건	
도착 시간 (s)	30
출발 시간 (s)	30
게이트 택시시간	15
항공기 처리 시간	변수
운영 제약 조건	종속 TLOF 패드 & 유도로

그림 195 항공기 처리 시간의 함수에 따른 6개의 다른 게이트 수의 최대 처리량

- 게이트가 없는 TOLA는 항공기 처리 시간이 30 초일 때 게이트가 8개인 TOLA와 동일한 처리량을 제공함. 최대 처리량은 TLOF 패드 용량으로 인해 모든 TOLA에 대해 15분 동안 20개 작업으로 제한됨. 게이트가 하나인 TOLA는 항공기가 게이트를 돌리기 전에 게이트에 도달하는 데 필요한 추가 택시 시간으로 인해 게이트가 없는 TOLA보다 낮은 처리량을 나타냄(TLOF 패드에서 직접 회전하는 것과 반대)
- 추가 게이트가 TLOF 패드 용량에 도달했을 때 최대 처리량을 증가 시키지는 않지만, 독립적인 TLOF 패드를 추가하면 아래 그림에 표시된 것처럼 TOLA가 처리 용량을 증가시킬 수 있음



모델 조건	
도착 시간 (s)	30
출발 시간 (s)	30
게이트 택시시간	15
항공기 처리 시간	변수
운영 제약 조건	종속 TLOF 패드 & 유도로

그림 196 항공기 처리 시간에 따른 다양한 수의 TOLF 패드 및 게이트가 있는 5개의 TOLA에 대한 최대 처리량

- 아래 첫 번째 식은 주어진 매개 변수 시나리오에서 TLOF 패드의 처리량을 최대화하는데 필요한 게이트 수를 추정하는 유용한 방법을 제공함. 또한 TLOF 패드에 대한 접근, 출발 및 택싱이 모두 종속적인 작업이라고 가정됨. 항공기가 TLOF 패드에 도착 또는 출발하는 항공기와 동시에 TLOF 패드에 대한 택싱이 허용된 경우, 아래 두 번째 식을 사용해야 함

$$tes\ Required = Ceiling\left(\frac{Aircraft\ Turnaround\ Time}{\max(Arrival\ Time, Departure\ Time + Taxi\ Time}\right) + 1 \quad (22)$$

$$Gates\ Required = Ceiling\left(\frac{Aircraft\ Turnaround\ Time}{\max(Arrival\ Time, Departure\ Time}\right) + 1 \quad (23)$$

- 항공기 도착 시간에 대한 처리량의 민감도

- 아래 그림에 제시된 데이터는 30 초의 일정한 도착 간격 및 출발 간격 시간에 대해 생성됨. 도착 간 시간이 90 초로 증가하면 그림에 표시된 대로 모든 항공기 턴어라운드

시간에 대해 게이트 수에 관계없이 TOLA의 최대 처리량이 감소함

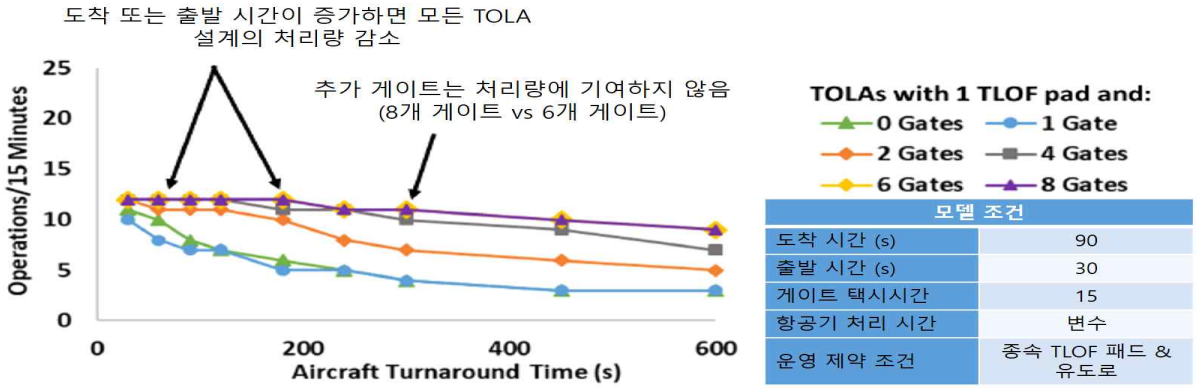


그림 197 6개 TOLA에 대해 최대 처리량을 긴 도착시간 간격에 대해 항공기 턴어라운드 시간의 함수로 표시

- 위 그림에서 8 게이트 TOLA는 표시된 모든 항공기 턴어라운드 시간에 대해 6 게이트 TOLA에 비해 처리량 이점을 제공하지 않음. 이것은 앞서 그림에서 7 번째 및 8 번째 게이트가 더 짧은 도착 시간을 제공한 증가된 처리량과 비교됨
- 게이트가 많은 TOLA는 항공기 처리 시간에 비해 도착 시간 간격이 짧을 때 상당한 처리량 이점이 있지만 이러한 TOLA는 TLOF 패드가 정체되고 항공기의 추가 게이트가 부족해지면서 도착 시간 간격이 증가함에 따라 처리량이 급격히 감소함

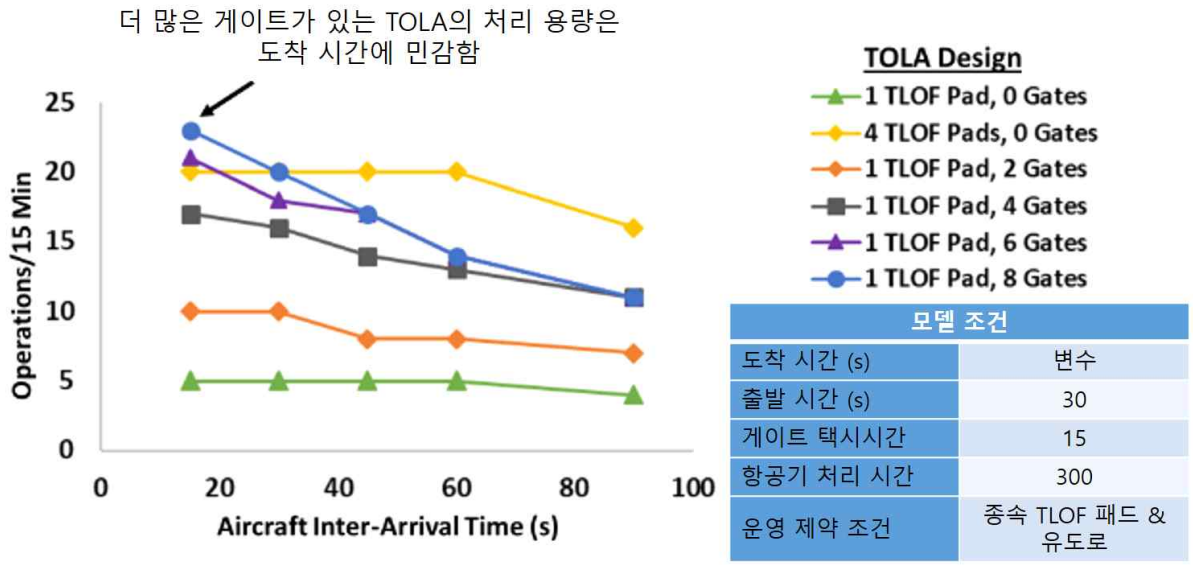


그림 198 6개의 TOLA에 대해 최대 처리량을 도착 시간 간격의 함수로 표시

- 도착 시간 간격에 대한 처리량의 민감도는 항공기 턴어라운드 시간에 대한 경향과 반대이기 때문에 설계 및 운영 관점에서 중요할 수 있음. 추가 게이트는 소요 시간의 변화에 대한 복원력을 증가시키지만 추가 게이트의 처리량 이점은 도착 시간 간격이 늘어남에 따라 감소함

- 동시 운영 정책의 영향

- 동시 운영 정책은 항공기가 vertiport에서 움직이는 방식에 영향을 줌. 이러한 정책은 두 항공기가 동일한 유도로를 반대 방향으로 동시에 사용하는 것을 금지하는 것과 같은 물리적 현실을 나타낼 수 있으며, 두 항공기가 근접한 종속 TLOF 패드에 대한 접근을 동시에 실행하는 것을 금지하는 것과 같은 규제 요구 사항을 나타낼 수 있음
- 수행된 민감도 연구는 7 가지의 동시 운영 정책을 고려함. 그 중 4가지는 단일 TLOF 패드에 대한 유도로와 접근/출발 절차 사이의 종속에 관한것임. 나머지 3개는 인접한

TLOF 패드에 대한 접근/출발 절차 사이의 의존성을 평가함. 접근/출발 절차 및 유도로를 제어하는 정책은 인접 TLOF 패드로의 접근/출발에 대한 정책보다 vertiport 처리량에 적은 영향을 줌

- 단일 TLOF 패드에 대한 정책의 영향

✓ 아래 첫 번째 그림은 단일 TLOF 패드에 대해 실험된 세 가지 동시 운영 정책을 보여주며 한 번에 하나의 항공기만 컬러 상자 내에서 운용할 수 있음. TLOF 패드에서의 이착륙 및 게이트와 스테이징 스탠드의 운영을 독립적으로 함으로써 처리량이 약간 증가함. 긴 택싱 시간의 영향은 아래 두 번째 그림에 표시된 것과 같이 독립성을 통해 부분적으로 완화되지만 대부분의 vertiport의 택싱 시간은 항공기의 접근, 출발 또는 회전 시간보다 훨씬 적을 것으로 예상되므로 이러한 이점이 작을 수 있음. 유도로에 독립성을 추가하는 것은 vertiport에 많은 스테이징 스탠드가 설치되어 있지 않으면 큰 이점이 없음

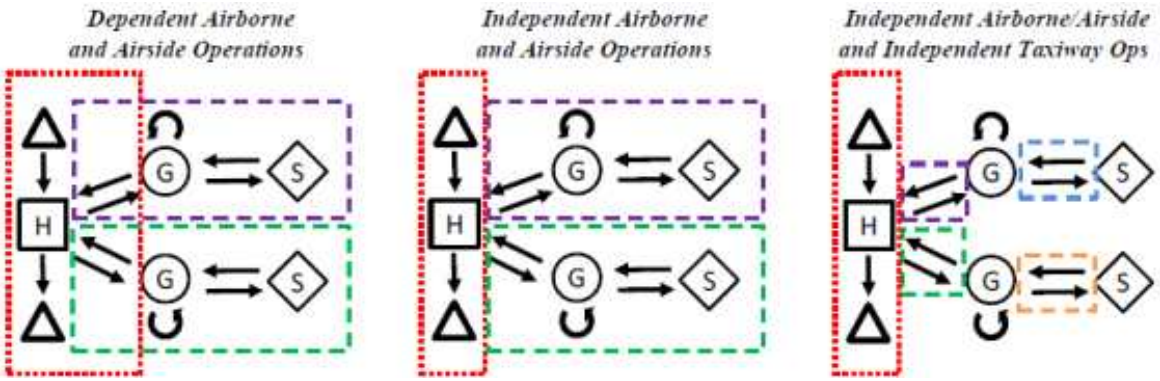


그림 199 단일 TLOF 패드 및 유도로 동시 운영 정책 중 3가지 ("H"는 TLOF 패드, "G"는 게이트, "S"는 스테이징 스탠드, 삼각형은 접근 또는 출발)

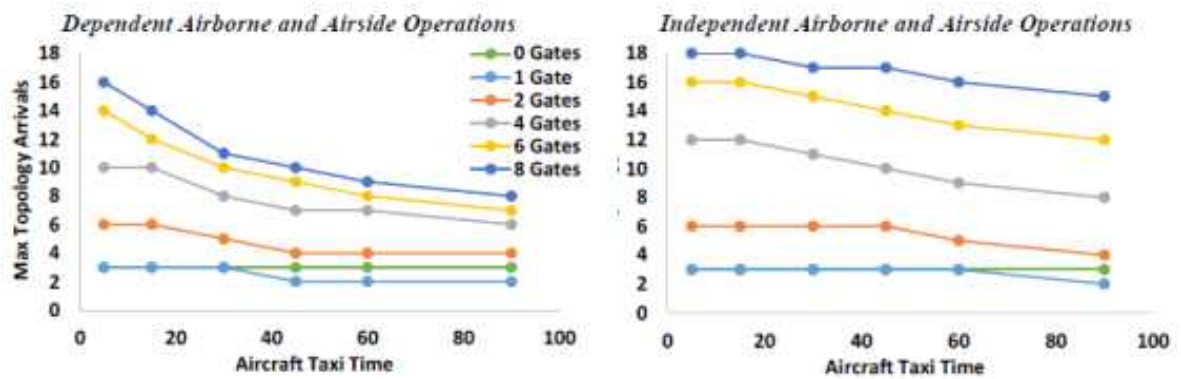


그림 200 TLOF 패드에서의 이착륙 및 게이트와 스테이징 스탠드의 운영 방식에 따라 택싱 시간에 따른 최대 처리량 비교

- 인접 TLOF 패드에 대한 정책의 영향

✓ 인접한 TLOF 패드 접근 및 출발 절차에 대한 동시 운영 정책은 단일 TLOF 패드 정책보다 vertiport 처리량에 더 큰 영향을 미침. 이는 병렬 활주로에 대한 동시 운영이 기존 공항 처리량에 미치는 중대한 영향과 일치함. 고려된 세 가지 정책은 아래 그림에 나와 있으며 각 정책의 일반적인 영향은 아래에 간략하게 설명됨

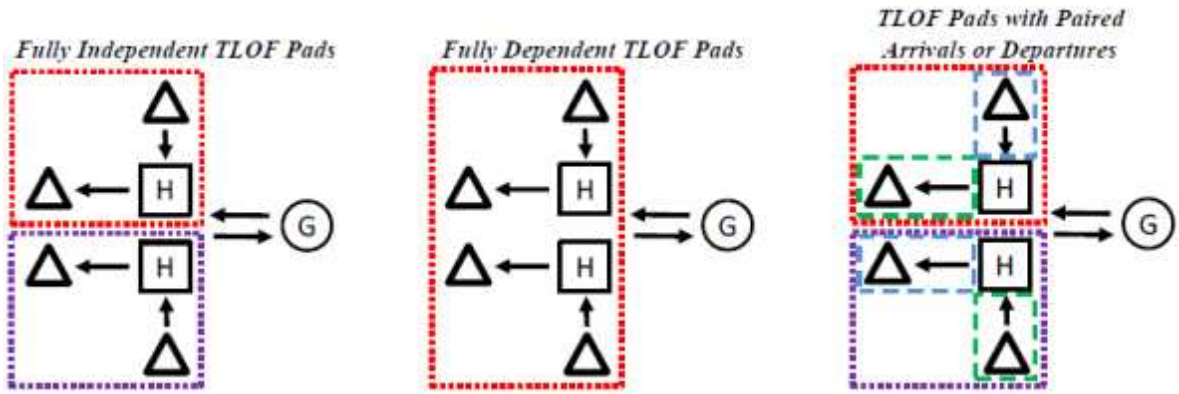


그림 201 인접한 TLOF 패드에 대한 동시 운영 정책 ("H"는 TLOF 패드, "G"는 게이트, 삼각형은 접근 또는 출발)

✓ 완전 독립 운영 (독립 운영)

- Vertiport 처리량을 최대화하는 가장 효과적인 시나리오는 다른 패드와 관계없이 한 패드에서 도착 또는 출발할 수 있는 완전히 독립적인 TLOF 패드 운영을 가능하게 하는 것임. 독립적인 TLOF 패드가 게이트를 공유하지 않으면 이 시설은 완전히 분리된 2개의 vertiport로 기능하고 단일 패드 및 게이트 세트의 처리량을 정확히 두 배로 지원함. TLOF 패드가 게이트를 공유하는 경우(예: 부두식 배치) 일부 상황에서 게이트 사용의 미미한 효율 개선으로 인해 vertiport의 처리량이 두 배 이상 증가할 수 있음
- 또한, 여러 개의 독립적인 TLOF 패드를 동일한 게이트 세트에 연결하면 도착, 출발 및 택싱 시간의 변동에 대한 처리 성능을 향상시킴. 운영상, 항공기가 TLOF 패드, 유도로 또는 게이트에서 비활성화 되는 경우 이러한 구성은 운영을 위한 유연성도 향상시킴
- 아래 첫 번째 그림은 1개의 TLOF 패드와 4개의 게이트가 있는 기준 vertiport와 비교하여 3개의 vertiport의 최대 처리량(가능한 도착 및 출발의 합)을 표시함. 첫 번째 그룹은 각 TLOF 패드(하나 이상이 있는 경우)가 독립적으로 운영하지만 공유 게이트를 사용하는 운영 시나리오에 해당함. 이와 같이 추가 TLOF 패드 없이 4개의 추가 게이트를 추가하면 최대 처리량 잠재력이 15%만 증가하지만, 4개의 게이트와 두 번째 TLOF 패드를 추가하면 두 배가 되고 여기에 4개의 게이트와 세 번째 TLOF 패드를 추가하면 세 배가 됨

✓ 완전 종속 운영 (종속 운영)

- 완전 종속 TLOF 패드를 vertiport에 추가하면(다른 인접 TLOF 패드에서 다른 도착 또는 출발이 발생하는 경우 도착 또는 출발을 못할 수 있음) 처리량이 약간 증가함. TOLA에 완전히 종속된 TLOF 패드를 추가하면 단방향 유도로를 사용하지 않는 한 처리 능력 이점이 없음. 이 경우 두 번째 종속 TLOF 패드는 택시 운영을 간소화하고 한 유도로에서 후진 택시로 인한 비효율성을 방지하여 처리량을 늘릴 수 있음. 따라서 종속 TLOF 패드는 TOLA에 처리 용량 이점을 거의 제공하지 않지만 견고성과 운영 이점을 제공할 수 있음
- 아래 첫 번째 그림의 세 번째 막대 그룹에 표시된 것처럼, 3개의 vertiport 배치에 대한 최대 처리량 증가는 추가된 TLOF 패드 또는 게이트 수에 관계없이 일정한 15%임. TLOF 패드에서의 도착 및 출발의 병목 현상으로 인해 3개의 vertiport가 모두 제한되기 때문에 처리량 이득은 적으므로, 게이트를 추가하면 처리량에 미미한 영향을 미치며 이미 포화된 패드와 독립적으로 사용할 수 없는 TLOF 패드를 추가해도 처리량에 미미한 효과가 있음

- 종속 TLOF 패드 및 게이트를 추가해도 vertiport에서 최대 항공기 처리량이 크게 증가하지는 않지만 시설에서 지원할 수 있는 불균형 도착 또는 출발 횟수는 증가하며, 그 효과를 아래 두 번째 그림에 나타냄. 이는 불균형 운영을 증가시키는 주요 원인이 스테이징 스탠드 또는 게이트의 추가이기 때문임. 2개 및 3개의 TLOF 패드를 가진 vertiport의 불균형 운영의 증가는 승객이 내린 항공기가 게이트에 머물러야하며 도착 비행을 지원하는 패드에 인접한 미사용 TLOF 패드에 주차할 수 없기 때문에 완전 종속된 시나리오가 독립 시나리오만큼 크지 않음(모델링 제약의 결과)

✓ 부분 종속 운영 (쌍을 이루는, 종속 운영)

- 인접 TLOF 패드가 한 쌍의 도착 항공편 또는 한 쌍의 출발 항공편을 지원할 수 있는 경우 TOLA의 처리량은 독립 TLOF 패드의 처리량과 일치할 수 있음. 쌍을 이룬 도착 및 출발의 주요 이점은 독립적인 VFR 작업에 필요한 일반적인 200 ft 또는 동시 IFR 작업에 필요한 수천 피트보다 더 가까운 TLOF 패드의 간격을 사용할 수 있다는 것임
- 이 시나리오에서는 인접한 TLOF 패드가 쌍을 이루는 도착 또는 출발 비행을 지원할 수 있음. 3개의 vertiport에 대한 잠재적인 처리량 이득은 아래 두 그림의 중간 막대 그룹으로 표시함. 흥미롭게도, 도착 또는 출발의 최대 처리량 성능 향상은 2개 및 3개의 TLOF 패드 배치의 경우 독립적인 TLOF 패드 운영의 처리량 성능과 유사함. 이는 TLOF 패드로의 도착 또는 출발을 지원하면 완전히 독립적인 접근 및 출발 절차를 보장할 필요없이 상당한 처리량 향상을 제공할 수 있음을 나타냄. 항공기가 인접 패드에 도착하는 동안에는 비적재 항공기를 TLOF 패드에 배치할 수 없기 때문에 이 운영 정책에 대한 불균형 도착은 독립 TLOF 패드의 도착보다 적음. 불균형 출발은 두 정책에서 동일함



그림 202 TLOF 패드 1개와 게이트 4개가 있는 vertiport와 비교하여 인접한 TLOF 패드 운영 정책이 3개의 vertiport 최대 처리량에 미치는 영향

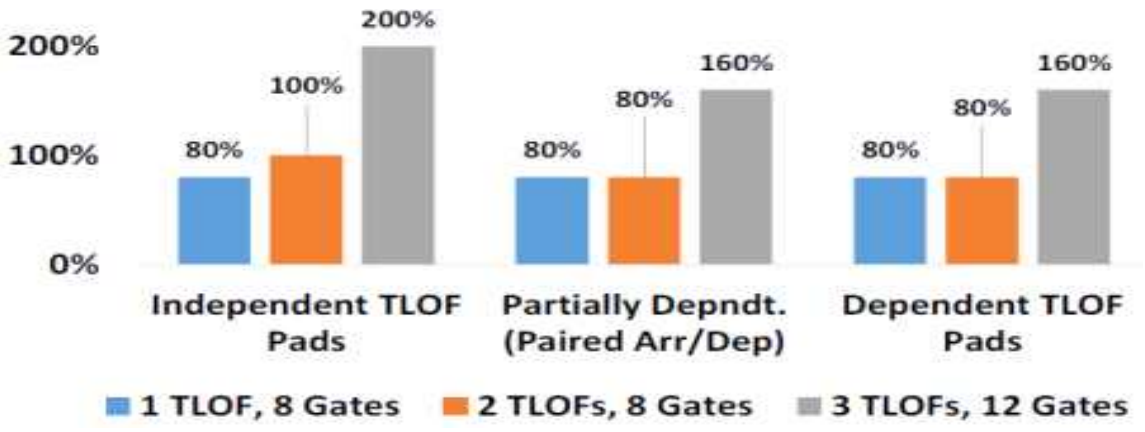


그림 203 TLOF 패드 1개와 게이트 4개가 있는 vertiport와 비교하여 인접한 TLOF 패드 운영 정책이 3개의 vertiport 최대 불균형 도착 수에 미치는 영향

- TOLA 설계 및 운영에 대한 처리량 민감도 요약

- 절충영역 분석 결과를 기반으로 TOLA 인프라 및 운영 변수의 주요 의미는 다음과 같이 요약됨
  - ✓ 독립적인 TLOF 패드의 수와 각 TLOF 패드와 관련된 게이트의 수는 처리 용량의 주요 요인임
  - ✓ 항공기 소요 시간이 도착 간격 및 출발 간격 시간에 비해 긴 경우 TOLA의 결정적 처리량은 각 TLOF 패드와 관련된 게이트 수를 늘리거나 TLOF 패드 수를 늘림으로써 최대화됨
  - ✓ 항공기 소요 시간이 도착 시간 간격 또는 출발 시간 간격에 비해 짧은 경우, 동시에 독립 또는 쌍을 이룬 항공기 작업을 지원할 수 있는 TLOF 패드의 수가 TOLA 처리량의 가장 중요한 요인임
  - ✓ TLOF 패드 당 많은 수의 게이트는 처리 시간을 증가시킴. 그러나 많은 게이트가 있는 TLOF 패드의 처리 용량은 도착 시간 간격이 늘어남에 따라 빠르게 감소함
  - ✓ 각 게이트 또는 스테이징 스탠드는 불균형 도착 또는 출발(즉, 해당 출발 없이 도착 또는 그 반대)을 지원하여 한 방향 비행 수요(예 :출퇴근 러시아워)를 지원하는 TOLA의 기능을 향상시킴

- 스테이징 스탠드와 사전 준비된 항공기의 영향

- Vertiport 처리량에 큰 영향을 미치는 최종 인프라 변수 및 운영 매개 변수는 각각 시설의 스테이징 스탠드 수와 vertiport에 사전 준비된 항공기 수임
- 아래 그림은 하나의 TLOF 패드와 4개의 게이트가 있는 vertiport에 최대 8개의 스테이징 스탠드를 추가한 효과를 보여줌. 추가된 각 스테이징 스탠드는 불균형 도착을 한 번 더 수행할 수 있게 하며 수용 범위가 넓어짐. 이는 TLOF 패드가 도착 항공기만 지원하여 포화 상태가 될 때까지 계속됨(아래 그림에는 표시되지 않았지만 최대 처리량 선이 x 축과 교차하는 지점). TLOF 패드가 포화 상태가 아닌 경우, 추가 스테이징 스탠드는 수행될 수 있는 총 운영 수(도착 및 출발)를 증가시킬 수 있으며, 이 상태는 아래 그림에서 0과 1 스탠드 시나리오 사이와 1과 2 스탠드 시나리오 사이에서 발생함

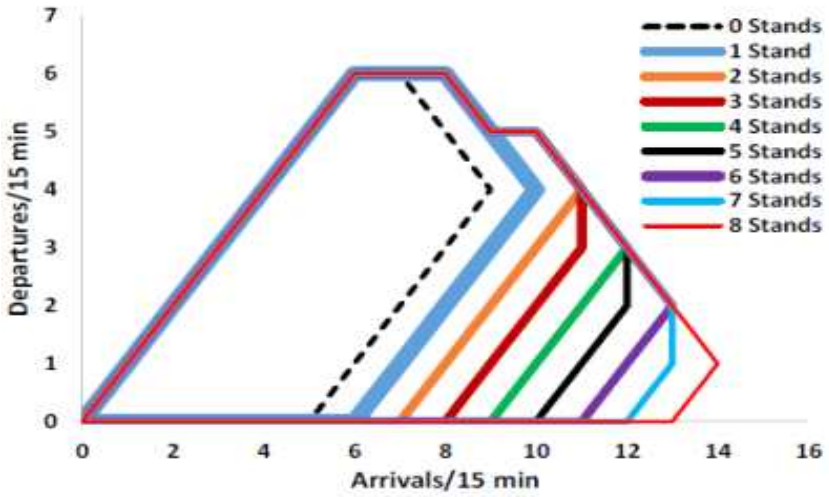


그림 204 TLOF 패드 1개와 게이트 4개가 있는 vertiport의 스테이징 스탠드 수에 따른 효과

- 아래 그림은 하나의 TLOF 패드, 2개의 게이트 및 2개의 스테이징 스탠드를 가진 vertiport에 준비된 항공기를 추가한 결과를 보여줌. 사전 준비된 항공기는 IP 솔루션 이전에 게이트 또는 대기 장소에 있는 항공기였음. 게이트에 사전 준비된 항공기는 이미 턴어라운드를 완료한 것으로 간주됨. vertiport에 1대 및 2대의 준비된 항공기가 추가된 경우 전체 수용 범위가 위쪽으로 이동하며 이것은 추가 출발이 범위의 상부 표면

에서 가능하고 하나 더 적은 도착이 범위의 하부 표면에 나타냄. 또한 이 두 가지의 수용 범위 각각에 대해 최대 처리량이 하나씩 증가함. 2대 이상으로 준비된 항공기는 실제로 최대 처리량을 줄이지만 불균형 출발 수는 계속 증가시키고 지원 가능한 도착 수는 계속 줄임

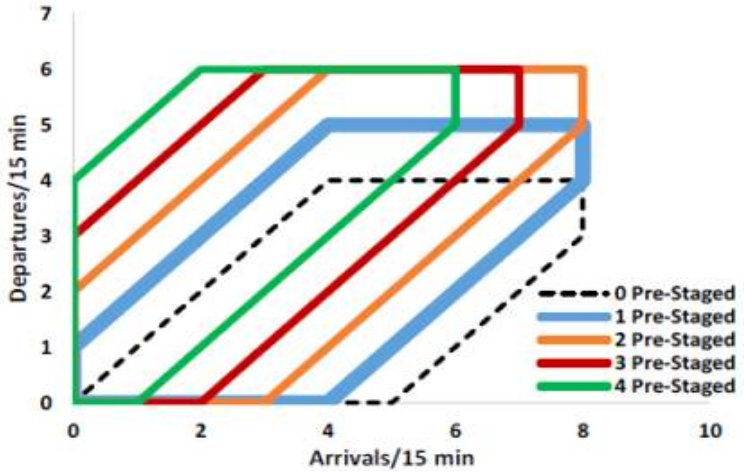


그림 205 TLOF 패드 1개, 게이트 2개, 스테이징 스탠드 2개가 있는 vertiport의 사전 준비된 항공기 수에 따른 효과

- 위 두 그림과 같이 스테이징 스탠드 및 사전 준비된 항공기의 수는 vertiport의 처리 능력에서 중요한 역할을 함. 스테이징 스탠드는 일반적으로 최대 처리량에 미미한 이득을 제공하지만, 수용 범위를 효과적으로 "채울 수 있는 " 불균형 운영의 수를 증가시킴 (이는 게이트를 추가하는 기능이기도 함). 불균형 도착 또는 출발을 지원하는 능력은 UAM 교통이 한쪽 방향일 수 있는 아침과 저녁 통근 시간 또는 운항이 많은 항공 뱅킹 기간 vertiport 운영에 특히 중요함. 사전 준비된 항공기는 vertiport 운영의 유일한 기능으로 추가적인 불균형 출발을 위해 수용 범위를 변경할 수 있음

- TOLA 설계 및 운영에 대한 처리량 민감도 요약

- 절충영역 분석 결과를 기반으로 TOLA 인프라 및 운영 변수의 주요 내용은 다음과 같이 요약됨
  - ✓ 독립적인 TLOF 패드의 수와 관련된 게이트의 수는 결정론적 처리 용량의 주요 TOLA 설계 요인임
  - ✓ 항공기 vertiport 체류시간이 도착 간격 및 출발 간격 시간에 비해 긴 경우 TOLA의 처리량은 각 TLOF 패드와 관련된 게이트 수를 늘리거나 TLOF 패드 수를 늘림으로써 최대화되며 동시 독립 또는 쌍 항공기 운영을 지원할 수 있음
  - ✓ 항공기 vertiport 체류시간이 도착 간격 또는 출발 간격 시간에 비해 짧은 경우, 동시에 독립 또는 쌍을 이룬 항공기 작업을 지원할 수 있는 TLOF 패드의 수가 TOLA 처리량의 가장 중요한 요인임
  - ✓ TLOF 패드 당 많은 수의 게이트는 처리 능력의 견고성을 높여 처리 시간을 증가시킴. 그러나 많은 게이트가 있는 TLOF 패드의 처리 용량은 도착 간격 시간이 늘어남에 따라 빠르게 감소함
  - ✓ 각 게이트 또는 스테이징 스탠드는 추가 불균형 도착 또는 출발(즉, 해당 출발 없이 도착 또는 그 반대)을 지원하여 한방향 vertiport 체류시간(예 : 출퇴근 러시아워)을 지원하는 TOLA의 기능을 향상시킴

○ 네 가지 Vertiport 배치 성능과 면적에 대한 민감도 연구 결과

- 전통적으로 도시 지역 주변에서 개발된 공항과 달리 UAM 서비스를 위한 vertiport는 인구 밀도가

높은 지역에 바로 적용될 것으로 예상되며 이러한 요구 사항은 토지 가용성, 비용 및 커뮤니티 수용 제약으로 인해 vertiport의 물리적 공간을 최소화해야하는 상당한 설계 압박이 발생함

- 4개의 vertiport 배치 종류 각각의 성능과 공간에 대한 vertiport 수용 범위 민감도 연구의 주요 결과를 아래에 나타냄

• **위성 배치**

✓ 배치 관점에서 위성 배치는 하나의 TLOF 패드와 최대 8개의 게이트가 있는 vertiport에 가장 견고한 배열이며 옥상과 같은 작은 설치 공간에 적합함. 그러나 UAM 항공기가 접근 및 출발 시간과 비교하여 충전과 같은 요소로 인해 소요 시간이 매우 길어지면 위성 배치에서 효율적인 TLOF 패드 활용을 위한 충분한 게이트를 지원할 수 없음

✓ 게이트에 TLOF 패드가 근접해 있기 때문에 지면 택싱은 호버 택싱에 비해 필요한 공간을 줄이고 로터 세류(rotor downwash)를 최소화하는데 적합함. 위성 배치 vertiport와의 접근 및 출발 경로 통합은 비행경로 아래에 있는 일부 게이트의 사용을 금지 할 수 있음. 더욱이, 위성 배치는 독립적인 출발 및 도착 경로를 가능하게 하는 것이 어려울 수 있기 때문에 다중 TLOF 패드 vertiport에 적합하지 않을 수 있음. 위성 배치는 게이트 공간이 제한되어 있지만 민감도 연구에서는 스테이징 스탠드를 추가하면 추가 공간 요구사항이 거의 없이 불균형 처리량이 크게 증가한다고 판단됨

✓ 마지막으로, **190 ft x 200 ft의 공간**은 1개의 TLOF 패드, 4개의 사용 가능한 게이트, 2개의 출발 및 도착 경로 및 지상 유도로를 갖춘 위성 배치 vertiport를 지원할 수 있을 것으로 추정됨. 공간을 약 **190 ft x 315 ft**로 늘리면 4개의 사용 가능한 게이트를 추가적으로 지원할 수 있음

• **부두 배치**

✓ 부두 배치는 많은 TLOF 패드 및 게이트가 있는 **대규모 시설에 가장 효율적**이므로 지면이 평평한 곳 또는 큰 공간의 옥상을 가진 시설에 더 적합함. 부두 배치는 부분적으로 또는 완전히 독립적인 운영을 위해 충분한 TLOF 패드 간격을 쉽게 지원하며 게이트 세트를 여러 TLOF 패드에 연결하여 운영상의 견고성을 향상시킴. 부두 배치는 유도로 정체가 발생할 수 있으므로 두 번째 TLOF 패드를 지원할 수 없는 소규모 처리량 시설의 성능이 제한적일 수 있음. 또한 항공기 승하차 시간이 매우 짧은 경우, 부두 배치에서 가능한 게이트 대 TLOF 패드의 높은 비율은 처리량 관점에서 비효율적일 수 있음

✓ 부두 배치 vertiport는 약 **190 ft x 225 ft**의 공간에 지상 유도로가 있는 하나의 TLOF 패드 및 4개의 사용 가능한 게이트를 지원할 수 있음. 또한 약 **190 ft x 70 ft** 크기의 추가 공간으로 시설에 2개의 추가 게이트 세트를 추가할 수 있음

• **선형 배치**

✓ 선형 배치는 영국 그랑프리 기간 동안 Silverstone 헬기장에서 경험한 것과 같이 **항공기의 지상 소요 시간이 매우 짧은 경우**(일반적으로 현장에서 재충전 또는 급유를 하지 않는 경우)에 적합함. 이러한 경우 게이트와 TLOF 패드 사이에 필요한 택싱 시간은 TLOF 패드 사용 시간의 상당 부분을 차지함. 선형 배치는 특히 부분적으로 또는 완전히 독립적인 TLOF 패드 운영이 필요한 경우 공간 효율성이 높지 않지만, 독립 TLOF 패드 사이 공간에 스테이징 영역을 설치하는 것이 이 공간을 활용하는 한 가지 방법이며 vertiport의 불균형 처리량을 크게 증가시킴

✓ 선형 배치는 한 쌍의 종속 TLOF 패드에 대해 약 90 ft x 180 ft가 필요하거나 한 쌍의 독립 TLOF 패드에 대해 90 ft x 270 ft가 필요하고, 추가 독립 TLOF 패드에 대해 90 ft x 180 ft가 필요함

• **원격 계류장 배치**

✓ 원격 계류장 배치는 소음 감소, 공항 통합 또는 안전과 같은 다른 설계 요구 사항을 충족하기 위해 설치 공간과 처리 효율을 감수해야 함. TLOF 패드를 게이트와 수백에서 수천 피트 떨어진 다른 곳에 배치하면 유도로의 시간 및 설치 공간 요구 사항이 크게 증가함. 이는 원격 계류장 배치의 vertiport에 대한 몇 가지 고유한 요구 사항 및 기회를 만듦

✓ 독립적인 항공 운송 및 운영은 원격 계류장 vertiport에서 처리량을 높이기 위한 중요한 요구 사항임

✓ 택싱 속도를 높이려면 시설에서 호버 택싱을 지원해야 함. 특히 공항에 통합된 vertiport의 경우 호버 유도로는 기존 활주로에서 멀리 떨어진 TLOF 패드를 공항 터미널에 연결하는 효과적인 수단이 될 수 있음. 심지어 표지등(navigation lights)으로만 구성된 "높은" 호버 유도로(하중 지지면 없음)가 UAM 접근을 가능하게하기 위해 붐비는 공항으로 이어지는 긴 거리로 건설될 수 있음. 이는 계기 비행 조건에서도 UAM 접근을 가능하게 할 수 있음

- 설치 공간이 제한된 TOLA의 처리량 추정 예

• 이전에 개발한 방법을 결합하여 가장 긴 치수에서 500 ft 이하의 공간으로 제한된 예제 TOLA의 처리량을 추정함. 이전 연구에 따르면 500 ft 미만의 TOLA 인프라는 주요 도시에서 잠재적으로 실행 가능한 사이트의 수를 크게 증가시킴[100,101,121,122]

• 결과는 유망한 TOLA 배치를 식별하여 주어진 공간 및 운영 조건에 대한 처리 용량을 최대화하고, 운영 조건이 처리량에 미치는 영향을 표시하고, TOLA에서 가능한 UAM 처리량에 대한 대략적인 추정치를 제공함

- 연구 방향

• 도심 TOLA 위치를 나타내는 공간으로 두 가지 사례를 고려함

✓ 사용 가능한 물리적 공간이 300 ft x 300 ft인 옥상

✓ 사용 가능한 물리적 공간이 500 ft x 200 ft인 수로 또는 고속도로

• 각 경우에 대해 TLOF 패드, 게이트 및 유도로는 위성, 부두 및 선형 배치에 따라 사용 가능한 공간 내에 배치됨. 다음으로, TOLA 형상의 처리량은 앞에서의 IP 모델을 사용하여 추정됨. 잠재적 처리량을 아래 표에 설명된 5 가지 운영 조건에 대해 추정함. 5 가지 운영 조건은 모두 단방향 유도로에서 포장된 노면을 가정함

표 38 TLOA 분석 예시에 대한 운영 조건

개념 시나리오	항공기 처리 시간 (s)	도착 시간 간격(s)	출발 시간 간격(s)	택싱 시간 (s)	독립 TLOF 패드 사이 공간 (ft)
VFR-Short Turn	60	30	30	15	200
VFR-Medium Turn	300	30	30	15	200
VFR-Long Turn	600	30	30	15	200
IFR-Short Turn	60	90	30	15	700
IFR-Medium Turn	300	90	30	15	700

• VFR (Visual Flight Rules),급선회 시나리오는 헬리콥터 항공사[120] 및 전세 헬리콥터 서비스에서 보여준 것과 유사한 운영 조건을 나타냄. VFR, 중회전 시나리오는 전기 항공기의 고속 충전을 위한 시간을 제공하는 Uber의 제안을 나타냄[104]. VFR, 장거리 회전 시나리오는 항공기 충전 시간을 보다 보수적으로 추정함

• IFR (Instrument Flight Rules) 시나리오에서는 더 큰 분리 최소값을 설명하기 위해 도착 간격 시간과 독립적인 TLOF 패드 간격이 모두 증가함. 동시에 독립적인 IFR 항공기

운영을 위한 최소 TLOF 패드 간격은 700ft[114]로 고려된 TOLA 공간의 예시보다 큼

- 이 연구의 목적은 각 공간에 대한 항공기 처리량을 최대화하는 것이므로 승객의 출입, 유지 보수 및 서비스 작업, 터미널 통합은 고려하지 않음. 이러한 추가 고려 사항은 처리 용량을 최대화하지 않더라도 특정 배치를 실제 구현에 더 적합하게 만들 수 있음

- 300 ft x 300 ft 공간 사례 연구

- 아래 그림은 세 가지 TOLA 형상은 위성, 선형 및 부두 배치에 대해 300 ft x 300 ft 물리적 공간 내에 위치할 수 있는 게이트 및 TLOF 패드의 수를 최대화하는 배치를 나타냄
- 즉 아래 표와 위 표의 5 가지 운영 시나리오에 대해 각 TOLA 형상의 최대 처리량을 보여줌
- 300 ft x 300 ft 설치 공간의 경우 위성 배치는 처리 용량 관점에서 부두 배치보다 우세함. 부두 배치에서 유도로의 폭은 제한된 공간에서 지원될 수 있는 게이트 및 TLOF 패드의 수를 제한함. 따라서 잠재적인 TOLA 처리량을 줄임

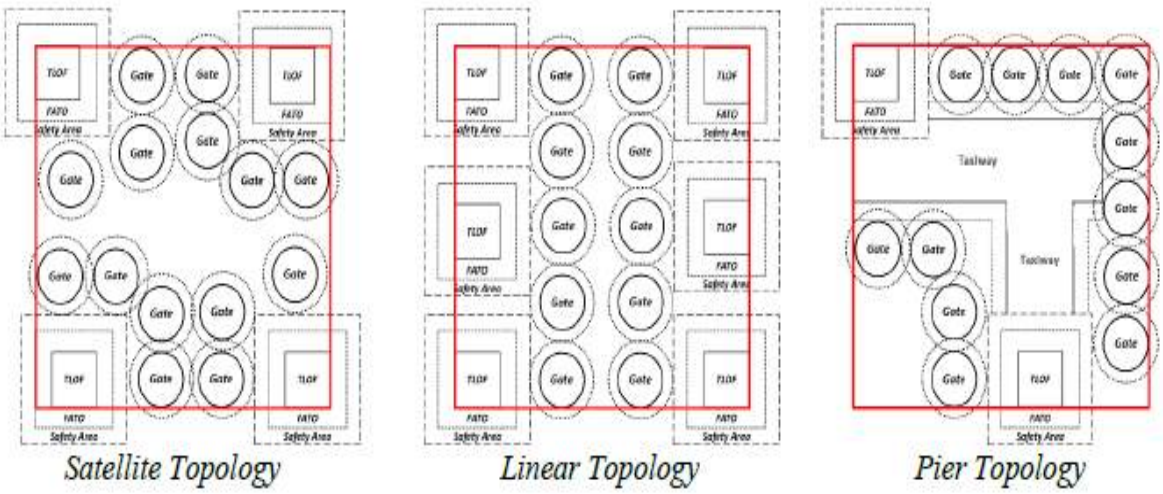


그림 206 300 ft x 300 ft 공간의 TOLA 물리적 공간에 대한 잠재적 배치

표 39 300 ft x 300 ft 공간의 TOLA 배치에 대한 15 분 처리량

		운영 시나리오				
		VFR: 30s 도착 간격 시간			IFR: 90s 도착 간격 시간	
TOLA 설계		60s 항공기 처리 시간	300s 항공기 처리 시간	600s 항공기 처리 시간	60s 항공기 처리 시간	300s 항공기 처리 시간
위성 배치	4 TLOF 패드 14 게이트	60초 도착 60초 출발	42초 도착 28초 출발	28초 도착 14초 출발	7초 도착 7초 출발	8초 도착 6초 출발
선형 배치	6 TLOF 패드 10 게이트	62초 도착 56초 출발	30초 도착 20초 출발	10초 도착 5초 출발	7초 도착 7초 출발	8초 도착 6초 출발
부두 배치	2 TLOF 패드 12 게이트	30초 도착 30초 출발	30초 도착 20초 출발	18초 도착 12초 출발	7초 도착 7초 출발	8초 도착 6초 출발

- 도착 간격 시간과 처리 시간이 모두 짧은 경우 독립 TLOF 패드의 수를 최대화하는 배치는 게이트 수에 관계없이 최고의 처리량을 가능하게 함. 위성 및 선형 배치는 모두 4개의 독립적인 TLOF 패드를 지원함. 선형 배치의 두 중간 TLOF 패드는 종속 연산만 지원하지만 300 초 또는 600 초의 긴 항공기 처리 시간의 경우 항공기 처리를 수행할 게이트가 적기 때문에 선형 배치의 처리량이 위성 배치보다 더 빠르게 감소함. 이러한 요소를 고려하면 위성 배치는 VFR 처리량을 최대화함

- 처리량 외에도 위 그림의 세 가지 배치는 ATC에 대해 서로 다른 잠재적인 문제를 야기함. 위성 또는 선형 배치에서 4개의 독립적인 TLOF 패드를 활용하려면 항공기가 서로 수렴하는 각도로 TOLA에 도착하고 출발해야함. 반면에 부두 배치는 하나의 TOLA가 도착을 처리하고 다른 하나가 출발을 처리하는 한 방향으로 항공기 흐름을 지원할 수 있음
- 마지막으로, IFR 조건에서 각 배치는 측면 분리 최소값으로 인해 한 번에 하나의 TLOF 패드만 사용하도록 제한됨

- 500 ft x 200 ft 공간 사례 연구

- UAM TOLA의 많은 잠재적 위치로는 철도 또는 수로를 포함하여 얇고 긴 공간이 있음. 아래 그림의 TOLA 형상은 세 가지 배치에 대해 500 ft x 200 ft의 물리적 공간에 잠재적인 TOLA 설계를 나타냄. 아래 표는 5 가지 운영 시나리오에서 각 TOLA의 최대 처리량을 나타냄

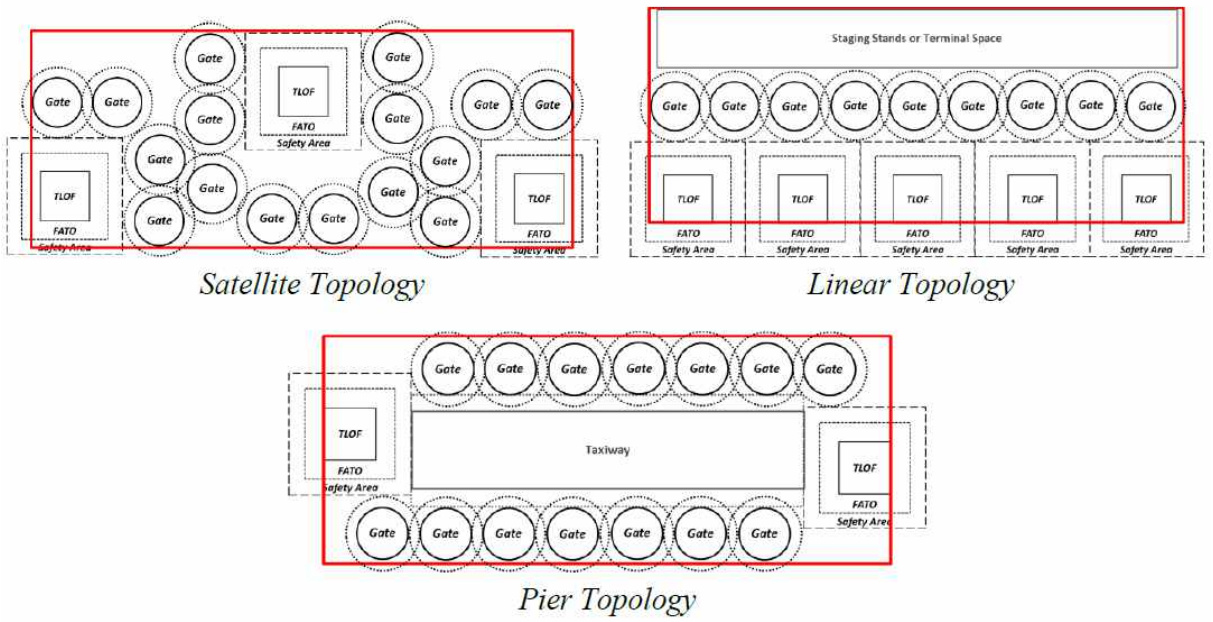


그림 207 500 ft x 200 ft의 물리적 공간의 TLOA에 대한 잠재적 배치

표 40 500 ft x 200 ft 공간의 TOLA 배치에 대한 15분 처리량

TOLA 설계		운영 시나리오				
		VFR: 30s 도착시간 간격			IFR: 90s 도착시간 간격	
		60s 항공기 처리 시간	300s 항공기 처리 시간	600s 항공기 처리 시간	60s 항공기 처리 시간	300s 항공기 처리 시간
배치	3 TLOF 패드 16 게이트	45초 도착 45초 출발	39초 도착 28초 출발	25초 도착 16초 출발	7초 도착 7초 출발	8초 도착 6초 출발
선형 배치	5 TLOF 패드 9 게이트	46초 도착 43초 출발	27초 도착 18초 출발	18초 도착 9초 출발	7초 도착 7초 출발	8초 도착 6초 출발
부두 배치	2 TLOF 패드 14 게이트	30초 도착 30초 출발	30초 도착 22초 출발	18초 도착 14초 출발	7초 도착 7초 출발	8초 도착 6초 출발

- 이전 사례와 마찬가지로 부두 배치는 사용 가능한 공간을 효율적으로 활용할 수 없었으며 모든 운영 시나리오의 처리량 측면에서 위성 배치가 우세함
- 항공기 처리 시간이 짧으면 위성 배치의 추가 게이트가 사용되지 않고 선형 배치가 비슷한 처리 용량을 제공함. 턴 타임이 증가함에 따라 처리량을 유지하기 위해 추가 게이트가 필요함. 선형 배치의 두 개의 종속 TLOF 패드는 선형 배치에 대한 처리량을 증가시키지 않음. 이러한 패드가 사용하는 공간은 게이트로 변환하면 처리량을 더 높임

○ 결론

- 본 연구는 결정적 vertiport 수용 범위를 분석적으로 개발하고 배치 형태 및 운영 매개 변수 상황에 대한 항공기 처리량의 민감도를 평가하기 위한 정수계획 접근법(IP, Integer Programming)을 개발함. IP 공식 및 기본 네트워크 모델링 접근 방식은 본 연구에서 특징지어진 4가지의 일반적인 vertiport 배치 형태 중 어느 것에나 유연하고 쉽게 적용할 수 있음. 이 접근법의 유연성은 156개의 다른 vertiport와 146개의 다른 운영 매개 변수 설정에 대한 적용을 통해 증명함. 민감도 연구 결과는 vertiport의 처리량을 최대화하고 물리적 공간을 최소화하며 공식적인 운영에 대한 견고성을 높이기 위해 설계 또는 운영 전략 및 비교분석을 확인할 수 있게 함
- 밀집된 도시 지역 내에서 TOLA에 대한 제한된 부지 선정 조건으로 인해, 대량의 항공기 운영을 지원할 수 있는 작은 물리적 공간을 가진 TOLA는 UAM 확장을 직접적으로 가능하게 함
- 첫째, 민감도 연구에 따르면 동시 및 독립 UAM 비행을 지원하는 vertiport에서 게이트 대 TLOF 패드의 비율이 핵심 설계 요소임. 주어진 운영 매개 변수 세트에 대한 처리량을 최대화하는 최적의 비율이 있음. 이 비율보다 적은 수의 게이트를 사용하면 TLOF 패드의 항공기 부족으로 처리량과 운영 견고성이 모두 줄어들 것임. 이 비율보다 많은 게이트를 사용하면 처리량에 거의 영향을 미치지 않지만 견고성이 향상되고 더 큰 설치 공간이 필요함. 주어진 공간에 대한 처리량을 최대화하는 데 필요한 패드 또는 게이트의 수는 주로 항공기의 도착 시간 간격, 항공기의 처리 시간 및 독립된 TLOF 패드 간의 필요한 측면 분리와 같은 세 가지 운영 변수에 따라 달라지는 것으로 나타남
- 둘째, vertiport에 스테이징 스탠드를 갖추면 상당한 이점을 얻을 수 있음. 각 스테이징 스탠드를 통해 vertiport는 특히 흐름이 시설 밖으로 나가는 경우(예: 출퇴근 러시아워 또는 항공 비행 뱅크 등)와 같은 혼잡시간대 운영 중 더 많은 불균형 도착 또는 출발을 지원할 수 있음. 스테이징 스탠드는 게이트보다 작은 공간을 필요로 하며 처리량 이점도 제공할 수 있음
- 셋째, 여러 개의 TLOF 패드를 가진 vertiport는 해당 패드가 완전히 독립적으로 운영되거나 동시에 쌍을 이루어 도착 및 출발할 수 있는 경우 처리량을 크게 높일 수 있음. 한 쌍의 도착 및 출발을 달성하면 독립적인 운영만큼 처리량이 크게 증가하지만 더 작은 최소 분리 및 특수 항공 전자 장치가 필요할 수 있음. 여러 TLOF 패드가 동일한 게이트 세트를 공급하는 경우에도 운영 견고성이 향상될 수 있음
- UAM 항공기가 시각비행 규칙(VFR)에 따라 작동할 때는 도착 간격 시간과 TLOF 패드 측면 분리 요구 사항이 적음. 10분 정도의 소요 시간을 보수적으로 추정하면 300 ft x 300 ft의 공간을 가진 UAM TOLA는 잠재적으로 시간당 약 100개의 항공기를 지원할 수 있음. 처리 시간 단축은 처리량을 시간당 약 500회까지 증가시킬 수 있음
- 그러나 UAM이 계기비행 규칙(IFR)에 따라 작동할 때는 기존의 측면 분리 최소값으로 인해 설치 공간이 수천 피트 미만인 TOLA에서 독립적인 TLOF 패드를 개발하지 못할 수 있음. 또한 종단 분리 요구 사항으로 인해 VFR 작업에 비해 도착 시간 간격이 크게 증가함. 결과적으로 TOLA의 최대 IFR 처리량은 시간당 약 50개로 감소함. 따라서 IFR 작업은 TOLA 처리량이 UAM 규모를 제한할 수 있는 가장 중요한 시나리오임
- 향후 연구로 운영 매개 변수 및 다양한 조건의 현실적인 차이에 대한 vertiport 운영의 견고성을 탐구할 수 있음. 이러한 조건에 확률을 할당하고 최소 공간에 대한 평균 처리량을 최대화하는 vertiport 배치를 결정하는 것이 초기 접근법임. 더 유용한 정보는 수용 범위에 대한 확률적 시뮬레이션 기능의 개발임. IP의 결정론적 공식은 처리 용량 상한값을 추정하지만 확률적 항공기 성능을 고려한 실제 처리량을 나타내지는 않음. 또한 빽빽하게 계획된 결정론적 솔루션은 안정성 문제에 취약함. 수용량 범위에 대한 확률적 시뮬레이션 기능의 개발은 이 결과를 확장하는 데 유용함.

마지막으로, 3차원 여러 층의 TOLA 개념 또는 터미널 인프라와 게이트에 대한 승객 접근의 통합 가능성을 고려하지 않음. 이들은 향후 연구를 위한 영역임

2-1-⑩. 바람 등 기상환경을 고려한 수직이착륙장 선정 국외 연구

○ 개요

- 고층 빌딩이 밀집되어 있는 수도권의 경우 건물 옥상에 다수의 헬리패드가 존재함. 하지만 이를 수직이착륙장으로 활용하기에는 돌풍 등 여러 문제점이 제기됨. 특히 기상환경의 영향이 적지 않음. 따라서 이를 고려한 수직이착륙장을 선정해야함

○ 기상환경을 고려한 수직이착륙장 선정

- 선정된 수도권의 100개 수직이착륙장 중 일부는 건물 옥상이기는 하나 상대적으로 넓은 공간이고 주변의 건물의 영향을 거의 받지않는 곳을 선택하여 기상환경의 영향을 크게 받지 않을 것으로 생각되나 정확한 분석을 위해서는 수직 이착륙장 100곳의 기상상황에 대한 2-3년간의 데이터를 축적하여 기상환경이 좋지 않는 곳은 대체 수직이착륙장을 선정해야 할 것으로 판단됨. 이러한 기상데이터 축적은 본 연구의 범위를 벗어나므로 본 연구에서는 생략하기로 함.

○ 날씨 장벽

- 날씨 제약은 UAM 시장의 특성을 보여주는 중요하고 복잡한 요소임. 날씨는 운영, 서비스 공급, 승객 편의, 커뮤니티 수용, 인프라 및 교통 관리를 포함하여 UAM의 많은 구성 요소에 영향을 미칠 수 있음.
- 본 연구에서는 운영에 중점을 두고 UAM에 영향을 미칠 수 있는 기상조건 또는 기후에 대한 초기 평가를 제공하는 것임. 기체 또는 기술에 대한 가정은 없었으므로 향후 특정한 사례를 검토하여 결과를 더 정확하게 만들 수 있음

○ 방법론

- 이 부분에서는 데이터 소스, 10개의 주요 도시 지역에서의 기후와 전반적인 날씨에 영향을 받는 시간의 결과들을 포함하여 기후학을 개발하는데 사용되는 날씨 분석 방법론에 대해 설명함
- 날씨 데이터 소스
  - 주요 도시 지역과 근처 지역의 사용 가능한 데이터 소스를 조사한 결과 고해상도의 신뢰할 수 있는 보정된 관측치들이 가용성이 제한되어 있음을 발견했음. 따라서 분석을 위해 Meteorological Aerodime Report (METAR), vertical sounding, 파일럿 보고서(PIREP: pilot report)를 포함한 정기적으로 수집된 기상 관측치를 목표로 삼았음
  - METAR는 일반적으로는 공항의 지표면에서 매시간 수집되는 지점 관측치이며 온도, 풍향 및 속도, sky cover (저고도/시계), 현재 날씨(뇌우, 비, 눈)를 포함함. Vertical sounding은 오전(12Z)과 오후(00Z)에 고정된 위치에서 하루에 두 번 발사되는 기상 관측 기구에서 생성되며 UAM 비행 중 또는 버티포트에서 경험할 수 있는 조건을 제공해줌. 이러한 수집된 데이터에는 지상에서 약 65,000 피트까지 여러 고도에서의 온도, 압력, 이슬점, 풍속 및 방향이 포함됨
  - PIREP는 조종사가 저 레벨의 윈드시어 또는 난기류와 같은 영향을 미칠 것으로 간주되는 기상조건을 경험할 때 보고됨. 이들은 정기적인 시간간격으로 수집되지 않으므로 분석에서 METAR 및 vertical soundings에서 관찰된 신호를 증폭시키기 위한 기상 영향의 보충 소스로 사용됨. 이러한 데이터가 지역 내에서 조건과 변동성을 얼마나 잘 나타내는지 평가하기 위해 주요 도시 지역과 관련된 관측 위치의 공간 범위와 분포를 평가했음

- 관측 위치의 METAR 표면 및 vertical sounding 관측 위치는 여러 대상 도시지역과 잘 겹치지만 많은 조건을 완전히 대표하지는 못할 수 있음. 대부분의 미국 동부 및 텍사스 대상 도시 지역에서 이러한 관측 위치는 지역 전체에 균등하게 분포되어 있지만 마이애미, 휴스턴과 같은 일부 지역에서는 그림과 같이 해당 지역의 한 부분에서만 관측위치가 분포되어 있음. 또한 덴버와 같은 일부 주요 도시 지역에서는 vertical sounding 관측이 도시지역 외부에서 수집되며 도시지역 내의 조건들을 완전히 나타내지는 않을 수 있음. 이러한 한계에도 불구하고 관측치는 UAM에 대한 날씨 장벽을 평가할 수 있는 대상 도시지역의 좋지 않은 환경에 대한 기준을 제공함

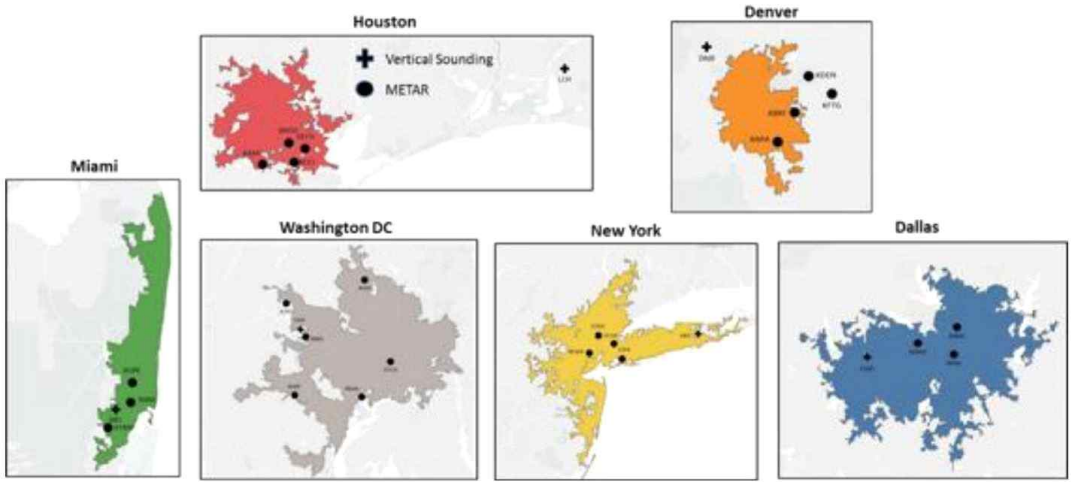


그림 208 10개 대상 도시지역 중 6개에 대한 표면 및 vertical sounding 관측 위치

- 과거 통계

- UAM 운영에 잠재적으로 영향을 미칠 수 있는 기상조건은 많은 대상 도시지역에서 일주와 계절에 따라 크게 다를 수 있으므로 봄, 여름, 가을, 겨울과 같은 계절과 시간별로 기후를 계층화하였음. 시장 분석에 맞추기 위해 현지시간으로 오전 7시부터 오후 6시까지 예상되는 UAM 운영에 분석을 집중하였지만 24시간에 대한 데이터를 보유하고 있음
- METAR 표면 관측을 위해 UAM 운영 기간의 각 시간 및 계절에 대한 뇌우 및 계기 비행 규칙(IFR: instrument flight rules)과 같은 조건의 빈도수와 평균 기온 등 7년간의 통계들에 대해서 계산하였음. 이러한 통계는 도시 지역의 각 METAR 위치에서 계산되고 평가되어 도시 지역 내의 여러 위치에서 불리한 조건들의 변동성을 평가할 수 있음
- 예를 들어 오후에 샌프란시스코 도시 지역에서 여름 오후 4시경 샌프란시스코 도시지역에서 20노트 이상의 바람 빈도가 SFO (Bay의 서쪽)에서는 50 % 이상이지만 OAK 에서는 5 % 미만으로 상당한 차이를 발견했음. 이는 바람 조건이 샌프란시스코 서부지역보다 동부지역이 UAM 운영에 더 유리하다는 것을 나타냄. 그런 다음 모든 METAR 관측소에서 이러한 통계를 집계해 계산하여 도시 지역의 조건에서 계절별 변동성을 분석하였음. 샌프란시스코의 예를 계속해서 살펴보면 대부분의 계절에서 오후에 20노트 이상 바람의 빈도가 가장 높지만 겨울에는 약 10 %에 불과하다는 사실을 발견했음. 이는 도시 전체에 걸쳐 UAM 운영이 겨울철에 더 유리함을 나타냄
- 앞서 언급했듯이 vertical sounding은 하루에 두 번만 수집되므로 모든 대상 도시 지역에서 이 두 시간대(12Z와 00Z)에 대해 5년 동안의 계절별 평균을 계산했음. 관측 장치가 올라갈 때 불규칙한 수직 간격으로 관측 값이 수집되므로 충분한 샘플을 보장하기 위해 500피트마다 평균 조건을 계산하였음. 밀도 고도는 버티포트에서의 양력 조건을 특성화하기 위해 모든 도시 지역 가장 낮은 고도의 장소에서 계절별 평균 조건을 계산하였음.

바람은 각각의 고도에서 측정되어온 바람의 평균 방향 구성요소를 계산하여 생성하였음

- 파일럿 보고서(PIREP: pilot report)는 특별한 목적으로 표면 및 vertical sounding 관측결과를 보강하기 위한 보충 관측치로 사용되었음. 초기에는 보고서의 공항 코드를 사용하여 주요 도시 지역 또는 그 근처의 3년간의 자료를 PIREP와 분리시켰음. 아래 그림과 같이 어떠한 기상 조건이 가장 우세한지 식별하기 위해 각 도시 지역 내에서 보고된 날씨의 유형별로 비율을 계산하였음. 모든 도시 지역에서 low ceilings과 난기류는 덴버와 샌프란시스코를 포함한 몇몇 도시 지역에서 자주 보고되는 낮은 수준의 윈드시어와 더불어 가장 자주 보고되는 조건임. 주어진 보고서에 둘 이상의 조건이 포함될 수 있으므로 이러한 비율이 항상 100 %가 되는 것은 아님

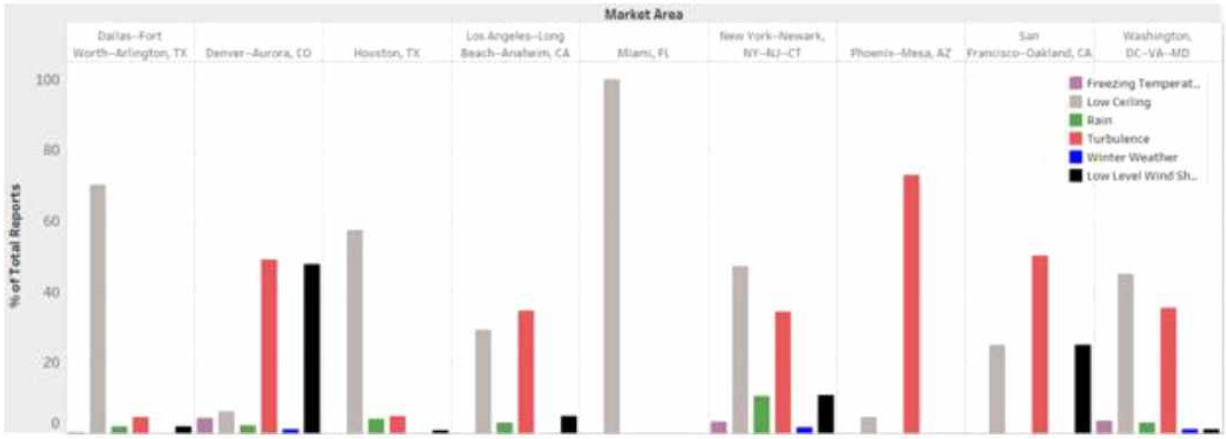


그림 209 주요 도시 지역에서의 기상 조건에 따른 PIREP 분포
그래프 순서(Freezing Temperature, Low Ceiling, Rain, Turbulence, Winter Weather, Low Level Wind Shear)

- 영향을 받는 시간

- 과거 기상 조건에 대한 자세한 통계를 개별적으로 생성한 후 기본 조건에 따라 UAM 운영이 잠재적으로 중요하게 영향을 받을 평균 시간을 계산했음. 이러한 영향을 받는 시간을 계산하는 목적은 UAM 운영일 동안 날씨 영향에 대한 통합 매트릭을 제공하는 것임. 영향을 받는 시간은 모든 데이터 소스 중 가장 높은 시간적 해결책을 제공하므로 METAR 표면 관측치를 기반으로 계산되었음
- 이를 위해 먼저 METAR 관측소에서 포착된 기상 조건에 대한 “impact scores”를 1에서 10점까지 정의했음. 항공 날씨에 대한 광범위한 전문 지식과 UAS 및 UAM 기체의 날씨 영향에 대한 가용 문헌을 활용하여 아래 그림과 같이 점수를 정의함. 이 점수는 예비점수이며 UAM 운영에 잠재적인 영향을 파악하기 위해 정의되었고 자동화 수준이나 기체 유형에 대해서는 가정하지 않았음. 이러한 구성 요소가 명시적으로 정의된 사례 연구를 통해 날씨 영향 점수의 추가 개선 및 정밀도를 달성할 수 있음

Weather Condition	Score		Weather Condition	Score
Drizzle	1		Wind 20 - 25 kts	7
Rain	1		Smoke (<3 sm)	7
MVFR Ceiling	1		LIFR Ceiling	7
Haze	1		IFR Visibility	7
Ice Crystals	1		Wind ≥ 25 kts	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
IFR Ceiling	4		Thunderstorms	9
Dust	5		Dust Storm	10
Snow	5		Funnel Cloud/Tornado	10
Sandstorm	5		Freezing Rain	10
Wind 15 - 20 kts	5		Hail	10
Mist (vis >= 5/8 sm)	6		Volcanic Ash	10
Snow Pellets	6			

그림 210 METAR의 각 기상 조건에 대한 영향 점수

- 수직 윈드시어는 표면 관측으로 직접 정량화할 수 없는 UAM 운영에 영향을 미칠 수 있는 중요한 조건임. 이러한 영향 점수는 상용 항공기의 관측과 같은 더 높은 시간 해상도 수직 데이터를 활용하여 확장할 수 있음. 그런 다음 해당 시간동안 발생해온 기상 조건들을 바탕으로 모든 대상 도시지역에서 계절별로 UAM 운영일의 시간별 평균 영향 점수를 계산하였음
- UAM 운영일의 시간을 “impacted”로 정의하기 위해 평균 영향점수 임계값을 정의해야 했음. 평균 영향 점수 분포의 변동성과 영향점수 자체를 평가한 결과 평균 영향점수 임계값 3이 UAM 운영에 미치는 최소 및 최대사이의 적당한 값임을 확인했음. 이 임계값은 추가 분석과 UAM 운영에 대한 특정 가정의 적용을 통해 더욱 세분화 될 수 있음. 따라서 어떤 계절의 시간에 대한 평균 영향 점수가 3을 초과하면 해당 시간이 잠재적으로 날씨에 영향을 받는 시간으로 간주하였음. 영향을 받는 시간의 수는 각 계절의 UAM 운영일 동안 합산되었음. 예를 들어 샌프란시스코의 여름 평균 영향점수는 현지 시간 오후 1-6시에서 3을 초과하여 총 6시간이 날씨영향을 받음

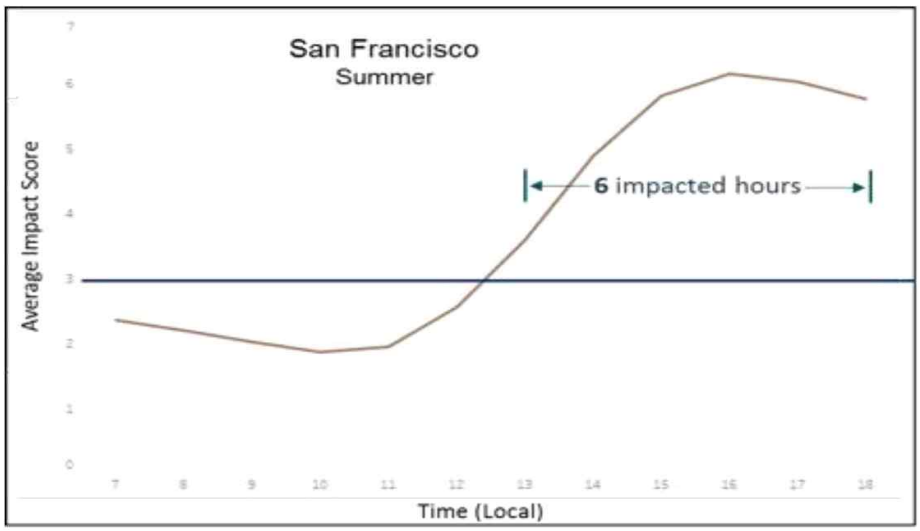


그림 211 여름철 샌프란시스코 도시 지역에서 UAM 운영일의 각 시간에 대한 평균 영향점수

○ 결과

- 잠재적으로 영향을 미칠 수 있는 기상 조건의 높은 과거 빈도, 도시지역 내 조건의 변동성, 일별 및 계절별 영향을 받는 평균 시간을 포함한 주요 신호에 초점을 맞춤
- 과거 PIREP의 표본 크기는 조건에서의 계절별, 일별 변동성을 평가하기에 충분하지 않았기 때문에 각 도시지역에서 보고된 조건의 공간분포를 평가하여 지상 및 수직에서 관찰되는 신호를 증가시켰음
- 먼저 도시지역에 대한 결과가 제시되고 그 후 모든 도시지역의 밀도고도가 제시되며 마지막으로 영향을 받는 시간이 제시됨
- 미국 서부 도시지역
  - 전반적으로 기상조건은 대부분의 미국 서부 중심 도시지역에서 UAM 운영에 유리함. 호놀룰루에서 20노트 이상의 지상풍은 봄과 여름의 이른 오후에 상대적으로 높은 발생빈도(9-10 %)를 가지는 기상 조건임
  - 피닉스는 평균적으로 고온, 강풍, 뇌우 등 UAM 운영에 영향을 미칠 수 있는 여러 기상 조건을 경험함. 이러한 불리한 조건은 여름철 오후에 가장 자주 발생함. 피닉스의 대부분의 파일럿 보고서는 난기류로 인해 도시 지역 전체에 균일하게 분포되어 있음
  - 로스엔젤스 도시지역에서는 IFR(Instrument Flight Rules) 조건이 아침, 특히 여름철에 자주 발생하지만 날씨 조건은 대부분 UAM 운영에 유리함. 또한 아래 그림에 따르면 여름 동안 도시지역 내에서 변동성이 있었는데, 과거 IFR 빈도는 LAX에서 이름 아침에 50 %를 초과한 반면 Van Nuys에서는 약 20 %에 불과했음
  - 대부분의 PIREP는 바다 표면에 위치한 난기류와 METAR 관측 결과와 마찬가지로 주로 서부 지역에 위치한 낮은 상승한도(low ceilings)에 인해 발생했음

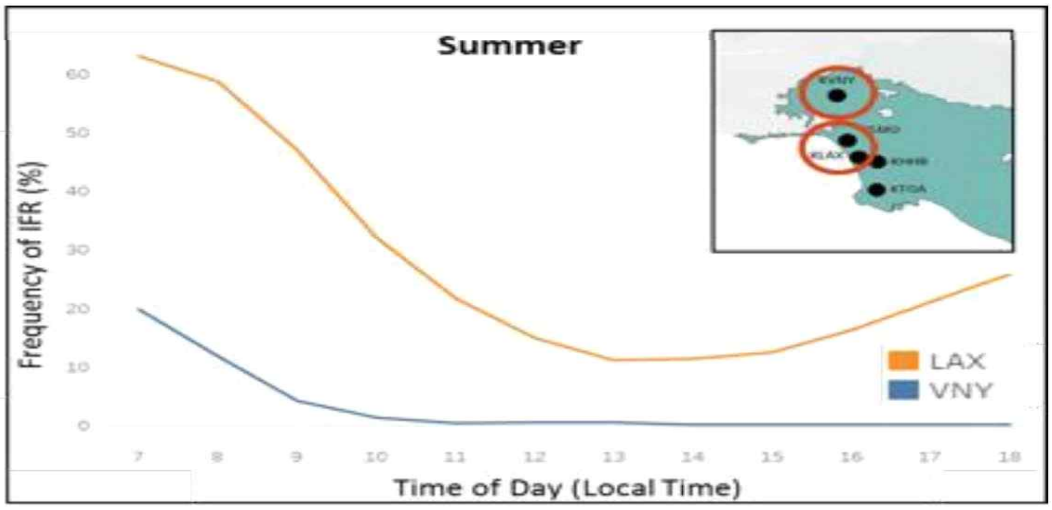


그림 212 로스엔젤레스 도시지역의 LAX 및 VNY에서 IFR 조건의 빈도

  - 또한 대부분의 계절에 IFR과 20노트 이상의 바람이 자주 발생하는 샌프란시스코 도시지역 내 조건에서의 변동성을 발견했음
  - 아래 그림과 같이 20노트 이상의 바람의 빈도는 겨울을 제외한 모든 계절에 OAK보다 SFO에서 훨씬 더 높음
  - 이는 바람조건이 오후 시간동안 도시지역의 동쪽 부분에서 UAM에 더 유리하다는 것을 의미함. IFR 조건은 또한 아침 시간에 높은 빈도를 가지며 여름철에는 현지시간으로 오전 8시 이전에 60 %를 초과함

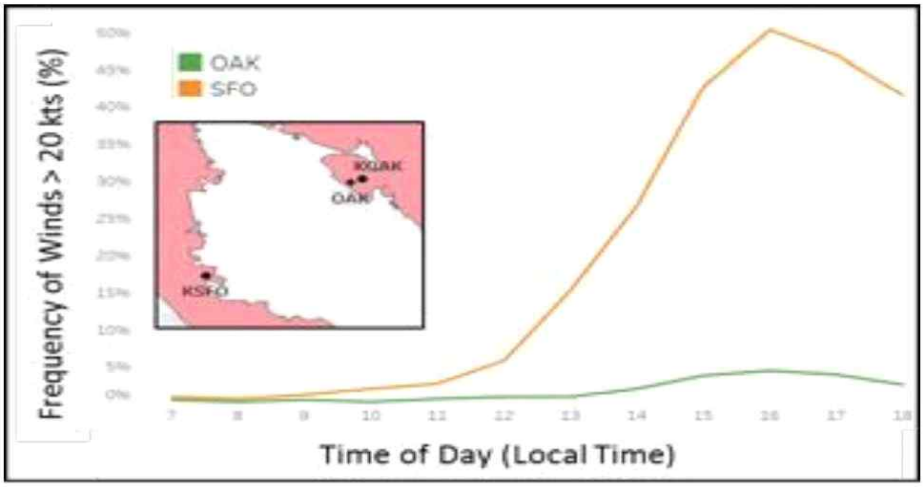


그림 213 SFO와 OAK 지역에서 20노트 이상 바람의 빈도

- 덴버에서는 평균 기상조건이 대부분의 시간동안 UAM 운영에 불리함. 특히 봄, 가을, 겨울철 아침 시간에 승객의 편안함을 감소시키고 기체 배터리 수명에 영향을 미칠 수 있는 저온 현상이 발생할 수 있음. IFR 상태는 또한 모든 계절에 걸쳐 아침에 빈번하게 발생(15 %)하며 여름철에는 낮은 빈도를 보임. 여름철 오후에는 뇌우와 강한 바람이 자주 발생하여 UAM 운영의 안정성을 위협할 수 있음. 평균적으로 모든 계절 동안 강한 바람이 관측되어 UAM 운영기간과 기체 간격유지에 영향을 미칠 수 있음. 덴버는 또한 모든 유형의 기상조건에 대해 PIREP가 생성된 주요도시지역 중 하나임

- 밀도고도

- Vertical sounding 데이터의 저 고도 조건에서 계산된 각 계절에 모든 대상 도시지역의 평균 밀도고도는 관측이 수행된 필드 고도와 함께 아래 그림에 나타냄. 이 값은 기온이 가장 높은 여름철 모든 도시지역에서 가장 큰 값을 가짐

Urban Area	Field Elev. (ft)	Spring	Summer	Fall	Winter
New York	65	-968	645	-618	-1976
Washington, D.C.	305	-152	1264	27	-1384
Miami	16	779	1281	1026	484
Dallas	561	682	2055	786	-460
Houston	33	436	1342	527	-349
Denver	5285	5742	6974	6025	4759
Phoenix	2464	3660	4614	3830	2641
Los Angeles	397	3	30	36	-9
San Francisco	10	-115	343	217	245
Honolulu	98	1039	1498	1248	885

그림 214 주요 도시지역의 계절별 평균 밀도고도

- 피닉스는 해수면 위의 표면 고도에 비해 평균 여름 밀도고도가 가장 높기 때문에 UAM 이륙 및 상승에 영향을 미칠 수 있음. 평균 밀도고도는 여름과 가을 마이애미의 표면 고도보다 약 1000-2000 ft 낮고 여름 댈러스, 덴버, 휴스턴보다 1000-2000 ft 낮음

- 날씨 영향 시간

- 앞서 설명한 바와 같이, 마지막으로 모든 주요 도시지역에서 각 계절별 UAM 운영일 동안 날씨 영향을 받는 전체 평균 시간 수를 계산하였음. 이러한 날씨 영향 시간을 아래 그림에 나타내었음. 계절별 평균값에 따르면 뉴욕, 워싱턴 D.C, 댈러스, 휴스턴, 덴버, 호놀

룰루를 포함한 대부분의 대상 도시지역에서 UAM 운영일의 약 절반이 날씨의 영향을 받을 수 있음

Urban Areas	Winter	Spring	Summer	Fall	Average
New York	12	12	0	8	**8**
Washington, D.C.	12	12	0	0	**6**
Miami	0	0	0	0	**0**
Dallas	11	12	3	0	**6.5**
Houston	9	11	0	0	**5**
Denver	12	12	4	3	**7.75**
Phoenix	0	0	5	0	**1.25**
Los Angeles	2	1	2	1	**1.5**
San Francisco	3	6	6	4	**4.75**
Honolulu	0	7	9	6	**5.5**
Average	**6.1**	**7.3**	**2.9**	**2.2**	

그림 215 계절별 모든 대상 도시지역의 평균 날씨 영향시간

- 북동부, 텍사스 및 덴버 도시지역 겨울, 봄철 UAM 운영일의 절반 이상이 날씨에 영향을 받음. 반대로 호놀룰루와 피닉스를 제외한 대부분의 도시지역이 여름, 가을철에 날씨에 영향을 받는 시간이 적었음. 피닉스의 여름철 뇌우 및 고온을 포함하여 여러 영향을 미치는 조건의 빈도가 높기 때문에 UAM 운영일의 거의 절반이 악천후의 영향을 받을 가능성이 있음. 호놀룰루에서는 여름철 UAM 운영일의 대부분 강풍이 자주 발생하여 영향을 받는 시간이 9시간이 됨
- 뇌우와 같은 불리한 조건이 발생했음에도 불구하고 마이애미의 날씨 영향시간은 모든 계절에 대해 0임. 이는 천둥폭풍의 빈도가 낮아 UAM 운영일 모든 시간에 대한 평균 영향 점수가 임계값인 3 미만으로 떨어졌기 때문임. 이러한 결과는 뇌우와 같은 소규모의 단기적인 기후 조건에 대해 더 작은 값이 예상되는 조건에 대해 발생 빈도가 다르다는 사실이 영향 점수를 개선하는데 도움이 됨을 보여줌

○ 기상 지능시스템 개발

- 기상예보를 기상지능시스템으로 변경 필요. 예를 들어 “화요일 서울지역에 바람이 강하게 분다”를 “UAM 비행을 위한 포트 A를 닫고 모든 드론의 운영을 화요일 1:45PM - 2:45PM 동안 중단한다”로 변경함

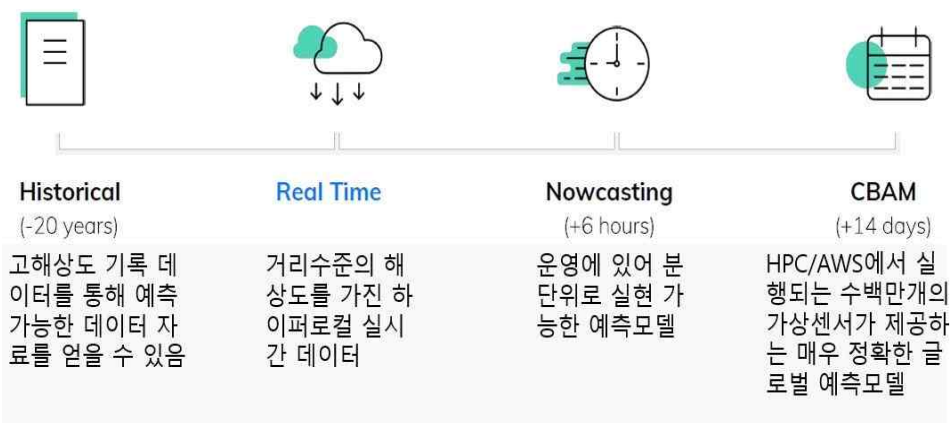


그림 216 UAM 기상예보 지능시스템

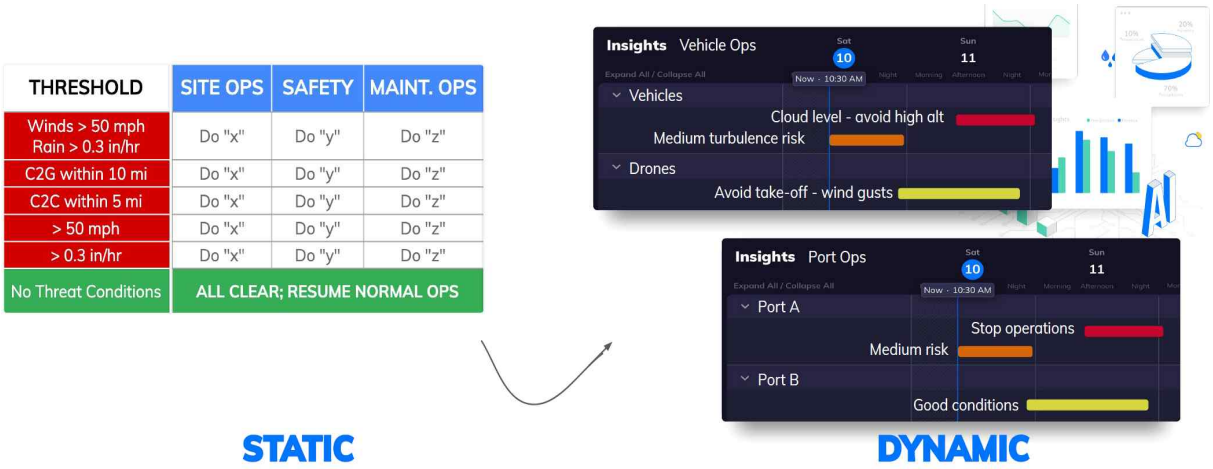


그림 217 기상지능시스템[123]

- UAM을 위해 향상된 센서가 필요함

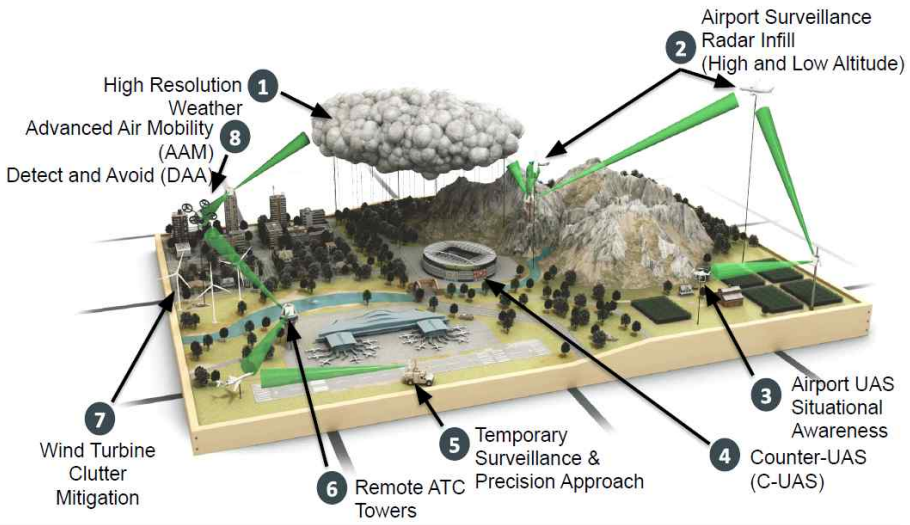


그림 218 향상된 UAM을 위한 센서들[123]

- UAM 기상관련 규정을 제정하는 working group

ASTM F38 WK73142: SPECIFICATION FOR WEATHER SUPPLEMENTAL DATA SERVICE PROVIDER (SDSP) PERFORMANCE	
What is ASTM?	International standards organization that develops and publishes voluntary consensus technical standards
What is F38?	Addresses issues related to design, performance, quality acceptance tests, and safety monitoring for unmanned air vehicle systems.
What is WK73142?	Group under F38.02 (Flight Operations) and charged with developing the new Weather SDSP Specification
Approach	Address gaps in current aviation weather standards using inputs from ANSI USSAC Roadmap, FAA UAS Traffic Management (UTM) CONOPS V2, lessons from field tests and demonstration, capabilities of IT systems and S&T etc.
Deliverable	Define minimum performance-based standards for Weather SDSP data and services to UAS Service Suppliers/Providers (USS/USP) and Operators for FAA consideration

그림 219 UAM 기상 관련 working group[123]

2-1-⑪. UAM 운영과 관련된 ICAO 인증, 운항, 운용 관련 정보 수집

○ 개요

- ICAO는 UN 산하의 전문기구로 국제 항공 운송에 필요한 원칙과 기술 및 안전에 대해 연구하고 있으며 국제 항공 운항의 원칙과 기술을 체계화하며 안전하고 질서 있는 성장을 보장하

기 위해 국제 항공 운송의 계획과 개발을 촉진함. 우리나라도 1952년부터 가입되어있기 때문에 UAM 운영과 관련한 정보를 수집할 필요가 있음

- ICAO는 현재 19종의 부속서(ANNEX)를 제정하고 이를 수시로 개정함으로서 모든 체약국이 각각 부속서에서 정한 기준을 따르도록 의무화하고 있음

○ UAM 운영과 관련된 ICAO 인증

- 항공안전법 및 ICAO의 부속서를 바탕으로 새롭게 정립해야 할 주요 인증 기준 및 제도는 다음과 같음[124]
  - PAV 감항증명기준(Airworthiness certification)
  - PAV 형식증명기준(Type certification)
  - PAV 제작증명기준(Production certification)
  - PAV 감항성 유지기준(Continuous airworthiness)
  - PAV 소음기준(Noise limit)
  - PAV 환경기준(Environmental standard, Emission standard)
  - UAM 교통관리시스템 운영체계 정립(Air traffic management and operations)
  - UAM 인프라 승인기준(Starting and Landing infrastructure approval)
  - PAV 파일럿 자격관리(Pilot license)

○ UAM 운영과 관련된 ICAO 운항

- ICAO 부속서 6항인 항공기 운항(Operation on Aircraft)에 해당함

○ UAM 운영과 관련된 ICAO 운용

- ICAO 부속서 8항인 항공기 감항성(Airworthiness of Aircraft)에 해당함

○ 국제 UAM 인증 개요

- 아래 그림은 국제 활동, 정책, 표준, 작업 그룹을 캡처하여 인증을 위한 국제 관련기관의 상호작용을 요약한 그림임. 지역별 관리 기관과 같은 UAM 인증에 대한 잠재적 규약에 대해 더 많은 고려사항을 설명함
- FAA 인증은 NASA, SAE, ASTM의 활동과 표준에 의해 적용됨
- ICAO는 FAA와 EASA를 포함한 다른 국가의 지침을 수용하는 것뿐만 아니라 Joint Authority for Rule making on Understanded Systems (JARUS), JAA, Single European Sky ATM Research (SEA)와 같은 기관의 지원을 받음
- 이러한 인증은 빠르게 변화하며 몇몇 최근 발전은 반영되지 않음. 예를들어 ICAO는 Remotely Piloted Aircraft Systems Panel, Unmanned Aircraft Systems Advisory Group (UAS-AG), Unmanned Aircraft System Task Force/Working Group (UAS-TF/WG)을 설립했음
- 독일에서는 Volocopter VC200이 초경량 항공기로서 독일 Ultralight Flight 협회에서 인증을 받았으며 이는 두바이에서 공개 시험을 위한 기초로 사용되었음. 또한 두바이는 원격 식별 및 추적 기술인 Skytrax를 의무화했음

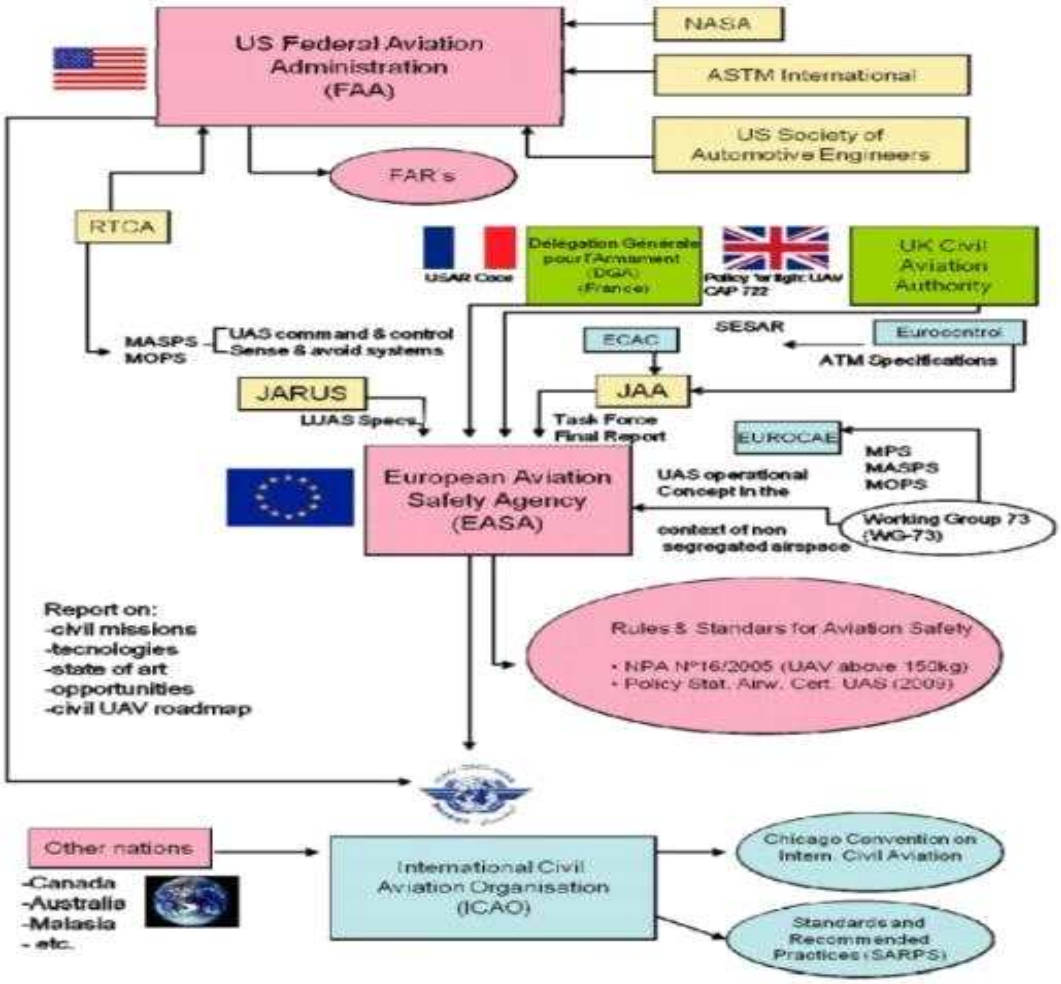
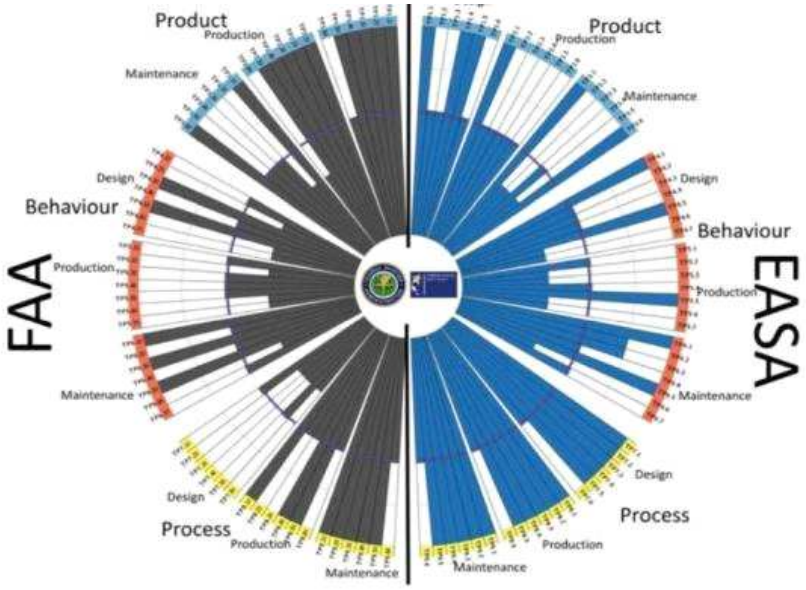


그림 220 국제 UAS 규제 분야[125]

- 규제에서 또 다른 고려사항은 특정 국가 내의 규제 프레임워크의 독립성임. 이 예에서 독립성은 규제를 감독하는 개인이 제품개발 과정으로부터 독립성의 정도를 나타냄
- 아래 그림은 EASA와 FAA 규제 프레임워크를 비교함. FAA는 보다 독립적인 제품 인증 기준을 가지고 있음. 감항성은 프로세스, 제품, 동작(behavior)을 포함한 프레임워크의 다차원적인 부분과 관련이 있음
- 독립성 등급은 인증 장소 결정에 영향을 미칠 수 있음. 독립성 수준은 위 그림과 같이 다음과 같이 정의됨
  - 5 - 정부 입법으로 뒷받침되는 독립적인 규제 기관 또는 개인 또는 독립적 지휘 계통을 가진 소유자/운영자로부터 완전히 독립적인 기관이나 개인, 외부 규제 기관임
  - 4 - 소유자/운영자로부터 독립적이지만 여전히 소유자/운영자 계통내에 있음, 내부 규제 기관임
  - 3 - 업무/규제 개발 담당이 아닌 관리 기관 또는 개인
  - 2 - 업무/규제 개발로부터 독립적인 기관 또는 개인
  - 1 - 업무 수행에 책임을 지는 개인
- FAA, EASA, NATO 감항성은 공통적인 요소와 기준을 공유함
- 감항성에서 상당한 기준 차이(SSD: Significant standards difference)가 존재하며 문서 37에 설명되어있음. 예를들어 EASA CS25와 FAA Part 25 Proof of Structure 용어를 비교했을 때 달성해야할 하중 수준을 포함하여 정적 강도 시험의 필요성과 범위에 대한 해석이 달라졌음



Independence Metric	
External Regulator / Legislation	5
Internal Regulator	4
Manager	3
Supervisor	2
Practitioner	1

그림 221 FAA와 EASA 규제 프레임워크 독립성 Metric 비교[125]

- NATO 표준화 협상(STANAG: Standardization Agreement) 4702는 Part 23, 27, CS23에 기반을 두고 있음. CS-VLA는 Part 21.17B와 유사성이 있음. STANAG 4746 초안은 EASA 필수 감항성 기준에 기초하고 STANAG 4703과 유사함. STANAG 4703과 4746은 EASA CS-VLR을 기준으로 사용함. CSE는 Part 33과 유사한 기준을 공유하며 테스트는 모든 추력 등급을 포함함. CS-P는 모든 항공기에서 프로펠러가 4파운드의 새의 충격을 견딜 수 있다는 것을 증명하는 것을 포함하여 Part 35와 유사한 기준을 공유함. 국제 형식 증명을 아래 그림에서 비교함

	Fixed Wing	Rotary	Hybrid or Special	Engines	Propellers
FAA	**Part 21** – Certification Procedures for Products and Parts **Part 23** – Small Fixed Wing **Part 25** –Transport Category Airplanes	**Part 27** – Small Rotorwing **Part 29** – Transport Category Rotorcraft	**Part 21.17(b)** – Designation of applicable regulations	**Part 33** – Aircraft Engines	**Part 35** – Aircraft Propellers
EASA	**CS-22**-Sailplanes and Powered Sailplanes **CS-23**- Normal, utility, aerobatic, and commuter aeroplanes **CS-25** – Large Aeroplanes	**CS-27** – Small Rotorcraft **CS-29** – Large Rotorcraft	**CS-VLA**- Very light aircraft **CS-VLR**- Very Light Rotorcraft	**CS-E** - Engines	**CS-P** -Propellers
NATO	**STANAG 4671** – UAV System Airworthiness Requirements (USAR), Fixed wing aircraft weighing 150kg to 20,000 kg **STANAG 4703** – Light unmanned aircraft systems	**STANAG 4702** – Rotary wing unmanned aircraft systems	**Draft STANAG 4746**- Vertical Take-off and landing (VTOL)	Referenced in **STANAG 4703** **STANAG 3372**	Referenced in **STANAG 4703**

그림 222 세계 인증기관의 형식 증명 비교[126]

○ 미국 UAM 인증 개요

- UAM 항공기는 무게, 서비스 유형, 추진, 승객 수, 속도에 따라 다양하며 인증 방법 또한 그에 따라 변할 수 있음
- UAM에 사용되는 새로운 항공기는 아래 그림에 나타낸 것과 같이 FAA 인증에 다양한 경로를 가짐
- 기존 범주에 속하는 항공기에 대해서는 Part 21.17(a)을 적용할 수 있음. 추가 요건 및 특수 조건이 적용될 수 있음. 예를 들어 part 23 또는 25에 따른 항공기 인증은 part 33 엔진 및 part 35 프로펠러도 준수해야함
- 기존 범주에 속하지 않는 항공기의 경우 Part 21.17(b)을 적용함. 이 경우는 대량 생산을 위한 것이 아니므로 이 규제를 적용하는 항공기에 대해서 프레임워크를 업데이트할 필요가 있음
- GAMA (General Aviation Manufacturers Association)는 날개달린 항공기 또는 로터크래프트와의 유사성을 바탕으로 한 인증 경로에 대한 “regime”이 있다고 제안함 (아래 그림). 이 스펙트럼에 속할 수 있는 몇 가지 항공기는 다음과 같음
  - Cirrus SR22: Part 23, with Part 33 engine, Part 35 propeller
  - Bell 429: Part 29 with Part 33 powerplant
  - AgustaWestland AW609: Part 21.17(b)



그림 223 FAA 감항성 인증 경로[127]

- 특별한 계층을 타겟으로 하는 UAM 플랫폼은 다음과 같은 표준 사용을 고려할 수 있음
  - Multiple: 21.187
  - Limited Category: 21.189
  - Experimental: 21.191 (R&D, Exhibition)

• Experimental: 21.193 (General)

- FAA는 이 규제 프레임워크를 지속적으로 검토하고 업데이트함. 예를 들어 유인 무인을 포함하여 10~6000파운드 규모의 실험형 인증사업 3건이 진행중임
- Part 23 Amendment 64는 더 높은 수준의 요구사항을 제공하고 산업계의 합의 표준이 상세한 요구사항을 채울 수 있도록 2017년 8월에 개정되었음. 개정안은 377개의 규제를 71개로 줄였음
- FAA는 최근 hybrid lift를 VTOL기능을 갖추고 수평 비행 시 날개를 사용하는 비행체로 정의하는 Order 8000.71을 내놓았음



그림 224 UAM에 사용되는 하이브리드 고정익과 회전익 항공기에 대한 인증 접근 범위[125]

○ FAA Part 인증 절차

- 형식증명은 아래 그림에 설명된 과정을 따르며 형식증명 및 설계의 효율적인 설계 승인 과정과 원칙과 모범사례는 원본 문서에서 논의됨

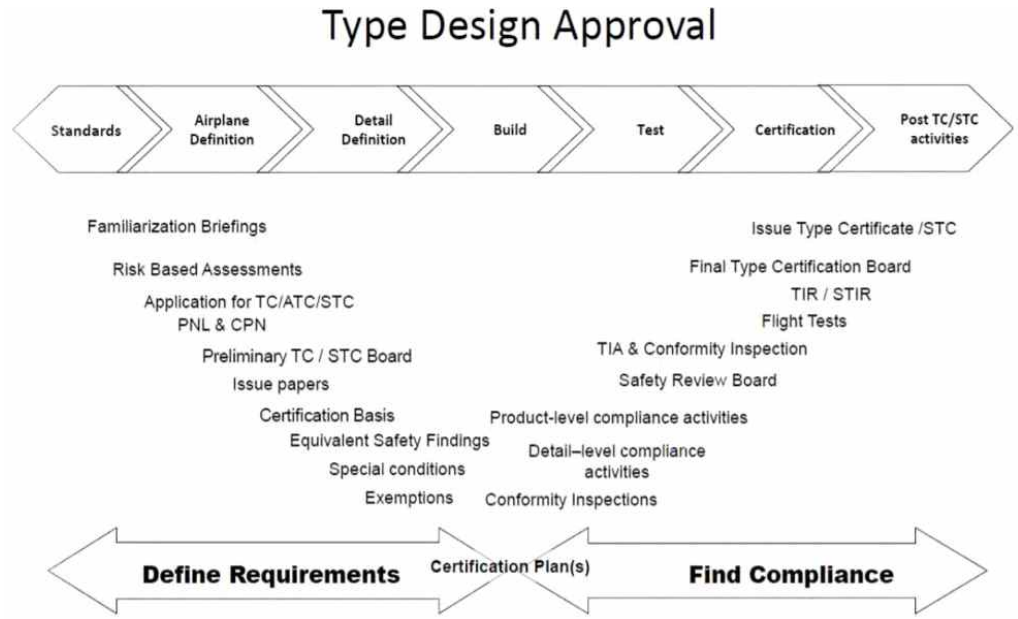


그림 225 형식 증명 설계 승인 절차[128]

- Part 규정에 따라 지속시간과 정확한 공정 세부 정보가 다를 수 있음. 예를 들어 파트 23은 일반적으로 신청자에 대한 현행 규정을 3년간 동결하였고 파트 25는 5년간 규제를 동결하였음
- ODA (Organizational Designation Authorizations)와 DER (Designated Engineering Representative)는 FAA Order 8130.2에서 정의한 '감항성' 조건을 신청자가 충족하도록

인증과정을 감독하는 대표자 역할을 함

- ODA와 DER는 14 CFR 183으로 정의되는 Order 8100.8D의 표준 또는 특수 인증 요청을 평가함. 기술표준(RTCA, SAE, ASTM 등)은 준수 방법을 제공할 수 있음
- UAS의 Part 21.17(b) 인증 절차 요약을 아래 그림에 나타냄

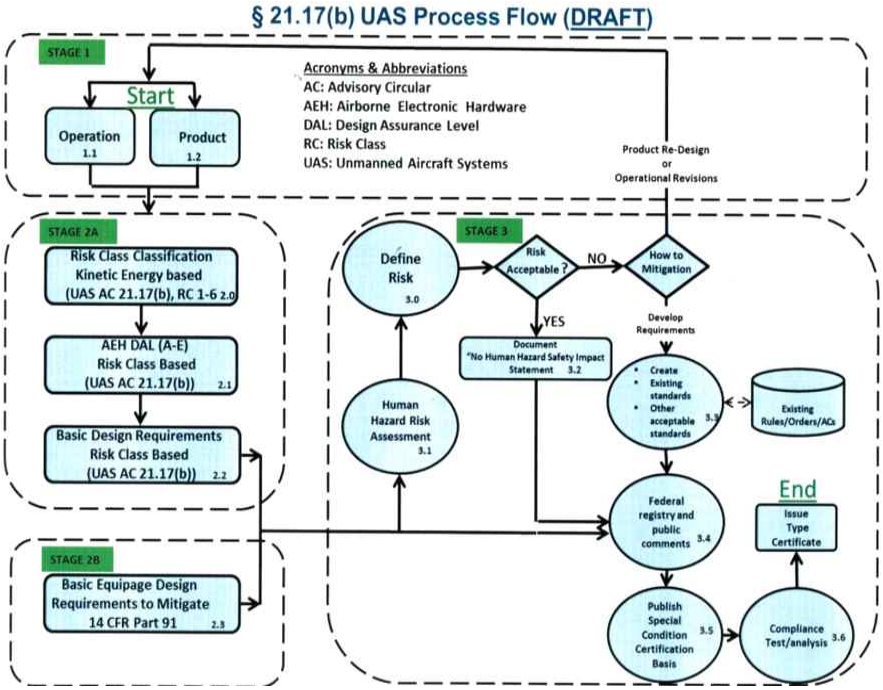


그림 226 Part 21.17(b) 인증 절차[125]

- 안전 위험 관리(SRM: Safety Risk Management)는 FAA가 규정을 개발할 때 적용됨. FAA는 이러한 인증 과정에서 승인 보유자 및 기타 출처에서 제공된 정보와 데이터를 사용하여 감항성 규제를 개발함. 이 과정은 위험을 식별하여 수행되며 이는 일반적으로 분류별로 구성된 항공기 및 해당 운용에 기초할 수 있음
- 안전 요건은 제품이나 조항의 위험 통제로 변환됨. 감항성 규정의 안전 요건은 허용되는 위험을 구성하는 안전 위험 통제임
- 감항성 규정은 체계적인 위험이 발견되고 관련 결과가 허용할 수 없는 위험이 발견될 때 적용됨. 허용 가능한 위험 단계는 규칙 제정 과정의 일부로 결정되며 Amendment 25-64의 25.561에 요약됨[128]
- 새로운 설계에는 명확하게 적용할 수 없는 기존 규제 요구사항의 측면이 있을 수 있음. 또한 새로운 요구사항을 통해 해결해야 하는 새로운 위험이 있을 수 있음. 예를 들어 Part 33 엔진부분은 피스톤 또는 터빈 엔진을 기준으로 작성되므로 전기 모터의 처리 방법을 결정해야 함
- 이는 어떤 요구사항이 적용되는지 그리고 요구사항을 준수할 수 있는 잠재적 수단이 무엇인지에 대한 의문을 남김. 이를 위해서는 새로운 준수 수단 개발이 필요함

○ FAA UAM 개념설계

- FAA는 UAM 협력관리 환경 내에서 영공 및 교통 운영에 대한 규제 및 운영 권한을 유지함. UAM 운영은 상호 운용이 가능한 정보 시스템을 활용하는 분산 네트워크를 통해 연합된 운영자(actors)에 의해 조직, 조정 및 관리됨
- 아래 그림은 UAM 운영자의 개념적 구조와 상황적 관계 및 정보 흐름을 보여줌. 이 설계는 FAA의 UTM 운영 개념에 명시된 UTM 설계에서 설정한 패턴을 기 함

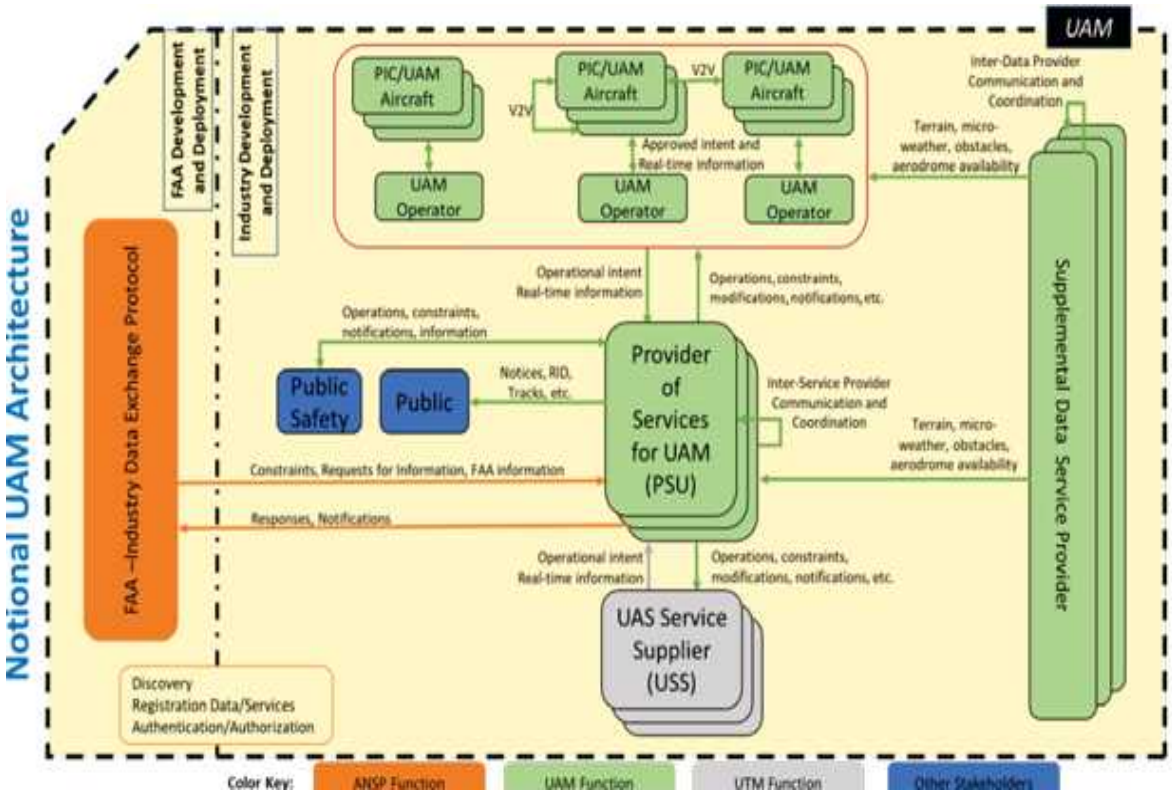


그림 227 UAM 개념설계 [129]

- 집단으로 운영되는 개별 PSU (Provider of services for UAM)로 구성된 PSU 네트워크는 UAM 개념 설계의 중심에 있으며 UAM 운영자, USS (UAS service supplier), SDSP (Supplemental data service provider), FAA 및 이해 관계자들과 데이터를 교환함. PSU는 SDSP로부터 UAM 운영관리를 지원하는 추가 데이터를 수신하고 관련 UAM 운영 데이터를 대중에게 제공함. PSU는 PSU 네트워크를 통해 통신하고 조정함. 이를 통해 PSU에 연결된 다른 UAM 이해관계자는 PSU 네트워크가 공유하는 데이터에 엑세스할 수 있음
- PSU와 USS는 UAM과 UTM 운영에 대한 운영 정보를 교환함. 개념적으로 USS는 제공된 서비스를 기반으로 PSU로 확장될 수 있고 그 반대의 경우도 가능함. 통합 서비스 제공업체는 UAM 및 UTM 환경 모두에서 운영을 지원함. 이 설계는 정보 교환을 위한 PSU 네트워크의 USS와의 연결을 나타내는 동시에 UAM 중심의 설계를 유지함
- 위 그림의 수직 대시선은 UAM의 일부로서 상호작용하는 인프라, 서비스, 독립체의 산업 책무와 FAA 사이의 경계를 나타냄. FAA 산업 데이터 교환 프로토콜은 NAS Data Exchange가 요구 시 UAM 운영 데이터를 요청하고 PSU 네트워크로 FAA 정보를 전송하여 UAM 운영자, PIC (Pilot in command), UAM 항공기 및 이해 관계자에게 배포할 수 있는 인터페이스를 제공함

○ 인증절차 지원 방법 : 준수수단(MOC: Means of Compliance)

- 규정, 자문회람, 합의표준을 포함할 수 있는 둘 이상의 준수 수단을 통해 규정에 명시된 요건을 충족할 수 있음. 아래 그림은 Part 23의 필요조건과 ASTM 표준을 통한 허용 가능한 준수수단(MOC)을 보여줌[130]
- 일부 규제들은 산업 표준에 더 의존함. 예를 들어 Part 23 Amendment 64는 세부 규제요건의 규정에서 상위 수준 요구사항의 규정으로 전환하였음. 특정 기술 솔루션을 규정하지도 않고 계층이나 범주를 규정하지도 않음
- 항공 커뮤니티에서는 이를 비행특성, 성능, 운용한계, 구조, 설계, 발전소, 에너지 저장에 대한 합의 표준(consensus standards)을 통해 세부 설계 표준을 개발할 수 있는 기회로 보고 있음. 합의 표준은 다음 활동을 통해 UAM 인증을 가속화 할 수 있음

- 적합한 계층 구성
- 특정 기술 솔루션 제공
- 테스트 사양 제공
- 구체적인 준수방법 제공

Part 23 Accepted Means of Compliance Based on ASTM Consensus Standards
Updated September 22, 2020

Part 23 Rule		Accepted MOC[1,2]		Potential Supplemental MOC[3]
Section	Title	ASTM Standard	FAA Changes	and additional notes
23.1457	Cockpit voice recorders	F3264-19, Section 9.12	None	
23.1459	Flight data recorders	F3264-19, Section 9.13	None	
23.1529	Instructions for continued airworthiness	F3264-19, Section 10.6	None	
Subpart A – General				
23.2000	Applicability and definitions	N/A	N/A	
23.2005	Certification of normal category airplanes	N/A	N/A	
23.2010	Accepted means of compliance	N/A	N/A	
Subpart B – Flight				
23.2100	Weight and center of gravity	F3264-19, Section 5.1	None	
23.2105	Performance data	F3264-19, Section 5.2	None	
23.2110	Stall speed	F3264-19, Section 5.3	None	
23.2115	Takeoff performance	F3264-19, Section 5.4	None	
23.2120	Climb requirements	F3264-19, Section 5.5	None	

그림 228 Part 23의 준수수단 샘플[130]

○ 볼로콥터 인증 사례

- Volocopter는 이미 유럽연합 항공안전국(EASA)의 수직 이착륙 차량용 특수 조건 (SC-VTOL)에 따라 2 인승 멀티 콥터 VoloCity의 형식 인증을 위해 노력하고 있으며 2023 년까지 승인을 목표로하고 있음
- 이 신생 기업은 FAA가 EASA 유형 인증서의 동시 검증 신청(Concurrent type certification validation)을 '긍정적으로 수락'하여 유럽과 동시에 미국에서 도심 에어 택시 서비스를 시작할 수 있다고 밝힘. Volocopter는 로스앤젤레스, 뉴욕, 샌프란시스코 및 워싱턴을 포함한 도시를 목표로 하고 있음
- Airbus 및 Boeing에서 이미 사용하고 있는 동시 유형 인증 검증을 통해 제조업체는 주요 관할권을 가진 규제 기관의 인증과 동시에 FAA 요구 사항을 충족하고 있음을 보여줄 수 있음
- FAA에는 EASA의 SC-VTOL에 직접 해당하는 항목이 없음. 대신 미국 규제 당국은 세 가지 대안을 고려하고 있음. 이 스타트 업은 기존의 이착륙 능력을 입증할 수 있는 날개 달린 전기 VTOL 비행체의 경우 FAA가 일반 항공기(General aviation)위한 표준 기반 규정인 Part 23 Amendment 64(유럽의 CS-23 Amdt. 5)를 사용할 수 있다고 함
- Volocopter에 따르면 회전익 항공기와 유사한 비행체는 일반 범주 헬리콥터의 인증 요구 사항인 Part 27 (유럽의 CS-27)을 사용해야 할 수 있음. 이러한 범주 중 하나와 일치하지 않는 디자인은 Part 21.17 (b)에 따라 특수 클래스로 처리됨
- SC-VTOL을 만들 때 EASA가 한 일은 CS-23 Amdt를 CS-27에서 파생 된 추가적인 안전 목표와 결합하는 것이였음. 이것은 FAA가 Part 21.17 (b)에 따라 인증 기반을 개발할 때 염두에 두

고 있는 것임

- Volocopter는 이 후자의 접근 방식이 유럽의 SC-VTOL과 미국의 Part 21.17 (b)에 따른 인증 요구 사항이 크게 겹치서 FAA를 통해 원활하고 직접적인 검증 가능성을 제공 할 것이라고 함



그림 229 Lilium Jet[131]

2-1-⑫. 도심 항공 모빌리티 시스템 체계종합 모델링

○ UAM 시스템 체계종합 모델링 프레임워크 개요

- UAM 시스템의 새로운 전체 모델 생성을 위해 필요한 설계 업무

- 모든 구성요소를 포함하는 체계종합
- 시스템 요구조건 정의
- 시스템 설명
- 링크 정보
- 시스템 종속성 확인
- 원인-효과 관계 설정
- 전체 시스템 모델링
- 기존 모델의 사용과 연결
- 데이터 생성
- 아이디어 및 개념 시험

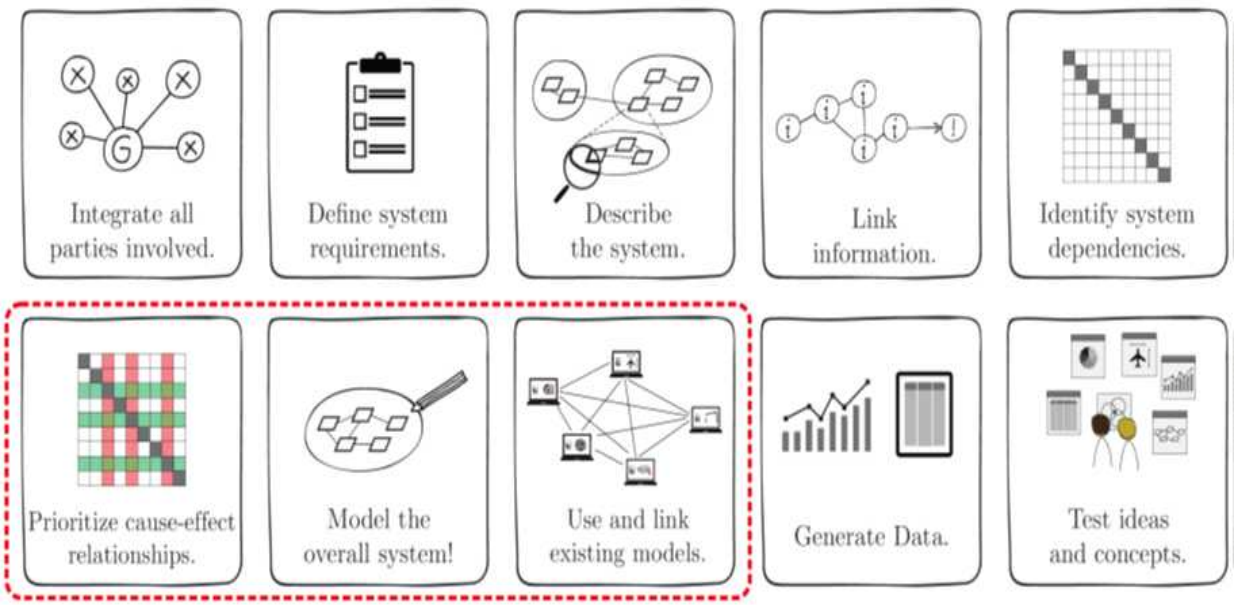


그림 230 UAM 시스템 체계종합 모델링을 위해 필요한 설계 업무[132]

○ UAM 시스템 체계종합 모델링 구성요소 기술[132]

- 수요 모델링(Demand Modeling)
- 운영 개념(Operating Concept)
- 비행체 선택(Vehicle Selection)
- 수직이착륙장 모델링(Vertiport Modeling)
- 수직이착륙장 체계종합(Vertiport Integration)
- 경로 시뮬레이션(Trajectory Simulation)
- 지역 대기 질 및 소음(Local air quality, Noise)
- 도심 데이터(Urban Data)
- 공역 개념(Airspace Concept)
- 경로 네트워크(Route Network)
- 비행 스케줄(Flight Scheduling)
- 충돌 탐지(Conflict Detection)
- 비용 모델링(Cost Modeling)
- 에너지 수요(Energy Demand)

○ UAM 시스템 체계종합 모델링 협업 방안[132]

- UAM 시스템 모델링에서 협업 방안

• UAM은 법적, 윤리적, 안전 및 보안 관련 문제를 광범위하게 포함함

✓ UAM 수요 예측
✓ 도시 공역 관리
✓ UAM 비행체 설계
✓ Vertiport 모델링
✓ 설계 및 통합, 경로 및 네트워크 시뮬레이션
✓ 비행 시나리오 및 충돌 방지 모델링
✓ 비용 및 수익 모델링
✓ 에너지 수요 및 소음평가

• 복잡한 UAM 시스템을 모델링하기 위해 다분야 설계 및 최적화 기술(MDO : Multidisciplinary Design and Optimization) 적용

✓ 기술적 접근 방법과 설계팀의 분석 능력을 결합(2nd MDO generation)
✓ 전문가 및 전문지식을 설계 및 시뮬레이션 과정에 통합하는 방식의 협업 필수(3nd MDO generation)

• 다분야 프로세스의 재사용성을 향상시키기 위해 통합 소프트웨어 RCE(Remote Component Environment) 사용
• DLR의 RCE는 로컬 및 원격 위치에서 하나의 전체 시스템 시뮬레이션으로 정의된 입력 및 출력으로 구성 요소를 통합
• 모든 입력 데이터를 사용할 수 있어, 각 구성 요소를 실행하며 동시 처리 가능함. 전체 시뮬레이션 시간 감소
• 본 타당성 검토 연구에서는 RCE보다는 간단한 EXCEL과 VBA(Visual Basic for Application) 기반 코딩을 수행함

○ UAM 시스템 모델링 프레임워크 구성 모듈들의 상호 연관성 설정

- UAM 일반적인 작업 흐름도

• 모델링 첫 단계는 단일 데이터 형식과 계획된 구성요소와 기존 구성요소 (UAM 시스템 요소) 간의 관계를 정의하는 N2 차트를 설정

✓ 아래 그림과 같이 N2 차트 형성. N 시스템 구성요소가 매트릭스의 대각선 요소에 순서대로 배열
✓ 그 결과로 식별된 상호 의존성과 상호 작용은 다이어그램에서 비대각선 요소로 표시

• 구성 요소 간의 상호 종속성은 'Initial, 'Iterative', 'Evaluation', 'Feedback-information' 으로 분류
• 1, i, f, e는 두 구성 요소 간에 단일 또는 반복 데이터 전송을 나타내며, 대각선에 위치
• 위 그림에서, 구성 요소 A는 구성 요소 B의 초기 입력('1') 역할을 하므로, 빨간색 점선으로 표시된 반복 루프의 초기입력으로 사용됨
• 각 사이클은 C를 통한 B에서 D로의 입력과 같은 반복적인 순방향 연결('i' , green)과

피드백 연결(‘f’ , red)로 구성됨

- 반복 루프가 모든 사이클을 통과한 후 평가 단계 시

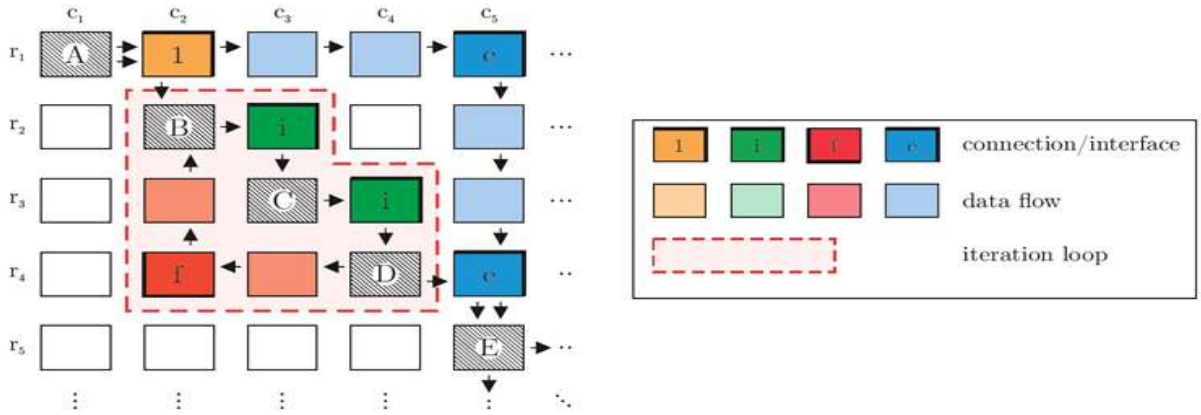


그림 231 UAM 작업 흐름도에서 각 구성요소들의 현재와 계획의 연계성을 나타내는 N2 도표[132]

- 초기화 단계 동안, 반복 모드를 시작하기 위한 모든 관련 데이터 추출 및 계산
- 반복 단계가 모든 사이클을 통과 한 후, 평가 단계가 시작되며 도출된 결과는 다양한 기준에 대해 평가
- 다양한 데이터 흐름 유형의 경우, 강조 표시된 영역이 둘 이상의 연결 유형에 할당될 수 있으며, 색상별로 분할 필드 표시

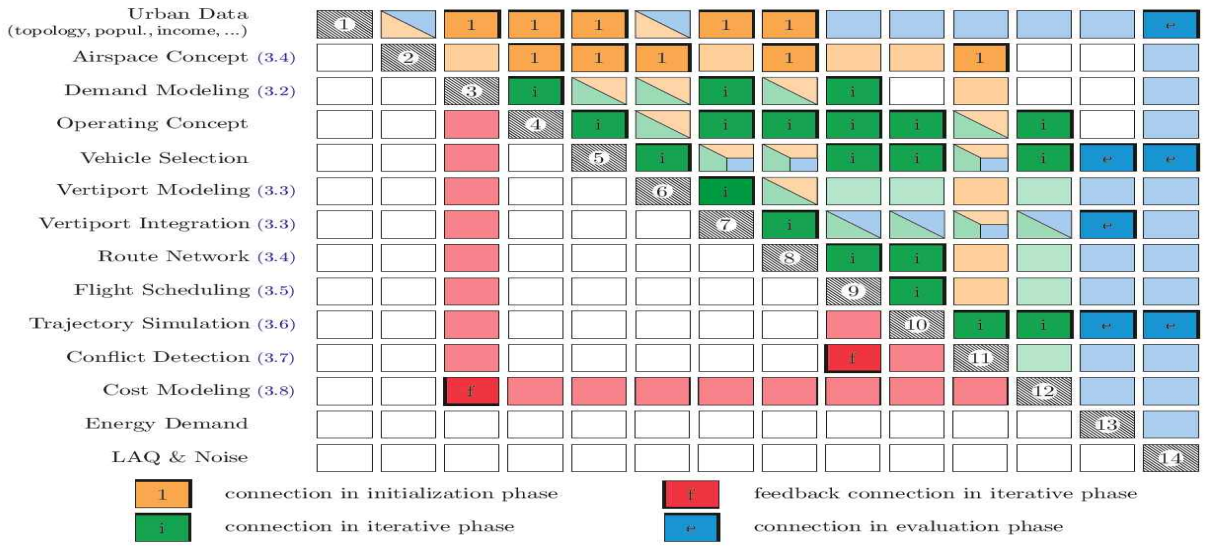


그림 232 UAM 작업 흐름도에서 각 구성 성분들의 현재와 계획의 연계성을 나타내는 N2 도표[132]

- UAM 시스템 모델링에서 시스템 작업 흐름도

- 인구 및 소득 분배(1)와 같은 도시 데이터를 고려하여 UAM 수요 모델(3)을 설정
- 출발지-목적지 수요의 특정 값과 해당 거리에 따라 공역 개념(2)이 선택되고, 이에 따라 운영 개념이 조사 대상(4)으로 선택
- 호환 가능한 비행체 선택(5)이 데이터베이스에서 선택되고, 인프라 네트워크가 생성되어 서로 다른 Vertiport 디자인 및 개수(6)를 각 도시에 할당
- 선택된 공역 개념(2)에 의해 부과된 경계 조건과 관련하여, 모든 vertiport간의 최적 route(8)를 도출
- 수요를 고려하여 비행 스케줄(9)을 설정하고, 4d 궤적 시뮬레이션을 수행하여 비행 경로(10) 도출

- 이후, 순항 비행 중 사전에 정의된 공간 분리 최소값(11)에 대한 위반 가능성이 있는지 전체 비행 경로를 검사

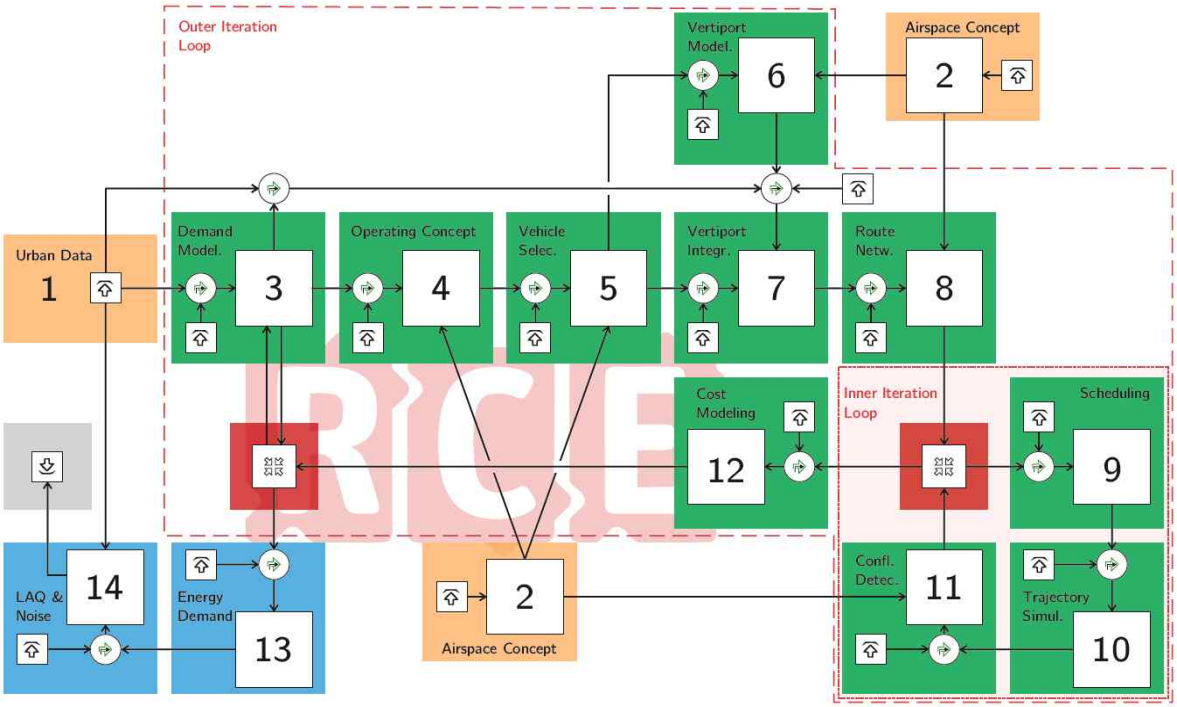


그림 233 도심 항공 모빌리티 시스템 작업 흐름도 초기 구조[132]

- UAM 체계종합 시스템의 각 구성성분의 입출력 개요

- 아래그림은 구성 요소의 CPACS (Common Parametric Configuration Schema) 인터페이스에 대한 개요를 나타냄
- 각 모듈별로 multi-fidelity 모델링 옵션을 제시
- 개발단계별로 일부 변수는 high-fidelity 모델로 계산
- 다른 모든 데이터는 가정 또는 경험적 관찰을 기반으로 하며, 이러한 데이터를 고려하는 적절한 방법이 개발되면 UAM 모델링 방식을 다른 대도시 지역에도 사용할 수 있음

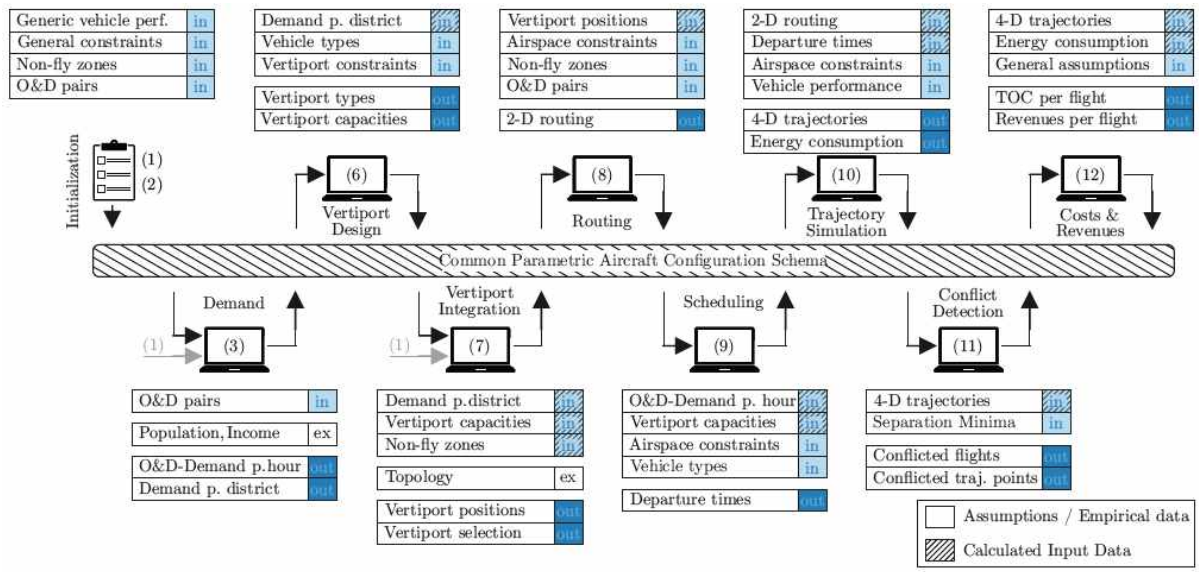


그림 234 도심 항공 모빌리티 체계종합 시스템 각 구성성분의 입출력 개요[132]

○ 수요 모델링(Demand Modeling) 모듈

- 아래 그림 : 함부르크 시의 토지이용계획, UAM 출발지-도착지 시나리오

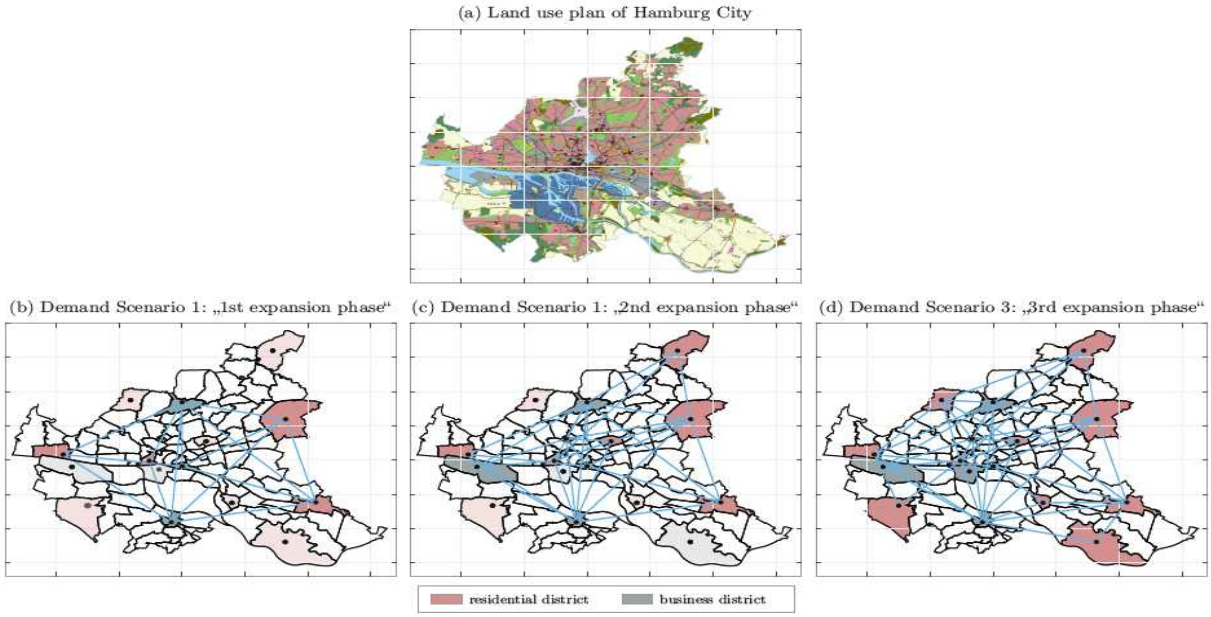


그림 235 상업지역 및 주거지역[132]

- UAM 수요 분석

- 계획된 UAM 시뮬레이션은 24시간을 기준으로 하므로, 각 경로의 결과는 시간 단위로 분류됨
- 하루 동안 개별 지역의 도착 및 출발 수를 대략적으로 추정하기 위해 여러 유형의 지역에 대한 분류 매개 변수 도입
- HafenCity : 노동지역, Rahlstedt : 주거지역을 나타내며, 교통량이 증가하는 시간대는 일반적으로 아침 또는 저녁으로 가정
- 아침 시간대에 Rahlstedt에서 HafenCity로 출근하는 인구수가 많은 것을 볼 수 있고, 저년 시간대에는 HafenCity에서 Rahlstedt로 퇴근하는 인구수가 많은 것을 볼 수 있음

$$_{ar} = 0.0013 \quad d + 11 \tag{24}$$

○ 공역 개념(Airspace Concept) 모듈

- 공역 구성 개념

- 기존의 항공 공역 구성 개념은 ATS (Air Traffic Services) 경로 네트워크로 정의됨. ATS 경로 네트워크에 따라 항공 교통 흐름을 채널화 할 수 있으며, 충돌을 피하기 위한 공간 분리를 할 수 있음
- 하지만, 이 개념은 고정익 항공기용으로 개발되었으며, 저속 비행 및 수직이착륙 항공기와는 상이함. 따라서, 공역 구성 개념을 새로운 기체의 특성과 최신 공역 모니터링 기술의 기능에 맞게 조정 필요
- 또한, PAV (Personal Air Vehicles)와 UAV (Unmanned Air Vehicles)가 도시 공역을 공동 사용한다는 점에서 새로운 절차 개발 필요
  - ✓ (a) 각 공역 사용자에게 안전 타원체를 할당, 공역을 동일하게 개방하는 시스템/ 타원체의 크기는 내비게이션, 통신 및 다른 공역 사용자를 감지하는 기능에 따라 다르므로 비행체 제조업체 및 운영자가 성능 관련 기술에 투자할 수 있음
  - ✓ (b) 방위에 따라 항공기에 고도를 할당하여, 각 비행 레벨에서 주요 교통 방향을 집중시켜 충돌 가능성을 줄임
  - ✓ (c) 공역을 방사상 및 동심 구역으로 나누어 표현

✓ (d) 고도마다 여러 개의 레이어가 있는 도시 웨이 포인트 그리드를 도입/ 높은 고도로 올라갈수록 mesh의 크기가 증가

- 기존 국내 공역 분석

- 국내 공역 등급및 내용은 아래와 같음
- A등급 : 모든 항공기가 계기비행을 하여야 하는 공역
- B등급 : 계기비행 시 시계비행을 하는 항공기가 비행가능하고, 모든 항공기에 분리를 포함한 항공교통관제업무가 제공되는 공역
- C등급 : 모든 항공기에 항공교통관제업무가 제공되나, 시계비행을 하는 항공기간에는 비행정보업무만 제공되는 공역
- D등급 : 모든 항공기에 항공교통관제업무가 제공되나, 계기비행을 하는 항공기와 시계비행을 하는 항공기 및 시계비행을 하는 항공기간에는 비행정보업무만 제공되는 공역
- E등급 : 계기비행을 하는 항공기에 항공교통관제업무가 제공되고, 시계비행을 하는 항공기에 비행정보업무가 제공되는 공역
- G등급 : 모든 항공기에 비행정보업무만 제공되는 공역

○ 비행 스케줄(Flight Scheduling) 모듈

- 비행 계획/스케줄 및 ATM 개요

- UAM 관련 비행 계획 및 스케쥴에 대한 연구가 부족한 실정
- 항공 교통 관리(ATM)의 하위 기능과 관련되어 있음
- 기존의 항공 공역 구성 개념은 ATS(Air Traffic Services) 경로 네트워크로 정의됨
- 전체 UAM 시스템의 비행 계획을 지속적으로 확인하기 위해서, 항공 교통 흐름 관리 이외에도 운영 계획 관리도 필요함

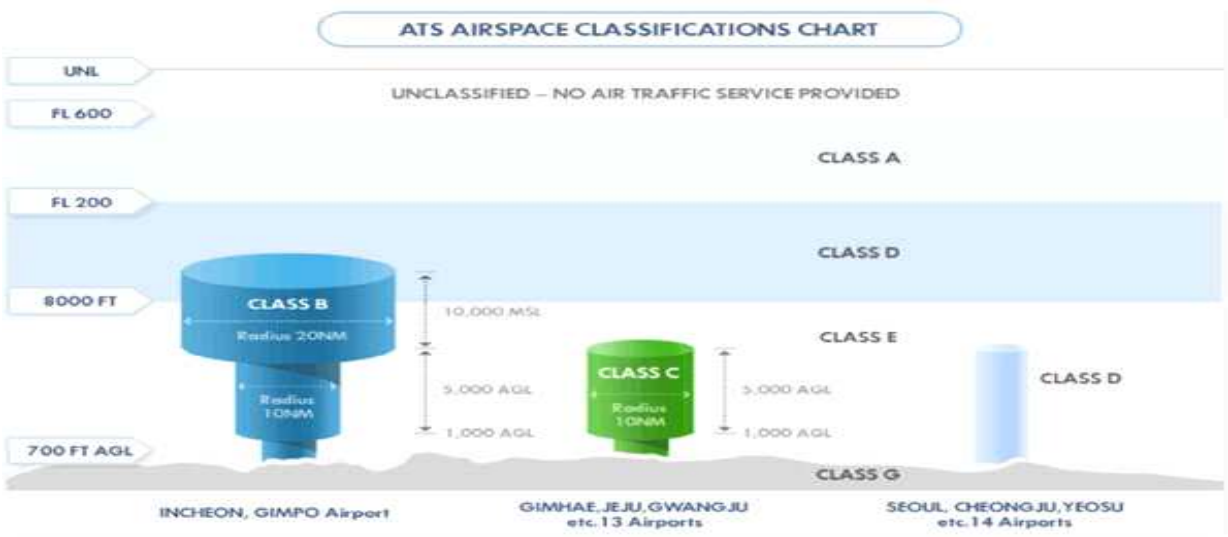


그림 236 공역 등급화 차트

✓ Customer request
✓ Registration
✓ Flight plan submission
✓ Flight plan check
✓ Release and start
✓ Flight plan execution
✓ Air traffic control
✓ Completion

- 아래 그림과 같이, 위험 category Y (높음), Z (가장 높음) 로 분류된 항공편의 경우 표준 유럽 항공 규칙 (SERA)에 따라 비행 계획을 수립함



그림 237 표준 유럽 항공 규칙 (SERA)에 따라 비행 계획을 수립

- 비행 스케줄 수립 방안
  - 1단계, 24시간을 기준으로 각 경로의 UAM 수요 분포는 각각의 비행으로 세분화 됨 (1. 고객 문의에 해당)
  - UAM 수요는 최대 좌석수와 관련된 load factor (LF)에 따라 최소 차량 개수를 할당함
  - 4-seat 항공기 유형만을 고려했을 때, LF의 값은 25~100% 범위에서 다양하며, 이는 ride-sharing 서비스 수익에 큰 영향을 미침
  - 따라서, 항공기 등급의 선택은 UAM 가격 시스템 및 UAM 수요 선택에 큰 영향을 미치며, 이는 UAM 시스템 모델링에서 고려됨
  - 2 단계, vertiport 출발 시간을 할당(4. flight plan check). 이륙 요청 시간에 모든 slot이 차있는 경우, 여유 slot이 생기거나, 최대 대기 시간을 초과할 때까지 비행이 지연됨
  - 비행 승인 이후에, 항공편의 출발은 선택된 시간 간격 내에서 확률적으로 결정됨

2-1-⑬. UAM 네트워크와 비행체의 모델링 및 평가 개요[133]

○ UAM 네트워크와 비행체의 모델링 및 평가 개요

- 본 연구에서는 UAM (Urban Air Mobility) 네트워크의 모델링과 해당 네트워크 내에서 운영할 비행체 크기에 대해 연구함
- UAM은 공역을 활용하여 대도시 지역 주변의 물품과 사람의 이동을 개선함
- 디젤, 제트 연료, 압축 천연가스 (CNG) 및 액화 천연가스 (LNG)로 연료를 공급하는 배터리 전기 및 다양한 하이브리드 전기 비행체의 비교를 포함하는 항공기 크기 및 전체 네트워크 성능 결과를 제공함
- 내연 기관-발전기, 터빈-발전기 및 고체 산화물 연료 전지로 구성된 하이브리드 전기 추진 시스템을 연구함
- 궁극적으로, 서로 다른 비행체 유형, 추진 시스템 및 저장된 에너지 원 각각에 대해 하루 동안 UAM 네트워크의 "성능"은 다음 네 가지 매개 변수로 설명됨
  - 좌석 킬로미터 당 평균 비용, 에너지 / 연료, 비행체 취득, 보험, 유지 보수, 조종사 및 배터리 교체 비용
  - 비행체 운영과 관련된 이산화탄소 배출량
  - 평균 승객 대기 시간
  - 평균 부하율, 즉 유료 승객으로 채워진 총 좌석 수를 사용 가능한 총 좌석 수로 나눈 값

임

- 결과는 항공기가 UAM 네트워크 주변을 비행하는 시기와 장소를 결정하는 "배치 모델"이 전체 네트워크 성능을 결정하는 데 중요하다는 것을 나타냄
- 이는 승객이 최소한의 대기 시간으로 출발하는 동시에 높은 부하율을 유지하여 운영 비용을 절감하려는 욕구가 상충되기 때문임
- 또한 디스패치 모델에 관계없이 디젤 또는 LNG로 연료를 공급하는 내연 기관으로 구동되는 하이브리드 전기 항공기는 좌석 킬로미터 당 비용이 지속적으로 가장 낮음
- 배터리 전기 및 미래 기술 LNG / 고체 산화물 연료 전지 항공기는 가장 낮은 배출량을 나타냄

2-1-⑭. 비행체 사이징

- 각각 다른 항공기의 구성, 추진 시스템 및 에너지 저장 유형을 비교하려면 먼저 항공기의 설계된 임무를 지정해야함. 이 섹션에서는 주어진 임무를 위해 비행체의 크기를 지정하는 데 사용되는 방법을 설명하고 다양한 추진 시스템을 사용하는 다양한 비행체를 비교함

○ 모델 가정

- 본 연구는 참고 문헌[134]에 제시된 내용을 확장 한 것이기 때문에 동일한 가정을 많이 사용함
- 비행체 추진시스템 구성품 사양
  - 각 비행체 형식에 대한 엔진 및 터빈 사이징 모델은 참고 문헌[105]에 설명되어 있음. SOFC 시스템의 비출력은 가정된 기술 수준에 대한 직접운영비용(DOC)과 비행체 최대 이륙 중량(MTOW)의 민감도를 결정하는 이 비교적 새로운 기술로 인해 다양함
  - 구체적으로, SOFC 고유전력은 디젤 연료 변종[135]의 경우 312 W/kg, 단기 액화천연가스(LNG)의 경우 350 W/kg으로 설정되며, 이는 단순화된 연료개조기를 통한 중량절감이 예상되기 때문임
  - 중장기 기술향상을 위해서는 향후 발전된 LNG/SOFC 옵션이 525W/kg, 700W/kg으로 검토됨
  - 모든 SOFC 시스템에 대한 연료의 낮은 열 방출로 인해 전기 생산 효율은 60%로 가정함[135].
  - 배터리 모델은 각각 다른 비출력과 비에너지 사양을 가진 상용 가능한 셀의 데이터베이스를 기반으로 구축됨
  - 단순화 하고 UAM 운영 시 존재할 수 있는 미래의 배터리 기술 향상을 모델링하기 위해, 배터리 팩은 셀 레벨 기술과 동일한 사양을 갖는 것으로 가정함. 즉, 셀에서 배터리 팩으로 이동하는 데 있어 "패키지 계수" 또는 오버헤드가 0임

표 41 비행체 구성품 가정: 비출력과 효율

구성품	비출력 (kW/kg)	효율
IC 엔진	0.0009.*설계 전력+1.4887	0.000004.*설계 전력+0.3699
터보 엔진	0.2476.*설계 전력.^0.4509	0.0641.*설계 전력.^0.2103
SOFC	0.312, 0.350, 0.525, 0.700	0.60
배터리	셀에 따라 다름	0.95
발전기	16	0.95
정류기	40	0.985
버스	1000	0.998
인버터	25	0.985
모터	4	0.95
보조 전원	25	0.985
배터리 충전 제어기	25	0.985
액체 냉각 시스템	6.25	1

- 이 접근방식은 본 연구에서 논의된 배터리-전기 항공기가 현재 양산될 수 없으며 기술 향상에 의존한다는 것을 의미함
- 선택할 수 있는 최대 비에너지는 관련 비출력이 586 W/kg인 293Wh/kg임. 또한, 향후 배터리 기술의 추가 증가가 가져올 수 있는 영향을 입증하기 위해, 데이터베이스로부터 배터리의 비에너지에 1.5의 "기술 인자"를 적용한 결과도 제시됨
- 이 인자는 데이터베이스의 최대 비에너지를 440Wh/kg으로 증가시키는 영향을 받음. 추가 가정은 위 표에 수록되어 있음

- 비행체 사이징 과정
  - 크기 조정은 시간 경과에 따른 전력 부하(예: kW/kg)를 지정하여 정의함. 동력 하중 임무 프로필의 예는 아래 그림에 제시되어 있음
  - 이 예에서 임무는 30초 동안 0.0083 kW/kg의 동력 하중이 필요한 택시 구간으로 시작함. 다음으로 30초 동안 0.25 kW/kg이 필요한 이륙 구간이 있고, 그 뒤로는 천이 구간이 있는데, 30초 동안 0.2 kW/kg이 필요함
  - 그런 다음 0.083 kW/kg의 동력 하중으로 10분간 항공기가 순항함. 그 후 항공기는 30초 동안 0.25 kW/kg의 동력 하중으로 착륙하고, 지상 활주는 30초 동안 0.0083 kW/kg의 동력 하중으로 착륙함. 그리고 이 임무가 반복됨
  - 마지막으로, 20분간의 크루즈 예약 시간이 있음. 미션 부문 시간은 Patterson et al이 제안한 미션에 기초함[136]. 그리고 동력 하중은 McDonald and German 참고문헌[137]에서 가져옴.
  - 각 항공기 유형은 서로 다른 가정된 동력 하중 매개변수 집합을 가짐. 아래 표에서 각 비행 구간에 대한 동력 하중은 쿼드로터, 틸트로터/틸트윙, 리프트+크루즈, 헬리콥터 등 고려된 각 항공기 유형에 대해 나열됨
  - 이러한 동력 하중 번호는 McDonald and German이 제시한 이륙 및 순항 전력 요건에서 도출한 것임[137]

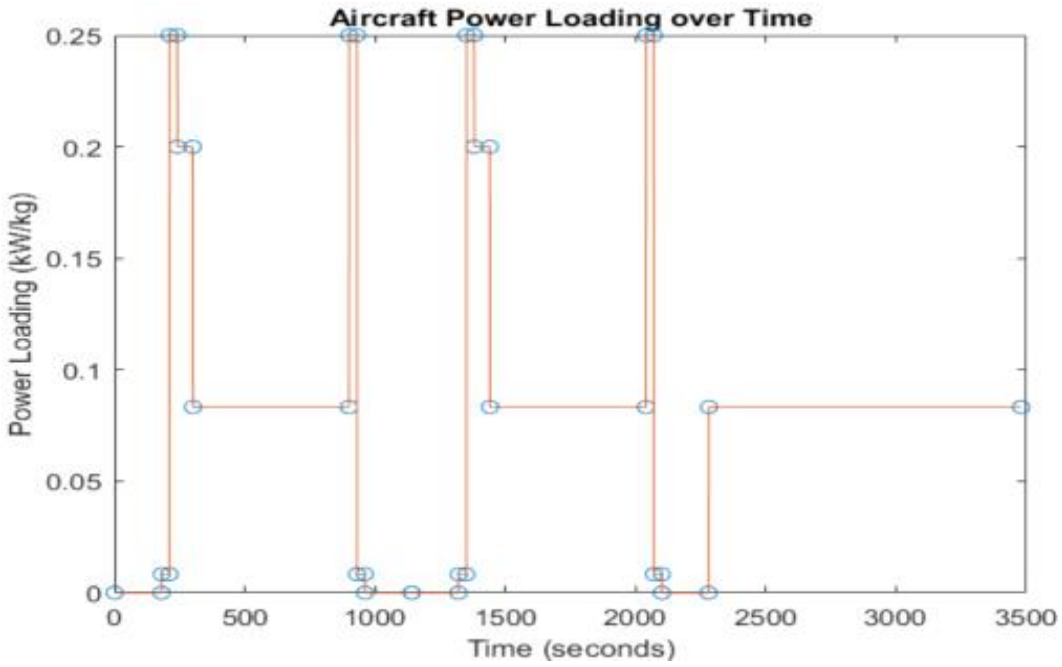
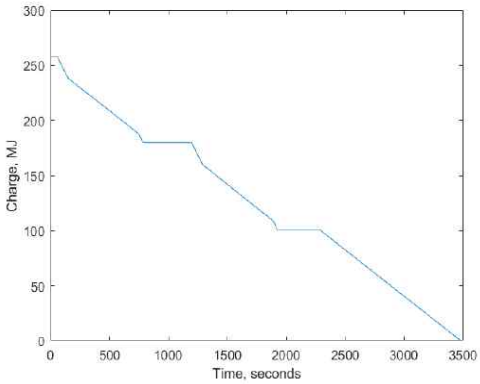


그림 238 시간 경과에 따른 동력 하중으로 표시된 항공기 임무 프로필의 예

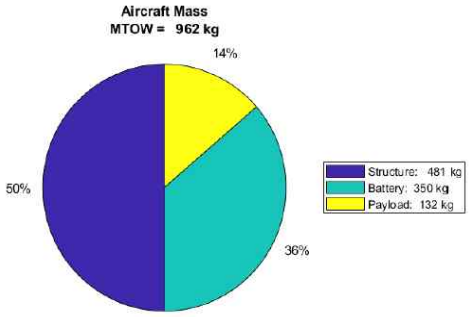
표 42 비행 구간별 동력 하중 가정

매개변수/미션 구간	쿼드로터	틸트로터/틸트윙	리프트+크루즈	헬리콥터
pVTOL (kW/kg)	0.125	0.25	0.25	0.125
pClimb (kW/kg)	pVTOL	(pVTOL/4)*1.5	(pVTOL/3)*1.5	pVTOL
pCruise (kW/kg)	pVTOL*1.5	pVTOL/4	pVTOL/3	pVTOL
pTaxi (kW/kg)	0.1*pCruise	0.1*pCruise	0.1*pCruise	0.1*pCruise
pLoad (kW/kg)	0	0	0	0
pCharge (kW/kg)	-0.2	-0.2	-0.2	-0.2

- 전지형 배터리로 구동되는 비행체의 경우, 비행체의 MTOW(2*목표 탑재량)에 대해 초기 추측이 이루어지며 먼저 배터리는 동력별로 크기가 지정되며 임무를 통해 항공기가 운행됨
- 배터리 용량은 사용된 에너지를 기반으로 업데이트되며, 전력 및 에너지 요구 사항이 모두 충족될 때까지 비행체를 다시 계산함. 그 결과 유상하중의 오류가 결정되고 MTOW 추측이 유상하중의 오류를 기반으로 업데이트됨
- 달성된 유상하중과 목표 유상하중 사이의 오차가 2kg 미만이 될 때까지 사이징을 실행함. 하이브리드 전기 비행체 사이징에는 동일한 프로세스가 수반되지만, 크기 조정 임무 종료 시 탱크가 비워지는 동안 증대(augmentation) 배터리와 연료 탱크의 반복은 증대 배터리가 전력 및 에너지 요구사항을 충족하도록 수행됨. 배터리 전용 비행체에 대한 사이징 출력의 예는 다음 그림에 나와 있음. 배터리 충전 상태는 다음 왼쪽 그림의 사이징 임무의 다른 부분에 대해 다른 속도로 감소하는 것으로 보여짐. 유상 하중과 배터리를 제외한 모든 것을 포함하는 구조물의 상대적 비율은 아래 오른쪽 그림의 배터리 및 유상하중비와 비교함

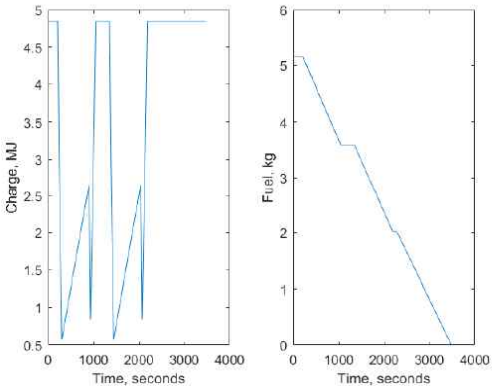


a) Battery state of charge during sizing mission.

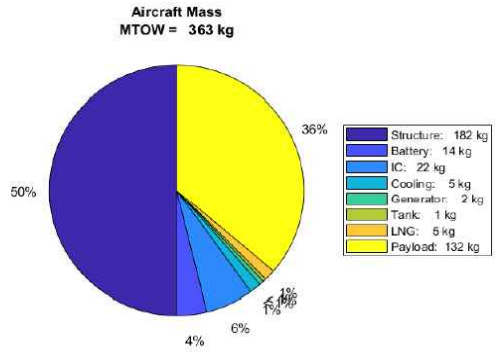


b) Battery vehicle mass fractions.

그림 239 배터리 전용 비행체에 대한 사이징 임무의 출력 예



a) Battery and fuel during sizing mission.



b) Fueled vehicle mass fractions.

그림 240 LNG-IC 비행체에 대한 크기 조정 임무의 출력 예

- 위 그림은 동일한 사이징 임무를 감안할 때 LNG-IC 비행체의 사이징에 따른 산출물의 예임. 위 왼쪽 그림에서는 배터리 충전량이 0 이상일 때 연료가 0으로 고갈되는 것을 관찰함(배터리는 임무를 수행할 수 있고 연료 탱크에는 임무 및 예비 요건을 충족하기에 충분한 연료가 포함되어 있기 때문에 사이징이 성공적이었음). 위 오른쪽 그림에서 동일한 임무를 가진 비행체의 중량은 위 두 번째 왼쪽 그림에 표시된 전지 옵션보다 상당히 작음. 구조비는 동일하지만(이것은 50%로 설정됨) 유상 하중비가 훨씬 높음

- 이산화탄소 배출량 계산 가정

- 이산화탄소(O) 배출은 아래 결과에 설명됨. 아래 표에 제시된 CO_2 발생률은 다양한 연료에 대해 고려되었음. 이는 항공기에 탑재된 에너지에 의해 생성되는 CO_2를 나타냄. 비교를 위해, LNG 또는 디젤 연료가 약 30%인 반면, 약 94%의 효율로 사용 가능한 기계 에너지로 전환될 것이라고 상상해 봤을 때 전기의 경우, CO_2 배출량이 현재의 캘리포니아 그리드 배출량을 나타내기 위해 선택되었는데, 이는 현재 50개 주 중 가장 깨끗한 지역 중 하나이며, 이는 고려 대상 지역이 샌프란시스코 만 지역이었기 때문임. 연료에 대한 CO_2 배출량은 연료를 연소하고 열 에너지 1 MJ를 방출함으로써 방출되는 CO_2를 나타냄

표 43 이산화탄소 배출량

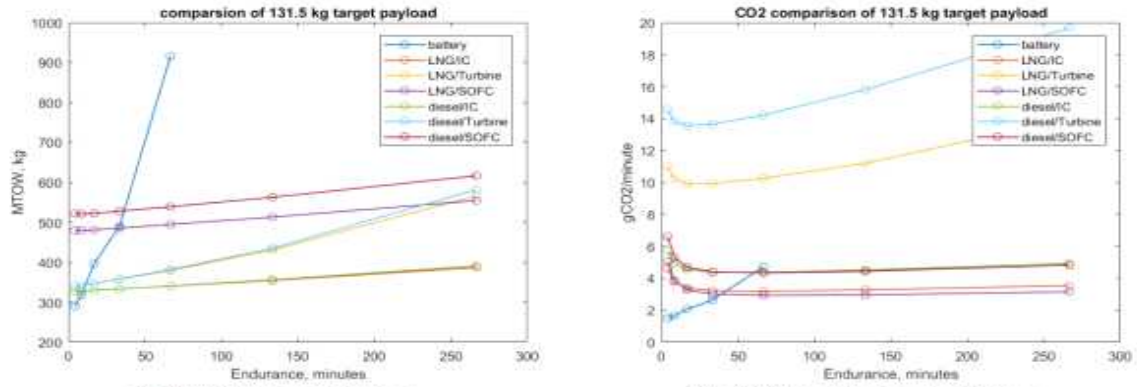
에너지 유형	이산화탄소 배출량
전지	78.2gCO_2 MJ (CA grid)
LNG	53.6gCO_2/MJ (raw)
디젤	74.1gCO_2/MJ (raw)

- 모델 한계

- 이 분석의 한 가지 제한사항은 항공기 구조, 모터 및 프로펠러가 비행체의 고정 비율을 구성하고 나머지 부분은 동력 시스템, 에너지 저장 및 탑재로 구성된다는 가정임. 이 섹션에 제시된 결과에 대해, 모델을 실행할 때 더 나은 숫자가 없어 구조 질량비는 모든 구성에 대해 50%로 가정되었음. 이후 리프트+크루즈와 틸트로터/틸트윙의 모델링은 각각 51.2퍼센트와 39.3퍼센트의 구조비를 사용했음. 이러한 구조물 비는 Silva가 제시한 틸트윙 비행체와 리프트+크루즈 개념 비행체의 중량비를 비교하여 선택되었음[138]
- 연료가 사용되면서 연료가 공급되는 항공기의 무게는 감소하지 않는다는 점도 분석의 추가 한계임. 오히려 연료 기반 전기항공기와 배터리 기반 항공기의 중량은 일정함. 이러한 일정한 무게 가정은 연료 공급 비행체가 예상한 것보다 약간 더 많은 연료를 소비하도록 함. 이러한 제한은 배터리-전기 비행체와 연료 비행체 간의 결과를 비교할 때 연료가 공급된 비행체의 중량이 시간이 지남에 따라 감소했을 때보다 배터리-전기 차량이 다소 더 유리해 보일 것임을 의미함

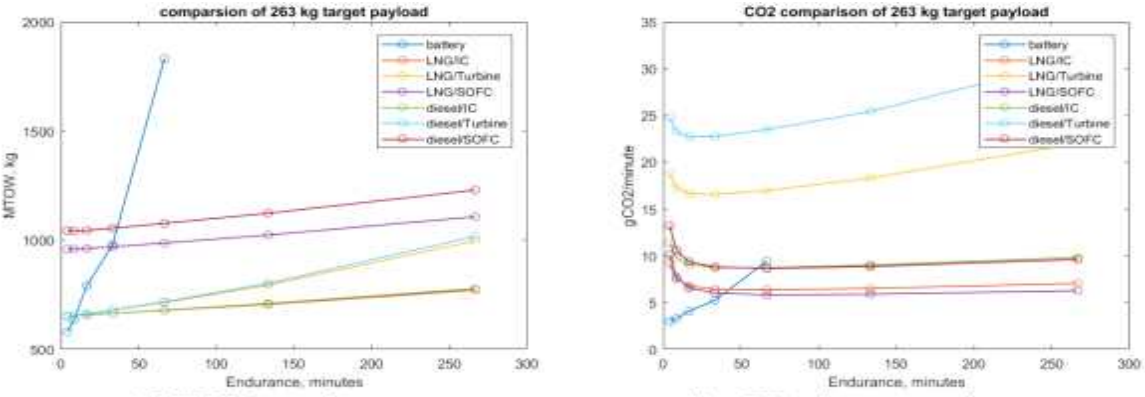
○ 추진 시스템과 에너지 저장 유형 비교

- 완전한 UAM 네트워크 시뮬레이션 전에, 다양한 에너지 저장과 추진 시스템 유형 사이의 일반적인 절충을 연구하는 것이 필요함. 틸트로터 비행체는 MTOW와 O 배출량이 어떻게 변화하는지 설명하기 위해 다양한 순항 기간에 대한 단일 부분 사이클 즉, 이륙 및 순항과 3개의 별도 탑재물로 구성된 임무에 맞춰 사이즈를 조정했음. 이륙이 시스템 전력 요건과 순항 세트 에너지 요건을 크게 좌우하기 때문에 이륙과 순항만 이용되었음
- 아래 3개의 그림에서의 결과는 1인승, 2인승, 4인승의 세 가지 척도로 IC 엔진, 터빈 또는 SOFC 시스템을 사용하는 LNG 및 디젤 비행체와 배터리 구동 비행체를 비교함. 그림 각각에서 MTOW는 왼쪽 그림의 각 기술 유형에 대한 체공시간 대비로 표시되며 분당 CO_2 발생률은 오른쪽 그림의 각 기술 유형에 대한 체공시간 대비로 표시됨



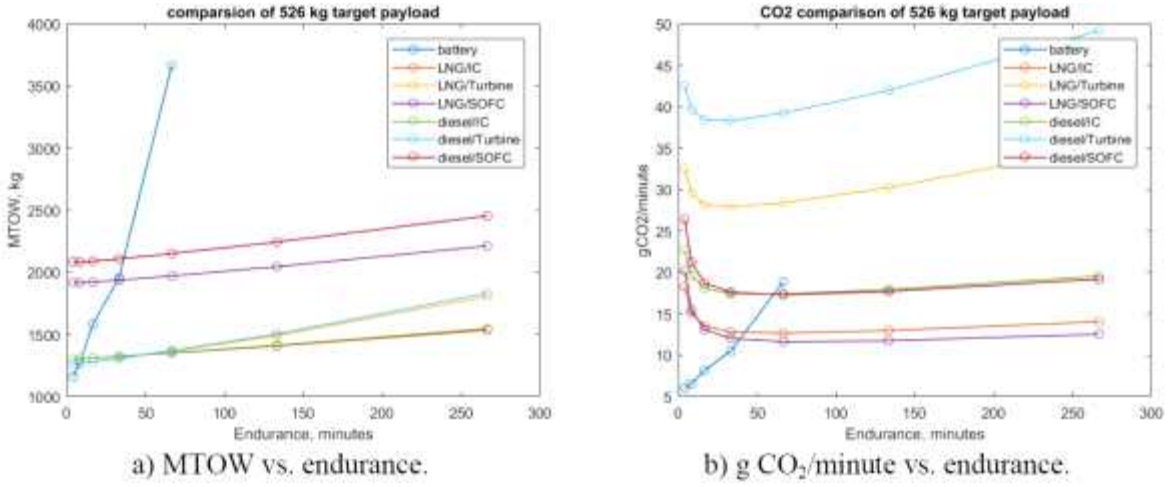
a) MTOW vs. endurance. b) g CO_2/minute vs. endurance.

그림 241 1인승(131.5kg 또는 290lb 유상 하중) 비행체 비교.



a) MTOW vs. endurance. b) g CO_2/minute vs. endurance.

그림 242 2인승(263kg 또는 580lb 유상 하중) 비행체 비교



a) MTOW vs. endurance. b) g CO_2/minute vs. endurance.

그림 243 4인승(526kg 또는 1160lb 유상 하중) 비행체 비교

- 1인승, 2인승, 4인승의 거의 모든 체공시간에서 IC 엔진의 중량이 가장 낮으며, 그 다음이 터빈임. 배터리 비행체는 최대 30분 체공시간에서 SOFC 차량보다 가볍지만, SOFC는 긴 체공시간에서는 배터리 비행체보다 가벼움. 배터리 비행체 사이징은 약 66분 이하의 체공시간에서 끝남(즉, 실현 가능한 무한 중량 비행체 결과). 33분 미만의 체공시간에서 배터리 비행체는 O 배출량이 가장 낮음. 체공시간이 길수록 LNG/IC와 LNG/SOFC는 CO_2 발생률이 서로 비슷하며, SOFC는 배출량이 약간 개선됨. IC 엔진은 SOFC보다 훨씬 덜 효율적이지만, IC 항공기의 가벼운 무게는 필요한 연료 소모율을 줄이고 IC의 탄소 배출은 SOFC와 유사하게 나타나지만, SOFC는 여전히 IC 엔진보다 약간 낮은 배출량을 나타냄. 다음으로 높은 CO_2비율은 디젤 IC와 디젤 SOFC임. 터빈은 시스템의 크기가 작기 때문에 매우 비효율적이며 CO_2 생산률이 가장 높음

2-1-⑮. 네트워크 모델

- Vertiport 네트워크 내에서 서로 다른 비행체의 성능을 평가하기 위해 전체 UAM 네트워크 시뮬레이션이 구축되었음
- UAM 네트워크는 Vertiport의 위치, 각 Vertiport에서 예상되는 상대적 수요(Vertiport에서 출발하거나 종료하는 여행의 확률이 "가중화" 요인에 의해 정의됨), 이륙/착륙, 주차 및 보급에 사용할 수 있는 Vertiport의 패드 수로 정의됨

○ 대도시권 표현

- vertiport 네트워크는 Google의 My MAP에서 내보낸 kml 파일을 사용하여 정의함[139]. Vertiport 위치는 Daskilewicz 등이 설명한 위치이며, 위치 선택 및 출발지/도착지 가중치에 대한 자세한 정보는 참고 문헌[99]에서 확인할 수 있음
- Vertiport 위치 선정 예
  - 샌프란시스코 만 지역이 네트워크 모델과 함께 연구 대상으로 선정되었음. 이 지역은 몇 개의 주요 도시 중심지 및 주변 도시의 무질서한 확장을 포함하는 대도시 지역이며, 샌프란시스코 만과 몇 개의 산맥이라는 기존 인프라에 의해 크게 제약을 받고 있음
  - Vertiport 사이트 맵을 아래 그림에 나타내었음. 폴섬은 지도나 시뮬레이션에 포함되지 않음. 배터리로 움직이는 비행체는 폴섬 Vertiport까지의 먼 거리 때문에 도달하는 데 문제가 있었음
  - 각 Vertiport별 GPS 좌표, 출발지 및 도착지 가중치, 패드 수는 그림 아래의 표와 같음. GPS 좌표는 비행 거리 계산에 사용됨

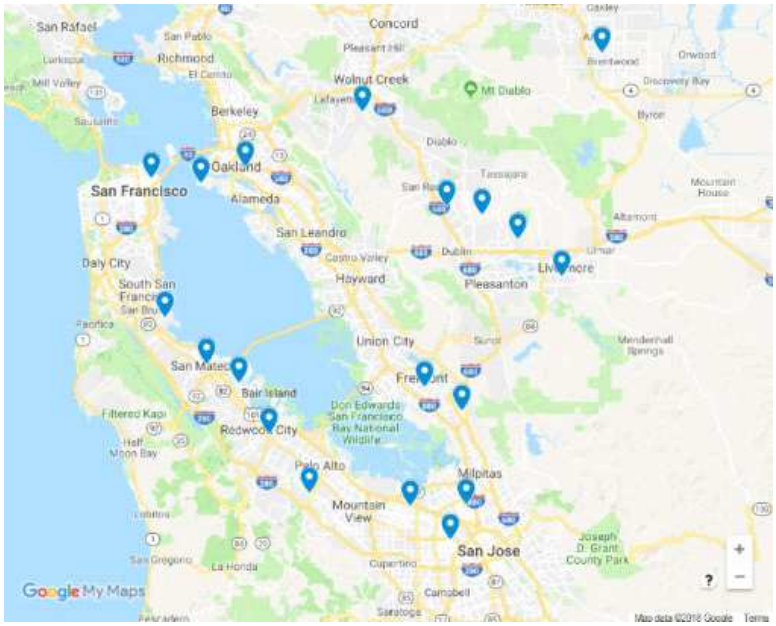


그림 244 샌프란시스코 만 지역의 제안된 Vertiport 부지 지도

- 속도 및 라우팅 요소(아래 두 번째 표 참조)와 함께 거리는 각 Vertiport 사이의 시간을 계산하는 데 사용됨. 가중치는 수요 발생 알고리즘에 사용되며, 이 알고리즘은 아래에서 자세히 설명됨. 이착륙(ToL) 패드의 개수를 선택하여 시뮬레이션의 실험 실행을 기반으로 한 vertiport의 병목현상을 줄였음

- 다른 매개변수

- 네트워크 시뮬레이션에는 다른 많은 관련 매개변수가 있음. 아래 두 번째 표는 모델을 실행하는 데 필요한 이러한 매개변수를 나열함. 이러한 매개변수 중 다수는 이후 섹션에서 설명함

표 44 Vertiport 매개변수

	위치		가중치					
이름	위도	경도	출발지	도착지	이착륙 패드 개수	보급	주차	비고
Oakland	37.80448996	-122.2582997	15	61	8	8	16	
Fremont	37.53653094	-121.9869842	52	34	12	8	16	
Weibel	37.50875569	-121.929619	15	3	4	8	16	
Doolan Canyon	37.71648155	-121.8433985	20	20	4	8	16	
Livermore	37.67114195	-121.7760421	42	20	12	8	16	
Brentwood	37.94220798	-121.7149882	19	6	4	8	16	
San Ramon	37.75696664	-121.9527965	21	24	4	8	16	
Walnut Creek	37.8703056	-122.0794298	18	22	4	8	16	
Bollinger canyon	37.74553802	-121.8986608	23	6	4	8	16	
Folsom	38.67095983	-121.1417955	4	5	0	0	0	사용 x
San Francisco Financial district	37.79031415	-122.4024319	14	33	4	8	16	
Alameda	37.78419086	-122.327654	0	0	4/16	8	16	Depot
San Mateo	37.56567723	-122.3183091	25	23	12	8	16	
Foster City	37.5419772	-122.2686095	29	23	8	8	16	
Redwood City	37.48046752	-122.2225149	20	23	4	8	16	
SFO Airport	37.62146198	-122.3823131	32	26	16	8	16	공항
North San Jose	37.3939046	-121.9218031	6	7	4/12	8	16	Depot
SJC Airport	37.35123421	-121.946514	16	27	12	8	16	공항
Sunnyvale	37.3923169	-122.0086362	9	8	4	8	16	

Palo Alto	37.40819168	-122.1615997	3	12	4	8	16	

- 거리를 이용한 비행시간

  • kml 파일의 각 vertiport에 대한 설명에는 착륙 패드 수, 보급 스테이션 수(사용하는 경우), 주차용 패드 수, 출발지 및 도착지 수요 가중치, vertiport 유형을 포함한 해당 vertiport에 대한 몇 가지 매개변수를 나타내는 태그가 포함되어 있음. kml 파일은 또한 vertiport의 GPS 위치와 vertiport의 이름을 포함함. 이 모든 정보를 분석하여 도시 모델에 포함함. 그런 다음 Haversine 거리(구 표면의 두 점 사이의 거리)를 각 Vertiport 쌍에 대해 계산함. 그런 다음 이 거리를 직선 비행경로에서 장애물 주위로 우회하는 편차를 고려하는 보정 계수인 라우팅 계수로 곱함. 사용된 라우팅 계수는 Moore가 제시한 값에 해당함[105]. 마지막으로, 지정된 비행체 순항 속도는 거리에서 비행시간으로 변환하는데 사용됨. 적재, 이륙, 상승, 착륙, 택싱를 포함한 미션 세그먼트 시간 등 다른 모든 시간과 함께 실제 비행시간으로 변환됨

표 45 기타 네트워크 모델 관련 매개변수

전체	이름	값	설명
	num_people	10000	시스템 내 인구수
	ratios	[.4,.1,.5]	통근자, 이탈 고객, 공항 승객
	parking_fraction	0.25	주차 공간의 비율
	max_wait_time_dispatch	300	비행체를 기다리는 시간
	max_wait_time	300	비행체에 타는 시간
	speed	208.35	km/hr
	people_per_vehicle	7	비행체에 탑승하는 고객 수
	new_time_step	30	time step
	routing_factor	1.42	각 경로에 곱해지는 거리 계수 [105]
	prediction_correction	1.6	연료 사용량 예측을 위한 조정
	rebalance	1	재조정, yes or no
	new_demand	1	새로운 수요 발생, yes or no
	timers	[180,30,30,60,30,30,180]	load, taxi out, takeoff, climb, land, taxi in, unload
	max_iterations	100	
	tVTOL	30	VTOL 모드 시간(사이징)
	tCruiseReserve	1200	크루즈 예약 시간(사이징)
	tClimb	60	상승 시간(사이징)
	tCruise	1200	크루즈 시간(사이징)
	tTaxi	30	택시 시간(사이징)
배터리	reserve_limit_bat	0.99	재충전이 발생하는 최댓값
	recharge_rate	200	kW, 배터리 충전율
	nCycles	1	사이징 임무를 위해 실행할 항공편 수
연료	replenish_at_depot	16	충전소에서의 중단 횟수
	reserve_limit_fuel	0.25	급유가 발생하는 한계
	refuel_rate	1	kg/s, 급유율
	recharge_in_flight	1	Boolean, 비행 중 충전 가능 여부
	nCycles	8	사이징 임무를 위해 실행할 항공편 수

- 모델 한계

  • 도시 모델은 현실적인 UAM 운영의 모든 복잡성을 모델링하는 능력에 한계가 있는 여러 가지 가정을 포함하고 있음. 모델은 예비 선택이 비행체 및 네트워크 성능에 미치는 영향을 파악하는 데 사용될 수 있으며, 시간이 지남에 따라 이러한 제한사항 중 많은 부분이 추가적인 모델링을 충실히 하는데 사용될 것임. 모델에서 보다 중요한 몇 가지 제한

표 46 기타 네트워크 모델 관련 매개변수

전체	이름	값	설명
	num_people	10000	시스템 내 인구수
	ratios	[.4,.1,.5]	통근자, 이탈 고객, 공항 승객
	parking_fraction	0.25	주차 공간의 비율
	max_wait_time_dispatch	300	비행체를 기다리는 시간
	max_wait_time	300	비행체에 타는 시간
	speed	208.35	km/hr
	people_per_vehicle	7	비행체에 탑승하는 고객 수
	new_time_step	30	time step
	routing_factor	1.42	각 경로에 곱해지는 거리 계수 [105]
	prediction_correction	1.6	연료 사용량 예측을 위한 조정
	rebalance	1	재조정, yes or no
	new_demand	1	새로운 수요 발생, yes or no
	timers	[180,30,30,60,30,30,180]	load, taxi out, takeoff, climb, land, taxi in, unload
	max_iterations	100	
	tVTOL	30	VTOL 모드 시간(사이징)
	tCruiseReserve	1200	크루즈 예약 시간(사이징)
	tClimb	60	상승 시간(사이징)
	tCruise	1200	크루즈 시간(사이징)
	tTaxi	30	택시 시간(사이징)
배터리	reserve_limit_bat	0.99	재충전이 발생하는 최댓값
	recharge_rate	200	kW, 배터리 충전율
	nCycles	1	사이징 임무를 위해 실행할 항공편 수
연료	replenish_at_depot	16	충전소에서의 중단 횟수
	reserve_limit_fuel	0.25	급유가 발생하는 한계
	refuel_rate	1	kg/s, 급유율
	recharge_in_flight	1	Boolean, 비행 중 충전 가능 여부
	nCycles	8	사이징 임무를 위해 실행할 항공편 수

사항과 결과가 실제 운영에서 어떻게 벗어날 수 있는지에 대해 논의함

- 우선 이 모델은 UAM을 실현하기 전에 해결해야 하는 복잡한 공역 통합 문제를 크게 단순화함. 특히 이 모델은 UAM 항공 교통이 모든 형태의 항공 교통(UAM 네트워크 외부의 항공기 포함)으로부터 안전하게 분리될 수 있다고 가정함. 모델은 항공기가 안전한 공역 통합을 위해 Vertiport 사이의 직접 거리보다 평균적으로 더 멀리 비행할 것으로 가정함
- 이 증가된 비행 거리는 본 연구에서 제시된 작업에 대해 1.42로 설정된 "라우팅 계수"를 통해 설명되며, 이는 출발지와 도착지 사이의 직접 거리를 곱한 것임. 그러나 모델은 Vertiport에서 비행체의 상호작용은 처리함. 즉, 두 대의 항공기가 동일한 ToL 패드, 보충 또는 주차 패드를 동시에 점유할 수 없음. 다른 항공기가 ToL 패드를 점유하고 있을 때 항공기가 도착지에 도착하면, 항공기는 패드가 자유로워질 때까지(순항과 동등한 동력 설정으로) 로터링하여 착륙할 수 있음
- 네트워크의 모든 비행체가 동일함. 예를 들어 동일한 모델에서 서로 다른 좌석 수를 가진 비행체를 동시에 모델링하거나 배터리와 연료 비행체를 혼합하여 사용하는 등, 복수의 비행체 유형을 모델링하는 용량은 현재 존재하지 않음
- 모델링된 임무 부문 시간에는 확률적인 특성이 없음. 임무 지속 시간은 거리, 속도 및 라우팅 계수를 통해 직접 계산됨. 속도나 경로의 변동은 고려하지 않음

○ 네트워크 시뮬레이션을 위한 항공기 사이징 방법

- 항공기는 원래 앞의 비행체 사이징 과정에서 설명한 것과 동일한 임무로 사이징 되었지만, 이러한 임무에 맞는 항공기와 실제 운용 고려사항으로 네트워크 성능의 초기 연구는 배터리-전기 및 하이브리드-전기 비행체에 대한 사이징 임무의 변경으로 이어졌음
- 앞서 논의한 바와 같이 순항 시간 10분 크기의 배터리-전기 비행체을 사용한 초기 시뮬레이션에서는 이러한 비행체가 앞의 Vertiport 위치 선정에 설명된 샌프란시스코 만 지역 네트워크 내에서 더 긴 경로를 비행할 수 없다는 것을 보여주었음. 또한 배터리-전기 비행체의 무게가 너무 크게 증가하지 않도록 하기 위해서였음. 모든 Vertiport는 항공기가 20분 예약의 단일 비행 사이클로만 사이징될 수 있도록 충전 인프라를 갖추게 될 것으로 가정했으며, 이는 시각적 비행 규칙에 따른 로터크래프트에 대한 기존 연방 항공 규정 요건[140]에 해당함. 이러한 가정 하에, 배터리 구동 항공기의 사이징 임무는 아래 그림에 나타나 있으며, 20분 순항이 예약된 단 하나의 20분 임무를 나타냄
- 하이브리드-전기 비행체의 크기는 비행체의 체공시간이 증가함에 따라 크게 증가하지 않기 때문에 연료를 재충전하기 전에 여러 미션을 수행하기 위해 하이브리드-전기 UAM 비행체의 사이징을 하는 것이 논리적으로 보임
- 또한 모든 Vertiport에 연료를 저장하는 것은 연료 분배 물류 관점에서 실용적이 아닐 수 있으며, 모든 Vertiport에 연료를 저장하는 것은 잠재적인 안전 위험임. 결과적으로, 하이브리드-전기 비행체는 연료 저장에 문제가 없을 수 있는 대도시 지역의 (또는 복수의) 중앙 집중식 연료 저장고 또는 특정 Vertiport에서만 연료를 주입할 수 있음(예: 기존 공항에 공동 배치된 차량 1대). 이러한 고려사항으로, 그리고 샌프란시스코 만 지역 UAM 네트워크의 초기 시뮬레이션 후, 연료 공급 비행체의 명목상 20분 주기의 횟수는 8회로 선택되었는데, 이는 하루 동안 1인승 항공기가 비행할 평균 임무 횟수보다 1회 많은 것임. 8주기 임무의 예는 아래 두 번째 그림에 나와 있음. 이 사이징 미션을 통해 과도한 연료 용량으로 비행체를 사이징하지 않고도 하루 중 비행체가 연료를 재충전해야 하는 횟수를 최소화 함

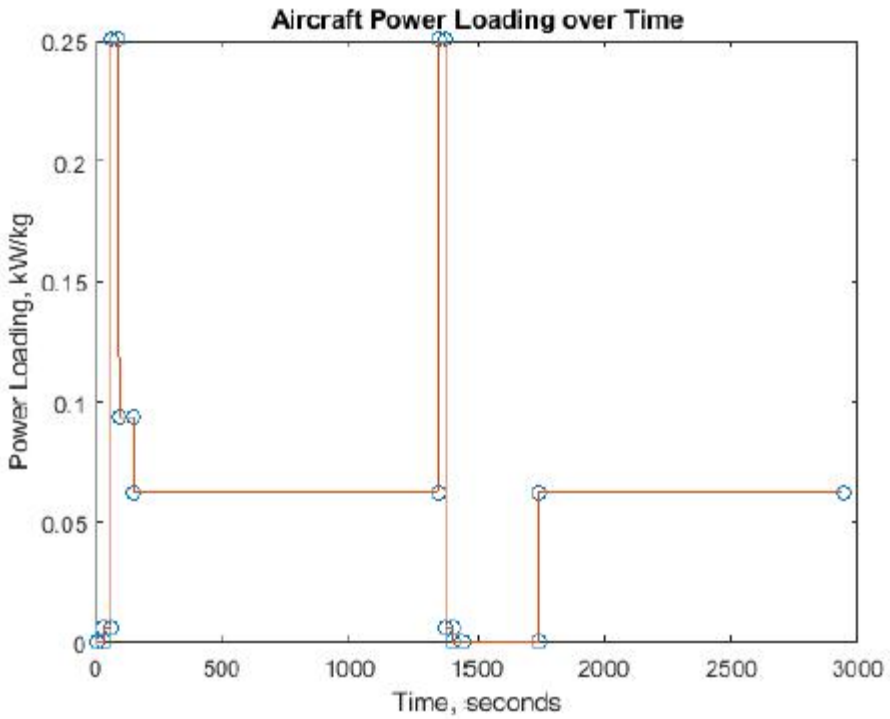


그림 245 배터리 구동 비행체에 대한 단일 사이클 사이징 임무

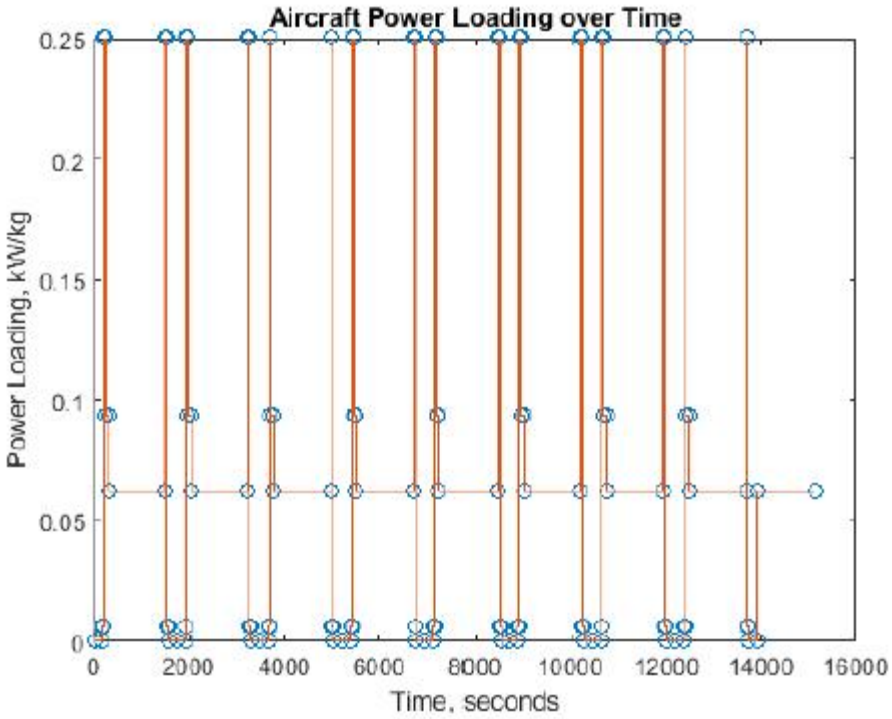


그림 246 예: 연료 공급 비행체에 대한 8주기 사이징 임무

○ 수요 모델

- 수요 모델은 수요 유형이 다른 개인별 데이터에 기초함. 세 가지 유형의 수요(통근자, 이탈 고객, 공항 승객)가 모델링됨. 통근자는 집과 직장을 오가는 아침에 한번, 저녁에 한번의 이동이 있음. 이탈 고객의 수요는 한 지점에서 다른 지점으로 한 번의 여행을 하는 사람을 모델로 하고, 도시 전역의 긴급 사업 회의와 같은 여행을 대표함. 공항 승객은 공항으로 이동하거나 공항에서 이동함

- 타이밍 생성 요청

- 여행 요청은 수요 유형에 따라 세 가지 방법 중 하나로 생성됨
- 첫 번째 수요 유형인 통근자는 두 번의 여행을 만듦. 첫 번째 발생은 표준 편차가 2시간인 오전 8:00에 집중된 정규 확률 분포로 정의되는 오전 중에 발생함. 두 번째 통근 여행은 표준 편차가 2시간인 오후 5시에 중심의 정상 확률 분포로 정의되는 저녁에 발생함
- 이탈 고객의 여행은 오전 5시에서 오후 9시 사이에 일정한 확률로 시간 분포에서 생성됨. 오전 5:00 이전에 확률 분포는 오전 5:00에 피크가 있고 표준 편차가 1시간인 정규 분포의 절반으로 정의됨. 마찬가지로 오후 9시 이후에는 평균이 오후 9시이고 표준 편차가 1 시간 인 정규 확률 분포의 절반으로 수요가 모델링됨. 이 분포는 하루 동안 깨어 있고 어떤 장소에 여행을 가고 싶은 사람들에게만 묶여 있는 네트워크의 기본 수준의 활동을 제공함
- 이 모델링의 목적상, 공항 승객은 표준 편차가 6시간인 오후 12시에 집중된 정규 확률 분포에서 정규 확률 분포의 분포로 생성되었음. 더 작은 정규 분포는 크기가 90에서 270 사이, 표준 편차는 0.2에서 1.0시간 사이였음. 이러한 분포는 공항 승객 수요의 "정점"을 포착할 수 있는 방식으로 시간 요청을 생성하기 위해 사용되었음. 정규 분포 예는 아래 그림에 나와 있음

- 출발지 및 도착지 선택

- 출발지와 도착지의 선택도 수요의 종류에 따라 다름: 통근, 이탈 고객 또는 공항 승객
- 통근자와 관련하여 아침 통근과 저녁 통근이 있음. 각 통근자의 아침 출발지와 저녁 도

착지는 동일한 Vertiport로, 이 Vertiport는 오전 중 Vertiport 출발지 가중치에 의해 무작위로 결정됨

- 아침 도착지, 즉 저녁 출발지는 아침 출근 중 Vertiport 도착지 가중치에 거리 가중 함수를 곱하여 무작위로 결정됨. 출발지 가중치가 높은 Vertiport는 주거지역인 경향이 있고, 도착지 가중치가 높은 Vertiport는 근무지가 많은 지역인 경향이 있음. 거리 가중 함수는 아래 식의 형태를 취하며, 4개의 적합 매개변수 a, b, c, d와 거리로 구성됨. 이것은 매우 짧은 통근거리와 매우 긴 통근거리를 강조하지 않는 효과가 있음. 거리 가중 함수의 효과는 아래 두 번째 그림에 표시된 여행 수요 거리 히스토그램으로 입증됨. 수요 발생의 확률적 특성과 출발지/도착지 가중치의 영향 때문에 분포는 가중 함수 에 대략 맞는데, 여기서 a는 1/367.8791이고 b는 0.001, c는 2, d는 2임

$$w_d = a \quad (distance^c) \quad \exp(-b \quad distance^d) \tag{25}$$

- 이탈 고객의 여행 출발지는 출발지 가중치에 관계없이 모든 기존 Vertiport로부터 무작위로 생성됨. 마찬가지로, 이탈 고객의 여행 도착지는 도착지 가중치에 관계없이 기존의 모든 Vertiport로부터 무작위로 생성됨
- 공항 승객의 여행은 공항과 결합된 Vertiport의 출발지 또는 도착지를 가질 것임. 공항이 출발지인지 도착지인지의 결정은 무작위로 결정되며, 출발지 또는 도착지가 공항일 확률은 같음. 두 개 이상의 공항이 있을 경우, 출발지 또는 도착지로 사용되는 공항은 공항에 위치한 모든 Vertiport 중에서 무작위로 선택됨. 그런 다음 모든 vertiport에서 해당 출발지 또는 도착지를 무작위로 선택함. 본 연구에서 모델링을 위해, 이러한 유형의 여행의 상대적 비율은 통근자 40%, 이탈 고객 10%, 공항 환승 50%로 가정했음

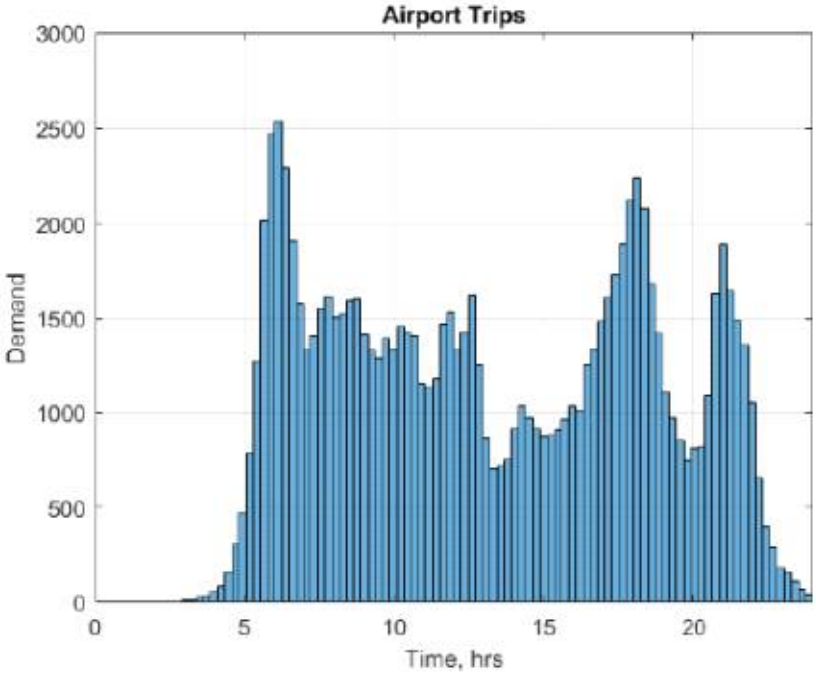


그림 247 정규 분포의 정규 분포의 예: 각 작은 분포는 공항으로부터의 항공기 출발 또는 도착에 의해 생성된 UAM 비행에 대한 수요를 나타냄

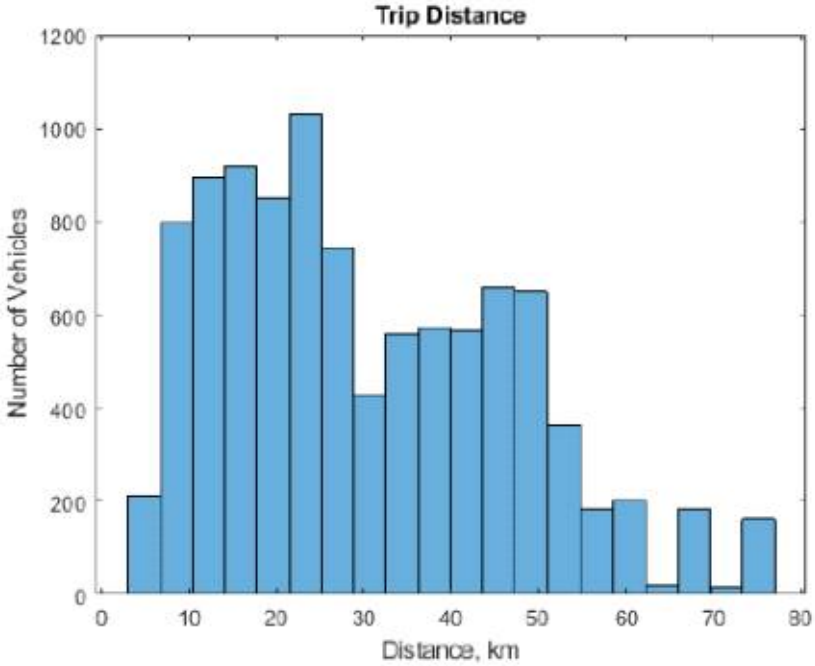


그림 248 거리 가중 함수를 포함한 수요 창출 알고리즘의 결과로 인한 여행 거리

- 모델 한계

  - 수요 모델은 통근 기반의 도심으로의 아침 유입과 저녁 유출을 유발하는 출발지와 도착지 가중치에 따라 달라짐. 이탈 고객들은 하루 종일 무작위로 여행을 떠남. 공항 승객은 시스템에 있는 사람들의 공항 중심 이동을 만듦. 각 여행 유형의 상대적 수와 각 수요 유형의 특정 확률 분포는 모델을 어떻게 사용할 수 있는지를 입증하기 위해 임의로 선택되었음
  - 이 작업이 개선됨에 따라, 각 여행 유형에 대한 시간 확률 분포, 출발지/도착지 선택 및 각 사람 유형의 상대 비율을 더 잘 알 수 있는 보다 상세한 정보를 얻을 수 있기를 기대함. 이러한 특성은 연구된 수도권마다 다를 것임

○ 배치(Dispatch) 모델

  - 수요기반 UAM 네트워크 모델의 가장 중요한 측면 중 하나는 배치 모델, 즉 항공기가 Vertiport에서 출발할 때와 도착지를 지시하는 모델임. 이 모델은 궁극적으로 시스템의 두 가지 주요 특성인 평균 대기시간과 평균 좌석 이용률(ALF: Average Load Factor)을 결정할 것임. 평균 대기시간은 하루 동안 네트워크의 모든 항공편을 고려해 승객이 탑승 요청부터 항공편이 출발할 때까지 기다려야 하는 평균 시간을 말함. ALF는 유료 승객들로 가득 찬 좌석 수를 하루 네트워크 전체의 모든 항공편의 총 좌석 수로 나눈 것임
  - 일반적으로 ALF와 평균 대기시간은 거래할 수 있음. 예를 들어 다인승 비행체의 경우 지정된 인원이 탑승할 때까지 차량 출발이 지연될 수 있어 평균 대기시간 비용으로 ALF를 개선하는 효과가 있음. 그러나 이러한 단순화된 시나리오에서 항공기가 정해진 수의 승객을 태우고 출발하는 경우 불충분한 수의 승객이 도착할 수 있어 특정 승객의 발이 묶일 수 있음. 분명히, 그러한 결과는 받아들일 수 없을 것임. 미탑승 승객의 문제를 완화하고 보다 수용 가능한 운행 수단을 제공하기 위해, 다인승 비행체는 지정된 수의 승객이 탑승할 때까지 또는 첫 번째 승객이 미리 정해진 시간 동안 기다릴 때까지 출발을 지연시킬 수 있음. 이 두 번째 시나리오에서, 더 많은 돈을 지불하는 승객으로 항공기를 채우는 것과 첫 번째 승객의 대기 시간을 줄이는 것 사이의 비교분석은 분명함. 궁극적으로 대기시간이 너무 커지면 승객들은 더 이상 항공 배치 모드를 이용함으로써 속도 우위의 혜

택을 받지 못하게 되고 UAM 서비스는 실패하게 됨. 더욱이 승객-km당 DOC는 ALF와 관련이 있기 때문에 배치 모델은 운영자가 DOC를 커버하기 위해 승객들에게 요금을 부과하는 데 필요한 가격에 큰 영향을 미칠 수 있음. 이 섹션의 나머지 부분에서는 시뮬레이션에 채택된 배치 모델에 대해 설명함

- 배치 모델 구현
  - 배치 모델은 전체 UAM 네트워크에서 ALF와 평균 대기시간의 균형을 추구하는 경험을 기반으로 함. 배치 모델의 일차적인 가정은 순전히 수요기반(On Demand)이라는 것임. 즉, 언제 여행이 요청될 것인지에 대한 사전 지식이 없고, 그 요청은 사람이 Vertiport에 도착하면 기록됨. 여행이 기록되면 가능한 경우, 비행체가 가득 찬 경우 즉시 비행체를 운항함. 비행체가 가득 차지 않은 경우, 비행체는 최대 300초(5분) 기다린 후 1.0 미만의 좌석 이용률을 가지고 출발함
  - 또한 전체 UAM 네트워크에서 수요를 가장 잘 충족시키면서 항공기가 Vertiport간에 이동하도록 "재조정" 과정이 있음. 특정 Vertiport의 수요가 수요를 충족하기 위해 해당 Vertiport의 모든 "사용 가능한" 항공기의 능력을 초과하는 경우, 재조정이 개시됨. 이용 가능한 항공기의 수는 vertiport에 준비된 항공기의 수와 그 vertiport로 이동하는 항공기의 수를 더한 것임. 또한, Vertiport에서의 이용 가능한 항공기 수가 Vertiport 주차 공간 수의 25% 미만일 경우, 재조정이 개시됨
  - 재조정이 시작되면, 요청을 개시하는 "대상 Vertiport"에서 Vertiport로 비행체를 파견하려는 시도가 있음. 재조정 요청은 대상 vertiport에서 이용 가능한 항공기 수가 해당 vertiport의 수요보다 적을 경우에만 성공할 수 있음. 결함으로 비행체를 Vertiport에 파견할 대상 Vertiport는 재조정 요청을 하는 Vertiport와 근접하며, 그 종류, 즉 대형 수직이착륙장 저장소(depot)인지 아닌지를 기준으로 선정함
  - 배터리 비행체만을 사용한 시뮬레이션의 경우, 모든 Vertiport에는 충전 인프라가 있어 depot가 없는 것으로 가정함. 이 시나리오에서 대상 vertiport는 처음에 재조정 요청을 시작한 vertiport와 가장 가까운 것으로 선택됨. 만약 그 Vertiport가 높은 수요 때문에 비행체를 제공할 수 없다면, 다음으로 가장 가까운 Vertiport가 대상 Vertiport가 됨. 대상 vertiport가 비행체를 제공할 수 없는 경우, 프로세스는 재조정 요청이 충족되거나 가능한 모든 대상 vertiport가 비행체를 발송하지 못할 때까지 vertiport에서 점점 더 멀리 있는 vertiport를 대상으로 계속함
  - 이 시뮬레이션에서 모든 연료 비행체의 경우인 대형수직이착륙장 저장소(depot)기반 보충을 통한 시뮬레이션의 경우, 첫 번째 대상 Vertiport는 수요 요청을 개시하는 Vertiport에 가장 가까운 depot으로 선택됨. 만약 이 Depot에 공급할 수 있는 항공기가 없다면, 다음 대상 Vertiport는 다음으로 가장 가까운 depot이 될 것임. depot에서 수요를 충족할 수 없는 경우 가장 가까운 non-depot Vertiport를 대상으로 하며, depot이 없는 앞에서 설명한 사례와 같이 프로세스가 계속됨
  - 마지막으로, depot 기반 급유 네트워크에서는 언제 비행체가 급유 depot에 파견되는지를 고려해야 함
  - 이러한 시뮬레이션을 위해 25%로 설정된 미리 정의된 예비 수준 이하의 연료를 사용하는 비행체는 자동으로 depot으로 보내져 연료를 주입함
  - 또한, 각 잠재적 비행 전에, 제안된 임무를 완료한 다음 Vertiport에서 가장 가까운 연료 보급소로 가는 추정 연료 사용량을 고려함
  - 이러한 연료 사용으로 인해 연료가 예비 레벨 아래로 떨어질 경우, 비행체는 임무를 수

행하는 대신 항공기의 현재 위치에 가장 가까운 저장소로 직접 연결됨

- 모델 결과
  - 비행체 설계 선택이 평균 좌석 이용률(ALF: Average Load Factor)과 평균 대기시간에 어떤 영향을 미치는지 연구하기 위해 추진 시스템과 연료 유형이 다른 틸트윙/틸트로터 비행체를 사용하여 UAM 네트워크 시뮬레이션을 수행했음. 또한, 자율 및 조종사 항공기와 사례의 평균 대기시간과 ALF의 비교가 수행되었으며, 이러한 시뮬레이션의 결과는 모두 이 섹션에 설명되어 있음
  - 서로 다른 전력 시스템을 사용하여 조종 및 자율 틸트윙/틸트로터 비행체를 비교할 때 평균 대기시간과 ALF 결과는 거의 동일했음. 이 결과는 조종사의 존재는 비행체의 무게을 증가시킬 뿐임. 따라서 본 섹션의 나머지 부분에서는 자율형 비행체를 사용한 시뮬레이션 결과만 제공됨
  - 그러나 아래 두 그림에 표시된 것처럼 연료 공급 비행체와 배터리 비행체 간에 차이가 관찰됨. 연료 비행체는 연료 비행체에 대한 depot 급유와 배터리 비행체에 대한 분산 충전으로 인해 ALF가 감소하고 평균 대기시간이 약간 증가함
  - 이는 연료 주입 비행체가 때때로 승객 없이, 즉 주유소로 가는 "데드헤드 항공편"을 운행하기 때문임
  - 평균 좌석 이용률(ALF: Average Load Factor)을 각 기술 및 1, 2, 4명의 승객에 대해 아래 그림에 자율 틸트윙/틸트로터에 대해 나타냄. ALF는 배차 모델이 평균 대기시간(300초 대기제한)을 합리적으로 낮게 유지하려고 하기 때문에 비행체 크기가 증가함에 따라 감소하는 것으로 관찰됨
  - 아래 두 번째 그림에 자율 틸트윙/틸트로터의 평균 대기시간을 각 기술 및 1, 2, 4명의 승객에 대해 나타냄
  - 비행체에 승객이 가득 찰 때까지 또는 300초 대기제한에 도달할 때까지 유지되기 때문에 비행체 크기가 증가하면 평균 대기시간이 증가함

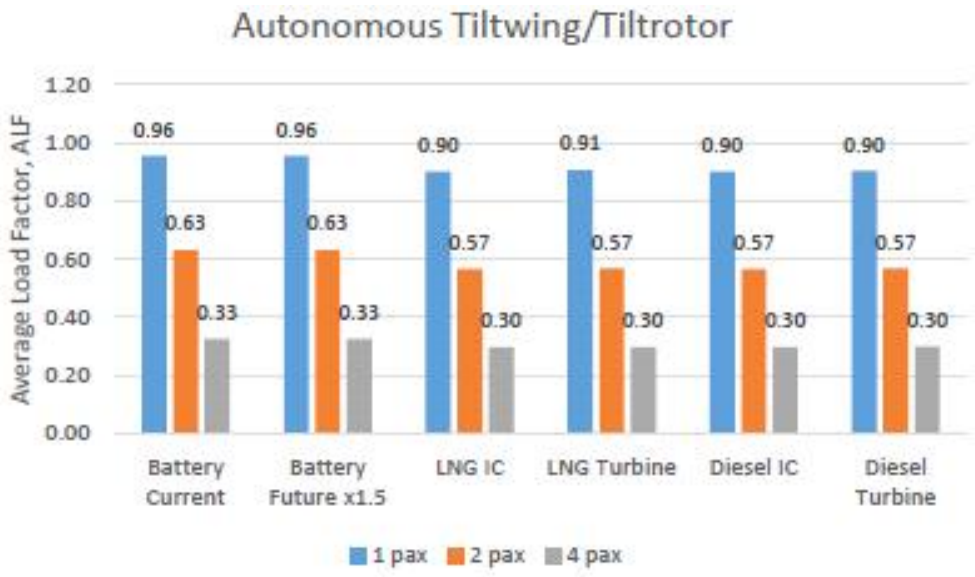


그림 249 자율 틸트윙/틸트로터 비행체 ALF; 에너지 유형

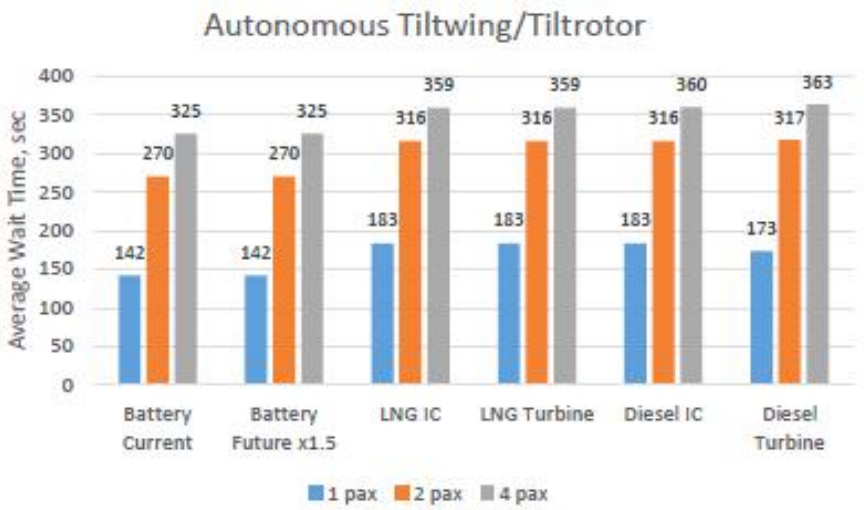


그림 250 자율 틸트윙/틸트로터 비행체 평균 대기시간; 에너지 유형

- 연료 공급 비행체의 사이징은 ALF와 평균 대기시간에 영향을 미침. 일반적으로 말해서, 더 많은 임무를 수행하도록 항공기를 사이징하면 운항 중에 더 적은 수의 급유 비행이 발생하기 때문임
- 이러한 영향을 탐색하기 위해 사이징 임무의 사이클 수가 변화하는 LNG를 연료로 하는 내연기관 엔진을 장착한 1인승, 2인승, 4인승 자율 틸트윙/틸트로터 항공기로 시뮬레이션을 수행했음
- 이러한 시뮬레이션의 결과는 ALF의 경우 아래 첫 번째 그림에 나타나있고, 평균 대기시간의 경우 아래 두 번째 그림에 나타냄
- 아래 첫 번째 그림에서 ALF는 연료충전 비행이 더 적게 필요하기 때문에 사이징 임무 주기의 횟수가 증가함에 따라 증가하는 것으로 관찰됨. 아래 두 번째 그림에서 평균 대기시간은 사이징 임무 주기의 수가 증가함에 따라 감소하는 것으로 관찰됨
- 사이징 임무 주기가 증가하면서 필요한 연료 공급 항공편의 수가 감소하기 때문에, 파견된 재조정 비행체가 depot에서 도착하기를 기다리는 시간이 줄어들었음. 12 사이클 이상 ALF에는 거의 변화가 없음

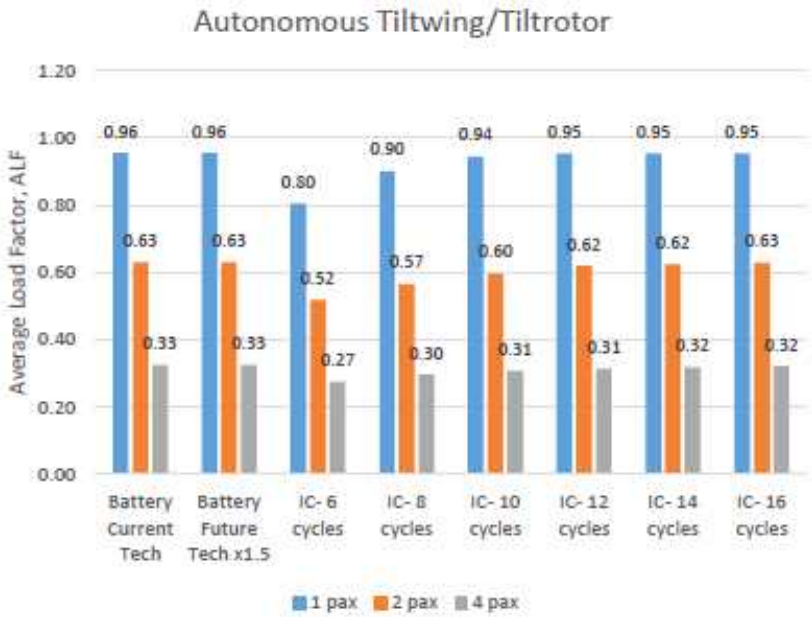


그림 251 자율 틸트윙/틸트로터 비행체의 ALF; 사이징 사이클 수 변화

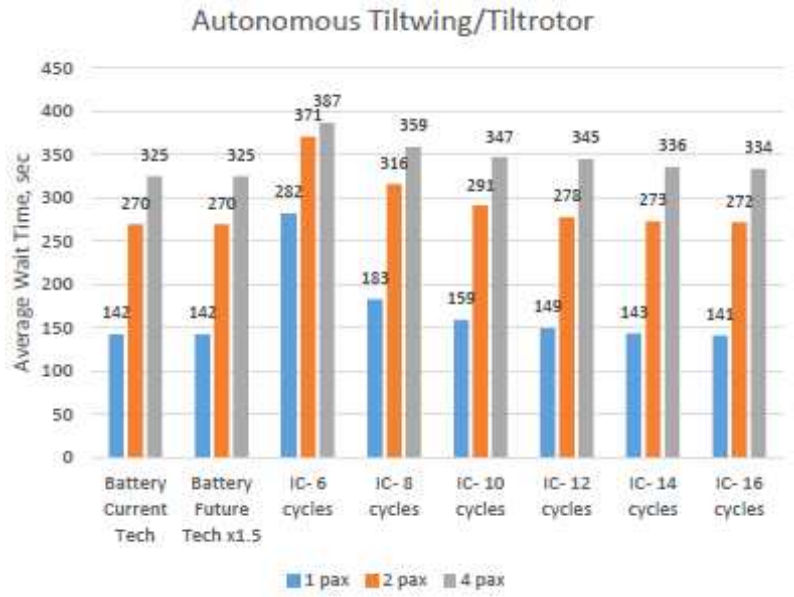


그림 252 자율 틸트윙/틸트로터 비행체의 평균 대기 시간(초); 사이징 사이클 수 변화

- 모델 한계
  - 현재의 모델은 순전히 주문형 운영을 전제로 하고 있는데, 실제로는 거의 확실히 그렇지 않을 것임. 여행이 며칠, 몇 시간, 몇 분 또는 심지어 단 몇 초 전에 예약될 수 있기 때문에, 이 정보는 UAM 네트워크 주변에 더 전략적으로 항공기를 배치하고 수요를 더 잘 충족시키기 위해 배치 모델에 의해 사용될 수 있음
  - 다만 사전 계획된 여행을 고려한 배치 모델은 시행하기가 더 복잡함. 실제적으로 좋은 배치 모델은 잠재적 사업자에게 경쟁적 경제적 우위를 나타낼 가능성이 높기 때문에 배치 모델은 광범위한 개발의 대상이 될 것임. 궁극적으로, 순수 주문형 모델에서 위에 제시된 결과는 사전 계획된 여행 정보에 접근할 수 있는 보다 지능적이고 복잡한 배치 모델에서 네트워크 성능이 낮아질 가능성이 있음

2-1-⑯. 비용 및 이산화탄소 배기가스 연구

○ 비용 모델링 구조

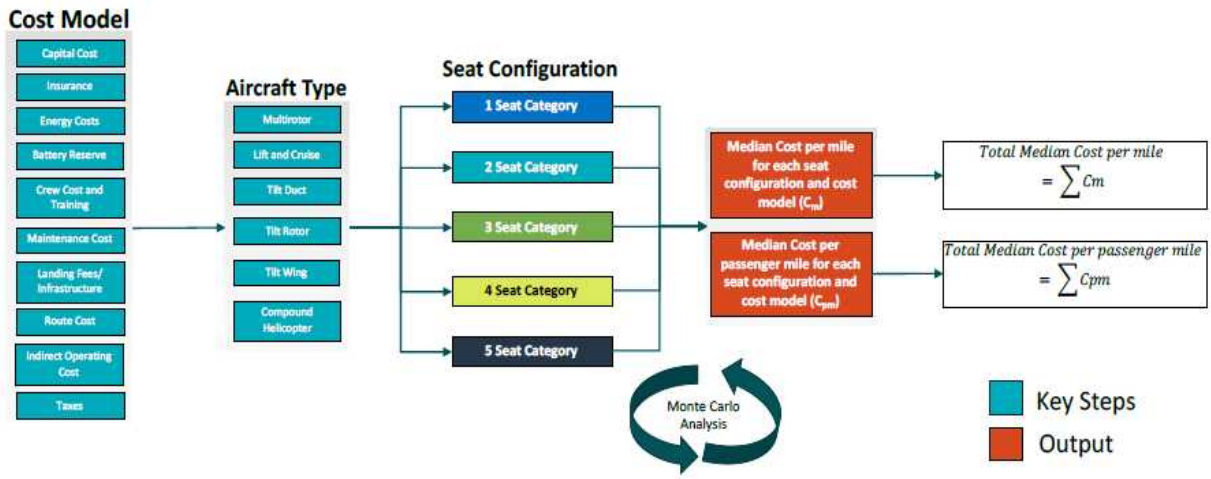


그림 253 비용 모델 구조[31]

- 비용 모델은 1-5 시트 구성에서 6가지 유형의 eVTOL에 적용됨. 운항 초기 몇 년 동안, 이 항공기를 운용할 수 있는 온보드 파일럿이 있다. 파일럿은 한 좌석을 차지하므로, 각 eVTOL은 승객을 위한 한 좌석을 더 적게 사용하므로 1인승 항공기는 사용할 수 없는 것으로 가정함.

특정 좌석 범주의 경우 각 항공기 유형에 대해 승객 마일(또는 차량 마일)당 비용이 별도로 계산되고 중앙값은 해당 좌석 범주의 승객 마일(또는 차량 마일)당 비용을 나타내는 6개 항공기 유형의 비용 번호에서 계산됨

- 이 섹션에서는 비용 모델을 설명하고 비행체 사이징 섹션에 기술된 다양한 비행체의 평균 승객당 km당 비용을 추산하며 네트워크 모델 섹션에 기술된 UAM 네트워크에서 운영함. 이러한 비용는 취득비용 모델, 에너지 비용 모델, 유지보수 비용 모델, 보험 비용 모델에 기초하며, 이 모든 비용는 아래에 기술되어 있음

○ 비용 모델 가정

- 네트워크 모델에서 설명한 네트워크에서 운영하는 서로 다른 개념의 비행체의 궁극적인 승객당 km 비용을 추정하기 위해 사용되는 비용 모델을 설명함. Booz Allen Hamilton의 취득비용 모델[141], 전기 및 기타 연료의 가격에 기초한 에너지 비용 모델[105], 참고 문헌[141]으로부터 도출된 유지보수 비용 모델, 보험 비용 모델, 그리고 조종사 급여 모델(해당되는 경우)이 포함됨

- 취득비용

  • 총 취득 비용은 전기 항공기든 하이브리드 전기 항공기든 해당 항공기에 맞먹는 배터리 비용과 항공기 비용을 합한 것으로 모델링함. 기체 취득 비용은 참고 문헌[141]에 제시된 UAM 비행체 개념의 통합 비용 선형 추정치에 기초함. 취득비용(배터리 비용 제외)은 아래 식과 같이 MTOW와 관련됨

$$rcraft\,Acquistition\,\mathrm{cost} = \frac{250{,}000}{750} \times MTOW \tag{26}$$

  • 배터리 비용은 비행체 사이징 과정에서 출력되는 설계 용량에 의존하고 있음. 비행체 배터리는 Holden and Goel[11]에 의해 제안된 $400/kWh에 판매될 것으로 판단됨. 취득가격은 IC, 터빈, SOFC에 대해 명시적으로 산출되지 않고 대신 위 식에서 계산된 것으로 가정함. 이러한 부품 비용을 해결하기 위해서는 모델에 대한 추가 작업이 필요함

- 운용비용

  • 항공기 운용비용 모델의 주요 구성 요소로는 비행체 구입비용 감가상각, 에너지 비용, 유지보수, 보험, 배터리 교체, 조종사 급여(시범 차량 추정) 등이 있음. 비행체 구입비용은 최초 계약금 40%에 배분된 후 비행체 수명 10년에 걸쳐 연 6%의 이자율로 매년 지급되는 것으로 가정함[141].

  • 에너지 비용은 에너지 종류뿐만 아니라 사용량에 따라 달라짐. 에너지 사용은 비행체 구성뿐만 아니라 네트워크 역학에 의해 결정됨. 즉, 네트워크가 더 효율적으로 운영할수록(즉, ALF가 높을수록), 필요한 에너지는 줄어듦. 아래 표는 모델에 사용된 에너지원과 각각의 비용을 포함함. 이 모델에서는 완전 배터리 구동 비행체만 충전이 필요한 것으로 가정함. 다른 모든 비행체는 하이브리드 전기지만 전기 그리드에서 충전이 필요하지 않음. 배터리의 수명은 2000 사이클이고 구입비용은 400달러/kWh인 것으로 가정함[105]

  • UAM 비행체는 시간당 60달러의 유지 관리 부대 비율(wrap rate)(노동력 + 오버헤드)[141]로 비행시간당 1시간의 유지보수가 필요한 것으로 가정함[142]. 재래식 민간 헬리콥터의 보험요율에 근거하여, 보험은 연간 비행체 구입비용의 약 3%로 추정됨[141]. 조종사 비용을 산정하기 위해 조종사는 연간 5만 달러의 급여를 받는다고 가정하며, 이는 지역 항공사 조종사의 급여에 버금감. 또한, 교대조정을 감안하여 네트워크 비행체보다 50% 더 많은 조종사가 있어야 한다고 규정되어 있음[11]

  • 마지막으로 DOC는 앞서 언급한 운용비용 요소와 더불어 평균 네트워크 좌석 이용률, 비

행체당 좌석 수, 평균 항속거리 및 각 비행체에 대해 연간 250일의 가정한 운영 기간에서 도출됨. DOC는 티켓 가격을 부분적으로 결정할 것이기 때문에 UAM 비행체 및 운영 전반의 실현 가능성을 보여주는 우수한 지표임

표 47 에너지 비용

에너지 유형	비용
전기	$0.036/MJ[105]
LNG	$0.019/MJ[105]
디젤	$0.025/MJ[105]
CNG	$0.018/MJ[143]
jet-A	$0.031/MJ[105]

○ 비용 및 탄소 배출 결과

- 직접 운용비(DOC)

  - 앞에서 설명한 비용 모델과 네트워크 운영 모델을 사용하여 틸트로터/틸트윙 비행체에 대해 DOC를 추정하였음. 네트워크 운영은 단일 임무에 해당하는 전기 항공기로 모델링되었으며, 20분 순항 부분으로 중앙 집중식 급유소에서 연료를 주입한 비행체를 재충전할 수 있으며, 8회의 비행 사이클을 수행할 수 있는 크기였다는 점을 상기해야함
  - 또한 배치 모델 결과 섹션에 제시된 ALF는 DOC 계산에 사용되며, DOC 계산은 아래에 제시된 이해가 어려운 결과의 일부를 이해하는 데 도움이 되는 중요한 포인트임. 틸트로터/틸트윙 구성은 취득비용 비교를 바탕으로 선택되었으며, 이는 이 구성이 최저의 취득비용 비행체를 선택할 수 있음을 나타냄
  - 마찬가지로 배터리, LNG 및 디젤 연료를 사용하는 틸트로터/틸트윙 항공기 변종만 위의 연구에 따르면 이러한 에너지 저장 유형이 가장 낮은 비용 또는 가장 낮은 CO2 배출량을 가지고 있다고 평가되었음
  - 아래 첫 번째 그림은 현재 배터리 기술, 미래 배터리 기술(현재 특정 에너지의 1.5배), LNG w/IC, LNG w/터빈, 디젤 IC 및 디젤 터빈에 대해 조종사가 있는 1인승, 2인승 및 4인승 차량에 대한 DOC를 $/(pax*km) 및 $/(pax*mi)로 나타냄. 디젤/IC와 LNG/IC는 상대적으로 원가가 가까움. 모든 하이브리드 구성은 중앙 저장소에서 연료를 재충전할 데드헤드 항공편이 더 많음에도 불구하고(동일한 승객 규모에서 비교했을 때) 기존 배터리보다 DOC가 낮음(즉, ALF가 더 낮음). 또한 대부분의 하이브리드 구성도 1.5배터리 케이스보다 DOC가 낮음. 가장 낮은 DOC는 모든 승객 크기에 걸쳐 LNG가 장착된 IC 엔진임
  - 자율 비행체에 대한 추정 DOC는 아래 두 번째 그림과 같음. 추정 DOC는 여러 가지 이유로 아래 첫 번째 그림과 두 번째 그림을 비교함으로써 관찰할 수 있듯이, 시범 비행체보다 자율비행 시스템 사용 시 상당히 적음. 첫째, 시범 급여는 자율적인 경우 0임. 둘째, 차량의 좌석이 1개 적으며 따라서 크기가 작아 구입, 보험 및 에너지 비용이 낮아짐. 자율비행 시스템 자체의 비용 자체가 비행체 구입비용의 차이에 포함되지 않기 때문에 아래 두 번째 그림에 제시된 수치는 실제 예상한 수치보다 낮을 수 있다는 점에 유의함. 또 사고율이 낮아진다고 가정했을 때 자율항공기의 보험률은 다를 가능성이 높지만 이 역시 포함되지 않았음
  - 하이브리드 시스템의 크기에 사용된 비행 주기 수 또한 고려되었으며, 운항 회수를 변화시킬 때의 DOC 추정치는 아래 세 번째 그림에 나타나 있음. LNG/IC 시스템이 모든 시스템에 대해 가장 낮은 DOC와 하이브리드 시스템 중 가장 낮은 CO2 배출량을 보였기 때문에 LNG/IC 옵션만을 사용하여 운항 회수의 영향을 평가하였음. DOC 관점에서 약 8~10회의 비행 주기가 최적인 것으로 보이며, 이는 두 가지 경쟁 효과 때문임. 첫째, ALF는 운

항 회수 사이클 수가 증가함에 따라 증가하는 경향이 있어 DOC가 감소함. 그러나 비행체의 중량은 비행체의 크기에 사용되는 운항 회수 사이클 수가 증가함에 따라 증가하며, 이로 인해 연료가 더 많이 사용되어 DOC가 증가하게 됨. DOC를 최소화하는 정확한 주기 수는 각 특정 네트워크와 배치 모델에 따라 다를 수 있음

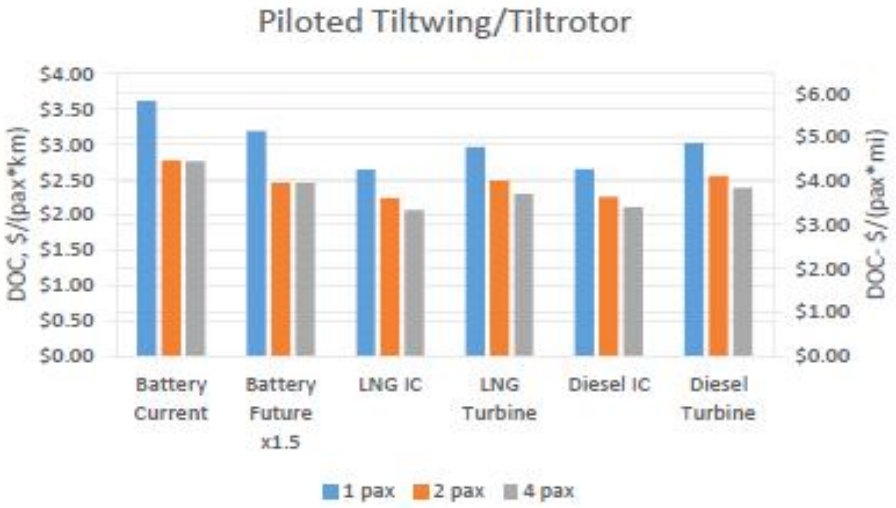


그림 254 1, 2, 4인승용 조종사가 있는 틸트윙/틸트로터 UAM 비행체 DOC

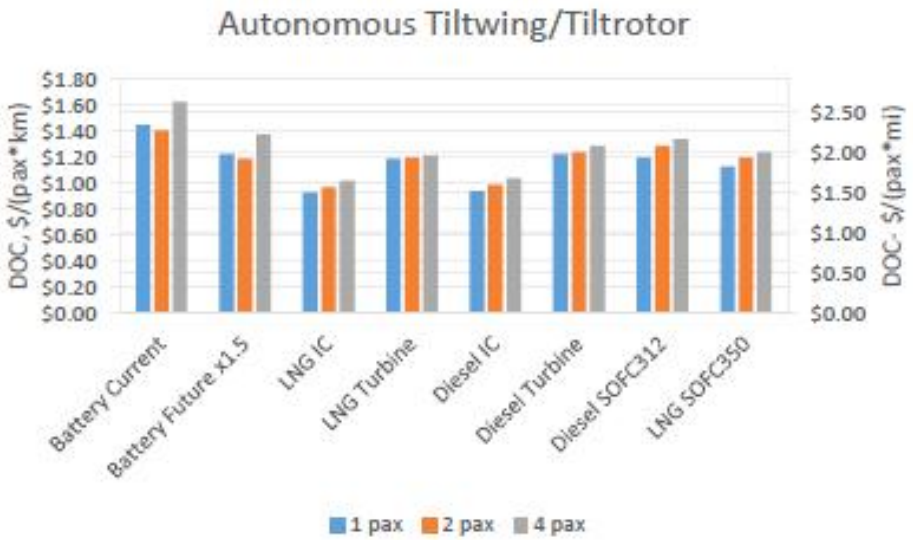


그림 255 1, 2, 4인승용 자율 틸트윙/틸트로터 UAM 비행체 DOC

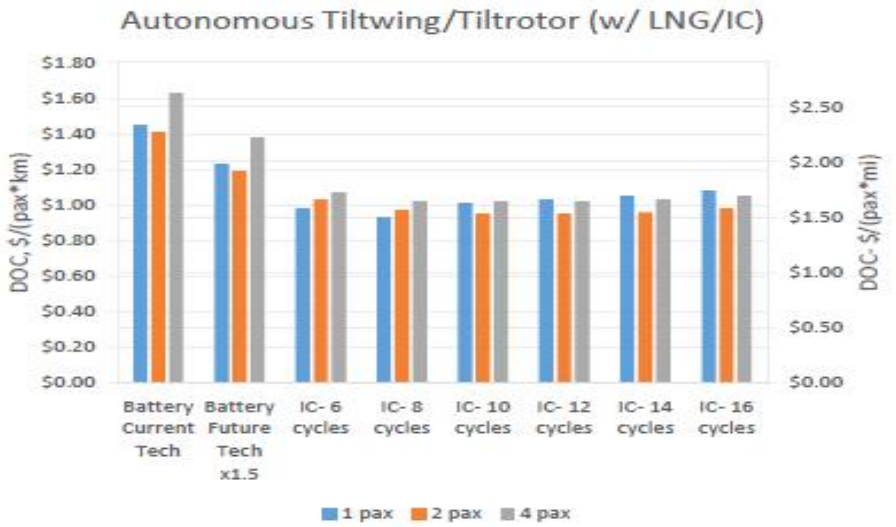


그림 256 LNG/IC를 사용하는 1, 2, 4인승에 대한 다양한 비행 주기에 대한 자율 틸트윙/틸트로터 비행체 DOC; 배터리는 1 사이클

- SOFC (Solid Oxide Fuel Cell: 고형산화물 연료전지)의 기술 수준, 즉 비출력의 변화도 조사하여 SOFC가 배터리 및 IC 엔진에 비견될 수 있는 기술 수준을 결정했음. 단기 디젤 연료 SOFC는 312 W/kg, 단기 LNG 연료 SOFC는 350 W/kg으로 고려되었음
- LNG 연료 SOFC 시스템의 추가 비교는 중기적으로는 525 W/kg에서, 장기적으로는 700 W/kg에서 평가되었음
- 자율 틸트로터/틸트윙 항공기에 대한 DOC 추정치는 아래 첫 번째 그림과 같음. SOFC 옵션은 단기 및 장기 모두에서 배터리와 즉시 경쟁한다는 점에 유의해야 함. 700W/kg급 LNG SOFC는 LNG/IC 옵션으로 DOC에서 경쟁력이 있을 것임

- 탄소 배출 결과

- O 는 아래 두 번째 그림부터 다섯 번째 그림까지 g/(pax*km) 단위로 나타냄. CO_2는 ALF가 떨어지기 때문에 승객 수에 따라 증가하는 경향이 있음
- 터빈 옵션은 이러한 낮은 효율 때문에 CO_2 배출이 가장 높음. LNG/IC 옵션은 현재 캘리포니아 그리드를 가정하여 계산된 배터리 옵션보다 CO_2 배출량이 약간 높을 뿐임
- 배터리와 마찬가지로 IC 엔진의 개선(예를 들어 터보 컴파운드 사용)과 매립 가스 및 기타 생물학적 메탄 발생원에서 LNG의 재생 가능한 생산을 통해 LNG/IC 옵션의 라이프 사이클 방출을 줄일 수 있음

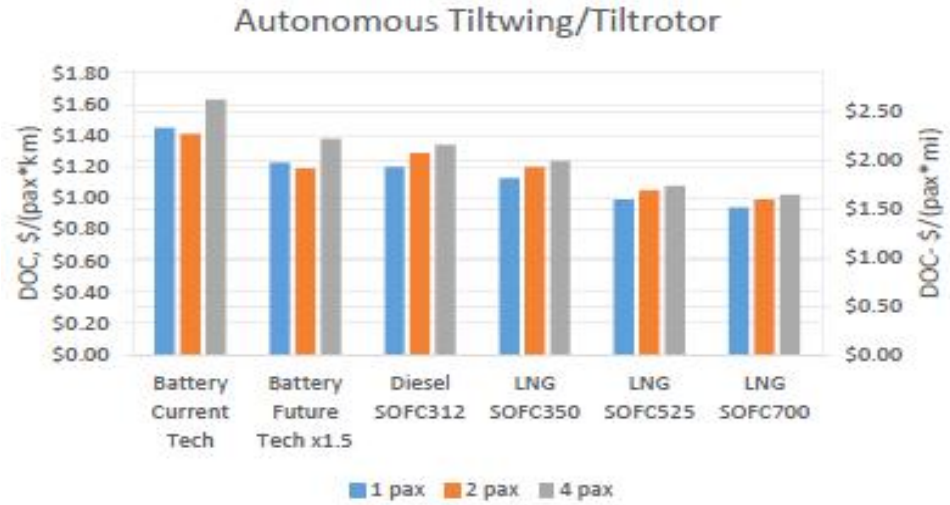


그림 257 SOFC 기술 수준이 다른 1, 2, 4인승 자율 틸트윙/틸트로터 비행체 DOC

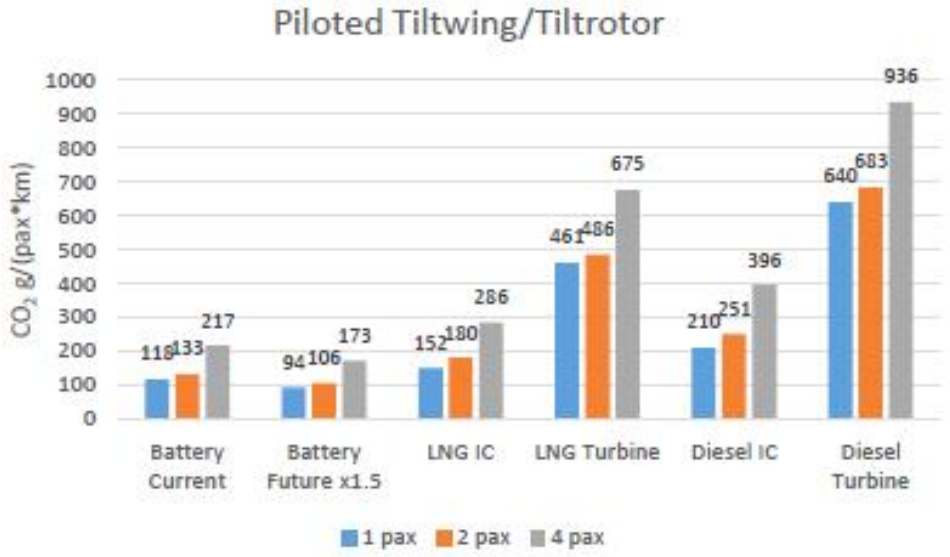


그림 258 1, 2, 4인승 조종사가 있는 틸트윙/틸트로터 UAM 비행체 CO2 배출량

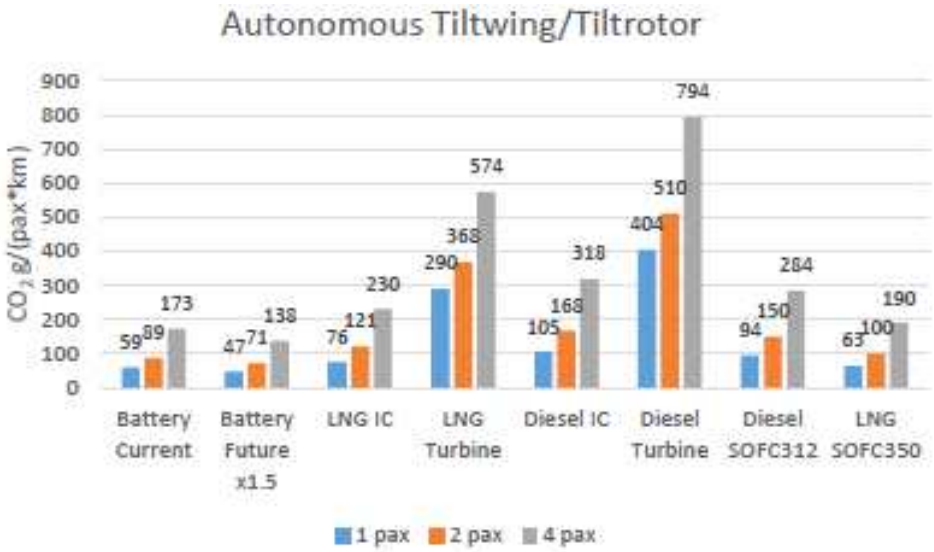


그림 259 1, 2, 4인승 자율 틸트윙/틸트로터 UAM 비행체 CO2 배출량

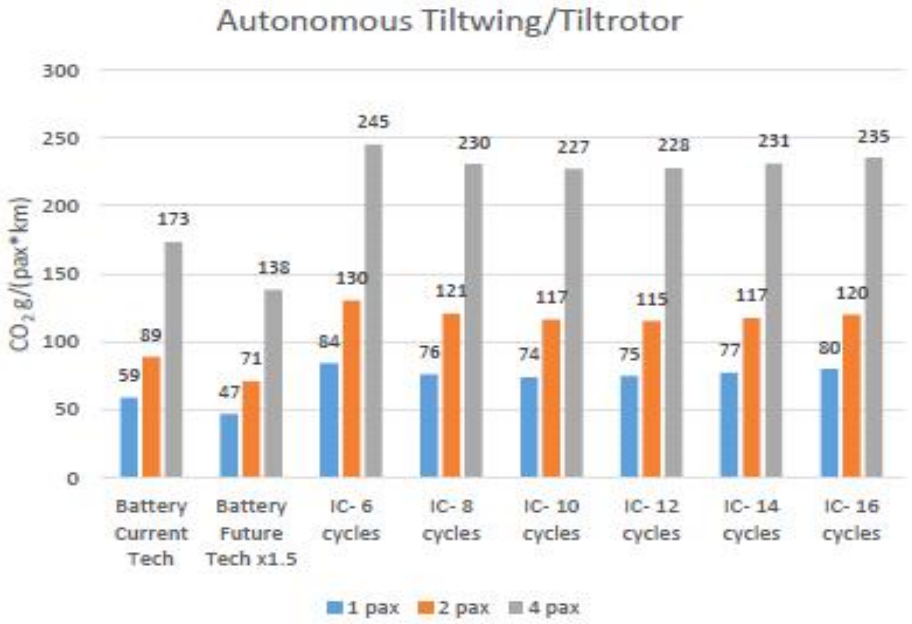


그림 260 비행 주기가 서로 다른 1, 2, 4인승 자율 틸트윙/틸트로터 비행체 CO2; 배터리는 1 사이클이고, 연료는 LNG

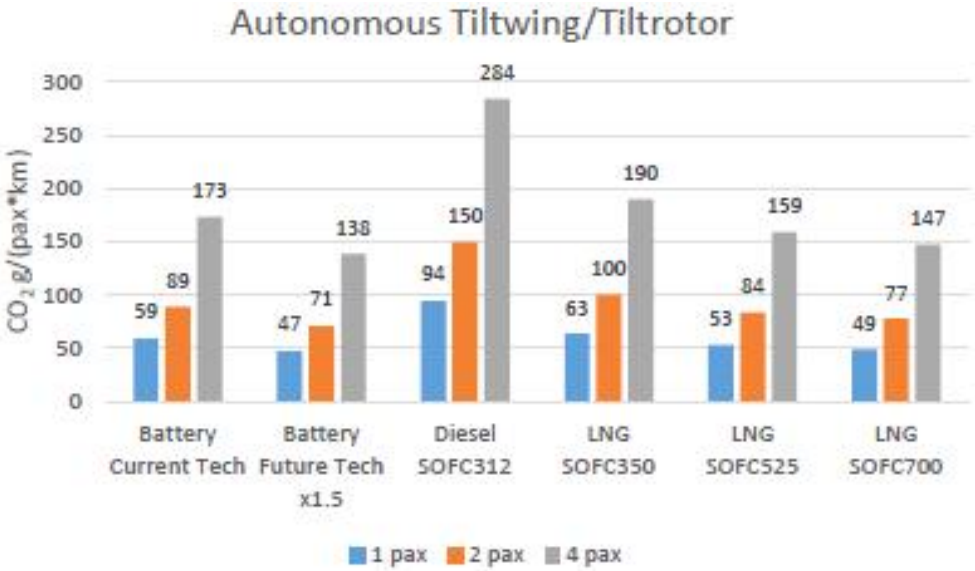


그림 261 SOFC 기술 수준이 다른 1, 2, 4인승 자율 틸트윙/틸트로터 비행체 CO2

- 위 그림에서 SOFC의 여러 기술 수준에 대한 O g/(pax*km)를 제시함. LNG를 탑재한 SOFC는 CO_2 기준으로 현재의 배터리 기술로 즉시 경쟁력이 있는 것으로 나타났음. SOFC 비출력을 개선하면 CO_2 배출량이 감소함. 또한 전기 그리드는 재생 에너지에 대한 투자로 시간이 지남에 따라 개선될 수 있기 때문에 장기적으로 배터리는 탄소배출을 줄일 수 있을 것임. 배터리를 탑재한 신재생 LNG와 재생 에너지는 탄소배출량 감소를 위한 최적의 경로로 보임

- 비용 및 탄소 배출량 교환

- 위의 결과는 배터리 비행체가 가장 낮은 탄소 배출을 제공하지만 하이브리드 비행체는 낮은 DOC를 제공하므로, 이러한 변수들 사이에 비교분석 연구가 필요함. 이러한 비교분석을 시각화하기 위해, 아래 그림에서 고려된 모든 기술에 대해 탄소 배출량을 DOC에 대해 도표로 표시함
- 이상적인 비행체 솔루션은 CO_2 배출량과 DOC를 모두 최소화한 솔루션일 것이므로 그림의 왼쪽 아래에 나타나는 디자인이 가장 유리함. 그림에서 보면, 자율비행 비행체가 CO_2 배출량과 DOC를 모두 줄일 수 있는 잠재력을 제공한다는 것은 분명함. 이 그림의 세 가지 자율 설계는 "Pareto 최적" 또는 "비 주도적(non-dominated)"임: LNG 연료 내연기관(DOC가 가장 낮음), 배터리 차량(CO_2 배출량이 가장 낮음), LNG를 연료로 한 SOFC(배출량과 DOC 사이에 "균형"된 설계)임
- 이러한 설계는 각각 잠재적인 장점을 가지고 있으므로 더 자세히 탐구해야 함. 데이터 지점 옆에 있는 번호(1, 2, 4)는 CO_2 및 DOC 번호에 도달하기 위해 차량의 크기가 조정되고 네트워크 운영 모델이 실행되는 승객 수를 나타냄

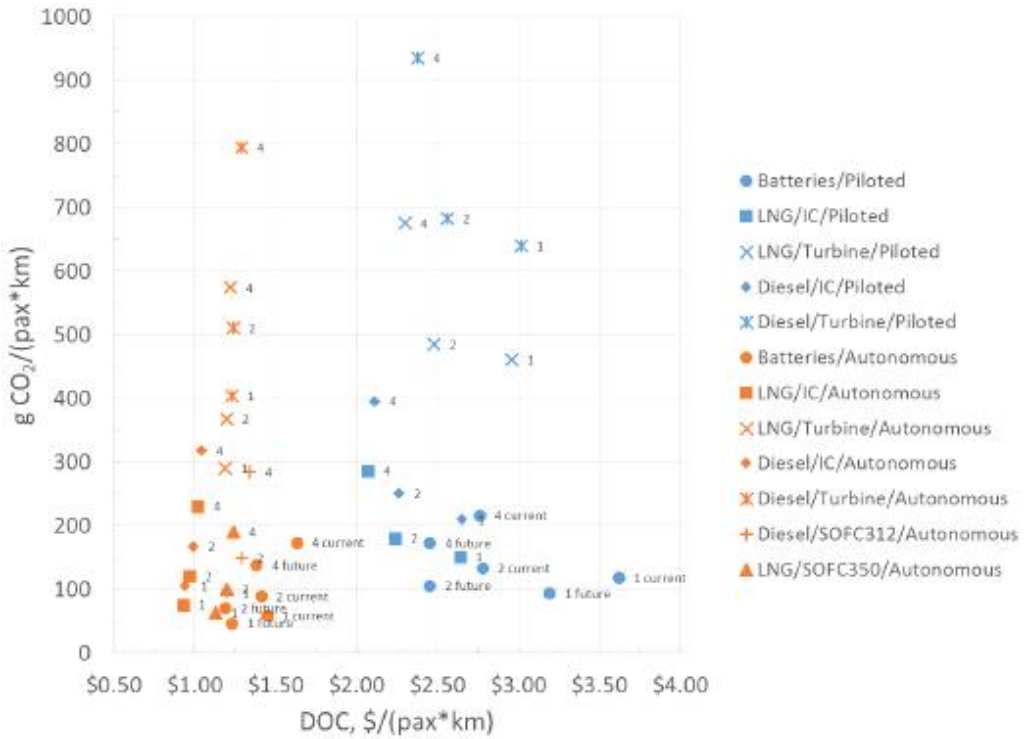


그림 262 다양한 기술에 대한 DOC에 대해 표시된 CO_2 배출량

○ UAM 모델링 결론

- 본 연구의 탐색적 모델링은 네트워크 주위로 항공기가 어떻게 배치되는지에 대한 운영자의 의사결정이 UAM 항공기 운용비용에 큰 영향을 미친다는 것을 입증했음. 순수 주문형 운행의 경우, 각 항공편의 유료 탑승객 수를 최대화하고, 항공편 출발 전에 승객이 기다려야 하는

시간을 최소화하는 방식으로 다인승 비행체를 운행하는 것은 어려움

- 사업자들이 네트워크의 효율성을 극대화하기 위해서는 수요에 기반한 가격 책정, 사전 예약 허용 또는 장려 등의 전략이 실제적으로 고효율 네트워크를 실현하여 DOC의 감소를 초래할 수 있음
- 또한, 본 연구에서 배치 모델의 구현은 전체적인 ALF 감소로 인해 순수 주문형 UAM 네트워크에서 운영할 때 객석의 수가 증가함에 따라 비행체 DOC가 눈에 띄게 증가할 수 있다는 직관적 결과를 나타냈음
- UAM 문헌에 근거한 비행체 특성에 대한 높은 수준의 가정을 바탕으로 본 모델링을 통해 추진 시스템 형식과 관계없이 틸트로터/틸트윙형 비행체가 UAM 항공기에 가장 적합할 가능성이 높다는 것을 알 수 있음
- 배터리 비행체를 원하는 경우 리프트+크루즈형 비행체도 적합할 수 있지만 멀티로터와 여러 개의 수직이착륙용 로터로 구성된 실제 비행체는 실제로 만들지 못할 수 있음. 설계자가 본 연구에서 연구한 것보다 효율적인 버전을 만드는 방법을 찾을 수 있다면, 이러한 일반화는 더 이상 유효하지 않을 수 있다는 점에 유의해야 함
- 순수 전기 비행체와 하이브리드 전기 비행체 유형에서 서로 다른 추진 시스템을 비교할 때, 내연 엔진은 배터리 전용, 터빈 및 SOFC와 비교할 때 가장 낮은 DOC 옵션을 제공함. LNG를 연료로 사용하면 디젤이나 제트-A 연료를 사용하는 비행체보다 비용이 저렴한 비행체로 이어질 가능성도 있음
- 배터리 비행체는 캘리포니아 그리드를 가정할 때 가장 낮은 탄소 배출량을 제공함. 또한 배터리 비행체는 충전된 전기 그리드에서 더 적은 양의 탄소를 방출할 경우 훨씬 더 낮은 배출량을 가질 수 있음
- LNG 연료를 사용하는 단기 SOFC 기술(350 W/kg)은 IC 엔진 및 배터리와 비교할 때 DOC와 O 배출량의 균형을 맞출 수 있는 잠재력을 제공함. 특히 LNG/SOFC 시스템은 430Wh/kg 정도의 향후 배터리 솔루션보다 약간 높은 낮은 DOC를 제공할 수 있음. 또한 LNG/SOFC 시스템은 IC 엔진 솔루션보다 CO_2 배출량은 낮지만 DOC는 약간 더 높을 수 있음

2-2. 도심 항공 공유기반 모빌리티(ODM: On-Demand Mobility)의 수도권 적용 연구

2-2-①. 데이터 수집 및 표현

○ 수직이착륙장 위치 선정 및 특징 분석

- 수직이착륙장은 공항, 고속도로 나들목, 한강 둔치, 고층 건물 옥상 등 다양한 곳에 설치될 수 있으나 각 지역의 특성에 맞는 설계가 필요함
- 나들목은 차량 접근성 좋고 공간 활용성이 높아 수직이착륙장으로 활용하기에 용이하며 주변에 비행체가 이착륙하기에 방해될 여지가 적고 건축물을 높게 하여 휴게시설, 졸음쉼터 등으로도 활용 가능하다는 장점이 있음. 한강 둔치는 주로 공원 및 여가생활 공간으로 사용되고 있으며, 한강은 서울의 중심을 지나고 있기 때문에 전반적으로 접근성이 좋음. 공항의 경우, 기존의 공역 관리 시스템과 관제 등을 쉽게 이용할 수 있으며 이미 확보되어 있는 부지를 활용할 수 있음. 김포공항과 인천공항 등에 아래 그림과 같이 게이트와 별도의 주기장을 보유하고 있는 이착륙장을 설치하여 수송 인원을 크게 늘릴 수 있음



그림 263 원격 계류장 배치 방식의 상파울루 캄포 데 마르테 헬기장[144]

- 정부에서는 K-UAM 로드맵에서[1] 비행체의 소음과 장애물, 비행 가능 구역 등을 고려하여 한강을 통과하는 노선을 포함한 수도권 지역 실증노선을 제시함. 김포공항, 뚝섬, 이촌, 잠원 한강시민공원, 서초 나들목의 부지를 수직이착륙장의 위치로써 검토함. 이 지역들은 아래 첫 번째 그림의 11개 한강공원 중에서 아래 두 번째 그림의 김포공항 노선에 근접하면서 수직이착륙장을 설치할 수 있는 충분한 부지가 있으며, 이착륙에 방해가 되지 않도록 가능한 다리에서 떨어져 있는 구역으로 선정함.



그림 264 11개 한강공원의 위치

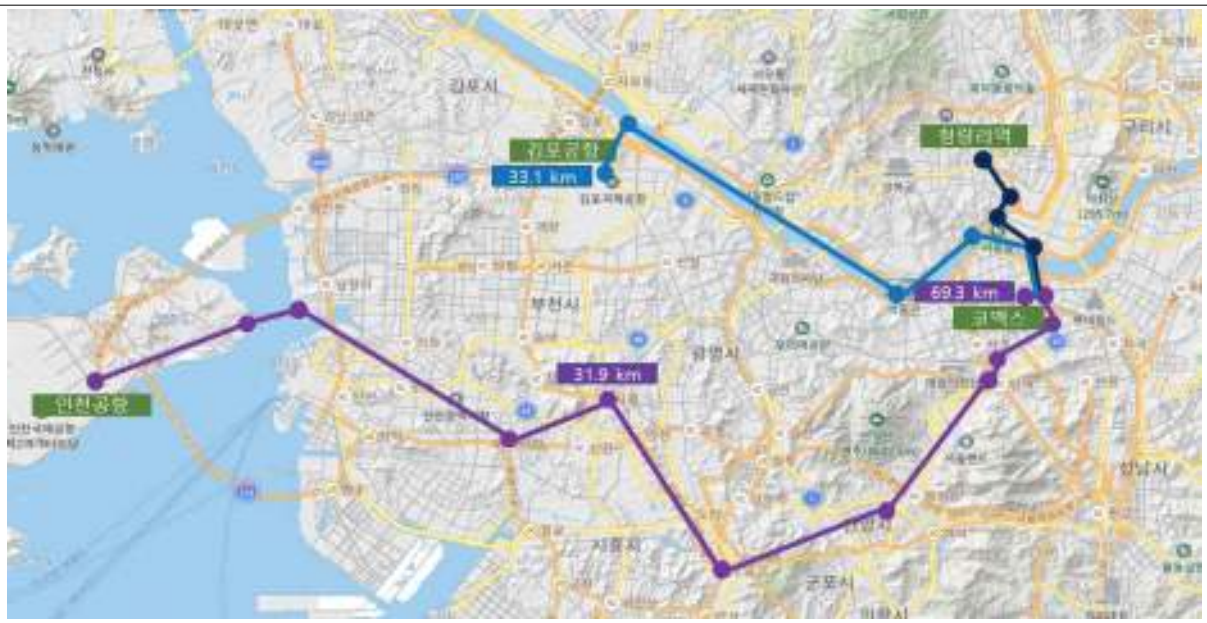


그림 265 국토교통부에서 제시한 수도권 지역 실증노선(안)[1]



그림 266 한화시스템에서 제시한 김포공항 버티허브 조감도[145]

○ 국내 실정을 고려한 수직이착륙장 위치 선정 기준

- 데이터 수집

- UAM이 우리 삶에 보편화된다면 가장 수요가 높을 것으로 예상되는 용도는 출퇴근용임. 출퇴근을 위한 PAV의 수요를 알아보기 위해 통계청에서 2015년도에 실시한 현 거주지/통근통학지별 통근 통학 인구수 조사를 토대로 데이터를 수집하였음[2]
- 수도권의 현 거주지와 통근 및 통학지는 총 79개의 시, 군, 구로 이루어져 있음. 이 데이터로부터 수도권 내에서 12세 이상인 통근 및 통학자 수가 약 14,335,975명이라는 것을 알 수 있음. 하지만 이들의 통근 및 통학지가 이들의 거주지와 같은 행정구역이라면 대부분의 경우 많은 시간이 소요되지 않는다는 점에서 통근자들이 PAV를 이용하지 않을 것이라는 가정을 하였음. 이러한 필터링을 통해 얻어진 데이터 수는 7,959,469명으로 축소되었음. 가장 많은 인구가 통근 및 통학하는 행정구역은 강남구로 총 609,119명이 다른 행정구역으로부터 통근 및 통학함
- 앞에서 구한 데이터들을 시각화하기 위해 MATLAB을 이용해 아래 그림과 같이 지도상에

표시하였음[3]. 각 행정구역에 할당된 데이터를 반올림하여 5,000명당 하나의 점으로 지도에 표시하였음. 이때 각 행정구역의 모양이 불규칙하여 단순하게 표현하고자 각 구역의 면적과 같은 크기의 정사각형으로 가정하여 나타내었음. 주요 행정구역들의 통근 및 통학자 수와 데이터 수를 아래 표에 나타냄

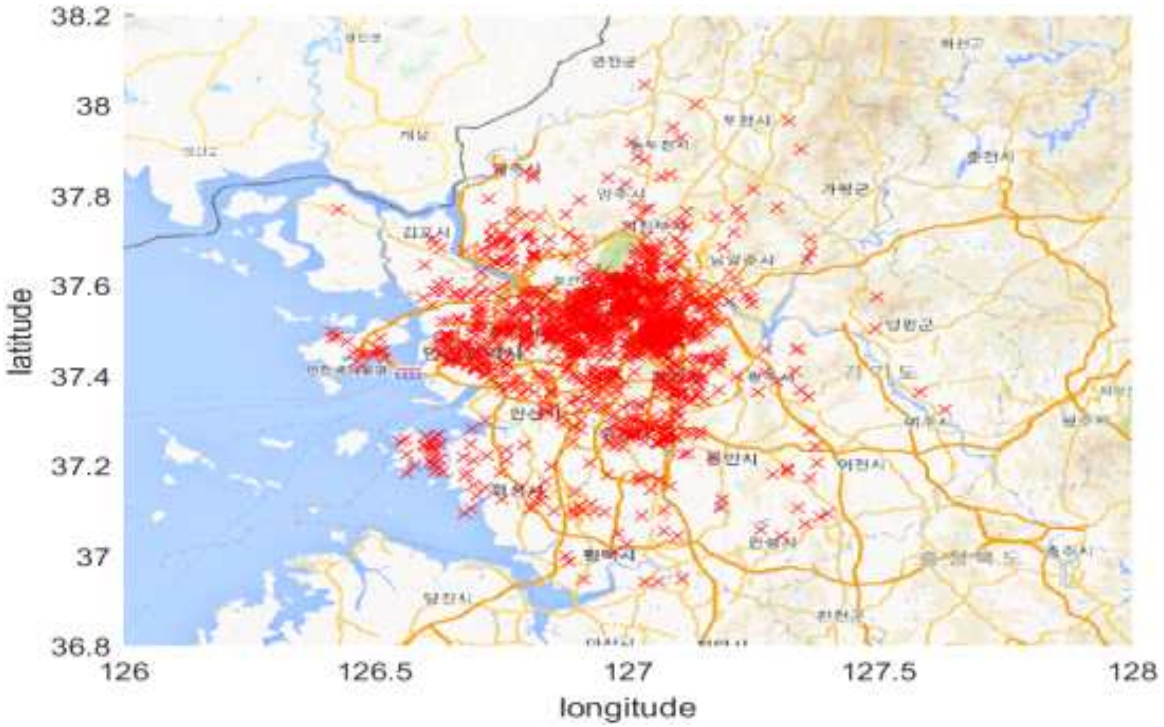


그림 267 MATLAB으로 표현한 각 행정구역별 통근 및 통학자 데이터

표 48 주요 행정구역들의 통근 및 통학자 수 및 데이터 수

District	Number of commuters	Number of data
Gangnam-gu	609,119	122
Jung-gu	352,261	70
Seocho-gu	300,469	60
Jongno-gu	282,783	57
Seongnam-si	231,130	46
⋮	⋮	⋮
Namdong-gu	112,460	22
Total	7,959,469	1,388

2-2-②. 교통상황 데이터 수집 및 시나리오 설정

○ 교통상황 데이터 수집



그림 268 차종별 지역별 통행 속도, 1984-2010[146]

- 아래 그래프는 차종 별 지역 별 통행 속도를 보여줌

- 1984년부터 오름과 내림을 반복하지만, 승용차의 속도는 계속해서 감소하는 경향을 보이며, 2010년 도심 내에서의 통행 속도는 18 ㎞/h 미만인 것을 알 수 있음

○ UAM 이용 경로 설정

- 아래 그림은 서울 내에서의 통행 속도와 교통량을 보여주며, 이를 바탕으로 출퇴근 시간대에 교통량이 많고 통행속도가 낮은 구간을 선정함

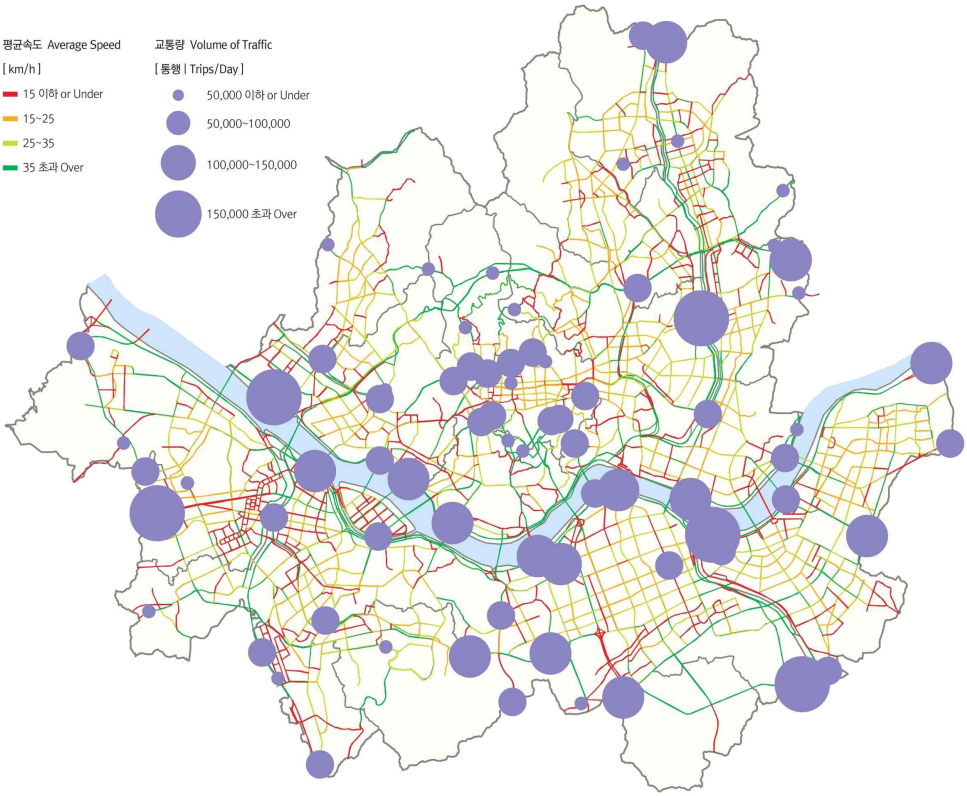


그림 269 통행속도 및 교통량 2012[146]

- 선정된 구간을 자동차, 지하철, 버스와 같은 기존의 교통수단이 아닌 UAM을 이용한다고 가정함
- 본 연구에서는 경부고속도로를 이용한 강남역에서 동탄 신도시까지의 경로, 경인고속도로를 이용한 부천에서 종로까지의 경로, 서울 도시고속도로를 이용한 서울시청에서 경기도 북부청사까지의 경로를 선정함
- 2017년 5월 22일부터 2017년 5월 26일까지의 출근시간대인 7시에서 9시와 퇴근시간대인 17시에서 19시까지의 평균 속도 데이터를 이용하여 평균적으로 이동하는 시간을 계산

• 경로 1 : 강남역 ~ 동탄 신도시

✓ 강남역에는 삼성화재, 삼성증권, KB 손해보험, 신한생명과 같은 많은 기업들의 본사가 위치해 있으며, 동탄 신도시는 인구가 증가하고, 근처에 화성 산업 단지가 있기 때문에 서울에 위치한 기업들과의 교류가 많을 것으로 예상함

✓ 강남대로에서 경부고속도로, 동탄기흥로를 이용한 경로

✓ 아래 표는 경기도 교통정보센터에서 제공하는 구간과 시간대별 자동차의 평균 속도를 나타냄. 달래내 고개에서 서초 IC까지의 구간이 오전 9시에 평균 속도 22.5 ㎞/h로 많이 지체됨

표 49 경로1 구간과 시간대 별 자동차 평균속도 (단위 : km/h)[147]

구간	7 A.M	8 A.M	9 A.M	5 P.M	6 P.M	7 P.M
수원IC ~신갈 JC	79.4	67.8	57.0	56.6	74.5	76.4
신갈 JC ~ 죽전휴게소	89.8	92.0	91.0	70.4	80.7	84.8
죽전휴게소 ~ 서울 T/G	86.8	89.2	90.0	66.8	61.2	78.6
서울 T/G ~ 판교 IC	85.2	84.8	84.5	63.4	48.7	70.6
판교 IC ~ 판교 JC	86.6	86.2	84.5	63.6	48.7	70.4
판교 JC ~ 달래내고개	61.8	50.0	48.0	61.2	59.7	56.0
달래내고개 ~ 양재 IC	40.4	33.8	22.5	28.8	25.2	22.8
양재 IC ~ 서초 IC	45.4	44.6	33.0	25.6	20.7	21.4

- 경로 2 : 부천 ~ 종로
  - ✓ 종로에는 교보생명, GS건설, 한국관광공사, 한국전력공사와 같은 많으 회사들이 밀집해있으며, 인천의 인구가 부천을 통해 서울로 출퇴근할 것으로 예상됨
  - ✓ 신촌로에서 선유로, 국회대로, 경인고속도로를 이용한 경로
  - ✓ 신월 IC에서 경인고속도로 입구까지의 구간이 오전 8시에 평균 20 km/h로 지체됨

표 50 경로2 구간과 시간대 별 자동차 평균속도 (단위 : km/h)[147]

구간	7 A.M	8 A.M	9 A.M	5 P.M	6 P.M	7 P.M
부천 IC ~ 신월 IC	46.6	55.6	57.0	56.4	41.0	53.0
신월 IC ~ 경인 고속도로 입구	22.7	20.0	18.5	42.4	46.3	47.2

- 경로 3 : 서울시청 ~ 경기도 북부청사
  - ✓ 의정부로 이어지는 노원구의 출퇴근 인구가 많을 것으로 예상됨
  - ✓ 금신로에서 동부간선도로, 왕산로, 종로를 이용한 경로
  - ✓ 동부간선도로 JC에서 노원교까지의 구간이 오후 5, 6시에 12 km/h로 지체됨

표 51 경로3 구간과 시간대 별 자동차 평균속도 (단위 : km/h)[147]

구간	7 A.M	8 A.M	9 A.M	5 P.M	6 P.M	7 P.M
동부간선도로 JC ~ 노원교	44.6	26.2	23.0	12.0	12.0	17.4
노원교 ~ 상계교	27.6	21.3	23.0	21.4	27.7	34.2
상계교 ~ 창동교	19.6	28.6	20.5	20.8	25.2	31.4
창동교 ~ 녹천교	19.3	23.3	20.0	20.8	22.5	32.6
녹천교 ~ 월계 1교	33.0	37.0	33.5	41.0	41.7	51.4
월계 1교 ~ 원릉 JC	37.3	52.6	54.0	79.0	79.0	78.8
원릉 JC ~ 중랑교	37.0	33.6	45.5	69.2	71.5	72.6
종암 JC ~월곡 램프	64.0	60.3	53.5	77.6	77.0	75.2

- 각 경로에 대해 평균 이동시간을 구하였을 때, 자동차를 이용한 경우 경로 1은 약 60분, 경로 2는 약 51분, 경로 3은 약 66분이 소요되고, 대중교통을 이용한 경우 경로 1은 약 118분, 경로 2는 약 99분, 경로 3은 약 78분이 소요됨

○ 시나리오 설정

- UAM 이용시 사용자의 출발지에서 목적지까지 이동하는 과정은 아래 그림과 같이 가정함

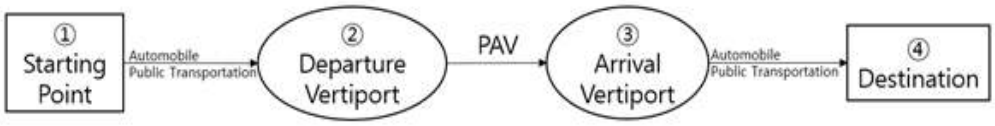


그림 270 ODM의 이동경로

- Starting Point는 사용자의 출발지를 의미하며, 출퇴근 시간대의 사용자는 자신의 거주지를 의미함
- Departure Vertiport는 자신의 출발지와 거리상 가장 가까운 UAM의 수직이착륙장을 의미함
- Starting Point에서 Departure Vertiport까지는 자신의 자동차를 이용하거나 버스와 지하철과 같은 대중교통을 이용하여 이동함
- Arrival Vertiport는 도착 수직이착륙장으로써 이용자의 목적지와 가장 가까운 UAM의 수직이착륙장을 의미함
- Departure Vertiport에서 Arrival Vertiport까지는 PAV와 같은 개인 항공기를 이용하며, VTOL PAV를 이용한다고 가정했을 때, 최대순항속도는 약 200km/h, 전기추진, 자율비행을 한다고 가정함
- Destination은 이용자의 최종 목적지를 의미하며, 이용자는 Arrival Vertiport에서 Destination까지 자동차나 대중교통을 이용하여 이동함
- UAM의 주된 이용자는 출퇴근 시간이 왕복 1시간을 넘는 사람들을 대상으로 하였으며. UAM의 Departure Vertiport와 Arrival Vertiport는 주로 각 경로에서 가장 가깝고 효율적으로 이용할 수 있는 건물의 옥상이나 도시고속도로의 입체교차로에 이착륙장을 건설한다고 가정함
- 건축법 시행령 제40조 3항 1조에 따라 층수가 11층 이상이며 각 층의 바닥면적의 합계가 1만 제곱미터 이상인 건축물의 옥상에는 반드시 헬리콥터와 같은 수직이착륙을 할 수 있는 헬리포트를 설치하도록 되어있기 때문에, 대부분의 경로에서 이러한 고층빌딩 옥상을 수직이착륙장으로 활용할 수 있을 것으로 예상됨
- 이러한 경로에 따라 UAM에 이용된다고 가정하였을 때 지정한 3개의 경로에서 수직이착륙장의 위치와 개수에 따른 이동시간을 계산하여 기존의 이동시간과 비교하였을 때 UAM 적용시 어느 정도의 효과가 있는지 분석함

2-2-③. K 평균 알고리즘 연구

○ 군집 추출 방식

- 통계학에서 데이터를 분류하는 방법인 군집의 추출방식에서는 계층적 방식과 비계층적 방식이 있음
- 계층적 군집화(hierarchical clustering)
  - 계층적 군집화는 나누고자 하는 군집의 개수를 먼저 정하는 것이 아닌 적절한 군집의 수에 따라 군집이 나누어지게 되며, 각 데이터들이 독립군집으로 출발하게 됨
  - 거리가 가장 가까운 어느 두 대상이 군집을 이루기 시작하여 가까운 군집들끼리 계속적인 군집화가 이루어지는 방법
  - 이 과정에서 계속적으로 군집의 개수가 감소하게 되며, 계층적 군집화에는 단일결합법, 완전결합법, 평균결합법, Ward법이 있고 이들은 군집들 간의 거리계산방식에서 차이가 있음[148]
  - 단일결합법은 최단거리를 기준으로 하며, 완전결합법은 형성된 군집과 다른 군집의 거

리를 계산할 때 최장거리를 기준으로 함

- 평균결합법은 한 군집의 모든 데이터로부터 다른 군집의 모든 데이터까지 거리의 평균을 기준으로 함
- Ward법은 앞의 세 방법과 동일하게 최단거리를 기준으로 군집화가 진행되지만 군집간의 거리를 계산하는 방식이 다름. Ward법은 두 군집가의 거리는 두 군집에 속한 각 데이터가 평균으로부터 떨어진 정도, 즉 '편차'의 제곱을 그 군집을 구성하는 대상들에 걸쳐 합한 것으로 구함

- 비계층적 군집화(nonhierarchical clustering)

- 군집의 개수가 한 개씩 감소하는 것이 아니라 사전에 정해진 군집의 숫자에 따라 대상들이 군집들에 할당되는 것임
- 예를 들어, 계층적 군집화의 경우 6개의 군집해(six-cluster solution)은 7개의 군집해에서 어느 두 군집들이 결합을 하는 것인 데 비해, 비계층적 군집화에서는 6개 군집해는 가증한 모든 6개의 군집해들 중에서 최상인 것임
- 비계층적 군집화의 방법은 대표적으로 k-평균(k-means)이 있으며, 여기서 k는 군집의 수를 의미함. 이 방법은 사전에 명시된 한정거리(threshold distance) 이내에 있는 대상들이 각 군집의 중심으로 군집화가 이루어짐
- 다음으로 또 다른 군집의 중심이 정해지고 같은 방식으로 군집화가 진행되지만, 어떤 대상이 사전에 한 군집에 속해졌더라도 새로운 군집의 중심에 가까우면 이 대상은 새로운 군집에 할당됨

- 계층적 군집화인 Ward방법과 평균결합법은 과거 군집화로 많이 이용되었지만 몇 가지 한계점 존재
- 먼저, 한 대상이 어느 군집에 소속되면 다른 군집으로 이동될 수 없으며, 예외값이 제거되지 않고 어느 군집에 반드시 속하게 된다는 문제점이 있음
- 따라서 이러한 문제를 해결하기 위해서는 예외값을 갖는 대상을 제거하고 군집화를 진행해야함. 따라서 최근에는 계층적 군집화보다 비계층적 군집화 방법이 더 많이 사용되고 있음. 비계층적 군집화는 계층적 군집화가 가지는 문제점은 없으나 군집화를 시작하기 전 군집의 개수를 미리 정해주어야 함

○ K 평균 알고리즘 연구

- 앞에서 수집한 데이터들은 각 행정구역별 통근자들의 수이지만 이는 UAM이 상용화됐을 때 PAV의 수요와 밀접하게 관련이 있음. 따라서 그들의 수요에 충족하는 적절한 위치에 수직이착륙장이 위치해야 함. 이를 위해 군집화(clustering)를 하여 MATLAB으로 표현하였고[3], 이때 사용된 기법은 K 평균 알고리즘임. K 평균 알고리즘은 데이터들을 k개의 군집으로 군집화하는 것으로 가장 일반적으로 사용됨. 군집화 과정을 통해 주어진 데이터들과 각 데이터들이 할당된 군집 중심 사이의 평균 제곱 유클리드 거리를 최소화함. 여기에서 군집 중심은 아래 식과 같이 cluster ω에서 데이터들의 mean or centroid μ로 정의됨[4]

$$\mu\ \omega)= \frac{1}{|\omega|}\sum_{x\in\omega}\vec{x} \tag{27}$$

- Centroid가 군집들의 데이터들을 얼마나 잘 나타내는지에 대한 척도는 아래 식과 같이 모든 벡터와 각 벡터의 군집 중심 사이 거리 차의 제곱 거리인 잔차제곱합(RSS; residual sum of squares)이고, 이 값을 줄이는 것이 K 평균 알고리즘의 목적임[4]

$$SS \quad _{=1}\sum_{x\in\omega} \vec{x}-\vec{\mu}\ \omega_k)\big|^2 \tag{28}$$

- K 평균 알고리즘에서 가장 중요한 것은 k라는 매개 변수를 초기에 지정해주어야 하는 것과 데이터들이 할당된 군집 중심들의 위치가 변하지 않을 때까지 군집을 구성하는 전체 과정이 반복된다는 것임. 반복 과정은 앞에서 데이터들을 표현한 MATLAB의 kmeans 함수를 이용해 간단하게 수행할 수 있지만 매개 변수 k 값 지정에는 다소 어려움이 있음. 앞에서 언급한 바와 같이 k는 군집의 개수이면서 수직이착륙장의 개수임. 즉, 군집화를 위해서는 수직이착륙장의 개수를 먼저 정해야 하고 그 수치를 이용해 군집화를 진행해야 함
- 군집화를 진행하기 위한 대략적인 k 값을 정하는 Rule of thumb[149]이나 군집의 개수인 k 값을 순차적으로 늘리면서 결과를 확인하는 Elbow method 등을 이용해 임의의 k 값을 지정할 수 있지만, 독일의 Porsche Consulting에 따르면 2,100만 명의 인구를 보유한 브라질 상파울루에서 UAM이 완전 상용화 시 자가용, 대중교통, 출퇴근 등 다양한 교통수단을 대체하기 위해 약 1,050대의 PAV가 필요하고, 수직이착륙장 같은 경우 기존의 교통중심지에서 헬리패드를 활용할 것이라 밝힘. 또한 초기에는 120대의 eVTOL을 위한 5개의 수직이착륙장을 계획하였으며, 이후 수직이착륙장의 개수를 40개로 늘리고 최종적으로 100개까지 늘릴 수 있다고 함[12]. 이 자료를 토대로 비슷한 인구수를 보유한 우리나라 수도권도 상파울루와 비슷한 100개의 수직이착륙장이 적절할 것으로 판단됨
- K 평균 알고리즘을 통해 데이터들을 k 값이 5, 40, 100일 때로 나뉘어 군집이 어떻게 형성되는지 아래 세 그림과 같이 나타내었음. 각 군집 내 데이터들은 같은 색의 점으로 지정되고, k로 지정된 수직이착륙장은 검정색 별로 나타냈음

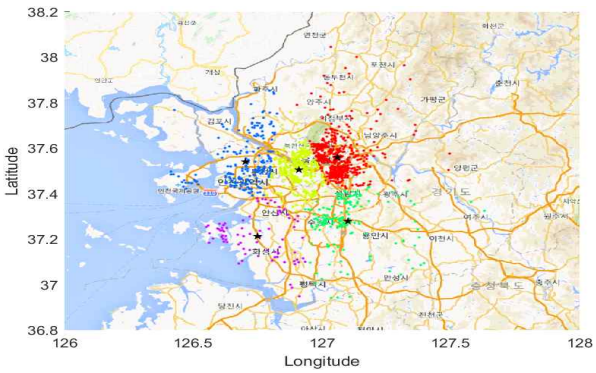


그림 271 수직이착륙장의 개수가 5개일 때 군집화 결과

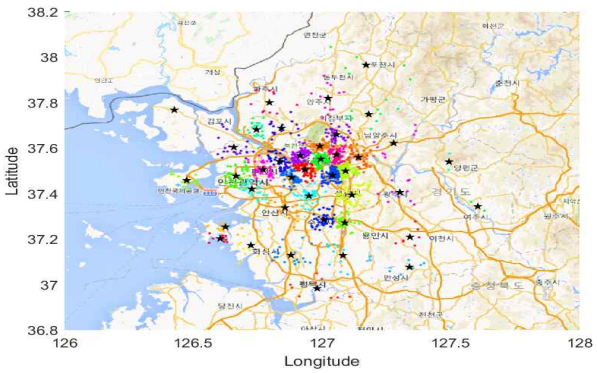


그림 272 수직이착륙장의 개수가 40개일 때 군집화 결과

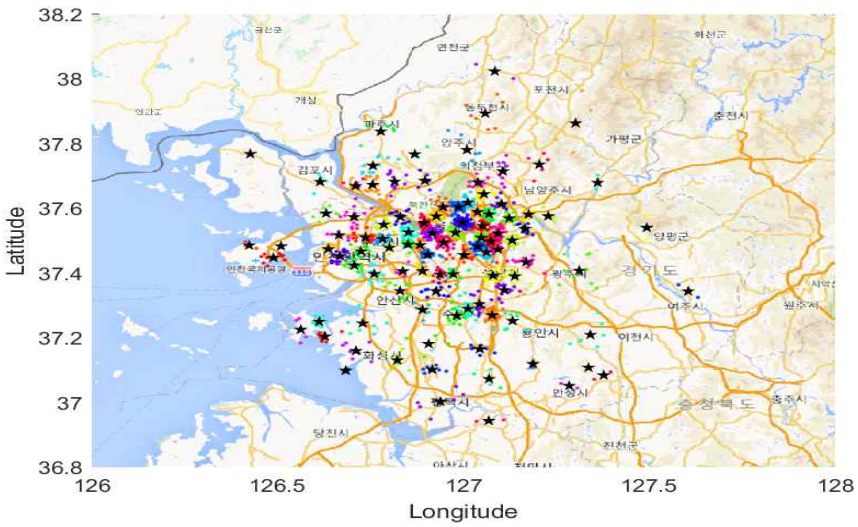


그림 273 수직이착륙장의 개수가 100개일 때 군집화 결과

- 수도권에 수직이착륙장 인프라를 구축하기 위한 다양한 방법이 있지만, 대부분의 경우 도심지여서 막대한 비용이 요구될 것임. 따라서 정확한 수직이착륙장의 개수, 즉 k라는 매개 변수를 잘 지정하는 것이 매우 중요함

2-2-④. 실루엣 기법 연구

○ 실루엣 기법

- K 평균 알고리즘은 k 매개 변수가 정해져야 반복 과정을 통해 최종적으로 그 위치를 결정하기 때문에 이는 치명적인 한계점으로 작용함. 따라서 정해진 k 값으로 군집화가 얼마나 잘 되었는지 평가해야 함. 평가 방법은 여러 가지가 있는데 그중 간단한 방법으로 평가를 할 수 있는 실루엣 기법을 이용하였음. 실루엣 기법은 1986년 Peter J. Rousseeuw에 의해 처음 서술되었고, 다음과 같이 계산됨. 각 데이터i와 i가 할당된 군집 내의 다른 데이터들과의 거리 평균을 a(i)라 하고, 다시 데이터i 와 i가 할당된 군집이 아닌 군집 내의 데이터들과의 거리 평균들 중 가장 가까운 것을 b(i)라 할 때, s(i)는 아래 식과 같음[5]

$$i) = \frac{b(i) - a(i)}{\max\{a(i), b(i)\}} \tag{29}$$

$$-1 \quad s(i) \quad 1 \tag{30}$$

- 위 식과 같이 s(i) 값은 -1과 1 사이의 값으로 정의됨. 여기에서 1에 가까울수록 클러스터링이 잘 되었다는 뜻이고, -1에 가까울수록 클러스터링이 잘못되었다는 뜻임. 이 과정은 MATLAB의 silhouette 함수를 이용하여 수행하였음
- 앞에서 나타낸 3개의 군집화 결과에 대한 실루엣 기법을 수행하였고, 그 결과는 아래 세 그림과 같음. 1,388개 데이터들의 각 실루엣 값을 일정 범위로 묶어 막대그래프로 나타내었음
- 이 그래프를 통해 5개, 40개, 100개로 군집화된 결과 모두 실루엣값이 -1보다 1에 가깝다는 것을 확인할 수 있고, 이를 더 구체화하기 위해 실루엣값을 평균으로 나타냈을 때, 각각의 결과는 0.4500, 0.5670, 0.5291로 나타났음. 이를 통해 군집화가 잘 되었다는 것을 알 수 있음

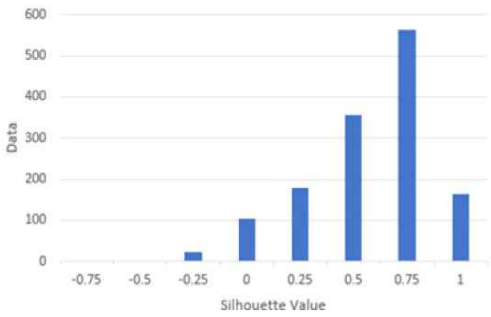


그림 274 수직이착륙장의 개수가 5개일 때 실루엣 평가 결과

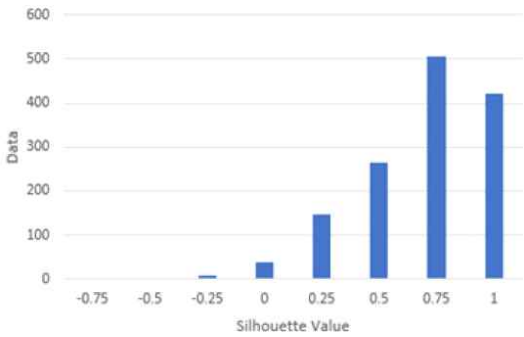


그림 275 수직이착륙장의 개수가 40개일 때 실루엣 평가 결과

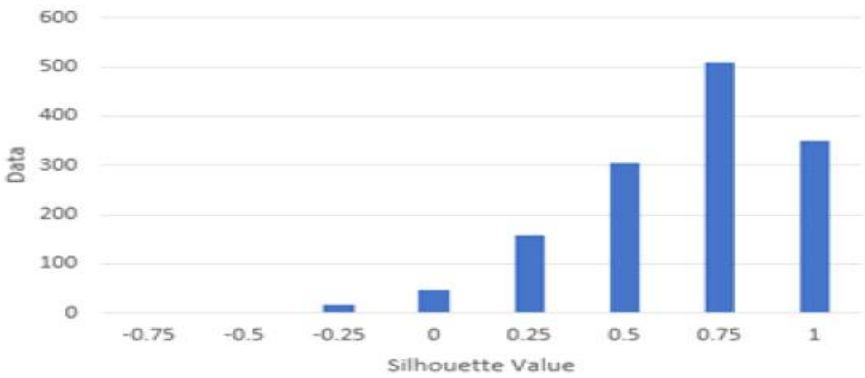


그림 276 수직이착륙장의 개수가 100개일 때 실루엣 평가 결과

2-2-⑤. 국내 실정을 고려한 수직이착륙장 위치 선정 방법 및 권고 사항

○ 국내 실정을 고려한 수직이착륙장 위치 선정 방법

- 군집화를 통해 분석한 수직이착륙장의 위치는 MATLAB을 통해 위도, 경도 값으로 그 위치를 확인할 수 있으며, 그 위치들을 연결하여 eVTOL이 운영될 수 있는 경로를 설정할 수 있음. 하지만 단순히 K 평균 알고리즘을 사용하여 수직이착륙장의 위치를 선정했기 때문에 실제 지리적인 조건이 반영되지 않았다는 점에서 최종 위치의 조정이 요구됨
- 우리나라의 경우 아래 그림과 같이 수도권 내 개발제한구역으로 지정된 그린벨트가 있기 때문에 그 위치에는 수직이착륙장을 설계할 수 없으며[6], 군사적인 이유로 비행이 금지된 비행금지 구역도 피해야 함. 또한 우리나라 인구의 대부분이 거주하고 있는 서울의 경우 거주 구역이 밀집되어 있는 곳에 수직이착륙장이 설계된다면 PAV의 소음으로 인한 문제가 발생할 가능성이 높기 때문에 고속도로나 강, 천 주변이 유력한 수직이착륙장 후보지가 될 것이라 판단됨

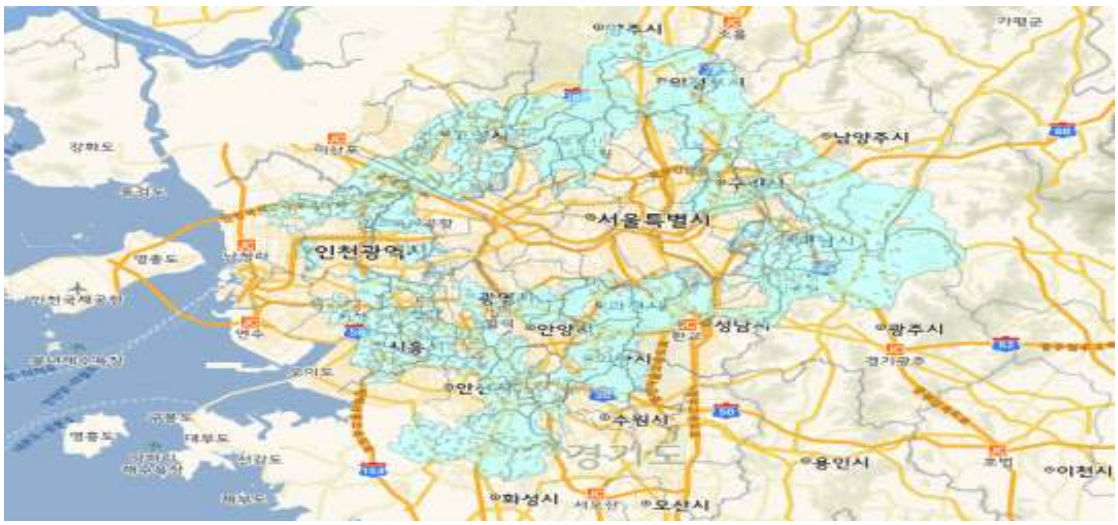


그림 277 수도권 그린벨트

- 위치조정 방법
  - K 평균 알고리즘을 이용하여 군집화한 수직이착륙장의 실제 위치를 파악한 뒤, 그 위치에 수직이착륙장을 실제로 구축이 불가능하다고 판단되면 군집화 과정을 재시도할 수 있음. K 평균 알고리즘은 군집화를 수행하면서 반복 작업을 시작할 초기 위치를 제시해주어야 하는데 MATLAB에 내장되어 있는 kmeans 함수는 그 시작점을 임의로 정한 뒤에 군집화를 수행함. 따라서 군집화 과정을 재시도하는 것만으로도 변경된 위치의 수직이착륙장을 선정할 수 있음. 하지만 이 과정은 임의의 수단일 뿐 최종 설계를 위해서는 MATLAB에서 제시한 군집의 중심을 기점으로 주변에 적절한 부지를 찾아 수직이착륙장의 최종 위치로 선정해야 함. 앞에서 수행한 3번의 군집화 결과들은 군집화 재시도를 통해 최적의 위치를 나타낸 것이기 때문에 주변의 수직이착륙장 설치가 가능한 적절한 위치로 재조정하여 최종 수직이착륙장의 위치를 선정하였음
- 5개의 수직이착륙장
  - 앞에서 수행한 5개의 수직이착륙장으로 군집화했을 때 각 수직이착륙장의 위치와 그 행정구역은 아래 첫 번째 표와 같고, 위치조정 과정을 수행한 최종 수직이착륙장의 위치와 그 행정구역은 아래 두 번째 표와 같음. 또한 아래 그림과 같이 새로운 수직이착륙장의 위치를 MATLAB을 이용해 표현하였음

표 52 수직이착륙장의 개수가 5개일 때 각 수직이착륙장의 위치

Number of vertiports	Latitude	Longitude	Location
1	37.5598	127.0596	Seongdong-gu
2	37.5054	126.9101	Yeongdeungpo-gu
3	37.2794	127.1005	Suwon-si
4	37.5407	126.7026	Gyeyang-gu
5	37.2132	126.7497	Hwaseong-si

표 53 위치 조정된 5개 수직이착륙장의 위치

Number of vertiports	Latitude	Longitude	Location
1	37.5532	127.0523	Seongdong-gu
2	37.5164	126.9267	Yeongdeungpo-gu
3	37.2894	127.1055	Suwon-si
4	37.5696	126.7541	Gyeyang-gu
5	37.3158	126.8577	Ansan-si



그림 278 위치 조정된 5개 수직이착륙장의 위치

- 40개의 수직이착륙장

• 앞에서 수행한 40개의 수직이착륙장으로 군집화했을 때 각 수직이착륙장의 위치와 그 행정구역은 아래 첫 번째 표와 같고, 위치조정 과정을 수행한 최종 수직이착륙장의 위치와 그 행정구역은 아래 두 번째 표와 같음. 또한 아래 그림과 같이 새로운 수직이착륙장의 위치를 MATLAB을 이용해 표현하였음

표 54 수직이착륙장의 개수가 40개일 때 각 수직이착륙장의 위치

Number of vertiports	Latitude	Longitude	Location
1	37.5066	126.9335	Dongjak-gu
2	36.9834	126.9812	Pyeongtaek-si
3	37.5607	127.1412	Gangdong-gu
⋮	⋮	⋮	⋮
38	37.8015	126.7957	Paju-si
39	37.2096	127.3415	Yongin-si
40	37.2029	126.6045	Ansan-si

표 55 위치 조정된 40개 수직이착륙장의 위치

Number of vertiports	Latitude	Longitude	Location
1	37.5173	126.9399	Yeongdeungpo-gu
2	36.9792	127.0773	Pyeongtaek-si
3	37.5728	127.1669	Gangdong-gu
⋮	⋮	⋮	⋮
38	37.7446	12637705	Paju-si
39	37.2397	127.2934	Yongin-si
40	37.2912	126.5776	Ansan-si



그림 279 위치 조정된 40개 수직이착륙장의 위치

- 100개의 수직이착륙장

• 앞에서 수행한 100개의 수직이착륙장으로 군집화했을 때 각 수직이착륙장의 위치와 그 행정구역은 아래 첫 번째 표와 같고, 위치조정 과정을 수행한 최종 수직이착륙장의 위치와 그 행정구역은 아래 두 번째 표와 같음. 또한 아래 그림과 같이 새로운 수직이착륙장의 위치를 MATLAB을 이용해 표현하였음

표 56 수직이착륙장의 개수가 100개일 때 각 수직이착륙장의 위치

Number of vertiports	Latitude	Longitude	Location
1	37.5460	127.0520	Seongdong-gu
2	37.2045	126.6271	Ansan-si
3	37.5109	126.7360	Bupyeong-gu
⋮	⋮	⋮	⋮
98	37.0844	127.3771	Anseong-si
99	37.4981	127.0734	Gangnam-gu
100	37.4479	126.4885	Jung-gu (Incheon)

표 57 위치 조정된 100개 수직이착륙장의 위치

Number of vertiports	Latitude	Longitude	Location
1	37.5421	127.0296	Seongdong-gu
2	37.3315	126.7501	Ansan-si
3	37.5234	126.7584	Bupyeong-gu
4	37.4397	127.0004	Gwacheon-si
5	37.4226	126.6092	Yeonsu-gu

6	37.8807	127.0533	Dongducheon-si
7	37.6097	126.9289	Eunpyeong-gu
8	37.2906	127.1018	Yongin-si
9	37.4794	126.8844	Geumcheon-gu
10	37.6885	126.7602	Goyang-si
11	37.5815	127.0492	Dongdaemun-gu
12	37.8810	127.2196	Pocheon-si
13	37.4768	126.6323	Dong-gu
14	37.5554	126.9705	Jung-gu
15	37.4233	126.8935	Gwangmyeong-si
16	37.5730	127.1666	Gangdong-gu
17	37.6399	127.0642	Nowon-gu
18	37.5040	127.4982	Yangpyeong-gun
19	37.4044	127.0942	Seongnam-si
20	37.3396	127.1914	Yongin-si
21	37.5638	126.8008	Gangseo-gu
22	37.4860	126.7488	Bucheon-si
23	37.5118	127.1522	Hanam-si
24	37.5935	127.2079	Namyangju-si
25	37.1189	126.8170	Hwaseong-si
26	37.0725	127.2069	Anseong-si
27	37.5180	126.9933	Yongsan-gu
28	37.5280	127.0195	Gangnam-gu
29	37.6011	126.6169	Seo-gu
30	37.3781	127.2404	Gwangju-si
31	37.3517	126.8027	Ansan-si
32	37.5706	127.1264	Guri-si
33	37.1842	126.9707	Hwaseong-si
34	37.3035	126.9618	Suwon-si
35	37.4337	126.7375	Namdong-gu
36	37.8718	126.7871	Paju-si
37	37.5714	127.0704	Dongdaemun-gu
38	37.4975	126.8500	Guro-gu
39	37.3661	126.6441	Yeonsu-gu
40	37.4058	126.9902	Uiwang-si
41	37.0364	127.1363	Anseong-si
42	37.9723	126.9021	Paju-si
43	37.2923	127.2213	Yongin-si
44	37.2118	126.7504	Hwaseong-si
45	37.5099	126.5229	Jung-gu (Incheon)
46	37.2664	127.4638	Icheon-si
47	37.2912	126.5777	Ansan-si
48	37.2648	127.0003	Suwon-si
49	37.5251	126.8358	Yangcheon-gu
50	37.6750	126.6357	Gimpo-si
51	37.3809	126.7320	Siheung-si
52	37.6709	127.1380	Namyangju-si
53	37.7251	126.6881	Paju-si
54	37.6019	127.0402	Seongbuk-gu
55	37.4647	127.0431	Seocho-gu
56	37.2782	126.8985	Hwaseong-si
57	37.7230	127.4058	Gapyeong-gun
58	37.8134	127.0728	Yangju-si
59	37.1785	127.0949	Hwaseong-si
60	37.2142	127.2068	Yongin-si
61	37.4686	126.8969	Geumcheon-gu
62	37.4695	126.9858	Seocho-gu

63	37.4840	127.0266	Seocho-gu
64	37.1243	126.8813	Hwaseong-si
65	37.3035	127.6381	Yeoju-si
66	37.1429	127.0852	Osan-si
67	37.5493	127.2404	Namyangju-si
68	37.3264	126.9211	Gunpo-si
69	37.5575	126.8629	Gangseo-gu
70	37.5686	127.0083	Jung-gu
71	37.6241	126.8548	Goyang-si
72	37.4359	126.6745	Nam-gu
73	37.6166	127.1021	Jungnang-gu
74	37.3008	127.0499	Suwon-si
75	37.0533	126.8893	Pyeongtaek-si
76	37.3507	127.1009	Seongnam-si
77	37.5290	126.9325	Yeongdeungpo-gu
78	37.6571	126.8173	Goyang-si
79	38.0169	127.0624	Yeoncheon-gun
80	37.0981	126.9951	Hwaseong-si
81	37.7202	127.1131	Uijeongbu-si
82	37.5154	126.6260	Seo-gu
83	37.7377	126.5154	Ganghwa-gun
84	37.4372	126.8177	Siheung-si
85	37.3158	126.8577	Ansan-si
86	36.9761	127.2430	Anseong-si
87	37.5695	126.7541	Gyeyang-gu
88	37.4332	127.1206	Seongnam-si
89	37.6932	127.0521	Uijeongbu-si
90	37.6483	126.7376	Goyang-si
91	37.5213	127.0957	Songpa-gu
92	37.4624	127.0891	Seocho-gu
93	37.0332	126.9855	Pyeongtaek-si
94	37.5059	126.9795	Dongjak-gu
95	37.6316	127.3095	Namyangju-si
96	37.3755	126.9332	Gunpo-si
97	37.5480	126.9085	Mapo-gu
98	37.0921	127.4505	Anseong-si
99	37.4943	127.0797	Gangnam-gu
100	37.4579	126.4885	Jung-gu (Incheon)



그림 280 위치 조정된 100개 수직이착륙장의 위치

○ 권고 사항

- 본 연구에서 수직이착륙장의 위치는 수집한 수요 데이터들을 k 평균 알고리즘을 활용하여 군집화를 통해 결정됨. 하지만 지리적 조건이 반영되어있지 않기 때문에 그 위치가 수직이착륙장의 정확한 위치로 선정되는 데 어려움이 있을 수 있음. 따라서 군집화를 통해 정해진 수직이착륙장의 위치는 최종적으로 국내 실정에 맞게 수정되어야 함
- 앞에서 언급한 것과 같이 우리나라 수도권에 UAM 상용화 시 약 100개의 수직이착륙장이 필요할 것이라고 판단하였기 때문에 본 연구를 통해 지정되고 위치가 조정된 수직이착륙장의 각 위치를 아래 그림들과 같이 나타내었음. 대부분의 수직이착륙장 위치는 한강공원 인근 또는 고속도로 IC의 cloverleaf에 위치하며, 주거지역이 밀집된 곳은 건물 옥상에 주차장이 있는 곳이나 고층 건물의 헬기장을 선정하였음. 또한 출퇴근용뿐만 아니라 공항 이용객들을 위해 김포공항과 같은 곳에도 수직이착륙장이 위치할 수 있게 하였음
- 본 연구에서는 아직 상용화되지 않은 도심항공 모빌리티(UAM)를 우리나라 수도권에 적용하기 위해 필요한 인프라인 수직이착륙장의 위치를 선정하고 평가하였음. 이를 수행하기 위해 통계청 거주지/통근통학지별 통근 통학 인구수 조사 데이터를 수집한 뒤, MATLAB을 이용해 지도상에 나타내었고, 데이터들을 K 평균 알고리즘을 사용하여 군집화해 수직이착륙장의 위치로 적합한 5개, 40개, 100개의 위치를 구하였음. 하지만 그 위치가 산이나 바다 또는 주거지역 내에 있어 수직이착륙장 설치가 불가능한 경우 위치조정 과정이 필요하다고 판단되었고, 이 조정 과정을 통해 최종 수직이착륙장의 위치로 적절한 곳을 선정하였음. 위치조정 과정을 수행하면서 우리나라 인구의 절반이 살고 있는 수도권의 경우 대부분의 지역이 주거지역이기 때문에 수직이착륙장의 위치를 선정하는 것에 어려움이 있었음. 하지만 한강공원, 고속도로 나들목, 우버사에서 제시한 주차장 건물 옥상 등과 같은 위치를 활용하여 수직이착륙장의 위치를 선정하였음. 이 외에도 고층 건물의 옥상에 위치한 헬리패드는 수직이착륙장의 역할을 할 수 있을 것이라 판단하였음
- 본 연구에 사용된 수요 데이터는 통계청에서 제공되는 통근 및 통학자 인구수임. 이는 인구총조사를 통해 수집된 것으로 정확성이 우수함. 하지만 거주지와 통근 및 통학지의 행정구역 정보로만 주어지기 때문에 구체적인 출발지와 도착지의 위치를 알 수 없다는 점에서 경기도의 포천시나 화성시 등과 같이 행정구역의 면적이 넓은 곳이나 안산시와 같이 행정구역이 두 개로 나뉘어져있는 곳은 데이터를 표현하는 데 큰 어려움이 있었음. 하지만 위치조정

과정에서 출발지 또는 도착지로 유력한 후보지를 위성 지도를 활용해 선정하였기 때문에 최종 수직이착륙장으로써의 활용도는 높을 것으로 판단됨. 또한 본 연구에서는 통학 및 통근자 수만을 이용해 수직이착륙장의 위치를 선정하였지만, UAM이 상용화된다면 이 외에도 여가 및 관광을 목적으로 하는 이동 또한 많은 비중을 차지할 것이라 판단됨. 따라서 다양한 목적을 가진 모빌리티들에 대해서도 분석하여 수직이착륙장의 위치를 선정하는 연구가 필요할 것이라 판단됨

- 위치조정 과정을 통해 도출해낸 5개의 최종 수직이착륙장 위치들은 40개의 수직이착륙장 위치에 일부가 포함되었으나 모두 포함되지는 않았음. 이는 설계하고자 하는 수직이착륙장의 개수에 따라 최고의 효율을 가질 수직이착륙장들의 배치가 달라진다는 것을 의미함. 따라서 최종적으로 필요한 수직이착륙장의 개수를 먼저 선정한 뒤에 군집화를 진행한다면 최적의 수직이착륙장 위치를 선정할 수 있을 것이라 판단됨



그림 281 수직이착륙장 예시 (1)



그림 282 수직이착륙장 예시 (2)



그림 283 수직이착륙장 예시 (3)



그림 284 수직이착륙장 예시 (4)



그림 285 수직이착륙장 예시 (5)



그림 286 수직이착륙장 예시 (6)



그림 287 수직이착륙장 예시 (7)



그림 288 수직이착륙장 예시 (8)



그림 289 수직이착륙장 예시 (9)



그림 290 수직이착륙장 예시 (10)



그림 291 수직이착륙장 예시 (11)



그림 292 수직이착륙장 예시 (12)



그림 293 수직이착륙장 예시 (13)



그림 294 수직이착륙장 예시 (14)



그림 295 수직이착륙장 예시 (15)



그림 296 수직이착륙장 예시 (16)



그림 297 수직이착륙장 예시 (17)



그림 298 수직이착륙장 예시 (18)



그림 299 수직이착륙장 예시 (19)



그림 300 수직이착륙장 예시 (20)



그림 301 수직이착륙장 예시 (21)



그림 302 수직이착륙장 예시 (22)



그림 303 수직이착륙장 예시 (23)



그림 304 수직이착륙장 예시 (24)



그림 305 수직이착륙장 예시 (25)



그림 306 수직이착륙장 예시 (26)



그림 307 수직이착륙장 예시 (27)



그림 308 수직이착륙장 예시 (28)



그림 309 수직이착륙장 예시 (29)



그림 310 수직이착륙장 예시 (30)



그림 311 수직이착륙장 예시 (31)



그림 312 수직이착륙장 예시 (32)



그림 313 수직이착륙장 예시 (33)



그림 314 수직이착륙장 예시 (34)



그림 315 수직이착륙장 예시 (35)



그림 316 수직이착륙장 예시 (36)



그림 317 수직이착륙장 예시 (37)



그림 318 수직이착륙장 예시 (38)



그림 319 수직이착륙장 예시 (39)



그림 320 수직이착륙장 예시 (40)



그림 321 수직이착륙장 예시 (41)



그림 322 수직이착륙장 예시 (42)



그림 323 수직이착륙장 예시 (43)



그림 324 수직이착륙장 예시 (44)



그림 325 수직이착륙장 예시 (45)



그림 326 수직이착륙장 예시 (46)



그림 327 수직이착륙장 예시 (47)



그림 328 수직이착륙장 예시 (48)



그림 329 수직이착륙장 예시 (49)



그림 330 수직이착륙장 예시 (50)



그림 331 수직이착륙장 예시 (51)



그림 332 수직이착륙장 예시 (52)

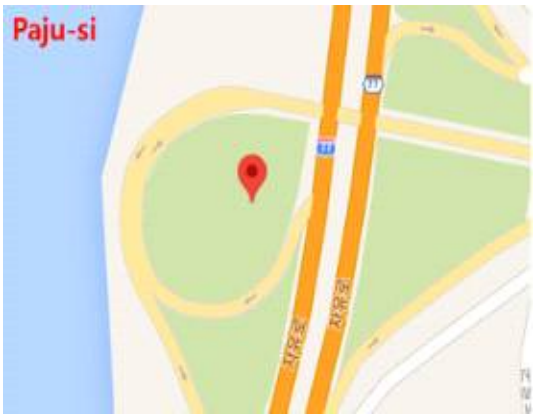


그림 333 수직이착륙장 예시 (53)



그림 334 수직이착륙장 예시 (54)



그림 335 수직이착륙장 예시 (55)



그림 336 수직이착륙장 예시 (56)



그림 337 수직이착륙장 예시 (57)



그림 338 수직이착륙장 예시 (58)

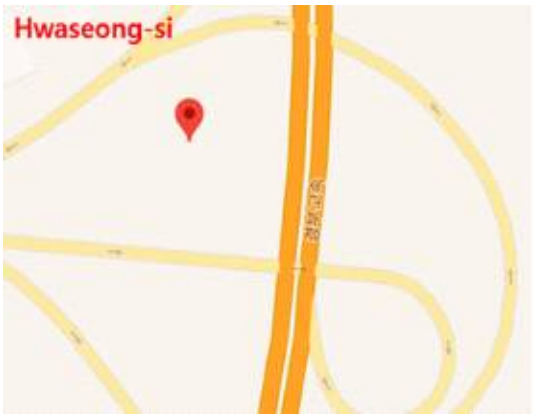


그림 339 수직이착륙장 예시 (59)



그림 340 수직이착륙장 예시 (60)



그림 341 수직이착륙장 예시 (61)



그림 342 수직이착륙장 예시 (62)



그림 343 수직이착륙장 예시 (63)



그림 344 수직이착륙장 예시 (64)



그림 345 수직이착륙장 예시 (65)



그림 346 수직이착륙장 예시 (66)



그림 347 수직이착륙장 예시 (67)



그림 348 수직이착륙장 예시 (68)



그림 349 수직이착륙장 예시 (69)



그림 350 수직이착륙장 예시 (70)



그림 351 수직이착륙장 예시 (71)



그림 352 수직이착륙장 예시 (72)



그림 353 수직이착륙장 예시 (73)



그림 354 수직이착륙장 예시 (74)



그림 355 수직이착륙장 예시 (75)



그림 356 수직이착륙장 예시 (76)



그림 357 수직이착륙장 예시 (77)



그림 358 수직이착륙장 예시 (78)



그림 359 수직이착륙장 예시 (79)



그림 360 수직이착륙장 예시 (80)



그림 361 수직이착륙장 예시 (81)



그림 362 수직이착륙장 예시 (82)



그림 363 수직이착륙장 예시 (83)



그림 364 수직이착륙장 예시 (84)



그림 365 수직이착륙장 예시 (85)



그림 366 수직이착륙장 예시 (86)



그림 367 수직이착륙장 예시 (87)



그림 368 수직이착륙장 예시 (88)



그림 369 수직이착륙장 예시 (89)



그림 370 수직이착륙장 예시 (90)



그림 371 수직이착륙장 예시 (91)



그림 372 수직이착륙장 예시 (92)



그림 373 수직이착륙장 예시 (93)



그림 374 수직이착륙장 예시 (94)



그림 375 수직이착륙장 예시 (95)



그림 376 수직이착륙장 예시 (96)



그림 377 수직이착륙장 예시 (97)



그림 378 수직이착륙장 예시 (98)



그림 379 수직이착륙장 예시 (99)



그림 380 수직이착륙장 예시 (100)

2-2-⑥. 공유기반 모빌리티의 이동시간 계산

○ UAM 이동시간 계산

- k-평균 알고리즘을 이용해서 군집화한 각 경우에서 미리 지정한 3개의 루트의 이동시간을 계산함. 앞서 가정한 3개 경로의 Starting Point와 Destination에서 군집화의 결과로 나온 Vertiport 중 거리상 가장 가까운 Vertiport를 Depart Vertiport, Arrival Vertiport로 정함
- Starting Point와 Departure Vertiport까지의 거리, Arrival Vertiport와 Destination까지 걸리는 시간을 자동차로 갈 때와 대중교통을 이용할 때로 나누어 구함
- 자동차와 대중교통을 이용할 때 걸린 시간은 포털사이트 naver에서 제공하는 지도를 이용하여 구함
- UAM를 이용하여 이동하는 구간인 Departure Vertiport에서 Arrival Vertiport까지의 시간은 먼저 비행체의 속도가 200km/h라고 가정하고 harversine 공식을 이용하여 거리를 구한 뒤 이동시간을 계산함
- harversine 공식은 지구상의 위도와 경도를 아는 두 점의 거리를 구할 때 쓰이는 공식으로

다음과 같음. 은 지구반지름, φ , φ_2은 점1과 점2의 위도, λ_1, λ_2 은 점1과 점2의 경로를 의미함

$$CD = 2*r*\arcsin(\ \ \sin^2((\varphi_2-\varphi_1)/2)+\cos\varphi_1\cos\varphi_2\sin^2((\lambda_2-\lambda_1)/2) \qquad (31)$$

- Vertiport의 개수가 2, 4, 6, 8개인 경우에는 Departure Vertiport와 Arrival Vertiport가 같은 경우가 발생하여 ODM을 적용할 수 없다고 판단함
- 따라서 Vertiport의 개수가 10부터 36개까지 자동차를 ODM과 함께 이용했을 때 이동시간과 대중교통과 ODM과 함께 이용했을 때 이동시간을 계산했고 아래 표에 나타냄
- 아래 표에서 ①-②는 Starting Point에서 Depart Vertiport까지 구간, ②-③은 Depart Vertiport에서 Arrival Vertiport까지 구간, ③-④은 Arrival Vertiport에서 Destination 까지 구간을 의미함
- 자동차와 ODM을 이용했을 때를 Ⅰ, 대중교통과 ODM을 이용했을 때를 Ⅱ라 함

표 58 경로 1의 구간별 거리와 이동시간

	①-②			②-③			③-④		
Vertiport 개수	거리 (km)	시간(min) Ⅰ	Ⅱ	거리 (km)	시간(min) Ⅰ	Ⅱ	거리 (km)	시간(min) Ⅰ	Ⅱ
10	12.32	25	60	30.13	9.039	9.038	7.04	29	36
12	12.82	25	67	27.38	8.215	5.215	5.43	23	34
14	12.56	25	62	27.49	8.247	8.247	8.77	25	32
16	12.56	25	62	26.68	8.005	8.005	4.15	16	24
18	12.11	27	66	25.86	7.759	7.759	2.03	12	16
20	11.9	25	66	27.05	8.116	8.116	3.82	14	25
22	11.4	23	60	25.09	7.742	7.742	0.9	4	0
24	12.7	26	64	24.89	7.466	7.466	1.78	7	15
26	6.55	18	39	28.08	8.424	8.424	1.63	7	18
28	6.66	18	41	27.85	8.355	8.355	1.71	8	14
30	8.29	16	51	40.10	12.03	12.03	0.9	4	0
32	9.78	17	40	28.19	8.456	8.456	0.9	4	0
34	11.34	24	60	26.08	7.825	7.825	0.9	4	10
36	8.8	20	43	26.93	8.079	8.079	1.86	7	16

표 59 경로 2의 구간별 거리와 이동시간

	①-②			②-③			③-④		
Vertiport 개수	거리 (km)	시간(min) Ⅰ	Ⅱ	거리 (km)	시간(min) Ⅰ	Ⅱ	거리 (km)	시간(min) Ⅰ	Ⅱ
10	5.04	16	30	27.99	8.398	8.398	11.1	26	39
12	4.89	16	32	24.97	7.491	7.491	2.03	9	15
14	0.7	3	0	22.19	6.658	6.658	1.19	6	10
16	0.8	5	13	22.39	6.718	6.718	1.35	9	16
18	3.23	11	21	19.76	5.929	5.929	2.32	9	15
20	0.8	5	13	22.55	6.765	6.765	2.31	12	11
22	9.1	21	31	21.75	6.525	6.525	1.86	8	12
24	3.12	12	18	20.80	6.239	6.239	1.59	8	12
26	1.59	10	16	23.00	6.900	6.900	2.59	11	16
28	3.19	12	23	23.50	7.051	7.051	1.35	9	16
30	2.64	9	16	19.32	5.797	5.797	1.88	10	13
32	2.93	11	20	20.75	6.224	6.224	1.39	8	14
34	3.02	12	19	20.21	6.062	6.062	1.35	9	16
36	2.9	9	15	20.54	6.161	6.161	3	14	18

표 60 경로 3의 구간별 거리와 이동시간

	①-②			②-③			③-④		
Vertiport 개수	거리 (km)	시간(min)		거리 (km)	시간(min)		거리 (km)	시간(min)	
		I	II		I	II		I	II
10	9.96	19	73	15.34	4.602	4.602	11.67	26	37
12	9.96	19	73	13.65	4.096	4.096	2.4	13	22
14	9.96	19	65	14.04	4.211	4.211	2.68	11	17
16	12.46	19	46	11.97	3.592	3.592	1.92	10	15
18	12.71	22	46	11.66	3.499	3.499	2.69	11	21
20	10.47	23	47	11.62	3.485	3.485	3.01	15	18
22	14.19	26	51	13.12	3.938	3.938	1.93	9	18
24	10.26	25	44	12.04	3.613	3.613	2.28	11	19
26	12.4	21	47	11.45	3.436	3.436	3.11	12	23
28	10.26	25	44	12.06	3.620	3.620	1.92	10	15
30	12.34	21	19	12.23	3.668	3.668	2.01	10	49
32	11.76	21	49	12.58	3.774	3.774	1.96	8	18
34	9.77	23	41	12.72	3.819	3.819	1.92	10	15
36	12.14	23	48	10.97	3.292	3.292	3.2	14	28

- 아래 표는 이동시간의 합임

표 61 경로 1의 Vertiport 개수 별 총 이동시간 (단위:분)

Vertiport 개수	경로 1		경로 2		경로 3	
	I	II	I	II	I	II
10	63.03	105.03	50.39	77.39	49.60	114.60
12	56.21	106.21	32.49	54.49	36.09	99.09
14	58.24	102.24	15.65	16.65	34.21	86.21
16	49.00	94.00	20.71	35.71	32.59	64.59
18	46.75	89.75	25.92	41.92	36.49	70.49
20	47.11	99.11	23.76	30.76	41.48	68.48
22	34.74	67.74	35.52	49.52	38.938	72.93
24	40.46	86.46	26.23	36.23	39.61	66.61
26	33.42	65.42	27.90	38.90	36.43	73.43
28	34.35	63.35	28.05	46.05	38.62	62.62
30	32.03	63.03	24.79	34.79	34.66	71.66
32	29.45	48.45	25.22	40.22	32.77	70.77
34	35.82	77.82	27.06	41.06	36.81	59.81
36	35.07	67.07	29.16	39.16	40.29	79.29

- 각 경로별로 총 이동시간을 보면 vertiport의 개수가 증가할수록 모든 경로에서 감소하는 경향을 보이지만, 일정 개수 이상에서는 감소하는 폭이 작아지며 vertiport 개수가 많아져도 이동시간이 오히려 증가하는 경우도 있음
- 따라서 vertiport의 개수가 많을수록 무조건 이동시간이 감소하는 것은 아니라는 것을 알 수 있으며, 모든 경로에서 대중교통과 ODM을 함께 이용할 때 보다 자동차와 ODM을 함께 이용할 때 이동시간이 더 많이 감소함을 알 수 있음
- 각 경로에서 자동차를 이용했을 때 가장 적은 이동시간은 경로 1은 vertiport가 32개일 때 약 29.46분, 경로 2는 vertiport가 14개일 때 약15.66분, 경로 3은 vertiport가 16개일 때 약 32.59분임.
- 대중교통을 이용했을 경우는 경로 1에서 vertiport가 32개일 때 약 48.46분, 경로 2에서 vertiport가 14개일 때 약 16.66분, 경로 3에서 vertiport가 34개일 때 약 59.82분임

- Vertiport의 개수가 많을수록 항상 이동시간이 감소하지 않는 것은 ODM를 수도권에 적용할 때 vertiport의 개수보다는 위치가 더 중요하게 고려해야할 요소임을 말해줌
- Vertiport의 개수가 많더라도 이용자 수가 적거나 대중교통을 이용하는 접근성이 떨어지면 ODM을 이용했을 때와 이용하지 않았을 때 시간 차이가 거의나지 않거나, ODM을 이용할 때 이동시간이 더 증가하는 경우도 나타남

➢ **경로 1 결과**

	①-②		②-③		③-④	
Vertiport 개수	거리 (km)	시간 (min)	거리 (km)	시간 (min)	거리 (km)	시간 (min)
10	12.32	25	30.129	9.0387	7.04	29
12	12.82	25	27.3836	8.2151	5.43	23
14	12.56	25	27.4883	8.2465	8.77	25
16	12.56	25	26.6829	8.0049	4.15	16
18	12.11	27	25.8639	7.7592	2.03	12
20	11.9	25	27.0531	8.1159	3.82	14
22	11.4	23	25.0874	7.7422	0.9	4
24	12.7	26	24.8855	7.4656	1.78	7
26	6.55	18	28.0808	8.4242	1.63	7
28	6.66	18	27.8505	8.3551	1.71	8
30	8.29	16	40.103	12.0309	0.9	4
32	9.78	17	28.1852	8.4556	0.9	4
34	11.34	24	26.082	7.8246	0.9	4
36	8.8	20	26.9314	8.0794	1.86	7

	①-②		②-③		③-④	
Vertiport 개수	거리 (km)	시간 (min)	거리 (km)	시간 (min)	거리 (km)	시간 (min)
10	12.32	60	30.129	9.0387	7.04	36
12	12.82	67	27.3836	5.2151	5.43	34
14	12.56	62	27.4883	8.2465	8.77	32
16	12.56	62	26.6829	8.0049	4.15	24
18	12.11	66	25.8639	7.7592	2.03	16
20	11.9	66	27.0531	8.1159	3.82	25
22	11.44	60	25.0874	7.7422	0.9	0
24	12.7	64	24.8855	7.4656	1.78	15
26	6.55	39	28.0808	8.4242	1.63	18
28	6.66	41	27.8505	8.3551	1.71	14
30	8.29	51	40.103	12.0309	0.9	0
32	9.78	40	28.1852	8.4556	0.8	0
34	11.34	60	26.082	7.8246	0.9	10
36	8.8	43	26.9314	8.0794	1.86	16

그림 381 UAM ODM 이용 시 경로1의 구간별 총 이동거리 및 시간

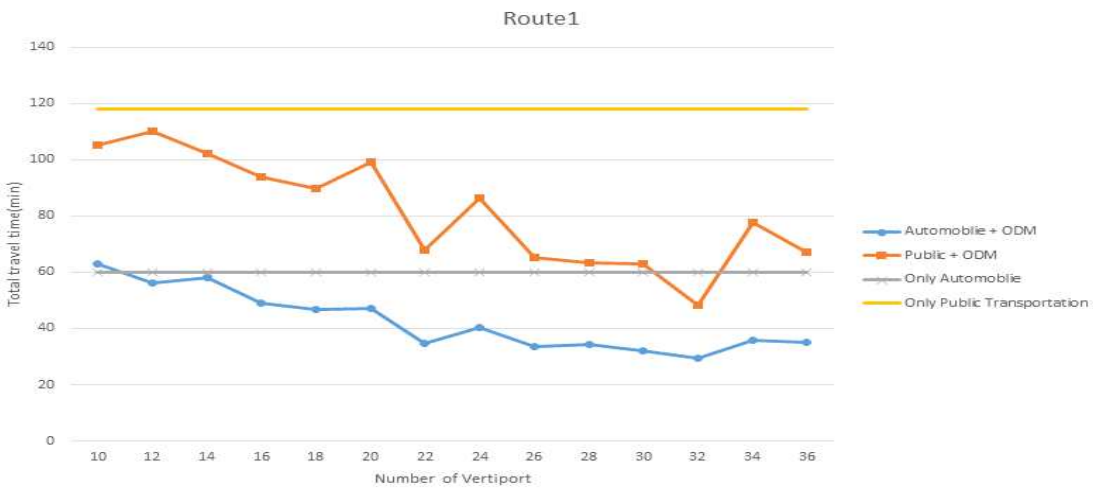


그림 382 UAM ODM 이용 시 경로1의 총 이동시간

- 예를 들어 경로 3의 vertiport개수가 가장 많은 경우인 36개일 때의 대중교통을 이용했을 경우 이동시간을 보면 약 79.29분으로 나타남. 기존의 대중교통을 이용했을 때 약 78분이 소요되는 것과 비교해보면 ODM을 이용하는 것이 실효성이 없다는 결론을 얻을 수 있음
- 구간별로 이동시간을 봤을 때 UAM와 같은 개인용 항공기를 이용하여 이동하는 구간인 ②-③ 구간은 다른 구간들에 비해 매우 적은 시간이 소요됨
- 경로 1의 vertiport가 30개인 구간의 12.03분인 것을 제외하면 ②-③ 구간은 모든 경우에서 10분을 넘지 않음. 따라서 지상에서 이동하는 구간인 ①-②, ③-④ 구간을 이용하는 시간을 더 감소시킬 수 있다면 총 이동시간을 더 감소시킬 수 있음

○ 수직이착륙장 및 경로 설정

- 우리나라 서울, 경기 지역에 UAM을 도입한다고 가정하고 서울, 경기 지역에서의 출퇴근 관련 데이터와 서울시의 생활인구 데이터를 수집하여 수직 이착륙장의 위치를 선정하고, 비행제한구역과 인구밀집 지역을 고려하여 운영 경로를 선정함
- 2019년 잡코리아와 알바몬에서 직장인 1301명을 대상으로 설문조사한 결과 아래 그림과 같이 경기 134.2분 인천 100분 서울 95.8분으로 수도권 직장인들은 평균 114.5분을 출퇴근하는데 시간을 쓰고 있음[12]

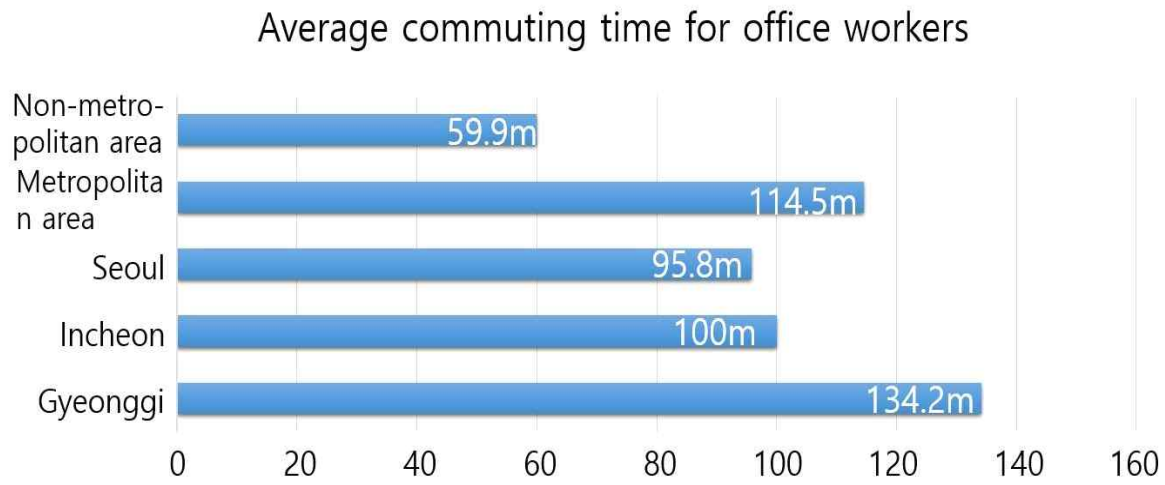


그림 383 수도권 직장인 평균 출퇴근 소요시간[150]

- 한국교통연구원에서 발표에 따르면 아래 그림과 같이 교통혼잡비용이 2005년 23.5조원에서 2015년 33.3조원으로 꾸준하게 증가하고 있음[150]

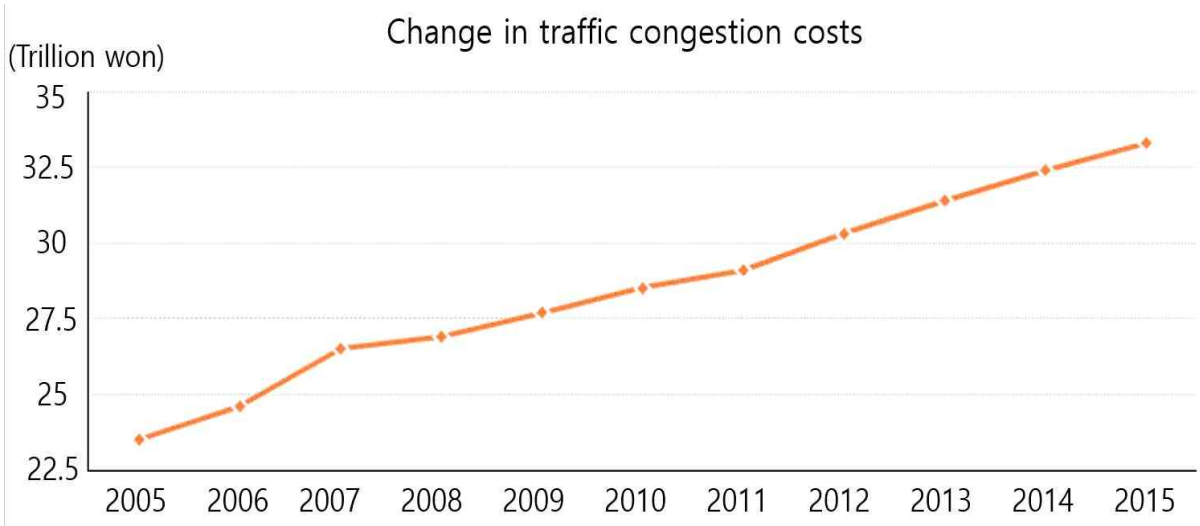


그림 384 교통혼잡비용 변화 추이[151]

- 2016년 국토 교통부와 한국 교통 연구원에서 조사한 경기도에서 서울 방향 출근 통행량 순위에 따르면 아래 그림과 같이 고양시와 성남시가 각각 97,054, 96,515 대로 1, 2위를 차지하였음[150]
- 2016년 경기도에서 발표한 경기도 지역 간 출근 통행량 데이터에서 고양시 덕양구가 총 출근 발생량이 20,5918명, 성남시 분당구에서 26,7197명으로 가장 많음
- 이 두 데이터를 참고하여 고양시 덕양구와 성남시 분당구를 경기도 지역 수직이착륙장 호부 지역으로 선정



그림 385 경기→서울 출근 인구[152]

- 서울시 내에 수직 이착륙장 장소를 선정하기 위해 서울시에서 매년 발표하고 있는 서울시 생활인구 데이터[152]를 이용하여 인구 유동이 거의 없는 새벽 3시의 서울시 생활 인구를 기준으로 하여 나머지 시간대의 생활인구 유출입 인구를 보여줄 수 있는 코로플레스 맵을 아래 첫 번째 그림과 같이 생성하였음[153]
- 오전 6시를 출근하기 전 시간대, 오후 4시를 출근 후 직장인들의 유동이 없는 시간대로 가정하였고, 아래 두 번째 그림에서 생활 인구의 유출이 많은 지역을 뜻하는 푸른색 지역을 거주 지역이라 가정하고 유입이 많은 지역을 뜻하는 붉은색 지역을 근로 지역이라고 가정함
- 이 결과와 서울시 생활인구 데이터를 바탕으로 서울시 내에서 생활인구 변화가 많은 지역 즉 출퇴근 유동인구가 많은 지역인 영등포구와 강남, 서초구를 서울시 내의 수직 이착륙장 후보지로 선정함

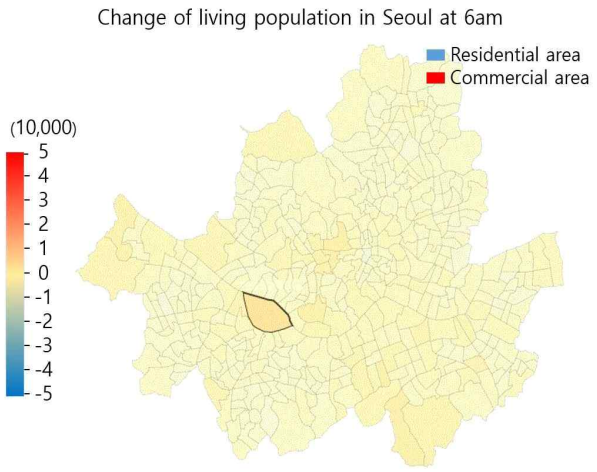


그림 386 오전 6시 서울시 상주인구 밀도[153]

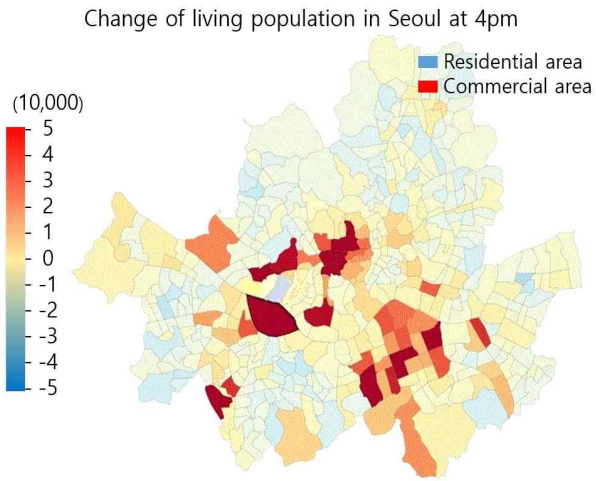


그림 387 오후 4시 서울시 생활인구 밀도[153]

- 수직이착륙장을 설치하기 위한 장소는 eVTOL 비행체를 수용할 수 있는 충분한 부지가 있어야 함. 설치에 필요한 최소 크기를 아래 표와 같이 날개길이와 동체길이가 가장 긴 현대자동차의 S-A1을 기준으로 아래 세 번째 그림과 같이 계산하여 가로 세로 162.8 ft (49.6 m)로 가정함
- 수직이착륙장은 교통이 원활하여야 함
- 위의 두 조건의 만족시키는 장소로 미항공우주국(NASA)에서는 수직이착륙장 장소의 해결책

으로 부지가 넓고 고속도로와 연결되어 있어 접근성이 높은 고속도로 나들목(IC; inter change)을 제시함

표 62 eVTOL 종류별 기본 사양[154]

비행체	PAX	유형	Body Dimension (ft)	Max Dimension (ft)
Vahana	2	Tilt Wing	20.6(wingspan)	28.5
Aurora	2	lift+cruise	26.2(wingspan)	29.2
Volocopter 2X	2	Multirotor	30(superstructure)	32.0
S-A1	4	Tilt Rotor	49(wingspan)	35.1

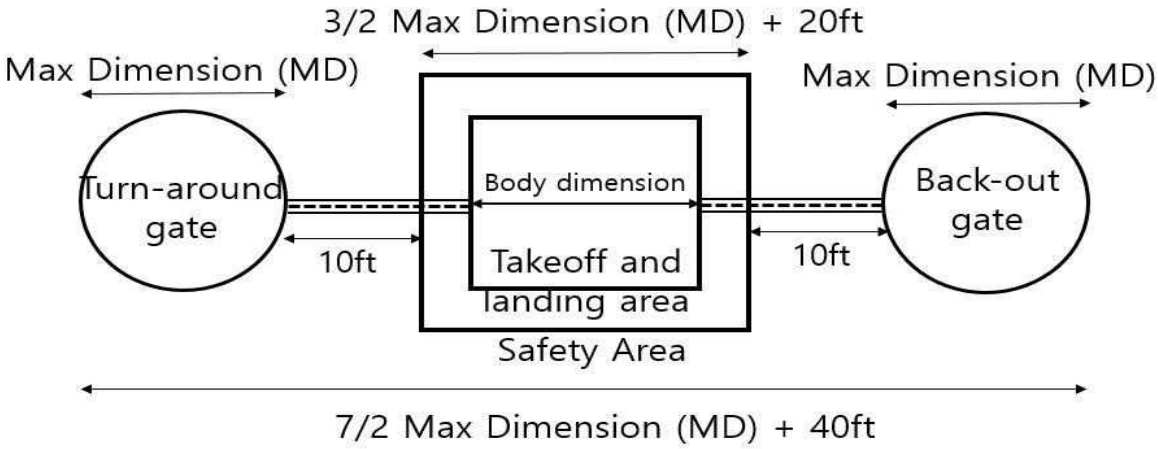


그림 388 수직이착륙장 크기와 공간[95]

- 현대자동차에서는 아래 그림과 같이 UAM의 비전 이미지를 공개하면서 충분한 부지와 교통이 원활한 한강공원 인근과 유사한 장소를 제시함



그림 389 현대자동차 미래 모빌리티 비전[155]

- 아래 그림과 같이 고양시 덕양구의 고양 IC, 성남시 분당구 인근의 판교 JC, 강남구와 서초구의 서초 IC, 영등포구의 여의도 한강공원을 수직 이착륙장 장소로 선정함



그림 390 서초IC, 판교JC, 고양IC, 여의도 한강공원 형상

- UAM의 경로를 설정하기 위해 세 가지 조건을 고려함
- 첫 번째로 항공법상의 문제를 고려함. 우리나라 항공법 제38조에 의하면 공역을 체계적이고 효율적으로 관리하기 위하여 아래 그림과 같이 비행정보공역을 관제공역, 비관제공역, 통제공역, 주의공역으로 나우어 관리하고 있음

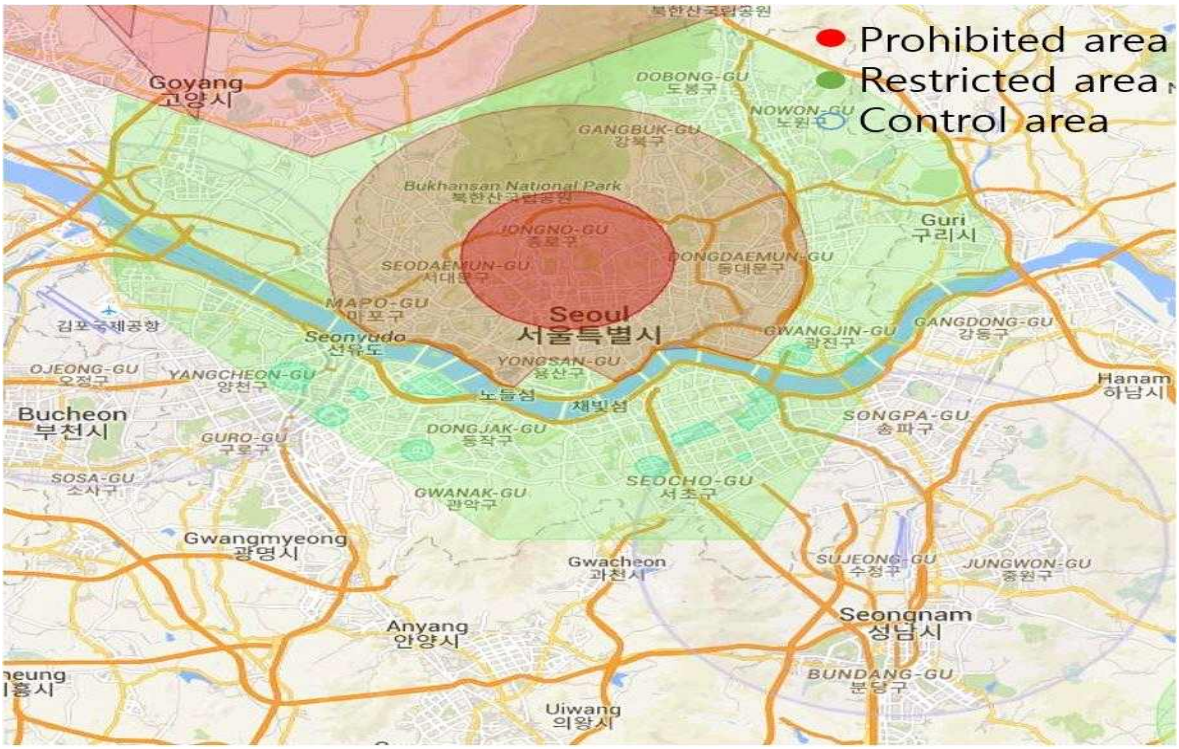


그림 391 서울 인근 비행 제한, 금지구역[156]

- 관제공역은 항공교통의 안전을 위하여 항공기의 비행 순서, 시기, 방법 등에 관하여 국토교통부장관의 지시를 받아야 할 필요가 있는 공역으로 관제권 및 관제구를 포함하는 공역임
- 관제권이란 비행장으로부터 9.3㎞ 이내인 곳을 말하며, 통제공역은 항공교통의 안전을 위하여 항공기의 비행을 금지하거나 제한할 필요가 있는 공역임
- 하지만 항공법 제38조의2 2항에 따르면 국토교통부장관의 허가를 받아 국토교통부장관이 정하는 비행 방식 및 절차에 따라 비행한다면 이 문제는 해결될 수 있음
- 두 번째로는 거주 인구 밀집 지역에 대한 문제가 고려됨. 거주 인구가 밀집되어 있는 지역을

운행한다면 소음공해, 사생활 침해 등의 문제가 발생하므로 경로를 설정할 때 이 지역을 피해 설정해야함

- 서울시 내의 거의 모든 지역은 포화 상태라고 할 정도로 인구가 밀집되어 있으므로 거주인구 밀집지역을 피하기 위해서는 고속도로 혹은 강을 따라 운행하거나 인구 밀집도가 가장 적은 지역으로 운행할 수 있는 경로를 찾아야 함
- 마지막으로는 시간 효율성의 문제와 교통 혼잡도 해결 문제가 고려됨. 경로를 설정하였을 때 이 경로대로 운행하였을 때 출퇴근 시간대의 교통 혼잡도를 얼마나 줄일 수 있는지, 타 교통수단에 비해 시간이 얼마나 단축될 수 있는지 분석해야 함
- 이 세 가지를 고려하여 수직 이착륙장 간 경로를 설정하여, 아래 그림들과 같이 고양 IC에서 여의도 한강공원사이의 경로(경로1), 여의도 한강공원과 서초 IC 사이의 경로(경로2), 서초 IC와 판교 JC 상의 경로(경로3), 고양 IC와 서초 IC 사이의 경로(경로4), 여의도 한강공원과 판교 JC 사이의 경로(경로5)를 설정함

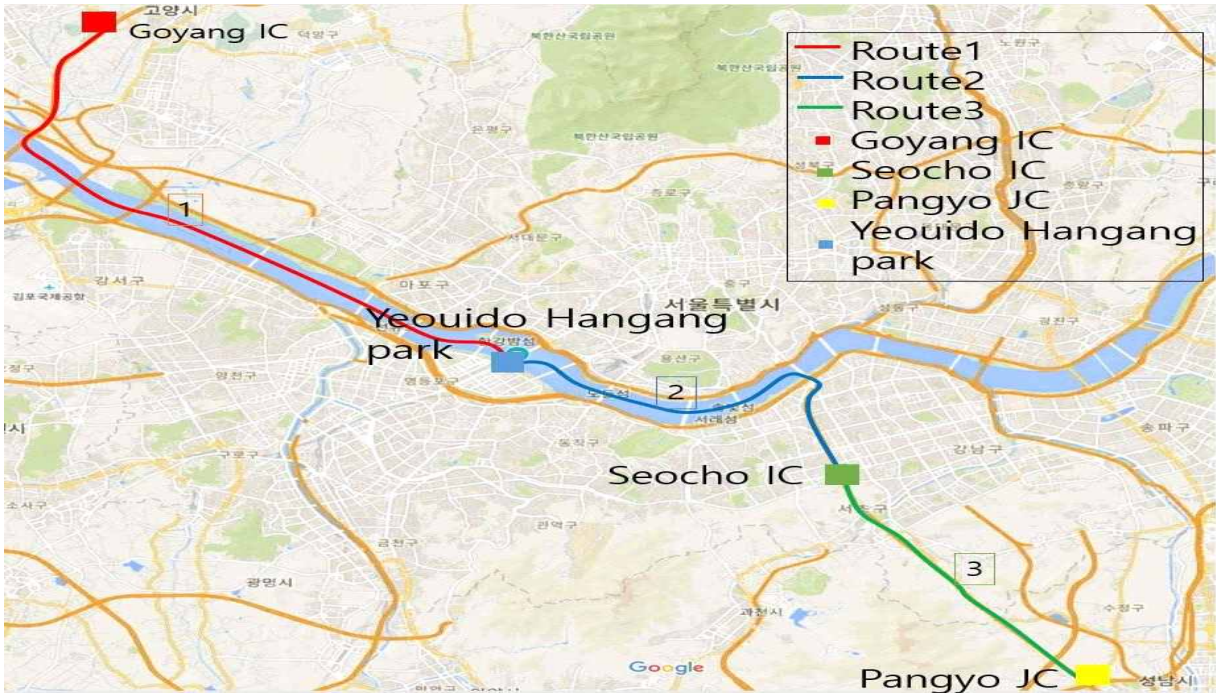


그림 392 경로 1(고양 IC-여의도 한강공원), 2(여의도 한강공원-서초 IC), 3(서초 IC-판교 JC)



그림 393 경로 4(고양 IC-서초 IC)

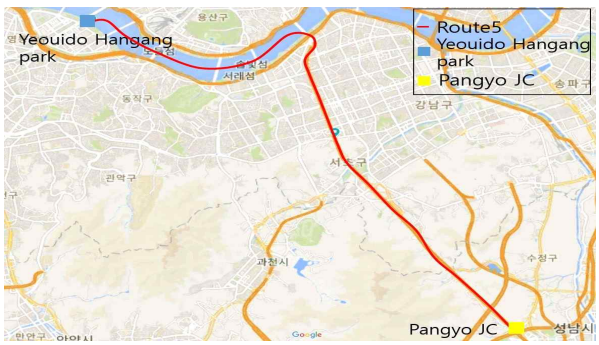


그림 394 경로 5(여의도 한강공원-판교 JC)

- 이 경로들은 대부분의 구간이 고속도로와 한강 위로 운항하는 경로이기 때문에 소음공해와 사생활 침해 등 여러 법적인 문제가 상대적으로 적다고 판단되며, 서울 내에서 혼잡도가 높은 도로인 강변북로와 자유로의 교통 혼잡도를 줄여 서울 내부 교통 혼잡구간을 많이 줄여줄 수 있을 것이고 서울과 성남, 용인을 이어주는 경부고속도로의 정체구간을 줄여줄 수 있을 것임

○ eVTOL 유형 분석 및 선정

- eVTOL의 유형별 데이터를 수집하여 소요시간 단축에 초점을 맞추어 UAM에 사용할 eVTOL 유형을 선정하고, 각각의 소요시간을 계산 및 타 교통수단들과 비교함
- eVTOL의 경우 많은 기술들이 보안이나 기술의 미완성 등의 이유로 상세하게 공개되지는 않았지만 개발 중인 비행체가 2018년 2월 50여개에서 2020년 8월 300여개로 늘어났을 정도로[153] 새로운 교통수단에 대한 필요성과 eVTOL시장의 기대치가 높아지고 있음
- eVTOL은 전통적인 한 개의 메인로터를 가진 헬리콥터와 비교하여 소음이 적고 안전하며 가격적인 면에서도 더 저렴하다. 또한 분산전기추진방식을 적용하여 로터 고장 시 안전성을 크게 향상시키고 저속에서 양력을 크게 높임[157]
- 추진 방식에 따라 틸트 윙/로터/덕트형, 복합형(lift &cruise), 멀티로터형으로 분류함
- 틸트 윙/로터/덕트형(Vectored Thrust)
  - 틸트 윙/로터/덕티드팬형은 추력편향(vectored thrust) 방식으로 추력방향을 변화시켜 항공기의 자세를 변화시키고 진행 방향을 바꾸는 기술을 사용하고 모두 날개를 장착하고 있으며 수직 비행 과정에서는 틸트 윙형은 날개, 틸트 로터형은 로터, 틸트 덕트형은 덕티드팬을 수직 방향으로 하여 수직이착륙을 하고 전진 비행 시에는 각각 날개, 로터, 덕티드팬의 방향을 이에 맞추어 변경하여 비행을 하는 형태임
  - 이 형태는 대부분 분산전기추진방식(DEP: Distributed Electric Propulsion)을 사용하기 때문에 하나의 프로펠러, 로터, 덕티드팬이 고장이 난다 해도 안전하게 이착륙이 가능하고 여러 개의 작은 모터를 배치하여 소음을 크게 줄일 수 있음
  - 전진비행 시에는 고정익 항공기와 유사한 방법으로 비행을 하므로 멀티콥터형에 비해 빠른 속도로 비행이 가능함[158,159]. 대표적인 eVTOL으로는 틸트 윙형은 에어버스사의 Vahana와 릴리움사의 Lilium jet이 있고, 틸트 로터형으로는 현대자동차의 S-A1, 틸트 덕트형은 벨사의 Nexus 4EX가 있음
- 복합형(Lift & Cruise)
  - 복합형은 고정익이 장착되어 있어 전진 비행 시 속도가 빠르고 추력편향 방식과 유사하지만 날개가 고정되어있고 장착되어 있는 수직이착륙 방향의 로터는 전진 비행에는 사용되지 않고 오직 수직 이착륙 과정에만 사용된다는 점에서 차이가 있음. 즉 수직 이착륙에 쓰이는 로터와 전진비행에 사용되는 프로펠러가 별도로 작동하고 동력이 수직이착륙 시에는 수직이착륙용 로터에만 집중되고 전진비행 시에는 프로펠러에만 전달됨
  - 하지만 수직이착륙 시 사용되는 로터들이 전진비행에는 고정이 되어 항력을 증가시켜 추력편향 방식과 비교해서는 전진비행 효율이 떨어짐[138]. 대표적인 복합형 eVTOL으로는 보잉사의 Aurora eVTOL이 있음
- 멀티로터형(Wingless)
  - 멀티로터형은 고정익 날개가 없고 두 개 이상의 양력을 생성하는 로터가 장착된 형태로서 로터를 이용하여 수직이착륙과 전진비행을 함
  - 멀티로터형은 단순한 로터 메카니즘으로 구성되어 있어 비행제어가 용이하며 안정성이 좋고, 다른 형태들과 마찬가지로 분산전기추진방식을 사용하여 설계의 다양성을 얻을 수 있으며, 커다란 디스크 액추에이터 표면을 가지고 있어 호버링과 수직이착륙을 하는데 있어서 높은 에너지 효율성을 보임
  - 하지만 날개가 장착되어 있지 않아 전진비행에 있어서 순항속도를 높이는데 한계가 있음[160]. 대표적인 멀티로터형 eVTOL으로는 이항(Ehang) 184, 216, 볼로콥터사의 Volocopter 2X가 있음

○ eVTOL 항공기 선정

- UAM을 주로 이용하는 고객을 출퇴근 시간대의 직장인으로 선정함. 이에 따라 UAM의 가장 큰 기대효과는 교통 혼잡도 해결과 직장인들의 출퇴근 소요시간 감소임. eVTOL을 선정하는데 있어서 가장 중요한 기준으로 eVTOL의 순항속도를 선택함
- 프로토타입이 존재하고 제원이 공개된 유형별 eVTOL의 순항속도를 아래 표에 나타냄. 평균 속도는 추력편향형은 254.4km/h, 복합형은 194km/h, 멀티로터형은 106km/h임
- 순항속도가 가장 빠른 추력편향형과 순항속도는 느리지만 안정성이 뛰어나고 기술적으로 상용화가 가장 빠른 멀티로터형을 운행 소요시간 분석에 사용함

표 63 eVTOL 유형별 순항속도[154]

유형	eVTOL PAV	순항 속도 (km/h)
추력편향	Vahana	200
	Airspacex Mobi	241
	Nexus 4EX	241
	S-A1	290
	Lilium jet	300
복합형	Aurora	180
	Ecrm-004	217
	TF-2A	180
	Cora	177
	Cityhawk	216
멀티로터	Ehang 216	130
	Volocoptor 2x	100
	Pop up	150
	Elroy	70
	Seraph	80

○ 소요시간 분석

- UAM 운행 소요시간을 계산하기 위해서 앞에서 설정한 5 가지의 경로에 대해서 각각 승용차를 이용한 경우, 대중교통을 이용한 경우, eVTOL을 이용하였을 경우 소요시간을 계산함
- 승용차를 이용하였을 경우는 서울 열린데이터 광장에서 제공하는 서울도시고속도로 일별 시간대별 속도정보를 이용해 시간을 계산하여 아래 첫 번째 표에 나타냄[7]. 출퇴근 소요시간은 각각 경로 1은 43분, 34분, 경로 2는 28분, 34분, 경로 3은 32분, 15분, 경로 4는 71분,77분, 경로 5는 60분, 49분이 소요됨
- 대중교통을 이용하였을 때 소요시간은 구글맵에서 제공하는 데이터를 이용하여 계산함. 출퇴근 소요시간은 각각 경로 1은 71분, 63분 경로 2는 51분, 53분 경로 3은 61분, 63분 경로 4는 95분 90분, 경로 5는 80분, 75분임
- eVTOL을 이용하여 5 가지 경로에 대하여 수직 이착륙장 간의 직선거리를 이동하는데 소요시간은 앞서 구하였던 추력편향 형태의 평균속도를 가지는 가상의 eVTOL1과 멀티로터 형태의 평균속도를 가지는 가상의 eVTOL2를 가정하여 계산함. 가상의 eVTOL1의 상세 제원은 아래 두 번째 표와 같이 순항속도 254.4.km/h, 가속도 2m/s , 이륙시간 20초, 착륙시간 20초로 가정하였음. 가상의 eVTOL2의 상세 제원은 아래 세 번째 표와 같이 순항속도 106km/h, 가속도 2m/s^2, 이륙시간 20초, 착륙시간 20초로 가정함

표 64 승용차 구간별 평균속도[7]

구간	출근(7~9)시간 평균 속도(km/h)	퇴근(17~19)시간 평균 속도(km/h)	거리(km)
고양IC-일산IC	95.4	93.7	3
일산IC-자유로JC	64.8	48.1	1.8
자유로JC-행주IC	38.5	25.5	2.3
행주IC-가양대교북단	17.6	46.7	5.6
가양대교북단-원효대교남단	30.7	26.4	8.5
원효대교남단-여의도한강공원	30	30	0.5
원효대교남단-원효대교북단	51.1	51.2	1.2
원효대교북단-한남대교북단	26.5	25.7	7.2
한남대교북단-한남IC	49.6	46.4	1.4
한남IC-서초IC	32.9	25.9	4.4
판고JC-양재IC	17.2	47.4	7.7
양재IC-서초IC	32.6	45.3	3.1

표 65 추력편향을 이용한 가상의 eVTOL1, 멀티로터를 이용한 가상의 eVTOL2 제원

구성	Virtual eVTOL1	Virtual eVTOL 2
유형	추력편향	멀티로터
순항속도 (km/h)	254.4	106
가/감속도 (m/s)	2	2
이륙시간 (s)	20	20
착륙시간 (s)	20	20
상승/하강 시간 (s)	35.3	14.7
상승/하강 거리(km)	1.25	0.78
PAX	4	4

- eVTOL을 5 가지 직선 경로에 대한 거리는 Haversine 공식을 이용하여 계산하였음. Haversine 공식은 지구상의 위도와 경도를 아는 특정 위치사이의 거리를 구할 때 사용하는 공식으로 다음과 같음[161]

$$= 2 \times r \times \arcsin(\ \ \sin\ ((\psi_2 - \psi_1)/2) + \cos(\psi_1)\cos(\psi_2)\sin^2((\lambda_2 - \lambda_1)/2)) \qquad (32)$$

- 여기서 d는 두 위치사이의 거리, r은 지구반지름, $_1, \psi_2$은 위치1과 위치2의 위도, λ_1, λ_2은 위치 1과 위치 2의 경도를 의미함
- 위 식을 이용하여 경로별 직선거리를 계산한 결과 아래 첫 번째 표와 같이 경로 1은 17.12km, 경로 2는 10.09km, 경로 3은 10.55km, 경로 4는 26.65km, 경로 5는 20.21km로 계산됨
- UAM의 임무형상은 항공안전법 시행규칙 제 199조에 의거하여 사람 또는 건축물이 밀집된 지역의 상공에서는 가장 높은 장애물의 상단에서 300m 고도에서 비행해야 하므로 아래 첫 번째 그림과 같이 300m고도까지 수직상승, 500m 고도까지 천이비행, 그 후 순항으로 나타냄
- 추력편향 형태인 가상의 eVTOL1을 이용하여 5 가지 직선경로에 대해서 임무형상을 적용시키면 소요시간은 아래 두 번째 표와 같이 경로 1은 5.25분, 경로 2는 3.62분, 경로 3은 3.73분, 경로 4는 7.53분, 경로 5는 6.01분이 소요됨. 멀티로터 형태를 적용한 가상의 eVTOL2를 이용하여 마찬가지로 적용하면 소요시간은 아래 두 번째 표와 같이 경로 1은 9.97분, 경로 2는 5.99분, 경로 3은 6.25분, 경로 4는 15.36분, 경로 5는 11.72분이 소요됨
- eVTOL을 이용하여 앞서 설정한 경로를 운행한 소요시간은 직선거리 소요시간 계산과 같은 방법으로 계산함. 먼저 위 식을 이용해 5 가지 곡선 경로들을 여러 개 직선으로 쪼개어

각각 계산하여 합한 결과 아래 첫 번째 표와 같이 경로 1은 19.64km, 경로 2는 12.95km, 경로 3은 10.55m, 경로 4는 32.58km, 경로 5는 23.5km로 계산됨. 가상의 eVTOL1을 이용하여 5 가지 경로에 대해서 임무형상을 적용시키면 소요시간은 아래 세 번째 표와 같이 경로 1은 5.87분, 경로 2는 4.79분, 경로 3은 3.73분, 경로 4는 8.93분, 경로 5는 6.79분이 소요됨. 가상의 eVTOL2를 이용하여 마찬가지로 적용시키면 아래 네 번째 표와 같이 경로 1은 11.39분, 경로 2는 7.61분, 경로 3은 6.25분, 경로 4는 18.71분, 경로 5는 13.58분이 소요됨

- 5 가지 경로에 대해서 승용차, 대중교통, eVTOL1을 이용하였을 때 소요시간을 아래 두 번째 그림 에 나타내었고, 승용차, 대중교통, 가상의 eVTOL2를 이용하였을 때 소요시간을 아래 세 번째 그림에 나타냄. 각 교통수단별로 5 가지 경로에 대한 소요시간의 평균을 내면 승용차 46.8분, 대중교통 71.6분, 직선거리를 가상의 eVTOL1을 이용하였을 경우 5.3분, 가상의 eVTOL2를 이용하였을 경우 9.86분, 우회거리를 가상의 eVTOL1을 이용하였을 경우 5.9분, 가상의 eVTOL2를 이용하였을 경우 11.51분이 소요됨
- 추력편향 형태인 eVTOL1과 멀티로터 형태인 eVTOL2를 비교해보면 아래 다섯 번째 표와 같이 eVTOL 1과 eVTOL 2의 소요시간 비율이 경로 1은 1.94, 경로 2는 1.77, 경로 3은 1.68, 경로 4는 2.10, 경로 5는 2로 표현할 수 있음. 즉 멀티로터 형태는 추력편향 형태와 비교하여 순항속도가 느려서 소요시간이 2배 가까이 차이가 나고 거리가 더 긴 경로에 대해서는 소요시간의 차이가 점점 더 커짐

표 66 경로별 직선, 우회 거리

	직선거리(km)	우회거리(km)
경로1	17.12	19.64
경로2	10.09	12.95
경로3	10.55	10.55
경로4	26.65	32.58
경로5	20.21	23.5

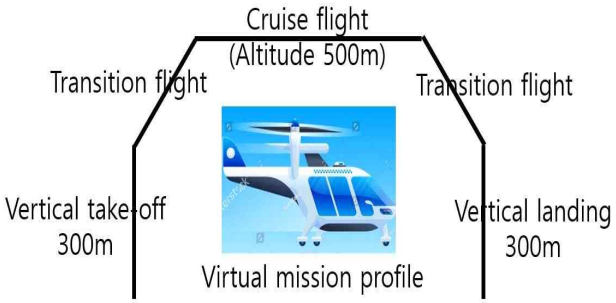


그림 395 가상의 임무형상

표 67 가상의 eVTOL1을 이용한 직선거리 소요시간

eVTOL1(직선거리)	이착륙시간 (s)	가/감속 시간 (s)	순항 시간 (min)	총 소요 시간 (min)
경로1	40	70.6	3.42	5.25
경로2	40	70.6	1.79	3.62
경로3	40	70.6	1.90	3.73
경로4	40	70.6	5.70	7.53
경로5	40	70.6	4.18	6.01

표 68 가상의 eVTOL2를 이용한 직선거리 소요시간

eVTOL2(직선거리)	이착륙시간 (s)	가/감속 시간 (s)	순항시간 (min)	총 소요 시간 (min)
경로1	40	29.4	8.81	9.97
경로2	40	29.4	4.83	5.99
경로3	40	29.4	5.09	6.25
경로4	40	29.4	14.20	15.36
경로5	40	29.4	10.56	11.72

표 69 가상의 eVTOL1을 이용한 우회거리 소요시간

eVTOL1(우회거리)	이착륙시간(s)	가/감속 시간(s)	순항시간 (min)	총 소요 시간 (min)
경로1	40	70.6	4.04	5.87
경로2	40	70.6	2.46	4.29
경로3	40	70.6	1.90	3.73
경로4	40	70.6	7.10	8.93
경로5	40	70.6	4.95	6.79

표 70 가상의 eVTOL2를 이용한 우회거리 소요시간

eVTOL2(우회거리)	이착륙시간(s)	가/감속 시간(s)	순항시간 (min)	총 소요 시간 (min)
경로1	40	29.4	10.23	11.39
경로2	40	29.4	6.45	7.61
경로3	40	29.4	5.09	6.25
경로4	40	29.4	17.56	18.71
경로5	40	29.4	12.42	13.58

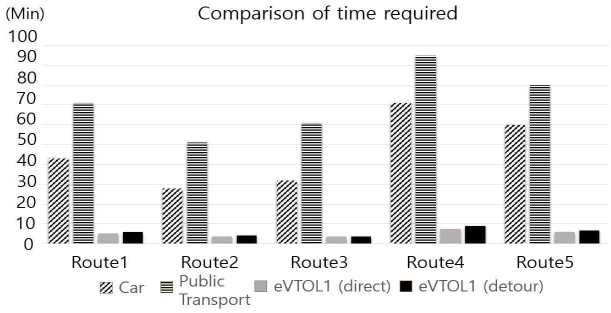


그림 396 승용차, 대중교통, eVTOL1 소요시간 비교

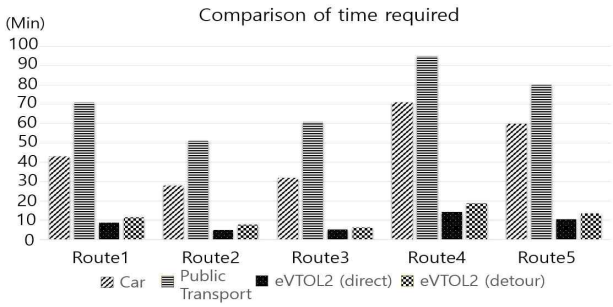


그림 397 승용차, 대중교통, eVTOL2 소요시간 비교

- 가상 eVTOL1을 사용한 UAM을 이용하여 최단거리 즉 직선거리를 운항하면 평균적으로 승용차에 비해서 소요시간이 1/9 수준으로 감소하고, 대중교통과 비교하면 1/13로 감소되며, 소음이나 사생활 침해와 같은 다양한 문제가 상대적으로 적은 한강과 고속도로 상공을 이용한 우회경로를 운항하는 경우 소요시간이 승용차와 비교하여 1/8, 대중교통과 비교하여 1/12수준으로 감소함
- 마찬가지로 가상의 eVOTL2를 사용한 UAM을 이용하면 소요시간이 직선거리는 승용차와 비교하여 3/14, 대중교통과 비교하여 1/7 수준으로 감소하고 우회거리는 승용차와 비교하여 1/4, 대중교통과 비교하여 1/6수준으로 감소됨
- 거주지와 직장에서 수직 이착륙장까지의 소요시간이 포함되지 않은 시간임을 감안해도 UAM을 이용하였을 때의 소요시간은 기존 교통수단 대비 소요시간이 매우 짧으므로 단순 소요시간만을 비교하였을 때 UAM은 새로운 교통수단으로서 적절하고, 교통 혼잡도를 해결해주며, 출퇴근 직장인들이 도로 위에서 낭비하는 시간을 줄여줄 것임
- 우버사와 여러 자문회사 보고서에 따르면 2035년경 UAM이 보편화되면 승객 당 비용이 기존 택시비용보다 낮아지는 것으로 되어있어 2035년경 UAM이 기존 대중교통 수단의 상당부분을 대체할 것으로 기대됨

2-3. 도심 항공 모빌리티(UAM) 수도권 운영에 따른 소음 분석

2-3-①. UAM 소음 목표 분석

○ 개요

- 최근 경제 수준의 향상에 따라 환경이 삶의 질을 결정하는 중요한 요소로 부각되므로 UAM 운용 시 발생하는 소음에 대해 분석할 필요성이 높아짐[162]. 헬리콥터가 UAM으로 사용하지 못하는 가장 큰 이유가 소음 때문임
- 수도권처럼 인구가 밀집되어 있는 곳에서 PAV를 운용하기 위해서는 안전성 다음으로 소음이 중요한 고려요소임
- 미항공우주국에서는 통근, 통학 인구가 밀집되어 있는 지역에서의 교통 혼잡 해결 방안으로 “Hoverless VTOL Hyper Commuter Mission Concept” 을 선보였고, 미국에서 가장 교통 혼잡이 심한 것으로 알려진 실리콘 밸리 주변의 출퇴근 시나리오에 적용함[163]

○ UAM 소음 목표 분석

- UAM 스테이션에서 운용 시 소음은 거주지 도로에서 운행하는 트럭 소음(고도 50 ft에서 75-80dB)의 절반에 근접해야 하며, 이는 현재 운용중인 헬리콥터의 4분의 1 수준임(고도 500 ft에서 약 62 dB)
- 도심 내에서의 UAM 운용이 동시다발적으로 일어날 것으로 예상되는 바, 소음 목표를 고도 250 ft에서 67dB로 설정하는 것이 합리적이라고 판단됨

2-3-②. UAM 국내외 소음 평가 단위 선정

○ UAM 국내외 소음 평가 단위 선정

- 항공기 소음 평가방법
  - 항공기 소음 평가 단위는 다양하며, 그에 따른 평가 기준도 모두 다름. 현재 우리나라의 경우에는 Weighted Equivalent Continuous Perceived Noise Level (WECPNL)을 사용하고 있음. WECPNL은 국제민간항공기구(ICAO)에서 항공기의 금속성 소음특성을 감안하여 항공기에 의한 장기 연속노출의 척도로서 제안한 측정 단위임. 우리나라에서는 항공기 최고소음도를 평균한 값에 주간, 야간, 심야 시간대별로 운항횟수를 가중하여 주민이 실제 느끼는 소음에 가깝게 산출함

$$ECPNL \quad L_{\max} + 10\log(N + 3N_3 + 10(N_1 + N_4)) - 27 \tag{33}$$

  - 그러나 WECPNL 평가 방법은 과도하게 근사화되었고, 국내의 다른 환경소음은 등가소음도 방식($_{en}$)을 적용하기 때문에 항공기 소음과 비교하기 어려워 지속적인 소음 노출의 총합을 반영하기에 한계가 있음. 또한, 미국, 유럽 등 항공 선진국의 경우 등가소음도 방식을 채택하고 있어, 대한민국 환경부는 국제적으로 통용되는 단위로 통일하기 위해 항공기 소음 단위를 현행 최고소음도 방식인 WECPNL에서 등가소음도 방식인 L_{den}로 변경하고, 2023년부터 본격 시행한다고 밝혔음
  - 등가소음평가 방식은 WECPNL 평가 방법의 단점들을 보완해 주고 WECPNL과 선형 관계에 있으며, 소음 측정 기술의 발달로 인하여 단순화의 과정 없이도 적분을 이용한 자동 측정이 용이하기 때문에 현재 기준치와의 연속성을 감안하였을 때 항공기 소음 평가 지표로 사용하기에 적절함[164]
  - 등가소음평가 방식은 하루 동안 매시간 등가소음도를 측정하고 시간대별로 가중치를 부여한 후에 24시간으로 나눈 평균 소음임. 또한, 그 시간대를 2분할 한 것이 L_{dn} (Day-Night Average Sound Level)이고, 3분할 한 것이 L_{den} (Day-Evening-Night

Average Sound Level)임. 2분할법의 경우에는 주간인 는 07:00~22:00이며, 야간인 L_n은 22:00~07:00으로 나눠지며, 야간 시간대에만 10 dB의 가중치가 부여됨. 한편, 3분할법의 경우 주간인 L_d는 07:00~19:00, 저녁인 L_e는 19:00~22:00이며, 야간인 L_n은 22:00~07:00으로 나눠지며, 저녁에는 5 dB, 야간에는 10 dB의 가중치가 부여됨

- 따라서 등가소음도로서 소음 측정에 용이하며 낮, 저녁과 야간 시간대 모두를 구분하며, 또한 국내의 개정 법률에 따라 2023년 WECPNL에서 바뀌게 되는 L_{den}을 기준으로 하여 소음 분석을 수행하였음

$$L_{dn} \quad 10\log[(\frac{1}{24}(15 \quad 10^{10}+9 \quad 10^{\frac{(L_n+10)}{10}})] \tag{34}$$

$$L_{den}=10\log[\frac{1}{24}(12 \quad 10\frac{L_d}{10}+3 \quad 10^{\frac{L_e+5}{10}}+9 \quad 10^{\frac{L_n+10}{10}})] \tag{35}$$

2-3-③. 소음 평가 도구 및 시나리오 선정

○ 인구분포를 고려한 소음 우선 경로 생성 및 소음평가 기준 선정

- 소음이 인구에 미치는 영향 평가방법

- 소음에 영향을 받는 인구 비율 산정식

✓ eVTOL PAV가 UAM으로 운용됨에 따라 운용 경로 주변에 소음이 발생하게 될 것이며, 따라서 해당 소음이 미치는 구역에 거주하는 인구에게 그 영향을 끼치게 될 것임. 따라서 소음이 적은 eVTOL PAV 운용 경로를 생성을 위해서는 발생하는 소음에 영향을 받는 각 거주 지역별 인구 비율(%)을 아래 식과 같이 측정하는 것이 중요함

✓ 아래 그림은 본래의 Shultz curve이며, 아래 식은 소음에 의해 높은 수준의 부정적인 영향을 받는 거주 인구수를 계산하기 위해 사용된 Shultz curve의 Curve Fitting 함수임[10]

✓ 아래 두 번째 그림은 야간시간 공유 비율에 따른 소음 측정 지표별 차이를 나타냄[165]. 이 그림에서 주목해야 할 지표별 차이는 L_{dn}과 L_{den}의 차이를 나타내는 부분임. 야간시간을 공유하지 않음에도 불구하고 2 dB 차이 밖에 발생하지 않았으며 공유 비율이 높아질수록 그 차이가 줄어드는 것을 확인할 수 있음. 또한 위의 두 식에서 L_{dn}과 L_{den}의 야간시간은 22:00~07:00로 동일함. 따라서 두 지표간의 소음 수준 차이는 작다고 가정하고 아래 식의 L_{dn}을 L_{den}으로 대체하는 것이 가능함

$$Highly annoyed,\% = \frac{100}{1+e^{(11.13-0.141L_{dn})}} \tag{36}$$

✓ 한편, Shultz curve는 서로 다른 소음원 사이의 특징을 구별하지 않은 상태에서 높은 수준의 소음의 영향을 표현한 것임. 이에 따라 후속 연구에서 교통수단 사이의 특징을 구별하여 높은 수준의 소음의 영향을 밝혔으며, 이를 아래 세 번째 그림에 나타내었음. 본래의 Shultz curve에 의하면 65 dB에서의 높은 수준의 소음 영향은 약 12%임. 하지만 항공기가 미치는 소음 영향은 다른 소음원에 비해 높은 경향을 보이므로 약 27% 수준이라는 것이 아래 그림에 나와 있는 Miedema curve임[10]

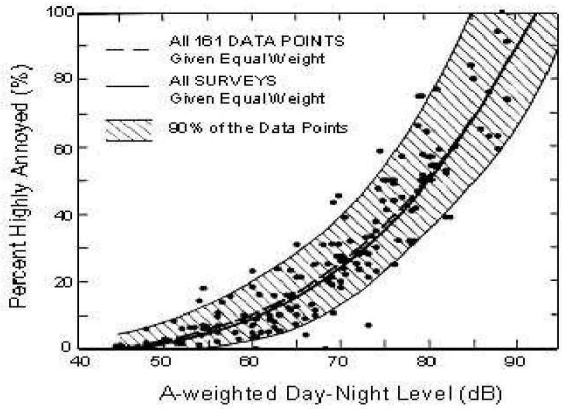


그림 398 본래의 슐츠 커브[10]

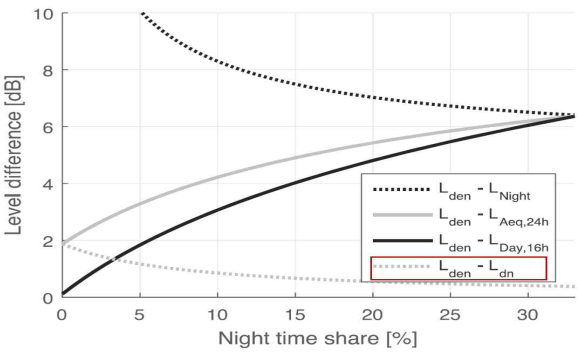


그림 399 야간시간 공유 비율에 따른 소음 측정 지표별 차이[165]

- 소음에 영향을 받는 인구수 산정방법
  - ✓ 경로 주변에 미치는 소음의 폭은 행정 구역 일부분에 한정될 확률이 높음. 또한 행정구역의 형태가 사각형과 같은 이상적인 도형의 형태가 아니며 거주민이 지역구의 단위 면적당 균등하게 분포되어 있지도 않음. 현재 인구분포는 행정구역에 따라 통계자료가 존재하므로 이를 보정하여 합리적으로 UAM 소음이 인구에 미치는 영향을 도출해 낼 수 있는 방법을 제시하고자 함

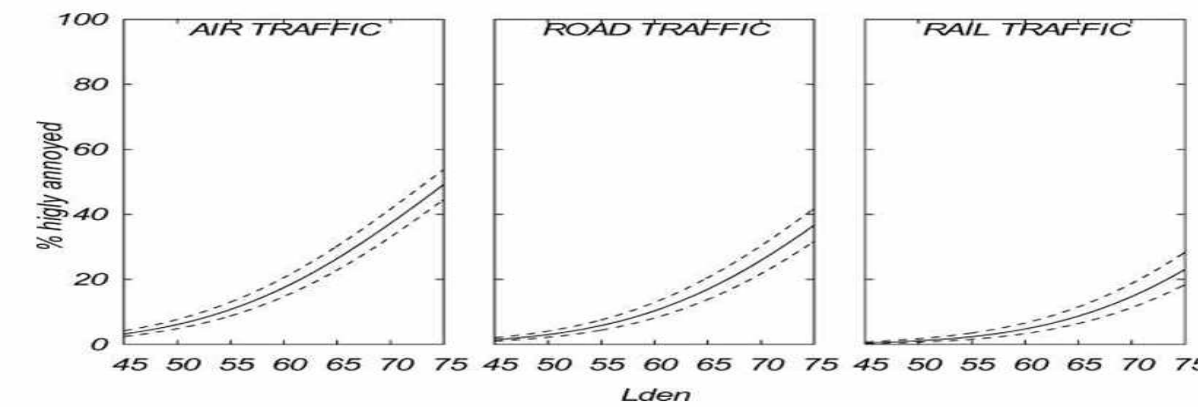


그림 400 소음원에 따른 높은 수준의 소음 영향 비율[10]

- ✓ 선행연구에서는 아래 그림과 같이 행정구역을 사각형 형태의 셀을 이어붙인 것으로 모델링한 것으로 실제 행정구역의 생김새와는 이질감이 있음. 또한, 행정구역마다 사각형의 셀의 넓이가 다르게 설정되어 전체적으로 통합된 느낌을 주지 못함
- ✓ 정육각형 셀을 이용하여 모델링한다면 실제 행정구역의 생김새와의 이질감을 최소화시킬 수 있음. 아래 그림은 동일한 면적의 정육각형 타일을 하나의 셀로 사용하여 서울시 일부분을 모델링한것임
- ✓ 행정구역의 실제 면적을 완전히 덮도록 다수개 배치함으로써 셀 면적의 합과 실제 면적이 동일하거나 근사하도록 만드는 것이 중요함
- ✓ 각 행정구역에 인구를 타일당 동일하게 분포시킬 수 있으며 정육각형 셀의 크기를 조절하여도 실제 행정구역의 모양과 이질감 없이 타일당 인구수를 줄이거나 늘임으로써 소음 면적에 따라 세밀하게 조정할 수 있다는 장점이 있음

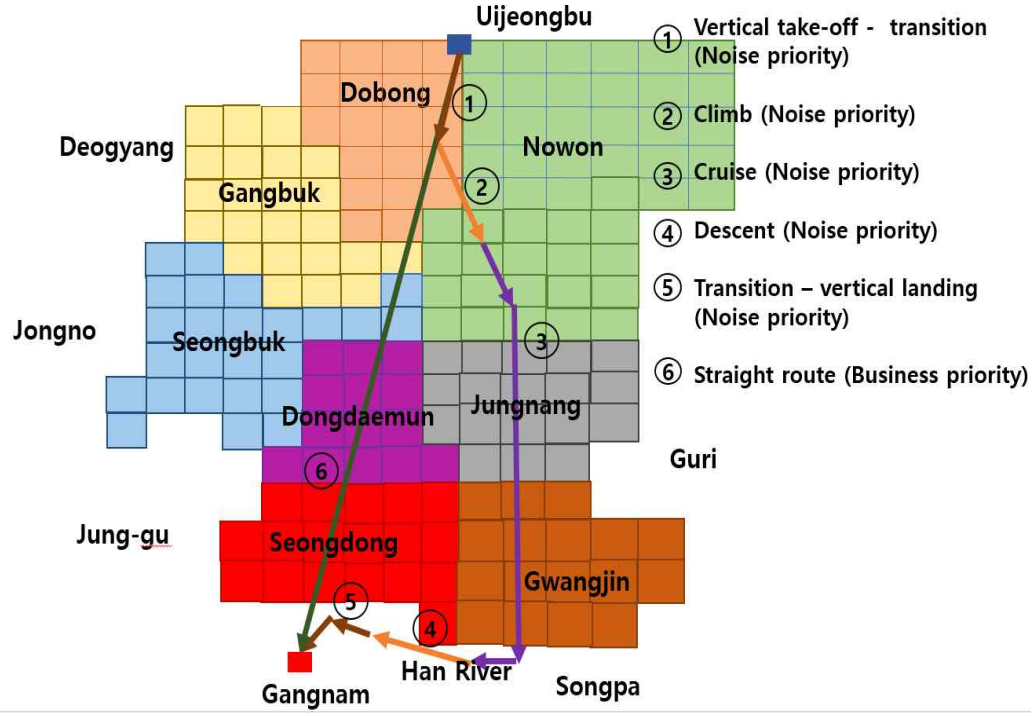


그림 401 선행연구에서 사용된 수도권 일부 지역 모델링

- ✓ 예를 들어, 아래 왼쪽 그림은 UAM이 실제 도시를 통과할 때 생성되는 소음을 가상적으로 나타낸 것이며, 오른쪽 그림은 이를 정육각형 타일로 이루어진 이상적인 공간에 옮겨 놓은 것임
- ✓ 아래 그림은 서울시 강서구를 모사한 것이며, 그 면적은 약 41.4 km^2임. 한편 정육각형 셀은 개당 0.8 km^2의 면적을 가지며 총 52개의 셀로 구성되어 있음. 따라서 모델링된 도시의 총 면적은 약 41.6 km^2로 실제 행정구역과의 적분상의 오차가 약 -0.48%가 발생하므로 적절히 모델링되었다고 볼 수 있음
- ✓ 대한민국 행정안전부에서 서비스 중인 주민등록 인구통계에 따르면 강서구의 거주 중인 총 인구수는 2021년 기준 572,377명임
- ✓ 한편 모델링된 도시는 총 52개의 셀로 이루어져 있으므로 셀 1개 당 11,007명을 가정하여 배치시킬 수 있음

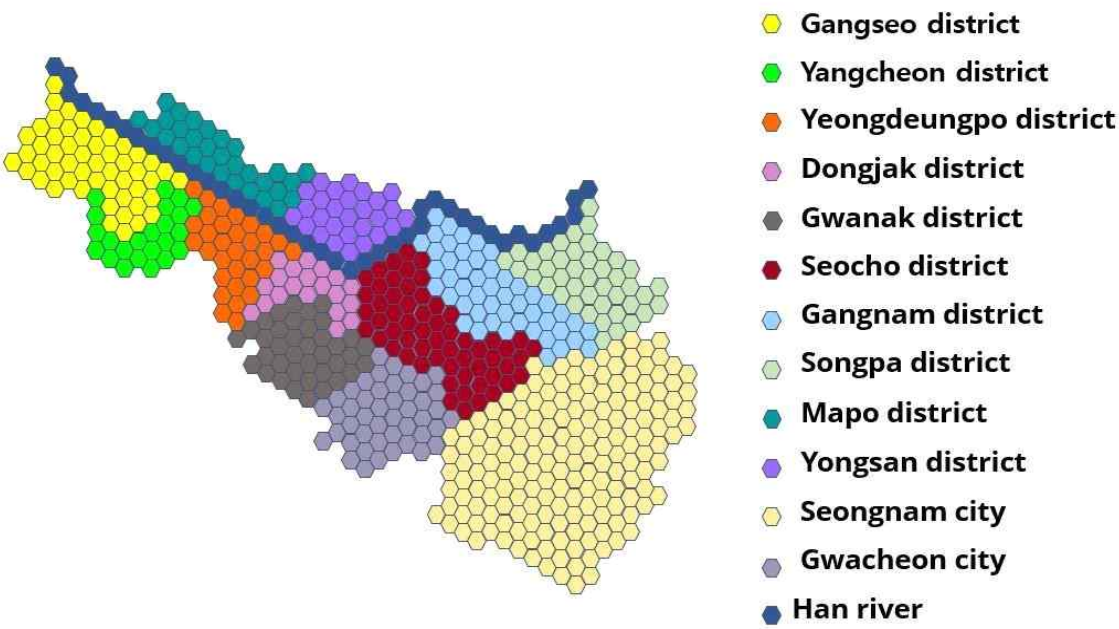


그림 402 정육각형 셀로 모델링된 서울시 일부

✓ 이때 65 dB에 해당하는 소음 영역은 총 6개의 셀을 포함하며 60 dB에 해당하는 소음 영역은 총 10개의 셀을 포함하므로 각각 66,042명과 110,070명이 해당 소음의 영향이 미치는 셀에 거주하는 인구의 수가 됨

✓ 결과적으로 위의 Miedema curve에 따라 UAM의 경로에서 발생하는 소음에 의해 높은 수준의 영향을 받는 인구수는 65 dB 구간에서는 총 17,831명이며 60 dB 구간에서는 총 19,813명이 됨

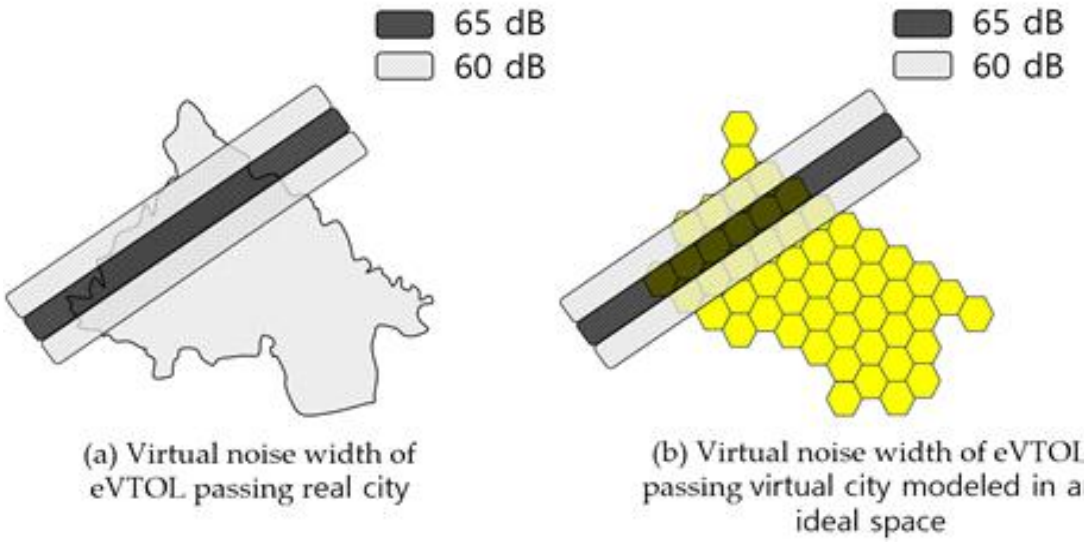


그림 403 모델링된 행정구역에서 나타낸 가상의 UAM 경로에 따라 발생하는 소음

- UAM 운용 시나리오 선정

• 경로 및 수직이착륙장 설정

✓ 본 연구에서는 비즈니스 우선 시나리오와 소음 우선 시나리오 두 가지 경로 설정 방법을 이용하였음.

✓ 비즈니스 우선 시나리오는 소음에 대한 영향을 무시한 채 최단거리로 목적지에 도착하는 경우이며, 소음 우선 시나리오는 소음에 대한 영향을 최대한 줄이기 위해 경로의 대부분을 인구가 최소로 거주하는 지역을 따라 비행하도록 설정된 시나리오임

✓ 위와 같은 두 가지 경로 작성 방법을 이용하여 아래 그림과 같이 K-UAM 로드맵 수도권 지역 실증노선(안)에 제시된 김포공항에서 코엑스까지의 노선이 줄일 수 있는 소음의 영향을 평가해보았음[1]

✓ 각 경로로부터 예상되는 소음의 영향권에 포함되는 행정구역에는 서울시의 강서구, 양천구, 영등포구, 동작구, 서초구, 강남구, 송파구, 관악구, 마포구, 용산구와 경기도의 과천시, 성남시가 있음

✓ 이 경로가 지나가는 행정구역을 위의 정육각형 셀로 모델링한 결과는 아래 표와 같음. 각 행정구역에서의 실제 면적과 모델링된 면적의 평균 오차율은 약 1.1%이며, 최대 오차율은 관악구의 2.7%로 적절히 모델링되었다고 볼 수 있음

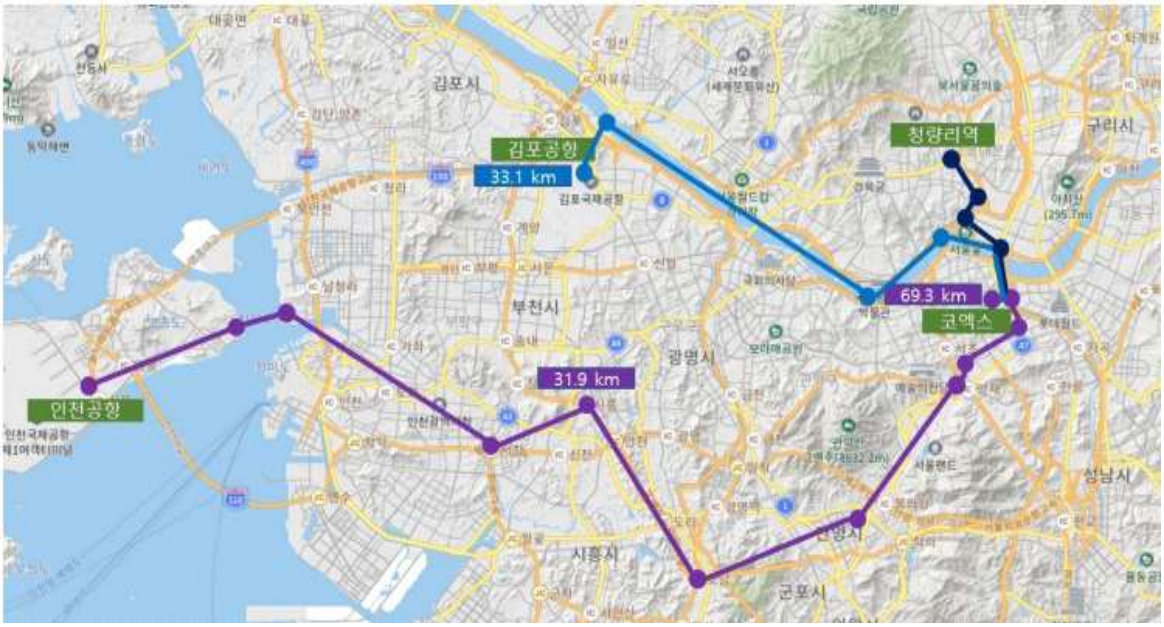


그림 404 수도권 지역 실증노선(안)[1]

표 71 실제 행정구역과 모델링된 행정구역 비교

District name	Gangseo	Yangcheon	Yeongdeunpo	Dongjak	Gwanak	Seocho
Real area(km2)	41.4	17.4	24.6	16.4	29.6	47.1
Number of cells	52	22	31	20	38	59
Cell area(km2)	0.8					
Total cells area(km2)	41.6	17.6	24.8	16	30.4	47.2
Error(%)	-0.48	-1.1	-0.8	2.4	-2.7	-0.2
Total population	574,454	385,415	516,173	390,084	488,136	609,076
Population on each cell	10,528	17,519	16,650	19,504	12,846	10,323
District name	Gangnam	Sonpa	Mapo	Yongsan	Seongnam	Gwacheon
Real area(km2)	39.6	33.9	141.7	21.9	23.9	35.9
Number of cells	49	43	177	28	30	45
Cell area(km2)	0.8					
Total cells area(km2)	39.2	34.4	141.6	22.4	24	36
Error(%)	1.01	-1.47	0.1	-2.3	-0.4	-0.3
Total population	875,606	754,899	927,886	308,551	476,777	66,420
Population on each cell	17,870	17,556	5,242	11,020	15,893	1,476

2-3-④. 소음평가를 위한 UAM 운용 모델 선정

○ 소음 평가를 위한 운용 모델 생성

- UAM이 상용화되면 동시다발적으로 운용될 것이며, 이에 따른 소음은 동시에 운용되어지는 기체들의 소음이 중첩되어있는 형태일 것임
- 따라서 AEDT 소프트웨어에 기체가 반복적으로 운용되어지도록 입력하여 소음을 구하는 것이 바람직하다고 판단됨. 하지만 eVTOL 개발사에서 NPD 데이터를 공개하지 않아 본 연구에서는 현재 운항 중에 있는 헬리콥터를 소음 운용 모델로서 선정하였음

- 2015 FAA Civil Aircraft Registry Database에 제시된 미국에서 민수용으로 운용 중인 유형별 헬리콥터와 시장 수요는 아래 표와 같음[8]

표 72 유형별 헬리콥터와 시장 수요[8]

Helicopter type	Representative helicopter	Number of operations	Proportion(%)
1-2 seats piston	Robinson R22	1,165	19.95
3-5 seats piston	Robinson R44	1,160	23.29
6-8 seats turbo-shaft	Bell 206B	3.001	51.39
9-12 seats turbo-shaft	Sikorsky S-76	314	5.38
Total		5,840	100

○ 소음 평가를 위한 운용 모델 생성: UAM PAV 운용 횟수 선정

- 국내에서는 현대의 S-A1, 한화의 Butterfly가 조종사 1인, 승객 5인을 수용할 수 있는 기체를 상용화할 계획이며 한국항공우주연구원에서도 OPPAV 기체를 스케일업하여 4-5인승급을 개발한다고 발표하였으므로 추세에 맞추어 3-5인승 유형의 헬리콥터만 이용하여 분석을 수행하였음
- 많은 eVTOL 개발사들의 목표 소음은 62-65dB임. 따라서 해당 목표 소음을 헬리콥터 운용 모델로 구현하기 위해 운용 시간대를 출퇴근 시간이 포함된 06:00와 20:00 사이로 고정한 뒤 운용 대수를 조절하였음
- 운용 대수 200대부터 100 씩 증가시켜가며 소음 지도를 구성해본 결과 이착륙 구간에서의 소음 수준은 큰 차이가 없었으나 순항 구간에서 300-500대의 경우 65-70 dB이 주요 소음 수준이었으며 200대인 경우에 60-65 dB이 주요 소음 수준으로 나타났음
- 따라서 본 연구에서는 AEDT 소프트웨어에서의 R44 운용 대수를 200대로 지정하여 순항 시에 해당 목표 소음이 포함된 60-65 dB로 맞추었음

○ 소음 평가를 위한 운용 모델 생성: UAM PAV 수직이착륙장 및 비행 경로 선정

- UAM의 수직이착륙장은 수도권과 같이 고층빌딩이 밀집한 지역에서는 고층빌딩의 옥상에 위치한 헬리패드(helipad)를 이용할 수 있을 것임. 또한 NASA에서는 도시 고속도로의 입체 교차로를 활용하는 방안도 제시한 바 있음
- 본 연구에서 선정한 수직이착륙장에 대해 모든 경로를 선정하는 것은 비행금지 구역, 비행제한 구역 등의 문제와 추후 진행될 K-UAM 핵심기술개발사업의 공역 및 비행절차 설계 기술의 UAM 위험도 및 소음 기반 공역/회랑 평가 기술의 결과를 반영해야 하므로 본 보고서에서는 대표적인 시범항로의 일부인 김포공항에서 코엑스 항로를 선정하였음. 따라서 수직이착륙장의 위치는 김포공항 주차장과 코엑스 건물 옥상으로 선정하였음

2-3-⑤. 수도권 운영 소음 분석: AEDT를 이용한 소음 분석 내용 설정

○ 수도권 운영 소음 분석: 수직이착륙장 및 비행경로 설정

- 아래 그림은 비즈니스 우선 시나리오와 소음 우선 시나리오 두 가지 경로 작성 방법을 AEDT 소프트웨어 상에서 나타낸 것임
- 비즈니스 우선 시나리오 경로는 김포공항에서부터 COEX까지의 최단 거리인 직선 경로로 설정되었으며 소음 우선 경로의 경우에는 소음에 대한 영향을 감소시킬 수 있는 한강을 통하여 비행할 수 있도록 설정되었음
- 헬리패드 설정
  - 구글 지도에서 위도, 경도, 고도 데이터 추출
- 비행경로 설정

- 비행경로는 하나의 헬리패드에서 시작하여 경로의 특정 위치에서 끝나는 것을 이륙-상승-순항 구간으로 하며 경로의 특정 위치에서 시작하여 다른 하나의 헬리패드에서 끝나는 것을 순항-하강-착륙 구간으로 설정함

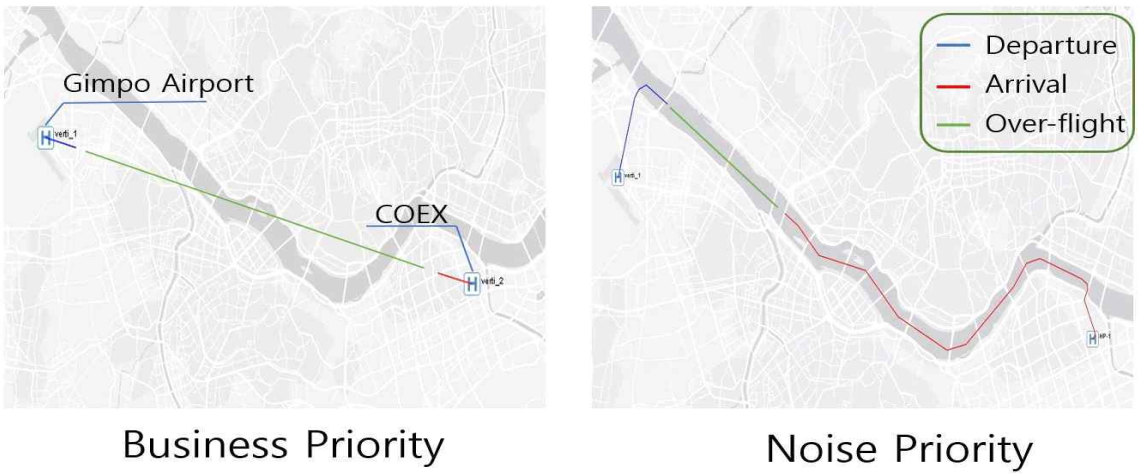


그림 405 두 가지 경로 작성 방법을 통해 나타낸 김포공항-COEX 경로

○ 수도권 운영 소음 분석: Receptor 및 운용 설정

- AEDT 소프트웨어에서 작성된 두 가지 시나리오에 대한 경로에서 발생하는 소음 지도는 아래 그림과 같음. 소음 지도가 구성되는 범위인 리셉터 세트 설정의 경우 그리드 방법을 선택하였고 경로가 서쪽에서 동쪽을 향해 있기 때문에 위도 37.48, 경도 126.64를 기준으로 X축으로부터 100, Y축으로부터 100 총 10,000개의 리셉터를 경로상에 위치시켰음. 리셉터 사이 간격은 X축에 대해 0.31 nm, Y축에 대해 0.1 nm으로 설정하였음

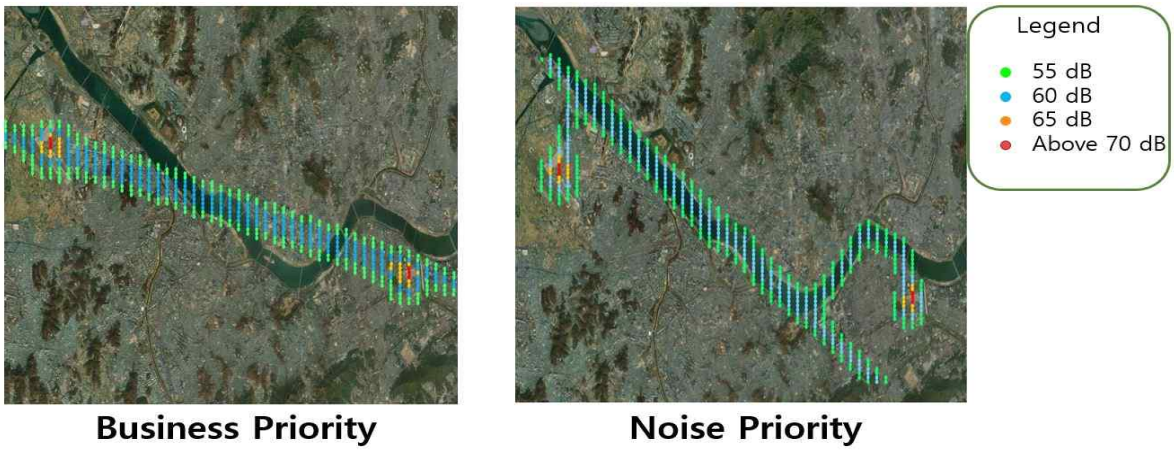


그림 406 AEDT 소프트웨어에서 나타낸 두 가지 경로에 대한 소음지도

2-3-⑥. 수도권 소음 분석 결과

○ 수도권 운영 소음 분석: 소음 분석 결과

- 아래 그림과 같이 FAA에 따르면, 60 dB은 도심지역 수준의 소음이고 65 dB 이상은 임계 소음 노출 수준을 벗어나는 소음이며, 55 dB은 교외지역 수준의 조용한 소음임[166]
- 본 연구는 도심지역에서 운용될 UAM에 대한 AEDT 소음 분석을 목표로 하기 때문에 55 dB 이하의 소음은 분석 수행을 진행하지 않았음.

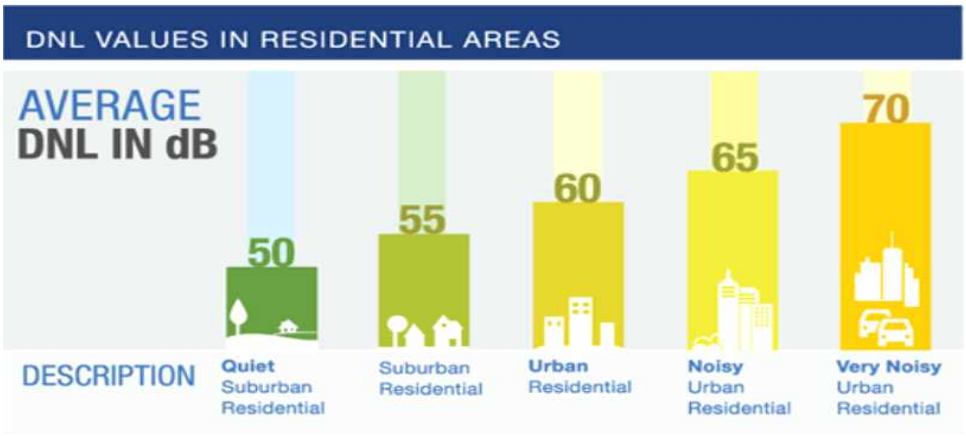


그림 407 FAA에서 제시한 소음 수준별 영향 비교[166]

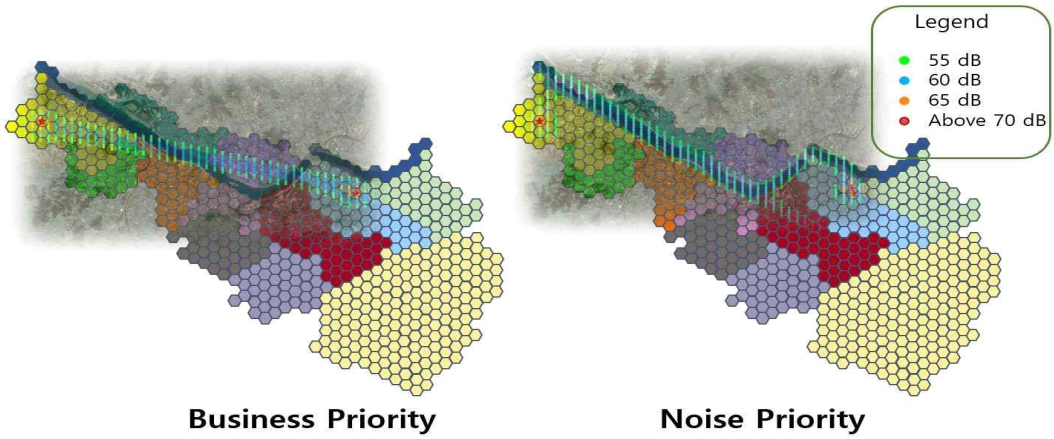


그림 408 모델링된 행정구역에 표시한 서로 다른 두 경로의 소음지도

- 측정된 소음이 인구에 미치는 영향 예측

- 위 그림은 AEDT를 통해 얻은 두 가지 경로에 대한 소음 지도와 수도권 내 일부 행정구역을 모델링한 것을 겹쳐 놓은 것이며 아래 표는 각 행정구역에 대하여 소음 지도의 리셉터가 지나는 셀의 수를 나타낸 것임
- 65 dB 이상의 결과는 모두 수직이착륙 시에 발생하므로 두 경로 모두 동일하였음. 즉 소음에 대한 영향의 차이가 발생하는 것은 60 dB 리셉터가 분포되어 있는 운항 구간임

표 73 두 가지 경로에 대해 소음 수준별 리셉터가 포함된 셀의 개수

	District	60dB	65dB	Above 70dB	Total Cells
Business Priority	Gangnam	6	4	1	11
	Gangseo	11	3	1	15
	Mapo	2	0	0	2
	Seocho	0	0	0	0
	Yangcheon	2	0	0	2
	Yeongdeungpo	3	0	0	3
	Yongsan	10	0	0	10
Noise Priority	Gangnam	2	4	1	7
	Gangseo	5	3	1	9
	Mapo	0	0	0	0
	Seocho	1	0	0	1
	Yangcheon	0	0	0	0
	Yeongdeungpo	0	0	0	0
	Yongsan	0	0	0	0

- 행정구역을 지나가는 소음 리셉터가 포함된 셀 개수와 위에서 제시한 셀 당 인구수 데

이터를 이용하여 소음 영향권에 있는 인구수를 추정하면 아래 표와 같음. 비즈니스 우선 경로는 총 581,464명이 소음의 영향을 받으며 소음 우선 경로는 총 230,165명이 소음의 영향을 받음

- 따라서 소음 우선 경로에서의 소음에 영향을 받는 인구수가 비즈니스 우선 경로보다 약 60% 감소되었으므로 더 효과적인 경로라고 할 수 있음

표 74 두 가지 경로에 대해 소음 수준별 리셉터가 포함된 셀의 개수

	District	Total Cells	Population on each cell	Affected Population	Total Affected Population
Business Priority	Gangnam	11	17,870	196,570	581,464
	Gangseo	15	10,528	157,920	
	Mapo	2	15,893	31,786	
	Seocho	0	10,323	0	
	Yangcheon	2	17,519	35,038	
	Yeongdeungpo	3	16,650	49,950	
	Yongsan	10	11,020	110,200	
Noise Priority	Gangnam	7	17,870	125,090	230,165
	Gangseo	9	10,528	94,752	
	Mapo	0	15,893	0	
	Seocho	1	10,323	10,323	
	Yangcheon	0	17,519	0	
	Yeongdeungpo	0	16,650	0	
	Yongsan	0	11,020	0	

- 뿐만 아니라, 위에서 제시한 Miedema curve에서의 소음 노출비를 곱하여 각 경로에서 60 dB에서 높은 수준의 소음 영향을 받는 인구수를 구해보면 아래와 같음

표 75 두 가지 경로에 대해 높은 수준의 소음 영향을 받는 인구수

	Business Priority	Noise Priority
Population	322,285	98,703
Highly annoyed(%)	18%	
Noise level	Population of noise exposure	
60 dB	58,011	17,766

- 소음에 대해 높은 수준의 영향을 받는 인구수는 비즈니스 우선 경로가 소음 우선 경로에 비해 약 70% 높으므로 소음 측면에서 더 효율적이라는 것을 알 수 있음

2-3-⑦. 보완된 소음 분석 방법: 소음 면적을 이용한 소음 분석

○ 소음 면적을 이용한 소음 분석 방법

- 소음 면적을 이용한 소음에 영향을 미치는 인구수 예측방법

- 위에서 제시한 방법은 소음 리셉터가 포함된 셀의 개수를 구하는 방법으로 장거리 경로 또는 다수의 경로를 분석하기에는 많은 시간이 소요되어 한계가 있음
- 또한, 아래 그림과 같이 실제 행정구역은 강과 같은 인구가 살지 않는 부분까지 그 경계선이 미치므로 인구를 셀에 배치시킬 때 생활 불가 구역까지 배치된다는 오류가 생김



그림 409 인구가 살지 않는 부분까지 경계선이 미치는 실제 행정구역

- 이러한 문제를 해결하기 위해 AEDT 소프트웨어에서 도출된 소음지도의 면적을 구해 행정구역의 넓이에 얼마큼의 비율을 차지하고 있는지를 계산할 수 있는 방법을 제시하고자 함

- 소음 지도 모델링

- 아래 그림과 같이 AEDT 소프트웨어는 Contour 형태의 데이터를 shp 파일로 저장할 수 있는 기능을 제공하고 있음
- 그 아래 그림과 같이 shp 파일 형태의 소음 지도는 가장 작은 소음 수준에 대한 영역이 상위 소음 수준에 대한 영역을 포함하고 있음. 따라서 GIS 프로그램을 이용하여 각 소음 수준별로 이를 구분 지어주었음

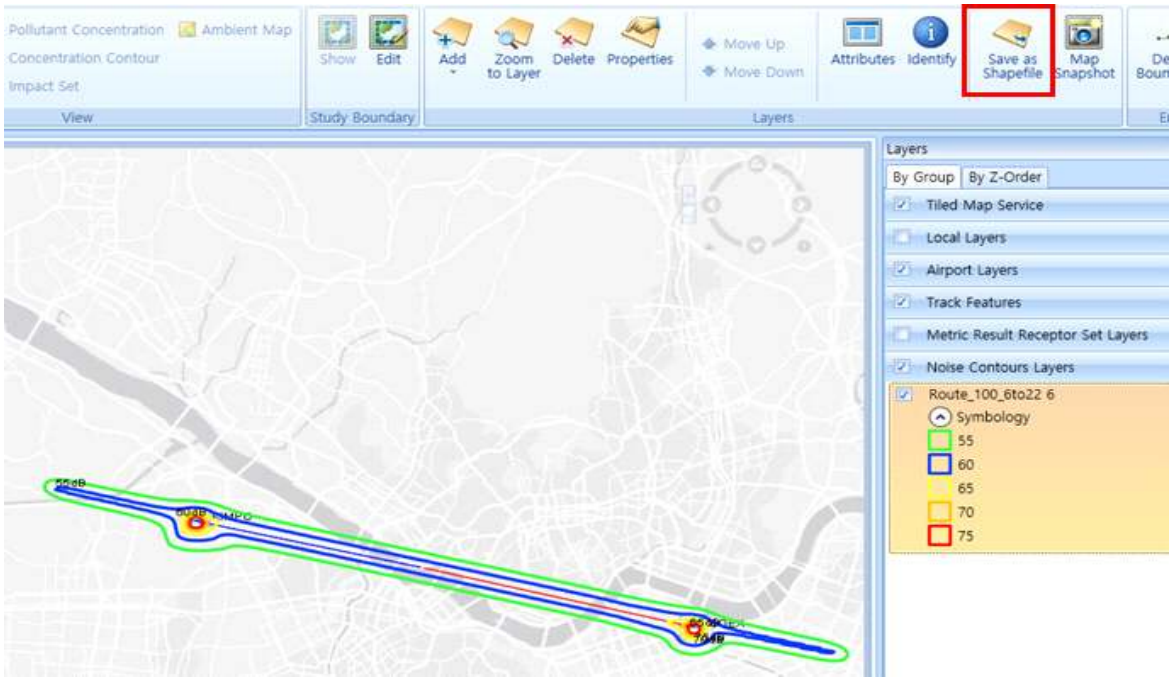


그림 410 shp 파일의 저장 기능을 제공하는 AEDT 소프트웨어

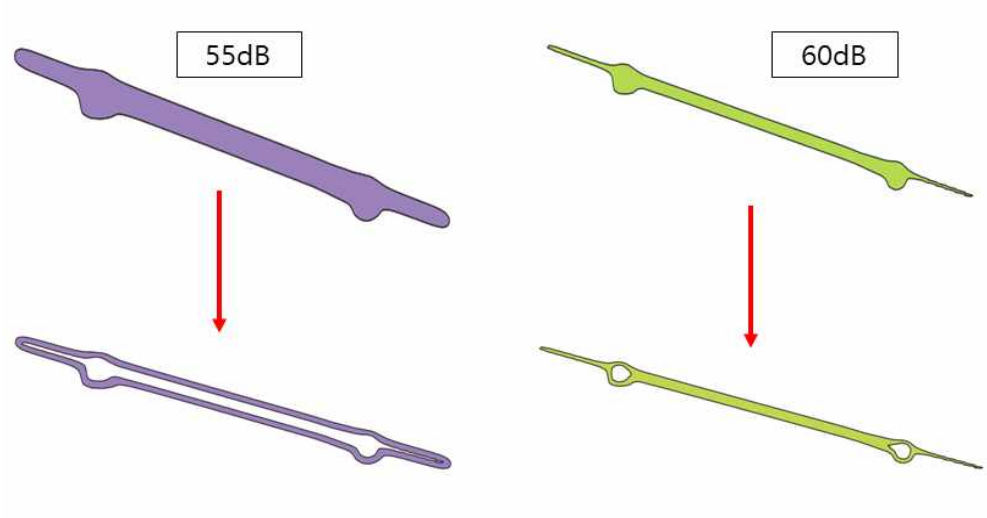


그림 411 소음 수준별 영역 구분

- 소음 면적을 이용한 소음 영향권 내 있는 인구수 추정

- 위의 데이터들을 종합하여 Python 소프트웨어로 처리하면 아래 그림과 같은 소음 지도를 얻을 수 있음. Python에서 구현한 소음 지도와 AEDT에서의 소음 지도가 동일함을 확인할 수 있음



그림 412 Python으로 구현한 UAM 경로에 대한 소음 지도

- 아래 표는 Python 소프트웨어를 이용하여 행정구역별 넓이와 소음 수준별 넓이를 구한 것임. 소음의 면적이 가장 적게 포함되어 있는 행정구역은 60 dB에서의 양천구로 그 넓이는 약 0.1 km^2임
- 따라서 행정구역 당 하나의 셀의 크기를 0.1 km^2로 하여 인구 배치 및 소음 면적에 대한 셀의 개수를 구한 것은 그 아래 표에 제시하였음

표 76 Python 소프트웨어를 이용해 계산한 행정구역 면적 및 소음 수준별 면적

District	District Area(km2)	55 dB	60 dB	65 dB	70 dB	75 dB
Gangnam	37.1	3.7	3.4	0.7	0.3	0.3
Gangseo	38	7.6	6.3	0.8	0.3	0.3
Gyeyang	45.3	3.9	1.2	-	-	-
Mapo	19.3	2	1.3	-	-	-
Seocho	45.4	0.4	0.2	-	-	-
Songpa	29.8	-	1.1	-	-	-
Yangcheon	17.3	-	0.1	-	-	-
Yeongdeungpo	19.2	-	0.8	-	-	-
Yongsan	18	-	3.5	-	-	-

표 77 행정구역별 셀당 인구수

District	Affected population on 55dB	Affected population on 60dB	Affected population on 65dB	Affected population on 70dB	Affected population on 75dB	Affected population on each district
Gangnam	87,320	80,240	16,520	7,080	7,080	198,240
Gangseo	114,912	95,256	12,096	4,536	4,536	231,336
Gyeyang	26,400	7,920	-	-	-	34,320
Mapo	96,140	62,491	-	-	-	158,631
Seocho	5,368	2,684	-	-	-	8,052
Songpa	-	27,863	-	-	-	27,863
Yangcheon	-	2,228	-	-	-	2,228
Yeongdeungpo	-	21,504	-	-	-	21,504
Yongsan	-	59,990	-	-	-	59,990
Total affected population	330,140	360,176	28,616	11,616	11,616	707,844

- 위의 데이터를 종합하여 셀당 인구수와 소음수준별 셀의 개수를 곱하여 아래 표와 같이 행정구역별 및 소음수준별 소음에 영향을 받는 인구수를 예측할 수 있음
- 본 연구와 같은 방법을 이용하면 경로에 따라 전체적인 소음의 영향을 조절할 수 있을 뿐만 아니라, 행정구역별, 소음수준별 소음의 영향 역시 조절할 수 있을 것으로 판단됨

표 78 행정구역별 셀당 인구수 및 소음수준별 셀의 개수

District	Number of cells	Population on each cell	Number of 55dB cells	Number of 60dB cells	Number of 65dB cells	Number of 70dB cells	Number of 75dB cells
Gangnam	371	2,360	37	34	7	3	3
Gangseo	380	1,512	76	63	8	3	3
Gyeyang	453	660	40	12	-	-	-
Mapo	193	4,807	20	13	-	-	-
Seocho	454	1,342	4	2	-	-	-
Songpa	298	2,533	-	11	-	-	-
Yangcheon	173	2,228	-	1	-	-	-
Yeongdeungpo	192	2,688	-	8	-	-	-
Yongsan	180	1,714	-	35	-	-	-

2-3-⑧. 수도권 소음 분석 결론

- 본 연구에서는 UAM의 수도권 운용 시 소음 감소를 위해 실제 행정구역을 셀 단위로 모델링하여 인구를 배치시킨 뒤 두 가지 경로를 비교해봤을 때 얼마큼의 소음 감소를 이루어낼 수 있는지 확인해 보았음
- 소음 우선 시나리오가 비즈니스 우선 시나리오에 비해 60-70% 소음 절감 효과가 있었음
- 따라서 UAM 운용 시 소음에 영향을 받는 인구수를 줄이는 방법은 크게 두 가지일 것이라고 판단됨
  - UAM 경로가 인구가 살지 않는 한강을 따라 비행할 수 있도록 하거나 고속도로를 따라 운용 혹은 운용에 위험하지 않은 선에서 산악 지형을 이용하여 비행
  - 셀당 인구수가 큰 행정구역은 그만큼 인구 밀집 구역이라는 뜻임. 인구가 밀집된 행정구역을 최소한으로 경유하도록 비행할 수 있는 경로 설정

2-4 도심 항공 모빌리티(UAM) 적용을 위한 수직이착륙장 개념 정립 및 구축 방안 마련

2-4-①. UAM 수직이착륙장 적용을 위한 수직이착륙장 개념 정립

○ 수직이착륙장 설계 요구조건

- 헬기장 문헌 검토

• 헬리콥터가 수직이착륙을 한다는 점과 eVTOL 항공기와 크기가 유사하다는 점에서 헬기장은 초기 UAM 시장에서 중요한 역할을 할 것으로 판단되며, 아래 그림과 같이 서울에는 500 여개 이상의 고층건물 헬기장이 있으며 UAM 실현 유망도시인 전 세계 75개 도시 중 서울은 헬리포트 (1위), 인구밀집도 (5위), 소득수준 (4위) 등 경쟁력이 높은 수준으로 평가되고 있다[167]. 따라서 기존의 헬기장을 활용하는 것이 새로운 생태계인 초기 UAM 시장의 비용을 절약할 수 있는 방안이 될 것임. 초기 단계에서는 5개의 헬기장으로도 충분하며, UAM가 활성화 되었을 때 500만에서 1천만 인구인 대도시들에는 전용 이착륙장 100개면 충분하다[12]

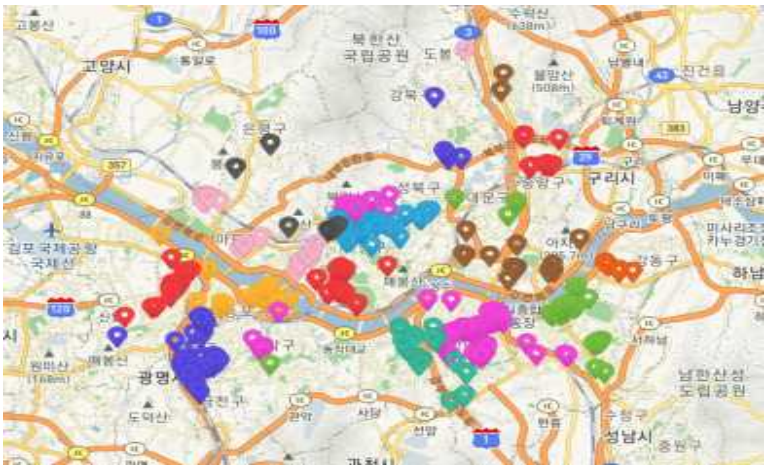


그림 413 서울의 고층건물 헬기장 위치

• 국토교통부의 비행장 설치기준에 따르면 "회전익 항공기 크기"를 해당 헬기장에 사용 예정인 가장 큰 회전익 항공기의 주 회전날개를 포함한 전체 길이와 폭 중 큰 값이라고 정의하고 있음. 착륙구역을 활주로 내부에 설치하는 경우 착륙구역의 중심은 활주로 가장자리에서 회전익항공기 크기의 0.6 배 이상 이격된 지점에 위치하여야 하며, 주기장의 크기는 회전익항공기 크기의 1.2 배 이상 직경의 원을 포함하는 크기를 확보해야 함[168]. 헬기장을 활용하여 수직이착륙장을 설계할 때 고려해야 할 구성요소에 대한 기준은 아래 그림들과 같음

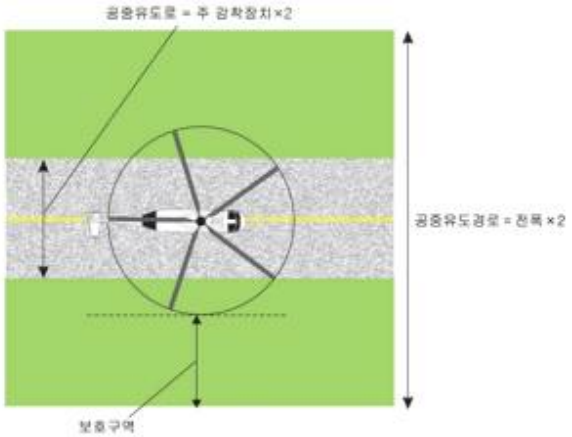


그림 414 유도로의 폭[168]

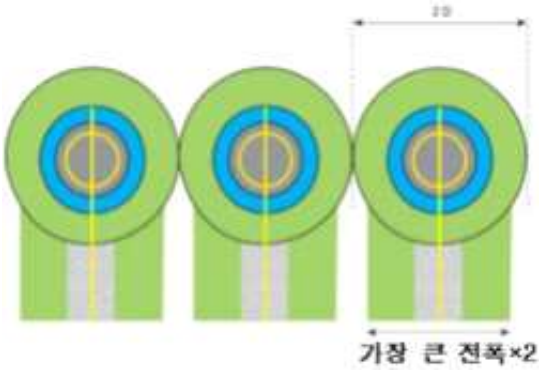


그림 415 수직이착륙장 동시 운용 시[168]

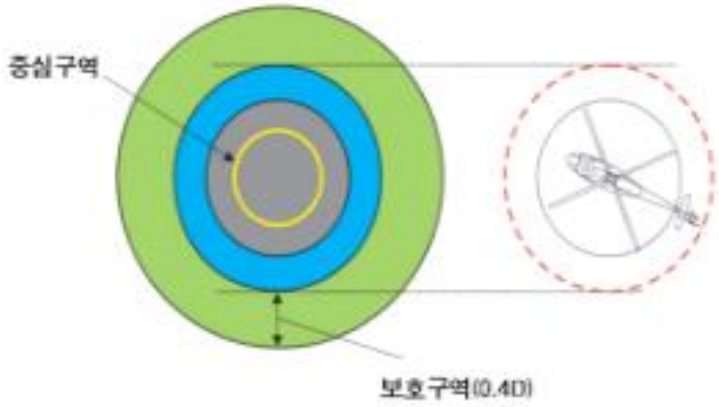


그림 416 주기장[168]

- UAM에 사용되는 비행체는 대부분 최대 이륙 중량이 7001lbs 미만이므로 '작은 헬리콥터' 로 분류됨. 수직이착륙장의 인프라 변수에는 이착륙 패드 외에도 유도로 및 게이트, 스테이징 스탠드 등이 있음[95]
- TLOF 패드는 AC 150/5390-2C의 권장 사항에 따라[113] 하나 이상의 운영 가능한 접근/출발 경로, 최종 접근 및 이륙 구역, TLOF 구역과 안전 영역으로 구성되며 아래 왼쪽 그림과 같음. 헬리콥터의 경우 TLOF 패드는 일반적으로 하나의 로터 직경 길이와 너비를 가지고 있지만 새로운 eVTOL 항공기의 경우 로터의 직경이 매우 작을 수 있으므로 TLOF 패드의 최소 길이와 너비는 양끝 길이(Tip-to-Tip Span)로 가정하며[115], 또한 양끝 길이는 수직 상승을 위한 프로펠러를 포함하며 아래 오른쪽 그림과 같음. 최종 접근 및 이륙 구역(FATO; final approach and takeoff area)은 항공기의 1.5배로 가정함. 하나의 TLOF 패드 당 하나의 안전구역이 필요하며, 20 ft 또는 로터 스팬의 1/3에 해당하는 구역임. 접근/출발 경로는 8:1의 경사로에서 위로 고도 4,000 ft까지 장애물이 없어야 하며, 접근/출발 표면은 FATO의 폭에서 500 ft 까지 선형으로 확장됨[95]
- 유도로는 크게 두 가지 유형으로 분류되며, 바퀴가 있는 항공기가 자체 추진하거나 단단한 표면을 따라 가는 지상 유도로와 호버링이 가능한 항공기가 1~5 ft의 바퀴/스키드 높이에서 20 knot의 속도로 이동할 수 있는 호버 유도로로 각각 정의됨. 유도로는 유도로 양쪽에 여유 공간을 확보해야하며, 최소 크기는 설계 항공기의 2배 또는 로터 직경의 1.5배임[113]

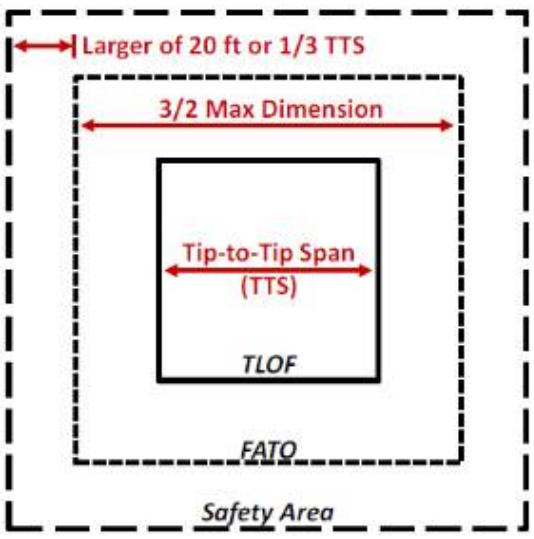


그림 417 TLOF 패드 디자인 요소와 규격[95]

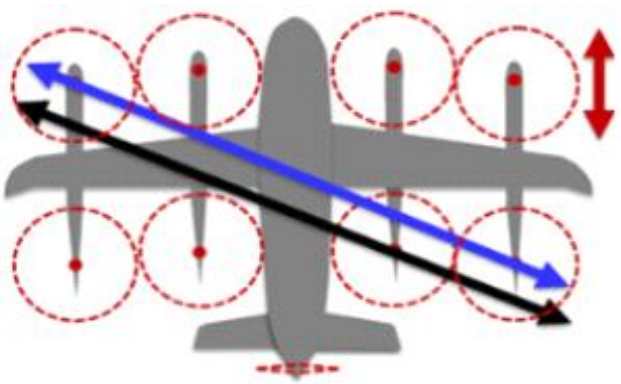


그림 418 수직이착륙장 설계 치수[95]

- 게이트는 항공기 조종 및 주기를 위한 장애물이 없는 최소 영역을 제공해야 함. 게이트의 유형에 따라 차이가 있을 수 있지만 게이트의 직경이 항공기의 최대 규격과 같다고 가정

하며, 지상 유도의 경우 10 ft, 호버 유도의 경우 10 ft 또는 로터 스팬의 1/3을 더한 값임[95]. 통근용 항공기의 경사로 운영에 대한 연구에 따르면 200 ft 이내에 항공기의 프로펠러를 가동시켰을 때 승객은 활주로에서 승하차가 허용되지 않음[118]

- 스테이징 스탠드는 게이트와 달리 항공기의 주기 및 서비스(충전, 연료 공급, 유지 보수 등)를 제공하지만 승객 활동이 없는 영역임. 이는 격납고, 계류장, 들판 등 항공기가 주기 될 수 있는 공간의 형태를 취할 수 있음[95]. 스테이징 스탠드는 주기 항공기의 게이트보다 공간 효율성이 좋으므로 공항과 같이 충분한 부지를 확보할 수 있다면 스테이징 스탠드를 활용하는 것이 효율적임. 인프라 변수 간의 상호 작용을 나타내는 수직이착륙장 운영 개념은 아래 그림과 같음[95]

- eVTOL 항공기와 국내 헬기장 크기 검토

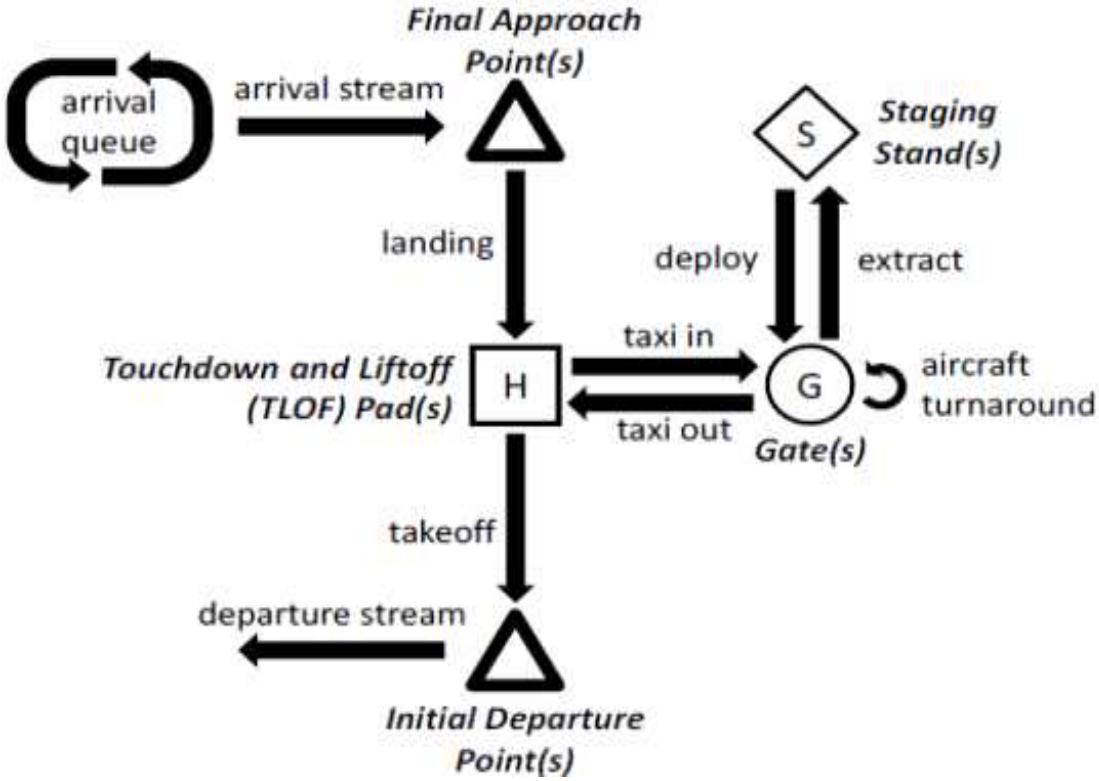


그림 419 인프라 변수 간의 운영 상호 작용을 표시하는 포괄적인 Vertiport 운영 개념[95]

- 현재 개발 중인 eVTOL 항공기들이 앞서 살펴본 국내 규정을 만족시키면서 현재 설치된 헬기장 크기에서 운영 가능한지를 판단하기 위해 주목받고 있는 기업들의 eVTOL 항공기 제원을 검토함. 여러 형태의 eVTOL 항공기 설계 치수 측정 방법으로 항공기 날개 길이와 기체 길이로 만든 사각형의 대각선 길이로 TLOF 패드 규격을 위한 최대 치수를 결정함. 검토한 5개의 eVTOL 항공기들의 최대 치수는 18.4 m이며, TLOF, FATO 및 안전 구역의 직경은 각각 18.4 m, 27.6 m, 33.7 m 임. 계산된 안전 구역의 직경에 대해 정사각형으로 변환하여 계산해보면 한 변의 길이가 23.8 m로 아래 첫 번째 표에서 검토한 eVTOL 항공기들의 크기는 아래 두 번째 표의 수도권 지역의 헬기장 중 규격에 맞는 9개의 헬기장을 활용하여 충분히 운용이 가능함

표 79 eVTOL 항공기별 차지하는 공간

Corporation (Nation)	eVTOL Aircraft	Footprint (wingspan×length)	Max dimension
Hyundai (Korea)	S-A1	15 m × 10.7 m	18.4 m
Bell (USA)	Nexus 4EX	12.2 m × 12.2 m	17.3 m
Airbus (France)	CityAirbus	8 m × 8 m	11.3 m
Volocopter (Germany)	Volocopter 2X	9.15 m × 9.15 m	12.9 m
Ehang (China)	Ehang 184	5.5 m × 3.86 m	6.7 m

표 80 수도권지역의 헬기장 패드[169]

Heliport Designation	Location	Pad Size (m m)
Jamsil	Seoul	20×20
Seocho-dong Complex	Seoul	25.5×24
Samsung Medical Center	Seoul	22.5×18.8
the Korea Broadcasting System	Seoul	19×19
Nodeulseom	Seoul	25×25
Inha University Hospital	Incheon	21×21
Incheon International Airport	Incheon	24×24
Ministry of Government Administration and Home Affairs Gwacheon	Gyeonggi	51.8×51.8
Parmi (Everland)	Gyeonggi	25×19
Serveone Konjiam CC	Gyeonggi	22.5×20
National 119 Rescue Services	Gyeonggi	100×21
KBS Suwon Center	Gyeonggi	18.3×21.4
Siamang Electronics Co., Ltd.	Gyeonggi	19×19
Samsung Electronics Co., Ltd. Rooftop	Gyeonggi	24×24
Chumsim Hospital land	Gyeonggi	27×27
Gimpo Aviation Industrial Complex	Gyeonggi	46×46 (34×34)
Hyundai Motor Namyang Research Institute Ground	Gyeonggi	75×27
Gyeonggi-do Fire and Aviation University	Gyeonggi	120×60

○ 수직이착륙장 운용주기 및 수용성 분석

- 변수 설정
  - 각 나라마다 지형과 인구 분포 등이 다르기 때문에 국내 실정에 맞는 수직이착륙장을 설계하는 것이 필요함. 수직이착륙장의 형태에 따라 운용 가능한 항공기의 대수 차이가 발생하며, 이는 수송 인원의 차이로 이어짐
  - 국토교통부의 항공안전법 시행규칙에 전기추진 수직이착륙기에 대한 이륙시간이나 이륙시간 간격 등에 대한 정확한 기준 및 규정이 없기 때문에 크기와 성능 정도가 비슷한 아래 표의 소형 헬리콥터의 상승 속도를 활용하여 각 수직이착륙장의 시간당 가능한 운용대수를 계산함

표 81 국내 운용 헬기들의 상승속도 검토

Helicopter Type	Rate of Climb (m/s)
S-64	6.8
Bell-206	6.9
Bell-212	8.6
UH-1	8.9
BO-105	8.0
AH-1	6.2
AH-64	9.0
KUH-1	8.5
AW-109	9.8
EC225	8.7

- 국토교통부의 K-UAM 실현 예측도에 따르면 UAM은 낮은 고도인 300~600 m에서 운용될 것으로 전망하고 있음[1]. 검토된 헬리콥터들의 상승 속도를 참고하여 계산해보면 8.15 m/s의 평균 상승 속도를 얻을 수 있으며, 300~600 m 고도까지 도달하는데 36.8~73.6 초의 시간이 소요됨. 본 논문에서는 현대자동차와 협업중인 우버사의 자료에 따라 임무형상의 순항고도인 1,500 ft (457.2 m)를 기준으로 하여[170] 56.1 초의 상승 시간을 가정함. 또한, 앞서 검토한 5개의 eVTOL 항공기 중에서 현대자동차의 S-A1은 재충전 시간을 5~7 분으로 예상하고 있으므로[171], 평균 시간인 6 분으로 가정하고 계산함. 우버사의 시뮬레이션 가정에 따르면 승객의 탑승과 하차에 필요한 시간을 각각 3 분과 2 분으로 가정하고 있으며[11], 이륙 전 최종 점검, TLOF 패드까지의 항공기 이동시간, 승객 승하차 시간 등을 고려하여 이착륙을 제외한 준비시간을 총 10 분으로 가정함

- 수직이착륙장 운영 대수 예측
  - eVTOL 항공기의 충전시간 동안 승객들이 탑승과 하차를 할 수 있는 시간이므로 승객의 승하차 시간을 재충전 시간에 포함시켜 시간을 단축하였으며 다음과 같이 하나의 eVTOL 항공기가 도착해서 이륙하는 한 주기를 간단하게 표현할 수 있음

$$cycle = t_{\ rrival} + t_{preparing} + t_{departure} \tag{37}$$

  - 순항고도까지의 이륙시간과 순항고도로부터 착륙까지의 시간이 같다고 가정하면 이착륙 시간인 56.1 초의 두 배(1.87 분)와 준비시간 10분을 더하여 수직이착륙장은 한 대의 항공기에 대한 11.87 분의 회전률을 얻을 수 있으며 이를 아래 표에 나타냄

표 82 eVTOL 항공기 한 대의 운영 주기

Arrival time (min)	Preparing time (min)	Departure time (min)	Total operation cycle time (min)
0.935	10	0.935	11.87

  - 앞에서 계산한 한 대의 항공기에 대한 11.87 분의 회전률로 한 시간에 약 5 대, 하루(오전 7시부터 오후 8시)에 약 65 대를 운용할 수 있음. 이는 실제 UAM 운용 시에 사용되는 적어도 하나 이상의 주기장을 포함하고 있는 형태의 수직이착륙장에 대한 것으로, 다른 항공기가 이착륙을 준비하는 동안 재충전(또는 배터리 교체)을 진행할 수 있어서 $_{reparing}$을 크게 줄일 수 있음
  - 또한 FAA Joint Order 7110.65W, 섹션 3-11-5에 따르면, 항공기는 200 ft 이상 분리된 중심선이 있는 TLOF 패드에 대해 동시 이륙 또는 착륙을 수행할 수 있음[129]. 미군은 150 ft 떨어진 TLOF 패드에서 작전을 수행하며, 최소 75 ft 떨어진 TLOF 패드 간격까지 작전을 수행할 수 있음[95]

- 수직이착륙장 이용가능 승객 수
  - 4 인승의 SA-1을 기준으로 앞의 계산 방식을 적용하여 한 달(30 일)동안의 이용 가능한 승객을 계산해보면 하나의 TLOF 패드만을 보유하고 있는 기본형 수직이착륙장에 대해 약 7,878 명을 수용할 수 있음
  - 동일한 기준으로 4 인승 eVTOL 항공기에 대해 단일 TLOF 패드와 적어도 두 개 이상의 주기장을 갖춘 수직이착륙장에 대해서 계산하면, 재충전시간으로 가정한 6 분을 생략할 수 있어 eVTOL 항공기 한 대의 운용 주기는 5.87 분이 되므로 시간당 하나의 수직이착륙장당 약 10 대, 한 달에 수용가능한 인원은 약 15,943 명으로 계산되며, 이는 기본형 수직이착륙장보다 약 102.4%의 증가된 승객이 이용할 수 있음
  - 여기서 동시운용을 적용하면 이착륙시간인 1.87 분을 무시할 수 있으므로 한 대의 항공기당 4 분의 주기로 운용이 가능하며, 시간당 15 대, 하루에 195 대, 한 달에 5,850 대를 운용할 수 있음. 4 인승 eVTOL을 기준으로 수송 가능한 승객은 시간당 60 명, 하루에 780 명, 23,400 명을 하나의 수직이착륙장에서 가능하며, 기본형 수직이착륙장보다 197.0% 증가된 승객이 이용할 수 있음. 각각의 적용에 따른 성능 비교를 아래 표에 나타냄

표 83 수직이착륙장의 향상된 성능 비교

Categories	Basic	Omitting recharging time	Applying simultaneous operation
Number of operational aircraft per hour	5	10	15
Number of operational aircraft per day	65	132	195
Number of operational aircraft per month	1,971	3,986	5,850
Number of passengers transportable	7,878	15,943	23,400
Improved ability	0%	102.4%	197.0%

2-4-②. 수직이착륙장(Vertiport/Vertistop) 개념 설계 및 구축 방안 마련

○ 수직이착륙장(Vertiport/Vertistop) 형상 설계

- 한강둔치 수직이착륙장 형상설계
  - 서울의 한강둔치에 설치할 수 있는 수직이착륙장 형상 모델을 CAD 소프트웨어인 CATIA를 사용하여 구현함. 아래 그림의 수직이착륙장은 현대자동차에서 제시한 모델을 참고하여 공개된 S-A1 크기를 기준으로 설계함

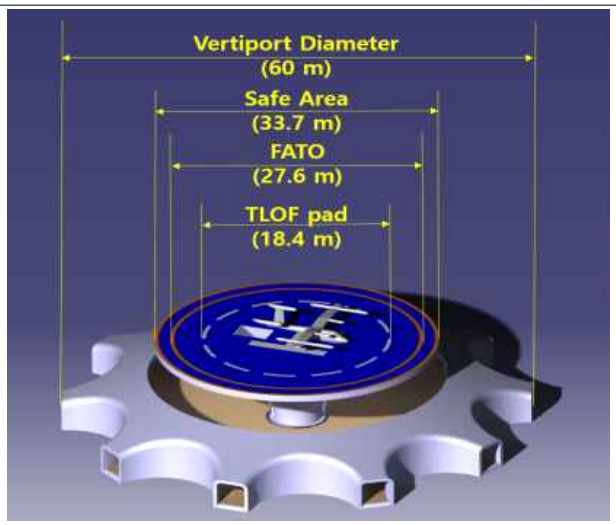


그림 420 한강둔치 수직이착륙장 형상설계

- 한강둔치 수직이착륙장 설치 지역을 직사각형으로 가정하여 설치할 수 있는 최대 수직이착륙장 개수를 계산함. CATIA를 사용하여 설계한 한강둔치 수직이착륙장의 직경은 60 m이므로 아래 그림에 나타낸 것과 같이 이촌과 잠원은 각각 4개를, 뚝섬 한강공원은 6개까지 가능함. 또한 검토된 한강둔치는 강변북로와 올림픽대교가 바로 옆을 지나므로 시민들의 접근성이 좋을 것으로 예상됨. 한강둔치 수직이착륙장은 주기장이 없는 단일 이착륙패드만으로 이착륙장이 구성되어 있지만, 각각의 건축물은 10개의 출입구 중 하나씩을 서로 연결하여 효율을 높일 수 있음. 구현한 수직이착륙장은 반지름 30 m의 원형이고 TLOF 패드의 반경은 안전구역을 포함하여 16.85 m임. 따라서 앞서 검토한 미군의 규정을 만족하는 150 ft (약 45 m) 이상 이격되도록 하기 위해 수직이착륙장 사이에 45 m에서 패드 경계간 거리인 26.3 m를 빼고 부족한 18.7 m만큼의 추가 간격을 두어 동시운용을 통한 효율적인 이착륙을 수행할 수 있으며 이를 아래 그림에 나타냄. 해당 공간의 크기와 설치 가능 수, 수직이착륙장이 설치되었을 때 시간당, 하루, 한 달 동안 수송 가능한 승객 수를 아래 표에 나타냄



그림 421 3개 한강공원에 대한 공간 측정 및 배치

표 84 한강둔치 수직이착륙장들의 성능 검토

Specification	Location		
	Ttukseom	Ichon	Jamwon
Vertiport size (diameter)	60 m		
Measured space ( )	159 240	138×330	160×206 and 84 ×171
Applied efficient method	simultaneous operation and skip recharging time		
Number of buildable vertiport	6	4	4
Number of passengers transportable per hour	360	240	240
Number of passengers transportable per day	4,680	3,120	3,120
Number of passengers transportable per day	140,400	93,600	93,600

- 나들목 수직이착륙장 형상설계
  - 수도권 지역의 나들목에 설치할 수 있는 수직이착륙장 모델 또한 CATIA를 사용하여 형상 설계를 진행함. 나들목의 수직이착륙장은 서초 IC의 네잎 클로버에 설치될 수 있는 크기로 설계하였으며, 아래 두 그림을 통해 설치될 공간의 크기를 검토함. 아래 그림과 같이 바깥쪽 도로는 기존의 도로이며 안쪽 도로는 수직이착륙장으로 접근하는 도로임



그림 422 서초 IC 공간 측정

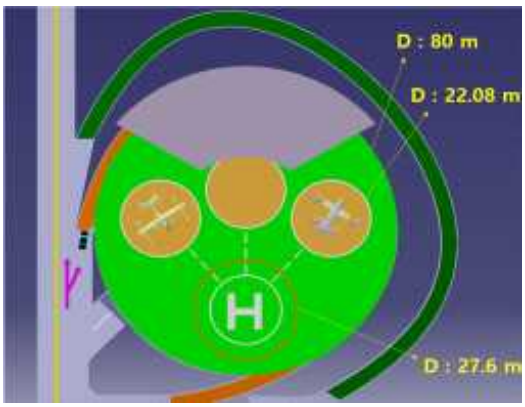


그림 423 나들목 수직이착륙장 규격

  - 아래 첫 번째 그림과 같이 바깥쪽 도로는 기존의 나들목 도로, 안쪽 도로는 수직이착륙장으로 접근하는 도로이며 옥상은 eVTOL 항공기가 대기 및 이착륙하는 공간이자 승객 대기 장소로 설계됨. 아래 두 번째 그림과 같이 1 층은 주차 및 충전 시설, 안내 데스크 등으로 사용되며 승강기를 통해 층간 이동이 가능하도록 설계함
  - 서초 나들목에서 폭이 100 m이상인 클로버 잎을 대상으로 설계한 나들목 수직이착륙장은 차량을 30 대 가량 수용할 수 있으며, UAM 운용뿐만 아니라 부가적인 편의시설까지 포함할 수 있는 등 많은 이점을 가지고 있음
  - 이착륙패드와 주기장의 크기는 앞서 검토한 국내 헬기장 규정에 따라 연구에 사용된 eVTOL 항공기인 SA-1을 기준으로 이착륙장은 1.2 배 이상으로, 1층의 주차장 규격은 국토교통부의 주차장법 시행규칙에 따라 너비 2.6 m 이상, 길이 5.2 m 이상을 적용하여 설계함[172]. 도로는 국토교통부의 도로의 구조·시설 기준에 관한 규칙에 따라 차로의 최소 폭이 3.5 m 이상인 4.5 m로 가정함[173]. 진입차량의 속도와 시야를 고려하여 출입구를 1 층에 배치함

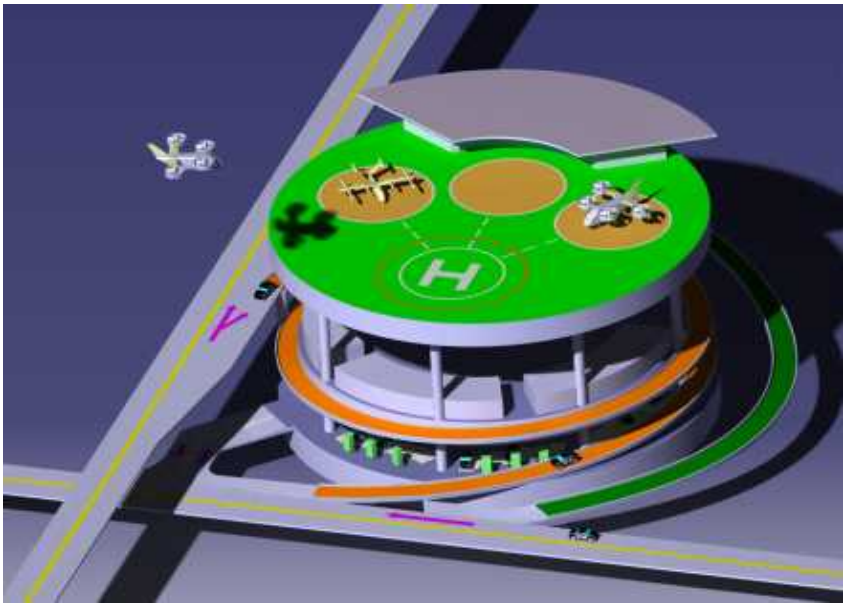


그림 424 나들목 수직이착륙장 형상 설계

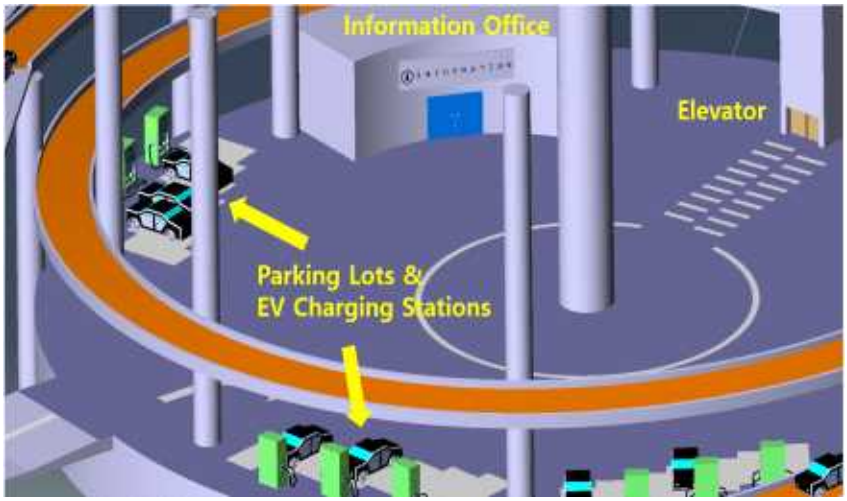


그림 425 서초 IC 수직이착륙장 1층 형상 설계

- 나들목 수직이착륙장은 한 대만을 설치하므로 항공기 이착륙시간을 포함하고, 충분한 주기장을 갖춘 형태이므로 4분의 준비시간만을 필요로 하여 5.87 분의 운용 주기를 가짐. 이에 따라 시간당 10 대, 하루에 130 대, 한 달에 3,986 대를 운용 가능하고, 4 인승의 eVTOL 항공기를 기준으로 시간당 40 명, 하루에 531 명, 한 달에 15,945 명을 수용할 수 있으며, 나들목 수직이착륙장의 전반적인 성능을 아래 표에 나타냄

표 85 서초 IC 수직이착륙장의 성능 검토

Specification	Seocho IC
Measured space (diameter)	85 m
Vertiport size (Diameter)	80 m
Applied efficient method	Skip recharging time
Number of buildable vertiport	1
Number of passengers transportable per hour	40
Number of passengers transportable per day	531
Number of passengers transportable per month	15,945

- 수직이착륙장의 승객 수용 능력
  - 2019년도 김포공항 이용객은 총 25,448,416 명이었으며[174], 행정안전부 인구통계에 따르면 18.67%가 서울에 거주중임[175]. 또한 초기 조종사를 동승하는 UAM 탑승에 대해 59%가 긍정적으로 생각하고 있고[1], 이 중에서 버스, 지하철, 자차 이용을 제외한 10%가 UAM을 이용하여 김포공항으로 이동한다고 가정하면 초기 수직이착륙장들은 한 달에 최소 23,360 명의 서울 UAM 이용객을 수용할 수 있는 능력이 요구됨. 김포공항과 인천공항을 제외하고 서울에 위치하고 있는 뚝섬, 이촌, 잠원 한강둔치와 서초 나들목 수직이착륙장에 대해 앞서 계산한 승객 수용 능력 예측과 설치 공간 및 배치 검토를 통해 한 달 동안 수용할 수 있는 인원에 수직이착륙장의 개수를 곱하면 뚝섬은 140,400명, 이촌과 잠원은 각각 93,600명, 서초 나들목은 15,945 명을 한 달 동안 수용할 수 있으므로 총 343,545 명을 수송할 수 있음
  - 김포공항의 수직이착륙장은 최소 23,360 명을, 최대 343,545 명을 수용할 수 있어야 하며, 이를 위해 김포공항의 주차장 부지를 검토함. 김포공항은 넓은 공간의 주차장을 갖추고 있고 대부분의 주차장이 지상 단층주차장이므로 3~4 층의 주차시설을 건설하고 옥상에 수직이착륙장을 설치하여 공간을 활용할 수 있음. 선정된 위치는 주차공간을 늘릴 수 있으며, 공항 및 지하철과 가까워 승객들이 도보로 이동할 수 있어 편리함
  - 우버사와 SHoP사에서 제시한 아래 첫 번째 그림의 가상 수직이착륙장 형태를 참고하여 해당 공간에 건설될 수 있는지를 검토함. 여유 공간을 위해 아래 첫 번째 그림의 수직이착륙장을 앞서 설계한 나들목 수직이착륙장 3개를 붙여 놓은 형태와 같다고 가정하고 공간을 측정함
  - 김포공항 제 1 주차장에는 3개의 TLOF 패드를 갖춘 수직이착륙장을 3개를, 제 2 주차장에는 2개의 TLOF 패드를 갖춘 수직이착륙장을 설치하여 아래 두 번째 그림과 같이 해당 시설에 총 33개의 스테이징 스탠드와 총 11개의 TLOF 패드를 갖춘 수직이착륙장을 설치할 수 있음
  - 가장 가까운 TLOF 패드 경계간 거리가 48 m로 동시운용이 가능하고, 재충전을 위한 주기장이 충분하므로 한 대의 eVTOL 항공기 운용 주기는 4 분이 됨. 따라서 하나의 수직이착륙장에서 시간당 15 대, 하루에 195 대, 한 달에 5,580 대를 운용할 수 있고, 시간당 60 명, 하루에 780 명, 한 달에 23,400 명의 승객을 수 있으며 이를 아래 표에 나타냄. 또한 11개의 TLOF 패드를 보유하고 있으므로 김포공항 수직이착륙장은 한 달에 257,400 명을 수용할 수 있음



그림 426 우버사와 SHoP사의 가상 수직이착륙장

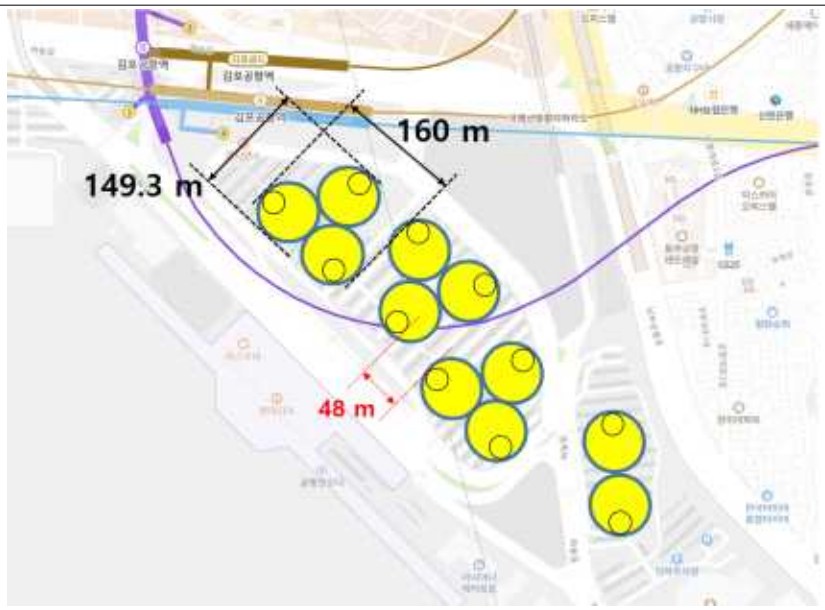


그림 427. 김포공항 수직이착륙장 예상도

표 86 김포공항 수직이착륙장의 성능 검토

Specification	Gimpo airport
Measured space ( )	160 × 240
Vertiport size (m^2)	136.6 ×160
Applied efficient method	Skip recharging time
Number of TLOF pads	11
Number of passengers acceptable per hour	180
Number of passengers acceptable per day	2,340
Number of passengers acceptable per month	70,200

○ 결론

- UAM을 국내에서 실현하기 위한 필요한 수직이착륙장의 설계요구조건을 분석하고, 항공기 대수와 승객 수용 능력을 예측하기 위해 eVTOL 항공기와 유사한 성능의 국내에서 운용 중인 헬기의 상승 시간과 개발 중인 현대자동차 S-A1 충전시간, 이륙 준비 시간 등의 변수를 설정하고, 단일 TLOF 패드만을 보유한 주기장이 없는 수직이착륙장을 기본형으로 설정하여 항공기의 운용 주기를 계산함. 동시운용 적용 및 충분한 수의 주기장 여부에 따른 재충전 시간을 고려하여 설계한 수직이착륙장에서의 시간당, 하루, 한 달 동안의 항공기 운용 가능 대수와 이용 가능한 승객 수를 계산함
- 수직이착륙장의 위치 선정은 초기 UAM 시장에서 5개의 이착륙장이면 충분히 운용 가능하다는 내용을 기반으로 김포공항, 서초 나들목, 뚝섬과 이촌, 잠원 한강시민공원의 5 곳을 대상으로 각 수직이착륙장의 설치 가능 수부터 한 달 동안의 수용 능력까지 계산하였고, 한강공원과 고속도로 나들목의 특성에 맞게 수직이착륙장의 형상설계를 수행함
- 앞서 본 논문에서 선정한 한강둔치의 수직이착륙장을 기반으로 하여 한강의 양면을 따라 더 많은 이착륙장을 설치한다면 항공기의 이착륙을 위한 건축물로써의 역할뿐만 아니라 한강공원의 편의시설 등으로 다양하게 활용될 것임. UAM 시스템은 서울에서 지방으로 출장이나 출퇴근하는 수요를 KTX나 고속버스에서 eVTOL과 김포공항으로 분산시켜 지방공항 활성화에 기여할 수 있음

- 추후 수직이착륙장의 구체적인 개념 설계단계로 넘어가기 위해서는 수직이착륙장의 개수, TLOF 패드와 게이트의 수 및 배치와 같은 내부 변수들을 변화시키면서 운영에 따른 수용가능한 승객 수, 소요시간 분석 등에 관한 연구가 필요함

2-4-③. 국내 UAM 수직이착륙장 적용에의 적용 예

○ Vertiport 구성요소 크기 검토

- Vertiport 구성요소 크기 결정

- 도심에서 운영되는 UAM의 인프라 중 vertiport는 기존의 공항이나 헬기장과 같이 넓은 공간을 할당할 수 없기 때문에 제한적인 구성 요소를 가지게 됨
- Vertiport의 구성요소는 크게 TLOF 패드, 게이트, 유도로 등으로 구성되며, 추가 요소로써 스테이징 스탠드를 고려하고 그에 따른 배치를 고려할 수 있지만 현대자동차 등은 공간 활용을 위해 하나의 구성 요소에서 다양한 서비스를 제공할 수 있는 축소된 형상을 제안하고 있음. 따라서 본 연구에서는 주어진 공간에 대해 기존 헬기장 규정을 참고하여 여러 가지 구성 요소의 배치를 검토함
- Vertiport 구성요소의 크기를 결정하기 위해 FAA의 헬기장 설치 규정 AC 105/2390-2C의 transport heliports 규정을 참고함. AC 150/5390-2C에 따르면, 헬기장 구성요소의 크기를 결정할 때, 일반적으로 하나의 rotor를 가진 헬기의 로터 직경(rotor diameter; RD)를 기준으로 크기를 결정함
- TLOF pad크기(길이, 너비 또는 직경)를 헬리콥터의 RD와 같게 하도록 권장하고 있기 때문에[113] 여러 개의 작은 로터를 가진 새로운 eVTOL 항공기에 그대로 적용할 수 없음. 또한 항공기 최대 크기에 관여할 수 있는 프로펠러 재원은 대부분 확정된 것이 아니기 때문에 충분한 마진을 제공하기 위해 본 연구에서는 크기가 큰 eVOTL 항공기에 속하는 현대자동차 S-A1 동체 크기를 기준으로 vertiport 구성요소의 크기를 결정함
- S-A1의 규격이 15 m x 10.7 m인 것을 고려하여 직사각형의 대각 길이인 18.4 m를 aircraft dimension(AD)로 지정하고[95], 문헌을 참고하기 위해 이 AD를 RD와 같다고 가정함
- Vertiport 구성 요소의 크기를 결정할 때 도시환경에서 circular shape pad는 square 또는 rectangular shape 보다 조종사에게 더 잘 인식될 수 있다는 내용을 토대로[113] AD가 만드는 원형 TLOF pad를 아래 그림과 같이 가정함

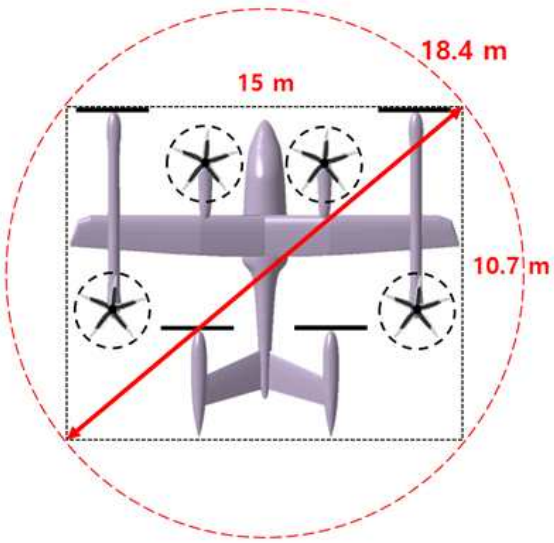


그림 428 S-A1크기로 결정된 TLOF pad 크기

- TLOF pad는 AC 150/5390-2C의 권장 사항에 따라 하나 이상의 운영 가능한 접근/출발 경로, 최종 접근 및 이륙 구역(final approach and takeoff area; FATO)와 안전 구역으로 구성됨[115]
- FATO의 크기는 AD의 2배이며 문헌은 1000 feet MLS 이상의 고도에서 FATO의 크기를 고도가 높아짐에 따라 일정 비율로 증가시켜야 한다고 그래프와 함께 제시하고 있음. 하나의 TLOF pad 당 하나의 안전 구역가 필요하며, FATO처럼 하중을 견디는 지면과 같은 실체일 필요는 없음. 1/2 RD와 30 ft (약 9.1 m) 중에서 더 긴 길이만큼 FATO의 모든 측면에서 바깥 방향으로 확장되며 가능한 FATO의 둘레에서 동일한 길이만큼, 동일한 고도에서 조명은 제외한 도출된 물체가 없는 영역을 설계하는 것이 권장됨
- VFR 헬기장의 접근/출발 경로는 8:1의 경사로에서 위로 고도 500 ft까지 장애물이 없어야 하며, 접근/출발 표면은 FATO의 가장자리에서 4,000 ft까지 수평으로 확장되어 장애물이 없어야 하며, 접근/출발 경로는 8:1의 기울기로 고도 500 ft 에서500 ft의 폭을 가짐[113]. 따라서 TLOF pad는 18.4 m, FATO는 36.8 m, safety area는 46 m로 크기가 결정되며, TLOF pad 와 같이 원형으로 설정하여 아래 그림에 나타냄

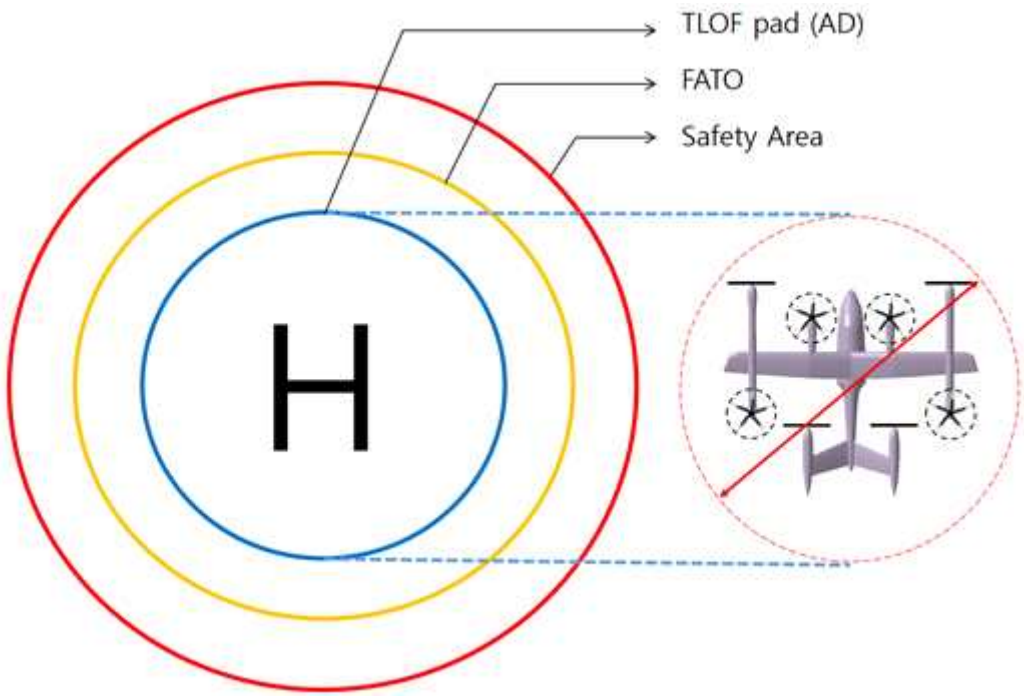


그림 429 S-A1 크기로 결정된 vertipad 크기

- 게이트는 시설에서 사용될 것으로 예상되는 헬리콥터 크기와 무게에 따라 그 수와 크기가 다르며, 모든 gate가 설계 헬리콥터를 수용할 필요는 없음. 하지만 모든 게이트는 유도로의 여유 공간 가장자리에서 1/3 RD 만큼 떨어져 있어야 하며, turnaround를 지원하는 게이트의 경우 게이트 최대 크기의 가장자리 사이가 1/3 RD 이상 확보되어야 함
- 지상 유도는 호버 유도를 지원할 때보다 항공기 turnaround 반경을 더 넉넉하게 고려해야 함[113]. 따라서 지상 유도를 지원하고, 분리된 계류장이 없으며, turnaround 뿐만 아니라 recharging, passenger boarding/unboarding등을 추가로 지원해야 하는 본 연구의 vertiport에서는 AD에 10 ft를 더한 크기를 게이트 최대 크기로 설정하고. 이를 아래 그림에 나타냄
- 통근용 항공기의 경사로 운영에 대한 연구에 따라[118] 200 ft 이내에서 항공기의 프로펠러를 가동시켰을 때 승객은 활주로에서 승하차가 허용되지 않지만, eVTOL 항공기는 승객 탑승/하차 시 프로펠러를 가동하지 않는다고 가정하여 운영에서 이 조건은 고려되

지 않음

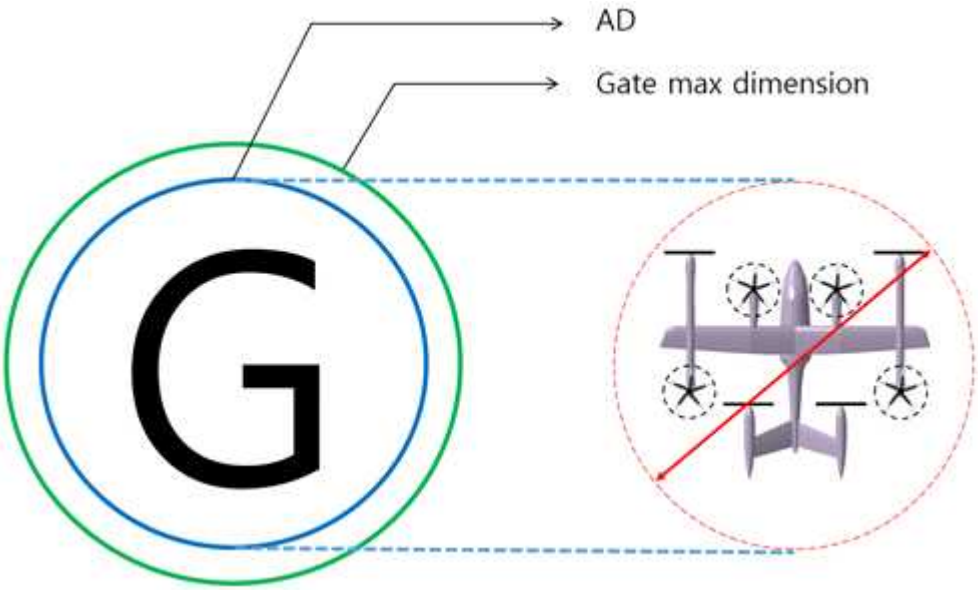


그림 430 S-A1 크기로 결정된 게이트 크기

- AC 150/5390-2C에 따르면 유도로와 그 치수는 헬리콥터의 크기, 유도 경로 표시, 유도로 택시 운영 유형(지상 유도 또는 호버 유도)로 값이 결정됨.
- 본 연구에서 다루는 지상 유도로의 경우 AC 150/5370-10의 P-217 항목 표준에 따라 포틀랜드 시멘트 콘크리트, 아스팔트 또는 잔디와 같은 안정화된 표면을 제공해야 함. 유도로의 비포장 부분의 경우 잔디 덮개를 제공하거나 지상을 어떤 방식으로든 처리하여 유도 헬리콥터 로터의 다운워시로 인해 흙과 파편이 올라오는 것을 방지해야 함. 유도로 세로 방향 경사는 2%를 초과하지 않도록 설계하고 가로 방향 경사를 0.5%에서 2% 사이로 설계해야 함[113]
- 유도로 양쪽에는 여유 공간을 확보해야 하며, 최소 크기는 설계 항공기의 2배 또는 로터 직경의 1.5배임. 호버 유도의 경우 로터 직경의 2배, 지상 유도는 로터 직경의 1.5배를 요구하고 있으므로[113] 유도로의 전체 폭은 지상 유도로 기준에 따라 AD의 1.5배인 27.6 m로 결정하였으며 아래 그림에 나타냄

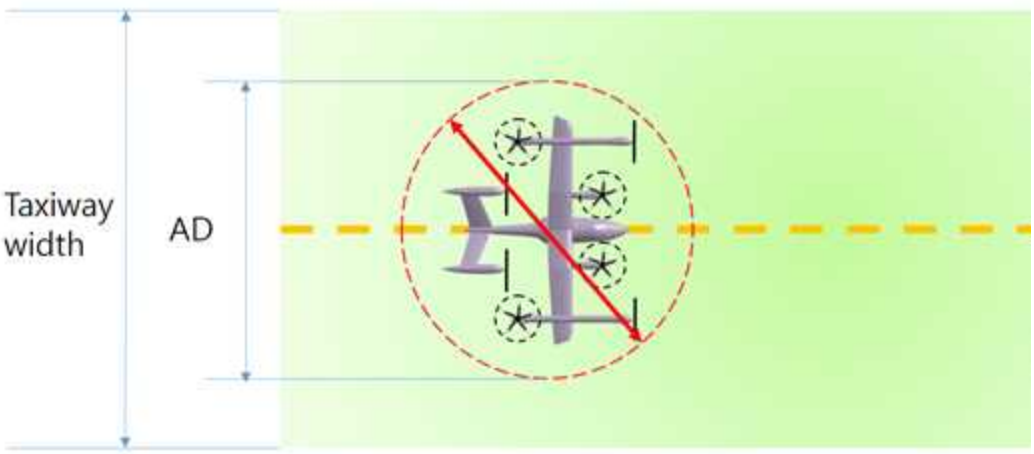


그림 431 S-A1 크기로 결정된 유도로 크기

- 위 분석을 통해 배치 이후 vertiport 수용 능력 분석에 사용되는 components의 크기와 규정을 아래 표에 나타냄

표 87 S-A1의 크기로 결정된 주요 vertiport 구성요소의 규정과 크기

Components	Regulation	Dimension
TLOF pad	AD	18.4 m
FATO	2 AD	36.8 m
Safety Area	FATO + max(1/2 AD, 30 ft)	46.0 m
Gate	AD + 10 ft	21.4 m
Taxiway Width	AD + 1/2 AD	27.6 m

- Vetriport 구성요소 제약조건

  - FAA Joint Order 7110.65W, 섹션 3-11-5에 따르면, 항공기는 200 ft 이상 분리된 중심선이 있는 TLOF 패드에 대해 동시 이륙 또는 착륙을 수행할 수 있으며[114], 미군은 150 ft 떨어진 TLOF 패드에서 작전을 수행하며, 최소 75 ft 떨어진 TLOF 패드 간격까지 작전을 수행할 수 있음[95]. 또한 AC 150/5390-2C에서는 헬기장에 하나 이상의 FATO가 있는 경우, 각 safety area가 겹치지 않도록 두 FATO의 둘레를 분리하기 위해 FATO 둘레 사이의 최소 거리를 200 ft (약 61m)로 지정하여 여러 대의 항공기를 동시에 운영하도록 권장하고 있음. 군에서 작전 시 지원하는 최소 분리 간격은 특별한 상황이므로 안전을 고려하여 도심 속 UAM 운영에서 safety area의 둘레 사이의 최소 간격을 51.8 m로 설정하고, 본 연구에서는 이를 기준으로 배치를 고려함

- 세 가지 배치의 예시와 각각의 특징 분석

  - 동일한 면적에 대해 세 가지 배치를 특징에 맞게 적용하여 일반화하고 각각의 특징을 조사함
  - 먼저, vertiport 면적은 각 배치에서 최소한으로 요구되는 면적을 앞서 검토한 TLOF pad와 게이트의 크기로 결정됨. 면적 선정 기준으로, vertiport가 gate를 보유한다면 하나의 TLOF pad 당 적어도 두 개 이상의 gate와 상호작용 할 수 있는 배치가 될 수 있도록 함. 세 개의 TLOF pad를 보유한 Linear 배치를 기준으로 세 가지 배치에 공통으로 요구되는 최소 면적은 이며, 해당 면적에 대해 앞서 검토한 vertiport 구성요소 크기를 적용한 satellite 및 pier 배치 구성을 결정함
  - 선형 배치는 여러 TLOF pad가 일렬로 배치되어 있는 형태로 바닷가나 강변과 같이 얇고 긴 공간에 대해 효율적으로 배치될 수 있음. 이 배치는 게이트를 보유할 수 없는 vertiport가 여러 TLOF pad를 보유한 경우, 각 TLOF pad는 게이트의 역할을 대신할 수 있으며, 배치 방식이 비교적 단순하다 장점이 있음.
  - 하지만 이 배치의 특성상 단층 혹은 저층으로 설치될 가능성이 높기 때문에 이착륙을 제외한 세 방향에 대해 추가적인 공간 확보가 필요함. 따라서 TLOF pad 주변의 이착륙에 방해가 될 수 있는 높이의 지형물을 고려하여 참고문헌[113]의 접근/출발 표면과 접근/출발 경로 규정에 맞게 추가 공간을 고려해야 함
  - TLOF pad를 보유한 선형 배치의 예시를 아래 그림에 나타냄

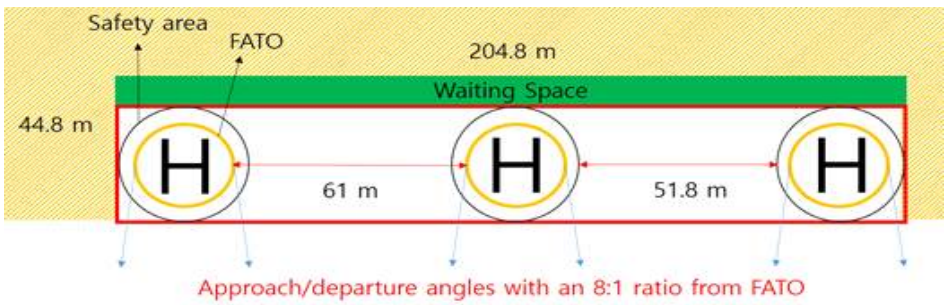


그림 432 선형 배치 예시

- 위성 배치는 하나 이상의 TLOF pad를 여러 gate가 부채꼴 모양을 둘러싸고 있는 형태로 SHoP's Architects사의 'Arc' skyport와 같이[35] 정사각형이나 원에 가까운 형태의 공간에 설치되기에 적절함. 이 배치의 특징은 vertiport에서 유도로의 설치가 비교적 쉽고, 그 길이가 일정하기 때문에 gate의 활용도가 높은 편임
- 또한 이 배치는 다른 배치에 비해 설치될 수 있는 공간이 현대 도심 구조에서 쉽게 찾을 수 없기 때문에 Uber에서 공개한 몇몇 Skyport 컨셉디자인과 같이 여러 개의 작은 위성 배치를 여러 개 나열하여 이를 해결할 수 있지만, 이착륙 방향에 큰 제한이 생기고, 최소한의 가로, 세로 폭을 요구하기 때문에 기존 인프라와 원활히 통합되기 힘들다는 단점이 있음

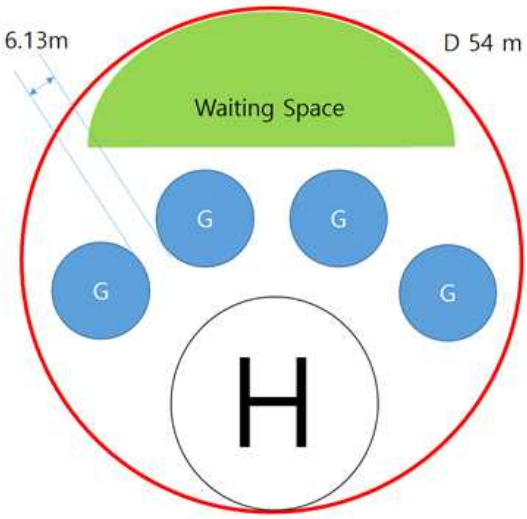


그림 433 위성 배치 예시

- 부두 배치는 선형 배치와 위성 배치의 중간 형태로 직사각형 구조를 갖음. 이 배치는 TLOF pad와 게이트의 구역을 간접적으로 분리하여 TLOF pad에서의 이착륙 각을 보다 넓게 가져갈 수 있으며, gate들을 기존 자동차 주차장과 같이 사용해 많은 수의 게이트를 보유하고 게이트 활용도를 높일 수 있음
- 하지만 이 배치는 주로 하나의 유도를 공유하기 때문에 항공기 turnaround 시간이 길어질 수 있으며 gate 구역이 혼잡해질 가능성이 큼. 이를 해결하기 위해서는 높은 레벨의 비행 관제 시스템 또는 두 개 이상의 유도로를 확보할 수 있는 넓은 공간이 요구됨. 실제 운영 중인 부두 배치의 헬기장과 앞서 계산한 최소 공간에 대한 배치 예시를 아래 그림에 나타냄

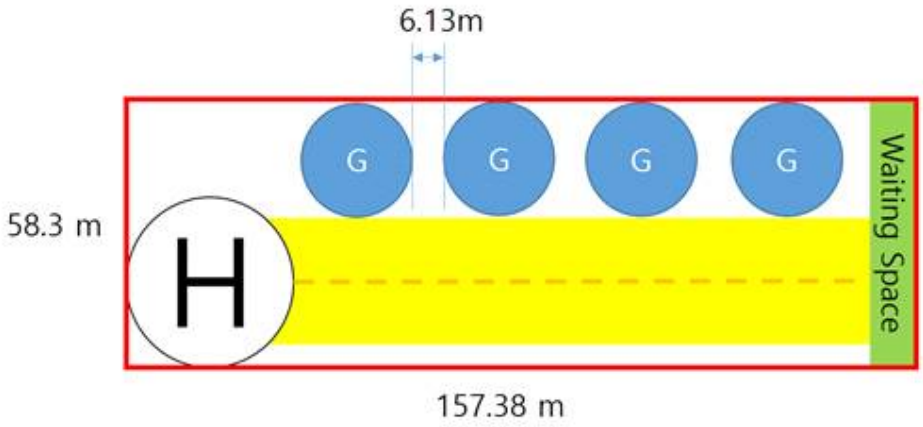


그림 434 부두 배치 예시

○ 국내 Vertiport 적용 부지 검토 및 배치 제안

- 김포공항 공간 검토

  • UAM의 초기 시장은 항공 엠뷸런스와 공항 셔틀이므로 본 연구에서는 서울의 국내선 공항로 사용되고 있는 김포공항 주차장에 3개의 배치를 배치하여 분석함

  • 공간 검토 방식으로는 네이버 지도[176]의 거리 측정 기능을 사용하여 대략적인 공간을 검토하여 앞서 결정한 vertiport 구성요소의 크기를 적용함. 공간 검토는 현재 김포공항 제 1 주차장의 면적을 고려한 현재 주차장 공간과 주변의 빈 공터를 포함한 확장된 주차장 공간의 두 경우로 나누어 측정함

  • 수직이착륙장을 운영하는 방식에 따라 여러 층으로 구성할 수 있지만 본 연구에서는 단층 또는 건물의 옥상 면적만을 사용하는 것으로 가정하고 주차장 외의 주변 도로와 지하철역 등을 가능한 침범하는 않는 공간을 측정하였으며, 측정된 공간 안에 수직이착륙장 구성 요소를 다음과 같이 세 가지 형태로 구분하여 효율적인 배치를 선정함

  • 추가 구성 요소로써 승객 대기 장소를 추가 구성요소로써 고려하였으며, 효율적인 항공기 순환을 위해 승객 대기 공간을 제외한 나머지 공간에 하나의 TLOF 패드 당 적어도 두 개 이상의 게이트가 배치가 연결되는 것을 최소 조건으로 함

  • 검토된 지형의 특성상, 지도를 기준으로 서남쪽에는 공항 활주로가 존재하므로, vertiport에서의 안전한 이착륙을 위해 TLOF pad가 서남 방향을 제외하고 이착륙할 수 있는 배치를 고려함



그림 435 현재 주차장 공간



그림 436 확장된 주차장 공간

- 김포공항 주차장에 세 가지 배치 적용

  • 선형 배치

  ✓ 선형 배치는 여러 TLOF 패드가 일렬로 배열되어 있어TLOF 패드는 일반적으로 게이트의 역할을 대신하기 때문에 항공기 turnaround는 TLOF 패드에서 수행됨. 선형 배치는 동시 운영을 지원하도록 배치되어 항공기 처리 시간이 짧고, 폭이 좁은 긴 형태의 공간에 설치될 때 유용함[96]

  ✓ 김포공항 주차장에 적용할 경우 선형 배치는 아래 그림과 같이 측정된 공간에 따라 두 가지 배치를 고려하였으며, 승객 대기 장소를 포함하여 TLOF pad, Gate, Taxiway 의 구성요소를 포함하고 있음

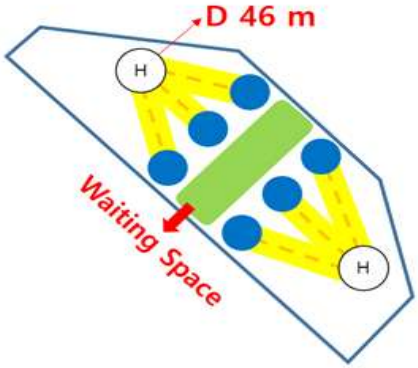


그림 437 현재 주차장 공간

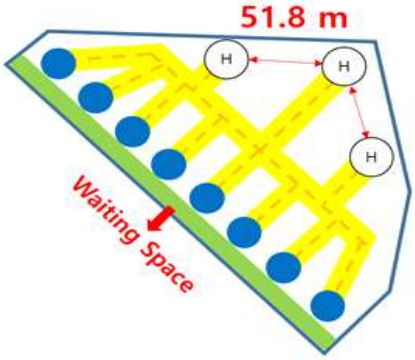


그림 438 확장된 주차장 공간

- 위성 배치

✓ 위성 배치는 하나 이상의 TLOF 패드가 원주상에 분포된 게이트와 연결되어 있는 형태임. 비행경로 아래에 있는 게이트는 사용될 수 없거나 설치될 수 없음. 촘촘한 배치이며 대략 정사각형 공간의 도시 및 교외의 격자형 지역에서 옥상 및 토지 구획에 구현하기에 적합함[96]

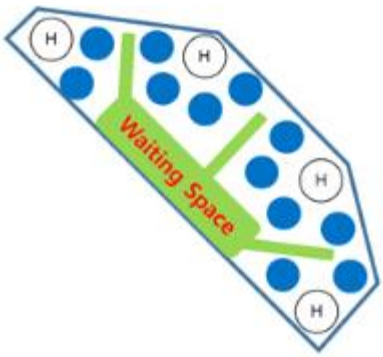


그림 439 현재 주차장 공간

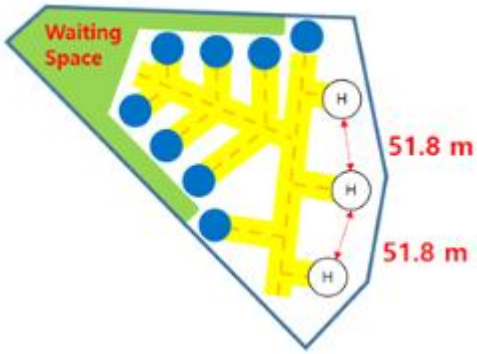


그림 440 확장된 주차장 공간

- 부두 배치

✓ 부두 배치에서 하나 이상의 TLOF 패드는 항공기를 긴 게이트 통로를 통해 공급할 수 있는 형태이다. 부두 배치는 위성 배치보다 더 많은 게이트와 항공기를 물리적으로 수용할 수 있기 때문에 항공기 승하차 시간이 더 길거나 여러 항공기를 배치하고자하는 vertiport에 유리할 수 있음[96]

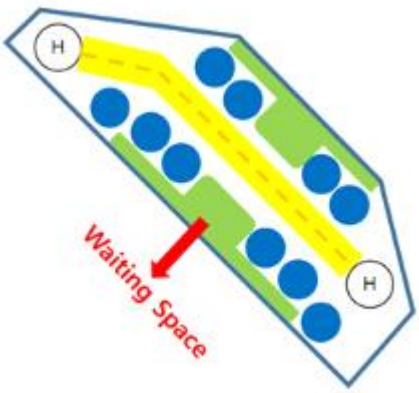


그림 441 현재 주차장 공간

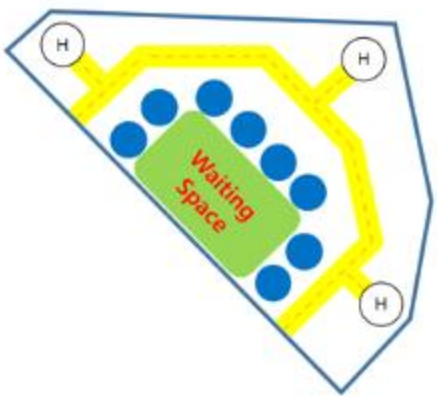


그림 442 확장된 주차장 공간

○ 수용 능력 판단 알고리즘 적용

- 세 가지 배치에 대한 수용 능력 분석

- Vertiport 운영 개념
  - ✓ UAM 운영을 위해 vertiport는 도심의 제한된 공간에 새로운 건물을 건설하거나 기존 인프라와 통합하는 형태로 설치될 것임. 따라서 한정된 공간에서 최대한 많은 항공기를 운용할 수 있는 배치를 고려해야 하며, 이를 위해 앞 절에서 검토한 세 가지 배치를 동일한 조건의 공간에 적용하여 수용능력을 비교하고자 함
  - ✓ 본 연구에서 수용능력 분석에는 Matlab program을 활용하였으며, 참고문헌[95]에서 정의한 조건들을 토대로 상부와 하부로 수용 범위를 구분하지 않고 IP에 사용된 식들 중 일부를 참고하여 아래 첫 번째 그림의 절차로 시간에 따라 vertiport에서 항공기의 상황을 그래프에 표시하는 코드를 구현함
  - ✓ 구현된 코드는 앞서 검토한 AC 150/5390-2C의 동시 운영 조건 거리를 적용한 vertiport를 대상으로 진행되며 0초에서 vertiport는 비어있다고 가정함
  - ✓ Vertiport의 안전한 운영을 위해 TLOF pad 와 게이트가 연결된 노드에는 한 대의 항공기만 존재할 수 있음. 예를 들어 하나의 TLOF pad를 보유한 vertiport에서 항공기가 도착하고 있을 때 ⑤번 절차는 진행할 수 없음
  - ✓ Vertiport가 항공기를 최대로 수용할 수 있는 범위를 분석하는 것이 목적이므로 출발과 도착이 모두 가능한 상태의 TLOF pad에서는 출발보다 도착을 우선으로 하며 아래 두 번째 그림의 ⓐ~ⓒ 구간에 해당하는 그래프가 그려짐
  - ✓ 아래 두 번째 그림은 계산이 진행됨에 따라 ⓐ~ⓖ 순서로 그려지는 결과 그래프의 각 section을 나타내며, 결과 선도가 만드는 closed-surface가 잠재적으로 발생할 수 있는 출발/도착 정수 쌍(pair)임
  - ✓ ⓐ구간은 vertiport에서 항공기 도착을 수용할 수 있는 횟수만큼의 크기이며, 초기 vertiport 상태에서 gate를 가득 채우는 항공기 도착 수만큼 생성됨. ⓑ와 ⓕ구간은 출발보다 도착을 우선 적용한 구간으로, 출발 또는 도착을 할 수 있는 상황에서 도착을 우선시하여 그래프가 선형으로 생성됨. ⓒ와 ⓔ구간은 free operation 구간으로 ⓒ 구간의 경우 지원되는 도착 수를 줄이지 않고 출발을 지원할 수 있을 때 생성됨. Free operation 구간은 사전 준비된 항공기 수, 도착 시간, 출발 시간, turnaround 시간 등에 따라 달라질 수 있음[95]. ⓓ구간은 vertiport에서 가능한 출발과 도착의 합이 최대가 되는 구간으로 한 점으로 생성하거나 도착을 줄이고 출발을 늘리며 선으로 생성될 수 있음. 따라서 해당 구간에서의 정수 순서쌍 데이터는 곧 분석하고자 하는 vertiport의 최대 수용 능력을 의미함. ⓖ구간은 사전 준비된 항공기가 존재할 때 생성되는 구간으로, 도착을 막고 출발을 지원할 때 생성됨

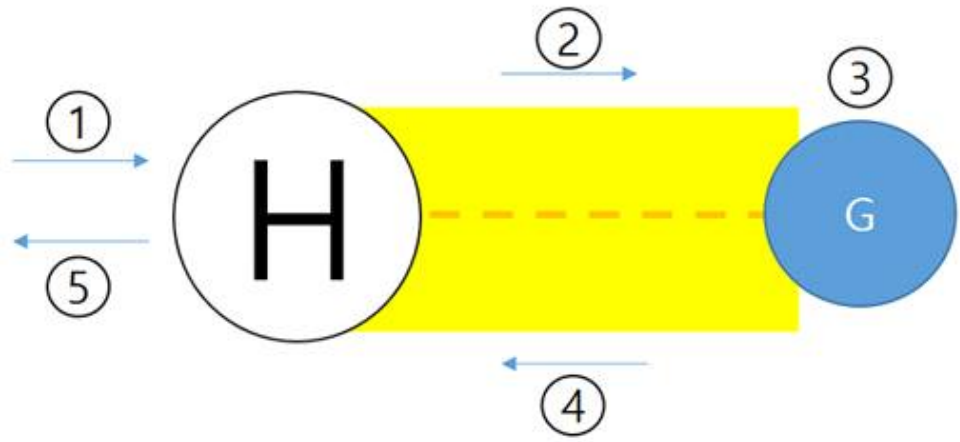


그림 443 Vertiport 운영 절차

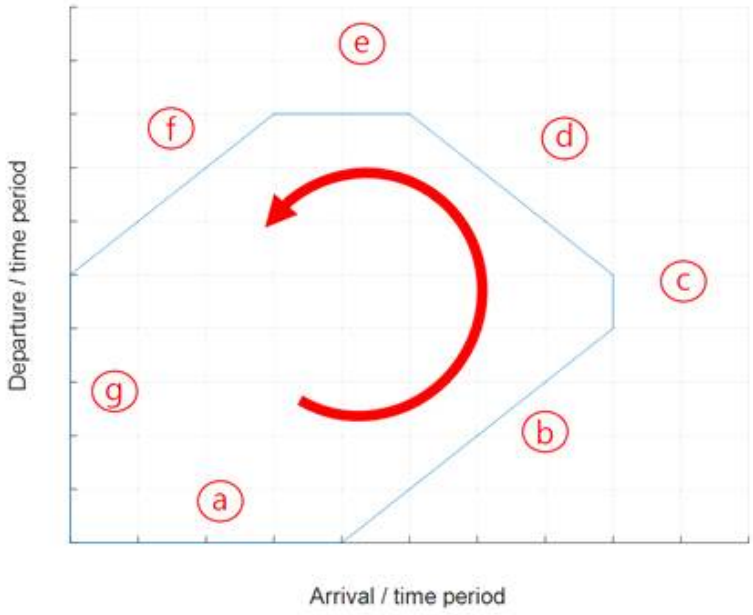


그림 444 운영 순서에 따른 결과 생성 순서와 일반적으로 생성되는 구간

- ✓ TLOF pad 활용도는 vertiport 운영 시간 동안 도착, Taxi-in, Taxi-out, 출발이 차지하는 비율임. 즉, TLOF pad와 게이트, 유도로만을 고려한 본 연구에서는 TLOF pad와 유도로를 항공기가 전체 운영 시간 동안 얼마나 활용하고 있는지를 나타내는 수치임. 좁은 공간에서의 안전상의 이유로 이착륙 시 유도로 사용을 금지하거나 vertiport가 하나의 유도로를 보유하여 양방향 유도가 불가능할 수 있기 때문에 TLOF pad 활용도에 유도로 사용 시간을 포함시킴
- ✓ TLOF pad 활용도와 유사하게 게이트 활용도는 전체 시간에서 각 게이트의 Taxi-in, Taxi-out, Turnaround time이 차지하는 비율의 평균으로 계산된 후, 수용 능력이 최대 처리량에 도달할 때의 평균으로 계산됨
- ✓ 게이트 활용도의 경우, 항공기 이륙 준비가 완료되었더라도 도착 우선으로 항공기가 출발하지 못하고 대기하는 상황이 발생할 수 있으며, 이 정체 시간 또한 게이트를 사용하는 것이므로 게이트 활용도에 포함됨. 이렇게 정체되는 시간을 게이트 홀딩(gate holding) 시간으로 측정함

- 세 가지 배치에 대해 수용 능력 계산 알고리즘 적용 및 분석

- ✓ 항공기가 도착하고 출발하는 수가 vertiport 처리량을 분석하는데 가장 중요하게 고려해야 할 요소이므로 효율적 배치의 선정 기준으로 TLOF pad 활용도를 우선조건으로 하며, 비슷한 TLOF pad 활용도가 나오는 경우에는 차선으로 게이트 활용도를 추가로 고려하여 결과를 비교함
- ✓ 이후 수용 능력 분석에 사용된 각각의 배치에서 TLOF pad와 게이트 사이를 연결하는 유도로의 길이는 모두 다르지만, 본 연구에서 taxing 시간은 모두 15초로 동일하다고 가정함
- ✓ 결과 그래프의 형태와 진행상황을 확인하기 위해 15분을 기준으로 각각의 결과를 비교하였으며, 추후 분석 데이터를 활용하기 용이하도록 가장 좋은 효율을 나타내는 배치에 대해 한 시간 동안의 수용 능력을 추가로 확인함
- ✓ 1개의 TLOF pad와 4개의 gate로 구성된 vertiport 예시에 대한 입력값을 아래 표에 나타내었으며, 가능한 수용 범위 그래프를 아래 그림에 나타냄. o는 도착을, x 는 출발을, □는 free-arrival을 의미하며, *은 최대 처리량을 의미함
- ✓ 운영 시간 (15분) 동안에 최대 (7, 4)의 도착 및 출발 또는 (6, 5)의 도착 및 출발을

수행할 수 있으며, 이 중에서 출발 수가 더 많은 (6, 5)의 도착/출발 쌍에 대해 수용 가능한 승객 수를 계산하고, 해당 운영 경과를 아래 두 번째 표에 나타냄

- ✓ 4 인의 승객은 운송할 수 있는 S-A1을 기준으로 최대 처리량에서 6 번의 항공기 도착 후 5 번의 출발을 수행할 수 있기 때문에 해당 vertiport는 지정 시간(15 분) 동안 20 명의 승객을 수용할 수 있음
- ✓ 같은 방식으로 운영 시간을 1 시간으로 설정하면 23 번의 도착, 22 번의 출발을 통해 시간당 88 명의 승객을 수용할 수 있음

표 88 입력된 운영 변수

Variable	Value
Arrival time	60 sec
Taxi-in time	15 sec
Turnaround time	300 sec
Taxi-out time	15 sec
Departure time	60 sec
Operation time	900 sec

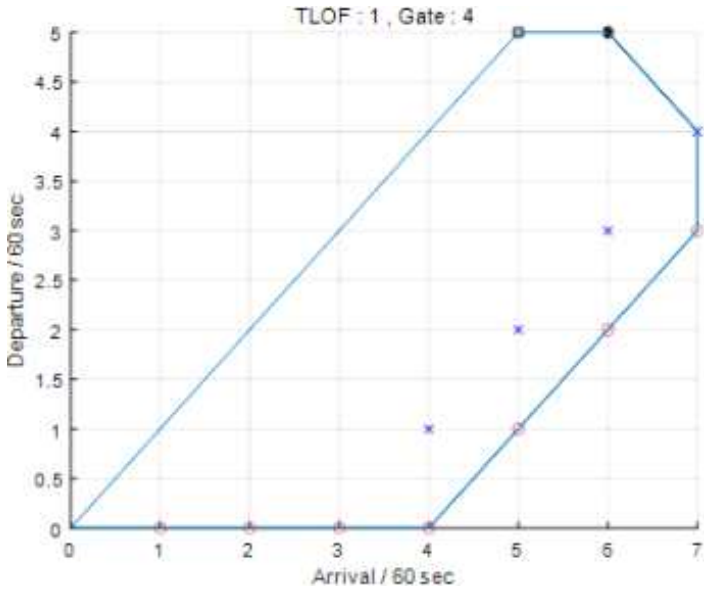


그림 445 1개의 TLOF pad와 4개의 게이트에 대한 진행 결과 예시

표 89 1개의 TLOF pad와 4개의 게이트에 대한 진행 예시

	Gate 1	Gate 2	Gate 3	Gate 4
0-15 sec.	'a'	[]	[]	[]
15-30 sec.	'a'	[]	[]	[]
30-45 sec.	'a'	[]	[]	[]
45-60 sec.	'a'	[]	[]	[]
60-75 sec.	'ti'	[]	[]	[]
75-90 sec.	'g'	'a'	[]	[]
90-105 sec.	'g'	'a'	[]	[]
105-120 sec.	'g'	'a'	[]	[]
120-135 sec.	'g'	'a'	[]	[]
135-150 sec.	'g'	'a'	[]	[]
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
600-615 sec.	'g'	[]	'g'	'to'

615-630 sec.	'g'	[]	'g'	'd'
630-645 sec.	'g'	[]	'g'	'd'
645-660 sec.	'g'	[]	'g'	'd'
660-675 sec.	'g'	[]	'g'	'd'
675-690 sec.	'g'	[]	'to'	[]
690-705 sec.	'g'	[]	'd'	[]
705-720 sec.	'g'	[]	'd'	[]
720-735 sec.	'g'	[]	'd'	[]
735-750 sec.	'g'	[]	'd'	[]
750-765 sec.	'g'	[]	'a'	[]
765-780 sec.	'g'	[]	'a'	[]
780-795 sec.	'g'	[]	'a'	[]
795-810 sec.	'g'	[]	'a'	[]
810-825 sec	'g'	[]	'a'	[]
825-840 sec.	'to'	[]	'g'	[]
840-855 sec.	'd'	[]	'g'	[]
855-870 sec.	'd'	[]	'g'	[]
870-885 sec.	'd'	[]	'g'	[]
885-900 sec.	'd'	[]	'g'	[]

- ✓ 아래 첫 번째 그림은 위 표의 운영 예시를 도식화 한 것이며 아래 두 번째 그림은 동일한 조건에서 운영 시간 변수를 30분(1800초)으로 설정한 운영 예시임
- ✓ 이전 15분의 운영 시간에 대한 예시와 비교했을 때 30분의 운영 시간에 대한 출발/도착 수가 두 배가 아닌 것을 알 수 있음. 이는 운영 개념 중 출발 수를 보장하는 자유 출발이 전체 분석 이후에 적용되기 때문임
- ✓ 따라서 출발 수로 계산되는 수용 가능 승객 수 또한 운영 시간 변수에 따라 배수로 증가하지 않음. 하지만 자유 출발이 없는 경우, 즉, 도착을 줄이고 출발을 늘리지 않는 경우에는 운영 시간에 따라 수용 가능 승객 수가 비례하여 증가함

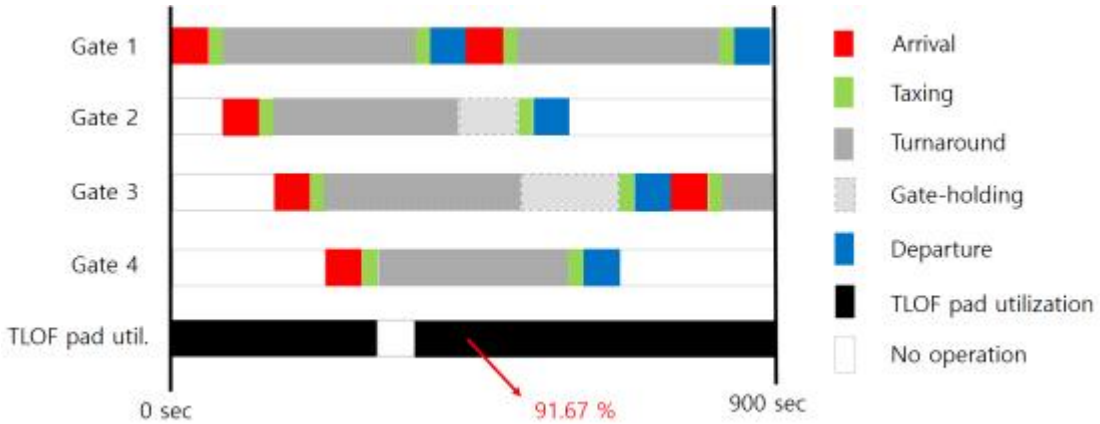


그림 446 TLOF pad 활용도 계산 방식(1 TLOF pad, 4 gates)



그림 447 30분의 운영 시간에 대한 수직이착륙장 운영 예시(1 TLOF pad, 4 gates)

- ✓ 다음은 김포공항 기존 제 1 주차장 공간에 세 가지 배치를 적용한 후, 각각의 수용 능력을 분석한 결과임. 입력된 운영 변수는 위 두 번째 표의 변수 값과 같음
- ✓ 아래 표에 각 배치에 대해 입력한 TLOF pad 수와 게이트 수, 활용도 결과를 나타냄
- ✓ 아래 세 그림은 김포공항 현재 주차장 공간에 대한 선형 배치, 위성 배치, 부두 배치 각각의 수용 능력을 나타냄. 이 세 가지 배치의 수용 능력을 비교해보면 TLOF pad utilization이 95.83%로 2개의 TLOF pad와 9개의 게이트를 보유한 부두 배치가 가장 좋은 효율을 보여줌
- ✓ 또한 수용 인원을 파악하는 기준으로는 가능한 많은 출발이 중요하기 때문에 최대 처리량에서 출발이 가장 많은 (12, 11)의 도착/출발 쌍을 선정할 수 있음. 조종사를 제외하고 4명의 승객을 운송할 수 있는 현대자동차의 S-A1을 운영한다고 가정하면 결정 시간 15분 동안 44명의 승객을 운송할 수 있음
- ✓ 이를 한 시간의 운영 시간으로 계산했을 때, 69 번의 도착과 63번의 출발을 통해 총 252 명의 승객을 수용할 수 있음

표 90 현재 주차장 공간에 대한 세 가지 배치의 수용 능력 분석 결과

	Linear	Satellite	Pier
Number of TLOF pads	2	4	2
Number of gates	6	10	9
TLOF pad Utilization	89.33 %	70.83 %	95.83 %
Gate Utilization	69.44 %	70.67 %	59.35 %
Gate holding	8.33 %	6.67 %	3.95 %

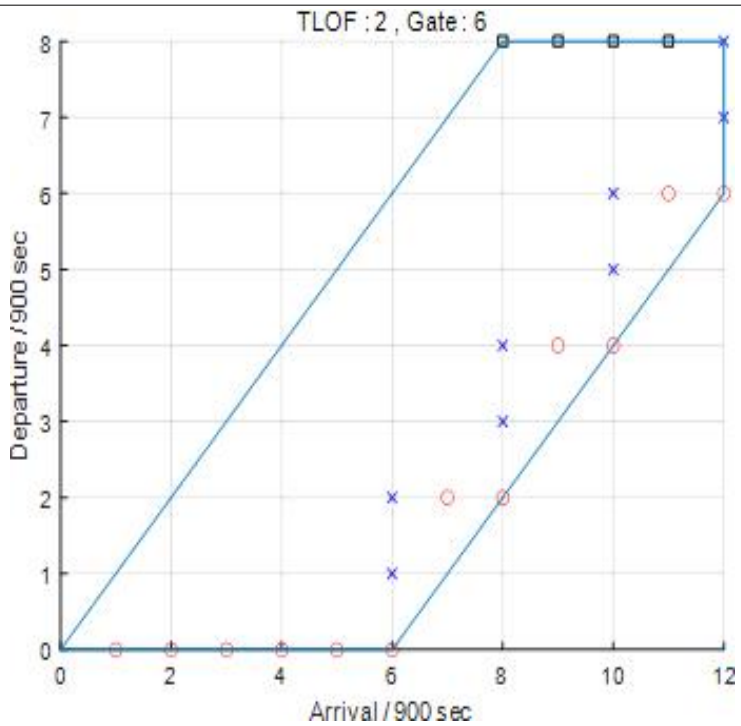


그림 448 현재 김포공항 주차장에 대한 선형 배치의 수용성

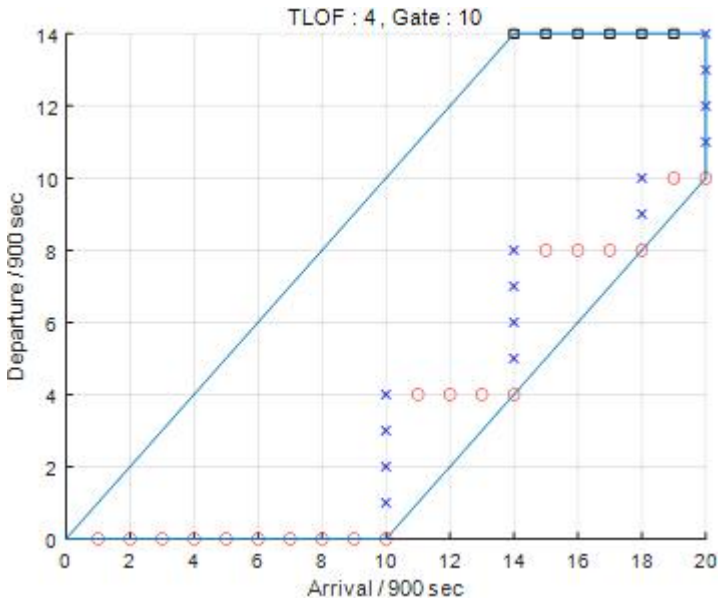


그림 449 현재 김포공항 주차장에 대한 위성 배치의 수용성

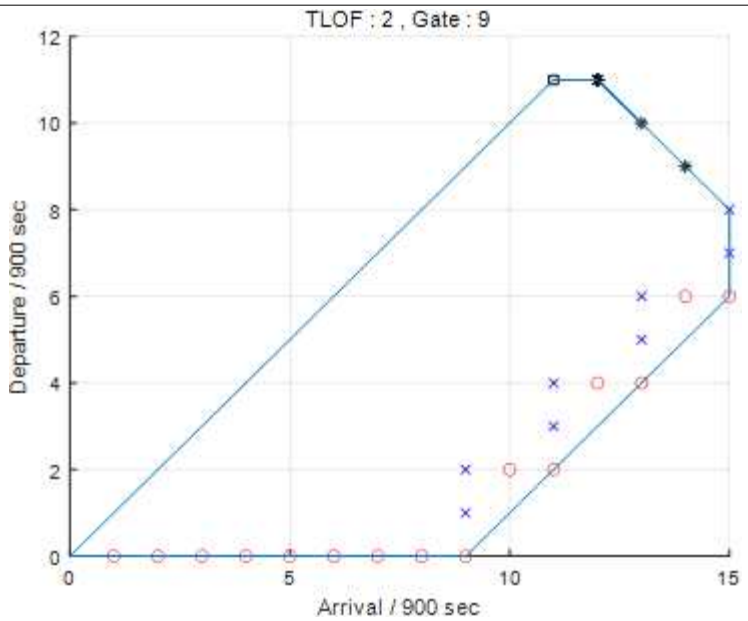


그림 450 현재 김포공항 주차장에 대한 부두 배치의 수용성

✓ 같은 방법으로 김포공항 expanded space에 대한 선형 배치, 위성 배치, 부두 배치 각각의 수용 능력을 아래 그림들에 나타냄. 이 세 가지 배치의 수용 능력을 비교해보면 TLOF pad utilization이 91.67%로 2개의 TLOF pad와 8개의 게이트를 보유한 위성 배치가 가장 좋은 효율을 보여줌. 최대 처리량에서 출발이 가장 많은 (12, 10)의 도착/출발 쌍에 대해 4명의 승객을 운송할 수 있는 현대자동차의 S-A1을 운영한다고 가정하면, 기준 시간 15분 동안 40명의 승객을 운송할 수 있음. 이를 한 시간의 운영 시간으로 계산했을 때, 72 번의 도착과 66번의 출발을 통해 총 264 명의 승객을 수용할 수 있음

표 91 현재 주차장 공간에 대한 세 가지 배치의 수용 능력 분석 결과

	Linear	Satellite	Pier
Number of TLOF pads	3	2	3
Number of gates	8	8	8
TLOF pad Utilization	75.00 %	91.67 %	75.00 %
Gate Utilization	70.21 %	61.88 %	70.21 %
Gate holding	7.29 %	4.38 %	7.29 %

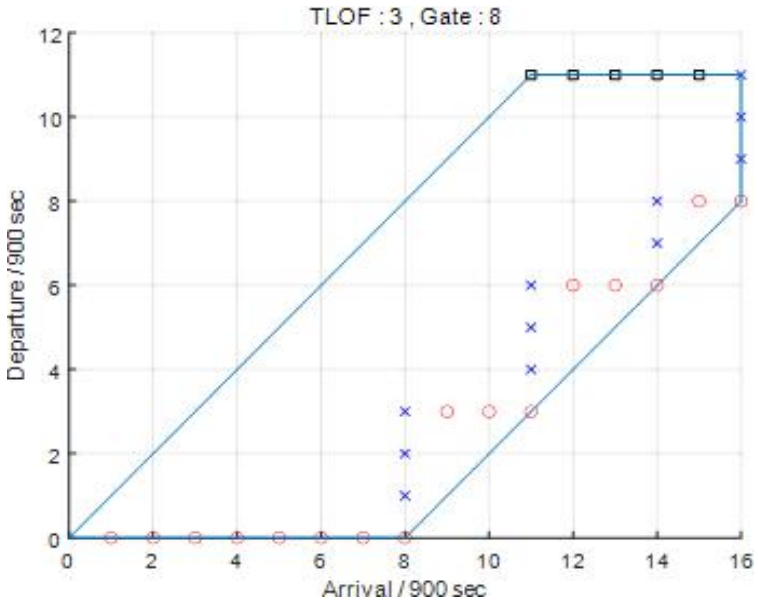


그림 451 확장된 김포공항 주차장에 대한 선형 배치의 수용성

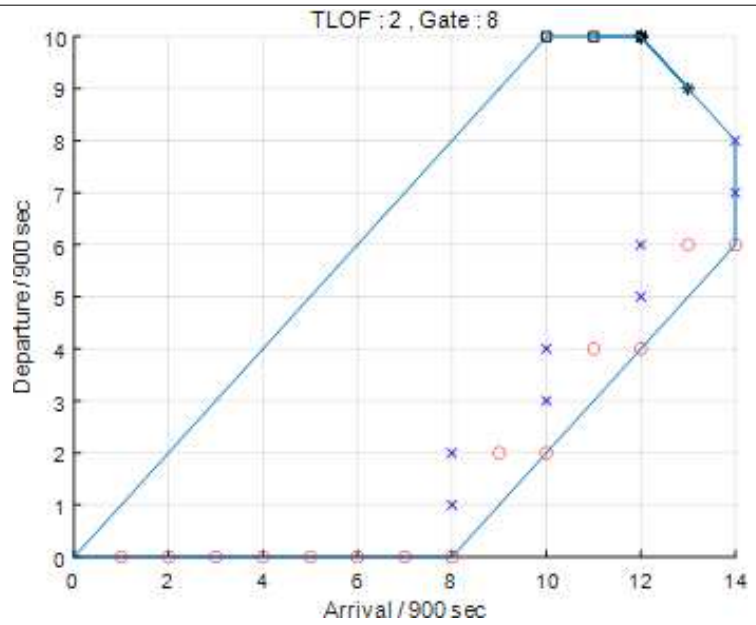


그림 452 확장된 김포공항 주차장에 대한 위성 배치의 수용성

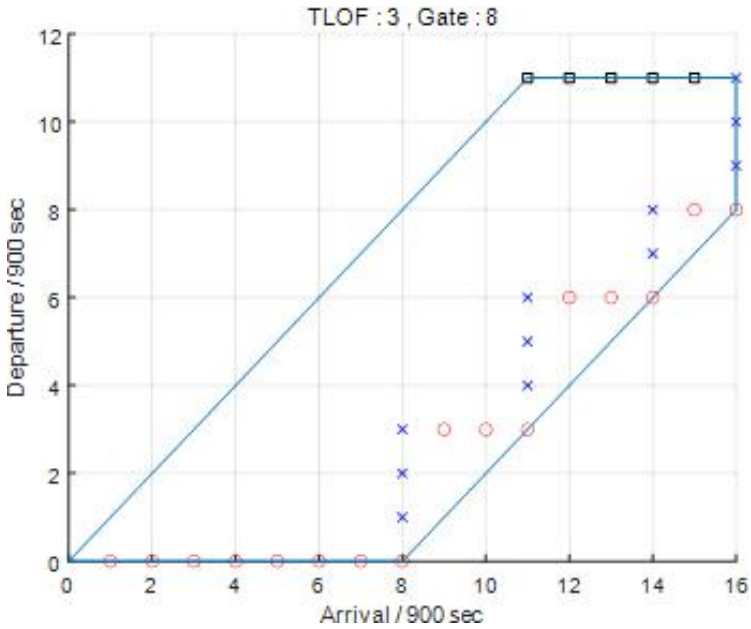


그림 453 확장된 김포공항 주차장에 대한 부두 배치의 수용성

✓ 결과적으로, 김포공항 제 1 주차장에 UAM 운영을 위한 가장 효율적인 vertiport를 배치를 고려해본다면 현재 주차장 공간에서 2개의 TLOF pad와 9개의 게이트로 구성된 부두 배치가, 확장된 주차장 공간에서 2개의 TLOF pad와 8개의 게이트로 구성된 위성 배치가 가장 효율적인 배치로 선정될 수 있음

3. 연구개발과제의 수행 결과 및 목표 달성 정도

1) 연구수행 결과

(1) 정성적 연구개발성과

○ UAM 국내외 연구 동향
- ■ UAM 요구도 분석
- ■ 비행체, 기술개발, 규제 적용, 인프라, 시장 기준 설정
- ■ UAM 운송 수요 모델링
- ■ 인프라 최적화 계획 생성
- ■ 인프라 최적화 비교분석 연구
- ■ 모델 적용 및 다양한 시나리오 평가
- ■ 도심 항공 모빌리티 소음: 진행중인 연구, 차이점 및 권고 사항
- ■ UAM 수직이착륙장 구축 개요 및 개발 사업자 측면에서의 주요 관심사항 분석
- ■ 기반시설을 가정한 시뮬레이션: 수직이착륙장 (Vertiport/Vertistop) 수용 능력 및 배치 분석
- ■ 바람 등 기상환경을 고려한 수직이착륙장 선정 국외 연구
- ■ UAM 운영과 관련된 ICAO 인증, 운항, 운용 관련 정보 수집
- ■ 도심 항공 모빌리티 시스템 체계종합 모델링
- ■ UAM 네트워크와 비행체의 모델링 및 평가 개요
- ■ 비행체 사이징
- ■ 네트워크 모델
- ■ 비용 및 이산화탄소 배기가스 연구

○ 도심 항공 공유기반 모빌리티(ODM: On-Demand Mobility)의 수도권 적용 연구
- ■ 데이터 수집 및 표현
- ■ 교통상황 데이터 수집 및 시나리오 설정
- ■ K 평균 알고리즘 연구
- ■ 실루엣 기법 연구
- ■ 국내 실정을 고려한 수직이착륙장 위치 선정 방법 및 권고 사항
- ■ 공유기반 모빌리티의 이동시간 계산

○ 도심 항공 모빌리티(UAM) 수도권 운영에 따른 소음 분석
- ■ UAM 소음 목표 분석
- ■ UAM 국내외 소음 평가 단위 선정
- ■ 소음 평가 도구 및 시나리오 선정
- ■ 소음평가를 위한 UAM 운용 모델 선정
- ■ 수도권 운영 소음 분석: AEDT를 이용한 소음 분석 내용 설정
- ■ 수도권 소음 분석 결과
- ■ 보완된 소음 분석 방법: 소음 면적을 이용한 소음 분석
- ■ 수도권 소음 분석 결론

○ 도심 항공 모빌리티(UAM) 적용을 위한 수직이착륙장 개념 정립 및 구축 방안 마련
- ■ UAM 수직이착륙장 적용을 위한 수직이착륙장 개념 정립
- ■ 수직이착륙장(Vertiport/Vertistop) 개념 설계 및 구축 방안 마련
- ■ 국내 UAM 수직이착륙장 적용에의 적용 예

○ 기존에 계획하였던 연구 내용을 포함하여 UAM 비용 분석, UAM 시스템의 체계종합 모델링, UAM 네트워크와 비행체의 모델링 및 평가 등의 추가적인 연구를 진행하였으며, 중간모니터링을 통해 받은 지적사항들에 대해 수정 및 보완하여 추가 연구를 진행하였음

(2) 정량적 연구개발성과

(: 편, 건, 명, 천원)

구분			목표	달성도(%)	비고
국외 논문 게재	SCI		1	700	SCI: 7편
	비SCI		-	-	
	계		1	700	SCI: 7편
국내 논문 게재	SCI		-	-	
	비SCI		7	129	등재지 9편
	계		7	129	등재지 9편
특허 출원	국내		2	100	국내 출원 2건
	국외		-	-	
	계		2	100	국내 출원 2건
인력 양성	석사		5	120	석사 6명
	박사		-	-	
	계		5	120	석사 6명
등록·기탁 대상 성과물	보고서 원문		1	100	본 보고서
	연구시설 · 장비		-	-	
	기술요약정보		-	-	
	생명자원	생명정보	-	-	
		생물자원	-	-	
		신품종	-	-	
	소프트웨어		-	-	
	화학물		-	-	

(3) 세부 정량적 연구개발성과

[과학적 성과]

□ 논문(국내외 전문 학술지) 게재

번호	논문명	학술지명	주저자명	호	국명	발행기관	SCIE 여부 (SCIE/비SCIE)	게재일	등록번호 (ISSN)	기여율
1	Optimal Design and Design Parameter Sensitivity Analyses of an eVTOL PAV in the Conceptual Design Phase	Applied Sciences	이봉술	제 10권 제15호	스위스	MDPI	SCI	2020.07.25	2076-3417	100
2	Surrogate Model Based Analysis of Inter-Ply Shear Stress in Fiber Reinforced Thermoplastic Composite Sheet Press Forming	Applied Sciences	Abera Tullu	제 10권 제16호	스위스	MDPI	SCI	2020.08.08	2076-3417	100
3	Derivation of a Wing-Weight Estimation Equation for a Roadable Personal Air Vehicle Using Regression Analyses of Data Obtained from Wing Planform Reference Points	Journal of Aerospace Engineering	김석범	제 34권 제 1호	미국	ASCE	SCI	2021.01.10	0893-1321	100
4	Technology Identification, Evaluation, Selection, and Optimization of a HALE Solar Aircraft	Applied Sciences	윤주열	제 10권 제21호	스위스	MDPI	SCI	2020.10.28	2076-3417	100
5	Initial sizing of a roadable personal air vehicle using design of experiments for various engine types	Aircraft Engineering and Aerospace Technology	차재영	제 93권 제 11호	영국	Emerald Publishing Limited	SCI	2021.02.11	1748-8842	100
6	Machine Learning Approach to Real-Time 3D Path Planning for Autonomous Navigation of Unmanned Aerial	Applied Sciences	Abera Tullu	제 11권 제10호	스위스	MDPI	SCI	2021.05.20	2076-3417	100

	Vehicle									
7	Selection of Vertiports Using K-Means Algorithm and Noise Analyses for Urban Air Mobility (UAM) in the Seoul Metropolitan Area	Applied Sciences	정준영	제 11권 제12호	스위스	MDPI	SCI	2021.06.21	2076-3417	100
8	도심항공 모빌리티 운용을 위한 인구분포를 고려한 소음 우선 경로 생성 및 소음 분석	한국항행학회논문지	소민준	제 24권 제 5호	한국	한국항행학회	비SCI	2020.10.31	1226-9026 (print) 2288-842X (online)	100
9	수도권 도심항공 모빌리티 수직이착륙장 위치 선정, 경로 설정 및 운행 소요시간 분석	한국항행학회논문지	오재석	제 24권 제 5호	한국	한국항행학회	비SCI	2020.10.31	1226-9026 (print) 2288-842X (online)	100
10	도심항공 모빌리티(UAM) 적용에 필요한 효율, 신뢰성, 안전성, 소음, 배기가스, 성능 및 인증의 요구도 분석	한국항행학회논문지	윤주열	제 24권 제 5호	한국	한국항행학회	비SCI	2020.10.31	1226-9026 (print) 2288-842X (online)	100
11	K-means 알고리즘을 활용한 수도권 도심항공 모빌리티(UAM) 수직이착륙장 위치 선정 및 평가	한국항행학회논문지	정준영	제 25권 제 1호	한국	한국항행학회	비SCI	2021.02.28	1226-9026 (print) 2288-842X (online)	100
12	역설계 기법을 사용한 도심항공 모빌리티용 복합형(틸트로터 + 양력 + 순항) eVTOL의 공력 해석, 요구 동력 및 중량 예측	한국항행학회논문지	김동희	제 25권 제 1호	한국	한국항행학회	비SCI	2021.02.28	1226-9026 (print) 2288-842X (online)	100
13	도심항공 모빌리티(UAM)를 위한 역설계 기법을 사용한 멀티콥터형 eVTOL의 기본 개념설계	한국항행학회논문지	최원석	제 25권 제 1호	한국	한국항행학회	비SCI	2021.02.28	1226-9026 (print) 2288-842X (online)	100
14	도심항공 모빌리티(UAM)의 국내 적용을 위한 수직이착륙장 설계 요구조건 분석 및 형상 제안	한국항행학회논문지	안병선	제 25권 제 1호	한국	한국항행학회	비SCI	2021.02.28	1226-9026 (print) 2288-842X (online)	100
15	다양한 eVTOL	한국항행학	김동희	제 25권	한국	한국항행학	비SCI	2021.06.30	1226-9026 (print)	50

	유형별 호버 효율, 회전판 하중 및 필요 배터리 비에너지 분석	회논문지		제 3호		회			2288-842X (online)	
16	도심항공 모빌리티(UAM)를 위한 틸트 덕티드 팬 형 eVTOL의 초기 사이징	한국항공운항학회논문지	이상곤	제 29권 제3호	한국	한국항공운학학회	비SCI	2021.09.30	1225-9705 (print) 2466-1791 (online)	50

□ 국내 및 국제 학술회의 발표

번호	회의 명칭	발표 내용	발표자	발표 일시	장소	국명

□ 기술 요약 정보

번호	연도	기술명	요약 내용	기술 완성도	등록 번호	활용 여부	미활용사유	연구개발기관 외 활용 여부	허용방식

□ 보고서 원문

번호	연도	보고서 명	발간일	등록 번호

□ 생명자원(생물자원, 생명정보)/화합물

번호	생명자원(생물자원, 생명정보)/화합물 명	등록/기탁 번호	등록/기탁 기관	발생 연도

[기술적 성과]

□ 지식재산권(특허, 실용신안, 의장, 디자인, 상표, 규격, 신품종, 프로그램)

번호	구분	지식재산권 등 명칭 (건별 각각 기재)	국명	출원			등록			기여율	활용 여부
				출원인	출원일	출원번호	등록인	등록일	등록번호		
1	특허	도심항공 모빌리티 수직이착륙장 위치 선정 시스템	한국	황호연 정준영	2021.06.09	10-2021-0074525				100	
2	특허	도심항공 모빌리티 비행 경로 소음 분석 시스템	한국	황호연 소민준	2021.07.12	10-2021-0090661				100	

ㅇ 지식재산권 활용 유형

번호	제품화	방어	전용실시	통상실시	무상실시	매매/양도	상호실시	담보대출	투자	활용 예정	기타

□ 저작권(소프트웨어, 서적 등)

번호	저작권명	창작일	저작자명	등록일	등록번호	저작권자명	기여율

□ 신기술 지정

번호	명칭	고시일	보호기간	지정번호

□ 기술 및 제품 인증

번호	인증 분야	인증기관	인증 내용		인증 획득일	국가명
			인증명	인증번호		

□ 표준화

ㅇ 국내표준

번호	인증구분	인증여부	표준명	표준인증기구명	제안주체	표준종류	제안/인증일자

ㅇ 국제표준

번호	표준화단계 구분	표준명	표준기구명	표준분과명	의장단 활동여부	표준특허 추진여부	표준개발 방식	제안자	표준화 번호	제안일자

[경제적 성과]

□ 시제품 제작

번호	시제품명	출시/제작일	제작업체명	설치장소	이용분야	사업화 소요 기간	인증기관 (해당 시)	인증일 (해당 시)

□ 현장적용

번호	적용기술명	적용일	발주기관명	적용 연구개발기관명	적용현장명(장소)

□ 기술 실시(이전)

번호	기술 이전 유형	기술 실시 계약명	기술 실시 대상 기관	기술 실시 발생일	기술료	
					발생 연도	발생액(천원)

□ 사업화 투자실적

번호	연도	투자 자금 성격*	추가 연구개발 투자(천원)	설비 투자(천원)	기타 투자(천원)	합계(천원)

□ 사업화 현황

번호	사업화 방식	사업화 형태	지역	사업화명	내용	업체명	매출액		매출 발생 연도	기술 수명
							국내 (천원)	국외 (달러)		

□ 매출 실적(누적)

번호	사업화명	발생 연도	매출액		합계	산정 방법
			국내(천원)	국외(달러)		
합계						

□ 사업화 계획 및 무역 수지 개선 효과

성과					
사업화 계획	사업화 소요기간(년)				
	소요예산(천원)				
	예상 매출규모(천원)		현재까지	3년 후	5년 후
	시장 점유율	단위(%)	현재까지	3년 후	5년 후
		국내			
		국외			
	향후 관련기술, 제품을 응용한 타 모델, 제품 개발계획				
무역 수지 개선 효과(천원)	수입대체(내수)		현재	3년 후	5년 후
	수 출				

□ 고용 창출

번호	사업화명	사업화 업체명	고용창출 인원(명)		합계(명)
			yyyy년	yyyy년	
합계					

□ 고용 효과

구분			고용 효과(명)
고용 효과	개발 전	연구인력	
		생산인력	
	개발 후	연구인력	
		생산인력	

□ 비용 절감(누적)

번호	사업화명	발생 연도	산정방법	비용 절감액(천원)
합계				

□ 경제적 파급 효과

(단위 : 천원/년)

구분	사업화명	수입 대체	수출 증대	매출 증대	생산성 향상	고용 창출 (인력 양성 수, 명)	기타
해당 연도							
기대 목표							

□ 산업 지원(기술지도)

번호	내용	기간	참석 대상	장소	인원(명)

□ 기술 무역

(단위 : 천원)

번호	계약 연월	계약 기술명	계약 업체명	계약업체 국가	총 계약액	기 징수액	해당 연도	징수액	향후 예정액	수출/ 수입

[사회적 성과]

□ 법령 반영

번호	구분 (법률/시행령)	활용 구분 (제정/개정)	명 칭	해당 조항	시행일	관리 부처	제정/개정 내용

□ 정책활용 내용

번호	구분 (제안/채택)	정책명	관련 기관 (담당 부서)	활용 연도	채택 내용

□ 설계 기준/설명서(시방서)/지침/안내서에 반영

번호	구 분 (설계 기준/설명서/지침/안내서)	활용 구분 (신규/개선)	설계 기준/설명서/ 지침/안내서 명칭	반영일	반영 내용

□ 신진연구자 채용

번호	채용 연구개발기관명	채용일	근로기간	채용인원(명)	채용인원 중 청년인력(명)

□ 전문 연구 인력 양성

번호	분류	연도	현황(명)										
			학위별				성별		지역별				
			박사	석사	학사	기타	남	여	수도권	충청권	영남권	호남권	기타

□ 산업 기술 인력 양성

번호	연도	프로그램명	프로그램 내용	교육 기관	교육 개최 횟수	총 교육 시간	총 교육 인원

□ 다른 국가연구개발사업에의 활용

번호	연도	중앙행정기관명	사업명	연구개발과제명	연구책임자	연구개발비(천원)

□ 국제화 협력성과

번호	구분 (유치/파견)	기간	국가	학위	전공	내용

□ 홍보 실적

번호	홍보 유형	매체명	제목	홍보일

□ 포상 및 수상 실적

번호	종류	포상명	포상 내용	포상 대상	포상일	포상 기관

[인프라 성과]

□ 연구시설・장비

번호	구축 기관	연구시설/ 연구장비명	규격 (모델명)	개발여부 (○/×)	연구시설・장비 종합정보시스템* 등록여부	연구시설・장비 종합정보시스템* 등록번호	구축일자 (YY.MM.DD)	구축비용 (천원)	비고 (설치 장소)

[그 밖의 성과](해당 시 작성)

○
–

○
–

(4) 계획하지 않은 성과 및 관련 분야 기여사항(해당 시 작성)

○
–

○
–

<참고 1> 연구개발성과 실적 증빙자료 예시

성과유형	첨부자료 예시
연구논문	논문 사본(저자, 초록, 사사표기를 확인할 수 있는 부분 포함, 연구개발과제별 중복 첨부 불가)
지식재산권	지식재산권 등록증(또는 출원서) 사본(발명인, 발명의 명칭, 연구개발과제 출처 포함)
제품개발(시제품)	제품개발사진 등 시제품 개발 관련 증빙자료
기술이전	기술이전 계약서, 기술실시 계약서, 기술료 입금 내역서 등
사업화 (상품출시, 공정개발)	사업화된 제품사진, 매출액 증빙서류(세금계산서, 납품계약서 등 매출 확인가능 내부 회계자료) 등

<참고 2> 「국가연구개발혁신법」 시행령 제33조 제4항 및 별표 4에 따른 연구개발성과의 등록·기탁 대상과 범위

구분	대상	등록 및 기탁 범위
등록	논문	국내외 학술단체에서 발간하는 학술(대회)지에 수록된 학술 논문(전자원문 포함)
	특허	국내외에 출원 또는 등록된 특허정보
	보고서원문	연구개발 연차보고서, 단계보고서 및 최종보고서의 원문
	연구시설·장비	국가연구개발사업을 통하여 취득한 3천만 원 이상(부가가치세, 부대비용 포함) 연구시설·장비 또는 공동활용이 가능한 모든 연구시설·장비
	기술요약정보	연차보고, 단계보고 및 최종보고가 완료된 연구개발성과의 기술을 요약한 정보
	생명자원 중 생명정보	서열·발현정보 등 유전체정보, 서열·구조·상호작용 등 단백체정보, 유전자(DNA)칩·단백질칩 등 발현체정보 및 그 밖의 생명정보
	소프트웨어	창작된 소프트웨어 및 등록에 필요한 관련 정보
	표준	「국가표준기본법」 제3조에 따른 국가표준, 국제표준으로 채택된 공식 표준정보(소관 기술위원회를 포함한 공식 국제표준화기구(ISO, IEC, ITU)가 공인한 단체 또는 사실표준화기구에서 채택한 표준정보를 포함)
기탁	생명자원 중 생물자원	세균, 곰팡이, 바이러스 등 미생물자원, 인간 또는 동물의 세포·수정란 등 동물자원, 식물세포·종자 등 식물자원, DNA, RNA, 플라스미드 등 유전체자원 및 그 밖의 생물자원
	화합물	합성 또는 천연물에서 추출한 유기화합물 및 관련 정보
	신품종	생물자원 중 국내외에 출원 또는 등록된 농업용 신품종 및 관련 정보

2) 목표 달성 수준

연 구 개 발 목 표	달 성 내 용	달성도(%)
UAM의 효율, 신뢰성, 안전성, 소음, 배기가스, 성능, 인증 요구도 분석	인증 요구도 분석	100
잠재적 사용자 및 서비스 제공자 요구도 분석 및 요구도 도출	요구도 분석 및 요구도 도출	100
도시 인프라 및 운항 요구도 및 도출	도시 인프라 및 운항 요구도 및 도출	100
UAM 활용 도심 공유기반 모빌리티 교통 수요 모델링	수도권 교통 수요 모델링	70
데이터 표현 방법 연구, 교통 상황 데이터 수집	수도권 데이터 표현 방법 연구, 교통 상황 데이터 수집	100
예상되는 목표 시장 인구의 통계학적 특성을 기준으로 데이터 필터링, 경로 시나리오 설정	수도권 데이터 필터링, 경로 시나리오 설정	100
비행체, 기술개발, 규제 적용, 인프라, 시장 기준 설정	비행체, 기술개발, 규제 적용, 인프라, 시장 기준 설정	70
인프라 노드 후보 매트릭스 축적	수도권 수직이착륙장 위치 선정	100
인프라 최적화 계획 생성	20, 40, 100개의 수직이착륙장 위치 선정	100
인프라 최적화 비교분석 연구	20, 40, 100개의 수직이착륙장 위치에 따른 효과 분석	100
배경조사, 데이터 수집 방법, 최적화 계획 등 요구조건을 만족하는 매개변수식 tool을 사용하여 다양한 시나리오 평가	다양한 수도권 운영 시나리오 평가	80
도심항공 모빌리티(UAM) 비용 분석(추가 연구)	도심항공 모빌리티 비용 분석	100
출퇴근 인구 데이터 수집 및 데이터 표현 방법	출퇴근 인구 데이터 수집 후 소음우선 경로 연구에 활용	100
교통상황 데이터 수집 및 시나리오 설정	교통상황 데이터 수집 후 경로 시나리오 작성에 활용	100
K 평균 알고리즘 연구	수도권 수직이착륙장 선정에 K 평균 알고리즘 사용	100
실루엣 기법 연구	수도권 수직이착륙장 선정 후 적절성 평가에 실루엣 기법 사용	100
K 평균 알고리즘과 실루엣 기법을 사용한 수직이착륙장의 개수와 위치선정	수도권 수직이착륙장의 개수와 위치선정	100
공유기반 모빌리티의 이동시간 계산	수도권 UAM 이동시간 계산	100

도심 항공 모빌리티 시스템 체계종합 모델링	시스템 체계종합 모델링	100
UAM 소음 목표	UAM 소음 목표 연구	100
UAM 국내외 소음 평가 단위 연구: WECPNL과 등가소음도 방식($_{en}$) 비교	WECPNL과 등가소음도 방식(L_{den}) 비교 연구	100
출퇴근 시나리오 선정	수도권 출퇴근 시나리오 선정	100
UAM PAV 선정	유형별 eVTOL 선정	100
UAM PAV 운용 횟수 선정	경로 시나리오별 운용 횟수 선정	100
UAM PAV 수직이착륙장 및 비행 경로 선정	UAM 수직이착륙장 및 비행 경로 선정 연구	100
수도권 수직이착륙장 및 비행경로 설정	수도권 수직이착륙장 및 비행경로 설정	100
수도권 Receptor 및 운용 설정	수도권 Receptor 및 운용 설정	100
수도권 소음 분석 결과	수도권 운영에 따른 소음 분석	100
수도권 소음 감소 기술 적용	수도권 소음 우선 경로 선정을 통한 소음 감소	100
도심 항공 모빌리티 소음: 진행중인 연구, 차이점 그리고 권고 사항(추가 연구)		100
UAM 수직이착륙장 개요	UAM 수직이착륙장 자료 분석 및 정리	100
UAM 수직이착륙장 구축 개발 사업자 측면에서의 주요 관심 사항 분석	수직이착륙장 설계 요구조건 분석	70
UAM 수직이착륙장 구축 구역 계획 수립	실제 지도 위치 정보를 고려한 현실성 있는 100개 수도권 수직이착륙장 선정	80
UAM 수직이착륙장 구축 구역 지정을 위한 권고 사항 도출	선형, 위성, 부두형 등을 고려한 수직이착륙장 구역 요구조건 도출	100
기반시설을 가정한 시뮬레이션	수직이착륙장 수용 능력 시뮬레이션	90
수직이착륙장(Vertiport/Vertistop) 개념 설계	수직이착륙장 개념설계	90
국내 UAM 수직이착륙장 적용에의 적용 예(추가 연구)		100
국내 실정을 고려한 수직이착륙장 위치 선정 기준, 절차, 방법 연구		100
바람 등 기상환경을 고려한 수직이착륙장 선정 연구		100
UAM 운영과 관련된 ICAO 인증, 운항, 운용 관련 정보 수집	UAM 운영과 관련된 FAA, EASA, ICAO 인증, 운항, 운용 정보 수집	100
우리나라 수도권 적용 시 FAA, EASA, ICAO의 수직이착륙장 설치 기준 연구	FAA, EASA, ICAO 수직이착륙장 설치 기준 연구	100
UAM 네트워크와 비행체의 모델링 및 평가 개요		100
바람 등 기상환경을 고려한 수직이착륙장 선정 연구		100
비행체 사이징		100
네트워크 모델		100
비용 및 이산화탄소 배기가스 연구		100
추후 연구 내용		100
요약 및 결론		100

4. 목표 미달 시 원인분석(해당 시 작성)

1) 목표 미달 원인(사유) 자체분석 내용

○
–

○
–

2) 자체 보완활동

○
–

○
–

3) 연구개발 과정의 성실성

○
–

○
–

5. 연구개발성과의 관련 분야에 대한 기여 정도

○ 본 연구는 도심항공 모빌리티(UAM) 적용을 위한 수직이착륙장 위치 선정, 소음분석, 수직이착륙장 개념 정립 및 구축 방안 마련 등을 수행한 연구로 국내에서는 최초로 수행된 연구임. 특히 UAM 운영에 따른 소음 우선 경로 선정 연구는 창의성이 있는 부분이며 수직이착륙장(버티포트) 구성요소를 분석하여 국내에 적용하는 연구도 창의성이 있는 부분임

○ 현재 운용되고 있는 민간/군용 항공기는 이미 항공선진국에 의한 선점되어 있으므로 사실상 새로운 시장개척이 거의 불가능함. 그러나 아직 시장이 형성되지 않는 UAM은 우리의 전략적 기회가 될 수 있음. 본 과제의 결과물인 UAM 운영에 따른 소음분석과 수직이착륙장 개념설계는 UAM에 중요한 핵심기술임. 즉 UAM의 핵심기술구축을 통하여 세계시장을 선점함으로써 많은 부가 가치를 창출할 수 있는 파급 효과가 기대됨

○ 본 연구 결과물인 UAM 소음분석과 수직이착륙장 개념설계는 2023년부터 2032년까지 총 1조6천억원의 예산으로 진행될 예정인 한국형 도심항공교통(K-UAM) 핵심기술개발사업에 직접적으로 활용될 수 있음. 특히 내역사업 3-8)의 내용인 UAM 위험도 및 소음 기반 공역/회랑 평가 기술 개발, UAM 공역/회랑비행절차 설계 및 자동화 기술에 활용될 수 있고 내역사업 4-11) 버티포트 입지 기반 운항 수요 및 시설 설계 기준 연구, 4-12) 소음 우선 경로선정 및 소음분석 기술 과제에 직접적으로 활용될 수 있음

○ 본 연구는 UAM 운영에 따른 소음분석, 수도권 수직이착륙장 위치선정, 수직이착륙장 개념정립 및 구축 방안 마련 등 계획서 상의 연구내용 이외에도 중간평가에서 제시된 수정의견을 반영하여 바람 등 기상환경을 고려한 연구, ICAO 인증, 운항, 운용 관련 정보 수집 연구를 수행하였음. 또한 연구 도중 중요한 내용으로 판단되어 UAM 소음의 진행중인 연구, 차이점, 권고 사항을 추가로 연구하였고 UAM 네트워크와 비행체의 모델링 및 평가 연구 등 추가 연구로 인해 방대한 양의 연구를 성실히 수행하였음

○ 해외 SCI논문 7편 게재완료(7편 단독 사사), 국내 학술지 9편 게재 완료(7편 단독 사사), 특허 출원 2건(2건 단독 사사) 완료

6. 연구개발성과 관리 및 활용 계획

한국형 도심항공교통(K-UAM) 핵심기술개발사업에 활용

- 국토교통부(주관), 과학기술정보통신부, 산업통상자원부, 중소벤처기업부, 기상청(이하 관계부처)에서는 아래 그림과 같이 도심항공교통(UAM) 운영 全분야의 안전성·신뢰성이 검증된 핵심기술 확보로 상용화 기반 마련 및 사회적 수용성 확대를 목적으로 국가연구개발사업인 `**한국형 도심항공교통(K-UAM) 핵심기술개발사업**`을 기획하고 있음



그림 454 K-UAM 발전 방향(미래통합시나리오)

- 사업기간은 '23년 ~ ' 32년이며, 총사업비는 1조 6,938억원 규모로 진행될 예정임
- K-UAM 안전운용 선도 · 기술도약 및 신산업 경쟁력 강화라는 비전을 갖고 있으며, 총 6개의 내역사업을 계획 중임
- 국토부, 과기부, 기상청에서 주관하는 **(내역사업 3) K-UAM 운송 · 운용 · 운항 관리기술 개발사업**은 UAM 운송운용서비스의 안정성 · 효율성 · 신뢰성 극대화, 첨단화 및 고밀도 교통흐름관리를 위한 K-UAM 운항체계 개발을 목표로 함(아래 그림). 이 중 8) UAM 공역 및 비행절차 설계기술 개발 과제에 본 연구결과를 적극적으로 활용할 수 있음. 이 과제의 주요 내용(안)은 다음과 같음
    - UAM 위험도 및 소음 기반 공역/회랑 평가 기술 개발
    - UAM 공역/회랑비행절차 설계 및 자동화 기술

구분	주요 내용	
사업명	한국형 도심항공교통 핵심기술개발사업	
비전	K-UAM 안전운용 선도·기술도약 및 신산업 경쟁력 강화	
목표	한국형 도심항공교통 핵심기술 확보를 통한 도심항공교통체계 기반 마련	
	(내역사업1) K-UAM 미래선도기술개발사업	高효율 · 안전성을 갖춘 UAM 도심운항을 위한 원격·자율 비행 및 소음·진동 저감 기술 개발
	(내역사업2) K-UAM 기체부품기술개발사업	UAM 기체 플랫폼 적용 요구조건 충족·지원을 위한 기계·전기 전자 및 동력·추진시스템 등 핵심 기체·부품설계·제작 기술개발
	(내역사업3) K-UAM 운송운용운항관리기술개발사업	UAM 운송운용서비스의 안정성·효율성·신뢰성 극대화, 첨단화 및 고밀도 교통흐름관리를 위한 K-UAM 운항체계 개발
	(내역사업4) K-UAM 인프라핵심기술개발사업	UAM 접근성 최적화 및 효율적 서비스 제공에 필수적인 버티포트 설계·구축 및 보조시스템 기술 개발
	(내역사업5) K-UAM 안전인증·지원시스템개발사업	안전한 UAM 생태계 구현을 위한 한국형 도심항공교통 인증기술 및 종사자 운용자격 체계 개발
	(내역사업6) K-UAM 상용화·통합실증기술개발사업	K-UAM 단계별 마일스톤 달성을 위한 핵심기술·부품의 적합성 입증·개조인증 및 통합실증 기술 개발

그림 455 한국형 도심항공교통(K-UAM) 핵심기술개발사업 주요 내용

○ (내역사업 3) K-UAM 운송 · 운용 · 운항관리 기술개발사업

중점추진과제	세부과제	주요내용(안)
UAM MRO 기술	1) UAM 선진 MRO 기술 개발을 위한 스마트 격납고 실증 연구	· 스마트 격납고 built-in 검사기술 개발 · Cobot 기반 LUT 및 VT 검사기술 개발 · LUT, RT, PAUT, 소음/진동 자율진단 인공지능 솔루션 개발 · 복합재 및 금속재 3D 프린터 기반 수리부품 스마트팩토리 기술 개발 · 스마트 격납고 통합 운용 실증
	2) UAM 특화 On-board SHM 기술 개발	· AE/충격 표정 센서 학습시스템 및 on-board SHM 시스템 개발 · 비행 데이터 및 변형률 센서 기반 On-board SHM 시스템 개발 · Fused SHM data 기반 진단 AI 개발 · 동력 및 추력 계통 on-board HUMS 및 상태진단 AI 개발
UAM 통신 및 항법 기술	3) UAM 비행운용·제어용 다중링크 통신 기술	· 다중링크(C대역, 5G, 위성) 무선통신 인프라 기술 개발 · 다중링크(C대역, 5G, 위성) 무선통신 탑재 통합단말 기술 · UAM 탑재 통신용 고이득 안테나 기술 개발
	4) UAM 통신망 및 데이터 보호 기술	· 양자내성암호 및 하이브리드 암호 기반의 K-UAM 통신망 및 데이터 보호 기술 · K-UAM 최적화된 사이버 위협 탐지/대응 및 보안관제 기술
UAM 항로 및 버티포트 감시 기술	5) UAM 협력적 감시 및 항로 감시 레이다 기술 개발	· 허용 주파수 대역에 최적화된 핵심 MMC 칩 개발 · 고각/방위각 커버리지 확대를 위한 능동 위상 배열 안테나 송수신 기술 개발 · 정밀 탐지/추적, 지상 클러터 및 간섭 신호 저감 등 신호처리 및 지시제어 기술 개발
	6) UAM 버티포트 복합감시 기술 개발	· 라이다 기반 감시 기술 · 영상 기반 감시 기술 · 체계 통합 및 시험 기술
실시간 UAM 운항 상황 모니터링 및 비행/운항/경로 계획 조정 기술	7) UAM 도심지 비행용 3차원 정밀지도 구축	· UAM 도심지 비행용 3차원 장애물 정보 구축 및 관리 기술 · UAM 비행용 CNS 커버리지 및 품질 3차원 맵 구성, 관리 기술 · 정보 관리 및 공유 기술
	8) UAM 공역 및 비행절차 설계 기술 개발	· UAM 위험도 및 소음 기반 공역/회랑 평가 기술 개발 · UAM 공역/회랑비행절차 설계 및 자동화 기술
	9) 실시간 운항정보 기반 UAM 교통관리 시스템 개발	· 교통상황 모니터링 및 예측 · UAM 교통 흐름 및 동적 공역 관리 기술 · 실시간 교통관리 서비스 (PSU 서비스) 및 정보 공유 체계 구현

그림 456 (내역사업 3) K-UAM 운송·운용·운항관리 기술개발사업

- 또한 국토부, 과기부, 산업부, 중기부에서 주관하는 (내역사업 4) K-UAM 인프라 핵심기술 개발사업은 UAM 접근성 최적화 및 효율적 서비스 제공에 필수적인 버티포트 설계 · 구축 및 보조시스템 기술 개발을 목표로 함. 이 중 11) 버티포트 입지 기반 운항 수요 및 시설 설계 기준 연구, 12) 소음 우선 경로선정 및 소음분석 기술 과제에 본 연구결과를 적극적으로 활용할 수 있음. 특히 12) 소음 우선 경로선정 및 소음분석 기술은 본 연구자가 기술수요를 제기하여 채택된 세부과제임. 이 과제들의 주요 내용(안)은 다음과 같음

- 11) 버티포트 입지 기반 운항 수요 및 시설 설계 기준 연구

  - 다수단 연계 이용자 이동패턴 기반 버티포트 입지 전략 연구
  - 대도심 빅데이터의 시공간적 동적 요소를 고려한 버티포트 별 수요 · 운영 권역 설정 기술 및 라우팅 기술 연구
  - 이용자 이동패턴 및 수요 기반 버티포트 환승시설 설계 기준 수립 연구
  - UAM 운행/이착륙 안정성 확보를 위한 버티포트 입지 기반 3차원 시정 및 안개위치 데이터베이스 구축 및 실시간 정보 산출 연구
  - 탄소중립을 위한 제로에너지 버티포트 입지 설계기준 수립 연구

- 12) 소음 우선 경로선정 및 소음분석 기술

  - UAM 소음지도 예측 프로그램 개발
  - UAM 소음 환경 모사를 위한 3D 모델링
  - UAM 소음환경을 고려한 운용 경로

○ (내역사업 4) K-UAM 인프라핵심 기술개발사업

중점추진과제	세부과제	주요내용(안)
UAM 서비스를 위한 버티포트 안전성 평가 기술 및 시설 설계 기준 개발	10) 버티포트 구조설계, 모듈화 시공, 구조 안전성 평가 기술	· 버티포트 구조 안전성 해석 및 설계기술 개발 · 버티포트 급속시공을 위한 적층형 모듈화 시공기술 개발 · 버티포트 구조적 안전성 상시 모니터링 및 평가기술 개발
	11) 버티포트 입지 기반 운항 수요 및 시설 설계 기준 연구	· 다수단 연계 이용자 이동패턴 기반 버티포트 입지 전략 연구 · 대도심 빅데이터의 시공간적 동적 요소를 고려한 버티포트 별 수요·운영 권역 설정 기술 및 라우팅 기술 연구 · 이용자 이동패턴 및 수요 기반 버티포트 환승시설 설계기준 수립 연구 · UAM 운행/이착륙 안정성 확보를 위한 버티포트 입지 기반 3차원 시정 및 안개위치 데이터베이스 구축 및 실시간 정보 산출 연구 · 탄소중립을 위한 제로에너지 버티포트 입지 설계기준 수립 연구
UAM 특화형 도시계획·조성 기술 개발	12) 소음 우선 경로선정 및 소음분석 기술	· UAM 소음지도 예측 프로그램 개발 · UAM 소음 환경 모사를 위한 3D 모델링 · UAM 소음환경을 고려한 운용 경로
	13) UAM 특화형 스마트 시티	· UAM 특화형 도시계획 및 설계 기술 · UAM 특화형 도시 디지털트윈 시뮬레이션 분석과 공간계획, 환경계획 활용 기술 · UAM 특화형 스마트시티 계획 및 조성(플랫폼, 솔루션) 기술 · UAM 특화형 스마트시티 인프라(신재생에너지, 송배전, 통신, 기상 등) 구축 기술 · UAM 특화형 스마트시티 모빌리티허브(MaaS, 응급의료연계 등) 구축 기술

그림 457 (내역사업 4) K-UAM 인프라핵심 기술개발사업

7. 참고 문헌

[1] “Korean Urban Air Mobility (K-UAM) Roadmap that opens the sky of the city,” Korean Government, 2020

[2] Statistics Korea [Internet]. Available: https://kosis.kr/index/index.do

[3] MATLAB [Internet]. Available: https://kr.mathworks.com/products/matlab.html

[4] C. D. Manning, P. Raghavan, H. Schutze, An Introduction to Information Retrieval, online ed. Cambridge University Press, 2009.

[5] Peter J. Rousseeuw, “Silhouettes: A graphical aid to the interpretation and validation of cluster analysis”, University of Fribourg, ISES, CH-1700 Fribourg, Switzerland

[6] Open Platform, Vworld map, [Internet]. Availablhttp://map.vworld.kr/map/maps.do

[7] Seoul open data plaza, urban highway speed information [Internet]. Available: https://data.seoul.go.kr/dataList/OA-15247/F/1/datasetView.do.

[8] J. H. Kim, D. Lim, S. G. Min, and Mavris, D., “Prediction of Community Noise Impacts from Commercialization of Vertical Takeoff and Landing Personal Air Vehicles,” in 15th AIAA Aviation Technology, Integration, and Operations Conference, AIAA 2015-3001, Dallas: TX, 2015.

[9] Federal Aviation Administration, —Aircraft Noise Issues, [Internet]. Available: http://www.faa.gov/about/office_org /headquarters _offices/ apl/noise_emissions/airport_noise_ issues /,Retrieved June 2015.

[10] Environmental Research and Consultancy Department, “Aircraft Noise and Annoyance: Recent findings,” Civil Aviation Authority, Aviation House, Gatwick Airport South, West Sussex, RH6 0YR, CPA 1588, 2018

[11] Uber Elevate, “Fast-Forwarding to a Future of On-Demand Urban Air Transportation”

[12] Porsche Consulting(2018), “The Future of Vertical Mobility”

[13] https://www.safran-group.com/media/first-ground-test-safrans-hybrid-electric-propulsion-system-20180719

[14] Chrzan, K., & Orme, B. K. (2000). An Overview and Comparison of Design Strategies for Choice-Based Conjoint Analysis. Sawtooth Software Research Paper Series, 98382(360). Retrieved from https://www.sawtoothsoftware.com/download/techpap/desgncbc.pdf

[15] Vascik, P., & Hansman, R. J. (2017). Systems-Level Analysis of On Demand Mobility for Aviation, (February), 1-306. Retrieved from http://hdl.handle.net/1721.1/106937

[16] Vrtic, M., Schuessler, N., Erath, A., & Axhausen, K. W. (2009). The impacts of road pricing on route and mode choice behaviour. Journal of Choice Modelling, 3(1), 109-126. Retrieved from www.jocm.org.uk

[17] MVV App. (2017). MVV. Retrieved from https://www.mvv-muenchen.de/

[18] Mytaxi App. (2017). Mytaxi. Retrieved from https://de.mytaxi.com/en/index.html

[19] Daniels, R., & Mulley, C. (2013). Explaining walking distance to public transport: The dominance of public transport sup

[20] Sarker, R. I. (2015). Surveying Acceptable Walking Distance To Different Modes of Local Public Transport in Munich Area. Retrieved from https://www.tphlink.com/uploads/1/1/4/0/11401949/icth_2015_rumana_sarker_06.07.pdf

[21] Krueger, R., Rashidi, T. H., & Rose, J. M. (2016). Preferences for shared autonomous vehicles. Transportation Research Part C: Emerging Technologies, 69, 343-355. https://doi.org/10.1016/j.trc.2016.06.015

[22] Twaddle, H. A. (2011). Stated preference survey design and pre-test for valuing influencing factors for bicycle use (master's thesis). Technical University of Munich. Retrieved from http://mediatum.ub.tum.de/doc/1130707/1130707.pdf

[23] ADAC. (2017). ADAC Autokosten Herbst/Winter 2017/2018

[24] Mengying Fu, et al, “Exploring Preferences for Transportation Modes in an Urban Air Mob

ility Environment : a Munich Case Study", Technische Universität München, 2018
[25] Sawtooth. (2017). The CBC system for choice-based conjoint analysis, 98382(360), 0-3 1.
[26] Atasoy, B., Glerum, A., & Bierlaire, M. (2006). Mode choice with attitudinal latent class: a Swiss case-study. Second International Choice Modeling Conference, 1-16. Retrieved from https://infoscience.epfl.ch/record/167866
[27] Winter, K., Oded, C., Martens, K., & van Arem, B. (2017). Stated Choice Experiment on Mode Choice in an Era of Free-Floating Carsharing and Shared Autonomous Vehicles: R aw Data. Transportation Research Board, 96th Annual Meeting, (1), 1-17. https://doi.org /10.4121/uuid:4ac4d7b7-c8b0-42ec-a096-55a4f1837585
[28] Lawrence, C. T., Zhou, J. L., & Tits, A. L. (1994). User's Guide for CFSQP Version 2.0: A C Code for Solving (Large Scale) Constrained Nonlinear (Minimax) Optimization Proble ms, Generating Iterates Satisfying All Inequality Constraints. Retrieved from http://read.p udn.com/downloads8/sourcecode/windows/25590/FSQP/cfsqp-manual.pdf
[29] Dillman, D. A., Smyth, J. D., & Christian, L. M. (2014). Internet, Phone, Mail, and Mixed -Mode Surveys: The Tailored Design Method (4th ed.). Wiley Publishing ©2014
[30] Pavan Yedavalli and Jessie Mooberry, "Airbus UTM : Defining Future Skies", Airbus, Sunn yval
[31] Reiche, Colleen, "Urban Air Mobility Market Study", Ph.D. dissertation, University of Calif ornia, Berkeley, 2018
[32] https://transcend.aero/index.php
[33] https://www.youtube.com/watch?v=KHXm288XA-I
[34] https://www2.deloitte.com/us/en/insights/focus/future-of-mobility/infrastructure-barriers-to-urban-air-mobility-with-VTOL.html
[35] https://dsm.forecastinternational.com/wordpress/2020/04/20/vertiplaces-and-navigating-the-world-of-urban-air-mobility-infrastructure/
[36] https://www.airbus.com/innovation/zero-emission/urban-air-mobility/infrastructure.html# missionvision
[37] https://vtol.org/events/virtual-workshop-on-evtol-infrastructure
[38] https://www.volocopter.com/en/voloport/
[39] https://www.intertraffic.com/news/articles/technological-barriers-to-the-elevated-future-of-mobility/
[40] http://ushst.org.dnn4less.net/Portals/0/PDF/VTOLVertiports.pdf
[41] https://humphreys.com/ -elevate-2018/
[42] Ivan Terekhov, "Assessing noise effects of the urban air transportation system, AIAA 201 8-2954
[43] Niklaß, M., "Ein systemanalytischer Ansatz zur Internalisierung der Klimawirkung der Luftf ahrt", PhD Thesis - Hamburg University of Technology, 2018
[44] Dill, J., Broach, J., Deutsch-Burgner, K., Xu, Y., & Levinson, D. M. (2014). Multiday GS P Travel Behavior Data for Travel Analysis. Federal Highway Administration report. Retriev ed from https://www.fhwa.dot.gov/planning/tmip/publications/other_reports/multiday_gps /fhwahep15026.pdf
[45] Hallie Ford, Lea Harris, et. al, "Modeiling On-Demanded VTOL Environments", Georgia In stitute of Technology, 2017
[46] Nadeau, G. (2016, April 6). United States Department of Transportation. Retrieved April 26, 2017 (2011). Regional Travel Survey: Final Report. Atlanta Regional Commission. Re trieved from http://www.atlantaregional.com/transportation/modeling/household-travel-su rvey
[47] Hansman, R. J., & Vascik, P. D. (2016, April 21). Operational Aspects of Aircraft Based On-Demand Mobility. Retrieved March 3, 2017, from FAA

[48] Antcliff, K., & Goodrich, K. (2016). NASA Silicon Valley Urban VTOL Air Taxi Study. On Demand Mobility Workshop. Hampton, VA: NASA LaRC.
[49] Holmes, B. J., Parker, R. A., & Stanley, D. (2017). NASA Strategic Framework for On-D emand Mobility. NASA. NASA.
[50] City of Atlanta - Planning and Community Development. (n.d.). Retrieved April 21, 2017, from http://www.atlantaga.gov/index.aspx?page=385
[51] National Academies of Sciences, Engineering, and Medicine, Advancing aerial mobility: A national blueprint. Washington, DC, The National Academies Press, 2020, https://doi.org /10.17226/25646.
[52] Johnson, W., Silva, C., and Solis, E., "Concept vehicles for VTOL air taxi operations," A HS Aeromechanics Design for Transformative Lift, San Francisco, CA, 2018.
[53] National Academies of Sciences, Engineering, and Medicine, Assessing community anno yance of helicopter noise. Washington, DC, The National Academies Press, 2017, https: //doi.org/10.17226/24948.
[54] "Helicopter Association International Fly Neighborly Committee, Fly Neighborly Guide," He licopter Association International, 2007.
[55] Lopes, L.V. and Burley, C.L., "ANOPP2 User's Manual: Version 1.2," NASA TM-2016-21 9342, 2016.
[56] Ffowcs Williams, J.E. and Hawkings, D.L., "Sound generation by turbulence and surface s in arbitrary motion," Philosophical Transactions of the Royal Society of London. Series A, Mathematical and Physical Sciences, Vol. 264, No. 1151, 1969, pp. 321-342, https:/ /doi.org/10.1098/rsta.1969.0031.
[57] Zawodny, N.S. and Boyd, D.D., "Investigation of rotor-airframe interaction noise associa ted with small-scale rotary-wing unmanned aircraft systems," Journal of the American H elicopter Society, Vol. 65, No. 1, 2020, pp. 1-17, https://doi.org/10.4050/JAHS.65.012 007.
[58] Zawodny, N.S. and Pettingill, N.A., "Acoustic wind tunnel measurements of a quadcopter in hover and forward flight conditions," InterNoise 2018, Paper 1364, Chicago, IL, 2018.
[59] Casalino, D., Velden, W.C.v.d., Romani, G., and Gonzalez-Martino, I., "Aeroacoustic an alysis of urban air operations using the LB/VLES method," 25th AIAA/CEAS Aeroacoustic s Conference, AIAA-2019-2662, Delft, NL, 2019, https://doi.org/10.2514/6.2019-2662.
[60] "AIR 1845, Rev. A, Procedure for the calculation of airplane noise in the vicinity of airport s," SAE International, Warrendale, PA, 2012.
[61] "Aviation Environmental Design Tool (AEDT), Version 3c, Technical Manual," Federal Avia tion Administration, DOT-VNTSC-FAA-20-05, 2020.
[62] Reherman, C.N., Roof, C.J., Fleming, G.G., Senzig, D.A., Read, D.R., and Lee, C.S.Y., "Fitchburg municipal airport noise measurement study : Summary of measurements, dat a and analysis," John A. Volpe National Transportation Systems Center, FAA-AEE-05-0 1, DOT-VNTSC-FAA-03-09, 2005.
[63] Synodinos, A.P., Self, R.H., and Torija, A.J., "Framework for predicting Noise-Power-Dis tance curves for novel aircraft designs," Journal of Aircraft, Vol. 55, No. 2, 2018, pp. 78 1-791, https://doi.org/10.2514/1.C034466.
[64] Page, J.A., Wilmer, C., Schultz, T., Plotkin, K.J., and Czech, J., "Advanced acoustic m odel technical reference and user manual, SERDP Project WP-1304," Wyle Laboratories, Inc., 2009.
[65] "Annex 16 to the Convention on International Civil Aviation, Environmental Protection, Vol ume I, Aircraft Noise (8th Edition)," International Civil Aviation Organization, Montreal, Ca nada, 2017.
[66] "Noise standards: aircraft type and airworthiness certification," in CFR Title 14, Chapter 1 -Federal Aviation Administration, Department of Transportation, Part 36, 2019 Edition,

pp. 763-842.
[67] Bennett, R.L. and Pearsons, K.S., "Handbook of aircraft noise metrics," NASA CR-3406, 1981.
[68] "Airport noise compatibility planning," in CFR Title 14, Chapter 1 - Federal Aviation Administration, Department of Transportation, Part 150, 2019 Edition, pp. 660-674.
[69] Schultz, T.J., "Synthesis of social surveys on noise annoyance," The Journal of the Acoustical Society of America, Vol. 64, No. 2, 1978, pp. 377-405, https://doi.org/10.1121/1.382013.
[70] Fidell, S., Barber, D.S., and Schultz, T.J., "Updating a dosage-effect relationship for the prevalence of annoyance due to general transportation noise," The Journal of the Acoustical Society of America, Vol. 89, No. 1, 1991, pp. 221-233, https://doi.org/10.1121/1.400504.
[71] "Federal agency review of selected airport noise analysis issues," Federal Interagency Committee on Noise, 1992.
[72] Miedema, H.M.E. and Vos, H., "Exposure-response relationships for transportation noise," The Journal of the Acoustical Society of America, Vol. 104, No. 6, 1998, pp. 3432-3445, https://doi.org/10.1121/1.423927.
[73] "Acoustics-Description, measurement and assessment of environmental noise - Part 1: Basic quantities and assessment procedures," ISO 1996-1:2016, 2016.
[74] Cointin, R., Sizov, N., and Hileman, J.I., "U.S. civil aircraft noise annoyance survey design," InterNoise 2016, Hamburg, Germany, 2016, pp. 2578-2583.
[75] Lyon, R.H., "Product sound quality - from perception to design," Sound and Vibration, Vol. 37, No. 3, 2003, pp. 18-23.
[76] Miller, N.P., Anderson, G.S., Horonjeff, R.D., Menge, C.W., Ross, J.C., and Newmark, M., "Aircraft noise model validation study," HMMH Report No. 295860.29, 2003.
[77] "Information on levels of environmental noise requisite to protect public health and welfare with an adequate margin of safety," U.S. Environmental Protection Agency, Office of Noise Abatement and Control, 550/9-74-004, 1974.
[78] National Academies of Sciences, Engineering, and Medicine, Evaluating methods for determining interior noise levels used in airport sound insulation programs. Washington, DC, The National Academies Press, 2016, https://doi.org/10.17226/23473.
[79] Robinson, D., Bernhard, R., and Mongeau, L., "Vibration and rattle mitigation," Federal Aviation Administration, PARTNER-COE-2008-004, 2008.
[80] Hodgdon, K., Atchley, A., and Bernhard, R., "Low frequency noise study," Federal Aviation Administration, PARTNER-COE-2007-001, 2007.
[81] Rathsam, J., Klos, J., Loubeau, A., Carr, D.J., and Davies, P., "Effects of chair vibration on indoor annoyance ratings of sonic booms," The Journal of the Acoustical Society of America, Vol. 143, No. 1, 2018, pp. 489-499, https://doi.org/10.1121/1.5019465
[82] Schomer, P. and Neathammer, R., "The role of helicopter noise-induced vibration and rattle in human response," The Journal of the Acoustical Society of America, Vol. 81, No. 4, 1987, https://doi.org/10.1121/1.394523.
[83] Sánchez, D., Naumann, J., Porter, N., and Knowles, A., "Current issues in aviation noise management: A non-acoustic factors perspective," 22nd International Congress on Sound and Vibration (ICSV22), Florence, Italy, 2015
[84] Pike, A.C. and Leverton, J.W., "Understanding helicopter noise - implications on design and operation," 24th European Rotorcraft Forum, Marseilles, France, 1998.
[85] Basner, M., Clark, C., Hansell, A., Hileman, J.I., Janssen, S., Shepherd, K., and Sparrow, V., "Aviation noise impacts: State of the science," Noise & health, Vol. 19, No. 87, 2017, pp. 41-50, https://doi.org/10.4103/nah.nah_104_16.
[86] Christian, A. and Cabell, R., "Initial investigation into the psychoacoustic properties of s

mall unmanned aerial system noise," 23rd AIAA/CEAS Aeroacoustics Conference, AIAA AVIATION Forum, AIAA-2017-4051, Denver, CO, 2017, https://doi.org/10.2514/6.2017-4051.
[87] Rizzi, S.A., Palumbo, D.L., Rathsam, J., Christian, A.W., and Rafaelof, M., "Annoyance to noise produced by a distributed electric propulsion high-lift system," 23rd AIAA/CEAS Aeroacoustics Conference, AIAA AVIATION Forum, AIAA-2017-4050, Denver, CO, 2017, https://doi.org/10.2514/6.2017-4050.
[88] Rizzi, S.A., "Toward reduced aircraft community noise impact via a perception-influenced design approach," InterNoise 2016, Hamburg, Germany, 2016, pp. 2-26.
[89] Zwicker, E. and Fastl, H., Psychoacoustics, Facts and Models, Third ed. Berlin, Springer-Verlag, 2007.
[90] Green, D.M. and Swets, J.A., Signal detection theory and psychophysics, John Wiley & Sons, New York, 1966.
[91] More, S.R., "Aircraft noise characteristics and metrics," Ph.D. dissertation, Purdue University, West Lafayette, IN, 2010.
[92] Glasberg, B.R. and Moore, B.C.J., "Development and evaluation of a model for predicting the audibility of time-varying sounds in the presence of background sounds," Journal of the Audio Engineering Society, Vol. 53, No. 10, 2005, pp. 906-918.
[93] Schell-Majoor, L., Rennies, J., Ewert, S.D., and Kollmeier, B., "Application of psychophysical models for audibility prediction of technical signals in real-world background noise," Applied Acoustics, Vol. 88, 2015, pp. 44-51, https://doi.org/10.1016/j.apacoust.2014.08.001.
[94] "Research review of selected aviation noise issues," Federal Interagency Committee on Aviation Noise, 2018.
[95] Parker D. Vascik and R. John Hansman, "Development of Vertiport Capacity Envelopes and Analysis of Their Sensitivity to Topological and Operational Factors," AIAA Scitech 2019 Forum, San Diego: CA, Jan. 2019.
[96] Parker D. Vascik, Systems Analysis of Urban Air Mobility Operational Scaling, Massachusetts Institute of Technology, Cambridge: MA, Report No. ICAT-2020-02.
[97] Vascik, P. D., Hansman, R. J., and Dunn, N. S., "Analysis of Urban Air Mobility Operational Constraints," Journal of Air Transportation, vol. 26, 2018, pp. 133-146, doi: 10.2514/1.D0120.
[98] Vascik, P. D., and Hansman, R. J., "Scaling Constraints for Urban Air Mobility Operations: Air Traffic Control, Ground Infrastructure, and Noise," 18th AIAA Aviation Technology, Integration, and Operations Conference, Atlanta, GA: AIAA, 2018, doi: 10.2514/6.2018-3849.
[99] Peisen, D. J., "Analysis of Vertiport Studies Funded by the Airport Improvement Program (AIP)," 1994.
[100] Daskilewicz, M. J., German, B. J., Warren, M. M., Garrow, L. A., Boddupalli, S.-S., and Douthat, T. H., "Progress in Vertiport Placement and Estimating Aircraft Range Requirements for eVTOL Daily Commuting," 18th AIAA Aviation Technology, Integration, and Operations Conference, Atlanta, GA: American Insitute of Aeronautics and Astronautics, 2018, doi: 10.2514/6.2018-2884.
[101] Robinson, J. N., Sokollek, M.-D., Justin, C. Y., and Mavris, D. N., "Development of a methodology for parametric analysis of STOL airpark geo-density," 18th AIAA Aviation Technology, Integration, and Operations Conference, Atlanta, GA: American Insitute of Aeronautics and Astronautics, 2018, doi: 10.2514/6.2018-3054
[102] Courtin, C., Burton, M., Butler, P., Yu, A., Vascik, P. D., and Hansman, R. J., "Feasibility Study of Short Takeoff and Landing Urban Air Mobility Vehicles using Geometric Programming," 18th AIAA Aviation Technology, Integration, and Operations Conference, Atlan

ta, GA: AIAA, 2018, doi: 10.2514/6.2018-4151.
[103] Vascik, P. D., and Hansman, R. J., “Evaluation of Key Operational Constraints Affecting On-Demand Mobility for Aviation in the Los Angeles Basin: Ground Infrastructure, Air Traffic Control and Noise,” 17th AIAA Aviation Technology, Integration, and Operations Conference, Denver, CO: AIAA, 2017, doi: 10.2514/6.2017-3084.
[104] Antcliff, K. R., Moore, M. D., and Goodrich, K. H., “Silicon Valley as an Early Adopter for On-Demand Civil VTOL Operations,” 16th AIAA Aviation Technology, Integration, and Operations Conference, Washington, DC: American Institute of Aeronautics and Astronautics, 2016, pp. 1-17, doi: 10.2514/6.2016-3466.
[105] Moore, M., “Uber Elevate: eVTOL Urban Mobility,” Rotorcraft Business & Technology Summit, 2017.
[106] Kohlman, L. W., and Patterson, M. D., “System-Level Urban Air Mobility Transportation Modeling and Determination of Energy-Related Constraints,” 18th AIAA Aviation Technology, Integration, and Operations Conference, Atlanta, GA: AIAA, 2018, doi: 10.2514/6.2018-3677.
[107] Gentry, J., Duffy, K., and Swedish, W. J., “Airport Capacity Profiles,” 2014.
[108] Voss, W. R., and Hoffman, J., “Analytical identification of airport and airspace capacity constraints,” Air Transportation Systems Engineering, G.L. Donohue, A.G. Zellweger, H. Rediess, and C. Pusch, eds.,Redondo Beach, CA: American Institute of Aeronautics and Astronautics, Inc., 2001, pp. 409-420.
[109] Gilbo, E. P., “Airport Capacity: Representation, Estimation, Optimization,” IEEE Transactions on Control Systems Technology, vol. 1, 1993, pp. 144-154.
[110] Civil Tiltrotor Development Advisory Committee (CTRDAC), “Civil Tiltrotor Development Advisory Committee - Report to Congress, Volume 1,” 1995.
[111] Smith, R. D., “Vertiport Design AC Revision - White Paper Vertiport Capacity,” Heliport/Vertiport Design Deliberations 1997-2000, R.D. Smith, ed., Washington, D.C.: Federal Aviation Administration, 2001.
[112] Ashford, N. J., Mumayiz, S., and Wright, P. H., Airport Engineering: Planning, Design, and Development of 21st Century Airports, Hoboken, New Jersey: John Wiley & Sons, Inc, 2011.
[113] Federal Aviation Administration, AC 150/5390-2C: Heliport Design, 2012.
[114] Federal Aviation Administration, JO 7110.65W: Air Traffic Control, 2015.
[115] Federal Aviation Administration, AC 150/5390-3: Vertiport Design, 1991.
[116] Ferguson, S. W., “Vertiport Design AC Revision - White Paper Civil Tiltrotor Manuevering and Ground Taxi Rotorwash,” Heliport/Vertiport Design Deliberations 1997-2000, R.D. Smith, ed., Washington, D.C.: Federal Aviation Administration, 2001.
[117] Smith, R. D., “Vertiport Design AC Revision - White Paper Vertiport Terminal Gate Separations,” Heliport/Vertiport Design Deliberations 1997-2000, R.D. Smith, ed., Washington, D.C.: Federal Aviation Administration, 2001.
[118] Syms, R. A., “Vertiport Design AC revision - White Paper Commuter Aircraft Ramp and Passenger Safety Practices,” Heliport/Vertiport Design Deliberations 1997-2000, R.D. Smith, ed.,Washington, D.C.: Federal Aviation Administration, 2001.
[119] Bertsimas, D. J., and Patterson, S. S., “The traffic flow management rerouting problem in air traffic control: a dynamic network flow approach,” Transportation Science, vol. 34, 2000, pp. 239-255.
[120] Joint DOT-NASA Civil Aviation Research and Development Policy Study, Concept Studies for Future Intracity Air Transportation Systems, Cambridge, MA: Massachusetts Institute of Technology, Flight Transportation Laboratory, 1970.
[121] Somers, L. A., Justin, C. Y., and Mavris, D. N., “Wind and Obstacles Impact on Airpark Placement for STOL-based Sub-Urban Air Mobility,” AIAA Aviation 2019 Forum, Dalla

s, TX: AIAA, 2019, doi: 10.2514/6.2019-3121.
[122] Justin, C. Y., and Mavris, D. N., “Environment Impact on Feasibility of Sub-Urban Air Mobility using STOL Vehicles,” AIAA Scitech 2019 Forum, San Diego, CA: AIAA, 2019, doi: 10.2514/6.2019-0530.
[123] “The World’s Leading Weather Intelligence Platform”, Climacell, 8th Annual Electric VTOL symposium, Vertical Flight Society, January 26-89, 2021, Virtual
[124] https://www.icao.int/Documents/annexes_booklet.pdf#search=annex
[125] https://ntrs.nasa.gov/api/citations/20190001472/downloads/20190001472.pdf
[126] https://www.faa.gov/aircraft/air_cert/design_approvals/engine_prop/engine_prop_regs/engine_prop_tvalidation/media/SSD_Propellers_List_14_CFR_35_Amdt_9_and_CS-P_Amdt_1.pdf
[127] https://www.youtube.com/watch?v=JJf4u4MTiFs&feature=youtu.be
[128] https://www.faa.gov/aircraft/air_cert/design_approvals/media/cpi_guide.pdf
[129] https://nari.arc.nasa.gov/sites/default/files/attachments/UAM_ConOps_v1.0.pdf
[130] https://www.faa.gov/aircraft/air_cert/design_approvals/small_airplanes/small_airplanes_regs/media/part_23_moc.pdf
[131] https://lilium.com/
[132] Malte Niklaß, et. al, “A collaborative Approach for an Integrated Modeling of Urban Air Transportation System”, Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR), Lufttransport systeme, 21079 Hamburg, Germany, 2020
[133] https://ntrs.nasa.gov/citations/20190001282
[134] “Blade - The Sharpest Way to Fly,” [Online]. Available: https://blade.flyblade.com/. [Accessed 20 Nov. 2018].
[135] N. K. Borer, S. C. Geuther, B. L. Litherland, and L. W. Kohlman, “Design and Performance of a Hybrid-Electric Fuel Cell Flight Demonstration Concept,” in 2018 Aviation Technology, Integration, and Operations Conference, Atlanta, GA, 2018.
[136] M. D. Patterson, K. R. Antcliff, and L. W. Kohlman, “An Exploration of Urban Air Mobility Mission Requirements,” in AHS International 74th Annual Forum & Technology Display, Phoenix, AZ, 2018.
[137] R. McDonald and B. German, “eVTOL Stored Energy Overview,” 2017. [Online].
[138] C. Silva, R. Wayne, Johnson, E. Solis, Michael D. Patterson and Kevin R. Antcliff, “VTOL Urban Air Mobility Concept Vehicles for Technology Development,” 2018 Aviation Technology, Integration, and Operations Conference, Atlanta: Georgia, June, 2018.
[139] Google, “My Maps,” [Online]. Available: https://www.google.com/mymaps. [Accessed 20 Nov. 2018].
[140] https://www.ecfr.gov/current/title-14/chapter-I/subchapter-F/part-91
[141] Booz Allen Hamilton, Detailed Project Discussion - Air Taxi, 2018.
[142] D. P. Raymer, Aircraft Design: A Conceptual Approach, Washington D.C.: AIAA, 1989.
[143] Alternative Fuels Data Center, “Fuel Prices,” [Online]. Available: https://www.afdc.energy.gov/fuels/ prices.html. [Accessed 27 Nov. 2017].
[144] Google map, [Internet]. Available: https://www.google.co.kr/maps/search/Heliponto-Campo+de+Marte+in+Sao+Paulo/@-23.5131612,-46.6408328,513m/data=!3m2!1e3!4b1?hl=ko
[145] Vertihub mouckup of Hanwhasystem, [Internet]. Available: https://www.hanwhasystems.com/kr/business/newbiz/uam.do
[146] http://data.si.re.kr/node/102
[147] https://gits.gg.go.kr/web/trafficInfo/webSectionStatistics.do
[148] 이학식, 임지훈. “SPSS 24 매뉴얼”, 집현재, p.470
[149] K. V. Mardia, J. T. Kent, J. M. Bibby, Multivariate Analysis, 1st ed. Academic Press, 1980.

[150] Job korea, Average commuting time [Internet]. Available: http://www.jobkorea.co.kr/GoodJob/Tip/View?News_No=15457&schCtgr=0&schTxt=%EC%B6%9C%ED%87%B4%EA%B7%BC&Page=1.
[151] E-nara indicator, Traffic congestion cost [Internet]. Available: http://www.index.go.kr/potal/main/EachDtlPageDetail.do?idx_cd=1248.
[152] Kyunghyang news, Rank of traffic [Internet]. Available: http://news.khan.co.kr/kh_news/khan_art_view.html?artid=201805161820001&code=940100.
[153] Pxd, Choropleth map [Internet]. Available: https://story.pxd.co.kr/1408.
[154] Electric VTOL News, eVTOL aircraft directory [Internet]. Available: https://evtol.news/aircraft.
[155] Hyundai, Hyundai future mobility vision [Internet]. Available: https://young.hyundai.com/hyundai/news/detail.do?seq=7128.
[156] xNOTAM, Restricted and prohibited airspace [Internet]. Available: http://aim.koca.go.kr/google/xNotamViewMap.jsp.
[157] C. J. Hwang, “Status and Challenges of Urban Air Mobility Development,” Current industrial and technological trends in aerospace, Vol. 16, No.1, pp. 33~41, 2018.
[158] B. S. Lee, J. Y. Yun and H. Y. Hwang, “Flight Range and Time Analysis for Classification of eVTOL PAV,” Journal of Advanced Navigation Technology, Vol. 24, No. 2, pp. 73~84, 2020.
[159] A. Bacchini and E. Cestino, “Electric VTOL Configurations Comparison,” Aerospace, Feb, 2019.
[160] Wikipedia, Multirotor [Internet]. Available: https://en. wikipedia.org /wiki/Multirotor.
[161] Wikipedia, Haversine Formula [Internet]. Available: https://en.wikipedia.org/wiki/Haversine_formula.
[162] S. K. Lee et. al, Study on the improvement of aircraft noise evaluation unit and measurement method, Seoul National University Research Center for Environmental Noise and Vibration, 2016.
[163] M. D. Moore, K. Goodrich, and K. Antcliff, Hoverless VTOL hyper commuter mission concept, AIAA Aviation, NASA, June 2015.
[164] S. G Lee, “Aircraft noise evaluation criteria and measurement method improvement research,” Seoul National University Environmental Noise and Vibration Research Center, Seoul, 2016
[165] M. Brink, B. Schäffer, R. Pieren, J. M. Wunderli, “Conversion between noise exposure indicators Leq24h, LDay, LEvening, LNight, Ldn and Lden: Principles and practical guidance,” International Journal of Hygiene and Environmental Health, Ittigen, Worblentalstr. 68, 2017
[166] https://www.faa.gov/
[167] Somemap, [Internet]. Available: https://somemap.kr/map/909
[168] Ministry of Land, Infrastructure and Transport, Airfield Installation Standard, [Internet]. Available: http://www.law.go.kr/%ED%96%89%EC%A0%95%EA%B7%9C%EC%B9%99/%EB%B9%84%ED%96%89%EC%9E%A5%EC%8B%9C%EC%84%A4%EC%84%A4%EC%B9%98%EA%B8%B0%EC%A4%80
[169] Ministry of Land, Transport and Maritime Affairs, A Study onthe Establishment of Heliport Establishment Standards, [Internet]. Available: http://www.prism.go.kr/homepage/origin/retrieveOriginDetail.do?cond_organ_id=1613000&research_id=1611000-201000119&pageIndex=1&leftMenuLevel=120
[170] Uber Air Vehicle Requirements and Missions, [Internet]. Available: https://s3.amazonaws.com/uber-static/elevate/Summary+Mission+and+Requirements.pdf
[171] Hyundai, Hyundai and Uber Announce Aerial Ridesharing Partnership, Release New Full-Scale Air Taxi Model at CES, [Internet]. Available: https://www.hyundai.com/worldwide/e

n/company/newsroom/-0000016369
[172] Enforcement Regulations of the Parking Lot Act, [Internet]. Available: https://www.law.go.kr/%EB%B2%95%EB%A0%B9/%EC%A3%BC%EC%B0%A8%EC%9E%A5%EB%B2%95%EC%8B%9C%ED%96%89%EA%B7%9C%EC%B9%99
[173] Regulations on the Standards of Structure and Facilities of Roads, [Internet]. Available: http://www.law.go.kr/LSW/lsInfoP.do?lsiSeq=138166#J4:0
[174] Transportation statistics by air route in Seoul, [Internet]. Available: https://data.seoul.go.kr/dataList/10690/S/2/datasetView.do;jsessionid=926357389EB64470923B6963D1BF4742.new_portal-svr-21]
[175] Statistics on resident registration of the Ministry of Security and Public Administration, [Internet]. Available: https://jumin.mois.go.kr/
[176] https://map.naver.com/v5/?c=14114757.4177453,4517437.4683157,13,0,0,0,dh

< 별첨 >

별첨 자료
1. 총 연구개발기간 성과점검기준표 및 증빙자료
2. 세부 정량적 연구개발성과 증빙자료(총 연구개발기간 성과점검기준표 실적 증빙자료에 기 포함되어 있는 증빙자료 제외)

[뒷면지]

주 의

1. 이 보고서는 국토교통부에서 시행한 국토교통과학기술 연구개발사업 '국토교통기술촉진연구사업' 연구개발과제 최종보고서이다.

2. 이 연구개발내용을 대외적으로 발표할 때에는 반드시 국토교통부(국토교통과학기술진흥원)에서 시행한 국토교통과학기술 연구개발사업의 결과임을 밝혀야 한다.

3. 국가과학기술 기밀 유지에 필요한 내용은 대외적으로 발표 또는 공개하여서는 안 된다.