

도심항공 모빌리티(UAM) 적용에 필요한 효율, 신뢰성, 안전성, 소음, 배기가스, 성능 및 인증의 요구도 분석

Requirement Analysis of Efficiency, Reliability, Safety, Noise, Emission, Performance and Certification Necessary for the Application of Urban Air Mobility (UAM)

윤주열 · 황호연*

세종대학교 항공우주공학과

Ju-Yeol Yun · Ho-Yon Hwang*

Department of Aerospace Engineering, Sejong University, Seoul, 05006, Korea

[요 약]

본 논문에서는 대도시 교통체증을 해결하기 위한 새로운 개념인 도심항공 모빌리티 (UAM; urban air mobility) 실현을 위해 필요한 요구도 분석을 수행하였다. 우선 UAM과 관련된 국내외 연구 개발 현황에 대해 살펴보았으며 상용화 준비 중인 다양한 형상의 비행체에 대해 장단점 및 임무 반경별 소요시간에 대한 요구조건을 분석하였다. 또한, UAM의 시장 수용성을 분석하기 위해, 개인의 의식 및 신뢰성에 관한 요구조건을 파악하고, 항공기 유형별 사고율 데이터를 통해 안전성 요구 조건을 분석하였다. 인구가 밀집된 도심 지역에서 운용하기 때문에, 지역사회에 영향을 끼칠 수 있는 환경적 요인인 소음과 배기가스에 대해서 요구조건 분석을 수행하였고, 항공기 성능과 관련된 요구조건과 인증 기준 및 FAA와 EASA의 감항기술기준에 대해서도 분석하였다.

[Abstract]

In this paper, we analyzed the requirements for the application of UAM, a new concept to solve the traffic congestion in large cities. First, the current domestic and foreign status of research and development related to UAM was investigated and the pros and cons and the time required for each mission radius were analyzed for various configurations of aircraft being commercialized. In addition, in order to analyze the market acceptance of the UAM, the individual's consciousness and reliability requirements were identified and safety requirements were analyzed through accident rate data for each aircraft type. Because it operates in a densely populated urban area, requirement analyses on noise and exhaust, which are environmental factors that can affect the community were performed, and requirements related to aircraft performance, certification standards, and airworthiness standards of FAA and EASA were also analyzed.

Key word : Urban air mobility, eVTOL PAV, Personal air vehicle (PAV), Air taxi, Noise analysis.

<https://doi.org/10.12673/jant.2020.24.5.329>



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

Received 5 August 2020; Revised 15 September 2020

Accepted (Publication) 14 October 2020 (30 October 2020)

*Corresponding Author; Ho-Yon Hwang

Tel: +82-2-3408-3773

E-mail: hyhwang@sejong.edu

I. 서론

글로벌 경쟁시대에 대도시권은 인적자원이 집중되면서 지상교통 혼잡은 지속될 것으로 예상된다. 현재, 전 세계는 급격한 도시화로 인해 발생하는 교통 문제를 해결하기 위해 많은 연구 개발을 진행하고 있다. 도심 지역의 지상 교통망이 포화 상태이므로 추가적인 지상 인프라 건설에 막대한 비용이 소요되어 이동 자유도를 증진시킬 수 있는 새로운 도심항공 교통수단이 필요하다. 도심항공 모빌리티 (UAM; urban air mobility)는 교통 문제를 해결하려는 대안 중 하나로, 도시의 기존 모빌리티인 자동차와 지하철 중심을 eVTOL (electric vertical take-off and landing) PAV (personal air vehicle)로 연결하여 교통체증 및 환경오염을 줄이려는 개념이다. 기존의 헬리콥터는 소음, 배기가스, 고비용 문제로 인해 도심항공 모빌리티에는 적합하지 않다. 이를 해결하기 위한 방안으로, 전기추진 수직이착륙 PAV가 제시되었고, 이는 항속거리와 체공시간에는 문제가 있으나 소음이 적고 배기가스 배출이 없다는 장점이 있다. 또한, 수직이착륙으로 운용하기 때문에 도심지 사이의 이동이 가능하며, 이동성을 확장시켜 통합함으로써 기존 자원을 더욱 효율적으로 사용할 수 있도록 해준다.

도심항공 모빌리티는 수직 모빌리티를 위한 수직이착륙장 (Vertiport)을 구축하여 교통의 중심 역할을 하는 대중교통에 적용되어야 한다. 수직이착륙장은 다수의 수직이착륙장과 지점대 지점(point to point) 연결이 가능하기 때문에 적은 수직이착륙장 개수로 높은 교통유연성을 얻을 수 있다. 예를 들어, 10개의 수직이착륙장 네트워크는 45개의 연결 가능성을 갖고 있다. 수직이착륙장 위치는 이용성을 증대시키기 위해 인구가 밀집되어 있고, 기존의 교통 중심에 위치해야하므로, 환경적인 영향 또한 중요한 고려 요소이다.

환경적인 영향에는 크게 소음과 배출가스의 영향이 있다. 항공기 소음은 일반소음과 달리 매우 크고, 주된 소음원이 항공기 엔진의 소음이므로 그 주파수가 고주파 성분을 포함한 금속성의 음질을 가지고 있다. 또한, 항공기 운항 시간에 따라 주간과 야간에 지속적으로 발생하며, 발생 장소가 상공이기 때문에 소음이 미치는 면적이 광범위하여 차단 시설의 설치가 어렵다. 항공기 소음의 평가는 항공기 기종에 대한 평가와 주민들이 실제로 느끼는 주거지 소음에 대해 물리적으로 정량화한 것이며, 일반적으로 항공기 소음 관련 규제나 환경기준에서 사용하는 것은 주거지 소음 평가이다[1]. 항공기 소음 평가 단위는 각 나라마다 다르고, 우리나라의 경우 WECPNL (weighted equivalent continuous perceived noise level)을 사용하고 있다. 세계적인 추세를 보면 미국, 유럽 등 항공 선진국의 경우 등가소음도 방식인 L_{den} (day-evening-night average sound level) 계열의 평가 단위를 채택하고 있으며, 표 1과 같이 우리나라와 중국에서만 WECPNL을 사용하고 있다. 최고소음도 방식인 WECPNL의 취약성과 세계적인 추세에 따라 환경부는 L_{den} 방식으로 변경하는 소음 진동 관리법 개정안을 발표하였고, 2023년부터 본격

표 1. 주요 국가들의 항공기 소음 평가 단위[2]

Table 1. Aircraft noise evaluation unit in major countries.

Country	Target	Classification criteria	Unit
Korea	Commercial	Environment	WECPNL
China	Commercial	Environment	WECPNL
Japan	Commercial	Environment	L_{den}
USA	Commercial	Environment	L_{den}, L_{AE}
	Military	Regulation	L_{dn}
France	Commercial	Regulation	L_{den}
Germany	Commercial,	Regulation	$L_{Aeq,16h}$
	Military	Regulation	$L_{Aeq,16h}$

시행하기로 하였다. 따라서 개정된 법안에 따라 새로운 소음 평가인증 기준을 연구할 필요가 있다.

도심항공 모빌리티 (UAM)가 상업적으로 성공하기 위해서는 몇 개 도시에서의 성공적인 시험비행이 필수적일 것으로 판단된다. 도심 내에서 운용하기 위해서는 배출가스, 소음, 안전에 관련된 인증기술 연구가 선행되어야 한다. 소음 문제는 한 도시에서의 운항수와 이륙 및 착륙 빈도에 따라 달라지므로 데이터 수집 등 면밀한 조사가 필요하다. 안전성 또한 중요한 고려 요소이며, 안전을 위한 eVTOL의 인증 표준은 분산 전기 추진 장치 (DEP; distributed electric propulsion) 기술이 기반이 될 수 있도록 규정을 강화하고 새롭게 정의될 필요성이 있다. 분산 전기 추진 장치는 여러 개의 전기 모터, 제어기 및 예비 배터리 시스템을 사용하며, 추진 시스템 이중화를 통해 엔진 고장에 따른 사고를 방지 할 수 있다. 이와 같이, UAM 시스템을 운용하기 위해서는 안전성을 입증할 수 있는 표준감항증명을 받아야 하며, 새로운 운항기준이 정해지거나 기존의 운항기준을 준수해야 한다.

정부는 2020년 6월 4일, 제2차 혁신성장전략회의에서 하늘길 출퇴근을 가능케 할 차세대 모빌리티인 도심항공교통 (UAM, Urban Air Mobility)의 '25년 상용화 서비스 개시를 주 내용으로 하는 「한국형 도심항공교통(K-UAM) 로드맵」을 확정·발표하였다. 본 논문에서는 UAM 시스템을 국내에서 운용하기 위한 효율, 신뢰성, 안정성, 소음, 성능, 인증기술기준 고려요소 등을 살펴보고, 요구도를 분석하고자 한다.

II. UAM 국내외 연구동향

2-1 UAM 인프라 구축

1) 우버 (Uber)

UAM 업계에서 가장 앞선 회사로 평가받고 있는 우버는



그림 1. Uber의 수직이착륙장 예상도[3]
Fig. 1. Uber vertiport concept.

2023년까지 Dallas와 Los Angeles에서 에어 택시 운용을 시작하겠다고 발표했으며, 하나의 수직이착륙장에서 시간당 400회에서 최대 1000회의 이착륙을 목표로 하고 있으며, 이는 10초에 한번 씩 이착륙하는 것과 같다[3].

2) NASA Grand Challenge

미항공우주국은 2020년 초에, 날씨, 교통 및 우발 상황에서의 UAM 운영에 대한 모든 요소를 평가하는 테스트를 수행하기로 발표하였다. Grand Challenge의 목표는 밀집된 도시 환경에서 효율적으로 운용할 수 있는 UAM 시스템을 위해 무엇이 필요한지 연구하는 것이다. 첫 단계인 GC-Development test는 2020년 7~11월 사이에 수행될 예정이며, 수직이착륙 기능과 여객 운송 기능을 모두 갖춘 UAM 비행체 연구에 중점을 두고 있다. NASA가 발표한 타임라인에 따르면, 2022년 중반에 실시간 비행 및 시뮬레이션이 진행되며, Grand Challenge의 첫 번째 시나리오에 대해 발표할 예정이다[4].

3) 현대자동차

2020년 1월, 미국 라스베이거스에 열린 ‘CES 2020’에서 현대 자동차는 우버와 전략적 파트너십을 맺어 S-A1 비행체와 도심 항공 모빌리티 생태계 비전을 제시하였다. 도심 항공 모빌리티(UAM), 목적 기반 모빌리티(PBV), 모빌리티 환승 거점(HUB)을 활용해 인간 중심의 역동적 미래도시를 구현하는 구상이며, 이를 통해 공간과 시간의 제약에서 벗어나 더 많은 가치를 창출할 수 있는 기반을 제공하고자 한다.

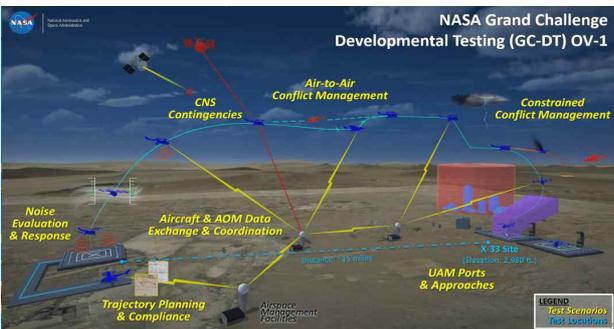


그림 2. NASA Grand Challenge 개념도[4]
Fig. 2. NASA's Grand Challenge concept.



그림 3. 현대자동차의 UAM 플랫폼 예상도[5]
Fig. 3. Hyundai motors UAM platform.

III. 도심항공 모빌리티 요구도 분석

3-1 도심항공 모빌리티(UAM)의 효율

1) eVTOL 항공기 개념

현재 UAM에 사용하기 위해 상용화 준비 중인 대부분의 비행체는 eVTOL (electric vertical take-off and landing) 항공기이며, eVTOL이란 기존의 내연기관 대신 전기로 추진되는 수직이착륙 비행체를 말한다. 전기 모터의 경우 기존의 내연기관이나 터보샤프트 엔진보다 약 3~4배 효율이 높기 때문에 비행체 무게가 크게 감소하므로, eVTOL의 적용은 합리적이고 지속 가능한 UAM을 달성하는데 필수적이다. 전기 추진 비행체의 여러 가지 장점 중 하나는 배출가스가 없고 소음이 감소하는 것이며, 이는 도심 내에서 운용하기 위해 필수적으로 고려해야 하는 요소이다. 또한 수직이착륙으로 운용되기 때문에 건물 옥상, 주차장, 기존의 헬기이착륙장, 고속도로 인터체인지의 cloverleaf와 같은 기존 인프라를 활용할 수 있다.

UAM에 사용되기 위한 eVTOL 비행체의 형상에 따른 효율성 분석도 필수적이다. 상용화 준비 중인 eVTOL 비행체들은 다양한 형상을 띄고 있으며, 이륙 후 추진 방식에 따라 복합형, 틸트 날개형, 멀티콥터형 등으로 나눌 수 있다. 복합형은 이륙을 위한 프로펠러와 전진 비행을 위한 프로펠러가 따로 존재하고, 전진 비행 시 고정익 항공기와 동일한 방식으로 비행하므로 비행속도가 빠르며 효율이 좋아 장거리 비행에 적합하다[6]. 대표적인 복합형 항공기에는 보잉사의 오로라(Aurora)가 있다.



그림 4. 보잉사의 오로라[7]
Fig. 4. Boeing Aurora.



그림 5. 에어버스사의 바하나[8]
Fig. 5. Airbus Vahana.

틸트 날개형은 날개의 방향을 자유롭게 바꾸어 비행하는 벡터추진 방식이다. 분산전기추진(DEP; distributed electric propulsion)을 사용하며, 이는 저속에서도 날개 위의 공기 속도를 높여 큰 양력을 얻을 수 있다. 또한, 다수의 프로펠러를 사용하기 때문에 하나의 프로펠러가 고장이 나도 안전하게 착륙이 가능하다. 대표적인 틸트 날개형에는 에어버스사의 바하나(Vahana)가 있다.

멀티콥터형은 회전익 항공기와 추진방식이 유사하며, 호버링 효율은 좋으나 비행속도가 느려 장거리 비행에 적합하지 않다. 도심 내의 단거리 이동이나 호버링 성능이 중요한 산업용 또는 응급 지원 항공기에 적합하다. 대표적인 멀티콥터형 항공기에는 볼로콥터(Volocopter)사의 볼로시티(Volocity)가 있다.

eVTOL 비행체의 임무형상은 FAA 규정에 따라 1,000 ft (304.8 m) 까지 수직상승하고, 이후, 1,500 ft (457.2 m) 까지 상승 및 전진비행을 수행한 다음 순항을 시작한다[9]. 표 2에 오로라, 바하나, 볼로시티의 운용 데이터를 나타내었다[6].

표 2의 데이터를 토대로 임무 반경별 소요시간을 비교하면 그림 7과 같다. 임무 반경 4 km는 서울 중심에서 중구까지 거리이며, 17 km는 서울 전지역, 35 km는 볼로시티의 한계 거리, 50 km는 경기도 일부를 포함한 거리이다. 이와 같이, 비행체 형상별로 소요 에너지와 소요 시간을 적절히 고려하여 UAM 운용 효율을 극대화하여야 한다.



그림 6. 볼로콥터사의 볼로시티[10]
Fig. 6. Volocopter Volocity.

표 2. 임무에 대한 eVTOL PAV 데이터[6]
Table 2. eVTOL PAV data for mission.

Category	Vahana	Aurora	Volocopter
Cruise power	57.68 kW	83.86 kW	16.43 kW
Cruise speed	200 km/h	180 km/h	100 km/h
Takeoff and landing power	56.85 kW	47.56 kW	30.6 kW
Available energy	67.18 kWh		50 kWh
Total time for takeoff and landing (A, B, D, E in Mission profile)	6 min		
Total energy for takeoff and landing(A, B, D, E in Mission profile)	7.61 kWh	7.55 kWh	3.61 kWh

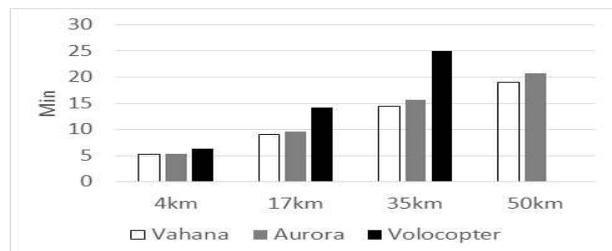


그림 7. 임무거리별 소요시간[6]
Fig. 7. Total time for each mission range.

2) 에어택시(Air taxi) 개념

에어택시는 본래 여객 운송을 목적으로 공항과 공항 사이를 부정기적으로 운항하는 소형 항공기를 의미하지만, 최근에는 말 그대로 하늘을 나는 택시의 의미로 사용되고 있다. 에어 택시는 교통체증 완화를 목적으로 수직이착륙 비행체를 이용한 서비스로서, 헬리콥터와 유사한 형태지만 소음이 작고 안전성을 높였다.

독일 전문 연구기관인 Porsche consulting이 지상 운송 수단인 자동차와 eVTOL의 이동시간 및 거리를 계산해본 결과, 독일 뮌헨국제공항에서 뮌헨시 중앙 광장인 Marienplatz까지 일반자동차는 40 km 거리를 45분 걸려 이동한 반면, eVTOL을 이용하면 30 km 거리를 10분에 이동할 수 있다.

우버사는 이미 헬리콥터 공유경제 개념인 Uber Copter 서비스를 시작했으며, 이는 미래 도시 항공 운송 서비스인 Uber Air를 구축하기 위한 첫 단추이다. 이 서비스는 차량 서비스를 요청할 때처럼 간편하게 항공편을 예약할 수 있을 뿐만 아니라 UBER 앱을 이용하여 헬리콥터 이착륙장을 오가는 차량 서비스까지 함께 예약할 수 있다. 운행 구간은 맨해튼에서 JFK 공항까지이며, 기존 50분가량 소요되던 거리를 8분 내에 도착할 수 있다.

이와 같이, 에어택시는 헬리콥터 운용과 비슷하지만, 가장 큰 문제인 소음이 해결될 뿐만 아니라 배기가스, 안전성 문제가 있어서 장점을 가지고 있다. 또한, 기존의 헬리콥터 이착륙장을 용도 변경시켜 재사용하고, eVTOL을 운용하기 위한 급속충전소 및 항공교통관리(ATC; air traffic control) 통신시스템 등

제소 등만 건설한다면 경제성 측면에서도 효율적이라고 판단된다.

3-2 도심항공 모빌리티(UAM)의 신뢰성 및 안전성

UAM의 도입에 따라 교통수단 선택 대안의 변화가 있을 것으로 예상되지만, 현재 대중화되지 않은 신개념 비행체이므로 UAM 및 eVTOL에 대한 개인의 선호의식을 분석할 필요가 있다. 즉 잠재선호의식(SP; stated preferred) 기법을 이용하여 UAM 선호에 미치는 요인 및 신뢰성을 분석할 수 있다. 잠재선호의식은 통계적인 실험계획법을 통해 가상적인 시나리오를 구축하고, 이를 개인에게 제공하여 개인의 선호를 찾는 일련의 기법이다. 교통 수요 및 정책을 분석하기 위해 많이 사용되어지며, 1980년대 중반 이후 교통학에 본격적으로 적용되어, 신뢰성이나 유용성이 검증되고 있다.

첫 번째 단계인 설문조사 설계는 UAM을 시장에 도입하기 전에, 가상의 UAM 환경에서 기존의 교통 모드와 새로운 교통 서비스에 관한 잠재적 사용자의 선택패턴을 이해함으로써 수요를 평가하기 위함이다. 설문조사에는 가장 자주 사용하는 교통 수단, 차량 가용성, 현재 이동 패턴에 대한 만족도와 같은 질문이 포함되며, 새로운 운송모드의 수용에 영향을 미칠 수 있는 인식들을 측정하기 위한 질문이 포함된다. 또한, 사용자의 선택에 영향을 미치는 중요한 요소를 파악하고, 응답자들에게 현실적인 시나리오를 제공하기 위해 Chrzan & Orme [11]은 선택적인 질문을 추가하도록 제안한다. 이 연구는 뮌헨 대도시 지역의 자율 비행 택시의 운용 가능성을 파악하기 위해 독일의 자율 비행 택시 서비스 특징과 일반적인 주행 패턴에 대해 검토하였다. 그림 8은 인구통계학적 특징인 나이에 따른 신기술, 자율주행(비행) 교통 수단에 대한 인식을 나타낸다. 5에 가까울수록 긍정적인 인식을 나타내며, 18-25세, 26-35세의 젊은 층에서 긍정적인 인식을 가지고 있는 것을 확인할 수 있다.

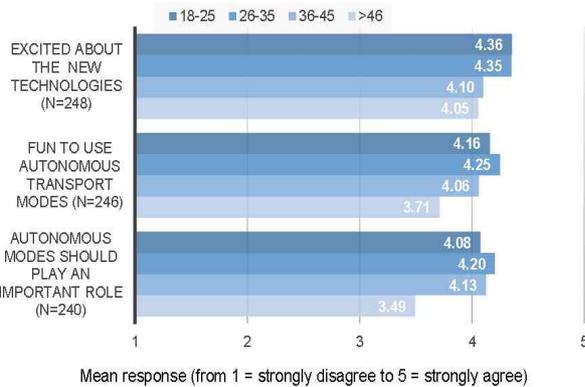


그림 8. 나이에 따른 신기술, 자율주행(비행) 교통수단에 대한 인식[12]

Fig. 8. Awareness of new technologies, autonomous driving (flight) transportation according to ages.

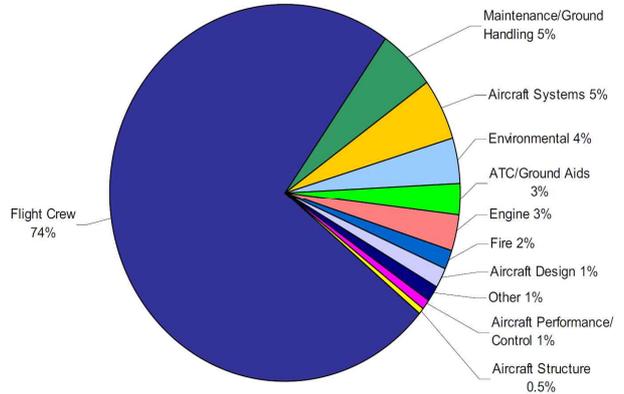


그림 9. 항공기 사고 유형별 비율[13]

Fig. 9. Percentage of aircraft accident types.

도심항공 모빌리티(UAM)를 운용하기 위해서는 기존 항공기의 안전성 감항 기준과 사고율을 분석해야한다. 그림 9과 같이, 1998-2007년 기간 동안 발생한 사고 유형을 보면, 대부분 조종사의 실수로 인한 제어력 상실이 원인이며[13], 이러한 사고 유형은 개선된 항법 및 기상 정보와 연동하여 단순한 형태의 자율비행체를 통해 예방이 가능하다고 판단된다.

1) 항공기 사고율 관계

항공기 유형별 사고율은 표 3과 같으며, 이는 비행시간 당 발생하는 사고횟수를 나타낸다. 이 사고율은 항공기 설계 오류가 아니라, 개발자가 인지하지 못한 시스템 에러로 인해 발생한 것으로 가정한다. FAA AC 23.1309-1E 에 따르면 경비행기 사고율은 1×10^{-4} /비행시간이며, 시스템으로 인한 고장은 전체의 10%를 차지한다[14]. 만약, 10,000대의 경비행기를 운용한다면, 사고율은 비행시간당 1대의 비행기가 추락한다는 것을 의미한다. 경비행기의 치명적인 고장 경우의 수를 10개로 가정하면, 시스템으로 인한 고장은 전체의 10%이므로 시스템의 고장 조건의 평균 확률은 1×10^{-6} /비행시간 이하가 되어야 한다 [15].

표 3. 항공기 유형별 사고율 데이터[14]

Table 3. Accident rate data by aircraft types.

Aircraft category/class	Accident rate (per flight hour)	Source data
Large transport	1×10^{-6}	AMC 25.1309
Normal Utility	1×10^{-4}	AC 23.1309-1E
Large public transport aeroplane	4.8×10^{-6}	UK-CAA CAP 780
Small public transport aeroplane	5.3×10^{-5}	
Public transport helicopters	1.91×10^{-5}	
Non-public transport conventional aeroplanes <5,700 kg	1.79×10^{-4}	
Non-public transport helicopters <5,700 kg	1.27×10^{-4}	
Microlights	3.1×10^{-4}	

표 4. 교통 수단에 따른 사고율 데이터[16]

Table 4. Accident rate data for transportation types.

Vehicle types	Annual fleet utilization			Average annual fatalities	Normalized fatality rates		
	Vehicle hours (1,000)	Vehicle miles (million)	Passenger miles (million)		Per 100,000 vehicle hours	Per 100M vehicle miles	Per 100M passenger miles
Passenger cars	50,300,000	1,510,000	2,340,000	14,701	1X (0.030)	1X (0.997)	1X (0.643)
Part 121 airlines	18,600	7,891	579,000	16	2.9X	0.208X	0.004X
Part 135 air taxi	2,100	375	1,500	18	29.3X	4.9X	1.9X
Motorcycle	600,000	18,000	19,800	4,809	27.4X	27.4X	38.7X
General aviation	22,400	3,370	6,740	511	78.1X	15.6X	12.1X

2) 안전성 요구 수준 분석

표 4에 미국 내에서 교통 수단에 따른 사고율 데이터를 나타내었다. 예를 들어, 자동차를 이용하였을 때의 연간 사고율은 아래 식과 같이 계산할 수 있다.

$$\text{Passenger car vehicle hours} = 50,300,000 \times 10^3 \quad (1)$$

$$\text{Average annual fatalities} = 14,701 \quad (2)$$

$$\text{Fatality rate} = \frac{14,701}{50,300,000 \times 10^3} = 2.92 \times 10^{-7} \quad (3)$$

$$\text{Fatality rate per } 10^5 \text{ hours} = 2.92 \times 10^{-7} \times 10^5 = 0.030 \quad (4)$$

자동차를 기준으로 정규화된 사고율을 보면, Part 121 규정을 따르는 여객기의 승객 및 마일 당 사고율은 자동차보다 0.004배로 낮은 수준이지만, 비행시간당 사고율은 자동차보다 2.9배 높다[16]. Part 135 규정을 따르는 에어택시와 일반항공급(general aviation) 모두 자동차보다 높은 사고율을 보이며, 승객 및 마일 당 사고율보다 비행시간당 사고율이 높은 것을 알 수 있다. 이에 따라, UAM을 도심에서 운용하기 위한 안전성 요구도에서 비행시간당 사고율을 분석하는 것이 중요하다. 현재를 기준으로, Part 135 규정을 따르는 에어택시의 비행시간당 사고율이 자동차 사고율 수준과 비슷하기 위해서는, 현재보다 29.3배 낮아야하며 이를 만족한다면 승객이 느끼는 위험도가 사회에서 수용 가능할 것으로 판단된다.

3) 안전성 요구 조건 분석

다음으로 높은 사고 원인은 엔진 고장과 관련 있으며, 연료 관리 오류를 포함하면 일반 항공 사고의 18%를 차지한다. 이와 같은 엔진 고장과 관련된 문제를 해결하는 안전성 증대 기술에는 분산 전기 추진 기술이 있다. 분산 추진 방식은 소수의 대형 추진 장치를 다수의 소형 추진 장치로 나누어 기체에 분산 배치하는 방식으로, 추진 효율 측면에서 성능 향상을 기대할 수 있으며 항공기의 소음 수준을 크게 낮출 수 있다[17]. 또한, 다중 전기 모터, 제어기 및 예비 배터리 시스템을 사용하면 추진 시스템 이중화를 통해 엔진 고장 문제에 대비할 수 있다. 다수의 프로펠러 모터들을 사용할 경우 난류 유동 조건과 같은 상태를 피하는데 도움을 주어 기존의 헬리콥터 보다 안전성을 확보

할 수 있을 것으로 판단된다. 하지만, 배터리가 현재의 연료보다 무겁고, 비용 또한 높다는 단점이 있다.

기상 조건 또한 안전성과 관련해서 매우 중요하고 복잡한 구성요소 중 하나이며, 운영, 서비스 공급, 승객 편의, 지역 사회 수용, 인프라 및 교통 관리 등 많은 요소에 영향을 줄 수 있다. 따라서 특정지역의 기상 조건 또는 기후학에 대한 초기 평가를 제공하여, UAM 운용에 미치는 영향을 예측하여야 한다.

UAM을 운용할 도심 지역에서 사용 가능한 데이터는 공항 기상관측 보고(METAR; meteorological aerodrome report), 수직 기상 관측 및 조종 보고(PIREP; pilot report) 등이 있다. METAR은 가장 일반적으로 공항에서 수집되는 관측치이며, 온도, 풍향 및 풍속, 구름 및 안개량, 현재 날씨를 나타낸다. PIREP는 아침 및 오후, 하루 두 번씩 발사되는 기상 비행선으로 측정되며, UAM이 비행하는 고도나 고고도에 위치한 수직이착륙장에서의 기상 정보를 제공할 수 있다. PIREP는 낮은 수준의 바람에 의한 전단 응력 또는 난기류와 같이 조종사에게 영향을 미치는 기상 조건에서만 생성되기 때문에, 일반적으로 METAR 기상 정보의 보충적 정보로 사용된다.

UAM 운용에 잠재적으로 영향을 미칠 수 있는 날씨 조건은 일주일 또는 계절마다 다를 수 있으며, 크게 바람의 영향과 밀도 고도로 나눌 수 있다. 20 kts 이상의 바람이 부는 계절과 시간에 대해 모든 METAR 관측소에서 통계를 집계하고, 계절 변동성을 분석하기 위해 최대 5년의 기간에 대해 계절 평균을 계산해야 한다. 밀도 고도는 수직 이착륙장에서의 양력 조건에 영향을 주며, PIREP 정보를 이용하기 때문에 기상 비행선이 상승함에 따라 불규칙한 간격으로 수집되므로 충분한 표본 크기를 보장하기 위해 152.4 m를 평균조건으로 계산한다[18].

과거의 기상 조건에 대한 상세한 통계를 이용하여, UAM 운용에 미칠 수 있는 영향을 표 5와 같이 정의한다. METAR 관측에서 수집된 각 기상 조건에 대해 “1”은 최소영향 및 운영감소, “10”은 상당한 영향 및 잠재적인 운영 중단을 의미한다. 이를 통해, 해당 시간 동안 발생한 조건을 기반으로 계절별 평균 영향 점수를 계산하고, 평균 영향 점수 분포의 변동성을 평가하여 평균 영향 점수 임계값을 3으로 정의한다. 따라서 각 계절의 평균 영향 점수가 3을 초과할 경우, 해당 시간이 날씨의 영향을 받는 것으로 간주한다[18]. 이와 같이, 잠재적으로 영향을 미칠

표 5. METAR 관측 데이터를 이용한 기상 조건에 따른 영향도 점수 평가[18]

Table 5. Impact scores for each weather condition from METAR.

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 ≤ 0°C	3	Freezing fog	8.5
Temp ≥ 37.8°C	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		

수 있는 기상 조건에 대한 누적 빈도수, 도시 지역 내 기상 조건의 변동성, 일주일 및 계절에 따른 영향 등을 모두 고려하여 UAM 운용 시 발생할 수 있는 안전성 문제를 사전에 파악하고, 요구 조건 분석을 수행하여야 한다.

3-3 도심항공 모빌리티(UAM)의 소음

도심항공 모빌리티(UAM)는 인구 밀도가 높은 도심 지역에서 운용되기 때문에 안전성 다음으로 소음이 중요한 고려 요소이다. 소음 공해는 다른 환경 문제와 달리 지속적으로 증가하는 경향이 있으며, 크게 경제적 영향과 환경적 영향으로 나눌 수 있다. 최근, 경제 수준의 향상에 따라 환경이 삶의 질을 결정하는 중요한 요소로 부각되므로 UAM의 도심 운용 시 발생하는 소음에 대해서도 분석해야 한다[1].

항공기 소음인증기술은 항공기 개발 및 인증에 있어 반드시 갖추어야 하는 핵심 기술이지만, 우리나라의 경우 항공기 소음 인증기술에 대한 연구가 부족한 실정이다. 항공기 소음이 유발하는 사회경제적 비용이 증가하는 추세이며, 또한 소음피해가 미치는 주변 지역의 가치를 하락시키고 주민들의 건강에 악영향을 미친다. 이에 따라, 인증체계 구축 및 항공기 개발에 있어 항공기 소음인증기술은 반드시 고려되고 적용되어야 한다[19].

1) 항공기 소음 평가방법

항공기 소음 평가 방법에는 최고소음도 방식인 WECPNL (weighted equivalent continuous perceived noise level)과 등가소음도 방식인 L_{den} (day-evening-night average sound level)이 있다. 현재, 한국의 경우 항공기 소음 평가 방법으로 WECPNL을 사용하고 있으며, 아래 식과 같이 항공기의 운항 수, 소음도, 지속 시간, 발생 시간 등을 감안하여 소음을 평가한다.

$$WECPNL_J = \overline{L_{Amax}} + 10 \log(N_1 + 3N_2 + 10N_3) - 27 \quad (5)$$

여기서 $\overline{L_{Amax}}$ 는 1일간 항공기 통과 시 마다 측정된 소음도 최고치의 평균값, N_1 은 07:00~19:00 동안의 비행 회수, N_2 는 19:00~22:00 동안의 비행 회수, N_3 는 22:00~07:00 동안의 비행 회수를 의미한다.

그러나 WECPNL 평가 방법은 과도하게 근사화되었고, 국내의 다른 환경소음은 등가소음도 방식(L_{den})을 적용하기 때문에 항공기 소음과 비교하기 어려워 지속적인 소음 노출의 총합을 반영하기에 한계가 있다. 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 밝혔다.

등가 소음도 방식인 L_{den} 는 아래 식으로 구할 수 있으며, 저녁에는 5 dB, 야간에는 10 dB의 가중치를 부여한 평균 소음 레벨이다.

$$L_{den} = 10 \log \left[\frac{1}{24} \left(12 \cdot 10^{\frac{L_d}{10}} + 3 \cdot 10^{\frac{L_e + 5}{10}} + 9 \cdot 10^{\frac{L_n + 10}{10}} \right) \right] \quad (6)$$

2) 항공기의 소음 특성

현재, 도심 내에서 운용하기 위해 개발 중이거나 상용화를 앞둔 비행체 대부분은 수직이착륙을 위해 헬리콥터와 같은 회전익 항공기의 특성을 갖고 있다. 소음 저감을 위해 내연기관 대신 전기모터를 사용하지만, 회전익 항공기의 주요 소음원에는 메인로터와 테일로터, 동력전달계통도 포함되어 있다. 이러한 소음원들은 상호작용을 통하여 복잡한 소음 특성을 나타낸다[19].

로터 소음의 경우, 블레이드 개수가 많고 고속으로 회전할수록 사람에게 더 예민한 주파수 대역의 소음을 발생시킨다. 상대적으로 블레이드 개수가 적고, 저속으로 회전할수록 강한 저주파 성분의 소음을 나타낸다.

3) AEDT를 이용한 항공기 소음 분석

항공기의 소음을 분석하고, 소음 분포도를 작성하기 위해서 항공기 소음 모델링 소프트웨어를 이용한다. 각 나라별로 사용하는 대표적인 소프트웨어는 INM (integrated noise model), ANCON, AzB, FLULA 등이 있으며, AEDT (aviation environmental design tool)는 앞으로 FAA (Federal Aviation Administration)의 환경 모델링 소프트웨어인 INM, EDMS (emissions and dispersion modeling system), MAGENTA (model for assessing global exposure to the noise of transport aircraft), SAGE (system for assessing aviation's global emissions)를 대체할 예정이다[20]. AEDT은 FAA에서 개발한 소프트웨어로, 항

공기의 소음, 연료 소모, 배출가스, 대기 오염과 같은 환경적인 영향을 분석한다. 소음 분석은 이전에 개발되었던 INM을 기반으로 설계되었으며, 현재 사용 중인 헬리콥터와 비행기에 대한 NPD (noise power distance) curve 데이터를 이용하여 항공기 모델, 비행경로, 운항 수에 따른 소음 피해를 분석한다.

4) 소음 요구 조건 분석

AEDT에서 측정 가능한 소음 분석 지표를 특정 가중치 별로 분류하면 표 6과 같다. A-weighted noise level은 가청 주파수의 표준 가중치로서, 2,000 ~ 6,000 Hz 사이의 주파수에 더 높은 가중치를 부여하여 사람에게 더 예민한 주파수에 대해 반영한다. 이 범위 이외의 주파수에 대해서는 낮은 가중치를 부여한다. C-weighted noise level은 약 90 dB 이상의 소음이 사람에게 미치는 영향도를 시뮬레이션하기 위한 것이며, 100 ~ 2,000 Hz 사이의 주파수에 높은 가중치를 부여한다. Tone-corrected Perceived noise level은 항공기 소음의 저주파를 평가하는데 사용된다[21].

UAM 스테이션에서 운용 시 소음은 거주지 도로에서 운행하는 트럭 소음(고도 15 m에서 75~80dB)의 절반에 근접해야 하며, 이는 현재 운용중인 헬리콥터의 4분의 1 수준이다(고도 150 m에서 약 62 dB). 도심 내에서의 UAM 운용이 동시다발적으로 일어날 것으로 예상되므로, 소음 목표를 고도 76 m에서 67 dB로 설정하는 것이 합리적으로 판단된다. 이를 위해서, 이착륙 지점의 주변 소음을 개별적으로 특성화하는 것이 중요하며, 일정 수준 이상의 소음을 발생시키지 않을 최대 운행 횟수를 모델링할 시스템이 필요하다. 또한, 발생하는 소음의 최대값보다 일정 수준 낮은 순간부터 그 이하로 떨어질 때까지의 시간이 얼마나 지속되는지 측정하여, 단기간의 소음 노출을 파악해야 한다.

3-4 도심항공 모빌리티(UAM)의 배기가스

도심항공 모빌리티(UAM) 운용 시 발생하는 배출가스 또한 고려해야 한다. 현재, 항공선진국의 경우 항공기 배출 가스 중 CO₂ 배출을 50%, NO_x는 80% 감축을 최종 목표로 삼고 있다 [22]. 항공교통 분야에서 배기가스를 감축하기 위한 방안으로 eVTOL PAV가 대두되었으며, 이는 비행 중 탄소 배출을 제로화하고, 풍력, 태양광 같은 재생 전기 에너지를 채택하여 탄소 배출을 현저히 낮추는 방향으로 나아가고 있다. 현재 상용화 준비 중인 대부분의 UAM에 사용되는 PAV는 전기추진 방식이므로 배기가스의 배출이 없다고 판단되지만, 화석연료 엔진과 발전기, 전기모터를 결합한 하이브리드 전기추진 방식도 감안하여 배기가스 요구도 분석을 수행하였다.

1) 항공기 배기가스 규제 현황

국제민간항공기구(ICAO; international civil aviation organization)에서는 항공분야에서 배출되는 온실가스의 감소를 위해 국가별로 매 3년마다 중장기 감축을 위한 국가이행계

표 6. AEDT의 소음 분석 지표 및 특정 가중치[23]

Table 6. AEDT noise metric and specific weighting.

Noise family	Metric Type	Noise metric
A-Weight	Exposure based	SEL
		DNL
		CNEL
		LAEQ
		LAEQD
	LAEQN	
	Maximum level	LAMAX
	Time-based	TALA
C-Weighted	Exposure based	CDNL
		CEXP
	Maximum level	LCMAX
	Time-based	TALC
Tone-corrected perceived	Exposure based	EPNL
		NEF
		WECPNL
		PNLTM

획을 권고하고 있다. 또한, CAEP (committee on aviation environmental protection) 위원회는 항공기 엔진 인증을 통하여 대기 오염 물질을 규제하고 있으며, 2010년부터 항공기 이산화탄소 인증기준(Aircraft CO₂ certification standard)을 개발하고 있다[24]. 우리나라 또한 2030년까지 온실가스 감축 목표를 배출 전량치(BAU; business as usual) 대비 37%로 선정하고, 유엔에 계획을 제출하였다. 정부는 제조업 위주의 국내 경제구조를 감안하여 산업계 감축량을 배출 전량치 대비 12% 이내로 결정하였으며, 온실가스 배출량이 많은 발전 및 수송 부문의 절감을 통해 감축량의 상당 부분을 해결하기로 하였다[25].

2) 항공기 배기가스 산정 기준

미 연방항공청(FAA)은 항공운항으로 소음, 대기오염, 기후변화 등의 환경 영향을 종합적으로 평가하기 위한 FAA environmental tool suite를 개발하였고[26], 미국 조지아공대(Georgia institute of technology)는 미래의 새로운 항공기에 의한 fleet level 온실가스를 분석하기 위해 GREAT(global regional environmental aviation tradeoff)라는 프로그램을 개발하였다 [27]. 항공 온실 가스 산정 프로그램 중 가장 앞선 것으로 평가 받는 것은 FAA에서 개발한 AEDT (aviation environmental design tool)와 영국의 Aero2k이다. AEDT는 국가 전체나 전세계적인 온실가스의 산출량을 상대적으로 정확히 계산하지만 3000 ft 이하는 SAE 1845 문서에 따른 알고리즘을 사용하고, 3000 ft 이상에서는 Eurocontrol의 BADA (base of aircraft data)를 사용하여 단일 비행의 경우 정확성이 떨어진다고 [28]. Aero2k는 10년동안의 항공기 관련 데이터를 추가하여 항공기의 연료 소모량과 온실가스 배출량을 측정하도록 개발되었다[29].

항공 온실가스 배출량 산정 기준 및 방법은 표 7과 같이 나타낼 수 있다, Tier 1/2/3a/3b 급의 산정기준은 범정부간기후변화 패널(IPCC; intergovernmental panel of climate change)에서 제시한 기준이다. 항공 선진국인 미국 및 유럽은 2000년 초반에 이미 Tier 3급(고정밀)의 AEDT, AERO-MS를 개발하여 보유하고

표 7. 항공 온실가스 배출량 산정 기준 및 방법

Table 7. Aircraft emission standards and method.

Category	Calculation method	Remark
Tier 1	Fuel consumption + Emission factor	-
Tier 2	3,000 ft or less (take off and landing) and more than (cruise) LTO×LTO emission factor×Cruise emission factor×(total fuel consumption-LTO fuel consumption)	NARML, KOTEMS
Tier 3a	Use of data between airport of departure and arrival CO2 emissions+other emissions(CH4, N2O)	Detailed CORINAIR Methodology
Tier 3b	Use of total flight trajectory information. Model capable of policy execution and implementation in consideration of aircraft, engine performance, and track	FAA

고 있으며, 이 프로그램들을 이용하여 ICAO CAEP 회의에서 항공분야의 배출가스에 대한 주요사안을 결정하거나, 회의를 이끌고 있다. 국내 항공온실가스 관련 프로그램인 나르미 및 KOTEMS는 대부분의 국가들과 마찬가지로 Tier 2급이다.

3) 항공기 배기가스 저감기술

우리나라는 ICAO가 2010년 37차 총회에서 이행계획 제출을 결의함에 따라 ICAO의 요구 사항을 충족하면서 항공 부문의 온실가스 감축을 위한 이행계획을 수립하고자 하였다. 하지만, 저감효과의 측정 분석을 위한 표준화된 산정기준이 없어 정량화된 평가가 어려운 실정이다. 따라서, 국제민간항공기구(ICAO) 및 국제항공운송협회(IATA)의 지침서와 항공기 기종 제작사 매뉴얼 등을 검토하여 표 8과 같이 비행운용, 운항관리, 성능개선, 중량관리 부문 등 다양한 기술들에 대한 기준을 마련하였다.

4) 항공기 배기가스 요구조건 분석

표 7에서와 같이 Tier 1, 2급은 연료 사용량 자료에 의존하는 방식이지만, Tier 3 급은 항공 교통 변화, 항공장비 교체, 혹은 다른 시나리오를 고려한 입력 자료를 사용하여 다양한 미래 예측 및 시나리오 분석을 가능하게 한다. 이는 단일 비행의 경도, 위도, 고도와 시간에 따른 구간별 온실가스 배출량 산정이 핵심 기능이며, 이를 기본으로 공항별, 항공기별, 연도별 온실가스 배출량을 계산한다. 단일 비행에 따른 온실가스 배출량 산정을 위한 요구조건은 표 9와 같다. 비행조건(출발지, 도착지, 항공기 종류 등)을 구체적으로 지정해야하며, 지정된 비행조건을 정의할 수 있는 데이터 베이스(공항 관련, 항공기 특성)와, 해당 비행에서 배출될 온실가스를 산정할 수 있는 데이터 베이스(각 온실가스의 단위 배출량 계수 등)가 존재해야 한다. 또한, 전 세계에 존재하는 공항의 자세한 정보와 이착륙 및 순항 구간에서의 비행 동력학 및 모델링 계수 등의 정보가 필요하며, ICAO에서 제공하는 소모 연료당 온실가스 배출량 정보가 필요하다.

표 8. 항공 온실가스 저감기술

Table 8. Aircraft emission reduction technology.

	Aircraft emission reduction technology
Flight operation	Idle reverse thrust
	Reduced flap takeoff/landing
	Engine shut-down taxiing
	Minimal use of APU
Flight management	Rolling take off/ Intersection take off/ Stabilized approach
	NADP (Noise Abatement Departure Procedure) change
	CDO (Continuous Descent Operation) enlarge
	Optimized CI (Cost Index) operation
Performance improvement	Replacement vertiport
	Shorten route
	E-Taxi
	Engine water wash
Weight management	PIP (Performance Improvement Package)
	Winglet mounting
	Zonal dryer
	Paperless cockpit
	Potable water optimization
	Aircraft strip repainting/ Weight reduction

표 9. 항공 온실가스 배출량 산정을 위한 요구 조건

Table 9. Requirements for calculating aircraft emissions.

	Conditions	Remark
Input	Airport layout	Information of the departure/arrival airport. Important information to determine weather and geographic characteristics
	Study boundary	Specify the boundary to be investigated
	Operation	Flight schedule information such as departure/arrival times and runways.
	Weather condition	Meteorological model, aerodynamic and fuel consumption
	Flight track	Information of the track. Essential information for calculating flight performance
	Fuel	Information of fuel characteristics such as biofuel
DB & Control constant	Airport DB (database)	Information of airports around the world
	Base of aircraft data	Information such as flight dynamics and modeling coefficients
	Aircraft noise and performance	Using 1845/Doc29 information. Flight dynamics and modeling coefficient
	ICAO emission index	Information on each emissions per fuel consumed
Output	Flight performance	Calculate latitude, longitude, speed, altitude, weight, propulsion
	Fuel burn	Calculate fuel consumption
	Emission	Calculate emissions

3-5 도심항공 모빌리티(UAM)의 성능

1) 순항 및 호버링

eVTOL 비행체의 임무는 순항 고도에 도달하기 위해 가파른 경로각에서 빠르게 상승하거나 수직 이륙한 다음 수직 착륙까지 감속하는 기능을 포함한다. 수직이착륙 비행체의 특성상, 수직 이착륙 시 가장 큰 출력을 내야하므로, 호버링 효율 및 성능이 중요하다. 현재 운용중인 헬리콥터는 장시간 비행을 필요로 하는 군사 및 다용도 역할에 적합하도록 설계되어 공기역학적 효율에 최적화 되어있다. 따라서, eVTOL 비행체의 단기 공기역학적 출력 성능과 장기적 순항 에너지 사이의 최적화를 수행할 필요성이 있다.

2) 속도 및 운행거리

UAM은 오늘날의 자동차 공유 네트워크가 제공하는 것처럼 다양한 유형의 비행체가 필요할 것으로 예상되며, 고객의 수요에 따라 다양한 속도와 운행거리를 가진 비행체가 개발될 것이다. 향후 기존의 교통 수단과 경쟁하기 위해 지상 교통 시간을 고려하여 목표 속도를 책정해야 한다. 서비스가 적용될 지역의 조건에 따라 특정 속도를 책정하는 것이 어렵지만, 선행 연구에 따르면 150~200 mph가 가장 효율적일 것으로 판단된다.

운행 거리는 배터리의 용량과 효율에 따라 제한될 것이므로 효율이 높고 저장용량이 큰 배터리 셀과 이에 따른 배터리 팩이 중요할 것으로 예상된다. 현재, 배터리 셀 1개가 고장나더라도 다른 배터리 셀에 영향을 끼치지 않도록 하는 연구가 진행 중이다. 미국 에너지부 (DOE; department of energy)의 Battery 500 프로젝트는 향후 5년 동안 500 Wh/kg 배터리를 350 kW의 대용량 충전기와 함께 개발 중이다[30].

3) 자율비행 성능

현재, 자율 주행 자동차가 자동차 사고로 인한 사망자 수를 줄일 수 있는 잠재력을 가지고 있고, eVTOL의 자율 비행 성능은 인간 조종사보다 더 큰 안전성을 제공한다는 통계적 데이터가 있어 구현될 가능성이 높다. 비행체 부품의 고장 또는 조작자 오류에도 불구하고, 안전한 운행을 입증하기 위해 안전성의 등가 수준 또는 개선된 수준을 보여주는 직접적인 방법이 있다. 자율비행 eVTOL에서 조종사가 제어 장치에 대한 권한을 역으로 갖게 하는 것 또한 안전성에 큰 영향을 줄 것으로 판단된다. 자율성 구성 요소 및 소프트웨어와 함께 조종사의 조합은 잠재

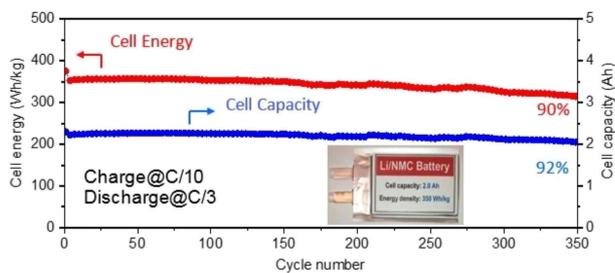


그림 10. 350 Wh/kg Li/NMC622 pouch cell의 안정 사이클[30]

Fig. 10. Stable cycling of 350 Wh/kg Li/NMC622 pouch cell.

적으로 인증 규제를 줄이고, 동시에 도심 내에서 조종사의 작업 부하를 감소시킨다.

3-6 도심항공 모빌리티(UAM)의 인증

eVTOL 항공기가 상용화되어 운행하기 전에, 항공 안전을 보장할 수 있는 규정이 필요하다. 이 규정은 설계, 생산, 조종사 면허 및 유지보수, 운용 요구사항에 대한 표준을 규정하여 시행한다.

인증 단계는 우선, 규제 당국과 제조자가 인증 기준에 동의해야 하며, 인증 기준에 따라 비행체의 설계, 제작, 운영 시 준수 여부를 결정하는 방법에 동의해야 한다. 그 다음, 제조자는 형식 인증을 취득하기 위해 인증기관이 승인한 표준에 대한 비행체의 적합성을 입증해야 한다. 종래의 일반 항공기의 신형 모델과 같이 단순한 케이스의 형식 인증은 약 2~3년, 새로운 생산인증은 약 1년이 더 걸린다. 그러나 eVTOL과 같은 신형 항공기의 도입에는 형식 인증과 병행하여 새로운 인증 기준이 필요할 경우, 약 4~8년까지 소요될 수 있다.

항공기 인증은 새로운 기술들의 빠른 통합을 방해하는 장벽이 될 수 있으며, UAM에 적용될 항공기의 경우 분산 추진, tilt-wing 추진, VTOL, 자동화 소프트웨어, 에너지 저장 등 새로운 기술들의 조합으로 인해 기존 인증 프로세스와는 차별화되어야 한다. 또한, 인구 밀집도가 높은 지역에서 운용하기 때문에, 안전 표준이 충분히 높으면서 승객에게 편안함을 제공해야 한다. 인증 요구도는 항공기의 종류와 등급에 따라 다르며, 항공기 및 수직이착륙장 설계에 영향을 미친다. 인증 요구조건들은 다양한 기상 조건 처리 방안, 충돌 감지 및 회피, 중앙 집중식 또는 분산형 통신 채널 사용 여부, 상업용 항공기와 eVTOL을 수용할 공역 분배 등을 고려해야 하며, eVTOL 비행체 인증 시 고려사항을 그림 11에 나타내었다.

기존의 항공기와 같이, eVTOL 항공기도 인증기관인 미국 FAA와 유럽의 EASA (European Union Aviation Safety Agency)의 규제 하에 상용화 될 것으로 예상된다. Powered lift 방식, VTOL 방식 기술의 감항기술기준 개발을 위해 FAA와 EASA는 AW-609의 tiltrotor 형식에 대한 감항기술기준안을 개발하여 인



그림 11. eVTOL 비행체 인증 시 고려사항[31]

Fig. 11. Considerations for eVTOL aircraft certification.

표 10. Airplane 및 rotorcraft에 대한 감항 인증 요소 및 요구조건[32]

Table 10. Airworthiness certification elements and requirements for airplanes & rotorcraft.

	Assessment level or class	Propulsion	Weight [lb]	Persons	Catastrophic failure rate [FH]	Design features
Normal category airplane (Part 23 ASTM F3230-17)	I	1 reciprocating	< 19,000	0-6+crew	$\leq 10^{-6}$	Wing-borne flight
	II	≥ 2 turbine or reciprocating	< 19,000	2-6+crew	$\leq 10^{-7}$	Propulsion emergency - glide
	III	≥ 1 turbine or reciprocating	< 19,000	7-9+crew	$\leq 10^{-8}$	Few critical parts
	IV	≥ 1 turbine or reciprocating	< 19,000	10-19+crew	$\leq 10^{-9}$	Common to increase performance with more complexity
Normal category rotorcraft (FAA Policy statement PS-ASW-27-15)	I	1 reciprocating	-	1-5	$\leq 10^{-6}$	Rotor-borne flight
	II	1 turbine	< 4,000	1-5	$\leq 10^{-7}$	Propulsion emergencies - autorotation
	III	1 turbine	4,001-7,000	6-9	$\leq 10^{-8}$	Many critical parts (cyclic, collective, anti-torque)
	IV	2 turbines	< 7,000	≤ 9	$\leq 10^{-9}$	Low reliance on increased complexity

표 11. Uber air 인증 요구 조건

Table 11. Uber air certification requirements.

	Propulsion	Weight [lb]	Persons	Catastrophic failure rate [FH]
Uber air requirements	≥ 2 electric motors	< 7,000	3-4+crew	1×10^{-8}

증을 진행 중이다. 전기동력 방식의 감항기술기준 개발 동향으로 FAA는 ASTM이 개발한 스포츠 경량항공기 인증기준(LSA; light-sport aircraft)을 채택하였다[33].

1) FAA

FAA는 Uber의 UAM 상용화 목표 및 세계 추세에 따라 신개념 비행체 및 인증 요구 조건 분석을 위해 관련 연구를 시작하였고, 2018년 8월에 Small airplane issue list (SAIL)를 통해 관련 인증기술의 주요 요소들을 제시하였다. 표 10에 Part 23 ASTM F3230-17과 FAA Policy statement PS-ASW-27-15를 참조하여 항공기와 회전익기에 대한 감항인증 요소들과 요구조건을 나타내었다. Uber는 이를 통해, Uber Air 운용을 위한 인증 요구조건을 표 11와 같이 새롭게 정의하였다. 추진기관은 전기 추진이며, catastrophic failure rate은 기존의 Part 23의 class II에 해당하는 $1 \times 10^{-7}/FH$ 에서 $1 \times 10^{-8}/FH$ 로 강화하였다. 이는 Fly-by-wire와 같은 복잡한 시스템을 고려한 것으로 판단된다.

2) EASA

EASA는 2018년 10월, CS-23의 special condition으로 1,814 kg (4,000 lbs), 5인승급 이하 VTOL에 대한 기술기준 초안을 고시하였고, 2019년 7월, 산업계 의견을 반영하여 표 12과 같이 최종안을 고시하였다[34].

최종안 적용대상은 3,175 kg (7,000 lbs), 9인승급 이하로 확대하였고, 이는 Part 27급 소형헬기 수준 기준이다. 신뢰성 요구도를 catastrophic failure condition 기준으로 최소 $10^{-7}/\text{비행시간}$ 에서 최대 $10^{-9}/\text{비행시간}$ 으로 정했으며, category enhanced가

표 12. 안전성 기준 및 기술개발 보증 수준 최종안

Table 12. Final Quantitative safety objectives & Function development assurance levels (FDAL).

Category	Maximum passenger seating configuration	Failure condition classifications			
		Minor	Major	Hazardous	Catastrophic
Category enhanced	-	$\leq 10^{-3}$ FDAL D	$\leq 10^{-5}$ FDAL C	$\leq 10^{-7}$ FDAL B	$\leq 10^{-9}$ FDAL A
	7 to 9	$\leq 10^{-3}$ FDAL D	$\leq 10^{-5}$ FDAL C	$\leq 10^{-7}$ FDAL B	$\leq 10^{-9}$ FDAL A
Category basic	2 to 6	$\leq 10^{-3}$ FDAL D	$\leq 10^{-5}$ FDAL C	$\leq 10^{-7}$ FDAL C	$\leq 10^{-8}$ FDAL B
	0 to 1	$\leq 10^{-3}$ FDAL D	$\leq 10^{-5}$ FDAL C	$\leq 10^{-6}$ FDAL C	$\leq 10^{-7}$ FDAL C

$10^{-9}/\text{비행시간}$ 수준으로 강화되었다[33]. Category enhanced의 경우 항공기의 안전한 비행 및 착륙을 방해하는 고장 조건은 catastrophic condition으로 간주하며, category basic의 경우, 항공기의 비상 착륙을 방해하는 조건을 catastrophic condition으로 간주한다.

IV. 결 론

본 논문에서는 대도시 교통 문제를 해결하기 위한 대안 중 하나인 도심항공 모빌리티 (UAM) 개념을 도심에 적용하기 위해 필요한 요구도를 분석하였다.

UAM에 사용될 대부분의 비행체는 eVTOL PAV이며, 기존의 내연기관 대신 전기로 추진되기 때문에 3~4배 효율이 높고, 소음과 배기가스가 적다. 비행체의 형상은 추진 방식에 따라 복합형, 틸트 날개형, 멀티콥터형으로 나눌 수 있으며, 이에 따른 장단점을 분석하였고, 임무 반영별 소요시간을 비교했다. 이 결과를 이용하여, 형상별 소요 에너지와 소요 시간을 고려하여 UAM 운용 효율을 극대화시킬 수 있다고 판단된다.

UAM은 현재 대중화되지 않은 신개념 비행체이므로, 이에 대한 개인의 의식 및 신뢰성을 분석하기 위해 잠재선호의식 연구가 필요하다. 이는 통계적인 실험계획법을 통해 가상의 시나리오를 구축하고, 이에 대한 개인의 선호를 찾을 수 있다. 본 논문에서는 뮌헨 대도시 지역의 자율비행 택시의 운용에 대한 인구통계학적 특징에 따른 인식을 참고하였고, 젊은 층에서 신기술 및 새로운 교통수단에 긍정적인 인식을 나타내는 것을 확인하였다. 또한, 설계 요구도 측면에서 기존 항공기의 안전성 감항 기준과 사고율을 분석하였다. 비행시간당 사고율을 기준으로 분석한 결과, Part 135 규정을 따르는 에어택시와 일반항공급(general aviation) 모두 자동차보다 높은 것을 확인하였고, 수용 가능한 위험도 수준을 만족하기 위해서는 비행시간당 사고율이 현재보다 약 29.3배 낮아야 할 것으로 판단되었다. 안전성과 관련해서 기상 조건 역시 중요한 고려요소이므로, 과거의 기상 조건에 대한 상세한 통계를 이용하여 UAM 운영에 미칠 수 있는 영향을 정의했으며, 공항 기상관측 보고(METAR) 및 수직 기상 관측 및 조종 보고(PIREP)를 사용하여 발생할 수 있는 안전성 문제를 사전에 파악하여야 한다.

또한, 인구 밀도가 높은 도심 지역에서 운용되기 때문에 환경적 요인인 소음과 배기가스에 대한 요구도를 분석하였다. 소음의 경우, 안전성 다음으로 중요한 고려 요소이며, 국내의 항공기 소음 평가방법이 2023년부터 최고소음도 방식에서 등가소음도 방식으로 바뀌기 때문에, 이에 대한 평가방법을 분석하였다. 배기가스의 경우, eVTOL PAV가 전기추진 방식이므로 배기가스 배출이 없다고 판단되지만, 하이브리드 전기 추진 방식도 감안하여 요구도 분석을 수행하였다. 항공기 배기가스 규제 현황에 대해 분석하고, 배기가스 산정 기준 및 저감기술에 대해 검토하였다.

eVTOL은 수직이착륙하므로 호버링 효율 및 성능이 중요할 것으로 판단된다. 현재 운용중인 헬리콥터는 장시간 비행에 적합하도록 설계되어 공기역학적 효율에 최적화되어 있다. 반면에, UAM에 적용될 eVTOL의 경우 도심 내에서 운용되기 때문에 단거리 비행에 적합하도록 설계되어야 하며, 헬리콥터의 공기역학적 효율간의 최적화를 수행해야 할 것으로 분석되었다. 또한, 자율 비행 성능이 인간 조종사보다 높은 안전성을 나타낼 것으로 판단되므로, 이를 입증하기 위해 안전성의 등가 수준 및 개선된 수준을 증명할 필요가 있다.

eVTOL 비행체가 상용화되어 UAM에 적용되기 위해서는 항공 안전을 보장할 수 있는 규정이 필요하다. 미국의 FAA와 유럽의 EASA는 감항기술기준 개발을 위해 AW-609의 틸트 방식에 대한 감항기술기준안을 개발하여 인증 진행 중이며, ASTM이 개발한 스포츠 경량항공기 인증기준을 채택하였다. Uber의 경우 Part 23 ASTM F3230-17과 FAA Policy statement PS-ASW-27-15를 기준으로 새롭게 정의했고, Fly-by-wire와 같은 복잡한 시스템을 고려하여 catastrophic failure rate에 대해 기존의 기준보다 강화하였다. EASA는 2019년 VTOL에 대한 기술기준 최종안을 고시하였고, 신뢰성 요구도 역시 시스템 복잡성을 고려하여 강화한 것을 확인하였다. 이와 같이 항공기 인증

이 강화될수록 새로운 기술들의 통합을 방해하는 장벽이 될 수 있지만, 자율성 구성 요소 및 소프트웨어와 조종사의 통합은 잠재적으로 인증 규제를 줄일 것으로 판단된다.

Acknowledgments

이 논문은 국토교통부의 재원으로 국토교통과학기술진흥원의 지원을 받아 수행된 연구사업임(과제번호 : 20CTAP-C157731-01)

References

- [1] 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.
- [2] K. B. Kim, Comparison and correlation analysis of aircraft noise assessment units, Masters dissertation, Seoul National University, Korea, August 2017.
- [3] Aviation today, Uber's Plan to Take Ridesharing to the skies, [Internet]. Available: <https://www.aviationtoday.com/2018/07/03/ubers-plan-take-ridesharing-skies/>.
- [4] Aviation today, NASA Launches Urban Air Mobility Grand Challenge Program, [Internet]. Available: <https://www.aviationtoday.com/2019/08/30/nasa-launches-uam-grand-challenge-program-accelerate-operational-maturity/>.
- [5] Hyundai Motor Group, [Internet]. Available: <https://tech.hyundaimotorgroup.com/kr/tag/uam/>.
- [6] 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.
- [7] EVTOL, NTSB shares more details on crash of Boeing PAV prototype, [Internet]. Available: <https://evtol.com/news/ntsb-shares-details-boeing-pav-crash/>.
- [8] Airbus, [Internet]. Available: <https://www.airbus.com/innovation/zero-emission/urban-air-mobility/vahana.html>.
- [9] FAA, Electronic code of federal regulations, [Internet]. Available: <https://www.ecfr.gov/cgi-bin/text-idx?c=ecfr&SID=3ff035e46386a527ed21813cb6ff9147&rgn=div8&view=text&node=14:2.0.1.3.10.2.4.10&idno=14>.
- [10] Volocopter, [Internet]. Available: <https://www.volocopter.com/en/product/>.
- [11] K. Chrzan and B. Orme, An overview and comparison of design strategies for choice-based conjoint analysis,

- Sawtooth Software, Research Paper Series, WA 98382(360), 2000.
- [12] F. Mengying, R. Rothfeld, and C. Antoniou, “Exploring preferences for transportation modes in an urban air mobility environment: munich case study,” *Journal of the Transportation Research Board*, Vol. 2673, No. 10, pp. 427-442, May, 2019.
- [13] CAP 780, Aviation safety review, Safety Regulation Group, November, 2008.
- [14] AMC RPAS.1309 Issue2, Joint authorities of rule making of unmanned systems, Safety Assessment of Remotely Piloted Aircraft Systems, November, 2015.
- [15] I. K. Ahn, “A study of the safety design requirements for a personal air vehicle,” in *The Society for Aerospace System Engineering, SASE 2018 Spring Conference*, Jeju: Korea, pp. 360-363, 2018.
- [16] Uber Elevate, Fast-forwarding to a future of on-demand urban air transportation, October, 2016.
- [17] K. B. Kim, B. H. Lee, and P. M. Park, “Technology trends on the electric propulsion system for aircraft,” *Current Industrial and Technological Trends in Aerospace*, Vol. 14, No. 1, pp. 70-82, 2016.
- [18] R. Colleen, B. Frank, M. Christian, S. Joel, and C. Adam, An assessment of the potential weather barriers of urban air mobility (UAM), US Berkeley Transportation Sustainability Research Center, 2018.
- [19] J. W. Choi and C. Kahng, “Introduction of noise characteristics and certification standard for rotorcraft,” *Journal of Aviation Development of Korea*, Vol. 55, No. 3, pp. 123-135, 2010.
- [20] E. Boeker and G. Fleming, “Functional description of the FAA’s aviation environmental design tool’s aircraft acoustic module,” in *Institute of Noise Control Engineering, Noise Control Engineering National Conference 23rd*, pp. 311-316, Michigan: MI, July, 2008.
- [21] E. H. Lim and H. Y. Hwang, “Noise analysis of new runway at the Gimhae international airport using aviation environmental design tool(AEDT),” *Journal of Advanced Navigation Technology*, Vol. 22, No. 5, pp. 343-350, 2018.
- [22] S. J. Oh, G. J. Lee, and S. H. Nah, “Aerodynamic design and aviation procedure considering global warming,” *The Korean Society for Aeronautical & Space Sciences*, Vol. 2010, No.1, pp. 387-390, 2010.
- [23] D. Joe, M. Mohammed, Aviation environmental design tool - technical manual version 2d, Federal Aviation Administration, MA, OBM, No. 0704-0188, Sept, 2017.
- [24] ICAO, ICAO Environmental Meeting Commits To a CO2 Standard (2010, February), International Civil Aviation Organization, [Internet]. Available: <http://icaoopressroom.wordpress.com/2010/02/19/icao-environmental-meeting-commits-to-a-co2-standard>.
- [25] H. J. Joo, H. Y. Hwang, B. W. Park, and D. W. Lim, “Aircraft emission and fuel burn estimation due to changes of payload and range,” *Journal of Advanced Navigation Technology*, Vol. 19, No. 4, pp. 278-287, Aug. 2015.
- [26] R. Cointin, Aviation environmental tools suite overview and integration, Federal Aviation Administration, Aviation Environmental Tools Colloquium, Dec 2010.
- [27] M. Kirby, K. Becker, S. Isley, G. Burdette, and D. Mavris, “Development of an interactive capability to tradeoff new technologies and future aircraft to reduce aviation environmental impacts”, in *Proceedings of the 27th Congress of the International Council of the Aeronautical Sciences*, Vol.4, Nice: France, pp. 1-12, Sep. 2010.
- [28] K. Jonathan, A. Meghan, B. Eric, H. Andrew, S. J. Hwang, M. Andrew, S. David, S. G. Barberio, D. Eric, Y. Michael, H. Clifford and M. Jim, Aviation environmental design tool(AEDT) technical manual version 2a, U.S. Department of Transportation and FAA(Federal Aviation Administration), DOT-VNTSC-FAA-12-09, Jan, 2014.
- [29] C. J. Eyers, P. Norman, J. Middle, M. Plohr, S. Michot, K. Atkinson, and R. A. Christou, AERO2k global aviation emissions inventories for 2002 and 2025, Institute of Propulsion Technology, Köln-Porz: German, QinetiQ Report/04/001113, December, 2004.
- [30] Office of Energy Efficiency & Renewable Energy, Battery 500: Progress Updated, [Internet]. Available: <https://www.energy.gov/eere/articles/battery500-progress-update>.
- [31] Porsche Consulting, The future of vertical mobility, A Porsche Consulting study, San Francisco, October, 2018.
- [32] EASA, Part 21 Light: Simple and proportionate rules for small aircraft manufacturers, eVTOL International Standards Workshop, Brussels, Belgium, April, 2019.
- [33] J. W. Choi and C. J. Hwang, “Status and approach on certification basis of eVTOL for urban air mobility,” *The Korean Society for Aeronautical & Space Sciences*, Vol.2019, No.1, pp. 621-622, 2019.
- [34] EASA, Special condition for small-category VTOL aircraft, European Union Aviation Safety Agency, SC-VTOL-01, July, 2019.



윤 주 열 (Ju-Yeol Yun)

2019년 2월 : 세종대학교 항공우주공학과 (공학사)
2019년 3월 ~ 현재 : 세종대학교 대학원 항공우주공학과 석사과정
※ 관심분야 : UAM, PAV Design, Solar Aircraft Design



황 호 연 (Ho-yon Hwang)

1993년 5월 : 미국 Georgia Institute of Technology 항공우주공학과 (공학박사)
2000년~ 현재 : 세종대학교 항공우주공학과 교수
2012년~2017년 : 세종대 부설 항공산업연구소 소장
※ 관심분야 : UAM, PAV Design, Solar Aircraft Design, Assessment of Environmental Impacts from Aviation