

Original Article

<https://doi.org/10.12985/ksaa.2025.33.2.089>
ISSN 1225-9705(print) ISSN 2466-1791(online)

Powered Lift 항공기 성공적인 조기 도입을 위한 안전 체계 수립

윤희석*

Establishing a Safety Framework
for Successful Early Introduction of Powered Lift

Hi-Seok Yoon*

ABSTRACT

The FAA's final rule for Powered-Lift provides legal and institutional basis for pilot certification and operations. The FAA is preparing to enhance operational safety by establishing Airman Certification Standards(ACS) and utilizing Flight Simulation Training Devices(FSTD). However, the first electric Vertical Take-Off and Landing(eVTOL) aircraft to be in service are expected to have a number of safety risks in various operating environments. This study introduces risk factor analysis and safety management measures for Powered-Lift to ensure safe Advanced Air Mobility(AAM) operation in Korea. For the success of Powered Lift operations, preliminary studies on Single-pilot Resource Management(SRM) and Specific Operational Risk Assessment(SORA) are required. It is proposed to establish a safety-oriented Powered Lift operation system through Simplified Vehicle Operations(SVO) that combines human factors and automation.

Key Words : Air Safety(항공안전), Powered-Lift(동력식-양력기), SFAR(특별연방항공규정), SORA(특정운항위험도평가), SPO(단일조종사운항), SVO(간소화된항공기운항)

1. 서 론

2024년 11월 FAA는 특별연방항공규정(SFAR, Special Federal Aviation Regulation)에 대한 RIN (Regulation Identifier Number) 2120-AL72 통합본으로 “Powered-Lift 조종사 자격증과 운항”에 관한 최종규칙안을 발표했다.

이번 특별연방항공규정(SFAR) 확정안으로 인해 FAA는 Powered-Lift 항공기 형식 인증 후에 eVTOL

항공기의 조종사 훈련과 운항 방안에 대하여 법·제도적 근거를 제시하였다.

이를 근거로 미래항공 모빌리티 시대를 준비하고 있는 각 국가의 항공 관계자들은 Powered-Lift 도입을 위해 운영체계 수립에 관한 기본 준비를 하고 있다. 대한민국에서도 Table 1과 같이 항공안전기술원을 중심으로 UAM 인증전문가 기술위원회를 구성하여 운영체계 분과별로 Powered-Lift 도입을 위한 인증 체계와 운영체계를 준비하고 있다.

그동안 미래항공 모빌리티에 대한 많은 국내 항공인들의 관심과 기대 그리고 K-UAM 그랜드 챌린지 팀들의 준비에도 불구하고 현재 실증테스트는 2024년 12월 고흥 국가성능항공시험장에서 실시한 JOBY S4 실증테스트가 유일하다. 다행인 점은 JOBY S4가 eVTOL

Received: 16. May. 2025, Revised: 27. May. 2025,

Accepted: 29. May. 2025

* 한국항공운항학회(전 대한항공 수석 기장)

연락처 E-mail : hiyoony@gmail.com

연락처 주소 : 서울시 은평구 연서로 44길7

Table 1. Korea UAM certificate plan

연구 목표	대한민국 UAM 항공기 인증체계 구축
연구 기간	2024.6 ~ 2026.12(2년 7개월)
연구 분야	운용체계 / 인증체계 / 인증기술 / 국제협력
운용 체계 법/제도 개선	인증 법령 개정
	관계 법령 개정
운영 계획	전체회의(연2회) / 분과회의(분기별 1회)

Source: Korea Institute of Aviation Safety Technology.

항공기 중에 기술적으로나 시스템적으로 가장 앞서 있고 상용화 가능성이 높은 Powered-Lift 항공기이다.

본 연구는 차후 대한민국에서 Powered-Lift 항공기 초기 도입이 확정되어 인증절차가 마무리되고 안전한 도심항공 모빌리티 운용을 시작하기 위하여서는 사전에 어떠한 안전 운항에 대한 준비와 연구가 필요한 가라는 관점에서 고찰되었다.

연구 방법은 항공우주연구원의 JOBY S4 실증 사항과 항공안전기술원의 Table 1 대한민국 UAM 인증 계획에서 논의 중인 UAM 운용체계 법/제도 연구 사항에 대하여 관계자와의 개별심층면담(IDI, in depth interview)과 포커스 그룹 토론(FGD, focus group discussion) 내용을 기초로 하여 예상되는 Powered-Lift 운항 위험 요소와 안전 대책을 연구하였다. 그리고 관련 공식 문헌과 선행연구 자료들을 참고하여 Powered-Lift 항공기 안전 체계 수립을 위한 위험 요소 분석과 준비 방안을 제시하였다.

II. Powered Lift 형식과 운항 위험

2.1 Powered-Lift 정의와 형식 분류

ICAO Annex 1, Personnel Licensing Definition에 따라 Powered-Lift에 대하여 '운항 기술 기준'에서는 다음과 같이 정의하고 있다.

"수직이착륙기 ? (powered-lift)"라 함은 주로 엔진으로 구동되는 부양장치 또는 엔진추력에 의해 양력을 얻어 수직이륙, 수직착륙 및 저속비행 하는 것이 가능하며, 수평비행 중에는 회전하지 않는 날개에 의하여 양력을 얻는 중(重)항공기(heavier than-air aircraft)를 말한다.

Powered-Lift의 원형은 1967년 첫 비행에 성공한 'Harrier 공격기'와 1989년 첫 비행에 성공한 'V-22 오스프리'라고 할 수 있다. 그러나 V-22는 예산과 기술적인 문제로 2007년이 되어서야 양산이 이루어지게 되었다. 이후 회전익과 고정익의 이점을 살린 장점으로 Turboprop 엔진을 장착한 군용기 개발은 계속 이루어지고 있으나 민간 상업용으로는 제도적 기술적 문제로 인증이 지연되고 있다.

1997년 미 연방항공규정(FAR)은 조종사 자격증 범주로 Powered-Lift를 추가했다. 그리고 2014년에는 NASA에서 분산전기동력추진(DEP, distributed electric propulsion) 시스템이 개발되어 eVTOL 항공기에 적용되기 시작하였다.

그리고 미 연방항공청(FAA, Federal Aviation Administration)은 VTOL, eVTOL 형태의 항공기를 ICAO(International Civil Aviation Organization) 정의와 같이 Powered-Lift에 추가하였다. FAA의 규정에 따르면 Vectored Thrust(tilt-rotor)와 Lift & Cruise 방식이 아닌 Multicopter 형식의 eVTOL은 수평비행 시에 날개 양력이 발생하지 않으므로 Powered-Lift로 분류하지 않고 특수분류 회전익기(special class rotorcraft)로 분류되어 SFAR, RIN 2120-AL72의 적용을 받지 않는다.

Table 2는 14 CFR §61.129 조항에 있는 사업용 조종사(CPL) 면장 취득 요건이다. Powered-Lift가 새로운 항공기 종류(category)로 분류됨에 따라 관련 모든 법제와 운영 규칙이 새롭게 규정되었다. 여기서 총 비행시간은 비행기의 250시간을 적용했으며 PIC 시간은 50시간에서 회전익기와 같은 35시간을 적용하는 대신에 나머지 15시간은 "C"등급 이상의 모의비행장

Table 2. Aeronautical experience for CPL

종류(category)	비행기	회전익기	Powered Lift(PL)
형식(class)	단발/다발	헬리콥터	N/A
한정(rating)	§61.129(a/b)	§61.129(c)	§61.129(e)
총 비행시간	250	150	250
1.동력항공기	100	100	100
2. PIC시간	100 비행기50+	100 헬기35+	100 PL35+
3.훈련비행시간	20	20	20
4. Solo 비행	10	10	10

Source: 14 CFR §61.129.

치(FFS) 경험으로 대체가능 하게 했다. 이와 같이 Powered-Lift 관련 법제와 연관 운항 규칙들도 안전 및 여러 상황과 eVTOL 개발자의 의견을 수용해 새롭게 설정되었다.

Powered-Lift 항공기는 등급(class)을 설정하지 않았다. 왜냐하면 개발 중인 eVTOL 항공기의 형태가 다양하고 설계 및 운용 특성에 대한 공통 등급화가 어렵기 때문이다. 그리고 조종사 면장을 취득하기 위해서는 eVTOL 항공기의 조작 및 비행 특성이 일정하지 않으므로 각각에 대하여 형식한정(type rating) 자격 증명을 취득해야 한다. 이처럼 다양하면서도 다수의 동력장치와 프로펠러의 Tilting 기술을 필요로 하는 Powered-Lift 항공기들은 기술적인 면과 조종 면에서 많은 위험 요소가 있다.

2.2 Powered-Lift 운항 위험 요소

Table 3은 Powered Lift 운항 시 예상되는 위험 요소들이다. 현재 개발인증 중인 대부분의 eVTOL 항공기들은 Beta Technologies ALIA-250을 제외하고는 경량화와 경제성을 위해 조종석이 하나인 단일조종사 운항(SPO, single pilot operation) 형태로 설계되었다. SPO는 초기 훈련과 운항 시에 기존 항공기와는 다른 안전 위험 요인들을 갖고 있다.

단일 비행조종장치의 사용은 실제 훈련 비행에서 학생조종사가 위험한 비행 상황에 노출되었을 때 교관조종사의 시기적절한 개입을 어렵게 할 것이며 비행 기량의 전수에도 제한을 받게 된다. FAA에서는 이를 보완하기 위한 방안들을 제시하고 있지만 시뮬레이터에서의 훈련 강화 외에는 제시 방안이 복잡하거나 모호

Table 3. Powered lift operational risk factors

분류	비행기	헬리콥터	Powered Lift
훈련	복좌	복좌	단좌 SPO
조종	휠/스틱	스틱	Inceptor
비상착륙	활강	Auto rotation	활강 or Auto rotation
와류	적음	영향	복합
연료	AVGAS	JET A, B	리튬이온배터리
예비 연료	VFR	30분	20분
	IFR	45분	30분
			30 → 20분 45 → 30분

Source: SFAR and Joby aviation.

한 사항도 있다.

진보된 조종 장치인 Inceptor가 조종을 쉽게 하도록 함으로서 안전도를 높일 수 있으나 여기에도 적응 훈련과 시간이 필요하게 된다.

현재 개발되고 있는 eVTOL 항공기들은 동력장치에 문제가 생겨 비상 착륙하게 되는 경우 이착륙 상황이나 고도 그리고 동력장치의 심각성에 따라 활강 또는 Auto rotation을 고려해야 하는 위험에 처할 수도 있다. 이런 방식도 일정 가능 고도가 있어야 하며 자세 유지와 안전 실속속도 유지 및 비상 착륙장의 문제도 고려되어야 한다.

버티포트 접근 시 급격한 기상 변화나 돌풍에 영향을 받는 다수의 Rotor wash는 복합적으로 안전한 착륙을 위협하게 된다.

eVTOL이 현재 사용하는 리튬이온배터리는 충격과 화재에 특히 취약하다. 그리고 급속 충전 시 발생하는 열도 세심한 관리를 필요로 하며 1시간 정도 비행 가능한 배터리 용량에서 예비연료 20~30분의 법정 유지는 충전 횟수 증가와 더 많은 대체 착륙지 확보를 요구하게 된다.

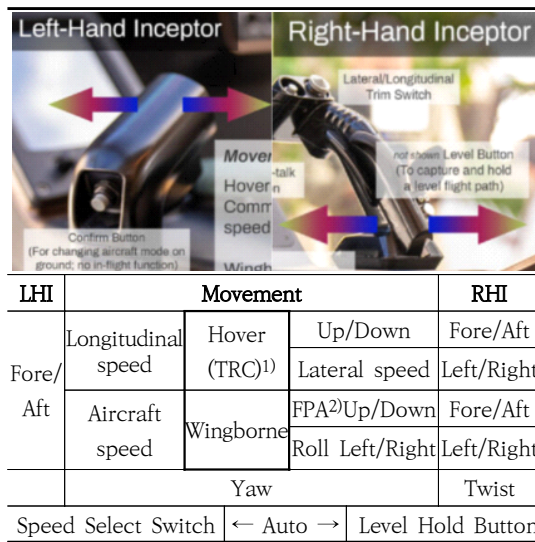
2.3 Powered-Lift Cockpit System

현재 형식 인증 진행 중인 eVTOL 항공기들의 Cockpit System이 공개되지는 않았지만 공통 구성개념 요소가 있다. 경량화와 직관적이고 통합적인 시스템 구성이다. 그리고 초기에 VFR 운항 위주로 비행하고 향후 정밀 운항을 위해 업그레이드 가능한 시스템이다. 다음은 Joby S4 시험모델을 기준으로 전통적 조종실과는 다른 시스템적 요소를 통해 안전을 위한 조종사 적응의 필요성을 살펴본다.

2.3.1 Inceptor의 기능과 적응

Fig. 1의 Inceptor는 Side-stick 등 조종 입력 장치 전반을 포함하는 상위 개념이다. 현재 대부분의 eVTOL 항공기는 정밀 제어와 피드백 기반으로 직관적 조작이 가능한 F-35B(수직이착륙기)의 조종간과 유사한 Inceptor를 채택하고 있다.

Joby S4에서 왼쪽 Inceptor는 비행 제어 컴퓨터에 명령을 전송하여 로터의 속도를 조절함으로써 수직 또는 수평비행 시 항공기의 이동 속도를 제어하는 스로틀 기능을 하며, 오른쪽 Inceptor는 자세를 바꿔 고도



Source: Joby aviation and the air current.

Fig. 1. Joby's S4 eVTOL Inceptors

와 방향을 제어한다. 경량화를 위해 Rudder Assembly를 없애고 오른쪽 Inceptor를 Twist시켜 Yaw를 제어한다. 휠타입 랜딩기어를 가진 eVTOL 항공기는 Rudder 위치에 작은 브레이크 Pedal을 남겨놓았다. 그리고 Inceptor를 완전히 놓으면, 안정적인 호버링 상태를 유지하며 실속 스피ن 방지 기능이 있다.

Lift & Cruise 방식인 ALIA-250의 오른쪽 Inceptor도 유사한 기능을 하며 왼쪽 Inceptor는 헬리콥터의 콜렉티브 레버 기능과 유사하다.

전통적인 비행기와 헬리콥터는 조종과 제어 방식이 대부분 동일하다. 그러나 eVTOL 항공기는 형식에 따라 어느 정도 다른 조종과 제어 방식 및 운용 특성을 갖게 된다. eVTOL은 조종하기 쉽게 설계되었지만, 정상 운항이 아닌 비정상 상태 운항의 복잡한 조종과 시스템 기능 저하 상태의 경우에 조종이 쉽지 않을 수 있다. 그리고 전통적 조종간에 습관화된 조종사는 충분한 적응의 시간을 필요로 한다.

2.3.2 Touchscreen의 사용과 단점

14 CFR Part 194, Subpart E, § 91.409(e)-(h) 항목에서 Powered-lift 항공기는 “조종사와 다중 컴퓨

터 시스템 간에 비행, 항행 또는 통신을 매개할 수 있는 전자적으로 진보된 시스템”과 “첨단 PFD 와 ND³⁾ 그리고 Fly-By-Wire 시스템과 Auto- Pilot을 갖춘 전자식 비행 제어 시스템”을 갖추어야 한다.라고 규정되어 있다. 이 규정에 따라 eVTOL 항공기들은 전면 계기 디스플레이를 전자식 통합체계 구성에 유리한 touchscreen으로 구성했다.

이것은 경량화와 직관적이고 통합적인 시스템 구성에 유리하다. 반면에 단점도 있다. 첫째, 터치스크린은 빛과 조종사의 손가락 기름의 영향을 받아 디스플레이가 흐릿해질 수 있다(Robinson et al., 2012). 둘째, 터치스크린과 상호 작용할 때 속도와 정확도의 상충 문제가 있으며, 특히 디지털 또는 기호의 대상 영역이 작거나 서로 가까이 있는 경우 실수로 터치될 가능성이 높다(Dodd et al., 2014). 셋째, 터치스크린 사용에 대한 가장 중요한 안전 문제는 진동과 외란에 크게 영향을 받는다. 조종사는 손과 눈의 협응 문제로 인해 진동 상황에서 오류율이 높아지고 성과가 떨어질 수 있다(Alapetite et al., 2018).

기존 항공기 조종실의 스위치, 버튼, Knob 등은 조작 중에 인적오류를 줄이고자 형태, 크기, 배치, 촉감까지도 고려해 설계되었다. 그러나 시각과 디스플레이 접촉에만 의존한 조작은 바쁘거나 비상 상황에서는 실수의 가능성을 높일 수 있다. 안전 관련 연구가 더 필요하며 비행 훈련 시 검토가 필요하다.

III. Powered Lift 안전 운항체계 구축

3.1 Powered-Lift 안전법과 운용개념 수립

Fig. 2는 항공안전기술원에서 설정한 UAM 안전 운항체계 개발의 단계별 연구과제이다. 국내에 Powered-Lift 항공기를 도입하여 운항하기 위해서는 FAA 형식인증(TC)에 대한 형식증명승인(TCV, type certificate validation)과 감항증명(AC, airworthiness certificate)을 진행해야 한다. 이 과정에서 eVTOL 기체에 대한 기술적 연구 자료 확보와 운항안전과 연관된 기술적 검토 및 다양한 운항 환경과 관련 종사자에 대한 안전관리 방안의 검토와 수립이 요구된다.

운용개념을 수립하기 위해서는 먼저 FAA SFAR,

1) TRC(Translational Rate Command) 전이속도명명. 정밀 호버링 및 수직 착륙 기동을 위해 TRC 활성화.

2) FPA(flight path angle) 비행경로각.

3) PFD(primary flight display) 주비행계기.
ND(navigation display) 항법계기.

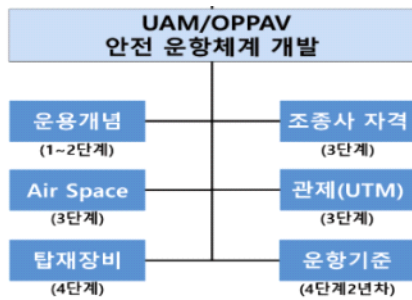


Fig. 2. Safety operation system development
(Source: Korea Institute of Aviation Safety Technology)

RIN 2120- AL72를 토대로 관련 항공 안전법의 제정과 보완이 필요하다. 여기서 다양한 운항 위험 요소를 파악하여 위험평가 기반의 대한민국에 적합하고 안전한 운용 개념과 표준이 제정되어야 한다.

3.2 Powered-Lift 훈련 체계 및 자격 구축

3.2.1 시뮬레이터 기반 훈련 체계 확보

14 CFR Part 60은 모의비행훈련장치 초기와 정기 자격 부여 및 사용에 관한 내용이다.

FAA 기준의 모의비행훈련장치(FSTD, flight simulation training device)는 Motion이 있는 모의비행장치(FFS, full flight simulator) A, B, C, D 등급과 Motion이 없는 비행훈련장치(FTD, flight training device) 4, 5, 6, 7 등급이 있다. FAA는 Powered-Lift 조종사 자격 취득과 유지에 사용할 수 있는 Simulator를 FFS “C” 등급 이상으로 규정했다. “D” 등급은 운송용 조종사의 자격과 유지를 위한 장비이다. 효과적인 훈련을 위해서는 FTD 7등급과의 공동 활용이 경제적이고 효율적이라 판단된다.

항공 안전법 시행규칙에서 정의하는 모의비행장치 “C” 등급의 운용 범위는 ‘비정상 자세 예방 및 회복 훈련(upset prevention recovery training)을 제외한’ 모든 기동이 가능해야 한다. 그리고 비행훈련장치 7 등급은 Motion이 없는 상태에서 FFS “C”와 유사한 훈련이 가능하다.

Table 4는 FAA, Powered-Lift 사업용 면장 취득을 위해 모의비행장치(FFS) 비상 운항 훈련에 포함해야 할 표준자격증명(ACS)의 필수항목들이다. 이를 바탕으로 Powered-Lift 제작사들은 각 eVTOL의 설계 및 운용 특성 그리고 조작 및 비행 특성에 적합하게 비

Table 4. FFS emergency operations for CPL

A	Powerplant(s) failure during T/O thrust-borne
B	Powerplant(s) failure during T/O semi-wing-borne
C	Inflight powerplant(s) failure & restart multi A/C
D	Vortex ring state (VRS) avoidance
E	Approach and landing with powerplant(s) failure
F	Emergency descent
G	Emergency equipment and survival gear
H	Systems and equipment malfunctions
I	Dynamic rollover
J	Recovery from unusual flight attitudes

Source: FAA-S-ACS-2.

상절차를 수립하게 된다.

Table 4의 eVTOL 비상절차와 유사한 항목을 운송용 비행기에서는 기장과 부기장이 CRM(crew resource management)을 통해 해결하여 나가는 것과 비교하면, 해당 항목에 대한 조종사 단독 운항(SPO) 수행 과정이 상당한 안전 위험 요인을 내포하고 있음을 알 수 있다. 그러므로 Powered-Lift 항공기를 도입하여 운항을 시작하기에 앞서 단일조종사자원관리(SRM, single pilot resource management)를 기반으로 한 안전한 시뮬레이터 훈련 체계와 운용 체계의 수립이 Powered-Lift 안전 운항의 핵심 요소가 된다.

3.2.2 Powered-Lift 조종사 초기 자격 부여 및 표준자격증명(ACS)

14 CFR Part 61은 조종사, 비행교관 및 지상 교관의 자격 증명 부여 및 사용에 관한 내용이다. FAA에서 Powered Lift 항공기 초기 조종사 양성을 위해서는 제작사 교관 조종사와 FAA 인증을 담당하는 시험 조종사 또는 조종사 형식한정 요건을 설정해야 하는 항공안전 감독관(ASI, aviation safety inspector)이 참여하게 되며, 이들이 초기 간부 교관그룹(initial cadre of instructors)을 양성하여 자격을 부여하게 된다.

FAA는 2023.11월 각각의 자격 증명에 대하여 상세한 기준을 밝힌 6가지의 Powered-Lift 표준자격증명(ACS, airman certification standards)을 아래와 같이 설정하여 공개했다.

- 1) FAA-S-ACS-13: 자가용 면장 표준자격 증명(private pilot certificate ACS)
- 2) FAA-S-ACS-2: 사업용 면장 표준자격증명 (commercial pilot certificate ACS)
- 3) FAA-S-ACS-17: 운송용 면장 및 형식한정 표준자격증명(airline transport pilot certificate and type rating ACS)
- 4) FAA-S-ACS-3: 계기 한정 표준자격증명 (instrument rating ACS)
- 5) FAA-S-ACS-27: 비행교관 면장 표준자격 증명(flight instructor certificate ACS)
- 5) FAA-S-ACS-28: 비행교관-계기한정 면장 표준자격증명(flight instructor instrument rating certificate ACS)

표준자격증명이 개발 중인 모든 Powered-Lift 유형의 VTOL, eVTOL에 대한 다양한 위험 상황을 전파 다루지는 못하지만 FAA는 6가지 ACS를 통하여 향후 Powered-Lift 운영을 위한 실질적인 시험 기반과 안전 운항의 기준을 제시했다.

국내 Powered-Lift 항공기의 초기 도입이 확정되면 비행 실증테스트와 인증 절차 진행 중에 해당 항공운송 사업자와 관련 기관 간에 초기 교관조종사 양성과 훈련을 위하여 FAA 표준자격증명(ACS)과 제작사 훈련 매뉴얼을 참조하여 국내 운항 환경에 맞는 표준자격증명(ACS)의 설정과 안전 관리 차원에서의 협조가 요구된다.

3.3 Simplified Vehicle Operations 개발

3.3.1 간소화된 항공기 운항(SVO)의 개념

현재 개발 중인 eVTOL 항공기들의 공통 설계 철학은 안전성과 경제성 및 간소화와 자동화이다. 그러나 안전성과 경제성은 상호 모순된 목표를 가지고 있다. 그러므로 이 둘의 안전간격을 좁혀주는 매개체가 간소화와 자동화의 추구이다.

2019년 일반항공제작자협회(GAMA, General Aviation Manufacturers Association)는 간소화된 항공기 운항(SVO, simplified vehicle operations)에 관한 “A Rational Construct for SVO” 백서 발행을 통해 인적 요소와 자동화를 결합한 간소화된 운용시스템으로 안전수준을 높이는 방안을 제시했다.

또한 GAMA는 권고안으로 다음과 같이 제안했다.

“현재 개발 중인 많은 상업용 eVTOL은 비행 영역 보호 및/또는 전환 과정에서 안정성과 제어력을 제공하기 위해 어떤 형태로든 간소화된 기체 운용 방식을 구현하고 있다. 따라서 FAA는 업계와 협력하여 이러한 기체의 운용에 필요한 안전수준을 충족하도록 보장하는 것이 필수적이다. 그러므로 기존 General Aviation에 SVO를 통합하면 현재 가장 흔한 치명적인 사고 원인 중 상당수를 획기적으로 줄일 수 있을 것이다.”

FAA는 GAMA의 권고를 수용하여 14 CFR 61.64(e) 모의비행훈련 내용을 개정하며, SFAR에 다음과 같이 언급하고 있다. “자동화와 인적 요소의 모범 사례를 결합하여 조종사가 습득해야 하는 기술 및 지식 교육의 양을 줄일 수 있는 간소화된 항공기 운항(SVO) 방식으로의 전환이 인정된다. 이것은 단일 제어 장치와 단일 조종사 운항을 하는 조종사에게 Powered-Lift에서 요구되는 감독된 비행경험(SOE, supervised operating experience) 요건의 대체 방안이 될 수 있다.”

SVO는 조종사와 자동화된 항공기 시스템 간의 협업 능력 향상을 통해 운항 중 정상, 비정상 상황에서 평균 조종사보다 더 높은 역량과 신뢰도를 확보하도록 하는 것이다.

SVO를 통해 역량과 신뢰도가 입증된 특정 영역에 대하여 조종사와 운항자의 훈련을 줄이고 자동화로 대체 가능하게 함으로서 운항안전과 경제적 운항의 목표를 수렴하게 한다.

eVTOL 항공기 운항의 최종 목표인 자율운항은 비행 제어와 운용 체계에 AI 적용의 확대로 실현되겠지만 안전성이 보증되어야 하므로 상당한 기간이 소요되게 된다. 그러므로 eVTOL 운항은 기존 운항체계를 따르다가 간소화되고 자동화된 운항의 진화 과정을 거쳐 자율운항으로 나아가게 된다.

3.3.2 특정 운항 위험도평가(SORA)

간소화된 항공기 운항(SVO)을 개발해 적용하기 위해서는 특정 운항 위험도평가(SORA, specific operational risk assessment)와 병행해서 수행해야 효과적이라고 판단된다.

SORA는 2019년 유럽 무인시스템규정제정통합기구(JARUS, Joint Authorities for Rulemaking on Unmanned Systems)에서 개발되어 드론과 무인 항공 시스템(UAS, unmanned aircraft systems) 운용 중

발생할 수 있는 위험을 평가하여 위험 허용 수준 이내로 평가된 무인기에 한하여 비행을 승인하는 시스템이다. 현재는 그 활용도를 확대하여 다른 고위험 운송 수단 안전 평가와 eVTOL 운항 안전 평가 시스템으로도 사용되고 있다.

Table 5는 14 CFR 135의 좌석 수 10개 미만으로 운항하는 Commuter와 주문형 항공기에 속하는 비정기 헬리콥터의 2018년 사고 유형과 횟수이다. eVTOL 운항이 시작되지 않았으므로 운영 특성, 비행 특성이 유사한 헬리콥터 사고데이터를 참조하고 비행 단계별로 구분하여 특정 운항의 위험도평가(SORA)를 실시하고 개선 방안을 적용한다.

Fig. 3은 간소화한 SORA 절차 진행 과정이다.

- eVTOL에서 SORA 절차적용 예시 -

- 1) 운영 개념(CONOPS) 정의:
eVTOL의 비행 경로, 이착륙 지점, 운항 방식, 인력요구 사항 등을 설정한다.
- 2) 지상 위험 평가(ground risk assessment):
도심 지역에서의 인구 밀도, 인프라 보호 필요성 등을 고려하여 위험 수준을 결정한다.
- 3) 공중 위험 평가(air risk assessment):
기존 항공기 및 드론과의 충돌 가능성을 분석하고, 공역 내 교통량을 고려한다.
- 4) 위험 완화 전략(risk mitigation strategies):
충돌 방지 시스템, 자동 복구 기능, 조종사 훈련

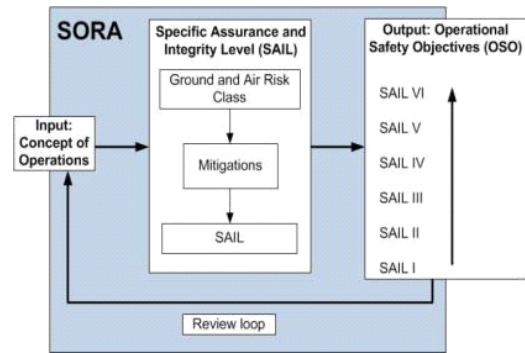


Fig. 3. Simplified SORA process
(Source: CEAS Aeronautical Journal)

등을 포함하여 위험 완화 방법을 적용한다.

- 5) 특정 보증 및 무결성 수준(SAIL, specific assurance and integrity levels) 결정:
eVTOL 운항 위험 수준을 6개 등급으로 분류하여 평가하고 필요한 안전 조치를 결정한다.
- 6) 운항 안전 목표(operation safety objective):
SAIL 값을 비행 시나리오별 위험 수준 Low, Medium, High 등급에 대입하여 위험 수준을 산출하고 관리하여 운항 안전 목표를 증진한다.

그리고 SORA를 통해 평가된 위험 완화 전략과 운항 안전 목표에 대하여 인적 요소와 자동화 요소 중 어느 쪽을 더 보완하여 협업된 안전 향상을 할지 각 범주별 사고율과 신뢰도를 참조하여 간소화된 항공기 운항(SVO) 방안을 마련한다.

Table 5. Non-Scheduled Part 135 accidents (Helicopters), 2018

Defining event	Total Accident	
	Fatal	Non-Fatal
System malfunction(non-powerplant)		3
Loss of control-inflight	1	1
Abnormal runway contact		2
Low altitude operations	1	
Collision with obstacle (T/O & L/D)	1	
Ground handling		1
Loss of control-ground		1
Other		3

Source: NTSB(National Transportation Safety Board)

Table 6. The Top 10 leading causes of fatal general aviation accidents 2001-2016

1	Loss of control inflight(LOC)
2	Controlled flight into terrain(CFIT)
3	System component failure powerplant(SCF-PP)
4	Fuel related(FUEL)
5	Unknown or undetermined
6	System component failure non powerplant(SCF-NP)
7	Unintended flight in IMC(UIMC)
8	Midair collisions(MAC)
9	Low-Altitude operations(LALT)
10	Other

Source: NTSB(National Transportation Safety Board)

3.3.3 간소화된 항공기 운항(SVO) 적용

Table 6은 NTSB의 2001-2016년 사이에 발생한 General Aviation 치명적 사고 원인 10가지이다.

Table 7은 SVO 인증을 위해 분류한 기량범주, 사고범주, 사고율, 신뢰도에 관한 예시 통계표이다.

좌측 기량범주는 FAA가 조종사를 대체할 자동화 성숙도가 필요한 영역에 대해 조종사 설문을 기초로 분류한 항목들 중 통신을 제외한 조종사 훈련과 연계한 12개 항목이다. 귀속사고범주는 치명적 사고 원인 사항들을 조종사 과실(75%) 및 시스템 문제와 기타 원인으로 분류한 후 세분화하였다. 귀속사고율은 사고범주 각 항목에 대한 사고 백분율이다.

제안신뢰도는 CFR 14 PART 91(일반항공운항) 및 PART 135 (Commuter와 주문형 운항)에서 추출된 운항 사고데이터로 기량범주에 상대적 가중치를 적용하여 산출한 결과 값이다.

이를 토대로 산출한 2004-2013년 사이 주문형(on demand) Helicopter 운항에 대한 치명적 평균 사고율은 시간당 3.75×10^{-6} 이다.

Table 7의 SVO 인증을 위한 신뢰도 요건은 조종사 기량에 대한 상대적 신뢰도 수준을 평가하는 데 사용될 수 있다. 또한 SVO를 지원하는 eVTOL 항공기의

자동화를 위한 인증에도 사용할 수 있다.

특정 사고에 대한 사고범주와 사고율을 통해 신뢰도 분석된 조종사 기량범주는 맞춤형 비행 훈련 프로그램 개발 및 자동화 향상을 위한 eVTOL 항공기의 SVO 시스템 인증 표준 설정에 도움이 된다.

SORA는 규제 안전 기준 및 위험 관리에 적용하여 규정 준수 및 안전을 보장하고 위험을 최소화하는 것을 목표로 하고 있다.

SVO는 eVTOL 항공기의 사용성과 안전성에 중점을 두어 조종사와 운용자가 인적요소와 자동화의 협업을 통해 eVTOL 항공기를 효과적으로 관리하고 운용을 간소화하는 데 중점을 두고 있다.

그러므로 Powered-Lift 항공기 조기 도입을 위한 안전 중심 운항체계 수립을 위해서는 특정 운항 위험도평가(SORA)와 간소화된 항공기 운항(SVO)의 장점을 융합하여 운용하는 것이 효과적이다.

이를 통해 Powered-Lift 항공기 운항의 안전성과 경제성이 높아질 것이며, 간소화된 항공기 운항(SVO)은 미래항공 모빌리티(AAM) 시대 자율운항으로 가기 위하여 운항 안전을 준비하는 중간적 과정이 되게 된다.

IV. 결 론

국내 미래항공 모빌리티(AAM) 운항의 시작은 많은 항공인들의 기대보다 여러 사유로 2-3년 늦어질 것으로 예상된다. 그러나 이것은 Powered-Lift 안전 운항을 준비할 좋은 기회라 생각된다.

본 연구에서는 eVTOL 항공기가 자동화된 첨단기술을 적용했음에도 불구하고 처음 개발된 기체 유형에서 처음 운용하는 단일조종사운항(SPO)으로 많은 잠재적 운항 위험이 존재할 것으로 분석되었다.

연구 결과, 새롭고 고유한 형식의 eVTOL 항공기 운항 안전을 높이기 위해서는 관련 항공 안전법 제정 및 제도의 마련과 동시에 표준자격증명(ACS)을 개발해 모의비행훈련장치에서의 충분한 훈련과 적응 과정이 필요하다. 그리고 차세대 운항안전과 경제적 운항을 달성하기 위해서는 단일조종사자원관리(SRM)와 특정 운항 위험도평가(SORA) 관련된 연구 및 간소화된 항공기 운항(SVO) 체계 개발이 필요할 것으로 평가하였다.

본 연구 결과의 시사점은 Powered-Lift 항공기의 안전 운항체계 구축에서는 기존 상업용 항공기에서 운용 중인 2 CREW를 기반으로 한 CRM 관련 안전 체계

Table 7. Reliability requirements for certification

(조종사)기량범주	귀속사고범주	귀속사고율	제안신뢰도
Aircraft handling	LOC	47.0%	1.76E-06
Navigation	CFIT	11.0%	4.13E-07
Aircraft system emergency	SCF-PP	8.0%	3.00E-07
Systems management	FUEL	6.0%	2.25E-07
Preflight inspection	SCF-NP	4.0%	1.50E-07
Decision making	UIMC	4.0%	1.50E-07
Detect & avoid	MAC	4.0%	1.50E-07
Takeoff & landing	LALT	3.0%	1.13E-07
Planning	All others	3.3%	1.22E-07
Terminal procedures	All others	3.3%	1.22E-07
Taxiing	All others	3.3%	1.22E-07
Cockpit/passenger emergency	All others	3.3%	1.22E-07
	TOTAL	100%	3.75E-06

Source: GAMA SVO

조종사 과실 75%

로의 접근방식이 유효하지 않으며 운영의 경제성도 달성하기 어렵다는 것이다. 그리고 조기 도입과 운항의 성공을 위해서는 FAA, EASA (European Union Aviation Safety Agency) 등 선진항공 당국의 Powered-Lift 관련된 항공 안전법과 안전관리 기법을 연구하여 한국 실정에 맞는 안전 운항체계를 준비해 진행해야 한다.

연구의 제한사항은 아직 eVTOL 항공기 인증 통과와 운항이 시작되기 전이므로 관련 정보가 충분치 않아 분석과 평가에 한계가 있어 운항 안전의 방법론적 측면에서 제한한다.

연구 결과를 통해 Powered-Lift 항공기 조기 도입과 운항의 성공을 위해서는 eVTOL 항공기의 도입과 운용이 처음이므로 운항 안전 관련하여 항공 운송사업자와 실증 담당 기관인 항공우주연구원 및 인증 허가 기관인 항공안전기술원 그리고 국토부 항공 안전 부서와의 긴밀한 협조와 조율이 필요하다.

그리고 대한민국 저고도 공역은 앞으로 미래항공 모빌리티(AAM)의 다양한 Powered-Lift 항공기와 경비행기, 헬리콥터, 무인기가 함께 사용하게 된다. 그러나 이러한 다양한 비행체들이 공동으로 이용해야 하는 기본 항공 인프라인 ADS-B 등 관련 항행시설들은 부족하고 활용도 또한 여러 사유로 제한적 사용에 그치고 있다. 차세대의 항공 안전과 다양한 비행체의 자율운항 시대를 준비하기 위하여 저고도 항행 인프라 및 시설의 확충과 활용도를 높여야 한다고 판단된다.

최종 결론으로 Powered-Lift 안전 체계 수립 및 관련된 저고도 공역 인프라 구축은 SSP(국가항공안전프로그램)과 SMS(안전관리시스템)의 통합적 항공 안전관리 차원에서 수립되고 구축되어야 한다.

References

1. FAA, "Integration of Powered-Lift: Pilot Certification and Operations; Miscellaneous Amendments Related to Rotorcraft and airplanes, RIN 2120-AL72, FAA, DOT, Washington DC, 2024, pp.78-112, 182.
2. Karl, D. B., Walter, W. J., and Paul, C. S., "Conceptual framework for single pilot operations", International Conference on Human-Computer Interaction in Aerospace, Santa Clara, California, USA, 2014, pp.1-8.
3. Elan Head, "Special report: Seeking lessons for eVTOL pilot training in the F-35", THE AIR CURRENT, Defense Technology, 2024, Available from: <https://theaircurrent.com/technology/special-report-evtol-pilot-training-f-35/> pp.1-14.
4. Li, C. W., Wang, Y., Korek, T. W., and Braithwaite, G., "Future flight deck design: Implementation of a touchscreen as flight inceptor for single pilot operation", SSRN Electronic Journal, 2023, pp.1-5.
5. KIAST, "OPPAV Operational Certification System Research", 2023, Available from: http://www.kiast.or.kr/kr/sub06_08_03_01.do
6. Baek, U. R., Lee, E. H., Kim, J. H., and Lee, K. C., "A study on the risk-based model for validation of civil aircraft", Journal of Aerospace System Engineering, 12(4), 2018, pp. 1-8.
7. Ministry of Land, Infrastructure and Transport Affairs, "Approval for Flight Simulation Training Devices", Sejong City, 2024, pp.5-11, 429-439.
8. FAA, "Commercial Pilot for Powered-Lift Category Airman Certification Standards", 2024, Available from: <https://asa2fly.com/content/test-standards/ACS-2.pdf> pp.49-57.
9. NTSB, "2018 NTSB US Civil Aviation Accident Statistics, Part 135 Commuter and On-Demand Carriers", 2018, Available from: <https://www.nts.gov/safety/data/Pages/AviationDataStats2018.aspx>
10. NTSB, "General Aviation Safety", 2018, <https://www.faa.gov/newsroom/general-aviation-safety?newsId=21274>
11. JARUS, "JARUS Guidelines on Specific Operations Risk Assessment (SORA)", JAR-D-EL-SRM-SORA-MB-2.5, Germany, 2024, pp. 21-57.
12. Christoph, T., Florian, N., Johann, C. D., Sebastian, S., and Jorg, S., Dittrich1,

- "Geofencing requirements for onboard safe operation monitoring", CEAS Aeronautical Journal, 2020, pp.1-13.
13. GAMA, "A Rational Construct for Simplified Vehicle Operations(SVO)", GAMA EPIC SVO Subcommittee Whitepaper, Vision 1.0, Washington, DC, 2019, pp.1-16.
14. Yoon, H. S., "ADS-B Joint development for advanced air mobility and general aviation", Journal of Advanced Navigation Technology, 20(6), 2024, pp.151-156.