

SMS 기반의 도심항공교통 운항 적합성 안전평가

UAM Flight Operation Safety Assessment Based on SMS

최지현*
진에어

Jihun Choi*

Jin Air, Seoul, 07802, Korea

[요약]

본 연구는 K-UAM 로드맵을 바탕으로 성공적인 UAM 사업의 초기 정착을 위하여 SMS에 기반한 UAM 운항 안전평가를 수행할 수 있는 최적의 방안을 제시한다. UAM 상용화는 국가의 역량을 집중하여 진행 중이나 사업화를 위한 기술개발에 치중되어 있으며 UAM의 안전관리의 적용에 관한 논의는 충분히 이루어지지 않고 있다. 따라서 이 연구는 운항학적 관점에서 UAM 운항 생태계의 안전성을 평가하는 방법을 제안하고자 하며, 이를 위해 민간항공에 적용중인 SMS 기반의 FOSA 방법론을 활용하는 방안을 제시한다. FOSA는 운항 안전 적합성을 평가하는 방법으로 PBN 운항 환경에 적용된다. 이 연구는 UAM 안전평가 담론에 대한 논의를 시작하는 계기로써 중요한 의미를 가지며 본 연구에서 제시된 안전평가 사례는 UAM 상용화 목표 달성과 UAM의 안전운항에 기여할 것으로 본다.

[Abstract]

Based on the K-UAM roadmap, this study evaluated the safety for the initial UAM demonstration project and operation. Research in each field is underway for early settlement of UAM, but the progress of research is showing limitations without clear regulations and lack of operational experience. This study aims to find a way for UAM to operate in reality, and for this purpose, the defense system for evaluating the safety of civil aviation was applied as SMS. In addition, the technical elements of the maneuvering of UAM aircraft were reviewed from a flight perspective. As a result, an unexpected problem was derived in the take-off and landing stage of the current airspace, flight corridor, and operation stage. Based on this, alternatives were derived and suggested to successfully complete the UAM demonstration project by FOSA which is Risk assessment Tool. Therefore, if the direction of UAM research is set by citing the results of this study, it is expected to contribute to the safe operation of UAM.

Key word : K-urban air mobility (K-UAM), Flight operational safety assessment (FOSA), Performance based navigation (PBN), Safety management system (SMS), Risk management.

<https://doi.org/10.12673/jant.2024.28.5.610>



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 30 September 2024; Revised 27 October 2024
Accepted (Publication) 30 October 2024 (31 October 2024)

*Corresponding Author; JiHun Choi

Tel: *** - **** - ****

E-mail: airliner1004@gmail.com

I. 서론

도심항공교통 (UAM; urban air mobility)은 2025년 상용화를 목표로 K-UAM 로드맵에 따라 UAM Team Korea 구성과 Grand Challenge 사업을 통해 정부 주도로 산·학·연이 협력하고 있으며, 약 700조 이상의 예산을 편성하고 UAM 생태계를 구축하고 있다 [1]. 하지만 UAM R&D (research & development) 연구·개발의 진행 상황을 보면, UAM 항공기의 운항 가능성에 대한 연구보다는 기술체계 도입 및 시스템 개발에 집중되어 있다. 이러한 연구 동향을 운항 적합성 평가 항목을 중심으로 검토한 결과 UAM 항공기의 운항 측면에서 개선해야 할 사항이 도출되었다. 연구의 범위는 실증사업 장소로 선정된 서울시로 한정한다.

SMS(safety management system)의 적용은 위험도 관리를 통해 식별된 위해요인을 제거하고 안전 목표를 유지 또는 발전시키는 데 목적이 있다. 현재 UAM 연구는 위험도 관리의 과정에서 UAM 운항환경의 위해요인을 식별하는 초기 단계로 볼 수 있다. SMS는 안전을 위협하는 위해요인을 조기 식별하여 대응할 수 있는 효과적인 안전관리 방안이다.

본 연구는 SMS에 기반한 FOSA (flight operational safety assessment) 기법을 적용하였으며 현재 개발 시점에서 UAM 항공기의 이착륙과 접근, 순항 단계에서 식별된 위해요인을 경감하고 선제적으로 대응하고자 한다.

II. 연구의 배경

2-1 문제제기

UAM 실증은 시계비행방식을 적용한다. 그러나 UAM 항공교통 인프라 개발은 PBN (performance based navigation), CNS/ATM (communication, navigation, surveillance / air traffic management), CNSi (communications, navigation surveillance, and information) 기술위주로 개발이 추진되고 있다[2]. 이것은 실증환경에서 시계비행방식을 기준으로 적용하는 것과 이를 지원하는 UAM 항공교통관제의 기술 방식과 모순이 발생한다. SMS 측면에서 현재의 UAM 개발방식은 Reactive 접근 방법을 적용하고 있어 Predictive 접근 방법으로 전환이 요구된다. UAM 운항 환경은 지형, 장애물, 빌딩풍, 난기류의 영향을 받는다. 이러한 위해요인을 기술적으로 극복하기 위해서는 결국 RNP AR(required navigation performance - authorization required) 기술의 적용이 요구된다. FOSA는 이러한 운항환경의 안전을 평가하는 SMS 기법이다.

2-2 FOSA 방법론

본 연구에서는 ICAO Doc 9997 및 ANNEX 19 SMS에 소개된 FOSA 방법을 활용한다. FOSA는 지형지물, 장애물, 산악지형에 적용한 PBN 방식의 항공인프라에 대한 안전성을 평가하는 방법으로 UAM 생태계의 안전성을 평가하는 데 적합하다[3].

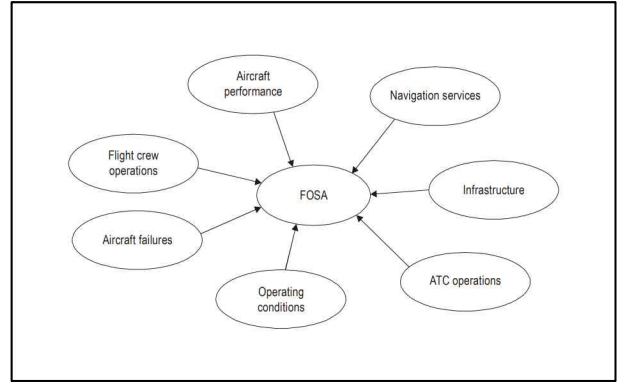


그림 1. FOSA 고려요소

Fig 1. Elements to consider in a FOSA.

미국 FAA(Federal Aviation Administration) 및 유럽항공안전청(EASA; European Aviation Safety Agency)은 FOSA를 적용하여 운항 안전평가를 수행하고 있다. 이런 점을 착안하여 FOSA 기법에서 제공된 안전평가 요소를 UAM 운항 안전평가에 적용하여 UAM 운항 안전성을 평가하고 식별되는 위해요인을 사전에 경감조치 할 수 있다. FOSA는 운항 필수조건, 항공기 성능의 한계, 운항환경을 예측하면서 반복적으로 안전성을 평가하는 수단이며, 위해요인에 직면했을 때 즉각 대응할 수 있는 안전평가 수단이다[4]. FOSA의 고려요소는 그림1과 같이 7개 분야로 구성되어 있다.

FOSA는 운항 조건, 항공기 및 환경의 각 특성에 대해 모든 고장 조건이 평가되고 필요한 경우 안전 기준을 충족하도록 안전조치가 시행되도록 한다. FOSA 평가는 절차 설계, 항공기 성능, 비행절차 및 운항환경 요소의 상호 의존성에 적절한 주의를 기울여야 한다.

2-3 선행연구

UAM 안전관리 기법의 안전평가 방법 연구는 미비한 실정이다. 이 연구에서는 UAM 운항환경을 분석한 선행연구를 통해 UAM 비행회랑 구성의 문제와 UAM 운항환경의 해결과제를 식별하였다. 운항환경을 분석한 대표적 연구는 김용욱(2023)의 연구로써 UAM 비행회랑 설계를 위한 기준을 제시하였다[5].

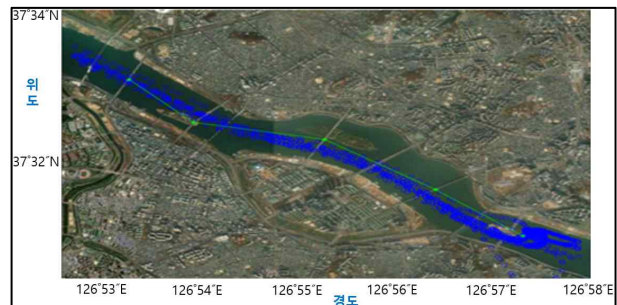


그림 2. 한강(노들섬)회랑 항적자료

Fig 2. Navigation data of Han River(Nodeul Island) corridor.

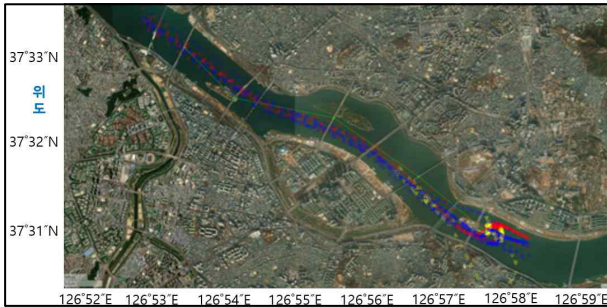


그림 3. 한강(노들섬)회랑 항적자료 MATLAB 분석
 Fig. 3. Analysis of MATLAB in the Hangang River(Nodeul Island) corridor navigation data.

그림2는 한강(노들섬)회랑의 항적자료를 분석한 결과이며 회전의 항공기 22편의 비행항적을 대상으로 고도 800ft 이상에서 유효 항적 수 609개를 분석한 결과이다.

그림3은 비행항적 분석에 사용된 항적인 총 22편 3,000개 항적에 대하여 한강회랑 구간(JP#1~JP#6)에서 각 참조점을 연결한 연장성(중심선)과 항적의 이격거리를 측정된 결과로, 평균 이격거리는 -91 m이며, 표준편차는 175 m, 최대값은 470 m 및 최소값은 -696 m이다.

이 선행연구에서 보듯 한강회랑을 비행한 회전의 항공기의 비행범위는 175m로 도심지역에서 운항을 해야 하는 UAM 항공기의 비행회랑의 기준을 설정하는 데 문제가 있다. 연구의 결과에서 보듯이 UAM 운항방식에 대한 재평가와 UAM 운항환경에 대한 안전평가가 동시에 요구되며 안전관리시스템 도입과 적용이 필요한 시점이다.

III. UAM 운항 적합성 안전평가

UAM 공역은 고도 300M~600M 범위로 지정된다. UAM 상용화에 있어 예측되는 위험은 도심지역의 고유특성과 관련이 있다. 특히 인적요인, 장애물, 지형, 고층건물로 이루어진 복잡한 도심환경, 생태학적 위해요인 등 운항 중 예측되는 위험들이 산재하다[6].

UAM 비행회랑 설계를 위한 기존 연구에서 보듯 VFR(visual flight rules) 비행 방식에서 비행회랑을 이용한 UAM 운항 인프라 구축은 활용이 제한적이며 미래의 신 교통체계를 구성하는 기술로 적용하는데 제한적이다. 따라서 UAM 체계에 적합한 기술의 적용과 안전관리 기법을 적용하여 사례 연구를 진행하였다.

본 연구는 첫째, FOSA 구성요소를 UAM 생태계에 맞도록 재구성하여 UAM 운항 적합성 안전평가 구성요소를 도출하고 UOSA(uam operation safety assessment) 기법을 정립하였다. 둘째, UOSA 기법을 통해 예상되는 위해요인을 식별하였고, 경감 조치 방안을 모색하였다. 또한 일련의 연구과정을 통해 SMS 기반의 UOSA기법의 활용 가능성을 확인하였다.

3-1 FOSA 구성요소

표 1. 운항 적합성 안전평가 고려사항

Table 1. Consideration of operation safety assessment.

Classify	Content
AERODROME	Flight Schedule
	OpSpec Amendment
	Approval by military AB
	Unfamiliar off-line station
RUNWAY DATA & TAKEOFF/LANDING PERFORMANCE	Re-fueling
	Elevation
	Runway Physical Characteristics
	Takeoff performance
	Landing performance
	Lighting
	ATS Communication facilities
	Noise abatement procedure
	Climatological data
	Flight chart
NAVAIDS & APPROACH PROCEDURE	STAR, obstacles
	SID, Obstacles
	Nav aids & approach procedures Navigation(EDTO,RVSM, RNP)
	En route obstacles(MEA, MORA,MOCA)
	Ground maneuvering
FLIGHT SAFETY & SECURITY	Alternate airports
	FIELD SURVEY
	SIM TEST
	SMS

운항 적합성 안전평가 고려사항은 표1과 같으며 FOSA 구성요소와 동일하거나 유사한 성격을 갖는다. 따라서 운항 적합성 안전평가 고려사항과 FOSA의 구성요소를 비교하여 UAM 운항 적합성 안전평가 요소를 도출하였다. 본 연구는 서울시 버티포트 후보지를 대상으로 SMS 기반의 FOSA 기법을 UAM에 적용한 최초의 사례이며 향후 UAM 운항 적합성 안전평가를 수행하는 방법론 개발과 적용에 관한 방향성을 제시한다.

3-2 UAM 운항 적합성 안전평가 구성요소

PBN의 운항 적합성 안전평가에 활용되었던 FOSA 기법은 민간 항공기의 안전운항을 보장하는 대표 안전관리 기법으로 활용되고 있다.

UOSA는 FOSA의 구성요소를 대입하여 설계된 UAM 운항 적합성 안전평가 방법이다. UOSA 기법에서 가장 중요한 과정은 위해요인의 정확한 식별이며 식별된 위해요인을 경감하는 재발방지 대책 마련하는 것이다.

이를 위해서는 UAM의 운항 생태계에 대한 면밀한 분석이 요구된다. UAM 기체성능과 한계, 기상상태, 도심지역 특성, 조류활동, 장애물, 지형지물 등을 고려해야 하며, UOSA 기법의 반복 수행을 통해 지속적인 SMS 이행과 유효 수준의 안전 수준에 도달해야 한다[7].

표2는 FOSA와 UOSA를 비교하여 UAM 운항 적합성 안전평가에 적용할 수 있도록 구성요소들을 도출한 결과이다. FOSA의 구성요소들을 유지, 변경, 삭제로 구분하여 향후 UOSA 기법에 필요한 필수 구성요소들로 구분하였다.

표 2. UAM 운항 적합성 안전평가 요소

Table 2. Consideration of UAM operation safety assessment.

Classify	Analysis Contents		Note*
	FOSA	UOSA	
Verti-port	Flight Schedule	Flight Schedule	P
	OpSpec Amendment	-	D
	Approval by military AB	MND Cooperation	P
	Unfamiliar off-line station	-	D
Verti-port & Take-Off/Landing Performance	Re-fueling	Re-Charging Station	C
	Runway Elevation	Vertiport Elevation	C
	Runway Physical Characteristics	Vertiport Physical Characteristics	C
	Takeoff performance	Takeoff performance OAT(15)	C
Navids & Approach Procedure	Landing performance	Landing performance OAT(15)	C
	Lighting	PAPI, ALS	P
	ATS Communication facilities	TWR, Weather INFO, GRD, RAMP CONTROL	C
	Noise abatement procedure	Noise abatement procedure	C
Flight Safety & Security	Climatological data	Temperature, Precipitation, Wind	P
	Flight chart	Flight chart	C
	STAR, obstacles	STAR, obstacles +Altimeter Set	C
	SID, Obstacles	SID, Obstacles +Altimeter Set	C
Navids & Approach Procedure	Navids & approach procedures Navigation (EDTO,RVSM,RNP)	RNP,RNAV,VFR	C
	Enroute,obstacles (MEA,MORA,MOCA)	Safety Altitude	C
	Ground maneuvering	3FT RA(Hover Taxi), IGE, OGE	C
	Alternate airports	Alternate Vertiport	C
Flight Safety & Security	Field Survey	Vertiport Survey	C
	SIM Test	SIM Test	C
	SMS	SMS	P

*P=Preserve / C=Change / D=Delete

3-3 UOSA 적용 분석 결과

UOSA 기법을 적용하여 사례 분석을 수행하였다. 서울시 버티포트 후보지 한강공원 제2주차장을 대상으로 정했으며 UAM 운항단계별로 구분하여 분석을 수행하였다.

UOSA의 구성요소 중 실증사업구역의 지정을 위한 검토항목(제2조 제2항 관련)과 운항학적 관점에서 UAM 공역 사용가능여부, 출발지와 목적지 구간의 거리와 항공기 기동 특성을 우선 고려하였다.

그 결과 VTOL(vertical take-off and landing)의 정상 이착륙(take off, landing), Climb, Cruise, Descent 단계에서 UAM 항공기 운항의 비효율적인 문제점이 식별되었으며 특히 Approach 구간에서 거리대비 고도 처리의 문제점이 식별되어 위험경감 대책이 필요한 것으로 도출되었다. 예를 들어 버티포트 대상지 한강공원 제2주차장과 김포공항의 거리는 대략 7NM 이내로 UAM 공역 최대고도 600M를 순항고도로 선정하기에는 부적절하였다. 서울시 버티포트 후보지 대부분의 경우 UAM 공역 고도 300M~600M 범위를 적용할 경우 UAM 비행회랑의 고도 설정에 문제점이 식별되며 UAM 공역에서 고도설정 범위에 대한 재검토가 필요한 것으로 분석되었다.

표 3. UOSA 안전관리

Table 3. UOSA safety management.

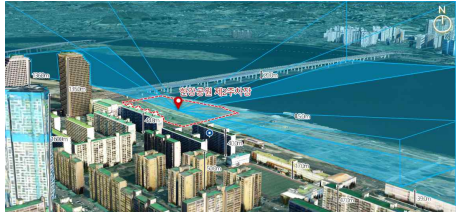

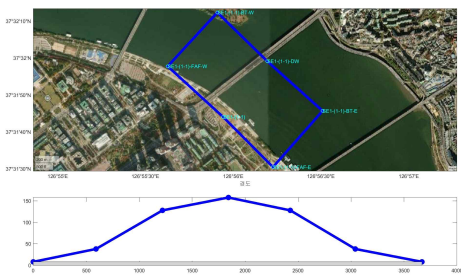
ITEMS	RISK MANAGEMENT		
Navids & Approach Procedure			
Risk Assessment #1			
	RED	YELLOW	GREEN
Risk Mitigation #1			
	RED	YELLOW	GREEN
Risk Mitigation #2	FIX	WAYPOINT	
	SE1-(1-1)	N373144.0412 E1265556.5728	
	SE1-(1-1)-FAF-E	N373134.8701 E1265607.8222	
	SE1-(1-1)-DL-E	N373134.8033 E1265618.647	
	SE1-(1-1)-BT-E	N373145.6873 E1265630.5479	
	SE1-(1-1)-DW	N373159.1588 E1265611.6486	
	SE1-(1-1)-BT-W	N373212.3697 E1265554.6064	
	SE1-(1-1)-DL-W	N373202.5271 E1265543.2244	
	SE1-(1-1)-FAF-W	N373153.5756 E1265543.435	
	SE1-(1-1)	N373144.0412 E1265556.5728	
Risk Assessment Criteria			
	RED (Unsatisfactory)	YELLOW (Acceptable)	GREEN (Satisfactory)

표 3과 같이 서울시 버티포트 후보지 한강공원 제2 주차장 UOSA를 적용하여 안전평가를 수행한 결과 Navids & approach procedures Navigation 요소에서 항공기의 Energy Management가 위해요인으로 식별된다. 이 지역은 북쪽 지역은

P73공역 제한과 접근 거리의 한계, 동서로 진출입은 가능하나 인접 버티포트와 노선 고려 시 구간 거리가 짧아 순항고도까지 상승하는 거리, 시간과 순항고도에서 강하, 접근하는 거리, 시간에서 위해요인이 식별된다.

이 경우 순항고도로부터 직진(straight-in) 진입이 제한되는 상황으로 강하구간과 접근구간의 수정이 요구된다. 그럼에도 VFR 적용시 이착륙 요건은 충족하므로 수용가능함(acceptable)으로 평가하였다.

표3에서 식별된 위해요인은 맞춤형 시계 장주 (tailored visual pattern) 또는 PBN 설계를 준용하여 위험을 경감할 수 있다. 1차 위험경감 단계에서 장주(traffic pattern)를 적용하여 고도처리가 가능하게 설계하였다. 2차 위험경감 단계에서는 비행향로 좌표를 명시하여 PBN에 기반한 위험경감 기준을 제시하였다. 위험경감 조치 위 후 위험평가는 충족(satisfactory)로 재평가 되었다.

그림 4는 서울시 버티포트 후보지 잠실헬기장을 대상으로 UOSA 방법을 적용한 위험경감의 사례이다. 그림4와 같이 UAM 항공기가 고도 300M에 위치할 경우 최소 반경 0.44NM의 장주(traffic pattern) 적용이 요구된다. UAM 항공기의 강하구간 비행제원은 대역기 최적인 항공기의 비행제원을 참고하여 접근속도 60KTS, 강하율 700FPM으로 적용하였다. UAM 항공기는 순항고도 300M에서 분당 700FPM 강하시 약86초가 소요되며 총 필요 비행거리는 대략 1.4NM로 산출된다. 결론적으로 장주(traffic pattern) 적용시 버티포트로 부터 최소 ABEAM 0.88NM 이상의 위치에서 선회와 강하시작이 필요하다.

UOSA는 SMS의 안전보증 기능인 변화관리(the management of change) 절차와 유사한 형태로 진행된다. 위험경감은 변화관리를 적용하며 단계별 순차적으로 식별된 위해요인을 줄여가는 과정을 반복된다. 위험경감의 연속성은 지속 유지되어야 하며 식별된 위해요인을 사전에 차단하는 순환구조로 운용된다. 궁극적으로 안전관리의 목적은 허용 가능한 안전 목표를 유지 또는 발전시켜 나가는 데 있다.



그림 4. UOSA 방법을 적용한 위험경감 사례
 Fig 4. A case of risk mitigation using UOSA method.

IV. 결 론

UAM은 다양한 위험을 내재한 사업으로 철저한 안전관리 내에서 진행되어야 한다. 본 연구는 안전한 하늘길 개척을 위한 SMS 기반의 UAM 안전관리 해결방안을 모색하였다. 선제적인 SMS 관리는 예측된 위험을 경감하고 방지함으로써 치명적인 UAM 사고를 줄일 수 있을 것이며 UAM 사업이 지속적으로 진행될 수 있도록 기여한다. UAM 개발 과정에서 항공사고 유무는 UAM 상용화에 영향을 미치므로 주의가 필요하다.

FOSA 기법은 UAM 운항체계의 안전을 평가하는 도구로 자체개념을 그대로 적용하기에는 한계가 있다. 때문에 이 연구에서는 UAM 고유 특성을 반영하여 UAM 운항 적합성 안전평가(UOSA)를 제시했으며 실 분석 사례를 소개하였다. 이 사례는 UAM 운항 안전 평가요소 중 일부 핵심요소만 적용한 사례로 차후 모든 요소를 적용하여 UAM 운항 안전평가를 강화해 나갈 수 있다. 또한 UAM 운항 안전평가는 전문지식, 시뮬레이션 검증, 시범 등 다양한 검증방법을 적용하여 신뢰성을 향상시킬 수 있다.

향후 해결과제로 UOSA는 UAM 운항환경을 구성하는 CNS/ATM의 명확한 법제화와 선제적 시행이 요구된다. 이는 UAM 운항을 위해서는 연구에서 식별된 위험을 경감하는 방안으로 성능기반항행(PBN) 도입이 불가피하기 때문이다. UAM 상용화 단계에서 PBN 적용은 K-UAM 로드맵 상 불확실하여 효과의 논란은 불가피하다.

FOSA를 기반으로 한 UOSA는 향후 UAM 운항 조건, 항공기 및 개별 환경 특정상황에 따른 모든 고장 조건이 평가됨과 동시에, 필요시 안전 기준을 충족할 수 있도록 유형 구분 및 해당 기준 완화가 원활하도록 보장되어야 한다.

UAM 상용화는 운항 안전성 및 사회적 인식의 변화가 충분히 보장되었을 경우 무인화 단계가 빠르게 진행됨과 동시에 이·착륙 지점이 대폭 확대 될 것이다. 이에 UAM 운항학적 측면에 따른 고려사항이 복합적으로 수행되어야 한다. 이 연구에서 제시한 UOSA의 유효성을 검증하기 위해서는 향후 추가연구가 요구된다.

References

[1] MOLIT, *K-UAM concept of operations 1.0*, UAM Team Korea, Sejong, Korea, Sep 2021. Retrieved from <https://www.kaia.re.kr/portal/cargos/attachFileDown.do?foSeqno=4020&seqno=7638>

[2] ICAO, *Annex 19: Safety Management System*, 2nd ed. Montreal, Canada, 2016.

[3] ICAO, *Doc 9997: Performance-based Navigation (PBN) Operational Approval Manual*, 2nd ed. Montreal, Canada, p. 131, May. 2020.

- [4] Cláudia Alexandra Fernandes Cabaço, *Flight Operational Safety Assessment Requirements for New Procedures (RNP-AR)*, Universidade Tecnica de Lisboa, Oct. 2010.
- [5] Y. O. Kim, A method for flight mission determination using urban helicopter flight operation analysis, Ph. D. dissertation, Hanseo University, Republic of Korea, 2023. Retrieved from <https://www.riss.kr/link?id=T16837975>.
- [6] Y. S. Kim, “Analysis of human casualties on the ground in urban area due to UAM crash,” *Journal of Advanced Navigation Technology*, Vol. 26, No. 5, pp. 668-676, Oct. 2022. DOI: <https://doi.org/10.12673/jant.2022.26.5.281>.
- [7] Safety Management International Collaboration Group (SM ICG), *Hazard Taxonomy Examples*, July. 2018.
- [8] J. H. Choi, “A study on the selection of UAM pilots and establishment of training,” *Journal of Korean Aviation Management Association*, Vol. 30, No. 3, pp. 132-139, Sep. 2022. DOI: <https://doi.org/10.12673/jant.2023.27.3.269>.



최지현 (Jihun Choi)

1997년 2월 동국대학교 북한학과(정치학사),
2008년 2월 동국대학교 북한학과(정치학석사)
2023년 2월 한서대학교 운항관리학과(이학박사)
2013년 4월 - 2019년 10월 대한항공 등 B737, B777 부기장
2019년 10월 - 현재 : 진에어 B737 기장 / SMS그룹장
* 관심분야: 항공운항, SMS, 시스템다이내믹스, UAM