

항공사고 및 준사고 조사를 위한 UAS 비행 기록 시스템 파라미터 도출 방안

A Method of Deriving UAS Flight Recording System Parameters for Aviation Accident and Incident Investigation

이 건 희 · 이 중 윤*

아주대학교 시스템공학과

Keon-hee Lee · Joong-yoon Lee*

Department of Systems Engineering, Ajou University, Gyeonggi-do, 16499, Korea

[요 약]

‘UAS 비행 기록 시스템’은 다양한 구성 요소로 이루어진 무인항공기 시스템에 장착되어 비행 관련 데이터를 기록하는 시스템이다. 이 시스템이 기록한 데이터는 유사사고 예방을 위하여 항공사고 및 준사고 조사에 활용되어야 한다. 특히, 운용 위험도가 높은 무인항공기 시스템의 범주에 대해서는 유인항공기의 안전장치 수준에 근접하게, 감항성 확보를 위하여 무인항공기 시스템 특성을 반영한 비행 기록 시스템의 개발이 시급하다. 본 논문은 항공사고 및 준사고 조사를 위해 UAS 비행 기록 시스템의 필요성을 부각하고, 운용 위험도가 큰 ‘Certified Category’를 대상으로 비행 기록 시스템 파라미터 도출 방안을 모색하였다. 이를 위해 Inter-City UAM을 구체적인 사용 사례로 지정하고, 임무 프로파일 및 시나리오로부터 사고 발생과 위해요인을 상정하여 시스템 파라미터 도출에 접근하는 프로세스를 고안하였다. 연구 결과, 이 프로세스를 통해 파라미터 도출이 가능함을 확인하였다.

[Abstract]

‘UAS flight recording system’ is a system that is mounted on an unmanned aircraft system consisting of various components and records flight-related data. The data recorded by this system should be used for aviation accident and incident investigations to prevent similar accidents. In particular, for the category of UAS with high operating risk, safety devices close to that of manned aircraft are required, and it is urgent to develop flight recording systems reflecting the characteristics of the UAS to secure airworthiness. This paper highlights the need for UAS flight recording systems for aviation accident and incident investigations and seek a method to derive flight recording system parameters for ‘Certified Category’ with high operational risk. To this end, Inter-City UAM was used as a concrete use case, and the process of approaching system parameters was devised by assuming accident occurrences and hazards from mission profiles and scenarios. As a result of the study, it was confirmed that parameters could be derived through this process.

Key word : Accident and incident investigation, Flight recording system, System parameter, Unmanned aircraft systems.

<http://dx.doi.org/10.12673/jant.2024.28.1.77>



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 31 January 2024; Revised 26 February 2024

Accepted (Publication) 28 February 2024 (29 February 2024)

*Corresponding Author; Joong-yoon Lee

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

E-mail: leejy@ajou.ac.kr

1. 서론

무인항공기는 조종사가 탑승하지 않은 채로 원격조종 또는 자율적으로 비행하는 항공기로, 사람은 무인항공기의 비행을 원격통신 또는 알고리즘으로 통제한다는 점에서 특성상 유인항공기와 많은 차이를 지니고 있다. 또한 무인항공기가 비행하기 위해서는 다양한 인프라 시설이 뒷받침되어야 하는데, 그로 인해 무인항공기 이외에도 운용 인원, 지상 장비, 공역, 법규 등 측면에서 새로운 개념이 제안되며 무인항공기 시스템(UAS; unmanned aircraft systems)의 개념이 강조되고 있다.

무인항공기 시스템의 활용도 증가로 관련 기술 개발도 눈부신 발전을 이루고 있으나 때로 성숙하지 않은 설계, 운용의 결과는 안전사고의 위험성을 높이고 심할 경우 사고로 이어지는 경우가 발생하고 있다. 이에 따라 무인항공기 시스템에 대한 안전관리의 요구가 유인항공기만큼 제기되기도 한다. 사고 예방을 위한 하나의 방법으로 유사 사고의 재발을 방지하고 국민의 생명과 재산을 보호하기 위한 항공기 사고조사가 있다. 항공기 사고조사의 첫 업무는 사고 발생에 관한 사실 정보를 수집하는 것이며, 사실 정보 수집에 있어서 조사관들에게 많은 도움을 주는 것 중 하나는 비행 기록 시스템이다. 무인항공기 시스템도 그 운용 특성과 환경을 고려한 비행 기록 시스템을 철저히 설계하여 사고조사에 활용하여야 한다. 그림 1은 이를 반영하는 UAS 비행 기록 시스템의 개념을 보여주고 있다.

과거 본 연구의 취지와 유사했던, 무인항공기 비행기록장치의 필요성을 인식하고 이를 설계하기 위한 연구 사례가 있었다. 무인항공기 비행자료 습득 시스템(FDAS; flight data acquisition system)을 고안하여 데이터를 저장하는 비행기록장치, 비행 파라미터를 측정하는 센서의 집합, 처리 및 시각화를 제공하는 소프트웨어 유틸리티 설계 연구[1], 무인항공기의 제한된 양력을 고려하여 비행기록장치의 치수와 무게 최소화를 구현하는 전자 모듈 설계 연구[2], 그리고 충분한 샘플링 속도를 확보하기 위해 SD(secure digital)/MMC(micro memory card)를 활용하여 빠른 데이터 처리를 실현하는 SDR(smart data recorder) 설계에 관한 연구[3]가 수행된 바 있다.

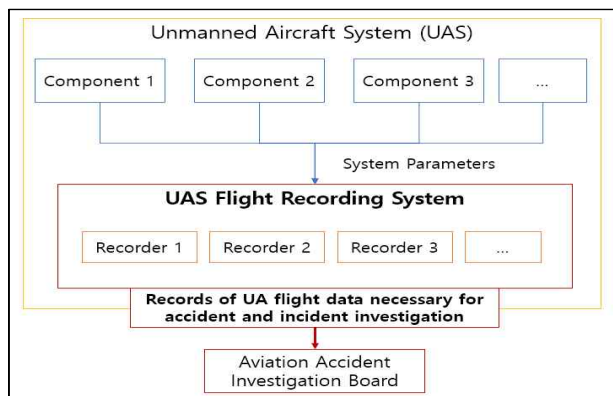


그림 1. UAS 비행 기록 시스템의 개념
Fig. 1. The concept of UAS flight recording system.

다만, 이 연구들은 사람이 탑승하지 않는 소형 무인항공기에 대한 비행기록시스템 설계에 주로 초점이 맞추어져 있었다. 이러한 배경에서 본 논문은 운용 위험성이 더 높은 무인항공기 시스템의 효과적인 사고조사를 위하여 UAS 비행 기록 시스템의 파라미터 도출 방안을 연구한 결과를 제안하고자 한다.

II. UAS 비행 기록 시스템의 필요성 검토사항

2-1 항공사고, 준사고, 사고조사의 정의

항공사고 및 준사고의 개념은 유인 항공뿐만 아니라 무인 항공 분야에서도 적용된다. 무인 항공 분야에서 사고(incident)는 무인항공기가 비행을 목적으로 움직일 준비가 된 시점부터 비행이 종료되고 주 추진 시스템이 정지할 때까지의 시간 동안 사람의 사망 또는 중상, 항공기의 치명적 손상, 항공기의 행방불명이 일어난 사건을 말한다. 준사고(incident)란 같은 시간동안 일어난, 사고는 아니지만 사고 발생 가능성이 컸던 무인항공기 운항 관련 사건을 의미한다[4].

‘항공사고등’이란 용어는 항공사고 및 준사고를 통칭하며, 발생(occurrence)이란 미미한 사건까지 포함한 것을 말한다. 또, 항공 분야에서 사고조사(incident investigation)란 항공사고등과 관련된 정보·자료 등의 수집·분석 및 원인 규명과 항공 안전에 관한 안전권고 등 항공사고등의 예방을 목적으로 항공·철도사고조사위원회가 수행하는 과정 및 활동을 말한다[5].

2-2 항공사고등 조사를 위한 비행기록장치 장착 관련 국내 규정

항공·철도사고조사위원회 운영규정에 따르면, ‘비행기록장치(flight recorder)’란 항공사고등의 조사에 도움을 줄 목적으로 항공기에 장착한 모든 형태의 기록장치를 말하며, 비행기록장치 세부기준은 국제민간항공협약 부속서 6 및 운항기술기준(국토교통부고시)에서 정한 규정에 따른다. 위원회 운영규정에 따르면 항공사고등의 항공기의 비행기록장치에 대한 관리는 사고발생 직후부터 위원회에 귀속된다. 또한 사고조사단장은 비행기록장치 및 항공교통업무 기록을 비롯한 모든 관련 자료에 대해 완전한 접근이 가능하며, 조사에 참여한 관계자가 지체 없이 세부조사를 수행할 수 있는 포괄적 통제권을 가진다[6].

유인항공기 분야는 일찍부터 항공사고 조사 및 준사고를 위한 비행기록장치 장착의 중요성을 강조해왔기 때문에 관련 법과 규정이 비교적 잘 마련되어 있다. 항공안전법 시행규칙에 따르면, 유인항공기 비행기록장치로는 비행데이터기록장치(FDR; flight data recorder), 조종실음성기록장치(CVR; cockpit voice recorder)가 대표적이며[7], 비행 데이터를 기록하거나 조종실 내 음성을 기록하는 장치는 별도 또는 통합적으로 제작되어 사용될 수 있다. 세부적인 비행기록장치의 종류, 성능, 기록하여야 하는 자료, 운영방법, 그 밖에 필요한 사항은 항공안전법 제77조에 따라 고시하는 운항기술기준에서 정하고 있다.

표 1. 고정익항공기 비행기록장치 분류

Table 1. Fixed wing aircraft flight recorders category.

Category	Sub category
Light flight recorders	ADRS (aircraft data recording system)
	CARS (cockpit audio recording system)
	AIRS (airborne image recording system)
	DLRS (data link recording system)
(Note) The image and data link information may be recorded in the CARS or ADRS, respectively.	

표 1은 고정익항공기 비행기록장치 분류표 중 경량비행기록 장치의 종류를 보여주고 있는데, 운항기술기준은 이와 같은 정보를 포함하여 항공기의 감항증명 또는 형식증명 획득 일자과 최대이륙중량에 따라 비행기록장치의 분류와 어떤 파라미터에 대한 데이터를 수집해야 하는지 규정하고 있다. 예시로써 항공 사고 예방을 위하여 무인항공기 시스템의 항공사고 및 준사고 조사에 활용할 수 있도록 비행 기록 장치 또는 시스템의 도입이 필요하나, 운항기술기준에는 무인항공기 시스템 비행 기록 관리에 관한 규제 법령은 별도로 마련되어 있지 않다.

2-3 항공사고 예방을 위한 비행기록장치의 중요성을 다룬 연구

항공사고 조사에 도움을 줄 목적으로 비행기록장치의 장착을 의무화되고 있는 이유는 비행기록장치가 항공사고 예방을 위해 특히 중요한 도구로 인식되어 왔기 때문에 그렇다.

‘항공기 사고조사에 있어 비행기록장치의 중요성’에 관한 연구는 기존 비행기록장치에서 관찰된 기술과 단점의 발전으로 인해 새로운 개념의 비행기록장치가 개발되었으며, 시간이 지남에 따라 더 많은 비행 파라미터를 기록할 수 있는 신뢰성과 성능을 가질 것임을 시사하였다. 따라서 비행기록장치는 항공기 사고조사관이 향후 조사를 수행하고 사고를 예방하기 위한 훨씬 더 나은 도구가 될 것이라 하였다[8].

이 연구의 핵심은 항공기 사고란 각각의 특성이 모두 다른 것이며, 객관적 접근을 통해 다른 기관의 영향력이 미치지 않는 독립적 조사가 이루어져야 한다는 개념에서 시작된다. 비행기록장치는 이를 가능하게 하는 사고조사의 핵심 단계이며, 기록된 파라미터와 녹화된 영상, 녹음된 음성 등의 분석으로 결정적 오류가 어떤 요인에 의해, 언제 발생했는지를 알 수 있다. 무인항공기 시스템도 결국은 항공기를 이용하는 시스템으로, 비행 기록 관리의 중요성은 유인항공기와 다를 바 없다.

2-4 비행 기록 시스템 개발이 시급한 UAS 범주 관련 국제 합의

UAS 비행 기록 시스템은 모든 무인항공기 시스템에 도입되어 비행 기록의 임무를 수행할 수 있다. 그러나, 산업이 함께 발전하면서 이 사고 예방 장치에 대한 수용도를 높이기 위해서는 비행 기록 시스템 개발이 시급한 무인항공기 시스템의 범주를 식별하여 집중적인 연구개발을 도모해야 한다.

이와 관련하여 2019년 JARUS(Joint Authorities for Rulemaking on Unmanned Systems) WG (working group)-7은 다

양한 유형의 무인항공기 시스템과 이 시스템들의 운용에 대한 규제 개입 수준을 설명하는 분류 체계를 수립하는 임무를 맡았다. 이 공동당국은 UAS에 대한 형식 인증, 운용 승인 및 감항성 인증서 발급에 국가 항공 당국이 개입할 수준을 제안하기 위하여 무인항공기 시스템의 범주 개념을 도출하였으며, 이에 위험 기반 접근법(risk-based approach)과 위험 관리의 개념을 적용하였다. 범주화 결과 Category A (open), Category B (specific), Category C (certified)의 범주가 도출되었고, 각 범주에 대하여 운용 제한, 승인, 자격, 설계 승인 등 위험 경감 방안들이 식별되었다. 이 중 Certified Category (Category C)는 가장 큰 위험성을 가진 무인항공기 시스템의 운용 범주로 분류되었다[9].

JARUS는 UAS에 의한 위험에 사람들이 노출되지 않도록 보장하면서 산업이 함께 발전할 수 있는 규제 체계를 설계하는 것을 가장 큰 목표로 하였기에, 안전 규제를 위한 과도한 시스템 설계는 우려하였다. 표 2는 위험 기반 접근법을 채택할 때 주로 고려되었던 위험 요소를 나타내고 있다. 이러한 위험을 고려할 때는 무인항공기(UA; unmanned aircraft)의 성능, 운영 환경 및 규모에 대한 이해가 반드시 요구된다[9].

그림 2는 안전 위험(safety risks) 측면에서 운용 범주를 나누고 범주에 따른 위험 경감 대책의 예시를 제시하고 있으며, 이를 통해 위험이 수용할 수 있는 수준으로 낮아질 수 있음을 보여주고 있다. 이에 의하면 UAS 비행 기록 시스템은 위험 경감 대책의 하나로 포함될 수 있으므로 선행 개발이 필요하다.

다만, 기록 파라미터 및 장착 기준 등의 구체적인 인증 사양은 위험 평가와 사고 재구성 가능성 평가를 거쳐 정해져야 한다.

표 2. 무인항공기 시스템 위험 고려사항

Table 2. UAS risk considerations.

Category	Sub category	Consideration
Operational risks	Safety risks	People on the ground
		Other airspace users
	Other risks	Critical infrastructure
		Property
		Privacy
		Security

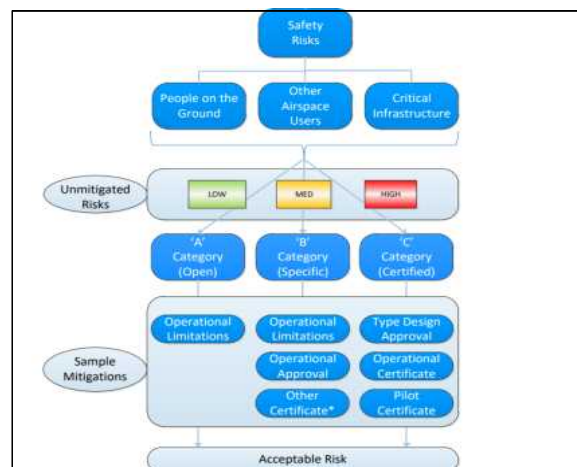


그림 2. 무인항공기 시스템 운용 범주 (안전 위험)
Fig. 2. UAS operational categorization (safety risks).

III. 파라미터 도출 연구 프로세스 및 방법

3-1 파라미터 도출 프로세스

그림 3은 UAS 비행 기록 시스템 파라미터 도출 프로세스를 흐름도로 나타내며, 순서대로 UAS 비행 기록 시스템이 적용될 대상 시스템(SoI; system of interest) 선정, 해당 시스템의 임무 구체화, 임무 중 사고 발생 상정, 그리고 파라미터 도출 방법을 거쳐 기록하여야 할 시스템 파라미터를 찾는 과정이다.

3-2 프로세스 구현을 위한 방법

1) 대상 시스템 선정

첫 번째 단계는 UAS 비행 기록 시스템의 대상 시스템을 찾는 것으로 무인항공기 시스템 운용 개념(ConOps; concept of operations) 및 사용 사례(use case)를 선정하는 것이 포함된다. 그리고 세부적으로 무인항공기 시스템 운용의 위험성이 높아 UAS 비행 기록 시스템의 개발이 시급한 Certified Category의 서비스 및 상위 임무를 선정하여 비행 기록 시스템이 적용될 대상 시스템을 식별한다. 이를 위하여 무인항공기 시스템의 서비스와 관련 타당성을 논한 문헌을 검색하고 분석한다.

2) 임무 구체화

두 번째 단계는 해당 사용 사례의 임무 시나리오를 구체화하고 시나리오별 필요한 시스템의 기능/목적을 인식하는 것이다. 본 연구에서 운용 개념 및 사용 사례 선정 시 참고한 문헌들로부터 상위 임무를 결정하고 대상 시스템의 경제성 등 타당성을 분석한 문헌의 정보로 임무 시나리오를 구체화한다.

3) 사고 발생 상정

세 번째 단계는 임무 중 발생할 수 있는 사고 시나리오를 다양한 측면에서 상정하는 것이다. 이때 사고는 시스템 기능의 실패와 연관이 있으므로, 임무에 따른 기능/목적에 따라 구분하여 기술한다. 특히, 사고 시나리오 상정 시에는 항공 분야의 환경과 무인항공기가 경험한 사고에 대한 정보를 참고하여 스트레스 상황을 주입할 수 있도록 ICAO(International Civil Aviation Organization)의 위험요인 분류 용어집 (hazard definitions and usage notes) 및 항공 발생 분류 체계(aviation occurrence categories)를 참고한다. 이 과정에서 생성형 대화 인공지능인 ChatGPT 프로그램을 병행 활용한다. ChatGPT는 기존에 없던 새로운 것의 유형을 분류할 수 있는 능력과 질문을 거듭할수록 생성 결과를 정교화하고 고차원적으로 변화시키는 능력이 있다[10]. 이러한 능력은 새로운 사고 상황을 상정하고 위험요인을 식별하는 것을 지원할 수 있다고 보인다.

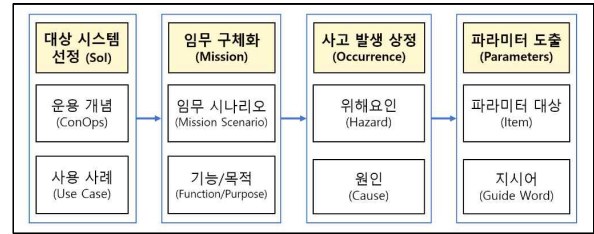


그림 3. UAS 비행 기록 시스템 파라미터 도출 프로세스
Fig. 3. UAS flight recording system parameter derivation process.

4) 파라미터 도출

상정한 사고 시나리오로부터 기록하여야 할 데이터의 파라미터를 도출하기 위하여 HAZOP (hazard and operability) 분석 방법을 적용한다. HAZOP 분석은 시스템 안전 분석의 한 기법으로써 엔지니어링, 화학, 안전, 운용 및 유지보수와 같은 다양한 분야의 전문 지식을 가진 구성원이 팀을 이뤄 시스템 설계 의도의 편향(deviation)을 조사하는 것을 목표로 시스템의 위험 및 운용상의 문제를 식별하고 분석하는 것이다. HAZOP 분석이 가지고 있는 차별점은 주요 지시어와 시스템 다이어그램을 활용하여 시스템 위험요인을 식별한다는 것이다[11].

비행 기록 시스템이 제공하는 정보는 다양한 분야의 전문가에게 사고조사의 실마리를 공유하므로 그 목표가 유사하다. 사고의 발생에 기여하며 이것의 존재 사실을 알 수 있는 위험요인 (hazard)의 종류를 알고 있다면, 비행 기록이 필요한 대상과 파라미터를 역으로 식별할 수 있다. HAZOP 분석 방법을 역으로 활용하기 위하여 HAZOP 워크시트를 가공하여 활용한다. 표 3은 권고되고 있는 HAZOP 워크시트 일부를 보여주며, 표 4는 이를 변형하여 본 연구에서 사용할 워크시트를 보여주고 있다.

HAZOP 워크시트에 임무 시나리오로부터 기능/목적의 사고(결과)가 무엇인지 기술하고, 이에 대한 위험요인과 원인까지의 정보를 담고 이로부터 파라미터를 도출한다. 시스템의 편차를 지시어와 시스템 파라미터의 조합으로부터 알아낸다는 HAZOP 분석의 원리를 역으로 활용한다. 본 연구에서는 변형된 HAZOP 워크시트를 위험요인 식별과 파라미터 도출에 활용한다. 그리고 이를 야기할 수 있는 시스템 파라미터와 편향의 종류를 나타내는 지시어(guide word)를 기술한다.

표 3. HAZOP 워크시트 권고사항

Table 3. The recommended HAZOP worksheet.

Item	Function/Purpose	Parameter	Guide Word	Consequence	Cause	Hazard	Risk	Recommendation

표 4. 변형된 HAZOP 워크시트

Table 4. The altered HAZOP worksheet.

Mission	Function/Purpose	Occurrence (Consequence)	Hazard	Cause	Item	Parameter	Guide Word

IV. UAS 비행 기록 시스템 파라미터 도출 결과

4-1 대상 시스템 선정 결과




본 절에서는 UAS 비행 기록 시스템이 적용될 높은 위험을 가진 무인항공기 시스템의 운용 범주를 선정하고 상위 임무를 결정한다. 이를 위하여 ‘대상 시스템 선정’ 방법에 따라 항공 안전기관 및 연구 기관의 ConOps 및 사용 사례를 분석하였다.

JARUS에 따르면 Category C 또는 Certified Category는 운용 위험성이 가장 큰 무인항공기 시스템의 운용 범주이다. 또한 영국 민간 항공국(CAA; Civil Aviation Authority)에 따르면 Certified Category는 유인 항공과 동등한 위험을 가진 운용을 포함하여 동일한 규제 시스템(무인항공기 인증, UAS 운영자 인증, 원격 조종사 허가 등)이 적용되어야 한다[4]. 여러 안전 장치가 필요한 Certified Category에 대한 인증 사양(CS; certification specification)은 고정익/회전익 항공기, 비행선 및 동력 부양장치와 같은 다양한 형식을 포함할 수 있으며, 무인항공기 자체뿐만 아니라 통제소(control station), 명령 및 제어(C2; command and control)에 관한 사양도 포함할 수 있다[12].

Certified Category의 무인항공기 시스템 운용 개념으로는 승객 수송 및 화물 수송 등이 대표적이다. 유럽항공안전청(EASA; European Aviation Safety Agency)은 이 범주에 해당하는 운용 유형을 표 5와 같이 3가지 사례로 구분하고 있다[13].

표 5에 제시된 것과 같은 인증 범주 운용 유형과 운용 개념과 시나리오를 더욱 구체화시킨다면 위험 평가를 거쳐 UAS 비행기록시스템 파라미터의 종류와 사양을 결정할 수 있다.

표 5. 인증 범주 무인항공기 시스템 운용의 예시
Table 5. Certified category of UAS operation examples.

Operations type	Cases	Illustration
1	International flight of certified cargo drones conducted in instrumental flight rule (IFR) in airspace classes A-C and taking-off and landing at aerodromes under EASA's scope. For example, an unmanned A320 transporting a cargo from Paris to New York.	
2	Drone operations in urban or rural environments using pre-defined routes in airspaces where U-space services are provided. This includes operations of unmanned drones carrying passengers or cargo. For example air-taxi or package delivery services that come directly to your balcony or the roof of your building or your front yard.	
3	Operations as in type #2, but conducted with an aircraft with a pilot on board. Actually this is expected to cover the first type of air taxi operations, where the pilot will be on board. In a second phase the aircraft will become remotely piloted (operations type 2)	

하지만 JARUS의 UAS 운용 범주화 보고서에서는 어떠한 세부 운용 개념들이 분석에 활용되었는지는 확인할 수 없다. 이에 예시로 든 표 5의 운용 유형과 같은 사례를 더 발굴해야만 한다. 한 예로 초저공역(VLL; very low level airspace)에서 비행하는 무인항공기 시스템의 분리 기준과 방법을 정의하여 U-space의 성능과 안전성을 향상시키는 것을 목표로 한 SESAR(Single European Sky Air Traffic Management Research) 프로젝트가 있다. 이때 SORA (specific operations risk assessment)와 같은 위험 기반 접근 방식을 적용하여 Certified Category에 해당하는 운용 개념을 식별하였다. 운용 범주가 ‘Certified’로 식별된 예시를 표 6에서 확인할 수 있다.

본 연구는 위험성이 가장 높은 Certified 범주에서 UAS 비행 기록 시스템 개발 대상인 구체적 무인항공기 시스템 Use case에 관한 정보를 얻기 위해 SESAR의 U-space 사용 사례를 참고하였다. U-space란 인공지능이 지원하는 높은 수준의 기능 및 특정 절차의 디지털화 및 자동화에 의존하는 일련의 새로운 서비스로, 자동으로 작동하며 다수의 무인항공기에 대한 안전하고 효율적이며 안전한 영공 접근을 제공하도록 설계된 공간을 말한다[14]. ICAO도 U-space를 드론과의 상업적 운영, 특히 더 큰 복잡성과 자동화를 수반하는 운영을 지원하기 위해 등장한 유럽의 교통관리체계의 일종으로 보고 있다[15]. 핵심적인 것은 자동화된 UAS 관리 및 통합을 달성하여 대규모 일련의 작업을 동시에 수행하고 모든 것은 기존의 항공교통관리(ATM; air traffic management) 시스템과 조화롭게 공존시키는 것이다.

SESAR는 U-space의 사용 사례 중 하나로 에어 택시(air taxi)를 제시하였다. 에어 택시는 도심항공교통(UAM; urban air mobility)의 일종으로 자동화 무인항공기를 사람의 수송에 이용하므로 높은 안전성과 보안성을 요구한다. 초기 에어 택시의 운영은 시범 운영될 시제 항공기를 시험하고 운용을 감시할 수 있는 전용 경로 상에서부터 시작될 예정이라고 한다[16].

표 6. SESAR 프로젝트 Certified 운용 개념의 예시
Table 6. Examples of certified ConOps in SESAR project.

Main paramater	Example 1	Example 2
Id	N	N
Vol	Y	Y
Operation category	Specific or certified	Specific or certified
Air risk	Controlled	Controlled
Ground Risk	Intermediate	Intermediate
Op. Type	VLOS	VLOS
Type of Drone	Multirotor	Multirotor
Dimension and mass	50Kg MTOM 20Kg empty ~2m diameter	50Kg MTOM 20Kg empty ~2m diameter
Cruise Speed	Estimated: 15ms-1	Estimated: 15ms-1
Maneuverability	Estimated: VRCD 5ms-1	Estimated: VRCD 5ms-1
Payload	No Risk	30Kg
T. Type	Line	Line
Flight Mode	Automatic	Automatic
Monitoring	YES	YES
Tracking service	YES	YES
Tactical Separation	YES	YES

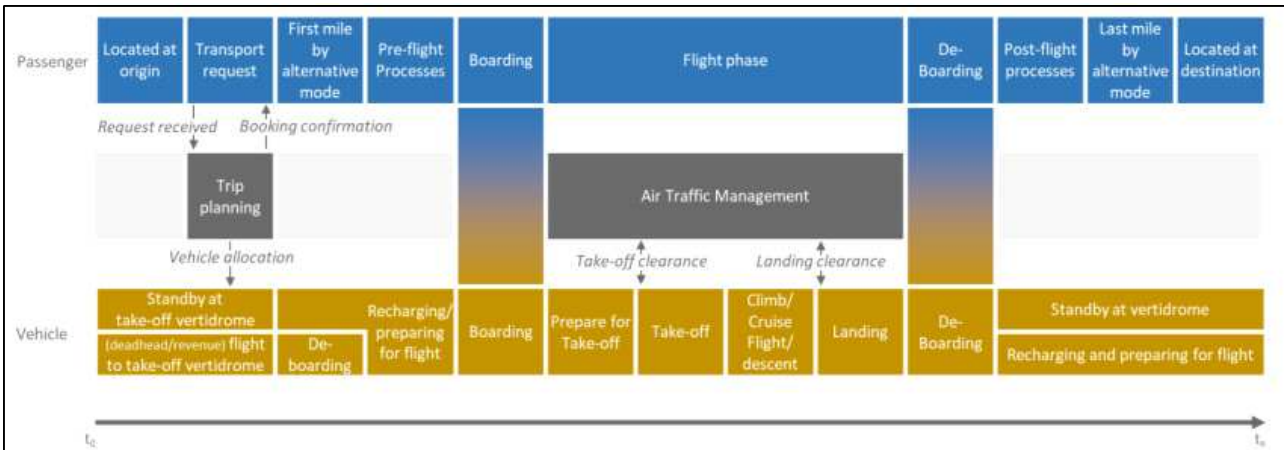


그림 4. 주문형 UAM 서비스 운용 개념
 Fig. 4. ConOps for on-demand UAM service.

예를 들면, 고정된 지상 장애물뿐만 아니라 유인 및 무인 교통을 우회하고 항공기 흐름 관리를 고려해야 하는 도시 내 위치한 버티포트(vertiport)와 공항 간의 점 대 점 이동이 있다[16].

에어 택시라는 사례 안에서도 매우 다양한 세부 운용 개념이 개발되고 있다. 독일의 항공우주센터에서는 HorizonUAM이라는 UAM 비전 연구프로젝트를 통해 UAM의 사용 사례, 임무, 그리고 이에 필요한 기술적 시나리오를 정의한 바 있다. 해당 연구는 UAM에 관한 두 가지 ConOps를 정의하였는데 하나는 그림 4의 주문형 UAM 서비스로 승객 수요와 UAM 항공기의 실시간 매칭을 가능하게 하는 것이다. ConOps는 3개의 도메인, 승객을 위한 프로세스, 항공기를 위한 프로세스, 그리고 기능 조율과 함께 수행자와 프로세스 간 관계로 구성되어 있다[17]. 본 연구는 주문형 UAS 서비스 운용 개념에서 비행 단계(flight phase)를 대상으로 파라미터 도출 연구에 활용하고자 하였다.

서비스 제공자(예: MaaS(mobility as a service) 제공자)는 여정을 계획하고 승객과 항공기의 프로세스를 조정한다. 이 여행 계획 프로세스는 승객의 운송 요청과 항공기 할당을 결합하기 때문에 주문형 UAM 서비스에 매우 중요하다. 따라서 주문형 UAM 서비스를 위한 ConOps는 승객의 운송 요청으로 시작된다. 운송 요청은 티켓 가격과 이동 시간 측면에서 승객을 위한 최상의 운송 솔루션을 결정하는 서비스 제공자에 의해 처리되며, 이를 통해 운송 모드와 경로를 선택하게 된다.

운송 요청에 관하여 가장 적합한 항공기는 UAM 시스템에서의 위치, 에너지 상태 및 부하 계수를 기반으로 식별된다. 선택된 항공기는 운송 요청을 처리하기 위해 할당되며 이미 이륙 버티포트에 있거나 경로 비행 중일 수 있다. 승객의 요구를 충족시키기 위해 이륙 버티포트로 가는 탑승자 또는 화물이 없는 비행을 해야 할 수도 있다. 항공기 임무를 계획한 후 승객은 예약 확인 후 이륙 버티포트로 간다. 탑승 수속 및 보안 확인 등 비행 전 프로세스 단계 후 승객이 항공기에 탑승하고 비행 프로세스가 시작되면 항공기와 승객의 두 프로세스 체인이 병합된다. 비행 프로세스 (임무 프로파일 그림 5 참조) 동안 항공교통 관리는 안전한 비행경로를 제공하고 항공기 이동을 조정하며 이

착륙 허가를 발급한다. 승객이 항공기를 떠날 때 승객 프로세스와 항공기 프로세스는 다시 분리된다. 비행 종료 시 승객은 최종 목적지까지 last mile 비행을 시작한다. 항공기는 다음 임무를 위한 비행 준비 후 대기한다.

HorizonUAM 프로젝트의 운용 개념에 대한 임무 프로파일은 그림 5와 같이 나타나 있으며, 향후 제시되는 사용 사례들은 모두 임무 프로파일에 나타난 비행 세그먼트의 조합으로 구성된다. 해당 프로젝트는 표 7과 같이 5가지 사용 사례를 제시하였으며, 이는 향후 항공기, 인프라, 운영 및 항공교통 관리에 관한 요구사항을 도출하는 데 사용될 것이다. 본 연구에서는 이를 참고하여 UAS 비행 기록 시스템 파라미터 요구사항을 도출하기로 하였다.

표 7의 UAM 사용 사례는 도시 내 운용, 대도시 운용, 공항 셔틀 운용, 근교 지역 운용, 도시 간 운용으로 분류되고 있다. UAM 중에서도 에어 택시를 위한 UAS 비행 기록 시스템 개발은 표 7에서 예시로 제시된 모든 사례에 대한 위험 평가 및 trade-off 연구를 통해 요구사항을 정제하는 과정이 필요하나, 본 연구에서는 HorizonUAM 프로젝트의 Inter-City UAM에 국한하여 UAS 비행 기록 파라미터 도출 과정을 보이고자 하였다. 이러한 Inter-City 사용 사례는 100 km 이상의 거리에 떨어진 두 도시를 연결하는 6개의 비행 세그먼트가 있는 비행 임무이다. 최대 10명의 승객이 수송되는 이 임무에는 수직이착륙이 가능한 고정익 항공기가 사용되는 것으로 가정한다[17].

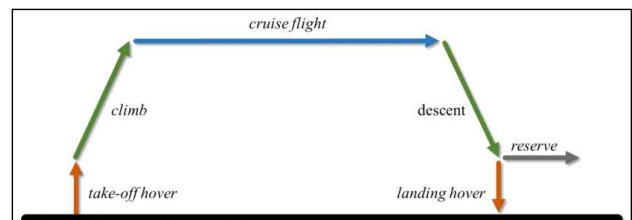


그림 5. 5개 비행 세그먼트와 예비 비행 세그먼트의 임무 프로파일
 Fig. 5. Mission profile with five flight segments plus reserve.

표 7. HorizonUAM 프로젝트의 UAM 사용 사례
Table 7. UAM use cases in HorizonUAM project.

Use Case	Mission Profile	Seats: 2 ~ 4, 90kg per person Range: up to 50km Speed: 80~100km/h Vehicle: Multi-rotor configuration
Intra-City		Seats: 2 ~ 4, 90kg per person Range: up to 50km Speed: 80~100km/h Vehicle: Multi-rotor configuration
Mega-City		Seats: 4 ~ 6, 90kg per person Range: up to 100km Speed: 100~150km/h Vehicle: Conventional helicopter / VTOL rotary-wing- / VTOL fixed-wing-configuration
Airport Shuttle		Seats: 4 with hand luggage (4x 110kg) Range: < 30km Speed: 100~150km/h Vehicle: Multi-rotor configuration
Sub-Urban		Seats: 4 with hand luggage (4x 90kg) Range: < 70km Speed: 100~150km/h Vehicle: Multi-rotor configuration
Inter-City		Seats: 6 ~ 10 Range: > 100km Speed: > 100km/h Vehicle: VTOL fixed-wing configuration

4-2 임무 구체화 결과

본 절에서는 ‘임무 구체화’ 방법에 따라 Inter-City UAM의 임무 시나리오를 구체화하고 시나리오별로 필요한 시스템 기능/목적을 인식한다. 이때 NASA(National Aeronautics and Space Administration)에서 제공한 연구를 참고하였다. NASA는 UAM 초기 임무 요구사항을 도출하는 접근법을 제한한 바 있으며, Inter-City UAM과 유사한 임무를 수행하는 무인항공기 시스템에 대한 순항고도, 탑재중량, 바람 조건, 충전 개념 요구사항 도출을 위해 그림 6의 임무 프로파일을 제시하였다[18].

HorizonUAM과 NASA 연구의 임무 프로파일로부터 표 8과 같이 총 10개의 세그먼트로 이루어진 임무 시나리오(지상 활주 > 수직 상승 > 천이 > 상승 > 순항 비행 > 하강 > 천이 및 제자리 비행 > 수직 하강 > 지상 활주 > 여유 비행)를 정리하였다.

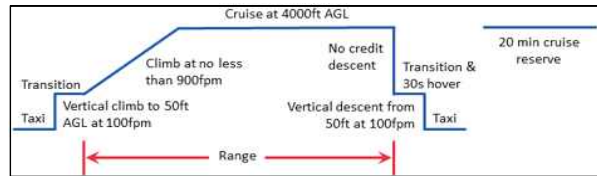


그림 6. NASA UAM 임무 프로파일
Fig. 6. NASA UAM mission profile.

4-3 사고 발생 상정 및 파라미터 도출 결과

본 절에서는 ‘사고 발생 상정’ 및 ‘파라미터 도출’ 방법을 병합해 임무에 따른 기능/목적에 따라 사고, 위해요인을 상정하고 HAZOP 분석 방법을 역으로 활용하여 파라미터를 도출한다.

표 9는 이 과정을 거쳐 도출된 파라미터를 임무 및 기능/목적에 따른 사고 발생(결과), 위해요인, 원인, 대상, 지시어와 함께 변형된 HAZOP 워크시트 상에 나타내고 있다.

표 8. Inter-City UAM 임무 시나리오
Table 8. Inter-City UAM mission scenario.

1. Taxi (to takeoff pad)	roll the wheel to power itself or move the vehicle from the parking/mounted area to the takeoff pad (for 15 seconds at 10% of the cruising power)
2. Vertical climb	take off from vertiport in VTOL mode (rise vertically to 50 ft (AGL) above ground at 100 ft/min, maintain slow speed for passenger comfort) * VTOL (vertical take-off and landing) due to conditions in densely populated areas where there is little land available and land costs are high
3. Transition	after 50 feet vertical take-off near vertiport, the aircraft switches to climb flight (for eVTOL aircraft (e.g. tiltwing), there is a finite period of time during which the aircraft changes shape from vertical to horizontal flight, and the maximum output must be able to be maintained for 10 seconds)
4. Climb	climb to cruise altitude (4000 ft AGL) maintaining more than 900 ft/min early in the climb to help the aircraft quickly raise altitude and move away from take-off areas *declare “over airspace where the UAV can operate” passing altitude of 500 ft AGL approximately one minute after takeoff
5. Cruise flight	cruise at 4000 ft AGL altitude (Cruising distance varies depending on mission) flying at a speed that maximizes range, rather than maintaining a specific cruising speed * to ensure sufficient maneuverability and the ability to fly higher if necessary (e.g. for potential airspace consolidation needs), aircraft can generate a rise rate of at least 500 ft/min during cruising flight * must be cruising directly over the arrival area
6. Descent	start descending directly over the area you want to arrive in (Default rate designation is reserved (no-credit)) * free descent to the turning point of 50 ft AGL
7. Transition & hover	transition to vertical flight at 50ft AGL, the turning point * add a 30-second hover to receive the final landing permit (if necessary) (also to place the aircraft in precision at the landing site), (therefore, at least one minute is required to maintain the thrust required for the hover)
8. Vertical descent	vertical descent (speed below 100 ft/min)
9. Taxi (to ramp)	roll the wheel to power itself or move the vehicle from the take-off pad to the parking/mounted area
10. Reserve	an additional 20 minutes of cruising flight (if necessary), spare flight time will allow the aircraft to fly to alternative vertical ports

표 9. UAS 비행 기록 시스템 파라미터 도출 결과

Table 9. The result of deriving UAS flight record system parameters.

Mission	Function/Purpose	Occurrence (Consequence)	Hazard	Cause	Item	Parameter	Guide Word
Takeoff	Move to Takeoff Pad	Collision with an obstacle during movement	Impact with static objects	Inadequate path planning	Navigation System	GPS coordinates	No
		Loss of control during navigation	Loss of directional stability	Failure in control system	Control System	Control inputs	More
	Power Activation for Taxi	Excessive power activation causing rapid movement	Uncontrolled acceleration	Failure in power modulation	Power Modulation System	Modulation settings	More
Vertical climb	Vertical ascent from VTOL to 50 ft AGL	Loss of altitude control during ascent	Altitude stability degradation	Control system failure	Altitude Control System	Altitude control inputs	No
	Maintain slow speed for passenger comfort	Inadequate climb rate	Slow ascent rate	Power system failure	Power System	Power settings	Less
Transition	Change from vertical to horizontal flight	Excessive lateral movement	Uncontrolled lateral acceleration	Control system failure	Control System	Lateral control inputs	More
Climb	Ascend to cruise altitude (4000 ft AGL) early in the climb	Loss of control during shape transition	Control instability during transition	Flight control system failure	Flight Control System	Control inputs during transition	No
		Collision with manned aircraft over 500 ft AGL	Manned aircraft intrusion	Inadequate airspace coordination	Airspace Coordination System	Airspace coordination status	No
		Loss of climb rate	Inadequate power supply	Power system failure	Power System	Power settings during climb	Less
Cruise flight	Cruise at 4000 ft AGL altitude	Deviation from planned altitude	Altitude deviation	Altitude control system failure	Altitude settings during cruise	Altitude settings during cruise	More
	Fly at a speed maximizing range	Loss of speed control	Inadequate speed control	Speed control system failure	Speed settings during cruise	Speed settings during cruise	Less
	Generate a rise rate of at least 500 ft/min	Failure to achieve required climb rate	Inadequate climb rate	Climb rate control failure	Climb rate settings during cruise	Climb rate settings during cruise	Less
	Ensure sufficient maneuverability	Loss of control during maneuvering	Inadequate maneuverability	Flight control system failure	Maneuverability status during cruise	Maneuverability status during cruise	No
Descent	Start descending directly over the arrival area	Deviation from planned descent path	Navigation error	Navigation system failure	Navigation System	Vertical descent rate during descent	More
	Free descent to the turning point of 50 ft AGL	Failure to reach the required altitude	Inadequate descent rate	Descent rate control failure	Descent Rate Control System	Descent rate settings during descent	Less
Transition & hover	Transition to vertical flight at 50ft AGL	Failure to transition to vertical flight as planned	System malfunction during transition	Software bug in transition control system	Transition Control System	Transition duration during transition	No
	Add a 30-second hover to receive the final landing permit	Delay or denial of landing permit due to hover instability	Instability in hover control system	Sensor malfunction in hover control system	Hover Control System	Hover duration during hover segment	No
Vertical descent	Control the vertical descent with a speed below 100 ft/min	Exceeding the specified descent speed due to system malfunction	Uncontrolled Descent	Failure in descent rate control system	Descent Rate Control System	Descent Rate	More
			Loss of Altitude Control	Malfunction in altitude control system	Altitude Control System	Altitude	Less
Taxi (to ramp)	Move the vehicle from the take-off pad to the ramp	Low visibility conditions during taxiing	FOD (Foreign Object Debris) on the taxiway	Poor Foreign Object Debris (FOD) control	Sensors detecting FOD on taxiway	FOD Detection System Status	Early/ Late
Reserve	Ensure additional 20 minutes of cruising flight for potential alternative vertiports	Additional cruising time	Energy Depletion	Limited battery capacity	Battery	Capacity	Less
				Inefficient power management	Power Management System	Efficiency	Less
				Unexpected power-consuming events	Various on-board systems (Avionics, Communication)	Power Consumption during Reserve Operation	More

V. 결 론

본 논문은 항공사고 예방을 위한 항공사고 및 준사고 조사를 위하여 UAS 비행 기록 시스템 개발의 필요성을 고찰하고 비행 기록 시스템의 파라미터를 도출하는 프로세스를 제안하였다.

UAS 비행 기록 시스템 파라미터 도출을 위하여 Certified Category를 상위 운용 개념으로 한 Inter-City UAM 사용 사례의

UAS를 대상 시스템으로 선정하고 이로부터 임무 프로파일 및 시나리오를 구체화하였다. 이로부터 사고 시나리오를 상정하고 HAZOP 분석 방법의 특성과 워크시트를 활용하여 사고의 결과로부터 위해요인, 원인에 역으로 접근함으로써 기록이 필요한 시스템 데이터 파라미터를 찾아낼 수 있었다. 결론적으로 운용 개념 및 사용 사례 선정, 임무 시나리오 구체화, 사고 시나리오 및 위해요인 상정의 프로세스를 거쳐 특정 UAS의 비행 기록 시스템 파라미터 도출을 수행할 수 있었다.

References

- [1] V. Brusov, J. Grzybowski, and V. Petruchik, "Flight data acquisition system for small unmanned aerial vehicles," in *International Micro Air Vehicles Conference and Flight Competition 2011 Summer Edition*, pp. 132-137, 2011.
- [2] P. Kordowski, Z. Jakielaszek, M. Nowakowsky, and A. Panas, "Miniaturized flight data recorder for unmanned aerial vehicles and ultralight aircraft," in *5th IEEE International Workshop on Metrology for Aerospace*, Rome: Italy, pp. 484-488, Sept. 2018.
- [3] Dharamvir and K. S. Hemanth, "Transformational perceptive of data recorder for UAV flight automation control system using image processing techniques," *Journal of Physics: Conference Series*, Vol. 2335, Online 012026, 2022
- [4] Safety and Airspace Regulation Group, Unmanned aircraft system operations in UK airspace – Policy and guidance, civil aviation authority, crawley, West Sussex, CAP 722, Ninth Edition Amendment 1, pp. 42-64, 2022.
- [5] Ministry of Land, Infrastructure and Transport, Aviation and Railway Accident Investigation Act. *Korean Law Information Center* [Online]. Act No. 18188, May 18, 2021. Available: <https://www.law.go.kr>.
- [6] Aviation and Railway Accident Investigation Board. Operational Regulations of the Aviation and Railway Investigation Board. *Korean Law Information Center* [Online]. Instruction No. 40, June 13, 2023. Available: <https://www.law.go.kr>.
- [7] Ministry of Land, Infrastructure and Transport. Aviation Safety Act Enforcement Rules. *Korean Law Information Center* [Online]. Ordinance No. 1262, Oct 19, 2023. Available: <https://www.law.go.kr>.
- [8] A. Vidović, A. Franjić, I. Štimac, and M. O. Ban, "The importance of flight recorders in the aircraft accident investigation," *Transportation Research Procedia*, Vol. 64, pp. 183-190, 2022.
- [9] J. Erinne, et al., UAS operational categorization, joint authorities for rulemaking of unmanned systems, JAR-DEL-WG7-UASOC-D.04, pp. 8-13, June 2019.
- [10] S. Kim, S. Sim, S. Yoon, and K. Han, "Can ChatGPT serve as a collaborative peer in consensual evaluation?" *Journal of Gifted/Talented Education*, Vol. 33, No. 3, pp. 273-290, 2023.
- [11] C. A. Ericson II, *Hazard Analysis Techniques for System Safety*, 2nd ed., New Jersey: Wiley, pp. 300-309, 2016.
- [12] EASA Brochure, Concept of operations for drones: A risk based approach to regulation of unmanned aircraft, European Aviation Safety Agency, Ottoplatz, 1 D-50679 Cologne, Germany, p. 7, May 2015.
- [13] European Union Aviation Safety Agency. Certified Category - Civil Drones. EASA Pro [Online]. Available: <https://www.easa.europa.eu/en/domains/civil-drones-rpas/certified-category-civil-drones>.
- [14] European Commission. U-space [Internet]. Available: <https://joinup.ec.europa.eu/collection/rolling-plan-ict-standardisation/u-space>.
- [15] European Civil Aviation Conference. What is U-space? [Internet]. Available: <https://www.ecac-ceac.org/activities/unmanned-aircraft-systems/uas-bulletin/22-uas-bulletin/504-uas-bulletin-2-what-is-u-space>.
- [16] Single European Sky ATM Research, Demonstrating the Everyday Benefits of U-Space: Initial results from SESAR demonstrations (2020-2022), Publications Office of the European Union, ISBN 978-92-9216-185-9, p. 8, 2001.
- [17] L. Asmer, et al. "Urban air mobility use cases, missions and technology scenarios for the HorizonUAM project," in *AIAA Aviation Forum*, pp. 8-15, Aug. 2021.
- [18] M. D. Patterson, K. R. Antcliff, L. W. Kohlman, "A proposed approach to studying urban air mobility Missions including an initial exploration of mission requirements", in *Annual Forum and Technology Display Conference*, Online published, Paper ID:2020190000991, pp. 1-14, May. 2018.



이 건 희 (Keon-Hee Lee)

2020년 2월 : 부산대학교 항공우주공학과 (학사)

2022년 2월 : 한국항공대학교 대학원 항공운항관리학과 (석사)

2022년 3월 ~ 현재 : 한국항공철도사고조사협회 연구원

2022년 9월 ~ 현재 : 아주대학교 시스템공학과 박사과정

※ 관심분야 : 시스템엔지니어링, 시스템 신뢰성 및 안전, 항공사고 및 준사고 조사, 비행 기록 시스템



이 중 윤 (Joong-Yoon Lee)

1993년 8월 ~ 2000년 2월: 대우자동차(주) 중앙연구소 연구원

2012년 9월 ~ 2020년 11월 : 포항공과대학교 엔지니어링 대학원(GEM), 철강대학원(GIFT) 교수

2019년 12월 ~ 현재 : 국제시스템엔지니어링협회(INCOSE), 한국 챕터 회장

2021년 3월 ~ 현재 : 아주대학교 시스템공학과 교수

※ 관심분야 : 시스템엔지니어링, 시스템 아키텍처, 개념설계, 모델기반 시스템엔지니어링, 시스템 신뢰성 및 안전