

Original Article

<https://doi.org/10.12985/ksaa.2024.32.3.154>
ISSN 1225-9705(print) ISSN 2466-1791(online)

AHP 기법을 활용한 항공교통관제사와 UAM-PSU의 주요 인적 요인 비교분석 연구

김정빈*, 전성민**

A Comparative Analysis of Major Human Factors of Air Traffic Controller and UAM-PSU Using AHP Techniques

Jung-Bin Kim*, Sung-Min Jeon**

ABSTRACT

Recently, various urban problems are expected to arise due to the concentration of urban population and acceleration of urbanization, and UAM, a new air transportation method, is emerging to solve these problems. Currently, the world is actively conducting research and development on UAM technology, infrastructure, and systems to commercialize UAM. Although UAM is expected to develop in a similar way to the air transportation industry, research on the human factors of UAM for safe UAM operation and accident prevention is insufficient. In this study, to ensure safe operation of UAM, the human factors of UAM-PSU were identified and presented using the AHP technique targeting aviation experts. In addition, a comparative analysis of the human factors of PSU and air traffic controllers was conducted through relative importance analysis, and an efficient management plan for important human factors was presented.

Key Words : Urban Air Mobility(도심항공교통), Provider of Services for UAM(UAM 교통관리 서비스 제공자), Air Traffic Controller(항공교통관제사), Human Factor(인적요인)

1. 서 론

1.1 연구의 배경

UN-Habitat(United Nations Human Settlements Programme, 유엔인간정주계획)에서 발간한 보고서에 따르면 전 세계 도시 인구가 현재 약 45억 명에서 2050

년에 약 67억 명으로 증가하면서 주요 도시인구 증가 및 도시화 가속화에 따른 대도시권으로의 인구 집중 현상으로 다양한 도시문제의 심각성을 지적하고 있다. 또한, 도시화로 인한 교통량 증가는 교통 혼잡을 유발하며, 이는 막대한 사회·경제적 비용을 초래하고, 대기 오염과 탄소 배출 증가로 이어져 환경 문제를 악화시킨다(UN Habitat, 2022). 전 세계는 교통 혼잡 문제를 해결하기 위해 제한된 공간에서 지상 교통수단에 발전 한계를 느끼게 되었으며, 도심 내 지상 이동수단인 자동차나 지하철을 대체할 수 있는 새로운 3차원 공간의 교통수단을 모색하게 되었다(Park et al., 2021).

이에 따라 새로운 미래항공교통 수단인 UAM(urban air mobility, 도심항공교통)은 친환경적이고 수직 이착

Received: 09. Aug. 2024, Revised: 12. Aug. 2024,
Accepted: 21. Aug. 2024

* 한국항공대학교 일반대학원 미래항공교통학과 박사과정

** 한국항공대학교 일반대학원 항공교통물류학과 박사과정

연락처 E-mail : kujsm@hanmail.net

연락처 주소 : 경기 고양시 덕양구 항공대학로 76

륙과 도심 내, 도시 간 이동이 가능한 비행기 형태로서, 도시화 문제로 인한 교통혼잡을 해결할 대안으로 대두되고 있다. 미래 교통수단을 선점하기 위해서 전 세계 민·관·군·산·학·연에서 UAM 미래 기술, 인프라, 정책, 제도 등의 연구·개발을 활발하게 진행하고 있다.

공중에서 이동하는 수단으로서 무엇보다 안전을 최우선 가치로 두어야 하며, 기존의 항공운송산업에서 요구하는 안전수준을 만족하기 위해 항공사고의 교훈을 UAM 산업에도 적용할 필요가 있다. 현재 기술은 급속도로 발전하여 기술적 요인에 의한 오류는 거의 발생하고 있지 않지만, 항공운송협회(IATA, International Air Transport Association)에서 발표한 전 세계 항공 사고통계 그래프(Fig. 1)를 참고해 보면, 항공사고는 기술이 발전했음에도 불구하고 꾸준히 발생하고 있는 것을 알 수 있다(IATA, 2023). Hawkins(1987)는 전 세계 항공사고는 대부분 직·간접적으로 인적요인과 관련이 있기 때문에 항공 분야에서는 인간을 중심으로 영향을 줄 수 있는 다양한 구성요소 관리의 중요성을 강조하고 있다.

UAM 또한 새로운 형태의 항공운송수단으로서 몇몇 학자와 항공기구에서는 UAM 인적 요인 관리의 중요성과 연구 필요성을 제기하고 있다. Bhomin은 UAM 내 잠재적인 인적 요인을 식별해서 ‘인간’을 중심으로 표준 및 절차 개발의 필요성을 제기하였으며(Bhomin, 2021), 미연방항공청(FAA, Federal Aviation Agency)은 새로운 공역에서 UAM 운영 시 복잡하고 다양한 인적 요인이 존재하게 될 것으로 예상하였다(FAA, 2021). 또한, 미국 항공우주국(NASA, The National Aeronautics and Space Administration)에서는 UAM 시스템과 인간의 상호작용과 UAM 이해관계자에 대한 철저한 교육·훈련 필요성을 제기하고 있다(NASA, 2021). UAM은 최신 기술이 집약된 미래 항공운송수단으로서 다양한 측면에서 연구·개발이 필요하지만, UAM과 관련한 인적 요인 연구 필요성만 제기

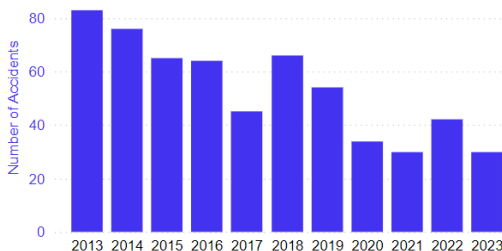


Fig. 1. Number of aviation accidents (2013~2023)

된 상태이며 UAM 이해관계자에 해당하는 중요한 인적 요인에 관한 연구는 미비한 상태이다. 이에 따라 UAM을 안전하게 운항하기 위해서는 항공운송산업 내 항공종사자들의 인적 요인을 바탕으로 UAM 이해관계자와 관련된 인적 요인을 사전에 식별하고, 체계적으로 관리하는 것이 필요하다.

1.2 연구의 목적

FAA에서 발행한 UAM 운영개념서에 따르면 UAM은 국가 항공시스템 내 통합과 함께 기존 항공운송 산업의 CNSi, 규제, 규칙 등을 적용하여 점차 발전할 것으로 전망했다(FAA, 2023). 또한, UAM의 초기 단계에는 사회적 및 기술적 한계로 인해 조종사가 탑승하여 운항하고, 기체, 이착륙시설, 운송, 관제, MRO 등 다양한 분야의 이해관계자로 구성된 생태계로 발전하여 기존의 항공운송산업과 유사한 형태로 발전할 것으로 전망하고 있다(MOLIT, 2020).

UAM 이해관계자의 역할과 책임을 명시한 UAM 교통체계의 구조(Fig. 2)를 참고해 보면, UAM 운항자, 기장, UAM 교통관리 서비스 제공자(PSU, Provider of Services for UAM), 버티포트 운영자 등으로 구성되어 있으며, 항공운송산업과 비슷한 형태의 구조로 되어 있다. UAM 이해관계자 중 PSU는 UAM 교통흐름을 관리하고, 운항 정보를 공유하는 등 안전하고 효율

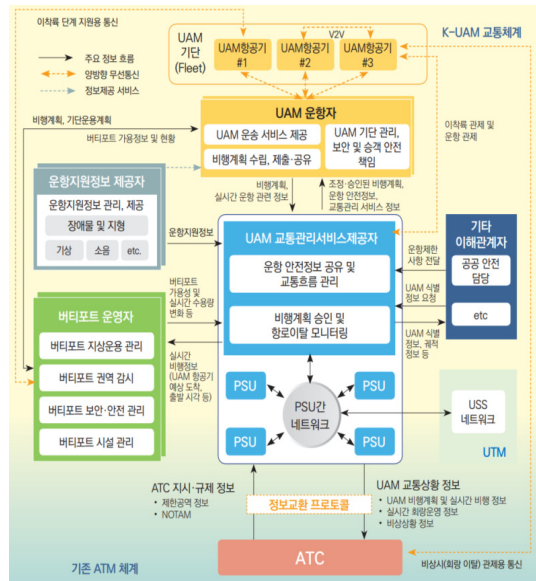


Fig. 2. Structure of the K-UAM transportation system

적인 UAM 운항을 위한 교통관리 서비스를 제공하며, 항공교통관제사와 유사한 역할을 한다.

따라서, 본 연구의 목적은 항공전문가를 대상으로 인적요인 분석 및 분류 시스템(HFACS, Human Factors Analysis and Classification System)을 적용한 계층화 분석법(AHP, Analytic Hierarchy Process)을 활용해서 PSU의 중요 인적요인을 식별하고 분석하고자 한다. 또한, AHP 기법으로 도출된 PSU의 인적요인과 PSU와 유사한 역할을 담당하는 항공교통관제사의 인적요인을 비교·분석하여 UAM 사고 방지 및 안전한 UAM 운항을 위한 인적요인의 효율적인 관리 방안을 제시하고자 한다.

II. 이론적 고찰

2.1 항공교통관제사 인적요인(Human Factors)

항공산업의 발전은 인류 교통역사의 중요한 전환점을 마련했으며, 상업적 효용가치를 극대화하는 탁월한 수단으로 자리매김하였다. 그러나 우수한 교통수단인 항공기는 사고 및 준사고 발생 시 물질적·사회적 피해가 가능하기 어려울 정도로 막대하다. 항공사고의 발생 원인 중 인적요인에 의한 사고가 큰 비중을 차지하고 있으며, 조종사 과실, 조종사와 관제사의 복합적인 과실, 관제사 과실 등 인적요인들에 기인하고 있다(Rodgers et al., 2000).

항공교통관제사는 고도의 집중력, 빠른 상황판단, 정확한 예측능력을 요구하는 업무를 수행하므로, 이를 저해하는 인적요인에 대해 철저한 분석과 체계적인 관리가 절실히 필요하다. 관제업무 특성상 야간 또는 교대근무 등의 불규칙한 근무형태와 실시간으로 변하는 다양한 항공교통상황을 마주하기 때문에 최대의 주의를 발휘하여 정확한 상황인식 및 의사결정을 할 수 있어야 한다. 항공기 간 안전거리 미확보, 항공기 지시 실수, 잘못된 상황판단 등과 같은 관제사의 인적 오류가 사고의 원인으로 약 82%를 차지하고 있으며, 다양한 인적요인은 항공교통관제 업무수행에 미치는 영향이 매우 크다고 언급하였다(Kwon, 2018).

항공사고가 직·간접적으로 인적요인에 의해 발생하고 있는 것으로 밝혀지면서 국제민간항공기구(ICAO, International Civil Aviation Organization)에서는 Table 1 인적요인의 구성을 토대로 다양한 연구가 진행되고 있다(Moon et al., 2008).

Table 1. Composition of human factors

구분	내용
항공생리	호흡, 기압영향, 감각한계, 가속영향, 착각, 피로·긴장, 수면장애 부족, 생체리듬, 시차
항공심리	인간실수, 업무부하, 정보처리, 태도·판단, 상황인식, 의사결정, 스트레스, 기량·경륜, 숙련도
적성	건강, 음주·약물, 연령, 후천적 요소와 업무, 적성심리, 스트레스, 임신
대인관계	의사소통, 정보전달, 안전효율성, 문제해결 방법, 집단 활동, 자원관리 기법, 인간과 주변 요소와의 상호관계에서 발생하는 요소
정비요소	구조·배치, 경계경보 체계, 안락성
소프트웨어	표준절차, 항공지도 자료·S/W, 자동화
운항환경	내적물리적, 외적물리적, 사회경제적

ICAO에서는 Table 1에서 제시된 인적요인의 구성요소를 바탕으로 항공교통관제의 안전과 업무수행에 어떠한 영향을 주는지에 대한 지속적인 연구와 개선의 필요성을 지적하고 있다. 이에 따라 ICAO뿐만 아니라, FAA, EUROCONTROL(European Organization for The Safety of Air Navigation, 유럽항공 항법 안전기구) 및 NTSB(National Transportation Safety Board, 미연방교통안전위원회)에서는 Table 2와 같이 항공교통관제 분야의 주요 인적요인을 제시하여 효율적인 관리를 권고하고 있다. 항공교통관제 분야의 주요 인적요인을 토대로 EUROCONTROL과 FAA에서는 'ATC 인적요인 관련 100여 편의 연구보고서 발간', 'Human Performance Newsletter 발행', '인적요인의 중요성에 대한 교육 진행' 등 다양한 연구관리체계를 구축하고 있다.

Table 2. Human factors in ATC

구분	내용
ICAO ATC 인적요인	피로(fatigue), 스트레스(stress), 권태(boredom), 자만(confidence), 인이함 complacency)
FAA ATC 인적요인	부주의(unattention), 건망증(forgetfulness), 경계소홀(lack of vigilance), 자만심(complacency), 피로(fatigue)
EURO CONTROL ATC 인적요인	피로(fatigue), 스트레스(stress), 업무부담(workload), 의사결정(decision making), 상황인식(situational awareness)
NTSB ATC 인적요인	피로(fatigue), 스트레스(stress), 상황인식(situational awareness)

국내 항공 분야의 감독 기관인 국토교통부는 산하의 3개 지방항공청(서울, 부산, 제주)과 함께 국제기준에 부합하는 관제사 인적요인 관리체계를 구축하고 있다. 효율적이고 효과적인 안전관리 제도의 시행을 위해, 2019년에 ‘항공교통업무 안전관리시스템 운영지침’을 제정하여 각 관제기관의 특성과 위험요인을 고려한 맞춤형 안전관리가 이루어지도록 하였다. 또한, ‘일상관제 상황 관찰제도’를 통해 최소 3년에 1회 이상 모든 관제 기관이 소속 관제사의 인적요인 및 항공안전에 영향을 미칠 수 있는 행동 패턴과 관제방식을 관찰·조사하고, 필요한 개선방안을 마련하여 시행함으로써, 관제사의 인적요인으로 인한 잠재적 위험요인을 사전에 식별하고, 예방할 수 있는 예측적 안전관리를 시행하고 있다.

2.2 UAM 인적요인 선행연구

UAM 교통체계 구조에는 UAM 운항자, 교통관리 서비스 공급자(PSU), 운항지원정보 제공자(SDSP, Supplemental Data Service Provide), 버티포트 운영자, 기타 이해관계자 등으로 구성되어 있으며, 기존 항공운송산업의 구조와 비슷한 구조를 갖추고 있다는 점을 고려한다면 UAM 분야의 인적요인으로 인한 사고 가능성 또한 존재한다(Kim, 2023).

Bhomin(2021)은 UAM이 현재 공역 시스템에 안전하게 통합되기 전에 UAM과 관련된 인적요인을 식별하고 해결하기 위해 UAM 내 잠재적인 인적요인인 주의 산만, 주의력 결핍, 스트레스, 상황인식, 의사결정 등을 ‘인간’을 중심으로 표준 및 절차 개발의 필요성을 제기 하였다. 안경수 등(2020)은 SHELL 모델을 활용하여 PAV 및 UAM 도입 시 인간을 중심으로, 인간과 인간, 인간과 소프트웨어, 인간과 환경, 인간과 하드웨어 분야의 인적요인 적용 가능성을 살펴보고, 인적요인 강화대책에 대해 고찰하였으며, 인적요인에 관한 다양한 연구를 수행해야 한다고 강조하였다. FAA(2021)는 고도화된 자율주행 운송 수단(HAV)이 UAM 환경 내에서 운영하게 된다면 복잡한 운영환경을 초래하고, 새로운 공역에서 새로운 운송 수단을 운영하기 때문에 복잡하고 다양한 인적요인이 존재하게 될 것으로 예상하였다. HAV 개념이 개발됨에 따라 추가적인 인적요인에 대한 조사와 분석이 필요하고, 시스템과 인간이 상호 작용하여 최적의 성능을 발휘하도록 초기 및 성숙 단계 전반에 걸쳐 시스템 개발과 함께 인적요인 연구의 필요성을 제기하였다. Michiel et al.(2019)은 12명의 항공사고 조사

전문가를 대상으로 미래 UAM 사고 원인에 대한 설문 조사를 시행하였고, 조사 결과에 따르면 UAM 운전자 간 인적요인의 실패와 UAM이 운영하게 될 도시 환경과 관련이 있는 것으로 밝혀졌다. 또한, UAM 설계 시 UAM 사고 원인을 고려하여 시스템을 개발하고, 정확한 사고 원인 조사를 위해 데이터와 비디오를 모두 녹화할 수 있는 기록 장치를 UAM 기체의 필수 설계 요건으로 갖출 것을 권장하였다.

2.3 UAM-PSU

PSU는 UAM 교통관리 서비스 제공자로서 UAM 기체 간 및 UAM 기체-타 항공기 간 충돌 회피, 공역, UAM 회랑, 버티포트 등의 인프라 가용성 등을 실시간으로 감시·관리하여 교통관리·관제 서비스를 제공한다. 또한, UAM 운항자의 안전하고 효율적인 운항을 위해 PSU 간, PSU-UAM 간 네트워크를 통한 정보를 공유하는 등의 역할을 수행하며, 항공운송산업 내 항공교통관제사의 역할과 유사하다(MOLIT, 2021). 국토교통부는 교통관리 자동화 및 운용 기체 증가 등을 고려한 UAM 미래 시나리오를 초기, 성장기, 성숙기로 구분하여 PSU의 역할을 Table 3과 같이 기술하였다.

2.4 HFACS 모델

HFACS는 1990년에 James Reason이 개발한 Swiss Cheese Model의 기본 구조를 기반으로 하여 인적요인을 보다 세분화하고 체계적으로 분석하기 위해 Sha-

Table 3. The role of PSUs in each stage of UAM future scenarios

구분	내용
초기 (‘25-’29)	<ul style="list-style-type: none"> • 배타적 비행을 위한 고정형 비행항로(fixed corridor)를 설정할 계획 • PSU는 ATC 서비스를 활용하여 교통관제 서비스 제공
성장기 (‘30-’35)	<ul style="list-style-type: none"> • 일부 UAM 교통관리 체계 구축으로 실시간 비행회랑 운영이 가능한 혼합형 비행항로(mixed corridor)를 설정할 계획 • PSU는 UAM 교통관제를 담당하고 비상상황 시 ATC가 교통관제 개입
성숙기 (‘35 이후)	<ul style="list-style-type: none"> • UAM 교통관리 체계 구축이 완료되어 혼합형 비행항로(mixed corridor)를 통한 도시 간 이동으로 확대 • PSU는 UAM 교통관제를 담당하고 비상상황 시 ATC가 교통관제 개입

ppell과 Wiegmann에 의해 개발된 인적요인 분석 및 분류 시스템이다. 또한, HFACS는 인적요인이 항공 사고에 미치는 영향을 체계적으로 분석하기 위한 프레임워크로서, 사고의 근본 원인을 규명하고, 이를 바탕으로 한 예방 대책을 수립하는 것을 목적으로 하고 있다. 항공 분야를 포함하여 철도 사고, 해양 사고, 광산 사도 등 다양한 분야에서 활용되고 있다(Tao et al., 2019).

HFACS는 인적요인을 네 가지 실수단계인 불안전한 행위(unsafe acts), 불안전한 행위의 전제조건(preconditions for unsafe acts), 불안전한 감독(unsafe supervision), 조직의 영향(organizational influence)으로 Fig. 3과 같이 구분한다. 조직의 영향은 가장 상위의 인적요소이며, 사고의 직접적인 요소가 아닌 하위의 다른 모든 요소에 간접적인 형태로 사고에 영향을 준다. 불안전한 감독은 불안전한 행동의 전제조건으로 이어지며, 불안전한 행동에 이르게 된다. 일련의 단계들은 각 단계마다 서로 구분되는 하위요인들로 나누어지고, 하위요인별로 구체적인 인적요인 항목을 분류하고 있다.

상위 4가지 요소에 대해 세부적으로 살펴보면, 조직의 영향은 감독자뿐만 아니라, 운영자의 조건과 행동에 직접적인 영향을 주며, 조직 내에 내포되어 있는 잠재된 문제와 관련되어 있다. 자원의 관리(resource management), 조직의 분위기(organizational climate), 조직의 과정(organizational process)으로 구분된다. 불안전한 감독은 감독자의 지시, 통제, 계획, 관리 등 감독

자의 행위와 결정이 사고에 미치는 영향을 나타낸다. 부적절한 감독(inadequate supervision), 계획의 부적절한 운영(planned inappropriate operations), 문제점 수정 실패(failed to correct problem), 감독 위반(supervisory violations)로 분류되며, 감독 실패, 훈련 실패, 부적절한 인원 배정, 실수 문제 교정 실패 등의 요인이 있다. 불안전한 행위의 전제조건은 불안전한 행위와 관련한 운영 환경, 인적 상태, 팀워크 등을 포함한다. 부적절한 정신적 상태(Adverse Mental States), 부적절한 신체적 상태(adverse physiological states), 신체적/정신적 한계(physical/mental limitations)의 요소로 구성되는 운영자의 표준 이하의 조건(substandard conditions of operators)과 부적절한 승무원 자원관리(crew resource mismanagement), 개인의 준비상태(personal readiness)의 요소를 포함하는 운영자의 표준 이하의 실행(substandard practices of operators)이 있다. 불안전한 행위는 직접적으로 사고를 유발하는 행위로서 오류(error)와 위반(violations) 2가지가 존재한다. 오류는 인간의 능력한계와 특성 때문에 개인의 정신적, 육체적 활동이 의도한 결과에 도달하지 못하는 것을 의미하며, 위반은 비행안전에 적용되는 규정이나 절차를 반복적, 예외적으로 무시하는 것을 의미한다.

HFACS는 사고 원인을 체계적으로 분석하고 분류할 수 있는 특징을 지니고 있지만, HFACS의 프레임워크가 포괄적인 구조로 되어 있어서 특정 운용 환경에서의 문제를 구체적으로 식별하기 어려움도 있다(Matthew, 2002). 또한, HFACS의 사고 분석결과와 정확성이 조사자의 능력에 따라 상이하다면 부적절한 방법을 사용하여 모호하게 보고될 수 있다(Nikki, 2011). Tao(2019)는 HFACS의 정확한 결과를 도출하고, ATC-HFACS 프레임워크를 구축하기 위해 전문가들과 ATC와 관련한 142건의 항공 사고를 분석하여 관련 인적요인을 식별하고 분석하였으며, ATC-HFACS 상위요소별 관련 요인을 Table 4와 같이 제시하였다.

III. 실증 분석

3.1 계층화 분석법(AHP)

계층화 분석법(AHP)은 조직 최고 결정자 개인의 주관적·직관적인 의사결정보다는 많은 사람의 의견을 반영한 객관적·분석적인 의사결정이 보다 합리적이라는 가정 아래, 현대사회같이 복잡한 문제가 얽혀 있는

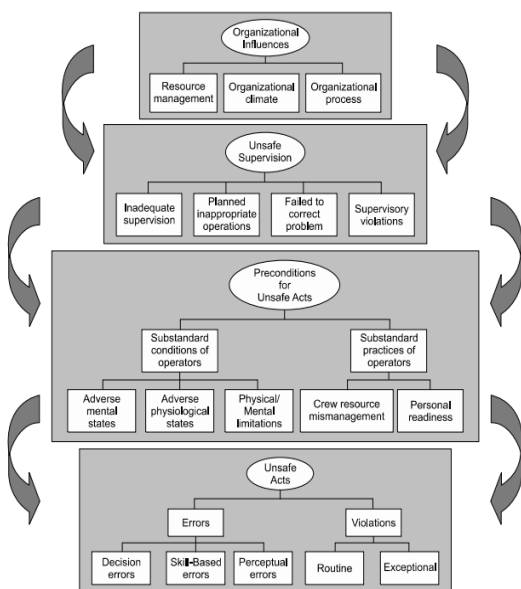


Fig. 3. Overview of the HFACS

Table 4. Related Factors by top-level elements of ATC-HFACS

구분	내용
조직의 영향	안전문화, 팀 인적 자원 할당, 급여 및 보상, ATC/항공승무원 협력, ATC 하드웨어/소프트웨어
불안정한 감독	감독 계획 부족, 부적절한 관리 규정, 관리 시행 실패, 부적절한 행위 수정 실패, 비효율적인 모니터링
불안정한 행위의 전제조건	피로, 교육 및 훈련, 소음, 신체적/정신적 상태, 환경적 요인, ATC 통신, 수면 부족
불안정한 행위	절차 미준수, ATC 통신 오류, 의사결정 오류, 부주의, 비표준 용어 사용, 주의산만, 집중력 부족, 정보 오류

경우, 다양한 데이터와 정보를 통합하여 종합하고, 장단기 상황을 고려하여 논리적인 의사결정을 하는 방법이다. AHP는 복잡한 문제를 계층적 구조로 분해하여 쌍대비교를 통해 각 요소의 중요도를 평가하고, 3가지 원칙에 기반한다. 첫째, 분석할 대상에 대해 계층 구조를 구체적으로 구성하고, 둘째, 각 계층에서 1부터 9까지의 척도를 사용하여 상대적 중요도를 쌍대비교 행렬을 사용해 우선순위를 결정한다. 셋째, 일관성 비율(CR, consistency ratio)을 계산하여 평가의 일관성을 검토해야 하며, 일관성 비율이 0.1이하이면 일관성이 있다고 판단하게 된다(Saaty, 2008). AHP는 의사결정의 대표적인 방법으로 공공기관, 기업 등 다양한 분야에서 최선의 대안을 선택하기 위해 이용되고 있다.(Kim et al., 2010).

이처럼 AHP는 복잡한 문제를 계층화하여 의사결정을 하는데 유용하고 항목별 중요도를 비교하여 우선순위를 결정할 수 있어서 AHP를 활용한 연구가 지속 활용되고 있다. 따라서 본 연구에서 향후 UAM이 상용화되기 전에 항공교통관제사와 유사한 역할을 담당할 PSU의 인적요인 우선순위에 대해 AHP 기법을 이용하여 중요한 인적요인을 도출하는 것은 적절한 연구방법이라고 판단된다.

3.2 연구대상 및 연구모형 설계

본 연구는 UAM 내 PSU 중요 인적요인의 상대적 중요도와 우선순위를 파악하여 안전한 UAM 운항과 사고 예방에 기여할 수 있는 효율적인 관리 방안을 제시하고자 한다. 따라서 현업에 종사하고 있는 고경력 조종사 및 항공교통관제사 총 20명을 전문가 집단으로 선정하

였다. AHP 설문을 수행하기에 앞서 설문 구성은 항공전문가와 브레인스토밍 과정을 통해 ATC-HFACS 모델을 선정하였다. 설문 구성은 HFACS 모델의 상위 4가지 요소와 하위 16가지 요소로 분류하였으며, Fig. 4와 같이 각 요소별로 ATC에 적용 가능한 요인을 정리하여 설문을 진행하였다. 기존 HFACS 모델에서 '불안정한 행위'의 중위 계층은 PSU에 영향이 미치는 수준을 고려하여 일반적인 수준에서 계층을 형성하였다. 또한, 생소한 개념에 대한 이해와 PSU에 영향 요인을 파악하기 용이하도록 설문조사 시 각 요소별 ATC 관련 요인에 대해 설명하였다.

3.3 AHP 분석 및 결과

본 연구는 설문조사 결과를 토대로 쌍대비교 행렬을 통해 정규화 과정을 거쳐 상대적 중요도를 도출하였다. 각 항목별 상대적 중요도 순으로 우선순위를 결정하였으며, 평가자의 판단에 대한 논리적 모순을 측정하기 위해 일관성 검증(CR)을 수행하였다. 일관성 검증(CR)은 일관성 지수(CI, consistency index)와 임의 지수(RI, random index)로 결정되며, 모든 항목의 CR 값이 0.1 미만으로 합리적인 수준의 결과 값을 Table 5와 같이 도출하였다.

AHP 기법을 활용하여 도출한 쌍대비교 행렬, 상대적 중요도, 일관성 검증(CR)에 대한 분석결과는 다음과 같다. 첫째, 조직의 영향은 Table 6과 같이 분석결과가 도출되었으며, 자원관리(A), 조직문화(B), 운영 프로세스(C)의 하위 계층을 분석하였다. 일관성 검증(CR)은 0.055로

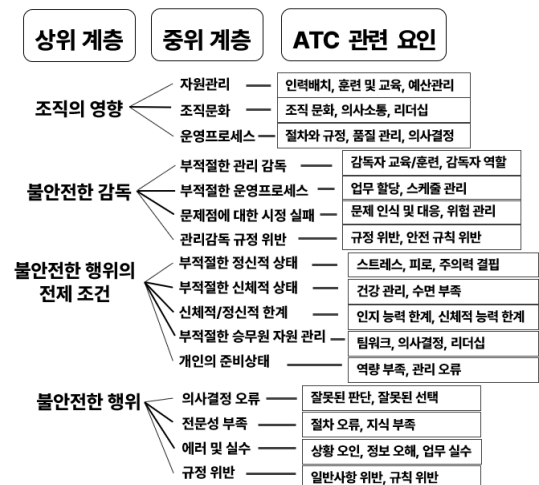


Fig. 4. AHP research model

Table 5. Consistency ratio value

구 분	일관성 검증(CR) 값
조직의 영향	0.055
불안정한 감독	0.076
불안정한 행위의 전제조건	0.051
불안정한 행위	0.097

Table 6. Analysis results of organizational influences

쌍대 비교			
	A	B	C
A	1	4.26	3.07
B	0.23	1	1.67
C	0.32	0.59	1
상대적 중요도			
A	B	C	
0.63	0.2	0.16	
일관성 검증(CR)			
0.055			

신뢰할 수 있는 수준이었고, 자원관리가 가장 상대적 중요도가 높아 중요한 변수로 판명되었다. 자원관리는 인력 부족, 부적절한 근무 관리, 훈련 및 교육 부족, 예산 부족 등과 관련이 있다. 이는 업무부담, 팀워크, 피로, 상황인식, 주의력 등의 인적요인에 영향을 미치는 요소이다.

둘째, 불안정한 감독은 Table 7과 같이 분석결과가 도출되었으며, 부적절한 관리 감독(A), 부적절한 운영 프로세스(B), 문제점에 대한 시정 실패(C), 관리감독

Table 7. Analysis results of unsafe supervision

쌍대 비교				
	A	B	C	D
A	1	2.49	3.29	3.12
B	0.4	1	4.85	4.5
C	0.3	0.2	1	0.73
D	0.32	0.22	1.36	1
상대적 중요도				
A	B	C	D	
0.44	0.34	0.09	0.11	
일관성 검증(CR)				
0.076				

규정 위반(D)의 하위 계층을 분석하였다. 일관성 검증(CR)은 0.076으로 신뢰할 수 있는 수준이었고, 부적절한 관리 감독이 가장 상대적 중요도가 높아 중요한 변수로 판명되었다. 부적절한 관리 감독은 감독자의 역할 부족, 모니터링 부족, 교육 및 훈련 부족 등과 관련이 있다. 이는 의사소통, 상호 협력, 판단력, 상황인식, 팀워크, 커뮤니케이션 능력 등의 인적요인에 영향을 미치는 요소이다.

셋째, 불안정한 행위의 전제조건은 Table 8과 같이 분석결과가 도출되었으며, 부적절한 정신적 상태(A), 부적절한 신체적 상태(B), 신체적/정신적 한계(C), 부적절한 승무원 자원 관리(D), 개인의 준비상태(E)의 하위 계층을 분석하였다. 일관성 검증(CR)은 0.051로 신뢰할 수 있는 수준이었고, 부적절한 정신적 상태가 가장 상대적 중요도가 높아 중요한 변수로 판명되었다. 부적절한 정신적 상태는 피로, 스트레스, 업무 압박, 불충분한 업무 준비 등과 관련이 있으며, 업무수행에 있어 정확한 판단과 주의 집중이 어려워지는 등 부정적인 영향을 미치는 상태이다. 이는 피로, 스트레스, 주의력, 판단력, 업무부담, 경계소홀, 안이함, 문제해결력 등의 인적요인에 영향을 미치는 요소이다.

넷째, 불안정한 행위는 Table 9와 같이 분석결과가 도출되었으며, 의사결정 오류(A), 전문성 부족(B), 에러 및 실수(C), 규정위반(D)의 하위 계층을 분석하였다. 일관성 검증(CR)은 0.097로 신뢰할 수 있는 수준이었고, 전문성 부족이 가장 상대적 중요도가 높아 중요한 변수로 판명되었다. 전문성 부족은 업무 수행 오류, 절

Table 8. Analysis results of preconditions for unsafe acts

쌍대 비교					
	A	B	C	D	E
A	1	3.46	3.67	1.56	3.66
B	0.29	1	1.96	1.93	2.23
C	0.27	0.51	1	1.54	1.43
D	0.64	0.52	0.65	1	1.5
E	0.27	0.45	0.7	0.67	1
상대적 중요도					
A	B	C	D	E	
0.41	0.21	0.13	0.14	0.09	
일관성 검증(CR)					
0.051					

Table 9. Analysis results of unsafe acts

쌍대 비교				
	A	B	C	D
A	1	0.16	2.29	1.74
B	6.25	1	2.69	4.26
C	0.44	0.37	1	1.71
D	0.57	0.23	0.58	1
상대적 중요도				
A	B	C	D	
0.18	0.55	0.15	0.1	
일관성 검증(CR)				
0.097				

차 오류, 지식 부족 등과 관련이 있다. 이는 상황인식, 주의력, 판단력, 안이함, 의사소통, 의사결정 등의 인적 요인에 영향을 미치는 요소이다.

3.4 ATC-PSU 인적요인 비교분석

AHP 기법을 활용하여 전문가들의 설문결과를 분석한 결과, ATC-HFACS 계층별 우선순위를 도출하였고, 각 상위 계층의 가장 중요도가 높은 항목과 관련된 인적요인을 모두 발췌하여 영향을 많이 미치는 순서대로 Table 10과 같이 정리하였다.

항공교통관제사와 PSU의 인적요인에 대해 관련성을 파악하기 위해 상대적 중요도 비교를 실시한 결과를 Fig. 5와 같이 시각화하였다. 항공교통관제사의 인적요인은 ICAO, FAA, EUROCONTROL 및 NTSB에서 권고하는 항공교통관제 분야의 핵심 인적요인 10가지를 비교 항목으로 설정하였으며, PSU의 인적요인은 AHP 분석결과를 통해 도출된 Table 10의 10가지 항목으로 비교하였다.

상대적 중요도 비교 결과, ATC와 PSU 각각 비교 항목에 없는 건망증과 업무부담을 제외하면 상황인식, 피로, 스트레스, 팀워크는 ATC와 PSU 모두에서 동일한 순위로 나타났다. 이는 4가지 요인이 ATC와 PSU 업무수행에 모두 중요하게 인식되고 있음을 시사한다. 향후 UAM에서 PSU가 업무를 수행할 때, 항공교통관

Table 10. Human factors of PSU

인적요인
상황인식, 피로, 스트레스, 판단력, 의사결정, 부주의, 의사소통, 경계소홀, 팀워크, 업무부담

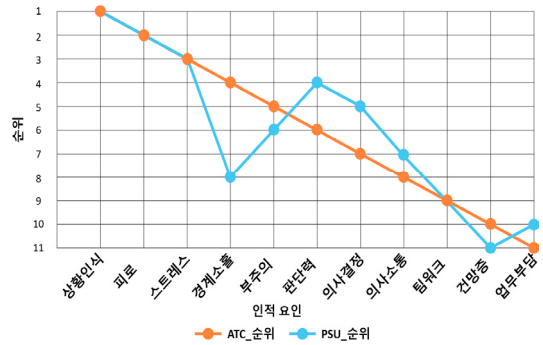


Fig. 5. Comparison of HF between ATC and PSU

제사와 유사하게 높은 중요도 순위를 차지하는 상황인식, 피로, 스트레스는 사고와 직결될 수 있는 인적요인으로서 효율적으로 관리하기 위한 안전조직, 안전정책, 안전관리시스템, 안전 교육 및 훈련프로그램 등이 절실히 필요하다.

IV. 결론

4.1 연구의 요약

최근 대도시권으로의 인구 집중 현상과 도시화 가속화로 인해 다양한 도시 문제가 대두되고 있으며, 특히, 교통 혼잡에 대한 문제의 심각성을 지적하고 있다. 이를 해결하기 위해 새로운 미래항공교통수단인 UAM에 대한 미래 기술, 인프라, 정책, 제도 등의 연구·개발이 활발하게 진행되고 있지만, 사고의 직·간접적인 원인인 인적요인에 관한 연구는 미비한 상태이다. UAM 생태계는 항공운송산업과 비슷한 형태의 구조로 되어 있다. UAM 내 PSU는 UAM 교통관리, 관제서비스 제공 등을 담당하며, 항공교통관제사와 유사한 역할을 한다. 따라서 본 연구에서는 PSU의 중요 인적요인을 도출하고자 항공전문가를 대상으로 AHP 기법을 활용하여 분석하였으며, 도출된 PSU의 인적요인과 항공교통관제사의 인적요인을 비교·분석하였다. 이를 통해 PSU의 중요 인적요인에 대한 효율적인 관리방안을 제시하여 UAM 사고 예방 및 안전한 UAM 운항에 기여하고자 하였다. PSU의 중요 인적요인은 상황인식, 피로, 스트레스, 판단력, 의사결정 등 항공교통관제사의 인적요인과 유사한 것으로 파악되었다.

4.2 연구의 시사점

ATC-HFACS 계층 구조를 통해 AHP 기법을 활용

하여 중요 인적요인을 도출한 결과, 자원관리, 부적절한 관리 감독, 부적절한 정신적 상태, 전문성 부족이 각 상위계층에서 가장 중요도가 높은 순위로 나타났으며, 중요 인적요인에는 상황인식, 피로, 스트레스, 판단력, 의사결정 등이 있었다. 또한, 항공교통관제사와 PSU의 인적요인을 비교 분석한 결과, 대부분 인적요인이 비슷한 수준을 보여주었으며, 상위 3가지 요인(상황인식, 피로, 스트레스)에 대한 시사점과 효율적인 관리방안에 대해 정리하였다.

첫째, 상황인식은 항공교통관제사와 PSU에서 중요도가 가장 높은 1순위에 해당한다. 상황인식은 현재 상황에 대한 시간적, 공간적 정보를 정확하게 지각하고, 그 정보를 바탕으로 현재 상황에 대한 이해와 앞으로 일어날 상황을 올바르게 예측하는 능력이다. 최근 복잡해진 항공교통 상황을 안전하고 효율적으로 운항하기 위해서 관제사의 전문성이 무엇보다 중요하며, 관제사의 핵심적 능력은 상황인식이다(Song et al., 2012). 그러므로 PSU는 상황인식 능력을 향상시키기 위해 다양한 상황별 교육 및 훈련을 통해 서술적 지식과 절차적 지식을 습득하고, 시뮬레이션을 통해 이러한 지식을 반복적으로 적용하는 것이 필요하다. 특히, 상황인식 능력은 정상 상황보다 비정상 상황에서 큰 역할을 하므로 발생한 모든 상황에 대해 주기적으로 훈련해야 한다.

둘째, 피로는 장시간 근무, 야간근무, 불규칙한 근무, 불충분한 휴식 등의 이유로 나타나는 부적절한 정신적 상태이다. PSU는 UAM 기체 간, UAM 기체-타 항공기 간 충돌 방지, UAM 회랑 감시, 버티포트 운영 관리 등 교통관리를 수행하기 때문에 효율적 운영을 위해 연속적으로 근무해야 하는 교대근무를 적용할 가능성이 있다. 교대근무 시 수면장애에 의한 집중력, 기억력, 인내심, 판단력 저하를 현저하게 가져온다. 이에 따라 항공분야에서는 ICAO, FAA 등 국제항공기구에서 피로 위험관리시스템을 적용하여 인적요인을 관리하고 있으며, 적용 여건이 부족한 곳은 교대 근무시간 조절을 통해 관리하고 있다. Kim(2023)은 항공교통관제 분야 교대 근무자를 위한 피로관리 전략으로 최적의 교대 방식, 교대 방향, 교대 근무시간, 야간근무 등을 제시하였으며, 피로관리를 위한 전략적인 방안과 교육프로그램을 개발해야 한다고 하였다. UAM 사고 예방을 위한 안전관리를 위해서 최적의 교대근무 형태를 모색하고, PSU의 피로관리 전략 방안을 구축하여 UAM 전체 이해관계자들에 확대 적용하는 것이 필요하다.

셋째, 스트레스는 관제업무 과부하, 시간 압박, 예측

불가능한 돌발상황, 항공안전장애 발생 등에 따른 정신적 상태를 의미하여 항공교통관제사는 스트레스 많이 받는 것으로 알려져 있다. 이는 개인의 능력에 비해 더 많은 것을 요구하는 상황에서 오는 압박감으로 인해 발생하며, 업무수행의 곤란을 초래하고 실수를 유발한다. 관제업무는 고도의 전문성과 집중력을 요구하며, 한 번의 실수가 막대한 사고로 이어질 가능성이 크기 때문에 스트레스 요인이 많이 작용한다. 항공교통관제사의 92%가 심리적 스트레스를 경험하며, 스트레스가 미치는 부정적 영향을 완화하기 위한 체계적인 스트레스 관리 대책의 도입 필요성을 강조하고 있다(Zhaoing et al., 2023). 스트레스를 효율적으로 관리하기 위해서는 개인 및 팀 차원에서의 효과적인 교육 체계 확립이 필요하다. 또한, 조직적 차원에서는 교육 체계 확립을 위한 지원이 요구된다. PSU 또한, 예측 불가능한 상황에 대한 압박, 물리적 환경, 사고 발생 등 스트레스 유발요인이 존재하므로 UAM 상용화 이전에 조직적, 팀 및 개인적 체계적인 스트레스 관리 교육 체계를 확립할 필요가 있다. 또한, UAM은 다양한 이해관계자들 간 효율적인 업무수행을 팀 차원에서 수행하기 때문에 항공교통 서비스의 안전과 효율성을 최적화하기 위해 사용 가능한 모든 자원(정보, 장비, 사람 등)을 최대한 활용하기 위한 TRM(team resource management) 개념을 적용한 관리가 요구된다.

본 연구에서는 UAM의 다양한 이해관계자 중 항공교통관제사와 유사한 역할을 담당하는 PSU의 인적요인에 대한 분석을 통해 효율적인 관리 방안과 시사점을 제시하였다. 아직 UAM은 상용화 이전 단계에서 연구·개발이 진행되고 있으며, 주요 항공기구에서 국제적인 표준화된 규정, 지침, 기준 등을 수립하고 있는 단계인 만큼 구체적인 PSU의 역할, 세부 업무 등을 바탕으로 분석하는데 한계점이 있다.

향후 과제로 PSU 양성을 위한 교육·훈련 체계 내 PSU의 중요 인적요인을 효율적으로 관리하기 위한 안전프로그램에 관한 연구와 항공운송산업에서 시행하고 있는 안전관리시스템, 피로관리시스템, TRM 등의 도입 방안에 대해 고찰하고자 한다.

References

1. UN Habitat, "Envisaging the future of cities, world cities report 2022", UN Habitat, Nairobi,

- 2022, pp.36-42.
2. Park, S. J., Yeo, W. J., and Hwang, H. W., "The policy suggestions for UAM passengers' in-flight safety and security", *Journal of the Aviation Management Society of Korea*, 19(4), 2021, pp.93.
 3. IATA, "IATA annual safety report", IATA, 2023, pp.1-34.
 4. Bhomin, B. C., "Human factors considerations for urban air mobility", *International Symposium on Aviation Psychology*, Wright State University, 2021, pp.10.
 5. FAA, "Research plan to investigate highly automated vehicle(HAV) human factors implications", FAA, 2021, pp.1-16.
 6. NASA, "Urban air mobility(UAM) vision concept of operations(ConOps) UAM maturity level (UML)-4", NASA, Washington DC, 2021, pp.18-20.
 7. FAA, "Urban air mobility(UAM) concept of operations v2.0", FAA, Washington DC, 2023, pp.8-10.
 8. MOLIT, "K-UAM roadmap", MOLIT, Sejong, 2020, pp.6-18.
 9. Rodgers, M. D., Mogford, R. H., and Strauch, B., "Situation awareness analysis and measurement", Lawrence Erlbaum Associates Publishers, Mahwah, 2000, pp.73-112.
 10. Kwon, B. H., "Final report of research service on introduction plan for air traffic controller fatigue management system", MOLIT, 2018, pp.2.
 11. Moon, W. C., Choi, Y. C., and Yang, H. M., "Association of human error on air traffic controller and pilot", *Journal of the Korean Society for Aviation and Aeronautics*, 16(4), 2008, pp.36-37.
 12. Kim, J. B., "A Study on the UAM-PSU (provider of services)'s human factors and TEM for air safety management: Including case studied on aircraft accidents by air traffic controller's human error", M.S. Thesis, Korea National University of Transportation, Chungju, 2023.
 13. MOLIT, "K-UAM technology roadmap", MOLIT, Sejong, 2021, pp.67-68.
 14. Tao, L., Wenbin, S., and Ke D., "Human factors analysis of air traffic safety based on HFACS-BN model", *Applied Sciences, Multidisciplinary Digital Publishing Institute*, 9(23), 2019, pp.1-2.
 15. Beaubien, J. M., and Baker, D. P., "A review of selected aviation human factors taxonomies, accident/incident reporting systems, and data reporting tools", *International Journal of Applied Aviation Studies*, FAA Academy, 2(2), 2002, pp.11-36.
 16. Nikki, S. O., "Coding ATC incident data using HFACS: Inter-coder consensus", *Safety Science*, Elsevier, 49(10), 2011, pp.2.
 17. Thomas L. S., "Decision making with the analytic hierarchy process", *International Journal of Services Sciences*, Inderscience Publishers, 1(1), 2008, pp.83-98.
 18. Kim, W. Y., Kim, D. H., and Choi, Y. C., "A study on application limitation of AHP priority vector with expert measurement", *Journal of the Korean Society for Aviation and Aeronautics*, 18(3), 2008, pp.92.
 19. Song, C. S., Yoon, Y. S., and Son, Y. W., "The effect of expertise on air traffic controller's situation awareness", *Korean Journal of Industrial and Organizational Psychology*, 25(3), 2012, pp.521-522.
 20. Zhang, Z., Shi, Z., Li, N., and Zhang, Y., "Study of psychological stress among air traffic controllers", *Engineering Psychology and Cognitive Ergonomics : 20th International Conference*, Springer, Copenhagen, 2023, pp.501-519.