

Original Article

<https://doi.org/10.12985/ksaa.2024.32.1.001>
ISSN 1225-9705(print) ISSN 2466-1791(online)

SHELL 모델과 HFACS를 활용한 영국 민간 무인 항공기 사고 요인 특징 분석

김도윤*, 장조원**

Characteristics Analysis of Accident Factors of UK Civil Unmanned Aircraft Using SHELL Model and HFACS

Do Yun Kim*, Jo Won Chang**

ABSTRACT

The unmanned aerial vehicle industry has developed a lot, but the possibility of accidents is increasing due to potential risks. In this study, SHELL models and HFACS were used to analyze unmanned aerial vehicle accidents in the UK and to identify the main causes and characteristics of accidents. The main cause analyzed by the SHELL model was identified as an abnormality in the alarm system. The main cause of the accident analyzed by HFACS was identified as the technical environment. The common cause identified by the SHELL model and HFACS was identified as a mechanical problem of unmanned aerial vehicles. This is due to the lack of accurate information or functionality of the alarm system in the operator interface, which often prevents the operator from responding to sensitive information. Therefore, in order to prevent civil UAV accidents, the stability and reliability of the system must be secured through regular inspections of the UAV system and continuous software updates. In addition, an ergonomic approach considering human interfaces is needed when developing technologies.

Key Words : SHELL Model(셸 모델), Unmanned Aircraft(무인 항공기), Human Factors(인적요인), Accident Investigation Report(사고조사보고서), HFACS(인적요인 분석 및 분류체계)

1. 서 론

무인 항공기는 초기에 군사적인 용도로 개발되었지만, 이후 인간이 접근하기 어려운 지역의 감시 및 탐사 등 다양한 산업으로 확장되었다(김재우, 2020). 미국의

UAV 기업인 틸 그룹(Teal Group)은 2017년부터 10년 동안 민간용 무인 항공기 시장이 연평균 43.9%의 성장률을 보여 감시 및 검사 분야에서 큰 성장 가능성을 가질 것으로 전망했다(한국과학기술기획평가원, 2018). 항공안전기술원은 국내에서 2016년부터 초경량비행장치(무인동력비행장치) 조종자 자격을 취득하는 사람들과 기체의 안전성 인증 현황이 증가하고 있다고 했다(항공안전기술원, 2022).

국내·외적으로 무인 항공기 산업은 급속한 확산 추세이며, 이로 인한 사고도 끊임없이 발생하고 있다. 2024년 1월 현재 우리나라 항공철도사고조사위원회의 초경량비행장치 사고조사보고서를 살펴보면, 무인 헬

Received: 4. Oct. 2023, Revised: 19. Dec. 2023,
Accepted: 22. Feb. 2024

* 한국항공대학교 일반대학원 항공운항관리학과 석사

** 한국항공대학교 항공운항학과 교수

연락처 E-mail : jwchang@kau.ac.kr

연락처 주소 : 경기도 고양시 덕양구 항공대학로 76 한국

항공대학교 본관 416호

리콥터 사고 3건과 무인 멀티콥터 사고 2건의 총 5건만 기록되어 있다. 그래서 다양하게 발생하는 사고 원인을 정확히 파악하기 곤란한 실정이다. 이는 국내 사고의 미비한 보고체계와 규제 및 신고 의무 미흡 등도 포함된다. 전 세계적으로 민간 무인 항공기의 기술이 발전함에 따라 가격이 저렴해지고, 이에 따라 민간에서 사용하는 무인 항공기 운용이 점차 늘어나고 있지만, 이 중에는 적절한 교육을 받지 않고 운용하는 경우가 발생한다. 이로 인해 안전 교육 및 절차를 따르지 않을 때는 사고 발생 가능성이 크다. 또한, 운용자의 안전의식 및 역량 문제 이외에도 자동화된 시스템을 의존하는 경우에는 시스템의 결함이나 기술적 제한과 인적 감독이 부족한 상황 등 예기치 않은 상황에 대처하기 어렵다. 더불어 개인 운용 및 소규모 운용에서는 규제나 보고에 대한 인식이 부족하거나, 법적 책임을 회피하려 사고를 보고하지 않는 경우가 발생한다. 이는 민간 무인 항공기 사고율이 높다는 것을 시사하며, 사고의 유형과 원인에 관한 심층적인 연구가 필요하다.

민간 무인 항공기 사고는 조종자의 경험 및 기술 부족과 부주의 등 다양한 원인으로 발생한다. 인적 요인 분석 및 분류체계(human factors analysis and classification system, HFACS)를 통해 군 무인 항공기 사고 원인을 분석한 Oncu & Yildiz(2014)의 연구에서는 운용자의 안전하지 못한 행위로 인한 절차적인 문제가 사고의 주요 원인이라 했다. 그들은 기기의 기술적인 환경 문제에서 사람과 기기 간의 상호작용 실패 요인도 높은 비중을 차지하는 것으로 분석했다. 이렇듯 무인 항공기 운용자는 장비의 원리, 운용 방법과 비행 훈련 및 안전 절차 등의 안전 교육 프로그램을 배우고 습득하지만, 운용자의 기량 및 역량 범주에 속하는 안전하지 않은 행위에 의한 사고 발생 가능성이 크다는 것을 시사한다. Tvaryanas, Thompson & Constable(2006) 등은 1994년부터 2003년 사이에 발생한 221건의 미군 원격조종 무인 항공기 사고 원인들을 HFACS 기법을 통해 연구했다. 그들은 각 군에서 발생하는 최상위(top level)의 주요 원인 중에 조직의 영향 문제가 가장 크다고 분석했다.

앞선 선행연구를 통해 확인한 바와 같이 미군의 경우에는 사고조사보고서가 군에서 공시를 하고 있으며, 사고 원인 및 분석 연구가 가능하다. 국내에서도 군 무인 항공기 사고사례를 분석하고 있지만, 보안상 확인하기 어렵다. 아울러 우리나라 민간에서 발생하는 초경량 비행장치 무인동력비행장치 사고를 공시하고 있지만,

분석할 내용이 다소 부족하여 다양하게 발생하는 사고의 원인을 파악하기 어려운 실정이다.

따라서, 본 연구는 우리나라 무인 항공기 사고사례가 부족한 상황에서 체계적이고 심층적인 분석을 위해 영국 항공사고조사국(Air Accidents Investigation Branch)의 민간 무인 항공기 사고조사 결과보고서를 활용하였다. 이를 기반으로 한 자료 40건을 토대로 SHELL 모델과 HFACS를 이용해 분석하였다. 이로써 운용자의 안전 실패 원인을 분석하고, 예방 대책을 수립하여 민간 무인 항공기의 다양한 사고 원인과 조종자와 기기 간의 상호작용 실패 원인을 발굴한다. 더불어 기술적인 인터페이스의 원인 요소 분석을 통해 사고 예방 대책을 제안하고 수립했다.

II. 연구 방법 및 분석자료 선정

2.1 SHELL 모델과 HFACS 구성 요소

SHELL 모델은 사람(운영자)을 중심으로 상호관계의 실패를 조명하고, 사고의 유형을 파악하는데 쉬운 안전 관리 이론이다. 또한, 유인 항공기 인적 요인 사고 원인을 파악할 수 있도록 잘 알려져 있다. SHELL 모델은 Software(소프트웨어), Hardware(하드웨어), Environment(환경), Liveware(인간)와 Liveware(인간)로 구성되어 있다. 여기에서 Liveware(인간)는 주변 요소 간에 상호작용의 중심이 되는 중요한 구성 요소이다. 또 다른 Liveware(인간)의 의미는 주변 관계자를 의미한다(ICAO, 2012). 또, SHELL 모델은 인간 상호작용의 중요성을 포함한 기호 사용의 중요성을 다루고 있어서 스위스 치즈 모델의 적용에도 도움을 준다(ICAO, 1993).

Table 1은 SHELL 모델의 구성 요소에 무인 항공기 분야를 적용한 것이다. S(Software)는 항공법령, 비행 전·후 점검, 절차 매뉴얼, 체크리스트 등이 포함될 수 있고, H(Hardware)는 무인 항공기의 모든 부품, 배터리, 조종기 등이, E(Environment)는 이·착륙장의 여건, 휴식 시간, 기온, 습도, 강수, 자기장 영향, 주변 장애물, 풍향 및 풍속, 기압 등을 포함한다. L(Liveware)은 무인 항공기의 조종자를 의미하고, 또 다른 L(Liveware)은 부 조종자, 보조자, 지상조업 인원, 감독관 등을 나타낸 것이다.

HFACS는 인적 요인 분석 도구로 항공 및 해상 분야에서 발생하는 사고와 준사고의 인적 요인을 분류하고 분석하는 데 사용된다. 이것은 1990년 James Reason

Table 1. Components of an unmanned aerial vehicle in SHELL model

SHELL	관련 요소	SHELL 모델에 무인 항공기 적용 결과
S	규정 및 절차	항공법령, 비행 전·후 점검, 절차 매뉴얼 숙지, 체크리스트
H	모든 기계류 및 장비	무인 항공기 부품, 배터리, 조종기
E	비행장 및 작업장 환경	이·착륙장 환경, 휴식 시간, 기온, 습도, 강수, 자기장, 장애물, 풍향 및 풍속, 기압
L	운용자	무인 항공기 조종자
L	운용자에 관여된 사람	부 조종자, 보조자, 지상조업 인원, 감독관

교수가 제안한 스위스 치즈 모델(Swiss Cheese model)을 기반으로 개발되었다. 이후 미 공군, 육군, 미연방 항공청(FAA), 미연방교통안전위원회(NTSB) 등에서도 사용된다. HFACS는 능동적 실패 요인과 잠재적 실패 요인, 즉 인적 오류의 원인을 식별하기 위해 설계되었으며, 사전적 안전관리 및 사고조사 결과를 통해 인적 오류의 원인을 파악하고 이를 예방할 수 있다.

Table 2는 가장 최신 버전인 HFACS(Ver. 7.0)의 구성 요소를 나타낸 것이며, 최상위(top level)에는 행위(acts), 전제조건(preconditions), 감독(supervision), 조직적 영향(organizational influences) 등 4단계로 구성된다. 최상위 하위에 근본 범주(root category)가 있으며, 그 하위에는 더욱 구체적인 세부 코드(nanocode)가 있다.

본 연구는 무인 항공기 운용의 안전성을 향상하기 위해 SHELL 모델과 HFACS를 통해 인적 요인을 분석하여 사고와 준사고의 원인을 파악했다.

2.2 연구 방법 및 범위

국내·외 무인 항공기의 운용 증가에 따라 사고 위험성은 높아지고 있다. Tvaryanas, Thompson & Constable(2006) 등은 HFACS를 활용하여 1994년부터 2003년 사이 10년간 발생한 미군의 원격조종무인항공기 사고사례 221건을 분석하였다. 분석 결과, Top level 인 조직의 영향 문제에서는 미 공군의 비중이 약 64%, 미 해군은 약 50%로 높게 분석되어 전 군이 다소 높았다. 각 군의 조직의 영향 중에서 요인별 가장 비중이 높은 세부요소는 정책 및 절차 마련 문제임을 확인했다. 불안정한 행위의 전제조건에서는 미 공군의 비중이 약

Table 2. Components of HFACS (ver 7.0)

Top level	근본 범주(Root category)
행위 (Acts)	성능기반 오류 (performance-based errors)
	판단/의사결정 오류 (judgment & decision-making errors)
	규정 위반(violence)
전제조건 (Preconditions)	물리적 환경 문제 (physical environment)
	기술적 환경 문제 (technological environment)
	협동(teamwork) 실패
	육체적 문제(physical problem)
	정신적 상태(state of mind)
	감각적 인지 저하 (sensory misperception)
	정신적 인지 저하 (mental awareness)
감독 (Supervision)	계획된 부적절한 운영 (planned inappropriate operations)
	부적절한 감독 (inadequate supervision)
조직적 영향 (Organizational influences)	자원 문제 (resource problems)
	인력 선발 문제 (personnel selection & staffing)
	정책/프로세스 문제 (policy & process issues)
	조직 풍토/문화의 영향 (climate/culture influence)

45%로 높게 분석되었으며 미 육군과 해군은 각각 약 25%와 27%를 차지한다. 공군이 비교적 높게 분석되었으며, 육군 및 해군도 무시하지 못한 수준이다. 각 군의 조직의 영향 중에서 요인별 가장 비중이 높은 세부요소는 정책 및 절차 마련 문제임을 확인했다. 또한, 전체 사고에서 불안정한 행위의 전제조건 중 기술 기반 오류는 공군에서 약 50%로 가장 높게 분석되었다. 판단 및 의사결정 오류에는 각 군이 차이를 보이지 않았다.

국내 무인 항공기 사고사례 4건을 HFACS를 활용하여 분석한 이진희(2022)는 사고요인으로 운용자의 조종 미숙 및 부주의, 소프트웨어나 기기 오작동, 기상환경, 통신 시스템 오류, 훈련 방법 등이라고 했다. 또, Oncu & Yildiz(2014)는 터키군이 무인 항공기 운용 중에 인적 요인에 의한 사고를 예방하고자 HFACS를 활용하여 미 해군 무인 항공기 사고사례를 분석하였다. 분석 결과, 주요 사고요인은 불안정한 행위에서 운전자

의 적절하지 못한 절차로 인한 사고 원인이 확인되었다. 판단 및 의사결정 오류에서는 실시간 판단 미흡으로 인한 사고의 주요 원인이었다. 안전하지 못한 행위에서 기술적 환경 요소에 속하는 적절하지 못한 소통 장비와 계기 및 피드백 부적절 요인이 분석되었다. 아울러 운용자의 과신 및 안주하는 마음 상태가 사고 원인으로 밝혀졌다. 이처럼 다양한 인적 요인으로 인한 무인 항공기 사고가 일어나고 있다.

앞선 선행연구는 HFACS를 활용하여 인적요인 사고 원인을 분석하였으며, 본 연구에서는 SHELL 모델을 추가하여 민간 무인 항공기 사고 원인을 보다 포괄적으로 분석했다. 분석의 기반으로는 영국의 민간 무인 항공기 사고 및 준사고 보고서를 토대로 진행하였다.

Fig. 1은 본 연구의 연구 방법 및 순서를 나타낸 것이다. 본 연구는 사고 유발 세부 요인들을 ① SHELL 모델로 분석하고, ② 인적 요인 및 분류체계(HFACS)를 통해 세부 원인을 재분석했다. 그리고 두 가지 분석 결과에 ③ 중첩되는 요인들을 식별함으로써 ④ 무인 항공기의 인적 요인 사고를 예방하기 위해 안전관리에 중점을 두었다.

2.3 분석 자료 선정

우리나라 항공철도사고조사위원회는 2009년부터 초경량비행장치(무인동력비행장치) 사고조사를 수행하고 있지만, 2023년 현재까지 단 5건에 불과하다. 한편, 영국에서는 민간 무인 항공기 안전 강화 및 사고 예방을 위해 사고조사가 활발히 이루어지고 있다. 조사한 내용은 보고서로 철저하게 정리하여 대중에 공개하며, 조사를 통해 얻는 경험과 교훈을 다른 운용자들과 공유하고 있다. 영국은 사고조사 결과를 근거로 안전을 체계적으로 관리하여 민간 무인 항공기 산업 전반에는 긍정적인 영향을 미치고 있다. 아울러 비슷한 상황에서 다른 국가나 기업에서의 사고 방지를 위해 기여한다. 또한, 인명 및 재산상의 피해에 대한 법적 책임을 명확하게 하

여 보상 절차를 원활할 수 있도록 돕는 등 다양한 이유로 사고조사에 힘쓰고 있다. 이에 따라 본 연구는 2016년부터 2020년까지 영국에서 발생한 민간 무인 항공기 사고 및 준사고 보고서 40건을 근간으로 진행했다.

영국 민간 무인기 사고 및 준사고 40건에 원인과 기여 요인을 체계적으로 분석하기 위해 SHELL 모델과 HFACS 가이드라인을 활용하여 인적, 조직적, 기술적 측면에서 원인을 식별하였다. 더불어 사고 발생 전후의 환경 및 조건, 개입된 모든 주체의 상호작용을 분석하여 각각의 기여도를 파악하였다. 이를 통해 총 143개 사고 원인을 추출하였다. Table 3은 SHELL 모델과 HFACS에 대입하여 발굴된 종합적 결과를 분석하였다. 사고 39건, 준사고(serious incident) 1건이고, 준사고는 ◆로 구분한다.

Table 3. The accident cause of the British unmanned aerial vehicle

사고 구분	보고서 번호	사고 원인
1	EW/G2016/10/10	(1) 불충분하거나 부적절한 절차 (2) 부주의한 작동에 대한 보호 (3) 체크리스트의 올바른 이행 실패 (4) 절차 이행준수 불량 (5) 급조작 혹은 태조작 (6) 자동화 장치의 불안정한 상황
		(7) 경고 시스템의 비정상적인 기능 (8) 자동화 장치의 불안정한 상황
2	EW/G2018/04/10	(9) 불충분하거나 부적절한 절차 (10) 육안 확인 실패 (11) 작업 우선순위 설정 실패
3	EW/G2017/06/07	(12) 불충분하거나 부적절한 절차 (13) 환경 조건에 의한 지각 오류 (14) 육안 확인 실패 (15) 실시간 판단 오류 (16) 작업 우선순위 설정 실패 (17) 시야에 영향을 주는 환경적인 상황
4	EW/G2017/07/13	(18) 경고 시스템의 비정상적인 기능 (19) 실시간 판단 오류 (20) 자동화 장치의 불안정한 상황
5	EW/G2017/12/07	(21) 불충분하거나 부적절한 절차 (22) 경고 시스템의 비정상적인 기능 (23) 협력 및 커뮤니케이션 (24) 경고/주의 무시 (25) 자동화 장치의 불안정한 상황 (26) 적절한 교육 제공 실패 (27) 숙련도가 부족한 구성원
6	EW/G2018/01/04	

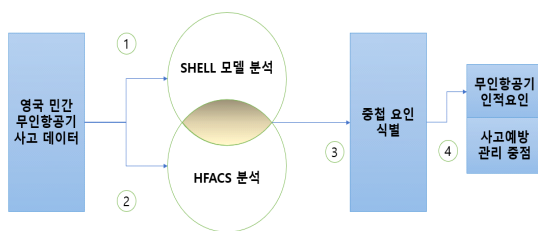


Fig. 1. Research method and flowchart

Table 3. Continued

사고 구분	보고서 번호	사고 원인
7	EW/G2018/05/36	(28) 불충분하거나 부적절한 절차 (29) 잘못 설계된 장비 (30) 충격을 받아내지 못하는 설계
8	EW/G2018/06/28	(31) 경고 시스템의 비정상적인 기능 (32) 자동화 장치의 불안전한 상황
9	EW/G2018/07/43	(33) 경고 시스템의 비정상적인 기능 (34) 자동화 장치의 불안전한 상황
10	EW/G2018/09/04	(35) 경고 시스템의 비정상적인 기능 (36) 자동화 장치의 불안전한 상황
11	EW/G2018/09/36	(37) 불충분하거나 부적절한 절차 (38) 부주의한 작동에 대한 보호 (39) 잘못 설계된 장비 (40) 경고 시스템 비정상적인 기능 (41) 절차이행 준수 불량 (42) 육안 확인 실패 (43) 자동화 장치의 불안전한 상황
12	EW/G2018/10/23	(44) 잘못 설계된 장비 (45) 경고 시스템의 비정상적인 기능 (46) 자동화 장치의 불안전한 상황
13	EW/G2018/10/09	(47) 잘못 설계된 장비 (48) 자동화 장치의 불안전한 상황
14	EW/G2018/10/17	(49) 경고 시스템의 비정상적인 기능 (50) 자동화 장치의 불안전한 상황
15	EW/G2019/01/05	(51) 불충분하거나 부적절한 절차 (52) 경고 시스템의 비정상적인 기능 (53) 체크리스트의 올바른 이행 실패 (54) 자동화 장치의 불안전한 상황
16	EW/G2019/01/14	(55) 경고 시스템의 비정상적인 기능 (56) 자동화 장치의 불안전한 상황
17	EW/G2019/01/12	(57) 경고 시스템의 비정상적인 기능 (58) 자동화 장치의 불안전한 상황
18	EW/G2019/02/06	(59) 불충분하거나 부적절한 절차 (60) 잘못 설계된 장비 (61) 경고 시스템의 비정상적인 기능 (62) 체크리스트의 올바른 이행 실패 (63) 자동화 장치의 불안전한 상황
19	EW/G2019/03/03	(64) 경고 시스템의 비정상적인 기능 (65) 자동화 장치의 불안전한 상황
20	EW/C2019/03/02	(66) 불충분하거나 부적절한 절차 (67) 잘못 설계된 장비 (68) 경고 시스템의 비정상적인 기능 (69) 자동화 장치의 불안전한 상황

사고 구분	보고서 번호	사고 원인
21	EW/G2019/03/08	(70) 경고 시스템의 비정상적인 기능 (71) 자동화 장치의 불안전한 상황
22	EW/G2019/03/17	(72) 불충분하거나 부적절한 절차 (73) 체크리스트의 올바른 이행 실패
23	EW/G2019/04/14	(74) 잘못 설계된 장비 (75) 경고 시스템의 비정상적인 기능 (76) 자동화 장치의 불안전한 상황
24	EW/G2019/06/08	(77) 잘못 설계된 장비 (78) 자동화 장치의 불안전한 상황
25	EW/G2019/07/40	(79) 잘못 설계된 장비 (80) 경고 시스템의 비정상적인 상황 (81) 자동화 장치의 불안전한 상황
26	EW/G2019/08/11	(82) 잘못 설계된 장비 (83) 경고 시스템의 비정상적인 기능 (84) 자동화 장치의 불안전한 상황
27	EW/G2019/09/30	(85) 잘못 설계된 장비 (86) 경고 시스템의 비정상적인 상황 (87) 자동화 장치의 불안전한 상황
28	EW/G2019/09/24	(88) 운용 매뉴얼의 비합리적인 목록 (89) 기기 및 제어장치 위치 미흡 (90) 경고 시스템의 비정상적인 기능 (91) 육안 확인 실패 (92) 경고/주의 무시 (93) 경고 장치의 오류 (94) 제어반 혹은 스위치 설계 오류
29	EW/G2019/10/14	(95) 불충분하거나 부적절한 절차 (96) 운용 매뉴얼의 비합리적인 목록 (97) 체크리스트의 올바른 이행 실패 (98) 절차이행 준수 불량
30◆	AAIB-26256	(99) 잘못 설계된 장비 (100) 경고 시스템의 비정상적인 기능 (101) 예기치 않은 장비의 작동 (102) 자동화 장치의 불안전한 상황
31	AAIB-26314	(103) 운용 매뉴얼의 비합리적인 목록 (104) 협력 및 커뮤니케이션 (105) 승무원/팀 리더십 실패 (106) 적절한 교육 제공 실패 (107) 숙련도가 부족한 구성원
32	AAIB-26456	(108) 불충분하거나 부적절한 절차 (109) 경고 시스템의 비정상적인 기능 (110) 체크리스트의 올바른 이행 실패 (111) 절차이행 준수 불량 (112) 과조작 혹은 부조작 (113) 자동화 장치의 불안전한 상황

Table 3. Continued

사고 구분	보고서 번호	사고 원인
33	AAIB-26470	(114) 환경 조건에 의한 지각 오류 (115) 경고 시스템의 비정상적인 기능 (116) 육안 확인 실패
34	AAIB-26685	(117) 불충분하거나 부적절한 절차 (118) 잘못 설계된 장비 (119) 경고 시스템의 비정상적인 기능 (120) 체크리스트의 올바른 이행 실패 (121) 절차이행 준수 불량 (122) 자동화 장치의 불안정한 상황
35	AAIB-26690	(123) 부주의한 작동에 대한 보호 (124) 생물학적 신체 리듬 (125) 작동 중 올라르지 못한 선택 (126) 자동화 장치의 불안정한 상황 (127) 피로
36	AAIB-26760	(128) 불충분하거나 부적절한 절차 (129) 운용 매뉴얼의 비합리적인 목록 (130) 체크리스트의 올바른 이행 실패
37	AAIB-26747	(131) 운용 매뉴얼의 비합리적인 목록 (132) 협력 및 커뮤니케이션 문제 (133) 과조작 혹은 부조작 (134) 팀 리더십 실패 (135) 적절한 교육제공 실패 (136) 숙련도가 부족한 구성원
38	AAIB-26799	(137) 물리적 환경으로 인한 주의 산만 (138) 외력 혹은 물체
39	AAIB-26810	(139) 불충분하거나 부적절한 절차 (140) 운용 매뉴얼의 비합리적인 목록 (141) 체크리스트의 올바른 이행 실패
40	AAIB-26982	(142) 잘못 설계된 장비 (143) 자동화 장치의 불안정한 상황

III. 연구 결과 및 토론

3.1 SHELL 모델 기반 분석 결과

본 연구는 영국 민간 무인 항공기 사고조사보고서에 제시된 사고요인들을 SHELL 모델로 분석했다.

Fig. 2는 143개 사고 세부 요인을 SHELL 모델을 기반으로 분석한 종합적인 결과를 나타낸 것이다. 사고요인은 L-S 인터페이스에서 50건(35%), L-H 인터페이스에서 75건(52.4%), L-E 인터페이스에서 7건(5%),

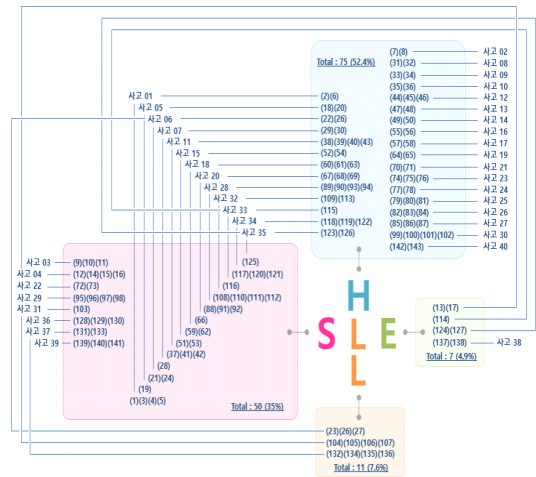


Fig. 2. Results of SHELL model analysis

L-L 인터페이스에 11건(7.6%)으로 분석되었다. 종합적으로, L-H 인터페이스에서 도출된 75건의 사고요인이 전체의 52.4%로 가장 높은 비중을 차지했다. 즉, 무인 항공기의 사고를 유발한 주요 요인으로는 경고시스템의 문제와 자동화 장치의 설계, 기능, 로직, 신뢰도의 불안정한 상황과 잘못 설계된 장비와 같은 하드웨어와 관련된 기술적 문제가 비중이 높았다. 이는 조종자와 장비 시스템 간의 상호작용 실패가 주요 사고 원인으로 해석할 수 있다.

3.2 HFACS 기반 분석 결과

본 연구는 영국 민간 무인 항공기 사고조사보고서에 제시된 사고요인들을 SHELL 모델로 분석한 후 인적요인 및 분류체계(HFACS)를 통해 세부 원인을 재분석하였다.

Fig. 3과 Table 4는 영국 민간 무인 항공기 사고조사보고서 40건에 제시된 사고 원인 143개를 HFACS를 통해 분석한 결과를 나타낸 것이다. 가장 높은 사고 원인은 전제조건(preconditions)에 포함된 요인으로 확인되었다. 이것은 물리적 환경 및 기술적 환경, 육체적 문제, 팀워크 문제 등 총 83건으로 전체 비율의 58%에 해당한다. 행위(acts)에 포함된 성능기반 오류, 판단/의사결정 오류, 위반 문제가 총 54건으로 전체의 36%를 차지한다. 감독(supervision)에 포함된 감독 위반은 적절한 교육 제공 실패와 숙련도가 부족한 구성원 원인 요소가 총 6건으로 전체 비율에 4%에 해당하여 총 143건의 원인 요소가 사고 발생 건수로 분석되었다.

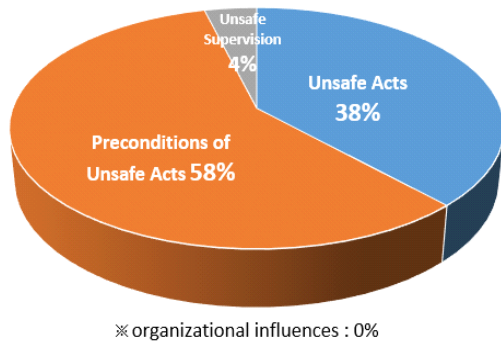


Fig. 3. Results of HFACS analysis

최상위(top level)의 행위(acts)는 근본 범주(root category) 단계에서 조종자의 성능기반 오류가 31% (45건)로 높은 요인으로 확인되었다. 이에 해당하는 세부 코드(nanocode) 단계에서는 절차 이행준수 불량 13%(19건) 및 체크리스트의 올바른 이행 실패 12% (17건)가 주요 사고 원인으로 식별되었다.

전제조건에서는 근본 범주 단계에서 기술적 환경이 49%(71건)로서 가장 높은 원인으로 파악되었다. 세부 코드 수준에서는 자동화 장치의 설계, 기능, 로직, 신뢰도의 문제, 장비의 충격 내구성, 경고 장치의 오류, 제어반 또는 스위치 설계 문제 등이 주요한 문제로 확인되었다. 불안정한 감독은 근본 범주 단계에서 부적절한 감독의 비율이 높았으며, 조종자에 대한 적절한 교육 제공 미흡과 숙련도가 부족한 구성원의 비율이 높은 것으로 확인되었다. 본 연구에서 영국 민간 무인기 사고 요인 특징을 분석한 결과에는 조직의 문제와 관련된 사고 원인은 발견되지 않았다.

이러한 결과를 토대로 민간 무인 항공기 기술을 개발할 때 안전성 인증 기준만을 충족한다는 개념을 탈피해야 한다. 그리고 조종자의 인적 성능을 고려한 시스템경고의 신뢰성을 향상시키고, 기체의 잠재적인 결함을 사전에 확인해야 한다.

3.3 SHELL과 HFACS 결과 종합 토론

군 무인 항공기 인적 요인 사고의 주요 원인은 선행 연구(Tvaryanas, Thompson & Constable, 2006, Oncu & Yildiz, 2014)를 통해 확인 결과, 절차이행 준수 부족 및 조직의 영향의 문제인 것으로 보고되었다. 하지만 본 연구에서 SHELL 모델과 HFACS 분석 결과에서 중첩된 사고 주요 원인으로는 무인 항공기 하드웨

Table 4. Results of accident analysis by HFACS

Top level	Root category	Nanocode	비율 (%)
Acts	성능기반 오류 (45건)	예기치 않은 장비의 작동(1건)	1
		체크리스트의 올바른 이행 실패(17건)	12
		절차 이행 준수 불량 (19건)	13
		기체의 과조작 혹은 태조작(2건)	1
		육안 확인 실패(5건)	3
		조치사항의 급조작 혹은 태조작(1건)	1
	판단/의사 결정 오류 (9건)	실시간 판단 오류(2건)	1
		작업 우선순위 실패(3건)	2
		경고/주의 무시(2건)	1
		작동 중 올바르게 못한 행위 선택(2건)	1
Preconditions	육체적 문제 (2건)	피로(2건)	1
	물리적 환경 (5건)	시야에 영향을 주는 환경적 상황(4건)	3
		외력 혹은 물체(1건)	1
	기술적 환경 (71건)	충격을 받아내지 못하는 설계 문제(2건)	1
		경고 장치의 오류(19건)	13
		제어반 혹은 스위치 설계 오류(2건)	1
		자동화 장치의 설계, 기능, 로직, 신뢰도 등 불안정한 상황(48건)	34
	팀워크 (5건)	승무원/팀 리더십 실패 (5건)	3
Supervision	부적절한 감독 (6건)	적절한 교육 제공 실패 (3건)	2
		숙련도가 부족한 구성원 (3건)	2
합계		143	100

어의 기술적인 문제가 확인되었다. 이것은 군과 민간의 운용 환경, 운용 목적, 훈련 및 절차 등의 차이 때문으로 추정된다. 민간 무인 항공기 하드웨어의 기술적인 문제를 관리하기 위해서는 기체 시스템의 정기적인 점검 및 유지보수를 통해 잠재적인 하드웨어 문제를 사전에

확인해야 한다. 더불어 소프트웨어는 지속적인 업데이트를 통해 시스템의 안정성과 신뢰성을 확보해야 한다. 그 다음으로 높은 사고 원인은 운용에 관한 절차적 문제가 사고 유발에 큰 영향을 미쳤다. 여기에는 운용자가 체크리스트를 올바르게 수행하지 않았거나, 육안 확인을 제대로 이행하지 못한 상태에서 비행을 진행한 경우가 포함된다. 더불어 운용자가 정해진 절차를 충분히 숙지하지 못하여 이를 따르지 않았거나, 조종 미숙 또는 장비 매뉴얼 숙지 부족 등도 포함된다. 이를 예방하기 위해서는 무인 항공기 조종자들은 체크리스트를 올바르게 이행하고, 규정과 절차에 따라 비행할 수 있도록 제도적인 교육·훈련 강화대책 마련이 필요하다고 생각된다. 아울러 기술을 개발할 때에는 조종자의 인적 성능을 고려하여 경고시스템의 신뢰성 및 인간공학적인 접근을 강화하여야 한다고 판단된다. 이러한 개선 전략이 체계적으로 추진된다면 민간 무인 항공기 운용상 안전성 및 신뢰성이 향상하여 민간 무인 항공기 사고의 발생 가능성을 크게 줄일 수 있을 것이다.

끝으로 안정성은 기술적 측면뿐만이 아니라, 운용자의 역할이 상호작용에서 큰 역할을 하는데, 이를 향상시키기 위해서는 운용자의 훈련과 인적 성능 강화가 필요하다. 또한, 기술적 결함을 사전예방하고 수정하는 것이 안전성 평가에 있어서 중요한 부분이다. 이러한 종합적인 접근은 민간 무인 항공기의 안정성을 향상시키고, 기술 발전의 지속 가능성을 확보하는 데 도움이 될 것이다.

IV. 결 론

본 연구는 민간 무인 항공기 인적 요인에 의한 사고 발생 원인을 파악하고, 방법을 제시하고자 영국 민간 무인 항공기 사고조사보고서 40건에 기술된 143개의 원인을 SHELL 모델과 HFACS를 활용하여 비교 분석했다.

SHELL 모델을 기반으로 분석한 결과, 경고시스템의 비정상적 작동으로 인한 무인 항공기 조종자와 하드웨어(hardware) 간의 인터페이스에서 발생한 사고 원인 비율이 52.4%(75건)로 가장 높은 것으로 확인되었다. HFACS로 분석한 결과, 불안전 행위의 전제조건 근본 범주(root category) 단계에서 기술적 환경 원인이 49%(71건)로 가장 높은 원인으로 확인되었다. 세부 코드(nanocode) 수준에서는 자동화 장치의 설계, 기능, 로직, 신뢰도의 문제, 장비의 충격 내구성, 경고 장치의

오류, 제어반 또는 스위치 설계 문제 등이 주요한 문제로 확인되었다. 또, SHELL 모델과 HFACS로 종합 분석한 결과에서 중첩된 사고 주요 원인으로는 기술적인 문제 및 조종자와 기기와 상호관계 실패의 한계로 판명되었다.

따라서 민간 무인 항공기 사고를 예방하기 위해서는 기체 시스템의 정기적인 점검과 지속적인 소프트웨어 업데이트를 통해 시스템의 안정성과 신뢰성을 확보하여야 한다. 더불어 운용에 관한 절차적인 문제는 운용자가 체크리스트를 올바르게 이행하고, 규정과 절차에 따라 비행할 수 있도록 제도적인 교육과 훈련 대책이 수립되어야 한다. 아울러 무인 항공기의 기술 개발에 있어서 안전성 기준에만 의존할 것이 아니라, 운용자의 인적 성능 강화를 위해 휴먼인터페이스 등을 고려한 인간공학적 접근이 필요하다고 판단된다.

마지막으로 사고 원인을 일관성과 신뢰성을 고려하여 여러 다른 국가를 제외한 영국의 민간 무인 항공기 사고사례만을 중점을 두었다. 이는 운용 환경에서 우리나라와 비슷한 기후 조건과 지리적 특성으로 인해 운용 경험을 참고하여 이해하는 데 도움이 된다고 판단한다. 다만, 미국 및 캐나다, 호주, 독일 등 항공 사고 조사 및 안전 감독에 있어 권위 기관의 다양한 무인 항공기 사고사례를 분석한다면, 민간 무인 항공기 안전에 더욱 기여할 것으로 예상된다.

본 연구는 다양하게 발생하는 인적 요인에 의한 사고 원인을 분석하였으나, 인적 요인 이외의 사고 원인은 확인하지 못하였다. 아울러 국내 민간에서 사용하는 초경량비행장치 범주 안에 속하는 무인동력비행장치는 주로 교육 및 레저, 촬영 등의 엔터테인먼트 목적으로 사용되는 25kg 이하에서 운용 기체가 많다. 이를 고려하여 대형이나 무거운 중량의 무인비행장치에서 발생하는 안전 문제에 대한 포괄적인 이해가 불충분하였다는 한계점이 있다.

References

1. Koo, B. E., "Human error vulnerability as a pilot in a military unmanned aerial vehicle system," Korean Academy of Aerospace Human Factors, Korea Airports Corporation Aviation Security Training Center, 2018, pp.1-26.

2. Kim, C. Y., "Aviation human factors and maintenance safety", Node Media, 2016, pp.362-375.
3. Kim, D. Y., "Analysis of factors contributing to UK civil unmanned aircraft accidents using SHELL model and HFACS", Korea Aerospace University, 2023.
4. ICAO, Safety Management Manual(SMM) - Third Edition, 2012.
5. Kim, J. W., and Shim, S. R., "A case study on the evolutionary development of U.S unmanned aerial vehicles(UAVs)", Journal of Advances in Military Studies, 3(2), 2020, pp.17-46.
6. Lee, K. H., "A study on the application of HFACS to investigate accidents of domestic civil unmanned aerial vehicles in Korea", Korea Aerospace University, 2022.
7. "Technology trend brief: Unmanned aerial vehicle", KISTEP, 3(3), 2020.
8. Lee, K. H., "Applicable focal points of HFACS to investigate domestic civil unmanned aerial vehicle Accidents" J. Adv. Navig. Technol. 25(3), 2021, pp.261-265.
9. Oncu, M., and Yildiz, S., "An analysis of human causal factors in unmanned aerial vehicle (UAV) accidents", Naval Postgraduate School, Monterey, CA, December 2014.
10. Reason, J., "Human error", Cambridge University Press, Cambridge, UK, 1990.
11. Yoo, T. J., "A study on the human error analysis tool and prevention for helicopter accident in Korea", Korea Aerospace University, 2020, pp.9-35.
12. Tvaryanas, A. P., Thompson, W. T., and Constable, S. H., "Human factors in remotely piloted aircraft operations: HFACS analysis of 221 mishaps over 10 years", Aviation, Space, and Environmental Medicine, 77(7), 2006, pp.724-732.
13. U.S. Air Force Safety Center, "DoD human factors analysis and classification system (HFACS) version 7.0", 2019, pp.1-23.
14. Wiegman, D., Shappell, S., "The human factors analysis an classification system (HFACS)", FAA, 2000, pp.1-2.
15. Choi, Y. C., Choi, Y. K., and Kim, C. Y., "A study on the detailed classification and empirical analysis of human error", The Korean Society for Aviation and Aeronautics, 10(1), 2002.