

비행시험 위해요인 식별 연구

Flight Test Hazard Identification

김 무근 · 임 인 규 · 유 병 선 · 강 자 영*
한국항공대학교 항공체계시험인증연구센터

Mu-Geun Kim · In-Kyu Lim · Beong-Seon Yoo · Ja-Young Kang*

Aviation System Test and Certification Research Center, Korea Aerospace University, Gyeonggi-do, 10540, Korea

[요 약]

항공기 개발 및 인증 등을 위한 비행시험은 타 항공우주산업 분야 보다 높은 항공 사고 발생 리스크를 가지고 있다. 따라서 안전관리시스템 중 리스크 관리를 위해 필요한 위해요인 식별은 비행시험 중 유사한 항공 사고를 예방할 수 있는 매우 중요한 요소이다. 그러나 국제적으로 발행되는 사고 통계자료는 통상적으로 상업 운송용 항공기에 국한된 것으로 비행시험의 특성을 반영하지 못하고 있으며, 국내 여건 또한 비행시험 중 위해요인을 식별할 수 있는 각종 데이터베이스가 구축되어 있지 않거나 가용하지 않은 실정이다. 따라서 본 연구에서는 항공기의 개발 및 인증을 위한 비행시험 특성을 알아보고, 리스크 관리에 필요한 국제기구 및 항공선진국 등에서 구축한 항공 사고 통계 및 예방 자료 등을 기초로 항공 사고의 주요 원인을 추적해 보았다. 미국교통안전위원회가 보유하고 있는 항공 사고/준사고 데이터베이스 중 비행시험 시 발생한 총 312건의 최종 보고서가 조사되었으며, 약 200여개의 비행시험 위해 요인이 식별되었다. 본 연구의 결과는 향후 국가종합 비행성능시험장의 안전관리시스템 구축을 위한 기초 자료로 활용될 예정이다.

[Abstract]

Flight tests for aircraft development and certification have higher air accidents risk than other aerospace industries. Accordingly risk identification necessary for risk management in the safety management system is a very important factor in preventing similar air accidents during flight tests. But internationally issued accident statistics are usually confined to commercial transport aircraft and they do not reflect characteristics of flight tests, also databases to hazards identification during flight tests are not established or available in Republic of Korea. Therefore, we identified flight test procedures and traced the major causes of aviation accidents based on the statistics and preventive materials for risk management which were issued by international organizations and advanced countries of aviation. A total of 312 final reports classified as flight test among air accident/incident database held by U.S. NTSB were researched and about 200 flight test hazard were identified. The results of this study will be used as basic data for establishing the safety management system of the national comprehensive flight performance test site.

Key word : Flight test, Hazard identification, Risk assessment, Safety management system, Test and evaluation.

<https://doi.org/10.12673/jant.2018.22.4.279>



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 6 August 2018; Revised 13 August 2018
Accepted (Publication) 24 August 2018 (30 August 2018)

*Corresponding Author; Jay Kang

Tel: +82-2-300-0081

E-mail: jaykang@kau.ac.kr

I. 서 론

항공 산업 발전은 선구자들의 모험적 행위에 의해 이루어졌다 해도 과언이 아니다. 미국의 월버 및 오빌 라이트 형제가 1903년에 인류 최초의 동력비행에 성공하고 수많은 항공 사고를 거치면서 항공산업이 발전하게 되었다. 이와 같이 항공 산업 초기에는 항공기 개발과 운항은 많은 리스크를 감내하는 것을 당연하게 여겼다. 항공기 개발 및 운영과 관련하여 100년 이상의 축적된 기술과 노하우를 갖게 되고, 컴퓨터에 의한 수학적 모델링 및 컴퓨터 시뮬레이션, 각종 시험기술의 발달은 높은 리스크를 안고 있는 비행시험을 최소화 할 수 있게 하였고 항공산업의 급속한 성장에 기여하게 되었다. 또한 1940년대 처음으로 적용된 시스템 엔지니어링과 1960~ 70년대부터 시작한 다양한 안전관리 기법의 개발 그리고 2006년 국제민간항공기구 (ICAO; International Civil Aviation Organization)가 안전관리(SM; safety management)의 표준 및 권고 실행(SARPs; standards and recommended practices)을 도입하면서 항공 산업의 패러다임은 리스크 감수(risk taking) 산업에서 안전 관리(safety management) 산업으로 변화하게 되었다.

우리나라는 군용항공기(KT-1, T-50, 수리온), 4인승 소형항공기(KC-100), 2인승 경량항공기(KLA-100), 스마트무인기 등을 개발한 경험을 갖고 있으며, 국가비행종합성능시험장(이하 시험장)을 구축하여 항공기 개발, 시험평가(T&E; test and evaluation) 및 감항인증 업무를 체계적으로 수행할 계획이다.

중국상용항공기공사가 개발, 시험 중인 여객기 C919에 중대 문제로 시험비행이 전면 중단되고, 일본 미츠비시가 개발 중인 여객기 MRJ도 2015년 11월 첫 비행이 성공한 후 납품계획이 최초 2013년에서 계속 지연되어 2020년으로 연기되었다. 또한 2018년 3월 8일 Moses Lake에 위치한 Grant Country 국제공항에서 VIP용 항공기로 전환하는 보잉사의 787 항공기가 지상에서 노즈 기어가 붕괴되는 사고가 발생하기도 하였다 [1]~[3]. 또한 국내에서는 2004년 8월 27일 소형비행기 ‘보라호’와 2018년 7월 17일 상륙기동헬기 ‘마린온’은 시험 비행 중 추락하여 인명 사고가 발생한 사례로 언론에 발표되기도 하였다. 이와 같이 항공기 개발은 항공기가 정상적으로 운용될 때까지 수많은 리스크가 상존한다.

대부분의 민간 항공 산업 분야에서는 사고 예방을 위하여 안전관리시스템(SMS ; safety management system)을 구축하여 운영토록하고 있다. 그리고 ICAO 및 항공선진국은 항공안전 관리에 활용할 수 있도록 주기적인 항공사고 분석 및 통계 자료를 발간하고 있다. 그러나 이러한 자료는 비행시험의 특수성을 고려한다면 기존의 리스크 관리(risk management)를 위해 식별된 위해요인(hazard)자료로 직접 활용하기에는 무리가 있다. 따라서 본 논문에서는 비행시험 정의, 분야 및 주요 평가 항목을 알아보고 비행시험의 위해요인 식별을 위해 국제기구 및 항공선진국에서 제공하고 있는 항공사고 분석, 통계 및 예방 자료와 비행시험 항공사고 결과 보고서를 비교 분석하여 비행 시험에서 주로 발생하는 위해요인을 식별하였다.

II. 비행시험의 정의, 분류, 절차 및 평가 항목

2-1 비행시험 정의, 분류

비행시험의 광의의 정의는 ‘비행을 통해 항공기를 시험’하는 것으로 명시되었으나 협의로는 ‘비행시험’과 ‘시험비행’을 구분하여 사용하고 있다[4],[5].

좁은 의미에서 비행시험이라 함은 개발 중인 항공기와 부수 장비의 개발 간 성능 확인 및 시험 평가를 위해 수행되는 비행이라 정의하고 있다. 세부적으로 비행 시험은 크게 개발비행 시험과 인증비행시험의 2가지로 분류하고 있다. 개발비행시험은 설계 형상대로 시제기를 제작하여 정의된 중량 및 무게 중심 형상에서 성능, 조종성 및 안정성, 하중 등이 요구조건을 만족하는지를 확인하기 위한 제작사의 비행시험으로서 개발 항공기에 문제점이나 미비사항이 있을 경우 개선안에 대한 비행 시험 평가를 통해 항공기의 형상을 확정하여 설계에 반영함으로써 초도개발을 완료하기 위해 실시하며 비행시험을 통해 비행교범(AFM; aircraft flight manual)에 포함시킬 항공기의 운용 한계, 정상비행 절차 및 비상조치 절차 등을 결정하기 위한 목적으로 수행되는 것을 말하며, 인증비행시험은 개발이 완료된(설계변경이 완료되어 형상이 확정된) 형상을 가지는 항공기를 이용해 인증당국이 제작사가 개발비행시험에서 입증한 결과를 바탕으로 감항기술기준의 각종 요구조건을 만족함을 인증당국이 확인하기 위해 실시하는 시험을 말한다[6]. 항공기 개발 및 인증 업무 수행에 있어서 그림 1과 같이 T&E 통합형 개발주기 모델을 적용하여 개발비행시험과 인증비행시험이 협력적으로 이루어지기도 한다.

또한, 항공기 개발이 완료되고 인증을 받은 항공기가 항공기 조립, 부품교체 및 수리 등의 이유로 비행 안전성을 확인하기 위한 비행을 시험비행이라 하고 있다.

2-2 비행시험 수행 절차

군용 항공기 기준의 비행시험 수행 절차는 비행계획단계,

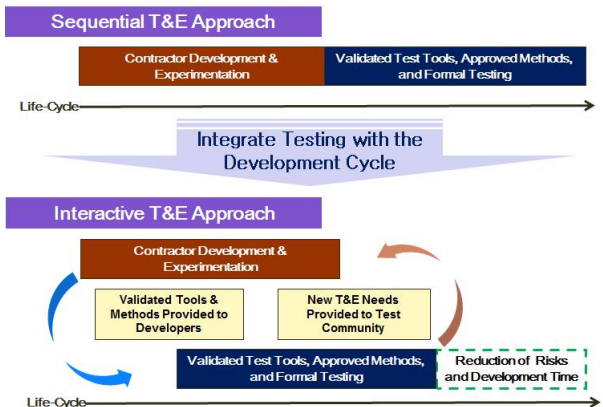


그림 1. T&E 통합형 개발주기[7]

Fig. 1. T&E integrated life cycle[7].

비행 후 자료 종합 및 처리 단계로 구분할 수 있다.

비행계획단계는 최종적으로 비행시험계획을 확정하는 것으로 다음과 같이 분류할 수 있다.

- 시험정보서(TIS : test information sheet) 검토: 설계 요구 조건(ROC; required operational capability, ASRD; aircraft system requirement document, SORD; system operational requirement document 등)과 군 요구조건을 충족하기 위해 업체에서 작성한 평가기준(설계 규격서, 군사 교리 등)을 기준으로 시험과목별 세부 시험내용을 작성하게 된다. 이 단계에서는 시험비행조종사, 시험비행 기술사 및 업체의 각 과목별 담당 엔지니어가 참여하여 검토를 거쳐 시험정보서를 최종적으로 확정하게 된다.
 - 기술검토 및 안전검토회의(TRB & SRB : technical review board & safety review board) : 작성된 시험정보서의 내용이 실제 비행시험 수행 시 원하는 목적달성을 위해 기술적으로 문제점이 없는지, 비행시험수행 시 비행안전에 저촉되는 사항과 시험 중지조건 및 비상절차 등을 검토하게 되며, 사업부서 담당자, 시험비행조종사 및 기술사, 시험 담당 엔지니어와 안전담당요원이 참여한다. 또한 안전검토회의는 기술검토회의와 상호 독립적으로 수행하여 사업부서 담당자의 간섭을 배제하도록 하며, 기술검토와 안전검토회의를 통해 시험정보서가 승인이 되었을 경우에 해당과목 비행시험 수행이 가능하게 된다.
 - 시험카드(test card) 작성 : 기술검토 및 안전검토회의를 거쳐 승인된 시험 정보서를 기준으로 실제 비행시험을 수행할 시험카드를 작성한다. 시험카드는 매 비행시험마다 별도의 시험카드를 작성하게 되며, 시험카드 작성 시는 실제 시험을 수행할 시험비행 조종사, 기술사, 해당 기술 엔지니어가 참여하여 검토를 거치게 된다.
 - 시뮬레이터(HQS; handling quality simulator, HBS; hot bench simulator)를 통한 사전점검 및 훈련: 초안으로 작성된 시험카드의 내용과 동일한 절차대로 시뮬레이터를 통해 시험절차를 점검하고, 시험비행조종사, 기술사, 해당 엔지니어들이 통합적으로 절차 숙달훈련을 한다. 이 절차를 거쳐 시험절차, 비행시간, 연료 소모량, 비행조건, 시험수행순서 결정 등 비행시험내용을 최적화하게 된다.
 - 유사항공기를 통한 사전훈련: 이 단계는 반드시 필요하지는 않지만 시뮬레이터를 통한 시험절차 숙달이 종료되면 성능과 시스템이 유사한 항공기를 이용하여 실제 비행을 통해 리허설을 실시함으로써 지상에서 예측하지 못한 사항을 최종적으로 점검하게 된다. 이 단계를 거쳐 최종적으로 시험카드를 확정하며, 비로소 일일 비행시험계획(schedule)을 작성하게 된다.
- 비행시험단계는 비행시험계획이 승인된 후 일일 비행계획에 의거 수행되며, 수행업무를 위해 다음과 같이 세 가지로 구성된다.
- 실제 시험을 수행하는 시제기와 시제기의 안전 추적 임무를 담당하는 안전추적기

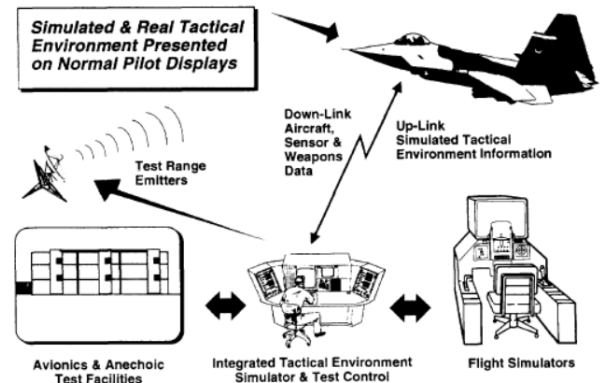


그림 2. 통합형 전술 비행시험 환경 개념[9]
 Fig. 2. Integrated tactical flight test environment concept[9].

- 시제기로부터 전송된 데이터를 처리하는 계측 시스템
- 시제기가 안전하고 효율적인 시험을 수행하도록 통제하고 조연하는 통제실

지상에 위치한 통제실에는 시험 진행을 통제하는 시험 통제관(test director), 시험 진행을 담당하는 시험 진행관(test conductor), 시험 수행 시 안전사항을 조연하는 시험 안전관(safety officer)과 시험담당 엔지니어들이 위치하게 된다.

비행 후 자료 종합 및 처리단계는 비행시험을 통해 획득된 데이터는 비행 후 필요한 데이터로 선별하게 된다. 선별된 계측 데이터는 각 시험담당 엔지니어에게 전달되고, 시험담당 엔지니어는 요구되는 형태대로 데이터를 분석하여 시험목적 달성이었는지 또는 데이터에 문제점이 있는지를 확인하여 차기 시험에 반영할 것인가를 결정하고, 데이터에 이상이 없을 경우 결과분석 자료를 이용하여 항공기 성능 및 특성을 정의하게 된다. 분석된 결과는 사용군의 요구조건을 비교하는 운용시험 부서와 개발자의 요구조건을 비교하는 기술시험 부서로 전달된다. 각각의 요구조건과 시험결과를 비교하여 평가한 후 결과를 판정하며, 시험결과가 판정기준과 차이가 있을 경우 시험자료 검토회의(test data scoring board)를 거쳐 의사를 결정하고, 시험결과가 판정기준을 만족할 경우 T&E 결과 보고서 작성의 자료로 제공된다[8]. 그림 2는 군용 항공기 개발을 목적으로 한 비행시험 단계의 통합된 비행시험 구성 환경을 도시한 개념도이다.

2-3 비행시험 주요 평가 항목

항공기기술기준 Part 23 (감항분류가 보통(N)인 비행기에 대한 기술기준), 미연방항공규정 14CFR Part 23 (airworthiness

표 1. 소형 비행기 대표적 비행시험 평가 항목[6]
 Table 1. Representative flight test evaluation items of small airplane[4].

Category	Items
Structure	Flutter

	Loads
	Vibration
Flight characteristics	Static & Dynamic stability
	Controllability
	Maneuverability
	Stall characteristics
	Spin
Flight Performance	PEC
	Stall speed
	Climb performance
	Gliding performance
	Cruise performance
	Takeoff & Landing performance
	Go-around performance
Avionics/ Electrical system	Avionics
	Electrical system
Propulsion	Engine operating characteristics
	Propeller pitch limits
	Air starts test
	Engine cooling test
	Hot weather operation test
	Minimum fuel test
Sub-system	Pilot workload evaluation
	Flight control system
	Trim system
	Autopilot system
	Environmental system
	Oxygen system
	Deicing system

standards; normal, utility, acrobatic, and commuter category airplanes)에는 일반사항, 비행(flight), 구조물(structures), 설계 및 구축(design and construction), 동력장치(powerplant), 장비(equipment), 비행승무원 인터페이스 및 기타정보에 대한 감항기준이 명시되어 있다. 이를 토대로 지상시험 및 비행시험 항목을 산출한다. T-50 항공기의 경우 비행특성, 항공기 성능 및 엔진, 세부계통의 3개 시험 분야에서 총 12개의 비행시험 항목을 산출하고, KC-100 항공기의 경우 플러터, 조종 안정성, 소음, 성능, 세부계통, 전장계통의 6개 시험 분야에서 19개의 비행시험 항목을 산출, 적용하였다[10],[11]. 표 1은 소형비행기에 대한 대표적인 비행시험 항목을 산출한 것이다.

III. 항공사고 데이터 조사 분석

3-1 위해요인 데이터 수집 방법

그림 3은 안전 관리의 연속성을 나타낸 것으로서, 사후적 또는 피동적(reactive), 사전적 또는 능동적(proactive), 예측적(predictive) 방법으로 안전관리의 예를 보여주고 있다. 안전관리 효율성 측면에서 사후적 리스크 관리보다는 사전적 또는 예측적 방법의 리스크 관리 방법이 바람직하지만 관련 기술이나 유사 시스템에 대한 운영 경험이 매우 적은 경우에는 상당히 어려운 부분이 있다. 따라서 본 논문에서는 전 세계 항공 기관 및 항공선진국의 사고조사 통계/결과 보고서 분석을 통한 사후

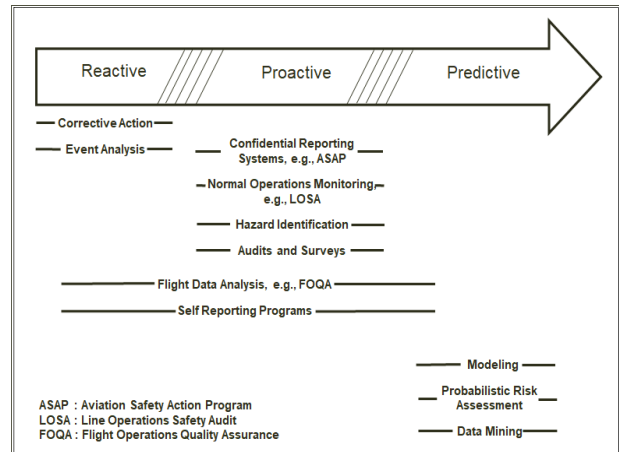


그림 3. 안전 관리 연속성[12]

Fig. 3. Safety management continuum[12].

적 또는 피동적(reactive) 방법으로 위해요인을 식별하였다. 그 밖에도 비행시험 분야 안전관리를 위해 미국항공우주국 비행 안전 데이터베이스(NASA flight safety database)와 비행시험안전위원회(flight test safety committee)의 수집 자료가 있으나 비행시험 위해요인 식별을 위해 활용하기에는 적합하지 않아 이번 논문에서는 제외하였다.

3-2 국제기구, 항공선진국 항공사고 조사 결과 분석

ICAO에서 발표한 항공기 운항부분의 최근 10년간 사고율은 그림 4와 같이 점차 감소되고 있으며, 2013년부터 2017년까지 매년 발간된 ICAO 안전보고서 및 ICAO 사고 통계를 분석한 결과 그림 5와 같이 활주로 안전 관련 사건(RS; runway safety related events), 비행 중 조종 불능(LOC-I; loss of control in-flight), 정상적인 조종 상태에서 감항성이 있는 항공기의 뜻하지 않은 지상충돌(CFIT; controlled flight into terrain)을 3대 높은 리스크 사고로 분류하고 체약국에 지속적인 관리를 요청하고 있다[13], [14].

국제민간항공협회(IATA; international air transport association)는 지역별, IATA/non-IATA 회원국, 엔진형식 등에 따른 사고분석 자료를 매년 발행하고 있다. 표 2는 2013년부터 2017년까지 발생한 사고/치명적 사고(accident/fatal accident)의 발생 빈도 순위를 나타낸 것이다[15],[16].

영국 민간항공국(CAA; civil aviation authority)은 10년 단위로 전 세계에서 발생한 이륙최대중량 57,000Kg 이상인 항공기의 fatal accident를 조사 분석하고 있다. 최근 자료에는 2002년부터 2011년 동안에 발생한 250건을 조사하여 통계 작성, 사고 결과 등을 제공하였다. 또한 사고 결과뿐만 아니라 사고를 발생 시킨 원인을 직접/간접 요인(causal/circumstantial factors)으로 구분하여 정리되어 있다. 표 3은 영국 CAA 2002년부터 2011년 사이에 발생한 fatal accident 순위를 나타낸 것이다 [15],[17].

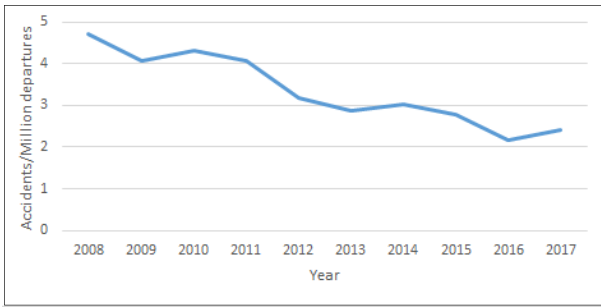


그림 4. 전 세계 5.7t 이상 정기 운송용 항공기 사고율[10]
 Fig. 4. Accident Rate scheduled commercial flight on airplanes above 5.7t only[10].

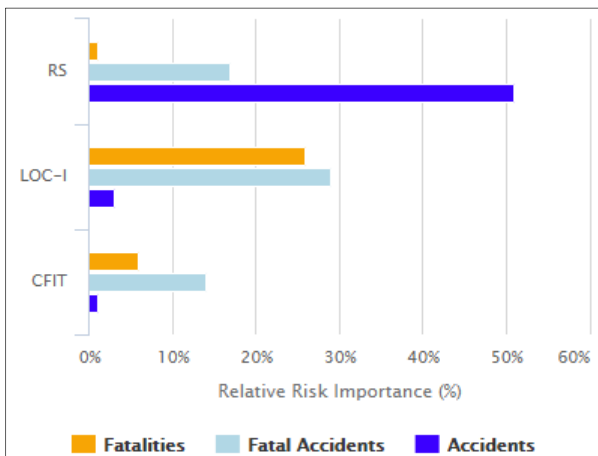


그림 5. ICAO. 2013-2017 리스크 분포도 (5.7t 이상 정기 운송용 항공기)
 Fig. 5. ICAO. 2013-2017 Risk Distribution (scheduled commercial flight above 5.7t only)

유럽항공안전국(EASA; european aviation safety agency)은 전세계 사고/준사고 결과 보고서를 토대로 매년 작성하고 있다. 특징으로는 상업운송 비행기(정기/부정기, 특수목적), 상업 운송용 헬기(해상운송, 기타), 비상업용 운송 항공기(비행기, 헬기), balloons, gliders/sailplanes, 무인항공기(RPAS; remotely piloted aircraft system/UAS; unmanned aircraft system/drone), 공항/지상조업, 항공교통관리/항공항행업무(ATM; air traffic management/ANS; air navigation services)의 총 8개 범주로 분류하고, 각 범주 별로 최근 1년, 10년 평균의 사고, 준사고 발생률과 발생 건수 등을 제공하고 있다. 또한 각 범주 별로 중점 관리가 필요한 핵심 리스크 분야를 선정하고 위해요인을 운항, 보안, 기술, 인적, 조직 등으로 구분하여 식별하였다[15],[18]. 표 4는 EASA 2017 연간안전보고서의 2006년부터 2016년 사이에 발생한 비상업용(비행기) 운항편의 사고/준사고 발생 건수를 나타낸 것이다.

ICAO, IATA, 영국 CAA에서 제공되는 사고조사 분석 자료는 이륙최대중량 57,000Kg 이상 또는 상업 목적으로 이용되는

표 2. IATA 2013 -2017 사고/인명 손실 사고 순위

Table 2. IATA 2013 -2017 accident/fatal accidents rank.

Rank	Accident	Fatal accident
1	Runway/taxiway excursion	Loss of control - in-flight
2	Gear up landing/gear collapse	Controlled flight into terrain
3	Hard landing	Undershoot
4	In-flight damage	Runway/taxiway excursion
5	Loss of control - in-flight	Other

표 3. 영국 CAA 2002-2011 인명 손실 사고 순위[17]

Table 3. England CAA 2002-2011 fatal accidents rank[17].

Rank	Consequence	No. Fatal Accident	Percent-age
1	Fire/Smoke resulting from impact	91	36
2	Loss of aircraft control (non-technical failure)	52	21
3	Controlled Flight into Terrain (CFIT)	47	19
4	Runway Excursion	35	14
5	Loss of aircraft control (technical failure)	32	13
6	Collision with obstacle(s), during take-off or landing	31	12

표 4. 2006-2016 비상업용 비행기 운항 사고/준사고 발생 건수 [18]

Table 4. Non-commercial operations accidents/serious incidents by 2006-2016 - aeroplane[18].

Operation type	Accidents and serious incidents	
	2006-2015 average	2016
Demonstration	1.1	0
Relocation	4.5	2
Flight training/ instructional	88.9	54
Pleasure	312.9	163
Test flight	5.1	3
Other	5.1	3
Unknown	4.4	39

항공기에 대한 항공사고 통계 및 분석 자료로서 항공기 운항 목적이 비행 시험인 상황이 고려되지 않고 있으며, EASA에서 제공하는 2017 연간안전보고서는 시험 비행으로 인한 사고/준사고가 건수는 2006년부터 2015년간 연평균 기준 5.1건, 2016년도 기준 3건 이 발생한 것으로 나타났으나 분석할 표본이 작을 뿐만 아니라 사고 원인에 대한 구체적 자료는 제시되어 있지 않고 있어 비행시험을 목적으로 하는 위해요인 식별에 한계를 갖는다.

3-3 NTSB 사고조사 결과 보고서 분석

미국 교통안전위원회(NTSB; national transportation safety board)는 미국에서 발생하고 있는 육상, 항공, 해상 등의 모든 교통사고의 원인을 조사하고 사고 예방을 위한 안전 권장사항을 발행한다. 특히 항공분야에서는 1962년 1월부터 시작하여 2018년 5월말 기준으로 약 81,580건 이상의 항공 사고 기초 자료와 사고 발생과 관련하여 예비보고서(preliminary report), 사

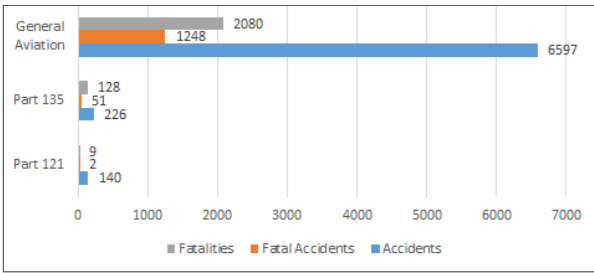


그림 6. 미국 민간 항공 2011-2015 운행 목적별 항공사고 요약
 Fig. 6. Major segment accident summary for 2011-2015 in US civil aviation.

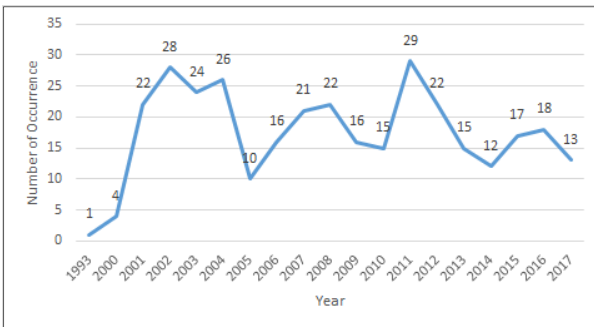


그림 7. 비행시험 중 발생한 연도별 사고/준사고 건수
 Fig. 7. Number of accidents/incident during the flight test.

표 5. NTSB 비행시험 사고/준사고 최종보고서 검토
 Table 5. Flight test review in NTSB accident/incident final report

14CFR code	Part 91 (flight test)	Part 91 (flight test)
Occurrence date	1993.7. ~ 2008.7.	2008.4. ~ 2017.6.
Number of final report	156	156
Review and distinction	Defining event	Non-stated (Blank)
	Probable Cause and Finding	Record "Probable cause and finding" according to the occurrence sequencing
Remark	In case of events from 2008.4. to 2008.7, those are used in both form	

실 보고서(factual report) 및 최종 보고서(final report)를 제공하고 있다. 특히 운행 목적에 따라 여객용(Part 121, air carriers), 전세용(Part 135, commuter and on-demand carriers) 및 일반항공(Part 91, general aviation)으로 구분한 사고발생 통계 자료와 항공 사고/준사고 보고서를 공개하고 있다[19]. 그림 6은 2011년부터 2015년 사이에 발생한 운행 목적별 사고 건수 및 사망자 수를 정리한 것이다. 미국의 항공사고 발생 건수를 분석하면 전체 사고의 약 94.7%, 사망 사고의 약 95.9%가 일반항공 분

야에서 발생하고 있음을 알 수 있다. 그림 7은 비행시험 중 발생한 사고 건수를 연도별로 정리한 것이다. 비행시험에서 발생하는 위해요인 식별을 위하여 NTSB 항공사고 자료, Part 91 일반비행 19,627건의 사고/준사고 목록 중 비행시험으로 인해 발생한 사고/준사고 최종결과보고서 312건을 분석하였다. 최종보고서 사고 원인 및 결과 부분의 작성 방법의 변경으로 인해 표 5와 같이 2개의 기간으로 분류(1993. 7.~ 2008.6. / 2008.4 ~ 2018.6.)하여 작성하였다.

1) 1993.7. ~ 2008. 7. 사고조사 보고서 분석

1993년 7월 26일 발생한 CANADAIIR CL-600-2B19 항공기가 비행시험 목적의 사고로 처음 기록된 이후 2008년 7월 19일 발생한 INDY AIRCRAFT LTD T-Bird II 항공기 사고에 이르기까지 이 기간에 발생한 주요 사고조사결과를 사건 발생 순서대로 기술하고 그에 따른 원인(cause) 및 발견내용(finding)을 기

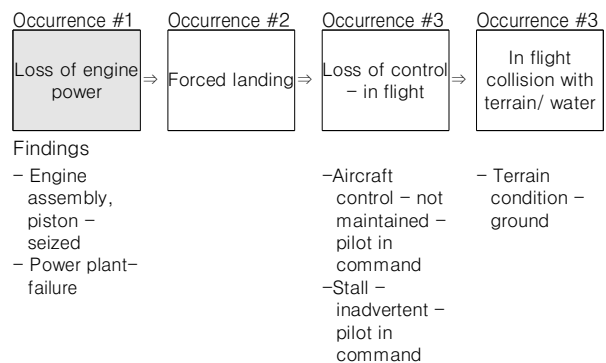


그림 8. 사건 순서에 따른 사고 원인/결과 기록 방법(예) (1993.7. ~ 2008.7.)

Fig. 8. Example of recording method cause and finding according to occurrence sequence (1993.7. ~ 2008.7.)

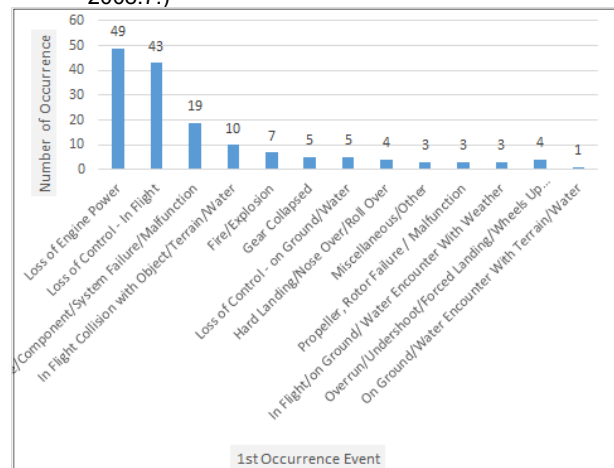


그림 9. 첫 번째 발생 사건별 비행시험 사고/준사고 건수 (1993.7. ~ 2008.6.)

Fig. 9. Number of flight test accident/incident by 1st occurrence event (1993.7. ~ 2008.6.).

록하였다(그림 8 참조).

그림 9는 첫 번째 발생한 사건을 기준으로 사고원인을 분류한 것이다. 비행시험 중 주요 사고 원인은 엔진 동력 손실, 비행 중 조종 불능, 기체/구성품/시스템의 고장 또는 오작동 순으로 나타났다.

2) 2008.4. ~ 2017. 6. 사고조사 보고서 분석

2008년 4월 9일 발생한 HAWKER BEECHCRAFT CORP G36 항공기 사고부터 2017년 6월 26일 발생한 AERO-ACE CE1 항공기 사고까지 이 기간에 발생한 사고에 대한 조사 결과 보고서는 사건 정의를 하고 이에 따라 항공기 문제, 인적문제, 환경적 문제, 조직의 문제 등 4가지 범주로 구분하여 사고조사에서 원인 및 발견 사항을 기록하는 방식으로 변경하였다(그림 10 참조).

그림 11은 정의된 사건을 기준으로 사고원인을 분류한 것이다. 비행시험 중 주요 사고 원인으로 엔진 동력 손실, 비행 중 또는 지상 운행 중 조종 불능, 실속/스핀 순으로 나타났다.

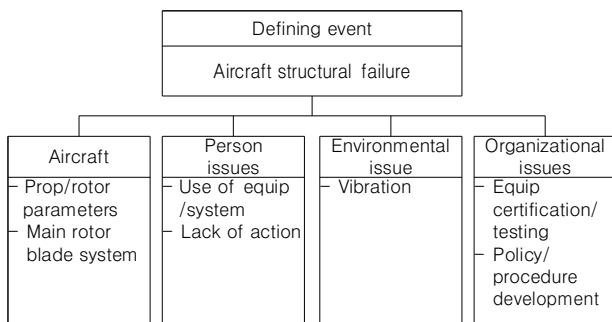


그림 10. 정의된 사건에 따른 사고 원인 및 발견 사항 기록(예) (2008.4. ~ 2017.6.)

Fig. 10. Example of accident cause and finding recording according to defining event (2008.4. ~ 2017.6.)

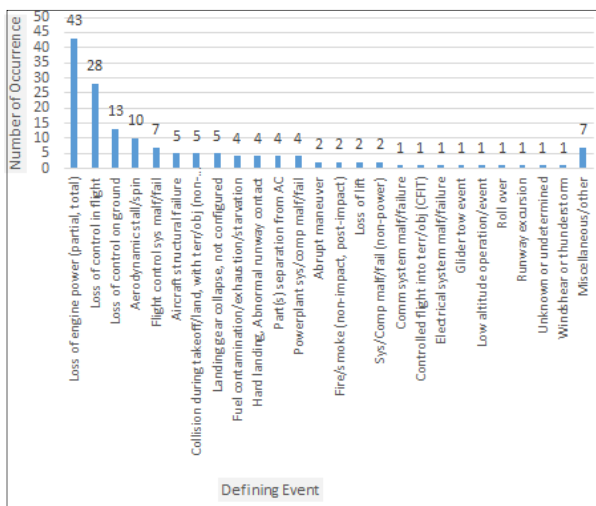


그림 11. 정의된 사건에 따른 비행시험 사고/준사고 건수 (2008.4. ~ 2017.6.)

Fig. 11. Number of flight test accident/incident by defining event (2008.4. ~ 2017.6.)

IV. 비행시험 위해요인 식별

4-1 일반 항공사고와 비행시험 항공사고 원인 비교

국제기구, 항공선진국의 항공사고 통계 자료와 NTSB 비행 시험 중 발생한 사고/준사고 최종 보고서를 분석하여 사고 원인을 비교한 결과 LOC-I로 인한 사고는 공통적으로 높은 사고율을 갖는 것으로 나타났으나 그밖에 사고에서는 다른 경향을 나타내고 있다. 국제기구, 항공선진국의 항공사고 통계 자료에서 높은 사고 발생률을 보였던 “활주로/유도로 이탈을 포함한 RS 사고”의 CFIT 사건이 NTSB 비행시험 중 발생한 사고에서는 각각 1회로 낮은 발생률을 보인 반면에 엔진 동력 손실, 기체/구성품/시스템의 고장/오작동, 지상에서 조종 불능 및 실속/스핀 사건이 다수 발생한 것으로 조사 되었다.

4-2 NTSB 최종보고서를 통한 비행시험 위해요인 식별

2008년 4월부터 2017년 6월 사이에 발생한 사고 중 발생률이 높은 상위 4개의 사건 및 무인항공기 사고에 대한 위해요인을 식별하였다.

- 첫째로, 엔진 동력 손실 사건에서는 엔진, 연료 및 연료 계통, 검사 등(이하 항공기 문제), 의사결정, 조종, 비행계획/준비, 비행 전 검사, 선행조치(predisposing), 기종 경험, 기종 이해, 설치, 수정/변경, 정비 후 검사, 계획 정비 등(이하 인적 문제), 착빙, 펜스, 차량, 장애물 등(이하 환경적 문제), 운영자 정책/절차, 장비 제조사, 부품/연장 추적 등(이하 조직상 문제)이 식별되었다.
- 둘째로 비행 중 조종불능 사건에서는 조종계통, 발전기, 속도/고도/받음각, 오토파일럿, 무게중심/중량 분포, 엔진/유압 등(이하 항공기 문제), 조종, 주의(attention), 건강/약물, 승무원/정비사자원관리 (CRM/MRM; crew resource management/ maintenance resource management) 기술, 의사결정, 장비/절차 습득, 사전조치(predisposing), 비행 전 검사, 최근/총 경험, 설치, 유지보수, 유지보수 후 검사 등(이하 인적 문제), 측풍, 돌풍, 시간/일정 압박 등(이하 환경적 문제), 유지보수 감독(이하 조직상 문제)이 식별되었다.
- 셋째로, 지상 조종불능 사건에는 측풍, 방향 조작, 랜딩기어 등(이하 항공기 문제), 조작, 설치, 최근 경험, 교체(이하 인적 문제), 측풍, 돌풍(이하 환경적 문제)이 식별되었다.
- 네 번째로 실속/스핀 사건에서는 속도/받음각, 오토파일럿, 상승능력, 엔진, 유압동력, 파라슈트, 성능/조작(performance/control), 프로펠러 조립(이하 항공기 문제), 조작, 상황판단, 약물, 장비사용,(이하 인적 문제), 장비 인증/시험, 운영 감독, 개발 정책/절차, 업무 스케줄/작업량(이하 조직상 문제)이 식별되었다.
- 마지막으로 무인항공기 비행시험 중 발생한 사고에 대한

최종보고서를 조사하여 위해요인을 식별하였다. 총 4건의 최종결과 보고서가 발간되었으며 정의된 사건을 기준으로 항공기 구조물(aircraft structural) 2건, 실속/스톨 1건, 비행 중 조종 불능 1건으로 나타났다. 사고원인으로 식별된 위해요인은 메인 프레임, 오토파일럿-컴퓨터/시스템, 날개 스파(spar on wing), 받음각, 엔진, 연료(이하 항공기 문제), 부적절한 조작, CRM/MRM 기술(이하 인적 문제), 요란(환경 문제), 장비 인증/시험(조직상의 문제)이 나타났다.

V. 결 론

라이트 형제가 최초로 동력 비행에 성공한 이후 많은 선구자들의 노력으로 항공기 제작 및 운영에 필요한 광범위한 데이터베이스와 노하우가 축적되었다. 1940년대부터 시작한 시스템엔지니어링과 1960~70년대부터 시작한 다양한 안전관리 기법의 개발 및 적용, 그리고 2006년 ICAO가 Safety Management SARP를 도입하면서 항공 산업의 패러다임은 리스크 감소 산업에서 안전관리 산업으로 변화하게 되었다. 하지만 항공기 개발 및 정비 부분에서 수행되고 있는 비행시험은 타 항공 분야보다 높은 리스크를 내재하고 있다. 본 논문에서는 비행시험 절차를 알아보고, 비행시험 목적의 항공기 운항에서 리스크 관리를 위해 국제기구 및 항공선진국 등에서 구축한 사고 관련 DB를 조사하여 위해요인을 식별하였다. NTSB 사고/준사고 자료와 EASA의 연간안전보고서를 제외한 사고 통계 자료는 상업용 항공기 운항에 국한된 것으로 RS, LOC-I, CFIT 사건을 고위험 리스크로 구분하고 있으나, NTSB의 비행시험 사고/준사고 보고서 312건을 분석한 결과는 엔진 동력 손실, 기체/구성품/시스템의 고장 및 오작동, 지상에서 조종 불능 및 실속/스핀 사건 순으로 발생하였다. 또한 사고 원인 분석을 통해 항공기 문제, 인적 문제, 환경적인 문제, 조직상의 문제로 구분하여 약 200여개의 위해요인을 식별하였다. 본 논문의 결과는 향후 국가종합 비행능성시험장의 안전관리시스템 구축을 위한 기초 연구 자료로 활용될 예정이며, 후속 연구에서는 식별된 위해요인에 대한 심각도, 발생 가능성 등을 고려하여 리스크 평가를 수행하고, 확인된 리스크에 대한 통제 또는 완화 방안이 제시될 예정이다.

Acknowledgement

본 연구는 국토교통부 항공안전기술개발사업 (과제번호: 15ATRP-C109146-01)의 지원을 받아 수행되었습니다.

References

- [1] Yonhap news, Chinese passenger plane C919, flight stop due to serious problem, 2018.6.20. [Internet]. Available: <http://www.yonhapnews.co.kr/bulletin/2018/06/21/0200000000AKR20180621060800009.HTML?from=search>
- [2] Reuters, Mitsubishi says on track to deliver long-delayed jets by 2020, 2017.12.31. [Internet]. Available: <http://www.businessinsider.com/r-mitsubishi-says-on-track-to-deliver-long-delayed-jets-by-2020-2017-12>
- [3] Flight Global, 787 suffers nose gear failure at VIP conversion site, 2018.3.22. [Internet]. Available: <https://www.flightglobal.com/news/articles/787-suffers-no-se-gear-failure-at-vip-conversion-site-446994/>
- [4] Collins Dictionary [Internet]. Available: <https://www.collinsdictionary.com/dictionary/english/flight-test>
- [5] DTaQ, Defense Science and Technology Glossary [Internet]. Available: <http://dtims.dtaq.re.kr:8084/dictionary.do?method=main>
- [6] P. S. Kim, "Considerations on the flight test implementation for small airplane certification program," *Journal of Aviation Development of Korea*, Total No. 63, pp.57~71, Oct. 2015.
- [7] J. Y. Kang, M. G. Kim, Y. H. Kim, and I. K. Lim, "T&E process for safety-critical CNS/ATM systems", *Journal of Advanced Navigation Technology*, Vol. 21, No.1, pp. 51-58, Jan. 2017.
- [8] Y. S. Jung, Comparison of flight test techniques on aircraft flight control system, Master thesis, Gyeongsang National University, Gyeongnam, S. Korea, 2004.
- [9] R. Herman and M. Herschel "Integrated flight test environment - a concept for integration of simulation with flight test", *Biennial Flight Test Conference, AIAA*, South Carolina: SC, pp. 170-181, 1994.
- [10] B. G. Lee, C. J. Kim, G. W. Kim, G. H. Han, and S. J. Park, *Practical Flight Test Written by T-50 Aircraft Development Experience*, Seoul, Korea: Cheongmungag, 2007.
- [11] D. W. Ko, N. S. Choi, M. S. Kang, G. H. Kim, and G. S. Ryu, *Development of civil aircraft based on KC-100 aircraft experience*, Seoul, Korea, Cheongmungag, 2013.12.
- [12] A. J. Stolzer and J. J. Goglia, *Safety Management Systems in Aviation*, 2nd ed, New York, NY: Routledge, 2015.
- [13] ICAO, Accident Statistics [Internet]. Available: <https://www.icao.int/safety/iStars/Pages/Accident-Statistics.aspx>
- [14] ICAO, Safety Report 2013, 2014, 2015, 2016, 2017 [Internet]. Available: <https://www.icao.int/safety/Pages/Safety-Report.aspx>

- [15] M. G. Kim, I. K. Lim, B. S. Yoo, and J. Y. Kang, "Flight test hazard identification for application of safety management system", in *The Korean Society for Aviation and Aeronautics, 2018 Spring Conference*, Gyeonggi-do: Korea, pp. 317~320, May. 2018.
- [16] IATA, Safety Report 2017, 2018. [Internet]. Available: <https://aviation-safety.net/airlinesafety/industry/reports/IATA-safety-report-2017.pdf>
- [17] UK CAA CAP1036, Global Fatal Accident Review 2002-2011, 2013. [Internet]. Available: <http://publicapps.caa.co.uk/modalapplication.aspx?appid=11&mode=detail&id=5605>
- [18] EASA, Annual Safety Review 2017, 2017. [Internet]. Available: <https://www.easa.europa.eu/document-library/general-publications/annual-safety-review-2017>
- [19] NTSB, Aviation: Data & Stats [Internet]. Available: https://www.ntsb.gov/investigations/data/Pages/Data_Stats.aspx



김 무 근 (Mu-Geun Kim)

2009년 2월 : 아주대학교 교통·ITS대학원 교통공학과 (공학석사)
 2015년 3월 ~ 현재 : 한국항공대학교 대학원 항공운항관리학과 박사과정
 ※관심분야 : CNS/ATM, 시험평가인증, 공항운영 및 관리



임 인 규 (In-Kyu Lim)

2002년 8월 : 한국항공대 정보통신공학과 (공학석사)
 2015년 8월 ~ 현재 : 한국항공대학교 대학원 항공운항관리학과 박사과정
 1991년 12월 ~ 현재 : 대한항공 정비본부 항공기 정비
 ※관심분야 : CNS/ATM, 시험평가인증, 공항운영 및 관리, 항공보안공학



유 병 선 (Beong-Seon Yoo)

1993년 03월 ~ 현재 : 한국항공대학교 항공운항학과 교수/사업용 조종사/조종교육 증명
 1999년 04월 ~ 현재 : 국토교통부 항공종사자 자격시험위원
 2005년 03월 ~ 현재 : G-TELP KOREA 항공영어시험 자문위원
 2005년 09월 ~ 현재 : 교통안전공단 항공준사고 자문위원
 2008년 11월 ~ 현재 : 해군발전 자문위원
 2011년 11월 ~ 현재 : 소방방재청 정책협의회 항공분야 자문위원
 ※관심분야 : 기초 비행교육 프로그램 개발, 항공종사자(조종사) 자격제도 개선, 산학연계 교육 프로그램 개발



강 자 영 (Ja-Young Kang)

1992년 06월 : 미국 Auburn Univ, AE/Ph.D., 1992년 06월 ~ 2002년 03월 : ETRI 책임연구원/팀장
 1979년 03월 ~ 1984년 08월 : 국방과학연구소 및 국방기술품질원 연구원
 1997년 03월 : FAA Private Pilot License, 2002년 03월 ~ 현재 : 한국항공대학교 항공운항학과 교수
 2011년 12월 ~ 2015년 12월, 2017년 08월 ~ 현재 : 한국항공대학교 부설 항공체계시험인증연구센터장
 2015년 03월 ~ 2016년 02월 : 한국항공대학교 부설 한국항공안전교육원장
 2004년 03월 ~ 현재 : 한국항공학회 정회원(중신회원)
 2014년 01월 ~ 2015년 12월 : 제11대 한국항공운항학회 회장
 ※관심분야 : CNS/ATM, 항공체계공학, 위성시스템 응용