

Original Article

<https://doi.org/10.12985/ksaa.2024.32.2.135>
ISSN 1225-9705(print) ISSN 2466-1791(online)

항공기 착륙 수직 가속도 이벤트 통계적 분석 연구

전제형*, 김현덕**

Research on Statistical Analysis of Vertical Acceleration Events
during Aircraft Landing

Je-Hyung Jeon*, Hyeon Deok Kim**

ABSTRACT

Despite the innovative technological advances in the aviation industry, hard landing events that occur during aircraft landing account for 13% of all accidents. Hard landing when landing an aircraft affects normal operation by generating a large load on the landing gear and the fuselage. In order to identify these risk factors, the airline monitors the high vertical acceleration event, a precursor to hard landing, through QAR (Quick Access Recorder) flight data analysis, and prepares and implements mitigation measures. In this study, it is intended to contribute to safety management based on flight data analysis that identifies the characteristics of high vertical acceleration G event data that can cause such hard landing and detailed parameters of precursor signs, and to identify the causal relationship of the occurrence of the event by applying statistical analysis methods such as variance analysis, correlation analysis, and regression analysis models to identify the characteristics of the event occurrence and eliminate the cause in advance.

Key Words : High Vertical Acceleration G (수직가속도 초과), Flight Data Analysis (비행데이터 분석), Regression Analysis(회귀분석), Safety Management(안전관리)

1. 서 론

IATA의 항공기 사고 유형별 집계에 의하면 활주로(runway)와 유도로(taxiway)의 이탈(excursion) 사고가 25%로 가장 많이 분포하였으며, 그 다음으로는 하드랜딩 이벤트가 약 13% 비율로 비행 안전을 저해하는 위험 요인으로 분석하였다(IATA, 2020). 항공기 착

륙 시의 하드랜딩은 착륙 기어(landing gear) 및 동체 부분에 큰 하중을 발생시킴으로써 정상 운항에 영향을 미친다(Oh et al, 2011).

항공사는 이러한 위험 요인을 식별하기 위하여 QAR (quick access recorder) 운항 데이터 분석을 통해 하드랜딩 전조 징후인 수직 가속도 초과(high vertical G) 이벤트를 모니터링하고, 경감 방안을 마련하여 시행하고 있다(FAA.A/C.2004)

해외 일부 항공사의 경우에는 수직 가속도 초과 (high vertical acceleration G) 이벤트 경감 방안으로 해당 기장에게 벌금(fine) 또는 인사상의 불이익을 주는 경우도 있다. 운항 데이터 분석 프로그램 (FDAP, flight data analysis program) 지침에 의하면 데이

Received: 30. May. 2024, Revised: 06. Jun. 2024,

Accepted: 10. Jun. 2024

* 에어부산 안전보안실 FOQA Analys

** 한국항공대학교 항공운항학과 교수

연락처 E-mail : hyeondkim@kau.ac.kr

연락처 주소 : 경기도 고양시 한국항공대학교 항공운항학과 10540

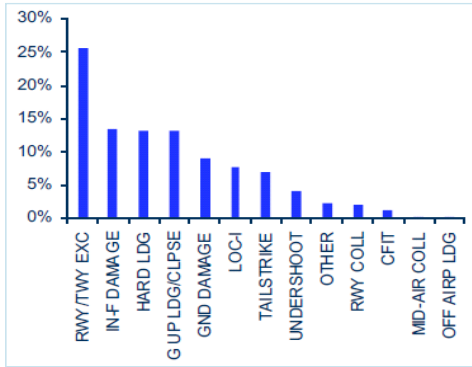


Fig. 1. Accident category distribution (IATA, 2020)

터의 수집 및 분석은 비행안전을 향상시키기 위한 목적이지만, 처벌(punishment)이나 인사상의 불이익으로 사용하면 안 된다고 명시하고 있다(Yang, 2011).

이러한 잘못된 이벤트의 경감 방안은 오히려 롱플레어(long flare) 이벤트의 증가로 이어지거나, 기장들이 부기장에게 착륙의 기회를 주지 않는 역효과를 가져올 수도 있다.

본 연구에서는 수직 가속도 초과 이벤트를 통계적인 분석 방법인 분산분석과 상관관계분석, 회귀분석 모형을 적용하여 이벤트의 발생 특성을 식별하고, 원인을 제거하는 운항 데이터 분석 기반의 안전관리에 이바지하고자 한다.

II. 본 론

2.1 QAR (Quick Access Recorder) 개념

QAR은 항공기 운항 중에 발생하는 다양한 비행 성능과 환경 등의 매개변수를 기록할 수 매체를 말하며, QAR 데이터의 샘플링 속도는 일반적으로 1/4 Hz에서 16 Hz 사이에 있으며, 연속적인 시계열 데이터로 기록되고, 가변 기압고도와 항공기 속도 등과 같은 다양한 파라미터 정보를 포함하고 있다. 항공사들은 이러한 QAR 데이터를 활용하여 비행안전 관리와 운항 품질을 개선하여 항공기의 사고 예방과 비행안전을 강화할 수 있다(FDAP, 2014).

2.1.1 QAR 데이터 기록방식

QAR 데이터의 디코딩은 바이너리 스트림, 즉 수신된 0과 1의 순서를 전송하는 것을 의미한다. 디코딩에는 DFL(data frame layout)이 필요하며, 이진형식에

서 공학단위로 변환해야 한다. 또한 매개변수의 정확도를 유지하기 위해 이 변환은 단순한 수학적 변환만으로는 처리되지 않을 수 있다. 이에 이진값 X 를 10진수로 변환하고, DFL에서 주어진 변환규칙에 따라 아핀선형방정식 $Y = A_0 + A_1 \cdot X$ 를 적용한다. Y 는 파라미터의 공학단위 값으로 표시되며, 변수 A_0 및 A_1 은 DFL에 의해 주어진 상수를 의미한다. 이러한 디코딩 프로세스를 통해 QAR 데이터를 이해할 수 있는 형식으로 변환하여 운항 데이터 분석 및 모니터링에 활용할 수 있다(Schwaiger and Holzapfel, 2021).

Fig. 2와 같이 항공기로부터 수신되는 데이터를 관리, 저장, 디코딩 및 분석하기 위해서는 전용 운항 데이터 분석(FDA: flight data analysis) 프로그램이 필요하며, 이 프로그램의 가장 주요 기능은 운항 데이터의 스트리밍을 처리하여 데이터를 체계적으로 저장하는 것이다(ICAO, 2021).

이러한 분석 데이터가 미리 설정한 임계값 기준치를 초과하면 발체되어 안전지표(incident metric)를 통한 사전적인 예방(proactive) 안전관리를 할 수 있다.

2.2 수직 가속도 초과 이벤트의 정의

본 연구에서의 수직 가속도 초과 이벤트는 항공기 착륙 단계에서의 발생하는 수직 가속도 값이 1.5G 이상 발체되는 경우를 의미한다. A320 제작사의 하드랜딩 발체 기준은 2.6G로 설정되어 있으나, 본 연구에서는 하드랜딩의 전조 징후인 수직 가속도 초과 이벤트의 경향성을 분석하기 위하여 Table 1과 같이 심각도의 정도에 따라 3단계로 나누었다.

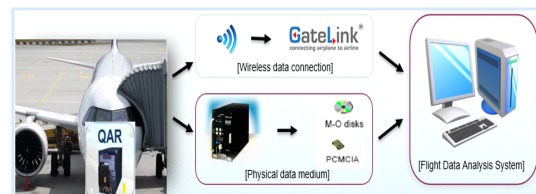


Fig. 2. Flight data monitoring process

Table 1. Description of data set

Precursor	Low severity	Medium severity	High severity
Vertical G	below 1.4G	1.4G ~ 1.5G	above 1.5G

2.3 실증분석

본 연구는 항공기 착륙 단계에서 수직 가속도 초과 이벤트를 발생한 집단과 정상 착륙한 집단 간에 영향을 미치는 매개변수의 특성과 관계를 분석하였다. 분석 대상은 A 항공사의 2019년부터 2023년까지 김포공항, 제주공항, 김해공항을 운항한 A320 기종의 운항데이터(표본크기 34만 회)를 전처리 과정을 통해 결측치 처리 및 정제하였다. 이들 계측값 중 수직 가속도 초과 이벤트의 전조 징후와 관련된 정량 변수 및 상관관계를 고려하여 최종적으로 17개의 매개변수를 선정하였으며, 각 매개변수의 정의는 Table 2의 내용과 같다.

2.3.1 이벤트 분석 방법

하드랜딩을 발생시킬 수 있는 수직 가속도 초과 이벤트 데이터의 특성과 전조 징후의 세부 계측값(parameters)들의 차이점을 확인하고, 이벤트의 발생 인과관계를 파악하기 위하여 분산분석, 상관관계분석, 회귀분석을 활용한 운항 데이터 통계 분석 모델을 Fig. 3과 같이 수행하였다.

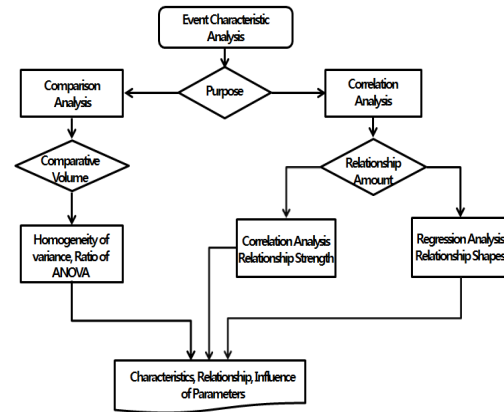


Fig. 3. Event characteristic analysis method

2.3.2 이벤트 분산분석

본 연구에서는 수직 가속도 초과 이벤트를 발생한 집단과 정상적으로 착륙한 집단 간의 운항 데이터를 비교 분석하였다.

항공기의 접근 속도(approach speed), 접지 기수

Table 2. Definition of parameters

Parameters	Definition
Pitch angle	항공기 실제 동체 축과 수평면 사이의 각도
Pitch command	항공기 피치를 조정하기 위해 조작한 각도
Roll angle	실제 항공기 Roll 축의 각도 변화 경향
Roll command	항공기 롤을 조정하기 위해 조작한 각도
Rudder altitude	러더의 회전 각도 변화 항공기가 수평축을 중심으로 한 Yaw의 방향 변화
Rudder pedal position	항공기 러더를 조정하기 위해 조작한 각도
Drift angle	항공기 경로와 항적과의 각도
Computed airspeed	항공기 표준대기압에서의 속도와 동압의 관계에 따른 공기 속도
Ground speed	항공기가 지상풍의 영향을 반영한 실제 속도
Vertical speed	항공기 수직 하강 방향의 속도
Heading_true_mag	항공기의 진행 방향을 가리키는 각도 (진북, 자북)
Angle of attack LH	날개 시위선과 공기 흐름간의 각도 (왼쪽)
Angle of attack RH	날개 시위선과 공기 흐름간의 각도 (오른쪽)
Throttle lever angle eng	트로틀 레버의 각도에 따른 항공기의 Engine 대한 출력을 나타냄
Wind direction	바람이 불어오는 방향
Wind speed	바람의 속도
Gross weight	항공기의 총 중량
Vertical acceleration	항공기 수직 방향으로의 가속을 나타내는 지표
Radio height1(RALT)	항공기와 지표면의 높이를 전자 장비를 이용해 측정한 고도

각도(pitch angle), 바람의 방향과 속도 등과 같은 운항 매개변수들에 대한 평균값들을 세 집단(low/medium/ high severity)으로 나누어 비교분석을 함으로써, 이벤트 발생과 가장 관련성 있는 요인을 식별하고자 하였다.

종합적인 분산분석 결과에 따른 유의미한 변수는 아래의 Fig. 4와 같다.

회색 바는 집단 간의 차이의 유의확률 아래의 평균값을 나타내며, 빨간색 선과 점은 유의확률 95% 이상의 값을 나타낸다. 파란색 막대는 유의확률이 고빈도, P-값 Mean 값의 비율 상위를 나타낸다.

이벤트 분산분석 결과에 의하면 항공기의 속도(airspeed)가 23.12%의 비율로 가장 높은 빈도를 나타내었으며, 강하 속도(vertical speed)는 22.50%, 항공기 기수 자세 (pitch attitude)는 21.32%로 항공기의 강하율과 관계가 많은 변수가 차례로 높은 빈도를 나타냈다.

편류각(drift angle)이 21.1%, 지상대기 속도(ground speed)가 19.50%, 기수 조종 위치(pitch command position)은 18.32% 순으로 나타났고, 집단 간의 변수들의 차이는 97% 이상의 높은 유의확률을 나타내었다. 고도별로는 접지 직전인 15ft (약 15.70%), 30ft(약14.53%), 50ft(약 13.95%)의 저고도 순으로 변수들의 집단 간의 유의미한 분포의 차이를 나타내었다.

2.3.3 이벤트 상관관계분석

본 연구에서는 수직 가속도 초과 이벤트 발생과 관련된 매개변수 간의 상관관계를 분석하여 어떤 변수들이 서로 연관성을 가지는지 파악하였다.

이는 이벤트 발생의 주된 원인을 식별하고, 이후 회귀분석의 변수 선택의 기준으로 활용하였다. 수직 가속도 초과 이벤트의 상관관계는 Fig. 5와 같으며, 공향, 활주로, 기종, 풍속의 차이에 상관없이 대부분 그룹에서 항공기 받음각 (angle of attack)과 기수 각도 (pitch angle) 간의 상관관계($p=0.83, 0.86$)가 높은 편으로 나타났다. 그 외에는 활주로에 따라 차이는 있으나, 항공기 기수(heading)와 편류각(drift angle) 간의 높은 상관관계($p=0.83$)를 확인할 수 있었다.

공향별 분석에 의하면 제주공항은 받음각(angle of attack)과 기수 각도(pitch angle) 간의 상관관계($p=0.81, 0.84$)가 높은 것을 확인하였으며, 특히 rwy 25에서는 항공기 기수(heading)와 풍향(wind direction) 간의 상관관계($p=0.64$)를 확인할 수 있었다. 김포 공항에서도 받음각(angle of attack)과 항공기 기수 각도(pitch angle) 간의 상관관계($p=0.83, 0.86$)가 높은 것을 확인할 수 있었다. rwy 14에서는 항공기 기수(heading)과 풍향 간의 상관관계($p=0.61$)를 확인할 수 있었으며, 김해공항에서도 받음각 (angle of attack)과 기수 각도(pitch angle)간의 상관관계($p=0.85, 0.88$),

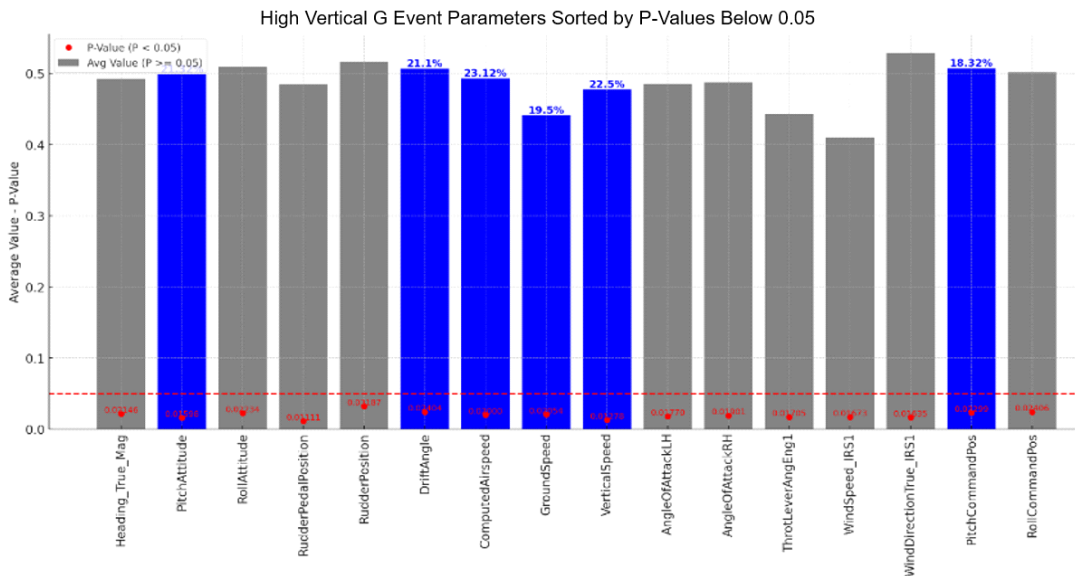


fig. 4. high vertical g event variance analysis results

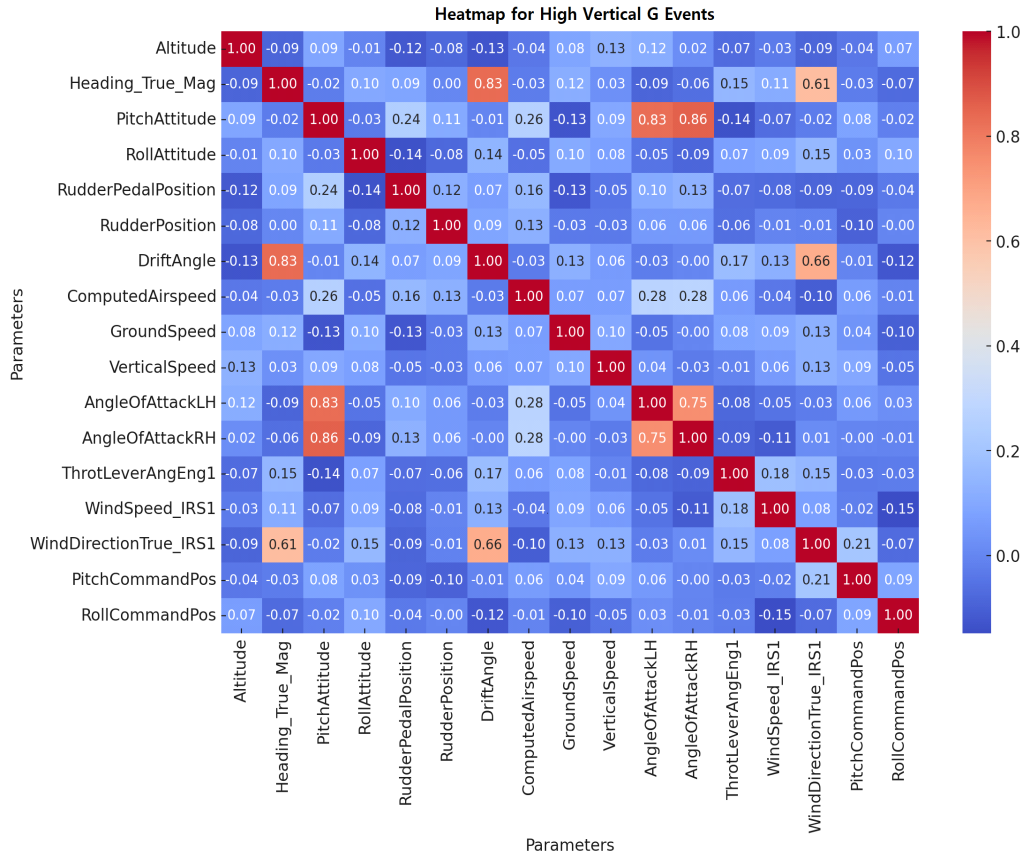


Fig. 5. High vertical G event correlation analysis results

항공기 기수(heading)와 풍향 간의 상관관계($p=0.62$)가 높은 편이며, RWY 36에서는 편류각(drift angle)과 풍향 간의 상관관계($p=0.72$)를 확인할 수 있었다.

2.3.4 이벤트 회귀분석

본 연구에서는 회귀분석을 통해 항공기 운항 중에 발생할 수 있는 수직 가속도 초과 이벤트에 영향을 미치는 핵심 매개변수들의 관계 모델링을 위하여 착륙 시 발생하는 매개변수들의 영향력을 정량화하여 분석하였다. 그 내용은 fig. 6과 같다.

종합적인 회귀분석의 결과를 통해 수직 가속도 초과 이벤트에 영향을 미치는 주요 변수 중에 가장 유의미한 영향을 미치는 변수는 기수 각도(pitch angle)로 음(-)의 방향으로 높은 수치(-0.624)를 나타낸다. 이는 수직 가속도 초과 이벤트의 원인인 조종사의 늦은 플레어(late flare)를 방지하기 위한 일정한 기수 각도(pitch angle) 유지의 중요성을 나타내는 것으로 해석된다.

반면 항공기 강하 속도(vertical speed) 0.748, 지상 속도(ground speed) 0.268, 트로틀 레버 각도(throttle lever angle) 0.695로 수직 가속도 초과 이벤트 발생 확률을 증가시키는 양(+)의 방향으로 강한 상관관계를 보인다. 이는 항공기의 강하율과 에너지 관리와 관련된 자세제어 변수 및 계수들이 이벤트 발생에 유의미한 영향을 미친다는 것을 나타낸다.

또한 풍속(wind speed)의 경우, 회귀 계수 0.232로 양수이지만 상대적으로 작은 값을 가진다. 이는 바람의 세기가 이벤트 발생 확률을 약간 증가시킬 수 있으나, 다른 변수들에 비해 그 영향력이 상대적으로 적다는 것을 의미한다. 풍속과 같은 환경적 요인이 이벤트에 영향을 미칠 수 있으나, 항공기의 자세제어 및 운항 관련 변수들이 더욱더 중요한 역할을 한다는 것을 나타낸다.

Fig. 6의 변수별 각각의 회귀계수들은 영향력의 크기와 방향성을 나타낸다.

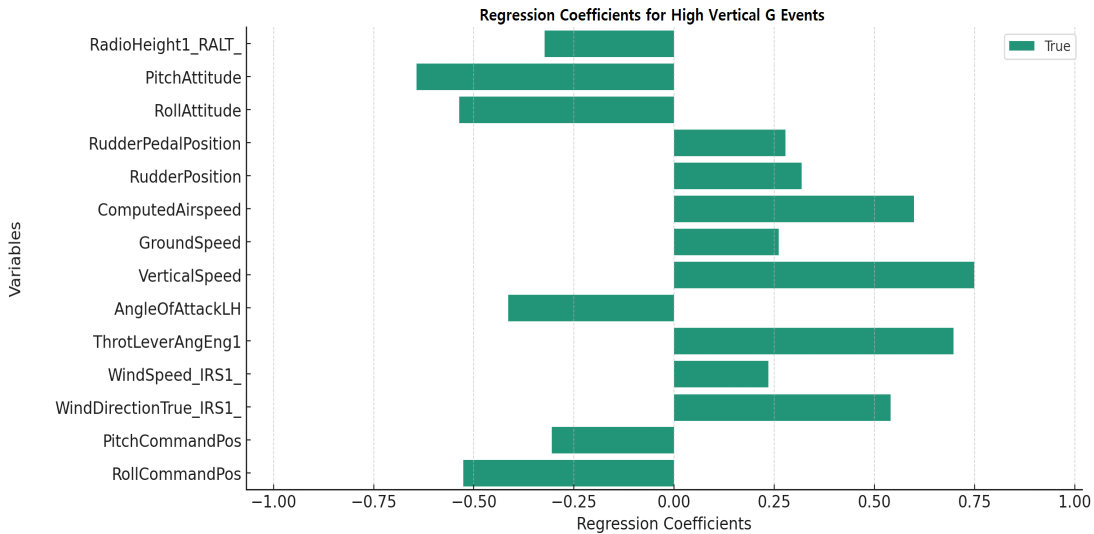


Fig. 6. Comprehensive results of high vertical G event regression analysis

III. 결 론

본 연구에서는 항공기 하드 랜딩의 전조 증상인 수직 가속도 초과 이벤트에 대한 분산분석, 상관관계분석, 그리고 회귀분석 결과는 다음과 같은 주요 특성을 나타내었다.

첫째, 이벤트 분산분석의 결과로는 항공기 속도(airspeed), 강하 속도(vertical speed), 항공기 기수 자세(pitch attitude) 등이 높은 빈도와 유의확률을 나타내며, 특히 강하율과 관련된 변수들이 중요한 역할을 하는 것으로 나타났다. 고도별 분석에서는 접지 직전인 15ft, 30ft, 50ft에서 변수들 간의 유의미한 차이가 관찰되었다.

둘째, 회귀분석 결과에 의하면 수직 가속도 초과 이벤트에 영향을 미치는 주요 요인들에는 차이가 존재하나, 항공기 강하 속도(vertical speed), 지상대기 속도(ground speed), 트로틀 레버 각도(throttle lever angle)는 이벤트 발생 확률을 증가시키는 기여 요인(contributing factors)으로 분석되었다.

이벤트의 통계 분석을 종합하면 항공기의 낮은 수직 경로(low vertical path)와 조종사의 늦은 플레어(late flare)가 수직 가속도 초과 이벤트 발생의 주요 원인으로 식별되었다. 또한 다양한 운항 관련 변수들이 이벤트에 영향을 미치는 가운데 특히 항공기의 강하율과 에너지 관리가 핵심 요인임을 도출하였다.

따라서 본 연구의 시사점은 항공기 하드랜딩의 전조 징후인 수직 가속도 초과 이벤트의 모든 통계 분석에서 대립가설이 채택되었으며, 이벤트 주요 원인을 식별하여 사전에 제거하는 예방적 안전관리에 통계 분석 연구 방안을 제시하였다는 것이다. 또한 공항과 항공기 유형에 따라 발생할 수 있는 이벤트의 특성을 예측하는 데 있어 통계 분석 결과에서 도출된 변수들의 영향력과 상관관계를 효과적으로 활용할 수 있으며, 항공사의 데이터 기반 안전관리를 구축할 수 있다는 것이다.

향후 운항 데이터 분석 연구에 있어서는 새로운 머신러닝(machine learning) 모델과 기존의 통계 분석 방안을 상호 적용하여 연계하는 빅데이터 플랫폼에 관한 연구가 이루어져 할 시점으로 사료된다.

References

1. International Air Transport Association, "Safety Report 2019", IATA, 2020, pp.47-73.
2. Oh, Y. K., Sim, S. K., and Shin, K. S., "A study of the effects of hard landing on aircraft structure", Journal of the Korea Institute of Military Science and Technology, 2011, pp.805-811.
3. Federal Aviation Administration, "Flight operational quality assurance", Advisory Circular

- lar 120(82), 2004, pp.1-25.
4. Yang, X., "Research of general aviation flight data analysis", Proceedings of 2011 International Conference on Electronic & Mechanical Engineering and Information Technology, 9, 2011, pp.4497-4499.
 5. International Civil Aviation Organization, "Manual on Flight Data Analysis Programmes (FDAP) (First Edition)", Vol. 10000 AN/501, Doc. Montréal, Québec: International Civil Aviation Organization, 2014.4.
 6. Schwaiger, F., and Holzapfel, F., "Fast decoding of ARINC 717 flight data recordings", AIAA Scitech 2021 Online Virtual Forum, 2021, pp.25-34.
 7. International Civil Aviation Organization, "Manual on Flight Data Analysis Programmes (FDAP) (First Edition)", Vol. 10000 AN/501, Doc. Montréal, Québec: International Civil Aviation Organization, 2021.