

Original Article

<https://doi.org/10.12985/ksaa.2026.34.3.289>
ISSN 1225-9705(print) ISSN 2466-1791(online)

항공사고 및 준사고 내러티브 기반 항공안전 이슈의 시기별 변화 분석 - NTSB 자료를 중심으로-

이지윤*

A Temporal Analysis of Aviation Safety Issues based on Aviation Accident and Incident Narratives - Evidence from NTSB Reports -

Jiyoon Lee*

ABSTRACT

This study examines the thematic structure and temporal changes of aviation safety issues using narrative information from aviation accident and incident investigation reports. Narrative data from the National Transportation Safety Board (NTSB) covering 2002-2025 were collected, and after preprocessing, 34,482 documents were analyzed using Latent Dirichlet Allocation (LDA), identifying 15 topics. The results showed that major topics included landing gear and landing-related damage, runway and terrain excursions, and low-altitude maneuvering, stall, and terrain impact. The topic related to landing gear and landing-related damage had the highest overall mean proportion and increased in relative proportion over time, while the topic related to low-altitude maneuvering, stall, and terrain impact remained relatively high during the middle and later periods. These findings demonstrate that accident investigation narratives can serve as unstructured safety data for identifying recurring aviation safety issues and their temporal changes.

Key Words : Aviation Accident(항공사고), Aviation Incident(항공준사고), NTSB Investigation Report(NTSB 조사보고서), Aviation Safety(항공안전), Topic Modeling(토픽모델링)

1. 서 론

항공사고는 기술적 결함, 운항 절차, 기상 및 환경 조건, 인적 요인 등이 복합적으로 작용하여 발생하는 사건으로 이해되어 왔다(Reason, 1990, 2000; Shap-

pell and Wiegmann, 2000; Kharoufah et al., 2018). 항공운송 분야의 전반적인 사고율은 장기적으로 감소해 왔지만, 항공사고와 준사고는 항공운송체계의 안전성을 위협하는 주요 문제로 남아 있다. 국제항공운송협회(International Air Transport Association, IATA)는 항공운송 사고율이 2016년 100만 운항 구간당 1.61건에서 2025년 1.32건으로 감소하였다고 보고하였다(International Air Transport Association, 2026). 그러나 사고율의 감소가 항공안전 문제가 해소되었음을 의미하는 것은 아니다. 사고 발생 빈도의 감소와 별개로 사고와 준사고에 포함된 위험요

Received: 29. Aug. 2026, Revised: 6. Sep. 2026,

Accepted: 18. Sep. 2026

* 한남대학교 경상대학 호텔항공경영학과, 조교수

연락처 E-mail : tourismjylee@hnu.kr

연락처 주소 : 대전광역시 대덕구 한남로 70, 한남대학교

경상대학 206호

인과 운항 맥락을 체계적으로 파악하는 일은 지속적으로 중요하다. 기존 항공안전 연구에서도 항공사고는 조종사 또는 관제사의 개별 오류만으로 설명되기보다 상황인식, 의사결정, 절차 준수, 의사소통, 감독 및 조직 요인 등이 작용하는 과정으로 논의되어 왔다(Reason, 1990, 2000; Kim and Baek, 2017; Kharoufah et al., 2018; Kim and Park, 2021).

항공안전 문제를 보다 체계적으로 이해하기 위해서는 개별 사고의 원인을 식별하는 데 그치지 않고 장기간에 걸쳐 사고와 준사고 자료에 반복적으로 기록되는 안전 이슈와 그 변화 양상을 검토할 필요가 있다. 항공 운송 환경은 항공기 기술, 운항관리 체계, 정비 시스템, 조종 및 관제 절차, 항공수요 변화 등 다양한 요인의 영향을 받으므로 특정 시점의 사고요인이나 개별 사례만으로 반복적으로 나타나는 안전 이슈의 구조를 충분히 파악하기 어렵다(Reason, 1990; Underwood and Waterson, 2014). 이러한 분석에 활용할 수 있는 주요 자료가 사고조사보고서의 서술정보이다. 미국 National Transportation Safety Board(NTSB)는 항공사고 및 준사고의 발생 경위, 조사 내용, 관련 조건 및 조사 결과 등을 포함한 서술정보(narrative)를 축적·공개하고 있다. 이 자료는 비정형 텍스트이기 때문에 대규모 자료를 수작업으로 검토하는 데 한계가 있지만(Ahadh et al., 2021; Yang and Huang, 2023), 기술적 조건, 운항 상황, 환경 요인 및 인적 행위가 어떠한 맥락에서 기록되는지를 파악할 수 있다는 점에서 기존 사고 원인 분류나 정형화된 사고 코드를 보완하는 자료로 활용될 수 있다(Agovic et al., 2010; Tanguy et al., 2016; Ison, 2025).

최근에는 이러한 대규모 비정형 자료를 분석하기 위해 텍스트마이닝과 자연어처리 기법이 항공안전 연구에 활용되고 있다(Ahadh et al., 2021; Kwon and Lee, 2023; Yang and Huang, 2023; Yoo et al., 2024). 토픽모델링은 문서 집합에 잠재된 주제 구조를 확률적으로 추정하는 방법으로(Blei et al., 2003) 항공안전 보고서에서 반복적으로 나타나는 주제를 탐색하는 데 활용되어 왔다(Agovic et al., 2010; Robinson, 2019; Nanyonga et al., 2024). 또한 LDA에서 산출되는 문서별 토픽 확률값을 시기별로 집계하면 각 토픽이 조사보고서 내러티브에서 차지하는 상대적 비중의 변화를 살펴볼 수 있다. 기존 연구는 사고 원인과 위험요인의 분류, 특정 사고유형의 분석, 안전보고서의

자동분류와 예측 등에 기여해 왔으나(Agovic et al., 2010; Underwood and Waterson, 2014; Boyd, 2015; Zhu et al., 2023), 장기간 축적된 NTSB 사고 및 준사고 내러티브를 대상으로 반복적인 안전 이슈의 주제 구조와 상대적 비중의 변화를 함께 분석한 연구는 제한적이다(Robinson, 2019; Ison, 2025). Ison (2025)은 2008-2025년 NTSB 사고보고서 내러티브의 변화를 분석하였으며, 이 연구는 분석기간을 2002년까지 확장하고 사고와 준사고를 함께 분석하여 도출된 토픽의 상대적 비중과 시기별 변화 양상을 검토한다는 점에서 차이가 있다.

2001년 9·11 테러 이후 미국에서는 transportation security administration(TSA)의 설립을 비롯하여 항공보안 정책과 감독체계가 강화되었으며, 항공운송 분야의 관리·감독 환경에도 변화가 나타났다(Elias, 2009; Price and Forrest, 2024). 이에 이 연구는 이러한 제도적 변화 이후인 2002년부터 2025년까지 축적된 NTSB 항공사고 및 준사고 조사보고서의 서술정보를 분석대상으로 설정하였다. 분석의 초점은 특정 사고의 직접 원인이나 개별 사건을 재분류하는 데 있지 않고 조사보고서에 반복적으로 나타나는 항공안전 이슈의 구조와 시기별 상대적 비중의 변화를 파악하는 데 있다. 구체적으로 첫째, 조사보고서 서술정보에 잠재된 주요 토픽을 도출하고 둘째, 각 토픽의 내용적 특성을 해석하며 셋째, 연도별 토픽 확률값을 바탕으로 토픽별 상대적 비중의 변화 양상을 검토한다. 이를 통해 대규모 사고조사 내러티브에 반복적으로 기록된 안전 관련 주제를 구조화하고 사고조사 서술정보가 항공안전관리와 위험관리에서 활용될 수 있는 비정형 안전 자료로서 갖는 가능성을 논의하고자 한다.

II. 항공사고 내러티브와 항공안전 이슈 분석

2.1 항공안전과 사고 발생 요인

항공사고와 준사고는 기술적 결함, 운항 절차, 기상 및 환경 조건, 인적 요인, 조직적 관리체계 등이 복합적으로 작용하여 발생하는 안전 사건으로 이해되어 왔다(Reason, 1990, 2000; Kharoufah et al., 2018). 항공안전 연구에서는 사고를 특정 개인의 오류나 하나의 직접 원인으로 환원하기보다 조종, 관제, 정비, 운항

관리, 절차 준수, 의사소통 및 감독체계 등 다양한 요인이 상호 관련되는 과정으로 파악해 왔다. Kharoufah et al.(2018)은 항공운송 사고 및 준사고에서 상황인식, 의사결정, 절차 준수 등 인적 요인이 주요 요소임을 제시하였으며, 국내 연구에서도 관제사의 인적오류, 피로, 스트레스, 상황인식 및 의사소통 등이 항공안전과 관련된 요인으로 다루어져 왔다(Kim and Baek, 2017; Kim and Park, 2021).

이러한 관점은 항공사고를 개인 수준의 행위만으로 설명하기보다 기술적·운영적·조직적 조건의 상호작용에 의해 형성되는 시스템적 과정으로 이해할 필요성을 보여준다. Reason(1990, 2000)은 현장 수준의 오류와 함께 조직관리, 운항 절차 및 안전장치와 관련된 잠재적 조건이 사고 발생에 영향을 미칠 수 있다고 보았으며, Underwood & Waterson(2014)은 복잡한 시스템의 사고가 단일 촉발 사건이나 선형적 인과관계만으로 충분히 설명되기 어렵다고 지적하였다. Leveson(2012) 역시 시스템 내부의 안전 제약과 구성요소 간 상호작용을 중심으로 사고를 파악할 필요성을 제시하였다. 따라서 항공사고와 준사고의 분석에서는 특정 원인 범주뿐 아니라 사고 발생 과정의 운항 상황, 장비 상태, 환경 조건, 인적 행위 및 절차적 맥락을 검토할 필요가 있다.

2.2 항공사고 및 준사고 조사보고서의 서술정보

항공사고 및 준사고 조사보고서는 사고와 준사고의 발생 과정과 관련 맥락을 파악할 수 있는 주요 자료원이다. 사고조사보고서는 사고 발생 일시와 장소, 항공기 정보, 비행 단계, 기상 조건, 운항 상황 및 사고 결과와 같은 구조화된 항목과 사건의 전개 과정과 조사 내용을 설명하는 서술정보(narrative)를 제공한다. Ison(2025)은 NTSB 사고 및 준사고 데이터베이스가 구조화된 변수와 조사자가 작성한 비정형 서술정보를 포함하며, 내러티브가 사건의 전개 과정과 관련 조건을 보다 상세하게 보여줄 수 있음을 제시하였다. 따라서 조사보고서의 서술정보는 정형화된 사고 원인 코드나 사전 분류항목만으로 충분히 드러내기 어려운 사고의 맥락을 보완적으로 파악하는 자료로 활용될 수 있다(Agovic et al., 2010; Ison, 2025).

하나의 사고 내러티브에는 비행 단계, 장비 이상, 조종 및 관제 상황, 기상 조건, 공항 환경, 절차 수행 및 사고 결과 등이 기록될 수 있다. Boyd(2015)는 NTSB

최종보고서의 원인 및 기여 요인 범주를 활용하여 비상업용 쌍발 피스톤 일반항공기 사고의 원인과 위험요인을 분석함으로써 사고조사 자료가 사고 결과뿐 아니라 기상 조건, 운항 조건 및 관련 요인을 검토하는 데 활용될 수 있음을 보여주었다. 이처럼 사고조사보고서의 서술정보는 개별 사고의 원인 설명을 보완하고 사고와 준사고가 발생한 운항 맥락과 관련 조건을 파악할 수 있는 비정형 안전자료로 활용될 수 있다.

2.3 토픽모델링을 활용한 안전 이슈 분석

텍스트마이닝은 대규모 비정형 문서에서 반복적으로 나타나는 단어와 패턴을 추출하여 자료에 잠재된 구조를 파악하는 데 활용된다. 항공안전 분야에서도 사고 및 준사고 보고서와 같이 서술형으로 축적되는 자료를 분석하기 위해 자연어처리와 텍스트마이닝 기법이 적용되어 왔다(Tanguy et al., 2016; Yang and Huang, 2023). 국내에서도 Kwon and Lee(2023)는 항공안전 관련 연구문헌에 키워드 분석과 토픽모델링을 적용하여 주요 연구 이슈를 분석하였으며, Yoo et al.(2024)은 항공 관련 문서자료를 대상으로 텍스트마이닝을 활용하여 항공사고와 항공안전의 주요 키워드와 경향을 검토하였다.

토픽모델링은 문서 집합에서 단어의 확률적 분포를 바탕으로 잠재된 주제 구조를 추정하는 방법이다. Blei et al.(2003)이 제안한 잠재 디리클레 할당(latent Dirichlet allocation, LDA)은 하나의 문서를 여러 토픽의 혼합으로 보고 각 토픽을 단어의 확률분포로 추정한다. 이러한 특성은 다양한 관련 정보가 하나의 서술에 포함되는 항공사고 내러티브에서 반복적인 주제 구조를 탐색하는 데 적합하다. Agovic et al.(2010)은 항공안전 보고서에 LDA를 적용하여 해석 가능한 주제를 추출하였으며, Nanyonga et al.(2024)은 NTSB 사고 및 준사고 내러티브에 다양한 토픽모델링 및 군집분석 기법을 적용하여 잠재적 주제 구조를 비교하였다.

LDA에서 각 문서는 하나의 토픽으로 분류되는 것이 아니라 여러 토픽이 서로 다른 비율로 구성된 문서-토픽 분포(document-topic distribution)를 갖는다. 문서 d 의 토픽 분포 θ_d 는 해당 문서에서 각 토픽이 차지하는 상대적 비중을 의미한다. 한편 각 토픽은 전체 어휘에 대한 확률분포인 토픽-단어 분포(topic-word distribution)로 표현되며, Blei et al.(2003)의 표기에서 β 는 토픽별 단어 확률을 나타낸다. 각 토픽에서 높

은 확률을 갖는 단어들은 해당 토픽의 의미를 해석하는 주요 단서가 된다. LDA의 기본 생성과정에서는 문서별 토픽 분포 θ_d 가 Dirichlet 분포로부터 생성되고, 문서 d 의 n 번째 단어에 대한 잠재 토픽 z_{dn} 이 θ_d 에 따라 선택되며, 관측 단어 w_{dn} 은 선택된 토픽과 토픽별 단어 확률 β 에 따라 생성된다(Blei et al., 2003). 이를 기본적인 생성과정으로 표현하면 식 (1)과 같다.

$$\begin{aligned}\theta_d &\sim \text{Dirichlet}(\alpha) \\ z_{dn} &\sim \text{Multinomial}(\theta_d) \\ w_{dn} &\sim p(w_{dn} | z_{dn}, \beta)\end{aligned}\quad (1)$$

여기서 θ_d 는 문서 d 의 토픽 분포, z_{dn} 은 문서 d 의 n 번째 단어에 할당된 잠재 토픽, w_{dn} 은 실제 관측된 단어를 의미한다. α 는 문서별 토픽 분포에 대한 Dirichlet 모수이며, β 는 각 토픽에서 단어가 생성될 확률을 나타내는 토픽-단어 확률 행렬이다(Blei et al., 2003).

LDA에서는 분석에 앞서 토픽 수 K 를 설정해야 하며, 토픽 수의 선택은 도출되는 주제 구조와 해석 가능성에 영향을 미친다. 지나치게 작은 K 는 서로 다른 주제를 하나의 토픽으로 통합할 수 있는 반면, 지나치게 큰 K 는 유사한 주제를 세분화하거나 중복된 토픽을 생성할 수 있다. 따라서 토픽 수는 모형의 통계적 적합도와 도출된 토픽의 해석 가능성을 함께 고려하여 결정할 필요가 있다. 모형 적합도는 perplexity와 같은 정량적 지표를 통해 비교할 수 있으나, 통계적 적합도의 개선이 반드시 의미적으로 명확한 토픽 구조를 보장하는 것은 아니다(Chang et al., 2009). 따라서 토픽 수를 결정할 때에는 정량적 적합도와 함께 토픽별 상위 확률 단어의 의미적 일관성, 토픽 간 내용적 중복 정도 및 전체적인 해석 가능성을 함께 검토하는 것이 중요하다(Chang et al., 2009).

토픽모델링은 도출된 주제의 시간적 변화까지 분석하는 데 활용될 수 있다. Robinson(2019)은 ASRS 보고서에 LDA를 적용하여 토픽의 월별 변화를 분석하였으며, Ison(2025)은 2008년부터 2025년까지 NTSB 사고보고서 내러티브의 변화를 분석하였다. 그러나 장기간의 NTSB 사고와 준사고를 대상으로 토픽별 상대적 비중의 변화를 시기별로 비교한 연구는 제한적이다. 이 연구는 2002년부터 2025년까지의 NTSB 항공사고

및 준사고 내러티브를 대상으로 LDA를 적용하여 안전 관련 토픽을 도출하고 각 토픽의 상대적 비중이 시기별로 어떻게 변화하는지를 분석한다.

III. 연구방법

3.1 자료 수집 및 분석 대상

분석자료는 미국 National Transportation Safety Board(NTSB)가 공개한 항공사고 및 준사고 조사보고서이다. 이 연구는 시기별 변화 양상을 분석하기 위해 분석기간을 2002년부터 2025년까지로 설정하였다. 2026년 자료는 자료 수집 시점 기준 부분 연도에 해당하므로 연도별 비교 분석에서는 제외하였다. 분석대상은 2002년부터 2025년까지의 항공사고 및 준사고 조사기록이며 전체 자료는 38,256건으로 구성되었다. 이 중 사고(accident, ACC)는 36,489건, 준사고(incident, INC)는 1,767건이었다. 각 조사기록에는 사고 또는 준사고의 발생 상황, 조사 내용, 관련 조건 등을 요약한 서술정보가 포함되어 있다. 이 연구에서는 해당 서술정보를 분석자료로 사용하고 개별 조사보고서를 분석단위로 설정하였다. 분석의 초점은 특정 사고의 직접 원인을 재판단하는 것이 아니라 대규모 사고 및 준사고 서술정보에 반복적으로 나타나는 안전 관련 주제와 그 시기별 변화 양상을 파악하는 데 있다.

3.2 텍스트 전처리

토픽모델링에 앞서 항공사고 및 준사고 조사보고서의 서술정보를 문서-단어 행렬로 변환하기 위한 전처리를 수행하였다. 전처리 과정에서는 영문 대소문자 통일, 문장부호 처리, 영어 불용어 제거 및 토큰화를 실시하였다. 이후 보고서 서술에서 반복적으로 나타나지만 주제 구분에 기여도가 낮은 36개의 공통 어휘를 추가로 제거하였으며, 전체 자료에서 50회 이상 출현한 단어를 분석 어휘로 구성하였다.

전체 38,256건의 조사기록 가운데 전처리 후 분석 가능한 유효 토큰이 남은 문서는 34,631건이었다. 이후 유효 토큰 수가 30개 이상인 문서만 토픽모델링 분석대상에 포함하였다. 이는 유효 단어 수가 지나치게 적은 문서의 경우 문서 내 단어 분포가 희박하여 LDA 모형이 문서의 주제 혼합 비율을 안정적으로 추정하기 어렵기 때문이다. 또한 30개 미만의 유효 토큰으로 구

성된 문서는 서술정보가 짧아 특정 토픽에 대한 충분한 단서가 제공되지 않을 가능성이 높다고 판단하였다. 따라서 이 연구에서는 최소한의 주제 단서를 포함한 서술정보만 분석에 반영하기 위해 유효 토큰 수 30개를 기준으로 적용하였다. 이에 따라 34,631건 중 149건을 추가로 제외하였으며, 최종 분석대상은 34,482건으로 확정하였다. 이후 각 조사보고서에 포함된 단어의 출현 빈도를 바탕으로 34,482개 문서와 7,322개 단어로 구성된 문서-단어 행렬(document-term matrix, DTM)을 구축하여 토픽모델링에 사용하였다.

3.3 토픽모델링 분석

항공사고 및 준사고 조사보고서의 서술정보에 나타난 주제 구조를 파악하기 위해 Latent Dirichlet Allocation(LDA)을 적용하였다. LDA는 문서를 여러 주제의 혼합으로 보고 각 주제를 단어들의 확률분포로 추정하는 생성확률모형이다(Blei et al., 2003). 분석에는 R의 topicmodels 패키지를 활용하였으며, 변분 기대값 최대화(variational expectation-maximization, VEM) 알고리즘을 통해 모형을 추정하였다. 전처리 및 문서 선별 과정을 거쳐 구축된 문서-단어 행렬을 이용하여 K=8, 10, 12, 15, 18, 20의 후보 모형을 각각 추정하고 각 모형의 perplexity를 비교하였다. 또한 K=15와 K=18 모형의 상위 확률 단어를 비교하여 토픽의 내용적 해석 가능성을 검토하였다. 이러한 정량적 모형 비교와 내용적 해석 가능성을 종합하여 토픽 수를 결정하였다.

3.4 토픽 해석 및 시기별 변화 분석

최종 LDA 모형에서 도출된 각 토픽은 토픽별 상위 확률 단어와 해당 토픽의 비중이 높은 대표 문서를 검토하여 해석하였다. 각 토픽의 명칭은 상위 단어 목록만을 기준으로 부여하지 않고 실제 보고서 서술에 나타난 내용적 특성을 고려하여 설정하였다. 이를 통해 항공사고 조사보고서의 서술정보에 반복적으로 나타나는 안전 관련 주제를 도출하였다.

토픽별 상대적 비중은 각 문서에 부여된 토픽 확률값(γ)을 활용하여 산출하였다. 개별 조사보고서의 토픽별 γ 값을 전체 문서에 걸쳐 평균하여 토픽별 상대적 비중을 계산하였다. 이때 γ 값은 하나의 문서 내에서 각 토픽이 차지하는 상대적 구성비를 나타내므로 특정 토픽의

평균 γ 값 증가는 해당 사고 또는 위험의 절대적 발생빈도 증가를 의미하지 않는다. 따라서 이 연구에서는 시기별 γ 값의 변화를 조사보고서 내러티브에서 각 토픽이 차지하는 상대적 비중의 변화로 해석하였다. 또한 보고서의 발생연도를 기준으로 토픽 확률값을 집계하고 연도별 평균 γ 값을 산출하여 안전 관련 주제의 시기별 변화 양상을 분석하였다. 장기간에 걸친 토픽 비중의 변화 방향을 비교하기 위해 분석기간을 2002-2008년, 2009-2015년, 2016-2025년의 세 구간으로 설정하였다. 이 구분은 특정 사건이나 제도 변화를 기준으로 항공안전의 역사적 시기를 구획하기 위한 것이 아니라, 장기간 자료에서 나타나는 토픽 비중의 변화를 일정한 구간으로 요약하여 비교하기 위한 분석적 구분이다. 전반부와 중반부는 각각 7년으로 동일하게 구성하였으며, 후반부는 분석 종료연도인 2025년까지의 자료를 포함하여 후기 변화 흐름을 함께 비교할 수 있도록 2016-2025년으로 설정하였다.

시기 경계의 설정에 따라 분석결과가 달라질 가능성을 점검하기 위해 민감도 분석(sensitivity analysis)을 추가로 실시하였다. 기존 구分的 두 경계연도를 각각 1년 앞당긴 2002-2007년, 2008-2014년, 2015-2025년과 1년 늦춘 2002-2009년, 2010-2016년, 2017-2025년의 대안적 구간을 설정하고 각 구간에서 산출된 토픽별 평균 γ 값의 변화 방향을 기존 구分的 결과와 비교하였다. 이를 통해 주요 토픽의 시기별 변화 양상이 경계연도의 설정에 따라 달라지는 정도를 확인하였다. 이러한 절차는 항공사고의 직접 원인을 재분류하기 위한 것이 아니라 NTSB 조사보고서 내러티브에서 반복적으로 기록된 안전 이슈의 주제 구조와 시간적 변화 양상을 파악하기 위한 것이다.

IV. 분석 결과

4.1 토픽모델링 결과

토픽 수의 후보값에 따른 모형 적합도를 비교하기 위해 K=8, 10, 12, 15, 18, 20의 LDA 모형에 대해 perplexity를 산출하였다. 분석 결과 K가 증가함에 따라 perplexity가 지속적으로 감소하여 특정 K에서 뚜렷한 최소값이 나타나지는 않았다. 이에 K=15와 K=18 모형의 상위 확률 단어를 추가로 비교한 결과, K=18에서는 일부 주제가 세분화되어 유사한 내용의

Table 1. Perplexity values for candidate numbers of topics

K	Perplexity
8	1083.4708
10	1054.7090
12	1044.0417
15	1015.2824
18	991.8936
20	980.7538

토픽이 분리되는 양상이 나타났다. 이러한 정량적 비교와 내용적 해석 가능성을 종합적으로 검토한 결과, K=15에서 주요 항공안전 이슈의 의미적 구분과 해석이 적절하다고 판단하여 최종 토픽 수를 15개로 설정하였다(Table 1).

LDA 분석 결과, 2002년부터 2025년까지의 NTSB 항공사고 및 준사고 조사보고서 서술정보에서 총 15개의 잠재 토픽이 도출되었다. 각 토픽은 상위 확률 단어와 대표 문서의 내용을 검토하여 명명하였다. 토픽명은 특정 단어의 빈도만을 기준으로 부여하기보다 해당 토픽에서 높은 확률을 보인 단어들이 어떠한 사고 상황, 운항 조건, 장비 이상, 환경 요인, 인적 행위와 관련되는지를 종합적으로 고려하여 결정하였다.

분석 결과 도출된 토픽은 항공사고 및 준사고 서술 정보에 반복적으로 기록된 주요 안전 이슈를 반영한다. 일부 토픽은 엔진, 연료, 정비, 장비 손상 등 항공기 기술 및 기계적 요인과 관련되었으며, 다른 토픽은 활주로, 착륙, 이륙, 접근, 기상 조건 등 운항 단계 및 환경 요인과 관련되었다. 또한 조종, 관제, 훈련, 절차 수행 등 인적·운항 맥락과 관련된 토픽도 확인되었다. 이는 NTSB 조사보고서의 서술정보가 사고 원인 범주만으로 환원되기 어려운 다양한 안전 이슈를 포함하고 있음을 보여준다.

Table 2는 LDA를 통해 도출된 15개 토픽의 주요 단어와 토픽명칭을 정리한 것이다.

4.2 토픽별 평균 비중

Table 3은 전체 분석 문서에서 각 토픽의 평균 γ 값을 산출한 결과이다. 전체 평균 비중이 가장 높은 토픽은 Topic 8(착륙 장치 및 착륙 중 손상, 0.1811)로 나타났다으며, Topic 7(이착륙·접근 중 활주로 및 지형 이

Table 2. Topic names and key terms from LDA topic modeling

토픽	토픽명	주요 키워드
1	충돌 후 항공기 손상 및 잔해	엔진, 프로펠러, 날개, 분리, 충격, 잔해
2	헬리콥터 훈련 및 로터 제어	헬리콥터, 교관, 로터, 학생 조종사, 공인비행교관, 컬렉티브 조종간
3	항공 운항 조건 및 정보 제공형 사고 보고	시계비행, 기상, 조건, 연방항공 규정, 주간, 자가용 조종사
4	기상·시정 및 계기 비행 조건	기상, 계기, 시정, 구름, 바람, 기상 조건
5	이륙 중 조종 및 방향제어	이륙, 조종, 러더(방향타), 롤(횡진), 엘리베이터(승강타), 활주로
6	장비·접점 및 기계 부품 손상	접점, 정비, 파손, 유압, 축, 기어
7	이착륙·접근 중 활주로 및 지형 이탈	활주로, 이륙, 착륙, 접근, 나무, 지형
8	착륙 장치 및 착륙 중 손상	착륙, 착륙장치, 활주로, 기수부, 손상, 방향제어
9	엔진 내부 부품 및 오일 계통 결함	오일, 실린더, 밸브, 배기, 베어링, 피로균열
10	기화기 관련 엔진 출력 손실	출력, 손실, 기화기, 스로틀 레버, 분당 회전수, 열
11	연료 고갈 및 관리에 따른 출력 손실	연료, 연료탱크, 연료탱크들, 갤런, 선택 밸브, 펌프
12	조종사 자격·비행 경험 및 의료기록	시간, 자격증명, 연방항공청, 신체검사, 총계, 기록
13	승무원·승객 및 기내 비정상 상황	승무원, 기장, 부기장, 난기류, 승객, 경고
14	저고도 기동·실속 및 지형 충돌	고도, 실속, 저고도, 지형, 충격, 대기속도
15	관제·공항교통 및 활주로 침범	활주로, 접근, 교통, 관제사, 관제탑, 유도로

탈, 0.1076), Topic 14(저고도 기동·실속 및 지형 충돌, 0.0902), Topic 3(항공 운항 조건 및 정보 제공형 사고 보고, 0.0833), Topic 5(이륙 중 조종 및 방향제어, 0.0778)의 순으로 나타났다. 이는 NTSB 항공사고 및 준사고 조사보고서의 서술정보에서 착륙 과정, 이착륙 및 접근 단계, 저고도 기동과 관련된 주제가 상대적으로 큰 비중을 차지하고 있음을 보여준다. 하지만 Topic 3은 대표 문서 검토 결과 항공 운항 조건과 규정 기반 서술, 정보 제공형 사고 보고의 성격이 강하게

Table 3. Overall mean topic proportions

순위	토픽	토픽명	평균 γ
1	Topic 8	착륙 장치 및 착륙 중 손상	0.1811
2	Topic 7	이착륙·접근 중 활주로 및 지형 이탈	0.1076
3	Topic 14	저고도 기동·실속 및 지형 충돌	0.0902
4	Topic 3	항공 운항 조건 및 정보 제공형 사고 보고	0.0833
5	Topic 5	이륙 중 조종 및 방향제어	0.0778
6	Topic 10	기화기 관련 엔진 출력 손실	0.0756
7	Topic 11	연료 고갈 및 관리에 따른 출력 손실	0.0635
8	Topic 2	헬리콥터 훈련 및 로터 제어	0.0632
9	Topic 9	엔진 내부 부품 및 오일 계통 결함	0.0464
10	Topic 4	기상·시정 및 계기 비행 조건	0.0408
11	Topic 15	관제·공항교통 및 활주로 침범	0.0369
12	Topic 13	승무원·승객 및 기내 비정상 상황	0.0364
13	Topic 12	조종사 자격·비행 경험 및 의료기록	0.0361
14	Topic 6	장비·점검 및 기계 부품 손상	0.0327
15	Topic 1	충돌 후 항공기 손상 및 잔해	0.0283

주: 평균 γ 는 전체 분석 문서에서 해당 토픽이 차지하는 평균 토픽 비중을 의미함.

반영된 토픽으로 판단된다. 따라서 이 토픽은 전체 평균 비중에서는 상위에 위치하지만, 이후 주요 안전 이슈의 시기별 변화 해석에서는 제한적으로 다루었다.

4.3 토픽 비중의 시기별 변화

Table 4는 2002-2008년, 2009-2015년, 2016-2025년의 세 시기별 토픽 평균 γ 값과 변화 양상을 제시한 것이다.

분석 결과, 토픽별 평균 γ 값은 시기별로 지속적인 증가 또는 감소, 중기 이후 유지·감소, 완만한 증가 등으로 다른 변화 양상을 나타냈다. 시기 구분에 대한 민감도 분석에서는 기준 구分的 경계연도를 각각 1년 앞당기거나 늦춘 경우에도 대부분의 토픽에서 증가·감소의 주요 방향이 유지되었다. 다만 변화폭이 작은 일부

Table 4. Changes in mean topic proportions across three periods

토픽	2002 -2008	2009 -2015	2016 -2025	변화 양상
1	0.0653	0.0081	0.0061	지속 감소
2	0.0530	0.0674	0.0707	지속 증가
3	0.2059	0.0157	0.0105	지속 감소
4	0.0558	0.0377	0.0272	지속 감소
5	0.0553	0.0897	0.0917	지속 증가
6	0.0417	0.0306	0.0249	지속 감소
7	0.0986	0.1215	0.1051	중기 증가 후 감소
8	0.1173	0.1919	0.2409	지속 증가
9	0.0324	0.0556	0.0536	중기 증가 후 유지
10	0.0475	0.0953	0.0884	중기 증가 후 소폭 감소
11	0.0505	0.0697	0.0721	지속 증가
12	0.0778	0.0165	0.0083	지속 감소
13	0.0336	0.0370	0.0389	완만한 증가
14	0.0300	0.1221	0.1271	중기 증가 후 유지
15	0.0353	0.0413	0.0347	큰 변화 없음

토픽에서는 후기의 소폭 증가 또는 감소 방향이 경계연도에 따라 달라지는 경우가 확인되었다. 이러한 결과는 주요 토픽의 장기적인 변화 방향이 경계연도를 전후 1년 조정한 경우에도 대체로 안정적으로 나타났음을 보여준다.

상대적 토픽 비중이 지속적으로 증가한 토픽은 Topic 2, Topic 5, Topic 8, Topic 11이었다. 이 가운데 가장 뚜렷한 증가는 Topic 8에서 확인되었다. Topic 8은 2002-2008년 0.1173에서 2009-2015년 0.1919, 2016-2025년 0.2409로 증가하여 조사보고서 내러티브에서 차지하는 상대적 토픽 비중이 세 시기에 걸쳐 지속적으로 높아지는 양상을 보였다. Topic 5는 2002-2008년 0.0553에서 2009-2015년 0.0897, 2016-2025년 0.0917로 증가하였다. Topic 11은 2002-2008년 0.0505, 2009-2015년 0.0697, 2016-2025년 0.0721로 완만한 증가를 보였으며, Topic 2도 0.0530에서 0.0674, 0.0707로 점진적으로 증가하였다.

중기 이후 증가하거나 높은 수준을 유지한 토픽도 확인되었다. Topic 14는 2002-2008년 0.0300에서

2009-2015년 0.1221로 크게 증가하였고 2016-2025년에도 0.1271로 유사한 수준을 유지하였다. Topic 10은 2002-2008년 0.0475에서 2009-2015년 0.0953으로 증가한 뒤, 2016-2025년에는 0.0884로 소폭 감소하였다. Topic 9도 2002-2008년 0.0324에서 2009-2015년 0.0556으로 증가한 뒤, 2016-2025년에는 0.0536으로 유사한 수준을 보였다. 이들 토픽은 초기보다 중기 이후에 상대적으로 높은 평균 비중을 보인다는 공통점이 있다.

반대로 지속적인 감소 양상을 보인 토픽은 Topic 1, Topic 3, Topic 4, Topic 6, Topic 12였다. Topic 3은 2002-2008년 0.2059로 높은 값을 보였으나, 2009-2015년 0.0157, 2016-2025년 0.0105로 크게 감소하였다. Topic 12도 2002-2008년 0.0778에서 2009-2015년 0.0165, 2016-2025년 0.0083으로 감소하였다. 특히 Topic 3과 Topic 12는 초기와 중기 사이에서 다른 감소 토픽보다 상대적으로 큰 폭의 변화를 보였다. Topic 1은 0.0653에서 0.0081, 0.0061로 감소하였고, Topic 4와 Topic 6도 세 시기에 걸쳐 지속적으로 낮아지는 양상을 보였다. 그 외에 Topic 7은 2002-2008년 0.0986에서 2009-2015년 0.1215로 증가한 뒤, 2016-2025년에는 0.1051로 감소하였다. Topic 13은 0.0336에서 0.0370, 0.0389로 완만하게 증가하였다. Topic 15는 2002-2008년 0.0353, 2009-2015년 0.0413, 2016-2025년 0.0347로 나타나 세 시기 간 큰 차이를 보이지 않았다.

시기별 변화가 비교적 뚜렷하고 항공안전 이슈로서 해석 가능성이 높은 토픽을 선별하여 Fig. 1에 제시하였다. 그림에는 지속 증가 양상을 보인 Topic 8, 중기 이

후 높은 수준을 유지한 Topic 14와 Topic 10, 완만한 증가 양상을 보인 Topic 5와 Topic 11을 포함하였다. Fig. 1에서 가장 뚜렷한 변화는 Topic 8에서 확인되었다. Topic 8은 세 시기에 걸쳐 지속적으로 증가하였으며, 2016-2025년에 가장 높은 평균 비중을 보였다. Topic 14는 2002-2008년에는 낮은 수준이었으나 2009-2015년에 크게 증가한 뒤 2016-2025년에도 유사한 수준을 유지하였다. Topic 10은 2009-2015년에 증가한 뒤 2016-2025년에 소폭 감소하였으나, 중기 이후 상대적으로 높은 비중을 유지하였다. Topic 5와 Topic 11은 세 시기 동안 완만한 증가 양상을 보였다.

V. 논 의

5.1 사고조사 내러티브의 항공안전 분석자료로서의 의미

이 연구의 분석 결과는 항공사고 및 준사고 조사보고서의 서술정보가 정형화된 사고 원인 분류를 보완하는 비정형 안전자료로 활용될 수 있음을 보여준다. LDA 토픽모델링 결과, NTSB 조사보고서의 내러티브에는 착륙 및 이착륙 단계, 저고도 기동과 실속, 방향 제어, 엔진 출력 손실, 연료관리, 관제 및 공항교통과 관련된 다양한 안전 이슈가 반복적으로 나타났다. 이는 사고조사 내러티브가 개별 사고의 설명에 머무르지 않고 장기간 축적된 조사자료에서 반복적으로 나타나는 안전 관련 주제의 구조를 파악할 수 있음을 보여준다.

도출된 토픽은 하나의 사고 원인 범주로 환원되기보다 운항 단계, 기체 상태, 조종 행위, 환경 조건, 관제 및 공항 운영 상황이 나타나는 형태로 구성되었다. 예를 들어 착륙 장치 및 착륙 중 손상 관련 토픽에는 착륙장치뿐 아니라 활주로 접지, 방향 유지, 기수부 손상, 착륙 후 제어와 관련된 서술이 포함되었으며, 저고도 기동·실속 및 지형 충돌 관련 토픽에서도 고도, 대기속도, 실속, 조종상실 및 지형과 관련된 내용이 나타났다. 이러한 결과는 사고조사 내러티브가 개별 요인을 분리하여 제시하는 자료라기보다, 사고와 준사고가 발생한 운항 맥락과 관련 조건을 포함하는 자료라는 점을 보여준다.

정형화된 사고 원인 코드와 분류체계는 사고자료를 일관되게 집계하고 비교하는 데 유용하지만 조사보고서의 서술정보는 분류항목 사이에 존재하는 운항 상황

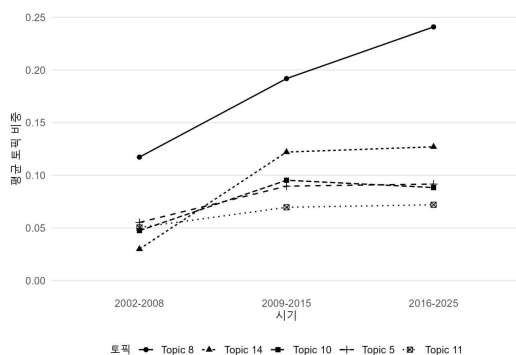


Fig. 1. Temporal changes in mean proportions of major topics

과 관련 조건을 보완적으로 파악할 수 있다는 점에서 의미가 있다. 따라서 사고조사 내러티브는 기존의 사고 원인 분류를 대체하는 자료가 아니라 정형화된 사고자료와 함께 활용하여 반복적으로 나타나는 안전 이슈의 구조와 맥락을 파악하는 보완적 분석자료로 이해할 수 있다.

5.2 주요 항공안전 이슈의 시기별 변화와 안전 관리적 함의

시기별 토픽 변화는 일부 안전 이슈가 후기로 갈수록 상대적 비중이 높아지거나 중기 이후 일정 수준을 유지하는 양상을 보여주었다. Topic 8과 Topic 14는 착륙 및 저고도 비행과 관련된 위험이 장기간 조사 내러티브에서 지속적으로 중요한 비중을 차지하고 있음을 보여준다. 이러한 변화는 해당 사고의 절대적 발생 위험 증가를 의미하지 않으며, LDA의 γ 값이 문서 내 토픽 간 상대적 구성비라는 점을 고려할 필요가 있다. 따라서 이들 토픽의 변화는 착륙과 저고도 비행 단계에서 반복적으로 나타나는 위험요인을 지속적으로 모니터링하고 관련 사고와 준사고 정보를 안전관리체계에서 축적하고 분석할 필요성을 시사한다. 이러한 해석은 사고를 개별 원인으로 환원하기보다 시스템의 조건과 구성요소 간 상호작용의 관점에서 파악할 필요가 있다는 선행연구의 논의와도 연결된다(Reason, 1990, 2000; Leveson, 2012; Underwood and Waterson, 2014).

Topic 5, Topic 10, Topic 11, Topic 15의 변화는 이륙, 지상운항, 연료관리, 출력손실과 관련된 이슈가 서로 다른 운항 맥락에서 반복적으로 나타나고 있음을 보여준다. 이는 항공안전관리가 특정 사고유형의 사후 분석에 그치지보다 운항단계별 위험을 지속적으로 식별하고 관리하는 방향으로 이루어질 필요가 있음을 시사한다. 특히 활주로 침범과 관련된 이슈는 조종사, 관제사, 차량과 보행자 등 여러 행위주체가 관련될 수 있으므로 개별 행위자의 오류만으로 설명하기보다 공항운영과 관계절차를 포함한 관리체계의 맥락에서 검토할 필요가 있다.

반면 Topic 3과 Topic 12의 상대적 비중 감소는 해당 위험의 실제 발생 감소를 직접 의미하지 않는다. 토픽 비중은 사고와 준사고의 구성뿐 아니라 조사보고서의 작성 방식과 서술 관행의 영향을 받을 수 있기 때문이다. 따라서 상대적 비중이 감소한 토픽 역시 위험

이 해소된 것으로 해석하기보다 장기간의 안전관리 과정에서 변화 추이를 지속적으로 관찰할 필요가 있다. 이러한 접근은 사고의 직접 원인뿐 아니라 시스템 내 잠재적 조건과 구성요소 간 상호작용을 함께 검토해야 한다는 안전관리 관점과도 부합한다(Reason, 2000; Leveson, 2012).

5.3 사고조사 내러티브 기반 안전분석의 활용과 한계

토픽모델링은 대규모 조사보고서에서 반복적으로 나타나는 주제 구조를 탐색하고 각 토픽의 상대적 비중이 시기별로 어떻게 변화하는지를 파악하는 데 유용하다. 전체 평균 비중과 시기별 변화를 검토하면 특정 토픽이 분석기간 전반에서 높은 비중을 유지하는지, 중기 이후 상대적으로 부각되는지 또는 감소하는지를 확인할 수 있다. 이러한 분석은 축적된 사고조사 내러티브에서 반복적으로 나타나는 안전 관련 주제와 운항 맥락을 파악함으로써 정형화된 사고자료를 보완하는 데 활용될 수 있다.

토픽모델링 결과를 사고의 직접 원인이나 기여 요인으로 해석하는 데에는 주의가 필요하다. 토픽은 문서 집합에서 나타나는 단어들의 확률적 분포를 바탕으로 도출되는 잠재 주제이므로 특정 토픽의 비중이 높거나 증가했다고 해서 해당 위험이나 사고유형의 절대적 발생이 증가했다고 볼 수는 없다. 또한 시기별 토픽 비중에는 실제 사고 및 준사고의 구성뿐 아니라 조사보고서의 작성 방식, 조사 초점, 자료 입력 및 서술 관행의 변화가 영향을 미칠 수 있다. 따라서 토픽모델링을 통해 나타난 시기별 변화는 사고위험의 직접적인 증감이 아니라 조사보고서 내러티브에서 나타난 주제 구성의 변화로 이해해야 한다.

향후 사고조사 내러티브의 활용도를 높이기 위해서는 토픽모델링 결과를 구조화된 사고 원인 코드, 비행 단계, 항공기 유형, 운항 형태, 사고 심각도 등과 연계하여 분석할 필요가 있다. 또한 도출된 토픽의 해석에는 주요 키워드뿐 아니라 대표 문서, 조사보고서의 원문 맥락, 항공안전 전문가의 검토를 반영해야 한다. 이러한 보완 절차가 병행될 경우 사고조사 내러티브는 정형화된 사고자료와 연계하여 항공안전 이슈의 구조와 변화 양상을 보다 구체적으로 파악하는 분석자료로 활용될 수 있다.

VI. 결 론

이 연구는 2002년부터 2025년까지의 NTSB 항공 사고 및 준사고 조사보고서 서술정보를 대상으로 LDA 토픽모델링을 적용하여 항공안전 이슈의 주제 구조와 시기별 변화 양상을 분석하였다. 분석 결과, 착륙 및 이착륙 단계, 저고도 기동과 실속, 방향제어, 엔진 출력 손실, 연료관리, 관제 및 공항교통과 관련된 다양한 안전 이슈가 도출되었다. 이 가운데 착륙 장치 및 착륙 중 손상 관련 토픽은 전체 평균 비중이 가장 높았으며, 후기로 갈수록 조사보고서 내러티브에서 차지하는 상대적 비중이 증가하였다. 저고도 기동·실속 및 지형 충돌 관련 토픽은 중기 이후 상대적으로 높은 수준을 유지하였고 이륙 중 방향제어와 연료관리 관련 토픽도 후기로 갈수록 상대적 비중이 높아지는 양상을 보였다. 이러한 결과는 항공사고 및 준사고 조사보고서의 서술 정보가 정제화된 사고 원인 분류를 보완하여 반복적으로 나타나는 안전 관련 주제와 그 시기별 변화 양상을 파악하는 비정형 안전자료로 활용될 수 있음을 보여준다. 이 연구는 대규모 사고조사 내러티브를 활용하여 항공안전 이슈의 주제 구조와 시간적 변화를 분석하고 사고조사 서술정보의 보완적 활용 가능성을 제시했다는 점에서 의의가 있다.

NTSB 조사자료는 다양한 항공기 유형과 운항 형태를 포함하므로 도출된 토픽 구조를 항공운송 분야 전반의 위험 특성으로 일반화하는 데에는 주의가 필요하다. 향후에는 항공기 유형과 운항 형태를 구분한 추가 분석을 통해 안전 이슈의 차이를 검토할 필요가 있다. 또한 토픽모델링은 단어의 확률적 결합을 바탕으로 잠재 주제를 추정하는 방법이므로 도출된 토픽을 사고의 직접 원인이나 인과관계로 해석해서는 안 된다. 이러한 한계를 고려할 때, 사고조사 내러티브의 항공안전관리 활용 가능성은 구조화된 사고자료와의 연계 속에서 보다 정교하게 검토될 필요가 있다.

사 사

이 논문은 2025학년도 한남대학교 학술연구비 지원에 의하여 연구되었음(This work was supported by 2025 Hannam University Research Fund (no. 2026A045)).

References

1. Reason, J., "Human Error", Cambridge University Press, Cambridge, UK, 1990.
2. Reason, J., "Human Error: Models and Management", BMJ: British Medical Journal, 320 (7237), 2000, pp.768-770.
3. Shappell, S. A., and Wiegmann, D. A., "The human factors analysis and classification system-HFACS", Federal Aviation Administration, Office of Aviation Medicine, Report No. DOT/FAA/AM-00/7, 2000.
4. Kharoufah, H., Murray, J., Baxter, G., and Wild, G., "A review of human factors causations in commercial air transport accidents and incidents: from 2000 to 2016", Progress in Aerospace Sciences, 99, 2018, pp.1-13.
5. International Air Transport Association, "2025 full year accident update: performance at 31st December 2025", 2026, Available from: https://www.iata.org/contentassets/4d18cb077c5e419b8a888d387a50c638/iata-safety-report-2025-fy_final.pdf
6. Kim, S. I., and Baek, K. W., "Human-based aviation accidents with air traffic controller torts", The Korean Journal of Air & Space Law and Policy, 32(2), 2017, pp.67-100.
7. Kim, J. B., and Park, S. S., "A case study on aircraft accidents due to air traffic controller's human error: Applying TEM (Threat & Error Management) analysis", Journal of the Korean Society for Aviation and Aeronautics, 29(4), 2021, pp.124-133.
8. Underwood, P., and Waterson, P., "Systems thinking, the Swiss Cheese Model and accident analysis: A comparative systemic analysis of the Grayrigg train derailment using the ATSB, AcciMap and STAMP models", Accident Analysis & Prevention, 68, 2014, pp.75-94.
9. National Transportation Safety Board, "Investigation reports", Available from: <https://>

- www.nts.gov/investigations/AccidentReports/Pages/Reports.aspx
10. Ahadh, A., Binish, G. V., and Srinivasan, R., "Text mining of accident reports using semi-supervised keyword extraction and topic modeling", *Process Safety and Environmental Protection*, 155, 2021, pp.455-465.
 11. Yang, C., and Huang, C., "Natural language processing (NLP) in aviation safety: Systematic review of research and outlook into the future", *Aerospace*, 10(7), 2023, Article 600.
 12. Agovic, A., Shan, H., and Banerjee, A., "Analyzing aviation safety reports: From topic modeling to scalable multi-label classification", *Proceedings of the 2010 Conference on Intelligent Data Understanding*, 2010, pp.83-97.
 13. Tanguy, L., Tulechki, N., Urieli, A., Hermann, E., and Raynal, C., "Natural language processing for aviation safety reports: from classification to interactive analysis", *Computers in Industry*, 78, 2016, pp.80-95.
 14. Ison, D., "Tracking changes in aviation safety narratives: A text mining study of NTSB reports (2008-2025)", *Aerospace Traffic and Safety*, 2(3-4), 2025, pp.196- 202.
 15. Kwon, M., and Lee, J. R., "Analysis of aviation safety management issues using text mining", *Journal of the Korean Society for Aviation and Aeronautics*, 31(4), 2023, pp.19-27.
 16. Yoo, J. H., Lee, J. H., and Kim, H. D., "Study on aviation safety management analysis and improvement strategies for aviation services using text mining", *Journal of the Korean Society for Aviation and Aeronautics*, 32(4), 2024, pp.8-15.
 17. Blei, D. M., Ng, A. Y., and Jordan, M. I., "Latent Dirichlet allocation", *Journal of Machine Learning Research*, 3, 2003, pp.993-1022.
 18. Nanyonga, A., Wasswa, H., Turhan, U., Joiner, K., and Wild, G., "Exploring aviation incident narratives using topic modeling and clustering techniques", *2024 IEEE Region 10 Symposium (TENSYP)*, 2024, pp. 1-6.
 19. Chang, J., Boyd-Graber, J., Gerrish, S., Wang, C., and Blei, D. M., "Reading tea leaves: How humans interpret topic models", *Advances in Neural Information Processing Systems*, 22, 2009.
 20. Robinson, S., "Temporal topic modeling applied to aviation safety reports: A subject matter expert review", *Safety Science*, 116, 2019, pp.275-286.
 21. Boyd, D. D., "Causes and risk factors for fatal accidents in non-commercial twin engine piston general aviation aircraft", *Accident Analysis & Prevention*, 77, 2015, pp.113-119.
 22. Zhu, Y., Liao, H., and Huang, D., "Using text mining and multilevel association rules to process and analyze incident reports in China", *Accident Analysis & Prevention*, 191, 2023, Article 107224.
 23. Elias, B., "Airport and Aviation Security: U.S. Policy and Strategy in the Age of Global Terrorism", CRC Press, Boca Raton, FL, USA, 2009.
 24. Price, J. C., and Forrest, J., "Practical Aviation Security: Predicting and Preventing Future Threats", 4th ed., Butterworth-Heinemann, 2024.
 25. Leveson, N. G., "Engineering a Safer World: Systems Thinking Applied to Safety", MIT Press, Cambridge, MA, USA, 2012.