

## Original Article

<https://doi.org/10.12985/ksaa.2024.32.4.114>  
ISSN 1225-9705(print) ISSN 2466-1791(online)

## 기후변화와 항공안전 및 항공산업의 대응방안 연구: 터블런스를 중심으로

김창우\*

A Study on Climate Change and Aviation Safety and  
the Response of the Aviation Industry: Focusing on Turbulence

Chang-Woo Kim\*

## ABSTRACT

Global warming has increased turbulence, which has also affected aviation accidents. Climate change is having a big impact on safety by changing the operating conditions of aircraft, and the aviation industry is exploring various strategies to respond to it. The main contents covered in this paper are as follows. Climate change directly affects air operations through increased extreme weather events and changes in air currents. The aviation industry is responding to climate change by improving fuel efficiency, optimizing routes, and introducing eco-friendly technologies. International cooperation and policy responses are essential to responding effectively to climate change, which is an important factor in ensuring aviation safety. In this study, we analyzed the impact of global warming on the increase in turbulence in commercial aircraft. Increased atmospheric instability due to global warming increases the frequency and intensity of turbulence events, which has significant implications for aviation safety. In addition, the economic impact of increased turbulence on airlines and passengers was also analyzed. Through case studies and data analysis, we were able to empirically confirm the impact of global warming on the frequency and intensity of turbulence occurrences. The results of this analysis specifically suggest how the aviation industry should respond to the increase in turbulence due to global warming in the future.

**Key Words** : Climate Change(기후변화), Global Warming(지구온난화), Turbulence(난류), CAT(청천난류), Jet Stream(제트기류), Air Accident(항공사고)

## 1. 서론

## 1.1 연구의 배경

지난 2024년 5월 21일, 런던에서 싱가포르 창이공항으

로 운항 중이던 싱가포르항공 SQ321편이 인도양 상공에서 터블런스를 조우, 방콕 수완나품공항으로 회항하는 과정에서 승객이 사망하는 사고가 발생해서 충격을 주었다. 이 뿐만 아니라 국적항공사 여객기도 근래 많은 터블런스 조우 사례를 언론을 통해 접하고 있다. 이러한 터블런스는 122년된 항공역사에 있어서 이전에도 항시 있어 왔으나, 최근에 급증하는 경향을 보이고 있다.

항공사고의 추이를 살펴보면, 비록 팬데믹 기간 운항 횟수 감소를 감안하더라도 최근 11년간 항공 사고는 점차 줄어드는 추세이며, 항공 사고로 인한 사망자

Received: 14. Oct. 2024, Revised: 14. Nov. 2024,

Accepted: 18. Dec. 2024

\* (주)대한항공 인천여객서비스지점, 경영학 박사

연락처 E-mail : solomon1299@naver.com

연락처 주소 : 인천시 서구 고산로 19, KAL아파트 106동 1401호

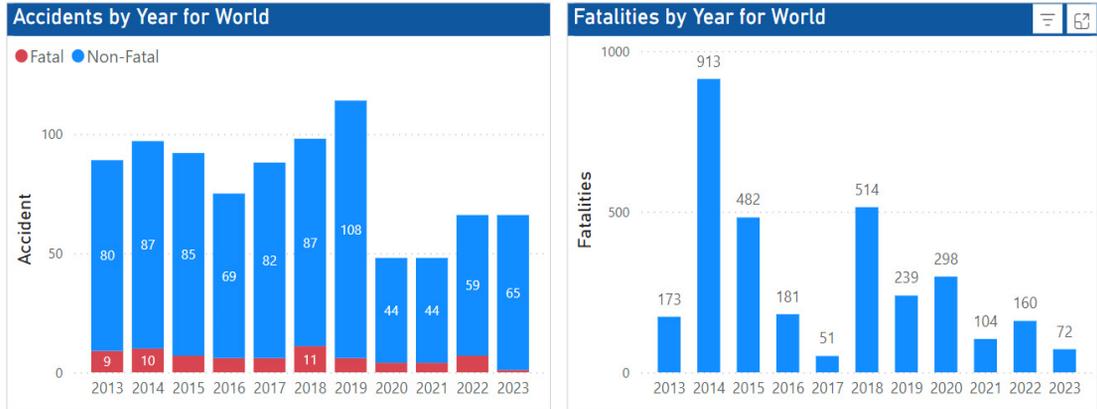


Fig. 1. Accident statistics and analysis, Source: ICAO safety report 2024 (Unit: count)

숫자도 줄어드는 경향을 보여주고 있다(Fig. 1 참조). 사고 발생 횟수만을 기준으로 그 발생 원인을 살펴보면, 절대다수 사고의 원인이 터블런스와 관련되어 있음을 분석결과가 잘 보여주고 있다(Fig. 2 참조).

### 1.2 연구의 목적

기후 변화, 특히 지구온난화는 21세기의 가장 중요한 환경 이슈 중 하나로 다양한 산업과 생태계에 걸쳐 광범위한 영향을 미치고 있다. 항공산업도 예외는 아니며, 특히 여객기 운항중 발생하는 터블런스가 지구온난화와

밀접한 연관이 있다는 연구들이 최근 주목받고 있다. 터블런스는 항공기 운항의 안전과 승객의 편의에 중대한 영향을 미치며, 그 발생 빈도와 강도가 증가하는 추세는 항공 안전을 위협하는 요인으로 작용할 수 있다.

터블런스는 승객들의 여행뿐만 아니라, 항공기 안전에도 중대한 영향을 미친다. 지구온난화로 인한 터블런스의 증가는 항공산업에 새로운 도전 과제를 제시하며, 이를 연구하고 대응책을 마련하는 것은 항공 안전을 보장하는 데 필수적이라 할 수 있겠다.

따라서 본 연구의 목적은 지구온난화가 항공기 터블런스 증가에 미치는 영향을 분석하고, 이를 통해 기후 변화에 따른 항공운항의 리스크를 이해하며, 이를 완화하기 위한 전략을 제시하고자 한다.

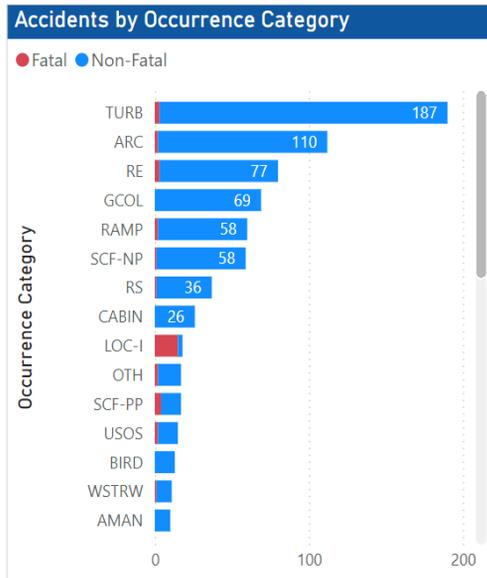


Fig. 2. Accidents by occurrence category, Source: ICAO safety report 2024 (Unit: count)

## II. 본 론

### 2.1 기후변화

#### 2.1.1 지구온난화의 배경과 효과

지구온난화는 주로 이산화탄소(CO<sub>2</sub>)와 같은 온실가스의 증가로 인해 발생한다. 산업화 이후 대기 중의 온실가스 농도는 급격히 증가하였으며, 이로 인해 지구의 평균 기온이 상승하고 있다. 이 과정에서 기상 패턴이 변화하고, 극단적인 기후 현상이 빈번해지고 있다.

지구온난화는 대기 중의 기류에도 영향을 미친다. 특히, 상층 대기의 온도 변화는 제트 기류의 강도와 경로에 변화를 초래할 수 있으며, 이는 터블런스 발생과 직접적인 연관이 있다. 기류의 변화는 터블런스의 빈도와 강도를 증가시키는 주요 요인으로 작용할 수 있다

(IPCC, 2021; Storer, 2018).

지구온난화로 인해 폭풍, 태풍, 그리고 강풍 등의 극단적인 기후 현상이 증가하고 있다. 이러한 현상은 터블런스 발생 가능성을 높이며, 항공기 운항에 추가적인 위험 요소로 작용할 수 있다. 따라서 이러한 기후변화와 터블런스 사이의 관계를 이해하는 것은 항공안전을 유지하는 데 중요한 역할을 한다(Artrill, 2021).

### 2.1.2 지구 기온 변화 추이

WMO 분석에 따르면 2023년 전 지구 연평균 온도는 산업화 이전 수준(1850~1900년)과 대비해 1.45도( $\pm 0.12$ 도 오차) 상승한 것으로 나타났다. 이는 미국 국립해양대기청(NOAA), 미 항공우주국(NASA)의 고다드 우주연구소(NASA GISS) 등 6개 기관의 전 세계 해양 네트워크 관측 및 선박·부표의 기후 데이터를 기반으로 분석한 수치다(WMO, 2024)(Fig. 3).

WMO와 함께 데이터를 측정하는 유럽연합(EU) 기후변화 감시기구 코페르니쿠스 기후변화연구소(C3S)가 관측한 지난해 전 지구 평균기온은 14.98도였다.

WMO는 특히 지난해 전 지구 평균기온이 국제사회의 지구온도 상승폭 제한 목표에 근접한 수준이라고 밝혔다. 지난해의 산업화 이전 대비 전 지구 지표면 평균 온도 상승폭 1.45도는 국제사회의 전 지구 평균온도 상승폭 제한 목표와 0.05도밖에 차이가 나지 않는다. 2015년 프랑스 파리에서 열린 기후변화협약 당사국총회에서 국제사회는 이번 세기말까지의 전 지구 평균온도 상승폭을 1.5도 이내로 제한하는 데 합의한 바 있다.

## 2.2 터블런스

### 2.2.1 터블런스의 종류

터블런스란 공기의 흐름이 불규칙하고 무질서하게 변

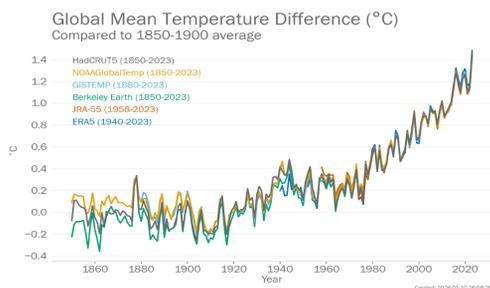


Fig. 3. Consolidated global temperature datasets for 2023 (WMO, 2024)

하는 현상을 의미하며, 항공기 운항 시 발생할 수 있는 주요 위험 요소 중 하나이다. 터블런스는 주로 대기 중의 기류 변화나 온도 차이로 인해 발생하며, 그 강도에 따라 항공기의 안전과 승객의 편의에 큰 영향을 미친다.

터블런스(난류)는 대기의 불규칙한 운동으로 인해 발생하며, 주요 터블런스 유형은 다음과 같다.

첫번째는, 청천난류(clear-air turbulence, CAT)이다. 구름이 없는 맑은 하늘에서 발생하는 난류로, 갑작스럽게 나타나기 때문에 예측이 어렵다. 주로 고도 7,500~12,000미터에서 발생하며, 제트 기류 또는 산등성이 주변에서 많이 나타난다.

두번째는, 대류난류(convective turbulence, thermal turbulence)이다. 태양열로 지표가 가열되면서 공기가 상승할 때 발생한다. 주로 낮 동안의 열 대류로 인해 발생하며, 뇌우가 있는 지역에서 강하게 나타날 수 있다.

세번째는, 전선난류(frontal turbulence)이다. 두 공기 덩어리가 만나는 전선 부근에서 발생하는 난류이다. 온도와 습도 차이가 큰 차가운 전선에서 자주 발생하며, 특히 기압이 급격히 변하는 경우 강하게 나타날 수 있다.

네번째는, 기압난류(mechanical turbulence)이다. 산맥이나 건물 등 지형적 장애물에 의해 공기의 흐름이 방해받으면서 발생한다. 저고도에서 주로 발생하며, 공항 근처에서 많이 경험할 수 있다. 성층권이나 100마일까지 확장 가능한 산악파도 여기에 속한다.

다섯번째는, 제트기류난류(jet stream turbulence)이다. 제트 기류가 흐르는 경계에서 발생하는 난류이다. 제트 기류는 고속으로 흐르는 좁은 공기층으로, 이 공기의 경계에서 난류가 발생하게 된다. 청천난류도 나타날 수 있다.

여섯번째는, 급변풍(wind shear)이다. 짧은 거리 내에서 순간적으로 풍향과 풍속이 급변하는 현상으로 전단풍 또는 저고도 기온역전 난기류라고 한다. 하층부는 안정되어 있으나, 상층부는 기온이 상승하여 대기가 불안정해져서 기온역전층에서는 순간적으로 바람의 속도가 변하고 방향도 변하는 현상이 발생한다. 항공기가 착륙하기 위해 맞바람을 받으며 속도를 줄이면서 내려오고 있을 때 윈드시어를 만나 갑자기 바람을 받지 못하면 착륙을 위한 최소한의 양력을 발생시키지 못하기 때문에 기체는 실속 상황에 빠져 위험한 상황과 직면할 수 있다.

한편, 이와 같은 다양한 터블런스 유형에 대해 ICAO에 의해, 터블런스의 강도에 따라 네 가지 범주로 나뉘며, 각 강도는 항공기에 미치는 영향에 따라 다음과 같

이 구분된다.

첫째, Light Turbulence(약강도 난류)이다. 항공기의 움직임이 미미하며, 기내 승객이 거의 느끼지 못할 정도이다. 음료수가 살짝 흔들리거나, 기내에서 서 있거나 걷는 데 약간의 불편함을 느낄 수 있다. 안전벨트를 풀어도 괜찮은 수준이다.

둘째, Moderate Turbulence(중강도 난류)이다. 항공기가 조금 더 눈에 띄게 흔들리며, 음료수가 넘칠 수 있다. 기내에서 서 있거나 걷는 데 상당한 불편함이 있으며, 이때는 안전벨트를 착용하는 것이 권장된다. 승객이 흔들림을 확실히 느낄 수 있다(Fig. 4).

셋째, Severe Turbulence(심한 강도 난류)이다. 항공기가 급격히 흔들리며, 단단히 고정된 물건도 흔들릴 수 있다. 승객이 좌석에서 튕겨 나갈 수 있어 안전벨트 착용이 필수이다. 기내 이동이 매우 위험하며, 물체가 떨어지거나 파손될 가능성이 있다.

넷째, Extreme Turbulence(극심한 강도 난류)이다. 항공기가 통제 불능 상태에 가까워지며, 매우 위험한 상황이다. 승객이나 물체가 크게 흔들리고, 항공기 자체의 구조적 손상 가능성도 존재할 수 있다.

이러한 난류들은 각각 다른 원인과 위치에서 발생하며, 항공기에 심각한 영향을 미칠 수 있다. 뇌우를 동반한 적운에서 발생하는 난류와 일반적인 난류는 예측과 예보가 가능하다. 그러나 항공안전에 가장 위협이 되는 난류는 바로 청천난류(clear air turbulence, CAT)로서, 이것은 예측이 불가능하고 갑자기 발생하는 경향이 많은 관계로 터블런스로 인한 대부분의 항공사고는 이 청천난류(CAT)로 인해 발생한다. 따라서 이 청천난류의 발생원인을 규명하고, 이에 대한 대처 방안을 찾아 실행하는 것이 중요하다(Table 1).

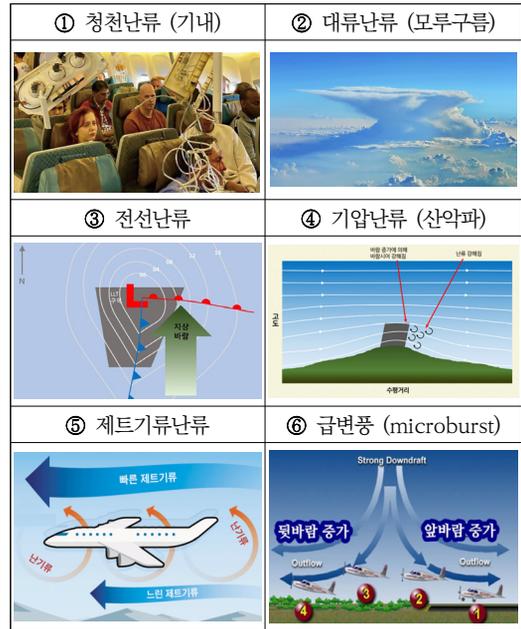


Fig. 4. Types of turbulence

2.2.2 청천난류 (Clear-Air Turbulence)

청천난류의 발생원인은 크게 두 가지로 나눌 수 있다. 하나는 강한 기류가 산맥을 넘을 때, 그 산맥 주변의 아래쪽에 강한 회오리 바람이 발생할 때이다. 다른 한 가지 원인은 제트기류때문인데, 제트기류는 대류권 상부나 대류경계면 부근에 존재하는 풍속 30m/s 이상의 강한 편서풍대를 말하며, 한대 제트기류와 아열대 제트기류가 있고, 겨울에는 평균풍속이 130km/h, 여름에는 65km/h이다. 제트기류의 중심인 제트코어의 위쪽과 아래쪽에서, 그리고 한랭기단쪽으로 강한 청천난류가 발생한다. 이때 제트기류가 강할수록 청천난류가 발생할 가능성이 높다.

Table 1. Turbulence stage classification

강도	가속도 (g)	체감정도 (비행체)	체감정도 (사람)	체감정도 (물건)	풍속의 변동폭	연직풍속 (ft/sec)
약강도 (light)	0.1~0.3	약간의 요동을 느낌	안전벨트 착용	움직임이 없음	15kt 이상	5
중강도 (moderate)	0.4~0.8	상당한 요동을 느낌, 통제가능	걷기 힘들어짐	움직임이 있음	15~25kt	15
심한 강도 (severe)	0.9~1.2	동요가 크고, 고도 변화가 있으며, 순간적 통제력 상실	심한 충격, 걷기가 불가능	심하게 흔들림	25kt 이상	25
극심한 강도 (extreme)	1.2 이상	심하게 흔들리며 통제력 상실				30이상

\*Source: ICAO(International Civil Aviation Organization), turbulence and icing, 2023.

### 2.2.3 청천난류의 위험성

일반적으로 난류는 적란운의 위치를 통해 예측할 수 있고, 지형이 험한 산악의 경우 산악파에 의해 발생하는 난기류를 예측하며, 기상 전선이 발생할 경우에 전선 측면의 난류를, 그리고 기온 측정을 통한 비교 데이터로 대류 난류 등을 충분히 예측할 수 있어서 경보를 발령할 수 있으나, 청천난류는 이러한 요소가 없다.

즉, 예측이 힘들어 갑자기 나타나므로 피해가 훨씬 크다. 터블런스 중에 특히 이 청천난류는 항공 안전에 지대한 위험요소로 작용하는데, 그것은 터블런스는 예측불가능성과 함께 그 강도가 moderate 이상 severe, extrtreme까지 발생하여 승객 부상은 물론, 항공기 구조에 스트레스를 가하며, 심한 경우 항공 사고로 이어질 수 있다. 또한, 승객들에게 불안감을 조성하고 항공 여행에 있어 안전장애 요소로 작용하는바 터블런스의 발생을 예측하고 관리하는 것은 항공 안전에서 중요한 부분이라 할 수 있다.

## 2.3 기후변화와 터블런스

### 2.3.1 기후변화와 터블런스 증가 추이

최근, 기후 변화로 인해 난기류 발생 빈도와 강도가 높아지고 있다. 연구 결과, 1979년부터 2020년까지 북

대서양과 미국 상공에서 청천난류 발생 건수가 늘었다. 북대서양의 경우, 1979년 대비 2020년 중강도 난류 발생 시간이 37% 증가했고, 심한 강도의 난기류는 55%까지 증가했다. 미국 상공에서도 유사한 경향이 관찰됐다.

Fig. 5의 모델은 (a)는 실제 1979년에 발생한 Moderate 이상의 CAT, (b)는 2020년에 발생한 Moderate 이상의 실제 CAT이며, 선형회귀모델로 추론한 1979년의 중강도(moderate) 이상의 CAT는 (c), 선형 회귀 모델에서 추론한 2020년의 중강도 이상의 CAT 연간 평균 발생 확률은 (d)에서 확인할 수 있다. 확률은 197hPa의 ERA5에서 계산되었으며, 21번의 CAT 진단을 평균한 것이다. 참고로 ERA5는 유럽중기예보센터(European Centre for Medium-Range Weather Forecasts, ECMWF)가 2016년 개발한 국제기후모니터링 tool이다. 즉, 1979년과 2020년에 Moderate 이상의 CAT와 조우 가능성을 프로그램으로 예측한 값이며, 색이 진할수록 CAT와 조우할 가능성이 높다(Prosser et al., 2023).

연구 결과, 지구온난화가 항공기 터블런스 빈도를 증가시킨다는 결과가 증명되었는데, 기후 모델링을 통해 고고도에서의 제트기류가 더 강력해지고 불안정해지면서 난류의 빈도가 증가하는 것이라고 결론지어졌고, 2050년까지 터블런스 빈도가 현재보다 두 배 이상 증가한다는 예측을 했다. 즉, 항공기 터블런스와 기후

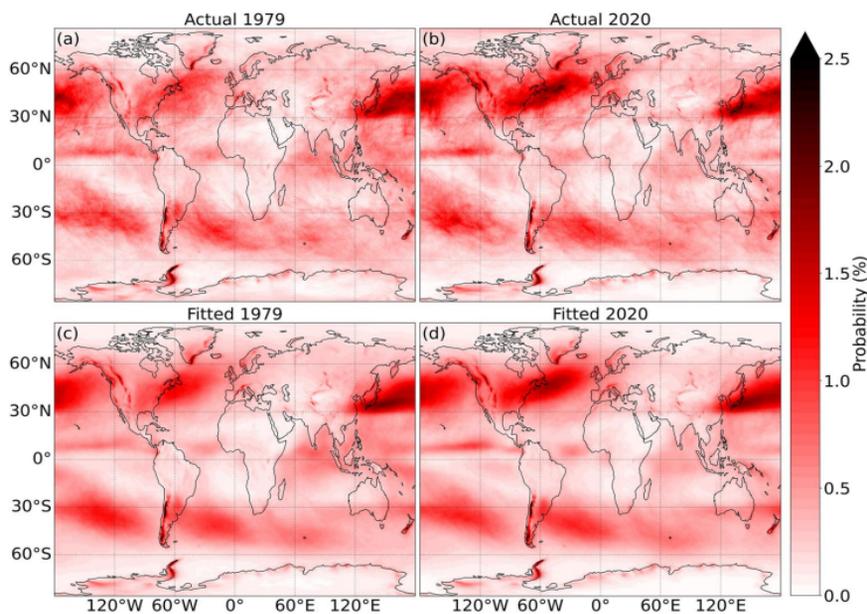


Fig. 5. Annual-mean probabilities of encountering moderate-or-greater clear-air turbulence in the year 1979 vs. 2020 (Prosser et al., 2023)

변화 간의 관계를 다룬 연구에서 지구온난화가 고고도에서의 제트기류를 강화하고, 이로 인해 터블런스 빈도가 증가했으며, 앞으로 대폭 증가할 것이라고 예측했다(Janiskova et al., 2020).

### 2.3.2 터블런스 증가 원인

터블런스 증가 원인은, 첫째, 지구온난화로 고고도에서 제트기류가 더 강해지고 불안정성이 커지기 때문이다. 제트기류는 북극과 중위도 지역의 온도 차에 의해 발생한다. 다만 기후 위기로 인해 북극지방 기온이 다른 지역보다 빠르게 상승하면서 극지방과 중위도의 기온차가 줄어들고 있다. 이에 강해진 제트기류가 일시적으로 약해지는 일이 잦아지면서, 제트기류의 흐름이 불안정해지고 상층 대기의 혼란이 가중되면서 청천 난기류가 점점 더 자주 일어나게 된 것이다. 또한, 기후 위기로 인해 기온이 상승하면, 대기 중 수증기량이 늘어나고, 대기 불안정성이 커져 난기류를 유발하는 대류성 구름이 발달하기 좋은 조건이 갖춰진다. 대류성 구름은 생성과 소멸 과정이 빠르고 복잡해, 이로 인한 난기류는 예측하기 무척 어렵다. 비행기 운항 경로로 운항한 후에야 난기류를 확인할 수 있는 경우가 많아, 승객들의 안전을 위협할 수 있다(Williams et al., 2020)(Table 2).

둘째, 해양-대기 상호작용이다. 연구 결과, 해양의 온도가 상승하면서 대기와 해양 간의 열 교환이 변화하여, 중층 대기에서의 난류가 증가한다는 결과가 나왔다. 해양의 온도가 높아짐에 따라 대기에서의 기온 구

배가 변화하고, 이는 저기압 시스템과 고기압 시스템의 상호작용을 통해 터블런스 빈도를 높인다는 점이 강조되었다(McGregor., 2018).

셋째, 여러 기후 모델을 통해 기후 변화에 따른 극단적인 기상 현상과 난류의 관계를 분석한 결과, 온실가스 배출 시나리오에 따라 미래의 기상 패턴이 어떻게 변할지를 예측할 수 있었는데, 특히 난류 발생 빈도가 북반구의 고위도 지역에서 증가할 것이라고 예측하고, 이러한 현상이 항공기 안전에 지대한 영향을 미칠 것이라고 강조했다(Williams et al., 2022).

### 2.3.3 우리나라의 터블런스로 인한 항공사고

2024년 상반기 국내항공사에 의해 보고된 난기류는 총 1만 4,820건으로, '19년 상반기(8,287건) 대비 78%(6,533건) 증가했다. 특히, 최근 5년간 국적사 난기류 사고(7건)는 전체사고(10건)의 70%를 차지했다고 국토부(2024)가 밝혔다.

## 2.4 터블런스 증가에 따른 항공 산업의 도전

### 2.4.1 항공 안전성 문제

터블런스 증가로 인한 항공 안전성 문제는 항공 산업의 주요 도전 과제 중 하나이다. 예측이 어려운 청천 난류의 발생은 특히 위험성이 높으며, 기체 피로 위험 증가, 승객 부상 등 사고 위험이 상존한다. 또한 이에 대한 심도 있는 대응 전략 수립이 요구된다.

Table 2. Cases of domestic aviation accidents in turbulence

사고대상	발생연도	용도	사고원인/기여요인	안전권고
사고	2020.02.15	운송사업	1. 사고요인 - 강하 중 예상하지 못한, 강한 강도의 청천난류 조우 2. 기여요인 - 승객의 좌석벨트 미착용 등의 자기 보호 부족	1. OO항공 - 난류 조우 시 승객과 승무원의 부상 방지를 위한 대책에 대하여 관리시스템 (SMS) 관점에서 검토하고, 이행 대책 마련 - 고고도에서의 난류조우 시에 항공기운용 관련 세부절차 마련 및 교육 훈련 강화 - 난류 조우 상황에 대한 객실승무원의 훈련 강화
사고	2021.05.28	운송사업	1. 사고요인 - 항공로 상 고도 상승 중 난기류조 2. 기여요인 - 조종사의 난기류 회피 노력 부족 - 부상승무원의 난기류 상황시 본인 안전조치 미흡	1. OO항공사 - 모든 승무원 대상 "난기류 조우 시 탑승자 안전 확보를 위한 적극적 회피 재교육" 및 "유사 사례 재발 방지를 위한 난기류 대응강화 조치를 시행" - 비행 중 난기류 조우 시 "객실 승무원 등의 부상관련 유사사례 방지를 위한 안전대책 마련"

\*Source: Ministry of Land, Infrastructure and Transport, Strengthen Safety of Airborne Turbulence, 2024.

#### 2.4.2 연료 소비와 운항 비용에 미치는 영향

터블런스를 피하기 위한 항공기의 경로 변경은 추가적인 연료 소비를 유발하며, 이는 항공사의 운영 비용을 증가시킨다. 연료 소비의 증가는 항공사의 재정적 부담을 가중시키며, 장기적으로 항공 요금 상승과 같은 경제적 영향을 미칠 수 있다.

#### 2.4.3 승객 경험과 서비스 품질의 변화

터블런스는 승객의 비행 경험에도 부정적인 영향을 미친다. 지속적인 터블런스는 승객의 불안감을 높이며, 이는 항공사의 서비스 품질 평가에도 악영향을 미칠 수 있다. 터블런스로 인한 지연이나 불편함은 승객의 불만을 초래하며, 이는 항공사 브랜드의 신뢰도에도 영향을 미칠 수 있다.

### 2.5 대응 전략

#### 2.5.1 항로 운영 전략 및 국제 정책적 대응

항공사들은 터블런스 증가에 대비하여 다음과 같이 운영 전략 개선이 요구된다.

첫째, 항공사의 항로 선정 정책 변화가 필요한 시점이다. 기존의 비행계획 단계에서의 항로 선정은 연료 절감을 최우선으로 하며, 부가적으로 태풍이나 화산 등 심각한 기상 사유가 있을 경우에만 우회 항로를 선정하고 있고, 상대적으로 터블런스 특히 청천난류(CAT)발생 예보 지역은 항로상에 표시만 해 주었을 뿐이었다. 즉, 기존의 항로 선정이 주로 연료 절감을 최우선 기준으로 선택하다 보니, 상대적으로 터블런스는 발생 예보시에 그 위치만 표시해 주고 우회항로를 통한 비행계획을 적용하지 않아 왔었다. 하지만 이제는 터블런스를 적용한 회피항로 비행계획 정책으로 과감한 변화가 필요한 시점이다. 즉, 청천난류 발생 예보 지역은 비행계획 단계에서부터 우회항로를 적용한 비행계획서를 발부해야 할 것이다. 나아가, 예보에서는 파악되지 않더라도 터블런스 발생 가능성이 높은 항로를 미리 파악하고, 대체 경로를 준비하는 것이 중요하다. 계절별, 항로별 터블런스 발생 데이터를 추적, 활용하고, 항공사 사이의 경험을 공유해 회피 전략을 구사해야 할 것이다.

둘째, 터블런스 발생시 PIREP(pilot report)전파 방식의 개선이 필요하다. 항로상 터블런스 조우시 기존의 전파방식은 터블런스 조우 항공기의 기장, 부기장 등 운항승무원이 관제기관에 통보해 유사 항로 운항 중인 여러

국적, 여러 항공사 항공기에의 전파하고 있는데, 동일 주파수 사용시에는 통신 내용을 동시 수신하므로 즉시 전파가 가능하나 관제 구역이 상이하거나 여타 주파수 사용 중인 항공기에는 즉시 전파가 곤란한 경우가 많다. 또 다른 전파 방식은 터블런스 조우 항공기가 항공사 본사의 종합통제실에 실시간으로 보고하여 본사 종합통제실에서 유사 항로 운항 중인 자사 항공기에 전파하는 방식이다. 이 두 가지 기존의 PIREP 전파가 주로 무선을 통한 전파 방식으로 인해 동일 주파수 사용 항공기나 동일 항공사에는 즉시 전파되지만, 관제기관이나 항공사 본사라는 일종의 중계국을 통한 전파방식인 관계로, 그렇지 않은 항공기에는 전파에 시간이 소요되거나 전파되지 못하는 경우가 있다. 터블런스가 급증, 빈발하는 현재와 같은 상황에서는 이를 개선, 유사 항로를 운항하는 모든 항공기에 동시에 즉시 전파될 수 있도록 모든 항공기에 기 장착 운용되고 있는 ACARS(aircraft communication addressing and reporting system) 기능 개선을 통한 비상 전파 신호 즉시 전파 방식을 전세계적으로 모든 항공기가 적용할 수 있도록 ICAO(International Civil Aviation Organization) 또는 IATA(The International Air Transport Association) 차원에서 정책적, 기술적 적용 검토가 필요한 시점이다.

#### 2.5.2 기내 서비스 방식의 변화

기내 서비스에 있어서, 빈도와 강도가 늘어난 터블런스에 대비해 부상위험이 있는 서비스의 중단이나 변경이 검토되어야 한다. 대한항공은 2024년 8월 15일부로 장거리 노선 기내 간식으로 무상 제공하던 컵라면을 '이코노미 클래스(일반석)'에서 서비스 중단했다. 대한항공 자회사 진에어도 그간 유상 판매를 이어오던 컵라면 간식을 10월 1일부터 전 노선에서 중단했다. 아시아나항공도 9월 30일부터 '단거리' 국제선의 '이코노미 클래스' 승객에게 커피·차 등 '뜨거운 음료' 제공을 중단했다. 국토부도 2024년 8월 15일 발표한 항공기 난기류 사고 예방 대책을 통해 뜨거운 국물이 있는 컵라면, 차 등의 기내 서비스 중단을 권고하면서, 항공사의 난기류정보 공유 확대, 종사자 역량 강화, 난기류 위험성 대국민 홍보, 국제기구와의 공조 등 4가지 정책을 제시하였다.

#### 2.5.3 항공기 설계 및 구조적 개선

121년된 항공역사에 있어서 급격한 터블런스 증가로 인한 항공기 기체에 가해지는 충격이 현재와 같이

점점 강하게 가해지고 있는 상황에서, 항공기의 내구성을 강화하면서도 항공기 자중 증가는 피하기 위한 새로운 재료와 기술을 적용한 항공기 설계가 필요하다. 경량화된 신소재와 탄소 섬유는 항공기의 강도를 높이고, 터블런스에 대한 저항력을 강화할 수 있다. 또한, 항공기 기체의 피로도 관리를 위한 새로운 방법론이 개발되고 있다.

#### 2.5.4 터블런스 예측 기술 개발과 적용

인공지능(AI)과 기계 학습을 활용한 터블런스 예측 모델이 개발되고 있으며, 이는 기존의 예측 방법보다 높은 정확도를 제공한다. 이러한 기술은 실시간 기상 데이터를 분석하여 터블런스 발생 가능성을 예측하고, 항공기의 경로를 조정하여 터블런스를 회피하는 데 중요한 역할을 할 수 있다.

#### 2.5.5 항공 산업의 지속 가능성 제고를 위한 전략-탄소 배출 감소와 지속 가능한 항공 연료

항공 산업은 지구 온난화의 주요 원인 중 하나인 탄소 배출을 줄이기 위해 노력하고 있다. 지속가능항공유(SAF)는 기존 화석 연료에 비해 탄소 배출량이 적으며, 재생 가능한 자원으로부터 생산된다. 항공사들은 SAF 사용을 확대하고 있으며, 이를 통해 항공 산업의 탄소 발자국을 줄이려 하고 있다. 대한항공은 2024년 8월 30일부터 SAF 사용을 개시하였다. 대한항공뿐 아니라 아시아나항공, 제주항공, 진에어, 티웨이항공 등 다른 항공사들도 SAF를 활용할 계획이다.

해외에선 이미 SAF 적용을 의무화하는 추세다. 유럽연합(EU)은 2025년부터 EU 역내 공항에서 출발하는 항공기에 최소 2% SAF를 의무 혼합하는 '리퓨얼(Refuel) EU' 정책을 발표한 바 있다. 혼합 비율을 점차 늘려 2050년에는 SAF를 전체 항공유의 70%까지 의무 사용하게 할 계획이다.

항공 산업의 지속 가능성을 높이기 위해서는 국제적인 협력과 규제가 필요하다. 각국 정부와 국제기구는 항공기 배출 규제와 같은 정책을 통해 항공 산업의 탄소 배출을 관리하고, 터블런스 증가에 대한 글로벌 대응을 강화해야 한다.

#### 2.5.6 항공기 터블런스 연구의 방향성과 과제

항공기 터블런스와 지구 온난화의 상관관계에 대한 지속적인 연구가 필요하다. 이를 통해 터블런스 발생

패턴을 더욱 정확하게 예측하고, 항공기 설계와 운항 전략을 개선하는 데 기여할 수 있다. 또한, 터블런스 연구는 항공 안전성을 높이는 데 중요한 역할을 하며, 이는 항공 산업의 지속 가능한 발전을 위해 필수적이다.

### III. 결 론

본 연구에서는 지구온난화가 항공기 터블런스 증가에 미치는 영향을 분석했다. 지구온난화로 인한 대기 불안정성 증가는 터블런스 발생 빈도와 강도를 증가시키며, 이는 항공 안전에 중대한 영향을 미친다. 또한, 터블런스의 증가가 항공사와 승객에게 미치는 경제영향도 분석하였다. 사례 연구와 데이터 분석을 통해 지구온난화가 터블런스 발생 빈도와 강도에 미치는 영향을 실증적으로 확인할 수 있었다. 이러한 분석 결과는 항공산업이 향후 지구온난화로 인한 터블런스 증가에 어떻게 대응해야 할지를 구체적으로 제시한다.

지구 기후변화는 항공기 터블런스 증가에 직접적인 영향을 미치며, 이는 항공 안전에 중대한 도전 과제를 제시한다. 본 연구는 이러한 문제를 인식하고, 항공사와 국제 기구가 취할 수 있는 대응 전략을 제시함으로써 향후 항공 안전을 강화하는 데 기여하고자 한다.

본 연구는 주로 기상 데이터와 항공 운항 기록을 기반으로 분석을 진행하였으나, 일부 데이터의 불완전성이나 터블런스 예측의 한계로 인해 연구 결과에 일정한 제약이 있을 수 있었다. 또한, 본 연구에서 다루지 않은 기타 기후변화 요소들(예: 폭염, 강풍 등)도 항공 안전에 중요한 영향을 미칠 수 있으므로 추가적인 연구가 필요하다. 연구를 통해 항공 산업, 기상 예측 및 공공 안전 정책에 중요한 정보를 제공하며, 기후 변화에 대한 지속적인 모니터링과 대응의 필요성이 강조된다고 하겠다.

향후 연구에서는 터블런스의 장기적인 추세를 보다 정확히 예측하기 위한 기상 모델의 개발이 필요하며, 또한, 지구온난화 외에도 항공 안전에 영향을 미칠 수 있는 다양한 기후 요인들을 종합적으로 분석하는 연구가 필요하다. 이를 통해 항공산업이 기후변화에 대응하여 더욱 안전한 운항 환경을 구축할 수 있도록 기여할 것이다.

### References

1. ICAO, Safety Report, 2023.
2. WMO, Global Temperature Record, 2023.

3. IPCC. "Climate change 2021: The physical science basis", 2021.
4. Atrill, J., Sushama, L., and Teufel, B., "Clear-air turbulence in a changing climate and its impact on polar aviation", *Safety in Extreme Environment*, 3, 2021, pp.103-124.
5. Prose, M. C., Williams, P. D., Marlon, G. J., and Harrison, R. G., "Evidence for large increases in clear - Air turbulence over the past four decades", *Geophysical Research Letters*, 10(1029), 2023, pp.2-7.
6. Williams, P. D., and Joshi, M. M., "Intensification of winter transatlantic aviation turbulence in response to climate change", *Nature Climate Change*, 3(8), 2013, pp.644-648.
7. Storer, L. N., and Williams, P. D., "Climate change and turbulence: How the jet stream may affect future aviation", *Weather*, 73(8), 2018, pp.271-275.
8. Lee, S., and Kim, K., "Long-term changes in mid - Latitude turbulence and its implications for aviation", *Atmosphere*, 11(2), 2020, pp.186.
9. Emanuel, K., "Increasing destructiveness of tropical cyclones over the past 30 years", *Nature*, 436(7051), 2005, pp.686-688.
10. ICAO, Environmental Report, 2019.
11. Gutierrez, R. J., and Williams, P. D., "Atmospheric turbulence forecasting for aviation: Advances and challenges", *Progress in Aerospace Science*, 85, 2016, pp.42-56.
12. Airbus Company, 2018. Global Market Forecast 2018 - 2037.
13. Shepherd, T. G., "Atmospheric circulation as a source of uncertainty in climate change projections", *Nature Geoscience*, 7(10), 2014, pp.703-708.
14. Brasseur, G. P., and Gupta, M., "Impact of aviation on climate: Research priorities", *Bulletin of the American Meteorological Society*, 91(4), 2010, pp.461-463.
15. Kim, D., and Chun, H., "Turbulence characteristics of aircraft - measured Clear Air Turbulence(CAT) events over the Korean Peninsula", *Journal of Climate*, 32(15), 2019, pp.5011-5026.
16. WMO, "Guide to meteorological instruments and methods of observation", 2017.