

Original Article

<https://doi.org/10.12985/ksaa.2025.33.4.066>
ISSN 1225-9705(print) ISSN 2466-1791(online)

러시아-우크라이나 전쟁으로 인한 유럽행 운항편의 상층풍 영향과 탄소배출량 변동 분석

서지원*, 윤연섭*, 원완식**

Upper-Level Winds and Carbon Emission Variability on Russia-Ukraine Rerouted Flights

Jiwon Seo*, Yeon-Sub Yoon*, Wan-Sik Won**

ABSTRACT

The airspace restrictions due to the ongoing Russia-Ukraine war have increased flight distance and fuel consumption, along with carbon emissions. In this study, Korean Air Flight KE907 is used as a case study to analyze the changes in flight trajectories and upper-level wind conditions before and after the conflict. The application of ERA5 (ECMWF reanalysis v5) allows the calculation of TAS, fuel consumption, and carbon emissions. The analysis indicated that the rerouted path increased the flight distance by approximately 823 NM, accompanied by a significant escalation in headwind effects. Consequently, the fuel consumption per flight increased by approximately 2,240 kg, and carbon emissions increased by approximately 6,552 kg. Furthermore, an examination of seasonal and altitude-dependent variations in upper-level winds over a one-year period revealed a trend of stronger headwinds at higher altitudes.

Key Words : Net Zero(탄소 중립), Flight Route(항로), CO₂ Emissions(이산화탄소 배출), Fuel Consumption(연료 소비), Upper-Level Wind(상층풍)

1. 서 론

1.1 연구 배경

지난 수십 년 동안 지구 온난화는 전례 없는 속도로 가속화되고 있으며, 특히 1970년 이후 지표면 평균 온도 상승 속도는 최근 2000년간 어떤 50년 기간보다 빠른 것으로 보고되었다(IPCC, 2023). IPCC(inter-governmental panel on climate change)는 인간

이 유발한 지구 온난화를 특정 수준으로 제한하기 위해서 누적된 CO₂ 배출을 제한하고, Net Zero 또는 Net Negative를 달성하여, GHG(green house gas) 배출을 강력히 감소시키는 것을 요구하고 있다. 지구 온도는 약 10년 전, 이미 예미안 간빙기 수준인 +1°C에 도달했으며, 현재는 +1.5°C에 이르렀고, 다시 과거 기후로 돌아갈 수 없는 Point of No Return에 도달하지 않아야 한다(Hansen, 2025).

항공산업에서도 탄소 배출량을 저감시키기 위해 다양한 노력을 기울이고 있다. ICAO는 CORSIA(carbon offsetting and reduction scheme for international aviation)를 도입하여 항공기 운영자에게 초과된 CO₂ 배출량을 상쇄하기 위한 배출권의 구매 및 취소를 요구한다(ICAO, 2023). IATA(2024)는 Net Zero 달성을 위하여 2050년까지의 aircraft

Received: 23. Oct. 2025, Revised: 10. Nov. 2025,
Accepted: 25. Nov. 2025

* 한국항공대학교 항공교통물류학부 학부생

** 한국항공대학교 항공교통물류학부 교수

연락처 E-mail : wswon@kau.ac.kr

연락처 주소 : 경기도 고양시 덕양구 항공대학로 76, 한국항공대학교 본관 422호

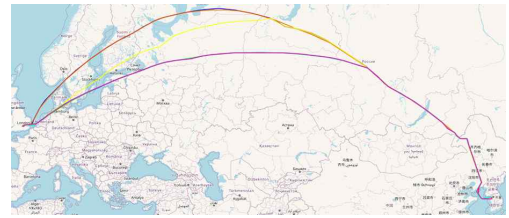
technology, energy and new fuels infrastructure, operations, finance, policy 등 5개의 road-map을 제공하고 있다.

한편 국제민간항공협약 제1조는 계약국은 각국이 그 영역상의 공간에 있어 완전하고 배타적인 주권을 보유한다는 것을 승인한다고 규정하고 있다(Korean Law Information Center, 1952). ICAO는 영공 운영에 있어 국제적 표준을 제시하지만, ICAO Annex 2에 따르면 발생하는 차이를 지속적으로 통보할 것을 제안하고 있다(ICAO, 2024). 미국의 경우, FAA AIP GEN 1.7를 통해 ICAO 기준과 다른 미국 내 규정을 발표하고 있다(FAA, 2025). 영공의 진입 가능 여부도 각 국가의 상황에 따라 변화하기도 한다. FAA는 워싱턴 D.C. 백악관 근방 일대를 비행 금지 영공으로 설정하거나 로켓 발사 시 안전을 위해 해당 구역 항공기 운항 금지를 NOTAM을 통해 공표하였다(FAA, 2025). EASA는 이스라엘의 무력 충돌 상황에 따른 이스라엘과 주변국들의 영공 일부 폐쇄 및 제한 가능성을 공식 수시로 권고하였고(EASA, 2023), EU Conflict Zone Alerting System을 운영하여 분쟁지역에서 발생할 수 있는 민간항공에 대한 위협 정보를 공유하는 시스템을 운영하고 있다. 일부 국가의 영공에 대해 민간 항공기의 비행 자제 또는 제한 권고를 발행하고 있다(EASA, 2025).

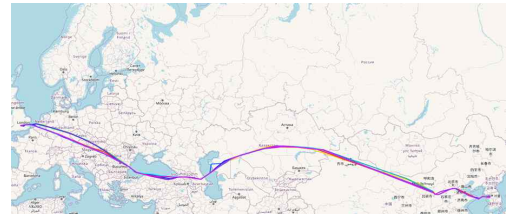
1.2 선행연구

1.2.1 러시아-우크라이나 전쟁 영향

2022년 2월 24일 러시아의 우크라이나 침공으로 인해 일부 국가가 러시아 항공기의 자국 영공 진입을 금지하였고, 이에 대한 보복 조치로 러시아도 상대국 항공기의 러시아 영공 진입을 금지하였다(Dannet et al., 2025). 러시아 영공 진입 금지로 인하여 항공기들은 기존 최적화된 항로를 비행하지 못하고 대체 항로를 이용해야 한다. 기존 러시아 영공을 이용하던 항공기들은 1~20%까지 비행거리가 증가하였고, 유럽 노선 항공기의 경우 비행거리가 14.8%, 북미 노선 항공기는 비행거리가 9.8% 증가하였다(Dannet et al, 2025). 특히 시베리아 영공 폐쇄로 인하여 일본, 한국, 핀란드, 싱가포르가 가장 심각한 영향을 받은 것으로 나타났다. 일본의 경우 국제선의 12.39%, 한국의 경우 국제선의 19.4%가 러시아 영공을 이용하고 있었으며, 이 항로들은 비행 거



(a) Feb. 2022



(b) Feb. 2023

Fig. 1. Flight trajectory from Incheon to London

리가 매우 길기 때문에, 경로 상 약간의 변경이 비행시간 및 비용의 큰 폭으로 증가할 수 있다(Chen et al., 2024). Fig. 1 (a)는 전쟁 전 인천-영국 항로, Fig. 2 (b)는 전쟁 후 인천-영국 항로를 보여준다.

비행거리가 증가함에 따라 연료 소비량과 탄소 배출량도 함께 증가하였다. 하지만 비행거리의 증가량보다 연료 소비량의 증가량이 더 높은 경우도 발생하였다. 이는 상층풍의 영향으로, 항공기가 비행 중 더 불리한 패턴의 상층풍을 마주한 것으로 고려된다(Dannet et al., 2025). 북미에서 아시아로, 아시아에서 유럽으로 비행하는 항공편은 상층에서 정풍이 강한 경로를 이용하기 때문에 비행시간이 증가하고 이에 따라 연료 소비량과 탄소 배출량도 증가한다(Dannet et al., 2025).

1.2.2 상층풍, 제트기류의 특성

KOSAE(Korean Society for Atmospheric Environment, 2025) 용어사전은 상층풍을 고층대기 속에서 부는 바람으로 정의하고, 고층풍으로 불리기도 한다고 명시하고 있다. 중위도 지방에서 고도가 높을수록 그리고 겨울철에 뚜렷하게 나타나고, 서풍을 타고 발생한다고 정의한다. AMS(American Meteorological Society, 2025)와 NWS(National Weather Service, 2025)는 각각 Upper air와 Upper Level에 대해 850hPa 이상 구역을 말한다. 제트 기류는 상층풍 일종으로, KOSAE(2025)는 위도 30°~40°의 대류권계면 부근에서 강하게 불고 있는 서풍이며, 높이 약

10 km 전후의 300 mb 등압면 부근에 있다고 정의한다. 주위의 편서풍 속을 뚫어내는 것처럼 흐르고 있고, 겨울에는 속력이 80 m/sec 이상에 달할 때도 있다. 원인은 지구상에 발생하는 편서풍에 의한 것이지만, 그것이 강화되고 집결된 것이라고 생각된다. 강물과 같이 사행하고, 대체로 지구를 둘러싸고 있지만 때때로 차단을 받을 때도 있다. 편서풍띠의 파동에 영향을 끼치며, 제트 기류의 가까이에서는 청천난류가 발생하여 비행기의 비행에 장애를 주고, 또 서행운향에 대하여 정풍으로 된다고 정의하고 있다. 세계기상기구(WMO)의 정의에 따르면, 제트기류는 준수평 축을 가진 대기 기류로서, 길이는 수천 km, 폭은 수백 km, 두께는 수 km에 이른다. 제트기류의 핵에서 풍속은 30 m/s를 초과해야 한다(EGibbs, 1958). 이러한 제트 기류는 계절에 따라 다른 특성을 나타낸다. 겨울철 제트기류는 강하게 나타나 적도 부근까지 영역을 확장하고, 여름철에는 세기가 약해지며 극지방 가까운 곳에 위치한다(Barnes & Simpson, 2017). 또한 제트기류의 계절별 위도 진폭은 해양보다 육지에서 더 크게 나타난다. 유라시아와 북아메리카 대륙에서는 20도 정도로 나타나며, 북대서양에서는 10도, 북태평양에서는 약 15도의 범위를 가진다(Hallam, et al., 2022).

1.2.3 항공기 운항 영향

앞서 제트기류에 대한 설명에서, 제트 기류는 비행기 비행에 장애를 주고, 서행 운항에 대하여 정풍으로 작용한다고 정의하고 있다. 항공기 운항에 있어 상층풍과 제트기류를 고려하는 것은 매우 중요하다. ICAO(2016)는 북대서양 지역에서 배풍과 정풍을 고려한 항로 선택이 OTS(organized track system) 설계의 기본 원리라고 서술하였다. 항공 궤적이 4D 자유항로(4D free routes)로 최적화되었을 경우, 연료 소모, 항공관제 비용(ATC charges), 그리고 항공 궤적의 환경 영향이 모두 감소할 수 있고, 풍향과 풍속의 강한 영향은 공역 내 최적화된 수평 궤적의 형태에 의미 있는 차이를 유발한다(Rosenow, 2019). NASA(1982)는 정확한 기상 데이터를 비행 계획 및 경로 선택에 활용할 경우, 절약 가능한 연료가 보수적으로 추정하여 평균 1.2%에서 2.5% 사이에 이른다고 말한다. Rosenow(2021)는 실시간 기상 상황을 고려하여 항로를 계획한 경우 항공편 당 약 0.5~7%의 연료 절감 효과를 확인하였다.

1.3 연구 목적

본 연구는 아시아-유럽 구간 항공편을 대상으로, 비행 항로와 운항 고도에 따라 발생하는 탄소 배출량을 최소화하는 것을 목적으로 하였다. 이를 위해 아시아에서 유럽으로 향하는 항공편에 대해 공역제한에 따른 기존 항로와 변경된 항로를 비교하고, 두 항로 간 비행 거리, 비행 시간, 연료 소모량 차이를 반영하여 항로 변경이 탄소 배출량에 미치는 영향을 정량적으로 분석하였다. 또한 각 항로에서의 상층풍의 영향을 분석하여, 항로별 상층풍 조건에서 연료 소모량과 탄소 배출량을 분석하였다.

나아가 1년간 계절별 상층풍 변동성을 고려하여 항로, 고도별 탄소 배출량을 계산하고, 계절과 고도에 따른 탄소 배출량을 최소화하였다.

II. 본 론

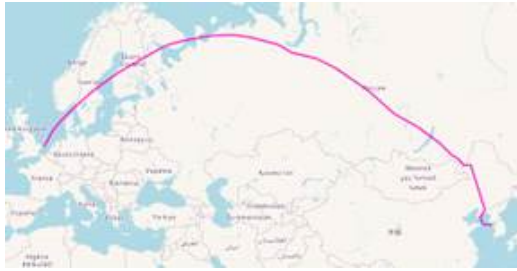
2.1 연구 범위

본 연구는 러시아-우크라이나 전쟁에 따른 공역 제한으로 경로가 변경된 아시아-유럽 간 항공편을 대상으로 한다. 분석 대상은 인천국제공항에서 런던 히드로 공항으로 운항하는 대한항공 KE907편이며, 공역 제한 전후의 항로 차이를 비교하기 위해 2022년 2월 11일(전쟁 이전)과 2023년 2월 27일(전쟁 이후)의 ADS-B(auto-matic dependent surveillance-broadcast) 항적 데이터를 활용하였다. 해당 구간에 ERA5(European Center for Medium-Range Weather Forecasts Reanalysis Version 5) 재분석 자료의 250 hPa(약 34,000 ft) 상층풍을 결합하여 분석하였다. 추가로 동일 항적을 기준으로 1년간 ERA5 250 hPa 자료를 적용하여, 계절별 상층풍 변동과 운항 고도 변화가 비행 효율에 미치는 영향을 검토하였다.

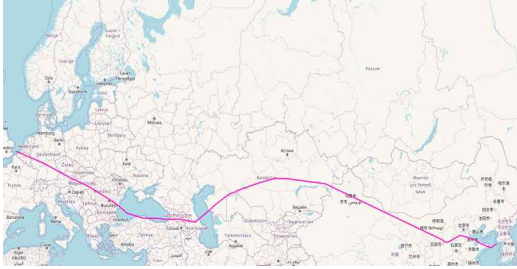
2.2 연구 방법

본 연구에서는 항공편의 순항 구간의 상층풍 영향을 정량적 분석하기 위해 다음과 같은 절차를 수행하였다.

우선 ADS-B 항적 데이터는 고도 30,000ft 이상 비행한 순항 구간만을 필터링하여 분석하였다. Fig. 2(a)는 전쟁 이전 러시아 공역을 이용한 항로이고, (b)는 전쟁 이후 변경된 항로이다.



(a) Feb. 02, 2022



(b) Feb. 27, 2023

Fig. 2. ICN-LHR Trajectory above 30,000 ft

ADS-B 데이터는 항공기의 위도, 경도, 고도, 지상 속도(GS) 정보를 수초 단위로 불규칙하게 제공하기 때문에 데이터의 시간 간격을 일치시키기 위하여 보간법을 적용하여 모든 데이터를 1초 간격으로 재구성하였다. 이를 통해 항적 데이터의 정확도를 높였다.

비행 거리 계산에는 위도와 경도 정보를 활용하여 하버사인 공식을 적용하였다. 하버사인 공식은 지구를 구형으로 가정하고, 두 지점 간 대원 거리를 수식 (1)을 통해 계산하였다.

$$d = 2r \times \arcsin \sqrt{\sin^2\left(\frac{\Delta\theta}{2}\right) + \cos(\theta_1)\cos(\theta_2)\sin^2\left(\frac{\Delta\lambda}{2}\right)} \quad (1)$$

d 는 두 지점 간 거리, r 은 지구 반지름(3,440.07 NM), θ 는 위도, λ 는 경도를 의미한다.

본 연구에서 사용한 ADS-B 데이터는 WGS-84 좌표체계를 사용하고 있고, 하버사인 공식은 지구를 구로 가정하여 계산하기 때문에 오차가 발생한다. 인천과 런던의 위도, 경도를 기준으로 직선거리를 계산한 결과 상호 오차가 0.1% 이하로 나타났다.

ERA5는 전지구적 기상 조건을 높은 해상도와 신뢰성으로 제공하는 ECMWF(European Center for Medium-Range Weather Forecasts)의 자료이다. 본 연구에서는 ERA5 재분석 자료 중 250 hPa 고도

(34,000 ft)에서의 동서 바람 성분(u), 남북 바람 성분(v)을 추출하여 활용하였다. 각 항적 지점에 대해 가장 인접한 ERA5 데이터의 바람 성분을 적용하여, 지점별 실제 상층풍 조건을 반영하였다. 이를 통해 각 지점의 배풍 및 정풍 성분을 계산하고, 항공기의 GS(ground speed)와 바람 성분을 통해 TAS(true air speed)를 Equation 2를 이용하여 계산하였다.

$$TAS = GS - (Wind Component) \quad (2)$$

Wind Component는 항공기의 항적 방향(direction)과 바람 방향의 각도 차이를 고려하여 계산하였다.

각 비행 구간에 대해 TAS와 GS의 평균값을 산출한 후, GS와 TAS의 차이($\Delta V = GS - TAS$)를 통해 비행 중 바람의 영향을 정량적으로 평가하였다. ΔV 가 양수이면 배풍, ΔV 가 음수이면 정풍을 의미한다. 또한 총 비행거리와 평균 속도를 이용하여 TAS와 GS 기준의 비행 시간을 각각 계산하였다. 마지막으로, 상층풍의 계절적 변동 영향을 평가하기 위하여 동일 항적에 대해 1년간 ERA5 자료를 적용하여 TAS 및 비행시간 변화를 추가로 계산하였다. 이후 비행 고도를 변수로 설정하여, 상층풍 조건을 최적으로 반영하는 항로를 도출하였다.

2.3 연구 결과

2.3.1 항적별 상층풍 분포 특성

먼저 Fig. 3의 (a) 2022년과 (b) 2023년의 항공기가 비행한 항로와 250 hPa 영역의 풍향 풍속을 항공기가 출발한 시점의 등풍속선과 화살표로 나타낸 그림이다. 위 그림에서 확인할 수 있는 것처럼 전쟁 이전 항로가 배풍의 영향을 더 많이 받는 것으로 확인된다. 전쟁 후 항로의 경우 항로의 대부분을 정풍을 맞으면서 비행한 것으로 나타난다.

Fig. 4는 항공기가 비행한 날 250 hPa(34,000 ft)의 (a) 2022년과 (b) 2023년 사례의 등풍속선을 나타낸 것이다. 전쟁 이전 항로를 이용한 경우 출발 직후 강한 풍속을 만난 것으로 나타나지만 그 이후 비교적 바람이 잔잔한 지역을 비행한 것에 비해 전쟁 이후 항로의 경우 바람이 강하게 나타난 지역도 비행한 것을 확인할 수 있다. 이는 전쟁 이전 항로가 풍향과 풍속 모두 비행에 효율적이었던 것을 알 수 있다.

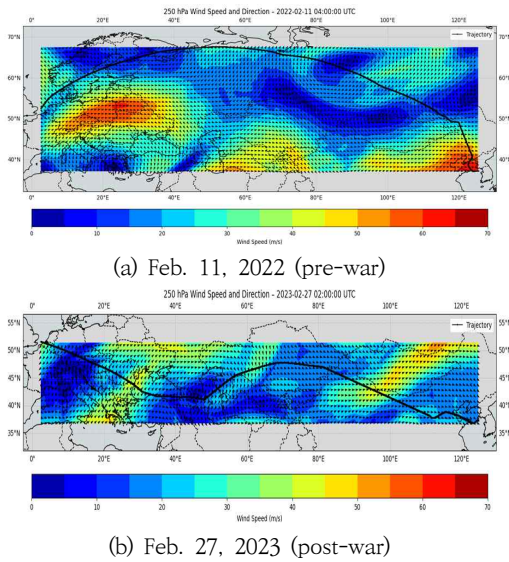


Fig. 3. Isotach and direction at 04 UTC

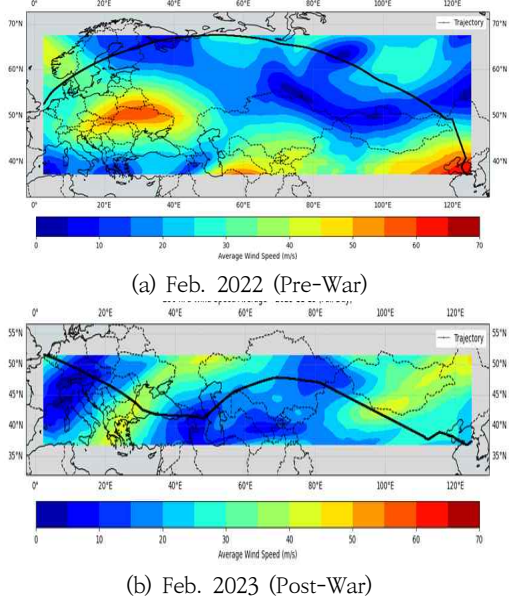


Fig. 4. Mean isotach map at 250 hPa

2.3.2 항로별 운항 효율성과 탄소 배출량 비교

Table 1은 전쟁 전 후로 변경된 항로에 대한 비행 거리와 상층풍의 영향, 그리고 추가 연료 소모량과 탄소 배출량을 비교 분석한 결과이다. 비행 거리 변화 분석 결과 공역 제한 조치 이후 항로 변경으로 인한 비행 거리가 크게 증가하였다. 전쟁 이전인 2022년 2월 11

Table 1. Comparison of flight distance and fuel consumption for the altered route

	Pre-war	Post-war	Differences	
Flight distances (NM)	4,840	5,663	823	
평균 TAS (kt)	463.7	464.6	0.9	
상층풍 영향	평균 TAS - GS (kt)	-2.5	-11.8	9.3
	비행 시간 차이(분)	3.6	19.2	15.6
	추가 연료 소모량 (kg)	420	2,240	1,820
	추가 탄소 배출량 (kg)	1,512	8,064	6,552

일의 항적은 약 4,840 NM이었으나, 전쟁 이후 2023년 2월 27일 항적은 약 5663 NM으로 823NM, 약 17% 증가하였다. 평균 TAS는 전쟁 이전 463.7 kt에서 464.6 kt로 소폭 증가하였다. 항공기는 비행할 때 TAS를 기준으로 비행하기 때문에, 두 항적 모두 유사한 TAS 평균값을 가진다. GS와 TAS의 차이는 -2.5 kt에서 -11.8 kt로 크게 감소하였다. 이는 앞서 분석한 항로에 따른 상층풍의 영향으로 공역 제한 이후 항로에서 정풍의 영향이 더 강하게 나타났음을 확인할 수 있다. 비행시간을 GS와 TAS 기준으로 각각 비교 분석한 결과, 공역 제한 이전 항로의 경우 GS 기준 비행시간과 TAS 기준 비행시간이 약 3.6분 증가하였으나, 공역 제한 이후 항로에선 비행시간 차이 폭이 약 19.2분으로 크게 나타났다. 이는 공역 제한 이후 항로가 정풍으로 인한 상층풍의 영향이 비행시간에도 영향을 미치는 것으로 파악된다.

비행시간이 증가함에 따라 항공기의 연료 소비량도 함께 증가하였다. 연료 소비량은 실제 비행에 투입된 Boeing 사의 B777-3B5(ER) 항공기의 실제 비행 데이터를 기반으로 7,000 kg/hr로 설정하였다(Boeing, 2022). 이를 적용하여 계산한 결과, 공역 제한 이전 항로에서는 추가 연료 소비량이 약 420 kg 증가하는데 그쳤으나, 공역 제한 이후 항로에서는 약 2,240 kg 증가하여 연료 소모 증가폭이 크게 확대되었다. 비행거리가 증가한 것 이상의 연료 소비 증가가 관측된 것은, 공역 제한 이후 항로에서 상층풍으로 인한 비행시간 증가가 주요 원인으로 작용했음을 의미한다. 즉 정풍으로 인해 실질적인 비행시간이 증가하면서 항공기의 추

가 연료 소모량도 비례하여 증가한 것으로 분석된다.

연료 소모량 증가에 따라 탄소 배출량도 증가하였다. 일반적으로 국내 항공 업계에서 가장 많이 사용하고 있는 Jet A-1 항공유의 탄소 배출량인 3.16 kg CO₂/kg을 가정하여 계산한 결과(KTEMS, 2023), 공역 제한 이후 항로 변경으로 인해 추가로 약 6,552 kg의 탄소가 배출된 것으로 확인되었다.

증가한 비행거리와 상층풍의 영향을 모두 고려한 결과, Fig. 5와 같이 총 비행시간은 2시간 증가하였다.

총 증가한 연료 배출량과 탄소 배출량은 다음의 Fig. 6과 같이 나타났다. 늘어난 비행시간으로 인하여 총 연료 소모량은 14,000 kg 증가하였고, 탄소 배출량은 50,400 kg 증가한 것으로 나타났다.

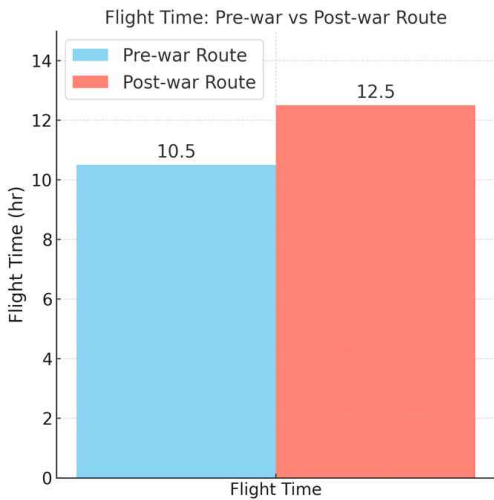


Fig. 5. Total flight time of pre-/post-war route

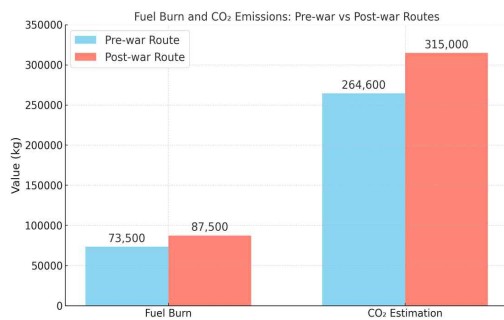


Fig. 6. Total fuel consumption and CO₂ emissions of pre-/post-war route

2.3.3 계절, 고도별 상층풍 영향 분석

다음으로 항로에 따른 상층풍의 영향이 대상 일에 국한된 것임을 알아보기 위하여 각각의 항로에서 연간 TAS와 GS 차이를 분석하였다.

연간 분석을 한 경우, Fig. 7처럼 나타났다. 2022년과 2023년 모두 연간 상층풍 영향의 경향이 비슷하게 나타났지만, 연간 평균 상층풍의 영향은 2023년 항로에서 더 강하게 나타났다. 이는 두 항로 모두 연간 비슷한 정도의 상층풍 패턴을 만나지만, 항로의 위치에 따라 전쟁 이후 변경된 항로가 더 강한 영향을 받는 것으로 해석된다.

편차가 가장 크게 나타난 6월과 7월, 11월과 12월을 대상으로 등풍속선을 작성하여 특성을 비교하였다.

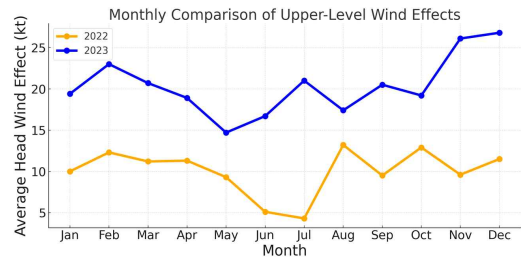
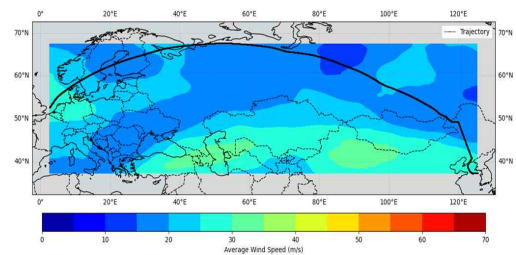
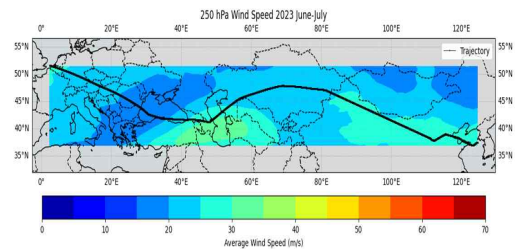


Fig. 7. Monthly comparison of upper-level wind effect 1 year



(a) June - July 2022



(b) June - July 2023

Fig. 8. Mean isotach at 250 hPa

Fig. 8은 (a) 2022년과 (b) 2023년 사례에 대해 각 6월, 7월의 평균 상층풍을 그린 것이다. 유사한 경향을 보이는 것으로 확인된다. 하지만 항공기가 비행한 항로를 살펴보면, 2023년이 풍속이 강한 지역을 더 자주 비행한 것을 확인할 수 있다.

동일한 방법으로 Fig. 9 (a)2022년과 (b)2023년의 11월 12월 평균 상층풍을 나타내었다.

11월과 12월의 경우 평균 상층풍도 2023년이 더 강했을 뿐만 아니라, 전쟁 이후 항로가 풍속이 강한 지역을 더 자주 비행한 것을 확인할 수 있다.

항공통계(2025)에 따르면, 한국에서 출발하는 유럽행 노선은 2023년 기준 139,920편이 운항되고 있다. 항로 변경으로 인한 피해는 위 운항편 모두에게 영향을 미칠 것으로 파악되고 이는 연간 약 920,000 t의 탄소를 추가 배출할 것으로 계산된다. 뿐만 아니라 2024년 기준 한국발 유럽행 노선은 171,124편이 운항되어 증가하는 추세로 공역 제한으로 인한 피해는 점차 증가될 것으로 보인다. 특히 이와 같은 탄소 배출량 증가는 한국발 항공편에만 국한되지 않고 동아시아와 유럽을 잇는 대부분의 항공편에서 광범위하게 발생하고 있다는 점에서 더욱 심각한 문제로 인식된다.

마지막으로 변경된 항로에서 연료 소비와 탄소 배출 측면에서 최소화하기 위하여 비행 고도를 200 hPa(39,000 ft), 250 hPa(34,000 ft), 300 hPa(29,000 ft)로 가정하여 각 고도의 상층풍을 고려한 TAS와 탄소 배출량을 계산하였다.

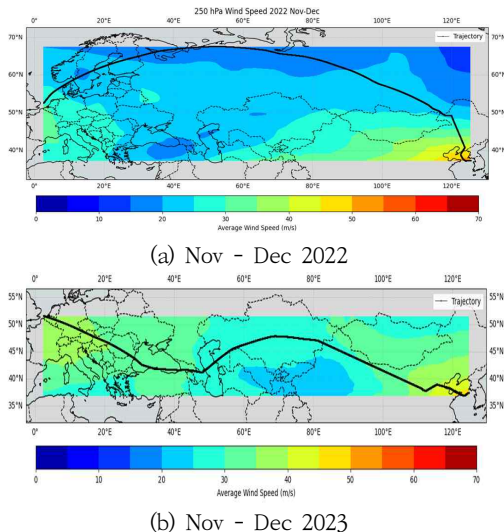


Fig. 9. Mean isotach at 250 hPa

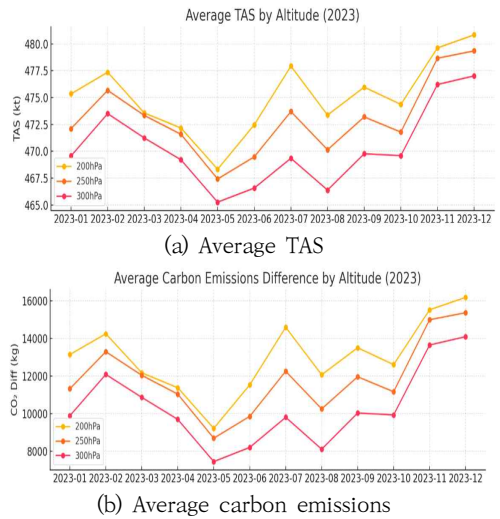


Fig 10. Differences by altitude

Fig. 10을 보면, 고도가 감소함에 따라 TAS와 탄소 배출량 모두 감소하였다. 이는 300~200 hPa(29,000~39,000 ft) 사이 고도에선 고도가 증가함에 따라 상층풍의 영향으로 인한 비행 효율이 감소한다는 것을 의미한다.

III. 결론

본 연구에서는 러시아-우크라이나 전쟁으로 인한 공역 제한 조치가 인천-유럽 간 항공편의 비행거리, 연료 소비, 탄소 배출량에 미친 영향을 정량적으로 분석하였다. 전쟁 발발 이전에는 최적화된 항로를 통해 비행 시간과 연료 소비를 최소화할 수 있었으나, 공역 제한 이후 항공기들은 우회 항로를 이용해야 했고, 이로 인해 비행거리가 약 823 NM로 17% 가량 증가하였다. 또한 변경된 항로에서 상층풍의 영향을 분석한 결과, 공역 제한 이후 항로는 정풍의 영향이 강화되어 비행 효율이 추가로 감소하는 것으로 나타났다. 실제 분석 결과, TAS와 GS의 차이 평균은 전쟁 이전 -2.5 kt에서 전쟁 이후 -11.8 kt로 악화되었으며, 상층풍으로 인한 연료 소비량은 약 1,820 kg, 탄소 배출량은 약 6,552 kg 가량 증가하였다. 변경된 항로에서 연료 소비와 탄소 배출을 최소화하기 위하여 항공기가 운항하는 비행고도를 변경하여 계산한 결과, 고도에 따른 상층풍만 고려할 경우 300 hPa(29,000 ft) 기압면이 가장 정풍의 영향을 덜 받는 것으로 확인되었다. 일반적으로 국제선 항

공기는 30,000~43,000 ft의 다양한 고도를 비행하는데, 항공기 성능과 상층풍 그리고 그 외 요소들을 종합적으로 고려하여 탄소 배출량을 최소화할 필요가 있다.

본 연구는 공역 제한으로 인한 항로 변경이 단순 운항 비용 증가뿐 아니라, 환경적 측면에서도 상당한 부정적 영향을 초래하고 있음을 실증적으로 보여준다. 이러한 결과는 향후 항공 산업이 탄소 배출 저감을 목표로 지속 가능한 운항 방안을 모색할 때 다양한 요인에 따른 항로 변경 가능성까지 고려해야 함을 시사한다. 추후 연구에서는 BADA(based on aircraft data) 등 항공기 성능과 관련된 보다 정확한 데이터를 통하여 정확한 연료 소비량과 탄소 배출량을 계산하고, 연료 소비량 최소화 비행을 위하여 항공기의 비행 고도뿐 아니라, 비행시간과 비행항로, 그리고 항공기 성능 데이터를 추가 활용하여 정밀 계산할 예정이다.

Acknowledgements

본 연구의 개선을 위해 소중한 의견을 주신 익명의 두분의 심사위원들께 감사드립니다. 이 연구는 기상청 「차세대 항공교통 지원 항공기상 기술개발」(RS-2024-00403421)의 지원으로 수행되었습니다.

References

1. Aircraft Commerce, "777 fuel burn performance", 60, 2008, pp. 8-9.
2. Airportal, "Air transport statistics", 2023-2024, Available from: <https://www.airportal.go.kr/stats/transport/chartDetail4.do>
3. AMS, "Glossary of meteorology", 2025, Available from: https://glossary.ametsoc.org/wiki/Upper_air
4. Barnes, E. A., and Simpson, I. R., "Seasonal sensitivity of the Northern Hemisphere jet streams to Arctic temperatures on subseasonal time scales", *Journal of Climate*, 30(24), 2017, pp. 10117-10137.
5. Chen, C., Zhang, H., Zhang, J., Cong, L., and Lu, F., "Assessing impacts of the Russia-Ukraine conflict on global air transportation: From the view of mass flight trajectories", *Journal of Air Transport Management*, 115(1), 2024, Article 102522.
6. Core Writing Team, Lee, H., and Romero, J., "Climate change 2023 synthesis report", IPCC, Geneva, 2023, p. 4.
7. Dannet, G., Bellouin, N., and Boucher, O., "Airspace restrictions due to conflicts increased global aviation's carbon dioxide emissions in 2023", *Communications Earth & Environment*, 6, 2025, Article 52.
8. EASA, "European information sharing and cooperation platform on conflict zones", 2025, Available from: <https://www.easa.europa.eu/en/domains/air-operations/information-on-conflict-zones/european-information-sharing-and-cooperation-platform-conflict-zones>
9. EASA, "Israel and neighbouring airspace", 2023, Available from: <https://www.easa.europa.eu/en/domains/air-operations/czibs/2023-03-r3>
10. FAA, "GEN 1.7 differences from ICAO standards, recommended practices and procedures", 2025, Available from: https://www.faa.gov/air_traffic/publications/atpubs/aip_html/part1_gen_section_1.7.html
11. FAA, "Restricted airspace", 2025, Available from: [https://www.faa.gov/newsroom/restricted-airpace-0](https://www.faa.gov/newsroom/restricted-airspace-0)
12. Gibbs, W. J., and Newton, C. W., "Observational characteristics of the jet stream: A survey of the literature", *World Meteorological Organization*, Geneva, 1958, p. 1.
13. Hallam, S., Josey, S. A., McCarthy, G. D., and Hirschi, J. J. M., "A regional (land-ocean) comparison of the seasonal to decadal variability of the Northern Hemisphere jet stream 1871-2011", *Climate Dynamics*, 59, 2022, pp. 1897-1918.
14. IATA, "Executive summary: Net zero CO₂ emissions roadmap", Montreal, 2024, pp. 1-8.
15. ICAO, "Annex 2 - Rules of the air", Montreal, 2024, p. 9.

16. ICAO, "North Atlantic operations and air-space manual", Neuilly-sur-Seine, 2016, pp. 37-39.
17. Hansen, J. E., Kharecha, P., Sato, M., Tselioudis, G., Kelly, J., Bauer, S. E., Ruedy, R., Jeong, E., Jin, Q., Rignot, E., Velicogna, I., Schoeberl, M. R., von Schuckmann, K., Amponsem, J., Cao, J., Keskinen, A., Li, J., and Pokela, A., "Global warming has accelerated: Are the United Nations and the public well-informed?", *Environment: Science and Policy for Sustainable Development*, 67(1), 2025, pp. 6-44.
18. Keitz, J. F., "Comparative analysis of operational forecasts versus actual weather conditions in airline flight planning: Summary report", NASA, Washington, D.C., 2013, p. 2.
19. KOSAE, "Glossary of atmospheric environmental terms", 2025, Available from: http://kosae.or.kr/dictionary/new_sch.php
20. KOTEMS, "Aircraft fuel consumption – Ministry of Land, Infrastructure and Transport (Korea)", 2023, Available from: <https://www.kotems.or.kr/app/kotems/forward?pageUrl=/kotems/ptl/emissionstat/air/KotemsPtlEmissionstatAirAmountEnergyLs&topmenu1=02&topmenu2=04&topmenu3=01&topmenu4=01>
21. NWS, "National weather service glossary", 2025, Available from: <https://forecast.weather.gov/glossary.php?word=upper+level>
22. Rosenow, J., Fricke, H., Luchkova, T., and Schultz, M., "Impact of optimised trajectories on air traffic flow management", *The Aeronautical Journal*, 123(1260), 2019, pp. 157-173.
23. Rosenow, J., Lindner, M., and Scheiderer, J., "Advanced flight planning and the benefit of in-flight aircraft trajectory optimization", *Sustainability*, 13(3), 2021, Article 1383.
24. Soraya, A., "Annex 16 environmental protection: Volume IV, carbon offsetting and reduction scheme for international aviation (CORSA)", ICAO, Montréal, 2023, p. 9.
25. The Korean Law Information Center, "Convention on international civil aviation", Ministry of Government Legislation, 1952, Available from: <https://www.law.go.kr/LSW/trtyInfoP.do?trtySeq=3837>