

한반도 상공에서 항공 사고로 이어진 두 난류 사례들의 발생 메커니즘 연구

정희원¹⁾ · 전해영^{1)*} · 고한창^{1),2)}

¹⁾연세대학교 대기과학과, ²⁾하와이대학교 대기과학과

(접수일: 2026년 1월 12일, 수정일: 2026년 2월 15일, 게재확정일: 2026년 3월 7일)

Generation Mechanisms of Two Aviation Turbulence Events Leading to Aircraft Accidents in Korea

Hee-Won Jung¹⁾, Hye-Yeong Chun^{1)*}, and Han-Chang Ko^{1),2)}

¹⁾Department of Atmospheric Sciences, Yonsei University, Seoul, Korea

²⁾Department of Atmospheric Sciences, University of Hawai'i at Manoa, Honolulu, HI, United States

(Manuscript received 12 January 2026; revised 15 February 2026; accepted 7 March 2026)

Abstract The generation mechanisms of two turbulence events that occurred near the Korean Peninsula and led to aircraft accidents were investigated using high-resolution numerical simulations with the Weather Research and Forecasting (WRF) model. The first case occurred on 12 January 2020 at 0417 UTC: an aircraft that departed from Kitakyushu Airport, Japan, en-route to Incheon Airport, encountered moderate intensity turbulence in clear sky at an altitude of 25,000 ft (approximately 375 hPa) over Fukuoka. Turbulence was observed beneath the core of a jet stream, where wind speeds exceeded 90 m s^{-1} over South Korea and strong horizontal wind shear and deformation appeared at the location of turbulence encounter. A developed upper-level frontal system induced strong vertical wind shear and tropopause folding down to approximately 480 hPa. Despite the relatively stable stratification, the strong vertical wind shear caused the Richardson number to decrease, leading to the generation of turbulence through the Kelvin-Helmholtz instability. The second case was 27 May 2021 at 2253 UTC: an aircraft that departed from Gimpo Airport en-route to Jeju Airport encountered severe intensity turbulence at an altitude of 17,000 ft (approximately 515 hPa) over Yesan, South Korea. A localized front developed north of the turbulence encountered location and propagated southeastward, during which it generated gravity waves with a horizontal wavelength of about 10 km. The localized front induced strong vertical wind shear by the thermal wind relationship, and the propagation of the gravity waves enhanced the Kelvin-Helmholtz instability, resulting in turbulence.

Key words Aviation turbulence, Numerical simulation, Upper-level frontal system, Frontogenesis, Kelvin-Helmholtz instability

*Corresponding Author: Hye-Yeong Chun, Department of Atmospheric Sciences, Yonsei University, 50 Yonsei-ro, Seodaemun-Gu, Seoul 03722, Korea.
Phone: +82-2-2123-2692, Fax: +82-2-365-5163
E-mail: chunhy@yonsei.ac.kr

1. 서 론

항공 난류(aviation turbulence)는 항공 운항에 직접적으로 영향을 미치는 대기 중 10-1,000 m의 작은 규모의 난류로 정의된다(Lester, 1994). 승객 및 승무원의 부상으로 이어진 전체 항공기 사고 중 약 65%가 항공 난류로 인해 발생하는등, 항공 난류는 기내 안전을 위협하여 매년 수천만 달러의 경제적 손실을 발생시킨다(Sharman et al., 2012; Sharman and Lane, 2016; Sharman and Pearson, 2017). 항공 난류의 종류에는 그 원인에 따라 대류 시스템에 의해 유도되는 convectively induced turbulence (CIT), 구름이 없거나 얇은 층운형 구름만 존재하는 대기에서 주로 제트 기류 혹은 연직 및 수평 시어가 강한 지역에서 발생하는 청천난류(clear-air turbulence, CAT), 그리고 산악 지형에 의해 유도되는 산악난류(mountain wave turbulence, MWT) 등이 있다(Doyle et al., 2005; Lane et al., 2012; Sharman and Lane, 2016). 이 중 특히 CAT는 항공기의 기상 레이더로 탐지가 어려우며, 순항고도에서 갑작스럽게 조우하여 승객과 항공기의 안전을 위협한다(Chambers, 1955; Lester, 1994; Sharman et al., 2006; Kim et al., 2011).

동아시아 및 한반도 지역은 항공 교통량 증가로 항공기의 난류 조우 빈도가 증가하고 있으며, 동시에 기후 변화로 인한 난류 강도의 증가도 우려된다(Kim et al., 2023; Lee et al., 2023; Miyamoto et al., 2023; Kang et al., 2025). 2016년부터 2025년 6월까지 약 10년간 대한민국에서 발생한 항공기 사고는 총 15건이며 이 중 7건이 항공기가 난류를 조우하여 발생하였다(MOLIT-KIAST, 2025). 이 중 비교적 최근인 2020년 이후 항공기가 난류를 조우하여 발생하여 조사중인 사고는 5건으로, 이 중 3건은 조사가 종료되어 보고서가 출판되었다. 출판된 보고서를 통해 난류 조우 당시 개괄적인 기상 환경은 확인할 수 있으나, 해당 난류의 발생 메커니즘, 특성, 그리고 사례를 통한 난류 예측 시스템의 개선 방향을 제시하는 측면에서는 부족하다.

한편, 우리나라에서는 항공 운항의 안전을 위해 동아시아 지역에 대한 한국형 항공 난류 예측 시스템(Korean aviation Turbulence Guidance, KTG)이 미국 국립기상연구소(National Center for Atmospheric Research, NCAR)의 항공 난류 예측 시스템인 Graphical Turbulence Guidance 2 (GTG2) 방법론(Sharman et al., 2006)을 기반으로 개발되었다(Kim and Chun, 2011b, 2012). 또한 Graphical Turbulence Guidance 3 (GTG3) 시스템의 방법론(Sharman and Pearson, 2017)을 기반으로, 전지구 영역을 대상으로 한 한국형 항공 난류 예측 시스템(Global-Korean aviation Turbulence Guidance,

G-KTG)이 개발되었다(Lee and Chun, 2018). KTG 및 G-KTG 시스템은 우리나라 항공 기상청(Aviation Meteorological Office, AMO)에서 일 4회(0000, 0600, 1200, 1800 UTC), 30시간 예측 시간까지 3시간 간격으로 예측자료를 산출하여 항공종사자들에게 null (NIL), light (LGT), moderate (MOD), severe (SEV), extreme (EXT) 강도로 분류된 항공 난류 정보를 제공하고 있다(Kang et al., 2025).

동아시아 및 한반도 지역에서 발생하는 난류의 주요 원인들로는 겨울철과 봄철의 북반구 중위도의 제트 기류에 수반되는 강한 연직 바람 시어, 여름철 몬순 시스템과 태풍 등의 대류 시스템, 태백산맥과 소백산맥에 의해 유도되는 산악파가 있다(Kim and Chun, 2011a; Lee and Chun, 2015). 난류 발생 원인을 과학적으로 이해하고 난류 예측 시스템을 개선하기 위해 항공기가 조우한 난류들의 원천과 발생 메커니즘을 규명하는 고해상도 수치 실험들이 수행되어 왔다(Lane et al., 2003; Lane and Sharman, 2008; Trier and Sharman, 2009; Kim and Chun, 2010; Sharman and Lane, 2016; Lee and Chun, 2018; Trier et al., 2020, 2022). 특히 제트 기류와 관련된 상층 전선 영역에서의 강한 연직 및 수평 바람 시어와 대기 중 유체가 바람장에 의해 늘어지거나(stretching) 찌그러지는(shearing) 형태 변화로 정의되는 변형(deformation)의 환경은 Kelvin-Helmholtz (K-H) 불안정을 통해 CAT를 발생시키는 주요한 원인으로 알려져 있다(Dutton and Panofsky, 1970; Ellrod and Knapp, 1992; Lee and Chun, 2018). K-H 불안정은 Richardson (Ri) 수가 0.25보다 작을 때 발생하지만(Miles and Howard, 1964), 선형 수치 실험 연구들을 통해 현실적인 3차원 및 비선형 흐름의 대기에서 난류 운동 에너지(turbulence kinetic energy, TKE)가 더 큰 Ri 수에서도 존재할 수 있으며 그 임계값이 1로 완화되는 것으로 나타났다(Miles, 1986; Galperin et al., 2007; Sharman et al., 2012; Lee and Chun, 2018). Lee and Chun (2018)에서는 우리 국적기가 인천공항에서 텐진공항으로 향하던 중 서해 상공에서 조우한 moderate-or-greater (MOG; MOD, SEV, EXT 강도 포함) 난류의 발생 메커니즘을 조사하였는데, 제트 기류 북쪽의 난류 조우 지역에서 강한 수평 바람 시어와 변형, 그리고 상층 제트 시스템에 의해 발생한 강한 연직 바람 시어와 관련된 K-H 불안정이 주요한 난류 발생 원인임을 보였다. 또한, KTG 시스템은 실제 난류 조우 위치에 MOG 강도의 난류를 적절히 예측함을 보였다.

본 연구의 목적은 2020년 이후 한반도 주변에서 발생하여 항공기 사고로 이어진 두 난류 사례를 소개하고, 고해상도 수치 실험을 통해 그 발생 메커니즘을 이해하는데 있다. 또한, 각 사례에 대해 한국형 난류

예측 시스템 KTG의 성능도 확인할 것이다. 이는 난류에 대한 과학적 이해를 증진시키고, KTG의 개선 방향을 제시함으로써 궁극적으로 항공안전에 기여할 것이다. 2장에서는 자료 및 연구 방법, 3장에서는 난류 조우 사례에 대한 설명을 기술하였으며, 4장에서는 연구 결과를 분석하였으며, 5장에서 요약 및 결론을 제시하였다.

2. 자료 및 연구 방법

2.1 모델 및 관측자료

난류 조우 시점 부근의 중관 규모의 대기 흐름을 살펴보기 위해 10 km 수평 해상도를 가지는 기상청 현업 통합모델(Unified Model, UM) 기반의 전지구 예보 모델(Global Data Assimilation and Prediction System,

GDAPS) 자료를 사용하였다. 또한 난류 발생 위치와 구름 간의 근접성을 확인하기 위해 국가기상위성센터의 Geostationary Korea Multi-Purpose Satellite-2A (GK-2A) 가시 채널과 운정고도 산출 자료를 사용하였다. 고해상도 수치 실험의 경계 및 초기 조건으로는 0.25° 수평 해상도를 가지는 ECMWF Reanalysis Data Version 5 (ERA5; Hersbach et al., 2020) 재분석 자료를 사용하였다. 또한 UM-GDAPS 자료와 우리나라 기상청에서 매일 0000, 1200 UTC에 비양하는 고층 레원존데 자료를 사용하여 고해상도 수치 실험 결과를 비교 검증하였다.

2.2 수치 모델 설정

두 난류 사례의 발생 메커니즘을 밝히기 위해 NCAR에서 개발된 Advanced Research version of the Weather

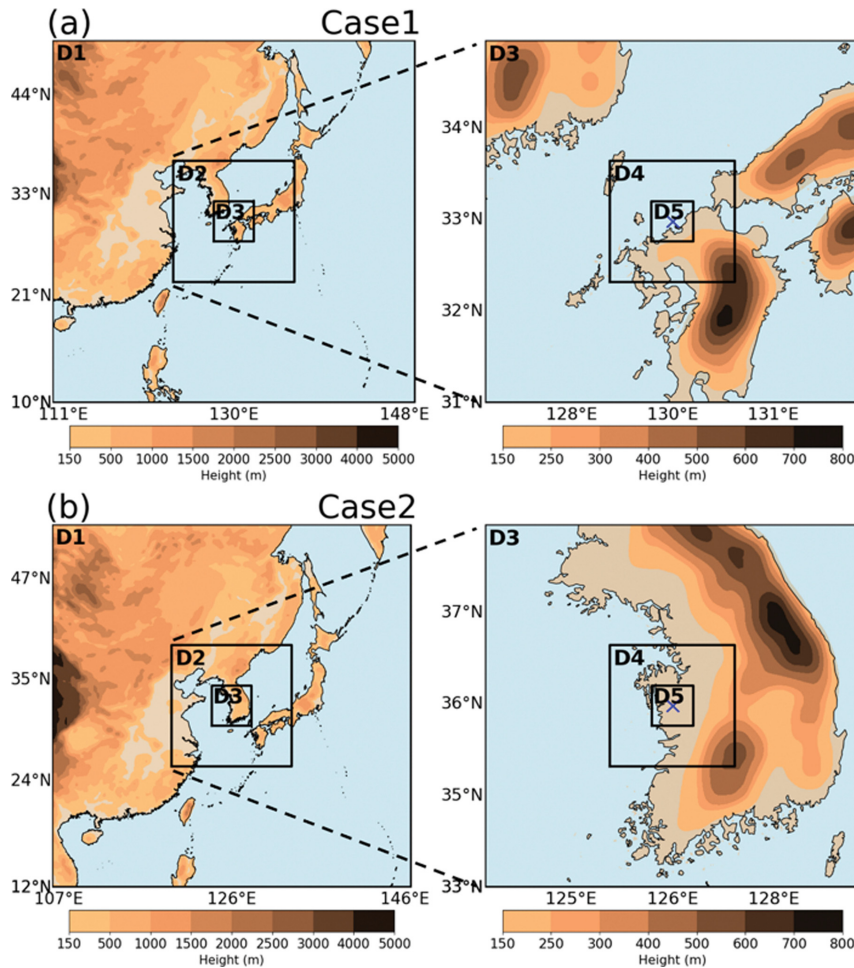


Fig. 1. Locations of five domains for each case (D1 with $\Delta x = 27$ km, D2 with $\Delta x = 9$ km, D3 with $\Delta x = 3$ km, D4 with $\Delta x = 1$ km, and D5 with $\Delta x = 0.333$ km). The location where the aircraft encountered turbulence is depicted as a blue "X" marker.

Research and Forecasting (WRF-ARW) 모델 버전 4.6.1 (Skamarock et al., 2019a)을 사용하여, 기상청 슈퍼컴퓨터(두루) 공동활용 시스템(<https://www.kma.go.kr/super/>)에서 수치 실험을 수행하였다. Figure 1은 각 사례에 대해 항공기가 조우한 난류의 발생 위치를 중심으로 설정한 총 5개의 도메인 영역을 나타내며, 첫 번째 도메인부터 다섯 번째 도메인까지 수평 격자(Δx)는 각각 27, 9, 3, 1, 및 0.333 km로 설정하였다. 난류 조우 부근의 소규모 대기 현상까지 모의하기 위해서는 1 km 미만의 수평 격자를 갖는 고해상도 도메인이 필요하며, 여러 선행연구에서 사용한 바가 있다 (예, Kim and Chun, 2012; Zovko-Rajak and Lane, 2014; Trier and Sharman, 2018; Trier et al., 2020, 2022; Lee et al., 2025). 연직으로는 지표부터 20 hPa 까지 100 m의 균등 격자로 구성하여 226개의 층을 설정하였다. Skamarock et al. (2019b)는 전지구 또는 지역모델에서 운동에너지 스펙트럼과 Ri 수 확률분포의 근사적인 수렴을 달성하기 위해서는 연직 격자가 200 m 이하여야 함을 강조하였으며, 관성-중력파는 연직 격자(Δz)가 100 m 일 때 성층권에서 뚜렷하게 모의되어, 수치 실험에서의 연직 해상도의 중요성을 시사하였다. 본 연구에서는 Skamarock et al. (2019b)

의 결과를 고려하여 전체 5개의 수평 도메인에 대해서 모두 100 m의 고해상도 연직 격자를 설정하였다. 항공 난류의 수치 실험에서 이와 같은 고해상도 연직 격자의 사용이 더욱 중요한 것은, 난류의 주요 지표가 되는 바람의 연직 시어 및 대기 안정도의 계산이 모델의 연직 해상도에 전적으로 의존하기 때문이다.

WRF 수치 실험에 사용한 물리 모수화는 다음과 같다. 행성 대기 경계층 모수화는 Mellor-Yamada-Janjić (MYJ) 방안(Mesinger, 1993; Janjić, 1994)을 모든 도메인에 적용하였다. 여기서 MYJ 방안은 PBL 뿐만 아니라 자유대기에서도 연직 혼합을 고려하며, 연직 바람 시어와 부력 효과에 따른 TKE의 생성, 수송, 소산의 균형 방정식을 통해 모델 격자에서 직접 분해되지 않는 아격자(subgrid-scale) TKE(이하 S-TKE)를 예측한다. 이때

$$\text{gradient Richardson 수, } Ri_g(Ri_g = \frac{\beta g \partial \theta_v / \partial z}{(\partial U / \partial z)^2 + (\partial V / \partial z)^2},$$

u 와 v 는 각각 동서 방향 및 남북 방향 바람 성분, β 는 $1/273$, θ_v 는 가온위)가 임계값(0.505; Janjić, 2002)보다 작을 때 0이 아닌 S-TKE가 발생하거나 존재할 수 있다. MYJ 방안은 여러 항공 난류 사례 연구에서 사용된 바 있다(Kim and Chun, 2012; Lee and Chun,

Table 1. Configuration of the Weather Research and Forecasting (WRF) Model in this study.

Domains and Time Controls						
Initial and Boundary Conditions		ERA5 Reanalysis (0.25° × 0.25°) model level, hourly				
Horizontal Domain		D1	D2	D3	D4	D5
		27 km	9 km	3 km	1 km	0.333 km
181 × 181						
(Case 1, 2) Two-way nesting, (Case 2) One-way nesting						
Vertical Domain		226 eta layers ($p_{top} = 20$ hPa)				
Constant vertical grid spacing of about 100 m						
Time Step		15 s	5 s	1.666 s	0.555 s	0.185 s
Integration Time		Case 1	0600 UTC 11-0600 UTC 12 January 2020 (24 hours) for D1, 2 1800 UTC 11-0600 UTC 12 January 2020 (12 hours) for D3-5			
		Case 2	0000 UTC 27-0000 UTC 28 May 2021 (24 hours) for D1, 2 1200 UTC 27-0000 UTC 28 May 2021 (12 hours) for D3-5			
Physics Parameterization Schemes						
Microphysics Scheme		WRF Single-moment 6-class				
Boundary Layer Scheme		Mellor-Yamada-Janjić (MYJ)				
Radiation Scheme		RRTM Longwave / Dudhia Shortwave				
Land Surface Model		Unified Noah Land Surface Model				
Cumulus Parameterization Scheme		Kain-Fritsch (Only D1, 2)				
Eddy Coefficient Option		Horizontal Smagorinsky 1st order closure				

2018; Trier and Sharman, 2018; Trier et al., 2022, Lee et al., 2025).

장파 복사 방안은 RRTM 방안(Mlawer et al., 1997)을 사용하였으며, 단파 복사 방안은 Dudhia 방안(Dudhia, 1989)을 사용하였다. 지표면 모델은 Unified Noah Land-Surface 모델(Tewari et al., 2004)을 사용하였다. 적운 모수화 방안은 Kain-Fritsch 방안(Kain, 2004)을 도메인 1과 2에만 적용하였으며, 미세구름 모수화는 WRF Single-moment 6-class (WSM6) 방안(Hong and Lim, 2006)을 모든 도메인에 적용하였다. 수평 혼합은 Smagorinsky 1st order closure (Skamarock et al., 2019a)를 사용하였다.

상층 경계 조건으로는 중력파의 상부 경계 반사를 방지하기 위해, 모델 상단으로부터 7 km 아래까지 Rayleigh 감쇠를 적용한 스펙트럼을 설정하였다. 모든 도메인에 two-way nesting을 적용하였으며 사례 2에 대해서는 피드백 효과의 여부에 따른 모의 결과를 비교하기 위해 추가적으로 one-way nesting 실험을 수행하였다(Table 1).

2.3 KTG 시스템 자료

KTG 시스템은 2011년 12 km의 해상도를 갖는 UM 지역 예보모델(Regional Data Assimilation and Prediction System, RDAPS)을 기반으로 개발되었으나(Kim and Chun, 2011b), 2019년 4월부터 기상청의 RDAPS 운영이 종료되면서 수평 해상도 10 km의 전구 GDAPS 자료를 동아시아 영역에서 12 km 수평 해상도로 변환한 자료를 사용하여 KTG 시스템을 구성하고 있다. 기상청 현업 예보 모델의 결과를 이용하여 구성되는 KTG 시스템에 대한 간략한 설명은 다음과 같다. 1) 동아시아 영역에서 우수한 예측성을 보인 상층 및 중층 각 20개의 진단지수들을 GDAPS 결과를 이용하여 계산하고, 2) 장기간 조종사 보고(Pilot Reports; PIREPs) 자료를 이용하여 결정된 개별 진단지수들의 강도별 임계값을 1차원 mapping 함수에 적용하여 0부터 1 사이의 값으로 표준화하며, 3) 개별 진단지수들의 예측성에 따라 가중치를 부여하여 하나로 결합한 뒤, LGT, MOD, SEV 강도에 대응되는 0.3, 0.475, 0.75의 임계값을 적용하여 최종 KTG 자료를 표출한다. KTG에 대한 자세한 설명은 Kim and Chun (2011b)와 Kang et al. (2025)에 명시되어 있다. 본 연구에서는 각 난류 조우 사례에 대하여 당시 유효하였던 KTG 시스

템의 예측 결과를 논의하기 위해 국가기후데이터센터로부터 난류 조우 당시의 시간과 가장 가까운 분석 및 예측 시간의 KTG 시스템의 예측 자료를 제공받았다.

3. 난류 조우 사례 및 사용한 자료

본 연구에서는 2020년 이후 우리나라에서 발생한 항공기 사고 중, 조사가 완료되어 난류 조우가 사고의 원인으로 결론지어 보고서가 출판된 3건의 사례 중 20,000 ft를 기준(Kim and Chun, 2011b, 2012)으로 상층과 중층 고도 사례를 각각 1건씩, 총 2건의 사례를 연구 대상으로 선정하였다. 두 사례의 항공기 난류 조우 시간, 위치, 고도, 그리고 조우한 난류의 강도는 Table 2에 보였다.

항공기가 난류를 조우한 시점 부근의 비행 상황과 난류의 강도를 분석하기 위해, 일본 운수안전위원회와 우리나라 국토교통부 항공철도사고조사위원회로부터 사고 조사에 사용된 Flight Data Recorder (FDR)의 그림 자료를 제공받았다(Figs. 2c-d, and 4c). FDR은 상업용 항공기에 설치되어 연직 및 수평 가속도, 고도 변화율 그리고 자세 등의 변수를 포함한 비행 자료가 기록된다. 연직 및 수평 가속도의 변화 기록을 통해 난류 강도를 추정할 수 있으며, 가속도의 변화에 따른 난류 강도의 분류 기준은 다음과 같다, MOD 강도는 0.5~1.0 g의 가속도 변화(여기서 g는 중력가속도를 의미함), SEV 강도는 1.0 g 초과 가속도 변화, LGT 강도는 MOD 강도보다 약한 강도, 그리고 EXT 강도는 SEV 강도보다 강한 강도로 정의된다(WMO, 2007). 또한 항공기의 난류 조우 지점과 비행 궤적을 확인하기 위해 위도, 경도 및 고도 정보를 포함한 Automatic Dependent Surveillance-Broadcast (ADS-B) 기반의 항적 자료를 Flightradar24 (<https://www.flightradar24.com/>)로부터 제공받았다(Figs. 2a, b, 4a, and b).

3.1 사례 1

Figure 2는 사례 1의 항공기 운항경로와 난류를 조우한 위치(Figs. 2a, b), 그리고 일본 운수안전위원회로부터 제공받은 FDR의 수평 및 수직 가속도(Fig. 2c), 회전각 및 방위각(Fig. 2d), 그리고 정풍 및 측풍 성분(Fig. 2e) 풍속 그래프를 나타낸다. 2020년 1월 12일 0406 UTC에 일본 기타큐슈 공항에서 이륙하여 인천국제공항으로 향하던 B737-800 기종의 항공기가

Table 2. Information on turbulence encountered by aircraft in Case 1, and 2.

	Time	Location	Altitude	Intensity
Case 1	0417 UTC 12 January 2020	130.3°E, 33.7°N	25,000 ft (≈ 375 hPa)	MOD
Case 2	2308 UTC 27 May 2021	126.8°E, 36.45°N	17,000 ft (≈ 515 hPa)	SEV

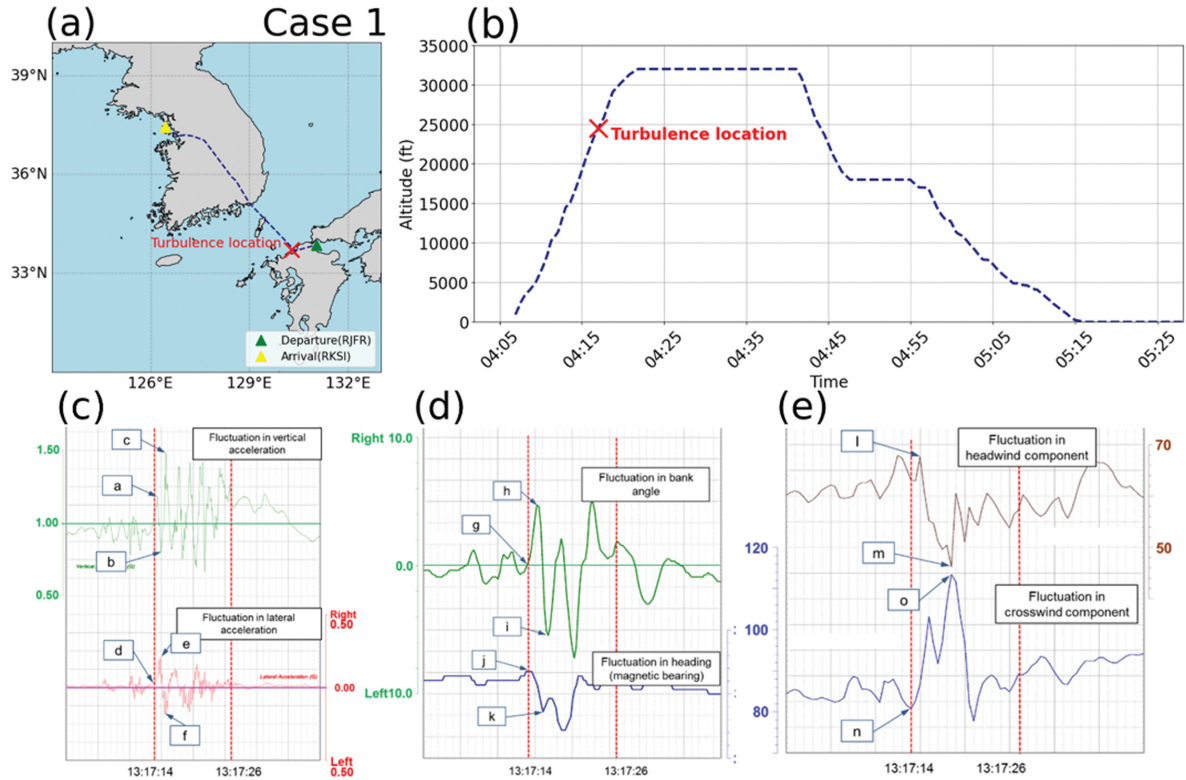


Fig. 2. (Case 1) ADS-B based horizontal (a) and vertical (b) flight routes with departure (green triangle), arrival (yellow triangle), and turbulence encounter location (red “X”). Flight Data Recorder (FDR) figure from the Japan Transport Safety Board are shown: (c) vertical (thin green) and lateral (red) acceleration, (d) bank (thick green) and heading (thick blue) angle, and (e) headwind (gray) and crosswind (thin blue) component.

G339 항로에서 상승하던 도중 이륙 11분 후인 0417 UTC에 후쿠오카 상공 약 25,000 ft(≈ 375 hPa)에서 난류를 조우하였다(Figs. 2a, b). 04:17:14 UTC부터 04:17:26 UTC까지 약 12초 동안 항공기는 급격한 수직 및 수평 가속도의 변화를 경험하였다. 수직 가속도의 최대 변화는 04:17:15 UTC에 0.8 g에서 1초 후 1.49 g로 0.69 g의 가속도 변화를 경험하였다. 수평 가속도는 수직 가속도의 변화가 최대인 시점에, Right (R) 0.2 g에서 Left (L) 0.18 g로 변화하여 0.38 g의 변화를 경험하였다(Fig. 2c). 회전각은 마찬가지로 수직 가속도의 변화가 최대인 시점에 R 4.7°에서 L 5.5°로 변화하였으며 방위각은 317°에서 314°로 변화하였다(Fig. 2d). 또한 04:17:14 UTC부터 04:17:19 UTC까지 5초 동안 정풍 성분이 68 kt에서 44 kt로 24 kt 감소하였으며 좌측 측풍 성분이 82 kt에서 114 kt로 32 kt 증가하였다(Fig. 2e). 따라서, 사례 1에서 항공기는 MOD 강도의 난류를 조우하였으며, 갑작스러운 측풍 성분의 증가로 뚜렷한 회전각과 방위각의 변화가 나타났다. 이러한 난류 조우로 인해 후방 갤리 중앙에

서 있던 객실 승무원 1명이 넘어지면서 우측 발목 골절 부상을 입었고, 항공기 사고로 분류되어 조사되었다(JTSD, 2021).

수치 실험의 결과를 분석하기에 앞서, 항공기가 난류를 조우한 시간과 가장 가까운 UM-GDAPS 자료와 GK-2A 위성 자료를 이용하여 중관 배경을 분석하였다. Figure 3은 UM-GDAPS에서 모의된 2020년 1월 12일 0000 UTC (+03 h)의 평균 해면기압(Fig. 3a)과 난류를 조우한 고도와 가장 가까운 300 hPa 등압면의 수평 풍속, 지오펜셀 고도 및 온도 분포(Fig. 3b), 그리고 난류 조우 시간과 가장 가까운 가시 채널 영상(Fig. 3c)과 운정고도(Fig. 3d)를 나타낸다. 먼저 사례 1의 평균 해면기압 패턴에서는 중국 동부 지역 중심에 강한 고기압이 자리 잡고 있는 반면, 한반도 동쪽과 일본 해역 일대에는 저기압 세력이 위치하여 한반도 지역에 동서 방향으로 완만한 기압 경도가 형성되어 있었다(Fig. 3a). 300 hPa 등압면에서는, 한반도 남부를 관통하여 동아시아를 가로지르며 난류 조우 위치를 포함하는 최대 풍속 94 m s⁻¹의 제트 기류가

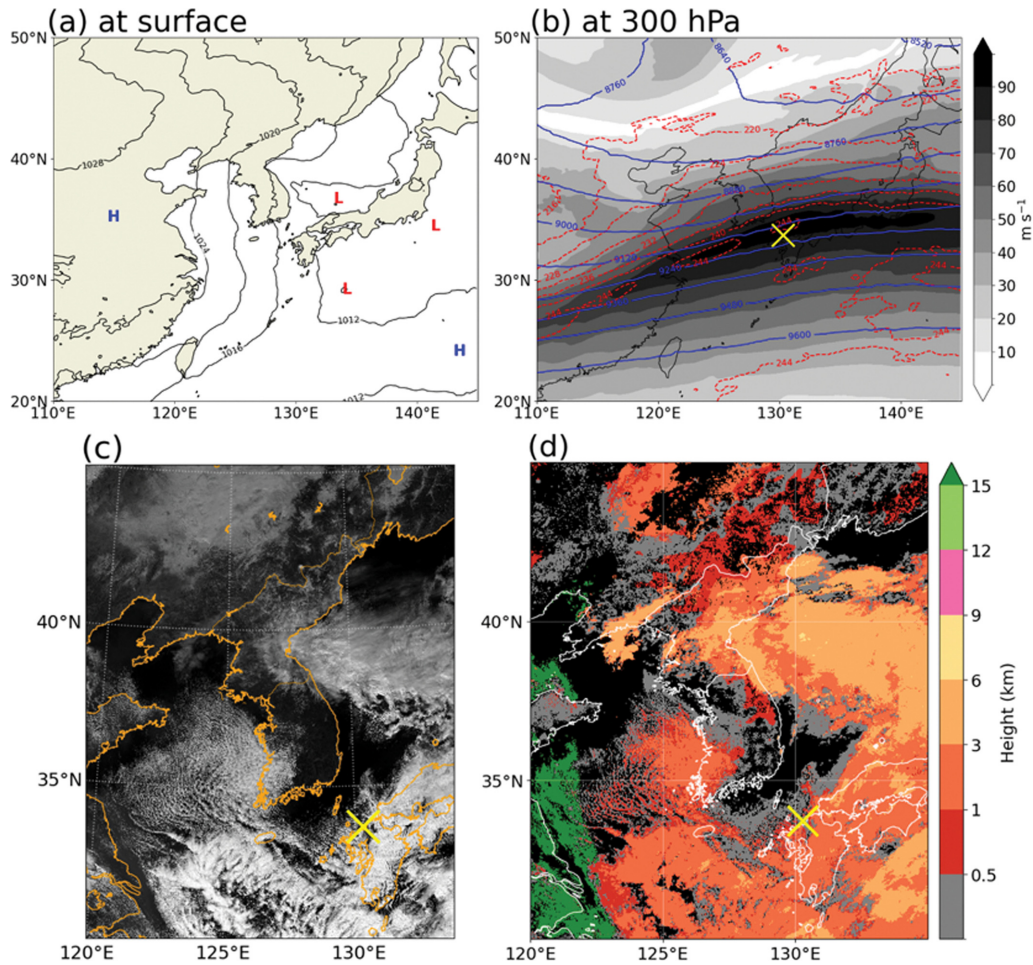


Fig. 3. (Case 1) (a) sea level pressure and (b) geopotential height (blue solid line) and temperature (red solid line) superimposed on horizontal wind speed (shading) at 300 hPa at 0000 UTC 12 Jan 2020 (+03 h) from Unified Model (UM) GDAPS data of KMA, and (c) VIS channel image of GK-2A and (d) cloud top height over the Korean Peninsula at 0418 UTC 12 Jan 2020. The location where the aircraft encountered turbulence is indicated by a yellow “X” marker. Contour intervals of the sea level pressure, geopotential height, and temperature are 4 hPa, 120 gpm, and 4 K, respectively.

나타났으며, 한반도 동쪽으로 상층 기압골이 형성되어 있었다. 또한 한반도 지역의 강한 남북 방향 온도 경도가 최대 풍속 영역의 북쪽에서 나타났다(Fig. 3b). 위성 자료를 살펴보면, 난류 조우 지점 부근의 구름은 1 km 이하의 하층운으로 확인되었다(Figs. 3c, d). 난류 조우 당시의 항공기 고도는 약 7.6 km로, 구름으로부터 약 6 km 이상의 수직 거리 차이가 있었으며, 난류 조우 당시의 항공기 주변의 대기는 청천 상태였다.

3.2 사례 2

Figure 4는 사례 2의 항공기의 운항경로와 난류를

조우한 위치(Figs. 4a, b), 그리고 우리나라 국토교통부 항공철도사고조사위원회로부터 제공받은 FDR 그래프이다; 연직 가속도(빨간색 실선), 기압 고도(녹색 실선), 연직 속도(마젠타색 실선; Fig. 4c). 2021년 5월 27일 2253 UTC에 김포공항에서 이륙하여 제주공항으로 향하던 B767-300 기종의 항공기가 16,000 ft에서 28,000 ft로 구름 회피를 목적으로 상승하던 도중 2308 UTC에 충남 예산 상공 약 17,000 ft (≈ 515 hPa)에서 난류를 조우하였다(Figs. 4a, b). 항공기는 23:08:19 UTC부터 23:08:23 UTC까지 4초간 난류를 경험하였으며, 이 사이에 최대 수직 가속도는 1.86 g, 최소 수직 가속도는 0.5 g가 기록되었으며, 그 차이는 1.36 g

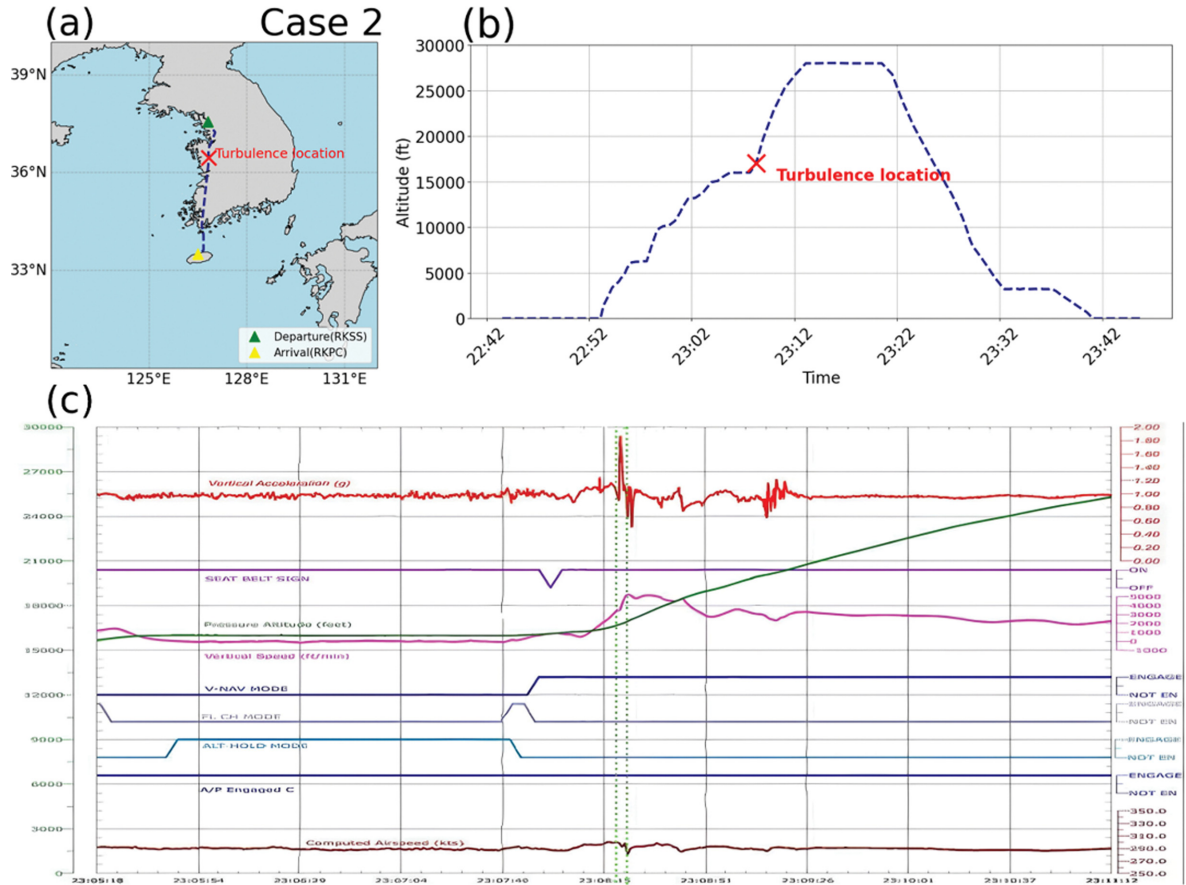


Fig. 4. (Case 2) (a), (b) same as Fig. 2, and (c) Flight Data Recorder (FDR) data provided by the Ministry of Land, Infrastructure and Transport of South Korea showing vertical acceleration (red) and vertical speed (magenta), pressure altitude (green) and other parameters around the turbulence encounter.

이었다. 항공기는 16,000 ft에서 28,000 ft로 분당 3,000 ft의 수직 속도로 고도 상승을 시작한(23:07:43 UTC) 이후, 난류를 조우한 시점인 23:08:19 UTC의 수직 속도는 분당 5,100 ft로 증가하였으며, 그 후 다시 분당 3,000 ft를 유지하였다(Fig. 4c). 사고조사 보고서에 따르면 외부온도, 바람, 그리고 받음각(angle of attack) 등에는 주목할 만한 변화가 없었다. 따라서 사례 2에서 항공기는 SEV 강도의 난류를 조우하였으며, 이로 인해 객실 승무원 1명이 넘어지면서 좌측 발목 골절을 입었고, 항공기 사고로 분류 및 조사되었다(ARAIB, 2022).

Figure 5는 UM-GDAPS에서 모의된 2021년 5월 28일 0000 UTC (+00 h)의 평균 해면기압(Fig. 5a)과 난류를 조우한 고도와 가장 가까운 500 hPa 등압면의 수평 풍속, 지오폰텐셜 고도 및 온도 분포(Fig. 5b), 그리고 난류 조우 시간 부근의 가시 채널 영상(Fig. 5c)

과 운정고도(Fig. 5d)를 보인 것이다. 사례 2의 평균 해면 기압 패턴에서는 발해만에 중심을 둔 저기압이 위치하여 한반도 중부까지 걸쳐 있었다(Fig. 5a). 이 저기압 세력은 500 hPa까지 유지되어 한반도 서쪽에 뚜렷한 기압골이 나타났으며, 저기압 지역에 인접한 남쪽에서 한반도 북부까지 40 m s⁻¹ 이상의 강한 남서풍에 의해 한랭 건조한 대륙성 공기가 한반도 지역에 침투하였다(Fig. 5b). 이에 따라 서해, 한반도 중부, 그리고 동해에 걸쳐 한랭 전선대가 형성되었고, 전선 영역에서 구름대가 발달하였다(Fig. 5c). 난류 조우 지점 부근의 구름의 운정고도는 3~6 km이었으며 난류 조우 지점의 값은 4.6 km로 당시 항공기는 운정고도로부터 약 400 m 상공을 통과하였다(Fig. 5d). 이는 사례 2의 사고조사 보고서(ARAIB, 2022)에서 조종사가 조종석 레이더로 확인된 구름을 상승하여 수직으로 회피하였다는 진술과 일치하였다.

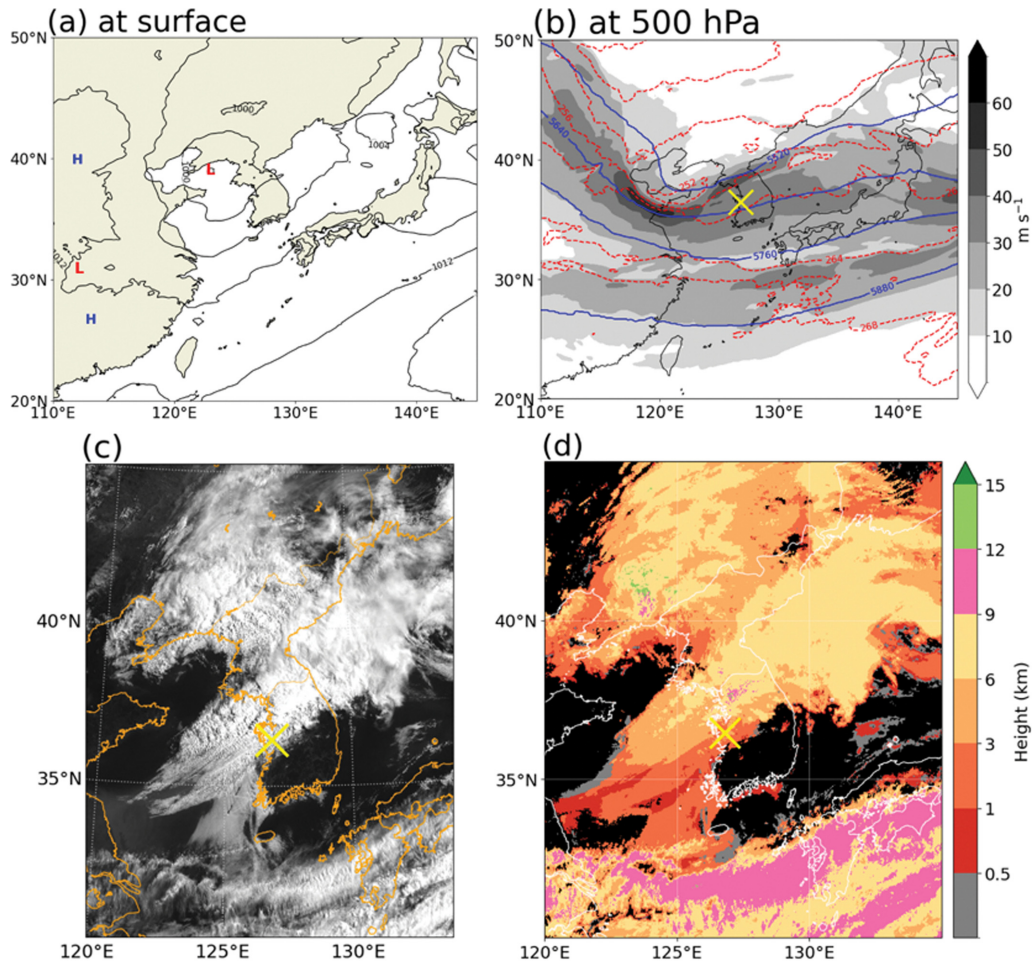


Fig. 5. (Case 2) Same as Fig. 3, except that (a) sea level pressure and (b) geopotential height and temperature with horizontal wind are shown at 500 hPa at 0000 UTC 28 May 2021 (+00 h), and (c) VIS channel image and (d) cloud top height from GK-2A are at 2308 UTC 27 May 2021.

4. 연구 결과

4.1 고해상도 수치 실험

고해상도 수치 실험의 결과를 통해 난류 조우 환경과 발생 메커니즘을 분석하기에 앞서, 우리나라 기상청에서 현업 운영 중인 UM-GDAPS 자료와 레윈존데 자료를 통해 WRF 수치 실험 결과를 검증하였다. Figure 6은 각 사례의 난류 조우 시간과 가장 가까운 수치 실험의 도메인 1에서 모의된 동아시아 지역의 지상 기압(Figs. 6a, c)과 수평 풍속, 지오포텐셜 고도, 그리고 온도 분포(Figs. 6b, d)를 보인 것으로, 각각 Figs. 3a, b와 5a, b에 대응된다. 사례 1에서 수치 실험 결과의 지상 기압(Fig. 6a)에서는 한반도 지역의 동서 방향으로의 완만한 기압 경도 패턴이 유사하게 나

타났으며, 300 hPa 등압면에서는 남북 방향으로 조밀하게 배치된 등고선 및 온도선 패턴과 약 북위 32도, 동경 130도 부근에 최대 풍속을 보이는 제트 기류가 유사하게 모의되었다(Fig. 6b). 사례 2 수치 실험의 도메인 1에서 모의된 지상 기압은 발해만 지역에 중심을 둔 1,000 hPa 영역이 UM-GDAPS에 비해 다소 넓게 모의되었고(Fig. 6c), 500 hPa 등압면에서의 풍속의 경우 발해만의 기압골 남쪽에서 UM-GDAPS보다 작게 모의되었으나(Fig. 6d) 대체로 유사하게 모의되었다. 종합적으로, WRF 수치 실험의 결과는 UM-GDAPS와의 비교에서, 수평 및 연직 해상도 차이 등의 이유로 미세한 차이는 있으나 전반적으로 일관되게 모의되었다.

항공기의 난류 조우 시간과 가장 가까운 시간에 비

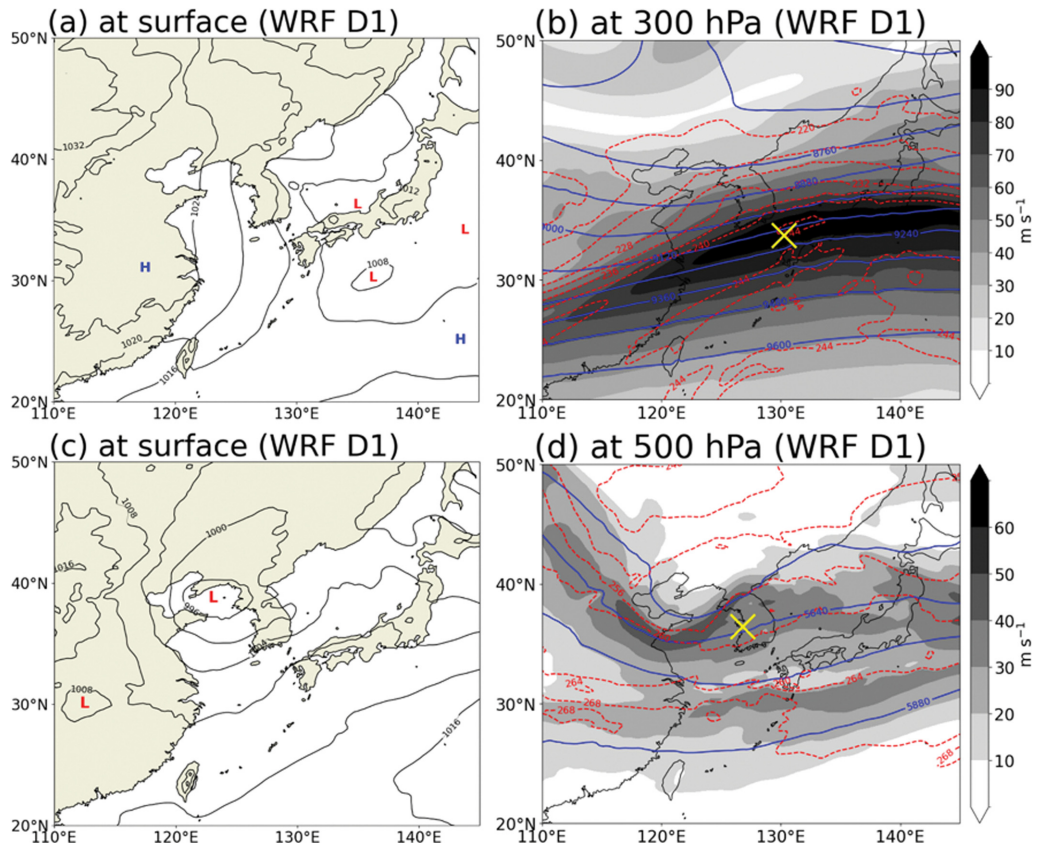


Fig. 6. (Case 1) (a) and (b) same as Fig. 3 (a, b) but from WRF model output in D1 at 0300 UTC 12 Jan 2020, and (Case 2) (c) and (d) same as Fig. 5 (a, b) but from WRF model output in D1 at 0000 UTC 28 May 2021.

양된 레윈존데 관측자료를 이용하여 풍속, 온도, 그리고 온위 변수들을 수치 실험 결과와 비교하였다. 사례 1에 해당하는 Figs. 7a, b는 포항 관측소(Station No. 47138)에서 2020년 1월 12일 0000 UTC에 비양된 레윈존데와 같은 시간의 WRF 도메인 1에서 모의된 같은 변수들 간의 비교를 보여준다. 약 10 km 이하 풍속의 증가와 감소 기울기가 매우 유사하며, 특히 레윈존데 자료에서 관측된 약 9 km에서 12 km 사이 풍속의 증감 패턴을 수치 실험이 유사한 고도에서 모의하였다(Fig. 7a). 수치 실험 결과의 온도와 온위 역시 관측자료와 매우 유사하게 나타났으며, 약 8 km의 기온 역전 현상 또한 수치 실험에서 모의되었다(Fig. 7b). 사례 2에 해당하는 Figs. 7c, d는 후산도 관측소(Station No. 47169)에서 2021년 5월 27일 1200 UTC에 비양된 레윈존데 관측과 수치 실험의 도메인 1에서 모의된 변수들을 보인 것이다. 풍속의 증가 및 감소 기울기와 약 12 km에서 나타나는 최대 풍속 지점이 수치 실험에서 유사하게 모의되었다(Fig. 7c). 온도와 온위 또한 수치 실험 결과는 관측과 매우 유사하게 모의되

었으며 약 9 km의 기온 역전 역시 수치 실험 결과에서 동일하게 나타났다(Fig. 7d). 이렇듯 WRF 수치 실험 결과가 레윈존데 관측 자료와 유사하게 모의된 데에는 $\Delta z \approx 100$ m의 세밀한 연직 해상도가 중요하게 기여한 것으로 생각된다(Lian et al., 2024). 종합적으로, 본 연구에서 사용한 WRF 수치 실험 결과는 난류의 발생 메커니즘 분석에 활용하기에 충분한 신뢰성을 갖춘 것으로 판단되었다.

4.1.1 수치 실험 결과 분석(사례 1)

4.1.1.1 난류 조우 환경 분석

Figure 8은 도메인 2($\Delta x = 9$ km)의 사례 1에서 항공기가 난류를 조우한 시간과 고도인 2020년 1월 12일 0417 UTC, 375 hPa 등압면의 수평 풍속(Fig. 8a), 수평 바람 시어(Fig. 8b), 변형(Fig. 8c), 연직 바람 시어(Fig. 8d), Ri 수(Fig. 8e), 그리고 연직 풍속(Fig. 8f)을

보인 것이다. 여기서 변형은 $\sqrt{\left(\frac{\partial u}{\partial x} - \frac{\partial v}{\partial y}\right)^2 + \left(\frac{\partial v}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial y}\right)^2}$

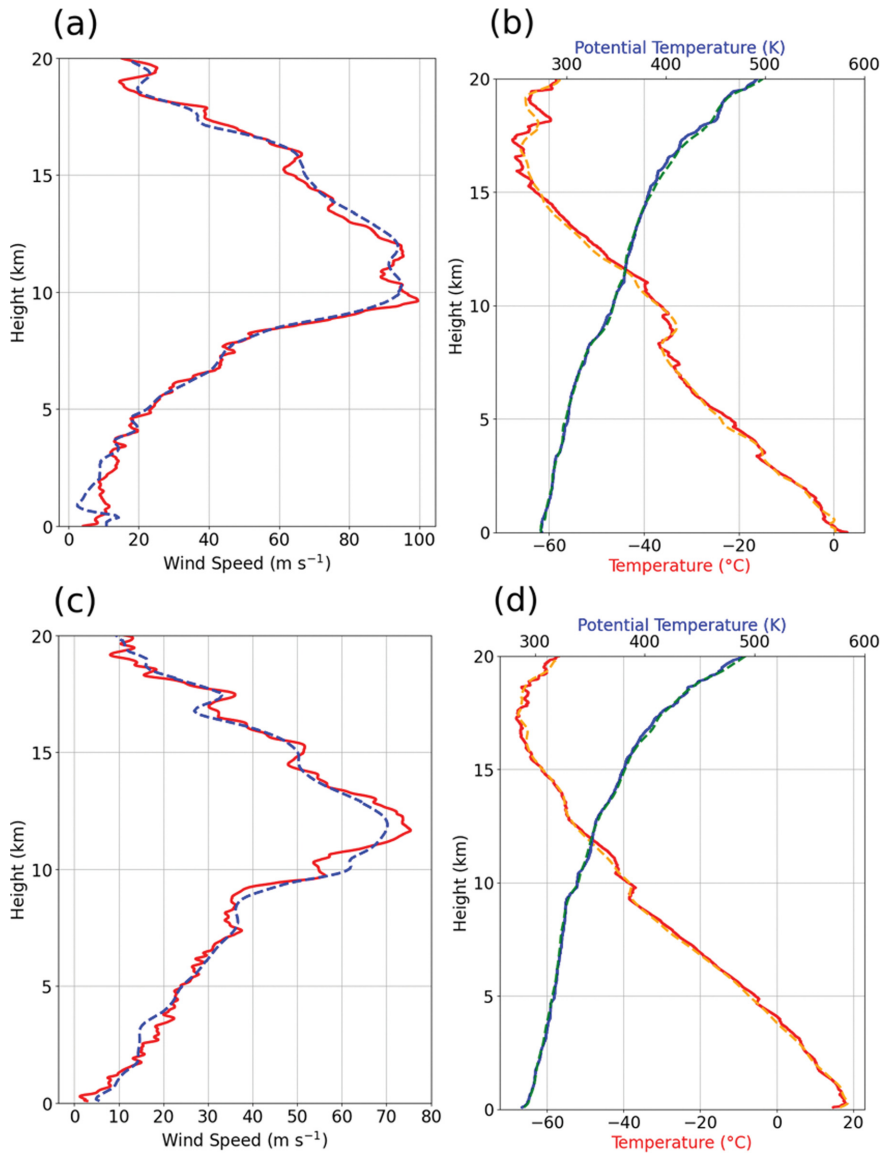


Fig. 7. (a) Wind speed and (b) temperature and potential temperature from rawinsonde launched at Pohang station (solid lines) and WRF model output (dashed lines) at 0000 UTC 12 Jan 2020 (Case 1). (c), (d) same as (a), (b), respectively, but for rawinsonde launched at Heuksando station at 1200 UTC 27 May 2021 (Case 2).

로 계산되었다. 난류 조우 지점은 일본 남서쪽 지역에서 70 m s^{-1} 이상의 풍속과 남서풍 계열의 제트 기류에 인접한 북쪽에 위치하였으며(Fig. 8a), 해당 지역에서는 제트 기류를 중심으로 남북으로 강한 수평 바람 시어가 나타났다. 난류 조우 지점에서 $-11.6 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$ 의 강한 수평 바람 시어는 FDR 자료(Fig. 2c)에서 항공기가 0.38 g 의 수평 가속도 변화를 경험한 것을 뒷받침한다(Fig. 8b). 또한 난류 조우 지점에는 강한 변

형이 나타났는데(Fig. 8c), 이는 수평 온도 경도를 증가시키고, 온도풍 관계를 통해 강한 연직 바람 시어를 발생시켰다(Fig. 8d). 제트 기류를 따라 Ri 수가 1 이하인 영역이 나타났으며, 난류 조우 지점의 Ri 수는 약 0.67으로 나타났다(Fig. 8e). 난류 조우 지점에서 연직 속도 0.5 m s^{-1} 이상의 뚜렷한 파동 패턴은 나타나지 않았으며(Fig. 8f), 도메인 3-5($\Delta x = 3-0.333 \text{ km}$)에서도 파동 패턴은 모의되지 않았다.

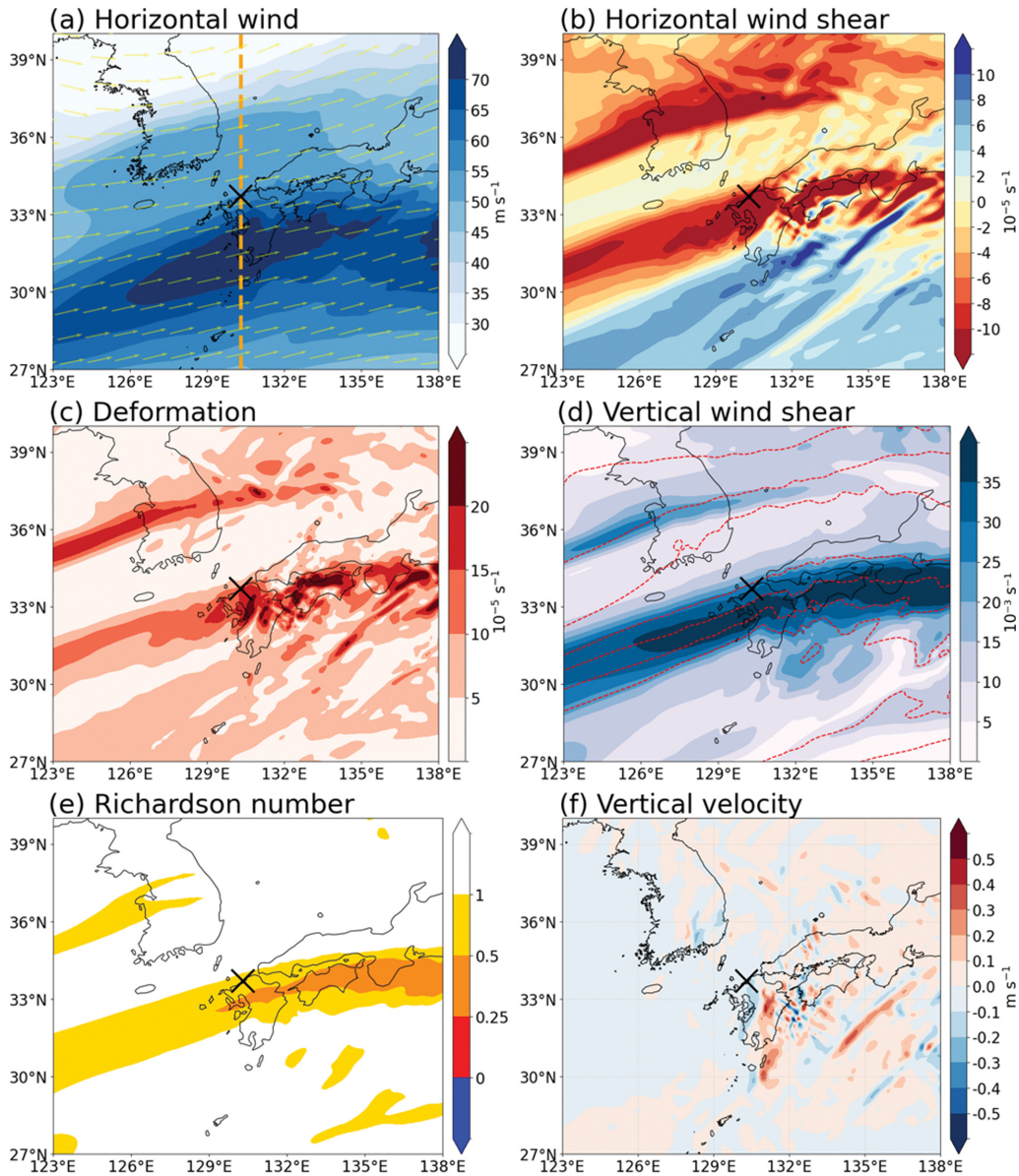


Fig. 8. (a) horizontal wind speed (shading) and direction (vectors), (b) horizontal wind shear, (c) deformation, (d) vertical wind shear (shading) and temperature (contours; 4 K intervals), (e) Richardson (Ri) number, and (f) vertical velocity at 375 hPa obtained from the WRF model D2 at 0417 UTC 12 Jan 2020. The location where the aircraft encountered turbulence is depicted as a black “X” marker.

Figure 9는 도메인 $5(\Delta x = 0.333 \text{ km})$ 에서 난류 조우 지점의 Ri 수, 연직 바람 시어, 그리고 Brunt-Väisälä frequency (N^2)의 연직 프로파일을 보인 것으로, 난류 조우 고도는 검은색 가로 점선, 그리고 Ri 수 연직 프로파일에서 회색 점선은 왼쪽부터 각각 0.25, 0.5, 그리고 1이다. 난류 조우 고도 부근인 380-330 hPa에서 1

이하의 Ri 수 영역이 존재하였으며 난류 조우 고도에서의 값은 0.62로 나타났다(Fig. 9a). 연직 바람 시어의 최대값은 난류 조우 상부인 346 hPa에서 $4.09 \times 10^{-1} \text{ s}^{-1}$ 으로 나타났으며(Fig. 9b), N^2 는 난류 조우 고도를 포함한 주변 고도에서 높은 안정도를 보였다(Fig. 9c). 또한 항공기는 난류 조우 당시 32,000 ft까지 가

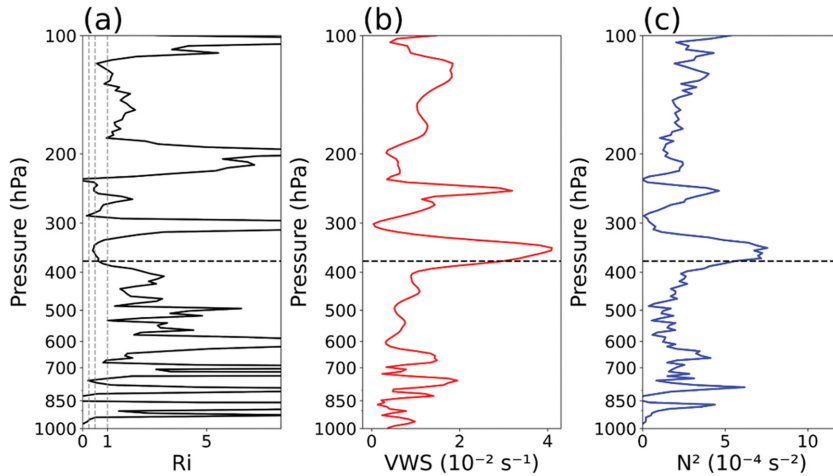


Fig. 9. Vertical profiles of (a) Richardson number, (b) vertical wind shear, and (c) Brunt-Väisälä frequency obtained from WRF model D5 at 0417 UTC 12 Jan 2020, at the grid point closest to the turbulence location (33.699°N, 130.299°E). The horizontal black dashed lines in all panels indicate the turbulence encounter altitude, and the vertical gray dashed lines in (a) represent $Ri = 0.25, 0.5, 1$, respectively.

파르게 상승을 하고 있었으므로(Fig. 1b), Ri 수가 더 작은 지역을 향해 운항하였을 수 있다.

4.1.1.2 난류 발생 메커니즘 분석

Figure 10은 Fig. 8a의 주황색 점선을 따라 난류 조우 지점을 가로지르는 도메인 2에서 난류 조우 시간에 모의된 수평 풍속, 연직 바람 시어, N^2 , Ri 수, 그리고 아격자 난류 운동에너지의 위도-고도 연직 단면을 나타낸다. 모든 그림에 검은색 점선의 등온위선, 역학적 대류권계면을 나타내는 파란색 두꺼운 실선의 2 potential vorticity unit (PVU) 등치선이 중첩되어 있다. 제트 기류의 코어는 북위 약 35도와 250 hPa의 고도에 위치하며, 제트-전선 시스템에 동반되는 제트 코어 아래에 기울어진 등온위선 구조가 나타났다. 이러한 상층 전선 시스템의 구조는 제트-전선 시스템 영역에서의 CAT 사례에 대한 선행 연구들에서도 보고되었다(Lane et al., 2004; Koch et al., 2005; Kim and Chun, 2010; Lee and Chun, 2018). 난류 조우 지점은 제트 코어 하부의 남쪽에 위치하며, 풍속은 55 m s^{-1} 이었다(Fig. 10a). 제트 코어 아래의 상층 전선을 따라 북위 약 32~36도에 강한 연직 바람 시어가 존재하였으며, 난류 조우 지점의 연직 바람 시어 값은 $28.7 \times 10^{-3} \text{ s}^{-1}$ 로 나타났다(Fig. 10b). 난류 조우 당시, 대류권계면이 제트 코어의 남쪽 아래로 약 480 hPa까지 접했으며, 이에 따라 안정한 성층권의 공기가 유입되어 상층 전선 시스템의 기울어진 등온위선을 따라 높은 안정도를 보였다. 또한, 난류 조우 지점의 N^2 는 약 $5.5 \times 10^{-4} \text{ s}^{-2}$ 로 대류권계면의 접힘에 따라 안정한 성

층권 영역에 포함되는 것으로 나타났다(Fig. 10c). 높은 안정도에도 불구하고, 강한 연직 바람 시어로 인해 1보다 작은 Ri 수의 영역이 제트 코어의 하층에 나타났으며(Fig. 10d), Ri 수가 0.5 미만인 영역을 중심으로 난류 조우 지점 부근에서 양의 S-TKE가 모의되었다(Fig. 10e). WRF 수치실험에서 난류는 양의 S-TKE로 나타난다. 이하 설명에서 “양의 S-TKE”는 편의상 “S-TKE”로 쓰겠다.

종합적으로, 사례 1에서 항공기가 조우한 난류의 발생의 주요한 원인은, 뚜렷한 대류권계면 접힘 현상과 함께 안정한 성층권 공기가 유입되었음에도 불구하고 상층 전선 영역에서의 남북 방향의 수평 온도 경도가 온도풍 관계에 따라 강한 연직 바람 시어를 발생시켜 Ri 수를 작게 한 K-H 불안정으로 분석되었다. 또한 FDR에 기록된 연직 가속도의 변화에서 12 초 동안 약 6주기의 파동 패턴이 나타났는데(Fig. 2c), 이러한 파동 형태는 WRF 모델에서 모의되지 않았다. 이는 K-H 불안정 지역의 파동열의 영향이거나 상층 전선 시스템에서 유도된 중력파가 존재하여 추가적으로 K-H 불안정을 강화하는 역할을 하였을 수 있다.

4.1.2 수치 실험 결과 분석(사례 2)

4.1.2.1 난류 조우 환경 분석

Figure 11은 사례 2에 대해 도메인 2($\Delta x = 9 \text{ km}$)에서 모의된 난류 조우 시간과 고도인 2021년 5월 27일 2308 UTC, 515 hPa 등압면에서의 수평 풍속(Fig. 11a), 전선 발달(Fig. 11b), 변형(Fig. 11c), 연직 바람 시어(Fig. 11d), Ri 수(Fig. 11e), 연직 풍속(Fig. 11f)을

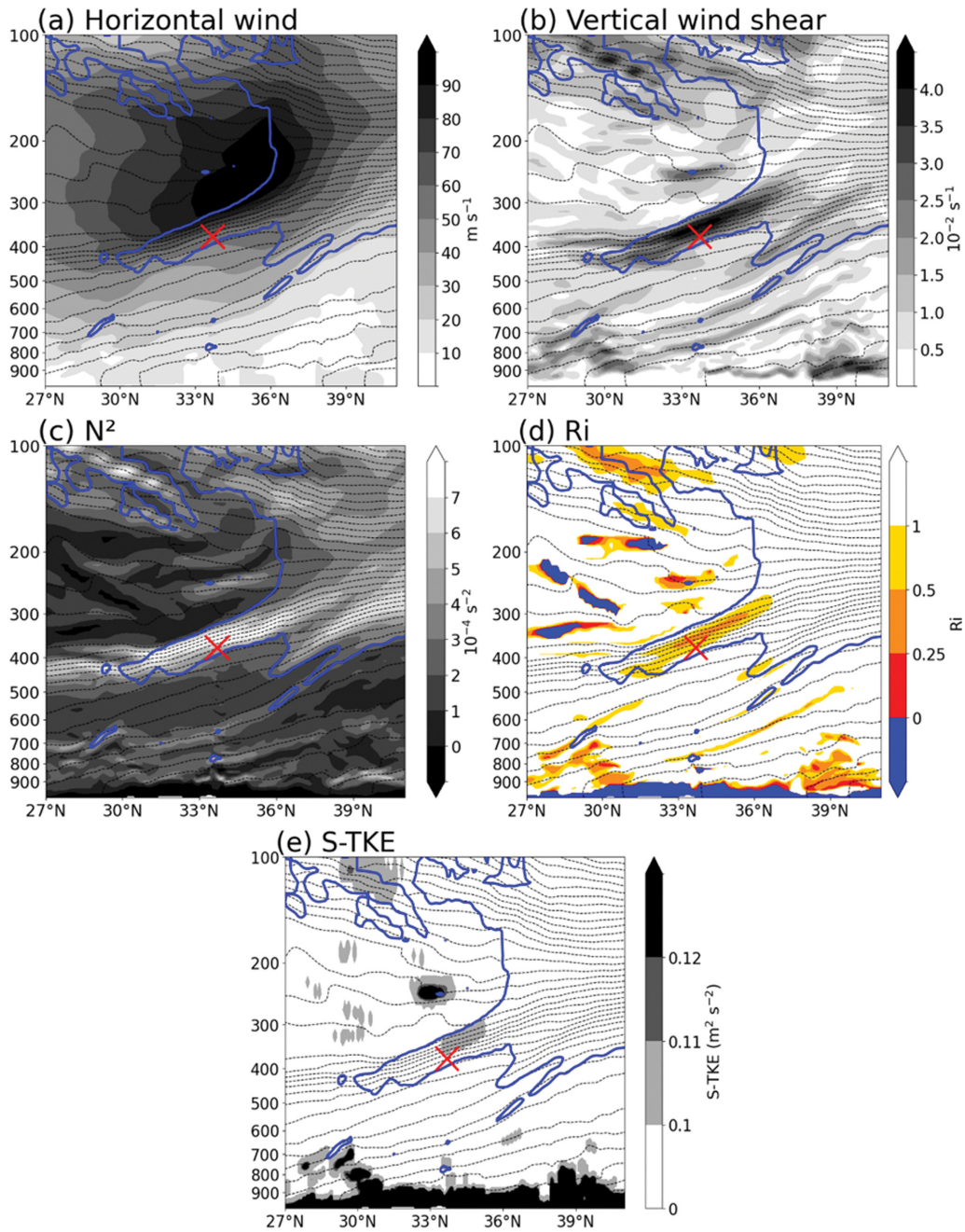


Fig. 10. Vertical cross sections of (a) horizontal wind speed, (b) vertical wind shear, (c) Brunt-Väisälä frequency, (d) Richardson number, and (e) subgrid-scale TKE (S-TKE) obtained from WRF D2 along the orange dashed line in Fig. 8a at 0417 UTC 12 Jan 2020. The thick blue solid line in all panels is the tropopause as represented by 2 PVU, and the thin black dashed lines in all panels are the potential temperature with 4 K intervals. The location where the aircraft encountered turbulence is depicted as a red “X” marker.

보인 것이다. 발해만 지역에 위치한 저기압 세력(Fig. 6c)의 반시계 방향 회전에 의해 강화된 $30 m s^{-1}$ 이

상의 남서풍이 한반도를 통과하였다(Fig. 11a). 3.2장에서 분석한 것과 같이 한반도 중부에 전선 발달 지

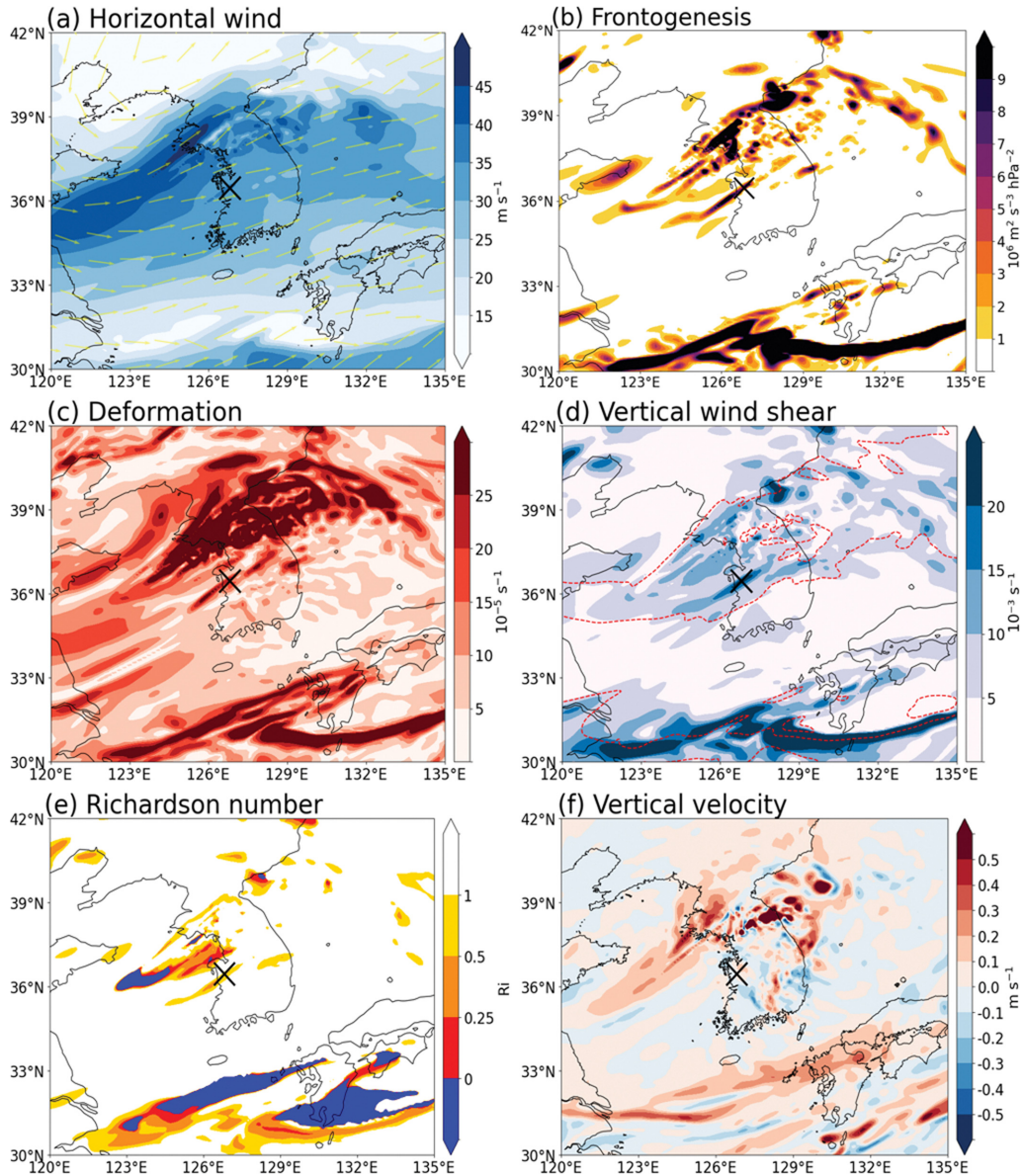


Fig. 11. (a) horizontal wind speed (shading) and wind direction (vectors), (b) Frontogenesis, (c) deformation, (d) vertical wind shear (shading) and temperature (contours; 4 K intervals), (e) Richardson (Ri) number, and (f) vertical velocity at 515 hPa obtained from the WRF model D2 at 2308 UTC 27 May 2021. The location where the aircraft encountered turbulence is depicted as a black “X” marker.

역이 있었으며, 난류 조우 지점을 포함하는 남서-북동 방향의 국지적인 전선 발달 지역이 나타났으며(Fig. 11b), 이 두 전선 지역에서는 수평 온도 경도를 증가시키는 변형이 강한 지역이 나타났다(Fig. 11c). 특히, 난류 조우 지점의 전선 영역에서는 강한 수평 기온 경도로 인해 연직 바람 시어가 강했으며, 난류 조우

지점에서는 그 값이 $21.1 \times 10^{-3} \text{ s}^{-1}$ 이었다(Fig. 11d). 이 연직 바람 시어가 강한 영역을 중심으로 Ri 수가 1 이하인 영역이 나타났으며, 난류 조우 지점에서는 0.5의 값을 보였다(Fig. 11e). 논문에서 제시하지는 않았으나 도메인 5에서는 Ri 수가 0.46까지 작아졌다.

도메인 2에서는, 한반도 중부 지역 전선 지역에서

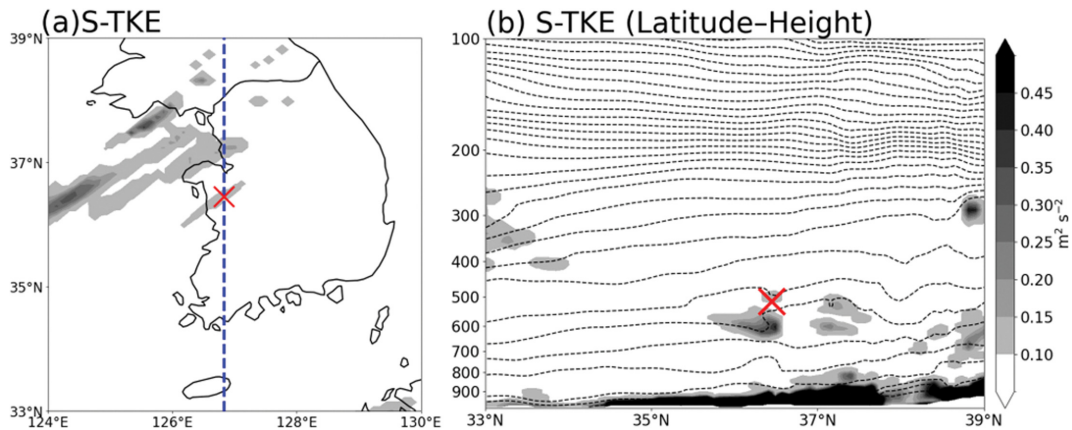


Fig. 12. (a) Subgrid-scale TKE at 515 hPa and (b) latitude-height cross section of subgrid-scale TKE along the blue dashed line in (a) obtained from WRF model D2 at 2308 UTC 27 May 2021. Thin black dashed lines in (b) are potential temperature with 4 K intervals. The location where the aircraft encountered turbulence is depicted as a red “X” marker.

는 활발한 연직 운동이 나타났으나 난류 조우 지점 주변에서의 파동 패턴은 나타나지 않았다(Fig. 11f). 그러나 도메인 3에서는 난류 조우 지역을 중심으로 연직 운동의 파동 패턴이 모의되기 시작하여 도메인 4, 5에서 뚜렷하게 나타났다(Fig. 13). 이 파동 패턴에 대해서는 4.1.2.2장에서 다시 논의하겠다.

4.1.2.2 난류 발생 메커니즘 분석

Figure 12는 도메인 2에서 모의된 난류 조우 시점의 S-TKE를 난류 조우 고도인 515 hPa의 등압면과 난류 조우 지점의 경도를 기준으로 연직 단면을 보인 것이다. S-TKE는 서해 상공의 Ri 수가 0.5보다 낮았던 영역(Fig. 11e)과 강한 연직 바람 시어가 나타난(Fig. 11d) 난류 조우 지점을 중심으로 모의되었다(Fig. 12a). 난류 조우 지점 부근의 S-TKE는 500 hPa를 중심으로 약하게 모의되었으며 난류 조우 위치 하부 약 600 hPa 고도의 등온위선의 뒤집힘이 나타난 곳에서도 S-TKE가 모의되었다(Fig. 12b). 결과적으로, 난류 조우 위치에서의 난류 발생은, 국지적인 전선 발달 지역에서의 강한 변형과 이에 따른 수평기온 경도 증가로 인해 온도풍 관계에 따라 강한 연직 바람 시어가 유도되었고, Ri 수가 낮아지면서 발생한 K-H 불안정에 기인한 것으로 해석된다.

Figure 13은 도메인 1($\Delta x = 27$ km)부터 5($\Delta x = 0.333$ km)까지 수치 실험에서 모의된 연직 속도를 나타낸 것이다. 도메인 2까지 나타나지 않았던 파동 구조가 도메인 3($\Delta x = 3$ km)부터 모의되기 시작하여 도메인 5($\Delta x = 0.333$ km)에서는 난류 조우 지점을 포함한 영역에서 명확하게 모의되었다. 연직 속도 ± 0.5 m s⁻¹ 이상의 이 뚜렷한 파동패턴은 국지적인 전선에

수반된 중력파로 보이며 약 60 km의 수평 규모에 걸쳐 전파되어 난류 조우 지점을 통과하는 것으로 나타났다.

중력파와 관련된 난류 발생 메커니즘을 고찰하기 위해서 도메인 5에서 분석을 수행하였다. Figure 14는 2230, 2245, 2300 UTC, 그리고 난류 조우 시간인 2308 UTC의 전선 발달 함수(Figs. 14a-d)와 연직 속도(Figs. 14e-h)를 515 hPa 등압면에서 나타내었으며 S-TKE ($S-TKE = 0.1$ m² s⁻²)는 회색 점선으로 중첩하였다. 남서-북동 방향으로 뻗어있는 국지적 전선 발달 지역이 남동 방향으로 이동하며 점차 강화되었다. 동시에 이 전선 발달 지역에서 약 10 km의 수평 파장을 갖는 중력파가 발생하여 전선과 같은 방향으로 전파되어 난류 조우 지점을 통과하였다. 이러한 중규모 중력파는 배경 안정도와 바람 시어를 교란하여 Ri 수를 감소시키고, 그 결과 K-H 불안정을 통해 난류를 발생시킬 수 있다(Chun and Baik, 1998; Lane et al., 2004). 시간이 지남에 따라 발달하는 전선 영역과 중력파의 전파에 따라 S-TKE 영역의 범위가 확장되며 2308 UTC에 난류 조우 지점이 S-TKE 영역에 포함되었다(Figs. 14e-h).

Figure 15는 Fig. 14a의 파란색 점선을 따라, 2230, 2245, 2300, 2308 UTC에서의 전선 발달과 S-TKE ($S-TKE = 0.1$ m² s⁻²; Figs. 15a-d), 연직 속도, 0.25의 Ri 수, 그리고 구름 경계를 나타내는 0.01 g kg⁻¹의 총 구름 응결물량의 연직 단면(Figs. 15e-h)을 보인 것이다. 난류 조우 고도에서는 전선 발달 지역이 시간의 경과에 따라 난류 에너지를 생성하며 남하하였다(Figs. 15a-d). 난류 조우 시간인 2308 UTC에 난류 조우 지

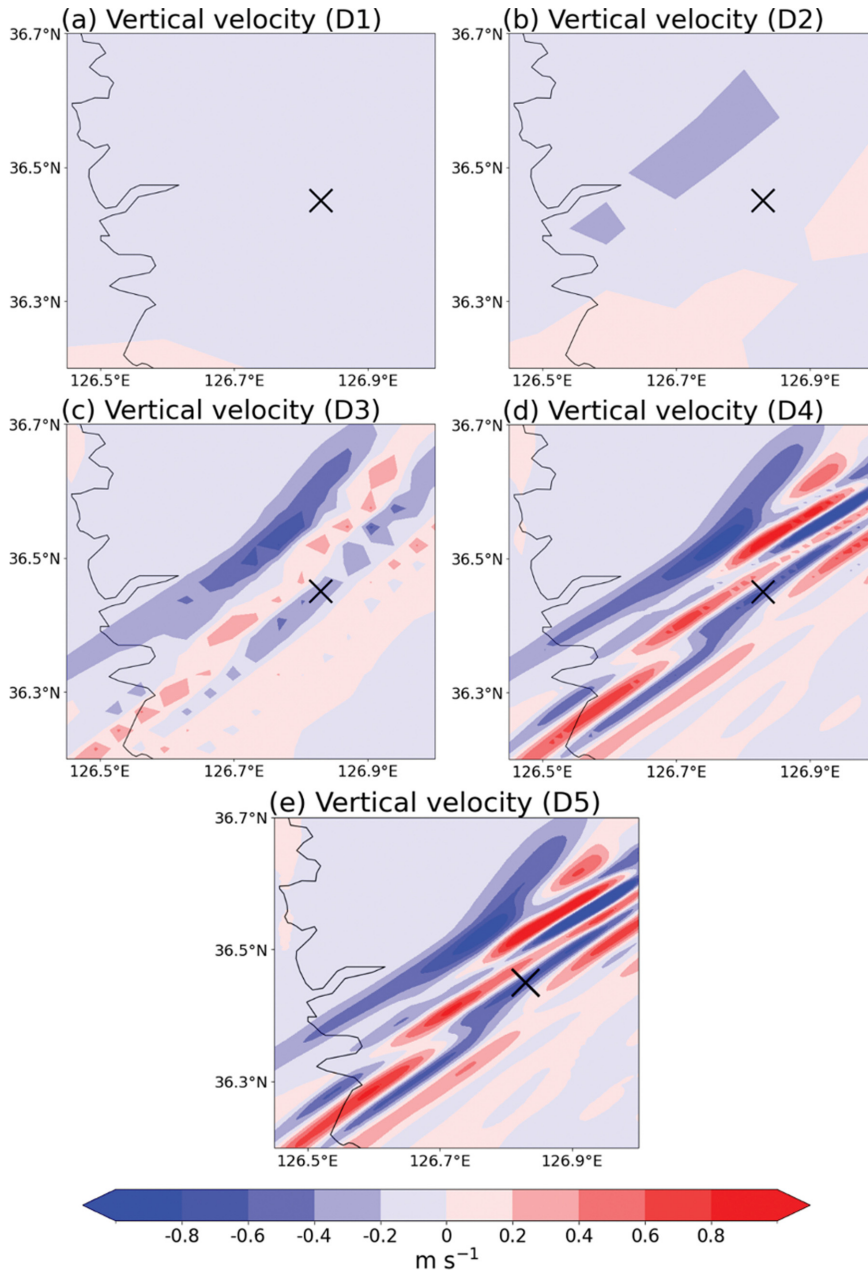


Fig. 13. Simulated vertical velocity from each of D1-5 within the D5 region (Δx : 27 km for D1, 9 km for D2, 3 km for D3, 1 km for D4, and 0.333 km for D5). The location where the aircraft encountered turbulence is depicted as a black “X” marker.

점이 전선 발달이 강한 지역에 위치하였으며, 해당 지점을 포함하여 S-TKE가 모의되었다(Fig. 15d). 난류 조우 지점 하부로는 600 hPa 고도 부근에 얇은 전선 발달 영역이 나타났으며 시간이 지남에 따라 점차 강화되었고(Figs. 15a-d), 이 영역을 포함하여 등온위선

의 뒤집힘 현상까지 나타난 정적 안정도가 낮은 500-600 hPa 고도에 걸쳐 S-TKE가 모의되었다(Figs. 15a-d). 900-500 hPa 고도 범위에서, 난류 조우 고도와 600 hPa 부근에서 남하하는 전선 발달 영역을 따라 중력파가 남쪽으로 증폭하며 전파되었다. 약 750 hPa에 모의된

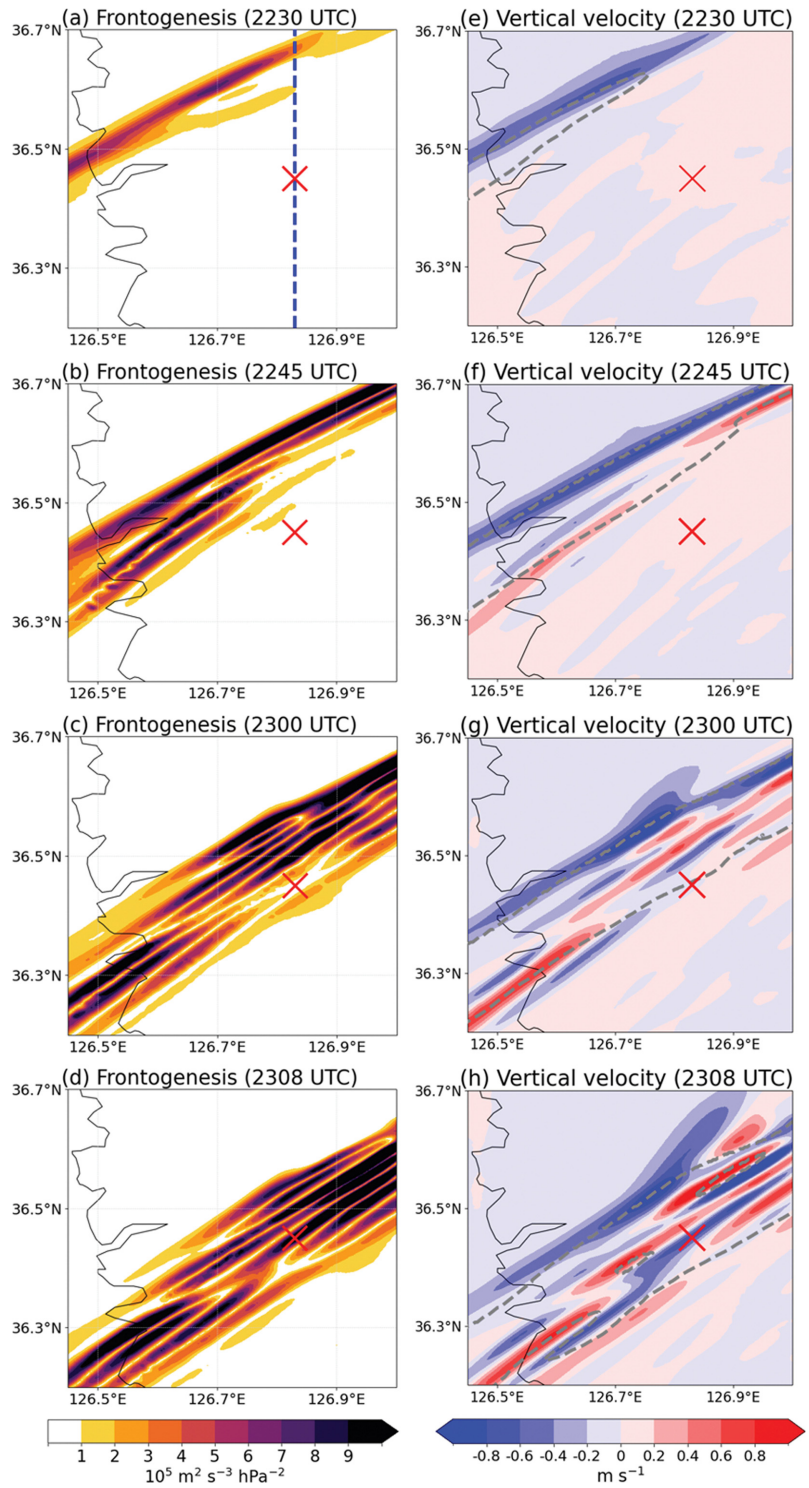


Fig. 14. (a)-(d) Frontogenesis and (e)-(h) vertical velocity (shading) and subgrid-scale TKE (gray contour at $S\text{-TKE} = 0.1 \text{ m}^2 \text{ s}^{-2}$) at 515 hPa obtained from WRF model in D5 from 2230 to 2308 UTC 27 May 2021. The location where the aircraft encountered turbulence is depicted as a red “X” marker.

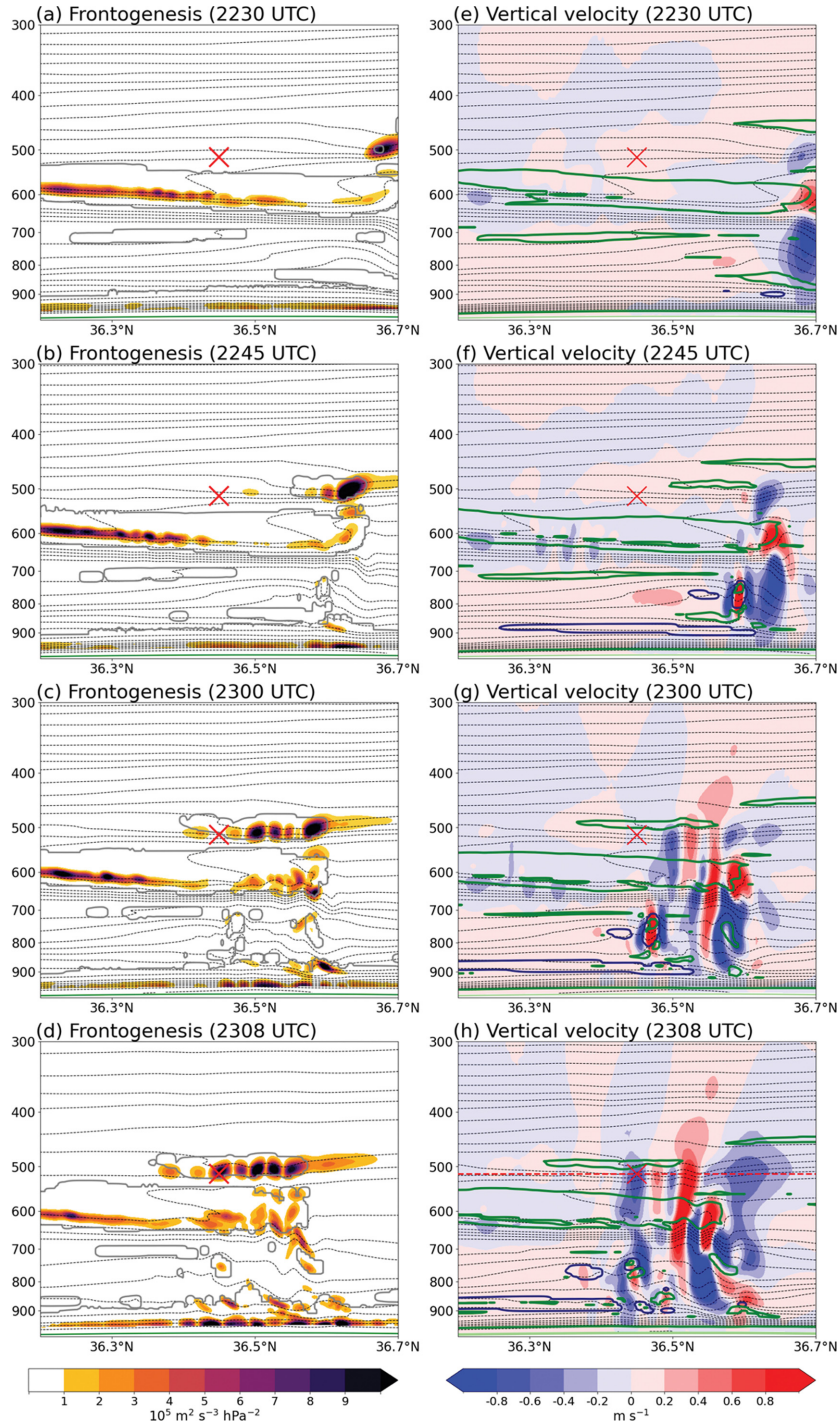


Fig. 15. Latitude-Height cross section of (a)-(d) frontogenesis (shading) and subgrid-scale TKE (gray contour at $S\text{-TKE} = 0.1 \text{ m}^2 \text{ s}^{-2}$) and (e)-(h) vertical velocity (shading), Richardson number (green contour at $Ri = 0.25$), total cloud condensate (navy contour at 0.01 g kg^{-1}), and topography (light green contour) along the blue dashed line in Fig. 14a obtained from WRF model D5 from 2230 to 2308 UTC 27 May 2021. The thin black dashed lines in all panels are the potential temperature with 1 K intervals. The location where the aircraft encountered turbulence is depicted as a red “X” marker.

구름 상부에서는 등온위선이 파동 형태의 요동을 보여 대류적으로 유도된 중력파의 존재가 나타나지만 600 hPa 이상으로는 전파되지 못하였다. 이는 중력파의 연직 전파를 결정하는 $m^2 = l^2 - k^2$ 의 조건(Kim and Chun, 2010)이 약 600 hPa에서 깨어졌기 때문이다. 여기서 l^2 는 Scorer parameter ($l^2 = \frac{N^2}{(U-c)^2} - \frac{d^2U/dz^2}{U-c}$,

N^2 는 Brunt-Väisälä frequency, U 는 도메인 평균 수평 바람, c 는 wave phase speed), k 는 수평 파수($k = \frac{2\pi}{\lambda}$, λ 는 수평파장) 나타내며, c 는 Fig. 14에서 보인 연직 속도장을 보다 조밀한 시간 간격으로(2분) 분석하여 추정된 9 m s^{-1} 을 사용하였고, λ 는 wavelet 분석으로 추정된 10 km를 사용하였다.

두 사례에 대하여 WRF에서 모의된 난류와 FDR에 기록된 난류 강도 간의 비교를 수행하였다. 이를 위하여 도메인 5에서 S-TKE와 격자 바람으로 계산한 TKE ($= u^2 + v^2 + w^2$)/2의 합을 구하고(Kim and Chun, 2012; Lee and Chun, 2018), 이를 이용하여 EDR을 계산하였다($\text{EDR} = \varepsilon^{1/3} = (\text{TKE}^{3/2}/L)^{1/3}$, Schumann, 1991). 여기서 length scale, L 은 Kim et al. (2019)와 Fedorovich et al. (2004)의 방법론을 따라 가장 작은 난류의 length scale이 연직 격자 간격일 것이라 가정하여, 100 m로 하였다. 여기서 바람 섭동은 각 격자점의 국지 바람 값에서 45×45 격자점에 대해 평균한(약 $15 \text{ km} \times 15 \text{ km}$ 도메인) 바람 값을 빼는 방식으로 계산하였다

(Yang et al., 2024; Lee et al., 2025). 그 결과(그림은 보이지 않았음), EDR은 사례 1과 2에서 각각 0.06 과 $0.12 \text{ m}^{2/3} \text{ s}^{-1}$ 로 산출되었으며, International Civil Aviation Organization에서 출판된 Annex 3의 EDR 강도 기준(ICA0, 2018)으로 각각 NIL과 LGT에 해당하였다. 이는 FDR에 기록된 강도(사례 1: MOD, 사례 2: SEV)보다 과소 모의된 결과이다. 바람 섭동을 계산하기 위한 평균 격자점 숫자를 조정하여도 그 결과는 크게 달라지지 않았다. WRF로 추정된 난류의 과소 모의는 비슷한 시도가 이루어진 이전 연구인 Lee and Chun (2018)에서도 나타났다. 사례 1과 2에서 조우한 난류의 시간 규모가 각 약 1초인 것과 당시 항공기 속도(사례 1: 168 m s^{-1} , 사례 2: 149 m s^{-1})를 고려하면(Figs. 2c, 4c), 각각의 수평 규모가 168 m, 149 m에 해당한다. 본 연구에서 사용한 WRF의 가장 고해상도 도메인의 격자 간격이 333 m임을 고려할 때, WRF 모델의 수치실험을 통하여 FDR에 측정된 난류를 정확하게 예측하는 것은 불가능하다. 또한, FDR에 기록된 연직 가속도의 변화는 항공기의 기종, 자세 등에 따라 달라질 수 있으므로 WRF 모델 결과와의 정량적인 비교에는 어려움이 있다고 판단된다. 향후, 보다 고해상도 수치모델링이 가능해진다면 관측된 난류를 직접 수치 모사할 수 있을 것이다(Ko et al., 2025).

4.2 KTG 시스템 예측 결과 분석

두 사례에 대한 난류 조우 시간과 고도에 가장 가까운 KTG 예측 결과를 확인하기 위해, 사례 1에 대해서는 2020년 1월 12일 0300 UTC에 유효했던 3시

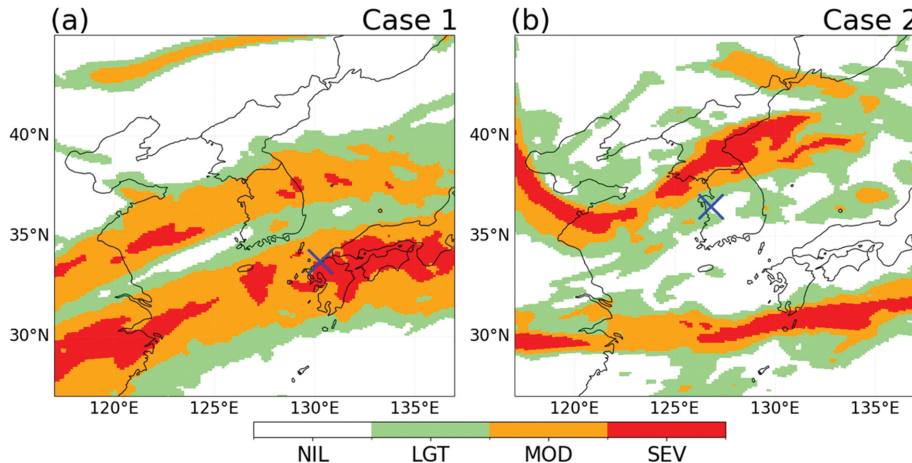


Fig. 16. (a) The 3-h forecasting result at 25,000 ft valid at 0300 UTC 12 Jan 2020 and (b) analysis results at 17,000 ft valid at 0000 UTC 28 May 2021 from the KTG model focused on Korean Peninsula. The LGT, MOD, and SEV intensity thresholds correspond to 0.3, 0.475, and 0.75, respectively. The location where the aircraft encountered turbulence is depicted as a blue “X” marker.

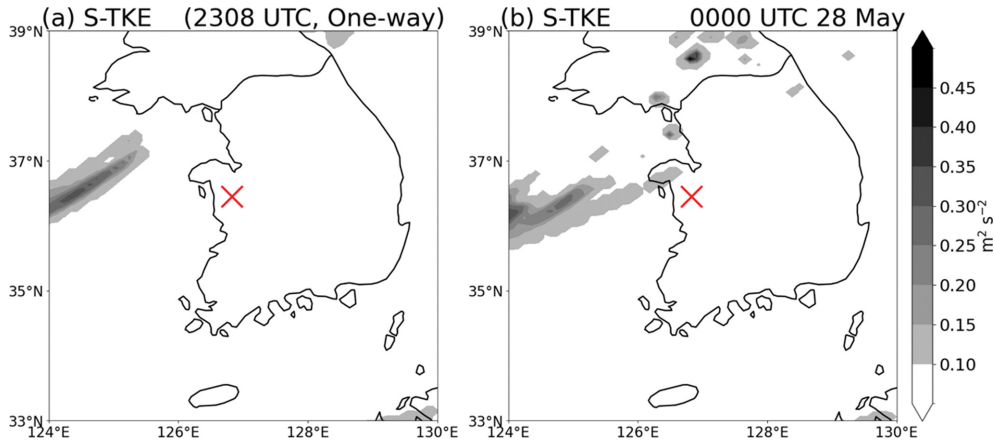


Fig. 17. (a) Simulated subgrid-scale TKE at 515 hPa obtained from one-way nested WRF model D2 at 2308 UTC 27 May 2021. (b) Simulated subgrid-scale TKE at 515 hPa obtained from WRF model D2 at 0000 UTC 28 May 2021.

간 예측 KTG를 25,000 ft에서, 사례 2에 대해서는 2021년 5월 28일 0000 UTC의 분석 KTG를 17,000 ft에서 각각 Fig. 16a와 16b에 보였다. 사례 1에 대하여 KTG는 제트 영역을 따라 MOG를 예측하였으나 난류 조우 지점의 값은 0.76으로 SEV 강도로 예측하였다. 실제로 항공기가 조우한 난류는 MOD 강도였으므로 (Table 2), KTG가 과대 예측을 한 것으로 평가할 수 있다. 다만, 항공기 난류 조우 시점과 모델 예측 간에 약 1시간의 시간 차이가 있고, 난류를 조우한 지점을 중심으로 비교적 넓은 영역에서 MOG 강도를 예측하였다는 점에서, KTG 시스템은 난류의 발생을 비교적 적절하게 예측한 것으로 판단되었다(Fig. 16a). 사례 2에 대해 KTG는 한반도 중부의 전선 발달 지역에 대해서는 MOG를 예측하였으나, 난류 조우 지점의 값은 0.18의 NIL 강도를 나타내어 관측된 난류를 적절히 예측하지 못하였다(Fig. 16b). 이는 KTG의 기반 모델인 UM-GDAPS의 수평해상도($\Delta x = 10$ km)와 유사한 WRF의 도메인 2($\Delta x = 9$ km)의 난류 조우 지점에서 국지적인 전선 발달 지역과 S-TKE가 모의되었던 것(Fig. 12)과 비교할 때 상이한 결과이다. 이와 같은 차이는 KTG의 UM-GDAPS 모델과 WRF 모델의 차이를 포함해서 여러가지 요인이 있을 수 있다. 아래에서는 추가적인 WRF 수치실험 결과 분석을 통해서 그 가능한 원인을 논의하고자 한다.

KTG가 사례 2의 난류를 예측하지 못한 것에 대한 가능한 이유로 첫째는, 본 연구의 수치 실험에 적용된 two-way nesting으로 인해, 도메인 2에서 2308 UTC에 난류 조우 위치에서 모의된 전선 발달 지역(Fig. 11b)과 S-TKE (Fig. 12a)는 도메인 3 이상의 도메인의 결과가 반영된 것일 수 있다. 이를 확인하기 위해 사례 2에 대해서 one-way nesting 실험을 추가적으로

수행하였다. Figure 17a는 WRF 도메인 2의 one-way nesting 실험으로부터 구한 S-TKE를 515 hPa에서 보인 것으로, Fig. 12a와 같은 5월 27일 2308 UTC에서의 결과를 나타낸 것이다. One-way nesting 실험에서는 2308 UTC에 난류 조우 지점에서 S-TKE가 모의되지 않았으며(Fig. 17a), 논문에 제시하지 않았으나 국지적 전선 발달지역도 모의되지 않았다. 또한 수치 실험의 도메인 3($\Delta x = 3$ km)부터 나타나기 시작한 전선 발달 지역에서 생성된 중력과(Fig. 13)가 낮은 수평 해상도의 UM-GDAPS 모델에서 모의되지 않아 K-H 불안정을 강화하는 역할이 부족하였을 수 있다. 따라서 국지적인 난류를 예측하는 데에 있어 UM-GDAPS의 10 km 수평 해상도는 충분하지 않았을 수 있다. 둘째, 난류 조우 시간과 UM-GDAPS 자료의 시간 차이로 인해 사례 2의 난류를 예측하지 못하였을 수 있다. Figure 17b는 난류 조우 시간과 가장 가까운 UM-GDAPS 분석장인 28일 0000 UTC의 WRF 도메인 2의 two-way nesting 실험으로부터 구한 S-TKE를 515 hPa에서 보인 것이다. 27일 2308 UTC에 난류 조우 지점에서 모의되었던 S-TKE (Fig. 12a)가 28일 0000 UTC에서는 나타나지 않았다(Fig. 17b). 또한, 본 논문에 제시하지 않았으나 도메인 5에서 계산된 Ri 수가 27일 2308 UTC에 0.45에서 28일 0000 UTC에 4.7로 증가하였다. 따라서 실령 UM-GDAPS 모델이 27일 2308 UTC에 국지적인 전선 발달 지역과 난류를 모의하였더라도 28일 0000 UTC 자료에는 나타나지 않았을 수 있다. 셋째, 추가적인 WRF 수치실험을 통하여 결과를 분석하지는 못하였으나, KTG 시스템의 진단지수들이 계산되는 UM-GDAPS 모델의 연직 해상도는 1000 hPa부터 0.4 hPa까지 26개의 등압면으로, 본 연구에서 사용한 $\Delta z \approx 100$ m의 WRF 수

치 실험에 비해 연직 해상도가 매우 낮다. 따라서 KTG에서 중요한 난류진단지수인 연직 바람 시어, 대기안정도와 같은 연직 변화를 계산하는 변수들이 UM-GDAPS 자료에서는 과소 혹은 과대 모의되었을 수 있다. 이러한 분석은 난류 예측에 있어 공간 및 시간 해상도의 중요성을 시사한다.

5. 요약 및 결론

본 연구의 목적은 2020년 이후 한반도 부근에서 발생한 우리나라 항공사의 항공기 사고들 중 난류를 조우하여 발생한 것으로 조사 완료된 3건 중 상층 및 중층 각 1건의 사례를 소개하고, 그 발생 메커니즘을 고해상도 수치모델링 결과를 분석함으로써 밝히는 데 있다. 첫 번째 사례는 2020년 1월 12일 0417 UTC에 일본 기타큐슈 공항에서 인천공항으로 운항하던 항공기가 청천대기의 후쿠오카 상공, 25,000 ft에서 MOD 강도의 난류를 조우하여 객실 승무원 1명이 부상을 입었다(Fig. 2). 두 번째 사례는 2021년 5월 27일 2308 UTC에 김포공항에서 제주공항으로 운항하던 항공기가 충남 예산 상공, 17,000 ft에서 SEV 강도의 난류를 조우하여 객실 승무원 1명이 부상을 입었다(Fig. 4). 두 난류 사례의 원인과 발생 메커니즘을 조사하기 위해 기상청 슈퍼컴퓨터 두루에서 WRF 수치 모델을 사용하여 조우 지점을 중심으로 5개의 도메인($\Delta x = 27\text{-}0.333\text{ km}$)과 약 100 m의 연직 해상도를 갖는 고해상도 수치 실험을 수행하였다(Fig. 1; Table 1).

사례 1의 중관 규모 특징은 겨울철에 동아시아 중위도 상공에서 전형적으로 나타나는 상층 전선 시스템이었다. 난류는 수평 풍속이 90 m s^{-1} 이상인 제트 코어 하부의 연직 바람 시어가 강한 영역에서 발생하였고(Fig. 10a), 대류권계면이 약 380 hPa까지 접하면서 난류 조우 지역을 포함하는 영역에 성층권의 안정한 공기가 대류권에 유입되었다(Fig. 10c). 난류 조우 지점은 성층권 영역에 포함되어 안정도가 높았음에도 불구하고 상층 전선 시스템의 큰 수평 기온경도가 온도풍 관계에 따라 도메인 5에서는 $0.03 \times 10^{-2}\text{ s}^{-1}$ 의 강한 연직 바람 시어를 발생시켜 Ri 수를 0.62로 작게 하였다(Fig. 9). 따라서 사례 1에서 항공기가 조우한 난류의 주요한 원인은 발달된 상층 전선 시스템에 의해 유도된 강한 연직 바람 시어로 인한 K-H 불안정으로 분석되었다. 또한 FDR에 기록된 연직 가속도 변화에서 파동 패턴이 나타났는데(Fig. 2c), 이는 K-H 불안정 지역의 파동열에 의한 영향이 나타난 것이거나 또는 상층 전선 시스템에 의해 유도된 중력파가 존재하여 K-H 불안정을 강화하는 역할을 하였을 수 있다.

사례 2의 중관 규모에서는 발해만 지역에서 지상부

터 상층까지 유지된 저기압 세력의 반시계 방향 회전으로 인해 한랭건조한 대륙성 공기가 한반도에 유입되어 한반도 중부 지역에 전선이 발달하였다(Fig. 5). 수치 실험 결과에서는 한반도 중부 지역 뿐만 아니라 항공기가 난류를 조우한 위치에 국지적인 전선 발달이 모의되었다(Fig. 11b). 이 국지적 전선 영역의 강한 수평 기온 경도는 온도풍 관계에 따라 난류 조우 지점에서 $21.1 \times 10^{-3}\text{ s}^{-1}$ 의 강한 연직 바람 시어를 발생시켰고, Ri 수를 0.5로 작게 하였으며(Figs. 11d, e) S-TKE는 난류 조우 지점을 포함한 국지적 전선 발달 지역을 중심으로 모의되었다(Fig. 12a). 전선으로부터 생성된 중력파는 도메인 3($\Delta x = 3\text{ km}$)부터 모의되었으며, 도메인 5($\Delta x = 0.333\text{ km}$)에서 가장 뚜렷하게 나타났다(Fig. 13). 국지적인 전선 발달 지역은 시간이 지남에 따라 중력파를 생성하며 남동쪽으로 이동하며 그 범위가 넓어졌고, 난류 조우 시간인 2308 UTC에 항공기는 강한 전선 발달 지역에 위치하였다(Fig. 14a). 중력파는 약 900-500 hPa 범위에서 남하하는 전선 발달 지역을 따라 전파되며 시간이 지남에 따라 증폭되었고, 난류 조우 고도에서의 중력파는 조우 위치의 상부 Ri가 0.25보다 작은 영역에 의해 중력파가 흡수되어 더 이상 위로 전파되지 못하였다(Fig. 15). 따라서 사례 2의 항공기가 조우한 난류의 주요한 원인은 전선 영역의 강한 연직 바람 시어와 전선으로부터 생성된 중력파에 의하여 강화된 K-H 불안정으로 분석되었다.

두 난류 사례에 대한 기상청의 현업 항공 난류 예측 시스템 KTG의 예측 결과를 분석하였다. 제트 코어 하부에서 발생한 사례 1에 대하여 KTG 시스템은 난류 조우 지점을 포함한 제트 기류를 따라 MOG 강도를 예측하였으나(Fig. 16a) 항공기가 난류를 조우한 위치에서는 SEV 강도로 과대 예측하였다. 다만, 실제 난류 조우 시간과 약 1시간의 시간 차이를 고려하면 항공기가 조우한 난류의 발생 가능성을 비교적 적절히 예측하였다고 판단되었다. 사례 2에 대하여 KTG 시스템은 한반도 중부 지역의 전선 발달 지역을 중심으로 MOG 강도의 난류를 예측하였지만, 항공기가 SEV 강도의 난류를 조우한 위치는 NIL 강도로 예측하였다(Fig. 16b). 추가적인 수치실험을 통하여 KTG 시스템의 실패 이유를 분석하였다. 첫째, one-way nesting 실험을 통하여 UM-GDAPS의 10 km 수평 해상도가 국지적 전선 발달 지역과 중력파를 모의하기에 충분하지 않음을 확인하였다. 둘째, KTG 예측의 시간 해상도가 충분치 않음을 확인하였다. 난류 조우 시간 2308 UTC에서 WRF 수치실험에서 보였던 S-TKE가 WRF의 0000 UTC 결과에서는 나타나지 않음을 통하여 난류의 간헐적인 특성을 나타내기에는 KTG 시스템의 시간 해상도가 충분하지 않음을 확인하였다.

셋째, KTG 시스템의 연직 해상도가 충분하지 않음에 기인한 것으로 보인다. 난류와 관련된 주요 변수인 연직 바람 시어나 대기안정도는 연직 해상도와 밀접하게 관련되어 있고, 본 연구의 WRF 수치실험에서 사용한 100 m의 연직 해상도와 비교하여 KTG의 연직 해상도가 매우 낮아서 현실적인 난류 예측에 어려움이 있었던 것으로 생각된다.

본 연구에서는 수치 실험 및 KTG 시스템의 예측 결과 분석을 통해 항공기 사고로 이어진 항공 난류 사례들의 발생 메커니즘을 이해하고 난류 예측에 있어 모델 해상도의 중요성을 시사하였다. 항공 현업에서는 여전히 KTG, G-KTG와 같은 난류 예측 시스템 자료를 참고하여 항로상의 난류를 예측하고 대응하는 것을 권장하며, 향후 KTG 및 G-KTG의 기반 모델인 GDAPS의 수평 및 연직 해상도가 증가하고, 시간적으로 예측 결과를 더 자주 제공한다면 항공 난류의 예측성이 증대될 것으로 생각된다. 이는 궁극적으로 난류 조우 대비 절차를 준비함으로써 항공사고를 예방하는 데 도움이 될 것으로 기대된다.

감사의 글

본 논문의 질적 향상을 위해 많은 조언을 주신 두분의 심사위원분들께 깊은 감사의 말씀을 드립니다. 이 연구는 기상청 「차세대 항공교통 지원 항공기상 기술개발(NARAE-Weather)」(RS-2022-KM220410)의 지원으로 수행되었습니다.

REFERENCES

- ARAIB, 2022: Aviation accident investigation report. Aviation and Railway Accident Investigation Board, ARAIB/AAR2102, 29 pp.
- Chambers, E., 1955: Clear air turbulence and civil jet operations. *J. Roy. Aeronautical Soc.*, **59**, 613-628, doi:10.1017/S036839310011692X.
- Chun, H.-Y., and J.-J. Baik, 1998: Momentum flux by thermally induced internal gravity waves and its approximation for large-scale models. *J. Atmos. Sci.*, **55**, 3299-3310, doi:10.1175/1520-0469(1998)055<3299:MFBTII>2.0.CO;2.
- Doyle, J. D., M. A. Shapiro, Q. Jiang, and D. L. Bartels, 2005: Large-amplitude mountain wave breaking over Greenland. *J. Atmos. Sci.*, **62**, 3106-3126, doi:10.1175/jas3528.1.
- Dudhia, J., 1989: Numerical study of convection observed during the winter Monsoon experiment using a meso-scale two-dimensional model. *J. Atmos. Sci.*, **46**, 3077-3107, doi:10.1175/1520-0469(1989)046<3077: NSOCOD>2.0.CO;2.
- Dutton, J., and H. A. Panofsky, 1970: Clear air turbulence: a mystery may be unfolding. *Science*, **167**, 937-944, doi:10.1126/science.167.3920.937.
- Ellrod, G. P., and D. I. Knapp, 1992: An objective clear-air turbulence forecasting technique: verification and operational use. *Wea. Forecasting*, **7**, 150-165, doi:10.1175/1520-0434(1992)007<0150:AOCATF>2.0.CO;2.
- Fedorovich, E., R. Rotunno, and B. Stevens, Eds., 2004: *Atmospheric Turbulence and Mesoscale Meteorology: Scientific Research Inspired by Doug Lilly*. Cambridge University Press, 280 pp.
- Galperin, B., S. Sukoriansky, and P. S. Anderson, 2007: On the critical Richardson number in stably stratified turbulence. *Atmos. Sci. Lett.*, **8**, 65-69, doi:10.1002/asl.153.
- Hersbach, H., and Coauthors, 2020: The ERA5 global reanalysis. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, **146**, 1999-2049, doi:10.1002/qj.3803.
- Hong, S.-Y., and J.-O. J. Lim, 2006: The WRF single-moment 6-class microphysics scheme (WSM6). *J. Korean Meteor. Soc.*, **42**, 129-151.
- ICAO, 2018: Annex 3 — Meteorological Service for International Air Navigation. *Twenty-First Edition*, incorporating Amendments 1-82, International Civil Aviation Organization, August 2018, 78 pp.
- Janjić, Z. I., 1994: The step-mountain eta coordinate model: Further developments of the convection, viscous sublayer, and turbulence closure schemes. *Mon. Wea. Rev.*, **122**, 927-945, doi:10.1175/1520-0493(1994)122<0927:TSMECM>2.0.CO;2.
- _____, 2002: Nonsingular implementation of the Mellor Yamada level 2.5 scheme in the NCEP Meso Model. NCEP Office Note 437, 61 pp.
- JTSA, 2021: *Aircraft accident investigation report*. Japan Transport Safety Board, AA2021-3, 9 pp.
- Kain, J. S., 2004: The Kain-Fritsch convective parameterization: An update. *J. Appl. Meteor.*, **43**, 170-181, doi:10.1175/1520-0450(2004)043<0170:TKCPAU>2.0.CO;2.
- Kang, Y.-J., H.-W. Choi, Y.-N. Choi, S.-S. Lee, H.-S. Lee, E.-S. Kim, and S.-B. Kim, 2025: Analysis of upper-level aviation turbulence observational data and performance evaluation of prediction models (KTG and GKTG) over the Korean Peninsula for 5 years (2019~2023). *Atmosphere*, **35**, 85-99, doi:10.14191/Atmos.2025.35.1.085.

- Kim, J.-H., and H.-Y. Chun, 2010: A numerical study of clear-air turbulence (CAT) encounters over South Korea on 2 April 2007. *J. Appl. Meteor. Climatol.*, **49**, 2381-2403, doi:10.1175/2010JAMC2449.1.
- _____, and _____, 2011a: Statistics and possible sources of aviation turbulence over South Korea. *J. Appl. Meteor. Climatol.*, **50**, 311-324, doi:10.1175/2010JAMC2492.1.
- _____, and _____, 2011b: Development of the Korean mid- and upper-level aviation turbulence guidance (KTG) system using the regional unified model. *Atmosphere*, **21**, 497-506, doi:10.14191/Atmos.2011.21.4.497.
- _____, and _____, 2012: Development of the Korean aviation turbulence guidance (KTG) system using the operational Unified Model (UM) of the Korea Meteorological Administration (KMA) and pilot reports (PIREPs). *J. Korean Soc. Aviat. Aeron.*, **20**, 76-83, doi:10.12985/ksaa.2012.20.4.076.
- _____, _____, R. D. Sharman, and T. L. Keller, 2011: Evaluations of upper-level turbulence diagnostics performance using the Graphical Turbulence Guidance (GTG) system and Pilot Reports (PIREPs) over East Asia. *J. Appl. Meteor. Climatol.*, **50**, 1936-1951, doi:10.1175/JAMC-D-10-05017.1.
- Kim, S.-H., H.-Y. Chun, R. D. Sharman, and S. B. Trier, 2019: Development of near-cloud turbulence diagnostics based on a convective gravity-wave drag parameterization. *J. Appl. Meteor. Climatol.*, **58**, 1725-1750, doi:10.1175/JAMC-D-18-0300.1.
- _____, J.-H. Kim, H.-Y. Chun, and R. D. Sharman, 2023: Global response of upper-level aviation turbulence from various sources to climate change. *npj Clim. Atmos. Sci.*, **6**, 92, doi:10.1038/s41612-023-00421-3.
- Ko, H.-C., H.-Y. Chun, and P. Bechtold, 2025: Evaluation and Improvement of the ECMWF Aviation Turbulence Forecasts. *J. Geophys. Res. Atmos.*, **130**, e2024-JD043158, doi:10.1029/2024JD043158.
- Koch, S. E., and Coauthors, 2005: Turbulence and gravity waves within an upper-level front. *J. Atmos. Sci.*, **62**, 3885-3908, doi:10.1175/JAS3574.1.
- Lane, T. P., J. D. Doyle, R. Plougonven, M. A. Shapiro, and R. D. Sharman, 2004: Observations and numerical simulations of inertia gravity waves and shearing instabilities in the vicinity of a jet stream. *J. Atmos. Sci.*, **61**, 2692-2706, doi:10.1175/JAS3305.1.
- _____, and R. D. Sharman, 2008: Some influences of background flow conditions on the generation of turbulence due to gravity wave breaking above deep convection. *J. Appl. Meteor. Climatol.*, **47**, 2777-2796, doi:10.1175/2008JAMC1787.1.
- _____, _____, S. B. Trier, R. G. Fovell, and J. K. Williams, 2012: Recent advances in the understanding of near-cloud turbulence. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, **93**, 499-515, doi:10.1175/BAMS-D-11-00062.1.
- _____, _____, T. L. Clark, and H.-M. Hsu, 2003: An investigation of turbulence generation mechanisms above deep convection. *J. Atmos. Sci.*, **60**, 1297-1321, doi:10.1175/1520-0469(2003)60<1297:AIOTGM>2.0.CO;2.
- Lee, D.-B., and H.-Y. Chun, 2015: A statistical analysis of aviation turbulence observed in pilot report (PIREP) over East Asia including South Korea. *Atmosphere*, **25**, 129-140, doi:10.14191/Atmos.2015.25.1.129.
- _____, and _____, 2018: A numerical study of aviation turbulence encountered on 13 February 2013 over the Yellow Sea between China and Korean Peninsula. *J. Appl. Meteor. Climatol.*, **57**, 1043-1060, doi:10.1175/JAMC-D-17-0247.1.
- Lee, J. H., J.-H. Kim, R. D. Sharman, J. Kim, and S.-W. Son, 2023: Climatology of clear-air turbulence in the upper troposphere and lower stratosphere in the Northern Hemisphere using ERA5 reanalysis data. *J. Geophys. Res. Atmos.*, **128**, e2022JD037679, doi:10.1029/2022JD037679.
- _____, _____, S. B. Trier, R. D. Sharman, and J. D. Doyle, 2025: Generation mechanisms of near-cloud turbulence events in the upper-level outflow of Tropical Cyclone Hagibis. *Mon. Wea. Rev.*, **153**, 521-542, doi:10.1175/MWR-D-24-0116.1.
- Lester, P. F., 1994: *Turbulence: A New Perspective for Pilots*. Jeppesen Sanderson, 212 pp.
- Lian, Q., Y. Zhang, X. Liu, and J. Xu, 2024: The impact of WRF vertical resolution on the simulated thermodynamic structures and intensity of Typhoon Lekima. *Front. Earth Sci.*, **12**, 1363482, doi:10.3389/feart.2024.1363482.
- Mesinger, F., 1993: Forecasting upper tropospheric turbulence within the framework of the Mellor-Yamada 2.5 closure. *Res. Activ. in Atmos. and Ocean. Mod., WMO, Geneva, CAS/JSC WGNE Rep. No. 18*, 4.28-4.29.
- Miles, J., 1986: Richardson's criterion for the stability of stratified shear flow. *Phys. Fluids*, **29**, 3470-3471, doi:10.1063/1.865812.
- _____, and L. N. Howard, 1964: Note on a heterogeneous shear flow. *J. Fluid Mech.*, **20**, 331-336, doi:10.1017/S0022112064001252.
- Miyamoto, Y., A. Matsumoto, and S. Ito, 2023: Statistical

- analysis of aviation turbulence in the middle-upper troposphere over Japan. *J. Appl. Meteor. Climatol.*, **62**, 575-588, doi:10.1175/JAMC-D-21-0191.1.
- Mlawer, E. J., S. J. Taubman, P. D. Brown, M. J. Iacono, and S. A. Clough, 1997: Radiative transfer for inhomogeneous atmospheres: RRTM, a validated correlated-k model for the longwave. *J. Geophys. Res.*, **102**, 16663-16682, doi:10.1029/97JD00237.
- MOLIT-KIAST, 2025: *Aviation Safety Brief*. Ministry of Land, Infrastructure and Transport and Korea Institute of Aviation Safety Technology, **13**, 14 pp.
- Schumann, U., 1991: Subgrid length-scales for large-eddy simulation of stratified turbulence. *Theoret. Comput. Fluid Dynamics*, **2**, 279-290, doi:10.1007/BF00271468.
- Sharman, R. D., C. Tebaldi, G. Wiener, and J. Wolff, 2006: An integrated approach to mid- and upper-level turbulence forecasting. *Wea. Forecasting*, **21**, 268-287, doi:10.1175/WAF924.1.
- _____, and J. M. Pearson, 2017: Prediction of energy dissipation rates for aviation turbulence. Part I: Forecasting nonconvective turbulence. *J. Appl. Meteor. Climatol.*, **56**, 317-337, doi:10.1175/JAMC-D-16-0205.1.
- _____, S. B. Trier, T. P. Lane, and J. D. Doyle, 2012: Sources and dynamics of turbulence in the upper troposphere and lower stratosphere: A review. *Geophys. Res. Lett.*, **39**, L12803, doi:10.1029/2012GL051996.
- _____, and T. Lane, 2016: *Aviation turbulence*. Springer International Publishing, Switzerland, 523 pp.
- Skamarock, W. C., and Coauthors, 2019a: A description of the advanced research WRF version 4. *NCAR Tech. Note NCAR/TN-556+STR*, 145 pp.
- _____, C. Snyder, J. B. Klemp, and S.-H. Park, 2019b: Vertical resolution requirements in atmospheric simulation. *Mon. Wea. Rev.*, **147**, 2641-2656, doi:10.1175/MWR-D-19-0043.1.
- Tewari, M., and Coauthors, 2004: Implementation and verification of the unified NOAA land surface model in the WRF model. *20th conference on weather analysis and forecasting/16th conference on numerical weather prediction*, 11-15 pp.
- Trier, S. B., and R. D. Sharman, 2009: Convection-permitting simulations of the environment supporting widespread turbulence within the upper-level outflow of a mesoscale convection system. *Mon. Wea. Rev.*, **137**, 1972-1990, doi:10.1175/2008MWR2770.1.
- _____, and _____, 2018: Trapped gravity waves and their association with turbulence in a large thunderstorm anvil during PECAN. *Mon. Wea. Rev.*, **146**, 3031-3052, doi:10.1175/MWR-D-18-0152.1.
- _____, _____, D. Muñoz-Esparza, and T. Lane, 2020: Environment and mechanisms of severe turbulence in a midlatitude cyclone. *J. Atmos. Sci.*, **77**, 3869-3889, doi:10.1175/JAS-D-20-0095.1.
- _____, _____, _____, and T. L. Keller, 2022: Effects of distant organized convection on forecasts of widespread clear-air turbulence. *Mon. Wea. Rev.*, **150**, 2593-2615, doi:10.1175/MWR-D-22-0077.1.
- WMO, 2007: *Aviation Hazards*. World Meteorological Organization, WMO/TD-No. 1390, ETR-20, 59 pp.
- Yang, S.-I., J. H. Lee, and J.-H. Kim, 2024: A case study on near-cloud turbulence around the mesoscale convective system in the Korean peninsula. *Atmosphere*, **34**, 153-176, doi:10.14191/Atmos.2024.34.2.153.
- Zovko-Rajak, D., and T. P. Lane, 2014: The generation of near-cloud turbulence in idealized simulations. *J. Atmos. Sci.*, **71**, 2430-2451, doi:10.1175/JAS-D-13-0346.1.