

Original Article

<https://doi.org/10.12985/ksaa.2025.33.3.093>
ISSN 1225-9705(print) ISSN 2466-1791(online)

한국형 수치예보모델(KIM) 기반의 한국형 항공 난류 예측모델(KTG) 구축 및 검증

강유정*, 김은미**, 최희욱***, 이상삼****, 최범규*****, 오희진*****, 임소영*****, 김승범*****

Development and Verification of the Korean Aviation Turbulence Guidance(KTG) based on the Korean Integrated Model(KIM)

Yujeong Kang*, Eunmi Kim**, Hee-Wook Choi***, Sang-Sam Lee****, Beomgyu Choi*****,
Heejin Oh*****, So-young Yim*****, Seungbum Kim*****

ABSTRACT

Aviation turbulence is one of the significant meteorological phenomena threatening aviation safety, causing sudden and severe disturbances to aircraft during flight. Recently, the Korea Meteorological Administration (KMA) has developed the Korean Integrated Model (KIM), a numerical weather prediction model specifically tailored for the Korean Peninsula and East Asia, aiming to replace the existing Unified Model (UM)-based forecast system. In this study, we newly established the KIM-based Korean Aviation Turbulence Guidance (KIM-KTG) system by transitioning from the currently operational UM-based KTG system. Verification of the predictive performance of the developed KIM-KTG system confirmed that its accuracy is sufficient for practical use in aviation operations. The results of this study are expected to contribute to improving the accuracy of aviation weather forecasts within Korea's Flight Information Region (FIR) in the future.

Key Words : Aviation Turbulence(항공 난류), Korean Aviation Turbulence Guidance(KTG; 한국형 항공 난류 예측모델), Korean Integrated Model(KIM, 한국형 수치예보모델), Eddy Dissipation Rate(에디소산률), Clear-Air Turbulence(청천난류)

1. 서 론

Received: 18. Aug. 2025, Revised: 09. Sep. 2025,

Accepted: 09. Sep. 2025

* 국립기상과학원 기상응용연구부 연구원

** 국립기상과학원 기상응용연구부 연구원

*** 국립기상과학원 기상응용연구부 연구사

**** 국립기상과학원 기상응용연구부 연구관

***** 항공기상청 차세대항공기상팀 기상서기

***** 항공기상청 차세대항공기상팀 기상주사

***** 항공기상청 차세대항공기상팀 팀장

***** 국립기상과학원 기상응용연구부 부장

연락처 E-mail : yjeong96@korea.kr

연락처 주소 : 인천광역시 중구 제2터미널대로 444,

국립기상과학원

항행 중인 비행기에 갑작스러운 흔들림을 야기시키는 대기 중 난류를 항공 난류(Aviation Turbulence)라 정의한다(Lane et al., 2012; Sharman and Lane, 2016). 강한 강도의 항공 난류는 탑승객 및 기내 종사자에게 큰 부상을 초래하며, 공역 용량과 효율성에도 부정적인 영향을 미친다(Sharman and Lane, 2016; Kim et al., 2018). 특히 맑은 하늘에서 갑작스럽게 발생하는 청천난류(Clear-Air Turbulence, CAT)는 예측이 어렵고 피해 규모도 크기 때문에 정확

한 예측이 필수적이다(Sharman et al., 2006; Kim and Chun, 2011). 이에 많은 연구진들을 중심으로 항공 난류 예측연구가 적극적으로 이루어지고 있으며(Sharman et al., 2006; Kim and Chun, 2011, 2012; Lee and Chun, 2018; Lee et al., 2022), 기상청은 2013년부터 한국형 항공 난류 예측모델(Korean aviation Turbulence Guidance, KTG)의 현업 운영을 시작하여 항공 난류에 대한 공역 예보 및 항공 기상 정보를 지원하고 있다.

KTG는 동아시아 영역의 CAT 예측을 목적으로 개발되었다(Kim and Chun, 2011, 2012). 이 모델은 수치예보모델 자료로부터 CAT 발생 관련 난류 진단지수들을 산출하고, 이를 정규화 및 가중 합산하여 최종 난류 지수를 도출하는 방식으로 구성된다(Sharman et al., 2006; Kim and Chun, 2011; Lee and Chun, 2018). 현재 기상청에서 운영 중인 시스템은 UM-GDAPS(Unified Model-Global Data Assimilation and Prediction System) (UM N1280 L70)에 기반한 KTG(이하 UM-KTG)로, AUC(Area Under Curve) 0.8 이상의 예보 정확도를 보이며 항공 산업에 실용적으로 활용되고 있다(Kang et al., 2025).

한편, 기상청은 오랜 기간 활용해온 영국 기상청의 통합모델(Unified Model, UM)이 가진 구조적 한계인 물리 모듈의 유연한 수정이 어렵고, 한반도에 특화된 기상현상의 정밀한 재현이 제한적이라는 점 등을 인식하였다(Hong et al., 2018). 이를 극복하기 위해 한국형 수치예보모델개발사업단(Korea Institute of Atmospheric Prediction Systems, KIAPS)은 UM을 대체할 한국형 수치예보모델(Korean Integrated Model, KIM)을 개발했다(Hong et al., 2018). KIM은 한반도의 지형 및 기상 특성을 정밀하게 반영하는 전 지구 수치예보 모델로, 2020년 4월부터 현업에 도입되었다(Kwon, 2023). 특히 고해상도 비정역학 체계와 병렬 컴퓨팅 최적화 구조를 통해 예보 정확도를 크게 향상시켰다(Hong et al., 2018; Kwon, 2023).

현재 기상청은 모든 수치예보 및 응용 모델에 대해 KIM 기반으로의 전환을 목적으로 하고 있다. 이러한 흐름에 따라 항공 난류 예보의 핵심인 KTG 역시 입력 수치예보모델 자료를 기존 UM-GDAPS에서 KIM-GDAPS로 변경할 필요성이 제기되었다. 이에 본 연구에서는 KIM-GDAPS를 입력 수치예보모델 자료로 사용하는 KTG(이하 KIM-KTG)를 구축하였다. 나아가, 2023

년 1년간 한반도 상공에서 관측된 민간항공기의 EDR(Eddy Dissipation Rate) 자료를 이용하여 KIM-KTG의 성능을 정량적으로 검증하고, UM-KTG와 비교 분석을 통해 현업 활용 가능성을 평가하고자 한다.

이러한, KIM 기반의 항공난류 예측모델 구축은 처음 시도되었으며, 이는 KIM 자료를 활용한 항공기상 예측모델 개발의 첫 번째 사례라는 점에서 중요한 의미를 가진다.

II. KIM-KTG 구축 및 검증 방법

2.1 한국형 항공 난류 예측모델(KTG)

동아시아 영역은 강한 제트기류가 지나가는 지역으로 상층에서의 항공 난류 발생 가능성이 매우 높은 것으로 알려져있다(Koch et al., 2006; Jaeger and Sprenger, 2007; Lee et al., 2023). 이러한 위험 기상에 효과적으로 대응하기 위해 동아시아 기상 특성이 반영된 항공 난류 예측 모델인 KTG를 개발하였다(Kim and Chun, 2011, 2012). 자세한 KTG의 알고리즘은 Kim & Chun(2011, 2012)에 서술되었으며, 본 논문에서는 간략하게 언급하겠다.

먼저, 기상청 현업 수치예보모델에서 산출되는 난류 관련 지수들과 동아시아 영역에서 관측된 조종사보고(Pilot REports, PIREPs) 난류 자료를 비교하여 각각의 지수들에 대하여 각 난류 강도[null(NIL), light(LGT), moderate(MOD), severe(SEV), extreme(EXT)]에 대응되는 임계값들 및 난류 예측성 정보에 대한 look-up table을 만든다. 다음으로 Table로 만든 개별 난류 진단지수들의 임계값을 각 지수의 난류 강도에 대응되는 임계값으로 정의하고, 각 난류 강도별 1차원 mapping 함수에 적용하여 0부터 1사이의 값으로 개별지수들을 변환하여 다양한 단위 및 범위를 가지는 개별 난류 진단지수값을 표준화한다. 마지막으로 mapping된 개별지수에 대해서 가중치를 적용하고, 하나로 결합하여 최종 KTG 난류지수값을 산출한다. KTG의 난류 강도 임계값은 단위가 없으며 LGT는 0.3, MOD는 0.475, SEV는 0.75이다.

KTG는 2013년부터 현업으로 운영하기 시작하였으며, 현재 UM-GDAPS를 기반으로 산출되고 있다. UM-KTG의 수평해상도는 12 km이며, 고도는 지상~40,000 ft에 대해서 1,000 ft 간격으로 자료가 생산된

다. 또한, 하루 4회(0000, 0600, 1200, 1800 UTC), 3 시간 간격으로 +30시간 예측시간까지 자료가 제공된다.

2.2 한국형 수치예보모델(KIM)

KIM은 KIAPS에서 전지구 중기 기상예보를 목적으로 개발된 국내 독자적인 기상 수치예보모델이다(Hong et al., 2018). 기존에 사용하고 있는 UM을 대체하여, 국가 기상예보 시스템의 기술적 자립성과 일관된 예보 체계 구현을 목표로 개발되었다(KMA KIAPS, 2020; KMA NMC, 2024).

KIM은 극점 특이점 문제를 해소한 정육면체구 격자 체계를 가지고 있으며, 수치 계산의 정확도와 병렬 효율을 고려한 분광요소법 기반의 비정역학 코어(Choi and Hong, 2016)와 고해상도 상세모의에 적합한 물리과정으로 구성되었다(Hong et al., 2018; KMA NMC, 2024). 위와 같은 설계로 대기의 연직 운동을 정밀하게 모의하여 다양한 규모의 대기 현상을 보다 정확히 재현할 수 있게 되었으며, 전 지구를 대상으로 하는 예보에서 좌표계 왜곡 없이 안정적이고 균일한 계산이 가능해졌다. 또한, 고품질의 초기장을 생성하기 위한 관측 전처리(Kang et al., 2018) 및 하이브리드 4차원 앙상블 변분 자료동화(Hybrid 4 Dimensional Ensemble Variational, Hybrid4DnVar) 체계가 갖추어져 있다(Hong et al., 2018). 2020년 4월부터 KIM version 3.5(KIM v3.5) 현업 운영하기 시작하였으며, 지속적인 업그레이드 및 개선을 통해 성능이 향상되고 있다(Kwon, 2023).

본 연구에서는 KIM v3.8(KIM NE360 NP3)을 사용하였다. KIM v3.8의 수평해상도는 12km, 연직해상도는 상층 0.01hPa까지 도달하는 수직 하이브리드층을 갖는 91층으로 산출되어 중-상층 대기 구조를 정밀하게 모의할 수 있다.

2.3 KIM-KTG 구축 방법

본 연구에서 KIM-KTG의 구축은 기존 UM-KTG의 진단-예측 구조를 그대로 유지하면서, 입력 수치예보모델 자료를 UM-GDAPS에서 KIM-GDAPS로 대체하는 방식으로 진행하였다. 이에 KIM-KTG 구축에 앞서 KIM-GDAPS가 KTG에 적용 가능한지 확인하였다.

먼저, KIM-GDAPS가 KTG 운영에 필요한 시-공간 해상도 요건을 충족하는지 분석하였다. KTG 운영을 위

해서는 수평해상도 12 km, 연직해상도 1,000 ft(지상~40,000 ft), 그리고 3시간 간격으로 최대 +30시간의 예측자료가 요구된다. 분석 결과, KIM-GDAPS는 KTG의 이러한 시-공간 해상도 조건을 모두 만족하였다.

다음으로, KTG 시스템에 입력되는 예측 요소들을 확인하였다. Table 1에 입력 예측 요소를 수치예보모델별로 비교하여 나타냈다. 비교 결과, KTG 모델에 필요한 요소들이 KIM-GDAPS에도 모두 존재했다. 다만, 단일면 고도 자료가 지위고도(geopotential height)로 제공되어, 이를 기하학적 고도(geometric height)로 변환하는 전처리 과정이 추가로 필요했다.

위 분석을 통하여 KIM-GDAPS가 KTG의 입력 수치예보모델 자료로 대체가능함을 확인하였다. 이에 따라 KIM-GDAPS를 입력 수치예보모델로 하는

Table 1. Comparison of input components for KTG between UM-GDAPS and KIM-GDAPS

요소	UM-GDAPS	KIM-GDAPS
파일명	단일면: g120_v070_erea_unis_h[HHH].[YYYYMMDD HH].gb2 등압면: g120_v070_erea_pres_h[HHH].[YYYYMMDD HH].gb2	단일면: KIM_g120_ne36_unis_h[HHH].[YYYYMMDD HH].gb2 등압면: KIM_g120_ne36_pres_h[HHH].[YYYYMMDD HH].gb2
고도	단일면: Geometric height (m) 등압면: Geopotential height (gpm)	단일면, 등압면: Geopotential height (gpm)
압력	단일면: Pressure reduced to MSL (Pa) 등압면: Isobaric surface (Pa)	
온도	Temperature (K)	
상대 습도	Relative humidity (%)	
동서 바람	U-component of wind (m s ⁻¹)	
남북 바람	V-component of wind (m s ⁻¹)	
연직 바람	Vertical velocity (geometric) (m s ⁻¹)	
위도	Latitude (Lambert conformal)	
경도	Longitude (Lambert conformal)	

KIM-KTG를 최종 구축하였다.

2.4 검증 방법 및 자료

검증은 선행연구를 참고하여(e.g. Sharman et al., 2006; Kim et al., 2011; Lee et al., 2022), POD(Probability Of Detection) 통계적 검증 방법을 사용하였다. 특정 임계값에 대하여 중강도 이상(Moderate-Or-Greater, MOG)의 난류가 관측된 지점에서 가장 가까운 격자점의 KTG 예측자료가 난류를 예측할 확률을 PODY(Probability Of Detection of "Yes")(Table 2, Eq. 1), 난류가 관측되지 않은(null, NIL) 지점에서 가장 가까운 격자점의 KTG 예측자료 역시 난류를 예측하지 않을 확률을 PODN(Probability Of Detection of "No")로 나타낸다(Table 2, Eq. 2) (Kim and Chun, 2012; Lee and Chun, 2018).

여기서 임계값을 변경시켜가며 POD 계산을 수행할 경우, PODY-PODN 쌍의 집합이 얻어지며 이를 x-y 도면에 표시하여 점들을 따라 그리면 ROC(Receiver Operating Characteristic) 커브가 만들어진다(Fawcett, 2006). 이 곡선의 아래 면적(Area Under Curve, AUC)이 모델의 예측성을 나타내는 값이 되고 0.5에서 1사이의 값을 가진다(Fielding and Bell, 1997). 1에 가까울수록 모델 분류 성능이 좋은 것을 의미하며, 0.5에 가까울수록 무작위 예측과 동일한 예측성능을 갖는 것을 의미한다(Tebaldi et al., 2002; Lee et al., 2022; Kang et al., 2025).

또한, TSS(True Skill Statistic) 방법을 이용하여 MOD 임계값에서의 정확도 검증을 수행하였다. (Allo-

uche et al., 2006). TSS는 PODY와 PODN을 사용하여 계산되며(Eq. 3), -1에서 1사이의 값을 가진다. 1에 가까워질수록 그 임계값에서의 정확도가 높은 것을 의미하며, 0 이하로 내려가면 예측성능이 거의 없음을 의미한다.

검증은 2023년 1월 1일부터 12월 31일까지, 한반도 영역(27.5~44°N, 119~135°E)에 대하여 수행하였다. 검증에 사용한 관측자료는 국제항공운송협회(International Air Transport Association, IATA)에서 민간항공기로부터 수집된 EDR 자료를 활용하였다. EDR은 국제민간항공기구(International Civil Aviation Organization, ICAO)에서 지정한 표준 항공 난류 지표로, 항공 난류 강도를 추정하는 유용한 척도이다(Cornman et al., 1995; Sharman et al., 2014). 검증에 사용하는 관측자료의 난류 강도 임계값은 선행연구(Lee et al., 2022, Kang et al., 2025)를 참고하여 NIL을 $0.01 \text{ m}^{2/3}\text{s}^{-1}$ 미만, MOG를 $0.22 \text{ m}^{2/3}\text{s}^{-1}$ 이상으로 분류하였다.

예측자료는 0000 UTC에 생산되는 KTG 자료를 사용하였으며, 예측시간(forecast time)별로 검증을 진행하였다. 예측자료와 관측자료의 비교는 예측시간으로부터 ±1시간 이내에 가장 근접한 격자점에서 관측된 EDR 자료와 비교하였다(e.g. Lee et al., 2022). 만약 동일 격자 및 시간 범위 내에 여러 관측값이 존재할 경우, 가장 큰 EDR 값을 대표로 사용하여 자료의 중복을 배제하였다.

III. KIM-KTG 구축 결과

본 절에서는 KIM-KTG 자료 구조 및 산출 예시를 설명하고, 검증 결과에 대하여 기술하였다. 또한, UM-KTG와 KIM-KTG에 대해 전체기간별, 고도별, 계절별로 비교 분석을 수행한 내용을 포함하였다.

3.1 KIM-KTG 자료 구조 및 예시

KIM-KTG는 입력 수치예보모델을 KIM-GDAPS로 변경한 KTG로, UM-KTG의 공간 및 시간해상도와 동일하게 산출된다. 새롭게 구축된 KIM-KTG의 산출이 잘 되었는지 확인하기 위해, 실제 AIREP(Air REPort)에 MOG 강도 난류가 보고된 사례의 예측자료에 대해서 정성적으로 비교 분석하였다. Fig. 1은 2023년 3월

Table 2. The four cases of receiver operating characteristic (ROC)

2×2 contingency table		Event observed	
		MOG	NIL
Event forecast	MOG	True positive (TP)	False positive (FP)
	NIL	False negative (FN)	True negative (TN)

$$\text{PODY} = \text{TP}/(\text{TP}+\text{FN}) \quad (1)$$

$$\text{PODN} = \text{TN}/(\text{TN}+\text{FP}) \quad (2)$$

$$\text{TSS} = \text{PODY} + \text{PODN} - 1 \quad (3)$$

29일 0000 UTC에 제주남부섹터 부근에서 MOD 강도 난류가 관측된 시점의 KIM-KTG 예측 결과이며, 비교를 위해 동일 시각의 UM-KTG 예측 결과를 Fig. 2에 함께 나타내었다. 두 모델의 예측 결과를 비교했을 때, 한반도 및 동아시아 영역에서 난류 발생의 전반적인 공간 분포가 매우 유사한 양상을 보였다. 특히, 실제 난류가 보고된 제주남부섹터 해상에서 두 모델 모두 MOG 강도에 해당하는 난류를 성공적으로 예측하였다. 이처럼 KIM-KTG가 기존 UM-KTG와 유사한 수준으로 난류 발생 구역과 강도를 모의하는 것을 통해, 모델이 잘 구축되었음을 확인할 수 있었다. 다만, 본

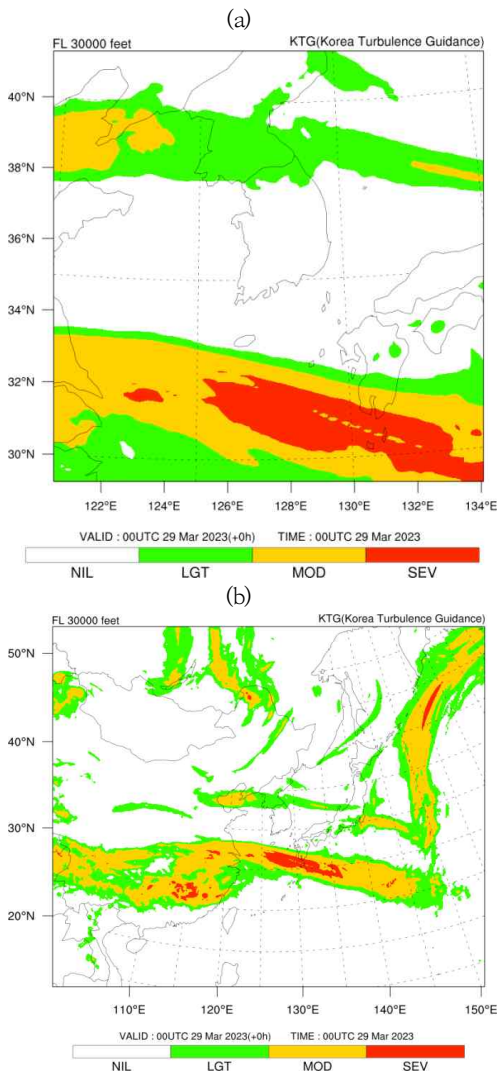


Fig. 1. KTG turbulence index for KIM-KTG of (a) Korean peninsula and (b) East Asia. The case is March 29 00UTC, 2023

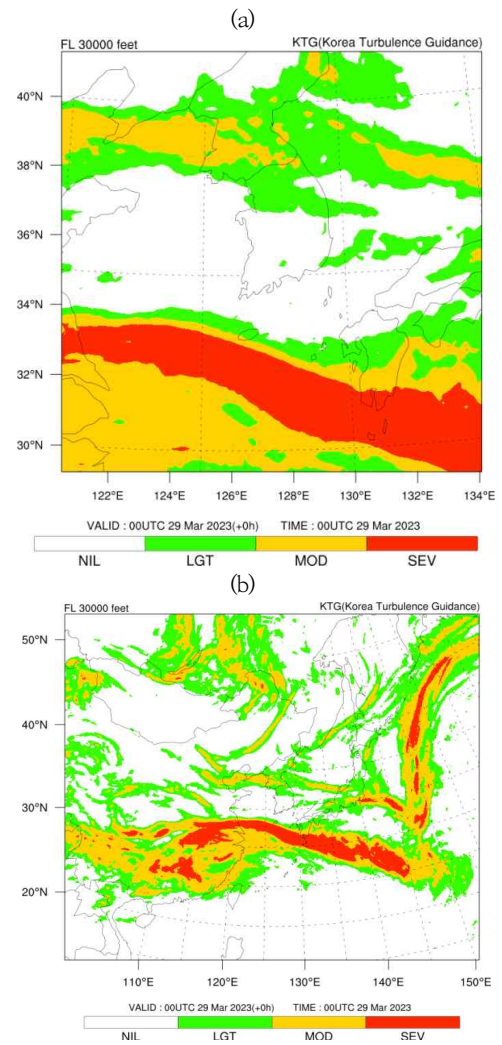


Fig. 2. Same as Fig. 1, but for UM-KTG

사례에서 KIM-KTG가 UM-KTG에 비해 전반적으로 난류 강도를 다소 약하게 모의하는 경향을 확인할 수 있었는데, 이는 본 사례뿐만 아니라 다른 사례에서도 동일한 경향성을 보였다.

3.2 KIM-KTG 검증 결과

앞서 정성적 분석을 통해 KIM-KTG가 잘 구축되었음을 확인하였다. 본 절에서는 KIM-KTG가 항공기상 예보 및 항공 운항 관련 종사자가 유의하게 활용할 수 있는 수준의 객관적인 예측 성능을 갖추었는지 평가하기 위해, 통계 기반의 정량적 검증을 수행하였다.

검증기간 및 영역은 2023년 1월 1일부터 12월 31

일 동안 한반도 영역에 대해 수행하였다. 또한, 예측시간별(0000 UTC부터 +2100 UTC까지 3시간 간격)로 검증을 진행하였으며 예측시간 기준으로 ± 1 시간의 가장 가까운 예측자료의 격자점과 비교하였다. 모델 성능 검증은 예측시간별로 구해진 AUC, PODY, PODN, TSS 값을 각각 평균하여 분석하였다.

전체 검증 기간에 대한 KIM-KTG와 UM-KTG의 예측 성능을 비교한 결과(Table 3 및 Fig. 3), 두 모델 모두 AUC 0.7 이상의 우수한 예측 성능을 보였다. 세부적으로 AUC, PODN, TSS 값은 KIM-KTG가 각각 0.05 더 높았다. 한편 PODY 값은 0.01 차이로 두 모델간에 차이가 거의 없었다. 이러한 결과는 두 모델 모두 MOG 난류를 예측하는 정확도는 유사하나, KIM-KTG가 NIL 사례를 더 높은 정확도를 가지고 모의하고 있음을 나타낸다. 즉, UM-KTG가 NIL 사례에서 난류 강도를 다소 더 강하게 모의하는 경향이 있는 것으로 판단된다.

더 상세한 분석을 위해, 고도별 및 계절별로 분석하였다. 먼저, 고도별로 정확도를 살펴보았다. 고도는 선행연구를 참고하여(e.g. Lee et al., 2022), 20,000 ft 이상을 상층(upper-level)으로, 10,000 ft ~ 20,000 ft를 중층(middle-level)으로, 10,000 ft 이하를 하층(low-level)으로 구분하였다.

고도별 검증 결과, 전반적으로 모든 고도에서 KIM-KTG의 성능이 UM-KTG보다 좋았으며, 고도별로는 상층, 하층, 중층 순으로 높게 나타났다(Table 4). 자세히 살펴보면, 상층에서는 KIM-KTG와 UM-KTG의 AUC가 각각 0.835, 0.827이었으며, TSS는 0.44로 동일하였다. 이러한 결과는 두 모델 모두 신뢰도 높은 정확도를 가지는 수준(AUC=0.8) 이상에 부합한다(Fahey, 1993; Sharman et al., 2006; Kim et al., 2009). 상층에 비해 중-하층에서의 정확도는 AUC 및 TSS가 각각 약 0.75, 약 0.32 이하로 다소 낮았다. 이

Table 3. Comparison of verification results between KIM-KTG and UM-KTG during 2023

	KIM-KTG	UM-KTG
AUC	0.777	0.727
PODY	0.42	0.41
PODN	0.92	0.87
TSS	0.33	0.28

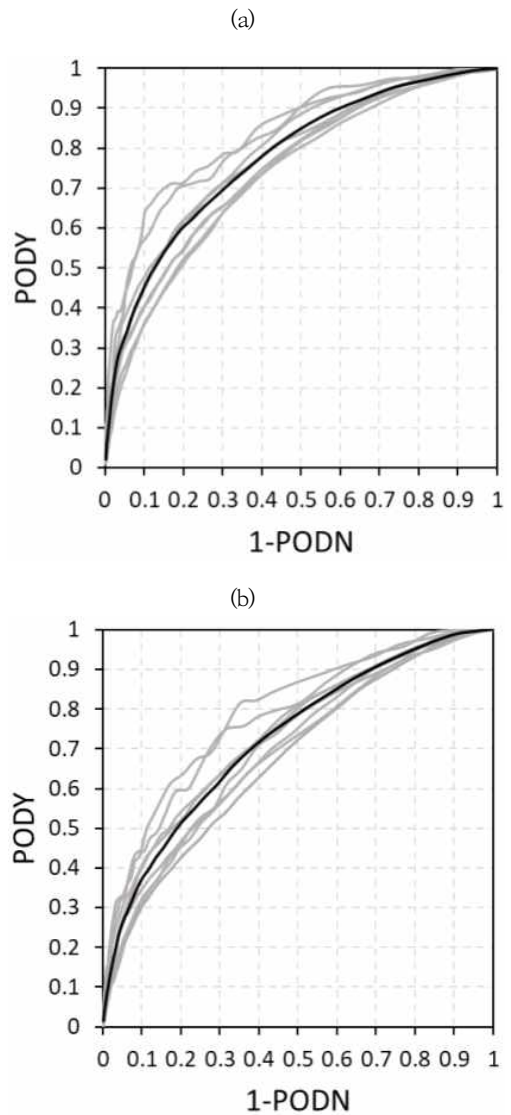


Fig. 3. ROC curves of (a) KIM-KTG and (b) UM-KTG during 2023. Gray solid lines indicate ROC curves for each lead time, and black solid lines represent the mean ROC curve across all lead times

는 상층의 CAT 예측에 최적화된 KTG의 특성 때문으로 판단된다(Kim and Chun, 2011, 2012).

그리고 특징적으로 두 모델 모두 중층이 하층에 비하여 정확도가 낮게 나타났다. 자세히는 하층에 비하여 중층이 KIM-KTG 및 UM-KTG의 AUC가 각각 0.081, 0.025, TSS는 각각 0.17, 0.19 더 낮았다. 이렇게 중층의 난류 예측 정확도가 낮았던 이유는 하층과 중층의 난류 발생 원인이 서로 다르게 나타났기 때

Table 4. Altitudinal verification results for KIM-KTG and UM-KTG

	KIM-KTG	UM-KTG
Low-level (~ 10,000 ft)		
AUC	0.759	0.684
PODY	0.41	0.42
PODN	0.92	0.84
TSS	0.32	0.26
Middle-level (10,000 ft ~ 20,000 ft)		
AUC	0.708	0.659
PODY	0.25	0.19
PODN	0.90	0.88
TSS	0.15	0.07
Upper-level (20,000 ft ~)		
AUC	0.835	0.827
PODY	0.53	0.58
PODN	0.91	0.86
TSS	0.44	0.44

문으로 보인다. 즉, 하층에 비하여 중층에서 난류 발생 원인이 CAT가 아닌 대류 및 지형으로 인한 난류 등의 다른 원인이 복합적으로 더 많은 영향을 주었을 가능성이 있는 것으로 판단된다.

다음은 계절별로 살펴보았다. 계절은 3월부터 5월을 봄(March-April-May, MAM), 6월부터 8월까지를 여름(June-July-August, JJA), 9월부터 11월까지를 가을(September-October-November, SON), 12월 및 1~2월은 겨울(December-January-February, DJF)로 구분하였다.

먼저, KIM-KTG의 계절별 검증결과(Table 5), AUC는 봄(0.821), 겨울(0.814), 가을(0.776), 여름(0.762) 순으로 높았고 TSS는 겨울(0.43), 봄(0.42), 가을(0.29), 여름(0.24) 순으로 높았다. PODN은 전체적으로 0.09의 변동성을 가져 유사하였으나, PODY는 0.28의 범위에서 변동하여 계절별로 차이가 크게 나타났다. 자세한 것은 봄, 겨울에 PODY가 0.5 이상으로 예측 정확도가 높았으며, 가을과 여름에는 정확도가 낮았다. 특히, 여름에는 PODY가 0.3을 넘지 못했다. 이러한 계절별 정확도는 CAT 예측을 목적으로 만들어진 난류 예측모델이 여름에 주로 나타나는 대류 기원 난류를 잘 예측하지

Table 5. Seasonal verification result for KIM-KTG

	MAM	JJA	SON	DJF
AUC	0.821	0.762	0.776	0.814
PODY	0.52	0.29	0.37	0.57
PODN	0.89	0.95	0.93	0.86
TSS	0.42	0.24	0.29	0.43

Table 6. Same as Table 5, but for UM-KTG

	MAM	JJA	SON	DJF
AUC	0.797	0.747	0.729	0.710
PODY	0.60	0.29	0.38	0.50
PODN	0.84	0.95	0.88	0.79
TSS	0.43	0.24	0.27	0.29

못한다는 선행연구와 일치한다(Kim and Chun, 2011; Lee and Chun, 2015; Kang et al., 2025).

더 나아가, UM-KTG의 계절별 검증 결과와 비교하였다(Table 6). 모든 계절에서 KIM-KTG의 AUC가 UM-KTG에 비하여 높았으며, TSS는 겨울을 제외하고 두 모델이 유사하였다. 자세히 살펴보면, KIM-KTG와 UM-KTG 모두 봄에 각각 TSS가 0.42, 0.43으로 높은 정확도를 보였으며, 가을 및 여름에는 TSS가 0.3을 넘지 못해 다소 낮은 정확도를 나타냈다. 한편, 겨울의 예측 정확도는 KIM-KTG가 AUC 및 TSS가 각각 0.104, 0.14 더 높았다. 이는 전 계절에 걸쳐 KIM-KTG의 성능이 더 좋았으며, 특히 KIM-KTG가 한반도의 겨울 특성을 더 잘 반영하여 겨울에 발생하는 CAT를 UM-KTG보다 더 잘 모의했던 것으로 판단된다.

정량적 검증 결과, KIM-KTG는 UM-KTG보다 더 높은 정확도를 가졌으며, 특히 봄과 겨울 그리고 상층에서 정확도가 높았다. 이러한 과정을 통해 KIM-KTG가 예보 활용 및 항공 관련 종사자가 유의하게 활용할 수 있는 자료로써 사용 가능하다는 것을 확인하였다.

IV. 결 론

현재 기상청에서는 수치예보 및 응용기상 모델을 KIM 중심으로의 전환을 추진하고 있다. 이러한 흐름에 맞추어, 본 연구에서는 항공 난류 예보 서비스의 핵심인 KTG 모델에 대해 입력 수치예보모델을 UM에서

KIM으로 변경하여 구축하는 것을 목적으로 하였다.

KIM-KTG의 구축은 기존에 UM-GDAPS로 운영하고 있는 UM-KTG의 진단-예측 구조를 그대로 유지하나, 입력 수치예보모델을 KIM-GDAPS로 대체하는 방식으로 수행하였다. 이에 KTG의 자료구조에 KIM-GDAPS가 호환 가능한지 시-공간해상도와 입력자료를 비교 분석하였다. 비교 분석한 결과, 호환가능한 구조임을 확인하였다. 다만, KIM-GDAPS의 단일면 고도자료가 지위 고도로 제공되기 때문에, 이를 기하학적 고도로 변환하는 전처리 과정을 추가하여 KIM-KTG를 구축하였다.

구축 후 KIM-KTG가 산출이 잘 되었는지 확인하기 위하여, UM-KTG와 정성적으로 비교 분석하였다. 분석 결과, 전체적으로 예측 영역 및 강도가 유사하게 모의되었음을 확인하였으며, 이를 통해 산출이 잘 이루어진 것으로 판단하였다. 한편, KIM-KTG가 기존의 UM-KTG보다 다소 약하게 모의되는 경향이 있었다.

더 나아가, 구축된 KIM-KTG의 정량적 검증을 통하여 객관적인 성능을 평가하였다. 2023년 1월 1일부터 12월 31일까지 한반도 영역에 대해서 UM-KTG와 함께 전체기간, 고도별, 계절별로 비교 분석을 수행하였다.

먼저, 전체기간에 대한 검증 결과, 두 모델 모두 AUC가 0.7 이상으로 높은 성능을 보였으며, KIM-KTG(AUC=0.777)가 UM-KTG(AUC=0.727)에 비하여 더 성능이 좋았다. 한편, POD는 유사하였으나 PODN은 KTG가 더 높았다. 이는 KIM-KTG가 NIL 사례에서 UM-KTG보다 더 높은 정확도를 가짐을 의미하며, UM-KTG가 NIL 강도 난류를 다소 과대모의하고 있음을 나타낸다. 다음으로, 고도별 검증 결과는 전반적으로 전 고도에서 UM-KTG에 비하여 KIM-KTG의 성능이 더 좋았으며, 상층, 하층, 중층 순으로 정확도가 높았다. 한편, 층별로 정확도가 상이하였는데, 이는 연직층별로 난류 발생 메커니즘이 다르게 나타났던 것으로 판단된다. 마지막으로, 계절별 검증 결과에서는 봄, 겨울에 정확도가 높고, 그 다음으로 가을과 여름이 가장 낮은 정확도를 보였다. 가을과 여름에 정확도가 낮았던 것은 선행연구에서도 언급이 되었다(Kim and Chun, 2011, 2012; Kang et al., 2025).

위 결과들을 통해, KTG의 입력 수치예보모델을 KIM-GDAPS로 대체한 KIM-KTG 구축이 가능하였으며, 구축된 KIM-KTG는 예보 및 항공종사자가 유의하게 사용할 수 있는 모델로써 사용할 수 있음을 확인하

였다. 이러한 UM에서 KIM으로의 입력 수치예보모델 변경은 모델의 일관성 확보 및 전반적인 공역 예보 신뢰성 향상이 기대된다.

V. 연구의 한계점 및 향후 개선 방향

본 연구는 KIM-KTG가 기존 UM-KTG를 성공적으로 대체할 수 있는 신뢰도 높은 항공난류 예측 모델임을 입증하였다. 그럼에도 불구하고, 특정 조건에서는 예측 성능의 한계가 관찰되었다. 본 장에서는 이러한 한계점을 분석하였으며, 향후 모델 개선을 위한 방향을 제시하였다.

본 연구에서 확인된 주된 한계점은 다음과 같다. 첫째로, 중-하층 고도에서의 낮은 예측 정확도이다. 이는 상층의 CAT 예측에 최적화된 KTG 알고리즘이 대류 활동이나 복잡한 지형 효과 등 중-하층의 다른 난류 발생 메커니즘을 충분히 모의하지 못하기 때문으로 분석된다. 다음으로 계절별 검증 결과, 여름 및 가을에 보인 낮은 모델 정확도이다. 이는 해당 시기가 대류의 활동이 활발해지는 시기이기 때문에 KTG가 효과적으로 예측하지 못했던 것으로 판단된다.

따라서, KTG의 예측 한계점을 극복하기 위해서는 향후 연구에서 지형 효과 및 대류로 인해 발생하는 난류를 예측하는 모델의 개발이 필요하다. 또한 지속적인 검증을 통해 개선이 이루어져야 할 것이다.

한편, 기상청에서는 8km 수평해상도로 향상된 KIM v4.0(KIM NE576 NP3)을 2025년 5월부터 현업 운영을 시작하였다. 이에, 향후 고해상도 초기 입력 수치예보모델 자료를 활용한 KTG 시스템의 구축과 이에 관한 검증 및 개선이 필요할 것으로 보인다.

Acknowledgment

이 연구는 기상청 국립기상과학원 수요자 맞춤형 기상정보 산출기술 개발사업(KMA2018-00622)의 지원으로 수행되었습니다.

References

1. Lane, T. P., Sharman, R. D., Trier, S. B., Fovell, R. G., and Williams, J. K., "Recent advances in the understanding of near-cloud turbulence", *Bulletin of the American Met-*

- eteorological Society, 93(4), 2012, pp. 499-515.
2. Sharman, R. D., and Lane, T., "Aviation turbulence", Springer International Publishing, Switzerland, DOI, 10, 2016, pp. 3-978.
 3. Kim, J.-H., Sharman, R. D., Strahan, M., Scheck, J. W., Bartholomew, C., Cheung, J. C., Buchanan, P. B., and Gait, N., "Improvements in nonconvective aviation turbulence prediction for the World Area Forecast System", Bulletin of the American Meteorological Society, 99(11), 2018, pp. 2295-2311.
 4. Sharman, R., Tebaldi, C., Wiener, G., and Wolff, J., "An integrated approach to mid- and upper-level turbulence forecasting", Weather and Forecasting, 21(3), 2006, pp. 268-287.
 5. Kim, J. H., Chun, H. Y., Sharman, R. D., and Keller, T. L., "Evaluations of upper-level turbulence diagnostics performance using the Graphical Turbulence Guidance (GTG) system and pilot reports (PIREPs) over East Asia", Journal of Applied Meteorology and Climatology, 50(9), 2011, pp. 1936-1951.
 6. Kim, J. H., and Chun, H. Y., "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)", Journal of the Korean Society for Aviation and Aeronautics, 20(4), 2012, pp. 76-83.
 7. Lee, D. B. and Chun, H. Y., "Development of the Global-Korean aviation turbulence guidance (Global-KTG) system using the global data assimilation and prediction system (GDAPS) of the Korea meteorological administration (KMA)", Atmosphere, 28(2), 2018, pp. 223-232.
 8. Lee, D. B., Chun, H. Y., Kim, S. H., Sharman, R. D., and Kim, J.-H., "Development and evaluation of global Korean aviation turbulence forecast systems based on an operational numerical weather prediction model and *in situ* flight turbulence observation data", Weather and Forecasting, 37(3), 2022, pp. 371-392.
 9. Kang, Y. J., Choi, H. W., Choi, Y. N., Lee, S. S., Lee, H. S., Kim, E. S., and Kim, S. B., "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(1), 2025, pp. 85-99.
 10. Hong, S. Y., Kwon, Y. C., Kim, T. H., Esther, Kim, J. E., Choi, S. J., Kwon, I. H., Kim, J. H., Lee, E. H., Park, R. S. and Kim, D. I., "The Korean integrated model (KIM) system for global weather forecasting", Asia-Pacific Journal of Atmospheric Sciences, 54(Suppl 1), 2018, pp. 267-292.
 11. Kwon, Y. C., "The operational run of the newly developed KIM and update efforts at Korea meteorological administration", Numerical Weather Prediction: East Asian Perspectives. Cham: Springer International Publishing, 2023, pp. 105-123, doi:10.1007/978-3031-40567-9_4
 12. Koch, P., Wernli, H., and Davies, H. C., "An event based jet stream climatology and typology", International Journal of Climatology: A Journal of the Royal Meteorological Society, 26(3), 2006, pp. 283-301.
 13. Jaeger, E. B., and Sprenger, M., "A Northern Hemispheric climatology of indices for clear air turbulence in the tropopause region derived from ERA40 reanalysis data", Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 112, 2007, D20106, doi:10.1029/2006JD008189
 14. Lee, J. H., Kim, J. H., Sharman, R. D., Kim, J., and Son, S. W., "Climatology of clear

- air turbulence in upper troposphere and lower stratosphere in the Northern Hemisphere using ERA5 reanalysis data", *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 128(1), 2023, e2022JD037677, doi:10.1029/2022JD037679
15. KMA KIAPS, "Development of Korean integrated model", Korea Meteorological Administration Korea Institute of Atmospheric Prediction Systems, Republic of Korea, Seoul, KMA KIAPS, 2020, pp. 39-585.
 16. KMA NMC, "Verification of numerical weather forecasting system (2023)", Korea Meteorological Administration Numerical Modeling Center, Republic of Korea, Daejeon, KMA NMC, 2024, pp. 19-382.
 17. Choi, S. J., and Hong, S. Y., "A global non-hydrostatic dynamical core using the spectral element method on a cubed-sphere grid", *Asia-Pacific Journal of Atmospheric Sciences*, 52(3), 2016, pp. 291-307.
 18. Kang, J. H., and Coauthors, "Development of an observation processing package for data assimilation in KIAPS", *Asia-Pacific Journal of Atmospheric Sciences*, 54, 2018, doi:10.1007/s13143-018-0030-2
 19. Fawcett, T., "An introduction to ROC analysis", *Pattern Recognition Letters*, 27(8), 2006, pp. 861-874.
 20. Fielding, A. H. and Bell, J. F., "A review of methods for the assessment of prediction errors in conservation presence/absence models", *Environmental Conservation*, 24(1), 1997, pp. 38-49.
 21. Tebaldi, C., Nychka, D., Brown, B. G., and Sharman, R., "Flexible discriminant techniques for forecasting clear air turbulence", *Environmetrics: The Official Journal of the International Environmetrics Society*, 13(8), 2002, pp. 859-878.
 22. Allouche, O., Tsoar, A., and Kadmon, R., "Assessing the accuracy of species distribution models: prevalence, kappa and the true skill statistic (TSS)", *Journal of Applied Ecology*, 43(6), 2006, pp. 1223-1232.
 23. Cornman, L. B., Morse, C. S., and Cuning, G., "Real-time estimation of atmospheric turbulence severity from *in-situ* aircraft measurements", *Journal of Aircraft*, 32(1), 1995, pp. 171-177.
 24. Sharman, R. D., Cornman, L. B., Meymaris, G., Pearson, J., and Farrar, T., "Description and derived climatologies of automated in situ eddy-dissipation-rate reports of atmospheric turbulence", *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 53(6), 2014, pp. 1416-1432.
 25. Fahey, T. H. "Northwest Airlines atmospheric hazards advisory and avoidance system. In *International Conference on Aviation Weather Systems*", 5 th, Vienna, VA, 1993, pp. 409-413.
 26. Kim, J. H., Chun, H. Y., Jang, W., and Sharman, R., "A study of forecast system for clear-air turbulence in Korea, Part II: Graphical Turbulence Guidance (GTG) system", *Atmosphere*, 19(3), 2009, pp. 269-287.
 27. Lee, D. B., and Chun, H. Y., "A statistical analysis of aviation turbulence observed in pilot report (PIREP) over East Asia including South Korea", *Atmosphere*, 25(1), 2015, pp. 129-140.