論文

기상청 현업 통합모델과 조종사기상보고 자료를 이용한 한국형 항공난류
예측시스템 개발

김정훈*, 전해영**

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)

Jung-Hoon Kim* and Hye-Yeong Chun**

ABSTRACT

Korean aviation Turbulence Guidance (KTG) system is developed using the operational unified model (UM) of the Korea Meteorological Administration (KMA) and pilot reports (PIREPs) over East Asia. The KTG system comprised of twenty turbulence diagnostics that represent various turbulence potentials and have the best forecasting skills, which are combined into a single ensemble-averaged index, namely KTG, at upper-(above FL250) and mid-(below FL250) levels. It is found that the overall performance of the KTG is higher than those produced from the one single best index, and satisfies the minimum criteria (80% accuracy) that the system is operationally useful in aviation industry.

Key Words : Korean aviation Turbulence Guidance (KTG; 한국형 항공난류예측시스템), Unified Model (UM; 통합모델), Pilot reports (PIREPs; 조종사 기상보고)

1. 서 론

항공난류는 대기 중 난류 요란이 항공기에 직접적으로 영향을 주어 항공기가 급격히 흔들리는 현상으로 정의 된다[1]. 특히 이러한 항공난류는 레이더 에코 또는 대류운과 같이 사전에 인지 가능한 경고 없이, 맑은 하늘에서 급작스럽게 발생하는 청천난류 (Clear-Air Turbulence; CAT)가 대부분을 차지하고 있어 그 예측이 어려운 실정이다[2]. 특히, 한국 및 동아시아 지역은 전 세계에서 가장 강한 제트류가 존재하는 지역이기 때

문에[3], 제트류에 의한 시어 및 관성 불안정, 지균 조절, 관성과 등의 다양한 메커니즘에 의한 항공난류 발생 가능성이 높다. 또한, 한국은 국토의 70% 이상이 산악으로 구성되어 있어, 산악으로 유입되는 하층 바람 및 풍상측 안정도의 계절 변동에 따라, 다양한 스펙트럼의 산악파에 의한 난류 발생이 사계절 모두 용이하다[4].

항공난류 예측성을 향상시키기 위해서, 다양한 관점에서 연구가 이루어져 왔다. Kim and Chun [4]는 장기간 조종사 기상보고(pilot reports; 이하 PIREPs) 자료와 현업일기모델 및 Lightning 관측 자료를 이용해서 한국에서 발생한 항공난류를 각각 제트류 청천난류, 산악파에 의한 청천난류, 대류운과 관련된 난류로 분류하였으며, 민재식 등 [5]은 청천난류를 중심으로 시어불안정, 관성불안정, 산악파에 의한 청천난류로 분류하여 그 메커니즘별 시·공간적 분포 특성을 파악하였다.

2012년 11월 21일 접수 ~ 2012년 12월 21일 심사완료
논문심사일 (2012.11.23, 1차), (2012.12.21, 2차)

* 연세대학교 지구환경연구소

연락처: kimjh99@yonsei.ac.kr

서울특별시 서대문구 연세로 50

** 연세대학교 대기과학과

한편, Kim and Chun[6]은 5년(2003-2008)동안 하루에 가장 많은 난류가 발생한 2007년 4월 2일 사례에 대한 고해상도 수치모델 실험을 통해, 같은 기간 다른 지역에서의 난류 발생 원인이 각각 제트 하부의 시어 불안정, 산악파 파동파괴, 고기압성 회전에 의한 관성 불안정으로 다름을 보였다. 또한, 민재식 등[7]은 선행연구에서 분류된 대표 사례들에 대한 수치실험 연구를 통해 분류된 사례들의 발생 메커니즘을 확인하였다.

장기간 항공난류의 시·공간적 분포 특성 및 발생 메커니즘에 따른 분류, 고해상도 수치모델 실험을 통한 각 사례별 난류 발생 메커니즘에 대한 명시적 분석은 최종적으로 현업 일기예보모형을 이용한 통합난류예측 시스템을 구축하는데 기초가 되었다. 통합난류예측 시스템의 기본 가정은 다음과 같다. 항공기에 직접적으로 영향을 주는 작은 규모(~2 km)의 난류 에너지는 현업 일기모형에서 분해 가능한 큰 규모의 기상 요란 운동들로부터 에너지가 cascade down되어 나타난다[8]. 따라서, 항공난류의 발생 가능한 위치 및 강도는 다양한 난류발생 메커니즘에 의해 개발된 여러 난류진단지수들을 현업 일기모형에 적용하고, 그들의 예측성에 따라 통합함으로써 최적화된 진단 및 예측이 가능하다[9].

Sharman et al.[9]은 통합난류예측 방법론을 미국에서 관측된 PIREPs과 현업 일기모형에 적용한 GTG(Graphical Turbulence Guidance) 시스템을 개발하였으며, 이를 통해서 각 난류지수 및 SIGMET(significant meteorological information) 등과 같은 예보자의 경험에 의거한 난류 예측보다 GTG에 의한 난류예측이 더 정확함을 보였다. 한국에서는 신대원[10], 김영철과 박상환[11]이 난류 관측 자료로, 이승재와 김영철[12], Lee et al.[13], 김영철[14], 김영철[15]이 수치모델자료로부터 계산된 개별난류지수들을 관측된 PIREPs와 비교하여 그 특성들을 살펴보았다. 장욱 등[16]과 김정훈 등[17]은 개별난류지수들을 통합하여 예측된 난류발생 지역을 관측된 PIREPs자료와 비교 및 검증함으로써, 한국에서도 통합난류예측이 개별난류지수들보다 그 예측성이 뛰어남을 보였다. Kim et al.[18]은 미국의 GTG 방법론을 한국 및 동아시아 자료에 적용하고, 추가적으로 시스템 구성요소인 난류지수개수, 계절 변동, 사용된 모델자료 및 예보리드타임에 따른 예측 민감도를 조사함으로써 Sharman et al.[9]의 연구를 확장하였다. 김정훈과 전해영[19]은 기상청 현업 일기예보모델에 최적화된 한국형 통합난류예측 시스템을 구축하고, 이를 항공기상청에 현업화 하였다.

선행연구들을 통해 통합난류예측 시스템의 예측 정확성은 시스템에 사용된 모델과 관측 자료에 따라 다음과 같이 달라짐을 확인하였다. 첫째, 사용된 수치모델 자체의 큰 규모 대기 운동에 대한 예측 능력이 정확할수록, 이를 이용한 난류예측 정확성도 높아진다. 둘째, 사용된 수치모델의 수평 및 연직 해상도가 증가되면, 이들로부터 계산된 온도 및 바람의 수평 및 연직 증감 등이 정확해지고, 이를 통해 계산된 개별 난류지수들이 정확히 계산되어 통합난류예측 시스템의 예측성 향상으로 이어진다. 셋째, 사용된 관측 자료의 양과 질이 높을수록, 구성 난류지수들의 임계값이 관측에 맞게 보정되어 시스템의 난류 예측 성능이 증가한다[9, 17, 18, 19].

기상청 현업일기예보모델은 크게 전구 모델과 지역 모델로 나누어지며, 두 모델 모두 동일한 통합 모델[19]이 기반이지만, 지역 모델은 한국을 중심으로 더 세밀한 수평격자(12 km)를 가지는 등지격자(Fig. 1)에서의 기상 변수들을 예측한다. 본 연구에서는 지역 모델만 다루었으며, 기상청 현업 지역모델은 2010년 5월부터 통합모델을 기반으로, 전구모델에서 생산되는 초기 및 경계장 자료만을 이용한 Cold-run 방식으로 시작하였다. 하지만, 2011년 5월 23일부터는 모델 초기장 오차로 인한 예측 불안정을 해소하기 위해, 4차원 변분자료동화과정(4DVAR)을 사용하는 시스템으로 업데이트하였으며, 예보도 기존의 하루 2번(00과 12 UTC)에서 4번(00, 06, 12, 18 UTC)으로 증대함으로써 일기예측성 향상을 도모하고 있다.

Fig. 1. Domain of the regional Unified Model (UM) operated in the Korea Meteorological Administration (KMA).

따라서, 기상청 현업 일기예보모델의 결과를 초기값으로 사용하는 한국형 통합난류예측 시스템(Korean aviation Turbulence Guidance; 이하 KTG)의 구성요소들은 일기모델의 교체와 함께 새로 구성되어야 한다. 또한, 일기모델 생산 횟수가 기존보다 2배 더 많은 하루 4회로 증대되기 때문에, 일기모델 생산 시기를 중심으로 ± 2 시간 이내에 관측된 PIREPs 자료만을 사용하는 KTG 시스템에 더 많은 관측 자료가 사용됨으로써, 그 예측성 증대를 도모할 수 있다. 한편, 인천 비행정보구역(Flight Information Region; FIR)에서의 난류 예보는 중층(10,000-25,000 ft; FL100-250)은 인천공항에 위치한 항공기상청의 SIGMET을 통해서, 상층(FL250 이상)은 영국 런던에 위치한 세계영역예보센터(World Area Forecast Centre; WAFC)에서 하루에 두 번(00과 12 UTC) 생산되는 Significant Weather(SIGWX) 차트를 통해서 제공된다. 하지만 이러한 기존의 예보 시스템은 한국 및 동아시아 영역에서 항공 교통량의 증가와 함께 다양화된 항공 수요자들의 욕구를 만족 시키기에 턱없이 부족한 실정이다. 따라서, 본 연구를 통해 구축된 새로운 KTG 시스템은 기존의 예보 구분 기준에 맞게 세분화되고, 정확하게 생산되어야 한다. 본 연구에서의 새로운 KTG 시스템은 기존 예보 구분 기준에 맞추어 중층과 상층을 25,000 ft를 기준으로 나누고, 각 레벨에서는 1,000 ft 간격의 비행고도로 세분화하였다. 이를 통해 기존의 중상층 난류예측에 사용된 SIGMET과 SIGWX 차트에 일치하는 보조 자료로써, 새로운 KTG 시스템이 사용될 수 있도록 하였다.

본 연구의 구성은 다음과 같다. 2장에서는 새로운 KTG 시스템의 구성요소 설정(2.1) 및 구축된 구성요소 적용(2.2) 및 검증 결과(2.3)에 대해 서술하였다. 특히, 2.3장에서는 새로운 KTG 시스템의 예측 결과 및 기존 KTG 시스템과의 비교, 계절 및 구성난류지수 개수에 따른 예측 민감성 조사와 통계적 검증까지 수행하였다. 마지막으로 3장에서는 요약 및 결론을 서술하였다.

2. 본 론

2.1 KTG 시스템 구성

새로운 KTG 시스템의 방법론은 김정훈과 전해영[19]에서 구축한 기존 KTG 시스템과 크게 다르지 않게 세 단계(구성요소 설정, 구축된 요소 적용, 검증 단계)로 구성된다. 본 연구에서는 각 과정을 비교적 간단하게 서술하였으며, 관련

논문은 김정훈과 전해영[19]이 있다. 먼저, KTG 시스템의 구성요소 설정 단계는 중층과 상층 각각의 KTG 시스템에 포함될 20개의 개별 난류진단지수들의 각 난류 강도[null (NIL), light(LGT), moderate(MOD), severe(SEV), extreme(EXT)] 별 임계값들과 그들의 난류 예측성 정보를 Look-up table로 만드는 과정이다. 우선, 현재까지 개발된 총 64개의 개별난류진단지수들을 1년간(2011.6-2012.5) 현업일기모델을 이용해 각각 계산하고, 관측된 PIREP 시간 및 위치의 가장 가까운 격자점에서 계산된 개별난류지수 값들을 관측된 난류 강도에 따라 나누어 누적화 시킨다. 난류 강도별로 누적화된 개별난류지수들의 평균값들(T1-T5)이 각 지수들의 난류강도(NIL-EXT)에 대응되는 임계값들이 된다[17, 18, 19].

Table 1. Names and AUC values for the best 20 indices of upper- and mid- level new KTG systems.

Upper-level KTG			Mid-level KTG		
Index	Units	AUC	Index	Units	AUC
Brown2	cm^2s^{-3}	0.763	DTF3	m^2s^{-2}	0.812
DTF3	m^2s^{-2}	0.753	-Ri	-	0.800
Fz	$\text{m}^2\text{s}^{-3}\text{K}^{-2}$	0.747	Brown2	cm^2s^{-3}	0.797
CP	kt^2	0.741	Dutton	$\text{ms}^{-1}\text{km}^{-1}$	0.775
Dutton	$\text{ms}^{-1}\text{km}^{-1}$	0.735	EDRav	$\text{m}^{2/3}\text{s}^{-1}$	0.770
VWS	s^{-1}	0.730	CP	kt^2	0.756
Epsil	$\text{m}^{2/3}\text{s}^{-1}$	0.729	Fz	$\text{m}^2\text{s}^{-3}\text{K}^{-2}$	0.739
TI2	s^{-2}	0.709	TI1	s^{-2}	0.734
TI1	s^{-2}	0.704	LHF	s^{-2}	0.668
EDRav	$\text{m}^{2/3}\text{s}^{-1}$	0.685	NGM1	ms^{-2}	0.654
-Ri	-	0.678	NVA	s^{-2}	0.653
NGM1	ms^{-2}	0.677	EDRLL	$\text{m}^{2/3}\text{s}^{-1}$	0.653
w	ms^{-1}	0.670	HTG	Km^{-1}	0.650
EDRLL	$\text{m}^{2/3}\text{s}^{-1}$	0.666	CCAT	$\text{m}^2\text{s}^{-3}\text{K}^{-2}$	0.640
DEF	s^{-2}	0.663	VORT	s^{-2}	0.633
LHF	s^{-2}	0.662	UBF	s^{-2}	0.628
CCAT	$\text{m}^2\text{s}^{-3}\text{K}^{-2}$	0.644	w	ms^{-1}	0.621
Fp	$\text{m}^2\text{s}^{-3}\text{K}^{-2}$	0.643	DEF	s^{-2}	0.584
HPG	PVUm^{-1}	0.617	DIV	s^{-1}	0.579
UBF	s^{-2}	0.611	HPG	PVUm^{-1}	0.565

Fig. 2. Horizontal distributions of upper-level MOG and NIL PIREPs data over East Asia for 1-yr (2011.6-2012.5).

Fig. 3. The same as Fig. 2 except for mid-level.

다음은 계산된 각 난류지수들의 moderate-or-greater(MOG) 강도와 NIL PIREPs에 대한 예측성을 계산하는 과정이다. 이 예측성 검증은 POD (probability of detection) 방법으로 수행되며, 관측된 MOG강도 난류 지점에서 가장 가까운 격자점에서 계산된 난류지수의 값이 주어진 임계값보다 클 경우 POD “yes”(PODY)를, 반대로 NIL에서 계산된 난류지수가 주어진 임계값보다 작을 경우는 POD “no”(PODN)를 선택하는 방법이다. 여기서 주어진 임계값들을 변경시켜가면서 계산된 각각의 PODY와 PODN 값들을 Fig. 4와 같이 x-y도면에 나타내고 연결을 하면, 그 커브의 면적(AUC; area under curve)이 각 개별난류지수

의 난류예측성이 된다. 여기서, AUC의 값이 1에 가까울수록 그 난류지수가 관측된 MOD와 NIL 난류사례들을 모두 완벽하게 예측하는 것을 의미하며, AUC가 0.5일 경우 예측 성능이 전혀 없음을 의미한다[9, 17, 18, 19].

Table 1은 1년간(2011.6-2012.5) 중층과 상층에서 00, 06, 12, 18 UTC를 중심으로 2시간 이내에 관측된 총 9,599개(상층)와 412개(중층)의 PIREPs 중 415개(상층)와 17개(중층)의 MOG 및 7,007개(상층)와 288개(중층)의 NIL 난류 사례들에 대한 개별난류지수들의 예측성(AUC)을 높은 순서대로 20개씩 각각 나열한 것이다. 참고로 PIREPs 자료는 국내의 경우 항공기상청 자료를 사용했으며, 동아시아영역은 미국 국립기상연구소로부터 제공받았다. Fig. 2와 3은 각각 상층과 중층에서의 MOG와 NIL PIREPs의 수평 분포를 나타낸 그림이다. 상층은 인천 FIR 지역과 함께 일본 및 북서태평양 지역에서 미국과 연결되는 항공로를 중심으로 관측 자료가 고루 분포하고 있으나, 중층은 국내선 위주로 인천 FIR에 대부분의 관측이 분포하고 있다. Table 1의 결과와 함께 중층과 상층을 비교해 보면, 각 고도에서의 난류예측성이 가장 높은 순서대로 8번째까지의 AUC는 중층이 상층보다 전반적으로 높게 나타났다. 반면, 8번째 이후부터 20번째까지의 AUC는 상층이 중층보다 높게 나타나, 가장 높은 AUC를 가지는 난류지수와 20번째 지수와의 예측성 차이는 상층이 중층보다 낮게 나타났다.

2.2 KTG 시스템 적용

본 과정은 2.1에서 Table 1의 개별난류지수 예측성과 각 지수별 임계값들(T1, T2, T3, T4, T5)로 구축된 새로운 KTG 시스템의 구성요소들을 현업 통합모델에 적용하는 단계이다. 본 연구에서는 2.1에서 사용되었던 1년간(2011.6-2012.5) 통합모델 자료에 구축된 새로운 KTG 시스템 구성요소들을 적용하였다. 하지만, 차후, 최근 자료가 축적되면 독립된 기간에 대해서, 본 연구에서 구축된 새로운 KTG 시스템을 다시 적용할 계획이다. Table 1의 개별 난류지수들은 그들의 수식에 따라 서로 다른 물리적 의미와 수학적 크기를 가진다. 이들을 관측된 난류강도에 맞게 획일화시키는 과정이 필요하다. Table 1의 개별난류진단 지수들에 대한 각 지수별 임계값들(T1, T2, T3, T4, T5)을 Fig. 4에 표현된 각 구간별 1차원 mapping 함수에 적용하면 개별지수들이 모두 0에서 1사이의 값으로 변환된다.

Fig. 4. An index mapping diagram from the thresholds (T1-T5) to 0-1 that corresponds the NIL-EXT PIREPs.

다음으로, 이렇게 mapping된 개별난류지수들 (D_n^*)은 그들의 예측성에 따라 가중치를 두어 하나의 예측인자로 통합한다. Table 1에서 계산된 그들의 예측성(AUC)을 이용해 아래의 수식에 따라 개별지수들의 가중치(W_n)가 계산된다.

$$W_n = \frac{AUC_n^2}{\sum_{n=1}^N AUC_n^2}.$$

최종적으로, 모든 격자점에서 0과 1사이 값들로 mapping된 개별난류지수들(D_n^*)과 그들의 가중치(W_n)를 아래의 수식을 통해 통합해 줌으로써, 하나의 난류예측 지수인 KTG 가 생산되게 된다. 여기서, 통합 예측된 단일지수 KTG 는 시스템의 이름과 혼동을 위해 이탤릭체로 표현한다.

$$KTG(i, j, k) = \sum_{n=1}^N W_n D_n^*(i, j, k).$$

Fig. 5와 6은 위 식에 의해 계산된 KTG 의 예시를 인천 FIR을 포함하는 한반도를 중심으로 나타낸 그림이다. Fig. 5는 2012년 1월 20일 06 UTC에 FL350에서의 상층 KTG 를, Fig. 6은 동일한 시간에 FL100에서의 중층 KTG 를 각각 나타낸다. Fig. 5와 6에서 NIL과 LGT, LGT와 MOD, MOD와 SEV 사이의 KTG 경계값들은 각각 0.25, 0.5, 0.75이다. Fig. 5의 상층 FL350 고도에서는 한반도 남부지역을 가로지르는 제트류로 인해 중

강도 이상의 난류 가능 지역이 넓게 분포하고 있다. Fig. 6의 중층 FL100 고도에서는 제주도 남쪽과 충청남도 및 서해상 근처에서 지역적으로 난류발생 가능 지역이 나타난다.

Fig. 5와 6과 같은 KTG 시스템 결과는 현재 항공기상청 내부서버에 현업화 되었다. 기상청 슈퍼컴퓨터에서 생산되는 현업 통합모델 예측자료를 실시간으로 전송받아, 항공청 예보자들에게 KTG 난류예측결과가 신속하게 활용되고 있다.

Fig. 5. Upper-level KTG at FL350 valid at 06 UTC 20 Jan. 2012.

Fig. 6. The same as Fig. 5 except for mid-level KTG at FL100.

2.3 KTG 시스템 (검증 단계)

Fig. 7은 2.2에서 구축된 상층 KTG 시스템을 1년간(2011.6-2012.5) 현업 통합모델에 적용하고, 동일기간 동안 관측된 PIREPs와 2.1에서 설명한 POD분석을 통해 KTG의 예측 성능을 검증한 결과이다. Fig. 7a에는 KTG의 예측선(굵은 실선)과 KTG 시스템을 구성하는 20개의 개별난류지수들(파선; Table 1)의 PODY-PODN 선들을 각각 나타내고 있다. KTG 시스템을 통해 계산된 상층 난류 예측 정확성은 0.8로써, Table 1에 보인 개별 난류지수 중 가장 좋은 AUC를 가지는 Brown2의 0.763 보다 향상된 예측성을 보이고 있다. 또한 $AUC = 0.8$ 즉, MOG와 NIL 난류 모두에 대한 예측성이 80%가 된다는 것은, 본 연구에서 구축된 KTG를 통한 난류 예보자료가 항공공사자들이 안전하고 경제적인 항공운항을 위해 사용되는데 충분히 실효성이 있음을 의미한다. 또한, 본 연구에서는 추가적으로 기존에 구축된 KTG 시스템[19]을 1년간(2011.6-2012.5) 현업 통합모델에 적용하고, 동일 기간의 PIREPs를 이용해 검증한 결과, AUC는 0.78을 기록하였다. 따라서, 새로 구축된 시스템을 통해 한국 및 동아시아 상층에서의 난류 예측성이 보다 더 정확해 졌다.

Fig. 7b는 계산된 KTG 예측성의 통계적 검증을 수행한 것으로, 1년간 수집된 상층 PIREPs 표본자료의 1/2 크기를 가지면서, 개별 사례들이 랜덤하게 선택된 100개의 샘플자료들을 이용해 추가적으로 검증을 수행한 PODY-PODN 곡선들 중 최대와 최소 AUC를 가지는 결과를 나타낸 것이다[9, 18, 19]. 그 결과, 최대와 최소 AUC가 각각 0.84와 0.77로써 KTG 예측성인 0.8을 중심으로 $\pm 5\%$ 오차 이내에 존재함을 확인하였다. 따라서, KTG 시스템의 1년간 예측성인 80%는 통계적으로도 실효성이 높은 결과임을 확인하였다.

Fig. 8a는 상층 KTG의 계절별 예측성을 나타낸 결과로써, 한국 및 동아시아에서의 상층 바람의 계절적 변화에 의해 상층 KTG 시스템의 예측성이 다소 변화함을 확인하였다. 그 중에서 봄철 KTG 예측성이 가장 높았으며, 이는 봄철 가장 빈번히 발생하는 강한 제트류 및 상층전선 때문으로 사료되며, 이는 선행연구결과와 일맥상통한다[4, 5, 6, 7, 17, 18, 19]. Fig. 8b는 각 1년간, 계절별 상층 KTG의 구성된 개별난류지수 개수에 따른 AUC값의 변화를 나타낸 그림이다. 전반적으로 KTG 시스템에 난류개수가 많이 구성될수록 그 예측성이 상승하였다.

Fig. 7. PODY-PODN performance of upper-level KTG (thick solid lines) with (a) 20 component indices (dashed lines) and (b) the maximum (dashed) and minimum (dot) boundaries among 100 experiments using subsets of randomly selected half-fraction samples, derived using 1-yr UM data.

Fig. 8c는 중층 KTG 시스템의 예측성(AUC)를 구성된 개별난류지수 개수에 따라 나타낸 결과이다. Table 1에 포함된 20개 개별난류지수들을 모두 사용하여 중층 KTG 시스템을 구축하였을 경우 그 예측성은 0.8에 미치지 못했지만, 3-13개와 16-18개를 사용했을 때 AUC가 0.8(80%) 이상의 예측성을 보였다. 3개 이후 그 예측성이 점차 낮아지는 것은 Table 1에 보였듯이, 8번째 이후 개별지수 예측성이 현저히 떨어졌기 때문이다.

Fig. 8. (a) PODY-PODN performance of 1-yr upper-level KTG (thick solid line) with each seasonal KTG (color lines), (b) AUC values for 1-yr (thick solid line) and seasonal (color) upper-level KTG as a function of the number of component indices, and (c) AUC values for 1-yr mid-level KTG as a function of the number of component indices. JJA (red solid), SON (green dashed), DJF (blue dotted), and MAM (yellow dot-dashed).

3. 결 론

본 연구에서는 현재 현업에 운용되고 있는 기상청 현업 통합모델에 최적화된 한국형 항공난류 예측(KTG) 시스템을 구축하기 위해, 다양한 난류 발생 메커니즘에 의거한 여러 난류진단지수들을 그들의 예측성에 따르는 가중치를 이용해 앙상블 평균한 하나의 최적화된 난류예측지수 *KTG*를 생산하였다. 현재 항공종사자들이 의무적으로 활용하고 있는 SIGMET 및 SIGWX와의 일관성을 유지하면서도 더욱 정확하고 정교한 난류예측 시스템을 구축하기 위해, SIGMET과 SIGWX의 구분 기준인 FL250을 중심으로 중층과 상층 KTG 시스템을 분류하였다. 각 고도별로 분류되어 현업 통합모델에서 계산된 개별지수들을 각각 관측된 1년간 PIREPs 자료를 이용해 중층과 상층 KTG 시스템을 구성하였다.

먼저, 상층 KTG 시스템을 1년간 관측된 총 20개의 개별난류지수로 구성한 결과, 그 예측성을 나타내는 AUC가 0.8로써, 관측된 MOG와 NIL 모두에 대해 80%의 예측정확성을 보였다. 이는 기존 KTG 시스템의 0.78에 비해 향상되었으며, 100개의 랜덤 샘플을 통한 추가적 검증을 통해 그 예측성의 통계적 유의성이 매우 높음을 확인하였다. 계절적 변동성을 살펴본 결과, 봄철 빈번한 제트류와 상층 전선의 영향으로 그 예측성이 0.81로 가장 높았다. 하지만, 계절에 따른 변동성이 크지는 않았다. 구성난류지수의 개수에 따른 예측성 변화를 살펴본 결과, 상층 *KTG*는 개별난류지수 개수가 증가할수록 그 예측성이 상승했다. 중층 KTG 시스템의 경우, 20개의 개별난류지수를 사용했을 경우 0.8의 예측성을 보이지는 않았지만, 3개의 개별난류지수만 사용했을 경우 0.83으로 상층 *KTG* 보다 예측성이 더 높았다. 중층은 구성된 지수 개수가 많아질수록 *KTG*의 예측성이 낮아졌는데, 이는 지수의 랭킹이 낮아질수록 예측성이 현저히 떨어졌기 때문이다.

본 연구로 구축된 KTG 시스템은 현재 인천공항에 위치한 항공기상청 내부서버에 현업화 되어 항공청의 예보자들이 활용하고 있으나, KTG 시스템의 활용성을 더욱 증대시키기 위해서는, 시스템 내부적으로는 차후 독립적인 기간에 대한 축적된 관측 자료를 이용한 객관적인 KTG 시스템의 검증이 필요하다. 또한, 다양한 사용자들의 요구에 충족되기 위해서, 차후 더욱 세분화된 그래픽 표출 시스템을 통해 제공될 수 있도록 해야

할 것이다.

후 기

이 연구는 기상청 기상지진기술개발사업 (CATER 2012-2011)의 지원으로 수행되었습니다.

참고문헌

- [1] Lester P., 1994: *Turbulence: A New Perspective for pilots*. 212pp, Jepperson Sanderson.
- [2] Ellrod, G. , P. Lester, and L. J. Ehenberger, 2003: *Clear air turbulence In Encyclopedia of Atmospheric Sciences*. Academic press. 393-403..
- [3] Koch, P., H. Wernli, and H. W. Davies, 2006: An event-based jet-stream climatology and typology. *Int. J. Climatol.*, 26, 283-301.
- [4] Kim, J.-H., and H.-Y. Chun, 2011: Statistics and possible sources of aviation turbulence over South Korea. *J. Appl. Meteor. Climatol.*, 50, 311-324.
- [5] 민재식, 전해영, 김정훈, 2011: 한국에서 발생한 청천난류 사례에서 나타나는 중관규모 대기상태에 대한 연구. *대기*, 21(1), 69-83.
- [6] 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.
- [7] 민재식, 김정훈, 전해영, 2012: 한국에서 발생한 청천난류 사례에 대한 수치연구. *대기*, 22(3), 321-330.
- [8] Cho, J. Y. N., and E. Lindborg, 2001: Horizontal velocity structure functions in the upper troposphere and lower stratosphere. 1. Observations. *J. Geophys. Res.*, 106, 10223-10232.
- [9] Sharman, R., C. Tebaldi, G. Wiener, and J. Wolff, 2006: An integrated approach to mid- and upper-level turbulence forecasting. *Wea. Forecasting*, 21, 268-287.
- [10] 신대원, 2005: 2월과 3월의 난류분포에 대한 연구. *한국항공운항학회지*, 13(2), 27-34.
- [11] 김영철, 박상환, 2007: Radiosonde 자료를 이용한 항공기난류 특성 분석. *한국항공운항학회지*, 15(4), 94-99.
- [12] 이승재, 김영철, 2002: 남한지역 상공에서 관측된 항공기 난류예보의 수치예보와 검증. *한국기상학회지*, 38(5), 493-507.
- [13] Lee, Y.-G., B. C. Choi, R. Sharman, G. Wiener, and H.-W. Lee, 2003: Determination of the primary diagnostics for the CAT (clear-air turbulence) forecast in Korea. *J. Kor. Meteor. Soc.*, 39, 677-688.
- [14] 김영철, 2010: KWRF를 활용한 한반도 항공기 난류 지수 특성 분석. *한국항공운항학회지*, 18(1), 91-101.
- [15] 김영철, 2011: PIREP과 KWRF를 활용한 한반도 난류, 착빙 지수의 임계값 설정 및 검증. *한국항공운항학회지*, 19(3), 54-60.
- [16] 장욱, 전해영, 김정훈, 2009: 한국의 청천난류 예보 시스템에 대한 연구. Part 1: 한국형 통합 난류 예측 알고리즘. *대기*, 19(3), 255-268.
- [17] 김정훈, 전해영, 장욱, R. Sharman, 2009: 한국의 청천난류 예보 시스템에 대한 연구. Part II: Graphical Turbulence Guidance (GTG) 시스템. *대기*, 19(3), 269-287.
- [18] Kim, J.-H., H.-Y. Chun, R. D. Sharman, and T. 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.
- [19] 김정훈, 전해영, 2011: 통합지역모델을 이용한 한국형 중상층 항공난류예측시스템 개발. *대기*, 21(4), 497-506.