

기상청 고해상도 지역예보모델을 이용한 한반도 영역 한국형 항공난류 예측시스템(한반도-KTG) 개발

이단비 · 전해영*

연세대학교 대기과학과

(접수일: 2015년 1월 26일, 수정일: 2015년 2월 4일, 게재확정일: 2015년 2월 4일)

Development of the Korean Peninsula-Korean Aviation Turbulence Guidance (KP-KTG) System Using the Local Data Assimilation and Prediction System (LDAPS) of the Korea Meteorological Administration (KMA)

Dan-Bi Lee and Hye-Yeong Chun*

Department of Atmospheric Sciences, Yonsei University, Seoul, Korea

(Manuscript received 26 January 2015; revised 4 February 2015; accepted 4 February 2015)

Abstract Korean Peninsula has high potential for occurrence of aviation turbulence. A Korean aviation Turbulence Guidance (KTG) system focused on the Korean Peninsula, named Korean-Peninsula KTG (KP-KTG) system, is developed using the high resolution (horizontal grid spacing of 1.5 km) Local Data Assimilation and Prediction System (LDAPS) of the Korea Meteorological Administration (KMA). The KP-KTG system is constructed first by selection of 15 best diagnostics of aviation turbulence using the method of probability of detection (POD) with pilot reports (PIREPs) and the LDAPS analysis data. The 15 best diagnostics are combined into an ensemble KTG predictor, named *KP-KTG*, with their weighting scores computed by the values of area under curve (AUC) of each diagnostics. The performance of the *KP-KTG*, represented by AUC, is larger than 0.84 in the recent two years (June 2012~May 2014), which is very good considering relatively small number of PIREPs. The *KP-KTG* can provide localized turbulence forecasting in Korean Peninsula, and its skill score is as good as that of the *operational-KTG* conducting in East Asia.

Key words: Pilot reports (PIREPs), Local Data Assimilation and Prediction System (LDAPS), Korean Peninsula-Korean aviation Turbulence Guidance (KTG) system (KP-KTG)

1. 서 론

항공 난류는 자유대기 내에서 항공기에 직접적으로 영향을 주는 10~1,000 m 규모의 작은 난류 운동을 말한다(Lester, 1994). 항공 난류는 승객 및 승무원 부상, 비행 연착, 연료 손실 등 항공 산업에 있어 많은 문

제를 야기시키며, 특히 순항고도에서 예기치 못하게 발생했을 때 더욱 위험하다. 항공 산업이 계속적으로 발전하고 항공 운행량이 급격하게 증가하면서, 이러한 항공 난류의 정확한 예보 필요성은 나날이 커지고 있다.

항공산업의 수요가 큰 여러 선진국에서는 항공 난류를 예측하기 위한 많은 연구들이 진행되어져 왔다. Sharman et al. (2006)은 수치예보모델을 이용하여 여러 개별 난류 진단지수들을 계산한 뒤, 그들의 예측성에 따라 가중치를 적용, 통합하여 하나의 앙상블 난류 예측지수로 제공되는 Graphic Turbulence Guidance

*Corresponding Author: Hye-Yeong Chun, Department of Atmospheric Sciences, Yonsei University, 50 Yonsei-ro, Seodaemun-gu, Seoul 120-749, Korea.
Phone : +82-2-2123-2692, Fax : +82-2-365-5163
E-mail : chunhy@yonsei.ac.kr

(GTG) 시스템을 개발하였고, 현재 미국의 항공 난류 예측 시스템으로 현업 중에 있다. Gill and Stirling (2013)은 바람 시어, 산악파와 관련된 난류들에 주로 초점을 두고 예측하던 World Area Forecast Centres (WAFCS)의 위험기상예보시스템에 대류 활동을 진단 하는 여러 진단지수들을 포함시킨 난류 예측 시스템을 제안하였다.

한국에서도 항공 난류를 예측하기 위한 연구들이 활발히 이루어지고 있다. Kim et al. (2009)은 Sharman et al. (2006)의 연구를 바탕으로 기상청의 MM5 (5th generation Mesoscale Model; Grell et al., 1994) 기반 지역예보모델(Regional Data Assimilation and Prediction System; RDAPS) 30 km 분석장과 조종사 보고자료 (pilot report: PIREP)를 이용하여 한국형-GTG 시스템을 개발하였으며, 5년간 한국에서 관측된 항공 난류의 예측성을 조사하였다. 이후 Kim and Chun (2011b, 2012)은 기상청의 현업 통합모델(Unified Model: UM) 기반 RDAPS 12 km 분석장과 PIREP을 이용하여 한국형 항공 난류 예측(Korean Aviation Turbulence Guidance; KTG) 시스템을 개발하였으며(이하 현업-KTG 시스템), 이는 현재 항공기상청에서 현업으로 항공난류 예측에 사용되고 있다. 또한 최근 Lee and Chun (2014)은 계절에 따라 난류를 발생시키는 주요 원인들이 다르다는 것을 고려하여, 계절별로 최적화된 시스템의 구성요소들을 달리 적용하는 계절 KTG 시스템(이하 계절-KTG 시스템)을 개발하였다. 계절-KTG 시스템 역시 항공기상청에서 현업으로 난류예측 정보를 실무자들에게 제공하고 있다.

한반도가 포함된 아시아 지역은 전 세계에서 가장 강한 제트류가 지나가는 지역으로(Koch et al., 2006), 제트기류 부근의 상하층, 고기압성 회전이 강한 지역 등에서의 관성 불안정, 시어 불안정 등에 의한 난류 발생 확률이 높으며(Jaeger and Sprenger, 2007; Kim and Chun, 2010; Min et al., 2011), 특히 한반도 영역은 대부분의 국토가 산악으로 이루어져 있어 하층 바람 유입에 따라 다양하게 나타나는 산악파를 통한 난류 발생 역시 높은 지역이다(Kim and Chun, 2011a; Kim and Chun, 2012). 본 연구에서는 1.5 km의 높은 수평해상도를 가지는 기상청 현업 UM 기반 지역예보모델(Local Data Assimilation and Prediction System: LDAPS) 자료를 이용하여 한국 기상환경에 초점을 둔 고해상도 한반도 영역 한국형 항공 난류 예측시스템(이하 한반도-KTG 시스템)을 개발하고자 하였다.

본 논문은 다음과 같이 구성된다. 2장에서는 한반도-KTG 시스템의 방법론에 대해 설명할 것이며, 3장에서는 한반도-KTG 시스템의 난류 예측성 검증 및 현업-KTG 시스템과 난류 예측성을 비교 분석할 것이다. 마지막으로 4장에서는 결론 및 요약의 제시할 것이다.

2. 한반도-KTG 시스템

한반도-KTG 시스템 개발은 크게 세 단계로 나뉘며, 이 시스템의 개발 방법론은 현업-KTG 시스템과 유사하기 때문에 본 논문에서는 간략하게만 그 방법론을 설명한다(Kim and Chun, 2011b; Kim and Chun, 2012). 시스템 개발의 첫번째 단계는 한반도-KTG 시스템을 구성하는 난류 진단지수들을 결정하는 단계로, 우선, 관측된 null (NIL)과 중강도 이상(moderate or greater: MOG)의 난류들에 대한 개별 난류 진단지수들의 예측성을 POD (probability of detection; Mason, 1982) 방법을 통해 검증한다. 이 방법은 MOG 난류가 관측된 지점에서 개별 난류 진단지수 역시 난류를 예측할 확률인 PODY (probability of detection for yes)와 NIL이 관측된 지점에서 개별 난류 진단지수가 난류를 예측하지 않을 확률인 PODN (probability of detection for no)을 고려한다. 기상청의 현업 LDAPS 자료가 생산되는 시간인 0000, 0600, 1200, 1800 UTC를 기준으로 ± 2 시간 이내에 발생한 PIREP 난류자료를 분류한 뒤(Kim and Chun, 2012), MOG 난류가 관측된 지점과 가장 근접한 수치예보모델 격자점에서 계산된 난류 지수값이 주어진 임의의 임계값보다 큰 경우를 선택하여 PODY를, NIL 관측 지점과 가장 근접한 격자점에서 계산된 난류 지수값이 주어진 임의의 임계값보다 작은 경우를 선택하여 PODN를 구한다. 이때 고려되는 임계값은 PIREP 관측과 근접한 격자점에서 계산된 개별 난류 진단지수들의 최소값과 최대값 사이에서 임의로 일정하게 변화시켜 가며 주어진다. 이렇게 계산된 PODN-PODY 쌍들을 x-y도면에 표시한 뒤 연결하면 커브형태가 그려지며, 그 커브 아래의 넓이(area under curve: AUC)가 각 지수들의 난류 예측성을 대표한다(Sharman et al., 2006; Jang et al., 2009; Kim and Chun, 2012). 이러한 일련의 과정을 이전 연구들을 통해 개발된 총 74개의 개별 난류 진단지수들에 대해 각각 수행하며, 이 중 AUC가 높은 순서대로 15개의 난류 진단지수들을 선택하였다.

다음으로 난류 강도별 지수들의 임계값을 구하기 위해, 기상청의 현업 LDAPS 자료를 이용하여 15개의 개별 난류 진단지수들을 계산한 뒤, LDAPS 영역에서 PIREP으로 관측된 난류와 가장 가까운 격자점 위치 및 시간(± 2 시간 이내)에 대해 따로 분류하여 난류 강도별로 누적시킨다. Figure 1은 본 연구에서 사용된 LDAPS의 영역과 한반도-KTG 시스템 개발에 사용된 자료 기간과 일치하는 1년 기간(2012. 06~2013. 05) 동안 해당 영역 내에서 관측된 PIREP에 나타난 light (LGT) 강도 이상의 난류들 위치를 나타낸 것이다. 참고로 PIREP 자료는 국내 항공기상청과 미국 국립기상연구소에서 제공받았다. PIREP에서 관측된 난

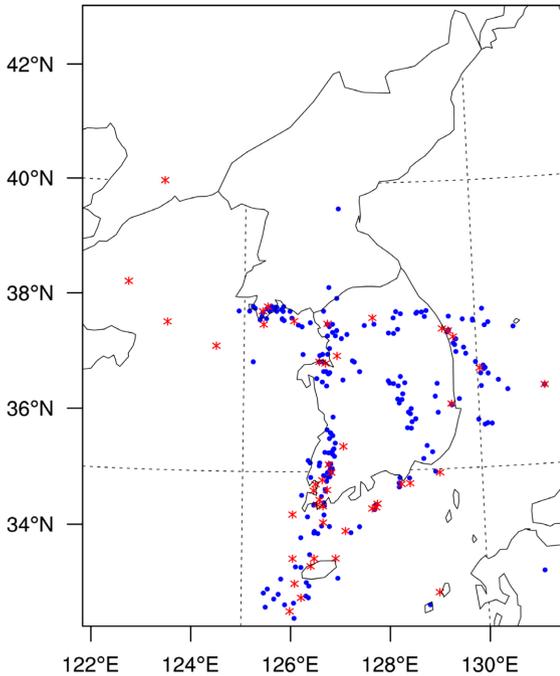


Fig. 1. Horizontal distribution of light (LGT) and moderate-or-greater (MOG) levels of turbulence observed from pilot reports (PIREPs) over the region of Local Data Assimilation and Prediction System (LDAPS) (32.26°N, 121.83°E~42.93°N, 132.53°E) from June 2012 to May 2013. The LGT and MOG levels of turbulence are depicted as blue dot and red asterisk, respectively.

류 위치들이 국내 주요 운항로를 따라 나타나는 것을 알 수 있으며, 특히, 서해안 및 남해안, 제주도 지역에서 밀집되어 보여진다. 각 난류 강도별로 누적된 개별 난류 진단지수 값들의 평균값은 그 지수들의 NIL, LGT, moderate (MOD) 강도들에 대한 임계값(T1 - T3)으로 결정되며, severe (SEV)와 extreme (EXT) 강도들의 경우 누적 횟수가 적기 때문에, 전체적으로 누적된 값들 중 98%, 99%에 해당하는 값들을 각각 해당 개별 난류 진단지수들의 SEV와 EXT에 대한 임계값(T4, T5)으로 정하였다(Kim and Chun, 2011b, 2012).

세 번째 단계는 구축된 한반도-KTG 시스템 구성요소들을 현업 통합모델에 적용하여 통합 난류 예측지수를 계산하는 단계이다. 먼저, 이전 단계에서 구축된 상위 15개의 개별 난류 진단지수들을 LDAPS의 모든 격자점에서 계산한다. 개별 난류 진단지수별 임계값들(T1, T2, T3, T4, T5)을 각각 0, 0.25, 0.5, 0.75, 1에 대응시킨 뒤, 각 구간마다 서로 다른 기울기를 가지는 선형함수들을 설정하여 모든 격자점에서 단위

및 값의 범위가 각기 다른 지수들의 값들을 0에서 1 사이의 값들로 표준화 시킨다. 마지막으로, 각 격자점에서 아래 (1)식과 같이 0과 1 사이로 표준화된 개별 난류 진단지수 값(D_n^*)들에 각 해당지수들의 가중치(W_n)를 곱한 뒤, 그것들을 합산하면 하나의 난류 예측인자인 *한반도-KTG*로 통합된다(여기서 통합된 난류 예측인자 이름을 시스템의 이름과 같이 사용하였으며, 시스템과 구분하기 위해서 이탤릭체로 표시하였다.). 이 때 사용되는 각 지수들의 가중치(W_n)는 아래 (2)식에 의해 계산된다.

$$KTG(i, j, k) = \sum_{n=1}^N W_n D_n^*(i, j, k), n = 1, 2, 3, \dots, N \quad (1)$$

$$W_n = \frac{AUC_n^2}{\sum_{j=1}^N AUC_j^2}, n = 1, 2, 3, \dots, N \quad (2)$$

마지막, *한반도-KTG*의 예측성 검증에는 첫 번째 단계에서 개별 난류 진단지수들의 예측성을 계산하기 위해 사용한 POD 방법을 이용하였다. 본 연구에서는 한반도-KTG 시스템을 구성한 자료와 같은 기간인 2012. 06~2013. 05뿐 아니라 최근 1년인 2013. 06~2014. 05 기간에 대해서도 예측성 검증을 수행하였다. KTG 시스템의 예측성은 시스템 구성요소들을 결정할 때 사용한 PIREP의 개수와 사용된 현업 수치예보모형의 수평, 연직 해상도에 영향을 받는다는 것이 Kim et al. (2011)과 Kim and Chun (2011b)에서 증명된 바 있다. 따라서 본 연구에서는 2011. 06~2012. 05, 1년 기간 동아시아 영역에서 관측된 PIREP 자료와 12 km 수평해상도를 가지는 UM-RDAPS을 기반으로 개발된 현업-KTG 시스템과 본 연구에서 개발한 한반도-KTG 시스템과의 난류 예측성 비교 검증을 추가로 수행하였다.

3. 연구 결과

Table 1은 2012년 6월부터 2013년 5월까지 LDAPS 생산시간인 0000, 0600, 1200, 1800 UTC를 중심으로 ±2시간 이내에 PIREP 관측자료에 나타난 강도별 난류 개수를 상층(≥ 25,000 ft)과 중층(< 25,000 ft)으로 나누어 살펴본 결과이다. 상층에서 관측된 PIREP은 총 482개로, 이 중 NIL이 338개, MOG가 122개 관측되었으며, 중층에서는 총 165개 중 NIL이 129개, MOG가 10개 관측되었다. 특히, 중층 PIREP은 중층 한반도-KTG 시스템 구성요소를 구축하기에는 그 개수가 현저히 적기 때문에, 본 연구에서는 상층 한반도-KTG 시스템만 개발하여 예측성을 검증하였다. 이후 언급될 한반도-KTG 시스템은 상층 한반도-KTG 시스템을 의미한다. Table 2는 예측성(AUC) 상위 15개의 한반도-KTG 시스템 구성요소들을 나열한 조건표(Look-up

Table 1. Numbers corresponding to null (NIL), light (LGT), moderate (MOD), severe (SEV), and extreme (EXT) levels of turbulence observed from the pilot reports (PIREPs) in June 2012–May 2013 used in development of the Korean Peninsula (KP)-KTG system.

Turbulence Intensity	2012.06.~2013.05.			
	Upper Level (≥ 25000 feet)		Middle Level (≥ 25000 feet)	
	Number	Percentage (%)	Number	Percentage (%)
Null (NIL)	338	70.1	129	78.2
Light (LGT)	122	25.3	26	15.7
Moderate (MOD)	22	4.6	10	6.1
Severe (SEV)	0	0	0	0
Extreme (EXT)	0	0	0	0
Total	482	100	165	100

Table 2. Thresholds (T1, T2, T3, T4, and T5) corresponding to NIL, LGT, MOD, SEV, and EXT intensities of upper-level (≥ 25000 feet) turbulence and AUC values for best 15 diagnostics for calculating the combined KP-KTG index that are based on the 1-yr PIREP data over LDAPS region and Unified Model (UM) based on operational Local Data Assimilation and Prediction System (LDAPS) in the Korea Meteorological Administration (KMA) from June 2012 to May 2013.

Index	Units	T1	T2	T3	T4	T5	AUC
<i>LHF/-Ri</i>	s^{-3}	1.61×10^{-13}	5.12×10^{-13}	1.01×10^{-12}	1.71×10^{-12}	2.41×10^{-12}	0.864
<i> Div /-Ri</i>	s^{-1}	7.57×10^{-6}	1.57×10^{-5}	3.02×10^{-5}	5.07×10^{-5}	7.11×10^{-5}	0.854
<i> Vort /-Ri</i>	s^{-1}	1.03×10^{-5}	2.35×10^{-5}	4.21×10^{-5}	7.91×10^{-5}	1.16×10^{-4}	0.851
<i>NVA/-Ri</i>	s^{-2}	1.68×10^{-8}	3.50×10^{-8}	1.87×10^{-7}	2.49×10^{-7}	3.11×10^{-7}	0.818
<i>-Ridnor</i>	-	1.49×10^{-1}	2.65×10^{-1}	3.87×10^{-1}	6.71×10^{-1}	9.55×10^{-1}	0.817
<i>CP</i>	kt^2	$1.39 \times 10^{+2}$	$2.96 \times 10^{+2}$	$5.76 \times 10^{+2}$	$1.28 \times 10^{+3}$	$1.98 \times 10^{+3}$	0.812
<i>EDR13/-Ri</i>	$m^{2/3} s^{-1}$	2.04×10^{-2}	3.97×10^{-2}	5.84×10^{-2}	1.12×10^{-1}	1.66×10^{-1}	0.808
<i>Fz/-Ri</i>	$m^2 s^{-3} Pa^{-1}$	4.18×10^{-7}	7.61×10^{-7}	1.76×10^{-6}	3.15×10^{-6}	4.54×10^{-6}	0.796
<i>DTF3</i>	$m^2 s^{-2}$	3.63×10^{-1}	5.89×10^{-1}	8.33×10^{-1}	1.49	2.15	0.793
<i>-Ri</i>	-	$-2.82 \times 10^{+1}$	$-1.69 \times 10^{+1}$	$-1.35 \times 10^{+1}$	-6.77	0.00	0.786
<i>Brown2</i>	$cm^2 s^{-3}$	3.22×10^{-1}	5.09×10^{-1}	7.64×10^{-1}	1.51	$2.26 \times 10^{+1}$	0.775
<i>Def/-Ri</i>	s^{-1}	1.37×10^{-3}	2.62×10^{-3}	3.99×10^{-3}	6.71×10^{-3}	9.44×10^{-3}	0.764
<i>Dutton</i>	$m s^{-1} km^{-1}$	$2.37 \times 10^{+1}$	$2.72 \times 10^{+1}$	$3.36 \times 10^{+1}$	$5.25 \times 10^{+1}$	$7.14 \times 10^{+1}$	0.761
<i>EDR13</i>	$m^{2/3} s^{-1}$	9.30×10^{-2}	1.09×10^{-1}	1.25×10^{-1}	1.63×10^{-1}	2.01×10^{-1}	0.756
<i>VWS</i>	s^{-1}	4.11×10^{-3}	5.16×10^{-3}	6.32×10^{-3}	9.33×10^{-3}	1.23×10^{-2}	0.756

Table)이다. Table 2에 보인 각 난류지수들의 수식은 Jang et al. (2009)와 Kim et al. (2009)에 나타나 있다. Table 2의 결과를 살펴보면 가장 높은 난류 예측성을 보이는 지수는 LHF/-Ri(LHF는 청천난류를 예측하기 위하여 Knox et al. (2008)이 제안한 것으로, 종관류의 불균형에 따른 관성 중력과의 방출과 관련된 Lighthill-Ford 이론을 기반으로 만든 지수이며, Ri는 리차드슨 수를 의미한다.)로, AUC 값은 0.864였다. 항공산업 실무자들에게 충분히 실효성 있는 난류 예측 정보가 가능하다고 보는 AUC 기준이 0.8 이상인 것을 감안하였을 때, 대부분의 지수들이 상당히 높은 예측성을 보인다는 것을 알 수 있다. Kim and Chun (2012)에서 현업-KTG 시스템의 구성요소들 중 가장 높은 예측성을 보인 단일 진단지수의 AUC 값이 0.763

였던 것을 감안할 때, 모델의 수평 해상도 향상이 난류 예측성 향상에 기여를 한 것으로 보여진다. 또한, 상위 8개 진단지수들 중 CP를 제외하고 대표적인 난류 진단지수인 Ri로 나눈 지수들인 것을 확인할 수 있다.

Figure 2는 한반도-KTG 시스템을 구성하기 위해 결합한 단일 진단지수 개수에 따른 한반도-KTG의 난류 예측성 변화를 나타낸 그림이다. 시스템을 구성하는 단일 진단지수들의 수가 5개가 될 때까지 난류 예측성은 지수들의 수에 따라 증가하는 경향을 보였고, 그 이후 15개가 될 때까지는 예측성이 조금씩 감소하는 경향을 보였다. 최대 예측성을 보인 5개 지수들을 결합한 한반도-KTG의 AUC 값은 0.886으로, 가장 좋은 예측성을 보였던 단일 진단지수 LHF/-Ri의 0.864보다 좋았다. 이는 단일 진단지수로 난류를 예측하는 것보

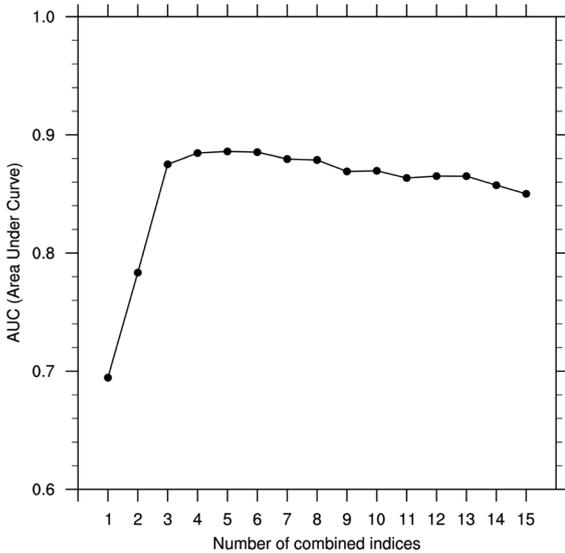


Fig. 2. AUC values of the KP-KTG system that is based on 1-yr (2012. 06–2013. 05) LDAPS analysis data and PIREPs over the Korean Peninsula, as a function of the number of combined diagnostics.

다 여러 진단지수들에 가중치를 적용, 결합하여 하나의 통합된 지수로 난류를 예측하는 것이 더 나은 결과를 보인다는 이전 연구결과들(Sharman et al., 2006; Kim et al., 2011)과 일치함을 확인할 수 있었다. 15개의 단일 진단지수들을 모두 결합하여 계산된 한반도-KTG의 경우, AUC값이 0.850으로 LHF/-Ri보다 오히

려 낮은 예측성을 보였다. 하지만, 15개의 서로 다른 물리적 의미들을 가지는 단일 난류 진단지수들로 구성된 한반도-KTG의 경우, 난류가 발생할 수 있는 다양한 기상환경 및 물리적 조건에 대해 고려될 수 있다는 장점이 있고, 결합하는 단일 진단지수들의 수에 따른 예측성 변화는 사용된 관측 자료와 모델의 종류 및 기간에 따라 달라질 수 있으므로, 5개의 진단지수를 결합하는 것이 15개의 진단지수를 결합하는 것보다 낫다고 결론짓기에는 무리가 있다.

가장 높은 난류 예측성을 보였던 5개의 상위 지수들을 결합한 한반도-KTG와 15개의 상위 지수들을 결합한 한반도-KTG의 예측성이 얼마나 통계적으로 유의한지 살펴보기 위하여 Fig. 3에 두 지수들에 대한 예측성을 100개의 서로 다른 PIREP 샘플들을 이용하여 반복 검증한 결과를 나타내었다. PIREP 자료의 기간은 1년 기간(2012. 06–2013. 05)이며, 수집된 PIREP 자료의 1/2 크기를 가지는 서로 다른 랜덤 샘플 100개를 뽑아서 사용하였다. Figures 3a와 b는 각각 5개의 상위 지수들을 결합한 한반도-KTG와 15개의 상위 지수들을 결합한 한반도-KTG에 대한 결과이며, 100번의 반복 검증 결과 중 가장 좋은 예측성과 가장 낮은 예측성을 나타내는 PODY-PODN 곡선에 대해서 각각 파선과 점선으로 나타내었다. 5개의 상위 지수들을 결합한 한반도-KTG의 랜덤 검증 변화도(Fig. 3a)는 해당 기간의 전체 PIREP에 대한 예측성인 0.886을 중심으로 +3.6%, -15% 이내에 나타나는 것을 확인하였다. 15개의 상위 지수들을 결합한 한반도-KTG의 경우(Fig. 3b), 같은 기간의 전체 PIREP에 대한 예측성인 0.850을 중심으로 랜덤 검증의 변화도가 +7.3%,

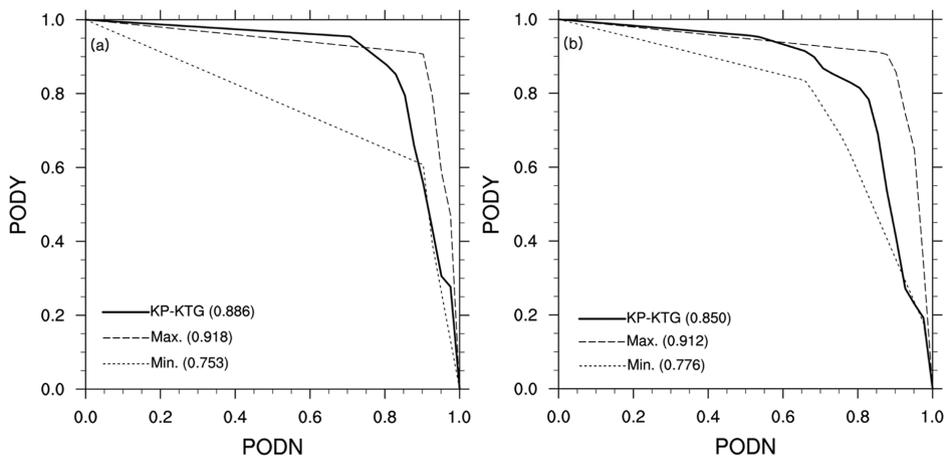


Fig. 3. PODY-PODN lines of the KP-KTG (thick solid line) computed by (a) 5 best diagnostics and (b) 15 best diagnostics and the maximum (dashed line) and minimum (dotted line) boundaries among the 100 experiments of the subsets of randomly selected PIREPs from June 2012 to May 2013.

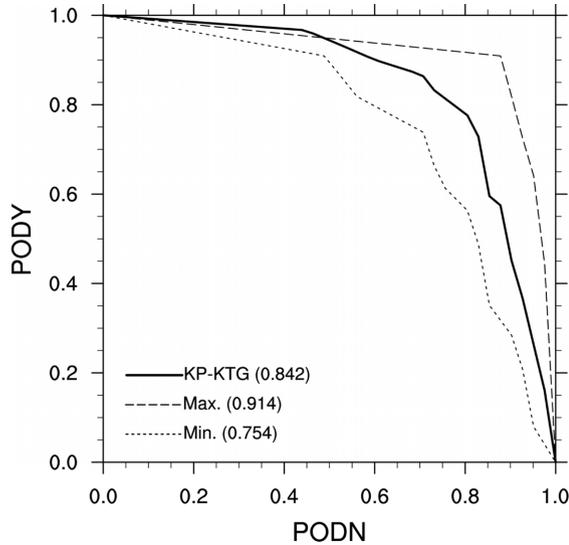


Fig. 4. The same as in Fig. 3b, except from June 2013 to May 2014.

-8.7% 이내에 나타난 것을 확인하였다. 이러한 결과를 통해 15개 지수들을 결합한 한반도-KTG가 5개 지수들을 결합한 한반도-KTG보다 통계적으로 좀 더 유의하다는 것을 알 수 있었다. 따라서 본 연구에서는 난류 예측에 대한 통계적 유의성이 더 높은 15개 지수들을 결합한 한반도-KTG에 초점을 두고 다른 기간에 대해서 난류 예측성에 대한 추가 검증을 수행하였다.

Figure 4는 최근 1년 기간(2013. 06~2014. 05) 동안 관측된 상층 PIREP을 이용하여 검증한 한반도-KTG의 PODY-PODN 곡선과 Fig. 3과 같은 방법으로 1/2

크기의 PIREP 자료에 대해 100번의 랜덤 검증을 수행한 뒤 나온 AUC 최대값(파선)과 최소값(점선)의 PODY-PODN 곡선을 나타낸 것이다. 이 기간에 LDAPS 영역 내 PIREP의 개수는 NIL 356개, LGT 124개, MOG 30개이다. 우선, 해당 기간의 전체 PIREP을 이용하여 검증했을 때, 한반도-KTG의 AUC 값이 0.842로 높은 예측성을 보이는 것을 확인하였다. 랜덤 검증 변화율의 경우, 0.842를 중심으로 +8.5%, -10.45% 이내에서 예측성이 나타났으며, 한반도-KTG 시스템을 구성한 기간인 2012. 06~2013. 05 기간에 대해 수행한 랜덤 검증(Fig. 3b)의 변화율과 비교해 보았을 때, 약간 더 변동성이 커진 것을 알 수 있었다.

Figure 5는 한반도-KTG 시스템의 개발기간(2012. 06~2013. 05) (Fig. 5a)과 추가 검증기간(2013. 06~2014. 05) (Fig. 5b) 동안의 LDAPS 영역 내 한반도-KTG와 현업-KTG의 예측성을 비교하여 나타낸 것이다. 한반도-KTG 시스템의 개발기간(Fig. 5a)에는 한반도-KTG가 현업-KTG보다 난류 예측성이 약간 더 높았으며, 추가 검증기간(Fig. 5b)에는 현업-KTG가 한반도-KTG보다 약간 더 높았으나, 큰 차이는 없었다.

Figure 6은 한반도-KTG 시스템 개발기간(2012. 06~2013. 05)의 각 계절마다 임의의 시간을 선택하여 그 시각에서의 한반도-KTG 예보장과 그 시각을 중심으로 ± 2 시간 이내에 관측된 PIREP의 위치 비교를 보인 것이다. 2013년 2월 4일 0000 UTC (Fig. 6c)에 발생한 몇몇 NIL 관측자료를 제외하고, 나머지 모든 해당날짜에 발생한 난류들을 한반도-KTG 시스템이 잘 예측하고 있다는 것을 알 수 있다. 또한 고해상도 LDAPS 자료를 이용하였기 때문에 난류 예측 지역이 국지적으로 나타나는 특징을 확인할 수 있었다.

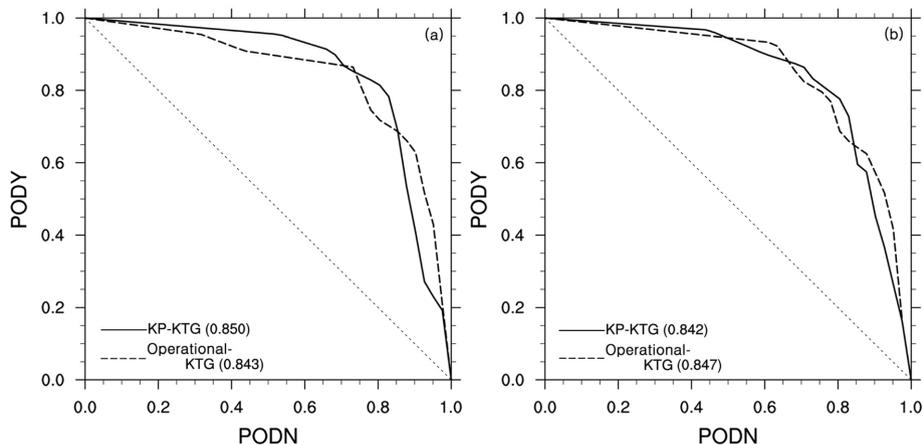


Fig. 5. PODY-PODN lines of the KP-KTG (solid line) computed by 15 best diagnostics and the operational-KTG (dashed line) validated using PIREPs during (a) 2012. 06~2013. 05 and (b) 2013. 06~2014. 05.

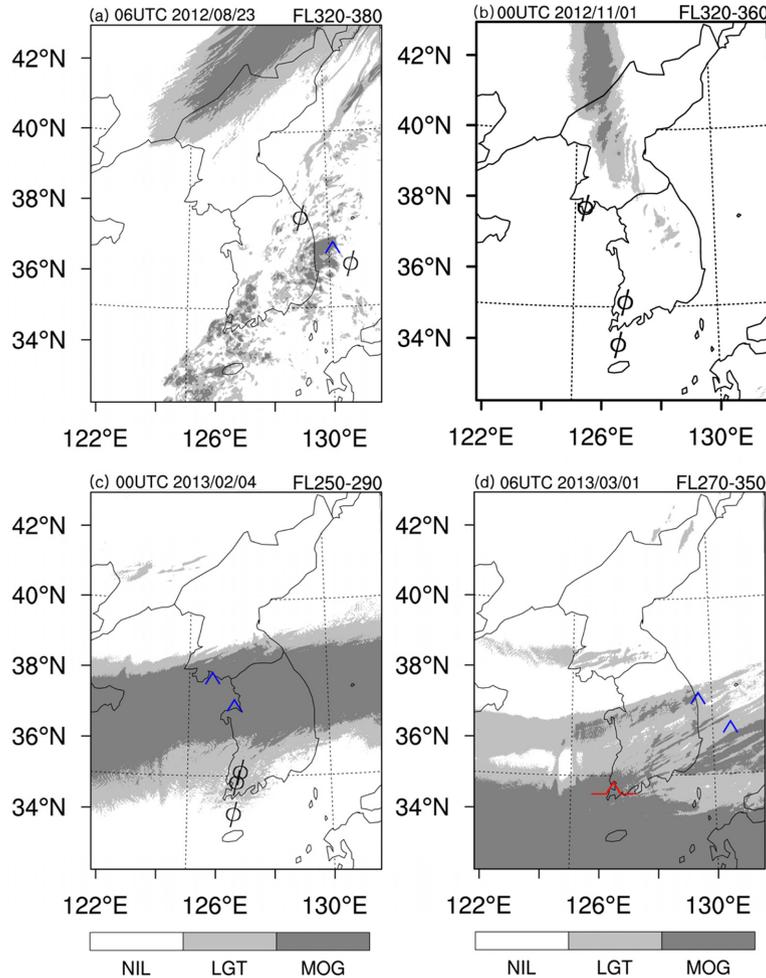


Fig. 6. Locations of the PIREPs over the Korean Peninsula occurred within ± 2 h of (a) 2012. 08. 23 0600 UTC, (b) 2012. 11. 01 0000 UTC, (c) 2013. 02. 04 0000 UTC, and (d) 2013. 03. 01 0600 UTC superimposed on the KP-KTG turbulence forecasting region. The observed NIL, LGT, and MOG-level events are depicted as conventional symbols of turbulence intensity (\emptyset ; null, \blacktriangle ; light, and \blacktriangledown ; moderate), respectively. FL means flight level in feet, i.e., FL320-380 in (a) represents 32000~38000 ft.

4. 요약 및 결론

본 연구노트에서는 한국의 기상환경에서 발생할 수 있는 난류 요인을 고려한 한반도 한국형 항공난류 예측시스템(한반도-KTG 시스템)의 방법론과 개발된 한반도-KTG 시스템의 난류 예측성을 살펴보았다. 한반도-KTG 시스템을 개발하기 위하여, 1년 기간(2012. 06~2013. 05)의 기상청 UM 기반 LDAPS 모델자료와 PIREP 관측자료를 이용해 총 74개의 개별 난류 진단지수들의 난류 강도별 임계값과 AUC들을 계산하였고, 그 중 한반도 공역 내에서 발생한 난류들의 특성을 가장 잘 진단하는 상위 15개의 개별 난류 진단지

수들을 결정하여 조건표를 구성하였다. 그 후 모델의 모든 격자점에서 계산된 개별 난류 진단지수들 값에 각 지수들의 가중치를 적용시킨 뒤 모두 합하여 최종적으로 하나의 통합 난류 예측지수인 *한반도-KTG*를 계산하였다. 본 연구에서 사용된 PIREP은 1년 기간 동안 한반도 공역과 비슷한 LDAPS의 영역 내에서 관측된 자료로, 중층과 상층 자료로 나누어 살펴보았을 때 중층 PIREP의 개수가 165개로 현저하게 작아 본 연구에서는 상층 한반도-KTG만 개발하였다.

한반도-KTG 시스템을 구성하는 15개의 개별 난류 진단지수들의 난류 예측성을 살펴본 결과, 15개 중 7개의 개별 난류 진단지수들이 0.8 이상의 AUC값을

보였으며, 고해상도 모델 자료를 이용한 것이 각 개별 난류 진단지수들의 예측성 향상에 기여한 것으로 보인다. 한반도-KTG 시스템 개발에 사용된 2012. 06~2013. 05 기간의 PIREP 관측자료를 이용하여 한반도-KTG 시스템과 12 km-RDAPS로 계산하는 현업-KTG 시스템의 난류 예측성을 비교한 결과, 0.007의 근소한 차이로 한반도-KTG 시스템의 예측성이 좋은 것으로 확인되었다. 추가 검증 기간(2013. 06~2014. 05)에는 현업-KTG 시스템의 예측성은 증가한 반면에, 한반도-KTG 시스템의 예측성은 다소 감소하여 현업-KTG 시스템이 한반도-KTG 시스템보다 예측성이 좋게 나타났다지만, 그 차이가 0.005로 큰 차이를 보이지 않았다. 이러한 결과를 통해, 한반도-KTG 시스템 개발에 사용된 PIREP의 개수가 현저히 적었음에도 불구하고 고해상도 LDAPS 자료를 사용함으로써 한반도-KTG 시스템이 한반도 영역에서 발생하는 항공 난류를 충분히 잘 예측한다는 것을 확인할 수 있었다. 차후 충분한 통계적 의미를 가질 수 있을 정도로 더 긴 기간에 대해 PIREP 난류자료가 축적된다면 중층 한반도-KTG 시스템도 개발할 수 있을 것이다.

감사의 글

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

REFERENCES

- Gill, P. G., and A. J. Stirling, 2013: Including convection in global turbulence forecasts. *Meteor. Appl.*, **20**, 107-114.
- Grell, G. A., J. Dudhia, and D. R. Stauffer, 1994: A description of the fifth generation Pen State/NCAT mesoscale model. NCAR Tec Note, NCAR/TN-398+STR, pp. 138.
- Jaeger, E. B., and M. Sprenger, 2007: A northern hemispheric climatology of indices for clear air turbulence in the tropopause region derived from ERA40 reanalysis data. *J. Geophys. Res.*, **112**, D20106, doi:10.1029/2006JD008189.
- Jang, W., H.-Y. Chun, and J.-H. Kim, 2009: A study of forecast system for clear-air turbulence in Korea. Part I: Korean Integrated Turbulence Forecasting Algorithm (KITFA). *Atmosphere*, **19**, 255-268 (in Korean with English abstract).
- 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.
- _____, and _____, 2011a: Statistics and possible sources of aviation turbulence over South Korea. *J. Appl. Meteor. Climatol.*, **50**, 311-324.
- _____, and _____, 2011b: Development of the Korean mid- and upper-level aviation Turbulence Guidance (KTG) system using the regional Unified Model. *Atmosphere*, **21**, 497-506 (in Korean with English abstract).
- _____, 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.
- _____, _____, W. Jang, and R. D. Sharman, 2009: A study of forecast system for clear-air turbulence in Korea, Part 2: Graphical Turbulence Guidance (GTG) system. *Atmosphere*, **19**, 269-287 (in Korean with English abstract).
- _____, and _____, 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.
- Knox, J., D. Mccann, and P. Williams, 2008: Application of the Lighthill-Ford theory of spontaneous imbalance to clear-air turbulence forecasting. *J. Atmos. Sci.*, **65**, 3292-3304.
- Koch, P., H. Wernli, and H. W. Davies, 2006: An event-based jet-stream climatology and typology. *Int. J. Climatol.*, **26**, 283-301.
- Lester, P. F., 1994: *Turbulence: A New Perspective for Pilots*. Jeppesen Sanderson, 212 pp.
- Lee, D.-B., and H.-Y. Chun, 2014: Development of the seasonal Korean aviation Turbulence Guidance (KTG) system using the regional Unified Model of the Korea Meteorological Administration (KMA). *Atmosphere*, **24**, 235-243.
- Min, J.-S., H.-Y. Chun, and J.-H. Kim, 2011: An investigation of synoptic condition for clear-air turbulence (CAT) events occurred over South Korea. *Atmosphere*, **21**, 69-83 (in Korean with English abstract).
- Mason, I., 1982 : A model for assessment of weather forecasts. *Aust. Meteor. Mag.*, **30**, 291-303.
- 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.