

## 통합지역모델을 이용한 한국형 중·상층 항공난류예측시스템 개발

김정훈 · 전해영\*

연세대학교 대기과학과

(접수일: 2011년 10월 24일, 수정일: 2011년 12월 14일, 게재확정일: 2011년 12월 16일)

### Development of the Korean Mid- and Upper-Level Aviation Turbulence Guidance (KTG) System Using the Regional Unified Model

Jung-Hoon Kim and Hye-Yeong Chun\*

Department of Atmospheric Sciences, Yonsei University, Seoul, South Korea

(Received: 24 October, 2011, Revised: 16 December 2011, Accepted: 16 December 2011)

**Abstract** Korean mid- and upper-level aviation turbulence guidance (KTG) system is developed using the unified model (UM)-based regional data assimilation and prediction system (RDAPS) of the Korea Meteorological Administration. The KTG system includes three steps. First, the KTG system calculates a suite of diagnostics in the UM-RDAPS domain. Second, component diagnostics that have different units and numerical magnitudes are normalized into the values between 0 and 1, according to their own thresholds in the KTG system. Finally, normalized diagnostics are combined into one KTG predictor by measuring the weighting scores based on the probability of detection, which is calculated using the observed pilot reports (PIREPs) exclusively of moderate-or-greater (MOG) and null (NIL) intensities. To investigate the optimal performance of the KTG system, two types (*RD-KTG* and *UM-KTG*) of the KTG systems are developed and evaluated using the PIREPs over Korea and East Asia. Component diagnostics and their thresholds in the *RD-KTG* are founded on the 8-yrs (2002.12-2010.11) MM5-based RDAPS (previous version of the RDAPS;  $\Delta x = 30$  km) and PIREPs data, while those in the *UM-KTG* are based on the 6 months (2010.12-2011.5) UM-based RDAPS ( $\Delta x = 12$  km) and PIREPs data. In comparison between the *RD-KTG* and *UM-KTG*, overall performance of the *UM-KTG* (0.815) is better than that of the *RD-KTG* (0.79) during the recent 6 months, because forecasting skill for the upper-level wind is higher in the UM-RDAPS than in the MM5-RDAPS. It is also found that the *UM-KTG* is more efficient than the *RD-KTG* according to the statistical evaluations and sensitivity tests to the number of component diagnostics.

**Keywords:** mid- and upper-level turbulence, PIREPs, KTG system, forecasting skill

## 1. 서 론

중층 난류는 10,000-20,000 ft (FL100-200; 약 3.3-6.6 km 상공), 상층 난류는 FL200 이상의 고도에서 수평 규모가 매우 작은 (약 10-1,000 m) 대기 중의 요란 운동

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

이 항공기에 직접적으로 영향을 주어 항공기가 급격히 흔들리는 현상으로 정의된다. 이러한 중·상층 난류는 구름이 없거나 층운형 구름만 존재하는 맑은 하늘 상태에서 급작스럽게 발생하는 청천난류 (clear air turbulence; CAT)가 대부분을 차지하기 때문에 그 예측이 매우 어려운 실정이며, 승객 및 승무원들이 안전벨트를 잘 매지 않고 있는 순항고도에서 빈번히 발생하기 때문에 이로 인한 인적물적 피해 또한 심각하다 (Kim *et al.*, 2011; Sharman *et al.*, 2006). 한국항공철도안전조사위원회

(Aviation and Railway Accident Investigation Board; ARAIB)의 통계조사에 따르면, 1957년부터 날씨와 관련된 항공기 사고들 중 약 24%가 난류에 의한 사고였으며, 이는 날씨관련 사고 중 가장 큰 발생원인으로 나타났다.

한국을 포함하는 동아시아 지역은 기후학적으로 전 세계에서 가장 강한 제트류가 흐르는 지역으로써 (Koch *et al.*, 2006), 이러한 제트의 상하층, 고기압성 회전이 강한지역, 제트 유출부 등에서는 시어 및 관성 불안정 등에 의한 중·상층 난류의 발생 가능성이 매우 높다 (민재식 등, 2011; Jaeger and Sprenger, 2007; Kim and Chun, 2010). 또한, 한국은 전 국토의 70% 이상이 산악이기 때문에 산악으로 유입되는 하층 바람 및 풍상층의 대기안정도 특성에 따라 다양한 스펙트럼을 가지는 산악파가 사계절 모두 나타나며, 그로 인한 난류 발생이 용이하다 (Kim and Chun, 2011). 세계 항공 운송량 1위를 차지하고 있는 인천국제공항을 중심으로 한국 및 동아시아에서의 항공 운행량이 최근 10년간 급격히 증가함에 따라, 운송용 항공기의 대부분의 시간이 소비되는 순항 고도에서 급작스럽게 발생하는 중·상층 난류에 대한 정확한 예측이 중요하게 여겨지고 있다.

수십 km의 수평 해상도를 가지는 현재의 현업수치예보모델의 예측장을 이용해 미세규모의 중·상층 난류를 명시적으로 예측하기에는 한계가 있다. 하지만, 이러한 난류운동에너지는 현업모델 격자에서 분해 가능한 큰 규모 대기운동의 요란으로부터 작은 규모로 에너지가 캐스케이드 되어 전달된다는 난류 이론에 입각할 때 (e.g., Cho and Lindborg, 2001; Dutton and Panofsky, 1970), 현업모델 예보장에서 모의된 대기운동이 정확하다고 가정할 경우 이로 인한 난류 발생의 예측이 논리적으로 가능해진다. 이를 바탕으로 현업 예보모델의 결과를 초기값으로 사용한 다양한 난류발생 메커니즘 (e.g., 시어 및 관성불안정, 지균조정 등)에 근거한 여러 난류진단지수들이 개발되어 현업 중·상층 난류예측에 사용되어왔다. Sharman *et al.* (2006)은 여러 난류진단지수들을 관측된 조종사 기상보고 자료들 (pilot reports; 이하 PIREPs)에 대한 그들의 예측성에 따라 서로 다른 가중치를 주어 하나의 통합된 앙상블 난류예측인자로 제공하는 통합난류예측 방법론을 적용한 Graphic Turbulence Guidance (GTG) 시스템을 개발하였고, 이를 이용할 경우 특정지수 하나만을 사용하거나 예보자의 경험에 의거한 난류 예측보다 그 정확성이 뛰어난을 보였다. 김정훈 등 (2009)과 Kim *et al.* (2011)은 이 방법론을 기상청 현업지역예보모델과 한국 및 동아시아 영역에서 관측된 PIREPs에 적용하여 그 예측성을 살펴 보았으며, 추가적으로 시스템에 구성되는 난류지수개수와 계절 변동에 따른 예측성 변화 및 사용된 모델자료와 예측리드타임에 따른 예측 민감도 조사를 수행함으로써 Sharman *et al.* (2006)의 연구를 확장하였다.

기상청은 2010년 5월부터 현업으로 운용 중인 지역예보모델 (Regional Data Assimilation and Prediction System; RDAPS)을 30 km 수평 격자간격을 가지는 기존의 MM5 (5th generation Mesoscale Model; Grell *et al.*, 1994) 기반 시스템 (이하 MM5-RDAPS)에서, 12 km 수평 격자간격을 가지는 UM (Unified Model; Davies *et al.*, 2005) ver. 6.6기반 시스템 (이하 UM-RDAPS)으로 교체하였다 (Fig. 1). 따라서, 현업 일기예보모델의 결과를 초기값으로 사용하는 통합난류예측 시스템의 구성요소들은 현업 예보모델의 교체와 함께 새롭게 구성되어야 하며, 그 예측성 또한 최근 관측자료를 이용한 다양한 민감도 조사와 통계적 검증을 통해 새롭게 최적화 되어야 한다 (Kim *et al.*, 2011; Sharman *et al.*, 2006). 미국해양기상청 (National Oceanic and Atmospheric Administration: NOAA)에서 현업으로 운용 중인 GTG 시스템의 경우에도, 미국환경예측센터 (National Centers for Environmental Prediction; NCEP)의 현업지역모델인 RUC (Rapid Update Cycle; Benjamin *et al.*, 2004) 모형에서 WRF (Weather Research and Forecasting; Skamarock *et al.*, 2008) 모형으로 교체되면서 이를 초기값으로 사용하는 GTG 시스템의 구성요소들을 새로운 모델과 관측된 자료에 맞게 최적화시킴으로써 GTG 시스템을 ver. 2에서 ver. 3로 개선하였다.

본 연구에서는 현재의 한국 실정에 최적화된 한국형 중·상층 난류예측시스템 (Korean mid- and upper-level Turbulence Guidance; 이하 KTG)을 개발하기 위해, 현재까지 개발된 여러 개별난류진단지수들을 새로운 UM-



**Fig. 1.** Domain of the Unified Model (UM)-based Regional Data Assimilation and Prediction System (RDAPS) operated in the Korea Meteorological Administration (KMA).

RDAPS 예보장에서 계산하고 통합난류예측 방법론에 의거하여 하나의 앙상블 난류예측인자인 KTG로 통합하였다. 또한, KTG 시스템의 구성요소들에 대한 다양한 민감도 실험 및 통계적 검증을 최근 6개월간 (2010.12-2011.5) 한국 및 동아시아 영역에서 관측된 PIREPs 자료와 비교, 분석하여 살펴봄으로써 최적의 예측성을 가지는 KTG가 되도록 설정하였다. 여기서, KTG는 KTG 시스템의 최종단계를 거쳐 나온 최종 앙상블 난류예측지수로써 그 이름이 시스템명과 동일하기 때문에 이를 구분하기 위해 KTG 예측지수는 *Italic*체로 표시하겠다. 2장에서는 KTG 시스템에 대한 설명 및 검증 방법과 사용된 자료에 따라 KTG 시스템의 구성요소를 달리한 두 가지 실험들 (*RD-KTG*, *UM-KTG*)에 대해 설명하였다. 3장에서는 두 실험들에서 나타난 KTG 시스템의 예측성 결과를 비교분석하였으며, 민감도 실험 및 통계적 검증을 병행해 한국 실정에 맞는 최상의 KTG 시스템을 구축하였다. 마지막으로 4장에서는 결론 및 요약을 정리하였다.

## 2. KTG 시스템

KTG 시스템은 크게 세 단계, 시스템의 구성요소들을 설정하는 선행 단계와, 구축된 구성요소들을 현업일기 모델에 적용하여 계산하는 단계 및 그 결과를 관측 자료로 검증하는 단계로 분리된다. 선행 단계는 KTG 시스템의 구성요소들을 Look-up table 형태로 만드는 단계이며, 이 Table에는 시스템에 포함되는 개별난류지수들의 종류 및 개수, 각 난류지수들의 관측된 난류강도 [null (NIL), light (LGT), moderate (MOD), severe (SEV), extreme (EXT)]에 대응되는 임계값들 (T1, T2, T3, T4, T5)과 그들의 예측성이 포함된다. 각 난류지수 별 임계값들 (T1-T5)은 주어진 기간 동안 현업일기모형 자료들로 계산된 개별난류지수 예측값들을 관측된 PIREPs 지점에서의 난류강도에 따라 누적한 평균한 값들로 계산된다 (김정훈 등, 2009; Kim *et al.*, 2011). 개별난류지수들의 PIREPs에 대한 예측성 검증 방법은 POD (probability of detection; Mason, 1982) 방법으로써, 관측된 중강도 이상 (moderate-or-greater: MOG) 사례에서 가장 가까운 격자점에서의 난류지수 예측값이 주어진 임계값보다 클 경우 POD “yes” (이하 PODY)를, 반대로 난류가 없다고 관측된 (null: NIL) 지점에서의 난류지수 예측값이 주어진 임계값보다 작을 경우 POD “no” (이하 PODN)를 선택하는 방법이다. 이 때, 주어진 임계값을 그 난류지수의 최소값과 최대값 사이에서 일정하게 변화시켜주면 각각의 주어진 임계값들에 대응되는 여러 PODY와 PODN 값들이 계산되며, 이들을 각각 x-y도면에 나타내어 연결한 커브의 면적 (Area Under Curve: AUC)이 그 개별 난류지수의 예측성이 된다 (김정훈 등, 2009; 장욱 등,

2009; Kim *et al.*, 2011; Sharman *et al.*, 2006).

두 번째 단계에서는 먼저, 선행 단계에서 구축된 KTG 구성요소 Table에 포함된 개별난류지수들을 현업일기 모형의 모든 격자점에서 계산하고, 난류지수 별 난류강도에 대응된 임계값 (T1, T2, T3, T4, T5)들과 1:1로 대응되는 0, 0.25, 0.5, 0.75, 1의 각 구간 사이에서 서로 다른 기울기를 가지는 선형 함수들을 이용해 모든 격자점에서 다양한 단위 및 범위를 가지는 개별난류지수 값들을 모두 0에서 1사이의 값들로 표준화 시켜준다.

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

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

다음으로, 식 (2)에 따라 표준화된 개별난류지수 값 ( $D_n^*$ )과 개별난류지수의 가중치 ( $W_n$ )을 곱하고, 그들을 합산함으로써 최종적으로 하나의 통합된 KTG 예측인자를 현업일기모형의 각 격자점에서 계산해준다. 여기서, 개별난류지수의 가중치 ( $W_n$ )는 각 난류지수의 예측성 (AUC)의 함수로써 식 (1)와 같이 계산된다. 본 연구에서 사용된 개별난류지수들의 수식들은 첨부에 포함하였으며, 통합난류예측 방법론에 대한 더 자세한 설명은 선행 연구들 (e.g., 김정훈 등, 2009; 장욱 등, 2009; Kim *et al.*, 2011; Sharman *et al.*, 2006)에서 참고할 수 있다.

마지막 단계는, KTG 시스템을 이용해 계산된 KTG 예측인자의 예측성을 개별난류지수들의 예측성 검증 방법과 동일한 POD 방법으로 따라 최근 6개월간 (2010.12-2011.5) 한국 및 동아시아에서 관측된 PIREPs를 이용해 검증하는 단계이다. 김정훈 등 (2009)과 Kim *et al.* (2011)에 의하면, 통합난류예측 시스템의 예측성은 그 구성요소들 (e.g., T1-T5)을 구축할 때 사용한 PIREPs 개수의 양이 증가할수록 즉, 더 긴 기간 동안 관측된 PIREPs와 모형자료들을 이용해 개별난류지수들의 임계값 등을 결정할수록 그 예측성이 향상되었다. 또한 사용된 현업일기모형의 수평 또는 연직 해상도가 좋거나, 모델 자체의 예측능력이 더 개선된 모델을 사용했을 때, 그를 이용한 통합난류예측 시스템의 예측성도 향상되었음을 알 수 있었다. 따라서, 본 연구에서는 먼저 장기간 (8년; 2002.12-2010.11) 한국 및 동아시아 지역에서 관측된 PIREPs와 그 기간 동안 기존 현업일기예보모델이었던 MM5-RDAPS 자료로 KTG 시스템의 구성요소들을 결정 한 MM5-RDAPS 기반 KTG (이하 *RD-KTG*)를 구축하였다. 다음으로, 30 km 수평 해상도를 가지는 기존 MM5-RDAPS 보다 수평격자간격이 줄어들었고 모델 예측능력

또한 향상된 최근 6개월간 (2010.12-2011.5) UM-RDAPS 자료 (수평 해상도: 12 km)와 PIREPs자료로 KTG 시스템의 구성요소들을 결정한 UM-RDAPS 기반 KTG 시스템 (이하 *UM-KTG*)도 구축하였다. 다음 장에서는 *RD-KTG*와 *UM-KTG*를 UM-RDAPS에 적용하고, 그 예측성들을 최근 6개월간 UM-RDAPS 도메인 영역 (Fig. 1)인 동아시아에서 관측된 PIREPs 자료를 이용해 비교분석할 것이며, 다양한 민감도 실험과 통계적 유의성 검증을 살펴봄으로써 현재 한국 실정에 최적화된 KTG 시스템이 무엇인지 살펴볼 것이다.

### 3. 연구 결과

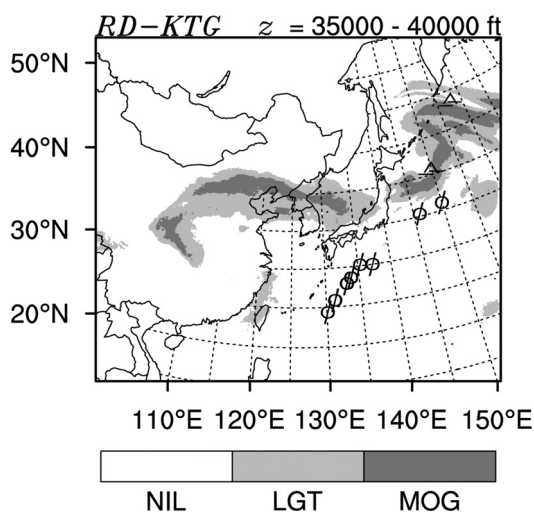
#### 3.1. RD-KTG

Table 1은 기존 현업일기예보모델인 MM5-RDAPS를 이용해 계산된 개별난류진단지수들의 예측성을 장기간 (8년간: 2002.12-2010.11) 한국 및 동아시아 지역의 상층

(FL200 이상)과 중층 (FL100-200)에서 관측된 PIREPs 자료들로 검증했을 때 그 예측성이 가장 좋은 상위 10개의 난류 지수들의 이름과 단위, 그들의 난류 강도에 대응되는 T1, T2, T3, T4, T5 임계값들과 AUC 값을 나타낸 표이다. 여기에서 개별난류진단지수의 예측성 검증에 사용된 PIREPs는 8년간 현업일기예보모델 생산 시간 이었던 00과 12 UTC를 중심으로  $\pm 2$ 시간 이내에 발생한 자료만 사용하였으며, 상층 (중층)에 대해 사용된 PIREPs 개수는 총 42776 (790)개이고, 이 중 NIL은 27032 (398)개, LGT는 13984 (323)개, MOG 난류는 1760 (69)개로 나타났다. 상층의 경우, *DTF3* (Diagnostic Turbulent kinetic energy Formulation 3; Marroquin, 1998) 지수가 0.790의 AUC값으로 가장 높은 예측성을 보였으며, CP (Colson-Panofsky; Colson and Panofsky, 1965) 지수가 0.771로서 뒤를 이었다. 중층의 경우, *PVU* (Potential Vorticity Unit) 지수가 0.718의 AUC값으로 가장 높은 예측성을 보였으며, 두 번째로 *HPG* (Horizontal PVU

**Table 1.** Thresholds (T1, T2, T3, T4, and T5) corresponding to null, light, moderate, severe, and extreme intensities of the mid- and upper-level turbulence and AUC values for their best 10 component diagnostics of the *RD-KTG* that are based on the 8-yr (2003-2010) PIREPs over Korea and East Asia. Formulations of all indices are in Appendix of the current paper.

Index	Units	T1	T2	T3	T4	T5	AUC
Upper-level (> 20,000 ft)							
<i>DTF3</i>	$m^2 s^{-2}$	0.37	0.55	1.0	1.65	2.3	0.790
<i>CP</i>	$kt^2$	8.3	17	45	86	127	0.771
<i>TII</i>	$s^{-2}$	$1.8 \times 10^{-7}$	$2.2 \times 10^{-7}$	$4.3 \times 10^{-7}$	$6.7 \times 10^{-7}$	$8.9 \times 10^{-7}$	0.758
<i>Brown2</i>	$cm^2 s^{-3}$	0.15	0.21	0.57	0.92	1.28	0.753
<i>-Ri<sub>e</sub></i>	-	-20	-2.0	-0.6	-0.3	0.5	0.753
<i>F<sub>0</sub></i>	$m^2 s^{-3} K^{-2}$	$2.2 \times 10^{-5}$	$4.0 \times 10^{-5}$	$8.4 \times 10^{-5}$	$1.5 \times 10^{-4}$	$2.2 \times 10^{-4}$	0.739
<i>TROPV</i>	$m^{-1}$	$1.4 \times 10^{-4}$	$3.8 \times 10^{-4}$	$6.2 \times 10^{-4}$	$9.2 \times 10^{-4}$	$1.2 \times 10^{-3}$	0.739
<i>Dutton</i>	$m s^{-1} km^{-1}$	20	22	30	42	53	0.710
<i>EDRLL</i>	$m^{2/3} s^{-1}$	0.008	0.01	0.017	0.034	0.051	0.697
<i>EDRTL</i>	$m^{2/3} s^{-1}$	0.007	0.009	0.015	0.038	0.059	0.696
Mid-level (10,000-20,000 ft)							
<i>PVU</i>	$K kg^{-1} m^2 s^{-2}$	$0.58 \times 10^{-6}$	$0.71 \times 10^{-6}$	$0.83 \times 10^{-6}$	$1.24 \times 10^{-6}$	$1.65 \times 10^{-6}$	0.718
<i>HPG</i>	$PVU m^{-1}$	$0.26 \times 10^{-5}$	$0.35 \times 10^{-5}$	$0.44 \times 10^{-5}$	$0.76 \times 10^{-4}$	$1.1 \times 10^{-4}$	0.715
<i>-Lapse</i>	$K m^{-1}$	-0.062	-0.061	-0.055	-0.043	-0.033	0.701
<i>DTF4</i>	$m^{-2} s^{-2}$	0.34	0.35	0.68	1.8	2.9	0.656
<i>VORT</i>	$s^{-1}$	$0.65 \times 10^{-5}$	$1.42 \times 10^{-5}$	$2.18 \times 10^{-5}$	$4.3 \times 10^{-5}$	$6.7 \times 10^{-5}$	0.643
<i>Brown2</i>	$cm^2 s^{-3}$	0.27	0.30	0.55	1.23	1.91	0.642
<i>CP</i>	$kt^2$	23	27	48	114	180	0.637
<i>CCAT</i>	$s^{-2}$	$1.06 \times 10^{-7}$	$2.2 \times 10^{-7}$	$2.9 \times 10^{-7}$	$6.1 \times 10^{-7}$	$9.3 \times 10^{-7}$	0.625
<i>TI2</i>	$s^{-2}$	$1.7 \times 10^{-7}$	$2.2 \times 10^{-7}$	$2.9 \times 10^{-7}$	$6.1 \times 10^{-7}$	$9.3 \times 10^{-7}$	0.619

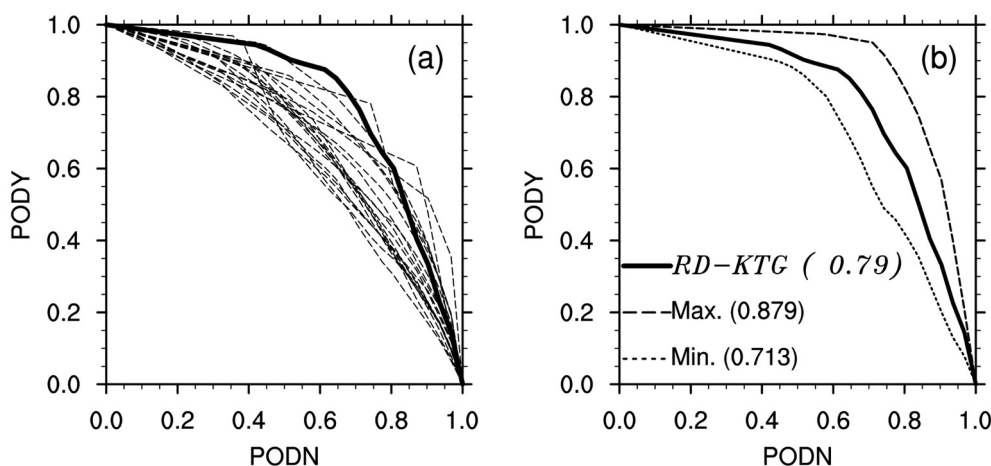


**Fig. 2.** Example of the upper-level *RD-KTG* at  $z = 35000 - 40000$  ft (FL350-400) valid at 1200 UTC 2 May 2011 on the UM-RDAPS domain, derived using the component diagnostics and their thresholds listed in Table 1 that is based on the 8-yr (2003-2010) PIREPs and MM5-RDAPS data over East Asia. Several MOG and NIL PIREPs observed within  $\pm 2$  hrs of 1200 UTC 2 May 2011 are depicted as convectational symbols of turbulence intensity. The thresholds for the boundaries between NIL- and LGT- and LGT- and MOG-levels are 0.3 and 0.475, respectively.

Gradient; Shapiro, 1978) 지수가 0.771의 AUC값으로 높게 나타났다.

Fig. 2는 Table 1의 상층 *RD-KTG* 구성요소들을 UM-RDAPS 자료를 이용하여 모든 격자점에서 계산하고, 통합난류예측 방법론에 의거하여 하나의 예측인자 (*RD-KTG*)로 통합하여 나타낸 결과로써, 2011년 5월 2일 12 UTC에 FL350-400 사이에서 평균된 값이다. 이 시간대를 중심으로  $\pm 2$ 시간 이내에 발생한 다수의 NIL과 MOG 난류 지점들도 각 난류강도 별 부호를 사용해 같이 나타내었다. 이 시기 상층 *RD-KTG*에서 예측된 MOG 난류 지역은 중국 요동에서 북한을 지나는 지역과 일본 북동부 해상지역으로 나타났으며, 이들 중 일본 북동부 해상에서 관측된 두 개의 MOG 난류지점들은 상층 *RD-KTG*의 MOG 예측지역과 잘 일치하고 있다. 한편, 일본 동쪽 및 남쪽 해상에서 관측된 다수의 NIL 지점들도 상층 *RD-KTG*가 예측한 NIL 지역과 잘 일치함을 알 수 있다.

상층 *RD-KTG*의 전반적인 예측성 및 그 예측성에 대한 통계적 유의성을 검증하기 위해, 2010년 12월부터 2011년 5월까지 6개월 동안 현업 UM-RDAPS자료가 생산되는 00과 12 UTC를 중심으로  $\pm 2$ 시간 이내에 상층에서 관측된 총 1455개 (NIL: 1105개, MOG: 70개)의 PIREPs를 수집하였다. Fig. 3(a)는 상층 *RD-KTG*와 이를 구성한 개별난류진단지수들의 예측성을 6개월간 관측된 PIREPs 자료를 이용해 PODY-PODN 곡선으로 각각 굵은 점선과 파선으로 나타내었다. 계산된 상층 *RD-KTG* 예측성의 통계적 유의성을 살펴보기 위해, Kim *et al.* (2011)과 Sharman *et al.* (2006)의 방법론에 따라, 수집된



**Fig. 3.** PODY-PODN performance statistics of (a) the upper-level *RD-KTG* (thick solid line) and 20 component diagnostics (thin dashed lines) and (b) the upper-level *RD-KTG* (thick solid line) and the maximum (dashed line) and minimum (dotted line) boundaries among the 200 experiments using the subsets of randomly selected half-fraction samples, derived using the 6-months (2010.10-2011.5) PIREPs and UM-RDAPS data over East Asia. The AUC values of the maximum, minimum, and *RD-KTG* are written in parentheses in (b).

PIREPs 자료의 1/2크기를 가지는 100개의 서로 다른 PIREPs 자료 샘플들을 랜덤하게 뽑아내고 이들을 이용해 상층 RD-KTG를 다시 반복적으로 검증하였다. Fig. 3(b)는 그들의 예측성 중 최대와 최소값에 대한 PODY-PODN 곡선을 각각 점선과 파선으로 나타낸 것이다. Fig. 3(a)을 통해서 상층 RD-KTG의 예측성 (AUC)이 이를 구성하는 개별난류진단지수 중 가장 예측성이 높은 DTF3의 그것과 같은 0.79로 나타남을 알 수 있으며, Fig. 3(b)를 통해서 상층 RD-KTG에 대한 랜덤 검증들의 변화가 0.79를 중심으로 큰 변화 없이 약 ±8-9% 이내에 위치해 상층 RD-KTG의 최근 6개월간 예측 결과가 통계적으로 유의한 수준에 있음을 보여준다. 이는 GTG 시스템을 MM5-RDAPS에 적용하고 6년간 (2003-2008) 동아시아 지역의 상층에서 관측된 PIREPs 자료로 검증한 Kim *et al.* (2011)의 예측성인 0.795 및 랜덤 검증의 최대와 최소값이 ±5% 이내에 위치했던 것과 비슷한 결과를 나타냈다. 결과적으로 MM5-RDAPS에 기반을 둔 상층 RD-KTG의 경우, 최근 6개월간 관측된 PIREPs 자료에 대한 예측성이 개별난류지수의 최대 예측성인 DTF3의 그것에 비해 크게 향상되지는 못하였음을 알 수 있었다. 한편, 중층 RD-KTG의 경우, 최근 6개월간 00과 12 UTC를 중심으로 ±2시간 이내에 중층에서 관측된 PIREPs 자료의 개수가 총 18개 (NIL: 13개, MOG: 2개)에 불과하기 때문에 본 연구에서 그 예측성을 검증할 수 없었다. 차후 중층 PIREPs 자료가 더 많이 축적이 되면, 이를 검증할 계획이다.

3.2. UM-KTG

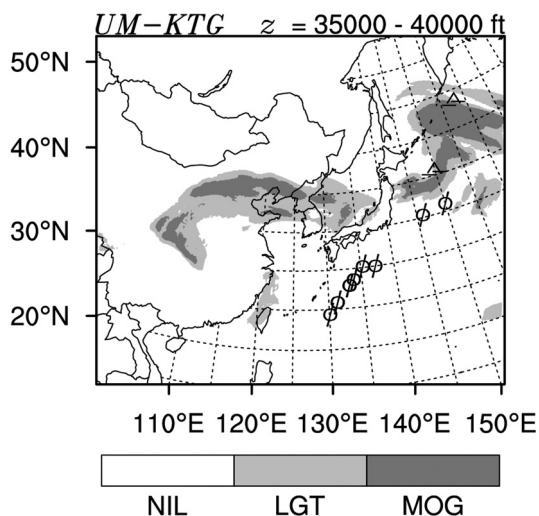
이번 장에서는 현재 기상청 현업일기예보모델인 UM-RDAPS를 이용해 개별난류진단지수들을 계산하고 이들

로부터 구성된 UM-KTG의 예측성을 살펴보겠다. Table 2는 UM-RDAPS를 이용해 계산된 개별난류진단지수들의 예측성을 최근 6개월간 (2002.12-2010.11) 한국 및 동아시아 지역의 상층 (FL200 이상) 에서 관측된 PIREPs 자료들로 검증했을 때 그 예측성이 가장 좋은 상위 10개의 난류 지수들의 이름과 단위, 각각의 난류 강도에 대응되는 T1, T2, T3, T4, T5 임계값들과 AUC 값을 나타낸 표이다. 앞 장에서 언급하였다시피, 최근 6개월간 중층에서 관측된 PIREPs의 개수가 부족하기 때문에, 중층 UM-KTG의 구성요소들은 본 연구에서 구성할 수 없었다. 최근 6개월간 UM-RDAPS 생산 시간이었다던 00과 12 UTC를 중심으로 ±2시간 이내에 발생한 상층 PIREPs 개수는 총 1455개였고, 이 중 NIL은 1105개, LGT는 280개, MOG 난류는 70개로 나타났다. 상층 UM-KTG 구성요소의 경우에도, 상층 RD-KTG와 마찬가지로 DTF3 지수가 개별난류지수들 중에서는 가장 높은 예측성을 보였지만, 상층 RD-KTG 때의 AUC = 0.790 보다 0.01 더 향상된 0.8의 AUC값을 나타냈다. 두 번째로는 T1 (Turbulence Index 1; Ellrod and Knapp, 1992) 지수가 AUC = 0.775로 높게 나타났다.

Fig. 4는 Fig. 2와 동일한 시간 및 고도에 대해, Table 2의 상층 UM-KTG 구성요소들을 UM-RDAPS에 적용하고 하나의 예측인자인 UM-KTG로 통합하여 나타낸 결과이다. Fig. 2와 비교해 볼 때, 상층 UM-KTG도 상층 RD-KTG와 비슷한 지역에서 MOG가 예측되었으나, 2개의 MOG 난류가 관측된 일본 북동쪽 해상에서 상층 UM-KTG의 MOG 예측지역이 상층 RD-KTG에 비해 좀 더 넓고 강한 값으로 예측되었다. Fig. 2와 마찬가지로 이 시기 관측된 다수의 MOG와 NIL 지점들이 상층 UM-

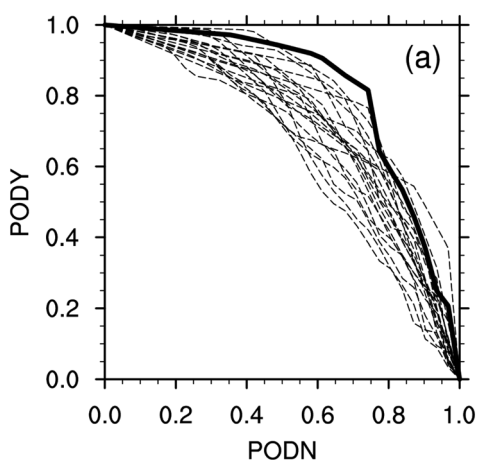
**Table 2.** Thresholds (T1, T2, T3, T4, and T5) corresponding to null, light, moderate, severe, and extreme intensities of the upper-level turbulence and AUC values for their best 10 component diagnostics of the UM-KTG that are based on the 6-months (2010.12-2011.5) PIREPs over Korea and East Asia. Formulations of all indices are in Appendix of the current paper.

Index	Units	T1	T2	T3	T4	T5	AUC
Upper-level (> 20,000 ft)							
DTF3	m <sup>2</sup> s <sup>-2</sup>	0.51	0.75	0.99	2.05	3.12	0.800
T11	s <sup>-2</sup>	2.6 × 10 <sup>-7</sup>	3.5 × 10 <sup>-7</sup>	4.8 × 10 <sup>-7</sup>	9.3 × 10 <sup>-7</sup>	14 × 10 <sup>-7</sup>	0.775
Brown2	cm <sup>2</sup> s <sup>-3</sup>	0.27	0.44	0.60	1.52	2.45	0.761
-R <sub>i</sub> <sub>e</sub>	-	-23	-2.5	-0.5	-0.25	0.3	0.755
CP	kt <sup>2</sup>	18	38	42	88	153	0.750
EDRLL	m <sup>2/3</sup> s <sup>-1</sup>	0.012	0.021	0.032	0.065	0.098	0.747
EDRTL	m <sup>2/3</sup> s <sup>-1</sup>	0.001	0.016	0.031	0.062	0.093	0.739
F <sub>e</sub>	m <sup>2</sup> s <sup>-3</sup> K <sup>-2</sup>	1.1 × 10 <sup>-5</sup>	1.9 × 10 <sup>-5</sup>	3.3 × 10 <sup>-5</sup>	5.8 × 10 <sup>-4</sup>	8.3 × 10 <sup>-4</sup>	0.738
Endlich	deg m <sup>-1</sup>	0.042	0.05	0.058	0.1	0.14	0.718
Dutton	m s <sup>-1</sup> km <sup>-1</sup>	24	28	31	57	84	0.705

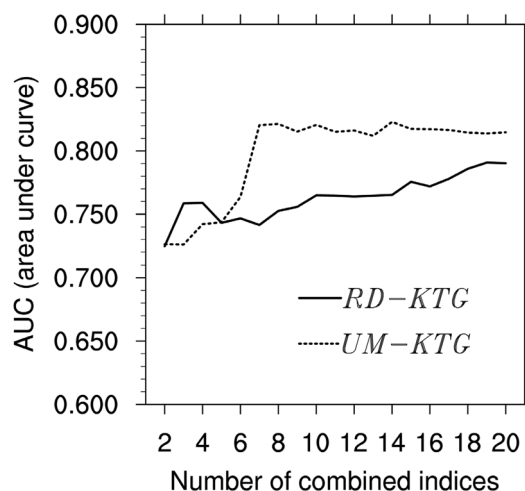


**Fig. 4.** As in Fig. 2, but the upper-level *UM-KTG*, which is based on the 6-months (2010.12-2011.5) PIREPs and UM-RDAPS data over East Asia.

*KTG*로 예측된 *MOG*와 *NIL* 지역과 잘 일치하였다. Fig. 5(a)는 상층 *UM-KTG*와 그를 구성하는 개별난류진단지수들의 예측성을 각각 굵은 점선과 파선들이인 *PODY-PODN* 곡선으로 나타내었고, Fig. 5(b)는 Fig. 3(b)와 같은 방법으로 상층 *UM-KTG*의 통계적 유의성을 살펴본 그림이다. Fig. 5(a)로부터 *UM-KTG*의 예측성 ( $AUC=0.815$ )은 가장 높은 개별난류진단지수인 *DIF3*의 0.8보다 0.15 더 향상된 값을 나타내고 있으며, Fig. 5(b)의 *UM-KTG*에 대한 랜덤 검증의 변화도 0.815를 중심으로 큰 변동 없이 약  $\pm 7-8\%$  이내에서 위치해 *UM-KTG*의 최근 6개월간의 예측 결과가 통계적으로 유의함을 보여준다. 이는



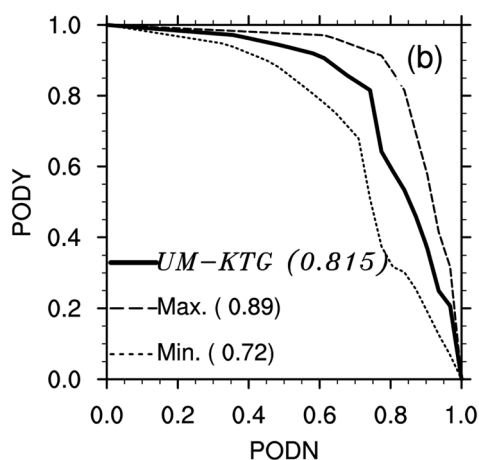
**Fig. 5.** As in Fig. 3, but the upper-level *UM-KTG*.



**Fig. 6.** AUC values of the *RD-KTG* (solid line) and *UM-KTG* (dashed line), as a function of the number of combined diagnostics, derived using the 6-months (2010.12-2011.5) PIREPs and UM-RDAPS data over East Asia.

앞 장에서 살펴본 상층 *RD-KTG*의 예측 결과인 0.79보다 크게 향상된 것으로써, 상층 *UM-KTG*가 최근 6개월간 한국 및 동아시아에서 관측된 PIREPs 자료들에 대해 개별난류지수들보다 향상된 예측을 하였으며, 상층 *RD-KTG* 보다 더 최적화 되었음을 확인할 수 있다.

Fig. 6은 상층 *RD-KTG*와 *UM-KTG*의 예측성 ( $AUC$ )들이 *KTG* 시스템을 구성하는 개별난류진단지수의 개수에 따라 각각 어떻게 변화하는지를 살펴본 그림이다. 상층 *RD-KTG* (실선)의 경우 시스템을 구성하는 난류지수의 개수가 증가할수록 점진적으로 그 예측성이 향상되어, 19개의 난류지수들을 통합해서 상층 *RD-KTG*를



구성했을 때 가장 높은 예측성 ( $AUC = 0.791$ )을 나타냈다. 반면, 상층 *UM-KTG* (점선)의 경우 시스템에 구성되는 난류지수개수가 8개가 될 때 ( $AUC = 0.821$ )까지 증가하다가 그 이후로 20개가 될 때까지는 예측성의 증가가 크게 없이 조금씩 감소 또는 증가하는 패턴을 보였다. 이는 8개 이후 추가되는 개별난류진단지수들의 물리적 의미들이 이미 8개로 구성된 *UM-KTG*에 충분히 포함되어 더 이상 추가적인 예측성 향상이 없었던 것으로 사료된다. 하지만, 이러한 해석은 사용된 관측 자료 및 기간, 지역 및 모델 등에 따라 달라질 수 있기 때문에, 특별한 사례에 대한 고해상도 수치모델 분석 (e.g., Kim and Chun, 2011)을 이용한 추가적인 연구가 필요할 것이라 생각된다.

또한, Fig. 6에서는 전반적으로 상층 *UM-KTG*의 예측성들이 상층 *RD-KTG*의 그것들보다 높게 나타나고 있다. 기상청 수치모델관리관실의 기술보고서인 “수치예보 시스템의 검증 (2010년)” (손주형 등, 2011)에 의하면, 2010년 5월 한달 동안 MMS-RDAPS와 UM-RDAPS로 예측된 300 hPa 바람장을 레디오존데 관측자료로 각각 검증한 결과, UM-RDAPS의 평균 오차와 RMSE (root mean square error)가 각각  $-0.1 \sim -0.32 \text{ m s}^{-1}$ 와  $1.23 \sim 1.83 \text{ m s}^{-1}$  정도로 나타나 MMS-RDAPS의 그것들 ( $-0.85 \sim -1.27 \text{ m s}^{-1}$ 와  $5.08 \sim 8.94 \text{ m s}^{-1}$  정도)에 비해 낮았다. 따라서, KTG 시스템에 사용되는 UM-RDAPS의 수평 해상도가 MMS-RDAPS 보다 높고, UM-RDAPS의 상층 대기흐름에 대한 정확성이 MMS-RDAPS에 비해 더 좋아졌기 때문에, 이를 이용한 KTG 시스템의 숙련도가 높아졌음을 알 수 있다. 현업난류예측 입장에서 살펴볼 때, *UM-KTG*를 이용한 상층 난류예측이 *RD-KTG*를 이용하는 것보다 더 적은 개별난류구성인자들을 이용해 더 효율적이고 빠르게 계산될 수 있으며, 그 예측 결과도 *UM-KTG*가 *RD-KTG*보다 더 정확함을 알 수 있다. 또한, 실제 항공산업에 종사하는 조종사, 항공 운항관리사 및 관제사 등이 예측된 난류 정보를 유용한 정보로써 활용하기 위해서는 MOG 난류에 대한 예측성이 최소한 80% ( $AUC = 0.8$ ) 이상이 되어야 하는데 (Fahey, 1993; Sharman *et al.*, 2006), 이러한 관점에서 상층 *UM-KTG*의 예측성이 0.8 이상으로 향상된 것은 매우 고무적이라 할 수 있겠다.

#### 4. 요약 및 결론

본 연구에서는 현재 한국 실정에 최적화된 한국형 중·상층 항공난류예측시스템 (KTG)을 개발하기 위해, 기상청 현업일기예보모형인 12 km 수평해상도를 가지는 UM-RDAPS 자료로 개별난류진단지수를 계산하고 통합난류예측 방법론에 의거하여 하나의 KTG 예측인자로 통합하였다. 계산된 중·상층 KTG 시스템의 검증 및 최

적화는 UM-RDAPS 도메인 영역에서 관측된 PIREPs 자료를 이용해 살펴보았다. 통합난류예측 시스템에 대한 선행 연구들에 의하면, 시스템 구성요소들을 구축할 때 장기간 관측된 PIREPs 자료를 이용할 경우 그들로 구성된 시스템의 예측성이 향상되었으며, 난류예측 시스템의 초기값으로 들어가는 현업일기예보모형의 해상도가 좋거나 모델 자체의 상층 대기운동에 대한 예측성이 좋을 경우 이를 이용한 난류예측 시스템의 예측성이 증가하였다. 따라서, 본 연구에서는 장기간 (8년간: 2002.12-2010.11) 관측된 PIREPs와 그 기간 동안의 현업일기예보모형이었던 MMS-RDAPS로 난류예측 시스템의 구성요소를 결정한 *RD-KTG*와 2010년 12월부터 현업일기예보모형으로 교체된 UM-RDAPS와 최근 6개월 (2010.12-2011.5) 관측된 PIREPs 자료로 난류예측 시스템의 구성요소들을 결정한 *UM-KTG*를 모두 구축하였다.

상층 *RD-KTG*와 *UM-KTG*를 검증하고 비교, 분석하기 위해 최근 6개월간 상층에서 관측된 총 1105개의 NIL 강도 PIREPs와 70개 MOG 강도 PIREPs를 수집하였다. 상층 *RD-KTG*의 경우 최근 6개월간 예측성이  $AUC = 0.79$ 로 나타났으며, 이는 구성된 개별난류진단지수들 중 최고의 예측성을 보인 *DTF3*의 0.79와 비교했을 때 크게 향상되지 않은 동일한 값이었다. 반면, 상층 *UM-KTG*의 경우 최근 6개월간 예측성이  $AUC = 0.815$ 로써, 구성된 진단지수들 중 최고인 *DTF3*의  $AUC = 0.8$ 보다 더 높고, 상층 *RD-KTG*에 비해서도 향상된 결과를 보였다. 계산된 예측성의 통계적 유의성을 살펴보기 위해 최근 6개월간 PIREPs의 1/2 크기를 가지는 100개의 샘플들을 랜덤하게 추출하고, 이들을 이용해 상층 KTG 시스템을 새롭게 반복해서 검증했다. 결과적으로, 랜덤 예측성들의 최대 및 최소값이 원래의 예측성을 중심으로  $\pm 7\sim 8\%$  이내 존재하여 상층 KTG 시스템의 예측성이 통계적으로도 유의함을 알 수 있었다. 중층 *RD-KTG* 시스템의 경우, 최근 6개월간 관측된 PIREPs의 개수가 충분치 않아서 본 연구에서 예측성을 분석할 수 없었으며, 중층 *UM-KTG*는 구축될 수 없어서 중층 *RD-KTG*와 *UM-KTG*의 비교, 분석은 수행되지 않았다.

마지막으로, 상층 *RD-KTG*와 *UM-KTG*에 구성된 개별난류진단지수의 개수에 따른 예측성을 살펴보았을 때, *RD-KTG*는 개별난류지수 개수가 증가할수록 예측성이 점진적으로 향상되어 19개 난류지수로 KTG 시스템을 구성했을 때  $AUC = 0.791$ 로 가장 높은 값을 나타냈다. 반면, *UM-KTG*의 경우 8개의 개별난류지수를 이용할 때까지 시스템의 예측성이 급격히 증가하여  $AUC = 0.821$ 을 기록한 뒤 20개가 될 때까지 예측성의 변화가 거의 없이 나타났다. 개별난류지수 개수에 대한 모든 민감도 실험에서 *UM-KTG*의 예측성들이 *RD-KTG* 보다 전반적으로 더 높은 값을 나타내는 것으로 보아, 모델 해상도가 더 좋고 상층 대기운동에 대한 예측이 더 정확함



현업일기모형을 사용했을 때 이를 초기값으로 해서 통합하는 KTG 시스템의 예측성도 향상됨을 알 수 있었다. 또한 실용적인 관점에서 상층 UM-KTG의 예측성이 0.8 이상으로 향상됨으로써, 항공 실무자들에게 예측된 난류 정보가 더 객관적이고 유용하게 사용할 수 있도록 만족되었다. 따라서, 상층 UM-KTG가 상층 RD-KTG보다 현재 한국 실정에 더 최적화된 한국형 항공난류예측 시스템을 확인하였다.

차후 더 많은 중층 PIREPs 자료가 확보되면 구축된 중층 RD-KTG의 예측성을 분석할 예정이며, 중층 UM-KTG도 구축하여 그 예측성들을 비교할 것이다. 또한, 2010년 5월 14일부터 현업 운용중인 UM-RDAPS는 2011년 5월 22일까지는 현업전구모델인 UM-GDAPS 예측장만을 초기 및 경계조건으로 이용한 Cold-run UM-RDAPS에서, 2011년 5월 23일 이후부터는 지역 4DVAR (four dimensional variational data assimilation)를 접합한 4DVAR UM-RDAPS로 새롭게 운용되고 있음을 감안할 때, 차후 지속적으로 축적될 4DVAR UM-RDAPS에 본 연구에서 구축된 RD-KTG와 UM-KTG를 적용시켜 비교할 경우 더 공정한 비교가 될 것으로 사료된다. 그리고, 현업일기모형인 UM-RDAPS에 대응하는 PIREPs 자료가 1년 기간 동안 축적되면 RD-KTG와 UM-KTG의 계절에 따른 예측성 변화를 조사할 계획이며, 이를 통해서 계절별로 급격하게 변화하는 한국 및 동아시아 지역의 중·상층 대기운동 변화에 최적화된 KTG 시스템으로 개선시킬 수 있을 것이다. 한편, 본 연구에서 개발된 KTG 시스템은 모듈 형태로 항공청 서버에 구축되어 현업 항공난류예보에 중요한 정보를 제공할 것이며, 궁극적으로 급작스럽게 발생하는 항공난류로 인한 인적, 물적 피해를 최소화하여 한국 및 동아시아 영역에서의 안전한 항공 여행에 도움을 줄 것으로 기대된다.

첨부 “KTG 시스템의 개별난류진단지수”

$$1. DTF3 = 0.7\varepsilon/(0.19N), \varepsilon = K_M VWS^2 \left( \frac{c_1}{c_3} - \frac{c_2}{c_3} Ri_f \right), \quad (a1)$$

$$Ri_f = Pr \times Ri, \quad N = \sqrt{\frac{g \partial \theta}{\theta \partial z}}, \quad K_M = 75.0 [m^2/s],$$

$$VWS = \left( \left| \frac{\partial u}{\partial z} \right|^2 + \left| \frac{\partial v}{\partial z} \right|^2 \right)^{1/2}, \quad Ri = \frac{N^2}{VWS^2},$$

$$Pr = 1.0/7 Ri (Ri > 1),$$

$$Pr = Ri (Ri < 1) \times [1.0 / \{c_0 Ri + 1.0 / (1 + c_0 Ri)\}],$$

$$c_1 = 1.44, \quad c_2 = 1.0, \quad c_3 = 1.92, \quad c_0 = 6.873.$$

$$2. Ri_e = \frac{N_e^2}{VWS^2}, \quad N_e = \sqrt{\frac{g \partial \theta_e}{\theta_e \partial z}}, \quad (a2)$$

$$3. TI1 = VWS \times Def, \quad Def = (D_{sh}^2 + D_{st}^2)^{1/2}, \quad (a3)$$

$$D_{sh} = (\partial v / \partial x) + (\partial u / \partial y), \quad D_{st} = (\partial u / \partial x) + (\partial v / \partial y)$$

$$4. Brown2 = \frac{Brown1}{24} VWS^2 \quad (a4)$$

$$Brown1 = (0.3 \zeta_a^2 \times D_{sh}^2 \times D_{st}^2)^{1/2}, \quad \zeta_a = \zeta + f$$

$$\zeta = (\partial v / \partial x) - (\partial u / \partial y),$$

$$5. CP = \lambda^2 VWS^2 \left( 1 - \frac{Ri_e}{Ri_{crit}} \right), \quad \lambda = \lambda_z, \quad Ri_{crit} = 1. \quad (a5)$$

$$6. F_\theta = \left[ \frac{\partial \vec{V}}{\partial \theta} \left[ \frac{\partial u}{\partial \theta} \frac{D}{Dt} \left( \frac{\partial u}{\partial \theta} \right)_\theta + \frac{\partial v}{\partial \theta} \frac{D}{Dt} \left( \frac{\partial v}{\partial \theta} \right)_\theta \right] \right] \quad (a6)$$

$$7. TROPV = \frac{|\nabla_H(HPVU)|}{(HPVU)}, \quad (a7)$$

$$HPVU = \text{Height of } 2 \text{ PVU.}$$

$$8. Dutton = 1.25 S_H + 0.25 VWS^2 + 10.5, \quad (a8)$$

$$S_H = \left( \frac{u}{|\vec{V}|} \right) \frac{\partial |\vec{V}|}{\partial y} - \left( \frac{v}{|\vec{V}|} \right) \frac{\partial |\vec{V}|}{\partial x}.$$

$$9. EDRL(s) = \langle [u(x) - u(x+s)] \times [v(x) - v(x+s)] \rangle \quad (a9)$$

$$10. EDRL(s) = \langle [u(y) - u(y+s)] \times [v(x) - v(x+s)] \rangle \quad (a10)$$

$$11. PVU = -\zeta_a g \frac{\partial \theta}{\partial p} \quad (a11)$$

$$12. HPG = |\nabla PVU| \quad (a12)$$

$$13. Lapse = - \left( \frac{\partial T}{\partial z} \right) \quad (a13)$$

$$14. DTF4 \propto \varepsilon = E_0 \exp[c_5 \{c_\mu VWS^2 (1 - Ri_i)\}^{1/2} (t - t_0)], \quad (a14)$$

$$E_0 = 3.5, \quad c_5 = 0.31, \quad c_\mu = 0.09, \quad t - t_0 = 500$$

$$15. VORT = \zeta^2 \quad (a15)$$

$$16. CCAT = \frac{g}{T} \times \frac{\zeta_a}{f} \times \left( \vec{V} \cdot \nabla \left| \frac{dT}{dz} \right| \right) \quad (a16)$$

$$17. TI2 = VWS \times (Def - Div), \quad (a17)$$

$$Div = \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y}$$

$$18. Endlich = |\vec{V}| \times \left| \frac{\partial \Phi}{\partial z} \right| \quad (a18)$$

### 참고문헌

김정훈, 전해영, 장욱, R. D. Sharman, 2009: 한국의 청천난류 예보 시스템에 대한 연구. Part II: Graphical Turbulence

- Guidance (GTG) 시스템. *대기*, **19(3)**, 269-287.
- 민재식, 전혜영, 김정훈, 2011: 한국에서 발생한 청천난류 사례에서 나타나는 중관규모 대기상태에 대한 연구. *대기*, **21(1)**, 69-83.
- 손주형, 강기룡, 원성희, 박영연, 박윤희, 2011: 수치예보 시스템의 검증 (2010년). 3.2. 지역예보모델. *수치모델관리관실 기술보고서 2011-01*, 발간등록번호:11-136000-000230-10, 35-63.
- 장욱, 전혜영, 김정훈, 2009: 한국의 청천난류 예보 시스템에 대한 연구. Part I: 한국형 통합 난류 예측 알고리즘. *대기*, **19(3)**, 255-268.
- Benjamin, S. G., G. A. Grell, J. M. Brown, T. G. Smirnova, and R. Bleck, 2004: Mesoscale weather prediction with the RUC hybrid isentropic-terrain-following coordinate model. *Mon. Wea. Rev.*, **132**, 473-494.
- 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.
- Colson, D., and H. A. Panofsky, 1965: An index of clear-air turbulence. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, **91**, 507-513.
- Dutton, J. A., and H. A. Panofsky, 1970: Clear air turbulence: A mystery may be unfolding. *Science*, **167**, 937-944.
- Davies, T., M. J. P. Cullen, A. J. Malcolm, M. H. Mawson, A. Staniforth, A. A. White, and N. Wood, 2005: A new dynamical core for the Met Office's global and regional modeling of the atmosphere. *Q. J. R. Meteorol. Soc.*, **131**, 1759-1782.
- Ellrod, G. and D. Knapp, 1992: An objective clear-air turbulence forecasting technique: Verification and operational use. *Wea. Forecasting*, **7**, 150-165.
- Fahey, T. H., 1993: Northwest Airlines atmospheric hazards advisory and avoidance system. Preprints, *5<sup>th</sup> Conf. on Aviation, Range, and Aerospace Meteorology*, Vienna, VA, Amer. Meteor. Soc., 409-413.
- Grell, G. A., J. Dudhia, and D. R. Stauffer, 1994: A description of the fifth generation Pen State/ NCAR 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.
- 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.
- \_\_\_\_\_, 2011: Statistics and possible sources of aviation turbulence over South Korea. *J. Appl. Meteor. Climatol.*, **50**, 311-324.
- Kim, J.-H., H.-Y. Chun, 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.
- Koch, P., H. Wernli, and H. W. Davies, 2006: An event-based jet-stream climatology and typology. *Int. J. Climatol.*, **26**, 283-301.
- Marroquin, A., 1998: An advanced algorithm to diagnose atmospheric turbulence using numerical model output. Preprints, *16<sup>th</sup> Conf. on Weather Analysis and Forecasting*, Phoenix, AZ, Amer. Meteor. Soc., 79-81.
- Mason, I., 1982: A model for assessment of weather forecasts. *Aust. Met. Mag.*, **30**, 677-688.
- Skamarock, W. C., J. B. Klemp, J. Dudhia, D. O. Gill, D. M. Barker, M. G. Duda, X.-Y. Huang, W. Wang, and J. G. Powers, 2008: A description of the advanced research WRF version 3. NCAR technical note, NCAR/TN-475+STR.
- Sharpiro, M. A., 1978: Further evidence of the mesoscale and turbulence structure of upper level jet stream-frontal zone systems. *Mon. Wea. Rev.*, **106**, 1100-1111.
- 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.