

한국의 청천난류 예보 시스템에 대한 연구. Part I: 한국형 통합 난류 예측 알고리즘

장욱 · 전해영* · 김정훈

연세대학교 대기과학과

(2009년 8월 4일 접수; 2009년 9월 2일 승인)

A Study of Forecast System for Clear-Air Turbulence in Korea. Part I: Korean Integrated Turbulence Forecasting Algorithm (KITFA)

Wook Jang, Hye-Yeong Chun and Jung-Hoon Kim

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

(Manuscript received 4 August 2009; in final form 2 September 2009)

Abstract

Based on the pilot reports (PIREPs) collected in South Korea from 2003 to 2008 and corresponding Regional Data Assimilation and Prediction System (RDAPS) analysis data of 30 km resolution, we validate the Korean Integrated Turbulence Forecasting Algorithm (KITFA) system that predicts clear-air turbulence (CAT) above the Korean peninsula. The CATs considered in this study are the upper level (higher than 20000 ft) turbulence excluding convectively induced turbulences. In the KITFA system, there are two main processes for predicting CATs: to select CAT indices and to determine their weighting scores. With the PIREPs observed for much longer period than those used in the current operational version of the KITFA system (March 4-April 8 of 2002), three improvable processes of the current KITFA system, re-calculation of weighting scores, change of method to calculate weighting scores, and re-selection of CAT indices, are tested. The largest increase of predictability is presented when CAT indices are selected by using longer PIREP data, with the minor change using different methods in calculation of weighting scores. The predictability is the largest in wintertime, and it is likely due to that most CAT indices are related to the jet stream that is strongest in wintertime. This result suggests that selecting proper CAT indices and calculating their weighting scores based on the longer PIREPs used in this study are required to improve the current KITFA.

Key words: CAT, KITFA, PIREP, predictability

1. 서 론

청천난류 (clear-air turbulence, 이하 CAT)는 운항 중인 항공기의 사고를 유발하는 가장 큰 기상학적 원인으로 알려져 왔으며 항공기와 승객에게 잠재적인 위협요소가 되고 있다. Ellrod *et al.* (2003)은 청천난류

를 5.6 km 이상의 고도에서 층운 안 혹은 구름이 존재하지 않는 상황에서 발생하여 항공기에 영향을 미치는 난류로 정의하였다. 선행연구를 통해서 강한 연직 바람시어와 낮은 안정도에 의해서 유도되는 Kelvin-Helmholtz 불안정 (Nappo, 2002; Sekioka, 1970), 산악파의 파쇄 (Clark *et al.*, 2000), 대류구름 상부에서부터 전파된 파동의 파쇄 (Lane *et al.*, 2003; Pantley and Lester, 1990), 제트 주변에서 발생하는 불균형적인 흐름 (Knox *et al.*, 2008; Koch and Caracena, 2002) 등이 청천난류의 발생 메커니즘으로 제안되었다.

청천난류는 수 cm부터 수 km까지 다양한 규모의 크기를 가지기 때문에 현재 사용되고 있는 수치예보모

*Corresponding Author: Hye-Yeong Chun, Department of Atmospheric Sciences, Yonsei University, 120-749, Seoul, South Korea.
Phone: +82-2-2123-2682, fax: +82-2-365-5163
E-mail: chunhy@yonsei.ac.kr

형의 분해능으로 이러한 규모의 난류를 정확하게 예측하기는 어려운 상황이다. 하지만 청천난류의 발생은 수십 km 규모의 운동으로부터 작은 규모의 운동으로 에너지가 캐스캐이드 된 것이므로 (Dutton and Panofsky, 1970; Koshyk and Hamilton, 2001; Tung and Olando, 2003) 수치예보모형으로 분해가 가능한 규모의 운동에 대한 정확한 예측을 통해서 청천난류에 대한 예측이 가능한 것으로 인식되고 있다 (Koch *et al.*, 2005). 따라서 청천난류에 대한 연구는 주로 난류가 유발되기 쉬운 중관 또는 중규모의 운동상태를 나타내는 매개변수와 관련되어져 왔다.

우리나라 항공기상청에서는 한반도 상공에서 발생하는 청천난류에 대한 예측을 위해서 2002년 National Center for Atmospheric Research (NCAR)와 공동으로 당시 미국의 청천난류 예보 시스템이었던 Integrated Turbulence Forecasting Algorithm (ITFA)에 기반을 둔 Korean Integrated Turbulence Forecasting Algorithm (KITFA)를 개발하였다. 그 이래로 KITFA 시스템을 통한 청천난류에 대한 예보는 30 km와 5 km 해상도의 Regional Data Assimilation and Prediction System (RDAPS) 예보장을 이용하여 항공기상청에서 수행되고 있다. 하지만 미국의 예보 시스템이었던 ITFA의 경우 지속적인 연구와 개발을 통해 Graphical Turbulence Guidance (GTG)의 새로운 시스템으로 업그레이드 된 반면 KITFA 시스템의 경우는 큰 변화가 없이 현재까지 예보에 이용되고 있는 상황이다.

KITFA 시스템에 대한 선행연구로서 기상연구소에서는 2002년 연차 보고서 (기상연구소, 2002)를 통하여 KITFA 시스템을 설명하고, 2002년 봄철에 수집된 Pilot Report (PIREP) 자료와 KITFA 시스템을 통해 예측된 청천난류의 강도 분포를 비교함으로써 그 예측성을 조사하였다. Lee *et al.* (2003)에서는 통계적인 분석 방법을 통하여 KITFA 시스템에서 사용중인 12개의 CAT 지수에 대한 예측성을 조사하였다. 그 결과, National Centers for Environmental Prediction's (NCEP's) Nested Grid Model 1 (NGM1), 연직 바람시어 (vertical wind shear: VWS), 와도의 제곱 (Vorticity²: vort²)이 청천난류 발생에 대한 예측에 있어서 가장 의미 있는 지수인 것으로 나타났다.

Tebaldi *et al.* (2002)은 CAT 지수와 각 지수가 가지는 가중치에 대한 결정이 ITFA 시스템에서 사용되고 있는 통계적인 청천난류의 예측 방법에 있어서 매우 중요함을 강조하였다. 하지만 현재 운용되고 있는

KITFA 시스템의 경우, 2002년 3월 4일부터 4월 8일 까지 수집된 PIREP 자료를 이용하여 CAT 지수와 각 지수의 가중치를 결정하였고 그 당시 정해진 지수와 가중치가 현재까지 사용되고 있다. 하지만 짧은 기간 동안에 수집된 적은 수의 PIREP 자료를 이용하여 정해진 CAT 지수의 종류와 가중치가 한반도 상공에서 발생하는 청천난류에 대한 예측에 있어서 충분한 타당성을 가지는가에 대한 의문이 존재할 수 있다.

따라서 본 연구에서는 현재 운용중인 KITFA 시스템을 살펴보고, 개선 될 수 있는 점을 세 가지로 나누고 각각에 대해 개선 효과를 조사하였다. 첫째, 현재 KITFA 시스템에서 사용중인 12개의 CAT 지수에 대한 가중치를 긴 기간 동안 (2002.12-2008.11) 수집된 PIREP 자료를 이용하여 새롭게 계산하여 개선의 효과를 확인하였다. 둘째, 현재 KITFA 시스템에서 가중치를 계산하는 방법인 root-mean-squared (RMS) 방법과 GTG에서 가중치를 계산하는 방법인 probability of detection (POD)를 비교하였다. 마지막으로 24개의 난류 지수 중에서 PIREP에 근거하여 선택되는 12개의 난류 지수를 긴 기간의 PIREP을 통해 새롭게 선정하여 그 결과를 비교하였다.

2. 자료와 방법

본 연구에서는 CAT 지수의 선정과 가중치 계산, 그리고 KITFA 시스템의 검증을 위해서 자료가 누락되어 그 수가 현저히 적은 2005년을 제외하고 2002년 12월부터 2008년 11월까지 수집된 PIREP 자료가 사용되었다. PIREP 자료는 난류가 관측된 위치 (위도, 경도, 고도), 시간, 강도에 대한 정보를 포함하고 있다. 난류의 강도는 Null (NIL), Light (LGT), Moderate (MOD), Severe (SEV)의 총 4단계로 나뉘어 기록되어 있으며 International Civil Aviation Organization (ICAO)가 제안하는 난류 강도의 계급표에 따라 조종사의 판단으로 결정된다. 본 연구에서 사용하는 PIREP에 대한 시, 공간적 특성은 Kim and Chun (2008)에 발표되었다.

관측된 난류 중에서 청천난류 사례만을 선택하기 위해 PIREP 자료는 몇 단계의 과정을 거치게 된다. 먼저, PIREP 자료에서 관측된 난류는 단일고도에서 발생한 것이 아니라 연직으로 일정한 범위에 걸쳐 발생하므로 관측된 난류 사례의 고도 정보가 정확한 높이가 아닌 범위로 기록 되었을 때, 그 사이의 모든 고도를 같은 강도를 가지는 PIREP으로 분리하게 된다 (STEP

Table 1. The numbers of raw data, increased (denoted by +) and decreased (denoted by -) data in each step, and final data used in this study. Detailed explanations of STEPs 1 - 4 (Split, CIT, FL200, and ±2 hrs) are presented in section 2 of the text.

Year	Number of raw data	STEP 1 (Split)	STEP 2 (CIT)	STEP 3 (<FL200)	STEP 4 (±2 hrs)	Number of final data
2003	1601	+425	-18	-330	-681	997
2004	1452	+328	-29	-212	-766	773
2006	1920	+214	-65	-238	-953	878
2007	2017	+259	-98	-252	-1005	921
2008	1632	+310	-45	-206	-933	758
Total	8622	+1536	-255	-1238	-4338	4327

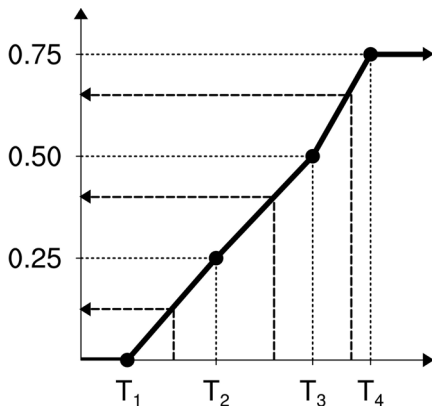


Fig. 1. An index mapping diagram. The raw values of the CAT indices are read along the abscissa with T1 corresponding to the index value for null, T2 for light, T3 for moderate, and T4 for severe turbulence.

1). 예를 들면 LGT의 난류가 어떤 위치와 시간의 22000-25000 ft 고도에서 관측 되었다고 했을 때, 이 하나의 PIREP은 동일한 위, 경도의 22000, 23000, 24000, 25000 ft 고도에서 LGT의 강도를 가지는 네 개의 PIREP으로 늘어나게 된다 (Kay *et al.*, 2006). 이 과정을 통해서 전체 1536개의 PIREP이 증가하였다.

두 번째 과정에서는 낙뢰자료를 이용하여 대류운에서 발생한 난류 (convectively induced turbulence, CIT) 사례를 제거하였다 (STEP 2). 관측된 난류 사례에 대해 ±20분 이내, 반경 50 km 이내에 낙뢰가 존재하였을 경우 CIT로 간주되었으며 이 과정에서 총 255개의 PIREP이 제거 되었다. 본 연구에서는 기상청의 낙뢰 자료를 이용하여 CIT를 제거하였다. 세 번째 과정은 중, 하층 CAT를 제거하기 위하여 20000 ft (약 6.1 km) 이하에서 관측된 1238개의 PIREP이 제거 되었다 (STEP 3).

마지막 단계에서는 PIREP이 수집된 시간과 같은 시간 동안의 30 km 해상도를 가지는 RDAPS 분석장

자료가 사용되었다. 30 km 해상도의 RDAPS 분석장은 동아시아 지역에 대하여 1000 mb-50 mb 사이의 24 개 층에서의 여러 변수에 대한 정보들을 포함한다. RDAPS 분석장이 존재하는 00, 12 UTC를 기준으로 ±2시간 내에 관측된 4327개의 PIREP 자료만이 마지막 단계에서 선택 되었다 (STEP 4). 분석장이 존재하는 시간과 난류가 관측된 시간이 정확히 일치하지 않기 때문에 이 과정은 분석장을 통해 계산된 난류 지수와 관측된 난류의 비교가 종관장의 변화로 인해서 타당성을 잃는 것을 방지한다. 결과적으로 원래 수집된 8622개의 자료의 약 50% 인 총 4327개의 PIREP이 최종적으로 분석에 사용되었으며 NIL, LGT, MOD, SEV의 난류 강도에 해당하는 PIREP 수는 각각 2840, 1250, 235, 2개인 것으로 나타났다. Table 1은 연도별 PIREP의 수와 STEP 1-STEP 4의 과정을 통해 변화하는 PIREP의 수를 나타낸다. 2003년부터 2008년까지 연 평균 1500~2000개의 PIREP이 수집되었으며 2007년이 2017개로 가장 많았다.

본 연구에서 사용된 CAT 지수와 KITFA 시스템의 검증 방법으로는 POD (Mason, 1982)가 사용되었다. 이 방법은 관측된 중강도 이상 (moderate or greater: MOG)의 난류 사례에 대한 예측에 성공할 확률 (probability of detection “yes”: PODY)과 난류가 없었던 (NIL) 사례의 예측에 성공할 확률 (probability of detection “no”: PODN)을 (1)과 같이 계산하여 청천난류 발생에 대한 예측성을 구하게 된다.

$$\begin{aligned}
 PODY &= \frac{Y_{obs} Y_{for}}{Y_{obs} Y_{for} + Y_{obs} N_{for}}, \\
 PODN &= \frac{N_{obs} N_{for}}{N_{obs} Y_{for} + N_{obs} N_{for}}.
 \end{aligned}
 \tag{1}$$

위 식에서 Y는 “yes”를, N은 “no”를 의미하며 obs와 for의 첨자는 각각 관측과 계산된 지수의 예측을 의미한다. 예를 들어 $Y_{\text{obs}}Y_{\text{for}}$ 는 관측에서 MOG의 난류가 발생하였고 CAT 지수도 난류의 발생을 예측한 경우이다. 이 때 난류의 발생 여부를 판단하는 지수의 임계값은 계산된 지수의 최저값과 최대값 사이를 균등한 구간으로 나누는 25개의 값으로 정한다. 25개 각각의 임계값에 대하여 한 쌍의 PODY와 PODN을 구하고 이를 X (PODY)-Y (PODN) 평면에 표시하면 Fig. 2와 같은 곡선이 만들어 지고 이 때 이 곡선의 넓이 (Area under curve, AUC)가 지수의 예측성을 나타내는 척도가 된다. AUC = 1은 난류의 발생을 완벽하게 예측할 수 있음을 의미하며 AUC = 0.5의 경우는 난류 예측에 효과가 없는 것을 나타낸다. POD 방법을 통해 구해진 AUC는 본 연구에서 CAT 지수의 선정, 가중치의 계산, KITFA 시스템의 검증에 사용 되었다.

3. KITFA 시스템을 통한 CAT 예측 생성 과정

3.1 청천난류 지수, 임계값, 가중치의 결정

KITFA 시스템을 통한 난류 예측의 생성 과정은 크게 예보 생성에 필요한 CAT 지수와 각 지수의 임계값, 가중치를 결정하는 과정과 RDAPS 예보장을 이용해 최종 난류 예측 지수를 생성하는 과정으로 나눌 수 있다. 전자의 과정에서는 먼저 POD 방법에 근거하여 24개의 CAT 지수들 중 예측성이 높은 12개의 지수가 선정된다. KITFA 시스템에서 고려한 24개의 CAT 지수들의 이름과 그 수식은 첨부에 포함되어져 있다. 앞으

로 언급할 CAT 지수들의 이름은 첨부에 포함된 24개 중의 하나이다. 선행연구를 통해서 제안된 다양한 CAT 발생 메커니즘을 한 가지의 지수를 통해서 설명하기가 어렵기 때문에 KITFA 시스템에서는 여러 지수들을 포함하여 CAT 예측을 수행하고 있다.

다음 단계로 청천난류의 강도를 NIL, LGT, MOD, SEV로 나누는 CAT 지수의 임계값 T_1, T_2, T_3, T_4 를 결정하게 된다. 수집된 PIREP에 기록된 난류의 위치와 시간에 대응되는 계산된 지수 값들을 모아서 내림차순으로 정렬 후, 하위 47%, 85%, 95%, 98%를 나누는 경계값을 각각 T_1, T_2, T_3, T_4 로 정의한다 (기상연구소, 2002). 위 과정을 통해 얻은 임계값은 계산된 모든 CAT 지수를 (2)에 따라서 0과 0.75 사이로 정규화 시키는 데 이용된다:

$$\left. \begin{aligned} D_n^* &= 0, D_n < T_{1,n} \text{ 일 때} \\ D_n^* &= 0.25 \times (p-2) + 0.25 \times \frac{(D_n - T_{p-1,n})}{(T_{p,n} - T_{p-1,n})}, \\ T_{p-1,n} &< D_n < T_{p,n} \text{ 일 때 } (p=2,3,4). \\ D_n^* &= 0.75, D_n > T_{4,n} \text{ 일 때} \end{aligned} \right\} (2)$$

여기서 첨자 n은 1부터 12까지 12개의 CAT 지수를, p는 1부터 4까지 각각 NIL, LGT, MOD, SEV 네 단계의 난류 강도를 나타낸다. D_n 과 D_n^* 는 n 번째 지수에 대한 정규화 전, 후의 지수 값을, $T_{p,n}$ 는 n 번째 지수에 대하여 p 단계의 난류 강도를 나타내는 임계값을 의미한다. Fig. 1은 식 (2)의 정규화 방법을 나타낸다. 그림과 같이 계산된 지수가 T_1 보다 작을 경우는 정규화 된 지수 값은 0, 계산된 지수의 값이 T_1 과 T_4 사이일 경우

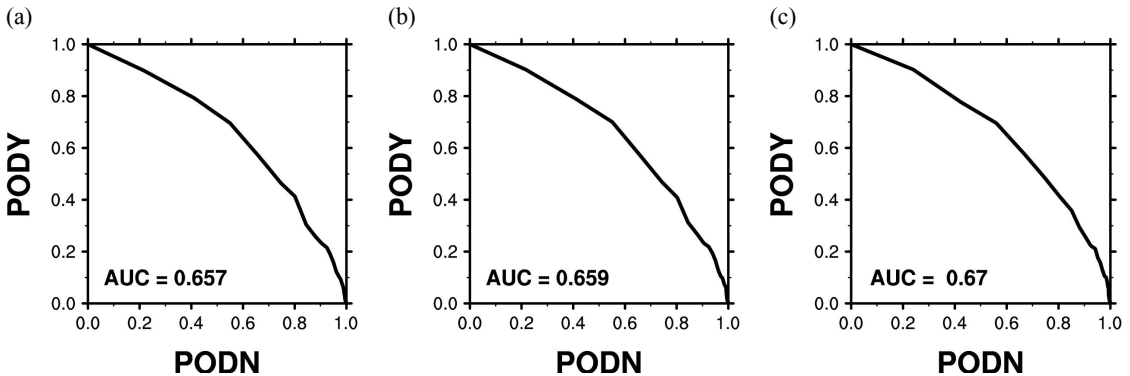


Fig. 2. KITFA PODY-PODN performance statistics derived using the (a) weightings in the current KITFA system, (b) weightings calculated using longer PIREP data and RMS method, and (c) weightings calculated using longer PIREP data and POD method.

Table 2. CAT indices used in the current KITFA system and their original and newly-calculated weightings based on RMS and POD methods. Definition and formulation of each CAT index are presented in the Appendix.

CAT indices	Original weightings (rank)	New weightings by RMS (rank)	New weightings by POD (rank)
VWS	0.0910 (1)	0.0875 (3)	0.107 (2)
Vorticity2	0.0869 (2)	0.0787 (11)	0.0561 (12)
HTG	0.0856 (3)	0.0835 (7)	0.0795 (7)
CP	0.0840 (4)	0.0899 (1)	0.117 (1)
S _H	0.0833 (5)	0.0794 (10)	0.0632 (11)
Endlich	0.0826 (6)	0.0841 (4)	0.0796 (6)
Brown1	0.0825 (7)	0.0841 (5)	0.0834 (5)
NGM1	0.0824 (8)	0.0816 (8)	0.0725 (8)
CCAT	0.0823 (9)	0.0814 (9)	0.0701 (9)
-Ri	0.0805 (10)	0.0836 (6)	0.106 (3)
THI	0.0795 (11)	0.0877 (2)	0.103 (4)
Div	0.0794 (12)	0.0787 (12)	0.0661 (10)

는 선형적으로 0.0-0.75 값으로 대응시키고 지수가 T₄ 보다 클 경우는 0.75의 값을 갖도록 정규화한다. 이러한 정규화 과정은 모두 다른 차수와 단위를 가지는 CAT 지수들이 같은 차수를 갖도록 함으로써 지수들 사이의 비교가 가능하도록 한다.

정규화된 지수는 수집된 PIREP 자료와의 비교를 통해 가중치 계산에 사용된다. 관측된 NIL, LGT, MOD, SEV의 난류 강도에 0, 0.25, 0.5, 0.75를 각각 대입하고 관측된 난류 지점을 둘러싸는 네 개의 격자에서 정규화된 지수와의 RMS를 수집된 모든 PIREP에 대하여 계산하게 된다. 각 지수의 가중치는 계산된 RMS에 반비례하도록 (3)과 같이 계산하며 모든 가중치의 합이 1이 되도록 (4)와 같이 정규화 한다:

$$W_n = 1 / \text{Max}(S_n, 10^{-6}), \tag{3}$$

$$W_n^* = \frac{W_n}{\sum_n W_n}. \tag{4}$$

여기서 S_n은 n 번째 지수의 RMS, W_n은 n 번째 지수의 가중치, W_n^{*}은 가중치의 합이 1이 되도록 정규화된 n 번째 지수의 가중치를 나타낸다.

3.2 최종 난류 예측 지수의 생성

위 과정을 통해 계산된 각 CAT 지수의 임계값과 가중치는 RDAPS 5 km와 30 km 예보장을 통하여 최종 난류 예측 지수의 생성에 사용된다. RDAPS 예보장을 이용하여 등압면에서 CAT 지수의 계산이 이루어지면

이를 고도에 대해 1000 ft 간격으로 내삽하고 식 (2)를 이용하여 정규화 시킨다. 정규화된 CAT 지수 (D_n^{*})와 가중치 (W_n^{*})를 곱하고 모든 지수에 대하여 더하면 최종적인 난류 예측 변수인 KITFA가 연직으로 1000 ft 간격으로 RDAPS 모형의 수평 격자에 대해 아래와 같이 만들어지게 된다.

$$KITFA = \sum_n W_n^* D_n^*. \tag{5}$$

본문에서 언급된 KITFA 시스템과 식 (5)에서 계산된 최종 난류 예측 변수는 공교롭게도 그 이름이 같다. 이로 인한 혼란을 막기 위하여 이후부터는 난류 예측 변수인 ‘KITFA’를 나타내는 경우 이탤릭체로 표시하였다.

4. 현재 운용중인 KITFA 시스템의 검증과 개선

4.1 새롭게 계산된 가중치가 KITFA 예측상에 미치는 영향

Table 2는 2002년 3월 4일-4월 8일 동안 수집된 PIREP 자료를 바탕으로 한 현업 KITFA 시스템에서 청천난류 예보를 위해 사용되고 있는 12개의 난류 지수와 가중치, 그리고 본 연구에서 고려한 2002년 12월-2008년 11월의 5년 동안 수집된 PIREP 자료를 이용하여 RMS와 POD 방법을 통해 새롭게 계산된 가중치를 나타낸다. 먼저 2002년 12월부터 2008년 11월까지의 PIREP을 이용하여 계산된 가중치의 값이 현업 KITFA 시스템에서 사용되고 있는 가중치와 비교했을 때 크게 바뀌는 것으로 나타났다. 새롭게 계산된 가중치에서는

Colson-Panofsky index (CP)가 RMS와 POD의 두 가지 방법 모두에서 가장 큰 값을 보였으며 현재 KITFA 시스템에서 가장 높은 가중치를 가지고 있는 VWS는 새롭게 계산 되었을 때에도 비교적 높은 가중치의 순위를 유지하였다. 하지만 두 번째로 높은 가중치를 보였던 $vort^2$ 의 경우는 RMS 방법에서는 11위, POD 방법에서는 12위로 순위가 크게 떨어지는 것으로 나타났고 11위로 낮은 순위였던 Turbulence index 1 (TI1)의 경우는 RMS와 POD에서 각각 2위와 4위로 순위가 높아졌다. Clark's CAT (CCAT)과 Divergence (Div)는 비교적 낮은 순위가 유지 되는 것으로 나타났다. 이러한 가중치와 그 순위의 변화는 관측된 CAT를 잘 설명할 수 있는 CAT 지수가 사례에 따라 달라지기 때문이며 이러한 변화는 결국 다양한 CAT의 특성을 의미한다고 할 수 있다. RMS와 POD 방법으로 계산된 가중치의 순위를 비교하였을 때, 음의 Richardson number (-Ri)를 제외하고는 모든 지수에 대해 2순위 이내의 변화가 나타나 전반적으로 비슷한 순위를 보였다. 하지만 1위와 12위의 가중치의 차이는 RMS의 경우 0.0112, POD는 0.0609로 POD 방법이 지수의 예측성에 따라서 가중치의 차이가 큰 것으로 확인되었다.

Fig. 2는 Table 2에서 보인 세 종류의 가중치를 이용하여 계산된 KITFA에 대한 검증 결과이다. 먼저 Fig. 2a와 b는 본 연구에서 첫 번째로 KITFA 시스템 개선을 위해 제안하고 있는 긴 기간 동안 수집된 PIREP을 이용해 RMS 방법을 통해 계산된 가중치가 KITFA 예측성에 미치는 영향을 나타낸다. 현업 KITFA 시스템에서 사용되고 있는 가중치를 이용하여 계산된 KITFA의 AUC는 0.657을 나타내었고 RMS 방법을 통해 새로 계산된 가중치로부터 구해진 KITFA의 경우는 0.659로 예측성이 다소 증가하였으나 큰 변화가 확인되지는 않았다. 두 번째로 시스템의 개선을 위해 제안하고 있는 가중치 계산 방법을 POD로 바꾸는 것에 대한 효과는 Fig. 2c에서 나타내었다. 이 경우의 AUC 값은 0.67로 첫 번째로 제안했던 개선의 방법보다 예측성 증가의 효과가 조금 더 큰 것으로 확인되었다. 그러나 Fig. 2에서 보인 결과는 근본적으로 큰 차이가 없는 것으로 나타났다.

4.2. 새롭게 선정된 청천난류 지수가 KITFA 예측성에 미치는 영향

세 번째 제안에서는 긴 기간 동안의 PIREP 자료에 근거하여 KITFA 시스템에서 사용되는 CAT 지수 자

Table 3. Newly-selected 12 CAT indices and their weightings calculated using longer PIREP data (2002.12-2008.11) and RMS and POD methods.

CAT indices	Weightings by RMS (rank)	Weightings by POD (rank)
CP	0.0870 (1)	0.103 (1)
VWS	0.0848 (5)	0.0953 (2)
-Ri	0.0809 (11)	0.0937 (3)
TI1	0.0849 (4)	0.0917 (4)
Dutton	0.0845 (6)	0.0889 (5)
Brown2	0.0851 (2)	0.0841 (6)
TI2	0.0849 (3)	0.0731 (7)
NGM2	0.0826 (7)	0.0763 (8)
Def	0.0815 (8)	0.0752 (9)
Brown1	0.0814 (9)	0.0740 (10)
HTG	0.0809 (12)	0.0705 (11)
Endlich	0.0814 (10)	0.0697 (12)

체를 새롭게 선택하였고 그 예측성을 현업 KITFA와 비교하였다. Table 3은 새롭게 선택된 지수와 각각에 대한 RMS와 POD 방법을 통해 계산된 가중치를 나타낸다. Dutton index (Dutton), Brown number 2 (Brown2), TI2, NGM2, Deformation (Def)이 새롭게 추가 되었으며 $vort^2$, Horizontal shear (S_H), NGM1, CCAT, Div가 상대적으로 낮은 예측성으로 인해서 빠지게 되어 총 5개의 지수가 교체되었다. CP는 24개의 지수 모두를 포함하여 가중치를 구하였을 때에도 RMS와 POD 방법 모두에서 가장 높은 가중치를 나타내었다. 또한 Table 2에서 RMS와 POD 방법으로 계산된 가중치의 순위가 비슷한 경향을 보인 것에 비해서 Table 3에서는 계산 방법에 따라 가중치의 순위가 많이 달라졌다. 계산된 가중치의 최대값과 최소값의 차이는 RMS의 경우 0.0061, POD의 경우 0.033으로 현재 KITFA 시스템에서 사용되는 CAT 지수를 이용하여 계산된 것에 비해 지수들 사이에 가중치의 차이가 줄어드는 것으로 확인되었다.

Fig. 3은 새롭게 선정된 12개의 CAT 지수를 기반으로 하여 RMS (Fig. 3a)와 POD (Fig. 3b) 방법을 통해 얻어진 가중치를 이용하여 계산된 KITFA에 대한 검증 결과이다. Table 3에서 보인 것과 같이 RMS와 POD 방법을 통해 계산된 가중치의 값과 순위가 다름에도 불구하고 AUC 값은 0.691로 같은 것으로 확인되었다. 이는 현업 KITFA의 AUC 값인 0.657 보다는 현저히 높았다. Fig. 2와 3의 비교를 통해서 본 연구에서 제안한 첫 번째와 두 번째 KITFA 시스템 개선의 방법보다

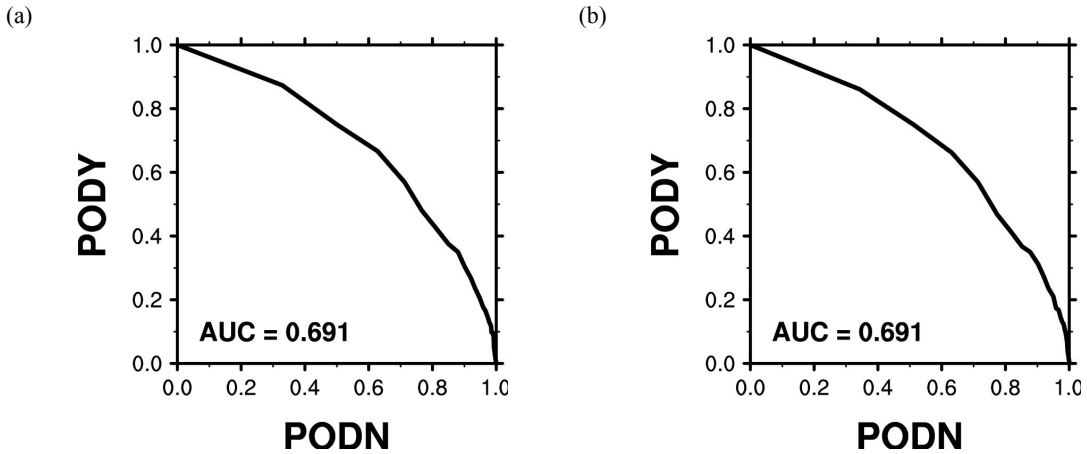


Fig. 3. *KITFA* PODY-PODN performance statistics based on newly-selected 12 CAT indices and their weightings calculated using (a) RMS and (b) POD methods.

청천난류의 지수를 선정하는데 있어서 긴 PIREP 자료를 사용한 세 번째 개선 방안이 *KITFA*의 예측성을 더 크게 향상시킨 것으로 나타났다. 특히 RMS 방법을 통해 구해진 AUC 값은 4.9% 증가하여 POD 방법보다 예측성 증대의 효과가 좀 더 크게 나타났다. 세 가지 개선 방법에 대한 효과를 종합하여 볼 때, 긴 기간 동안 수집된 PIREP에 근거하여 새롭게 지수를 선택하는 것이 청천난류 예보에 대한 예측성 향상에 가장 효과가 큰 것으로 확인되었다.

5. *KITFA* 예측성의 연도, 계절별 변화

Table 4는 2003년부터 2008년 까지 PIREP 자료가 누락된 2005년을 제외하고 각 해에서 POD 방법을 통해 예측성이 좋은 것으로 선정된 12개의 CAT 지수와 RMS 방법을 통해 계산된 가중치를 나타낸다. 연도에 따라서 예측성이 높은 지수가 일정하지 않고 바뀌는 경향을 보였으나 음영 표시가 된 다섯 지수 (CP, TII, VWS, Dutton, -Ri) 는 5년 모두에 포함되어 지속적으로 청천난류의 예측을 잘 했던 것으로 나타났다. 특히 이 지수들은 Table 3에서 보인 것과 같이 전체 PIREP 자료를 통해서 선정된 지수 중에 가장 예측성이 좋은 다섯 지수인 것으로 확인되었다. North Carolina State University index (NCSU1), CCAT, turbulent kinetic energy (TKE), NGMI, potential vorticity⁻¹ (1/PV), -Brunt-Väisälä frequency (-N²), Richardson number tendency (Ri_{tend}) 의 7개의 지수가 5년에 걸쳐 총 14번 선택된 것을 제외

하고는 Table 2의 지수들이 지속적으로 선택되었다. 각 지수의 가중치의 값과 순위의 경우도 연도에 따라서 일정하지 않고 변화하는 경향을 보였다.

Fig. 4는 각 해의 PIREP 자료에 근거하여 선정된 CAT 지수에 의한 AUC와 이를 이용하여 계산한 *KITFA*에 대한 검증 결과이다. 제일 낮은 *KITFA* 값을 보인 2004년을 제외하고는 각각의 지수가 나타내는 예측성에 비해서 식 (5)에 의해 계산된 *KITFA*의 예측성이 비교적 높은 것으로 확인 되었다. 특히 2007년에 계산된 *KITFA*는 2003년-2008년 중에서 그 해에 발생한 CAT 사례를 가장 잘 예측한 것으로 나타났다. *KITFA* 는 여러 지수들의 예측성에 따라 가중치를 다르게 부여하고 이를 결합하였기 때문에 *KITFA*의 예측성은 지수들의 예측성에 대해 평균적으로 나타나지 않고 다른 지수들에 비해 좋은 경향을 보이는 것으로 나타났다.

예보의 관점에서는 과거 PIREP 자료만 사용할 수 있으므로 당해 연도 1년의 PIREP 자료를 이용한 당해 연도의 *KITFA* 검증은 큰 의미를 가질 수 없다. 이와 같은 문제점을 해결하기 위하여 해당 연도의 전 해에 선정된 지수들과 가중치를 이용하여 *KITFA*를 계산하고 해당 연도의 PIREP을 통해 검증을 하였다. Fig. 5의 네 그림은 각각 2003, 2004, 2006, 2007년의 PIREP 자료를 이용해 선정된 지수와 가중치를 이용하여 그 다음 해인 2004, 2006, 2007, 2008년의 *KITFA*를 계산하여 검증한 결과를 보여준다. 4가지 경우 중, 2006년에 수집된 PIREP에 근거해 만들어진 *KITFA*가 2007년에 발생한 청천난류에 대한 예측을 가장 잘했던 것

Table 4. CAT indices selected using PIREP data in each year and their weightings calculated using the yearly data and RMS method. Indices selected in all years are shaded.

2003		2004		2006		2007		2008	
Indices	Weighting	Indices	Weighting	Indices	Weighting	Indices	Weighting	Indices	Weighting
Endlich	0.0872	CCAT	0.0859	CP	0.0875	CP	0.0905	Brown1	0.0859
CP	0.0866	TI2	0.0856	VWS	0.0861	Dutton	0.0881	Def	0.0856
TI2	0.0855	CP	0.0846	Brown2	0.0855	NCSU1	0.0876	TI1	0.0852
Brown2	0.0854	TI1	0.0845	Dutton	0.0850	Brown2	0.0874	TI2	0.0852
NCSU1	0.0850	NGM2	0.0838	1/PV	0.0836	VWS	0.0872	NGM2	0.0841
TI1	0.0848	Brown2	0.0837	-Ri	0.0835	TI1	0.0854	CP	0.0837
VWS	0.0842	VWS	0.0831	NCSU1	0.0834	TI2	0.0853	HTG	0.0832
Dutton	0.0831	-Ri	0.0825	TI1	0.0832	-Ri	0.0833	VWS	0.0825
HTG	0.0830	Dutton	0.0823	Endlich	0.0831	Endlich	0.0781	Dutton	0.0821
-Ri	0.0806	NGM1	0.0813	-N2	0.0831	S _H	0.0775	NGM1	0.0812
CCAT	0.0803	Brown1	0.0813	NGM2	0.0830	Def	0.0774	-Ri	0.0810
TKE	0.0742	Def	0.0813	TKE	0.0730	TKE	0.0721	Ri _{tend}	0.0804

Table 5. Same as in Table 4 except for using seasonal PIREP data for 5 years.

DJF		MAM		JJA		SON	
Indices	Weighting	Indices	Weighting	Indices	Weighting	Indices	Weighting
CP	0.0876	CP	0.0882	-Ri	0.0949	-Ri	0.0904
Brown2	0.0873	Dutton	0.0872	TI2	0.0851	Endlich	0.0855
TI1	0.0863	Brown2	0.0869	VWS	0.0847	Brown2	0.0851
Dutton	0.0849	VWS	0.0867	Dutton	0.0846	CP	0.0844
VWS	0.0847	NCSU1	0.0855	CP	0.0842	TI1	0.0836
TI2	0.0845	TI1	0.0853	Brown2	0.0838	Dutton	0.0834
Def	0.0839	HTG	0.0824	TI1	0.0829	VWS	0.0834
Brown1	0.0838	TKE	0.0817	HTG	0.0808	TI2	0.0834
NGM2	0.0824	-Ri	0.0805	Endlich	0.0804	NCSU1	0.0821
NGM1	0.0820	NGM1	0.0796	NGM2	0.0801	Brown1	0.0809
HTG	0.0806	CCAT	0.0795	Def	0.0792	Def	0.0803
-Ri	0.0715	Div	0.0765	Brown1	0.0792	Div	0.0769

으로 나타났다. 반면에 2006년은 *KITFA*의 예측성이 가장 안 좋았던 것으로 확인 되었다. 2006년의 경우는 누락된 2005년의 PIREP 자료로 인하여 2년 전인 2004년에 수집된 PIREP에 근거하여 *KITFA*가 만들어 지고 2006년의 PIREP을 통하여 검증되었다. 그러나 다른 해와 비교하여 그 예측성이 떨어진 것이 2년전의 결과를 이용했기 때문인지는 확실치 않다. 이를 검증하기 위해서는 다른 해의 경우에도 비슷하게 2년 전의 PIREP 자료를 사용한 실험을 수행하여 Fig. 5와 비교 하여야 하나 더 이상의 실험을 수행하지는 않았다.

장기간의 PIREP을 사용하는 것이 예보의 관점에서 *KITFA*의 예측성을 향상시키는지 확인하기 위하여 추

가적으로 2006, 2007, 2008년에 대하여 이전 모든 해의 PIREP을 포함하여 CAT 지수를 선정하고 이를 통해 계산된 *KITFA*의 검증을 실시하였다. 추가적으로 계산된 *KITFA*의 AUC는 2006, 2007, 2008년이 각각 0.603, 0.723, 0.724로 Fig. 5에서 보인 바로 전체에만 수집된 PIREP을 이용한 결과와 비교해보면 2006년은 비슷하게, 2007년에는 작게, 2008년에는 크게 나타났다. 결국 다음 해의 CAT 예측을 위해서 당해 연도의 PIREP만을 사용하는 것과 당해 연도를 포함하는 모든 이전의 PIREP을 사용하는 것 둘 중에 어떤 방법이 예측성이 높은지 판단하기는 어려운 것으로 생각된다. 장기간 자료를 사용하는데 있어서는 모든 이전의

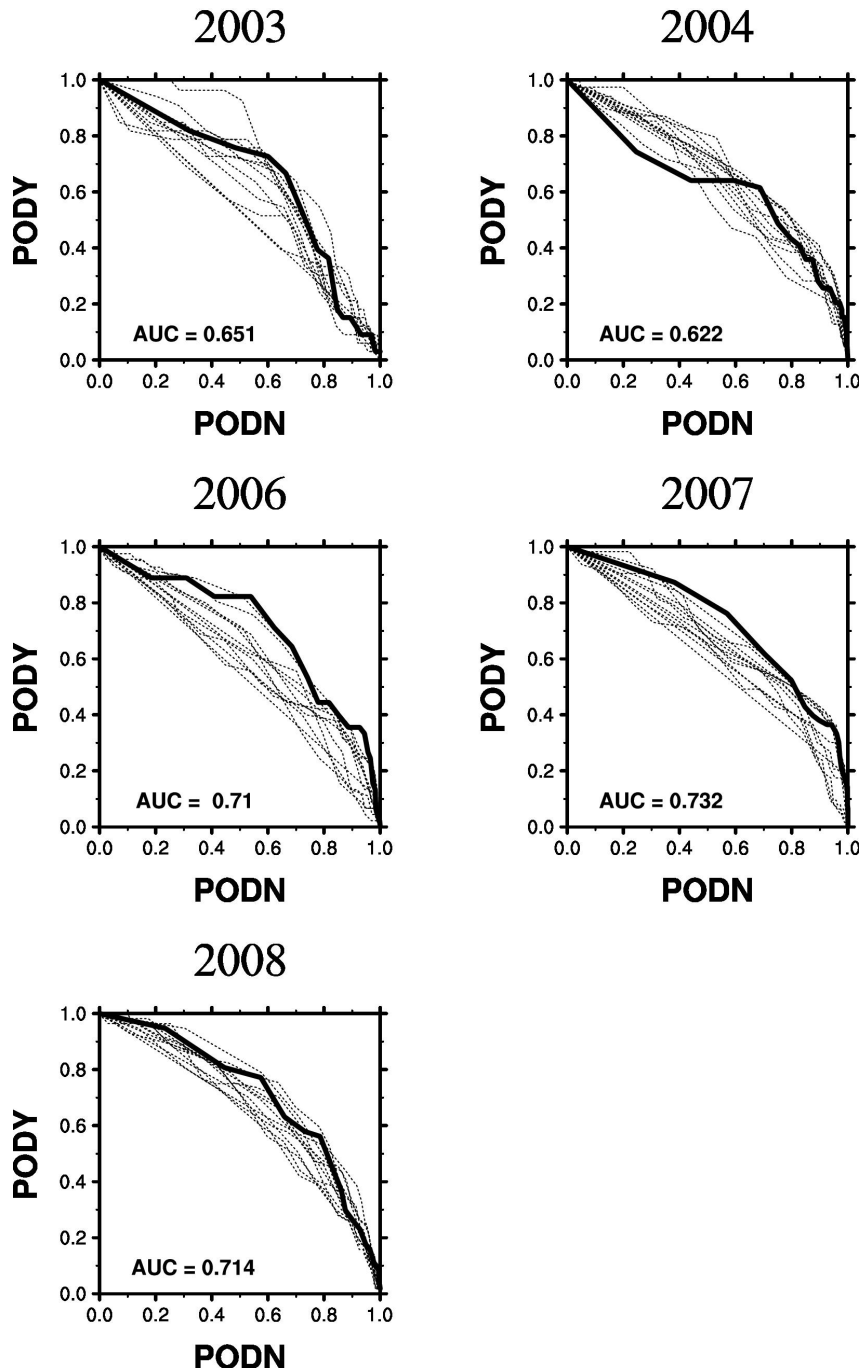


Fig. 4. PODY-ODN performance of *KITFA* (solid lines) and that by individual CAT index (dashed lines) selected in each year from 2003 to 2008 excluding 2005.

PIREP을 사용하는 것 외에 최근 3년 혹은 2년 동안의 PIREP을 사용하는 방법 등 여러 가지 방안이 있을 수 있지만 결국 이러한 장기간 자료가 항상 *KITFA*의 예

측성을 크게 향상 시키지는 못할 것으로 판단된다.

Table 5는 계절별로 분류된 PIREP을 이용하여 선정된 지수와 RMS 방법을 통해 계산된 가중치를 보여

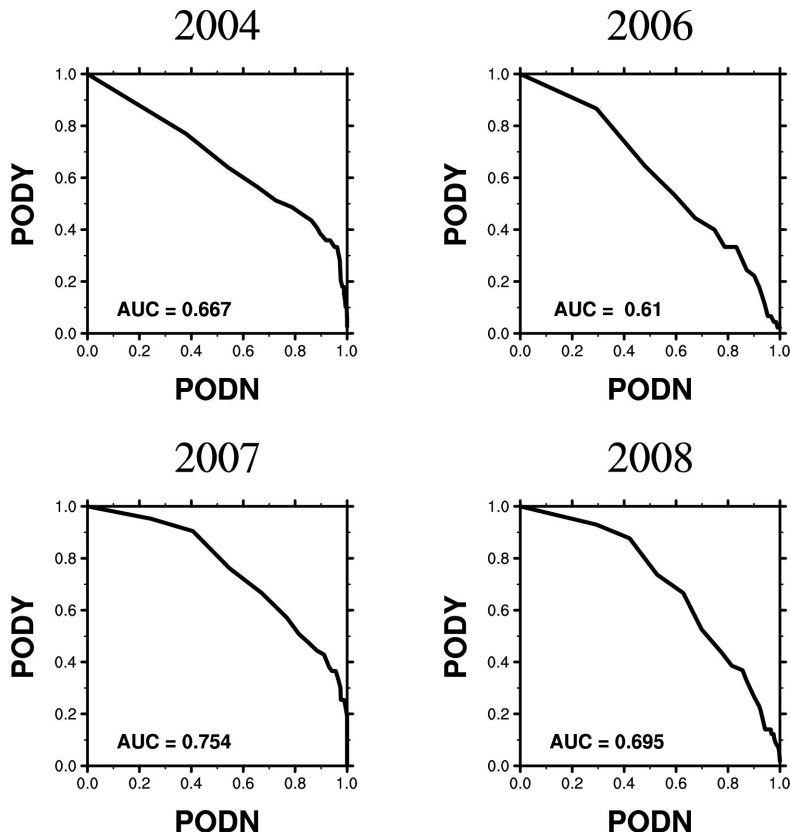


Fig. 5. KITFA PODY-PODN performance statistics derived using the CAT indices selected in the previous year.

준다. 음영으로 표시된 지수는 예측성이 좋은 12개의 지수 중에 네 계절 모두에서 선정된 지수로 총 6개 (CP, Brown2, T11, Dutton, VWS, -Ri)가 확인 되었다. 이 6개의 지수는 Table 4에서 음영으로 보인 지수와 유사하게 전체 PIREP을 이용해 선정된 12개의 지수 중에서 가장 예측성이 좋았던 6개의 지수인 것으로 확인되어 이 지수들은 계절에 크게 영향을 받지 않고 좋은 예측성을 유지하는 것으로 나타났다. Table 3에 포함되지 않은 지수로는 Brown1, NGM1, NCSU1, TKE, CCAT, Div가 있었으며 네 계절 동안에 총 9번이 선택되었고 나머지 39번은 Table 3에 보인 지수들이 선택되었다. Fig. 6은 계절별로 분류된 PIREP에 근거하여 계산된 CAT 지수와 KITFA의 예측성을 보여준다. 겨울철 PIREP을 이용해 계산된 KITFA가 예측성이 가장 좋았으며 이 때 각각의 CAT 지수들도 다른 계절에 비해 예측성이 좋은 것으로 나타났다. 이는 CAT 발생의 주요 원인 중 하나인 제트가 겨울철에 강화되면서 제트와 관련된 CAT 지수들 각각이 겨울철에 제트와 관

련되어 발생하는 CAT를 다른 계절에 비해서 잘 예측하기 때문이다. 결국, 다른 계절에 비해 높은 예측성을 보이는 지수들의 결합을 통해 만들어지는 KITFA는 높은 예측성을 보이게 된다. 봄철의 경우가 AUC 값이 가장 작아 예측성이 가장 낮았으며 지수 각각의 예측성도 가장 좋지 않은 것으로 확인되었다. 겨울과 여름철의 AUC 값은 Fig. 3에서 보인 5년 자료 전체를 사용해서 구한 AUC 값인 0.691 보다 높았으며, 가을은 거의 비슷하고 봄은 다소 낮은 값을 보였다. 그러나 Fig. 3의 결과를 각 계절별로 나누어 계산한 AUC는 봄, 여름, 가을, 겨울에 각각 0.644, 0.717, 0.65, 0.758로 겨울과 여름은 오히려 Fig. 6의 결과보다 높고 봄은 거의 같았으며 가을의 경우에만 더 작은 것으로 나타났다. 즉, 5년 전체의 자료를 사용하여 구한 CAT 지수와 그 가중치를 전 계절에 적용하는 것이 각 계절별로 따로 CAT 지수와 그 가중치를 계산하여 그 계절의 KITFA 예측에 적용하는 것과 큰 차이를 보이지 않았다.

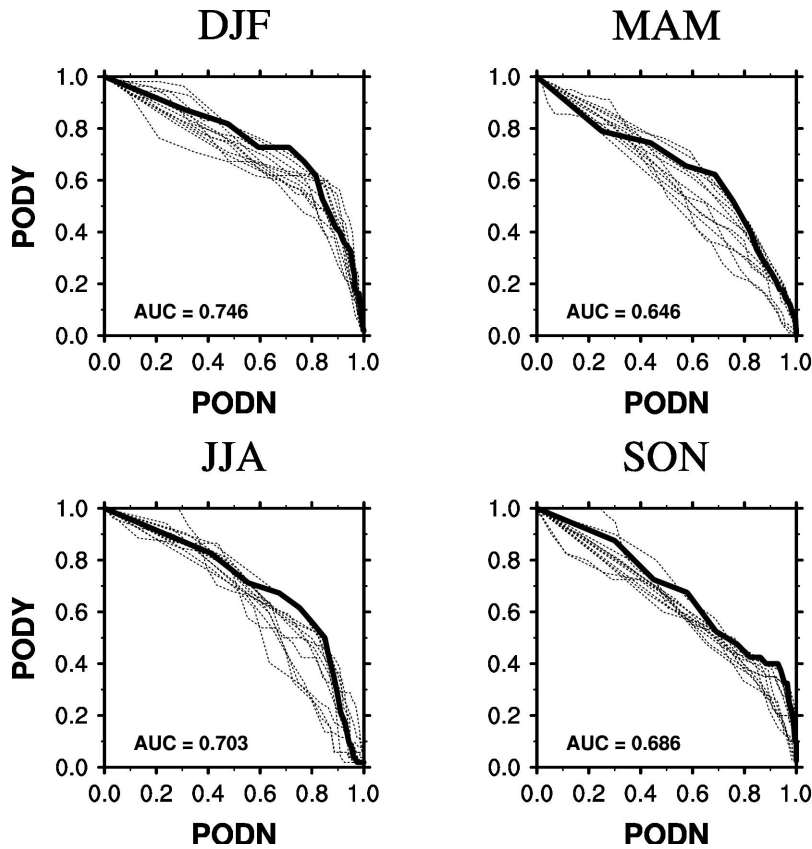


Fig. 6. The same as Fig. 4 except for the seasonally evaluated statistics derived using seasonally selected CAT indices.

6. 요약 및 결론

본 연구에서는 자료가 누락된 2005년을 제외하고 2002년 12월부터 2008년 11월까지 수집된 PIREP 자료를 이용하여 현재 운용되고 있는 KITFA 시스템을 검증하고 그 개선점을 제시하였다. 기존의 KITFA가 2002년 봄철만의 PIREP을 사용하였기 때문에 2002년 이후의 CAT을 예측하기에 부족한 것으로 판단하여 최근 5년 동안 수집된 PIREP 자료의 사용을 통해 KITFA 시스템의 예측성을 향상시키고자 하였다.

난류 예보의 최종 산물이 되는 *KITFA*의 생성과정은 예보를 만들기 위해 필요한 CAT 지수와 각 지수의 임계값, 가중치를 정하는 과정과 이를 이용하여 RDAPS 예보장을 통해 *KITFA*를 생성하는 과정으로 크게 나눌 수 있다. 본 연구에서는 현업 KITFA 시스템에서 사용한 PIREP (2002년 3월 4일-4월 8일) 보다 현저히 긴 기간 (2002년 12월-2008년 11월) 동안 수집된 PIREP 자료를 이용한 다음의 세 가지 개선 가능한 점을 제시

하였다.

1) 현재 KITFA 시스템에서 사용하는 CAT 지수에 대해서 가중치를 새롭게 계산

2) 가중치 계산하는 방법을 기존의 RMS와 더불어 POD 방법을 비교

3) KITFA 시스템에서 사용되는 12개의 CAT 지수를 새롭게 선정하고 그 가중치도 새롭게 계산함.

긴 기간 동안의 PIREP을 이용하여 RMS 방법을 통해 가중치를 새롭게 계산하였을 때, 기존에 각 지수가 가지고 있던 가중치의 값과 그 순위가 달라지는 것을 확인하였다. 그러나, 달라진 가중치를 적용하여 *KITFA*를 계산한 결과는 현재 사용되는 KITFA 시스템의 결과와 큰 차이가 없어, CAT 지수를 고정시키고 가중치만을 바꾼 경우 예측성에 큰 영향을 미치지 못하는 것으로 나타났다. 가중치 계산의 방법을 RMS에서 POD로 바꾸었을 때에는 가중치의 값과 순위가 변화하였으며 *KITFA*의 예측성은 다소 증가하는 경향을 보였으나, 그 변화는 거의 미미한 수준이었다. 세 번째 개

선점으로, 긴 기간 동안 수집된 PIREP에 근거하여 12개의 CAT 지수를 선정하고 그 가중치도 긴 기간의 PIREP 자료를 이용하여 계산하였다. 새로 선정된 CAT 지수는 현업 KITFA 시스템에서 사용중인 지수 중에서 5개가 교체 되었다. 계산된 *KITFA*의 검증 결과, 위의 세 가지 개선 방법 중에서 세 번째 방법이 *KITFA*의 예측성을 가장 크게 증가시키는 것으로 나타났다. 이러한 결과를 통해 현재 KITFA 시스템의 CAT 예보에 대한 예측성을 향상시키기 위해서는 업데이트 된 PIREP 자료를 이용하여 지수 선정을 새롭게 하는 것이 필요하다는 것을 확인하였다.

긴 기간 동안 수집된 PIREP을 연도, 계절별로 분류하고 분류된 PIREP에 근거하여 *KITFA*를 계산하여 그 예측성의 변화에 대해서 조사하였다. 연도에 따라서 선정된 지수와 가중치가 달라지는 것을 확인하였으며 CP, TI1, VWS, Dutton, -Ri의 경우에는 높은 예측성으로 인해 모든 연도에 걸쳐서 12개 지수에 포함되었다. 2007년에 수집된 PIREP에 근거하여 계산된 *KITFA*가 5년 중에 가장 예측성이 좋았던 것으로 나타났다. 예보의 관점에서 *KITFA*의 예측성을 조사하기 위해 이전 해에 결정된 12개의 지수와 가중치를 이용해 당해의 *KITFA*를 계산하고 검증하였다. 그 결과, 2006년에 선정된 12개의 지수를 이용해 계산된 2007년의 *KITFA*가 관측된 난류를 가장 잘 예측하는 것으로 나타났다. 그러나, 2007년을 제외하고 다른 해에는 그 예측성이 5년 전체 자료를 사용한 결과에 비해서 큰 차이를 보이지는 않았다. 이전의 한 해 동안에 수집된 PIREP과 이전의 모든 해에 수집된 PIREP을 이용하여 계산된 *KITFA*를 당해 연도의 PIREP을 통하여 검증하고 비교한 결과 두 가지 방법 중에서 예측성이 높은 방법은 해에 따라서 다르게 나타났다. 결국, 두 가지 방법 중 어떠한 방법이 *KITFA*의 예측성을 향상시키는지 판단하기는 어려운 것으로 확인 되었다.

계절별 분석에서는 위의 5개 지수와 더불어 Brown2가 네 계절 모두에서 *KITFA* 계산에 이용 되었다. 겨울철에 수집된 PIREP에 근거하여 계산된 *KITFA*가 다른 계절에 비해 예측성이 가장 좋았으며 봄철이 가장 낮은 것으로 나타났다. 그러나 계절적으로 다르게 선택된 CAT 지수에 근거한 *KITFA*의 예측값이나 그 계절별 차이가 5년 자료를 모두 사용하여 계산된 *KITFA*의 계절별 예측값과 크게 다르지 않았다.

이 결과는 두 가지를 시사하고 있는데, 첫째 5년의 PIREP 자료에 근거하여 선택된 CAT 지수와 그 가중

치를 계절에 상관없이 사용하여도 될 것으로 생각된다. 둘째, 계절별로 KITFA 시스템을 이용한 CAT 예측성에 차이가 많다는 것은 현재 사용되는 24개의 CAT 지수가 특정 계절의 난류를 잘 나타내는 것으로 판단된다. 이와 같은 CAT 지수의 계절적 선호도를 완화시키기 위해서는 보다 많은 CAT 지수를 고려하는 것이 필요할 것으로 생각된다. 현재 운용되고 있는 KITFA 시스템은 CAT 지수 24개만을 이용하여 예보를 하고 있으나 예측성 향상을 위해서는 최근에 개발되고 있는 여러 지수들을 포함할 필요가 있다. 또한 현재 미국의 청천난류 예보 시스템인 GTG에서 사용되고 있는 예보 방법을 도입하여 이를 검증하고 적용해 보는 것도 필요할 것으로 생각된다. GTG 시스템의 소개와 KITFA 시스템과의 예측성 비교와 관련된 자세한 내용은 Part II의 논문에 언급될 것이다.

본 결과로부터 2002년 12월-2008년 11월의 PIREP 자료를 이용하여 결정한 CAT 지수와 그 가중치를 현재 항공기상대에서 운영중인 KITFA 시스템에 적용할 경우 CAT 예측성 향상을 가져올 것으로 판단된다. 다만, 본 연구에서는 RDAPS 예보장이 아닌 분석장을 사용함으로써 현업 KITFA 시스템과는 다소 차이가 있을 수 있겠다. 향후, RDAPS 예보장을 이용한 KITFA 시스템의 검증을 수행할 예정이다.

첨부 KITFA 시스템의 청천난류 지수들의 수식

$$1. \quad N^2 = \frac{g}{\theta} \frac{\partial \theta}{\partial z}. \quad (a1)$$

$$2. \quad VWS = \left(\left| \frac{\partial u}{\partial z} \right|^2 + \left| \frac{\partial v}{\partial z} \right|^2 \right)^{1/2}. \quad (a2)$$

$$3. \quad Ri = \frac{N^2}{VWS^2} \cdot NVC \quad (a3)$$

$$4. \quad CP = \lambda^2 VWS^2 \left(1 - \frac{Ri}{Ri_{cri}} \right). \quad (a4)$$

$$5. \quad TKE = C \frac{\Phi^{3/2}}{d\Phi/dz}, \quad \Phi = VWS^2 - \alpha N^2, \quad (a5)$$

$$\alpha = 1/Pr = K_H / K_M.$$

$$6. \quad Div = \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y}. \quad (a6)$$

$$7. \quad vort^2 = \left(\frac{\partial v}{\partial x} - \frac{\partial u}{\partial y} \right)^2. \quad (a7)$$

$$Ri_{tend} = \frac{2}{VWS^2} F_\theta - Div,$$

$$8. F_\theta = \left| \frac{\partial \vec{v}}{\partial \theta} \right|^{-1} \left[\frac{\partial u}{\partial \theta} \frac{d}{dt} \left(\frac{\partial u}{\partial \theta} \right) + \frac{\partial v}{\partial \theta} \frac{d}{dt} \left(\frac{\partial v}{\partial \theta} \right) \right]. \quad (a8)$$

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

$$9. \zeta_a = vort + f, D_{sh} = (\partial v / \partial x) + (\partial u / \partial y), \quad (a9)$$

$$D_{st} = (\partial u / \partial x) - (\partial v / \partial y).$$

$$10. Brown2 = \frac{Brown1}{24} VWS^2. \quad (a10)$$

$$11. Def = (D_{sh}^2 + D_{st}^2)^{1/2}. \quad (a11)$$

$$12. TI1 = VWS \times Def. \quad (a12)$$

$$13. TI2 = VWS \times (Def - Div). \quad (a13)$$

$$14. PV = -\zeta_a g \frac{\partial \theta}{\partial p}. \quad (a14)$$

$$15. CCA1 = \frac{g}{T} \times \frac{\zeta_a}{f} \times \left(\vec{v} \cdot \nabla \left| \frac{dT}{dz} \right| \right). \quad (a15)$$

$$16. stone = f \left[f \left(1 - \frac{1}{Ri} \right) + vort \right]. \quad (a16)$$

$$17. HTG = \left(\left| \frac{\partial T}{\partial x} \right|^2 + \left| \frac{\partial T}{\partial y} \right|^2 \right)^{1/2}. \quad (a17)$$

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

$$19. S_H = \left(\frac{u}{|\vec{v}|} \right) \frac{\partial |\vec{v}|}{\partial y} - \left(\frac{v}{|\vec{v}|} \right) \frac{\partial |\vec{v}|}{\partial x}. \quad (a19)$$

$$20. Dutton = 1.25 S_H + 0.25 VWS^2 + 10.5. \quad (a20)$$

$$21. NGM1 = \left| \vec{v} \right| \times Def. \quad (a21)$$

$$22. NGM2 = \left| \frac{dT}{dz} \right| \times Def. \quad (a22)$$

$$23. NCSU1 = \frac{1}{Max(Ri, 10^{-5})} Max \left(u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial x}, 0 \right) \times |\nabla vort|. \quad (a23)$$

$$24. NVA = Max \left\{ \left[-u \frac{\partial \zeta_a}{\partial x} - v \frac{\partial \zeta_a}{\partial y} \right], 0 \right\}. \quad (a24)$$

감사의 글

이 논문은 정부의 재원 (교육인적자원부 학술연구 조성사업비)으로 한국학술진흥재단 (KRF-2007-313-

C00778)의 지원으로 수행되었습니다. 본 연구를 위해 RDAPS 분석장 30 km 자료를 제공해주신 기상청 수치모델관리관과 PIREP 자료를 제공해 주신 항공기상청 정보지원과에 감사드립니다.

참고문헌

기상연구소, 2002: 항공기상 예측 기술 개발 연구 (III), 연차보고서 MR020A02, 185 pp.

Clark, T. L., W. D. Hall, R. M. Kerr, D. Middleton, L. Radke, F. M. Ralph, P. J. Neiman, and D. Levinson, 2000: Origins of aircraft-damaging clear-air turbulence during the 9 December 1992 Colorado downslope windstorm: Numerical simulations and comparison with observations. *J. Atmos. Sci.*, **59**, 186-201.

Dutton, J., and H. A. Panofsky, 1970: Clear air turbulence: A mystery may be unfolding. *Science*, **167**, 937-944.

Ellrod, G., P. F. Lester, and L. J. Ehernberger, 2003: Clear air turbulence. In *Encyclopedia of Atmospheric Sciences*, vol. 1, edited J. R. Holton et al., Academic Press, 393-403.

Kay, M. P., J. K. Henderson, S. A. Krieger, J. L. Mahoney, L. D. Holland, and B. G. Brown, 2006: *Quality Assessment Report of GTG version 2.3*. Report to the Federal Aviation Administration Aviation Weather Technology Transfer (AWTT) Technical Review Panel.

Kim, J.-H., and H.-Y. Chun, 2008: Analysis on the spatial and temporal distribution of the aircraft turbulences occurred in South Korea for the recent 10 years. Preprints, *13th Conf. on Aviation, Range, and Aerospace Meteorology*, New Orleans, LA, Amer. Meteor. Soc., CD-ROM, P3.3.

Knox, J. A., D. W. McCann, and P. D. Williams, 2008: Application of the Lighthill-Ford theory of spontaneous imbalance to clear-air turbulence forecasting. *J. Atmos. Sci.*, **65**, 3292-3304.

Koch, S. E., and F. Caracena, 2002: Predicting clear-air turbulence from diagnosis of unbalance flow. Preprints, *10th Conf. on Aviation, Range, and Aerospace Meteorology*, Portland, OR, Amer. Meteor. Soc., 359-363.

_____, B. Jamison, C. Lu, T. Smith, E. Tollerud, N. Wang, T. Lane, M. Shapiro, D. Parrish, and O. Cooper, 2005: Turbulence and gravity waves within an upper-level front. *J. Atmos. Sci.*, **62**, 3885-3908.

Koshyk, J. N., and K. Hamilton, 2001: The horizontal energy spectrum and spectral budget simulated by a high-resolution troposphere-stratosphere-mesosphere GCM. *J. Atmos. Sci.*, **59**, 329-348.

Lane, T. P., R. D. Sharman, T. L. Clark, and H.-M. Hsu, 2003: An investigation of turbulence generation mechanisms above deep convection. *J. Atmos. Sci.*, **60**, 1297-1321.

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.
- Mason I., 1982: A model for assessment of weather forecasts. *Aust. Met. Mag.*, **30**, 291-303.
- Nappo, C. J., 2002: *An Introduction to Atmospheric Gravity Waves*. Academic press, 276 pp.
- Pantley, K. C., and P. F. Lester, 1990: Observations of severe turbulence near thunderstorm tops. *J. Appl. Meteor.*, **29**, 1171-1179.
- Sekioka, M., 1970: Application of Kelvin-Helmholtz instability to clear air turbulence. *J. Appl. Meteor.*, **9**, 896-899.
- Tebaldi, C., D. Nychka, B. G. Brown, and R. Sharman, 2002: Flexible discriminant techniques for forecasting clear-air turbulence. *Environmetrics*, **13**, 859-878.
- Tung, K. K., and W. W. Orlando, 2003: The k-3 and k-5/3 energy spectrum of atmospheric turbulence: Quasigeostrophic two-level model simulation. *J. Atmos. Sci.*, **60**, 824-835.