

기상청 전지구 수치예보모델을 이용한 전지구 한국형 항공난류 예측시스템(G-KTG) 개발

이단비 · 전해영*

연세대학교 대기과학과

(접수일: 2018년 4월 23일, 수정일: 2018년 5월 18일, 게재확정일: 2018년 5월 23일)

Development of the Global-Korean Aviation Turbulence Guidance (Global-KTG) System Using the Global Data Assimilation and Prediction System (GDAPS) of the Korea Meteorological Administration (KMA)

Dan-Bi Lee and Hye-Yeong Chun*

Department of Atmospheric Sciences, Yonsei University, Seoul, Korea

(Manuscript received 23 April 2018; revised 18 May 2018; accepted 23 May 2018)

Abstract The Global-Korean aviation Turbulence Guidance (G-KTG) system is developed using the operational Global Data Assimilation and Prediction System of Korea Meteorological Administration with 17-km horizontal grid spacing. The G-KTG system provides an integrated solution of various clear-air turbulence (CAT) diagnostics and mountain-wave induced turbulence (MWT) diagnostics for low [below 10 kft (3.05 km)], middle [10 kft (3.05 km) - 20 kft (6.10 km)], and upper [20 kft (6.10 km) - 50 kft (15.24 km)] levels. Individual CAT and MWT diagnostics in the G-KTG are converted to a 1/3 power of energy dissipation rate (EDR). 12-h forecast of the G-KTG is evaluated using 6-month period (2016.06~2016.11) of in-situ EDR observation data. The forecast skill is calculated by area under curve (AUC) where the curve is drawn by pairs of probabilities of detection of “yes” for moderate-or-greater-level turbulence events and “no” for null-level turbulence events. The AUCs of G-KTG for the upper, middle, and lower levels are 0.79, 0.69, and 0.63, respectively. Comparison of the upper-level G-KTG with the regional-KTG in East Asia reveals that the forecast skill of the G-KTG (AUC = 0.77) is similar to that of the regional-KTG (AUC = 0.79) using the Regional Data Assimilation and Prediction System with 12-km horizontal grid spacing.

Key words: Global-korean aviation turbulence guidance system, global data assimilation and prediction system, in-situ flight Eddy Dissipation Rate (EDR) data

1. 서 론

운항중의 항공기에 직접적으로 영향을 줄 수 있는 10~1,000 m 규모의 항공 난류는 예기치 못하게 조우했을 경우, 연료 손실, 기체 파손, 승무원 및 승객의

부상 등 많은 피해를 가져올 수 있다(Sharman and Lane, 2016; Sharman and Pearson, 2017). 항공 난류를 일으키는 기상학적 요인들은 수십 년간 지속적으로 연구되어 왔으며, 지금까지 밝혀진 난류 발생 요인들은 다음과 같다. 첫째, 제트류-상층전선 시스템에서 야기될 수 있는 강한 연직바람시어가 시어 불안정을 일으켜 난류를 발생시킨다(Ellrod and Knapp, 1992; Koch et al., 2005; Kim and Chun, 2010). 둘째, 상층 제트류 근처 고기압성 회전이 존재하는 영역에서의

*Corresponding Author: Hye-Yeong Chun, Department of Atmospheric Sciences, Yonsei University, Seoul 03722, Korea.
Phone: +82-2-2123-2692, Fax: +82-2-365-5163
E-mail: chunhy@yonsei.ac.kr

비지균성 흐름이 관성불안정을 일으켜 난류를 발생시킨다(Knox, 1997; Kim and Chun, 2010; Min et al., 2011). 셋째, 상층 제트류 주변에서 지균 조절 과정 중에 중력파를 발생, 전파시켜서 주변 환경을 섭동시키거나 중력과 깨짐을 통해 난류 발생을 야기시킨다(Knox, 1997; Sharman et al., 2012). 넷째, 하층 바람이 산악지대를 가로지를 때 발생한 산악파가 연직 전파하여 상층에서 깨지면서 난류를 발생시킨다(Kim and Chun, 2010; Sharman et al., 2012; Strauss et al., 2015). 다섯째, 적운 대류의 주변이나 적운 대류가 유도한 중력파의 깨짐에 의해 난류가 발생할 수 있다(Kim and Chun, 2012a; Lane et al., 2012; Trier et al., 2012; Sharman and Trier, 2018). 항공기에 탑재된 레이더로 탐지가 가능한 적운대류와 관련된 항공난류를 제외한 나머지 발생 기작은 관측기기로 사전탐지가 불가능한 청천난류(clear-air turbulence: CAT)와 관련된 요인들이며, 예기치 못한 항공난류의 조우로 인한 피해를 줄이기 위해서는 이러한 청천난류를 사전에 정확하게 예측하는 것이 매우 중요하다.

수치예보모델들의 수평해상도가 꾸준히 향상되어 왔음에도 불구하고, 수치예보모델로부터 항공기 규모의 난류 현상을 직접적으로 모의하는 것은 아직까지 불가능한 실정이다. 하지만 중관 규모의 대기 운동이 가진 에너지가 난류 규모로 캐스캐이드 다운 된다는 난류 이론(Dutton and Panofsky, 1970; Tung and Orlando, 2003; Sharman et al., 2006)을 근거로 한다면, 중관 규모의 대기 운동을 잘 예측하는 수치예보모델을 이용하여 난류 잠재 영역을 예측하는 것이 가능할 것이다(Sharman et al., 2006; Kim et al., 2011; Sharman and Pearson, 2017). 이러한 가정을 근거로, 수치예보모델을 이용하여 난류예측시스템을 개발하고자 하는 다양한 연구들이 수행되어 왔다. Sharman et al. (2006)은 처음으로 미국 지역에서의 난류예측모델인 Graphic Turbulence Guidance (GTG) 시스템을 개발하였다. GTG 시스템은 수치예보모델에서 나온 기상 변수들을 이용하여 지금까지 여러 연구들을 통하여 제시된 수십개의 난류 진단지수들을 계산한 뒤, 난류 관측 자료와의 비교를 통해 검증된 각 지수별 예측성 정도에 따라 관측자료를 가장 잘 예측하는 진단지수 9~10개를 통합하여 단일 난류예측지수를 생산한다. 이렇게 계산된 통합 난류예측지수는 개별 난류진단지수로만 난류를 예측하는 것보다 예측 정확성이 높다는 것이 많은 연구들을 통해 증명된 바 있다(Sharman et al., 2006; Kim and Chun, 2011, 2012b).

한국에서도 이러한 통합 난류예측시스템을 기반으로 하는 항공 난류 예측시스템 개발 연구들이 활발히 이루어져 왔다. Kim and Chun (2012b)은 기상청에서 현재 운용 중인 현업 지역예보모델(regional data assimilation

and prediction system: RDAPS) 1년 자료와 동일한 기간의 난류 관측 자료를 이용하여, GTG 시스템의 방법론을 기반으로 하는 동아시아 영역에 최적화된 한국형 항공 난류 예측시스템(Korean aviation turbulence guidance; KTG)을 개발하였으며(이하 지역-KTG 시스템), Lee and Chun (2014)은 계절마다 다른 주요 난류 발생 메커니즘을 고려하여, 시스템의 구성지수들을 계절별로 달리 적용시키며 가중치와 함께 하나로 평균하는 계절-KTG 시스템을 개발하였다. 최근에 Lee and Chun (2015)은 기상청 LDAPS (local data assimilation and prediction system) 이용하여 한국의 기상 요건으로 인해 발생하는 난류 예측에 최적화된 고해상도의 한반도-KTG 시스템을 개발하였고, 난류 관측 자료를 이용해 예측성을 검증하였다. 현업 항공난류 예측모델인 지역-KTG는 2012년부터 현업 예보를 시작해왔으며, 24시간 예보를 매 3시간 간격으로 제공하고 있다. 자세한 설명은 Lee and Chun (2015)를 참조하기 바란다. 계절-KTG, 한반도-KTG는 기상청 지역-KTG의 보조자료로써 실무자들에게 제공되고 있다.

최근 국제선 운항량이 급격하게 증가함에 따라, 전 세계적인 항공난류 예보 필요성이 대두되고 있다. 본 연구에서는 17 km 수평해상도의 기상청 현업 전지구예보모델(global data assimilation and prediction system: GDAPS)을 이용하여 전지구 한국형 항공난류 예측시스템(이하 G-KTG 시스템)을 개발하였다. 본 기술노트에서는 G-KTG의 방법론 및 난류 예측성을 제시할 것이다.

본 논문은 다음과 같이 구성된다. 2장에서는 G-KTG 시스템의 방법론에 대해 설명할 것이며, 3장에서는 전지구 영역에서 관측된 항공기 항공난류 관측 자료를 이용하여 G-KTG 시스템의 난류 예측성 검증 결과를 분석하고, 동아시아 영역에서의 지역-KTG와 G-KTG의 예측성 비교 검증을 수행할 것이다. 마지막으로 4장에서는 결론 및 요약을 제시할 것이다.

2. G-KTG 시스템 구축

G-KTG 시스템은 미국 국립기상연구소(National Center for Atmospheric Research: NCAR)에서 개발한 GTG3 시스템의 방법론(Sharman and Pearson, 2017)을 기반으로 개발되었으며, 이에 따라 현업에 운용 중인 지역-KTG 시스템과 다른 세가지 특징을 가지고 있다. 첫째, 중층(10,000~25,000 ft)과 상층(25,000~48,000 ft) 두 고도 영역으로 구분되어 난류를 예측한 지역-KTG와 달리, G-KTG는 하층(지표 - 10,000 ft), 중층(10,000~20,000 ft), 상층(20,000~50,000 ft) 세 고도 영역에 대해서 난류 예측 정보를 제공한다. 둘째, 지역-KTG의 경우, 청천난류를 일으키는 진단지수들(이

Table 1. CAT diagnostics used in the G-KTG system in the upper, middle, and low levels, and the coefficients *a* and *b* used for normalizing CAT diagnostics into EDR [Eqs. (2)-(4)]. *Ri** is the maximum value between Richardson number (*Ri*) and 10^{-3} . Explanations of CAT diagnostics can be found from Kim and Chun (2011), Sharman et al., 2006, and Sharman and Pearson (2017).

Index	Units	<i>a</i>	<i>b</i>
Upper level (20,000~50,000 ft)			
<i>Ellrod3</i>	s^{-2}	6.2132	0.53760
<i>Fth/Ri*</i>	$m^2 s^{-3}$	0.65940	0.22127
<i>DEFSQ</i>	s^{-2}	5.7554	0.40141
<i>iawind</i>	$m s^{-2}$	-3.3344	0.63660
<i>UBF/Ri*</i>	s^{-2}	-0.80335	0.38419
<i>PVGRAD</i>	PVU km^{-1}	0.61206	0.58286
<i>EDRLL</i>	$m^{4/3} s^{-2}$	1.1648	0.75097
<i>TEMPG/Ri*</i>	$K m^{-1}$	3.3749	0.38078
<i>NCSU2/Ri*</i>	s^{-3}	5.5547	0.25468
<i>EDRLUN</i>	$m^{2/3} s^{-1}$	1.4565	0.70548
<i>wsq/Ri*</i>	$m^2 s^{-2}$	-0.20735	0.26326
Middle level (10,000~20,000 ft)			
<i>NGMI</i>	$m s^{-2}$	2.0058	0.60126
<i>EDR</i>	$m^{4/3} s^{-2}$	1.7331	0.95061
<i>1/RiTW</i>	-	-1.5438	0.33699
<i>iawind/Ri*</i>	$m s^{-2}$	-1.7974	0.37634
<i>F3D/Ri*</i>	$K m s^{-1}$	5.3018	0.30212
Low level (surface ~10,000 ft)			
<i>NGMI</i>	$m s^{-2}$	1.8245	0.52295
<i>1/Ri_v</i>	-	-1.8530	0.29375
<i>LHFK/Ri*</i>	m	2.1992	0.29194
<i>wsq</i>	$m^2 s^{-2}$	-0.0414	0.27299
<i>SIGWAVG/Ri*</i>	$m^2 s^{-2}$	0.32077	0.23160

하 CAT 지수)만 고려하였으나, G-KTG의 경우, 산악과 난류(mountain wave turbulence: MWT) 지수들(이하 MWT 지수)을 추가적으로 포함하였다. 셋째, 값의 범위 및 단위가 서로 다른 개별 난류진단지수들을 표준화 하는 방법이 다르다. 지역-KTG의 경우, 난류 강도들에 대한 임계값들을 각각 0, 0.25, 0.5, 0.75, 1로 대응시킨 뒤, 그 사이사이 값의 범위에 해당되는 계산된 지수 값들을 선형함수를 통해 0~1 사이의 값들로 표준화 시켰으나(Kim and Chun, 2011; Lee and Chun, 2014, 2015), G-KTG의 경우, 개별 난류진단지수들을 에너지 소산율(energy dissipation rate; ϵ)의 1/3제곱 값을 나타내는 에디 소산율(Eddy Dissipation Rate: EDR) 값으로 표준화하였다. EDR은 현재 국제 민간항공기구(International Civil Aviation Organization: ICAO)에서 공표한 표준 난류지표이다.

G-KTG 시스템의 방법론을 크게 세 단계로 나누어

Table 2. The same as in Table 1, except for MWT diagnostics. d_s represents the near-surface diagnostic [Eq. (1)]. Explanations of MWT diagnostics can be found from Kim and Chun (2011), Sharman et al., 2006, and Sharman and Pearson (2017).

Index	Units	<i>a</i>	<i>b</i>
Upper level (20,000~50,000 ft)			
$d_s TEMPG $	$K s^{-1}$	-1.2213	0.40382
$d_s \times CTSQ$	$K^2 m^{1/3} s^{-1}$	-1.9327	0.25473
Middle level (10,000~20,000 ft)			
$d_s \times CTSQ$	$K^2 m^{1/3} s^{-1}$	-2.2596	0.24770
$d_s \times SIGWAVG$	$m^3 s^{-3}$	-2.6195	0.21086
$d_s DIV $	$m s^{-2}$	-1.6071	0.36232
Low level (surface ~10,000 ft)			
$d_s DIV $	$m s^{-2}$	-1.5400	0.39327
$d_s \times SIGWAVG$	$m^3 s^{-3}$	-2.5158	0.22230

간략하게 언급하면 다음과 같다. 첫 번째 단계는 GDAPS에서 산출된 기상변수들을 이용하여 G-KTG을 구성하는 개별 난류진단지수들을 계산한다. 하층, 중층, 상층별로 사용된 CAT 난류진단지수들은 Table 1에, MWT 난류지수들은 Table 2에 나타나 있으며, 지수들이 나타내는 의미는 Sharman and Pearson (2017)을 참고하여 Table 3에 표기하였다. Table 1과 Table 2를 보면, CAT 지수는 *Fth/Ri**, *DEFSQ*, *Ellrod3* 등 청천난류를 야기하는 기상 요건과 관련한 진단지수들로 구성되어 있으며, MWT 지수는 여러 CAT 지수에 d_s 를 곱한 형태로써 구성되어 있다. 여기서, d_s 는 아래의 식 (1)을 통해 계산된다.

$$d_s = 0, \text{ if } h < 200 \text{ m, } \text{grad}(h) < 5 \text{ mkm}^{-1}$$

$$d_s = V_i(\text{max in lowest 1500 m}) \times \min(h, 2750 \text{ m}), \text{ otherwise} \quad (1)$$

식 (1)에서 *h*는 모델격자점(*i, j*)에서의 지면고도를, V_i 은 저층 바람속도를 의미한다.

두 번째 단계는 계산된 값의 범위 및 단위가 다른 개별 난류진단지수들을 하나로 통합하기 위해 공통의 EDR 규모로 표준화하는 단계이다. 본 연구에서는 Sharman and Pearson (2017)에서 제안한 개별 난류진단지수 초기값(D_i)과 지수값으로부터 변환된 EDR 값(D_i^*) 간의 간단한 맵핑식을 이용하여 CAT 지수 및 MWT 지수들의 값을 EDR로 표준화하였으며, 해당 식은 아래와 같다.

$$\ln D_i^* = a + b \ln D_i \quad (2)$$

$$a = \overline{\ln \epsilon^{1/3}} - b \overline{\ln D_i} \quad (3)$$

Table 3. Descriptions of individual diagnostics in the G-KTG system.

Diagnostic	Description	Reference
<i>Ellrod3</i>	The vertical shear-deformation index with divergence tendency	Ellrod and Knox (2010)
<i>Fth</i>	Normalized 2-dimensional frontogenesis function computed on isentropic surfaces	Sharman et al. (2006)
<i>DEFSQ</i>	Total deformation ²	
<i>iawind</i>	Inertial advective wind	McCann (2001)
<i>UBF</i>	Unbalanced flow	McCann (2001)
<i>PVGRAD</i>	Horizontal potential vorticity gradient	
<i>EDRLL</i>	$\epsilon^{2/3}$ calculated from second-order longitudinal structure function	Frehlich and Sharman (2004a)
<i>TEMPG</i>	Horizontal temperature gradient	Sharman et al. (2006)
<i>NCSU2</i>	The North Carolina State University 2 index; Gradient of Montgomery streamfunction × vorticity gradient computed on isentropic surfaces	Kaplan et al. (2006)
<i>EDRLUN</i>	$\epsilon^{1/3}$ from simplified $D(\text{Richardson number})/Dt$	Gill and Buchanan (2014)
<i>wsg</i>	Vertical velocity ²	
<i>NGMI</i>	Deformation ×wind speed	Reap (1996)
<i>EDR</i>	$\epsilon^{2/3}$ calculated from average of longitudinal and transverse second-order structure functions	Frehlich and Sharman (2004a)
<i>1/RiTW</i>	Inverse Richardson number with vertical wind shear from thermal wind relation	Sharman et al. (2006)
<i>F3D</i>	3-dimensional frontogenesis function on constant z surfaces	
<i>1/Ri_s</i>	Inverse moist Richardson number	Sharman et al. (2006)
<i>LHFK</i>	Lighthill-Ford spontaneous imbalance	Knox et al. (2008)
<i>SIGWAVG</i>	Variance of vertical velocity calculated from average of longitudinal and transverse second-order structure functions	Frehlich and Sharman (2004b)
<i>CTSQ</i>	Temperature structure constant calculated from average of longitudinal and transverse second-order structure functions of temperature	Frehlich et al. (2010)
<i>DIV</i>	Horizontal divergence	

$$b = \frac{SD[\ln \epsilon^{1/3}]}{SD[\ln D_i]} \quad (4)$$

여기서 SD 는 표준편차(standard deviation), $(\bar{\quad})$ 는 평균 값을 의미하며, $\epsilon^{1/3}$ 은 관측된 EDR 값을 의미한다. a 와 b 는 식 (2)에 들어가는 맞춤계수로, 각 지수별로 다르게 결정되는 값이다. 식 (3)과 식(4)에 들어가는 평균값 $(\ln \epsilon^{1/3})$ 및 표준편차값 $(SD[\ln \epsilon^{1/3}])$ 은 장기간에 대한 in-situ 관측 EDR의 로그정규 분포도로부터 얻어지는 값으로, 본 연구에서는 Sharman and Pearson (2017)에서 구한 값을 사용하였다. $\ln D_i$ 및 $SD[\ln D_i]$ 은 장기간 수치예보모델로 계산된 개별 난류진단지수들 값의 분포도를 가장 잘 대표하는 로그정규분포도로부터 구해진다. 개별 난류진단지수 계산에 사용되는 수치예보모델에 따라서 각 지수들의 값의 범위 및 분포도가 달라지며, 본 연구에서는 3개월 기간(2015년 10월~2015년 12월)의 GDAPS 분석장을 이용하여 계산한 개별 난류진단지수들의 로그정규분포로부터 구하

였다. G-KTG 시스템에 사용되는 각 지수별 EDR 맵핑식에 적용된 맞춤계수 a, b 값은 Table 1과 Table 2에 나타내었다.

마지막으로, EDR 규모로 표준화된 개별 난류진단지수들을 결합하여 하나의 통합 난류예측지수인 $GKTG$ 를 산출한다. 모델의 각 격자점에서 아래 식 (5)을 이용하여 EDR 규모로 표준화된 개별 난류진단지수 값 (D_n^*)들에 각 지수들마다 달리 적용되는 가중치(W_n)를 곱한 후 그것들을 평균함으로써, 하나의 통합 난류예측지수인 $GKTG$ 를 산출한다(본 연구에서는 시스템 명과 구분하기 위해서 통합 난류예측지수 이름은 이텔릭체로 표시하였다).

$$GKTG(i, j, k) = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N W_n D_n^*(i, j, k) \quad (5)$$

$n = 1, 2, 3, \dots, N$

식 (5)에서 사용된 각 지수별 W_n 은 GTG3 시스템에서 규정된 고정값들을 적용시켰는데(Sharman and Pearson, 2017), 이는 1~2년 동안의 난류관측자료를 이

용하여 검증된 각 지수들의 예측성을 기반으로 하여 결정된 것이다. 본 연구에서 개발한 G-KTG 시스템은 CAT 관련 진단지수들과 MWT 관련 진단지수들을 구분하여 식 (5)에 적용시킴으로, 최종적으로 두 통합지수인 CAT-GKTG와 MWT-GKTG를 산출하도록 하였다. 추가적으로, 각 격자점에서 계산된 CAT-GKTG와 MWT-GKTG 중에서 최대인 값을 표출하는 maximum-GKTG 역시 시스템의 최종 산출물이다.

3. G-KTG 검증

이번 장에서는 민간 항공기로부터 관측된 전구 영역에 대한 in-situ EDR 관측 자료를 이용하여 G-KTG 시스템의 12시간 예보장의 예측성을 검증하고자 한다. 본 연구에서 사용한 EDR 항공기 관측자료는 미국 NCAR로부터 수집한 자료를 제공받았으며, 항공기 자료로부터 무강도(null: NIL) 및 중강도 이상(moderate-or-greater: MOG)의 난류를 선별하기 위한 난류 강도 별 EDR의 임계값은 Sharman et al. (2014)와 Sharman and Pearson (2017)을 참고하여 light (LGT), moderate (MOD), severe (SEV)에 대해 각각 0.15, 0.22, 0.34로 설정하였다.

Figure 1은 2016년 6월 13일 0600 UTC에 유효한 G-KTG 시스템에서 최종 산출된 세 가지 12시간 예보장(CAT-GKTG, MWT-GKTG, maximum-GKTG)과 해당 시각을 중심으로 ±1시간 이내에 항공기로부터 관측된 EDR의 위치를 36,000 ft 고도 영역에 대해 비교한 결과를 나타낸 것이다. CAT-GKTG로부터 예보된 난류 지역은 상층 흐름을 따라 나타나고 있으며, 특히 제트류의 저, 고기압성 곡률이 강하게 나타나는 남반구 영역 및 일본의 동쪽 북서태평양 지역에서 MOG 강도에 해당하는 강한 난류 지역이 나타났다(Fig. 1a). MWT-GKTG는 높은 산악 지대 영역에서 난류 지역이 나타나고 있으며, 특히 남아메리카의 안데스산맥과 중국의 텐산, 칭링산맥 영역에서 MOG 강도의 강한 난류 지역이 보여지고 있다(Fig. 1b). 당시에 동아시아 영역에서 실제로 MOG 강도의 난류가 발생한 것을 확인할 수 있는데, 그 지역이 CAT-GKTG에서 예보된 강한 난류 지역과 잘 일치하는 것을 알 수 있으며(Fig. 1a), 이에 따라 각 격자점에서 CAT-GKTG와 MWT-GKTG 중 최대값을 대표하는 maximum-GKTG의 난류 지역과도 해당 난류 발생 지역이 잘 일치하였다(Fig. 1c).

본 연구에서는 G-KTG 시스템의 예측성 검증에 통계적 검증 방법인 probability of detection (POD) 방법(Mason, 1982)을 사용하였다. POD 방법은 검증기간동안 난류예측모델이 실제로 MOG 난류가 관측된 지점에서 난류를 예측할 확률을 나타내는 PODY와 반대로 NIL 난류가 관측된 지점에서 난류를 예측하지

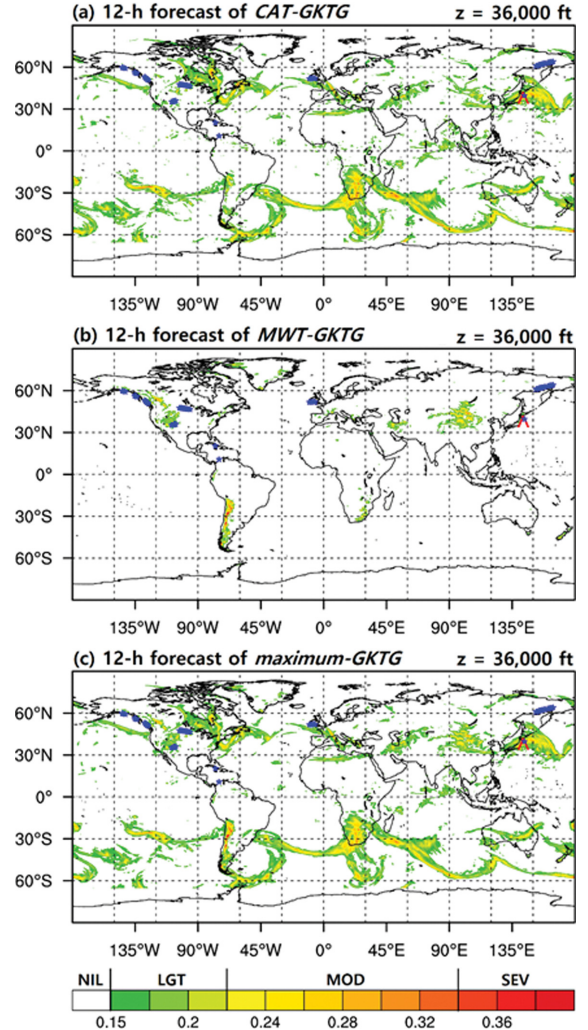


Fig. 1. Locations of in-situ flight EDR data over global region observed within ± 1 h centered at 0600 UTC 13 June 2016 at 36,000 ft superimposed on the 12-h forecasts of (a) CAT- and (b) MWT- and (c) maximum-GKTG. Blue asterisk and red caret represent NIL- and MOG-level turbulence observed from the in-situ flight EDR data, respectively.

않을 확률을 나타내는 PODN을 고려함으로써 예측성을 검증한다. 검증 기간은 총 6개월 기간(2016년 6월~2016년 11월)이며, 검증에 사용된 난류 관측자료는 GDAPS 생산시간인 0000, 0600, 1200, 1800 UTC을 중심으로 ±1시간 이내에 비행기 자료에서 기록된 NIL 및 MOG 강도의 난류들만을 선별하여 사용하였다. PODN (PODY)는 NIL (MOG)가 관측된 지역과 가장 근접한 격자점에서의 난류예측모델값들 중 주어진 임의의 임계값을 넘지않는(넘는) 경우를 셈함으로써 구

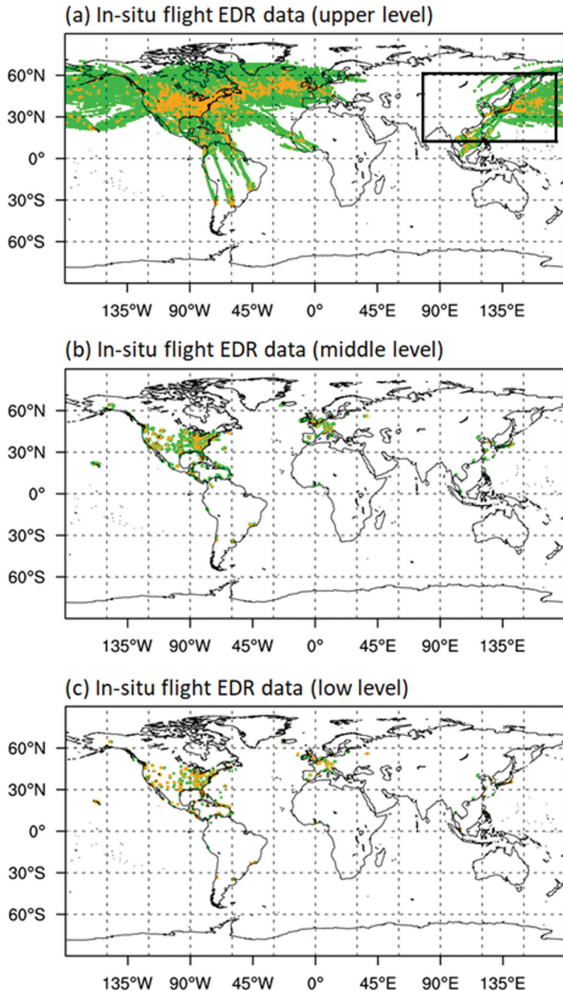


Fig. 2. Horizontal distribution of MOG- and NIL-levels of turbulence over global region in the (a) upper (20,000~50,000 ft), (b) middle (10,000~20,000 ft), and (c) low (surface ~10,000 ft) levels observed from in-situ flight EDR data from June 2016 to November 2016. The MOG- and NIL-level turbulence are depicted as orange and green dots, respectively. Black box in (a) represents East Asia region which coincides with domain of regional-KTG (R-KTG) system.

하며, 이 때 임계값은 검증기간동안 계산된 난류예측 모델값들을 오름차순으로 나열한 뒤 최소값에서부터 최대값까지 일정한 간격으로 변화시켜가며 결정한다. 임계값의 개수만큼 구해진 PODY-PODN쌍을 x-y도면에 표시하면 점들을 따라 하나의 곡선을 그릴 수 있으며, 해당 곡선 아래의 면적(area under curve: AUC)이 시스템의 예측성을 나타내는 값이 된다. 또한, 추가적인 통계적 검증 방법으로 true skill statistic (TSS)

를 고려하였으며, $TSS = PODY + PODN - 1$ 식으로 구해진다. AUC는 0.5~1의 값의 범위를, TSS는 -1에서 +1 사이의 값의 범위를 가지며, 두 값 모두 1에 가까울수록 예측성이 좋다는 것을 의미한다. 비행기로부터 관측되는 NIL 자료는 MOG 난류 경우와는 달리 매우 빈번하게 관측되기 때문에, PODN을 계산할 때 같은 예보시간 내에 동일한 격자점에서 중복으로 세어지는 경우에는 한 NIL 사례에 대해서만 검증에 사용하도록 선별하였다.

Figure 2는 GDAPS-17 km 기반 G-KTG 시스템의 예측성 검증을 위하여 분류된 6개월 기간(2016년 6월 ~2016년 11월)의 비행기 관측 자료부터 얻은 NIL 및 MOG 난류에 대한 세 고도 영역별 수평 분포도를 나타낸다. 미국 민간항공기로부터 기록된 자료이기 때문에 하층(지표 ~10,000 ft)에서 관측된 NIL과 MOG가 대부분 미국에 집중되어 있으며, 미국 민간항공기의 주요 운항도시들이 있는 서유럽, 남미 및 동아시아 일부 지역들에서도 난류가 관측되었다(Fig. 2c). 항공기의 운항고도가 점차 올라감에 따라 중층(10,000~20,000 ft)에서는 하층에 비해 수평적으로 넓게 난류가 분포되어 있으나, 하층보다는 MOG 난류의 발생이 적게 나타나는 것으로 확인된다(Fig. 2b). 상층(20,000~50,000 ft)의 경우, 항공기의 주요 운항 고도에 해당되므로 가장 많은 NIL과 MOG 난류가 주요 운항로를 따라 분포되어 있으며, 특히 MOG 난류는 미국, 북대서양, 일본의 동쪽 해안 영역에서 주로 관측되었다(Fig. 2a). 남미 일부 지역을 제외하고는 남반구에서는 관측 자료가 거의 없으며, 또한 유라시아 대륙 및 아프리카 대륙 대부분 지역에서도 난류 자료가 관측되지 않은 것을 통해, 해당 자료의 지역적인 한계점을 알 수 있다.

Table 4는 Fig. 2에서 보인 NIL과 MOG 난류 개수를 상층, 중층, 하층별로 보인 것으로, 전구와 동아시아 지역에서의 G-KTG 검증에 사용된 자료의 수를 각각 나타낸 것이다. 전구적으로 보면, 하층 영역에서는 총 150,428개로, 이 중 NIL이 147,494개, MOG가 2,934개 관측되었으며, 총 개수에 대해서 각각 98.0%와 2.0%를 차지하였다. 중층에서는 총 192,438개의 관측자료 중 NIL이 191,694개(99.6%), MOG가 744개(0.4%) 관측되었고, 상층에서는 총 2,506,271개의 관측자료 중 NIL이 2,504,305개(99.9%), MOG가 1,966개(0.1%) 관측되었다. 상층 영역에서 관측자료가 가장 많았으나, MOG 난류는 하층에서 가장 많이 관측되었다. 동아시아 영역에서는 하층 영역에서 총 6,052개의 EDR이 관측되었으며, 이 중 NIL이 5,953개(98.4%), MOG가 99개(1.6%) 관측되었다. 중층에서는 총 5,927개 중 NIL이 5,900개(99.5%), MOG가 27개(0.5%) 관측되었고, 상층에서는 총 96,681개 중 NIL이 96,469

Table 4. Numbers corresponding to null (NIL), moderate (MOD), and severe (SEV) levels of turbulence observed from in-situ flight EDR data over global and East Asia regions in the upper (20,000~50,000 ft), middle (10,000~20,000 ft), and low (surface ~10,000 ft) levels from June 2016 to November 2016, which is used for the validation of G-KTG system. EDR thresholds for turbulence intensity are based on values of Sharman and Pearson (2017).

Turbulence intensity	2016.06~2016.11		
	Upper Level Globe (East Asia)	Middle Level Globe (East Asia)	Low Level Globe (East Asia)
Null (NIL)	2,504,305 (96,469)	191,694 (5,900)	147,494 (5,953)
Moderate (MOD)	1,773 (183)	655 (24)	2,766 (89)
Severe (SEV)	193 (29)	89 (3)	168 (10)
Total	2,506,271 (96,681)	192,438 (5,927)	150,428 (6,052)

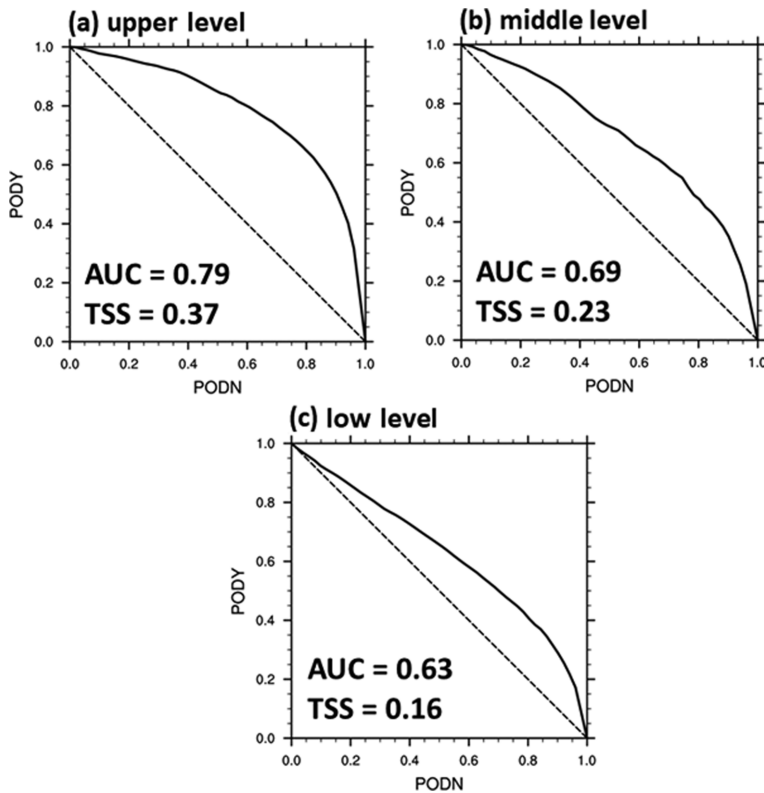


Fig. 3. PODY and PODN performance statistics of 12-h forecasts of *maximum-GKTG* in the (a) upper (20,000~50,000 ft), (b) middle (10,000~20,000 ft), and (c) low (surface ~10,000 ft) levels against in-situ flight EDR data observed over global region for 6 months (2016.06~2016.11).

개(99.8%), MOG가 212개(0.2%)로, 세 고도 영역 중에서 NIL과 MOG 난류 모두 가장 많이 관측되었다.

본 연구에서는 관측된 난류가 MWT인지, 아니면 CAT인지 구분할 수 있는 추가적인 정보가 없기 때문에, POD 방법을 통한 예측성 검증은 CAT, MWT 모두를 고려하여 나타낸 *maximum-GKTG*에 대해서 수행하였다. Figure 3은 Fig. 2와 Table 4에서 보인 6개

월 기간의 항공기 관측 난류에 대한 *maximum-GKTG* 12시간 예보장의 예측성을 고도별로 보인 것이다. 세 고도 영역 중 상층 영역에서 AUC가 0.79, TSS가 0.37로 가장 좋은 예측성을 보였으며, 하층 영역에서 AUC가 0.63, TSS가 0.16으로 가장 낮은 예측성을 보였다. 상층 영역을 제외한 다른 두 고도 영역에서는 AUC 값이 0.7보다 작았는데, 이는 검증기간이 6개월 정도

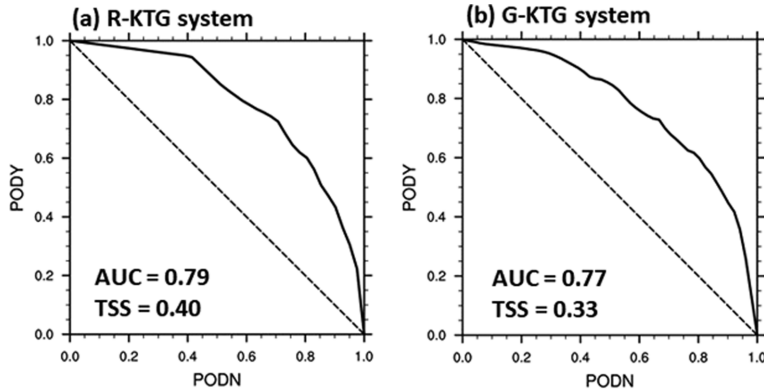


Fig. 4. PODY and PODN performance statistics of 12-h forecasts of (a) *RKTG* and (b) *maximum-GKTG* in the upper level against in-situ flight EDR data observed over East Asia region for 6 months (2016.06~2016.11).

로 짧았으며, 상대적으로 난류예측시스템들의 난류 예측성이 떨어지는 여름(Kim et al., 2009, 2011; Lee and Chun, 2014)이 주요 검증기간에 포함되어 있기 때문인 것으로 보여진다. 또한 CAT 지수들의 대부분이 자유 대기 위에서 발생하는 난류 메커니즘과 관련한 지수들이기 때문에, 행성경계층 영역에 해당하는 하층에서의 난류 발생을 G-KTG 시스템에서 사용한 진단 지수들로 정확하게 예측하기에는 어려운 것으로 보인다. 향후, 하층 항공난류 예측시스템 개선을 위한 난류예측지수 개발이 이루어져야 할 것이다. 추가적으로, 동일한 항공기 관측 난류를 이용하여 *CAT-GKTG* 12시간 예보장의 난류예측성을 살펴본 결과, *maximum-GKTG*보다 하층, 중층, 상층 영역에 대해서 AUC 값이 각각 0.013, 0.018, 0.004 정도 떨어진 것을 확인할 수 있었다(not shown). 이러한 결과는 CAT 발생 가능성을 고려한 *CAT-GKTG*보다 MWT 발생 가능성을 같이 고려한 *maximum-GKTG*가 다양한 요인들로 인해 발생한 난류들을 더욱 정확하게 예측할 수 있다는 것을 보여준다.

Figure 4는 현재 항공기상청에서 현업 중인 RDAPS 기반 *지역-KTG* (*RKTG*)와 *maximum-GKTG*와의 6개월 기간(2016년 6월~2016년 11월)에 대한 예측성을 동아시아 영역(Fig. 2a에서 검은색 박스로 표시)에 대해서 비교 검증한 결과로, 25,000~48,000 ft의 상층 영역에 대해서 비교를 수행하였다. 중층의 경우에는 25,000 ft 고도 이상에서 관측된 EDR 자료가 없고, 하층의 경우에는 개발된 *RKTG*가 없기 때문에, 중층과 하층 영역에 대해서는 비교 검증을 따로 수행하지 않았다. Figure 4 결과를 보면, *RKTG*의 AUC 및 TSS 값이 *maximum-GKTG*보다 다소 높게 나타난 것을 알 수 있다. *지역-KTG* 시스템의 경우 GDAPS보다 더 높은 12 km 수평해상도의 RDAPS 자료를 통해 난류를 예측

하며, 또한 동아시아 영역에서 발생하는 난류들을 통계적으로 가장 잘 예측하는 개별 난류진단지수들 위주로 결합하였기 때문에, G-KTG 시스템보다 동아시아 영역에 대해서 최적화된 시스템이라 할 수 있다. 하지만, 두 시스템의 AUC 차이는 0.02로 매우 근소한 차이인 데다가, *maximum-GKTG*가 0.77 정도의 상당히 높은 AUC 값을 보이고 있기 때문에, 충분히 G-KTG 시스템으로도 동아시아 상층 영역의 난류 잠재 영역에 대한 유의미한 예측정보를 제공할 수 있을 것으로 보여진다. 특히, 향후 기상청 현업 전지구 수치예보모델 GDAPS의 수평격자가 17 km 이하로 해상도가 더욱 좋아진다면, *지역-KTG* 시스템을 따로 운영할 필요 없이 G-KTG 시스템을 통하여 동아시아 예보도 할 수 있을 것으로 판단된다. 다만 이를 위해서는 보다 긴 기간의 비행기 관측자료를 이용한 G-KTG 시스템의 검증 및 개선이 이루어져야 할 것이다.

4. 요약 및 결론

본 연구노트에서는 기상청의 현업 전지구 수치예보 모델인 17 km 수평해상도의 GDAPS을 이용하여 개발된 전지구 한국형 항공난류 예측시스템(G-KTG)의 방법론에 대해 설명하고, 항공기 계기로부터 관측된 in-situ EDR 자료를 이용하여 G-KTG 시스템의 항공난류 예측성 검증을 전구 영역 및 동아시아 영역에 대해 수행하였다.

통합 난류예측시스템인 G-KTG 시스템은 미국 NCAR에서 최근에 개발한 GTG3 시스템을 기반으로 하며, 총 3단계 과정을 통해 개발되었다. 우선 GDAPS의 기본 기상변수들을 이용하여 개별 난류진단지수들을 계산한다. 하층(지표 - 10,000 ft), 중층(10,000~20,000 ft), 상층(20,000~50,000 ft)에 대해서 각각 5개, 5개, 11개

의 CAT 지수와 2개, 3개, 2개의 MWT 지수들을 계산하였다(Table 1, 2). 두 번째 단계로, 이전 단계에서 계산된 각기 다른 크기 및 단위를 가지는 개별 난류 진단지수들을 각 지수들마다 달리 적용되는 간단한 EDR-scale 맵핑식을 통해 공통의 EDR 지표로 표준화한다. 마지막으로, 모델의 각 격자점에서 공통의 EDR 지표로 값이 표준화된 개별 난류진단지수들을 지수별로 달리 적용되는 가중치와 함께 곱한 뒤 평균함으로써, 하나의 단일 통합 난류예측지수인 GKTG를 계산하였다. G-KTG 시스템은 CAT와 MWT 지수들을 분리하여 각각 통합함으로써, 최종적으로 청천난류 예측에 적합한 CAT-GKTG와 산악과 관련 난류 예측에 적합한 MWT-GKTG를 생성하며, 추가적으로 각 격자점에서 CAT-GKTG와 MWT-GKTG 중 큰 값을 표출하는 maximum-GKTG도 시스템에서 산출되었다.

G-KTG 시스템의 난류 예측성을 검증하기 위해, 미국 NCAR에서 제공받은 in-situ EDR 비행기 자료 중 모델생성시간을 기준으로 ± 1 시간 이내에 관측된 자료만을 선별하여 POD 분석을 수행하였다. 6개월(2016년 6월~2016년 11월) 기간의 예측성 검증을 수행한 결과, 전구적으로는 상층, 중층, 하층에서의 AUC 값이 각각 0.79, 0.69, 0.63으로, 상층에서 가장 높은 예측성을, 하층에서 가장 낮은 예측성을 보였다. 동아시아 지역에서는 현재 현업으로 사용하는 12 km 수평 해상도의 지역-KTG와 비교하여(AUC = 0.79), G-KTG 시스템의 예측성이 거의 비슷한 값을 보였다(AUC = 0.77). 본 연구에서 고려한 검증기간이 6개월 정도로 짧고, 상대적으로 예측성이 떨어지는 여름을 검증기간에 주로 포함하고 있기 때문에, 다소 낮은 예측성이 나타난 것으로 판단된다. 통계적으로 보다 유의미한 예측성을 살펴보기 위해서는 더 긴 기간에 대한 예측성 검증이 지속적으로 수행되어야 할 것이다.

감사의 글

이 연구는 기상청 「기상·지진See-At기술개발연구」(KMIPA2015-1080)의 지원으로 수행되었습니다.

REFERENCES

- Dutton, J., and H. A. Panofsky, 1970: Clear air turbulence: A mystery may be unfolding. *Science*, **167**, 937-944.
- Ellrod, G. P., and D. I. Knapp, 1992: An objective clear-air turbulence forecasting technique: Verification and operational use. *Wea. Forecasting*, **7**, 150-165.
- _____, and J. A. Knox, 2010: Improvements to an operational clear-air turbulence diagnostic index by addition of a divergence trend term. *Wea. Forecasting*, **25**, 789-798, doi:10.1175/2009WAF2222290.1.
- Frehlich, R., and R. D. Sharman, 2004a: Estimates of turbulence from numerical weather prediction model output with applications to turbulence diagnosis and data assimilation. *Mon. Wea. Rev.*, **132**, 2308-2324.
- _____, and _____, 2004b: Estimates of upper level turbulence based on second order structure functions derived from numerical weather prediction model output. Preprints, *11th Conf. on Aviation, Range, and Aerospace Meteorology*, Hyannis, MA, Amer. Meteor. Soc., 4.13. [Available online at <https://ams.confex.com/ams/pdfpapers/81831.pdf>].
- _____, R. Sharman, F. Vandenberghe, W. Yu, Y. Liu, J. Knievel, and G. Jumper, 2010: Estimates of C_n^2 from numerical weather prediction model output and comparison with thermosonde data. *J. Appl. Meteor. Climatol.*, **49**, 1742-1755, doi:10.1175/2010JAMC2350.1.
- Gill, P. G., and P. Buchanan, 2014: An ensemble based turbulence forecasting system. *Meteor. Appl.*, **21**, 12-19, doi:10.1002/met.1373.
- Kaplan, M. L., and Coauthors, 2006: Characterizing the severe turbulence environments associated with commercial aviation accidents: A Real-Time Turbulence Model (RTTM) designed for the operational prediction of hazardous aviation turbulence environments. *Meteor. Atmos. Phys.*, **94**, 235-270.
- 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, doi:10.1175/2010JAMC2449.1.
- _____, and _____, 2011: 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 _____, 2012a: A numerical simulation of convectively induced turbulence above deep convection. *J. Appl. Meteor. Climatol.*, **51**, 1180-1200, doi:10.1175/JAMC-D-11-0140.1.
- _____, and _____, 2012b: 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. Kor. Soc. Aviat. Aeron.*, **20**, 76-83, doi:10.12985/ksaa.2012.20.4.076.
- _____, _____, W. Jang, and R. D. Sharman, 2009: A study of forecast system for clear-air turbulence in Korea, Part II: Graphical Turbulence Guidance (GTG) system. *Atmosphere*, **19**, 269-287 (in Korean with

- English abstract).
- _____, _____, 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, doi: 10.1175/JAMC-D-10-05017.1.
- Knox, J. A., 1997: Possible mechanisms of clear-air turbulence in strongly anticyclonic flows. *Mon. Wea. Rev.*, **125**, 1251-1259.
- _____, 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 Coauthors, 2005: Turbulence and gravity waves within an upper-level front. *J. Atmos. Sci.*, **62**, 3885-3908.
- Lane, T. P., R. D. Sharman, S. B. Trier, R. G. Fovell, and J. K. Williams, 2012: Recent advances in the understanding of near-cloud turbulence. *Bull. Amer. Meteorol. Soc.*, **93**, 499-515, doi:10.1175/BAMS-D-11-00062.1.
- 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, doi:10.14191/Atmos.2014.24.2.235 (in Korean with English abstract).
- _____, and _____, 2015: 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). *Atmosphere*, **25**, 367-374, doi:10.14191/Atmos.2015.25.2.367 (in Korean with English abstract).
- Mason, I., 1982: A model for assessment of weather forecasts. *Aust. Meteor. Mag.*, **30**, 291-303.
- McCann, D. W., 2001: Gravity waves, unbalanced flow, and aircraft clear air turbulence. *Natl. Wea. Dig.*, **25**, 3-14.
- 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).
- Reap, R. M., 1996: Probability forecasts of clear-air-turbulence for the contiguous US. National Weather Service Office of Meteorology Tech. Procedures Bull. 430, 15 pp [Available online at http://www.nws.noaa.gov/mdl/pubs/Documents/TechProcBulls/TPB_430.pdf].
- Sharman, R., and T. Lane, Eds., 2016: *Aviation Turbulence: Processes, Detection, Prediction*. Springer, 523 pp.
- _____, and J. Pearson, 2017: Prediction of energy dissipation rates for aviation turbulence. Part I: Forecasting nonconvective turbulence. *J. Appl. Meteor. Climatol.*, **56**, 317-337, doi:10.1175/JAMC-D-16-0205.1.
- _____, and S. B. Trier, 2018: Influences of gravity waves on Convectively Induced Turbulence (CIT): A review. *Pure Appl. Geophys.*, doi:10.1007/s00024-018-1849-2.
- _____, C. Tebaldi, G. Wiener, and J. K. Wolff, 2006: An integrated approach to mid- and upper-level turbulence forecasting. *Wea. Forecasting*, **21**, 268-287.
- _____, S. B. Trier, T. P. Lane, and J. D. Doyle, 2012: Sources and dynamics of turbulence in the upper troposphere and lower stratosphere: A review. *Geophys. Res. Lett.*, **39**, L12803, doi:10.1029/2012GL051996.
- _____, L. B. Cornman, G. Meymaris, and J. Pearson, 2014: Description and derived climatologies of automated in situ eddy-dissipation-rate reports of atmospheric turbulence. *J. Appl. Meteor. Climatol.*, **53**, 1416-1432, doi:10.1175/JAMC-D-13-0329.1.
- Strauss, L., S. Serafin, S. Haimov, and V. Grubišić, 2015: Turbulence in breaking mountain waves and atmospheric rotors estimated from airborne in situ and Doppler radar measurements. *Q. J. R. Meteorol. Soc.*, **141**, 3207-3225, doi:10.1002/qj.2604.
- Trier, S. B., R. D. Sharman, and T. P. Lane, 2012: Influences of moist convection on a cold-season outbreak of Clear-Air Turbulence (CAT). *Mon. Wea. Rev.*, **140**, 2477-2496, doi:10.1175/MWR-D-11-00353.1.
- Tung, K. K., and W. W. Orlando, 2003: The k^{-3} and $k^{-5/3}$ energy spectrum of atmospheric turbulence: Quasi-geostrophic two-level model simulation. *J. Atmos. Sci.*, **60**, 824-835.