

Original Article

<https://doi.org/10.12985/ksaa.2020.28.4.001>
ISSN 1225-9705(print) ISSN 2466-1791(online)

고해상도 규모상세화 수치자료 산출체계(KMAPP)를 이용한 저고도 항공난류 진단

석재혁*, 최희욱*, 김연희*, 이상삼*

Diagnosis of Low-Level Aviation Turbulence Using the Korea Meteorological Administration Post Processing (KMAPP)

Jae-Hyeok Seok*, Hee-Wook Choi*, Yeon-Hee Kim*, Sang-Sam Lee*

ABSTRACT

In order to diagnose low-level turbulence in Korea, diagnostic indices of low-level turbulence were calculated from Aug 2016 to Jul 2019 using a Korea Meteorological Administration Post Processing (KMAPP) developed by the National Institute Meteorological Sciences (NIMS), and the indices were evaluated using Aircraft Meteorological Data Relay (AMDAR). In the mean horizontal distribution of diagnostic indices calculated, severe turbulence was simulated along major domestic mountains, including near the Taebaek Mountains, the Sobaek Mountains and Hallasan Mountain on Jeju Island due to geographical factors. Later, detection performance was evaluated by calculating the KMAPP Low-Level Turbulence index (KLT) on combined index, using AUC value of Individual diagnostic indices as a weight. The result showed that the AUC value of KLT was 0.73, and the detection performance was improved (0.02-0.13) when the index was combined. Also, when looking for the AMDAR data is divided into years, seasons, and altitudes, up to 0.94 AUC values were found in winter (DJF) and the surface (surface-1,000ft). By using high-resolution numerical data reflecting detailed terrain data, local turbulence distribution was well demonstrated and high detection performance was shown at low-level.

Key Words : Korea Meteorological Administration Post Processing(KMAPP), Aircraft Meteorological Data Relay(AMDAR), KMAPP Low-Level Turbulence Index(KLT), Low-Level Turbulence(LLT)

1. 서 론

항공난류(aviation turbulence)는 대기의 급변으로 인해 비행중인 항공기에 직접적인 영향을 주는 수직에

서 수백미터 규모의 난류로 정의된다[1, 2, 3]. 항공난류는 다양한 발생원인에 따라 청천난류(CAT; Clear-Air Turbulence), 대류와 관련한 난류(CIT; Convective-Induced Turbulence), 산악파 난류(MWT; Mountain-Wave Turbulence), 저고도 난류(LLT; Low-Level Turbulence)로 분류된다[4]. 이들 중 저고도 난류는 지표면 위를 지나가는 강한 바람에 의한 연직시어 및 지형적 요인, 태양복사의 증가로 인한 대류활동 등의 원인으로 대기하층(약 10,000ft 이하)에서

Received: 04. Oct. 2020, Revised: 23. Oct. 2020,
Accepted: 23. Oct. 2020

* 국립기상과학원 미래기반연구부

연락처 E-mail : yeonheekim@korea.kr

연락처 주소 : 제주도 서귀포시 서로북로 33

갑작스럽게 발생하는 난류로서[5], 600m(약 2,000ft) 이하에서 위험성이 강조되고 있다[6]. 또한, 저고도 난류는 민간항공기 운항에서 가장 중요한 항공기 이·착륙시 예기치 못한 활주로 이탈, 테일 스트라이크(tail strike) 등을 발생시킬 수 있으며, 이로 인한 경제적·인적 피해를 가져올 수 있다.

오늘날 경제발전과 삶의 질 향상으로 항공 수요가 지속적으로 증가하면서 선진국에서는 수치모델을 이용한 항공난류 진단을 위한 연구들이 진행되어 왔다. 먼저, 관측자료와 수치모델을 이용하여 여러 가지 난류발생 메커니즘을 나타내는 다양한 난류진단지수들이 제안되어 난류진단에 활용되었다[7, 8, 9, 10]. 이후, Sharman et al.[11]은 수치예보모델을 이용하여 앞서 제안된 여러 개별 난류진단지수들을 계산한 뒤, 그들의 진단성능에 따라 가중치를 적용하고 결합하여 하나의 통합 난류진단지수로 제공되는 Graphic Turbulence Guidance(GTG) 시스템을 개발하였다. 초기 버전의 GTG 시스템은 항공기 순항고도(20,000~30,000ft)에서 CAT를 진단·예측하였으나, 이후 CIT와 MWT를 포함하여 3시간 간격으로 36시간 예측할 수 있는 GTG3와 대기하층영역이 추가된 GTG3의 2시간 단기예측자료와 지상 및 항공관측자료를 동화하여 실시간 난류현황을 제공할 수 있는 GTGN(GTG Nowcasing)까지 발전되어 현재 미국 항공난류 예측시스템으로 현업 운영 중에 있다[12]. 한편, 여러 수치모델들을 결합한 확률론적 난류예측시스템도 제안되었다. Storer et al.[13]은 세계 두 곳의 World Area Forecast Centres(WAFCs)인 Met Office의 글로벌 앙상블 예측시스템(MOGRPEs; Met Office and Regional Ensemble Prediction System)과 NOAA(National Oceanic and Atmospheric Administration)의 유럽 중규모 기상예보센터 앙상블 예측시스템(ECMWF-EPS; European Centre for Medium-Range Weather Forecasts-Ensemble Prediction System)에서 각각 T11[9] 지수의 확률론적 예측정보 산출하고 결합하여 앙상블 모델을 이용한 확률론적 난류진단 시스템을 제안하였다.

국내에서도 항공난류 진단 및 예측을 위한 연구들이 활발히 이루어지고 있다. Lee and Kim[14]은 수평해상도 20km의 KAF-MM5(5th generation Mesoscale Model)를 이용하여 상층 난류진단을 위해 개발된 T12[9] 지수를 산출하고, 10,000ft 이하 저고도 영역에 적용하여 조종사 보고자료(PIREP; Pilot Report)와 비교

한 결과, Moderate 강도가 관측된 영역에 대해 최대 88%의 예측 정확도를 보였으며, 저고도 영역에서도 상당한 효용성이 있음을 밝혔다. Kim and Park[15]은 라디오존데(radiosonde) 자료를 이용하여 1990~1999년 사이 10년간 한반도 저고도 영역의 연직윈드시어(VWS; Vertical Wind Shear)를 산출하고, PIREP 자료와 비교한 결과, 강릉지역에서 최대 77.8%의 적중률을 보였으며, VWS가 항공난류진단에 유효한 지수임을 제시하였다. Kim et al.[16]은 Sharman et al.[11]의 GTG 시스템을 바탕으로 기상청 지역예보모델(RDAPS; Regional Data Assimilation and Prediction System) 30km 분석장과 PIREP을 이용하여 다양한 메커니즘의 난류진단지수를 결합한 한국형-KTG 시스템을 제안하였으며, 이후, Kim and Chun[17]은 RDAPS 12km 분석장과 PIREP을 이용하여 한국형 항공난류 예측(KTG; Korean Aviation Turbulence Guidance) 시스템을 개발하였으며, 개별난류진단지수의 조합에 따라 예측성능의 변동성이 존재함을 고찰하였다. 최적의 난류진단지수 조합으로 개발된 한국형-KTG는 상층과 중층에서 각각 80%, 83%의 예측 정확성을 보였으며, 현재 항공기상청에서 현업 운영 중이다. Lee and Chun[18]은 한국의 지역적, 지역적 특성을 고려하기 위해 비교적 고해상도 수치모델인 1.5 km 기상청 현업 국지예보모델(LDAPS; Local Data Assimilation and Prediction System) 자료를 이용하여 한국 기상환경에 초점을 둔 한반도-KTG 시스템을 개발하였으며, RDAPS 12km로 개발된 한국형-KTG 시스템과 난류 예측성을 AUC(Area Under Curve) 지수로 비교한 결과, LDAPS 1.5km의 한반도-KTG가 0.007 더 예측성이 좋은 것으로 나타났다. 이는 수치모델의 수평 및 연직 해상도가 높아지면 모델에서 산출되는 바람, 기온 등의 정확도가 향상되고, 이들로부터 계산되는 난류지수들의 진단성능 향상으로 이어질 수 있음을 나타낸다[17].

또한, 이들 모두 종관 규모의 대기 운동이 가진 에너지가 항공난류 규모(1,000m 이하)로 캐스캐이드 다운(cascade-down) 된다는 난류이론[11, 19, 20]을 근거로 수km-수십km 해상도의 수치예보모델을 이용하여 진행되었지만, 항공난류 규모의 직접적이고 명확한 탐지를 위해서는 1km 이하의 고해상도 수치모델 활용이 요구된다.

이에 본 연구에서는 국내 저고도 항공난류 진단을 위해 2016-2019년 동안 고해상도 규모상세화 수치자

료 산출체계(KMAPP; Korea Meteorological Administration Post Processing)에서 생산되는 고해상도 수치자료를 이용하여 저고도 난류진단지수를 계산하고, 진단 및 평가하였다. 2장에서는 사용된 자료와 분석방법을 설명하고, 3장에서는 계산된 개별난류진단지수의 임계값 설정 및 지수 결합과 항공기 기상관측자료를 이용한 진단 및 평가 결과를 분석하였으며, 4장에서는 결론 및 요약 제시하였다.

II. 자료 및 방법

2.1 고해상도 규모상세화 수치자료 및 항공기 기상관측자료

본 연구에서는 고해상도 저고도 항공난류를 산출하고 진단하기 위하여 국립기상과학원에서 개발한 KMAPP를 사용하였다. KMAPP는 수평해상도 1.5km의 기상청 현업 LDAPS에서 상세지형자료를 반영하여 최근점 내삽, 선형 내삽, 지능형 격자 선택 내삽과정이 적용된 규모상세화 산출체계이다. 100 m의 수평해상도로 우리나라 남한영역(Fig. 1)을 포함한 6,900(N-S) × 6,750(E-W)개 격자로 이루어져 있으며, 연직층은 약 3 km 고도까지 29개 층으로 구성되어, 기온, 기압, 바람성분(u, v) 자료를 산출한다. KMAPP의 분석장은 3시간 간

격의 시간해상도를 가지며, 단기에측장은 일 4회(00, 06, 12, 18 UTC) 48시간 예측정보를 담고 있다. 본 연구에서는 고해상도 수치자료를 이용한 개별난류진단지수의 임계값 설정 및 결합된 난류지수의 탐지성능 평가를 위해 2016년 8월부터 2019년 7월까지 3년간의 KMAPP 분석장을 사용하였다.

국내·외 선행연구들에서는 대부분 PIREP 자료를 이용하여 수치모델에서 계산된 난류지수들의 임계값을 설정하였다. 하지만 최근 조종사 주관적 판단에 의해 작성되는 PIREP 특성상 자료 신뢰성이 떨어지며, 항공기 유형별 독립적인 난류 측정이 어렵다는 의견이 제시되면서 운항 중인 항공기 자체에서 관측되는 현장(situ) 기상관측자료 사용이 제안되고 있다[4, 5, 13, 21]. 이에 본 연구에서는 KMAPP를 통해 산출된 난류지수의 임계값 설정과 평가를 위해 국제 항공기 기상관측자료(AMDAR; Aircraft Meteorological Data Relay)를 사용하였다. AMDAR 자료는 미국 환경예측센터(NCEP; National Centers for Environmental Prediction)의 기상관측데이터 수집 시스템(MADIS; Meteorological Assimilation Data Ingest System)에서 품질관리되어 제공되며, 항공기 위치정보(위도, 경도, 고도), 풍속, 풍향, 기온, 기압, 습도 등과 함께 난류강도를 포함하여 1시간 간격으로 저장되어 있다. 여기서 난류강도는 항공기 기종(크기, 형태 등)에 따라 국제 민간 항공기구(ICAO; International Civil Aviation Organization)에서 제안하는 표준 대기난류계수인 EDR(Eddy Dissipation Rate)로 계산한 뒤, 중간값과 순간 최대값에 따라 Turbulence Index로 변환되어 제공된다[22].

항공난류 강도별 임계값 설정은 Table 1의 EDR 값에 따른 난류강도 분류표[22]에 따라 국제 항공기 기상관측자료의 Turbulence Index를 항공난류강도(aviation turbulence intensity)로 변환하여 사용하였으며, 본 연구에서 항공난류강도는 NIL (null), LGT (light), MOD (moderate), SEV (severe), EXT (extreme)으로 구분하였다.

2.2 난류지수 계산 및 임계값 설정

본 연구에서는 항공기상청에서 현업 운영 중인 KTG에서 사용되는 주요 지수들 중 항공난류예측과 높은 상관성을 보인 VWS와 Ellrod 지수[9]를 선정하였다. 계산에 앞서 5,000ft 이하 저고도 영역에 대한 난류지수 산출을 위하여 지표 바람 성분은 KMAPP 분석장의 최

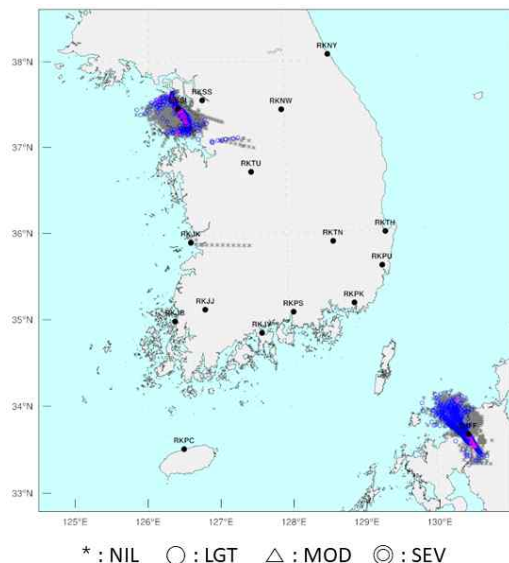


Fig. 1. Horizontal distribution of AMDAR data by turbulence intensity.

Table 1. Turbulence intensity classification according to eddy dissipation rate (EDR) value

Turbulence indicator		Turbulence peak EDR(m ² /3s-1)						
		<0.1	0.1-0.2	0.2-0.3	0.3-0.4	0.4-0.5	0.5-0.8	>0.8
Turbulence mean EDR (m ² /3s-1)	<0.1	0	1	3	6	10	15	21
	0.1-0.2		2	4	7	11	16	22
	0.2-0.3			5	8	12	17	23
	0.3-0.4				9	13	18	24
	0.4-0.5					14	19	25
	0.5-0.8						20	26
	>0.8							27
Turbulence intensity		Nil	Light		Moderate		Severe	

하층(10m) 자료를 이용하였고, 연직으로는 1,000ft(약 304.8m) 간격의 6개(surface-5,000ft) 층으로 내삽하여 사용하였다.

2.2.1 VWS 지수

VWS 지수는 임의의 두 층 사이 갑작스럽게 풍향과 풍속이 변하는 현상을 말하며, 식(1)과 같이 정의된다.

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

여기서 u , v 는 각각 동서 및 남북방향 바람성분이며, z 는 고도를 의미한다. $\frac{\partial u}{\partial z}$ 와 $\frac{\partial v}{\partial z}$ 는 1,000ft 간격 사이 풍향과 풍속의 변화를 의미한다.

2.2.2 Ellrod 지수

상층 전선발생 강도식에 근거하여 요약시킨 Ellrod 지수는 Turbulence Index(TI)라고 명명하고 있으며, 저고도에서 VWS와 유체변형이 강한 지역에서 TI2 지수의 증가를 야기할 수 있다. TI2는 VWS항과 유체의 2차원 속도장(velocity field)을 나타내기 위해 일반적으로 사용되는 유체변형(defomation), 발산(divergence)항으로 이루어져 있으며, 정의는 식(2)와 같다.

$$TI2 = VWS \times (Def - Div) \quad (2)$$

$$D_{sh} = \left(\frac{\partial v}{\partial x}\right) + \left(\frac{\partial u}{\partial y}\right), D_{sl} = \left(\frac{\partial u}{\partial x}\right) - \left(\frac{\partial v}{\partial y}\right) \quad (3)$$

$$Def = (D_{sh}^2 + D_{sl}^2)^{1/2} \quad (4)$$

$$Div = \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} \quad (5)$$

식(2)에서 VWS는 연직윈드시어를 의미하며, Def 와 Div 는 각각 유체변형과 발산항을 나타낸다. 각각의 요소는 식(1), 식(4), 식(5)를 통해 계산된다(x , y 는 동서/남북방향이며, ∂x , ∂y 는 100m).

산출된 개별난류진단지수들은 서로 다른 단위와 범위를 가지고 있기 때문에 통일된 항공난류강도로 맞추어 주기 위한 과정이 필요하다[16]. 각 항공난류강도별 개별난류진단지수들의 임계값을 구하기 위하여 AMDAR 자료에서 관측된 난류강도별 대응하는 개별난류진단지수 값들을 누적하고, 이들의 누적분포(PDF; Probability Density Function)를 산출하였다. 여기서 개별난류진단지수들과 관측된 난류강도별 대응을 위해 KMAP에서 자료가 생산되는 00, 03, 06, 09, 12, 15, 18, 21 UTC를 기준으로, ± 1 시간 30분 이내에 관측된 난류발생지점과 가장 가까운 격자점에서 계산된 개별난류진단지수 값들을 난류강도에 따라 각각 누적인 뒤, 강도별 누적분포평균을 개별난류진단지수의 임계값으로 정의하였다.

2.3 개별 난류진단지수 결합

수치모델에서 계산된 다양한 매커니즘의 난류지수

들은 그들의 수식에 따라 서로 다른 물리적 의미와 수학적 크기를 가지고 있으며, 결합된 지수를 산출하기 위해서는 관측된 난류강도에 맞게 획일화 시키는 과정이 필요하다[17]. 본 연구에서는 항공기상청 현업 KTG 시스템의 지수결합 방법론을 이용하여 KMAPP에서 계산된 개별난류진단지수들을 결합하였다. 먼저, 누적분포를 이용하여 구해진 항공난류강도별 임계값들을 T1(NIL), T2(LGT), T3(MOD), T4(SEV), T5(EXT)로 정의하고, 각각 0, 0.25, 0.5, 0.75, 1에 대응시킨 뒤, 각 구간마다 서로 다른 기울기를 가지는 1차원 함수를 적용하여 개별난류진단지수를 0에서 1사이 값으로 변환한다. 그 다음 변환된 해당 개별난류진단지수의 탐지성능(AUC; Area Under Curve)을 이용하여 식(6)에 따라 가중치를 구한다. 마지막으로 식(7)과 같이 개별난류진단지수 값과 가중치를 곱한 뒤, 그들을 합하여 KMAPP 자료를 이용한 저고도 난류지수(KLT; KMAPP Low-level Turbulence index)가 산출된다. 가중치 산출과정에서 개별난류진단지수의 AUC는 2.4절 난류 탐지성능 평가방법에서 기술하였다.

$$W_n = \frac{AUC_n^2}{\sum_{n=1}^N AUC_n^2} \quad (6)$$

$$KLT = \sum_{n=1}^N W_n D_n^* \quad (7)$$

2.4 난류 탐지성능 평가방법

산출된 개별난류진단지수 및 결합된 난류지수의 객관적인 탐지성능 평가를 위해 ROC(Receiver Operating Characteristic) diagram의 AUC 값을 비교·분석하였다. ROC diagram은 수치예보모델의 성능을 평가하기 위해 사용되는 방법으로 다양한 항공기 상분야에서 적용되어 왔다[4, 16]. 이 방법은 개별난류진단지수가 중간강도 이상(MOG; Moderate Or Great) 관측된 지점에서 난류를 탐지할 확률을 나타내는 POD (Probability of Detection)와 난류가 없음을 의미하는 NIL 강도가 관측된 지점에서 난류를 탐지하지 않을 확률을 나타내는 POFD (Probability of False Detection)을 고려하여 평가한다. 이때 AMDAR 관측 자료와 근접한 격자점에서 계산된 개별난류진단지수들의 최소값부터 최대값 사이를 일정한 간격으로 변화시켜 가며 POD와 POFD를 계산한다. 이렇게 계산된 POD-POFD 쌍들을 x-y 그래프에 표시한 뒤 점들을 연결하면 곡선이 그려지며, 곡선 아래 넓이(AUC)가 각 지수

들의 난류 탐지성능을 나타낸다[18]. POD와 POFD는 Table 2를 참고하여 아래 식(8)과 식(9)를 이용하여 계산할 수 있다.

$$POD = \frac{TP}{TP + FN} \quad (8)$$

$$POFD = \frac{FP}{FP + TN} \quad (9)$$

III. 결 과

3.1 개별난류진단지수 임계값

Table 3은 개별난류진단지수 임계값 설정을 위해 KMAPP에서 자료가 생산되는 00, 03, 06, 09, 12, 15, 18, 21 UTC를 기준으로, ± 1 시간 30분 이내에 관측된 5,000 ft 이하 AMDAR 자료를 난류강도 및 고도별로 분류한 결과이다. 전체 9,495건 중 NIL이 7,779건으로 가장 높은 빈도를 나타내었으며, LGT가 1,689건, MOG가 25건, SEV가 2건 순으로 관측되었다.

Fig. 1은 AMDAR 자료의 항공난류 강도별 수평 공간분포를 나타낸 결과이다. 사용된 국제 AMDAR 자료의 경우 국제선 항공기 자료만 기록되어 있으며, 5,000ft 이하 고도에서는 주로 공항 인근에서 항공기가 이·착륙하는 고도이므로 공항 위치를 함께 표기하였다. 관측된 난류의 위치들이 주로 국제선 비행편이 많은 인천공항(RKSI) 인근과 KMAPP 영역에 포함되는 일본 후쿠오카 공항(RJFF) 인근에 밀집되어 있으며, 군산공항(RKJK) 인근에서도 일부 관측되었다.

본 연구에서는 국내 남한영역 저고도에서 관측된 9,495건의 AMDAR 자료를 이용하여 개별난류진단지수의 강도별 임계값을 산출하였다.

Fig. 2는 난류강도별로 분류된 AMDAR 자료에서 각 난류강도에 대응되는 VWS (Fig. 2a, b)와 TI2 (Fig. 2c, d) 지수값의 누적분포를 나타낸 결과이다. 회

Table 2. Contingency table between observation and KMAPP

Contingency table		Event observed	
		Yes	No
Event model	Yes	TP	FP
	No	FN	TN

Table 3. Number of AMDAR data by turbulence intensity and altitude

Intensity altitude	NIL	LGT	MOD	SEV	Number of data
Surface	550	381	5	0	936
1,000ft	1,190	338	4	0	1,532
2,000ft	1,666	510	6	1	2,183
3,000ft	1,480	193	4	0	1,677
4,000ft	1,426	162	1	1	1,590
5,000ft	1,467	105	5	0	1,577
Total	7,779	1,689	25	2	9,495

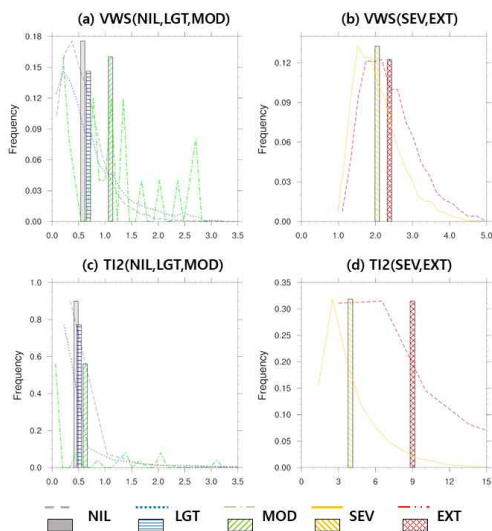


Fig. 2. (a)–(d) PDF of VWS and TI2 for NIL, LGT, MOD, SEV and EXT intensity.

색, 파란색, 녹색, 주황색, 빨간색 점선이 각각 NIL, LGT, MOD, SEV, EXT 강도의 누적분포를 나타낸 것이며, 굵은 세로 실선은 각 난류강도별 누적분포의 평균을 나타낸 것이다. SEV와 EXT강도에 대응하는 누적분포(Fig. 2b, d)는 해당 강도로 관측된 AMDAR 자료 수가 현저히 적기 때문에 개별난류진단지수의 3년간 누적분포에서 상위 98, 99%에 해당하는 값으로 대체하였다. 개별난류진단지수 난류강도별 누적분포의 평균된 지수값은 Table 4에 나타내었다.

난류강도가 강해짐에 따라 임계값들이 순차적으로 증가하는 것으로 볼 때, 산출된 개별난류진단지수가 3년간 AMDAR 자료에서 관측된 난류들을 난류강도에 따라 적절히 구분된 것으로 간주되며, 산출된 개별난류

진단지수의 임계값은 난류탐지성능 평가에서 활용된다.

Fig. 3은 KMAPP 자료에서 산출된 VWS (Fig. 3a)와 TI2 (Fig. 3b)지수의 고도별 3년간 평균분포에 개별난류진단지수별 임계값을 적용한 그림이다. 두 지수 모두 한반도 남한영역 지표층(지상~1,000ft)에서 MOD 이상의 난류가 가장 넓게 분포하고 있다. 특히, 태백산맥과 소백산맥 및 제주도 한라산 인근을 따라 SEV 이상의 강한 난류가 분포하고 있으며, 고도가 높아짐에 따라 난류강도는 점점 약해지나 산맥을 따라 난류가 모의되는 경향이 이어지는 것으로 나타났다. 한반도 지역은 대부분이 산악지역이기 때문에 하층 바람 유입에 따른 다양한 유형의 난류 발생 역시 높음을 알 수 있었다. 또한, 고해상도 수치자료를 이용함으로써 난류 발생지역이 상세하고 국지적으로 나타나는 특징을 확인할 수 있었다.

3.2 난류진단지수 결합 및 탐지성능 평가

난류진단지수의 객관적인 탐지성능 평가를 위해 2016년 8월부터 2019년 7월까지의 KMAPP 자료를 통해 산출된 개별난류진단지수 값들과 같은 기간 국제 AMDAR 자료를 이용하여 ROC diagram의 AUC 값을 산출 및 평가하였다. 이때 사용된 자료 분포와 방법론은 2장 자료 및 방법에 기술하였다. Fig. 4는 개별난류진단지수와 지수별 가중치로 활용하여 결합된 난류진단지수 KLT의 MOG 강도에 대한 ROC diagram을 나타낸 결과이다. 파란색 점선은 VWS, 빨간색 점선은 TI2, 회색 실선은 KLT의 ROC 곡선을 의미하며, ROC diagram의 좌측 하단에 지수별 AUC 값을 함께 표시하였다. VWS의 AUC 값은 0.71이며, TI2는 0.6으로 나타났다. 이는 동일한 기간동안 난류관측자료를

Table 4. Threshold by turbulence intensity of individual turbulence index

Index	NIL	LGT	MOD	SEV	EXT
(a)VWS	0.5776×10^{-2}	0.6840×10^{-2}	1.1032×10^{-2}	2.0466×10^{-2}	2.3771×10^{-2}
(b)TI-2	4.5110×10^{-6}	5.1060×10^{-6}	6.2304×10^{-6}	3.9679×10^{-5}	8.9971×10^{-5}

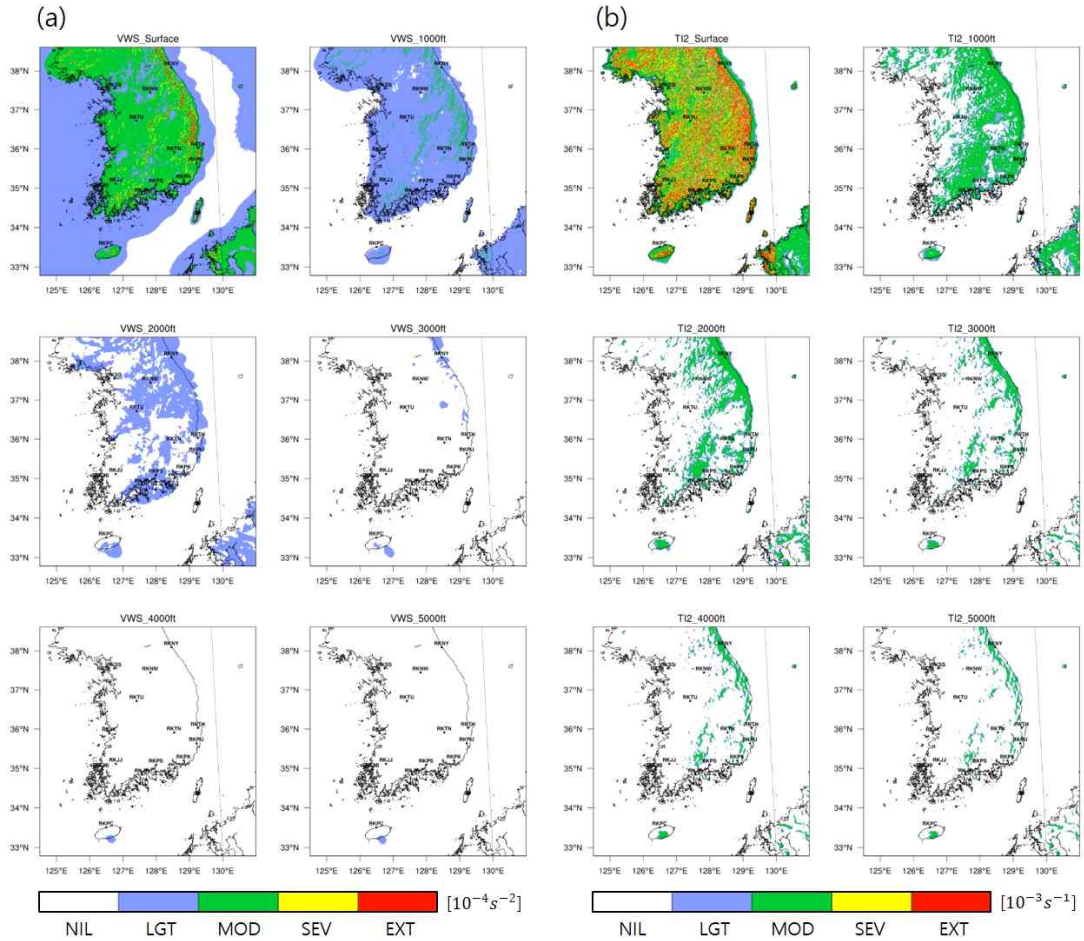


Fig. 3. (a)–(b) Horizontal distribution of 3 years(Aug 2016–Jul 2019) mean by altitude of individual turbulence index with threshold applied. The (a) is VWS and (b) is TI2

사용하였을 때, VWS의 탐지성능이 더 좋음을 의미한다. 국내에서는 저고도 영역에 대한 난류진단시스템이 개발되지 않았기 때문에 정확한 비교 대상은 없지만, 30 km RDAPS로 개발된 한국형-KTG(상층 영역) 시스템에서 AUC가 높은 상위 10개 지수들이 0.605–0.722인 것으로 볼 때[16], VWS와 TI2는 상층영역의 현업모델과 비슷한 탐지성능이 있는 것으로 보인다.

또한, KLT의 AUC 값은 VWS와 TI2 지수보다 각각

0.02, 0.13이 더 높은 0.73으로 나타났으며, 이는 개별진단지수보다 결합했을 경우 탐지성능이 향상됨을 의미한다. KLT의 경우, GTG 단계예측자료와 관측자료 및 위성기반 난류탐지 알고리즘 등이 동화된 GTGN의 하층영역 AUC가 0.7–0.75인 것으로 볼 때 [12], GTGN 하층영역의 탐지성능과 비슷한 성능으로 보인다.

하지만 항공산업 실무자들에게 실효성 있는 난류정

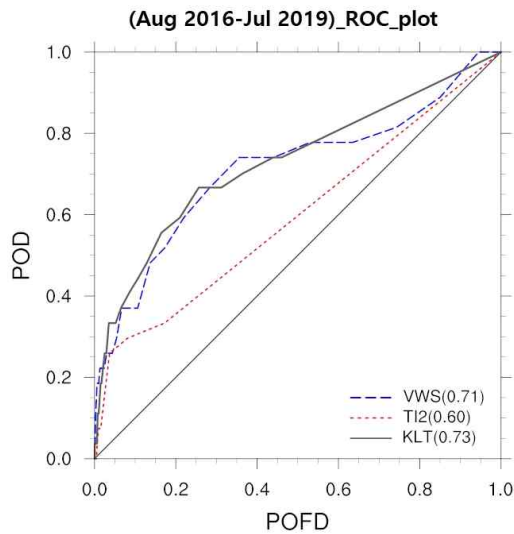


Fig. 4. The ROC diagram on MOD intensity of VWS(blue dashed line), TI2(red dashed line) and KLT index(gray solid line) Evaluated using AMDAR during Aug. 2016-Jul. 2019. The AUC value is indicated in the bottom left corner.

보가 되기 위해서는 AUC 값이 0.8 이상을 보여야 한다[17]. 본 연구에서 3년간 국제 AMDAR 관측자료를 이용하여 산출한 AUC 평가에서는 평가기간 내 개별난류진단지수와 KLT지수 모두 0.8에는 미치지 못한 결과를 나타내었으며 이는 사용된 역학적 난류진단지수들이 평가영역 내 관측된 다양한 난류발생 요인들을 모두 탐지할 수 없는 한계점으로 보인다. 또한, Kim et al.[16]은 관측자료를 연도별, 계절별로 분류하여 산출한 임계값에 따라 탐지성능의 변동성이 나타나며, 실용적인 난류진단 시스템을 위해서는 관측자료에 최적화된 분류 구성요소를 찾아야 함을 제시하였다. 본 연구에서도 관측자료의 분류를 통해 최적의 임계값 구성요소를 찾아야 하지만, 사용된 국제 AMDAR 자료를 연도별, 계절별로 분류하였을 때, MOD 이상 관측자료가 10개 미만으로 분류되기 때문에 기존의 산출된 임계값을 그대로 적용하고, 평가기준이 되는 AMDAR 자료를 연도별, 계절별, 고도별로 나누어 살펴보았다.

Table 5는 국제 AMDAR 자료를 연도별(Year), 계절별(Season), 고도별(Altitude)로 나누어 진단했을 때, 개별난류진단지수와 KLT 지수의 AUC 값을 나타낸 표이다. 먼저 연도별로 나누었을 때, KLT 지수의 진단성능은 2017년 8월부터 2018년 7월까지(17-18)의 관측자료를 사용했을 경우, AUC가 0.74로 가장 좋은 성능이 나타났으며, 2016년 8월부터 2017년 7월

Table 5. The AUC value KLT index evaluated by year, season and altitude of AMDAR data

3-year AMDAR threshold value		KLT
		(MOG)
3-year		0.73
Year	16-17	0.69
	17-18	0.74
	18-19	0.73
Season	MAM	0.68
	JJA	0.66
	SON	0.78
	DJF	0.94
Altitude	Surface	0.94
	1,000ft	0.71
	2,000ft	0.62
	3,000ft	0.88
	4,000ft	0.45
	5,000ft	0.69

까지(16-17)의 관측자료를 사용했을 경우 0.69로 가장 낮은 성능이 나타났다. 이들의 차이는 0.05으로 비교적 근소하였다. 계절별로 살펴봤을 때, 겨울철(DJF) 자료를 사용했을 경우 0.94로 상당히 높은 성능이 나타났으며, 여름철(JJA) 자료를 사용했을 경우 0.66으로 가장 낮은 성능이 나타났다. 계절별로 분류된 관측자료를 사용하였을 경우 0.28의 변동성이 나타났으며, 이는 대류활동으로 인한 난류 발생사례가 많은 여름철의 탐지성능이 다른 계절에 비해 떨어지는 것으로 보인다 [14]. 마지막으로 고도별로 분류된 관측자료를 사용하였을 경우 지표층(surface)에서 0.94로 가장 높은 성능이 나타났으며, 4,000ft 층에서 0.45로 가장 낮은 성능이 나타났다. 고도별 분류에서는 지표층과 4,000ft 층 사이 0.49로 가장 큰 변동성을 보였다. 겨울철 진단 성능과 마찬가지로 고도별 진단에서는 지표층이 0.8 이상의 실용성 있는 성능을 보였다. 이는 상세지형자료가 반영된 고해상도 수치모델의 효과가 지표층에서 가장 두드러지는 것으로 보인다.

결과적으로, 2016년 8월부터 2019년 7월까지의 국제 AMDAR 관측자료를 사용하였을 때, KLT의 AUC는 0.73으로 나타났으며, 이는 신뢰성 높은 난류탐지

성능이라고 보기 어려운 것으로 판단된다. 이에 대한 원인을 살펴보고자 관측자료를 연도별, 계절별, 고도별로 세분화하여 평가하였을 때, 0.06-0.49의 변동성이 존재함을 확인하였고 진단성능이 낮은 여름철과 4,000ft 층은 대류활동으로 인한 다양한 난류 발생원인과 고도 내삽 과정으로 인한 오차인 것으로 판단된다. 반대로 진단성능이 가장 좋게 나타난 겨울철과 지표층은 모두 0.94의 AUC가 나타남에 따라 실용성 있는 성능으로 사료된다.

IV. 요약 및 결론

본 연구에서는 국내 저고도 항공난류 진단을 위해 2016년 8월부터 2019년 7월까지 3년간 KMAPP에서 생산되는 고해상도 수치자료를 이용하여 저고도 난류 진단지수들을 계산하고, 국제 AMDAR 자료를 통해 진단 및 평가하였다.

먼저 KMAPP에서 자료가 생산되는 00, 03, 06, 09, 12, 15, 18, 21 UTC를 기준으로, ± 1 시간 30분 이내에 관측된 5,000ft 이하 국제 AMDAR 관측자료를 난류강도별로 분류한 뒤, 난류강도에 대응되는 VWS와 TI2 지수의 임계값과 그들의 탐지성능을 나타내는 AUC를 계산하였다. 그 결과, VWS와 TI2의 AUC 값은 각각 0.71, 0.6으로 나타났으며, 한국형-KTG(상층 영역) 시스템의 지수들의 AUC 값이 0.605-0.722인 것으로 볼 때, 저고도 영역에서도 상당한 탐지성능이 있는 것으로 보인다. 산출된 개별난류진단지수의 평균 분포를 살펴보면 태백산맥과 소백산맥 및 제주도 한라산 인근 등 국내 주요산맥을 따라 SEV 이상의 강한 난류가 모의되는 경향이 나타났다. 한반도 지역은 대부분이 산악지역으로 이루어져 있어 하층 바람 유입에 따른 다양한 유형의 난류가 발생하는 지역임을 알 수 있다. 또한, 고해상도 수치자료를 이용한 결과, 상세하고 국지적인 난류 분포를 잘 나타내고 있음을 확인하였다.

이후, 개별난류진단지수 AUC 값을 가중치로 활용하여 결합된 난류진단지수 KLT를 산출하고 탐지성능을 평가한 결과, KLT의 AUC 값은 VWS와 TI2 지수보다 각각 0.02, 0.13이 더 높은 0.73으로 나타났으며, 지수를 결합했을 경우 탐지성능이 향상됨을 확인하였다. 하지만 본 연구에서 3년간 국제 AMDAR 관측자료를 이용하여 산출한 AUC는 개별난류진단지수와 KLT 지수 모두 항공산업 실무자들에게 실효성있는 난류정보가 되기 위한 0.8 수준에는 미치지 못했으며, 이

는 사용된 역학적 난류진단지수들이 평가영역 내 관측된 다양한 난류 발생요인들을 모두 탐지할 수 없는 한계점으로 보인다. 이에 실용적인 난류진단을 위해서 AMDAR 자료를 연도별, 계절별, 고도별로 나누어 살펴본 결과, 분류별 0.06-0.49 AUC의 변동성이 존재함을 확인하였고 상대적으로 난류진단 성능이 떨어지는 여름철과 4,000 ft 층은 대류활동으로 인한 다양한 난류 발생원인과 고도내삽으로 인한 오차인 것으로 보인다. 반대로 진단성능이 가장 좋게 나타난 겨울철과 지표층은 모두 0.94의 AUC가 나타남에 따라 실용성이 있음을 보였다. 이는 활용된 난류진단지수들이 대류활동이 적은 겨울철 탐지성능이 높음을 나타내며, 상세 지형자료가 반영된 고해상도 수치모델의 효과가 지표층에서 가장 두드러지는 것으로 보인다. 한편, 본 연구의 관측자료로 사용된 국제 AMDAR 자료는 남한영역에서 분포가 다양하지 못한 한계점이 있음에도 불구하고 국내 저고도 영역에서 발생하는 항공난류의 진단 가능성이 있음을 확인할 수 있었다. 차후 다양한 분포의 AMDAR 자료와 본 연구에서 수가 현저히 적어서 사용하지 못한 PIREP 및 AIREP(Aircraft Report) 자료가 축적되어 검증에 활용된다면, 고해상도 저고도 항공난류 예측시스템까지도 구축이 가능할 것으로 보인다.

본 연구는 공항·공역 인근 저고도 영역의 항공난류 예보를 위한 기초연구로써, KMAPP 분석장을 이용하여 남한영역 저고도 항공난류진단을 수행하였다. 향후, 다양한 메커니즘의 난류진단지수를 추가한 예측정보 생산 및 검증이 수행된다면, 저고도 영역에서의 안전항행에 기여할 수 있을 것으로 사료된다.

후 기

이 연구는 기상청 국립기상과학원 ('20)항공·도시 기상 기술 개발 (KMA2018-00621)의 지원으로 수행되었습니다.

References

1. Lester, P. F., "Turbulence: A new perspective for pilots". Jeppesen Sanderson, 1994, pp. 212.
2. Kim, Y.-C., "A verification of threshold of the aircraft turbulence index and icing index using PIREPs and KWRF on Korean

- peninsula", *Journal of the Korean Society for Aviation and Aeronautics*, 19(3), 2011, pp. 54-60.
3. Lee, D.-B., and H.-Y. Chun, "A numerical study of aviation turbulence encountered on 13 February 2013 over the yellow sea between China and the Korean peninsula", *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 57(4), 2018, pp. 1043-1060.
 4. Sharman, R and Pearson, J. M., "Prediction of energy dissipation rates for aviation turbulence. part I: Forecasting nonconvective turbulence.", *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 56(2), 2017, pp. 317-337.
 5. Lee, D.-B., and Chun, H.-Y., "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)", *Journal of Korean Meteorological Society Atmosphere*, 28(2), 2018, pp. 223-232.
 6. ICAO, "Manual on Low-Level Wind Shear First Edition, International Civil Aviation Organization", 2005.
 7. Colson, D., "Analysis of clear-air turbulence data for March 1962", *Monthly Weather Review*, 91, 1963, pp. 73-82.
 8. Dutton, M. J. O., "Probability forecasts of clear-air turbulence based on numerical output", *Meteorol. Mag.*, 109, 1980, pp. 293-310.
 9. Ellrod, G., and Knapp, D., "An objective clear-air turbulence forecasting technique: Verification and operational use", *Weather and Forecasting*, 7, 1992, pp. 150-165.
 10. Kaplan, M. L., Charney, J. J., Waight K. T., Lux, K. M., Cetola, J. D., Huffman, A. W., Riordan, A. J., Slusser, S. D., Kiefer, M. T., Suffern, P. S., and Lin, Y. L. "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", *Meteorology and Atmospheric Physics*, 94, 2006, pp. 235-270.
 11. Sharman, R. D., Tebaldi, C., Wiener, G. and Wolff, J., "An integrated approach to mid- and upper-level turbulence forecasting", *Weather and Forecasting*, 21, 2006, pp. 268-287.
 12. Pearson, J. M., and Sharman, R., "Prediction of energy dissipation rates for aviation turbulence. part II: Nowcasting convective and nonconvective turbulence", *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 56(2), 2017, pp. 339-351.
 13. Storer, L. N., Gill, P. G., and Williams, P. D., "Multi-diagnostic multi-model ensemble forecasts of aviation turbulence", *Meteorological Applications*, 26, 2020, pp. 416-428.
 14. Lee, S.-J., and Kim, Y.-C., "A numerical forecast and verification of the aircraft turbulence observed over South Korea", *Journal of Korean Meteorological Society*, 38(5), 2002, pp. 493-507.
 15. Kim, Y.-C., and Park, S.-H., "The analysis of the characteristics of aircraft turbulence using radiosonde data", *Journal of the Korean Society for Aviation and Aeronautics*, 15(4), 2007, pp. 94-99.
 16. Kim, J.-H., Chun, H.-Y., Jang, W., and Sharman, R. "A study of forecast system for clear-air turbulence in Korea, partII: Graphical turbulence guidance (GTG) system", *Journal of Korean Meteorological Society Atmosphere*, 19(3), 2009, pp. 269-287.
 17. Kim, J.-H., and Chun, H.-Y., "Development of the Korean aviation turbulence guidance (KTG) system using the operational unified model (UM) of the Korean Meteorological Administration (KMA) and pilot reports (PIREPs)", *Journal of the Korean Society for*

- Aviation and Aeronautics, 20, 2012, pp. 76-83.
18. Lee, D.-B., and Chun, H.-Y., "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)", *Journal of Korean Meteorological Society Atmosphere*, 25, 2015, pp. 367-374.
 19. Dutton, J., and Panofsky, H. A. "Clear air turbulence: A mystery may be unfolding", *Science*, 167, 1970, pp. 937-744.
 20. Tung, K. K., and Orlando, W. W. "The $k-3$ and $K-5/3$ energy spectrum of atmospheric turbulence: Quasi geostrophic two-level model simulation", *Journal of the Atmospheric Sciences*, 60, 2003, pp. 824-835.
 21. Kim, S.-H., and Chun, H.-Y., "Comparison of turbulence indicators obtained from in situ flight data", *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 56(6), 2017, pp. 1609-1623.
 22. WMO, "Aircraft Meteorological Data Relay (AMDAR) Reference Manual", WMO: Geneva, Switzerland, 2003.