

## Original Article

<https://doi.org/10.12985/ksaa.2023.31.3.050>  
ISSN 1225-9705(print) ISSN 2466-1791(online)

## 제주국제공항 저층급변풍 발생 특성 및 예측 성능

김근희\*, 최희욱\*\*, 석재혁\*\*\*, 이상삼\*\*\*\*, 이용희\*\*\*\*\*

## Low Level Wind Shear Characteristics and Predictability at the Jeju International Airport

Geun-Hoi Kim\*, Hee-Wook Choi\*\*, Jae-Hyeok Seok\*\*\*, Sang-Sam Lee\*\*\*\*, Yong Hee Lee\*\*\*\*\*

## ABSTRACT

Sudden wind changes at low altitudes pose a significant threat to aircraft operations. In particular, airports located in regions with complex terrain are susceptible to frequent abrupt wind variations, affecting aircraft takeoff and landing. To mitigate these risks, Low Level Wind shear Alert System (LLWAS) have been implemented at airports. This study focuses on understanding the characteristics of wind shear and developing a prediction model for Jeju International Airport, which experiences frequent wind shear due to the influence of Halla Mountain and its surrounding terrain. Using two years of LLWAS data, the study examines the occurrence patterns of wind shear at Jeju International Airport. Additionally, high-resolution numerical model is utilized to produce forecasted information on wind shear. Furthermore, a comparison is made between the predicted wind shear and LLWAS observation data to assess the prediction performance. The results demonstrate that the prediction model shows high accuracy in predicting wind shear caused by southerly winds.

**Key Words** : Terrain(지형), Low Level Wind Shear Alert System(저층급변풍경고장비), Wind Shear(급변풍), Jeju International Airport(제주국제공항), High-Resolution Numerical Model(고해상도수치모델)

## 1. 서 론

항공기 운항에 가장 큰 위협으로 작용하는 요소 중 하나는 짧은 거리나 시간 동안 급격하게 변화하는 바람이다. 항공기상에서는 지상 1,600ft 미만의 고도에서 발생하는 15knot 이상의 급격한 바람 변화를 저층급변풍

으로 정의하고 있다(ICAO, 2007). 이러한 저층급변풍은 항공기의 비행 안정성과 조종에 영향을 미칠 수 있으며, 이륙 또는 착륙 중인 항공기에 특히 위험할 수 있다.

급변풍으로 인한 사고와 인명 피해를 줄이기 위해 급변풍에 대한 이해와 대응을 위해 많은 연구가 수행되었다. Hon and Chan(2014)은 열대저기압으로 인해 발생한 급변풍을 대상으로 원격관측장비와 지상관측자료로 에디 소산율을 구하고, 이를 AMDAR(Aircraft Meteorological Data Relay)와 비교하여 저층난류강도를 산출하였다. Tse et al.(2014)은 태풍 기간 중 발생한 급변풍에 대해 TDWR(Terminal Doppler Weather Radar)의 급변풍 탐지성능에 대해 분석하고 평가하였다. Chan and Hon(2016)은 TDWR, LIDAR (Light Detection And Ranging)와 200m 해상도의 모델을 이용하여 개발

Received: 10. Jul. 2023, Revised: 19. Jul. 2023,

Accepted: 25. Jul. 2023

\* 국립기상과학원 기상응용연구부 연구원

연락처 E-mail : gnenara@korea.kr

연락처 주소 : 제주특별자치도 서귀포시 서호북로 33

\*\* 국립기상과학원 기상응용연구부 연구사

\*\*\* 국립기상과학원 기상응용연구부 연구원

\*\*\*\* 국립기상과학원 기상응용연구부 연구관

\*\*\*\*\* 국립기상과학원 기상응용연구부 부장

된 급변풍 예측시스템이 홍콩국제공항에서 발생한 마이크로버스트(microburst)를 성공적으로 모의하였다고 설명하였다. Li et al.(2020)은 란저우 중완국제공항의 강수를 동반하지 않은 급변풍 사례에 대해 분석하였다. 또한 LIDAR를 활용한 급변풍 탐지알고리즘을 개발하고 기존 시스템 대비 향상된 결과를 보인다고 하였다. Chan et al.(2021)은 홍콩국제공항에서 발생한 심각한 급변풍 사례에 대해 40m 해상도의 LES(Large Eddy Simulation)를 통해 분석하였다. LIDAR, 지상관측자료와 비교한 결과 LES는 지형에 의해 발생한 작은 에디를 잘 모의하여 만족스러운 결과를 보였다고 하였다. 또한 상당히 큰 영역에 LES의 급변풍 경보에 대한 응용을 확인한 연구라고 하였다. Lin et al.(2021)은 PIREP(Pilot Report)과 ATCTREP(Air Traffic Controller Report)를 이용하여 중국 115개 공항에 대한 급변풍의 발생 특성을 분석하였다. Hon and Chan(2022)은 2001년부터 2019년까지의 장기간 PIREP 자료를 이용하여 홍콩국제공항에서 발생한 급변풍의 특성을 시·공간적으로 분석하였다. Chen et al.(2022)는 WRF(Weather Research and Forecasting)와 LES를 결합한 모델로 급변풍 사례를 모의한 후 지상관측자료 및 LIDAR와 비교하였다. 착륙경로에 따른 정풍(headwind)을 분석한 결과 지형에 의한 시·공간적인 변화를 잘 모의하였다고 설명하였다.

국내에서도 급변풍 발생 및 이해에 대한 다수의 연구가 있었다. 특히 제주국제공항은 기상학적 요인뿐만 아니라 지형적 요인으로 인해 다른 국내 공항보다 급변풍이 많이 발생한다(Table 1). Hong(2006)은 제주국제공항에 발생하는 급변풍의 발생 특성을 파악하기 위해 2002~2005년의 저층급변풍경고장비(LLWAS, Low Level Wind shear Alert System) 자료를 이용하였다. 계절별 급변풍 발생 메커니즘에 대해 분석한 결과 풍속차에 의한 급변풍과 풍향·풍속의 변화에 의한 급변풍으로 나눌 수 있다고 하였다. Koo et al.(2008)은 제주국제공항 급변풍 발생을 기압배치별로 분류하여 급변풍 경보 발표에 활용할 수 있는 예보가이드를 제시하였다. 북서풍 및 태풍은 현재 급변풍 피해 사례가 드물지만 남풍류로 인한 수렴 및 주풍으로 인하여 나타나는

급변풍의 경우는 예측이 매우 어렵고 발생빈도도 매우 높다고 설명하였다. Min et al.(2020)은 제주국제공항을 대상으로 고해상도 수치자료를 사용하여 저층연직급변풍 예측시스템을 구축하였다. AMDAR와 비교한 결과 연직보다 항공기 착륙경로를 따라 급변풍을 계산하는 것이 예측 성능이 높다고 하였다. Cho and Baik(2021)은 제주국제공항의 복행(go-around) 사례를 토대로 강한 남서풍에 의한 급변풍과 남풍에 의한 급변풍을 분석하였다. 지상일기도, 850hPa 바람장 및 지상풍 모델 등을 활용하여 급변풍 발생 유형을 예측할 수 있다고 하였다.

제주국제공항은 한라산과 주변 지형의 영향으로 인해 급변풍이 자주 발생하는 곳으로 알려져 있다. 이를 대비하기 위해 제주국제공항은 저층급변풍 경고장비(LLWAS)를 설치하여 운영하고 있다. 그러나 LLWAS는 실시간으로 급변풍을 탐지할 수는 있어도 급변풍 경고를 미리 예측할 수 없는 한계가 있다. 이에 국립기상과학원은 급변풍 예측을 목적으로 LLWAS 탐지알고리즘을 분석하고 고해상도 수치모델을 이용하여 저층급변풍 예측체계를 구축하였다(Kim et al., 2021).

본 연구에서는 앞서 개발된 저층급변풍 예측체계의 예측성능과 활용가능성을 평가하고자 한다. 2020년부터 2021년까지 LLWAS 관측자료를 이용하여 월, 시간, 위치, 강도 등에 대해 분석하고 그 특성을 살펴보았다. 그리고 LLWAS와 저층급변풍 예측체계를 비교하여 일별 예측성능을 평가하고 사례 분석을 통해 제주국제공항 급변풍 예측에 대한 특징과 한계점을 설명하고자 한다.

## II. 자 료

### 2.1 저층급변풍경고장비(LLWAS)

LLWAS는 활주로와 활주로 인접지역의 저층에서 발생하는 급변풍 및 마이크로버스트를 탐지하여 항공기에 공항 주변 지역과 이·착륙 지역에서 발생하는 돌풍 현상을 경고하기 위한 시스템이다. 제주국제공항의 LLWAS는 총 11개 지점으로 구성되어 있다. 급변풍 경고 자료는 매 10초마다 수집된 바람 자료를 분석하여 급변풍이 발생하였을 때 관측시간, 활주로 위치, 경고 종류, 강도, 발생 위치, 활주로 말단의 풍향·풍속의 정보를 저장한다. 제주국제공항의 활주로는 RWY07, RWY25, RWY13, RWY31으로 총 4개이고, 07A/25D, 25A/07D, 13A/31D, 31A/13D는 도착(Arrival)과 출발(Departure)에 대해 구분한 것으로 실재는 같은 활주로를 의미한다(Fig. 1). 여기서 '07A'는 70° 방향으로 착륙시 사용

Table 1. Wind shear warning at major airports

	2020	2021	2022	Total
Incheon	157	183	148	488
Jeju	250	301	250	801
Gimpo	43	77	79	199



Fig. 1. Location of 11 LLWAS sensors and runway corridors at Jeju International Airport

하는 도착(A) 활주로, '25D'는 250° 방향으로 이륙시 사용하는 출발(D) 활주로를 의미한다. 경고 종류는 WSA(급변풍)와 MBT(마이크로버스트)로 표기되며, 강도는 정풍(+)과 배풍(-)의 값을 knot로 표기한다. 발생 위치는 각 활주로의 급변풍 발생 구역으로 RWY, 1MD, 2MD, 3MD, 1MF, 2MF, 3MF로 표기된다. 1MD에서 1M은 활주로부터의 거리를, D는 출발(Departure)을 의미한다. 여기서 M은 해리(1해리는 약 1,852m)를 뜻하며 최대 3해리까지 표기할 수 있다. 1MF에서 F는 최종접근(Final approach)을 의미한다.

## 2.2 저층급변풍 예측체계

저층급변풍 예측체계는 고해상도 수치모델 예측자료를 이용하여 급변풍을 예측하기 위해 개발되었다. 사용된 모델은 국립기상과학원에서 구축한 고해상도 규모상세화 수치자료 산출체계(KMAP, Korea Meteorological Administration Post-processing)로 영국기상청에서 개발한 후처리 소프트웨어인 규모상세화 패키지(UKPP, United Kingdom Post Processing)에 그 기반을 두고 있다(Min et al., 2020; Seok et al., 2020). 시간 해상도는 1시간, 공간해상도는 100m이다. 입력자료로 제주국제공항 LLWAS 지점에 해당하는 격자의 지상바람자료(u, v)를 추출하였다. 급변풍은 지정된 2지점 사

이에서 활주로 방향에 평행하는 바람 성분인 정풍(headwind)의 변화로 계산된다. 4개의 활주로별로 RWY25는 13개, RWY07은 17개, RWY13은 3개, RWY31은 11개의 쌍이 있다. 각 활주로별로 최댓값과 최솟값을 구해서 그 값이 급변풍 경고 기준인  $\pm 15\text{knot}$ 를 넘으면 경고 구역으로 정의하며, 이 구역은 항공기가 강력한 급변풍을 최초 조우하는 지점을 의미한다. 급변풍 예측자료는 00, 06, 12, 18 UTC(Universal Time Coordinated)에 일 4회 생산되고 48시간까지 예측된다. 예측영역은 제주국제공항 활주로 및 주변 8개 영역이고 예측요소는 급변풍 발생구역 및 강도이다.

## III. 결 과

### 3.1 급변풍 발생 통계

Fig. 2는 2020년부터 2021년까지 LLWAS에서 관측된 급변풍 경고횟수의 월별 변동이다. 2020년은 171,654회이고 2021년은 154,754회로 2020년부터 2021년까지 급변풍 경고횟수는 총 326,408회이다. 급변풍 경고는 7월(49,310회; 15.1%), 6월(38,592회; 11.8%), 8월(35,321회; 10.8%), 4월(32,236회; 9.9%), 5월(30,094회; 9.2%)순으로 가장 많았으며 10월(1,240회; 0.4%)에 가장 적었다. 연도별 차이는 있지만 태풍

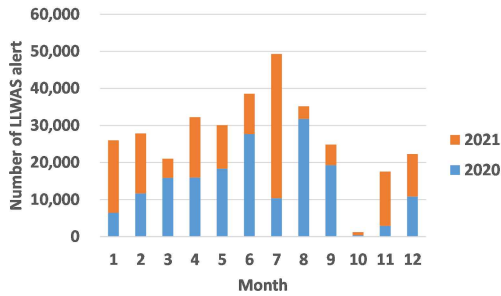


Fig. 2. Monthly variation of wind shear alert between 2020 and 2021

이 자주 발생하고 북태평양고기압 가장자리에서 남풍류의 영향을 받는 여름과 저기압이 주기적으로 통과하는 봄에 급변풍이 많이 발생하였다.

Fig. 3은 활주로별 급변풍 경고횟수에 대한 그래프이다. 제주국제공항은 크게 주활주로 (RWY07, RWY25)와 보조활주로(RWY13, RWY31)로 나눌 수 있다. 급변풍은 07A/25D(135,650회; 41.6%), 25A/07D(105,930회; 33.4%)에서 자주 발생하였고, 13A/31D(14,328회; 4.4%) 활주로에서 빈도가 가장 낮았다.

Fig. 4는 급변풍 경고횟수의 시간별 분포이다. 급변풍 경고가 많은 시간대는 13 KST(Korea Standard Time)부터 16 KST 사이에 100,620회로 전체 경고횟수 중 31%를 차지한다. 야간으로 갈수록 경고횟수는 점차 감소하다가 04 KST에 가장 낮아졌다. 주간

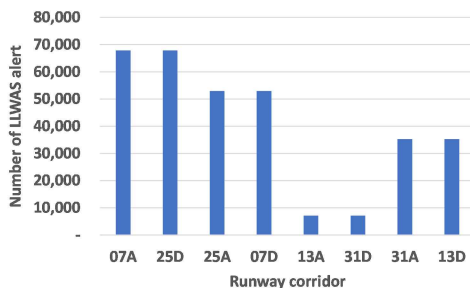


Fig. 3. Number of LLWAS alert by runway corridor

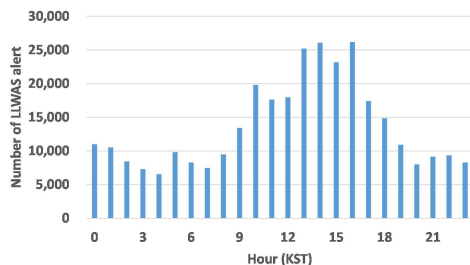


Fig. 4. Number of LLWAS alert by hour of day in KST

(09~18 KST)에 총 201,736회로 전체 중 61%로 야간보다 주간에 급변풍 발생빈도가 높음을 알 수 있다.

급변풍 강도에 따른 급변풍 경고횟수를 보면, +20knot (128,236회; 39.3%)가 가장 높았고(Fig. 5), 정풍(265,944회; 81.5%)이 배풍(60,416회; 18.5%)보다 높게 나타났다.

### 3.2 급변풍 예측 성능

급변풍 예측성능평가를 위해 2020년부터 2021년까지 2년간 급변풍 예측 결과와 제주국제공항 LLWAS의 경고자료를 비교하였다. 급변풍 예측자료는 00 UTC에 생산된 00~23 예측시간 자료를 사용하였다. 매 10초마다 생산되는 LLWAS 급변풍 경고자료는 예측자료와 같이 1시간 간격으로 일치시키기 위해 총 360회(1시간) 중 60회(10분) 이상 발생하였을 때 해당 시간에 경고가 발생한 것으로 하였다. 평가는 급변풍 발생일에 급변풍 경고를 예측하였으면 적중한 것으로 하고 식 (1)~(3)과 Table 2를 이용하여 탐지예측률(POD, Probability Of Detection), 오경보율(FAR, False Alarm Ratio), 임계 성공지수(CSI, Critical Success Index)를 산출하였다.

$$POD = \frac{A}{A + C} \quad (1)$$

$$FAR = \frac{B}{A + B} \quad (2)$$

$$CSI = \frac{A}{A + B + C} \quad (3)$$

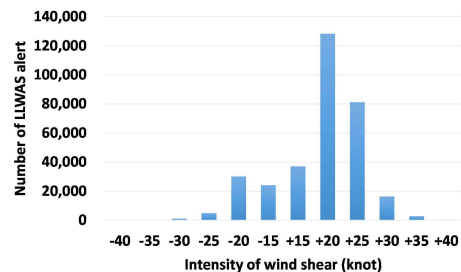


Fig. 5. Distribution of the intensity of wind shear alert

Table 2. The 2×2 contingency table

		Event observed	
		Yes	No
Event forecast	Yes	A (hits)	B (false alarms)
	No	C (misses)	D (correct negatives)

2020년부터 2021년까지 2년간 탐지예측률(POD), 오경보율(FAR), 임계성공지수(CSI)를 산출한 결과 각각 0.35, 0.27, 0.31로 나타났다(Table 3). 계절별로 분석한 결과 POD는 봄과 여름이 각각 0.50, 0.49로 높았고 겨울은 0.06으로 상대적으로 겨울의 예측성능이 매우 낮았다. Table 4는 계절별로 적중(Hit), 오경보(False), 놓침(Miss) 횟수를 나타낸 것이다. 급변풍 발생빈도는 여름(55회), 봄(38회), 겨울(33회), 가을(24회)의 순으로 높게 나타났다. 봄과 여름에는 각각 19회, 27회를 적중했지만, 가을에는 5회, 겨울에는 2회 밖에 적중하지 못하였다. 제주국제공항은 봄과 여름에는 이동성 고기압과 북태평양 기단의 영향을 받아 남풍류에 의한 급변풍이 주로 발생하고 가을과 겨울에는 시베리아 기단으로 인해 북서풍에 의한 급변풍이 주로 발생한다. 남풍류에 의한 급변풍은 비교적 잘 예측하였지만 북서풍 계열에 의한 급변풍은 예측하지 못하여 계절별로 예측성능의 차이를 보였다.

Table 3. The probability of detection (POD), false alarm ratio (FAR) and critical success index (CSI) for four seasons

	Spring	Summer	Autumn	Winter	Total
POD	0.50	0.49	0.21	0.06	0.35
FAR	0.17	0.27	0.38	0.60	0.27
CSI	0.45	0.42	0.19	0.06	0.31

Table 4. The contingency table for a) spring, b) summer, c) autumn and d) winter

**a) Spring(MAM)**

		Event Observed	
		Yes	No
Event Forecast	Yes	Hit 19	False 4
	No	Miss 19	C.N 142

**c) Autumn(SON)**

		Event Observed	
		Yes	No
Event Forecast	Yes	Hit 5	False 3
	No	Miss 19	C.N 155

### 3.3 사례별 분석

지상일기도와 지상바람관측자료를 이용하여 급변풍 사례를 분석하고 LLWAS 자료와 급변풍 예측결과를 비교하였다. 사례일은 적중 사례인 2020년 3월 21일, 2020년 8월 2일과 놓침 사례인 2021년 1월 7일 그리고 오경보 사례인 2021년 8월 28일로 선정하였다.

#### 3.3.1 2020년 3월 21일

Fig. 6a는 2020년 3월 21일 03 UTC(12 KST)의 지상일기도이다. 산둥반도에 저기압이 위치해 있고 제주도 남쪽 해상에서 동진하는 고기압의 영향으로 제주도에 남서풍이 유입되고 있다. Fig. 6b는 제주도 주변의 13 KST 지상바람관측자료로 풍속과 풍향을 바람깃으로 나타내고 있다. 마라도(726)와 가파도(855) 지점을 보면 제주도에 남서풍이 유입되고 있음을 확인할 수 있고 제주(184)에 북동풍이 외도(863)에 서풍이 불면서 제주국제공항에서 바람이 수렴하고 있음을 알 수 있다. 13 KST의 LLWAS 경고 자료를 보면 RWY25(25A/07D) 활주로의 1해리 구역에 +25knot 강도의 급변풍을 경고하였다(Fig. 6c). 같은 시간대의 급변풍 예측결과에서는 2번과 3번 지점 사이에 +23.8knot, 4번과 11번 지점 사이에 +16.4knot 강도의 급변풍을 예측하였다(Fig. 6d). 급변풍 경고 구역에 다소 차이가 있지만 활주로 주변에서 바람이 수렴하는 현상을 모의하여 급변풍 및 그 강도를 정확하게 예측하였다.

**b) Summer(JJA)**

		Event Observed	
		Yes	No
Event Forecast	Yes	Hit 27	False 10
	No	Miss 28	C.N 119

**d) Winter(DJF)**

		Event Observed	
		Yes	No
Event Forecast	Yes	Hit 2	False 3
	No	Miss 31	C.N 145



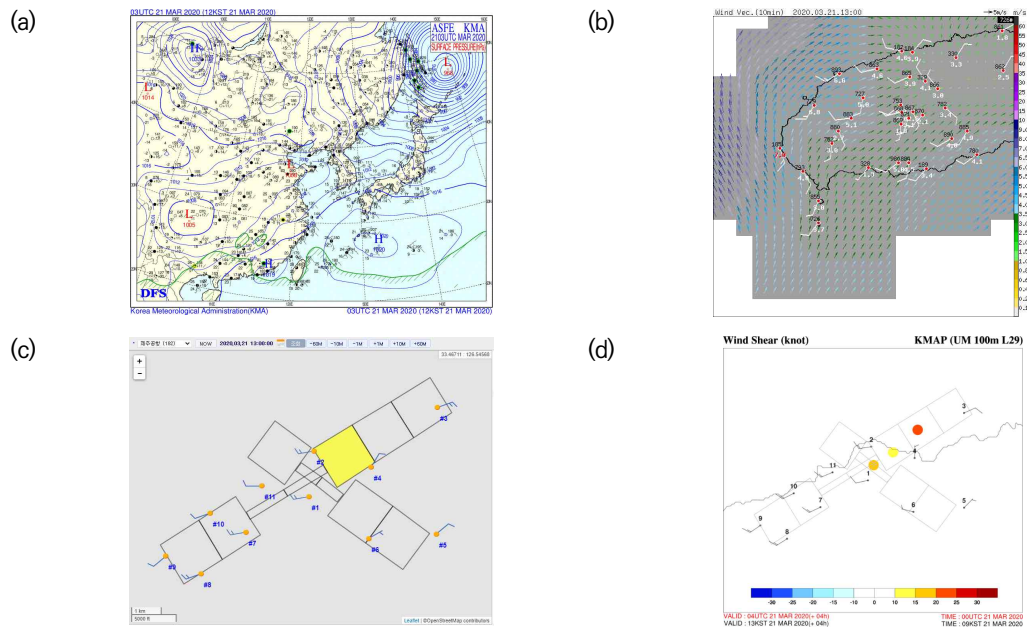


Fig. 6. (a) The surface weather chart, (b) surface wind measurements, (c) LLWAS and (d) forecast of wind shear on 21 March 2020

### 3.3.2 2020년 8월 2일

Fig. 7a는 2020년 8월 2일의 06 UTC(15 KST) 지상일기도이다. 제주도는 북태평양 고기압 가장자리에 들면서 남풍이 유입되고 있다. Fig. 7b의 지상바람관

측자료를 보면 마라도(726)와 가파도(855)에서 남풍의 유입을 확인할 수 있고 이 바람은 한라산을 좌우로 돌아 제주북부 지역에 수렴하는 현상을 보인다. Fig. 7c는 15 KST의 LLWAS 자료로 RWY25(25A/07D) 활

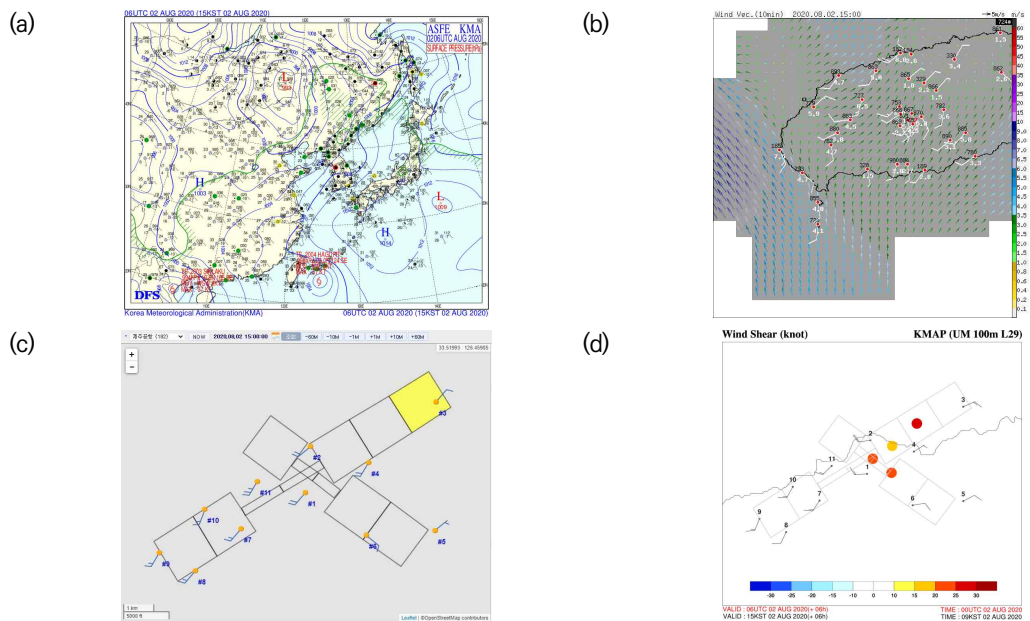


Fig. 7. (a) The surface weather chart, (b) surface wind measurements, (c) LLWAS and (d) forecast of wind shear on 2 August 2020

주로에서 바람이 수렴되면서 3해리 구역에 +25knot의 급변풍을 경고하였다. 급변풍 예측결과에서는 2번과 3번 지점 사이에 +29.3knot의 급변풍을 예측하여 관측의 강도 및 구역과 일치하였다(Fig. 7d). 특히 해당 사례일은 남풍 계열의 바람이 한라산을 넘어가면서 활주로 양쪽 끝에 각각 배풍이 발생하였고, 이로 인해 항공기의 복행이 있었다(Cho and Baik, 2021).

### 3.3.3 2021년 1월 7일

Fig. 8a는 2021년 1월 7일 03 UTC(12 KST)의 기상일기도이다. 시베리아 고기압이 확장하여 서고동저의 기압배치로 인해 한반도와 제주도에 북서풍이 부는 전형적인 겨울의 일기도이다. 해당 사례일은 해기차에 의해 발달한 구름이 제주도에 유입되면서 제주국제공항에 강수가 있었다. 기상바람관측자료에서 제주(184) 지점이 북서풍의 영향을 받고 있음을 알 수 있다(Fig. 8b). 사례일 13 KST의 LLWAS 경고 자료와 급변풍 예측결과를 비교해보았다. LLWAS 경고에선 활주로에 -20knot, RWY25(25A/07D) 활주로의 1해리 구역에 -20knot, RWY31 1해리 구역에 +30knot의 급변풍 경고를 하였다(Fig. 8c). 이는 대부분의 LLWAS 관측 지점에서 23~31knot의 풍속이 관측된 것에 비해 5번, 6번 지점에서는 4knot과 13knot로 비교적 약한 풍속

이 관측되어 풍속차에 의한 급변풍이 발생한 것으로 보여진다. Fig. 8d의 급변풍 예측결과에서는 11개 LLWAS 지점에서 약 11~19knot의 풍속이 예측되어 실제 관측보다 10knot 이상 과소모의하였고 5번과 6번 지점에서의 풍속 변화가 크게 나타나지 않아 급변풍 경고를 하지 못했다. 이러한 현상은 가을과 겨울에 북서풍에 의한 급변풍 발생시 자주 발생하며 풍속차에 의한 급변풍이 모의되지 않음을 의미한다.

### 3.3.4 2021년 8월 28일

Fig. 9a는 2021년 8월 28일의 00 UTC(09 KST) 기상일기도이다. 제주도는 남쪽의 북태평양 고기압의 영향으로 남서풍이 불어오고 있다. Fig. 9b의 10 KST의 기상바람관측자료를 보면 마라도(726)와 가파도(855)에서 남서풍의 유입을 확인할 수 있고 제주(184)에 동풍이 외도(863)에 서풍이 관측되었다. Fig. 9c의 10 KST의 LLWAS 자료에서는 3번 지점에는 북서풍이 관측되었고, 다른 지점에서는 남서풍이 관측되었지만 급변풍 경고는 없었다. 그러나 급변풍 예측결과에서는 2번과 6번 사이 +16.6knot의 급변풍 경고를 예측하면서 오경보를 하였다(Fig. 9d). 이러한 오경보는 2번 지점과 6번 지점의 풍향차로 인해 발생한 것으로, 2번 지점에서 모의된 서풍과 6번 지점에서 모의된 동풍이 원인이었다.

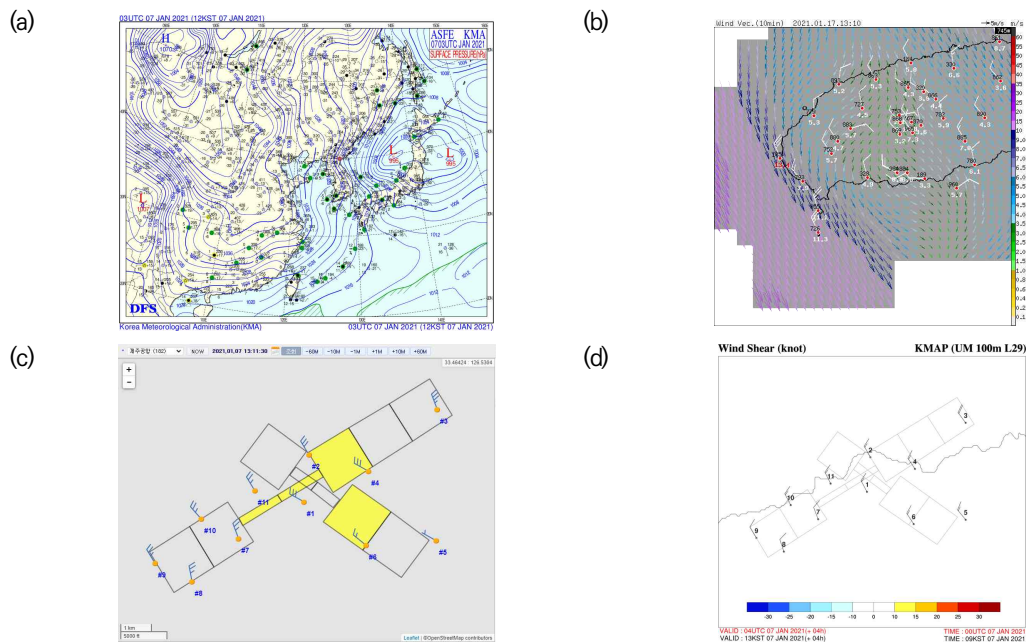


Fig. 8. (a) The surface weather chart, (b) surface wind measurements, (c) LLWAS and (d) forecast of wind shear on 07 January 2021

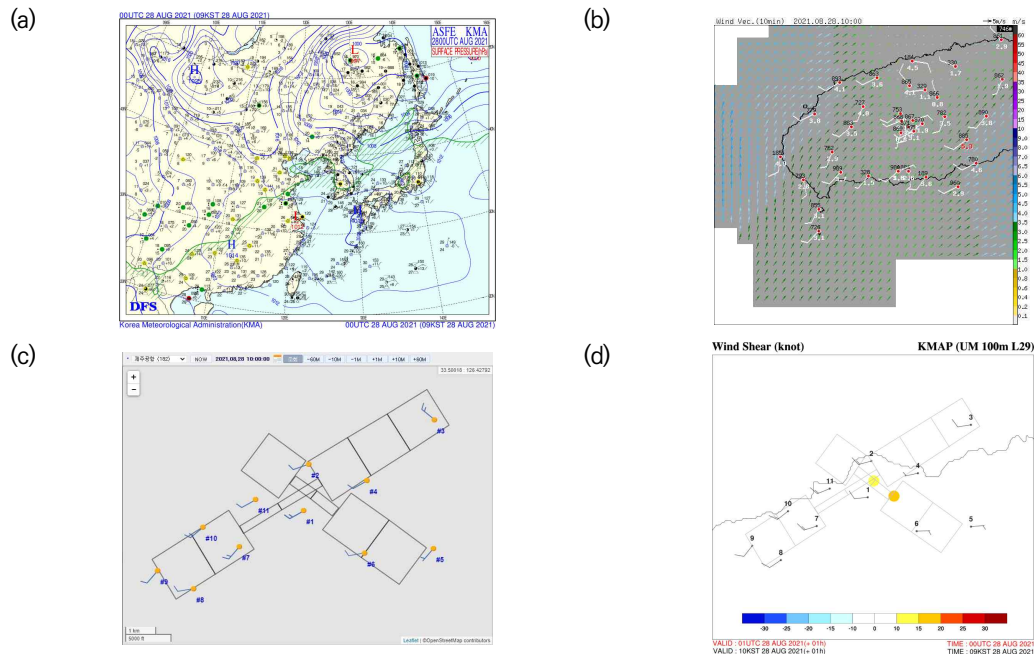


Fig. 9. (a) The surface weather chart, (b) surface wind measurements, (c) LLWAS and (d) forecast of wind shear on 28 August 2021

#### IV. 결 론

2020년부터 2021년까지 LLWAS 자료를 이용하여 제주국제공항의 급변풍 발생 특성을 분석하였다. 급변풍 발생은 7월에 가장 많았으며 10월에 가장 적었다. 급변풍이 자주 발생하는 활주로는 RWY07(41.6%)과 RWY25(33.4%)로 주활주로에서 빈도가 잦음을 알 수 있었다. 급변풍은 야간보다 주간(09~18 KST)에 자주 발생하였으며 급변풍 강도는 배풍보다 정풍의 빈도가 높았다.

같은 기간 동안 고해상도 수치모델 기반 저층급변풍 예측체계의 성능을 평가하였다. 제주국제공항의 LLWAS의 급변풍 경고자료와 급변풍 예측결과를 비교한 결과 탐지예측률은 0.35, 오경보율은 0.27, 임계성공지수는 0.31로 나타났다. 계절별 탐지예측률은 봄(0.50)과 여름(0.49)에 높았고 가을(0.21)과 겨울(0.06)으로 매우 낮았다. 지상일기도와 지상관측자료를 이용하여 급변풍 적중, 놓침, 오경보 사례를 분석하였다. 저층급변풍 예측체계는 남풍류 유입시 제주국제공항에서 북동풍과 남서풍이 수렴하는 현상을 잘 모의하여 높은 예측성능을 보였다. 하지만 북서풍에 의한 급변풍 발생시 전체적으로 풍속을 과소모의하였고 해상에서 육지로 오면서 감소하는 풍속을 모의하지 못하면서 낮은 예측성능을 보였다. 즉, 풍향에

의한 급변풍은 비교적 잘 예측하였지만 풍속차에 의한 급변풍의 예측성능은 매우 낮았다. 한라산 지형에 의해 풍향이 변화하여 생기는 급변풍에 대해서는 현 모델에서도 예측성을 확보한 것으로 보이나, 해상에서 불어오는 북서풍의 풍속차에 의한 급변풍을 제대로 모의하기 위해서는 미세규모 현상을 모의할 수 있는 전산유체역학모델, 자료동화 기법 등의 접근이 필요할 것으로 사료된다.

본 연구는 장기적인 LLWAS 관측자료를 이용하여 제주국제공항의 급변풍 특성을 알아보고 급변풍 예측모델의 예측성을 조사하였다. 본 연구를 통해 제주국제공항에 주로 영향을 주는 봄철과 여름철의 급변풍에 대해서는 예측성을 확보한 것으로 확인되었으며, 향후 고해상도 관측 및 수치모델 개발을 통해 공항 위험기상 발생 예보와 경보 정확도 향상에 기여할 수 있을 것으로 기대된다.

#### 사 사

이 연구는 기상청 국립기상과학원 「수요자 맞춤형 기상정보 산출기술 개발 연구」(KMA2018-00622)의 지원으로 수행되었습니다.



## References

1. ICAO, "Meteorological Service for International Air Navigation: Annex 3 to the Convention on International Civil Aviation", 16th edition, International Civil Aviation Organization, 2007.
2. Hon, K. K., and Chan, P. W., "Terrain-induced turbulence intensity during tropical cyclone passage as determined from airborne, ground-based, and remote sensing sources", *Journal of Atmospheric Oceanic Technology*, 31, 2014, pp.2373-2391.
3. Tse, S. M., Hagio, M., and Maeda, Y., "Wind-shear detection by terminal Doppler weather radar during tropical cyclone Mujigae in 2015", *Meteorological Applications*, 26(4), 2019, pp. 620-631.
4. Chan, P. W., and Hon, K. K., "Observation and numerical simulation of terrain-induced windshear at the Hong Kong International Airport in a planetary boundary layer without temperature inversions", *Advances in Meteorology*, 2016, 1454513.
5. Li, L. Q., Shao, A. M., and Zhang, K. J., "Low-level wind shear characteristics and lidar-based alerting at Lanzhou Zhongchuan International Airport, China", *Journal of Meteorological Research*, 34(3), 2020, pp.633-645.
6. Chan, P. W., Lai, K. K., and Li, Q. S., "High-resolution (40m) simulation of a severe case of low-level windshear at the Hong Kong International Airport—Comparison with observations and skills in windshear alerting", *Meteorological Applications*, 28(4), 2021, pp. 1-25.
7. Lin, C., Zhang, K., Chen, X., Liang, S., Wu, J., and Zhang, W., "Overview of low-level wind shear characteristics over Chinese mainland", *Atmosphere*, 12(5), 2021, p.628.
8. Hon, K. K., and Chan, P. W., "Historical analysis (2001–2019) of low-level wind shear at the Hong Kong International Airport", *Meteorological Applications*, 29(2), 2022, p.e2063.
9. Chen, F, Peng, H., Chan, P. W., Huang, Y., and Hon, K. K., "Identification and analysis of terrain-induced low-level windshear at Hong Kong International Airport based on WRF–LES combining method", *Meteorology and Atmospheric Physics*, 134(60), 2022.
10. Hong, K. D., "A study on the low level windshear around Jeju International Airport", M.S. Thesis, Department of Marine Production Graduate School of Industry, Jeju National University, June 2006.
11. Koo, D. Y., Park, J. S., Kang, H. Y., Park, H. N., and Shin, S. Y., "Development of Guidance for the Notification of Wind Shear Alerts," Jeju Airport Weather Office, 2008, pp.1-8.
12. Min, B. H., Kim, Y. H., Choi, H. W., Jeong, H. S., Kim, K. R., and Kim, S. B., "Low-level wind shear (LLWS) forecasts at Jeju International Airport using the KMAPP", *Journal of Korean Meteorological Society Atmosphere*, 30(3), 2020, pp.277-291.
13. Cho, J. H., and Baik, H. J., "A study on the characteristics of Low-Level wind shear at Jeju International Airport from go-around flight perspective", *Journal of the Korean Society for Aviation and Aeronautics*, 29(1), 2021, pp.1-8.
14. Kim, G. H., Choi, H. W., Seok, J. H., and Kim, Y. H., "Prediction of low level wind shear using high resolution numerical weather prediction model at the Jeju International Airport, Korea", *Journal of the Korean Society for Aviation and Aeronautics*, 29(4), 2021, pp.88-95.
15. Seok, J. H., Choi, H. W., Kim, Y. H., and Lee, S. S., "Diagnosis of low-level aviation turbulence using the Korea meteorological administration post processing (KMAPP)", *Journal of the Korean Society for Aviation and Aeronautics*, 28(4), 2020, pp.1-11.