

Original Article

<https://doi.org/10.12985/ksaa.2021.29.4.088>
ISSN 1225-9705(print) ISSN 2466-1791(online)

고해상도 수치모델을 이용한 제주국제공항 저층급변풍 예측

김근희*, 최희욱*, 석재혁*, 김연희*

Prediction of Low Level Wind Shear Using High Resolution Numerical Weather Prediction Model at the Jeju International Airport, Korea

Geun-Hoi Kim*, Hee-Wook Choi*, Jae-Hyeok Seok*, Yeon-Hee Kim*

ABSTRACT

In aviation meteorology, the low level wind shear is defined as a sudden change of head wind below 1600 feet that can affect the departing and landing of the aircraft. Jeju International Airport is an area where low level wind shear is frequently occurred by Mt. Halla. Forecasting of such wind shear would be useful in providing early warnings to aircraft. In this study, we investigated the performance of statistical downscaling model, called Korea Meteorological Administration Post-processing (KMAP) with a 100 m resolution in forecasting wind shear by the complex terrain. The wind shear forecasts was produced by calculating the wind differences between stations aligned with the runways. Two typical wind shear cases caused by complex terrain are validated by comparing to Low Level Wind Shear Alert System (LLWAS). This has been shown to have a good performance for describing air currents caused by terrain.

Key Words : Wind Shear(급변풍), Jeju International Airport(제주국제공항), Korea Meteorological Administration Post-Processing(고해상도 규모상세화 수치자료 산출체계), Low Level Wind Shear Alert System(저층급변풍경고장비)

1. 서 론

항공기의 안전 운항에 가장 위협을 주는 기상현상은 저층에서 급격히 발생하는 바람이다. 항공기상에서는 지상 1,600 ft 미만의 고도에서 15 knot 이상의 급작스러운 바람 변화를 저층급변풍으로 정의하고 있다(ICAO, 2007). 이러한 저층급변풍은 공항에서 항공기의 이륙 및 착륙에 영향을 주어 항공기 운항 지연 및 결항, 사고

등 경제적 문제뿐 아니라, 인명의 피해도 발생시킨다.

이러한 급변풍을 탐지하고 예측하기 위해서 지금까지 많은 연구가 있었다. Boilley and Mahfouf(2013)는 프랑스 니스코트다쥐르국제공항에서 지상기상관측 자료, LIDAR(Light Detection And Ranging)와 윈드프로파일러를 이용하여 급변풍 발생원인을 밝히고, 수치예보모델의 예측가능성에 대해 설명하였다. Keller et al.(2015)은 미국 덴버국제공항에서 발생한 돌풍에 의한 항공기 사고에 대해 250 m 해상도의 수치예보모델로 재현하고, 고해상도 모델이 풍하파를 모의하여 비슷한 사고를 예방할 수 있다고 설명하였다. Nechaj et al.(2019)은 슬로바키아의 브라티슬라브국제공항에서 발생한 급변풍 사례를 발생원인별로 나누고 LIDAR를 이용한 탐지의 이점과 한계에 대해 설명하였다.

Received: 13. Oct. 2021, Revised: 18. Nov. 2021,
Accepted: 01. Dec. 2021

* 국립기상과학원 미래기반연구부

연락처 E-mail : gnenara@korea.kr

연락처 주소 : 제주특별자치도 서귀포시 서호북로 33

홍콩국제공항은 지형이 복잡한 란타우섬의 북쪽에 위치하여 급변풍이 자주 발생하는 공항이다. 이러한 이유로 홍콩국제공항을 대상으로 한 연구가 많이 이루어지고 있다. Chan(2012a, b)은 홍콩국제공항에서 발생한 급변풍에 대하여 사례 분석하고 LIDAR를 이용한 탐지가능성을 밝혔다. Wong et al.(2013)은 고해상도 수치예보모델을 개발하여 해풍과 지형에 의해 발생한 급변풍 사례를 설명하고, 모델해상도의 향상으로 해풍에 의한 수렴현상을 잘 모의하였지만 개선이 필요하다고 설명하였다. Carruthers et al.(2014)은 관측자료와 FLOWSTAR 모델을 이용하여 지형과 역전층에 의한 강풍현상을 준실시간으로 모의할 수 있다고 하였다. Tse et al.(2014)은 뇌우에 의한 2개의 복행(go-around) 사례를 분석하고 TDWR(Terminal Doppler Weather Radar)을 이용한 나우캐스팅의 한계와 예측모델의 필요성에 대해 설명하였다.

관측자료를 이용한 급변풍의 특성에 관한 연구로 Hon and Chan(2014)은 5개의 열대저기압 사례에 대해 다양한 원격관측장비와 지상관측자료로 에디소산을 구하고, 이를 항공기 관측자료와 비교하여 저층난류강도를 산출하였으며 Chan(2017)은 홍콩국제공항에서 발생한 30 knot 이상의 강한 급변풍 사례의 특징을 조사하였다. Tse et al.(2019)은 TDWR을 이용하여 열대성 저기압에 의한 마이크로버스트를 탐지와 그 특징에 대해서 연구하였다. Chan and Li(2020)은 홍콩국제공항에서 4개의 열대저기압에 의한 급변풍 발생 사례를 지상관측자료, LIDAR, TDWR을 이용하여 분석하였다.

급변풍 사례분석과 수치예보모델을 연계한 연구로 Chan(2014a)은 2009년 2월에 이륙시 발생한 tail strike에 대해 LIDAR 감지와 수치예보모델의 예측가능성에 대해 설명하고 관측자료에서 탐지하지 못한 급변풍을 LIDAR에서 탐지할 수 있었으며 수치예보모델은 Gust 예측결과에서 예측가능성을 확인하였고, Chan(2014b)은 홍콩국제공항에서 열대저기압에 의한 와류방출 사례를 통해 50 m 해상도의 수치예보모델로 성공적으로 모의함으로써 급변풍의 예측가능성을 제시하였다. Chan and Hon(2016)은 홍콩국제공항에서 TDWR, LIDAR, Aviation Model(200m 해상도)을 이용하여 급변풍 예측시스템을 만들어 이를 검증하고 마이크로버스트 사례를 처음으로 모의하고 평가하였으며, HON(2020)은 Aviation Model에 대해 2년 동안 홍콩국제공항의 급변풍 예측성능을 통계적으로 평가하였다.

제주국제공항은 한라산과 주변 지형의 영향으로 급변풍이 자주 발생한다. 제주국제공항과 유사한 지리적 조건을 가진 홍콩국제공항은 TDWR 2소, 윈드프로파일러 2소, LIDAR 2소, 해상부이 5소의 급변풍 탐지장비를 보유하고 있지만 제주국제공항에는 LLWAS(Low Level Wind Shear Alert System) 1소뿐이다. LLWAS는 급변풍을 실시간으로 탐지하기에 급변풍 경보를 조기에 제공하지 못하는 한계가 있어 급변풍 예측이 필요한 상황이다. 또한 규모가 작은 급변풍을 예측하기 위해서는 1.5 km 해상도의 기상청 국지예보모델(Local Data Assimilation and Prediction System, LDAPS)로는 한계가 있어 고해상도 수치예보모델이 필요하다.

본 연구에서는 지형에 의한 급변풍의 발생 예측을 위해 제주국제공항에 설치된 LLWAS의 알고리즘을 분석하고 수치예보모델을 이용하여 저층급변풍 예측체계를 구축하였다. 수치예보모델은 국립기상과학원에서 운영하고 있는 고해상도 규모상세화 수치자료 산출체계(Korea Meteorological Administration Post-processing, KMAP)를 사용하였다. 그리고 제주국제공항에서 납품류에 의한 급변풍 사례를 분석하고 예측결과와 비교하였다.

II. 자료 및 방법

2.1 LLWAS

LLWAS는 활주로 주변에 풍향풍속계를 설치하여 활주로 인근 저층에서 발생하는 급변풍 및 마이크로버스트를 탐지하고 분석하여 이·착륙 항공기에 항공로상의 돌풍현상을 사전에 제공하는 시스템이다. LLWAS는 활주로를 중심으로 설치되어 있는 관측장비와 무선송신장치를 포함한 원격처리장치(remote station)와 자료의 수집, 분석, 경보발생을 처리하는 주처리장치(master station)로 구성되어 있다. 원격처리장치는 활주로 주변으로 11소가 있고 제주국제공항은 총 4개의 활주로(RWY25, RWY07, RWY13, RWY31)가 있다(Fig. 1). 관측장비는 3개의 센서에서 발사하는 초음파의 이동시간을 측정하는 초음파 풍향풍속계(WMT-703, Vaisala)로 관측 높이는 15~40 m이다(Table 1). 주처리장치는 각각의 원격처리 장치에서 매 10초마다 수집된 바람자료를 분석하여 수평으로 양쪽 활주로 말단부터 3해리(nautical mile)까지 급변풍이나 마이크로버스트 발생시 경보 정보를 화면에 표출할 수 있게 한다. 1 해리는 약 1,852 m이다.

Table 1. Topographical information of each 11 LLWAS sensors around the Jeju International Airport

Sensor	WGS 84 latitude	WGS 84 longitude	UTM easting	UTM northing	Height
1	33°30'18"	126°29'33.40"	267084.4	3710088	40 m
2	33°31'8.8"	126°29'39.90"	267289.9	3711649	24 m
3	33°31'58.7"	126°32'28.40"	271674.6	3713082	18 m
4	33°30'51.3"	126°30'58.30"	269300.1	3711061	40 m
5	33°29'35.9"	126°32'27.10"	271536.7	3708684	33 m
6	33°29'30.1"	126°30'55.30"	269162.8	3708561	36 m
7	33°29'38.1"	126°28'7.10"	264826.9	3708913	33 m
8	33°28'50.7"	126°27'6.20"	263219.1	3707491	43 m
9	33°29'11"	126°26'18.00"	261990.1	3708147	36 m
10	33°29'59.17"	126°27'18.56"	263589.9	3709593	31 m
11	33°30'30.5"	126°28'29.20"	265436.7	3710513	24 m



Fig. 1. Location of 11 LLWAS sensors around the Jeju International Airport

LLWAS에서 생산되는 급변풍 경보 정보는 Runway location, Alert, Gain+/Loss-, Event Pos., Direction, Speed로 총 6가지이다(Fig. 2). Runway location은 활주로의 종류와 출발·도착을 나타낸다. 07A에서 07은 활주로를 나타내고, A는 도착(arrival)을 나타내며

Runway location	Alert	Gain+/Loss-	Event Pos	Direction	Speed
07A	WSA	20+	IMF	290	6
07D	WSA	20+	RWY	90	19
13A				90	19
13D				60	14
25A	WSA	20+	RWY	90	19
25D	WSA	20+	RWY	290	6
31A				60	14
31D				90	19

Fig. 2. Wind shear alerts information from LLWAS

출발(departure)일 경우 D로 표시한다. Alert는 경보 종류로 WSA는 급변풍, MBT는 마이크로버스트를 나타낸다. Gain+/Loss-는 gain과 loss값을 나타내고 Event Pos.은 발생구역으로 RWY는 활주로, 1MD에서 1M은 활주로부터의 거리를 의미하며 M은 해리를 뜻하며 최대 3해리까지 표시할 수 있다. D는 출발(departure)을 의미하며, F는 최종 접근(final approach)을 나타낸다. direction과 speed는 해당 활주로의 풍향과 풍속을 나타낸다.

2.2 고해상도 규모상세화 수치자료 산출체계

고해상도 규모상세화 수치자료 산출체계(Korea Meteorological Administration Post-processing, KMAP)는 국립기상과학원에서 구축한 수치정보 산출체계로, 영국 기상청에서 개발한 후처리 소프트웨어인 규모상세화 패키지(United Kingdom Post Processing)에 그 기반을 두고 있다. 1.5 km 수평 해상도인 국지 예보모델(LDAPS)의 분석·예측자료에 상세 지형자료 반영과 최근점 내삽, 선형 내삽, 지능형 격자 선택 내삽과정이 적용되어 있다. 남한영역을 포함한 6750(동서) × 6900(남북) 격자로 이루어져 있으며, 연직층은 약 3 km 고도까지 29개 층으로 구성되어 있다. 예측요소로는 기온, 기압, 바람성분(u, v)이고 1시간, 100 m의 시공간해상도를 가지고 있다. 일 4회(00, 06, 12, 18 UTC) 생산되며 48시간 예측자료를 담고 있다(Seok et al., 2020).

III. 결 과

3.1 KMAP 기반 저층급변풍 예측체계

KMAP 기반 저층급변풍 예측체계는 관측자료 대신 고해상도 수치모델 예측자료를 이용하여 급변풍을 예측하기 위해 개발되었다. 사용한 모델은 앞서 설명한 고해상도 규모상세화 수치자료 산출체계(KMAP)로 지상 바람 예측자료를 사용하였다. 예측자료는 KMAP과 동일하게 00, 06, 12, 18 UTC에 일 4회 생산되고 48시간 예측자료를 담고 있다. 예측영역은 제주국제공항 활주로 및 주변 12개 영역이고 예측요소는 급변풍 발생구역 및 강도이다.

급변풍을 예측하기 위해 제주국제공항 LLWAS에 적용된 알고리즘을 사용하였다. 항공기가 이·착륙시 받는 바람의 영향을 살펴보기 위해 활주로 방향에 평행하는 바람 성분인 정풍(headwind)을 계산하게 된다. loss는 항공기가 받는 바람이 음인 상태이고 gain은 양인 상태를 뜻한다. loss와 gain은 다음 식을 이용하여 계산한다.

$$\text{Loss or gain} = (u_2 - u_1) \times \text{Dir_X}(\text{rwy}) + (v_2 - v_1) \times \text{Dir_Y}(\text{rwy})$$

여기서 u_1 , u_2 와 v_1 , v_2 는 각 지점 풍속의 동서성분과 남북성분이며, $\text{Dir_X}(\text{rwy})$ 와 $\text{Dir_Y}(\text{rwy})$ 는 각 활주로의 방향성분이다(Table 2). 계산에 사용되는 지점의 정보는 Table 3에 나타내었다. 4개의 활주로별로 RWY25는 13개, RWY07은 17개, RWY13은 3개, RWY31은 11개의 쌍이 있다. 각 활주로별로 가장 큰 gain과 가장 작은 loss를 구해서 그 값이 급변풍 경고 기준인 $\pm 7.5 \text{ m s}^{-1}$ ($\pm 15 \text{ knot}$) 이상이면 경보 구역으로 정의되며, 이 구역은 항공기가 강력한 급변풍을 최초 조우하는 지점으로 지정된다.

Table 2. The list of runway direction factor

	RWY25	RWY07	RWY13	RWY31
DIR_X	0.78	-0.78	-0.877	0.877
DIR_Y	0.625	-0.625	0.48	-0.48

Table 3. The list of parameter for runway oriented loss and gain in the Airport Configuration File (ACF)

#	RWY25			RWY07			RWY13			RWY31		
	PAIRS		DIST. (km)	PAIRS		DIST. (km)	PAIRS		DIST. (km)	PAIRS		DIST. (km)
1	1	7	2.541	7	1	2.541	2	4	1.942	1	11	1.563
2	1	10	3.258	7	2	3.529	11	1	1.563	4	1	1.162
3	1	11	1.207	7	4	4.93	11	4	2.725	4	2	1.942
4	2	7	3.529	7	11	1.333				4	11	2.725
5	2	10	4.247	8	1	4.646				5	1	4.399
6	2	11	2.196	8	7	2.106				5	4	3.238
7	3	2	4.477	8	10	1.388				5	6	1.825
8	3	4	3.076	8	11	3.439				6	1	2.575
9	4	1	2.389	9	7	2.832				6	2	3.355
10	4	2	1.401	9	10	2.114				6	4	1.413
11	4	7	4.93	9	11	4.165				6	11	4.138
12	4	11	3.597	10	1	3.258						
13	11	7	1.333	10	2	4.247						
14				10	11	2.051						
15				11	1	1.207						
16				11	2	2.196						
17				11	4	3.597						

3.2 사례분석 및 검증

제주국제공항은 지형에 의한 급변풍의 발생이 잦은 곳이다(Lee et al., 2010). 특히 한라산의 영향이 가장 크다고 볼 수 있다. 특히 남서풍, 남풍 계열은 지형의 영향으로 인한 급변풍을 일으키는 주된 풍향이다(Cho and Baik, 2021). 이번 분석에는 제주도에 남풍에 유입된 두 사례를 선정하여 지상일기도와 지상관측자료를 이용하여 분석하고 예측자료와 비교·검증해 보았다.

3.2.1 2020년 4월 30일

Fig. 3은 2020년 4월 30일 1500 KST의 지상일기도이다. 한반도 북서쪽에 저기압이 동쪽에 고기압이 위치하면서 제주도에 남풍이 유입된 사례이다. Fig. 4는

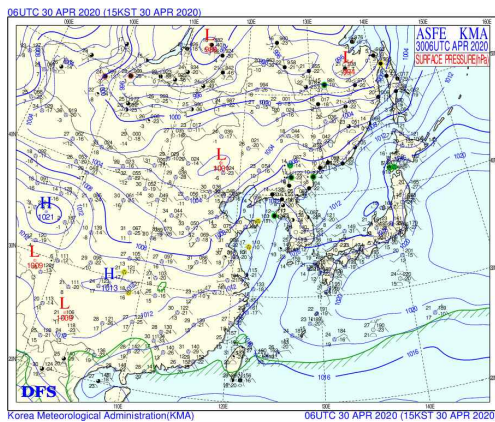


Fig. 3. The surface weather chart at 1500 KST on 30 April 2020

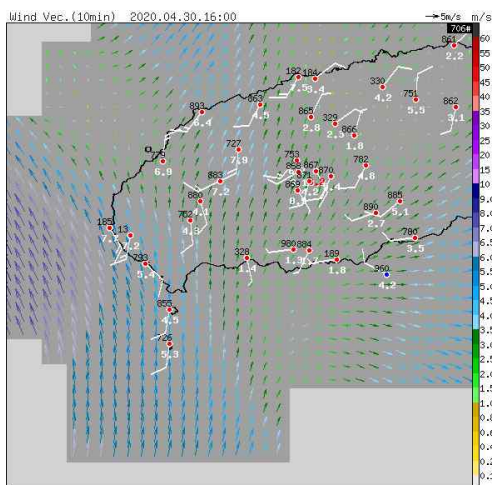


Fig. 4. Surface wind measurements at 1600 KST on 30 April 2020

2020년 4월 30일 1600 KST의 제주도에 설치된 자동 기상관측지점의 풍속과 풍향을 바람깃으로 나타내고 있다. 지상바람자료를 보면 가파도(855) 지점에서 남풍이 관측되었으며, 내륙으로 오면서 한라산을 중심으로 바람이 나누어져 제주국제공항 중심으로 수렴하는 것을 확인할 수 있다. 이로 인해 이날 제주국제공항에는 2020년 4월 30일 0800 KST부터 2100 KST까지 급변풍 특보가 발표되었다.

관측과 예측의 비교를 위하여 4월 30일 1600 KST의 LLWAS 관측자료와 저층급변풍 예측체계에서 생산된 예측자료를 비교하였다(Fig. 5). LLWAS 관측자료는 경보 구역을 노란색으로 표시하며 활주로와 RWY25 1해리 구역에 경보가 관측되었고 그 강도는 12.5 m s^{-1} 였다. 예측자료에서 경보 구역의 표시는 계산에 사용된 2지점의 중간에 나타내었으며 강도는 2.5 m s^{-1} 단위로 색으로 구분하였다. 예측의 경우, 2번과 4번 지점

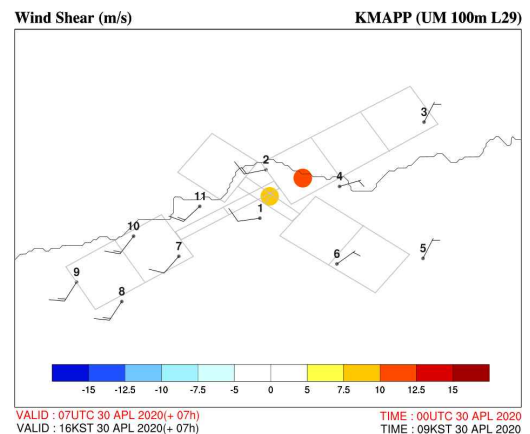
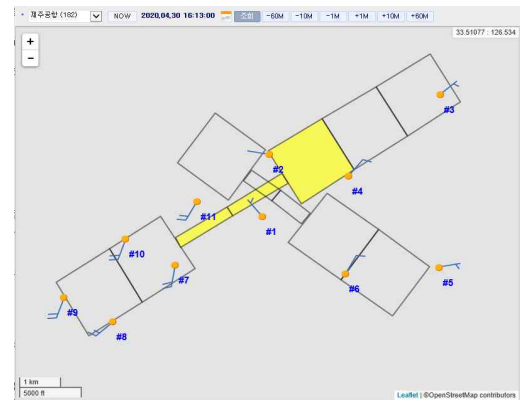


Fig. 5. The comparison of (top) the wind shear warning information from the LLWAS and (bottom) the forecast of wind shear at the Jeju International Airport at 1600 KST on 30 April 2020

사이에서 10.4 m s^{-1} 강도의 급변풍과 4번과 11번 지점 사이에서 9.6 m s^{-1} 강도의 급변풍을 예측하여 급변풍 발생 구역과 강도를 유사하게 모의하였다. 지점별 바람 자료를 비교하면 관측에서 RWY07 방향(7, 8, 9, 10번 지점)의 남서풍과 RWY25 방향의 상대적으로 약한 북동풍을 잘 모의하였다. 하지만 바람이 수렴하는 활주로 주변 지점에서 풍향이 다소 차이를 보이고 있었다.

3.2.2 2020년 5월 9일

Fig. 6은 2020년 5월 9일 0600 KST의 지상일기도이다. 한반도 서쪽에 저기압이 위치하면서 남북으로 길게 등압선이 나타나 제주도 지역에 남풍의 바람이 불었고, 저기압으로 인해 강우가 내렸던 사례이다. 지상관측자료에서도 앞선 사례보다 강한 남풍류의 유입으로 인해 제주국제공항에 15 m s^{-1} 이상의 강풍이 관측된 사례이다(Fig. 7). 해당일에 제주국제공항에는 2020년 5월 8일 2000 KST부터 5월 9일 0500 KST까지 급변풍 특보가 발표되었다.

관측과 예측의 비교를 위하여 5월 9일 0600 KST의 LLWAS 관측자료와 저층급변풍 예측체계에서 생산된 예측자료를 비교하였다(Fig. 8). LLWAS 관측자료는 활주로 구역에 경보가 관측되었고 그 강도는 10.0 m s^{-1} 였다. 예측자료는 4번과 7번 지점 사이에서 10.8 m s^{-1} 의 급변풍을 예측하여 경보 구역과 강도가 유사하게 모의되었다. 지점별 바람 자료를 비교하면 관측에서 RWY07 방향(7, 8, 9, 10번 지점)에서 15 m s^{-1} 이상의 남풍을 예측자료에서도 모의하였고 활주로는 바

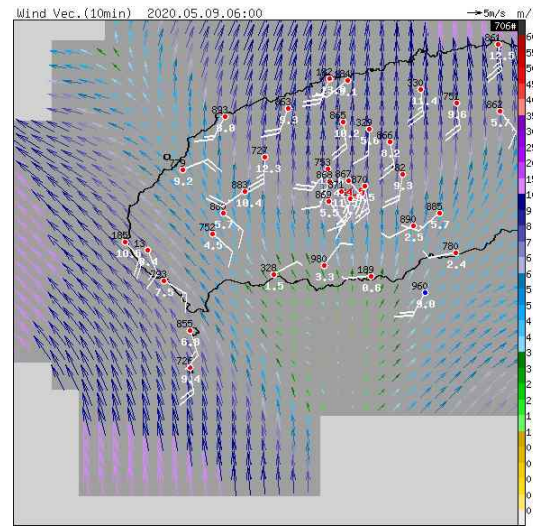


Fig. 7. Surface wind measurements at 0600 KST on 9 May 2020

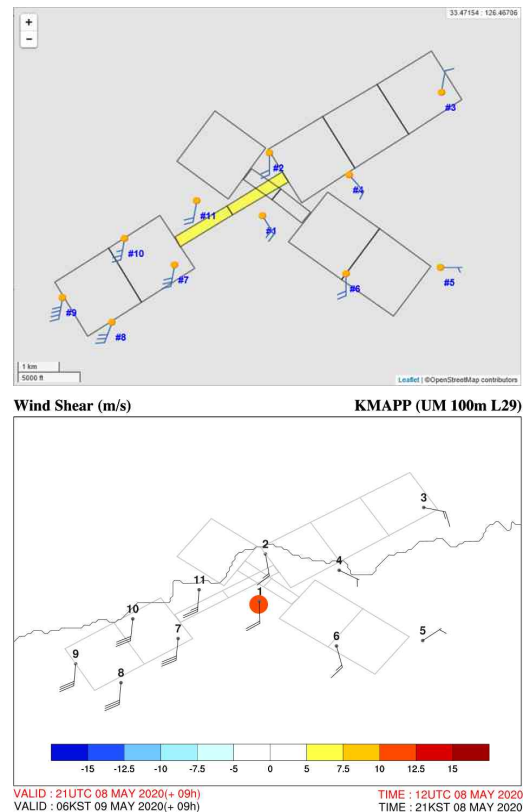


Fig. 8. The comparison of (top) the wind shear warning information from the LLWAS and (bottom) the forecast of wind shear at the Jeju International Airport at 0600 KST on 9 May 2020

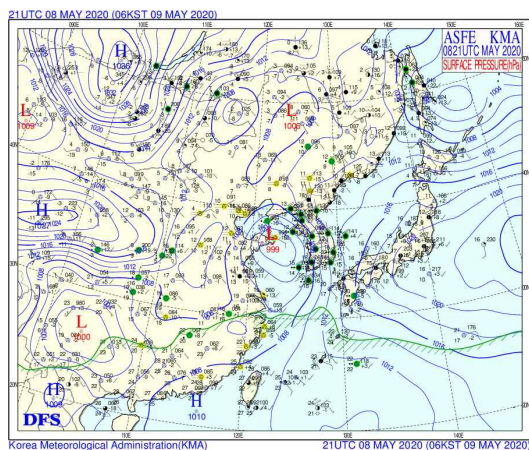


Fig. 6. The surface weather chart at 0600 KST on 9 May 2020

람이 수렴하는 현상을 잘 모의하였다. 하지만 3번 지점의 경우 풍속은 다소 강하게, 풍향은 실제 북풍이었지만 동풍으로 예측하였다.

IV. 결 론

본 연구에서는 지형에 의한 급변풍 발생 예측을 위해 제주국제공항에 설치된 LLWAS의 알고리즘을 분석하고 100 m 해상도를 가진 고해상도 규모상세화 수치자료 산출체계(KMAP)를 활용하여 저층급변풍 예측체계를 구축하였다. 예측자료는 KMAP과 동일하게 00, 06, 12, 18 UTC에 일 4회 생산되고 48시간 예측자료를 담고 있다. 예측영역은 제주국제공항 활주로 및 주변 12개 영역이고, 예측요소는 급변풍 발생구역 및 강도이다.

저층급변풍 예측체계의 성능을 평가하기 위해 지형에 의한 급변풍이 발생한 2020년 4월 30일과 2020년 5월 9일 사례를 분석하고 예측결과와 비교하였다. 2개의 사례를 통해 제주국제공항을 중심으로 북동풍과 남서풍이 수렴하는 현상을 잘 모의하여 급변풍 발생구역과 강도가 LLWAS 관측과 유사함을 알 수 있었다. 이를 통해 저층급변풍 예측체계가 지형에 의해 발생하는 바람의 흐름을 잘 모의하여 급변풍 예측이 가능함을 확인할 수 있었다.

본 연구에서는 남풍류에 의한 급변풍 사례에 대해 검증하였으나, 다른 풍향의 급변풍 사례에 대해 분석이 부족하여 장기간의 예측성능에 대한 연구가 필요하다. 향후 장기간의 예측자료를 생산하고, 이를 활용하여 저층급변풍 예측체계 성능평가 연구를 수행할 계획이다.

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 ed. International Civil Aviation Organization, 2007.
2. Boilley, A., and Mahfouf, J.-F., "Wind shear over the Nice Cote d'Azur airport: Case studies", *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.*, 13, 2013, pp. 2223-2238.
3. Keller, T. L., Trier, S. B., Hall, W. D., Sharman, R. D., Xu, M., and Liu, Y., "Lee waves associated with a commercial jetliner accident at Denver International Airport", *J. Appl. Meteor. Climatol.*, 54, 2015, pp.1373-1392.
4. Nechaj, P., Gaál, L., Bartok, J., Vorobyeva, O., Gera, M., Kelemen, M. and Polishchuk, V., "Monitoring of low-level wind shear by ground-based 3D Lidar for increased flight safety, protection of human lives and health", *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 16, 2019, 4584.
5. Chan, P. W., "A significant wind shear event leading to aircraft diversion at the Hong Kong international airport" *Meteorol. Appl.*, 19, 2012a, pp.10-16.
6. Chan, P. W., "An event of tail strike of an aircraft due to terrain-induced wind shear at the Hong Kong International Airport", *Meteorol. Appl.*, 19, 2012b, pp.325-333.
7. Wong, W. K., Lau, C. S., and Chan, P. W., "Aviation model: A fine-scale numerical weather prediction system for aviation applications at the Hong Kong International Airport", *Adv. Meteor.*, 2013, 532475.
8. Carruthers, D., Ellies, A., Hunt, J., and Chan, P. W., "Modelling of wind shear downwind of mountain ridges at Hong Kong International Airport", *Meteor. Appl.*, 21, 2014, pp.94-104.
9. Tse, S. M., Chan, P. W., and Wong, W. K., "A case study of missed approach of aircraft due to tailwind associated with thunderstorms", *Meteorol. Appl.*, 21, 2014, pp.50-61.
10. 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. *J. Atmos. Oceanic Technol.*, 31, 2014, pp.2373-2391.
11. Chan, P. W., "Severe wind shear at Hong Kong International Airport: Climatology and case studies", *Meteorol. Appl.*, 24, 2017, pp.397-403.
 12. Tse, S. M., Hagio, M., and Maeda, Y., "Windshear detection by terminal Doppler weather radar during tropical cyclone Mujigae in 2015", *Meteorol. Appl.*, 26, 2019, pp.620-631.
 13. Chan, P. W., and Li, Q. S., "Some observation of low level wind shear at the Hong Kong International Airport in association with tropical cyclones", *Meteorol. Appl.*, 27, 2020, e1898.
 14. Chan, P. W., "A tail strike of an aircraft due to terrain-induced wind shear at the Hong Kong International Airport", *Meteorol. Appl.*, 21, 2014a, pp.504-511.
 15. Chan, P. W., "Observation and numerical simulation of vortex/wave shedding for terrain-disrupted airflow at the Hong Kong International Airport during Typhoon Nesat in 2011", *Meteorol. Appl.*, 21, 2014b, pp.512-520.
 16. 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", *Adv. Meteor.*, 2016, 1454513.
 17. Hon, K. K., "Predicting low-level wind shear using 200-m-resolution NWP at the Hong Kong International Airport", *J. Appl. Meteor. Climatol.*, 59, 2020, pp.193-206.
 18. 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)", *J. Korean Soc. Aviat. Aeronaut.*, 28(4), 2020, pp.1-11.
 19. Lee, K.-O., Shimizu, S., Maki, M., You, C.-H., Uyeda, H., and Lee, D.-I., "Enhancement mechanism of the 30 June 2006 precipitation system observed over the northwestern slope of Mt. Halla, Jeju Island", *Korea. Atmos. Res.*, 97, 2010, pp.343-358.
 20. 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", *J. Korean Soc. Aviat. Aeronaut.*, 29(1), 2021, pp.1-8.