

고해상도 KMAPP 자료를 활용한 제주국제공항에서 저층 윈드시어 예측

민병훈^{1)*} · 김연희²⁾ · 최희욱²⁾ · 정형세²⁾ · 김규량¹⁾ · 김승범¹⁾

¹⁾국립기상과학원 재해기상연구부, ²⁾국립기상과학원 미래기반연구부

(접수일: 2020년 6월 26일, 수정일: 2020년 9월 2일, 게재확정일: 2020년 9월 16일)

Low-Level Wind Shear (LLWS) Forecasts at Jeju International Airport using the KMAPP

Byunghoon Min^{1)*}, Yeon-Hee Kim²⁾, Hee-Wook Choi²⁾, Hyeong-Se Jeong²⁾,
Kyu-Rang Kim¹⁾, and Seungbum Kim¹⁾

¹⁾High Impact Weather Research Department, National Institute of Meteorological Sciences, Gangneung, Korea

²⁾Innovative Meteorological Research Department, National Institute of Meteorological Sciences, Jeju, Korea

(Manuscript received 26 June 2020; revised 2 September 2020; accepted 16 September 2020)

Abstract Low-level wind shear (LLWS) events on glide path at Jeju International Airport (CJU) are evaluated using the Aircraft Meteorological Data Relay (AMDAR) and Korea Meteorological Administration Post-Processing (KMAPP) with 100 m spatial resolution. LLWS that occurs in the complex terrains such as Mt. Halla on the Jeju Island affects directly aircraft approaching to and/or departing from the CJU. For this reason, accurate prediction of LLWS events is important in the CJU. Therefore, the use of high-resolution Numerical Weather Prediction (NWP)-based forecasts is necessary to cover and resolve these small-scale LLWS events. The LLWS forecasts based on the KMAPP along the glide paths heading to the CJU is developed and evaluated using the AMDAR observation data. The KMAPP-LLWS developed in this paper successfully detected the moderate-or-greater wind shear (strong than 5 knots per 100 feet) occurred on the glide paths at CJU. In particular, this wind shear prediction system showed better performance than conventional 1-D column-based wind shear forecast.

Key words: Low-level wind shear, Jeju International Airport, Aircraft Meteorological Data Relay, Korea Meteorological Administration Post-Processing

1. 서 론

바람의 연직, 수평방향 경도를 윈드시어라 부르며, 항공기가 운항 중 윈드시어를 만나면 바람의 방향과 속도가 급격하게 변하는 것처럼 느끼게 된다. 특히 낮은 고도에서 발생하는 저층 윈드시어(Low-Level Wind Shear, LLWS)는 공항 또는 이착륙경로에 영향을 주

게되며, 그 결과 항공기 운항지연 및 결항, 사고 등 경제적 또는 인명적 피해를 발생시킨다(Kessler, 1990; Regmi and Maharjan, 2015). 따라서 윈드시어에 의한 피해를 줄이기 위해 윈드시어 발생원인 및 사례분석 등 다양한 연구가 이뤄지고있다.

윈드시어의 발생원인은 대류에 의한 요인과 산악 및 지형에 의한 요인으로 나눌 수 있다. 대류에 의한 요인은 마이크로버스트(Wilson et al., 1984; Kessler, 1990; Lewis et al., 1994), 대류운(Kim and Chun, 2012; Kim et al., 2014), 태풍(Tse et al., 2019) 등이 있으며, 산악 및 지형에 의한 요인은 대표적으로 산악파(Lilly, 1978; Pattantyus et al., 2011; Chan, 2012;

*Corresponding Author: Byunghoon Min, High Impact Weather Research Department, National Institute of Meteorological Sciences, Room #707, Inderstry Academy Cooperation Center, 7, Jukheon-gil, Gangneung-si, Gangwon-do 25457, Korea
Phone: +82-070-7850-6732, Fax: +82-33-644-2657
E-mail: als8245@korea.kr

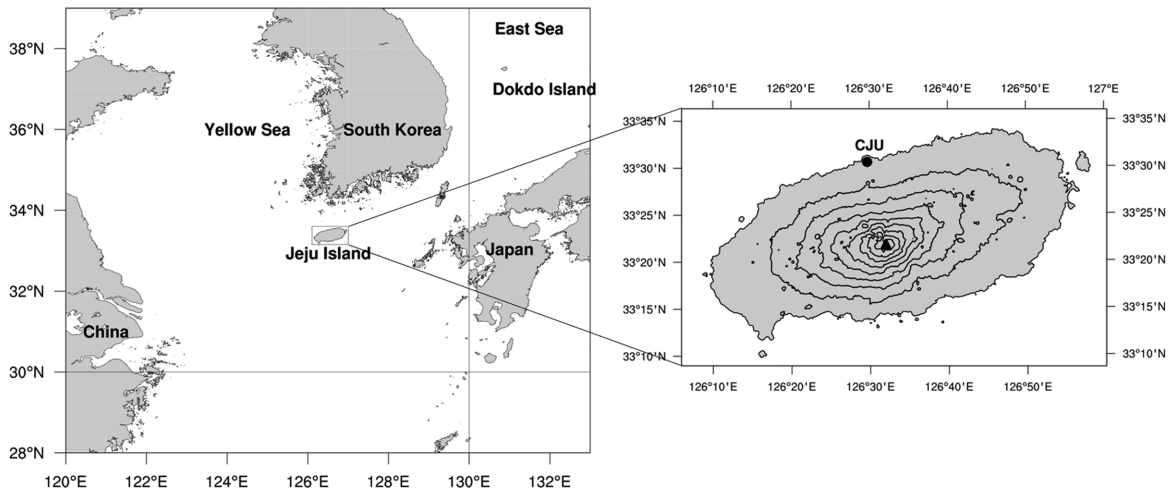


Fig. 1. Left: location of Jeju Island, Right: Jeju Island orography and location of Jeju International Airport (CJU).

Boilley and Mahfouf, 2013; Carruthers et al., 2014; Keller et al., 2015; Regmi and Maharjan, 2015)가 있다. 이러한 윈드시어를 정확하게 탐지 및 예측하기 위해 다양한 시도들이 이뤄지고 있다. Kessler (1990)는 활주로 주변에 발생한 항공기 불시착 사례를 연구해 LLWS (Low-Level Wind Shear Alert System)와 TDWR (Terminal Doppler Weather Radar)의 병행을 제안했으며, Bowles (1990a, 1990b)는 항공기의 역학적 에너지 변화를 수치적으로 나타내는 F-factor 사용을 제안했다. Carruthers et al. (2014)는 고해상도 수치모델을 활용한 LLWS 및 돌풍 등 항공 위험기상을 모의했다.

이착륙중인 항공기는 순항하는 항공기에 비해 상대적으로 속도가 느리고 고도가 낮아 바람 변화에 민감하다. 따라서 이착륙중인 항공기가 심한 강도의 윈드시어를 만나면 양력을 잃고 고도가 급격히 낮아지거나 추락할 가능성이 있다. 실제로 이착륙중인 항공기가 마이크로버스트를 만나 급격한 고도 변화를 보이거나 추락한 사례가 있으며(Kessler, 1990; Lewis et al., 1994), 산악파에 의한 항공기의 경로 이탈(Chan, 2012; Carruthers et al., 2014; Keller et al., 2015) 및 지형과의 충돌 사고(Regmi and Maharjan, 2015) 등 경제적, 인명적 피해가 지속적으로 발생하고 있다.

항공기 안전에 직접적으로 영향을 주는 LLWS를 사전에 예측하고 경보를 내리기 위해 수많은 공항들이 수치모델 및 관측장비를 활용하고 있다. 대표적인 예로 홍콩국제공항은 공항 근처에 발생하는 LLWS를 사전에 관측하고 경보를 내리기 위해 풍속계, 부이, TDWR, LIDAR (Light Detection And Ranging), LLWS, 윈드프로파일러 등을 운영하고 있다(Shun and Chan, 2008; Chan and Lee, 2011). 또한 고해상도 수

치모델을 활용해서 LLWS 및 돌풍 등 항공 위험기상을 사전에 예측하고 있으며, 이를 다양한 관측장비를 이용해서 검증하고 있다(Carruthers et al., 2014). Shun and Chan (2008)은 홍콩국제공항에 발생한 항공기 재상승 사례를 분석하기 위해 LIDAR와 QAR (Quick Access Recorder) 관측자료를 사용해서 착륙경로에 발생한 정풍(head wind)의 변화를 확인했으며, Carruthers et al. (2014)은 수치모델을 사용해서 항공기 재상승 사례를 모의했다. Chen et al. (2019)은 활주로 주변 건물들이 항공기 착륙경로의 바람에 어떤 영향을 미치는지 확인하기 위해 풍동실험을 실시했다.

제주도는 한반도 남쪽 바다 한가운데에 있는 타원 모양 화산섬으로 중심에는 고도 1,950 m인 한라산이 위치해 있다(Fig. 1). 제주국제공항은 한라산 북쪽에 위치해있으며 지형적인 효과로 산악에 의한 기류변형이 자주 발생한다(Lee et al., 2010, 2014). 본 논문에서는 제주국제공항 착륙경로에 발생한 윈드시어 사례에 대해 연구를 진행했다. 제주국제공항에 착륙한 항공기의 항공기 기상관측자료(Aircraft Meteorological Data Relay, AMDAR)를 바탕으로 윈드시어 사례를 선정했으며, 각 사례에 대한 분석을 진행했다. 그리고 사례 재현 및 윈드시어 예측시스템(KMAPP-LLWS) 구축을 위해 국립기상과학원의 고해상도 규모상세화 수치정보 산출체계(Korea Meteorological Administration Post-Processing, KMAPP)를 활용했다.

본 연구의 목적은 ① 고해상도 수치자료인 KMAPP 자료를 사용해서 보다 정확한 윈드시어 발생정보를 제공하는 KMAPP-LLWS의 제안, ② 제주국제공항 착륙경로에 발생한 윈드시어 사례 분석, ③ 제주국제공항 윈드시어 사례를 바탕으로 KMAPP-LLWS를 검증

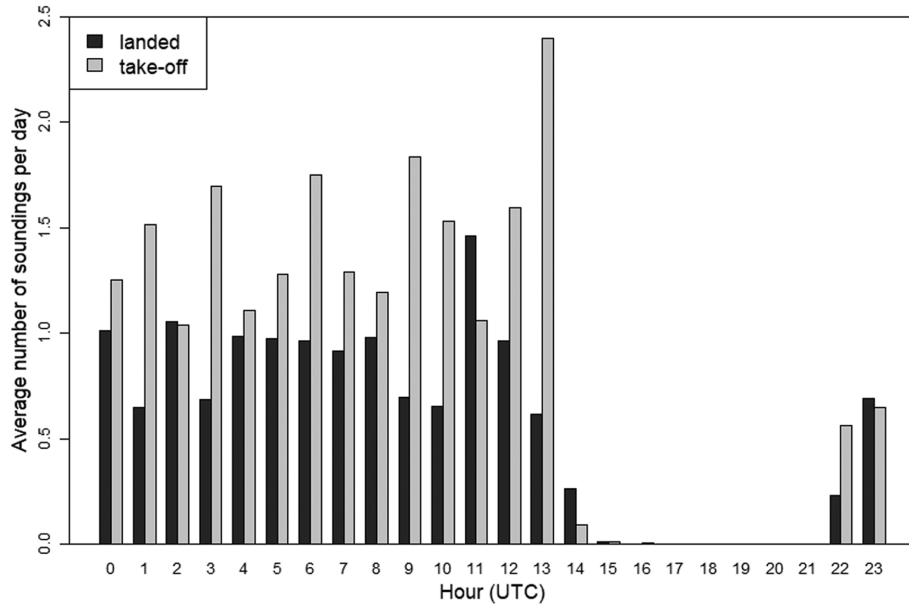


Fig. 2. For 2017~19, the average number of soundings with landed (dark bar) and take-off (light bar) aircraft each hour per day.

하는 것이다.

2. 자 료

2.1 항공기 기상관측자료(AMDAR)

AMDAR는 2003년 세계기상기구(World Meteorological Organization, WMO)의 권고아래 2019년 8월 기준 12 개 국가 및 지역의 43개 항공사가 참여중인 실시간 기상자료 수집 프로그램이다. AMDAR는 관측용 항공기가 아닌 상업용 항공기에 설치된 관측장비를 사용해서 기상자료를 수집하기 때문에 자료수집에 들어가는 비용이 상대적으로 저렴하고 전세계 항공경로에서 기상자료를 실시간으로 수집할 수 있다(WMO, 2014).

AMDAR 자료의 정확도를 확인하기 위해 다양한 방법으로 검증이 이뤄졌다. Ding et al. (2015)와 Zhang et al. (2019)는 AMDAR 자료를 레인존데 자료와 비교해서 바람과 온도의 정확도를 검증했고, Drüe et al. (2008)는 시공간적으로 유사한 독립적인 관측자료들의 에러를 통계적인 방법으로 추정하는 연어법(collocation)을 사용해서 AMDAR 자료를 검증했다. 이렇게 검증된 AMDAR 자료는 기상정보 서비스나 수치예보 자료동화 외에도 기후학적 특성 연구(Rahn and Mitchell, 2016), 다른 관측장비의 검증(Strajnar, 2012) 등에 쓰이고 있다.

AMDAR 자료는 항공기가 운항중에 관측하는 특성상 시공간과 해상도가 일정하지 않으며 관측공백지가

많아 활용이 제한적이다. 하지만 고층 기상정보를 얻을 수 있으며, 공항 근처 저고도에서는 일정한 경로로 항공기가 운항하기 때문에 부분적으로 AMDAR 자료의 활용도가 높아진다. 본 논문에서는 항공기가 저고도에서 일정한 경로로 운항하는 특징을 활용해 2,800 ft 이하 착륙경로에서 관측된 AMDAR 자료를 사용했다.

Figure 2는 AMDAR 시스템이 설치된 항공기가 제주국제공항에 이착륙한 일평균 비행 횟수를 나타낸다. 2017년~2019년 3년동안 관측된 AMDAR 자료를 사용했으며, 제주국제공항 부근 2,800 ft 이하 고도에서 관측된 AMDAR 자료의 관측시간, 비행기 번호(tail number), 이착륙 공항 등의 정보를 바탕으로 비행 횟수를 카운트했다. Figure 2를 보면 1500 UTC~2100 UTC 사이에는 관측자료가 거의 없다(야간에 국내선 운항이 없기 때문). 그에 반해 0000 UTC~1300 UTC 사이에 착륙하는 항공기(landed)의 경우 0.6~1.5회, 이륙하는 항공기(take-off)의 경우 1.0~2.4회 관측이 이뤄져 매시간 관측자료가 쌓이는 것을 알 수 있다.

2.2 고해상도 규모상세화 수치정보 산출체계(KMAPP)

KMAPP은 국립기상과학원에서 구축한 수치정보 산출체계로, 영국 기상청에서 개발한 후처리 소프트웨어인 규모상세화 패키지(United Kingdom Post Processing)에 그 기반을 두고 있다. KMAPP의 입력장은 1.5 km 수평 해상도인 국지예보모델(Local Data Assimilation and Prediction System, LDAPS)의 분석·예측자료이며, 상세 지형자료 반영과 내삽과정을 통해 규모상세화

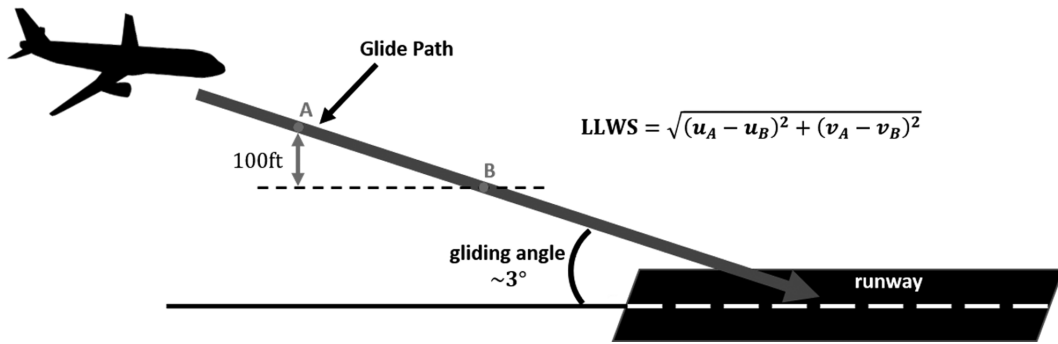


Fig. 3. Outline of KMAPP-LLWS.

Table 1. Runway characteristics of Jeju International Airport.

Runway No.	Runway direction (°)	TDZ elevation (m)	Glide angle (°)	Longitude of THR (°E)	Latitude of THR (°N)
07	58.46	26.6	3	33.500	126.468
25	238.47	23.6	3	33.515	126.498

(downscaling)를 수행한다. 또한 목표 지점에 대한 지점 특화 정보를 산출하는 과정인 지점특화 가이드스(Site-Specific Processing System)가 포함되어 있다(NIMS, 2017).

KMAPP은 100 m (6,900 × 6,750) 수평해상도를 가지며 지표면자료와 모델면자료로 나뉘어 생산되고 있으며, 생산 주기는 일 4회(0000, 0600, 1200, 1800 UTC) 48시간 예측정보를 1시간 간격으로 생산한다. 지표면자료의 경우 바람(u, v), 기온, 상대습도, 일사량, 시정, 강수량, 해면기압 8개 변수가 생산된다. 모델면자료의 경우 29층(모델 상단 고도: 약 3 km)으로 구성되어 있으며 바람(u, v) 기온, 기압 4개종 변수가 생산된다.

3. 연구방법

3.1 KMAPP-LLWS 개발

KMAPP-LLWS는 KMAPP을 사용해서 공항 착륙경로에 발생하는 윈드시어의 세기 및 발생 위치를 예측하는 시스템으로 실제 항공경로를 고려해서 윈드시어 발생을 예측하는 특징을 갖는다(Fig. 3). 따라서 KMAPP-LLWS를 구축하는데 있어서 항공기 착륙경로를 설정하는 단계는 매우 중요하며, 제주국제공항의 착륙경로를 설정하기 위해 항공기 착륙시스템 중 하나인 계기착륙시설(Instrument Landing System, ILS)의 개념을 적용했다.

공항에 착륙하기 위해 접근한 항공기는 관제탑의 지시에 따라 포인트머지(point merge)를 통과한 후 활주로 착륙접지대(TouchDown Zone, TDZ)로 비스듬히

하강한다. 공항에는 항공기의 안전한 착륙을 위해 다양한 항행안전시설이 설치되어 있는데, 그 중 ILS는 활주로의 위치 및 중심선, 활공각(gliding angle) 등의 정보를 제공해서 항공기의 안전한 착륙을 유도한다. 방위각제공시설(Localizer, LLZ)은 활주로에 접근중인 항공기에 착륙유도범위와 활주로 중심선 정보를 알려주며, 활공각제공시설은 활주로에 착륙하는 항공기에 활공각 정보를 제공한다. 이때 활공각은 대부분의 공항에서 3°를 사용한다.

제주국제공항은 주 활주로(07/25)와 보조 활주로(13/31) 두개의 활주로는 있으며, 이착륙하는 항공기는 특별한 경우를 제외하면 주 활주로를 사용한다. 따라서 제주국제공항 KMAPP-LLWS는 주 활주로 착륙경로에서 윈드시어를 예측하며, 착륙방향에 따라 07A(Arrival)와 25A로 나뉘어서 구축했다. KMAPP-LLWS에 착륙경로를 설정하기 위해 Table 1에 나와있는 제주국제공항 활주로 정보를 사용했다. Table 1에서 THR(runway threshold)는 활주로 말단을 나타낸다. LLZ를 설정하기 위해 Table 1의 제주국제공항 활주로 방향과 THR 위경도가 사용되었고, 활공각제공시설 설정에는 THR 고도와 활공각 3°를 사용했다.

윈드시어 계산은 국제민간항공기구(International Civil Aviation Organization, ICAO)에서 명시한 고도 100 ft 당 바람 변화 크기를 사용하며 아래 식을 따른다(ICAO, 2005).

$$LLWS = \frac{\sqrt{(u_A - u_B)^2 + (v_A - v_B)^2}}{|h_A - h_B|} \times 100 \quad (1)$$

Table 2. Provisional criteria for wind shear intensity proposed by the Fifth Air Navigation Conference (Montreal, 1967).

Wind shear level	Light	Moderate	Strong	Severe
Wind shear scale (/100 ft)	0 kt ≤ LLWS < 5 kt	5 kt ≤ LLWS < 9 kt	9 kt ≤ LLWS < 12 kt	12 kt ≤ LLWS

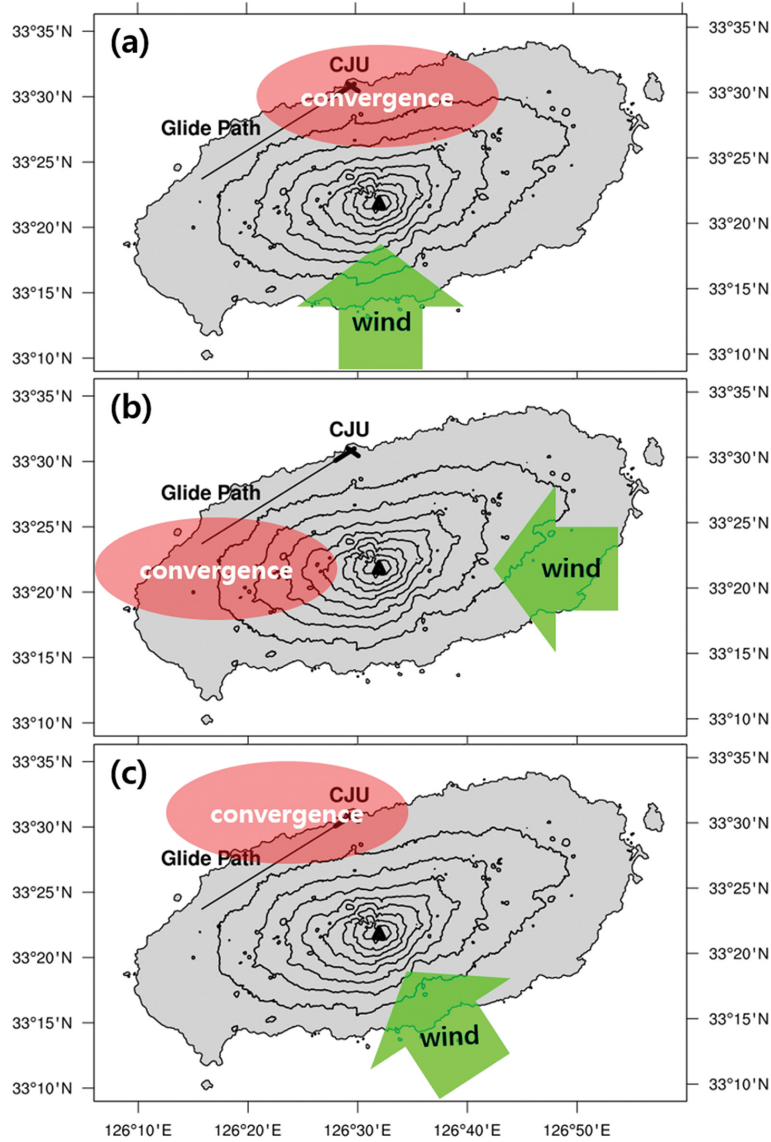


Fig. 4. Glide path (black line) and Jeju Island orography. Cross Marker shows Jeju International Airport (CJU) runway. Wind direction and convergence show the windward and leeward in (a) the south wind, (b) the east wind and (c) the southeast wind.

여기서 u 와 v 는 각각 서풍과 남풍을, h 는 고도를 나타낸다. 속도 성분의 단위는 knot를, 길이 성분의 단위는 feet를 사용하며 아래첨자 A와 B는 고도가 다른 두 지점을 뜻한다.

KMAPP-LLWS는 고도 100 ft 단위로 윈드시어를 계산하기 때문에 식(1)은 다음과 같이 간소화된다.

$$LLWS = \sqrt{(u_A - u_B)^2 + (v_A - v_B)^2} \quad (2)$$

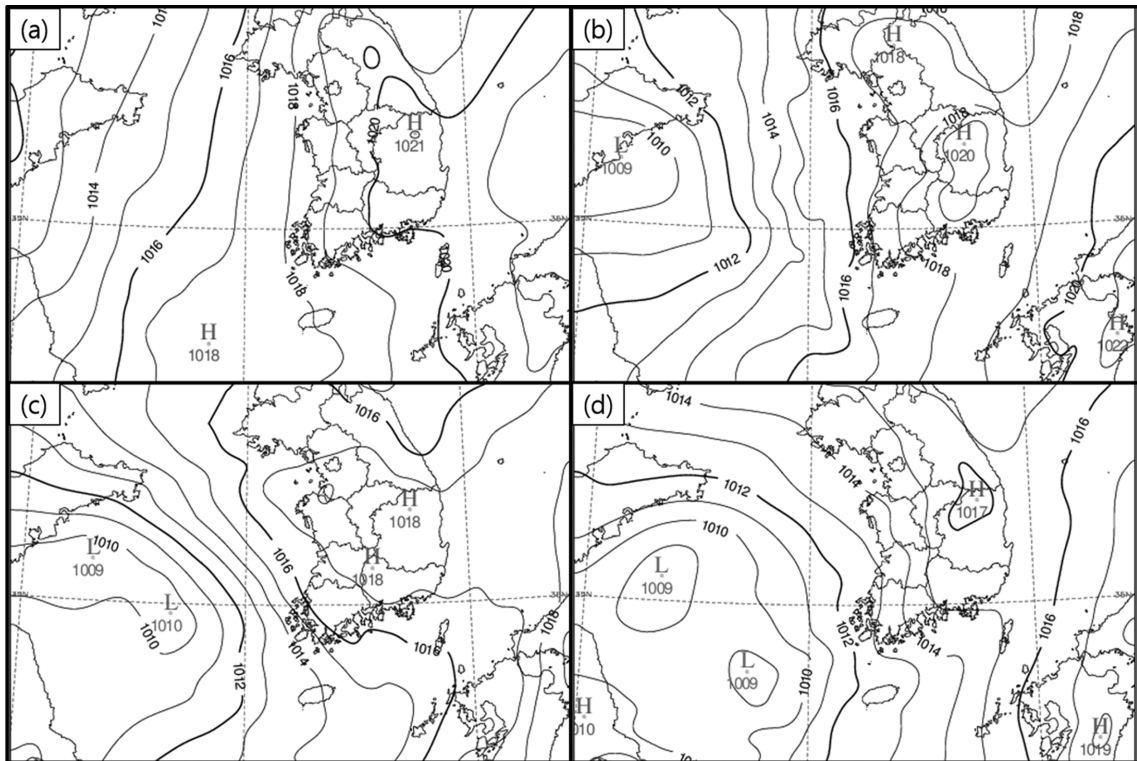


Fig. 5. The weather chart at (a) 1800 UTC on 1 September, 2017, (b) 0000 UTC on 1 October, 2017, (c) 0600 UTC on 1 October, 2017, (d) 1200 UTC on 1 October, 2017.

여기서 A 와 B 는 고도 차이가 100 ft인 착륙경로상의 두 지점이다(Fig. 3). 식(1)과 (2)에서 계산된 윈드시어 값은 Fifth Air Navigation Conference (Montreal, 1967)에서 제안한 윈드시어 등급표(Table 2)를 사용해서 위험 등급[약한(light), 중간(moderate), 강한(strong), 심한(severe)]별로 분류했다.

3.2 사례선정 및 검증 방법

제주국제공항 활주로 또는 항공경로에 산악에 의한 기류변형이 발생하면 이착륙하는 항공기들은 바람의 변화(윈드시어)를 맞이하게 된다. 특히 제주국제공항 07A 착륙경로(또는 25D 이륙경로)의 경우 한라산과 가깝게 위치해 있어서(Fig. 4a-c) 산악에 의한 기류변형이 발생할 가능성이 높다.

제주국제공항 착륙경로에서 윈드시어 사례를 선정하기 위해 AMDAR 자료를 사용했다. 2017년 8월부터 2019년 7월까지 2년동안 관측된 AMDAR 자료의 풍향, 풍속, 고도 자료와 식(1)을 사용해서 윈드시어 값을 산출했으며, 계산된 윈드시어 값을 Table 2와 비교해서 중간(moderate) 등급 이상의 윈드시어 사례 3건을 선정했다. 선정된 사례가 적은 이유는 위험기상

이 발생하면 항공기 운항이 지연 및 결항되기 때문이다.

KMAPP의 고해상도 바람자료를 사용해서 제주국제공항 착륙경로에 발생한 윈드시어 사례를 재현했다. 또한 KMAPP-LLWS에서 예측한 윈드시어와 활주로 연직방향으로 예측한 윈드시어를 비교했으며, 이들의 검증을 위해 AMDAR 자료에서 계산된 윈드시어를 사용했다. 또한 한반도 해면기압일기도 분석장으로부터 각 사례의 윈드시어 발생원인을 분석했다.

4 결 과

4.1 사례 분석

4.1.1 2017년 10월 1일 사례

Figure 5는 2017년 9월 30일 1800 UTC부터 10월 1일 1200 UTC까지 6시간 간격으로 그린 한반도 해면기압일기도 분석장이다. 이날 산동반도 남쪽에서 접근한 저기압의 영향으로 동고서저형 기압배치가 형성되면서 제주도에 남풍계열 바람이 불었다. 그 결과 한라산 북쪽 지역에서 기류가 변했고, 제주국제공항 부근에 윈드시어가 발생했다(Fig. 4a). 실제로 이날 제주국제공항에는 윈드시어경보와, 강풍경보(10분 평균

Table 3. AMDAR data of aircraft landed at Jeju International Airport and the calculated wind shear values between 0350 UTC and 0830 UTC on 1 October, 2017.

Tail number	Time (UTC)	Altitude (ft)	Longitude (°E)	Latitude (°N)	Wind direction (°)	Wind speed (kt)	Wind shear (/100 ft)
HL7718	0350	2250	33.462	126.375	162	46	5.33
	0351	1390	33.483	126.423	78	8	1.32
	0352	590	33.508	126.467	7	10	-
HL7599	0516	2120	33.445	126.383	168	58	2.75
	0517	1160	33.468	126.435	162	32	5.71
	0518	340	33.492	126.480	332	15	-
HL7402	0709	2730	33.435	126.362	177	57	0.68
	0710	1720	33.465	126.417	172	52	7.03
	0711	890	33.488	126.463	19	7	0.65
	0712	160	33.508	126.503	336	5	-
HL7719	0742	2880	33.408	126.347	190	60	1.49
	0743	1890	33.435	126.400	177	57	1.41
	0744	950	33.465	126.452	180	44	6.27
	0745	90	33.485	126.497	29	11	-
HL7716	0827	1850	33.482	126.407	190	59	1.47
	0828	830	33.508	126.460	184	45	7.29
	0829	50	33.532	126.505	61	18	-

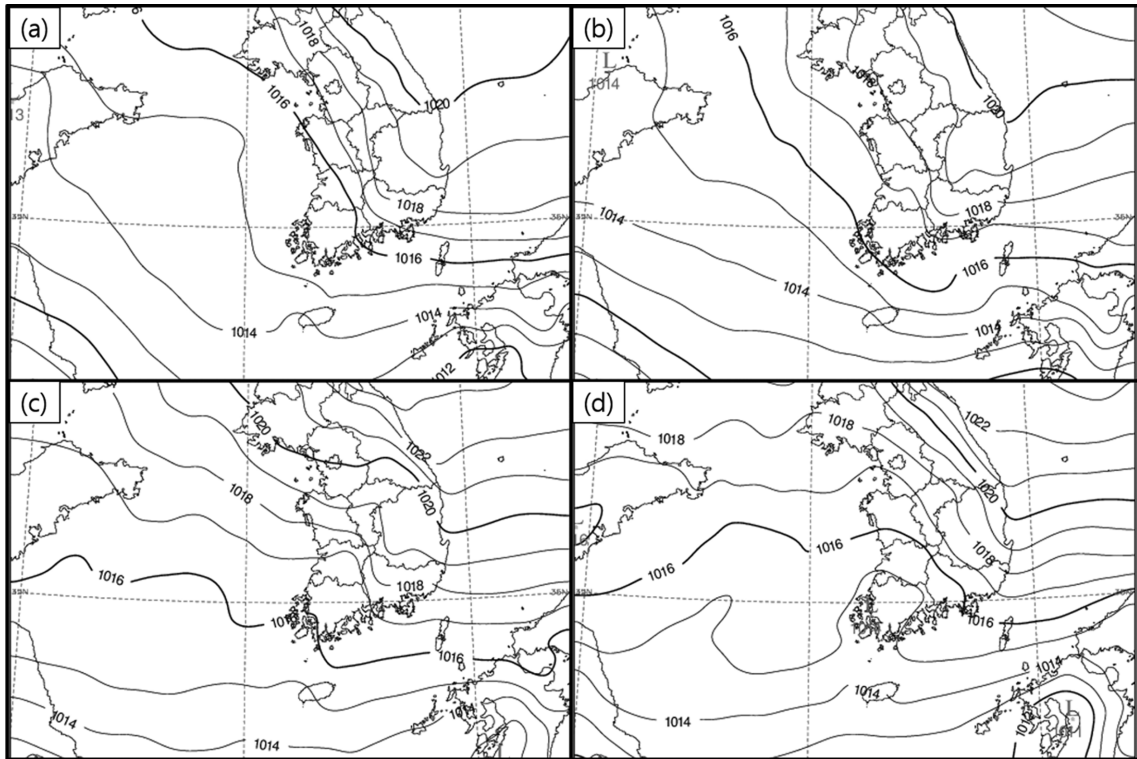


Fig. 6. The weather chart at (a) 1200 UTC on 1 May, 2018, (b) 1800 UTC on 1 May, 2018, (c) 0000 UTC on 2 May, 2018, (d) 0600 UTC on 2 May, 2018.

Table 4. AMDAR data of aircraft landed at Jeju International Airport and the calculated wind shear values between 0204 UTC and 0207 UTC on 20 May, 2018.

Tail number	Time (UTC)	Altitude (ft)	Longitude (°E)	Latitude (°N)	Wind direction (°)	Wind speed (kt)	Wind shear (/100 ft)
HL7704	0204	2550	33.433	126.360	244	2	5.48
	0205	1770	33.455	126.403	95	41	1.11
	0206	1120	33.472	126.437	89	35	1.85
	0207	470	33.488	126.472	91	23	-

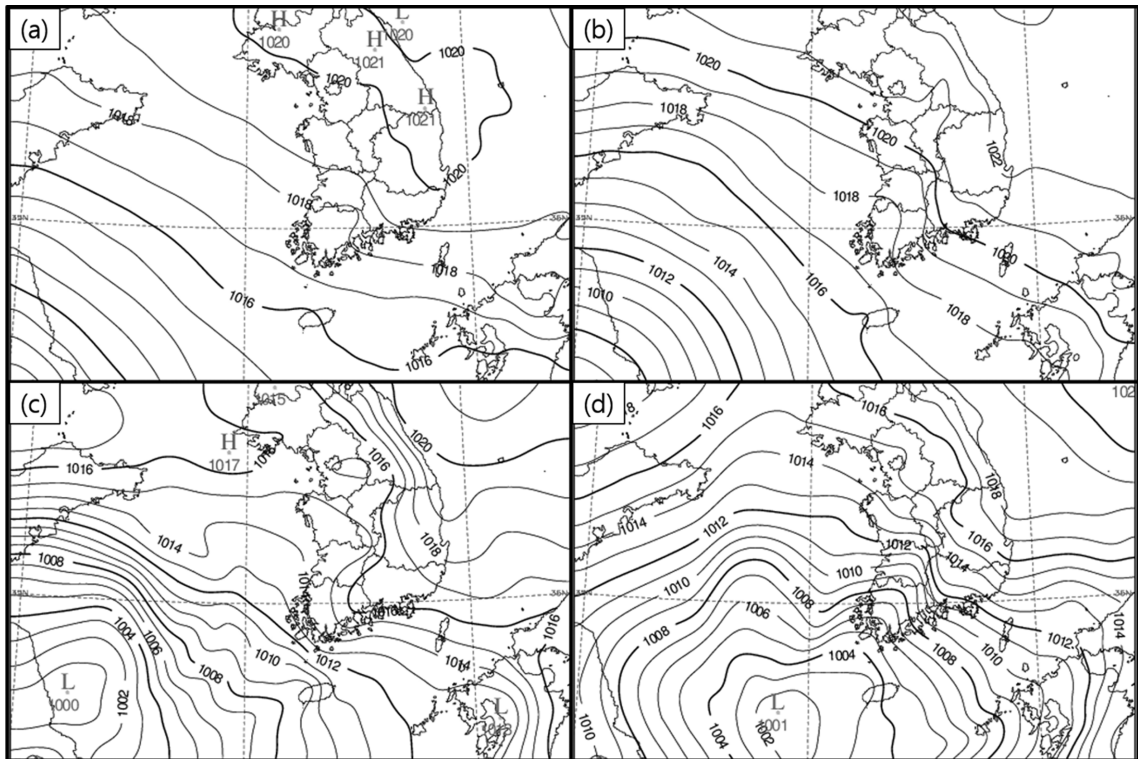


Fig. 7. The weather chart at (a) 1800 UTC on 8 April, 2019, (b) 0000 UTC on 9 April, 2019, (c) 0600 UTC on 9 April, 2019, (d) 1200 UTC on 9 April, 2019.

25 kt 이상)가 동시에 발생했으며, 이 두 현상이 AMDAR 관측자료에 나타나있다.

Table 3은 2017년 10월 1일 0350~0830 UTC에 제주국제공항에 착륙한 항공기 5편(HL7718, HL7599, HL7402, HL7719, HL7716)의 AMDAR 자료와 AMDAR 자료로부터 계산된 윈드시어 값이다. 이 사례에서는 1,800 ft 이상 고도에서 풍향 162°~190°, 풍속 46 kt 이상인 남풍계열의 강풍이 관측됐으며, 800 ft 이하 고도에서는 20 kt 이하의 북풍 또는 동풍계열 바람이 관측됐다. 따라서 풍향과 풍속이 급변하는 제주국제공항 착륙경로에서 윈드시어가 발생했으며, 그 크기는 5.3~7.3 kt/100 ft로 중간(moderate) 등급이다.

4.1.2 2018년 5월 20일 사례

Figure 6는 2018년 5월 19일 1200 UTC부터 20일 0600 UTC까지 6시간 간격으로 그린 한반도 해면기압 일기도 분석장이다. 저기압이 한반도 남쪽을 통과하는 북고남저형 기압배치로 제주도에는 동풍계열 바람이 불었다. 그 결과 한라산 서쪽에서 기류가 변했고, 제주국제공항에 착륙하기 위해 접근한 항공기는 07A 착륙경로 상층부에서 윈드시어를 마주했다(Fig. 4b). 실제로 이날 제주국제공항에는 윈드시어경보와, 강풍경보가 동시에 발생했다.

Table 4는 2018년 5월 20일 0204~0207 UTC에 제주국제공항에 착륙한 항공기 HL7704편의 AMDAR 자

Table 5. AMDAR data of aircraft landed at Jeju International Airport and the calculated wind shear values between 0806 UTC and 0808 UTC on 9 April, 2019.

Tail number	Time (UTC)	Altitude (ft)	Longitude (°E)	Latitude (°N)	Wind direction (°)	Wind speed (kt)	Wind shear (/100 ft)
HL7569	0806	1800	33.462	126.408	159	52	6.80
	0807	980	33.483	126.453	71	22	2.40
	0808	230	33.502	126.492	91	37	-

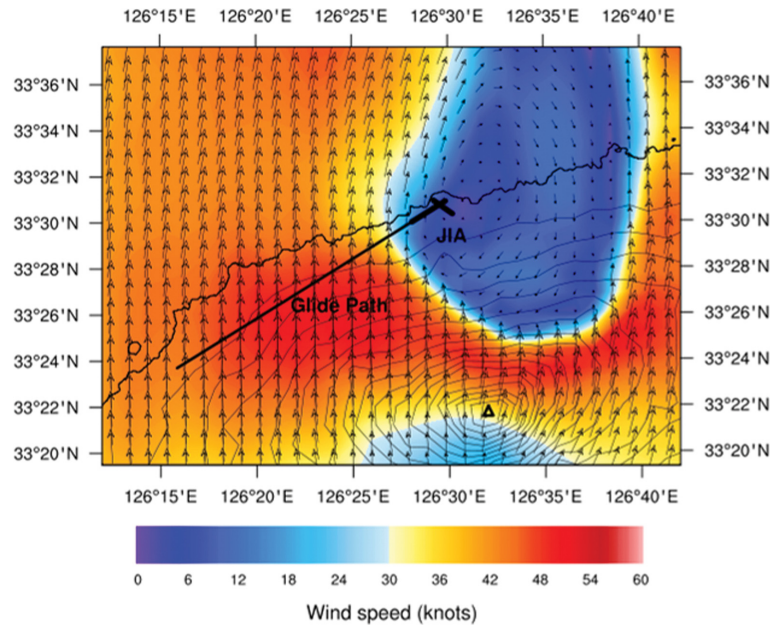


Fig. 8. Simulated horizontal wind field at the height of 360 m around the Jeju International Airport (CJU) glide path at 0800 UTC on 1 October, 2017.

료와 AMDAR 자료로부터 계산된 윈드시어 값이다. Table 4를 보면 고도 1,770 ft 이하에서 풍향 89°~95°, 풍속 20~40 kt인 동풍계열의 강풍이 관측됐다. 그러나 고도 2,550 ft에서는 풍향 244°, 풍속 2 kt인 아주 약한 바람이 관측됐다. 따라서 제주국제공항 07A 착륙경로 상층부에 윈드시어가 발생했으며, 그 크기는 5.48 kt/100 ft로 중간(moderate) 등급이다.

4.1.3 2019년 4월 9일 사례

Figure 7은 2019년 4월 8일 1800 UTC부터 9일 1200 UTC까지 6시간 간격으로 그린 한반도 해면기압일기도 분석장이다. 이날 양쯔강 하류 부근에서 접근한 저기압의 영향으로 제주도에 남동풍계열 바람이 불었다. 그 결과 한라산 북서쪽에서 기류가 변했고, 07A 착륙 경로에 윈드시어가 발생했다(Fig. 4c). 실제로 이날 제주국제공항에는 윈드시어경보와, 강풍경보가 동시에 발생했다.

Table 5는 2019년 4월 9일 0806~0808 UTC에 제주국제공항에 착륙한 항공기 HL7569편의 AMDAR 자료와 AMDAR 자료로부터 계산된 윈드시어 값이다. Table 5를 보면 고도 980 ft 이하에서 풍향 71°~91°, 풍속 22~37 kt인 동풍계열의 바람이 관측됐다. 그러나 고도 1,800 ft에서는 풍향 159°, 풍속 52 kt인 남동풍계열의 바람이 관측됐다. 그 결과 제주국제공항 착륙 경로에 윈드시어가 발생했으며, 그 크기는 6.80 kt/100 ft로 중간(moderate) 등급이다.

4.2 KMAPP-LLWS을 이용한 사례 검증

4.2.1 2017년 10월 1일 사례

KMAPP이 2017년 10월 1일 제주국제공항 부근에서 발생한 기류 변화를 잘 모의하는지 확인하기 위해 수평바람의 수평·연직바람장을 확인했다. Figure 8과 Fig. 9은 각각 제주국제공항 07A 착륙경로를 중심으로 그린 수평바람장과 수평바람의 연직분포이며, 2017

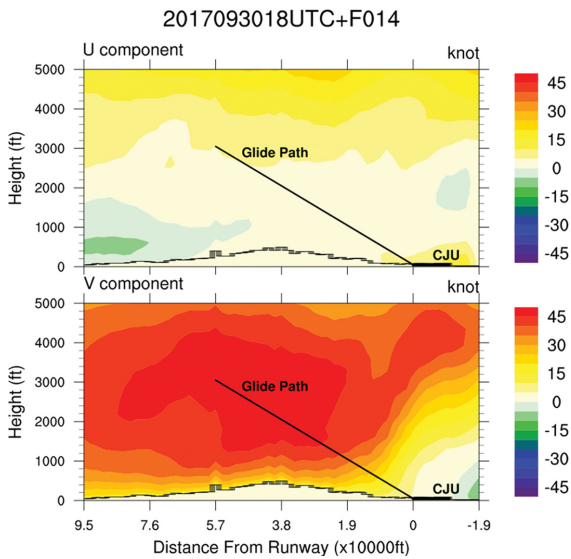


Fig. 9. Simulated vertical wind field of u (top) and v (bottom) along the Jeju International Airport (CJU) glide path at 0800 UTC on 1 October, 2017.

년 9월 30일 1800 UTC를 입력장으로 14시간 예측한 결과이다. 수평·연직바람장에 제주국제공항 활주로(CJU)와 07A 착륙경로(Glide Path), 한라산 위치도 같이 표현했다.

Figure 8은 지상고도 1,181.1 ft (360 m) 수평바람장으로 지형은 등고선으로, 풍속은 색으로, 풍향은 벡터로 나타냈다. Figure 8을 보면 남풍계열 바람이 한라산과 부딪히면서 한라산 남쪽은 풍속이 30 kt 이하인 것을 확인할 수 있다. 하지만 한라산을 넘어온 바람은 풍속이 증가하면서 45 kt 이상의 풍속을 나타내고, 풍하층에 위치한 제주국제공항 부근은 10 kt 이하의 풍속을 나타내고 있다.

Figure 9은 제주국제공항 07A 착륙경로를 따라 그린 수평바람의 연직바람장이다. x 축은 제주국제공항 07A 활주로말단으로부터 거리를, y 축은 해발고도를 나타내고 있으며 u , v 성분으로 나뉘어서 그렸다. Figure 9의 u 성분 연직바람장을 보면 착륙경로 주변에서 5 kt 이하의 약한 바람을 나타내고 있다. 하지만 v 성분 연직바람장은 고도 1,000 ft 이상 착륙경로에서 풍속 40 kt 이상의 남풍을 나타내고 있으며, 고도 500 ft 이하 착륙경로에서 10 kt 이하의 남풍을 나타내고 있는 것을 확인할 수 있다. 따라서 KMAPP이 500~1,000 ft 사이 고도에서 윈드시어 발생을 예측하는 것을 알 수 있다.

KMAPP-LLWS의 예측성능을 확인하기 위해 AMDAR 자료에서 계산된 윈드시어 값과 비교했으며, 착륙경로에서 윈드시어 예측이 적합한지 확인하기 위해 활

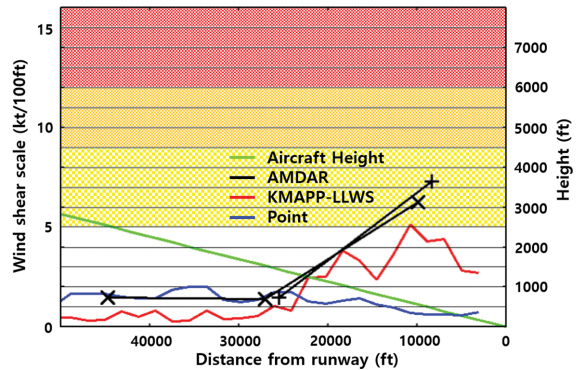


Fig. 10. Variation of wind shear with height along the glide path (KMAPP-LLWS and AMDAR) and at the Jeju International Airport (KMAPP). Wind shear are computed from AMDAR data (black) and from KMAPP [KMAPP-LLWS (red), Point (blue)] at 0800 UTC on 1 October, 2017.

주로 연직방향으로 예측한 윈드시어도 같이 비교했다 (Fig. 10). Figure 10에서 KMAPP-LLWS (빨간색 실선)는 KMAPP-LLWS에서 계산된 윈드시어 예측값을, Point (파란색 실선)는 KMAPP에서 활주로 연직 방향으로 추출한 바람(wind profiler)을 식(2)에 넣어서 계산한 윈드시어를, 그리고 AMDAR (검정색 실선)는 Table 3의 AMDAR 자료를 사용해서 계산한 윈드시어 관측값을 나타내며, Aircraft Height (초록색 실선)은 착륙경로의 고도를 나타낸다. KMAPP-LLWS와 Point의 계산을 위해 2017년 9월 30일 1800 UTC를 입력장으로 14시간 예측한 u , v 성분이 사용됐다.

Figure 10에서 배경 색은 윈드시어의 등급을 나타낸다[흰색: 약한(light), 노란색: 중간(moderate), 주황색: 강한(strong), 빨간색: 심한(severe)]. 윈드시어 관측값(AMDAR) 및 예측값(KMAPP-LLWS, Point)의 크기는 왼쪽 y 축에 나타냈으며 07A 활주로 활주로말단으로부터 거리는 x 축에 나타냈다. 활주소에 접근하는 항공기의 고도(Aircraft Height)는 오른쪽 y 축에 나타냈으며, 윈드시어 관측 및 예측 고도는 Aircraft Height와 x 값이 일치하는 지점의 항공기 고도와 같다.

Table 3을 보면 2017년 10월 1일 0742~0829 UTC에 항공기 HL7719와 HL7716의 AMDAR 자료에서 산출된 윈드시어는 고도 950~1,890 ft와 830~1,850 ft 사이에서 1.5 kt/100 ft 이하의 값을 나타낸다. 하지만 고도 90~950 ft와 50~830 ft 사이에서는 각각 6.27 kt/100 ft와 7.29 kt/100 ft 값을 나타내면서 중간(moderate) 등급 윈드시어가 발생한 것을 알 수 있다.

이러한 특징은 KMAPP-LLWS에서 잘 나타나있다. KMAPP-LLWS에서 산출된 예측값(KMAPP-LLWS)은 1,400 ft 이상 고도에서 1 kt/100 ft 보다 작은 값을 나

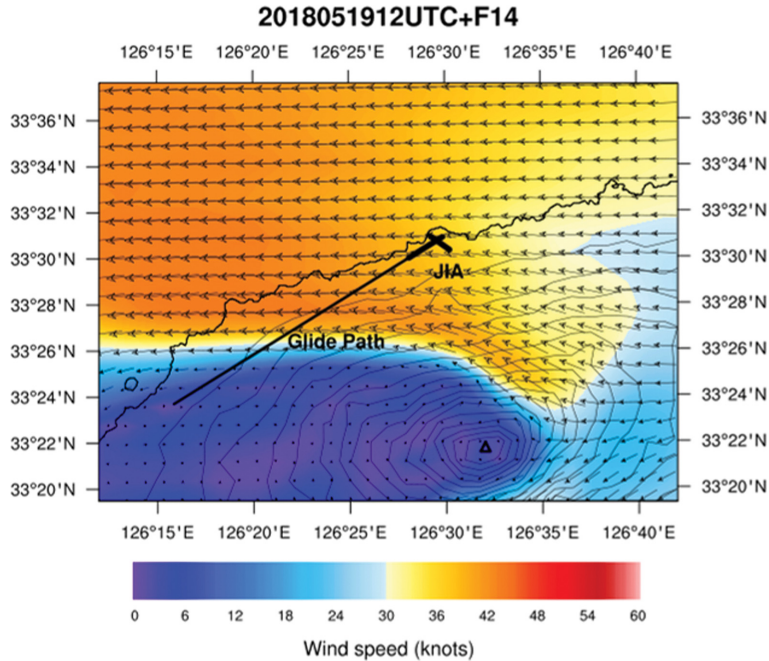


Fig. 11. Simulated horizontal wind field at the height of 360 m around the Jeju International Airport (CJU) glide path at 0200 UTC on 20 May, 2018.

타낸다. 하지만 고도 1,300 ft 이하에서 윈드시어 값이 증가하다가 고도 600 ft에서 세기 5 kt/100 ft 이상인 중간(moderate) 등급의 윈드시어를 모의했다. 그에 반해 활주로에서 연직방향으로 예측한 윈드시어(Point)는 모든 고도에서 2 kt/100 ft 이하의 윈드시어를 모의하면서 윈드시어 발생을 예측하지 못했다.

4.2.2 2018년 5월 20일 사례

KMAPP이 2018년 5월 20일 07A 착륙경로 상층부에 발생한 윈드시어를 잘 모의하는지 확인하기 위해 수평바람장과 수평바람의 연직분포를 확인했다. Figure 11과 Fig. 12은 각각 제주국제공항 07A 착륙경로를 중심으로 그린 수평바람장과 수평바람의 연직분포이며 Figs. 8, 9과 같은 방법으로 표현했다. 사용된 바람자료는 2018년 5월 19일 1200 UTC를 입력장으로 14시간 예측한 *u*, *v* 성분을 사용했다.

Figure 11을 보면 한라산 북쪽에 30 kt 이상인 동풍 계열 바람을 나타내고 있다. 하지만 한라산 서쪽은 지형적인 영향으로 5 kt 이하 바람을 나타내고 있다. 이러한 특징은 Fig. 12에서도 잘 나타난다. Figure 12의 *u* 성분 연직분포를 보면, 2,500 ft 이상 착륙경로에서 풍속 5 kt 이하 동풍을 나타내고 있다. 하지만 착륙경로를 따라 바람이 급격하게 상승해 2,000 ft 이하에서 풍속 30~40 kt 동풍을 나타내고 있다. 따라서 KMAPP

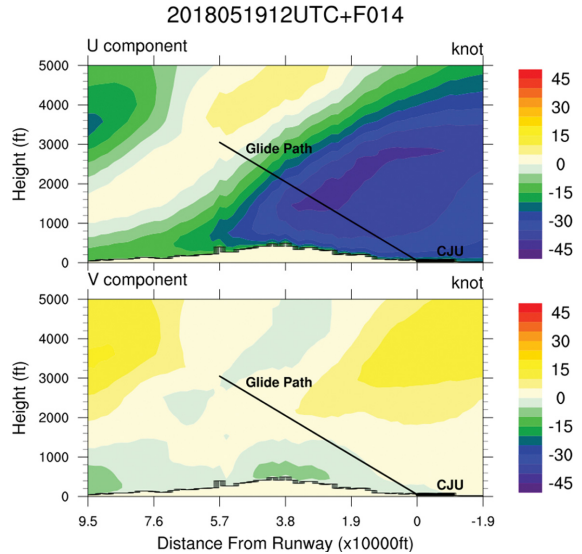


Fig. 12. Simulated vertical wind field of *u* (top) and *v* (bottom) along the Jeju International Airport (CJU) glide path at 0200 UTC on 20 May, 2018.

이 2,000~2,500 ft 사이 고도에서 윈드시어 발생을 예측하는 것을 알 수 있다.

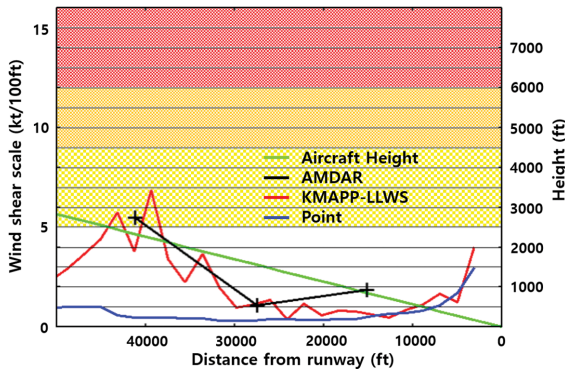


Fig. 13. Variation of wind shear with height along the glide path (KMAPP-LLWS and AMDAR) and the vertical (Point). Wind shear are computed from AMDAR data (black) and from KMAPP [KMAPP-LLWS (red), Point (blue)] at 0200 UTC on 20 May, 2018.

Figure 13의 AMDAR (검정색 실선)는 2018년 5월 20일 0204~0207 UTC에 제주국제공항에 착륙한 항공기 HL7704가 관측한 AMDAR 자료(Table 4)에서 산출된 윈드시어 관측값이다. 윈드시어 관측값은 1,770~2,550 ft 사이 고도에서 세기 5.48 kt/100 ft로 중간(moderate) 등급이다. 하지만 고도 470~1,770 ft 사이

에서는 세기 1.85 kt/100 ft 이하인 약한(light) 등급의 윈드시어가 관측됐다. KMAPP-LLWS에서 산출된 예측값(KMAPP-LLWS)은 고도 2,200 ft에서 세기 6.87 kt/100 ft인 중간(moderate) 등급을 예측했고, 2,000 ft 이하 고도에서 4 kt/100 ft 이하의 약한(light) 등급을 예측하고 있다. 그에 반해, 활주로에서 연직방향으로 예측한 윈드시어(Point)는 모든 고도에서 3 kt/100 ft 이하의 윈드시어 세기를 모의하면서 윈드시어 발생을 예측하지 못했다.

4.2.3 2019년 4월 9일 사례

KMAPP이 2019년 4월 9일 제주국제공항 부근 착륙경로에 발생한 바람의 수렴현상을 잘 모의하는지 확인하기 위해 수평바람장과 수평바람의 연직분포를 확인했다. Figures 14, 15는 각각 제주국제공항 07A 착륙경로를 중심으로 그린 수평바람의 수평바람장과 연직바람장으로 2019년 4월 8일 1800 UTC를 입력장으로 14시간 예측한 u, v 성분을 사용해서 그렸다. 수평바람장(Fig. 14)을 보면 남동풍계열 바람이 한라산과 부딪히면서 한라산 남동쪽에 풍속이 30 kt 이하인 바람을 나타내고 있다. 하지만 한라산을 넘어온 바람은 풍속이 증가하면서 한라산 서쪽에서 북동쪽에 걸친 영역에 60 kt 이상의 바람을 나타내고 있으며, 풍하측에 위치한 제주국제공항 서쪽은 10 kt 이하의 바

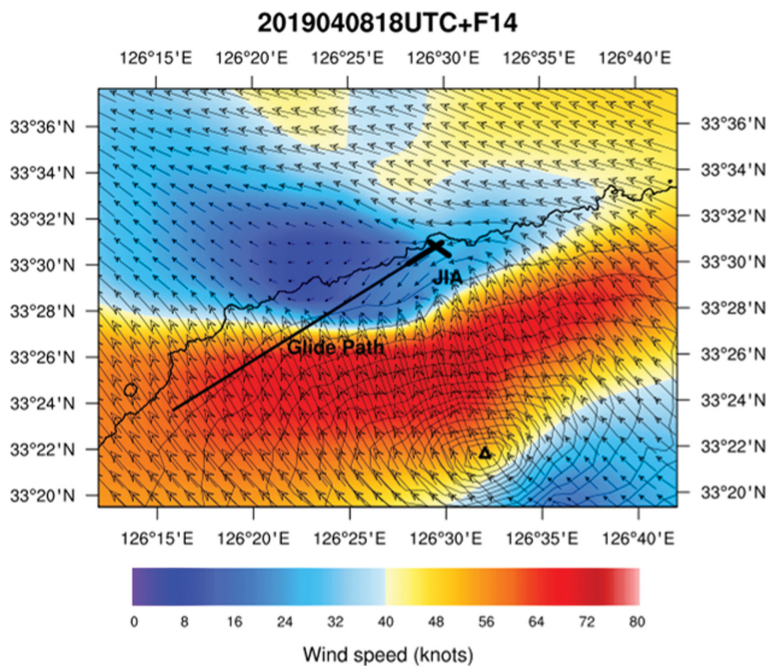


Fig. 14. Simulated horizontal wind field at the height of 360 m around the Jeju International Airport (CJU) glide path at 0800 UTC on 9 April, 2019.

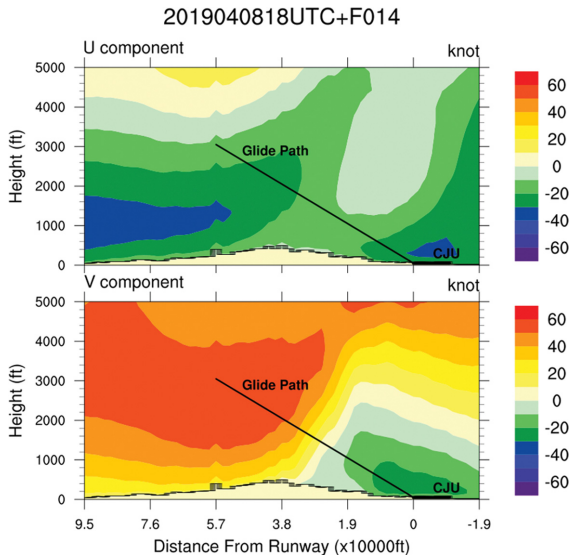


Fig. 15. Simulated vertical wind field of u (top) and v (bottom) along the Jeju International Airport (CJU) glide path at 0800 UTC on 9 April, 2019.

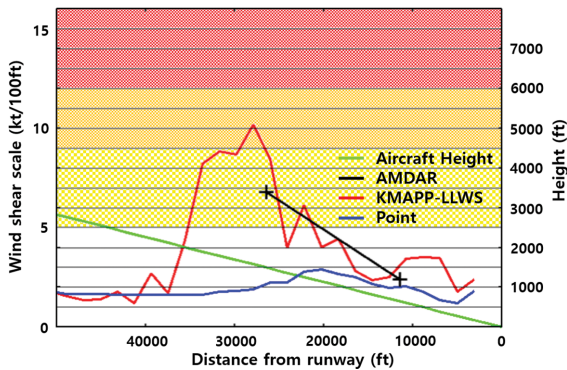


Fig. 16. Variation of wind shear with height along the glide path (KMAPP-LLWS and AMDAR) and the vertical (Point). Wind shear are computed from AMDAR data (black) and from KMAPP [KMAPP-LLWS (red), Point (blue)] at 0800 UTC on 9 April, 2019.

람을 나타내고 있다.

u 성분 연직바람장(Fig. 15)을 보면 착륙경로에서 10 kt 이상의 풍속이 모의되지만 풍속의 변화가 크지 않아서 윈드시어 발생과는 거리가 멀어 보인다. 하지만 v 성분은 착륙경로 상층부인 2,000 ft 이상에서 풍속 60 kt 이상 남풍을, 그리고 1,000 ft 이하 착륙경로 하층부에서 풍속 20 kt 이상 북풍을 나타낸다. 따라서 KMAPP이 1,000~2,000 ft 사이 고도에서 윈드시어 발생을 예측하는 것을 알 수 있다.

Figure 16의 AMDAR (검정색 실선)는 2019년 4월 9일 0806~0808 UTC에 제주국제공항에 착륙한 항공기 HL7569가 관측한 AMDAR 자료(Table 5)에서 산출된 윈드시어 관측값이다. 윈드시어 관측값은 980~1,800 ft 사이 고도에서 세기 6.80 kt/100 ft의 중간(moderate) 등급을 확인할 수 있다. 하지만 고도 230~980 ft 사이에서는 세기 2.40 kt/100 ft인 약한(light) 등급의 윈드시어가 계산됐다.

KMAPP-LLWS에서 산출된 윈드시어 값(KMAPP-LLWS)은 고도 1,500~2,000 ft에서 세기 8.21~10.18 kt/100 ft인 중간-강한(moderate-strong) 등급을 예측했다. 그에 반해, 활주로에서 연직방향으로 예측한 윈드시어(Point)는 모든 고도에서 3 kt/100 ft 이하의 윈드시어 세기를 모의하면서 윈드시어 발생을 예측하지 못했다.

5. 결 론

본 연구에서는 고해상도 규모상세화 수치정보 산출 체계(KMAPP)를 활용해서 제주국제공항 착륙경로에 KMAPP-LLWS를 구축했으며, KMAPP-LLWS의 성능을 확인하기 위해 항공기 기상관측자료(AMDAR)에서 선정된 윈드시어 사례를 바탕으로 검증을 진행했다. 또한 활주로 연직방향으로 예측한 윈드시어와의 비교도 같이 진행했다.

2017년 8월 1일부터 2019년 7월 31일까지 2년간 제주국제공항에 착륙한 항공기의 AMDAR 자료로부터 중간(moderate) 등급 이상(5 kt/100 ft) 윈드시어 사례를 선정했으며, 한반도 해면기압일기도 분석장과 AMDAR 바람자료를 바탕으로 사례를 분석했다. 분석결과 제주국제공항 07A 착륙경로에 발생한 윈드시어는 제주도에 남풍, 남동풍, 동풍계열 바람이 불 때 발생했으며 풍향에 따라 윈드시어 발생 위치가 달라졌다. AMDAR 자료에서 산출된 윈드시어 세기는 5.3~7.3 kt/100 ft로 중간(moderate) 등급이 관측됐다.

KMAPP-LLWS를 제주국제공항 07A 착륙경로에 구축하고 3개 사례에 대한 검증을 진행했다. KMAPP-LLWS에서 예측된 윈드시어 세기는 5.14~10.18 kt/100 ft로 중간-심한(moderate-strong) 등급이 예측됐으며, 윈드시어 사례와 비교했을 때 발생고도 및 세기를 잘 모의했다. 하지만 활주로 연직방향으로 계산한 윈드시어는 1.00~2.91 kt/100 ft로 약한(light) 등급이 예측돼 윈드시어 발생을 모의하지 못했다. 이러한 결과는 윈드시어 예측에서 윈드시어의 계산 방향이 중요함을 의미한다. 즉 윈드시어 예측은 연직 또는 수평방향이 아닌 실제 항공기 경로를 따라 이뤄져야하며, 특히 항공기가 이착륙하는 낮은 고도에서는 연직방향과 수평방향 윈드시어 성분이 모두 포함되어야 한다.

KMAPP-LLWS를 활용해서 제주국제공항 착륙경로

에 발생한 윈드시어를 예측하는데 성공했다. 이러한 사실은 고해상도 수치자료를 활용해서 예측한 윈드시어 정보가 윈드시어 예·경보에 충분히 사용 가능함을 보여준다. 하지만 본 연구에서 구축된 KMAPP-LLWS는 제주국제공항을 대상으로 했으며 착륙경로에서만 연구가 진행됐다. 따라서 다른 공항들에서 KMAPP-LLWS의 구축 및 검증이 진행되어야 하며, 항공기 이륙경로에 발생하는 윈드시어 연구도 동반되어야 할 것이다. 또한 AMDAR 자료 뿐만 아니라 다양한 관측자료를 활용한 KMAPP-LLWS 검증이 필요하다.

감사의 글

본 논문의 개선을 위해 좋은 의견을 제시해 주신 두 분의 심사위원께 감사를 드립니다. 이 연구는 기상청 국립기상과학원 「항공·도시기상 기술개발」(KMA2018-00621)의 지원으로 수행되었습니다.

REFERENCES

- Boilley, A., and J.-F. Mahfouf, 2013: Wind shear over the Nice Côte d'Azur airport: case studies. *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.*, **13**, 2223-2238, doi:10.5194/nhess-13-2223-2013.
- Bowles, R. L., 1990a: Reducing windshear risk through airborne systems technology. *Conf. Paper, The 17th Congress of the ICAS*, Stockholm, Sweden, 27 pp.
- _____, 1990b: Windshear detection and avoidance: airborne systems survey. *Conf. Paper, 29th IEEE Conference on Decision and Control*, Honolulu, HI, USA, 708-736.
- Carruthers, D., A. Ellis, J. Hunt, and P. W. Chan, 2014: Modelling of wind shear downwind of mountain ridges at Hong Kong International Airport. *Meteorol. Appl.*, **21**, 94-104, doi:10.1002/met.1350.
- Chan, P. W., 2012: A significant wind shear event leading to aircraft diversion at the Hong Kong international airport. *Meteorol. Appl.*, **19**, 10-16, doi:10.1002/met.242.
- _____, and Y. F. Lee, 2011: Application of a ground-based, multi-channel microwave radiometer to the alerting of low-level windshear at an airport. *Meteorol. Z.*, **20**, 423-429, doi:10.1127/0941-2948/2011/0275.
- Chen, F., H. Peng, P.-W. Chan, and X. Zeng, 2019: Low-level wind effects on the glide paths of the north runway of HKIA: A wind tunnel study. *Build. Environ.*, **164**, 106337, doi:10.1016/j.buildenv.2019.106337.
- Ding, J., X.-Y. Zhuge, Y. Wang, and A. Xiong, 2015: Evaluation of Chinese Aircraft Meteorological Data Relay (AMDAR) weather reports. *J. Atmos. Oceanic Technol.*, **32**, 982-992, doi:10.1175/JTECH-D-14-00145.1.
- Drüe, C., W. Frey, A. Hoff, and T. Hauf, 2008: Aircraft type-specific errors in AMDAR weather reports from commercial aircraft. *Q. J. R. Meteorol. Soc.*, **134**, 229-239.
- ICAO, 2005: Manual on low-level wind shear, 1st edition. International Civil Aviation Organization, 213 pp.
- Keller, T. L., S. B. Trier, W. D. Hall, R. D. Sharman, M. Xu, and Y. Liu, 2015: Lee waves associated with a commercial jetliner accident at Denver International Airport. *J. Appl. Meteor. Climatol.*, **54**, 1373-1392, doi:10.1175/JAMC-D-14-0270.1.
- Kessler, E., 1990: Low-level windshear alert systems and doppler radar in aircraft terminal operations. *J. Aircraft*, **27**, 423-428.
- Kim, J.-H., and H.-Y. Chun, 2012: 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.
- _____, _____, R. D. Sharman, and S. B. Trier, 2014: The role of vertical shear on aviation turbulence within cirrus bands of a simulated western pacific cyclone. *Mon. Wea. Rev.*, **142**, 2794-2813, doi:10.1175/MWR-D-14-00008.1.
- Lee, K.-O., S. Shimizu, M. Maki, C.-H. You, H. Uyeda, and D.-I. Lee, 2010: Enhancement mechanism of the 30 June 2006 precipitation system observed over the northwestern slope of Mt. Halla, Jeju Island, Korea. *Atmos. Res.*, **97**, 343-358, doi:10.1016/j.atmosres.2010.04.008.
- _____, H. Uyeda, and D.-I. Lee, 2014: Effect of an isolated elliptical terrain (Jeju Island) on rainfall enhancement in a moist environment. *Tellus A*, **66**, 20484, doi:10.3402/tellusa.v66.20484.
- Lewis, M. S., P. A. Robinson, D. A. Hinton, and R. L. Bowles, 1994: The relationship of an integral wind shear hazard to aircraft performance limitations. NASA TM-109080, 16 pp.
- Lilly, D. K., 1978: A Severe downslope windstorm and aircraft turbulence event induced by a mountain wave. *J. Atmos. Sci.*, **35**, 59-77.
- NIMS, 2017: Korea Meteorological Administration Post-Processing (KMAPP) user manual. *NIMS Tech. Rep.*, 11-1360620-000101-01, 14 pp (in Korean).
- Pattantyus, A. K., S. Chiao, and S. Czyzyk, 2011: Improving high-resolution model forecasts of downslope winds in the Las Vegas valley. *J. Appl. Meteor. Climatol.*

- tol.*, **50**, 1324-1340, doi:10.1175/2011JAMC2586.1.
- Rahn, D. A., and C. J. Mitchell, 2016: Diurnal climatology of the boundary layer in southern California using AMDAR temperature and wind profiles. *J. Appl. Meteor. Climatol.*, **55**, 1123-1137, doi:10.1175/JAMC-D-15-0234.1.
- Regmi, R. P., and S. Maharjan, 2015: Trapped mountain wave excitations over the Kathmandu valley, Nepal. *Asia-Pac. J. Atmos. Sci.*, **51**, 303-309, doi:10.1007/s13143-015-0078-1.
- Shun, C. M., and P. W. Chan, 2008: Applications of an infrared doppler lidar in detection of wind shear. *J. Atmos. Oceanic. Technol.*, **25**, 637-655.
- Strajnar, B., 2012: Validation of Mode-S meteorological routine air report aircraft observations. *J. Geophys. Res. Atmos.*, **117**, D23110, doi:10.1029/2012JD018315.
- Tse, S. M., M. Hagio, and Y. Maeda, 2019: Windshear detection by terminal doppler weather radar during tropical cyclone Mujigae in 2015. *Meteorol. Appl.*, **26**, 620-631, doi:10.1002/met.1789.
- Wilson, J. W., R. D. Roberts, C. Kessinger, and J. McCarthy, 1984: Microburst wind structure and evaluation of doppler radar for airport wind shear detection. *J. Climate Appl. Meteor.*, **23**, 898-915.
- WMO, 2014: The benefits of AMDAR data to meteorology and aviation. WMO Tech. Rep., 2014-1, 7 pp.
- Zhang, Y., D. Li, Z. Lin, J. A. Ananello Jr., and Z. Gao, 2019: Development and evaluation of a long-term data record of planetary boundary layer profiles from aircraft meteorological reports. *J. Geophys. Res.*, **124**, 2008-2030, doi:10.1029/2018JD029529.