

Original Article

<https://doi.org/10.12985/ksaa.2021.29.1.001>
ISSN 1225-9705(print) ISSN 2466-1791(online)

항공기 복행사례를 통한 제주국제공항 저층 윈드시어의 특징 연구

조진호*, 백호종**

A Study on the Characteristics of Low-Level Wind Shear at Jeju International Airport from Go-Around Flight Perspective

Jin Ho Cho*, Ho Jong Baik*

ABSTRACT

Low level wind shear, which often occurs at Jeju International Airport, is a phenomenon that occurs when the topological location and topographical characteristics of Jeju Island are combined with weather characteristics. Low level wind shears, which are caused by rapid changes in wind direction and wind speed, pose a threat to aircraft safety and also cause abnormal situations, such as aircraft go-around, diversion, and cancellation. Many meteorological studies have been conducted on weather patterns, occurrence periods and frequency of low level wind shears. However, researches related to aircraft operations are limited where here we study the similarities and differences between strong southwest winds and bidirectional tailwind type low level wind shears based on aircraft go-around cases at Jeju International Airport. The results are expected to be used to enhance safety when operating to Jeju International Airport, which includes pilot training that reflects the characteristics generated by wind changes, pilot prior notification, providing pilots with latest trends, and increasing extra fuel.

Key Words : Jeju International Airport(제주국제공항), Low Level Wind Shear(저층 윈드시어), Go Around(복행), Hydraulic Jumps(물 뿜 현상), Bidirectional Tailwind(양방향 배풍)

1. 서 론

제주국제공항은 위험 기상 상황에 많이 노출되는 공항이다. 대표적으로 동계 주기적인 강한 북서풍 계열의 강풍, 봄철 저기압 통과와 저층 윈드시어¹⁾, 하계 장마 전 해무, 장마 전선, 그리고 태풍 등이 직접 영향을 주고 있다. 특히 바람과 관련한 저층 윈드시어로 인한 복

행, 회항과 착륙 시 발생하는 어려움은 제주국제공항의 큰 특징이라 할 수 있다.

윈드시어란 수직 또는 수평 방향으로 풍향, 풍속이 급변하는 현상으로 특히 지면에서 500m(1,600ft) 내의 저층 윈드시어는 항공안전에 큰 위협이 되고 있다 [1]. 저층 윈드시어는 주로 봄부터 여름에 걸쳐 제주도 북서쪽에 저기압이 위치하여 제주국제공항 활주로에 남서풍 계열이 강하게 불 때 발생하는 대표적 기상 특성으로 항공기의 자세와 속도 유지를 어렵게 하고 있다. 특히 활주로로 접근, 착륙하는 저속 및 저고도 단계의 항공기에 불안정한 착륙, 양력 저하, 활주 거리

Received: 05. Feb. 2021, Revised: 15. Mar. 2021,

Accepted: 16. Mar. 2021

* 한국항공대학교 항공교통물류학과 박사과정

** 한국항공대학교 항공교통물류학부 교수

연락처 E-mail : hbaik@kau.ac.kr

연락처 주소 : 경기도 고양시 덕양구 항공대학로 76

1) 기상법 시행령 제 10조 13항에 윈드시어는 급변풍(Wind Shear)로 표현됨.

증가 등을 초래할 수 있어서 항공안전에 매우 중요한 요소이다.

항공사 입장에서 볼 때, 제주국제공항은 안전과 영업적인 측면에서 매우 중요한 공항으로 저층 윈드시어로 인한 복행, 회항 및 결항 가능성에 대한 판단이 중요하다. 저층 윈드시어의 대체적인 발생 가능성에 대한 예측은 가능한 수준이나, 눈에 보이지 않을 뿐만 아니라 매우 짧은 시간에 변화하는 현상이기 때문에 정밀한 예측에 어려움이 있다. 또한 항공기 기종 특성과 중량, 항공사의 운항 절차, 조종사 경험 및 비행시간 등 다양한 요소가 복합적으로 작용하기 때문에 항공기 운항에 직접 영향을 줄 정도인지를 예측하는 것은 더욱 어렵다.

제주국제공항의 저층 윈드시어에 대해서는 기상 관서, 한국기상학회 중심으로 윈드시어의 원인, 특성, 발생 요인별 분류 등 기상학적 측면의 상세한 연구와 연구 논문 발표가 이루어지고 있다. 그러나 항공 전문가들에 의한 연구 논문은 부족한 편이다.

저층 윈드시어에 대한 다각적이고 심층적인 연구를 위해서는 실제 항공기 운항 과정에서 나타난 데이터를 이용할 필요가 있다. 항공기의 접근, 착륙과정에서 발생한 복행은 저층 윈드시어 연구에 매우 중요한 자료가 된다. 왜냐하면 강한 저층 윈드시어가 예상되어 사전 결항하거나 회피하기 위해 지연하는 항공편에는 없는 정보와 자료를 갖고 있기 때문이다. 본 연구자는 2020년 하계기간인 6월에서 8월 사이 발생한 6일간의 대표 사례를 바탕으로 그간 선행연구에 대한 검증은 물론 복행의 특징과 이를 통한 저층 윈드시어의 실체를 보다 구체적이며 심층적인 연구를 수행하였다.

II. 본 론

2.1 제주국제공항과 바람의 영향

제주도는 기상변화가 잦은 중위도대에 위치한 섬으로 중앙에 높이 1,950m의 한라산이 있고, 정상에서 해안까지 약 360여 개의 기생화산이 분포하고 있다. 제주도 북쪽 해안가에 위치한 제주국제공항은 길이 3,180m의 동북동-서남서 방향 활주로인 07/25를 주 활주로로 사용하며, 1,900m의 남동-북서 방향 활주로 13/31은 매우 제한적으로 사용하고 있다. 항공기의 이륙과 착륙은 기본적으로 정풍(headwind)을 이용하기 때문에 주 활주로 방향 고려 시 서풍 또는 동풍인 경우가 운항에

가장 좋은 조건이 된다.

Fig. 1은 제주국제공항에 영향을 미치는 대표적인 바람의 모식도이다. 동계 주기적인 강한 북서풍, 봄부터 하계기간에 한라산을 넘어오는 강한 남서풍 또는 한라산을 좌우로 돌아 들어오는 남풍, 봄철 또는 기압 패턴에 의한 동풍 등이 대표적이라 할 수 있다.

이러한 제주도의 지리적 위치와 지형적 특징은 계절적 기상 특성과 맞물려 제주국제공항 활주로에 풍향 및 풍속의 급격한 변화를 일으키게 된다. 동계 310~330도 방향의 강한 북서풍이 불 때는 항공기 운항을 위한 측풍 제한치를 초과하기도 하며, 특히 남서풍, 남풍 계열은 지형의 영향과 결합하면서 제주국제공항 활주로에 착륙을 위한 접근경로에 저층 윈드시어를 일으키는 주된 풍향이 되고 있다.

2.2 문헌 연구

구대영 외 4명(2007)은 제주국제공항에서 발생하는 윈드시어는 기상학적 요인에 지형적 요인이 결합하면서 계절별로 발생 특성이 다르다고 하였다. 특히 한라산을 넘으면서 풍하 측의 바람이 풍상 측보다 강하게 되는 물 뿜 현상(hydraulic jumps)으로 인한 돌풍성 현상임을 추측할 수 있다고 설명하였다[2]. 박정규, 최영진(2009)은 2005년~2008년 자료를 근거로 제주국제공항이 윈드시어의 영향을 가장 많이 받는다고 하였다. 연구자는 윈드시어에 대해 월별, 계절별 발생 빈도, 지속시간을 연구하였고, 발생 원인별 및 기압 배치별로 통계, 분석을 통해 예보 가이던스를 도출하였다[3]. 이민규 외 5명(2013)은 북쪽 저기압에 의한 윈드시어는 남풍에 의한 풍향 시어와 남서풍에 의한 풍속 시어가 많이 발생하였고, 남서풍에서 서풍으로 바뀔 때 소멸한

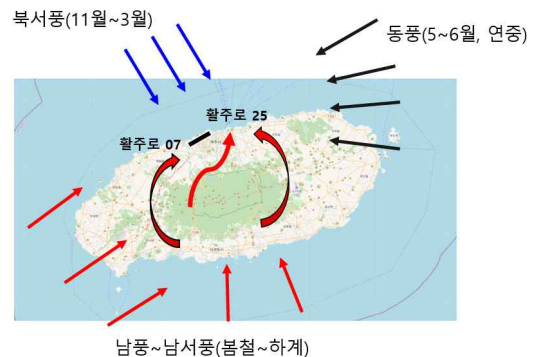


Fig. 1. Jeju International Airport location, topography and wind system

다고 하였다[4].

국내 학술대회 논문에서 강해연 외 3명(2017)은 2016년 1년 LLWAS(Low Level Wind Shear Alert System) 자료와 윈드시어 경보 자료를 월별, 시간대별, 계절별로 분석하였다. 하루 중 발생 횟수가 가장 많은 시간대는 9시부터 16시이고, 난류 발생이 적은 야간보다 난류 발생이 활발한 주간에 실제 윈드시어 발생 횟수와 발생 가능성이 더 크다는 것을 확인하였다[5]. 또한 민병훈 외 5명(2019)은 2018년 5월, 2019년 4월 사례를 선정하여 제주국제공항 하강 경로에서 저층 연직 윈드시어를 예측하고, 이를 공항 연직 방향 저층 윈드시어 예측과 비교하였다[6].

해외 학술논문으로는 홍콩국제공항을 대상으로 한 연구가 대표적이다. 홍콩국제공항은 지형이 복잡하고 산이 많은 란타우섬의 바로 북쪽에 있으며, 동풍 계열의 강한 바람과 란타우섬의 복잡한 지형 사이의 상호 작용으로 인해 윈드시어가 발생할 수 있는 특징이 있기 때문이다. Tse 외 2명(2021)은 전산 유체역학(CFD, computational fluid dynamics)을 위한 오픈소스 플랫폼인 OpenFOAM을 사용하여 란타우섬과 홍콩국제공항 상공의 난기류를 수치로 시뮬레이션하였다. 남풍, 남동풍 및 동풍의 세 방향의 바람은 란타우섬의 산 틈새에서 뿜어져 나오는 다수의 고속 V자형渦의 강한 기류를 형성하고, 홍콩국제공항의 착륙 접근 경로를 따라 정풍과 측풍의 변화를 일으킨다. 특히 윈드시어를 가장 야기하는 것은 남풍과 남동풍이라는 것을 발견하였고, 이 두 풍향의 경우 윈드시어는 란타우섬과 가장 가까운 두 활주로의 착륙경로를 따라 가장 많이 발생한다는 것을 설명하였다[7]. Lei 외 3명(2013)은 전산 유체역학 모델인 FLUENT를 사용하여 홍콩국제공항 인근 산에서 난기류의 유출을 시뮬레이션하였다. 난기류 유출의 두 가지 대표적인 경우, 즉 평균 풍속과 난류 에너지가 높이 방향으로만 변하는 것으로 가정된 중립 대기, 그리고 봄철 동풍류에서 안정하게 성층화된 대기를 고려하였다. 연구 결과, 공항 근처의 산에서 유출되는 난기류의 생성과 전파는 모델 시뮬레이션에서 잘 포착되었고, 연구 결과는 윈드시어와 난류 예측의 정확도를 개선하는 데 도움이 될 것이라고 하였다[8]. Chan(2012)은 2011년 태풍 네삿(Nesat) 사례를 통해 홍콩국제공항 인근의 산에서 난기류(Vortex/Wave)가 유출된 사례를 공항 기상레이더(TDWR, Terminal Doppler Weather Radar) 시선 속도 영상을 통해 제시하였다. 난기류는 홍콩국제공항

의 북쪽 활주로 서쪽에 있는 도착 활주로의 착륙 경로에서 정풍 감소가 발생하여 도착 항공기에 위험할 수 있는 상당한 윈드시어를 발생시켰다. 란타우섬으로부터 밀려오는 소용돌이는 항공기가 마주치는 강한 윈드시어와 관련이 있을 수 있으며, 바람의 변동 때문에 실제 접근을 수행하였음을 설명하였다[9].

2.3 연구자료, 방법 및 절차

본 연구는 2020년도 저층 윈드시어에 의해 복행이 있었던 6월 29일, 7월 19일, 23일 및 8월 2일, 5일, 9일을 연구 대상으로 하였다. 복행(Go-around)이란 착륙 진입 중인 항공기가 관제탑으로부터의 지시, 기상 불량, 진입 고도 불량 등의 이유로 착륙을 단념하고 재차 상승하는 조작을 의미한다[10]. Table 1은 복행 발생 시간대와 횟수, 그리고 풍향, 풍속 및 활주로 사용에서 서로 다른 특징을 보인 두 가지 유형으로 구분한 것이다. 즉, 6월과 7월 사례는 강한 남서풍에 의한 복행의 유형으로, 8월 사례는 활주로 양방향 배풍에 의한 복행의 유형으로 각각 분류하였다. 제주국제공항의 활주로 양방향에서 나타나는 배풍은 매우 특징적인 기상 현상으로 연구자는 이 활주로 양 배풍 현상을 Bidirectional Tailwind로 표현하였다. 배풍은 이착륙 활주 거리 증가를 야기할 수 있기 때문에 매우 중요한 바람의 성분이다.

연구를 위한 기상자료는 기상청 방재기상정보시스템을 이용하였다. 여기에는 지상 및 상층일기도, 지상풍, 2분 및 10분 활주로별 풍향, 풍속자료가 포함된다. 상층일기도는 850hPa 바람장(Wind Field)을 사용하였는데, 850hPa 면은 해발 약 1.5km 상공의 등압면으로 하층대기 기류와 평균기류 분석에 이용되는 점을 고려하였다.

복행 시의 고도와 조종사의 보고 내용은 실제 운항

Table 1. Go-around records and type classification

구분	시간대	횟수	구분
6/29	19:00~21:00	12	강한 남서풍으로 활주로 25 방향 사용
7/19	14:00~22:30	13	
7/23	12:00~17:00	4	
8/2	11:00~19:00	8	활주로 양 방향 배풍으로 활주로 변경 발생
8/5	10:00~21:00	4	
8/9	07:00~18:00	9	

과정에서 확인한 자료를 이용하였다. 즉, 연구 대상 일에 운항한 때 항공편을 실시간 모니터링하였고, 복행 시각, 고도, 위도와 경도는 flightradar24²⁾정보를 활용하였다. 또한, 해당 시간대 착륙 항공기의 조종사로부터 접근, 착륙 시의 기류, 윈드시어 정도 등에 대해 보고를 받은 후 이를 종합하였다.

수집된 연구 자료를 바탕으로 복행을 고도별로 분류하였고, 연구 대상 시간대 활주로별 풍향과 풍속, 가장 근접 시간대의 일기도, 조종사 보고를 바탕으로 저층 윈드시어와 복행의 특징을 도출하였다.

2.4 사례 분석

2.4.1 복행 고도

Table 2는 강한 남서풍이 우세했던 사례 일자에 발생한 복행 편이 복행 과정에서 기록된 가장 낮은 고도를 분류한 것이다. 총 29회 복행 중 16편인 55.2%가 1,000ft 이상 고도에서, 13편인 44.8%가 1,000ft 미만에서 복행하였다. 특히 6월 29일은 2,000ft 이상에서 7편이 복행하였다.

Table 3은 활주로 양방향 배풍이 있었던 사례 일자의 복행 고도별 자료다. 총 21회 복행 중 8편인 38.1%가 1,000ft 이상 고도에서, 13편인 61.9%가 1,000ft 미만에서 복행하였다. 또한, 9편인 42.9%는 500ft 미만에서 하였다. 강한 남서풍에 의한 복행 때와 달리 더 낮은 고도에서 복행한 사례가 많았다.

2.4.2 평균 풍향과 풍속

Table 4는 강한 남서풍에 의해 복행이 집중적으로 발생하였던 시간대의 사용 활주로였던 활주로 25방향의 풍향과 풍속의 평균값이다. 풍향은 202~210도의 남남서풍, 풍속은 18kt 이상이었다. 특히 2시간 동안

Table 2. Number of go-arounds by flight altitude in strong southwest wind cases

구분	~999ft	1,000~1,999ft	2,000~2,999ft	계
6/29	2	3	7	12
7/19	9	4	0	13
7/23	2	2	0	4
계	13	9	7	29

Table 3. Number of go-arounds by flight altitude in bidirectional tailwind cases

구분	~999ft	1,000~1,999ft	2,000~2,999ft	계
8/2	5	3	0	8
8/5	1	3	0	4
8/9	7	1	1	9
계	13	7	1	21

12편의 복행과 이 중 6편의 2회 복행, 그리고 10편의 회항이 발생하였던 6월 29일은 평균풍속 28kt, 최대풍속 43kt를 보였다. 평균 풍향 남남서풍과 최대 풍향 230도의 남서풍으로, 전체적으로 강한 남서풍 계열의 바람이 특징적이다. 따라서 저층 윈드시어가 강했던 사례 일자의 특징은 남서풍이 우세하고 당시 사용 활주로는 25방향임을 나타낸다.

Table 5는 활주로 양방향 배풍으로 복행이 집중적으로 발생하였던 시간대의 활주로별 평균 풍향과 풍속을 보여준다. 풍향은 남풍 계열이 우세하며, 풍속은 9~13kt를 보였다. 강한 남서풍이 우세했던 때와 비교할 때 남풍 계열이 우세하고, 풍속은 현저히 낮았다.

Table 4. Strong southwest wind cases (wind direction: degrees, wind speed: kt)

일자	풍향	풍속	최대풍속	최소풍속
6/29	210	28.0	43.3	17.0
7/19	202	18.3	30.1	8.8
7/23	209	20.3	30.6	12.1

Table 5. Bidirectional tailwind cases (wind direction: degrees, wind speed: kt)

일자	활주로	풍향	풍속	최대풍속	최소풍속
8/2	07	229	12.9	18.8	6.4
	25	141	9.8	16.4	3.6
8/5	07	186	10.0	17.5	5.0
	25	161	8.9	16.1	3.6
8/9	07	205	13.4	22.4	5.8
	25	192	13.2	21.2	5.8

2) 지도에 실시간 상용 항공기 비행 정보를 보여주는 인터넷 기반 서비스.

2.4.3 풍향 분포

Fig. 2는 사례 일자의 활주로별 풍향, 풍속을 방위 각에 표출한 것이다. 남서풍이 강했던 상단 3일간은 해당 시간대 10분 또는 20분 단위의 평균 풍향, 풍속을 표출하였고, 활주로 07, 25 양방향 모두 남서풍의 일정한 풍향, 풍속을 보였다.

반면, 활주로 양방향 배풍이 있었던 하단 3일간은 활주로마다 정풍과 배풍이 불규칙적으로 발생한 특징을 보였기 때문에 평균값을 취하지 않고 연구자가 실시간으로 기록한 순간값을 활용하여 표출하였다. 따라서 매우 짧은 시간 내 정반대의 풍향이 활주로 07, 25 방향에서 발생하고 있었음을 알 수 있었다.

활주로 양방향 말단에서 서로 반대 방향의 풍향이 부는 것은 매우 특징적인 현상이며, 이는 매우 낮은 고도에서 복행을 일으키는 요인이 된다. 일반적으로 항공기의 배풍 착륙 제한치는 10kt이며, 이와 같은 조건에서는 일시적으로 활주로 양방향 모두 배풍 초과 가능성이 발생한다.

2.4.4 조종사 보고

연구에 사용된 총 50회의 복행 중 47회가 활주로 25 방향 접근 중 발생하였다. Fig. 3은 47회 복행 중에서 활주로 25 말단으로부터 1NM(Nautical Mile, 1,852m)내에서 발생한 30회의 복행 시 최저고도 통과 위치를 표출한 것이다. 기호 O는 강한 남서풍, X는 활주로 양방

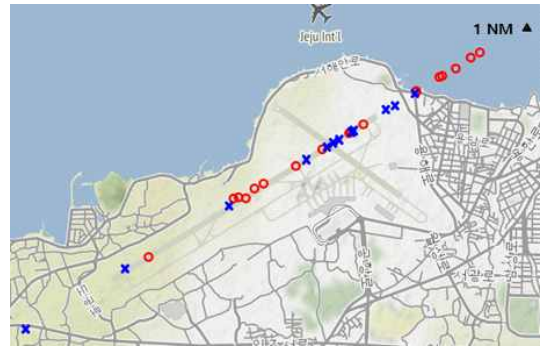


Fig. 3. Lowest altitude positions of go-around flights within 1 NM from runway thresholds

향 배풍 때에 발생한 위치로 복행은 활주로 근접한 위치에서 많이 발생하였음을 보여주고 있다. 특히 양 배풍 상황 시, 관제탑으로부터 정풍 정보와 함께 착륙허가를 받더라도 실제 착륙 시점에서는 배풍으로 변화되는 특성이 있어서 매우 주의가 필요하다.

착륙한 항공기의 조종사로부터 무선통신을 통해 받은 조종사 보고는 접근경로의 저층 윈드시어 상황을 이해하는데 중요한 자료가 된다. 보고 내용을 종합해 보면, 강한 남서풍 상황에서는 주로 속도 변화, 기류 불안정, 윈드시어, 심한 돌풍 현상 등의 보고가 많았다. 한편, 양 배풍 상황에서는 심한 풍향 변화, 착륙 활주까지 배풍이라는 보고가 많아 서로 상이한 부분을 발견할 수 있었다.

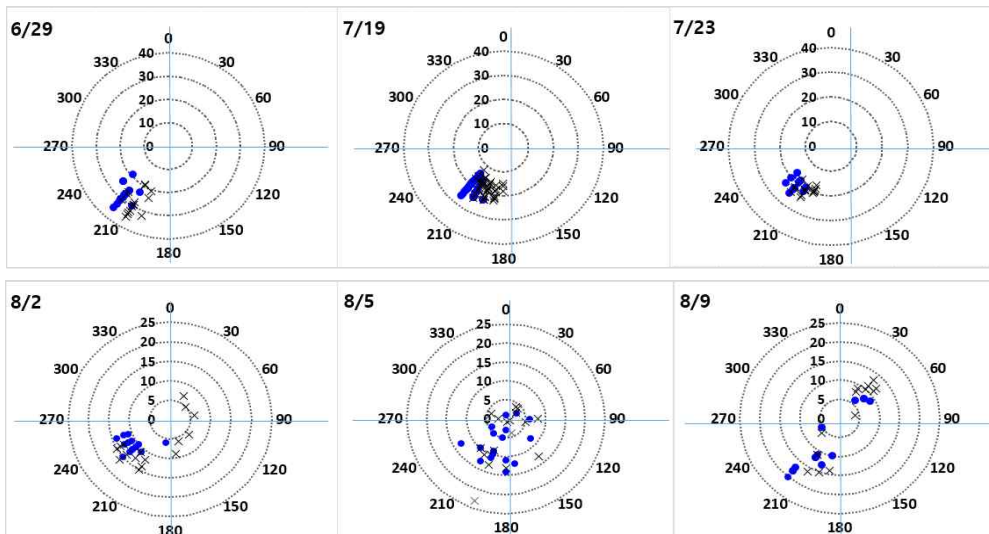


Fig. 2. Wind direction and speed by each runway (● : Runway 07, x : Runway 25)

2.4.5 지상 및 상층 일기도

Fig. 4는 강한 남서풍일 때인 6월 29일 21시와 활주로 양방향 배풍일 때인 8월 2일 12시 각각의 지상일기도 및 850hPa 자료로 서로 유사점과 차이점을 발견할 수 있다.

지상일기도 및 850hPa 바람장에서 저기압이 제주 북서쪽에 위치하는데, 특히 강한 남서풍에 의한 저층 윈드시어 발생일의 특징은 현저한 저기압이 제주도 북서쪽에 위치하면서 동진하는 패턴을 보였다. 또한 850hPa 바람장에서 제주도는 30kt 초과 강풍이 불고 있다. 이러한 조건에서는 활주로 25방향 접근경로에 난기류와 활주로 양방향 모두 강한 남서풍이 나타나게 된다. 저기압이 동진하여 남서풍이 서풍으로 바뀌는 시점까지 저층 윈드시어를 일으킨다.

반면, 활주로 양 배풍의 사례는 제주도 북서쪽은 기압이 낮고(low), 남동쪽은 높은(high) 기압계에서 발생하며, 850hPa 바람은 20kt 내외로 강하지 않아 한라산을 넘는 기류보다는 좌우로 돌아 활주로에서 수렴함에 따라 발생하는 양 배풍을 초래하고 있다.

즉, 동일한 남서풍인 경우라도 6월 29일처럼 강한 경우는 기류가 한라산을 넘어 영향을 주고, 상대적으로 약한 8월 2일은 기류가 한라산을 좌우로 돌아 활주로 양방향에 배풍을 유발하는 특성을 보였다. 따라서 예상 지상일기도와 850hPa 바람장 등의 분석을 통해 저층 윈드시어 발생 가능성과 그 유형을 예측할 수 있다.

2.5 연구결과 종합

본 연구는 복행 사례를 바탕으로 강한 남서풍 계열과 활주로 양방향 배풍에 의한 저층 윈드시어의 유사점과 차이점을 구분하고 서로 다른 특징을 도출하였다.

강한 남서풍 계열에 의한 저층 윈드시어의 특징은 다음과 같다. 첫째, 평균 풍향 202~210도와 최대 풍향 230도인 남남서풍, 남서풍의 풍속 평균 20kt, 최대 30kt 초과하는 강풍이 윈드시어를 강하게 유발하였다. 구대영(2007)은 선행연구 문헌을 근거로 이처럼 강한 남서풍이 제주도의 지형 특징과 결합하여 발생하는 것을 물 뿜 현상으로 설명하고 있다. 본 연구자는 물 뿜 현상, 역학적 난류 등에 대하여 학술적으로 연구가 더 필요한 부분이라고 판단한다. 둘째, 발생 시기는 저기압이 주기적으로 이동하는 봄과 하계기간이나 계절과 무관하게 제주도 북서쪽에 강한 저기압이 위치할 때에도 발생할 수 있다. 셋째, 지상일기도에서는 현저한 저기압이 공항 북서쪽에 위치하면서 850hPa 바람장에 제주도는 남서풍 30~50kt의 강풍을 보인다. 넷째, 남서풍 구역이 넓기 때문에 주야 관계없이 수 시간 지속해서 영향을 주게 된다.

특히 복행 사례 연구를 통해 다음과 같은 구체적인 사실들을 확인할 수 있었다. 첫째, 풍향 190~220도의 지상 실제 바람 평균 30kt, 최대 40kt 초과 시 복행은 주로 고도 2,000ft 내외에서 많이 발생하였다. 둘째, 동일 풍향에서 평균 20kt, 최대 30kt 내외의 경우 복

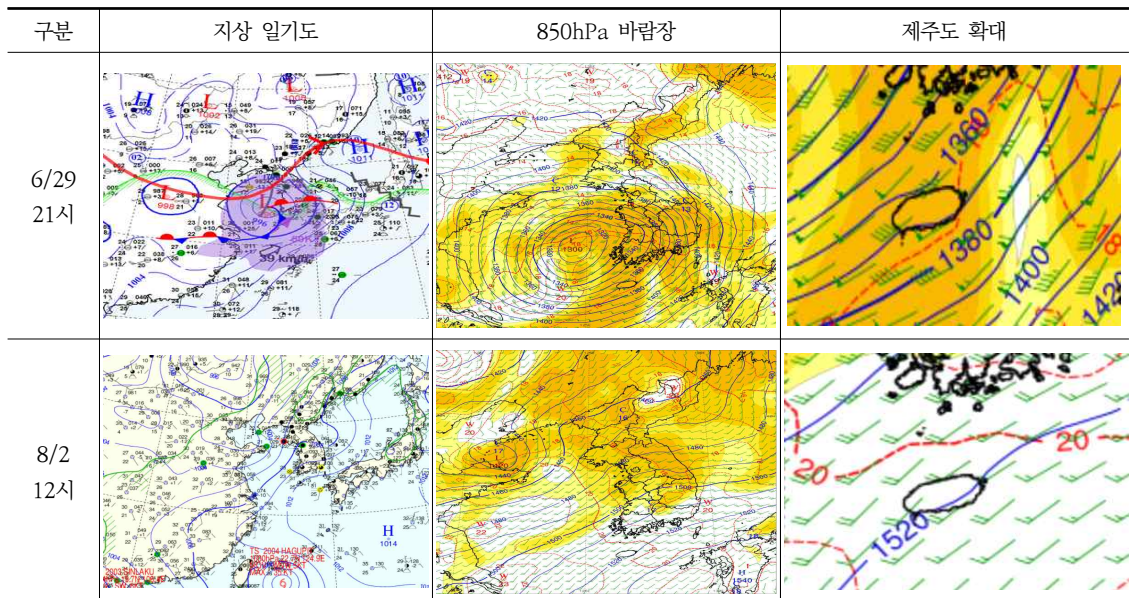


Fig. 4. Surface weather chart, 850hPa wind field

행은 주로 고도 1,000ft 아래에서 많이 발생하였다. 셋째, 남서풍이 강할수록 활주로 25방향 접근경로의 먼 거리, 높은 고도까지 난기류가 발생하는 경향을 보였다. 넷째, 평균 풍향이 남남서(190~210도), 남서(220~240도), 그리고 평균 및 최대 풍속이 30kt 미만 또는 초과라는 두 변수가 가장 크게 작용하며, 풍향 220도를 경계로 하여 남남 쪽이면 강하게, 남서 쪽이면 다소 약하게 발생하는 경향을 보였다.

또한, 활주로 양 배풍에 의한 저층 윈드시어는 강한 지 않은 남풍 계열의 바람이 한라산을 휘감아 돌아 제주국제공항 활주로에서 수렴함에 따라 발생하고 있다. Fig. 5는 8월 2일 12시 지상 10m의 풍향과 풍속 값을 보여주는 모델로 제주국제공항의 활주로 07과 25방향에 풍향이 크게 차이가 나고 있음을 보여준다.

따라서 대체로 500ft 미만의 저고도에서 풍향의 급변을 일으키고 있다. 풍향의 변화는 활주로 07, 25방향의 배풍의 증가 또는 감소를 일으키고, 양 배풍은 난류가 증가하는 낮 시간대 현저하고, 야간에는 약해지는 경향을 보였다.

복행은 항공기 기종 특성과 항공사의 운항 절차, 조종사의 훈련과 경험 등이 복합적으로 작용하기 때문에 복행 기록만으로 저층 윈드시어를 정밀히 분석해내는 것에는 한계가 있을 수 있다. 하지만, 복행 기록을 통한 제주국제공항의 저층 윈드시어 특성 분석은 항공기 안전운항이라는 관점에서 의미가 있다고 할 수 있다.

III. 결 론

본 연구에서는 저층 윈드시어에 대한 선행연구를 고찰하였으며, 2020년 하계에 발생한 복행사례를 토대로

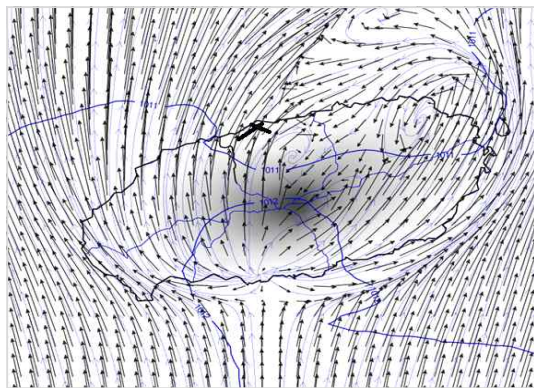


Fig. 5. Surface wind model
(2 August, 2020, 12:00pm)

강한 남서풍에 의한 유형과 활주로 양방향 배풍에 의한 유형의 저층 윈드시어 유사점과 차이점에 대해 실증적 분석을 수행하였다.

제주도에 부는 강한 남서풍은 한라산을 넘으며 제주국제공항의 동북동쪽인 활주로 25방향으로 접근하는 항공기와 윈드시어 형태로 조우하게 된다. 풍속이 강할수록 보다 높은 접근고도인 2,000ft 내외와 접근경로의 먼 거리까지 영향을 미치고, 상대적으로 강하지 않을 때는 고도 1,000ft 내외로 영향을 받는 접근경로의 거리는 줄어들게 된다. 풍향 220도 부근에서 풍속이 강할 때 강한 저층 윈드시어를 일으키며, 이는 풍향이 240도 가량의 서풍으로 변화되는 시점까지 지속되는 특성이 있다. 세력이 강한 저기압의 영향을 받는 경우 남서풍 구역이 넓기 때문에 저층 윈드시어의 영향 시간이 길어지게 된다. 반면, 활주로 양방향 배풍에 의한 저층 윈드시어는 남풍 계열이 우세하면서 풍속이 강하지 않아 활주로 양쪽에서 수렴하는 현상에 따라 발생한다. 복행 고도는 대체로 낮은 편이고, 양 배풍 현상은 주간에 활발한 후 야간에 약해지는 특성이 있다.

항공기 착륙단계인 저고도, 저속에서의 저층 윈드시어는 안전한 착륙에 어려움을 주는 기상 현상으로서 안전운항을 위협하고 승객에 불편을 초래하고 있어 더욱 깊이 있는 연구와 적절한 대응이 필요하다. 본 연구를 통해 지상일기도, 850hPa 바람장 및 지상풍 모델 등을 활용하여 저층 윈드시어의 가능성과 그 유형을 예측할 수 있음을 확인했다. 향후 전산 유체역학 기법을 사용하여 더욱 정량적인 분석 및 저층 윈드시어 예측모델의 개발이 필요하다고 본다. 또한 복행이 발생한 시간대에도 복행 없이 착륙한 항공편들이 더 많기 때문에 연구 대상 편을 확장할 필요가 있다.

본 연구 내용에 포함된 제주국제공항의 위도, 지형 등 물리적 특성과 기상 특성을 정확히 이해하는 것은 저층 윈드시어에 대한 올바른 대응을 위한 첫걸음이다. 또한 본 연구 내용을 바탕으로 조종사에게 사전 예측 정보와 최신 추세 제공 및 예비연료 탑재 등 안전운항을 위한 실무적 자료로 활용될 수 있을 것으로 기대된다.

후 기

본 연구는 한국항공운항학회 2020년 추계학술대회의 이공계 대학생 논문대회에서 발표한 논문을 수정, 보완하였음을 알려 드립니다.

References

1. Aviation Meteorological Office, "Manual for Aerodrome Warnings and Wind shear Warnings", Aviation Meteorological Office, 2020. 6.
2. 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, 2007, pp.1-8.
3. Park, J. K. and Choi, Y. J., "The study of low level wind shear used LLWAS," Meteorological Research Institute, 2009. 15., pp.59-62.
4. Lee, M. G., Song, G. H., Lim, J. Y., Choi, U. S., Kim, H. W., and Ko, J. W., "2012 aeronautical meteorology field study: 9. guidance study for the efficient production of wind shear alerts," Aviation Meteorological Office, 2013, pp.96-97.
5. Kang, H. Y., Lee, H. S., Kim, S. W., and Kim. B. J., "A comparative analysis of LLWAS ALERT data and wind shear alert data at Jeju International Airport," Korean Meteorological Society, Autumn Conference, Busan BEXCO Convention Hall, Oct. 25-27, 2017, pp.605-606.
6. Min, B. H., Choi, H. W., Kim, G. H., Seok, J. H., Kim, Y. H., and Ha, J. C., "Forecasts and verification of low level vertical wind shear at Jeju International Airport," 2019 Korean Meteorological Society Autumn Conference, Gyeongju Hwabaek Convention Center, Oct. 30-31 & Nov. 1, 2019, pp.1-5.
7. Tse, L. K., Guan, Y., and Li, L. K., "RANS simulations of terrain-disrupted turbulent airflow at Hong Kong International Airport," Computers and Mathematics with Applications, 81, Elsevier, January 2021, pp. 737-758.
8. Lei, L., Chan, P. W., Li-Jie, Z., and Hui M., "Numerical simulation of terrain-induced vortex/wave shedding at the Hong Kong International Airport", Meteorologische Zeitschrift, 22(3), Gebrüder Borntraeger, October 2013, pp.317-327.
9. Chan, P. W., "Observation and numerical simulation of vortex/wave shedding for terrain-disrupted airflow at Hong Kong International Airport during Typhoon Nesat in 2011," METEOROLOGICAL APPLICATIONS Meteorol. Appl. 21, Wiley Online Library, 2014, pp.512-520.
10. Lee, T. K., "Dictionary of Aerospace Engineering Terms," Saenyeok Publisher, 2012.