

Original Article

<https://doi.org/10.12985/ksaa.2023.31.3.093>
ISSN 1225-9705(print) ISSN 2466-1791(online)

제주국제공항 활주로에 양배풍을 유발하는 기압 패턴에 관한 연구

조진호*, 이강민**, 백호종***, 박장훈****

A Study on the Pressure Patterns that Causes Bidirectional Tailwind on the Runway of Jeju International Airport

Jinho Cho*, Kangmin Lee**, Hojong Baik***, Janghoon Park****

ABSTRACT

Jeju International Airport is characterized by the occurrence of low-level windshear due to its location, surrounding terrain, and its weather characteristics. Especially the low-level windshear accompanied by tailwinds on both sides of the runway i.e., bidirectional tailwind, is a hazardous weather phenomenon with unique characteristics that are difficult to find at any other airports. This study focuses on bidirectional tailwind occurrence at Jeju International Airport in 2020-2021. As a result, characteristic pressure patterns of the types that cause bidirectional tailwind was identified as it was possible to categorize strong wind types such as 1) strong southwest wind, 2) strong east wind, and 3) strong northwest wind, which do not cause bidirectional tailwind, and wind direction variation types such as 4) bidirectional tailwind, and 5) south wind followed by southwest wind, which cause bidirectional tailwind. The results of this study are expected to contribute to improving aviation safety by enabling aviation operators to predict and take appropriate safety measures based on their understanding of the causes and characteristics of bidirectional tailwind.

Key Words : Bidirectional Tailwind(양배풍), Go Around(복행), Jeju International Airport(제주국제공항), Low Level Windshear(저층 윈드시어), Pressure Pattern(기압 패턴)

1. 서 론

1.1 연구 배경 및 목적

제주국제공항은 섬 중앙에 위치한 한라산(1,950m)으로부터 약 17km 떨어진 북쪽 해안가에 있으며 주 활주로는 동북동/서남서 방향인 07/25로 제주도 장축

과 나란한 모습이다. 제주도는 바람이 많은 곳으로 지형의 영향과 맞물려서 제주국제공항의 항공기 접근 경로 및 활주로에 기류 불안정, 즉 저층 윈드시어(급변풍, 기상법 시행령 제10조 13항)를 일으키고 있다.

Fig. 1은 제주도의 지형과 연중 발생하는 주요 바람, 그리고 제주국제공항의 위치를 표현한 것이다. 동풍, 남동풍, 남풍, 남서풍은 한라산과 제주도 지형의 영향으로 항공기 접근 경로 상에 기류 불안정을 유발하고 있다. 특히 한라산을 좌우로 돌아 활주로로 불어 들어오는 지상풍은 활주로 양방향에 모두 배풍을 보이는 양배풍¹⁾과 기류 불안정을 유발하고 있다는 점에서 제주국제공항에서 발생하는 매우 특징적 현상이다.

1) 활주로 양쪽 말단 부근에서 관측된 각각의 바람 성분이 모두 배풍(Tail wind)을 보이는 현상.

Received: 01. Aug. 2023, Revised: 08. Aug. 2023,
Accepted: 01. Sep. 2023

* 한국항공대학교 항공교통물류학과 이학박사

** 한국항공대학교 항공교통물류학과 이학석사

*** 한국항공대학교 항공교통물류학부 교수

**** 한국항공대학교 항공교통물류학과 이학박사

연락처자 E-mail : ajgaqwsuvnh@gmail.com

연락처자 주소 : 경기도 고양시 덕양구 항공대학교로 76

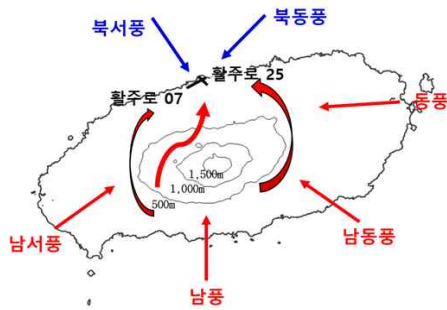


Fig. 1. Jeju International Airport location, topography and wind directions

본 연구에서 저층 윈드시어는 고도 2,000ft 이하에서 풍향, 풍속이 급변하는 현상을 의미하며, 양배풍은 저층 윈드시어의 유형 중에서 활주로 양방향 모두 배풍을 보이는 현상을 의미한다. 양배풍이 있을 때 활주로에 접근, 착륙하는 항공기는 정풍이었던 바람이 갑작스럽게 배풍으로 변화되거나, 약한 배풍이 10kt를 초과하게 되면 고도와 자세 유지에 어려움을 겪게 된다.

Fig. 2는 제주국제공항의 활주로를 나타낸다. 이 활주로는 Table 1의 풍향 및 풍속을 같이 살펴볼 필요가 있다. Table 12)은 제주국제공항에서 발생하는 양배풍 현상을 보여주기 위한 사례로, 2021년 7월 12일 1400kst부터 1500kst까지 10분 간격으로, 1500kst부터 1510kst까지는 1분 단위의 실시간 AMOS³⁾ 자료이다. 풍속 성분의 (-) 값은 배풍을 의미한다. 활주로 07은 이미 배풍 10kt 초과이기 때문에 이착륙 활주로는 25로, 1400~1420kst는 약한 배풍, 1430~1450kst는 14.6~18.5kt의 정풍, 이후 특히 굵은 박스의 1503~1506kst에는 배풍 10kt 초과를 보였다. 즉, 활주로 07쪽은 남남서풍의 일정한 풍향과 풍속 13kt~16kt를 보였지만, 활주로 25쪽은 배풍과



Fig. 2. Jeju International Airport runway 07/25

Table 1. Runway wind speed components

구분	활주로 07			활주로 25		
시각	평균풍향	평균풍속	풍속성분	평균풍향	평균풍속	풍속성분
14:00	250	12.6	-12.6	20	4.7	-3.0
14:10	230	13.6	-12.8	340	4.3	0.0
14:20	230	16.9	-15.9	20	3.1	-2.0
14:30	250	16.7	-16.7	240	14.8	14.6
14:40	250	16.5	-16.5	230	16.1	15.1
14:50	240	16.9	-16.6	250	18.5	18.5
15:00	250	15	-15.0	340	7.2	0.0
15:01	250	15.7	-15.7	40	8.4	-7.3
15:02	250	16.1	-16.1	70	8.9	-8.9
15:03	250	15.7	-15.7	80	10.5	-10.3
15:04	250	15.4	-15.4	90	12.6	-11.8
15:05	250	14.6	-14.6	90	13	-12.2
15:06	250	14	-14.0	90	10.9	-10.2
15:07	250	13.6	-13.6	100	8.2	-7.1
15:08	250	13.2	-13.2	110	6.8	-5.2
15:09	250	13.2	-13.2	90	6.2	-5.8
15:10	250	14	-14.0	90	4.3	-4.0

정풍, 그리고 배풍 10kt 초과를 보이는 등 매우 불규칙한 풍향, 풍속을 보였다. 이러한 양배풍은 공항예보(TAF)나 정시기상관측(METAR)을 통해 예측 및 확인이 쉽지 않다. 그뿐만 아니라, 강도 높은 저층 윈드시어와 함께 강한 배풍이 복행과 이착륙 제한, 활주로 변경에 따른 체공 등을 일으킴으로써 항공기의 운항에 혼란을 야기한다. 따라서 양배풍의 주요 요인을 밝히는 연구는 항공기의 안전 운항에 중요한 사안이다.

제주국제공항의 저층 윈드시어에 대해서는 주로 국내 기상 관서, 한국기상학회 등에서 연구되고 있지만, 양배풍과 관련된 체계적인 연구는 미흡한 실정이다. 본 연구의 목적은 양배풍을 일으키는 원인과 발생 시 그 특징을 분석하는 데 있다. 나아가 본 연구를 통해 향후 양배풍 발생에 대한 예측과 대비를 통해 항공기 안전 관리를 위해 활용할 수 있는 기초연구의 틀을 마련하고자 하였다.

1.2 문헌 연구

제주국제공항의 저층 윈드시어를 연구한 구대영(2008)에 따르면, 제주국제공항의 윈드시어는 기상학적 요인과 지형적 요인이 결합하면서 발생한다고 하였다. 윈드시어는 계절별로 서로 다른 발생 특성이 있으며 특히 풍향에 따른 특성이 다르다고 하였다[1]. 저층

2) 자료 출처: 기상청 방재기상정보시스템.

3) 공항기상관측장비, Aerodrome Meteorological Observation System.

윈드시어 연구자료 중에서 양배풍에 관해 기술한 것으로는 구대영(2008), 박정규(2009), 이민구(2013) 각각의 연구자들에 의한 것으로, 제주도에 남풍 계열의 바람이 불 때 한라산을 감고 돌아오는 바람이 양배풍을 일으킨다고 하였다[1,2,3]. 조진호(2021, 2022)는 저층 윈드시어 의한 항공기 복행 사례를 바탕으로 저층 윈드시어, 양배풍을 일으키는 원인과 각 특징에 대해 분류, 설명하였다[4,5]. 그러나 그 이상으로 양배풍에 대한 보다 실증적인 연구나 항공기 운항 데이터를 접목하여 연구한 사례는 찾기 어려웠다.

국의 공항 중 저층 윈드시어를 연구한 대표적인 것은 홍콩국제공항을 대상으로 한 것이다. Chan(2012), Li Lei(2013), Feng Chen(2019), Louis(2021)는 공항 남쪽에 위치한 란타우섬으로부터 강한 바람이 불어올 때 활주로 접근경로에 저층 윈드시어가 발생함을 연구하였다[6,7,8,9]. 일본에서는 Yoshino(2019)가 강한 남서풍이 불 때 저층 윈드시어가 발생하는 나리타 국제공항을 대상으로 연구하였고[10], 중국 공항을 대상으로 Caiyan Lin(2021)이 조종사와 항공교통 관제사의 보고서를 이용하여 연구하였다[11]. 위와 같이 지형과 저층 윈드시어의 관계에 대한 연구는 활발히 이루어지고 있는 편이나 양배풍을 동반한 저층 윈드시어 연구사례는 찾아보기 어렵다.

II. 본 론

2.1 연구 방법

Fig. 3은 본 연구의 흐름도로, 2020년~2021년 2년간 제주국제공항에서 저층 윈드시어가 발생하고 항공기 복행이 발생한 모든 날을 대상으로 연구하였다. 2년간의 복행 항공편 자료와 해당 시점의 일기도, 실시간 풍향 및 풍속 자료를 바탕으로 저층 윈드시어와 복행을 일으키는 유의미한 기압 패턴을 분류하였다. 나아가 양배풍을 일으키는 기압 패턴과 특징을 도출함으로써 양배풍 원인과 그 예측 가능성을 연구하였다.

구체적인 연구자료 수집과 분석은 다음과 같이 하였다. 저층 윈드시어에 의한 복행 발생 시 복행 편에 대한 복행 시각, 위치, 고도, 속도 등 상세 자료는 Flightradar24⁴⁾ 자료를 활용하여 수집하였다. 조종사

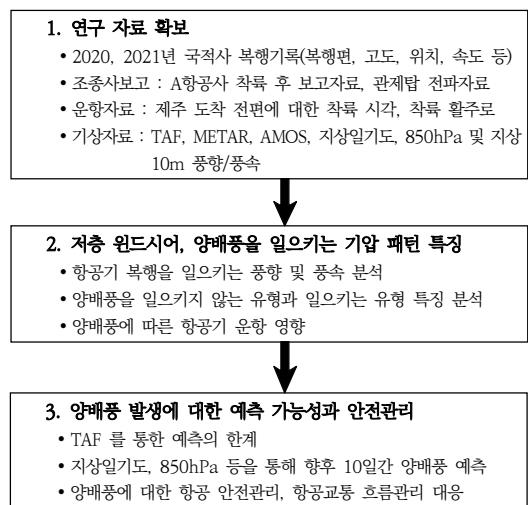


Fig. 3. Research workflow

보고 자료는 국내 A 항공사 운항 편 착륙 후 보고 자료를 접근경로 기류분석을 위해 활용하였다. 기상분석 자료는, 기상청 방재기상정보시스템내 지상일기도, 850hPa 바람장⁵⁾, 지상 10m 지상풍⁶⁾ 등 사전 예측 자료, 6시간마다 발부되는 공항예보, 정시기상관측, 그리고 실시간 활주로 별 상세한 풍향, 풍속 정보가 포함된 AMOS 자료를 활용하였다.

지상일기도는 고기압과 저기압의 세력, 위치와 이동에 따른 지상 풍향, 풍속의 변화를 분석함으로써 제주국제공항 접근경로와 활주로에 발생하는 저층 윈드시어를 예측하는 기본이 되는 자료이다. 850hPa 바람장은 지상 약 1,500m 높이 고도의 풍향 및 풍속도로써 항공기의 착륙 접근 중 지형의 영향에 따른 기류 불안정과 양배풍 가능성을 분석하는 데 활용하였다. 또한, 지상 10m 지상풍은 활주로 인근에서의 풍향 및 풍속의 불연속면, 양배풍 가능성에 대한 분석으로 활용하였다.

2.2 항공기 복행 시점의 풍향 및 풍속

제주국제공항 활주로에 착륙을 위해 접근 중 저층 윈드시어가 원인이 되어 발생한 항공기 복행은 저층 윈드시어를 연구할 수 있는 중요한 운항자료가 된다. 연구 기간인 2020년~2021년, 2년간 실시간 모니터링과 복행 발생 후 재검증을 통해 확인한 복행은 총 497회

4) 웹 기반의 항공기 운항정보 제공 플랫폼.

5) 850hPa Height, Temp, Wind and T-Td로 본 논문에서는 850hPa 바람장으로 표현.

6) Stream line and Surface wind at 10m로 본 논문에서는 지상 10m 지상풍으로 표현.

를 보였으며, 이 기록을 저층 윈드시어를 일으키는 원인과 항공기 이착륙에 미치는 영향을 규명하는 연구에 활용하였다.

Table 2는 총 497회 복행에 대해 복행 발생 시 사용 활주로의 AMOS 실시간 풍향(x축, 도) 및 풍속(y축, 5kt 단위)을 기준으로 분류한 것이다.⁷⁾ 예를 들어 풍향 210도, 풍속 30~34kt에서는 복행이 10회 발생하였음을 의미한다. 참고로 각 칼럼의 숫자 0은 해당 풍향 및 풍속에서 착륙 편은 있으나 복행 편이 발생하지 않았다는 것을 나타낸다.

제주국제공항에서 항공기 복행을 유발하는 풍향과 풍속을 살펴볼 수 있다. 강한 남서풍인 경우는 풍향 200~240도 범위에서, 풍속은 15kt 이상에서 발생이 많았다. 강한 동풍에서는 풍향 90~110도 범위에서 풍속 15kt 이상에서, 한편 강한 북서풍에서는 310~340도, 역시 풍속 15kt 이상에서 발생 발생이 두드러졌다. 강한 남서풍과 강한 동풍은 지형의 영향이 동반되나 강한 북서풍은 지형의 영향 없이 풍속 차에 의한 저층 윈드시어와 강한 측풍으로 복행을 유발하였다.

이러한 강한 남서풍, 강한 동풍, 강한 북서풍에서 발생하는 것과는 달리, 넓은 범위의 풍향에서 풍속이 14kt 이하에서도 발생하였고, 또한 풍향 10~80도에서 상대적으로 많은 복행 편이 발생하였다는 점이 특징적이다. 이는 제주국제공항에서 발생하는 저층 윈드시어의 특징적인 면으로 강하지 않은 바람, 여기에는 양배풍에 의한 저층 윈드시어가 복행을 일으키는 요인으로 작용하고 있다는 점이다.

또한 특징적으로, 풍향 140~190도에서 25kt 이상의 강풍이 보이지 않았다는 점이다. 이는 강한 남풍 예상 시 사전 결항이 된 경우도 있지만, 공항 남쪽에 위

치한 한라산과 제주도 지형의 영향으로 활주로에 강한 남풍보다는 이미 좌우로 분기되어 양배풍으로 들어오는 것을 방증한다고 할 수 있다. 아울러 풍향 10~50도 사이에서도 25kt 이상의 강풍이 나타나지 않았는데 이는 이러한 풍향과 강풍을 유발하는 기압 패턴의 발생이 매우 드물기 때문에 나타난 것으로 분석하였다.

2.3 기압 패턴과 양배풍

2.3.1 강풍형 기압 패턴

기압 패턴과 그 특징은 항공기 접근과 착륙 단계에서의 풍향, 풍속을 지배하며, 특히 저층 윈드시어 발생, 복행 가능성, 항공기 운항에 미치는 영향 등에 대한 예측에 활용할 수 있다.

Fig. 48)는 2.2항에서 살펴본 바와 같이 항공기 복행을 유발한 강한 풍속인 강한 남서풍, 강한 동풍, 강한 북서풍이 불 때(유형별 굵은 화살표 표시)의 대표적인 지상일기도이다. 공통된 특징은 현저한 저기압 또는 고기압이 보이고 또한 등압선 간격이 좁은 형태를 보인다는 점이다. 강한 저기압이 제주도 북서쪽에 위치할 때는 강한 남서풍이, 강한 고기압이 제주도 북동쪽에 위치할 때는 강한 동풍이, 제주도 북서쪽에서 강한 고기압이 남하할 때는 강한 북서풍이 불었다. 이때 지상일기도, 850hPa 바람장, 지상 10m 지상풍은 물론 활주로 07, 25 말단 모두 유사한 풍향과 풍속을 보였다. 이와 같은 강풍형 기압 패턴에서는 저층 윈드시어를 일으키고 항공기 복행과 운항상 영향을 주지만 양배풍은 발생하지 않는 것을 확인할 수 있었다.

Table 2. Categorization by runway wind direction and speed during go-arounds

합계	8	16	8	9	9	14	13	25	19	46	14	7	2	1	2	1	2	3	3	16	43	45	18	15	8	8	10	6	4	13	27	30	17	17	8	8	497
35~	-	-	-	-	-	0	0	0	4	0	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1	3	1	0	-	-	-	0	0	0	0	1	2	-	-	-	12	
30~34	-	-	-	-	-	0	0	5	11	0	-	-	-	-	-	-	-	-	-	10	4	4	0	0	0	0	1	1	1	3	2	0	0	-	-	42	
25~29	-	-	-	-	-	0	0	3	3	10	1	0	0	-	-	-	-	-	-	2	14	17	3	2	0	0	0	0	0	5	19	13	10	1	0	0	103
20~24	0	0	-	0	0	0	3	3	1	10	1	1	0	0	-	-	-	1	1	1	8	4	1	3	2	1	0	0	1	2	2	6	1	8	1	0	62
15~19	0	0	3	1	0	3	3	3	9	7	8	3	2	1	0	0	0	1	2	8	5	11	5	7	3	2	2	2	1	0	2	5	2	2	3	1	107
10~14	4	2	2	2	2	3	4	13	0	1	3	2	0	0	1	0	0	0	0	4	4	4	2	0	2	3	6	2	1	2	0	0	1	1	4	3	78
5~9	4	11	3	6	7	8	2	3	1	5	1	1	0	0	1	1	1	1	0	1	1	1	1	2	1	2	1	1	0	3	0	3	1	5	0	3	82
0~4	0	3	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	1	1	0	0	1	0	0	0	1	0	0	0	0	1	11	
풍속 풍향	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100	110	120	130	140	150	160	170	180	190	200	210	220	230	240	250	260	270	280	290	300	310	320	330	340	350	360	합계

7) Flightradar24에 기록된 복행 발생 시 최저고도 통과 1분 전의 시각 기준.

8) 대표 사례로, 2020.06.29.2100kst, 2021.02.27.1200kst, 2021.11.30.1800kst 지상일기도.

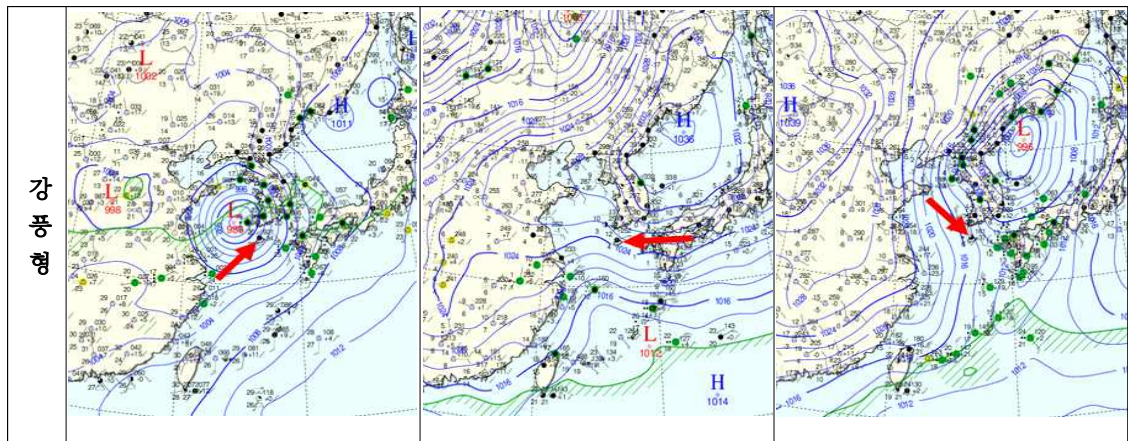


Fig. 4. Pressure pattern associated with strong wind speed

2.3.2 풍향 변화형 기압 패턴

Fig. 5)의 지상일기도는, 2.3.1의 강풍형보다 등압선 간격이 넓으며, 제주도 남쪽 또는 남동쪽에 고기압, 북쪽 또는 북서쪽에 저기압 형태가 나타난다는 공통된 특징을 보인다. 따라서 접근경로의 기류를 예측할 수 있는 850hPa 바람장에서의 풍향은 남동풍, 남풍 또는 남

서풍을 보였다. 또한 양배풍을 예측할 수 있는 지상 10m 지상풍에서는 활주로 07과 25쪽으로 풍향이 수렴하는 형태를 보인다는 점이다. 이와 같은 기압 패턴에서는 접근경로에서는 남풍류가 우세하나 착륙 지점에 다다라서는 북풍, 북동풍, 동풍, 서풍 등 풍향이 매우 불규칙하고 이러한 상황에서 양배풍 현상이 나타나는 것이다.

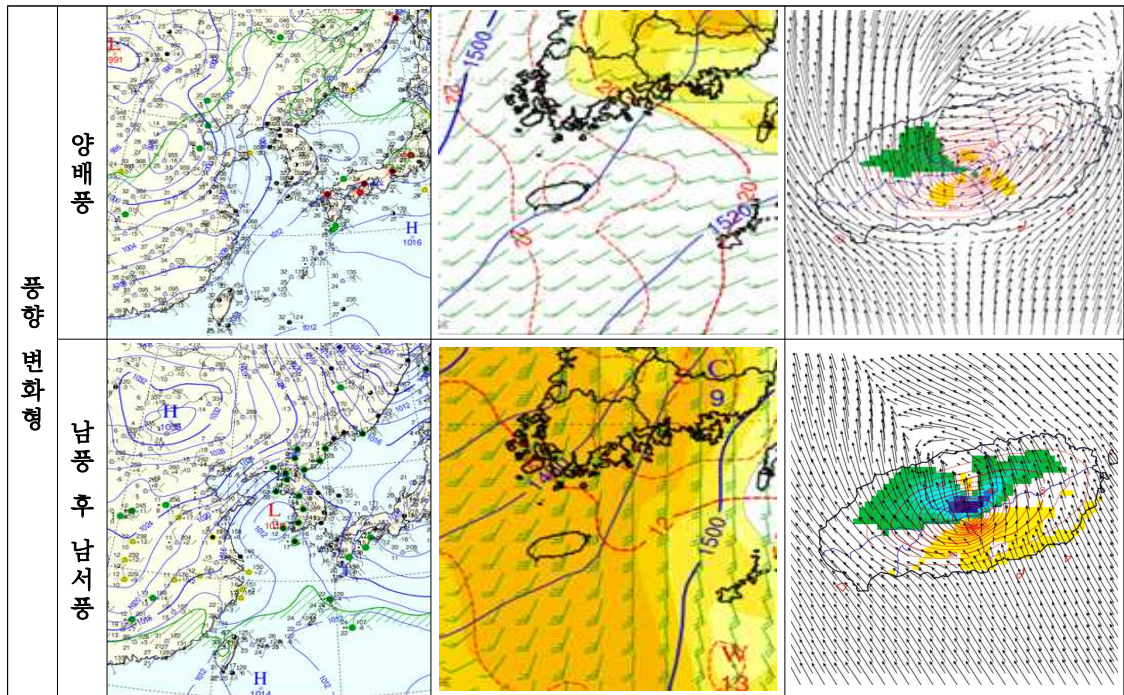


Fig. 5. Pressure pattern associated with bidirectional tailwind (surface weather chart, 850hPa wind field, 10m surface wind)

풍향 변화형 중 양배풍은 가장 전형적으로 양배풍이 발생하는 유형으로 제주도 남동쪽에 고기압이 위치하는 기압 패턴에 의한다. 시정이 양호한 낮 시간대에 1 시간에서 수 시간 사이 발생하며 저녁 무렵이 되면서 약화, 안정화된다. 또한, 남풍 후 남서풍과 같이 저기압이 제주도 서쪽에서 북서쪽으로 움직이는 시점에도 양배풍이 발생한다. 이와 같은 기압 패턴에서는 경로상의 강한 남풍에도 불구하고 지상풍은 변화가 심한 유형이다. 해당 유형에서는 남풍에서 남서풍으로 변화되는 시점까지 불규칙한 지상풍이 접근 경로 상에 저층 윈드시어를 일으키고 일시 양배풍도 유발하며 풍향이 보다 서풍화가 되면서 저층 윈드시어도 안정화된다. 이 유형은 양배풍 발생 시간이 불규칙하며, 주야 무관하게 저기압 영향권 시간대에 따라 달라진다.

2.3.3 유형별 복행 분류

Table 3은 2년간 저층 윈드시어로 복행이 발생한 횟수를 기압 패턴별로 분류한 것이다. 일회성 복행 기록을 최소화하기 위해 복행 발생 시 '최소 3번의 복행이 발생하고, 각각의 복행 간 간격은 2시간 이하일 경우'로 하였다. 총 497회 복행 중 399회가 상기 기준에 부합하였다. 2.3.2항의 풍향 변화형 중 양배풍 유형에서 복행 발생일 14일, 복행 발생 횟수 94회를 보였고, 남풍 후 남서풍 유형에서는 9일, 89회를 보였다.

복행 발생 시의 사용 활주로를 보면, 강풍형의 강한 남서풍은 활주로 25, 강한 동풍은 07, 강한 북서풍은 활주로는 측풍 성분이 발생하며 25 사용이 기본적인다. 반면, 풍향 변화형은 활주로 변경이 발생하기 때문에 강풍형에 비해 항공교통 관리 측면에서 어려움이 더욱 증대한다.

Table 4는 양배풍을 유발하는 두 유형에 대해 사

Table 3. Occurrence of go-around days and frequency by wind types

구분		발생일	횟수
강풍형	강한 남서풍	9	96
	강한 동풍	9	48
	강한 북서풍	7	72
풍향 변화형	양배풍	14	94
	남풍 후 남서풍	9	89
계		48	399

Table 4. Occurrence of go-around frequency per runway

구분	R07	R25	계
양배풍	29	65	94
남풍 후 남서풍	53	36	89
계	82	101	183

용 활주로를 분류한 것으로 두 유형 모두 활주로 사용이 가변적임을 보여주고 있다. 이처럼 양배풍 상황에서는 10kt 초과 배풍에 따른 복행과 이착륙 제한, 활주로 변경 등이 발생함으로써 항공교통의 원활한 흐름에 악영향을 미치는 현상이 나타나게 된다. 따라서 항공사나 관제기관의 예측적 상황관리가 더욱 요구되고 할 수 있다.

2.4 양배풍 발생 시 특징과 영향

2.4.1 850hPa 바람장 분석

Fig. 6은 양배풍을 유발하고 항공기 복행이 발생했던 14일간의 850hPa 바람장을 분석하기 위해 제주도 남서쪽 S1, 남쪽 S2, 동쪽 S3 위치를 설정하였다. Table 5는 기상청으로부터 S1, S2, S3 위치의 850hPa 바람장 예보모델 데이터를 받아 풍향 및 풍속을 산출한 것이다. 이후 S1, S2, S3 각 위치에서 나타난 풍향 및 풍속의 공통 범위를 도출한 결과, 풍향은 동남동에서 남서(110도~230도), 풍속은 11~28kt를 보였다. 이와 같은 풍향, 풍속이 양배풍과 복행을 일으키는 임계치라 할 수 있으며, 이보다 약한 경우는 활주로 양쪽 모두 유사한 풍향, 상이한 풍향, 약한 양배풍 등 다양한 경향을 보이거나 저층 윈드시어는 강하지는 않았다.

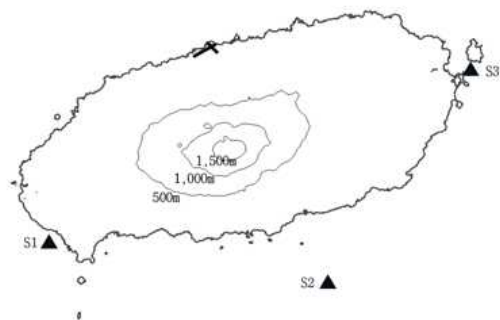


Fig. 6. Observation locations for 850hPa wind direction and speed measurements

Table 5. Wind direction (degree) and speed (kt) at S1~S3 locations

구분		S1		S2		S3	
날짜	KST	풍향	풍속	풍향	풍속	풍향	풍속
20.03.21	1500	222	11	232	12	238	9
20.04.30	1800	224	24	234	22	250	17
20.06.09	1200	123	27	121	23	131	23
20.08.02	1200	229	15	234	16	227	14
20.08.09	0900	201	27	207	24	196	32
20.11.18	1200	174	28	181	31	181	34
21.05.15	1800	213	14	220	13	236	13
21.07.05	1500	219	22	236	21	227	26
21.07.11	0900	231	14	232	16	237	16
21.07.12	1500	218	16	229	18	236	13
21.07.13	1000	215	22	225	21	228	22
21.07.17	1500	106	19	102	16	112	15
21.07.18	1800	152	18	144	12	142	17
21.07.19	0900	135	15	130	15	130	15

2.4.2 복행 시점의 AMOS 자료 특징

Fig. 7은 Table 3의 양배풍, 남풍 후 남서풍 유형의 복행 발생 시점의 접근 활주로 풍향(x축)과 풍속(y축)을 실시간 AMOS 자료로 나타낸 것이다. 위쪽은 양배풍이 발생하는 전형적인 기압 패턴, 아래쪽은 남풍 후 남서풍으로 변화가 있는 기압 패턴 상황에서 복행 발생 시점의 풍향 및 풍속을 나타낸 것이다. 두 가지 유형 모두 복행 시점에서의 풍향이 다양하게 나타났지만,

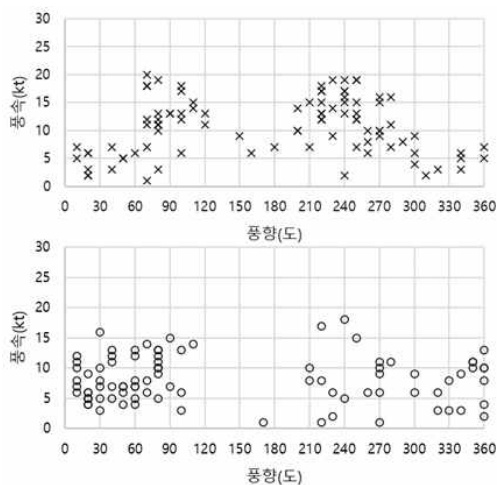


Fig. 7. AMOS wind direction and speed during go-arounds

그중에서도 북동, 동, 남서풍이 우세한 경향을 보였다. 양배풍, 남풍 후 남서풍 유형은 복행 발생 시의 평균 풍속이 각각 4~12kt, 6~16kt를 보였다. 이와 같은 풍속은 수치상 항공기 착륙에 전혀 문제없는 수준이라 할 수 있다. 그런데도 항공기 복행과 체공 등 착륙에 어려움을 주는 것은 양배풍으로 인한 풍향 및 풍속의 변화가 심하다는 것을 방증한다.

2.4.3 지상 10m 지상풍 특징

지상 10m 지상풍의 예보모델 특징을 살펴볼 필요가 있다. Fig. 8의 좌측은 850hPa 바람장에서 남서풍, 가운데는 남풍, 우측은 남동풍을 보였던 대표 사례를 각각 2일씩 표출한 것이다. 각각에 대한 풍향의 불연속면은 굵은 실선으로, 남서풍인 경우 활주로 25 말단의 동쪽으로, 남풍은 활주로 인근의 양옆으로, 남동풍은 활주로 07 말단의 서쪽으로 불연속면이 형성되는 특징을 보였다.

참고로 Fig. 8에서 노란색은 연직 속도 증가를, 녹색은 연직 속도 감소를 나타내며, 바람이 한라산과 제주도로 불어 들어가는 쪽은 연직 속도 증가를, 산 사면을 내려가는 쪽은 연직속도 감소를 보여주고 있다. 이러한 연직 속도 변화는 항공기 접근경로 및 활주로에 저층 윈드시어를 증가시키는 요인으로 작용하고 있다.

이러한 풍향의 불연속면은 접근경로 또는 활주로에서 나타나게 된다. 즉, 850hPa 바람장에 영향을 받는 접근 경로에서는 남풍류가 관측되나 고도 강하가 이루어지면서 풍향의 변화가 생기고 특히 착륙 지점에 다다라서는 Fig. 8의 굵은 불연속면과 같이, 1) 활주로 25 동쪽, 2) 활주로 가운데 부분, 3) 활주로 07 서쪽 등으로 풍향의 불연속면이 활주로, 활주로 주변 또는 최종 접근 경로상에서 형성되는 것으로 분석하였다.

2.4.4 계절별 특징과 예측 가능성

Fig. 9는 양배풍 현상 속에 항공기 복행이 발생한 94회를 월별로 분류한 것이다. 발생 빈도는 북태평양 고기압이 우리나라에 영향을 주는 7월~8월에 가장 많이 나타났으며, 또한 봄철 저기압의 통과 시점인 3월~6월에도 발생하였다. 한편, 가을철과 겨울철은 발생이 낮은 편이나 11월에 발생한 것처럼 우리나라 남동쪽에 고기압이 위치하는 기압 패턴이 발생하는 경우 양배풍 현상이 나타나기도 하였다. 이러한 계절적 특징과 기압 패턴의 특징적 모습을 통해 양배풍 가능성에 대해 사전 예측이 가능하게 되었다.

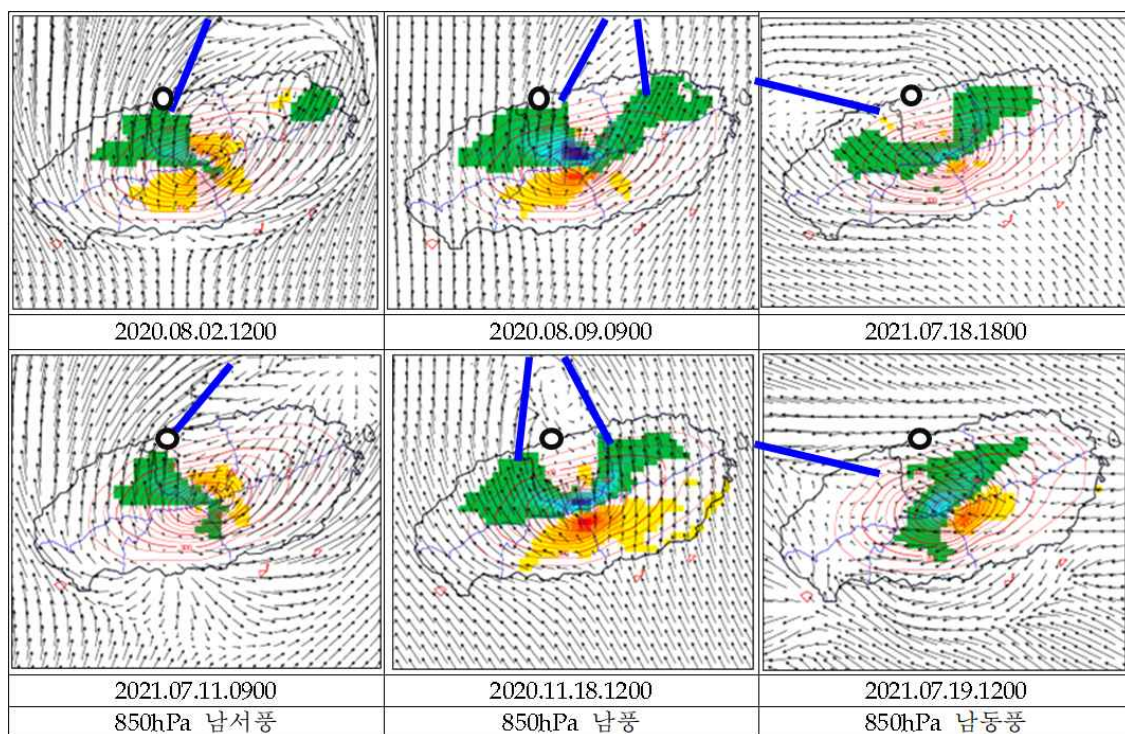


Fig. 8. 10m surface wind direction and surface of discontinuity (blue bold lines)

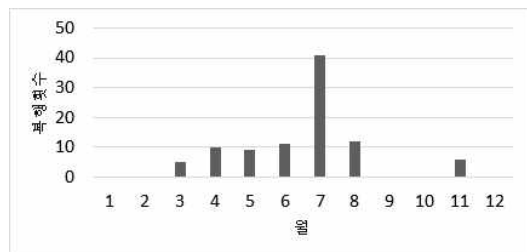


Fig. 9. Occurrence of go-around frequency per month

2.4.5 저고도 복행, 조종사 보고

제주국제공항에서 발생하는 저층 윈드시어에 의한 복행은 대체로 2,000ft 미만에서 발생하고 있으며, 특히 양배풍 유형에서 발생한 총 94회 복행 중 45회인 48%가 복행 시 기록된 최저 고도 500ft 이하에서 발생하여 착륙 단계의 저속, 저고도 항공기 안전에 위협이 되고 있음을 확인하였다.

저층 윈드시어 상황에서 접근, 착륙하는 조종사가 만나는 기류 상태에 대한 보고는 당시의 풍향과 풍속, 항공기 계기 상에 나타나는 기상 데이터, 저층 윈드시

어의 세기와 함께 조종사의 경험과 비행시간, 항공기 기종 특성과 운항 중량 등 매우 다양한 요소가 반영된 것이다. 따라서 조종사 보고는 주관적인 특성이 내포되어 있으며 한편으로는 가장 실질적이고 정확한 상황을 파악하는 방안이기도 하다.

저층 윈드시어에 의해 항공기 복행이 발생하는 사유에는 윈드시어 경고 메시지 또는 Horn이 울리거나, 분당 강하율(Vertical Speed)이 1,000fpm를 초과하는 경우, 접근 속도에 +15/-5kt 초과하는 경우 등이 포함된다.¹⁰⁾

양배풍 유형으로 분류된 14일간 조종사 보고는 총 73건이었으며 대표적인 특징은 접근경로 강한 남풍류 20~30kt, 접근하면서 풍향과 풍속 변화가 심하고, 정풍과 배풍 간 경계선이 있고, 특히 100ft 부근에서 풍향이 정반대로 변화된다는 보고가 많았다.

III. 결 론

저층 윈드시어는 저속, 저고도로 접근, 착륙 중인 항공기의 안전에 큰 영향을 끼치는 위험기상으로 이에

10) A항공사 A320F 기종에 대해 청취한 사례이며 운항 기종과 운항 상황에 따라 다르다.

대한 분석과 연구는 매우 중요하다.

제주국제공항에서의 저층 윈드시어는 풍향과 풍속이라는 기상학적, 물리적 수치와 지형적 특성이 결합하여 발생하기 때문에 기압 패턴을 연구할 필요가 있다. 2020년~2021년, 2년의 자료 연구를 통해 저층 윈드시어를 일으키나 양배풍 발생은 없는 강풍형인, 강한 남서풍, 강한 동풍, 강한 북서풍 유형과 양배풍을 유발하는 풍향 변화형인 양배풍, 남풍 후 남서풍이라는 유형으로 분류할 수 있었다.

제주국제공항에서 발생하는 전형적인 양배풍은 제주도 남동쪽에 고기압이 위치하는 기압 패턴에 의한다. 여름철 북태평양 고기압이 지배하는 시기에 양배풍의 발생빈도가 잦은 편이다. 시정이 매우 양호한 상태에서 낮 시간대에 1시간에서 수 시간 사이 발생하며 저녁이 되면서 약화된다. 또한, 저기압이 제주도 서쪽에서 북서쪽으로 움직이는 시점에도 발생한다. 이때는 양배풍 발생 시간도 불규칙하며, 주야 무관하게 저기압의 영향권 시간대에 따라 달라진다.

위와 같은 기압 패턴에서 접근경로의 기류를 대표할 수 있는 850hPa 풍향과 풍속은 대체로 동남동에서 남서(110도~230도), 11~28kt를 보였다. 또한 지상의 활주로 07/25의 실시간 AMOS에 나타나는 풍향이 매우 가변적이며, 활주로 07/25 모두 배풍을 보이고 일시적으로 10kt 초과를 나타내기도 한다. 이러한 양배풍 상황에서는 무엇보다 저층 윈드시어가 심하며, 배풍 초과, 활주로 변경 등 운항 여건이 악화된다.

공항예보(TAF) 또는 정시기상관측(METAR)의 지상풍이 지형의 영향이 없는 서, 북서, 북, 북동풍을 보이더라도 이 바람은 실제 남풍이 지형의 영향을 받아 활주로로 불어 들어오는 것인지 파악해야 한다. 이를 위해서는 연구 자료와 같이 지상일기도, 850hPa 바람장 및 지상 10m 지상풍 등을 활용하여 접근경로의 기류를 입체적으로 봐야 한다. 이러한 기상자료는 향후 10일까지 예측도 가능하기 때문에 사전 대비를 용이하게 한다.

본 연구를 바탕으로 제주국제공항에서의 양배풍의 발생 가능성과 그 영향을 사전 분석, 대비함으로써 항공사의 예방적 안전관리, 항공관제의 흐름관리 등에 적용할 수 있을 것이다.

한편, 제주국제공항에서 발생하는 양배풍에 대해서 기압 패턴과 항공기 복행을 중심으로 연구하였으나, 더욱 다양한 방법을 동원하여 양배풍의 실체를 보다 명확히 밝히는 것이 필요하다고 판단한다.

후 기

본 연구는 박사학위논문을 기반으로 추가, 보완하였음을 알려 드립니다. 아울러 국토교통부 재원으로 데이터 기반 항공교통관리 기술개발사업의 지원을 받아 수행된 연구입니다(RS-2021-KA16337312882086980103).

References

1. 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, p.6,10,13, pp.16-17, p.19,23.
2. Park, J. K., and Choi, Y. J., "The Study Of Low Level Wind Shear Used LLWAS", Meteorological Research Institute, 2009, p.38,51,61.
3. 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, p.99.
4. 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.1-7.
5. Cho, J. H, "An empirical study on the correlation between low-level wind shear and aircraft go-around at Jeju International Airport", Ph.D. Thesis, Korea Aerospace University, Goyang-City, Gyeonggi-do, Korea, Aug 2022.
6. 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 21, Wiley Online Library, 2014, p.520.
7. Li, L., Chan, P. W., Zhang, L. J, and Mao, H., "Numerical simulation of terrain-induced vortex/wave shedding at the Hong Kong International

- Airport", *Meteorologische Zeitschrift*, 22(3), Gebrüder Borntraeger, 2013, pp.325-326.
8. Feng, C., Haorong, P., Pak-wai, C., and Xiaoqing, Z., "Low-level wind effects on the glide paths of the north runway of HKIA: A wind tunnel study", *Building and Environment*, 164, 2019, pp.1-8.
 9. Louis, K. S., Tse, Y. G., and Larry Li, K. B., "RANS Simulations of Terrain-Disrupted Turbulent Airflow at Hong Kong International Airport", *Computers and Mathematics with Applications*, 81, Elsevier, 2021, p.755.
 10. Yoshino, K., "Low-level wind shear induced by horizontal roll vortices at Narita International Airport, Japan", *Journal of the Meteorological Society of Japan*, 97(2), 2019, pp.419-420.
 11. Caiyan, L., Kaijun, Z., Xintao, C., Sheng, L., Junjie, W., and Wei, Z., "Overview of low-level wind shear characteristics over Chinese Mainland", *Atmosphere* 2021, 12, 628, pp.16-18.