

Original Article

<https://doi.org/10.12985/ksaa.2026.34.3.105>
ISSN 1225-9705(print) ISSN 2466-1791(online)

LLWAS 기반 제주국제공항 양배풍 특성 분석

김근희*, 김민성*, 최희욱**, 이상삼***

Characteristics of Bidirectional Tailwinds at Jeju International Airport
based on LLWAS Observations

Geun-Hoi Kim*, Min-seong Kim*, Hee-Wook Choi**, Sang-Sam Lee***

ABSTRACT

This study investigates the characteristics of bidirectional tailwinds at Jeju International Airport using 10-s wind observations from the Low-Level Wind shear Alert System (LLWAS). A bidirectional tailwind was defined as a convergent wind structure in which tailwind components from both ends of runway 07/25 flow toward each other. Based on this definition, bidirectional tailwinds were detected using 14 LLWAS sensor pairs representing wind differences between the western and eastern sides along the runway direction. A total of 133 bidirectional tailwind events were identified in 2024 by applying duration and merging criteria to the 10-s detection data. The occurrence frequency was highest in July and was concentrated in the afternoon, with relatively high frequencies in sensor pairs including the eastern LLWAS sensor #3. Representative cases showed different spatial patterns, including eastward, westward, and stationary types, under different low-level inflow conditions and surface wind distributions around the airport. These results provide a basis for understanding bidirectional tailwind structures at Jeju International Airport.

Key Words : Bidirectional Tailwind(양배풍), Low-Level Wind Shear(저층급변풍), Jeju International Airport(제주국제공항), Low-Level Wind Shear Alert System(저층급변풍경고장비), Local Data Assimilation And Prediction System(기상청 현업용 지역모델)

1. 서 론

저층급변풍(low-level wind shear)은 항공기 이착륙 안전을 위협하는 주요 기상현상이다. 국제민간항공기구(ICAO, 2005)는 저층급변풍과 난류를 항공 안전과

관련된 주요 기상요인으로 제시하였고, 미국 연방항공청(FAA, 1988)은 저층급변풍이 항공기 대기속도와 연직 속도에 급격한 변화를 유발할 수 있음을 설명하였다.

제주국제공항은 제주도 북부 해안에 위치하며, 남쪽에는 한라산이 자리하고 있다. 이러한 지형적 조건에서는 종관 규모의 저층 유입류가 제주도 지형을 통과하거나 우회하면서 공항 주변의 지상풍이 국지적으로 변형될 수 있다. 또한 공항 북쪽의 해양과 남쪽의 산악 지형의 영향으로, 활주로 주변의 풍향·풍속 차이가 짧은 시간 규모에서 크게 나타날 수 있다. 이와 유사한 현상은 홍콩국제공항에서도 보고된 바 있다. 산악 지형에 의해

Received: 3. Jul. 2026, Revised: 19. Aug. 2026,

Accepted: 19. Aug. 2026

* 국립기상과학원 기상응용연구부 연구원

** 국립기상과학원 기상응용연구부 연구사

*** 국립기상과학원 기상응용연구부 연구관

연락처 E-mail : gnenara@korea.kr

연락처 주소 : 제주특별자치도 서귀포시 서호북로 33

변형된 저층 흐름이 활주로 접근·이륙 경로의 급변풍을 유발하는 것으로 나타났다(Chan and Hon, 2016). 따라서 제주국제공항은 활주로 주변 저층 바람 구조에 대한 고해상도 관측자료 기반의 분석이 필요한 공항이다.

제주국제공항 활주로 주변에서는 이러한 국지적 바람 변화로 인해 활주로 양쪽의 배풍 성분이 서로 마주 보는 구조가 나타날 수 있다. 본 연구에서는 이를 양배풍으로 정의하며, 이는 활주로 양쪽에서 유입되는 배풍 성분이 수렴성 바람 구조를 형성하는 현상을 의미한다. 양배풍이 발생하면 활주로 주변의 짧은 거리 안에서 활주로 방향 바람 성분이 서로 다르게 나타날 수 있다. 따라서 항공기의 접근·이륙 과정에서 나타나는 바람 조건을 이해하기 위해서는 양배풍의 공간 구조를 분석할 필요가 있다.

제주국제공항 저층급변풍과 관련해서는 다양한 연구가 수행되어 왔다. Cho & Baik(2021)은 항공기의 복행 사례를 이용하여 제주국제공항 저층급변풍의 특성을 분석하였고, Min et al.(2020)은 항공기 기상관측자료 수집체계(aircraft meteorological data relay, AMDAR)와 100 m 해상도의 고해상도 수치자료를 이용하여 제주국제공항 접근 경로의 저층급변풍 예측 가능성을 평가하였다. Kim et al.(2023)은 저층급변풍 경고장비(low-level wind shear alert system, LLWAS)와 고해상도 수치모델을 이용하여 제주국제공항 저층급변풍의 발생 특성과 예측 성능을 분석하였으며, 급변풍 경고가 여름철과 봄철에 많고 남풍류에 의한 급변풍은 비교적 잘 예측되지만 북서풍 계열 급변풍은 예측이 어려워, 발생 유형에 따라 예측 성능의 차이가 나타날 수 있음을 제시하였다. Cho et al.(2023)은 제주국제공항 활주로에서 발생하는 양배풍과 관련된 기압 패턴을 분석하였으며, 양배풍이 제주도 남동쪽 고기압 또는 제주도 서쪽 - 북서쪽 저기압과 관련된 기압 패턴에서 발생할 수 있고, 활주로 주변에서 풍향 변화와 양방향 배풍이 동반될 수 있음을 제시하였다.

그러나 양배풍을 LLWAS 10초 관측자료에서 직접 판별하고, 발생빈도·지속시간·급변풍 강도·공간 분포를 이벤트 단위로 정량화한 연구는 아직 부족하다. 이에 본 연구에서는 2024년 제주국제공항 LLWAS 10초 풍향·풍속 자료를 이용하여 활주로 07/25 주변의 양배풍을 정량적으로 판별하고, 그 발생 특성을 분석하였다. 또한 대표 사례를 통해 저층 유입류와 공항 주변 지상풍 분포에 따른 양배풍의 공간적 특징을 검토하였

다. 본 연구의 목적은 활주로 주변의 상세 바람 관측자료를 활용하여 제주국제공항 양배풍의 시간적 발생 특성, 이벤트 특성, 급변풍 강도 및 활주로 주변 공간 분포를 통합적으로 제시하고자 하였다.

II. 자료 및 방법

2.1 분석자료

제주국제공항에 설치된 저층급변풍경고장비(low-level wind shear alert system, LLWAS)의 관측자료를 주요 분석자료로 사용하였다. LLWAS는 공항 주변의 저층 바람 변화를 감시하기 위한 장비로, 활주로 및 접근·이륙 경로 주변에 설치된 다수의 풍향·풍속 센서로 구성된다. 분석 기간은 2024년 1월 1일부터 12월 31일까지이며, 제주국제공항 LLWAS 11개 지점에서 관측된 10초 간격의 풍향·풍속 자료를 사용하였다. 풍속은 분석 과정에서 knot 단위로 통일하였다.

Fig. 1은 제주국제공항 주변의 LLWAS 센서 배치, 활주로 및 저층급변풍 경보 대상 구역, 대표 사례분석에서 사용한 주요 AWS 지점의 위치를 나타낸다. 주황색 원은 LLWAS 센서 #1 - #11을, 검은 선은 LLWAS에서 정의한 활주로와 활주로 말단으로부터 1 - 3 NM 범위의 저층급변풍 경보 대상 구역을 나타낸다. 붉은 원은 공항 주변 지상풍 해석에 사용한 AWS 지점인 외도(863), 제주공항(182), 제주(184)를 의미하며, 각각 공항 서쪽, 중심부, 동쪽의 지상풍 변화를 확인하는 데 사용하였다. 대표 사례분석에는 지상일기도, 기상청 현업용 지역모델(local data assimilation and prediction system, 이하 LDAPS) 925hPa 유선·풍속장, AWS 바람벡터 자료, 현업 LLWAS 경보자료를 보조자료로 사용하였다.

2.2 양배풍 판정 기준

본 연구에서 양배풍은 제주국제공항 활주로 07/25 주변에서 활주로 양쪽의 배풍 성분이 수렴성 바람 구조를 형성하는 현상으로 정의하였다. 이를 판정하기 위해 LLWAS 11개 센서 중 활주로 07/25 방향의 서쪽과 동쪽 지점 간 바람 차이를 나타낼 수 있는 14개 센서 조합을 사용하였다(Table 1). Table 1의 zone은 각 센서 조합의 활주로 방향상 위치를 서쪽(W), 중앙(C), 동쪽(E) 구역으로 단순화한 것이다. 양배풍 판정은

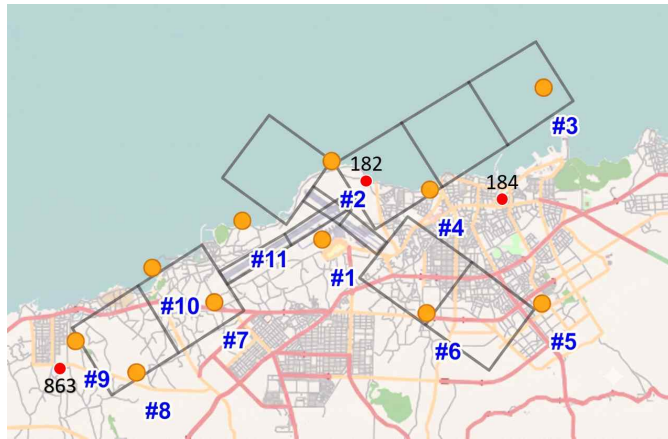


Fig. 1. Locations of LLWAS sensors, runways, low-level wind-shear alert areas, and major AWS stations around Jeju International Airport. Orange circles indicate LLWAS sensors #1-#11, and black lines represent the runway location and the low-level wind-shear alert areas within 1-3 NM from the runway ends as defined by LLWAS. Red circles indicate the AWS stations used in the representative case analysis: Oedo (863), Jeju Airport (182), and Jeju (184)

Table 1. LLWAS sensor pairs used for bidirectional tailwind detection and their three-zone classification. W, C, and E denote the western, central, and eastern runway zones, respectively

Pair ID	Western sensor	Eastern sensor	Zone
P01	#9	#10	W
P02	#8	#7	W
P03	#9	#11	W
P04	#10	#11	W
P05	#8	#1	W
P06	#10	#2	C
P07	#7	#1	C
P08	#11	#2	C
P09	#7	#4	C
P10	#11	#3	E
P11	#1	#4	E
P12	#1	#3	E
P13	#2	#3	E
P14	#4	#3	E

먼저 각 센서 조합의 풍향·풍속 조건을 이용하여 양쪽에서 유입되는 배풍 성분을 식별한 뒤, 활주로 방향 급변풍 강도를 계산하였다. 풍향 조건은 제주국제공항 활주로 07/25 방향을 기준으로 서쪽 지점의 풍향이 $250^\circ \pm 70^\circ$ 이고 동쪽 지점의 풍향이 $70^\circ \pm 70^\circ$ 범위

포함되는 경우로 설정하였다. 이 기준은 활주로 양쪽에서 서로 마주보는 방향으로 유입되는 배풍 성분을 포착하기 위한 것이며, $\pm 70^\circ$ 의 허용범위는 활주로 주변의 국지적 풍향 변동을 고려한 것이다. 또한 활주로 양쪽에서 유입되는 바람의 수렴 구조를 명확히 구분하기 위해 두 지점 간 풍향차가 120° 이상인 경우만 양배풍 후보로 간주하였다. 또한 악풍 조건에서 발생할 수 있는 풍향 불확실성을 줄이기 위해 두 지점의 풍속이 모두 2 ms^{-1} (약 3.9 kt) 이상인 경우에만 활주로 방향 급변풍 강도를 계산하였다(Fig. 2).

풍향·풍속 조건을 만족한 조합에 대해서는 서쪽 지점과 동쪽 지점의 풍향·풍속을 각각 수평 바람 성분으로 변환하였다. 이후 동쪽 지점과 서쪽 지점의 바람벡터 차이를 산출하고, 이를 LLWAS에서 정의한 07/25 활주로 방향 단위벡터에 투영하여 활주로 방향 급변풍 강도를 계산하였다. 이 값의 절대값이 15 kt 이상인 경우, 해당 센서 조합에서 양배풍이 발생한 것으로 판정하였다. 최종적으로 각 센서 조합에 대해 풍향·풍속 조건과 활주로 방향 급변풍 조건을 모두 만족하는 시각을 양배풍으로 판별하여 10초 단위 판별자료를 산출하였다. 이 판별자료는 이후 양배풍 이벤트를 정의하고 발생 특성을 분석하는 기초 자료로 사용하였다.

2.3 양배풍 이벤트 정의

2.2절에서 산출한 10초 단위 양배풍 판별자료를 이

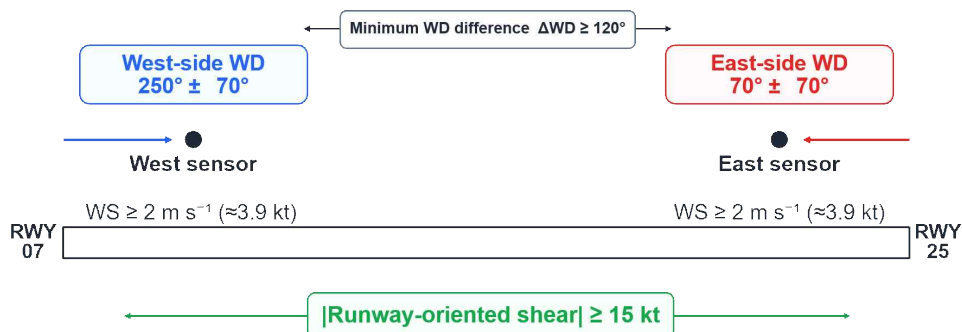


Fig. 2. Schematic diagram of the bidirectional tailwind detection criteria. Bidirectional tailwind was defined when the wind-direction and wind-speed conditions were satisfied for a sensor pair and the runway-oriented wind-shear intensity, calculated by projecting the wind-vector difference onto the runway 07/25 direction, was 15 kt or greater

용하여 양배풍 이벤트를 정의하였다. 10초 자료는 짧은 시간 규모의 풍향 변동이나 일시적인 관측 변동을 포함할 수 있으므로, 단일 시각의 판별 결과를 곧바로 하나의 이벤트로 간주하지 않았다. 대신 양배풍으로 판별된 시각이 60초 이상 연속되는 구간을 양배풍 후보 구간으로 정의하였다. 이는 10초 자료 기준으로 6개 이상의 연속 관측 시각에서 양배풍 조건이 만족되는 경우에 해당한다. 이후 시간적으로 인접한 후보 구간들을 하나의 이벤트로 묶기 위해 병합 허용시간 기준을 적용하였다. 병합 허용시간은 두 후보 구간을 하나의 이벤트로 병합할 수 있는 최대 시간 간격으로 정의하였다. 따라서 병합 허용시간은 양배풍의 연속적인 지속 시간을 의미하는 것이 아니라, 간헐적으로 반복되는 후보 구간들을 하나의 이벤트로 묶기 위한 기준이다.

후보 구간 병합을 적용하면 하나의 이벤트에는 실제 양배풍 조건을 만족한 시간과 만족하지 않은 시간이 함께 포함될 수 있다. 이를 정량적으로 평가하기 위해 이벤트 순도를 정의하였다. 이벤트 순도는 각 이벤트의 전체 지속시간 중 양배풍으로 판별된 시간의 비율을 의미한다. 최종 병합 허용시간은 600, 1,800, 3,600, 7,200, 10,800, 14,400, 18,000, 21,600초에 대한 민감도 테스트를 바탕으로 선정하였다(Fig. 3). 병합 허용시간이 길어질수록 이벤트 개수는 감소하고 평균 지속시간은 증가하였으며, 평균 이벤트 순도는 점차 낮아졌다. 본 연구에서는 평균 이벤트 순도가 0.5 이상으로 유지되면서 이벤트의 과도한 분할을 줄일 수 있는 7200초를 최종 이벤트 병합 기준으로 사용하였다. 위의 후보 구간 추출 및 병합 절차를 10초 단위 양배풍 판별자료에 적용한 결과, 총 133개의 양배풍 이벤트가 정의되었다.

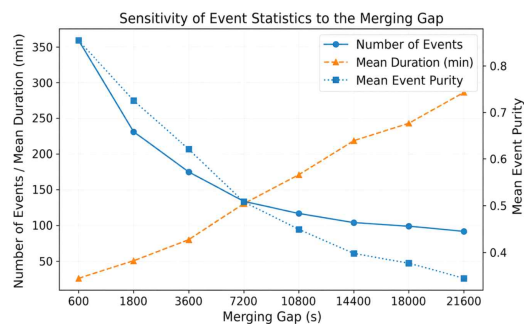


Fig. 3. Sensitivity of event statistics to the merging gap used for bidirectional tailwind event definition. The merging gap of 7200 s was selected as the final criterion considering both event purity and event fragmentation

2.4 분석 방법

양배풍 발생 특성은 10초 단위 양배풍 판별자료와 이벤트 자료를 구분하여 분석하였다. 양배풍 판별자료 기반 분석은 실제 양배풍 조건이 만족된 시각과 공간적 분포를 파악하기 위한 것으로, 양배풍으로 판별된 10초 자료를 이용하였다. 이를 통해 월별, 시간대별, 센서 조합별 발생빈도와 급변풍 강도의 분포를 분석하였다. 이벤트 기반 분석은 2.3절에서 정의한 양배풍 이벤트의 발생 특성을 파악하기 위해 수행하였다. 각 이벤트에 대해 발생 시각, 지속시간, 이벤트 순도, 최대 급변풍 강도 등을 산출하였으며, 이를 이용하여 월별 발생 특성과 지속시간 - 순도 분포를 분석하였다. 특히 지속시간 - 순도 분포는 양배풍 이벤트의 지속성과 이벤트 내부의 양배풍 비율을 함께 평가하기 위해 사용하였다.

대표 사례분석에서는 2.3절에서 정의한 양배풍 이벤트 중 순도 0.7 이상인 이벤트를 대상으로 사례를 선정하였다. 대표 사례는 최대 급변풍 강도, 지속시간, LDAPS 925hPa 유선·풍속장에서 확인된 저층 유입류 방향을 함께 고려하여 선정하였다. 이를 통해 급변풍 강도가 큰 사례, 지속시간이 긴 사례, 서로 다른 저층 유입류 조건에서 발생한 사례를 포함하였다. 선정된 사례에 대해서는 지상일기도와 LDAPS 925hPa 유선·풍속장을 이용하여 지상 기압계와 제주도 주변 저층 유입류를 분석하였다. LDAPS 자료는 사례 중심시각에 가장 가까운 3시간 간격 자료를 사용하였으며, 지상일기도는 이에 대응하는 대표 시각의 자료를 사용하였다. 지속시간이 긴 사례의 경우 초기·중간·후반의 변화를 파악하기 위해 복수 시각의 자료를 함께 사용하였다. 또한 AWS 바람벡터를 이용하여 제주도 지상풍과 공항 주변 수렴 구조를 확인하고, 현업 LLWAS 경보자료를 이용하여 활주로 주변 경보구역의 위치를 확인하였다. 이를 10초 단위 양배풍 판별자료에서 나타난 공간 분포와 비교하여, 사례별 양배풍 구조가 실제 경보구역에서 어떻게 표현되는지를 검토하였다. 대표 사례별 공간 분포는 10초 단위 양배풍 판별자료에서 최대 급변풍 강도를 보인 센서 조합을 Table 1의 W, C, E 구역으로 변환하여 분석하였다. 이를 통해 사례별 최초 발생 구역, 우세 구역, 구역별 비율을 산출하였다. 또한 최초 발생 구역과 우세 구역의 상대적 위치를 비교하여 구역 변화 유형을 구분하였다. 양배풍이 서쪽 구역에서 시작되어 중앙 또는 동쪽 구역에서 우세하게 나타난 경우를 동진형, 중앙 또는 동쪽 구역에서 시작되어 서쪽 구역에서 우세하게 나타난 경우를 서진형, 최초 발생 구역과 우세 구역이 동일한 경우를 정체형으로 정의하였다.

III. 결 과

3.1 10초 자료 기반 발생 특성

10초 단위 양배풍 판별자료를 이용하여 2024년 제주국제공항에서의 양배풍 발생 시기와 공간적 분포를 분석하였다. 먼저 월별 발생빈도를 살펴보면, 양배풍은 여름철에 뚜렷하게 집중되었으며 특히 7월에 가장 높은 발생빈도를 보였다(Fig. 4). 7월의 발생빈도는 다른 월에 비해 현저히 높았고, 6월과 12월에는 상대적으로

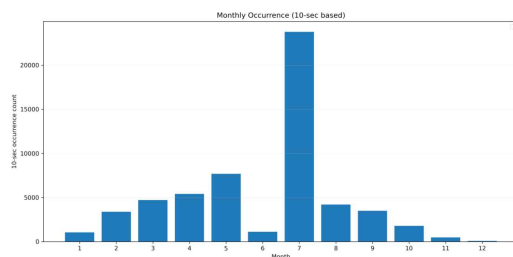


Fig. 4. Monthly frequency of bidirectional tailwind occurrence based on 10-s detection data. Occurrence frequency indicates the number of 10-s records classified as bidirectional tailwind

발생이 적었다.

시간대 - 월별 발생빈도에서도 7월의 발생 집중이 뚜렷하게 나타났다(Fig. 5a). 전체 10초 기반 발생빈도 중 7월은 약 41.5%를 차지하였으며, 특히 오후 시간대에 발생빈도가 높게 나타났다. 월 - 시간대 조합에서는 7월 13시에 가장 높은 발생빈도가 확인되었고, 7월 12 - 18시 전반에서 높은 값이 지속되었다. 반면 1월, 11월, 12월에는 양배풍이 나타나지 않은 시간대가 비교적 많아, 월과 시간대에 따라 발생 여부가 뚜렷하게 달라졌다. 센서 조합별 발생빈도는 양배풍 발생 시 활주로 방향 급변풍이 가장 크게 산출된 조합의 분포를 나타낸다(Fig. 5b, c). Fig. 5b와 5c는 각 10초 시각에 양배풍 조건을 만족한 센서 조합이 여러 개 존재할 경우, 그 중 급변풍 강도가 가장 큰 조합 하나를 선택하여 산출하였다. 또한 y축의 센서 조합은 위에서 아래로 갈수록 활주로 방향을 따라 동쪽에서 서쪽으로 배열하였다. 월별로는 7월에 대부분의 조합에서 발생빈도가 증가하였으나, 증가 폭은 조합별로 차이를 보였다(Fig. 5b). 전체 기간과 7월 모두에서 11_3 조합의 발생빈도가 가장 높았으며, 7_4, 1_3, 2_3, 8_1 조합도 상대적으로 높은 발생빈도를 보였다. 반면 12월에는 여러 조합에서 발생빈도가 0으로 나타났다. 시간대별로는 13시에 발생빈도가 가장 높았고, 12 - 14시 및 17시에도 높은 값이 나타났다(Fig. 5c). 특히 상위 조합 중 11_3, 1_3, 2_3은 가장 동쪽에 위치한 #3 지점을 포함하며, 7_4는 활주로 중심부에 해당한다. #3 지점을 포함하는 조합들의 발생빈도는 7_4보다 약 3배 크게 나타나, 양배풍 발생 시 가장 큰 급변풍은 활주로 중심부보다 동쪽 지점을 포함하는 조합에서 더 자주 산출되었다. 시간대 - 월별 최대 급변풍 강도는 발생빈도와는 다소 다른 분포를

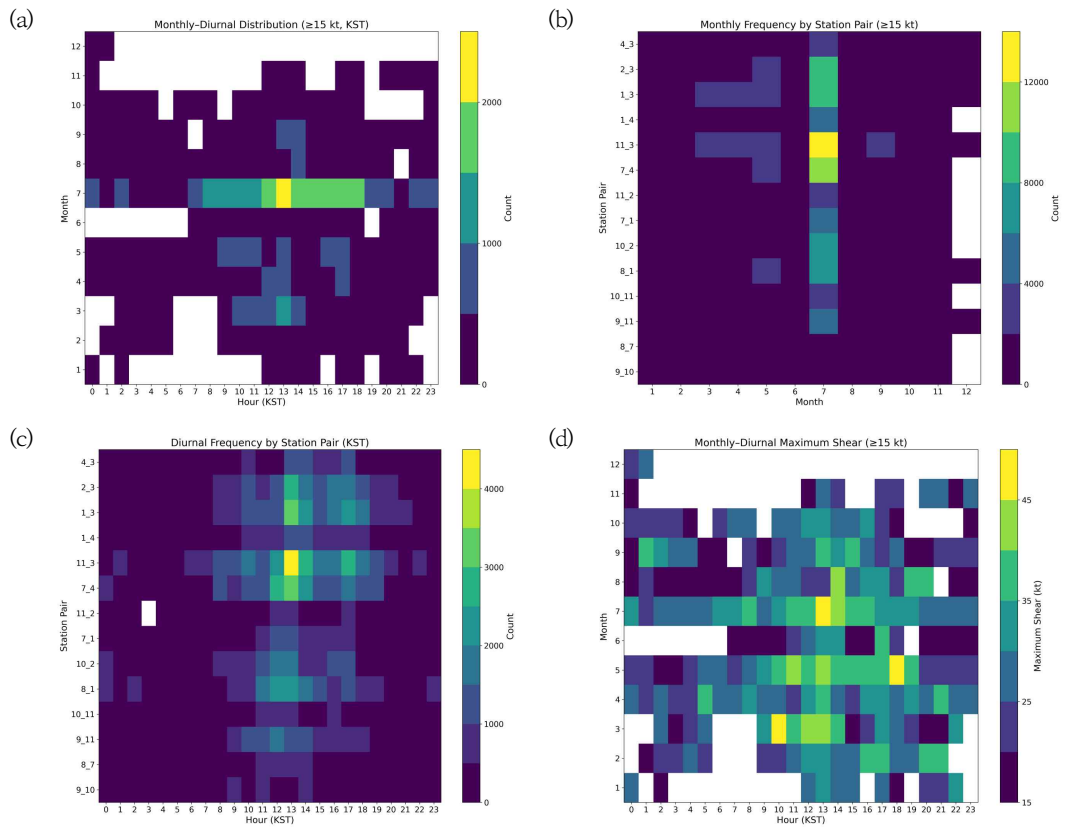


Fig. 5. Characteristics of bidirectional tailwind occurrence based on 10-s detection data. Panel (a) shows occurrence frequency by hour-month, panels (b) and (c) show occurrence frequency by month-sensor pair and hour-sensor pair, respectively, and panel (d) shows the maximum runway-oriented wind-shear intensity by hour-month. Panels (b) and (c) were calculated by selecting the pair with the largest runway-oriented wind-shear intensity when multiple pairs satisfied the bidirectional tailwind criteria at a given 10-s time step. Occurrence frequency indicates the number of 10-s records classified as bidirectional tailwind, and the y-axis sensor pairs in (b) and (c) are arranged from west to east along the runway direction from bottom to top

보였다(Fig. 5d). 발생빈도가 가장 높았던 7월에도 큰 최대 급변풍 강도가 나타났지만, 전체 최댓값은 5월 18시에 확인되었고 3월 10시에도 유사한 수준의 강한 급변풍이 나타났다. 또한 40 kt 이상의 최대 급변풍 강도는 3월, 5월, 7월, 8월에서 확인되었다. 이러한 결과는 양배풍의 발생빈도는 7월과 오후 시간대에 뚜렷하게 집중된 반면, 강한 급변풍은 발생빈도가 상대적으로 낮은 월과 시간대에서도 나타났음을 의미한다.

3.2 이벤트 기반 발생 특성

2.3절에서 정의한 133개 양배풍 이벤트를 대상으로

월별 발생 수, 지속시간, 이벤트 순도, 최대 급변풍 강도를 분석하였다. 여기서 이벤트는 60초 이상 지속된 양배풍 후보 구간을 7,200초 병합 허용시간 기준에 따라 병합한 통계 단위를 의미하며, 이벤트 순도는 전체 지속시간 중 실제 양배풍으로 판별된 시간의 비율을 의미한다. 10초 기반 분석이 실제 양배풍으로 판별된 시각의 누적 발생 특성을 나타내는 반면, 이벤트 기반 분석은 지속시간, 내부 양배풍 비율, 급변풍 강도 특성을 함께 파악하는 데 목적이 있다.

월별 발생 수를 살펴보면, 10초 기반 발생빈도와 마찬가지로 7월에 발생 수가 가장 많았다(Fig. 6). 이는 7월의 높은 10초 기반 발생빈도가 소수의 장시간 구간

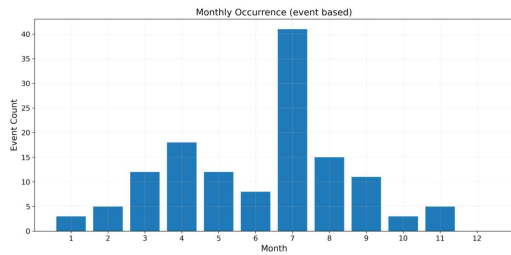


Fig. 6. Monthly frequency of bidirectional tailwind occurrence based on events. Occurrence frequency indicates the number of bidirectional tailwind events defined in section 2.3

에 의해서만 나타난 것이 아니라, 발생 수의 증가와도 관련되어 있음을 의미한다. 4월, 8월, 9월에도 상대적으로 많은 수가 확인되었으며, 12월에는 거의 나타나지 않았다.

각 이벤트의 지속시간과 내부 양배풍 비율을 함께 평가하기 위해 지속시간 - 순도 분포를 분석하였다(Fig. 7). Fig. 7은 각 양배풍 이벤트를 하나의 점으로 나타낸 것으로, x축은 지속시간, y축은 순도를 의미한다. 지속시간은 짧은 이벤트와 장시간 이벤트를 함께 비교하기 위해 로그스케일로 표시하였으며, 색은 계절(Fig. 7a)과 최대

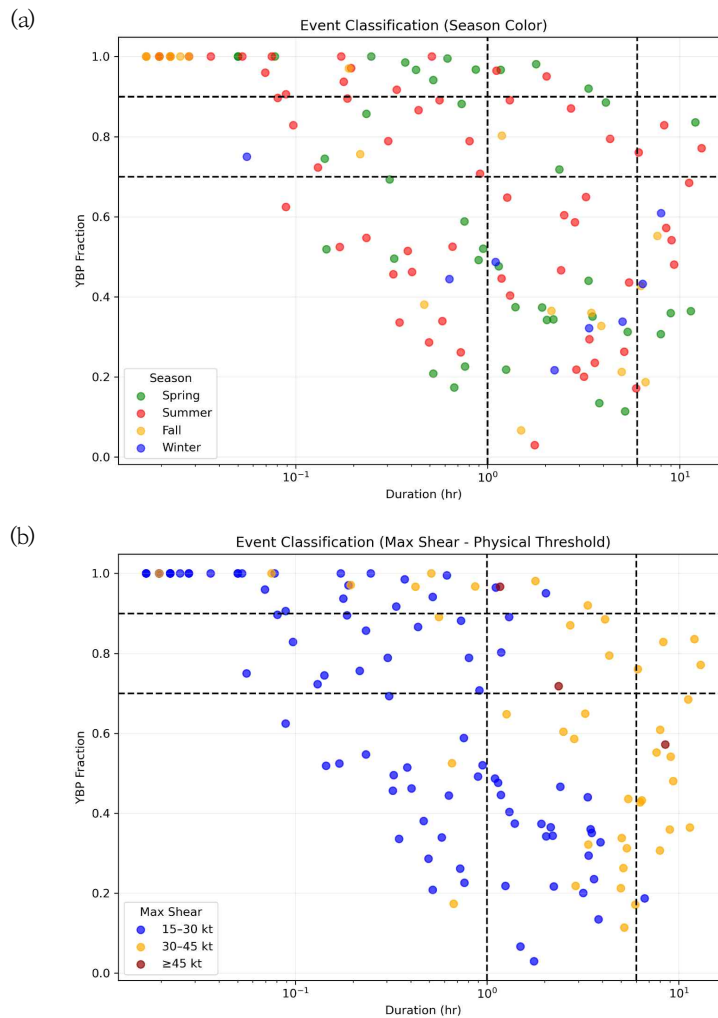


Fig. 7. Duration-purity distribution based on bidirectional tailwind events. Each dot represents one bidirectional tailwind event; the x-axis shows duration in hours on a logarithmic scale, and the y-axis shows event purity. Colors indicate (a) season and (b) maximum runway-oriented wind-shear intensity class

급변풍 강도 등급(Fig. 7b)을 각각 나타낸다. 지속시간별로는 30분 미만인 53개(39.8%)로 가장 많았으며, 30 - 60분은 18개(13.5%)로 나타났다. 한편 1 - 6시간 지속된 경우는 46개(34.6%), 6시간 이상 지속된 경우는 16개(12.0%)로 확인되었다. 즉, 30분 미만의 단시간 이벤트가 가장 큰 비중을 차지하지만, 1시간 이상 지속된 이벤트도 62개(46.6%)로 전체의 절반에 가까웠다. 다만 여기서 지속시간은 양배풍이 연속적으로 유지된 시간이 아니라, 2.3절에서 정의한 병합 허용시간 기준에 따라 시간적으로 인접한 양배풍 후보 구간을 하나의 이벤트로 묶은 분석 단위의 길이를 의미한다. 계절별 분포를 살펴보면, 여름철이 64개(48.1%)로 가장 많았고, 봄철이 42개(31.6%)로 그 뒤를 이었다(Fig. 7a). 반면 가을과 겨울은 각각 19개(14.3%), 8개(6.0%)로 상대적으로 적었다. 이러한 분포는 앞서 10초 기반 발생빈도에서 확인된 여름철 집중 경향과 일관된다. 또한 여름철에는 짧은 지속시간과 높은 순도를 갖는 경우부터 장시간 지속되지만 순도가 낮은 경우까지 넓은 범위에 분포하였다. 최대 급변풍 강도별로는 15 - 30 kt 등급이 89개(66.9%)로 가장 많았으며, 30 - 45 kt 등급은 41개(30.8%), 45 kt 이상은 3개(2.3%)로 나타났다(Fig. 7b). 따라서 전체의 약 1/3은 최대 급변풍 강도가 30 kt 이상이였다. 이러한 30 kt 이상에 해당하는 경우는 특정 지속시간 또는 순도 범위에 집중되지 않고, 다양한 지속시간 - 순도 범위에 분포하였다.

3.3 사례 분석

3.3.1 개요

Table 2는 본 연구에서 선정한 4개 대표 양배풍 사례의 발생 기간, 지속시간, 순도, 평균 및 최대 급변풍 강도, 그리고 사례별 주요 특징을 요약한 것이다. 4개

사례는 모두 순도 0.7 이상인 고순도 양배풍 이벤트에 해당한다. 사례 1은 최대 급변풍 강도가 48.4 kt로 2024년 사례들 중 가장 크게 나타난 사례이며, 사례 2는 지속시간이 12.98시간으로 가장 긴 사례이다. 사례 3과 사례 4는 사례 1 - 2와 다른 저층 유입류 조건에서 나타난 양배풍 구조를 확인하기 위해 각각 동풍계와 남동풍계 유입 사례로 선정하였다. 따라서 사례 1 - 2는 강도와 지속시간 측면에서, 사례 3 - 4는 저층 유입류 방향의 차이 측면에서 대표성을 갖는다.

3.3.2 사례 1: 남서풍계 유입 조건의 최대 급변풍 사례

사례 1은 2024년 3월 29일 09:50 - 11:00 KST에 발생한 사례로, 2024년 양배풍 이벤트 중 최대 급변풍 강도를 보인 사례이다. 이 사례의 지속시간은 1.17시간, 순도는 0.97이며, 평균 급변풍 강도는 31.5 kt, 최대 급변풍 강도는 48.4 kt로 산출되었다(Table 2). Fig. 8a의 지상일기도에서는 제주도 부근이 서쪽 고기압과 동쪽 저기압성 순환 사이의 기압경도 영향을 받는 환경에 위치하였다. Fig. 8b의 LDAPS 925hPa 유선·풍속장에서는 제주도 남서쪽 해상에서 제주도 부근으로 남서풍계 저층류가 유입되는 구조가 나타났다. 제주도 부근에서는 서풍 성분도 함께 나타나, 본 사례는 남서풍계에서 서풍계로 이어지는 저층 유입류 조건에서 발생한 양배풍 사례로 볼 수 있다.

AWS 바람벡터에서는 공항 주변 3개 지점의 풍향 차이가 시간에 따라 변화하였다(Fig. 9a - c). 09:50 KST에는 공항 서쪽의 외도(863)에서 남서풍계가 나타난 반면, 공항 중심부에 가까운 제주공항(182)과 공항 동쪽의 제주(184)에서는 북동풍계가 나타났다. 10:30 KST에는 외도(863)와 제주공항(182)이 남서풍계로 전환되었으나, 제주(184)에서는 북동풍계가 유지되었다. 11:00 KST에는 세 지점 모두 남서풍계가 나타났다.

Table 2. Summary of the four representative bidirectional tailwind cases

Case	Event period (KST)	Duration (hr)	Purity	Mean/max shear (kt)	Feature
Case 1	2024-03-29 09:50 - 11:00	1.17	0.97	31.5 / 48.4	Highest maximum shear under southwesterly inflow at 925hPa
Case 2	2024-07-22 07:13 - 20:12	12.98	0.77	22.5 / 38.6	Longest duration under southwesterly inflow at 925hPa
Case 3	2024-08-05 14:00 - 14:31	0.51	1.00	27.5 / 40.9	Easterly inflow at 925hPa
Case 4	2024-04-14 06:23 - 07:00	0.62	0.99	19.1 / 22.2	Southeasterly inflow at 925hPa

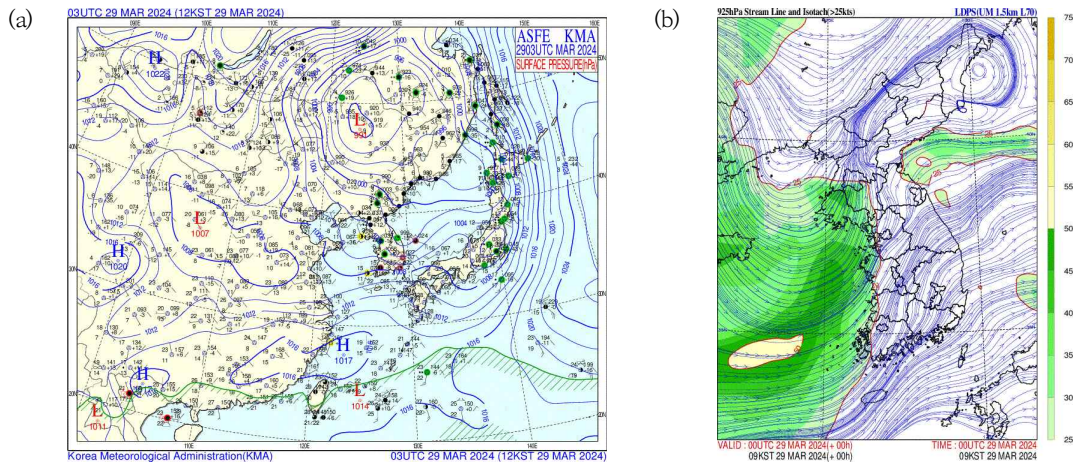


Fig. 8. Synoptic field and 925hPa low-level inflow for Case 1. (a) Surface weather chart at 12 KST on 29 March 2024 and (b) LDAPS 925hPa streamline and wind-speed field at the same time

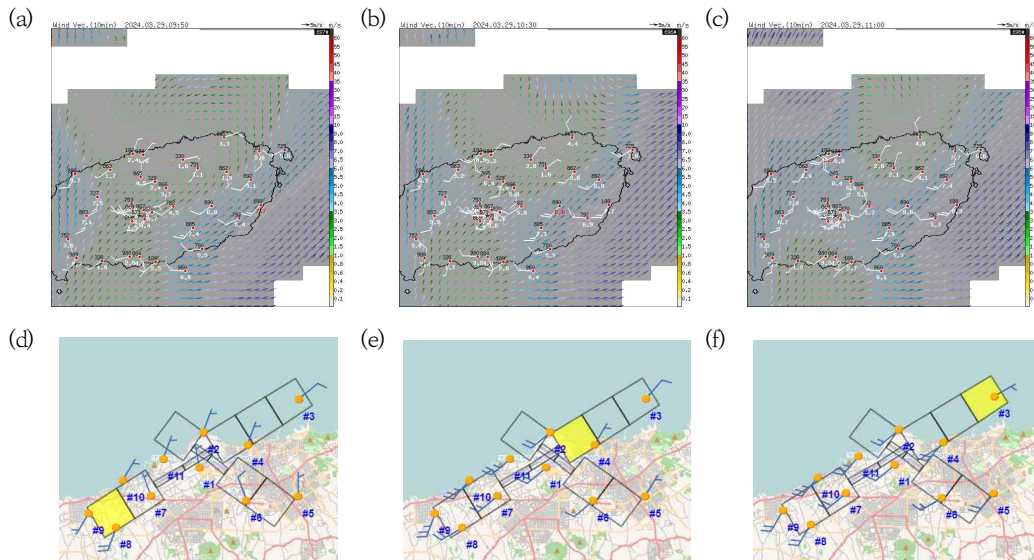


Fig. 9. AWS wind vectors and LLWAS alert areas for Case 1. (a)-(c) AWS wind vectors at 09:50, 10:30, and 11:00 KST on 29 March 2024, respectively, and (d)-(f) alert areas at the same times. Yellow areas indicate LLWAS alert areas

즉, 사례 초반에는 공항 주변에 서로 다른 방향의 지상풍이 공존하였고, 시간이 지나면서 남서풍계 지상풍이 공항 주변으로 확대되는 양상이 확인된다.

현업 LLWAS 경보자료에서도 이러한 변화가 활주로 주변 경보구역의 시간적 변화로 나타났다(Fig. 9d - f). 09:50 KST에는 서쪽 및 중앙부 주변에서 경보구역이 확인되었고, 10:30 KST에는 중앙부와 동쪽 구역으로 경보 분포가 확장되었으며, 11:00 KST에는 동쪽 구역

의 경보가 뚜렷하게 나타났다. 이는 10초 단위 양배풍 판별자료의 구역 분석 결과와도 일치한다. 사례 1은 W 구역에서 처음 발생하였으나, 전체 기간에는 E 구역 비율이 55.9%로 가장 높았고 W 구역도 31.1%를 차지하였다. 구역 변화 유형은 동진형으로 분류되며, 이는 양배풍 및 급변풍 구조가 서쪽에서 시작된 뒤 중앙부를 거쳐 동쪽 구역에서 우세해졌음을 의미한다. 따라서 사례 1은 남서풍계 저층 유입류 조건에서 공항 주변 지상풍의 풍

향 차이가 나타났고, 그 결과 활주로 주변 양배풍 구조가 서쪽에서 동쪽으로 이동하며 강화된 사례로 해석된다.

3.3.3 사례 2: 남서풍계 유입 조건의 최장 지속 사례

사례 2는 2024년 7월 22일 07:13 - 20:12 KST에 발생한 사례로, 2024년 양배풍 이벤트 중 지속시간이

가장 긴 사례이다. 이 사례의 지속시간은 12.98시간, 순도는 0.77이며, 평균 급변풍 강도는 22.5 kt, 최대 급변풍 강도는 38.6 kt로 산출되었다(Table 2). 지상일기도에서는 사례 기간 동안 제주도 주변이 남쪽 고기압과 북쪽 저기압성 흐름 사이에 위치하며 남서풍계 저층류가 유입되기 쉬운 기압 배치가 유지되었다(Fig. 10a, c, e).

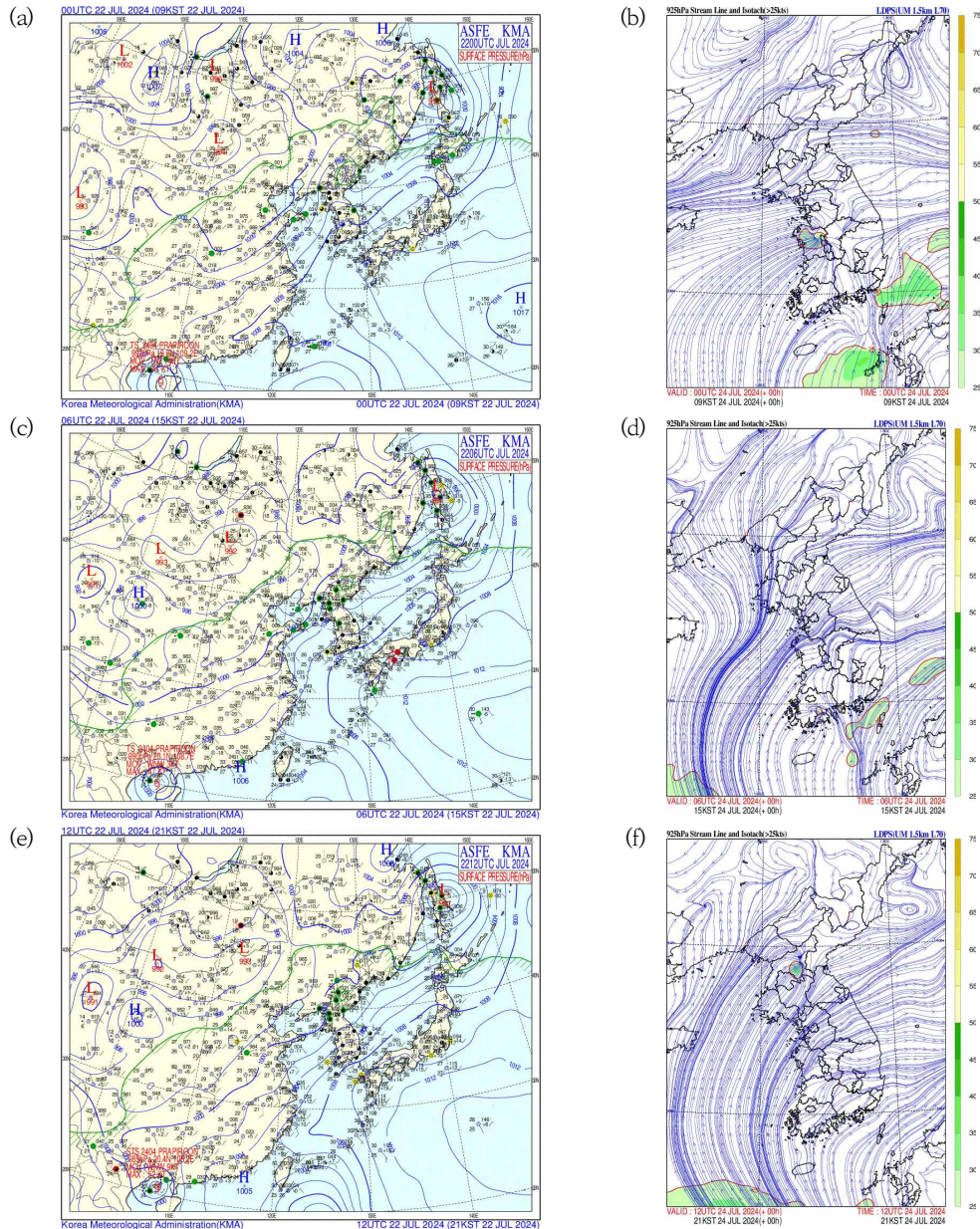


Fig. 10. Synoptic fields and 925hPa low-level inflow for Case 2. (a), (c), and (e) Surface weather charts at 09, 15, and 21 KST on 22 July 2024, respectively, and (b), (d), and (f) LDAPS 925hPa streamline and wind-speed fields at the same times

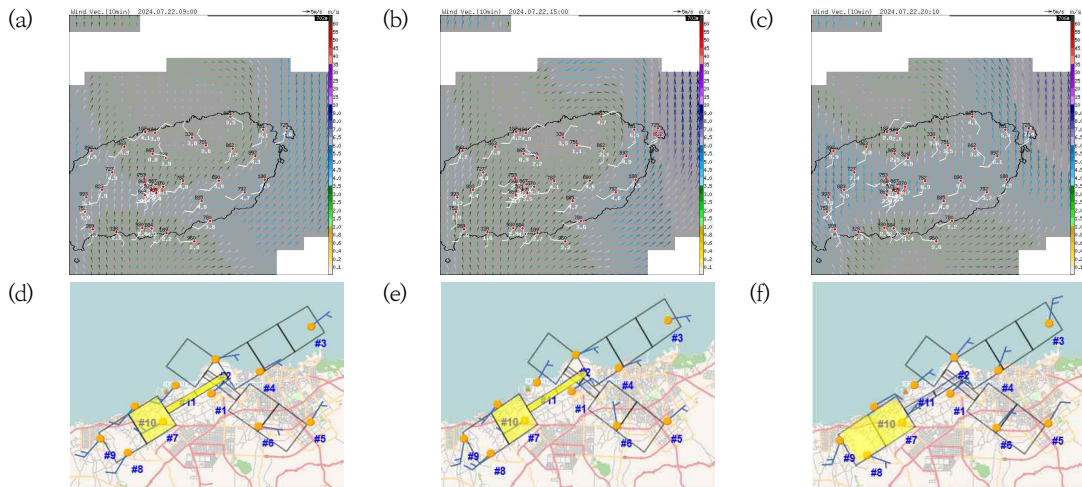


Fig. 11. AWS wind vectors and LLWAS alert areas for Case 2. (a)–(c) AWS wind vectors at 09:00, 15:00, and 20:10 KST on 22 July 2024, respectively, and (d)–(f) alert areas at the same times. Yellow areas indicate LLWAS alert areas

LDAPS 925hPa 유선·풍속장에서도 09, 15, 21 KST 모두 제주도 부근으로 남서풍계 저층류가 유입되는 구조가 나타났다(Fig. 10b, d, f). 다만 시간이 지날수록 제주도 주변의 저층 유입류는 남서풍계에서 남풍계 성분이 강화되는 방향으로 변화하였다. 따라서 본 사례는 남서풍계 저층 유입류가 장시간 유지되는 가운데, 후반으로 갈수록 유입류 방향이 점차 남풍계로 변화한 조건에서 발생한 양배풍 사례로 볼 수 있다.

AWS 바람벡터에서는 남서풍계 저층 유입류가 유지되는 가운데, 공항 주변 3개 지점의 풍향 차이가 시간에 따라 달라졌다(Fig. 11a – c). 09:00 KST에는 공항 서쪽의 외도(863)와 공항 중심부에 가까운 제주공항(182)에서 남서풍계가 나타났으나, 공항 동쪽의 제주(184)에서는 북동풍계가 확인되었다. 15:00 KST에도 외도(863)와 제주공항(182)은 남서풍계, 제주(184)는 북동풍계로 나타나 공항 동쪽과 그 서쪽 구역 사이의 풍향 차이가 유지되었다. 20:10 KST에는 외도(863)에서 남서풍계가 유지된 반면, 제주공항(182)과 제주(184)에서는 북동풍계가 나타났다. 즉, 사례 기간 동안 남서풍계 지상풍과 북동풍계 지상풍이 공항 주변에서 공존하였으며, 종료 직전에는 북동풍계가 공항 중심부까지 확장된 양상을 보였다.

현업 LLWAS 경보자료에서는 이러한 지상풍 변화와 함께 경보구역의 위치도 시간에 따라 달라졌다(Fig. 11d – f). 09:00 KST와 15:00 KST에는 서쪽-중앙부에 걸친 유사한 경보 분포가 나타났고, 20:10 KST에

는 경보구역이 더 서쪽으로 치우치며 활주로 서쪽의 수렴성 경보 구조가 뚜렷하게 나타났다. 이는 남서풍계와 북동풍계가 마주보는 구역이 시간에 따라 서쪽으로 이동했음을 보여준다. 한편 925hPa에서 후반으로 갈수록 남풍계 성분이 강화되었으며, 이와 함께 공항 주변 지상풍 구조와 수렴 구역의 위치도 변화하였다. 10초 단위 양배풍 판별자료의 구역 분석에서도 사례 2는 C 구역에서 처음 발생하였고, 전체 기간에도 C 구역 비율이 44.3%로 가장 높았으나, E 구역과 W 구역도 각각 28.5%, 27.2%를 차지하였다. 구역 변화 유형은 서진형으로 분류되며, 이는 양배풍 및 급변풍 구조가 중앙부를 중심으로 나타나다가 후반에는 서쪽 구역으로 치우쳤음을 의미한다. 따라서 사례 2는 남서풍계 저층 유입류가 장시간 유지되는 동안 공항 주변 지상풍의 국지적 변화에 따라 양배풍 구조가 활주로 중심부를 중심으로 동서 양쪽 구역에 반복적으로 나타났고, 후반에는 수렴성 경보 구조가 서쪽으로 이동한 사례로 해석된다.

3.3.4 사례 3: 동풍계 유입 사례

사례 3은 2024년 8월 5일 14:00 – 14:31 KST에 발생한 사례로, 동풍계 저층 유입류 조건에서 나타난 양배풍 사례이다. 이 사례의 지속시간은 0.51시간, 순도는 1.00이며, 평균 급변풍 강도는 27.5 kt, 최대 급변풍 강도는 40.9 kt로 산출되었다(Table 2). Fig. 12a

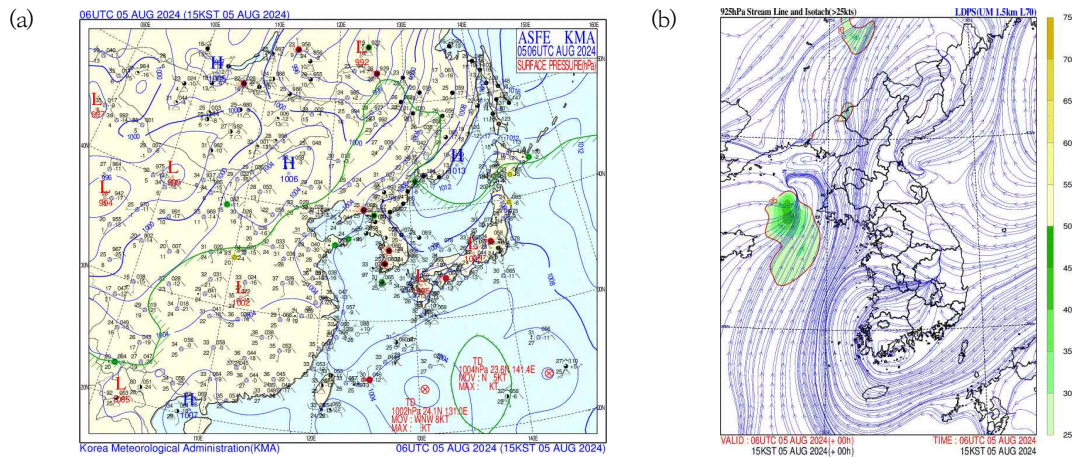


Fig. 12. Synoptic field and 925hPa low-level inflow for Case 3. (a) Surface weather chart at 15 KST on 5 August 2024 and (b) LDAPS 925hPa streamline and wind-speed field at the same time

의 지상일기도에서는 제주도 남동쪽 해상에 태풍이 위치하고, 제주도 주변은 태풍 외곽의 기압계 영향을 받는 환경에 놓여 있었다. Fig. 12b의 LDAPS 925hPa 유선·풍속장에서는 제주도 부근으로 동풍계 저층류가 유입되는 구조가 나타났다. 이는 사례 1-2의 남서풍계 유입 조건과 구분된다.

AWS 바람벡터에서는 짧은 시간 동안 공항 주변 3개 지점의 풍향이 뚜렷하게 변화였다(Fig. 13a, b).

14:00 KST에는 외도(863), 제주공항(182), 제주(184)에서 모두 북동풍계가 나타났으나, 14:20 KST에는 외도(863)에서 남풍계, 제주공항(182)에서 남동풍계, 제주(184)에서 동풍계가 나타났다. 즉, 사례 초반에는 공항 주변 지상풍이 북동풍계로 비교적 일관되었으나, 이후 서쪽-중심-동쪽 지점 간 풍향 차이가 커지면서 공항 주변에 수렴성 바람 구조가 형성될 수 있는 환경으로 변화하였다.

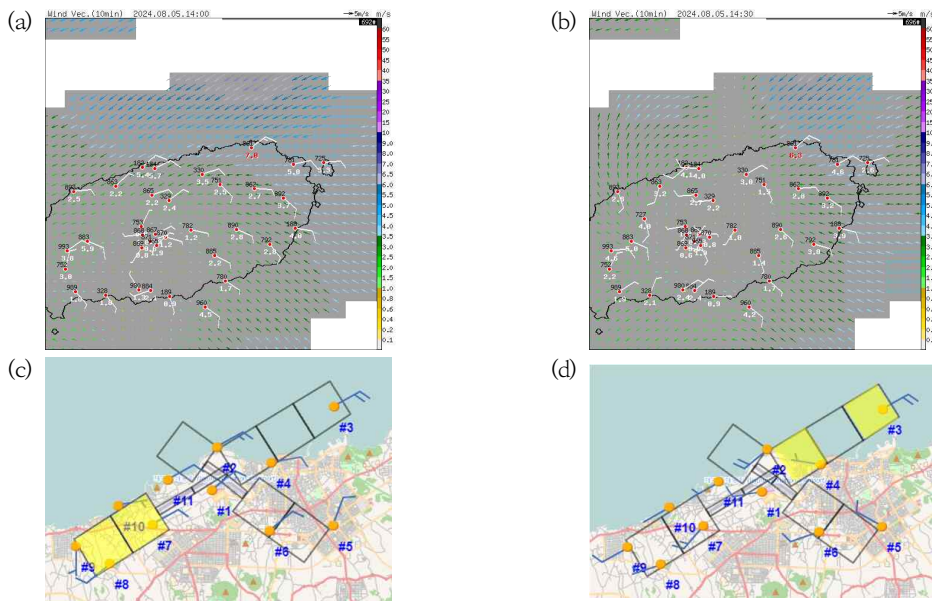


Fig. 13. AWS wind vectors and LLWAS alert areas for Case 3. (a)-(b) AWS wind vectors at 14:00 and 14:20 KST on 5 August 2024, respectively, and (c)-(d) alert areas at the same times. Yellow areas indicate LLWAS alert areas

현업 LLWAS 경보자료에서도 이러한 지상풍 변화와 함께 경보구역의 위치가 달라졌다(Fig. 13c, d). 14:00 KST에는 서쪽 구역을 중심으로 경보구역이 나타났으나, 14:20 KST에는 경보구역이 동쪽으로 확대되어 활주로 동쪽 구역의 경보가 뚜렷하게 확인되었다. 10초 단위 양배풍 판별자료의 구역 분석에서도 사례 3은 W 구역에서 처음 발생하였으나, 전체 기간에는 E 구역 비율이 63.8%로 가장 높았다. W 구역도 24.9%를 차지하였으나 C 구역은 11.4%로 상대적으로 낮았다. 구역 변화 유형은 동진형으로 분류되며, 이는 짧은 지속시간 동안에도 양배풍 및 급변풍 구조가 서쪽에서 시작되어 동쪽 구역에서 우세해졌음을 의미한다. 따라서 사례 3은 동풍계 저층 유입류 조건에서 공항 주변 지상풍이 짧은 시간 안에 재배열되었고, 그 과정에서 활주로 주변 양배풍 구조가 동쪽 구역으로 빠르게 이동한 사례로 해석된다.

3.3.5 사례 4: 남동풍계 유입 사례

사례 4는 2024년 4월 14일 06:23 - 07:00 KST에 발생한 사례로, 남동풍계 저층 유입류 조건에서 나타난 양배풍 사례이다. 이 사례의 지속시간은 0.62시간, 순도는 0.99이며, 평균 급변풍 강도는 19.1 kt, 최대 급변풍 강도는 22.2 kt로 산출되었다(Table 2). Fig. 14a의 지상일기도에서는 제주도 주변이 한반도 서쪽의 저기압성 흐름과 동쪽 해상의 고기압 사이에 위치하여, 제주도 부근으로 남동쪽 계열의 저층류가 유입될 수 있는 기압 배치를 보였다. Fig. 14b의 LDAPS 925hPa 유선·풍속장

에서도 제주도 부근으로 남동풍계 저층류가 유입되는 구조가 나타났다. 이는 사례 1 - 2의 남서풍계 유입 조건, 사례 3의 동풍계 유입 조건과 구분된다.

AWS 바람벡터에서는 06:30 KST에 외도(863), 제주공항(182), 제주(184)에서 모두 남서풍계 지상풍이 나타났다(Fig. 15a). 이는 남동풍계 저층 유입류가 한라산을 비롯한 제주도 지형의 영향을 받아, 북부 해안과 공항 주변에서는 남서풍계 지상풍으로 나타난 것으로 해석된다. 한편 제주도 남동쪽 지역의 AWS 자료에서는 남동풍계의 영향이 확인되어, 지형을 경계로 지상풍의 풍향 차이가 형성된 것으로 볼 수 있다.

현업 LLWAS 경보자료에서는 같은 시간 활주로 동쪽 구역을 중심으로 경보구역이 확인되었다(Fig. 15b). 10초 단위 양배풍 판별자료의 구역 분석에서도 사례 4는 E 구역에서 처음 발생하였고, 전체 기간에도 E 구역 비율이 100.0%로 나타났다. 구역 변화 유형은 정체형으로 분류되며, 이는 양배풍 및 급변풍 구조가 사례 기간 동안 동쪽 구역에 고정되어 나타났음을 의미한다. 따라서 사례 4는 남동풍계 저층 유입류 조건에서도 공항 주변 지상풍은 남서풍계로 나타났으며, 이와 같은 저층 유입류와 지상풍의 방향 차이가 존재하는 가운데 활주로 동쪽 구역에 수렴성 경보 구조가 집중된 사례로 볼 수 있다.

IV. 결 론

본 연구에서는 제주국제공항 LLWAS 10초 풍향·풍속 자료를 이용하여 활주로 07/25 주변의 양배풍을 정

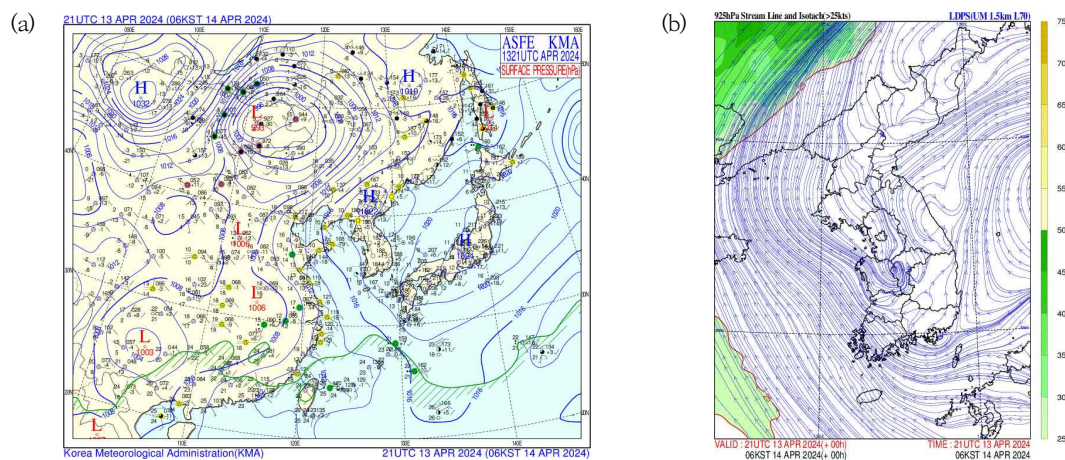


Fig. 14. Synoptic field and 925hPa low-level inflow for Case 4. (a) Surface weather chart at 06 KST on 14 April 2024 and (b) LDAPS 925hPa streamline and wind-speed field at the same time

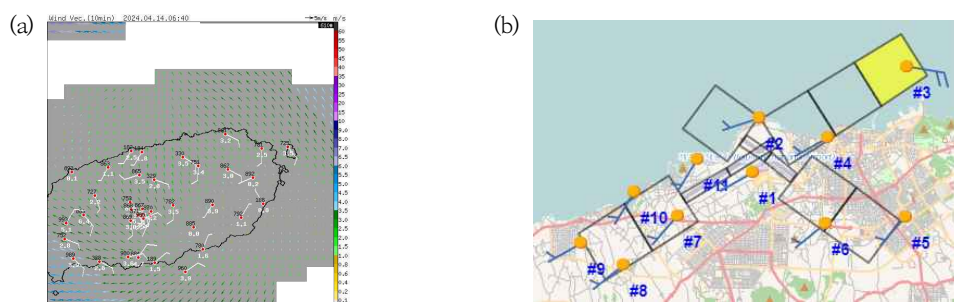


Fig. 15. AWS wind vectors and LLWAS alert areas for Case 4. (a) AWS wind vectors at 06:30 KST on 14 April 2024 and (b) alert areas at the same time. Yellow areas indicate LLWAS alert areas

량적으로 판별하고, 2024년 한 해 동안의 발생 특성과 대표 사례를 분석하였다. 활주로 양쪽에서 서로 마주보는 배풍 성분과 15 kt 이상의 활주로 방향 급변풍 강도를 기준으로 10초 단위 양배풍 판별자료를 산출하였으며, 이를 바탕으로 총 133개의 양배풍 이벤트를 정의하였다. 본 연구의 이벤트는 60초 이상 지속된 양배풍 후보 구간을 병합 허용시간 기준에 따라 묶은 분석 단위이며, 이벤트 내부에서 실제 양배풍으로 판별된 시간의 비율을 평가하기 위해 순도를 함께 사용하였다.

2024년 제주국제공항의 양배풍은 발생빈도 측면에서 뚜렷한 월별·시간대별 집중성을 보였다. 10초 단위 양배풍 판별자료에서 7월의 발생빈도는 전체의 약 41.5%를 차지하였고, 오후 시간대에 발생이 집중되었다. 또한 11_3, 1_3, 2_3 등 활주로 동쪽의 #3 지점을 포함하는 센서 조합에서 발생빈도가 높게 나타났다. 이는 2024년 자료에서 양배풍이 여름철 오후 시간대와 활주로 동쪽 구역을 중심으로 자주 판별되었음을 의미한다. 그러나 최대 급변풍 강도는 발생빈도 분포와 동일한 양상을 보이지 않았으며, 40 kt 이상의 최대 급변풍은 3월, 5월, 7월, 8월에서 확인되었다. 따라서 제주국제공항의 양배풍은 발생빈도가 높은 시기와 강한 급변풍이 나타나는 시기를 구분하여 해석할 필요가 있다.

이벤트 기반 분석에서는 양배풍 후보 구간들이 시간적으로 어떻게 묶이는지와, 병합된 이벤트 내부에서 실제 양배풍이 차지하는 비율이 함께 중요함을 확인하였다. 30분 미만의 이벤트가 가장 큰 비중을 차지하였으나, 1시간 이상 지속된 이벤트도 전체의 절반에 가까웠다. 다만 이러한 지속시간은 양배풍이 연속적으로 유지된 시간을 의미하는 것이 아니라, 시간적으로 인접한 양배풍 후보 구간을 하나의 이벤트로 병합한 분석 단위의 길이를 의미한다. 따라서 지속시간만으로 양배풍

의 지속성을 판단하기보다는, 이벤트 순도와 함께 해석하는 것이 필요하다. 또한 최대 급변풍 강도 30 kt 이상인 이벤트는 특정 지속시간 또는 순도 범위에만 집중되지 않고 다양한 지속시간-순도 범위에 분포하였다. 이는 양배풍 이벤트를 평가할 때 발생 여부뿐 아니라, 이벤트 내부의 양배풍 비율과 급변풍 강도를 함께 고려해야 함을 보여준다.

대표 사례분석에서는 925hPa 저층 유입류 방향과 공항 주변 지상풍 분포를 함께 분석하여, 활주로 주변 양배풍 구역의 위치와 변화 양상이 사례별로 다르게 나타남을 확인하였다. 남서풍계 저층 유입 조건에서도 사례 1은 W 구역에서 시작되어 E 구역에서 우세한 동진형으로 나타난 반면, 사례 2는 C 구역을 중심으로 발생한 뒤 후반에 서쪽으로 치우치는 서진형으로 나타났다. 동풍계 유입 조건의 사례 3은 동진형, 남동풍계 유입 조건의 사례 4는 E 구역에 고정된 정체형으로 분류되었다. 이러한 결과는 저층 유입류 방향이 양배풍 발생 환경을 설명하는 중요한 배경 조건이지만, 실제 수렴 구역의 위치와 이동은 공항 주변 지상풍 분포 및 활주로 주변 LLWAS 경보구역과 함께 검토되어야 함을 의미한다.

본 연구는 제주공항 양배풍을 LLWAS 10초 다지점 관측자료에서 직접 판별할 수 있는 방법론을 제시하고, 10초 단위 발생 특성, 병합 이벤트의 지속시간과 순도, 급변풍 강도, 활주로 주변 공간 분포를 함께 제시했다는 점에서 의미가 있다. 다만 본 연구는 2024년 1년 자료를 대상으로 하였으므로, 장기적인 발생 특성이나 연도별 변동성을 일반화하기에는 한계가 있다. 향후에는 다년 자료를 이용하여 제주공항 양배풍의 계절성, 강도 분포, 구역별 발생 특성을 재검토할 필요가 있다. 또한 수치모의 또는 고해상도 관측자료를 활용하여 저

층 유입류와 지형 효과가 활주로 주변 수렴 구조에 미치는 영향을 추가적으로 분석함으로써, 제주국제공항의 양배풍 대응 및 피해 예방에 기여할 수 있을 것으로 기대한다.

사 사

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

References

1. International Civil Aviation Organization (ICAO), "Manual on Low-Level Wind Shear and Turbulence", Doc 9817, 1st ed., International Civil Aviation Organization, Montreal, 2005, Amendment No. 3, 2018.
2. Federal Aviation Administration (FAA), "Pilot Windshear Guide", Advisory Circular AC 00-54, Federal Aviation Administration, Washington, D.C., 1988.
3. 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, Article ID 1454513, 2016, pp.1-9.
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.1-8.
5. Cho, J.-H., Lee, K.-M., Baik, H.-J., and Park, J.-H., "A study on the pressure patterns that causes bidirectional tailwind on the runway of Jeju International Airport", *Journal of the Korean Society for Aviation and Aeronautics*, 31(3), 2023, pp.93-102.
6. Kim, G.-H., Choi, H.-W., Seok, J.-H., Lee, S.-S., and Lee, Y.-H., "Low level wind shear characteristics and predictability at Jeju International Airport", *Journal of the Korean Society for Aviation and Aeronautics*, 31(3), 2023, pp.50-58.
7. 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", *Atmosphere*, 30(3), 2020, pp.277-291.