

3차원 레이더 바람장을 이용한 공항 급변풍 탐지

이지윤^{1)*} · 최범규²⁾ · 오희진²⁾ · 임소영²⁾ · 이용희¹⁾

¹⁾기상청 수치모델링센터, ²⁾항공기상청 차세대항공기상팀

(접수일: 2025년 8월 9일, 수정일: 2025년 9월 26일, 게재확정일: 2025년 10월 29일)

Three-Dimensional Radar-Based Wind Shear Detection Algorithm for Airports

Ji-Yun Lee^{1)*}, Beom-gyu Choi²⁾, HeeJin Oh²⁾, SoYoung Yim²⁾, and YongHee Lee¹⁾

¹⁾Numerical Modeling Center, Korea Meteorological Administration, Daejeon, Korea

²⁾Next Generation Aviation Meteorological Team, Aviation Meteorological Office, Korea

(Manuscript received 9 August 2025; revised 26 September 2025; accepted 29 October 2025)

Abstract A wind shear detection system using WISSDOM (Wind Synthesis System using DOppler Measurements) a 1 km resolution analysis field incorporating radar radial velocities through 3D-VAR was developed and evaluated to detect wind shear along aircraft glide paths at domestic airports. This system addresses limitations of existing LLWAS, which detects low-level wind shear only within a narrow area near runways at altitudes below 30 m. Vertical and horizontal wind shear detection techniques were applied in parallel, with performance verified using LLWAS alarm data and IATA aircraft observations from Incheon, Jeju, and Yangyang airports. Wind shear values from the system were generally lower than the ICAO standard (5 kt/100 ft). Optimal thresholds maximizing TSS were derived: vertical 1.0~1.5 kt/100 ft and horizontal 1.6~2.4 kt/km. Performance was highest at Incheon (horizontal wind shear PODY 0.82, AUC 0.71), followed by Jeju, and lower at Yangyang. Case analyses using AMDAR data showed spatial similarity between observed and detected wind shear events, supporting the system's operational capability. Despite resolution limits for sub-kilometer phenomena, the system effectively detects mesoscale wind shear and offers a practical means to enhance aviation safety and operational efficiency.

Key words: Low-level wind shear, Radar, LLWAS, Aviation turbulence

1. 서 론

항공 안전 분야에서 이착륙 단계는 항공기의 고도와 속도가 상대적으로 낮아 조종사의 대응 시간이 제한되고 기체의 회복 능력이 제약되는 등 위험도가 높은 단계로 알려져 있다. International Air Transport Association (IATA) 자료에 따르면 2005년부터 2023년까지 전체 항공 사고의 53%가 착륙 단계에서 발생했

으며, 이착륙 두 단계를 합치면 전체 사고의 60% 이상을 차지한다(Armstrong, 2024). 이러한 경향은 국내에서도 유사하게 나타나, ARAIB (2023)의 분석에 따르면 2013년부터 2022년까지 이착륙 단계 관련 사고가 61.6%를 차지한 것으로 확인되었다.

이처럼 높은 사고 비율을 보이는 이착륙 단계에서 기상 요인은 특히 중요한 위험 요소로 작용한다. 국내 공항의 위험 기상 특보 발효 현황(Fig. 1)을 보면, 다양한 특보 원인 중에서도 급변풍이 높은 비율을 차지하고 있다. 이는 급변풍이 이착륙 단계에서 항공기 운항에 위협이 될 수 있는 중요한 기상 요소임을 보여준다. 저층 급변풍(Low-Level Wind Shear, LLWS)은 지상 1,600 ft (약 500 m) 이하 저고도에서 짧은 시

*Corresponding Author: Ji-Yun Lee, Numerical Modeling Center, Korea Meteorological Administration, 189 Cheongsa-ro, Seo-gu, Daejeon 35208, Korea.
Phone: +82-32-222-3019, Fax: +82-32-740-2807
E-mail: estherlee@korea.kr

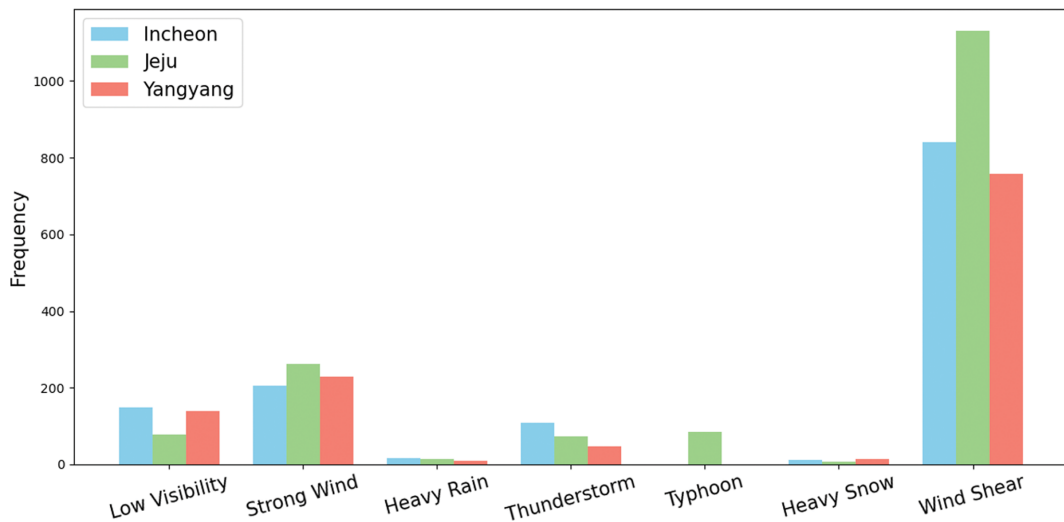


Fig. 1. Status of Airport alerts by hazardous weather phenomena (2017~2021).

간과 거리 상에 바람의 속도나 방향이 급격히 변화하는 현상으로(ICAO, 2005), 발생 시 운항 지연과 결항뿐 아니라 심각한 경우 항공 사고로 이어져 막대한 경제적·인적 손해를 초래할 수 있다.

이러한 저층 급변풍은 다양한 기상 현상과 관련되며, 그 발생 메커니즘은 크게 대류적 현상과 지형 효과로 구분된다(ICAO, 2005). 대류적 현상에는 뇌우(Tse et al., 2012), 마이크로버스트(Wilson et al., 1984; Hjelmfelt, 1988), 돌풍 전선(Kling-Wilson and Donovan, 1991), 대류운(Lane et al., 2003; Kim and Chun, 2012), 태풍(Kim and Chun, 2014; Chan and Li, 2020) 등이 있으며, 주로 대기 불안정과 강한 연직 운동에 의해 나타난다. 지형 효과에는 산악파나 국지 지형에 따른 풍속의 가속·감속 등이 포함되며(Lilly, 1978; Strauss et al., 2016; Yoshino, 2019), 홍콩국제공항은 주변 산악 지형의 영향으로 지형 효과에 의한 저층 급변풍이 빈번하게 발생하여 관련 연구가 활발한 공항이다(Chan, 2011; Chan and Hon, 2016; Stocker et al., 2022). 국내에서는 제주국제공항을 대상으로 지형 효과에 의한 저층 급변풍 특성과 진단, 예측에 관한 연구가 다수 진행되었다(Min et al., 2020; Seok et al., 2020; Cho and Baik, 2021; Kim et al., 2021, 2023; Cho et al., 2023, 2025).

이러한 다양한 원인으로 발생하는 급변풍을 탐지하기 위한 기술은 지난 40여 년간 지속적으로 발전해 왔다. 1980년대 Wilson et al. (1984)은 도플러 기상레이더를 이용하여 마이크로버스트 구조 분석을 수행하였고 Bedard et al. (1983), Wilson et al. (1993)의 Low-Level Wind Shear Alert System (LLWAS) 도입

을 통해 실용적인 급변풍 탐지 시스템이 시작되었다. 2000년대에는 Terminal Doppler Weather Radar (TDWR) 시스템이 전 세계 주요 공항에 도입되며 강수 환경에서의 탐지 성능이 크게 향상되었다(Tse et al., 2012). 2010년대 이후에는 도플러 라이다를 활용한 연구가 이어져, Chan et al. (2011)의 홍콩국제공항 사례, Zhang et al. (2018)의 베이징수도국제공항 사례, Yoshino (2019)의 나리타국제공항 사례 등 동아시아 각국에서 활발한 연구가 진행되었다. 또한 Khattak et al. (2023a, b)은 기계학습 기반 급변풍 예측 시스템을 개발하였으며, 최근에는 LLWAS, TDWR, LIDAR 등 다양한 탐지 기술을 상호 보완적으로 조합한 통합 급변풍 탐지 시스템 구축이 국제적 추세로 자리 잡고 있다.

현재 국내 공항에서는 LLWAS, TDWR, LIDAR, 공항기상관측장비(AMOS) 등이 급변풍 탐지를 위해 운영되고 있다. LLWAS는 인천, 제주, 양양 공항에 설치되어 있으며, TDWR은 인천국제공항에서, LIDAR는 2025년 6월 13일부터 제주국제공항에서 정식 운영되고 있다. 그러나 인천국제공항을 제외한 대부분의 국내 공항은 급변풍 탐지 장비 설치 수준이 미비하여 효과적인 탐지가 어려운 상황이다. 특히 급변풍 발생 위험이 높은 제주국제공항은 LLWAS를 통해 저고도 급변풍을 탐지하고 있으나, 관측 센서 위치와 높이(약 30 m)의 한계로 탐지 범위가 활주로 인근 지상 구역에 한정되어 항공기 이착륙 경로상의 급변풍을 효과적으로 포착하지 못하고 있다.

이러한 기존 급변풍 탐지의 한계를 보완하기 위해 본 연구에서는 3차원 고해상도 레이더 바람장 Wind Synthesis System using DOPpler Measurements

(WISSDOM)을 활용하여 공항 이착륙 경로상의 급변풍을 산출하는 기술을 개발하였다. WISSDOM은 한반도 전역을 대상으로 수평 해상도 1 km, 시간 해상도 5분 간격으로 산출되는 고해상도 레이더 바람 분석장으로, 수치예보장과 레이더 시선속도, 지상 관측 자료 및 윈드프로파일러가 자료동화 기법을 통해 결합되어 생산된다.

본 연구의 급변풍 탐지 기술은 인천·제주·양양 공항을 대상으로 연직·수평 급변풍 탐지 방법을 적용하여 개발하였으며, 2022~2023년 IATA 항공기 관측 자료와 2022~2024년 LLWAS 경고 사례를 활용해 탐지 성능을 검증하였다. 또한 제주공항 이착륙 구간에서 발생한 실제 급변풍 사례 중 The Aircraft Meteorological Data Relay (AMDAR) 자료에서 중강도 이상의 윈드시어가 탐지된 두 사례를 선정하여 본 탐지 기술의 적용 결과를 제시하고 실용성을 평가하였다.

2. 자료 및 산출방법

본 연구에서 사용된 자료는 기상레이더센터에서 개발하여 운영 중인 고해상도 3차원 레이더 바람장 Wind Synthesis System using Doppler Measurements (WISSDOM)이다. WISSDOM은 도플러 레이더로부터 관측된 시선속도(radial velocity)를 기반으로, 연속방정식, 와도방정식, 경계조건 등을 포함한 비용함수를 최소화하는 방식으로 3차원 바람장을 산출한다(Liou and Chang, 2009). 변분법의 비용함수에 와도방정식과 경계조건에 대한 강제항을 추가하여 연직속도를 정확하게 추정할 수 있으며, 지상 관측 바람 자료에 대한 강제항과 가상경계법(Peskin, 1977)을 통해 복잡한 지형에서 지형에 의한 강제력과 지상 관측 바람 자료가 반영되어 보다 실제에 가까운 저층 바람벡터를 모의할 수 있다.

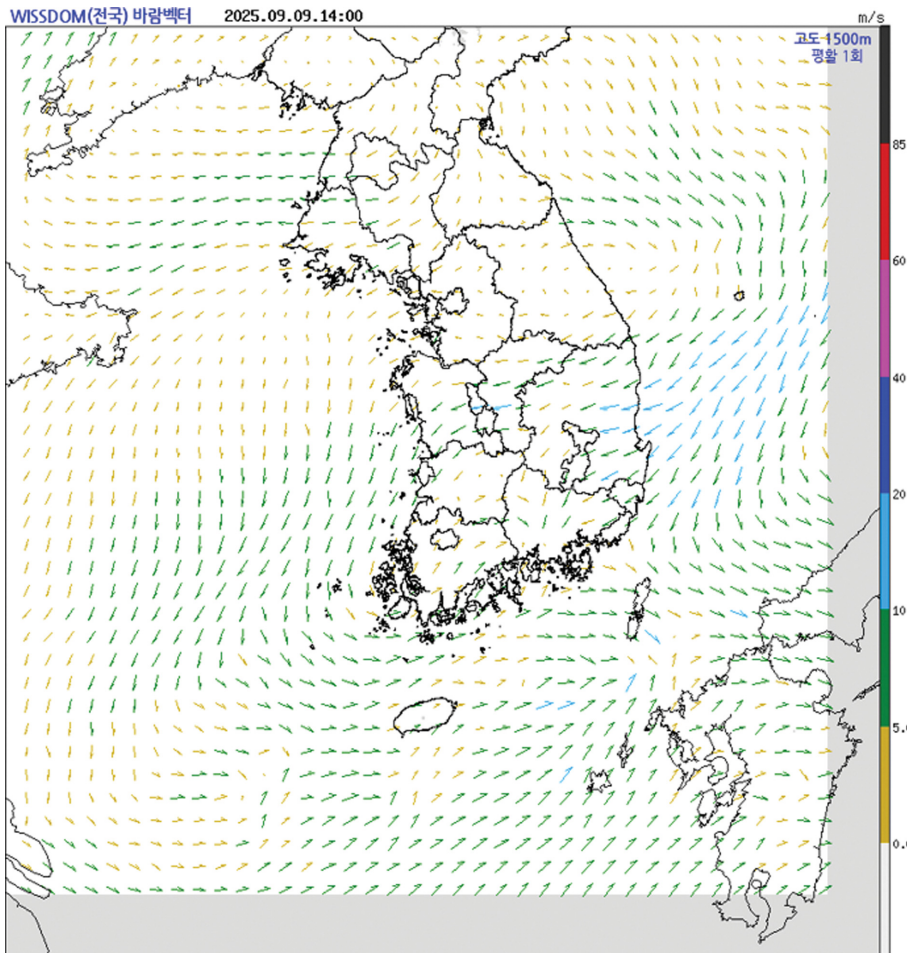


Fig. 2. Wind vector example within the WISSDOM domain.

Table 1. Configuration of the WISSDOM.

Parameter	WISSDOM (National)	WISSDOM-AIR
Coverage area	Korea Peninsula	Incheon Airport
Horizontal resolution	1 km (960 × 960)	0.2 km (1001 × 1001)
Vertical resolution (sfc~1 km)	50 m	20 m
Temporal resolution	5 min	
Total vertical layers	56 layers	101 layers

WISSDOM은 레이더 시선속도를 통해 여러 대 레이더의 관측치를 결합하여 수평 및 연직 바람을 합성하며, 지형고도 자료로 지형 경사에 따른 바람 변형 효과를 반영한다. 레이더 반사도는 강수 및 에코 존 재 여부 확인과 품질 관리에 활용되고, 온도 및 밀도 프로파일은 연직 안정도와 공기 밀도 분포를 반영하여 연속방정식과 운동방정식 적용 시 활용된다. 또한 지상 관측 바람 벡터는 레이더가 포착하기 어려운 저층 바람을 보완하며, KLAPS 수치모델 바람장은 배경장으로 활용되어 관측 자료 부족 구역을 보완한다. Kim et al. (2018)에 따르면 WISSDOM 바람 자료와 라디오존데 고층 관측 자료의 비교 검증을 통해 풍속 오차는 2.8 m s^{-1} , 풍향 오차는 12.7° 로 나타났다.

WISSDOM 자료는 Table 1과 같이 두 가지 형태로 생산된다. 본 연구에서는 한반도 전역 WISSDOM (Fig. 2)를 사용하였다. 공항 특화형 WISSDOM-AIR가 0.2 km 수평 해상도로 소규모 급변풍 산출에 더 효율적이지만, 현재 인천공항 한 곳에만 적용되고 있어 활용 범위가 제한적이며 인천, 제주, 양양을 제외한 국내 대다수 공항은 LLWAS나 TDWR 등의 탐지 장비가 설치되어 있지 않은 실정이다. 따라서 전국 공항으로의 확장성을 고려하여, 국내 대다수 공항에 적용 가능한 1 km 해상도의 한반도 전역 WISSDOM 자료를 활용하여 급변풍을 산출하였다. 다만, 1 km 해상도는 마이크로버스트와 같은 1 km 이하의 작은 규모 현상으로 인한 급변풍 탐지에는 한계가 있으나, 저기압·전선·해륙풍·지형 효과 등 중규모 이상의 기상 현상으로 인한 급변풍을 포착하는 데 적합하다.

2.2 급변풍 산출 방법

급변풍은 연직급변풍(vertical wind shear)과 수평급변풍(horizontal wind shear)으로 구분하여 산출하였다. 연직급변풍은 국제민간항공기구(ICAO, 2005) 정의에 따라 고도 100 ft 간격에서의 바람 변화량을 기준으로 계산되며 이를 위해 연직 50 m 간격의 WISSDOM의 U(동서성분 바람)와 V(남북성분 바람)를 연직 상하 층 100 ft 간격($Z_2 - Z_1$)으로 선형 보간하여 식(1)에 대입하여 연직 급변풍을 산출하였다.

$$VWSH = \frac{\sqrt{(U(z_2) - U(z_1))^2 + (V(z_2) - V(z_1))^2}}{Z_2 - Z_1} \quad (1)$$

연직 급변풍은 상승류 및 하강류와 같이 고도 차이에 따른 기류 변화를 포착하는 데 유효하며, 특히 이착륙 단계에서 항공기의 고도 변화에 따른 위험 감지에 적합하다.

수평 급변풍은 Sharman et al. (2006)의 기법을 적용하여, 수평적으로 인접한 격자 간 풍속 차이를 계산하는 방식으로 바람 속도의 수평 공간 변화율 식(2)을 바탕으로 산출하였다. 본 연구에서 사용한 WISSDOM 바람장 자료의 수평 해상도는 1 km이며, 이에 따라 식(2)에서의 dx , dy 는 각각 1 km로 설정하였다.

$$HWSH = \frac{UdS}{Sdy} - \frac{VdS}{Sdx}, [S = \sqrt{U^2 + V^2}, \text{ 풍속}(\text{m s}^{-1})] \quad (2)$$

본 연구에서는 연직 및 수평 급변풍의 두 방법을 병행하여 활용함으로써, 다양한 규모 및 형태의 기상 현상에서 발생 가능한 급변풍을 보다 포괄적으로 탐지하고자 했으며 연직급변풍과 수평급변풍의 상호 보완적 특성을 통해 항공기 이착륙 중 발생 가능한 위험 상황을 탐지하고자 하였다.

3. 검증 자료 및 방법

3.1 관측 자료

본 연구에서는 WISSDOM 급변풍 산출 결과의 신뢰성을 검증하기 위해 LLWAS와 IATA 항공기 난류 관측 자료를 활용하였다.

LLWAS 자료는 인천, 제주, 양양국제공항에서 2022년 1월부터 2024년 12월까지 관측된 3년간의 자료가 사용되었다. LLWAS는 공항 주변에 설치된 풍향·풍속계 네트워크를 통해 약 10초 간격으로 저고도 급변풍을 탐지하여 경보를 산출한다.

원시 LLWAS 자료의 신뢰성을 확보하기 위해 시간 형식 검증, 중복 경보 통합, 오경보 제거, 정시(KST) 매핑의 순서로 품질관리 절차를 수행하였다. 동일 시

Table 2. LLWAS record counts before and after quality control (2022~2024).

Airport	Year	Before QC	After QC	Valid ratio (%)
Jeju	2022	159,702	698	0.44
	2023	138,336	714	0.52
	2024	159,378	526	0.33
	Total	457,416	1,938	0.42
Incheon	2022	24,942	142	0.57
	2023	20,774	91	0.44
	2024	17,706	77	0.44
	Total	63,422	310	0.49
Yangyang	2022	28,748	406	1.41
	2023	9,862	173	1.75
	2024	8,589	145	1.69
	Total	47,199	724	1.53

Table 3. IATA record counts before and after quality control (2022~2023).

Airport	Year	Airport area (Alt. ≤ 1 km)	EDR ≥ 0.2	Spatial QC and Hourly Integ.
Jeju	2022	13,360	1,484	717
	2023	19,449	2,067	864
	Total	32,809	3,551	1,581
Incheon	2022	2,871	225	107
	2023	12,470	747	407
	Total	15,341	972	514

각에 복수의 센서에서 발생한 정보는 공항 단위로 통합하였으며, ±30분 이내의 다중 정보는 하나의 사례로 묶었다. 또한 동일 정시 내 발생 횟수가 15회 미만이거나 30분 이내 종료된 사례는 단기 잡음으로 간주하여 제거하였다. 이러한 절차를 통해 공항 단위 대표성을 확보하고 센서 간 잡음에 의한 국지적 편향을 최소화하였다.

품질관리 결과, 제주공항은 약 45만 7천 건의 원시 정보 중 1,938건(0.42%), 인천공항은 6만 3천 건 중 310건(0.49%), 양양공항은 4만 7천 건 중 724건(1.53%) 이 남아 최종적으로 약 0.5% 수준의 자료만이 유효한 자료로 활용되었다(Table 2).

IATA 항공기 난류 관측 자료는 제주 및 인천공항 영역의 고도 1 km 이하에서 2022~2023년 동안 수집된 자료를 사용하였다. 본 연구에서는 Sharman et al. (2014)의 기준을 참고하여 $EDR \geq 0.2 \text{ m}^{2/3} \text{ s}^{-1}$ 를 중강도 이상 난류로 정의하고 급변풍 사례로 선별하였다. 먼저 항공기 관측 위치가 공항 영역 내에 존재하는 자료를 선별하였고, 다음으로 난류 강도 기준을 적용하여 중강도 이상 사례를 추출하였다. 이후 항공로 외곽에 위치한 공간적 이상치를 제거하고, 활주로 이착

륙 경로에 해당하는 관측 지점만을 선별하였다. 마지막으로 선별된 자료를 KST 기준으로 정시에 통합하였으며, 동일 정시 내 다수의 관측이 존재할 경우 정시에 가장 근접한 관측을 대표값으로 선택하였다. 그 결과 제주공항의 경우 2022~2023년 공항 영역 내 32,809건의 관측 중 중강도 이상 사례는 3,551건이었으며, 최종적으로 1,581건의 유효 사례가 검증에 사용되었다. 인천공항은 총 15,341건 중 중강도 이상 972건에서 정시 통합 후 514건을 사용하였다(Table 3). 양양공항의 경우 해당 영역에서 IATA 자료가 존재하지 않아 IATA 기반 검증에서는 제외하고 LLWAS 기반 검증만 수행하였다.

Figure 3은 품질관리와 정시(KST) 매핑을 거쳐 1시간 간격으로 통합된 $EDR \geq 0.2$ 중강도 이상 난류 사례의 IATA 관측자료 공간 분포를 나타낸 것이다. 본 연구의 검증 과정에 활용된 인천국제공항(Fig. 3a)과 제주국제공항(Fig. 3b) 영역 위에 해당 관측 지점을 표시하였다. 인천의 경우 2022년에 107개(빨간색 점), 2023년에 407개(파란색 점)의 자료가 활용되었으며, 2022년의 표본 수가 적은 것은 코로나19 팬데믹으로 인한 국제선 운항 제한의 영향으로 판단된다. 제주의

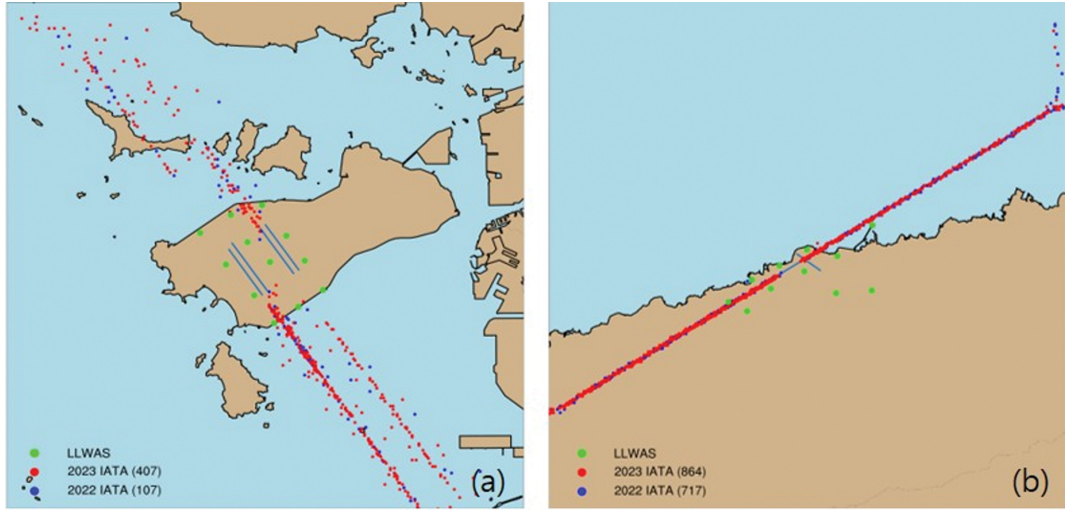


Fig. 3. Spatial distribution of IATA aircraft-observed turbulence ($EDR \geq 0.2 \text{ m}^{2/3} \text{ s}^{-1}$, Moderate or greater): (a) Incheon Airport area, (b) Jeju Airport area.

Table 4. Contingency table.

Radar windshear detection system	Event observed	
	Yes	No
Yes	True Positive (TP)	False Positive (FP)
No	False Negative (FN)	True Negative (TN)

경우 2022년 717개, 2023년 864개의 자료가 사용되어 총 1,581개의 중강도 이상 난류 사례가 확보되었으며, 이는 제주공항 주변 저고도 구간에서 실제 급변풍이 빈번하게 발생했음을 보여준다.

품질관리 후 정시(KST)로 변환된 LLWAS 및 IATA 자료는 WISSDOM의 정시 산출결과와 매칭하였다. 검증은 각 공항 중심 반경 약 18 km, 고도 3,000 ft 이하 영역을 대상으로 수행하였으며, 이는 항공기가 착륙 시 3° 글라이드 슬로프를 따라 3,000 ft 고도에서 활주로까지 접근할 때의 수평 거리(약 17.4 km)에 해당한다. WISSDOM은 1 km 수평 격자 해상도로 인해 실제 발생 지점과 모델 격자 간의 공간적 불일치가 존재할 수 있으므로, 공항 영역 내 모든 격자에서 산출된 연직 및 수평 급변풍 값 중 최대값을 대표값으로 사용하였다. 이러한 접근은 공항 주변의 국지적 난류 특성을 반영하고, 항공기 궤적과 모델 격자 불일치로 인한 성능 저평가를 방지하며, 관측자료와의 공간적·물리적 일관성을 확보하기 위한 것이다. 이후 동일 정시에 대응하는 관측자료(LLWAS, IATA)와 WISSDOM 산출값을 매칭하여 급변풍 예측 성능을 정량적으로 평가하였다.

3.2 검증 방법

탐지 정확도 평가는 Sharman et al. (2006)에서 제안한 통계적 방법을 적용하였다. 분할표(Table 4)에 따라, 실제 급변풍이 발생했고 시스템도 이를 올바르게 탐지한 경우를 True Positive (TP), 실제 급변풍이 발생하지 않았으나 시스템이 잘못 탐지한 경우를 False Positive (FP), 실제 급변풍이 발생했으나 탐지하지 못한 경우를 False Negative (FN), 실제 급변풍이 발생하지 않았고 시스템도 이를 올바르게 판단한 경우를 True Negative (TN)으로 정의하였다.

이러한 분류를 바탕으로 산출된 성능 지표는 다음과 같다. POD“Yes” (PODY)는 실제 급변풍 발생 사례 중 탐지에 성공한 비율을, POD“No” (PODN)는 미발생 사례 중 이를 올바르게 판별한 비율을 의미한다. Critical Success Index (CSI)는 정탐(TP)을 전체 탐지 관련 사례(TP + FP + FN)로 나눈 값으로 전반적인 탐지 성능을 나타내며, True Skill Statistic (TSS)는 PODY와 PODN을 동시에 고려한 종합 지표로 1에 가까울수록 최적의 성능을 의미한다.

또한 Receiver Operating Characteristic (ROC) 곡선을 활용하여 임계값 변화에 따른 탐지 성능을 평가하

었다. ROC 곡선은 참양성률(PODY)과 위양성률(FPR = 1 - PODN)의 관계를 나타내며, 곡선이 좌상단에 가까울수록 성능이 우수함을 의미한다. Area Under the Curve (AUC)는 ROC 곡선을 정량적으로 요약하는 지표로, 전체적인 탐지 성능을 한눈에 평가할 수 있다.

인천 및 양양공항의 경우 상대적으로 표본 수가 적어 ROC 기반 성능 평가의 신뢰성이 제한될 수 있음을 고려하여, 이를 보완하기 위해 선행연구(Baek et al., 2024; Park et al., 2025)를 참고하여 bootstrap 재표본화 기법을 적용하였다. Bootstrap 방법은 원본 자료에서 복원 추출을 통해 다수의 재표본을 생성하고, 각 재표본에서 산출된 통계량의 분포를 이용해 신뢰구간을 추정하는 통계적 기법이다. 본 연구에서는

bootstrap 재표본화를 수행하여 ROC 곡선과 AUC의 95% 신뢰구간을 산출하였으며, 이를 통해 표본 수 제약에도 불구하고 성능 평가의 통계적 신뢰성을 확보하였다.

$$POD \text{ "YES"} (PODY) = \frac{TP}{TP + FN} \quad (3)$$

$$POD \text{ "NO"} (PODN) = \frac{TN}{TN + FP} \quad (4)$$

$$CSI (Critical Success Index) = \frac{TP}{TP + FP + FN} \quad (5)$$

$$TSS (True Skill Statistic) = PODY + PODN - 1 \quad (6)$$

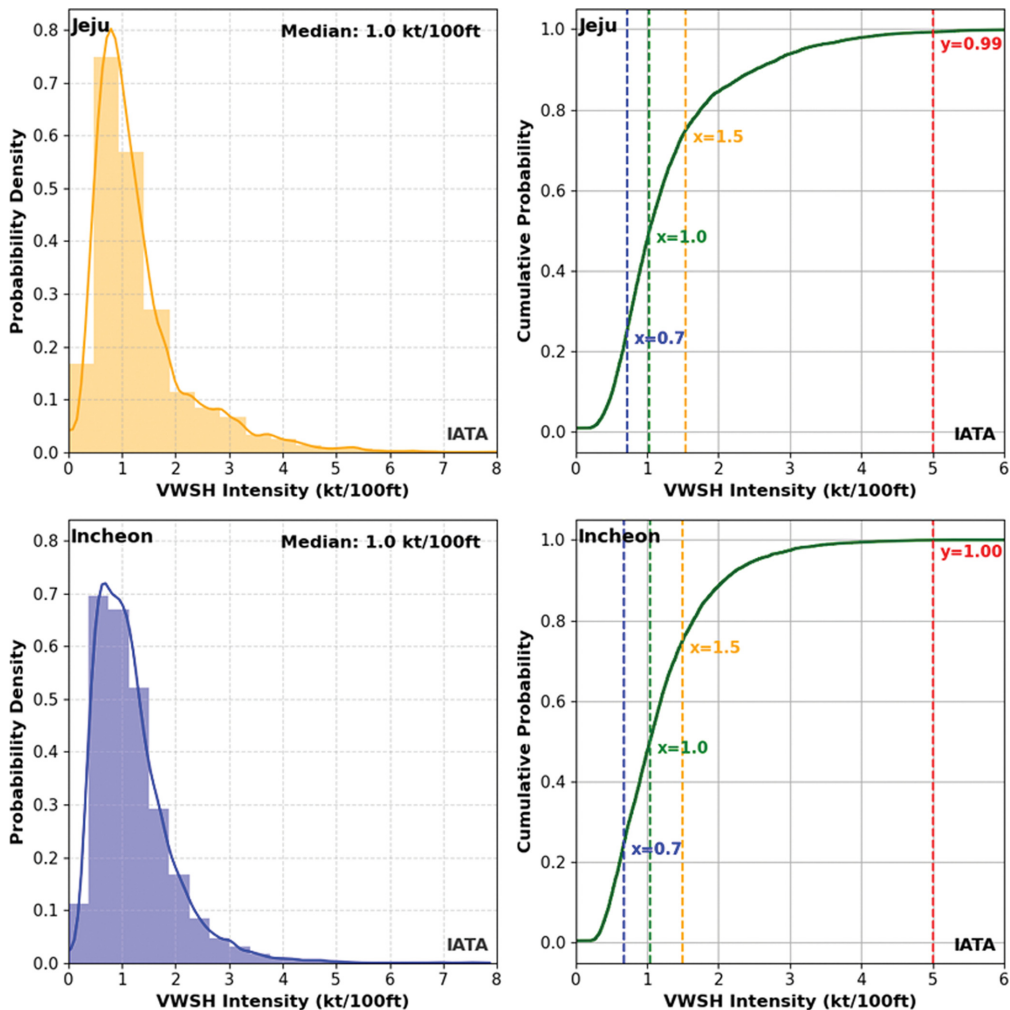


Fig. 4. Probability density function (left) and cumulative distribution function (right) of vertical wind shear at Jeju (top), Incheon (middle), and Yangyang (bottom) airports based on IATA turbulence moderate cases.

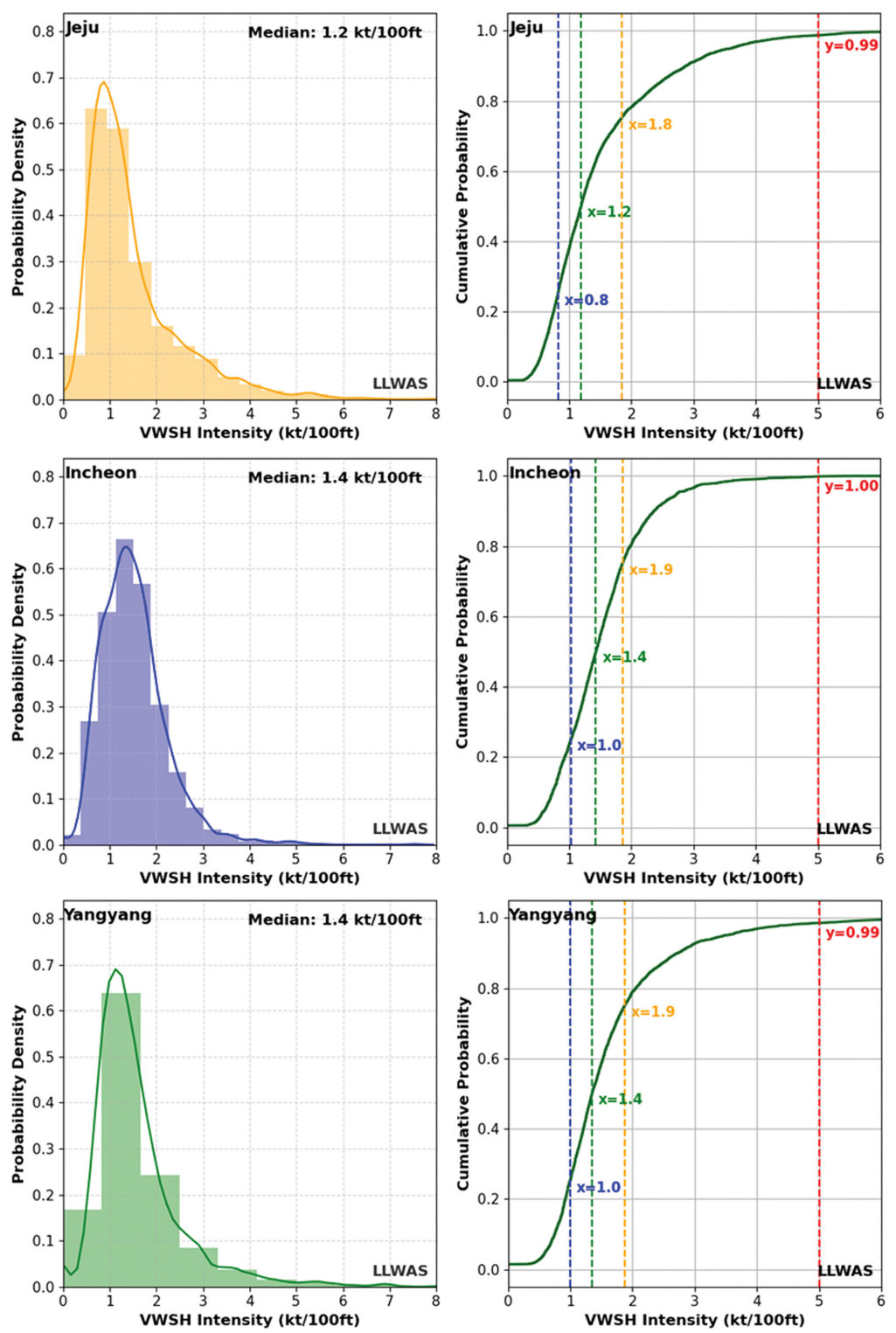


Fig. 5. Probability density function (left) and cumulative distribution function (right) of vertical wind shear at Jeju (top), Incheon (middle), and Yangyang (bottom) airports based on LLWAS warning cases.

4. 결 과

4.1 급변풍 분포 특성 분석

4.1.1 연직 급변풍 분포 분석

국제민간항공기구(ICAO)는 연직 급변풍의 판정 기준으로 5 kt/100 ft를 제시하고 있다. 본 연구에서는 이 기준의 적용 가능성을 평가하기 위해, 급변풍 탐지 기술을 통해 산출된 연직 급변풍 값의 분포 특성을 분석하였다. 분석에는 확률밀도함수(Probability Density Function, PDF)와 누적분포함수(Cumulative Distribution Function, CDF)를 활용하였으며, 제주, 인천, 양양 공항별로 IATA 및 LLWAS 사례를 구분하여 검토하였다.

그 결과, IATA 기준(Fig. 4, 왼쪽)의 경우 제주와 인

천 모두 약 1.0 kt/100 ft 부근에 집중되는 분포를 나타냈으며, LLWAS 경보 사례(Fig. 5, 왼쪽)에서는 연직 급변풍의 중심값(중앙값, median)이 1.2~1.4 kt/100 ft 수준에서 형성되었다. 특히, ICAO가 제시한 5 kt/100 ft 기준을 초과하는 사례의 비율은 IATA 및 LLWAS 기준 모든 사례에서 1% 이하로 매우 낮게 나타났으며(Fig. 4 및 Fig. 5, 오른쪽), 이는 ICAO 기준이 WISSDOM 시스템의 특성을 고려할 때 적절하지 않을 가능성을 시사한다.

산출된 급변풍 값이 ICAO 기준보다 낮게 분포하는 원인은 WISSDOM의 공간 해상도, 자료동화 과정, 그리고 연직 내삽 과정과 관련이 있는 것으로 추정된다.

현재 WISSDOM 시스템의 1 km 수평 해상도는 공

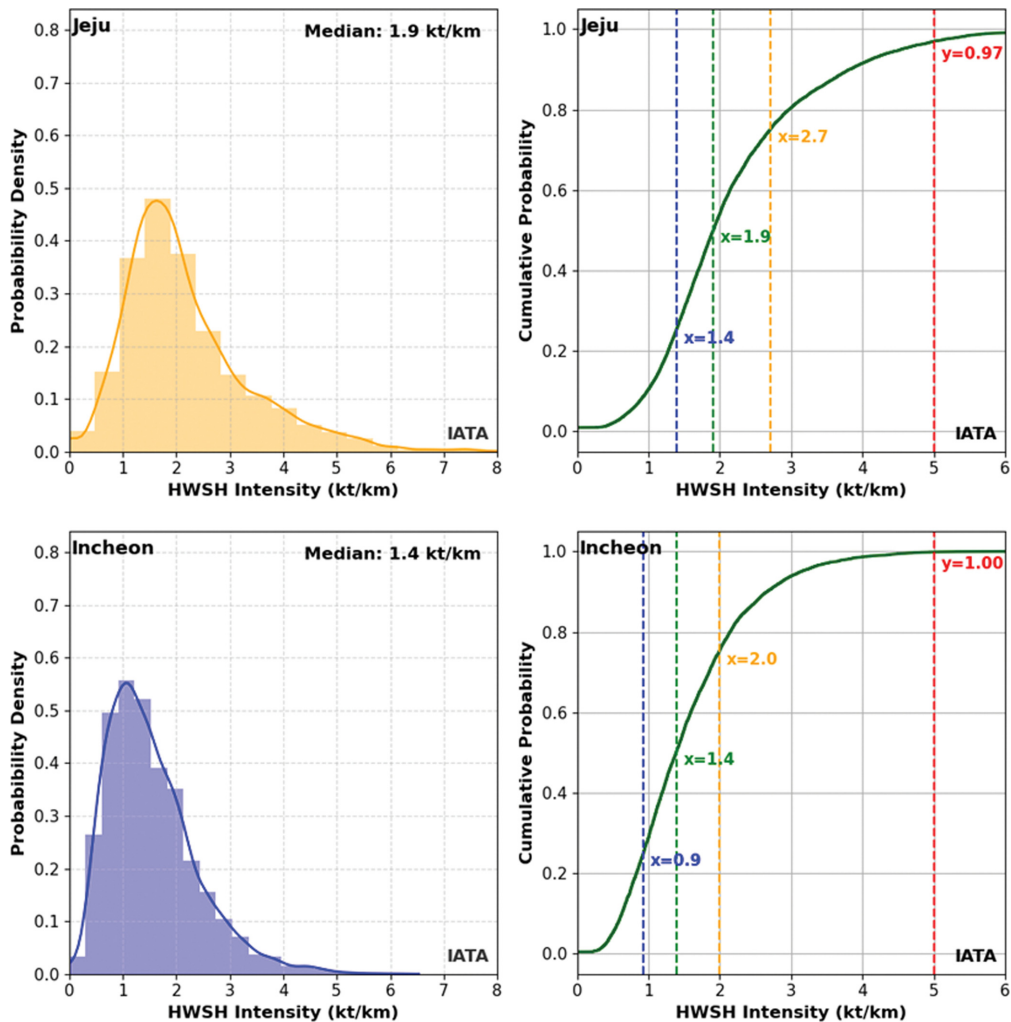


Fig. 6. Probability density function (left) and cumulative distribution function (right) of horizontal wind shear at Jeju (top) and Incheon (middle) airports based on IATA Turbulence cases.

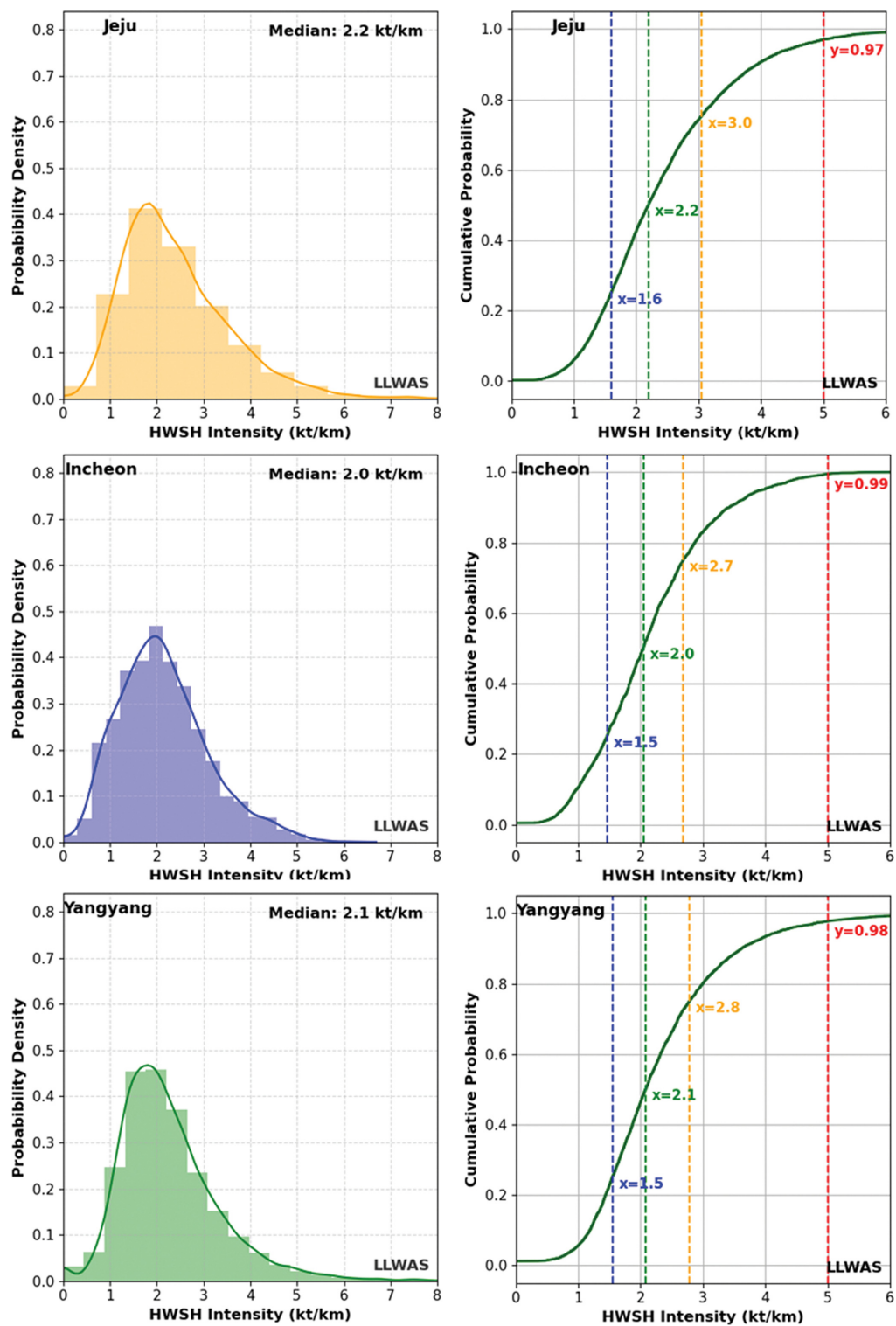


Fig. 7. Probability density function (left) and cumulative distribution function (right) of horizontal wind shear at Jeju (top), Incheon (middle), and Yangyang (bottom) airports based on LLWAS warning cases.

항 주변에서 발생하는 소규모 국지적 연직 바람 변화를 충분히 재현하기에는 한계가 있으며, 이로 인해 급변풍 강도가 체계적으로 과소 추정될 가능성이 존재한다. 또한 250 m 해상도를 가진 레이더 시선속도 자료는 수치모델 바람장과의 일관성을 유지하기 위해 동화 과정에서 조정과 필터링을 거치게 되며, 이 과정에서 급격한 바람 변화가 평활화되어 실제보다 낮은 급변풍 값이 산출될 수 있다.

더불어 본 연구에서는 WISSDOM의 50 m 간격 연직 바람 자료를 ICAO에서 제안한 100 ft(약 30 m) 간격의 바람 차이로 변환하기 위해 선형 내삽을 수행하였다. 선형 내삽은 인접한 두 지점의 값을 일차 함

수로 근사하여 그 사이의 임의 위치 값을 추정하는 방법으로, 실제 대기 중 존재하는 급격한 바람 변화나 비선형적 특성이 완화되는 한계를 가진다. 이러한 과정에서 시어 강도가 실제보다 낮게 산출될 수 있으며, 이는 급변풍 값의 과소 추정에 기여할 것으로 보인다.

결과적으로 WISSDOM 기반으로 산출된 연직 급변풍 값은 ICAO 기준에 비해 전반적으로 낮은 수준에서 도출되며, 이에 따라 WISSDOM의 특성을 반영한 별도의 판정 임계값 설정이 요구된다.

4.1.2 수평 급변풍 분포 분석

수평 급변풍의 경우, 국제민간항공기구(ICAO)나 기

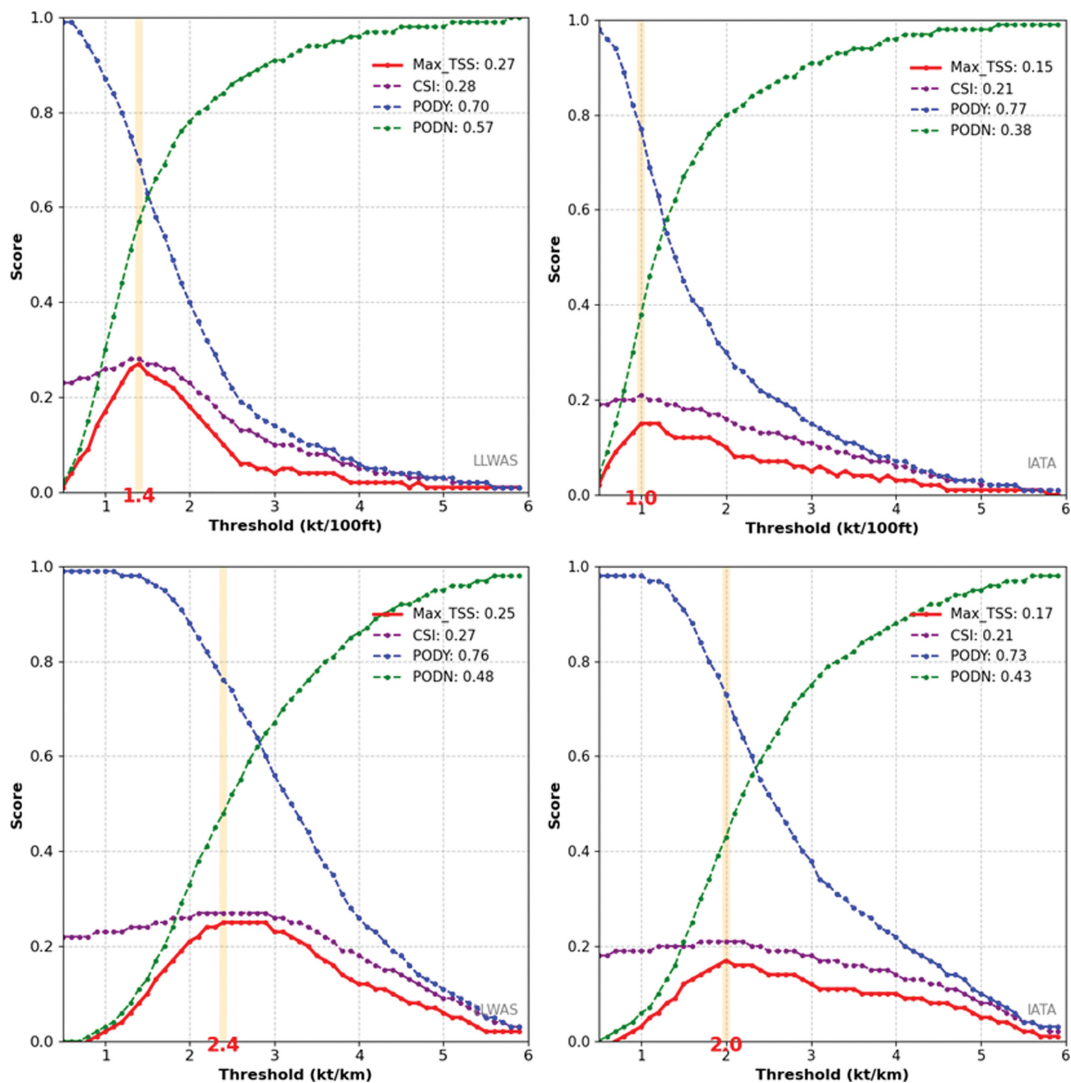


Fig. 8. Wind shear detection performance at Jeju Airport: Skill scores (TSS, PODY, PODN) as functions of threshold values for vertical (top) and horizontal (bottom) wind shear, based on LLWAS (left) and IATA (right) data.

존 문헌에서 표준화된 탐지 기준이 제시되어 있지 않다. 이에 따라 본 연구에서는 수평해상도 1 km에 대한 수평 급변풍의 분포 특성을 파악하고, 이를 기반으로 항후 임계값 설정의 참고 자료로 활용하기 위해 연직 급변풍과 동일한 방식으로 PDF 및 CDF 분석을 수행하였다(Fig. 6: IATA 기준, Fig. 7: LLWAS 기준).

분석 결과, IATA 기준 사례(Fig. 6, 왼쪽)의 경우 제주와 인천은 각각 1.9 kt/km, 1.4 kt/km를 중심으로 분포하였다. 반면, LLWAS 경보 사례(Fig. 7, 오른쪽)에서는 제주, 인천, 양양 공항 모두 2.0~2.2 kt/km 수준에서 중심값이 형성되어, 수평 급변풍의 강도가 상대적으로 높게 나타나는 경향을 보였다.

또한 연직 급변풍과 동일한 방식으로 CDF를 활용하여 대략적인 분포를 보고자 5 kt/km 이상에 해당하는 사례의 비율을 분석한 결과, IATA 및 LLWAS 기준 모든 사례에서 해당 비율은 3% 이하로 낮게 나타났다(Fig. 6 및 Fig. 7, 오른쪽).

이러한 결과는 수평 급변풍에 대해 표준화된 탐지 기준이 부재한 상황에서, WISSDOM 기반 산출값의 통계적 특성을 반영한 탐지 임계값 설정이 필요함을 시사한다.

4.2 공항별 최적 임계값 도출

앞에서 분석한 급변풍 분포 특성을 바탕으로, 연직 및 수평 급변풍 탐지를 위한 최적 임계값을 도출할 필요성이 확인되었다. 본 연구에서는 TSS 지표를 기준으로 인천, 제주, 양양 공항에 대해 최적 임계값을 산정하였다. TSS는 탐지율(PODY)과 비탐지율(PODN)을 균

형 있게 반영하는 통계적 지표로, 식(6)과 같이 정의된다.

LLWAS 경고 사례 및 IATA 중강도 난류 사례를 각각 기준으로 하여, 연직 및 수평 급변풍에 대한 탐지 성능 지표(PODY, PODN, CSI, TSS)를 산출하고, 임계값 변화에 따른 성능 지표의 변화를 꺾은선 그래프로 시각화하였다. TSS 값이 최대가 되는 지점을 최적 임계값으로 설정하였으며, 이는 탐지 성능이 가장 우수한 지점임을 의미한다. Figure 8에는 제주공항을 예시로 한 TSS 최대 지점과 각 성능 지표의 변화 곡선이 제시되었다.

4.2.1 연직 및 수평 급변풍 최적 임계값

각 공항에 대해 도출된 연직 및 수평 급변풍의 최적 임계값은 다음과 같다.

연직 급변풍의 경우, LLWAS 경고 기준에서 도출된 최적 임계값(kt/100 ft)은 인천공항 1.5, 제주공항 1.4, 양양공항 1.4로, 전체적으로 1.4~1.5의 유사한 범위로 나타났다(Table 5). 반면, IATA 기준에서는 인천공항 1.3, 제주공항 1.0의 값이 도출되었으며, 두 공항 모두 LLWAS 기준보다 상대적으로 낮은 임계값을 보였다. 양양공항은 IATA 관측자료가 부족하여 분석 대상에서 제외되었다.

수평 급변풍의 경우, LLWAS 기준 최적 임계값(kt km⁻¹)은 인천공항과 제주공항에서 2.4, 양양공항은 2.2로 도출되어, 전반적으로 2.2~2.4 범위로 요약된다(Table 6). IATA 기준에서는 인천 1.6, 제주 2.0의 값이 산정되었으며, LLWAS 기준보다 낮은 임계값이 도출되었다. 마찬가지로 양양공항은 IATA 기준 분석에

Table 5. Vertical windshear LLWAS and IATA system performance by Airport.

Airport	DATA	Thr_opt	Max_TSS	PODY	PODN	AUC	CSI
Incheon	LLWAS	1.5	0.34	0.88	0.45	0.73	0.17
	IATA	1.1	0.21	0.77	0.43	0.64	0.07
Jeju	LLWAS	1.4	0.27	0.70	0.57	0.67	0.28
	IATA	1.0	0.15	0.77	0.38	0.64	0.21
Yangyang	LLWAS	1.4	0.09	0.68	0.40	0.58	0.16
	IATA	-	-	-	-	-	-

Table 6. Horizontal windshear LLWAS and IATA system performance by Airport.

Airport	DATA	Thr_opt	Max_TSS	PODY	PODN	AUC	CSI
Incheon	LLWAS	2.4	0.36	0.82	0.54	0.71	0.18
	IATA	1.6	0.22	0.73	0.49	0.65	0.07
Jeju	LLWAS	2.4	0.36	0.75	0.48	0.70	0.27
	IATA	2.0	0.25	0.73	0.43	0.63	0.21
Yangyang	LLWAS	2.2	0.15	0.73	0.42	0.60	0.16
	IATA	-	-	-	-	-	-

서 제외되었다.

Figure 8의 곡선을 살펴보면, 임계값 변화에 따라 탐지 성능 지표들이 상반된 경향을 보이는 trade-off가 드러난다. 임계값이 낮을수록 PODY(파란색 선)는 높은 값을 유지하지만 PODN(초록색 선)은 급격히 감소하고, 반대로 임계값을 높이면 PODN은 개선되나 PODY는 저하되는 양상이 나타난다. 이러한 상반된 특성이 교차하는 지점에서 TSS(붉은 빨간색 선)는 최대값을 보이며, 이는 다양한 성능 지표 간 절충점(trade-off point)을 의미한다.

4.2.2 최적 임계값 결과 및 적용 방안

앞 절에서 살펴본 바와 같이, TSS 최대 지점은 통계적으로 균형 잡힌 탐지 성능을 제공하지만 실제 운영 적용에는 한계가 있다. Park and Kim (2023a, b)에서도 논의된 것처럼, 임계값 변화는 PODY와 PODN 간의 뚜렷한 trade-off를 동반하므로, 단일 지표(TSS)에 근거한 최적화를 곧바로 현업 적용에 반영하는 데에는 추가적인 검토가 필요하다. 실제 운영에서는 안전성(탐지율 확보)을 우선할지, 효율성(FAR 억제)을 중시할지에 따라 임계값을 조정해야 한다.

이러한 trade-off 문제를 보완하기 위한 방법으로 Park et al. (2025)에서 제안된 경제적 가치(Economic Value) 분석이 있다. 이 접근법은 예방 조치 비용과 손실 비용의 비율을 고려하여 운영상 최적 임계값을 도출하는 방법론으로, 단순한 통계적 지표를 넘어 실제 항공 운영의 효율성을 정량적으로 평가할 수 있다.

향후 연구에서는 최적 임계값 설정에 이 방법론도 고려할 필요가 있다.

그럼에도 불구하고, 실제 현업 예보 및 감시 체계에서는 탐지 기준의 일관성과 해석의 명확성이 요구되므로 단일 임계값 제시는 불가피하다. 이에 본 연구에서는 TSS 분석 결과를 바탕으로 하되, 수평 급변풍은 활주로 인근 저고도에서 수평 바람 변화를 직접 관측하는 LLWAS 기준을 중심으로, 연직 급변풍은 항공기가 체감한 난류 정보를 반영하는 IATA 기준을 중심으로 최적 임계값을 설정하였다.

도출된 최적 임계값을 기준으로 비교한 결과, 연직 및 수평 급변풍 모두 LLWAS 기준이 IATA 기준보다 상대적으로 높은 값을 나타내는 경향이 확인되었다. 이는 두 기준의 관측 방식 및 탐지 고도의 차이에 기인한 것으로 해석된다. LLWAS는 활주로 인근 수십 미터 고도에서 실시간 수평 바람 변화를 측정하는 반면, IATA 검증 자료는 약 3,000 ft 이하 고도에서 항공기가 체감한 난류 강도(Eddy Dissipation Rate, EDR)를 기반으로 하여 연직방향 난류나 대류성 요인에 더 민감할 수 있다.

Table 5과 Table 6의 결과를 보면 공항 간 차이는

제한적이었다. 예를 들어, 수평 급변풍은 LLWAS 기준 2.2~2.4 kt km⁻¹, IATA 기준 1.6~2.0 kt km⁻¹ 범위였으며, 연직 급변풍은 IATA 기준 1.0~1.3 kt/100 ft, LLWAS 기준 1.4~1.5 kt/100 ft로 나타났다. 이는 공항별 개별 값보다 단일 임계값 설정이 현업 적용에 효율적임을 시사하며, 급변풍 분포도 시각화에서도 색상 범례(컬러바)의 일관성을 확보하는 데 기여할 수 있다.

이에 본 연구에서는 수평급변풍의 경우 LLWAS 기준을 고려하여 2.0 kt km⁻¹, 연직 급변풍의 경우 IATA 기준을 반영하여 1.0 kt/100 ft를 단일 최적 임계값으로 설정하였다. 이 기준은 향후 급변풍 분포도 기반 사례 분석 및 실시간 감시 체계에 적용되어 탐지 기준의 일관성과 시각화 운영의 효율성을 동시에 확보하는 데 기여할 것으로 기대된다.

4.3 공항별 급변풍 탐지 성능 비교

최적 임계값 설정을 기반으로 각 공항의 급변풍 탐지 성능을 정량적으로 평가한 결과는 Table 5(연직)과 Table 6(수평)에 요약하였다. 주요 성능 지표로는 3.2 절에서 언급한 실제 급변풍 발생 시 탐지율을 나타내는 PODY, 오탐지율과 관련된 PODN, 종합 분류 성능을 나타내는 AUC, 그리고 탐지 정확도 지표인 CSI를 활용하였다.

연직 급변풍 탐지 성능에서는(Table 5) 인천공항이 LLWAS 및 IATA 기준 모두에서 가장 높은 PODY 및 AUC 값을 기록하였다. 제주공항은 연직 급변풍에서 IATA 기준 PODY 0.77, LLWAS 기준 CSI 0.28로 특히 CSI 지표에서 타 공항 대비 우수한 성능을 보여, 연직 급변풍 탐지에 대한 신뢰할 만한 성능을 확보하고 있는 것으로 평가된다.

수평 급변풍의 경우(Table 6), LLWAS 기준으로 인천공항은 PODY 0.82, PODN 0.54, AUC 0.71로 가장 높은 성능을 보였고, 제주공항은 PODY 0.75, AUC 0.70로 인천공항에 근접한 우수한 성능을 나타냈으며, 양양공항은 PODY 0.73, AUC 0.60으로 상대적으로 낮은 성능을 기록하였다. IATA 기준에서는 양양공항을 제외한 인천공항과 제주공항을 대상으로 평가하였으며, 인천공항이 근소하게 가장 우수한 성능을 보였고 제주공항이 그 뒤를 이었다.

Figure 9에서는 공항별 탐지 성능을 시각적으로 비교하기 위해 ROC 곡선을 제시하였다. ROC 곡선은 탐지 민감도(PODY)와 오탐률(1 - PODN)의 관계를 나타내는 그래프로, 곡선이 좌상단에 가까울수록 우수한 탐지 성능을 의미한다. 본 연구에서는 LLWAS 기준으로는 3개 공항 모두에 대해, IATA 기준으로는 양양공항을 제외한 인천공항과 제주공항에 대해 수평 및 연직 급변풍에 대한 ROC 곡선을 작성하였다. LLWAS 기준 ROC 곡선 분석 결과 인천 > 제주 > 양

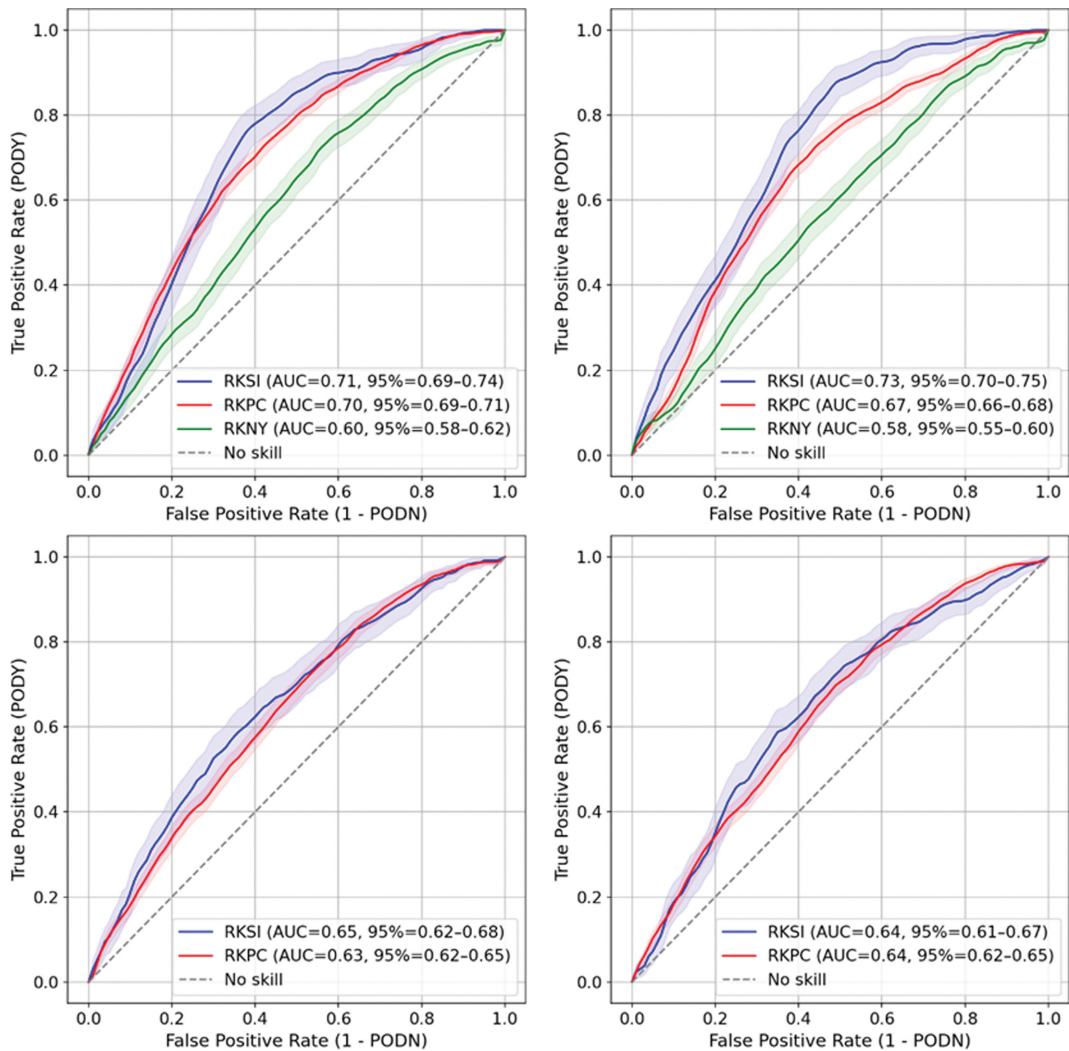


Fig. 9. ROC curves of wind shear detection at Incheon, Jeju, and Yangyang airports: horizontal (left) vs. vertical (right), validated by LLAS (top) and IATA (bottom), with bootstrap confidence intervals.

양 순으로 탐지 성능이 우수하게 나타났으며, IATA 기준에서는 인천공항과 제주공항이 거의 비슷한 성능을 보였다. 다만 인천과 양양의 경우 제주공항에 비해 상대적으로 표본 수가 적어 단일 ROC 곡선 결과만으로는 성능 평가의 신뢰도를 확신하기 어렵다. 이를 보완하기 위해 본 연구에서는 선행연구(Baek et al., 2024; Park et al., 2025)에서 적용된 방법론을 참고하여 bootstrap 재표본화를 수행하였으며, Fig. 9에서는 ROC 곡선과 함께 AUC의 95% 신뢰구간을 제시하였다. 분석 결과 예시로 LLAS 수평급변풍 결과는 인천공항은 AUC가 0.71 (95% CI: 0.69~0.74), 제주공항은 0.70 (95% CI: 0.69~0.71)로 나타나 두 공항 모두 신뢰구간이 비교적 좁아 탐지 성능이 안정적

이고 통계적 신뢰도가 높음을 확인하였다. 반면 양양공항은 AUC가 0.60 (95% CI: 0.58~0.62)로 신뢰구간이 상대적으로 넓게 나타났으며, 이는 제한된 표본 수와 관측 조건의 제약이 반영된 결과라 할 수 있다. 종합하면, 인천공항과 제주공항이 가장 안정적이고 신뢰도 높은 탐지 성능을 확보한 것으로 평가된다.

4.4 제주국제공항 급변풍 사례 적용

레이더 급변풍 탐지 기술의 실제 사례 적용을 위해 제주국제공항의 이착륙 구간에서 발생한 실제 급변풍 사례 중 AMDAR 자료에서 중강도 이상의 급변풍이 탐지된 두 사례를 선정하여 급변풍 탐지 기술의 적용 결과를 제시하였다.

Table 7. AMDAR data of aircraft landing at Jeju International Airport and calculated wind shear values (per 100 ft) on 27 November 2024, 0835 UTC.

Tail number	Time (h, m, s) (UTC)	Altitude (ft)	Longitude (°E)	Latitude (°N)	Wind direction (°)	Wind speed (kt)	Wind shear (/100 ft)
HL7706	08:35:00	20	126.5336	33.5417	264	9	5.15
	08:34:00	640	126.5678	33.5500	298	39	0.72
	08:33:00	1,400	126.6019	33.5694	290	39	-

Table 8. AMDAR data of aircraft takeoff at Jeju International Airport and calculated wind shear values per 100 ft on 08 May 2025, 2212 UTC.

Tail number	Time (h, m, s) (UTC)	Altitude (ft)	Longitude (°E)	Latitude (°N)	Wind direction (°)	Wind speed (kt)	Wind shear (/100 ft)
HL7708	22:12:30	1,800	126.5172	33.5194	152	48	0.32
	22:12:24	1,570	126.5172	33.5194	152	49	5.12
	22:12:18	1,250	126.5172	33.5194	147	33	1.13

AMDAR는 세계기상기구(WMO)가 상업 항공기를 활용하여 전 세계에서 기온, 풍향, 풍속, 기압 등의 대기 관측자료를 수집하기 위해 운영하는 프로그램이다 (WMO, 2003). 사례의 선정 기준은 AMDAR의 고도에 따른 풍속 값을 ICAO 급변풍 정의에 따라 고도차 100 ft 사이의 풍속 차이로 환산하여, 5 kt 이상일 때 급변풍 사례로 분류하여 선정하였다. Table 7과 Table 8은 급변풍 사례 분석에 사용된 AMDAR 자료를 보여준다. 이 자료는 제주국제공항 이착륙 항공기가 고도 3,000 ft 이하에서 관측한 것으로, 항공기 식별번호, 관측 시각, 고도, 위경도, 풍향, 풍속, 그리고 100 ft 당 산출된 급변풍 값으로 구성되어 있다.

4.4.1 급변풍 분포도의 구성 및 해석

사례 적용 결과인 Fig. 11은 2024년 11월 27일 0835 UTC에 발생한 급변풍의 수평 및 연직 구조를 보여준다. 4개의 분포도 중 상단 좌측 분포도는 제주공항을 중심으로 반경 약 16 km 범위 내 수평 급변풍의 분포를, 우측 그림은 연직 급변풍의 수평 분포를 나타낸다. 수평 분포도는 영역 내 각 격자점에서 연직 방향으로 계산된 급변풍의 최대값을 표출한 것으로, 공항 주변에서 급변풍이 발생한 위치를 파악할 수 있다. 또한 급변풍 발생 당시의 바람 조건을 파악하기 위해, 수평 분포도에는 925 hPa (약 750 m) 고도의 바람 벡터를 함께 표출하였다.

하지만 수평 분포도만으로는 급변풍의 고도 정보를 파악하기 어렵기 때문에, 주 활주로(RWY 07~25)와 이착륙 경로를 따라 산출한 연직 단면도를 수평 급변풍 하단에 함께 제시하였다. RWY 07 방향은 수평 분포도와 단면도에서 A로 표기하고 RWY 25는 B로 표

기하여 구분하였다. 이 단면도를 통해 급변풍이 어느 고도에서 발생했는지를 확인할 수 있다. 연직 단면도에도 활주로 방향으로 투영한 남북 성분 바람(V)과 수직 바람 성분(W)을 합성하여 활주로 상의 바람 구조를 함께 표출하였다. 수평 분포도의 붉은 파선은 이착륙 경로, 파란 점과 파란선은 제주공항 중심 위치와 활주로, 별표(asterisk)는 AMDAR 자료에서 중강도 이상의 난류가 탐지된 위치를 나타내며, 지도 내 빗금 처리된 영역은 한라산 지형으로 인한 관측 결손 구간을 나타낸다. 수평 급변풍과 연직 단면도의 컬러 바는 급변풍 강도를 나타내며, 수평 급변풍은 kt km^{-1} , 연직 급변풍은 $\text{kt}/100 \text{ ft}$ 단위로 표시하였다. LLWAS와 IATA 검증을 통해 제주국제공항의 최적 임계값은 연직 급변풍의 경우 $1.0 \text{ kt}/100 \text{ ft}$, 수평 급변풍의 경우 2.0 kt km^{-1} 로 설정하였다. 따라서 이 값 이상의 구간은 급변풍 발생 영역으로 판단할 수 있다.

4.4.2 2024년 11월 27일 사례

첫번째 적용 사례는 제주도 지역에 북서풍이 유입되면서 강한 난류 및 바람 변화가 발생한 상황이다. 당시 기압계 분석 결과(Fig. 10), 한반도를 통과한 저기압의 영향 이후 중국 내륙에서 확장한 대륙고기압이 한기를 동반해 남하하였고, 이에 따라 제주도 전역에는 강한 북서풍이 유입되었다. 이 영향으로 강풍과 강수 현상이 동반되었으며, 제주공항에는 강풍경보(11월 26일 22시~28일 22시)와 급변풍경보(11월 26일 10시~28일 10시)가 발효되었다.

0833 UTC에는 제주공항 LLWAS 11개 전 지점에서 풍속 20 kt 이상의 강한 바람이 관측되었고, LLWAS는 최대 35 kt의 바람 변화를 포함한 다수의 급변풍

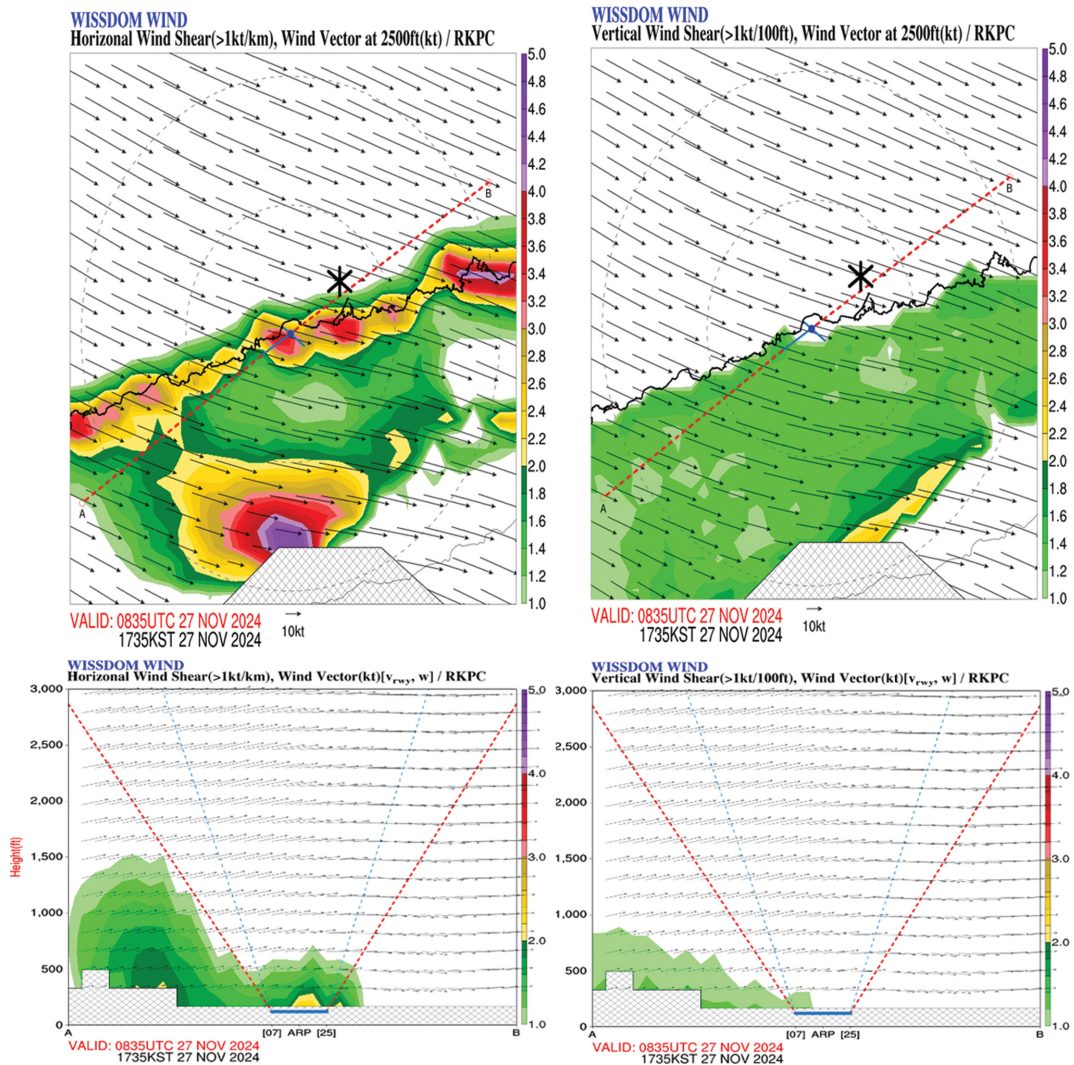


Fig. 11. Horizontal (top) and cross-sectional (bottom) wind shear distributions along RWY 07~25 at 0835 UTC (1735 KST) on 27 November 2024. RWY 07 and 25 are marked as (A) and (B), respectively. Left and right panels show horizontal and vertical wind shear, respectively.

로 지표에서 약 1,000 ft 사이에서 나타났다.

이러한 분석 결과를 종합해보면, 해안선을 따라 내륙 지표면 부근에서 수평 및 연직 방향 모두에서 급변풍이 레이더 급변풍 탐지에서 나타났으며, 착륙 중이던 항공기가 활주로에 근접함에 따라 급변풍을 조우한 상황이 레이더 탐지 결과와 일치함을 확인할 수 있다. 이를 통해 당시 항공기가 어떤 고도와 위치에서 급변풍을 겪었는지에 대한 상황을 파악할 수 있다.

4.4.3 2025년 5월 8일 사례

두 번째 적용 사례는 2025년 5월 8일 발생한 기상

상황이다(Fig. 12). 당시 북서쪽의 찬 공기와 남쪽의 따뜻한 공기가 충돌하면서 기압골이 형성되고 저기압이 발달하였다. 이로 인해 하층 제트와 지형 효과가 더해지면서 제주 및 남부 지역을 중심으로 강한 비가 예상되었으며, 강한 기압 경도력과 하층 제트의 영향으로 서해안 및 남해안 지역에는 강풍이 발생하였다.

2025년 5월 8일 2300 UTC 시까지 제주공항에서는 총 8편의 항공기가 결항되었으며, 급변풍 경보가 발효되었다. 2210 UTC에는 제주공항 LLWAS에서 급변풍 경보가 발령되었고, 이 시각 제주 지역은 강한 강수 하에 남서풍 계열의 평균 풍속 약 25 kt, 최대 순

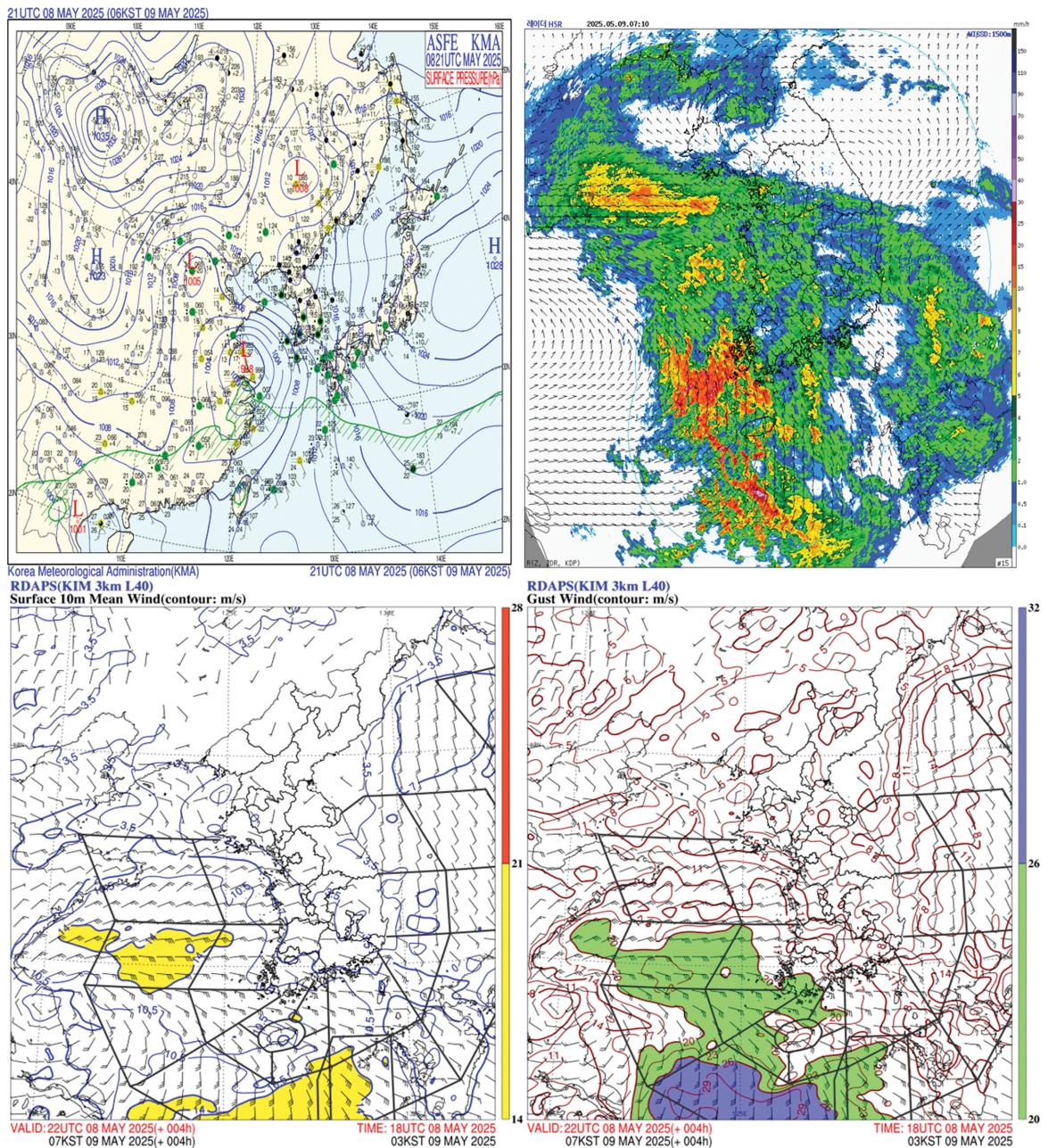


Fig. 12. Same as Fig. 9. but for 2210 UTC on 08 May 2025.

간 풍속 약 45 kt의 바람이 관측되었다.

Table 8에 제시된 AMDAR 자료에 따르면, 2212 UTC 이륙 중이던 항공기가 07번 활주로(A) 부근 고도 약 1,570 ft 상공에서 5.12 kt/100 ft의 급변풍을 관측하였다. 레이더 영상(Fig. 12, 상단 왼쪽)에서는 제주공항 인근에 강한 강수가 분포하고 있었으며, 이는

연직 상승류 등 연직 방향의 기류 변화가 동반되었을 가능성을 시사한다. Figure 13에는 수평 및 연직 급변풍의 공간 분포와 함께 07/25번 활주로(A/B)를 따라 산출된 연직 단면도가 제시되어 있다. 분석 결과, 25번 활주로(B) 방향에서는 지표면부터 약 500 ft 사이에 강한 연직 급변풍이 존재하였고, 최대 약 2,000 ft

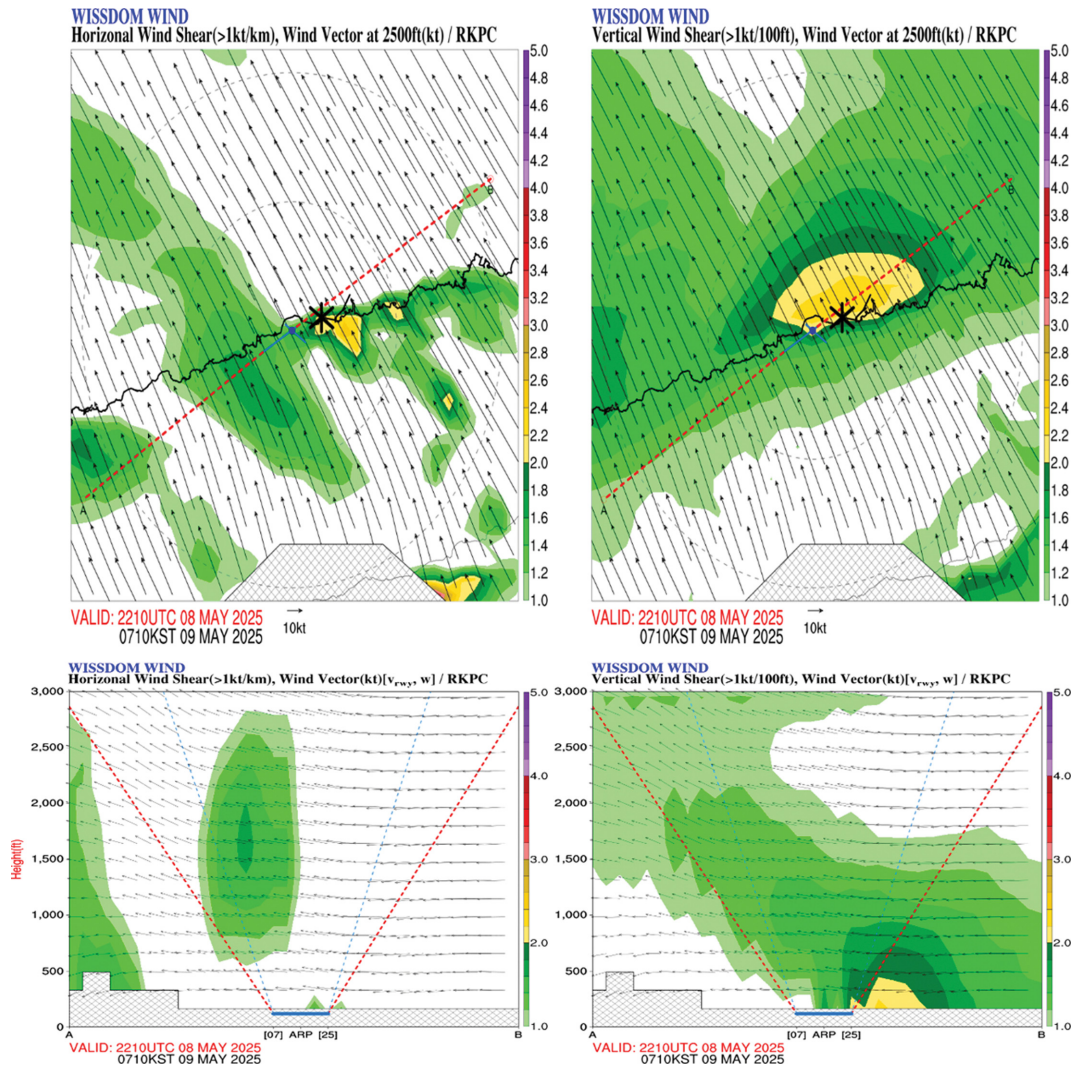


Fig. 13. Same as Fig. 10. but for 2210 UTC on 08 May 2025.

고도까지 확장되어 있었다. 07번 활주로(A) 방향에서는 약 1,500 ft부터 3,000 ft 이상의 고도까지 급변풍이 분포하고 있는 것으로 나타났다.

AMDAR가 급변풍을 관측한 위치에서 레이더 탐지 결과 또한 수평 및 연직 방향 모두 2 kt 이상의 강한 급변풍이 확인되었다. 이는 AMDAR 관측 위치와 레이더 탐지 급변풍이 공간적으로 일치함을 보여주며, 레이더 기반 급변풍 탐지 기술이 실제 급변풍 발생 상황을 효과적으로 탐지하고 있음을 확인 할 수 있다.

4.4.4 사례 적용 결과

제주국제공항을 대상으로 한 두 건의 급변풍 사례 분석 결과, AMDAR 자료에서 중강도 이상의 급변풍

이 관측된 위치와 레이더 급변풍 탐지에서 나타난 급변풍 영역이 공간적으로 유사한 것으로 나타났다. 특히 2024년 11월 27일 사례에서는 착륙 항공기가 25 활주로 방향 저고도에서 급변풍을 경험한 위치와, 2025년 5월 8일 사례에서는 이륙 항공기가 07 활주로 방향에서 급변풍을 조우한 위치 모두에서 레이더 탐지 결과와 유사한 급변풍 패턴이 확인되었다.

또한 두 사례 모두 강수가 동반된 기상 상황에서 급변풍이 발생하였으며, 이는 급변풍 발생 환경으로서의 강수와 강풍 특성이 레이더 탐지 결과와 일관되게 나타났다는 점에서 의미가 있다. 이러한 결과는 본 탐지 기술이 실제 공항 주변의 급변풍 발생 상황을 일정 수준 반영하고 있음을 나타내며, 운항 안전 확

보를 위한 유용한 정보로 활용될 가능성이 있음을 보여준다.

5. 결론 및 토의

본 연구는 공항 이착륙 경로상에서 발생하는 급변풍을 탐지하기 위해 3차원 고해상도 레이더 바람장 WISSDOM을 활용한 탐지 기법을 개발하였다. 기존 공항 급변풍 탐지 시스템인 LLWAS는 활주로 부근에만 센서가 국한되어 있어 항공기의 이착륙 경로 전반에 대한 감시에 한계가 있으며, 국내에서는 인천·제주·양양 3개 공항에서만 운영되고 있어 LLWAS가 설치되지 않은 국내 공항에 대한 급변풍 탐지 체계 구축이 필요한 상황이다.

이러한 한계를 보완하기 위해 본 연구는 고해상도 레이더 바람장을 이용하여 연직 및 수평급변풍을 산출하고, LLWAS 경보 사례와 IATA 항공기 관측 난류 자료를 활용하여 탐지 성능을 검증하였다. 한편, 본 연구의 검증 결과 해석 시 몇 가지 유의점이 있다. WISSDOM으로부터 산출된 연직 및 수평 시어는 공간 해상도(1 km)와 시간 해상도(5분)의 제약으로 인해 중규모(mesoscale) 이상의 흐름 변화를 포착하는 특성을 가지는 반면, LLWAS는 공항 주변 센서 간 수평 바람 차이를 이용해 활주로 주변 국지적(local-scale) 윈드시어를 감지하고, IATA의 EDR은 항공기가 실제로 경험한 난류 강도를 정량화한 값이다. 이러한 물리적 특성이 서로 다른 두 검증 변수를 병행 활용한 것은 WISSDOM 기반 급변풍 산출값의 해상도 제약을 고려하면서도 발생 경향성과 공간적 일치성을 통해 관측자료에 대한 모델의 신뢰성을 검증하기 위함이다.

이러한 전제 하에서, 레이더 바람장 기반 급변풍 산출값은 ICAO 기준(5 kt/100 ft)에 비해 전반적으로 낮게 나타났으며, TSS 지수를 이용한 최적 임계값 분석 결과 연직 급변풍은 1.0~1.5 kt/100 ft, 수평 급변풍은 1.6~2.4 kt km⁻¹ 범위에서 최적값이 도출되었다. 공항 간 임계값 차이가 크지 않아 현업 적용의 효율성을 고려하여 각각 1.0 kt/100 ft와 2.0 kt km⁻¹를 단일 임계값으로 제시하였다. ROC 곡선 분석 결과, 인천공항의 탐지 성능이 상대적으로 우수했으며(연직 급변풍 AUC 0.78, 95% CI: 0.70~0.85), 제주공항은 유사한 성능(AUC 0.75, 95% CI: 0.68~0.82)을, 양양공항은 상대적으로 낮은 탐지 성능(AUC 0.65, 95% CI: 0.55~0.74)을 보였다. 또한 제주국제공항의 2024년 11월 27일과 2025년 5월 8일 난류 사례 분석에서는 AMDAR 자료의 중강도 이상 윈드시어 구간과 레이더 기반 급변풍 탐지 판정 결과가 공간적으로 잘 일치하여 공항 이착륙 경로상에서의 실질적 활용 가능성을 확인하였다.

본 연구에서 개발한 탐지 기법은 LLWAS의 공간적 한계를 보완하며, 공항 이착륙 경로를 포함한 3차원 공간에서 급변풍을 효과적으로 탐지할 수 있음을 확인하였다. 특히 본 연구의 결과는 저층 난류(Low-Level Turbulence, LLT) 영역의 EDR 예측 정량화를 위한 기초 자료로서, Kim et al. (2021)과 Muñoz-Esparza et al. (2018a, b)의 LLT 영역 EDR 예측 연구와 그 맥락을 공유하며 저층 난류 예측 체계의 고도화에 기여할 수 있을 것으로 기대된다.

향후 연구에서는 TSS 기반 임계값 최적화 과정에서 탐지율과 오탐률 간의 상충 관계뿐 아니라, 난류 강도 및 EDR과의 물리적 연계성을 함께 검토할 필요가 있다. 이를 통해 공항 저층 대기의 실제 난류 강도 예측 정확도 향상을 기대할 수 있을 것으로 판단된다. 또한 Park et al. (2025)이 제시한 경제적 가치(Economic Value) 분석을 적용함으로써, 탐지 임계값이 운항 안전성 확보뿐 아니라 항공 운항 지연 및 회항으로 인한 경제적 손실 최소화, 나아가 운항 의사 결정 지원에도 기여할 수 있는 실용적 기준을 마련하는 것이 바람직하다. 이를 통해 향후 저층 급변풍 탐지 및 예측 체계의 정량화와 실무적 운용 효율성을 동시에 강화할 수 있을 것으로 기대된다.

감사의 글

본 논문의 개선을 위해 좋은 의견을 제시해 주신 두 분의 심사위원님께 감사를 드립니다. 이 연구는 수치모델링센터 『수치예보 및 자료응용 기술 개발』과 제(KMA2018-00721)와 국립기상과학원 수요자 맞춤형 기상정보 산출기술개발사업(KMA2018-00622) 지원으로 수행되었습니다.

REFERENCES

- Armstrong, M., 2024: Most airplane accidents happen during landing. Statista, 9 January 2024. [Available online at <https://www.statista.com/chart/31529/mostairplaneaccidents-happen-during-landing/>].
- ARAIB, 2023: Aviation and Railway Accident Case Studies (2013~2022). Aviation and Railway Accident Investigation Board, 39 pp.
- Baek, S.-H., J.-H. Kim, S.-H. Kim, Y. Lee, Y.-J. Noh, and S.-M. Lee, 2024: Characteristics of convectively induced turbulence in East Asia using geostationary Korea multi-purpose Satellite-2A (GK-2A) and in situ aircraft data. *J. Geophys. Res. Atmos.*, **129**, e2024JD041671, doi:10.1029/2024JD041671.
- Bedard, A. J. Jr., J. McCarthy, and T. Lefebvre, 1983: Sta-

- tistics from the operation of the Low-Level Wind Shear Alert System (LLWAS) during the Joint Airport Weather Studies (JAWS) Project. JAWS-NCAR-01-83, DOT/FAA/PM-84/32, 86 pp.
- Chan, P. W., 2011: A significant wind shear event leading to aircraft diversion at the Hong Kong International Airport. *Meteorol. Appl.*, **18**, 232-243, doi:10.1002/met.242.
- _____, and K. K. Hon, 2016: Observation and numerical simulation of terrain-induced windshear at the Hong Kong International Airport in a planetary boundary layer without temperature inversions. *Adv. Meteor.*, **2016**, 1454513, doi:10.1155/2016/1454513.
- _____, and Q. S. Li, 2020: Some observations of low level wind shear at the Hong Kong International Airport in association with tropical cyclones. *Meteorol. Appl.*, **27**, e1898, doi:10.1002/met.1898.
- Cho, J. H., and H. J. Baik, 2021: A study on the characteristics of low-level wind shear at Jeju International Airport from go-around flight perspective. *J. Korean Soc. Aviat. Aeronaut.*, **29**, 70-79, doi:10.12985/ksaa.2021.29.1.001.
- _____, K. Lee, H. Baik, and J. Park, 2023: A study on the pressure patterns that cause bidirectional tailwind on the runway of Jeju International Airport. *J. Korean Soc. Aviat. Aeronaut.*, **31**, 93-102, doi:10.12985/ksaa.2023.31.3.093.
- _____, Y. Lee, H. Baik, and J. Park, 2025: An investigation of the relationship among weather, low-level wind shear and aircraft go-around at Jeju International Airport in Korea. *J. Air Transp. Manage.*, **129**, 102860, doi:10.1016/j.jairtraman.2025.102860.
- Hjelmfelt, M. R., 1988: Structure and life cycle of microburst outflows observed in Colorado. *J. Climate Appl. Meteor.*, **27**, 900-927, doi:10.1175/1520-0450(1988)027<0900:SALCOM>2.0.CO;2.
- ICAO, 2005: Manual on Low-level Wind Shear, 1st ed. Doc 9817, International Civil Aviation Organization, 213 pp.
- Khattak, A., P.-W. Chan, F. Chen, and H. Peng, 2023a: Prediction of a pilot's invisible foe: The severe low-level wind shear. *Atmosphere*, **14**, 37, doi:10.3390/atmos14010037.
- _____, _____, _____, and _____, 2023b: Time-series prediction of intense wind shear using machine learning algorithms: A case study of Hong Kong International Airport. *Atmosphere*, **14**, 268, doi:10.3390/atmos14020268.
- Kim, G.-H., H.-L. Kim, S.-H. Jung, K.-I. Jang, and J.-H. Lee, 2018: Development of three-dimensional wind fields retrieval technique from multiple Doppler weather radar network based on variational method. Weather Radar Center. [Available online at <https://books.google.co.kr/books?id=QwA0zAEACAAJ>].
- Kim, G.-H., H.-W. Choi, J.-H. Seok, and Y.-H. Kim, 2021: Prediction of low level wind shear using high resolution numerical weather prediction model at the Jeju International Airport, Korea. *J. Korean Soc. Aviat. Aeronaut.*, **29**, 88-95, doi:10.12985/ksaa.2021.29.4.088.
- _____, _____, _____, S.-S. Lee, and Y.-H. Lee, 2023: Low level wind shear characteristics and predictability at the Jeju International Airport. *J. Korean Soc. Aviat. Aeronaut.*, **31**, 50-58, doi:10.12985/ksaa.2023.31.3.050.
- Kim, J., J.-H. Kim, and R. D. Sharman, 2021: Characteristics of energy dissipation rate observed from the high-frequency sonic anemometer at Boseong, South Korea. *Atmosphere*, **12**, 837, doi:10.3390/atmos12070837.
- Kim, J., and J.-H. Kim, 2022: Retrieval and quality assessment of atmospheric wind from the aircraft-based observation near Incheon International Airport, Korea. *Atmosphere*, **32**, 323-340, doi:10.14191/Atmos.2022.32.4.323.
- _____, and _____, 2011: Statistics and possible sources of aviation turbulence over South Korea. *J. Appl. Meteor. Climatol.*, **50**, 311-324, doi:10.1175/2010JAMC2492.1.
- _____, and _____, 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.
- Klingele-Wilson, D., and M. F. Donovan, 1991: Characteristics of gust fronts. Preprints, 4th Int. Conf. on Aviation Weather Systems, Paris, France, *Amer. Meteor. Soc.*, 387-392.
- Lane, T. P., R. D. Sharman, and T. L. Clark, 2003: An investigation of turbulence generation mechanisms above deep convection. *J. Atmos. Sci.*, **60**, 1297-1321, doi:10.1175/1520-0469(2003)060<1297:AIOTGM>2.0.CO;2.
- Lilly, D. K., 1978: A severe downslope windstorm and aircraft turbulence induced by a mountain wave. *J.*

- Atmos. Sci.*, **35**, 59-77, doi:10.1175/1520-0469(1978)035<0059:ASDWAA>2.0.CO;2.
- Liou, Y.-C., and Y.-J. Chang, 2009: A variational multiple-Doppler radar three-dimensional wind synthesis method and its impacts on thermodynamic retrieval. *Mon. Wea. Rev.*, **137**, 3992-4010, doi:10.1175/2009MWR2980.1.
- Min, B.-H., Y.-H. Kim, H.-W. Choi, H.-S. Jeong, K.-R. Kim, and S.-B. Kim, 2020: Low-level wind shear (LLWS) forecasts at Jeju International Airport using the KMAPP. *Atmosphere*, **30**, 277-291, doi:10.14191/Atmos.2020.30.3.277.
- Muñoz-Esparza, D., R. D. Sharman, and J. K. Lundquist, 2018a: Turbulence dissipation rate in the atmospheric boundary layer: Observations and WRF mesoscale modeling during the XPJA field campaign. *Mon. Weather Rev.*, **146**, 351-371, doi:10.1175/MWR-D-17-0186.1.
- _____, and R. Sharman, 2018b: An improved algorithm for low-level turbulence forecasting. *J. Appl. Meteorol. Clim.*, **57**, 1249-1263.
- Park, Y., and J.-H. Kim, 2023a: Aviation convective index for deep convective area using the global unified model of the Korean Meteorological Administration, Korea: Part 1. Development and statistical evaluation. *Atmosphere*, **33**, 531-548, doi:10.14191/Atmos.2023.33.5.519.
- _____, and J.-H. Kim, 2023b: Aviation convective index for deep convective area using the global unified model of the Korean Meteorological Administration, Korea: Part 2. Seasonal optimization and case studies. *Atmosphere*, **33**, 519-530, doi:10.14191/Atmos.2023.33.5.531.
- _____, J.-H. Kim, D.-B. Lee, H.-J. Choi, S.-H. Kim, M. Steiner, and S.-H. Kim, 2025: Multi-model and -diagnostic ensemble-based deep convective area forecast for aviation operations using the Global Unified Model and Korean Integrated Model. *Wea. Forecasting*, doi:10.1175/WAF-D-25-0006.1.
- Peskin, C. S., 1977: Numerical analysis of blood flow in the heart. *J. Comput. Phys.*, **25**, 220-252, doi:10.1016/0021-9991(77)90100-0.
- Seok, J.-H., H.-W. Choi, Y.-H. Kim, and S.-S. Lee, 2020: Diagnosis of low-level aviation turbulence using the Korea Meteorological Administration Post Processing (KMAPP). *J. Korean Soc. Aviat. Aeronaut.*, **28**, 1-11, doi:10.12985/ksaa.2020.28.4.001.
- Sharman, R. D., C. Tebaldi, G. Wiener, and J. Wolff, 2006: An integrated approach to mid- and upper-level turbulence forecasting. *Wea. Forecasting*, **21**, 268-287, doi:10.1175/WAF924.1.
- _____, L. B. Cornman, G. Meymaris, J. Pearson, and T. Farrar, 2014: Description and derived climatologies of automated in situ eddy-dissipation-rate reports of atmospheric turbulence. *J. Appl. Meteor. Climatol.*, **53**, 1416-1432, doi:10.1175/JAMC-D-13-0329.1.
- Stockert, J., K. Johnson, R. Jackson, S. Smith, D. Connolly, D. Carruthers, and P.-W. Chan, 2022: Hong Kong Airport wind shear now-casting system development and evaluation. *Atmosphere*, **13**, 2094, doi:10.3390/atmos13122094.
- Strauss, L., S. Serafin, and V. Grubišić, 2016: Atmospheric rotors and severe turbulence in a long deep valley. *J. Atmos. Sci.*, **73**, 1481-1506, doi:10.1175/JAS-D-15-0192.1.
- Tse, S. M., P.-W. Chan, and W. K. Wong, 2012: A case study of missed approach of aircraft due to tailwind associated with thunderstorms. *Meteorol. Appl.*, **19**, 146-153, doi:10.1002/met.1296.
- Wilson, F. W., and R. E. Cole, 1993: LLWAS II and LLWAS III performance evaluation. Preprints, Fifth Conf. on Aviation Weather Systems, *Amer. Meteor. Soc.*, 204-208.
- 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, doi:10.1175/1520-0450(1984)023<0898:MWSAEO>2.0.CO;2.
- WMO, 2003: Aircraft Meteorological Data Relay (AMDAR) Reference Manual. WMO-No. 958, World Meteorological Organization, 84 pp.
- Yoshino, K., 2019: Low-level wind shear induced by horizontal roll vortices at Narita International Airport, Japan. *J. Meteor. Soc. Japan*, **97**, 403-421, doi:10.2151/jmsj.2019-023.
- Zhang, H., S. Wu, Q. Wang, B. Liu, and X. Zhai, 2018: Airport low-level wind shear lidar observation at Beijing Capital International Airport. *EPJ Web Conf.*, **176**, 06013, doi:10.1051/epjconf/201817606013.