

Original Article

<https://doi.org/10.12985/ksaa.2024.32.3.069>
ISSN 1225-9705(print) ISSN 2466-1791(online)

지상관측자료를 활용한 인천국제공항 급변풍 탐지 연구

김근희*, 김민성*, 최희욱**, 이상삼***, 이용희****

A Study on Detection of Wind Shear Using Ground-based Observations
at Incheon International Airport

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

ABSTRACT

This study evaluates the detection and utilization of wind shear using data from the Low-Level Wind Shear Alert System (LLWAS) and the Aerodrome Meteorological Observation System (AMOS) for the year 2023 at Incheon International Airport. A comparison of wind shear occurrence days revealed that LLWAS recorded 57 days, the reproduced LLWAS recorded 84 days, and AMOS recorded 163 days, with AMOS and the reproduced LLWAS showing higher occurrences. Performance metrics, including Probability of Detection (POD), False Alarm Ratio (FAR), Critical Success Index (CSI), and True Skill Statistic (TSS), were analyzed to evaluate detection capabilities. For the reproduced LLWAS, most wind shear events were detected, but the FAR was high, indicating lower performance. AMOS detected about 50% of actual wind shear events, with a lower FAR than the reproduced LLWAS but still relatively high. To improve detection performance, optimal thresholds for wind shear warnings were analyzed and adjusted, resulting in an increase in the CSI from 0.53 to 0.68 for the reproduced LLWAS and from 0.25 to 0.28 for AMOS. By adjusting the wind shear warning thresholds, the balance between POD and FAR was improved, confirming the potential for ground-based equipment to issue wind shear warnings effectively.

Key Words : Wind Shear(급변풍), Low-Level Wind Shear Alert System(저층급변풍경고장비), Aerodrome Meteorological Observation System(공항기상관측장비), Incheon International Airport (인천국제공항)

1. 서 론

급변풍(Wind Shear)은 바람의 속도와 방향이 급격

히 변하는 기상 현상으로, 특히 항공기의 이·착륙시 심각한 위험을 초래할 수 있다. 이러한 위험을 최소화하기 위해 공항에서는 다양한 방법을 통해 급변풍을 탐지하고, 이를 조기에 경고하는 시스템을 갖추는 것이 필수적이다. 그 중에서도 지상관측장비는 실시간으로 기상 상태를 모니터링하고, 급변풍의 발생을 탐지하는데 있어 핵심적인 역할을 한다.

다양한 지상관측장비를 활용한 급변풍 탐지 연구에서 그 중요성을 설명하고 있다. Hon and Chan(2014)은 열대저기압으로 인해 발생한 급변풍을 연구하여, 원격관측장비와 지상관측자료를 이용하여 에디소산울(Eddy

Received: 16. Jul. 2024, Revised: 31. Jul. 2024,

Accepted: 02. Aug. 2024

* 국립기상과학원 기상응용연구부 연구원

** 국립기상과학원 기상응용연구부 연구사

*** 국립기상과학원 기상응용연구부 연구관

**** 국립기상과학원 기상응용연구부 부장

연락처자 E-mail : gnenara@korea.kr

연락처자 주소 : 제주특별자치도 서귀포시 서호북로 33

Dissipation Rate, EDR)을 계산하고, AMDAR (Air-craft Meteorological Data Relay)와 비교하여 저층난류강도를 평가하여 급변풍 탐지에 지상관측장비의 필요성을 설명하였다. Chan(2017)은 홍콩국제공항에서 발생한 30 knots 이상의 강한 급변풍 사례를 조사하여 그 특징을 분석하였다. 이 연구는 공항에서의 급변풍 탐지 및 관리의 필요성을 강조하고 있다. Nechaj et al.(2019)은 슬로바키아의 브라티슬라브국제공항에서 발생한 급변풍 사례를 발생 원인별로 나누고, LIDAR (Light Detection And Ranging)를 이용한 급변풍 탐지의 이점과 한계를 설명하였다. Li et al.(2020)은 중국 란저우 중화국제공항의 강수를 동반하지 않은 급변풍 사례를 분석하고, LIDAR를 활용한 급변풍 탐지 알고리즘을 개발하여 기존 시스템 대비 향상된 결과를 보고하였다. 홍콩국제공항에서 LIDAR를 사용하여 다양한 기계학습방법에 대한 평가도 진행되고 있다(Khattak et al., 2023; Khattak et al., 2024). 이러한 연구들은 LIDAR 기술이 급변풍 탐지에 있어 중요한 역할을 할 수 있음을 보여준다. Tse et al.(2019)은 공항기상레이다(Terminal Doppler Weather Radar, TDWR)를 이용하여 열대성 저기압에 의한 마이크로버스트를 탐지하고, 그 특징에 대해 연구하였다. Chan and Li(2020)는 홍콩국제공항에서 발생한 4개의 열대저기압에 의한 급변풍 발생 사례를 지상관측자료, LIDAR, TDWR을 이용하여 분석하였다. 이는 다양한 장비의 통합적 활용이 급변풍 탐지에 효과적일 수 있음을 시사한다. Lin et al.(2021)은 PIREP (Pilot Report)과 ATCTREP (Air Traffic Controller Report)를 활용하여 중국 115개 공항에 대한 급변풍 발생 특성을 분석하였다. 이러한 보고서는 조종사와 관제사의 경험이 급변풍 탐지에 어떻게 기여할 수 있는지를 잘 보여준다. Hon and Chan(2022)은 장기간의 PIREP 자료를 이용하여 홍콩국제공항에서 발생한 급변풍의 특성을 시·공간적으로 분석하였다. 이 연구는 장기적인 자료 수집과 분석이 급변풍의 패턴을 이해하는 데 중요한 역할을 할 수 있음을 강조한다. 실시간 관측자료를 활용하여 모델 입력에 필요한 변수들을 생산하여 급변풍 발생 예측 성능을 높이는 연구도 진행되고 있다(Stoker et al., 2022).

인천국제공항은 대한민국의 주요 국제 관문으로, 항공기 이·착륙 빈도가 높아 급변풍 탐지 및 경고의 중요성이 더욱 부각되고 있다. 현재 인천국제공항은 급변풍 탐지를 위해 TDWR과 저층급변풍경고장비(LLWAS)를 운영 중에 있으나, 외국 제조사의 기술에 의존하고 있어 각 공항의 급변풍 특성을 반영하기 힘든 상황이다. 홍콩

기상청은 홍콩국제공항의 급변풍과 난류를 탐지하기 위해 통합급변풍 탐지시스템(Windshear and Turbulence Warning System, WTWS)을 운영 중이다(Hong Kong Observatory, 2019). 이 시스템은 TDWR, 윈드 프로파일러, LIDAR, 해상부이 등 다양한 관측장비에서 생산되는 급변풍 자료를 종합하여 우선 순위를 정한 후 항공기 이·착륙 영역에 급변풍 정보를 매분마다 제공한다. 미국의 경우, TDWR, LIDAR, LLWAS 등을 이용한 통합공항기상시스템(Integrated Terminal Weather System, ITWS)을 운영 중이며(Evans and Ducot, 1994), 일본 역시 TDWR과 LIDAR를 활용하여 급변풍을 탐지하고 있다. 국내에서도 공항 급변풍 경보를 위해 각 공항의 급변풍 특성을 최대한 반영할 수 있는 관측장비의 추가 및 시스템의 개발이 필요하다.

본 연구에서는 인천국제공항의 다양한 지상관측장비를 활용한 급변풍 종합탐지기술의 개발을 목적으로 저층급변풍경고장비(LLWAS), 공항기상관측장비(AMOS), 통합센서를 이용하여 급변풍 정보를 산출하였다. 그리고 이를 실제 급변풍 경고와 비교하여 활용가능성을 평가하고자 한다.

II. 자료 및 방법

2.1 LLWAS 재현

LLWAS는 활주로와 활주로 인접지역의 저층에서 발생하는 급변풍 및 마이크로버스트를 탐지하여 항공기에 공항 주변 지역과 이·착륙 지역에서 발생하는 돌풍 현상을 경고하기 위한 시스템이다. LLWAS에서 생산되는 급변풍 정보는 급변풍이 발생한 활주로와 위치, 강도, 경고 종류 등이 있다. 위 자료는 LLWAS에서 자동으로 계산되어 시스템에 결과만 표출되었기 때문에 탐지 알고리즘에 대한 이해가 부족한 상황이었다. 이에 UCAR(1992)에서 만든 문서를 바탕으로 LLWAS 탐지 알고리즘을 분석하고, 관측자료를 이용하여 이를 재현하였다. LLWAS 탐지알고리즘은 자료준비, 네트워크 통계 분석, 발산 분석, 경고 분석의 4단계로 나눌 수 있다(NIMS, 2022). 현업운영 중인 LLWAS의 원시자료(10 Hz) 수집이 현실적으로 불가능하여 이용가능한 인천국제공항 LLWAS 12개 지점의 10초 평균 풍향·풍속 자료를 사용하였다(Fig. 1). 해당 자료는 자료준비와 네트워크 통계 분석이 적용되었다고 가정하고, 배

Table 2. The runway direction factors at Incheon International Airport

	RWY33R	RWY15L	RWY33L	RWY15R	RWY34R	RWY16L	RWY34L	RWY16R
DIR_X	0.685	-0.685	0.685	-0.685	0.685	-0.685	0.685	-0.685
DIR_Y	-0.729	0.729	-0.729	0.729	-0.729	0.729	-0.729	0.729

정보 등 급변풍 경고 산출에 필요한 상수값이 정의된 파일이다(UCAR, 1992). 인천국제공항의 계산 조합은 활주로별로 9~14개로 총 94개이다.

발산은 Edge(2지점), Triple(3지점)의 발산을 계산한다. Edge 발산은 식 (2)를 이용하였다.

$$\Delta u = u_2 - u_1, \Delta v = v_2 - v_1$$

$$\text{Edge_dvrg} = (\Delta u \times \text{Dir_X} + \Delta v \times \text{Dir_Y}) / L \quad (2)$$

여기에서 u_1, u_2, v_1, v_2 는 2지점 바람의 동서성분과 남북성분이고, L 은 지점간의 거리(km)이다. 인천국제공항의 Edge 발산은 43개의 조합이 있다.

Triple 발산은 식 (3)을 이용하였다.

$$U1 = u_2 - u_1, V1 = v_2 - v_1$$

$$U2 = u_3 - u_1, V2 = v_3 - v_1$$

$$u_x = (Y1 \times U2 - Y2 \times U1) / (2 \times \text{TRI_AREA})$$

$$v_y = (V1 \times X2 - V2 \times X1) / (2 \times \text{TRI_AREA})$$

$$\text{Tri_dvrg} = u_x + v_y \quad (3)$$

여기에서 $u_1, u_2, u_3, v_1, v_2, v_3$ 는 3지점 바람의 동서성분과 남북성분, $X1, X2, Y1, Y2$ 는 각각 삼각형 측면 벡터, TRI_AREA는 3지점으로 둘러싸인 삼각형의 면적(km²)이다. Edge와 Triple의 발산 계산에 필요한 상수와 지점들의 정보는 공항설정파일에 정의되어 있다.

2.2 AMOS 기반 급변풍

공항기상관측장비(Aerodrome Meteorological Ob-

servation System, AMOS)는 활주로 부근의 기상상황(풍향·풍속, 기온, 이슬점온도, 기압, 시정, 활주로 가시거리, 현재일기, 구름고도, 기압 등)을 실시간으로 관측·제공하는 공항의 기본시설이다(Aviation Meteorological Office, 2024). 인천국제공항 AMOS 8개 지점(33R, 15L, 33L, 15R, 34R, 16L, 34L, 16R)의 1분 평균풍향과 1분 최대풍속 자료를 이용하여 앞선 식 (1)으로 배풍(loss) 및 정풍(gain)을 계산하였다. 여기서 사용된 방향 성분계수는 LLWAS 재현과 동일하며, 계산지점의 조합은 Table 3과 같이 설정하였다.

2.3 통합센서 기반 EDR 산출

EDR 산출을 위해 인천국제공항 LLWAS 9번 지점 근처에 위치한 통합센서(WXT520, Vaisala)의 바람 자료를 사용하였다(Fig. 1). EDR은 ICAO (International Civil Aviation Organization)에서 권고하는 객관적 난류 계량기준이다(ICAQ, 2017). 통합센서의 1 Hz 수평 바람자료(u, v)를 이용하여 에너지 스펙트럼 기반의 EDR(m^{2/3}s⁻¹)을 식 (4)를 이용하여 산출하였다(Kim et al., 2021).

$$EDR = \varepsilon^{1/3} = \left(\frac{2\pi}{U} \right)^{1/3} \left[\frac{S(f)f^{5/3}}{\alpha_i} \right]^{1/2} \quad (4)$$

여기에서 $S(f)$ 는 에너지 스펙트럼 밀도, f 는 주파수, U 는 평균풍속, α_i 는 Kolmogorov 상수(u : 0.53, v : 0.707)이다(Strauss et al., 2015). 계산에 사용된 에너지 스펙트럼 밀도의 관성아영역은 0.1~0.5 Hz

Table 3. The pairs of runway oriented loss and gain for AMOS

	RWY33R		RWY15L		RWY33L		RWY15R		RWY34R		RWY16L		RWY34L		RWY16R	
1	33R	15L	15L	33R	33R	15L	15L	33R	34R	16L	16L	34R	34R	16L	16L	34R
2	33R	15R	15L	33L	33R	15R	15L	33L	34R	16R	16L	34L	34R	16R	16L	34L
3	33L	15L	15R	33R	33L	15L	15R	33R	34L	16L	16R	34R	34L	16L	16R	34R
4	33L	15R	15R	33L	33L	15R	15R	33L	34L	16R	16R	34L	34L	16R	16R	34L

구간을 사용하였으며, 120초 동안 관측된 수평 바람성분 u , v 에서 각각 계산된 EDR을 로그평균하여 산출하였다.

III. 결 과

3.1 인천국제공항 급변풍 발생

Fig. 2는 인천국제공항의 활주로와 급변풍 경고 영역을 나타낸 것이다. 인천국제공항의 활주로는 1활주로(15R-33L), 2활주로(15L-33R), 3활주로(16L-34R), 4활주로(16R-34L)로 이루어져 있다. 급변풍 발생위치는 각 활주로별로 RWY, 1MD, 2MD, 3MD, 1MF, 2MF, 3MF로 표기된다. '1M', '2M', '3M'은 활주로 말단부터의 거리를 나타내며, 출발 활주로로 사용될 경우 출발(Departure)을 의미하는 'D'가 거리 뒤에 표기되고, 도착 활주로로 사용될 경우 최종접근(final approach)을 의미하는 'F'가 거리 뒤에 표기된다. 여기서 M은 해리(1해리는 약 1,852m)를 뜻하며, 최대 3해리까지 표기된다.

Table 4와 Table 5는 2023년 LLWAS 경고 자료에서 추출한 착륙과 이륙시 위치별 급변풍 경고 발생횟수이다. 급변풍 발생은 1활주로(15R-33L)와 2활주로(15L-33R)의 1,408회(14%)보다 3활주로(16L-34R)와 4활주로(16R-34L)에서 8,979회(86%)로 더 자주 발생하였다. 도착 활주로의 급변풍 발생 구역별 빈도는 RWY에서 5,808회(55.9%), 2MF에서 2,672회(25.7%), 1MF에서 1,907회(18.4%) 순으로 나타났다. 출발 활주로의 경우, 대부분이 RWY(10,365회, 99.8%)에서 발생하였다.

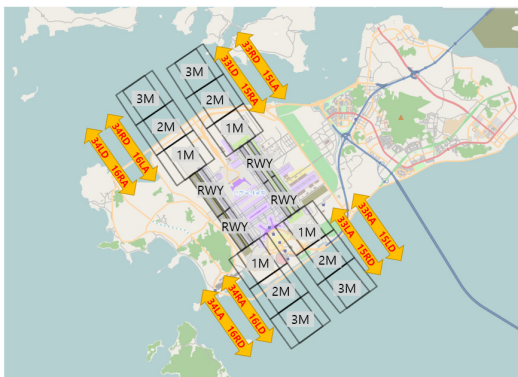


Fig. 2. LLWAS alert area and runway corridors at Incheon International Airport

Table 4. Number of LLWAS alert by runway location(arrival) in 2023

	RWY	1MF	2MF	3MF	Total
15LA	164	52	45	0	261
33RA	310	6	127	0	443
15RA	164	52	45	0	261
33LA	310	6	127	0	443
16LA	1,524	386	0	0	1,910
34RA	1,102	665	1,017	0	2,784
16RA	1,524	75	311	0	1,910
34LA	710	665	1,000	0	2,375
Total	5,808	1,907	2,672	0	10,387

Table 5. Number of LLWAS alert by runway location(departure) in 2023

	RWY	1MD	2MD	3MD	Total
33RD	261	0	0	0	261
15LD	438	5	0	0	443
33LD	261	0	0	0	261
15RD	438	5	0	0	443
34RD	1,910	0	0	0	1,910
16LD	2,778	6	0	0	2,784
34LD	1,910	0	0	0	1,910
16RD	2,369	6	0	0	2,375
Total	10,365	22	0	0	10,387

3.2 LLWAS 재현 및 AMOS 급변풍 검증

Fig. 3은 2023년에 발생한 급변풍 일수를 LLWAS, LLWAS_nims, AMOS 급변풍의 3가지 시스템으로 비교한 월별 그래프이다. 그래프에서 LLWAS 재현은 LLWAS_nims로 표기하였다. 통합센터는 2023년 9월부터 관측이 시작되어 본 분석에서는 제외되었다. 연간 급변풍 발생일수는 LLWAS는 57일, LLWAS 재현은 84일, AMOS 급변풍은 163일이었다. LLWAS 재현은 LLWAS와 유사한 경향을 보였지만, AMOS는 급변풍 경고가 상대적으로 더 많이 나타났다. LLWAS와 LLWAS 재현은 두 시스템 간의 차이가 상대적으로 작고, 유사한 월별 패턴을 보인다. 이는 LLWAS 재현이 LLWAS의 성능을 잘 모의하고 있음을 시사한다. 다만

LLWAS 재현이 월별 급변풍일수가 높게 나타나는데, LLWAS 알고리즘 단계 중 자료준비와 네트워크 통계 분석이 생략된 것이 원인으로 보여진다. LLWAS와 LLWAS 재현의 경우, 11월부터 1월까지 시베리아 고기압에 의한 북서계절풍의 영향으로 급변풍 발생이 빈번함을 확인할 수 있다. 반면, AMOS 급변풍은 4~9월까지 급변풍 빈도가 높게 나타났다. 이는 관측지점의 지리적인 차이로 보여진다. LLWAS 관측지점은 바다와 인접한 지역에도 설치되어 있지만, AMOS 관측지점은 활주로 주변에만 집중되어 급변풍 경고 구역이 상대적으로 국한되어 있다. 또한 LLWAS는 급변풍 여부 판단 시 발산과 지속성이 적용되어 과도한 경고를 조절하지만, AMOS 급변풍은 2지점의 배풍과 정풍값으로만 판단하므로 급변풍 경고일수가 높게 나온 것으로 보인다.

LLWAS 재현, AMOS 급변풍, EDR을 실제 급변풍과 비교하기 위해 급변풍 발생일수가 가장 많았던 2023년 11월을 대상으로 시계열을 분석하였다(Fig. 4). Fig. 4(a)는 급변풍 경보(wind shear warnings)와 LLWAS 경고를 나타낸 것이다. 급변풍 경보는 급변풍 탐지장비(LLWAS, TDWR 등)를 활용하여 배풍(loss) 및 정풍(gain)이 15 knots 이상으로 관측되거나, 지속될 것으로 예상될 때 발표하게 된다. 급변풍 경보(wind shear warnings)는 급변풍의 유효시간을 기준으로 시계열에 붉은색 음영으로 표시하였다(Fig. 4a~c). LLWAS 경고는 급변풍이 발생하였을 때 관측 시간, 활주로 위치, 경고 종류, 강도, 발생 위치, 활주로 말단의 풍향·풍속의 정보를 저장하고 있다. 급변풍 경보 유효시간의 시작은 LLWAS 경고와 일치하였고, LLWAS 경고보다 급변풍 경보는 유효시간을 더 길게 발표하였다. Fig. 4(b)는 LLWAS 재현의 시계열로 LLWAS 경고와 상당히 유사하였다. 비록 몇몇 시간대

에서 차이를 보였지만, 재현이 성공적이었음을 알 수 있다. Fig. 4(c)는 AMOS 급변풍으로 LLWAS 경고와 유사한 패턴을 보이나, 그 강도는 낮게 나타났다. 이는 급변풍은 두 지점에서의 풍속벡터차를 계산하게 되는데, LLWAS에 비해 지점의 수와 탐지 영역이 차이가 원인으로 보인다. 또한 시간해상도에서도 차이를 보이는데, 10초인 LLWAS와 달리 1분 평균자료를 사용하였기 때문에 전체적으로 낮은 급변풍의 값을 보였다. Fig. 4(d)는 통합센서를 활용한 EDR 그래프이다. 통합센서의 위치를 고려하여 34L과 34R 활주로에서 발생한 LLWAS 경고와 비교하였다. EDR의 강도를 판단하기 위해 중강도(0.24)와 고강도(0.55)를 표시하였다. 이 값은 NCAR (National Center for Atmospheric Research)에서 난류 예보를 위해 대형 항공기에 적용되는 EDR 임계값이다. LLWAS 경고가 발생할 때 EDR은 대체로 중강도 이상의 값을 보였다. 그러나 EDR이 중강도 이상일 때 LLWAS 경고가 항상 발생하지는 않았다. 반면, EDR이 고강도 이상일 때 LLWAS 재현과 일치하는 경우가 많아, EDR이 공항 주변의 급변풍과 연관성이 있음을 나타낸다. 이는 급변풍 경고를 판단하는데 유용한 자료로 사용될 수 있음을 시사한다.

LLWAS 재현과 AMOS 급변풍의 활용성 평가를 위해 POD(Probability Of Detection), FAR (False Alarm Ratio), CSI (Critical Success Index), TSS (True Skill Score) 등의 평가지수를 분석하였다. 각 지표의 정의와 식은 다음과 같다. POD는 실제로 발생한 급변풍 중 탐지된 비율을 나타낸다. 값이 1에 가까울수록 탐지 성능이 우수함을 의미한다.

$$POD = \frac{TP}{TP + FN}$$

여기서 TP(true positive)는 맞힘을, FN(false negative)은 놓침을 의미한다(Table 6).

FAR은 탐지된 급변풍 중 실제 급변풍이 아닌 경우의 비율을 나타낸다. 값은 0에 가까울수록 좋다.

$$FAR = \frac{FP}{TP + FP}$$

여기서 FP(false positive)는 오경보를 의미한다.

CSI는 탐지 성능을 종합적으로 평가하는 지표로, POD와 FAR을 모두 고려하여 계산된다. 값이 1에 가까울수록 탐지 성능이 우수함을 의미한다.

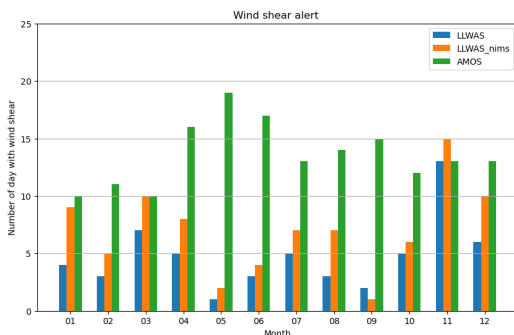


Fig. 3. The monthly number of day with wind shear in 2023

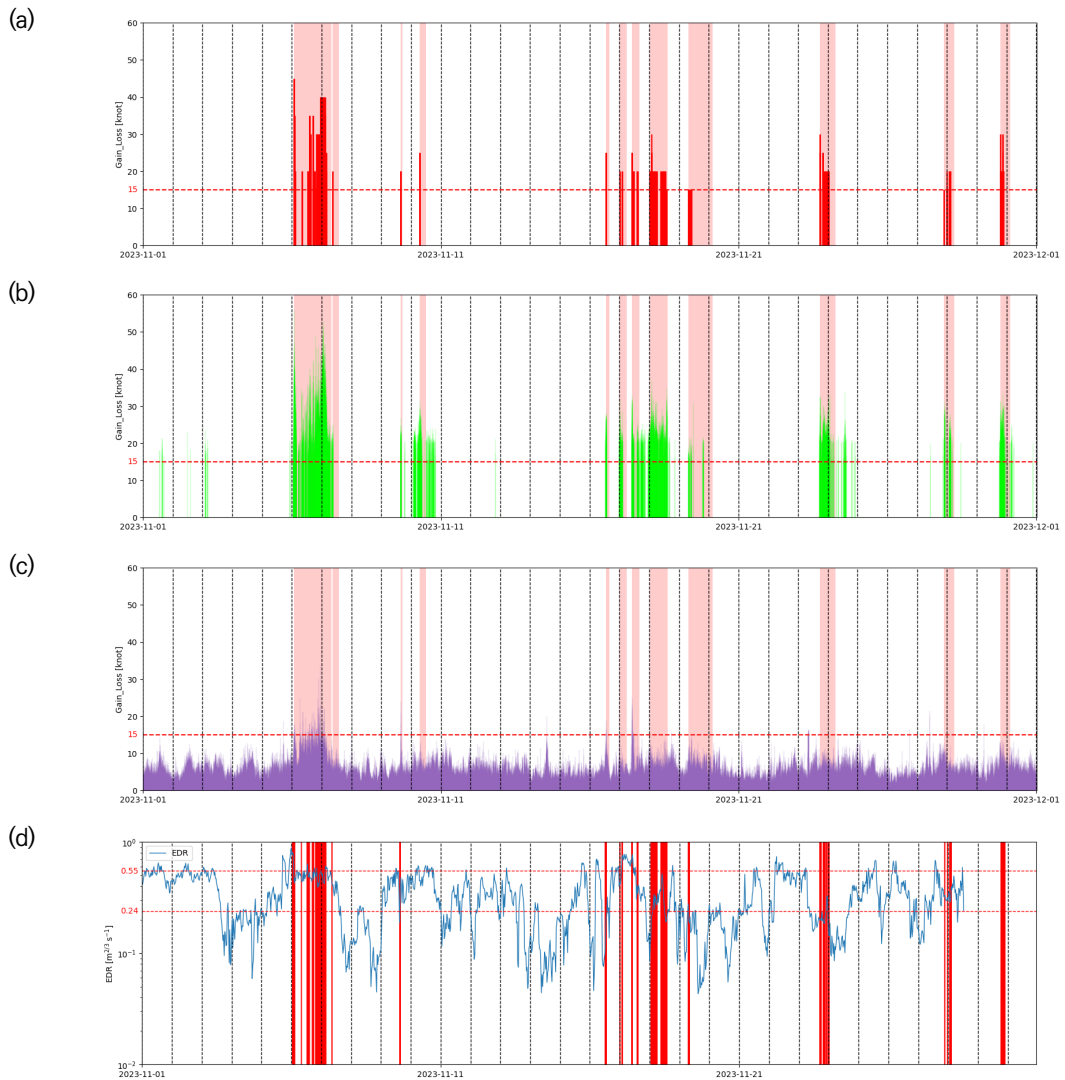


Fig. 4. The time series of (a) LLWAS alert, (b) LLWAS_nims, (c) AMOS, (d) EDR in November, 2023

$$CSI = \frac{TP}{TP + FN + FP}$$

TSS는 탐지 성능과 함께 무작위로 맞출 확률을 고려한 지표로, 완벽한 예측은 1, 무작위 예측은 0을 나타낸다.

$$TSS = POD - \frac{FP}{FP + TN}$$

여기서 TN(true negative)은 현상없음을 맞힌 경우를 뜻한다.

Table 6. The 2×2 contingency table

		Event observed	
		Yes	No
Event forecast	Yes	TP (hits)	FP (false alarms)
	No	FN (misses)	TN (correct negatives)

2023년 1월부터 12월까지 1년 동안 LLWAS 재현의 POD, FAR, CSI, TSS는 각각 0.98, 0.46, 0.53, 0.95로 나타났다(Table 7). POD에서 확인할 수 있듯

이 급변풍 경고 발생은 대부분 탐지가능하였지만, FAR이 다소 높아 낮은 CSI를 보였다. 계절별로는 가을이 CSI가 0.59로 가장 높았고, 봄이 0.48로 가장 낮았다. AMOS 급변풍의 경우, POD, FAR, CSI, TSS는 각각 0.52, 0.67, 0.25, 0.49로 나타났다. POD는 여름이 0.77로 가장 높았지만 FAR이 높아 CSI는 0.35로 가을이 가장 높았다(Table 8).

3.3 LLWAS 재현 및 AMOS 급변풍임계값 조정

앞선 결과에서 LLWAS 재현은 LLWAS에서 경고한 급변풍을 대부분 탐지하였지만, 과도한 경고를 발생시키는 경향을 보였다. AMOS 급변풍의 경우, 역시 높은 FAR을 보였다. 높은 FAR을 조정하기 위해 급변풍 경고 임계값에 따른 평가지수의 변화를 분석하였다. Fig. 5는 급변풍 경고 임계값을 10~24 knots 범위에서 변화시켰을 때 POD, FAR, CSI, TSS의 변화를 보여준다. POD는 15 knots까지 최고값을 보이다가 그 이후부터 점차 낮아졌고, FAR은 임계값이 높아질수록 점차 낮아졌다. CSI는 23 knots에서 가장 높았고, TSS는 15 knots에서 가장 높았다. 본 연구에서는 CSI가 가장 높았던 23 knots를 적정 임계값으로 설정하였을 때, 전체기간의 POD, FAR, CSI, TSS는 0.83, 0.21, 0.68, 0.82로 POD(-0.15)와 TSS(-0.13)는 다소 낮아졌지만 FAR(-0.25), CSI(+0.15)로 기존 임계값(15knots)보다 개선된 결과를 보였다(Table 9).

Table 7. Seasonal analysis of POD, FAR, CSI and TSS for LLWAS_nims

	Spring	Summer	Autumn	Winter	Total
POD	0.96	0.94	0.92	1.00	0.98
FAR	0.51	0.55	0.38	0.43	0.46
CSI	0.48	0.44	0.59	0.57	0.53
TSS	0.94	0.92	0.88	0.97	0.95

Table 8. Seasonal analysis of POD, FAR, CSI and TSS for AMOS

	Spring	Summer	Autumn	Winter	Total
POD	0.49	0.77	0.55	0.38	0.52
FAR	0.83	0.75	0.51	0.62	0.67
CSI	0.14	0.24	0.35	0.24	0.25
TSS	0.45	0.74	0.52	0.36	0.49

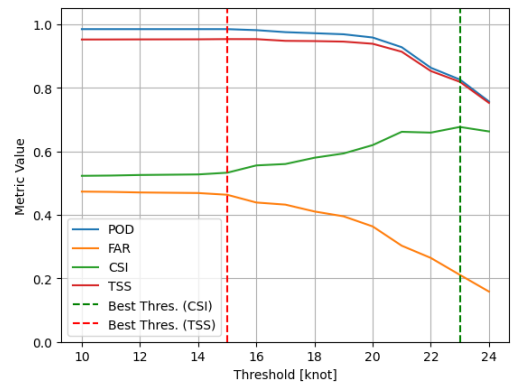


Fig. 5. Variation of verification metrics based on threshold value for LLWAS_nims

Table 9. Comparison of verification metrics using original and optimal thresholds

	LLWAS_nims		AMOS	
Thres.	15knots	23knots	15knots	17knots
POD	0.98	0.83	0.52	0.41
FAR	0.46	0.21	0.67	0.52
CSI	0.53	0.68	0.25	0.28
TSS	0.95	0.82	0.49	0.40

Fig. 6은 AMOS 급변풍의 임계값에 따른 평가지수 결과이다. LLWAS 재현과 마찬가지로 임계값이 증가할수록 POD, FAR은 감소하였다. CSI를 기준으로 적정 임계값은 17 knots로, 그 이후로는 성능이 감소하였다. 임계값을 15 knots에서 17 knots로 변경한 후, POD는 0.52에서 0.41로 0.11이 낮아졌지만, FAR은 0.67에서 0.52로 0.15가 낮아졌다. CSI는 0.25에서 0.28로 0.03이 높아져 개선됨을 확인할 수 있었다(Table 9).

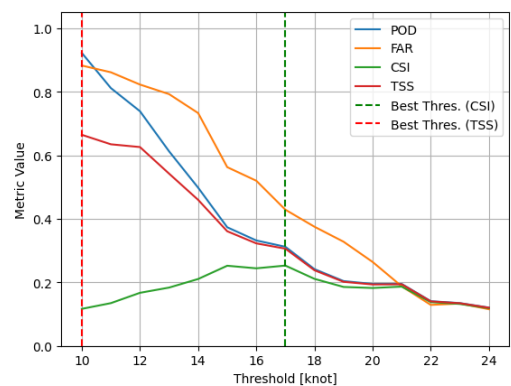


Fig. 6. Variation of verification metrics based on threshold value for AMOS

Table 9. Comparison of verification metrics using original and optimal thresholds

Thres.	LLWAS_nims		AMOS	
	15knots	23knots	15knots	17knots
POD	0.98	0.83	0.52	0.41
FAR	0.46	0.21	0.67	0.52
CSI	0.53	0.68	0.25	0.28
TSS	0.95	0.82	0.49	0.40

IV. 요약 및 결론

인천국제공항에 설치된 LLWAS, 공항기상관측장비(AMOS), 통합센서를 이용하여 급변풍을 산출하고, 그 활용성을 평가하였다.

LLWAS 탐지알고리즘 중 발산 분석과 경고 분석을 적용하여 LLWAS 12개 지점 관측자료로 LLWAS를 재현하였다. 또한 AMOS 관측자료를 사용하여 배풍과 정풍을 계산하였다. 2023년 급변풍 발생일수를 비교한 결과, LLWAS는 57일, LLWAS 재현은 84일, AMOS 급변풍은 163일로 LLWAS 재현은 유사하였으나, AMOS 급변풍에서 발생일수가 많았다. 2023년 11월을 대상으로 시계열 분석한 결과, LLWAS 재현 결과는 상당한 유사성을 보이고 있었고, AMOS 급변풍은 관측지점의 영향으로 낮은 강도를 보였다. 통합센서를 이용한 EDR 산출은 LLWAS 경고와 상당한 유사성을 보여 급변풍 탐지의 한 방법으로 활용할 수 있음을 확인하였다.

급변풍 탐지 성능을 평가하기 위해 POD, FAR, CSI, TSS의 지표를 분석하였다. LLWAS 재현의 경우, POD, FAR, CSI, TSS가 각각 0.98, 0.46, 0.53, 0.95로 실제 발생한 급변풍을 대부분 탐지하였지만, FAR이 0.46으로 높아 성능이 다소 낮게 나타났다. AMOS 급변풍의 경우, POD, FAR, CSI, TSS는 각각 0.52, 0.67, 0.25, 0.49로 실제 발생한 급변풍의 50% 정도를 탐지하였지만 FAR이 0.67로 높아 CSI는 0.25로 나타났다. 탐지성능의 개선을 위해 급변풍 경고 적정 임계값을 분석한 결과, 기존 15 knots에서 LLWAS 재현의 경우 23 knots로 AMOS 급변풍의 경우 17 knots로 나타났다. 임계값을 조정함으로써 LLWAS 재현은 CSI(0.53 → 0.68)는 15%가 증가하였고, AMOS 급변풍은 CSI(0.25 → 0.28)로 3%가 증가하였다. 급변풍 경고 임계값을 조정하여 POD와 FAR의 균형을

맞춰 탐지 성능을 개선할 수 있었다.

본 연구결과를 통해 향후 급변풍 탐지시스템이 없는 공항에서도 지상관측장비를 활용한 급변풍 경고가 가능함을 확인하였다. 이는 항공기 운항 안전성을 높이고, 인천국제공항을 비롯한 국내 다른 공항에서의 급변풍 대응 능력을 강화하는 데 기여할 것이다. 특히, 급변풍 탐지방법의 다양성을 통해 항공기 사고를 예방하고, 공항 운영의 효율성을 증대시킬 수 있을 것으로 기대된다.

사 사

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

References

1. Hon, K. K., and Chan, P. W., "Terrain-induced turbulence intensity during tropical cyclone passage as determined from airborne, groundbased, and remote sensing sources", *Journal of Atmospheric Oceanic Technology*, 31, 2014, pp.2373-2391.
2. Chan, P. W., "Severe wind shear at Hong Kong International Airport: Climatology and case studies", *Meteorological Applications*, 24, 2017, pp.397-403.
3. Nechaj, P., Gaál, L., Bartok, J., Vorobyeva, O., Gera, M., Kelemen, M., and Polishchuk, V., "Monitoring of low-level wind shear by ground-based 3D Lidar for increased flight safety, protection of human lives and health", *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 16, 2019, pp.4584.
4. Li, L., Xie, N., Fu, L., Zhang, K., Shao, A., Yang, Y., and Ren, X., "Impact of lidar data assimilation on low-level wind shear simulation at Lanzhou Zhongchuan International Airport, China: A case study", *Atmosphere*, 11, 2020, pp.1342.
5. Khattak, A., Chan, P. W., Chen, F., and Peng,

- H., "Time-series prediction of intense wind shear using machine learning algorithms: A case study of Hong Kong International Airport", *Atmosphere*, 14, 2023, pp.268.
6. Khattak, A., Zhang, J., Chan, P. W., Chen, F., and Almujibah, H., "Explainable boosting machine: A contemporary glass-box strategy for the assessment of wind shear severity in the runway vicinity based on the doppler light detection and ranging data", *Atmosphere*, 15, 2024, pp.20.
 7. Tse, S. M., Hagio, M., and Maeda, Y., "Wind-shear detection by terminal Doppler weather radar during tropical cyclone Mujigae in 2015", *Meteorology Application*, 26, 2019, pp.620-631.
 8. Chan, P. W., and Li, Q. S., "Some observation of low level wind shear at the Hong Kong International Airport in association with tropical cyclones", *Meteorological Applications*, 27, 2020, e1898.
 9. Lin, C., Zhang, K., Chen, X., Liang, S., Wu, J., and Zhang, W., "Overview of low-level wind shear characteristics over Chinese mainland", *Atmosphere*, 12(5), 2021, pp.628.
 10. Hon, K. K., and Chan, P. W., "Historical analysis (2001 - 2019) of low-level wind shear at the Hong Kong International Airport", *Meteorological Applications*, 29(2), 2022, e2063.
 11. Stocker, J., Johnson, K., Forsyth, E., Smith, S., Gray, S., Carruthers, D., and Chan, P. W., "Derivation of high-resolution meteorological parameters for use in airport wind shear now-casting applications", *Atmosphere*, 13, 2022, pp.328.
 12. Hong Kong Observatory, "Windshear and turbulence in Hong Kong - Information for pilots", 2019, pp.36.
 13. Evans, J. E., and E. R. Ducot, "The integrated terminal weather system (ITWS)", *The Lincoln Laboratory Journal*, 7(2), 1994, pp.449-474.
 14. UCAR, "Network expansion llwas (Phase III) algorithm specification", 1992, pp.51.
 15. NIMS, "Developing technology for user-specific weather informaion production", National Institute of Meteorological Sciences, 2022, pp.84.
 16. Aviation Meteorological Office, "Aviation weather service user manual", 2024, pp.304.
 17. ICAO, "Meteorological service for international air navigation, 17th edition", ICAO: Montreal, CA, Canada, 2010, pp.206.
 18. Kim, J., Kim, J. H., and Sharman, R. D., "Characteristics of energy dissipation rate observed from the high-frequency sonic anemometer at Boseong, South Korea", *Atmosphere*, 12(7), 2021, pp.837.
 19. Strauss, L., Serafin, S., Haimov, S., and Grubišić, V., "Turbulence in breaking mountain waves and atmospheric rotors estimated from airborne in situ and Doppler radar measurements", *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 141(693), 2015, pp.3207-3225.