

Original Article

<https://doi.org/10.12985/ksaa.2026.34.3.318>
ISSN 1225-9705(print) ISSN 2466-1791(online)

제주공항 지상관측 기반 난류(EDR) 특성 및 급변풍 비교 분석

김민성*, 최희욱**, 석재혁*, 김근희*, 이상삼***, 김승범****

Characteristics of Turbulence (EDR) and Comparative Analysis of Wind Shear based on Ground Observations at Jeju International Airport

Min-Seong Kim*, Hee-Wook Choi**, Jae-Hyeok Seok*, Geun-Hoi Kim*,
Sang-Sam Lee***, Seungbum Kim****

ABSTRACT

Jeju International Airport frequently experiences wind shear and turbulence due to the influence of Mt. Halla and the surrounding complex terrain. In this study, eddy dissipation rate (EDR) was derived from 1Hz horizontal wind observations collected by the Aerodrome Meteorological observation system (AMOS), and its relationship with wind speed, wind direction, and wind shear alerts was investigated. The results showed that EDR generally increased with wind speed and was higher under northerly and northwesterly wind conditions. In addition, EDR values significantly increased during wind shear alert events. ROC analysis produced AUC values greater than 0.78 for both Runways 07 and 25, demonstrating that EDR is an effective indicator for wind shear detection. These findings suggest that AMOS observations can be used to identify low-level turbulence and wind shear hazards and may provide a practical supplement to aviation weather monitoring at airports without LLWAS.

Key Words : Jeju International airport(제주 국제공항), Turbulence(난류), Wind Shear(급변풍), Eddy Dissipation Rate(에디 소산률)

1. 서 론

항공기 운항 중 발생하는 난류(turbulence)는 승객과 승무원의 안전을 위협할 뿐만 아니라, 항공기의 운항 효율성에 심각한 지장을 초래하는 대표적인 위험 기상 현상이다. 특히 이착륙 단계에서의 난류는 항공기

의 고도가 매우 낮고 조종사의 비행 여유 고도(altitude margin)가 제한된 상황에서 발생하기 때문에 대형 사고로 이어질 위험성이 크다(Gultepe et al., 2019). 활주로 접근 및 최종 착륙 과정에서 조우하는 저고도 급변풍(low-level wind shear)과 기계적 난류는 항공기 자세 제어를 방해하는 치명적인 요소로 작용한다. 미국 연방항공청(Federal Aviation Administration, FAA) 및 국가교통안전위원회(National Transportation Safety Board, NTSB)의 분석에 따르면, 난류로 인한 항공 안전사고의 상당수가 이착륙 단계에서 집중적으로 발생하며, 지상 부근의 저고도 난류(low-level turbulence)가 기체 손상과 승객 부상을 유발하는 주된 원인으로 지적되고 있다(NTSB, 2021).

대기 경계층(atmospheric boundary layer) 내에서

Received: 18. Aug. 2026, Revised: 15. Sep. 2026,

Accepted: 18. Sep. 2026

* 국립기상과학원 기상응용연구부 연구원

** 국립기상과학원 기상응용연구부 연구사

*** 국립기상과학원 인공지능기상연구과 연구관

**** 국립기상과학원 기상응용연구부 부장

연락처 E-mail : alstjd0451@korea.kr

연락처 주소 : 제주특별자치도 서귀포시 서호북로 33

국립기상과학원

난류의 구조적 특성과 강도를 분석하기 위해 일반적으로 난류운동에너지(turbulent kinetic energy, TKE), 플럭스(flux)를 비롯한 다양한 대기 역학 변수를 활용하여 대기 경계층 내에서의 구조 및 특성을 분석하는 데 이용된다. 특히 항공 분야에서는 난류의 강도를 정량적으로 평가하기 위해 난류 소산률(eddy dissipation rate, EDR)을 표준 척도로 삼아 활용하고 있다. EDR은 항공기 승무원의 안전 운항 및 기상 정보 체계와 직결되는 중요한 난류 지표로서, 국제민간항공기구(ICAO)에서 공식적으로 지정한 전 세계 표준 난류 지표이다(ICAO, 2017).

이러한 EDR은 관측 목적과 대상 고도에 따라 다양한 원격 탐사 및 현장 관측 장비를 통해 산출된다. 현재 라이다(light detection and ranging, LiDAR), 공항기상 레이더(terminal doppler weather radar, TDWR), 초음파 풍속계, 그리고 항공기 자체 관측 데이터(aircraft meteorological data relay, AMDAR) 등이 활용되고 있으며, 이는 실제 항공 운항 및 공항 관제 실무에서 난류 정보 시스템을 구축하는 데 핵심 변수로 폭넓게 적용되고 있다(Chan and Lee, 2012; Bodini et al., 2018; Chu et al., 2025. Beak et al., 2025). 기존 연구에 따르면, 활주로 주변에서 관측된 EDR 자료와 조종사 보고(pilot weather report, PIREP) 기반의 윈드시어 정보 시스템을 비교 분석함으로써 EDR 지표가 급변풍 탐지 및 항공기 위험도 예측에 유의미한 상관성을 가짐이 입증되었다(Chan and Lee, 2012).

제주국제공항(RKPC)은 국내에서 가장 혼잡한 항공노선 중 하나이나, 지형적 및 기후적 요인으로 인해 위험 기상 발생 빈도가 매우 높은 공항이다. 제주국제공항은 제주도 북부 해안선에 바로 접해 있으며, 공항 남쪽에는 제주시 도심을 지나 해발 1,950m의 한라산이 위치하고 있다. 공항의 주 활주로는 07/25 방향으로 구성되어 있는데, 사방이 바다로 둘러싸인 섬이라는 특성과 남북으로 높게 솟은 산악 지형이 맞물리면서 복잡한 기류 메커니즘이 형성된다. 특히 해양에서 유입되는 기류와 해륙풍, 그리고 강한 계절풍이 한라산이라는 거대한 지형적 장애물과 충돌할 때, 공항 주변에는 양배풍 및 물뿔 현상(hydraulic jump)과 같은 심각한 기류 교란이 유발된다. 또한, 해안가와 인접한 위치적 특성상 해양 경계층의 열적·역학적 변화가 지형성 바람과 복합적으로 작용하여 예측하기 어려운 강한 난류가 빈번히 발생한다(Stull, 1988)

공항 기상 경보의 대상이 되는 급변풍이나 강풍 등

의 현상은 대개 강력한 난류를 동반하므로, 고해상도 난류 분석을 통한 실시간 데이터 제공은 기존 정보 시스템의 사각지대를 보완하는 데 필수적이다. 난류의 정량적 강도를 EDR 분석을 통해 실시간으로 모니터링함으로써, 단순 풍향·풍속 변화 외에 항공기 비행 특성에 실질적인 영향을 미치는 위험 기상을 사전에 탐지하고 비행 사고를 예방할 수 있을 것으로 기대된다.

따라서 본 연구에서는 제주국제공항에서 관측된 고해상도 바람 자료를 활용하여 연간 EDR을 정량적으로 산출하였다. 이를 바탕으로 풍향 및 풍속에 따른 난류 강도 분포를 분석하였으며, 공항에 발효된 급변풍 경보 시점과의 비교 분석을 수행하였다. 최종적으로 대표적인 위험 기상 사례 분석을 통해 저고도 급변풍 발생 시 EDR의 시공간적 변동성과 난류의 연관성을 심층적으로 고찰하고자 한다.

II. 자료 및 방법

2.1 관측장비 및 장소

본 연구에서는 제주국제공항의 주 활주로인 07방향 활주로(활주로 07)와 25방향 활주로(활주로 25) 양 끝단에 설치된 공항기상관측장비(aerodrome meteorological observation system, AMOS) 자료를 활용하였다(Fig. 1). AMOS는 활주로 양 끝단에 설치되어 이착륙하는 항공기에 필수적인 기상 실황을 1초 및 1분 단위로 실시간 제공하는 핵심장비이다. 해당 장비는 지상으로부터 10m 높이에 설치되어 있으며, 4Hz 주기로 수집된 원시 데이터(raw data)를 1초 간격으로 평균하여 1Hz 단위의 고해상도 바람 데이터를 산출한다. 본 연구에서는 이 1Hz 단위의 수평 바람 자료를 동서 성분(u)과 남북 성분(v)으로 분해하여 난류 강도의 지표인 EDR을 계산하는 데 적용하였다.

제주도는 한라산의 영향으로 지역별 바람 특성의 편차가 크게 나타나 EDR의 시공간적 특성을 심층적으로 분석하기 위해, 제주도 내 위치한 종관기상관측장비(automated synoptic observing system, ASOS) 4개 지점(제주, 고산, 서귀포, 성산)의 바람 관측 자료를 평균하여 종관 규모의 기준 바람으로 설정하였다. 활주로 주변은 지형지물이나 이착륙하는 항공기로 인해 국지적인 난류 및 급변풍이 발생하기 쉬우므로, 이러한 공항 내부의 미세 규모 교란 효과를 배제하고 섬 전체

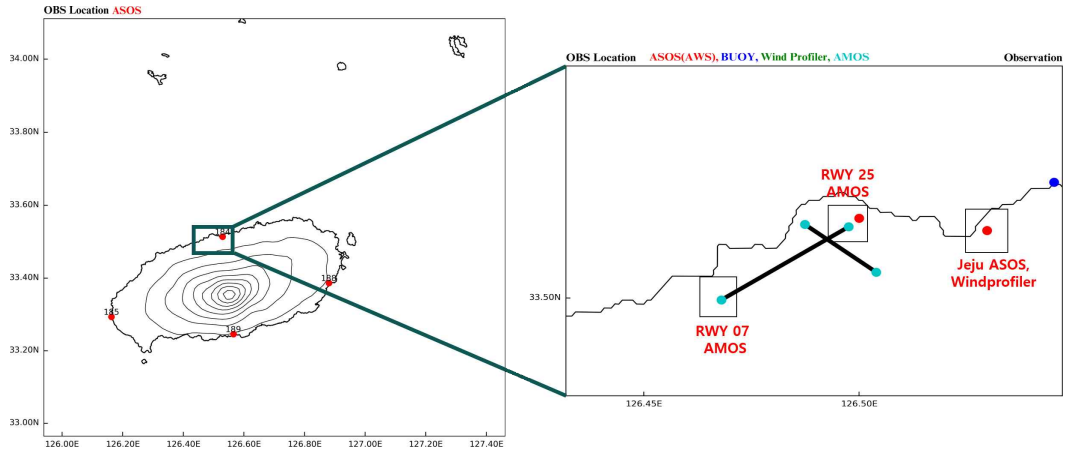


Fig. 1. Locations of AMOS observation points on runways 07/25 and the Jeju ASOS station

에 유입되는 배경 바람(background wind)의 풍향 및 풍속 조건에 따른 제주국제공항의 난류 강도(EDR) 분포 특성을 객관적으로 분석하고자 하였다.

2.2 EDR 산출

대기 중 바람, 태양 복사, 지형 효과 등 다양한 요인으로 인해 발생하는 대규모 소용돌이는 점차 더 작은 소용돌이로 에너지를 전달하면서 점성에 의해 최종적으로 열로 소산된다. 이러한 에너지 전달 과정에서, 대규모 소용돌이로부터 소규모 소용돌이로 에너지가 관성력에 의해 연속적으로 전달되는 구간을 관성 아영역(inertial subrange)이라 한다.

Kolmogorov(1941)는 등방성 난류의 가정하에, 관성 아영역에서는 에너지 소산이 없는 이상적인 조건에서 에너지 스펙트럼이 파수에 대해 $-5/3$ 의 법칙을 따른다고 정의하였다(Taylor, 1935). 즉, 이 영역에서 에너지 스펙트럼의 기울기는 일정하며, 다음과 같은 식으로 표현된다:

$$S(k) = \alpha_i \varepsilon^{2/3} k^{-5/3} \quad (1)$$

여기서, $S(k)$ 는 에너지 스펙트럼 밀도(m^2s^{-3}), α_i 는 풍향별 Kolmogorov 상수이다($u=0.53$, $v=0.707$)(Bodini et al., 2018). ε 는 난류 소산률($\text{m}^2/3\text{s}^{-1}$), k 는 파수(m^{-1})이다.

난류 관측 시, 시간에 따라 측정된 데이터를 공간 정보로 변환하기 위해 Taylor의 동결 난류 가설(frozen turbulence hypothesis)이 적용된다(Taylor, 1935). 이에 따르면, 난류 구조는 평균 흐름 속도에 의해 고정된 형태로 이동한다고 가정할 수 있으며, 이를 통해 파

수 k 와 주파수 f 간의 관계는 다음과 같이 표현된다:

$$f = \frac{U}{2\pi} k \quad (2)$$

여기서 U 는 각 방향의 평균 유선방향 풍속 (m/s)을 의미한다.

위의 관계를 에너지 스펙트럼 식에 대입하면, EDR을 주파수 영역에서 다음과 같이 추정할 수 있다.

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

본 연구에서는 관성 아영역의 주파수 범위 $0.1 \sim 0.5\text{Hz}$ 로 결정하였으며, 수평바람을 통해 계산된 u , v 성분을 이용하여 각 성분의 EDR을 계산하고 로그평균을 통해 최종 EDR이 산출되었다. 분석 시 사용된 시간 윈도우는 120초로 10초 간격 EDR을 산출하였다(Kim et al., 2021).

III. 결 과

3.1 EDR 산출 결과

본 연구에서 1Hz AMOS 바람 자료를 기반으로 산출한 EDR의 타당성을 검증하기 위해 파워스펙트럼밀도(power spectral density, PSD) 분석을 수행하였다. Fig. 2는 2024년 7월 1일 17시 40분(LST)에 활주로 07의 관측 자료로부터 산출된 PSD의 대표적인 예시이다. 관측된 PSD는 난류 관성아영역에서 이론적으

로 예측되는 $-5/3$ 의 콜모고로프 기울기(Kolmogorov slope)와 높은 일치도를 보였다.

연구에 사용된 2년간의 관측 자료를 기반으로 산출된 활주로별 평균 기울기는 Table 1에 정리하였다. 모든 활주로에서 이론적 기울기 대비 오차는 17% 이내로 나타났으며, 이는 선행연구(Borque et al., 2016)에서 사용된 오차범위 20% 이내로, 본 연구의 EDR 산출 과정이 신뢰할 수 있음을 확인하였다. 전반적으로 기울기가 이론값 대비 다소 낮게 나타나는 경향이 관찰되었으나, 이는 나이퀴스트 주파수(Nyquist frequency) 부근의 고

주파수 대역에서 발생하는 측정 노이즈로 인해 저에너지 대역이 과소평가된 결과로 해석된다.

3.2 EDR 특성

EDR 산출 방식의 신뢰성을 바탕으로, 제주국제공항의 계절적 특성에 따른 난류 강도의 변화를 확인하기 위해 시계열 분석을 수행하였다. Fig. 3은 활주로 07 및 25에서 2년간 관측된 자료의 3시간 평균 및 월별 평균 EDR 시계열을 나타낸다. 분석 결과 EDR 평균값은 강한 북서계열 계절풍이 지속적으로 유입되는 겨울철에 가장 높게 나타났으나, 실제 조종사들이 체감하는 이착륙 난이도는 봄철에 높게 보고되는 경향이 있다. 이러한 차이는 겨울철의 경우 강한 풍속에 의한 '연속적인 기계적 난류'가 주를 이루어 EDR의 절대값이 높게 산출되는 반면, 봄철에는 이동성 고기압과 저기압의 빈번한 교체, 해륙풍 전선 발달 등으로 인해 풍향과 풍속이 불규칙하게 급변하는 급변풍 및 열적 난류가 복합적으로 발생하기 때문인 것으로 해석된다. 즉, 관측된 EDR 수치는 연속적인 난류 에너지의 총량을 잘 반영하지만, 순간적인 풍향 급변으로 인한 항공기 제어의 어려움은 별도의 관점에서 해석될 필요가 있음을 시사한다. 또한 7~8월 사이 여름철에도 EDR이 일시적으로 증가하는 경향이 나타났는데, 이는 여름철 강한 일사에 의한 지표면 가열로 열적 난류(thermal turbulence)가 활발히 발생한 결과로 유추할 수 있다(Bodini et al., 2019).

일반적으로 대기 중에서 관측되는 EDR은 로그정규 분포(log-normal distribution)를 따른다고 선행연구들을 통해 보고되어 왔다(Sharman et al., 2014; Muñoz-Esparza and Sharman, 2018). Fig. 4는 연

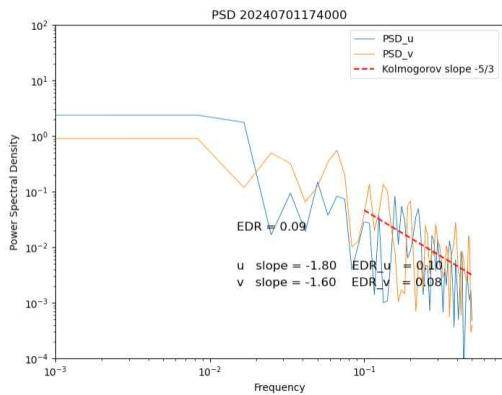


Fig. 2. Power spectral density by wind components u (blue) and v (orange)

Table 1. Average slope of the energy spectrum density by wind component

	07 RWY	25 RWY
u_slope	-1.941	-1.950
v_slope	-1.922	-1.940

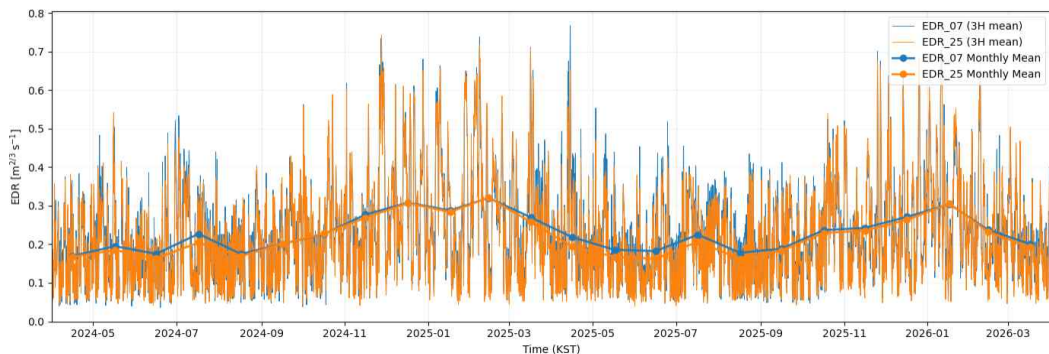


Fig. 3. 3 Hourly and monthly time-series of EDR for runways 07 and 25(Apr.2024 – Mar.2026)

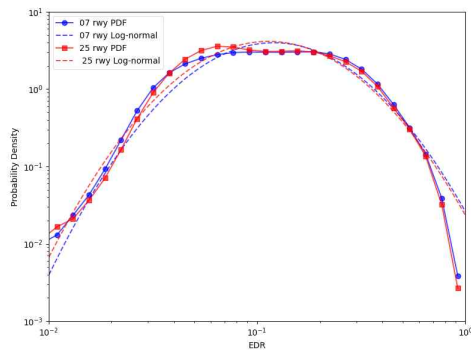


Fig. 4. Probability density functions(PDF) of EDR for runways 07 and 25 over the entire study period

구 기간 동안 관측된 EDR의 확률분포(PDF)를 나타내며, 전체적으로 로그정규분포(점선)에 잘 부합하는 모습을 보였다. 특히 PDF 상에서 두 개의 피크가 나타나는 이중 피크 형태가 관찰되었으며, 이는 계절적인 효

과와 더불어 AMOS 관측 장비가 활주로 상에 위치함에 따라 이착륙하는 항공기에 의해 유발된 인위적인 후류(Wake effect)의 영향을 일부 반영한 결과로 추정된다. 이와 같은 공항 내 국지적 교란 요인에도 불구하고, 2년간의 전체 분석 결과는 기존 선행연구(Kim et al., 2021)에서 제시된 EDR의 보편적인 로그정규적 통계 특성과 뚜렷하게 일치하였다.

3.3 풍향·풍속에 따른 난류 분석

대기 경계층 내에서 발생하는 난류의 강도는 배경 바람(background wind)의 대기운동학적 특성 및 주변 지형지물과의 상호작용에 크게 의존한다. 따라서 제주국제공항 주변에 유입되는 배경 기상 조건이 공항 내부의 난류 강도에 미치는 영향을 정량적으로 파악하기 위하여, 종관 기준 바람(ASOS)의 풍속 및 풍향 조건에 따른 EDR의 분포 특성을 분석하였다.

Fig. 5의 상단 그래프는 ASOS 관측 지점의 풍속 구

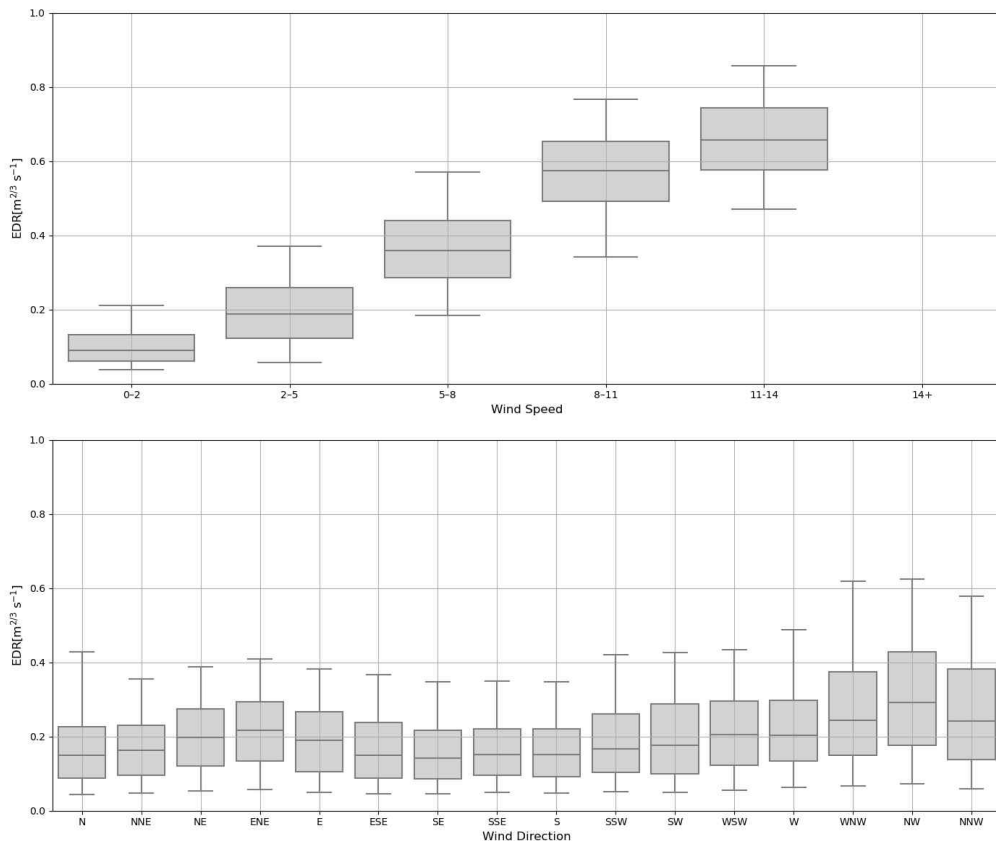


Fig. 5. Box plots of EDR distributions by wind speed (upper) and wind direction (lower) at Jeju International Airport

간에 따른 EDR 분포를 박스플롯으로 나타낸 것이다. x축은 풍속 구간을 의미하며, y축은 해당 조건에서 산출된 EDR 값을 나타낸다. 분석 결과, 풍속이 증가할수록 EDR의 중앙값이 전반적으로 상승하는 뚜렷한 양의 상관관계가 나타났다. 0~2 m/s 및 2~5 m/s의 낮은 풍속 구간에서는 EDR 값이 전반적으로 낮고 분포의 편차도 작은 반면, 강한 풍속 구간으로 갈수록 EDR의 중앙값과 사분위 범위(interquartile range)가 점진적으로 확대되는 특징을 보였다. 이는 풍속이 강해질수록 강한 난류 운동에너지가 생성되고, 이에 따라 EDR이 증가하게 되었음을 의미한다.

Fig. 5의 하단 그래프는 풍향 조건에 따른 난류 강도의 분포를 보여준다. x축은 풍향 구간을 의미하며, y축은 해당 풍향 조건에서 산출된 EDR 값을 나타낸다. 두드러지는 특징은 북서풍 계열(WNW - NW - NNW)이 유입될 때 EDR의 중앙값과 분포 범위가 타 풍향 대비 상대적으로 높게 나타난다는 점이다. 이러한 풍향별 난류 강도의 차이는 제주의 계절적 배경 기상 현상과 밀접하게 연관된다. 제주도는 겨울철에 시베리아 고기압의 확장으로 인해 북서풍 계열의 강한 바람이 우세하게 분다. 앞서 확인된 풍속 증가에 따른 난류 강도 상승 경향이 겨울철 강한 북서풍과 결합되면서, 해당 풍향 구간에서 EDR 분포가 높게 나타난 것으로 사료된다.

북서풍 계열에서 EDR이 높게 관찰되는 원인이 단순히 풍속의 영향인지, 혹은 해당 풍향 자체가 갖는 지형적·물리적 특성 때문인지를 명확히 구분하기 위해, 풍속 구간 내에서 풍향별 EDR 분포를 교차 분석하였다.

Fig. 6은 동일한 풍속 조건에서 풍향에 따라 난류 특성이 어떻게 달라지는지를 종합적으로 보여준다. 이를 통해 풍속 증가에 따른 난류 강도 변화뿐만 아니라, 동일한 풍속 조건에서 풍향에 따라 난류 특성이 어떻게 달라지는지를 종합적으로 분석할 수 있다. 전반적으로 모든 풍향 조건에서 풍속이 증가함에 따라 EDR의 중앙값과 분산이 함께 증가하는 경향이 나타나며, 이는 앞선 풍속 단독 분석 결과와 일관된 특성을 보인다. 풍속 구간 내에서도 풍향에 따른 난류 강도의 차이가 명확하게 나타났으며, 특히 0~2 m/s의 미풍 대역을 제외한 모든 풍속 구간에서 북서풍 계열의 EDR 중앙값이 타 풍향에 비해 뚜렷하게 높게 나타났다.

이는 동일한 강도의 바람이 불더라도, 북쪽에서 유입되는 기류가 제주공항에 더 강한 난류를 유발함을 시사한다. 이러한 현상은 마찰 특성에 의해 생긴 것이며, 마찰이 거의 없는 매끄러운 해수면을 통과한 북서풍 기류가 공항이 위치한 육지로 진입할 때, 지표면 거칠기(surface roughness)의 급격한 증가로 인해 강한 기계적 난류가 생성되어 EDR 상승에 기여한 것으로 사료된다(Maruhashi et al., 2019). 이러한 메커니즘은 3.5절의 사례분석을 통해 구체적으로 확인하였다.

3.4 급변풍 경보자료 기준 난류 비교분석

제주국제공항은 국내 공항 중 위험 기상에 의한 공항경보 발효 빈도가 가장 높은 곳 중 하나이다. 연구 기간 2024년 4월부터 2026년 3월까지 SIGMET, AIRMET 경보를 제외한 전국 공항경보 3,648건 중 약

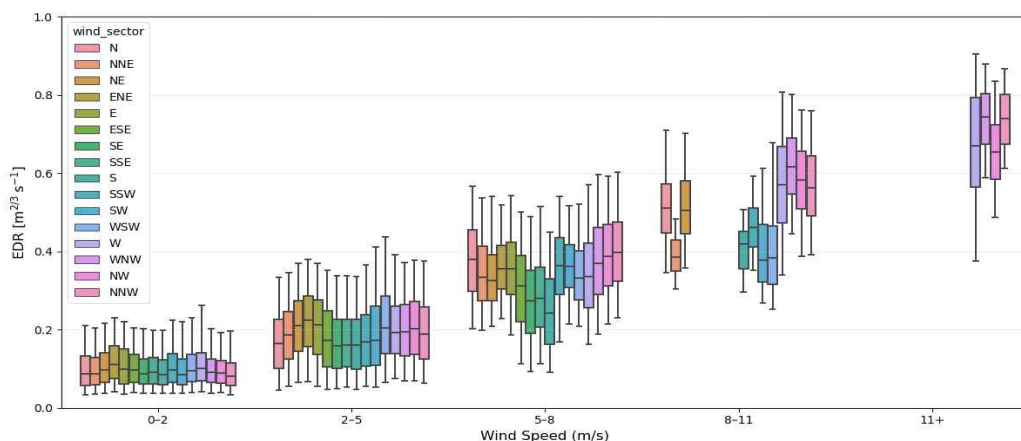


Fig. 6. Box plots of EDR distribution by wind direction, categorized by wind speed intervals

24%에 해당하는 887건이 제주국제공항에서 발효되었으며, 그중 급변풍(wind shear) 정보가 669건, 강풍 정보가 119건을 차지하였다. 이는 제주국제공항이 이착륙 단계에서 급변풍과 난류의 영향을 상시적으로 받는 환경임을 시사하며, 조종사의 기량뿐만 아니라 실시간 기상 관측 및 예측 기술의 중요성을 방증한다. 특히 최종 접근(final approach) 및 착륙 과정에서 조우하는 급변풍은 자동조종장치(autopilot)의 의도치 않은 해제, 접근 속도 유지 실패, 활주로 이탈(runway excursion) 등 치명적인 비행 안전 사고를 초래할 수 있다(Cho and Baik, 2021).

저고도 급변풍(low-level wind shear, LLWS)은 항공기 운항, 특히 이착륙 단계에서 조우할 수 있는 난류의 발생과 밀접한 연관을 가진다. 지상 장애물이나 지형적 요인, 혹은 전선 통과 시 발생하는 급격한 풍향 및 풍속의 변화는 대기 하층부의 공기 흐름을 불규칙하게 만든다. 이렇게 형성된 급변풍 영역에서는 서로 다른 속도 벡터를 가진 공기층이 상호 작용하며 마찰을 일으키고, 이로 인해 불규칙한 와동(vortex)이 형성되면서 난류 강도가 급격히 증가하게 된다. 급변풍에 의해 유도된 난류는 항공기의 양력 변화와 자세 불안정을 초래하는 직접적인 위험 요인으로 작용할 수 있다(ICA0, 2005).

앞선 3.3절에서는 풍속이 증가할수록 난류 강도가 전반적으로 상승하는 상관관계를 확인하였다. 이에 더해, 동일한 풍속 조건 하에서 급변풍 발생 여부가 난류 강도에 미치는 가중 효과를 심층 분석하였다(Fig. 7).

풍속 구간별로 급변풍 동반 유무에 따른 EDR 분포를 비교한 결과, 모든 풍속 구간에 걸쳐 급변풍이 동반된 사례의 EDR 중앙값 및 분포 범위가 급변풍이 없는 사례에 비해 전반적으로 높게 분포하는 경향을 보였다. 이는 단순히 절대적인 풍속의 세기뿐만 아니라, 풍향·풍속의 급격한 시공간적 변동(급변풍) 자체가 대기 흐름의 불안정성을 가중시켜 난류를 더욱 활발하게 생성하고 증폭시킴을 시사한다.

급변풍 발생 시 EDR의 실질적인 탐지 성능을 정량적으로 평가하기 위해 ROC(receiver operating characteristic) 곡선 분석을 수행하였다. Fig. 8은 급

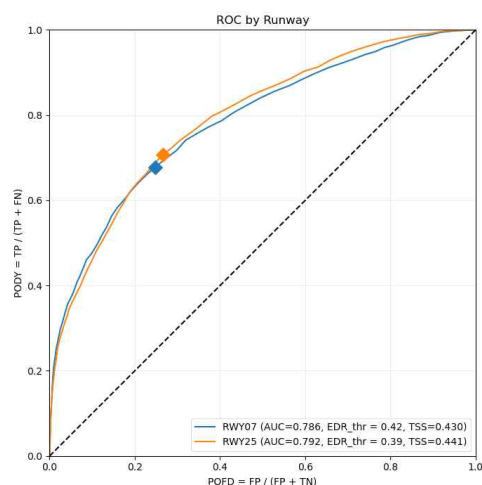


Fig. 8. Receiver operating characteristic (ROC) curve analysis of EDR relative to operational wind shear alerts

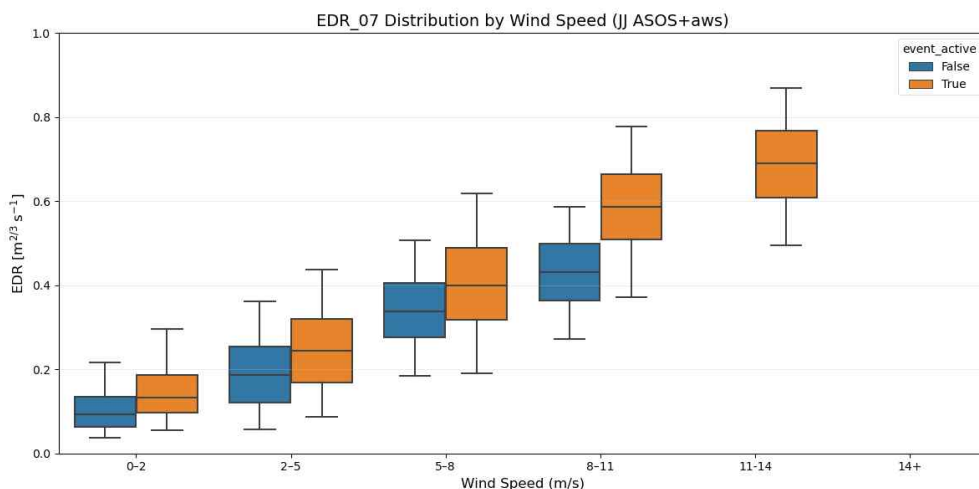


Fig. 7. Box plots of EDR categorized by wind speed and the presence of wind shear alerts

변풍 경보 발생 여부에 따른 EDR의 ROC 곡선을 나타낸다. ROC 분석 결과, EDR의 최적 임계값(optimal threshold)은 활주로 07에서 $0.42 \text{ m}^{2/3} \text{ s}^{-1}$, 활주로 25에서 $0.39 \text{ m}^{2/3} \text{ s}^{-1}$ 로 산정되었다. 해당 임계값에서 양활주로 모두 탐지확률(probability of detection, PODY)이 0.65 이상으로 나타났으며, AUC(area under the curve) 또한 0.78 이상으로 도출되어 급변풍 탐지에 대한 우수한 탐지 성능을 보이는 것으로 확인되었다.

이와 같은 분석 결과는 지상 기상 관측 자료(AMOS)로부터 산출된 EDR이 급변풍 탐지 및 경보의 핵심 보조 지표로서 높은 실효성을 가짐을 뒷받침한다. 현재 다수의 국내의 공항에 기본 기상 관측 장비로 구축되어 있는 AMOS의 고해상도 풍속 자료를 활용할 경우, 저고도 돌풍경보장비(low-level wind shear alert system, LLWAS)와 같은 고가의 전용 급변풍 탐지 장비가 구축되지 않은 중소규모 공항에서도 EDR 산출을 통해 저고도 급변풍의 발생 가능성과 위험 기상탐지를 효과적으로 할 수 있음을 시사한다.

3.5 급변풍 발생 사례분석

앞선 통계적 분석을 통해 풍속 증가에 따른 난류 강도의 상승과 특히 북서풍 계열의 강풍 유입 시 급변풍과 강한 난류가 동시에 유발되는 경향성을 확인하였다. 이러한 통계적 결과가 실제 물리적 대기 현상으로 어떻게 발현되는지 검증하기 위해, 북서풍 계열의 강한 바람과 함께 급변풍 경보 및 높은 EDR이 관측된 2024년 12월 28일 사례를 선정하여 상세 분석을 수행

하였다.

Fig. 9는 2024년 12월의 급변풍 경보, ASOS 바람 및 EDR 시계열 변화를 나타낸다. 그래프 상단은 ASOS에서 관측된 바람 벡터와 제주국제공항의 급변풍 경보 발효 구간을, 하단은 AMOS 기반 EDR의 변화를 보여준다. 분석 결과, 급변풍 경보가 발효된 시점에 일관적으로 강한 북서풍 계열 바람이 동반되었으며, 이와 동시에 EDR 값이 강한 난류 기준을 상회하는 $0.6 \text{ m}^{2/3} \text{ s}^{-1}$ 이상으로 급격히 증가하는 양상이 뚜렷하게 관찰되었다. 이는 급변풍 발생이 EDR 수치에 즉각적이고 민감하게 반영됨을 시사한다.

Fig. 10은 12월 28일 03시 30분(LST) 사례에서 왼쪽은 지상관측자료(LLWAS, AMOS, Buoy, ASOS)를 융합한 지상 바람의 수평 분포이며 오른쪽은 윈드프로파일러(wind profiler)에서 관측된 연직바람분포를 이용하여 상세한 분석을 수행하였다. 지상 수평 바람 분포를 살펴보면, 해상 및 해안선 인근에서는 강한 북서풍이 유지되나 육상(내륙)으로 진입함에 따라 풍속이 급격하게 감소하는 특징이 포착되었다. 또한, 윈드프로파일러의 연직 바람장에서는 상승 기류와 하강 기류가 교차하는 불안정한 대기 연직 구조가 뚜렷하게 나타났다. 해양에서 유입된 강한 바람이 거친 지표면(육지)과의 마찰로 인해 급격히 감소하면서 수평 윈드시어를 유발하고, 이와 맞물려 불안정한 대기 연직 운동이 혼합되면서 심각한 기계적 난류를 파생시켰기 때문으로 사료된다.

결과적으로 이번 사례 분석은 북서풍 계열 강풍 유입 시 지표 마찰 효과와 맞물려 높은 난류 분포 및 급

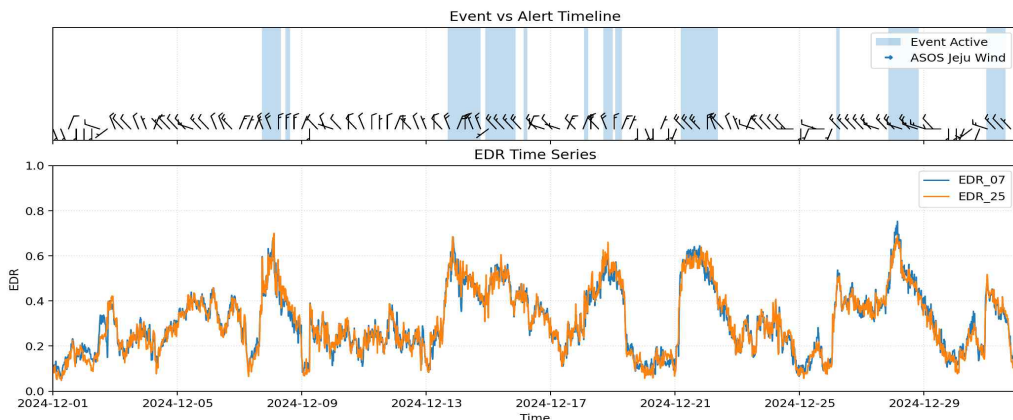


Fig. 9. Timeseries of wind shear alerts, wind vectors from Jeju ASOS (upper), and EDR from runways 07/25 (lower) for December 2024

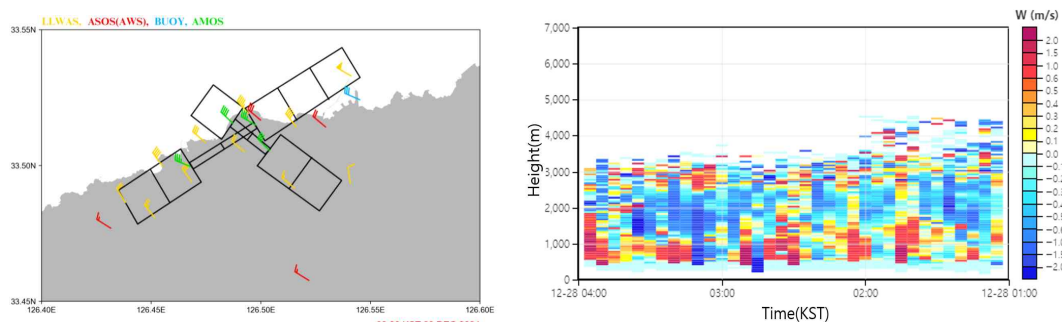


Fig. 10. Horizontal wind field from surface observations at Jeju International Airport. The map displays the LLWAS (yellow), ASOS (red), Buoy (blue), and AMOS (green) sites, (left) and vertical wind profile observed by the Jeju Wind Profiler (right) at 03:30 KST on 28 December 2024.

변풍이 동반된다는 앞선 통계적 경향성이 실제 대기 역학 메커니즘과 유사한 경향을 보인다. 특히 해양에서 불어오는 강한 북서풍이 제주도의 지형 및 지면 조도와 상호작용하여 급격히 변조되는 과정에서, 급변풍과 강한 난류가 동시에 발생함을 확인하였다. 이는 AMOS 기반 고해상도 EDR 산출 기법이 이러한 복합적 원인의 위험 기상을 실시간으로 감시하고 공항 운항 안전을 확보하는 데 유효한 지표임을 나타내는 결과이다.

IV. 결 론

본 연구에서는 공항기상관측자료를 기반으로 저고도 난류를 산출하고, 풍속·풍향 및 급변풍 발생 여부에 따른 난류 특성을 종합적으로 분석하여 공항 이·착륙 단계에서의 기상 위험 평가 가능성을 검토하였다. 이를 위해 공항 관측 자료와 주변 ASOS 풍향·풍속 자료를 활용하여 난류 강도(EDR)를 산출하고, 다양한 기상 조건에서의 난류 분포 특성을 체계적으로 분석하였다.

분석 결과, 풍속이 증가할수록 난류 강도가 전반적으로 상승하는 경향이 확인되었으며, 특히 제주공항으로 북서풍 계열의 바람이 유입될 때 상대적으로 높은 EDR 분포가 나타났다. 이는 해상에서 유입된 강한 바람이 육상으로 진입하며 겪는 표면 거칠기의 급격한 변화에 따른 마찰 효과에 의해 기계적 난류를 가중시키기 때문으로 분석된다.

급변풍 발생 여부를 연계하여 교차 분석한 결과, 모든 풍속 구간에서 급변풍이 동반되었을 때 난류 강도가 일관되게 높게 나타났다. 특히 풍속이 강할수록 급변풍 유무에 따른 EDR의 분포 차이가 더욱 뚜렷해지는 특징을 보였다. 이는 대기 경계층 내 난류 강도가

단순한 절대 풍속의 크기뿐만 아니라, 기류의 급격한 시공간적 변동이 유발하는 강한 전단 응력(shear stress)에 의해 폭발적으로 증폭됨을 의미한다.

북서풍 계열 강풍 조건에서 급변풍과 높은 난류 강도가 동시에 발생한 사례(2024년 12월 28일)를 분석한 결과, 통계적으로 도출된 경향성이 실제 개별 물리적 현상에서도 일관되게 발현됨을 사례를 통해 확인하였다. 해상에서 유입된 강한 기류가 지형 및 지표 마찰과 상호작용하며 급속히 감속하는 과정에서 수평 윈드시어와 연직 불안정이 파생되었으며, 이러한 공항 인근 저고도의 국지적 위험 현상을 지상 관측 자료인 AMOS만으로도 포착할 수 있는 가능성을 제시하였다.

본 연구에서는 2년 동안의 자료를 사용하여 계절적 특성을 완벽히 분석하기에 한계가 있었으며, 사례 또한 제한되어 공간적인 분포를 완벽히 분석하기에는 한계가 존재하였다. 이러한 한계를 보완하기 위해 추후 연구에서는 관측기관을 확장하고 Lidar, TDWR 등 다양한 원격탐사장비와 결합하여 사례별 3차원 분석을 진행하고 항공기 실측데이터와 비교검증을 수행하여 신뢰성을 개선하는 연구가 필요할 것으로 보인다.

결과적으로 본 연구는 LLWAS와 같은 고가의 전용 급변풍 탐지 장비가 구축되어 있지 않은 중소규모 공항에서도, 기본 인프라인 AMOS 자료 기반의 EDR 산출을 통해 기존 공항기상 감시체계를 보완할 수 있는 기초 자료 또는 보조적 위험감시지표로서의 활용 가능성을 제시한다는 점에서 의미를 가진다. 기존 관측망을 고도화하여 중소규모 공항의 위험 기상 탐지 공백을 효과적으로 메울 수 있다. 향후 공항기상관측자료 기반의 난류 산출 체계는 항공 운항 안전 확보 및 공항 기상 감시 서비스 고도화에 핵심적인 기여를 할 것으로 기대된다.

사 사

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

Reference

1. Gultepe, I., Sharman, R., Williams, P. D., Zhou, B., Ellrod, G., Minnis, P., and Neto, F. A., "A review of high impact weather for aviation meteorology", *Pure and Applied Geophysics*, 176(5), 2019, pp.1869-1921.
2. National Transportation Safety Board, "Preventing turbulence-related injuries in air carrier operations conducted under Title 14 CFR Part 121", 2021, Available from: <https://www.nts.gov/safety/safety-studies/Documents/SS2101.pdf>
3. ICAO, "Meeting of the meteorology panel (METP) working group MOG", International Civil Aviation Organization, 2017, pp.1-17, Available from: <https://www.icao.int>
4. Chan, P. W., and Lee, Y. F., "Application of short-range lidar in wind shear alerting", *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 29(2), 2012, pp.207-220.
5. Stull, R. B., "An Introduction to Boundary Layer Meteorology", Springer Science & Business Media, 1988, pp.590-594.
6. Taylor, G. I., "Statistical theory of turbulence", *Proceedings of the Royal Society of London A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 1935, pp.421-444.
7. Bodini, N., Lundquist, J. K., and Newsom, R. K., "Estimation of turbulence dissipation rate and its variability from sonic anemometer and wind Doppler lidar during the XPIA field campaign", *Atmospheric Measurement Techniques*, 11(7), 2018, pp.4291-4308.
8. Chu, Y., Lin, G., Deng, M., and Wang, Z., "Characteristics of eddy dissipation rates in atmosphere boundary layer using Doppler lidar", *Remote Sensing*, 17(9), 2025, Article 1652.
9. Baek, S., Kim, K., Kim, J. H., and Lee, G., "Evaluation of turbulent energy dissipation rate estimation from Doppler lidar: impact of techniques and scanning strategies", *Remote Sensing*, 17(5), 2025, Article 939.
10. Kolmogorov, A. N., "Energy dissipation in locally isotropic turbulence", *Dokl. Akad. Nauk. SSSR*, 32, 1941.
11. Kim, S. H., Kim, J., Kim, J. H., and Chun, H. Y., "Characteristics of the derived energy dissipation rate using the 1-Hz commercial aircraft Quick Access Recorder (QAR) data", *Atmospheric Measurement Techniques Discussions*, 2021, pp.1-36.
12. Borque, P., Luke, E., and Kollias, P., "On the unified estimation of turbulence eddy dissipation rate using Doppler cloud radars and lidars", *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 121(10), 2016, pp.5972-5989.
13. Bodini, N., Lundquist, J. K., Krishnamurthy, R., Pekour, M., Berg, L. K., and Choukulkar, A., "Spatial and temporal variability of turbulence dissipation rate in complex terrain", *Atmospheric Chemistry and Physics*, 19(7), 2019, pp.4367-4382.
14. Sharman, R. D., Cornman, L. B., Meymaris, G., Pearson, J., and Farrar, T., "Description and derived climatologies of automated in situ eddy-dissipation-rate reports of atmospheric turbulence", *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 53(6), 2014, pp. 1416-1432.
15. Muñoz-Esparza, D., and Sharman, R., "An improved algorithm for low-level turbulence forecasting", *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 57(6), 2018, pp. 1249-1263.
16. Maruhashi, J., Serrão, P., and Belo-Pereira,

- M., "Analysis of mountain wave effects on a hard landing incident in Pico Aerodrome using the AROME model and airborne observations", *Atmosphere*, 10(7), 2019, Article 350.
17. 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.
18. ICAO, "Manual on Low-Level Wind Shear", International Civil Aviation Organization, Montreal, Canada, 2005.