

Original Article

<https://doi.org/10.12985/ksaa.2024.32.3.114>
ISSN 1225-9705(print) ISSN 2466-1791(online)

고흥 K-UAM 그랜드 챌린지 실증지역에서의 난류 분석

김민성*, 최희욱**, 박성화**, 김근희*, 이상삼***, 이용희****

Analysis of Turbulence at the K-UAM Grand Challenge Site in Goheung

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

ABSTRACT

Recently, urban population congestion has caused significant traffic and air pollution problems in city centers. To address these issues, Urban Air Mobility (UAM) has been proposed, with commercialization targeted for 2025 in Korea. The Korea Meteorological Administration (KMA) has been conducting the K-UAM Grand Challenge in Goheung since 2022 to develop operational standards and relevant technologies. This study uses a ultrasonic anemometer at a height of 10 meters to analyze turbulence around the vertiport. Data was collected from November 2022 to November 2023. For turbulence analysis, the Eddy Dissipation Rate (EDR = $\epsilon^{1/3}$), defined by the International Civil Aviation Organization (ICAO), was used. EDR was calculated using Kolmogorov's theory and derived from the energy spectrum. EDR values were classified into None, Light, Moderate, and Severe, and analyzed by season, day, and wind direction. The results showed strong daytime turbulence in summer, especially with southerly winds in spring and summer, due to sea breeze fronts. This study provides essential data for planning safe UAM operations considering weather conditions.

Key Words : UAM(도심항공교통), Vertiport(버티포트), Turbulence(난류), EDR(난류 소산률), K-UAM Grand Challenge(K-UAM 그랜드챌린지)

1. 서 론

도심 인구 과밀화와 이에 따른 교통 혼잡과 대기오염 문제는 현대 사회가 직면한 주요 과제 중 하나이다. 이를 해결하기 위해 도심항공교통(urban air mobility,

UAM)이 새로운 대안으로 제시되고 있다. UAM은 전통 수직이착륙기(eVTOL, electric vertical take-off and landing)를 통해 도심 내에서 친환경적이고 효율적인 교통수단을 제공하여 교통 혼잡을 완화하고 이동 시간을 단축할 수 있는 잠재력을 가지고 있다. 우리나라 정부는 UAM 관련 미래시장 선점을 위해 2025년 상용화를 목표로 민관합동 한국형 도심항공교통(K-UAM) 로드맵을 수립하였다(UAM Team Koea, 2020). 또한 본격 상용화부터 시장이 확대되는 시점인 2030년 이후의 기술분야 특화 전략을 제시한 기술로드맵을 연이어 수립하였다(UAM Team Korea, 2021). 이러한 로드맵상의 실제적인 추진에 앞서 UAM 안전성 검증 및 국내

Received: 14. Aug. 2024, Revised: 19. Aug. 2024,

Accepted: 28. Aug. 2024

* 국립과학기상원 기상응용연구부 연구원

** 국립과학기상원 기상응용연구부 연구사

*** 국립과학기상원 기상응용연구부 연구관

**** 수치모델링센터 수치자료응용과 과장

연락처자 E-mail : alstjd0451@korea.kr

연락처자 주소 : 제주특별자치도 서귀포시 서호북로 33

국립기상과학원

실정에 맞는 안전-운영 기준 마련을 위한 민관 합동 실증사업인 K-UAM 그랜드챌린지(grand challenge) 사업이 2022년부터 진행 중이다. K-UAM 그랜드 챌린지의 실증계획은 2단계로 구성되어 있다(Fig. 1). 그랜드 챌린지 1단계는 국가종합비행성능시험장(전남 고흥)에서 사전시험을 통한 UAM 기체 및 통신체계 안정성 확인, 개할지 통합운용이 목표이며, 2단계는 공항과 준도심 및 도심을 연결하는 노선 등 최초 상용화가 예상되는 지역을 대상으로 통합운용을 목표로 실증사업이 진행되고 있다(UAM Team Korea, 2021).

UAM의 수직 이착륙방식은 좁은 공간에서 이착륙이 가능하여 좁은 도심지에서 운행에 유리하지만, 난류와 같은 기상환경에 취약하다는 단점이 있다. 또한, UAM은 기체의 크기 및 특성상 난류에 대한 영향이 기존 항공기보다 크게 작용하기 때문에 난류는 UAM 비행 성능에 심각한 영향을 미칠 수 있다. 특히, 수직이착륙 과정에서 난류는 사고의 주요 원인이 될 수 있다(McKercher et al., 2024). 따라서 복잡한 도시환경에서 수직이착륙시 운행되는 UAM의 안전한 운행을 위해서는 정확한 기상 관측과 난류 분석이 필수적이다(Archdeacon et al., 2020; Labbad et al. 2022).

Schweiger et al.(2023)은 바람과 돌풍이 버티포트에서 비행 흐름에 미치는 영향을 평가하였으며, Mohamed et al.(2023)은 PBL (planet boundary layer)에서의 Turbulence Intensity (Ti)와 돌풍이 무인항공기(UAV, uncrewed air vehicle)에 미치는 영향을 분석하였다. 그 밖에도 UAM에 미치는 난류를 정량화하고 분석하기 위하여 다양한 연구가 이루어지고 있다(Bauranov et al., 2021; Won and Kim, 2023).

대기 경계층에서의 난류는 난류 운동에너지, 난류 소산 등과 같이 다양한 방법으로 표현할 수 있으며, 항공 분야에서는 난류 운동에너지가 열로 변환되는 비율인 Eddy Dissipation Rate (EDR)가 일반적으로 이용

된다(Kang et al., 2023). EDR은 국제민간항공기구(ICAO)에서 지정한 표준 난류 지표이다(ICAO, 2010).

본 연구는 고흥 그랜드 챌린지 실증지역에서 관측한 기상 데이터를 이용하여 UAM 버티포트 주변에서 발생하는 EDR을 에너지 스펙트럼 방법을 이용하여 산출하였다. 산출된 EDR은 일별 및 풍향별 변화와 난류 강도에 대해 계절별로 분석하였으며, 고흥의 지형적 특성에 의해 발생하는 해풍전선의 유무를 파악하고, 전선면에서 발생할 수 있는 난류에 대해서 분석하였다. 연구 결과는 UAM의 안전한 운행을 위해 중요한 기초 자료를 제공하며, 특히 난류가 강하게 발생하는 시간대와 기상 조건을 파악함으로써 UAM 운행 계획 수립과 기상 예보 및 관리에 기여할 수 있을 것이다.

II. 자료 및 방법

2.1 관측장비 및 장소

본 연구에서는 EDR 계산을 위해 그랜드 챌린지 1단계 고흥 국가종합비행장에서 관측 중인 3차원 초음파 풍속계 데이터를 이용하였다. 국립기상과학원은 UAM 실증지역의 기상환경 조사와 위험 기상 파악 및 예측을 위해 2022년 11월부터 라디오존데, 윈드라이다, 운고계, 난류 측정 장비 등을 이용한 저층 집중관측 및 상시 관측을 수행하고 있다.

본 연구에서 2022년 12월 1일부터 2023년 11월 30일까지 일 년 치 자료를 분석에 이용하였으며, 6월 23일부터 7월 6일까지와 10월 24일부터 11월 24일까지의 데이터는 결측되었다. 결측된 자료를 제외한 데이터는 봄(3, 4, 5월), 여름(6, 7, 8월), 가을(9, 10, 11월), 겨울(12, 1, 2월) 계절별로 구분하여 분석하였다.

연구에 이용되는 3차원 초음파풍속계(CSAT3A, 높이: 10m)는 20Hz 샘플링 속도로 동서방향(u), 남북방향(v), 연직방향(w)의 풍속과 온도(T)를 관측한다.



Fig. 1. K-UAM grand challenge regional integrated operations plan

고흥 그랜드 챌린지 실증지역은 남쪽으로 복잡한 해안선이 있으며, 관측지점을 기준으로 동쪽방향 약 150m 지점에는 비행선 시험동(높이: 33.5m)과 소형기 시험동(높이: 15.5m)이 있다(Fig. 2).

2.2 EDR 산출

바람, 태양 복사, 지형 효과 등으로 생성된 큰 소용돌이는 작은 소용돌이로 에너지 소산되며 최종적으로 열로 소멸하게 된다. 이때 큰 소용돌이에서 작은 소용돌이로 관성에 의해 에너지의 전달되는 영역을 관성아영역(inertial subrange)이라고 한다. 관성아영역에서 에너지가 소산되는 기울기는 $-5/3$ 의 일정한 기울기를 가진다(Kolmogorov, 1941).

등방성 난류의 경우 관성 아영역에서 에너지 스펙트럼은 다음과 같이 표현할 수 있다.

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

여기서 $S(k)$ 는 에너지 스펙트럼 밀도(m^2s^{-1}), α_i 는 풍향별 Kolmogorov 상수($u: 0.53, v: 0.707, w: 0.707$)(Bodini et al., 2018), ε 는 난류소산률(m^2s^{-3}) 그리고 k 는 파수(m^{-1})이다. 이때, 테일러 동결난류가설에 의해 주파수(f)는 다음과 같이 표현할 수 있다(Taylor, 1935).

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

U 는 각 방향의 평균 유선방향 풍속(ms^{-1})을 의미한다. Eq. 2를 Eq. 1에 적용하면 EDR은 다음과 같이 주파수를 이용하여 계산할 수 있다.

$$EDR = \varepsilon^{1/3} = \left(\frac{2\pi}{U} \right)^{1/3} \left[\frac{S(f)f^{6/3}}{\alpha_i} \right]^{1/2} \quad (3)$$

주파수 영역에서 에너지 스펙트럼 밀도를 계산하기 위해서 Welch(1967)의 방법을 이용하였다. 이때 시간 윈도우는 120s로 하였으며, 30s 간격으로 EDR을 산출하였다(Kim et al., 2021).

2.3 관성아영역 결정

Fig. 3은 초음파 풍속계에서 20Hz로 관측된 각 바람 성분의 에너지 스펙트럼 밀도와 바람성분별 EDR 산출의 예시이다. 20Hz의 관측자료는 FFT (fast fourier transform)를 이용해 나이퀴스트 주파수인 10Hz까지 에너지 스펙트럼 밀도를 구할 수 있다.

Fig. 3에서 나이퀴스트 주파수 주변에서 편차가 커지고 기울기가 감소하는 경향이 나타났으며, 이는 나이퀴스트 주파수 주변에서 발생하는 노이즈와 알리아싱으로 발생하는 오차로 추정된다. 이를 해결하기 위해 EDR 계산에서 관성아영역의 주파수 구간을 전체 구간인 0.5~10.0Hz에서 0.5~5.0Hz로 조정하였다. 관성아영역 구간의 조정 전과 후의 바람 성분별 에너지 스펙트럼 밀도의 기울기의 평균은 Table 1과 같다.

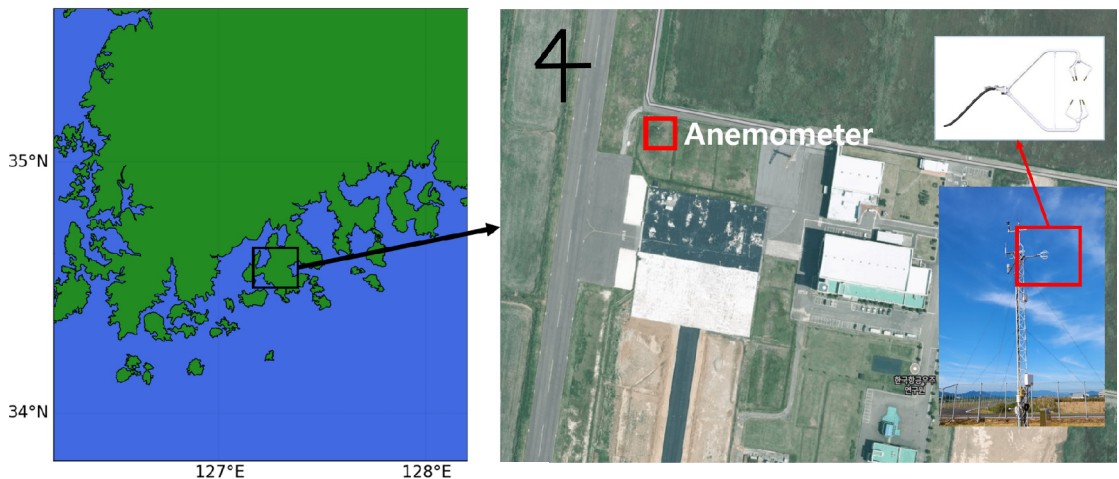


Fig. 2. Location of ultrasonic anemometers(CSAT3A) and surrounding structures in the Goheung grand challenge

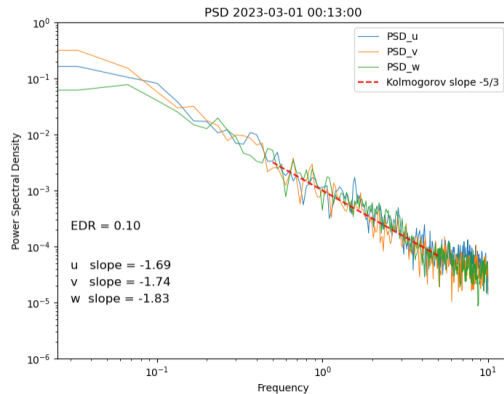


Fig. 3. Power spectral density by wind components u (blue), v (yellow), and w (green)

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

	0.5~10.0 Hz	0.5~5.0 Hz
u	-1.38	-1.55
v	-1.38	-1.56
w	-1.54	-1.61

Kolmogorov 난류 가설에 따른 이론적 기울기인 $-5/3$ 기준으로 전체 구간에 대한 기울기 평균의 백분율 오차는 u, v, w 각각 17%, 17%, 8%이며, 관성아영역의 주파수 구간을 조정된 후의 기울기 평균의 백분율 오차는 7%, 6%, 3%로 모든 바람 성분에 대해서 기울기 오차가 감소하였다.

관성 아영역을 조정된 후 EDR을 u, v, w 각 바람 성분에 대해 계산하였으며, 이를 로그평균하여 최종적으로 EDR을 산출하였다(Eq. 4).

$$\overline{EDR} = 10^{(\log_{10} EDR_u + \log_{10} EDR_v + \log_{10} EDR_w)/3} \quad (4)$$

III. 결 과

3.1 EDR 산출 결과

항공기에서 체감되는 난류는 항공기 종류, 무게, 구성, 항속 등에 따라 달라진다. Table 2은 ICAO에서 제시한 Light-size (7,000kg less) 항공기에서의 난류 체감 강도의 기준이다(ICA0. 2017). 일반적으로 UAM은 소형 항공기보다도 작은 크기에 해당되며, EDR의 체감 기준이 정해져 있지 않은 실정으로 본 연구에서는 ICAO에서 제시한 소형 항공기의 기준에 따라 난류 강도를 구분하였다. 향후 연구에서 UAM 항공기에 따른 체감 난류 강도의 기준이 필요할 것으로 보인다.

0.5~5Hz의 관성아영역을 설정한 후 계산된 EDR의 시계열 그래프를 이용해 연간 EDR의 변화를 살펴 보았다. Fig. 4는 EDR의 연간 시계열 그래프를 나타낸 것으로 가로 파선은 소형항공기(Light size) 기준에서의 Severe, Moderate, Light의 임계값을 나타낸다(Table 2). 시계열 자료에서 EDR은 Light와 Moderate 구간에 가장 많이 분포해 있었으며, 모든 계절에서 Severe 임계값을 넘어서는 강한 난류가 나타나는 것을 볼 수 있다. 특히 7월과 8월에 Severe 이상의 높은 강도가 나타나는 빈도가 높게 나타나 여름철이 난

Table 2. EDR intensity thresholds for light-sized aircraft specified by ICAO

	Severe	Moderate	Light
EDR($m^{2/3}s^{-1}$)	0.36	0.16	0.04

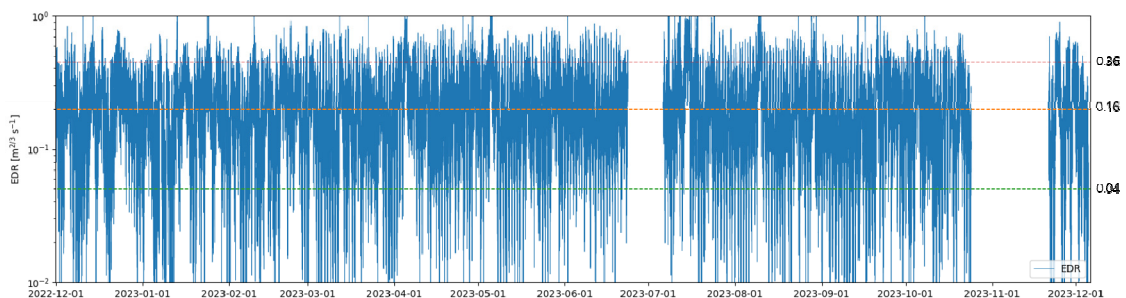


Fig. 4. EDR time series data from December 2022 to November 2023, with dashed lines indicating the thresholds for severe (red), moderate (green), and light (orange)

류의 강도가 다른 계절에 비해 높게 나타날 것으로 사료된다. UAM의 기체의 크기를 고려하였을 때 기체에 더 큰 난류를 체감할 수 있어 난류 강도에 대한 상세한 분석이 필요하다. 이를 위해 본 연구에서는 계절별, 일별 변화 그리고 해풍 사례에 대해 분석하였다.

3.2 풍향 및 EDR 일변화 분석

그랜드 챌린지 실증지점에서 난류의 일변화를 분석하기 위해 풍향과 난류의 일 변화를 계절별로 구분하였다. Fig. 5는 각 시간에 해당되는 풍향의 빈도를 나타낸 것이다. 풍향은 봄과 여름에는 약 12시를 기준으로 해

풍 방향인 남풍계열의 빈도가 높아졌다. 봄에는 16시에 남풍의 빈도는 0.42로 가장 높게 나타났다. 여름에는 17시에 0.56으로 남풍의 빈도가 가장 높았고 14시부터 18시까지 남풍의 빈도가 0.5보다 높게 유지되었다. 가을에는 이러한 남풍계열 바람의 빈도가 낮아지고 북풍계열의 바람에 오전에 우세하였으며, 주간으로 갈수록 바람의 빈도는 비교적 균등하게 나타났다. 겨울의 바람 빈도는 밤, 낮 모두 북풍계열이 우세하였으며 12시에 북풍의 빈도는 0.51로 가장 높게 나타났다.

Fig. 6은 각 시간에 해당되는 EDR의 상자 그래프이며, 해당시간 EDR의 중앙값, IQR (Inter Quartile

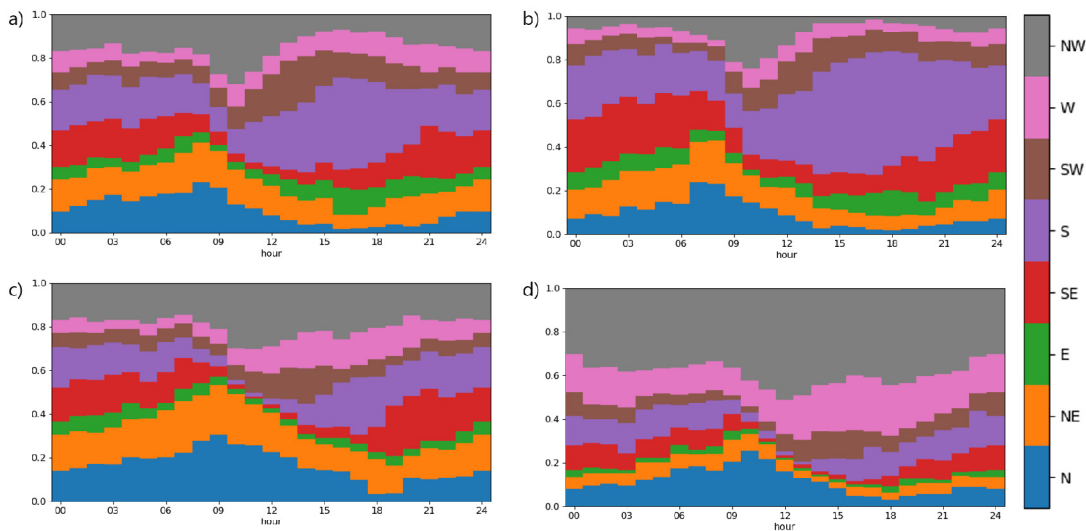


Fig. 5. Seasonal diurnal variation of wind direction rate: (a) spring, (b) summer, (c) fall, (d) winter

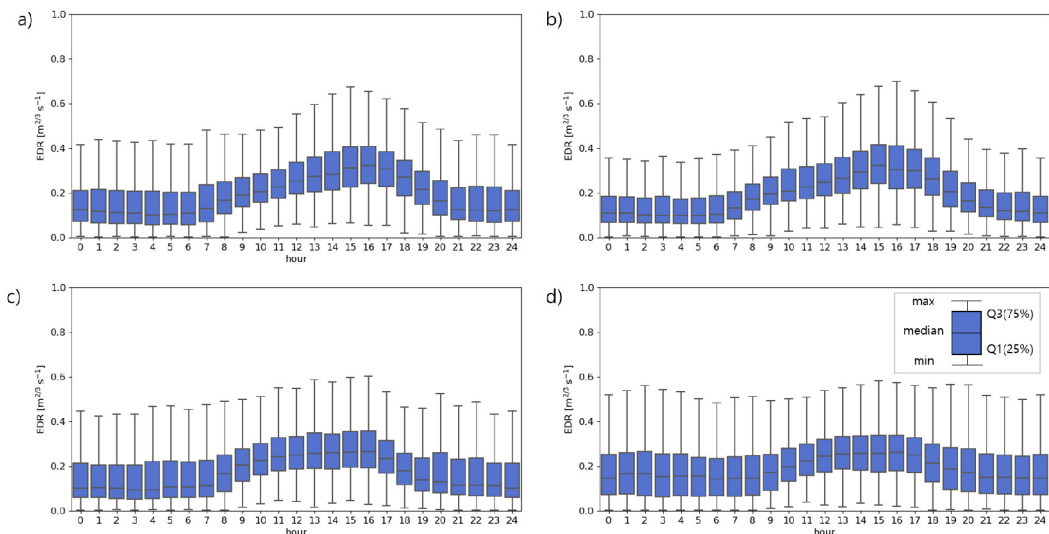


Fig. 6. Seasonal EDR diurnal variation box plot: (a) spring, (b) summer, (c) fall, (d) winter

Range), 최댓값, 최솟값을 계절별로 표현한 것이다. Fig. 6에서 EDR은 모든 계절에서 일주기가 나타났다. 특히, 풍향의 빈도와 마찬가지로 봄과 여름, 가을과 겨울이 서로 유사하게 분포하였으며, 봄과 여름은 EDR의 최대와 최소의 편차가 크게 나타나고, 가을과 겨울은 여름에 비해 최대 최솟값의 편차가 적어 일 변화가 적은 것으로 나타난다. 이는 해풍(sea breeze)이 들어 오면서 발생하는 난류의 발생과 더불어 강한 태양복사의 영향으로 강한 열플럭스가 발생하여 EDR이 주간에 높게 나타나 일 변화가 크게 나타난 것으로 보인다.

EDR의 최댓값은 봄, 가을, 겨울은 16시, 여름에는 15시에 나타났다. 이는 주간에 발생하는 지표 가열로 인해 생성되는 난류이며, 여름에는 일주기가 빠르게 나타나 더 이른 시간에 최댓값이 나타난 것으로 보인다. 이를 바탕으로 UAM이 주로 운행하는 주간에 가열로 인한 난류가 높게 나타났으며, 특히 난류가 높은 시간대인 15시와 16시에 운행에 있어 기상환경의 각별한 주의가 필요할 것으로 보인다.

3.3 풍향별 난류강도

EDR의 풍향에 따른 영향을 보기 위해 계절별 풍향 변화에 따른 변화를 분석하였다. Fig. 7은 풍향에 따른 난류강도와 풍향별 난류강도의 비중을 계절별로 나타낸 것이다. EDR의 강도는 Severe(빨간색), Moderate(초록색), Light(주황색), None(파란색)으로 구분하였으며, 구분기준은 Table 2와 같이 구분하였다.

풍향은 여름과 겨울에는 뚜렷한 계절풍이 나타났다. 봄과 여름에는 남풍계열의 계절풍이 강하게 나타났으며, 가을과 겨울에는 북동풍계열의 바람이 우세하였다. 특히, 봄과 여름의 남풍에서는 심각한 수준(severe)의 난류 빈도가 높게 나타났다. 이는 맑은 날 남풍계열의 해풍의 영향을 받아 발생한 것으로 분석된다. 해풍은 바다에서 육지로 불어오는 바람으로, 주간에 발생하여 대기의 불안정성을 증가시켜 난류를 발생시킨다.

모든 계절에서 서풍의 빈도가 낮았으며 다른 방향에 비해 Moderate 이상 난류강도의 빈도가 높게 나타났다. 이는 초음파 풍속계 센서의 서쪽에 위치한 관측 타워의 영향을 받아 발생한 현상일 가능성이 있다(Fig. 2). 관측 타워는 구조물로 인해 주변 공기의 흐름을 변화시키고, 이로 인해 강한 난류가 발생한 것으로 사료된다.

현재 관측 장소에서는 건물의 영향으로 인한 강한 난류 빈도가 높게 나타나지 않았지만, 모든 계절에서

동풍의 빈도가 낮은 것으로 보아 배경 바람이 건물의 영향을 받는 것으로 사료된다. 이는 관측 장소의 위치와 주변 환경이 난류 발생에 영향을 미칠 수 있음을 시사한다.

3.4 사례분석: 해풍 사례

앞선 연구 결과에 따르면 봄과 여름에 해풍 방향인 남풍계열의 바람에서 난류가 높게 나타나는 것이 확인되었다. 이는 해풍전선이 발생하고 이동하는 과정에서 난류가 증가하기 때문에 해풍을 구분하고 해풍 발생 유무에 따른 난류 변화를 분석하였다.

해풍이 난류에 미치는 영향을 파악하기 위해 해풍이 발생한 날과 발생하지 않은 날을 기상청의 1시간 관측 단위의 고흥 ASOS(Automated Surface Observing System)자료와 거문도 부이(Buoy) 자료를 활용하여 구분하였다. 해풍 선정 과정은 다음과 같다.

첫째, 주간(06:00 ~ 18:00)에 해풍 계열(100°에서 220° 사이)의 바람이 3시간 이상 지속되는지를 확인하였다. 해풍은 주로 해양에서 육지로 부는 바람으로, 이러한 바람이 일정 시간 동안 지속될 경우 해풍이 형성된 것으로 간주하였다. 해풍은 일반적으로 태양 복사열에 의해 육지가 해양보다 빠르게 가열될 때 발생하며, 이에 따라 해양에서 시원한 공기가 육지로 유입되는 현상이다.

둘째, 해풍이 발생하기 2시간 전에 육풍 방향(270° 이상, 30° 미만)의 바람이 불어오는지를 확인하였다. 이는 해풍이 발생하기 전 육지에서 해양으로 부는 바람이 수렴하면서 해풍전선을 형성하는지를 판단하기 위한 것이다. 육풍은 밤 동안 육지가 냉각되면서 해양보다 온도가 낮아져 발생하는 바람으로, 육지방향에서 부는 바람이 해풍과 수렴하게 되면 해풍전선이 형성된다.

셋째, 해풍과 육풍이 수렴하는 시간대에는 차등 가열에 의해 육지의 기온이 해양보다 높게 나타나는지를 확인하였다. 이를 위해 육지에 설치된 ASOS의 기온이 해양의 부이 기온보다 높은지를 비교하였다. 이러한 기온 차이는 해풍 형성의 중요한 지표가 되며, 해풍 발생 여부를 최종적으로 판별하는 기준으로 사용되었다.

해풍은 난류 데이터가 결측된 날을 제외한 총 322일 중 27일 발생하였으며, 여름철인 6월에서 8월 사이에 18번 발생하여 여름에 가장 빈번하게 나타났다. 이는 태양복사가 강하고 맑은 여름에 해풍이 더 자주 발생하는 기상 조건을 반영한다.

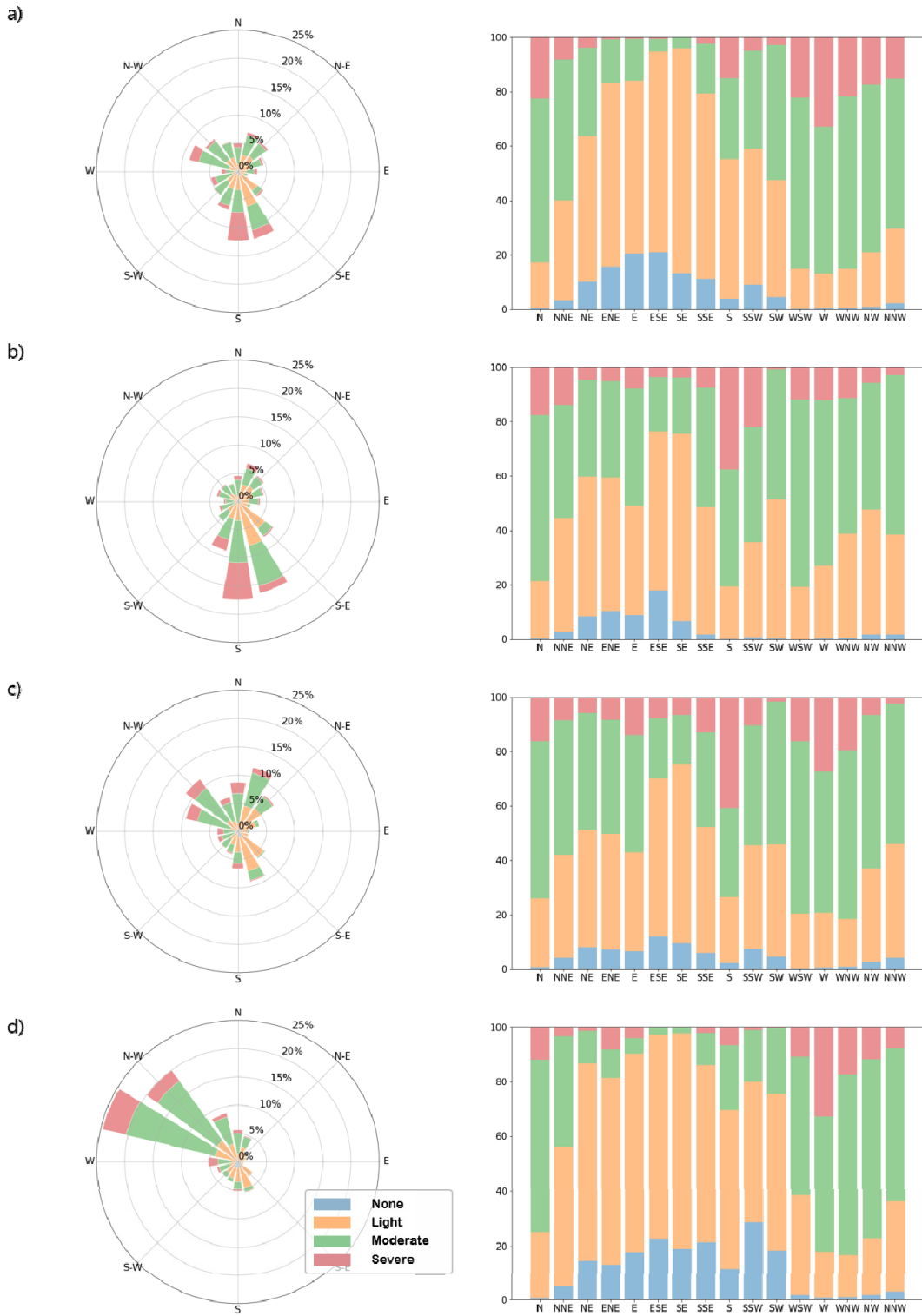


Fig. 7. Seasonal EDR ROSE(left) and wind direction EDR intensity distribution(right) (severe: red; moderate: green; light: orange; none: blue): (a) spring, (b) summer, (c) fall, (d) winter

Fig. 8은 전체 관측 데이터에서 해풍이 발생하지 않은 날과 해풍이 발생한 날의 EDR 일변화를 비교하여 나타낸 것이다. 해풍이 발생하지 않은 날의 EDR은 16시에 $0.300 \text{ m}^{2/3}\text{s}^{-1}$ 로 가장 높았으며, 03시에 $0.157 \text{ m}^{2/3}\text{s}^{-1}$ 로 가장 낮았다. 이러한 데이터를 바탕으로 한 전체 평균 EDR은 $0.208 \text{ m}^{2/3}\text{s}^{-1}$ 로 나타났다.

반면, 해풍이 발생한 날의 EDR 일 변화에서는 15시에 $0.369 \text{ m}^{2/3}\text{s}^{-1}$ 로 가장 높았고, 04시경에 $0.078 \text{ m}^{2/3}\text{s}^{-1}$ 로 가장 낮았다. 해풍 발생일의 전체 평균 EDR은 $0.182 \text{ m}^{2/3}\text{s}^{-1}$ 로 나타났다. EDR의 일변화는 해풍 발생 여부와 관계없이 주간에 높고 야간에 낮은 뚜렷한 일주기 패턴을 보였다. 특히, 해풍이 발생한 날에는 야간에 안정된 대기가 유지되었고, 주간에는 강한 난류가 발생하여 일주기 패턴이 더욱 뚜렷하게 나타났다.

해풍전선이 가장 활발하게 생성될 수 있는 시간대인 14시에서 16시 사이에 EDR이 높게 나타난 것으로 보아, 해풍전선의 발생이 난류에 영향을 미친다는 것을 보여준다.

IV. 결 론

본 연구는 K-UAM 그랜드 챌린지 실증지점에서 UAM의 안전운항에 영향을 주는 난류를 분석하였다. 난류 자료는 고흥 그랜드챌린지 실증지점에서 2022년 12월부터 2023년 11월까지 초음파 풍향풍속계 자료를 이용하여 산출하고 분석하였다. 난류 분석에는 국제 민간항공기구(ICAO)에서 지정한 객관서풍 계열의 바람 빈도는 낮지만, 모든 계절에서 난류가 강하게 나타났다. 이는 관측 타워의 영향을 받은 것으로 보인다. 다목적 난류 지표인 EDR을 사용하였다. EDR은 스펙트럼 에너지 밀도를 이용하여 산출되었다.

산출된 EDR은 계절별, 일별, 풍향별로 분석하였으

며, 기상청의 ASOS 자료와 부이 자료를 이용하여 해풍 사례에서 난류의 특성을 파악하였다.

계절별 EDR의 일변화 분석 결과, 모든 계절에서 뚜렷한 일주기 패턴이 나타났으며, 특히 여름철에 강한 난류가 발생하는 것을 확인할 수 있었다. 이는 여름철 강한 태양 복사로 인해 지표 가열이 발생하고, 그로 인해 지표 플럭스에 의한 난류가 증가한 것으로 보인다.

서풍 계열의 바람 빈도는 낮지만, 모든 계절에서 난류가 강하게 나타났으며, 이는 관측 타워의 영향을 받은 것으로 보인다. 또한, 건물의 영향을 받아 동풍 계열의 바람 빈도가 낮게 나타났다. 여름철에는 남풍 계열의 바람에서 난류가 강하게 나타났으며, 이는 여름철에 발생하는 강한 태양복사와 더불어 다른 계절에 비해 자주 발생하는 해풍의 영향을 받은 것으로 보인다. 해풍이 발생한 날과 발생하지 않은 날을 구분하여 분석한 결과, 해풍전선이 발생하는 시간대에 특히 강한 난류가 발생함을 확인했다.

상세한 난류 정보를 파악하기 위해서는 실제 버티포트 주변의 건물 정보와 지형적 특성을 면밀히 조사할 필요가 있다. 현재 관측 사이트도 건물과 더 가까운 곳에서 관측을 수행함으로써 건물의 영향을 확인하는 것이 필요할 것이다. 이러한 조사를 통해 난류 발생 메커니즘을 더 정확히 이해하고, 예측 모델의 정확성을 높일 수 있을 것이다.

본 연구의 결과는 K-UAM 그랜드 챌린지 1단계가 진행 중인 고흥 국가종합비행성능시험장에서의 난류를 최초로 분석함으로써 UAM의 이착륙과 운항 시 기상 환경의 영향을 고려하는 데 중요한 기초 자료를 제공하였다. 특히, 난류가 강하게 발생하는 시간대와 기상 조건을 사전에 파악함으로써 UAM의 안전한 운항 시간과 기상 조건을 결정하는 데 기여할 수 있을 것으로 기대된다. 이와 같은 난류 분석 결과는 고흥 지역에 국

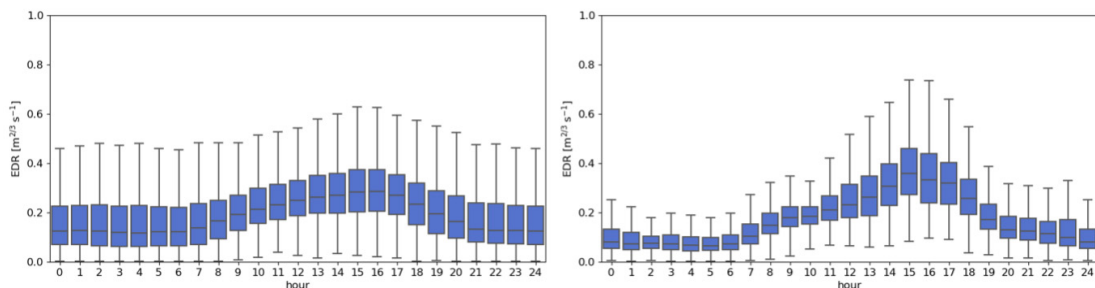


Fig. 8. Diurnal variation box plot of EDR without sea breeze (left) and with sea breeze (right)

한되지 않으며, 그랜드 챌린지 2단계 시범 노선인 서울-한강-김포공항 같은 복잡한 도심지 환경에서도 난류의 주기와 특성이 나타날 가능성을 시사한다. 특히, 도심지에서는 건물과 지형적 특성이 난류 발생에 큰 영향을 미칠 수 있으며, 이는 UAM 운항 경로의 최적화 및 안전성 확보에 중요한 고려사항이 될 것이다. 따라서, 본 연구의 결과는 시범 노선에서의 난류 위험을 사전에 평가하고, UAM 운영 전략 수립에 있어 기초 자료로 활용될 수 있을 것으로 기대된다.

사 사

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

References

1. UAM Team Korea, "K-UAM roadmap", Ministry of Land, Infrastructure, and Transport, 2020.
2. UAM Team Korea, "K-UAM technology roadmap", Ministry of Land, Infrastructure, and Transport, 2021.
3. UAM Team Korea, "Operational plan for the Korean urban air mobility (K-UAM) grand challenge", Ministry of Land, Infrastructure, and Transport (<http://www.molit.go.kr>), 2021.
4. McKercher, Richard G., et al., "Modelling and control of an urban air mobility vehicle subject to empirically-developed urban airflow disturbances", *Aerospace*, 11(3), 2024, pp.220.
5. Archdeacon, J. L., and Iwai, N., "Aerospace cognitive engineering laboratory (ACELAB) simulator for urban air mobility (UAM) research and development", In *AIAA Aviation 2020 Forum*, 2020, pp.3187.
6. Al Labbad, M., Wall, A., Larose, G. L., Khouli, F., and Barber, H., "Experimental investigations into the effect of urban airflow characteristics on urban air mobility applications", *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 2022, pp.229.
7. Schweiger, K., Schmitz, R., and Knabe, F., "Impact of wind on eVTOL operations and implications for vertiport airside traffic flows: A case study of hamburg and munich", *Drones*, 7(7), 2023, pp.464.
8. Mohamed, A., Marino, M., Watkins, S., Jaworski, J., and Jones, A., "Gusts encountered by flying vehicles in proximity to buildings", *Drones*, 7(1), 2023, pp.22.
9. Bauranov, A., and Rakas, J., "Designing air-space for urban air mobility: A review of concepts and approaches", *Progress in Aerospace Sciences*, 125, 2021, pp.100726.
10. Won, W. S., Kim, Y. M., "Weather barriers of urban air mobility (UAM) operations: A case study of the visibility and wind shear around Han-river corridor", *Atmosphere. Korean Meteorological Society*, 33(4), 2023, pp.413-422.
11. Kang, Y. J., Choi, H. W., Choi, Y. N., Lee, S. S., Hwang, H. W., Lee, H. J., and Lee, Y. H., "Performance evaluation and improvement of operational aviation turbulence prediction model for middle- and upper- levels", *Journal of the Korean Society for Aviation and Aeronautics*, 31(3), 2023, pp.30-41.
12. ICAO, "Meteorological service for international air navigation, 17th edition", ICAO: Montreal, CA, Canada, 2010, pp.206.
13. Kolmogorov, A. N., "Energy dissipation in locally isotropic turbulence", *Dokl. Akad. Nauk. SSSR*, 32, 1941.
14. 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.
15. Taylor, G. I., "Statistical theory of turbulence, in: *Proceedings of the Royal Society of London A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 1935, pp.421-444.

16. Welch, P., "The use of fast Fourier transform for the estimation of power spectra: A method based on time averaging over short, modified periodograms", IEEE Trans. Audio Electroacoust, 15, 1967, pp.70-73.
17. 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.
18. ICAO, "Meeting of the meteorology panel (METP) working group MOG", International Civil Aviation Organization(<https://www.icao.int>), 2017, pp.1-17.