



J. Korean Soc. Aeronaut. Space Sci. 50(12), 899-907(2022)

DOI: <https://doi.org/10.5139/JKSAS.2022.50.12.899>

ISSN 1225-1348(print), 2287-6871(online)

드론의 안전 비행을 위한 윈드라이더 저고도 바람 분석 방법 제시

김제원¹, 류정희², 나성준³, 성성철⁴

Analysis of Low Altitude Wind Profile Data from Wind Lidar for Drone Aviation Safety

Je-Won Kim¹, Jung-Hee Ryu², Seong-Jun Na³ and Seong-Cheol Seong⁴The EAST, Gyeonggi-do, Republic of Korea^{1,3,4}Gangneung-Wonju National University, Gangwon, Republic of Korea²

ABSTRACT

According to the Unmanned aircraft system Traffic Management (UTM), drones are permitted to fly up to 150m above ground, which is located in the atmospheric boundary layer where there is considerable wind fluctuation due to turbulence. Although it is difficult to predict when turbulence will occur drone aviation safety could be enhanced by having a better understanding of the characteristics of vertical profile of wind in the flight area. We used wind lidar (WIndMast 350M) to observe vertical profiles of wind at the test site for aviation meteorological observation equipment located near Incheon International Airport in July and September, 2022. In this study, we utilized the observed wind profile data to propose a technique for obtaining information that could help improve the drone aviation safety. The Fourier transform analysis is used to evaluate the temporal characteristics of the horizontal wind speed at various vertical levels up to 350m. We also examined the relative contribution of the variance of wind having scales of less than an hour, a crucial scale for drone flight, to the variance of wind having all scales at each vertical altitude for days with and without precipitation.

초 록

초경량 비행장치인 드론의 최대 허용 비행 고도는 지상 150m로 이는 난류의 영향을 받아 바람의 변동성이 강한 대기경계층 내에 존재한다. 또한 대기경계층 내에서의 바람 변동성은 지리적 위치에 따라 다른 특성을 가지므로 드론 관련 안전사고 방지를 위해서는 비행 지역에서의 각 고도의 바람 특성에 대한 명확한 이해가 필요하다. 본 연구에서는 인천국제공항 인근에 위치한 항공기상관측장비 테스트베드에서 윈드라이더(WindMast 350M)를 사용하여 2022년 7월과 9월에 바람의 연직 구조 관측을 수행하였고, 이러한 관측된 바람 자료를 활용하여 드론의 안전비행을 위한 정보를 생산하는 분석 방안을 제시하였다. 우선 윈드라이더를 통해 수집된 바람 자료에 푸리에 변환 분석 방법을 사용하여 수평 풍속의 시간 규모 특징을 각 고도별로 살펴보았다. 또한 강수와 무강수 사례의 바람장의 스펙트럼으로부터 드론 비행에 중요한 바람의 시간 규모인 1시간 이하 규모의 수평 풍속의 분산을 분리하여 전체 규모에 대한 1시간 이하 규모의 기여도를 각 고도별로 확인하였다.

Key Words : Drone(드론), Fourier Transform(푸리에 변환), Unmanned Aerial System Traffic Management(무인기교통관리), Urban Air Mobility(도심항공교통), Wind Lidar(윈드라이더)

† Received : October 5, 2022 Revised : November 22, 2022 Accepted : November 23, 2022

¹ Researcher, ² Research professor, ³ Chief Executive Officer, ⁴ Research director

² Corresponding author, E-mail : jhryu@gwnu.ac.kr, ORCID 0000-0003-2441-151X

© 2022 The Korean Society for Aeronautical and Space Sciences

1. 서론

드론 및 무인기교통관리(Unmanned aerial system Traffic Management, UTM)는 법적으로 150m 이내에서 비행하도록 제한되어 있다. 이 고도는 대기경계층에 포함되어 있는데, 여기서 대기경계층은 지표면으로부터 직접적인 영향을 받는 층으로, 통상적으로 지표면으로부터 약 1km이다[1]. 만일 실제 대기의 바람이 일관성 있는 흐름이라면, 우린 쉽게 바람을 예측할 수 있을 것이다. 그러나 실제 대기경계층 내에 바람은 불규칙한 대기의 흐름이 일반적이며, 이것을 흔히 난류라 부른다. 난류는 항공기의 기체 불안정뿐만 아니라 사고까지 발생시킬 수 있다. 특히 작은 비행체일수록 난류에 더 취약하다. 따라서 드론 및 UTM의 안전사고를 방지하기 위해서는 반드시 대기경계층 내 고도별 바람 특성을 이해하는 것이 중요하다.

최근에 O'Connel[2]은 강한 바람이 부는 환경에서도 스스로 적응하며 비행하는 인공지능(Artificial Intelligence, AI) 드론을 개발하였다. 이는 강한 바람이 부는 실험실 환경에서 설정된 경로대로 스스로 학습하며 비행하도록 설계된 것이다. 앞서 언급했듯이 실제 대기는 안정한 바람의 흐름보다 불규칙한 바람의 흐름인 난류가 일반적이다. 따라서 AI를 접목하여 안전사고가 없는 발전된 드론을 개발하기 위해서는 비행 지역 내 바람 특성을 이해하는 것은 매우 중요하다. 본 연구에서는 윈드라이다로부터 관측된 저고도의 바람장을 활용하여 드론의 안전사고 예방에 도움을 줄 수 있는 기상정보 분석 방법을 제시하고자 한다.

관측된 대다수의 기상 시계열 자료에는 다중규모 시그널이 포함되어 있다. 이처럼 시계열 내 존재하는 각기

다른 시간 규모에서의 기상 변수들의 특징을 분석하기 위해 흔히 푸리에 변환(Fourier Transform)을 사용한다. 푸리에 변환은 삼각함수를 기저 함수(basis function)로 하여 다양한 시간 규모(주파수)에서의 변동(즉, 분산)을 주파수의 함수로 표현하는 것으로, 각 시간 규모의 상대적인 변동의 크기를 비교할 수 있게 된다.

푸리에 변환을 활용한 선행 연구에서 Kim and Kang[3]은 강원도 지역 내 기상 관측소에서 관측한 10m 수평 풍속자료를 푸리에 변환을 통해 지역적 시간 규모 특징을 확인하였고, Kang and Won[4]은 BAO 기상 타워에 10m와 100m 고도의 수평 풍속자료를 스펙트럼 분석을 통해 시간 규모 및 난류를 분석하였다. 그뿐 아니라 Kim and Kang[5]은 푸리에 변환과 유사한 기능을 하는 다중규모(Multi-resolution) 분석법을 사용하여 강원 해안가 인근에 있는 기상 관측소에 10m 바람 시계열 자료에서 해륙풍의 특성을 확인하였고, 1일 이하 시간 규모를 분리하여 해안 지역에 해륙풍의 기여도를 분석하였다.

또한 드론과 관련하여 Lee[6]는 돌풍에 의한 드론 안전도 평가 방법을 제시하는 연구를 수치 모델을 사용하여 수행하였고, Chong[7]은 해륙풍의 특성을 파악하고자 드론에 기상 센서를 부착하여 보성 표준기상관측소 주변에 고도별 기온, 습도, 바람 등을 관측하였다. 그러나 고도별 관측자료를 사용하여 드론 안전사고를 위한 기상을 분석한 연구는 없었다.

본 연구에서는 드론 비행 시 안전사고로 어어질 수 있는 수 초에서 수 분의 시간 규모를 가지는 난류를 포함하고 드론의 비행시간을 고려하여 1시간 이하 시간 규모를 갖는 저고도에서의 바람장의 특징을 분석하고자 한다. 이를 위해 인천국제공항 인근에 있는 항공기상관측

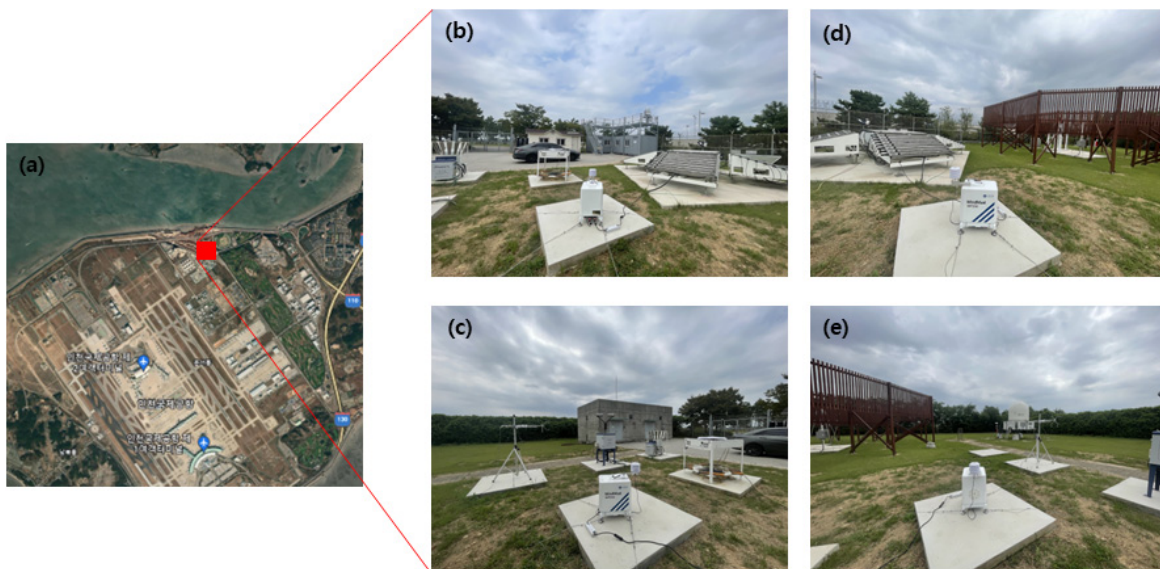


Fig. 1. Information of wind lidar observation site at the testbed for aviation meteorological observation equipment. (a) Location of the tested near the Incheon International Airport and (b)-(e) the observation environment in the north, west, east, south, respectively.

장비 테스트베드에 윈드라이다(모델명: WindMast 350M) 장비를 설치하여 2022년 7월부터 9월까지 관측을 수행하였다. 특히 지상에서부터 150m에 이르는 저고도에서의 바람장의 관측자료를 활용하여 드론의 안전사고 예방에 도움을 줄 수 있는 기상정보 생산 방법을 제시하고 있다는 점에서 다른 연구와 차별성이 있으며, 본 연구에서 제시한 방법들은 다양한 지역에서 관측된 자료들에도 확대 적용할 수 있을 것으로 기대된다.

II. 본 론

2.1 관측 지점 및 장비

2.1.1 항공기상관측장비 테스트베드

본 연구는 드론 안전사고를 위한 기상정보 생산 방법을 제시하기 위해 항공기와 밀접한 관련이 있는 인천국제공항 주변에 위치한 항공기상관측장비 테스트베드(위도: 37.49296030000027, 경도: 126.45345169999986)에 윈드라이다 장비를 2022년 7월부터 9월까지 약 3개월간 설치 및 운용하였다. 그러나 본 연구에 사용한 자료의 기간은 7월과 9월(약 2개월)이다. 이는 8월 4일까지 장비를 운용하다가 윈드라이다 장비 정확도 검증에 대해 보성 글로벌표준기상관측소에서 바람 비교 관측을 수행하였고, 8월 17일에 열린 무인이동체산업엑스포에서 윈드라이다 장비 소개로 인하여 총 20일간 설치 운용하지 못하였다. 윈드라이다 장비는 8월 24일에 재설치 및 운용하였다.

항공기상관측장비 테스트베드는 북쪽으로, 직선거리 약 1km 이내에 해안선이 있으며 관측 지점을 둘러싸는 건물이나 높은 나무 등으로 인한 차폐가 거의 없는 지역이다. 다시 말해 해당 위치는 인위적으로 만들어진 환경(도심의 건물 등)에 의해 발생하는 난류 등의 영향을 적을 것으로 생각된다(Fig. 1).

2.1.2 윈드라이다

고도별 바람을 관측하기 위해 본 연구는 LEICE 사의 WindMast 350M라는 윈드라이다 장비를 사용하였다. WindMast 350M는 고도별 바람을 관측하는 기상 타워를 대체하기 위한 목적으로 제작되었다.

본 연구에 사용된 윈드라이다는 간섭성 도플러 라이다(Coherent Doppler Lidar, CDL) 기술을 선택하였고, 1.55 μ m 파장(인간의 눈에는 안전한 파장대)을 사용하여 고도별 풍향과 풍속을 관측한다. 이 장비는 설치된 지표면으로부터 40m부터 350m 이내의 저고도 바람을 관측하고 있으며, 40m~200m는 10m 해상도, 200m~350m는 20m 해상도의 자료를 제공한다. 또한, 사용자 설정에 따라 1분, 2분, 5분 그리고 10분 평균 자료를 입수할 수 있다. 본 연구에서는 10분 평균 자료를 사용하였다. Table 1은 장비에 대한 상세한 정보를 보여준다.

Table 1. Specifications of the Wind Lidar

Specifications	Parameter
Wave length	1.55 μ m
Detection height range	40m~350m
Vertical resolution	40m~200m: 10m 200m~350m: 20m
Time resolution	1/2/5/10min
Wind speed range	0~70m/s
Wind speed accuracy	\leq 0.1m/s
Wind direction accuracy	$<$ 3° (average wind speed $>$ 2m/s)
Scanning mode	Multibeam scanning/VAD
Size (L/W/H)	463/351/564mm
Weight	$<$ 30kg

2.2 윈드라이다 관측자료 검증

LEICE 사의 윈드라이다(WindMast 350M)은 국내 학술지 등 연구에 사용된 사례를 찾지 못하였다. 국외 사례의 경우 Wu[8]은 LEICE 사의 Wind3D 6000과 WindMast PBL 장비(WindMast 350M과 동일한 CDL 방법으로 관측하는 윈드라이다)를 사용하여 Aeolus 위성에서 관측된 바람과 비교했을 뿐만 아니라 장비 신뢰성 검토를 위해 기상 타워의 풍향, 풍속자료를 사용하여 검증하였다. 자료를 비교한 결과, 두 윈드라이다 모두 좋은 성능을 보여주었다.

선행 연구를 통해 LEICE 사의 Wind3D 6000과 WindMast PBL 장비는 검증된 사례가 있는데 반면, WindMast 350M은 검증한 결과를 찾아볼 수가 없었다. 따라서 본 연구에서는 WindMast 350M 장비의 신뢰성을 확인하기 위해 보성 글로벌표준기상관측소의 기상 타워와 약 100m 떨어진 위치에서 2022년 8월 7일부터 2022년 8월 9일까지 약 이틀간 관측을 수행하였고, 기상 타워에서 관측된 40m, 180m 그리고 300m 고도의 10분 평균 수평 풍속자료와 윈드라이다에서 관측된 동일 고도의 수평 풍속자료와 비교하였다.

Figure 2는 윈드라이다와 기상 타워에서 관측된 (a) 40m, (b) 180m 그리고 (c) 300m 고도의 수평 풍속자료를 10분 평균하여 1:1로 비교한 그래프이다. 여기서 Y-축은 윈드라이다의 수평 풍속 값, X-축은 기상 타워의 수평 풍속 값을 나타내었다. 그 결과, 40m, 180m 그리고 300m의 R-Square 값은 각각 0.98, 0.96, 0.92를 보였다. 다시 말해, 윈드라이다 장비에서 관측된 수평 풍속과 기상 타워 각 고도에 설치된 풍속계와 유사한 결과를 보여주고 있다는 것을 의미하며, 이는 본 연구에서 사용된 WindMast 350M의 높은 신뢰성을 보여준다.

2.3 고도별 수평 풍속 스펙트럼

2.3.1 사례 선정

윈드라이다의 관측 원리는 대기 중 에어로졸로 인하여 후방 산란 되는 신호를 받아 바람을 관측하는 장비이다. 만일 대기 중 에어로졸 입자가 없는 맑은 날, 또는 강수가 강한 날은 전달되는 신호가 약하거나 노이즈가 심해서 윈드라이다 관측자료의 품질을 떨어뜨리는데, 이 자료를 바로 사용하여 분석하면 신뢰성 있는 분석 결과를 생산하기 어렵다. 따라서 윈드라이다는 관측 후 고품질의 자료를 얻기 위해 전처리를 수행해야 한다[9,10]. Wu[8]은 LEICE 사의 윈드라이다 장비에서 고품질의 자료를 선별하기 위해 관측 중에 산출되는 SNR(Signal-to-Noise Ratio)이 -10dB보다 큰 자료만을 선택하였다. 본 연구도 마찬가지로 SNR이 -10dB보다 컸던 관측값만을 선택하여 분석하였다.

본 연구는 2022년 7월과 9월에 관측된 고도별 수평 풍속자료를 사용하여 연구를 수행하였다. 2.1.1장에서 언급했듯이 8월에는 보성 글로벌표준기상관측소에서 윈드라이다 장비 검증과 무인이동체산업엑스포 참가로, 총 20일 동안 항공기상관측장비 테스트베드에서 관측을 수행하지 못하였다. 또한, 8월 29일부터 9월 1일 낮까지 윈드라이다 장비 내 소프트웨어 오류로 인해 관측이 제대로 수행되지 않았다. 이러한 이유로 본 연구에서는 연속적인 관측이 상대적으로 잘 수행된 7월과 9월 관측자료를 분석하였으며, 그중 하루의 총 결측률이 50% 이상인 날은 분석에서 제외하였다. 또한 충분히 많은 난류를 포함할 수 있을 만큼 긴 시간 간격을 만족하면서 유의미한 분석을

Table 2. Information of 5 days case

Index of Case	Period
Case 1	2022.07.02. ~ 2022.07.06
Case 2	2022.07.07. ~ 2022.07.11
Case 3	2022.07.21. ~ 2022.07.25
Case 4	2022.07.26. ~ 2022.07.30
Case 5	2022.07.31. ~ 2022.08.04
Case 6	2022.09.02. ~ 2022.09.06
Case 7	2022.09.07. ~ 2022.09.11
Case 8	2022.09.12. ~ 2022.09.16
Case 9	2022.09.17. ~ 2022.09.21
Case 10	2022.09.22. ~ 2022.09.26

위해 5일 간격으로 사례를 선정하였다(Table 2).

Figure 3은 (a) 각 사례의 총 결측률과 (b) 사례 기간 중 가장 연속적으로 결측된 시간(관측자료는 10분 간격의 자료이기 때문에 실제 결측된 길이는 곱하기 6을 하면 된다)을 나타낸 것이다. 모든 사례는 높은 고도일수록 총 결측률은 커지고 결측 구간의 길이는 증가하는 것을 볼 수 있다. 이것은 여러 원인이 있을 수 있겠지만, 대표적으로 관측장비의 물리적 한계가 40m부터 350m까지 관측을 수행하기 때문에 높은 고도의 후방 산란 신호가 관측장비까지 약하게 전달되어서 발생하는 문제로 생각되고, 강수가 강한 날은 전달되는 신호에 노이즈가 커서 윈드라이다의 소프트웨어에서 자체적으로 필터링을 하는 것으로 보인다.

본 연구는 총 24개의 고도 중 드론 및 UTM의 제한 고도인 150m 이내(총 12개 층)에서 고도별 스펙트럼 차이를 보기 위해 관측장비의 물리적 한계로 인한 최하층인 40m와 드론 제한 고도의 최고층인 150m 고도를 선택하였다. 본 연구는 Fig. 3을 통해 윈드라이다 장비는 고도가 증가할수록 자료의 결측이 빈번하게 발생한다는 것을 확인하였지만, 150m 고도의 수평 풍속 시계열 분석 여부의 적절성을 파악하지 못하였다. 따라서 본 연구는 150m 수평 풍속자료 사용 가능 여부를 확인하기 위해 결측이 전혀 없는 CASE 2의 40m 시계열을 임의로 선택하여 총 결측률을 1~40%를 랜덤적으로 조정해보고, 연속적인 결측 시간도 1~36시간으로 변경하면서 푸리에 변환 후 원래 결과와 얼마만큼 차이를 보이는지 피어슨 상관관계수(Pearson correlation)를 통해 확인하였다. 그 결과 총 결측률의 증가보다 연속적인 결측 시간이 길어질수록 상대적으로 스펙트럼 결과에 더 민감한 반응을 보였다. 그러나 총 결측률과 결측 시간은 각각 0.99와 0.94 이상으로 높은 상관성을 보였고, 그중 연속적인 결측 시간의 길이는 12시간 미만에서 0.99의 값을 보였다. 따라서 본 연구에서는 설정한 40m와 150m 수평 풍속자료를 사용하여 푸리에 변환을 수행하는 데 이상이 없을 것으로 생각하였다(Fig. 3).

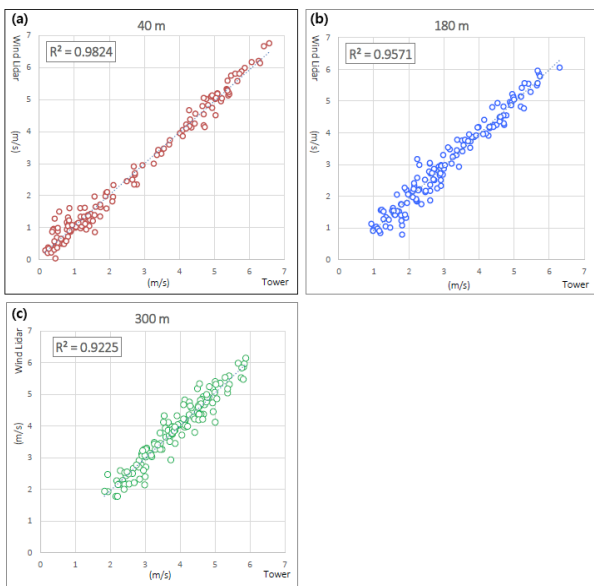


Fig. 2. A comparison of wind lidar and weather tower for horizontal wind speed. (a)-(c) 10-min averaged horizontal wind speed at the levels of 40m, 180m and 300m above ground, respectively

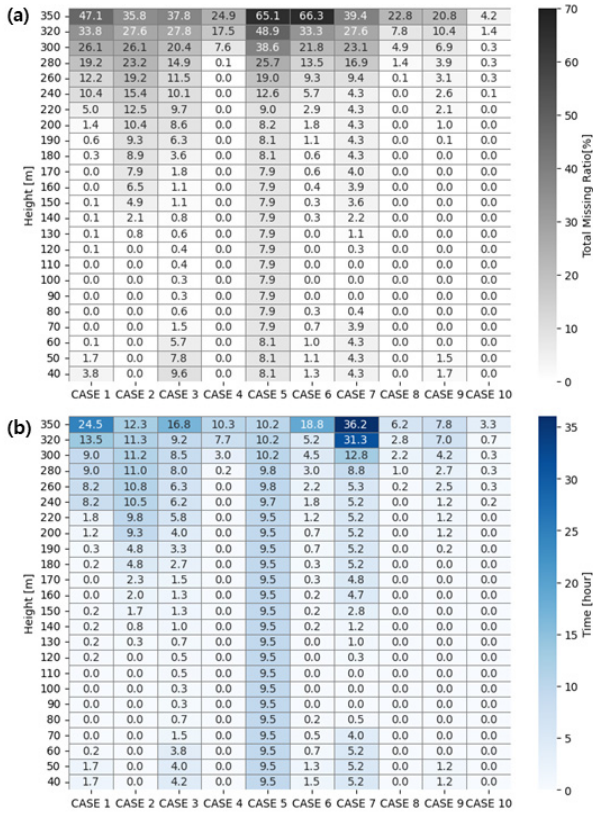


Fig. 3. (a) The percentage of missing data for the horizontal wind speed at various levels and cases and (b) the longest consecutive period of the missing data

2.3.2 고도별 수평 풍속 스펙트럼

본 연구는 고도별로 관측된 수평 풍속자료의 시간 규모 특징을 보기 위해 푸리에 변환(Fourier Transform)을 사용하였다. 여기서 수평 풍속자료는 관측주기(본 연구는 10분)부터 시계열 총 기간(본 연구는 5일) 사이에 시간 규모의 시그널이 모두 포함된 복잡한 시계열이다. 관측된 대다수의 시계열 자료는 다중규모 시그널이 포함된 시계열이기 때문에 이 자료만을 보고 시간 규모 특징을 분석하기 매우 어렵다.

기상학에서는 시계열 내 시간 규모 특징을 분석하기 위해 흔히 푸리에 변환을 사용한다. 푸리에 변환은 삼각함수를 기저 함수(basis function)로 하여 시간의 함수로 표현되는 시계열을 시계열 내 존재하는 다양한 시간 규모(주파수)에서의 변동(즉, 분산)을 주파수의 함수로 표현하는 것으로 각 시간 규모의 상대적인 변동의 크기를 비교하는 데 사용된다. 본 연구에서는 푸리에 변환을 사용[3,4]하여 고도별 수평 풍속 스펙트럼을 분석하였고, 이를 통해 관측 지역의 고도별 수평 풍속의 시간 규모 특징을 이해하고자 하였다.

푸리에 변환을 수행하기 위해서는 입력자료 안에 결측값을 포함하지 않아야 한다. 선행 연구[3,4]는 푸리에 변환을 하기 위해 수평 풍속 시계열 내 결측값을 선형,

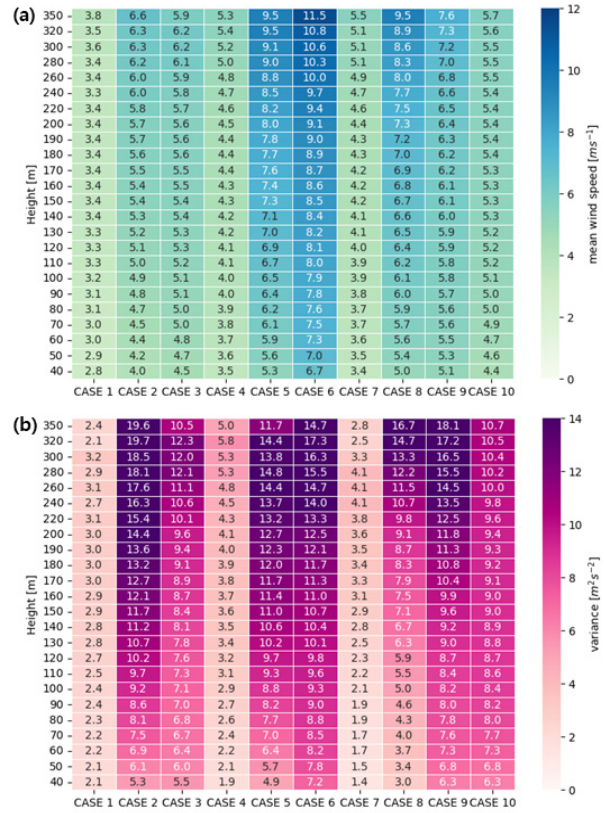


Fig. 4. (a) The mean and (b) variance of the horizontal wind speed at various altitudes and cases

최근린, 0-차, 1-차, 2-차 그리고 3-차 스플라인 보간법을 적용해 보았다. 그 결과, 2-차와 3-차 스플라인 보간법은 양수만 있어야 하는 풍속 시계열에서 음수를 생산하였고, 0-차와 최근린 보간법은 결측 구간이 길어질수록 스펙트럼 결과에 민감한 반응을 보였다. 반면 1-차 스플라인과 선형 보간법은 상대적으로 스펙트럼 결과에 덜 민감한 반응을 보였다. 따라서 본 연구도 선행 연구[3,4]를 기반으로 수평 풍속 시계열 내 결측 자료를 선형 보간법을 사용하여 값을 채웠다.

Figure 4는 각 사례의 고도별 수평 풍속 시계열의 (a) 평균(Mean)과 (b) 분산(Variance)을 나타낸 것이다. 수평 풍속의 평균과 분산은 전반적으로 40m에서부터 고도가 증가할수록 값이 커지는 것을 볼 수 있는데, 이 결과를 통해 전반적인 스펙트럼의 에너지는 고도가 증가할수록 많은 에너지를 포함하고 있다는 것을 암시한다. 그러나 Fig. 4의 평균과 분산의 분포만을 가지고 특정 시간 규모의 변동성과 특징은 확인할 수 없다. 따라서 본 연구는 푸리에 변환을 사용하여 각 사례, 각 고도의 스펙트럼 구조를 분석하였다.

Figure 5는 40m와 150m 고도의 수평 풍속 시계열 자료를 푸리에 변환을 사용하여 각 고도의 스펙트럼으로 나타낸 것이다. 여기서 Y-축은 주파수가 가중된 스펙트럼(frequency-weighted spectrum, $fS_M(f)$)이고, X-축 하단은 주파수(Hz), 상단은 시간 규모를 나타냈다. 그리고 스

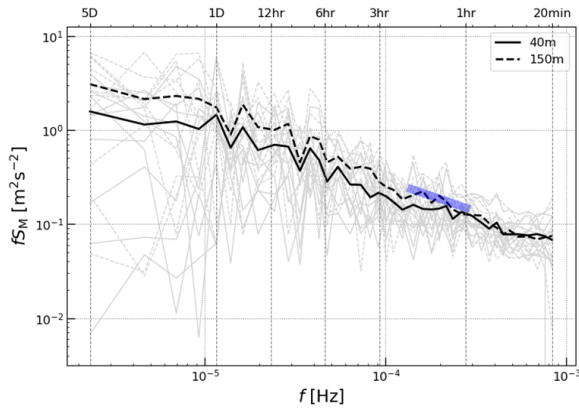


Fig. 5. The frequency-weighted spectra $fS(f)$ of 10-min averaged time series of horizontal wind speed, M as a function of frequency f at 40m (solid) and 150m (dashed) above ground. Each case's spectra are represented by the gray lines, while the composites are represented by the black lines. The thick blue line indicates the Kolmogorov slope.

펙트럼을 표현할 때 10개 각 사례의 스펙트럼(회색 실선은 40m, 회색 파선은 150m)과 10개의 사례를 합성한 스펙트럼(검정 실선은 40m, 검정 파선은 150m)으로 나타냈다. Fig. 5를 통해 각 시간 규모의 스펙트럼의 에너지, 다시 말해 각 시간 규모의 변동성의 크기를 확인할 수 있다.

Figure 5에 40m와 150m 각 고도의 합성된 스펙트럼에서 2시간부터 1시간 시간 규모 사이에 $f^{-2/3}$ (파란색 실선)의 기울기를 따르고 있는 것을 확인할 수 있는데, 이는 난류 과정에 의해 작은 규모로 에너지가 전달되는 에너지 캐스케이드(energy cascade) 과정이 일어나고 있음을 의미한다[11]. 이 결과는 본 연구를 위해 설치한 윈드라이더 장비로부터 관측된 고도별 수평 풍속자료가 이론적인 자연 현상을 잘 관측하고 있음을 보여주는 것으로, 본 연구에서 사용한 윈드라이더(WindMast 350M)에서 관측된 수평 풍속자료에 대한 신뢰성을 보여준다.

또한 150m 고도의 합성된 스펙트럼의 전반적인 에너지는 40m 고도의 합성된 스펙트럼보다 상대적으로 높은 것을 볼 수 있다. 이는 150m의 수평 풍속자료가 40m보다 평균적으로 강한 바람과 큰 변동성을 가진다고 해석할 수 있는데, 이것은 Fig. 4에서 각 사례의 평균과 분산이 고도가 증가함에 따라 값이 커지는 것과 잘 일치한다. 특히 1시간보다 큰 규모(X-축 상단 시간 규모)에서는 150m 고도의 스펙트럼의 에너지가 40m 고도의 스펙트럼의 에너지보다 높는데 반면, 1시간 이하 규모에서는 두 높이에서 거의 비슷한 스펙트럼 에너지를 보였다. 이 결과는 평균적으로 볼 때 40m보다 150m에서 1시간보다 큰 시간 규모의 변동성이 큰 반면, 1시간보다 작은 규모의 변동성은 두 고도에서 큰 차이를 보이지 않았다. 다시 말해 드론 비행에서 중요한 시간 규모인 1시간 이하 규모의 변동성은 평균적으로 지상으로부터 150m 고도 사이에서는 크게 다르지 않음을 암시한다.

2.4 시간 규모 분석

2.4.1 강수대 무강수 사례 스펙트럼

본 연구에서 사용한 스펙트럼 분석법은 자료의 수가 많을수록 통계적으로 신뢰성을 가진다. 그러나 본 연구는 약 2달이라는 다소 짧은 기간의 자료를 사용하였고 그 기간 중 수차례 강수가 있었으며, 9월에는 태풍이 발생하였다. 이러한 이유로 본 연구 기간에 관측된 자료는 월별 혹은 지역적인 대표성을 보이기 어렵다고 생각된다. 따라서 본 연구는 10개 사례에서 가장 일반적이면서 특징이 명확하게 차이가 나는 강수와 무강수 각각의 단일 사례를 선택하여 분석하였다.

본 연구에서는 강수와 무강수 사례를 분류하기 위해 항공기상관측장비 테스트베드에서 가장 가까운 국제 표준기상관측소인 인천 종관기상관측시스템(Automatic Synoptic Observation System, ASOS)에서 관측된 일 누적 강수량을 사용하였다. 본 연구는 강수가 온 날을 일 누적 강수량이 0.1mm 이상 기록된 날로 정의하였고, 강수 사례는 태풍과 같은 특이 기상이 없고 강수가 온 날이 5일 중 4일 이상이 된 사례를 선정하였다. 따라서 강수 사례는 CASE 5, 무강수 사례는 CASE 1로 선택되었다. CASE 5는 5일 중 4일간 강수가 온 것으로 기록된 사례이고, CASE 1은 5일 동안 강수가 기록되지 않은 사례이다.

Figure 6은 (a) 40m와 (b) 150m 고도의 무강수(빨간 실선)와 강수(파란 실선)의 사례를 비교한 스펙트럼들이다. 먼저 무강수 사례의 경우 해안 지역에서 흔히 나타나는 해륙풍으로 인해 1일 시간 규모에서 강한 스펙트럼의 에너지 피크가 보이며, 강수 사례의 경우 강수 및 구름 발달로 무강수 사례와 다르게 1일 시간 규모에서 스펙트럼의 에너지 피크는 보이지 않지만, 중규모 시스템의 영향으로 1시간보다 큰 규모에서 스펙트럼의 에너지가 강화되는 것으로 분석된다. 또한 40m 고도의 1시간 이하 규모에서 무강수 사례는 스펙트럼의 에너지가 감소하지만, 강수 사례는 증가하는 것을 볼 수 있다. 이는 1시간보다 큰 규모에서 전달되는 스펙트럼의 에너지와 난류의 에너지가 중첩되어 발생하는 것으로 보인다. 따라서 40m 고도에서 드론을 비행할 경우 무강수보다 강수 사례에서 더 유의해서 비행해야 하는 것을 의미한다.

Figure 6(b), 150m 고도의 무강수 사례는 40m 고도의 스펙트럼과 유사하게 1일 시간 규모에서 피크를 보이며 3시간-1일 규모 사이의 에너지가 증가했다. 마찬가지로 분석 지역의 지역적인 해륙풍의 특징이 150m 고도까지 잘 반영되며, 3시간-1일 사이의 스펙트럼 에너지가 증가하는 것은 해륙풍뿐만 아니라 다른 중규모 시스템의 영향이 시계열 내 포함된 것으로 분석된다. 강수 사례는 40m 고도의 스펙트럼과 유사한 특징을 보이는데, 1시간 이하 시간 규모에서 40m 고도와 다르게 스펙트럼의 에너지가 감소하는 것으로 분석된다. 이는 고도가 증가할수록 1시간보다 큰 규모의 영향을 더 많이 받고, 그보다 작은 1시간 이하 규모의 변동성은 감소하는 것으로 분석된다.

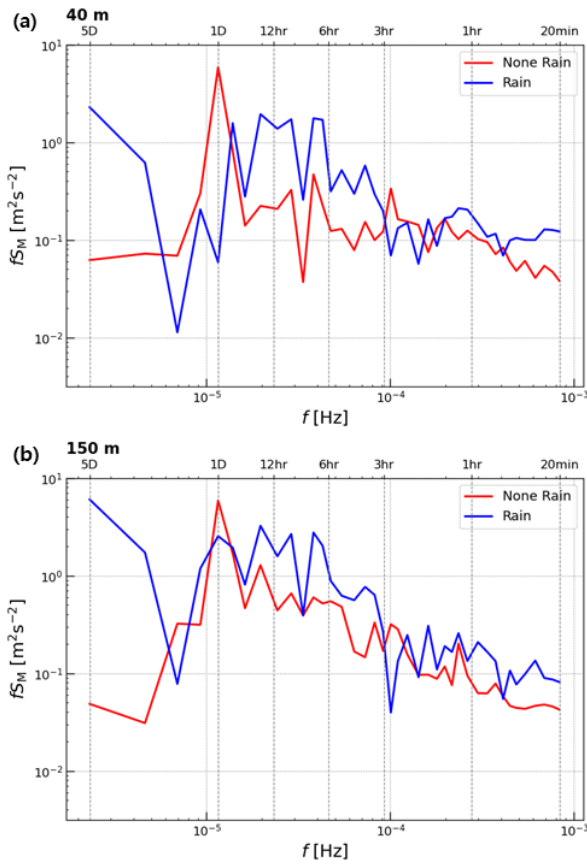


Fig. 6. The frequency-weighted spectra $fS_M(f)$ of 10-min averaged time series of horizontal wind speed, M as a function of frequency f at (a) 40m and (b) 150m above ground. The cases with and without precipitation are depicted by blue and red lines, respectively.

2.4.2 1시간 이하 규모 분리 분석법

본 연구에서 제시하는 분석 방법은 대기경계층 내에서 비행하는 드론의 안전사고에 도움이 되는 정보를 생산하기 위함이다. 대기경계층에서 비행하는 드론은 갑작스러운 바람 변화 즉, 난류로 인한 안전사고가 발생할 수 있다. 이는 기상 현상의 시간 규모로 보았을 때 1시간 이내, 수 초에서 수 분 시간 규모에서 발생한다. 따라서 본 연구는 관측자료가 10분 해상도라는 한계로 모든 난류(수 초~수 분의 시간 규모)를 분해할 수 없지만, 전체 시계열에서 최대한 난류를 포함하기 위해 1시간 이하 규모의 변동성을 따로 분리하여 고도별 변화를 분석하고자 한다.

선행 연구에서 Kim and Kang[5]은 강원 해안 지역의 해륙풍 특징을 확인하고자 다중규모(Multi-Resolution) 분리법을 사용하여 전체 바람 시계열에서 1일 이하 규모의 변동성을 분리하였고, 분리된 시계열에서는 해륙풍의 특징을 명확하게 보았다. 본 연구는 선행 연구에서 사용한 방법을 기반으로 1시간 이하 규모의 변동성을 보고자 절단 규모(Cut-off scale, τ)를 1시간으로 설정하였다.

푸리에 변환을 통해 구해진 주파수가 가중된 스펙트럼 ($fS_M(f)$)과 주파수(f)는 로그와 선형 축으로 각각 놓고 적분하였을 경우 전체 시계열의 분산(σ_M^2)이 된다[1]. 이를 수식으로 나타내면 식 (1)과 같다.

$$\sigma_M^2 = \int_{\tau \geq 2\Delta t} fS_M(f) \ln f \quad (1)$$

여기서 $fS_M(f)$ 은 주파수가 가중된 스펙트럼, f 은 주파수, 아래 첨자 M 은 수평 풍속을 의미한다. Δt 은 니퀴스트(Nyquist) 주파수이며, 본 연구에서는 20분(1200초)이다.

본 연구는 1시간 이하 시간 규모의 변동성과 그 변동성이 전체 시계열에서 어느 정도 영향을 주고 있는지 확인해 보고자 했다. 먼저, 식 (1)을 사용하여 1시간 이하 규모의 변동성을 구하는 방법을 식 (2)에 나타냈다.

$$\{\sigma_M^2\} = \{fS_M(f)\} = \int_{\tau \geq 2\Delta t}^{\tau \leq 1\text{hour}} fS_M(f) \ln f \quad (2)$$

식 (2)에서 $\{\sigma_M^2\}$ 은 1시간 이하 시간 규모의 변동성을 의미하며, 이는 분산의 단위(m^2s^{-2})를 가진다. 이것은 전체 시계열의 분산에서 1시간 이하 시간 규모의 분산을 분리한 것과 같다.

또한 1시간 이하 규모의 변동성이 전체 시계열에 기여하는 정도를 정량적으로 분석하기 위해 스펙트럼을 정규화했고, 식 (3)은 정규화된 스펙트럼을 수식으로 표현한 것이다.

$$fS_M(f)/\sigma_M^2 = fS_M(f) / \int_{\tau \geq 2\Delta t} fS_M(f) \ln f \quad (3)$$

정규화된 스펙트럼 $fS_M(f)/\sigma_M^2$ 은 무차원이며, 이 스펙트럼을 전체 적분하였을 경우 1의 값을 가진다. 본 연구에서는 정규화된 스펙트럼에서 1시간 이하 시간 규모를 분리하였는데, 이때 분리된 1시간 이하 규모의 크기는 1 미만의 값을 가져야 하며, 이것은 전체 시계열에서 1시간 이하 시간 규모가 얼마나 기여하고 있는지를 상대적인 개념에서 정량적으로 확인 가능한 방법이다. 식 (4)는 정규화된 스펙트럼에서 1시간 이하 시간 규모를 분리하기 위한 수식이다.

$$\{fS_M(f)/\sigma_M^2\} = \int_{\tau \geq 2\Delta t}^{\tau \leq 1\text{hour}} fS_M(f)/\sigma_M^2 \ln f \quad (4)$$

Figure 7(a)는 식 (2)를 사용하여 강수(파란 실선)와 무강수(빨간 실선) 각 사례의 1시간 이하 시간 규모의 변동성의 크기를 고도별로 나타낸 것이고, (b)는 식 (4)를 사용하여 전체 수평 풍속 시계열 중 1시간 이하 시간 규모의 변동성이 기여하고 있는 정도를 고도별로 나타낸 것이다. Fig. 7(b)는 다시 말해 전체 시간 규모에서 1시간 이하 시간 규모가 상대적으로 어느 정도 영향을 주고 있는지 고도별로 나타낸 것이다.

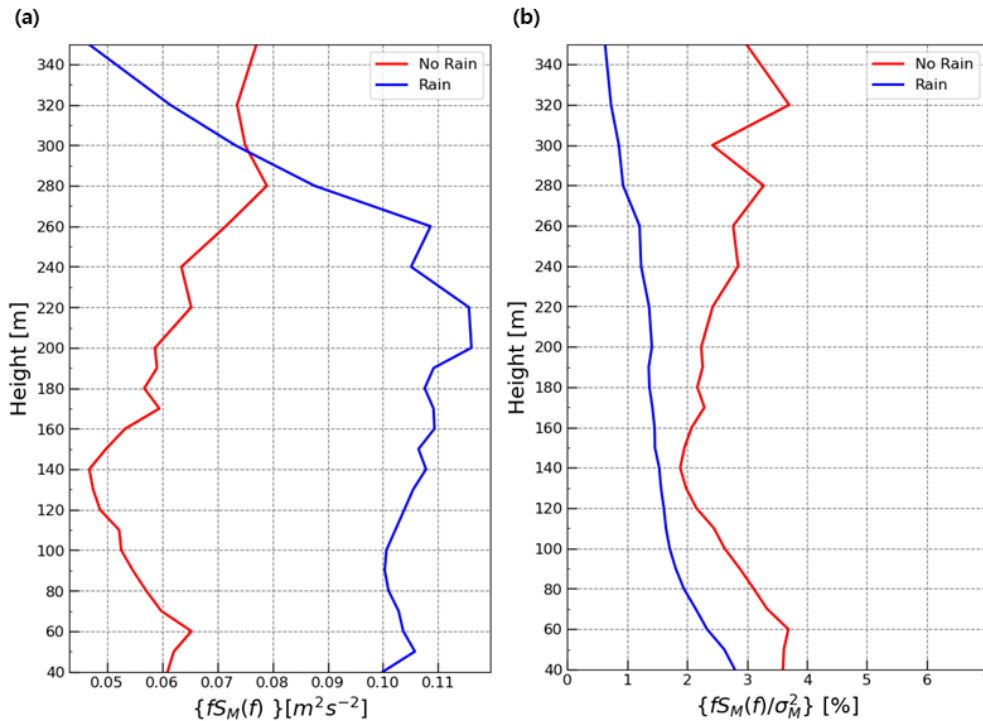


Fig. 7. (a) The variance of wind with scales of less than an hour and (b) its proportional contribution to the variance of wind with all scale at each vertical altitude on days with (blue) and without (red) precipitation

먼저 Fig. 7(a)에서 강수 사례는 무강수 사례보다 1시간 이하 규모의 변동성이 전반적으로 큰 것을 확인할 수 있다. 강수 사례는 40m부터 260m까지 고도가 증가할수록 큰 변동폭을 보이지 않지만, 260m 고도 이상부터는 1시간 이하 규모의 변동성의 크기가 급격하게 작아지는 것을 확인할 수 있다. 무강수 사례는 60m부터 140m까지 감소하는 추세를 보이고, 140m 이상부터 1시간 이하 시간 규모의 변동성의 크기는 다시 증가한다. 현재 사례에서는 무강수의 경우 드론 법적 제한 고도인 150m 이내에서 드론을 비행할 시 지표면에 가깝게 비행하는 것보다 높은 고도에서 비행하는 것이 안전할 수 있다는 근거가 될 수 있을 것으로 생각된다. 또한 강수 사례는 무강수 사례보다 전반적으로 1시간 이하 시간 규모의 변동성이 크기 때문에 특히 더 안전에 유의해서 비행할 필요가 있을 수 있다. 하지만 이러한 특징은 단일 사례이기 때문에 좀 더 통계적 유의미한 지역적인 대표성을 갖는 결과를 위해 지속적인 관측을 통한 자료의 축적이 필요할 것으로 생각된다.

Figure 7(b)를 Fig. 7(a)와 비교해 보면 강수 사례는 1시간 이하 시간 규모의 변동성이 무강수 사례보다 크지만, 전체 시계열에서 기여하는 비중은 상대적으로 작은 것을 볼 수 있다. 다른 측면에서 생각하면 강수 사례는 무강수 사례보다 평균 바람의 세기와 분산(Fig. 4)이 크므로 1시간 이하 규모보다 1시간 이상 규모(중규모 이상 기상 현상)가 상대적으로 전체 시계열 내 더 많은 기여를 하고 있다. 반면 무강수 사례는 1시간 이하 규모의

변동성은 강수 사례보다 작지만, 전체 시계열 내 상대적으로 더 많은 부분을 차지한다. 이를 통해 1시간 이하 규모의 변동성이 중요한 드론은 강수 사례일 때 더 주의해서 비행해야 하지만 상대적인 개념에서 볼 때 무강수 사례에서도 결코 무시할 수는 없다. 따라서 향후 연구에서는 단순히 강수와 무강수 사례로 나눠서 분석하는 것이 아니라 더 많은 관측자료를 사용하여 다양한 날씨 조건을 구분하여 앙상블 접근법으로 상세하게 분석할 필요성이 있다.

III. 결 론

본 연구에서는 윈드라이다로부터 관측된 수평 풍속 자료를 활용하여 드론의 안전사고 예방에 필요한 정보를 생산하기 위한 분석 방법을 제시하였다. 이를 위해 본 연구는 인천국제공항 인근에 있는 항공기상관측장비 테스트베드에서 2022년 7월과 9월에 관측된 자료를 사용하였고, 지상 40m부터 350m까지 총 24개 고도에서의 10분 평균 수평 풍속자료를 분석하였다.

먼저 본 연구에서는 드론 비행 시 안전사고로 이어질 수 있는 수 초에서 수 분의 시간 규모를 가지는 난류를 포함한 시간 규모와 드론의 비행시간을 고려하여 1시간 이하 시간 규모를 갖는 저고도에서의 바람장의 특징을 사례별(강수와 무강수)로 분석하였다. 그 결과 1시간 이하 시간 규모의 변동성은 강수와 무강수 사례에서 고도가 증가함에 따라 감소하는 공통적인 특징을 보였다. 이

를 통해 드론 법적 제한 고도인 150m 이내 고도에서는 지표면보다 150m 인근에서 비행하는 것이 난류의 영향을 적게 받아 상대적으로 안정적인 비행을 할 수 있다는 근거가 될 수 있을 것으로 기대한다. 또한 1시간 이하 시간 규모의 변동성은 전반적으로 강수 사례가 무강수 사례일 때보다 컸고, 전체 시간 규모에서 1시간 이하 시간 규모의 기여도는 무강수 사례가 더 높았다. 종합해서 보면 드론 비행은 무강수일 때보다 강수 시 안전사고에 더 유의해야 하는데, 상대적인 개념으로 보았을 때 무강수 시에도 난류의 영향을 결코 무시할 수 없다.

본 연구에서 제시한 분석 방법의 결과는 단일 사례의 결과이기 때문에 지역적인 대표성을 갖는다고 할 수 없다. 또한, 사용된 관측자료는 10분 평균된 자료이기 때문에 수 초에서 수 분 시간 규모를 갖는 난류를 완전히 포함하지 못한다. 따라서 본 연구 결과는 통계적 유의성이 다소 부족하지만 향후 지속적인 관측을 통해 장기간의 관측자료를 축적할 경우 분석 지역에 대한 대표성 있는 결과를 도출할 수 있을 것으로 기대하며, 이를 단순히 강수와 무강수 사례로 분리하는 것이 아닌 더 상세한 날씨 조건을 구분하여 앙상블 접근법으로 분석하면 통계적으로 더 유의미한 결과를 생산할 수 있을 것으로 생각된다. 또한 관측자료의 시간 해상도를 수 초 이내로 줄일 수 있다면, 드론 안전사고를 위한 난류 연구가 더 활발하게 진행될 수 있을 것으로 기대한다.

후 기

이 연구는 미래유망민간기상서비스 성장기술개발 사업 중 ‘드론 등 초경량비행장치를 위한 기상데이터 플랫폼 및 맞춤형 서비스 개발’ 과제(KMI2020-00310)로 수행되었습니다. 또한 윈드라이다 관측을 위한 관측장소 및 자료제공은 기상청 국립기상과학원 ‘수도권 위험기상 입체관측 및 예보 활용 기술개발’(KMA2018-00125)의 지원으로 수행되었고, 교신 저자는 2022년도 연구재단의 지역우수과학자(2021R111A3044379) 사업의 지원을 받아 연구를 수행했습니다.

References

1) Stull, R. B., "An introduction to boundary layer meteorology," *Kluwer Academic Publisher*, 1998.
 2) O'Connell, M., Shi, G., Shi, X., Azizzadenesheli, K., Anandkumar, A., Yue, Y. and Chung, S. J., "Neural-Fly enables rapid learning for agile flight in strong winds," *Science Robotics*, Vol. 7, No. 66, 2022, eabm6597.

3) Kim, J. W. and Kang, S. L., "Spectral analysis of wind time series at a mountainous coastal region of the eastern Korea peninsula," *Journal of the Korean Data and Information Science Society*, Vol. 30, No. 2, 2019, pp. 365~383.

4) Kang, S. L. and Won, H., "Spectral structure of 5 year time series of horizontal wind speed at the Boulder Atmospheric Observatory," *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, Vol. 121, No. 20, 2016, pp. 946~967.

5) Kim, J. W. and Kang, S. L., "Multiresolution analysis of wind time series at a coastal area: Focusing on the diurnal cycle of sea/land breeze," *Journal of the Korean Data and Information Science Society*, Vol. 31, No. 2, 2020, pp. 221~241.

6) Lee, D. Y., Park, S. H. and Shin, S. J., "Risk Assessment of a Drone Under the Gust and its Precise Flight Simulation," *Journal of the Korea Society for Aeronautical and Space Sciences*, Vol. 50, No. 3, 2022, pp. 173~180.

7) Chong, J., Shin, S., Hwang, S. E., Lee, S., Lee, S. H., Kim, B. J. and Kim, S., "Vertical Measurement and analysis of meteorological factors Over Boseong region using meteorological drones," *Journal of Earth Science Society*, Vol. 41, No. 6, 2022, pp. 575~587.

8) Wu, S., Sun, K., Dai, G., Wang, X., Liu, X., Liu, B., Song, X., Reitebuch, O., Li, R., Yin, J. and Wang, X., "Inter-comparison of wind measurements in the atmospheric boundary layer and the lower troposphere with Aeolus and a ground-based coherent Doppler lidar network over China," *Atmospheric Measurement Techniques*, Vol. 15, No. 1, 2022, pp. 131~148.

9) Paschke, R., Leinweber, R. and Lehmann, B., "An assessment of the performance of a 1.5 μ m Doppler lidar for operational vertical wind profiling based on a 1-year trial," *Atmospheric Measurement Techniques*, Vol. 8, 2015, pp. 2251~2266.

10) Park, M. S. and Choi, M. H., "Development of a Quality Check Algorithm for the WISE Pulsed Doppler Wind Lidar," *Atmosphere*, Vol. 26, No. 3, 2016, pp. 461~471.

11) Wyngaard, J. C., "Turbulence in the Atmosphere," *Cambridge University Press*, 2010.